

Sviluppo di un sistema UAV a basso costo per il monitoraggio del territorio

Ugo Coppa (*), Alberto Guarnieri (**), Nicola Milan (**), Antonio Vettore (**)

(* Osservatorio Vesuviano – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Napoli, coppa@ov.ingv.it

(**) CIRGEO-Centro Interdipartimentale di Geomatica, Università degli Studi di Padova, cirgeo@unipd.it

Sommario

In questa nota si presenta lo stato attuale dello sviluppo di un sistema di rilevamento aereo a basso costo basato su un elicottero radiocomandato a guida autonoma. Lo scopo principale di questo progetto è quello di realizzare un sistema di misura in grado di acquisire dati per la mappatura ed il monitoraggio del territorio, operando in zone difficilmente o per nulla accessibili agli attuali sistemi di rilevamento mobili (MMS) basati su veicoli ruotati.

Nella nota vengono presentate le varie fasi di sviluppo di questo sistema di rilevamento aereo autonomo, in particolare: il modello matematico di simulazione del volo, implementato in ambiente Matlab e finalizzato alla determinazione dei valori ottimali per i controlli dei servi, l'Helitrainer, una struttura in alluminio creata per eseguire i primi test di volo a guida autonoma in condizioni di massima sicurezza, infine i risultati preliminari ottenuti da test di volo libero eseguiti su apposito campo di calibrazione.

Abstract

In this paper we present the state-of-the art of the development of a low-cost aerial mapping system, based on a radiocontrolled model helicopter provided with autonomous flight capabilities. The system is designed to collect data for mapping and land monitoring purposes working on areas which represent a difficult task for already existing ground-based mobile mapping systems. The paper describes the various development stages of this autonomous aerial mapping system, namely: the flight simulation software, implemented in Matlab and aimed at the determination of the optimal setups for the servos, the Helitrainer, an aluminium structure used to perform initial autonomous flight tests in safety conditions, and finally the preliminary results of a test flight carried out on a suited calibration field.

1. Introduzione

I notevoli progressi intercorsi negli ultimi anni nel settore dei sistemi aerei a guida autonoma (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*), hanno accresciuto l'interesse verso questi sistemi per la realizzazione di applicazioni di tipo commerciale, industriale, scientifico e militare. Tipiche attività effettuate con UAV includono rilievi fotogrammetrici, ispezione di condutture (gasdotti, oleodotti, ecc.), controllo di dighe, mantenimento di infrastrutture, monitoraggio ambientale, rilevamento di incendi, osservazioni vulcaniche e così via. All'interno della categoria dei sistemi UAV, gli elicotteri rivestono un ruolo molto interessante, in quanto essendo in grado di eseguire decolli ed atterraggi verticali, stazionamenti in quota su punto fisso (*hovering*) e volo laterale, risultano adatti a svolgere molte attività per le quali i velivoli ad ala fissa presentano difficoltà operative.

D'altro canto le differenti caratteristiche di volo di un elicottero rispetto ad un aereo richiedono una maggiore attenzione da parte dell'operatore a terra per controllare manualmente il velivolo via

collegamento radio. In particolare sono necessarie elevate capacità di pilotaggio per mantenere l'elicottero in hovering su un punto prestabilito o per poter seguire una ben determinata traiettoria di volo. Un'ulteriore difficoltà è rappresentata dalla necessità di mantenere il velivolo sempre in vista al fine di poter valutare correttamente e controllare correttamente il suo orientamento istante per istante. Nel corso del tempo, queste problematiche hanno motivato la ricerca e lo sviluppo di sistemi di guida autonoma in grado sia di stabilizzare il velivolo (riducendo gli effetti delle vibrazioni della struttura e del vento, in particolare laterale), sia di consentire al medesimo di seguire una ben precisa traiettoria.

In aggiunta, gli sviluppi occorsi negli ultimi anni nel settore dei sistemi di navigazione assistita hanno portato alla realizzazione di dispositivi miniaturizzati che, integrando su un unico supporto GPS e unità inerziali basate su tecnologia MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*), consentono ai sistemi UAV di volare in modo completamente autonomo, anche su lunghe distanze. E' quindi ormai possibile integrare anche sugli aeromodelli sistemi di navigazione a basso costo, di piccole dimensioni e peso estremamente contenuto (dell'ordine del centinaio di grammi). Ovviamente la miniaturizzazione si paga in termini di riduzione delle precisioni ottenibili nel posizionamento e orientamento dell'aeromodello. Ciononostante, l'impiego di tali sistemi di navigazione autonoma consente di ottenere comunque risultati più precisi e affidabili rispetto ai dispositivi UAV pilotati manualmente (Eisenbeiss, 2007).

In questa nota si presenta lo stato attuale dello sviluppo di un sistema di rilevamento aereo a basso costo basato su un elicottero radiocomandato a guida autonoma. Lo scopo principale di questo progetto è quello di realizzare un sistema di misura in grado di acquisire dati per la mappatura ed il monitoraggio del territorio, operando in zone difficilmente o per nulla accessibili agli attuali sistemi di rilevamento mobili (MMS) basati su veicoli ruotati. In particolare si prevede di utilizzare l'elivolo su aree di estensione limitata (quali ad esempio cave, corsi d'acqua, terreni agricoli, zone soggette a piccole frane, ecc.), non solo per monitorare l'evoluzione del territorio ed registrare variazioni morfologiche a carattere locale, ma anche per individuare eventuali utilizzi irregolari delle risorse naturali (es. discariche abusive, coltivazioni illegali, ecc.).

2. Componenti del sistema di rilevamento

Il sistema in corso di realizzazione si basa su un elicottero per modellismo radiocomandato, Raptor 90 v2 (Figura 1), dotato di un dispositivo di navigazione autonoma costituito da una scheda di autopilotaggio Micropilot MP2128^{HELLI} (Figura 2). Questa scheda, caratterizzata da un ingombro ridotto (4cm x 10cm) ed un peso estremamente contenuto (solo 28 g), integra sullo stesso supporto un'unità GPS a 4Hz, una IMU (*Inertial Measurement Unit*) realizzata con tecnologia MEMS ed un altimetro a ultrasuoni, entrambi funzionanti a 5 Hz. Benchè la MP2128^{HELLI} consenta di eseguire in modo completamente automatico anche le fasi di decollo ed atterraggio, tali caratteristiche non sono state prese in considerazione per motivi di sicurezza. Il controllo in tempo reale dei parametri di volo, dei servi e dei sensori di misura si basa sulla ricezione di dati telemetrici attraverso un collegamento radio modem a 2.4GHz tra l'elicottero e la stazione base a terra. Quest'ultima è costituita da un PC portatile su cui è installato il software di controllo MicroPilot Horizon, tramite il quale l'operatore può impostare la traiettoria di volo (sottoforma di *waypoints*), visualizzare i punti di presa previsti su un'immagine di sfondo georeferenziata e caricare tutti i dati di volo necessari sulla scheda di autopilotaggio a bordo del velivolo.

Il sottosistema di visione è costituito da una coppia di fotocamere digitali Panasonic Lumix DMC-FX3 (Figura 3), montate su un apposito supporto posto sotto alla carlinga, tra i due pattini dell'elicottero. Le fotocamere sono inclinate verso il terreno e con assi ottici convergenti tra loro in modo da garantire una sufficiente sovrapposizione tra le immagini acquisite, operando ad una quota di volo massima prevista di 30-40 m. Ciascuna fotocamera è caratterizzata da una dimensione del sensore d'immagine CCD di 1/2.5" (see table 2), una risoluzione massima di 6 Megapixel ed una focale variabile tra 35 mm e 105 mm (35 mm equivalenti). Le camere sono inoltre dotate di

stabilizzatore d'immagine ottico (MEGA O.I.S., *Optical Image Stabilizer*), grazie al quale è possibile ridurre notevolmente gli effetti di mosso/sfocatura dell'immagine dovuti a vibrazioni indesiderate. Tramite un'apposita interfaccia, le Panasonic possono essere collegate alla MP2128^{HELI} ed essere quindi attivate automaticamente in corrispondenza di punti di presa predefiniti, consentendo quindi di realizzare veri e propri rilievi aerofotogrammetrici, seppure a bassa quota.



Figura 1 – Elimodello Raptor 90 v2.

Lunghezza fusoliera	1410 mm
Larghezza fusoliera	190 mm
Altezza	465 mm
Diametro rotore principale	1580 mm
Diametro rotore di coda	260 mm
Peso totale	4.8 kg

Tabella 1 – Caratteristiche principali del Raptor 90 v2.



Figura 2 – Scheda autopilot MP2128^{HELI}.



Figura 3 – Fotocamera Panasonic Lumix DMC-FX3.

3. Il sistema di simulazione

Al fine di evitare il più possibile eventuali danneggiamenti dell'elicottero, e dei sensori installati a bordo, nella fase di settaggio dei parametri di controllo dei servi da parte della scheda di *autopilot*, si è deciso inizialmente di sviluppare un ambiente di simulazione del volo dell'elimodello in Matlab/Simulink (Coppa et al., 2008). Per realizzare tale obiettivo è stata accuratamente modellata la dinamica del volo prendendo in considerazione gli effetti dei seguenti elementi: rotore principale, rotore di coda, la resistenza aerodinamica della fusoliera all'azione del vento laterale, gli impennaggi verticali ed orizzontali. Per quanto riguarda invece i servi è stata modellata l'azione dei seguenti controlli: collettivo del rotore principale, collettivo del rotore di coda, ciclico longitudinale e laterale del rotore principale ed il gas (giri del motore). Lo schema a blocchi completo del sistema di simulazione realizzato in Simulink è riassunto in figura 4. Qui il primo blocco modella i servi dell'elicottero, le cui uscite (comandi di volo) costituiscono l'input del secondo, che rappresenta la dinamica del velivolo. A sua volta tale blocco fornisce in uscita l'accelerazione di traslazione e la velocità angolare, relative al cosiddetto *body frame*, posizione e assetto inerziali. Questi parametri fungono quindi da input per il blocco di simulazione dei sensori di misura (GPS, IMU): a ciascun modello di sensore è stata aggiunta anche una sorgente di rumore allo scopo di simularne il reale funzionamento nel modo più verosimile possibile. L'uscita (rumorosa) di tale blocco costituisce lo stato del sistema che viene quindi elaborato da un filtro di Kalman esteso (EKF). Il risultato del filtraggio viene infine confrontato con una traiettoria di riferimento opportunamente generata sulla base delle specifiche tecniche dell'elicottero e delle fotocamere digitali (inclinazione e campo di vista). Dal confronto vengono determinati i nuovi valori da assegnare ai servi, necessari per correggere posizione e assetto in modo da mantenere il più possibile il volo lungo la traiettoria prestabilita.

Successivamente i risultati delle simulazioni effettuate sono stati sperimentalmente verificati, apportando anche alcune correzioni nei settaggi, eseguendo dei test di volo nel corso dei quali l'elicottero è stato mantenuto "vincolato" ad una struttura in acciaio fissa a terra, l'*Helitrainer* (Figura 5). Tale dispositivo consente al velivolo di muoversi in tutte le direzioni: sono possibili rotazioni attorno al proprio asse, spostamenti laterali, decollo ed atterraggio. Il solo moto di traslazione rettilineo si traduce necessariamente in una rotazione su una circonferenza attorno all'asse verticale dell'*Helitrainer*. Tramite tale struttura è quindi potenzialmente possibile operare l'UAV e modificare la configurazione dei servi in pressochè totale sicurezza, evitando danneggiamenti dovuti alla perdita di controllo del mezzo.

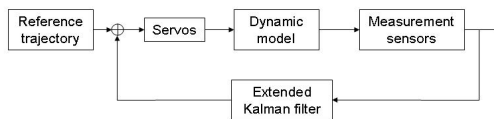


Figura 4 – Schema a blocchi del dispositivo di simulazione.



Figura 5 – L'*Helitrainer*.

4. Test e Risultati

Dopo la fase sperimentale di assemblaggio delle componenti e di taratura dei servi si è provveduto ad eseguire la calibrazione dell'intero sistema di rilevamento, passo necessario per poter stimare i parametri che definiscono le mutue relazioni tra i diversi sistemi di riferimento associati ai vari sensori di misura (GPS, IMU e fotocamere) e pervenire alla georeferenziazione delle immagini acquisite.

Non essendo ancora disponibile l'apposito alloggiamento per le fotocamere, da posizionare sotto alla carlinga, in questo test di volo preliminare è stata utilizzata una sola camera digitale con l'asse ottico diretto ortogonalmente verso il terreno.

4.1 Calibrazione del sistema

Inizialmente i parametri di orientamento interno (IOP) della fotocamera sono stati stimati tramite calibrazione in laboratorio con il software iWitness. Successivamente l'intero sistema è stato calibrato e validato utilizzando un *test field* realizzato presso la sede del Cirgeo, composto da una serie di target (40), bianchi e neri non retroriflettenti variamente disposti sul terreno (figura 6). La dimensione di queste mire (30 cm x 30 cm) è stata scelta in considerazione della massima quota operativa ammessa (30 m), limitata sia da ragioni di sicurezza sia dalla necessità di poter comunque

stabilire visivamente l'orientamento dell'elicottero anche se operante in modalità automatica. Le coordinate plano-altimetriche dei target sono state determinate nel *frame* WGS84, integrando tra loro misure GPS con quelle derivate da stazione totale. L'area di test è stata ricoperta con un blocco di tre strisciate, acquisendo le immagini ad una velocità di volo di circa 2m/s e con un tempo di scatto impostato a 1/1000s. Considerando che il test è stato eseguito ad una quota effettiva di 25 m, adottando la massima risoluzione d'immagine di 6 Megapixel nel formato 4:3, la dimensione a terra del pixel è risultata pari a 9 mm e l'area coperta da una singola immagine pari a 25 m x 19 m. Avedno imposto una sovrapposizione longitudinale del 60% e laterale del 20 %, l'intervallo di tempo tra diue acquisizioni successive è stato pari a 4 s. Tutti questi parametri di volo sono riassunti in figura 7.



Figura 6 – Il test field di calibrazione.

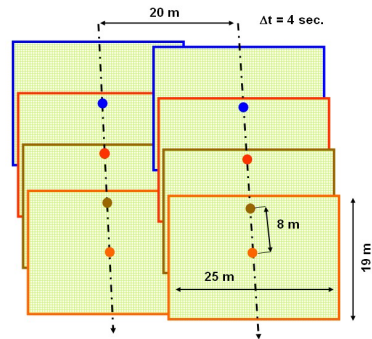


Figura 7 – Rappresentazione schematica del volo.

4.2 Elaborazione delle immagini

La procedura di triangolazione fotogrammetrica è stata effettuata in ambiente LPS (Leica Photogrammetry Suite), utilizzando i parametri di orientamento interno derivati da iWitness. Le posizioni approssimate della fotocamera, calcolate dal filtro di Kalman implementato all'interno della scheda Micropilot, sono state utilizzate come valori iniziali per la stima dell'orientamento esterno dei fotogrammi. Una parte dei target disposti sul terreno sono stati usati come punti di controllo (GCP) per la stima dei parametri di calibrazione del sistema complessivo, mentre i restanti (in particolare quelli meglio individuabili tra essi) sono stati usati come *check points* (CP) per valutarne le prestazioni in termini di precisione di georeferenziazione delle *features* selezionate sulle immagini. I risultati ottenuti sono riportati in tabella 2.

Il basso livello di precisione ottenuto è dovuto principalmente ai seguenti fattori: eccessive vibrazioni residue non compensate dallo stabilizzatore ottico delle fotocamere Panasonic, il livello medio di risoluzione delle immagini acquisite e la precisione di posizionamento del ricevitore GPS, integrato sulla scheda Micropilot, che ha operato in modalità *standalone* anziché in differenziale.

Precisione dei Punti di Controllo (RMSe)	
Planimetria (m)	0.08
Altimetria (m)	0.15

Tabella 2 – Risultati della triangolazione aerea sui *check points*.

5. Conclusioni

In questa nota è stato presentato lo stato attuale dello sviluppo di un sistema UAV finalizzato all'esecuzione di rilievi aerofotogrammetrici da bassa quota per scopi di monitoraggio del territorio. L'UAV è composto da un elicottero radiocomandato dotato di scheda Micropilot per la guida automatica lungo traiettorie di volo predefinite e di una coppia di fotocamere digitali a media risoluzione. In considerazione delle capacità di volo di un elicottero e quindi della possibilità di essere impiegato in aree di difficile accesso, il sistema presentato si configura come un interessante strumento di rilevamento complementare ai sistemi di mobile terrestri (MMS) già esistenti. Benché i risultati ottenuti da un primo volo di test non siano soddisfacenti, lo sviluppo del sistema è ancora in corso e quindi miglioramenti possono essere sicuramente introdotti soprattutto per quanto riguarda le prestazioni del sistema di navigazione e la riduzione delle vibrazioni nell'alloggiamento delle fotocamere.

Riferimenti Bibliografici

- Bendea H. F., Chiabrando F., Tonolo F. G., Marenchino D. (2007). "Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV: the Augusta Bagiennorum Test site". *XXI International CIPA Symposium*, Atene.
- Coppa U., Guarnieri A., Pirotti F., Vettore A. (2008). "Accuracy enhancement of unmanned helicopter positioning with low cost system", XXIth ISPRS Congress, Pechino.
- Coppa U., Guarnieri A., Pirotti F., Vettore A. (2009). "Autonomous model helicopter for mobile mapping applications: first results", *Proc. of 6th Symposium on Mobile Mapping Technology*, Presidente Prudente, San Paolo, Brasile.
- Eisenbeiss H. (2004). "A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition". *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI-5/W1, su CD-ROM.
- Eisenbeiss H., Lambers K. and Sauerbier M. (2005). "Photogrammetric recording of the archaeological site of Pinchango Alto (Palpa, Peru) using a mini helicopter (UAV)". *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV-5/C34, 238- 243.
- Eisenbeiss H. (2007). "Applications of photogrammetric processing using an autonomous model helicopter". *Revue Francaise de Photogrammetrie et de Teledetection. Symposium ISPRS Commission Technique I "Des capteurs a l'Imagerie"*, n°185 (2007-1), Saint-Mande Cedex, Francia.
- Horcher A., Visser R.J.M. (2004). "Unmanned aerial vehicles: Applications for natural resource management and monitoring". *Proc. of COFE (Council on Forest Engineering) Annual Meeting 2004*.