

Linee guida per la digitalizzazione 3D

Beni storico-artistici e museali

INDICE

INDICE.....	2
1. INTRODUZIONE: IMPOSTAZIONE METODOLOGICA	4
1.1. AMBITI DI DIGITALIZZAZIONE 3D: UNA DISTINZIONE TRA BENI ARCHITETTONICI E BENI MOBILI MUSEALI	4
1.2. OBIETTIVI DEL DOCUMENTO E DESTINATARI	6
1.3. STRUTTURA DEL DOCUMENTO E ALLEGATI.....	10
1.4. DIGITALIZZAZIONE SECONDO L'APPROCCIO DOCUMENTALE.....	11
1.5. UN MODELLO SIGNIFICANTE: CONTENUTO DIGITALE E REPLICA DIGITALE	13
1.6. PRINCIPI FAIR E RIUSO DEI DATI.....	14
1.7. LICENSING DELLE RIPRODUZIONI DIGITALI TRIDIMENSIONALI.....	16
2. CLASSIFICAZIONI QUALITATIVE E DI PROCESSO	19
2.1. CLASSIFICAZIONE DELLE TIPOLOGIE DI DATI E DEGLI STANDARD DI QUALITÀ.....	19
2.1.1. <i>Unità di misura, posizionamento e orientamento del modello nello spazio 3D</i>	19
2.1.2. <i>Rappresentazione della geometria come mesh triangolata</i>	23
2.1.3. <i>Risoluzione, accuratezza e precisione del modello</i>	24
2.1.4. <i>Appearance, texture mapping, materiali</i>	26
2.1.5. <i>Risoluzione delle texture</i>	29
2.1.6. <i>Dati grezzi, Modello Master e Modelli Derivati</i>	32
2.2. CLASSIFICAZIONE DELLE PRINCIPALI TECNOLOGIE PER L'ACQUISIZIONE DIGITALE 3D.....	34
2.2.1. <i>Scansione a triangolazione (Laser e luce strutturata)</i>	35
2.2.2. <i>Scansione con dispositivi hand-held</i>	38
2.2.3. <i>Scansione laser terrestre</i>	40
2.2.4. <i>Fotogrammetria digitale</i>	41
2.3. CLASSIFICAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEGLI OGGETTI IN RELAZIONE AL PROCESSO DI SCANSIONE	44
2.3.1. <i>Complessità della geometria, forma e natura dell'oggetto</i>	46
2.3.2. <i>Complessità del materiale dell'oggetto</i>	58
2.3.3. <i>Complessità del contesto</i>	69
3. PROCESSI E FASI DELLA PRODUZIONE DEI MODELLI 3D	76
3.1. ALLESTIMENTO E PREPARAZIONE DELLE POSTAZIONI DI DIGITALIZZAZIONE NEL CANTIERE.....	78
3.2. ACQUISIZIONE DATI	79
3.2.1. <i>Fotogrammetria</i>	79
3.2.2. <i>3D Scanner attivi</i>	82
3.3. ELABORAZIONE DATI E GENERAZIONE DEL MODELLO MASTER	83
3.3.1. <i>Elaborazione dati da fotogrammetria</i>	83
3.3.2. <i>Elaborazione dati da 3D scanner</i>	85
3.3.3. <i>Elaborazione dei modelli 3D</i>	89
3.4. POST-PRODUZIONE DEI MODELLI DERIVATI	91
3.4.1. <i>Impiego della modellazione manuale in computer grafica nei modelli derivati</i>	92
3.5. ESPORTAZIONE DEI DATI RAW E DEI MODELLI 3D	95
3.5.1. <i>Formati non interoperabili</i>	95
3.5.2. <i>Formati interoperabili per dati 3D</i>	96
3.5.3. <i>Formati interoperabili per informazione colore e materiale</i>	99
3.5.4. <i>Formati per contenuti accessori</i>	100
3.6. DOCUMENTAZIONE DEL PROCESSO DI PRODUZIONE DEI MODELLI	101
3.6.1. <i>Relazione dei setup e dei processi di acquisizione</i>	101
3.6.2. <i>Relazione della elaborazione dati e creazione del modello master</i>	104
3.6.3. <i>Relazione della creazione dei modelli derivati</i>	105
4. DEFINIZIONE E COMPOSIZIONE DEL DATASET	106
4.1. METADATAZIONE DEI MODELLI 3D DEL PATRIMONIO CULTURALE	106
4.2. DEFINIZIONE E STRUTTURA DEL DATASET DI CONSEGNA	107

4.3.	CONTENUTI DIGITALI DEL MODELLO MASTER	108
4.3.1.	<i>Metodologia di auto-verifica preliminare della qualità e della risoluzione del modello master</i>	108
4.4.	CONTENUTI DIGITALI DEI MODELLI DERIVATI.....	109
4.5.	CONTENUTI ACCESSORI.....	109
4.5.1.	<i>Rendering 2D di preview dei modelli master e derivati</i>	109
4.5.2.	<i>Contenuti culturali relativi all'oggetto digitalizzato</i>	112
4.6.	PRINCIPI PER LA GESTIONE DEL CICLO DI VITA DELLA RISORSA 3D	113
GLOSSARIO		115
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA		121
CREDITI		125

1. INTRODUZIONE: IMPOSTAZIONE METODOLOGICA

Le *Linee guida per l'acquisizione 3D dei beni storico-artistici e museali* (di seguito "Linee guida") costituiscono una appendice tecnica delle *Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale*, Allegato 1 del *Piano nazionale di digitalizzazione del patrimonio culturale 2022-2023 (PND)*. Queste linee guida definiscono metodologie e criteri standardizzati per l'attività di **digitalizzazione tridimensionale delle collezioni museali**, focalizzando l'attenzione in particolare sui **beni mobili di interesse storico artistico e archeologico**. Le Linee guida offrono indicazioni pratiche per la progettazione e l'esecuzione delle campagne di digitalizzazione 3D, per la documentazione dei processi messi in opera, e per la gestione dei contenuti digitali e del loro ciclo di vita. Il documento propone esempi concreti di buone pratiche consolidate nel settore sulla base delle potenzialità tecnologiche attuali, affrontando al contempo la grande sfida posta dalla quantità e dalla varietà dei materiali presenti nelle collezioni museali nazionali.

Le Linee guida hanno l'obiettivo di definire un punto di equilibrio tra la standardizzazione dei processi e i requisiti qualitativi delle risorse digitali prodotte, adottando un **approccio di tipo documentale** alla digitalizzazione tridimensionale. I criteri su cui si basa questo approccio garantiscono il massimo risultato che le tecnologie attuali per la misura e il *processing* 3D sono in grado di restituire in assenza di un rilevante contenuto autoriale nei processi di digitalizzazione. L'approccio documentale, il cui frutto è la generazione di modello tridimensionale *master*, insieme all'assunzione dei principi FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*), favoriscono l'oggettività, la coerenza, la compatibilità e il potenziale riuso dei *dataset* prodotti per i più disparati scenari d'uso. In relazione a questi ultimi, le presenti Linee guida definiscono il concetto di modelli "derivati" a partire dal *master*, ovvero modelli "specializzati" frutto di operazioni di *editing*, semplificazione od ottimizzazione, finalizzati ad una specifica applicazione.

1.1. Ambiti di digitalizzazione 3D: una distinzione tra beni architettonici e beni mobili museali

Queste Linee guida, mediante un processo di sintesi ponderata tra letteratura scientifica e i pareri degli esperti di dominio, raccolgono, organizzano e descrivono raccomandazioni relative all'acquisizione tridimensionale degli oggetti appartenenti alle collezioni museali, che sono eterogenei per forma, dimensione, materiale, comportamento rispetto alla luce e condizioni di conservazione. Pertanto, le indicazioni in esse contenute sono orientate al **rilievo alla scala dell'oggetto mobile**, e non contengono indicazioni specifiche riferite a oggetti di scala architettonica o territoriale ambiti che verranno affrontati in future integrazioni specifiche delle *Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale* allegate al PND. Similmente, si rimanda a futuri aggiornamenti delle suddette *Linee guida* per la trattazione di ambiti che presentano problematicità specifiche, come ad esempio il patrimonio subacqueo, che richiede un grado di specializzazione tecnica che esula dallo scopo del presente contributo.

L'obiettivo di questo documento è, conseguentemente, offrire riferimenti utili alla definizione di prassi operative, standard qualitativi, processi di metadattazione, tipizzazione delle complessità e individuazione delle più convenienti strategie per la digitalizzazione valide per la più larga parte dei materiali che popolano le collezioni museali nazionali. Il documento, come descritto in modo esteso alla sezione [1.2](#) e secondo la struttura esplicitata alla sezione [1.3](#), offre un punto di vista scientifico sulle procedure e buone pratiche per la digitalizzazione 3D di oggetti mobili di interesse storico, artistico e archeologico secondo l'approccio

documentale definito alla sezione [1.4](#), ovvero privo di interventi autoriali e finalizzato alla massima trasparenza.

La produzione di un oggetto digitale di natura tridimensionale a partire da un oggetto fisico è l'esito del processo di **acquisizione tridimensionale**. Con questa definizione si fa riferimento all'applicazione di un insieme di tecnologie e metodi che permettano di acquisire la forma e l'apparenza visiva di un oggetto mediante strumenti di misura. L'esistenza di numerose tipologie di manufatti, distinguibili in base alla dimensione e alle caratteristiche della superficie, ha portato alla specializzazione di diversi strumenti di misura, spesso integrabili e complementari ma comunque distinguibili macroscopicamente sia dal punto di vista del sensore di acquisizione sia, conseguentemente, da quello delle metodologie e delle casistiche di applicazione. Un primo criterio di distinzione tra le tecnologie riguarda il contatto o meno con la superficie da acquisire, ovvero tra **tecniche di misura dirette**, nel caso in cui avvenga un contatto tra sensore e oggetto della misura, **oppure indirette**, nel caso di sistemi che non implicino tale interazione fisica con l'oggetto. Una ulteriore distinzione tra le diverse tecnologie di rilievo indiretto deriva dall'origine naturale o artificiale dell'impulso elettromagnetico essenziale al loro funzionamento. In caso di sfruttamento della luce disponibile naturalmente si parlerà di tecnologie di rilevamento **indiretto passivo** (ad esempio fotogrammetria), nel caso di implementazione di sorgenti artificiali si farà riferimento a tecnologie di rilevamento **indiretto attivo** (ad esempio laser scanner statici o dinamici, scanner a luce strutturata).

Gli aspetti principali per i quali il rilievo architettonico si distingue da quello delle collezioni museali o, più in generale, degli oggetti mobili, sono generalmente due: **la dimensione** e **la distribuzione spaziale dell'oggetto di rilievo**. Sulla base di questi parametri derivano differenze significative negli approcci metodologici, tecnologici e procedurali dell'acquisizione. Da un punto di vista metodologico è necessario osservare che, se nel rilievo architettonico ci si trova materialmente all'interno o in prossimità dell'oggetto da acquisire, nel caso della digitalizzazione tridimensionale degli oggetti questi possono almeno in linea teorica essere **movimentati** in prossimità del *setup* di acquisizione (sugli oggetti non movimentabili e con difficoltà di accesso si veda sezione [2.3.3](#)). Da questa prima distinzione, oltre a un'ovvia differenza di apprestamento delle postazioni di rilevamento (sez. [3.1](#)) deriva una grande differenza nelle metodologie e nelle tecniche implementate per la **registrazione*** di più posizioni di misura. Se, infatti, nel rilievo a scala architettonica vengono impiegati sia la registrazione per punti misurati con strumentazione topografica sia quella per punti omologhi, il rilievo a scala di manufatto non richiede misure topografiche per orientare le diverse **range map*** acquisite per descriverlo, ma unicamente abbondanti aree di sovrapposizione.

Queste osservazioni determinano differenze tecnologiche sostanziali nei sistemi di acquisizione per le due fattispecie: per il rilievo di manufatti, considerando la loro dimensione minore e la trasportabilità, saranno da preferire sensori con ridotta **soglia*** di misura, anche dotati di **portata*** modesta, con **precisione*** sub-millimetrica, anche caratterizzati da **finestre di lavoro*** contenute, ovvero scanner a luce strutturata (sez. [2.2.1](#) e [2.2.2](#)), e **probing arm***. Per il rilievo architettonico invece saranno da prediligere, considerando la dimensione e le **scale di restituzione***, sensori con ampia portata, precisione sub-centimetrica e finestre di lavoro più vicine possibili all'emisfera, ovvero **laser scanner terrestri** (sez. [2.2.3](#)), **stazionari** o **mobili**. Una posizione particolare in questa rassegna di tecniche è ricoperta dalla **fotogrammetria** (sez. [2.2.4](#)), che si qualifica come il più versatile tra i procedimenti di misura descritti, essendo implementabile con profitto in entrambe le casistiche.

Da un punto di vista procedurale va osservato come nella rappresentazione architettonica esistano scale di restituzione convenzionalmente accettate (ad esempio UNI EN ISO 5455) in funzione della scelta di cosa rappresentare e quindi con conseguenti **errori di graficismo***. La formalizzazione di scale di restituzione standard esiste invece in modo molto limitato nel rilievo di manufatti museali, spesso limitatamente ad ambiti specifici come, ad esempio, quello archeologico (ad esempio la rappresentazione in scala 1:1 della ceramica o delle monete a seguito di rilievo a contatto). Nel rilievo di manufatti museali le scale di ingrandimento rappresentano una prassi consolidata, e vengono determinate in maniera occasionale in modo direttamente proporzionale alla dimensione dell'oggetto di rilievo e dei suoi dettagli caratterizzanti (sez. [2.1.3](#)).

1.2. Obiettivi del documento e destinatari

Le Linee guida definiscono **parametri di qualità standardizzati** per la digitalizzazione 3D degli oggetti museali tenendo conto delle potenzialità tecnologiche disponibili sul mercato e dell'eterogeneità dei materiali che compongono le collezioni. L'impostazione **approccio documentale**, volto alla produzione di asset digitali che riproducano i beni alla massima **risoluzione e accuratezza*** possibile (sez. [2.1.3](#) e [2.1.5](#)) e privi di interventi autoriali creativi. Dal modello *master* ottenuto è possibile ricavare dei **modelli derivati** (sez. [2.1.6](#)) capaci di supportare specifici casi d'uso.

Il documento stabilisce i **requisiti di qualità attesi per i modelli digitali** (sez. [2.1](#)) dal punto di vista **geometrico e dell'appearance***. Una specifica sezione è dedicata all'**interoperabilità** dei formati (sez. [3.5](#)) e ai **metadati** (sez. [4.10](#)) in grado di garantire l'accessibilità, longevità e riuso dei contenuti digitali. Vengono trattati anche i **requisiti di processo** (sez. [3.3](#)), al fine di preservare la massima qualità del dato acquisito durante tutto il successivo processo di elaborazione, fino alla pubblicazione del *dataset*.

I prodotti della digitalizzazione tridimensionale descritti nelle Linee guida consentono l'utilizzo per finalità di **studio conservativo**, pur limitato all'**esame visivo della forma e della superficie dell'oggetto rappresentato** secondo la scala di rappresentazione prescelta per la replica digitale dell'oggetto. Non vengono invece trattate, dalle Linee guida, le tecniche di **diagnostica** (ad esempio riflettografia, termografia, fluorescenza a raggi X, spettroscopia RAMAN, radiografia, *imaging in range* spettrali della luce diversi dal visibile, ecc.) utili all'individuazione dei materiali costitutivi degli oggetti, del loro stato conservativo, delle tecniche e del processo esecutivo, delle micro-tracce (ad esempio piccoli graffi, scarsa adesione fra gli strati) e degli elementi invisibili o sub-superficiali del manufatto.

Destinatari privilegiati di questo documento sono i soggetti del Ministero della Cultura che si occupano di conservare, valorizzare e tutelare il patrimonio culturale, nonché le industrie culturali e creative che lavorano ai processi di digitalizzazione del patrimonio storico-artistico. I soggetti destinatari potranno beneficiare delle Linee guida in relazione ai seguenti processi:

- progettazione consapevole, pianificazione ed esecuzione di interventi di digitalizzazione 3D del patrimonio culturale;
- scelta consapevole dei manufatti da digitalizzare e valutazione del livello di complessità e di opportunità della digitalizzazione;
- conduzione delle operazioni digitalizzazione presso i cantieri e successiva elaborazione dei dati;

- composizione del pacchetto di contenuti relativamente a ciascun oggetto digitale;
- valutazione delle offerte e dei progetti tecnici presentati da aziende, fornitori o professionisti.

Le Linee guida pongono l'attenzione sul concetto di "**contenuto digitale**", che va oltre quello di "oggetto digitale" (sez. [1.5](#)). Il contenuto digitale comprende l'**informazione** intrinseca all'oggetto fisico inteso come oggetto culturale, amplificandone il valore e la comprensione. Le Linee guida stabiliscono le modalità di acquisizione, i vincoli procedurali e le strutture dati necessarie per la corretta creazione e archiviazione del contenuto digitale.

Una parte significativa del documento (sez. [2.3](#)) è dedicata all'analisi **della complessità dell'azione di digitalizzazione**, fornendo indicazioni per la corretta pianificazione delle attività, per l'individuazione di **soluzioni tecnologiche e operative** per supportare gli istituti nella definizione del proprio **piano dei fabbisogni** e per valutare lo sforzo delle operazioni previste in funzione delle caratteristiche degli oggetti coinvolti. A tal fine vengono individuate e formalizzate delle **classi tipologiche di complessità della digitalizzazione** dei manufatti in relazione alle loro caratteristiche intrinseche (morfologiche, di materiale, di comportamento rispetto alla luce) o estrinseche (complessità dovute al contesto in cui si opera, sez. [2.3](#)). Per ciascuna classe di complessità viene suggerita la soluzione tecnologica di mitigazione più appropriata. Questa formalizzazione è utile tanto ai Responsabili di istituto delle collezioni per operare **studi di fattibilità** rispetto alla digitalizzazione del proprio fabbisogno e alla sua definizione, quanto agli operatori della digitalizzazione che potranno programmare le attività e avere un riferimento pratico per la scelta delle soluzioni tecniche per far fronte alle diverse casistiche operative.

Le Linee guida si prefiggono quindi di tracciare una panoramica estesa e approfondita sulle strategie e metodologie della digitalizzazione secondo l'attuale stato dell'arte, e allo stesso tempo di offrire un quadro di riferimento il più possibile **duraturo**, capace di trascendere quanto più possibile le contingenze tecnologiche del momento.

Campagne di rilievo ordinarie e straordinarie

Le tecnologie e le procedure operative legate alla digitalizzazione 3D sono estremamente numerose e varie, fattore che rende arduo delineare un insieme di approcci strategici validi per ogni contingenza, esigenza ed eventualità. Il contesto di applicazione principale delle Linee guida è riferito ad attività di digitalizzazione condotte da **soggetti specializzati nel rilievo digitale**, che utilizzano **strumenti hardware e software disponibili sul mercato** (sez. [2.2](#)), e che applicano **procedure di misura ed elaborazione dei dati accettati come standard nella comunità di settore** (sez. [3.2](#), [3.3](#)), integrando ad esse specifiche strategie di mitigazione delle criticità (sez. [2.3](#)). Le Linee guida pongono inoltre particolare attenzione agli aspetti di **efficienza e scalabilità** delle operazioni, prendendo in considerazione il rapporto tra le risorse, i tempi e i risultati della digitalizzazione, con l'obiettivo di promuovere una digitalizzazione il più possibile estesa del patrimonio culturale nazionale. Lo scopo di un'attività di digitalizzazione così condotta è **la produzione di una rappresentazione digitale versatile**, in grado di soddisfare le differenti esigenze degli enti conservatori del patrimonio per fini di documentazione, studio e presentazione virtuale. Finalità tecniche specifiche quali, ad esempio, il restauro o la diagnostica, richiedono soluzioni dedicate o sperimentali, non riconducibili a procedure standard.

Le Linee guida sono basate sullo stato dell'arte delle tecnologie e dei processi per la digitalizzazione 3D di tipo **metrico**, che si concretizza nella realizzazione di modelli 3D fedeli all'originale rappresentato. Questi dati e metodologie possono essere impiegati in flussi di lavoro condivisi e standardizzati nel campo dei beni culturali, ma anche nel campo dell'industria, dell'ingegneria, dell'architettura, delle industrie culturali e creative e della comunicazione. Questi approcci sono coerenti con i requisiti di trasparenza, fedeltà all'originale, neutralità e completezza dei modelli prodotti, secondo quanto descritto nella sezione [1.4](#).

In questa sede, si definisce questa tipologia di campagna di digitalizzazione come **ordinaria**, per distinguerla da azioni sperimentali più articolate che coinvolgono come partner attivi gruppi di ricerca, enti o imprese sviluppatrici che fanno uso di strumenti *software*, *hardware*, procedure di misura e di elaborazione progettati ad hoc con l'obiettivo dell'avanzamento dello stato dell'arte della digitalizzazione 3D. Queste tipologie di campagne, definite in questa sede come **straordinarie o sperimentali**, non sono infrequenti nel settore dei beni culturali, ma proprio per la loro natura innovativa non si prestano ad una trattazione specifica nel contesto del presente documento. I principi metodologici, gli approcci tecnici, e le indicazioni prescrittive espresse in queste Linee guida restano non di meno validi riferimenti anche per campagne di digitalizzazione che esulano dal contesto ordinario sopra descritto. Nel caso di una campagna di digitalizzazione straordinaria, tuttavia, è possibile, in modo motivato, discostarsi rispetto alle prescrizioni tecniche in materia di procedure, strumentazioni, e *output* delle presenti Linee guida a seconda degli obiettivi della campagna sperimentale.

Intelligenza artificiale e rappresentazioni alternative del dato 3D

Il mondo digitale si evolve con incredibile rapidità e in modo multiforme: nuovi algoritmi di intelligenza artificiale o di **light field rendering*** consentono di generare ed elaborare il dato 3D o di rappresentare oggetti reali attraverso processi che prescindono dalla misura diretta strumentale sul campo. Questi argomenti vengono trattati sinteticamente in questa sezione poiché, pur rappresentando un ambito di ricerca e sviluppo di massimo interesse, essi rappresentano un'attuale frontiera di ricerca e non si dispone per essi di procedure e strumenti consolidati e condivisi dalla comunità di interesse.

L'**intelligenza artificiale** (AI) e il *machine learning* offrono la possibilità di **automatizzare** e **potenziare** una serie di processi manuali di acquisizione, elaborazione e metadattazione. Come dimostrato dalla recente indagine di Europeana sul ruolo e l'impatto dell'AI nel settore del patrimonio culturale digitale¹, esistono numerosi progetti già in corso con l'obiettivo di aumentare l'efficienza della digitalizzazione, la risoluzione delle riproduzioni, l'accessibilità e l'indicizzazione automatica dei dati per mezzo dell'AI. L'interesse legato a queste pratiche è spesso legato alla ricerca di soluzioni per la gestione e l'utilizzo delle collezioni digitalizzate, data la potenzialità delle tecnologie di AI di lavorare su grandi moli di dati. L'interpretabilità e l'affidabilità dei risultati delle applicazioni di AI, così come le problematiche etiche, sono questioni al centro di diverse iniziative di ricerca a livello Europeo.

¹ Report del nuovo gruppo di ricerca europeo sull'impiego dell'AI nelle gallerie, biblioteche, archivi e musei:

<https://pro.europeana.eu/post/new-europeanatech-task-force-report-explores-ai-in-relation-to-glams>

<https://pro.europeana.eu/project/ai-in-relation-to-glams>

Un primo campo di applicazione delle tecnologie di AI è da individuarsi nel **supporto alle attività di digitalizzazione**, con l'obiettivo di raggiungere una più accurata stima, correzione e completamento delle informazioni di geometria e di colore dei modelli digitali. A queste possibilità si aggiunge il contributo alle successive elaborazioni dei modelli 3D, in particolare **l'analisi e le classificazioni delle caratteristiche di forma ed apparenza**: gli studi dimostrano che i descrittori basati sull'AI sono in grado di eguagliare i descrittori tradizionali creati a mano².

Altro ambito emergente nella ricerca è il *light field rendering*, tecnica capace di produrre una rappresentazione delle proprietà visuali di una scena (così come appaiono ad un osservatore) senza generare una rappresentazione esplicita e misurabile (come nella digitalizzazione 3D) della scena stessa. Per mezzo del *light field rendering* è possibile costruire una rappresentazione tridimensionale a partire da un certo numero di immagini statiche, e generare immagini da nuovi punti di vista. Tecnologie come i **NeRF*** (*Neural Radiance Field*, basati su reti neurali) o il **gaussian splatting*** sono esempi di queste tecniche. Siccome queste tecniche sono basate solo sull'apparenza visuale della rappresentazione, la loro caratteristica distintiva è la loro efficacia nella rappresentazione percettivamente fedele di apparenze molto complicate, come oggetti trasparenti o riflettenti. Queste caratteristiche rendono le tecnologie di *light field rendering* una strada percorribile in alcuni casi limite dove altre tecnologie ordinarie non sono in grado di produrre risultati soddisfacenti. Anche se da queste rappresentazioni è possibile estrarre modelli 3D e informazioni di materiale ed illuminazione, allo stato attuale della tecnologia questi non consentono di produrre una **documentazione metricamente rigorosa** e vengono principalmente utilizzate per la **visualizzazione di scene 3D**. Si ricorda infine che tutte queste tecniche sono accomunate da un *input* fotografico, e condividono con la fotogrammetria la prima fase di orientamento delle immagini (sez. [2.2.4](#)). Pertanto, le indicazioni fornite da queste Linee guida per le acquisizioni fotogrammetriche, e in particolare le raccomandazioni di preservare tutti i dati intermedi, possono essere direttamente utilizzate per produrre un *dataset* fotografico adatto anche alla generazione di tali rappresentazioni.

È opportuno considerare in questa sede anche la **Reflectance Transformation Imaging** (RTI). Le rappresentazioni ottenute con questo metodo appartengono alla famiglia della fotografia computazionale (*computational photography*), ossia costituiscono un dato digitale che presenta le caratteristiche di una immagine pur non derivando da un processo fotografico diretto, bensì da una elaborazione di dati fotografici contenenti informazioni in merito alla forma e al materiale dell'oggetto. Nella fattispecie, gli RTI sono **single immagini** "reilluminabili", che rendono possibile **modificare la direzione di illuminazione in tempo reale** di una particolare vista di un oggetto per simulare, ad esempio, una analisi autoptica a luce radente. Generalmente gli RTI vengono utilizzati per rappresentare oggetti quasi piatti, o con un dettaglio minuto rispetto alla dimensione totale. Anche in presenza di materiali con comportamenti ottici complessi, gli RTI sono in grado di rappresentare con efficacia i dettagli di superficie e le caratteristiche del materiale, consentono una fruizione molto simile a quella dell'oggetto reale; permettono inoltre di applicare specifici filtri per evidenziare le caratteristiche della superficie. Tipici ambiti di applicazione dell'RTI sono monete, incisioni, tavolette cuneiformi, stampi su ceramica, fossili, segni di lavorazione su sculture, tessuti, graffiti, superficie pittorica di quadri o matrici di stampa. La tecnica RTI non verrà tuttavia trattata in queste Linee guida perché, anche se ampiamente impiegata nel campo dei beni culturali, non fornisce un dato 3D

² Kroeger O. et al. 2023. Kutlu H., et al. 2023

misurabile e interoperabile con gli strumenti standard di documentazione, studio e presentazione, e richiede un flusso di lavoro sostanzialmente diverso da quello della digitalizzazione metrica.

1.3. Struttura del documento e allegati

Questo documento si compone di **quattro capitoli**.

Il capitolo **1** contiene l'**introduzione** e l'**impostazione metodologica**. In questo capitolo viene perimetrato l'ambito di applicazione delle Linee guida e vengono presentati i loro obiettivi, i criteri utilizzati nella loro redazione e i destinatari principali a cui esse si rivolgono. È sinteticamente inquadrato l'impiego sperimentale dell'intelligenza artificiale nell'automazione dei processi di elaborazione del dato, ambito di ricerca che è ancora prematuro normare nelle presenti Linee guida. Viene quindi introdotto l'**approccio documentale**, che si traduce nell'adozione di specifiche tecnologie e modalità operative per la produzione di modelli digitali di beni culturali il più possibile oggettivi e privi di interventi autoriali, secondo i più alti standard qualitativi. Il concetto di "oggetto digitale" viene esteso verso quello di "**contenuto digitale**", che non si limita al solo modello 3D o replica digitale, ma integra più livelli informativi, riferibili al processo di digitalizzazione, al significato e al contesto dell'oggetto stesso, indissolubilmente connessi alla sua natura culturale³. Il capitolo si conclude con un fondamentale richiamo ai principi FAIR dei dati e con una disamina delle principali casistiche delle tipologie di riproduzione tridimensionale dei beni culturali in relazione ai diritti di riproduzione e di sfruttamento commerciale ad essi connessi.

Il capitolo **2** tratta le **classificazioni qualitative e di processo**, cioè gli standard di qualità richiesti per i modelli 3D, una disamina degli strumenti *hardware* e *software* per la digitalizzazione 3D e la classificazione degli oggetti in base ai livelli di complessità che essi pongono al processo di digitalizzazione. Per quanto riguarda gli **standard di qualità dei modelli** vengono presentati i criteri di posizionamento e di orientamento del modello all'interno dello spazio 3D, il sistema di riferimento, le caratteristiche e il trattamento della geometria *mesh** e delle *texture* in relazione sia al modello *master*, frutto dell'approccio documentale, sia ai modelli *derivati* finalizzati ai vari scenari d'uso. Per quanto riguarda le **principali tecnologie** per l'acquisizione digitale 3D, esse sono diversificate nei due macro-raggruppamenti di sistemi con sensore attivo e passivo; di ciascuna tecnologia viene descritto il principio di funzionamento, l'usabilità, le potenzialità e il tipo di dato generato (*output*). La sezione riguardante la **classificazione degli oggetti** in relazione al processo di acquisizione è utile a contestualizzare e argomentare l'Allegato A *Matrice degli indici di complessità* della digitalizzazione 3D. In essa vengono trattate le varie criticità e gli aspetti problematici che un manufatto può presentare in fase di acquisizione digitale (dimensioni, caratteristiche di forma, comportamento del materiale rispetto alla luce, accessibilità e condizioni di contesto). Vengono quindi suggerite le soluzioni operative più appropriate per ciascuna casistica.

3. Si veda il documento "Basic principles and tips for 3D digitisation of cultural heritage", punto 5:

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/basic-principles-and-tips-3d-digitisation-cultural-heritage>

Il capitolo **3** è dedicato ai **processi e alle fasi della produzione del modello 3D**. Tenendo conto di quanto discusso nel precedente capitolo, vengono formalizzate in una sequenza virtuosa le fasi di produzione del modello 3D: dall'allestimento delle postazioni di digitalizzazione presso il **cantiere**, alle modalità di **acquisizione**, al successivo lavoro in laboratorio di **processing** ed **editing** dei dati acquisiti, sia del modello *master* che dei dati derivati. Circa i modelli **derivati**, viene discussa la possibilità di avvalersi dell'ausilio della **modellazione manuale in computer grafica** in presenza di particolari condizioni e necessità; ne viene argomentata l'utilità, la plausibilità e il corretto approccio metodologico, in coerenza con i principi espressi in queste Linee guida. In merito all'esportazione e all'archiviazione dei modelli 3D, vengono descritti e raccomandati i principali **formati interoperabili**, in riferimento alla geometria, alle *texture* e ai metadati. Alla fine del capitolo sono indicate le modalità con cui è opportuno **documentare il processo** di acquisizione e di elaborazione del modello, esplicitandolo per mezzo di appositi template allegati alle Linee guida (**Allegato B: Relazione_Setup_Acquisizione** e **Allegato C: Relazione_Elaborazione**).

Il capitolo **40** è dedicato alla **definizione e alla composizione del dataset** oggetto della consegna. Vengono trattati i **metadati** e la loro funzione in connessione ai principi FAIR. Seguono indicazioni sulla **composizione del pacchetto di consegna**, comprensivo di file *master* e **dati grezzi*** di acquisizione, file derivati, metadati, paradata, contenuti accessori, *rendering di preview*, ed eventualmente le descrizioni catalografiche dei beni digitalizzati. Viene quindi esplicitata la logica di organizzazione gerarchica dell'intero *dataset*. In riferimento al modello *master*, vengono suggerite le modalità per effettuare un'**auto-verifica** della qualità dei *dataset* prima della consegna, al fine di vagliarne la conformità rispetto agli standard stabiliti dalle presenti Linee guida. Infine, vengono presentati alcuni dei criteri per la gestione del **ciclo di vita della risorsa digitale 3D** e per il suo eventuale incremento e aggiornamento nel tempo.

Queste Linee guida sono corredate da:

- un **glossario**, che esplicita il significato di termini e concetti utilizzati nel documento;
- una **bibliografia** ragionata e una **sitografia**;
- **Allegati**:
 - a. *Matrice degli indici di complessità*, foglio di calcolo che consente la valutazione della complessità di un progetto di digitalizzazione;
 - b. *Relazione_Setup_Acquisizione*, template da seguire per redigere la relazione delle attività di setup e acquisizione nella postazione di digitalizzazione presso il cantiere (paradata);
 - c. *Relazione_Elaborazione*, template da seguire per redigere la relazione delle fasi di elaborazione del *master* e derivati (paradata).

1.4. Digitalizzazione secondo l'approccio documentale

Il Ministero della Cultura (MiC) promuove la digitalizzazione del patrimonio culturale secondo un **approccio documentale**, finalizzato a costruire una **rappresentazione digitale dell'oggetto reale** quanto più possibile simile nelle caratteristiche di forma e apparenza, e che ne possa rappresentare una documentazione il più possibile **fedele, oggettiva e completa**. Con il termine *documentale* si sottolinea l'importanza di un approccio che mira alla documentazione del patrimonio culturale secondo la tradizionale definizione della *Venice*

Charter⁴, che rimarca come "ogni stadio del processo debba essere riportato e reso pubblico" e mira a rapportarsi con il processo di costruzione del dato 3D con lo stesso spirito di "rispetto per il materiale originale e per l'autenticità" che dovrebbe caratterizzare gli interventi di conservazione e restauro.

La digitalizzazione 3D del patrimonio culturale è un processo che può essere affrontato secondo molte modalità e con differenti finalità. Come discusso più ampiamente nella sezione 3.4, le tecnologie di acquisizione e le diverse *pipeline* di produzione e processamento disponibili consentono di raggiungere obiettivi molto eterogenei, che possono andare dalla produzione di *asset* per ambienti interattivi, alla creazione di modelli per analisi, alla generazione di scene per *rendering* fotorealistici ad alta qualità. Alcune finalità possono comportare approcci al processo di digitalizzazione diversi da quello documentale. Ad esempio, generare un modello 3D per un contesto interattivo (quale potrebbe essere frutto di una modellazione manuale condotta a bassa qualità geometrica, risultante in una rappresentazione "sintetica" o interpretativa non fedele all'oggetto reale.

Nel solco tracciato dal PND, queste Linee guida sottolineano l'importanza della digitalizzazione del patrimonio culturale come fattore abilitante per i futuri processi di trasformazione digitale, e mettono in guardia rispetto al rischio di **obsolescenza** dei dati prodotti nelle campagne pregresse. Come suggerito nella *London Charter*⁵, la raccomandazione dell'adozione dell'approccio documentale è finalizzata alla creazione di un contenuto digitale che documenti il processo di creazione dei modelli, il cui **utilizzo** possa essere il **più ampio possibile**. In quest'ottica, i principi che hanno guidato la stesura delle Linee guida si articolano intorno a **tre pilastri fondamentali**:

- **trasparenza**: tutte le azioni effettuate per ottenere i dati digitali devono essere riportate e documentate per quanto possibile;
- **neutralità**: gli operatori devono limitare il proprio contributo intellettuale allo stretto indispensabile. Quanto prodotto non deve poter essere considerato in alcun modo opera autoriale ma mera operazione di documentazione (sez. 3.3.3);
- **completezza**: l'oggetto digitale risultante deve includere tutti i dati prodotti nel processo di digitalizzazione nella forma grezza e in formati aperti.

I seguenti capitoli dettagliano le modalità operative di applicazione dei tre principi sopra elencati, che hanno un significativo impatto sulla qualità degli oggetti digitali prodotti. È fondamentale sottolineare l'importanza del principio di **trasparenza**, che si traduce nell'attività di accurata documentazione delle modalità di generazione dei dati. La qualità e l'efficacia di una riproduzione digitale, simile nella forma e nell'apparenza all'originale, sono strettamente correlate alla conoscenza delle tecnologie e dei processi di come questa è

⁴ Carta internazionale di Venezia per la conservazione e il restauro di siti e monumenti, 1964: The Venice Charter- 1964, 2nd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Venice, 1964. Per una antologia critica delle varie carte, convenzioni e principi sulla documentazione dei beni culturali si rimanda a Haddad, Naif A., Leen A. Fakhoury, and Yasir M. Sakr. "A CRITICAL ANTHOLOGY OF INTERNATIONAL CHARTERS, CONVENTIONS & PRINCIPLES ON DOCUMENTATION OF CULTURAL HERITAGE FOR CONSERVATION, MONITORING & MANAGEMENT." *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 21.1 (2021): 291-310.

⁵ La Carta di Londra definisce i principi per utilizzare i metodi e i risultati della visualizzazione digitale nella ricerca e nella comunicazione legata ai Beni Culturali. *London Charter*: "For the computer-based visualisation of cultural heritage". <https://londoncharter.org/>

stata prodotta. Un accurato processo di documentazione è pertanto fondamentale per poter garantire il riuso dei risultati di una campagna di digitalizzazione in modo ampio e consapevole. Garantire il più possibile la **neutralità** degli interventi attribuisce affidabilità ai prodotti della digitalizzazione, alimentando la consapevolezza dell'assenza di integrazioni arbitrarie (ad esempio rimodellazione manuale di parti mancanti o di difficile acquisizione), consentendo il riuso consapevole dei dati ottenuti. La necessità di puntare alla **completezza del dataset** che compone gli oggetti digitali è ormai una consapevolezza diffusa, maturata a seguito delle numerose esperienze pregresse nel campo: si sottolinea quindi l'importanza della consegna e dell'archiviazione non solo dei prodotti finali della digitalizzazione, ma anche di tutti i dati intermedi prodotti durante il processo.

I principi di trasparenza, neutralità e completezza dell'approccio documentale sono complementari ai principi di **FAIRness** descritti nella sezione [1.6](#). Infatti, mentre i principi qui descritti si riferiscono principalmente all'organizzazione e alla documentazione del processo, i secondi interessano soprattutto l'ambito del riuso del dato nell'ottica dell'*open access* e dell'*open science*.

1.5. Un modello significativo: contenuto digitale e replica digitale

Per "**oggetto digitale**" si intende un file digitale (messaggio di testo, immagine, modello 3D, file multimediale audio o video) che è riproduzione di un bene materiale, o nativamente digitale. L'oggetto digitale costituisce una **approssimazione** della **forma** e dell'aspetto dell'oggetto reale rappresentato ⁶.

In virtù della sua natura immateriale, la digitalizzazione non deve limitarsi all'approssimazione formale dell'oggetto, per quanto accurata essa sia. Al fine delle presenti Linee guida, è utile estendere il concetto di oggetto digitale a quello di "**contenuto digitale**", ovvero di una unità espressiva dotata di forma e significato in grado di veicolare tanto la funzione, il contesto e il valore culturale del bene quanto le informazioni necessarie a comprendere come il processo di digitalizzazione sia stato condotto. La realizzazione di un modello digitale secondo un approccio documentale permette di operare successivamente e in maniera consapevole possibili integrazioni di forma (restauro virtuale), contestualizzazione rispetto ai luoghi originari (ricostruzione virtuale), o ricostruire le **relazioni** con l'ambiente, i valori e significati a esso attribuiti nel corso della storia (mappatura semantica e narrazione)⁷.

Se acquisito secondo un approccio documentale (processo trasparente, neutrale e completo), un contenuto digitale può consentire la conoscenza del patrimonio culturale in casi estremi di danneggiamento, perdita o distruzione dell'originale. Attraverso tecniche di stampa 3D è possibile ottenere a partire dalla replica digitale una replica **materiale**, capace di rappresentare alcune delle proprietà di un originale disperso, e può essere manipolata o collocata per ripristinare un contesto frammentario o scomparso.

Le Linee guida si focalizzano sulla digitalizzazione tridimensionale degli oggetti storico-artistici museali nel loro stato di conservazione al momento dell'acquisizione, e sono pertanto strettamente legate alla dimensione temporale dell'acquisizione, fattore che non esclude e anzi incoraggia la realizzazione di

⁶ Lévy, M., Niggemann, E., De Decker, J., 2011

⁷ Francesco Antinucci, *Comunicare nel Museo*, Laterza, Bari 2014

interventi di digitalizzazione futuri. Esse prevedono l'associazione al **modello master** di una serie di risorse: i **dati grezzi** di acquisizione, i **modelli derivati** (sez. [2.1.6](#)), le informazioni descrittive del dominio di descrizione. Come si vedrà (capitolo [40](#)) il “contenuto digitale” o “pacchetto” di dati qui formalizzato è costituito da:

- dati grezzi di acquisizione;
- modello 3D *master*;
- modelli 3D derivati;
- metadati relativi all’oggetto digitale;
- relazioni di documentazione inerenti ai processi di *setup*, acquisizione ed elaborazione (paradati);
- dati descrittivi inerenti all’identificazione del bene, al contesto di provenienza e di fruizione, alla sua accessibilità;
- altri contenuti accessori.

Il contenuto digitale così definito costituisce l’elemento imprescindibile per un uso consapevole dei modelli al fine di creare **scenari d’uso** e di apprendimento per un pubblico diversificato. Come indicato nell’Allegato 4 del PND, *Linee guida per la classificazione di prodotti e servizi digitali, processi e modelli di gestione*⁸, una **nuova economia** potrebbe svilupparsi grazie a pratiche di digitalizzazione condivise e consapevoli, come la creazione di librerie digitali e servizi ad alto valore aggiunto, basate su **nuovi modelli di accesso al patrimonio e di interscambio culturale** a livello internazionale e di nuove pratiche **storytelling**. L’oggetto/contenuto digitale corredato dalle necessarie informazioni può così entrare a pieno titolo a fare parte di collezioni virtuali, seguendo le logiche consolidate dei “prestiti” fra musei. Siffatte collezioni virtuali possono integrare quelle reali esposte nei musei, completarle nel caso in cui apparati o contesti siano fisicamente smembrati e disseminati in più luoghi, stabilire connessioni o raffronti fra oggetti di varia provenienza ma legati da un come filo storico, tematico o culturale. Questi principi mirano alla diffusione di buone pratiche di **curatela digitale evoluta**, capaci di generare un ampio valore culturale, sociale ed economico.

1.6. Principi FAIR e riuso dei dati

Nel 2016 è stato stilato un elenco di principi fondamentali, denominati principi **FAIR**⁹, per ottimizzare la riutilizzabilità dei dati della ricerca. Tali principi rappresentano un insieme di linee guida e buone pratiche sviluppate per garantire che i dati prodotti siano:

- **Rintracciabili (Findable)**: dati e metadati rintracciabili sia dagli esseri umani sia dalle macchine (protocolli *machine-to-machine*). Il recupero automatico e affidabile dei *dataset* dipende dall’efficacia degli identificatori persistenti (PID, *Persistent IDentifiers*) utilizzati, quali ad esempio l’*Handle System*, il *Digital Objects Identifier* (DOI) o lo *Uniform Resource Name* (URN), e dai metadati descrittivi associati ai dati, che devono essere registrati in “cataloghi” o in *repository* indicizzabili.
- **Accessibili (Accessible)**: i dati, o almeno i loro metadati, devono poter essere accessibili dagli esseri umani e dalle macchine attraverso sistemi di autenticazione mediante l’uso di **protocolli standard**, e

⁸ PND Linee guida per la classificazione di prodotti e servizi digitali, processi e modelli di gestione: <https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-servizi-docs/it/consultazione/index.html>

⁹ <https://www.go-fair.org/fair-principles/>, si veda anche Wilkinson, 2016

devono essere depositati in archivi o *repository* che li rendano persistenti nel tempo e rintracciabili in rete. Almeno i metadati dovrebbero rimanere sempre disponibili, anche quando i dati non sono liberamente accessibili. I modelli 3D archiviati su *repository* di realtà pubbliche o private, anche se accessibili solo limitatamente, potranno così essere facilmente identificati e localizzati.

- **Interoperabili (*Interoperable*):** dati e strumenti informatici devono poter essere tra loro combinati. Il formato dei dati deve pertanto essere aperto e interpretabile dal più ampio spettro possibile di *software*, nonché essere in grado di colloquiare con altre basi di dati. Il concetto di interoperabilità è applicabile non soltanto alle risorse digitali, ma anche ai metadati. Ad esempio, i metadati devono utilizzare un linguaggio standardizzato e condiviso a livello internazionale dai servizi di indicizzazione.
- **Riutilizzabili (*Reusable*):** dati e metadati devono essere documentati nel migliore dei modi a garanzia della loro qualità, affinché possano essere replicati e/o combinati in contesti diversi. Il trattamento dei dati dovrebbe conformarsi agli standard o ai protocolli riconosciuti dalle comunità scientifiche di riferimento. Le possibilità di uso e riuso di dati e metadati dovrebbe essere dichiarato per mezzo di dichiarazioni sui diritti e licenze chiare ed accessibili.

Si noti che i principi FAIR non impongono la *openness* delle risorse digitali, ma forniscono adeguate disposizioni in base alle quali gli *asset* digitali devono essere correttamente gestiti. I dati possono essere pienamente in linea con i principi FAIR anche quando il loro l'accesso è limitato.

In accordo al documento *Guidelines on implementation of Open Access to Scientific Publications and Research Data*¹⁰ del 2017 emanato dall'European Research Council per i progetti nell'ambito di Horizon2020, i seguenti principi dovrebbero essere applicati ai dati della ricerca:

- rendere i dati della ricerca aperti e immediatamente accessibili per l'utilizzo da parte dei ricercatori e delle comunità di interesse;
- definire le opportune direttive per l'accesso ai dati se l'accesso aperto non è possibile a causa di limitazioni di diversa natura;
- fornire informazioni chiare sugli strumenti necessari per il riutilizzo dei dati;
- includere i metadati dei dati depositati;
- Depositare i dati in *repository* che assicurino:
 - identificatori univoci e persistenti (PID);
 - sostenibilità a lungo termine;
 - disponibilità dei metadati;
 - cura e garanzia della qualità dei dati;
 - elevati standard di accesso (ad esempio accesso gratuito e facile al riutilizzo), sicurezza, privacy;
 - formati aperti e largamente condivisi;
 - efficaci protocolli di provenienza e *version control* (ad esempio registri dettagliati delle modifiche ai *set* di dati e ai metadati);

¹⁰ https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/hi/oa-pilot/h2020-hi-erc-oa-guide_en.pdf

Il PND promuove l'applicazione dei principi FAIR al patrimonio culturale digitale nazionale, in quanto essi rappresentano una condizione essenziale affinché il ciclo di vita della risorsa digitale possa svilupparsi e crescere in modo sostenibile e virtuoso, capace di generare nuovo valore culturale, sociale ed economico. I dati, infatti, non vanno solo prodotti, ma anche aggiornati nel tempo, condivisi, correttamente riutilizzati, alimentando la creazione di nuovi contenuti culturali. Secondo quest'ottica, l'adozione dei principi FAIR è alla base della **creazione** e del **mantenimento di dati di qualità**, capaci di garantire una più facile **interazione fra i soggetti** che, a vario titolo, svolgono un ruolo attivo nella tutela, valorizzazione e ricerca sul patrimonio culturale, nonché nella creazione di nuovi contenuti culturali.

1.7. **Licensing delle riproduzioni digitali tridimensionali**

In riferimento alle *Linee guida per l'acquisizione, la circolazione e il riuso delle riproduzioni dei beni culturali in ambiente digitale*, Allegato 3 del *Piano Nazionale di Digitalizzazione (PND)*, che trattano in modo esteso le tematiche relative, in questa sede si intendono fornire alcuni spunti di riflessione relativi alle specificità delle riproduzioni digitali tridimensionali. Per quanto riguarda l'ambito della riproduzione fotografica è possibile individuare una distinzione fra la "mera riproduzione" e la riproduzione con apporto creativo o contenuto artistico da parte dell'autore: se nel primo caso si applicano esclusivamente le disposizioni in materia previste dal Codice dei beni culturali (D.Lgs. n. 42/2004 e successivi aggiornamenti), nel secondo si assommano a queste quelle sul diritto d'autore del produttore dell'immagine, essendo essa stessa un'opera creativa. Come si vedrà più avanti, è possibile applicare distinzioni simili anche nel caso delle riproduzioni digitali tridimensionali, con alcune opportune precisazioni.

È necessario, a tale scopo, introdurre una prima distinzione tra due di modelli: quelli che sono il **risultato di modellazione** (costruzione ex-novo del modello, sia come ripristino di una situazione antica non più esistente, sia come riproduzione dell'esistente costruita su base puramente creativa e senza strumenti di rilievo tecnico); e quelli, invece, **esito di rilievo degli oggetti** esistenti attraverso un processo di digitalizzazione tridimensionale. Questa distinzione teorica lascia spazio ad interpretazioni e non consente di tracciare una netta linea di confine tra una casistica e l'altra (ad esempio l'unione di rilievi e modellazione nell'ambito dell'anastilosi virtuale e gli interventi di correzione manuale dei modelli ottenuti da digitalizzazione) ma è nondimeno necessaria per tentare un approccio organico al tema.

Per la prima categoria, trattandosi di manifestazioni della creatività individuale, si applica la normativa del diritto d'autore (la cui cornice normativa è fondamentalmente ancora riconducibile alla legge 633 del 22 aprile 1941, mentre nel contesto digitale sono recentemente intervenute la direttiva UE 790/2019 e il d.lgs. 177/2021), e il creatore del modello digitale è da considerarsi titolare dei diritti a esso connessi e del relativo sfruttamento economico. Per la seconda categoria, relativa alle riproduzioni in senso stretto (ovvero, ottenute con procedimenti di rilievo digitale), si rientra nella casistica della **riproduzione fedele** del patrimonio culturale nazionale. È importante specificare che ci si riferisce in questa sede agli oggetti del patrimonio dello Stato nel pubblico dominio, sui quali non grava il diritto di sfruttamento economico da parte dell'autore.

Generalmente, le riproduzioni digitali tridimensionali del patrimonio culturale e la digitalizzazione tridimensionale condotta secondo l'approccio documentale sono certamente da ricondurre alla seconda

casistica, ovvero quella di riproduzione fedele del bene culturale rappresentato. Non è da escludere, tuttavia, che alcuni scenari possano prevedere un intervento autoriale da parte dell'operatore addetto alla digitalizzazione tridimensionale, e che il modello prodotto abbia esso stesso dignità di opera artistica o creativa originale. È il caso dell'arte digitale, insieme ampio e in costante espansione, che comprende le espressioni della **crypto art** e dei *Non-Fungible-Token (NFT)*, che non infrequentemente annovera tra le sue pratiche quella della libera reinterpretazione, della contaminazione e del riuso di riproduzioni digitali tridimensionali del patrimonio culturale. Per tutte queste circostanze è necessario adottare gli opportuni accorgimenti in merito alle pratiche di uso e riuso delle riproduzioni digitali, che dovranno essere opportunamente concordate con l'autore delle opere creative.

Rappresenta invece un confine più sfumato e meno esplorato quello della rappresentazione tridimensionale del patrimonio culturale ottenuta a partire da interventi di esclusiva modellazione nativa, senza l'utilizzo di strumenti di rilievo o di cattura. Le tecnologie di modellazione tridimensionale attuali permettono infatti di raggiungere un elevato livello di verosimiglianza con gli originali anche in assenza di una effettiva operazione di misura condotta avendo accesso al bene fisico. È dunque lo statuto stesso di "rappresentazione" del patrimonio culturale di questi modelli che può essere messo in discussione, rispetto a modelli tridimensionali che, a prescindere di una loro natura di riproduzione fedele o di una loro preponderante componente creativa autoriale, sono comunque frutto di operazioni di misura e di cattura della realtà condotta per mezzo delle diverse tecnologie disponibili (fotogrammetria, scansione laser, ecc.), alle quali poi, come già accennato, possono assommarsi attività di modellazione, manipolazione, contaminazione dei modelli di natura "non documentale".

Queste Linee guida, nel sottolineare il carattere non prescrittivo né definitivo delle distinzioni proposte, propongono di individuare una serie di casistiche generali che possono essere utili agli istituti per gestire i processi di digitalizzazione e operare scelte consapevoli in merito alla realizzazione dei modelli tridimensionali e alle loro pratiche di uso e riuso. È utile, a tale scopo, prendere in considerazione tanto i diritti intellettuali (inalienabili secondo la legislazione italiana) quanto i diritti commerciali (relativi allo sfruttamento economico delle opere, e disciplinati dalla normativa sul diritto di autore) relativi alla produzione delle opere. Sulla base dei presupposti enunciati, si individuano dunque le seguenti casistiche notevoli:

- **Riproduzioni digitali tridimensionali creative del patrimonio culturale frutto esclusivo della libera creatività dell'autore del modello digitale, e non esito di procedimenti di rilievo:** la proprietà intellettuale e commerciale del modello 3D sono di pertinenza dell'autore. Generalmente riferibili al contesto della produzione artistica, l'effettiva natura di "riproduzione" del patrimonio culturale di queste opere è difficilmente misurabile sulla base di parametri definiti, fattore che suggerisce di affrontare ciascuna circostanza in modo specifico. A queste considerazioni si aggiunge il punto di attenzione in merito all'appartenenza del bene culturale rappresentato al pubblico dominio o meno (le diverse casistiche di applicazione sono disciplinate ai punti seguenti).
- **Rappresentazioni digitali tridimensionali fedeli del patrimonio culturale frutto di procedimenti di acquisizione basati sul rilievo condotti su beni culturali pubblici fuori dal pubblico dominio:** è necessario applicare le disposizioni del Codice dei beni culturali rispetto alle possibilità di uso e riuso della rappresentazione digitale, e la normativa sul diritto di autore relativamente all'autore dell'opera digitalizzata.

- **Rappresentazioni digitali tridimensionali fedeli del patrimonio culturale frutto di procedimenti di acquisizione basati sul rilievo condotti su beni culturali pubblici nel pubblico dominio:** è necessario applicare le disposizioni del Codice dei beni culturali rispetto alle possibilità di uso e riuso della rappresentazione digitale.

2. CLASSIFICAZIONI QUALITATIVE E DI PROCESSO

Questo capitolo presenta gli standard di qualità richiesti per i modelli 3D, una disamina degli strumenti *hardware* e *software* per la digitalizzazione e la classificazione dei livelli di complessità del processo di digitalizzazione sulla base delle caratteristiche degli oggetti da digitalizzare. Tali tematiche non verranno affrontate solo da un punto di vista teorico, ma anche pratico, offrendo indicazioni strategiche e raccomandazioni operative in merito alle scelte da effettuare al verificarsi di specifiche condizioni, utili alla progettazione e all'esecuzione delle campagne di digitalizzazione e alla documentazione dei processi.

2.1. Classificazione delle tipologie di dati e degli standard di qualità

2.1.1. Unità di misura, posizionamento e orientamento del modello nello spazio 3D

Unità di misura

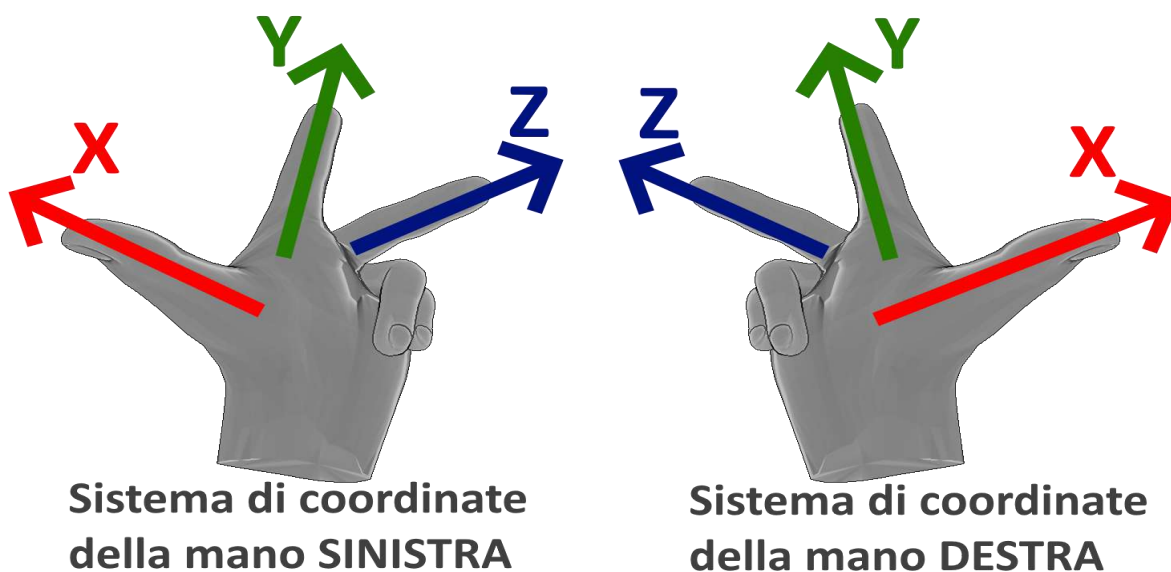
L'utilizzo documentale dei modelli 3D presuppone una loro natura **metrica**: per questo motivo, l'informazione relativa alla unità di misura usata nei modelli 3D è essenziale. Purtroppo, nella maggior parte dei formati di file 3D non è possibile indicare l'unità di misura scelta. **Dovrà essere quindi cura dell'operatore indicare sempre e comunque, nella documentazione dei dati prodotti, l'unità di misura utilizzata.** È sempre possibile cambiare l'unità di misura di un modello, al momento dell'utilizzo, attraverso un'operazione di **scalatura**.

Nella gestione standard dei dati 3D provenienti dalla misurazione di oggetti reali, si usano in genere solo due unità di misura: metri (*m*) o millimetri (*mm*). In generale, gli strumenti di scansione 3D che lavorano su oggetti medio-piccoli (dalla scala umana a scendere), producono di default dati espressi in millimetri, mentre gli strumenti di scansione 3D "terrestri" (per oggetti di dimensione riferibile ad automobili, edifici o terreni) producono di *default* dati espressi in metri. Esistono eccezioni a questa regola, per i dati che provengono da strumentazione scientifica (come, ad esempio, le micro-TAC e altri strumenti di misurazione ad altissimo dettaglio) che lavorano a risoluzioni di ordini di grandezza inferiori al millimetro e producono dati in micrometri. Nel caso della fotogrammetria, scala e unità di misura vengono sempre impostate durante l'elaborazione del dato da parte degli operatori. Per ottenere dati omogenei e facilmente utilizzabili è **opportuno, all'interno di un determinato progetto di digitalizzazione, utilizzare una delle unità di misura standard (metri o millimetri) e mantenere la medesima unità di misura per l'intero progetto.** Per gli stessi motivi, è raccomandabile adeguarsi alle scelte già condotte in precedenti campagne di digitalizzazione da parte del medesimo ente. Come indicazione generale, lavorare utilizzando l'unità di misura dei millimetri è conveniente per la gestione degli oggetti medio-piccoli, mentre lavorare in metri rende più facile integrare i dati 3D prodotti con altri modelli digitali tridimensionali di ambienti o edifici.

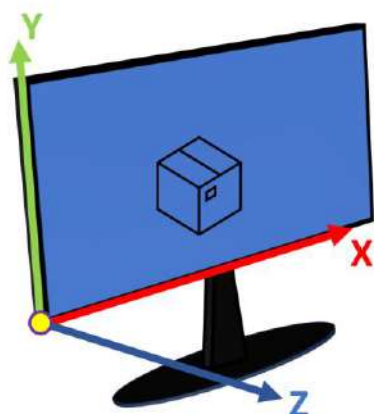
Sistemi di riferimento

Uno spazio 3D è uno spazio cartesiano dove è stabilito un punto zero, detto **origine**, da cui partono **tre assi ortonormali**, denominati **X**, **Y** e **Z**. Ogni punto in questo spazio è univocamente individuato dalle sue coordinate **[x, y, z]** che indicano la distanza dall'origine di tale punto lungo i tre assi. Questa definizione non è univoca, ed esistono diversi modi di definire gli spazi di riferimento.

Orientamento degli assi. Esistono spazi 3D che, rispetto all'orientamento degli assi, sono detti "della mano destra" (destrorsi) e "della mano sinistra" (sinistrorsi): considerando pollice, indice e medio come gli assi X, Y e Z dello spazio (rispettivamente), uno spazio costruito secondo l'orientamento delle dita della mano destra e uno spazio costruito secondo l'orientamento che si ottiene dalle dita della mano sinistra definiscono due spazi 3D fra di loro speculari. Passare da sistemi destrorsi a sinistrorsi all'interno dei *software* di modellazione (e viceversa) è possibile, ma è sconsigliabile in quanto possibile fonte di errori. La maggior parte dei *software* 3D e le principali librerie grafiche oggi disponibili lavorano su spazi destrorsi: pertanto si consiglia l'utilizzo del **sistema di riferimento destrorso** ai fini della digitalizzazione documentale.



**Sistema di coordinate
COMPUTER GRAPHICS**



**Sistema di coordinate
INGEGNERIA / ARCHITETTURA**

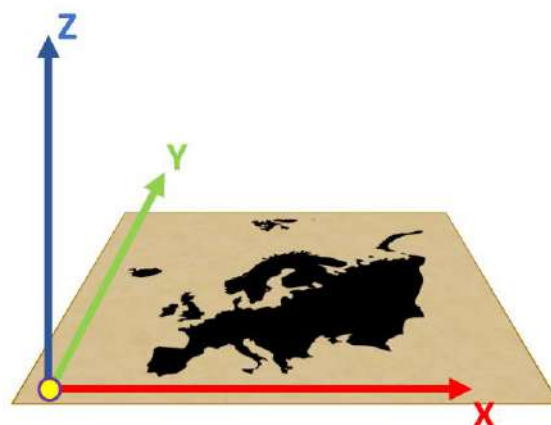


Figura 1a-b. Schema spazi di riferimento e sistemi di coordinate

Direzioni degli assi. Gli assi degli spazi 3D vengono allineati a delle direzioni “fisiche” per i quali esistono due standard: “Z-verticale” e “Y-verticale”. Il cambio di coordinate fra Z-verticale e Y-verticale è sempre possibile attraverso una operazione di rotazione sull’asse X.

La maggior parte dei *software* di *Computer Graphics* usano la convenzione Y-verticale: l’asse X è orizzontale e cresce verso destra, l’asse Z è longitudinale e cresce verso l’osservatore, l’asse Y è verticale e cresce verso l’alto. Gli standard della *Computer Graphics* derivano dalla gestione dei dati su monitor, dove X è la direzione orizzontale e Y quella verticale del piano immagine, mentre l’asse Z indica la profondità rispetto al piano XY dell’immagine. La maggior parte dei *software* di ingegneria, architettura e cartografia, usano invece la convenzione Z-verticale: l’asse X è orizzontale e cresce verso destra, l’asse Y è longitudinale e cresce allontanandosi dall’osservatore, l’asse Z è verticale e cresce verso l’alto. Gli standard di queste discipline derivano dall’uso di mappe, dove l’asse X è la direzione est-ovest, Y è nord-sud, e Z è l’elevazione.

Sulla base della necessità diffusa di integrare i dati 3D generati con altre fonti di dati, spesso architettoniche o cartografiche, è **preferibile adottare la convenzione Z-verticale**.

Sistemi di riferimento. Esistono due principali tipologie di sistemi di riferimento: “locali” o “globali”. Nei sistemi **locali**, l’origine è posta in una posizione arbitraria ma significativa, e gli assi sono orientati in modo significativo rispetto all’oggetto o al suo contesto. Nei sistemi **globali**, l’origine è in una posizione rilevante da un punto di vista geografico o geopolitico, e gli assi sono allineati a direzioni geografiche notevoli. I sistemi di riferimento locali spesso semplificano l’elaborazione e l’utilizzo dei modelli 3D, mentre i sistemi di riferimento globali sono necessari per un uso dei dati 3D di tipo ingegneristico e architettonico o per una gestione cartografica delle informazioni. Il passaggio da sistemi di riferimento locali a globali (e viceversa) è sempre possibile, ma richiede una lavorazione aggiuntiva. Sistemi di riferimento globali sono poco supportati dalla maggior parte dei *software* di elaborazione/visualizzazione di modelli 3D e possono creare problemi numerici nella gestione delle coordinate assolute; inoltre, alcuni sistemi di riferimento globali sono non-cartesiani, e questo può generare ambiguità per alcuni formati di file 3D. Lavorando su oggetti mobili, che non hanno una posizione assoluta geografica, utilizzare un sistema di riferimento globale non ha significato.

Per i beni storico-artistici museali, e in particolare per i beni mobili, è dunque **preferibile adottare sistemi di riferimento locali**.

È **opportuno indicare sempre comunque, nella documentazione dei dati prodotti, quale sistema di riferimento è stato scelto** (orientamento degli assi sinistrorso o destrorso; direzione degli assi Z-verticale o Y-verticale; sistema di riferimento locale o globale).

Orientamento dei modelli 3D

Assumendo che si siano seguite le raccomandazioni delle sezioni precedenti e si sia optato per un sistema di riferimento locale, all’interno dell’ambiente di modellazione è **necessario utilizzare una posizione e un orientamento del modello 3D che siano significativi e utili alla gestione del dato**.

Generalmente, gli strumenti di scansione 3D generano i dati in un sistema di riferimento che è relativo alla loro posizione ed orientamento durante la misurazione (ad esempio l’origine coincide con la posizione del

centro ottico dello scanner). Alcuni strumenti, ad esempio, i “laser terrestri”, usati per edifici e terreni, effettuano correzioni a questo spazio usando sensori a bordo (ad esempio bussole digitali, accelerometri/giroscopi, sistemi di geo-localizzazione globale satellitare **GNSS***). Nella fotogrammetria, il sistema di riferimento iniziale deriva dalla posizione e dall’orientamento stimati delle fotografie, e può essere poi imposto un nuovo spazio di riferimento usando **marker*** o altre informazioni (es. dati GNSS e di orientamento presenti negli **EXIF***). È normale che durante l’elaborazione dei dati grezzi si lavori in questi sistemi di riferimento: al momento di produrre il modello 3D *master* verrà scelto un sistema di riferimento che faciliti la gestione del dato 3D.

L’origine deve essere posta in una posizione notevole rispetto al modello tridimensionale, che renda facile l’utilizzo del dato e la sua misurazione. Per il posizionamento dell’origine si possono seguire diversi criteri, a seconda del singolo oggetto o della classe/tipologia di oggetto:

- **Posizione notevole rispetto alla forma dell’oggetto.** Questa scelta semplifica alcune operazioni sul modello 3D: elaborazione, visualizzazione, stampa, *rendering*. Ad esempio:
 - centro di massa;
 - centro di simmetria;
 - centro della base.
- **Posizione notevole rispetto alla natura dell’oggetto.** Posizione che abbia un significato rispetto alla funzione dell’oggetto o al suo specifico valore culturale. Questa scelta può aiutare alcune operazioni di visualizzazione, studio e confronto. Ad esempio:
 - il bocchino o il centro del foro del fornello per una pipa;
 - il centro dell’occhio per un’ascia o un martello;
 - il centro della bocca per un vaso, o il puntale per un’anfora.
- **Posizione esterna, misurabile come punto di riferimento.** Questa scelta rende facile un eventuale uso del modello 3D per la conservazione dell’oggetto, in quanto può essere usata come caposaldo per la misurazione sull’oggetto reale e il riporto di informazioni metriche da e verso il modello 3D. Ad esempio:
 - l’angolo del basamento di una statua;
 - l’angolo della cornice di un quadro;
 - un chiodo o un caposaldo di riferimento.

A seconda delle caratteristiche dell’oggetto (o della classe di oggetti) considerato è possibile individuare casistiche intermedie a quelle presentate per individuare un posizionamento dell’origine ottimale. In alcune circostanze, il posizionamento dell’origine può anche essere imposto dal committente, ad esempio per quelle classi di oggetti per cui esistono standard di rappresentazioni che possono guidare questa scelta.

L’oggetto rappresentato deve essere orientato rispetto agli assi in maniera tale che gli assi siano allineati in modo coerente rispetto all’oggetto e che si possano ottenere in maniera semplice viste canoniche significative.

L’asse verticale dell’oggetto, quando rilevante, dovrebbe essere orientato seguendo l’asse Z o Y (a seconda della convenzione Z-verticale o Y-verticale, rispettivamente), mantenendo la direzione dell’“alto” coerente con la realtà. Se un oggetto può essere rappresentato utilizzando diversi orientamenti occorre sceglierne uno seguendo le indicazioni del committente, eventualmente seguendo un criterio di omogeneità di rappresentazione di oggetti o classi di oggetti simili all’interno del progetto (ad esempio, una spada può

essere orientata verticalmente, con la punta verso il basso, come è nel fodero, o verticalmente con la punta verso l'alto, come tenuta in mano, o orizzontale come se posata su un tavolo). È possibile che, per alcune classi o tipologie di oggetti, esistano standard di rappresentazione che possano guidare questa scelta. Stabilito l'asse verticale, l'oggetto dovrebbe essere ruotato rispetto a questo asse in maniera da mostrare il fronte quando guardato dalla direzione di *Y negative* o *Z positive* (a seconda della convenzione Z-verticale o Y-verticale, rispettivamente). Alternativamente, se l'oggetto ha una forma o una funzione che richiamano chiaramente delle direzioni, è possibile utilizzare queste ultime per il suo orientamento rispetto agli assi. Anche in questo caso queste regole generali possono essere adattate alla natura specifica dell'oggetto in questione.

La scelta di posizionamento e di orientamento dei modelli 3D rispetto allo spazio di riferimento dovrebbe essere, per quanto possibile, uniforme all'interno dell'intero progetto di digitalizzazione, e seguire delle strategie comuni. In una collezione eterogenea è certamente possibile seguire delle regole specifiche per ciascun tipo di oggetto. Esempi concreti:

- Monete: assumendo Z-verticale, tutte le monete hanno l'origine nel centro di massa, il fronte rivolto verso l'asse Y negativo e ruotate per avere la figura impressa sul fronte verticale e allineata con l'asse Z;
- Dipinti: l'origine nell'angolo in basso a sinistra della tela, asse X allineato al bordo orizzontale della tela, e asse Z allineato al bordo verticale della tela.

2.1.2. Rappresentazione della geometria come *mesh* triangolata

Un modello tridimensionale è una rappresentazione digitale della geometria di un oggetto: nel contesto di queste Linee guida, la rappresentazione più comune di una geometria si ottiene attraverso una struttura dati chiamata **mesh poligonale**. Le *mesh* poligonali sono frequentemente usate in computer grafica, in matematica e geometria computazionale per ottenere la descrizione tridimensionale di un oggetto. Nel contesto di queste Linee guida, per *mesh* poligonale si intende il risultato finale della elaborazione dei dati di sensori attivi e passivi usati nelle attività di rilievo.

Una *mesh* poligonale descrive la superficie di un oggetto partendo da vertici sopra cui viene costruita una rete (in inglese, *mesh*) di **facce poligonali**. Un **vertice** è un punto nello spazio definito da una terna di coordinate $[x, y, z]$: i vertici di un *mesh* sono punti sulla superficie dell'oggetto. La distanza fra questi punti, in relazione alla dimensione del manufatto, è direttamente proporzionale alla risoluzione del modello (sez. [2.1.3](#)). I vertici sono collegati fra di loro per formare delle strutture poligonali, che rappresentano la superficie dell'oggetto: le facce. Una **faccia** è una superficie poligonale descritta da tre o più vertici. Le facce si distinguono a seconda del numero di vertici che le descrivono: triangoli, quadrilateri, **n-gon***. Il segmento che connette due vertici, detto **spigolo** o *edge*, è in alcuni *software* indicato come altra primitiva (oltre a vertici e facce), ma più spesso è solo un sottocomponente delle facce.

La rappresentazione standard da utilizzare per la realizzazione di modelli 3D del patrimonio culturale a partire dal rilievo geometrico è quella delle facce triangolari. Le facce triangolari sono sempre planari e sono più semplici da elaborare e visualizzare. Le facce quadrangolari sono più comuni nella modellazione

manuale, perché offrono una migliore versatilità di manipolazione; le facce con più di quattro vertici, similmente usate nella modellazione, vengono utilizzate in situazioni specifiche.

L'orientamento di un poligono (ossia, quale lato del poligono è l'esterno e quale l'interno) viene determinato dall'ordine in cui i vertici formano la faccia (*winding*). La struttura poligonale determina quindi in maniera implicita il lato interno ed esterno di un poligono e, localmente, la direzione del suo **vettore normale*** (un vettore con direzione ortogonale alla superficie della faccia e verso determinato dall'ordine dei vertici). La **normale** delle facce determina a sua volta la normale dei vertici (come media, spesso ponderata su area, delle normali delle facce incidenti). Un modello 3D può però specificare in maniera esplicita, per ciascuna faccia o ciascun vertice, un valore di normale calcolato seguendo altre strategie: questo è poco comune nei modelli 3D derivati da rilievo, e più comune in quelli modellati manualmente. Per migliorare la compatibilità e l'usabilità un modello **deve avere tutte le facce orientate coerentemente fra di loro, con la normale rivolta verso l'esterno, determinata seguendo la regola del *counter-clockwise winding*** (il lato esterno di una faccia è quello dove i vertici sono ordinati in senso antiorario).

I modelli tridimensionali del patrimonio culturale oggetto di consegna devono inoltre essere **“topologicamente puliti” (2-manifold*)**, ossia non devono contenere irregolarità nella maglia di triangoli che ne rendano difficile la visualizzazione, il *rendering* e l'elaborazione. L'argomento della pulizia topologica è affrontato in maggiore dettaglio nella sezione [3.3.3](#).

Le *mesh* poligonali descrivono unicamente la superficie esterna di un oggetto, e non contengono informazioni esplicite relative al volume interno del modello (come invece succede con modelli volumetrici come quelli prodotti da TAC o Risonanza Magnetica). Una mesh poligonale rappresenta solamente la geometria di un oggetto: ogni altra informazione, ad esempio il *colore*, può essere memorizzata mappando le informazioni sugli elementi costitutivi della *mesh* (vertici, facce), o attraverso mappatura UV (una associazione puntuale delle coordinate 3D della superficie verso i punti 2D di un'immagine). Un modello 3D può limitarsi a contenere vertici, senza alcuna faccia: in quel caso, si parla di **nuvola di punti***. Questo tipo di dato, dove è assente una vera rappresentazione della superficie, può essere il risultato intermedio di un rilievo (tramite scanner o fotogrammetria) oppure il modello finale in ambiti come l'architettura e l'ingegneria. Una nuvola di punti, per le limitazioni che pone rispetto a una rappresentazione di superficie come una *mesh* triangolata, **non può essere considerata come prodotto finale (file master) per la consegna di riproduzioni digitali 3D di oggetti museali**, salvo casi rari e particolari che devono essere opportunamente dettagliati e motivati.

2.1.3. Risoluzione, accuratezza e precisione del modello

Risoluzione. La **risoluzione** di un modello tridimensionale può essere espressa come la **media della lunghezza degli spigoli** di una *mesh* poligonale o la media della distanza tra i punti di una nuvola di punti. Questo **valore medio (d)** indica la frequenza del campionamento delle misure di superficie e determina quindi il livello di dettaglio di acquisizione delle caratteristiche morfologiche del manufatto digitalizzato.

La scelta della risoluzione di un modello tridimensionale deriva dalle necessità dell'attività di misura; pertanto, propedeutica rispetto all'attività di acquisizione è la definizione del **dettaglio minimo** che si intende rilevare sulla superficie dell'oggetto acquisito. In termini pratici, occorre definire il livello di dettaglio

dell'acquisizione della forma del manufatto e se (e con quale precisione) si vogliono acquisire caratteristiche geometriche che ne caratterizzano la superficie (ad esempio graffiti, incisioni). Da queste scelte deriveranno considerazioni strumentali, operative e procedurali volte a raggiungere l'obiettivo prefissato.

La risoluzione minima di un modello tridimensionale di qualità deve essere uguale o inferiore ad un quarto del dettaglio minimo (**dm**) da rilevare sulla superficie dell'oggetto acquisito.

$$d \leq dm/4$$

Uno dei fattori di stima della risoluzione di un modello tridimensionale può essere descritto dal rapporto tra la **lunghezza della diagonale** della **bounding box*** che racchiude un modello digitale (**D**) e la distanza media tra i vertici della *mesh* come descritta precedentemente (**d**), ovvero dalla relazione **D/d**. Questo rapporto può essere adoperato anche come indicatore prescrittivo della risoluzione minima di un modello 3D. Come indirizzo generale, fatte salve le circostanze richiedenti particolari incrementi della risoluzione, per la scelta circa la frequenza del campionamento o risoluzione dei modelli (**d**) si faccia riferimento alla tabella X di relazione tra dimensione dell'oggetto (**D**) e risoluzione minima richiesta (**d**). Il rispetto della relazione tra dimensione (**D**) e risoluzione (**d**) esplicitato, oltre che strumento di pianificazione della campagna di misura, è utile come strumento di autovalutazione preliminare e di collaudo del modello fornito.

Diagonale della <i>bounding box</i> (D) o dimensione massima dell'oggetto	Intervallo di risoluzione minima
< 3 cm	0,05 mm
3-5 cm	0,07 – 0,14 mm
5-10 cm	0,09 – 0,18 mm
10-15 cm	0,1 – 0,2 mm
15-20 cm	0,2 – 0,3 mm
20-30 cm	0,45 – 0,65 mm
30-60 cm	0,65 – 0,85 mm
60-100 cm	0,85 – 1 mm
100-200 cm	1 – 1,5 mm
> 200 cm	1,5 mm

Tabella 1: Intervallo di risoluzione minima in relazione alle dimensioni dell'oggetto

Accuratezza e precisione. Secondo la norma ISO 5725-1, il termine **accuratezza** descrive la vicinanza di una misura o di una osservazione al valore reale del campione misurato. Le misure o osservazioni implicano sempre una componente di errore casuale e una componente di errore sistematico. L'accuratezza di una misura è la vicinanza della media di un insieme di risultati di misurazione al valore effettivo. La **precisione** rappresenta la vicinanza reciproca dei risultati di un gruppo di misure. In sintesi, si può affermare che un insieme di misure della medesima quantità sia **accurato** se la media delle misure è vicina al valore reale della quantità misurata, mentre può dirsi **preciso** se la sua **deviazione standard*** è relativamente piccola. Da questa premessa deriva la necessità che i dati acquisiti in campagne di misura 3D siano, oltre che adeguatamente **risolti** (cioè che presentino una risoluzione adeguata), anche **accurati** e **precisi**.

L'**accuratezza (A)** minima di un modello di qualità deve avere un valore minimo pari almeno alla metà della risoluzione (**d**).

$$A \leq d/2$$

Ad esempio: data la risoluzione di 1 mm, l'accuratezza dovrà essere uguale o inferiore a 0,5 mm.

I valori di risoluzione e di accuratezza indicati garantiscono, nella maggior parte dei casi, una digitalizzazione tridimensionale di qualità. Tuttavia, esistono particolari circostanze in cui i valori proposti potrebbero risultare inadeguati, a fronte, ad esempio, di particolari caratteristiche degli oggetti da acquisire o di particolari scopi futuri dei modelli tridimensionali prodotti. È necessario, dunque, in fase di pianificazione dell'intervento di digitalizzazione, definire tutte le esigenze di rappresentazione cui il modello deve rispondere, in modo tale da stabilire valori di risoluzione e di accuratezza adeguati in relazione alle finalità del progetto.

Per garantire in modo verificabile accuratezza e precisione sub-millimetrica per rilievi fotogrammetrici è necessario adoperare **kit metrologici industriali** (ad esempio: *Artec Metrology Kit*, *Brunson Invar kits*, *CHI Photogrammetric Scale Bars*, *Arago Photogrammetry Rig*, ecc.). Per garantire un'accuratezza adeguata anche in assenza di questi strumenti, è consigliabile impiegare la fotogrammetria solo per la generazione di modelli con diagonale della *Bounding Box* superiore a 100 cm ($D \geq 100$ cm). In caso di implementazione di kit metrologici industriali per la fotogrammetria o di sensori attivi, il rispetto dell'accuratezza prescritta sarà garantito dalle specifiche tecniche della strumentazione utilizzata (singolo **frame*** e volumetrica) e dalla presenza del certificato di calibrazione in corso di validità. Qualora si scelga di implementare unicamente la tecnica fotogrammetrica per l'acquisizione della geometria, si consiglia inoltre l'uso di *marker a riconoscimento automatico* per limitare l'errore dovuto all'inserimento manuale dei punti di controllo (si rimanda per maggiore dettaglio alle sezioni [2.2.4](#) e [3.2.1](#)).

2.1.4. Appearance, texture mapping, materiali

Un modello 3D rappresenta la geometria di un oggetto: per rendere questa rappresentazione più verosimile è spesso necessario rappresentare anche le informazioni di **colore**, del comportamento ottico o delle caratteristiche superficiali (in un termine più generale, il **materiale**) delle varie parti dell'oggetto.

Associare le informazioni di colore o del materiale alle singole componenti di un modello (*per-vertex* o *per-face color/material*) è una soluzione rapida ma poco pratica, perché la risoluzione finale del dato del colore/materiale è limitata da quella della geometria. La strategia più diffusa e flessibile è l'utilizzo di **texture mapping**. Una **texture** è una immagine bidimensionale che viene proiettata sulla superficie del modello 3D, capace di fornire le informazioni di colore/materiale. La più semplice applicazione del **texture mapping** consiste nell'assegnare alla superficie 3D un valore di colore proveniente da una campagna fotografica: questo produce una "mappa texture" (*texture map*), ossia una approssimazione del colore diffuso dell'oggetto. **Modelli 3D realizzati per la digitalizzazione del patrimonio culturale museale devono**

contenere informazione di colore attraverso *texture mapping* ottenuto a partire da una campagna fotografica.

Per usare il *texture mapping* è necessario definire una funzione che definisca, punto per punto, una corrispondenza fra le coordinate 3D della superficie con le coordinate 2D dell'immagine: questa funzione è chiamata **mappatura UV** o *parametrizzazione*. Questa mappatura è ottenuta calcolando e memorizzando, per ciascuna componente del modello 3D (facce e vertici), le coordinate UV della porzione dell'immagine 2D corrispondente.

Quando il modello 3D viene modellato manualmente, la mappatura UV viene creata e l'immagine (o immagini) *texture* viene compilata man mano che viene generata la geometria, usando appositi strumenti manuali o assistiti. In alternativa, se il modello è già esistente, si utilizzano strumenti di **unwrapping*** o *texture parametrization*. Questi suddividono porzioni della superficie e li appiattiscono disponendoli sul piano della immagine *texture* nello spazio UV, anche in questo caso, con una procedura manuale o assistita.

Nel caso dei modelli 3D generati da digitalizzazione, è più comune derivare la *texture* e la sua mappatura UV con una **procedura automatica (*texture building*) che parametrizza il modello 3D e vi proietta sopra una serie di fotografie calibrate e orientate nello stesso spazio di riferimento del modello**. In fotogrammetria vengono utilizzate le medesime fotografie utilizzate per la creazione della geometria del modello 3D. Se il modello geometrico è ottenuto a partire da uno scanner 3D, in genere queste informazioni sono spesso raccolte a parte con una campagna fotografica dedicata, le cui immagini sono poi calibrate e orientate nello spazio del modello 3D attraverso un processo fotogrammetrico. Alcuni strumenti scanner (ad esempio, molti scanner della classe *hand-held*) raccolgono fotografie e i dati posizionali direttamente durante il processo di scansione.

Dato il modello 3D e le foto calibrate e orientate è possibile, attraverso la proiezione prospettica inversa, retroproiettare le informazioni di colore dalle foto alla superficie. A seconda del *software*, la creazione della *texture* e della mappatura avviene usando strategie diverse, che sfruttano questo principio proiettivo. Il risultato è una o più immagini *texture* che contengono frammenti dell'informazione di colore proveniente dalle foto di *input*: questo tipo di *texture* è spesso chiamato **atlas**, perché, come una mappa, contiene le "isole" di informazione che sono usate dai vari componenti del modello 3D. L'oggetto può essere diviso in zone seguendo la copertura fotografica, scegliendo per ogni zona la foto migliore, e definendo la mappatura UV di ciascuna area attraverso la proiezione prospettica. In questo caso, le immagini *texture* contengono aree delle foto originali, ritagliate (come rettangoli o frammenti frastagliati), assemblate come in un collage, e con filtraggi che rendono i bordi adiacenti più uniformi fra di loro. In altri casi, la superficie 3D viene parametrizzata in maniera automatica, tagliando la geometria in parti che vengono appiattite e disposte sul piano 2D delle *texture*, e le informazioni colore sono proiettate in questo nuovo spazio. Le immagini *texture* appariranno quindi come "pezzi" dell'oggetto, appiattiti e deformati sul piano immagine.

Tecniche per migliorare la rappresentazione del colore e dei materiali del modello 3D

La generazione di una *texture* a partire da immagini acquisite per mezzo di campagna fotografica è il metodo più comunemente utilizzato per aggiungere informazione colore ad un modello 3D. È opportuno considerare che il risultato di questa procedura è una rappresentazione basata sul "**colore apparente**", ossia quello

catturato in fotografia, che contiene effetti di luce come ombre e riflessi speculari. Si tratta dunque di una approssimazione del reale colore diffusivo (**albedo***) dell'oggetto. Occorre mitigare la reazione innaturale di un modello 3D alla luce virtuale durante la sua visualizzazione, che potrebbe verificarsi se le immagini utilizzate per generazione dell'informazione colore sono ottenute in condizioni non omogenee o estreme (sopra o sotto-esposizione, presenza di riflessi, ecc.). La *texture*, inoltre, non contiene informazione sul comportamento ottico del materiale dell'oggetto reale, generando la percezione di un oggetto "piatto", senza distinzione (globale o puntuale) dei materiali che lo compongono.

È essenziale, ai fini dell'approccio documentale, che le texture e le mappe di materiale per il modello master siano sempre frutto di una elaborazione automatica a partire da dati misurati, e mai realizzate in maniera manuale o arbitraria in fase di elaborazione, come avviene in generale nella computer graphics interattiva.

Nel caso dei **modelli derivati** è possibile produrre una rappresentazione del materiale dell'oggetto sfruttando le possibilità date dai moderni strumenti di **painting e gestione dei materiali 3D** (sez. [3.4](#)). Per assicurarne la compatibilità, anche qualora vengano utilizzate rappresentazioni più complesse del materiale e delle caratteristiche ottiche per il modello, il pacchetto di consegna **dovrà sempre contenere anche la mappa texture con la sola informazione del colore diffuso mappato da foto** (apparente o *de-shaded*).

Nel corso del tempo sono state elaborate diverse strategie per migliorare la rappresentazione del colore e dei materiali sui modelli 3D:

- **De-shaded color;**
- **Modelli di materiale semplici;**
- **Rappresentazioni PBR* (*Physically-Based Rendering*);**
- **Modelli avanzati di materiale.**

Si offre di seguito una sintetica trattazione delle strategie sopra elencate e una indicazione sui rispettivi ambiti di applicazione consigliati:

- **De-shaded color** (anche detto *un-shaded, de-lighted, shadow/specular removal*). Grazie a questa tecnica è possibile alleviare o rimuovere gli effetti indesiderati di luce come ombre e riflessi speculari, partendo da foto con differente illuminazione o punto di vista, o informazioni di colore HDR (*High Dynamic Range*), o dati che catturano la luce incidente (ad esempio **light probe***). Il risultato è una versione del colore diffuso più simile all'albedo dell'oggetto. Oggi diversi *software* di fotogrammetria sono in grado di effettuare un parziale de-shading delle foto durante la creazione della *texture* del colore diffuso. Questo viene fatto usando la ridondanza data dai diversi punti di vista delle foto, e usando delle euristiche per individuare ed eliminare le zone in ombra. Questo procedimento automatico, per quanto non completamente in grado di produrre una rappresentazione esatta dell'albedo, **è comunque accettabile anche ai fini della produzione dei modelli 3D del patrimonio culturale museale**. Questa strategia riguarda solo la rappresentazione del colore su texture.
- **Modelli di materiale semplici**. I modelli di materiale sono funzioni che approssimano le modalità di interazione con la luce di un determinato materiale, producendo effetti di illuminazione osservabili

nella realtà (ad esempio diffusione, specularità, trasparenza, metallescenza, emissione), create per caratterizzare il comportamento ottico di un oggetto. Alcuni semplici modelli di materiale sviluppati agli albori della grafica 3D vengono ancora oggi utilizzati per la loro semplicità e versatilità (ad esempio *Phong*, *Cook–Torrance*, *Oren–Nayar*) e sono generalmente supportati da diversi *software*. In questi modelli, il comportamento del materiale è controllato da pochi parametri numerici. Questi valori possono essere impostati sull'intero oggetto o in maniera uniforme su parti della geometria (a simulare un oggetto interamente composto da un singolo materiale, o un oggetto con più parti di materiali diversi). Comunemente, nei modelli 3D generati da misurazione, questi parametri vengono definiti in maniera puntuale, memorizzandoli in mappe *texture* (sez. [3.5.3](#)) utilizzate come canali di informazione sul materiale. Qualora non fosse possibile utilizzare la rappresentazione standardizzata **PBR** (vedi punto successivo), **è possibile utilizzare modelli di materiali semplici, anche se non standardizzati**.

- **Rappresentazione PBR (*Physically-Based Rendering*)**. Si tratta di una standardizzazione della rappresentazione di modelli tramite “canali” di informazioni ed equazioni di calcolo dell'interazione luce-materiale (come descritto al punto precedente) per rendere più facile l'interscambio fra vari *software*. Un modello 3D con mappature dei materiali PBR dispone di più mappe *texture*, ciascuna delle quali rappresenta uno dei canali *standard* PBR. Le *texture* possono avere risoluzioni diverse fra di loro e anche usare ciascuna una diversa mappatura UV. Il PBR rappresenta di fatto lo *standard* di rappresentazione in molti campi della grafica 3D e in particolar modo per la modellazione (mappe spesso disegnate in maniera manuale o assistita da un 3D-artist). A oggi, alcuni *software* di fotogrammetria possono creare alcune mappe *standard* PBR partendo dalle foto della campagna di rilievo, rendendo possibile una rappresentazione più completa del materiale e delle caratteristiche ottiche dell'oggetto in maniera automatica. **L'uso di mappature PBR è consigliabile per la produzione dei modelli *master* del patrimonio culturale.**
- **Modelli avanzati di materiale: *BxDF***, ovvero *BRDF* (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*), *BTDF* (*Bidirectional Transmittance Distribution Function*), o *BSSDF* (*Bidirectional Scattering-Surface Distribution Function*). Si tratta di modelli matematici complessi basati su funzioni di approssimazione che simulano l'interazione fra luce e il materiale. Questi modelli di materiale possono condurre a rappresentazioni molto realistiche, ma comportano un considerevole *effort* per il loro impiego. Ad oggi, alcuni prototipi di ricerca sono in grado di misurare un modello di materiale *BxDF* in maniera puntuale su un oggetto arbitrario; inoltre, il calcolo di un modello *BxDF* durante la visualizzazione è considerevolmente oneroso da un punto di vista computazionale. Per queste motivazioni, è necessario ponderare con attenzione l'utilizzo di questi modelli ai fini della produzione dei modelli *master* del patrimonio culturale; allo stato attuale dell'arte, infatti, queste tecniche saranno difficilmente applicabili con profitto all'interno di un progetto di digitalizzazione ordinaria del patrimonio culturale.

2.1.5. Risoluzione delle *texture*

La risoluzione di una *texture* proiettata su un modello 3D viene comunemente espressa in **texel***, in modo simile a come i *pixel* vengono generalmente utilizzati per esprimere la risoluzione delle immagini raster. Questo distinguo è necessario perché la risoluzione di una *texture* è sempre da esprimersi in relazione alla

superficie di un modello 3D su cui essa viene applicata (m/texture o mm/texture) al pari di quanto avviene con le immagini (DPI - dot per inch). In altre parole, una texture di 2048*2048 texel avrà una "risoluzione spaziale" (o risoluzione fisica) maggiore o minore a seconda che venga applicata a un modello 3D che riproduce un oggetto alto 200 cm o 20 cm: nel primo caso, la risoluzione sarà dieci volte inferiore rispetto al secondo.

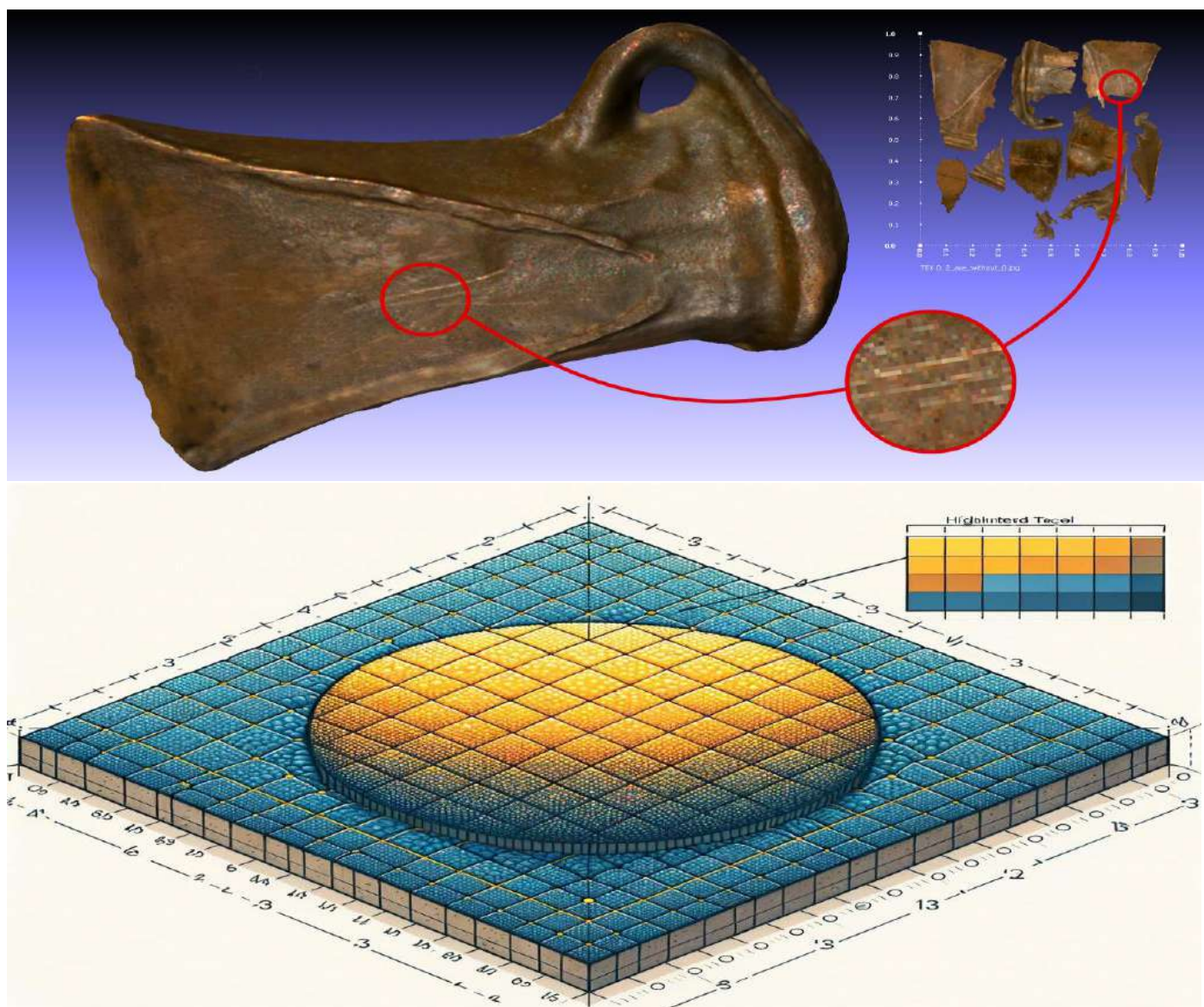


Figura 2: Schematizzazione del texel

Il calcolo di questo valore non è tuttavia altrettanto immediato: la texture è una immagine bidimensionale mappata su una superficie tridimensionale, quindi soggetta, nella maggior parte dei casi, a distorsioni. Aree diverse della texture avranno conseguentemente una risoluzione fisica differente. È quindi necessario calcolare il **valore medio** della risoluzione sullo spazio texture, prendendo in considerazione l'area dell'immagine 2D effettivamente proiettata sul modello 3D, ignorando le aree inutilizzate e quelle che separano le varie parti dell'atlas.

Si fornisce di seguito un *range* di parametri minimi per determinare l'intervallo di risoluzione minima della *texture* a seconda della diagonale della *bounding box* o della dimensione massima dell'oggetto, ai fini della produzione di un modello tridimensionale di qualità:

Diagonale della <i>bounding box</i> o dimensione massima dell'oggetto	Intervallo di risoluzione minima della <i>texture</i>
< 30 cm	Entro 0,4 mm/tx
Da 30 cm a 100 cm	0,7 – 0,9 mm/tx
Da 100 cm a 200 cm	Entro 1 mm/tx
> 200 cm	Entro 1,5 mm/tx

Tabella 1: Intervallo di risoluzione minima della *texture* in rapporto alle dimensioni dell'oggetto

I valori di risoluzione minima della *texture* indicati garantiscono, nella maggior parte dei casi, una digitalizzazione tridimensionale di qualità. Tuttavia, esistono particolari circostanze in cui i valori proposti potrebbero risultare inadeguati, a fronte, ad esempio, di particolari caratteristiche degli oggetti da acquisire o di particolari scopi futuri dei modelli tridimensionali prodotti. È necessario, dunque, in fase di pianificazione dell'intervento di digitalizzazione, definire tutte le caratteristiche del modello finale in modo tale da stabilire valori di accuratezza della *texture* compatibili con le finalità del progetto.

La discrezionalità nella scelta della risoluzione della *texture* del modello *master* è simile a quella che si può riscontrare nella scelta della risoluzione della *mesh* triangolata e, a seconda delle caratteristiche di ciascun oggetto, è utile tenere in considerazione i seguenti fattori:

- Nel caso in cui l'attenzione della riproduzione tridimensionale sia focalizzata su particolari **dettagli o porzioni specifiche** dell'oggetto rappresentato, si può scegliere un valore di risoluzione che sia in grado di restituire una visione chiara del **dettaglio minimo di interesse**. Come nel caso della geometria, si può usare una formula che associ alla dimensione del dettaglio minimo che si interessa rappresentare una stima della risoluzione *target* della *texture* (ad esempio, la dimensione *target* del *texel* deve essere uguale o inferiore a $\frac{1}{4}$ della dimensione del dettaglio minimo).
- Nel caso in cui l'oggetto abbia rilevanza **nella sua interezza**, si può stabilire una risoluzione minima (e una ideale) che sia proporzionata alla dimensione globale dell'oggetto.

È opportuno, inoltre, distinguere l'applicazione del criterio della risoluzione delle *texture* in riferimento al modello *master* e al modello derivato:

- **modello master:** la risoluzione spaziale della *texture* è il parametro che indica la risoluzione del campionamento fotografico, non è correlato alla risoluzione geometrica e deriva dalle limitazioni degli strumenti e delle condizioni del rilievo, ma anche dalla capacità di elaborazione dei dati colore;
- **modello derivato:** generalmente, per attività interattive quali *rendering* e manipolazione real-time, la *texture* deve avere una risoluzione superiore a quella della geometria (ogni triangolo deve contenere più di un singolo *texel*).

Seguono alcune considerazioni generali volte a **massimizzare l'efficienza, la compatibilità e la maneggevolezza delle texture create** anche in relazione alla loro pesantezza computazionale: infatti, diversamente dal modello 3D (che può essere più facilmente scalato con elaborazioni geometriche

automatiche, come sistemi di multi-risoluzione in grado di elaborare modelli di grande complessità con un basso impatto sulla precisione del modello) **le texture sono difficilmente riducibili** senza procedimenti complessi di ri-campionamento e ri-generazione degli spazi di parametrizzazione che possono degradare la qualità dell'informazione del colore (al punto che, spesso, è più economico generarne una nuova).

Per massimizzare l'efficienza e la compatibilità dei modelli, è preferibile generare texture quadrate e con risoluzioni in pixel pari a potenze di 2. A causa di limitazioni *hardware* e *software* e per motivi di efficienza, in passato le *texture* avevano sempre forma quadrata e risoluzioni in *pixel* pari a potenze di 2 ([...], 256, 512, 1024, [...]). Queste limitazioni sono ad oggi decadute a livello di driver e di *hardware*; tuttavia, alcuni *software* continuano ad avere limitazione tecniche in merito a questi parametri. Pertanto, *texture* quadrate e con dimensioni pari a potenze di 2 sono generalmente più efficienti nella gestione della memoria e del *rendering*.

Per garantire una maggiore compatibilità degli output, è opportuno valutare attentamente l'utilizzo di texture con risoluzioni molto elevate, e l'utilizzo di un numero elevato di immagini texture. *Hardware* e *software* possono porre limiti alla dimensione massima di una singola *texture*: questi limiti variano a seconda dell'*hardware* e del *software* utilizzato (e tendono a diventare meno stringenti con il progredire della tecnologia). Se la dimensione di una *texture* supera il limite della piattaforma su cui viene usata, può essere ridimensionata in *background* (cioè automaticamente dal *software*), oppure parti dell'oggetto potrebbero apparire nere, pregiudicando una corretta visualizzazione del modello. La presenza di più file, specie se di grandi dimensioni, può provocare la degradazione delle performance o complicare la manipolazione del *dataset*.

2.1.6. Dati grezzi, Modello Master e Modelli Derivati

Al fine di esaudire l'esigenza di una vasta platea di fruitori si raccomanda la produzione e la consegna di più versioni del modello 3D dell'oggetto culturale, accompagnate dai dati grezzi di acquisizione. In particolare, i *dataset* 3D dovranno includere:

1. **dati grezzi** di acquisizione che hanno portato alla creazione del modello 3D *master* (set di fotografie, singole riprese derivanti da scanner, misurazioni, nuvole di punti);
2. modello 3D *master*, prodotto secondo l'approccio documentale (sez. [1.4](#)), alla massima qualità;
3. modelli 3D **derivati**, utili per vari scenari d'uso.

Ai modelli si assoceranno altri file che ne consentiranno l'identificazione, la gestione e la validazione, in particolare:

4. i **paradati** del *master* e dei derivati, cioè la **documentazione** relativa ai processi di digitalizzazione, *processing* e *post-processing* adottati;
5. i **metadati dell'oggetto digitale**;
6. i **file di preview** dei modelli (sez. [4.5](#) e [3.5.4](#)).

Il modello 3D *master* è il prodotto alla massima risoluzione e accuratezza, frutto dell'acquisizione strumentale e delle operazioni di *processing* (ad esempio registrazione delle nuvole, eliminazione del

rumore, generazione della *mesh*, correzione delle normali, eliminazione delle ridondanze), volta ad ottenere una replica digitale dell'oggetto reale che sia fedele, neutra, consistente e topologicamente coerente, priva di interventi autoriali di tipo creativo o interpretativo, nel rispetto dei criteri fissati nell'approccio documentale (sez. [1.4](#)). Per questa ragione eventuali **lacune** nell'oggetto digitalizzato, in corrispondenza di aree non raggiungibili dal sensore di misura e acquisizione, dovranno essere mantenute e visibili all'interno del modello *master*. Solo buchi molto piccoli rispetto alla risoluzione scelta potranno essere "chiusi" all'interno del file *master*.

I modelli **derivati** sono file "specializzati" per uno o più casi d'uso, e sono ottenuti a partire dal *master* attraverso processi di *editing*, di semplificazione e ottimizzazione. Generalmente, la generazione di un file derivato implica una perdita di informazione rispetto al file *master*, connessa all'adattamento del file derivato rispetto a determinati scenari di utilizzo (stampa 3D, risarcimento di lacune, annotazione semantica, aggiunta di animazioni, ecc. - sezione [3.4](#) e [3.4.1](#)). A partire dal medesimo modello *master* nel tempo possono essere ricavati tanti diversi modelli derivati le cui caratteristiche dipendono in larga misura dai casi d'uso e dalle specifiche tecniche dei *software* e degli *hardware* che li utilizzeranno. Le specifiche tecniche per la generazione dei modelli derivati devono quindi essere valutate e concordate caso per caso tra gli operatori e i committenti e non è possibile indicare criteri universalmente validi per la creazione dei derivati.

A livello metodologico, si evidenzia dunque l'utilità potenziale di produrre, a partire dal *master*, alcune delle seguenti tipologie di **modelli 3D derivati**, da valutare in base alle caratteristiche dell'oggetto e alle finalità previste per il derivato; l'elenco fornito è indicativo e non esaustivo:

Si fornisce di seguito un elenco (a titolo esemplificativo e non esaustivo) delle diverse tipologie di modelli 3D derivati ottenibili a partire dal file *master*:

- modello derivato con **integrazioni manuali in computer grafica** per **completare porzioni lacunose** impossibili da acquisire strumentalmente (sez. [3.4.1](#));
- modello derivato per una **consultazione interattiva su piattaforme online**, ad esempio a uso didattico;
- modello derivato **composto** risultante dalla **ricomposizione di contesti smembrati**, ad esempio costituito da elementi o frammenti dell'oggetto digitalizzati separatamente (CG9, sez. [2.3.1](#));
- modello derivato risultante dalla **ricomposizione di più pose** di un oggetto mobile acquisite attraverso diversi **setup di acquisizione*** (CG8, sez. [2.3.1](#));
- modello derivato di un **oggetto dinamico**, ovvero con meccanismo mobile di funzionamento, animato in modo realistico e dettagliato (CG10, sez. [2.3.1](#)). Per realizzare l'animazione sarà necessario affiancare all'esperto di digitalizzazione una competenza in computer grafica o **motion capture***;
- modello derivato dal ridotto peso computazionale per la visualizzazione come **thumbnail o preview 3D** su piattaforme web;
- modello derivato per una **replica digitale stampata in 3D**.

Per determinate tipologie di derivati, il modello può essere **scomposto in elementi semantici** dotati di uno specifico significato o funzione. La scomposizione semantica di un modello è utile nel caso di oggetti complessi costituiti da più elementi (un quadro e la sua cornice; la cassa, le ruote, gli assi, il timone di un

carro; il basamento e il corpo di una statua appartenenti ad epoche diverse; le interazioni posticce di un marmo antico). L'annotazione semantica del modello consente di meglio comprendere caratteristiche intrinseche (storiche, artistiche, materiali) del bene culturale, predisponendo il modello 3D all'implementazione all'interno di diversi scenari d'uso. Questa azione di mappatura semantica andrà concordata e guidata da un esperto di dominio, come un catalogatore o un conservatore.

I modelli derivati possono essere creati attraverso i metodi e i processi di ottimizzazione descritti nella sezione [3.4](#). In vari casi possono avvalersi di ulteriori operazioni in computer grafica manuale (sez. [3.4.1](#)), così come dell'applicazione sperimentale, su casi specifici, di algoritmi di intelligenza artificiale per la ricomposizione di frammenti o di tecniche di segmentazione semantica del modello, o ancora di tecniche di *rigging** e *motion capture* per la simulazione di oggetti dinamici.

2.2. Classificazione delle principali tecnologie per l'acquisizione digitale 3D

In questa sezione viene offerta una **panoramica sulle tecnologie** di rilevamento cui si fa riferimento all'interno delle Linee guida. In questa sede non si presenta un elenco esaustivo di tutte le tecnologie disponibili, ma una trattazione sintetica delle principali tecnologie e metodologie correntemente utilizzate per la realizzazione di modelli tridimensionali del patrimonio culturale. Le sezioni sono organizzate in modo da offrire una descrizione tecnologica dell'apparato o della metodologia e una sintesi facilmente comprensibile dei principi fisico-matematici di funzionamento. Questi aspetti vengono adoperati per puntualizzare, in forma sintetica, vantaggi, svantaggi e limiti di ciascun approccio. È utile a tale scopo introdurre alcuni concetti trasversali alle diverse tipologie di scansione. Le tecniche di acquisizione digitale sono divise in due grandi macrocategorie: *range-based* e *image-based*.

- Le tecniche ***range-based*** utilizzano **sensori attivi** in grado di emettere e registrare una radiazione luminosa che colpisce l'oggetto da acquisire. Rientrano in questa categoria tutti gli **strumenti di scansione laser terrestri** (a tempo di volo, a differenza di fase), gli **strumenti a triangolazione** (laser, luce strutturata) e altre soluzioni ibride;
- le **tecniche *image-based*** utilizzano invece **sensori ottici passivi**, e le informazioni 3D sono generate a seguito dell'elaborazione delle immagini acquisite. Rientrano in questa categoria **l'elaborazione fotogrammetrica** di foto scattate con le camere fotografiche, e la classe di **sensori stereo** integrati (strumenti dotati di più telecamere pre-calibrate che generano dati 3D direttamente a bordo del sensore, generalmente di solo uso industriale e in robotica).

Entrambi gli approcci, seppure sfruttando metodi di calcolo diversi, misurano la geometria degli oggetti producendo una serie di **punti nello spazio 3D** (nuvola di punti). Questi punti vengono successivamente elaborati in una **rappresentazione di superficie** (modello a *mesh* poligonale, sez. [2.1.2](#)). Esistono diverse opportunità di integrazione tra i due approcci *range-based* e *image-based*, implementabili in funzione di diversi fattori illustrati in dettaglio nel capitolo [3](#) relativo ai processi e alle fasi di produzione di un modello 3D.

2.2.0. Scansione a triangolazione (Laser e luce strutturata)

Gli scanner a triangolazione sono strumenti stazionari di misurazione composti da un emettitore (laser, lampada o LED) e da un sensore (CCD o CMOS) posti in modo tale da definire nello spazio un “triangolo” con il punto da rilevare. La luce emessa dall’emettitore viene riflessa dall’oggetto e cattura dal sensore. Essendo nota la distanza tra emettitore e sensore (**baseline***), entrambi otticamente calibrati, il *software* di questi strumenti è in grado di determinare la distanza tra il sensore il punto oggetto di misura con estrema precisione.

Un principale elemento di distinzione tra le diverse tipologie di scanner è la “forma” della luce proiettata dall’emettitore e usata per la triangolazione. Gli scanner **laser** usano una o più linee che vengono proiettate sull’oggetto. Gli scanner a **luce strutturata** (SLS, da *Structured Light Scanner*) utilizzano generalmente luce bianca o quasi-mono-frequenza (LED) che viene proiettata su tutta l’area di acquisizione secondo un pattern definito. Gli scanner laser sono in genere più veloci e di immediato utilizzo, ma l’uso di una singola frequenza della luce laser o di un numero esiguo di linee di luce può generare problemi su alcuni materiali. I sistemi a luce strutturata sono generalmente più lenti nell’acquisizione di uno scanner laser, ma più precisi, e generalmente meno soggetti a problemi causati da materiali con comportamenti ottici difficili. Tuttavia, gli scanner a luce strutturata sono in genere più delicati, richiedono spesso un tempo di riscaldamento prima di poter lavorare e una calibrazione ogni volta che vengono trasportati o quando si cambiano le ottiche o l’area di lavoro. La dimensione della baseline determina volume e distanza di lavoro: l’ambito di applicazione di questi strumenti riguarda in genere oggetti medio-piccoli, **da pochi cm a 1-2 m**

Gli scanner a triangolazione lavorano **acquisendo singole riprese**: vengono posizionati (in genere su un treppiedi o stativo) e puntati sull’area da digitalizzare. Scelti i parametri di ripresa, lo scanner effettua una misurazione di tutto quello che rientra nel campo di lavoro, producendo come *output* una *range map*. L’oggetto viene ripreso da più punti per ottenere un modello unico, sfruttando eventualmente la presenza di *marker* per aiutare la fase di allineamento (o ottenere un allineamento dei dati automatico) e per valutare la stabilità dell’acquisizione. La risoluzione della *range map* ottenuta deriva da quella del sensore utilizzato (viene generato un punto 3D per ciascun *pixel*), essendo il sensore di questi strumenti costituito da una o più fotocamere (o videocamere). Essendo i punti così generati molto vicini, e lo scarto di profondità nella nuvola non alto, **la maggior parte dei software di controllo degli scanner produce nativamente una triangolazione di base di questi punti**, creando per ciascuna *range map* una *mesh* triangolata parziale dell’oggetto ripreso.

Gli strumenti a triangolazione devono **rimanere fermi per tutta la durata della singola ripresa**, che può durare anche alcuni secondi: vibrazioni o movimento durante una ripresa producono dati deformati. Questo pone un problema se si deve lavorare in *setup* instabili, ad esempio su ponteggi o in aree con una pavimentazione flottante.

La misurazione della geometria dipende dalla **visibilità della luce emessa dallo scanner sulla superficie dell’oggetto**: questa luce deve essere dominante nella scena. Per questo motivo, è generalmente impossibile utilizzare scanner a triangolazione in ambienti esterni, o comunque esponendo gli oggetti da acquisire alla luce diretta del sole. Alcuni tipi di illuminazione artificiale possono ridurre la precisione o interferire con la scansione (come particolari frequenze di sorgenti luminose e/o l’oscillazione della intensità delle luci tipo neon). Materiali troppo scuri assorbono la luce proiettata; materiali traslucidi e trasparenti trasmettono la

luce in direzioni diverse; materiali lucidi o riflettenti allontanano la luce proiettata dal sensore o la riflettono troppo concentrata. Tutte queste situazioni limitano la precisione del sensore e, nei casi più critici, impediscono la misurazione dell'oggetto.

La maggior parte degli scanner 3D a triangolazione, essendo di derivazione industriale, non è in grado di catturare l'informazione colore. Alcuni strumenti integrano fotocamere a colori, e possono generare *texture*, ma con una **qualità di resa dei colori inferiore rispetto a quella che si può ottenere per mezzo di fotocamere digitali professionali.**



Figura 3. Scanner a triangolazione, luce strutturata



Figura 4. Scanner a triangolazione laser



Figura 5. Scanner a luce strutturata

2.2.1. Scansione con dispositivi *hand-held*

Per soddisfare l'esigenza di pratiche di acquisizione 3D sempre più speditive e versatili, sono stati sviluppati sul mercato degli strumenti portatili in grado di **rilevare la geometria muovendo lo strumento manualmente** (*hand-held*), inquadrando progressivamente tutta la superficie dell'oggetto. Anche se questi strumenti non sono accomunati da una singola tecnica di misurazione i dispositivi di scansione *hand-held* presentano metodologie di lavoro specifiche che è opportuno trattare in modo organico.

Anziché effettuare una singola ripresa da una singola posizione, gli scanner *hand-held* effettuano **tante veloci riprese in maniera continua inquadrando l'oggetto da riprendere mentre lo scanner viene mosso**. Siccome il movimento dello scanner fra una ripresa e quella successiva è contenuto, i *software* di elaborazione dei dati dello scanner sono in grado di tracciare lo spostamento compiuto dallo strumento di rilevazione (usando i dati di scansione, la camera, sensori inerziali e altri metodi) e registrare i dati in maniera incrementale all'interno di un sistema di riferimento. Per ottenere una scansione completa è necessario che l'operatore muova lo scanner andando a ricoprire progressivamente tutta la superficie dell'oggetto da acquisire. Alla fine del processo, il ***software* processa tutto il dataset raccolto** per migliorare l'allineamento delle scansioni e **generare un singolo modello 3D**. Il dato grezzo prodotto da questi strumenti, quindi, non consiste in singole *range map* (come negli scanner a triangolazione o terrestri) ma in un "aggregato" delle varie riprese, pre-allineato durante l'acquisizione: questo rende più complicata una elaborazione secondaria del dato grezzo prodotto da scanner *hand-held*.

I maggiori vantaggi nell'uso di questi strumenti sono la portabilità e la versatilità, specialmente in ambito museale, dove è utile poter lavorare *in situ* senza dover approntare aree di lavoro complesse. Tuttavia, questi sistemi possono raggiungere una precisione inferiore rispetto ai sistemi a triangolazione sopra descritti e producono al contempo un dato grezzo meno utilizzabile. Questo tipo di scanner è di facile utilizzo, poiché la procedura di lavoro è intuitiva e l'operatore può monitorare in tempo reale la posizione catturata dell'oggetto. È comunque necessaria una certa dimestichezza nell'impiego di questi strumenti, adottando movimenti corretti e privilegiando determinate sequenze di acquisizione al fine di facilitare le operazioni di *tracking*. Questo tipo di strumenti è progettato per lavorare su oggetti dai **10 cm a 1-2 m**, ma avvicinandosi agli estremi di questo *range* mantenere il *tracking* e ottenere un buon risultato diventa sempre più difficile. Le limitazioni per tipo di materiale sono le stesse degli strumenti a triangolazione. La loro natura di dispositivi da utilizzare in movimento li rende adatti all'utilizzo su superfici poco stabili (es. ponteggi).

I dispositivi *hand-held* spesso combinano differenti principi di misura: triangolazione, stereo, interferenza di fase e tempo di volo (vedi sezione successiva). I modelli commerciali presenti sul mercato sono brevettati e lavorano sulla base di *hardware* e *software* proprietari, ed è quindi spesso difficile avere la conoscenza completa dell'esatto metodo di misurazione. Anche questa classe di strumenti può beneficiare dell'uso di *marker* posti sull'oggetto. In modo simile agli scanner a triangolazione la maggior parte degli scanner *hand-held* è dotata di fotocamera a colori di modesta qualità fotografica, in grado di produrre una *texture* (generalmente di qualità non adatta ad una digitalizzazione documentale).

Occorre pertanto valutare attentamente, prima dell'implementazione di strumenti a scansione *hand-held*, che le condizioni di illuminazione consentano l'uso dell'apparato e che la risoluzione, sia della geometria

(sez. [2.1.3](#)) sia della *texture* (sez. [2.1.5](#)) rispettino i parametri di qualità definiti per il progetto. Particolare attenzione va prestata alla risoluzione della *texture* generata da questo tipo di strumento, spesso dotato di sensori appositi per l'acquisizione del dato colore, che però sono generalmente meno performanti rispetto ad altre alternative. Qualora le prestazioni di risoluzione della *texture* dello scanner non dovessero essere sufficienti, è possibile procedere ad una contestuale acquisizione fotogrammetrica per provvedere alla realizzazione di *texture* di elevata qualità.



Figure 6a e 6b. Scansione con sistemi hand-held

2.2.2. Scansione laser terrestre

I laser scanner terrestri (TLS, *Terrestrial Laser Scanner*), definiti anche come topografici, distanziometrici o *ranging scanner*, comprendono gli strumenti basati su **tecnologia a tempo di volo** (TOF, *Time Of Flight*) o a **interferenza di fase** (PS, *phase shift*). Entrambi permettono di ottenere risultati con precisioni sub-centimetriche, e si differenziano per le modalità con cui effettuano le misurazioni delle distanze tra il sensore e i punti rilevati sulla superficie del manufatto.

Nel primo caso degli scanner a **tecnologia a tempo di volo (TOF)** la distanza è misurata dal *software* dello strumento, calcolando il tempo impiegato dall'impulso laser per percorrere lo spazio tra l'emettitore e il soggetto del rilievo e il ritorno al sensore. Questi strumenti mantengono inalterata la qualità del segnale anche su lunghe distanze, e pertanto sono **generalmente usati nel rilievo architettonico o del paesaggio**. Il raggio di azione di questi strumenti è compreso **tra i 40 e i 300 m**, anche se alcuni modelli possono raggiungere distanze ancora maggiori.

Nel secondo caso degli **scanner a differenza di fase** la distanza viene calcolata misurando la differenza tra la fase d'onda del segnale emesso e quella del segnale riflesso. Rispetto agli scanner TOF, gli scanner a differenza di fase hanno superiore velocità di acquisizione, precisione e risoluzione, ma raggiungono distanze massime operative inferiori, in genere **al di sotto dei 120 metri**. Pertanto, il loro impiego è particolarmente adatto **per singoli edifici o elementi architettonici, indoor, o ambienti ipogei**.

Gli scanner terrestri lavorano in **singole riprese**: posizionato lo scanner, questo misura la geometria della area circostante. La maggior parte degli scanner terrestri opera in maniera polare: la testa del sensore ruota orizzontalmente di 360° mentre uno specchio rotante proietta il segnale dell'emettitore. Il tempo per una singola scansione di uno scanner terrestre è molto alto (5-20 minuti per gli scanner TOF, da qualche secondo a 5 minuti per gli scanner PS): questo comporta difficoltà quando si deve lavorare su impalcature o superfici instabili. Il risultato è una **mappa di punti polare** con l'origine posta in corrispondenza della posizione dello scanner e un punto campionato per ciascuna direzione del segnale. Dal momento che l'estensione in profondità di questi dati può essere molto ampia, **i dati degli scanner terrestri non vengono direttamente triangolati e si elaborano sotto forma di nuvola di punti**.

Tutti gli scanner terrestri misurano **solo la geometria**. Nella maggior parte dei casi ai punti è associato un **falso colore, o valore di riflettanza**, che rappresenta quanto la superficie ha riflesso il laser; questo colore ha una correlazione con il colore/materiale/caratteristiche della superficie, e aiuta la leggibilità del dato, ma non è un valore utilizzabile in maniera diretta. Alcuni modelli integrano una o più fotocamere, che possono essere utilizzate per una mappatura speditiva di colore sui punti rilevati: la qualità e coerenza di questa informazione sul colore è generalmente modesta e poco adatta agli usi specifici del comparto dei beni culturali.

Scanner laser terrestri sono adatti per l'acquisizione di dati geometrici del patrimonio culturale ma, per la scala di lavoro e precisione, sono generalmente impiegati per le operazioni di **rilievo di architetture, edifici, ambienti, siti archeologici e monumenti**. Più rare sono le applicazioni di questi strumenti agli oggetti museali di medio-piccole dimensioni, limitate ai casi in cui le dimensioni del soggetto rientrino nei parametri operativi

di questi strumenti e la loro ridotta risoluzione e accuratezza non sia un fattore limitante (ad esempio statue colossali, gruppi statuari, ecc.).

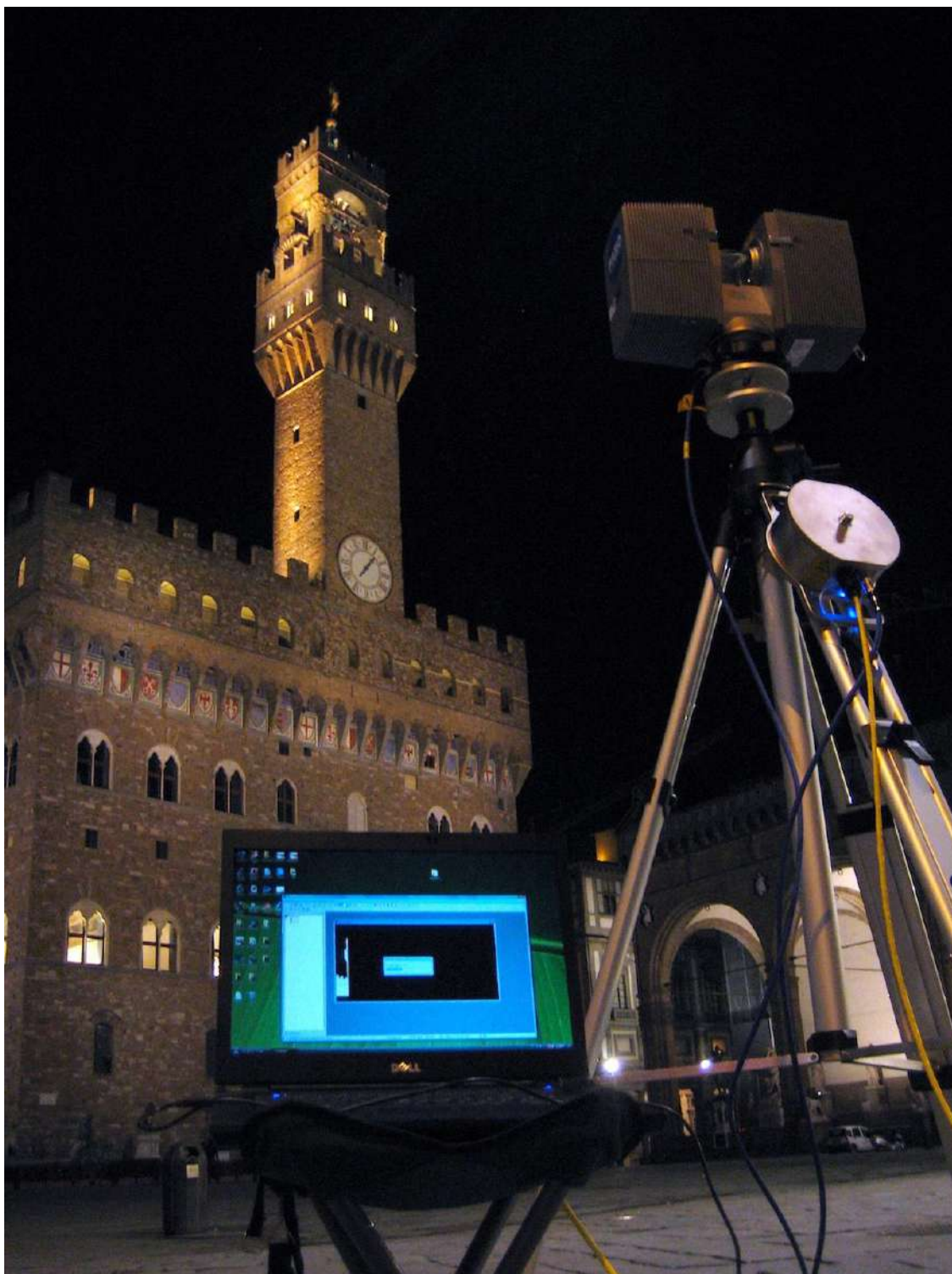


Figura 7. Scansione con laser terrestre

2.2.3. Fotogrammetria digitale

Con il termine fotogrammetria si fa riferimento a un insieme di procedure di acquisizione e tecnologie di calcolo finalizzate a **registrare misure a partire da immagini fotografiche**. La tecnica, che ha una lunga tradizione analogica, con l'avvento dell'informatica di consumo ha subito un notevole impulso, e viene ampiamente utilizzata per la robustezza dei risultati e la speditività esecutiva, comparabile o superiore a quella ottenibile con sistemi analogici. In questo documento, nonostante l'esistenza di numerosi paradigmi operativi e applicativi, si farà unicamente riferimento alla fotogrammetria digitale, eseguita secondo la procedura nota come **Structure from Motion (SfM)**, ovvero la ricostruzione della geometria di presa basata sull'identificazione biunivoca di punti di legame tra coppie di foto eseguita in modo automatico. È possibile suddividere una campagna di rilievo fotogrammetrico in tre momenti: acquisizione, elaborazione fotogrammetrica, estrazione elaborati.

Acquisizione: consiste nell'insieme delle operazioni di presa delle immagini, adoperando fotocamere digitali. La luce, la cui intensità è misurata tramite esposimetro e regolata da diaframma e otturatore, attraversa l'obiettivo e viene catturata dall'elemento fotosensibile (il sensore delle fotocamere digitali) impressionandolo. Il dato digitale derivato dal sensore è poi salvato su apposita scheda di memoria. Nella fotogrammetria SfM la fase di acquisizione è comunemente condotta con fotocamere digitali commerciali. Tali camere, a differenza dei modelli calibrati dove le informazioni su distanza focale e deformazione dei corpi ottici sono noti, registrati e riportati su un certificato di calibrazione, non sono appositamente costruite per scopi di misurazione. Tali valori vengono dunque stimati in seguito ad una fase di auto calibrazione condotta dall'utente o automaticamente dal *software* nella fase di orientamento. La scelta delle impostazioni della fotocamera in ambito fotogrammetrico (diaframma, tempi di scatto e sensibilità del sensore) e le modalità di scatto, non differiscono da quelli adottati in ambito fotografico. In entrambi i casi la buona prassi richiede una corretta messa a fuoco e un bilanciamento adeguato tra diaframma ed otturatore per ottenere una corretta esposizione. Particolare attenzione, in ambito fotogrammetrico, deve essere posta ad avere la maggior profondità di campo ottenibile, scegliendo, ove possibile, di lavorare a **distanza iperfocale***.

Alcuni accorgimenti nella scelta della fotocamera e degli obiettivi sono alla base del buon esito di una campagna di acquisizione. Nella scelta della camera particolare attenzione deve essere posta alla dimensione del sensore, parametro che va privilegiato rispetto al numero dei pixel. Sebbene infatti questa tecnica sia applicabile teoricamente con i prodotti di qualsiasi tipo di fotocamera digitale (comprese quelle di *smartphone o tablet*) sono da preferire camere di qualità professionale caratterizzate da **sensori che siano almeno a pieno formato (full-frame)** prediligendo, ove possibile, il medio formato digitale. Per quanto riguarda le ottiche, al fine di ridurre i problemi derivanti dalle distorsioni, sono da preferire **obiettivi a focale fissa** con distanza focale compresa tra 24 e 50 mm (per maggiori indicazioni su accorgimenti da utilizzare nella scelta della strumentazione si veda la sezione [3.2.1](#)).

Due fondamentali operazioni che precedono la fase di acquisizione delle immagini sono la **pianificazione della geometria di presa**, con particolare riguardo alla scelta della distanza di lavoro ed il **posizionamento dei target**. Prima della conduzione delle prese fotogrammetriche, l'operatore deve stabilire la distanza media di lavoro rispetto all'oggetto di rilievo al fine di ottenere la risoluzione desiderata, nonché posizionare i *target*. Questi strumenti permettono di individuare in modo inequivoco posizioni analoghe in più riprese, e vengono collocati nell'area del rilievo, oppure - più raramente - sull'oggetto stesso. I **target fotogrammetrici**,

elementi di materiali e dimensioni diversi, scelti in funzione della dimensione dell'oggetto, sono distinti da pattern che permettono il loro riconoscimento automatico durante il *processing* via *software*.

Elaborazione fotogrammetrica: processo che consente di calcolare la posizione, l'orientamento e il centro di presa delle immagini al momento dello scatto, derivando successivamente da queste informazioni i dati necessari a produrre una rappresentazione tridimensionale dell'oggetto di rilievo. Nella fotogrammetria SfM questo processo avviene attraverso l'esecuzione sequenziale di specifici algoritmi che, a partire dalla lettura di alcuni dati **EXIF** delle immagini (ad esempio focale, dimensione dell'immagine), calcolano in modo automatico i parametri di orientamento **interno** (centro ottico, distorsione radiale e tangenziale della lente, focali) ed **esterno** (orientamento e posizione di ogni camera rispetto al soggetto ripreso) della camera. In modo più specifico, questa procedura prevede l'esecuzione sequenziale di *feature detection*, *feature matching*, *image orientation*, di cui si presenta una sintetica descrizione nel paragrafo successivo.

Il processo *SfM* inizia con la **feature detection**¹¹: l'individuazione di aree di pixel (*key-points*) con alto contrasto o tessitura distintiva. I *key-points* vengono identificati attraverso diversi algoritmi (*SIFT*¹², *Scale Invariant Feature Transform*; *SURF*¹³, *Speeded Up Robust Features*; *ORB*¹⁴, *Oriented fast and Rotated Brief*). Il processo di *SfM* prosegue con il **feature matching**, ovvero con la costruzione di omologie tra gruppi di *key points* in immagini diverse e quindi con il riconoscimento di *tie points* o punti di legame. Per ricostruire la posizione delle prese (**image orientation**¹⁵) e conseguentemente la geometria della scena, è necessario attribuire corrispondenze coerenti tra più coppie di immagini. In un processo SfM incrementale questo avviene selezionando, come punto di partenza, una coppia di immagini con adeguato angolo di intersezione e corrispondenze sufficienti e ben distribuite. Posizione e orientamento di camera e posizione tridimensionale delle corrispondenze di questa prima coppia vengono calcolate attraverso triangolazione e successivamente raffinate utilizzando il **Bundle Adjustment*** (BA) o compensazione a stelle proiettive. Questa procedura è poi ripetuta aggiungendo immagini e performando BA, prima iterativamente e poi globalmente. Nella fase di **image orientation** vengono riconosciuti sulle immagini del *dataset* (manualmente o tramite processi di riconoscimento automatico) i *target* fotogrammetrici posizionati durante la fase di acquisizione e di cui si conoscono le coordinate. Questi possono essere utilizzati come **punti di vincolo** o *Control Point* (CP) o come **punti di verifica** o *Check Point* (CKP). I punti di vincolo sono utilizzati durante il BA per orientare, vincolare e scalare il modello in *real world units*. I punti di verifica sono invece usati per valutare l'accuratezza del calcolo di posizione di camera e di orientamento, restituendo un valore necessario a stimare la qualità dei calcoli. Da questa precisazione deriva la necessità di non adoperare tutti i *target* come punti di vincolo, ma utilizzare almeno il 30% di essi come punti di verifica per stimare in modo efficace l'accuratezza della restituzione.

Estrazione elaborati: eseguito il calcolo dell'orientamento interno ed esterno delle immagini è possibile eseguire ulteriori processi per ottenere elaborati misurabili e utili alla visualizzazione, tra questi la nuvola di punti densa, la *mesh* 3D e le ortofoto. Per ottenere la nuvola di punti densa, le nuvole di punti sparse generate con i punti calcolati nella fase di *image orientation* vengono processate con gli algoritmi *Clustering*

¹¹ Govender, Natasha, 2009

¹² Lowe, D.G., 2004.

¹³ Sedaghat, A., Mohammadi, N., 2019

¹⁴ Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., Bradski, G., 2011

¹⁵ Cao, M., Jia, W., Lv, Z., Li, Y., Xie, W., Zheng, L., Liu, X., 2019

View for Multi-ViewStereo (CMVS¹⁶) e Patch-based Multi-view Stereo (PMVS2). La risoluzione della nuvola di punti densa è direttamente proporzionale alla distanza tra l'oggetto del rilievo e il sensore (distanza di presa), e alla dimensione di questo in pixel. Il modello di punti può essere utilizzato direttamente o integrato con altri dati di misura, in un processo di **remeshing*** (sez. [1.1.2](#)). La posizione delle immagini, in relazione al modello è essenziale per il texturing (sez. [2.1.5](#)).

Il modello *mesh* consente di ottenere ortofoto, ovvero immagini ortografiche di qualità fotografica prive di distorsione prospettica e quindi direttamente misurabili.

Rispetto ai sistemi a scansione, questa tecnica offre diversi vantaggi: costi di accesso (*hardware e software*) generalmente più bassi, maggiore versatilità nell'implementazione e una migliore qualità nell'acquisizione del colore. I principali limiti sono i tempi di elaborazione, generalmente più lunghi, e la necessità di disporre di misure esterne (*Control Point*) per orientare e scalare il modello, nonché per verificare l'accuratezza dell'allineamento delle immagini.



Figure 8a e 8b. Fotogrammetria digitale

2.3. Classificazione delle caratteristiche degli oggetti in relazione al processo

di scansione

In questa sezione si analizzano le caratteristiche degli oggetti che possono influenzare l'operazione di digitalizzazione, causando problematicità che possono rallentare il lavoro di scansione, rendere il dato meno preciso o completo, oppure richiedere l'utilizzo di specifici strumenti e approcci. Per ciascuna delle complessità individuate viene fornito un esempio concreto e una illustrazione, e viene illustrato il relativo impatto sul processo di digitalizzazione, seguito dalle scelte consigliate in termini di metodologia, procedure e strumenti da utilizzare per risolvere o mitigare le criticità riscontrate.

Le complessità dell'oggetto vengono suddivise in tre macro-categorie, ciascuna relativa ad un differente aspetto dell'oggetto da digitalizzare o del luogo di conservazione o di esposizione dell'oggetto:

- **CG - Complessità della Geometria** (sez. [2.3.1](#)): questa categoria comprende le problematiche dovute alla forma, dimensioni e dettagli geometrici dei manufatti oggetto del rilievo;
- **CM - Complessità del Materiale** (sez. [2.3.1](#)): questa categoria abbraccia le problematiche derivanti dai materiali costruttivi dell'oggetto;
- **CA - Complessità di Accesso** (sez. [2.3.2](#)): quest'ultima categoria riguarda aspetti logistici o conservativi che possono presentarsi durante le attività di rilevamento. In genere tali criticità sono legate all'accesso, alla manipolazione e alla movimentazione dell'oggetto.

Matrice degli indici di complessità

Queste categorie di complessità sono strutturate all'interno di una **matrice degli indici di complessità**, **Allegato A** alle presenti Linee guida. La matrice fornisce un utile riferimento che aiuta a individuare potenziali elementi di criticità nei processi di digitalizzazione e a mitigarne gli effetti per mezzo di soluzioni tecniche specifiche. La matrice può supportare la definizione del piano dei fabbisogni degli istituti e la pianificazione della campagna di digitalizzazione sulla base delle caratteristiche degli oggetti coinvolti. Il documento, strutturato in forma tabellare, è concepito con l'obiettivo di supportare sia gli istituti conservatori sia gli operatori nella stima dei tempi, delle risorse, e degli accorgimenti logistici necessari per un cantiere di digitalizzazione. Può consentire, inoltre, di individuare possibili oggetti *outlier* (ovvero, che influiscono sulla complessità totale del progetto in maniera anomala e predominante).

In particolare, in fase di pianificazione del *procurement* o delle attività di digitalizzazione presso un determinato cantiere, è opportuno tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- **Additività delle complessità:** in linea di massima, le criticità individuate sono da considerarsi additive, cioè ciascun tipo di problematica si somma alle altre, rendendo sempre più complessa la digitalizzazione di un certo oggetto. Esistono però situazioni dove alcune complessità di ordine superiore ne comprendano altre, più lievi, o dove alcune complessità si escludano a vicenda.
- **Soglia massima di complessità di progetto.** A seguito della valutazione, è possibile che a un dato oggetto venga attribuita una notevole complessità. È necessario stabilire una soglia di complessità massima per la campagna, per poter individuare quegli oggetti che, per le loro caratteristiche, richiederebbero uno sforzo (economico, temporale, tecnologico) non coerente con gli obiettivi e le risorse della campagna, oppure che produrrebbero un risultato con una qualità non in linea con le necessità del committente. In questi casi, è necessaria una valutazione di fattibilità specifica, che coinvolga il committente e la parte appaltante, per stabilire nuovi parametri organizzativi ed

eventuali modifiche all'organizzazione della campagna per permettere la gestione di oggetti *outliers* o di casi più complessi.

- **Costi ammortizzabili.** Alcune complessità, in particolar modo quelle di contesto, possono essere mitigate per mezzo di soluzioni dedicate, come ad esempio, la creazione di una postazione di lavoro specifico (a luce o clima controllati), il coinvolgimento di personale specializzato per la movimentazione, o l'utilizzo di particolari strumenti di movimentazione. L'impatto economico e tecnico di queste operazioni complesse e può tuttavia essere ammortizzato qualora le dette soluzioni fossero implementate per più oggetti, e integrate in maniera efficiente nel processo globale di lavoro. Ad esempio, noleggiare un trabattello per il rilievo in quota avrà un'incidenza (logistica, economica, tecnica) inferiore se lo strumento verrà impiegato per l'acquisizione di numerosi manufatti. Nel computo delle complessità dei singoli oggetti è dunque importante valutare le circostanze operative in relazione a tutta la collezione oggetto della campagna, al fine di consentire una corretta stima dell'*effort*, delle tempistiche e dei costi complessivi della campagna.

2.3.0. Complessità della geometria, forma e natura dell'oggetto

Una prima categoria di complessità riguarda forma e geometria dell'oggetto. Più articolata e complessa è la forma dell'oggetto, maggiore sarà la difficoltà di accesso alle varie parti di esso e più complicato risulterà il lavoro dell'operatore. Inoltre, alcune conformazioni geometriche locali (zone sottili, tunnel, punte e lame) richiedono una maggior cura nella misurazione e nella ricostruzione delle geometrie. Con questa definizione si intendono le limitazioni di accesso dovute alla conformazione fisica, alla forma e alla tipologia dell'oggetto: le limitazioni di accesso dovute a fattori esterni e limiti logistici sono trattate nella sezione [2.3.2.](#)

Questo tipo di criticità, in linea di massima, **influenza la pianificazione, l'esecuzione del rilievo e l'elaborazione dei dati.** Forme complesse e aree a bassa accessibilità costringono ad effettuare più riprese, adattando di volta in volta la direzione di ripresa. Questo tipo di problematiche **influenza anche le tempistiche e la complessità dell'elaborazione**, perché spesso determinano un numero di riprese molto elevato (per coprire aree complesse o sottosquadri, e a difficile o scarso accesso), oppure una maggiore risoluzione (per poter ricostruire in maniera corretta le aree sottili o a punta).

Alcune criticità sono determinate dalla dimensione e dalle proporzioni degli oggetti che devono essere digitalizzati (CG1, CG2). Infatti, per consentire che gli algoritmi di elaborazione dei dati possano operare in modo stabile ed efficiente, l'area di ripresa di uno strumento (scanner o macchina fotografica) deve essere adeguata rispetto alla dimensione totale dell'oggetto. Altre problematiche sono relative alla conformazione geometrica di specifiche parti dell'oggetto (CG3, CG4, CG5, CG6, CG7). Sia la fotogrammetria sia la scansione sono basate su metodi ottici, che presuppongono la visibilità della superficie da misurare e pongono vincoli specifici sulle distanze di lavoro e gli angoli di vista.

Il funzionamento di molti scanner è basato sul principio di triangolazione: per essere misurato, un punto sulla superficie deve essere visibile **contemporaneamente** sia dal proiettore (sorgente laser o luce strutturata) che dal sensore. Questo crea un **cuneo di visibilità** che impedisce di accedere ad aree troppo concave. Molti scanner presentano una distanza di lavoro fissa (focale fissa). Questo limita i possibili posizionamenti dello strumento rispetto all'oggetto da acquisire. In fotogrammetria, per ricostruire una data porzione di superficie, questa deve essere stata inquadrata da almeno tre o più punti di vista, tra di loro

disposti secondo un angolo adeguato, non troppo alto da risultare non correlabile, e al tempo stesso non troppo basso da rendere instabile il calcolo geometrico). A prescindere dalla tecnologia usata, le superfici disposte parallelamente o quasi parallelamente rispetto alla direzione della vista non saranno misurabili con efficacia per problemi di stabilità numerica nel calcolo. Tutte queste limitazioni rendono difficile, e a volte impossibile, misurare alcune parti concave dell'oggetto. Esistono poi complessità che derivano da oggetti che non costituiscono una singola entità rigida, e che quindi richiedono una diversa pianificazione ed esecuzione del lavoro di rilievo (CG8, CG9, CG10).

CG1a - Oggetti molto più grandi dell'area ripresa da una singola scansione / foto.

CG2 - Oggetti con delle proporzioni sbilanciate, dove una delle dimensioni è molto più sviluppata delle altre.

Questa problematica emerge sia con gli scanner sia con la fotogrammetria, in maniera simile, quando l'area di ripresa è troppo piccola rispetto alla dimensione dell'oggetto. Nel caso degli scanner, a causa dall'accumulazione dell'errore, l'allineamento geometrico può produrre un allineamento impreciso. Nella fotogrammetria, la fase di orientamento delle foto è matematicamente più difficile, risultando in una stima inesatta delle posizioni di ripresa. In entrambi i casi, il problema causa sul modello 3D deformazioni a livello globale o locale, difformità di scala, e la superficie del modello può mostrare "doppie superfici" (difetti della geometria 3D, causati da dati non perfettamente allineati durante la generazione del modello: possono apparire, ad esempio, multiple superfici frammentate, a tratti sovrapposte e intersecanti, anziché una singola superficie che rappresenta la forma corretta dell'oggetto).

In queste situazioni, può essere risolutivo l'utilizzo di **marker** o la presenza di **oggetti di riferimento** nella scena. I **marker** sono supportati sia dai **software** di gestione degli scanner che dai **software** di fotogrammetria, e possono anche rendere più veloce l'elaborazione dei dati. Oggetti di riferimento nella scena sono oggetti rigidi, a volte di forma/dimensioni note, posti vicino al soggetto della ripresa. La loro presenza aiuta l'allineamento geometrico e l'orientamento delle foto, fornendo punti di riferimento esterni e di più facile gestione rispetto al soggetto principale.

CG1b - Oggetti troppo piccoli rispetto all'area di ripresa.

Nel caso di scanner, se l'oggetto è troppo piccolo rispetto all'area di ripresa (ad esempio inferiore a $\frac{1}{4}$ della diagonale della ripresa), il **software** di gestione potrebbe non riuscire a gestire la singola ripresa e incorrere in problemi durante l'allineamento geometrico. In questi casi occorre utilizzare un dispositivo più adatto alla dimensione dell'oggetto acquisito o un'ottica con un diverso campo di lavoro per i dispositivi fotografici. L'allineamento geometrico può essere comunque facilitato dall'utilizzo di **marker** o di oggetti di esterni di riferimento.

Nella fotogrammetria, oggetti molto piccoli rendono più difficoltosa la messa a fuoco e riducono la profondità di campo necessaria per le acquisizioni. Per oggetti con dimensione massima superiore ai 10 cm è spesso sufficiente utilizzare una **apertura minima del diaframma** per aumentare la profondità di campo. Per oggetti di dimensioni inferiori ai 10 cm è spesso indicato usare **ottiche macro** (in grado di mettere a

fuoco a distanze inferiori a 50cm). In caso di oggetti ancora più piccoli (inferiori al centimetro) è possibile utilizzare tecniche come il *focus stacking*¹⁶.



Figure 9a e 9b. Esempi di CG2

¹⁶ Gallo, A., Muzzupappa M., and Bruno F.. 2014.

CG3 - Zone non raggiungibili dallo scanner/fotocamera perché interne e con aperture ridotte, oppure rivolte verso direzioni dove non è possibile posizionare il sensore.

Esempi sono l'interno di un vaso, o le cavità interne di statue di terracotta o di metallo. Dal momento che queste aree non possono essere misurate, il risultato è la presenza di zone mancanti nel modello 3D. In queste circostanze non esistono soluzioni universalmente applicabili, ma si possono comunque applicare tecniche di mitigazione in grado di limitare l'errore in fase di acquisizione.

Effettuare più riprese, modificando posizione e orientamento reciproco dello strumento e dell'oggetto, aiuta ad ampliare l'area coperta, pur richiedendo maggiore tempo e generando più dati in fase di ripresa. È possibile, inoltre, aggiungere al rilievo riprese di dettaglio, effettuate con aree di misura più piccole (per gli scanner cambiando l'ottica; per la fotogrammetria effettuando riprese più ravvicinate o cambiando l'ottica alla macchina fotografica).

Pur applicando le tecniche di mitigazione sopra descritte, è possibile che alcune zone degli oggetti acquisiti non siano in alcun caso misurabili; questo fattore può portare alla generazione di **modelli tridimensionali master incompleti**, ovvero che non rappresentano l'interezza della superficie dell'oggetto reale acquisito. Il modello *master* così generato, pur se incompleto in alcune sue parti, conterrà solo dati metrici acquisiti (e non ricostruiti a seguito di interpolazioni). A partire dal *master* potranno poi essere generati modelli derivati, andando ad integrare le lacune attraverso metodi di interpolazione basati sui dati sia semi-automatici (ovvero guidati dall'intervento umano) sia attraverso modellazione. Per ottenere un modello 3D documentale il più completo possibile, è comunque auspicabile acquisire almeno i punti estremi delle aree non accessibili offrendo così una buona rappresentazione dei bordi della zona non misurabile. Ad esempio, per un incavo cilindrico stretto è praticamente impossibile coprire le pareti interne, ma potendo misurare qualche punto sul fondo, verrà generato un riferimento metrico per la profondità, e avendo una buona rappresentazione del bordo e del suo orientamento, sarà possibile usare questi riferimenti per poter completare il modello 3D derivato nella fase successiva di *post-processing*.



Figure 10a e 10b. Esempi di CG3

CG4 - Geometrie che, a livello locale, impediscono la visibilità di specifiche aree da parte del sensore (sottosquadri, infossamenti, scanalature).

In generale, queste aree corrispondono al concetto scultoreo di sottosquadro. La differenza rispetto alla criticità CG3 è che, in questo caso, si parla di dettagli localizzati e con una estensione molto inferiore rispetto alla dimensione totale dell'oggetto. Un esempio sono le parti in aggetto di altorilievi e intagli, oppure incavi e affossamenti stretti (buchi non passanti) presenti su capigliature e barbe lavorate a trapano della statuaria classica.

Anche in questo caso, lavorare con più riprese da più direzioni mitiga la complessità realizzativa, pur incrementando tempi di rilievo e di elaborazione. Le scanalature, ad esempio quelle dei panneggi delle statue, possono essere troppo strette per permettere al sensore di raggiungerne il fondo o i lati. Lavorando con scanner a triangolazione, posizionare lo strumento con l'asse emettitore-sensore in allineamento con la scanalatura aiuta a coprire meglio la zona critica. Similmente, in fotogrammetria, si ottiene un miglioramento effettuando le riprese con una parallasse che segue la direzione alla scanalatura.

Anche in questo caso, tuttavia, alcune aree potrebbero risultare non misurabili. Se le aree inaccessibili sono molto piccole rispetto alla dimensione totale dell'oggetto (geometrie locali), qualora si siano catturati almeno i bordi per mezzo di riprese aggiuntive, è probabile che metodi automatici di interpolazione possano colmare le aree non riprese in maniera coerente nella generazione del modello.



Figure 11a e 11b. Esempi di CG4

CG5 - Buchi passanti.

Esempi possibili di questi casi sono colini di terracotta, metallo corroso, pannelli decorativi intagliati, occhi/bocca di maschere storiche, o cancellate di ferro battuto. La presenza di molteplici "tunnel" può prolungare il lavoro di digitalizzazione, perché richiede di riprendere tutti i buchi da più direzioni, da ambo i lati. Più lunghi e stretti sono i tunnel, più è probabile che sulla superficie interna del tunnel rimangano aree non misurabili.

Anche in questa situazione è consigliabile coprire quanto più possibile i bordi dei buchi, da ambo i lati, per poter fornire agli algoritmi di interpolazione almeno una indicazione precisa della direzione di sviluppo della superficie.

Nel caso della fotogrammetria, l'area interna dei buchi può risultare troppo scura a causa della scarsa illuminazione dovuta all'occlusione, rendendo impossibile all'algoritmo di *matching* individuare punti omologhi. In questo caso, l'impiego di scatti a diversa esposizione o esposizione multipla potrà ridurre il numero e l'entità delle aree sottoesposte.



Figure 12a e 12b. Esempi di CG5

CG6 - Aree prive di dettaglio geometrico.

Questa complessità riguarda quasi esclusivamente la digitalizzazione tramite scanner attivo. Rientrano in questa categoria superfici troppo lisce, ossia dove il dettaglio geometrico locale è largamente inferiore all'estensione della superficie dell'oggetto acquisito. Un esempio è la superficie di un quadro, dove aree di svariati cm quadri presentano dettagli geometrici della pellicola pittorica dell'ordine di pochi millimetri. Altre tipologie di aree prive di dettaglio geometrico sono:

- **zone a curvatura costante con estensione maggiore dell'area di una singola ripresa, e curve "sfuggenti".** Rientrano in questa categoria oggetti come ceramiche con ampie aree di curvatura continua e costante (ad esempio olle) oppure alcune parti di armi bianche (ad esempio lunghe lame e punte) e armi da fuoco (ad esempio la volata di un cannone o la canna di un moschetto);
- **zone con estensione maggiore dell'area di una singola ripresa che presentano pattern geometrici ripetuti.** Rientrano in questa categoria decorazioni a stampo applicate su ceramiche o oggetti metallici, o decorazioni ripetitive scolpite su pietra.

Tutte queste tipologie possono causare problemi all'allineamento geometrico, poiché prive di punti di riferimento geometrici individuabili dall'algoritmo di registrazione; in alcune circostanze, l'algoritmo può generare falsi posizionamenti dovuti alla ripetizione delle forme. Un modello 3D affetto da questi problemi può presentare deformazioni, difformità di scala o "doppie superfici".

Queste complessità possono essere mitigate per mezzo dell'utilizzo di *marker* o oggetti di riferimento, perché forniscono un riferimento all'algoritmo di allineamento. In queste circostanze la fotogrammetria rappresenta una valida alternativa alla scansione attiva, in quanto meno sensibile rispetto alla mancanza di dettaglio geometrico. Tuttavia, se l'oggetto ricade anche nella criticità CM1 (privo di dettaglio di tessitura), anche la fotogrammetria incorrerebbe nella stessa problematica e l'uso di *marker* e oggetti di riferimento resta l'unico approccio percorribile.



Figura 13a e 13b. Esempio di CG6

CG7 - Aree con geometrie locali piccole rispetto alla risoluzione di lavoro. Pareti sottili, punte e lame.

Dettagli di forma specifica possono essere localmente misurabili ma difficilmente integrabili nel *dataset* totale dell'oggetto. Questo è il caso di zone con pareti molto sottili rispetto alla risoluzione di lavoro, oppure zone dove facce opposte vanno ad assottigliarsi fino a combaciare, creando geometrie quali ad esempio quelle di lame e punte. Possibili esempi sono armi (vere, o sculture che rappresentano armi), lastre di metallo lavorate a sbalzo, ceramica sottile e monete/medaglioni. L'allineamento geometrico delle scansioni di queste aree è complesso, perché un minimo errore porta ad una sovrapposizione di strutture rivolte in direzioni diverse. Anche in fotogrammetria, piccoli errori della fase di orientamento hanno un grosso impatto su zone sottili, lame e punte. Lavorando su oggetti con queste caratteristiche, è necessaria una maggiore cura nelle fasi di elaborazione che può impattare negativamente sulla spedività delle lavorazioni. In fase di generazione della *mesh* i dati che provengono dai due lati opposti dell'oggetto possono creare interferenza, producendo artefatti. Questi si manifestano come buchi passanti, aree con rumore (visivamente somigliante a delle "onde"), rigonfiamenti, e falsa geometria che connette i due lati opposti o che "galleggia" all'interno del modello 3D. Simili artefatti possono verificarsi nel caso della ricostruzione della parte finale di lame e punte acuminata. A seconda del caso, la superficie può apparire più smussata di quanto sia nell'oggetto reale, o si possono venire a creare sbavature e pezzi di geometria che protrudono dalla zona perimetrale dell'oggetto.

Per mitigare queste problematiche, durante la digitalizzazione si possono utilizzare **marker** ed effettuare maggiori riprese della zona problematica per ottenere un dato più denso e meno ambiguo. È consigliabile inoltre lavorare utilizzando una **più alta risoluzione** per una ricostruzione più dettagliata e precisa. Queste misure si traducono generalmente in una elaborazione più lenta dei modelli, dovuta alla maggiore quantità di dati grezzi, che può risultare in un modello finale più pesante e complesso.



Figura 14. Esempio di CG7

CG8 - Oggetti non rigidi.

Questa categoria include oggetti che si deformano in maniera plastica, come vestiti, tessuti e accessori (ad esempio, borse di pelle), ma anche oggetti composti da più parti rigide articolate, come collane o catene. Sia la scansione attiva che la fotogrammetria integrano dati provenienti da riprese effettuate da direzioni diverse e spesso richiedono lo spostamento dell'oggetto che viene acquisito, in modo tale da consentire la visibilità della zona di appoggio. Un oggetto non rigido, al momento di essere spostato, perderà la forma che aveva nelle prime riprese, rendendo impossibile l'integrazione dei dati provenienti da acquisizioni diverse ottenute a seguito della movimentazione dell'oggetto.

Anche in questo caso non esistono soluzioni univoche applicabili universalmente in tutte le circostanze, ma occorre valutare soluzioni specifiche per ogni tipologia di oggetti considerata. **Supporti temporanei, meccanici o basati su adesivi a basso impatto** (blue tac, nastro carta) possono mantenere in posizione piccole parti mobili degli oggetti da acquisire durante le fasi di movimentazione. Se non è possibile evitare la ripresa di questi supporti assieme all'oggetto, essi dovranno essere rimossi manualmente durante l'elaborazione dei dati. Tali soluzioni dovranno essere preventivamente approvate dai responsabili della tutela degli oggetti (curatori, restauratori). Un caso limite consiste nell'acquisizione dell'oggetto in una sola posizione, senza procedere alla sua movimentazione, che in questo caso deve essere scelta in modo tale da massimizzare la quantità di dato acquisibile.





Figure 15a e 15b. Esempi di CG8

CG9 - Oggetti composti da più parti.

La categoria CG9 comprende quegli oggetti composti da parti scollegate fra di loro e meccanicamente indipendenti. Ciascuna delle diverse componenti dovrà essere trattata indipendentemente, con una operazione di digitalizzazione e di elaborazione, e risulterà nella creazione di un modello *master* per ciascuna delle parti considerate.

Per quei casi in cui le parti non hanno un posizionamento relativo definito (ad esempio un gruppo di quattro vasi canopi), ciascuno dei modelli 3D realizzati avrà un proprio sistema di riferimento, indipendente dagli altri. La stessa situazione potrà verificarsi per frammenti non ricomposti di un vaso o di una statua, non essendo disponibile in questo caso un posizionamento ricostruttivo definitivo che definisca l'oggetto originario. Nel caso, invece, in cui le parti abbiano un posizionamento relativo esplicito e noto, come nel caso di una scatola e il suo coperchio, i singoli modelli 3D dovranno avere un sistema di riferimento coerente fra di loro. Questo posizionamento relativo potrà essere *misurato* o *approssimato*, a seconda delle necessità e delle possibilità pratiche. Un posizionamento può essere misurato attraverso riprese di strumenti attivi, l'uso di *marker*, misurazione di punti di riferimento con metodi fotogrammetrici o altri strumenti di rilievo. Un

posizionamento approssimato può essere imposto tramite intervento umano in maniera manuale, oppure usando caratteristiche geometriche dei modelli 3D (ad esempio, sovrapposizione di *feature* o superfici). Al momento di pianificare la campagna di digitalizzazione, queste diverse opzioni devono essere valutate con il personale dell'ente committente.

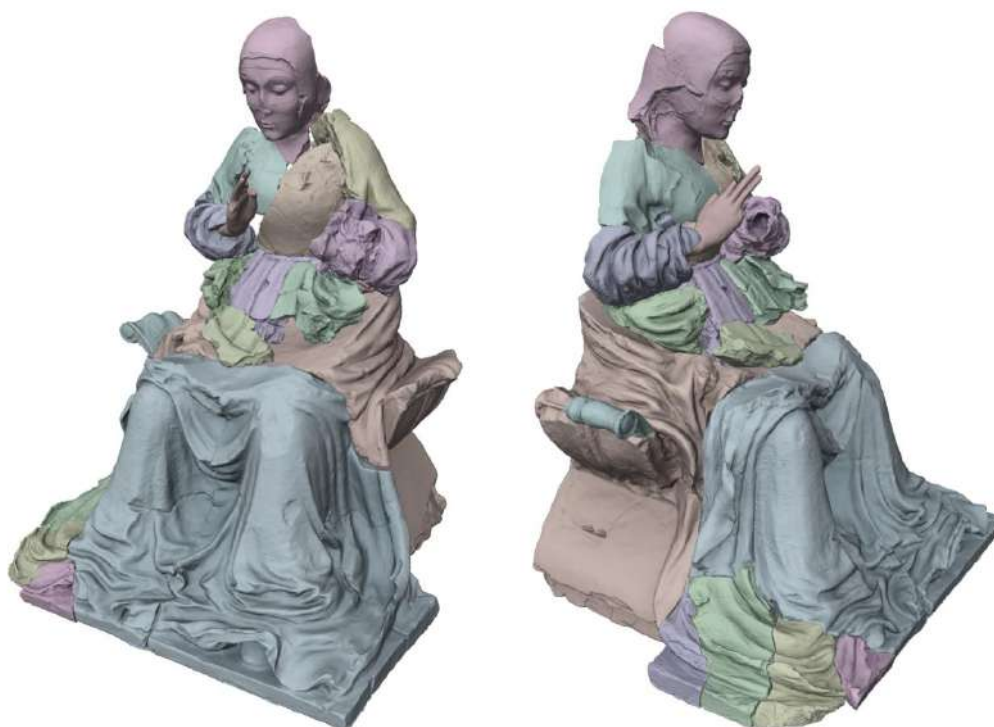


Figura 16. Esempio di CG9

CG10 - Oggetti con parti mobili che hanno, per loro natura e funzione, più configurazioni.
Un esempio di questa categoria sono gli apparati meccanici, o arredi con parti mobili.

In queste situazioni è opportuno considerare ciascuna configurazione come un diverso oggetto. È necessario, dunque, identificare tutte le configurazioni che si vogliono acquisire (ad esempio mobile con anta aperta e mobile con anta chiusa), e ciascuna di queste rappresenterà, ai fini della campagna, una distinta azione di digitalizzazione, che andrà a produrre uno specifico modello 3D. È possibile altresì scegliere una o più delle diverse configurazioni disponibili, escludendo le altre, a seconda dei casi d'uso del modello 3D che si intende ottenere.

Gli strumenti adibiti alla digitalizzazione 3D precedentemente trattati non consentono una cattura dinamica del processo di cambio di configurazione dell'oggetto acquisito. In un modello derivato (sez. 3.4), si potranno ottenere dati di animazione che simulano il passaggio da una configurazione all'altra attraverso modellazione diretta e/o guidata da una misurazione del movimento attraverso *motion capture*.



Figura 17. Esempio di CG10

2.3.1. Complessità del materiale dell'oggetto

Le complessità del materiale riguardano le caratteristiche fisiche superficiali di un manufatto, in particolare la sua composizione materiale e la sua risposta ottica alla luce (sia essa ambientale, o di illuminatori fotografici, o proiettata dagli scanner). Dal momento che le principali tecnologie di digitalizzazione sfruttano

la triangolazione ottica con luce visibile o *near-visible*, ogni comportamento dei materiali rispetto alla luce che si discosti da quello ideale rende più complesso, e talvolta impossibile, il rilievo. Rispetto alle criticità della forma, le criticità del materiale possono più spesso ridurre la precisione della misurazione, introdurre nel modello rumore o geometrie spurie, che si traducono in aree del modello eccessivamente compromesse che devono essere rimosse dall'operatore in fase di *processing*.

Questo tipo di criticità, in linea di massima, **rende più complessa l'operazione di misura**, richiedendo una scelta accurata dei parametri di lavoro, una strumentazione ottica aggiuntiva (ad esempio filtri, illuminanti) e un maggiore *effort* per ciascuna foto/ripresa. La presenza di queste criticità **limita la precisione dell'operazione di acquisizione e può produrre un dato incompleto**. L'elaborazione del dato, inoltre, **può diventare più laboriosa**, perché può richiedere un numero superiore di riprese sul campo e maggiore tempo ed attenzione nelle operazioni di pulizia e filtraggio durante il *processing* dei dati.

Pur avendo attuato le strategie di mitigazione, molte delle criticità di questa classe possono causare la presenza di **lacune** nei dati rilevati. Come già discusso per le criticità della forma, ai fini di una digitalizzazione documentale è opportuno non integrare in modo arbitrario il modello *master*, che conterrà dunque solo dati metrici, a partire dal quale potranno essere generati modelli derivati che integrano le lacune (metodi di interpolazione automatici basati sui dati, strumenti automatici di pulizia delle superfici [*smoothing*] semi-automatici guidati dall'intervento umano, o modellazione esplicita, come *sculpting* manuale della geometria).

Le caratteristiche di aspetto e decorazione degli oggetti (CM1) possono influire negativamente sulla digitalizzazione, perché l'assenza o la scarsità di dettaglio rende difficile l'uso di tecniche di acquisizione fotogrammetriche. Una seconda famiglia di criticità riguarda in maniera specifica il comportamento ottico del materiale dell'oggetto (CM2, CM3, CM4, CM5): tutti i comportamenti ottici che portano il raggio di vista o quello di illuminazione a penetrare la superficie, essere assorbito, o a rimbalzare in maniera non uniforme rendono difficile (o impossibile) la triangolazione e imprecisa la misura. Infine, altre criticità possono emergere dalla presenza simultanea di materiali e colori differenti all'interno del medesimo oggetto (CM6) o da specifiche situazioni in cui l'oggetto presenti aree caratterizzate da micro-geometria (CM7).

Oggetti/materiali scuri o debolmente riflettenti. Condizione comune a tutte le tecnologie ottiche di rilievo è che il materiale dell'oggetto acquisito rifletta almeno parzialmente la luce che riceve. Se il materiale assorbe tutta la luce proiettata dallo scanner non sarà possibile triangolare il punto colpito dalla luce; similmente, in fotogrammetria, un materiale troppo scuro rende impossibile individuare punti di corrispondenza. **Più un oggetto è scuro (ossia, maggiore è l'assorbimento della luce), minore sarà la precisione e la completezza del dato.** Lavorare su oggetti scuri è una situazione abbastanza usuale nell'ambito di un progetto di digitalizzazione del patrimonio culturale, e perciò non è compresa nella matrice degli indici di complessità come una casistica specifica. Vengono comunque offerte alcune indicazioni generali di lavoro in questa sezione introduttiva. Una soluzione generalmente applicata consiste nell'usare un'**esposizione alta**. Materiali con un grado di assorbimento della luce tale da rendere completamente impossibile la digitalizzazione ottica sono estremamente rari e generalmente di fattura moderna, fattore che rende improbabile la presenza di tali materiali in oggetti del patrimonio culturale (ad esempio i pigmenti come il *Vantablack*). Un altro caso estremo è rappresentato da un oggetto con un materiale in grado di assorbire completamente la lunghezza d'onda della luce emessa da uno scanner, risultando di fatto

completamente invisibile allo strumento. Questa circostanza, teoricamente possibile, è tuttavia così rara da non rappresentare una reale criticità operativa, riguardando solo scanner che usano sorgenti di luce mono-frequenza (ad esempio lama laser) nel remoto caso in cui l'oggetto da scansionare presenti il perfetto assorbente della lunghezza d'onda usata dallo scanner.

CM1 - Superfici uniformi senza dettagli di tessitura.

Questa situazione riguarda superfici di colore uniforme, e si presenta su oggetti di design o arte moderna, o per oggetti antichi che presentino parti decorate con campiture piene. Superfici del genere possono causare problemi al processo fotogrammetrico che può non riuscire a individuare punti di riferimento per le corrispondenze tra le diverse immagini, sia nella fase di calibrazione e di orientamento sia in quella di generazione della nuvola di punti.

La **scansione attiva** non risente di questo problema e **va preferita come tecnologia di misura per oggetti di questo tipo. L'uso dei marker e di oggetti di riferimento** può mitigare i problemi in fase di calibrazione e di orientamento, ma è meno efficace per la generazione della geometria.

Esiste inoltre la possibilità di "**arricchire**" l'**area uniforme con un dettaglio proiettato**¹⁷. Utilizzando un proiettore, si proietta sull'area priva di dettaglio un pattern che fornisce punti di riferimento utili al *matching* fotogrammetrico. Questa proiezione va mantenuta costante durante tutte le operazioni di ripresa, e va poi integrata con acquisizioni prive della proiezione stessa, per ottenere un riferimento della vera apparenza della superficie. In fase di elaborazione, le foto con proiezione verranno utilizzate per generare la geometria, e quelle senza proiezione verranno utilizzate per ottenere la *texture*. Questa soluzione, come altre disponibili in letteratura¹⁸, è però abbastanza laboriosa (sia durante la digitalizzazione che l'elaborazione) e andrebbe impiegata solo nell'impossibilità di individuare tecniche alternative.

¹⁷ Koutsoudis, A., et al. 2015.

¹⁸ Baldacci, A., et al., 2016Xue, F., Filin, S., Elnashef, B. and Jin, W., 2022

Morelli, L., A. Karami, F. Menna, and F. Remondino. 2022



Figure 18a e 18b. Esempio CM1

CM2 - Oggetti traslucidi o trasparenti.

Se la luce proiettata da uno scanner penetra all'interno dell'oggetto non sarà possibile triangolarne la superficie, e i punti generati appariranno "dentro" l'oggetto a profondità variabile. Similmente, nella fotogrammetria, i punti di corrispondenza triangolati non saranno posti esattamente sulla superficie, ma saranno affetti da rumore che ne sposta la posizione verso l'interno. Questa problematica si può verificare per oggetti lievemente traslucidi come il marmo o la pelle, dove si manifesta sotto forma di ridotta precisione e un maggior rumore, e va ad aumentare proporzionalmente alla traslucenza del materiale, come nel caso dell'alabastro o della pasta vitrea. Materiali organici che possono apparire opachi, come l'avorio, possono presentare il medesimo comportamento, poiché moderatamente permeabili alla luce e dotati di una struttura biologica con venature.

In situazioni di **traslucenza lieve o moderata**, la **fotogrammetria** è in grado di produrre risultati più affidabili rispetto agli scanner attivi, e andrebbe preferita. Oggetti completamente trasparenti, come vetri o cristalli, lasciano passare la luce proiettata e nelle foto rendono visibile (deformandolo) ciò che si trova dietro all'oggetto: questo rende arduo applicare metodi ottici, a meno di non **usare sostanze opacizzanti** (vedi criticità CM5 *Oggetti con comportamenti ottici estremi*).



Figura 19. Esempio di CM2

CM3 CM4 - Oggetti con riflessi.

I riflessi speculari, generati dalle aree particolarmente lucide degli oggetti, fanno arrivare al sensore dello scanner o della macchina fotografica molta luce concentrata in un solo punto, rendendo illeggibile quell'area. I riflessi speculari sono fenomeni che dipendono dal punto di vista, ossia si "spostano" da una vista all'altra, e possono quindi confondere l'individuazione delle corrispondenze fotogrammetriche. Se si utilizzano degli scanner, i riflessi possono generare locali inconsistenze della geometria (piccoli salti di profondità). I riflessi speculari dati da superfici metalliche (CM4) sono spesso i più problematici, perché possono essere molto intensi, ampi nella risposta in frequenza, con confini molto nitidi, e meno polarizzati (rendendo più difficile la loro completa eliminazione tramite filtri).

Una maggior quantità di scansioni e di foto, andando a coprire più direzioni di vista differenti, può migliorare il dato finale, in quanto i riflessi dipendono dal punto di vista (*view dependant*). Questa strategia però richiede più tempo durante la digitalizzazione e produce più dati da elaborare. Un altro metodo per mitigare l'effetto dei riflessi speculari è l'**uso di spray opacizzanti**, come descritto nella sezione successiva per la criticità CM5 (Oggetti con comportamenti ottici estremi).

Per risolvere i problemi generati dai riflessi speculari, quando si lavora con tecniche fotogrammetriche, si può ricorrere ai **filtri di polarizzazione, sia singola che *cross-polarization***¹⁹. Un polarizzatore è un filtro capace di bloccare i raggi di luce che presentano un determinato angolo di oscillazione (polarizzazione). Ruotando il filtro si possono quindi rimuovere dalla ripresa i raggi di luce che hanno una specifica polarizzazione, come spesso accade nei riflessi speculari. Anche un singolo filtro polarizzatore applicato alla lente della camera può ridurre l'impatto dei riflessi, ma per una ripresa ottimale è consigliabile utilizzare il *setup* completo. Nella *cross-polarization*, si applica un filtro di polarizzazione alle fonti di luce (rendendo quindi la luce prodotta polarizzata a un dato angolo), e un filtro di polarizzazione alla camera. I filtri vanno orientati in maniera che la polarizzazione di uscita delle lampade sia poi eliminata dal filtro della camera. Questo elimina tutti i raggi di luce che arrivano alla camera direttamente o con un rimbalzo di riflesso speculare, lasciando nell'immagine solo la componente diffusiva e ambientale della luce. Il risultato è una foto quasi completamente priva delle componenti di riflessi. Anche se questo tipo di foto presenta l'oggetto con un aspetto differente da quello che l'occhio umano percepisce, essa costituisce un *input* ideale per la ricostruzione fotogrammetrica e genera dati di alta qualità e coerenza. La *texture* risultante può però richiedere dei ritocchi, necessari per re-introdurre informazioni cromatiche o di luminosità perdute durante il processo. Per esempio, modelli 3D di oggetti metallici trattati con processi di *cross-polarizzazione* tendono ad apparire scuri e desaturati. In caso di riflessioni moderate e di oggetti privi di profondi sottosquadri è possibile, in alternativa, condurre un rilievo in ambienti controllati, caratterizzati da luce ambientale tenue e diffusa e privi di sorgenti luminose dirette che possano generare riflessioni sull'oggetto. In questi casi è necessario però un appropriato settaggio di camera con esposizioni molto lunghe, che possono rallentare il processo di acquisizione.

¹⁹ Atkinson, Gary A., and Edwin R. Hancock. 2005
Cosentino, Antonino. 2013



Figure 20a e 20b. Esempi di CM3, superficie lucida non metallica



Figure 21a e 21b. Esempi di CM4, superficie lucida metallica

CM5 - Oggetti con comportamenti ottici estremi.

Rientrano in questa categoria oggetti caratterizzati da comportamenti ottici di superficie complessi che influenzano negativamente il lavoro degli scanner o del processo fotogrammetrico. Fenomeni di interferenza dovuti alla **microgeometria** di alcuni materiali producono oggetti con **colori cangianti a seconda del punto di vista**. Questa situazione è comune per materiali di origine biologica come piume, conchiglie e insetti. I **riflessi anisotropici** sono riflessi speculari che appaiono solo (o prevalentemente) in una direzione, ad esempio in oggetti di metallo spazzolato, nei capelli, e in tessuti come il velluto e il broccato. Le pietre dure semi-preziose e preziose sono poi un caso limite: non solo sono in genere molto lucide, e per lo più traslucide/trasparenti, ma possiedono anche una serie di comportamenti ottici che rendono la loro digitalizzazione con metodi ottici non pratica.

Anche in questo caso non esiste una soluzione applicabile in modo standardizzato a questa famiglia di problematiche. Alcuni scanner possono avere **filtri appositi per restringere frequenze specifiche di luce** dei riflessi. Come nel caso dei riflessi speculari, **l'utilizzo di polarizzazione** (vedi CM3 e CM4) può migliorare la ripresa fotogrammetrica. La maggior parte di questi fenomeni è dipendente dal punto di vista, ed è possibile produrre una **maggior quantità di scansioni e/o di fotografie** che copra un maggior numero di direzioni di vista differenti.

È possibile poi usare appositi **spray opacizzanti**, sostanze chimiche volatili e rimovibili (normalmente chiamati *scanning, coating o developer spray*) che possono essere applicate sulla superficie tramite aerosol, rendendola opaca e diffusiva²⁰. Dopo breve tempo, queste sostanze evaporano naturalmente, lasciando il pezzo nelle condizioni originali; oppure possono essere rimosse facilmente dopo la scansione per mezzo di processi meccanici o chimici (purché inerti, ovvero non interagenti con la superficie dell'oggetto). Questo tipo di prodotti, commercializzato esplicitamente per la digitalizzazione, può essere risolutivo per problemi di traslucenza, trasparenza, riflessi e comportamenti ottici particolari. L'utilizzo di queste sostanze in ambiente museale non è infrequente²¹ ed esistono diversi prodotti specifici sul mercato²², il cui utilizzo è comunque sempre subordinato all'approvazione da parte del personale competente in materia di tutela dei beni da digitalizzare. Per la digitalizzazione di gemme o pietre dure, l'utilizzo di spray opacizzanti può

²⁰ esempio di workflow: <https://www.3dscanstore.com/blog/3d-scanning-reflective-objects>

²¹ Porter, S.T., Roussel, M. and Soressi, M., 2016

Wachowiak, M.J. and Karas, B.V., 2009

Nam, J., Valinasab, B. and Jun, M.B., 2017

Christova, A., 2020

Gerbino, S., et al., 2016

Pagliarulo, V., et al., 2018

²² Esempi di prodotti:

- AESUB spray: <https://aesub.com/en>
- Reflecon spray : Soluzione per aerografo e raccomandata specificamente per lo scanner Artec Micro da Artec3D.
- Helling 3D Laserscanning Anti-Glare Spra (Privo di acetone, talco e altre sostanze chimiche pericolose): <https://3dscanspray.com/>
- Cyclododecane Spray: utilizzata nel campo dell'archeologia e del restauro in quanto privo di tutti i solventi, del biossido di titanio (TiO₂) e dell'adamantano :<https://www.kremer-pigmente.com/en/shop/mediums-binders-glues/87099-cyclododecane-spray.html>
- CEREC® Optispra: utilizzato in ambito odontoiatrico
- AB24 - 3D Scanning Spray: utilizzato in applicazioni di archeologia e restauro: <https://3dscannersupply.com/products/24-hour-sublimating-spray-cyclododecane>.

consentire la digitalizzazione della loro forma, ma la risposta ottica andrà poi modellata manualmente, andando a definire appositi materiali per il *rendering*.



Figura 22. Esempio di CM5

CM6 - Zone con salti drastici di colore, luminosità, comportamento ottico.

Anche quando i materiali dell'oggetto non presentano, individualmente, caratteristiche ottiche estreme è possibile che la giustapposizione di materiali o colori molto differenti all'interno del medesimo oggetto generi complessità di trattamento dei modelli. Questa situazione emerge in occasione di drastici salti di contrasto tra aree diverse dell'oggetto, ad esempio quando alcune parti dell'oggetto sono particolarmente scure e altre particolarmente chiare, oppure di colori molto differenti). La copresenza di materiali con comportamenti ottici molto diversi sul medesimo oggetto può causare simili problematiche. Questa circostanza si può verificare ad esempio per statue di pietra o di metallo con inserti di materiali diversi (ad esempio occhi in pasta vitrea, più scuri e riflettenti), per superfici intarsiate, oggetti con decorazioni dipinte con campiture piatte con confini netti. Altro esempio frequente sono i numeri di inventario scritti a pennarello su alcuni reperti archeologici (spesso, con tratti neri su fondo chiaro).

Queste complessità si traducono in una maggiore difficoltà di ripresa, perché il valore di esposizione fotografico ideale varia da area ad area, e per aree dove compaiono vari colori contemporaneamente è complesso stabilire un valore corretto. Questo problema riguarda per lo più gli scanner 3D. In questi casi è opportuno **effettuare più riprese della zona problematica, utilizzando ogni volta esposizioni differenti**, oppure, per gli scanner che lo prevedono, **usare modalità di espansione del range dinamico** tramite fusione di multi-esposizione. In entrambi i casi si aumenta il tempo di ripresa e si generano più dati che dovranno essere poi gestiti. Anche la fotogrammetria non è immune a queste problematiche: in presenza di oggetti che presentano queste caratteristiche, stabilire i corretti parametri di esposizione fotografica è più complesso, e spesso è necessario fotografare utilizzando esposizioni differenti.

Un secondo effetto imputabile a questa complessità è la comparsa di errori di misura e di “falsa” geometria. Questo fenomeno è generalmente localizzato nella porzione di confine fra le aree con colori o materiali differenti. Il cambio repentino della risposta ottica può essere erroneamente interpretato dai *software* come un “salto” di geometria. Il risultato è una geometria che presenta un rilievo o un avvallamento inesistenti, “salti” improvvisi di profondità o rumore localizzato. Il problema può essere risolto **durante l’elaborazione, andando a rimuovere le aree errate**. Un classico esempio è la presenza di numeri di inventario scritti sull’oggetto con pennarelli indelebili neri. In questo caso, nella geometria, lettere e numeri appariranno a rilievo. Questo problema riguarda per lo più gli scanner a lama laser; gli scanner a luce strutturata sono meno sensibili a questa casistica di complessità. La fotogrammetria è più robusta rispetto a questo fenomeno e genera migliori dati in corrispondenza di queste aree problematiche.



Figura 23. Esempio di CM6

CM7 - Superfici non coerenti, composte da un gran numero di elementi individuali, raggruppati.

Questo è il caso di capelli, pelliccia, piume, tessuti non coerenti. In questo caso, il problema emerge dal fatto che ciascuno di questi elementi è più piccolo della risoluzione spaziale dello scanner o della fotogrammetria, e la triangolazione produce un risultato instabile perché riceve *input* contrastanti che variano molto da punto a punto. In molte di queste situazioni, poi, ciascuno dei microelementi ha un comportamento ottico particolare (ad esempio i capelli sono lucidi e hanno riflessi anisotropici, le piume hanno spesso colori di interferenza). Il risultato è una ridotta precisione e un rumore diffuso in tutta l'area caratterizzata da questa tipologia di materiale. Un altro effetto è che le zone affette appaiono come un'unica superficie geometrica (spesso rumorosa), e non come un insieme di microstrutture, come invece appaiono all'occhio umano. Questo può rendere il modello 3D poco somigliante all'oggetto originale (anche se abbastanza corretto dal punto di vista metrico).

Allo stato attuale, non esiste una strategia univocamente efficace per gestire questa tipologia di problematiche. Una **scelta di parametri specifici** (ad esempio tempo di esposizione, esposizioni multiple, filtraggio in base alla qualità dei punti) su alcuni scanner può mitigare l'impatto del problema. **La fotogrammetria** può, in alcune situazioni, essere **più robusta**, ma si produrranno comunque dati rumorosi e non rappresentativi delle microstrutture. L'utilizzo di **polarizzatori** può mitigare i comportamenti ottici più complessi.

In fotogrammetria, nei casi particolari dove gli elementi, pur piccoli, sono comunque sufficientemente grandi da rientrare nella risoluzione spaziale dello strumento ma talmente ravvicinati da poter generare instabilità, può essere utile utilizzare sfondi uniformi e ad alto contrasto cromatico rispetto all'oggetto da acquisire. Tale contrasto può così facilitare e automatizzare la fase di mascheratura e rendere meno rumoroso e più accurato il risultato del matching.



Figura 24. Esempio di CM7

2.3.2. Complessità del contesto

Questo tipo di complessità deriva non dall'oggetto in sé, quanto dal **contesto** in cui l'oggetto risiede, o a determinate condizioni di conservazione che non permettono o rendono laboriosa la movimentazione del pezzo, o l'allestimento della strumentazione per la digitalizzazione nei pressi dell'oggetto. Come nel caso delle criticità per geometria e forma, anche queste situazioni influenzano il progetto di acquisizione. Posizionamenti particolari, problemi di accesso, manipolazione o movimentazione e la presenza di impedimenti ambientali richiedono strategie di ripresa differenziate a seconda del contesto. In alcune situazioni può essere necessario anche l'impiego di attrezzature specifiche o di personale di supporto. In altre, le restrizioni all'accesso possono essere legate all'accessibilità fisica dell'oggetto, quali orari di apertura dell'istituto conservatore oppure esposizione limitata alla luce o all'aria del manufatto per esigenze di conservazione.

Sebbene le Linee guida riguardino la digitalizzazione di oggetti mobili, non è scontato che tutti questi oggetti siano effettivamente movimentabili. Ad esempio, statue ed elementi decorativi architettonici sono spesso ancorati o inseriti in contesti che ne precludono la movimentazione, anche per brevi distanze. In altre circostanze la movimentazione è impedita da prescrizioni limitanti da parte degli enti preposti alla tutela dei beni. **È dunque fondamentale esaminare i diversi condizionamenti logistici, ambientali, procedurali o legati alla tutela che possono incidere sul processo di digitalizzazione dei manufatti.** In tutte le circostanze per cui l'oggetto è inamovibile, o anche solo parzialmente movimentabile, i tempi di lavoro si allungheranno, perché spostare gli strumenti di acquisizione è più lento e difficoltoso rispetto alla movimentazione dei pezzi davanti ad un *setup* fisso. È altrettanto comune che le strutture di supporto e/o le strutture di dissuasione fisse siano di impaccio, rendendo più difficile trovare le posizioni ideali di ripresa.

Le prime criticità riguardano gli oggetti inamovibili e dipendono dal posizionamento dell'oggetto di interesse. Questo può essere inserito in un contesto che rende alcune sue parti inaccessibili (CA1), posizionato in modo tale da rendere difficile l'accesso dello strumento alle parti più in alto o più in basso del soggetto (CA2), oppure senza un adeguato spazio intorno per permettere un posizionamento agevole dello strumento (CA3). Altre criticità emergono per oggetti manipolabili che richiedono condizioni particolari, personale specializzato o attrezzatura specifica per la loro gestione (CA4, CA5, CA6)

Le criticità di questa categoria influenzano in maniera significativa il cantiere e richiedono molto lavoro e un notevole dispendio economico. È importante che queste necessità vengano esplicitate prima dell'inizio della campagna, in modo da poter predisporre gli strumenti aggiuntivi, gli spazi necessari e allestire correttamente le postazioni di digitalizzazione.

CA1 - Oggetto inamovibile, parte di una struttura più grande che ne occlude parti

La presenza di elementi strutturali e/o di arredo può complicare il rilievo, limitando i possibili posizionamenti dello scanner e i punti di ripresa fotografica. Statue su piedistalli, capitelli inseriti tra colonna e architrave (dove non sono accessibili né la superficie superiore né quella inferiore), nonché basi di statue o vasi esemplificano questa criticità. Tuttavia, in questi casi, l'area non digitalizzabile è di secondaria importanza e spesso è una superficie piatta, quindi, nei modelli derivati le lacune possono essere integrate.

Uno scenario comune è quello in cui l'oggetto non può essere rimosso dalla sua vetrina o teca, oppure la vetrina stessa non è rimovibile. Questo accade, ad esempio, quando la vetrina o il supporto del manufatto

sono parte di un allestimento storico, realizzati con materiali che non permettono una facile gestione senza danneggiare la struttura o il supporto dell'opera, richiedendo l'intervento di artigiani qualificati. In tali condizioni, il rilievo è fortemente condizionato dallo spazio limitato e dalla presenza di interfacce come vetro, plexiglas o metacrilato. Non esistono soluzioni universali per mitigare o eliminare queste problematiche; quindi, è sempre opportuno effettuare una valutazione accurata e una pianificazione dettagliata delle attività. Se la vetrina o la teca sono solo parzialmente apribili e lo spazio di manovra per operare con uno scanner è limitato, si rimanda a quanto detto in CA3 (vedi sotto). Nel caso in cui, nonostante la presenza della vetrina, sia possibile effettuare scatti fotografici per la ricostruzione fotogrammetrica, si raccomanda l'uso di filtri polarizzatori o, preferibilmente, dei *lens hood* * in silicone per eliminare i riflessi. In situazioni estreme, è consigliabile realizzare un modello prototipale per valutare in modo ragionato se sia possibile raggiungere risultati soddisfacenti



Figura 25. Esempio di CA1

CA2 - Oggetto inamovibile con porzioni troppo alte o troppo basse rispetto all'altezza dello strumento.

Una problematica molto frequente riguarda la collocazione dell'oggetto da acquisire: oggetti posti su piedistalli o fissati a pareti rendono difficilmente accessibili allo strumento le loro parti più alte. Per misurare queste parti, infatti, lo scanner o la macchina fotografica devono essere posizionati a una quota superiore rispetto a quella delle porzioni da acquisire.

Se l'altezza necessaria per inquadrare la parte superiore dell'oggetto supera la capacità di uno stativo standard per la digitalizzazione (circa 2 m), è possibile utilizzare **stativi telescopici** in grado di sostenere sensori controllati a distanza.

Quando l'oggetto raggiunge i 3 m o più, può essere necessario l'uso di un **trabattello** o addirittura di un **ponteggio**. Queste soluzioni, se risolvono il problema dell'altezza, possono a loro volta causare problemi di posizionamento, andando ad occludere l'oggetto e restringendo l'area in cui il sensore può essere posizionato.

Per le riprese fotografiche si può usare un'asta e, se le caratteristiche dell'ambiente lo consentono, potrebbe essere valutato l'uso di un drone da interni.

Analogamente, un oggetto posto a terra o su una base di piccole dimensioni può presentare problematiche simili: in quanto può essere difficoltoso o impossibile collocare lo strumento nelle posizioni ideali per acquisire le zone più basse dell'oggetto. Se non è possibile spostare l'oggetto, è opportuno considerare l'utilizzo di strumenti che consentano distanze di lavoro molto ravvicinate all'oggetto.





Figure 26a e 26b. Esempi di CA2

CA3 - Oggetto inamovibile senza sufficiente spazio libero intorno.

Nel caso di oggetti all'interno di nicchie, statue poste a poca distanza l'una dall'altra, manufatti prossimi a muri, parapetti o colonne, alcune porzioni o interi lati dell'oggetto possono risultare non acquisibili o digitalizzabili con difficoltà a danno della completezza e della qualità. Uno scanner ha un ingombro determinato e può prevedere una distanza minima di lavoro o una distanza fissa di messa a fuoco. In fotogrammetria, anche se le macchine fotografiche hanno *range* di messa a fuoco maggiore, un punto di ripresa molto vicino alla superficie inquadra aree di ridotte dimensioni. Questo comporta un maggior numero di immagini per coprire l'intera superficie e una elaborazione più laboriosa e meno stabile.

Una pianificazione accurata del processo di digitalizzazione tende a massimizzare l'area ripresa. Quando si usano sistemi a scansione è possibile integrare i dati dello scanner "principale" con riprese provenienti da scanner portatili o con diversi *range* di lavoro. Nel caso di impiego della fotogrammetria, è possibile integrare il set di dati riprendendo le aree meno accessibili con foto eseguite con camere o ottiche con maggiore angolo di campo o con distanza minima di messa a fuoco inferiore.



Figura 27. Esempio di CA3

CA4 – Oggetto che richiede condizioni ambientali specifiche per essere manipolato.

Si tratta di oggetti sottoposti a specifiche condizioni conservative, in contesti di illuminazione, temperatura e umidità controllate, che non possono essere alterate ai fini della campagna di digitalizzazione.

Ambienti a luce controllata

Le tecniche di digitalizzazione ottica necessitano di una componente luminosa (gli scanner proiettano un segnale luminoso sull'oggetto, la fotogrammetria origina da un processo fotografico). Gli scanner 3D possono operare in ambienti privi di illuminazione, poiché generano tramite un emettitore il segnale luminoso per la

misurazione. È da notare che il segnale luminoso emesso dagli scanner attivi non è normalmente dannoso per le superfici, visto che i valori effettivi di potenza della luce emessa sono molto ridotti e i tempi di illuminazione limitati a pochi secondi. Diversi strumenti consentono di configurare i parametri di emissione, riducendoli al minimo, comportando però esposizione più lunghe che incrementano il tempo di lavoro. In fotogrammetria è teoricamente possibile lavorare con una quantità di luce minima, ma questo richiede lunghi tempi di esposizione o l'uso di valori ISO elevati. Questo allunga i tempi di lavoro e può produrre foto con molto rumore, che influiranno negativamente sulla qualità del dato.

In caso di materiali molto sensibili alla luce (ad esempio vernici e pigmenti degradati), occorrerà sempre verificare, con il personale addetto alla conservazione, che la potenza e la frequenza della luce emessa dallo scanner o dalle sorgenti di illuminazione per la fotogrammetria siano compatibili con i requisiti di conservazione dell'oggetto.

Sia gli scanner attivi che la fotogrammetria richiedono ambienti con luce controllata. La luce solare diretta è spesso problematica e va evitata, in quanto può essere troppo intensa rispetto a quella emessa dallo scanner per misurare una superficie e può interferire con le frequenze utilizzate dal sensore. In fotogrammetria, la luce solare può essere troppo intensa e direzionale, rendendo difficile ottenere un'esposizione appropriata e rendendo la ricostruzione del colore non uniforme. Anche le luci fluorescenti possono causare problemi: sebbene l'occhio umano le percepisca come stabili, la loro luminosità oscilla (a 50 o 60 Hertz, a seconda del paese). Molti scanner compensano automaticamente gli effetti della luce fluorescente, mentre alcuni scanner possono avere problemi con luci di una specifica lunghezza d'onda. È quindi importante verificare queste condizioni nella postazione di digitalizzazione prescelta.

Per la fotogrammetria, l'illuminazione museale è generalmente inadatta, pertanto è opportuno creare un ambiente con illuminazione controllata e diffusa mediante studi fotografici portatili. In generale, la gestione della luce è una procedura standard nell'impostazione di una postazione di lavoro; non va quindi considerata una criticità specifica, ma una precondizione per ottenere una buona digitalizzazione.

Climatizzazione e ulteriori vincoli conservativi

Una diversa categoria di oggetti può richiedere condizioni specifiche di climatizzazione, come temperatura, umidità o un controllo fine della qualità dell'aria. Gli scanner, e in misura minore le fotocamere digitali, pur avendo limiti operativi in termini di temperatura e umidità, sono generalmente in grado di tollerare i *range* presenti nelle sale climatizzate.

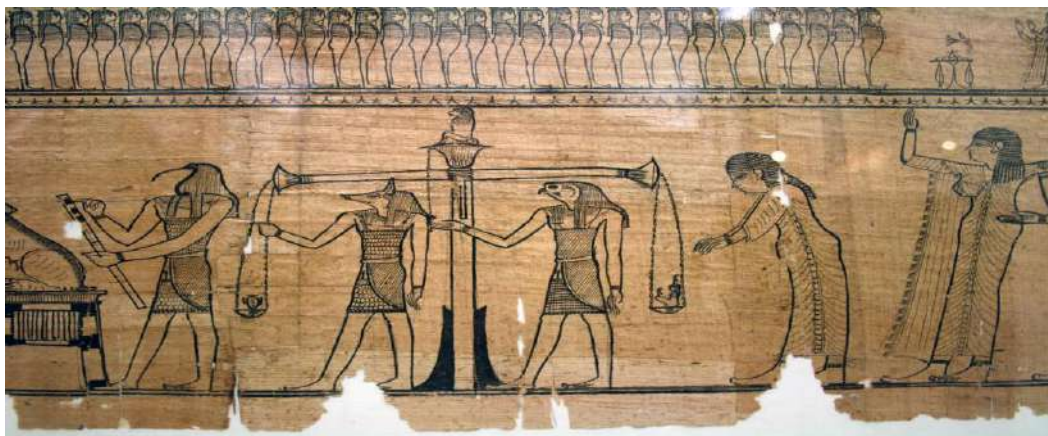


Figura 28. Esempio di CA4

CA5 - Oggetto manipolabile solo da personale autorizzato/specializzato.

È possibile che, per importanza, fragilità, valore, limitazioni assicurative o a causa dello stato di conservazione, un oggetto sia manipolabile solo da personale autorizzato/specializzato

In base alle esigenze, disponibilità, limitazioni e accordi specifici, si stabilirà se il personale specializzato debba essere fornito dal committente o dalla ditta appaltante, previa approvazione del committente.

CA6 – Oggetto che richiede strumentazione specifica per la movimentazione o per il supporto.

Per le dimensioni, il peso, o le condizioni di conservazione, un oggetto può richiedere una **strumentazione specifica per la movimentazione**, oltre a supporti che lo mantengano in una posizione stabile.

Manufatti di pietra di considerevole dimensione, possono essere spostati solo con argani, verricelli, o gru-cavalletti. Oggetti incompleti e frammentati, come statue di terracotta o legno, sono spesso montati su supporti che li mantengono in posizione verticale, sopperendo alla loro mancanza di parti. Questa criticità è simile alla CA2, dove un oggetto posto troppo in alto può richiedere una strumentazione specifica come l'uso di un trabattello, ma logisticamente più complessa, perché possono essere richiesti strumenti di movimentazione più particolari o realizzati appositamente.

Perché una digitalizzazione risulti completa è spesso necessario avere l'oggetto in una posizione specifica, e quindi disporre di apparati e/o strutture di supporto che permettano di posizionare il manufatto in tale posizione. Poi per acquisire tutta la superficie è spesso necessario collocare l'oggetto in posizioni diverse, questo può richiedere l'uso di supporti per evitare che il peso gravi su parti delicate (ad esempio la posizione capovolta sull'asse verticale, che risulterebbe in una statua "a faccia in giù").

Per complessità ed esigenze specifiche, questi supporti potrebbero dover essere realizzati su misura, questo aumenta i costi operativi, ma può velocizzare e rendere più completa e sicura la digitalizzazione.

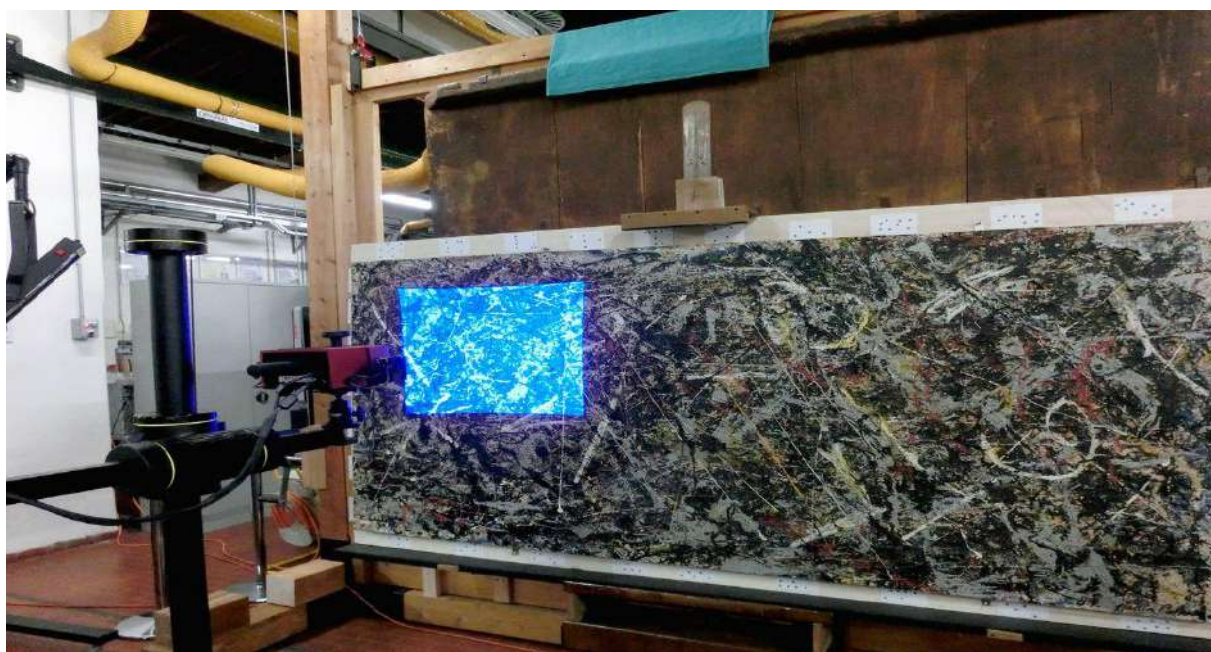


Figura 29. Esempio di CA6

3. PROCESSI E FASI DELLA PRODUZIONE DEI MODELLI 3D

Le attività legate alla digitalizzazione 3D dei beni storico-artistici museali, dalla preparazione dei cantieri alla creazione dei modelli tridimensionali, richiedono metodi di esecuzione e strumentazioni specifiche. Come ampiamente sottolineato, è necessaria una fase accurata di valutazione e pianificazione per garantire risultati di qualità, rispettando i requisiti e gli obblighi di tutela imposti dal committente. Pur rispettando le prescrizioni generali delle *Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale del PND*, che forniscono indicazioni di alto livello sulla digitalizzazione tridimensionale, i principali processi e fasi della produzione del modello 3D sono riassunti nella tabella seguente. Questa tabella offre una visione d'insieme che facilita la comprensione del ruolo, dei dati coinvolti e delle relazioni tra le varie fasi all'interno del processo complessivo.

Fase	Descrizione	Output	Sez.
Allestimento e preparazione delle postazioni di digitalizzazione	<p>Partendo dalla lista degli oggetti da digitalizzare e dalle loro caratteristiche, e valutando le criticità logistiche presenti, si allestiscono le postazioni di digitalizzazione nel cantiere.</p> <p>Le aree operative vengono definite e i <i>setup</i> di digitalizzazione vengono preparati, includendo postazioni di acquisizione, strumenti e allestimenti specifici.</p> <p>Le postazioni di digitalizzazione, le scelte operative e i vari <i>setup</i> vengono accuratamente documentati.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Documentazione del cantiere, delle postazioni di digitalizzazione, dei <i>setup</i> di acquisizione 	3.1
Acquisizione dati	<p>In questa fase viene effettuata la misurazione vera e propria degli oggetti.</p> <p>Le tecnologie e gli approcci sono stati scelti in base alle esigenze del progetto e alle caratteristiche degli oggetti da digitalizzare.</p> <p>La digitalizzazione utilizza i <i>setup</i> di digitalizzazione preparati nella postazione di acquisizione al passo precedente.</p> <p>I dati grezzi prodotti in questa fase, che serviranno nella fase successiva per la creazione del modello <i>master</i>, vengono archiviati in maniera ordinata per essere inclusi nel pacchetto di consegna.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dati grezzi per ciascun oggetto. • Documentazione del processo di acquisizione di ciascun oggetto. 	3.2
Elaborazione dati e generazione del modello master	<p>Per ciascun oggetto, i dati grezzi raccolti nella fase precedente vengono elaborati per generare il modello <i>master</i>.</p> <p>L'elaborazione varia in funzione della tecnologia utilizzata per la digitalizzazione, ma segue sempre un approccio documentale.</p> <p>Tutti i passaggi dell'elaborazione dei dati grezzi per ottenere il modello <i>master</i> vengono accuratamente documentati.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modello <i>master</i> per ciascun oggetto. • Documentazione del processo di elaborazione per ciascun oggetto. 	3.3
Post-produzione modelli derivati	<p>A partire dal modello <i>master</i>, vengono generati i modelli 3D derivati in base alle esigenze del progetto e alle richieste del committente.</p> <p>L'elaborazione di ciascun modello derivato dipende strettamente dal tipo di prodotto richiesto e dalle specifiche del progetto.</p> <p>Tutti i passaggi che portano alla generazione dei modelli derivati vengono accuratamente documentati.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelli derivati per ciascun oggetto. • Documentazione del processo di elaborazione per ciascun oggetto. 	3.4
Esportazione dati raw e modelli 3D	<p>Viene preparato il pacchetto di consegna, seguendo le indicazioni di queste Linee guida e le specifiche esigenze del progetto.</p> <p>I dati grezzi, il modello <i>master</i> e i modelli derivati vengono esportati in formati interoperabili.</p> <p>I dati grezzi in formato proprietario sono esportati dai <i>software</i> di controllo degli strumenti.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pacchetto di consegna. 	3.5

Tabella 2: fasi della produzione dei modelli 3D

Esiste un'attività trasversale a tutte le fasi considerate: la **documentazione del processo**, descritta nella sezione [3.6](#). Questa attività, utilizzando relazioni schematiche, mira a fornire una descrizione dettagliata delle varie fasi di lavoro, dalla preparazione delle postazioni di digitalizzazione e dei *setup* di acquisizione fino alla predisposizione dei modelli 3D del pacchetto di consegna. Queste relazioni, associate come **para-dati** ai modelli consegnati, forniscono **informazioni sul processo di creazione di un modello** (analogamente a come i metadati forniscono informazioni sull'oggetto stesso). I para-dati consentiranno una futura rielaborazione dei dati e serviranno come riferimento nella fase di collaudo successiva alla consegna, per valutare la correttezza documentale del *dataset* prodotto.

3.1. Allestimento e preparazione delle postazioni di digitalizzazione nel cantiere

Presso ciascun soggetto destinatario dovrà essere allestito un cantiere di digitalizzazione, che comprenda tutte le postazioni specifiche necessarie per l'acquisizione tridimensionale degli oggetti selezionati, sia movimentabili che non movimentabili. L'appaltatore sarà responsabile dell'allestimento di tutte le postazioni di digitalizzazione necessarie per svolgere correttamente le diverse attività.

Per garantire che le attività siano eseguite secondo le specifiche indicate nel presente documento, presso ogni postazione di digitalizzazione potranno essere impiegati diversi *setup* di acquisizione. Questi rappresentano una particolare configurazione o combinazione di strumenti utilizzati per erogare il servizio, come un *setup* per l'acquisizione tridimensionale mediante scanner o un *setup* per l'acquisizione fotogrammetrica. Ciascun *setup* dovrà essere adeguatamente documentato.

Preliminarmente alla scelta del luogo in cui allestire le postazioni di digitalizzazione, in aggiunta al rispetto delle normative vigenti in merito alla sicurezza sui luoghi di lavoro, è necessario che siano verificate le seguenti condizioni:

- la possibilità di governo della luce naturale (ad esempio al fine di agevolare l'acquisizione di oggetti riflettenti o l'uso di sistemi proiettivi di acquisizione);
- la disponibilità di spazi sufficienti per procedere alla settorializzazione del cantiere di digitalizzazione;
- l'adeguatezza degli impianti elettrici (valutare l'uso di quadri elettrici mobili da cantiere e prevedere la messa in sicurezza dell'impianto elettrico provvisorio ad uso del cantiere);
- la possibilità di isolare le postazioni di digitalizzazione, fuori dagli orari di lavoro, garantendo la sicurezza degli oggetti da digitalizzare che eventualmente siano stati temporaneamente posizionati presso l'area di movimentazione (vedi oltre);
- la valutazione della stabilità dei solai che sosterranno le postazioni di digitalizzazione per verificare l'assenza di vibrazioni, inopportune per le operazioni di acquisizione.

Una volta scelto il luogo in cui allestire la postazione di digitalizzazione, che soddisfi le condizioni di cui sopra, è necessario procedere alla **settorializzazione** per tipologia di lavorazione, distinguendo le seguenti aree:

- un'area di movimentazione dei beni (un'area in cui vengano temporaneamente posizionati, dal personale incaricato, gruppi di manufatti da digitalizzare nella giornata di lavoro e presso cui ricollocare gli oggetti già acquisiti);
- un'area di acquisizione (un'area in cui vengono allestiti i *setup* di acquisizione);

- un'area di stoccaggio delle strumentazioni di acquisizione (da prevedere nel caso in cui l'appaltatore desideri o necessiti lasciare apparecchiature presso il cantiere);
- un'area di verifica e primo processamento dei dati.

È necessario, per limitare lo spostamento dei beni, che l'area di movimentazione e quella di acquisizione siano nello stesso ambiente o immediatamente adiacenti.

3.2. Acquisizione dati

Il processo di acquisizione dipende dalle tecnologie utilizzate per la digitalizzazione del manufatto. Di seguito sono riportate le raccomandazioni per i flussi operativi di acquisizione delle tecniche di fotogrammetria e scansione attiva descritte in precedenza.

3.2.1. Fotogrammetria

Per impostare un progetto di acquisizione fotogrammetrica, è necessario gestire un flusso di lavoro complesso che include il settaggio della fotocamera, la definizione di uno schema di presa e di illuminazione. Per rispettare le prescrizioni sulla risoluzione della geometria e della *texture*, come descritto nelle sezioni **2.1.3** e **2.1.5**, è indispensabile effettuare un sopralluogo preliminare. Questo serve a verificare le condizioni operative e valutare la dimensione del sensore, il tipo di ottica e la distanza media di presa dall'oggetto. In questa fase, è anche importante identificare eventuali complessità legate all'oggetto del rilievo, al materiale di cui è composto, al contesto operativo, che potrebbero influenzare la successiva fase di *processing* (in particolare il riconoscimento dei *key-points*) come:

- proporzioni sbilanciate / dimensione prevalente (CG2);
- presenza di superfici sottili o punte/lame (CG7);
- oggetti non rigidi (CG8);
- mancanza di dettaglio geometrico (CG6);
- oggetto inserito in un contesto che ne occlude delle parti (CA1);
- non sufficiente spazio intorno all'oggetto (CA3);
- mancanza di dettaglio e di tessitura (CM1);
- superficie lucida (CM3, CM4);
- comportamento ottico problematico (CM2, CM5).

Dopo questa attività preliminare è possibile impostare il progetto di acquisizione fotogrammetrica:

- 1. Scelta di camera e ottiche.** La scelta della camera e in particolare delle ottiche dipenderà molto dalle dimensioni del manufatto e dalla possibilità di movimento attorno allo stesso. Per quanto riguarda i sensori, si raccomanda di impiegare almeno un sensore full frame (36x24 mm) o, se disponibile, un sensore di medio formato (43,8x32,9 mm). Per le ottiche, si consiglia di utilizzare sempre la stessa lunghezza focale e di prediligere ottiche fisse con lunghezza focale compresa tra 24-50mm.
- 2. Schema di presa.** Generalmente, nel caso di manufatti museali di dimensioni comprese tra i 15 cm e i 2 m, si opterà per un'acquisizione ad assi convergenti. Tale modalità può essere eseguita secondo due approcci:

- **utilizzando un piatto rotante o turntable.** Questo può essere utilizzato solo nel caso di manufatti di piccole dimensioni e con un peso adeguato ad essere gestito in sicurezza sul piatto. Il suo uso consente tempi di acquisizione più veloci, poiché il sensore è fisso ed è l'oggetto a essere movimentato (sez. [2.3.2](#));
- **spostando la camera attorno al soggetto.** In questo secondo scenario, sarà l'operatore a effettuare una serie di scatti attorno al manufatto da digitalizzare. Per seguire uno schema rigoroso e ordinato, è opportuno materializzare a terra (mediante adesivi) dei segnaposto che permettano di mantenere la distanza (vedi oltre) ed un angolo di presa costanti.

Per agevolare gli algoritmi di *feature detection* al riconoscimento dei *key-points* nella successiva fase di *processing*, occorre che gli scatti soddisfino queste condizioni operative:

- la corretta centratura e messa a fuoco del manufatto;
- la nitidezza dell'immagine, conseguente all'uso di una profondità di campo più estesa possibile (preferibilmente mai inferiore a f8);
- la corretta esposizione;
- l'utilizzo di valori ISO bassi per evitare il rumore digitale (non esiste una soglia massima di riferimento, poiché dipendente dal produttore della macchina fotografica; quando possibile si consiglia di utilizzare i valori minimi di 100-200 ISO);
- l'assenza di mosso o micro-mosso;
- l'alta percentuale di sovrapposizione tra le fotografie (70-80%);
- evitare cambi di prospettiva con angoli di presa troppo ampi;
- è sempre raccomandato l'uso di un treppiedi e un dispositivo per lo scatto remoto, qualora non sia possibile usare tempi di esposizione che escludano il rischio di mosso o micro-mosso;
- disabilitare qualunque funzione di *editing* automatico dell'immagine (come rotazione, stabilizzatore automatico, ecc.);
- disattivare, qualora presente, il **GPS** (*Global Positioning System*).

3. Calcolo della distanza di lavoro e progettazione della risoluzione

La risoluzione media (**d**) di una acquisizione fotogrammetrica è determinata dalla distanza di lavoro (**H**), la dimensione del sensore (**S**) e del pixel (**p**) ed è scelta, come illustrato precedentemente (sezioni [2.1.3](#); [2.1.5](#)) in funzione della dimensione dell'oggetto o delle *feature* che si vogliono rappresentare.

Poiché **S** e **p** sono costanti che dipendono dal *hardware* disponibile, risulta determinate il calcolo della distanza dal soggetto (**H**) che può essere calcolata secondo la seguente formula:

$$H = \frac{f \times d}{p}$$

ovvero, la distanza di lavoro (**H**) è uguale alla distanza focale (**f**) moltiplicata per la risoluzione media desiderata (**d**) divisa per la dimensione del pixel (**p**).

Ad esempio, considerando una macchina fotografica digitale con un pixel size (**p**) di 0.0054 mm/px, per ottenere una risoluzione (**d**) di 1 mm, confacente ad un oggetto di dimensione 2 m (vedi tabella risoluzione) e adoperando un'ottica con lunghezza focale da 50 mm, è necessario scattare ad una distanza (**H**) non superiore a 9 m

$$9.259 \text{ mm} = \frac{50 \times 1}{0,0054}$$

È conseguentemente ovvio che aumentando la dimensione del sensore (**S**) possa essere proporzionalmente aumentata la distanza di lavoro (**H**).

Questa formula si riferisce a un modello geometrico teorico; nella pratica, la distanza di presa varia in base alle sporgenze e concavità dell'oggetto, all'inclinazione della fotocamera e alle deformazioni ottiche. Pertanto, è buona pratica ridurre di 1/10 la distanza di presa (**H**) calcolata con la formula indicata.

4. Posizionamento dei target. Il numero e la posizione dei *target* dipendono dalla dimensione del manufatto e dallo schema di presa. È utile:

- utilizzare *target* codificati a riconoscimento automatico così da ridurre l'errore di posizionamento e ridurre i tempi di *processing*;
- distribuire i *target* intorno agli oggetti in modo che possano essere chiaramente visibili in più immagini;
- distribuire un numero sufficiente di *target* da usare sia come punti di controllo (CP) che come punti di verifica, (CKP). I *target* possono essere distribuiti secondo una delle seguenti configurazioni:
 - **configurazione con scale bar:** i *target* sono stampati su supporti rigidi, di forma lineare o a "L", devono essere distribuiti in modo omogeneo intorno all'oggetto che si intende rilevare garantendo una copertura completa di tutti i lati. La distanza tra i *target* sulla *scalebar* è nota, premisurata e certificata;
 - **configurazione con template:** si tratta di una griglia con numerosi *target* codificati, distribuiti in modo uniforme stampata su un supporto piano. In alcuni template, le coordinate dei *target* sono premisurate e riferite a un sistema locale arbitrario, mentre in altri le distanze tra i *target* sono note. Il template viene posizionato direttamente sotto il manufatto da acquisire, se l'operatore si muove attorno all'oggetto, oppure fissato su un *turning table* in modo da ruotare insieme al manufatto;
 - **configurazione libera:** i *target* sono distribuiti in modo strategico intorno al manufatto da acquisire, assicurandosi che la distribuzione sia uniforme su tutti i lati. La posizione e le distanze reciproche dei *target* sono ignote, e quindi gli stessi devono essere misurati per esempio con strumentazione topografica. Nella pratica questa configurazione è usata per lo più in ambito architettonico/paesaggistico o comunque su manufatti di grandi dimensioni.

5. Settaggio delle luci. La scelta e il settaggio delle luci devono essere valutati in concomitanza con le modalità di acquisizione fotografica, tenendo conto del triangolo dell'esposizione (ISO, tempo e diaframma), in relazione al contesto operativo e al materiale del manufatto da digitalizzare, in particolare se si tratta di superfici riflettenti. Come regola generale, il *setup* delle luci dovrebbe essere progettato per creare un'illuminazione diffusa e uniforme su tutta la superficie del manufatto. Ciò richiede l'uso di

più sorgenti luminose disposte attorno all'oggetto. A seconda delle dimensioni e della manovrabilità dei manufatti, è possibile realizzare diversi scenari di illuminazione:

- se l'oggetto è di piccole dimensioni (entro 1 metro nei tre assi) e movimentabile in sicurezza, è raccomandabile l'uso di **lightbox*** oppure **tavoli/set da fotografia still life*** abbinati a un piatto rotante su cui orientare il manufatto da rilevare;
- per oggetti di dimensioni maggiori è raccomandabile optare per **tende in stoffa traslucida, ombrelli o soft box** (diffusori) di grandi dimensioni, oppure **pannelli di polistirolo espanso** illuminati da luci poste all'esterno. Qualora l'oggetto non sia posizionabile su un piatto rotante è invece raccomandabile la preparazione di un *set* di luci diffuse orientate su tutti i lati mediante stativi verticali e/o giraffa. Se logisticamente possibile, è consigliabile l'uso di un fondale (in tela, carta o pvc a seconda delle necessità) di colore bianco per migliorare l'illuminazione diffusa (o colorato, nel caso sia necessario generare contrasto con un soggetto chiaro) e per facilitare la mascheratura del soggetto in fase di *pre-processing* con tecnica fotogrammetrica.

Per facilitare il controllo dell'esposizione è sempre consigliato l'utilizzo di un esposimetro esterno a luce incidente. Esso permette una maggiore accuratezza rispetto agli esposimetri integrati nelle macchine fotografiche e diventa indispensabile nel caso di utilizzo di flash.

L'impiego di un *target* di riferimento o *Color-Checker* è invece essenziale per il bilanciamento del bianco. Il *Color-Checker* deve essere fotografato frontalmente, a fuoco e ben esposto, deve occupare una porzione sufficiente della foto (circa il 10-15%) ed essere sempre illuminato dalla stessa luce che colpisce il soggetto. Ogni volta che il *setup* luci viene cambiato, è necessario acquisire nuovamente il riferimento colorimetrico.

3.2.2. 3D Scanner attivi

Per impostare un progetto di rilievo con sistemi a scansione, è sempre necessario effettuare un sopralluogo preliminare per verificare le condizioni operative. La valutazione delle caratteristiche del manufatto e l'identificazione di eventuali criticità relative all'accesso, alla geometria e ai materiali, come descritto nella sezione [2.3](#), sono fondamentali per la scelta della strumentazione, delle prassi operative e per l'adozione di misure di mitigazione delle problematiche individuate.

Un aspetto fondamentale da considerare è la gestione delle condizioni di illuminazione. È importante **evitare sempre la luce solare diretta**, poiché può compromettere le misurazioni. Inoltre, è necessario valutare la **compatibilità dello strumento con le sorgenti di luce** artificiale presenti sulla scena. Durante il sopralluogo, è utile identificare l'ambiente più adatto per la digitalizzazione nel caso di oggetti mobili, oppure prevedere l'uso di misure o infrastrutture per schermare la luce quando si trattano oggetti non movimentabili che presentano questo problema.

Una volta effettuate le opportune valutazioni, sarà necessario:

- verificare la necessità d'impiego di *target* a riconoscimento automatico utili alla registrazione delle singole scansioni;
- verificare la possibilità di impiego di piatti rotanti;
- determinare lo schema di acquisizione e il numero dei punti di scansione per garantire un rilievo completo o comunque ridurre al minimo le zone d'ombra. È sempre opportuno operare con ridondanza di dato soprattutto se si usano strumenti privi di tecnologie che permettono il

tracciamento e la visualizzazione in tempo reale della progressione del lavoro.

Per soddisfare i requisiti di risoluzione e qualità della *texture* descritti al punto [2.1.5](#), è fondamentale **valutare l'integrazione delle scansioni con una campagna fotografica finalizzata esclusivamente alla generazione della *texture*** (da realizzare in fase di elaborazione) dei modelli acquisiti. Lo schema di acquisizione e il numero di fotografie necessarie per la creazione della *texture* del modello 3D dovranno essere determinati caso per caso, tenendo conto della complessità geometrica del manufatto. Per quanto riguarda l'illuminazione, si dovrà fare riferimento a quanto indicato al punto 3 della sezione [3.2.1](#).

3.3. Elaborazione dati e generazione del modello *master*

Questa sezione descrive i flussi di lavoro per l'elaborazione dei dati e la generazione dei modelli *master*, in base alla tecnica utilizzata durante la fase di acquisizione.

3.3.1. Elaborazione dati da fotogrammetria

L'elaborazione di un modello *master*, ottenuto con fotogrammetria, si articola in due fasi: la predisposizione delle immagini acquisite durante la campagna di rilievo e successivamente l'elaborazione fotogrammetrica delle immagini editate.

Elaborazione fotografica.

Questa fase è propedeutica a quella fotogrammetrica e permette di **ottimizzare il *dataset* fotografico**. La gestione dei file *raw* avviene in *software* dedicati come *Adobe Lightroom* e *Camera Raw* (*software* commerciali) o *RawTherapee* (*software open source*) che permettono la gestione non distruttiva dei file. Sono raccomandate le seguenti elaborazioni:

- bilanciamento del bianco con il *Color-Checker*;
- correzione dell'esposizione;
- bilanciamento alte luci e ombre.

Se necessario, è possibile intervenire sulla correzione della nitidezza e sull'aberrazione cromatica, facendo attenzione a non introdurre artefatti.

È fondamentale che tali correzioni vengano **applicate in modo coerente a tutte le immagini**, per mantenere le corrispondenze necessarie per la calibrazione, l'orientamento e la generazione della geometria da parte del *software* fotogrammetrico.

Le correzioni delle distorsioni ottiche e i ridimensionamenti o ritagli delle immagini devono essere assolutamente evitati.

Infine, il *dataset* fotografico deve essere esportato in formato TIFF alla risoluzione originale.

Elaborazione fotogrammetrica.

Il *dataset* fotografico così ottimizzato viene elaborato in *software* dedicati quali *Agisoft Metashape*, *Reality Capture*, *3DF Zephyr*, *Artec Studio* (*software* commerciali), *Meshroom*, *Visual SFM* (*software open source*). Sebbene ogni *software* abbia strumenti, comandi e algoritmi specifici, il flusso di lavoro per la costruzione del modello 3D è costituito da passaggi *standard* obbligati. Di seguito si elencano quelli che devono essere necessariamente tenuti in considerazione per effettuare un corretto processo fotogrammetrico.

Fase di calcolo dei dati 3D:

1. importazione delle foto;
2. creazione automatica o manuale di maschere, se opportune o comunque nel caso in cui l'acquisizione sia stata condotta con tavoli rotanti;
3. avvio della fase SfM di calibrazione e orientamento delle camere mediante il calcolo automatico dei parametri interni ed esterni delle camere e ricostruzione della geometria mediante l'estrazione di una nuvola sparsa di punti;
4. applicazione di eventuali filtri per la rimozione di punti con errori di riproiezione sopra soglia;
5. riconoscimento automatico o manuale dei *target* (CP e CKP, vedi sezione [2.2.3](#));
6. allineamento del modello con i vincoli 3D importando le coordinate (o le distanze note) dei *target* riconosciuti (con conseguente scalatura e rototraslazione del modello in un sistema di riferimento) e calcolo a stelle proiettive (*bundle adjustment*) per ottimizzare l'allineamento delle camere e verificare l'errore;
7. *dense stereo matching*: calcolo delle *depth map* che assegnano ad ogni pixel dell'immagine un valore relativo di profondità e fusione volumetrica portando alla creazione della nuvola densa di punti;
8. applicazioni di eventuali filtri (ad esempio confidenza dei punti, classificazioni, colore) per eliminare il rumore o cancellare parti superflue dalla nuvola.

Fase di elaborazione del modello *master*:

- eventuale esportazione del modello di punti in *software* esterni come *MeshLab* e *CloudCompare* (*software open source*) o *Geomagic* (*software commerciale*) per un *editing* avanzato della *point cloud* e del *mesh processing* (vedi sezione [3.3.3](#)). Questo passaggio è consigliato nel caso in cui persistano criticità irrisolvibili o di più complessa gestione all'interno del *software* proprietario;
- calcolo della *mesh* triangolata;
- eventuale applicazione di ulteriori filtri per piccoli aggiustamenti della topologia: riempimento di piccoli buchi o rimozione di picchi. Tale operazione può essere condotta nel *software* proprietario o esterno (sez. [3.3.3](#));
- eventuale **decimazione*** del modello, se troppo complesso per un'agevole manipolazione. La decimazione riduce la complessità geometrica di un oggetto generando una nuova geometria con la stessa forma ma con meno triangoli. La decimazione non deve comunque violare la risoluzione minima prescritta (sez. [2.1.3](#));
- calcolo della *texture* secondo l'algoritmo più adatto al caso in lavorazione. Il numero e la risoluzione della *texture* sono determinati dal *texel* medio previsto in fase di acquisizione (sez. [2.1.5](#)).

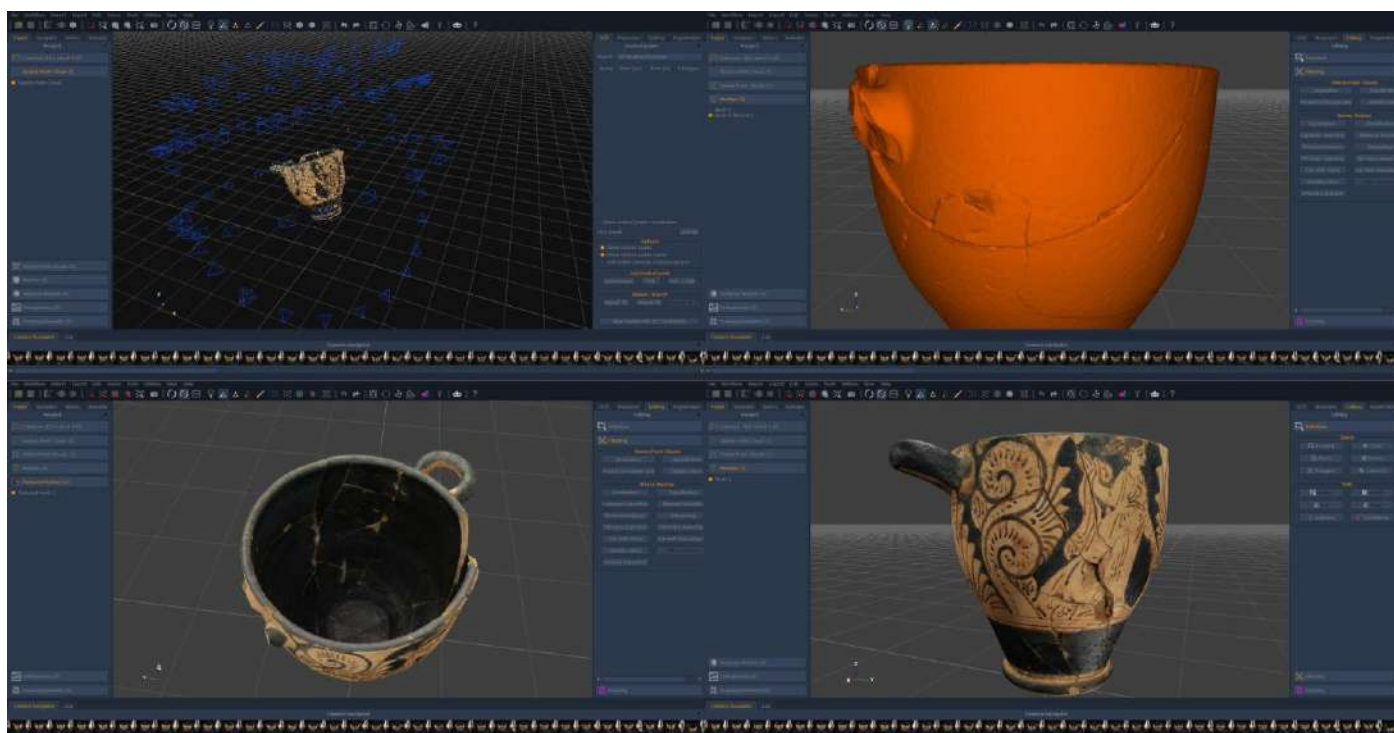


Figura 30. Fotogrammetria, post-processing CA6

3.3.2. Elaborazione dati da 3D scanner

L'elaborazione dei dati di misura ottenuti con sensori attivi, quali gli scanner 3D, viene generalmente svolta con i *software* proprietari a corredo degli strumenti di acquisizione. È possibile utilizzare *software* di terze parti, sia proprietari che *open source* (vedi sezione [3.3.3](#)), per elaborazioni specifiche. Tuttavia, per garantire la neutralità, caratteristica fondamentale dell'approccio documentale (vedi sezione [1.4](#)), si raccomanda di evitare soluzioni che non rientrano nei flussi di lavoro previsti dai *software* forniti con gli strumenti di acquisizione. Di seguito viene illustrato un tipico flusso di lavoro per questi dati. Molte delle fasi richiedono un intervento manuale, per una trattazione dettagliata delle operazioni consentite al fine di mantenere l'approccio documentale, si rimanda alla sezione [3.3.3](#).

Pulizia dati

Eliminare le aree estranee alla ripresa e correggere gli errori, riduce la quantità di dati da elaborare e migliora la qualità del *dataset*. Questa fase iniziale è prevalentemente manuale e deve essere eseguita su ogni singola acquisizione. Lo scanner cattura tutto ciò che inquadra, quindi è probabile che i dati grezzi contengano parti del supporto e del contesto dell'oggetto che devono essere rimosse. Alcuni errori di misurazione, come punti "fantasma" che fluttuano nell'aria, *spike* (punti che sporgono dalla superficie a causa di riflessi) o aree con alto rumore, possono essere individuati ed eliminati. A seconda della complessità e delle esigenze di funzioni avanzate, queste operazioni possono essere eseguite con *software* proprietari o di terze parti.

Allineamento delle riprese

Le singole riprese (*range map*), ciascuna originariamente in un proprio sistema di riferimento, vengono rototraslate in un unico sistema di riferimento, scelto dall'operatore, ricomponendo le diverse viste dell'oggetto. L'allineamento, o registrazione, si articola in due fasi: un primo allineamento grossolano basato

sulle caratteristiche della superficie e un successivo allineamento fine basato sulla sovrapposizione locale delle aree comuni utilizzando **algoritmi ICP*** (*Iterative Closest Point*). La prima fase può essere manuale, assistita o automatica e, in molti casi, può sfruttare la presenza di *marker* o *target*. La fase finale è un processo automatico e iterativo che termina quando è raggiunto il valore prestabilito per l'errore massimo di allineamento. La procedura di registrazione può variare leggermente tra strumenti che acquisiscono singole riprese, nei quali la registrazione avviene aggiungendo una ripresa alla volta (dopo ciascuna ripresa o al termine del rilievo), e sistemi *hand-held*, che effettuano l'allineamento grossolano in modo automatico e continuo durante la fase di acquisizione.

Il *software* di controllo dello scanner può eseguire l'allineamento anche durante la digitalizzazione, è comunque prassi consolidata che questo primo allineamento venga controllato e ottimizzato nelle elaborazioni successive alla digitalizzazione. L'allineamento comporta che le singole acquisizioni siano espresse in uno stesso sistema di riferimento; tuttavia, rimane un errore residuo (indicato dai *software* e spesso espresso come **RMSE***, *Root Mean Square Error*) a causa della natura dei processi di misurazione e allineamento. **L'errore residuo deve essere annotato nei metadati e nella relazione di processo.** Per un risultato corretto, **l'errore residuo dell'allineamento dovrebbe essere inferiore alla metà della risoluzione target dell'oggetto.**



Figura 31. Allineamento delle singole acquisizioni

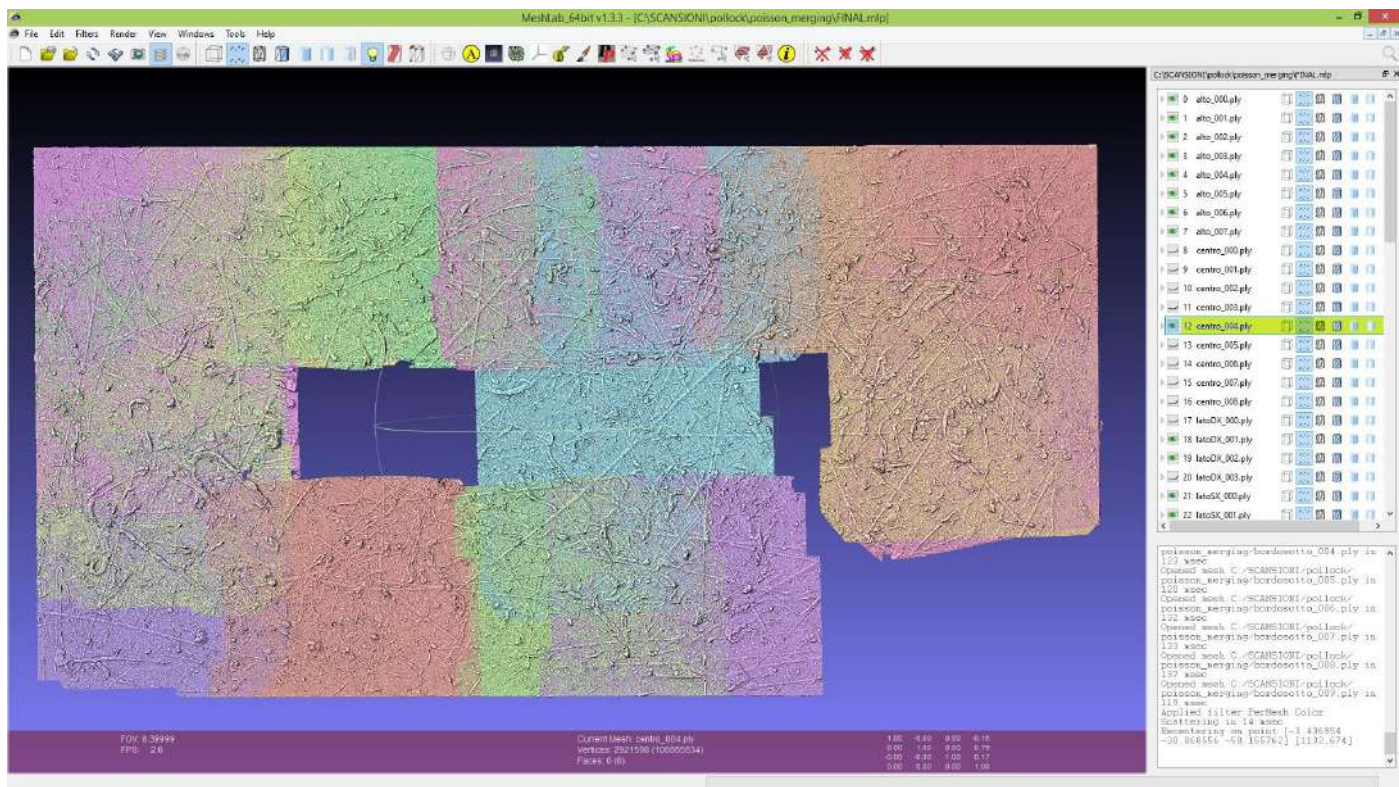


Figura 32. Unione delle singole acquisizioni

Pulizia dati e sotto-campionamento

Al termine dell'allineamento, quando tutti i dati sono espressi in un unico sistema di riferimento, è più facile percepire la forma completa dell'oggetto e individuare ulteriori aree che richiedono una pulitura con la rimozione di dati spuri o incoerenti. Inoltre, è possibile valutare la densità totale e locale dei dati misurati. Se i dati risultano troppo pesanti per l'elaborazione, si può procedere al sotto-campionamento per facilitare il processo, **sempre rispettando i requisiti di risoluzione geometrica minima**. A seconda della complessità e delle necessità di funzioni avanzate, queste operazioni possono essere eseguite con *software* proprietari o di terze parti.

Generazione della superficie

Dal dato allineato, la forma dell'oggetto può essere descritta come una *mesh* triangolata. Questa fase è detta anche *meshing*, *remeshing*, fusione, o triangolazione. Si tratta di una operazione automatica, generalmente controllata tramite un parametro principale che determina la risoluzione della *mesh* da cui deriva la dimensione obiettivo delle componenti (distanza fra i vertici, lunghezza degli edge). Il parametro di risoluzione scelto in questa fase deve essere conforme alle prescrizioni di risoluzione geometrica minima (sez. [2.1.3](#)).

Per facilitare l'utilizzo in ambienti CAD (*Computer-Aided Design*) o per produrre modelli 3D esteticamente migliori, il *software* di elaborazione può offrire opzioni aggiuntive per generare superfici più lisce e spigoli più definiti, o per ridurre il rumore tramite mediazione. Tuttavia, queste opzioni di miglioramento automatico sono da evitare ai fini di una digitalizzazione documentale, poiché alterano i dati misurati in modo poco controllato e arbitrario.

La creazione di una superficie continua a partire dai dati grezzi di scansione, comporta un processo di ricampionamento e interpolazione che può chiudere localmente le lacune presenti nei dati di *input*. La superficie di chiusura, è generata a partire dalle caratteristiche della superficie nell'area immediatamente circostante, è accettabile e non viola l'approccio documentale per le aree non digitalizzate con dimensioni vicine alla risoluzione di lavoro (cioè, lacune fino a cinque-sei volte la risoluzione *target*). Per aree più estese, è opportuno eliminare nel modello *master* le zone interpolate. Queste aree possono essere individuate automaticamente in base alla dimensione dei triangoli generati, alla loro inconsistenza con le aree limitrofe, o perché marcate direttamente dall'algoritmo di generazione della superficie. Ad esempio, la famiglia di algoritmi *Poisson merging*, ampiamente utilizzata nei *software* di elaborazione, genera sempre una superficie chiusa, interpolando anche lacune di grandi dimensioni, ma contrassegna le aree interpolate, facilitandone la selezione e l'eliminazione.

Pulizia e ottimizzazione del modello

Sulla *mesh* triangolata, per ottenere una migliore rappresentazione, possono essere eseguiti piccoli interventi.

La geometria generata può contenere errori topologici come indicato nella sezione [2.1.2](#) (vertici duplicati o non riferiti, facce degeneri, elementi *non-manifold*), auto-intersezioni, aree estranee non connesse alla geometria principale, errori di ricostruzione dovuti a rumore o dati spuri. La soluzione a queste frequenti problematiche si ottiene con minimi interventi di filtraggio automatico o pulizia manuale senza inficiare la validità documentale del risultato. Lo scopo è quello di migliorare la visualizzazione della superficie reale eliminando quegli elementi che non la rappresentano realisticamente e che compromettono l'usabilità del modello stesso.

Il modello di superficie può essere decimato se risulta troppo complesso per un'agevole manipolazione. La decimazione riduce la complessità geometrica di una superficie generando una nuova geometria con la stessa forma ma con meno triangoli. **La decimazione non deve comunque violare la risoluzione minima prescritta** (sez. [2.1.3](#)). Anche in questo caso, questo processo, per complessità o necessità di funzioni avanzate può essere eseguito con *software* proprietari o di terze parti.

Texture mapping

Sulla geometria del modello viene costruita la *texture* e la mappatura UV, a partire da foto calibrate ed orientate nello stesso sistema di riferimento del modello. Alcuni scanner e i relativi *software* di gestione sono in grado di generare una *texture*, partendo da foto catturate durante la scansione, ma in genere non sono in grado di ottenere un risultato che **rispetti le prescrizioni di risoluzione delle texture per il modello master** (sez. [2.1.5](#)). In questi casi, sarà necessaria un'acquisizione fotogrammetrica ed effettuare il *texture mapping* nel *software* di *fotogrammetria* importando il modello di superficie ottenuto dall'elaborazione dei dati scanner. Tuttavia, se il *software* dello scanner ha la possibilità di utilizzare immagini esterne per generare la *texture*, allora è possibile effettuare il *texture mapping* direttamente con il *software* a corredo dello strumento, così da conservare la neutralità prevista secondo l'approccio documentale. In questo caso, sarà sufficiente scattare un numero di foto adeguate a coprire tutta la superficie del soggetto (sez. [3.2.2](#)), considerando sempre le prescrizioni della risoluzione della *texture*.

Orientamento e posizionamento del modello

I dati grezzi sono espressi in un sistema di riferimento locale, temporaneo, che non è quello definitivo richiesto dal progetto di digitalizzazione. Usando operazioni rigide di rotazione e traslazione, il modello, avrà **un orientamento e una origine secondo le esigenze del progetto di rilievo** (sez. 2.1.1). Questo processo avviene con il controllo diretto dell'operatore, oppure usando riferimenti esterni derivati da *marker/target* o misurazioni specifiche. Questa fase si svolge, a discrezione dell'operatore, prima della creazione della *texture* e secondo considerazioni di praticità.

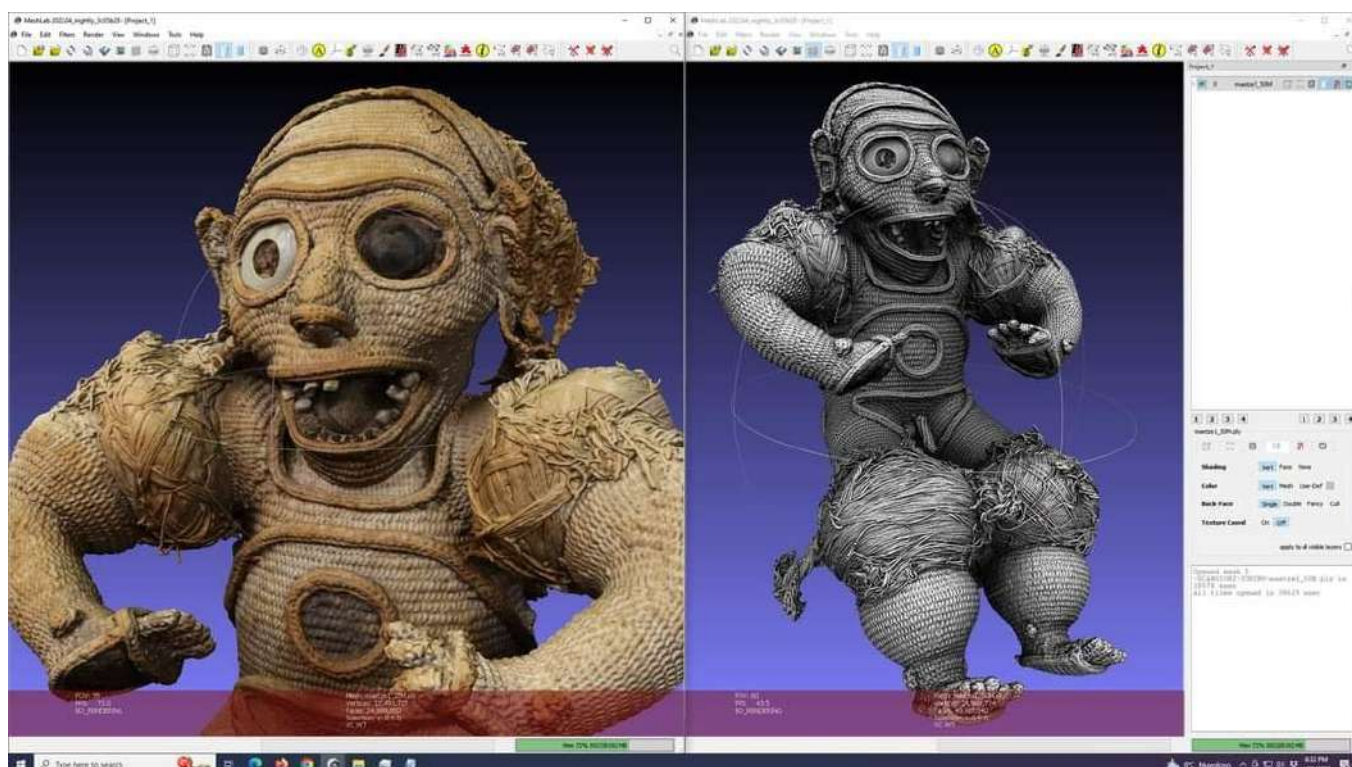


Figura 33. Modello da scansione con texture fotogrammetrica

3.3.3. Elaborazione dei modelli 3D

La distinzione tra i termini *pre-processing*, *processing*, *post-processing*, elaborazione e ottimizzazione è spesso fuorviante, poiché indica la fase di un processo, piuttosto che il tipo di attività eseguita. Tutte le elaborazioni, infatti, manipolano dati 3D e possono essere applicate indipendentemente dalla natura dei dati (nuvole di punti, *range map*, modelli triangolati) e dalla fase del loro ciclo di vita (dati grezzi, modelli 3D intermedi, modello *master* e modelli derivati). Premesso questo, è essenziale **distinguere le operazioni che consentono di mantenere la neutralità di un modello**, e quindi che possono essere applicate per la creazione del modello *master* senza comprometterne l'approccio documentale, da quelle che appartengono a una fase successiva di realizzazione ed elaborazione dei modelli derivati.

Attualmente, la maggior parte dei dispositivi di scansione attiva dispone di *software* di controllo che supportano tutte le fasi di elaborazione. Quindi, è consigliabile eseguire l'elaborazione direttamente all'interno dei *software* proprietari, che sono ottimizzati per sfruttare al meglio i dati grezzi rispetto a *software* esterni. I *software* proprietari sono sviluppati e calibrati secondo le caratteristiche dei dati prodotti dagli strumenti e hanno accesso a dati interni dello strumento spesso non esportabili. Allo stesso tempo è

necessario valutare con attenzione le funzionalità per il miglioramento (*smoothing*, interpolazione, lisciatura o completamento) spesso presenti in questi *software* perché possono alterare i dati in modo indiscriminato, come discusso nella sezione 3.4.

Durante la creazione e l'ottimizzazione del modello *master*, è possibile eseguire diverse elaborazioni con l'utilizzo sia di *software* proprietari che esterni, pur mantenendo la neutralità dell'approccio documentale. Tra queste, la pulizia dei dati con la selezione e l'eliminazione di aree di dato estranee o errate, la pulizia topologica, con la correzione automatica locale di imperfezioni della struttura della *mesh*, la trasformazione del sistema di riferimento (sez. [2.1.1](#)), con il cambio dell'orientamento e del posizionamento e la modifica della unità di misura tramite scalatura. Va evidenziato che, nel processo fotogrammetrico, l'assegnazione della scala è una fase essenziale che deve essere eseguita una sola volta, durante la creazione del modello *master*, in modo controllato e non più alterata. È possibile applicare processi di decimazione e sottocampionamento, ma solo in situazioni di estrema ridondanza dei dati e sempre nel rispetto delle indicazioni di risoluzione obiettivo (sez. [2.1.3](#)).

Sono invece da evitare le operazioni di **denoising*** locale o applicate in modo manuale, che tendono a modificare la geometria in maniera sensibile e poco controllata. Allo stesso modo non si devono usare operazioni che deformano il modello 3D, anche localmente, e che alterano la geometria spostando i vertici o le facce. Per garantire la minor autorialità possibile al modello *master* e quindi la massima aderenza all'approccio documentale, sono da prediligere le procedure di *filtraggio* basate su parametri (e dunque standardizzate, documentabili e ripetibili) applicate all'intero modello in maniera automatica.

Per la produzione dei **modelli derivati** è necessario l'utilizzo di *software* di *post-processing*. Questi possono variare a seconda della tecnica/dispositivo di acquisizione utilizzato e del modello derivato che si desidera ottenere.

Questi possono essere sommariamente distinti in:

- **software di editing.** In questa categoria ricadono i **point-cloud e mesh processing software** tra cui *Meshlab*, *CloudCompare* (*software open source*) e *Geomagic* (*software commerciale*) che possono essere impiegati per interventi automatici sia sui modelli *master* che su quelli derivati. Questi applicativi consentono, ad esempio, la pulitura della nuvola di punti e della *mesh*, la scalatura, il posizionamento e l'orientamento dei modelli, la decimazione e il *remeshing*, l'*editing*, la chiusura di piccoli buchi;
- **software di modeling.** Appartengono a questa categoria i **2D e 3D modeling software**. Tra i prodotti più noti di questa categoria ci sono, ad esempio, *Blender* (*software open source*), *Autodesk 3DsMax* e *Maya* (*software commerciali*). Questi, salvo casi particolari (sez. [2.1.6](#) e [3.4.1](#)), devono essere impiegati esclusivamente sui modelli derivati perché nell'*editing* di modelli da scansione consentono interventi autoriali (decisi dall'operatore mediante controllo puntuale sull'operazione) potenzialmente molto invasivi quali l'alterazione della topologia, la modellazione *from scratch* di estese aree mancanti, la clonazione del colore nelle *texture*.

La tipologia degli interventi ammissibili sui modelli derivati è discussa in dettaglio nella sezione [3.4](#).

3.4. Post-produzione dei modelli derivati

Gli interventi di *post processing* sui modelli derivati dipendono fortemente dai loro possibili scenari d'uso. In questa sede si farà riferimento a quanto descritto alla sezione [2.1.6](#) ovvero:

- **modello derivato con integrazioni manuali in computer grafica** per completare porzioni lacunose che non è stato possibile acquisire strumentalmente (sez. [3.4.1](#));
- **modello derivato per una consultazione interattiva** su piattaforme online e in servizi online offerti dalla stessa piattaforma, ad esempio per uso didattico, il derivato di un oggetto complesso, andrà semanticamente scomposto e caratterizzato nelle sue parti funzionali;
- **modello derivato composto**, ovvero risultante dalla ricomposizione di elementi di un contesto smembrato o frammenti dell'oggetto digitalizzati separatamente (CG9, sez. [2.3.0](#)) oppure da ricomposizione di più pose di un oggetto mobile acquisite attraverso diversi *setup* di digitalizzazione (CG8, sez. [2.3.0](#));
- **modello derivato di un oggetto dinamico**, ovvero con un meccanismo mobile di funzionamento, animato in modo realistico e dettagliato (CG10, sez. [2.3.0](#)). Per realizzare l'animazione l'esperto di digitalizzazione sarà affiancato da un esperto di computer grafica o di *motion capture*;
- **modello ridotto** da visualizzare come *thumbnail/preview* 3D su piattaforma;
- **modello 3D stampabile** per una replica fisica del modello digitale.

Di seguito si indicano alcuni possibili interventi di ottimizzazione e integrazione sui modelli derivati. Oltre agli interventi con *Point-cloud* e *mesh processing software* descritti nella sezione [3.5](#), potrebbero essere impiegati *2D* e *3D Modelling software* che prevedono anche interventi autoriali sul modello 3D e sulle *texture* (vedi anche sottosezione successiva):

- **preparazione e settaggio di materiali con modello PBR (*Physically-Based Rendering*)** per l'impiego dei modelli 3D in scenari interattivi online e offline di realtà virtuale. Per una rappresentazione fotorealistica del colore sul modello, tali materiali prevedono, oltre alle *texture diffuse/albedo*, anche l'impiego di *texture* aggiuntive che vanno a simulare determinate proprietà fisiche del modello; rientrano tra queste:
 - *roughness*: simula la rugosità della superficie di un oggetto e di conseguenza la nitidezza dei riflessi;
 - *metalness*: definisce se una superficie è conduttiva o dielettrica;
 - *normal*: simula i dettagli di una superficie (depressioni e sporgenze) attraverso l'inclinazione della normale;
 - *ambient occlusion* (AO): simula effetti di illuminazione diffusa (come l'ombreggiamento delle superfici);
- **editing/sculpting della topologia** per chiudere grandi lacune della *mesh* e ricostruire parti mancanti di un oggetto dovute al sotto-campionamento o all'impossibilità di acquisire determinate aree durante il rilevamento. Quest'ultimo caso si verifica quando un oggetto presenta sottosquadri che impediscono l'accesso o la visibilità ai dispositivi di rilievo (ad esempio, le pieghe molto ravvicinate in un pannello) oppure quando certe aree di un manufatto non movimentabile sono occluse per contatto o vicinanza con un altro oggetto (ad esempio, la parte posteriore di una statua posta in nicchia). Tale intervento può anche essere necessario per eseguire una stampa 3D (che prevede di

un modello a “tenuta stagna” o *watertight*), oppure per ricostruire le parti mancanti nel caso del restauro digitale di un manufatto;

- **remeshing** per ottenere una *mesh* con una topologia più regolare e uniforme, passando ad esempio da *tris* (maglia triangolare con facce a tre bordi) a *quad* (maglia quadrangolare con facce a quattro bordi). Lavorare con quadrilateri può infatti semplificare il flusso di lavoro ed offrire un approccio più intuitivo alla gestione della topologia del modello con operazioni manuali che agiscono sulle componenti della *mesh* (vertici, spigoli e facce). Tale intervento può essere applicato, ad esempio, per utilizzare il modello in applicazioni di restauro digitale o ricostruzione virtuale, o per implementare i modelli su piattaforme interattive on line o offline;
- **rigenerazione di coordinate UV** per ricalcolare e applicare in modo più efficiente la *texture* su un modello 3D e per ottimizzarne la mappatura UV (vedi *infra*);
- **ottimizzazione della mappatura UV** evitando sprechi di spazio *texture*, spesso causati dai processi automatici di *texture building* nella fotogrammetria e per generare *unwrapped texture* (frutto cioè dello “srotolamento” o dell’appiattimento di una superficie 3D su un piano) più facilmente editabili con *software* di grafica 2D (ad esempio, per intervenire su piccole lacune o eseguire correzioni di colore e tonalità). Tali interventi sono spesso necessari quando è previsto l’impiego di un modello in scenari 3D interattivi online e off-line;
- **texture painting**. Questo intervento permette di clonare o applicare il colore in aree prive di questa informazione, per correggere effetti **ghosting*** (generati in seguito a piccoli errori di allineamento camere nei processi fotogrammetrici e non risolvibili in fase di *processing*), o per un restauro digitale, quando si desidera ricostruire le porzioni di colore perdute di un manufatto e ripristinare le sue presunte fattezze originali;
- **conversione del modello** in formati di interscambio o formati specifici per utilizzo in determinati scenari (ad esempio STL per la stampa 3D).

Diversamente dai modelli *master*, non è opportuno indicare degli specifici **valori di soglia per la risoluzione dei modelli derivati**, in quanto la loro risoluzione dipende dalle finalità d’uso.

3.4.0. Impiego della modellazione manuale in computer grafica nei modelli derivati

Nelle operazioni di digitalizzazione di beni culturali si può presentare la condizione di non poter accedere a tutte le parti dell’oggetto, a causa di criticità inerenti alla sua forma (CG3 o CG4, sez. [2.3.0](#)), al materiale (CM7, sez. [2.3.1](#)) o al contesto di acquisizione (CA1, CA2 o CA3, sez. [2.3.2](#)). Un’istanza condivisa nell’ambito della digitalizzazione tridimensionale dei beni culturali, finalizzata ad una variegata platea di fruitori, è di presentare oggetti digitali compiuti e auto-consistenti. Inoltre, diverse categorie di modelli 3D possono fortemente avvantaggiarsi delle potenzialità del digitale per esprimere pienamente il significato e la funzione dell’oggetto rappresentato. Si pone in questi casi una scelta metodologica circa l’opportunità di ricorrere alla **modellazione manuale per il completamento del modello 3D derivato**.

[1.4](#)La modellazione manuale in computer grafica di un modello 3D rappresentativo di un oggetto culturale introduce l’elemento **dell’interpretazione**, il cui esito, non essendo ripetibile scientificamente, perché condotto senza l’ausilio esclusivo di processi automatici guidati da parametri matematici, potrebbe variare a seconda dell’operatore che esegue la modellazione. Inoltre, la modellazione manuale sovente richiede competenze diverse da quelle dell’operatore tecnico addetto alla digitalizzazione.

La modellazione manuale dei modelli derivati in computer grafica, così come l'elaborazione sperimentale tramite algoritmi di intelligenza artificiale (sez. [1.2.1](#)), sono pratiche ammissibili per offrire soluzioni più efficaci in termini di comprensione, di rappresentazione e di fruizione dell'oggetto digitalizzato (sez. 2.1.6). È il caso, ad esempio, di elementi ben visibili e accessibili dell'oggetto la cui geometria è tuttavia molto difficile o **impossibile da acquisire strumentalmente**, come ad esempio le piume che decorano un cappello (CM7, sez. [2.3.1](#)).

Le altre tipologie di oggetti che potrebbero beneficiare di un intervento di modellazione sono:

- **oggetti non rigidi**, ad esempio una collana flessibile (CG8, sez. [2.3.1](#)): in questo caso le diverse pose acquisite con diversi *setup* possono essere allineate tramite processi manuali o automatizzati (AI) in computer grafica;
- **oggetti frammentari**, ad esempio una statua rotta non riassemblata, oppure un **contesto smembrato** in più parti ognuna delle quali sia conservata presso un diverso museo (CG9, sez. [2.3.0](#)): in questo caso i frammenti o i singoli elementi possono essere riassemblati per ricomporre il contesto originario tramite processi manuali o automatici (AI) in computer grafica;
- **oggetti dinamici**, ovvero dotati di meccanismi mobili, ad esempio un'antica macchina a stampa a caratteri mobili, un carillon, un automa (CG10, sez. [2.3.0](#)): in questo caso è possibile animare, in modo realistico e dettagliato, i meccanismi dell'oggetto attraverso un'operazione di **rigging** del modello *mesh*. Qualora il meccanismo dell'oggetto originale reale sia ancora funzionante, l'animazione potrà essere guidata da una misurazione e acquisizione del movimento reale attraverso tecniche di **motion capture** (previa autorizzazione e assistenza del personale conservatore).

I file derivati dal *master* vengono generati in funzione di determinati **scenari d'uso**: videogiochi, applicazioni di realtà virtuale con usi narrativi, *storytelling* e in tutti i contesti audiovisivi in cui l'utente si trova coinvolto in una esperienza fisica, cognitiva, emozionale, per cui lo scenario deve essere consistente e credibile ai fini dell'immedesimazione nell'esperienza virtuale.

La replica di oggetti museali con stampa 3D rappresenta un potenziale utilizzo per il quale è possibile applicare delle operazioni manuali sul modello derivato per predisporre lo stesso alla stampa. Le repliche fisiche 3D costituiscono interfacce tattili utili a incrementare l'accessibilità degli oggetti anche a persone con disabilità visiva e cognitiva, ma sono anche utilizzate in installazioni multimediali ibride, dove non sia possibile accostare l'oggetto reale ai contenuti digitali (ad esempio, in ambienti di **mixed reality***). Le repliche fisiche ampliano la fruizione in occasione di indisponibilità dell'originale (per prestiti, restauri, private), e possono essere commercializzate con il *merchandising*. Tutto il processo per la predisposizione dei modelli 3D alla stampa (riempimento delle lacune, definizione della finitura, conversione dei formati, scelta dei materiali per la stampa) devono essere opportunamente valutate da personale competente.

In ogni caso, le integrazioni del modello derivato devono essere eseguite con l'obiettivo di conservare la **massima verosimiglianza rispetto all'oggetto rappresentato**, mantenendo i principi di **plausibilità** (ovvero essere scientificamente ragionate, giustificate e documentate), di **riconoscibilità** e limitandone quanto più possibile il numero e l'entità. Si raccomanda di attestare e argomentare tali processi, sia nella scheda di documentazione riferita alla post-elaborazione del modello derivato (sez. [3.6.3](#)), sia nel file dei metadati dell'oggetto digitale indicando le operazioni compiute (sez. [4.2](#)).

Alcune modalità con cui rendere riconoscibili le operazioni effettuate possono essere:

- evidenziare sul modello 3D, con **annotazioni semantiche** o tramite **mappatura a colori**²³, quali porzioni sono il frutto di una misurazione strumentale e quali sono il risultato di un intervento manuale, automatico o semi-automatico volti a emendare le lacune; a tal fine può essere prodotto un ulteriore derivato capace di sottolineare (ad esempio, per mezzo di materiali arbitrari, non realistici) le operazioni eseguite sul modello;
- rendere l'elemento risarcito un elemento autonomo nella scena 3D, allineato al modello frutto della misura strumentale senza che i vertici delle due geometrie siano saldati fra di loro.

Rimane confermato il **principio di oggettività del modello *master***, ovvero il modello alla massima risoluzione e accuratezza, frutto della sola elaborazione diretta della misura strumentale. Il modello *master* presenterà delle lacune in quelle porzioni del manufatto che il sensore non è riuscito a raggiungere.



Figura 34. Esempio di modello derivato. Stampa 3D, anastilosi

²³ Pietroni E., Ferdani D., 2021

Pietroni E., Menconero S., Demetrescu E., 2022

Pietroni E., Manconero S., Ghedini F., Botti C., 2022



Figura 35. Esempio di modello derivato. Ri-colorazione

3.5. Esportazione dei dati *raw* e dei modelli 3D

La produzione dei modelli tridimensionali si conclude con l'esportazione dei dati acquisiti ed elaborati: dati *raw*, il modello *master* e i modelli derivati. Durante le fasi di acquisizione, elaborazione e post-produzione, gli operatori utilizzano i formati e le convenzioni specifiche dei vari strumenti *hardware* e *software* impiegati. Nella fase di esportazione dei dati per la creazione del pacchetto di consegna, come illustrato nella sezione [1.6](#) sui principi FAIR, è fondamentale utilizzare formati robusti e *standard* interoperabili. Questo assicura il massimo riutilizzo dei dati e facilita la loro manipolazione e integrazione tra diversi servizi.

Nelle sezioni che seguono, vengono illustrati i formati più utilizzati, mettendo in risalto le loro caratteristiche di interoperabilità, le tipologie di *asset* supportate e la perdita di informazione associata a ciascun formato.

3.5.1. Formati non interoperabili

La maggior parte degli strumenti *hardware* di scansione e i loro relativi *software* di gestione utilizzano **formati proprietari non interoperabili** dei quali le specifiche tecniche complete non sono liberamente disponibili. Per costruire un *dataset* di consegna completo che consenta di ricostruire il processo di digitalizzazione nella sua interezza, ed eventualmente di ripercorrere le fasi di elaborazione e processamento dei dati, è **necessario includere i file di progetto proprietari** prodotti in fase di acquisizione e non modificati dall'elaborazione. La disponibilità dei file proprietari consente, in caso di necessità, di intervenire a

posteriori, sul dato originario acquisito; Inoltre, tali dati includono informazioni di misura e para-dati che non potrebbero essere ottenuti in altro modo. Solo se esplicitamente richiesto dal committente è possibile fornire pacchetti di consegna composti dai soli modelli *master* e derivati post-prodotti, privi dei file in formato proprietario risultanti dalla fase di acquisizione.

3.5.2. Formati interoperabili per dati 3D

Questa sezione descrive alcuni dei principali formati interoperabili adottabili per i modelli *master* e *derivati*, prodotti nelle fasi descritte nel capitolo 3, distinguendo opportunamente i formati che introducono potenzialmente una perdita di informazione. Nel caso dei formati derivati, questi si basano su *standard* internazionali consolidati e ampiamente adottati nel settore. Vengono evidenziati i formati particolarmente adatti al *delivery*, come ad esempio quelli per la fruizione interattiva dei modelli 3D. Le due sottosezioni seguenti includono tabelle che illustrano le principali caratteristiche dei formati descritti, fornendo un quadro delle loro proprietà e dei diversi scenari di utilizzo.

Formati lossless

I formati interoperabili che appartengono a questa categoria non introducono perdita di informazione (*lossless*), e per questa ragione possono sempre essere convertiti in altri formati di degradazione dei dati, a seconda delle necessità. Utilizzare uno di questi formati garantisce quindi una maggiore versatilità.

	OBJ	PLY	E57	LAS/LAZ	XYZ
Tipo file	ASCII	ASCII o binario	binario	binario	ASCII
Mesh	x	x			
Point Cloud		x	x	x	x
Colore	x	x	x	x	x
Normal	x	x	x		x
Texture	x	x			

Tabella 3: caratteristiche principali dei formati interoperabili lossless

- **Wavefront OBJ (.obj):** è un formato originariamente sviluppato in ambito commerciale, poi diventato di libero utilizzo. È il formato più comunemente usato nella grafica 3D, supportato dalla maggioranza degli applicativi per l'interscambio di dati con altri programmi. Il formato rappresenta solamente la geometria 3D, ovvero la posizione di ogni vertice, la posizione di ogni coordinata UV per le *texture*, le normali e le facce (triangolari o poligonali) che compongono il modello. Viene generalmente accompagnato da un file di materiale (.mtl) che definisce alcune proprietà visive, includendo anche riferimenti a *texture* come file immagini esterne. Il formato OBJ è un formato testuale o **ASCII*** (*American Standard Code for Information Interchange*), all'interno del quale entità e numeri sono salvati come testo: questa caratteristica comporta che i file OBJ siano generalmente di grandi dimensioni, e che possono talvolta presentare problematiche di cancellazione numerica dovuta al troncamento dati, soprattutto con dati con coordinate geografiche assolute.
- **Polygon File Format (.ply):** anche conosciuto come "*Stanford Triangle Format*", questo formato è stato progettato per memorizzare dati 3D provenienti da laser scanner. Il formato PLY²⁴ è molto flessibile (ed estensibile) e può contenere diverse entità e componenti, specificate nel suo *header*.

²⁴ Specifiche formato PLY: <http://paulbourke.net/dataformats/ply/>

Nasce per contenere *mesh* poligonali (triangoli, ma anche poligoni a n facce), ma può contenere anche solo nuvole di punti. Pur supportando il colore per vertice/faccia e *UV mapping*, supporta in modo limitato i materiali complessi (PBR), quindi non è una scelta adatta per memorizzare quel tipo di informazione. Un file PLY può essere salvato come ASCII o binario (l'*header* del file è sempre ASCII); l'*encoding* binario riduce la dimensione del file rispetto a quello ASCII.

- **Stereolithography STL (.stl):** è un formato originariamente sviluppato in ambito commerciale, poi diventato di libero utilizzo. È il formato più usato per controllare le stampanti 3D, inoltre essendo molto facile da leggere e scrivere è molto utilizzato per l'interscambio di dati fra *software* diversi. Per sua natura, il formato STL gestisce unicamente mesh di triangoli e non memorizza tutte le possibili informazioni di un modello 3D. Un file STL contiene solo la geometria dell'oggetto (vertici e triangoli), ma con estensioni può memorizzare anche il colore per vertice. La geometria viene salvata triangolo per triangolo, replicando i dati dei vertici sui triangoli adiacenti, perdendo quindi l'informazione topologica originale. La ridondanza dei dati produce in genere file di grandi dimensioni.
- **ASTM E57 3D file format (.e57):** Il formato E57 è uno degli *standard* più comuni per l'archiviazione e l'interscambio di dati di misura 3D. È un formato file neutrale, indipendente dal fornitore, che serve per lo scambio di nuvole di punti, immagini e metadati. Un file E57 è costituito da un *header* di 48 *byte*, una serie di blocchi di dati e infine una sezione XML (*eXtensible Markup Language*). Questo tipo di file colleziona punti tridimensionali $[x, y, z]$, valori di intensità e valori RGB. Questo formato è progettato per essere molto flessibile, consentendo all'utente di scegliere quali attributi includere nel file, a seconda delle proprie esigenze attraverso l'uso di estensioni. Queste permettono di differenziare e configurare i dati salvabili nel formato in funzione del sensore impiegato, fornendo agli sviluppatori di applicazioni E57 nuove funzionalità, oltre a quelle specificate nello *standard* E2807. Questo *standard* descrive un formato di scambio di file di dati per dati di *imaging* tridimensionali (3D), noto come formato di file 3D ASTM E57, versione 1.0.
- **LIDAR Aerial Survey (.las; .laz):** il formato LAS (*LIDAR Aerial Survey*) è un formato di file binario ampiamente utilizzato per archiviare i dati delle nuvole di punti 3D raccolti dai sistemi LiDAR (*Light Detection And Ranging*). È stato sviluppato dall'*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) nel 2003 ed è ora considerato lo *standard* del settore. I file LAS contengono una raccolta di singoli punti LiDAR, ciascuno con una serie di attributi come coordinate $[x, y, z]$; valori di intensità, numeri di ritorno e codici di classificazione. Il formato è progettato per essere flessibile, consentendo all'utente di scegliere quali attributi includere nel file, a seconda delle proprie esigenze. È progettato per essere facilmente estendibile, quindi è possibile aggiungere nuovi attributi in base a specifiche necessità.
- **XYZ (.xyz, .txt, .ascii):** Il formato XYZ è un formato ASCII per descrivere le configurazioni di sistemi particellari nello spazio 3D. Comunemente utilizzato per nuvole di punti, con valori organizzati per righe. Esistono tante varianti di questo formato, che spesso usano la stessa estensione. Nel caso base, un file XYZ descrive un vertice per linea, attraverso le sue coordinate $[x, y, z]$, ma può contenere dati come la normale $[n_x, n_y, n_z]$, un colore RGB o valore di riflettanza per vertice. Può contenere una o più righe di *header* che descrivono il contenuto o con commenti. Un file XYZ può contenere una o più nuvole di punti memorizzate sequenzialmente all'interno del file. In alcuni casi, una nuvola può essere preceduta da una matrice di rototraslazione.

Formati di delivery, o con potenziale perdita di informazione

Questi formati interoperabili sono generabili a partire dai formati illustrati nella precedente sezione, e possono introdurre una perdita di informazione, in funzione dei parametri di compressione o quantizzazione usati sul dato di partenza; questo comporta che siano tipicamente utilizzati come dati derivati per scopi specifici, come il *delivery* (ad esempio verso piattaforme di fruizione interattiva).

	gITF	3D Tiles	USD	X3D
Descrittore	JSON o binario	JSON	ASCII o binario	XML
Scenario tipico	Web	Web o Desktop	Desktop	Web
Mesh	x	x	x	x
Point cloud	x	x	x	
Colore	x	x	x	x
Normal	x	x	x	x
Texture	x	x	x	x
Materiali PBR	x	x	x	
Multi-risoluzione		x		
Animazioni	x		x	x

Tabella 4: caratteristiche principali formati interoperabili di delivery

- GL Transmission Format (.gltf, .gltf):** è uno *standard* aperto (*standard* ISO²⁵) di *delivery*, sviluppato da Khronos Group²⁶ e viene utilizzato su scala internazionale per la trasmissione efficiente e il *rendering* interattivo di modelli e scene 3D sul web sotto forma di un descrittore JSON. Tale *standard* minimizza la dimensione del *dataset* 3D e i processi di decodifica a *runtime* per il loro consumo all'interno di un web browser. A livello geometrico, il formato gITF può inoltre adottare librerie come Draco²⁷ (Google) per comprimere o decomprimere la geometria della *mesh* o della nuvola di punti, offrendo diverse opzioni. Draco è impiegata sia per minimizzare lo *storage* e sia per rendere ancora più efficiente la trasmissione del dato in formato gITF sul web. Il formato gode di un ecosistema importante e diffuso di strumenti *software* (*open source* e proprietari) per la sua creazione e ottimizzazione, snellendo processi di conversione a partire da un dato *master* e facilitando integrazioni con strumenti o servizi di pubblicazione e consumo interattivo di modelli o scene 3D sul web. La sua estendibilità e apertura lo rendono inoltre adeguato alla conservazione a lungo termine dei dati 3D in svariati sistemi di pubblicazione e *digital library* FAIR su larga scala. Tale flessibilità permette inoltre l'arricchimento del formato con estensioni legate a metadati estendibili, come XMP (*Extensible Metadata Platform*, ISO 16684-1), per trasmettere assieme al dato 3D anche attribuzioni, licenze e altre informazioni utili legate a IPR (*Intellectual Property Rights*, sez. 1.7).
- Cesium 3D Tiles (.json):** è uno *standard* OGC* (*Open Geospatial Consortium*)²⁸ multi-risoluzione sviluppato da Cesium²⁹, progettato per la trasmissione e *rendering* interattivo di dati massivi (anche su scala planetaria) sul web, particolarmente orientato a dati 3D fotogrammetrici, BIM (*Building Information Modeling*), CAD, istanze di modelli 3D e nuvole di punti. Lo *standard* definisce una struttura spaziale gerarchica paginata e un insieme di formati per singolo *tile* (incluso lo *standard*

²⁵ <https://www.iso.org/standard/83990.html>

²⁶ <https://www.khronos.org/>

²⁷ <https://google.github.io/draco/>

²⁸ <https://www.ogc.org/>

²⁹ <https://cesium.com/why-cesium/3d-tiles/>

glTF) per contenuto da renderizzare. Un *dataset* nel formato 3D Tiles (chiamato *tileset*) contiene una qualunque combinazione di formati per-*tile* e specifiche di stile non dipendenti da soluzioni, tecnologie o prodotti *vendor-specific*. I 3D Tiles sono dichiarativi, estendibili e applicabili a varie tipologie di dati 3D contenenti informazioni di geometria e *texture* su scala massiva. Diversi strumenti *software* (proprietary e non) e servizi sono in grado di processare ed esportare direttamente nel formato 3D Tiles (ad esempio *Metashape*, *Reality Capture*, *Cesium ion*) tipicamente a partire dal formato *master* del *dataset*. La recente evoluzione dello *standard* offre inoltre una serie di estensioni focalizzate sullo *streaming* efficiente di dati semantici, integrazione con simulazioni e *analytics* su scala massiva e una maggiore integrazione con l'ecosistema glTF.

- **Universal Scene Description (.usd, .usdz):** il formato aperto USD³⁰ è stato sviluppato da Pixar e viene utilizzato per l'interscambio di contenuti 3D, tipicamente in ambito *desktop*. È progettato per essere efficiente e per supportare un'ampia gamma di casi d'uso, tra cui animazione, *visual effects* e il settore *gaming*. USD è molto diffuso nel settore cinematografico e degli effetti visivi ed è supportato da una serie di *software* legati a questi settori (ad esempio *Autodesk Maya*, *Houdini*). Il formato è indipendente dal file system e fornisce un risolutore di risorse estensibile per supportare qualsiasi modello di archiviazione dei dati che consenta origini di dati disparate. USD è inoltre il formato alla base di *NVIDIA Omniverse*³¹, utilizzato per presentazioni in **augmented reality*** (come Apple AR Quick Look).
- **Extensible 3D (.x3d):** è uno *standard* aperto (ISO/IEC 19775-1)³² per rappresentare scene o oggetti 3D, attraverso un file descrittore XML. Il formato è dichiarativo, offrendo la possibilità di definire un grafo di scena. È possibile aggiungere alle funzionalità di base estensioni personalizzate per *vendor* e componenti. X3D definisce diversi profili (insiemi di componenti) per vari livelli di capacità, tra cui X3D Core, X3D Interchange, X3D Interactive, X3D CAD Interchange, X3D Immersive e X3D Full. Il formato X3D è ASCII ed estremamente verboso, di conseguenza può generare file di grandi dimensioni se non utilizzando opportuni contenitori esterni per la geometria (si veda formato *glTF* con geometria esterna al descrittore).

3.5.3. Formati interoperabili per informazione colore e materiale

Esistono numerosi formati utilizzabili congiuntamente ai formati 3D della precedente sezione per il trasporto di informazione colore (diffuse o albedo) e/o proprietà fisiche del materiale applicate a *mesh*. Tali informazioni sono tipicamente codificate in *mappe texture*, utilizzando quindi formati immagine (2D). In base al tipo di informazione, vi è quindi una scelta tra formati senza perdita (*lossless*) o con perdita dovuta a quantizzazione o compressione.

- **JPEG (.jpg):** il JPEG³³ è uno *standard* internazionale di compressione dell'immagine digitale a tono continuo, sia a livelli di grigio che a colori. Viene comunemente impiegato sia per *texture* rappresentative di informazione colore di base (albedo o diffuse), sia per mappe PBR dove è tollerabile la perdita di informazione (ad esempio, sulle proprietà fisiche di *roughness* o *metalness*) mantenendo un discreto livello qualitativo. In base al fattore di compressione, viene introdotta una

³⁰ <https://openusd.org/release/index.html>

³¹ <https://www.nvidia.com/it-it/omniverse/>

³² <https://www.web3d.org/what-x3d-graphics>

³³ <https://jpeg.org/>

perdita di informazione, quindi il formato non è indicato per rielaborazioni iterative, ma come derivato utilizzabile per *delivery* su piattaforme di fruizione, per trasporto *texture* di base o proprietà fisiche (PBR) associate al modello 3D.

- **Portable Network Graphics (.png):** il PNG è uno *standard* internazionale³⁴ per memorizzare immagini, caratterizzato da una compressione *lossless* efficiente soprattutto per contenuti grafici non fotografici. Supporta la trasparenza attraverso il quarto canale (alpha), fornendo quindi un buon contenitore per il trasporto di mappe *texture* con trasparenza (ad esempio foglieame) in alternativa alla combinazione di due mappe separate (colore + maschera di opacità). Grazie alla mancanza di perdita di informazione, tale formato viene comunemente usato anche per **normal map***, tipicamente molto sensibili a compressioni con perdita (ad esempio utilizzando il formato JPEG).
- **WebP (.webp):** è un formato aperto³⁵ di compressione per le immagini sviluppato da Google specificatamente per l'utilizzo sul web. Offre una compressione sia con che senza perdita di informazione, supportando anche la trasparenza con il canale alpha e animazioni.
- **KTX (.ktx):** Il formato *Khronos Texture*³⁶ rappresenta un *container* efficiente e leggero per *texture* GPU (*Graphics Processing Unit*) super-compresse. È uno *standard* progettato per ridurre la dimensione di mappe e l'impronta di memoria su scheda grafica, mantenendo alta la qualità della *texture*. Tale formato può essere integrato con lo *standard* glTF (già descritto) per trasporto di informazione legata al colore di base (*albedo/diffuse*) o a proprietà fisiche (si veda i tipici utilizzi *texture* del formato JPEG) in combinazione con altre compressioni.

3.5.4. Formati per contenuti accessori

3.5.23.5.3 Per contenuti accessori si intende la documentazione a corredo del modello 3D che fa parte del contenuto digitale e che, come tale, deve fare parte del pacchetto di consegna:

- relazioni di processo (paradati);
- metadati dell'oggetto digitale;
- immagini 2D (schemi, fotografie di documentazione della postazione di digitalizzazione, schermate o grafici dei parametri, *rendering preview* dei modelli).

Nello specifico le relazioni di processo, o paradati, inerenti alla digitalizzazione e la creazione del modello 3D si riferiscono a:

- documentazione del **setup di acquisizione** (sez. [3.6.1](#));
- documentazione delle fasi di **elaborazione del master** (sez. [3.6.2](#));
- documentazione delle fasi di **elaborazione dei derivati** (sez. [3.6.3](#)).

Queste potranno essere consegnate come documenti di calcolo (.xls) o di elaborazione di testo (.docx) e preferibilmente utilizzando i template inclusi in queste Linee guida (Allegati B e C).

Per i **metadati**, lo *standard* di riferimento del Ministero della Cultura (MiC) è il Profilo METS –ECO-MiC. Per ciascun pacchetto di consegna dovrà essere elaborato un **Unico** file XML, redatto secondo il profilo di metadattazione METS ECO-MiC, capace di rendere conto dell'articolazione del *filesystem* sia per i modelli *master* sia per i derivati.

³⁴ <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2083>

³⁵ <https://developers.google.com/speed/webp>

³⁶ <https://www.khronos.org/ktx/>

Sono parte dei contenuti accessori le **immagini 2D** estranee alle *texture*, che possono essere:

- **schemi, disegni o fotografie di documentazione** che illustrano il *setup* di acquisizione, da allegare alla relazione di cui al precedente punto 1 (anche per finalità di archiviazione, documentazione, comunicazione, promozione delle attività svolte);
- **schermate o grafici** che mostrano l'**impostazione di parametri**, da allegare alla relazione di cui ai precedenti punto 1, 2 e 3;
- **rendering 2D di preview** dei modelli (sez. [4.5](#)).

Queste immagini 2D saranno salvate nei formati interoperabili .png, (senza perdita di informazione) o JPG ad alta qualità, o .pdf.

3.6. Documentazione del processo di produzione dei modelli

La gestione di una campagna di digitalizzazione è un'attività complessa e articolata che produce una grande quantità di dati. Per utilizzarli al meglio, sia durante la consegna che per scopi futuri, e per garantirne una conservazione ottimale, è fondamentale **disporre di una documentazione completa di tutte le fasi e operazioni svolte**. Inoltre, al momento della consegna, questa documentazione potrà supportare le attività di **collaudo e di verifica di conformità** rispetto ai requisiti del committente.

Per queste ragioni è necessaria una relazione dettagliata da includere nel *dataset* di consegna. La relazione dovrà includere le informazioni relative all'**attività di misura sul campo** (sez. [3.1](#) e [3.2](#)), alle **fasi di elaborazione dati e creazione del modello master** (sez. [3.3](#) e [3.5](#)), e alla **generazione dei modelli derivati** (sez. [3.4](#) e [3.5](#)). Ogni fase del processo andrà dettagliatamente descritta: le scelte operate, gli strumenti e i *software* utilizzati, i processi effettuati sui dati e i parametri scelti per ciascuna operazione. Per garantire efficacia, efficienza e sinteticità, è preferibile evitare che la relazione sia scritta in forma libera è invece consigliato un elenco strutturato, che consenta un accesso rapido e standardizzato alle informazioni. Anche quando non specificamente richiesto, è incoraggiata una documentazione fotografica e grafica (sez. [3.5.4](#)). Le Linee guida sono corredate di due template allegati: Allegato B "*Relazione_Setup_Acquisizione*" e Allegato C "*Relazione_Elaborazione*", per la documentazione dei processi e per raccogliere le informazioni durante lo svolgimento delle attività o al verificarsi di circostanze particolari; infatti, la scrittura della relazione al termine del processo, potrebbe compromettere la completezza e la correttezza delle informazioni in essa riportate.

3.6.1. Relazione dei *setup* e dei processi di acquisizione

Una completa documentazione del processo di digitalizzazione dovrà contenere le seguenti informazioni:

- la descrizione dei *setup* e acquisizione;
- la descrizione delle metodologie e delle caratteristiche del rilievo;
- la descrizione dei casi particolari;
- la produzione di documentazione accessoria

Queste informazioni andranno strutturate e dettagliate nell'Allegato B **Template "*Relazione_Setup_Acquisizione*"**, che si compone di due fogli: **SETUP_#n** e **RILIEVO_ID**.

Descrizione del setup di acquisizione

Nel foglio **SETUP_#n** del *Template Relazione_Setup_Acquisizione* è necessario descrivere ciascun *setup* di acquisizione utilizzato nell'ambito della postazione di digitalizzazione. Questa documentazione non deve essere prodotta per ogni oggetto acquisito, ma deve invece documentare tutti i *setup* implementati, che a scopo descrittivo saranno numerati progressivamente (ad esempio *setup* #1; #2) e dotati di scheda individuale.

Pertanto, è obbligatorio produrre la seguente documentazione riguardante:

- **il tipo di ambiente** in cui si svolge l'acquisizione, le sue dimensioni e l'eventuale delimitazione dello spazio;
- **l'illuminazione;**
- **la tipologia degli strumenti di misura utilizzati.** Per ogni strumento impiegato, nei diversi *setup*, deve essere fornito:
 - una descrizione analitica della strumentazione impiegata, modello, marca, (comprese ottiche e filtri);
 - il *link* alla scheda tecnica degli strumenti;
 - i certificati di calibrazione, obbligatori per gli strumenti attivi, da allegare se disponibili per i sensori fotografici;
 - descrizione dei sistemi di riferimento metrici e calibratori;
 - la tipologia di *target*;
- **elenco degli strumenti di supporto utilizzati.** Per ciascuno strumento di supporto (luci, schermi, supporti) utilizzato deve essere fornita:
 - una descrizione analitica degli strumenti di supporto;
- **elenco dei software di acquisizione utilizzati.** Per ciascun *software* di acquisizione impiegato nei diversi *setup*, devono essere forniti:
 - il nome e la versione del *software*;
- **documentazione visiva** per ciascun *setup* messo in opera:
 - documentazione fotografica del *setup* allestito;
 - schema planimetrico del *setup*.

Documentazione delle metodologie e delle caratteristiche del rilievo

Nel foglio **RILIEVO_ID** del *Template Relazione_Setup_Acquisizione* occorre documentare le metodologie e le caratteristiche del rilievo che riguarda ciascun oggetto interessato dalla campagna di acquisizione, **in termini quantitativi, qualitativi e di procedimento**, in relazione ai seguenti aspetti:

- individuazione dell'oggetto tramite il suo ID (da scheda catalografica di dominio ICCD);
- eventuale indice di complessità dell'oggetto (dall'Allegato A *Matrice degli indici di complessità*);
- *setup* adoperato nell'acquisizione (ad esempio *setup* #1);
- trattamento dell'oggetto (ad esempio consolidamenti preliminari, uso di sostanze opacizzanti non invasive come spray o polveri reversibili, indicando la tipologia, la marca e il procedimento);
- modalità di impiego degli strumenti di acquisizione, se uno o più di uno e come sono stati eventualmente integrati;
- condizioni ambientali;
- numero di acquisizioni;

- “progetto di presa”, ossia la descrizione del modo in cui le riprese sono andate a coprire la superficie dell’oggetto (ad esempio Numero, sequenza e quota di scansioni, distanza di lavoro, cambi di posizione del soggetto, sottosquadri, riprese globali o di dettaglio; vedi sez. [2.1.3.2.1](#));
- impostazione dei parametri di acquisizione delle immagini, in relazione alla risoluzione progettata per l’acquisizione;
- impostazioni dei parametri di acquisizione della geometria, in relazione alla risoluzione progettata per l’acquisizione;
- elenco dei *software* di acquisizione con specifica menzione dei parametri impostati;
- descrizione della procedura di registrazione tra *range map*, qualora effettuata in fase di acquisizione, esplicitando l’errore residuo;
- descrizione, in caso di acquisizione solo fotogrammetrica, dei riferimenti metrici utili alla scalatura (vedi sez. [2.1.3](#));
- presenza di immagini utili alla correzione del colore;
- note: descrizione generale della procedura implementata, e menzione specifica di eventuali problemi incontrati e conseguenti soluzioni impiegate per risolvere o mitigare il problema;
- tempo impiegato per la preparazione del *set* e l’acquisizione/elaborazione sul campo.

Documentazione di casi particolari

È opportuno che situazioni particolari o problematiche, che richiedano eccezioni significative ai *setup standard*, oppure soluzioni ad hoc implementate per i singoli oggetti o tipologie specifiche, siano documentate in maniera completa e dettagliate nella sezione Note della “*Documentazione delle metodologie e caratteristiche del rilievo*”.

Documentazione accessoria

È opportuno prevedere la produzione di fotografie, immagini e video finalizzate al controllo del processo produttivo e al rispetto delle norme in materia di tutela dei beni, ad attività di divulgazione e di promozione. Questi possono essere, a titolo esemplificativo e non esaustivo:

- screenshot/video dei *software* di scansione durante il lavoro sul campo;
- foto/video che inquadrano lo strumento puntato sul soggetto;
- foto/video, anche realizzati al di fuori dell’attività di acquisizione, per descrivere la dinamica del processo di scansione (ad esempio soggetto illuminato dalle frange della luce strutturata/ linee laser);
- foto che mostrano i tecnici al lavoro.

Non è necessario che ogni oggetto sia rappresentato in questo tipo di documentazione, possono essere scelti oggetti o classi di oggetti particolarmente significativi, oppure situazioni di lavoro rappresentative. Considerando la potenziale circolazione delle immagini prodotte per finalità didattiche, comunicative e divulgative, è opportuno evitare di ritrarre esplicitamente prodotti commerciali facilmente riconoscibili, ad eccezione degli strumenti di lavoro. Le modalità di utilizzo delle immagini accessorie prodotte dovranno essere concordate dalle parti. Gli operatori visibili in questa documentazione dovranno firmare un modulo di consenso informato.

3.6.2. Relazione della elaborazione dati e creazione del modello *master*

L'Allegato C, *Template Relazione_Elaborazione* fornisce le indicazioni per la relazione dei processi relativi alla creazione del modello *master*. La relazione deve permettere di ricostruire l'intero processo di elaborazione così da poterlo, se necessario, replicare partendo dai dati originali.

La relazione dovrà contenere contenente le seguenti informazioni:

- individuazione dell'oggetto tramite il suo ID (dalla scheda catalografica di dominio ICCD);
- data;
- tempistiche totali;
- elenco degli operatori che hanno preso parte alla elaborazione;
- elenco dei *software* utilizzati;
- elenco e caratteristiche dei dati grezzi di *input* (ad esempio, le foto in formato *raw* della campagna fotografica, le scansioni, i dati misurati, i dati dei *marker*);
- caratteristiche del modello (descrizione tecnica, dimensione, numero di triangoli e punti, risoluzione, *texture*, contenuto);
- file modello (formato, nomenclatura);
- unità di misura;
- sistema di riferimento impiegato;
- note (testo libero a discrezione dell'operatore).

L'elaborazione di un modello 3D è spesso descritta come una sequenza diretta e immutabile di operazioni. Tuttavia, ciò non è sempre vero: per adattarsi alle caratteristiche specifiche dell'oggetto e dei dati, alcune operazioni possono essere ripetute più volte o eseguite in ordini diversi rispetto alla sequenza "canonica". Per ottenere una documentazione più dettagliata e analitica, è necessario considerare ogni operazione singolarmente, trattandola come un "blocco" di informazioni. La documentazione risultante sarà quindi composta da una concatenazione di blocchi schematici che illustreranno le operazioni in sequenza.

Si elencano di seguito a titolo esemplificativo le tipologie di informazione contenute dai blocchi analitici:

- data;
- elenco degli operatori;
- tipo di operazione (ad esempio allineamento, *meshing*);
- parametri *input* dell'operazione e risultati numerici (ad esempio per il *meshing*, la risoluzione *target* e le caratteristiche della *mesh* ottenuta; per l'allineamento, l'errore residuo al termine del processo);
- *software* utilizzato;
- note (testo libero a discrezione dell'operatore).

Altre informazioni specifiche potranno essere aggiunte come campi ulteriori, secondo le necessità, o secondo la rilevanza nel caso specifico (ad esempio tempistiche, problematiche rilevate, elenco dati intermedi prodotti). Ciascun blocco avrà un campo opzionale "note" di testo libero, da usare a discrezione dell'operatore per commentare in maniera sintetica il contenuto del blocco.

Per conoscere le fasi e le operazioni che devono essere documentate, si può fare riferimento alle sezioni [3.3.1](#) e [3.3.2](#) di queste Linee guida, dove vengono dettagliate le fasi, sottofasi e operazioni che sono generalmente parte di questo processo.

Alcuni *software* di elaborazione generano dei report che contengono una descrizione del processo. Questi documenti non sostituiscono una relazione strutturata come descritta, in quanto non sono *standard* e spesso sono in formati non consultabili direttamente. Rappresentano tuttavia, un ottimo spunto per la compilazione della relazione ed è incoraggiato allegarli nel pacchetto di consegna.

3.6.3. Relazione della creazione dei modelli derivati

La creazione di modelli derivati è un processo meno standardizzato rispetto alla generazione del file *master*, e può comportare una maggiore varietà di procedure, *software* e approcci.

La documentazione da produrre per ciascun modello derivato andrà compilata utilizzando sempre il *Template Relazione_Elaborazione* dell'Allegato C, compilando l'apposita sezione e indicando:

- individuazione dell'oggetto tramite il suo ID (da scheda catalografica di dominio ICCD);
- finalità del derivato;
- data;
- tempistiche;
- operatori;
- *software* usati;
- caratteristiche del modello finale ottenuto;
- file modello (formato, nomenclatura);
- unità di misura;
- sistema di riferimento;
- note.

Una documentazione dettagliata delle singole fasi di elaborazioni in questo caso è **opzionale**, qualora si scegliesse di compilarla, è auspicabile seguire la stessa metodologia di lavoro “a blocchi” descritta nella sezione precedente per la produzione del modello *master*.

4. Definizione e composizione del *dataset*

4.1. Metadatazione dei modelli 3D del patrimonio culturale

Per un corretto uso e per l'interpretazione dei modelli 3D finali, indipendentemente dalla loro complessità e dalle tecniche impiegate per la loro realizzazione, è necessario disporre delle informazioni relative agli oggetti originari e alle modalità di digitalizzazione. Lo schema di metadatazione, quindi deve riportare tutte le informazioni che possono contribuire alla documentazione, al miglioramento o perfezionamento del processo: il tipo di file, il tipo di sensore usato per l'acquisizione, la calibrazione, i settaggi selezionati, le condizioni fisiche al momento della ripresa, le unità di misura, la risoluzione, l'errore strumentale, il sistema di riferimento adottato, il formato del file e le fasi di post-elaborazione.

I metadati sono informazioni descrittive che forniscono contesto e significato all'oggetto o ai dati stessi. La creazione di metadati, nota come metadatazione, consiste nel processo di aggiunta di informazioni a un oggetto digitale o a un insieme di dati, con lo scopo di descriverli, organizzarli e renderli facilmente ricercabili e recuperabili.

Nell'ambito della digitalizzazione 3D, è fondamentale fornire una serie di informazioni che permettano di:

- stabilire un'appropriata relazione tra modello e oggetto reale;
- compilare i diversi dati richiesti dalle piattaforme digitali;
- fornire gli elementi necessari per l'interpretazione dei risultati e del processo di digitalizzazione stesso.

A tal fine, è necessario definire un approccio alla metadatazione che descriva, con i dettagli appropriati, sia i singoli file prodotti, sia la struttura del pacchetto di consegna (descritto nella sezione [4.2](#)). Per ogni tipologia di file, è utile fornire sia i metadati descrittivi generali che i metadati tecnici specifici, in modo che possano essere leggibili e utilizzabili sia dagli utenti, sia dalle diverse piattaforme digitali. In particolare, rispetto ai processi di digitalizzazione 2D (illustrati nelle Linee Guida Generali per la digitalizzazione del patrimonio culturale del Ministero della Cultura, MiC), dovranno essere aggiunti i metadati riguardanti:

- dati grezzi generati nella fase di rilievo (*set* di fotografie, singole riprese, misurazioni, nuvole di punti; sez. [2.1.6](#));
- modello 3D realizzato dall'elaborazione dei dati acquisiti durante la digitalizzazione (modello *master*; sez. [2.1.6](#));
- modelli derivati ottenuti da fasi di post processing (sez. [2.1.6](#));
- diverse tipologie di *texture* e i dati relativi ai materiali associati al modello 3D (sez. [2.1.4](#));
- contenuti accessori, come i file di anteprima (2D e 360°; sez. [4.5.1](#));
- relazioni sul processo di *setup*-acquisizione e di elaborazione che è stato adottato (Paradati; sez. [3.6](#)).

Una corretta e coerente compilazione dei metadati è anche indispensabile per garantire la *FAIR-ness* e la qualità dei contenuti prodotti. L'utilizzo dei metadati nella fase di caricamento all'interno delle piattaforme digitali (*ingestion*), contribuisce a migliorare la reperibilità e l'accessibilità (*Findable/Accessible*) degli oggetti digitalizzati. È inoltre possibile valutare la qualità dei dati consegnati verificando la presenza nei metadati di descrittori relativi all'inclusione nel pacchetto di consegna, delle versioni interoperabili dei file prodotti (*Interoperability*) e dei file grezzi dell'acquisizione (in grado di garantire opportunità di riuso dei dati per

l'applicazione di processi differenti di elaborazione). Per la compilazione dei metadati della risorsa digitalizzata si dovrà impiegare lo schema METS-ECOMiC, profilo applicativo di metadattazione del Ministero della Cultura, che definisce una modalità di codifica aggregata delle informazioni con differenti schemi *standard* di riferimento i dati dei diversi domini, come indicato all'interno delle *Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale* allegate al PND.

4.2. Definizione e struttura del *dataset* di consegna

In base a quanto indicato nelle precedenti sezioni, **un pacchetto di contenuto digitale ottimale dovrà includere:**

- 1) metadati dell'oggetto digitale;
- 2) modello *master*;
- 3) dati grezzi sorgenti (misure 3D e immagini) da cui il *master* è stato generato (includendo sia i formati interoperabili che i formati proprietari, sez. [3.5.1](#), [3.5.2](#) e [3.5.3](#));
- 4) modelli derivati;
- 5) relazione e documentazione del *set-up* e dei processi di acquisizione;
- 6) relazione e documentazione delle attività di *post-processing* del *master*;
- 7) relazione e documentazione delle attività di *post-processing* dei derivati;
- 8) *thumbnails* e immagini di *preview* per la rapida consultazione dei contenuti;
- 9) risultati dell'auto-verifica, cioè del collaudo interno svolto dall'azienda;
- 10) file di testo riepilogativo del contenuto del pacchetto consegnato.

Ogni **oggetto digitale** sarà identificato con il **codice univoco del catalogo nazionale** attribuito dall'ICCD. Il codice è stato attribuito dall'ICCD all'oggetto reale, dunque tutti i prodotti digitali riferiti all'oggetto (*master*, derivati, metadati, paradata, contenuti accessori), ereditano il medesimo codice univoco, qui definito **ID-OGGETTO**.

Come si è detto, è possibile che un modello derivato sia il risultato di un'azione di ricomposizione di un complesso smembrato, in cui ciascuna delle parti potrebbe trovarsi in un diverso istituto della cultura e potrebbe essere stata identificata con un diverso codice univoco dall'ICCD. L'oggetto composto andrebbe quindi ricondotto a più codici dell'ICCD in sequenza. Se invece la ricomposizione riguarda frammenti dello stesso oggetto identificati tutti con lo stesso codice unico dell'ICCD, il derivato composto andrà individuato sotto questo medesimo codice. Data questa duplice possibilità e considerando la varietà di azioni che potranno essere messe in atto in futuro anche sui medesimi oggetti da parte di diversi operatori, è opportuno creare una cartella "radice" denominata **ID-CONSEGNA**. In essa verrà incluso tutto il complesso *dataset* riconducibile a un'azione coerente di digitalizzazione di un singolo oggetto e dei suoi derivati, e anche gli eventuali derivati composti. Qualora in un futuro un determinato oggetto fosse nuovamente digitalizzato da altri operatori al fine di ottenere un diverso risultato, verrà prodotto un altro pacchetto ID_Consegna. La relazione con la/le precedenti versione/i della digitalizzazione potrà essere stabilita attraverso i metadati. Per la definizione dettagliata della struttura gerarchica dei pacchetti di contenuto (cartelle, sottocartelle e posizionamento dei files), della nomenclatura e della composizione e attribuzione del file METS, si farà riferimento a quanto verrà stabilito dal MiC nel "Manuale di metadattazione" della procedura.

4.3. Contenuti digitali del modello *master*

In riferimento all'**ID-OGGETTO_MASTER** dovranno essere salvati i seguenti contenuti:

- **modello 3D completo** di geometria, materiale e *texture* (*texture diffuse* obbligatoriamente e altre mappe, come *roughness*, *metalness*, se presenti) nei formati interoperabili indicati nelle sezioni [3.5.2](#) e [3.5.3](#). Si prediligono i formati **OBJ** e **PLY**. Per le *texture* si predilige il formato **PNG**;
- **dati grezzi di acquisizione** nei formati interoperabili (sez. [3.5.2](#)), suddivisi in: *pointcloud*, *range map*, immagini *input*, (queste ultime, se necessario, divise in *set*). Nel caso non sia possibile rinominare i file grezzi originali senza perdere la struttura necessaria alla elaborazione, è possibile mantenere i nomi di file originali, allegando obbligatoriamente un file di testo che descriva la relazione fra i nomi originali a quelli qui suggeriti;
- **dati del modello *master*** nell'eventuale formato proprietario con cui è stato digitalizzato e generato. Questo può includere il/i file e/o cartelle di progetto del *software* usato nella digitalizzazione ed elaborazione. Data la variabilità degli strumenti, non è possibile dare indicazioni precise sul contenuto;
- **relazione di documentazione del *set-up* e dei processi di acquisizione** (paradati), redatta secondo lo schema fornito nel *Template* dell'Allegato B (sez. [3.6.1](#)). La relazione potrebbe contenere immagini, video, grafici, schemi, che possono essere salvati nella stessa cartella della relazione a cui si riferiscono;
- **relazione tecnica sui processi di elaborazione** per la creazione del modello 3D *master* (paradati), (sez. [3.6.2](#)), redatta secondo lo schema fornito nel *Template* dell'Allegato C. La relazione potrebbe contenere immagini, grafici, schemi, che possono essere salvati nella stessa cartella della relazione a cui si riferiscono.

4.3.1. Metodologia di auto-verifica preliminare della qualità e della risoluzione del modello *master*

Al momento della preparazione del pacchetto di consegna è opportuno procedere a un'auto-verifica, che permetta all'esecutore della campagna di rilevamento di controllare la coerenza dei dati con le indicazioni formalizzate in queste Linee guida. Questo controllo non va inteso come sostitutivo del collaudo effettuato dall'ente committente (che potrà essere anche condotto per mezzo di strumenti automatici o semi-automatici), bensì come una forma di collaudo interno ad opera del soggetto produttore delle risorse digitali prima della consegna del lavoro.

Per le finalità sopra enunciate si raccomanda di controllare:

- la **qualità della *mesh*** (sez. [2.1.2](#)), verificando la validità topologica (*2-manifold*), e la coerenza dell'orientamento delle facce;
- il **sistema di riferimento del modello** (sez. [2.1.1](#)), verificare che i modelli siano conformi al progetto per scala, posizione e orientamento;
- la **risoluzione geometrica dei modelli** (sez. [2.1.3](#)), verificando la coerenza con quanto indicato circa il rapporto tra le dimensioni dell'oggetto e la lunghezza media degli spigoli;
- la **risoluzione della *texture*** (sez. [2.1.5](#)), valutando il rapporto tra l'area della superficie del modello e il numero di texel;

effettuare poi un **controllo visivo complessivo** di tutti i modelli (*master* e derivati) inclusi nel pacchetto di consegna (compresi i file 2D di documentazione accessoria).

Le operazioni indicate richiedono un'ispezione visiva e la misura di alcune caratteristiche geometriche del modello 3D. I *software* di controllo degli scanner attivi e i *software* di fotogrammetria professionali possono includere questo tipo di strumenti di analisi che possono essere compresi anche in *software* terzi di elaborazione dati 3D (come i *software open source Blender* o *MeshLab*). In *Blender*, molte di queste funzioni sono disponibili in strumenti nativi ma sono disponibili anche plugin specifici (come 3DSC³⁷) che offrono strumenti dedicati per questo tipo di valutazione. In *MeshLab* è possibile ottenere informazioni sulle dimensioni della *mesh*: assi principali, diagonale della *bounding box*, lunghezza media degli *edge*, superficie della *mesh* e verifica delle proprietà topologiche.

4.4. Contenuti digitali dei modelli derivati

Nella cartella **ID-OGGETTO_DERIVATO** dovranno essere salvati, per ciascun modello derivato nella relativa sottocartella, i seguenti contenuti:

- **modello 3D derivato completo** di geometria, materiale e *texture* (*texture diffuse*, *roughness*, *metalness*, *normal*, queste ultime tre se presenti) **nei formati interoperabili** indicati nelle sezioni [3.5.2](#) e [3.5.3](#);
- **relazione tecnica sui processi di elaborazione** per la creazione del modello 3D derivato (sez. [3.6.3](#); paragrafi), redatta secondo lo schema fornito nel *Template* dell'Allegato C. La relazione potrebbe contenere immagini, grafici, schemi, che possono essere salvati nella stessa cartella della relazione a cui si riferiscono;
- **dati grezzi del derivato** (opzionale): potrebbero includere algoritmi di intelligenza artificiale e parametrizzazione utilizzata, files di *motion capture*.

4.5. Contenuti accessori

Oltre ai metadati associati ai modelli 3D (sez. [4.10](#)) e ai paragrafi, cioè le relazioni che documentano i processi di acquisizione e di elaborazione (sez. [3.6](#)), sarà fondamentale includere ulteriori contenuti accessori, 2D e testuali, al fine di:

1. agevolare la consultazione e il riconoscimento dei modelli della Digital Library;
2. arricchire il *dataset* con contenuti storico artistici e archeologici.

Le specifiche dei contenuti accessori, sono dettagliati in questa sezione, mentre per i formati con cui predisporli si rimanda a [3.5.4](#)

4.5.1. Rendering 2D di preview dei modelli master e derivati

Per ottenere le *preview* 2D dei modelli (*master* e derivati), sarà necessario produrre dei *rendering* dei modelli 3D. I *rendering* statici mostreranno l'oggetto nella sua interezza da **sei punti di osservazione** ortogonali e una vista prospettica:

- fronte/*front* (ortho);

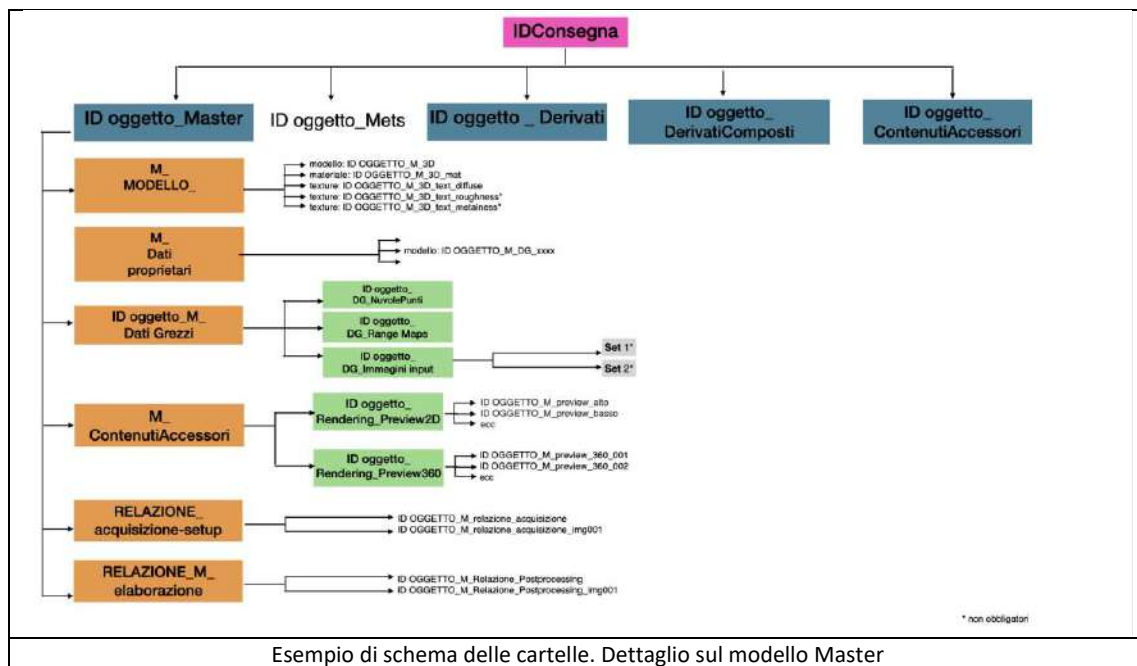
³⁷ <https://github.com/zalmoxes-laran/3D-survey-collection>

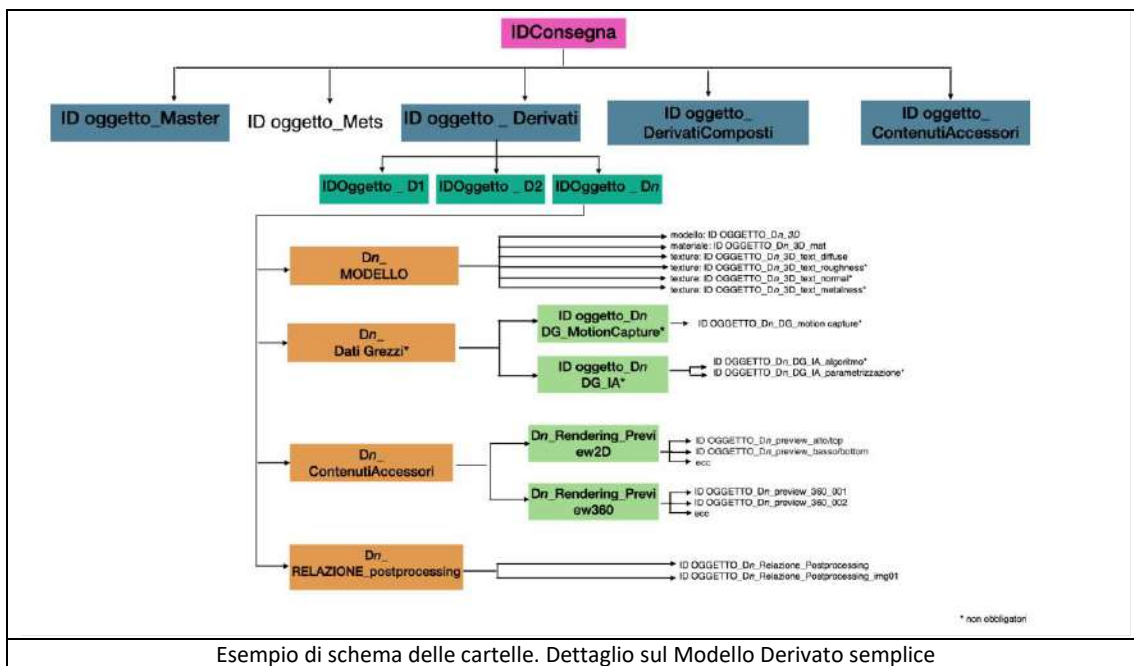
- retro/back (ortho);
- destro/right (ortho);
- sinistro/left (ortho);
- alto/top (ortho);
- basso/bottom;
- vista rappresentativa (prospettica).

Per ciascuno dei punti di osservazione, l'oggetto 3D sarà rappresentato con due *rendering*:

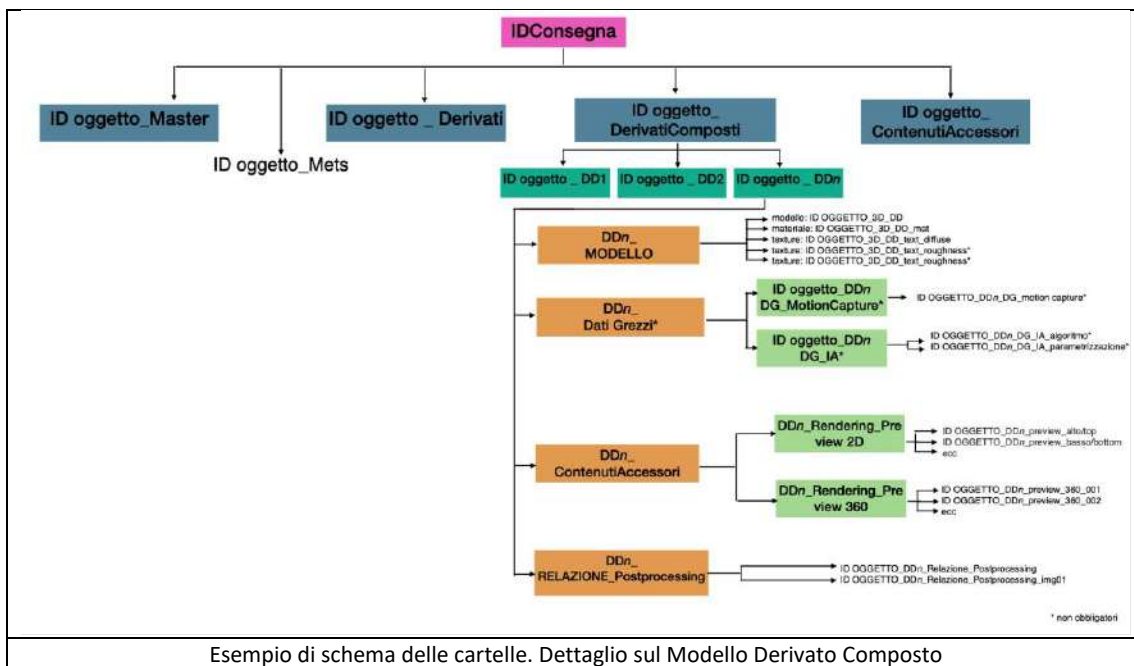
- come **mesh con la sola geometria**, senza *texture*;
- come **mesh con il materiale e le texture**.

Nel caso di oggetti molto grandi o con inserti decorativi caratterizzati da elevato dettaglio, e comunque a discrezione degli autori, è possibile aggiungere ulteriori *preview* 2D da punti di vista ritenuti significativi. La risoluzione di ogni *preview* 2D dovrà essere almeno 4K (3840 x2160 pixel), in formato *landscape* o *portrait*, in base alle proporzioni dell'oggetto. Il formato quadrato è ammesso qualora le proporzioni dell'oggetto lo giustifichino. Le *preview* 2D devono avere sfondo nero o bianco o entrambi. I formati *standard* ammessi per tali sono *TIFF* o *PNG*, senza perdita di qualità, o *JPG* ad alta qualità (sez.3.5.4). Per ciascuno dei modelli derivati dal *master* andrà prodotto un *set* di *preview* 2D che segua le medesime regole. In generale sarà utile includere nei file di *preview* anche un **rendering 360** dell'oggetto che permetta di ruotarlo interattivamente. Ciò può essere realizzato con una sequenza di *PNG* renderizzate con intervallo angolare di 10° e risoluzione 4K. La visualizzazione 360 sarà risolta dalla piattaforma di accesso alla Digital Library.

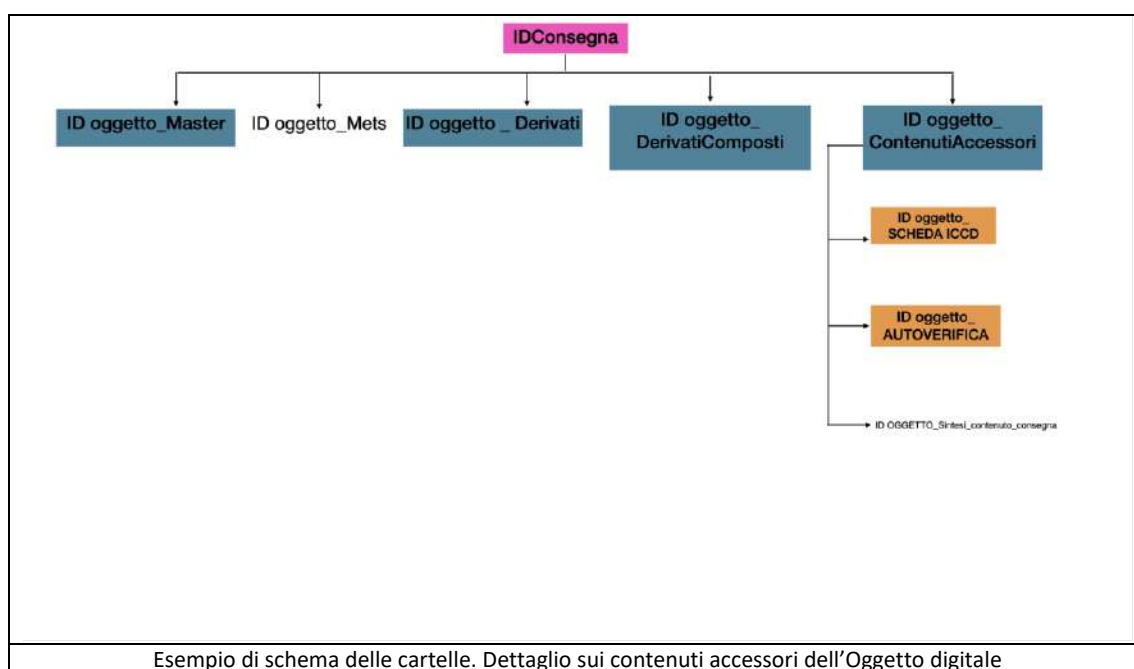




Esempio di schema delle cartelle. Dettaglio sul Modello Derivato semplice



Esempio di schema delle cartelle. Dettaglio sul Modello Derivato Composto



4.5.2. Contenuti culturali relativi all'oggetto digitalizzato

Gli oggetti 3D saranno corredati da informazioni storico-artistiche o archeologiche, utili a contestualizzare gli stessi dal punto di vista storico, geografico e culturale, costituendo un'unità comunicativa di forma e significato (sez. 1.5). Le informazioni auspicabili sono:

- codice ID del catalogo nazionale;
- identificazione univoca dell'oggetto digitale (per la composizione del codice si faccia riferimento al capitolo 6 "Nomenclatura degli oggetti digitali" delle linee guida per la Digitalizzazione del patrimonio culturale);
- tipologia di oggetto (ad esempio vaso, dipinto su tela, ecc.)
- tipologia di scheda;
- materia e tecnica;
- dimensioni;
- attribuzioni;
- contesto espositivo e indirizzo (luogo presso cui è attualmente esposto);
- notizie storico-critiche (cronologia, iconografia/iconologia, contesto di creazione e/o rinvenimento, significato, funzione, valore, vicenda conservativa, accessibilità, relazioni con altri oggetti);
- condizione giuridica;
- ente competente per la tutela;
- presenza di iscrizioni o di segni/simboli;
- ente schedatore;
- data di compilazione della scheda e identità del compilatore;
- licenza metadati.

Le schede dovranno contenere testi, immagini o video quando utili a rafforzare la comprensione del manufatto. Si potranno riportare link ad altre risorse digitali o pagine web del Ministero della Cultura (MiC). Si veda un esempio di scheda al seguente link:

<https://www.catalogo.beniculturali.it/detail/HistoricOrArtisticProperty/0500406450>

La scheda ICCD sarà collegata al modello 3D dell'oggetto attraverso il file di metadattazione METS che ha una sezione descrittiva in cui viene referenziata la scheda di catalogo. Qualora l'oggetto digitalizzato non sia presente nel catalogo nazionale ICCD, è necessario che sia catalogato incaricando professionalità con specifiche competenze. I catalogatori produrranno anche il Codice ID di catalogo nazionale e lo inseriranno nel file METS.

4.6. Principi per la gestione del ciclo di vita della risorsa 3D

È di fondamentale importanza adottare criteri di elaborazione e gestione dei dati digitali per garantirne il mantenimento e lo sviluppo a lungo termine. Una volta generato, il contenuto digitale inizia il suo ciclo di vita e può essere **aggiornato, incrementato, ulteriormente implementato e integrato in una rete di contenuti digitali e relazioni semantiche**. I soggetti che operano su questi contenuti possono essere vari e diversificati. Pertanto, in linea con il Piano Nazionale della Digitalizzazione, queste Linee guida propongono una serie di criteri funzionali per abilitare una corretta gestione del ciclo di vita delle risorse digitali tridimensionali del patrimonio culturale e per favorire il progressivo arricchimento dei contenuti da parte di diverse competenze.

Il rispetto dei principi **FAIR** è un requisito fondamentale (sez. [1.6](#)), fra cui di particolare rilevanza l'**interoperabilità** (sez. [3.5.2](#)) e la corretta **metadattazione** dei modelli. I metadati (sez. [4.10](#)) e i paradatai (sez. [3.6](#)) forniscono infatti una serie di informazioni che consentono di documentare i modelli e valutarne l'affidabilità, ricostruendo e contestualizzandone il processo creativo secondo un protocollo strutturato. L'adozione di **nomenclature** univoche nell'organizzazione dei dati è molto importante perché consente di non disperdere risorse e di orientarsi all'interno di *dataset* molto complessi. La pubblicazione dei dati in **formati aperti**, secondo i principi dell'*Open Science*, è un presupposto del ciclo di vita dell'informazione pubblica, in coerenza con gli orientamenti generali della pubblica amministrazione e delle **tendenze strategiche europee**, soprattutto nell'ambito del programma Horizon2020 (Horizon 2020 Open Research Data Pilot and Data Management Plan) e Horizon 2021-2027. Il ciclo di vita della risorsa digitale è un tema ampiamente discusso nel **Piano Nazionale della Digitalizzazione** (PND) a cui si rimanda per la trattazione dei principi generali. Tra questi, gli Istituti Culturali, dovranno dotarsi di un Piano di Gestione, individuare i diversi livelli di responsabilità/*governance* nella pianificazione, creazione, validazione, gestione, pubblicazione e valorizzazione delle risorse digitali, aggiornare periodicamente le competenze e adottare i principi dell'*Open Data*.

Il PND, oltre alle responsabilità dei vari ruoli istituzionali, indica le azioni necessarie a garantire il pieno compimento del ciclo di vita della risorsa digitale e poiché le stesse non mutano sostanzialmente quando si opera in un contesto di digitalizzazione 3D e non saranno qui ripetute. Le procedure di accesso, consultazione, visualizzazione, circolazione e riuso dovranno essere per quanto possibile semplificate e razionalizzate, con **chiare policy sulle licenze** che regolamentano l'accesso e il ri-uso. I file andranno organizzati secondo una struttura semplice e chiara (sezioni da [4.2](#) a [4.5](#)), accompagnati dai rispettivi metadati e paradatai che rendano possibile l'incremento qualitativo e quantitativo del *dataset* da parte di soggetti anche diversi rispetto ai creatori originari.

Le crescenti istanze di partecipazione e condivisione dell'informazione culturale, legate anche a programmi e iniziative di "**citizen science**", co-creazione e *crowdsourcing* sono espressioni della transizione digitale in corso. Affinché il patrimonio digitale sia soggetto ad un controllo di qualità, diffonda cultura, **generi nuovo valore culturale, sociale ed economico**, e non vada disperso, occorre adottare regole, servizi, strumenti e buone pratiche. In uno scenario futuro, ad esempio, per l'**annotazione semantica** dei modelli si potranno prevedere dinamiche di co-creazione da parte di utenti esperti accreditati che potranno accedere alla piattaforma di fruizione nazionale tramite apposito *login* e servizi dedicati. Essi potranno stabilire reti di relazioni semantiche fra più oggetti affini o con rimandi tematici. Come enunciato alla (sez. [2.1.6](#)) a titolo esemplificativo, i possibili fruitori di questo nuovo ecosistema culturale che possono beneficiare con profitto degli *asset* digitalizzati in 3D sono:

Musei (ad esempio curatore, operatore culturale);
Aziende (per finalità di riutilizzo, anche commerciale);
Studiosi/Ricercatori;
Docenti scolastici;
Visitatori-utenti generalisti.

Le **nuove creazioni** realizzate a partire dai modelli della Digital Library potranno essere nuovamente condivise; se risponderanno ad adeguati criteri qualitativi, produrranno nuova conoscenza e offriranno esperienze utili e originali con un impatto educativo sul pubblico. In questi casi le istituzioni valuteranno l'opportunità di accogliere e dare visibilità sulle varie piattaforme (Ministeriali o locali) a contenuti e applicazioni sviluppati da enti di ricerca, aziende e scuole che siano rispondenti agli *standard* qualitativi e ai principi etici stabiliti. Si sottolinea in tal senso l'importanza della collaborazione con il **settore scolastico**, sollecitando gli operatori della didattica a integrare nelle attività con gli studenti l'interazione con i modelli digitali del patrimonio, fornendo *tools* e servizi che possano stimolare l'apprendimento senso-motorio attraverso esperienze multimediali e creative, in linea con il **Piano Scuola 4.0** emanato dal Ministero dell'Istruzione nell'ambito del PNRR. Come argomentato nella sezione [1.5](#), se la documentazione di qualità rappresenta il primo passo verso la conservazione e la diffusione della conoscenza, di primaria importanza sono i **processi di interazione e di creazione di nuovo valore** abilitati dalle pratiche di **digital cultural heritage**. Una nuova economia potrebbe svilupparsi grazie a pratiche di digitalizzazione condivise e consapevoli, **nuovi servizi di accesso e interscambio culturale a livello internazionale** e di **nuovi storytelling**.

GLOSSARIO

I termini del glossario sono in ordine alfabetico. La prima occorrenza del termine nel testo è evidenziata tramite grassetto e un asterisco (ad esempio **Accuratezza***).

Accuratezza: in metrologia, il termine accuratezza descrive la vicinanza di una misura o di una osservazione al valore reale del campione misurato.

Albedo: in computer grafica, l'albedo si riferisce al colore di base di un oggetto, prima che venga applicato qualsiasi tipo di illuminazione o ombreggiatura. L'albedo *map* definisce il colore diffuso di un oggetto, ovvero il colore apparente in condizioni di luce uniformemente distribuita.

Algoritmi ICP: gli algoritmi ICP (*Iterative Closest Point*) sono una classe di algoritmi utilizzati per ridurre al minimo la differenza tra due nuvole di punti, spesso utilizzati per ricostruire superfici 2D o 3D a partire da diverse *range map*. Tali algoritmi mantengono fissa una nuvola di punti (il riferimento) mentre trasformano l'altra (la sorgente) per corrispondere al meglio al riferimento mediante una serie di trasformazioni rigide (traslazioni e rotazioni), che vengono stimate iterativamente al fine di ridurre al minimo una metrica di errore.

Appearance: nel contesto di queste Linee guida, per *appearance* si intende l'insieme delle caratteristiche e delle proprietà (ad esempio materiali, *texture*, tecniche di *shading*) legate all'aspetto della superficie di un modello 3D.

ASCII: acronimo di *American Standard Code for Information Interchange*, è un codice di codifica di caratteri. Consente la rappresentazione numerica dei caratteri alfanumerici, simboli di punteggiatura e altri simboli. Un file contenente dati codificati in ASCII è leggibile con un qualunque *editor* di testo ed è universalmente riconosciuto da tutti i computer.

Augmented reality: con il termine *Augmented Reality* (AR) si fa riferimento ad una tecnologia immersiva che permette di generare/sperimentare un ambiente in cui elementi del mondo reale ed elementi sintetici generati dal computer possano coesistere. Avvalendosi dell'uso di specifici visori/*device*, tale tecnologia consente di sovrapporre oggetti virtuali all'ambiente fisico reale. Sebbene presenti elementi di sovrapposizione con la *Mixed Reality*, a differenza di quest'ultima è in grado di fornire minori livelli di immersività, di interazione con gli elementi virtuali, e di integrazione fra elementi sintetici e reali.

Baseline: nel rilievo digitale e nel contesto delle tecniche di acquisizione *range-based*, con particolare riferimento al processo di acquisizione 3D mediante triangolazione, con *baseline* si definisce la distanza fra la sorgente emettitrice (diodo laser, lampada o led) e il sensore di rilevamento (camera/e). Se il termine fa riferimento a tecniche di acquisizione *image-based* in cui si usano solo sensori ottici passivi (come avviene in fotogrammetria), allora definisce la distanza fra due prese fotografiche.

Bounding box: letteralmente scatola di delimitazione, è la misura più piccola (di area, volume, o ipervolume in dimensioni maggiori) entro cui sono contenuti tutti i punti di un insieme di elementi nello spazio.

Bundle adjustment: la compensazione “a stelle proiettive”, o *bundle adjustment*, è un processo di ottimizzazione che migliora le stime dei parametri estrinseci della camera (posizione e orientamento, o posa) e le posizioni tridimensionali (3D) delle feature utilizzando più immagini della stessa scena scattate da diverse prospettive. Utilizzato in fotogrammetria e computer *stereo vision*, permette di minimizzazione l'errore di riproiezione³⁸.

Dati grezzi: nel contesto di queste Linee guida, dati di acquisizione nella loro forma meno processata. Ad esempio, nel caso di ricostruzioni fotogrammetriche si intendono tutte le fotografie in formato DNG (*Digital Negative Image*), mentre per scansioni effettuate con uno strumento di scansione attiva si intendono le singole *range map* ottenute dallo strumento e salvate in un formato aperto.

Decimazione: in ambito di 3D *processing*, per decimazione di una *mesh* (o sotto-campionamento, nel caso di nuvole di punti) si intende un processo atto a ridurre la complessità geometrica di un modello digitale, generando una geometria semplificata con meno triangoli o punti, ma ancora rappresentativa del modello originale.

Denoising: in ambito di 3D *processing*, per *denoising* di una *mesh* si intende un processo atto a rimuovere il rumore eventualmente presente sulla superficie di un modello 3D, preservando i segnali intrinseci della superficie nel modo più accurato possibile.

Deviazione standard: in statistica lo scarto quadratico medio (o deviazione *standard*) è un indice di dispersione statistico, vale a dire una stima della variabilità dei dati intorno ad un indice di posizione (come, ad esempio, la media aritmetica o una sua stima).

Distanza iperfocale: in ottica o fotografia, indica la specifica distanza di messa a fuoco che permette di avere tutti gli elementi di una scena accettabilmente nitidi fino all'infinito. Definisce la massima estensione della profondità di campo alla quale un obiettivo può mettere a fuoco.

Errore di graficismo: in cartografia definisce la dimensione minima degli oggetti che vanno riportati su una carta ad una determinata scala, nonché la tolleranza sulla loro posizione. Convenzionalmente è considerato pari a 0,2 mm.

Exif: l'Exif (*EXchangeable Image File format*) è una specifica che definisce un *set* di metadati. Tali metadati, possono essere integrati all'interno di svariati formati di file immagine (JPEG, TIFF) e possono contenere informazioni come tipo di fotocamera, ottiche, dimensioni, numero di *pixel*, lunghezza focale, valori ISO, data e ora di scatto.

Finestra di lavoro: in metrologia, per finestra di lavoro di uno strumento di misura si intende l'intervallo di funzionamento dello stesso. Tale intervallo è dato dal valore massimo (portata) e minimo (soglia o sensibilità) della grandezza in esame che lo strumento è in grado di fornire.

³⁸ Moore, Z., Wright, D., Schinstock, D.E. and Lewis, C., 2009

Frame: in ambito di acquisizione 3D, con *frame* si intende la finestra di lavoro propria dello scanner e l'insieme di dati in essa misurati in un singolo scatto, a partire dai quali viene prodotta la risultante *range map*.

Gaussian splatting: in computer grafica, si intende un approccio avanzato per la ricostruzione volumetrica 3D a partire da un *set* incompleto di immagini 2D sparse. Questa tecnica, basata su *machine learning*, utilizza funzioni gaussiane per rappresentare la scena 3D come nuvole di punti non strutturati, successivamente convertiti ed organizzati nello spazio 2D per un *rendering* efficace e veloce (*gaussian splatting* 3D). Con gli ultimi avanzamenti tale tecnica può supportare il *rendering* in tempo reale di scene 3D dinamiche (*gaussian splatting* 4D).

Ghosting: in fotogrammetria, il *ghosting* è un fenomeno che si verifica quando, nel processo di generazione della *texture* attraverso la combinazione di più immagini, un oggetto in movimento viene rappresentato più volte nella *texture* apparendo semitrasparente, come un fantasma (*ghost*).

GNSS: acronimo di *Global Navigation Satellite System*, con GNSS si intende un sistema autonomo di geo-posizionamento e navigazione satellitare con copertura globale, operante tramite radiofrequenza. A titolo esplicativo, fanno parte di questa categoria il sistema GPS (*Global Positioning System*, controllato dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America) e il sistema Galileo (sviluppato dall'Unione Europea).

Lens hood: dispositivo progettato per essere posizionato nella parte anteriore di un sistema di lenti al fine di prevenire l'ingresso di luce indesiderata nell'ottica a cui è collegato, evitando o riducendo riflessi e bagliori. Riferibile in italiano genericamente come "paraluce", un *lens hood* può essere di varie forme (conico, cilindrico, a petalo) e materiali (plastica, silicone).

Light field rendering: in computer grafica, tecnologie che mirano a catturare e riprodurre il fronte d'onda luminoso emesso/riflesso da un oggetto nella sua completezza. Le rappresentazioni utilizzate da questi approcci, concentrandosi sull'apparenza visuale dell'oggetto, possono essere in grado di riprodurre in maniera fedele oggetti complessi per le tecnologie di acquisizione tradizionali, ma non offrono una rappresentazione misurabile accurata della forma e geometria dell'oggetto acquisito.

Light probe: in computer grafica, tecnica per approssimare, in maniera computazionalmente poco onerosa, l'illuminazione globale di una scena 3D. Tale tecnica consiste nel campionare e memorizzare informazioni sull'illuminazione in una scena 3D acquisendo dati sulla luce che attraversa punti specifici della scena stessa. I dati pre-calcolati con la tecnica *light probe* possono essere utilizzati in fase di *rendering* per migliorare l'*appearance* di un oggetto 3D.

Lightbox: in generale, è una superficie traslucida illuminata dal retro. Una sua possibile configurazione, utilizzata in ambito fotografico, è rappresentata da cubi rivestiti internamente in tessuto di alluminio e dotati di luci led integrate che permettono di illuminare l'oggetto con una luce morbida e controllabile (intensità e temperatura), utile ad eliminare le ombre portate.

Manifold: in matematica, indica uno spazio topologico che localmente assomiglia ad uno spazio euclideo. Ad un *manifold* n-dimensionale (o *n-manifold*) corrisponde uno spazio euclideo n-dimensionale. Oggetti 2-*manifold* sono dunque oggetti che localmente hanno le proprietà di un piano. In grafica 3D il concetto di 2-*manifold* viene utilizzato per definire geometrie *mesh* topologicamente più facili da trattare. In particolare, in una *mesh 2-manifold* ogni *edge* deve essere condiviso da massimo 2 facce, ed ogni vertice deve essere condiviso da massimo una stella.

Marker: nell'acquisizione 3D, un *marker* (o *target*) identifica un oggetto fisico che per forma, colore/*pattern*, o comportamento ottico, viene riconosciuto automaticamente e usato come punto di riferimento dal *software* dello scanner oppure dal *software* di fotogrammetria. Durante la scansione 3D, i *marker* aiutano a verificare la qualità della ripresa; aiutano o rendono automatico l'allineamento delle varie riprese sia durante la ripresa sia nell'elaborazione successiva. In fotogrammetria, i *marker* riconosciuti sulle foto possono rendere più veloce e precisa la prima fase di calibrazione/orientamento delle foto; successivamente, nella fase di generazione dei dati densi sono usati per l'orientamento, scalatura e georeferenziazione del dato 3D; infine, possono essere usati per verificare l'accuratezza del risultato.

Mesh: una *mesh* poligonale, in computer grafica, è un'approssimazione discreta di una superficie, impiegata per definire un oggetto tridimensionale nello spazio tramite un insieme di vertici, lati, e facce planari. Il reticolo di poligoni definito da una *mesh* definisce solo la superficie dell'oggetto, per questo motivo si parla di rappresentazioni *boundary-based*.

Mixed reality: con il termine *Mixed Reality* (MR) si fa riferimento ad una tecnologia immersiva che permette di generare/sperimentare un ambiente in cui elementi del mondo reale ed elementi sintetici generati dal computer possano coesistere. Avvalendosi dell'uso di specifici visori/device, tale tecnologia consente di integrare oggetti virtuali nell'ambiente fisico reale. Sebbene presenti elementi di sovrapposizione con l'*Augmented Reality*, a differenza di quest'ultima è in grado di fornire maggiori livelli di immersività, di interazione con gli elementi virtuali, e di integrazione fra elementi sintetici e reali.

Motion capture: la "cattura del movimento" è il processo di registrazione del movimento del corpo umano o di oggetti. Il dispositivo utilizzato per l'acquisizione del movimento è un sistema fotogrammetrico, ovvero un sistema di più telecamere che sono anche emettitrici di luce (che può essere visibile, infrarossa o *near-infrared*) e di marcatori (piccole sfere) di materiale riflettente.

NeRF: in computer vision, con il termine NeRF (*Neural Radiance Field*) si intende un approccio avanzato per la ricostruzione di scene 3D a partire da un *set* incompleto di immagini 2D sparse. Tale metodo, basato su deep learning, attraverso l'uso delle informazioni provenienti dalle diverse prospettive, fornite in *input* ad una *neural deep network*, è in grado di apprendere proprietà come la geometria della scena 3D, la riflettanza della superficie, o la posizione delle camere, e di eseguire il *rendering* di viste 3D fotorealistiche da nuovi punti di vista, generando automaticamente dati sintetici per colmare le lacune.

N-gon: in computer grafica, un n-gon è un poligono con più di quattro vertici e lati.

Normal map: in computer grafica, una *normal map* è tipicamente una immagine 2D (*texture*) in formato RGB, che codifica informazione delle normali su una superficie. È una tecnica ampiamente usata per simulare

la complessità del rilievo di superfici (micro-variazioni) senza doverle modellare in dettaglio nella mesh geometrica.

Nuvola di punti: una nuvola di punti, in computer grafica, è un'approssimazione discreta di una superficie, impiegata per definire un oggetto tridimensionale nello spazio tramite un insieme di punti caratterizzati da coordinate spaziali. Tali nuvole, che sono solitamente generate a seguito di un rilievo fotogrammetrico o laser scanner, rappresentano dunque solo la superficie (campionata) dell'oggetto del rilievo.

OGC: l'OGC (*Open Geospatial Consortium*) è un'organizzazione internazionale che supporta una comunità diversificata di oltre 500 aziende, agenzie governative, organizzazioni di ricerca e università, impegnata nella creazione e definizione di *standard* interoperabili e nel rendere le informazioni geospaziali FAIR.

PBR: in ambito 3D *real-time*, il PBR (*Physically-Based Rendering*) è un modello di materiale ampiamente diffuso che cerca di approssimare la risposta ottica delle superfici in base ad una serie di proprietà fisiche (ad esempio ruvidità, lucidità, metallescenza, emissione) tipicamente codificate in immagini 2D (mappe *texture*) associate al modello 3D. Il modello PBR mira a una simulazione più corretta e coerente di materiali complessi, in base al contesto di illuminazione virtuale o reale.

Portata: in metrologia, per portata di uno strumento di misura si intende il valore massimo della grandezza in esame che lo strumento è in grado di fornire.

Probing arm: dispositivo di acquisizione 3D in grado di rilevare punti discreti sulla superficie degli oggetti fisici mediante il contatto diretto con sonde di scansione meccaniche dotate di appositi sensori alle estremità.

Precisione: in metrologia, il termine precisione descrive il grado di vicinanza reciproca di un insieme di misure o di osservazioni ripetute sullo stesso campione a parità di condizioni.

Range map: in ambito di acquisizione 3D, per *range map* si intende una mappa di profondità ottenuta con un dispositivo di scansione attiva. Può essere salvata sia come *mesh* sia come immagine utilizzando un formato che permetta di salvare canali di profondità, come ad esempio EXR (*Extended Dynamic Range*).

Registrazione: in ambito di acquisizione 3D, per registrazione si intende la fase di allineamento reciproco fra due o più levate di misura (tipicamente *range map*) in un sistema di riferimento comune. L'approccio di registrazione *standard* consiste in un allineamento approssimativo iniziale seguito da una tecnica di raffinazione automatica (algoritmi ICP).

Remeshing: in ambito di 3D *processing*, per *remeshing* si intende un cambiamento nel numero, nella forma, nella dimensione o nella disposizione dei poligoni che formano una *mesh* 3D, atto a definire la sua superficie in termini di una nuova *mesh* digitale.

Rigging: nella computer grafica 3D l'operazione di *rigging* è il processo di preparazione di un modello 3D per l'animazione, che prevede l'aggiunta di scheletri virtuali, chiamati "*rig*", alla *mesh* del modello. È importante

perché consente di creare personaggi o oggetti 3D che possono essere animati in modo realistico e dettagliato.

RMSE: in statistica l'RMSE, o *Root-Mean-Square Error* (radice quadrata dell'errore quadratico medio) è un indice in grado di misurare la differenza media fra i valori dei dati osservati ed i valori dei dati stimati. In ambito di acquisizione 3D, l'RMSE è utilizzata come misura di valutazione del processo di registrazione 3D.

Scala di restituzione: in ambito di acquisizione 3D, per scala di restituzione si intende la scala di rappresentazione (ovvero il rapporto che intercorre tra le misure grafiche del modello digitale e le misure reali dell'elemento digitalizzato) propria del modello acquisito.

Setup di acquisizione: in ambito di acquisizione 3D, per *setup* di acquisizione si intende l'insieme degli elementi (strumenti di misura, attrezzature di supporto, *software* di acquisizione) utilizzati in fase di acquisizione, nonché la loro configurazione di utilizzo (posizionamento della strumentazione, parametri di funzionamento, protocollo di utilizzo).

Soglia: in metrologia, per soglia (o sensibilità) di uno strumento di misura si intende il valore minimo della grandezza in esame che lo strumento è in grado di fornire.

Tavoli/Set da still life: supporti smontabili costituiti da un telaio in metallo ed un fondale continuo in vari materiali (ad esempio carta, tela) bianco o di vari colori. L'illuminazione non è integrata ma affidata a illuminatori o flash esterni montati su stativi e dotati di diffusori.

Texel: in computer grafica, un texel (o *texture pixel*) è l'unità fondamentale di una *texture*. Le *texture* sono rappresentate da matrici di texel che rappresentano lo spazio *texture*, proprio come le immagini sono rappresentate da matrici di pixel.

Unwrapping/Texture Parametrization: in computer grafica, con *UV-unwrapping* si indica il processo di parametrizzazione della superficie di un oggetto sullo spazio *texture*. Questo processo permette di associare ad ogni punto della superficie di un oggetto 3D un punto di una immagine 2D (*texture*) per associarci colore, normale, riflettanza, et. In pratica è un processo in cui si ritagliano porzioni della superficie e si appiattiscono sul piano cercando di minimizzare la distorsione che si genera.

Vettore normale: vettore tridimensionale perpendicolare al piano di riferimento. La normale di un punto p appartenente ad una superficie è un vettore perpendicolare al piano tangente a quella superficie nel punto p .

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Attività di Rilevamento

- Atkinson Gary, A., Edwin R. Hancock 2005, "Analysis of Directional Reflectance and Surface Orientation Using Fresnel Theory." Lecture Notes in Computer Science, 103–11. doi:10.1007/11578079_11
- Baldacci, A., Bernabei, D., Corsini, M., Ganovelli, F., Scopigno, R., 2016. 3D reconstruction for featureless scenes with curvature hints. *The Visual Computer*, 32, pp.1605-1620.
- Cao, M., Jia, W., Lv, Z., Li, Y., Xie, W., Zheng, L., Liu, X., 2019. Fast and robust feature tracking for 3d reconstruction. *Opt. Laser Technol.* 110, 120–128. Zhang, G., Liu, H., Dong, Z., Jia, J., Wong, T.-T., Bao, H., 2016. Efficient non-consecutive feature tracking for robust structure-from-motion. *IEEE Trans. Image Process.* 25 (12), 5957–5970.
- Cosentino, A., 2013. "Polarized light photography for art documentation." *Cultural Heritage Science Open Source*. <https://chopensource.org/polarized-light-photography-for-art-documentation/>
- Christova, A., 2020. A Comparison of Selected Photogrammetric Techniques for Creating 3D Models of Cultural Objects with Specular Surface.
- Furukawa, Y., Ponce, J. (2007). Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Trans. Pattern Anal.* 32. 10.1109/CVPR.2007. 383246. Yasutaka Furukawa and Jean Ponce, Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 32, Issue 8, Pages 1362-1376, August 2010.
- Gallo, A., Maurizio M., and Fabio B. 2014. "3D Reconstruction of Small Sized Objects from a Sequence of Multi-Focused Images." *Journal of Cultural Heritage* 15, no. 2: 173-182. doi: 10.1016/j.culher.2013.04.009
- Gerbino, S., Del Giudice, D.M., Staiano, G., Lanzotti, A., Martorelli, M., 2016. On the influence of scanning factors on the laser scanner-based 3D inspection process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84, pp.1787-1799.
- Govender, N. (2009). Evaluation of feature detection algorithms for structure from motion. Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, Technical Report.
- Koutsoudis, A., Ioannakis, G., Vidmar, B., Arnaoutoglou, F., Chamzas, C., 2015. Using noise function-based patterns to enhance photogrammetric 3D reconstruction performance of featureless surfaces. *Journal of Cultural Heritage*, 16(5), pp. 664-670.
- Kroeger, O., Krumpek, O., Kock, P., Pape, M., Schneider, J., Kruegel, J., 2023: High Resolution 2D-3D –scanning and deep learning segmentation for digitization of fragmented wall paintings. In proceedings of I 21st Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage GCH2023, Lecce 4-6 September 2023, editors A. Bucciario, B. Fanini, H. Graf, S. Pescarin, and S. Rizvic. Published by Eurographics - The European Association for Computer Graphics, EG Digital Library.
- Kutlu H., Brucker, F., Kallendrusch, B., Santos, P., Fellner D.W.: AI based image segmentation of cultural heritage objects used for multi-view stereo 3D reconstructions. In Proceedings of 21st Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage GCH2023, Lecce 4-6 September 2023, editors A. Bucciario, B. Fanini, H. Graf, S. Pescarin, and S. Rizvic. Published by Eurographics - The European Association for Computer Graphics, EG Digital Library. DOI: 10.2312/gch.20231160
- Lowe, D.G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vision* 60 (2), 91–110. Wu, C., 2007. SiftGPU: A gpu implementation of david lowe’s scale invariant feature transform (sift). <https://github.com/pitzer/SiftGPU>.
- Moore, Z., Wright, D., Schinstock, D.E. and Lewis, C., 2009, March. Comparison of bundle adjustment formulations. In *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Nam, J., Valinasab, B. and Jun, M.B., 2017. Performance Evaluation of Atomization-Based Uniform Spray Coating for 3D Scanning. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 34(10), pp.689-693.
- Pagliarulo, V., Farroni, F., Ferraro, P., Lanzotti, A., Martorelli, M., Memmolo, P., Speranza, D. and Timpone, F., 2018. Combining ESPI with laser scanning for 3D characterization of racing tyres sections. *Optics and Lasers in Engineering*, 104, pp.71-77.
- Porter, S.T., Roussel, M. and Soressi, M., 2016. A simple photogrammetry rig for the reliable creation of 3D artifact models in the field: lithic examples from the Early Upper Paleolithic sequence of Les Cottés (France). *Advances in Archaeological Practice*, 4(1), pp.71-86.
- Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., Bradski, G., 2011. Orb: An efficient alternative to sift or surf. In: 2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE, pp. 2564–2571.

- Sedaghat, A., Mohammadi, N., 2019. High-resolution image registration based on improved surf detector and localized gtm. *Int. J. Remote Sens.* 40 (7), 2576–2601. Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., Van Gool, L., 2008. Speeded-up robust features (surf). *Comput. Vision Image Understand.* 110 (3), 346–359.
- Xue, F., Filin, S., Elnashef, B. and Jin, W., 2022. Shape from Polarization for Featureless and Specular Objects. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, pp.143-148.
- Wachowiak, M.J. and Karas, B.V., 2009. 3D scanning and replication for museum and cultural heritage applications. *Journal of the American Institute for Conservation*, 48(2), pp.141-158
- Morelli, L., A., Karami, F., Menna, and F. Remondino. 2022. "Orientation of Images with Low Contrast Textures and Transparent Objects." *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-2/W2-2022: 77-84.* doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W2-2022-77-2022.

Linee Guida nel panorama Europeo

- Data Act. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-act>. Legge sui dati, adottata dalla Commissione europea il 23 febbraio 2022
- Common European Data Space for Cultural Heritage. Commission Recommendation (EU) 2021/1970 of 10 November 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021H1970>
- Niccolucci, F., Felicetti, A., & Hermon, S. (2022). "Populating the data space for cultural heritage with heritage digital twins". *Data*, 7(8), 105.
- Freire, N., Manguinhas, H., Isaac, A., & Charles, V. (2023, September). Persistent Identifier Usage by Cultural Heritage Institutions: A Study on the Europeana. eu Dataset. In *International Conference on Theory and Practice of Digital Libraries* (pp. 341-348). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Dore, G., & Turan, P. (2024). "When Copyright Meets Digital Cultural Heritage: Picturing an EU Right to Culture in Freedom of Panorama and Reproduction of Public Domain Art". *IIC-International Review of Intellectual Property and Competition Law*, 1-29.
- European Commission. (2022). "Strengthening Cultural Heritage Resilience for Climate Change: Where the European Green Deal Meets Cultural Heritage". Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2766/44688>
- Lévy, M., Niggemann, E., De Decker, J., "The new Renaissance: report of the Comité des Sages on bringing Europe's cultural heritage online", Publications Office, 2011, <https://data.europa.eu/doi/10.2759/45571>
- European Commission, Directorate-General for Education, Youth, Sport and Culture, Stormy times – Nature and humans – Cultural courage for change – 11 messages for and from Europe, Publications Office of the European Union, 2022. <https://data.europa.eu/doi/10.2766/90729>
- Official Journal of the European Union. "On the digitisation and online accessibility of cultural material and digital preservation". Commission Recommendation of 27 October 2011
- Digital Cultural Heritage and Europeana (DCHE) Expert Group. "Basic principles and tips for 3D digitisation of cultural heritage", 2020. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/basic-principles-and-tips-3d-digitisation-cultural-heritage>
- Network of European Museum Organizations (2020), "Digitisation and IPR in European Museums" (Final report). https://www.nemo.org/fileadmin/Dateien/public/Publications/NEMO_Final_Report_Digitisation_and_IPR_in_European_Museums_WG_07.20_20.pdf
- Pritchard, D., Rigauts, T., Ripanti, F., Ioannides, M., Brumana, R., Davies, R., ... & Toumpouri, M. (2021). "Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage". <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/study-quality-3d-digitisation-tangible-cultural-heritage>
- European Research Council (ERC) Guidelines on Implementation of Open Access to Scientific Publications and Research Data in projects supported by the European Research Council under Horizon 2020: https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/hi/oa-pilot/h2020-hi-erc-oa-guide_en.pdf

Linee Guida nel panorama Nazionale

- Linee guida del Piano nazionale di digitalizzazione del patrimonio culturale: <https://digitallibrary.cultura.gov.it/linee-guida/>
- Linee guida per l'acquisizione, la circolazione e il riuso delle riproduzioni dei beni culturali in ambiente digitale: <https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-circolazione-riuso-docs/it/consultazione/index.html>

- Linee guida per la classificazione di prodotti e servizi digitali, processi e modelli di gestione, PND: <https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-servizi-docs/it/consultazione/index.html>
- NORMATIVA OA – OPERE E OGGETTI D'ARTE VERSIONE 3.00 NORME DI COMPILAZIONE: <http://www.iccd.beniculturali.it/getFile.php?id=6588>

Interoperabilità formati 3D

- Atkinson, R. A., Hunter, A., Car, N. J., Purss, M. B. J., & Cochrane, B. (2022). Roadmap for interoperable 3D data models in OGC APIS and other data exchange approaches. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 13-20.
- Tommasi, C., & Achille, C. (2017). Interoperability matter: Levels of data sharing, starting from a 3D information modelling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 623-630.
- Fonseca, Í. A., Gaspar, H. M., de Mello, P. C., & Sasaki, H. A. U. (2022). A standards-based digital twin of an experiment with a scale model ship. *Computer-Aided Design*, 145, 103191.
- Lentz, R. W., Brutzman, D. P., & Kamburelis, M. (2021, November). X3D and glTF Model Differencing for Conversions, Comparison and Conformance Testing. In *Web3D* (pp. 6-1).
- Runtime 3D asset delivery format - glTF ISO/IEC 12113:2022 standard: <https://www.iso.org/standard/83990.html>
- Champion, E. (2017). The role of 3D models in virtual heritage infrastructures. In *Cultural heritage infrastructures in digital humanities* (pp. 15-35). Routledge.
- France, F. G., & Forsberg, A. (2021, June). Addressing the challenges of interoperability and cultural heritage data. In *Archiving Conference* (Vol. 18, pp. 33-37). Society for Imaging Science and Technology.
- Storeide, M. S. B., George, S., Sole, A., & Hardeberg, J. Y. (2023). Standardization of digitized heritage: a review of implementations of 3D in cultural heritage. *Heritage Science*, 11(1), 249.
- Havele, A., Polys, N., Benman, W., & Brutzman, D. (2022, November). The keys to an open, interoperable metaverse. In *Proceedings of the 27th International Conference on 3D Web Technology* (pp. 1-7).
- Albrezzi, F., Bonnett, J., Gniady, T., Richards-Risetto, H., & Snyder, L. (2022). Accessing 3D Data.
- Huber, D. (2011, January). The ASTM E57 file format for 3D imaging data exchange. In *Three-Dimensional Imaging, Interaction, and Measurement* (Vol. 7864, pp. 88-96). SPIE.
- Bolstad, M. A. (2019, October). Large-scale cinematic visualization using universal scene description. In *2019 IEEE 9th Symposium on Large Data Analysis and Visualization (LDAV)* (pp. 1-2). IEEE.
- Li, X., Yalcin, B. C., Christidi-Loumpasefski, O. O., Martinez Luna, C., Hubert Delisle, M., Rodriguez, G., ... & Olivares Mendez, M. A. (2022, May). Exploring NVIDIA omniverse for future space resources missions. In *Space Resources Week 2022*.
- Wilkinson, M. D. *et al.* The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Sci. Data* 3:160018 doi: 10.1038/sdata.2016.18 (2016).

Diritti commerciali e intellettuali delle riproduzioni digitali tridimensionali

- Arizza M., Boi V., Piergrossi A., Palombini A., Alessandra Caravale, eds. (2018). I dati archeologici. Accessibilità, proprietà, disseminazione. *ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI*, Firenze, All'Insegna del Giglio, ISSN: 2385-1953 DOI:10.19282/ac.29.2018.01
- Palombini A. (2017), The rights of reproducing Cultural Heritage in the digital Era. An Italian Perspective. In: *Ex Novo Journal of Archaeology*, ISBN: 978-1-78491-763-0

Schemi e modelli di dati

- Modello dati di Europea: <https://pro.europeana.eu/page/edm-documentation>
- Modello concettuale di riferimento CIDOC. ICOM: <http://www.cidoc-crm.org>
- Programma Vocabolario Getty. J. Paul Getty Trust: <http://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/>
- Linked art (Repository):

<https://github.com/linked-art/linked-art>

- ICCD: norme di compilazione delle schede di catalogo:
www.iccd.beniculturali.it/it/ricercanormative
- ICCD-MiBACT/Standard-catalografici:
<https://github.com/ICCD-MiBACT/Standard-catalografici/tree/master/schede-di-catalogo>
- Horizon 2020 Open Research Data Pilot and Data Management Plan:
https://ec.europa.eu/research/participants/docs/h2020-funding-guide/cross-cutting-issues/open-access-dissemination_en.htm
- F. Ferrante, "Strumenti per la catalogazione dei beni storici e artistici" (luglio 2015):
<http://www.iccd.beniculturali.it/getFile.php?id=4252>
- Nomenclatura degli oggetti digitali secondo il PND:
<https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-digitalizzazione-docs/it/v1.0-giugno-2022/nomenclatura-degli-oggetti-digitali/indicazioni-general-1.html>

Progetti di Ricerca

- Pietroni E., Ferdani D., 2021: Virtual Restoration and Virtual reconstruction in Cultural Heritage: terminology, methodologies, visual representation techniques and cognitive models. In journal Information, MDPI-Basel, Volume 12, Special Issue 4 "Virtual Reality Technologies and Applications for Cultural Heritage", 2021, guest editor Juan Carlos Torres. ISSN 2078-2489. DOI 10.3390/info12040167. <https://www.mdpi.com/2078-2489/12/4/167/pdf>
- Pietroni E., Menconero S., Demetrescu E., 2022: Linee Guida mappatura del backend scientifico sulle ricostruzioni virtuali. In Zenodo (indexed by OpenAire), Community e-Archeo project, <https://zenodo.org/record/6614747>. License (for files): Creative Commons Attribution 4.0. International. DOI: 10.5281/zenodo.6614747
- Pietroni E., Manconero S., Ghedini F., Botti C., 2022: e-Archeo: A Pilot National Project to Valorise Italian Archaeological Parks through Digital and Virtual Reality Technologies. In Applied System Innovation, MDPI, Special Issue Advanced Virtual Reality Technologies and Their Applications, 2023 Volume 6, Issue 2, 38. <https://www.mdpi.com/2571-5577/6/2/38/pdf>

CREDITI

Queste Linee Guida e i relativi allegati sono state promosse dall'Istituto centrale per la digitalizzazione del patrimonio culturale – Digital Library, e sono state concettualizzate e sviluppate con il contributo scientifico dell'Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale - ISPC e dell'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione - ISTI del CNR.

Nello specifico, hanno contribuito:

- Per il CNR: Eva Pietroni (Coordinatrice), Marco Callieri, Paolo Cignoni, Emanuel Demetrescu, Bruno Fanini, Daniele Ferdani, Matteo Greco, Augusto Palombini, Eva Pietroni, Marco Potenziani, Diego Ronchi.
- Per il Ministero della Cultura (MiC): Giovanni Pescarmona (Coordinatore), Fabio Giorgio Cavallero, Francesco De Stefano, Lidia Fiorini, Valeria Parisi, Valentina Rossetti.

A cura di:

Ministero della cultura

Istituto centrale per la digitalizzazione del patrimonio culturale – Digital Library

I contenuti del presente documento sono liberamente riutilizzabili da chiunque per qualsiasi fine; è gradita la citazione della fonte.