

NAVIGAZIONE FOTOGRAMMETRICA CON SENSORI A BASSO COSTO

PHOTOGRAMMETRIC NAVIGATION WITH LOW-COST SENSORS

D. Pagliari

DICA – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale , Politecnico di Milano,
Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano
diana.pagliari@polimi.it

PAROLE CHIAVE: Outdoor, Indoor, Navigazione, Fotogrammetria, Kinect, GNSS, low-cost, depth maps

KEY WORDS: Outdoor, Indoor, Navigation, Photogrammetry, Kinect, GNSS, low-cost, depth maps

RIASSUNTO:

L'utilizzo di applicazioni che richiedono una soluzione di posizionamento è in continuo e costante incremento. Si consideri, a titolo esemplificativo, la sempre crescente necessità di informazioni richieste dalle applicazioni per cellulare che sono legate alla posizione dell'utente. In molti casi è sufficiente una localizzazione di tipo approssimato, ma spesso è necessaria una soluzione con accuratezza decimetrica. Il problema della navigazione è stato da tempo risolto grazie all'impiego dei sistemi GNSS. In zone urbane e all'interno di edifici, però, la ricezione del segnale satellitare è impedita dalla presenza di numerosi ostacoli. La fotogrammetria, assistita utilizzando informazioni complementari, rappresenta una interessante alternativa a basso costo. All'interno del presente articolo, l'impiego di tale soluzione è stato indagato sia in contesti outdoor che indoor. Il problema della navigazione urbana è stato studiato sviluppando un sistema di posizionamento fotogrammetrico, basato su appoggio cartografico a grande scala, utilizzando punti di legame estratti automaticamente dalle immagini acquisite in fase di rilievo. Il metodo è stato testato in diverse situazioni, ricostruendo la traiettoria con un'accuratezza di 0,20 m, migliorata sino a 0,15 m integrando anche alcune pseudo-osservazioni GNSS. Per quanto concerne la navigazione indoor, si è pensato di utilizzare in modo integrato i dati acquisiti dal sensore Microsoft Kinect, identificando punti caratteristici sulle immagini RGB e riproiettandoli sulle nuvole di punti create a partire dalle depth maps acquisite. Tali punti sono stati poi utilizzati per stimare le matrici di rotazione tra nuvole di punti successive e, conseguentemente, ricostruire la traiettoria seguita con circa 0,05 m di errore.

ABSTRACT:

Nowadays, devices and applications that require navigation solutions are continuously growing. For instance, consider the increasing spread of applications based on users' location. In some case it could be sufficient an approximate solution, but often a decimetric solution is required.

The navigation problem has been solved from a long time using GNSS. However, it can be unless in obstructed areas, such as in urban areas or inside buildings. Photogrammetry, assisted using additional information, represents an interesting low-cost solution.

In this paper, the use of assisted photogrammetry has been tested for both outdoor and indoor scenarios. The problem of outdoor navigation has been faced developing a positioning system based on photogrammetry, using Ground Control Points extracted from urban maps as constrain and tie points automatically extracted from the images acquired during the survey. The proposed approach has been tested under different scenarios, recovering the followed trajectory with an accuracy of 0.20 m. This result has been improved up to 0.15 m integrating within the solution also some GNSS pseudo-observations.

For indoor navigation a solution has been thought to integrate the data delivered by Microsoft Kinect, by identifying interesting features on the RGB images and re-projecting them on the point clouds generated from the delivered depth maps. Then, these points have been used to estimate the roto-translation matrices between subsequent point clouds and, consequently, to recover the trajectory with about 0.05 m of error.

1. INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi anni l'utilizzo di dispositivi e applicazioni che richiedono una soluzione di navigazione accurata sono in continuo aumento. Si consideri, ad esempio, la costante e crescente richiesta di applicazioni di 3D mapping basate sulla posizione dell'utente. Per alcune di queste applicazioni è sufficiente conoscere la posizione in cui si trova l'utente con la precisione di una decina di metri, ma nella maggioranza dei casi è fondamentale disporre di una soluzione più accurata nell'ordine del decimetro, come ad esempio per

localizzare il personale paramedico o i vigili del fuoco che intervengono in situazioni di emergenza e si devono recare in zone pericolose, quali ad esempio edifici parzialmente crollati.

Il problema della navigazione è stato da tempo risolto utilizzando sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System): questi sistemi rappresentano ormai una soluzione standard (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Per calcolare una soluzione GNSS è necessario che il ricevitore sia in grado di ricevere il segnale da almeno quattro satelliti, aventi una buona distribuzione geometrica nel cielo, per un periodo

sufficientemente lungo per garantire la completa trasmissione di tutto il segnale navigazionale. Questa ipotesi difficilmente si verifica, però, in zone urbane, a causa della presenza di ostacoli (come ad esempio edifici di media o elevata altezza, alberi con fogliame denso, tunnels, etc.) che ostruiscono la visibilità del cielo. I segnali dei sistemi di posizionamento GNSS sono trasmessi a elevate frequenze (ad esempio la frequenza del segnale GPS – Global Positioning System – è pari a 1.575 GHz) e per questa ragione non sono in grado di attraversare i muri, rendendo impossibile l'utilizzo di ricevitori standard per la navigazione indoor.

Queste due tipologie di ambienti rappresentano quindi un'interessante sfida per il settore nella navigazione, poiché non è possibile fare affidamento sui soli sistemi di posizionamento satellitare per effettuare il calcolo di una soluzione accurata.

Nel settore della navigazione urbana, e non solo, le grandi potenzialità dei Mobile Mapping Systems (MMS) sono note da tempo: questi sistemi permettono infatti di calcolare una soluzione di navigazione integrando dati acquisiti con sensori di natura diversa, quali ad esempio INS/GPS (Inertial Measurement Systems). Al riguardo si veda, ad esempio, Hassan et al., (2006). I MMS permettono di raggiungere le accuratze necessarie per la navigazione geodetica, ma sono soluzioni molto costose; anche le soluzioni "economiche" hanno un costo superiore ai 200.000 \$ (Al-Hamad e El-Sheimu, 2004). Una interessante soluzione, spesso applicata per abbassare i costi, è quella di utilizzare sistemi di navigazione a basso costo, quali ad esempio i ricevitori HSGNSS (High Sensitive GNSS) (MacCougan, 2003). Una forte spinta per il loro sviluppo e diffusione è legata all'introduzione del cosiddetto mandato E-911 da parte dell'American Federal Communication, al cui interno si richiede che, in caso di emergenza, sia possibile localizzare le chiamate con una tolleranza di 50 m nel 67% dei casi e con un errore non superiore ai 150 m per il 95% delle chiamate ricevute. La conseguenza diretta della promulgazione di questa legge è stata lo sviluppo di una serie di networks che possono essere utilizzati per localizzare gli utenti della rete mobile (come ad esempio il GPS Assistito - AGPS), permettendo di avere una soluzione anche in zone caratterizzate da una difficile ricezione del segnale. Ciò ha spinto sempre più verso lo sviluppo di ricevitori a basso costo. I ricevitori HSGNSS rappresentano una interessante opportunità per la navigazione in zone urbane, però essi sono troppo spesso caratterizzati da evidenti errori di misurazione, soprattutto a causa di fenomeni quali il multipath. Infatti, il raggio riflesso può essere addirittura più forte che quello diretto: il ricevitore può facilmente confonderli e calcolare una soluzione di posizionamento errata, anche nel caso in cui siano implementati metodi quali la correlazione dei picchi per eliminare tali fenomeni. Da non dimenticare poi che ci sono zone in cui semplicemente ci sono troppi ostacoli e conseguentemente i satelliti visibili sono troppo pochi, magari caratterizzati anche da una cattiva distribuzione geometrica. Nel prossimo futuro, diversi miglioramenti sono attesi grazie all'introduzione di soluzioni multi-costellazione, basate ad esempio sull'integrazione GPS-Galileo e BeiDou.

Le antenne GNSS utilizzate per la navigazione sono spesso affiancate da sistemi inerziali, ma le loro prestazioni sono strettamente legate a costi e dimensioni. La continua richiesta di sistemi sempre più piccoli, da integrarsi all'interno di beni di consumo di massa, quali ad esempio smartphones, controller per console di videogiochi etc. ha spinto il mercato verso lo sviluppo dei Micro Electrical Mems System (MEMS), che a loro volta hanno spinto verso lo sviluppo di sensori inerziali a basso costo. Purtroppo però questi sistemi sono caratterizzati da scarse performances e basse accuratze, se confrontate con

quelle di sensori di grado più elevato (es. quelli che trovano impiego nel settore militare). Le soluzioni calcolate con gli inerziali a basso costo sono caratterizzate da elevati errori di posizionamento e orientamento: conseguentemente, la soluzione stimata deriva rapidamente nel tempo, soprattutto quando i MEMS sono utilizzati in modalità stand-alone.

La soluzione di posizionamento che permette di raggiungere le accuratze più elevate, nell'ordine di qualche millimetro, sia in ambienti indoor che outdoor, prevede l'impiego di stazioni totali a inseguimento automatico (Böniger et al, 2010). Questi strumenti però sono molto costosi e richiedono una continua e chiara visibilità del riflettore installato sul veicolo che deve essere tracciato. Inoltre, il punto deve essere collimato da un punto di stazione stabile, che si trovi a una distanza inferiore rispetto al range operativo dello strumento, che si attesta di solito intorno a qualche centinaia di metri; ovviamente è difficile garantire una simile condizione in ambiti urbani o all'interno degli edifici.

Per quanto concerne il posizionamento indoor diverse soluzioni, che garantiscono un'elevata accuratezza, sono già disponibili; tuttavia il costo delle infrastrutture necessarie è spesso proibitivo per la maggior parte dei progetti. Naturalmente anche in questo caso le precisioni e le accuratze finali sono fortemente legate al costo della strumentazione impiegata. Ad esempio i sistemi Ultra Wide Band (UWB) sono largamente impiegati nel campo medico e permettono di arrivare ad accuratze nell'ordine del millimetro (Mahfouz et al, 2008), mentre i sistemi di posizionamento di tipo magnetico permettono di raggiungere accuratze centimetriche (Storms et al, 2010). Sistemi quali Radio Frequency Identification (RFID) (Zhou and Liu, 2007) or Wi-Fi (Vaupel et al, 2010) sono caratterizzati da accuratze variabili in funzione della distribuzione spaziale dei tags/access points installati. Lo stesso principio può essere esteso anche ai metodi di posizionamento basati sul fingerprinting (Takenga et al, 2007): in questo caso l'accuratezza che si può raggiungere in fase di posizionamento è strettamente dipendente dalla qualità della fase di addestramento svolta e dal numero di dati di riferimento inseriti all'interno del database utilizzato per la comparazione e la classificazione del segnale acquisito in fase operativa.

Scopo principale del lavoro discusso nel presente articolo è di investigare e sviluppare una soluzione di navigazione a basso costo: per questa ragione possibili soluzioni che garantiscono elevate accuratze a fronte di un cospicuo investimento economico non sono state considerate.

La fotogrammetria rappresenta un'interessante soluzione a basso costo, utilizzabile sia in ambienti outdoor che all'interno di edifici; inoltre essa permette, potenzialmente, di raggiungere un livello di accuratezza particolarmente elevato, in dipendenza della camera fotogrammetrica e dell'obiettivo impiegato. Ovviamente, con lo scopo di utilizzare le immagini acquisite in fase di rilievo per calcolare una soluzione di navigazione (nonché per scalare il problema fotogrammetrico) è auspicabile disporre di un certo numero di vincoli aggiuntivi. Inoltre, l'impiego di una soluzione puramente fotogrammetrica può non risultare praticabile, qualora nelle immagini acquisite siano presenti solo oggetti caratterizzati da una tessitura uniforme. Una possibile soluzione è quella di integrare tra loro dati acquisiti sia con sensori attivi che passivi: tale approccio è stato indagato esplorando le possibilità d'impiego del sensore Microsoft Kinect per la navigazione indoor.

Il resto dell'articolo è organizzato come segue. Nel paragrafo 2 è fornita una breve panoramica dell'utilizzo di sistemi fotogrammetrici per la navigazione, considerando sia applicazioni outdoor che indoor. Nel paragrafo 3 è descritta la soluzione implementata per la navigazione in ambito urbano

con approccio fotogrammetrico. La metodologia sviluppata per l'integrazione di immagini RGB e depth maps è discussa nel successivo paragrafo 4. Al termine si trovano alcune conclusioni, insieme con alcuni possibili sviluppi futuri.

2. NAVIGAZIONE BASATA SU METODI FOTOGRAMMETRICI

Il recente successo dei sistemi ottici è legato principalmente agli avanzamenti tecnologici e alla miniaturizzazione dei componenti dei sensori Charged Coupled Devices (CCDs), combinati con un forte incremento delle capacità computazionali e allo sviluppo degli algoritmi automatici per il processamento delle immagini. Tutti questi fattori hanno permesso di utilizzare la fotogrammetria in una grande varietà di campi e di applicazioni, caratterizzati da diversi livelli di accuratezza. Ad esempio nel settore della metrologia essa viene impegnata per raggiungere precisioni sub-millimetriche per applicazioni di reverse engineering o controllo di qualità, ma in altri campi sono accettabili anche errori di decine di metri, come ad esempio nel caso della pedestrian navigation per dispositivi quali smartphones.

L'impiego della fotogrammetria per ricostruire la traiettoria di un veicolo in caso di assenza prolungata del segnale GPS è discussa in Da Silva et al. (2003), dove sono presentati lo sviluppo di un MMS a basso costo e l'impiego di una soluzione puramente fotogrammetrica per ovviare all'assenza del segnale GPS. Il loro approccio richiede di disporre di alcune posizioni GPS per vincolare i centri di presa delle coppie di immagini localizzate agli estremi del blocco fotogrammetrico. L'impiego di tecniche basate sull'utilizzo di immagini per supplire all'assenza di una soluzione GPS è presentato anche in Chaplin (1999) e Tao et al. (2001). In questi casi le coordinate del punto di partenza sono considerate note, essendo acquisite con un sistema INS/GPS. Una soluzione puramente fotogrammetrica è discussa anche in Roncella et al. (2005), dove si propone di utilizzare in punti di legame estratti automaticamente per eseguire il bundle-block adjustment e ricostruire la traiettoria del veicolo a partire dai parametri di Orientamento Esterno (OE) delle camere. Vista l'assenza di punti d'appoggio (GCPs), la soluzione proposta può essere impiegata solo nel caso di brevi periodi di assenza del segnale GPS; gli autori hanno verificato come nel caso di una assenza prolungata per 300 m circa il drift conseguente sia nell'ordine di 1,5 m.

In accordo con Eugaster et al. (2012) un simile risultato può essere migliorato aggiungendo GCPs in posizioni adeguate lungo l'estensione del rilievo.

Soprattutto nel campo delle applicazioni per la navigazione indoor, i sistemi ottici possono essere classificati considerando come sono acquisite le informazioni necessarie per georeferenziare il blocco fotogrammetrico (es. dal modello dell'edificio, targets automatici etc.) e se sono necessarie o meno delle informazioni a-priori. Una catalogazione esaustiva di questi sistemi si trova in Mautz (2012). Per le applicazioni di navigazione indoor è comune identificare oggetti sulle immagini ed effettuare un matching con i dati precedentemente inseriti all'interno di un database. Un tale approccio è, però, oneroso in termini di tempo necessario per raccogliere tutte le informazioni necessarie per popolare il database.

La vera sfida per il posizionamento indoor è rappresentata dalla navigazione autonoma dei robot: in questo caso, infatti, è necessario risolvere il problema in real-time, calcolando una soluzione che sia indipendente da ogni informazioni nota a-priori. Questo problema è comunemente noto come Simultaneous Location And Mapping (SLAM). Il problema può essere spiegato semplicemente considerando che per muoversi

da un posto all'altro un robot deve conoscere la sua posizione nell'ambiente. SLAM è un tipico esempio di problema circolare: infatti, per localizzare la posizione e l'assetto di una camera nell'ambiente è necessario disporre di un modello dell'ambiente stesso, ma, allo stesso tempo, la creazione del modello 3D richiede di conoscere l'OE delle camere.

In letteratura si trovano numerose applicazioni che utilizzano la SLAM per la navigazione, soprattutto nel settore della robotica, dove è pratica comune fondere insieme dati acquisiti con sensori aventi una natura differente. Ad esempio, Ramos et al. (2007) hanno integrato dati laser e dati acquisiti con sensori ottici con lo scopo di riconoscere dei landmarks, ottenendo un RMS pari a 6,8 m. Storicamente i sistemi laser sono stati da sempre installati sui robot con lo scopo di acquisire le informazioni necessarie per la navigazione autonoma. Il lancio sul mercato del sensore Microsoft Kinect ha permesso di accedere facilmente a dati acquisiti simultaneamente da sensori attivi e passivi a un costo veramente basso (200 euro circa), aprendo una serie di nuove opportunità per la guida automatica dei robot, e non solo.

3. NAVIGAZIONE URBANA CON L'AUSILIO DELLA FOTOGRAMMETRIA

Il problema della georeferenziazione di un veicolo può essere facilmente risolto in zone extraurbane con l'ausilio dei sistemi di posizionamento satellitare; come già sottolineato in precedenza, ciò non è però possibile nelle aree urbanizzate, a causa della presenza di numerosi ostacoli che ostruiscono la ricezione del segnale. La fotogrammetria rappresenta quindi un'interessante alternativa a basso costo per la navigazione in aree urbane. La soluzione descritta nel presente articolo è stata sviluppata all'interno del progetto UMALS (High Speed 3D Underground Utilities and Automatic Electrical Lying System), il cui obiettivo finale è lo scavo e la posa automatizzata di cavi di media tensione. Con lo scopo di effettuare in sicurezza tali operazioni, è fondamentale conoscere in modo molto preciso la posizione e la geometria di tutte le infrastrutture già presenti nel sottosuolo, come ad esempio fognature, cavi interrati etc.

Questo problema è solitamente risolto eseguendo un rilievo ad hoc con il Ground Penetrating Radar (GPR) trainato da un veicolo o spinto a mano. Questo strumento, però, non è in grado di fornire alcuna informazione circa la sua posizione e la necessità di essere georeferenziato utilizzando della strumentazione esterna. Per effettuare una corretta ricostruzione della posizione e della geometria degli oggetti che si trovano nel sottosuolo, il GPR deve essere georeferenziato con una accuratezza compresa da 0,20 e 0,30 m. Come già sottolineato più volte, questo problema non può essere risolto in zone urbane con sistemi GNSS poiché non si ha una buona visibilità del cielo. Inoltre l'antenna georadar si muove molto lentamente (in modo da garantire i requisiti di campionamento necessari per illuminare correttamente gli oggetti indagati), conseguentemente una soluzione impiegando sistemi INS/GPS non è praticabile poiché si verificherebbero troppo rapidamente delle derive inaccettabili. Si consideri poi come l'acquisizione dei dati con il GPR sia realizzata per strisciate parallele: il tempo di permanenza in zone dove il segnale GNSS è assente può quindi perdurare a lungo.

Il metodo proposto prevede di installare una o più fotocamere e una antenna GNSS sullo stesso veicolo che traina l'antenna georadar (Figura 1). Esso si basa su un approccio fotogrammetrico inverso e prevede di vincolare il blocco fotogrammetrico utilizzando punti d'appoggio estratti automaticamente dalla cartografia a grande scala, in

corrispondenza di punti facilmente individuabili, quali ad esempio spigoli di edifici.

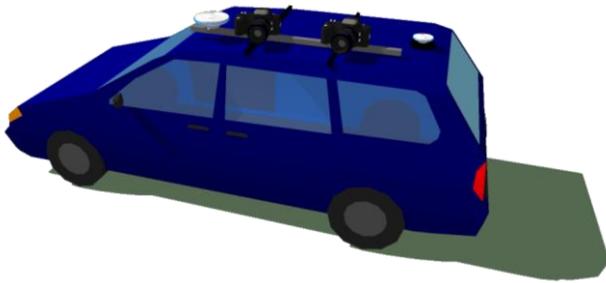


Figura 1. Il veicolo equipaggiato con due camere fotogrammetriche e due antenne GNSS utilizzato per i test cinematici

L'idea di utilizzare dati estratti dalla cartografia per migliorare la soluzione di navigazione era già stata proposta da Crosilla e Visentini (1988), ma le informazioni cartografiche venivano utilizzate in modo diverso. Nel loro lavoro, infatti, la soluzione era calcolata applicando un filtro di Kalman di tipo forward: dalla cartografia venivano estratti una serie di punti, poi interpolati con una funzione di tipo spline, in modo da definire il modello dinamico del veicolo. In questo modo gli autori sono stati in grado di definire l'OE utilizzando una camera e un odometro. La soluzione qui proposta (vedere lo schema metodologico in Figura 2) prevede, invece, di risolvere il problema fotogrammetrico con un bundle block adjustment, utilizzando come punti d'appoggio dei punti estratti dalla cartografia a grande scala e come punti di legame punti omologhi estratti automaticamente dalle immagini acquisite in fase di rilievo. L'impiego di punti estratti automaticamente permette di incrementare il numero di osservazioni, assicurando allo stesso tempo un'accuratezza migliore (tipicamente sub-pixel). Essi sono facilmente estraibili in ambienti urbani, grazie alla presenza di numerosi dettagli e textures ricche di particolari: talvolta i punti estratti possono essere addirittura troppo numerosi, rendendo difficile la gestione del blocco fotogrammetrico. Per ovviare a questa problematica è stato scritto un software che permette di ottimizzare la distribuzione dei punti di legame nello spazio immagine, preservandone allo stesso tempo anche la molteplicità. Questa operazione permette di ridurre il tempo necessario per il calcolo della soluzione fotogrammetrica, mantenendo inalterate le accurattezze finali.

La traiettoria descritta dal georadar può poi essere facilmente ricostruita trasferendo la soluzione fotogrammetrica in corrispondenza del GPR. Ciò è possibile poiché tutti i sensori che costituiscono il sistema di navigazione (fotocamere e antenna GNSS) e lo stesso GPR sono rigidamente fissati al veicolo. La posizione del centro di fase dell'antenna e la trasformazione rigida (rototraslazione) dal sistema di riferimento della camera al sistema di riferimento veicolo sono stimati durante la fase di calibrazione geometrica del veicolo. In tale fase è necessario acquisire una serie di immagini di un poligono di calibrazione, quale ad esempio la facciata di un edificio su cui sono stati misurati dei punti d'appoggio con strumentazione topografica classica, acquisendo contemporaneamente anche le corrispondenti soluzioni GNSS. Dal confronto tra la soluzione del blocco fotogrammetrico, ottenuta con un bundle block adjustment, e le soluzioni GNSS è possibile stimare le componenti dei vettori che collegano nello spazio i diversi strumenti.

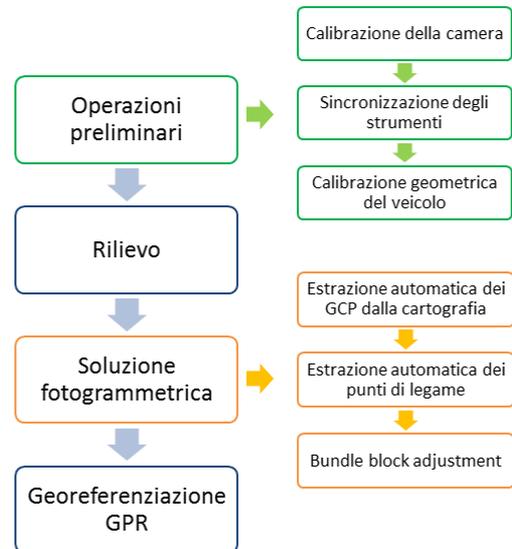


Figura 2. Schema metodologico del metodo fotogrammetrico proposto

Il metodo fotogrammetrico proposto è pensato come una soluzione di backup quando il segnale GNSS non può essere ricevuto con qualità adeguata. Infatti, il metodo proposto è dispendioso sia dal punto di vista computazionale, che per il tempo richiesto per il calcolo della soluzione. Inoltre le accurattezze che si possono ottenere sono comunque inferiori a quelle che caratterizzano una soluzione GNSS ottenuta con differenze doppie di fase, poiché i punti d'appoggio che sono estratti dalla cartografia sono caratterizzati da una precisione legata alla scala della carta stessa (ad esempio, nel caso di cartografia a scala 1:1000 le accurattezze sono pari a 0,20 m per le coordinate altimetriche e 0,30 m per quelle planimetriche).

3.1 Test preliminari

Numerose simulazioni e test preliminari sono stati realizzati con lo scopo di valutare la fattibilità del metodo proposto. In Barzaghi et al. (2009) una serie di simulazioni è stata presentata, illustrando le potenzialità della soluzione fotogrammetrica. Successivamente diversi test preliminari sono stati svolti con lo scopo di valutare l'applicabilità delle tecniche di Structure from Motion (SfM) e le loro prestazioni durante l'estrazione di punti di legame in zone urbane e nel caso di lunghe sequenze di immagini con pochi GCPs. Durante questi test la ricerca dei punti omologhi è stata realizzata con il software EyeDEA (Roncella et al., 2011a – Roncella et al., 2011b).

Un rilievo cinematico completo, discusso in Cazzaniga et al. (2012) è stato realizzato per poter valutare l'effettiva fattibilità del metodo proposto in condizioni molto simili a quelle reali. Il veicolo è stato equipaggiato con 2 fotocamere Nikon D70s con focale fissa pari a 20 mm e un'antenna GPS, avente lo scopo di simulare la presenza del georadar e fornire contemporaneamente anche una traiettoria di riferimento da utilizzarsi per valutare l'accuratezza della soluzione fotogrammetrica. Il rilievo è stato realizzato in via Golgi (Milano) per una lunghezza totale di 350 m. Il blocco fotogrammetrico acquisito è composto da 220 immagini ed è stato georeferenziato utilizzando 11 GCPs estratti dalla cartografia a grande scala (1:1000) della città di Milano. Le posizioni e gli assetti delle camere sono stati calcolati con un bundle block adjustment e le precisioni ottenute sono nell'ordine di 0,10 m in tutte le direzioni. Le posizioni dei centri di presa delle camere sono state poi

trasferite in corrispondenza del GPS (che simula la presenza del GPR) utilizzando le componenti del vettore determinate in fase di calibrazione. I residui calcolati sono, per tutte le posizioni, superiori a 0,186 m, sintomo della presenza di un errore di tipo sistematico, dovuto probabilmente al fatto che l'orientamento del vettore di calibrazione, rispetto al sistema body frame (fisso rispetto al sistema di riferimento veicolo), era stato stimato con una accuratezza limitata. Inoltre, la presenza di un trend è emersa chiaramente dal confronto tra le due soluzioni. Questo fatto può essere spiegato considerando principalmente due fattori: una deriva della stima delle posizioni dei centri di presa e un disallineamento tra i sistemi di riferimento stimati. Nonostante questi problemi, però, la soluzione fotogrammetrica mostra un errore inferiore alla tolleranza richiesta per un tratto di lunghezza pari a circa 150 m, dopo di che l'incremento dei residui è soprattutto legato delle accuratezze del segnale GPS.

3.2 Test cinematico di Cremona

Durante lo svolgimento dei test preliminari è stata provata la fattibilità del metodo fotogrammetrico e i risultati ottenuti sono sempre stati in linea con le tolleranze richieste per la georeferenziazione del georadar. Nonostante ciò è però emerso chiaramente come la soluzione fotogrammetrica sia fortemente legata alla qualità dei punti d'appoggio utilizzati per georeferenziare il blocco fotogrammetrico. La cartografia a grande scala è caratterizzata da accuratezze diverse nelle diverse aree della città; inoltre, sono spesso presenti degli outliers legati a errori commessi in fase di restituzione o a cambiamenti dell'ambiente urbano che sono successivi alla creazione della carta stessa. Considerando tutte queste problematiche si ritiene che sia fondamentale integrare all'interno della soluzione anche alcune pseudo-osservazioni GNSS. Questi punti possono essere facilmente acquisiti laddove c'è una maggiore visibilità del cielo, come ad esempio in corrispondenza di incroci o piazze. Essi sono poi noti con accuratezze di qualche centimetro, il che permette di vincolare maggiormente il blocco fotogrammetrico, nonché di identificare e rigettare eventuali outliers presenti nei GCPs estratti dalla cartografia. Partendo da tutte queste considerazioni, un secondo test cinematico è stato realizzato in un ambiente "maggiormente controllato" (Cazzaniga et al., 2013), ovvero in un quartiere residenziale della città di Cremona (si veda Figura 3). L'area oggetto del rilievo è stata selezionata poiché ivi sono presenti solo edifici bassi (massimo uno o due piani fuori terra), il che garantisce di poter sempre acquisire una soluzione GNSS di buona qualità da utilizzarsi per valutare l'accuratezza del metodo proposto.

Le immagini sono state acquisite lungo traiettorie chiuse, garantendo quindi l'autoconsistenza della soluzione fotogrammetrica, con lo scopo di evitare le possibili derive evidenziate nel corso dei test preliminari, che sono stati discussi in precedenza. Il veicolo utilizzato per il test è stato equipaggiato con due fotocamere digitali Nikon D70s con focale fissa pari a 20 mm e due antenne GPS. I dati acquisiti con la prima delle due antenne sono stati utilizzati per valutare l'effetto dell'introduzione di alcune pseudo-osservazioni GPS all'interno del bundle-block adjustment, mentre i dati acquisiti con la seconda antenna sono stati utilizzati come soluzione di riferimento e per simulare la presenza del georadar.

L'impiego di due fotocamere, rigidamente fissate al veicolo, ha permesso di valutare anche l'effetto dell'introduzione dell'ulteriore vincolo dell'orientamento relativo tra i due sensori ottici.



Figura 3. L'area residenziale scelta per lo svolgimento del test cinematico. I GCPs estratti dalla cartografia sono raffigurati in rosso, mentre le pseudo-osservazioni GPS sono rappresentate in giallo

Durante il rilievo sono state acquisite in totale 600 immagini, utilizzando un tempo di scatto pari a un secondo. Il sistema è stato geometricamente calibrato utilizzando come poligono di calibrazione la facciata di un edificio, sul quale erano stati precedentemente misurati 7 GCPs con strumentazione topografica classica. Durante la fase di calibrazione del veicolo sono state acquisite una serie di immagini del poligono, acquisendo simultaneamente anche le corrispondenti posizioni GPS. Le componenti del vettore di calibrazione sono state calcolate con precisione di qualche centimetro; esse sono state poi utilizzate per inserire le pseudo-osservazioni all'interno del bundle block adjustment (Forlani et al., 2005).

Sono state analizzate diverse soluzioni, calcolate considerando diverse configurazioni d'appoggio del blocco fotogrammetrico. Nel primo scenario è stato considerato un appoggio puramente cartografico, utilizzando 52 GCPs estratti dalla cartografia a grande scala della città di Cremona (scala 1:1000). I punti d'appoggio sono stati selezionati in corrispondenza di spigoli di edifici, pensiline o tetti. Questi ultimi punti sono particolarmente importanti poiché la loro quota altimetrica è molto utile per migliorare la geometria del blocco, nonché la sua stabilità. L'accuratezza dei GCPs utilizzati è pari a 0,20 m per le coordinate planimetriche e pari a 0,30 m per le coordinate altimetriche, valori tipici di una cartografia in scala 1:1000. Poiché è ragionevole ipotizzare che in alcune aree, laddove il cielo è maggiormente visibile, sia possibile acquisire alcune pseudo-osservazioni GNSS da inserirsi all'interno del bundle block adjustment in modo da vincolare al meglio il blocco fotogrammetrico, sono state analizzate soluzioni integrate fotogrammetria-GNSS. Infatti, le soluzioni GNSS hanno una accuratezza superiore, pari a qualche centimetro: tali valori si possono considerare tipici di una soluzione calcolata utilizzando le differenze doppie di fase.

Inoltre, l'Orientamento Relativo (OR) tra le due camere è stato considerato come ulteriore vincolo aggiuntivo. Per ognuno degli scenari considerati è stato calcolato un bundle block adjustment, dal quale sono stati ricavati le posizioni e l'assetto delle camere, poi utilizzati per definire la traiettoria del veicolo. Il problema fotogrammetrico è stato risolto dapprima con il software commerciale PhotoModeler® e poi raffinato con il software scientifico Calge (Forlani, 1986), il quale permette anche di inserire all'interno della soluzione le pseudo-osservazioni GNSS, così come il vincolo dell'OR tra le due fotocamere. L'estrazione automatica dei punti di legame è stata effettuata utilizzando il software EyeDEA (Roncella et al., 2011a, Roncella et al., 2011b). I punti estratti sono stati filtrati secondo il criterio accennato nel precedente Paragrafo 3. Al

termine di tale operazione il blocco risulta essere composto da più di 60.000 punti immagini, che corrispondono a circa 17.600 punti oggetto, con una molteplicità media pari a 3 (vedi Figura 4). In media, il blocco è caratterizzato da 106 punti per immagine, con una copertura media dei fotogrammi pari al 79%. Il numero medio di raggi per punto omologo è pari a 3 (con un massimo di 22 osservazioni), mentre l'angolo di intersezione tra i raggi omologhi è pari a 17°.

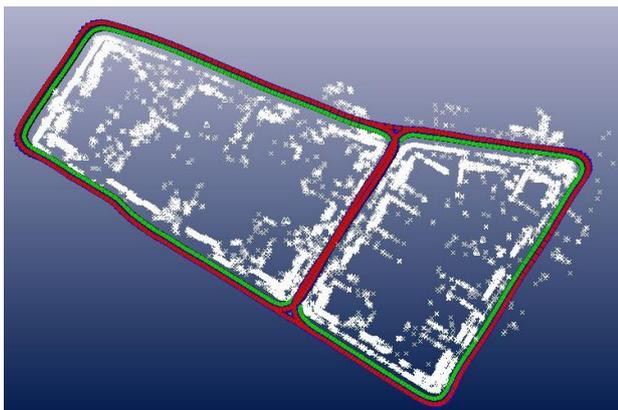


Figura 4. Il blocco fotogrammetrico acquisito in fase di rilievo. I punti bianchi rappresentano i tie points, mentre i poligoni colorati rappresentano i centri di presa della camera

In Tabella 1 sono riportati gli RMSe calcolati considerando i residui tra le posizioni stimate con il metodo fotogrammetrico proposto e la soluzione GPS, interpolata al tempo di scatto.

	N[m]	E[m]	h[m]
52 GCP cartografici	0,180	0,311	0,260
52 GCP cartografici + OR	0,195	0,261	0,248
52 GCP cartografici + 6GPS	0,148	0,140	0,128
52 GCP cartografici +6GPS+OR	0,114	0,092	0,153

Tabella 1 - RMSe calcolati considerando le differenze tra la soluzione GPS e la soluzione fotogrammetrica (trasferita utilizzando il vettore di calibrazione)

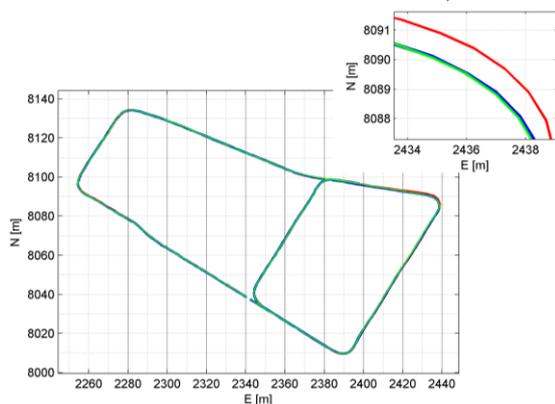


Figura 5. Traiettorie stimate considerando diversi appoggi per il blocco fotogrammetrico e soluzione GPS di riferimento (in blu è rappresentata la soluzione GPS di riferimento, in rosso la traiettoria fotogrammetrica ottenuta considerando un appoggio puramente cartografico e in verde la soluzione integrata fotogrammetria-GPS)

4. NAVIGAZIONE INDOOR CON IL SENSORE MICROSOFT KINECT

Il problema della navigazione in ambienti indoor è stato affrontato considerando la possibilità di impiegare il sensore Microsoft Kinect. Il Kinect è stato lanciato sul mercato nel 2010 dalla Microsoft Corporation come controller remoto per la console Xbox360. Diversamente dagli altri human control devices (come ad esempio il Wii Remote Controller della Nintendo o il PlayStation Move della Sony) il Kinect permette all'utente di giocare e controllare completamente la console senza dover tenere in mano alcun tipo di controller, ma solo con l'utilizzo di voce e gesti. Questo è possibile poiché durante il gioco il giocatore è completamente tracciato e il suo personaggio all'interno del gioco si muove in accordo con i suoi gesti. La prima versione del Kinect è composta da una camera RGB, una camera IR, un proiettore IR (che proietta un pattern casuale), un array di microfoni, un tilt motor e un accelerometro triassiale. Nell'estate 2014 una nuova generazione di sensori Kinect è stata lanciata sul mercato. Anche questo nuovo sensore è composto da una camera RGB, una camera IR, ma in questo caso la distanza viene misurata effettuando una correlazione tra il segnale emesso e quello riflesso.

Il Kinect ha conosciuto fin da subito una grandissima diffusione, essendo impiegato in numerosissime applicazioni anche molto differenti dall'idea originale del sensore di essere una 3D human interface, grazie soprattutto al fatto che rende accessibile a tutti, a fronte di un costo veramente basso, dati acquisiti sia da sensori attivi che passivi. Generalmente le immagini RGB possono essere utilizzate in modo proficuo in ambienti dove è presente una forte variazione cromatica o oggetti caratterizzati da features altamente distintive. Al contrario, nel caso di superfici caratterizzate da una texture uniforme, quale ad esempio dei muri intonacati, può essere molto difficile estrarre delle features. In queste situazioni possono essere molto utili le nuvole di punti create dai dati acquisiti da sensori di tipo attivo. Per poter garantire, però, un corretto allineamento dei modelli 3D generati è necessario che nella scena ripresa siano presenti alcune variazioni di volume (es. presenza di mobili). La natura complementare dei dati acquisiti dal Kinect lo rende molto interessante, soprattutto per la navigazione autonoma di robot e per la ricostruzione di modelli 3D.

4.1 Calibrazione dei sensori ottici del Kinect for XboxOne

Con lo scopo di poter definire i parametri di Orientamento Interno (OI) di entrambi i sensori ottici che compongono il Kinect è necessario eseguire una procedura di calibrazione; nel caso qui presentato è stato utilizzando l'apposito tool del software PhotoModeler (versione 2012.2.1.779). Una serie di immagini del pannello di calibrazione (vedi Figura 6) sono state acquisite, sia con la camera RGB che con quella IR.



Figura 6. Il pannello di calibrazione di PhotoModeler usato per

la stima dei parametri di OI delle camere RGB e IR

Un software con interfaccia grafica è stato scritto in modo da controllare il sensore e vedere a schermo il flusso dei dati acquisiti dal Kinect: in questo modo è possibile ruotare e traslare il sensore nella posizione corretta e acquisire solo le immagini necessarie ai fini della calibrazione (ovvero che inquadrano il pannello nella sua interezza). In Tabella 2 e Tabella 3 sono riportati i parametri di OI stimati, rispettivamente per le camere RGB e IR.

Kinect for XboxOne – camera RGB		
Risoluzione [pixel]	1920x1080	
Pixel size [μm] ¹	3,1	
Parametri OI		
	Valore	Dev.St.
Focale [mm]*	3,291	1,0e-03
Larghezza sensore [mm]*	6,00	
Altezza Sensore [mm]*	3,38	
Larghezza immagine [pixel]	1920	
Altezza immagine [pixel]	1080	
Punto Principale X [mm]*	-0,015	5,6e-04
Punto Principale Y [mm]*	-0,016	6,9e-04
Parametri aggiuntivi		
K_1	3,823e-03	3,8e-05
K_2	3,149e-04	3,8e-06
P_1	2,332e-04	2,0e-05
P_2	-5,152e-04	2,1e-06

Tabella 2: Parametri di orientamento interno, stimati in fase di calibrazione, per la camera RGB del Kinect for XboxOne

Kinect for XboxOne – camera IR		
Risoluzione [pixel]	512x424	
Pixel size [μm]*	11,7	
Parametri OI		
	Valore	Dev.St.
Focale [mm]*	4,285	6,0e-04
Larghezza sensore [mm]*	6,00	
Altezza Sensore [mm]*	4,97	
Larghezza immagine [pixel]	512	
Altezza immagine [pixel]	424	
Punto Principale X [mm]*	-0,038	4,0e-04
Punto Principale Y [mm]*	-0,039	5,0e-04
Parametri aggiuntivi		
K_1	-4,740e-03	2,03-05
K_2	6,391e-05	3,0e-06
P_1	-1,175e-05	6,8e-05
P_2	1,354e-04	7,8e-06

Tabella 3: Parametri di orientamento interno, stimati in fase di calibrazione, per la camera IR del Kinect for XboxOne

¹ Il Kinect for XboxOne è un sensore relativamente nuovo sul mercato e Microsoft non ha ancora rilasciato le specifiche tecniche dei sensori ottici impiegati. Poiché le immagini sono prive di file Exif (dal quale il software utilizzato estrae i parametri utilizzati come valori approssimati) si noti come i parametri contrassegnati con * sono stimati a meno di un fattore di scala incognito.

4.2 Integrazione di immagini RGB e depth maps

In letteratura sono presenti un ampio numero di applicazioni basati sull'uso di RGB e depth maps. Si veda ad esempio Oliver et al. (2012) o Endres et al. (2012). Solitamente le soluzioni proposte sono basate su approcci di tipo SLAM, soprattutto nel caso di navigazione di robot dove è richiesta una soluzione in real-time; conseguentemente l'accuratezza con cui sono stimate le traiettorie decresce rapidamente poiché la stima delle posizioni e dell'orientamento delle camere accumula errore nel tempo. Inoltre nella maggior parte degli studi che riguardano l'uso del Kinect per la navigazione sono fortemente legati al mondo della Computer Vision, quindi risulta particolarmente complesso trovare informazioni circa la calibrazione dei sistemi impiegati, le precisioni e/o le accuratezze delle soluzioni proposte. La soluzione qui discussa non è stata pensata per essere una soluzione real-time, nonostante ciò però le scelte algoritmiche sono state fatte considerando soprattutto il tempo richiesto per calcolare la soluzione.

L'operatore di interesse SIFT (Lowe, 2004) è l'operatore più comunemente utilizzato in ragione delle sue ottime prestazioni per una grande varietà di applicazioni, ma la fase richiesta per il matching delle features estratte è molto lunga, soprattutto nel caso di lunghe sequenze di immagini, come quelle acquisite dal Kinect. Nonostante ciò, però, SIFT è un operatore di interesse caratterizzato, generalmente, da prestazioni migliori rispetto a quelle degli altri algoritmi, soprattutto se si considera il numero di features estratte. L'algoritmo di feature tracking KLT (Lucas and Kanade, 1981 - Tomasi and Kanade, 1991) è in grado di tracciare features molto rapidamente, ma i punti estratti da tale algoritmo sono identificati usando un corner detector, che non sempre è in grado di identificare un elevato numero di punti qualora la scena ripresa sia caratterizzata da elementi omogenei. Per ovviare a queste problematiche (e allo stesso tempo trarre vantaggio dalle caratteristiche dei due algoritmi) si è deciso di implementare un nuovo software, partendo dall'algoritmo KLT, ma tracciando lungo la sequenza di immagini punti estratti con operatori di interesse più affidabili, come SIFT.

Le immagini RGB e depth sono poi integrate con lo scopo di ricostruire la traiettoria del Kinect.

Lo schema metodologico che descrive il metodo implementato è rappresentato in Figura 7.

Dalle immagini di profondità acquisite in fase di rilievo, noti i parametri di orientamento interno della camera IR, è possibile generare le corrispondenti nuvole di punti. Le immagini RGB e le depth maps sono state acquisite quasi simultaneamente (con solo qualche millisecondo di differenza dovuto ai tempi tecnici per il salvataggio delle immagini): per prima cosa è necessario identificare i fotogrammi corrispondenti, dopo di che è possibile riproiettare tutti i punti che costituiscono le nuvole di punti nello spazio immagine RGB. Le features estratte con SIFT, e successivamente tracciate con KLT, sono già definite in tale spazio; utilizzando un criterio di minima distanza euclidea, tra i punti tracciati e quelli riproiettati, sono poi identificate le osservazioni corrispondenti. Tale approssimazione è ritenuta accettabile poiché le differenze sono in media dell'ordine di un pixel. I punti individuati sono poi usati come input per la stima delle matrici di roto-traslazione che descrivono le trasformazioni tra una nuvola di punti e la successiva. Le matrici di rototraslazione sono state stimate con il software Rotoprocuster_scaling, realizzato dal gruppo di ricerca 3DOM della Fondazione Bruno Kessler. La traiettoria descritta dal Kinect è poi stimata eseguendo il prodotto delle matrici di roto-traslazione ed è poi raffinata stimando con l'algoritmo ICP (Chen e Medioni, 1991 – Besl e McKay, 1992) le roto-traslazioni residue.



Figura 7. Schema metodologico proposto per la stima della traiettoria del sensore Kinect

4.3 Test cinematico con il Kinect for XboxOne

Un test cinematico è stato realizzando utilizzando la versione per Microsoft Windows del Kinect for XboxOne. Il sensore è stato posto su un carrello, che è stato mosso lungo un corridoio di un edificio adibito ad uffici. Il sensore è stato installato su un treppiede fotografico, che a sua volta è stato rigidamente vincolato al carrello (vedere Figura 8). Sullo stesso carrello è stato poi anche installato un prisma retroriflettente, utilizzato per tracciare la traiettoria di riferimento seguita in fase di rilievo con la stazione totale ad inseguimento automatico Topcon Is203.



Figura 8. Il carrello equipaggiato con il Kinect for XboxOne, un laptop e il prisma retroriflettente

Il sistema è stato calibrato geometricamente, con lo scopo di definire le componenti dei vettori che collegano nello spazio i sensori ottici del Kinect e il prisma retroriflettente, realizzando un rilievo in modalità stop and go. Durante tale rilievo sono state acquisite immagini RGB e IR (vedi Figura 9), e contemporaneamente misurata la posizione del prisma retroriflettente. Sul muro inquadrato nelle immagini erano stati preventivamente applicati una serie di target automatici, le cui coordinate sono state misurate con misure topografiche classiche. Le immagini RGB e IR acquisite durante il rilievo stop and go sono state compensate insieme in un unico bundle

block adjustment, con lo scopo di definire l'OR tra le due camere.



Figura 9. Esempio di coppie di immagini IR (sopra) e RGB (sotto) del poligono di calibrazione acquisiti dallo stesso punto di stazione

In Tabella 4 sono riportati i parametri di OR stimati: è evidente come l'unica componente significativa sia quella lungo l'asse X, il che corrisponde ad affermare che le due camere possono considerarsi allineate. Le componenti lungo l'asse Y e Z, così come le componenti angolari, sono risultate tutte essere non significative.

	Media	Dev. Standard
X[m]	0,026	0,007
Y[m]	-0,002	0,003
Z[m]	0,001	0,003
ω [gon]	0,317	0,254
ϕ [gon]	399,543	0,580
κ [gon]	0,202	0,169

Tabella 4. Parametri di orientamento relativo tra la camera IR e la camera RGB

Dopo la prima fase di calibrazione è stato realizzato un rilievo cinematico: durante tale test il carrello è stato mosso lentamente e la posizione del target retroriflettente è stata acquisita con la stazione totale ad inseguimento automatico. Simultaneamente, con il Kinect sono state acquisite anche le immagini RGB e depth maps. Il sensore è stato controllato remotamente con un laptop, sul quale era stato installato un software appositamente scritto, basato sul SDK Microsoft.

Dopo aver risolto l'orientamento esterno del primo frame acquisito con la camera IR la traiettoria è stata ricavata direttamente nel sistema di riferimento oggetto (XYZ). La traiettoria così calcolata è stata trasferita in corrispondenza del prisma retroriflettente, utilizzando il vettore stimato durante la fase di calibrazione geometrica. In Figura 10 è raffigurata la traiettoria calcolata utilizzando l'algoritmo KLT-SIFT, nonché la soluzione raffinata utilizzando l'algoritmo ICP. Nella stessa figura è riportata anche la traiettoria di riferimento, acquisita con la stazione di riferimento totale. I risultati mostrano come vi

sia un buon accordo tra la soluzione calcolata con il Kinect e quella di riferimento, dato che gli RMSe delle differenze delle due soluzioni sono nell'ordine di 0,05 m, come riportato in Tabella 5. I risultati ottenuti sono in linea con le precisioni ottenute in fase di calibrazione, nella determinazione dei parametri di OR (tra camera IR e RGB) e nella stima del vettore che collega nello spazio le camere e il prisma retroriflettente. Si è poi verificato che le correzioni ottenute applicando l'algoritmo ICP non sono significative, in quanto sono dello stesso ordine di grandezza dell'errore commesso dal Kinect for XboxOne quando viene utilizzato come un sensore per la misura della distanza.

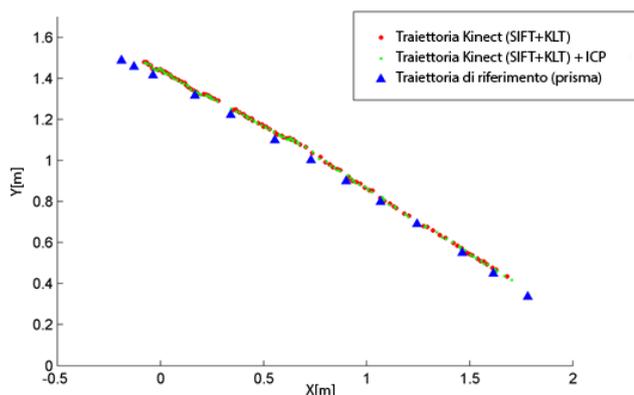


Figura 10. Traiettorie ricostruite con il Kinect a seguito del test cinematico. In rosso è riportata la traiettoria stimata utilizzando SIFT-KLT tracking, in verde la traiettoria corretta con l'algoritmo ICP. I triangoli blu rappresentano la traiettoria di riferimento acquisita tracciando la posizione del prisma retroriflettente con la stazione totale.

	X[m]	Y[m]	Z[m]
RMSe KLT-SIFT Kinect 2.0 trajectory	0,047	0,035	0,038
RMSe KLT-SIFT Kinect 2.0 trajectory +ICP correction [m]	0,046	0,030	0,029

Tabella 5. RMSe tra le soluzioni del Kinect (trasferite utilizzando il vettore di calibrazione) e la traiettoria di riferimento del prisma retroriflettente

5. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state discusse due soluzioni di navigazione, basate su un approccio fotogrammetrico integrato, da utilizzarsi in quegli ambienti dove, a causa della presenza di numerosi ostacoli, non è possibile effettuare il posizionamento con sistemi GNSS. Il problema del posizionamento in questi ambienti è stato declinato considerando sia il caso di ambienti outdoor che indoor, sviluppando soluzioni basate sulla fotogrammetria e l'integrazione di dati a essa complementari, applicabili rispettivamente in aree urbane e all'interno di edifici. Entrambe le soluzioni illustrate si sono dimostrate affidabili nella ricostruzione della traiettoria, anche se il calcolo della soluzione rimane strettamente legato alla possibilità di individuare almeno qualche punto di legame lungo la sequenza di immagini.

Per la navigazione in aree urbane si è dimostrato come la fotogrammetria (assistita dall'integrazione di qualche pseudo-osservazione GNSS) rappresenti una soluzione a basso costo che permette di georeferenziare un veicolo in movimento con un'accuratezza di pochi decimetri, qualora si disponga di una cartografia a larga scala aggiornata.

Per quanto concerne, invece, la navigazione indoor, l'impiego del sensore Microsoft Kinect ha chiaramente mostrato come

l'integrazione di immagini RGB e depth maps possa essere utile per superare i possibili problemi che potrebbero emergere utilizzando una soluzione puramente fotogrammetrica in ambienti caratterizzati da una tessitura uniforme. Il metodo proposto ha permesso di ricostruire la traiettoria con un errore di pochi centimetri. I risultati ottenuti possono essere migliorati utilizzando descrittore RGB-D, garantendo così una più profonda integrazione tra i dati acquisiti da sensori ottici attivi e passivi e, conseguentemente, buone prestazioni anche in situazioni particolarmente critiche. L'impiego di descrittori RGB-D può essere esteso anche alla navigazione outdoor; si potrebbe pensare, ad esempio, all'installazione sul veicolo di un laser scanner a basso costo (come un profilometro) o, qualora le distanze tra veicolo e oggetto ripreso siano inferiori a 4,5 m, all'impiego dello stesso sensore Kinect for XboxOne. Infatti, questa nuova versione del sensore può essere impiegata anche all'esterno, diversamente da quella precedente per la quale le misurazioni di distanza erano fortemente ostacolate dalla componente infrarossa della radiazione solare.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro illustrato e descritto all'interno del presente articolo è un estratto della mia tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Ambientale e delle Infrastrutture discussa nel marzo 2015 c/o Politecnico di Milano, sviluppata sotto la guida dei prof. Livio Pinto e prof. Riccardo Barzaghi. Parte del lavoro è stato svolto in collaborazione con il Dipartimento ICATeA dell'Università degli Studi di Parma. Si ringrazia poi anche l'unità di ricerca 3DOM della Fondazione Bruno Kessler per il supporto fornito durante lo sviluppo della soluzione di navigazione indoor.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Al-Hamad, A., El-Sheimy, N., 2014. Smartphones Based Mobile Mapping Systems. In: *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XL-5, Proceedings on the ISPRS Technical Commission V Symposium, Riva del Garda, Italy.
- Barzaghi, R., Carrion, D., Cazzaniga, N.E., Forlani, G., 2009. Vehicle Positioning in Urban Areas Using Photogrammetry and Digital Maps, Proceedings of the ENC-GNSS09, Napoli.
- Besl, J.P., McKay, H.D., 1992. A Method for Registration of 3-D Shape. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 14(2), pp.239-256.
- Böniger, U., Troncke, J., 2010. On the Potential of Kinematic GPR survey Using Self-Tracking Total Station: Evaluating System Crosstalk and Latency. *IEEE Transaction on Geoscienze and Remote Sensing*. Vol. 28, n. 10, pp. 3792-3798.
- Cazzaniga, N.E., Pagliari, D., Pinto, L., 2013. Fotogrammetria e GPS per posizionamento di veicoli dedicati al rilievo dei sottoservizi. *Bollettino SIFET*, n°1.
- Cazzaniga, N.E., Pagliari, D., Pinto, P., 2012. Photogrammetry for Mapping Underground Utility Lines with Ground Penetrating Radar in Urban Areas. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXIX-B1, Melbourne, Australia

- Chaplin B., 1999. Motion Estimation from Stereo Image Sequences for a Mobile Mapping System. Msc. Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- Chen, Y., Medioni, G., 1991. Object Modelling by registration of Multiple Range Images. *Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. vol. 3, pp. 2724-2729.
- Crosilla, F., Visentini, D., 1998. External Orientation of a Mobile Sensor via Dynamic Vision of Digital Map points. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*. 57(1), pp.41-60.
- Da Silva, J.F. de Oliveira Carmago, P., Gallis R. B. A., 2003. Development of a low-cost mobile mapping system: a South American experience. *The Photogrammetric Record*. Vol. 18 (101), pp. 5-26.
- Endres, F., Hess, J., Engelhard, N., Sturn, J., Cremer, D., Burgard, W., 2012. An Evaluation of RGB-D SLAM System. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. River Centre, Saint Paul, Minnesota.
- Eugster, H., Huber, F., Nebiker, S., and Gisi, A., 2012. Integrated georeferencing of stereo image sequences captured with a stereovision mobile mapping system – approaches and practical results. In: *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXIX-B1, pp. 309-314.
- Forlani, G., 1986. Sperimentazione del nuovo programma CALGE dell'ITM. In: *Bollettino SIFET*. No. 2, pp. 63-72
- Forlani G., Roncella R., Remondino F., 2005. Structure and motion reconstruction of short mobile mapping image sequences. *Proc. of the 7th Conf. On Optical 3D measurement techniques*. Vol I, pp. 265-274.
- Hassan, T., Ellum, C., El-Sheimy, N., 2006. Bridging land-based mobile mapping using photogrammetric adjustments. *ISPRS Commission I Symposium*. From Sensors to Imagery.
- Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, B., Walse, E., 2008. GNSS- Global Navigation Satellite Systems. *SpringerWeinNewYork*.
- Lowe, D., 2004. Distinctive Image Feature from Scale-Invariant. *International Journal of Computer Vision*. 60(2), pp. 91-110.
- Lucas, B.D., Kanade, T., 1981. An Iterative Registration Techniques with an Application to Stereo Vision, *Proceedings of 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. (IJCAI) 1981., pp. 674-679.
- MacGougan, G. D., 2003. High Sensitive GPS Performance Analysis in Degraded Signal Environments. M.Sc Thesis. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- Mautz, R. (2012). Indoor Positioning Technologies. Habilitation Thesis at ETH Zurich, 127 p, Swiss Geodetic Commission, Geodetic-Geophysical Reports of Switzerland, no. 86, ISBN 978-3-8381-3537-3.
- Mahfouz, M.R., Zhang, C., Merkl, B.C., Kuhn, M.J., Fathy, A. E., 2008. Investigation of High-Accuracy Indoor 3d Positioning Using UWB Technology. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 56 (6), June 2008.
- Oliver, A., Kong, S., Wünsche, B., MacDonald, B., 2012. Using the Kinect as a Navigation Sensor for Mobile Robotics. *Proceedings of the 27th Conference on Image and Vision Computing*, pp. 505-514.
- Ramos, F.T.; Nieto, J.; Durrant-Whyte, H.F., 2007. Recognizing and Modelling Landmarks to Close Loops in Outdoor SLAM. *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2036-204.
- Roncella, R., Re, C., Forlani, G., 2011. Comparison of two Structure from Motion Strategies. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, vol. XXXVIII, 5-W16.
- Roncella, R., Re, C., Forlani, G., 2011. Performance Evaluation of a Structure and Motion Strategy in Architecture and Cultural Heritage.. In: *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. ISPRS volume XXXVIII-5/W16.
- Roncella, R., Remondino, F., Forlani, G., 2005. Photogrammetric Bridging of GPS outages in mobile mapping. *Electronic Imaging*. pp.308-319.
- Storms, W., Shockley, J., Raquet, J., 2010. Magnetic Fields Navigation in Indoor Environment. *Proceeding of Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service*. (UPINLBS), pp 1-10.
- Takenga, C., Kyamakya, K., 2007. A low-cost Fingerprinting Positioning System in Cellular Networks. Second International Conference on Communications and Networking in China. CHINACOM'07, pp 915-920.
- Tao, C. V., Chapman, M. A., Chaplin, B. A., 2001. Automated Processing of Mobile Mapping Image Sequences. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. vol. 55, pp 330-346.
- Tomasi, C., Kanade, T., 1991. Detection and Tracking of Point Feature. Carnegie Mellon University Technical Report, CMU-CS-91-132, April 1991.
- Vaupel, T., Kiefer, J., Haimerl, S., Thielecke, J., 2010. Wi-Fi Positioning Systems Consideration and Devices Calibration. *2010 International Conference of Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*.
- Zhou, Y., Lui, W., 2007. Laser-Activated RFID-based Indoor Localization System for Mobile Robots. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome. Italy, 10-14 April.