

Rilievi 3D di architetture medievali a Padova: alcuni test fotogrammetrici

Massimo Fabris, Vladimiro Achilli, Denis Bragagnolo, Andrea Menin

LRG, Laboratorio di Rilevamento e Geomatica, DAUR, Università degli Studi di Padova
Via Marzolo 9, 35131 Padova, Tel. 049 8271614, Fax: 049 8275582, e-mail: massimo.fabris@unipd.it

Riassunto

Il lavoro si colloca nell'ambito del progetto di ricerca ARMEP (Architettura Residenziale Medievale a Padova) che si pone come obiettivo quello di censire e studiare l'intero patrimonio architettonico privato del centro storico di Padova compreso all'interno delle mura carraresi. Nell'ambito del progetto, il rilievo di alcune architetture è stato effettuato mediante l'integrazione della fotogrammetria digitale, del laser scanning terrestre e delle metodologie topografiche classiche. Inoltre sono stati condotti alcuni test fotogrammetrici basati sulla misura di un numero minimo di punti d'appoggio con la determinazione dei punti necessari all'orientamento delle immagini successive direttamente sui modelli fotogrammetrici restituiti, allo scopo di studiare una procedura di rilievo rapida, a basso costo, efficiente e applicabile in forma estesa soprattutto per richieste di semplificazione operativa in ambito archeologico.

Abstract

The paper is a part of the research project ARMEP (Medieval Residential Architecture at Padova) that aims to catalogue and study the private architectural heritage of the old town of Padova inside to the carraresi walls. In the frame of the project, the survey of some architectural surfaces was performed by means of the integration of different methodologies: terrestrial digital photogrammetry, laser scanning and classical topography. Moreover, some photogrammetric tests were conducted measuring a min number of control points. In this case the known points, necessary for the orientation of the subsequent images, were measured directly on the photogrammetric models extracted. This procedure of orientation can reduce the operations survey in situ and generate low cost photogrammetric models for simplified application in the archaeological sector.

Introduzione

Il progetto di ricerca sulle Architetture Residenziali MEDievali di Padova (ARMEP) nasce con l'esigenza di censire, catalogare e studiare il patrimonio architettonico privato del centro storico di Padova compreso all'interno delle mura carraresi. L'idea principale dalla quale nasce il progetto è che l'economia interagisce con le trasformazioni sociali favorendo la formazione di classi e comportamenti legati alla mobilità sociale e spaziale. L'attività economica produce ricchezza che viene poi ridistribuita ad altri gruppi e ad altre risorse, grazie al suo investimento in attività produttive e nell'architettura.

In questo senso l'analisi delle architetture residenziali costituisce una lente di ingrandimento per osservare la storia sociale ed economica di un centro urbano (http://www.lettere.unipd.it/discant/CatMedievale/attivita%20scientifica/altre%20web/ARMEP_WEB/ARMEP/INDEX%20ARMEP.htm).

Per il rilievo metrico tridimensionale di alcuni edifici sono state utilizzate ed integrate metodologie topografiche classiche per la misura delle reti topografiche di inquadramento e dei punti di controllo e quelle laser scanning e fotogrammetriche terrestri per l'estrazione di modelli 3D texturizzati.

I rilievi laser scanning

I rilievi 3D laser scanning sono stati effettuati per la definizione delle caratteristiche metriche dell'edificio situato tra via Santa Lucia, via Boccalerie e via Pietro D'Abano e per la Torre degli Anziani nel centro storico di Padova. Prima del rilievo 3D, per entrambi gli edifici, sono state progettate, materializzate e misurate 2 reti topografiche di inquadramento locale per la misura dei target laser scanning in uno stesso sistema di riferimento utilizzando le stazioni integrate Leica TC2003 e TCR1201. Risolta la rete, mediante la compensazione delle misure sovrabbondanti, a partire dai suoi vertici sono stati misurati i target necessari all'allineamento delle scansioni: in particolare, sono stati misurati 28 target relativamente al rilievo dell'edificio di via Santa Lucia e 22 target per la Torre degli Anziani. Le acquisizioni laser scanning sono state effettuate con il laser scanner a tempo di volo Leica HDS2500 per rilevare le superfici delle murature posizionando, prima del rilievo, almeno 5 target retro-riflettenti. Sfortunatamente nelle porzioni più elevate, difficilmente raggiungibili, spesso non è stato possibile posizionare i target. In questo caso le acquisizioni sono state effettuate prevedendo un'ampia sovrapposizione con le scansioni dotate di target laser scanning dovendo effettuare il successivo allineamento per nuvola di punti. E' stato impostato un passo griglia pari a 0.5 cm per l'acquisizione delle nuvole di punti dell'edificio di via Santa Lucia e 1 cm per quelle della Torre degli Anziani. Per il rilievo dell'edificio di via Santa Lucia sono state realizzate 22 scansioni, mentre per il rilievo della Torre degli Anziani sono state necessarie 19 scansioni.

L'allineamento delle nuvole di punti è stato effettuato con il software Cyclone, mentre le operazioni di estrazione di piante, sezioni longitudinali e trasversali, linee di discontinuità, prospetti e texturizzazione sono state realizzate con il software Reconstructor (Besl, McKay, 1992; Chen, Medioni, 1992; Fabris et al., 2010) ottenendo le rappresentazioni 3D di figura 1 per l'edificio di via Santa Lucia e di figura 2 per la Torre degli Anziani.

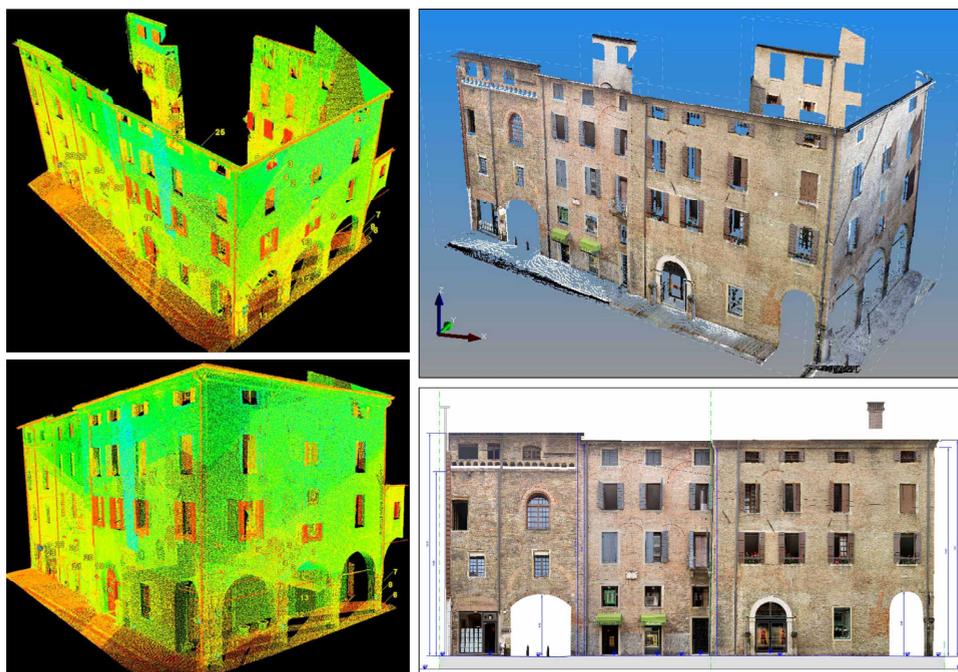


Figura 1 – Modello 3D per nuvola di punti e texturizzato dell'edificio situato tra via Santa Lucia, via Boccalerie e via Pietro D'Abano.

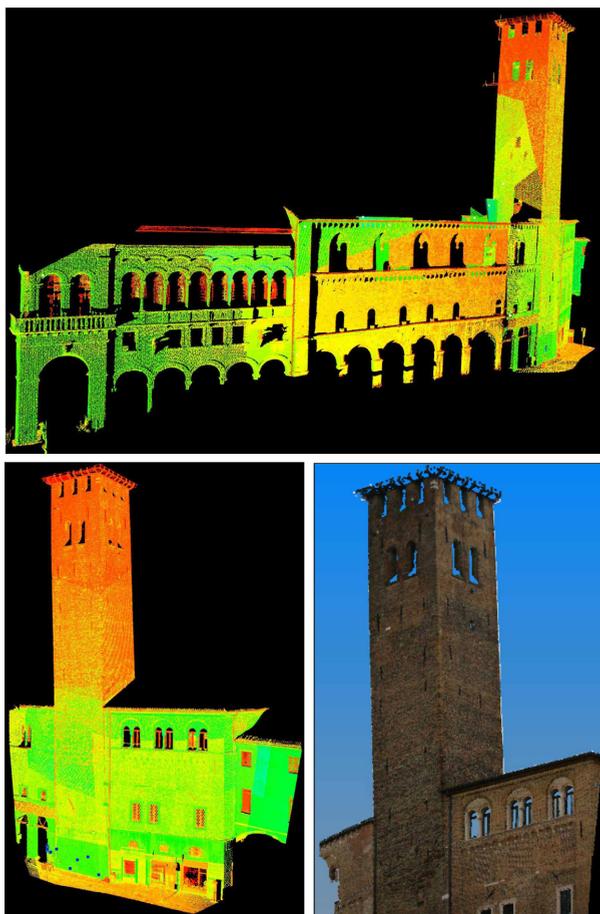


Figura 2 – Modello 3D per nuvola di punti e texturizzato della Torre degli Anziani.

Il rilievo fotogrammetrico di Casa dell'Angelo

Anche in questo caso è stata misurata una rete topografica di inquadramento generale dai cui vertici sono state rilevate le coordinate di 102 punti fotografici d'appoggio naturali georiferiti in un unico sistema di riferimento.

Il rilievo 3D è stato effettuato mediante metodologia fotogrammetrica: il progetto di rilievo ha previsto di realizzare strisciate orizzontali con sovrapposizione delle immagini dell'ordine del 60-70% ed una sovrapposizione tra strisciate adiacenti di circa il 20-30%. E' stato previsto di avere, per ogni coppia, almeno 6 punti fotografici d'appoggio di coordinate note rispetto alla rete topografica di inquadramento.

L'elaborazione dei dati è stata realizzata con il software Topcon Image Master Photo: dopo aver orientato i singoli modelli mediante i punti fotografici d'appoggio e la misura di almeno 9 punti di legame, ben distribuiti per ogni coppia di immagini, sono state estratte automaticamente le superfici 3D. Laddove il risultato dell'elaborazione non era soddisfacente, sono state aggiunte *breakline* ed eseguito nuovamente il calcolo. In figura 3 viene rappresentato il modello 3D finale secondo alcuni punti di vista: risultano evidenti difficoltà di estrazione automatica delle superfici dovute alla scarsa correlazione tra le immagini in corrispondenza delle finestre per la presenza del vetro che riflette la luce in modo diverso tra una presa e l'altra.

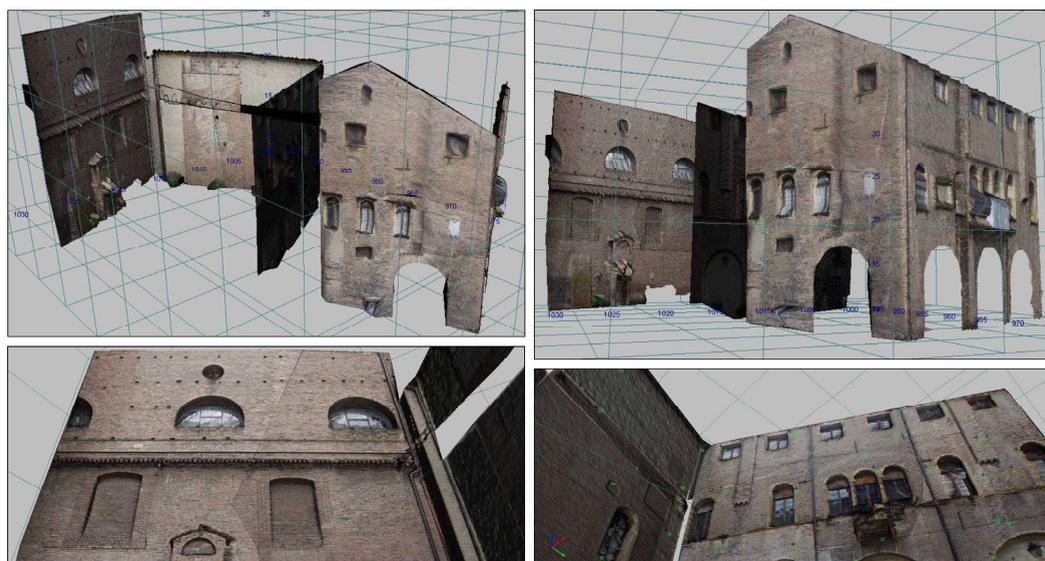


Figura 3 – Visualizzazione del modello 3D di Casa dell'Angelo ottenuto con il software Topcon Image Master Photo.

Il rilievo 3D della Chiesa di San Daniele

Il rilievo 3D parziale della Chiesa di San Daniele è stato effettuato integrando le metodologie topografiche classiche con quelle fotogrammetriche. E' stata utilizzata la stazione integrata Leica TCR1201 per la misura della rete topografica di inquadramento locale necessaria per la misura dei punti fotografici d'appoggio indispensabili nell'orientamento delle immagini fotogrammetriche ed il rilievo di dettaglio plano-altimetrico. Sono state effettuate misure sovrabbondanti in modo da compensare i vertici della rete ottenendo deviazioni standard dell'ordine di qualche millimetro.

Il rilievo fotogrammetrico è stato realizzato utilizzando la camera digitale metrica Canon EOS 1 Ds Mark II collocata su una barra calibrata. Sono state acquisite coppie di immagini con sovrapposizione dell'ordine del 60-70% distribuite su differenti strisciate.

Dai vertici della rete topografica sono stati misurati punti naturali caratteristici sulle pareti della Chiesa: questi punti sono stati scelti in modo da essere distribuiti omogeneamente sulle superfici, ben visibili sulle immagini fotogrammetriche e in fase di collimazione con la stazione integrata. Le due pareti acquisite, di particolare interesse per le analisi storico-architettoniche, erano caratterizzate da spazi disponibili differenti: la parete di figura 4 non aveva particolari problemi: per il rilievo della parete, e della Torre campanaria adiacente, sono stati misurati 40 punti fotografici d'appoggio naturali e acquisite 16 immagini disposte su 2 strisciate. L'altra parete (figura 5), invece, si trovava lungo una via stretta, tipica dei centri storici delle città medievali: in questo caso è stato necessario acquisire immagini su 3 strisciate per la copertura verticale della parete. Le immagini sono state acquisite da terra per l'indisponibilità di piattaforme mobili.

Allo scopo di studiare una procedura rapida ed efficiente, riducendo il più possibile il numero di punti fotografici d'appoggio, sono stati effettuati alcuni test fotogrammetrici sulle due pareti acquisite. Sulla parete principale (figura 4) sono stati misurati 30 punti con 8 immagini distribuite su 2 strisciate: in questo modo è stato quindi possibile utilizzare alcuni di questi punti per l'orientamento esterno delle immagini, verificando le precisioni sugli altri (*check points*). Per l'altra parete (figura 5) lo studio è stato effettuato relativamente ad una porzione centrale caratterizzata da 22 punti d'appoggio e 4 immagini acquisite su 2 strisciate.

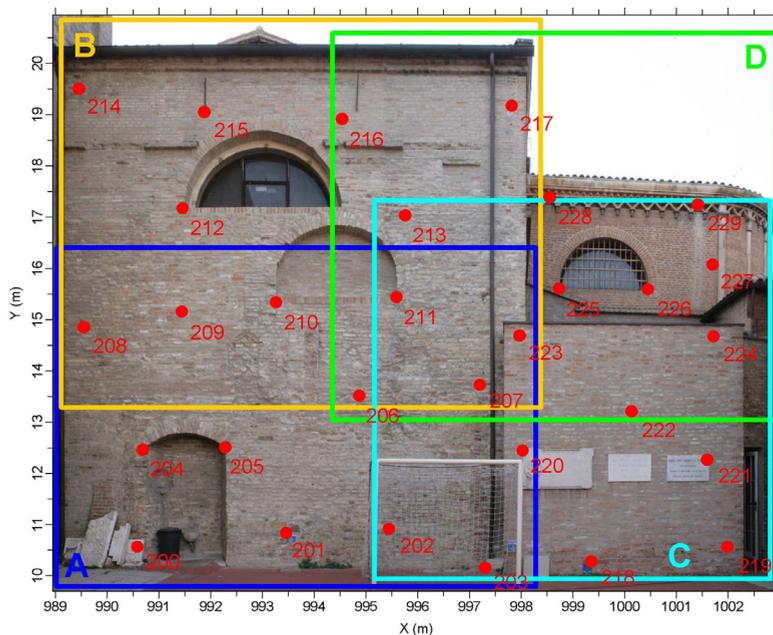


Figura 4 – Localizzazione dei 30 punti fotografici d'appoggio sulla parete principale della Chiesa.

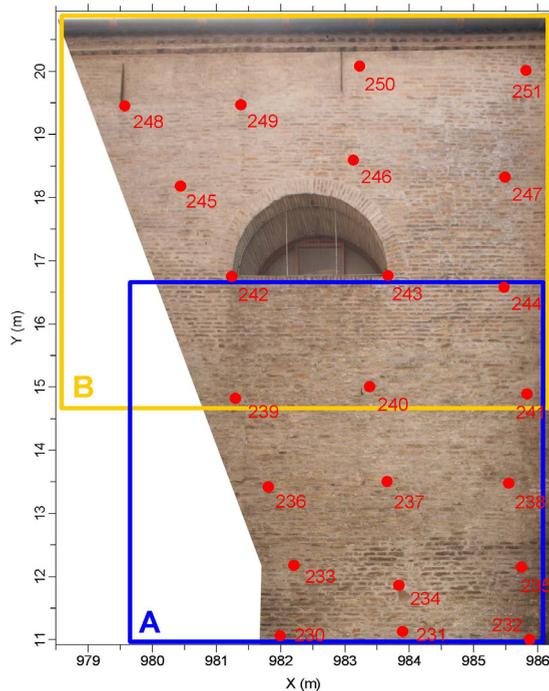


Figura 5 – Localizzazione dei 22 punti fotografici d'appoggio sulla parete secondaria della Chiesa.

Test fotogrammetrici

Come detto, nell'ambito del rilievo della Chiesa di San Daniele sono stati effettuati alcuni test fotogrammetrici riducendo il numero di punti fotografici d'appoggio per l'orientamento delle immagini. A tal fine, sono stati presi in considerazione 2 prospetti della Chiesa sui quali erano disponibili punti noti sufficienti per essere utilizzati alternativamente come vincoli per l'orientamento delle immagini e come *check points* per valutare le precisioni finali raggiungibili.

Nella prima parete sono state considerate 4 coppie distribuite su due strisciate. Nella seconda parete 2 coppie, in verticale, su 2 strisciate.

1. Orientamento dei singoli modelli con 4 PFA

Utilizzando il software Topcon Image Master Photo, è stato generato il modello fotogrammetrico di ogni coppia utilizzando 4 Punti Fotografici d'Appoggio (PFA) distribuiti approssimativamente in corrispondenza degli spigoli dell'area di sovrapposizione delle immagini. Gli altri punti noti, presenti nell'area della generica coppia, sono stati utilizzati come *Check Points* (CP).

Creando ogni singolo modello con 4 PFA e 9 *tie points* omogeneamente distribuiti, sono state misurate, sul modello fotogrammetrico generato, le coordinate dei CP. La differenza tra le coordinate rispettive di ogni singolo punto, misurate con la stazione integrata e sul modello fotogrammetrico generato, viene visualizzata nelle tabelle 1, 2, 3 e 4 per la parete di figura 4, e 5 e 6 per la parete di figura 5.

PFA	CP	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
200		0.1	0.0	0.0
202		0.1	-0.1	0.0
208		-0.3	0.0	0.0
211		0.1	0.2	0.0
	201	-0.1	0.5	0.2
	203	-0.1	0.3	0.1
	204	0.3	0.5	0.7
	205	-0.8	0.1	1.8
	206	-0.2	0.2	0.5
	207	0.3	0.5	0.1
	209	-0.2	0.5	0.3
	210	-0.8	1.1	2.0

Tabella 1 – Confronto tra le coordinate di Punti Fotografici d'Appoggio e Check Points misurati topograficamente e sul modello fotogrammetrico (A, figura 4).

PFA	CP	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
207		-0.1	-0.5	-0.1
208		-0.3	-0.0	0.0
214		0.6	0.3	0.2
217		-0.3	0.2	-0.1
	206	-0.9	0.9	1.3
	209	-1.0	1.1	1.6
	210	-0.8	0.8	1.0
	211	-0.9	0.8	1.2
	212	-1.2	1.1	1.4
	213	-1.3	1.5	1.6
	215	-2.1	2.0	2.9
	216	-2.4	2.3	3.5

Tabella 2 – Confronto tra le coordinate di Punti Fotografici d'Appoggio e Check Points misurati topograficamente e sul modello fotogrammetrico (B, figura 4).

Dalle tabelle 1 e 2 si nota come le differenze in corrispondenza dei CP risultino limitate per l'area A (figura 4) ($M = 0.3$ cm; $\sigma = 0.5$ cm), mentre sono più consistenti per l'area B (figura 4) ($M = 0.6$ cm; $\sigma = 1.6$ cm). Si tratta di due modelli che si riferiscono ad una stessa parete, pressoché piana, tuttavia le immagini inferiori (area A) sono state acquisite in condizioni di presa normale, mentre per quelle superiori (area B) non è stato possibile usufruire di carrelli elevatori o ponteggi allontanandosi così dalla presa normale.

Considerazioni analoghe si possono estendere alle tabelle 3 e 4: in questo caso i valori di media e deviazione standard sui CP risultano superiori anche a causa della presenza di pareti su piani diversi (area C, figura 4, $M = 1.6$ cm; $\sigma = 3.6$ cm) (area D, figura 4, $M = 1.8$ cm; $\sigma = 3.3$ cm).

La tabella 5, che si riferisce alla parete secondaria (area A, figura 5), fornisce sui CP una $M = 0.0$ cm e $\sigma = 0.3$ cm sia per il fatto che la parete è piana, sia perché la distanza camera-oggetto risulta

inferiore rispetto al caso precedente (4 m circa) e le condizioni di presa sono prossime a quelle del caso normale. I valori invece peggiorano per il modello superiore (area B, figura 5) per il quale si ottiene $M = 0.5$ cm e $\sigma = 2.5$ cm (parete piana ma condizioni di presa lontane dal caso normale).

PFA	CP	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
202		0.0	-0.1	0.0
211		0.0	0.0	0.0
219		-0.1	0.1	0.0
229		0.0	0.0	0.0
	203	-0.4	1.5	0.2
	207	-1.6	1.1	4.2
	218	-0.4	-0.3	1.6
	220	-1.1	0.4	2.2
	221	-0.4	-0.2	-0.2
	222	-0.5	0.2	-0.1
	223	-1.1	0.9	2.3
	224	-0.9	0.2	0.7
	225	-1.2	5.0	12.6
	226	-0.7	4.8	10.3
	227	-0.8	5.1	11.2

Tabella 3 – Confronto tra le coordinate di Punti Fotografici d’Appoggio e Check Points misurati topograficamente e sul modello fotogrammetrico (C, figura 4).

PFA	CP	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
207		-0.3	0.2	-0.1
216		0.4	0.0	0.4
221		0.3	-0.5	-0.1
229		-0.4	0.3	-0.1
	211	-1.1	1.0	1.2
	213	-1.0	1.1	1.2
	217	-0.5	4.2	4.8
	220	-0.8	-0.2	-0.8
	222	-0.6	-0.1	-0.4
	223	-1.5	1.4	1.8
	224	-0.4	1.0	1.7
	225	-1.2	5.9	10.8
	226	-1.0	4.5	7.3
	227	-1.0	4.1	6.8
	228	-1.3	5.5	8.9

Tabella 4 – Confronto tra le coordinate di Punti Fotografici d’Appoggio e Check Points misurati topograficamente e sul modello fotogrammetrico (D, figura 4).

PFA	CP	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
230		0.2	0.0	-0.2
232		-0.1	-0.3	-0.1
239		0.4	0.3	0.1
244		-0.4	0.2	-0.2
	231	-0.1	-0.6	0.0
	233	0.0	-0.2	0.0
	234	-0.1	-0.3	0.1
	235	0.1	0.0	0.1
	236	-0.1	0.0	0.0
	237	0.2	0.1	0.2
	238	-0.2	-0.1	-0.1
	240	0.5	0.4	0.1
	241	0.6	0.5	-0.3

Tabella 5 – Confronto tra le coordinate di Punti Fotografici d’Appoggio e Check Points misurati topograficamente e sul modello fotogrammetrico (A, figura 5).

PFA	CP	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
239		0.4	-0.1	0.1
241		-0.3	-0.2	-0.1
248		0.3	0.2	0.1
251		-0.5	0.1	-0.1
	240	0.1	1.2	-1.1
	242	-0.4	3.3	-2.4
	243	-0.8	2.3	-1.6
	244	1.0	2.5	-0.8
	245	0.4	3.2	-0.9
	246	-0.3	3.4	-1.1
	247	-0.2	3.5	-1.3
	249	-0.2	5.8	-3.3
	250	-0.3	6.4	-3.5

Tabella 6 – Confronto tra le coordinate di Punti Fotografici d’Appoggio e Check Points misurati topograficamente e sul modello fotogrammetrico (B, figura 5).

2. Orientamento di 2 modelli con 4 PFA

Nel tentativo di ridurre ulteriormente il numero di punti necessari all’orientamento, sono stati considerati solo 4 PFA per ogni modello ed orientate le coppie delle zone A e C della parete di

figura 4 ed A della parete di figura 5. Prendendo in considerazione il primo modello (A), sul fotogrammetrico così orientato sono state misurate le coordinate di punti naturali che fossero ben visibili anche sul modello superiore (B): i punti così ottenuti sono stati utilizzati come se fossero PFA per l'orientamento esterno della coppia della zona B; sono stati cioè trasferiti i punti di controllo: misurati su un modello fotogrammetrico orientato in modo rigoroso, vengono utilizzati come PFA per l'orientamento del successivo. Questo è stato fatto per la coppia dell'area A di figura 4 sulla quale è stata orientata quella dell'area B sempre di figura 4, per quella dell'area C sulla quale è stata orientata quella dell'area D (figura 4) e per quella dell'area A di figura 5 sulla quale è stata orientata quella dell'area B (figura 5). Come nel caso precedente, su questi 3 modelli complessivamente orientati sono state misurate le coordinate dei CP e confrontate con quelle ottenute dal rilievo topografico. Nelle tabelle 7 ed 8 vengono riportate le differenze rispettive per le 2 coppie del primo modello (A e B) e le 2 coppie del secondo modello (C e D).

PFA	CP	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
200		0.1	-0.1	0.0
203		-0.1	-0.1	0.0
208		0.1	0.2	0.0
211		-0.1	0.0	0.0
	201	0.6	0.7	-0.9
	202	0.4	0.5	0.1
	204	1.0	0.2	-0.3
	205	0.1	0.0	0.5
	206	0.3	0.2	1.1
	207	0.5	0.6	1.7
	209	0.1	0.2	0.0
	210	0.1	0.2	-0.1
	212	0.5	0.6	1.7
	213	0.6	0.4	1.5
	214	1.1	2.4	2.9
	215	1.0	2.3	2.9
	216	0.4	2.3	2.7
	217	1.7	1.5	0.6

Tabella 7 – Confronto tra le coordinate di Punti Fotografici d'Appoggio e Check Points misurati topograficamente e sul modello fotogrammetrico (A+B, figura 4).

PFA	CP	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
202		0.0	-0.4	0.0
211		0.1	0.4	0.0
219		-0.2	0.1	0.0
224		0.1	-0.1	0.0
	203	0.4	-0.1	-1.2
	207	3.7	-4.9	2.4
	213	2.3	-2.9	2.8
	217	3.4	3.7	4.0
	218	0.2	-0.4	-1.1
	220	0.9	-0.4	-2.9
	221	1.0	-1.0	-2.0
	222	0.1	-0.5	-1.8
	223	1.5	-2.0	-1.1
	225	2.9	-9.3	14.2
	226	1.4	-9.1	14.6
	227	1.5	-9.2	14.8
	228	3.3	-10.0	13.0
	229	2.0	-11.2	15.6

Tabella 8 – Confronto tra le coordinate di Punti Fotografici d'Appoggio e Check Points misurati topograficamente e sul modello fotogrammetrico (C+D, figura 4).

Nel primo caso (tabella 7), trattandosi di una parete quasi piana, l'analisi sui CP ha fornito $M = 0.7$ cm e $\sigma = 0.9$ cm con valori più elevati per i CP lontani dal solido dei PFA. Nel secondo caso (tabella 8), trattandosi di superfici su piani diversi, i valori di media e deviazione standard sui CP risultano molto elevati, particolarmente, come atteso, sulle pareti sprovviste di PFA: $M = 2.9$ cm, $\sigma = 5.6$ cm. In figura 6 viene riportata una rappresentazione planimetrica dei modelli C e D con indicazione dei 4 PFA e i vettori ottenuti dalla differenza sulle coordinate dei CP tra misure topografiche e fotogrammetriche. Nell'ultimo caso, relativo alla parete secondaria della Chiesa (A+B, figura 5), sono stati ottenuti valori di media e deviazione standard simili al primo caso ($M = 0.4$ cm e $\sigma = 0.8$ cm).

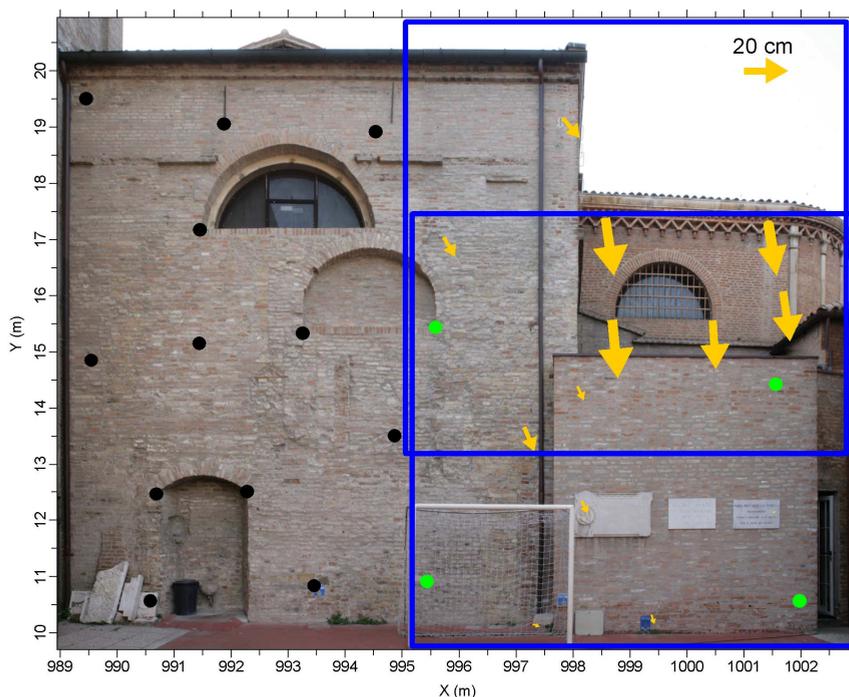


Figura 6 – Rappresentazione delle differenze sui CP relativamente all'orientamento in un unico blocco dei modelli C e D di figura 4.

3. Orientamento di 4 modelli con 4 PFA

Uno studio ulteriore è stato realizzato per orientare il primo modello in modo rigoroso (zona A, figura 4) utilizzando 4 PFA e 9 *tie points*, misurando successivamente i PFA necessari per l'orientamento delle altre 3 coppie (zone B, C e D) direttamente sul modello orientato.

Come in precedenza, sono stati scelti punti naturali ben visibili anche sulle immagini dell'area superiore (B) e laterale (C). Orientato anche il modello laterale, su questo sono stati misurati ulteriori punti utilizzati come PFA per l'orientamento dell'ultimo modello (D). Quindi sono state misurate le coordinate dei CP sul modello fotogrammetrico finale e confrontate con quelle ottenute dal rilievo topografico.

La figura 7 visualizza i risultati ottenuti: anche in questo caso la mancanza di PFA in corrispondenza delle pareti su piani diversi da quello iniziale fornisce un risultato finale non utilizzabile ai fini metrici.

4. Orientamento dei singoli modelli con 6 PFA

In questo caso, oltre ai 4 PFA distribuiti sui 4 spigoli della generica stereo-coppia, sono stati considerati anche altri 2 PFA, localizzati nella porzione centrale del modello fotogrammetrico e disposti su piani differenti nel caso di superfici non complanari (figura 8). I risultati hanno fornito miglioramenti considerevoli per tutti i modelli: mediamente è stato osservato un dimezzamento dei valori della deviazione standard sui CP rispetto all'orientamento dei modelli con 4 PFA.

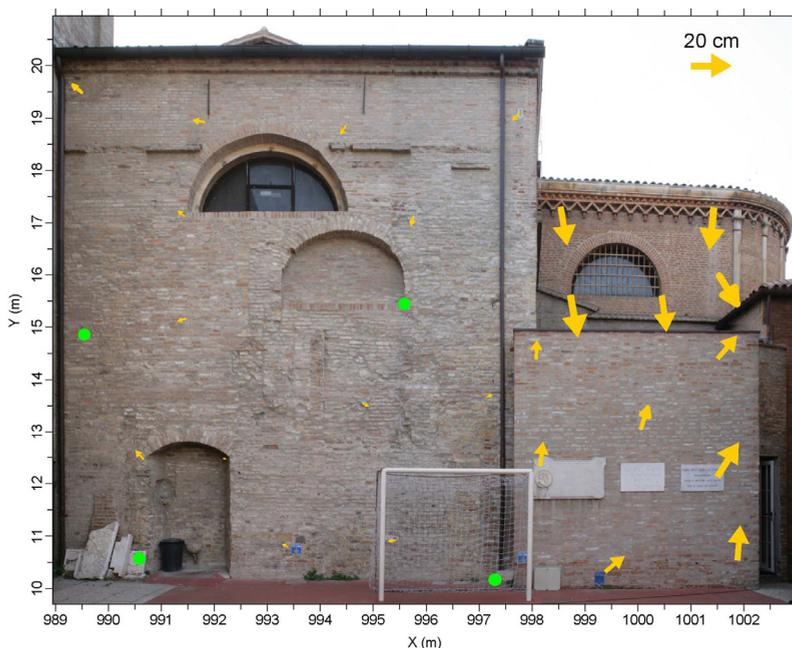


Figura 7 – Rappresentazione delle differenze sui CP relativamente all'orientamento in un unico blocco dei modelli A, B, C e D di figura 4 (partendo dall'orientamento del modello A).

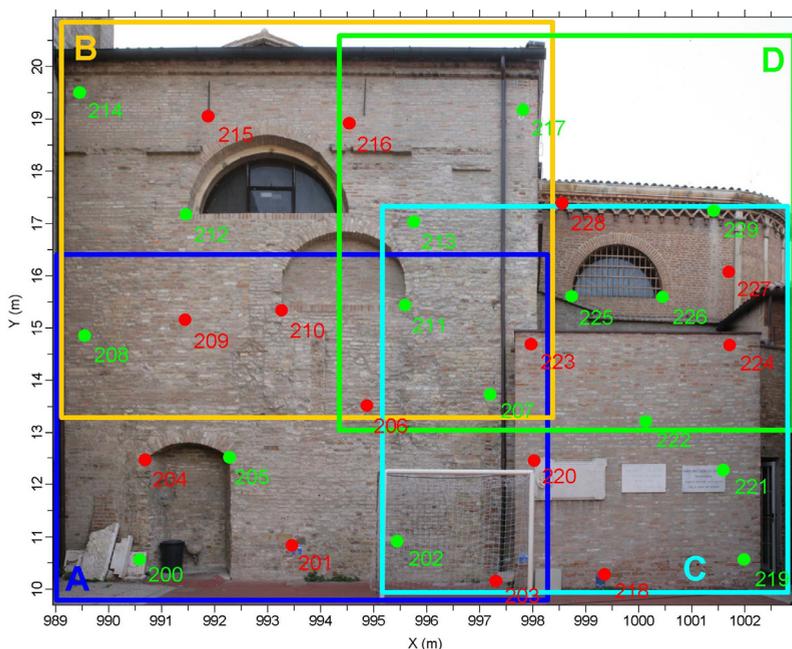


Figura 8 – Localizzazione dei PFA (in verde) e dei CP (in rosso) nell'orientamento di ogni singolo modello con almeno 6 PFA.

Estrazione delle superfici 3D

Ottenuto il modello fotogrammetrico complessivo, sono state estratte le superfici 3D delle porzioni analizzate (software Topcon Image Master Photo). Con un passo griglia di 5 cm sono stati generati punti 3D dalla correlazione delle immagini digitali. Nelle aree di scarsa correlazione e in quelle dove il risultato tridimensionale non risultava soddisfacente, l'estrazione automatica delle superfici è stata effettuata dopo l'inserimento delle *breakline* caratteristiche dell'area considerata. La figura 9 visualizza una porzione del modello finale della Chiesa e dell'adiacente Torre campanaria.

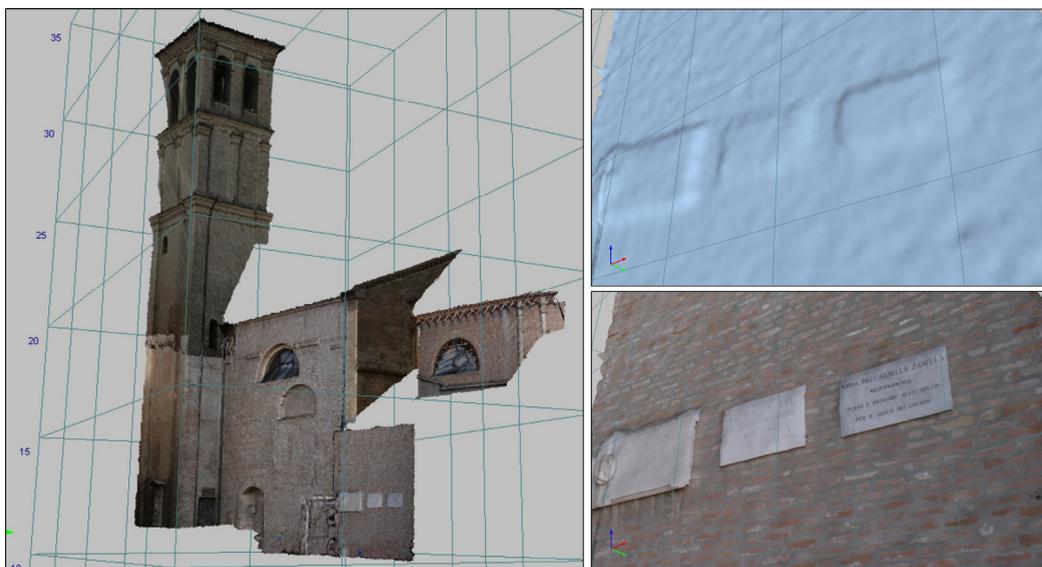


Figura 9 – Visualizzazione di una porzione del modello 3D della Chiesa di San Daniele e della Torre campanaria con un dettaglio rappresentato per superficie 3D e con la relativa texture.

Dall'analisi dei dettagli della figura 9 si nota come le superfici generate automaticamente presentino valori “rumorosi” e “smoothing” pronunciati (Fabris et al., 2009; Achilli et al., 2011): la lettura della tessitura muraria non è evidenziabile dall'analisi per superfici ma soltanto sulla corrispondente texture, sia a causa del rumore presente, sia per aver estratto le superfici con passo griglia di 5 cm.

Conclusioni

Nell'ambito di questo lavoro sono state utilizzate ed integrate le metodologie di rilievo topografico classico con quelle laser scanning e fotogrammetriche terrestri. Il laser scanner a tempo di volo è stato utilizzato per il rilievo 3D dell'edificio situato tra le vie Santa Lucia, Boccalerie e Pietro D'Abano e la Torre degli Anziani a Padova. La fotogrammetria digitale è stata utilizzata per il rilievo di Casa dell'Angelo e di una porzione della Chiesa di San Daniele.

In quest'ultimo caso sono stati effettuati alcuni test fotogrammetrici allo scopo di studiare una procedura di rilievo rapida, a basso costo, efficiente e applicabile in forma estesa soprattutto per richieste di semplificazione operativa in ambito archeologico. E' stato testato un approccio basato sulla misura di un numero minimo di Punti Fotografici d'Appoggio con la determinazione dei punti necessari all'orientamento delle immagini successive, direttamente sui modelli fotogrammetrici restituiti. Il confronto dei risultati ottenuti, per la stima della precisione, è stato effettuato con punti naturali noti utilizzati come *Check Points*.

In una prima fase, utilizzando il software Topcon Image Master Photo, sono stati orientati 6 modelli fotogrammetrici utilizzando 4 PFA per ogni modello: i risultati hanno fornito buone precisioni ($\sigma <$

0.5 cm sui CP) nel caso di pareti pseudo-piane e condizioni di presa quasi normali (tabelle 1 e 5). Nel caso invece di pareti disposte su piani differenti o pareti piane ma condizioni di presa lontane dal caso normale, 4 PFA risultano non sufficienti ($\sigma > 1.6$ cm, tabelle 2, 3, 4 e 6): in queste situazioni è necessario incrementare il numero dei PFA, distribuiti sui piani interessati dal rilievo, con almeno una coppia di punti per ogni parete collocata su piani diversi (in questi casi, nei 6 modelli analizzati, l'utilizzo di 6 PFA ha fornito un dimezzamento nei valori della deviazione standard sui CP).

Anche l'orientamento di un singolo modello (con 4 o 6 PFA) e la misura di altri punti noti sul modello fotogrammetrico orientato per l'orientamento dei modelli vicini, comporta un errore sui CP dei nuovi modelli orientati non accettabile, anche per un singolo nuovo modello aggiunto: come atteso, è indispensabile che i PFA siano distribuiti omogeneamente sull'area interessata dal rilievo; nei casi studiati, si ottengono valori inaccettabili appena ad di fuori del solido formato dai PFA.

Concludendo, ai fini della precisione del modello fotogrammetrico complessivamente generato, l'utilizzo di 4 PFA per ogni coppia di immagini è possibile solo nel caso di pareti pressoché piane e condizioni di presa prossime al caso normale. Nel caso di superfici più complesse l'utilizzo di 6 PFA può generare modelli 3D che, rinunciando ad una precisione spinta, rappresentano un buon compromesso negli studi di oggetti tridimensionali in ambito archeologico.

Bibliografia

Achilli V, Fabris M, Bragagnolo D, Grassi MT, Menin A, Targa G. (2011), "Rilievi 3D ad alta risoluzione nell'antica città di Palmyra (Siria) mediante metodologie geomantiche", *Atti del Convegno "Geomatica. Le radici del futuro"*, Pavia, 10-11 febbraio, 2011, 117-122. Edizioni SIFET. ISBN: 88-901939-6-4.

Besl PJ, McKay N.D. (1992), "A method for registration of 3-D shapes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 (2): 239-256

Chen Y, Medioni G. (1992), "Object modelling by registration of multiple range images", *Image and Vision Computing*, 10 (3): 145-155

Fabris M, Achilli V, Artese G, Boatto G, Bragagnolo D, Cancheri G, Meneghello R, Menin A, Treccoli A. (2009), "High resolution data from laser scanning and digital photogrammetry terrestrial methodologies. Test site: an architectural surface", *ISPRS The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII, part 3/W8: 43-48

Fabris M, Boatto G, Achilli V. (2010), "3D laser scanning surveys in the modelling of cultural heritage", *Invited chapter in Recent Advances in Non Destructive Inspection (C. Meola Editor) NovaScience Publishers*, 2010, 1-32. ISBN: 978-1-61728-082-5 (ebook) ISBN: 978-1-61668-550-8 (hardcover).

http://www.lettere.unipd.it/discant/CatMedievale/attivita%20scientifica/altre%20web/ARMEP_WEB/ARMEP/INDEX%20ARMEP.htm