

DENSE IMAGE MATCHING PER IL RECUPERO DI CONTENUTO METRICO DA IMMAGINI DI DOCUMENTAZIONE E CAMERE NON METRICHE

DENSE IMAGE MATCHING FOR METRIC INFORMATION RETRIEVAL USING NON-METRIC CAMERAS AND DOCUMENTATION SHOTS

F. Noardo ^a

^a Politecnico di Torino – DIATI/DIST, c.so Duca degli Abruzzi, 24 10129 Torino, Italy – francesca.noardo@polito.it

PAROLE CHIAVE: fotogrammetria digitale, Computer Vision, Dense Image Matching, SfM, Beni Culturali, documentazione

KEY WORDS: digital photogrammetry, Computer Vision, Dense Image Matching, SfM, Cultural Heritage, documentation

RIASSUNTO

Questo contributo è finalizzato a dimostrare come sia possibile, impiegando i recenti algoritmi di *image matching*, estrarre dati metrici da immagini acquisite per scopi tutt'altro che indirizzati a quelli del rilievo o della modellazione metrica.

Le tecniche di Structure from Motion (SfM) e Dense Image Matching sono state utilizzate per orientare a posteriori un set di foto realizzate durante un intervento di restauro della facciata di una chiesa.

Le foto sono state scattate per documentare sommariamente e qualitativamente alcune stratificazioni storiche rinvenute nel corso del restauro. Si tratta pertanto di immagini acquisite con camera amatoriale, senza seguire in alcun modo le regole di acquisizione fotogrammetrica né considerando i requisiti ottimali per l'elaborazione con software di fotogrammetria digitale.

Dalle immagini elaborate, utilizzando diverse applicazioni e algoritmi, è stato generato un modello 3D utile per documentare la geometria della facciata e per restituire graficamente le tracce delle antiche stratificazioni, recuperando un'informazione metrica molto importante per la documentazione del Bene Culturale, altrimenti perduta.

ABSTRACT

Dense Image Matching and Structure – from – Motion (SfM) techniques are used to orient a posteriori a set of photos realized during a restoration intervention on a church façade. The photos were taken to provide quality and hurried documentation to some discovered historical stratifications. Images were captured with a non-professional camera, neither following correct photogrammetry acquisition, nor considering optimal requirements for digital photogrammetry software processing. Images were processed, using different applications and algorithms, and a 3D model was generated which was useful to store information about the façade geometry.

From this the drawing of ancient stratification tracks can be plotted, making it possible to recover an otherwise lost metric information, which is very important to the Monument documentation.

1. INTRODUZIONE

È noto quanto sarebbe importante documentare graficamente, tramite report scritti e immagini, ogni fase di lavorazione delle opere edilizie ed architettoniche, sia durante la costruzione sia in occasione degli interventi successivi, in modo da poter facilmente individuare in un secondo momento stratigrafie, caratteristiche costruttive della struttura, localizzazione degli impianti, etc. Questo è tanto più necessario nel caso dei Beni Culturali, in cui tale documentazione è essenziale, in alcuni casi, per documentare elementi o stratigrafie antiche non più visibili o rintracciabili ad opere completate; essa inoltre permetterebbe di evitare interventi molto invasivi in successive opere di indagine e di restauro. Tale buona norma è formalizzata a partire dalla Carta italiana del restauro (1932), che afferma al punto 11: “[...] nel restauro dei monumenti sia condizione essenziale e tassativa, che una documentazione precisa accompagni i lavori mediante relazioni analitiche raccolte in un giornale

del restauro e illustrate da disegni e da fotografie, sicché tutti gli elementi determinanti nella struttura e nella forma del monumento, tutte le fasi delle opere di ricomposizione, di liberazione, di completamento risultino acquisite in modo permanente e sicuro”. Sfortunatamente non sempre i lavori di restauro vengono sistematicamente documentati con adeguate tecniche metriche e fotografiche, per diversi motivi: mancanza di mezzi, fretta nell'esecuzione dei lavori, scarsa sensibilità a ritenere la documentazione essenziale per il futuro. In questo contributo si analizza se e come possono essere utilizzate le uniche immagini (digitali) disponibili di un Bene architettonico in fase di restauro, realizzate in modo sommario da operatore non esperto senza seguire alcuna regola di acquisizione fotogrammetrica. L'oggetto è la facciata di una chiesa momentaneamente priva dell'intonaco, rimosso per essere rinnovato durante lavori di restauro. Utilizzando tecniche di *dense image matching* si tenta di ricostruire un modello 3D utilizzabile per analizzare la superficie scoperta e da cui estrarre prodotti di supporto alla

realizzazione o al completamento della restituzione grafica del prospetto con le tracce delle stratificazioni portate alla luce. Si tenta poi di scalare il modello ottenuto con l'aiuto di alcuni punti di controllo acquisiti in sito in una fase successiva, usando come riferimenti alcuni punti visibili nelle immagini non interessati dall'intervento di sostituzione intonaco.

Per comprendere l'utilità di una ricerca di questo tipo è necessario considerare che gli interventi di restauro sulle opere monumentali devono essere attentamente documentate. Le normative di settore (D.lg. n.42 22 gennaio 2004) e le abituali istruzioni delle Soprintendenze italiane ai Beni Architettonici e Paesaggistici impongono di realizzare una documentazione esauriente delle opere, soprattutto nel caso in cui nel corso dei lavori si rintraccino stratigrafie risalenti a periodi precedenti del Bene non più visibili nella conformazione attuale. Tale documentazione è indispensabile per ricostruire la storia del monumento, che può essere fondamentale per l'interpretazione di dinamiche umane o urbane del passato e può essere significativo come elemento da considerare negli interventi di restauro, conservazione, rifunzionalizzazione dell'edificio. Per questi motivi, negli archivi delle Soprintendenze e degli operatori di settore si conservano enormi quantità di immagini (digitali e analogiche) acquisite come documentazione durante le opere di restauro. Tale materiale tradizionalmente è utilizzato per una fotointerpretazione manuale e senza riferimenti metrici diversi dalle misure lineari dirette rilevate sul campo (quando disponibili) o dalla bibliografia relativa alle tecniche costruttive dell'epoca a cui si presume risalire la stratigrafia emersa. La procedura perciò è manuale ed è affidata interamente alle conoscenze e alle capacità critiche dell'operatore, che, seppur fondamentali per lo studio dei manufatti storici, sono ovviamente soggetti a errore umano di valutazione o non possono tenere efficacemente in conto di anomalie costruttive che costituiscono eccezione rispetto alle normali pratiche edilizie di un'epoca. Inoltre, essendo le fotografie soggette alle deformazioni note nelle discipline fotogrammetriche (Kraus, 2004), l'interpretazione diretta da una sola immagine può condurre a errori di valutazione, soprattutto quando le geometrie rappresentate sono complesse.

Le tecniche *structure-from-motion* permettono di estrarre in tempi ridotti informazione spaziale e metrica da immagini anche in situazioni di presa non ottimale, come alcune esperienze precedenti, descritte di seguito, dimostrano. In questo articolo sono considerati alcuni software che implementano algoritmi derivanti dalla *computer vision*, con l'obiettivo di definire quali accorgimenti sono necessari affinché un prodotto misurabile 3D sia estratto da un set di immagini del tutto inadatto agli scopi della fotogrammetria. Le procedure evidenziate possono essere impiegate nel caso sia necessario estrarre informazioni metriche utilizzando come punto di partenza l'enorme patrimonio di documentazione delle stratificazioni dei Beni architettonici ospitato negli archivi.

1.1 Computer vision – Dense Image matching – Structure from Motion

I software di fotogrammetria digitale integrano oggi algoritmi e processi derivanti da altre discipline, in particolare dalla *computer vision*, di cui sfruttano i sistemi *Structure-from-motion* (SfM). Tali sistemi permettono di stimare la posizione 3D di punti rappresentati in molteplici immagini, ricostruendo la geometria dell'oggetto rappresentato (*structure*) e la posizione delle prese (*motion*) anche quando non si è in possesso di definiti parametri di orientamento interno. Gli elementi caratteristici (*tie-features*) delle

immagini vengono preliminarmente individuati in automatico; in particolare, vengono estratti oggetti (punti) riconoscibili dal software analizzando il contrasto radiometrico nelle differenti direzioni. Ciò permette di identificare alcuni pixel in maniera univoca, secondo diversi operatori, considerando o meno la scala e il livello piramidale dell'immagine a seconda degli algoritmi utilizzati. Ad ogni punto individuato viene assegnato un descrittore, utilizzabile nella fase successiva di *feature matching*. In questa fase i punti con i descrittori più simili (riconosciuti dal software come omologhi) vengono allineati per effettuare il passaggio successivo di triangolazione e compensazione del blocco. Nella fotogrammetria tradizionale, per stimare la posizione tridimensionale di ogni punto visibile da almeno due fotogrammi attraverso la triangolazione fotogrammetrica, si utilizzano le equazioni di collinearità che richiedono la conoscenza dei parametri di orientamento interno ed esterno delle immagini. Nei processi SfM i parametri di orientamento non sono necessariamente noti, perciò si utilizzano le regole della geometria epipolare, che regola le relazioni fra i *tie points* (TP), i centri di presa e la posizione 3D del punto, per orientare le prese e stimarne gli orientamenti interni ed esterni. Il vantaggio è la possibilità di impiegare immagini di cui non si conosce la provenienza e il cui file EXIF può non essere corretto o completo delle informazioni necessarie. L'autocalibrazione delle immagini avviene in questi casi attraverso l'applicazione delle regole della geometria proiettiva su un numero sufficiente, meglio se sovrabbondante, di immagini, preferibilmente con alte percentuali di ricoprimento. Uno dei metodi standard più utilizzati dai sistemi SfM è il *Bundle block adjustment* (BA), tecnica iterativa, derivante dalla fotogrammetria, con cui si minimizzano gli errori di proiezione dei fasci di raggi che connettono il centro di presa con i punti 3D. Alcuni sistemi (ad esempio VisualSfM) non ripetono tutto il processo ad ogni iterazione, ma utilizzano un algoritmo incrementale in cui le immagini sono aggiunte in sequenza, anche se in alcuni casi ne può in parte risentire la precisione del risultato finale. Il *bundle adjustment* funziona meglio quando si dispone di molte immagini (centinaia) e migliaia di punti di legame. Per questi motivi il processo è realizzabile e implementabile quando si dispone di alte potenzialità computazionali, come quelle offerte dagli attuali sistemi informatici. Queste caratteristiche hanno portato i grandi avanzamenti dati dall'introduzione del digitale in fotogrammetria, ora portati ad alti livelli dagli algoritmi di computer vision recentemente introdotti. Nel caso qui considerato non sussistono le condizioni favorevoli descritte (molte immagini, alta percentuale di ricoprimento), è perciò necessario valutare il comportamento di questi sistemi in condizioni non ottimali (Szeliski R., 2010).

Esistono numerosi algoritmi di individuazione e descrizione di features per l'associazione e conseguente orientamento di immagini nei software di fotogrammetria e computer vision, tra questi uno dei più diffusi è SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) (Lowe, 2004), che sta alla base, con adattamenti e revisioni, di alcuni software utilizzati nelle elaborazioni delle immagini in questo contributo.

Una volta che le immagini sono orientate è possibile ricostruire il modello 3D dettagliato dell'oggetto, come nuvola densa di punti, a partire da ulteriori algoritmi, basati sui principi della geometria epipolare, che individuano le corrispondenze stereoscopiche su una elevatissima quantità di pixel (Szeliski R., 2010).

Molti software prevedono la possibilità di georiferire e scalare il modello utilizzando GCPs (*Ground Control Points*), che però in questo caso non erano stati misurati contestualmente all'acquisizione di immagini, come è abituale secondo le normali procedure. Alcuni punti di

controllo sono stati misurati in un secondo momento sulle parti del manufatto visibili nelle immagini che, fortunatamente non sono state oggetto di intervento e sono perciò rimaste invariate. In mancanza di GCP, anche misure lineari possono essere utilizzate in alcuni software per scalare il modello, ad esempio in MicMac, (Pierrot-Deseilligny, IGN, France) in cui è anche possibile definire la posizione degli assi su cui orientare la geometria. È però importante che le misure seguano direzioni definite (in particolare l'orizzontale e la verticale rispetto al piano considerato). Non sempre però questo è possibile. I modelli ottenuti dalle elaborazioni possono essere georiferiti in un secondo tempo, se sono presenti punti facilmente individuabili anche a posteriori, oppure possono essere scalati applicando manualmente un fattore di scala con l'aiuto di software di elaborazione dati 3D (Technodigit 3D Reshaper, Meshlab...). Con algoritmi implementati negli stessi software si possono riportare le nuvole nel corretto sistema di riferimento, ad esempio inserendo alcune coordinate oppure associando il modello ad una nuvola di punti orientata con metodi quali ICP (*Iterative Closest Point*) (Gruen and Akca, 2005) o simili.

1.2 Utilizzo di foto amatoriali per la documentazione 3d ex-post: esperienze precedenti

Sfruttando queste tecniche sono stati sviluppati alcuni progetti per la ricostruzione 3D di oggetti a partire da foto, di diversa origine e da parte di diversi autori, presenti nel web (progetto "Photo Tourism" <http://phototour.cs.washington.edu/>). Gli oggetti rappresentati sono in particolare le mete del turismo mondiale (la fontana di Trevi a Roma, la muraglia cinese, alcune famose piazze europee...) le cui immagini sono state acquisite (e pubblicate sul web) da centinaia di operatori. Questa grande sovrabbondanza di dati ha permesso di estrarre migliaia di punti omologhi e utilizzare le tecniche di *bundle adjustment* per ricostruire la posizione delle prese e la geometria degli oggetti, nonostante i dati relativi alla calibrazione delle camere fossero inesistenti o incompleti e le immagini provenissero da centinaia di camere diverse, per cui è stato necessario correggere i parametri di orientamento attraverso l'autocalibrazione di ogni immagine. I modelli ottenuti sono stati poi georiferiti attraverso l'integrazione di ulteriori immagini di orientamento noto, o attraverso l'introduzione a posteriori di GCPs, o adattando il modello a modelli del terreno o ulteriori riferimenti disponibili (Snavely et al., 2008).

Un altro caso nel quale foto acquisite da operatori non esperti vengono utilizzate per la costruzione di modelli 3d è ARC 3D Webservice (Vergauwen, M., & Van Gool, L., 2006), servizio rivolto a operatori nel campo dei beni culturali. Il sistema prevede l'utilizzo delle foto caricate dagli utenti su un apposito server (dal sito internet <http://homes.esat.kuleuven.be/~visit3d/websevice/v2/index.php>). Le immagini vengono elaborate con le tecniche precedentemente descritte e viene restituito un modello 3D dell'oggetto. In questo caso, nonostante l'utente non sia un operatore specializzato, una breve guida istruisce comunque su quale sia il modo migliore di acquisire i fotogrammi per ottenere un migliore risultato finale. Lo stesso vale per l'applicazione Autodesk 123D Catch (<http://www.123dapp.com/catch>), che prevede l'elaborazione in remoto di immagini inviate da utente per la costruzione di modelli 3D.

In questi ultimi progetti, il modello risultante dall'elaborazione non ha riferimenti metrici precisi: è corretto l'orientamento relativo delle immagini e il modello 3D ottenuto è geometricamente rappresentativo della realtà, ma è

sprovvisto del corretto rapporto di scala e di un sistema di coordinate note.

1.3 Il caso studio

Il caso studio considerato è la facciata della chiesa di S. Maria del Monte Carmelo al Colletto, comune di Roletto (TO) (Figura 1). La chiesa è parte di un complesso conventuale di Carmelitani instauratosi nel sito nel 1493, su preesistenze trecentesche. Seguono lavori per la costruzione del convento e della chiesa o per l'adeguamento delle strutture precedenti. La documentazione disponibile riguardo alle trasformazioni avvenute nel tempo è molto scarsa ed imprecisa, probabilmente anche in seguito alla dispersione dei documenti del convento successivamente alla sua soppressione e al degrado che ne seguì. Oggi siamo in grado di determinare alcuni punti di riferimento nella storia del convento: nel 1535 viene consacrata la chiesa; nel 1584 il convento riceve la visita di un delegato apostolico che constata lo stato di conservazione del complesso e stabilisce alcune modifiche da apportare (tra cui lo spostamento di un accesso di cui finora si erano perse le tracce); la chiesa riceve donazioni da nobili locali con l'installazione di mausolei nel corso dei secoli XVII – XVIII; lavori di rinnovamento vengono eseguiti a metà '700, nel 1798 avviene la soppressione del convento per volere di Napoleone; a inizio '800 vengono eseguite ulteriori opere di manutenzione, alla fine del XIX secolo vengono demolite due delle tre maniche del convento, in pessimo stato di conservazione. Seguono fino ad oggi periodi di degrado ed abbandono alternati a lavori di restauro e adattamento delle strutture condotti con criteri più o meno consoni all'importanza storico-artistica del Bene, spesso calibrati meramente in relazione alla sensibilità personale dei Rettori succedutisi nel tempo, nonostante il complesso sia stato dichiarato Monumento Nazionale nel 1904. Questa irregolarità nella gestione degli interventi porta ad avere oggi una estrema carenza di documentazione degli interventi succedutisi e delle stratificazioni man mano emerse o demolite e perse (AA.VV., 2012).



Figura 1- Chiesa e convento di S. Maria del Monte Carmelo al Colletto.

Si rende perciò fondamentale raccogliere ogni possibile dato e documento della sostanza della fabbrica (oltre che degli interventi ancora documentabili) per poterne ricostruire

l'evoluzione storica e poter garantire una corretta conoscenza e conservazione del Bene.

Oggi il complesso è retto da don Lorenzo Rivoiro, il quale ha svolto nel tempo numerosi interventi di restauro e risanamento delle strutture, affette da degradi molteplici, dovuti in particolare all'umidità e a problemi statici sviluppati in conseguenza della demolizione di una parte del convento. Il sito è diviso tra diversi Comuni e diverse proprietà, il che contribuisce a rendere non semplice la gestione economica ed amministrativa degli interventi; questo si traduce spesso nella ulteriore scarsità di tempo e risorse per la realizzazione delle opere e della relativa documentazione, spesso affidata a operatori non esperti e poco organizzati, o alla buona volontà dello stesso Rettore. Questo accade nonostante il monumento meriti un'attenzione più rigorosa, per la ricchezza decorativa della chiesa e l'importanza storica del monumento.

La facciata della chiesa è stata oggetto, nel settembre 2012, di un intervento di sostituzione di una parte di intonaco nella parte inferiore, che era stato necessario rimuovere in occasione di precedenti opere di deumidificazione. Nel 2012 la muratura è stata scoperta per l'applicazione dell'intonaco definitivo. In questa occasione sono state acquisite alcune immagini della facciata per una documentazione qualitativa, non metrica, delle stratificazioni emerse: aperture, ora tamponate, risalenti a precedenti configurazioni della chiesa che potrebbero essere molto importanti per la lettura delle diverse fasi storiche del monumento. Una di queste si trova sulla facciata posteriore della chiesa (Figura 2) e potrebbe corrispondere a quella prescritta in occasione della visita pastorale del 1584.

Nel prosieguo, si illustrano le procedure individuate per utilizzare le poche foto disponibili, relative ad una situazione non più disponibile, ovvero la rimozione dell'intonaco, per estrarre informazioni misurabili delle tracce rinvenute.

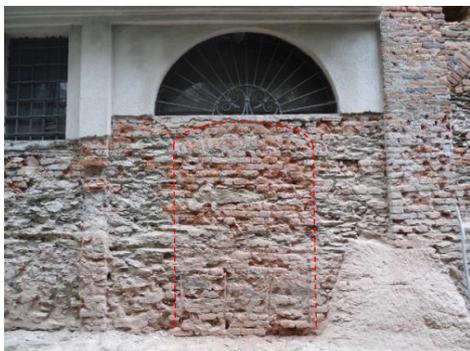


Figura 2 - Apertura tamponata individuata nella muratura della parte posteriore della chiesa, in corrispondenza dell'attuale sacrestia.

2 ELABORAZIONI

2.1 Dati disponibili

Durante i lavori di rimozione dell'intonaco sono state acquisite 16 foto relative alla facciata principale e 19 relative al fronte absidale della chiesa affaccia su una strada stretta e poco adatta per acquisire immagini con una angolazione e una distanza corrette, secondo le regole di presa della fotogrammetria. La facciata principale invece si affaccia su un vasto piazzale che permetterebbe la realizzazione di prese fotogrammetriche più adatte, ma l'inesperienza dell'operatore non ha permesso lo svolgimento delle fasi di acquisizione in maniera adeguata. Le immagini qui trattate sono quelle relative alla facciata principale, divisa

in due porzioni (1a e 1b) in seguito alla constatazione dei migliori risultati raggiungibili dai software se i due set rimangono separati.

Le immagini sono state acquisite con una fotocamera SONY DSC-W510, con distanza focale 4,7 mm secondo il file EXIF, anche se, avendo un'ottica retraibile è facile che la lunghezza focale non sia costante. Le dimensioni delle immagini sono 4000 x 3000 pixels, dimensione pixel pari a 0,35 mm.

In aggiunta alla documentazione fotografica sono stati sommariamente tracciati alcuni schizzi della facciata con l'indicazione di alcune dimensioni relative alle tracce delle antiche aperture emerse nella muratura (distanza dal portale principale e di limiti della porzione di muratura, larghezza e altezza delle aperture. Queste sono state misurate con la bindella, senza precisi riferimenti. Inizialmente si prevedeva di utilizzare tali misure per scalare il modello e orientarlo secondo gli assi cartesiani. Dal momento però che non si avevano garanzie riguardo sia alle accuratezze sia alle direzioni delle misure, per orientare il modello derivante dalle elaborazioni si sono integrati i dati con la misurazione topografica (stazione totale Leica TS06 in un sistema locale) di alcuni punti tuttora riconoscibili, non oggetto degli interventi del 2012 (Figura 3).



Figura 3 - Punti di controllo misurati su punti naturali di porzioni di facciata rimasti invariati rispetto alle immagini acquisite.

2.2 Agisoft Photoscan

Agisoft Photoscan è un software commerciale low-cost di SfM, che permette di ricostruire modelli 3D di oggetti estraendo una nuvola di punti densa da numerose immagini digitali utilizzando gli algoritmi SfM (Koutsoudis, 2013).

Il processo di elaborazione prevede diversi passaggi: in primo luogo PhotoScan individua *Tie points* (punti di legame) nelle foto di origine (il software riconosce i punti omologhi indipendentemente dal punto di vista e dalle variazioni di

illuminazione delle singole foto) e ne genera un descrittore in base all'intorno di ognuno. Procede poi a un *matching* tra le diverse immagini in modo simile all'approccio utilizzato dall'algoritmo SIFT. Successivamente, leggendo i parametri di calibrazione eventualmente presenti nel file EXIF di ogni immagine, utilizza un algoritmo *greedy* per individuare le posizioni di presa approssimate che raffina in seguito attraverso un algoritmo di *bundle adjustment*. In questo modo il software risolve l'orientamento interno ed esterno definendo la posizione relativa e l'assetto della camera per ogni presa. Le coordinate dei GCPs misurati vengono collimati sulle immagini e utilizzati dal software per orientare il modello. Alcuni punti misurati non vengono utilizzati nell'orientamento ma sono impiegati come *check points* (CP) per verificare l'accuratezza del modello.

Photoscan usa poi i descrittori generati per individuare le corrispondenze tra pixel omologhi delle foto per generare una nuvola di punti densa, attraverso un approccio *multi-view* (Harwin and Lucieer, 2012). La superficie, sotto forma di mesh triangolare, viene poi interpolata a partire da questa nuvola (George, 1998). Per applicare una texture fotografica, PhotoScan usa parti dei fotogrammi scelti in base alla vista ottimale su ogni parte del modello. Da questa esporta l'ortofoto (Chiabrando et al., 2014).

2.2.1 Elaborazione

Un primo tentativo di allineamento non restituisce risultati di orientamento soddisfacenti, per cui si usano gli strumenti previsti nel software per meglio vincolare l'elaborazione: le parti delle immagini da non considerare nel matching vengono mascherate, in modo che la geometria principale non ne venga disturbata; inoltre le foto vengono preliminarmente girate nel verso corretto, per facilitare il riconoscimento da parte del software, evidentemente sensibile a questi cambiamenti. Non è invece necessario porre le foto nel corretto (o più verosimile) ordine di sequenza lungo la facciata. A queste condizioni la ricerca delle *features* di riferimento e la fase di *matching* tra le immagini sono fasi abbastanza rapide, visto anche il ridotto numero di immagini da elaborare. In figura 4 sono rappresentati i punti accoppiati da uno dei software (Agisoft Photoscan) allo scopo di associare le immagini fra loro; non tutti gli accoppiamenti sono riconosciuti validi (*outlier* in rosso), come rappresentato nell'immagine. Dalla tabella si può però vedere come il numero degli *inlier* (in blu) sia sufficientemente alto per associare fra loro le immagini. Le prime fasi di allineamento vengono effettuate con un'elevata accuratezza fornendo una prima automatica preselezione di immagini accoppiabili.

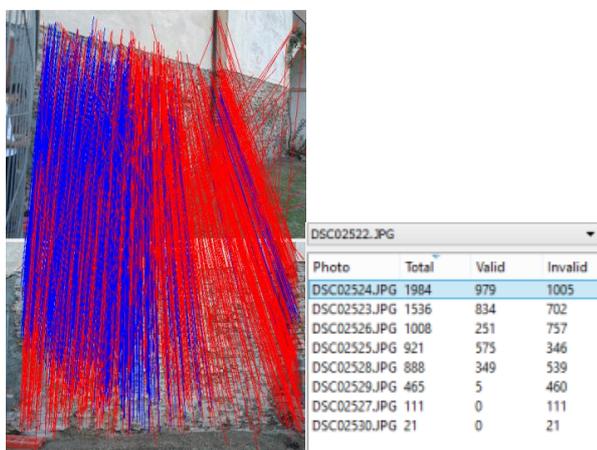


Figura 4 - Visualizzazione degli accoppiamenti di tie points tra due foto: in blu quelli considerati validi (*inliers*).

Dalla visualizzazione delle posizioni delle prese (Figura 5) si nota come le immagini siano state acquisite in modo casuale e senza seguire le consuete regole. La difficoltà in questo caso sta nel predisporre i dati iniziali in modo che l'applicazione possa elaborarli nel miglior modo possibile, riducendo il rumore e ricostruendo la corretta geometria. Per questo, una volta effettuato l'orientamento, le maschere sulle immagini si ampliano andando a comprendere, oltre agli elementi di disturbo, anche le porzioni della facciata visibili ma non considerate per la costruzione del modello. Il *matching* finale viene poi realizzato in modo da ottenere la massima qualità possibile, stabilendo un numero massimo di punti generati pari a 2.000.000.

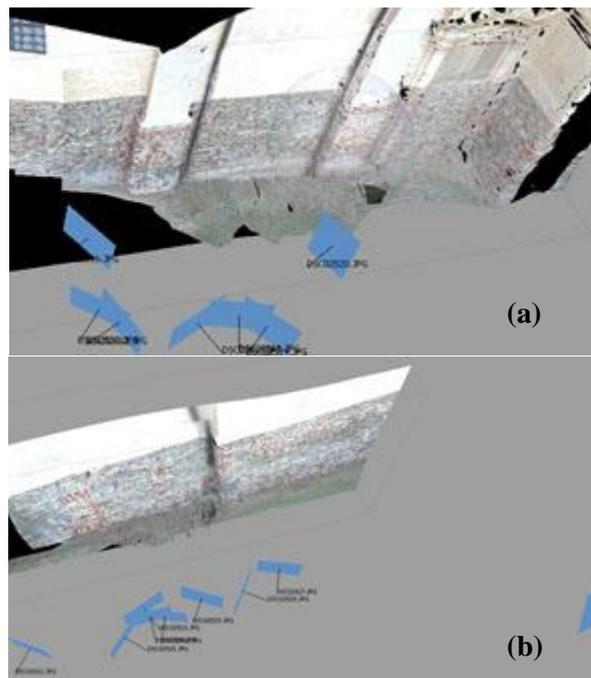


Figura 5- Facciate 1a (a) e 1b (b). Visualizzazione del modello con le posizioni di presa.

2.2.2 Risultati

I risultati dell'elaborazione dei modelli sono riassunti nelle tabelle 1 e 2. Da ciò che si può constatare da un'analisi visiva dei prodotti, si può notare come i dati di output siano in parte rumorosi (Figure 6-7), ma possano essere rappresentativi della geometria complessiva, una volta puliti e meglio definiti (Figure 8-9), in questo caso attraverso procedura manuale, in software di gestione modelli 3D (3D Reshaper, meshlab), anche perché era necessaria un'interpretazione difficile da delegare a procedure automatiche integrate nei software. Inoltre le ortofoto, o gli stessi modelli, possono facilmente essere utilizzati per una restituzione grafica che metta in risalto le tracce rinvenute in facciata (Figura 10). L'elaborazione ha richiesto circa un'ora per ogni set di immagini.

Tabella 1 - Risultati dell'elaborazione. Facciata 1a.

Number of images:	7
Tie-points:	25.326
Extracted points	1.999.922
GCPs RMSE [x,y,z] in mm	23.2, 27.8, 34.3
CPs RMSE [x,y,z] in mm	26.3, 24.1, 36.3

Tabella 2 - Risultati dell'elaborazione. Facciata 1b.

Number of images:	9
Tie-points:	37.510
Extracted points	1.999.841
GCPs RMSE [x,y,z] in mm	31.6, 25.7, 32.1
CPs RMSE [x,y,z] in mm	29.3, 22.9, 35.0

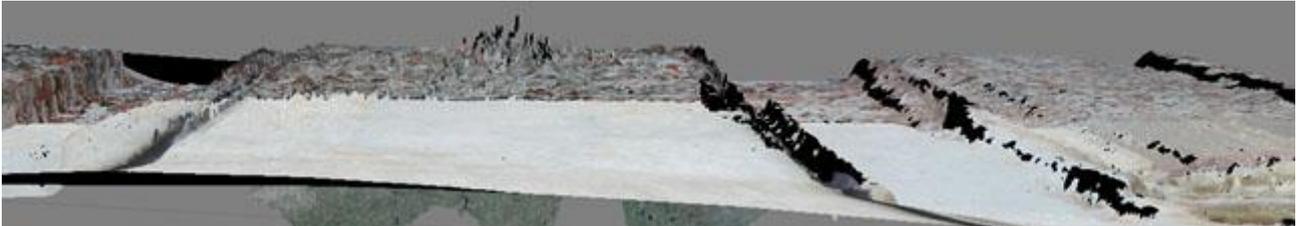


Figura 6 - Facciata 1a. Rumore nel modello finale.

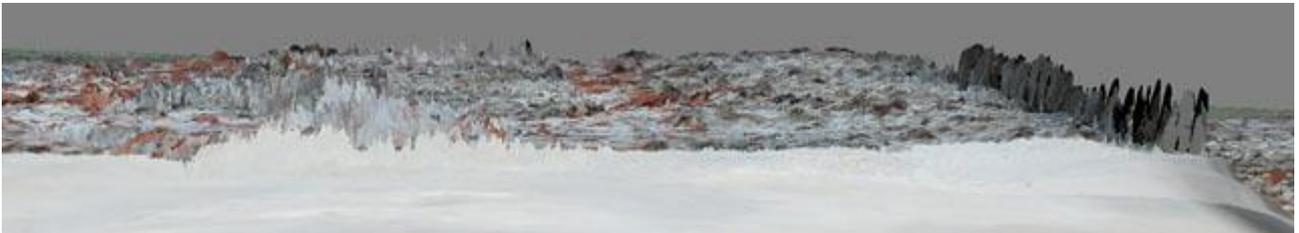


Figura 7 - Facciata 1b. Rumore nel modello finale.



Figura 8 - Facciata 1a. Vista complessiva del modello triangolato

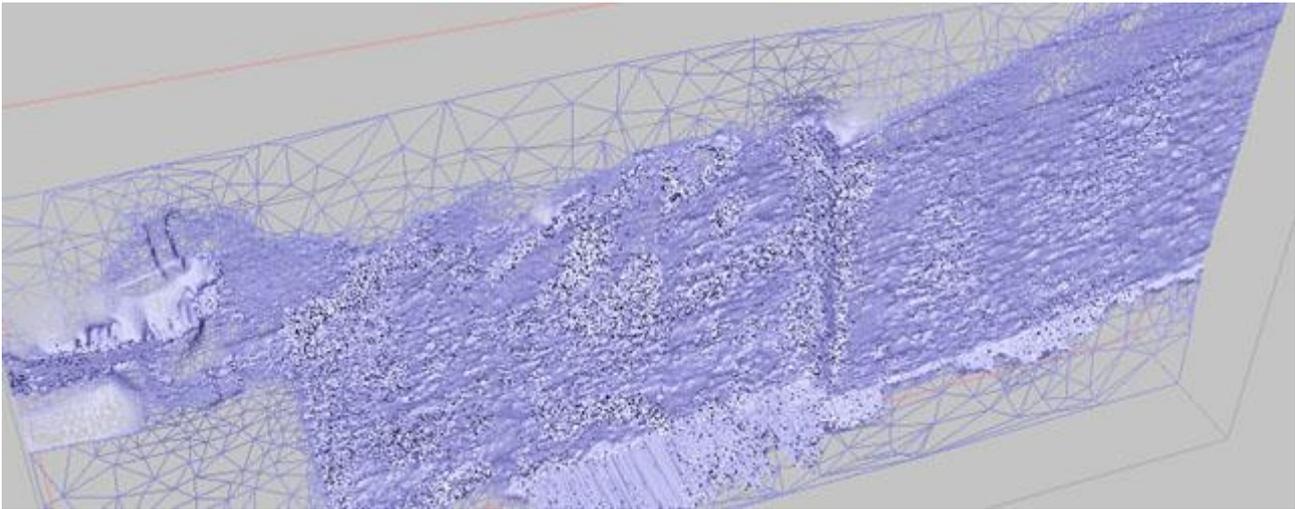


Figura 9- Facciata 1b. Vista complessiva del modello triangolato



Figura 10 - Facciata 1b. Ortofoto estratta da PS, con bozza di restituzione delle linee principali.

2.3 MicMac – Apero

Secondo le consuete fasi dell'elaborazione fotogrammetrica di immagini digitali, MicMac estrae automaticamente punti di legame dalle immagini, dopodiché calcola i parametri di calibrazione della camera con un procedimento *bundle-adjustment* e infine ricerca la corrispondenza tra i pixel delle immagini per generare una nuvola densa di punti, utilizzata per generare il modello 3D, calcolare le ortofotografie e i modelli altimetrici. La prima fase di elaborazione è l'estrazione di TP da ogni coppia di immagini: per l'individuazione dei punti caratteristici è utilizzata una versione modificata dell'algoritmo SIFT in grado di elaborare grandi immagini (Pierrot-Deseilligny, Cléry, 2011). Il secondo passaggio è la definizione dell'orientamento esterno (con contestuale raffinamento dei parametri di orientamento interno); normalmente questa fase è effettuata in un primo tempo solo per l'orientamento relativo e in seguito il modello viene complessivamente georiferito utilizzando GCPs tramite un completo *bundle block adjustment*. Un'alternativa offerta dal software è l'orientamento del modello secondo linee orizzontali e verticali e l'inserimento di alcune misure lineari. Infine viene generata la nuvola densa di punti attraverso un definitivo *matching* tra le immagini. MicMac è basato su un approccio multi-scala, multi-risoluzione e piramidale, con

l'impiego di una funzione di minimizzazione dell'energia impiegata. Durante il processo di *matching* è anche generata l'ortofotografia di ogni foto. Dai dati così estratti si genera la nuvola densa di punti (convertibile in file .xml o .ply) e il mosaico dell'ortofoto dell'intero oggetto (Chiabrando et al., 2014).

2.3.1 Elaborazione

Per l'elaborazione in MicMac le foto disponibili sono poche e con ricoprimenti non sempre sufficienti, perciò è necessario calibrare alcuni parametri; ad esempio per la ricerca di *tie points* e la fase di *matching* (comando "Tapioca") vanno utilizzate le immagini alla massima risoluzione. Ciononostante la fase di orientamento delle prese avviene correttamente per l'intera porzione di facciata 1a, mentre si eliminano per comodità due immagini della porzione di facciata 1b, secondarie in relazione al modello da ottenere, che disturbano l'orientamento delle immagini. I modelli sono orientati con l'inserimento dei GCPs di coordinate note. In alternativa potrebbero anche essere dimensionati in una seconda fase secondo il corretto rapporto di scala grazie alla possibilità di definire una dimensione lineare tra due punti (comando "SaisieBasc"). Inoltre, le nuvole possono venire orientate secondo gli assi cartesiani (con X orizzontale e Z

uscite) definendo una linea orizzontale e un piano principale, attraverso la funzione di MicMac “GlobBascule”. Questa seconda opzione potrebbe essere fondamentale nell’utilizzo del software su datasets di cui non è possibile individuare punti ancora misurabili, ma su cui sono state realizzate alcune misure dirette lineari riportate nella documentazione.

Ottenuti i parametri di orientamento si può procedere all’elaborazione della nuvola densa di punti a risoluzioni altissime attraverso il comando “Malt” (Figura 11). Il software permette anche di esportare la *depth map* e la

visualizzazione ombreggiata dell’oggetto (Figura 12). Da queste ultime si vede chiaramente come persista un consistente rumore nelle nuvole di punti ricostruite, oltre che la presenza di errori in corrispondenza di alcuni dettagli dipinti, erroneamente rappresentati in rilievo (Figura 12a), fenomeno già evidenziato da Chiabrando et al., 2014.

Di ogni immagine viene memorizzata l’ortofoto, utilizzabile, anche se non mosaicata nella configurazione complessiva, come riferimento per una prima restituzione grafica dell’oggetto (Figura 13).

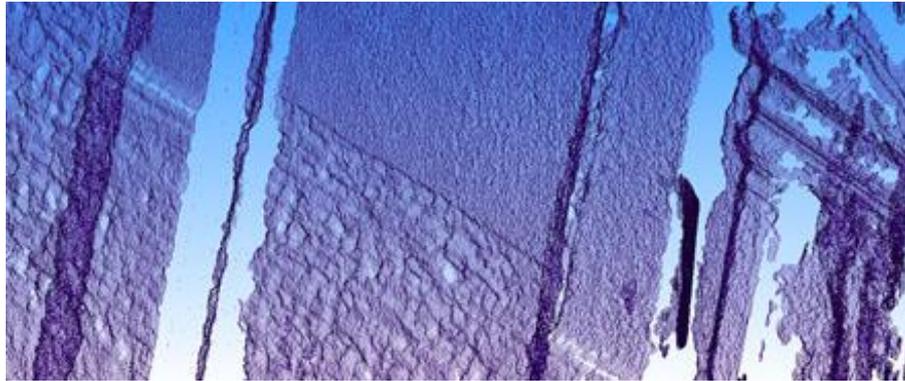


Figura 11 - Facciata 1a. Nuvola densa di punti.

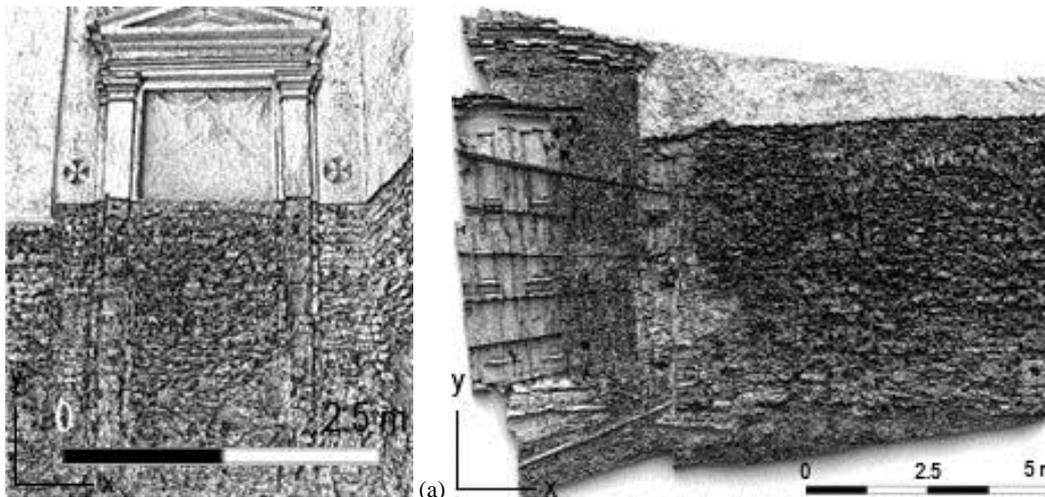


Figura 11 - Rappresentazione *shaded* di un’immagine originale della facciata 1a (a) e di un’immagine rettificata della facciata 1b (b)

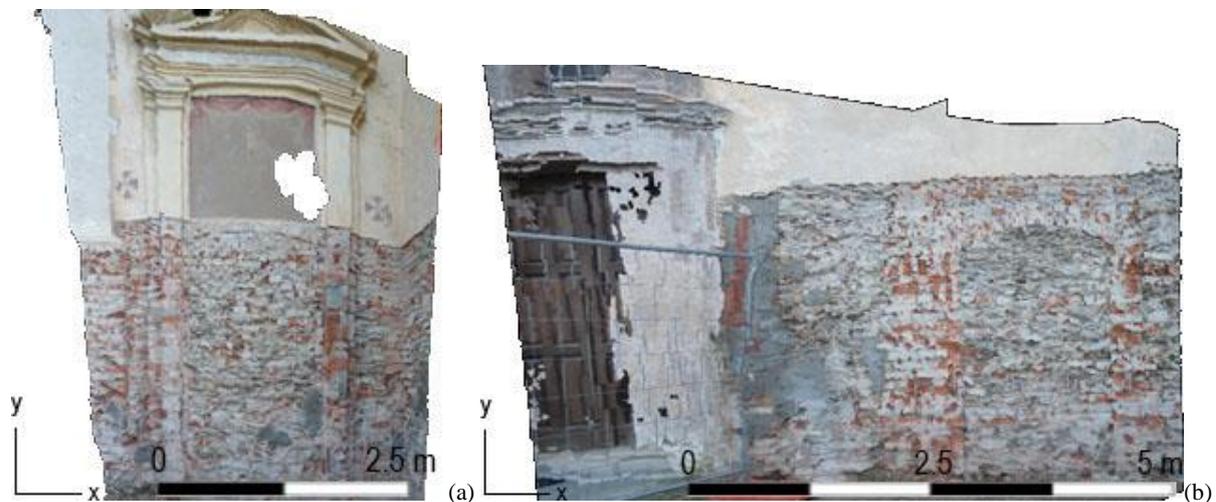


Figura 12 - Ortofoto di un’immagine della facciata 1a (a) e 1b (b) in corrispondenza delle tracce di aperture da documentare.

2.3.2 Risultati

I risultati dell'elaborazione dei modelli sono riassunti nelle tabelle 3 e 4.

Tabella 3 - Risultati dell'elaborazione. Facciata 1a.

Number of images:	7
Tie-points:	67.604
Extracted points	1.126.686
GCPs RMSE [x,y,z] in mm	41.3, 40.2, 43.5
CPs RMSE [x,y,z] in mm	39.1, 38.9, 44.5

Tabella 4 - Risultati dell'elaborazione. Facciata 1b.

Number of images:	7
Tie-points:	132.879
Extracted points	2.975.045
GCPs RMSE [x,y,z] in mm	34.9, 35.0, 41.3
CPs RMSE [x,y,z] in mm	32.8, 37.7, 40.9

Il modello elaborato dalle immagini della facciata 1a presenta alcune grossolane inesattezze dovute all'orientamento scorretto di alcune immagini. Considerando la parte meglio ricostruita, così come il modello della facciata 1b, si può notare come, oltre ad essere rappresentative della geometria reale, la nuvole siano molto poco rumorose e presentino pochissimi punti dispersi rispetto alle superfici principali, come si può notare dalle figure 12-13. Le nuvole di punti così elaborate presentano inoltre il vantaggio di essere scalate correttamente, rappresentando prodotti metricamente validi che potrebbero anche essere utilizzati come riferimento per riportare i restanti modelli alla corretta dimensione. Nel modello della facciata 1a manca però una porzione importante, poiché vi si trova parte dell'oggetto da documentare, il che può significare anche la non affidabilità dell'ortofoto prodotta (Figura 14). Essendo in questa stessa porzione anche buona parte dei GCP misurati, i residui che si ottengono indicano un'accuratezza minore rispetto a quelli dei punti rappresentati integralmente nelle immagini orientate correttamente.



Figura 13 - Nuvola densa di punti della facciata 1a. Vista dall'alto.



Figura 14 - Nuvola densa di punti della facciata 1b. Vista dall'alto.

Il modello della porzione di facciata 1b (Figura 17) è estremamente utile anche per una eventuale restituzione grafica, poiché l'apertura tamponata è chiaramente individuabile nella nuvola di punti anche in assenza dei valori RGB. Questo lascia dedurre che anche l'ortofoto prodotta sia attendibile. In questo caso sono poco definiti i riferimenti laterali in relazione a cui determinare la posizione dell'apertura, ma sussistono comunque alcune tracce da cui si

può intuire la collocazione degli elementi laterali, inoltre la percezione della differenza di piani può essere un elemento di interesse per l'indagine storica del manufatto.

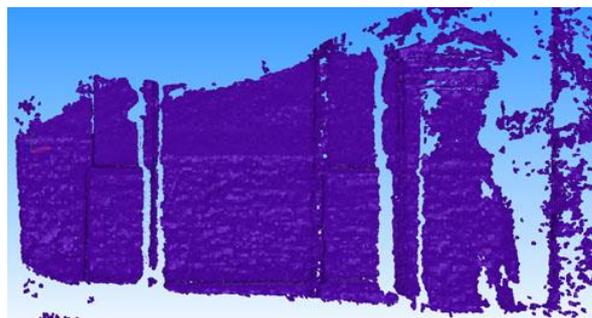


Figura 15 - Facciata 1a. Nuvola densa di punti, vista frontale.

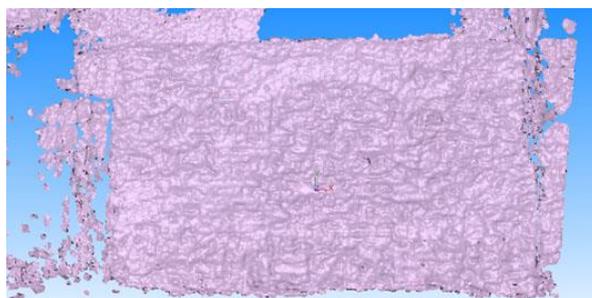


Figura 16 - Facciata 1b. Nuvola densa di punti, vista frontale.

2.4 Visual SFM

VisualSfM è un'applicazione open source per la ricostruzione di modelli 3D attraverso sistemi SfM. Per velocizzare i processi l'applicazione sfrutta il parallelismo *multi-core* per l'individuazione delle *tie features*, per l'accoppiamento tra elementi omologhi e la realizzazione del *bundle adjustment* (Wu, 2011). Questo integra in un'interfaccia grafica precedenti progetti del suo programmatore: "SIFT on GPU" (SiftGPU), "Multicore Bundle Adjustment" e "Towards Linear-time Incremental Structure from Motion".

"SiftGPU" consiste nell'implementazione dell'algoritmo SIFT per l'unità di elaborazione grafica (GPU - *Graphics Processing Unit*). Il programma processa i pixel costruendo parallelamente i livelli piramidali gaussiani e individuando i *keypoints* utilizzando la differenza tra gaussiane (DoG - *Difference of Gaussians*), algoritmo per il miglioramento nell'individuazione delle features di riferimento che prevede la sottrazione di una versione più sfocata di un'immagine dalla versione originale, attraverso un *band-pass filter* che mantiene solo un numero ridotto di "frequenze spaziali" presenti nell'immagine originale. SiftGPU utilizza poi un metodo misto CPU/GPU per costruire in modo efficiente liste di keypoints compatte attraverso "istogrammi dei livelli piramidali" del GPU (Ziegler, et al., 2006). Infine i keypoints sono elaborati in parallelo per ottenerne l'orientamento e i rispettivi descrittori.

Il progetto "Multicore Bundle Adjustment" ottimizza i processi di elaborazione e i relativi tempi sfruttando il parallelismo tra nuclei operativi hardware CPU e GPU (Wu et al., 2011).

L'ultimo algoritmo integrato in VisualSfM, "Towards Linear-time Incremental Structure from Motion" elabora un nuovo processo SfM per la fase di *bundle adjustment* che permette di ridurre i tempi di elaborazione mantenendo

un'elevata accuratezza nei risultati: si introduce un *matching* preventivo per ridurre notevolmente il numero di coppie di immagini utili per la ricostruzione; si analizza la necessità di tempo per l'esecuzione dei metodi BA, riducendola notevolmente per le necessità pratiche attraverso una nuova procedura; si introduce una ritriangolazione per ovviare al problema degli errori accumulatisi per mancanza di completezza del processo (Wu, 2013).

L'applicazione si interfaccia inoltre con lo strumento PMVS/CMVS (*Clustering views for Multi-View Stereo*) di Yasutaka Furukawa (<http://www.di.ens.fr/cmvs/>), che utilizza l'output dell'algoritmo SfM scomponendo il set di immagini in diversi cluster di dimensioni più maneggevoli per ricercare in ognuno le corrispondenze stereoscopiche tra le immagini e generare la nuvola densa di punti. Ogni cluster viene elaborato indipendentemente e in parallelo, unendo poi le diverse ricostruzioni senza che venga perso il livello di dettaglio che si otterrebbe da una ricostruzione complessiva.

2.4.1 Elaborazione

Anche in questo caso le due porzioni di facciata vengono suddivise. La necessità di questa divisione viene riconosciuta dal software stesso durante la procedura di *feature matching*: costruisce infatti due diversi schemi ad albero in cui sono visibili gli accoppiamenti tra le immagini individuati nella fase di allineamento (Figure 18-19).



Figura 17- Facciata 1a. Albero delle gerarchie tra le immagini

Si possono visualizzare i *matches* delle immagini. È possibile notare come non tutte le corrispondenze individuate siano verificate (es. le linee che scendono in direzione dell'angolo in basso a destra in Figura 20a), o che alcune immagini siano associate senza che vi sia fra loro alcuna relazione (Figura 20b). Alcune di queste sono filtrate, come visibile nella modalità "*Inlier matches*" (Figura 20c). Le corrispondenze possono venir facilmente individuate anche se le immagini sono orientate in un verso diverso (Figura 20d). Le *features* individuate possono anche venire rappresentate in ogni singola immagine Secondo diverse modalità (Figura 21).

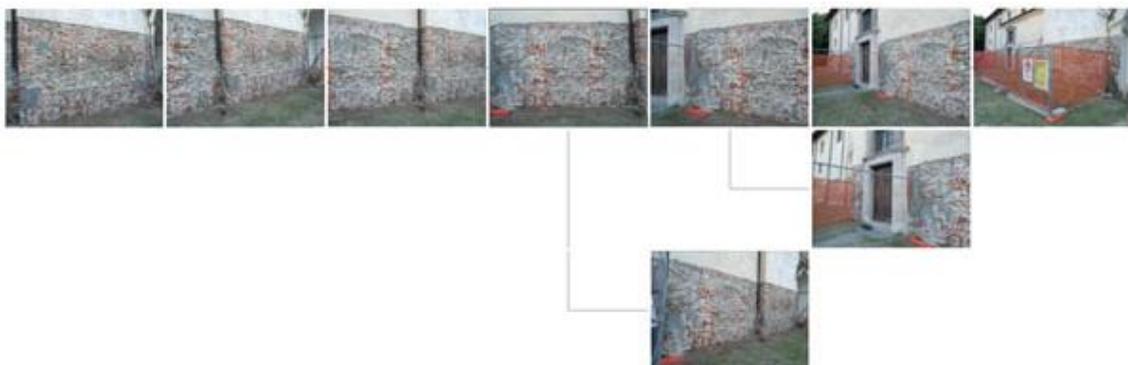


Figura 18 - Facciata 1b. Albero delle gerarchie tra le immagini

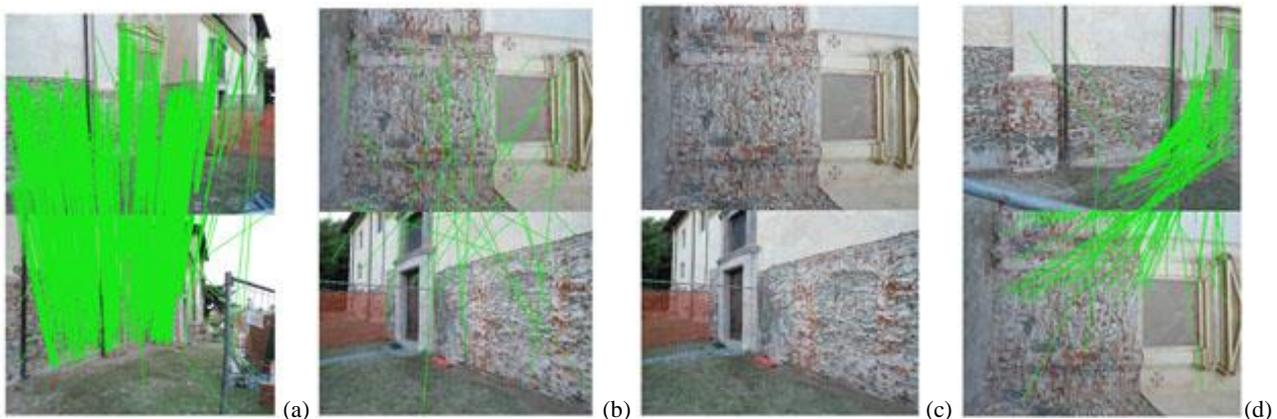


Figura 19- Feature matches individuate fra due immagini accoppiabili (a), tra due non sovrapponibili (b), visualizzazione degli "inlier matches" delle stesse immagini (c), feature matches tra oggetti orientati in modo diverso nelle immagini (d).

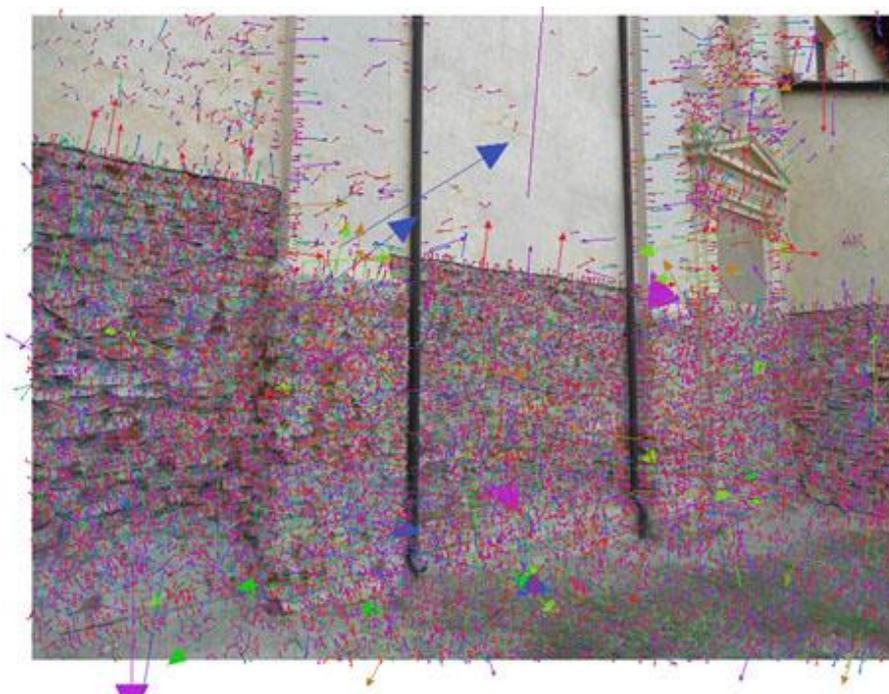


Figura 20 - Rappresentazione delle *features* su un'immagine.

L'applicazione ha richiesto per questa fase 6 secondi per individuare le *features* in ognuna delle 16 immagini, estraendo in media 10.221,5 *tie points* per ogni immagine (min. 8002, max. 12694). In seguito ha individuato 120 coppie di immagini e ha eseguito il *matching* su ogni coppia, in ulteriori 59 secondi.

Dalla fase di orientamento vengono creati per ogni foto un file *.mat* e un file *.sift* che memorizzano i parametri di calibrazione del *matching* effettuato.

Lanciando il comando "Compute 3D Reconstruction" i parametri di *matching* e quelli leggibili dal file EXIF delle foto vengono utilizzati per ricostruire l'orientamento relativo delle immagini e la geometria approssimata dell'oggetto. Il processo viene inizializzato a partire da due immagini caratterizzate da un alto numero di corrispondenze e posizione di presa adatta, in modo da costituire un punto di partenza corretto per l'utilizzo della geometria epolare. Il software non riconosce sempre in modo automatico la coppia di immagini più adatta per inizializzare il processo; è perciò necessario un controllo dei risultati per eventualmente impostare manualmente le immagini di partenza. Da queste prime immagini vengono calcolate le proiezioni dei punti visibili e viene corretta la distanza principale presente nel file EXIF. Nel caso in esame, in cui è utilizzata una camera amatoriale con ottica retraibile, è importante ristimare la lunghezza focale delle immagini. A questo punto le restanti foto vengono correlate una per volta a questo primo modello, la lunghezza focale viene ristimata, e le distorsioni vengono corrette. L'intera serie di immagini è infine associata generando una nuvola di punti rada che delinea la geometria da ricostruire (Figura 22). Il file di orientamento (*.nvm - NView Match*) viene salvato per poter essere utilizzato in seguito anche per l'elaborazione in SURE (Rothermel et al., 2012).

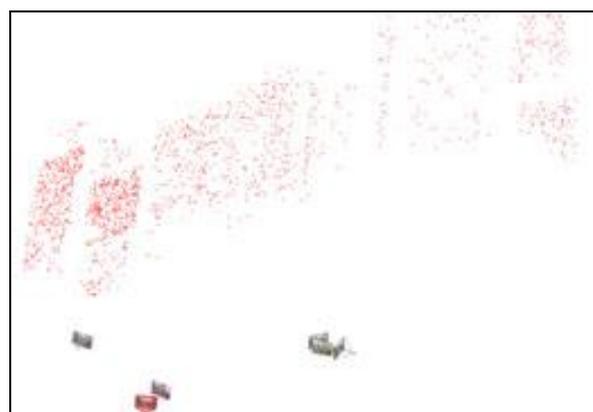


Figura 21- Ricostruzione dell'orientamento delle immagini per la facciata 1a. L'immagine evidenziata in rosso (come i punti che ne sono stati estratti) è quella utilizzata per inizializzare il processo.

A questo punto può essere lanciato l'algoritmo CMVS per la ricostruzione densa della geometria (Figura 23).



Figura 22 - Facciata 1a. Nuvola densa di punti, vista frontale.

L'esecuzione automatica della ricostruzione 3D per l'elaborazione della facciata 1b non ha dato buoni risultati (Figura 24a), perciò la geometria è stata ricalcolata scegliendo manualmente alcune coppie di immagini da cui

inizializzare il processo, constatando che la migliore soluzione viene partendo da una coppia di immagini con alto ricoprimento reciproco (circa 80%) e con un alto numero di corrispondenze individuate (*Number of putative matches* = 4034, *Number of inlier matches* = 3849) (in rosso in Figura 24b). La geometria derivante dalla ricostruzione 3D a partire da questa coppia di immagini è in prima analisi soddisfacente.

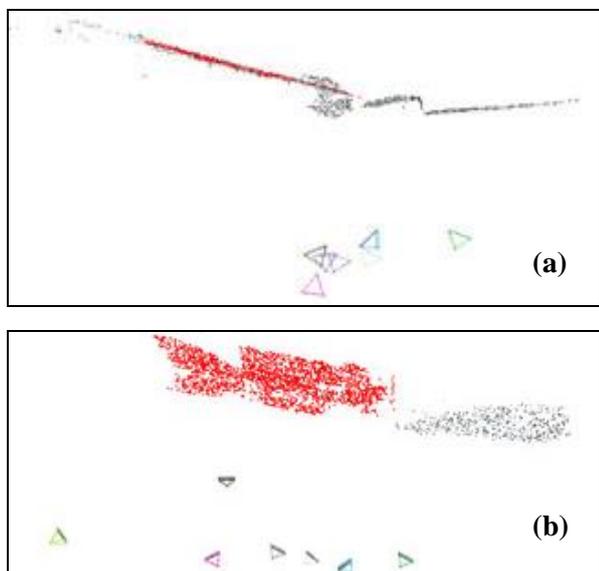


Figura 23- Facciata 1b. Orientamento delle immagini con scelta automatica (a) o manuale (b) delle immagini di partenza.

Tempi di elaborazione facciata 1a: SfM / BA – 4sec.; CMVS – 108 sec.

Tempi di elaborazione facciata 1b: SfM / BA – 14 sec.; CMVS – 100 sec.

2.4.2 Risultati

I risultati dell'elaborazione dei modelli sono riassunti nelle tabelle 5 e 6.

Tabella 5 - Risultati dell'elaborazione. Facciata 1a

Number of images:	7
Tie-points:	10.957
Extracted points	161.630
GCPs RMSE [x,y,z] in mm	25.4, 22.4, 29.3
CPs RMSE [x,y,z] in mm	26.5, 21.8, 30.9

Tabella 6 - Risultati dell'elaborazione. Facciata 1b

Number of images:	9
Tie-points:	22.424
Extracted points	209.156
GCPs RMSE [x,y,z] in mm	33.6, 36.7, 41.0
CPs RMSE [x,y,z] in mm	31.6, 37.0, 40.6

Il modello 1a appare rappresentativo della forma reale dell'oggetto, nonostante restino porzioni di geometria scollegate o non coerenti con la nuvola principale, ad una

prima analisi visiva non si nota particolare rumore ed è possibile giudicare l'output dell'elaborazione un buon risultato (Figura 25). Una limitazione di questo applicativo è l'impossibilità di esportare prodotti ulteriormente elaborati (mesh 3D, modelli altimetrici, ortofoto, etc.). Si può provare in un secondo tempo a texturizzare il modello con il sussidio di ulteriori software. I residui sui GCPs inseriti dimostrano anche dal punto di vista dell'accuratezza, come il software sia in grado di elaborare un modello efficace.



Figura 24 - Facciata 1a. Visualizzazione dall'alto della nuvola densa ricostruita con CSVM da VisualSfM

Nel modello 1b invece si nota poco rumore, ma la geometria ricostruita è parziale e non sufficiente alla restituzione della facciata (Figure 26-27). Si potrebbe provare ad irrigidire il sistema aggiungendo foto della parte superiore, il cui intonaco non è stato rimosso, acquisite in un secondo momento. Anche i residui sui GCPs sono infatti peggiori rispetto a quelli sulla facciata 1°.



Figura 25- Facciata 1b. Nuvola di punti densa generata in VisualSfM, vista frontale



Figura 26- Facciata 1b. Nuvola di punti densa generata in VisualSfM, vista dall'alto

2.5 SURE (photogrammetric SURface REconstruction from imagery)

L'applicativo SURE, elaborato dall'Istituto di fotogrammetria dell'Università di Stuttgart, permette di generare nuvole dense di punti 3D a partire dall'output di un algoritmo SfM che abbia preliminarmente orientato le immagini. Il software utilizza un approccio al metodo *multi-view stereo* (MVS) basato sulla tecnica SGM (*Semi-Global Matching*), che rappresenta un buon compromesso tra l'accuratezza raggiunta dai modelli e i tempi di elaborazione (Hirschmüller, 2011). Un'immagine di riferimento è considerata in relazione a una serie di immagini adiacenti, i cui pixel vengono associati singolarmente utilizzando il risultato di un calcolo di una funzione di "costo" nel matching, che si traduce in una mappa delle differenze calcolata per ogni coppia di immagini. In una seconda fase i modelli stereoscopici, tutte le mappe delle differenze riguardanti la stessa immagine di riferimento, vengono unite in un unico modello. In particolare, è impiegata una soluzione per raffinamenti successivi (*coarse-to-fine*) del metodo SGM per cui vengono prima utilizzati livelli piramidali a risoluzione inferiore per limitare il campo di ricerca di corrispondenze tra le immagini, che poi sono associate nei livelli piramidali con risoluzione maggiore. Dalle disparità calcolate si individua il campo di ricerca per ogni singolo

pixel e la dimensione di ogni buffer viene adattata dinamicamente. Questo permette la riduzione della memoria e del tempo necessari all'elaborazione, con il conseguente vantaggio di poter lavorare agevolmente su grandi quantità di dati (Rothermel et al., 2012).

2.5.1 Elaborazione

Il file .nvm elaborato da VisualSFM viene utilizzato per calcolare in SURE la nuvola densa di punti da cui eventualmente estrarre il modello. Un risultato accettabile viene raggiunto solo per la facciata 1a, mentre per l'elaborazione della 1b probabilmente non sono disponibili sufficienti modelli stereoscopici e non è possibile la generazione del modello complessivo. Vengono elaborate solo le nuvole 3D di tre immagini, di cui solo una visualizzabile, probabilmente per gli eccessivi errori presenti nelle restanti due. In ogni caso, anche questa è rumorosa e poco leggibile per i nostri scopi, non verrà perciò presa in considerazione.

Il DSM viene calcolato nel passaggio successivo dall'unione dei modelli elaborati da ogni coppia di immagini e viene restituita un'unica nuvola di punti (Figura 28).



Figura 27 - DSM, dense cloud della Facciata 1a, elaborata da SURE. Vista frontale

2.5.2 Risultati

In tabella 7 sono riassunti i risultati dell'elaborazione del modello.

Tabella 7 - Risultati dell'elaborazione. Facciata 1a

Number of images:	7
Tie-points:	estratti da VSFM
Extracted points	766.352

La nuvola densa di punti ottenuta è poco rumorosa e segue la corretta geometria, apparendo sufficientemente corrispondente alla situazione reale (Figura 29). Le tracce sulla muratura sono sufficientemente riconoscibili, grazie anche al sussidio dei valori RGB mantenuti dai punti.



Figura 28 - DSM, dense cloud della Facciata 1a elaborata da SURE. Vista dall'alto.

2.6 Comparazione dei risultati ottenuti

I prodotti dei diversi processi mettono in luce come gli algoritmi sfm siano molto flessibili nello stimare la posizione delle prese da immagine di cui si conosce poco dei parametri di orientamento. Anche dal punto di vista dei residui sui CP acquisiti ex-post, si può osservare come gli errori siano

maggiori della soglia rispetto al livello di dettaglio atteso per le distanze di presa ravvicinate (<10 m) da cui sono state scattate le foto, che permetterebbero di raggiungere un'accuratezza adeguata ad una scala 1:50 in condizioni abituali. Ma comunque l'accuratezza raggiunta permette di rappresentare il modello in una scala 1:200, sufficiente per molte analisi (individuazione stratigrafie, analisi 3D superfici, comunicazione e analisi storica del manufatto a partire dal modello, etc.).

Come già notato in 2.2.2, è possibile utilizzare i prodotti di PhotoScan per avere una base su cui individuare le principali linee dei prospetti: la facciata 1a può venir restituita utilizzando una visione ortogonale del modello 3d, mentre la facciata 1b è agevolmente restituibile sulla base dell'ortofoto estratta. Lo stesso vale per l'ortofoto della facciata 1b elaborata da MicMac, mentre lo stesso software non fornisce un dato utilizzabile per la restituzione completa delle stratificazioni in facciata 1a. VisualSFM, pur ricostruendo una geometria abbastanza pulita, non produce dati utili per la restituzione dei prospetti. Infine SURE non elabora i dati relativi alla facciata 1b, ma costruisce una nuvola densa di punti della facciata 1a completa dei valori RGB e molto leggibile, per cui può venire utilizzata in una vista ortogonale per restituire graficamente l'oggetto. I risultati delle elaborazioni sono riassunti in tabella 8.

Tabella 8 - Sintesi dei risultati ottenuti.

Software utilizzato	Ricostruzione geometria		Possibilità di restituzione		Produzione di un modello scalato e orientato	
	Facciata 1a	Facciata 1b	Facciata 1a	Facciata 1b	Facciata 1a	Facciata 1b
Agisoft Photoscan	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì
Apero - MicMac	Parziale	Sì	No	Sì	Sì	Sì
VisualSFM	Sì	Parziale	No	No	Sì	Sì
SURE	Sì	No	Sì	No	Sì	Sì

Una soluzione efficace potrebbe essere l'unione delle porzioni di modello ricostruito dai vari software, georeferenziate nel comune sistema di riferimento per la costruzione di un modello 3D unico che ottimizzi le performance dei diversi software integrando i dati potenzialmente parziali prodotti.

CONCLUSIONI

Le attuali tecniche di sfm permettono di ottenere risultati soddisfacenti anche lavorando in condizioni non ottimali per il processo fotogrammetrico: poche foto con ricoprimento irregolare, riprese da posizioni del tutto casuali e non progettate secondo le corrette regole della presa fotogrammetrica. In questi casi è necessario prestare maggiore attenzione alle fasi di elaborazione, calibrandone i parametri in base alle migliori prestazioni raggiungibili dai software, ma l'evoluzione degli algoritmi permette comunque di ottenere prodotti di qualità adatta al conseguimento degli scopi dell'elaborazione. La qualità geometrica di ogni modello potrebbe essere ulteriormente indagata (estrazione di sezioni, computo delle differenze tra nuvole, etc.) con diversi software per valutare quale, fra quelle ottenute, presenti

maggior uniformità e coerenza con la forma reale dell'oggetto.

In questo contributo è stato analizzato come i processi di orientamento delle immagini e ricostruzione della geometria da parte di diversi software possano essere utili per l'estrazione di specifiche informazioni dai vari dati di output. Queste sono notevolmente più sintetiche dei complessi modelli elaborati ed elaborabili dagli algoritmi utilizzati, e possono essere utilizzate, ad esempio, per la restituzione 3D delle stratificazioni storiche, la mappatura degli interventi di restauro succedutisi nel tempo o delle aree affette da degrado sul palinsesto della facciata. In entrambi i casi si possono produrre elaborati grafici tradizionali, ad esempio da ambiente CAD, o i dati generati possono essere gestiti complessivamente in GIS adeguatamente progettati (Donadio, 2013 - Noardo, 2012). Altre analisi realizzabili sui modelli (nonostante vadano ulteriormente editati) possono riguardare alcune analisi statiche o sull'andamento delle superfici. La ricerca può essere proseguita con il miglioramento delle condizioni in cui i software lavorano: si possono ulteriormente selezionare le immagini o le porzioni di immagini da considerare nel *dense-matching*, si possono variare i parametri delle elaborazioni fino ad ottenere prodotti migliori, si può provare ad irrigidire i sistemi con l'utilizzo di ulteriori fotogrammi acquisiti a posteriori sulla parte di facciata non scoperta nelle immagini dell'intervento, in modo che si costruisca un modello di riferimento a partire da prese acquisite in grandi quantità secondo le regole fotogrammetriche, utile per orientare di conseguenza le immagini della muratura scoperta nella parte inferiore della facciata.

Inoltre i modelli già ottenuti possono venire ulteriormente raffinati con appositi software di trattamento dati 3D, eliminando il rumore e gli errori sulle nuvole di punti, costruendone la *mesh*, texturizzando il modello, portando le nuvole nel corretto sistema di riferimento, etc. Questi sviluppi potranno essere oggetto di indagine in esperienze future.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografia da riviste:

Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., Chamzas, C., 2013. Multi-image 3D reconstruction data evaluation, *Journal of Cultural Heritage*, 15(1), pp.73-79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2012.12.003> (02 Feb. 2014)

Harwin, S., Lucieer, A., 2012. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing*, 4(6), pp. 1573-1599.

Snavely, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), pp. 189-210.

Vergauwen, M., Van Gool, L., 2006. Web-based 3D reconstruction service. *Machine Vision and Applications*, 17(2), pp. 321-329.

Gruen, A., Akca, D., 2005. Least squares 3D surface and curve matching. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(3), pp. 151-174.

Lowe, D., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *Int. Journal of Computer Vision*, Vol. 60, pp. 91-110.

Bibliografia da libri:

Szeliski R., 2011. *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer, London. pp. 181-207, 303-332.

George, P.L. Borouchaki, H., 1998. *Delaunay triangulation and Meshing*. Hermes Editions.

Bibliografia da convegni:

Chiabrando, F., Lingua, A., Noardo, F., Spanò, A., 2014. 3D modelling of trompe l'oeil decorated vaults using dense matching techniques. In: *ISPRS Annals of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5, 97-104, doi:10.5194/isprsannals-II-5-97-2014.

AA.VV., 2012. *Il Colletto di Pinerolo: mezzo millennio di storia, arte e devozione – Atti del Convegno di Studi*, 2008. Roletto, Italy.

Rothermel, M., Wenzel, K., Fritsch, D., Haala, N., 2012. SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. In: *Proceedings LC3D Workshop*, Berlin, Germany.

Pierrot-Deseilligny, M., Cléry, I., 2011. APERO, an Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of a Set of Images. In: *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology*, Trento, Italy.

Hirschmüller, H., 2011. Semi-Global Matching - Motivation, Developments and Applications. In: *Photogrammetric Week*, Stuttgart, Germany, pp. 173-184.

Bibliografia da web site:

Wu, C., 2013. *Towards Linear-time Incremental Structure from Motion*. <http://ccwu.me/vsfm/vsfm.pdf> (accessed 06 May 2014)

Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., Seitz, S. M., 2011. *Multicore Bundle Adjustment*, CVPR 2011, <http://grail.cs.washington.edu/projects/mcba/poster-mcba.pdf> (accessed 05 May 2014)

Wu, C., 2011. *VisualSFM: A visual structure from motion system*. <http://ccwu.me/vsfm> (accessed 05 May 2014)

Ziegler, G., Tevs, A., Theobalt, C., Seidel H.P., 2006. *GPU point list generation through histogram pyramids*. Technical Report. [http://domino.mpi-inf.mpg.de/internet/reports.nsf/117d628e56a6c2bdc1256758006acf0f01a747d7f70884d2c12571970074ea5f/\\$FILE/MPI-I-2006-4-002.pdf](http://domino.mpi-inf.mpg.de/internet/reports.nsf/117d628e56a6c2bdc1256758006acf0f01a747d7f70884d2c12571970074ea5f/$FILE/MPI-I-2006-4-002.pdf) (accessed 06 May 2014)

Davidson, M. W., Abramowitz, M., 1998. *Molecular Expressions Microscopy Primer: Digital Image Processing – Difference of Gaussians Edge Enhancement Algorithm*, Olympus America Inc., and Florida State University. <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/digitalimaging/processing/diffgaussians/index.html> (accessed 05 May 2014)

Wu, C. *SiftGPU: a GPU implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT)*, <http://www.cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu/> (accessed 05 May 2014)

<http://grail.cs.washington.edu/projects/mcba/> (accessed 04 May 2014)

<http://www.di.ens.fr/cmvs/> (accessed 04 May 2014)

<http://phototour.cs.washington.edu/> (accessed 09 May 2014)

Bibliografia da tesi di Laurea:

Donadio, E., 2013, *Tecnica laser scanning e tecnologia GIS per l'analisi stratigrafica del patrimonio storico costruito: la chiesa di Santa Maria dell'Abbazia di Staffarda*. Rel. Spanò, A., Beltramo, S., Chiabrando, F. Politecnico di Torino, II Facoltà di Architettura, Corso di laurea in Architettura per il progetto sostenibile, tesi di Laurea Specialistica.

Noardo, F., 2012, *Il progetto di conservazione: nuove tecnologie (laser scanner e GIS) per la sua formulazione: l'ex*

convento dei Carmelitani del Colletto. Rel. Vinardi, M.G., Spanò, A. Politecnico di Torino, II Facoltà di architettura, Corso di laurea in architettura (restauro e valorizzazione), Tesi di Laurea Specialistica.

Normativa

Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 Legge 6 luglio 2002, n. 137