

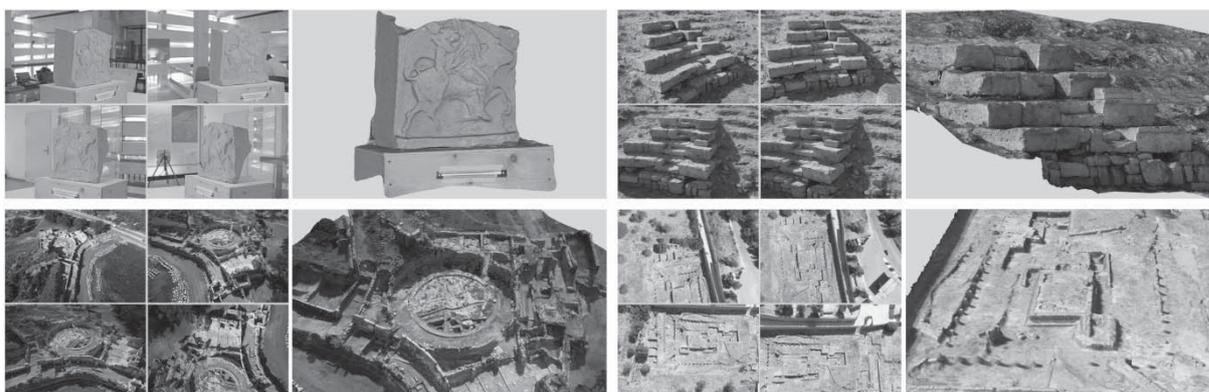


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA DELLE INFRASTRUTTURE VIARIE
CICLO XXIV - SSD ICAR/06 (TOPOGRAFIA E CARTOGRAFIA)

TESI DI DOTTORATO

***LA RICOSTRUZIONE 3D IN AMBITO ARCHEOLOGICO
E POSSIBILE UTILIZZO NEL CAMPO DELLE
INFRASTRUTTURE STRADALI: ANALISI DELLE
POTENZIALITA' DELLE TECNICHE IMAGE-BASED***



Dottoranda:
Arch. Paola Meli

Coordinatore del Corso:
Prof. Ing. Orazio Giuffrè

Tutor:
Dott. Mauro Lo Brutto



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
AMBIENTALE, AEROSPAZIALE, DEI MATERIALI

Gennaio 2014

Ai miei genitori

a Lucia, Marco e Vittorio

ai miei amici

Indice

1. Introduzione	1
1.1. Organizzazione della tesi	5
2. La fotogrammetria e i sistemi da acquisizione	7
2.1. Cenni storici	8
2.2. Le grandezze fotogrammetriche e la proiettività	10
2.3. Le equazioni fondamentali della fotogrammetria: le equazioni di collinearità.....	13
2.4. La fotografia: proiezione centrale	15
2.5. Le immagini digitali.....	17
2.6. I tipi di sensori e le loro caratteristiche	19
2.6.1. L'applicazione dei filtri per l'informazione sul colore	23
2.7. Le deformazioni ottiche	24
2.8. La calibrazione della camera	26
2.9. I sistemi di acquisizione aerea a bassa quota	30
3. La <i>Computer Vision</i> e l'approccio <i>Structure from Motion</i>	35
3.1. La <i>Computer Vision</i>	35
3.2. Recenti sistemi di ricostruzioni 3D da immagini.....	37
3.3. La geometria epipolare e la matrice fondamentale	38
3.4. Descrizione delle fasi per la ricostruzione 3D	39
3.4.1. Rilevamento ed estrazione delle features.....	40
3.4.2. Accoppiamento delle features	41
3.4.3. Stima dei parametri della camera	42
3.4.4. Gli algoritmi di <i>dense image matching</i>	43

3.5. Gli strumenti utilizzati	44
3.5.1. Arc3D	44
3.5.2. Photosynth.....	46
3.5.3. Autodesk 123D Cacth	47
3.5.4. My3Dscanner	48
3.5.5. Cubify Capture (già Hypr3D)	49
3.5.6. VisualSfm + Sfm_Georef.....	50
3.5.7. Agisoft PhotoScan.....	51
4. Impiego di tecniche <i>image-based</i> e <i>range-based</i> nell'ambito delle infrastrutture stradali	53
4.1. Sistemi di acquisizione 2D e 3D impiegati nell'ambito delle infrastrutture stradali	54
4.2. Potenzialità delle tecniche geomatiche	59
4.2.1. Le tecniche <i>image-based</i>	60
4.2.2. Le tecniche <i>range-based</i>	64
5. Casi studio: prese terrestri	70
5.1. Metodologia adottata	71
5.2. <i>Dataset</i> 1: Rovine del teatro antico di Solunto	72
5.2.1. Elaborazione delle immagini.....	74
5.2.2. Verifiche metriche.....	77
5.3. <i>Dataset</i> 2: Elemento scultoreo a forma di testa	79
5.4. <i>Dataset</i> 3: Arula del Tempio della Vittoria	83
5.5. <i>Dataset</i> 4: Fontana dei Delfini	89
6. Casi studio: prese aeree di prossimita'	96
6.1. Metodologia adottata	97
6.2. Un caso di prese aeree da pallone: Elaiussa Sebaste	98
6.2.1. Descrizione delle aree di studio	99

6.2.2. Descrizione dei <i>dataset</i>	100
6.2.3. Rilievo dei punti di appoggio	102
6.2.4. Verifica delle procedure di georeferenziazione e di messa in scala.....	103
6.2.5. Calcolo e verifica dei modelli 3D	106
6.3. Un caso di prese aeree da drone: il Tempio di Iside e il Quartiere ellenistico-romano nella Valle dei Templi di Agrigento	112
6.3.1. Il velivolo utilizzato: il multicottero Md4-200 della Microdrones	113
6.3.2. Progettazione ed esecuzione dei voli	114
6.3.3. Procedure di georeferenziazione e di messa in scala	117
6.3.4. Calcolo dei modelli 3D e verifiche metriche	123
7. Conclusioni e sviluppi futuri.....	137
Bibliografia e Sitografia	143
Ringraziamenti	154

1. Introduzione

La Scienza del rilievo ha sempre accompagnato la storia dell'umanità, migliorando, nel corso dei secoli, le procedure e le metodologie di misura grazie alle innovazioni tecnologiche, soprattutto di tipo informatico, che si sono avute nel corso degli anni. I molteplici ambiti di applicazione in cui è possibile utilizzarla, fanno sì che possa essere considerata a tutti gli effetti una scienza interdisciplinare. Esempi di tali applicazioni si trovano in molti campi operativi e di ricerca che vanno dalle scienze mediche alle scienze ambientali, naturalistiche e geologiche dal campo dei Beni Culturali all'ambito dello studio di sistemi ed infrastrutture (stradali, ferroviarie etc...).

La Scienza del rilievo, comprendente le procedure e le metodologie di misura, fa parte attualmente di quel grande ambito interdisciplinare indicato con il termine di Geomatica. Tale termine è stato coniato a partire dagli anni '80 presso l'Università di Laval in Canada, per descrivere tutte le strumentazioni, metodologie e procedure moderne per acquisire, archiviare, analizzare ed utilizzare dati spazialmente referenziati. La Geomatica abbraccia l'insieme delle discipline afferenti alla Scienza del rilievo come la Topografia, la Geodesia, la Fotogrammetria, il Telerilevamento, la Cartografia, il Laser Scanning, i Sistemi Informativi Territoriali nelle loro procedure, tecniche e strumentazioni più aggiornate. La Geomatica racchiude sia le tecnologie utili per acquisire dati metrici e qualitativi che per elaborarli, analizzarli, gestirli in moltissime applicazioni e studi, relativi al territorio e alle infrastrutture in generale. In particolare, uno degli ambiti che recentemente ha avuto un notevole sviluppo è quello riguardante le tecniche di acquisizione avanzate per ottenere misure e rappresentazioni tridimensionali in maniera molto più rapida e completa rispetto alle tecniche tradizionali.

Nell'ambito dei Beni Culturali, la Scienza del rilievo è sempre stata di fondamentale importanza per la realizzazione di prodotti utili alla conoscenza dei Beni storico-artistici, per la loro valorizzazione ed il loro restauro. Infatti, la conoscenza per fini di recupero e valorizzazione, deve riguardare non soltanto gli aspetti storico-artistici, ma anche le caratteristiche geometriche, materiche, tipologiche e geografiche.

Il grande vantaggio offerto dalle tecniche di rilievo è la possibilità di ottenere caratteristiche di oggettività del bene in esame in relazione allo stato di conservazione, alla geometria, forma, tipologia, posizione, caratteristiche materiche, costruttive etc... e di avere informazioni su tutti gli elementi esistenti ottenendo una base utilizzabile in diversi ambiti disciplinari.

Uno degli aspetti più interessanti dell'applicazione delle tecniche di rilievo nell'ambito dei Beni Culturali è quello offerto dalla possibilità di eseguire rilievi tridimensionali che consentono di ricostruire, in maniera virtuale con elevatissimi livelli di dettaglio, gli oggetti studiati. Nell'ambito della Scienza del rilievo, o più genericamente della Geomatica, esistono numerose tecnologie per effettuare il rilievo tridimensionale classificabili in vari modi; una possibile classificazione opera la suddivisione tra i metodi che prevedono un contatto fisico tra l'oggetto da misurare e lo strumento di misura e quelli che non lo prevedono (Curless, 2000; Remondino & El-Hakim, 2005). Queste due principali categorie possono a loro volta essere suddivise in varie sottocategorie fino ad indicare l'effettiva tecnica di misura utilizzata (Figura 1.1).

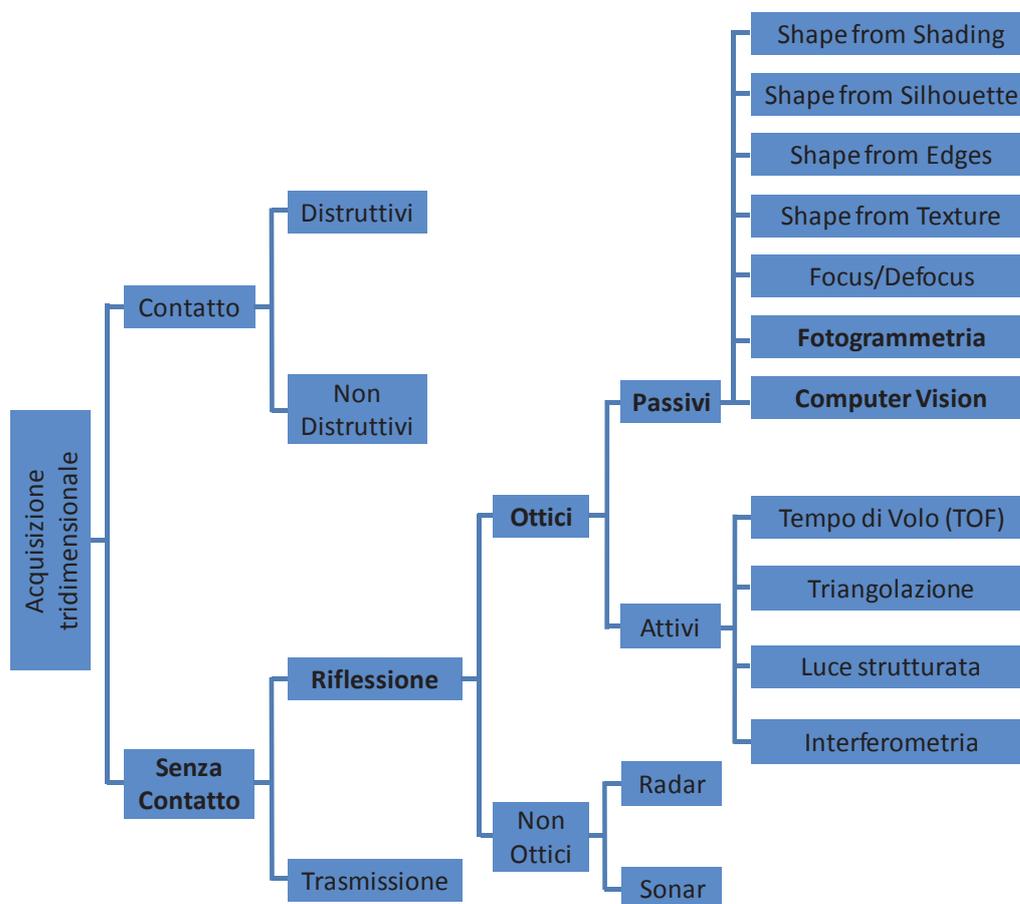


Figura 1.1 – Schema delle tecnologie geomatiche per l'acquisizione 3D (Curless, 2000 modificato)

Attualmente i metodi maggiormente impiegati per l'acquisizione 3D di Beni Culturali sono quelli che utilizzano sensori ottici attivi (in genere indicati con la terminologia *range-based*), come i *laser scanner*, i sistemi a luce strutturata o le *range-imaging camera*, e quelli che utilizzano i sensori ottici passivi (indicati come *image-based*), come le fotocamere digitali. I primi sono strumenti che consentono di individuare la geometria di una superficie in modo totalmente automatico fornendo direttamente, nel momento del rilievo, le coordinate spaziali dell'oggetto, mentre le seconde permettono di ottenere una misura accurata delle caratteristiche geometriche di un oggetto, come dimensioni, forma e posizione, attraverso l'impiego congiunto di fotografie che lo ritraggono da posizioni differenti (Guidi et al., 2010). La scelta di una tecnica piuttosto che l'altra dipende dal *budget* e dal tempo a disposizione, dalle condizioni operative, dalla complessità e dalle caratteristiche degli oggetti da rilevare, dall'esperienza degli operatori (Remondino, 2011).

Tra le tecniche *image-based* vi sono la fotogrammetria, la *Computer Vision* (CV), che utilizzano le immagini per ricavare informazioni 3D di un oggetto attraverso l'uso di modelli matematici, e le tecniche *shape from shading*, *shape from silhouette*, *shape from edges*, *shape from texture* e *Focus/Defocus* che individuano il dato 3D usando diverse informazioni ottenibili dalle immagini come appunto l'ombra, il contorno, la *texture* etc... (Remondino & El-Hakim, 2006).

La fotogrammetria, tecnica maggiormente impiegata nell'ambito dei Beni Culturali, ha come obiettivo principale l'accuratezza metrica dei prodotti finali e si fonda su modelli rigorosi di calcolo consentendo di stimare qualità e precisione dei processi, sia automatici che manuali, attraverso parametri statistici. La CV è una tecnica simile che però ha come obiettivo principale l'automazione dei processi, puntando più sulla rapidità del calcolo che sulla precisione metrica della ricostruzione 3D (Mundy, 1993; Barazzetti & Scaioni, 2010).

Negli ultimi anni la ricerca nell'ambito del rilievo metrico dei Beni Culturali si sta indirizzando sempre più verso lo studio di soluzioni che consentono sia di minimizzare i tempi e i costi dei rilievi tridimensionali sia di ottenere ricostruzioni 3D sempre più complete e metricamente accurate. Le tecniche *image-based* stanno diventando le principali protagoniste di questo ambito della ricerca grazie allo sviluppo di algoritmi e strategie di calcolo derivati dalla CV e denominate *Structure from Motion* (SfM) (Guidi & Remondino, 2012). Tali procedure consentono di orientare in maniera automatica un numero elevato di immagini, di cui non si conosce né la geometria di presa né il tipo di camera utilizzata, e di ottenere una "nuvola di punti" tridimensionale, che però non fornisce una rappresentazione esaustiva dell'oggetto o della scena ripresa (Barazzetti et al., 2011). L'integrazione di

procedure SfM con algoritmi di *dense matching*, sviluppati in fotogrammetria, consente di ottenere una “nuvola di punti” a più alta risoluzione dalla quale calcolare il modello 3D dell’oggetto. Questa integrazione tra tecniche fotogrammetriche e tecniche della CV sono state sviluppate in *software* commerciali (PhotoScan, Photomodeler Scanner), *software open-source* (Blunder e PMVS, VisualSFM, Apero, etc...) e in applicazioni *web* definite *3D web-service* (Arc3D, Autodesk 123D Catch, Cubify, My3Dscanner etc...) (Vergauwen & Van Gool, 2006), in modo da sfruttare da un lato l’elevato livello di automazione della CV e dall’altro i modelli rigorosi della fotogrammetria.

Il lavoro sviluppato nell’ambito della tesi si pone come obiettivo generale quello di approfondire le problematiche relative alle tecniche *image-based*, ed in particolare alla fotogrammetria e alla CV, per il rilievo e la ricostruzione 3D di Beni Culturali soprattutto di tipo archeologico. Negli ultimi anni infatti la costruzione di modelli 3D per diversi tipi di rappresentazione e documentazione è sempre più richiesta in ambito archeologico per effettuare analisi per il restauro e la diagnostica, per gli studi storico-artistici o semplicemente per la realizzazione di modelli utili per fini turistici e di visualizzazione. Le tecniche di rilievo da impiegare in ambito archeologico dovrebbero soddisfare alcuni requisiti come la portabilità, utile nel caso di siti difficilmente accessibili, la rapidità nell’esecuzione del rilievo, utile quando non si vuole interrompere lo scavo per troppo tempo, ed il basso costo delle strumentazioni impiegate sia nella fase dell’acquisizione che della elaborazione dei dati, poiché generalmente le campagne di scavo hanno *budget* limitati. Questi requisiti potrebbero essere soddisfatti adoperando le tecniche *image-based*, che grazie all’integrazione degli algoritmi della CV all’interno delle tecniche fotogrammetriche, offrono una grande opportunità attraverso lo sviluppo di applicativi facilmente utilizzabili come i cosiddetti *3D web-service*, i *software open-source* o a basso costo. In particolare lo sviluppo dei *3D web-service*, applicazioni *web* totalmente gratuite, rende le tecniche *image-based* molto più moderne ed in linea con i tempi, visto che questi applicativi si avvalgono di internet, strumento ormai divenuto fondamentale per moltissime applicazioni, con cui è possibile ottenere informazioni praticamente in tempo reale. In contrapposizione a tutti questi aspetti positivi è necessario però evidenziare che l’avvento degli algoritmi della CV all’interno di procedure fotogrammetriche è piuttosto recente ed ancora non si sono ben comprese né le potenzialità né gli effettivi limiti soprattutto per quanto riguarda gli aspetti metrici.

L’obiettivo della ricerca è quello di investigare le prestazioni in termini di operatività, affidabilità dei processi, qualità ed accuratezza metrica dei modelli 3D ottenuti tramite processamento con tecniche *image-based*. Inoltre si vogliono valutare i risultati dal punto

vista qualitativo e metrico e studiare se è possibile sostituire le tecniche *laser scanning* e fotogrammetriche tradizionali con gli strumenti della CV in alcune applicazioni in ambito archeologico.

I nuovi approcci *image-based* sono stati utilizzati in diverse sperimentazioni sul campo, in modo da poterne valutare le potenzialità ed analizzare le criticità che di volta in volta si sono riscontrate. La ricerca si è avvalsa dei dati raccolti durante i tre anni di Dottorato che hanno consentito di fare delle valutazioni sui possibili approcci sia nella fase di acquisizione che di elaborazione dei dati anche in relazione alle caratteristiche e particolarità degli oggetti rilevati. I casi studio indagati sono differenti per tipologia di oggetti (in relazione soprattutto alle dimensioni e forme), per tipo di camere utilizzate, per condizioni e modalità di presa (numero di immagini, risoluzioni, distanze di presa, prese terrestri e aeree di prossimità ecc...).

Infine per dimostrare il vasto campo operativo delle tecniche geomatiche un capitolo della tesi viene dedicato allo studio delle tecniche impiegate nell'ambito delle infrastrutture stradali per analizzare il contributo che la Geomatica, ed in particolare le tecniche *image-based* e *range-based*, possono fornire in questo settore.

1.1. Organizzazione della tesi

Dopo questo capitolo introduttivo la tesi si sviluppa su altri cinque capitoli secondo la seguente organizzazione:

- Nel secondo capitolo, “La fotogrammetria e i sistemi di acquisizione”, dopo un *excursus* della storia e delle origini della fotogrammetria, vengono descritti i principi della fotogrammetria, le caratteristiche delle immagini e gli strumenti di acquisizione, le camere digitali. Infine vengono descritti degli innovativi sistemi di acquisizione aerea di prossimità che, grazie ai molteplici vantaggi che offrono, si stanno diffondendo molto rapidamente nell'ambito del rilievo dei Beni archeologici.
- Nel terzo capitolo, “La *Computer Vision* e l'approccio *Structure from Motion*”, dopo un breve *excursus* sulla storia degli algoritmi della CV e sui campi di applicazione, vengono esposte le fasi della strategia SfM e vengono riportati gli aspetti principali degli algoritmi di *dense image matching*. Infine vengono descritti gli strumenti che sono stati utilizzati per elaborare le immagini relative alla parte sperimentale.
- Nel quarto capitolo, “Impiego di tecniche *image-based* e *range-based* nell'ambito delle infrastrutture stradali”, dopo una dissertazione di alcune delle ricerche per l'estrazione di informazioni 2D e 3D che sono state condotte nell'ambito delle applicazioni stradali, viene

analizzato il possibile utilizzo in questo settore delle tecniche afferenti alla Geomatica ed in particolare delle tecniche *image-based* e *range-based* per la ricostruzione 3D.

- Nel quinto capitolo, “Casi studio: prese terrestri”, sono presentati dei casi studio aventi come oggetto dei *dataset* terrestri che riprendono oggetti di piccole e medie dimensioni che si differenziano per forma e tipologia. Le immagini sono state elaborate utilizzando un approccio SfM con i diversi strumenti indagati e, attraverso delle verifiche qualitative e metriche dei prodotti ottenuti, si è valutato se questi nuovi strumenti possono sostituire o eventualmente integrare le tecniche *laser scanning* e fotogrammetriche tradizionali.
- Nel sesto capitolo, “Casi studio: prese aeree di prossimità”, i casi studio presentati hanno come oggetto dei *dataset* aerei di prossimità che si differenziano per geometrie di prese e per tipologie di piattaforme impiegate. Anche in questi casi studio le immagini, che riprendono aree archeologiche con estensione, tipologia, forma e geometria differenti, sono state elaborate attraverso un approccio SfM per valutare le prestazioni e le potenzialità delle diverse applicazioni nell'ambito del rilievo aereo di prossimità, valutando qualità ed accuratezza metrica delle ricostruzioni 3D generate.

2. La fotogrammetria e i sistemi di acquisizione

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che consente di ottenere informazioni metriche, come forma, dimensioni e posizione, di oggetti reali mediante la misura e l'interpretazione di immagini fotografiche.

I principi della fotogrammetria sono legati alle regole dell'ottica, della fotografia e della geometria descrittiva ed in particolare alla prospettiva inversa. L'immagine fotografica può infatti essere assimilata ad una proiezione centrale e quindi, attraverso costruzioni grafiche, è possibile stimare le posizioni nello spazio di punti facilmente riconoscibili nella rappresentazione prospettica di una scena ovvero da una fotografia.

La fotogrammetria è una tecnica che ha avuto, e continua ad avere, modifiche e miglioramenti nelle sue varie fasi sia di acquisizione del dato primario (le immagini) che di processamento. Attualmente tale tecnica può essere suddivisa, in funzione del metodo di acquisizione, in tre tipologie:

- fotogrammetria aerea quando l'acquisizione avviene da piattaforme aeree o a da satellite;
- fotogrammetria aerea di prossimità quando l'acquisizione avviene da piattaforme aeree di prossimità motorizzate e non (paragrafo 2.9.);
- fotogrammetria terrestre quando l'acquisizione avviene da camere posizionate a terra.

All'interno della fotogrammetria terrestre è possibile definire la fotogrammetria *close-range* o dei vicini quando gli oggetti ripresi si trovano ad una distanza inferiore ai 300 m circa dalla camera fotografica. La fotogrammetria *close-range* viene utilizzata prevalentemente per rilievi alla scala architettonica e impiega differenti approcci che si distinguono per numero di immagini e tipologia di presa:

- approccio monoscopico, cioè da immagine singola;
- approccio stereoscopico, cioè da due o più immagini ;

- approccio multi-immagine in cui la restituzione avviene attraverso più immagini riprese da posizioni differenti.

Le procedure di restituzione sono regolate da dei parametri che definiscono i rapporti tra lo spazio oggetto 3D e quello immagine.

2.1. Cenni storici

La fotogrammetria è legata alla geometria descrittiva, alla storia della fotografia e dell'ottica ed i suoi principi hanno una storia antica, ma per renderla una tecnica effettiva occorre aspettare la nascita dei primi apparecchi fotografici. Lo studio delle teorie prospettiche si intensificò nel Rinascimento con Paolo Uccello, Piero della Francesca e Leonardo Da Vinci fino ad arrivare alla teorizzazione ufficiale per opera di Leon Battista Alberti e Filippo Brunelleschi. Nel 1759 Johan Heinrich Lambert nella sua opera "*Perspectiva liber*", definì i principi e le leggi matematiche su cui si baserà la fotogrammetria.

La prima immagine fotografica incisa esclusivamente dalla luce è stata ottenuta nel 1826 da Joseph Nicéphore Niépce con l'utilizzo di una lastra di peltro trattata con un particolare bitume fotosensibile che dopo alcune esposizioni induriva nelle parti luminose dell'immagine mentre le parti in ombra venivano asportate evidenziando il peltro sottostante (Figura 2.1). Gli studi di Joseph Nicéphore Niépce furono continuati dal suo predecessore L.-J.-M. Daguerre che nel 1837 inventò il dagherròtipo. Il dagherròtipo attraverso il processo della dagherrotipia forniva un'unica copia positiva, non riproducibile, su supporto in argento o rame argentato sensibilizzato, in camera oscura, mediante esposizione a vapori di sodio. La ripresa richiedeva lunghi tempi di esposizione, da ca. 20 minuti fino a tre quarti d'ora e quindi si potevano ritrarre esclusivamente elementi immobili.

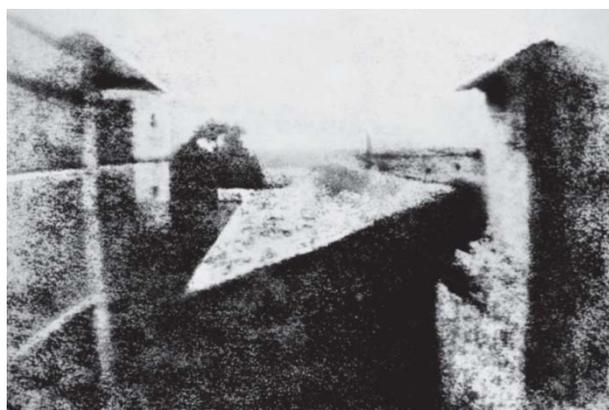


Figura 2.1 – Prima immagine fotografica incisa esclusivamente dalla luce ottenuta da Joseph-Nicéphore Niépce "*View from the Window at Le Gras*"

Il primo apparecchio che dà l'idea di una camera fotografica molto primitiva è la camera con foro stenopeico; una sua descrizione si trova in un trattato sistematico di ottica di un matematico arabo nel 1000 d.C. tradotto in latino nel 1270 dal titolo "Opticae thesaurus". L'idea di ottenere misure reali di un edificio da immagini è nata "grazie" ad un incidente avvenuto a Albrecht Meydenbauer nel 1858 nel tentativo di rilevare parte del duomo di Wetzlar. Infatti, dopo avere rischiato la vita decise di utilizzare un metodo indiretto, la fotografia, per rilevare l'edificio attraverso l'applicazione di nozioni di geometria descrittiva e di fotografia. In tal modo si posero le basi per la fotogrammetria architettonica.

A quell'epoca ancora non si conosceva l'effetto di distorsione che provocavano gli obiettivi e quindi non era chiaro del perché non vi fosse una perfetta corrispondenza di una fotografia con una prospettiva centrale. I primi studi in questo campo si devono a Ignazio Porro, che formulò alcune teorie per evitare gli effetti delle distorsioni e le mise in pratica realizzando nel 1860 il primo fotogoniometro, inaugurando così la fototopografia, rilevamento topografico del terreno mediante l'uso della fotografia.

Nel 1859 invece si posero le basi per la fotogrammetria aerea con la costruzione di una mappa di Parigi a partire da immagini prese dai tetti della città grazie ad Aimè Laussedat che in una relazione espose un procedimento chiamato "iconometria" per determinare le coordinate di punti a terra a partire da una coppia di immagini.

La tecnica è stata migliorata attraverso l'introduzione della stereoscopia e delle marche mobili introdotte dal tedesco F. Scholze nel 1892. In particolare le marche mobili facilitavano il riconoscimento dei punti omologhi in due diversi fotogrammi. La marca mobile attraverso dei segnali luminosi regola la sovrapposizione in z di due punti omologhi presenti in due fotogrammi. A partire al 1901 si svilupparono degli strumenti che eseguivano in maniera automatizzata il processo della restituzione (passaggio dalla prospettiva alla proiezione ortogonale) come lo stereocomparatore (1901), o strumenti che permettevano il tracciamento continuo di linee planimetriche e di curve di livello partendo da fotogrammi terrestri (stereo-autografo, 1909) e da fotogrammi aerei (stereo-planigrafo, 1923).

Nel 1903 si effettuarono i primi voli per ottenere immagini dall'alto: Orville e Wilbur Wright realizzarono il primo volo con il Flyer, velivolo motorizzato più pesante dell'aria con un pilota a bordo facendolo alzare per quattro volte in modo duraturo e sostanzialmente controllato, mentre il tedesco Alfred Maul brevettò la sua invenzione per lanciare una fotocamera utilizzando un razzo (Geert J. J. Verhoeven, 2009).

Le due guerre mondiali hanno agevolato l'evoluzione dalla fotogrammetria meccanica a quella analogica per la necessità di mappare il territorio nemico.

Negli anni '50 l'introduzione del calcolo elettronico portò grandi cambiamenti nelle elaborazioni fotogrammetriche fino ad arrivare alla nascita della fotogrammetria analitica con l'avvento dei calcolatori elettronici e con lo sviluppo dei restitutori semi-analitici attraverso l'aggiunta di una componente elettronica di misura ai precedenti restitutori analogici. I fondamenti della fotogrammetria analitica hanno vita più antica rispetto alla nascita dei calcolatori elettronici con Finsterwalder all'inizio del XX secolo. Le equazioni di collinearità furono sviluppate da Otto Von Gruber nel 1932, che diventeranno le basi della fotogrammetria analitica.

Sempre negli anni '50 si sviluppa una tecnica, la triangolazione aerea, che consente di diminuire il numero dei punti di appoggio da utilizzare per le operazioni di orientamento esterno riducendo al minimo le operazioni topografiche.

L'ultimo passaggio è avvenuto negli anni '90 con l'introduzione delle camere digitali con le quali si passa alla fotogrammetria digitale. In questo modo la restituzione fotogrammetrica avviene attraverso procedimenti semi-automatici ed automatici. Le basi della fotogrammetria digitale erano già state poste negli anni '80 con lo sviluppo della Computer Grafica. La nascita dei sensori CCD ha permesso lo sviluppo di scanner fotogrammetrici in grado di trasformare i fotogrammi scattati con le vecchie camere a pellicola in immagini *raster* cioè sotto forma di matrici numeriche in cui vi è un numero associato ad ogni cella (denominata pixel), che rappresenta l'intensità di colore con una prestabilita risoluzione radiometrica. In questo modo la gestione del dato avviene attraverso le *Digital Photogrammetric Workstation* (DPW), sviluppate negli anni '90. Questi sistemi offrono la possibilità di analizzare le immagini acquisite tramite scansione attraverso la visione stereoscopica dei fotogrammi con l'uso di diversi dispositivi come occhiali passivi e attivi, schermi polarizzati etc.... Infine grazie alla nascita delle moderne camere digitali tutto il processo fotogrammetrico avviene appunto in modalità digitale dalla fasi di acquisizione fino al processamento. L'uso di camere digitali ha prima investito la fotogrammetria terrestre e, solo a partire dall'inizio dello scorso secolo, ha interessato pure la fotogrammetria aerea.

2.2. Le grandezze fotogrammetriche e la proiettività

Le difficoltà riscontrate in passato per ottenere informazioni 3D da immagini sono dovute al fatto che nel processo fotogrammetrico entrano in gioco moltissimi fattori. Per esempio Meydenbauer, avendo soltanto delle nozioni di geometria descrittiva, soltanto dopo un decennio di prove e di tentativi riuscì a descrivere la sua teoria in un articolo. Inoltre all'epoca non si conoscevano le problematiche che si hanno sull'uso di obiettivi che a quell'epoca

apportavano distorsioni elevate. Le grandezze che hanno necessità di essere relazionate per elaborare un processo fotogrammetrico sono (Figura 2.2):

- le coordinate 3D (X, Y, Z) dell'oggetto;
- le coordinate 2D (x, y) dell'immagine;
- parametri di orientamento.

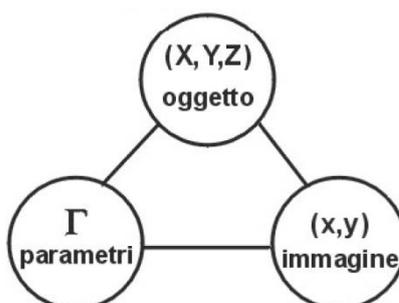


Figura 2.2 – Le grandezze fotogrammetriche

Il problema fondamentale della fotogrammetria è quello di instaurare una relazione tra lo spazio oggetto e lo spazio immagine in maniera univoca per cui è necessario individuare dei punti discreti caratteristici e ben visibili in tutti e due gli spazi. Lo spazio oggetto è quello in cui si trova appunto l'oggetto da rilevare, lo spazio immagine è la presa fotogrammetrica che inquadra l'oggetto. I parametri di orientamento sono quelli che stabiliscono le "regole" che rendono possibile la corrispondenza tra lo spazio oggetto e quello dell'immagine.

Il processo si divide in fasi che sono descritte di seguito:

- Fase di acquisizione delle immagini: in questa fase si acquisisce il dato, le immagini, e quindi si stabiliscono due tipologie di parametri: l'oggetto del rilievo (X, Y, Z) e la fotocamera (posizione e tipo di fotocamera);
- Fase di orientamento: in questa fase vengono determinate le posizioni della camera nelle differenti viste che riprendono l'oggetto del rilievo;
- Fase di restituzione: una volta noti i parametri sopra esposti è possibile avviare la trasformazione dalle coordinate immagine nello spazio 2D alle corrispondenti coordinate oggetto nello spazio 3D ricavando così forma e dimensione dell'oggetto rilevato.

La legge che regola la relazione tra i due spazi è la proiezione che è governata da relazioni ben precise che provengono dalla matematica e dalla geometria descrittiva.

La proiettività viene regolata da una matrice di parametri A fungente da operatore della trasformazione attraverso la quale è possibile operare appunto la trasformazione di tutti i punti nello spazio oggetto nei corrispondenti punti nello spazio immagine.

La relazione che schematizza tale trasformazione è la seguente:

$$u = AU$$

dove u è una matrice colonna con le coordinate bidimensionali dello spazio immagine, A è la matrice di trasformazione contenente i parametri di orientamento e U è una matrice colonna con le coordinate tridimensionali dello spazio oggetto.

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ a_5 & a_6 & a_7 & a_8 \\ a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_i \\ V_i \\ W_i \\ T \end{bmatrix}$$

Con riferimento ai due sistemi di coordinate (x, y) e (X, Y, Z) le relazioni sopra scritte diventano:

$$u = kBX$$

Dove k è il fattore di scala, ovvero:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_5 & b_6 & b_7 & b_8 \\ b_9 & b_{10} & b_{11} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Con le seguenti corrispondenze:

$$\frac{u}{t} = x; \quad \frac{v}{t} = y; \quad b_j = \frac{a_j}{a_{12}} \quad (b_{12} = \frac{a_{12}}{a_{12}} = 1)$$

$$k = \frac{T}{t} a_{12}; \quad X = \frac{U}{T}; \quad Y = \frac{V}{T}; \quad Z = \frac{W}{T}$$

In generale l'espressione può essere scritta come:

$$x_i = k_i B X_i$$

Da questa relazione è possibile scrivere sistemi di equazioni che offrono la soluzione del problema con varie dimostrazioni per via analitica.

La proiettività che regola i rapporti tra i due spazi è tale che il punto nello spazio oggetto, il suo corrispondente punto nello spazio immagine ed il centro di proiezione giacciono sulla stessa retta.

Il principio del processo è la triangolazione e quindi per ottenere misure nello spazio occorre disporre di almeno due immagini che ritraggono l'oggetto del rilievo da due angolazioni differenti, in quanto non è possibile ricostruire un oggetto da una sola retta proiettiva. Infatti, mentre ad un punto dello spazio oggetto corrisponde uno ed un solo punto nello spazio immagine, ad un punto dello spazio immagine non corrisponde uno ed un solo punto dello spazio oggetto.

Quindi da un'immagine non è possibile ricavare misure tridimensionali. I punti che rappresentano lo stesso particolare in due o più fotografie vengono definiti punti omologhi.

Il punto $O (X_0, Y_0, Z_0)$ viene definito centro della proiettività e da esso passano tutte le rette proiettive (Figura 2.3). Gli elementi della matrice di trasformazione sono quei parametri caratteristici dell'insieme di rette proiettive. L'insieme delle rette proiettive si definisce stella o fascio proiettivo.

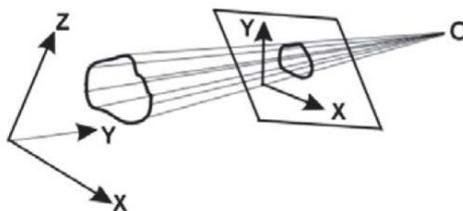


Figura 2.3 – Centro della proiettività

2.3. Le equazioni fondamentali della fotogrammetria: le equazioni di collinearità

Le equazioni di collinearità stanno alla base della fotogrammetria. Esse stabiliscono che il punto oggetto, il centro di presa e il punto immagine corrispondente sono allineati, cioè appartengono ad una stessa retta, ipotizzando così una prospettiva centrale rigorosa (Fig 2.4).

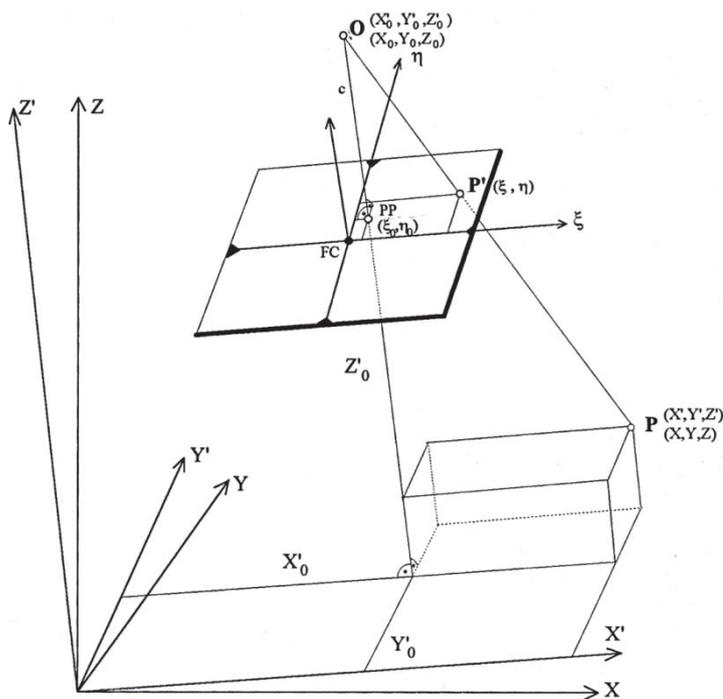


Figura 2.4 – Condizione dell'equazione di collinearità

Con le equazioni di collinearità viene definita la trasformazione proiettiva tra lo spazio immagine e lo spazio oggetto e quindi contengono implicitamente questa condizione geometrica:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i = \lambda_{ij} R_j \begin{bmatrix} x_{ij} - x_{0j} \\ y_{ij} - y_{0j} \\ z_{ij} - z_{0j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

Dove:

X_i, Y_i, Z_i sono le coordinate nello spazio oggetto di un punto P_i ;

X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j} sono le coordinate oggetto del centro di presa O_j ;

x_{ij}, y_{ij} sono le coordinate immagine misurate del punto P'_{ij} ;

x_{0j}, y_{0j} sono le coordinate immagine del punto principale H'_{ij} ;

c_j è la distanza focale;

R_j è la matrice di rotazione tra lo spazio immagine e lo spazio oggetto;

λ_{ij} è il fattore di scala per il raggio immagine;

$i=1, \dots, n_p$ è il numero dei punti oggetto;

$j=1, \dots, n_f$ è il numero delle immagini.

Nel sistema precedente l'orientamento interno dell'immagine digitale j è dato dai parametri x_{0j} , y_{0j} , c_j mentre i parametri X_{0j} , Y_{0j} , Z_{0j} , R_j (ω_j , ϕ_j , κ_j) definiscono l'orientamento esterno, dove ω_j , ϕ_j , κ_j sono i tre angoli di rotazione della matrice R_j

Eliminando il fattore di scala λ_{ij} è possibile ricondurre il sistema a due equazioni e quindi diventano:

$$x_{ij} = -c_j f_{ij}^x + x_{0j} = -c_j \frac{r_{11j}(X_i - X_{0j}) + r_{21j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{31j}(Z_i - Z_{0j})}{r_{13j}(X_i - X_{0j}) + r_{23j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{33j}(Z_i - Z_{0j})}$$

$$y_{ij} = -c_j f_{ij}^y + y_{0j} = -c_j \frac{r_{12j}(X_i - X_{0j}) + r_{22j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{32j}(Z_i - Z_{0j})}{r_{13j}(X_i - X_{0j}) + r_{23j}(Y_i - Y_{0j}) + r_{33j}(Z_i - Z_{0j})}$$

Dove r_{11j} , r_{33j} sono gli elementi della matrice R_j

Questa espressione descrive un modello matematico-geometrico ideale e semplificato non rispondente quindi alla realtà. Infatti, per la presenza degli errori sistematici indotti dalla camera che provocano uno spostamento dei punti immagine dalla posizione teorica, questo modello non corrisponde esattamente al modello reale. Per potere descrivere ciò che avviene nella realtà occorre modificare le equazioni di collinearità introducendo delle opportune correzioni alle coordinate immagine, per cui le equazioni divengono:

$$x_{ij} = -c_j f_{ij}^x + x_{0j} + \Delta x_{ij}$$

$$y_{ij} = -c_j f_{ij}^y + y_{0j} + \Delta y_{ij}$$

dove i termini Δx_{ij} e Δy_{ij} sono quelli di correzione delle coordinate immagine x_{ij} e y_{ij} da applicare al fine di riportare la realtà fisica della geometria del sensore al modello teorico descritto.

2.4. La fotografia: proiezione centrale

Come già detto dal punto di vista geometrico una foto può essere assimilata ad una proiezione centrale infatti una proiezione centrale è ottenuta proiettando i punti dell'oggetto su un piano (detto piano o quadro di proiezione), da un punto esterno ad esso (detto centro di proiezione o di vista). Le rette congiungenti i punti dell'oggetto con

il centro di proiezione sono dette rette proiettanti. I loro punti di intersezione con il piano di proiezione costituiscono le proiezioni o "immagini" dei punti dell'oggetto (Figura 2.5).

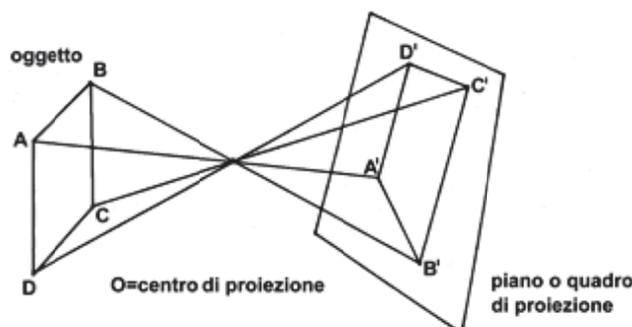


Figura 2.5 – Individuazione del punto coniugato

Gli elementi della proiezione centrale quali il piano di proiezione, il centro di proiezione e le rette proiettanti corrispondono nel caso della fotografia rispettivamente al sensore della fotocamera, ad un punto dell'obiettivo della fotocamera e ai raggi luminosi che formano l'immagine fotografica. In un obiettivo fotografico, essendo un sistema ottico complesso, non esiste un unico centro, ma in esso possono invece individuarsi due punti, detti punti nodali, posti lungo l'asse ottico del sistema ad una certa distanza l'uno dall'altro.

In un sistema ottico ideale i raggi luminosi provenienti dallo spazio esterno (spazio oggetto) per raggiungere il piano del sensore della camera fotografica, passano dal primo di tali punti nodali (N1), ed emergono nello spazio interno alla camera fotografica (spazio immagine), passando dal secondo punto nodale (N2) in direzione parallela a quella che essi avevano nello spazio oggetto (Figura 2.6).

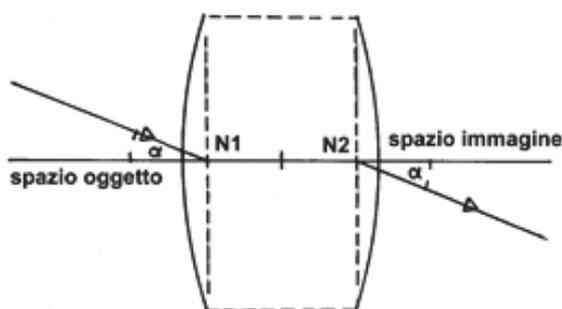


Figura 2.6 – I punti nodali

Nella realtà la situazione è più complessa ma tale semplificazione nella pratica fotogrammetrica è sufficiente. Infatti è possibile considerare nulla la distanza fra i due punti nodali ed assimilare il primo punto nodale al centro di proiezione dell'immagine fotografica, cioè corrispondente al punto di presa, punto dello spazio in cui la fotografia è stata scattata.

2.5. Le immagini digitali

L'immagine digitale o numerica è rappresentata da una struttura matriciale che viene definita *raster*, dall'inglese trama, reticolo. Questo termine deriva dalla tecnologia televisiva analogica in riferimento alle linee parallele che si formano sullo schermo quando viene proiettata un'immagine dai televisori a tubo catodico. Infatti l'immagine digitale è costituita da una matrice bidimensionale composta da righe e colonne i cui elementi di dimensioni finite, i pixel (*picture element*), descrivono il contenuto radiometrico dell'immagine secondo una funzione continua $g(i,j)$ dove i,j sono variabili spaziali.

$$g(x, y) = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \cdots & g(0, C - 1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \cdots & g(1, C - 1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(R - 1,0) & g(R - 1,1) & \cdots & g(R - 1, C - 1) \end{bmatrix}$$

Dove:

$i = 0, 1, \dots, R-1$ indice di riga;

$j = 0, 1, \dots, C-1$ indice di colonna;

$R =$ massimo numero di righe;

$C =$ massimo numero di colonne;

$g(x,y) = \{0, 1, \dots, \max\}$ valori radiometrici.

Quindi ad ogni pixel sono associati univocamente due numeri interi che indicano la posizione in riga e colonna all'interno della matrice. Il numero corrispondente alla riga varia da 1 a i con passo unitario mentre quello corrispondente alla colonna varia da 1 a j . Il pixel rappresenta un elemento di immagine di dimensione finita pari a Δx_i e Δy_j .

In particolare la formazione dell'immagine digitale è un procedimento che consiste di due operazioni la quantizzazione e il campionamento che sono legate la prima alla risoluzione radiometrica e la seconda a quella geometrica.

Il processo che converte una rappresentazione continua in una discreta si chiama

digitalizzazione (*digitizing*), e avviene campionando le variabili spaziali e quantizzando i valori radiometrici corrispondenti. La luce partendo da una o più sorgenti luminose, riflette una o più superfici della scena, e passando attraverso l'ottica della fotocamera (le lenti) raggiunge infine il sensore, cuore dello strumento di digitalizzazione. In questo modo il sensore misura la luce incidente, che viene convertita sotto forma di tensione elettrica con intensità proporzionale; quest'ultima a sua volta viene trasformata da un convertitore analogico/digitale (ADC) in *digital number*, cioè in bit di informazione. L'insieme di questi valori viene elaborato dal microprocessore della fotocamera e costituisce l'informazione necessaria alla ricostruzione dell'immagine catturata.

Nella Figura 2.7 sono riportate le fasi successive che hanno luogo all'interno delle camere digitali per la formazione dell'immagine digitale.

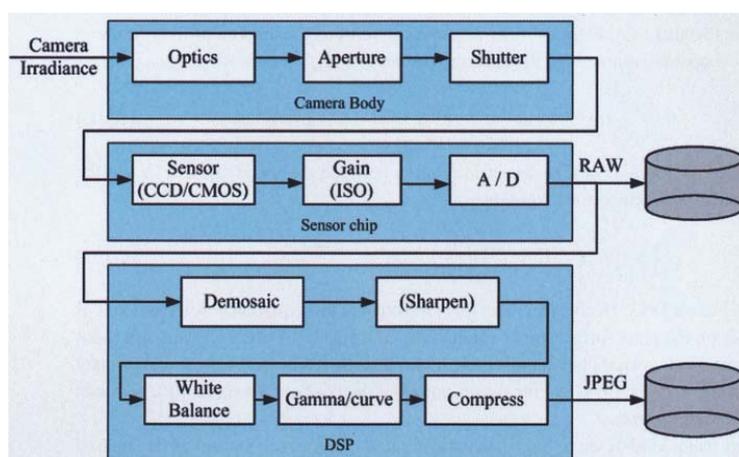


Figura 2.7 – Il processo di formazione dell'immagine

La risoluzione radiometrica, da cui dipende la qualità di un'immagine, è un numero intero prodotto dal sensore, memorizzato in corrispondenza di ciascun pixel, e derivante dalla conversione dell'intensità del segnale luminoso in un valore di intensità elettrica. Inoltre il valore è legato al numero di bit utilizzati per rappresentare il suo valore radiometrico che generalmente varia da 1 a 8 bit. Il numero di livelli è rappresentato da $2^{(\text{numero di bit per pixel})}$. Quindi si va da una rappresentazione binaria per un'immagine avente 1 bit come risoluzione radiometrica (immagine in bianco e nero) fino ad arrivare alle immagini a 8 bit che presentano 256 livelli cromatici. I 256 livelli vanno dallo 0 che corrisponde al nero al 255 che invece rappresenta il bianco, i valori intermedi determinano le gradazioni di grigio (immagini a livelli di grigio).

In altro modo si deve ragionare per le immagini a colori in quanto ogni colore viene scomposto in tre canali o nei tre livelli RGB (rosso, verde e blu) o in YCM (giallo, ciano e

magenta) e a sua volta ciascun componente è suddiviso in 256 valori che variano da 0 (assenza di colore) a 255 (saturazione del colore). La radiometria di un pixel quindi viene rappresentata dalla somma dei tre numeri interi che esprimono la saturazione delle tre componenti principali, quindi tre byte (24 bit) per ogni pixel. In questo modo l'immagine avrà 16.777216 di colori, cioè 2^{24} .

Quando si utilizzano le immagini per scopi metrici come avviene nella fotogrammetria nasce l'esigenza di conoscere quanto è la dimensione di un pixel. Questo valore è legato alla risoluzione geometrica. Le dimensioni del pixel dipendono dalla densità di campionamento (discretizzazione) ed un'elevata risoluzione geometrica comporta la generazione di un'immagine costituita da una matrice con un elevato numero di righe e colonne, cioè, a parità di dimensioni del sensore, con dimensioni del pixel più piccole. La risoluzione geometrica indica il numero di pixel contenuti in una unità di lunghezza che viene solitamente espressa in dpi (*dot per inch*- punti per pollice). Poiché un pollice è pari a 2,54 cm la relazione che permette di calcolare la dimensione del pixel corrispondente è:

$$d_{pixel}[\mu m] = 25400/dpi$$

Poiché solitamente i pixel sono quadrati un'immagine di 400 dpi avrà una dimensione del pixel pari a 85 μm in entrambe le direzioni. La risoluzione geometrica influisce sulla possibilità di vedere maggiori dettagli della scena.

2.6. I tipi di sensori e le loro caratteristiche

Nelle fotocamere attuali sono utilizzati due tipologie di sensori che sono il tipo CCD (*Charged Coupled Device*) dispositivo a carica accoppiata e il tipo CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) semiconduttore a metallo ossido complementare (Figura 2.8).

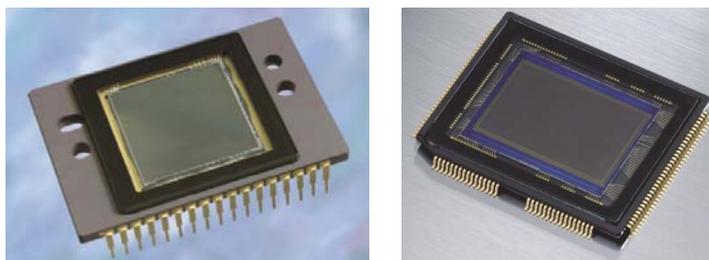


Figura 2.8 – Sensori CCD (a sinistra) e CMOS (a destra)

Entrambi sono dispositivi fotosensibili basati sul silicio, costituiti da degli elementi

disposti in una linea o in una matrice bidimensionale in grado di convertire un segnale luminoso (fotoni) in carica elettrica (elettroni). In questo modo ogni elemento di base è in grado di fornire in uscita una carica elettrica proporzionale alla quantità di fotoni da cui è stato colpito. La differenza tra i sensori CCD e i CMOS sta nel procedimento con cui avviene la trasformazione della carica elettrica in tensione ed il suo trasferimento dal chip alla camera. Nei sensori CCD l'elemento base, il pixel, è costituito da due elementi: un fotodiodo (microsensore) e un'area chiamata *charge transfer region* che trasforma il fotone in carica elettrica e dove la carica risiede prima di essere letta in modo seriale, ovvero un pixel dopo l'altro. In questo modo la carica registrata viene trasportata attraverso tutto il chip da una riga di fotositi a quella adiacente, finché non sono depositati negli amplificatori di rilevamento, che amplificano il segnale e lo passano al convertitore analogico-digitale (ADC).

Il nome CCD deriva dal metodo usato per leggere l'informazione dal sensore una volta registrata l'immagine: le cariche di ogni "riga" del sensore sono "accoppiate" a quelle della riga precedente, in modo che quando la prime si spostano, le seconde si muovono per prenderne il posto. La capacità di immagazzinamento di elettroni è limitata e quando questa capacità viene superata si ha una sovraesposizione e la carica eccedente si riversa sui pixel adiacenti (effetto *blooming*). I sensori CCD più recenti presentano al loro interno la tecnologia *anti-blooming* che minimizza questo problema di sovraesposizione attraverso l'utilizzo di conduttori attraverso cui la carica in eccesso viene catturata.

I sensori CMOS sono basati su dei semiconduttori basati sulla tecnologia dei più comuni transistor impiegati largamente nelle applicazioni elettroniche. Essi sono molto più semplici dei sensori CCD e la trasformazione da carica elettrica a tensione avviene all'interno di ogni pixel, e il chip trasferisce direttamente il *Digital Number*.

I principali fattori che influenzano le prestazioni di un sensore di una camera digitale sono la velocità dell'otturatore, il passo di campionamento, il fattore di riempimento, la dimensione del chip, il guadagno analogico, il rumore del sensore e la risoluzione del convertitore analogico-digitale. Molti dei valori effettivi di questi parametri possono essere letti dalle informazioni contenute negli EXIF file delle immagini digitali, mentre altri possono essere ottenuti dalle schede tecniche dei produttori delle macchine fotografiche o da recensioni.

In linea generale possiamo affermare che i sensori CCD superano i CMOS in termini di qualità dell'immagine, però hanno bisogno di più energia e sono lenti nelle operazioni *read in/out*. Al contrario i sensori CMOS acquisiscono le immagini molto velocemente ma con una qualità inferiore rispetto al CCD in quanto la carica è amplificata per ogni pixel, quindi si ha una minore uniformità del dato in output. Analizziamo i principali fattori che influenzano le

prestazioni di un sensore.

Velocità dell'otturatore. La velocità dell'otturatore (tempo di esposizione) regola direttamente la quantità di luce che raggiunge il sensore e, di conseguenza, determina se le immagini sono sovra o sotto esposte o se i soggetti in essa presenti vengono sfocati o meno. Per le scene dinamiche, la velocità dell'otturatore determina anche la presenza dell'effetto mosso su soggetti in movimento.

Passo di campionamento. Il passo di campionamento è la distanza fisica tra celle adiacenti del chip del sensore. Un sensore con un passo di campionamento inferiore ha una densità superiore di campionamento e fornisce quindi una risoluzione maggiore (in termini di pixel). Tuttavia, un passo minore implica che il sensore presenta un'area piccola e quindi non può accumulare tanti fotoni; questo lo rende poco sensibile alla luce e maggiormente soggetto al rumore.

Fattore di riempimento. Per fattore di riempimento (*fill factor*) si intende la percentuale dell'area di un fotodiodo che risulta utile per raccogliere la luce. Solitamente sono da preferire fattori di riempimento superiore. Un sensore CCD ha un *fill factor* del 100%, percentuale molto più alta rispetto a quella dei sensori CMOS. In condizioni di luce scarsa un sensore CMOS necessita di maggiori aperture o di tempi di esposizione leggermente più lunghi di un sensore CCD. Per ovviare in parte a questo problema, vengono spesso utilizzate sopra ogni singolo fotodiodo delle micro-lenti, che intercettano la luce destinata a cadere sui circuiti di servizio e la convogliano sulle parti sensibili. I costruttori cercano di aumentare il *fill factor* dei sensori CMOS riducendo sempre di più le dimensioni dei circuiti integrati. Il fattore di riempimento di una macchina fotografica può essere determinato empiricamente usando un processo di calibrazione fotometrico.

Dimensione del chip. L'avvento e la diffusione delle camere digitali ha portato la produzione di una grande varietà di sensori di diverse dimensioni e formati. Le reflex digitali cercano di avvicinarsi alla dimensione delle reflex tradizionali a pellicola con formato da 35 mm, infatti, come già visto, una dimensione grande del chip è preferibile, poiché ogni cella del sensore risulta maggiormente fotosensibile. Di contro i chip più grandi sono più costosi da fabbricare, sia per problemi logistici di produzione che per l'aumento della probabilità della presenza di un sensore difettoso in proporzione all'aumento della sua area, quindi la maggior parte delle fotocamere compatte presenta un chip molto piccolo che determina una compattazione delle ottiche in maniera proporzionale. Un parametro che determina in modo efficace la risoluzione geometrica di un'immagine digitale ed è legata alla dimensione del pixel del sensore è il *Ground Sampling Distance* (GSD) che rappresenta l'area di superficie

reale corrispondente all'area di un pixel della corrispondente immagine, proiettata sul piano focale e quindi sul sensore. Il GSD, riferendoci ad una ripresa aerea, è definito anche come la dimensione del pixel al suolo.

In realtà se D è la distanza di presa, f è la focale della camera ed L la dimensione del lato del pixel, il GSD è dato dalla relazione:

$$\text{GSD} = D \frac{L}{f}$$

dalla quale risulta che il GSD è funzione dei tre parametri L , f e D . Si può quindi notare che la camera che produce immagini con maggior risoluzione non è quella che ha la dimensione dei pixel del sensore più piccolo.

Guadagno analogico. Prima della conversione del segnale da analogico a digitale, il segnale è di solito potenziato da un amplificatore di rilevamento. In particolare il numero di fotoni in arrivo e il segnale in uscita dal sensore sono legati da un fattore moltiplicativo di guadagno (analogico o digitale) che nelle più recenti fotocamere digitali è possibile controllare attraverso l'impostazione della sensibilità ISO. Un valore ISO alto equivale ad un guadagno alto che consente alla fotocamera di funzionare meglio in condizioni di luce scarsa quando si potrebbero ottenere immagini sfocate a causa di tempi lunghi di esposizione. Tuttavia non conviene utilizzare impostazioni ISO elevate perché queste amplificano l'effetto rumore, non opportuno quando le immagini devono essere elaborate per applicazioni di tipo metrico.

Rumore del sensore. Durante l'intero processo di acquisizione delle immagini, viene introdotto del rumore da varie fonti, come per esempio il *Fixed Pattern Noise* denominato anche *Dark Current*, che è insito del sensore e dipende dall'esposizione e dalla temperatura. Questo problema si presenta nel caso in cui, a causa della temperatura elevata alla quale si trova l'elemento sensibile alla luce (*photodetector*), uno o più elettroni vengono rilasciati e quindi raccolti dai pixel anche quando nessun fotone colpisce la loro superficie. Ogni sensore è caratterizzato da un certo rumore termico costituito dalla continua presenza di un flusso di elettroni (corrente) che è sempre presente, anche quando il sensore digitale non è esposto alla luce. La sua entità dipende dalla qualità del sensore e soprattutto dalla temperatura alla quale esso si trova.

Risoluzione dell'ADC. L'ultimo *step* nel processo di formazione dell'immagine avviene all'interno del convertitore del segnale analogico a quello digitale (ADC). I due parametri che entrano in gioco in questo processo sono la risoluzione (numero di bit prodotti) e il livello di

rumore (quanti di questi bit sono utilizzabili nella pratica). Per la maggior parte delle fotocamere, il numero di bit indicati (otto bit per le immagini compresse JPEG e un valore nominale di 16 bit per i formati RAW forniti da alcuni DSLR- *Digital Single-Lens Reflex*) supera il numero effettivo di bit utilizzabili. E' possibile calibrare il rumore di un dato sensore, ad esempio, scattando più immagini di una stessa scena e tracciando il rumore stimato in funzione della luminosità.

Post-elaborazione digitale. Una volta che i valori di irradianza che arrivano al sensore sono stati convertiti in bit digitali la maggior parte delle camere esegue una serie di operazioni di elaborazione del segnale digitale (*DSP digital signal processing*) per migliorare l'immagine prima della compressione e memorizzazione dei valori dei pixel. Questi includono l'applicazione del *color filter array* (CFA) che vedremo nel prossimo paragrafo.

2.6.1. L'applicazione dei filtri per l'informazione sul colore

Gli elementi di cui è costituito un sensore sono monocromatici e per risalire ad informazioni sul colore esistono due tecniche:

- *Color Filter Array* (CFA);
- *Foveon*.

La prima consiste nell'applicazione di un filtro sopra ogni pixel avente la funzione di scomporre la luce incidente nelle tre bande RGB. Nel mercato vi sono numerose tipologie di filtri come ad esempio il filtro CMYM costituito da elementi che originano il ciano, il giallo, il verde e il Magenta in quantità uguali, RGBE che filtrano il rosso, il verde, il blu e il verde smeraldo ed infine quello più utilizzato nelle camere fotografiche il GRGB che dà origine per il 25% rosso e blu e per il 50% verde. Quest'ultimo, denominato filtro di Bayer, è costituito da una matrice di filtri colorati con un determinato reticolo spazialmente periodico composto dallo stesso numero di elementi del sensore e perfettamente allineati a ciascun fotodiodo del sensore stesso. Esso permette il passaggio di una sola banda di lunghezza d'onda della luce corrispondente ad un ben determinato colore. In questo modo solamente un colore viene misurato per ogni pixel del sensore ed è la camera a dover stimare i due colori mancanti in corrispondenza di ciascun pixel, effettuando un'operazione che viene definita demosaicizzazione, che applica algoritmi di interpolazione dei colori. Essa consiste nella stima dei colori mancanti per interpolazione coi valori dello stesso colore adiacenti, letti da altri elementi sensibili. In questo modo si hanno tre immagini che sovrapposte restituiscono l'immagine RGB. Un inconveniente di questa tecnica è la creazione di un effetto di aberrazione cromatica sulle immagini ed una riduzione nel contrasto dell'immagine, che può

generare problemi se le immagini devono essere utilizzate per scopi metrici.

La seconda tecnologia, la Foveon, determina i tre colori primari attraverso tre layers filtranti sovrapposti; in questo modo viene evitato il processo di demosaicizzazione in quanto l'immagine prodotta è la combinazione del risultato del triplice filtraggio. Nonostante questa tecnologia sia migliore non viene di norma utilizzata nelle camere commerciali a medio-basso costo perché è ovviamente più costosa e costruttivamente più complicata (Figura 2.9).

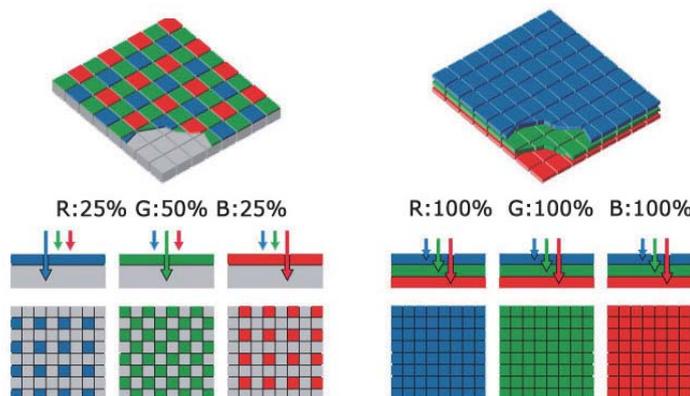


Figura 2.9 – I filtri di Bayer (a sinistra) e Foveon (a destra)

2.7. Le deformazioni ottiche

La luce per potere formare l'immagine digitalizzata deve passare attraverso le lenti della camera fotografica. Per molte applicazioni teoriche queste sono considerate delle superfici ideali, ma purtroppo non è così e la luce, quindi, poiché deve passare attraverso materiali reali con caratteristiche proprie, forma immagini con sfocature più o meno pronunciate causate da aberrazioni ottiche dell'obiettivo. Esistono differenti tipi di aberrazioni che sono:

- aberrazioni sferiche e coma;
- aberrazioni di astigmatismo e curvatura di campo;
- aberrazioni di distorsione che si dividono in distorsione radiale e tangenziale.

L'aberrazione sferica consiste nel fatto che la focalizzazione dei raggi luminosi è diversa nelle zone centrali della lente rispetto a quelle di bordo, in questo modo un fascio di raggi luminosi paralleli all'asse ottico non converge, dopo la rifrazione con la lente, in uno stesso punto ma tendono a focalizzarsi più vicino; pertanto nell'immagine si forma un dischetto di luminosità variabile. L'aberrazione coma, invece, avviene quando i raggi luminosi non sono paralleli all'asse ottico e provocano un'immagine a forma di virgola che ricorda la chioma di una cometa, da cui il termine coma. Per attenuare questo tipo di aberrazioni, se si impiegano lenti sferiche, occorre utilizzare diaframmi più stretti, invece per eliminarlo del tutto occorre

montare lenti asferiche caratterizzate da una superficie iperbolica.

Le aberrazioni di astigmatismo e curvatura di campo sono strettamente legate tra loro. La prima provoca la formazione di un'immagine allungata secondo una specifica direzione così, per esempio, un oggetto circolare viene visto di forma ellittica. La seconda provoca invece la corrispondenza di figure curve a superfici che nella realtà sono piane. Ciò è dovuto alla particolare forma delle lenti che sono assimilabili ad una calotta sferica.

Questi tipi di aberrazioni non vengono corrette in fotogrammetria poiché, al contrario delle aberrazioni da distorsione, non influiscono molto sulla misurazione fotogrammetrica. Esistono due tipi di aberrazione da distorsione: radiale e tangenziale. Entrambe provocano deformazione delle immagini e quindi vengono corrette mediante procedure di calibrazione delle camere. La prima determina la formazione di immagini deformate in cui gli oggetti ripresi risultano distorti via via che ci si allontana dall'asse ottico fino ad avere la massima deformazione ai bordi dell'immagine. Tale aberrazione dipende dal fatto che i raggi passanti dal centro ottico non proseguono mantenendo inalterata la loro inclinazione, come si suppone nel caso teorico, ma subiscono una deviazione; in conseguenza di ciò, l'ingrandimento trasversale di una lente non è costante, come detto in precedenza, ma variabile da punto a punto. Esistono due tipologie di distorsione radiale: a cuscino o a barile (Figura 2.10).



Figura 2.10 – Le due tipologie di distorsione radiale: a cuscino (a sinistra) e a barile (a destra)

Usualmente la prima si trova negli obiettivi grandangolari mentre la seconda nei teleobiettivi. Fortunatamente l'andamento di queste deformazioni può essere descritto attraverso una funzione polinomiale in particolare attraverso una curva (curva di distorsione) dove in ascisse sono riportate le distanze dal punto principale dell'immagine mentre nelle ordinate i valori di distorsione Δr (Figura 2.11).

Accanto alla distorsione radiale se ne considera un'altra detta tangenziale dovuta ad un imperfetto assemblaggio delle lenti costituenti il sistema ottico. Questo difetto costruttivo comporta uno spostamento dell'immagine in direzione normale alla retta congiungente il punto immagine con il punto intersezione del piano immagine con l'asse ottico. Anche questo tipo di deformazione è regolata da una funzione polinomiale.

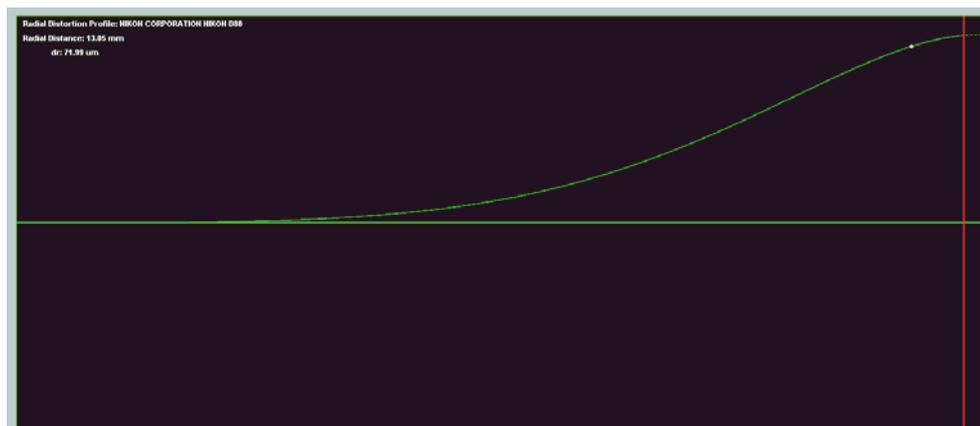


Figura 2.11 – La curva di distorsione

2.8. La calibrazione della camera

Non è possibile risolvere il problema fotogrammetrico di ricavare le coordinate dei punti nello spazio a partire dalle proiezioni prospettiche applicando soltanto le regole della proiezione centrale, in quanto occorre apportare le opportune correzioni dovute a errori sistematici sia di tipo meccanico che ottico dell'apparecchio fotografico. Infatti le equazioni esaminate finora fanno riferimento ad un caso teorico ideale, nella realtà occorre considerare nel calcolo i parametri di orientamento interno della camera che sono: le coordinate del punto principale (x_p , y_p), la distanza principale che corrisponde approssimativamente con la distanza focale (c) e i parametri di distorsione della lente. In passato si utilizzavano le camere di tipo metrico nate esclusivamente per scopi fotogrammetrici e quindi tali informazioni venivano fornite direttamente dal costruttore della camera attraverso il certificato di calibrazione. Oggi per fini fotogrammetrici si utilizzano camere digitali di qualsiasi tipo e, per ottenere informazioni 3D attendibili, devono essere determinati i parametri di orientamento interno attraverso una procedura chiamata calibrazione della camera.

In fotogrammetria il modello analitico delle equazioni di collinearità sono la base per il processo di calibrazione. Generalmente possono essere fatte diverse classificazioni delle procedure di calibrazione e quella più specifica viene effettuata in base alla stima dei parametri di calibrazione, elencati più avanti, e della tecnica di ottimizzazione impiegata (Remondino & Fraser, 2006):

- Tecniche lineari che, anche se hanno caratteristiche di semplicità e di velocità del processo, in genere non gestiscono la distorsione della lente ed hanno bisogno di punti di controllo di coordinate note: di solito semplificano il modello di fotocamera, portando a risultati di bassa precisione. Un esempio è la DLT- *Direct Linear Transformation* (Abdel-Aziz & Karara, 1971).

- Tecniche non lineari come l'equazione estesa del modello di collinearità, che costituisce la base della *self-calibration* attraverso il *bundle adjustment*, sono le più utilizzate in ambito fotogrammetrico in quanto è possibile ottenere una modellazione rigorosa ed accurata dei parametri di orientamento interno della camera e dei parametri di distorsione dell'obiettivo (Brown, 1971) attraverso un processo di stima iterativo ai minimi quadrati.
- Una combinazione di tecniche lineari e non lineari, dove un metodo lineare viene impiegato per recuperare approssimazioni iniziali per i parametri, dopo di che l'orientamento e la calibrazione vengono iterativamente raffinati (Faugeras & Toscani, 1986; Tsai, 1987; Weng et al, 1992; Heikkilä & Silven, 1997). Questo approccio costituito da due fasi è stato superato per molti aspetti dalla più accurata calibrazione attraverso il *bundle adjustment*, che è anche implicitamente un processo diviso in due fasi (Remondino & Fraser, 2006).

In fotogrammetria *close-range* viene utilizzato il modello di camera prospettica descritto dalle equazioni di collinearità estese, che sono la base della *self-calibration* attraverso il *bundle adjustment*. Le equazioni di collinearità estese sono quelle dove Δx_{ij} e Δy_{ij} sono i termini di correzione delle coordinate immagine calcolate tenendo conto dei parametri addizionali (APs acronimo di *additional parameters*). Questi parametri sono funzione di quelli della camera ($\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta c$), dell'incertezza della forma del pixel S_x , di un fattore che tiene conto della non ortogonalità del sistema di riferimento (*shear factor* A), dei parametri della distorsione radiale simmetrica della lente (k_1, k_2, k_3) e di quelli della distorsione tangenziale della lente (p_1, p_2) secondo la seguente relazione:

$$\Delta x = -\Delta x_0 + \frac{\Delta c}{c} \bar{x} + \bar{x} S_x + \bar{y} A + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{x} + p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x} \bar{y}$$

$$\Delta y = -\Delta y_0 + \frac{\Delta c}{c} \bar{y} + \bar{x} A + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{y} + 2p_1 \bar{x} \bar{y} + (r^2 + 2\bar{y}^2)$$

Con:

$$\bar{x} = x - x_0, \quad \bar{y} = y - y_0, \quad r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$$

Dove x e y sono le coordinate misurate e x_0 e y_0 sono le coordinate del punto principale. Tali equazioni sono definite modello fisico in quanto gli APs possono essere interpretate

fisicamente. Da studi sperimentali è stato dimostrato che la distorsione tangenziale causata dal decentramento delle lenti rispetto all'asse ottico produce degli effetti trascurabili e quindi potrebbe non essere considerata nel calcolo (Remondino & Fraser, 2006). Le equazioni di collinearità sono le equazioni delle osservazioni utili per la stima tramite metodo ai minimi quadrati dei parametri incogniti e il loro modello funzionale può essere scritto:

$$l = f(x)$$

Le equazioni sono non lineari e quindi devono essere linearizzate. Il sistema risultante dalla linearizzazione è:

$$-e = A \times x \times l$$

Dove e è l'errore reale, A è la matrice di disegno con i coefficienti dell'equazione di collinearità linearizzata, x è il vettore delle incognite ed l è il vettore assoluto delle osservazioni. Tale sistema può essere risolto con il modello stocastico ai minimi quadrati di Gauss-Markov, che è un metodo di stima dei parametri proposto da Gauss e Legendre. In particolare, consiste nell'identificare come stime dei parametri i valori che rendono minima la somma dei quadrati delle differenze tra i valori osservati della variabile dipendente e quelli teorici previsti dal modello. In questo modo il vettore delle incognite vale:

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P l$$

Dove P è la matrice dei pesi da associare alle osservazioni ed è una matrice diagonale avente forma:

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_m \end{bmatrix}$$

La matrice di disegno A si calcola in maniera iterativa ad ogni passo con i nuovi valori di x fino a convergenza, in tal modo si trova una nuova stima robusta dei valori di x .

L'accuratezza della compensazione è data dai residui v delle osservazioni e dalla stima della varianza dell'unità di peso $\hat{\sigma}_0$. L'equazione matriciale per calcolare il residuo è la seguente:

$$v = A\hat{x} - l$$

Mentre la varianza dell'unità di peso e la deviazione standard sono date da:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{v^T P v}{m - n} \quad e \quad \hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{v^T P v}{m - n}}$$

Dove m è il numero delle equazione osservabili e n è il numero delle incognite.

La conoscenza di $\hat{\sigma}_0$ e della matrice normale ($A^T P A$) permette il calcolo della matrice non scalata di covarianza e della matrice di varianza-covarianza poiché la prima è data da:

$$Q_{xx} = (A^T P A)^{-1}$$

E quindi la seconda è data da:

$$K_{xx} = \hat{\sigma}_0^2 Q_{xx}$$

Essa è una matrice quadrata, simmetrica di n righe e colonne con n numero delle incognite e contiene le informazioni fondamentali per esprimere in modo qualitativo e quantitativo le precisioni dei punti calcolati. Ogni elemento della diagonale rappresenta la deviazione standard di ogni singola incognita, mentre i restanti elementi della matrice rappresentano la covarianza fra l'incognita x_i e l'incognita x_j (con i diverso da j).

Ad ogni step del calcolo viene confrontata la varianza di ogni singolo elemento con le variabili ricalcolate. Se il valore ottenuto è minore di un valore assunto a priori, allora la stima del parametro è affidabile. Altrimenti, se il valore ottenuto è maggiore, la stima potrebbe non essere sufficientemente accurata.

Un'altra analisi che viene effettuata per determinare l'accuratezza della compensazione è l'analisi della correlazione. In particolare questa analisi permette di definire se la correlazione tra due parametri è elevata e quindi di eliminare quello la cui stima potrebbe risultare non sufficientemente accurata. A tal fine si definisce il coefficiente di correlazione come:

$$p_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sqrt{q_{ii}q_{jj}}}$$

Se tale coefficiente è vicino ad 1 in valore assoluto allora vi è una correlazione elevata tra i parametri x_i e x_j .

La *self-calibration* attraverso il *bundle adjustment* può essere effettuata con o senza dei vincoli nello spazio oggetto costituiti usualmente da punti di controllo. Dei vincoli minimi sono sempre richiesti per definire la rete, questi possono essere impliciti come vincoli interni o modalità *free-network* ovvero senza punti di controllo e fornendo almeno una distanza nota per la restituzione in scala o possono essere espliciti attraverso l'introduzione di un numero minimo o sovrabbondante di punti di controllo (Remondino et al., 2011, Remondino et al., 2012).

La geometria della rete e la configurazione della camera fotografica sono parametri fondamentali per la qualità della calibrazione. In particolare, studi sperimentali hanno dimostrato che (Remondino, Fraser, 2006):

- L'accuratezza dello schema di presa migliora in relazione all'aumento degli angoli di convergenza tra le immagini che equivale ad un aumento del rapporto tra la distanza tra i centri di presa, base, e la distanza di presa cioè la distanza della camera dall'oggetto.
- L'accuratezza migliora con l'aumento del numero dei raggi per un dato punto e quindi con l'aumento del numero delle immagini. Cioè più raggi ottici vedono un punto, migliore e più affidabile è il risultato.
- L'accuratezza migliora con l'aumento del numero di punti collimati in un'immagine e con una loro buona distribuzione nell'immagine.
- E' opportuno scattare immagini ruotate di $\pm 90^\circ$, soprattutto se i punti collimati sono disposti su un piano, in quanto i parametri addizionali sono correlati tra di loro e con i parametri di orientamento esterno; una geometria con immagini ruotate aiuta ad eliminare o ridurre tale problema.
- Infine le prese devono essere eseguite da differenti distanze.

2.9. Sistemi di acquisizione aerea a bassa quota

Il rilievo di siti archeologici che si sviluppano su aree di estensioni variabili, anche dell'ordine di qualche chilometro quadrato, è sempre stato abbastanza problematico per la mancanza di strumenti adeguati che permettono di colmare il vuoto tra i classici rilievi fotogrammetrici aerei e i rilievi fotogrammetrici terrestri. Infatti la fotogrammetria aerea, è sempre stata utilizzata per la generazione di cartografie di vaste aree territoriali non

permettendo rilievi di estremo dettaglio. Negli ultimi anni questo gap è stato colmato dallo sviluppo di sistemi di acquisizione a bassa quota costituiti da strumenti di varia natura e tipo: dalle piattaforme non motorizzate come aste telescopiche (Chiabrando et al. 2010), ponteggi, carroponti o scale estendibili, palloni (S. Gesafidis, 1999; Altan et al., 2004; Mihajlović et al., 2008), aquiloni (Aber et al., 2002), dirigibili (J. Everaerts, 2008, Zhang et al., 2008; Gomez-Lahoz & Gonzalez-Aguilera, 2009), etc... alle piccole piattaforme aeree a pilotaggio remoto (UAV o Unmanned Aerial Vehicles, detti anche “droni”) come modellini di elicotteri o di aeroplani (Theodoridou, 2000; Zischinsky, 2000; Eisenbeiss, 2008; Remondino et al., 2009), multicotteri etc... (Verhoeven, 2009; Eisenbeiss, 2011; Eppich et al., 2011).

Gli UAV, noti con differenti acronimi, UVS (*Unmanned Vehicle Systems*), ROA (*Remotely Operated Aircrafts*), RPV (*Remotely Piloted Vehicles*), si caratterizzano per l'assenza di pilota a bordo e possono volare in maniera autonoma o attraverso controllo a distanza. Il termine UAS (*Unmanned Aircraft or Aerial Systems*) piuttosto che UAV è l'acronimo più completo utilizzato a livello internazionale in quanto comprende tutti gli aspetti di tali velivoli e non solo la piattaforma.

Diverse classificazioni vengono effettuate in funzione del peso, delle caratteristiche del motore, del carico trasportabile (*payload*), della massima distanza percorribile, della quota di volo, del tipo di ala (fissa o rotante); in accordo con la classificazione effettuata dalla associazione internazionale UVS essi possono essere suddivisi in: tattici, strategici e per scopi speciali. Gli UVS tattici sono costituiti da nove sub categorie elencate nella Tabella 2.13 quelli strategici sono costituiti da velivoli con autonomia di volo fino a 4 giorni, mentre quelli per scopi speciali sono utilizzati esclusivamente per usi militari.

Gli UVS sono nati negli anni '50 principalmente per applicazioni in ambito militare, per sorvegliare e perlustrare aree nemiche, remote o difficilmente raggiungibili. Negli ultimi anni si sta diffondendo il loro utilizzo in ambito civile in maniera considerevole e con l'uso di differenti sensori. I principali ambiti di applicazione sono: nel settore agricolo (agricoltura di precisione), ambientale (misurazioni atmosferiche, monitoraggio di disastri naturali quali frane, maremoti, terremoti etc... o di rischi causati dall'attività umana), forestale (caratterizzazione delle biomasse, monitoraggio della vegetazione, di incendi etc...) (Niranjan, 2007).

Subcategoria UAV	Acronimo	Raggio [km]	Altitudine [m]	Durata [h]	Massa [kg]
Micro	μ (Micro)	<10	250	1	<5
Mini	Mini	<10	150 e 300	<2	150
Close Range	CR	da 10 a 30	3000	da 2 a 4	150
Short Range	SR	da 30 a 70	3000	da 3 a 6	200
Medium Range	MR	da 70 a 200	5000	da 6 a 10	1250
Medium Range Endurance	MRE	>500	8000	da 10 a 18	1250
Low Altitude Deep Penetration	LADP	>250	Da 50 a 9000	Da 0.5 a 1	350
Low Altitude Long Endurance	LALE	>500	3000	>24	< 30
Medium Altitude Long Endurance	MALE	>500	14	24 e 48	1500

Tabella 2.13 – Classificazione degli UAV tattici effettuata dalla associazione internazionale UVS

Negli ultimi anni si è assistito ad una loro diffusione in ambito geomatico ed in particolare nel settore architettonico ed archeologico (Eisenbeiss, 2004; Bendea *et al.*, 2007, Remondino *et al.*, 2011). Gli UAV utilizzati per scopi fotogrammetrici sono quelli appartenenti agli UAV tattici ed in particolare alle sub categorie mini e micro UAV. Nella Figura 2.14 sono raffigurati alcune tipologie di velivoli utilizzati nell'ambito del rilievo di Beni Culturali.

Questi sistemi stanno vivendo grande popolarità grazie allo sviluppo di piattaforme evolute con prestazioni dal punto di vista tecnologico sempre più avanzate. Inoltre, la diffusione sul mercato di fotocamere digitali compatte a basso costo ad elevate risoluzioni, grazie anche allo sviluppo di sensori sempre più miniaturizzati, ha permesso, negli ultimi anni, una diffusione del numero di sistemi UAV utilizzati per applicazioni fotogrammetriche. Le potenzialità offerte da questi sistemi sono principalmente collegate alla possibilità di ottenere immagini aeree a bassa quota utile sia per scopi puramente documentativi che per produzione dei prodotti metrici tradizionali necessari per la rappresentazione e l'analisi del sito indagato.

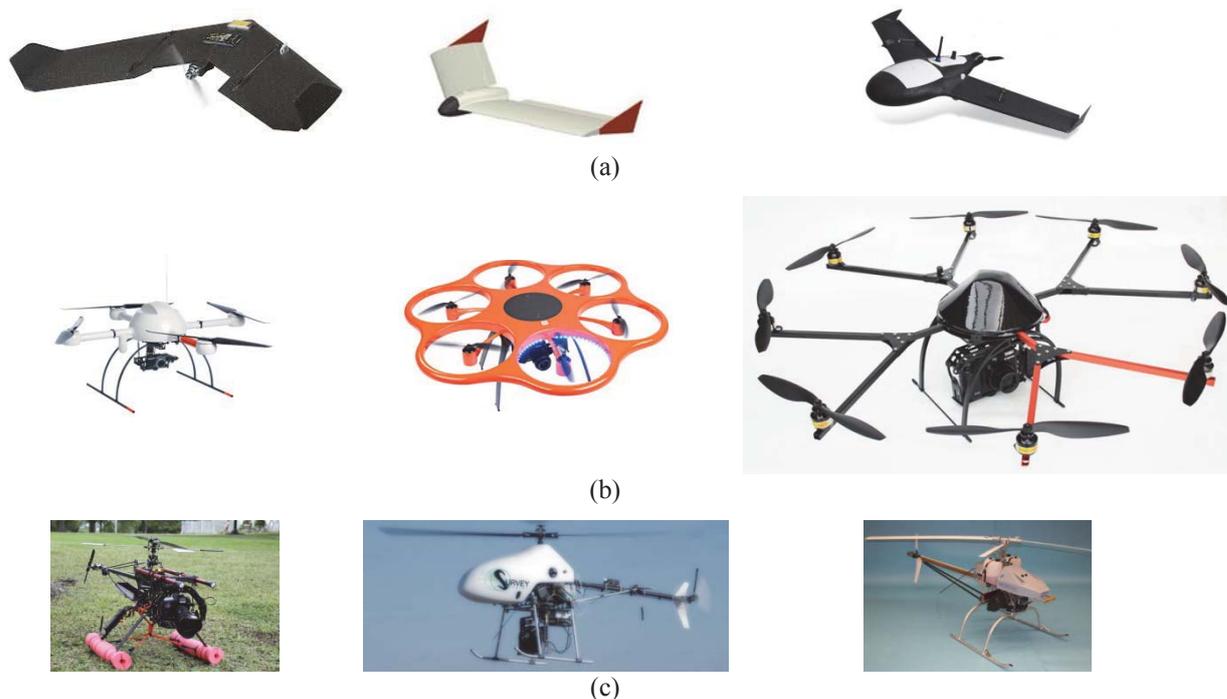


Figura 2.14 – Alcune tipologie di velivoli: (a) ad ala fissa (b) multirotori (c) elicotteri

La diffusione in ambito civile ed in particolare nel settore dei Beni Culturali per scopi fotogrammetrici è dovuta principalmente alla possibilità di ottenere immagini dell'area di interesse con numerosi vantaggi quali basso costo, rapidità nell'esecuzione del rilievo, possibilità di mappare aree non accessibili, risoluzione delle immagini maggiore rispetto a quella ottenibile dalla tradizionale fotogrammetria aerea, grazie alla riduzione della quota di volo. Inoltre il sistema GNSS/INS consente di eseguire voli programmati con grande facilità e rapidità con la possibilità di ripetere il volo con gli stessi parametri in tempi differenti, molto utile quando si vogliono effettuare rilievi multi-temporali.

La risoluzione maggiore delle immagini ottenibile risulta un grosso vantaggio quando si vogliono avere dei particolari spinti dell'oggetto del rilievo soprattutto quando sono richiesti degli elaborati tridimensionali e bidimensionali in scala architettonica.

Una delle principali applicazioni in questo ambito è sicuramente quello per la realizzazione di modelli digitali del terreno (DTM o DSM) e di ortofoto con elevata accuratezza e risoluzione geometrica. Il flusso di lavoro viene in genere suddiviso in tre fasi: pianificazione del volo, acquisizione delle immagini e calcolo degli orientamenti e degli elaborati finali. Ciascuna fase presenta problematiche e caratteristiche proprie che dipendono da vari fattori. La pianificazione del volo dipende dalle caratteristiche della piattaforma da cui a sua volta dipendono il *payload*, che influenza la scelta del sensore da utilizzare, e l'autonomia di volo, che determina l'estensione dell'area da rilevare. La fase di acquisizione è

influenzata dalla morfologia del sito, dalla presenza di “pericoli” per il volo (ostacoli), dalle condizioni metereologiche (in particolare dalla presenza di venti). Il processamento delle immagini è fortemente influenzato dalla notevole irregolarità dei blocchi fotogrammetrici e dall’elevato numero di immagini necessarie per una completa copertura delle aree di studio.

3. La *Computer Vision* e l'approccio *Structure from Motion*

Nel precedente capitolo abbiamo visto quali sono i principi fondamentali della fotogrammetria. In questo capitolo saranno esposti i principali aspetti teorici ed applicativi della CV. Come si vedrà le applicazioni sono molteplici e variegate, e nell'ambito di questo studio ci si sofferma sulla SfM, strategia di calcolo impiegata largamente nei programmi utilizzati per lo sviluppo di questa tesi, e sugli algoritmi di *dense image matching* che vengono comunemente accoppiati alla SfM per avere le necessarie informazioni per la ricostruzione 3D di una scena o di un oggetto. In particolare, saranno trattati i concetti fondamentali di geometria epipolare su cui questa strategia si basa e dei principali algoritmi di *dense matching*.

3.1. La *Computer Vision*

La CV è una scienza nata negli anni '70 che ha forti legami con le discipline che studiano la funzione del sistema visivo dell'uomo come la psicologia della percezione e la teoria della visione. In particolare, lo studioso David Marr, ha elaborato alcune teorie sull'approccio computazionale che legano il mondo della percezione umana con quello del *computer* ipotizzando che la mente e il sistema nervoso possono essere descritti con dei termini analoghi a quelli utilizzati per sviluppare i programmi dei computer. Marr individua tre livelli all'interno di un sistema di elaborazione dell'informazione visuale: teoria computazionale, rappresentazione ed algoritmi e infine implementazione *hardware*. Il primo livello analizza che cosa fa il sistema visivo e quali sono i suoi componenti funzionali; il secondo studia gli algoritmi con cui il sistema visivo esegue la sua funzione ed in che modo rappresenta le informazioni pertinenti; il terzo ed ultimo livello esamina il modo in cui gli algoritmi e le rappresentazioni del secondo livello vengono realizzati in un dato *hardware*. Quest'ultimo livello grazie ai crescenti sviluppi delle unità di elaborazione grafica (GPU) e di processori *multi-core* per le diverse applicazioni della CV risulta sempre attuale ed importante (Poggio, 1981; Szeliski, 2011).

Questo tipo di approccio è piuttosto innovativo ed interessante in quanto ha portato allo sviluppo di una scienza di elaborazione delle informazioni visive i cui i risultati, essendo basati sulla fisica del mondo reale e sulle leggi fondamentali della formazione dell'immagine, sono alquanto stabili e robusti (Poggio, 1981).

Lo scopo della CV quindi è principalmente quello di ricostruire ciò che l'uomo vede del mondo reale ed in particolare la forma, l'illuminazione e la distribuzione del colore in un dato oggetto o scena reale rappresentati in una o più immagini (Szeliski 2011). Gli algoritmi per raggiungere questo scopo hanno subito e tuttora subiscono sviluppi e continue modifiche. I primi tentativi di ricostruzione di un'intera scena reale 3D hanno riguardato l'estrazione di bordi e quindi la descrizione della scena 3D attraverso la struttura topologica di linee, con lo sviluppo dei cosiddetti *line labelling algorithms* (Huffman, 1971; Rosenfeld *et al.*, 1976; Kanade, 1980, Ziou & Tabbone 1998). I primi algoritmi di *feature-based stereo correspondence* sono stati sviluppati a partire dalla metà degli anni settanta (Marr & Poggio 1976; Moravec 1977; Marr e Poggio 1979; Baker 1982; Barnard & Fischler 1982; Grimson 1985; Pollard *et al.*, 1985). I primi studi sulla SfM sono stati effettuati nei primi anni '80 (Ullman, 1979; Longuet-Higgins, 1981). E' in questo periodo che viene teorizzato l'approccio computazionale di Marr, che secondo Szeliski, 2011, può risolvere i problemi attuali così come quelli di 25 anni fa. In questa decade si sviluppano le diverse tecniche di *image-based* alcune delle quali oggi utilizzate dalla maggior parte dei *software* sia a pagamento che gratuiti che utilizzano gli algoritmi della CV. Queste tecniche sfruttano diverse informazioni ricavabili dalle immagini per ricostruire la forma 3D degli oggetti come per esempio le ombre (*shape from shading*), la *texture* (*shape from texture*), la silhouette (*shape from silhouette*) (Horn 1975; Pentland 1984; Remondino & El Hakim, 2006). Negli anni '90 importanti innovazioni sono state apportate nella strategia SfM con lo sviluppo di una ricostruzione proiettiva che non richiede alcuna conoscenza della calibrazione della camera (Faugeras 1992; Hartley *et al.*, 1992; Hartley 1994; Hartley & Zisserman, 2004). Per migliorare il calcolo si inizia ad adoperare una tecnica denominata piena ottimizzazione globale poi riconosciuta come la tecnica del *bundle adjustment* o a stelle proiettive già utilizzata nel campo fotogrammetrico a partire dagli anni '50 (Taylor *et al.*, 1991; Szeliski & Kang 1994; Azarbayejani & Pentland 1995; Triggs *et al.*, 1999). Infatti il metodo più accurato per ricostruire la geometria 3D e la posizione delle camere è appunto quello del *bundle adjustment*, che consente di eseguire la minimizzazione robusta non lineare dell'errore di retro-proiezione (Szeliski, 2011). Inoltre negli stessi anni vengono fatti progressi negli algoritmi di ricostruzione densa (*dense stereo correspondence algorithms*), tra i quali i più

utilizzati e studiati sono i *multi-view stereo algorithms* (Dyer & Seitz 1999; Kutulakos & Seitz 2000; Seitz *et al.*, 2006). L'interazione con la computer grafica ha portato allo sviluppo in diversi settori di due tecniche basate sulle immagini: *image-based modeling* e *image-based rendering*. Questa interazione ha portato alla nascita di tecniche che modificano le immagini per creare nuovi prodotti, come la tecnica di *image morphing* (combinazione di più immagini) o quella del *panoramic image stitching* per la creazione di panorami unendo immagini prese da punti di vista diversi. Nello stesso tempo, sono state introdotte le tecniche *image-based* per la creazione automatica di modelli 3D realistici (*image-based modeling techniques*).

La CV oggi ha svariate applicazioni in vari settori: dal riconoscimento ottico dei caratteri (OCR) per esempio per la lettura dei codici postali al controllo di macchine in campo aeronautico; dalla diagnostica per immagini in campo medico alla rilevazione di ostacoli inaspettati nell'ambito della sicurezza automobilistica; dalla tecnica denominata *motion capture* (mocap) utilizzata in ambito cinematografico o nei videogiochi per catturare il movimento di soggetti ripresi da più telecamere attraverso l'uso di marcatori di materiale riflettente al riconoscimento biometrico e tramite impronte digitali nel settore forense fino alla costruzione di modelli 3D (con l'integrazione di tecniche fotogrammetriche) in maniera completamente automatica.

Negli ultimi anni quest'ultima applicazione si è diffusa per la realizzazione di modelli 3D nel campo dei Beni Culturali, ed in particolare nel settore archeologico, dove la costruzione di modelli tridimensionali è diventata fondamentale.

3.2. Recenti sistemi di ricostruzioni 3D da immagini

Negli anni recenti si è diffusa una metodologia di ricostruzione 3D basata sulle immagini che combina la SfM con algoritmi di *dense image matching*. Questo approccio è alquanto innovativo e recente, ed è stato implementato in *software open-source* (Blunder e PMVS, VisualSFM, Apero, etc...), in *software commerciali* (Photoscan, Photomodeler Scanner) ed anche in applicazioni *web* definite *3D web-service* (ARC3D, Autodesk 123D Catch, Cubify, My3Dscanner etc...) (Vergauwen& Van Gool, 2006). La strategia SfM, il cui funzionamento verrà descritto più avanti in maniera più specifica, permette la ricostruzione di una nuvola di punti sparsa di una scena o di un oggetto inquadrato da un numero anche elevato di immagini non ordinate e riprese da punti di vista differenti (Barazzetti *et al.* 2011). La SfM determina le caratteristiche corrispondenti visibili nelle diverse immagini, per calcolare i parametri intrinseci ed estrinseci della camera (*self-calibration*) attraverso diversi operatori di interesse il più possibile invarianti rispetto alle variazioni di scala, rotazione, traslazione e al cambio di

illuminazione e dei punti di vista come il SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) (Lowe, 2000) e il SURF (*Speeded Up Robust Features*) (Bay et al., 2008).

Molti sistemi utilizzano il metodo dei fasci proiettivi o *bundle adjustment* per migliorare la precisione nel calcolo degli orientamenti e per minimizzare l'errore di retro-proiezione. Il *bundle adjustment* viene formulato come un problema non lineare ai minimi quadrati (Remondino *et al.*, 2012). Alcuni ricercatori hanno sviluppato una versione migliorata del *bundle adjustment* utilizzando il parallelismo delle architetture *multi-core* (Wu et al., 2011). Photosynth è uno dei primi 3D *web-service* sviluppato originariamente per fini turistici, proponendo un metodo che permette l'esplorazione virtuale di immagini orientate tramite SfM. In particolare questo strumento utilizza Bundler, *software open source*, per la ricostruzione 3D della scena tramite una nuvola di punti sparsa (Snavely et al., 2006; Snavely, 2008).

Queste tipologie di ricostruzioni sono insufficienti per descrivere in maniera dettagliata scene e oggetti, quindi per migliorare le ricostruzioni 3D producendo una nuvola di punti densa, la strategia SfM viene accoppiata agli algoritmi di *dense image matching* che calcolano le corrispondenze tra i pixel delle immagini. Esistono diverse tipologie di algoritmi di *dense image matching*, che saranno analizzate in maniera più approfondita nel paragrafo 3.4.4. di questo capitolo.

3.3. La geometria epipolare e la matrice fondamentale

La geometria epipolare descrive le relazioni e i vincoli geometrici che legano due immagini della stessa scena catturata da due fotocamere con posizione e orientamento distinto. Questa geometria viene utilizzata sia in ambito fotogrammetrico che nel processo automatico della SfM. Nella Figura 3.1 sono schematizzati i principali elementi della geometria epipolare che esprime la relazione tra due viste diverse di una stessa scena.

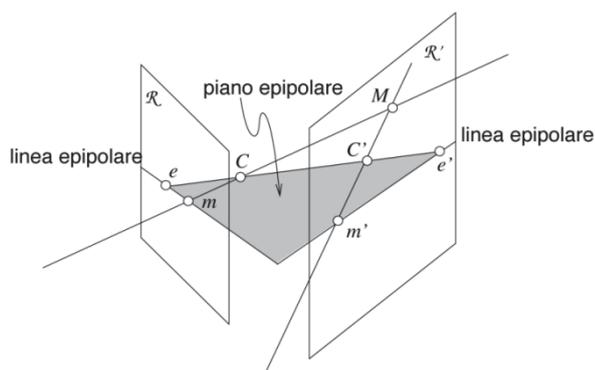


Figura 3.1 – Elementi fondamentali della geometria epipolare

Gli elementi fondamentali della geometria epipolare sono:

- Epipoli: gli Epipoli sono i punti di intersezione dei piani immagine con la retta passante per i centri ottici. La retta su cui giacciono gli epipoli e i centri ottici prende il nome di baseline;

- Rette epipolari: le rette epipolari sono le rette di intersezione tra il piano epipolare con i piani delle immagini. Tutte le rette epipolari si incontrano negli epipoli;

- Piano epipolare è il piano che contiene la baseline e le rette epipolari.

Utilizzando le regole della geometria epipolare è possibile ridurre lo spazio in cui ricercare una corrispondenza, da uno spazio bidimensionale ad uno unidimensionale, in quanto tale geometria impone il vincolo che il corrispondente di un punto su un'immagine può trovarsi nell'altra immagine solo sulla corrispondente retta epipolare.

La rappresentazione algebrica della geometria epipolare è la matrice fondamentale F che è una matrice 3×3 di rango 2. In particolare conoscendo tale matrice risulta possibile tracciare la retta epipolare di un qualsiasi punto, poiché essa definisce un vincolo bilineare tra le coordinate di punti immagine corrispondenti. Cioè date alcune coppie di punti omologhi $x_i \leftrightarrow x'_i$, la matrice fondamentale esprime il vincolo di geometria epipolare mediante la relazione:

$$x_i^T F x'_i = [x'_i \quad y'_i \quad 1] F \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

Il calcolo della matrice fondamentale risulta determinante per stimare in maniera robusta le corrispondenze tra i punti delle immagini.

3.4. Descrizione delle fasi per la ricostruzione 3D

La procedura della SFM accoppiata agli algoritmi di *dense image matching* consente di ricostruire la struttura tridimensionale di una scena senza la conoscenza né dell'orientamento interno della camera né dell'orientamento esterno dei fotogrammi si compone di quattro fasi successive totalmente automatiche riassumibili in:

- 1- Rilevamento ed estrazione delle *feature*: individuazione dei punti di legame (*keypoints*) e loro descrizione tramite vettori di numeri (*descriptor*);

- 2- Accoppiamento delle *feature*: una volta individuati ed estratti i punti omologhi, viene eseguito il loro accoppiamento (*matching*) nelle diverse immagini;

3- Stima dei parametri della camera: calcolo dei parametri di orientamento interno ed esterno attraverso una procedura iterativa;

4- Esecuzione del *matching* denso: calcolo di una nuvola di punti più completa attraverso algoritmi di *dense image matching*.

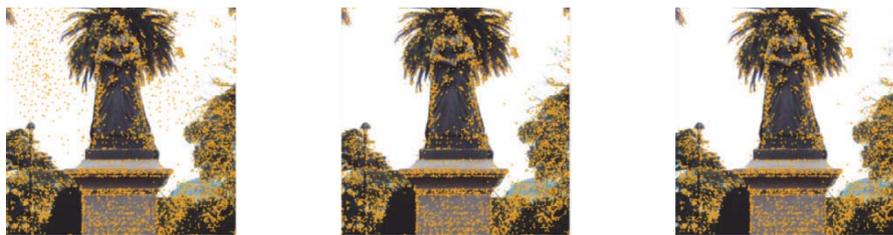
Quindi l'individuazione di un set sparso di corrispondenze diventa un passo preliminare necessario per poi determinare la geometria 3D della scena (*Structure*) e conseguentemente la posizione delle camere (*Motion*); passaggi obbligati per poi computare un set denso di corrispondenze attraverso gli algoritmi di *dense image matching*.

3.4.1. Rilevamento ed estrazione delle *features*

La prima fase ha lo scopo di individuare i punti di legame (*keypoint features*) attraverso l'uso di operatori di interesse (*interest operators*). I punti scelti devono avere caratteristiche tali da essere ben visibili nella maggior parte delle immagini per effettuare abbinamenti corretti.

La buona riuscita di questa fase dipende dalla qualità delle immagini, dalla presenza o meno di zone di ombra, occlusioni, variazioni nell'illuminazione, superfici riflettenti. Infatti la presenza di questi elementi potrebbe creare problemi nella identificazione ed estrazione dei punti di legame tra tutte le viste. Poiché spesso le immagini variano per orientamento, scala e illuminazione diventa difficile l'individuazione dei punti di legame ed uno degli obiettivi della CV è quello di analizzare quale descrittore di immagini (*image descriptors*) sia maggiormente invariante rispetto a questi cambiamenti. I descrittori possono ricercare punti omologhi da accoppiare o in zone ristrette come spigoli o elementi con discontinuità radiometriche (*point detector*) oppure in zone più ampie come regioni superando problemi di occlusione e di deformazioni prospettiche (*region detector*).

Uno dei operatori d'interesse che ha dato i migliori risultati nella ricerca dei punti omologhi appartiene alla seconda categoria ed è denominato SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*). Esso si è dimostrato abbastanza robusto rispetto a variazioni di scala, rotazione, traslazione e parzialmente invariante rispetto al cambio del punto di vista e dell'illuminazione (Lowe, 2004). Nella Figura 3.2 è riportato un esempio delle varie fase di estrazione delle *features*.

Figura 3.2 – Esempio delle varie fasi di estrazione delle *features*

3.4.2. Accoppiamento delle *features*

Questa fase ha lo scopo di risolvere il problema della corrispondenza, cioè una volta individuati i punti caratteristici come individuare i punti corrispondenti nelle altre immagini? Per valutare la somiglianza tra due punti di interesse in due immagini viene impiegata la funzione distanza euclidea tra i descrittori (vettori n -dimensionali). Dato un punto nella prima immagine I_a avente il descrittore d_a il punto corrispondente nell'immagine I_b è quello che ha il descrittore più vicino a d_a . L'impostazione di determinati parametri permette di regolare la quantità dei punti estratti ed il tempo di elaborazione per ciascuna immagine. Può accadere però che, anche se i due punti chiave sono vicini e quindi simili, il punto individuato nella seconda immagine non sia quello corretto. Così nasce il problema dell'insorgere di corrispondenze false ed errate (*outlier*), circostanza più frequente nel caso di scene contenenti oggetti con caratteristiche molto simili o elementi ripetitivi. Per migliorare la fase del *matching* occorre l'utilizzo di strategie di stima robusta per individuare con maggiore precisione l'effettivo punto omologo nell'immagine candidata; per esempio definendo un rapporto il cui valore determina la soglia di tolleranza per affermare che il punto estratto nell'immagine I_b sia effettivamente il corrispondente del punto individuato nell'immagine di riferimento (Lowe, 2004). Nel caso di un numero elevato di immagini il corrispondente del punto di interesse ricercato può trovarsi in molte immagini e quindi ciascuna immagine viene accoppiata ai vicini più prossimi. Durante il processo le coppie di immagini il cui numero di caratteristiche corrispondenti è inferiore ad una certa soglia vengono rimosse.

Per eliminare in maniera il più possibile accurata gli *outlier* è necessario introdurre un vincolo geometrico per minimizzare le false corrispondenze: si tratta del vincolo epolare che permette di ridurre lo spazio in cui ricercare una corrispondenza, da uno spazio bidimensionale ad uno unidimensionale, in quanto afferma che il corrispondente di un punto su un'immagine può trovarsi solo su una retta (detta appunto epolare) nell'altra immagine.

Quindi la geometria epolare è importante soprattutto perché descrive la relazione tra due viste di una stessa scena, come già visto, dunque è fondamentale per la ricostruzione del

modello 3D dell'oggetto inquadrato. A tal fine per determinare in maniera robusta la geometria di presa si passa al calcolo della matrice fondamentale F , descritta nel paragrafo 3.3, che contiene le informazioni relative alla geometria epipolare.

Così, per una data coppia di immagini, vengono considerati ammissibili solo le *features* corrispondenti che rispettano il vincolo epipolare. Tutti gli altri punti corrispondenti sono considerati degli *outlier* e per questo non considerati nel calcolo.

3.4.3. Stima dei parametri della camera

Una volta che le immagini sono state accoppiate l'ultima fase prevede la ricostruzione della scena 3D e il recupero dei parametri interni ed esterni della camera, quindi l'applicazione della strategia SfM. In questa fase è importante la selezione della coppia iniziale da cui fare partire tutto il processo di ricostruzione della scena 3D. Da questa scelta dipende il buon esito del calcolo, in quanto se la coppia di immagini scelta non risponde a certi parametri minimi il processo automatico si blocca. Per evitare ciò è necessario che la coppia di immagini scelta abbia un'ampia zona di sovrapposizione, cioè un numero elevato di corrispondenze ed una base di presa grande. In questo modo la ricostruzione dei primi due fotogrammi, su cui si baserà l'intero calcolo, verrà determinata in maniera robusta. La strategia SfM ha la particolarità di essere di tipo incrementale, poiché una volta ricostruita la scena 3D delle prime due immagini le successive vengono aggiunte una per volta, selezionando l'immagine che condivide il maggior numero di punti omologhi dei quali le posizioni 3D sono già state determinate.

In questa fase vengono determinati i parametri di orientamento interno la cui conoscenza permette la ricostruzione reale del blocco fotogrammetrico e della scena (R. Roncella, 2006).

Tali parametri vengono stimati direttamente dalle corrispondenze già determinate (self-calibration). Questo è l'elemento di forza della SfM, cioè la ricostruzione reale dell'oggetto e del blocco anche nel caso in cui siano incogniti i parametri di calibrazione della camera utilizzata.

Per evitare l'accumulo di errori ad ogni iterazione e quindi per migliorare la precisione della ricostruzione 3D viene applicato il *bundle adjustment*. In tal modo si arriva così alla definizione completa dei parametri di orientamento interno ed esterno di ciascun fotogramma (*Motion*), oltre che della geometria della scena (*Structure*), per mezzo dei punti definiti dalle corrispondenze finali che risultano coerenti con la geometria stimata (Figura 3.3).



Figura 3.3 – le diverse fasi della ricostruzione 3D tramite SfM

3.4.4. Gli algoritmi di *dense image matching*

Il risultato delle prime tre fasi è una ricostruzione sparsa della scena 3D. Ora per il calcolo di una nuvola di punti più densa vengono utilizzati gli algoritmi di *dense image matching*. Gli algoritmi di *image matching* sviluppati dalla comunità scientifica sono molteplici. In linee generali si suddividono in algoritmi che usano una stereo coppia per trovare le corrispondenze (*stereo matching*) e quelli che invece le identificano in multiple immagini (*multi-view stereo*). Un'altra classificazione li divide in diverse categorie in funzione delle primitive che vengono considerate per il *matching*. In questo modo vengono definiti gli algoritmi di *area based matching* (ABM) e quelli di *feature based matching* (FBM). I primi si basano sul confronto statistico dell'intensità di grigio tra i pixel delle immagini. Dal punto di vista operativo si distinguono dagli algoritmi di *feature based matching* (FBM), poiché non prevedono una fase di estrazione delle *feature*, ma trattano direttamente i valori di intensità dei pixel che compongono la coppia stereo e le corrispondenze vengono cercate confrontando due piccole porzioni di immagini (*image patches*) delle quali la prima, denominata una matrice sagoma, viene tenuta fissa e la seconda denominata matrice di ricerca, viene fatta muovere per cercare l'area corrispondente sull'altra immagine. Della prima categoria fa parte il metodo *Least Squares Matching* (LSM), metodo molto accurato grazie alla possibilità di ricercare le corrispondenze al livello del sub-pixel. Gli algoritmi FBM ricercano invece dapprima le *features* (angoli, spigoli, bordi etc...) in entrambe le immagini e solo successivamente ne analizza la corrispondenza. Certamente, con questo metodo non è possibile ottenere nuvole di punti dense poiché data la sparsa ed irregolare natura delle *features* estratte solo una piccola parte dei pixel delle immagini è coinvolta nel *matching*; tuttavia, gli algoritmi FBM sono estremamente efficienti sotto l'aspetto del tempo di elaborazione.

Spesso gli ABM vengono sostituiti o combinati con gli FBM (Remondino & Zhang, 2006). Infatti gli ABM presentano problemi in presenza di oclusioni e di ripetitività della *texture* (Remondino *et al.*, 2013).

Un'altra classificazione suddivide gli algoritmi di *stereo matching* in metodi locali e globali. I primi risolvono il problema della corrispondenza impiegando esclusivamente

informazioni locali (es. mediante misure di *matching* calcolate fra finestre di dimensione fissata centrate nei pixel considerati). Quindi ogni disparità dipende dall'analisi di punti spazialmente vicini al punto considerato; per disparità si intende la differente posizione tra due punti coniugati in due immagini corrispondenti, che se immaginiamo di sovrapporre compongono una nuova immagine chiamata mappa disparità. I metodi globali coinvolgono nella ricerca delle corrispondenze un numero di pixel elevato e quindi ogni disparità dipende dall'analisi di tutti i punti dell'immagine. I metodi locali sono veloci ma possono creare dei problemi per la determinazione delle corrispondenze in aree dove la disparità risulta ambigua, come nelle porzioni delle immagini caratterizzate da poca *texture* o con presenza di occlusioni. Un loro vantaggio è la minore sensibilità, rispetto ai metodi locali, alle regioni che presentano disparità ambigua (occlusioni e regioni a *texture* uniforme), poiché sfruttano procedure addizionali per la gestione delle regioni difficilmente trattabili con metodi locali. In questo modo i metodi globali offrono risultati migliori in termini di accuratezza della mappa di disparità anche se dal punto di vista computazionale sono molto onerosi (Szeliski, 2011).

3.5. Gli strumenti utilizzati

In questo paragrafo si descrivono gli strumenti che sono stati utilizzati per le successive sperimentazioni. Gli applicativi si suddividono in *3D web-service*, *software open-source* e *low-cost*.

3.5.1. Arc3D

Arc3D è l'acronimo di *Automatic Reconstruction Conduit 3D* ed è uno strumento realizzato in collaborazione tra il *Visual Computing Lab* del CNR-ISTI e l'ESAT-PSI Lab di K.U. Leuven (Belgio) entrambi legati alla rete EPOCH, rete europea di eccellenza sul patrimonio culturale costituita da circa un centinaio di Istituzioni culturali. Esso è nato dall'idea di creare uno strumento che riuscisse a ricostruire un'intera scena 3D solo attraverso l'uso di una camera digitale e della connessione internet. E' il primo *3D web-service* nato per la creazione di modelli 3D (nuvole di punti e modelli poligonali) attraverso il processamento di una serie di immagini (Tingdahl & Van Gool, 2011). Il funzionamento e gli algoritmi sono descritti in Vergauwen & Van Gool, 2006. Per caricare le immagini al server è necessaria l'installazione di una piattaforma di comunicazione tra l'utilizzatore e il server (Figura 3.4). Dopo la fine del calcolo della scena 3D, il risultato viene inviato via mail in due formati: il formato obj ed il

formato v3d per eventuali elaborazioni su MeshLab, *software open source* utilizzato per la visualizzazione e la modifica di nuvole di punti e modelli triangolari 3D.

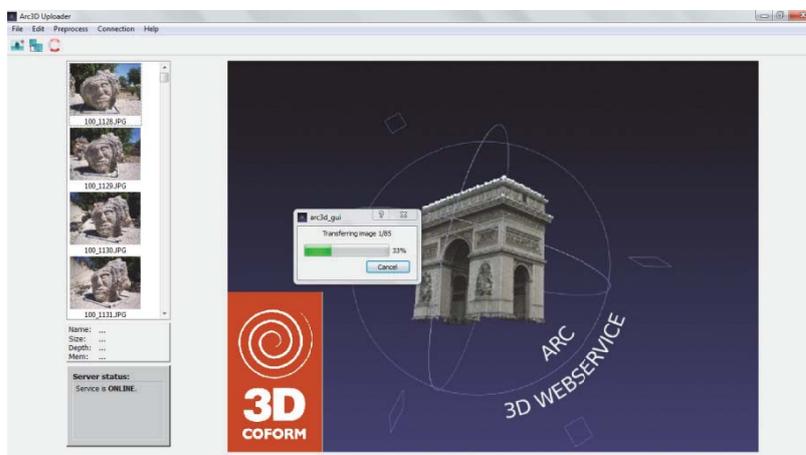


Figura 3.4 – la piattaforma di gestione di Arc3D

MeshLab permette, attraverso il settaggio di alcuni parametri, di calcolare il modello 3D a maglia triangolare (*mesh*). In particolare vengono create delle mappe di profondità caratterizzate da dei colori che evidenziano le aree dove il *software* è riuscito a trovare le corrispondenze per la ricostruzione del modello 3D: il blu scuro evidenzia una buona corrispondenza e quindi zone dove probabilmente la ricostruzione 3D andrà a buon fine, mentre il rosso ed il giallo indicano quelle aree in cui probabilmente la ricostruzione 3D non avrà successo (Figura 3.5).

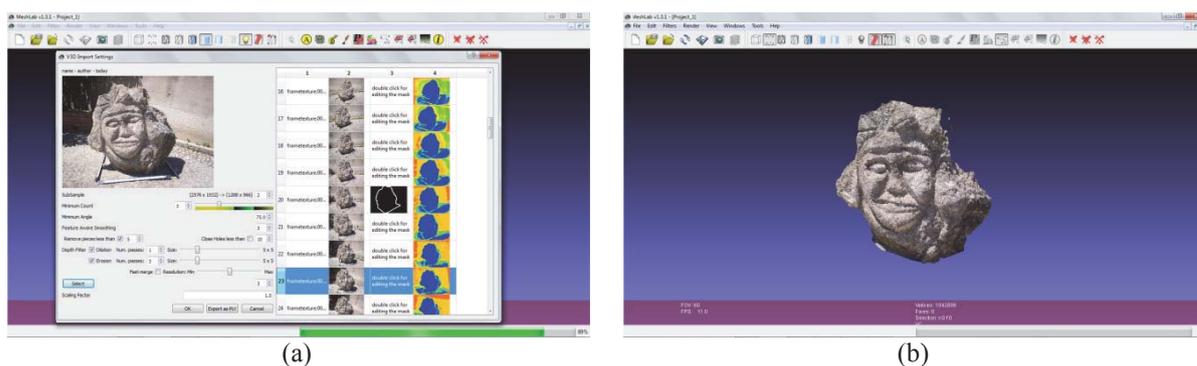


Figura 3.5 – (a) La schermata di MeshLab per il settaggio dei parametri per la creazione della *mesh* generata con Arc3D, (b) il modello 3D texturizzato risultante

Alcuni dei parametri più importanti che definiscono il modello a superficie risultante sono: *subsample* (sottocampionamento) che permette di impostare il numero di pixel da calcolare nel file di output; *minimum count* che determina in quante immagini il programma

deve trovare il punto chiave per considerarlo nel calcolo; infine il parametro *noise management* che gestisce il rumore che potrebbe essere presente nel modello generato. Inoltre è possibile per ciascuna immagine selezionare, attraverso una maschera, l'area d'interesse della ricostruzione 3D, eliminando in tal modo gli elementi di sfondo non facenti parte dell'oggetto da rilevare.

3.5.2. Photosynth

Photosynth è un servizio *web* di Microsoft sviluppato nel 2008 ed accessibile tramite un *account* Windows Live sul sito www.photosynth.net. questo 3D *web-service* deriva da Bundler Per caricare le immagini nel server è necessaria l'installazione di un'applicazione. Photosynth permette di creare due tipi di prodotti: panorami e synth (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Alcune schermate del 3D *web-service* Photosynth: (a) la piattaforma per il caricamento delle immagini con Photosynth e i synth creati (b) con le nuvole di punti e (c) con le foto

Il primo combina insieme una serie di immagini scattate dallo stesso punto per creare una immagine panoramica. Il secondo ricostruisce tridimensionalmente una determinata scena e successivamente permette di esplorare la relativa nuvola di punti generata o il relativo set di immagini navigando da una vista all'altra con un effetto particolare di transizione con lo scopo

di creare dei veri e propri tour in 3D di luoghi. Infatti Photosynth è stato creato appositamente per creare dei prodotti utilizzabili per fini turistici (Snavely et al., 2006).

I parametri di calibrazione della telecamera, i parametri di orientamento esterno delle immagini e la nuvola di punti possono essere esportati attraverso un'applicazione SynthExport (<http://synthexport.codeplex.com>) in diversi formati.

La possibilità di creare panorami è stata aggiunta nel 2010 e nel 2011 è uscita la app per i dispositivi iOS per l'acquisizione e la visualizzazione di panorami. Infine nel 2012 è stata una app anche per Windows Phone.

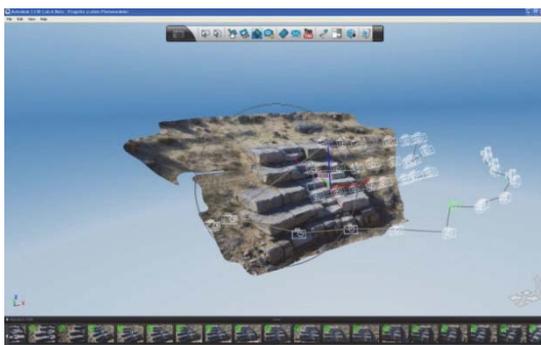
3.5.3. Autodesk 123D Catch

Autodesk 123D Catch (già progetto Photofly) utilizza una combinazione di tecnologie di cui la principale deriva da una tecnologia sviluppata dalla RealViz, società francese fondata nel 1998 dal gruppo di ricerca RobotVis dell'INRIA (National Institute for Research in Computer Science and Automatic Control) e capeggiato da Dr. O. Faugeras. La RealViz è stata acquisita dall'Autodesk nel 2008 che nell'estate del 2010 ha introdotto il progetto Photofly, un servizio *web* gratuito per la generazione di modelli 3D da immagini (3D *web-service*). Nel 2011 la Autodesk ha inserito il progetto Photofly all'interno dei servizi *web* di Autodesk 123D denominandolo 123D Catch.

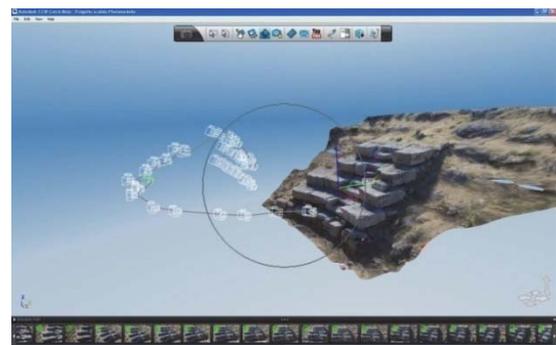
Per il calcolo della scena 3D questo strumento utilizza algoritmi di *multi-view stereo matching* (Courchay et al., 2010). Autodesk 123D Catch può essere utilizzato attraverso una piattaforma installabile su pc, che ha lo scopo di trasmettere i dati tra l'utente ed il server e di effettuare operazioni di *editing* sul modello 3D risultante; sia attraverso un'applicazione che permette di creare e visualizzare la scena 3D su diversi dispositivi portatili quali iPad ed iPhone; ed infine tramite un'applicazione *web* che permette di calcolare la scena 3D direttamente *on line*. La piattaforma di gestione da pc permette di caricare le immagini al *server* dopo l'inserimento di alcune informazioni come la lunghezza focale o il tipo di camera impiegata (Figura 3.7). Il modello può essere generato in tre diverse risoluzioni: mobile, standard e massima. Dopo il primo processamento è possibile modificare il risultato, come, ad esempio, migliorare l'orientamento delle immagini attraverso la collimazione manuale dei punti oppure scalare il modello inserendo una distanza di riferimento tra due punti visibili in due o più immagini. Inoltre è possibile inserire ulteriori immagini da computare nel calcolo. I modelli 3D possono essere esportati in diversi formati come OBJ o LAS.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7 – Alcune schermate del 3D *web-service* 123D Catch: (a) la piattaforma per il caricamento delle immagini (b) (c) modello 3D generato

3.5.4. My3DScanner

My3DScanner è un sistema di ricostruzione 3D *on-line* completamente automatizzato, che acquisisce come *input* fotografie digitali (o video) che elabora per produrre come *output* modelli 3D (dense nuvole di punti 3D e modelli poligonali) senza l'intervento dell'utente. Le immagini di ingresso non richiedono nessuna calibrazione né pre-elaborazione dall'utente. La tecnologia si basa sui recenti sviluppi nelle tecnologie di visione artificiale e di CV. My3DScanner è un classico sistema SfM, che tramite il modulo Bundler (Snavely et al., 2006), produce una ricostruzione 3D delle posizioni delle camere e una geometria sparsa della scena. Per rendere più densa la ricostruzione 3D utilizza il modulo PMVS, sviluppato da Yasutaka Furukawa (Fukurawa & Ponce, 2010) che produce una nuvola di punti ad elevata densità. Infine elabora la nuvola di punti generando una *mesh*.

Il *server* di My3DScanner accetta le immagini, non più di 100, all'interno di una cartella compressa nei formati rar, zip e 7z delle dimensioni massime di 200 MB. Il processo automatico si compone di tre stadi: un primo stadio in cui i file vengono caricati sul server (*uploaded*), un secondo stadio in cui il calcolo è in fase di elaborazione (*started*) ed un terzo ed ultimo stadio in cui il calcolo è completo ed il modello 3D è pronto (*completed*). Il server

invia due email di notifica, la prima quando lo stato del processo cambia da *uploaded* a *started* e la seconda quando lo stato cambia da *started* a *completed* e quindi è possibile scaricare il modello generato.



Figura 3.8 – Le diverse fasi del processamento automatico di My3Dscanner e i prodotti finali: (a) le tre fasi del processo; (b) (c) anteprima delle nuvole di punti generate

3.5.5. Cubify Capture (già Hypr3D)

Hypr3D, come My3Dscanner, lavora completamente *online* elaborando sia immagini che video. La prima operazione da eseguire è la scelta del formato di file da caricare (immagini o video). La seconda è il caricamento dei file, almeno cinque immagini, che sono utili per la creazione del modello 3D. Appena il *download* è completo è possibile fare partire il processo automatico che si divide in diversi *step*. Una prima fase di analisi delle foto e quindi di calcolo degli orientamenti, una seconda fase di ricostruzione della nuvola di punti, una terza di creazione della superficie a *mesh* che viene texturizzata nell'ultima fase (Figura 3.9).

Una volta finito il processo è possibile visualizzare i tre prodotti: la nuvola di punti, il modello *wireframe* e il modello ad alta risoluzione texturizzato. Il modello può essere scaricato in diversi formati e a due differenti risoluzioni (*High* e *Low*).

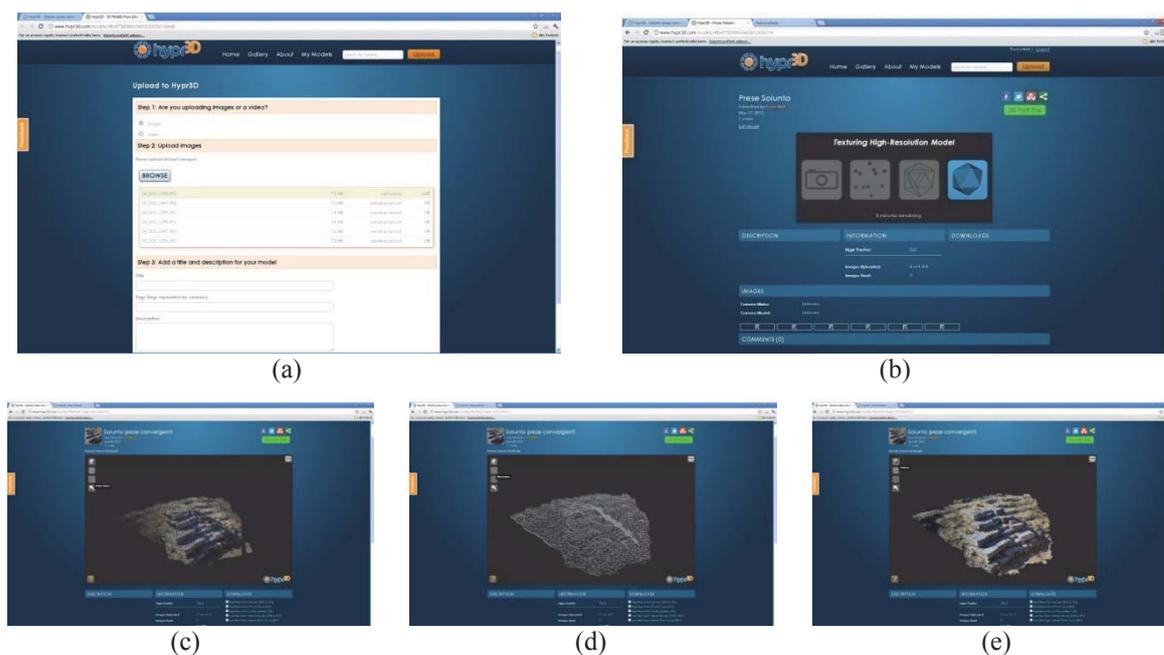


Figura 3.9 – Le diverse fasi del processamento automatico di Hypr3D e i prodotti finali: (a) la schermata per il caricamento dei file; (b) l'ultima fase del processo che genera il modello texturizzato; (c) la ricostruzione 3D a nuvola di punti, (d) il modello wireframe e (e) texturizzato

Hypr3D è stato sostituito da un altro 3D *web-service*, Cubify Capture BETA che, però, in base alla esperienza condotta per questa tesi presenta alcuni problemi nel caricamento delle immagini. Il nuovo applicativo oltre a creare un modello 3D esportabile in diversi formati permette alcune semplici operazioni di *editing*, come l'eliminazione delle parti non pertinenti alla ricostruzione.

3.5.6. VisualSfm + Sfm_Georef

VisualSFM è un'applicazione con interfaccia grafica (GUI-Graphical User Interface) sviluppato dall'Università di Washington che utilizza la strategia SFM con diverse implementazioni per ricavare scene 3D da immagini (Figura 3.10). Il sistema parte da studi e sistemi già esistenti come il sopramenzionato sistema SFM già impiegato per il progetto del Photo-tourism con un'implementazione del SIFT per l'unità di elaborazione grafica (SiftGpu) e l'integrazione della tecnica del *Bundle Adjustment* con l'uso di architetture *multicore* (Wu et al., 2011). In questo modo VisualSfm migliora le prestazioni in termini di tempo delle tre fasi della Strategia SfM, usufruendo della scheda grafica e del parallelismo delle architetture multicore degli attuali PC; mentre la ricostruzione densa viene effettuata con il *software* gratuito PMVS/CMVS.

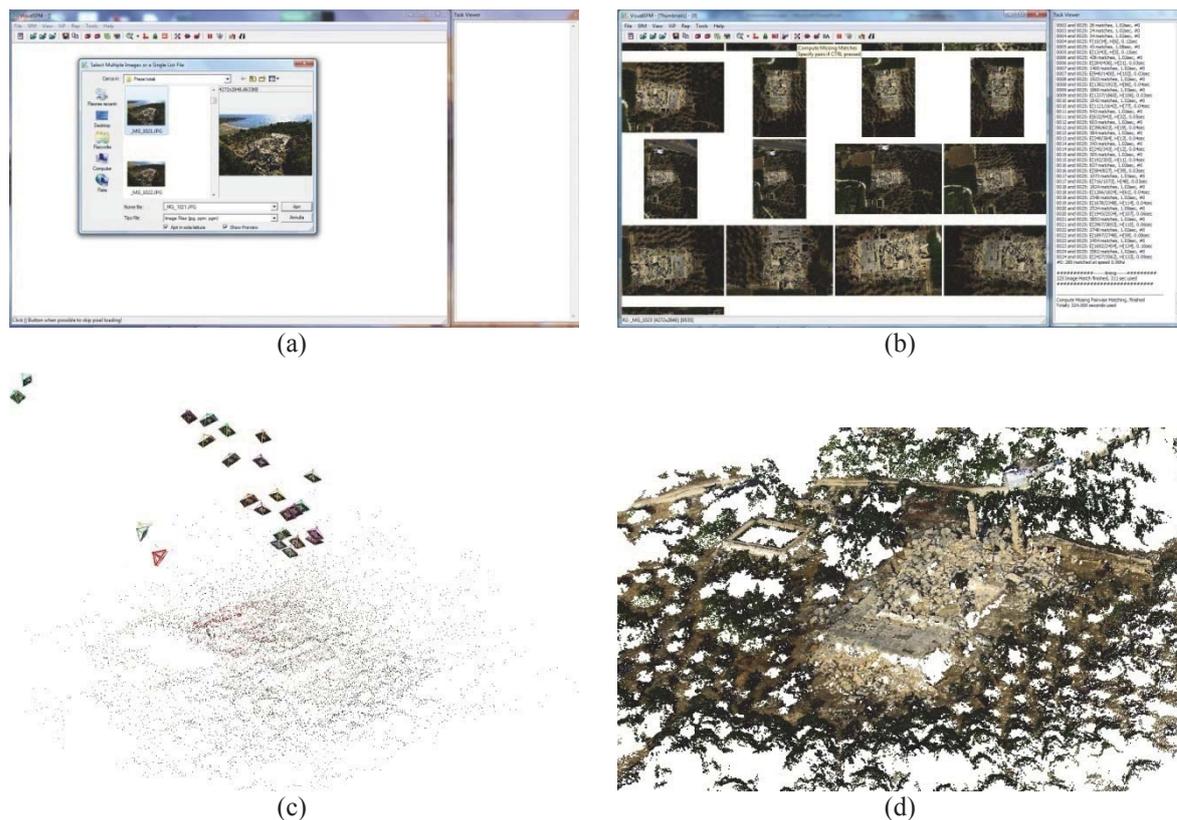


Figura 3.10 – Le diverse fasi del processamento automatico di VisualSfm: (a) la schermata per il caricamento delle immagini; (b) il loro orientamento; (c) la ricostruzione 3D sparsa a nuvola di punti, (d) la ricostruzione 3D densa a nuvola di punti

Per scalare i modelli creati con VisualSfm è stato utilizzato il *software open source* Sfm_georef, sviluppato dall'Università di Lancaster. Sfm_georef è uno strumento con interfaccia grafica utile per la messa in scala e per la georeferenziazione, attraverso rototraslazione con variazione di scala, di nuvole di punti generate da *software* che utilizzano la strategia SFM, attraverso collimazioni di punti caratteristici, *target* o punti naturali, effettuate direttamente sul *dataset* delle immagini.

Per la messa in scala di un progetto, è necessaria almeno una distanza tra punti che sono ben visibili in due o più immagini. Per la georeferenziazione di un progetto sono necessarie le coordinate 3D reali di tre o più punti (punti di controllo) che possono essere collimati in due o più immagini. Una volta che è stata applicata la trasformazione, è possibile salvare la nuvola di punti nel formato ply.

3.5.7. Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan è un pacchetto *software* a basso costo che utilizza immagini per ottenere modelli 3D di alta qualità. Il *software* è basato su una ricostruzione 3D *multi-view* e

può orientare un numero di immagini anche molto elevato. Il flusso di lavoro è completamente automatico e comprende l'orientamento delle immagini, la ricostruzione e la texturizzazione del modello 3D; il modello può essere esportato per la modifica in *software* esterni (Figura 3.11). Tutti i processi possono essere eseguiti con vari livelli di precisione e possono essere impostati molti parametri per migliorare il risultato finale.

Inoltre sono disponibili diversi comandi di *editing* per modificare o migliorare il modello 3D ottenuto, come ad esempio la decimazione del modello poligonale, la rimozione di triangoli sconnessi, la chiusura degli eventuali buchi, ecc...la messa in scala o la georeferenziazione dei modelli è possibile effettuarla dopo la generazione delle ricostruzioni 3D collimando direttamente sulle immagini i punti, marker, di distanza o di coordinate note.

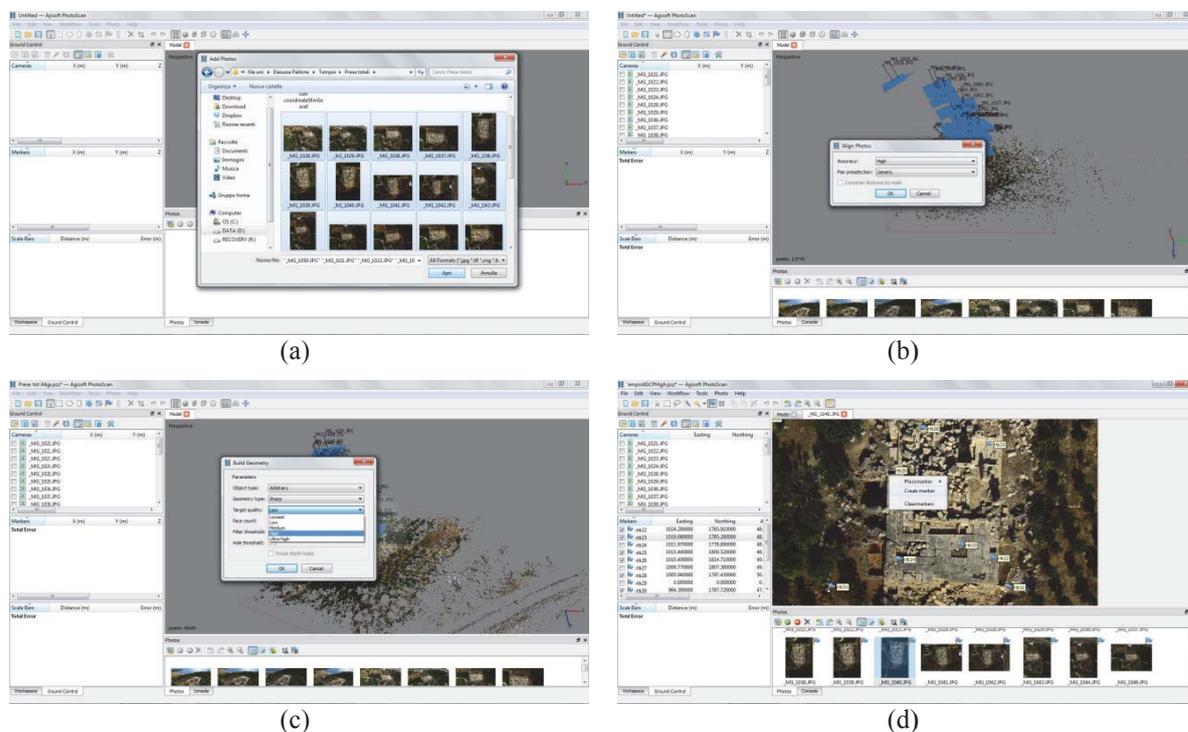


Figura 3.11 – Le diverse fasi del processamento automatico di PhotoScan: (a) la schermata per il caricamento delle immagini; (b) il loro allineamento; (c) la generazione del modello 3D, (d) la creazione di marker per la messa in scala e/o la georeferenziazione

PhotoScan è in grado di produrre modelli 3D con risoluzione geometrica molto elevata, ma, per ottenerli, è necessario disporre di una *workstation* ad alte prestazioni. Infine è possibile esportare diversi prodotti come ortofoto ad alta risoluzione georeferenziate e DEM (*Digital Elevation Model*) molto dettagliati.

Nella nuova versione, la 0.9.1 (non utilizzata per questo lavoro) è possibile ottimizzare la fase di orientamento ricalcolando i parametri di orientamento interno della camera.

4. Impiego di tecniche *image-based* e *range-based* nell'ambito delle infrastrutture stradali

La rete stradale fa parte di quei sistemi e di quelle infrastrutture che costituiscono elementi essenziali delle funzioni sociali ed economiche come i trasporti, le comunicazioni, la distribuzione dell'energia, la fornitura delle acque etc... Inoltre la sua gestione, con le necessarie opere di progettazione e di manutenzione rappresenta una tematica molto importante e complessa a cui afferiscono diverse problematiche e argomentazioni.

Prima di tutto lo studio della condizione della rete stradale è un importante fattore nell'intero sistema di gestione delle infrastrutture viarie in relazione alla programmazione delle opere di manutenzione necessarie per garantire la sicurezza collettiva. Infatti i sistemi delle infrastrutture stradali devono avere caratteristiche tali da soddisfare bisogni fondamentali per il benessere comune, come sicurezza stradale ed impatto ambientale. Proprio per questi requisiti le infrastrutture stradali necessitano di continua manutenzione secondo attività pianificate per garantire le caratteristiche prestazionali, funzionali e strutturali (regolarità, sicurezza, portanza, rumorosità), indispensabili per garantirne le condizioni ottimali (Pasetto & Bortolini, 2006). La rete stradale è soggetta a livelli di usura elevati dovuti a diversi fattori, come condizioni atmosferiche e ambientali, e principalmente al traffico veicolare che provoca continue sollecitazioni meccaniche. In particolare lo studio del livello di usura dello strato superficiale del manto stradale fornisce le necessarie informazioni per determinare lo stato di salute delle infrastrutture in relazione alle cause di degrado sopra esposte. Per esempio un fattore che determina diversi elementi, quali la sicurezza della circolazione, la resistenza al rotolamento, l'attrito tra lo pneumatico e la pavimentazione, oltre che caratteristiche legate al rumore sia all'interno dell'abitacolo che ambientale, è la tessitura di una pavimentazione stradale, definibile come la deviazione della superficie reale della pavimentazione da un ideale piano di riferimento (Bitelli *et al.*, 2012). In generale vi sono diverse metodologie per determinare le caratteristiche prestazionali del manto stradale che vanno dall'uso di indici denominati PCI, acronimo di *Pavement Condition Index* alla

valutazione del grado di usura attraverso lo studio delle tipologie di fessurazioni, avvallamenti etc... Nel presente capitolo dopo una breve esposizione di alcune delle ricerche per l'estrazione di informazioni 2D e 3D nell'ambito delle applicazioni stradali, viene analizzato il possibile utilizzo in questo settore delle tecniche afferenti alla Geomatica ed in particolare delle tecniche *image-based* e *range-based*.

4.1. Sistemi di acquisizione 2D e 3D impiegati nell'ambito delle infrastrutture stradali

Nell'ambito delle Infrastrutture stradali la maggior parte delle ricerche si sono occupate di tecniche e metodologie atte a studiare lo stato di salute del manto stradale riguardo sia alle caratteristiche superficiali che a quelle materiche, compositive e strutturali dei conglomerati per determinare, in maniera veloce e con il minimo intervento da parte degli operatori, le caratteristiche prestazionali del manto stradale. In particolare gli studi si sono concentrati sull'analisi delle informazioni 2D provenienti dalle immagini (Wang & Smadi, 2011) per studiare sia le lesioni della superficie stradale che la composizione mineralogica degli aggregati che compongono i conglomerati. Per il primo caso si menziona una ricerca dedicata alla elaborazione, all'analisi e allo studio delle tecniche di acquisizione ed elaborazione delle immagini per lo studio di sistemi automatici non distruttivi per il rilievo del degrado delle pavimentazioni stradali (Pasetto & Bortolini, 2006). In particolare, grazie alle tecniche di elaborazione delle immagini, vengono estratte le caratteristiche geometriche delle fessure in evidenza, valutandone l'entità tramite l'utilizzo di indici standardizzati.

Per il secondo caso viene menzionato uno studio rivolto alle tecniche di analisi di immagini di sezioni planari estratte da provini di asfalto, da cui potere studiare la gradazione della composizione mineralogica della miscela senza la necessità di lunghe e complesse metodologie di laboratorio che spesso risultano onerose e pericolose per gli operatori (Bruno *et al.*, 2012).

In generale la ricerca nell'ambito delle infrastrutture stradali è indirizzata verso lo studio di tecniche in grado di trovare un razionale equilibrio tra funzionalità, costi, automazione, sicurezza ed impatto ambientale. Per fare ciò negli ultimi anni si sono sfruttati i recenti sviluppi tecnologici che hanno portato all'introduzione di nuove tipologie di sensori digitali e di innovativi strumenti rispettivamente per l'acquisizione e per il processamento dei dati, che agevolano in maniera efficace l'acquisizione e l'interpretazione delle informazioni necessarie.

Una metodologia che negli ultimi anni si sta diffondendo per l'analisi dei manti stradali impiega dei sistemi costituiti da diversi sensori e strumentazioni montati su veicoli che

acquisiscono il dato quando il veicolo è in movimento. Questi metodi sono nati nell'ambito di ricerche atte a studiare tecniche di acquisizione automatiche e ripetibili, operativamente più sicure del rilievo manuale, e che richiedono tempi brevi e costi limitati, utili per la conoscenza, lo studio ed il monitoraggio della rete stradale. Si distinguono in quelli che acquisiscono il dato 2D ed in quelli che invece ottengono il profilo 3D della superficie stradale. Un sistema che permette l'acquisizione di dati 2D è stato sviluppato dall'Università di Catania, ed è costituito da un veicolo, un vero e proprio “laboratorio mobile”, su cui viene montata una camera digitale. In questo modo vengono eseguiti rilievi ad alte velocità attraverso immagini digitali georeferenziate grazie all'integrazione tra il sistema GPS e il sistema di acquisizione delle immagini (Cafiso *et al.*, 2006) (Figura 4.1). L'elaborazione delle immagini avviene attraverso un *software* che le corregge dalle distorsioni ottiche e rileva e classifica in maniera automatica i degradi.



Figura 4.1–Il “laboratorio mobile” sviluppato dall'Università di Catania

Negli anni recenti si assiste ad un rapido sviluppo di ricerche che introducono il dato 3D nei rilievi per applicazioni in ambito stradale attraverso l'utilizzo di tecnologie di *imaging laser* o attraverso l'applicazione di alcuni principi fotogrammetrici (Wang & Smadi, 2011). In particolare la prima fase di una ricerca dell'Università dell'Arkansas nell'ambito del progetto NCHRP IDEA ha l'obiettivo di rilevare il livello di usura della superficie stradale utilizzando tecniche di stereo visione per ricavare il dato 3D (Wang & Gong, 2007). Nella seconda fase invece viene perfezionato il sistema e viene approfondito l'aspetto riguardante lo sviluppo di algoritmi per il rilevamento automatico dello stato di salute del manto. Il modello di veicolo è il DHDV *Digital Highway Data Vehicle* che viene di volta in volta perfezionato (Wang *et al.*, 2007).

Il sistema impiega delle particolari camere, *area-scan* e *line-scan cameras*, da sempre utilizzate in ambito industriale per l'ispezione di oggetti sul nastro trasportatore (Sansoni *et al.*, 2009, Wang&Smadi, 2011) (Figura 4.2). Le prime contengono matrici di pixel che

catturano l'immagine di una determinata area, mentre le seconde contengono una sola riga di *pixel* utilizzata per catturare dati in maniera molto rapida.

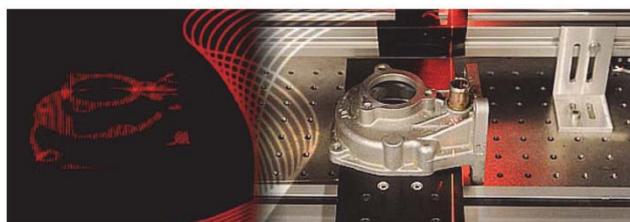
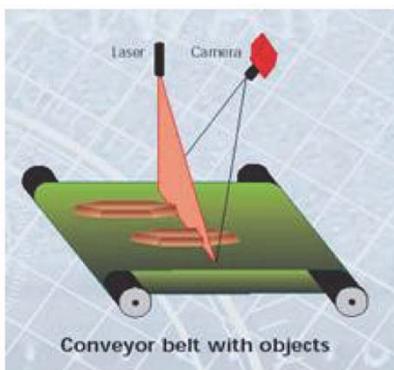


Figura 4.2– Esempio di camera lineare (*line-scan cameras*) nell'ispezione industriale (Wang & Smadi, 2011)

Nella prima fase il veicolo presenta quattro camere *area-scan*, che attraverso tecniche di stereovisione, consentono la ricostruzione della superficie 3D del manto stradale (Figure 4.3 e 4.4).

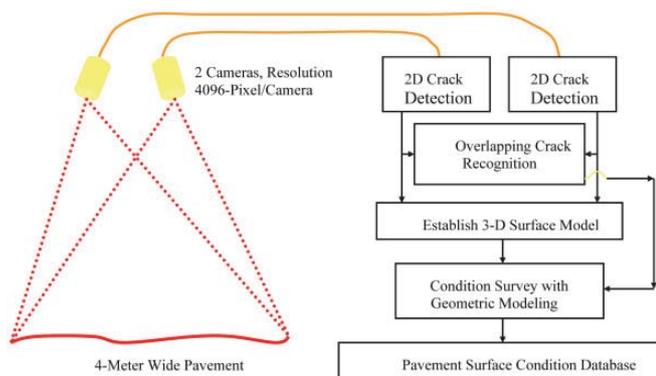
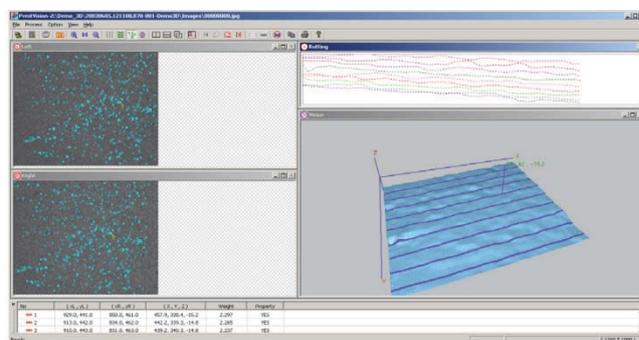


Figura 4.3– Schema del funzionamento del sistema che impiega la visione stereo (Wang *et al.*, 2007)



(a)



(b)

Figura 4.4– Il veicolo della prima fase (a) e la ricostruzione 3D (b) (Wang *et al.*, 2007)

Nella seconda fase il sistema denominato LRIS, acronimo di *Laser Road Imaging System*, è stato perfezionato con l'inserimento di due camere del tipo lineare (*line-scan*) e *laser* illuminatori, montanti all'interno di una struttura a tenuta d'acqua in alluminio montato su un telaio esterno. Il sistema permette di coprire una sezione trasversale della strada di 4 m con risoluzione di 1 millimetro a velocità che possono superare 100 chilometri all'ora. Questo sistema di *imaging* è stato progettato per aumentare il contrasto e la visibilità delle piccole crepe stradali sia longitudinali che laterali. Il sistema LRIS può funzionare in pieno giorno perché è immune alle variazioni delle condizioni di illuminazione esterne e alle ombre proiettate da oggetti lungo le strade, da viadotti o dal veicolo stesso. Altri vantaggi di questo sistema sono la sua compattezza e un basso consumo energetico inferiore a 200 watt (Wang *et al.*, 2007). La Figura 4.5 mostra i sensori LRIS montati sul DHDV.



Figura 4.5– Il sistema LRIS della seconda fase (Wanget *al.*, 2007)

Le camere lineari utilizzano una sola riga di pixel del sensore (quindi unidimensionale) per costruire un'immagine bidimensionale. La seconda dimensione è data dal movimento della camera che si muove con il veicolo. Le immagini bidimensionali della pavimentazione vengono acquisite linea per linea dalle successive scansioni della singola riga, mentre la camera si muove perpendicolarmente con il veicolo (Figura 4.6). In questo modo viene ricostruito il profilo 3D della superficie stradale.

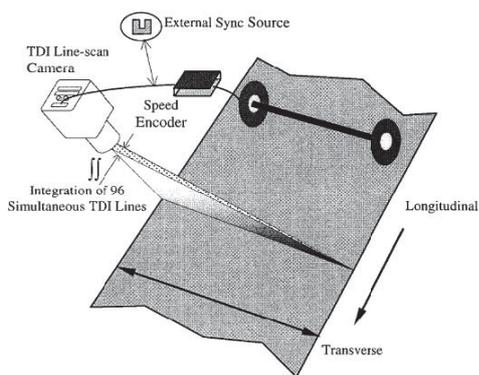


Figura 4.6– Il funzionamento del metodo di scansione lineare (Wanget *al.*, 2007)

Il sistema più avanzato presenta un sistema più complesso di sensori denominato *PaveVision3D* costituito da un sistema ibrido di *imaging laser 2D/3D*, montato sempre in un veicolo DHDV (Figure 4.7 e 4.8) (Wang *et al.*, 2011).



Figura 4.7– Il sistema DHDV con il sistema ibrido di *imaging laser 2D/3D* denominato *PaveVision3D*

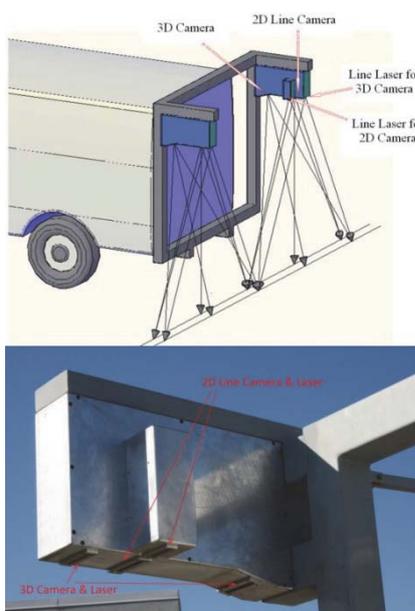


Figura 4.8– Il sistema di configurazione dei sensori

In questo modo è possibile ottenere importanti informazioni su forma e dimensioni delle lesioni e degli avvallamenti buche in 3D (Figura 4.9).

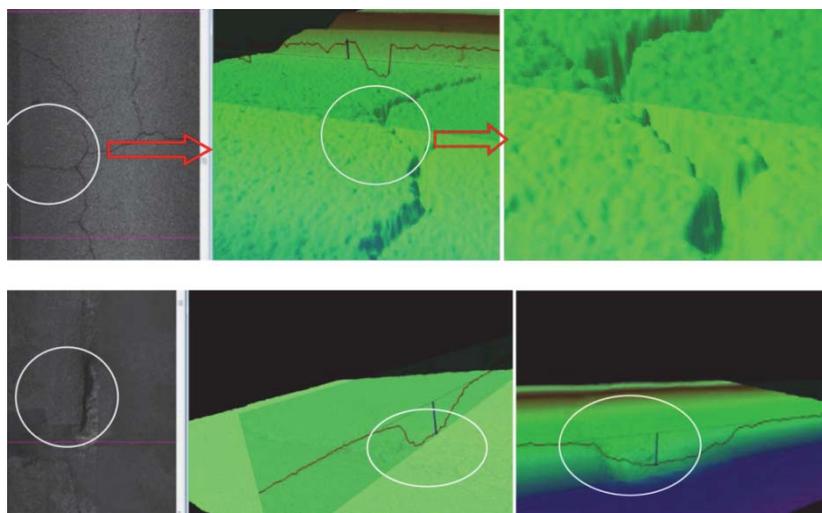


Figura 4.9– Lesioni e avvallamenti nei prodotti 2D e 3D

Questi sistemi si dimostrano molto funzionali agli scopi prefissati poiché forniscono in tempo reale, con procedure automatiche e con risoluzioni elevate i dati necessari per lo studio dei degradi della superficie stradale. Come vedremo però nei prossimi paragrafi il contributo offerto dalla Geomatica potrebbe determinare lo sviluppo di nuove applicazioni e metodologie in grado fornire prodotti utili non soltanto per lo studio dello stato di salute della superficie stradale ma anche per altre tipologie di analisi e applicazioni.

4.2. Potenzialità delle tecniche geomatiche

In questo ampio quadro le nuove tecnologie provenienti dalla Geomatica con le moderne tecniche di acquisizione 3D offrono interessanti prospettive nell'ambito delle infrastrutture stradali. In particolare le tecniche *image-based* e *range-based* permettono di ottenere modelli 3D accurati, misurabili ed eventualmente georeferenziati, che possono costituire un supporto utile per i tecnici del settore per effettuare le necessarie verifiche sulla condizione del manto con la possibilità di analizzare i rapporti spaziali e volumetrici, ma anche di effettuare studi sulle caratteristiche prestazionali, che nell'ambito della sicurezza stradale sono fattori di fondamentale importanza. I vantaggi offerti sono la ripetibilità, l'automazione, l'accuratezza e la precisione metrica, oltre alla possibile integrazione delle tecniche in relazione alle informazioni che si vogliono ottenere. Inoltre con l'applicazione delle tecnologie afferenti alla Geomatica si introducono nel settore delle infrastrutture stradali nuovi scenari e nuovi

possibilità applicative. Oltre allo studio dei degradi della superficie stradale su modelli 3D, nascono nuove tecniche automatiche per la estrazione e la classificazione degli elementi costituenti una arteria stradale, oppure nuovi sistemi per il monitoraggio del traffico.

4.2.1. Le tecniche *image-based*

Le tecniche *image-based* possono contribuire anche in maniera significativa per gli studi in ambito stradale. In particolare l'utilizzo di piattaforme aeree a bassa quota (vedi cap 2 Paragr. 2.12) è un sistema innovativo con caratteristiche di flessibilità, ripetibilità e basso costo che può offrire molti vantaggi, per esempio quando occorre effettuare rilievi dall'alto di intere arterie viarie. Uno studio condotto dall'Università di Melbourne in Australia utilizza una piattaforma aerea per il rilievo 3D di una strada sterrata (Zhang &Elaksher, 2012). La metodologia proposta per questo rilievo, attraverso la sperimentazione delle più recenti strumentazioni nel campo del rilievo e della documentazione, definisce delle procedure e tecniche applicabili per qualsiasi tipologia di strada. La piattaforma è costituita da un elicottero dotato di un sistema di controllo del volo costituito da un ricevitore GPS, un sistema di navigazione inerziale (INS) e un computer di bordo che, durante il volo, comunica con la stazione di controllo a terra (GCS *Ground Control Station*) per attivare automaticamente la telecamera nelle posizioni preimpostate (*waypoints*) per acquisire le immagini (Figura 4.10). L'elicottero ha buone caratteristiche prestazionali con grande stabilità al vento e con un alto carico utile trasportabile, 6,8 kg. La fotocamera impiegata, una Canon EOS 400D Digital RebelXTi, ha una lunghezza focale di 50 mm, una risoluzione 10,1 Mpixel e una dimensione del *pixel* di 5,7 μm .



Figura 4.10– La piattaforma UAV

Data la vasta estensione sul territorio e la grande varietà dimensionale delle infrastrutture stradali il rilievo da piattaforme aeree a bassa quota può diventare un fondamentale aiuto per gli studi del settore. Per il rilievo della strada sterrata viene eseguito il classico flusso di

lavoro che si svolge nei tradizionali processi fotogrammetrici con l'estrazione dei prodotti finali tipici della fotogrammetria (modelli 3D ed ortofoto) (Figura 4.11).

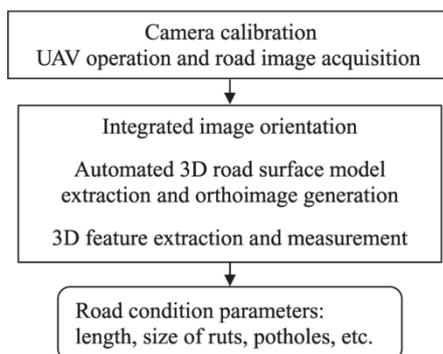


Figura 4.11– Flusso di lavoro del processamento dei dati.

I modelli 3D generati (Figure 4.12) sono di grande dettaglio e quindi da questi è possibile estrarre informazioni utili sullo stato di usura della strada e sull'entità dei degradi.



Figura 4.12– La ricostruzione 3D di solchi e avvallamenti.

Nello studio viene verificata la precisione metrica raggiunta attraverso l'utilizzo di segnali, costituiti da cerchi rossi con croci bianche perpendicolari che indicano il diametro del cerchio, e di coni di traffico posti lungo le strade (Figura 4.13). Le verifiche hanno dimostrato che il sistema fornisce una buona precisione metrica con differenze rispetto ai dati reali non superiori al mezzo centimetro.



Figura 4.13– I coni e i segnali utilizzati per le verifiche metriche e la ricostruzione 3D di un cono di traffico.

Infine l'ortofoto generata può essere utilizzata per misurare altri parametri come area e estensione di solchi ed avvallamenti(Figura 4.14).

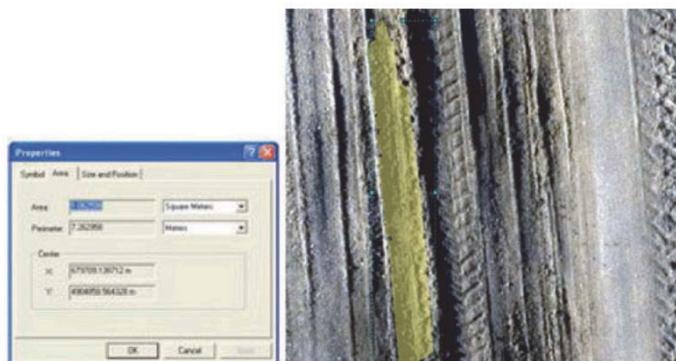


Figura4.14– Misura dell'area di un solco.

Quindi lo studio proposto ha dimostrato che questa tecnica di rilievo è molto promettente per le applicazioni nell'ambito delle infrastrutture stradali. I prodotti ottenuti consentono di avere informazioni 3D a risoluzioni elevate e metricamente accurate che costituiscono un buon supporto per determinare lo stato di salute della superficie stradale. Inoltre l'uso di tecnologie *image-based* avanzate consente di avere una visione, descrizione e rappresentazione a più ampio spettro dei sistemi della rete viaria proponendo nuove metodologie di acquisizione e nuove prospettive per l'analisi e la caratterizzazione dei degradi.

La ricostruzione 3D tramite tecniche *image-based*, accoppiate agli algoritmi di riconoscimento utilizzati nell'ambito della CV, può essere utilizzata per la classificazione automatica degli elementi che contraddistinguono una strada. Infatti la complessità delle infrastrutture stradali porta alla necessità di eseguire in maniera automatica e frequente rilievi ed analisi utili per la programmazione dei necessari interventi di manutenzione. Da qui la

nascita di gruppi di ricerca che studiano possibili tecniche in grado di fornire in maniera automatica le informazioni necessarie per la gestione delle infrastrutture stradali.

In particolare uno studio realizzato dall'Università della Virginia sviluppa una metodologia per classificare in maniera automatica gli elementi di una autostrada attraverso riconoscimento di colore, forma e struttura, partendo da un sistema implementato e descritto in Goldpavar-Fard *et al.* 2009; esso utilizza, per ricostruire la scena 3D, la strategia SfM, per ricavare una nuvola di punti sparsa, e algoritmi di *multi-view stereo matching* (MVS), per ottenere una ricostruzione densa (Tabella 4.15 e Figura 4.16) (Uslu *et al.*, 2011).

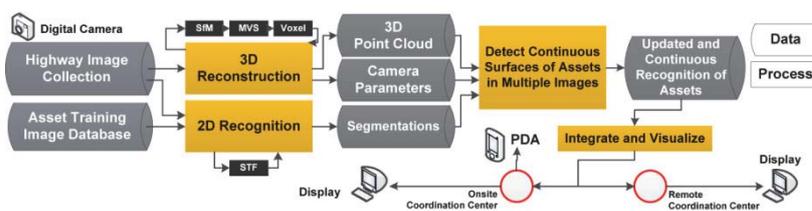


Figura 4.15– Schema del sistema sviluppato

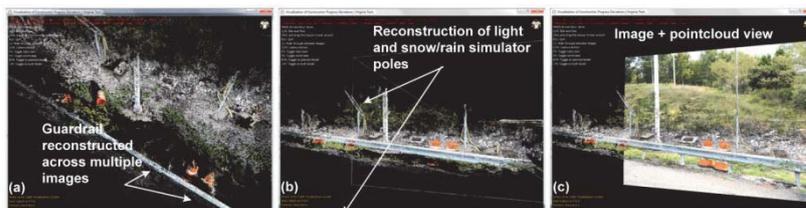


Figura 4.16– I risultati delle ricostruzioni 3D

In totale sono state individuate 13 categorie di elementi (asfalto, cemento, guardrail, segnali stradali etc...) classificate in funzione dei valori RGB (Tabella 4.17 e Figura 4.18).

Questa ricerca proposta dimostra come l'utilizzo combinato di tecniche *image-based* di ricostruzione 3D e di algoritmi di riconoscimento provenienti dalla CV può dare un valido contributo nei sistemi di gestione delle infrastrutture stradali.

Il sistema può essere una valida alternativa a agli attuali sistemi soggettivi e manuali di gestione delle infrastrutture stradali grazie alle sue caratteristiche di accuratezza, basso costo, automatismo oltre che per l'elevato livello di sicurezza per il personale impiegato (Uslu *et al.*, 2011).

Category Name	Images (#)	(R,G,B)	Color	Category Name	Images (#)	(R,G,B)	Color
Void	7	(0,0,0)	Black	Grass	7	(128,0,128)	Purple
Asphalt Pavement	7	(0,128,0)	Green	Soil	7	(255,0,0)	Red
Concrete Pavement	7	(0,0,128)	Blue	Sky	7	(0,255,0)	Light Green
Guardrail	7	(128,0,0)	Dark Red	Safety Cones	7	(0,0,255)	Dark Blue
Poles	7	(128,128,0)	Olive	Traffic Lights	7	(255,128,255)	Pink
Signs	7	(128,128,128)	Grey	Pavement Markings	7	(128,255,255)	Light Blue
Trees	7	(0,128,128)	Teal				

Tabella 4.17– Le categorie individuate in funzione dei valori RGB

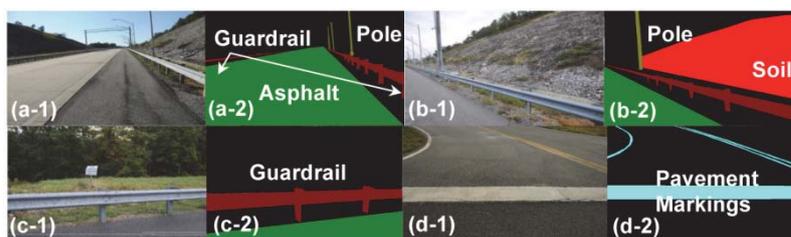


Figura 4.18– Le immagini con l'individuazione degli elementi classificati

4.2.2. Le tecniche *range-based*

I sistemi *range-based* possono essere impiegati per una varietà di applicazioni; di cui alcune sono state indagate, mentre altre risultano essere poco conosciute e non ancora analizzate in maniera adeguata.

Una delle applicazioni che sono state poco investigate riguarda l'uso di *laser scanner* per determinare lo stato di salute dei conglomerati bituminosi attraverso ricostruzioni 3D di campioni prelevati da pavimentazioni stradali. Questo aspetto è stato analizzato in uno studio in cui vengono scansionate delle carote di asfalto per eseguire analisi di tipo statistico e geometrico sulla miscela di conglomerato (Girardi, 2011; Bitelli *et al.*, 2012). In particolare si sfruttano le potenzialità dell'acquisizione tridimensionale per determinare i tradizionali parametri che caratterizzano le prestazioni dei manti stradali solitamente valutati attraverso rilievi bidimensionali.

Un *laser scanner* triangolatore, che permette il rilievo di piccoli oggetti con precisioni anche sub-millimetriche, è ideale per questa sperimentazione. Questa tipologia di *laser* usa il sistema detto a triangolazione ottica, il cui funzionamento, concettualmente semplice, è del tutto analogo alla triangolazione che si usa in topografia. Il raggio *laser*, deflesso secondo un passo incrementale, colpisce l'oggetto secondo una scansione regolare, ed il segnale riflesso (punto o linea/lama *laser*) viene catturato da un sensore di immagine a stato solido CCD o

CMOS, posto ad una distanza prefissata e calibrata (*baseline*) rispetto al punto da cui il *laser* viene inviato all'oggetto (Figura 4.19). In particolare il *laser scanner* impiegato è prodotto dalla *Next Engine Inc.* che utilizza un sistema a scansione multilinea denominato MLT (*Multistripe Laser Triangulation Technology*) basato su quattro piani di scansione paralleli fra di loro. In questo modo grazie alla differente spaziatura tra le linee di scansione consente di avere una maggiore copertura dell'oggetto da rilevare. Lo strumento può lavorare in due differenti modalità, *Macro* e *Wide*, che corrispondono a due differenti *baseline* (Bitelliet al., 2012).

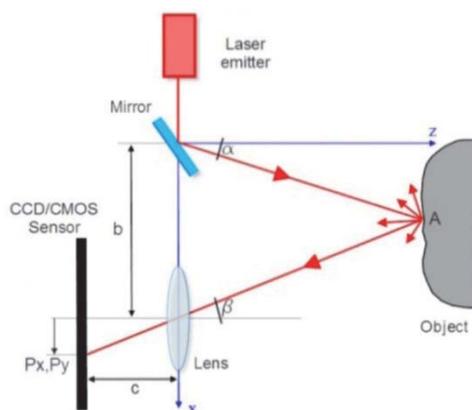


Figura 4.19– Lo schema del principio di funzionamento del *laser* a triangolazione ottica

Sono stati scansionati tre tipologie di campioni del diametro di circa 15 cm estratti da tre diverse tipologie di pavimentazioni per la percentuale dei vuoti: il primo assimilabile ad uno strato di usura (DGAC- *Dense Graded Asphalt Concrete*), il secondo ad un strato drenante (OGAC- *Open Graded Asphalt Concrete*) e il terzo di usura antisdrucchiolo (SMA- *Splitt Mastix Asphalt*). I DSM, ottenuti utilizzando entrambe le modalità, *Macro* e *Wide*, sono stati utilizzati come supporto per l'estrazione degli indici che di norma vengono utilizzati per la caratterizzazione dei manti stradali (Figura 4.20).

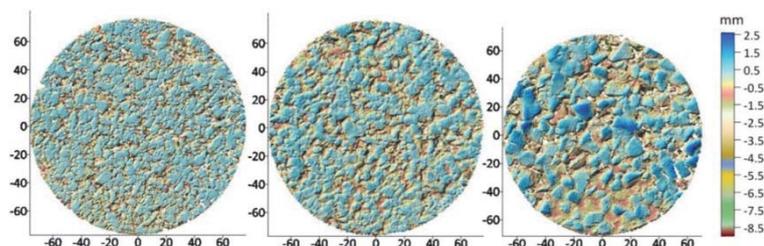


Figura 4.20– I DSM dei provini analizzati. Da sinistra a destra Usura, SMA e Drenante

Per fare questo sono stati ricavati, tramite ricerca in letteratura e nella normativa, gli indici prestazionali che caratterizzano la tessitura di una pavimentazione stradale che sono divisi in tre macroaree: geometrici prestazionali e statistici (Tabella 4.21 e Figura 4.22).

Indicatore	udm	Descrizione	Classe
MPD	[L]	Profondità media del profilo	Geometrici
R _a	[L]	Rugosità media	
R _u	[L]	Profondità livellamento	
R _m	[L]	Massima distanza linea media concavità	
R _t	[L]	Distanza massima sommità incavo	
HS	[L]	Altezza in sabbia	Prestazionali
BPN		Grip Number	
MTD	[L]	Mean Texture Depth	
VAR	[L ²]	Varianza	Statistici
R _{rms}	[L]	Scarto quadratico medio	
R _{sk}		Asimmetria (skewness)	
R _{ku}		Curtosi (kurtosis)	

Tabella 4.21– Indicatori di tessitura

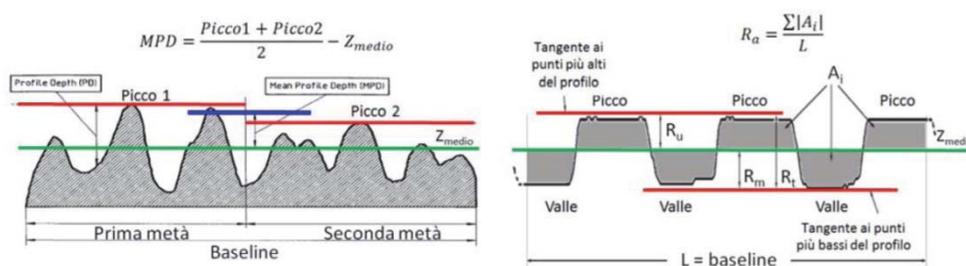


Figura 4.22– Parametri di caratterizzazione della tessitura

Lo scopo della ricerca è quello di studiare le possibilità offerte dall'uso del *laser scanner* di ampliare la gamma dei parametri impiegati per questo tipo di applicazione a tutto il campione, estendendo gli indicatori, già proposti in ambito bidimensionale attraverso analisi di profili, in un contesto tridimensionale. Per fare questo sono stati introdotti nuovi parametri di forma come aree, proiezioni su piani di riferimento, volumi. In questo modo i descrittori geometrici e statistici caratterizzano l'intero campione (Figura 4.23) e vengono valutati anche parametri morfologici areali derivanti dal rilievo della superficie dei campioni come la dimensione della *texture*, la spaziatura e la sua distribuzione (Bitelli *et al.*, 2012).

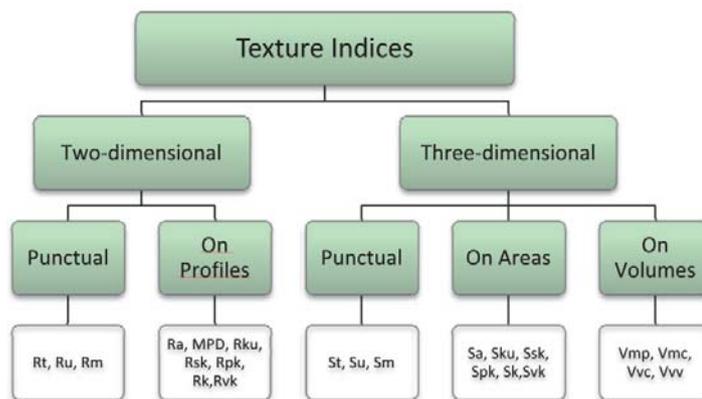


Figura4.23– Parametri di caratterizzazione della tessitura ottenibili dal rilievo *laser scanner*

Dai tre campioni vengono estratte delle sezioni ottenute intersecando la superficie del campione secondo piani radiali. In questo modo sono stati estratti dei profili su cui eseguire le tradizionali analisi per determinare sia gli indicatori di tipo geometrico che statistico (Figura 4.24).

Two-dimensional Profilometric Parameters			
<i>Profilometric</i>			
<i>indicator</i>	DGAC	SMA	OGAC
MPD (mm)	0.65	0.97	1.54
Ra (mm)	0.41	0.51	0.79
Rsk	0.17	2.07	0.15
Rku	2.27	-0.15	2.29
<i>Punctual</i>			
Rt (mm)	3.32	3.84	9.01
Ru (mm)	0.71	1.23	2.15
Rm (mm)	-2.68	-2.61	-7.25

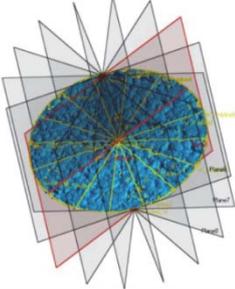


Tabella 4.24– I parametri 2D

I parametri 2D che hanno una espressione matematica facilmente estendibile alla informazione 3D sono stati estratti analizzando i campione nelle tre dimensioni (Figura 4.25).

3D parameters			
<i>On Areas</i>			
<i>indicator</i>	DGAC	SMA	OGAC
Sa(mm)	0.46	0.50	0.80
Ssk	2.24	-1.26	-1.4
Sku	9.72	5.27	7.08
<i>Punctual</i>			
St (mm)	6.13	6.26	11.22
Su (mm)	1.02	1.44	2.58
Sm(mm)	-5.11	-4.86	-8.63

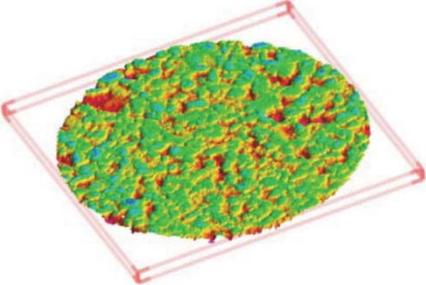


Tabella 4.25– I parametri 3D

Si rimanda all'articolo per la descrizione e la caratterizzazione dei nuovi parametri ricavati. Lo studio ha dimostrato che le informazioni ed i parametri relativi alla tessitura del manto possono essere ricavati dal modello 3D offrendo una serie di vantaggi nel monitoraggio della qualità dei manti e nella loro caratterizzazione tramite i tradizionali indici. Il principale vantaggio è l'alta precisione ed affidabilità dei risultati che vengono estesi non soltanto ai singoli profili ma a tutto il campione riferito ad un'intera porzione di pavimentazione. Inoltre l'approccio proposto è un metodo di indagine veloce applicabile sia in sito che in laboratorio, che può accompagnare o sostituire le indagini tradizionali, che di solito sono più lente e meno precise (Bitelli *et al.*, 2012).

Così come l'acquisizione di immagini da piattaforme aeree possono essere utili nell'ambito del rilievo dello stato di salute di una arteria stradale allo stesso modo il *laser scanner* da aereo (ALS- *Airbone Laser Scanning*) risulta funzionale nel caso per esempio di monitoraggio del traffico veicolare su strade urbane (Yao *et al.*, 2008) oppure nella estrazione e classificazione automatiche degli elementi costituenti la strada sia da sistemi ALS (Samadzadegan *et al.*, 2009; Akelet *et al.*, 2005; Choiet *et al.*, 2008) che da sistemi MLS- *Mobile Laser Scanning* (Yang *et al.*, 2013). Nella Figura 4.26 è rappresentato un esempio di estrazione e classificazione di strade da un sistema MLS.



Tabella 4.26– Esempio di estrazione e classificazione delle strade in una zona residenziale (Yang *et al.*, 2013)

Infine applicazioni in ambito stradale vengono condotte attraverso l'uso di sistemi multi sensore, indicati come MMS, acronimo di *Mobile Mapping System*, che solitamente presentano a bordo *laser scanner*, GPS, un sistema elettronico costituito da sensori inerziali come accelerometri e giroscopi (IMU- *Inertial Misurement Unit*), e video camere. Con il dato proveniente da questi sistemi è possibile, per esempio, ricostruire tridimensionalmente la superficie del manto stradale per analisi dei degradi classificando, attraverso procedure di segmentazione, gli elementi esterni (Figura 4.27) (Yu *et al.*, 2007). Questo studio dimostra come queste tecniche possono essere utili per la gestione delle infrastrutture stradali, infatti i modelli ottenuti insieme alla *texture* di elevata risoluzione possono essere archiviati ed analizzati per studiare il grado di usura delle strade.

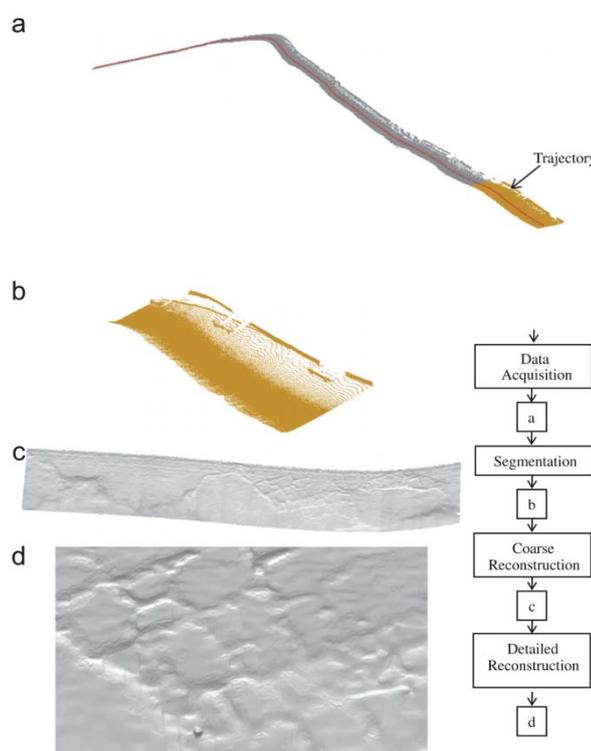


Tabella 4.27– Schema della metodologia seguita per la ricostruzione del modello a superficie da un sistema MMS (Yuet *et al.*, 2007)

5. Casi studio: prese terrestri

In letteratura sono reperibili, già da qualche anno, alcuni studi in ambito archeologico nei quali vengono ricavate informazioni 3D attraverso il processamento di immagini terrestri impiegando tecniche della CV sia durante operazioni di scavo che per la documentazione di reperti (Callieri, 2011; Kersten & Lindstaedt, 2012; Moulon & Bezzi, 2011; Plets *et al.*, 2012; De Reu *et al.*, 2013); tali studi hanno dimostrato le notevoli potenzialità di questo approccio, pur evidenziandone anche diverse criticità. Inoltre, il crescente utilizzo di questi strumenti in applicazioni scientifiche ha comportato una serie di attività di ricerca per lo studio dell'attendibilità e correttezza metrica dei modelli 3D prodotti, della affidabilità dei processi e sul loro eventuale possibile utilizzo in sostituzione di tecniche *laser scanning* e fotogrammetriche tradizionali (Fratu De Balestrini & Guerra 2010; Doneus *et al.* 2011; Skarlatos & Kiparissi 2012; Di Paola *et al.* 2013; Inzerillo & Santagati 2013).

Il lavoro della tesi ha ulteriormente approfondito questi aspetti utilizzando diversi *dataset* sia di tipo terrestre che aereo. I casi studio esposti in questo capitolo riguardano il rilievo con prese terrestri di oggetti di piccole e medie dimensioni. I *dataset* presentano sequenze di immagini con schemi di presa differenti in relazione alla tipologia di oggetto e sono stati acquisiti con camere fotografiche differenti. Il processamento delle immagini è stato condotto con strumenti 3D *web-service*, *software open source* e *software low-cost* descritti nel capitolo 3. Lo studio è stato incentrato principalmente sulla realizzazione di modelli 3D utilizzando un approccio SfM con lo scopo di investigare le prestazioni delle varie applicazioni relativamente a qualità ed accuratezza metrica dei prodotti finali. In questo modo è stato possibile fare delle prime valutazioni sulla possibilità di sostituire o eventualmente integrare rilievi fotogrammetrici tradizionali in casi analoghi nell'ambito del rilievo di Beni archeologici.

5.1. Metodologia adottata

Gli applicativi considerati per la sperimentazione sono Photosynth, Autodesk 123D Catch, Arc3D, Hypr3D (ora Cubify), My3Dscanner, quattro dei 3D *web-service* attualmente disponibili in rete senza nessun costo, il *software open source* VisualSfm, e il *software low-cost* PhotoScan. Il lavoro è stato suddiviso in tre fasi: acquisizione e processamento di immagini relative ai *dataset* campioni, esportazione, messa in scala e allineamento dei modelli 3D, confronto con modelli 3D di riferimento.

I *dataset* sono stati ottenuti con diverse camere e condizioni di presa (numero di immagini, risoluzioni, distanze di presa, ecc.) e sono relativi a quattro oggetti differenti per dimensioni e tipologia (Tabella 5.1).

Le immagini sono state processate con i vari 3D *web-service* secondo le normali procedure previste da questi servizi (*upload* delle immagini, calcolo in remoto degli orientamenti e del modello 3D, *download* del modello sotto forma di “nuvola di punti” o *mesh*); il processamento con VisualSfm e PhotoScan è stato invece eseguito con le risorse *hardware* del laboratorio di Geomatica del DICAM.

I modelli 3D sono stati messi in scala con approcci differenti in relazione alle funzioni disponibili negli strumenti utilizzati; con Autodesk 123D Catch e con VisualSfm le misure impiegate per la messa in scala sono state inserite collimando direttamente sulle immagini i punti di distanza nota attraverso la piattaforma di gestione del 3D *web-service* nel primo caso e attraverso il *software open source* Sfm_Georef nel secondo caso; con Photosynth, Arc3D, Hypr3D e My3Dscanner i modelli 3D sono stati messi in scala con il *software open source* MeshLab attraverso l'inserimento di un rapporto di scala stimato tramite misura di una o più distanze note direttamente sulle nuvole di punti o sui modelli poligonali.

I modelli 3D di riferimento sono stati ottenuti o tramite scansioni *laser scanning* o tramite il processamento delle stesse immagini attraverso programmi di fotogrammetria *close-range*.

L'allineamento per riportare tutti i modelli in uno stesso sistema di riferimento è stato eseguito tramite l'algoritmo ICP.

Soltanto con il *software* PhotoScan è stato seguito un diverso approccio; i modelli calcolati con questo programma sono stati scalati ed allineati al sistema di riferimento globale utilizzando dei punti di appoggio. Le coordinate dei punti in alcuni casi sono state ricavate dai progetti fotogrammetrici, in altri casi direttamente da rilievi topografici.

Per i confronti metrici sono stati impiegati tre diversi criteri, scelti anche in funzione delle caratteristiche degli oggetti rilevati:

- confronto delle superfici tridimensionali attraverso creazione di una mappa che individua la distanza nelle tre dimensioni;
- confronto tra profili 2D;
- calcolo delle differenze delle distanze tra punti caratteristici, naturali o *target* fotogrammetrici.

Dataset	Descrizione	Dimensioni [cm]	Camera	Risoluzione [pixel]	N° immagini	Distanza di presa [m]	GSD [mm]
1	Rovine del teatro antico di Solunto	360 x 330 x 190	NikonD80	3898 x 2616	25	4,00	1,40
					17	6,00	2,00
2	Elemento scultoreo	30 x 45 x 30	Kodak Easyshare C315	2600 x 1944	85	0,75	0,28
3	Reperto archeologico	33 x 33 x 15	Canon EOS-1Ds Mark II	5006 x 3337	8	1,00	0,15
4a	Fontana	490 x 540 x 260	Canon EOS D60	3074 x 2049	6	8,00	3,00
4b					11	7,00	2,60
4c					25	9,00	3,35

Figura 5.1 – Principali caratteristiche dei *dataset* utilizzati

5.2. Dataset 1: Rovine del teatro antico di Solunto

Il primo caso studio ha come oggetto il *dataset* costituito da immagini che riprendono le rovine dell'antico teatro greco del sito archeologico di Solunto. L'antica città di Solunto si trova sulla costa settentrionale della Sicilia, nei pressi di Palermo, sul lato sud-est del Monte Catalfano. La città è stata fondata dai Fenici nel VI secolo aC, in seguito divenne dapprima colonia greca e poi romana. Solunto aveva un piano urbanistico ellenistico di tipo ippodameo, dove i tre centri principali, religioso, politico-amministrativo e commerciale, erano dislocati in blocchi edifici di uguale dimensione delimitati da strade, spesso lastricate, che si incrociano perpendicolarmente.

Il teatro si trova al di sopra dell'agorà ed in origine aveva un diametro di circa 45 metri e 21 ordini di sedili, con la possibilità di accogliere fino a mille persone (Figura 5.2a). L'orchestra ha due strati sovrapposti attribuibili a due fasi successive: il primo è probabilmente del VI secolo a.C., il secondo del periodo ellenistico. Oggi rimane solo una

piccola porzione di gradinate, le cui dimensioni sono pari a 3,60 m x 3,30 m x 1,90 m (Figura 5.2b).



Figura 5.2 – La cavea del teatro di Solunto (a) e la parte di gradinate interessate dal rilievo (b)

L'acquisizione delle immagini è stata condotta utilizzando una macchina reflex digitale Nikon D80 dotata di un obiettivo da 28 mm a focale fissa, con sensore CCD di 3898 pixel x 2616 pixel ed una dimensione del pixel di 6.1 μ m. L'acquisizione è stata effettuata ponendo la camera su un'asta telescopica, dotata di un aggancio a baionetta per la camera, estendibile fino a 2 metri. Le immagini sono state eseguite ponendo l'asta a varie altezze rispetto al piano campagna: alcune immagini sono state riprese poggiando l'asta a terra (da circa 2 m di altezza quindi), altre alzando l'asta per portare la camera ad altezze pari a 2,25 m e 2,50 m. Le immagini sono composte da sequenze convergenti e stereoscopiche e sono state scattate inclinando la camera in modo da avere una buona copertura dell'oggetto. Sono state acquisite tre strisciate stereoscopiche da una distanza media di circa 4 m e da tre diverse altezze, rispettivamente da circa 2 m, 2,25 m e 2,50 m, per complessive 25 immagini stereoscopiche. Le immagini convergenti sono state scattate da un'altezza di 2,00 ed una distanza di 6 m per un totale di 17 immagini (Figure 5.3).

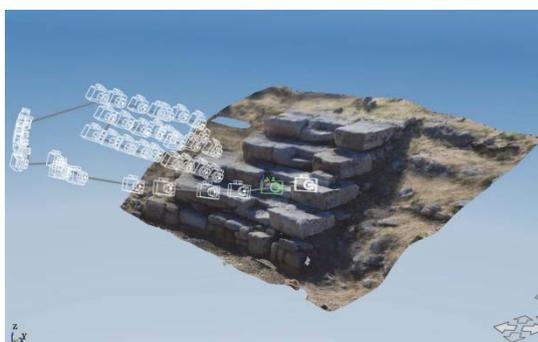


Figura 5.3 – Le due sequenze utilizzate per la ricostruzione 3D

Il modello di riferimento per le successive verifiche metriche è stato eseguito utilizzando un *laser scanner* FARO Focus^{3D} S120. Questo *scanner laser* utilizza la tecnologia a differenza di fase ed offre un *range* operativo da 0,6 m a 120m, con un errore nella distanza lineare di ± 2 mm tra i 10 m e i 25 m e permette di misurare fino a 976,000punti/sec. Il suo campo di vista è molto ampio, 360° in orizzontale e 305° in verticale. Lo strumento, dotato di fotocamera coassiale integrata con una risoluzione di 70 megapixel, consente di fotografare immagini con lo stesso sistema di riferimento delle nuvole di punti permettendo l'associazione di un valore di colore RGB ad ogni punto tridimensionale misurato.

5.2.1. Elaborazione delle immagini

Nel paragrafo vengono descritti le procedure eseguite per ottenere la ricostruzione 3D della porzione del teatro interessata dal rilievo dai diversi strumenti indagati.

Microsoft Photosynth: Il modello realizzato con Photosynth è stata eseguito utilizzando tutte le immagini stereoscopiche e convergenti (42 immagini). Il 3D *web-service* è stato in grado di orientare tutte le immagini in un tempo molto breve. Questo è un grande vantaggio quando si lavora con un gran numero di immagini. Tuttavia la nuvola di punti prodotta è molto rumorosa e sparsa, non adeguata per ottenere un modello 3D ricco di dettagli. Inoltre, uno svantaggio di Photosynth è l'assenza di strumenti che permettono di creare un modello poligonale (*mesh*). Nel complesso sono stati calcolati circa 120.000 punti. I punti sono stati importati in Geomagic per produrre un modello poligonale. La nuvola di punti ha permesso di ottenere un modello 3D composto da un numero di triangoli inferiore rispetto a quello ottenuto dagli altri strumenti indagati. La *mesh* è scarsamente definita con la presenza di lacune principalmente in corrispondenza delle superfici superiori delle sedute più alte e nelle superfici laterali di tutte le sedute. Dopo una fase di *editing* è stato ottenuto un modello 3D con circa 230.000 triangoli (Figura 5.4).



Figura 5.4 – Il modello ottenuto con Photosynth

Arc3D: L'esperienza condotta con Arc3D ha messo in evidenza alcuni problemi durante l'elaborazione delle immagini. Per ottenere il modello 3D sono state eseguite diverse prove

utilizzando differenti blocchi di immagini con diversi livelli di campionamento. Il primo test è stato eseguito utilizzando tutte le immagini senza applicare alcun ricampionamento. Il 3D *web-service* è stato in grado di caricare tutte le immagini, ma il modello ottenuto presentava molte lacune soprattutto in corrispondenza delle sedute più alte. Pertanto altre prove sono state effettuate caricando sul server tutte le immagini e applicando varie percentuali di ricampionamento, fino al 50% della risoluzione originale delle immagini, senza però ottenere risultati qualitativamente soddisfacenti. Altri test sono stati eseguiti con solo le 25 immagini stereoscopiche e con solo le 17 immagini convergenti. Il risultato migliore, un modello 3D ad alta risoluzione per quanto riguarda il livello di definizione della maglia triangolare è stato ottenuto utilizzando solo le 17 immagini convergenti senza eseguire alcuna ricampionamento.

Il processo automatico è stato in grado di ricostruire completamente le superfici sia laterali che superiori delle sedute del teatro, le poche lacune presenti sono situate sulle facce superiori delle sedute più alte. Il modello è stato importato in Geomagic per eseguire qualche operazione di *editing* in modo da ottenere un modello 3D completo composto di 390.000 triangoli (Figura 5.5).



Figura 5.5 – Il modello ottenuto con Arc3D

Questa esperienza evidenzia che spesso il processo automatico può fallire con Arc3D, in particolare se le immagini utilizzate non soddisfano i requisiti per l'elaborazione. In realtà, non sempre è facile comprendere il problema del fallimento del processo; l'unico modo è eseguire diverse prove variando il numero, la configurazione e la risoluzione delle immagini. Tuttavia quando il processo automatico ha successo, è possibile avere modelli 3D di alta qualità in breve tempo.

Hyper3D: Anche con Hyper3D (ora Cubify) sono stati effettuati alcuni test con diversi *dataset* per valutare con quale tipo di immagini è possibile ottenere un modello 3D completo e ad alta risoluzione. Per fare ciò sono state effettuate tre prove: la prima con tutte le 42 immagini, la seconda utilizzando solo le 25 immagini stereoscopiche, e l'ultima con solo le 17 immagini convergenti. A differenza di Arc3D, Hyper3D è stato in grado di orientare tutti e tre i blocchi e per tutti e tre è riuscito a produrre dei modelli 3D qualitativamente apprezzabili, ma

il modello 3D ottenuto dalle 17 immagini convergenti è risultato migliore degli altri e quindi è stato utilizzato per le successive verifiche. La nuvola ottenuta è costituita da circa 150.000 punti. Allo stesso modo di Photosynth e di Arc3D questo 3D *web-service* non ha strumenti per modificare o migliorare il modello 3D ottenuto così la nuvola di punti è stata importata in Geomagic per creare un modello a superficie. Alcune lacune erano presenti nelle porzioni meno visibili dalle immagini. Dopo una fase di *editing* è stata ottenuta una *mesh* di circa 220.000 triangoli (Figura 5.6).



Figura 5.6 – Il modello ottenuto con Hypr3D

Autodesk 123D Catch: Con questo 3D *web-service* sono state utilizzate tutte le immagini ed il loro orientamento è riuscito al primo tentativo, ma il modello 3D ottenuto presentava alcune imperfezioni nella ricostruzione delle gradinate con la presenza di blocchi deformati. Quindi per migliorare la ricostruzione 3D si è sfruttata una funzione disponibile nel *software* di gestione che consente di misurare direttamente sulle immagini alcuni punti omologhi per vincolare meglio l'orientamento tra le immagini. Questa possibilità offerta da 123D Catch è un grande vantaggio, in quanto rende possibile l'interazione dell'utente per aiutare la ricostruzione tridimensionale. Un altro vantaggio è la possibilità di impostare la risoluzione della *mesh* in funzione dello scopo del rilievo. Per questo lavoro il modello 3D è stato ricalcolato con la massima risoluzione. In questo caso non è stata necessaria alcuna fase di editing poiché la ricostruzione 3D è apparsa soddisfacente e non erano presenti buchi. Il modello 3D poligonale creato presentava circa 800.000 triangoli (figura 5.7). Un grande svantaggio è l'assenza di strumenti che permettono di verificare il corretto orientamento delle immagini, come si vedrà in seguito, questo può creare problemi nella precisione geometrica del modello finale.



Figura 5.7 – Il modello ottenuto con 123D Catch

PhotoScan: Il processamento delle immagini effettuato con PhotoScan è stato eseguito utilizzando tutte le immagini (42 immagini). Le immagini sono state orientate automaticamente eseguendo un primo orientamento con un basso livello di precisione e successivamente ricalcolando gli orientamenti con un alto livello di precisione. La risoluzione del modello 3D ottenuto è stata limitata dalla versione del *software* utilizzato in questa prova (8.3 a 32 bit) e dall'*hardware* disponibile. E' stato possibile calcolare un modello 3D con una qualità della *mesh* media imponendo un limite massimo di 400.000 triangoli (Figura 5.8).



Figura 5.8 – Il modello ottenuto con PhotoScan

5.2.2. Verifiche metriche

Dalle rappresentazioni grafiche delle comparazioni metriche delle superfici tridimensionali tra i modelli generati dagli strumenti indagati con il modello *laser* si evince come per tutti i modelli la distribuzione delle deviazioni non è uniforme. Le mappe 3D di Photosynth, Arc3D, Hypr3D e PhotoScan mostrano che le deviazioni massime sono comprese tra $\pm 0,06$ m e si trovano in aree critiche come gli interstizi tra le pietre delle sedute, in cui i dati presentano rumore, e le zone di confine, che sono poco visibili nelle immagini (Figura 5.9).

La mappa 3D che presenta deviazioni maggiori è quella ottenuta dal confronto con 123D Catch. In particolare si denota una strana distribuzione tra i valori positivi e negativi delle deviazioni, sia tra sedili della stessa fila che tra sedili di fila differente. Inoltre, le superfici frontali delle sedute dei due ordini inferiori hanno scarti positivi nelle parti esterne e negativi nelle parti interne; mentre le deviazioni sono per la maggior parte negative in corrispondenza delle facce frontali delle sedute degli ultimi due ordini. Questo risultato potrebbe indicare un problema nella corretta geometria del modello (Figura 5.9).

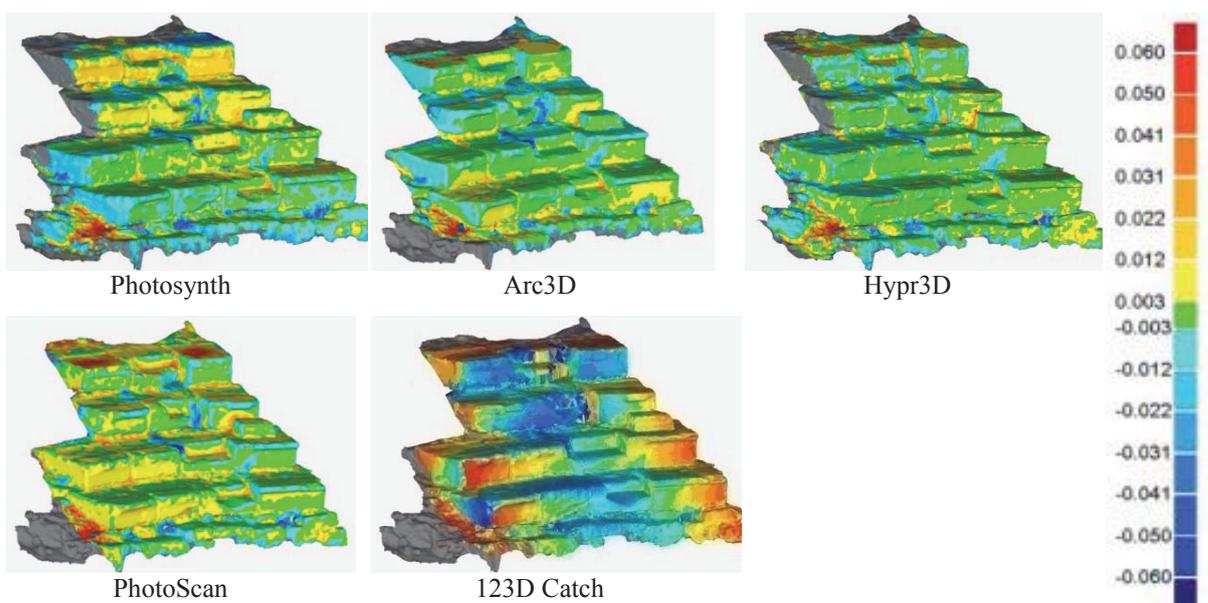


Figura 5.9 – Rappresentazione grafica dei confronti relativi al *dataset 1*

I parametri statistici valutati (media e deviazione standard) risultanti dai confronti evidenziano sia il problema relativo alla distribuzione non uniforme degli scarti visibile in tutti i modelli sia la distribuzione anomala di 123D Catch. Infatti le medie sono nell'ordine del millimetro (tra -1,18 mm ottenuta dal confronto con PhotoScan e 1,24 mm ottenuta dal confronto con 123D Catch) e le deviazioni standard sono dell'ordine del centimetro e quindi entro le tolleranze per restituzioni grafiche alla scala 1:50. Tolleranza non rispettata dal modello generato da 123D Catch poiché presenta una deviazione standard di $\pm 26,12$ mm pari a circa il doppio delle altre (Tabella 5.10).

	Media [mm]	Dev. Standard [mm]
Photosynth	-1,05	13,89
Autodesk 123D Catch	1,24	26,12
Arc3D	1,08	12,35
Hypr3D	-1,14	12,45
Photoscan	-1,18	13,59

Tabella 5.10 – Valori statistici risultanti dalle comparazioni relative al *dataset 1*

5.3. Dataset 2: Elemento scultoreo a forma di testa

Il secondo test è stato eseguito su un *dataset* che riprende un elemento scultoreo che rappresenta una testa con due facce presente nel "Castello Incantato" di Sciacca. Il "Castello Incantato" sorge su un'ampia area di campagna nella parte occidentale della città a pochi chilometri dal centro. In tale area lo scultore Filippo Bentivegna ha cosparso tra alberi di ulivi e mandorli sculture di teste scolpite nella roccia o sui tronchi d'albero. La testa rilevata, delle dimensioni di 30 cm x 45 cm x 30 cm, è stata ripresa da due strisciate convergenti scattate girando attorno alla scultura da una distanza media di circa 75 cm. La prima strisciata è costituita da 43 immagini acquisite ponendo la camera frontalmente; la seconda è composta da 42 immagini che inquadrano la testa dall'alto verso il basso (Figure 5.11- 5.12). In totale sono stati acquisiti 85 fotogrammi. La camera adoperata è una compatta della Kodak, modello Easyshare C315 con sensore CCD di 2600 pixel x 1944 pixel e una dimensione del pixel di 2,15 μm . La distanza focale utilizzata è di 6 mm e il GSD medio delle immagini è pari a circa 0,28 mm.



Figura 5.11 – Schema delle prese



Dataset frontale

Dataset dall'alto

Figura 5.12 – Alcune delle foto delle due strisciate

Il modello di riferimento è stato generato con il *software* Photomodeler Scanner 2013 eseguendo il classico *workflow* fotogrammetrico (calibrazione della camera, orientamento delle immagini, calcolo nuvole di punti e del modello 3D). La procedura di orientamento fotogrammetrico ha fornito dei residui con uno s.q.m. di 0,48 pixel nelle coordinate immagine e di $\pm 0,62$ mm nelle coordinate oggetto. Per mettere in scala il modello fotogrammetrico sono state utilizzate quattro barre calibrate posizionate ai quattro lati della scultura ciascuna della lunghezza di 30 cm (indicate rispettivamente con un numero dall'uno al quattro); due barre, rispettivamente la 1 e la 3 posizionate in corrispondenza delle due facce, sono state effettivamente utilizzate per l'operazione di messa in scala, mentre le altre due sono state adoperate come controllo. Su queste ultime sono stati ottenuti residui pari rispettivamente a 0,17 mm e 0,05 mm. Il modello 3D è stato calcolato imponendo un passo di 1,5 mme utilizzando 20 coppie di immagini.

I modelli realizzati con i 3D *web-service* e con VisualSfm sono stati convertiti in un formato di scambio e gestiti con i *software* Geomagic e CloudCompare per eseguire le verifiche metriche. Anche per questi modelli è stata eseguita una verifica sulla correttezza della messa in scala attraverso la misura delle distanze delle barre calibrate non utilizzate. I residui sono risultati tutti al disotto del millimetro evidenziando quindi che i modelli sembrano essere stati scalati in maniera corretta (Tabella 5.13). Tale verifica non è stata effettuata per il modello generato con Arc3D poiché tre delle quattro barre sono state ricostruite solo parzialmente.

Barre	Residui [mm]		
	2	3	4
Photomodeler Scanner	0,17	-	0,05
Autodesk 123D Catch	0,46	0,70	0,60
Arc3D	-	-	-
My3DScanner	-0,20	-0,60	0,20
VisualSFM	-0,09	-	0,80

Tabella 5.13 – Residui sulle lunghezze delle barre calibrate non utilizzate per la messa in scala

Per facilitare la rappresentazione grafica del confronto con il modello di riferimento i modelli 3D sono stati rappresentati nei due lati principali denominati “Faccia A” e “Faccia B” (Figura 5.14)

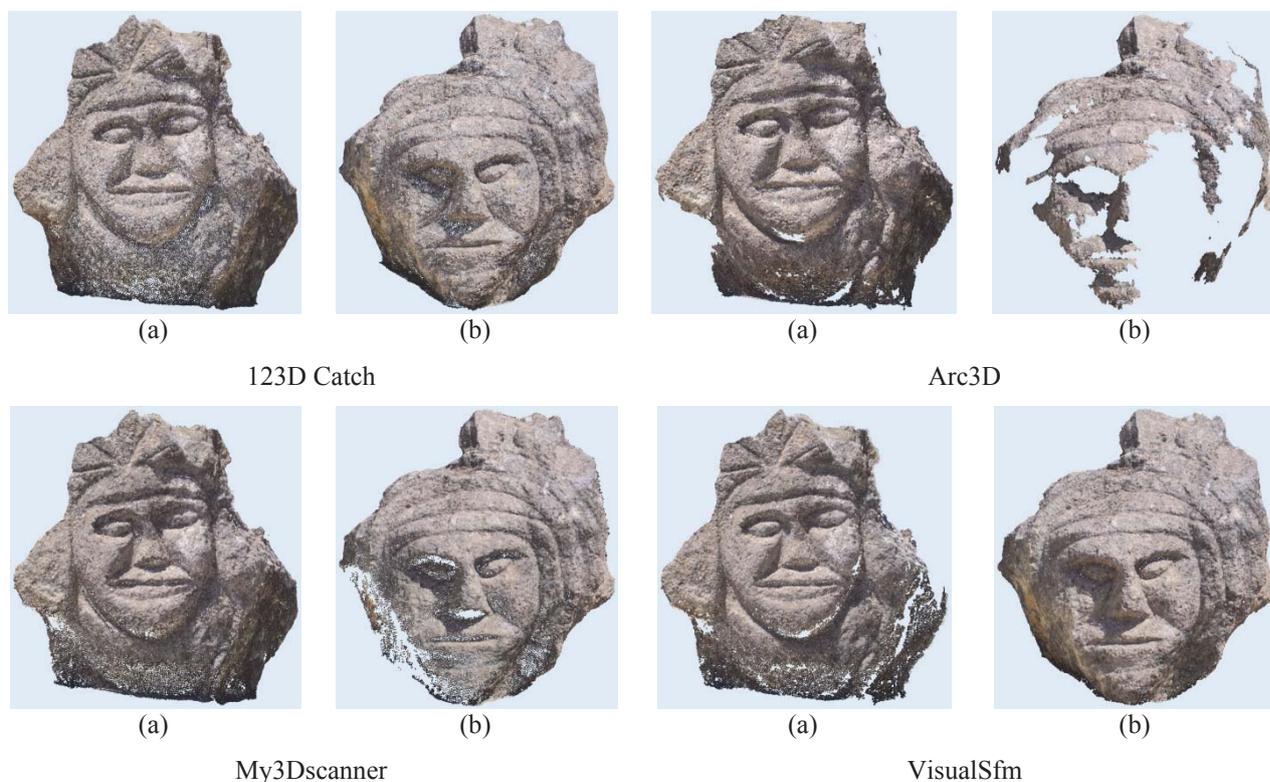


Figura 5.14 – Modelli a “nuvola di punti” generati con 123D Catch, Arc3D, My3DScanner e VisualSfm (a) Faccia A, (b) Faccia B

Una prima analisi sulla ricostruzione del modello è stata condotta valutando il numero dei punti 3D calcolati, il conseguente numero di triangoli e la percentuale di lacune delle rispettive superfici poligonali. Tale analisi evidenzia come non sempre ci sia una effettiva relazione tra il numero di punti calcolati e la ricostruzione 3D dell’oggetto. Per esempio, il modello ottenuto con Arc3D, pur essendo costituito dal maggior numero di punti e di triangoli, è quello che evidenzia le lacune più significative (Tabella 5.15).

	N. punti	N. triangoli	Lacune [%]
Photomodeler Scanner	957.072	1.918.178	-
Autodesk 123D Catch	228.454	456.306	1
Arc3D	1.721.166	3.364.809	28
My3DScanner	425.747	773.109	8
VisualSfm	311.612	618.657	12

Tabella 5.15 – Numero di punti e di triangoli e la percentuale delle lacune per il *dataset 2*

Successivamente sono stati eseguiti i confronti con il modello di Photomodeler Scanner. La Figura 5.16 mostra le mappe ottenute dove è possibile notare che in linea generale la distribuzione delle deviazioni è abbastanza soddisfacente poiché in tutti i modelli, ad eccezione del modello ottenuto con Arc3D, le deviazioni risultano essere per la maggior parte contenute nell'intervallo ± 2 mm; inoltre, le zone con valori di deviazione più elevati sono soprattutto quelle dove sono presenti dei sottosquadri, come le zone intorno agli occhi o vicino al naso e le zone più basse o quasi a contatto con il pavimento.

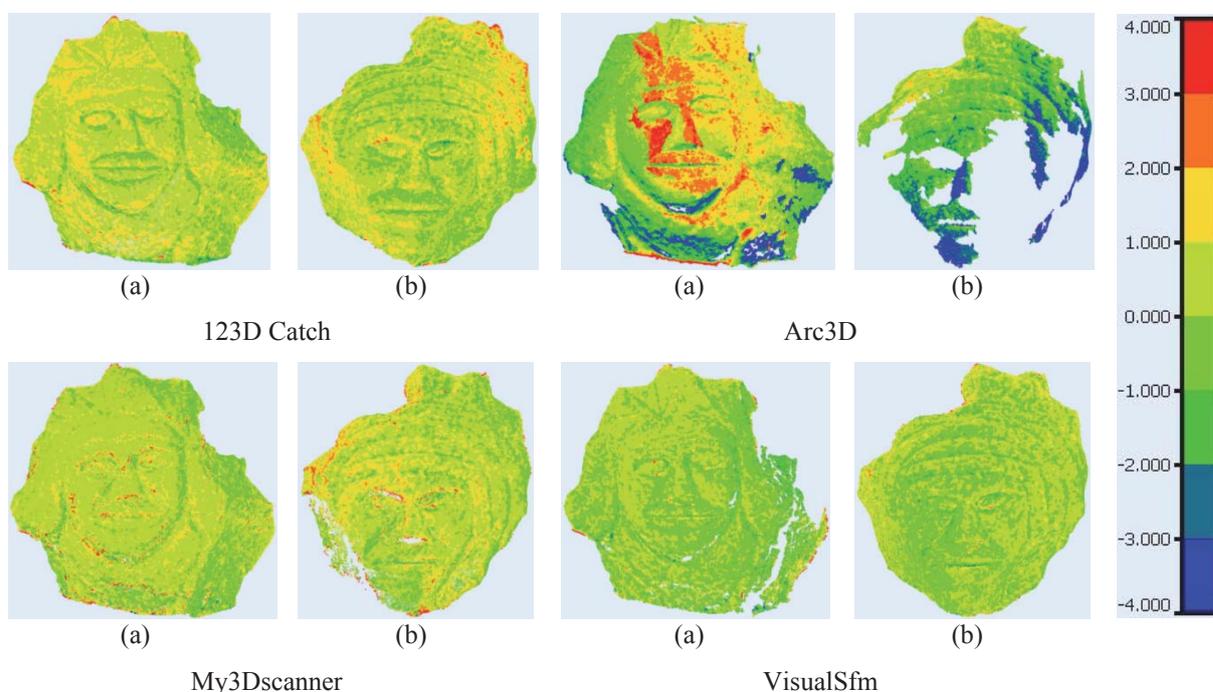


Figura 5.16 – Comparazioni 3D tra i modelli ottenuti e il modello fotogrammetrico: a sinistra la faccia indicata con la lettera A (a), a destra la faccia indicata con la lettera B (b)

I risultati peggiori sono stati ottenuti con Arc3D che, oltre a presentare una ricostruzione parziale, ha scarti superiori rispetto a tutti gli altri modelli e una distribuzione delle deviazioni anomala soprattutto nella “Faccia B” dove la maggior parte dei valori sono negativi.

Dai valori di media e di deviazione standard si nota come il modello più corretto dal punto di vista metrico è quello ottenuto con VisualSfm (Tabella 5.17); inoltre, i valori di media ottenuti con i 3D *web-service* sono risultati sempre tutti positivi e con valori anche abbastanza significativi (0,46 mm e 0,56 mm rispettivamente per 123D Catch e Arc3D). Tale condizione denota la presenza di un errore sistematico la cui causa è difficilmente individuabile (problemi nell’orientamento delle immagini, errori nell’operazione di messa in scala o problemi nell’allineamento tra i modelli 3D). I valori di deviazione standard si presentano comunque al di sotto del millimetro in tutti i modelli risultanti, tranne che per Arc3D, e quindi entro tolleranze per restituzioni grafiche ad una scala 1:2.

	Media [mm]	Dev. Standard [mm]
Autodesk 123D Catch	0,46	0,70
Arc3D	0,56	1,38
My3DScanner	0,15	0,66
VisualSfm	0,00	0,55

Tabella 5.17 – Valori statistici risultanti dalle comparazioni relative al *dataset 2*

5.4. Dataset 3: Arula del Tempio della Vittoria

Il terzo test ha come oggetto un reperto archeologico che rappresenta uno dei pezzi più importanti della collezione conservata presso il Museo Archeologico di Imera (Palermo). Si tratta di un'Arula, risalente al 480 a.C di origine greca facente parte del Tempio della Vittoria del sito archeologico di Imera. Il Tempio della Vittoria costituisce la parte più consistente dei ritrovamenti dell'area sacra dell'antica città. Esso simile ai templi agrigentini è stato incendiato e distrutto nel 409 a.C. ad opera dei Cartaginesi. L'Arula è una piccola ara che presenta un bassorilievo raffigurante un vecchio alato che trasporta il corpo esanime di un giovinetto probabilmente una rappresentazione del mito di Dedalo ed Icaro. Le sue dimensioni sono circa 33 cm x 33 cm x 15 cm. Il test è stato limitato soltanto alla ricostruzione della superficie del bassorilievo; complessivamente sono state scattate 8 foto frontali secondo una sequenza convergente da una distanza media di circa 1 m con una Canon EOS-1Ds Mark II

con sensore CMOS di 5006 pixel x 3337 pixel, una dimensione del pixel di 7,19 μm , dotata di un obiettivo a focale fissa da 50 mm (vedi Figure 5.18 - 5.19); le immagini presentano un GSD medio pari a circa 0,15 mm.

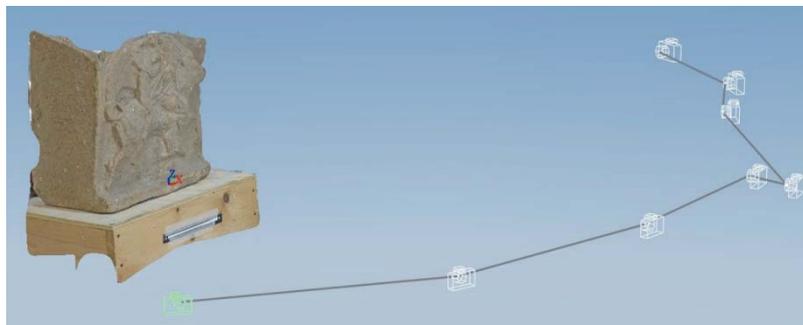


Figura 5.18 – Schema delle prese relative al *dataset* dell'Arula



Figura 5.19 – Alcune foto del *dataset* dell'Arula

Per l'esecuzione dei confronti sono stati utilizzati come modelli di riferimento sia un modello prodotto fotogrammetricamente sia un modello ottenuto attraverso scansione *laser*.

Il modello fotogrammetrico è stato ottenuto con il *software* Image Master. La procedura di orientamento fotogrammetrico ha fornito residui con uno s.q.m. di 0,10 pixel nelle coordinate immagine e di $\pm 0,10$ mm nelle coordinate oggetto. L'orientamento delle immagini è stato effettuato tramite l'utilizzo di *target* circolari del diametro di 3 mm disposti sia sulla superficie dell'Arula che sulla base in legno su cui la scultura è posta. Questi *target*, non presenti nel modello ottenuto tramite scansione *laser*, sono stati utilizzati in un secondo momento per ulteriori verifiche metriche dei modelli ottenuti tramite tecniche della CV. Il modello 3D è stato calcolato utilizzando due coppie di immagini ed impostando un passo di 1 mm.

La scansione *laser* del bassorilievo dell'Arula è stata eseguita con un *laser scanner* a triangolazione ottica, il Minolta Vivid 9i. La scansione è costituita da 26 “nuvole” di punti che presentano un'elevata percentuale di sovrapposizione. Tali scansioni sono state registrate e mosaicate con il *software* PET e, considerata l'elevata ridondanza di punti, sono state ricampionate per ottenere una superficie con un passo uniforme di 0,50 mm.

Una prima analisi sulla qualità della ricostruzione è stata condotta confrontando il numero dei punti 3D calcolati, il conseguente numero di triangoli e la percentuale di lacune delle rispettive superfici poligonali generate rispetto al modello ottenuto tramite scansione *laser*. Tale analisi evidenzia come le nuvole di punti ottenute con gli applicativi utilizzati presentano un numero di lacune molto basso (Figura 5.20); in particolare, anche in questo caso il modello generato con Arc3D è costituito da un numero di punti nettamente superiore rispetto a tutti gli altri strumenti utilizzati ma sempre con una percentuale di lacune più alta, anche se di poco (Tabella 5.21).



Figura 5.20 – Modelli a nuvola di punti relativi al *dataset 3*

	N. punti	N. triangoli	Lacune [%]
Laser Scanner	65.308	127.277	-
Autodesk 123D Catch	101.666	210.507	1
Arc3D	2.218.318	4.345.869	2
My3DScanner	102.700	212.947	1
VisualSfm	222.959	461.854	0

Tabella 5.21 – Numero dei punti e dei triangoli e percentuale delle lacune per il *dataset 3*

Per mettere in scala i modelli è stata utilizzata una barra calibrata delle dimensioni di circa 170 mm posta sulla base in legno su cui è poggiata l'Arula.

Una prima verifica metrica è stata condotta misurando in tutti i modelli alcune distanze tra i sei *target* disposti sulla superficie del bassorilievo (Figura 5.22) e confrontandoli con le stesse distanze misurate sul modello fotogrammetrico.



Figura 5.22 – Indicazione dei *target* fotografometrici utilizzati per le verifiche metriche

I *target* sono stati individuati per My3Dscanner e Arc3D direttamente sul modello 3D, per 123D Catch e VisualSfm attraverso la collimazione diretta sulle immagini rispettivamente con la piattaforma di gestione del 3D *web-service* e con il *software* SFM_Georef. Nella tabella 5.24 sono indicate le distanze misurate, le differenze calcolate e le deviazioni standard per ciascun strumento.

Dist.	Distanze [mm]					Scarti [mm]			
	Laser	123D Catch	My3Dscanner	Arc3D	VisualSfm	123D Catch	My3Dscanner	Arc3D	VisualSfm
1-4	218,35	218,85	218,30	218,24	218,58	0,50	-0,05	-0,11	0,23
2-3	245,72	245,32	246,10	245,68	246,01	-0,40	0,38	-0,04	0,29
1-6	365,10	364,70	365,30	364,83	365,47	-0,40	0,20	-0,27	0,37
2-5	387,61	388,47	387,05	387,79	387,32	0,86	-0,56	0,18	-0,29
3-6	273,92	273,96	274,52	273,96	274,20	0,04	0,60	0,04	0,28
4-5	298,14	298,12	297,99	298,51	297,80	-0,02	-0,14	0,37	-0,34
Dev. Stand. [mm]						0,51	0,42	0,23	0,33

Figura 5.24 – Confronto delle distanze tra *target* fotografometrici

Le deviazioni standard sono tutte al di sotto del mm evidenziando quindi che i modelli sono stati scalati in maniera corretta. Le distanze che hanno riportato gli scarti minori sono quelle misurate nel modello ottenuto con Arc3D (valore di deviazione standard pari a $\pm 0,23$ mm), mentre quelle che hanno riportato gli scarti maggiori sono quelle misurate nel modello ottenuto con 123D Catch (valore di deviazione standard pari a $\pm 0,51$ mm).

Dalle rappresentazioni grafiche delle comparazioni metriche tra i modelli generati dagli strumenti indagati e i modelli fotografometrico e *laser scanner* (Figura 5.25) si nota subito come le deviazioni sono molto più uniformi nel confronto con il modello fotografometrico rispetto a quello con il modello *laser scanner*; ciò è dovuto sia al leggero effetto di *smoothing*, tipico dei modelli ottenuti attraverso tecniche *image-based*, che ai maggiori dettagli della superficie mantenuti dal modello *laser*. Inoltre, in entrambi i confronti i valori di deviazioni più grandi si trovano per la maggior parte in corrispondenza dei bordi dell'Arula.

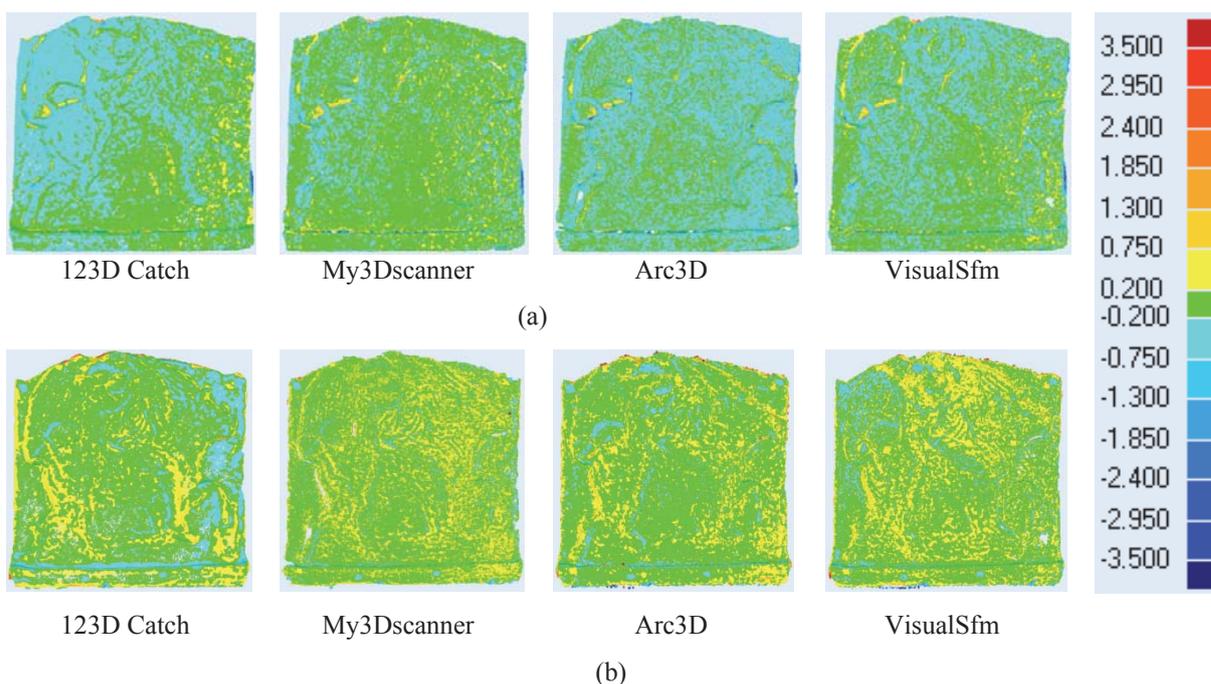


Figura 5.25 – Rappresentazione grafica dei confronti col modello fotogrammetrico (a) e col modello *laser* (b)

I valori di media e deviazione standard (Tabelle 5.26) sono tutti al di sotto del mm con valori di media al di sotto del decimo di millimetro ad eccezione della media risultante dal confronto tra il modello fotogrammetrico e il modello di 123D Catch che è pari a 0,17 mm. Le deviazioni standard rientrano nella tolleranza per restituzioni grafiche alla scala 1:2 e sia quelle risultanti dal confronto con il modello fotogrammetrico che quelle risultanti dal confronto con il modello *laser* sono inferiori al passo di campionamento rispettivamente del modello di Image Master (1 mm) e della nuvola di punti della scansione *laser* (0,50 mm).

	Confronto col modello fotogrammetrico		Confronto col modello <i>laser</i>	
	Media [mm]	Dev. Standard [mm]	Media [mm]	Dev. Standard [mm]
Autodesk 123D Catch	-0,17	0,29	0,05	0,33
Arc3D	-0,05	0,28	0,03	0,32
My3DScanner	-0,01	0,29	0,03	0,29
VisualSfm	-0,05	0,31	0,00	0,28

Tabella 5.26 – Valori statistici risultanti dalle comparazioni relative al *dataset 3* con il modello fotogrammetrico e con il modello *laser*

Oltre all'analisi degli scarti sull'intera superficie dell'Arula un'ulteriore verifica è stata condotta estrapolando due sezioni (Figura 5.27) e analizzando i rispettivi scarti rispetto alle stesse sezioni estratte dal modello *laser* utilizzato come riferimento (Figura 5.28).

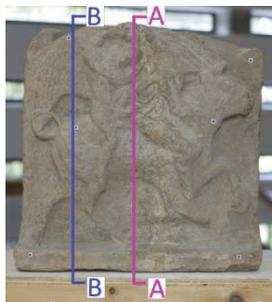


Figura 5.27 – Individuazione delle sezioni estratte

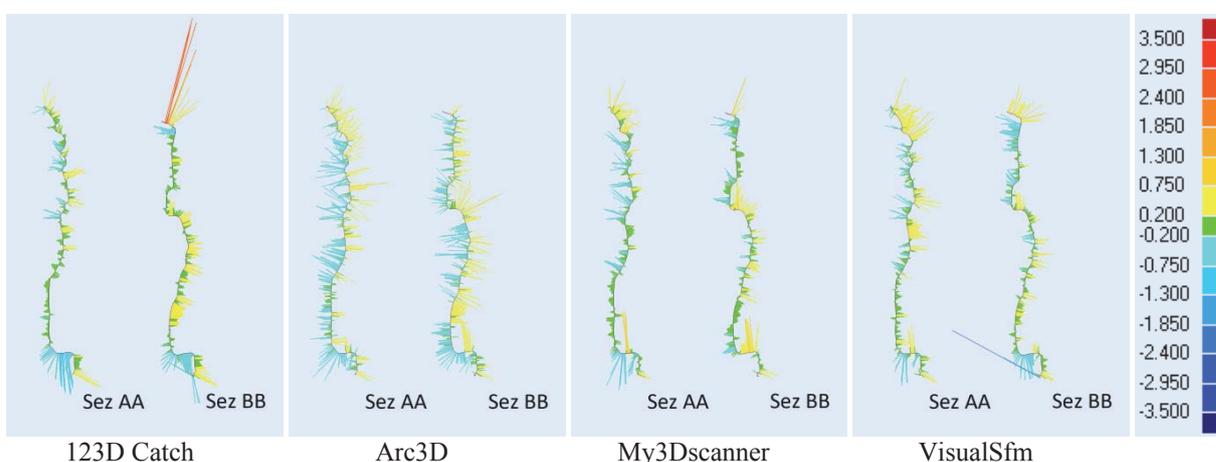


Figura 5.28 – Comparazioni 2D tra i modelli generati e il modello *laser*

Nella sezione AA i valori di deviazione maggiori sono presenti nelle zone sporgenti ed in corrispondenza dei cambiamenti di curvatura; la sezione che presenta scarti maggiori è quella risultante dalla comparazione con Arc3D. Nella sezione BB i valori di deviazione maggiori sono presenti in corrispondenza dei bordi. In particolare la sezione risultante dalla comparazione con 123D Catch presenta valori anomali nelle aree di bordo della parte sommitale e si denota una prevalenza di scarti positivi soprattutto nella parte centrale della sezione; anche in questo caso la sezione risultante dalla comparazione con Arc3D presenta maggiori deviazioni distribuite uniformemente in tutta la sezione.

5.5. Dataset 4: Fontana dei Delfini

L'oggetto del quarto test è costituito dai tre *dataset* relativi alla Fontana dei Delfini che si trova nel cortile del castello della città di Ettlingen, la Fontana ha dimensioni pari a 4,90 m x 5,40 m x 2,60 m.

Tali *dataset*, reperibili dal sito <http://cvlabwww.epfl.ch/data/multiview/denseMVS.html>, sono stati messi a disposizione per eventuali verifiche metriche su procedure di *dense multi-view stereo matching* (Strecha *et al.*, 2008). Questo *dataset* è stato scelto anche per valutare l'affidabilità, la correttezza e la precisione degli strumenti automatici della CV per la ricostruzione 3D di oggetti di medie dimensioni all'aumentare del numero di immagini da elaborare. Infatti i tre *dataset* sono costituiti rispettivamente da 6, 11 e 25 immagini che per comodità sono stati indicati come 4a, 4b e 4c. La camera utilizzata è una Canon EOS D60 con un sensore CMOS di 3074 pixel x 2049 pixel, una dimensione del pixel di 7,38 μm . I *dataset* riprendono la Fontana secondo gli schemi visibili nella Figura 5.29.

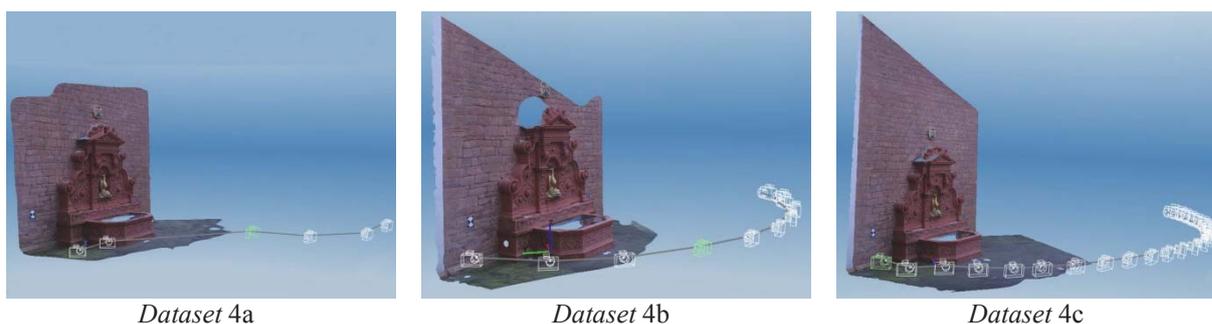
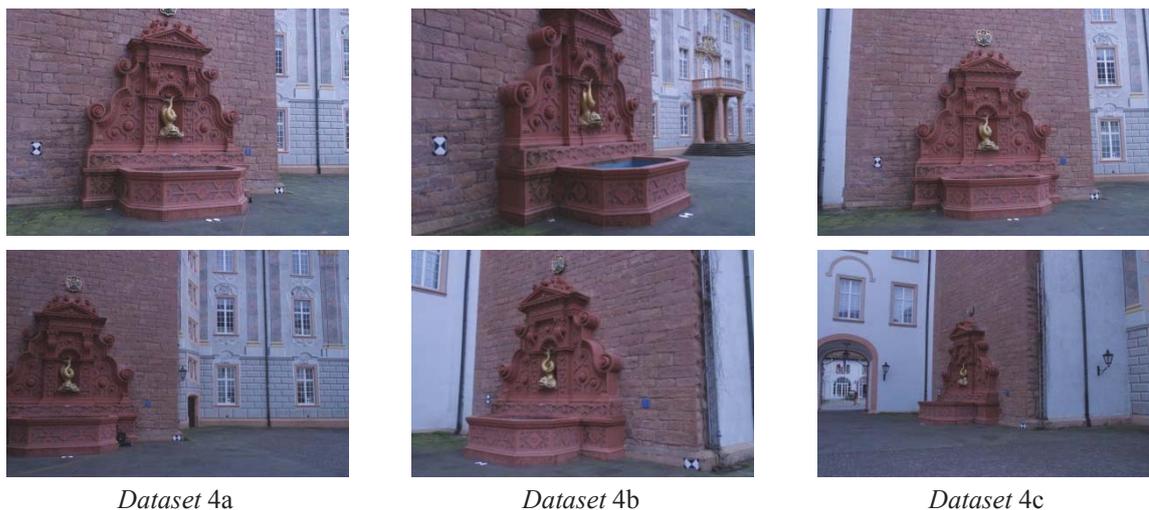


Figura 5.29 – Schema delle prese dei dataset 4

Si evidenzia come il secondo *dataset* presenta una distanza di presa costante, mentre il primo ed il terzo *dataset* sono costituiti da immagini con variazioni di scala anche piuttosto evidenti in particolar modo nel terzo *dataset* (Figura 5.30). In generale le immagini presentano un GSD medio rispettivamente di 3,00 mm per il *dataset* 4a, 2,60 mm per il *dataset* 4b e 3,35 mm per il *dataset* 4c. Per l'esecuzione dei confronti è stato utilizzato come modello di riferimento un modello ottenuto attraverso scansione *laser* con un passo di circa 5 mm disponibile dallo stesso sito internet.

Figura 5.30 – Alcune delle foto dei *dataset 4*

Le immagini sono state processate con tutti gli strumenti indagati ad eccezione di Arc3D che non è riuscito a ricostruire un modello sufficientemente completo per effettuare le comparazioni. Come si vede dalle nuvole di punti generate (Figura 5.31) e dal numero di punti e di triangoli delle ricostruzioni 3D di ciascun strumento (Tabella 5.32) i modelli a nuvola di punti di 123D Catch per tutti e tre i *dataset* presentano meno lacune (rispettivamente l'11 %, il 9 % e l'1%) rispetto ai restanti modelli nonostante il numero dei punti e dei triangoli risulti inferiore. Le ricostruzioni 3D del primo *dataset* generate da My3Dscanner e VisualSfm si presentano le più incomplete con evidenti lacune nelle parti sommitali delle volute e nella porzione destra della fontana. In particolare la lacuna presente nella porzione in basso a destra è dovuta alla presenza di un elemento estraneo alla fontana che è stato restituito soltanto da 123D Catch. Infine si nota come il numero di punti e di triangoli relativi alle ricostruzioni 3D del secondo *dataset* risultano maggiori rispetto alle ricostruzioni del terzo *dataset* nonostante la percentuale delle lacune si riduca all'aumentare delle immagini.

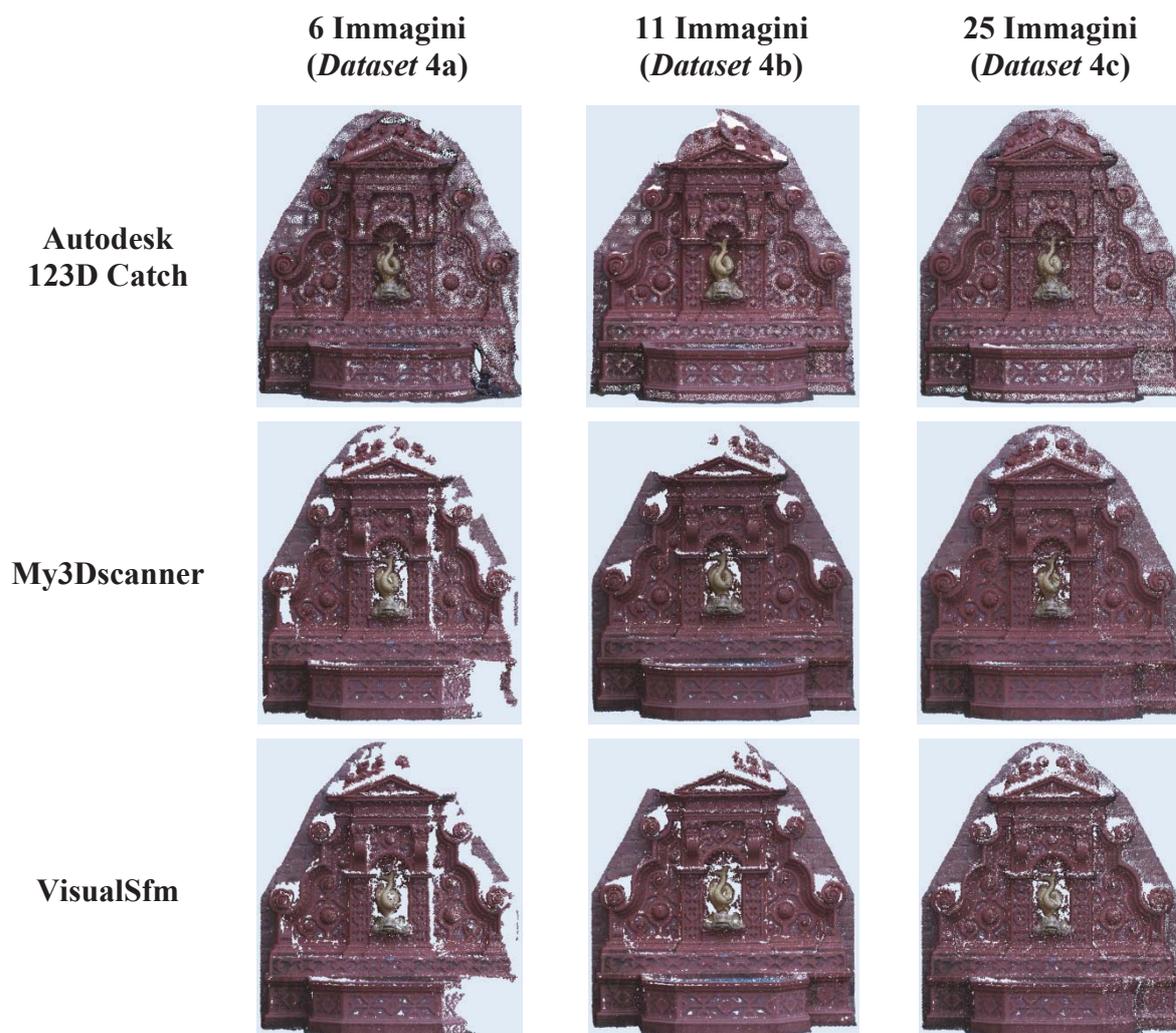


Figura 5.31 – Modelli a nuvola di punti in funzione del numero di immagini impiegate

		6 Immagini (Dataset 4a)	11 Immagini (Dataset 4b)	25 Immagini (Dataset 4c)
Autodesk 123D Catch	N. punti	89.226	145.190	112.394
	N. triangoli	170.774	277.887	214.543
	Lacune [%]	11	9	1
My3DScanner	N. punti	96.270	204.471	190.037
	N. triangoli	186.622	391.387	370.061
	Lacune [%]	38	16	10
VisualSfm	N. punti	99.593	187.211	116.404
	N. triangoli	194.474	360.121	229.522
	Lacune [%]	42	23	18

Tabella 5.32 – Numero dei punti e dei triangoli e percentuale delle lacune per i tre *dataset*

Per una verifica della corretta messa in scala dei modelli e della loro accuratezza metrica sono state misurate, sui *dataset* 4b e 4c, 6 distanze tra punti caratteristici ben visibili su tutti i modelli che sono state confrontate con le stesse distanze prese sul modello *laser* (Figura 5.33). I risultati sono visibili nelle tabelle 5.34 e 5.35. La verifica non è stata effettuata per il *dataset* 4a poiché i modelli 3D presentano lacune proprio in corrispondenza dei punti individuati.



Figura 5.33 – Indicazione dei punti caratteristici che individuano le distanze misurate

Dist.	Distanze [mm]				Scarti [mm]		
	Laser	123D Catch	My3Dscanner	VisualSfm	123D Catch	My3Dscanner	VisualSfm
AB	4882,56	4877,70	4882,06	4886,34	-4,86	-0,50	3,78
CD	3208,79	3213,00	3209,51	3209,74	4,21	0,72	0,95
EF	3629,65	3629,50	3629,10	3628,54	-0,15	-0,55	-1,11
GH	3760,83	3757,10	3757,02	3756,18	-3,73	-3,81	-4,65
IL	1821,24	1823,70	1825,91	1821,82	2,46	4,67	0,58
MN	1916,98	1914,40	1915,29	1915,40	-2,58	-1,69	-1,58
Dev. Stand. [mm]					3,37	2,59	2,61

Tabella 5.34 – Confronto delle distanze tra punti caratteristici del *dataset* 4b

Dist.	Distanze [mm]				Scarti [mm]		
	Laser	123D Catch	My3Dscanner	VisualSfm	123D Catch	My3Dscanner	VisualSfm
AB	4882,56	4876,70	4883,61	4881,84	-5,86	1,05	-0,72
CD	3208,79	3205,80	3207,44	3207,65	2,99	-1,64	-0,21
EF	3629,65	3634,30	3633,57	3632,45	-4,65	0,73	1,12
GH	3760,83	3757,10	3760,71	3763,32	3,73	-3,61	-2,61
IL	1821,24	1822,50	1819,05	1820,93	-1,26	3,45	-1,88
MN	1916,98	1915,40	1919,55	1916,56	1,58	-4,15	2,99
Dev. Stand. [mm]					3,72	2,78	1,88

Tabella 5.35 – Confronto delle distanze tra punti caratteristici del *dataset 4c*

Gli scarti presentano valori positivi e negativi in egual misura e le deviazioni standard sono tutte dell'ordine dei mm evidenziando la correttezza della messa in scala. In entrambi i *dataset* le distanze che hanno riportato i valori di deviazione standard maggiori sono quelle misurate nei modelli di 123D Catch ($\pm 3,37$ mm per il *dataset 4b* e $\pm 3,72$ mm per il *dataset 4c*). Invece le distanze che hanno riportato deviazioni standard minori sono relative al *dataset 4b* per il modello ottenuto con My3Dscanner ($\pm 2,59$ mm) e al *dataset 4c* per il modello ottenuto con VisualSfm ($\pm 1,88$ mm).

Dalla rappresentazione grafica della comparazione dei modelli 3D di tutti e tre i *dataset* si vede subito come gli scarti maggiori sono presenti nelle aree poco visibili dalle foto come la nicchia centrale o le aree con presenza di sottosquadri come le porzioni incavate delle spire delle volute (Figura 5.36). I risultati migliori sono stati ottenuti dai confronti con le ricostruzioni 3D generate da VisualSfm, infatti come si vede dalle rappresentazioni grafiche, le distribuzioni delle deviazioni sono più uniformi e la maggior parte degli scarti è compresa tra ± 10 mm; mentre si evidenzia qualche problema nella distribuzione delle deviazioni nei modelli risultanti dal confronto con My3Dscanner. In particolare, nel modello risultante dal confronto relativo al *dataset 4a* si vede come vi è una distribuzione delle deviazioni non uniforme con una concentrazione di scarti positivi in corrispondenza della vasca.

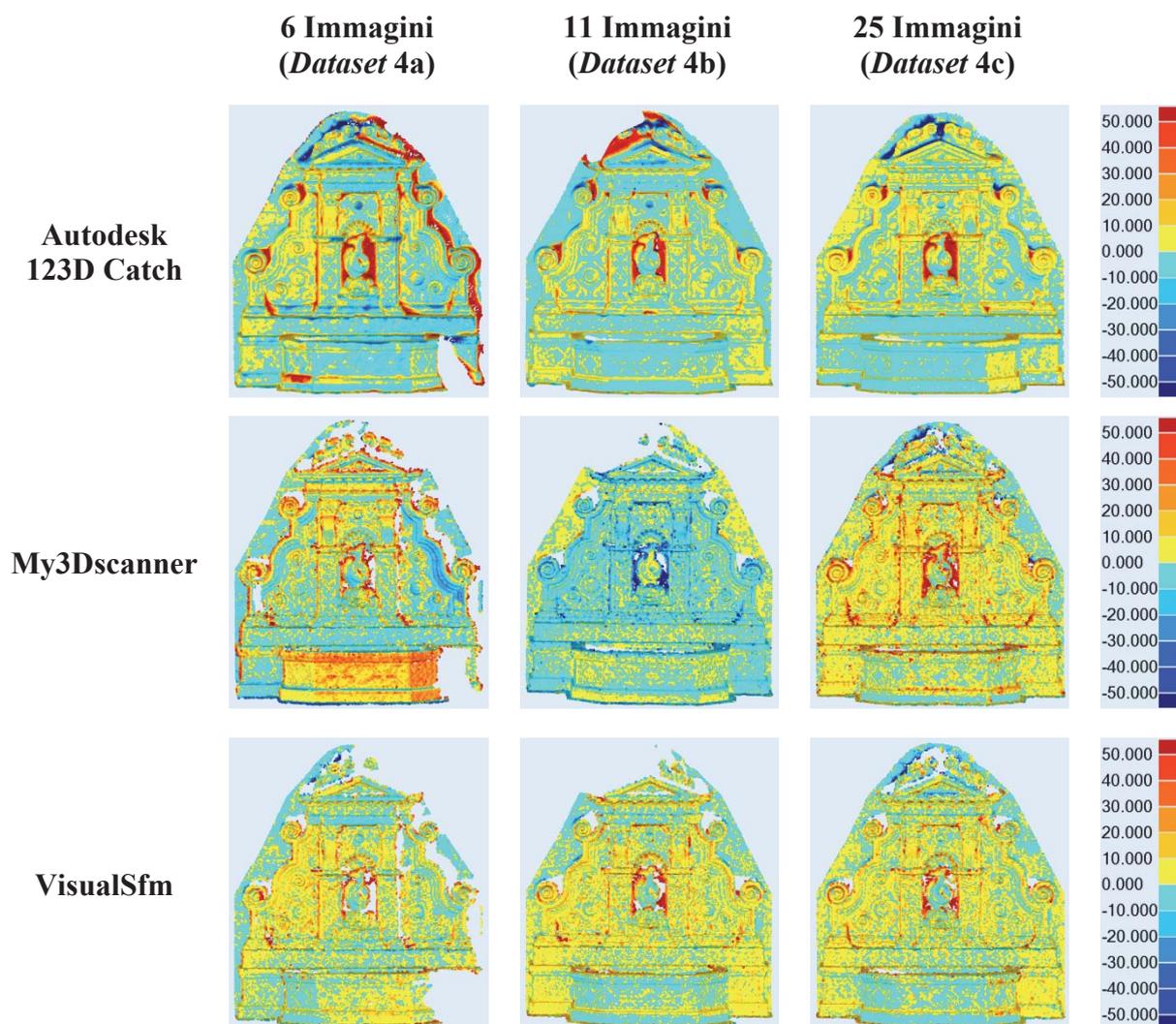


Figura 5.36 – Rappresentazione grafica del confronto con il modello *laser* relativo ai *dataset* della Fontana

Analizzando i valori di media e di deviazione standard si vede come in linea generale il *dataset* che è risultato migliore dal punto di vista metrico per tutti e tre gli strumenti indagati è il secondo con valori di media compresi tra 0,51 mm ottenuto con 123D Catch e 0,66 mm ottenuto con VisualSfm e con valori di deviazione standard compresi tra $\pm 9,06$ mm di My3Dscanner e $\pm 14,06$ mm di 123D Catch.

Al contrario il *dataset* che si presenta meno corretto dal punto di vista metrico è il primo con valori di media compresi tra 0,68 mm ottenuto con VisualSfm e 2,69 mm ottenuto con 123D Catch e con valori di deviazione standard compresi tra $\pm 10,06$ mm di VisualSfm e $\pm 21,04$ mm di 123D Catch.

Complessivamente i modelli che presentano livelli di accuratezza metrica inferiore sono quelli ottenuti con 123D Catch, mentre quelli che si presentano metricamente più corretti sono quelli generati da VisualSfm.

Le deviazioni standard sono dell'ordine del centimetro e quindi permettono eventuali restituzioni grafiche alla scala 1:50, ad eccezione del modello generato con 123D Catch relativo al *dataset* 4a (Tabella 5.37).

		6 Immagini (Dataset 4a)	11 Immagini (Dataset 4b)	25 Immagini (Dataset 4c)
Autodesk 123D Catch	Media [mm]	2,69	0,51	1,94
	Dev. Standard [mm]	21,04	14,07	18,77
My3DScanner	Media [mm]	0,91	-0,55	0,89
	Dev. Standard [mm]	15,42	9,06	11,93
VisualSfm	Media [mm]	0,68	0,66	0,70
	Dev. Standard [mm]	10,06	9,35	9,89

Tabella 5.37 – Valori statistici risultanti dalle comparazioni relative al *dataset* 4a, 4b e 4c con il modello *laser*

6. Casi studio: prese aeree di prossimità'

In questo capitolo vengono presentati dei casi studio che riguardano il rilievo con prese aeree di prossimità di aree archeologiche con estensione, tipologia, forma e geometria differenti. I *dataset* presentano sequenze di immagini acquisite da diverse camere fotografiche e da differenti piattaforme. In particolare quest'ultimo aspetto ha determinato fortemente la tipologia e la geometria delle prese; così i primi tre *dataset*, acquisiti da un pallone aereostatico, sono costituiti da blocchi fotogrammetrici non convenzionali con geometrie molto irregolari, mentre gli ultimi due, acquisiti da un multirottore, sono composti da blocchi fotogrammetrici tradizionali con strisciate regolari e con ricoprimenti costanti sia longitudinali che trasversali.

Il processamento delle immagini è stato eseguito utilizzando le stesse tecniche e gli stessi strumenti già impiegati nei casi studio terrestri, *3D web-service*, *software open source* e *low-cost*.

Anche in questi casi studio ci si sofferma sulla ricostruzione 3D delle aree archeologiche utilizzando un approccio SfM. In questo modo sono state valutate le prestazioni e le potenzialità delle diverse applicazioni relativamente sia all'elaborazione di immagini non convenzionali e non acquisite per scopi propriamente fotogrammetrici come nel caso dei *dataset* acquisiti da pallone, sia alla qualità ed accuratezza metrica degli elaborati finali all'aumentare del numero delle immagini.

Lo scopo è quello di valutare se strumenti della SfM possono sostituire le tecniche *laser scanning* e fotogrammetriche tradizionali anche nell'ambito di applicazioni del rilievo aereo di prossimità. I confronti effettuati sono di tipo qualitativo e metrico.

L'utilizzo di piattaforme aeree di prossimità negli ultimi anni si sta diffondendo rapidamente soprattutto nel settore dei Beni Culturali ed in particolare nel rilievo archeologico (Pueschelet. *al.*, 2008; Zhang, 2008; Chiabrando&Spanò, 2009; Gomez-Lahoz&Gonzalez-Aguilera, 2009; Chiabrando *et al.*, 2011; Seitz&Altenbach, 2011); una delle principali applicazioni in questo ambito è sicuramente quella per la realizzazione di modelli digitali del

terreno (DTM o DSM) e di ortofoto con elevata accuratezza e risoluzione geometrica. Il processamento delle immagini è fortemente influenzato dalla notevole irregolarità dei blocchi fotogrammetrici e dall'elevato numero di immagini necessarie per una completa copertura delle aree di studio. Diverse sperimentazioni sono state effettuate per quest'ultimo aspetto, mettendo a confronto *software* derivanti dalla CV e classici programmi fotogrammetrici (Neitzel 2011; Verhoeven, 2011; Lo Brutto *et al.*, 2012). Infatti, le tecniche che utilizzano la SfM sono utili nel caso in cui le immagini vengono acquisite da piattaforme non facilmente controllabili che non offrono la possibilità di eseguire voli programmati o quando il numero di immagini da elaborare è elevato, come nella maggior parte dei *dataset* aerei di prossimità. Inoltre, la possibilità di avere i dati 3D in tempi molto più rapidi rispetto ai tempi lunghi delle tradizionali tecniche fotogrammetriche e *laser scanning* è un grande vantaggio durante operazioni di scavo. In questo modo infatti la documentazione può avvenire anche quotidianamente offrendo la possibilità agli archeologi di effettuare in maniera veloce i necessari studi e le relative interpretazioni in particolare degli strati che devono essere eliminati.

6.1. Metodologia adottata

Come visto per gli oggetti di piccole e medie dimensioni l'operatività dei 3D *web-service* sicuramente risulta inferiore rispetto a quella dei *software open source* e *low-cost* analizzati (VisualSfm e PhotoScan). Per questo motivo all'aumentare della dimensione degli oggetti indagati si è deciso di utilizzare soltanto 123D Catch che, oltre ad essere l'unico a permettere di scalare i modelli, si è dimostrato più prestante all'aumentare sia del numero delle immagini da elaborare che della dimensione dell'oggetto inquadrato. Quindi gli applicativi utilizzati per questi casi studio sono VisualSfm, PhotoScan e 123D Catch

Il lavoro si suddivide in tre fasi: acquisizione e processamento delle immagini, esportazione, georeferenziazione e messa in scala dei modelli 3D ottenuti, verifica della precisione metrica e della qualità dei prodotti finali. Le immagini sono state processate seguendo le procedure previste dai vari strumenti impiegati.

I modelli 3D ottenuti con VisualSfm e con PhotoScan sono stati scalati e georeferenziati attraverso collimazione sulle immagini dei punti di appoggio e inserimento delle relative coordinate calcolate tramite tecniche GNSS, nel primo caso attraverso l'uso del *software open source* SFM_Georef, mentre nel secondo caso attraverso le funzioni presenti all'interno di PhotoScan. In questo modo la trasformazione che è stata applicata ai modelli 3D è una rototraslazione nello spazio con variazione di scala, senza imporre nessun vincolo metrico per

l'orientamento come può avvenire in uno dei procedimenti del *bundle adjustment*, quindi le superfici 3D sono frutto esclusivamente dell'orientamento automatico.

I modelli ottenuti con 123D Catch sono stati scalati all'interno della piattaforma di gestione del 3D *web-service* inserendo una distanza tra due punti d'appoggio e successivamente sono stati allineati ai modelli già georeferenziati ottenuti con i primi due *software* mediante algoritmi ICP. In questo modo tutti i modelli 3D presentano lo stesso sistema di riferimento. Le ricostruzioni 3D generate con VisualSfm sono state esportate nel formato previsto dal *software* (sottoforma di nuvola di punti) e successivamente, per avere dei formati analoghi ai prodotti finali degli altri due *software* utilizzati, sono stati trasformati in superfici triangolate (*mesh*).

Non disponendo per questi *dataset* di modelli 3D di riferimento, le verifiche della qualità dei prodotti finali sono state condotte attraverso valutazioni della densità dei modelli 3D generati, confronti visivi e attraverso analisi di alcune sezioni.

Una prima analisi dell'accuratezza metrica è stata eseguita attraverso delle verifiche sulle procedure di georeferenziazione per PhotoScan e VisualSfm e di messa in scala per 123D Catch. Un'ulteriore verifica dell'accuratezza metrica è stata condotta, per quei *dataset* di cui si disponeva di dati metrici reali, attraverso il confronto in quota di alcuni punti misurati topograficamente tramite tecniche GNSS. In questo modo sono state evidenziate alcune problematiche relative alla correttezza metrica dei prodotti finali, in particolare sono state riscontrate delle deformazioni in alcuni modelli.

6.2. Un caso di prese aeree da pallone: Elaiussa Sebaste

La ricostruzione 3D da immagini aeree riveste un ruolo fondamentale nel rilievo di scavi archeologici che si estendono su aree territoriali di estensione variabile. In particolare in letteratura esistono molte applicazioni di acquisizione di immagini da piattaforme aeree a bassa quota che utilizzano palloni, aquiloni, dirigibili (vedi capitolo 2 paragrafo 2.9.). I sistemi solitamente sono costituiti da un aerostato, vincolato e manovrato da terra mediante dei cavi di ritenuta e un sistema radio controllato per l'acquisizione delle immagini (Angelini *et al.*, 2007). Il problema di queste piattaforme è la stabilità al vento in particolare la presenza di vento anche debole rende l'acquisizione molto problematica. Inoltre spesso il sistema di controllo da terra non assicura l'acquisizione di prese che seguono le regole convenzionali fotogrammetriche. Per questo motivo spesso risulta conveniente eseguire il processamento delle immagini provenienti da queste piattaforme tramite programmi che impiegano la SfM (Verhoeven *et al.*, 2012).

La campagna di rilievo svolta in Turchia presso il sito di Elaiussa Sebaste, città portuale vicino ad Ayas offre un interessante caso studio. Tale campagna è stata realizzata nell'ambito del progetto PRIN 2009 in collaborazione con il Dipartimento di Scienze Storiche e Antropologiche dell'Antichità dell'Università di Roma; le immagini utilizzate sono state acquisite da pallone nel 2010 con una geometria di presa molto irregolare e riprendono tre importanti aree archeologiche: il Tempio romano, il Quartiere residenziale e il Palazzo bizantino. Durante la campagna di rilievo sono state eseguite anche diverse misure topografiche per la realizzazione di reti di inquadramento e per il rilievo dei punti di appoggio. I rilievi topografici sono stati eseguiti sia con stazione totale che con tecniche GNSS.

6.2.1. Descrizione delle aree di studio

La città di Elaiussa Sebaste era un grande centro portuale della Cilicia Tracheia e si trova a circa 60 km da Mersin lungo la costa sud-orientale della Turchia. Elaiussa uno dei principali porti dell'Anatolia si sviluppò in età augustea mantenendo la sua importanza commerciale fino all'età bizantina. Le emergenze architettoniche venute alla luce finora sono: grandi complessi architettonici pubblici di età romana (teatro, agora, terme, tempio, necropoli) e di età protobizantina (palazzo, basiliche cristiane, acquedotti) e settori dei quartieri abitativi e commerciali.

I *dataset* indagati riprendono tre aree aventi caratteristiche differenti come forma e dimensione e variazioni altimetriche.

Il primo *dataset* riprende l'unico Tempio rinvenuto finora di epoca romana, di cui risulta sconosciuta la divinità a cui era dedicato. Il Tempio, grazie alla sua posizione, domina tutto il promontorio che delimita a sud l'area urbana. L'edificio, ben visibile sia da mare che da terra, è stato edificato nel I secolo d.C. e ha subito modifiche all'inizio del V sec. d.C. a seguito della trasformazione della sua destinazione d'uso: da Tempio pagano a luogo di culto cristiano. Questa trasformazione ha comportato il riutilizzo di strutture già esistenti con opere di riadattamento che hanno alterato la planimetria originaria del complesso, quali lo spostamento degli accessi e il frazionamento degli spazi interni. Il Tempio è frutto dell'intervento in epoca cristiana ma anche dei saccheggi e spoliazioni, antiche e recenti. L'impianto è comunque andato distrutto probabilmente a causa di un terremoto di ampie proporzioni, avvenuto dopo il VII secolo d.C.

Il secondo *dataset* riprende il Quartiere residenziale che aveva funzione abitativa ed artigianale. Il Quartiere, organizzato su terrazze digradanti verso il mare, è situato nel settore

sud-orientale del promontorio ed ha origine nella tarda età ellenistica. Il suo sviluppo continuò nel periodo bizantino con la realizzazione di un impianto di produzione industriale databile nelle fasi più tarde. Le abitazioni, il cui ingresso avveniva tramite strette vie costituite da rampe e gradinate, sono caratterizzate dalla disposizione di diversi ambienti su più piani che si sviluppano intorno a spazi aperti lastricati e porticati. L'area per la produzione industriale si trova nella terrazza inferiore dove è stata rinvenuta una fornace per la produzione di anfore (in uso fino all'inizio del VII secolo d.C.), e alcune strutture connesse a questa attività, come una cisterna integralmente scavata nella roccia al cui interno sono state rinvenute numerose anfore in buono stato di conservazione.

Il terzo *dataset* riprende il Palazzo bizantino situato nell'area compresa tra gli antichi due porti di Elaiussa. Quest'area ha subito diverse modifiche nel corso degli anni con una occupazione continua dalla fondazione della città fino al suo abbandono. Un imponente muro in opera poligonale fu costruito per fortificare l'area tra il II e il I secolo a.C. con la costruzione successiva di edifici per lo stoccaggio delle merci. In età imperiale la struttura è stata monumentalizzata con la costruzione nel settore meridionale di un muro in opera quadrata e di un portico colonnato affacciato direttamente sul mare lungo la fronte del porto nord. Intorno dalla metà del V secolo d.C. fu costruito, nel settore occidentale del promontorio, un grandioso complesso architettonico destinato al potere civile e militare della città. Il complesso è caratterizzato dalla presenza di un ampio portico circolare su due piani che fungeva da collegamento tra le due ali dell'edificio, il Palazzo ospitava, tra l'altro, anche un'aula absidata ed una cappella privata, entrambe riccamente decorate. Gran parte delle strutture esistenti furono obliterate o riutilizzate durante la costruzione del nuovo complesso architettonico; la via colonnata, per esempio, venne chiusa parzialmente e trasformata nel vestibolo dell'edificio bizantino. Il Palazzo fu distrutto nella prima metà del VI secolo d.C. e spoliato in maniera sistematica. Nell'ultima fase di vita della città, il cui definitivo abbandono si data intorno alla metà del VII secolo d.C., il Palazzo fu parzialmente trasformato in area produttiva.

6.2.2. Descrizione dei *dataset*

I *dataset*, come detto nell'introduzione, non rispecchiano i tradizionali blocchi fotogrammetrici aerei. Le immagini sono caratterizzate da scale, punti di vista e geometrie di prese fortemente irregolari, che determinano notevoli variazioni prospettiche (Figura 6.1).



Figura 6.1 – Esempi delle foto dei tre *dataset*: (a) Tempio romano (b) Quartiere residenziale (c) Palazzo bizantino

Nella Figura 6.2 sono visibili le geometrie delle prese relative alle tre aree archeologiche in cui risulta evidente come la maggior parte dei centri presa sono concentrati nelle stesse aree non garantendo una copertura omogenea degli oggetti del rilievo.

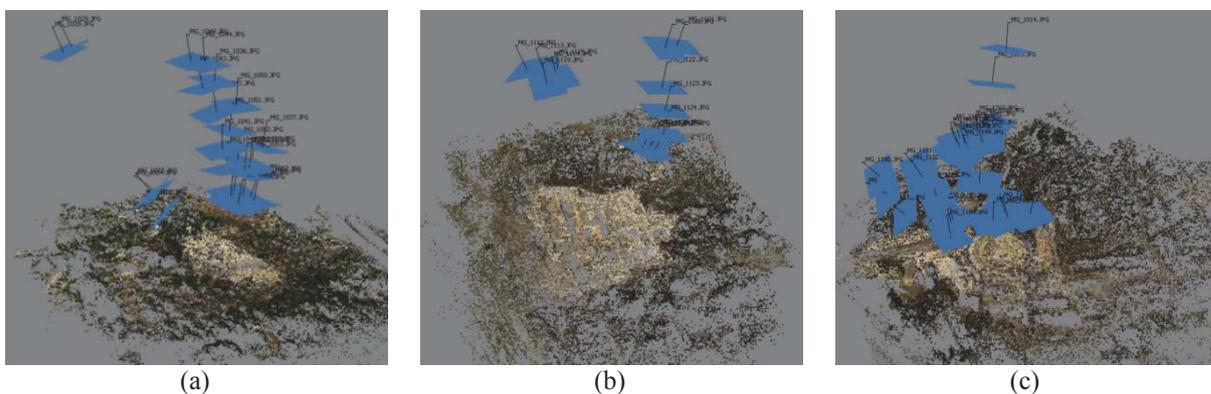


Figura 6.2 – Schema delle prese relative ai tre *dataset*: (a) Tempio romano (b) Quartiere residenziale (c) Palazzo bizantino

Nella tabella 6.3 sono riassunti le principali caratteristiche dei tre *dataset*, con l'estensione delle aree ricoperte dalle immagini, la quota media relativa di volo, il numero delle immagini e il GSD medio. La camera utilizzata è una Canon EOS 450D da 12 Megapixel con sensore CMOS (4278 pixel x 2852 pixel). I parametri della camera impostati per l'acquisizione non sono noti, come il tipo di messa a fuoco o la distanza focale utilizzata, le uniche informazioni disponibili sono quelle ricavabili dagli EXIF file.

Dataset	Estensione [ha]	Quota relativa di volo [m]	N. Immagini	GSD [cm/pix]
Tempio romano	1,70	69	26	2,3
Quartiere residenziale	0,70	53	14	1,8
Palazzo bizantino	1,10	70	31	2,2

Tabella 6.3 – Principali caratteristiche dei tre *dataset*

6.2.3. Rilievo dei punti di appoggio

Per la scelta dei punti d'appoggio è stata effettuata preventivamente un'analisi delle immagini disponibili per scegliere dei punti naturali ben identificabili dalle foto, visto anche il lungo lasso di tempo che è intercorso tra l'acquisizione dei fotogrammi (2010) e la realizzazione della campagna di rilievo (2012). I punti scelti quindi sono costituiti da spigoli netti come gli angoli delle pavimentazioni, blocchi lapidei sporgenti, o elementi con evidenti contrasti cromatici (per esempio tra gli elementi in cotto e in materiale lapideo). La tecnica impiegata per il rilievo è il GNSS in modalità RTK che ha permesso di rilevare i punti in maniera celere. Infatti a causa dell'elevato numero di immagini che normalmente vengono acquisite in queste applicazioni e dell'irregolarità dei blocchi fotogrammetrici, è spesso necessario misurare un numero di punti di appoggio piuttosto elevato. Ciò comporta l'utilizzo di tecniche di rilievo sufficientemente rapide, come appunto il rilievo in RTK, che prevedono precisioni nell'ordine di qualche centimetro. In realtà, tali precisioni possono essere anche peggiori a causa di errori che possono verificarsi durante la fase di rilievo e che non sempre possono essere evidenziati dai parametri di acquisizione (errori di centramento dovuti al fatto che in genere l'asta con l'antenna viene tenuta a mano da un operatore, cattive configurazioni satellitari, ecc.).

6.2.4. Verifica delle procedure di georeferenziazione e di messa in scala

Una prima valutazione sulla operatività e sulle potenzialità nel processamento di immagini non convenzionali è stata condotta esaminando le procedure di georeferenziazione condotte con VisualSfm e con PhotoScan e di messa in scala effettuate con 123D Catch. Nel primo caso la verifica è consistita nell'analisi degli scarti ottenuti sui punti di appoggio utilizzati per la georeferenziazione. Ciò ha permesso anche di fare delle valutazioni sull'esito degli orientamenti delle immagini che sono avvenuti attraverso i processi completamente automatici della SfM.

Gli scarti sui punti di appoggio ottenuti con PhotoScan e con VisualSfm sono visibili nella Tab. 6.4.

Dataset	Software	N. GCP	SQM X [m]	SQM Y [m]	SQM Z [m]	SQM (X,Y) [m]	SQM TOT [m]	SQM Pixel [pix]
Tempio romano	Photoscan	12	0,021	0,025	0,038	0,033	0,050	0,71
	VisualSfm + Sfm_Georef	12	0,023	0,029	0,029	0,037	0,047	0,86
Quartiere residenziale	Photoscan	10	0,025	0,022	0,019	0,033	0,038	0,93
	VisualSfm + Sfm_Georef	10	0,026	0,022	0,023	0,034	0,041	0,93
Palazzo bizantino	Photoscan	12	0,020	0,023	0,032	0,030	0,044	0,61
	VisualSfm + Sfm_Georef	12	0,017	0,011	0,019	0,020	0,028	0,92

Tabella 6.4 – Scarti sui punti d'appoggio ottenuti con PhotoScan e con VisualSfm relativi ai tre *dataset*

Gli scarti ottenuti sono dell'ordine dei centimetri, compatibili con le precisioni del rilievo topografico e, teoricamente, con rappresentazioni cartografiche alla scala 1:200. Nello specifico i valori ottenuti con VisualSfm sono compresi tra $\pm 0,028$ m per il *dataset* del Palazzo bizantino e $\pm 0,047$ m per il *dataset* del Tempio romano. I valori ottenuti con PhotoScan sono compresi tra $\pm 0,038$ m per il *dataset* del Quartiere residenziale e lo $\pm 0,050$ m per il *dataset* del Tempio romano. Questi valori mostrano come le procedure di orientamento automatico sono andate a buon fine, non evidenziando nessun tipo di anomalia.

La verifica della messa in scala dei modelli ottenuti da 123D Catch è stata eseguita misurando alcune distanze tra i punti di appoggio sui modelli ottenuti con il 3D *web-service* e confrontandole con i valori reali. Le distanze calcolate per il *dataset* del Tempio romano sono comprese tra 28,69 m e 51,93 m. Lo scarto quadratico medio calcolato sulle differenze delle distanze è pari a $\pm 0,09$ m (Figura 6.5 e Tabella 6.6).

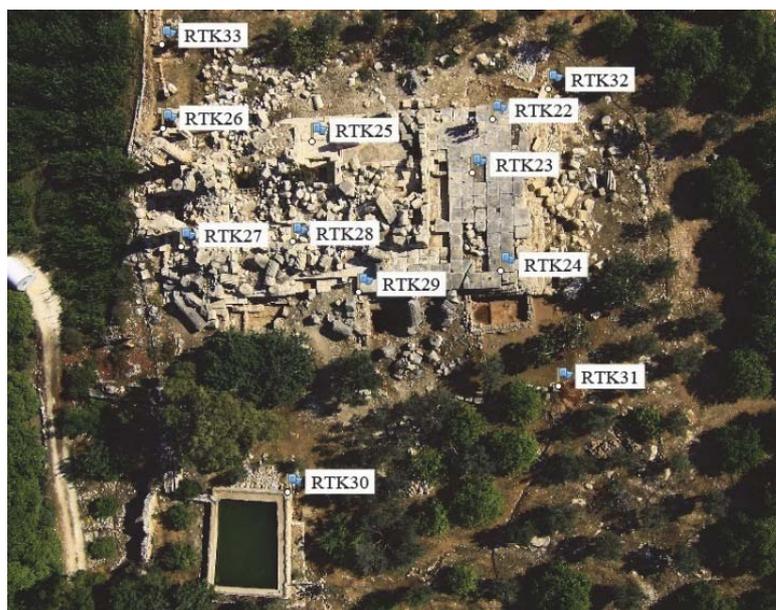


Figura 6.5 – I punti di appoggio del *dataset* del Tempio romano

Punti	Distanza reale [m]	Distanza 123Dcatch [m]	Differenza [m]
RTK22-RTK33	34,28	34,32	-0,04
RTK23-RTK30	34,86	34,80	0,06
RTK23-RTK33	34,35	34,35	0,00
RTK24-RTK36	35,85	35,66	0,19
RTK26-RTK31	45,62	45,62	0,00
RTK27-RTK31	38,17	38,28	-0,11
RTK27-RTK32	38,30	38,45	-0,15
RTK28-RTK32	28,31	28,32	-0,01
RTK30-RTK33	46,46	46,48	-0,02
RTK31-RTK33	51,90	51,93	0,03
		SQM [m]	0,09

Tabella 6.6 – Distanze calcolate per la verifica della messa in scala del modello 3D del Tempio romano ottenuto con 123D Catch

Mentre le distanze calcolate per il *dataset* del Quartiere residenziale sono comprese tra 19,32 m e 39,70 m e lo scarto quadratico medio calcolato sulle differenze delle distanze è risultato pari a $\pm 0,16$ m (Figura 6.7 e Tabella 6.8).



Figura 6.7 – Punti d'appoggio del *dataset* del Quartiere residenziale.

Punti	Distanza reale [m]	Distanza 123Dcatch [m]	Differenza [m]
RTK1-RTK5	27,67	27,50	-0,17
RTK1-RTK6	34,84	34,85	0,01
RTK1-RTK7	27,14	26,99	-0,15
RTK2-RTK8	23,80	23,98	0,18
RTK2-RTK10	38,24	38,20	-0,04
RTK3-RTK10	39,70	39,86	0,16
RTK3-RTK5	22,07	22,00	-0,07
RTK6-RTK9	19,32	19,40	0,08
RTK6-RTK10	23,86	24,12	-0,26
RTK9-RTK10	32,61	32,38	-0,23
		SQM [m]	0,16

Tabella 6.8 – Distanze calcolate per la verifica della messa in scala del modello 3D del Quartiere residenziale ottenuto con 123D Catch

Infine le distanze calcolate per il *dataset* del Palazzo bizantino sono comprese tra 35,23 m e 77,77 m e lo scarto quadratico medio calcolato sulle differenze delle distanze è risultato pari a $\pm 0,06$ m (Figura 6.9 e Tabella 6.10).

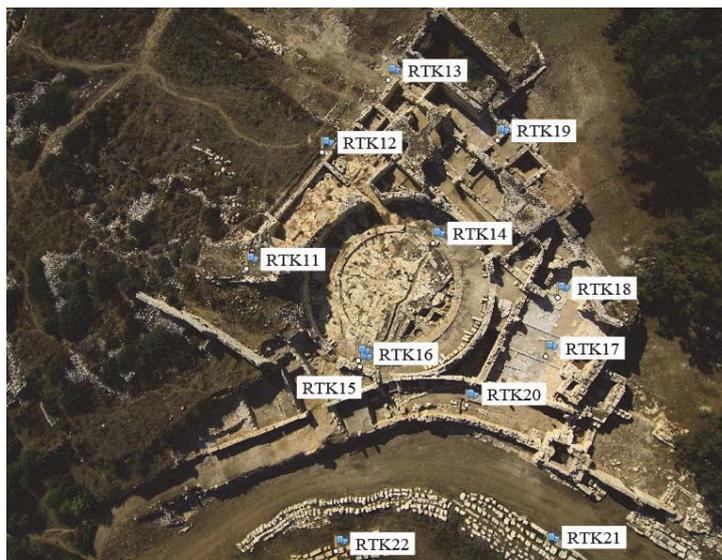


Figura 6.9 – Punti d'appoggio del *dataset* del Palazzo bizantino.

Punti	Distanza reale [m]	Distanza 123Dcatch [m]	Differenza [m]
RTK11-RTK18	46,21	46,10	-0,11
RTK11-RTK19	42,45	42,42	-0,03
RTK12-RTK15	35,23	35,25	0,02
RTK12-RTK22	68,18	68,16	-0,02
RTK13-RTK21	77,77	77,73	-0,04
RTK13-RTK18	42,90	42,97	0,07
RTK17-RTK22	48,59	48,57	-0,02
RTK18-RTK22	56,39	56,49	0,10
RTK19-RTK20	41,21	41,23	0,02
RTK19-RTK22	73,21	73,25	0,04
		SQM [m]	0,06

Tabella 6.10 – Distanze calcolate per la verifica della messa in scala del modello 3D del Palazzo bizantino ottenuto con 123D Catch

In tutte e tre le verifiche le differenze sono ugualmente distribuite tra valori positivi e negativi non indicando problemi di messa in scala. Si denota solo che lo scarto quadratico medio calcolato sulle differenze delle distanze per il Quartiere residenziale è risultato leggermente più alto degli altri ($\pm 0,16$ m).

6.2.5. Calcolo e verifica dei modelli 3D

I modelli 3D delle tre aree di studio sono stati ottenuti a differenti risoluzioni. In particolare per la generazione dei modelli con PhotoScan sono state impostate diverse

risoluzioni scelte in funzione delle risorse *hardware* disponibili: high per il Tempio romano e per il Palazzo bizantino e ultra high per il Quartiere residenziale. I modelli generati sono di elevato dettaglio e presentano una spaziatura media tra i vertici dei triangoli rispettivamente di 0,04 m per il Tempio romano e per il Palazzo bizantino e di 0,03 m per il Quartiere residenziale. Le ricostruzioni 3D generate con VisualSfm presentano un passo medio tra i vertici dei triangoli di 0,05 m. Dalle Figure 6.11a, 6.11b e 6.11c si nota subito la presenza di molte lacune per la maggior parte localizzate nelle pareti verticali. Infine i modelli realizzati con 123D Catch sono stati calcolati alla risoluzione più bassa (mobile) poiché i processi per la ricostruzione ad alta risoluzione non sono andati a buon fine. Le ricostruzioni a *mesh* presentano una spaziatura media tra i vertici dei triangoli di 0,40 m. Nonostante questo i modelli 3D si presentano completi e con un accettabile livello di definizione dei dettagli.

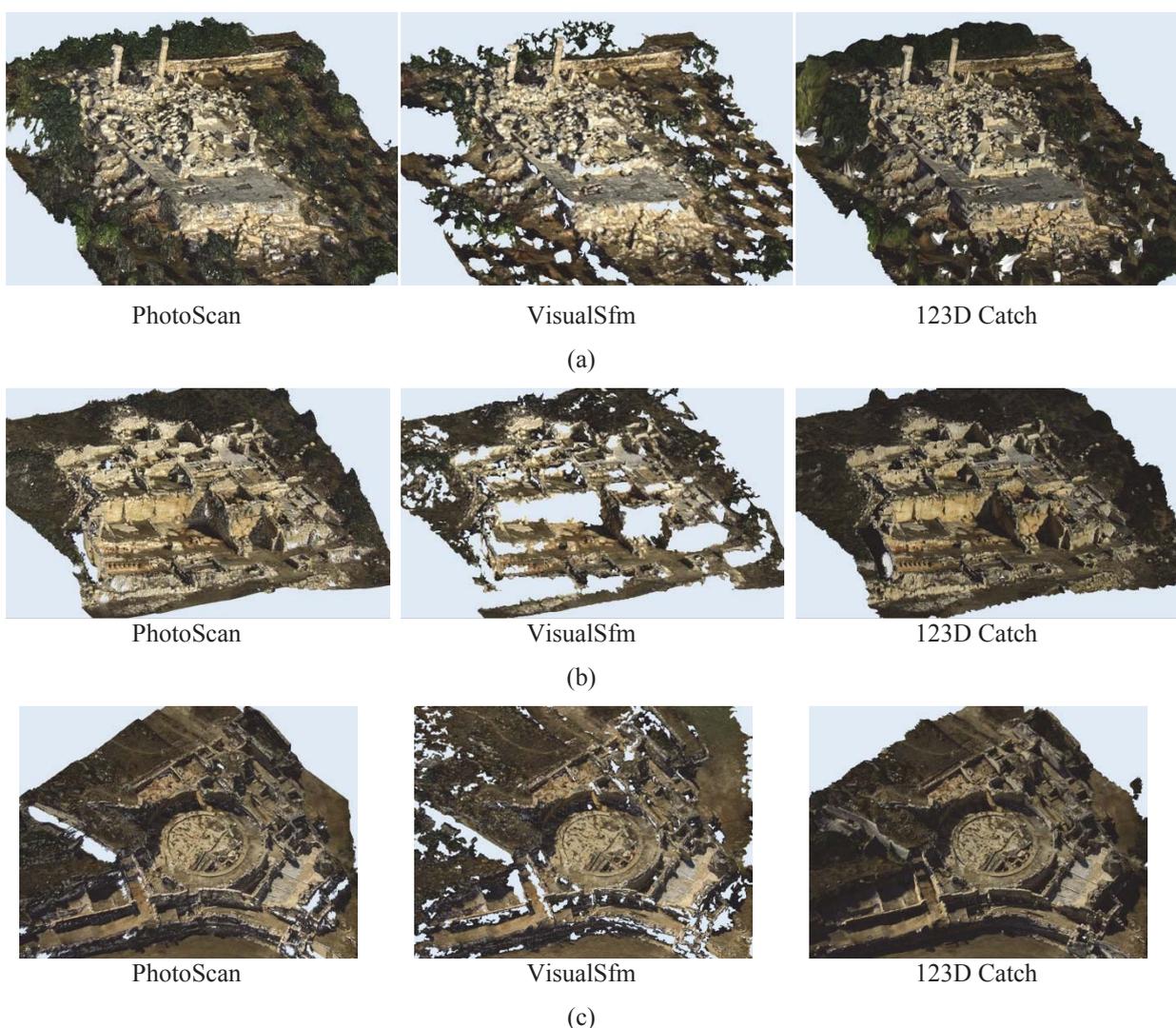


Figura 6.11 – Ricostruzioni 3D delle tre aree: Tempio romano (a), Quartiere residenziale (b), Palazzo bizantino (c)

Nella Figura 6.12 sono visibili i dettagli delle *mesh* in corrispondenza della porzione pavimentata del Tempio, dell'ambiente centrale del Palazzo bizantino e dell'area per la lavorazione industriale del Quartiere residenziale relativi ai tre strumenti indagati. Si vede l'estremo dettaglio delle ricostruzioni ottenute con PhotoScan in tutti e tre i modelli. Il livello di dettaglio dei modelli realizzati con VisualSfm risulta variabile con la presenza di molto rumore nel modello del Tempio, con un livello di dettaglio discreto in corrispondenza dell'ambiente centrale del Palazzo bizantino e con una scarsa definizione dei particolari nel modello del Quartiere residenziale con la presenza di molte lacune. Infine il livello di definizione ottenuto con 123D Catch in tutti e tre i modelli è leggermente inferiore rispetto a quello ottenuto con PhotoScan.

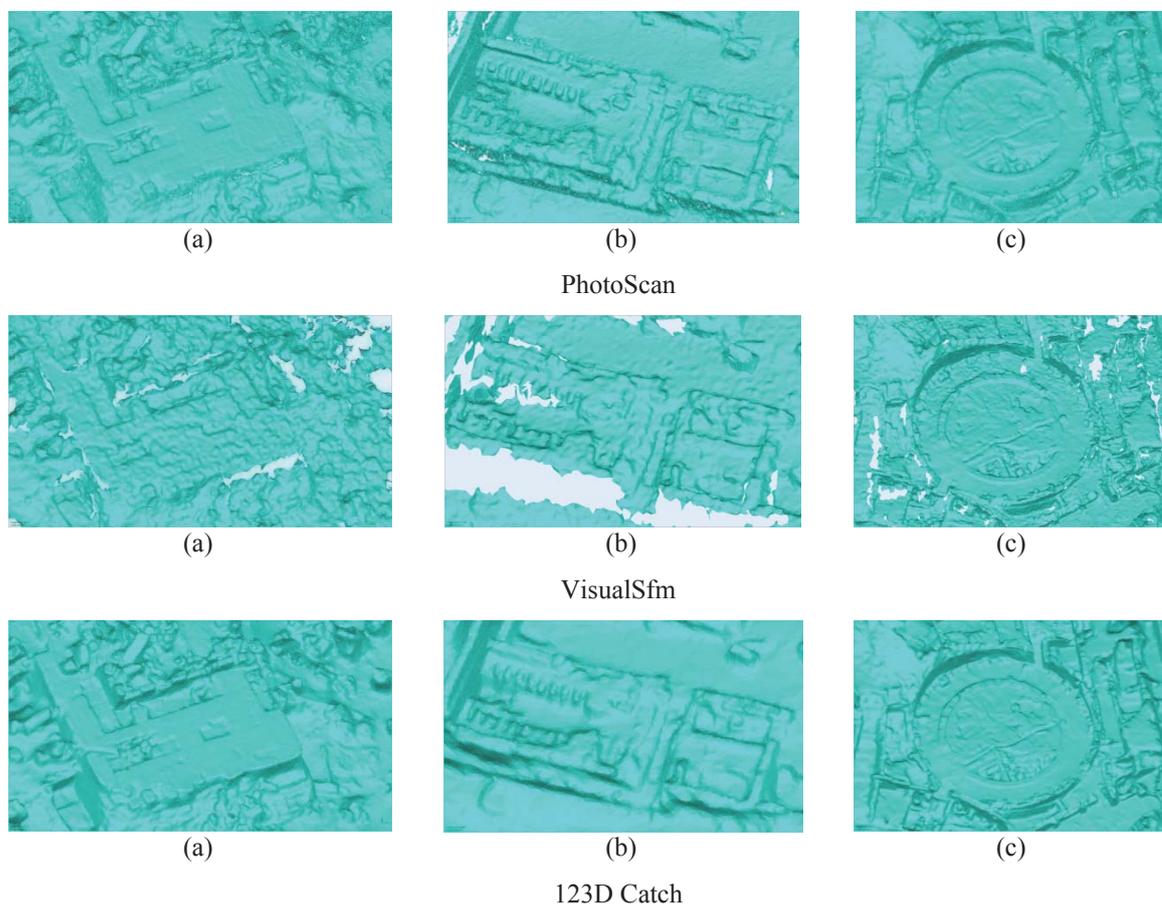


Figura. 6.12 – Livello di dettaglio ottenuto nelle ricostruzioni 3D: area pavimentata del Tempio (a), sala centrale del Palazzo bizantino (b) e zona industriale del Quartiere residenziale (c)

Per verificare le ricostruzioni 3D, poiché non si disponeva di informazioni reali, ricavate, per esempio, tramite misurazioni topografiche, per l'effettuazione di eventuali verifiche metriche in senso assoluto, sono state eseguite delle verifiche relative confrontando tra loro delle sezioni estratte dai modelli 3D.

La ricostruzione del Tempio è sicuramente una delle più critiche e difficoltose poiché la presenza delle macerie rende la geometria irregolare e quindi molto complessa. La sezione estratta dai modelli 3D del Tempio comprende sia aree con presenza degli ammassi di detriti e quindi con forti sporgenze e rientranze, sia aree geometricamente più regolari. (Fig 6.13).

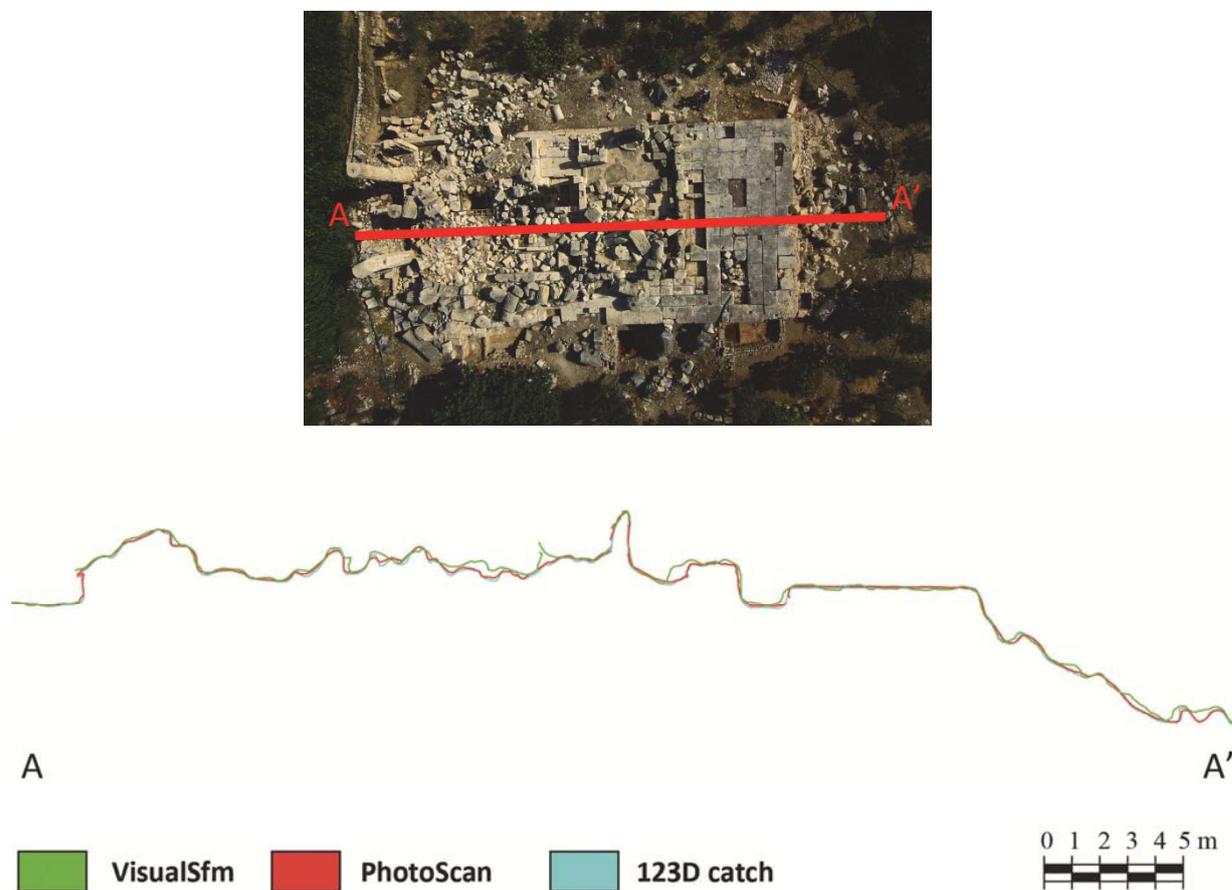


Figura 6.13 – Sezione AA' estratta dai modelli 3D del Tempio romano

E' possibile notare come le *mesh* generate da PhotoScan e da 123D Catch presentano profili molto simili tra loro e un livello di dettaglio paragonabile. In particolare sono rappresentati i profili dei blocchi interessati dal crollo. La ricostruzione che invece si presenta molto più rumorosa è quella generata da VisualSfm. In particolare in corrispondenza dell'area pavimentata la ricostruzione di VisualSfm segue un profilo ondulato anziché piano.

L'area del Quartiere residenziale è caratterizzata da differenze di quota molto elevate e quindi appare interessante studiare il comportamento dei *software* indagati proprio in corrispondenza di questi salti di quota. Per fare ciò dai modelli 3D del Quartiere residenziale sono state estratte due sezioni con un andamento approssimativamente perpendicolare (Figura 6.14)

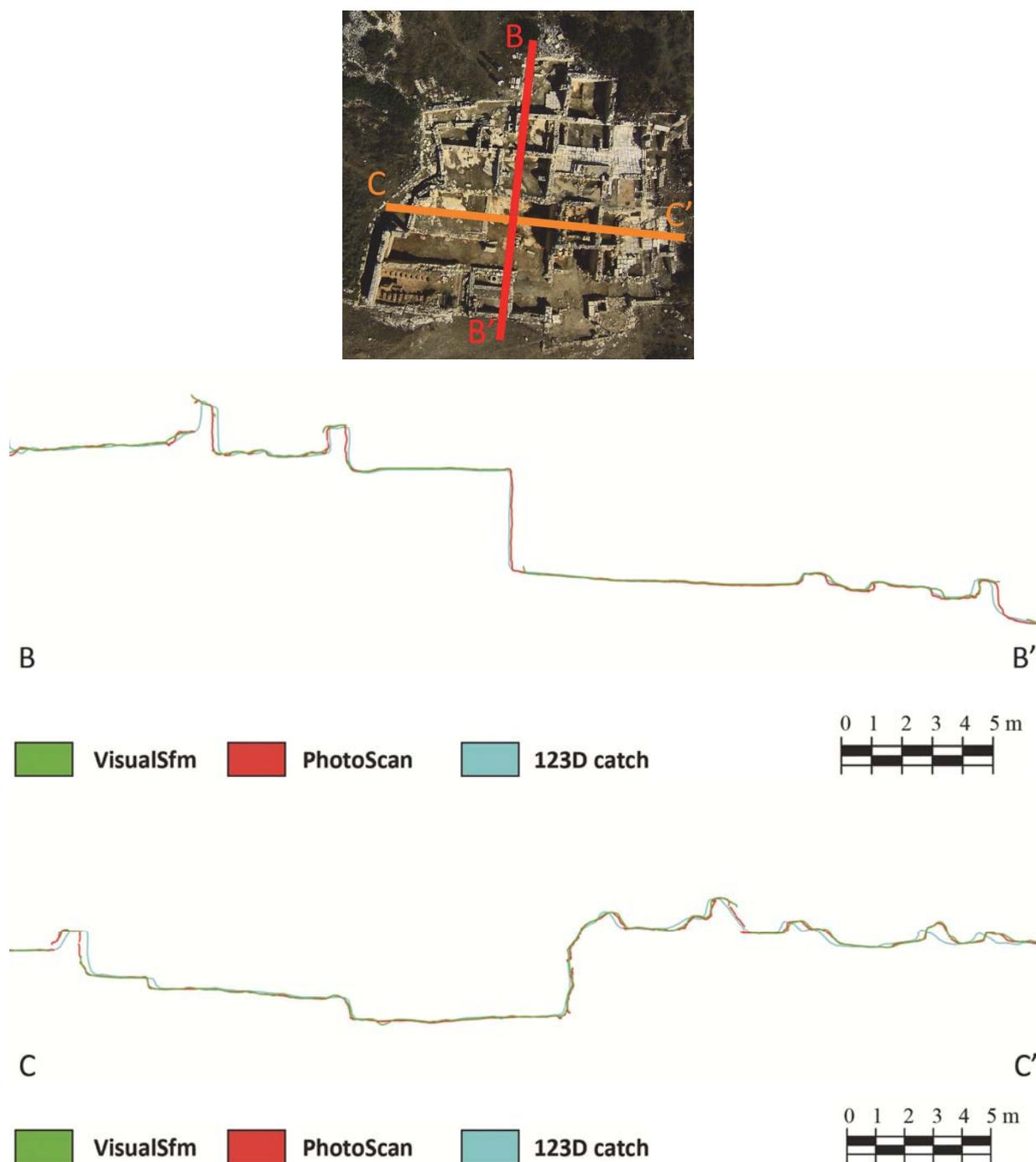


Figura 6.14 – Sezione BB' (in alto) e CC' (in basso) estratte dai modelli 3D del Quartiere residenziale

La prima sezione, BB', è stata estratta longitudinalmente con direzione parallela alla maggiore pendenza e la seconda, CC' trasversalmente. Dalle sezioni si nota subito un problema nella ricostruzione generata da 123D Catch poiché in tutte e due le sezioni vi è uno spostamento del profilo rispetto agli altri modelli, in particolare alle estremità delle sezioni. Le ricostruzioni di VisualSfm e di PhotoScan sono molto simili tra loro ed i salti di quota non hanno causato delle differenti ricostruzioni. L'unica differenza tra le due ricostruzioni è il diverso grado di completezza poiché i profili derivanti dal modello di VisualSfm presentano

molte lacune principalmente in corrispondenza delle pareti verticali, specialmente lungo la sezione longitudinale.

Infine dall'analisi del profilo estratto dai modelli del Palazzo bizantino si evince come le ricostruzioni sono risultate più dettagliate e con profili più simili tra loro (Figura 6.15). Non si è riscontrato il problema evidente di 123D Catch visto per il Quartiere residenziale. Nello specifico è stata estratta una sezione che si sviluppa approssimativamente in senso radiale rispetto all'ambiente circolare centrale. La sezione interseca l'ambiente centrale e la strada colonnata. Anche in questo caso i profili risultanti dalla ricostruzione 3D di VisualSfm si presentano leggermente più rumorosi rispetto ai profili derivanti dalle ricostruzioni generate con gli altri strumenti.

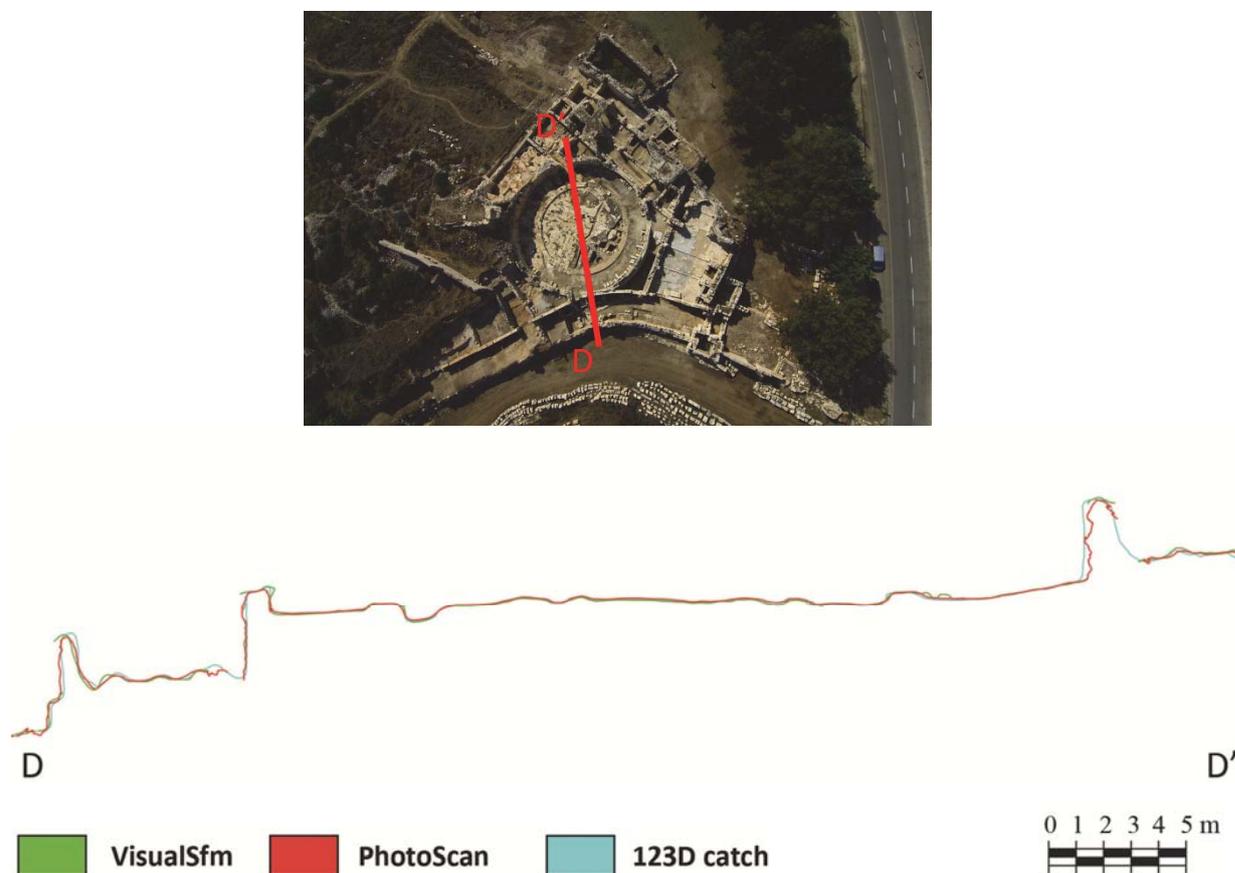


Figura 6.15 – Sezione DD' estratta dai modelli 3D del Palazzo bizantino

6.3. Un caso di prese aeree da drone: il Tempio di Iside e il Quartiere ellenistico-romano nella Valle dei Templi di Agrigento

Il secondo caso studio con prese aeree di prossimità ha come oggetto due aree del Parco archeologico della Valle dei Templi di Agrigento. In questo caso la piattaforma utilizzata per l'acquisizione delle prese è un quadricottero della *Microdrones*.

Le zone selezionate sono l'area del Tempio di Iside e un'*insula* del Quartiere ellenistico-romano (Figura 6.17).



Figura 6.17 – Area del Tempio di Iside (in giallo) e del Quartiere ellenistico-romano (in rosso)

Le due zone sono tra i siti meno conosciuti dell'intero Parco Archeologico e per questo poco frequentati dai turisti: rappresentano due casi studio abbastanza interessanti in quanto la zona del Tempio di Iside è soltanto parzialmente scavata, mentre il Quartiere ellenistico-romano rappresenta il classico ritrovamento archeologico in cui la struttura dell'impianto urbano si è conservata in maniera molto completa. Inoltre, le aree presentano diverse geometrie: lo scavo del Tempio di Iside è più assimilabile ad un quadrato con nessuna dimensione prevalente mentre l'*insula* del Quartiere ellenistico-romano presenta una forma stretta e lunga.

Il Tempio di Iside fu eretto in età augustea con modifiche tra il I e il II secolo d.C.; l'edificio presenta un podio e un triportico che delimita una piazza. L'interno racchiude una cella preceduta da un pronao e seguita da un avancorpo su podio, accessibile mediante due rampe laterali di nove gradini. Il triportico sovrastato da una trabeazione decorata da un fregio dorico, era contraddistinto da sessantadue colonne a fusto liscio e due mezze colonne

terminali, con portico impreziosito da un fregio composto da metope alternate a triglifi, con l'inserimento di un elemento a rilievo liscio che, con un intervallo di due triglifi, si sostituisce al triglifo stesso. L'esistenza del Tempio si presume si sia protratta fino alla fine del IV secolo d.C., cui seguì un lunghissimo periodo di abbandono, conseguenza del sacco di Genserico avvenuto nel 440 d.C.

Il Quartiere ellenistico-romano costituisce una parte dell'abitato dell'antica città e la sua scoperta è stata fondamentale per comprendere l'antica organizzazione urbana. Il Quartiere si dispone su terrazzi degradanti inserite secondo un regolare schema urbanistico in tre isolati (*insulae*), definiti dall'incrocio delle vie principali est-ovest (*decumani*) con le strade minori nord-sud (*cardines*). Tale impianto, sviluppato tra il II-I sec. a.C. e il IV sec. d.C., ricalca un tracciato più antico di origine greca databile tra la fine del VI e l'inizio del V sec. a.C. Le abitazioni sono di diverse tipologie: case di tipo ellenistico con ampio cortile circondato da colonnato (*peristilio*) e case di tipo pompeiano con atrio e vasca centrale per la raccolta dell'acqua piovana. Inoltre, sono rimaste tracce delle decorazioni interne come intonaci parietali dipinti e pavimentazioni a mosaico con elementi geometrici o motivi vegetali e animali. Gli scavi hanno portato alla luce circa venti abitazioni. Il rilievo da drone ha interessato soltanto una delle *insulae* e in particolare quella situata a sud-ovest.

6.3.1. Il velivolo utilizzato: il multicottero Md4-200 della Microdrones

Il velivolo utilizzato è il modello *md4-200* della *Microdrones*, un elicottero quadrirotore con struttura in fibra di carbonio (Figura 6.18), dal peso complessivo pari a 900 gr, con un diametro inferiore ad 1 metro. Questo velivolo fa parte della classe VTOL (*Vertical Take-off and Landing*) ed è dotato del sistema AAHRS (*Attitude, Altitude and Heading Reference System*), costituito da diversi tipi di sensori: accelerometri, giroscopi, magnetometro, barometro, GPS che consentono l'esecuzione di voli programmati e gli conferiscono maggiore stabilità in presenza di vento. Il carico utile trasportabile è di 200 gr, ha un raggio d'azione pari a circa 500 m, una quota relativa massima di volo di 150 m e una autonomia di volo di circa 20 minuti in condizioni standard. Lo sviluppo della rotta non può superare i 2 km e le velocità di volo si differenziano in funzione della direzione: per la traslazione rettilinea orizzontale le velocità sono comprese tra 0,1 – 5 m/s, per quella verticale 0,1 – 3 m/s ed infine la velocità di rotazione intorno al proprio asse è pari a 10 – 90 deg/s. Nonostante presenti un sistema che migliora la sua stabilità in presenza di vento non può volare quando la velocità del vento supera i 4 m/s. Il sistema di propulsione è costituito da 4 motori elettrici alimentati da batterie a litio-polimero.



Figura 6.18 – Quadricottero md4-200 della Microdrones

Il sistema di controllo del velivolo è composto da un computer su cui è installato il *software* proprietario (*mdCockpit*) da cui si evincono informazioni utili come lo stato del velivolo, il livello della batteria, la posizione, l'altitudine, il numero di satelliti disponibili utile per il posizionamento GPS, la velocità e tempo di volo.

I sensori utilizzati per le riprese sono montati su di una struttura in fibra di carbonio che permette rotazioni rispetto all'orizzontale pari a 100° e quindi offre l'opportunità di effettuare riprese sia nadirali che frontali. La struttura è dotata di un asse servo-assistito, controllabile a distanza tramite radiocomando. Infine, il sistema è dotato di un datalink a 2,4 GHz con cui è possibile in tempo reale attraverso una GCS (*Ground Control Station*) controllare in qualsiasi momento le telemetrie di volo e ciò che viene ripreso dalla camera, o attraverso occhiali LCD o qualsiasi altra tipologia di monitor.

6.3.2. Progettazione ed esecuzione dei voli

Per il rilievo delle zone di studio sono stati progettati voli con strisciate orientate lungo direzioni perpendicolari. In considerazione dello sviluppo delle aree da rilevare, le direzioni di volo sono risultate coincidenti approssimativamente con le direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest. Nella Figura 6.19 sono indicate le direzione dei voli con direzione del volo NS parallelo al lato più lungo di entrambe le aree.



Figura 6.19 – Voli: direzione NS in ciano; direzione EO in rosso

La scelta di volare su più direzioni è stata fatta per potere disporre di *dataset* che consentissero di eseguire più prove in relazione alla conformazione geometrica di volo. Tutte le riprese sono state progettate imponendo un classico schema di prese fotogrammetriche aeree (prese nadirali) e con un ricoprimento longitudinale sempre pari all'80% e un ricoprimento trasversale pari al 70%. La camera fotografica utilizzata è una compatta, la Pentax Optio RZ18 da 16 Megapixel con sensore CCD (4612 pixel x 3468 pixel) e con un obiettivo a zoom variabile da 4,5 mm a 81 mm. Durante l'esecuzione dei voli è stata impostata la modalità wide (minima distanza focale) e messa a fuoco a infinito. I parametri di orientamento interno non erano noti, ma questi sono stati calcolati in maniera automatica dagli applicativi utilizzati. Tutti i voli sono stati eseguiti in modalità automatica seguendo il piano di volo impostato nel *software* proprietario del drone; inoltre è stata eseguita l'acquisizione di due immagini per ciascun *waypoint*, in modo tale da avere una minima ridondanza di dati. Comunque prima dell'elaborazione delle immagini è stata condotta per ogni *waypoint* una selezione delle immagini migliori, dal punto di vista radiometrico e di geometria di presa.

L'area del Tempio di Iside interessata dal rilievo presenta un'estensione di circa 0,57 ha ed è stata ripresa con due voli (uno Nord-Sud e l'altro Est-Ovest); le quote relative di volo sono risultate pari a circa 71 metri per la ripresa Nord-Sud e a circa 65 metri per quella Est-Ovest a cui corrispondono rispettivamente un GSD (*Ground Sample Distance*) di circa 1,9 cm/pix e di circa 1,6 cm/pix.

Per le riprese dell'*insula* del Quartiere ellenistico-romano, avente un'estensione maggiore di quella del Tempio di Iside (0,67 ha), è stato necessario, per rientrare nei venti minuti

dell'autonomia del velivolo, eseguire quattro voli (due per ogni direzione di volo). Le riprese sono state eseguite da una quota relativa di volo di circa 45 metri a cui corrisponde un GSD di 1,2 cm/pix. Nella Tabella 6.20 sono riassunte le caratteristiche principali dei voli.

Dataset	Estensione [ha]	Direzione dei voli	Ricoprimento longitudinale [%]	Ricoprimento trasversale [%]	Quota relativa di volo [m]	N. Immagini	GSD [cm/pix]
Tempio di Iside	0,57	NS	80	70	71	24	1,9
		EO	80	70	65	27	1,6
Quartiere ellenistico-romano	0,67	NS	80	70	45	56	1,2
		EO	80	70	45	65	1,2

Tabella 6.20 – Caratteristiche dei voli

Contestualmente alla ripresa sono stati posizionati e rilevati topograficamente dei *target* di dimensioni pari a 20 cm x 20 cm (Figura 6.21).



Figura 6.21 – *Target* utilizzati per il rilievo

Anche in questo caso per il rilievo dei *target* è stato utilizzato il sistema GNSS in modalità RTK ricavando le coordinate nel sistema di riferimento UTM-WGS84ETRS2000 utilizzando sempre una stazione master posizionata all'interno delle aree di rilievo. Una prima valutazione sulla precisione del rilievo topografico è stata effettuata attraverso il calcolo degli s.q.m. ottenuti durante la fase di rilievo. Tale valore è risultato pari a circa $\pm 1 \div 2$ cm, come era prevedibile aspettarsi. Inoltre per avere una stima più precisa dell'accuratezza media delle coordinate dei punti di appoggio, si è scelto di misurare le coordinate dei *target* del *dataset* del Quartiere ellenistico-romano due volte in due giorni differenti. Il risultato del confronto tra le coordinate dei due rilievi ha consentito di calcolare uno s.q.m. pari a $\pm 1,2$ cm sia per la planimetria che per l'altimetria, con errori massimi soprattutto in quota anche nell'ordine dei 4 cm. Tale verifica, anche se statisticamente non rigorosa, da un'idea più realistica delle

accuratezze dei punti di appoggio e delle precisioni massime che è possibile aspettarsi dal processamento delle immagini.

6.3.3. Procedure di georeferenziazione e di messa in scala

I *dataset* relativi alle due aree di studio (Tempio di Iside e Quartiere ellenistico-romano) sono stati processati con il *software* PhotoScan, con VisualSfm e con 123D Catch. Per tutti e tre gli applicativi sono state eseguite tre diverse elaborazioni utilizzando tre diverse configurazioni dei blocchi di immagini acquisiti: dapprima sui singoli blocchi NS e EO e poi su un unico blocco con tutte le immagini. Una prima valutazione sulla correttezza delle procedure di georeferenziazione è stata effettuata analizzando gli scarti ottenuti sui punti di appoggio con PhotoScan e VisualSfm. Questa verifica ha permesso anche di fare delle valutazioni sull'esito degli orientamenti delle immagini che sono avvenuti attraverso processi completamente automatici.

Dall'analisi degli scarti ottenuti sui punti di appoggio del *dataset* del Tempio di Iside (Tabella 6.22) si nota subito come i valori diminuiscono, anche leggermente, con l'aumentare del numero di immagini e con il cambiamento della geometria delle prese nei voli incrociati con le due direzioni NS e EO.

Software	Direzione dei voli	Direzione dei voli	N. GCP	SQM X [m]	SQM Y [m]	SQM Z [m]	SQM (X,Y) [m]	SQM TOT [m]	SQM Pixel [pix]
Photoscan	NS	24	13	0,021	0,015	0,021	0,026	0,033	0,76
	EO	27	13	0,024	0,026	0,033	0,035	0,048	0,60
	NS+EO	51	13	0,017	0,016	0,012	0,023	0,027	0,67
VisualSfm + Sfm_Georef	NS	24	13	0,019	0,016	0,022	0,025	0,033	0,65
	EO	27	13	0,027	0,024	0,028	0,036	0,046	0,51
	NS+EO	51	13	0,016	0,013	0,007	0,021	0,022	0,39

Tabella 6.22 – Scarti sui punti d'appoggio ottenuti con PhotoScan e con VisualSfm relativi al *dataset* del Tempio di Iside

In particolare gli scarti ottenuti sono tutti dell'ordine dei centimetri, e rientrano entro le tipiche tolleranze per restituzioni cartografiche alla scala 1:200.

I valori più bassi sono risultati dai blocchi unici NS+EO per tutti e due gli strumenti. In particolare gli scarti ottenuti con PhotoScan sono compresi tra $\pm 0,027$ m per il blocco NS+EO e $\pm 0,048$ m per il blocco EO; mentre quelli risultanti da VisualSfm sono compresi tra $\pm 0,022$ m per il blocco NS+EO e $\pm 0,046$ m per il blocco EO. Le precisioni ottenute sono abbastanza buone e gli scarti mostrano come le procedure di orientamento automatico sono andate a buon fine, non evidenziando nessun tipo di anomalia.

A contrario i valori degli scarti sui punti di appoggio ottenuti per la georeferenziazione del *dataset* del Quartiere ellenistico-romano con il *software* VisualSfm sono risultati maggiori. In particolare gli s.q.m. totali relativamente ai blocchi NS e EO sono superiori al decimetro e quasi dell'ordine del decimetro per il blocco unico (Tabella 6.23).

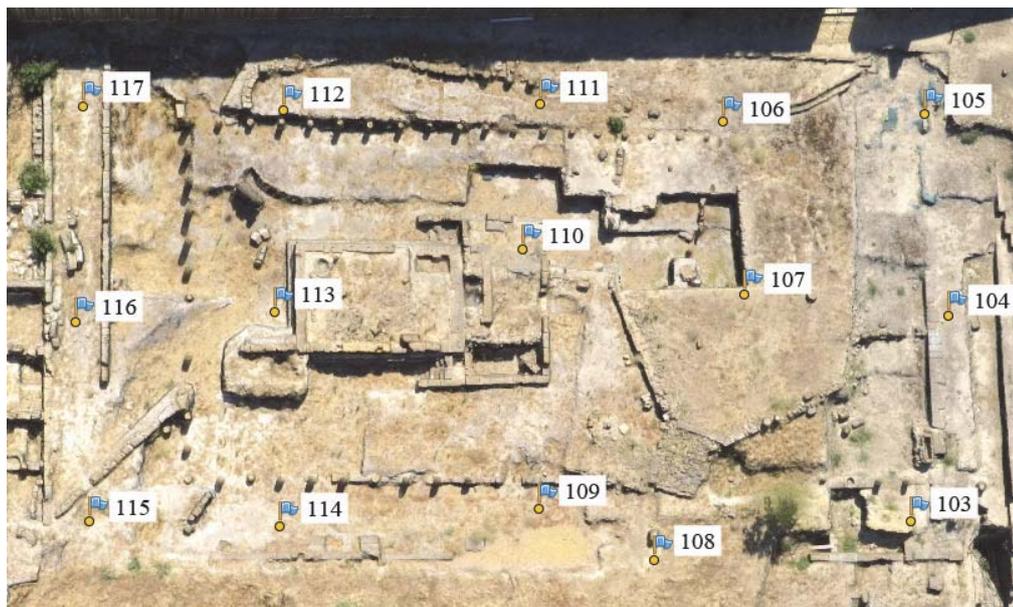
Software	Direzione dei voli	Direzione dei voli	N. GCP	SQM X [m]	SQM Y [m]	SQM Z [m]	SQM (X,Y) [m]	SQM TOT [m]	SQM Pixel [pix]
Photoscan	NS	56	10	0,025	0,018	0,047	0,031	0,056	0,61
	EO	65	10	0,021	0,025	0,048	0,033	0,058	0,61
	NS+EO	121	10	0,012	0,016	0,044	0,020	0,048	0,63
VisualSfm + Sfm_Georef	NS	56	10	0,046	0,052	0,286	0,069	0,294	0,50
	EO	65	10	0,025	0,030	0,117	0,039	0,124	0,57
	NS+EO	121	10	0,014	0,017	0,091	0,022	0,094	0,82

Tabella 6.23 – Risultati degli orientamenti per i *dataset* del Quartiere ellenistico-romano

In questo caso gli scarti evidenziano valori che rientrano nella tolleranza per restituzioni grafiche alla scala 1:200 per PhotoScan e tolleranze per scale grafiche anche molto più piccole per VisualSfm (inferiori o uguali alla scala 1:500). Gli scarti ottenuti con VisualSfm fanno ipotizzare che il calcolo degli orientamenti con il *software open source* non è avvenuto in maniera corretta, in particolare per il blocco NS poiché i valori degli scarti in quota sono molto elevati.

Nello specifico i valori ottenuti con PhotoScan sono compresi tra $\pm 0,048$ m per il blocco NS+EO e $\pm 0,058$ m per il blocco EO. I valori ottenuti con VisualSfm sono compresi tra $\pm 0,094$ m per il blocco NS+EO e $\pm 0,294$ m per il blocco NS.

Una verifica della messa in scala dei modelli ottenuti da 123D Catch è stata eseguita misurando delle distanze di controllo tra i punti di appoggio di coordinate note nei modelli del 3D *web-service* e confrontandole con quelle reali. I punti di appoggio utilizzati per le verifiche sui *dataset* del Tempio di Iside sono visibili nella Figura 6.24, mentre i relativi risultati sono visibili nelle Tabelle 6.25- 6.26-6.27.

Figura 6.24 – I punti di appoggio del *dataset* del Tempio di Iside

Distanze	Distanza reale [m]	123D Catch [m]	Scarti [m]
103-115	58,57	58,61	0,04
104-116	63,45	63,44	-0,01
104-117	64,54	64,57	0,03
105-115	67,99	67,96	-0,03
105-117	61,84	61,87	0,03
106-114	43,52	43,54	-0,02
107-116	47,29	47,31	-0,02
108-117	50,74	50,83	0,09
109-112	33,20	33,29	0,09
111-115	43,01	43,06	-0,05
Dev. Stand. [mm]			0,049

Tabella 6.25 – Distanze calcolate nel modello di 123D Catch del Tempio di Iside generato dal blocco NS e confronto con quelle reali

Distanze	Distanza reale [m]	123D Catch [m]	Scarti [m]
103-115	58,57	58,45	-0,12
104-116	63,45	63,41	-0,04
104-117	64,54	64,53	-0,01
105-115	67,99	67,99	0,00
105-117	61,84	61,87	0,03
106-114	43,52	43,58	0,06
107-116	47,29	47,27	-0,02
108-117	50,74	50,73	-0,01
109-112	33,20	33,28	0,08
111-115	43,01	43,03	0,02
Dev. Stand. [mm]			0,053

Tabella 6.26 – Distanze calcolate nel modello di 123D Catch del Tempio di Iside generato dal blocco EO e confronto con quelle reali

Distanze	Distanza reale [m]	123D Catch [m]	Scarti [m]
103-115	58,57	58,51	-0,06
104-116	63,45	63,46	0,01
104-117	64,54	64,53	-0,01
105-115	67,99	68,00	0,01
105-117	61,84	61,85	-0,01
106-114	43,52	43,56	0,04
107-116	47,29	47,33	0,04
108-117	50,74	50,78	-0,04
109-112	33,20	33,29	0,09
111-115	43,01	43,04	0,03
Dev. Stand. [mm]			0,042

Tabella 6.27 – Distanze calcolate nel modello di 123D Catch del Tempio di Iside generato da un unico blocco NS+EO e confronto con quelle reali

Le distanze misurate per la verifica dei modelli 3D del Tempio di Iside sono comprese tra 33,20 m e 67,99 m. In tutte e tre le verifiche le differenze sono ugualmente distribuite tra valori positivi e negativi non indicando problemi di messa in scala. I valori di deviazioni standard sono dell'ordine del centimetro con il valore più basso, pari a $\pm 0,042$ m, risultante dal modello 3D relativo al *dataset* NS+EO

La stessa verifica è stata condotta per i modelli 3D del Quartiere ellenistico-romano. I punti di appoggio utilizzati per le verifiche sono visibili nella Figura 6.28, mentre i relativi risultati sono visibili nelle Tabelle 6.29- 6.30-6.31.

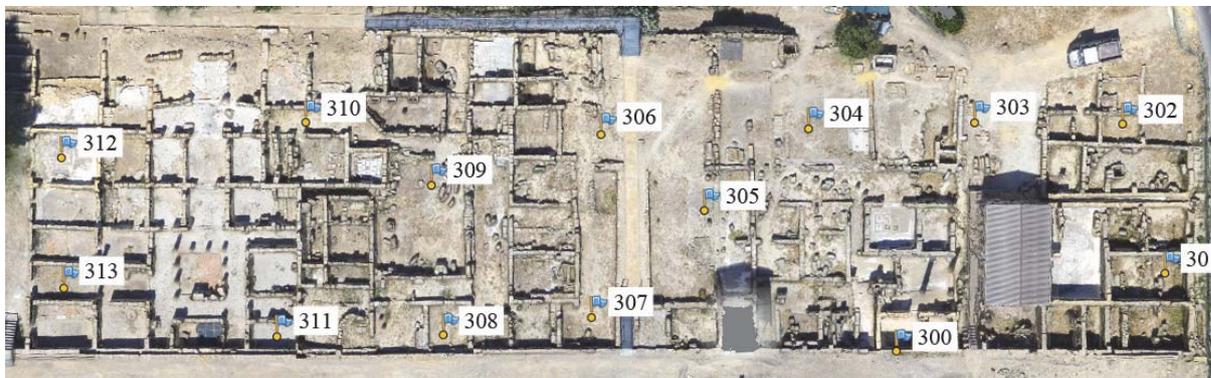


Figura 6.28 – I punti di appoggio del *dataset* del Quartiere ellenistico-romano

Distanze	Distanza reale [m]	123D Catch [m]	Scarti [m]
300-310	72,29	72,44	0,15
300-311	70,92	70,98	0,06
302-307	64,90	64,93	0,03
303-310	76,54	76,64	0,10
303-311	83,68	83,70	0,02
303-313	106,00	105,90	-0,10
304-308	47,99	48,05	0,06
304-311	65,36	65,31	-0,05
304-312	87,07	87,05	-0,02
305-313	73,85	73,65	-0,20
306-311	43,82	43,71	-0,11
307-310	39,64	39,62	-0,02
Dev. Stand. [mm]			0,094

Tabella 6.29 – Distanze calcolate nel modello di 123D Catch del Quartiere ellenistico-romano generato dal blocco NS e confronto con quelle reali

Distanze	Distanza reale [m]	123D Catch [m]	Scarti [m]
300-310	72,29	72,38	0,09
300-311	70,92	70,98	0,06
302-307	64,90	65,00	-0,10
303-310	76,54	76,62	0,08
303-311	83,68	83,75	0,07
303-313	106,00	105,95	-0,05
304-308	47,99	48,04	0,05
304-311	65,36	65,42	-0,06
304-312	87,07	87,00	-0,07
305-313	73,85	73,76	-0,09
306-311	43,82	43,87	0,05
307-310	39,64	39,68	0,04
Dev. Stand. [mm]			0,070

Tabella 6.30 – Distanze calcolate nel modello di 123D Catch del Quartiere ellenistico-romano generato dal blocco EO e confronto con quelle reali

Distanze	Distanza reale [m]	123D Catch [m]	Scarti [m]
300-310	72,29	72,33	0,04
300-311	70,92	70,84	-0,08
302-307	64,90	64,94	0,04
303-310	76,54	76,61	0,07
303-311	83,68	83,65	-0,03
303-313	106,00	105,98	-0,02
304-308	47,99	47,98	0,01
304-311	65,36	65,34	-0,02
304-312	87,07	87,05	0,02
305-313	73,85	73,80	-0,05
306-311	43,82	43,79	-0,03
307-310	39,64	39,66	0,02
Dev. Stand. [mm]			0,041

Tabella 6.31 – Distanze calcolate nel modello di 123D Catch del Quartiere ellenistico-romano generato da un unico blocco NS+EO e confronto con quelle reali

Le distanze misurate per la verifica dei modelli 3D del Quartiere sono comprese tra 39,64 m e 106,00 m. In tutte e tre le verifiche le differenze sono ugualmente distribuite tra valori positivi e negativi non indicando problemi di messa in scala. I valori di deviazioni standard sono dell'ordine del centimetro con il valore più basso, pari a $\pm 0,041$ m, risultante dal modello 3D relativo al *dataset* NS+EO

6.3.4. Calcolo dei modelli 3D e verifiche metriche

Per tutti e due le aree di studio sono stati calcolati i modelli 3D con i tre strumenti indagati utilizzando prima i singoli blocchi NS e EO e poi un unico blocco fotogrammetrico con tutte le immagini. I modelli 3D delle due aree di scavo sono stati ottenuti a differenti risoluzioni. In particolare per la generazione dei modelli con PhotoScan sono state impostate due diverse risoluzioni in funzione delle risorse *hardware* disponibili: high per il Tempio di Iside e medium per il Quartiere ellenistico-romano. I modelli generati sono di elevato dettaglio e presentano una spaziatura media tra i vertici dei triangoli di 0,04 m sia per il Tempio di Iside che per il Quartiere ellenistico-romano. Le ricostruzioni 3D generate con VisualSfm presentano un passo medio tra i vertici dei triangoli di 0,07 m per il Tempio di Iside e di 0,05 m per il Quartiere ellenistico-romano. Infine i modelli realizzati con 123D Catch sono stati calcolati a differenti risoluzioni a causa di problemi nel processamento automatico; così i modelli del Tempio di Iside sono stati generati alla risoluzione massima (*Maximum*) mentre i modelli del Quartiere alla risoluzione più bassa (*Mobile*). Le ricostruzioni a *mesh* del Tempio di Iside presentano una spaziatura media tra i vertici dei triangoli di 0,10 m, mentre le ricostruzioni 3D del Quartiere presentano una spaziatura media tra i vertici dei triangoli di 0,40 m. Il diverso livello di risoluzione in questo caso è evidente e le ricostruzioni dei modelli generati dai blocchi separati NS ed EO presentano molte deformazioni ed imperfezioni come si vedrà più avanti.

Per analizzare i modelli del Tempio di Iside e del Quartiere ellenistico-romano sono stati eseguiti dei confronti qualitativi tra i modelli a *mesh* sia con che senza la *texture*.

Come si vede dalle Figure 6.32a-6.32b-6.32c i modelli del Tempio di Iside generati con PhotoScan utilizzando le tre combinazioni dei blocchi di immagini non presentano molte differenze. I modelli 3D si presentano completi e di estremo dettaglio.

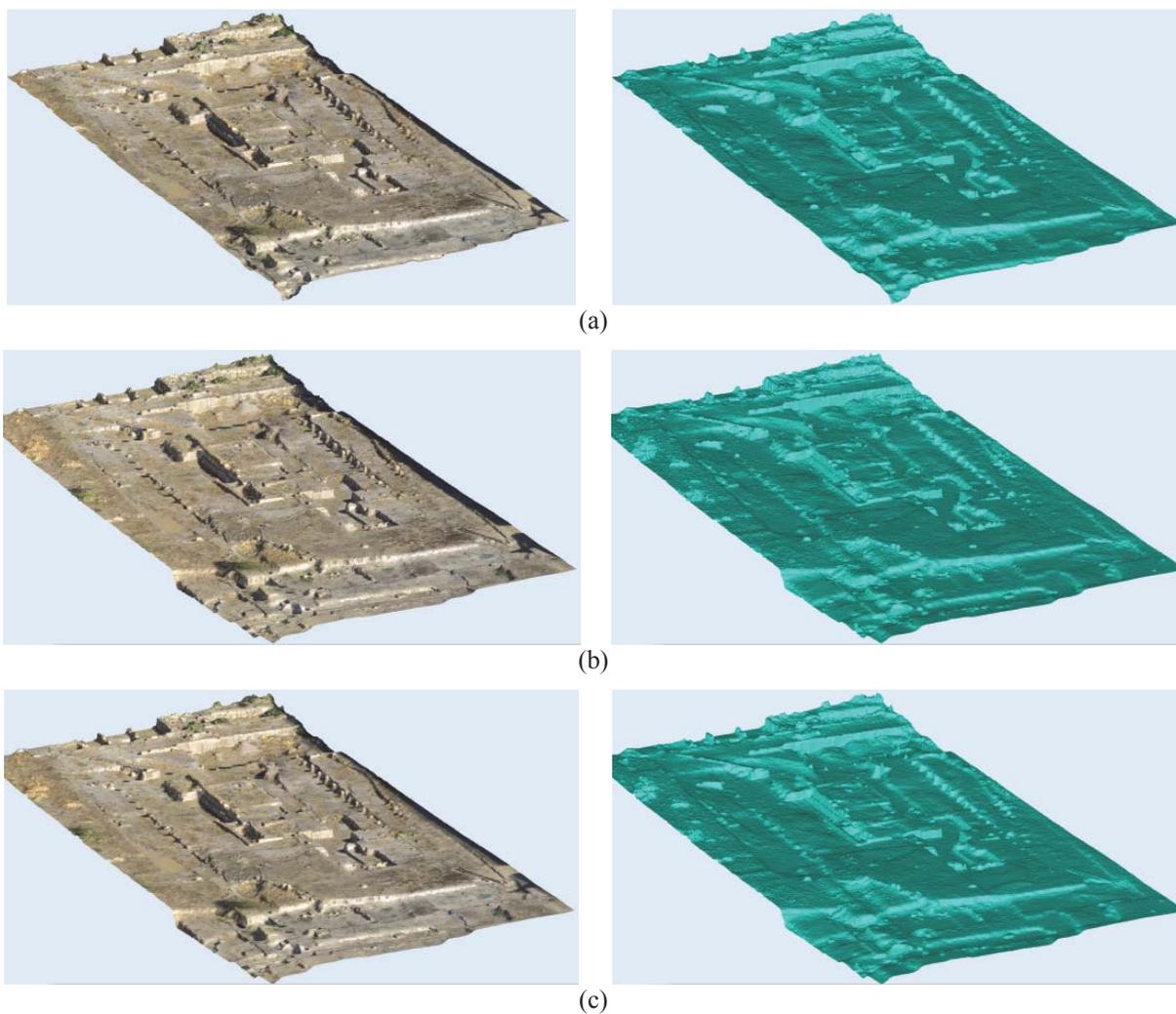


Figura 6.32 – I modelli a *mesh* con *texture* a sinistra e senza *texture* a destra del Tempio di Iside generati con PhotoScan dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c)

I modelli generati con VisualSfm si presentano anche con un buon livello di dettaglio con la presenza di alcune lacune, di numero maggiore nel modello EO, localizzate nelle pareti verticali (Figure 6.33a-6.33b-6.33c). Il modello ottenuto con il blocco unico NS+EO si presenta leggermente più rumoroso degli altri con una superficie più irregolare.

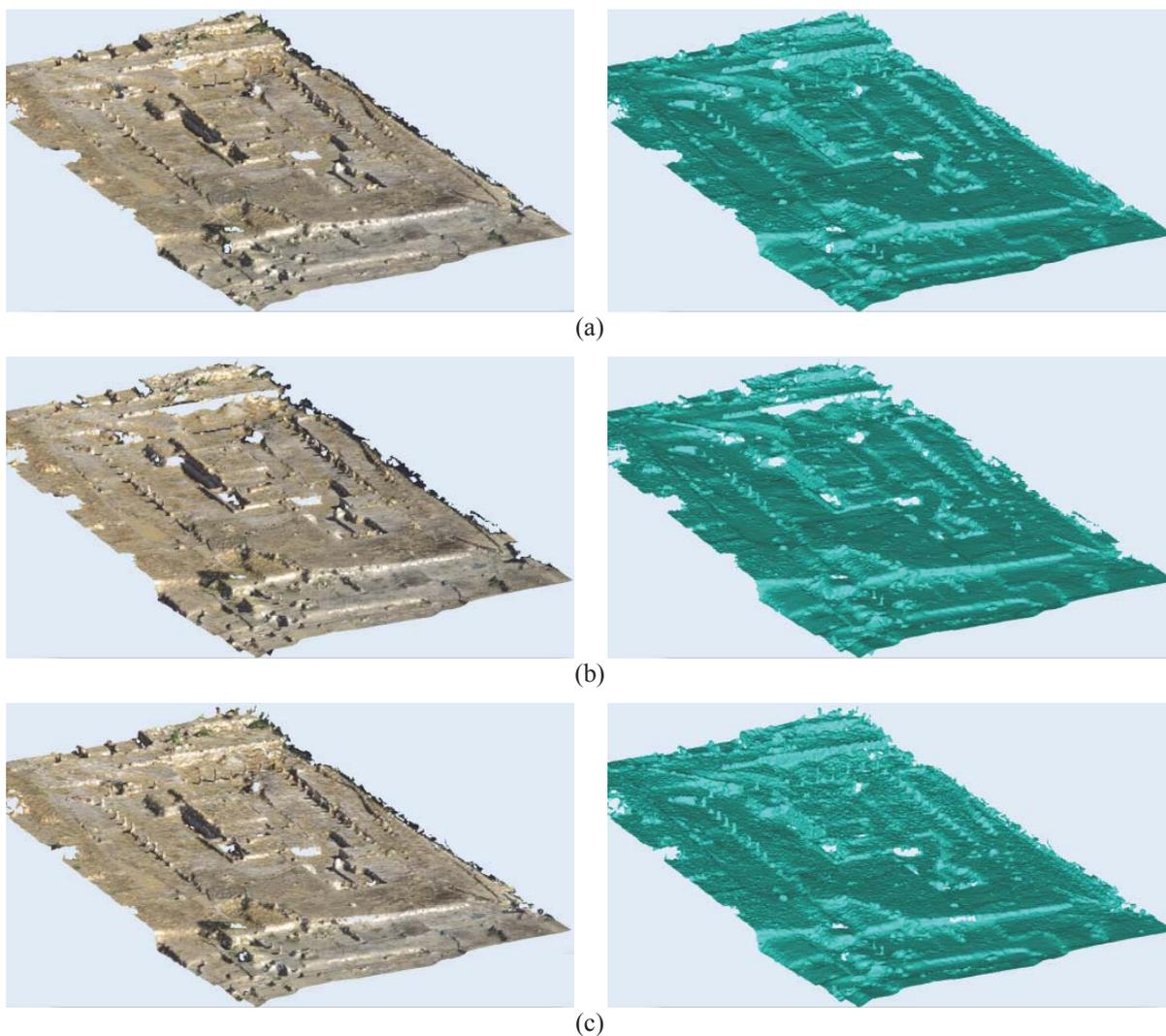


Figura 6.33 – I modelli a *mesh* con *texture* a sinistra e senza *texture* a destra del Tempio di Iside generati con VisualSfm dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c)

I modelli generati con 123D Catch si presentano completi e con un buon livello di dettaglio paragonabile a quello ottenuto con PhotoScan. Inoltre non sono presenti deformazioni o anomalie nelle ricostruzioni delle superfici che come vedremo si sono presentate nei modelli del Quartiere (Figure 6.34a-6.34b-6.34c).

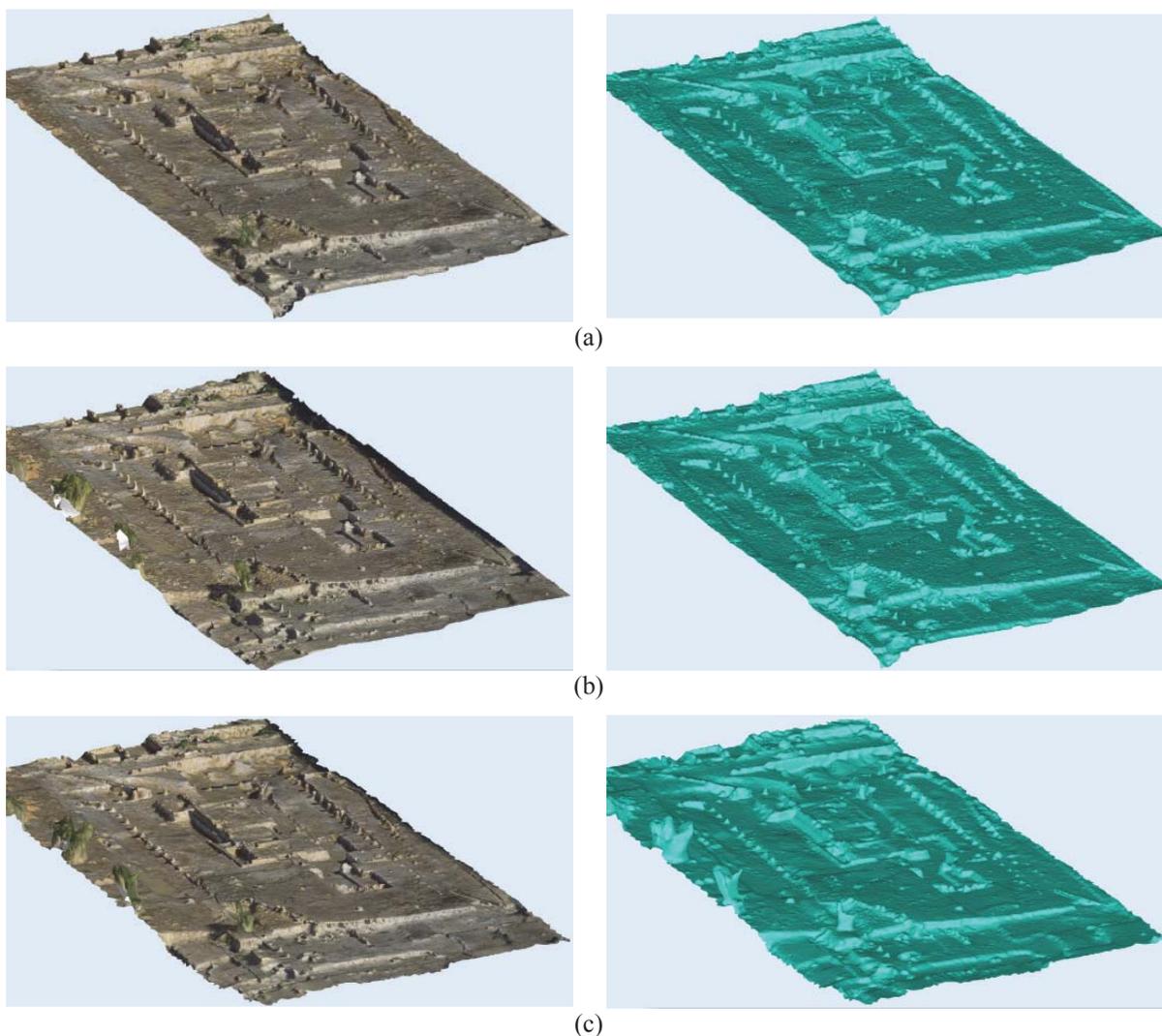


Figura 6.34 – I modelli a *mesh* con *texture* a sinistra e senza *texture* a destra del Tempio di Iside generati con 123D Catch dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c)

La generazione dei modelli del Quartiere ellenistico-romano è stata più problematica come già visto dagli scarti ottenuti, in particolare per la ricostruzione ottenuta con 123D Catch. I modelli di PhotoScan sono anche in questo caso molto dettagliati anche se presentano alcune lacune negli elementi più alti, le due coperture che preservano i mosaici dagli agenti atmosferici. In particolare, la copertura più piccola non è stata ricostruita in nessuno dei tre modelli, probabilmente il *software* non è riuscito a calcolare la superficie a causa della tipologia di *texture* che presenta un *pattern* ripetitivo. Il livello di completezza delle ricostruzioni 3D è analogo per tutti e tre i modelli (Figure 6.35a-6.35b-6.35c).

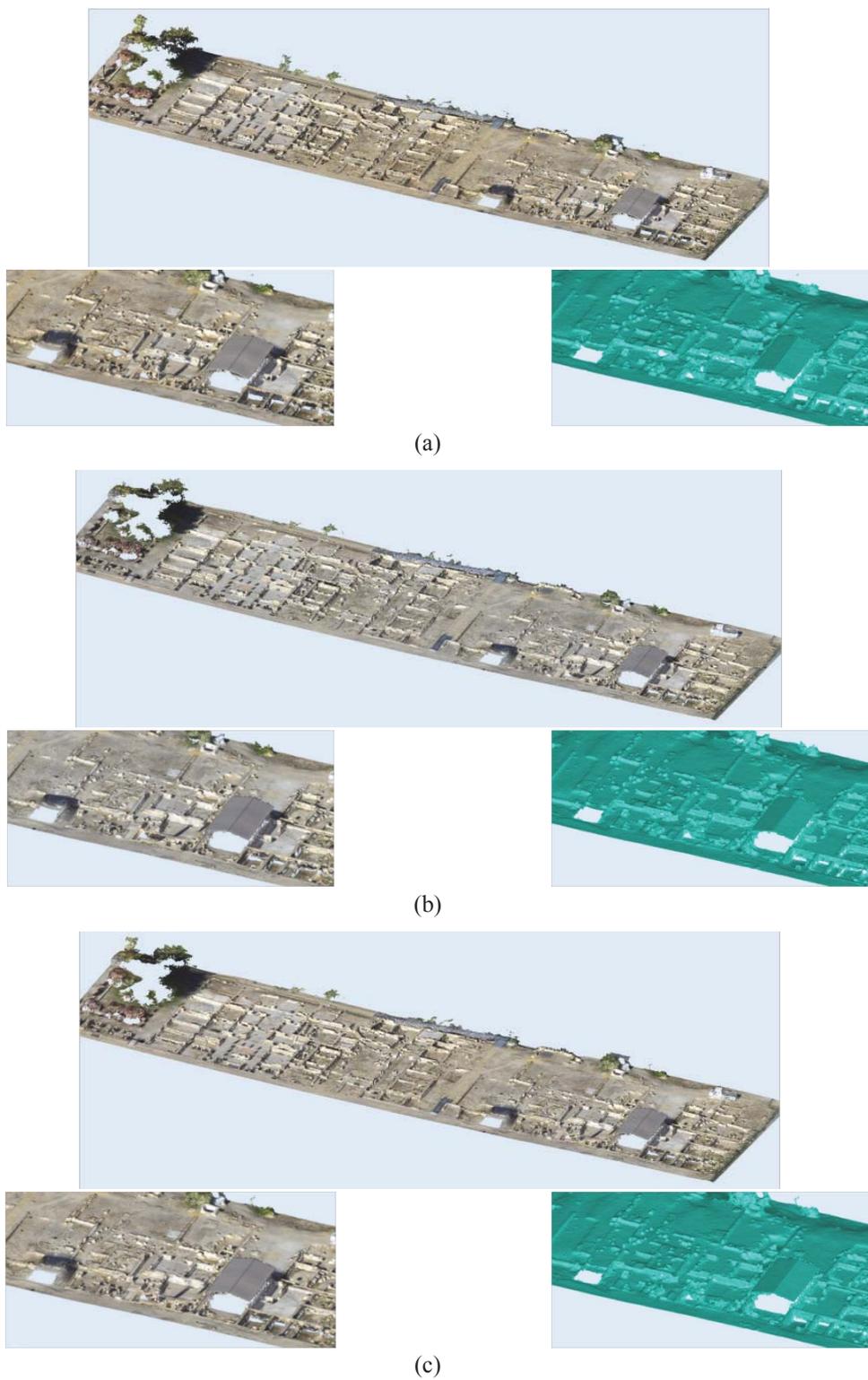


Figura 6.35 – I modelli a *mesh* del Quartiere ellenistico-romano generati con PhotoScan dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c)

I modelli generati con VisualSfm invece presentano alcune differenze per quanto riguarda il gradi di completezza. La ricostruzione che presenta meno lacune è quella ottenuta dal blocco NS+EO, come si vede anche dal dettaglio nell'area dei mosaici (Figure 6.36a-6.36b-

6.36c). La copertura più grande presenta lacune nei modelli NS e EO mentre risulta completa nel modello NS+EO. Inoltre la piccola copertura è stata ricostruita in tutti e tre i modelli.

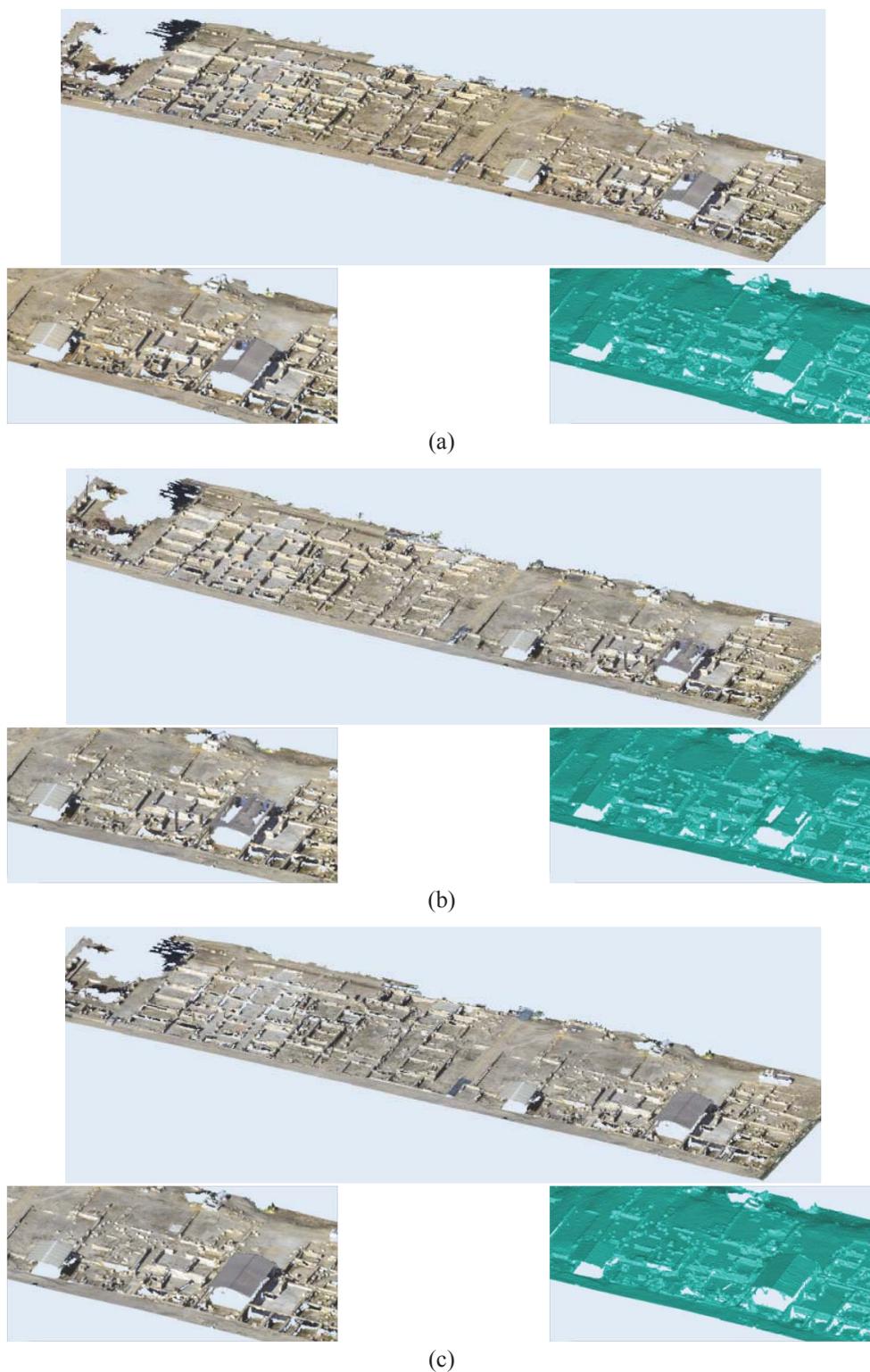


Figura 6.36 – I modelli a *mesh* del Quartiere ellenistico-romano generati con VisualSfm dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c)

I modelli 3D del Quartiere ottenuti con 123D Catch, come già accennato, presentano grosse deformazioni come si vede dalle Figure (Figure 6.37a-6.37b-6.37c). Il modello presentante meno imperfezioni è quello ottenuto col blocco NS+EO.

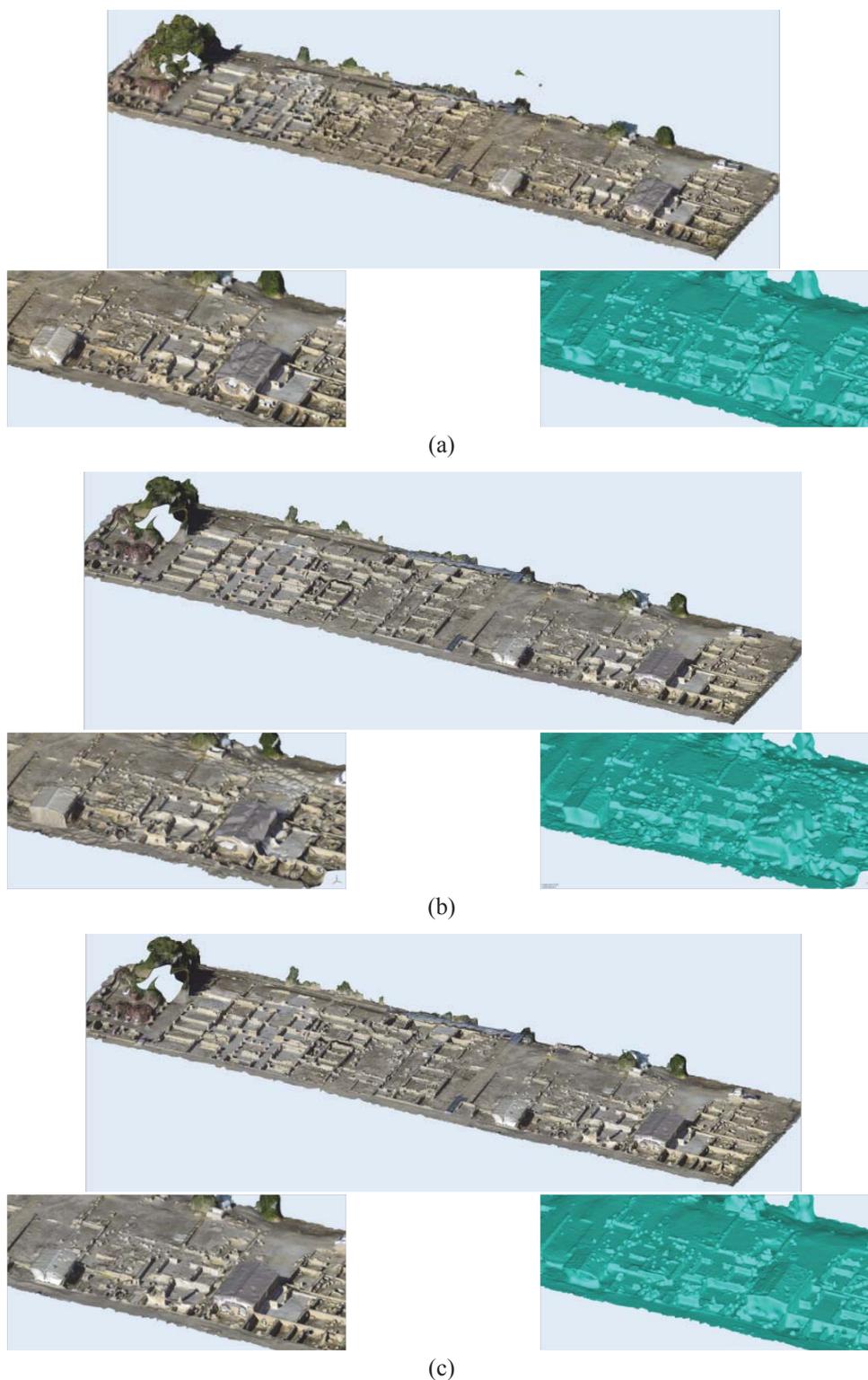


Figura 6.37 – I modelli a *mesh* del Quartiere ellenistico-romano generati con 123D Catch dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c)

Per una verifica metrica relativa alle informazioni in quota dei modelli, che già dai precedenti confronti sono risultate le più problematiche, sono stati rilevati tramite tecniche GNSS dei punti sparsi nelle due aree di studio. In totale sono stati presi 313 punti nell'area del Tempio di Iside e 110 punti nell'area del Quartiere ellenisico-romano. Le ricostruzioni 3D sono state convertite in nuvole di punti e sono state interpolate secondo una maglia regolare che è stata stabilita in funzione della densità dei modelli. Per PhotoScan è stata creata una maglia di punti di 3 cm, mentre per VisualSfm e 123D Catch una maglia pari a 5 cm. L'interpolazione è una tecnica che crea da un insieme di punti non ordinati una griglia regolare in cui ad ogni nodo corrisponde un punto. I valori dove il dato è mancante viene calcolato sulla base degli altri valori noti. Nel nostro caso il metodo di interpolazione utilizzato è il *Nearest Neighbor* che determina i valori della griglia basandosi sui valori noti dei punti più vicini al nodo. La verifica ha messo in evidenza alcune deformazioni ed anomalie dei modelli generati. Per la verifica sono state create delle mappe dove sono rappresentati i punti di controllo, sovrapposti alle ortofoto dei due siti, contraddistinti da un colore che evidenzia le differenze tra la quota reale e la quota misurata sulle varie superfici interpolate. Nelle rappresentazioni grafiche relative al Tempio di Iside rispettivamente dei blocchi NS e EO generati con PhotoScan si vede una concentrazione di differenze positive nella porzione centrale del Tempio e negative ai bordi. Questa strana concentrazione non è invece risultata dalle mappe relative al blocco unico NS+EO, ma in tale mappa le differenze tra le quote risultano distribuite in maniera più omogenea (Figure 6.38a-6.38b-6.38c). Questo sembra evidenziare una leggera deformazione dei modelli generati con i blocchi NS e EO considerati singolarmente.

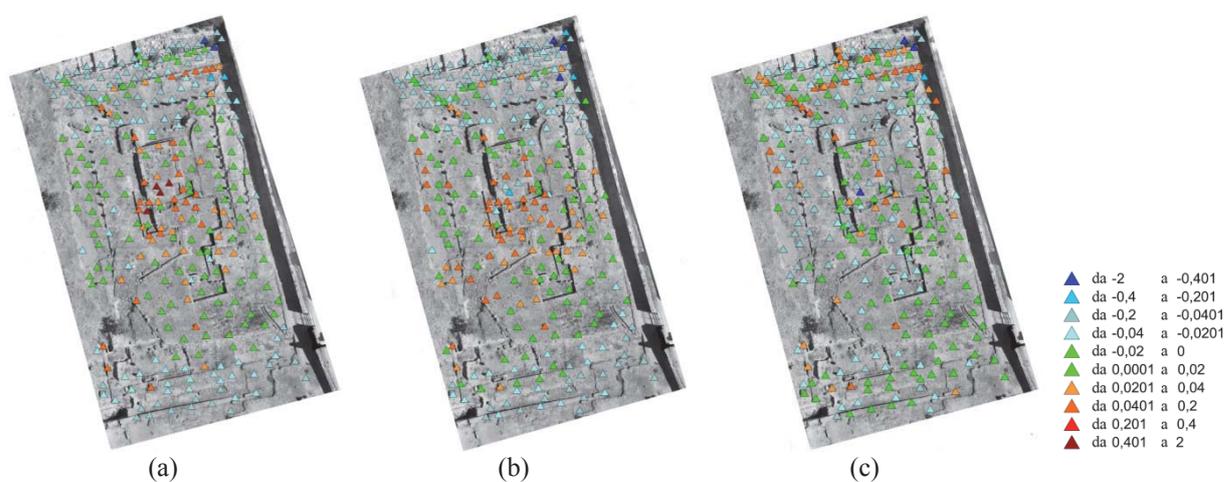


Figura 6.38 – Differenze tra le quote dei punti sparsi misurati con tecniche GNSS e quelle calcolate nei modelli interpolati di PhotoScan generati dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c) relativi all'area del Tempio di Iside

Lo stesso problema si presenta nei modelli generati con VisualSfm; in particolare questa strana distribuzione è maggiormente accentuata nel modello risultante dal blocco NS rispetto a quello EO. Infatti nel modello generato dal blocco NS vi sono differenze positive ai bordi e negative al centro (Figura 6.39a) mentre nel modello generato dal blocco EO vi sono sempre differenze positive ai bordi ma al centro vi è una concentrazione di differenze di quota comprese tra $\pm 0,02$ m (Figura 6.39b). Anche in questo caso questa strana distribuzione non è presente nella mappa relativa al blocco unico NS+EO, dove le differenze di quota sia positive che negative risultano equamente distribuite (Figura 6.39a-6.39b-6.39c).

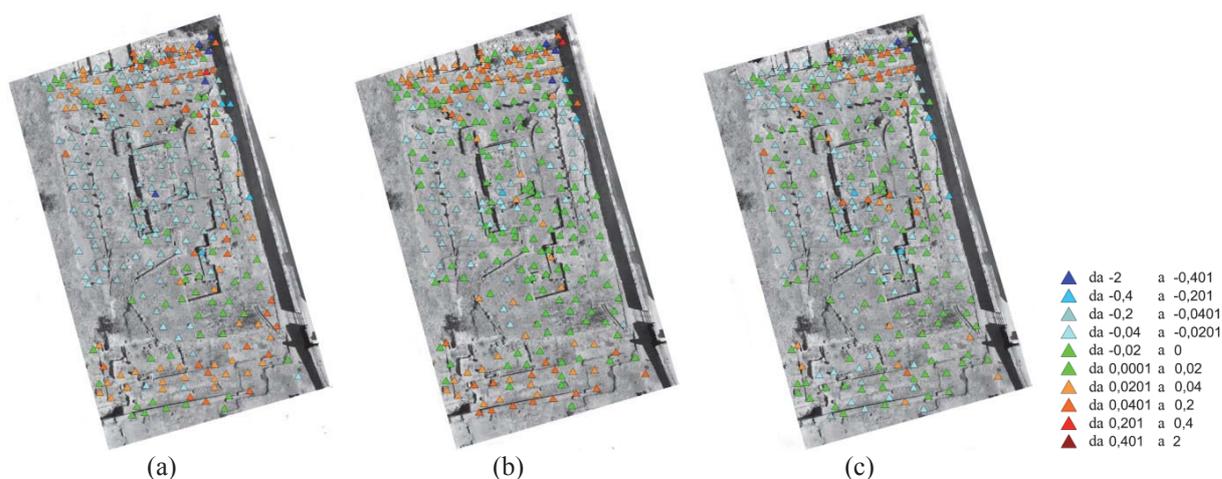


Figura 6.39 – Differenze tra le quote dei punti sparsi misurati con tecniche GNSS e quelle calcolate nei modelli interpolati di VisualSfm generati dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c) relativi all'area del Tempio di Iside

La stessa problematica è stata riscontrata anche nelle rappresentazioni grafiche derivanti dalle verifiche dei modelli generati con 123D Catch (Figure 6.40a-6.40b-6.40c). E' interessante notare come i modelli presentano lo stesso tipo di anomalia anche nel segno, con quote superiori rispetto a quelle reali ai bordi ed inferiori nella porzione centrale.

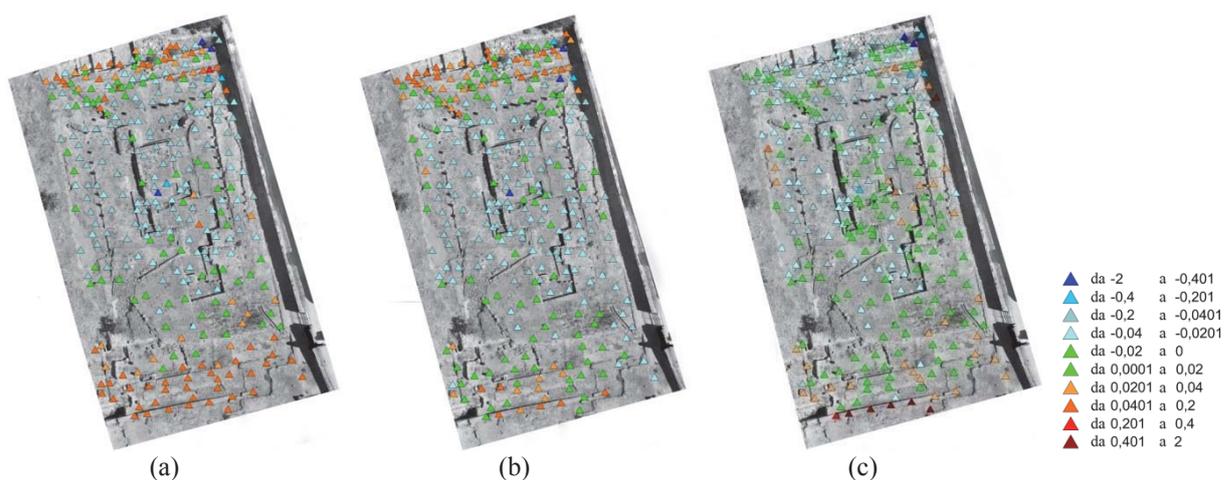


Figura 6.40 – Differenze tra le quote dei punti sparsi misurati con tecniche GNSS e quelle calcolate nei modelli interpolati di 123D Catch generati dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c) relativi all'area del Tempio di Iside

Nella tabella 6.41 sono visibili i valori di media e deviazione standard risultati dalle verifiche. I valori di media ottenuti con PhotoScan sono compresi tra -0,01 m per il blocco NS+EO e -0,03 m per il blocco EO; mentre i valori di media ottenuti sia con VisualSfm che con 123D Catch sono compresi tra 0,00 per il blocco NS+EO e -0,02 sia per il blocco NS che per quello EO. I valori di deviazione standard ottenuti con PhotoScan sono compresi tra $\pm 0,07$ m per il blocco NS+EO e $\pm 0,11$ m per il blocco NS; quelli ottenuti con VisualSfm sono compresi tra $\pm 0,07$ m sia per il blocco EO che per il blocco unico NS+EO e $\pm 0,11$ m per il blocco NS; infine quelli risultanti da 123D Catch sono tutti pari a $\pm 0,07$ m.

In generale i valori denotano una buona precisione compatibile con quella ottenuta dalle verifiche delle procedure di georeferenziazione.

Software	Direzione dei voli	Numero di punti	Media [m]	Deviazione Standard [m]
Photoscan	NS	313	-0,02	0,11
	EO	313	-0,03	0,08
	NS+EO	313	-0,01	0,07
VisualSfm + Sfm_Georef	NS	313	-0,02	0,11
	EO	313	-0,02	0,07
	NS+EO	313	0,00	0,07
Autodesk 123D Catch	NS	313	-0,02	0,07
	EO	313	-0,02	0,07
	NS+EO	313	0,00	0,07

Tabella 6.41 –Valori statistici relativi alle verifiche metriche dell'area del Tempio di Iside

Nelle rappresentazioni grafiche relative al Quartiere ellenistico-romano si ha una distribuzione strana delle differenze dei punti in quota in quasi tutti i modelli. Le tre mappe relative ai tre modelli generati da PhotoScan sono molto simili tra loro con differenze negative alle estremità e positive al centro (Figure 6.42a-6.42b-6.42c).

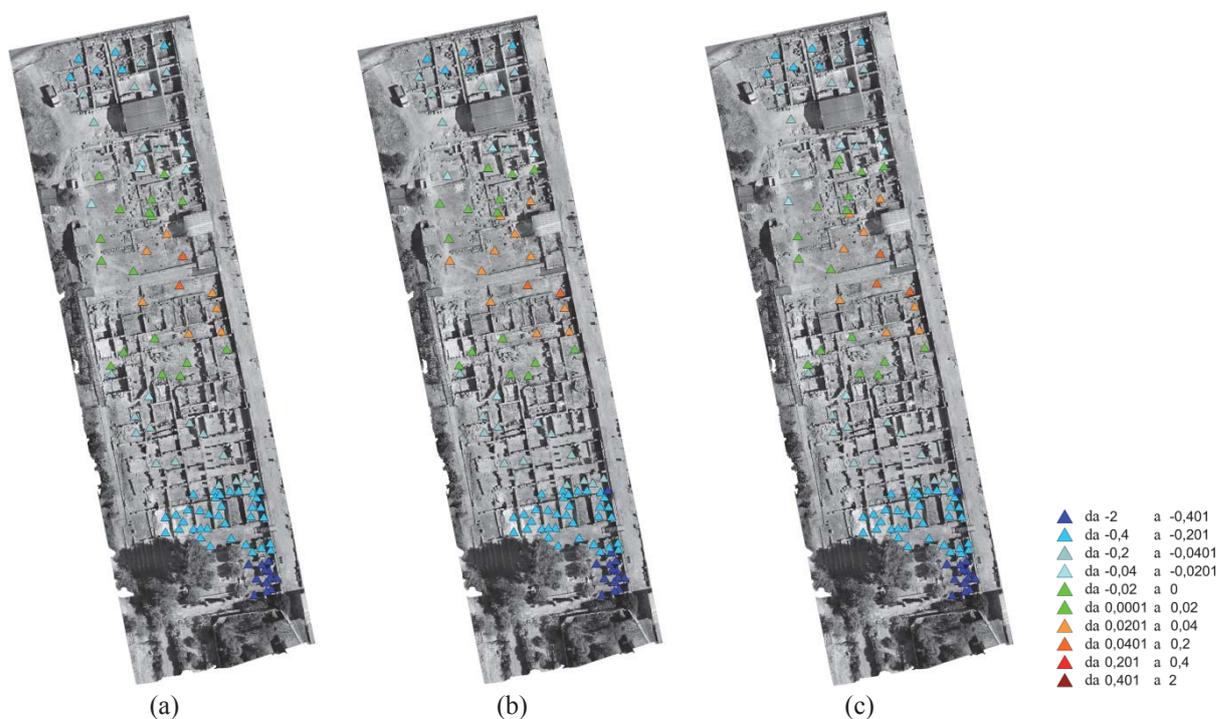


Figura 6.42 – Differenze tra le quote dei punti sparsi misurati con tecniche GNSS e quelle calcolate nei modelli interpolati di PhotoScan generati dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c) relativi all'*insula* del Quartiere ellenistico-romano

Nella verifica con i modelli generati con VisualSfm sono state riscontrate le stesse problematiche, solo che in questo caso i modelli presentano lo stesso tipo di distribuzioni anomale con segni discordanti. In particolare la mappa relativa al modello generato con il blocco NS presenta scarti positivi alle estremità e negativi al centro, valori invertiti sia rispetto a quelli risultanti dalle verifiche sui modelli di PhotoScan, sia quelli risultanti dalle verifiche sui modelli ottenuti con VisualSfm generati dai blocchi EO e NS+EO. Queste differenze di segno sono visibili nelle Figure 6.43a-6.43b-6.43c.

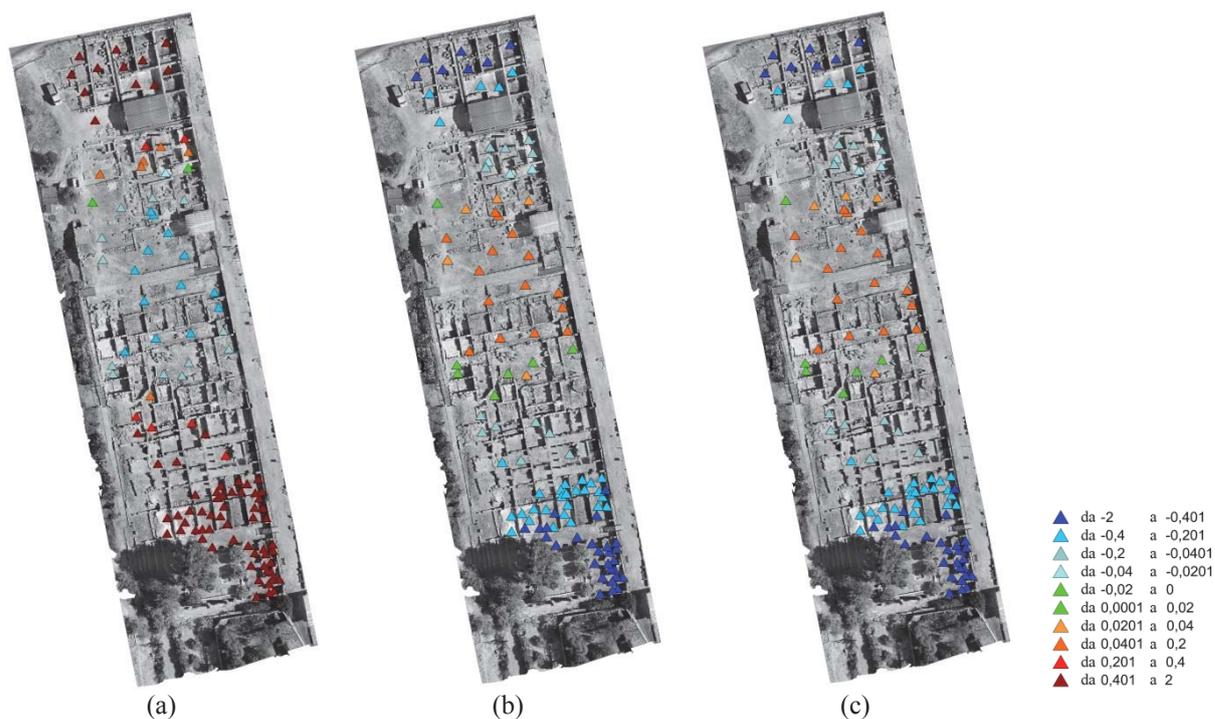


Figura 6.43 – Differenze tra le quote dei punti sparsi misurati con tecniche GNSS e quelle calcolate nei modelli interpolati di VisualSfm generati dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c) relativi all'*insula* del Quartiere ellenistico-romano

Questa differente distribuzione tra valori positivi e negativi è risultata anche dalle verifiche sui modelli generati con 123D Catch. In particolare i modelli ottenuti dal blocco NS e EO presentano scarti positivi alle estremità e negativi al centro, mentre il modello generato dal blocco NS+EO presenta concentrazione di valori positivi negli ambienti delle abitazioni esposti a sud e valori negativi negli ambienti delle abitazioni esposte a nord forse per problemi relativi all'allineamento (Figure 6.44a-6.44b-6.44c).

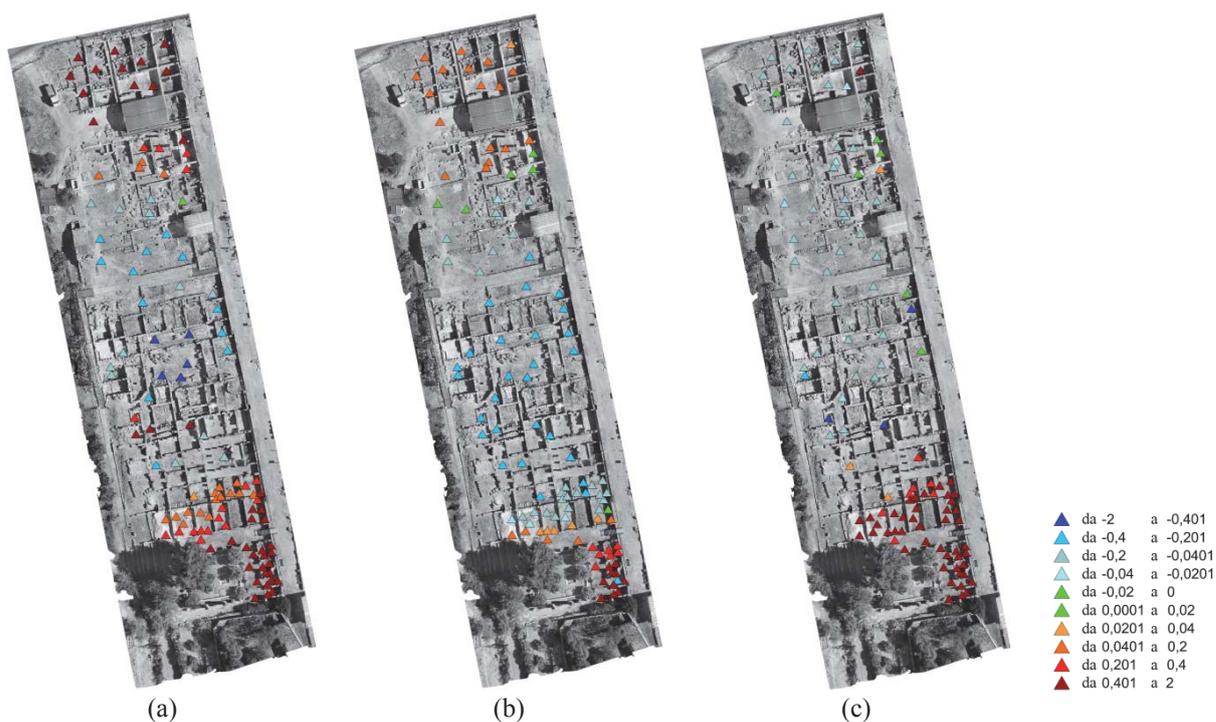


Figura 6.44 – Differenze tra le quote dei punti sparsi misurati con tecniche GNSS e quelle calcolate nei modelli interpolati di 123D Catch generati dai blocchi NS (a), EO (b), NS+EO (c) relativi all'*insula* del Quartiere ellenistico-romano

Dai parametri statistici relativi alle verifiche metriche emergono delle anomalie nei valori di media ottenuti. Per prima cosa le medie presentano sia valori positivi che negativi, confermando la differente distribuzione tra valori positivi e negativi delle differenze dei punti in quota rilevata dalle mappe. Inoltre i valori ottenuti sono tutti molto elevati, addirittura dello stesso ordine di grandezza della deviazione standard, denotando la presenza di un evidente errore sistematico in quasi tutti i modelli di difficile individuazione (Tabella 6.45). L'unico modello che presenta un valore pari a 0 è quello generato da 123D Catch relativamente al blocco unico NS+EO.

I valori di deviazioni standard ottenuti sono compatibili con gli scarti dei punti di appoggio risultati dalle verifiche effettuate precedentemente, evidenziando ancora di più i problemi già riscontrati per le altimetrie con valori anche molto elevati in particolare per il modello generato con VisualSfm con il blocco NS.

Nello specifico i valori di media ottenuti con PhotoScan sono tutti negativi e pari a -0,18; mentre i valori di media ottenuti con VisualSfm sono compresi tra -0,26 sia per il blocco unico NS+EO che per quello EO e 0,95 per il blocco NS; infine i valori di media ottenuti con 123D Catch sono tutti positivi e compresi tra 0,00 per il blocco unico NS+EO e 0,33 m per il blocco NS. Infine i valori di deviazione standard ottenuti con PhotoScan sono tutti pari a

$\pm 0,17$ m; quelli ottenuti con VisualSfm sono compresi tra $\pm 0,24$ m sia per il blocco EO che per il blocco unico NS+EO e $\pm 0,96$ m per il blocco NS; infine quelli risultanti da 123D Catch sono compresi tra $\pm 0,27$ m per il blocco unico NS+EO e $\pm 0,49$ m per il blocco NS.

Software	Direzione dei voli	Numero di punti	Media [m]	Deviazione Standard [m]
Photoscan	NS	109	-0,18	0,17
	EO	109	-0,18	0,17
	NS+EO	109	-0,18	0,17
VisualSfm + Sfm_Georef	NS	109	0,95	0,96
	EO	109	-0,26	0,24
	NS+EO	109	-0,26	0,24
Autodesk 123D Catch	NS	109	0,33	0,49
	EO	109	0,30	0,48
	NS+EO	109	0,00	0,27

Tabella 6.45 – Valori statistici relativi alle verifiche metriche dell'*insula* Quartiere ellenistico romano

Quindi i parametri statistici confermano le anomalie evidenziate dalle mappe relative alle verifiche. In particolare le deformazioni riscontrate possono essere dovute alle procedure impiegate per l'allineamento e per l'orientamento delle immagini. Infatti i modelli 3D generati derivano esclusivamente da procedure SfM, senza l'utilizzo di vincoli metrici nel calcolo. La georeferenziazione dei modelli è infatti avvenuta inserendo a posteriori, dopo la ricostruzione 3D, i punti di coordinate note, ed eseguendo una rototraslazione con variazione di scala, senza applicare alcuna correzione ai parametri di orientamento esterno come invece avviene nelle procedure di *bundle adjustment* con inserimento di vincoli metrici minimizzando gli errori attraverso compensazioni ai minimi quadrati (Capitolo 2, paragrafo 2.11). In effetti le deformazioni di blocchi aerei che riprendono aree pianeggianti anche molto estese può verificarsi quando non si inseriscono vincoli durante l'orientamento delle immagini (Nex & Remondino, 2013).

Per il Tempio di Iside la robustezza del blocco unico NS+EO ha minimizzato le deformazioni presenti nei blocchi NS ed EO considerati singolarmente, mentre la forma molto stretta e allungata dell'*insula* del Quartiere ellenistico ha determinato delle deformazioni in tutti i modelli sia in quelli generati dai singoli blocchi NS e EO che in quelli ottenuti dai blocchi unici NS+EO.

7. Conclusioni e sviluppi futuri

La ricerca svolta nell'ambito di questa tesi è stata finalizzata allo studio delle tecniche geomatiche per ottenere ricostruzioni virtuali e modelli 3D digitali di oggetti reali. In particolare, sono state analizzate le possibilità offerte dall'uso delle tecniche *image-based* nel settore archeologico; uno studio è stato anche eseguito per alcune applicazioni nell'ambito delle infrastrutture stradali.

La ricerca è stata condotta utilizzando dei casi studio, in ambito archeologico o dei Beni Culturali, opportunamente scelti, aventi caratteristiche differenti sia per quanto riguarda la tipologia e le dimensioni degli oggetti che per i sistemi di acquisizione impiegati. Come descritto nel corso della tesi, i nuovi progressi tecnologici e informatici hanno dato alle tecniche *image-based* nuove opportunità di sviluppo e diffusione, estendendo il numero delle possibili applicazioni e degli eventuali utilizzatori. Gli aspetti esaminati, attraverso l'acquisizione e il processamento di diversi *dataset*, sono inerenti alle prestazioni di questi nuovi strumenti in termini di operatività, affidabilità dei processi, qualità ed accuratezza metrica dei prodotti finali.

I casi studio presentati, relativi sia a prese terrestri che aeree di prossimità, sono incentrati sulla ricostruzione 3D tramite tecniche *image-based* che impiegano algoritmi della CV.

I casi studio terrestri permettono di fare diverse considerazioni relativamente alle prestazioni degli strumenti indagati. In particolare, per gli oggetti di piccole dimensioni è possibile ottenere dei risultati buoni sia in termini di qualità delle ricostruzioni 3D che di accuratezza metrica. La qualità delle ricostruzioni può essere valutata in funzione della percentuale delle lacune ottenute che, a sua volta, dipende, dalla geometria delle prese, dalle caratteristiche dell'oggetto rilevato dalla tipologia di camera fotografica impiegata. Quest'ultimo aspetto ha determinato delle differenze, in termini di percentuale di lacune, tra il secondo ed il terzo *dataset*, aventi come oggetto rispettivamente la scultura a forma di testa e il bassorilievo dell'Arula. Infatti, le differenti tipologie di camere adoperate, rispettivamente una digitale compatta nel primo caso e una reflex digitale nel secondo, hanno determinato la

presenza di un numero in percentuale maggiore di lacune nel primo caso, anche utilizzando molte più immagini. Questa differenza ha influito pure sulla precisione metrica raggiunta, in quanto i parametri statistici ottenuti dai confronti 3D hanno evidenziato alcuni problemi nel secondo *dataset*. In particolare le medie tutte positive ottenute con i 3D *web-service* e con valori anche piuttosto elevati per 123D Catch (0,46 mm) e per Arc3D (0,56 mm) denotano la presenza di errori sistematici la cui causa è difficile da individuare. I problemi possono essere dovuti o ad un non corretto allineamento delle immagini o a errori di messa in scala o a problemi relativi all'allineamento dei modelli 3D. Inoltre le deviazioni standard risultate dal confronto 3D relativo ai modelli del secondo *dataset* sono circa il doppio di quelle ottenute dal terzo *dataset*. Comunque tutti i valori di deviazioni standard, tranne quello ottenuto dal confronto con Arc3D nel caso della scultura a forma di testa che è risultato pari a $\pm 1,38$ mm, sono al di sotto del millimetro per entrambi i *dataset*; questo risultato può quindi fare ipotizzare che gli elaborati prodotti rispettano, tolleranze equivalenti agli elaborati grafici a grandi scale (a partire da una scala 1:2). Quest'ultimo assunto permette di affermare che per i piccoli oggetti gli strumenti indagati possono sostituire o eventualmente integrare i rilievi condotti tramite la fotogrammetria tradizionale o tramite tecniche *laser scanning*.

La ricostruzione 3D di oggetti di medie dimensioni è stata più problematica, specialmente per il *dataset* delle rovine del teatro di Solunto. Le diverse prove che è stato necessario effettuare con il 3D *web-service* Arc3D sottolineano come sia importante disporre di immagini adeguate al tipo di strumento impiegato. Inoltre le evidenti deformazioni ottenute con 123D Catch evidenziano la possibilità dei 3D *web-service* di generare modelli non corretti metricamente. I test sui *dataset* della fontana consentono di valutare l'effetto sulla qualità ed accuratezza metrica anche all'aumentare del numero delle immagini utilizzate per la ricostruzione 3D (tre *dataset* costituiti da 6, 11 e 25). Il numero delle lacune diminuisce all'aumentare delle immagini, anche se in termini di densità dei punti, i modelli generati dal secondo *dataset*, sono risultati i migliori dal punto di vista qualitativo. Da ciò si deduce che la qualità della ricostruzione 3D dipende da una combinazione di fattori ed in particolare da un buon compromesso tra numero di immagini e uniformità della loro scala (le immagini del *dataset* costituito da 25 immagini presentavano forti variazioni di scala e conseguentemente di GSD). Anche dal punto di vista metrico il *dataset* che è risultato migliore per tutti e tre gli strumenti della CV indagati è il secondo (valori di media compresi tra 0,51 mm ottenuto con 123D Catch e 0,66 mm ottenuto con VisualSfm e valori di deviazione standard compresi tra $\pm 9,06$ mm di My3Dscanner e $\pm 14,06$ mm di 123D Catch). Anche in questo caso complessivamente i modelli che presentano livelli di accuratezza metrica inferiore sono quelli

ottenuti con i 3D *web-service* ed in particolare con 123D Catch, mentre quelli che si presentano metricamente più corretti sono quelli generati da VisualSfm. I valori di deviazione standard ottenuti, essendo inferiori a ± 20 mm, rientrano nelle tolleranze per restituzioni grafiche alla scala 1:50, ad eccezione del valore, pari a $\pm 21,04$ mm, ottenuto da 123D Catch relativo al *dataset* costituito da 6 immagini. In generale è possibile affermare che per oggetti di medie dimensioni la precisione metrica raggiunta dell'ordine del centimetro è un risultato accettabile per molte applicazioni in ambito archeologico ma non adeguata a rilievi metrici accurati. Inoltre, i risultati ottenuti evidenziano che, per queste scale di rilievo, l'approccio adottato non è ancora comparabile dal punto di vista metrico con i "classici" rilievi fotogrammetrici o *laser scanner*.

Bisogna però tenere sempre in considerazione, sia per i rilievi di oggetti di piccole sia di quelli di medie dimensioni, che si opera con strumenti di tipo *black box* sui quali l'operatore non può intervenire per facilitare la buona riuscita del processo e non può verificare in maniera semplice la correttezza metrica degli elaborati; e quindi opportuno fornirsi di adeguati strumenti per la verifica metrica dei modelli ottenuti. Inoltre è importante prestare particolare attenzione alla fase di acquisizione delle immagini, oltre a scegliere la geometria di presa più congeniale in funzione delle caratteristiche dell'oggetto da rilevare. Infatti se non si dispone di immagini adeguate al tipo di strumento impiegato si potrebbero ottenere prodotti incompleti e con la presenza di deformazioni. In relazione ai risultati raggiunti nell'ambito della presente tesi è possibile affermare che in termini di prestazioni per gli oggetti di piccole e medie dimensioni lo strumento che ha fornito i migliori risultati sia dal punto di vista qualitativo che metrico è VisualSfm, mentre lo strumento che si è dimostrato più instabile è il 3D *web-service*, Arc3D, in quanto le ricostruzioni 3D non sempre vanno a buon fine, e, quando hanno successo, l'accuratezza metrica non è sempre soddisfacente.

L'esperienza condotta con le prese aeree di prossimità acquisite da pallone permettono di asserire come gli strumenti che utilizzano la CV sono la soluzione ottimale per elaborare questo tipo di *dataset* con geometrie di prese non convenzionali. I modelli 3D ottenuti presentano un buon livello di dettaglio tanto da potere affermare che, in queste condizioni e con alcuni dei *software* impiegati, si possono raggiungere livelli qualitativi molto vicini a quelli ottenibili dalle tecniche *laser scanning* e fotogrammetriche tradizionali. Le ricostruzioni ottenute con PhotoScan sono quelle più dettagliate nella definizione dei particolari per tutti e tre i modelli ottenuti. Un livello di dettaglio accettabile, quasi paragonabile a quello ottenuto con PhotoScan, è stato riscontrato nei modelli generati da 123D Catch, mentre le ricostruzioni 3D calcolate da VisualSfm si presentano con livelli di definizione della superficie variabili,

con superfici più rumorose e con la presenza di lacune. Queste problematiche sono risultate anche dai confronti tra le sezioni estratte dai modelli 3D, in particolar modo nella ricostruzione 3D del Tempio romano: la superficie generata dal *software open source* presenta superfici molto irregolari e frastagliate anche nelle porzioni, quali l'area pavimentata del Tempio, che dovrebbero presentare un profilo piano e regolare. Dal punto di vista qualitativo i modelli calcolati da PhotoScan e 123D Catch si sono dimostrati migliori rispetto a quelli calcolati con VisualSfm.

Infine l'esperienza eseguita con le prese aeree acquisite da drone ha mostrato alcune problematiche che portano a delle importanti deduzioni, sia in funzione di forma e dimensione delle aree rilevate che delle geometrie di prese. Quest'ultimo aspetto è stato indagato progettando e realizzando delle coperture fotografiche ridondanti che hanno permesso di fare anche delle valutazioni sull'orientamento e georeferenziazione dei blocchi fotogrammetrici oltre che sulla realizzazione dei modelli 3D.

Prima di tutto si sottolinea come le ricostruzioni 3D del Tempio di Iside sono risultate abbastanza apprezzabili dal punto di vista qualitativo, con modelli di estremo dettaglio per tutti gli strumenti indagati. Gli s.q.m. risultanti dalle verifiche delle procedure di georeferenziazione del Tempio con PhotoScan e con VisualSfm hanno evidenziato una maggiore precisione degli orientamenti derivanti dai blocchi unici NS+EO (rispettivamente s.q.m. pari a $\pm 0,027$ m con PhotoScan e a $\pm 0,022$ m con VisualSfm), indicando una maggiore robustezza del blocco con strisciate incrociate. Tutti i valori, rientrando nella tolleranza grafica per restituzioni cartografiche alla scala 1:200, costituiscono un buon risultato dal punto di vista metrico.

Le ricostruzioni 3D relative al *dataset* dell'*insula* del Quartiere ellenistico-romano ottenute con PhotoScan e con VisualSfm sono abbastanza soddisfacenti, dal punto di vista qualitativo, con la presenza di poche lacune; al contrario le ricostruzioni 3D ottenute con il processo automatico di 123D Catch sono state le più problematiche. Infatti i modelli che il calcolo automatico è riuscito a produrre sono a risoluzioni più basse con presenza di superfici molto deformate. Gli s.q.m. risultanti dalle verifiche delle procedure di georeferenziazione sul *dataset* del Quartiere sono accettabili per PhotoScan, (s.q.m. compresi tra $\pm 0,048$ m per il blocco NS+EO e $\pm 0,058$ m per il blocco EO) ma evidenziano delle problematiche per VisualSfm (s.q.m. compresi tra $\pm 0,094$ m per il blocco NS+EO e $\pm 0,294$ m per il blocco NS), mostrando una diminuzione, anche piuttosto significativa della precisione metrica del calcolo automatico del *software open source*. Le verifiche metriche dei punti in quota, però, hanno messo in evidenza delle deformazioni, oltre che nei modelli 3D di VisualSfm, anche nei

modelli generati sia con PhotoScan che con 123D Catch, ad eccezione del modello di 123D Catch derivante dal blocco unico NS+EO. La presenza delle deformazioni riscontrate in tutti i blocchi sottolineano come il calcolo automatico può portare a delle ricostruzioni di modelli metricamente scorretti. Inoltre i parametri statistici, già analizzati, sono indicativi di queste problematiche denotando la presenza di errori sistematici in quasi tutti i blocchi con medie elevate e quasi dello stesso ordine di grandezza delle deviazioni standard. Il problema, probabilmente, è dovuto ai processi completamente automatici della SfM con cui sono state prodotte le ricostruzioni 3D, senza l'inserimento di vincoli metrici nel calcolo, e non applicando alcuna correzione ai parametri di orientamento esterno, come può essere applicata nelle procedure del *bundle adjustment* con inserimento di vincoli metrici minimizzando gli errori attraverso compensazione ai minimi quadrati. Una maggiore robustezza nel calcolo automatico può essere introdotta anche attraverso l'acquisizione di immagini con buone e solide geometrie di prese, come possono essere delle prese nadirali incrociate nell'ambito dell'acquisizione aerea. Questo è risultato valido per i *dataset* del Tempio di Iside, dove la robustezza del blocco unico NS+EO ha minimizzato le deformazioni presenti nei blocchi NS ed EO considerati singolarmente, mentre non ha fornito buoni risultati nei *dataset* dell'*insula* del Quartiere ellenistico. Infatti la forma molto stretta e allungata dell'*insula* ha determinato delle deformazioni in tutti i modelli, sia in quelli generati dai singoli blocchi NS e EO che in quelli ottenuti dai blocchi unici NS+EO.

Quindi se si utilizzano le tecniche della CV per oggetti di grandi dimensioni o con geometria particolare, come può essere la forma stretta e lunga dell'*insula*, occorre avere informazioni adeguate per verificare la correttezza metrica dei prodotti finali. Alla luce dei risultati raggiunti dalla elaborazione delle immagini aeree di prossimità, la precisione metrica ottenibile dagli strumenti della CV non è paragonabile a quella dei “classici” rilievi fotogrammetrici o *laser scanning*.

Infine lo studio svolto sul possibile utilizzo delle tecniche *image-based* e *range-based* nel settore delle infrastrutture stradali ha dimostrato come il contributo offerto da queste tecnologie può essere molto rilevante, grazie alla possibilità di eseguire nuove tipologie di analisi e applicazioni. Le ricerche presentate che impiegano le tecniche *image-based* si avvalgono delle stesse metodologie adoperate nei casi studio relativi al campo dei beni archeologici. In particolare l'introduzione di piattaforme aeree a bassa quota per il rilievo di infrastrutture stradali offre numerosi vantaggi, quali flessibilità, ripetibilità e basso costo e consentono di avere informazioni 3D a risoluzioni elevate e metricamente accurate, che costituiscono un supporto utile per determinare la condizione del manto stradale attraverso

analisi e caratterizzazione dei degradi. Inoltre, la ricostruzione 3D, tramite le stesse tecniche analizzate nella presente ricerca, possono costituire un supporto utile per eseguire estrazioni e classificazioni automatiche degli elementi che contraddistinguono una strada, introducendo metodologie con caratteristiche di basso costo ed di elevato automatismo. Gli studi presentati che impiegano le tecniche *range-based*, hanno dimostrato come i modelli 3D generati da queste tecnologie costituiscono delle basi utilizzabili per diverse ed innovative tipologie di analisi più precise e veloci, come per esempio per la caratterizzazione della tessitura dei manti stradali oppure per la classificazione automatica degli elementi costituenti una strada o per il monitoraggio in tempo reale del traffico.

Molteplici potrebbero essere gli sviluppi futuri delle tecniche indagate nel campo del rilievo archeologico. Prima di tutto i modelli 3D ottenuti, grazie alla loro qualità fotorealistica, possono costituire una base utilizzabile per la creazione di musei virtuali, per studi di tipo multi-temporale o per analisi dei degradi superficiali attraverso mappatura delle superfici. Inoltre potrebbe essere interessante lo studio e l'analisi dei prodotti ottenibili delle applicazioni per i-Phone ed i-Pad, che sono recentemente state sviluppate anche per i 3D *web-service* utilizzati nell'ambito del presente studio. Infatti l'utilizzo di queste *app* potrebbe essere interessante per acquisire il dato metrico in *real-time* in qualsiasi contesto, soltanto disponendo di un dispositivo portatile e di una connessione internet, utile, per esempio, per il rilievo veloce di reperti che devono essere spostati per la prosecuzione di uno scavo.

Nell'ambito delle infrastrutture stradali le tecniche indagate possono fornire sviluppi interessanti, come: la definizione di procedure e tecniche che utilizzano sistemi di acquisizione aerea di prossimità per la determinazione dello stato di salute di qualsiasi tipologia di strada; metodologie standardizzate per la estrazione e classificazione degli elementi stradali attraverso sistemi MMS; standardizzazione di indici di tipo volumetrico ed areale valutabili su modelli 3D acquisiti con tecnologie geomatiche.

Bibliografia

- Abdel-Aziz Y.I. and Karara H.M., 1971. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry. Proc. Symposium on Close-Range Photogrammetry, pp. 1-18.
- Aber, J. S., Aber, S. W. and Pavri, F., 2002. Unmanned small-format aerial photography from kites for acquiring large scale, high-resolution, multiview-angle imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS, Denver, CO, USA, 6 pp.
- Akel, N.A., Kremeike, K., Filin, S., Sester, M., Doytsher, Y., 2005. Dense DTM generalization aided by roads extracted from LIDAR data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science 36 (Part 3/W19), pp. 54–59.
- Albertini L., Sandrini P., 2012. L'uso della fotografia. Tecniche, autori e applicazioni. Tesi di Laurea, Politecnico di Milano.
- Altan M.O., Celikoyan T.M., Kemper G., Toz G., 2004. Balloon photogrammetry for cultural heritage. ISPRS Archives Vol. XXXV-B5, XX ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, pp. 964-968.
- Angelini A., Colosi F., Gabrielli R., Fentress E., Filippone C., 2007. Tecniche speditive per la ricostruzione tridimensionale dell'area archeologica di Villa Magna. Archeologia e Calcolatori 18, pp. 141-158.
- Azarbayejani A. and Pentland A. P., 1995. Recursive estimation of motion, structure, and focal length. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 17(6) pp. 562–575.
- Baker H. H., 1982. Depth from Edge and Intensity Based Stereo. Technical Report AIM-347, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University.
- Barazzetti L., Scaioni M., 2010. Dalle immagini dell'oggetto alla replica fisica in modalità automatica. Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA, Brescia, 9-12 novembre 2010, pp. 149-154.

- Barazzetti L., Remondino F., Scaioni M., 2011. Automated and accurate orientation of complex image sequences. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-5/W16, pp. 277-284.
- Barnard S. T. e Fischler M. A., 1982. Computational stereo. *Computing Surveys*, 14(4), pp. 553–572.
- Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L., 2008. SURF: Speeded Up Robust Features, *Computer Vision and Image Understanding*, 110, pp. 346-359.
- Bendea H., Chiabrandò F., Tonolo G., Marenchino D., 2007. Mapping of Archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum test site XXI International CIPA Symposium, 01-06 October, Athens, Greece, pp. 117-123.
- Bitelli G., Simone A., Girardi F. and Lantieri C., 2012. Laser scanning on road pavements: A New Approach for Characterizing Surface Texture, *Sensors* 2012, 12, pp. 9110-9128.
- Brown, D.C., 1971. Close-range camera calibration. *PE&RS*, Vol. 37(8), pp.855-866.
- Bruno L., Parla G., Celauro C., 2012. Image analysis for detecting aggregate gradation in asphalt mixture from planar image. *Construction and building materials*, Vol. 28, Issue 1, pp. 21-30.
- Cafiso S., Di Graziano A. e Battiato S., 2006. Evaluation of pavement surface distress using digital image. *Collection and analysis*, 7° International Congress on Advances in Civil Engineering, October 11-13, 2006, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey, 10 pp.
- Callieri M., Dell'Unto N., Dellepiane M., Scopigno R., Soderberg B., Larsson L., 2011. Documentation and Interpretation of an Archeological Excavation: an experience with Dense Stereo Reconstruction tools. *The 12th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*, 8 pp.
- Chiabrandò F., Spanò A., 2009. Digital wide scale orthoprojections and mapping from low-height aerial images. *Journal of Cultural Heritage* 10S, pp. e49–e58.
- Chiabrandò F., Rinaudo F., Spano' A., Costamagna E., 2010. Very close nadiral images: a proposal for quick digging survey. *The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, pp. 6, 2010, Vol. XXXVIII/5, pp. 155-160, ISSN: 1682-1777.
- Chiabrandò F., Nex F., Piatti D., Rinaudo F., 2011. UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy). *Journal of Archaeological Science*, 38, pp. 697-710.

- Choi, Y.W., Jang, Y.W., Lee, H.J., Cho, G.S., 2008. Three-dimensional LiDAR data classifying to extract road point in urban area. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 5 (4), pp. 725–729.
- Courchay J., Pons J.-P., Monasse P., Keriven R., 2010. Dense and Accurate Spatio-temporal Multi-view Stereovision. In: Zha H., Taniguchi R.-i., Maybank S. (eds.) *ACCV 2009, Part II*. LNCS, vol. 5995, Springer, Heidelberg, pp. 11–22.
- Curless B., 2000. Overview of active vision techniques. Slide del corso "3D Photography", SIGGRAPH.
- De Reu J., Plets G., Verhoeven G., De Smedt P., Bats M., Cherretté B., De Maeyer W., Deconynck J., Herremans D., Laloo P., Van Meirvenne M., De Clercq W., 2013, Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* 40, pp. 1108-1121.
- Di Paola F., Inzerillo L., Santagati C., 2013. Image-based modeling techniques for architectural heritage 3D digitalization: limits and potentialities. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2*, 2013, pp. 555-560.
- Doneus M., Verhoeven G., Fera M., Briese Ch., Kucera M., Neubauer W., 2011. From deposit to point cloud – a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. *Geoinformatics CTU FCE*, 6, pp. 81-88.
- Dyer C. M. e Seitz S. M., 1999. Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring. *International Journal of Computer Vision*, 35(2), pp. 151–173.
- Eisenbeiss H., 2004. A mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System overview and image acquisition. *International Workshop on Processing and Visualization using High Resolution Imagery. Proceeding of the International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXVI(5/W1)*, November 18-20, Pitsanulok, Thailand, 7 pp.
- Eisenbeiss H., 2008. The autonomous mini helicopter: a powerful platform for mobile mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1*. Beijing, pp. 977-984.
- Eisenbeiss, H., 2011. The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping, *Settimana della Fotogrammetria di Stoccarda*, Dieter Fritsch (Ed.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 135-145.

- Eppich R., Almagro A., Santana M., Almagro A., 2011. The view from above overview and comparison of low cost aerial photographic technique. XXIII International CIPA Symposium, Prague, 12-16 September, 10 pp.
- Everaerts J., 2008. The use of unmanned aerial vehicles (UAVS) for remote sensing and mapping. ISPRS Archives Vol. XXXVII. ISPRS Congress, Beijing, China, pp. 1187-1192.
- Faugeras O. and Toscani G., 1986. The calibration problem for stereo. IEEE CVPR, pp. 15-20.
- Faugeras O. D., 1992. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? In Second European Conference on Computer Vision (ECCV'92), pp. 563–578, Santa Margherita Liguere, Italy.
- Fratus De Balestrini E., Guerra F., 2010. New instruments for survey: on line softwares for 3D reconstruction from images. The International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Science, Vol. XXXVIII-5/W16, pp. 545-552.
- Furukawa Y., Ponce J., 2010. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 32(8), pp. 1362–1376.
- Fusiello A., 2013. Visione computazionale. Tecniche di ricostruzione tridimensionale. Franco Angeli Editore.
- Gesafidis S., Kambourakis A., Karras G.E., Lympelopoulos E., Madani M., Mavrelis G., Mavromati D., 1999. Digital orthophotography in archaeology with lowaltitude non-metric images. ISPRS Archives Vol. XXXII, Part 5/W11, pp. 8-11.
- Girardi F., 2011. Rilevamento e modellazione tridimensionale per oggetti di piccole dimensioni. Tesi di Dottorato in Ingegneria Geomatica e dei Trasporti, XIII Ciclo.
- Golparvar-Fard M., Peña-Mora F., and Savarese S., 2009. “D4AR- a 4-dimensional augmented reality model for automating construction progress data collection, processing and communication. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 14, pp. 129-153.
- Gomasca M.A., 2004. Elementi di geomatica. ed. Associazione Italiana di Telerilevamento.
- Gomez -Lahoz J., Gonzalez-Aguilera D., 2009. Recovering traditions in the digital era: the use of blimps for modelling the archaeological cultural heritage. Journal of Archaeological Science 36, pp. 100–109.
- Grimson W. E. L., 1985. Computational experiments with a feature based stereo algorithm. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-7(1), pp. 17–34.
- Guidi G., Russo M., Beraldin J.A., 2010. Acquisizione 3D e modellazione poligonale.

- McGraw-Hill, Milano 2010.
- Guidi, G., Remondino, F., 2012. 3D modeling from real data. In "Modeling and Simulation in Engineering", C. Alexandru (Ed.), ISBN 978-953-51-0012-6, DOI: 10.5772/30323, InTech Publisher
- Hartley R., Gupta R. e Chang T., 1992. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras. Second European Conference on Computer Vision (ECCV'92), Santa Margherita Liguere, Italy, pp. 579–587.
- Hartley R. I., 1994. Projective reconstruction and invariants from multiple images. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16(10), pp. 1036–1041.
- Hartley R. I. e Zisserman A., 2004. Multiple View Geometry. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Heikkilä J. and Silven O., 1997. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. CVPR97.
- Horn B. K. P., 1975. Obtaining shape from shading information. in Winston, P. H. (ed.), "The Psychology of Computer Vision", McGraw-Hill, New York, pp. 115–155.
- Huffman D. A., 1971. Impossible objects and nonsense sentences. Machine Intelligence, 8, pp. 295–323.
- Inzerillo L. e Santagati C., 2013. 123D Catch: efficiency, accuracy, constraints and limitations in architectural heritage field. International Journal of Heritage in the Digital Era, Multi Science Publishing, Volume 2, Numero 2, pp. 263-290.
- Kanade T., 1980. A theory of the origami world. Artificial Intelligence, 13, pp. 279–311.
- Kersten, T.P. e Lindstaedt, M., 2012. Image-based low cost systems for automatic 3D recording and modelling of archaeological finds and objects. Proceedings of Euromed 2012, Lemesos, Cyprus, October 29 e November 3, 10 pp.
- Kraus K., Fotogrammetria, vol. 1 Teoria e Applicazioni. Libreria Universitaria Levrotto & Bella, Torino 1994.
- Kutulakos K. N. e Seitz S. M., 2000. A theory of shape by space carving. International Journal of Computer Vision, 38(3), pp. 199–218.
- Lingua A., Marenchino D., Nex F., 2008. L'operatore SIFT per l'orientamento di immagini acquisite con prese non-normali. Atti 12^a Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila 21 – 24 ottobre 2008, 6 pp.
- Lo Brutto M., Borruso A., D'Argenio A., 2012. UAV Systems for photogrammetric data acquisition of archaeological sites. Journal of Heritage in the Digital Era, 1, Supplement 1, p. 7-13.

- Longuet-Higgins H. C., 1981. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 293, pp. 133–135.
- Lowe D., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), pp. 91-110.
- Marr D. e Poggio T., 1976. Cooperative computation of stereo disparity. *Science*, 194, pp. 283–287.
- Marr D. C. e Poggio T., 1979. A computational theory of human stereo vision. *Proceedings of the Royal Society of London, B* 204, pp. 301–328.
- Mihajlovic' D, Mitrovic' M, Cvijetinovic' Z' , Vojinovic' M. 2008. Photogrammetry of archaeological site Felix Romuliana at Gamzigrad using aerial digital camera and non-metric digital camera. In *Silk Road for Information from Imagery. Proceedings of the XXith ISPRS Congress, Beijing, China*, pp. 397–399.
- Moravec H., 1977. Towards automatic visual obstacle avoidance. *Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'77)*, p. 584, Cambridge, Massachusetts.
- Moulon P. e Bezzi A., 2011. PythonPhotogrammetry Toolbox: a free solution for three-dimensional documentation. *Atti del VI Workshop ArcheoFOSS 2011, Napoli, 9-10 giugno*, 12 pp.
- Mundy J.L., Hartley R., 1993. The relationship between Photogrammetry and Computer Vision. *SPIE*, 1993, 13 pp.
- Neitzel F., Klonowski J., 2011. Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/C22, pp. 39-44.
- Nex F., Remondino, F., 2013. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, Novembre 2013, 27 pp.
- Nguyen H. M., Wünsche B., Delmas P., 2012. 3D Models from the Black Box: Investigating the Current State of Image-Based Modeling. *Proceedings of the 20th international conference on computer graphics, visualisation and computer vision (WSCG 2012)*, Pilsen, Czech Republic, June 25–28, 2012, 10 pp.
- Niranjan S., Gaurav G., Nimish S., Mohit M., Vineet S., 2007. Initial Efforts toward Mission-specific Imaging Surveys from Aerial Exploring Platforms: UAV. *Map World Forum*, Hyderabad, India, 8 pp.
- Pasetto M., Bortolini G., 2006. Acquisizione, elaborazione ed analisi spaziale di immagini per la gestione del degrado delle pavimentazioni stradali. *XVI Convegno Nazionale S.I.I.V.- Campus di Arcavacata di Rende (CS) - 20-22 Settembre 2006*, 12 pp.

- Pentland, A. P., 1984. Local shading analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-6(2), pp. 170–179.
- Plets G., Gheyle W., Verhoeven G., De Reu J., Bourgeois J., Verhegge J.&Stichelbaut B., 2012. Three-dimensional recording of archaeological remains in the Altai Mountains. *Antiquity* 86 (333), pp. 884–897.
- Poggio T., 1981. Marr's computational approach to vision. in *Neuroscience*, October 1981, Vol. 4 No. 10 pp. 258-262.
- Pollard S. B., Mayhew J. E. W. e Frisby J. P., 1985. PMF: A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit. *Perception*, 14, pp. 449–470.
- Pueschel H., Sauerbier M., Eisenbeiss H., 2008. A 3D model of Castle Landenberg (CH) from combined photogrammetric processing of terrestrial and UAV-based images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII-B6b, pp. 93-98.
- Remondino, F., El-Hakim, S., 2005. Critical overview of image-based 3D modeling. In "Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage", E. Baltsavias, A. Gruen, L. Van Gool, M. Pateraki (Eds), Taylor & Francis / Balkema, ISBN 0 415 39208 X, pp. 299-313, May 22-27, Ascona, Switzerland.
- Remondino, F., El-Hakim, S., 2006. Image-based 3D modelling: a review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), pp. 269-291.
- Remondino, F., Zhang, L., 2006. Surface reconstruction algorithms for detailed close-range object modeling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36(3), pp. 117-123
- Remondino F., Fraser C., 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25-27 September*, pp. 266-272.
- Remondino F., Gruen A., Von Schwerin J., Eisenbeiss H., Rizzi A., Sauerbier M., Richards-Rissetto H., 2009. Multi-sensors 3D documentation of the Maya site of Copan. *ISPRS Archives Vol. XXXVIII-3/W8, XXII CIPA Symposium, Kyoto, Japan*, 6 pp.
- Remondino F., 2011, *Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning*. *Remote Sensing*, 3(6), pp. 1104-1138.
- Remondino F., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D., 2011. UAV photogrammetry for mapping and 3D modelling- current status and future perspectives-. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-I/C22 UAV-g2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland, pp. 25-31.

- Remondino F., Del Pizzo S., Kersten T., and Troisi S., 2012. Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – A Critical Overview. International Conference on Cultural Heritage, 29 Ottobre - 3 Novembre, Cipro, in *Computer Science* vol. n. 7616, 2012, pp 40-54.
- Remondino, F., Spera, M.G., Nocerino, E., Menna, F., Nex, F., Gonizzi-Barsanti, S., 2013. Dense image matching: comparisons and analyses. Proc. IEEE Conference "Digital Heritage 2013", Vol. 1, 28 Oct - 1 Nov., Marsiglia, Francia, pp. 47-54.
- Roncella R., 2006. Sviluppo e applicazioni di tecniche di automazione in fotogrammetria dei vicini. Tesi di Dottorato.
- Rosenfeld A., Hummel R. A. e Zucker S. W., 1976. Scene labeling by relaxation operations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-6, pp. 420–433.
- Russo M., Remondino F., Guidi G., 2011. Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico. *Archeologia e Calcolatori* 22, pp. 169-198.
- Samadzadegana F., Bigdelia B., Hahn M., 2009. Automatic road extraction from lidar data based on classifier fusion in urban area. In: Bretar F, Pierrot-Deseilligny M, Vosselman G (Eds) *Laser scanning 2009, IAPRS*, Vol. XXXVIII, Part 3/W8 – Paris, France, September 1-2, 2009, pp.81-86.
- Sansoni, G., Trebeschi, M., Docchio, F., 2009. State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation. *Sensors* 2009, 9, pp. 568–601.
- Seitz S., Curless B., Diebel J., Scharstein D. e Szeliski R., 2006. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'2006)*, New York, NY, pp. 519–526.
- Seitz C., Altenbach H., 2011. Project archeye – the quadrocopter as the archaeologist's eye. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-I/C22, pp. 297-302.
- Skarlatos D., Kiparissi S., 2012. Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surfaces. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume I-3, pp. 299-304.
- Snavely K.N., Seitz S. M., Szeliski R., 2006. Photo tourism: exploring photo collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics* 25(3), pp. 835-846.
- Snavely K.N., 2008. Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections. Tesi di Dottorato.

- Szeliski R. e Kang S. B., 1994. Recovering 3D shape and motion from image streams using nonlinear least squares. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 5(1), pp. 10–28.
- Szeliski R., 2011. *Computer Vision: Algorithms and Application*. Springer, Londra.
- Taylor C. J., Kriegman D. J. e Anandan P., 1991. Structure and motion in two dimensions from multiple images: A least squares approach. *IEEE Workshop on Visual Motion*, Princeton, New Jersey, pp. 242–248.
- Theodoridou S., Tokmakidis K., Skarlatos D., 2000. Use of radio-controlled model helicopters in archaeology surveying and in building construction industry. *ISPRS Archives Vol. XXXIII-B5, XIX ISPRS Congress*, Amsterdam, The Netherlands, pp. 825-829.
- Tingdahl D. e Van Gool L., 2011. A Public System for Image Based 3D Model Generation. *Computer Vision/Computer Graphics Collaboration Techniques 5th International Conference, MIRAGE 2011*.
- Triggs B., McLauchlan P. F., Hartley R. I. e Fitzgibbon A. W., 1999. Bundle adjustment- a modern synthesis. *International Workshop on Vision Algorithms*, Kerkyra, Greece, pp. 298–372.
- Tsai R.Y., 1987. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Int. Journal Robotics and Automation*, Vol. 3(4), pp. 323-344.
- Ullman S., 1979. The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London*, B-203, pp. 405–426.
- Uslu B., Golparvar-Fard M., e de la Garza J.M, 2011. Image-based 3D reconstruction and Recognition for Enhanced Highway Condition Assessment. *Journal Computing in Civil Engineering (ASCE)*, pp. 67-76.
- Vergauwen, M., Van Gool, L., 2006. Web-based 3D reconstruction service. *Machine Vision and Application*, 17, pp. 411-426.
- Verhoeven G.J.J., 2009. Providing an Archaeological bird's-eye view-an overall picture of ground-based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP). *Archaeology in Archaeological Prospection* 16 (4), pp. 233-249.
- Verhoeven G., 2011. Taking computer vision aloft e archaeological three dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan. *Archaeological Prospection* 18 (1), pp. 67-73.

- Verhoeven G., Taelman D., Vermeulen F., 2012. Computer vision-based orthophoto mapping of complex archaeological sites: the ancient quarry of Pitaranha (Portugal-Spain). *Archaeometry* 54, 6, pp. 1114–1129.
- Wang K.C.P. e Gong W., 2007. Automated Real-Time Pavement Crack Detection and Classification. Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 29 pp.
- Wang K.C.P., Hou Z., Watkins Q.B. and Kuchikulla S.R., 2007. Automated imaging technique for runway condition survey. FAA worldwide airport technology transfer conference Atlantic City, New Jersey, USA, 11 pp.
- Wang K. C. P., Smadi O., 2011. Automated imaging technologies for pavement distress surveys. Transportation Research Circular, N° E-C156, Washington D.C., pp 15.
- Wang K.C.P., Gong W., Tracy T. Nguyen V., 2011. Automated survey of pavement distress based on 2D and 3D laser image. MBTC-3023, 24 pp.
- Weng J., Cohen P. and Herniou M., 1992. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Trans. On PAMI*, Vol. 14(10), pp. 965-980
- Wu C., Agarwal S., Curless B., Seitz S. M., 2011. Multicore bundle adjustment. Proceedings of 24th Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 20-5, Colorado Springs, pp. 3057 - 3064.
- Yang B., Fang L., Li J., 2013. Semi-automated extraction and delineation of 3D roads of street scene from mobile laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 79 (2013), pp. 80–93.
- Yao W., Hinz S., Stilla U., 2008. Traffic monitoring from airborne LIDAR—Feasibility, simulation and analysis, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B3b, Beijing 2008, pp. 593-598.
- Yu S., Sukumar S.R., Koschan A.F., Page D.L., Abidi M.A., 2007. 3D reconstruction of road surfaces using an integrated multi-sensory approach. *Optics and Lasers in Engineering* 45, pp. 808–818.
- Zhang Y., 2008. Photogrammetric processing of low altitude image sequences by unmanned airship. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, pp. 751-757.
- Zhang W., Xinping G., Zhoua G., Yana G., 2008. Study on Blimp-Based Low-cost Remote Sensing Platform, in *Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: Monitoring and Assessment of Natural Resources and Environments*, ed.

- Lin Liu, Xia Li, Kai Liu, Xinchang Zhang, Yong Lao, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 7145 (SPIE, Bellingham, WA 2008), 71452Q, 9 pp.
- Zhang C., Elaksher A., 2012. An Unmanned Aerial Vehicle-Based Imaging System for 3D Measurement of Unpaved Road Surface Distresses. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 27, pp. 118–129.
- Ziou D. e Tabbone S., 1998. Edge detection an overview. *International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis*, 8(4), pp. 537–559.
- Zischinsky T., Dorfner L., Rottensteiner F., 2000. Application of a new model helicopter system in architectural photogrammetry. *ISPRS Archives Vol. XXXIII-B5/2, XIX ISPRS Congress, Amsterdam*, pp. 959-965.

Sitografia

- Visics, 2011. Arc 3D. <http://homes.esat.kuleuven.be/wvisit3d/webservice/v2/index.php>. (ultimo accesso dicembre 2013).
- MeshlabVisual Computing Group - ISTI - CNR, 2011. <http://meshlab.sourceforge.net/>. (ultimo accesso dicembre 2013).
- PhotoSynth 2011, Microsoft Corporation, <http://photosynth.net>, (ultimo accesso agosto 2012).
- 123D Catch. Autodesk, <http://www.123dapp.com/catch> (ultimo accesso dicembre 2013).
- My 3D Scanner, <http://my3dscanner.com> (ultimo accesso dicembre 2013).
- Hypr3D. <http://www.hypr3d.com/> (ultimo accesso agosto 2012).
- Cubify Capture. <http://cubify.com/products/capture/> (Ultimo accesso dicembre 2013).
- Wu, C., 2011. VisualSFM: A visual structure from motion system, <http://www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm> (ultimo accesso dicembre 2013).
- SFM_Georef, http://www.lancs.ac.uk/staff/jamesm/software/sfm_georef.htm (ultimo accesso dicembre 2013).
- AgiSoft LLC, 2011b. Agisoft PhotoScan. Professional Edition, Version 0.8.4. <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/>
- Dataset Fontana*, <http://cvlabwww.epfl.ch/data/multiview/>

Ringraziamenti

Desidero ringraziare persone, Enti ed Aziende che mi hanno dato l'opportunità di produrre questo lavoro di studio e di ricerca:

Ringrazio il Prof. Dott. Mauro Lo Brutto che con pazienza e dedizione mi ha sostenuto e seguito durante lo svolgimento della tesi: grazie per gli insegnamenti e per la continua disponibilità;

Ringrazio il Prof. Ing. Orazio Giuffrè per la disponibilità dimostratami e per i preziosi consigli;

Ringrazio il Prof. Ing. Benedetto Villa che mi ha dato l'opportunità di scoprire una disciplina così affascinante quale è la Geomatica applicata ai Beni Culturali ed archeologici;

Ringrazio in modo particolare l'Arch. Fabio Di Salvo per la piacevolezza delle ore di lavoro, studio, confronto, dialogo condivise insieme, per il suo supporto tecnico e morale nei momenti più difficili e per essere stato un ottimo compagno di tanti viaggi e avventure;

Ringrazio tutti i colleghi del Dipartimento del DICAM area Geomatica con i quali ho condiviso ore di lavoro, campagne di rilievo, esercitazioni;

Ringrazio Dott.ssa Adriana Fresina, direttore del sito archeologico di Solunto per la disponibilità concessa ad accedere al sito;

Ringrazio l'Ente "Parco Archeologico e Paesaggistico della Valle dei Templi di Agrigento" per aver concesso l'accesso alle aree oggetto dei rilievi;

Ringrazio il Consorzio Ticonzero per l'esecuzione dei voli nell'area archeologica della Valle dei Templi.