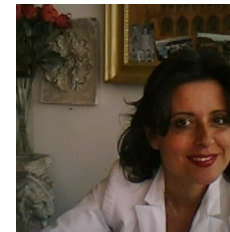


Ricostruzione di una scena urbana 3D utilizzando VisualSfM *Reconstructing urban scene 3D using VisualSfM*

Le tecniche di computer vision oggi danno la possibilità di costruire in maniera rapida e automatica modelli 3D dettagliati a partire da dataset fotografici. La comunità accademica ha visto una crescente attenzione alla ricostruzione 3D di scene urbane. Tra i vari strumenti oggi a disposizione spicca VisualSfM sviluppato dall'università di Washington e Google. Si tratta di una interfaccia grafica open source strutturata in algoritmi dedicati alla tecnica di Structure from Motion (SfM). VisualSfM utilizza un estrattore di *features* chiamato SIFTGPU e un algoritmo di Bundle Adjustment Multicore. Inoltre è possibile ottenere una nuvola di punti densa utilizzando gli algoritmi CMVS/PMVS2. La finalità di questo studio è di verificare l'accuratezza metrica delle ricostruzioni attraverso l'utilizzo integrato di VisualSfM e CMVS/PMVS2. L'approccio quindi è stato testato su diversi dataset di una certa entità strutturati da collezioni fotografiche ragionate.

New computer vision techniques use photo dataset to rapidly build detailed 3D models. Computer-vision researchers have explored many approaches to city-scale 3D reconstruction. Among these systems stands out VisualSfM developed by the University of Washington & Google Inc. It is an open source GUI application of a Structure from Motion (SfM) software that uses a feature extractor called SiftGPU and the Multicore Bundle Adjustment. In addition it embeds the CMVS/PMVS2 able to reconstruct dense 3D point cloud. Our goal is to demonstrate the metric accuracy of VisualSfM+CMVS/PMVS2 and that to get run it, you can use an unstructured photo dataset but the result improves if you use a structured photo dataset. The approach has been tested on several large datasets with structured images.



Laura Inzerillo
Ricamatore presso l'Università degli Studi di Palermo, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Architettura. È direttore del Dipartimento di "Comunicazione grafica interattiva. AR" dello I.E.M.E.S.T. Ha pubblicato 63 lavori: 18 articoli in rivista, 14 contributi in volume, 24 contributi in Atti di convegno, 1 abstract in atti di convegno, 1 poster, 3 monografie, 2 curatele.



Cettina Santagati
Ingegnere e Dottore di Ricerca ICAR/17 presso "La Sapienza", Roma. È docente a contratto presso il Dipartimento di Architettura, Università di Catania. L'attività di ricerca è incentrata sulle tecnologie informatiche per il rilievo e la rappresentazione del patrimonio architettonico, archeologico e ambientale. È autrice di settanta pubblicazioni scientifiche in ambito nazionale ed internazionale.



Francesco Di Paola
Ingegnere e ricercatore non confermato per il S.S.D. ICAR/17-Disegno, svolge attività presso l'Università di Palermo al Dipartimento di Architettura. Si occupa in generale di tematiche inerenti il rilievo, la rappresentazione e l'analisi grafico-geometrica dell'Architettura. È autore di circa sessanta pubblicazioni scientifiche in ambito nazionale ed internazionale.

Parole chiave: Modellazione da immagini, Ricostruzione 3D, Scena urbana
Keywords: Image-based modeling, 3D reconstruction, Urban Scene



1



2



3



4



5

1. INTRODUZIONE

Il Visual SfM+CMVS/PMVS2 (VSfM) è un software scaricabile da internet, attraverso cui è possibile costruire, con un data set fotografico, una dense di punti, ovvero una nuvola non strutturata di punti, che ricostruisce perfettamente l'oggetto ripreso. Il nostro intento, in questo lavoro, è quello di verificare e dimostrare la sua attendibilità metrica e la sua applicabilità su scala urbana.

Come esempio applicativo è stato preso in esame il caso della piazza Garibaldi ad Enna progettata nel 1935 dall'architetto palermitano Salvatore Caronia Roberti (Galizia, 2012; Restuccia et al., 2012). La scelta è stata guidata, fondamentalmente, dalla disponibilità delle scansioni dei singoli edifici che si affacciano sulla piazza. L'accuratezza metrica del VSfM, la compattezza della nuvola di punti e la densità della stessa ci hanno permesso di eseguire sperimentazioni sia su piccola scala che su media scala per finire alla scala urbana.

L'articolo è strutturato nel seguente modo: lavori correlati, descrizione del VSfM, attendibilità metrica e applicazione su scala urbana, conclusioni.

2. RELATED WORK

In questi ultimi anni abbiamo assistito al sempre crescente interesse, da parte della Comunità scientifica, verso le tecniche della *Computer Vision – Structure from Motion (SfM)* – finalizzate alla ricostruzione 3D di oggetti del mondo reale. I lavori presenti in letteratura sono fondamentalmente di due tipi e rispecchiano l'avanzamento dello stato dell'arte in questo campo. Un primo gruppo in cui, partendo dallo scopo amatoriale di ricostruire attraverso fotografie nuvole di punti dell'oggetto di interesse, molti ricercatori hanno messo in campo e verificato algoritmi per ricostruire in maniera del tutto automatica il problema della calibrazione della macchina fotografica, dell'orientamento interno e relativo al fine di ritrovare nello spazio la posizione delle camere al momento della presa e ricostruire una nuvola di punti tridimensionali che corrispondano ai pixel dell'immagine fotografica. A partire da questa nuvola di punti – *sparse reconstruction* – i ricercatori attraverso tecniche di *Dense Stereo Matching (DSM)* sono riusciti ad ottenere delle nuvole di punti ricche di dettagli - *dense reconstruction* - in

grado di ricostruire anche interi ambienti urbani. Il secondo gruppo di studi riguarda la verifica dell'attendibilità metrica dei diversi algoritmi e software ormai facilmente a disposizione anche open source e a basso costo al fine di capire se è possibile utilizzare tali sistemi per l'acquisizione di informazioni 3D nel campo dei beni culturali dalla piccola alla grande scala.

Nella prima classe ricadono le sperimentazioni portate avanti su grande scala architettonica e scala urbana, (Snaveley et al., 2006; Vergauwen, Van Gool, 2006; Snaveley et al, 2008; Vu et al., 2009; Agarwal, 2010; Furukawa et al., 2010; Furukawa, Ponce, 2010; Pierrot-Deseilligny, 2011).

Per quanto riguarda la seconda categoria bisogna precisare che la maggior parte dei lavori riportati in letteratura, ha finora affrontato casi applicativi su oggetti di piccola entità metrica (Nguyen et al, 2012), di reperti archeologici (Kersten, Lindstaed, 2012), di porzioni di siti archeologici (Lo Brutto, Meli, 2012; Rodríguez-Navarro, 2012; Dellepiane et al., 2013) e di statue come gli eccellenti risultati ottenuti da Kersten (Kersten, Lindstaed, 2012) sulle statue Moai dell'Easter Island, o le ricostru-

zioni dei sarcofagi di Costanza e dei Reali d'Aragona (Galizia, Santagati, 2012). Per quanto riguarda le applicazioni nel campo architettonico e la ricostruzione di scene urbane si citano Kersten e Stallmann (2012) che hanno realizzato alcune applicazioni su edifici molto semplici; e alcuni studi finalizzati al confronto e alla verifica metrica di diversi software (Remondino et al. 2012; Manfredini, Galassi, 2013; Santagati, Inzerillo, 2013; Santagati et al. 2013).

3. VISUALSfM+CMVS/PMVS2

Il VSfM è un'interfaccia grafica progettata da Changchang Wu (Wu, 2011a) che ricostruisce la pipeline per ottenere una *sparse reconstruction* mettendo insieme tutti gli algoritmi necessari a tale scopo SiftGPU (Wu, 2012) e Multicore Bundle Adjustment (Wu, 2011b). In più, integra gli algoritmi sviluppati da Furukawa PMVS2 (Furukawa, Ponce, 2010) e CMVS (Furukawa et al, 2010) per il calcolo delle *dense reconstruction* attraverso la scomposizione del problema in Cluster ragionati. L'utilizzo di questo strumento con consapevolezza e maestria, può dare risultati eccellenti sia sotto il profilo dell'accuratezza grafica che metrica. Come tutti i pacchetti che si avvalgono delle tecniche *Structure from Motion*, il VSfM rielabora un dataset di immagini, suddivide le stesse in clusters (CMVS), ne ricava l'orientamento e i punti omologhi e, infine, ne estrae una nuvola di punti che ricostruisce fedelmente l'oggetto indagato. Se pur, molto semplice e banale, il processo di elaborazione non dispensa strane sorprese a chi si avvicina all'utilizzo di questa tecnica. Ci sono, infatti, una serie di variabili che vanno tenute in considerazione durante l'intero processo di elaborazione dei dati e che determinano il corretto *processing* della nuvola di punti che si ottiene. La qualità del prodotto finale della nuvola dei punti è garantita dalla presenza di tre vincoli che regolano la ricostruzione:

- Vincolo di compattezza: le immagini ridondanti sono automaticamente escluse dai clusters;
- Vincolo di dimensione: ogni cluster è sufficientemente piccolo tale da consentire la ricostruzione MultiViewStereo (MVS);
- Vincolo di copertura: la ricostruzione MVS di

questi clusters riportano una perdita minima di contenuto e di dettaglio rispetto a quanto non si ottiene attraverso l'elaborazione di un completo data set.

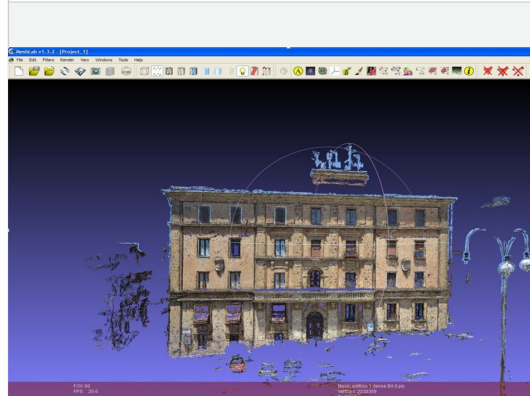
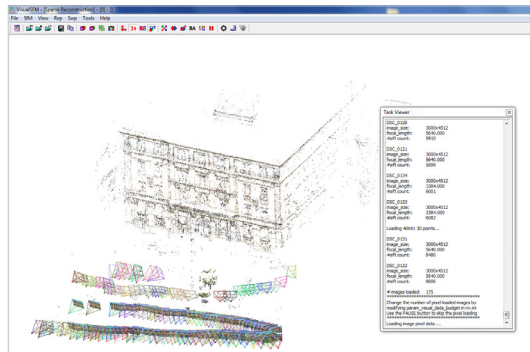
Le applicazioni sviluppate da Furukawa riguardano ricostruzioni di monumenti estremamente famosi come il Colosseo o Piazza S. Marco o la fontana di Trevi (Agarwal, 2010). Lo studioso, infatti, non tende a dimostrare l'accuratezza metrica delle sue elaborazioni attraverso confronti metrici, ma tende a dimostrare la capacità ricostruttiva degli algoritmi e filtri usati di oggetti il cui dataset è scaricabile da siti web come Flirck.com. Ad esempio, per la ricostruzione del Colosseo ha scaricato 1.167 immagini, per la fontana di Trevi 1.936 e per Piazza S. Marco 13.709. Grazie a queste elaborazioni si è testata la capacità di questi algoritmi di elaborare dataset imponenti ma, non è da trascurare che, per queste elaborazioni sono stati utilizzati fino a 360 processori in parallelo grazie alla scomposizione del problema in clusters. Quindi, possiamo dire che il VSfM è un software con grandi potenzialità ma, anche, con grandi esigenze hardware, non sempre disponibili.

Se Furukawa, per le sue elaborazioni, utilizza dei dataset di immagini non strutturati, noi, in questo lavoro, mostreremo gli esiti di una ricerca che ha sperimentato dataset strutturati anche perché applicati a siti architettonico-urbanistici poco turistici e, quindi, con un repertorio fotografico sul web molto scarso se non, del tutto assente. Inoltre, vista la finalità di verificare l'attendibilità metrica si è deciso di operare adoperando la stessa macchina fotografica per le riprese, utilizzando un'ottica fissa (senza quindi cambiare la distanza focale) ed effettuando prese convergenti con un criterio di copertura e sovrapposizione delle immagini simile a quello fotogrammetrico.

Vediamo quali sono i passi da seguire per lanciare un'elaborazione in VSfM.

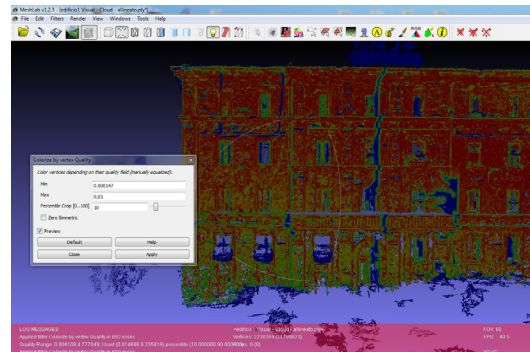
Innanzitutto si scarica la versione del software a 32 o 64 bit a seconda del profilo del proprio computer. Successivamente si apre una cartella con il nome dell'edificio da elaborare, all'interno della quale si scaricano le immagini realizzate per quel data set. A questo punto si devono lanciare soltanto cinque comandi:

- Quindi si lancia il VSfM e si caricano le immagini selezionando la cartella in oggetto.
- Si lancia l'elaborazione dei SIFT (*Scale-Invariant-Feature-Transform*) e dei *Matches* per il calcolo dei punti omologhi tra le immagini. Questa operazione richiederà, a seconda del numero delle immagini e della risoluzione utilizzata, un tempo di calcolo non indifferente.
- Il passaggio successivo è quello di ottenere una *sparse reconstruction*, ossia una nuvola di punti ottenuta attraverso la ricostruzione nello spazio dei punti individuati dal sistema per il calcolo delle features necessarie alla risoluzione del problema dell'orientamento interno ed esterno. Durante l'elaborazione in sistema visualizza in tempo reale i risultati della ricostruzione della posizione delle camere fotografiche nello spazio e i relativi punti che sono stati generati.
- Questa prima ricostruzione è affetta da una serie di errori che vengono corretti mediante l'algoritmo matematico di *Bundle Adjustment* che raffina il calcolo eliminando i punti sbagliati.
- La ricostruzione così ottenuta viene "densificata" lanciando gli algoritmi CMVS/PMVS2 di Furukawa che scompongono il problema in sotto-cluster e lo ricompongono in un unico file in formato .ply evitando di appesantire le risorse hardware a disposizione. Prima di iniziare l'elaborazione della *dense reconstruction* è consigliabile salvare la *sparse*, questo perché è possibile personalizzare i parametri di calcolo del CMVS/PMVS2 (risoluzione delle immagini, numero di immagini per cluster, parametri di distorsione ed altro), quindi può essere utile richiamare quel file anche successivamente immettendo input diversi. Specialmente all'inizio non è facile comprendere se le caratteristiche hardware della macchina utilizzata renderanno possibile il completamento della ricostruzione dense in tempi ragionevoli. La sequenza delle operazioni è relativamente semplice e le difficoltà esecutive dipendono direttamente dalla potenza del computer che si sta utilizzando. Nel nostro caso le elaborazioni sono state condotte utilizzando un computer con due processori Intel Xeon E5-26, 2Giga Hertz, 32 Giga-byte Ram, NVIDIA I Quadro K 5000.



Elaborazione VisualSfM - edificio 1	
Dimensione dell'oggetto	larghezza 29,30 m altezza 18,00 m
Numero di immagini	174
Numero di immagini ridondanti	0
Risoluzione	12 Mpix
Tempo di elaborazione	134 min
Numero di clusters	2
Numero di punti	2,106,267
RSM	0.05 m

Edificio 1



4. VISUALSfM+CMVS/PMVS2 APPLICATO AGLI EDIFICI DI PIAZZA GARIBALDI

In un percorso che segue le fasi di funzionamento del Vsfm, il primo passo da fare è quello della realizzazione del dataset. Sorge spontaneo chiedersi che tipo di macchina fotografica utilizzare, che risoluzione adottare, se è possibile cambiare la distanza focale tra una presa e l'altra e se è possibile cambiare obiettivo. Tutte queste domande trovano risposta nella sperimentazione a tappeto di un software che finora è stato indagato maggiormente sulla piccola scala piuttosto che sulla grande scala dove le esigenze operative sono ben diverse. Innanzi tutto, per le prese fotografiche si è utilizzata una Nikon D3200 con obiettivo VR 18/105. Si è pensato, altresì di mantenere, qualora possibile, la stessa distanza focale (18 mm) e di realizzare prese convergenti di insieme e prese di dettaglio. Su scala architettonica e, ancora di più urbana, ci sono degli ostacoli visivi quali, pali, vegetazione, chioschi, ecc che si interpongono tra il punto di vista e l'oggetto stesso. Questo, ovviamente, ne limita il campo visivo e, di conseguenza, le prese fotografiche. Si è pensato, pertanto di

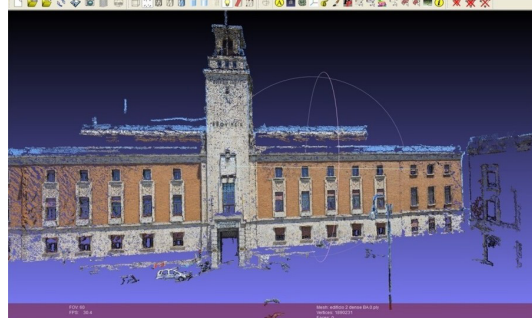
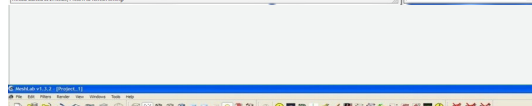
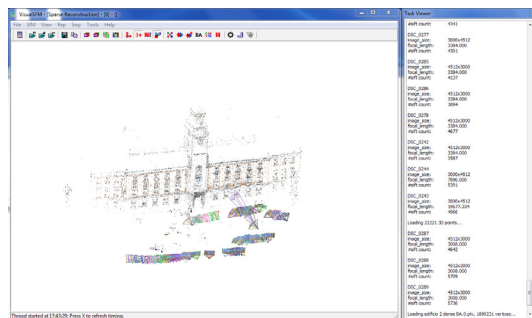
Ricostruzione di una scena urbana 3D utilizzando VisualSfM

- Dataset e *sparse reconstruction* dell'edificio 1, visualizzazione della nuvola di punti in Meshlab e tabella con i valori tecnico-professionali.
- Allineamento tra la nuvola del VSfM e la nuvola della scansione in Cloud-Compare.

procedere secondo direzioni possibili percorrendo due volte il tragitto individuato per realizzare due prese ad altezze diverse. Le prese di dettaglio sono state fatte a seconda dell'edificio e dei suoi elementi di dettaglio architettonico.

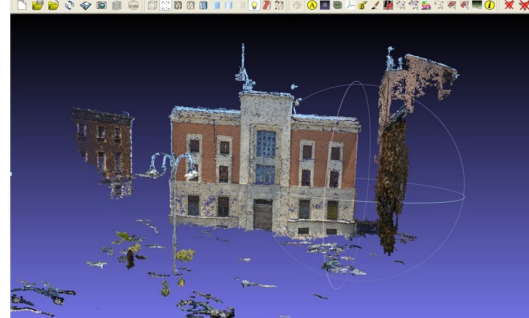
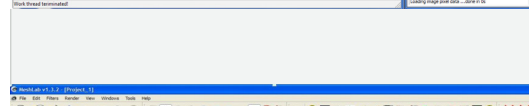
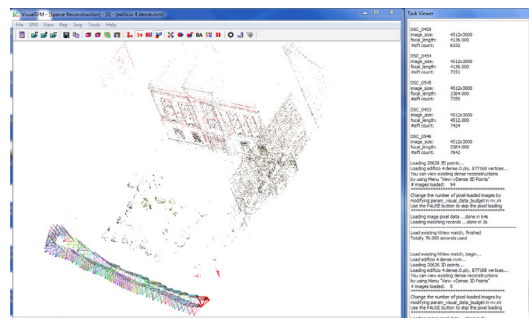
4.1. ELABORAZIONE VISUAL DELL'EDIFICIO 1

Come si può evincere dalla figura 2, lo stato dei luoghi ha consentito, per la realizzazione del dataset, diversi percorsi frontali di cui alcuni di insieme ed altri di dettaglio. Per l'elaborazione è stato realizzato un data set fotografico di 174 immagini a 12 Mpix. Il tempo totale di elaborazione della nuvola dei punti è stato di poco più di 2 ore. Allo scopo di testare l'accuratezza metrica del VSfM è stato condotto un confronto metrico tra la nuvola ottenuta e la nuvola ottenuta mediante scansione laser. Per gli allineamenti tra le nuvole si è utilizzato il *CloudCompare*, un software open source gratuitamente scaricabile da internet. All'interno di *CloudCompare* si è proceduto alla scalatura e all'allineamento della nuvola ottenuta mediante il VSfM sulla relativa scansione laser.



Elaborazione VisualSfM - edificio 2	
Dimensione dell'oggetto	larghezza 68,00 m altezza 18,00 m
Numero di immagini	113
Numero di immagini ridondanti	0
Risoluzione	12 Mpix
Tempo di elaborazione	39 min
Numero di clusters	1
Numero di punti	1,890,231

Edificio 2



Elaborazione VisualSfM - edificio 3	
Dimensione dell'oggetto	larghezza 20,60 m altezza 20,00 m
Numero di immagini	101
Numero di immagini ridondanti	0
Risoluzione	12 Mpix
Tempo di elaborazione	32 min
Numero di clusters	1
Numero di punti	877,168

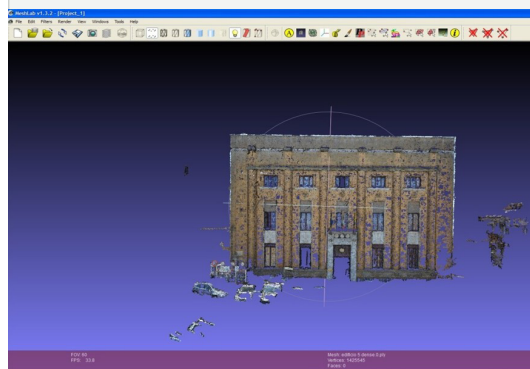
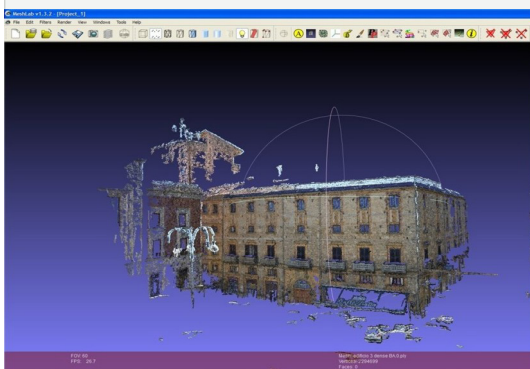
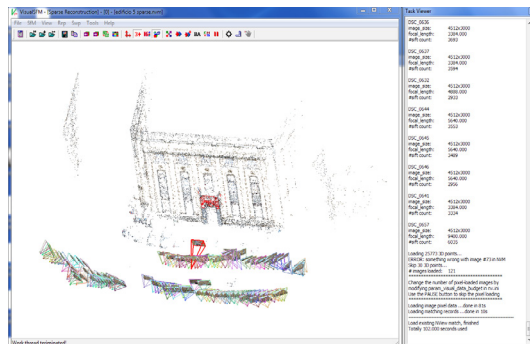
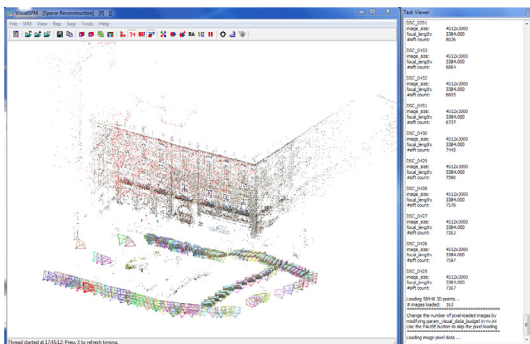
Edificio 3

4. Dataset e sparse reconstruction dell'edificio 2, visualizzazione della nuvola di punti in Meshlab e tabella con i valori tecnico-professionali.

5. Dataset e sparse reconstruction dell'edificio 3, visualizzazione della nuvola di punti in Meshlab e tabella con i valori tecnico-professionali.

Il confronto metrico è avvenuto in Meshlab mediante il calcolo della distanza di Hausdorff tra le due nuvole, generando il relativo istogramma in cui l'RSM è di 5 cm. L'immagine in figura 3, in cui i punti sono colorati in funzione della qualità della sovrapposizione, denuncia nelle zone rosse un'ottima corrispondenza di valori e nelle zone blu una cattiva corrispondenza di valori. È bene precisare, che molte delle zone blu sono in corrispondenza di mancanze nella nuvola della scansione e, quindi, si può concludere che la ricostruzione del VSfM in ambito urbano ha uno scarto di 5 cm.

4.2. ELABORAZIONE VISUAL DELL'EDIFICIO 2
Per l'elaborazione dell'edificio 2 è stato realizzato un data set con 113 immagini prese in modo poco lineare a causa di impedimenti presenti in sito. Per questa applicazione e, per applicazioni con facciate molto lunghe come questa, è necessario coprire con le prese tutta la larghezza della facciata per evitare che ci siano delle zone meno dense rispetto ad altre. Nel nostro caso, a causa della presenza di lavori di manutenzione stradale proprio in corrispondenza dell'estremità sinistra



- 6. Dataset e *sparse reconstruction* dell'edificio 4, visualizzazione della nuvola di punti in Meshlab e tabella con i valori tecnico-professionali.
- 7. Dataset e *sparse reconstruction* dell'edificio 5, visualizzazione della nuvola di punti in Meshlab e tabella con i valori tecnico-professionali.

Elaborazione VisualSfM - edificio 4	
Dimensione dell'oggetto	larghezza 33,80 m altezza 16,00 m
Numero di immagini	163
Numero di immagini ridondanti	0
Risoluzione	12 Mpix
Tempo di elaborazione	120 min
Numero di clusters	2
Numero di punti	2,204,599

Elaborazione VisualSfM - edificio 5	
Dimensione dell'oggetto	larghezza 27,80 m altezza 19,00 m
Numero di immagini	121
Numero di immagini ridondanti	0
Risoluzione	12 Mpix
Tempo di elaborazione	52 min
Numero di clusters	1
Numero di punti	1,425,545

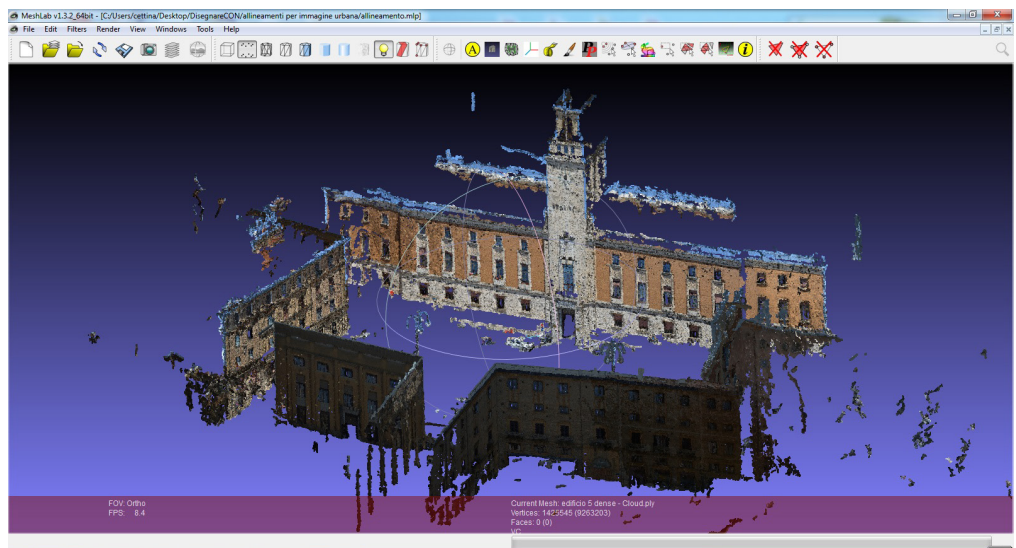
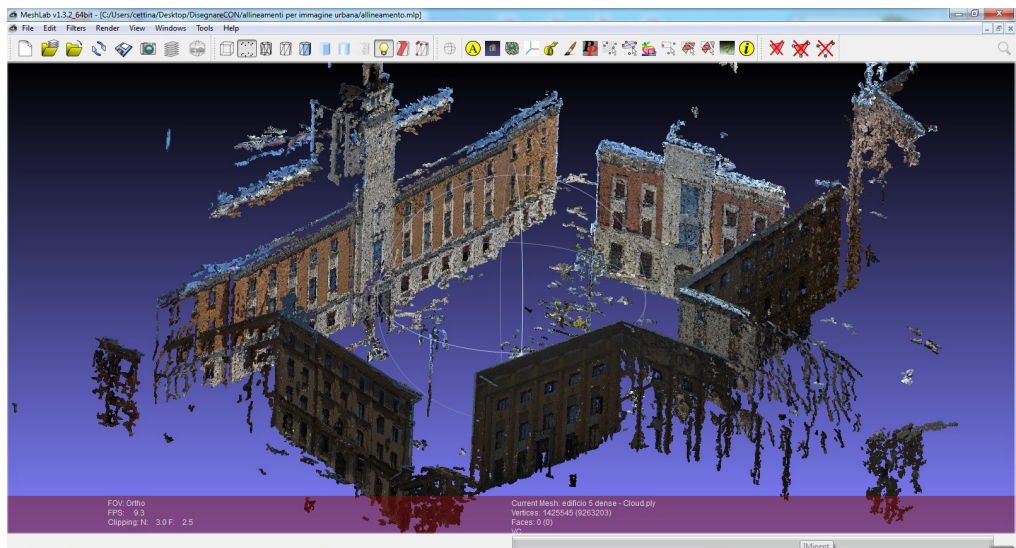
dell'edificio, non è stato possibile completare il data set sulla parte suddetta e, pertanto, anche l'elaborazione della nuvola di punti, presenta, sull'estremità sinistra, zone di vuoti (Fig. 4). Dalla tabella è possibile estrapolare tutti i dati prestazionali del VSfM.

4.3. ELABORAZIONE VISUAL DELL'EDIFICIO 3
Per l'elaborazione dell'edificio 3 è stato realizzato un data set con 101 immagini scattate frontalmente rispetto alla facciata su un doppio percorso ad altezze diverse. Anche in questo caso, come nel caso precedente, il tempo di elaborazione è stato molto breve: tra il loading delle immagini, il calcolo dei SIFT, la *sparse* e la *dense* sono serviti appena 30 minuti (Fig. 5).

4.4. ELABORAZIONE VISUAL DELL'EDIFICIO 4
Per l'elaborazione dell'edificio 4 è stato realizzato un data set con 163 immagini scattate secondo un percorso consentito dall'arredo urbano della piazza e dalla presenza di autovetture parcheggiate. L'elaborazione ha richiesto 2 ore di tempo, con la creazione di 2 cluster ed una nuvola con

Edificio 4

Edificio 5



8-9. Ricostruzione urbana della piazza, sovrapposizione in CloudCompare, tra le singole nuvole ottenute dal Visual e la nuvola laser.

2.294.599 punti. In questo caso, come si evince dalla figura 10, la nuvola di punti appare molto densa e dettagliata e, in effetti, è proprio così grazie ad un data set più ricco e con un numero maggiori di dettagli.

4.5. ELABORAZIONE VISUAL DELL'EDIFICIO 5
Anche in questo caso, per l'elaborazione dell'edificio 5 è stato realizzato il data set fotografico consentito dall'arredo urbano. Sono state scattate 121 immagini secondo un doppio percorso. L'elaborazione ha richiesto poco meno di 1 ora di tempo, con la creazione di 1 cluster ed una nuvola con 1.425.545 punti. Dalla tabella si possono estrapolare i valori tecnico-prestazionali.

5. RICOSTRUZIONE URBANA
L'applicazione di tecniche di *Dense Stereo Matching*, per la ricostruzione urbana della piazza, è risultata particolarmente utile. Come si evince dalle figure 8 e 9, la sovrapposizione in *CloudCompare*, tra le singole nuvole ottenute dal Visual e la nuvola laser, ha generato uno scarto in termini di centimetri, errore che, a scala urbana,

è assolutamente accettabile.

La scena urbana, così ottenuta, è di grande effetto e, la metodologia utilizzata per la sua realizzazione, costituisce un'ottima alternativa alle tecniche laser di rilevamento che, ancora oggi, sono un ostacolo nella catena produttiva del professionista nel settore dell'ingegneria e dell'architettura.

6. CONCLUSIONI

Dal confronto dei diversi dataset fotografici e le relative nuvole di punti ottenute, possiamo affermare che il VSfM è un ottimo open source 3D modeling tool poiché l'accuratezza metrica in caso di dataset fotografici costruiti con consapevolezza raggiunge l'ordine del cm come verificato nel paragrafo 4.1. Abbiamo anche riscontrato che a dataset fotografici con poche immagini corrispondono ricostruzioni di nuvole poco dense e, quindi, poco definite e metricamente meno attendibili. Tuttavia, la possibilità di strutturare il cluster iniziale, ottimizza il rapporto tra numero di foto e qualità delle stesse. Ovvero, migliorando il criterio di presa e la risoluzione dell'immagine, si raggiunge un grado di definizione e di dettaglio della nuvola sempre maggiore. Il prodotto finale ottenuto con VisualSfM + CMVS/PMVS2 è una nuvola di punti, che può essere importata in programmi open source quali *Meshlab* o *CloudCompare* e trasformata in mesh applicando l'algoritmo di ricostruzione delle superfici di Poisson. Ciò diversamente dagli altri software commerciali che consentono invece di elaborare la mesh direttamente nell'ambiente di lavoro. Questo può essere considerato un punto di debolezza, unitamente al fatto che per quanto l'interfaccia grafica di VSfM possa essere di aiuto nella sequenza delle operazioni, i parametri che regolano CMVS/PMVS2 vanno comunque inseriti in un file .ini che di volta in volta deve essere aggiornato, rendendo un po' ostico l'approccio al software. Attualmente il gruppo di ricerca è impegnato in una serie di verifiche che mettono a confronto (protocolli operativi, tempistiche, qualità dei risultati ottenuti) diversi programmi che usano tecniche di image based modeling e dense stereo matching al fine di verificarne l'utilizzo nel campo dei beni architettonici.

BIBLIOGRAFIA

Agarwal, Saran, Furukawa, Yasutaka, Snavely, Noah, Curless, Brian, Seitz, Steve, Szeliski, Richard, (2010), *Reconstructing Rome*, in *Computer*, 43 (6), pp. 40-47.

Bandiera, Adriana, Beraldin, Jean Angelo, Gaiani, Marco, (2011), *Nascita ed utilizzo delle tecniche digitali di 3D imaging, modellazione e visualizzazione per l'architettura e i beni culturali*, in Ikhnos, Siracusa, Lombardi editore, pp. 81-134.

Dellepiane, Matteo, Dell'Unto, Nicolò, Callieri, Marco, Lindgrec, Stefan, Scopigno, Roberto, (2013) *Archeological excavation monitoring using dense stereo matching techniques*, in *Journal of Cultural Heritage*, 14(3), pp. 201-210.

Furukawa, Yasutaka, Ponce, Jean, (2010), *Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis*, in *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, vol. 32, n. 8, pp. 1362-1376.

Furukawa, Yasutaka, Curless, Brian, Seitz, Steve, Szeliski, Richard, (2010), *Towards Internet-scale Multi-view Stereo*, in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.

Galizia, Mariateresa, (2012), *Il disegno delle torri medievali di enna nel paesaggio urbano tra passato e presente*, Giuseppe Maimone Editore, Catania.

Galizia, Mariateresa, Santagati, Cettina, (2012), *Low-cost image-based modeling techniques for archaeological heritage digitalization: more than just a good tool for 3D visualization?*, *Proceedings of ARQUEOLÓGICA 2.0*, Seville, Spain.

Kersten, Thomas, Stallmann, Dirk, (2012), *Automatic texture mapping of architectural and archaeological 3d models*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B5, pp. 273-278.

Kersten, Thomas, Lindstaedt, Ma-

ren, (2012), *Image-Based Low-Cost Systems For Automatic 3d Recording And Modelling Of Archaeological Finds And Objects*, in *EuroMed 2012, Progress In Cultural Heritage Preservation*, LNCS 7616, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 1-10.

Lo Brutto, Mauro, Meli, Paola, (2012), *Computer vision tools for 3d modelling in archaeology*, in *International Journal of Heritage in the Digital Era*, Volume 1, Supplement, pp. 1-6.

Nguyen, Hoai-Minh, Wunsch, Burkhard, Delmas, Patrice, Luttenroth, Christof, (2012), *3D Models from the Black Box: Investigating the Current State of Image-Based Modeling*, in *Proceedings of the 20th International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG, Pilsen, Czech Republic*.

Manferdini, Anna Maria, Galassi, Mark, (2013), *Assessments for 3d reconstructions of cultural heritage using digital technologies*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W1, pp. 167-174.

Pierrot-Deseilligny, Marc, De Luca, Livio, Remondino, Fabio, (2011), *Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation*, *Proc. CIPA*.

Remondino, Fabio, Del Pizzo, Silvio, Kersten, Thomas, Troisi, Salvatore, (2012), *Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation—A Critical Overview* in *EuroMed 2012, Progress In Cultural Heritage Preservation*, LNCS 7616, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 40-54.

Restuccia, Franca, Galizia, Mariateresa, Santagati, Cettina, (2012), *Urban and Architectural Design of the "Piazza del Governo" in Enna*, *Journal of Literature and Art Studies*, vol 2 (6), pp. 606-621.

Rodríguez-Navarro, Pablo, (2012), *Automated Digital photogrammetry versus the systemsbasedonacti-*

ve 3D sensors - *La Fotogrammetria Digital Automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3D activos*, in *Revista EGA*, n.º. 20, año 17, Valencia, pp. 100-111, ISSN: 1133-6137.

Santagati, Cettina, Inzerillo, Laura, (in press), *123D Catch: efficiency, accuracy, constraints and limitations in architectural heritage field*, in *International Journal of Heritage in Digital Era*, vol 2 (2), pp 263-290. ISSN: 2047-4970

Santagati C., Inzerillo L., Di Paola F., *Image-based modeling techniques for architectural heritage 3d digitalization: limits and potentialities* (2013), in *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial and Information Sciences*, vol. XL-5/W2, 2013. pp 550-560.

Snavely, Noah, Seitz, Steve, Szeliski, Richard, (2006), *Photo tourism: Exploring photo collections in 3D*, in *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Proceedings)*, 25(3), pp. 835-846.

Snavely, Noah, Seitz, Steve, Szeliski, Richard, (2008), *Modeling the World from Internet Photo Collections*, in *International Journal of Computer Vision*, 80(2), pp. 189-210.

Vergauwen, Maarten, Van Gool, Luc, (2006), *Web-based 3D Reconstruction Service*, in *Machine Vision and Applications*, vol. 17, pp. 411-426.

Vu, Hoang, Keriven, Renaud, Labatut, Patrick, Pons, Jean-Philippe, (2009), *Towards high-resolution large-scale multi-view stereo*, in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.

Wu, Changchang, Agarwal, Sameer, Curless, Brian, Seitz, Steve, (2011), *Multicore Bundle Adjustment*, in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.

Wu, Changchang, (2012), *SiftGPU: A GPU Implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT)*

<http://www.cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu/10/04/2012>.

Wu, Changchang, (2011), *VisualSfM: A Visual Structure from Motion System* <http://homes.cs.washington.edu/~ccwu/vsfm/2011>.

RINGRAZIAMENTI

Le scansioni di piazza del Governo sono state realizzate ed assemblate da Cettina Santagati e Mariateresa Galizia, che si ringrazia, nell'ambito delle attività di ricerca svolte presso il Laboratorio di Fotogrammetria Architettonica e Rilievo "Luigi Andreatozzi" dell'Università di Catania.