

Mobile Mapping Systems: recenti sviluppi e caso applicativo

di Isabella Toschi, Fabio Remondino e Simone Orlandini

I sistemi di rilievo *Mobile Mapping* (MMS) costituiscono una tecnologia emergente che permette di rilevare, in modalità dinamica, dati metrici 2D/3D geo-referenziati, ad altissima risoluzione ed elevata accuratezza. Di seguito vengono descritte le loro principali caratteristiche tecniche/tecnologiche e un esempio applicativo finalizzato al rilievo 3D di un centro storico cittadino.

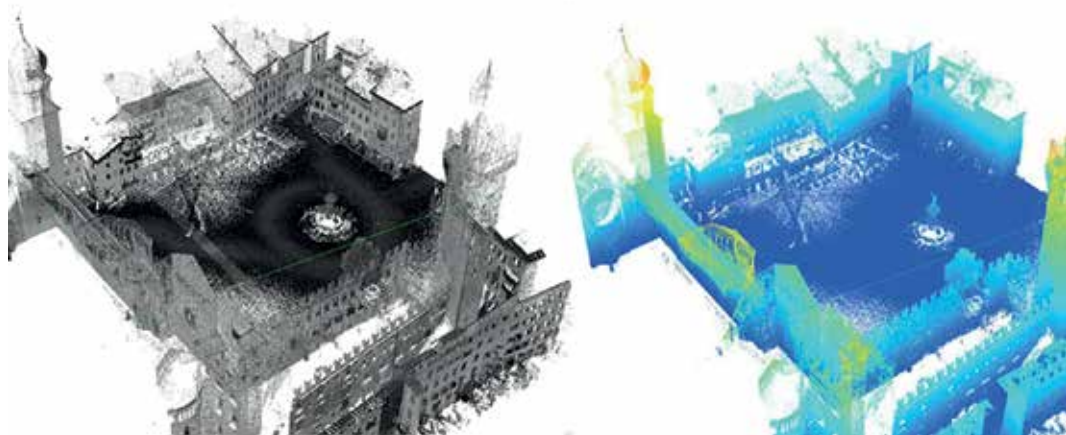


Fig. 1 – Nuvola di punti acquisita da MMS nel centro storico di Trento: mappa di intensità (sinistra) e di altezza (destra).

Si definisce *Mobile Mapping System* (MMS) una piattaforma mobile, sia essa aerea oppure terrestre, sulla quale sono integrati sistemi e sensori di misura atti ad acquisire, contemporaneamente, la posizione 3D quasi-continua della piattaforma e dati metrici 2D/3D geo-referenziati. A tale scopo, dal punto di vista tecnologico, un MMS è costituito dall'integrazione di tre principali componenti hardware: sensori ottici (laser scanner e/o fotocamere digitali), sensori di navigazione/posizionamento (IMU/GNSS) e un'unità di controllo e sincronizzazione. A seconda dell'ambito applicativo e del tipo di piattaforma mobile adottata, si possono citare diversi esempi di MMS, quali: gravimetria da aereo, *laser scanning* da aereo, *mobile mapping trains*, *mobile mapping vans*, etc. Elemento in comune tra tutte queste applicazioni è l'importanza fonamen-

tale di una rigorosa sincronizzazione del flusso di dati tramite un'elevata integrazione dei differenti processi di misura. Questo permette generalmente di ridurre il lavoro di *post-processing* e fornire in tempo reale stime attendibili delle misure effettuate. Dal punto di vista dell'utente finale, ciò si traduce nella possibilità di acquisire velocemente e a costi contenuti dati 3D geografici ad elevata risoluzione ed accuratezza.

Limitando lo sguardo alle piattaforme terrestri, storicamente lo sviluppo dei MMS risale all'inizio degli anni '90 quando le prime sperimentazioni mostrarono le loro potenzialità per l'acquisizione di informazioni geografiche (Bossler e Novak, 1993; El-Sheimy, 1996). Il primo MMS terrestre fu sviluppato dal *Center for Mapping* presso l'università dell'Ohio (USA). Il sistema, chiamato *GPSVan*TM, comprendeva un ricevitore GPS a misura

di codice, due fotocamere digitali, due videocamere e un sistema di giroscopi e odometri. Da allora, lo sviluppo dei MMS ha coinciso con l'avanzamento tecnologico dei ricevitori GPS, la definizione di nuovi metodi per fornire la correzione differenziale e l'impiego di più accurati sistemi IMU. Ciò ha permesso la diffusione dei MMS e la loro piena maturazione dall'ambito puramente accademico a quello commerciale. Esempi di altri sistemi finalizzati all'acquisizione in movimento di immagini digitali sono: *GIMTM*, *GPSVision*, *VISATTM*, *KISSTM* e *GI-EYETM* (Grejner-Brzezinska, 2001).

I sistemi di *mobile mapping* che utilizzano la tecnologia LiDAR (anche chiamati sistemi di *Mobile Laser Scanning* - *MLS*) rappresentano la soluzione più recente. Essi acquisiscono in tempo reale dense nuvole di punti (Fig. 1) e offrono impor-

tanti vantaggi, quali: (i) elevata velocità di acquisizione dei dati, con conseguente riduzione dei costi e del tempo necessari; (ii) elevata densità spaziale dei dati misurati, che permette una ricostruzione 3D densa della scena rilevata; (iii) acquisizione dei dati da remoto, che garantisce l'efficienza e la sicurezza del rilievo. Grazie a questi benefici e al continuo sviluppo delle tecnologie *laser scanning* e di navigazione, l'attuale trend della richiesta di rilievi tramite MMS è in costante salita, anche se il trattamento e la gestione dei dati raccolti scoraggia spesso i possibili utenti. In Tabella 1 e Figura 2 vengono riportati i principali sistemi MMS commerciali, mentre esistono diverse altre soluzioni *in-house* sviluppate da PMI e centri di ricerca. Le applicazioni sono svariate: dalla mappatura delle strade a fini catastali, al rilievo di infrastrutture urbane, reti elettriche, gas/metanodotti, fino alla ricostruzione 3D di vaste aree urbane per applicazioni di *city modelling*.

RIEGL VMX-450

Tra i sistemi MMS commerciali disponibili sul mercato, la piattaforma RIEGL VMX-450 rappresenta una delle più recenti soluzioni e si distingue per la sua altissima velocità di scansione ed elevata qualità, completezza e densità del dato. Essa integra due laser scanner VQ-450, un'unità

Distributore	Nome	Laser Scanner			IMU/GNSS	Camera Digitale
		Sensore/i	Portata	Accuratezza	Pos. Assoluta ⁽¹⁾	Risoluzione
TOPCON	IP-S3	1 scanner	100 m, @ ρ100 100%	50 mm, @ 10 m (1σ)	0.015-0.025 m	Camera sferica, 8000 x 4000 px
TRIMBLE	MX8	1-2 VQ-250	500 m, @ ρ80%	10 mm, @ 50 m (1)	0.020-0.025 m	Fino a 7 camere, 5 Mpx
		1-2 VQ-450	800 m, @ ρ80%	8 mm, @ 50 m (1σ)		
3D Laser Mapping	Street Mapper	1-2 VUX-1HA	400 m, @ ρ80%	5 mm, (1σ)	0.050 m	Camera panoramica, 12 Mpx
RIEGL ⁽²⁾	VMX-250	2 VQ-250	500 m, @ ρ80%	10 mm, @ 50 m (1σ)	0.020-0.050 m	Fino a 6 camere, 5 Mpx
Renishaw	Dynascan S250	1-2 scanner	250 m	10 mm, @ 50 m (1σ)	0.020-0.050 m	-
TELEDYNE OPTTECH	Lynx SG1	2 scanner	250 m, @ ρ10%	5 mm, (1σ)	0.050 m	Fino a 5 camere, 5 Mpx
	Lynx MG1	1 scanner			0.200 m	e/o camera panoramica
MITSUBISHI ELECTRIC	MMS-X	2-4 scanner standard	65 m	Scanner standard: 10 mm, @ 7 m (1σ)	0.060 m	Fino a 6 camere, 5 Mpx
	MMS-X320R	2 scanner standard / 1 scanner long-range	65 m / 200 m	Scanner long-range: 10 mm, @ 80 m (1σ)		3 camere, 5 Mpx
	MMS-K320	2 scanner standard	65 m			3 camere, 5 Mpx
Leica Geosystems	Leica Pegasus: Two	ZF 9012	119 m	0.9 mm, @ 50 m, 80% (1)	0.015-0.020 m	8 camere, 2000x2000 px
		Leica Scanstation P20	120 m, @ 18%	6 mm, @ 100 m (1)		

Tab. 1 – Le principali soluzioni di sistemi *mobile mapping* disponibili sul mercato ⁽¹⁾ valori di RMS in post-processing; ⁽²⁾ le specifiche di RIEGL VMX-450 sono fornite di seguito).

unità di controllo VMX-450-CU e una soluzione integrata GNSS/INS per il posizionamento. Il sistema (2 scanner) è in grado di acquisire fino a 1.1 milioni di punti e 400 profili al

secondo e utilizza l'ultima generazione RIEGL di laser scanner (*multiple target capability* grazie alla digitalizzazione dell'eco del segnale riflesso). La piattaforma è anche dotata di un'unità



Fig. 2 – Immagini di alcuni sistemi MMS commerciali.

modulare di fotocamere digitali VMX-450-CS6, che completa l'acquisizione dei dati geometrici con immagini digitali co-registrate alla geometria. E' possibile integrare fino a sei camere industriali, precedentemente calibrate dal costruttore.

Tutti i sensori e le apparecchiature per l'acquisizione dei dati (laser scanner, fotocamere e antenna GNSS) sono integrati in un apposito nucleo che viene normalmente posizionato sul tetto di una vettura (Fig. 3). Il computer con i dischi per il salvataggio dei dati e l'alimentazione sono assemblati nel gruppo alloggiato nel bagagliaio. Infine, il monitor per il controllo della



Fig. 4 – La traiettoria percorsa con MMS nel centro storico di Trento e gli edifici selezionati per le valutazioni statistiche in Piazza Duomo (simboli rosso e blu) e nelle strade strette circostanti (simbolo verde). In legenda si riporta anche la tecnica usata per acquisire i dati di riferimento.

Sensore	VQ-450
Principio di misura	Time-of-Flight Pulsed-Wave
Lunghezza d'onda	Vicino infrarosso
Frequenza	300 – 1100 kHz
Distanza massima (portata)	800 m
Distanza minima	1.5 m
Accuratezza	8 mm, 1σ
Precisione	5 mm, 1σ
Sensore	IMU/GNSS
Posizione (assoluta)	0.020 – 0.050 m
Posizione (relativa)	0.010 m
Roll & Pitch	0.005 °
True Heading	0.015 °
Sensore	VMX-450-CS6
Risoluzione	5 Mpx (2452 x 2056 px)
Dimensione del pixel	3.45 μm
Lunghezza focale nominale	5 mm

Tab. 2 – Le principali caratteristiche tecniche del sistema RIEGL VMX-450.



Fig. 3 – RIEGL VMX-450.

fase di acquisizione è ospitato all'interno dell'abitacolo. Dal punto di vista software, la suite RIEGL permette di gestire ogni fase del rilievo, dall'acquisizione dei dati (modulo RiACQUIRE), al processamento delle osservazioni (modulo RiPROCESS), fino alla correzione della traiettoria e orientamento della piattaforma mobile all'interno di un particolare sistema di coordinate (modulo RiWORLD). Il prodotto finale è rappresentato da dense nuvole di punti colorate e geo-referenziate, che possono essere visualizzate e analizzate in software di modellazione e progettazione CAD per l'estrazione di informazioni di interesse

(profili stradali, mappatura di infrastrutture, ecc.). Le principali caratteristiche tecniche del sistema RIEGL VMX-450 sono riassunte nella Tabella 2.

Rilievo mobile mapping del centro storico di trento

Nell'autunno 2014 è stato progettato e realizzato un rilievo MMS da autovettura nel centro storico di Trento al fine di (i) analizzare le prestazioni metriche della piattaforma RIEGL VMX-450 all'interno di un'area cittadina storica e (ii) valutare l'impiego dei dati MMS a scopi di cartografia, restituzione architettonica, 3D city modelling e catasto strade.

La sperimentazione ha interessato un'area di circa 700 m (ovest-est) x 500 m (nord-sud) nel centro storico di Trento, comprendente: (i) Piazza Duomo (80 m x 70 m, Fig. 1), sulla quale si affacciano alcuni dei più importanti edifici storici della città; (ii) un complesso di strade strette e articolate, che si diramano dalla piazza verso l'esterno e vedono l'alternarsi di alti edifici storici, chiese e case residenziali. Le aree selezionate (Fig. 4) costituiscono

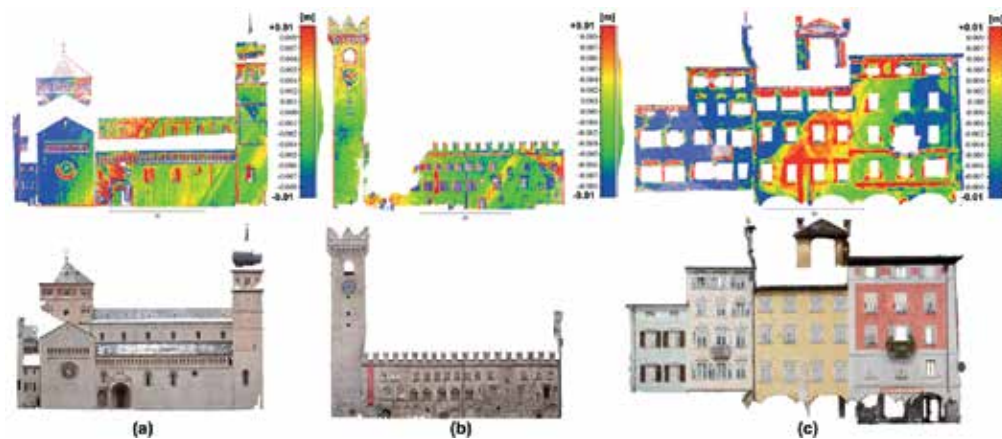


Fig. 5 – Mappe delle differenze (errori) derivanti dai confronti tra i dati MMS e Fotogrammetria per il Duomo (a), Palazzo Pretorio (b) e case residenziali (c). La scala va da -0.01 m (blu) a 0.01 m (rosso). Le corrispondenti nuvole di punti ottenute tramite *dense image matching* sono riportate nella parte inferiore.

uno scenario difficile e impegnativo per un rilievo MMS, la cui performance metrica dipende principalmente dall'accurata determinazione della posizione e dell'orientamento della piattaforma mobile. All'interno dei cosiddetti *canyon* urbani, infatti, effetti di *multipath* e perdite di segnale causati dalla presenza di alti edifici in spazi ristretti possono deteriorare le condizioni GNSS e, di conseguenza, il calcolo della traiettoria.

I dati raccolti sono stati processati senza l'ausilio di punti di controllo ed esportati sotto forma di nuvole di punti (formato LAS) inquadrare nel sistema di coordinate WGS84. Queste sono caratterizzate da una risoluzione spaziale media di 2-3 cm e sono state fornite separatamente per ciascuno dei due laser scanner integrati nella piattaforma mobile. Per valutare la precisione interna e la ripetibilità del sistema di misura, il rilievo di Piazza Duomo è stato ripetuto in tre passaggi successivi.

Valutazione della precisione e dell'accuratezza

Per valutare metricamente i risultati del rilievo MMS, sono stati acquisiti dati esterni di riferimento tramite tecnica fotogrammetrica (*dense image matching*) e tecnologia Laser Scanner Terrestre (TLS). Quando si confrontano nuvole di punti acquisite da strumenti

e tecniche diversi tra loro, alcuni aspetti devono essere sempre considerati, ovvero: (i) è necessario definire le incertezze che caratterizzano ciascun sistema; (ii) i punti 3D che vengono confrontati non corrispondono mai esattamente tra loro; (iii) dato che le posizioni di acquisizione sono diverse, le superfici ricostruite sono digitalizzate in modo differente. Partendo da tali considerazioni, si è evidenziata l'esigenza di definire una metodologia di valutazione nuova, basata su metodi statistici avanzati e su una rigorosa analisi della distribuzione statistica che caratterizza la popolazione di osservazioni (Toschi et al., 2015). I confronti tra le nuvole di punti acquisite contemporaneamente dai due laser scanner sono caratterizzati da una stima gaussiana della MAD (*Median Absolute Deviation*) nell'ordine di $\pm 5,2$ mm, che è coerente con la precisione (valore 1σ) dichiarato dalla scheda tecnica del sistema MMS.

L'errore aumenta fino a $\pm 8,6$ mm se si confrontano le acquisizioni effettuate in due epoche diverse. Queste differenze, che permettono di valutare la precisione del sistema, possono essere ricondotte a errori residui di geo-referenziazione, effetti di *multipath* e problemi legati alle caratteristiche intrinseche delle superfici rilevate. L'utilizzo di punti di controllo nella fase

di post-elaborazione potrebbe quindi, almeno in parte, mitigare queste problematiche.

La valutazione dell'accuratezza di una singola nuvola di punti mostra infine le buone potenzialità metriche del sistema RIEGL adottato. Gli errori stimati per gli edifici che si affacciano sulla Piazza Duomo sono caratterizzati da una dispersione media di $\pm 5,9$ mm (MMS vs. fotogrammetria, Fig. 5) e $\pm 3,6$ mm (MMS vs. TLS). Questi valori sono coerenti con l'incertezza indicata dal costruttore (8 mm 1σ). Come previsto, gli errori aumentano se il rilievo MMS viene eseguito in strade strette con edifici alti che deteriorano il segnale GNSS. Tuttavia, il valore di errore risultante in quelle aree ($\pm 7,4$ mm) rappresenta ancora un compromesso accettabile.

Conclusioni

Al giorno d'oggi le numerose soluzioni commerciali di sistemi MMS presenti sul mercato rappresentano il miglior esempio di integrazione tra diverse tecniche e sistemi di acquisizione di dati territoriali geo-referenziati, grazie a un'efficiente combinazione di sensori ottici passivi (fotocamera), attivi (laser scanner a lunga portata) e sensori di posizionamento (GNSS/IMU). L'attuale trend positivo della richiesta di rilievi tramite MMS è anche accompagnato da un crescente interesse della comu-

nità scientifica nei confronti di tali sistemi, come dimostrato dalle iniziative presentate da associazioni internazionali quali EuroSDR (Kartinen et al., 2013). Risulta però ancora aperto il problema di gestione dei dati MMS da parte degli utilizzatori finali (amministrazioni pubbliche, studi, soprintendenze, ecc.): possibili *desiderata* rimangono la facile fruizione delle enormi nuvole di punti, l'estrazione automatica di informazioni vettoriali, la classificazione degli elementi urbani, l'integrazione con dati aereo- o tele-rilevati, ecc.

I requisiti di precisione e accuratezza per i dati acquisiti con sistemi MMS variano in funzione dell'applicazione e comportano la distinzione tra due principali categorie di MMS, ovvero: (i) sistemi per la mappatura cartografica e (ii) sistemi per il rilievo di infrastrutture (strade, ferrovie, tunnel, ecc.) a scopi di monitoraggio e verifica. Le specifiche tecniche dei vari MMS commerciali dovrebbero dunque essere attentamente valutate a priori per scegliere di volta in volta la soluzione più adatta all'applicazione prevista. Dato che spesso le caratteristiche tec-

niche dichiarate sono definite in base a test eseguiti internamente dal costruttore e non esplicitamente spiegate all'utente, è consigliabile valutare le prestazioni metriche del sistema tramite confronto con dati di riferimento esterni. L'utilizzo di metodi statistici avanzati e di un rigoroso filtraggio degli *outliers*

risultano a tale scopo essenziali e devono sempre essere accompagnati da un'adeguata analisi delle fonti di incertezze che caratterizzano ciascun sistema di misura confrontato.

BIBLIOGRAFIA

- Bossler, J.D. & Novak, K. (1993), Mobile Mapping System: new tools for the data collection of GIS information. *Canadian conference on GIS'93*, Ottawa, Canada, 306-315.
- D.A. Grejner-Brzezinska (2001), Mobile mapping technology: ten years later, Part I, Survey. *Land Inform. Syst.* 61 (2), 75-91.
- El-Sheimy, N. (1996), A mobile multi-sensor system for GIS applications in urban centers. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXI/ B2, 95-100.
- Kartinen, H., Hyyppä, J., Kukko, A., Lehtomäki, M., Jaakkola, J., Vosselman, G., Elberink, S.O., Rutzinger, M., Pu, S. & Vaaja, M. (2013), Mobile mapping – Road environment mapping using mobile laser scanning. *EuroSDR Official Publication* N. 62.
- Tao, V. & Li, J. (2007), *Advances in Mobile Mapping Technology*. London: Taylor & Francis Group.
- Toschi, I., Rodríguez-González, P., Remondino, F., Minto, S., Orlandini, S. & Fuller, A. (2015), Accuracy evaluation of a mobile mapping system with advanced statistical methods. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W4, 245-253.

ABSTRACT

MMS is nowadays an emerging technology, whose development goes back to the 90's and is constantly growing. From a technological point of view, it is the best example of sensor integration and cost-effective

acquisition of geo-referenced spatial data, with a combination of digital imaging devices, long-range laser scanners and GNSS/IMU positioning sensors. The accuracy requirements for the acquired data is substantially different in each application, with road or rail infrastructure surveying being much more demanding in this particular respect. Thus, every scanner specification should be taken into account in order to obtain the best solution according to the intended application. Additionally, a proper evaluation procedure should be carried out by adopting external reference datasets. In this work, a review of the MMS technology is given, together with results achieved with RIEGL VMX-450 in the city center of Trento.

PAROLE CHIAVE

SISTEMI MOBILE MAPPING; LASER SCANNER; FOTOGRAMMETRIA; NUVOLE DI PUNTI; 3D

AUTORE

ISABELLA TOSCHI
TOSCHI@FBK.EU
FABIO REMONDINO
REMONDINO@FBK.EU
3D OPTICAL METROLOGY (3DOM), FONDAZIONE BRUNO KESSLER (FBK), TRENTO

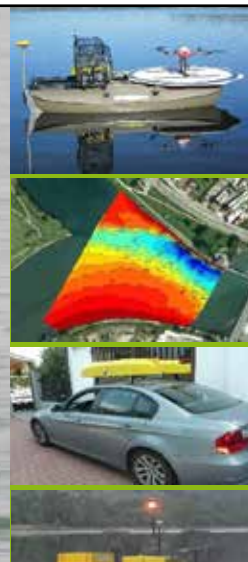
SIMONE ORLANDINI
SIMONE@MICROGEO.IT
MICROGEO, FIRENZE

Natanti robotizzati

- Rilievi batimetrici automatizzati
- Fotogrammetria delle sponde
- Acquisizione dati e immagini
- Mappatura parametri ambientali
- Attività di ricerca



Studi e servizi di ingegneria - Robotica di servizio



Vendita - Noleggio - Servizi chiavi in mano, anche con strumentazione cliente

Strada Salga 38C - 10072 Caselle (TO) - Tel. 3389258046 - info@aerrobotix.com - www.aerrobotix.com