



Sandro Parrinello

Achitetto e ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università degli Studi di Pavia e Dottore di Ricerca Europeo in Scienza del Rilievo e della Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente è coordinatore scientifico del Laboratorio congiunto Landscape Survey & Design e visiting professor all'Università tecnologica di Perm (RU).



Francesca Picchio

E' architetto e dottoranda presso l'Università degli Studi di Firenze in Scienza del Rilievo e della Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente. Svolge attività di ricerca in ambito internazionale partecipando a progetti europei in Finlandia e Russia interessandosi allo sviluppo di metodologie per la rappresentazione del paesaggio urbano.

Dalla fotografia digitale al modello 3D dell'architettura storica *From digital photography to the 3D model of the historical architecture*

Le procedure di *Structure from motion* si sono, negli ultimi anni, affinate al punto da risultare un interessante sistema di acquisizione dati anche in risposta ad esigenze di documentazione affidabili dei diversi contesti architettonici. Le sperimentazioni riguardanti proprio lo sviluppo delle metodologie alternative di rilievo integrato hanno condotto ad interessanti risultati riguardanti protocolli metodologici per il controllo dell'affidabilità su processi di rilievo architettonico attraverso la fotografia, ponendo le basi per ulteriori sviluppi relativi alle connessioni che certi modelli sono in grado di generare per la conoscenza, la documentazione e la valorizzazione dell'architettura storica.

The Structure from motion procedures have, in recent years, refined to the point of an interesting data acquisition system, also in response to needs for reliable documentation of the different architectural contexts. The study cases about the development of alternative methodologies of that integrated survey are bringing to interesting results concerning methodological protocols to check the reliability of these processes of architectural significance through photography, and lay the foundations for further developments relating to connections that certain models can to generate knowledge, documentation and enhancement of historic architecture.

Parole chiave: rilievo integrato, modelli 3D da rilievi architettonici, modelli 3D affidabili.

Keywords: integrated survey, reality based 3d model, 3D model accuracy.

PREMESSA

Il rilievo architettonico, teso a definire le qualità di uno spazio e di un luogo, è costituito da molte operazioni che trascendono la misura per fornire elaborati descrittivi immediati. Sistemi di analisi che sfruttano la fotografia si inseriscono nel racconto dello spazio generando strumenti conoscitivi che aiutano la definizione delle qualità ambientali e integrano informazioni qualitative connesse al luogo. L'immagine fotografica utilizzata a supporto di elaborati finalizzati prevalentemente a descrivere le qualità superficiali dei complessi architettonici, dai materiali ai cromatismi, ha assunto nell'ultimo periodo un ruolo innovativo nell'ambito della documentazione, sia per la facilità di esecuzione, ottimizzate con le fotocamere automatiche, sia per le tecnologie che vi si sono sviluppate attorno e che permettono di ottenere risultati sempre più soddisfacenti.

Il rilievo e la rappresentazione architettonica sempre più sono orientati verso una condivisione di elaborati grafici che, partendo dalla qualità della misura, intervengono a favore di una ricostruzione anche tridimensionale, utile alla costituzione di modelli conoscitivi completamente virtuali, dove la creazione di strumenti rappresentativi immediati e di supporti di archivio accessibili ha implementato una coscienza comune sulla qualità dello spazio e sulle aspettative di analisi. Questo contribuisce a fornire strumenti valutativi che, partendo dal dato fotografico, traducono e codificano nuovamente lo spazio fisico e dinamico del luogo esplicitandone i significati.

L'avvento del digitale, come strumento attraverso il quale costituire grandi archivi di immagini e librerie dinamiche, ha rivoluzionato il modo di intendere e investigare la dimensione architettonica eliminando il problema della distanza, compresa quella temporale. La visione condivisa dello spazio ha affermato il passaggio dal concetto di democrazia rappresentativa a quello di democrazia diretta del luogo,[1] così che, moltiplicandosi i riferimenti accessibili ad una cyberdemocrazia, si è assistito alla nascita di un'intelligenza collettiva in merito alla conoscenza dello spazio comune. [2] Ultimamente si assiste ad un crescente interesse collettivo verso una visione geografica dei pro-

blemi del luogo, che implica un aumento delle potenzialità di alcuni di quegli strumenti che non richiedono particolari complessità nell'utilizzo: sempre di più i modelli rappresentativi sono costruiti direttamente dalle immagini, stimolando e rafforzando un principio di affidabilità legato a sistemi di ripresentazione del reale che hanno guidato la recente crescita di interesse da parte di utenti assolutamente non esperti ad affrontare problematiche di rappresentazione spaziale impegnando centri e studi di ricerca nel tentativo di creare servizi di supporto agli utenti per lo studio e lo sviluppo di modellazioni semplificate dell'ambiente.[3]

E' da sottolineare che la fotografia accompagna e caratterizza, come elaborato fondante, tutte le procedure di rilevamento ambientale che anche una figura professionale che non possiede una conoscenza culturale, tecnica e scientifica sui problemi del rilievo architettonico, può condurre. La fotografia inoltre, considerata come strumento

1. Sketchup, il più intuitivo dei software di modellazione, prevede già da anni di ricavare il modello direttamente disegnando dalle fotografie, che utilizza poi per mappare la superficie. I singoli scatti fotografici vengono orientati in ambiente 3D ed utilizzando la fotografia come base per il disegno, ripassandola e considerandola su 2 dimensioni, in realtà si disegna in modo quasi automatico il modello tridimensionale sviluppato con geometrie semplici. Alla fotografia, che si drapppeggia automaticamente sulle geometrie semplici, viene demandato il compito di qualificare il modello. Questi strumenti, ormai sostituiti da software di più recente concezione, sviluppano modelli che risultano poco affidabili. Da una verifica incrociata con rilievi eseguiti con laser a scansione e strumenti topografici sull'edilizia storica, oltre che utilizzando altri modelli tridimensionali come "basi fotografiche" per l'elaborazione della costruzione semiautomatica del modello 3D, si sono riscontrati, su edifici di modeste dimensioni, anche errori di svariate decine di centimetri.





di partenza per la conoscenza dimensionale del luogo, è soggetta ad analisi di costruzione geometrica dello spazio utili per ricavare ordinamenti tridimensionali in grado di facilitare il disegno. Per un tecnico, non esperto di modellazione solida, risulta molto più semplice e meno problematico eseguire misure dirette e disegni su una fotografia invece che su un modello solido in ambiente tridimensionale. Inoltre l'immagine digitale ad alta risoluzione, utilizzata per generare l'immagine solida, rimane invariata senza subire deformazioni o modifiche.

La grafica tridimensionale e la modellazione degli spazi virtuali sempre più, per molteplici ragioni di carattere economico e pratico, adoperano sistemi automatici che partendo da fotografie sono in grado di elaborare e creare automaticamente modelli tridimensionali.[4]

Questa prassi, calibrata all'interno dei più evoluti programmi di fotogrammetria e che oramai sembra essere alla portata di tutti, esplicita però una perplessità in merito all'affidabilità del dato metrico ed alla fedeltà della ricostruzione geometrica degli elementi riportati.

Se nella grande maggioranza dei casi a queste procedure viene richiesto di soddisfare una generica condizione di descrizione del contesto reale, ed una qualità morfologica semplificata in funzione della leggerezza gestionale del dato prodotto, anche finalizzato a visualizzazione web, questo è dovuto in larga parte alla consapevolezza di un insufficiente controllo qualitativo sulle deformazioni cui sono soggette le procedure fotogrammetriche.

Confronti tra elaborazioni tridimensionali ottenute attraverso modellazione solida con programmi *open source* e modellazione su base di rilievi topografici, hanno dimostrato come sia possibile durante le acquisizioni in campagna, specialmente se svolte a livello di ambiente urbano, commettere errori di svariati decimetri nella definizione, ad esempio, di un solo fabbricato.

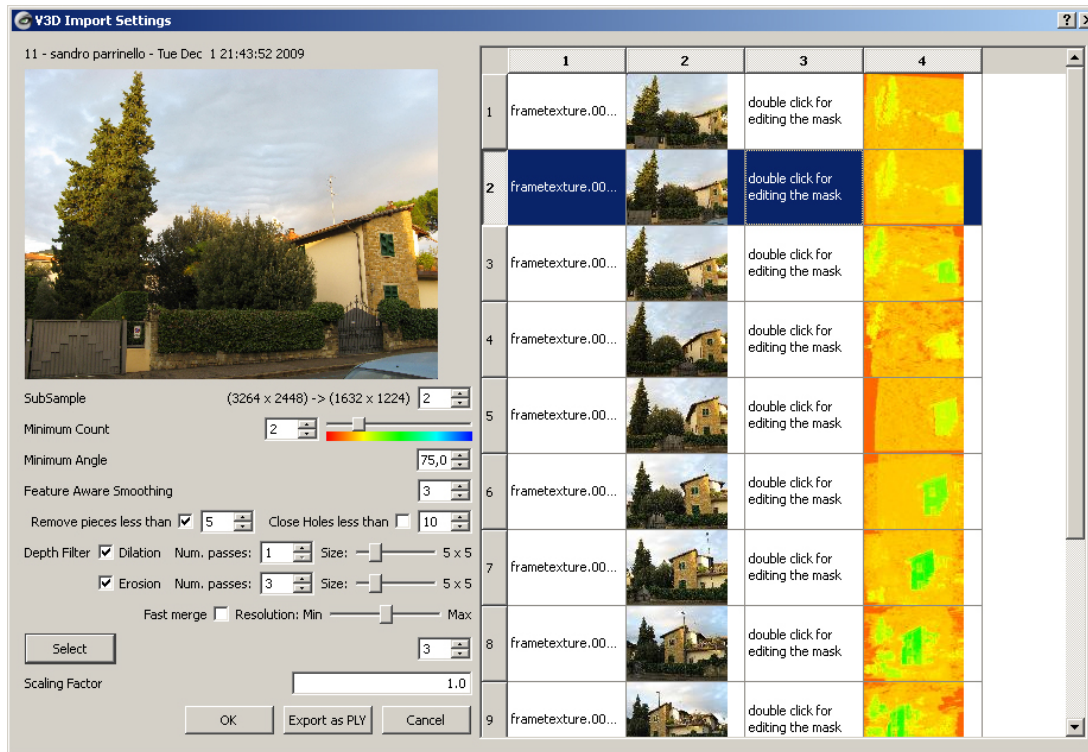
Oltre alla fotografia, come supporto per il disegno dei modelli, la fotogrammetria applicata allo studio dello spazio tridimensionale ha condotto all'elaborazione di *software* in grado di esportare da un sistema di foto sistemi di nuvole di punti ordinati in un sistema di coordinate spaziali.

2. Il software gratuito di Autodesk 123d catch consente di creare modelli 3D da una serie di fotografie. Il processo di reverse modeling prevede che in una serie di fotografie punti notevoli del contesto siano presenti in almeno tre scatti per cui, tramite regole di triangolazione, sia possibile conoscerne la posizione nello spazio. Le procedure automatiche di cloud computing facilitano l'utilizzo di questo strumento utilizzabile anche con un normale smartphone. Obiettivo del software incrementare una banca dati di modelli 3D che possa arricchire piattaforme interattive sul web. Da un'analisi sull'affidabilità del dato metrico si sono riscontrate in sperimentazioni condotte su siti monumentali risultati estremamente soddisfacenti, limiti considerevoli emergono però, per gli addetti ai lavori dovuti alla incapacità di gestire il processo di cloud computing, anche in relazione alle diverse esigenze di risoluzione del dato 3D.

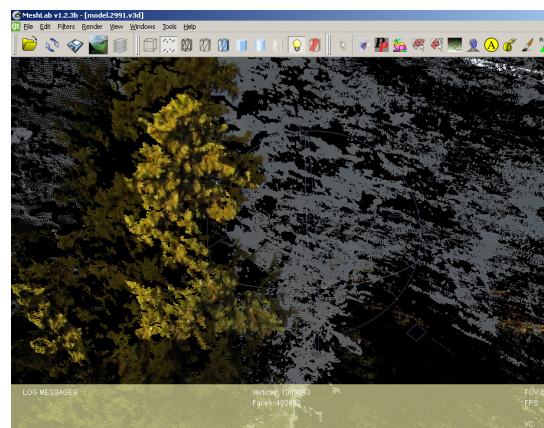
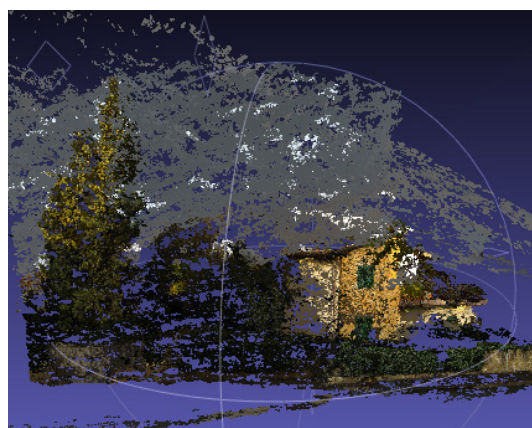
Questi metodi di rilevamento sono ancora nella grande maggioranza dei casi in via di sperimentazione, ma i risultati ottenuti da i primi *software* dedicati danno ragione di credere che possano configurarsi molto presto come una valida alternativa, e senza dubbio più economica, ai laser scanner di tipo tradizionale. Se il vantaggio esecutivo per giungere alla nuvola di punti risiede nella semplicità strumentale impiegata, il controllo della qualità del processo di acquisizione e di elaborazione del modello dipende dalla lettura automatica dei contrasti riportati sul supporto raster continuo della fotografia che deve trasformarsi in sistema discreto di punti nello spazio.

SPERIMENTAZIONI SU FORME COMPLESSE

Anni fa, sperimentando sistemi per il rilevamento del verde,[5] affrontai il tema dell'affidabilità di queste strumentazioni per la lettura di forme irregolari, come le alberature, all'interno dello spazio urbano. Se da un lato la necessità di conoscere la corretta geometria di un'architettura è evidente per qualificarne in generale l'aspetto e la riuscita dell'effetto finale, nel verde è possibile immagi-

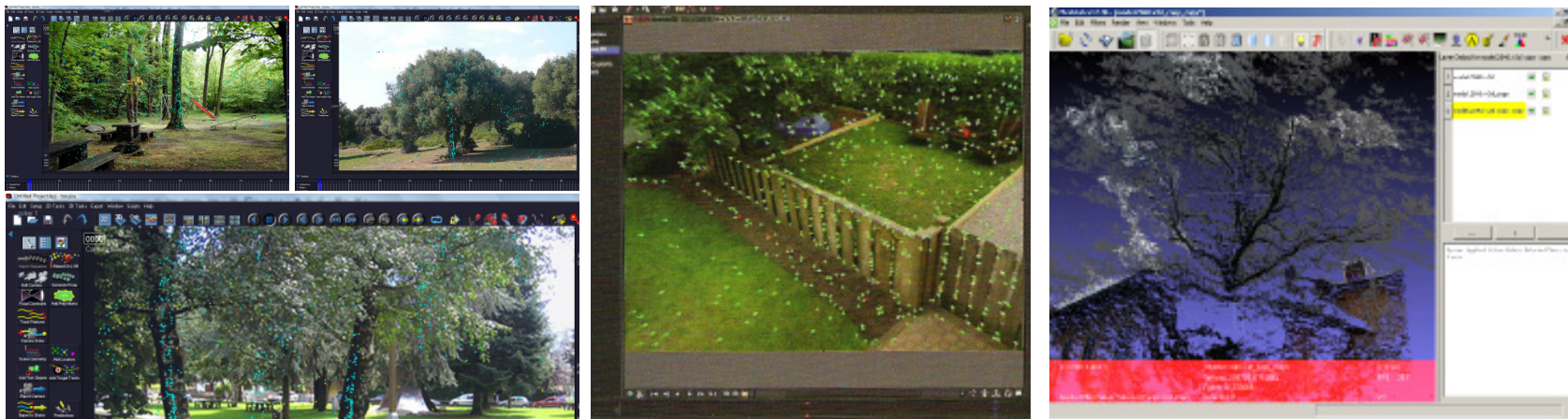


3. Schermata del software MeshLab elaborato dal CNR con visualizzazione dei livelli e del canale Alfa di ogni immagine relativo alla costruzione della nuvola di punti tridimensionale. La sperimentazione riportata riguarda la definizione di un cloud computing per l'ottenimento di dati relativi alle masse fogliari delle chiome degli alberi.



narse che questa precisione di forme non sia necessaria ai fini della descrittività dell'oggetto ed è facile immaginare che sarebbe già un grande risultato capire in che modo ottenere uno strumento valutativo spaziale su un ambiente naturale, avendo come base di appoggio il semplice ed immediato dato fotografico. Vi è una differenza importante tra mondi reali e virtuali. Nel reale tutte le interazioni sono prodotte dalla natura mentre nel mondo virtuale devono essere prodotte dal sistema. Non è chiaro se si può fare a meno della geometria, quando la complessità di un tale aumento delle interazioni sembra annullare ogni possibile e deducibile forma.

La complessità morfologica del verde si evidenzia in questo processo dove la porosità della chioma dovrà essere approssimata a forme metaboliche in grado di contenere *texture* ricavate direttamente dalla fotografia. Il computer, non essendo in grado di interpretare gli elementi di un'immagine, ma soltanto di leggerne qualità relative alle relazioni tra i singoli *pixel*, è costretto a strutturare situa-



4. Sistemi Autotracking, Boujou (sulla sinistra) ed un tools per Maya (sulla destra); la distribuzione dei punti è casuale e non descrittiva, confrontando la qualità tridimensionale del dato con una nuvola topografica del medesimo oggetto complesso si riscontrano errori considerevoli. Sotto un particolare di una chioma di un albero, in ambiente meshLab, la cui ramificazione risulta acquisita mediante Structure from motion.

zioni ipotetiche nella costruzione dello spazio che spesso non coincidono con il reale. Tramite i contrasti dell'immagine i computer possono riconoscere i singoli oggetti, ma non le classi di oggetti per le quali strutturare procedure analoghe. L'automazione dell'interpretazione del dato ottico è ancora un processo inaffidabile dove la diversità e la porosità dell'unità vegetale complicano enormemente la qualità del dato.

In genere i modelli sono basati su immagini semplici che costituiscono un campione rappresentativo delle condizioni di visibilità rilevante; la comprensione della scena automatica ha bisogno di una forte ipotizzazione sulla condizione reale che, frutto di una concomitanza di eventi traducibili con simboli o immagini presenti nella scena, restano razionalmente solo contrasti di colori su una superficie.

Il computer è in grado di estrarre alcuni indizi piuttosto che esplorare l'input visivo nella sua totalità. La difficoltà è insita in due distinte fasi che però non appaiono legate al procedimen-

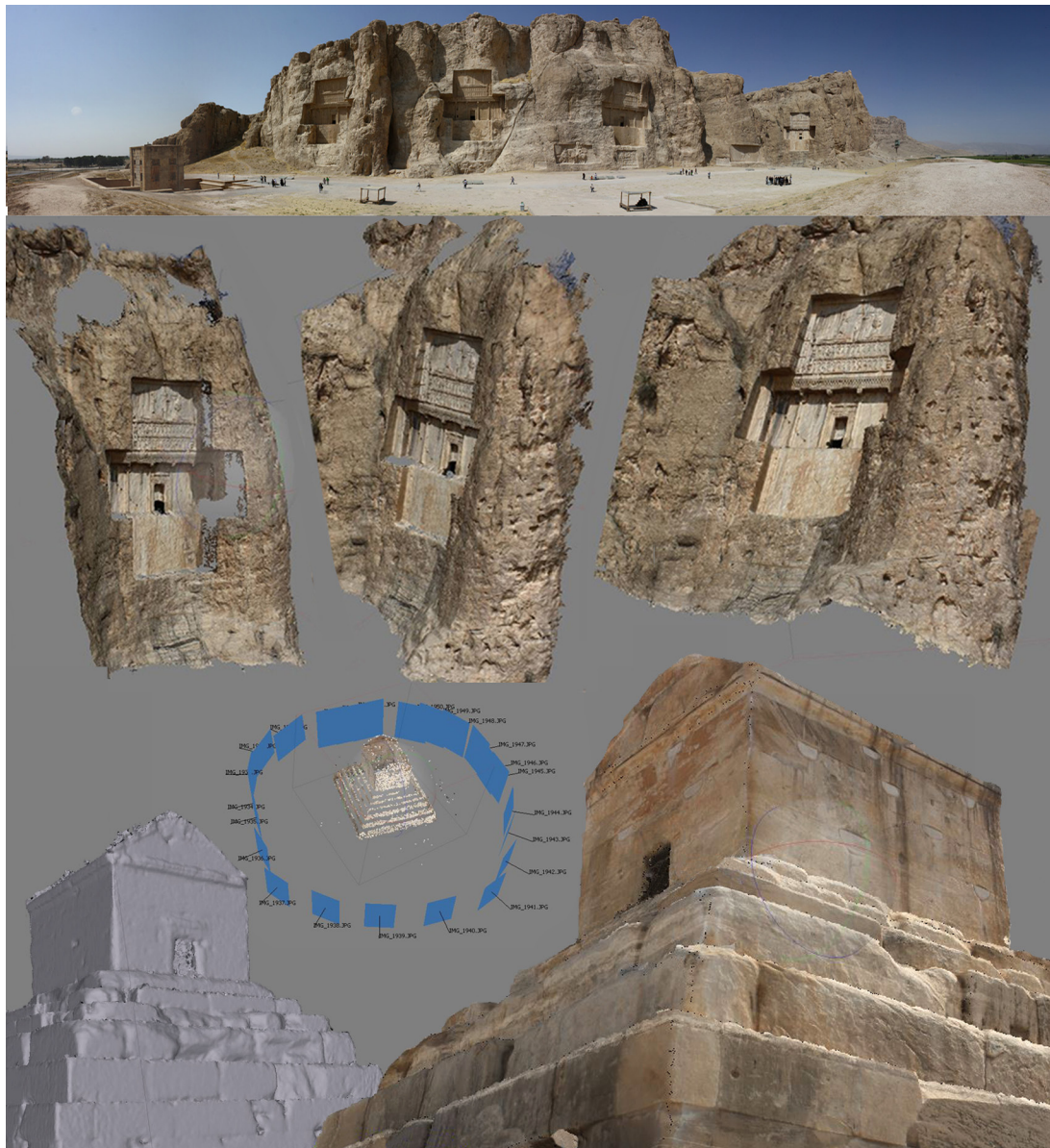
to fotogrammetrico: la prima legata comunque al disegno tridimensionale dell'elemento vegetale e la seconda è relativa alla qualità del dato fotografico che il computer deve interpretare.

La complessità morfologica dell'albero non permette di individuare superfici che consentano un'approssimazione ed inoltre anche nei processi di ricostruzione automatica del modello, l'albero ed i contesti naturali si qualificano per una mancanza di omogeneità di contrasti in grado di favorire la lettura del dato. Gli esseri umani sono in grado di riconoscere facilmente gli oggetti da diversi punti di vista anche se questo può cambiare radicalmente il loro aspetto. I tentativi iniziali di dotare i computer della medesima flessibilità sono stati condotti ricreando ambienti virtuali nei quali erano impiegati modelli 3D di oggetti descritti per punti omologhi. L'individuazione di punti omologhi risulta essere un passaggio il più delle volte non automatico ma anche se affidato alla cura del rilevatore è facile dedurre come sia praticamente impossibile definire con pre-

cisione medesimi punti su due, anche se uguali, immagini virtuali della medesima struttura naturale. E' inoltre opportuno sottolineare la difficoltà riscontrata nel riuscire a realizzare delle fotografie idonee al fine descritto.

Mantenere una distanza il più possibile costante dall'oggetto, inquadrare su più fotografie medesimi punti di riferimento in grado di orientare lo spazio, eseguire l'acquisizione in specifiche condizioni di illuminazione, con una luce che non esalti eccessivamente i contrasti ma anche che non lasci lo spazio verde privo di differenziazioni cromatiche, sono solo alcuni aspetti che complicano ulteriormente il procedimento.

In futuro si ritiene che i sistemi di elaborazione si concentreranno maggiormente sul carattere dinamico e continuo, più sensibili al contesto permettendo di combinare simultaneamente più riprese, anche video, del medesimo ambiente e rielaborando contemporaneamente i file.



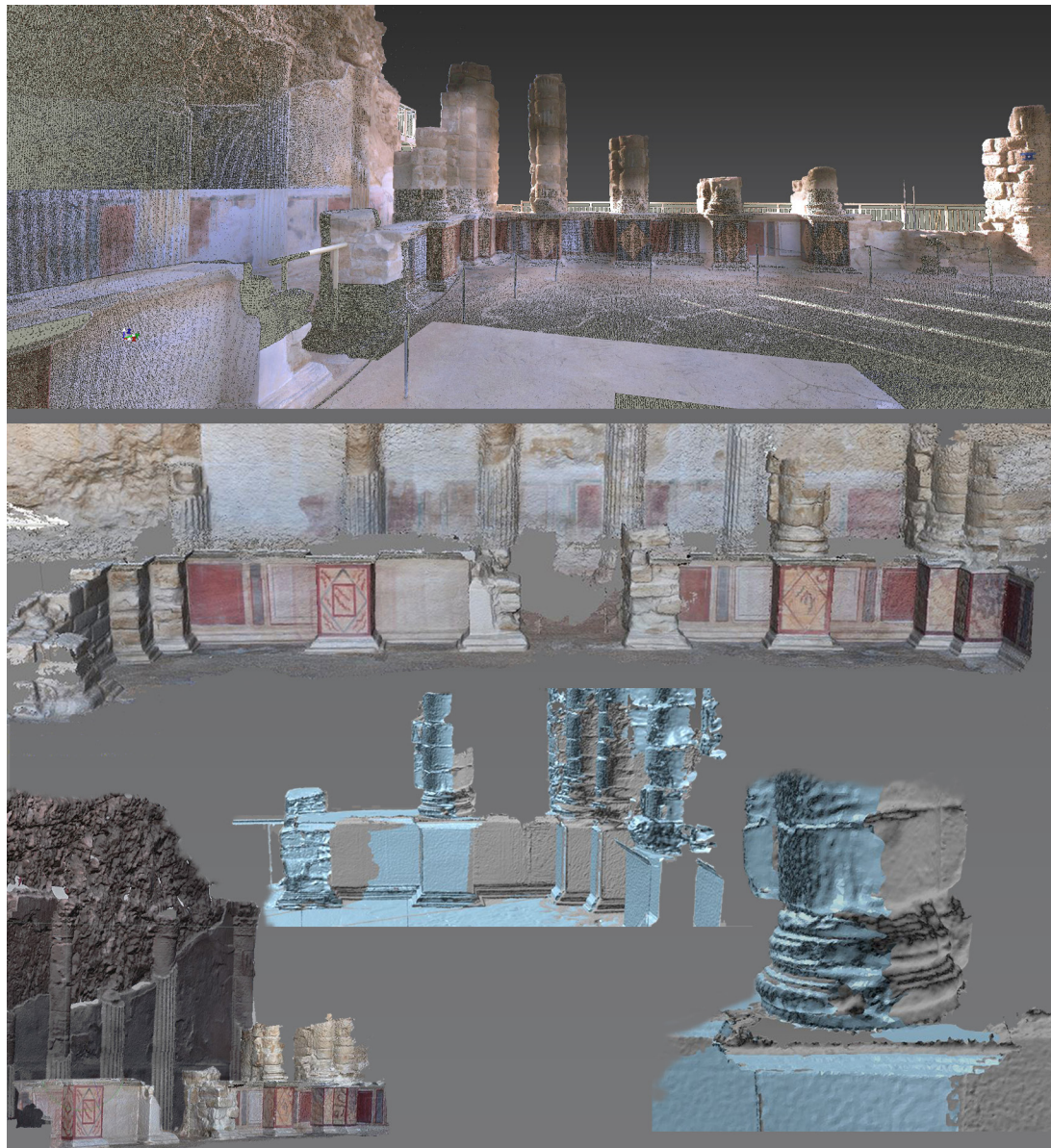
5. Elaborazioni 3D realizzate con software Agisoft PhotoScan. Le tombe dei re achemenidi, scavate nella roccia a Naqsh-e Rostam, nei pressi di Persepoli e la tomba di Ciro a Pasargadae. La generazione di nuvole di punti 3D arricchite con informazioni colorimetriche consentono di definire ambienti ad alta densità di poligoni in grado di supportare graficamente le indagini e gli studi archeologici proponendo una moltitudine di informazioni semantiche.

CRITERI DI INTEGRAZIONE DATI

I progetti di documentazione sviluppati interamente sfruttando le potenzialità dello strumento fotografico hanno consentito di elaborare un elevato numero di modelli digitali 3D che, sia utilizzati singolarmente che posti in relazione con altri ambienti virtuali tridimensionali, risultano fondamentali nel desumere informazioni di carattere morfologico su elementi architettonici complessi. Si tratta di un'esigenza di controllo della deformazione su ambientazioni o architetture di cui, come nei casi illustrati nelle immagini a fianco, la dimensione compromette l'utilizzo di sistemi di misurazione diretta e che, a causa di una complessità geometrica e morfologica, richiede strumenti di controllo della forma che riescano a raccogliere il dato qualitativo relativo alla complessità delle superfici.

E' noto che le tecniche di rilevamento si concentrano su metodologie di elaborazione dati acquisiti mediante due possibili tipologie di strumenti, quelli che utilizzano sensori attivi o passivi, impiegati in ogni caso con procedure di integrazione anche al fine di verificare e controllare la correttezza e la veridicità del dato metrico.

Le principali tecniche di rilievo digitale *reality-based*, basate su sensori attivi e finalizzate ad acquisire dati utili alla produzione di modelli 3D, impiegano strumenti che emettono un segnale elettromagnetico che viene poi registrato al fine di derivarne una misura di distanza. Stazioni totali e laser a scansione nel campo del rilievo architettonico e dei beni culturali hanno riscontrato un grande successo aumentando la facilità con la quale possono essere acquisiti i dati formali re-



6. Sovrapposizione tra una nuvola di punti ottenuta con laser a scansione Leica C10 ed una nuvola elaborata tramite software Agisoft PhotoScan per alcune porzioni di murature del Castello di Erode a Masada.

lativi a semplici oggetti o ad ampie strutture e, semplificando sostanzialmente le progettazioni del rilievo incentrate sulla definizione di scenari ad ampia visibilità, demandano la criticità del dato acquisito a riflessioni condotte in fase di post produzione. La precisione strumentale, se rispettati certi parametri e condizioni al contorno, è poi garantita dallo strumento stesso. Tecniche basate su sensori passivi, che sfruttano invece la luce presente nell'ambiente per acquisire immagini da elaborare successivamente per derivarne informazioni 3D della scena osservata, sono quelle che riguardano i metodi *image-based* qui trattati. I numerosi studi che si sono interessati a tali strumenti hanno visto la sostanziale ottimizzazione dei risultati ottenuti mediante l'utilizzo di macchine fotografiche digitali.

Un'accurata campagna fotografica, eseguita per ambienti interni ed esterni di un complesso architettonico, consente oggi di ottenere modelli tridimensionali ad altissima affidabilità metrica e ad alto contenuto descrittivo, sia sul piano della restituzione materica sia di quella geometrica. *Software* di gestione ed elaborazione di sequenze fotografiche, come ad esempio *Agisoft PhotoScan*, sono in grado di realizzare modelli ad elevato contenuto descrittivo e direttamente relazionabili al sistema di rilevamento utilizzato.

In linea di principio tre immagini ortografiche di quattro punti sono sufficienti a recuperare le posizioni dei punti di ciascuna immagine rispetto ad un sistema di riferimento relativo alle immagini stesse, individuando i reciproci punti di vista dai quali sono state scattate le singole fotografie.[6] Questo comporta la possibilità di desumere da

un flusso di immagini prodotte con una camera mobile, sia la forma degli oggetti che si trovano nel campo visivo, sia il movimento e quindi la posizione della fotocamera al momento dell'acquisizione dell'immagine.

Attraverso specifici algoritmi è possibile recuperare la profondità di triangolazione di ciascun punto dello spazio, e calcolare la forma dell'oggetto fotografato, considerando le differenze tra valori di profondità.[7]

Come è facilmente intuibile, le potenzialità offerte dallo sviluppo tecnologico di tali strumenti implicano una totale rivoluzione riguardo all'approccio conoscitivo dell'oggetto in esame. L'oggetto viene rilevato, acquisito e conosciuto dallo strumento, prima che dall'operatore, il quale si trova a dover gestire, elaborare e quindi conoscere a posteriori, l'output di tali strumentazioni: la discretizzazione del dato, sostanzialmente, non avviene più sul posto, durante la campagna di rilievo, ma quasi totalmente in fase di postproduzione dei dati acquisiti. L'uso estensivo di alcuni di questi strumenti, come lo scanner 3D piuttosto che la macchina fotografica, ha indotto a modificare sostanzialmente l'approccio al problema della presa della misura: la possibilità di poter acquisire un'enorme quantità di dati in breve tempo consente anche una breve permanenza sul campo, che implica un diverso approccio alla tradizionale procedura di discretizzazione.

L'operatore deve saper interrogare (in maniera intelligente) questa banca di dati al fine di poter interpretare, elaborare e produrre modelli tridimensionali di varia accuratezza, finalizzati alla valutazione e alla comprensione dell'opera.[8]

Alcuni dei progetti di rilievo affrontati negli ultimi anni e ancora in via di sperimentazione, come quello per la documentazione della fortezza del San Lorenzo del Chagres a Colón (Panama), si inseriscono proprio a cavallo di questo passaggio tecnologico-procedurale: alla metodologia di rilevamento classica è stato affiancato un sistema di sperimentazione fotografica tridimensionale, andando a costituire un sistema combinato di strumentazioni capace di acquisire dati quantitativi e contemporaneamente qualitativi in tempi brevissimi a garanzia della massima affidabilità metrica.

IL CASO DI SAN LORENZO DEL CHAGRES

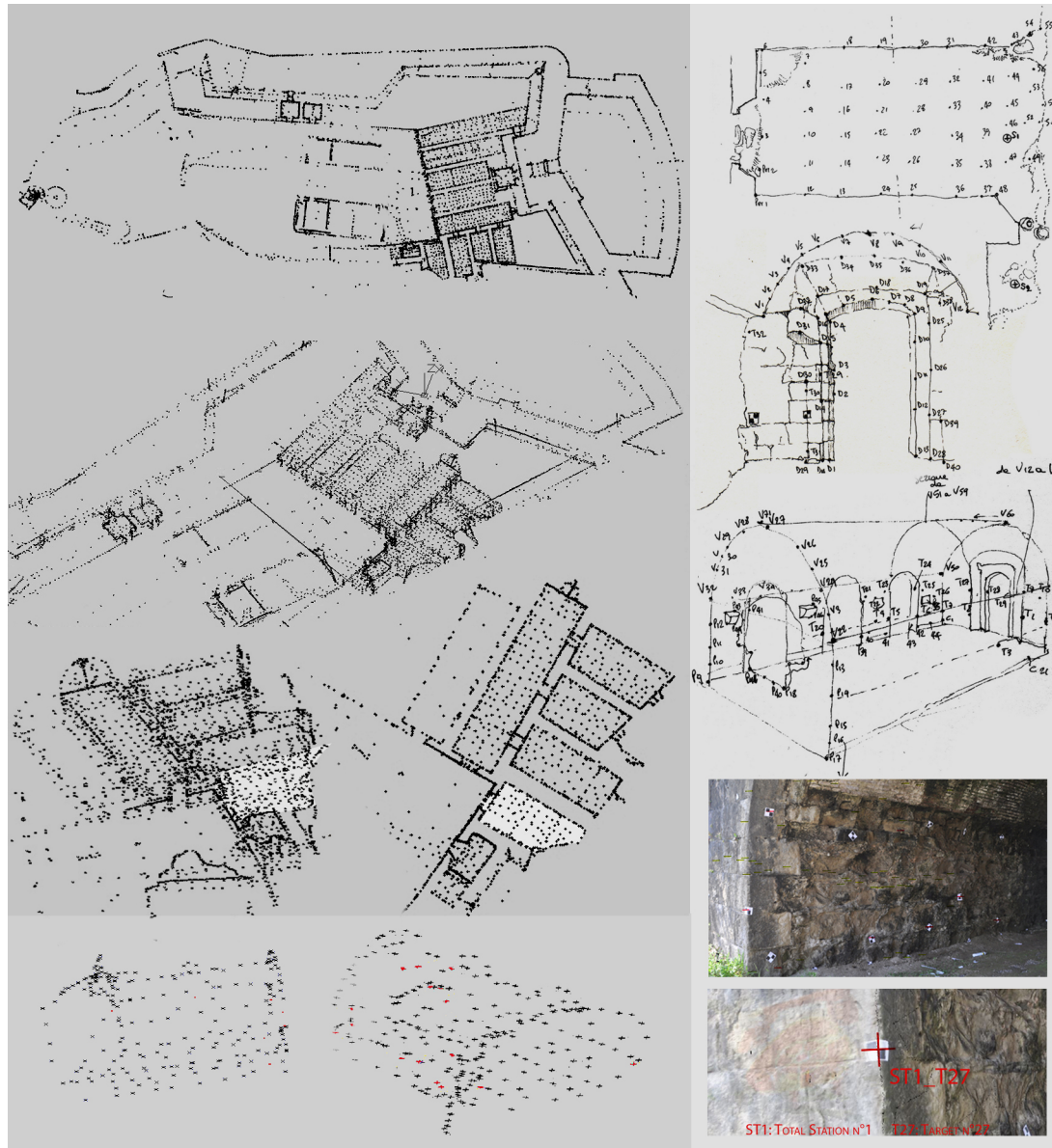
L'esperienza di seguito riportata, che descrive le fasi di rilievo e di postproduzione dei dati acquisiti, è finalizzata alla documentazione del complesso di una fortificazione, quella del San Lorenzo, facente parte di una rete di strutture militari strategiche progettate dalla famiglia di ingegneri italiani Antonelli nel XVII secolo, che si trovano dislocate lungo le coste del Mar dei Caraibi.

Da anni questi complessi fortificati animano un crescente interesse che vede coinvolte sia soprintendenze locali che enti e istituti di ricerca per sviluppare un programma di documentazione che preveda la pianificazione di attività finalizzate alla salvaguardia, la tutela, la valorizzazione e alla divulgazione di complessi tanto rilevanti da essere, per la maggior parte, nominati patrimoni dell'umanità dall'UNESCO.[9]

La metodologia di rilievo adottata è stata ideata combinando diverse tecniche al fine di sfruttare i vantaggi di più strumenti e sopperire agli eventuali limiti, nei quali rientrano anche problema-



7. Il sito UNESCO di San Lorenzo alla foce del Rio Chagre a Panama, nella provincia di Colon. Immagine del complesso e delle rovine sulla piazza d'armi e foto durante i rilievi a Dicembre 2012.

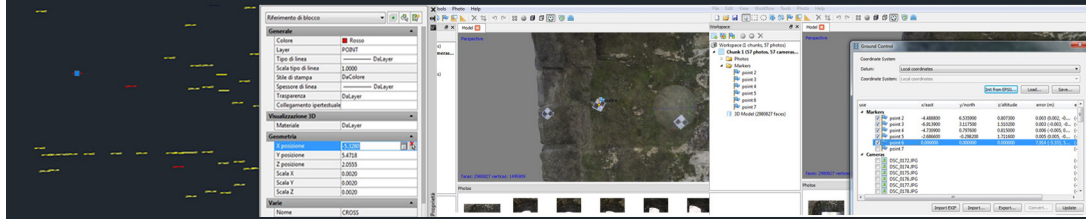


8. Nuvola di punti topografica del complesso di San Lorenzo, veduta zenitale e particolari assonometrici degli ambienti interni. A ciascun punto topografico corrisponde un target applicato alle murature o un punto significativo del sistema costruttivo. Nella stanza posta in evidenza i punti rossi sono quelli utilizzati per la rototraslazione del modello 3D mentre gli altri punti sono stati utilizzati per le verifiche dimensionali e di il controllo dell'esito del cloud computing. A destra le monografie dei punti e il particolare di un target.

tiche logistiche dovute alla complessità del sito, ubicato all'interno della foresta tropicale umida panamense: il fine del rilievo, concordato con le soprintendenze locali, [10] prevedeva la produzione di un corpus documentario accurato di tutto il complesso per definire, dalla lettura dei segni presenti sulle murature, proposte di ricostruzione storica del sito.

Considerate le molteplici complessità morfologiche del sito, sia relative al sistema ambientale ed al posizionamento di alcuni bastioni a strapiombo sul mare, sia relativa alla complessità specifica delle singole murature, sono state definite procedure di acquisizione dati in grado di ottenere modelli tridimensionali altamente affidabili capaci di descrivere e riportare le specificità di ogni ambiente.

L'impossibilità di effettuare una documentazione del complesso con strumenti laser scanner ha vincolato la campagna di rilievo alla programmazione di un'attività che unisce strumento topografico *total station* e fotomodellazione. Le misurazioni topografiche, siano esse utili per rilevare alcune delle misure fondamentali che costituiscono l'oggetto, siano esse finalizzate a elaborare una nuvola di punti molto rada del complesso, sono state impiegate per riferenziare rispetto ad un'unica terna cartesiana i singoli modelli provenienti dalle foto. Questo ha consentito di verificare costantemente l'affidabilità delle elaborazioni fotogrammetriche in ambiente tridimensionale, permettendo inoltre di gestire un passaggio di scala, dal generale al particolare, utile a connettere i diversi sistemi tridimensionali elaborati per il sito in esame.



9. Fasi di cloud computing in ambiente Agisoft PhotoScan; inserimento dei punti di controllo del modello 3D e verifica dell'affidabilità morfometrica con sovrapposizione tra modello 3D e nuvola di punti topografica. L'errore massimo riscontrato è risultato essere comunque al di sotto dei 3 cm.

UNA METODOLOGIA DI RILIEVO FOTOGRAMMETRICO INTEGRATO

Nell'ottica di utilizzare l'immagine fotografica come elemento qualificante della complessità nel processo di acquisizione e di postproduzione dei dati di questo progetto di rilievo, è stato utile considerare una diversa concezione di elaborato tecnico descrittivo dell'architettura storica. Se tradizionalmente la costruzione di elaborati di tipo bidimensionale, planimetrie e sezioni, permettevano di leggere in forma composta l'architettura e da questi stessi poi venivano discretizzate e ridotte le informazioni, semplificandole sostanzialmente, per giungere ad un modello tridimensionale in grado di esplicitare la complessità volumetrica generale, è qui invece posto in atto un processo inverso, dove dal contesto tridimensionale *reality based* si passa poi ad una semplificazione di dati utili all'esplicitazione dei disegni caratterizzanti l'architettura.

Tale inversione costringe a rivedere completamente il processo con il quale i dati vengono acquisiti, progettando una moltitudine di campagne di ripresa fotografica il cui obiettivo è quello di giungere alla maggior affidabilità di un modello tridimensionale generale del complesso, per cui ogni superficie, muro o elemento architettonico rientra in una scomposizione logica del costruito, orientata tra rilievo topografico da un lato ed esigenza di ricostruzione tridimensionale dall'altro, considerando poi le modalità di allineamento in un sistema di riferimento unico.

I modelli tridimensionali prodotti dalle foto, mantengono una complessità di dettaglio che deve essere gestita nel sistema complessivo del rilievo rototraslando le singole porzioni sulla maglia topografica. Quest'ultima, costituendo lo strumento del rilievo generale al quale viene demandato il con-



trollo dell'affidabilità, è stata progettata in modo da poter coprire tutta la superficie calpestabile del complesso, grazie alla pianificazione di una maglia poligonale costituita da un totale di 68 stazioni dislocate tra fortezza e batterie esterne.

Sono poi state condotte alcune operazioni di rilievo diretto finalizzate ad inserire nel contesto da rilevare elementi geometrici ben riconoscibili, come un piano di riferimento a quota costante, definito con l'ausilio di livelle laser e canne ad acqua per gli ambienti esterni. L'acquisizione dei punti topografici ha così incluso dei target individuati sul piano di riferimento, oltre a capisaldi, profili, cornici ed altri elementi architettonici ritenuti utili. In particolare le superfici continue di volte e pavimentazioni sono state prima cosparse di target, per formare griglie a carattere semiregolare, e poi ciascun target è stato acquisito nella rete topografica di appoggio.

Il risultato di questo rilievo è una nuvola di punti rada ma in grado di descrivere qualitativamente la spazialità del complesso, dove ogni punto risulta inoltre facilmente identificabile grazie all'ausilio di un codice di riferimento strutturato per ambienti e tipologie di elementi architettonici, riscontrabile

inoltre dalle schedature di ciascun punto rilevato. Di tutti i punti rilevati da ciascun caposaldo, è stata realizzata una monografia, costituita da un sistema organizzato di eidotipi, fotografie e codici alfanumerici, dati indispensabili nella postproduzione per un continuo rapporto tra modelli generati dall'elaborazione delle sequenze di immagini e il rilievo topografico di riferimento.

La fase di acquisizione di immagini che è seguita, ha previsto la copertura dell'intero oggetto architettonico sia nei suoi locali interni che nelle parti esterne, includendo ambienti come il fossato e le pareti scoscese verso la foce del Chagres, nelle quali un'operazione di disboscamento della scarpata, richiesta alla soprintendenza in occasione dei rilievi, aveva messo in luce resti importanti del sistema fortificato quali il "camino cubierto" ed il basamento di alcuni bastioni crollati nel corso dell'ultimo secolo.

Tale progetto di rilevamento fotografico ha costretto a pensare in parallelo a sistemi funzionali di archiviazione dei dati che, giorno per giorno, hanno visto la realizzazione di banche dati fotografiche che catalogassero ciascun muro, pietra o elemen-

10. Modello 3D dello scalone monumentale realizzato da una quindicina di fotografie e dettaglio della qualità dei poligoni con output a valore "medio".

to architettonico costruttivo, al fine di conservare e organizzare in maniera precisa ed univoca tutto il materiale in funzione della successiva fase di elaborazione dati.

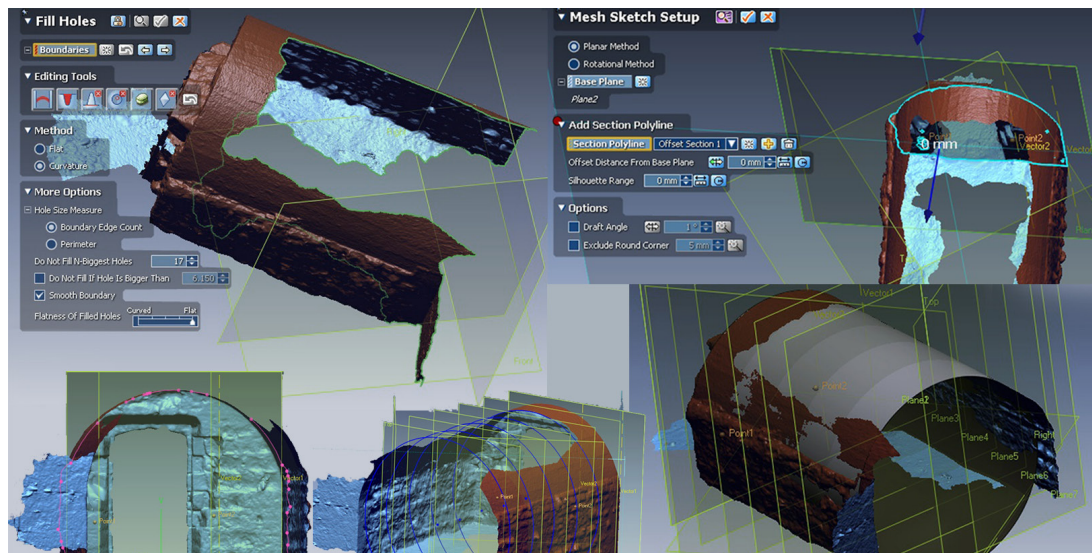
Il rilievo integrato topografico e *structure from motion* ha così assicurato l'affidabilità metrica quantitativa, demandata alla precisione del rilievo strumentale topografico, e quella materica qualitativa dei modelli generati dalle sequenze di immagini bidimensionali, in grado di descrivere lo stato di conservazione, le patine e le qualità strutturali oltre che morfometriche del manufatto architettonico.

I singoli fotogrammi vengono orientati rispetto al sistema di riferimento quando, a restituzione ultimata, il modello ottenuto viene scalato e posizionato correttamente proprio grazie ai target in comune tra modelli 3D e topografico, al fine di rendere i rispettivi dati congrui e allineabili rispetto a degli assi che ne facilitino le operazioni di restituzione.[11]

LA POSTPRODUZIONE: SVILUPPO E FINALITÀ

L'enorme vantaggio che tali tecniche offrono, specie per siti come quello descritto in questo contributo, riguarda sia la fase di acquisizione dei dati sia l'immediata restituzione tridimensionale del bene architettonico. La possibilità di vedere in tre dimensioni l'oggetto rilevato, oltre a semplificare le operazioni di analisi e documentazione approfondita dello stato conservativo del bene, può consentire uno sviluppo di ricerca legato alla ricostruzione virtuale o all'anastilosi, utile per ripristinare, anche se solo virtualmente, l'originaria immagine che doveva avere il complesso, nella sua totalità o nelle parti mancanti.

L'estrema varietà di soluzioni costruttive e dello stato conservativo della fortezza ha indirizzato la campagna fotografica verso l'acquisizione di immagini



11. Post produzione ed elaborazione dati per l'ottimizzazione dei modelli. Al fine di individuare la combinazione di operazioni in grado di condurre al risultato finale migliore tutti gli output sono stati sottoposti al comando Fill Holes, di riempimento dei vuoti e delle porzioni di superfici erroneamente triangolate. Anche per questa operazione sono previste due alternative utili: il riempimento tramite superfici o il riempimento con volumi. Le due opzioni conducono inevitabilmente a risultati differenti, ma è opportuno precisare che il riempimento con superfici, piane, curve o smussate è un'operazione manuale di chiusura dei singoli vuoti e delle discontinuità della superficie, dove l'abilità e la precisione dell'operatore, nel richiudere le imperfezioni presenti, può giocare un ruolo di rilievo nella determinazione del risultato finale, mentre la chiusura di volume consente di regolare esclusivamente alcuni parametri generali, senza permettere di indicare manualmente il modo in cui una determinata superficie possa recuperare la sua originaria continuità. Per ottimizzarne ulteriormente il risultato si utilizzano processi di elaborazione del modello come il Global Remesh, che ridisegna le mesh elaborate migliorando la conformazione interna dei triangoli e il comando Mesh sketch setup che permette di realizzare circonferenze che meglio approssimano le superfici non rilevate. Laddove si riscontrano dati estremamente lacunosi, come ad esempio su alcune porzioni di volte, una risposta alternativa al problema delle superfici continue è stata sperimentata ricostruendo verosimilmente le superfici mancanti facendo passare le nuove geometrie di integrazione per piani di sezione e successivamente per punti di aderenza di questi al modello.

di dettaglio, sia costruttivi che di degrado, non soltanto difficilmente riproducibili in maniera realistica, ma anche difficilmente manipolabili e misurabili con strumentazioni di rilievo diretto e molto più facilmente rappresentabili direttamente da un sistema di modellazione tridimensionale. In molti di questi casi l'elaborazione dalla terza alla seconda dimensione è risultata decisamente più immediata ed efficace a descriverne la complessità costitutiva. In questo modo la documentazione dell'oggetto riesce a comprendere, con una precisione centimetrica, dal volume generale alla più piccola scala di dettaglio, garantendo una molteplicità di finalità descrittive alle quali il rilievo è indirizzato. Nello specifico il modello complessivo così generato, opportunamente scalato in riferimento al sistema topografico e quindi metricamente e morfologicamente affidabile, può traguardare molteplici obiettivi: dall'analisi accurata di ogni elemento costituente il manufatto, che comprende indagini stratigrafiche, diagnostiche e conoscitive dell'apparato costruttivo finalizzate alla conservazione e al restauro, fino ad arrivare alla possibilità di una visualizzazione iperrealistica tramite fruizioni interattive anche su piatta-

forme web, utili per la valorizzazione del sito. E' evidente che nel primo caso il modello assume una connotazione tecnica, mentre nel secondo una più semplicemente divulgativa. Parallelamente al sempre più crescente interesse verso le potenzialità espressive del *real-time*, la possibilità di rendere accessibile un oggetto architettonico fedelmente descritto in spazialità e caratteristiche costruttive ad un sempre più vasto numero di persone che si trova virtualmente all'interno, aumenta la necessità di ottimizzare il modello, cioè renderlo più facilmente navigabile, gestibile ed interattivo. Questo implica inevitabilmente un abbassamento quantitativo delle maglie poligonali, costituenti la geometria dell'oggetto tridimensionale, che contrasterebbero con la rapidità di visualizzazione e di fruizione da parte dell'utente.[12] E' inoltre fondamentale sottolineare che l'*output* dei modelli generati dalle fotografie molto difficilmente si presenta privo di imperfezioni: parti mancanti per l'assenza del dato fotografico, errori nel rimontaggio da parte del *software* o più semplicemente la necessità di scorporre un ambiente in una serie di modelli più leggeri e più facilmente gestibili obbliga ad una lunga e complessa fase di postproduzione del dato da

parte dell'operatore. Molti dei modelli, specialmente degli ambienti interni e sotterranei, presentano la necessità di integrazioni per alcune porzioni del volume (volte, angoli, dettagli). Questa operazione prevede di ricostruire geometricamente la porzione di volume mancante, riferendosi al dato fotografico e metrico e cercando di mantenere una forma congruente all'immagine originaria del manufatto. Inoltre, in base alle finalità del rilievo, è importante stabilire se effettivamente risulti più o meno utile la parziale o totale ricostruzione di alcune parti. Per rilievi finalizzati alla documentazione delle qualità costruttive dell'architettura storica viene giustamente adottata una metodologia di approccio conservativa e di fedeltà rispetto all'acquisizione dei dati, che non devono in alcun modo essere alterati o falsificati, interpretati nelle loro parti mancanti mediante ricostruzioni, per quanto piccole esse possano essere. Per il caso studio di San Lorenzo ogni ambiente generato da software di *structure from motion* assolve alla duplice funzione di rappresentazione: un primo modello è stato mantenuto con il massimo numero di *mesh* generate dal programma nell'intento di ottimizzare la corrispondenza alla morfologia reale delle



12. Inportazione dei modelli parziali su un unico sistema di riferimento topografico. Le sequenze di operazioni descritte, nelle loro molteplici alternative, hanno condotto a risultati che, seppur diversi, hanno mantenuto una conformità con il dato morfometrico di partenza relativo alla nuvola. L'iter di modellazione tuttavia comporta delle caratterizzazioni irreversibili relative alla qualità del dato infografico ad ogni passaggio che, pertanto, dovrà essere calibrato in funzione della specifica finalità della modellazione. Le molteplici alternative di modellazione vedono il processo costituirsi in funzione di render finalizzati a scale diverse di rappresentazione, dall'esclusiva rappresentazione dell'oggetto selezionato fino a scene più complesse dense di elementi; il lavoro può inoltre essere destinato ad obiettivi che possono prevedere la dinamicità del prodotto o particolari restrizioni relativamente alla dimensione del file. L'inserimento del file all'interno di software dedicati alla navigazione virtuale degli ambienti via web, così come l'interazione con strumenti di gestione dati, comporta la definizione di parametri che, in funzione del dettaglio descrittivo richiesto, dovranno approssimare il dato realistico, oltre che morfometrico, del modello.

strutture, un secondo è stato notevolmente ottimizzato nel numero di poligoni, mantenendo una forma aderente al reale, ma decisamente più semplificata, che descrive qualitativamente lo spazio. In questo modo è possibile usufruire di un modello molto più leggero, che messo su web permette di visitare "virtualmente" un luogo distante e difficilmente accessibile al pubblico, oltre alla possibilità di avere accesso ad informazioni aggiuntive che facilitano ed arricchiscono la fruizione dei contenuti multimediali. [13]

Se da un lato si vanno diminuendo le complessità morfometriche e si semplifica la complessità del reale nel sistema rappresentativo, è necessario considerare che questo modello potrebbe essere criticamente aumentato con informazioni di diversa natura, in grado di esplicitare nuovamente la complessità del reale, trasformando in ultima istanza la propria natura descrittiva del sistema rappresentativo, che diverrebbe così un metacorpo rappresentativo in grado di sostituire la struttura delle informazioni attraverso una forma, disegnata, più simile alla stessa struttura reale poiché in una qualche maniera ne ricalca morfologicamente le forme distributive.

CONCLUSIONI

Le sperimentazioni condotte, dallo studio dei sistemi territoriali fino all'analisi dei dettagli architettonici, finalizzate alla creazione di modelli 3D affidabili realizzati attraverso processi fotogrammetrici, danno ragione di riconoscere, in questi stesse metodologie, le premesse per una rinnovata configurazione della disciplina del rilievo architettonico. Così come i laser a scansione avevano stravolto, soltanto un decennio fa, le metodologie di pianificazione per l'acquisizione dei dati relativi alle condizioni morfometriche e spaziali di un determinato contesto, oggi la modellazione "automatica" ed il rilievo relativamente affidabile di complessi ambientali, sviluppato tramite l'utilizzo della macchina fotografica, costituiscono un incremento nella relazione tra disegno e informazione diffusa, variando le possibilità delle relazioni tra rilevatore ed il sistema complesso da rilevare. L'educazione al modello 3D, alla realtà virtuale, ed all'informazione sistemata su canali dinamici, interattivi, sviluppata attraverso i diversi messaggi visivi, alterano il senso profondo del disegno assistito ed anche la relazione dell'immagine con lo spettatore che è destinato a riceverla ed interpretarla. Tra forme del disegno, trame della rappresentazione e prospettiva critica, si estende una complessa linea cognitiva riassumibile non più nel punto di vista etico del ricettore, ma nelle sperimentali e innovative forme della rappresentazione. Queste convergono così in una volontà che corrisponde alla naturale "spiegazione" del discorso, ossia alla natura di come si spiegano e si organizzano le informazioni,[14] di come i dati vengono organizzati e messi insieme per organizzare una scrittura visuale.[15] Non è ancora del tutto semplice il passaggio da questi modelli 3D alle forme standardizzate del disegno architettonico convenzionale, quello costituito da elaborati 2D rappresentanti sezioni quotabili, ma se molte ricerche si orientano proprio in questa direzione è anche vero che questi modelli oggi si configurano con un preciso obiettivo che va oltre il disegno, quello di definire una scrittura visuale in grado di educare il lettore all'analisi della complessità architettonica esaltando, nell'illusione del reale, un metaspazio comunicativo nel quale ogni forma risulta compiuta e finita.

NOTE

[1] Internet è il più grande spazio pubblico che l'umanità abbia conosciuto, dove si sta realizzando anche una grande redistribuzione di potere [...] Un luogo dove tutti possono prendere la parola, acquisire conoscenza, produrre idee e non solo informazioni, esercitare il diritto di critica, dialogare, partecipare alla vita comune, e costruire così un mondo diverso di cui tutti possano egualmente dirsi cittadini. Rodotà S., (2007), *The Role of Parliaments in the Development in the Information Society*, Inter-Parliamentary Union International Conference,

[2] Le crescenti banche dati online di elementi e modelli tridimensionali visitabili tramite piattaforme interattive che consentono di ambientare i modelli stessi ne sono un esempio e google maps è senza dubbio la più famosa. Per una riflessione sui modelli sociali vincolati alla incrementazione di uno spazio virtuale Cfr. Lévy P., Bianco G. (a cura di), (2008), *Cyberdemocrazia*, Mimesis Volti, Milano.

[3] Si fa riferimento ai centri di calcolo disponibili online per i quali molti software sono stati dedicati alle modalità di upload dei files destinati al processamento dei dati. Tra questi si ricorda "image uploader" sponsorizzato dal VClub del CNR-ISTI per l'utilizzazione combinata con meshlab ed il più famoso 123Dcatch della Autodesk, sperimentati durante le ricerche qui riportate.

[4] Image-based è la dizione che si utilizza per definire i modelli direttamente generati dalle immagini bidimensionali.

[5] Mi riferisco alle sperimentazioni condotte durante il dottorato in Scienza della Rappresentazione e del Rilievo Architettonico e Ambientale, nel corso delle ricerche svolte per lo studio dei sistemi di rilevamento del verde urbano. In particolare alcune riflessioni connesse allo studio di forme complesse sono

riportate nell'articolo: Parrinello Sandro, *Il disegno dell'imperfetto. Esigenze descrittive per l'analisi architettonica*, in atti del XI Congresso Internazionale di *Espression grafica applicata a la edificación*, Università Politecnica de Valencia, Valencia, 2012, pp. 375-381.

[6] Tomasi Carlo and Kanade Takeo, (1991), *Shape and motion from image streams : a factorization method*. Computer Science Department. Paper 2041.

[7] Cfr. Tomasi, Carlo and Kanade, Takeo, (1991), *Shape and motion from image streams : a factorization method*. Computer Science Department. Paper 2041

[8] Cfr. Bini Marco, prefazione, in Bertocci Stefano, Bini Marco, (2012) *Manuale di rilievo architettonico ed urbano*, Città Studi Edizioni, De Agostini Scuola SpA, Novara, Pag. 237.

[9] Il progetto di ricerca per la documentazione delle architetture fortificate realizzate su progetti della famiglia Antonelli prende avvio nel 2005 con la campagna di rilievo del forte San Pedro de la Roca a Santiago de Cuba. Negli otto anni successivi sono state documentate le fortezze dell'isola cubana in accordo con l'Oficina del Conservador di Santiago de Cuba e l'Oficina dell'Historeador della città dell'Havana, le fortezze della città di San Juan di Porto Rico (USA), Il forte San Juan de Ulua a Veracruz (Messico), Il forte di Bernia in Spagna, la cittadella di Peniscola (Spagna) ed i siti che si trovano a Panama: Portobello, San Lorenzo, del quale riportiamo alcuni risultati in questo articolo e Panama Vieja.

[10] Le ricerche per la documentazione dei siti antonelliani a Panama sono state coordinate in collaborazione con le istituzioni governative locali. In particolare per il Patronato de Portobello y San Lorenzo: Nilda Quijano, Manager MIT, Manzanilla International Terminal; Yelitzta Norse, Vice-Direttrice del Patronato;

Rodolfo Suñe, Architetto del Patronato. Per l'INAC, Instituto Nacional de Cultura: María Eugenia Herrera, direttrice generale; Almyr Alba, Architetto. Per il Parque Nacional Portobello: Elizabeth Castro, Direttrice. Per la Fundación Bahía de Portobello: Caridad García, Direttrice. Del Municipio di Portobello: Carlos Chavarria Cerezo, Sindaco.

[11] Cfr. Bertocci Stefano, Bini Marco, (2012) *Manuale di rilievo architettonico ed urbano*, Città Studi Edizioni, De Agostini Scuola SpA, Novara.

[12] Cfr. Merlo A., Sánchez Belenguier C., Vendrell Vidal E., Fantini F., and Aliperta A., (2013) *3D Model visualization enhancements in real-time game engines*. In Boehm J., Remondino F., Kersten T., Fuse T., Gonzalez-Aguile D. (a cura di), *3D-ARCH 2013 - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, Trento, Italy, Pagg. 181-188.

[13] Cfr. Remondino Fabio, Rizzi Alessandro, Agugiaro Giorgio, Jimenez Belen, Menna Fabio, Nex Francesco, Baratti Giorgio, (2012) *Rilievi e Modellazione 3D* Atti 15ª Conferenza Nazionale ASITA - Reggio di Colorno.

[14] Quel processo di cui tanto si è discusso nel secolo scorso a partire dalle esperienze intraprese da Bateson nel suo Balinese Character e nelle esperienze trattate in Naven alle quali le correnti avanguardiste delle scienze sociologiche devono molto.

[15] Sull'esigenza di sperimentare nuovi metodi testuali della rappresentazione in relazione alla necessità di descrivere specifici contesti culturali, e quindi applicabile anche all'esigenza di descrivere ambiti contestuali ai quali attribuire significati ai luoghi, è possibile confrontare alcuni tesi fondamentali quali: Clifford J., Marcus G., (1986) *Writing culture*, University of California Press, Berkeley; Marcus G.E., Fisher M., (1994) *Antropologia come critica culturale*, Anabasi, Milano.

BIBLIOGRAFIA

Merlo A., Sánchez Belenguier C., Vendrell Vidal E., Fantini F., and Aliperta A., (2013) *3D Model visualization enhancements in real-time game engines*. In Boehm J., Remondino F., Kersten T., Fuse T., Gonzalez-Aguile D. (a cura di), *3D-ARCH 2013 - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, Trento, Italy.

Benedetti Benedetto, Gaiani Marco, Remondino Fabio (2009), *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, (a cura di), Edizioni della Normale, Pisa.

Remondino Fabio, Rizzi Alessandro, Giorgio Agugiaro, Jimenez Belen, Menna Fabio, Nex Francesco, Baratti Giorgio, (2011), *Rilievi e Modellazione 3D*, Atti 15ª Conferenza Nazionale ASITA - Reggio di Colorno

Guidi Gabriele, Russo Michele, Berardin Jean Angelo, (2010), *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, McGraw-Hill Companies.

Rodriguez Navarro Pablo, (2012), *Digital photogrammetry versus the system based on active 3D sensors*. In *Espression grafica arquitectónica*, numero 20.

Bertocci Stefano, Bini Marco, (2012), *Manuale di rilievo architettonico ed urbano*, Città Studi Edizioni, De Agostini Scuola SpA, Novara.

Tomasi Carlo, Kanade Takeo, (1991), *Shape and motion from image streams: a factorization method*. Computer Science Department, Paper 2041.