

Archeologia e Calcolatori
22, 2011, 169-198

PRINCIPALI TECNICHE E STRUMENTI PER IL RILIEVO TRIDIMENSIONALE IN AMBITO ARCHEOLOGICO

1. INTRODUZIONE

La continua evoluzione delle tecniche di rilievo e modellazione 3D basate su sensori e lo sviluppo di sistemi sempre più performanti per la visualizzazione di dati digitali evidenziano il valore aggiunto dato dall'uso di queste metodiche nell'ambito archeologico. In particolare appare sempre più chiaro il contributo attivo che tali tecnologie possono fornire nella fase interpretativa, nella conservazione e archiviazione dei dati e nella valorizzazione del bene attraverso il web. Tutti questi aspetti portano verso un miglioramento generale dell'informazione e la crescita della ricerca archeologica (GUIDI, RUSSO, BERARDIN 2010).

L'interesse sulle diverse tecniche e metodologie di rilievo digitale e di modellazione tridimensionale in ambito archeologico è evidenziato dalla crescita della richiesta, dal loro sempre più frequente impiego e dalla necessità di utilizzare sempre di più forme di registrazione e archiviazione digitale a differenti livelli di scala e risoluzione. Ovviamente l'uso di questi strumenti si inserisce all'interno di un processo conoscitivo ben codificato, nel quale particolare attenzione deve essere posta proprio nella fase di integrazione tra le metodiche tradizionali e quelle innovative. La definizione di un sistema conoscitivo che integri tutte queste forme di analisi è il risultato di un processo nel quale vengono coinvolte differenti competenze e professioni che hanno la capacità di comunicare e condividere un obiettivo comune.

Questo risultato può essere raggiunto grazie ad uno sforzo comune, profuso da un lato dagli esperti del 3D Imaging nel cercare di comprendere ed interpretare le richieste degli archeologi, dall'altro dagli archeologi nel conoscere le potenzialità e il funzionamento di base di queste tecnologie, al fine di poterne valutare la reale efficacia ed utilità in relazione alla condizione di utilizzo. Il seguente articolo si propone di delineare in maniera sintetica, ma esaustiva, i metodi di applicazione e i principi di funzionamento degli strumenti di acquisizione 3D più utilizzati in ambito archeologico, evidenziandone i pregi e i difetti. In conclusione viene descritto il metodo di multirisoluzione e multisensore come una possibile ma efficace strada per migliorare la capacità degli strumenti e poter rilevare al meglio le complesse informazioni geometriche e materiche presenti nei manufatti archeologici.

Per comprendere meglio i principi su cui si basano gli strumenti di acquisizione 3D si può pensare alla più consueta digitalizzazione bidimensionale di documenti, la cui scansione è basata sulla trasformazione di una pagina cartacea in una matrice di numeri che rappresentano il colore di

ogni microscopico elemento di immagine, mentre si assume nota a priori la geometria dell'oggetto e la sua estensione. Nella scansione 3D quello che interessa è l'acquisizione in forma digitale dell'andamento nello spazio delle superfici esterne di un oggetto, sulle quali non viene fatta nessuna assunzione a priori. Compito del sensore 3D è proprio quello di suddividere la superficie inquadrata e proiettata sul sensore in elementi di immagine analoghi ai pixel di un'immagine digitale e in relazione ad ognuno di questi valutarne le corrispondenti coordinate spaziali e, in taluni casi, il relativo colore.

2. SENSORI TRIDIMENSIONALI

I sensori tridimensionali sono strumenti che consentono di generare un'immagine 3D della scena che inquadrano. La classe di sensori trattata in questo articolo è quella basata sull'uso della radiazione luminosa, all'interno della quale si può fare un'ulteriore distinzione in funzione della natura della luce che viene impiegata per effettuare la misura. Se si tratta di luce naturale i metodi di misura si dicono "passivi" (tecnica fotogrammetrica, teodoliti, etc.); se invece la luce è codificata in maniera da svolgere un ruolo nel processo di misura, si parla di "sensori attivi" (laser scanner, strumenti a proiezione di luce strutturata, radar, stazioni totali, etc.).

La creazione di modelli tridimensionali reality-based di manufatti o siti archeologici può avvenire attraverso l'impiego di dati 3D generati da entrambe le tecnologie descritte, mentre esistono tecniche di modellazione 3D basate su rilievi già esistenti come piante di edifici o mappe e le strutture 3D che vengono generate attraverso estrusioni o applicando regole architettoniche (MÜLLER *et al.* 2006; YIN, WONKA, RAZDAN 2009). La scelta dei dati da impiegare o della tecnica di rilievo da utilizzare avviene in funzione della caratterizzazione della superficie da rilevare, l'accuratezza e il dettaglio geometrico richiesti, le dimensioni dell'oggetto, la collocazione spaziale, l'esperienza, i costi del progetto, etc.

I sensori ottici attivi (BLAIS 2004; GUIDI, RUSSO, BERARDIN 2010) permettono di ottenere direttamente la posizione spaziale della superficie o del punto rilevato, a volte accoppiata all'informazione del colore (anche se di bassa qualità); quest'ultima può essere registrata dal sensore stesso o da una fotocamera digitale esterna ad integrazione dello strumento. Questa tipologia di strumenti attivi ha il principale pregio di acquisire direttamente e in poco tempo grandi quantità di dati relativi ad una geometria complessa con un'accuratezza molto spinta. Per contro i sensori attivi sono molto costosi, normalmente voluminosi e definiti da una limitata flessibilità di utilizzo. L'insieme di queste caratteristiche rende questa tipologia di strumenti ideale per molte applicazioni, soprattutto nell'ambito dei Beni Culturali, ma non adattabile a tutte le condizioni ambientali e alle caratteristiche materiche dei manufatti (EL-HAKIM, BERARDIN, BLAIS 1995).

Rilievo archeologico	Oggetti da rilevare	Dati e tecniche di rilievo
Scala regionale	Territorio Topografia Sito	Immagini satellitari Immagini aeree a piccola scala Radar Lidar GPS
Scala locale	Sito Architetture Scavo Strati	Immagini satellitari ad alta risoluzione Immagini aeree a grande scala Radar Lidar Laser scanner TOF/CW Immagini terrestri Stazione totale GPS
Scala oggetto	Ritrovamenti Oggetti museali	Immagini terrestri Laser scanner a triangolazione Sistemi a luce strutturata

Tab. 1 – Scale di lavoro archeologiche e possibili dati o tecniche per il rilievo 3D digitale e non invasivo.

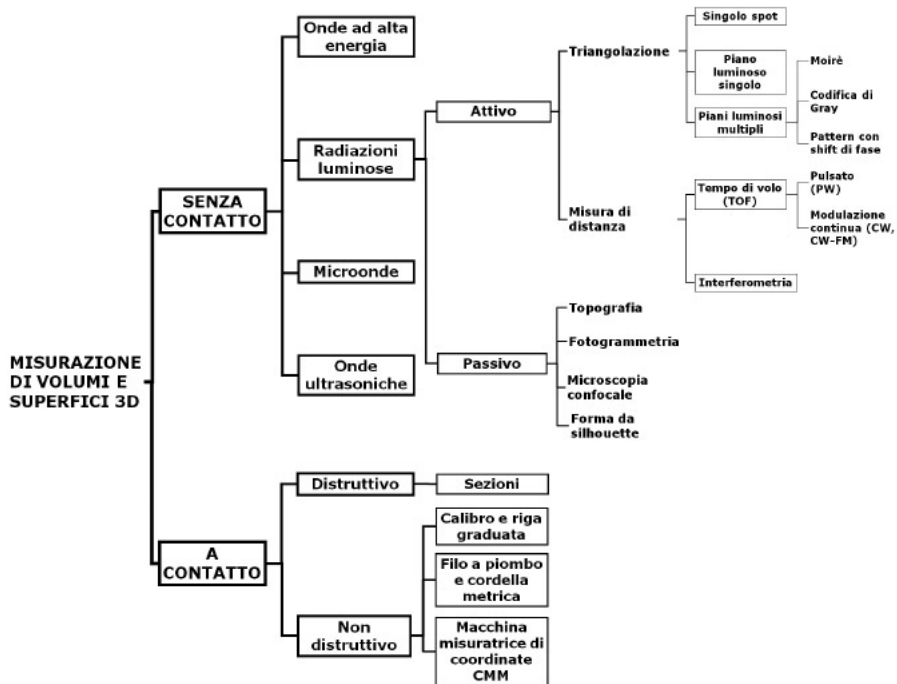


Fig. 1 – Schema di tutti gli strumenti per l'acquisizione 3D.

L'utilizzo di questo genere di strumenti ha raggiunto la sua completa maturità già da diversi anni e il processo di modellazione da dati range-based è oggi ben strutturato e definito (CIGNONI, SCOPIGNO 2008), nonostante presenti ancora alcuni "colli di bottiglia" legati in particolare alla gestione delle grandi quantità di dati acquisiti. Uno strumento attivo che impiega luce laser viene normalmente chiamato range camera o laser scanner 3D. Il principio di funzionamento di una range camera può variare a seconda delle dimensioni dell'oggetto da rilevare e, di conseguenza, a seconda della distanza tra sensore e oggetto (Tab. 1). Per volumi di misura medio-piccoli, indicativamente inferiori al metro cubo, gli scanner si basano sul principio di misura della triangolazione; per volumi di dimensioni superiori si utilizzano sensori detti a tempo di volo o Time of Flight (TOF). Tra i sensori attivi vanno anche ricordati i radar (strumenti montati su piattaforme aeree o terrestri, che acquisiscono immagini e consentono di rilevare informazioni 3D attraverso processi di interferometria), il GPS e le stazioni totali (strumenti in grado di restituire puntualmente coordinate e posizioni nello spazio).

I metodi basati sulla elaborazione metrica delle immagini (image-based) richiedono una ben precisa formulazione matematica (geometria proiettiva o prospettica) per trasformare i dati estratti dalle immagini in coordinate metriche 3D (REMONDINO, EL-HAKIM 2006). Le immagini contengono tutte le informazioni necessarie per riprodurre sia la geometria che la texture del manufatto fotografato, rendendo possibile la generazione di modelli tridimensionali con un contenuto informativo ottimale. La ricostruzione virtuale di modelli 3D accurati e fotorealistici da immagini rimane comunque ancora un processo difficoltoso che richiede esperienza, soprattutto nel caso di acquisizione di grandi e complessi siti archeologici o se vengono utilizzate immagini non calibrate o molto separate tra di loro.

Questa tipologia di dati tridimensionali, proveniente dai sistemi image-based e range-based, può essere facilmente integrata con altre informazioni metriche provenienti da rilievi diretti e da mappe, al fine di ottenere una corretta georeferenziazione e scalatura del modello. Anche se esistono diverse tecniche di rilievo e sensori che permettono di generare modelli 3D realistici, definiti da una buona qualità metrica e da un dettaglio coerente con le caratteristiche geometriche del modello (Fig. 1), il migliore approccio per il rilievo consiste nella combinazione di differenti strumenti e tecniche di modellazione. Infatti l'uso di una sola tecnologia di rilievo 3D non permette, al momento, di arrivare ancora ad un risultato soddisfacente in tutte le condizioni di lavoro e in termini di accuratezza geometrica, portabilità, automatismo, fotorealismo e bassi costi, a parità di efficienza e flessibilità. Per questo i dati provenienti da immagini e laser scanner vengono integrati per sfruttare appieno le potenzialità di ogni singola tecnica di misura (GUIDI *et al.* 2003; STUMPFEL *et al.* 2003; EL-HAKIM *et al.* 2004; GUARNIERI, REMONDINO, VETTORE 2006; GUIDI *et al.* 2009).

3. SENSORI OTTICI ATTIVI: LASER SCANNER AEREI/TERRESTRI E PROIETTORI DI FRANGE

Un sensore ottico attivo misura fundamentalmente distanze ed è in grado di restituire direttamente un grande numero di coordinate 3D della superficie misurata. I sensori ottici attivi più impiegati in architettura e archeologia sono i laser scanner (terrestri o aerei) e i sistemi a proiezione di frange (o luce strutturata). Questi strumenti di misura sono costituiti da un emettitore di luce e da un sensore per registrarne la risposta. La maggior parte dei sistemi di acquisizione 3D attivi vengono calibrati dal produttore, tranne nel caso di alcuni particolari strumenti di alta precisione che richiedono calibrazioni a cadenza settimanale.

La forma di luce che per prima ha consentito di creare uno scanner 3D è la luce laser che per le sue proprietà fisiche permette di generare spot luminosi estremamente focalizzati su intervalli di distanza anche elevati. Una distinzione importante è legata alla tipologia di emissione e proiezione della luce, che può essere un singolo spot laser, una lama di luce laser in movimento o un pattern di luce proiettato a risoluzioni diverse.

Nel primo caso la sorgente laser genera un sottile fascio di luce che produce un puntino luminoso sulla superficie da misurare. Attraverso un sensore da ripresa, quale ad esempio una videocamera digitale, spostato lateralmente rispetto alla sorgente di luce, viene ripresa l'immagine del puntino luminoso, in maniera che la sorgente, il centro di proiezione sul sensore e il punto luminoso riflesso dalla superficie vengano a formare un triangolo (Fig. 2). Attraverso la conoscenza di una serie di parametri noti a priori (baseline b , angolo α e lunghezza focale f) e grazie ad alcune semplici relazioni trigonometriche (GUIDI, RUSSO, BERARDIN 2010) è possibile risalire alla distanza z tra lo strumento e l'oggetto e di conseguenza alla posizione spaziale del punto sull'oggetto.

Lo schema di principio precedentemente illustrato può essere esteso da un singolo punto luminoso ad un insieme di punti allineati che vanno a formare un segmento (o lama). I sistemi attivi di questo genere usano una lama di luce generata da un laser riflesso da uno specchietto rotante o da una lente cilindrica e registrata da una camera digitale disassata di una base b . Per ogni punto che forma il profilo luminoso si ottengono in un'unica soluzione le coordinate tridimensionali corrispondenti al segmento illuminato, analogamente a quanto detto per il sensore a spot singolo.

Per arrivare ad avere un'immagine tridimensionale relativa ad una porzione di un oggetto è necessario muovere tali sensori attivi in maniera meccanicamente controllata, il che porta al concetto di scansione, producendo come risultato una range map relativa ad un'area rettangolare la cui dimensione dipende dall'estensione del movimento (BERARDIN *et al.* 2000).

Per quanto riguarda i sensori ottici attivi a luce strutturata (o a proiezione di frange), al posto dell'emettitore di luce laser viene impiegato un apposito

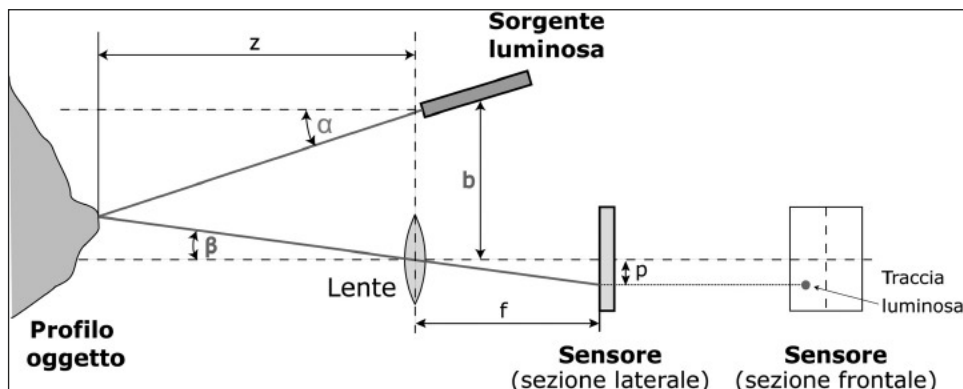


Fig. 2 – Schema di principio di uno scanner 3D a triangolazione con emissione di un singolo spot di luce laser.

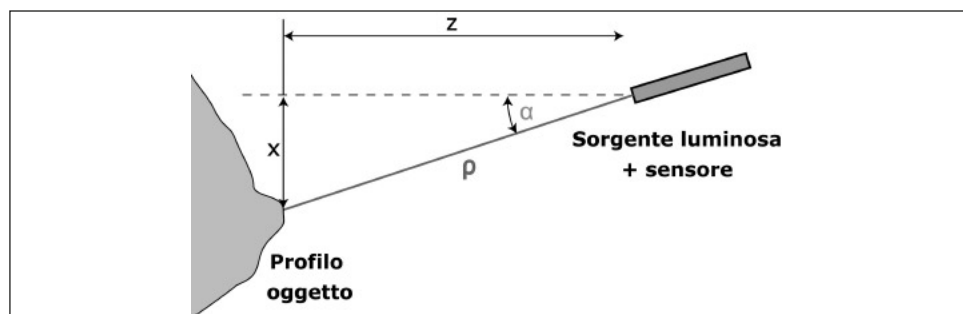


Fig. 3 – Schema di principio di uno scanner a tempo di volo (TOF).

proiettore che emette una luce strutturata, mentre l'immagine della superficie investita da questo pattern luminoso è acquisita da una camera digitale, disassata di una base b . Supponiamo che tale immagine sia una sequenza di strisce verticali alternate bianche e nere (pattern): l'immagine vista dalla fotocamera sarà ancora una sequenza di strisce se la proiezione avviene su un piano, mentre, se l'andamento della zona su cui si proietta non è piana, queste tenderanno a distorcersi diversamente a seconda della forma della superficie sottostante. Ogni transizione da bianco a nero all'interno del pattern può quindi svolgere il compito della lama di luce laser già vista precedentemente. Calibrando opportunamente il sistema di misura, questo metodo consente di verificare con grande accuratezza l'andamento spaziale di una superficie (SANSONI, CAROCCI, RODELLA 2000).

In sintesi, i sistemi a triangolazione permettono elevate prestazioni di misura, con risoluzioni fino al decimo di millimetro e una incertezza di misura di poche decine di micron. Per contro, sono sistemi che lavorano a distanze limitate

(entro i 2 m) e con campi di inquadratura limitati. Per questo motivo, per il rilievo di oggetti più grandi come edifici, scavi archeologici e intere aree territoriali, si ricorre ad apparecchi ottici in grado di misurare con grande precisione la direzione di puntamento, a cui si aggiunge un distanziometro che prevede l'invio di impulso laser e la successiva misura del tempo impiegato dalla luce per andare sulla superficie e tornare fino allo strumento di misura (TOF). Tale intervallo di tempo consente di risalire alla distanza tra lo strumento e la superficie, che integrata con la conoscenza degli angoli permette di definire le coordinate 3D della zona puntata dal laser. Uno scanner a tempo di volo automatizza l'operazione di puntamento usando un motore che modifica automaticamente la direzione di puntamento su una zona opportunamente programmabile. Nella Fig. 3, in analogia a quanto visto per i sistemi a triangolazione, è rappresentato uno schema funzionale di un sistema attivo a tempo di volo.

L'elevatissima velocità della luce introduce un'aleatorietà nella stima del tempo di volo che si traduce in un'incertezza di misura elevata: sistemi di questo genere infatti hanno un'incertezza di misura che difficilmente scende sotto i 2 mm, circa 20 volte peggiore dell'incertezza di 0,1 mm di un sistema attivo a triangolazione. Anche per questo motivo, i laser scanner a tempo di volo si utilizzano essenzialmente per oggetti di grandi dimensioni, per i quali un errore assoluto di qualche millimetro è relativamente piccolo. I sistemi che si basano sul principio della misura di distanza sono in genere indicati come Laser Radar o LIDAR, acronimo di Light Detection And Ranging che sta ad indicare una pura funzione di misura di distanza tramite la luce. Nell'accezione corrente tale definizione è stata impropriamente attribuita ad una particolare categoria di laser scanner, quelli montati su aeromobile, la cui definizione più corretta è Airborne Laser Scanner (ALS).

Lo schema funzionale di uno scanner a tempo di volo prevede una sorgente luminosa movimentata ed un rivelatore incorporati all'interno della stessa unità. Le strategie utilizzabili per misurare coordinate 3D sfruttando il ritardo di propagazione sono principalmente tre: l'invio di impulsi luminosi o Pulsed Wave (PW) sulla scena, e la misura diretta del ritardo tra impulso trasmesso e ricevuto (tempo di volo); l'invio di una radiazione luminosa continua a frequenza fissa o Continuous Wave (CW) e la misura indiretta del tempo di volo, attraverso la stima dello sfasamento tra segnale trasmesso e ricevuto; l'invio di una radiazione luminosa continua a frequenza variabile o Continuous Wave-Frequency Modulated (CW-FM) e la misura indiretta del tempo di volo, attraverso l'insieme degli sfasamenti tra segnale trasmesso e ricevuto alle diverse frequenze, e delle corrispondenti alterazioni delle ampiezze.

La prima categoria di strumenti (PW) è per principio adatta a misurare distanze anche molto lunghe (si può arrivare a coprire alcuni chilometri) con una intrinseca limitazione nella velocità di acquisizione e nella precisione che può andare da qualche decimetro a qualche millimetro. Il principio di funzio-

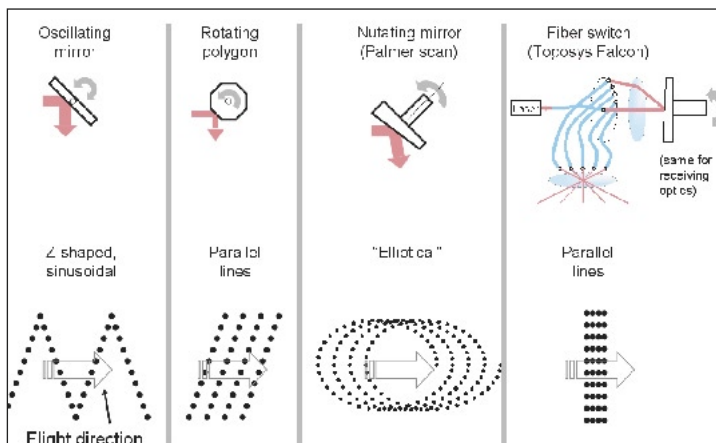


Fig. 4 – Sistemi di acquisizione ALS e relativi principi di funzionamento.

namento della seconda categoria di strumenti (CW) implica una limitazione di distanza connessa alla lunghezza d'onda del segnale luminoso utilizzato che impone una massima distanza di lavoro di alcune decine di metri. La precisione in questo caso migliora fino a scendere sotto il millimetro e la velocità di acquisizione può salire fino a un milione di punti al secondo. La terza categoria di strumenti (CW-FM) è molto sofisticata e richiede un livello di elaborazione del segnale che la rende estremamente costosa. Il principale vantaggio risiede nella elevatissima precisione ottenibile, migliore di un decimo di millimetro. Per contro il sistema è piuttosto lento pur mantenendo un range di lavoro limitato a poche decine di metri.

Mentre i laser scanner a triangolazione vengono utilizzati strettamente per applicazioni terrestri, data la limitata distanza di lavoro, i laser scanner basati sul principio del tempo di volo possono essere impiegati sia per applicazioni terrestri che da aereo o elicottero per il rilievo del territorio. La differenza sostanziale è che, come verrà mostrato estesamente nel § 3.1, nel primo caso il posizionamento dei dati geometrici in un unico sistema di riferimento avviene utilizzando dati ridondanti e applicando un opportuno algoritmo di allineamento, mentre nel secondo si opta per l'integrazione tra lo scanner laser e un sensore in grado di fornire la posizione e l'orientamento dello scanner.

I primi laser scanner da aereo furono realizzati negli anni Sessanta ma solo negli anni Novanta, con il miglioramento dei sistemi GPS e la loro combinazione con sistemi INS (Inertial Navigation Systems), si assiste alla crescita dei sistemi ALS e al loro impiego per rilevare il territorio in maniera rapida e precisa, attraverso la restituzione di modelli digitali del terreno (DTM) e di superficie (DSM). La maggior parte dei sistemi LIDAR emettono luce nello

spettro del vicino infrarosso (Near InfraRed o NIR) e sono quindi influenzati dalle condizioni atmosferiche come nuvole, neve, pioggia o umidità.

Il sistema è composto da un emittitore/ricevitore laser che permette la misura della distanza fra l'apparecchio e il suolo e un sistema integrato composto da un GPS (in modalità differenziale con una stazione a terra abbastanza vicina) e una piattaforma inerziale (INS), che consente in tempo reale il posizionamento e l'orientamento in un sistema di riferimento assoluto dello strumento di acquisizione 3D durante la misura (Fig. 4). Conoscendo il tempo intercorso tra l'emissione dell'impulso ed il ritorno è possibile risalire alla distanza del punto colpito sul terreno (VOSSELMAN, MAAS 2010). I più recenti sistemi ALS permettono di registrare diverse riflessioni del segnale emesso, consentendo quindi di discriminare la superficie rilevata in terreno, vegetazione, urbanizzato, etc. In funzione della quota di volo e del sistema di scansione impiegato, un rilievo ALS può fornire nuvole di punti con densità che vanno da un punto per m² fino 15-20 punti per m².

In sintesi, i sistemi a scansione terrestri o aerei basati sul principio del tempo di volo fanno della distanza di lavoro e del campo inquadrato il loro punto di forza, poiché sono in grado di rilevare oggetti anche a qualche chilometro di distanza e generare un campo di presa emisferico. Per contro, i sistemi a tempo di volo sono sistemi che raggiungono in generale una risoluzione e precisione superiore al millimetro, ovviamente in funzione della distanza strumento-superficie.

3.1 L'elaborazione di dati raccolti con sensori ottici attivi: il Reverse Modeling

Il processo che definisce il passaggio dall'acquisizione del dato reale fino alla generazione del modello poligonale digitale prende il nome di Reverse Modeling, a sottolineare il processo "inverso" rispetto a quello che viene normalmente compiuto in fase progettuale dal modello (digitale e non) alla sua realizzazione fisica (GUIDI, RUSSO, BERARDIN 2010).

La prima fase, ovvero quella di progetto del rilievo digitale, è la più delicata di tutto il processo. La sua importanza è data dalle scelte che vengono operate e dalle conseguenze che queste comportano in tutti i successivi passaggi fino alla generazione del modello digitale finale. La prima valutazione riguarda la tipologia di strumento e i relativi parametri di rilievo (risoluzione, precisione, accuratezza) ed è dettata da un'analisi critica di dimensione, geometria, posizione e materiale del manufatto. A questa si aggiunge la pianificazione del "progetto di presa", che deve tenere conto del tipo di strumento, della complessità del modello e della possibilità di muoversi attorno ad esso, controllando le caratteristiche ambientali. Tutte queste valutazioni fatte a priori hanno la duplice finalità di ottimizzare il processo e nel contempo prevederne le possibili problematiche (BERARDIN *et al.* 1998).

La fase di acquisizione tridimensionale rappresenta spesso uno dei passaggi più rapidi dell'intero processo. Nell'ipotesi si tratti di un'acquisizione con uno scanner a triangolazione, a causa del piccolo campo di vista dello strumento, bisogna prevedere un grande numero di prese tali da coprire l'intera superficie ed avere una sovrapposizione tra range map (o nuvole di punti) contigue dell'ordine del 30-40%. Questo permette di ottenere un rilievo completo e dettagliato dell'oggetto e di registrare correttamente le varie range map. Diverso è il modo di procedere con uno strumento a tempo di volo, per cui sono necessarie molte meno scansioni e non è sempre fondamentale ottenere un'ampia sovrapposizione dei dati grazie all'utilizzo di target esterni nell'ambiente, che permettono di orientare le singole prese rispetto ai punti noti. È però molto importante dedicare una fase di rilievo all'acquisizione dei target, poiché da essa può dipendere la qualità dell'allineamento e di conseguenza l'accuratezza del modello finale.

I principali parametri legati alla misurazione tridimensionale sono la risoluzione geometrica, l'accuratezza e l'incertezza di misura (precisione) (BERALDIN *et al.* 2007). La risoluzione (massima) è definita dal minimo passo di campionamento spaziale utilizzabile, o, in altri termini, dalla massima capacità di catturare i dettagli di una superficie, dipendente a sua volta dall'insieme delle qualità ottiche, meccaniche ed elettroniche dello strumento (GUIDI, RUSSO, BERALDIN 2010). Ogniqualvolta si effettua la misura di una distanza, di un peso o di un qualunque altro parametro fisico, ciò che viene misurato non corrisponde esattamente al dato vero, ma ne rappresenta sempre un'approssimazione. La fluttuazione di una misura si compone di una "parte sistematica", prodotta dal sussistere di una prestazione di lavoro dello strumento diversa da quella teorica, e di una "parte casuale", originata da possibili fluttuazioni aleatorie di alcuni parametri che intervengono nel processo di misura.

La prima parte è descritta dal parametro dell'"accuratezza", che rappresenta l'errore tra la misura di una quantità e il suo vero valore (o il valore accettato per vero). È un errore che si sovrappone sistematicamente ai dati rilevati e che, a differenza del parametro di precisione, non è facilmente rilevabile, poiché il dato acquisito ed eventualmente mediato dovrebbe essere confrontato con un campione di misura, e non semplicemente con la sua media (BÖHLER, MARBS 2003). La seconda parte, ovvero l'eventuale errore aleatorio residuo dello strumento dopo la calibrazione, è definita dalla deviazione standard che stima l'incertezza di misura (precisione) dello strumento. L'incertezza di misura è rappresentata dalla dispersione (σ) delle misure intorno alla loro media e permette di stimare la componente casuale dell'errore: considerando più misure ripetute è valutata dallo scarto quadratico medio tra le singole misure e la loro media (GUIDI *et al.* 2009).

Ogni singola scansione viene acquisita rispetto al sistema di riferimento locale dello strumento, quindi la fase di allineamento (o registrazione) delle

prese è un passo fondamentale per la creazione del modello digitale finale. Il processo di allineamento può contare su tre differenti approcci metodologici, basati su: allineamento tra prese adiacenti che prevedano un certo livello di ridondanza tramite l'algoritmo ICP (Iterative Closest Point e le sue innumerevoli varianti); allineamento tra prese che contengano al loro interno target fissi o punti riconoscibili sulla scena visti da posizioni diverse; allineamento guidato da sensori esterni in grado di fornire al laser scanner la propria posizione e orientamento (ad es. laser scanner da aereo).

Il primo approccio coinvolge normalmente i dati provenienti da scanner a triangolazione e prevede una prima fase di allineamento grezzo di coppie di prese, identificando 3-4 punti in comune tra le due nuvole di punti e una seconda fase di allineamento fine, in cui vengono minimizzate le differenze tra tutti i punti delle nuvole.

I target si usano invece solamente con i sistemi a tempo di volo per calcolare la roto-traslazione necessaria per l'allineamento delle scansioni, applicando in un secondo momento i parametri della trasformazione all'intera nuvola da registrare. Il minor numero di punti coinvolti in questo metodo di allineamento non comporta necessariamente una diminuzione nella qualità del risultato, qualora l'identificazione dei target avvenga con un livello di sofisticazione superiore rispetto agli altri punti della scena.

L'allineamento basato su integrazione di sensori fornisce sicuramente un risultato più rapido per l'eliminazione della fase di post-elaborazione necessaria nei primi due approcci, sebbene la qualità dell'allineamento possa variare significativamente a seconda della qualità del sensore esterno. Ad esempio in meccanica esistono laser scanner guidati da Coordinate Measurement Machines (CMM) con accuratezze migliori di 10 micrometri, mentre l'allineamento basato su GPS/INS può consentire al massimo accuratezze centimetriche.

La fase successiva all'allineamento consiste, normalmente, nella creazione di un'unica superficie poligonale (mesh) dalle diverse range map che compongono il modello, avendo cura di ridurre punti ridondanti o errati. La superficie poligonale così ottenuta necessita di una prima elaborazione, che consiste nell'eliminazione di tutte le incoerenze topologiche presenti nella mesh. Quindi si passa alla "lisciatura" della superficie, utile nel caso si voglia migliorare le porzioni del modello caratterizzate da un andamento della superficie molto irregolare rispetto alla realtà, mentre è da evitare se si vuole preservare tale caratteristica. Infine il modello presenta quasi sempre delle lacune, generate dalla presenza di zone d'ombra, che possono essere chiuse se la natura del manufatto e l'applicazione per la quale viene rilevato lo consentono. In ambito archeologico questo è fortemente sconsigliato, per non introdurre artefatti geometrici negativi ai fini dell'interpretazione del manufatto. La fase di ottimizzazione del modello poligonale dipende nuovamente dall'applicazione per la quale deve essere utilizzato. In generale la decimazione della mesh è indispensabile per



Fig. 5 – Due esempi di applicazione delle tecniche di acquisizione 3D e modellazione poligonale da dati reali: (a) fotografia dell’area archeologica della Villa delle Vignacce (Roma) con relativo modello digitale texturizzato; (b) fotografia della cripta della chiesa di San Giovanni in Conca (P.zza Missori, Milano) con relativo modello digitale texturizzato.

migliorare la gestione informatica del modello e la relativa visualizzazione, ma se non controllata può apportare pesanti modifiche alla geometria del modello (SOUCY, LAURENDEAU 1995). Accanto alla decimazione, il processo di remesh permette di regolarizzare la maglia poligonale, riordinandola dopo tutte le modifiche apportate nella fase di editing.

Infine il modello poligonale può essere texturizzato per una sua visualizzazione fotorealistica (Fig. 5) ed esportato in diversi formati, dall’STL considerato oramai uno standard de facto dei formati poligonali, all’OBJ fino al VRML. La scelta del formato dipenderà dall’applicazione per cui viene prodotto il modello poligonale (LENSCH *et al.* 2001). Per la texturizzazione del modello poligonale, se vengono impiegate immagini acquisite da una camera esterna o separata allo strumento, è necessario identificare almeno 6 punti omologhi per poter registrare la mesh con i dati immagine (metodo della DLT: ABDEL-AZIZ, KARARA 1971), oppure utilizzare il metodo delle proiezioni UV.

Per l'intera procedura di modellazione 3D con sistemi ottici attivi, è bene considerare in generale un rapporto di 1:5 tra tempi di acquisizione dei dati (singole scansioni) e tempi di allineamento, pulitura, generazione della mesh poligonale e texturing. Negli ultimi anni questo rapporto sta mutando, poiché l'introduzione dei sistemi TOF-AM permette di ridurre il tempo di acquisizione 3D a discapito della fase di elaborazione dei dati, che deve trattare una grandissima quantità di informazioni.

Il processo di acquisizione e modellazione 3D da range map, per quanto risulti strutturato e definito nei suoi passaggi principali, può variare in funzione dell'applicazione. In alcuni casi ad esempio (Fig. 5a) può risultare necessario, per ridurre al massimo il tempo e i costi del processo, incentrare l'intero processo non tanto sull'acquisizione 3D conforme alle caratteristiche geometriche del manufatto da rilevare (resolution-driven time frame) quanto sull'ottimizzazione del tempo di acquisizione (time-frame driven resolution), cercando di ottenere il massimo risultato nei tempi e costi previsti (RUSSO, ARYA 2010). In altri casi invece il processo di acquisizione ed elaborazione viene strutturato in maniera da ottenere non un prodotto finale utilizzabile quanto uno "stampo digitale" (Fig. 5b) di partenza per una fase di rimodellazione matematica di superfici e materiali.

4. SENSORI PASSIVI/FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria (MIKHAIL, BETHEL, MCGLONE 2001) è la scienza che consente di ottenere misure accurate da fotografie (immagini) acquisite con sensori terrestri, aerei o satellitari. Partendo da diversi punti omologhi individuati nelle immagini, la tecnica fotogrammetrica consente di determinare informazioni metriche sulle dimensioni, forma e posizione di un oggetto o scena. La fotogrammetria pertanto stabilisce una relazione geometrica fra le immagini e la scena reale al momento della ripresa fotografica. Una volta ricostruita questa relazione mediante l'utilizzo del modello matematico della collinearità, è possibile ottenere informazioni metriche sull'oggetto attraverso l'impiego di almeno due immagini.

La fotogrammetria viene spesso associata al Remote Sensing, che però impiega immagini principalmente satellitari per l'analisi o il rilevamento di cambiamenti sul terreno o per la sua classificazione. Con l'avvento dei satelliti ad alta risoluzione (risoluzione geometrica inferiore al metro) le due tecniche ovviamente si avvicinano sempre più, anche se la fotogrammetria rimane sempre dedicata al trattamento geometrico delle immagini.

In fotogrammetria, analogamente a quanto avviene nella visione umana, se un oggetto viene ripreso in almeno due immagini prese da punti di vista differenti, le diverse posizioni dell'oggetto nelle immagini (la cosiddetta parallasse) consentono di ottenere viste stereoscopiche e derivare informazioni 3D

dalle aree di sovrapposizione nelle immagini. La fotogrammetria è utilizzata in molti campi, dal tradizionale impiego industriale ai video giochi, alle produzioni cinematografiche, alla documentazione del patrimonio culturale sino al campo medico. La fotogrammetria è per tradizione considerata come una procedura lunga, manuale e ormai obsoleta, soprattutto dopo l'avvento dei laser scanner. Ma i recenti sviluppi di questa tecnologia ne hanno aumentato le prestazioni e automatizzato molte procedure di restituzione, riportandola come tecnica di base anche per il rilievo architettonico e archeologico.

Attualmente, per la restituzione di un modello completo, preciso e dettagliato, l'intervento manuale di un utente all'interno della pipeline di modellazione fotogrammetrica è ancora necessario. Se l'obiettivo è quello di creare un modello 3D da utilizzare per semplici visualizzazioni o per applicazioni di realtà virtuale, procedure completamente automatizzate (shape-from-motion) possono essere impiegate (cfr. ad esempio l'applicazione web-based Arc3D, VERGAUWEN, VAN GOOL 2006). Paragonata ad altre tecniche image-based per ottenere informazioni 3D (come computer vision, shape from shading, shape from texture, etc.), la fotogrammetria non mira ad una completa automazione delle procedure di restituzione, ma ha come obiettivo primario l'acquisizione di informazioni metriche accurate (precise e affidabili) e dettagliate dal punto di vista geometrico.

Rispetto ai sensori attivi, i rilievi fotogrammetrici utilizzano immagini che contengono tutte le informazioni (geometria e tessitura) utili alla restituzione di modelli 3D. Inoltre con la fotogrammetria è possibile rilevare, impiegando immagini di archivio, oggetti o scene che non sono più disponibili o sono state danneggiate (GRUEN, REMONDINO, ZHANG 2004). Gli strumenti fotogrammetrici (camere e software) sono generalmente meno costosi (è possibile utilizzare camere digitali commerciali, oltre che telefoni cellulari), portatili e semplici da utilizzare.

La fotogrammetria può essere applicata utilizzando una singola immagine (ad esempio per applicazioni quali il fotoraddrizzamento e il monoplotting), o coppie (stereo) o più immagini (bundle-block adjustment). Per applicazioni di fotoraddrizzamento, una singola immagine viene rettificata rispetto ad un piano di riferimento utilizzando una trasformazione proiettiva e conoscendo le coordinate di almeno 4 punti. Il monoplotting è invece una tecnica di digitalizzazione che consente di restituire oggetti in 3D partendo da un'immagine (o ortofoto) e il rispettivo modello digitale della scena.

La fotogrammetria si basa sul principio della collinearità (Fig. 6) che stabilisce come il centro di proiezione della fotocamera, un punto P' sull'immagine e il suo corrispondente punto P nello spazio, devono giacere su una linea retta. Quando molteplici raggi di collinearità vengono intersecati per calcolare le coordinate 3D di un punto identificato in almeno due immagini, si parla di triangolazione fotogrammetrica o bundle adjustment.

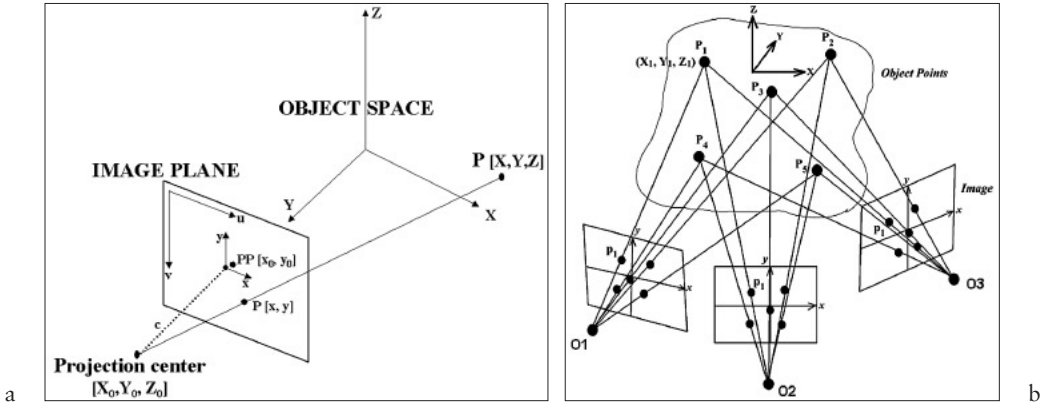


Fig. 6 – Principio della collinearità (a): centro di proiezione, punto P' sull'immagine e corrispondente punto P nello spazio devono giacere su una linea retta. Principio della triangolazione fotogrammetrica o bundle adjustment (b) con immagini convergenti: le coordinate 3D dei punti P_i sono determinate intersecando i raggi omologhi provenienti dalle varie immagini.

I sensori e le fotocamere digitali in grado di acquisire immagini sono normalmente utilizzati da terra oppure montati su piattaforme aeree (aeroplani, palloni, aquiloni, elicotteri, UAV, etc.) o satellitari (Ikonos, World-View, Spot, Quickbird, etc.). Si possono quindi distinguere:

- fotocamere terrestri: attualmente sul mercato ci sono a disposizione diversi tipi di fotocamere (o macchine fotografiche) digitali. Le due principali tipologie di camere digitali terrestri sono denominate “compatte” (o amatoriali) e “reflex” (SLR professionali) che si distinguono a seconda del tipo di sensore (CCD o CMOS, a matrice o lineare), ottica (fissa o intercambiabile), stabilità, costo, utilizzo, etc. Esistono anche camere panoramiche (con sensori lineari) in grado di acquisire immagini sferiche ad alta risoluzione (geometrica e radiometrica) (Fig. 7);
- camere avio-trasportate: vengono normalmente distinte in piccolo, medio e grande formato e acquisiscono immagini con sensori digitali lineari oppure frame. Le camere aeree analogiche che acquisivano fotografie con le marche fiduciali sono ormai state completamente abbandonate;
- sensori montati su piattaforme satellitari: sono generalmente di tipo lineare, accoppiati ad un'ottica che permette di acquisire immagini da 400-700 km d'altezza con elevate risoluzioni geometriche (<1 m) e radiometriche (8-16 bit).

Nel caso di riprese terrestri, l'operatore deve cercare di acquisire le immagini in modo da ricoprire l'intera superficie dell'oggetto da rilevare, evitando le zone d'ombra e garantendo sempre un sufficiente grado di sovrapposizione tra le diverse immagini. Un punto viene restituito tridimensionalmente solo se è visibile (e misurabile) in almeno due immagini, riprese da punti di vista diffe-

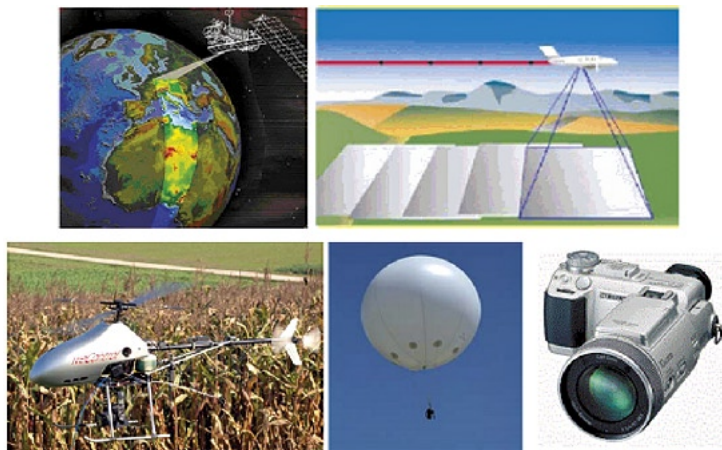


Fig. 7 – Differenti piattaforme (satelliti, aerei, UAV, palloni, terrestri) e sensori (lineari o a matrice) per raccogliere immagini da processare fotogrammetricamente.

renti. In applicazioni terrestri c'è molta più flessibilità nelle acquisizioni, mentre immagini aeree e satellitari sono tutte acquisite con assi di prese paralleli.

Una volta acquisite le immagini, l'intero flusso di lavoro per derivare informazioni metriche e 3D di una scena attraverso la procedura fotogrammetrica consiste in:

- calibrazione della fotocamera per determinarne l'orientamento interno;
- triangolazione delle immagini per determinarne l'orientamento esterno;
- restituzione 3D della scena per derivarne una nuvola di punti non strutturata;
- creazione di un modello geometrico 3D strutturato;
- texture mapping e visualizzazione del modello 3D finale fotorealistico.

4.1 L'elaborazione fotogrammetrica di dati raccolti con fotocamere digitali

È necessario distinguere fra parametri di orientamento interno ed esterno delle fotocamere. I parametri di orientamento interno vengono ottenuti mediante la procedura di calibrazione e consistono nella costante della camera (o lunghezza focale f), posizione del punto principale (x_0, y_0) e alcuni parametri addizionali (AP) usati per modellare eventuali errori sistematici dovuti, ad esempio, alla distorsione della lente. I parametri di orientamento esterno consistono nella posizione nello spazio della camera e nelle tre rotazioni del centro prospettico della camera rispetto all'origine del sistema di riferimento. Questi parametri vengono generalmente ottenuti utilizzando due immagini (orientamento relativo) o un set di immagini (soluzione bundle) e un modello matematico rigoroso (collinearità) o empirico (per esempio attraverso dei Polinomi Razionali).

Per poter utilizzare una camera o sensore digitale a fini metrici e per un'accurata e dettagliata restituzione 3D, deve essere eseguita una procedura detta di "calibrazione" (REMONDINO, FRASER 2006). Sensori satellitari e aerei vengono normalmente calibrati dal costruttore e i parametri d'orientamento interno vengono forniti al momento dell'acquisto delle immagini. Per camere terrestri (amatoriali, SLR o panoramiche) la calibrazione deve essere eseguita dall'operatore ad intervalli di tempo abbastanza frequenti. La calibrazione delle camere digitali costituisce quindi un prerequisito per il rilievo metrico tridimensionale a partire da immagini. Una camera è calibrata quando sono note la sua lunghezza focale, la posizione del punto principale e alcuni parametri aggiuntivi atti a modellare eventuali errori sistematici (ad esempio causati dalla distorsione della lente). In molte applicazioni, la fase di calibrazione delle camere consiste nella sola determinazione della lunghezza focale (che attualmente viene riportata nell'EXIF delle immagini), mentre per effettuare restituzioni più accurate vengono generalmente calcolati tutti i parametri di orientamento interno. Quindi con la procedura di calibrazione si determina la deviazione geometrica fra la realtà (collinearità) e il sistema di acquisizione delle immagini. Una restituzione 3D con una camera calibrata è in grado di ottenere risultati con un'accuratezza fino a 10 volte superiore (migliore) rispetto alla stessa restituzione ma senza calibrazione.

La procedura di calibrazione normalmente viene effettuata acquisendo immagini di un oggetto tridimensionale, costituito da punti segnalizzati (target) ben riconoscibili e misurabili automaticamente e con elevata precisione (inferiore a 1/10 di pixel) nelle immagini. I target possono avere coordinate 3D note (per esempio misurate con una stazione totale) e quindi essere utilizzati come punti di controllo nella soluzione del bundle adjustment. Si possono misurare anche punti naturali, ma la loro misura avrà una precisione inferiore rispetto ai target. Oggetti planari possono anche essere impiegati per calibrare una camera digitale, con l'accortezza di acquisire molte immagini convergenti e a distanze diverse dall'oggetto, per compensare le diverse correlazioni tra i parametri incogniti da calcolare all'interno del bundle. L'algoritmo di bundle adjustment, generalmente accoppiato con il modello stocastico ai minimi quadrati di Gauss-Markov, restituisce simultaneamente tutti i parametri incogniti del sistema, oltre alla stima delle precisioni e delle correlazioni dei parametri stessi. I parametri incogniti del sistema sono l'orientamento della camera (interno ed esterno), le coordinate 3D dei punti omologhi misurati nelle immagini e i parametri aggiuntivi (AP). Le osservazioni sono le coordinate bidimensionali dei punti omologhi misurati in almeno due immagini (ed eventualmente le coordinate di alcuni punti di controllo). Per ciascuna osservazione, un'equazione di collinearità viene scritta ed il sistema di equazioni, linearizzato e risolto iterativamente, fornisce le incognite cercate. Il sistema del bundle adjustment, per essere risolto, necessita della definizione

di un *datum*, che può essere fornito importando 7 informazioni esterne note (per esempio le coordinate di almeno 3 punti di controllo) oppure in modalità *free-network*, ovvero senza punti di controllo e fornendo almeno una distanza nota per restituire correttamente la scala.

Nel caso in cui siano disponibili punti di controllo, è possibile calibrare una camera anche utilizzando una sola immagine (resezione spaziale), ottenendo comunque un risultato qualitativamente molto inferiore rispetto al processo di *bundle adjustment* descritto precedentemente.

Per effettuare una calibrazione corretta, è preferibile fotografare un oggetto tridimensionale con una decina di immagini convergenti, riprese a differenti distanze dall'oggetto, ruotando anche la fotocamera di ± 90 gradi (per ridurre le correlazioni tra i parametri) e con una distribuzione uniforme e non coplanare dei punti nelle diverse immagini. Un progetto di ripresa fotografica che non rispetta questi requisiti può generare delle elevate correlazioni tra i parametri del sistema e determinare un'instabilità nella stima ai minimi quadrati. Inoltre l'uso inappropriato dei parametri addizionali (AP) può influire negativamente sulla soluzione del sistema. Una corretta configurazione delle prese per calibrare una camera digitale è riportata in Fig. 8a.

Una volta che i parametri di orientamento interno sono noti, si può passare alla fase di orientamento esterno, ovvero alla determinazione delle posizioni e rotazioni di ciascuna immagine che si sta utilizzando rispetto ad un particolare sistema di riferimento nello spazio. Di solito le fasi di calibrazione e di orientamento esterno sono distinte poiché la geometria di presa più consona alla calibrazione di una camera è molto diversa rispetto alla geometria di presa di immagini utili per ricostruire in 3D un oggetto o una scena (Fig. 8b). Approcci in cui le due fasi di orientamento interno ed esterno vengono eseguite contemporaneamente portano a risultati poco interessanti dal punto di vista della precisione e qualità della restituzione 3D. Risulta quindi migliore calibrare una camera in laboratorio e poi acquisire le immagini in sito con gli stessi setting di calibrazione.

L'orientamento esterno delle immagini (Fig. 8b) viene calcolato sempre attraverso la procedura di *bundle adjustment* e il principio della collinearità, fissando però i parametri aggiuntivi (AP) calcolati nella fase di calibrazione. Le incognite del sistema questa volta sono solo i parametri esterni di ciascuna immagine e le coordinate 3D dei punti omologhi misurati nelle immagini. Ad ogni punto omologo corrisponde un'equazione di collinearità. Tali equazioni formano un sistema di equazioni che viene nuovamente risolto con il metodo iterativo dei minimi quadrati (Gauss-Markov) per determinare le incognite del sistema e i rispettivi valori statistici della stima. Come accennato precedentemente, il sistema di equazioni può essere risolto in maniera relativa o assoluta. In quest'ultimo caso, soprattutto per applicazioni di fotogrammetria aerea o satellitare, è necessario fornire ulteriori informazioni esterne, quali,

ad esempio, dei punti di controllo sul terreno (almeno tre). In fotogrammetria terrestre, si può lavorare anche senza punti di controllo (soluzione free-network). Per avere un risultato metrico e correttamente scalato è però necessario definire una distanza nota fra due punti.

Una volta determinati i parametri di calibrazione e orientamento, è possibile iniziare la fase di restituzione 3D della scena attraverso ulteriori misure (manuali, semiautomatiche o automatiche) di punti omologhi tra le immagini. I punti vengono individuati nelle zone più salienti della scena da restituire, in modo da poterla poi definire attraverso linee e superfici (soprattutto per applicazioni architettoniche).

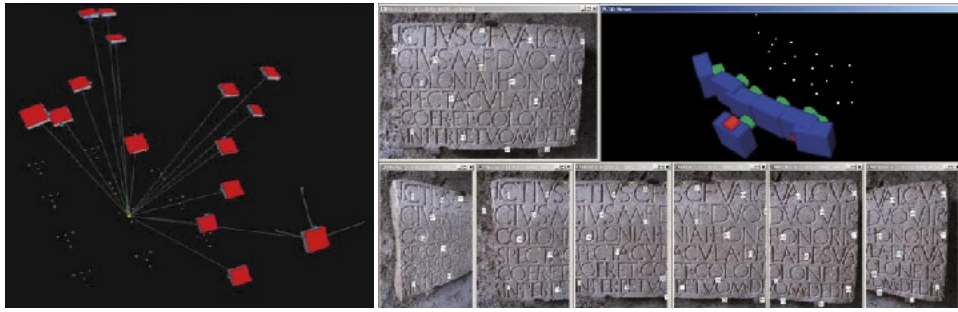
Misurazioni manuali o semiautomatiche vengono effettuate quando la geometria di un oggetto può essere ricostruita digitalmente utilizzando pochi punti, come ad esempio nel caso di edifici o semplici strutture architettoniche o archeologiche, in cui gli spigoli definiscono le forme geometriche principali (Fig. 9a). Procedure automatiche di restituzione (generalmente chiamate correlazione o image matching) vengono invece utilizzate quando si devono restituire superfici irregolari con dettagli e discontinuità, come basso e altorilievi, scavi, terreni, statue, etc. (Fig. 9b).

I recenti sviluppi e risultati nel campo della correlazione automatica di immagini (image matching: REMONDINO *et al.* 2008) testimoniano le grandi potenzialità del metodo fotogrammetrico per derivare informazioni 3D dettagliate e precise alle diverse scale, paragonabili a quelle ottenute con sensori ottici attivi.

Una volta estratte le corrispondenze tra le immagini, le coordinate 3D dell'oggetto vengono calcolate utilizzando nuovamente le equazioni di collinearità e i parametri interni ed esterni ottenuti precedentemente. A secondo del numero e densità di punti 3D restituiti, si derivano nuvole di punti dense o sparse (Fig. 10). L'insieme di punti viene di solito segmentato (nel caso di strutture architettoniche restituite con nuvole sparse) o convertito direttamente in una superficie poligonale (mesh). Per una visualizzazione fotorealistica, il modello geometrico viene poi texturizzato, proiettando direttamente le immagini (in applicazioni terrestri) o creando un'ortofoto (nel caso di applicazioni aeree o satellitari).

5. INTEGRAZIONE DELLE TECNICHE DI RILIEVO TRIDIMENSIONALE: IL CASO DEL FORO DI POMPEI

Dalla descrizione delle due più importanti tecniche di rilievo 3D, quali i sensori ottici attivi e la tecnica fotogrammetrica, emerge un punto fondamentale: ogni singolo strumento o metodo di rilievo è definito da peculiarità che lo rendono unico sia nella modalità di acquisizione che nel tipo di dati rilevati (Tab. 2). Questa forte caratterizzazione ne rappresenta da un lato il fattore



a

b

Fig. 8 – (a) Configurazione geometrica ottimale per calibrare una fotocamera digitale e determinare i parametri di orientamento interno, utilizzando immagini convergenti a distanze diverse da un oggetto tridimensionale. (b) Tipica configurazione di immagini acquisite per modellare in 3D un oggetto misurando alcuni punti omologhi tra le immagini per ricavarne l'orientamento esterno.



a



b

Fig. 9 – Esempi di strutture semplici e complesse restituite in 3D da immagini terrestri e con procedure manuali interattive (a) e automatiche (b).

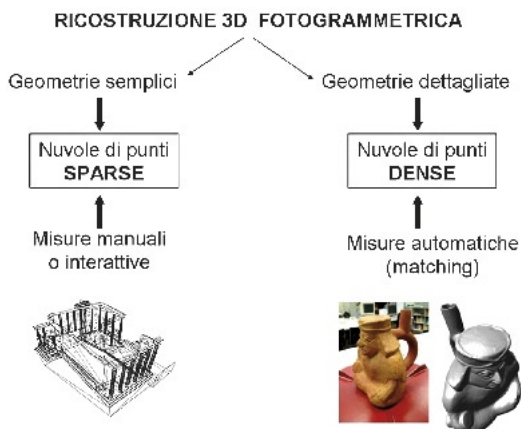


Fig. 10 – Restituzione fotogrammetrica per modellare con geometrie semplici o complesse.

Caratteristiche	Fotogrammetria (Image-Based Modeling)	Laser scanner (Range-Based Modeling)
Costo strumentazione (HW e SW)	Contenuto	Elevato
Maneggevolezza	Ottima	Sufficiente
Tempi per l'acquisizione dei dati	Minori	Maggiori
Tempi per la modellazione	Maggiori	Minori
Informazioni 3D	Da derivare	Dirette
Dipendenza dalla distanza	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalle dimensioni	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dal materiale	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalla luce ambientale	Dipendente	In parte/del tutto Indipendente
Dipendenza dalla geometria	Abbastanza dipendente	Indipendente
Dipendenza dalla texture	Dipendente	Indipendente
Scala/metricità	Assente/da fornire	Implicita (1:1 con dato reale)
Volume dei dati	Dipende dalla risoluzione delle immagini e dal tipo di misure	Nuvola di punti densa
Modellazione dei dettagli fini	Buona/ottima	Ottima
Texture	Inclusa	Assente/bassa risoluzione
Rilievo di spigoli	Ottimo	Abbastanza problematico
Analisi quantitative/statistiche	Per ogni punto calcolato	Globale
Software open-source	Molto pochi	Molto pochi

Tab. 2 – Sintesi delle caratteristiche di funzionamento relative alla tecnica fotogrammetrica e al laser scanner 3D.

distintivo, nel caso in cui l'applicazione ricalchi esattamente le prestazioni dello strumento. Nel contempo però ne limita fortemente l'uso esclusivo se le condizioni di rilievo risultano complesse e non esattamente coerenti con le potenzialità del singolo strumento (BERALDIN *et al.* 2002).

La diversa capacità di acquisire il dato tridimensionale e di estrarre dati 3D sotto forma di diverse rappresentazioni digitali dell'oggetto reale (si pensi a un rilievo che restituisce una matrice di punti indistinta o le feature di un oggetto) evidenzia una forte complementarità, più marcata tra alcuni particolari sistemi di acquisizione 3D, e la possibilità di sfruttare al meglio le potenzialità dei singoli strumenti.

Accanto a questa evidenza ne viene posta un'altra: le condizioni di rilievo reali sono spesso molto complesse e richiedono un range prestazionale che i singoli strumenti difficilmente possono offrire da soli. Si pensi ad esempio alla facciata di una chiesa antica o ad un'ampia area archeologica che contiene diversi piccoli manufatti. In tutti questi casi l'integrazione fra i diversi sistemi di acquisizione tridimensionale permette di ottenere il miglior risultato possibile in termini di precisione del singolo dato, di accuratezza globale nonché di ottimizzazione dell'intero processo dal rilievo alla modellazione 3D.

Il tema dell'integrazione fra diversi sistemi di rilievo 3D rappresenta oggi, a distanza di circa dieci anni dalle prime sperimentazioni nell'ambito dei Beni Culturali, un argomento centrale di ricerca in diversi ambiti disciplinari, all'interno del quale si studiano nuovi metodi per risolvere i problemi di compatibilità tra le diverse tecnologie in maniera automatica o semiautomatica, esaltandone le potenzialità (BERALDIN 2004).

L'approccio all'integrazione tra più sistemi di acquisizione coinvolge tre principali componenti: la rappresentazione dell'informazione, la descrizione dell'incertezza e l'ottimizzazione del metodo. Dal punto di vista operativo ciò si traduce nel fatto che esistono alcune principali finalità nell'applicazione integrata di due o più strumenti: per aumentare le informazioni sull'oggetto e per verificarne, o spesso migliorarne, il livello di accuratezza globale. Nel primo caso il modello viene risolto attraverso una prima acquisizione spaziale che viene arricchita con aggiunte progressive che ne permettano una migliore leggibilità. Il secondo e più complesso aspetto riguarda l'accuratezza complessiva del modello, tema molto delicato per chi si occupa di rilievo tridimensionale a fini di documentazione, restauro, replica e conservazione. La sua centralità dipende proprio dalla grande ed evidente differenza che passa tra la qualità e l'accuratezza del singolo dato rilevato rispetto all'accuratezza globale di un modello: mentre la prima è sostanzialmente legata al tipo di strumento e alla capacità del rilevatore, la seconda si ottiene solo al termine di un processo complesso nel quale intervengono molti fattori di criticità. In tal senso l'integrazione tra diversi strumenti può intervenire su due differenti livelli: da un lato verificare il livello di accuratezza del modello complessivo prodotto dalla fusione di più range map attraverso l'applicazione di strumenti che garantiscano un grado di accuratezza noto sulla misura globale; dall'altro migliorare l'accuratezza dell'intero modello evitando di incorrere in errori locali che si possono propagare sull'intera superficie del modello.

Sulla base di queste tre finalità, si può affermare che l'integrazione di dati tridimensionali provenienti da diversi strumenti si persegue acquisendo il maggior numero di informazioni compatibile con ogni metodologia impiegata, introducendo quindi una certa quota di ridondanza, ma minimizzando nel contempo l'impatto dell'incertezza di misura sia in fase di rilievo che in fase di creazione del modello digitale, e raccogliendo una quantità di dati geometrici adatta alla generazione di modelli a risoluzione variabile.

È evidente come il vantaggio nell'uso integrato degli strumenti risieda nella possibilità di sfruttare le potenzialità delle tecnologie impiegate per massimizzare il rendimento del sistema di rilievo, minimizzando i limiti dati dall'uso dei singoli strumenti. Si evidenzia quindi come l'uso della tecnica fotogrammetrica si riveli vantaggiosa quando si ha una limitata possibilità di permanenza nel luogo del rilievo o se il manufatto è descrivibile in maniera esaustiva da soli punti e linee, mentre la grande mole di informazioni generata dallo scanner e il consistente tempo impiegato nella fase di acquisizione e (soprattutto) di post-elaborazione dei dati sono in parte compensati dalla completezza dei dati acquisiti e difficilmente ottenibili con la sola tecnica fotogrammetrica tradizionale (ad esempio il rilievo della deformazione di una facciata). Ma le differenze tra le tecniche di acquisizione non risiedono solamente nella qualità del prodotto finale, quanto anche nell'accuratezza del modello digitale e nel tempo impiegato nella fase di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Un altro tema riguarda la relazione esistente tra la dimensione del manufatto e i tempi di elaborazione dei dati acquisiti: mentre la durata di un'applicazione fotogrammetrica è invariante rispetto alle dimensioni dell'oggetto e dipende dalle sole dimensioni (numero dei pixel) delle immagini, il metodo che utilizza il laser scanner è estremamente legato alla dimensione del manufatto. Ad un aumento delle dimensioni corrisponde un aumento esponenziale del tempo di elaborazione dei dati. Il fattore dimensionale del manufatto condiziona quindi soprattutto le tecniche di rilievo attive, ma se oltre a questo si considera l'aspetto della caratterizzazione geometrica dell'oggetto, è interessante confrontare l'accuratezza prodotta dalle singole metodologie applicate a casi differenti per dimensione e caratterizzazione formale (REMONDINO, GUARNIERI, VETTORE 2005). Da questo confronto si evince ad esempio come la tecnica fotogrammetrica risulti migliore in termini di accuratezza, soprattutto nel caso di manufatti di media e grande dimensione, mentre l'uso del laser scanner su piccoli oggetti porta solitamente ad un risultato più completo e aderente alla realtà.

In base a queste prime considerazioni di carattere generale appare evidente che le tecniche attive e passive non siano in competizione l'una con l'altra ma si completino, viste le diverse prestazioni di accuratezza e di controllo dell'acquisizione geometrica, particolarmente utili quando ci si deve confrontare con dinamiche dimensionali molto accentuate. In questa situazione un

approccio metodologico che preveda l'uso di differenti strumenti di rilievo e restituisca dati metrici caratterizzati da una risoluzione variabile, chiamata appunto "multirisoluzione", permette di ottenere un risultato metrico coerente con le diverse geometrie contenute nell'ambiente di rilievo.

La multirisoluzione è un metodo sempre più utilizzato sia nell'ambito del rilievo 3D che nel campo della visualizzazione, poiché permette di definire strutture gerarchiche di dati che possono essere alla base di differenti database informativi. Gli esempi più conosciuti in tal senso sono Google Earth e Microsoft Virtual Earth, ambienti virtuali nei quali è possibile passare da una risoluzione geometrica e di texture di centinaia di metri fino a pochi decimetri (solo per le texture). L'utilizzatore può navigare in una visualizzazione a bassa risoluzione e passare, quando è necessario, a immagini dettagliate ad alta risoluzione, spesso collegate a ulteriori informazioni 2D e 3D (testi, immagini, modelli di città, etc.).

Un esempio di rilievo 3D multirisoluzione in ambito archeologico è fornito dal rilievo digitale del Foro di Pompei. Per un'area così ampia (150×80 m), una documentazione esaustiva dell'intero ambiente e dei singoli manufatti richiede un sistema di dati caratterizzato da una dinamica di risoluzione molto elevata, che deve essere attentamente allineata e integrata per produrre risultati tridimensionali realistici che non mostrino questo genere di transizione.

Il rilievo e la modellazione tridimensionale del Foro di Pompei sono parte di un progetto più ampio basato sull'accordo tra l'azienda ARCUS, la Soprintendenza Speciale ai Beni Archeologici di Napoli e Pompei e la Scuola Normale Superiore di Pisa. Il progetto di modellazione tridimensionale ha avuto tra gli obiettivi quello di proporre alcune linee guida per l'acquisizione e la modellazione tridimensionale, che possano essere impiegate in futuro come requisiti che garantiscano la qualità scientifica dei dati e la corretta interazione tra i modelli 3D e il Sistema Informativo. La metodologia proposta quindi si è incentrata sulla stretta collaborazione tra archeologi ed esperti nel campo dell'acquisizione e modellazione tridimensionale (GUIDI *et al.* 2009).

Questo lavoro è stato affrontato prevedendo un approccio top-bottom che impiegasse la combinazione di diversi strumenti e metodologie (GPS, strumenti topografici, laser scanner TOF, fotografie da aereo e terrestri), cercando di coprire l'intera area archeologica con una risoluzione variabile dalla scala paesaggistica a quella di dettaglio dei singoli artefatti e bassorilievi, che vanno a comporre il database 3D dei manufatti presenti nel Foro. La finalità perseguita dal progetto sull'integrazione degli strumenti è duplice: adattare il livello informativo contenuto in ogni singolo artefatto allo strumento di rilievo e nel contempo introdurre un livello di ridondanza utile per ottimizzare l'accuratezza e verificare gli eventuali errori metrici contenuti nell'intero modello.

I dati rilevati nel Foro hanno in particolare sfruttato le seguenti fonti informative: 3 immagini nadirali da aereo (scala 1:3.500), immagini oblique

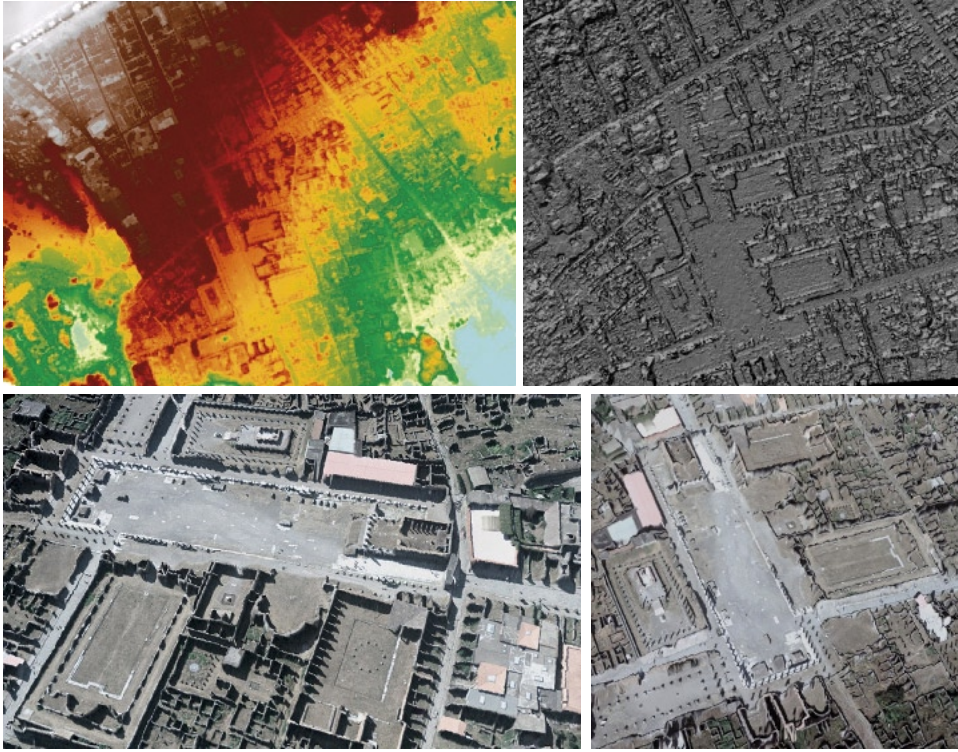


Fig. 11 – Modello digitale della zona archeologica del Foro di Pompei, ricostruito da immagini aeree con procedure di restituzione 3D automatiche.



Fig. 12 – (a) Rendering dell'Arco di Nerone e (b) rendering del modello digitale texturizzato del Foro in cui sono integrati i modelli digitali fotogrammetrici (reperti) e il modello ottenuto da scanner 3D (*Macellum*).

da aereo per finalità di texturing (Fig. 11), range data da terra provenienti da due differenti sistemi laser scanner TOF e immagini terrestri. Il laser scanner è stato utilizzato principalmente per definire lo “scheletro” dell’intero modello sul quale allineare i singoli modelli 3D dei manufatti e nel contempo mantenere un controllo sull’accuratezza globale del modello (nuvola composta da 18 milioni di punti a 25 cm di risoluzione). Per alcuni particolari manufatti, caratterizzati da un livello di complessità difficilmente gestibile dalla tecnica fotogrammetrica, il laser scanner è servito anche come principale strumento di acquisizione dati. Le immagini da terra (3.600 circa) invece sono state acquisite per coprire le lacune esistenti nei dati da scanner, documentare tutti i piccoli reperti contenuti nel Foro con una risoluzione adatta al livello di dettaglio, fino ad arrivare al dense image matching per i manufatti più complessi (REMONDINO *et al.* 2008), e ricostruire i modelli 3D delle strutture architettoniche caratterizzate da geometrie più semplici. La risoluzione ottenuta da questo complesso sistema integrato di strumenti spazia da 25 cm a pochi millimetri per quel che riguarda la geometria e da 15 cm a pochi millimetri per la texture.

Dato che il progetto è fondato sulla multirisoluzione, che mira ad ottimizzare la fase di acquisizione del dato in funzione della complessità geometrica del manufatto rilevato, è stata dedicata una particolare attenzione anche alla fase di elaborazione del modello finale (ottenere in fase successiva un sovracampionamento avrebbe messo in discussione le basi su cui si fonda il progetto).

Questo ha comportato una seconda fase di rifinitura e di eliminazione dei poligoni in eccesso, soprattutto se concentrati in aree piane, in maniera da arrivare ad un modello geometrico di minima per la rappresentazione coerente del reale. Il livello di dettaglio delle texture è stato curato in maniera indipendente da quello geometrico per massimizzare l’informazione associata ad ogni singolo manufatto. In questo modo si è ottenuto un modello “ibrido”, in cui sono state integrate informazioni di colore dettagliate sulle superfici piane e materiali uniformi e non particolarmente rilevanti su superfici geometriche complesse (Fig. 12).

Questo caso di studio rappresenta un chiaro esempio di come possono venire integrate correttamente diverse tecniche di acquisizione 3D e come venga gestito il contenuto informativo del modello fino alla definizione di un sistema digitale multirisoluzione.

6. CONCLUSIONI

Le attuali tecniche di rilievo digitale tridimensionale sono caratterizzate da un livello di complessità decisamente superiore alla maggior parte dei metodi di rilievo diretto correntemente utilizzati dall’archeologo. Questa difficoltà, legata principalmente all’utilizzo e alla gestione delle informazioni 3D, è però compensata dalla grande potenzialità di questi strumenti, che permettono di

ottenere informazioni geometriche e colorimetriche molto più complete di quelle accessibili attraverso le semplici tradizionali tecniche di rilievo, con tempistiche decisamente inferiori e con un grado di accuratezza decisamente superiore. L'applicazione di queste metodologie permette di generare copie digitali dei modelli reali con una tolleranza relativa al dato reale dipendente dal tipo di strumento e al metodo di restituzione scelto.

A prescindere da quale tecnica di rilievo ed elaborazione si decida di percorrere, il risultato che si ottiene è un “modello digitale informativo”, ovvero un contenitore di informazioni legate al manufatto analizzato (rilievi geometrici 2D e 3D, georeferenziazione, planimetrie CAD, immagini attuali e storiche, fonti bibliografiche ed iconografiche del reperto, etc.) e legate ad esso secondo diversi livelli di interattività.

Per ottenere il rilievo tridimensionale di un bene culturale si può ricorrere a diverse tecnologie o metodologie di acquisizione 3D, distinte per caratteristiche e prestazioni, la cui scelta dipende dalle finalità del modello digitale finale, dalle caratteristiche geometriche e materiche del manufatto, dalle condizioni ambientali in cui deve avvenire il rilievo, dal budget a disposizione e dall'esperienza dell'operatore o di chi commissiona il lavoro. Le due famiglie di strumenti e metodi più utilizzati nelle applicazioni archeologiche sono i sistemi laser scanner 3D e la tecnica fotogrammetrica. L'integrazione tra queste diverse tecnologie dimostra come le caratteristiche dei singoli strumenti siano connotate da un livello di complementarietà tale da rendere un sistema integrato più performante e flessibile, in grado di restituire un risultato decisamente migliore in termini assoluti e capace di adattarsi alle singole esigenze morfologiche dei diversi oggetti contenuti nella scena rilevata. L'integrazione delle tecniche permette di ottimizzare il processo di acquisizione e modellazione, utilizzando ogni singolo strumento al meglio delle sue caratteristiche e prestazioni.

Le tematiche sviluppate in questo articolo portano a fare due differenti considerazioni sulla formazione dell'archeologo: se da un lato è evidente che difficilmente possa venire data per scontata una conoscenza approfondita di questi aspetti, normalmente appannaggio di esperti nel settore del 3D Imaging, dall'altro viene sempre più richiesta una conoscenza sull'esistenza di queste tecnologie, delle dinamiche di funzionamento e delle loro potenzialità. Tale consapevolezza permette all'archeologo di decidere innanzitutto quando è necessario ricorrere a tali metodologie di indagine, cosa è possibile derivarne, e quando invece è sufficiente utilizzare strumenti di studio tradizionali. Inoltre, vista la sempre maggiore necessità di integrare figure professionali differenti e competenze eterogenee all'interno di un progetto, la conoscenza di queste tematiche permette all'archeologo di comunicare in maniera più chiara le finalità della ricerca a chi dovrà fare il rilievo tridimensionale, condividendone gli obiettivi finali. Infine, sulla base delle competenze acquisite,

lo stesso archeologo ha la capacità di valutare la qualità dei risultati ottenuti e discutere eventuali problematiche incontrate nel corso del processo. A questo si aggiunge la capacità (da non sottovalutare) di sapere come utilizzare il modello digitale che viene generato al termine del processo di acquisizione ed elaborazione dei dati e di conoscere gli strumenti per interrogarlo ed estrarre le informazioni utili per l'analisi in corso.

In conclusione la conoscenza di queste complesse tematiche non implica né che la figura dell'archeologo venga snaturata dal punto di vista culturale né la obbliga ad orientarsi verso una specializzazione estremamente verticale. La formazione dell'archeologo deve invece rimanere estremamente orizzontale, flessibile e capace di comprendere ogni singola problematica all'interno del processo che porta alla completa conoscenza ed interpretazione di un manufatto. All'interno di questo processo è oggi sempre più importante essere consapevoli dell'importanza che stanno assumendo le tecniche di analisi digitale e l'impatto che hanno nel processo di analisi ed interpretazione "interdisciplinare" del bene, con il fine di migliorare la conoscenza del manufatto archeologico.

MICHELE RUSSO, GABRIELE GUIDI
Politecnico di Milano
FABIO REMONDINO
Fondazione Bruno Kessler (FBK)
Povo (Trento)

BIBLIOGRAFIA

- ABDEL-AZIZ Y.I., KARARA H.M. 1971, *Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry*, in *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA, 1-18.
- BERALDIN J.A. 2004, *Integration of laser scanning and close-range photogrammetry. The last decade and beyond*, in *Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Commission VII*, Istanbul, 972-983.
- BERALDIN J.A., BLAIS F., BOULANGER P., COURNOYER L., DOMEY J., EL-HAKIM S., GODIN G., RIOUX M., TAYLOR J. 2000, *Real world modeling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures*, «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», 55, 4, 230-250.
- BERALDIN J.A., BLAIS F., COURNOYER L., RIOUX M., BERNIER F., HARRISON N. 1998, *Portable digital 3-D imaging system for remote sites*, in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 5, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 488-493.
- BERALDIN J.A., BLAIS F., EL-HAKIM S., COURNOYER L., PICARD M. 2007, *Traceable 3D imaging metrology: Evaluation of 3D digitizing techniques in a dedicated metrology laboratory*, in *The 8th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, Zürich, National Research Council Canada, 310-318.

- BERALDIN J.A., PICARD M., EL-HAKIM S., GODIN G., VALZANO V., BANDIERA A., LATOUCHE C. 2002, *Virtualizing a Byzantine crypt by combining high-resolution textures with laser scanner 3D data*, in *Vsmm 2002. Proceedings of the Eighth International Conference on Virtual Systems and Multimedia, Creative and Digital Cultur*, Gyeongju, Korea, Kiwisoft Company Ltd, 3-14.
- BERNARDINI F., MARTIN I.M., RUSHMEIER H. 2001, *High-quality texture reconstruction from multiple scans*, «IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics», 7, 4, 318-332.
- BLAIS F. 2004, *A review of 20 years of range sensors development*, «Journal of Electronic Imaging», 13, 1, 231-240.
- BÖHLER W., MARBS A. 2003, *Investigating laser scanner accuracy*, «The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 34-5/C15, 696-701.
- CIGNONI P., SCOPIGNO R. 2008, *Sampled 3D models for CH applications: A viable and enabling new medium or just a technological exercise?*, «ACM Journal on Computing and Cultural Heritage», 1,1, 1-23.
- EL-HAKIM S., BERALDIN J.A., BLAIS F. 1995, *A comparative evaluation of the performance of passive and active 3-D vision systems*, in E.A. FEDOSOV (ed.), *SPIE Proceedings, Conference on Digital Photogrammetry and Remote Sensing*, 2646, St. Petersburg, 14-25.
- EL-HAKIM S., BERALDIN J.A., PICARD M., GODIN G. 2004, *Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques*, «IEEE Computer Graphics and Application», 24, 3, 21-29.
- GRUEN A., REMONDINO F., ZHANG L. 2004, *Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan*, «The Photogrammetric Record», 19, 107, 177-199.
- GUARNIERI A., REMONDINO F., VETTORE A. 2006, *Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to Cultural Heritage 3D modeling*, «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 36, 5, on CD-Rom.
- GUIDI G., BERALDIN J.A., CIOFI S., ATZENI C. 2003, *Fusion of range camera and photogrammetry: A systematic procedure for improving 3-D models metric accuracy*, «IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics», 33, 4, B, 667-676.
- GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., MENNA F., RIZZI A., ERCOLI S. 2009, *A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archeological areas*, «International Journal of Architectural Computing», 7, 1, 39-55.
- GUIDI G., RUSSO M., BERALDIN J.A. 2010, *Acquisizione e modellazione poligonale*, Milano, McGraw-Hill.
- GUIDI G., RUSSO M., MAGRASSI G., BORDEGONI M. 2010, *Performance evaluation of triangulation based range sensors*, «Sensors» Special Issue in Instrumentation, Signal, Treatment and Uncertainty Estimation, 10, 8, 7192-7215.
- GUIDI G., TUCCI G., BERALDIN J.A., CIOFI S., OSTUNI D., COSTANTINI F., EL-HAKIM S. 2002, *Multiscale archaeological survey based on the integration of 3D scanning and photogrammetry*, in *Proceedings of the International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording – Complementing or Replacing Photogrammetry*, Corfu, National Research Council Canada, 58-64.
- KOSKINEN M., TYPPO J., KOSTAMOVAARA J. 1992, *Fast time-to-amplitude converter for pulsed Time-of-Flight laser rangefinding*, in R.J. BECHERER (ed.), *SPIE Proceedings, Laser Radar VII: Advanced Technology for Applications*, The International Society for Optical Engineering, 1633, Los Angeles, 128-136.
- LENSCH H.P.A., GOESELE M., KAUTZ M., SEIDEL H.P. 2001, *A framework for the acquisition, processing, transmission, and interactive display of high quality 3D models on the web*, in *Tutorial Notes for DAGM 2001*, München.
- MIKHAIL E.M., BETHEL J.S., MCGLONE J.C. 2001, *Introduction to Modern Photogrammetry*, New York, Wiley.

- MÜLLER P., WONKA P., HÄGLER S., ULMER A., VAN GOOL L. 2006, *Procedural modeling of buildings*, «ACM Transactions on Graphics – Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006», 25, 3, 614-623.
- REMONDINO F., EL-HAKIM S. 2006, *Image-based 3D modelling: A review*, «Photogrammetric Record», 21, 115, 269-291.
- REMONDINO F., EL-HAKIM S., GRUEN A., ZHANG L. 2008, *Turning images in 3-D models. Development and performance analysis of image matching for detailed surface reconstruction of heritage objects*, «IEEE Signal Processing Magazine», 25, 4, 56-65.
- REMONDINO F., FRASER C. 2006, *Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», ISPRS Commission V Symposium, Dresden, 36, 5, 266-272.
- REMONDINO F., GUARNIERI A., VETTORE A. 2005, *3D modelling of close-range objects: Photogrammetry or laser scanning?*, in J.-A. BERARDIN, S.F. EL-HAKIM, A. GRUEN, J.S. WALTON (eds.), *SPIE Proceedings: IS&T Electronic Imaging, Videometrics VIII*, 5665, San Jose (CA), 216-225.
- RUSSO M., ARYA D.A. 2010, *Time constraints effects in 3D acquisition and data processing: The case of “Villa delle Vignacce”*, in *Proceedings of 37th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*, Williamsburg (<http://www.caa2009.org/PapersProceedings.cfm/>).
- SANSONI G., CAROCCI M., RODELLA R. 2000, *Calibration and performance evaluation of a 3-D imaging sensor based on the projection of structured light*, «IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement», 49, 3, 628-636.
- SOUCY M., LAURENDEAU D. 1995, *A general surface approach to the integration of a set of range views*, «IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 4, 17, 344-358.
- STUMPFEL J., TCHOU C., YUN N., MARTINEZ P., HAWKINS T., JONES A., EMERSON B., DEBEVE P. 2003, *Digital reunification of the Parthenon and its sculptures*, in D.B. ARNOLD, A. CHALMERS, F. NICCOLUCCI (eds.), *VAST 2003. The 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, Brighton (UK), Eurographics Association, 41-50.
- VERGAUWEN M., VAN GOOL L. 2006, *Web-based reconstruction service*, «Machine Vision and Applications», 17, 6, 411-426.
- VOSSELMAN G., MAAS H-G. (eds.) 2010, *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Dunbeath, Caithness Scotland, Whittles Publishing.
- YIN X., WONKA P., RAZDAN A. 2009, *Generating 3D building models from architectural drawings*, «IEEE Computer Graphics and Applications», 29, 1, 20-30.

ABSTRACT

The increase of 3D acquisition and modeling techniques applied to archeology is due principally to (i) their capacity to survey archeological artifacts with high precision and a non-contact approach and (ii) the possibility to create 3D digital models useful for data analysis, simulation and preservation. These benefits in terms of knowledge oblige the contemporary archaeologist to acquire a better understanding of 3D acquisition and modeling principles and practice. This evidence arises from the necessity of adopting a common language for experts in 3D data management and archaeologists with the principal aim being the understanding of each other's requirements and sharing of the purposes of the project. In this article the authors propose a concise but exhaustive explanation of the working principles of active and passive 3D acquisition techniques. For each one a description of instruments and methodologies is developed, pointing out pros and cons of every technique. In conclusion, a sensor fusion approach is presented as an interesting solution to increase the instrument performances while obtaining at the same time a quality improvement of 3D acquisition and modeling results. A final multi-resolution application about Pompeii Forum 3D modeling follows and closes the article.