

## **Procedure per la progettazione del piano di volo per rilievi fotogrammetrici da UAV con autopiloti ardupilot e wookong**

G. Caroti, W. Giagoni, A. Piemonte

Laboratorio A.S.T.R.O., Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale, Università di Pisa, Largo Lucio Lazzarino 1, 56123 PISA, tel 050 221 7770, fax 050 221 7779, e-mail gabriella.caroti@dic.unipi.it

### **Riassunto**

Il Laboratorio A.S.T.R.O. del Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Pisa sta sviluppando, nell'ambito del progetto PRIN2010 diversi sistemi di rilievo fotogrammetrico da velivoli senza pilota. In particolare, in collaborazione con la ditta CAM (Costruzioni Aero Meccaniche) di Pisa, ha testato su aerei e multi rotori due sistemi di autopilota e stabilizzazione dei velivoli: l'Ardupilot e il WooKong. Per effettuare un corretto rilievo fotogrammetrico sono stati implementati degli algoritmi per la compilazione dei piani di volo negli standard richiesti dalle due diverse piattaforme. Nel presente lavoro vengono descritti questi standard e gli algoritmi sviluppati per la definizione progetto fotogrammetrico a partire dalla definizione su Google Earth del poligono da rilevare e dalle caratteristiche del prodotto finale richiesto e dei sensori installati a bordo dei velivoli.

### **Abstract**

The ASTRO Laboratory of the Department of Civil and Industrial Engineering, University of Pisa is developing different systems of photogrammetric survey from unmanned aircraft, as part of PRIN2010. In particular, in cooperation with Pisa firm CAM (Costruzioni Aero Meccaniche – Aero-Mechanical Construction), ASTRO tested two systems of autopilot and stabilization of the aircraft (Ardupilot and WooKong) on planes and multi rotors. In order to carry out a proper photogrammetric survey new algorithms have been implemented for the compilation of flight plans in the standards required by the two different platforms. The present work describes these standards and the relevant algorithms for the compilation of the photogrammetric project, starting from the definition on Google Earth of the polygon to be detected and the characteristics of the required final product and of on-board sensors.

### **Introduzione**

Il Laboratorio A.S.T.R.O. è impegnato da alcuni anni, prima nell'ambito del PRIN2008 ed ora del PRIN2010, nella sperimentazione di rilievi metrici speditivi del territorio da attuare nella gestione delle emergenze. In particolare, una delle linee di ricerca seguite è quella riguardante il rilievo da drone. In tal senso è stata avviata dal Laboratorio una collaborazione con l'azienda CAM (Costruzioni Aero Meccaniche) avente sede a Pisa, per lo sviluppo di prototipi di velivoli orientati principalmente al rilievo di tipo fotogrammetrico. La scelta di sviluppare dei prototipi e di non affidarsi alle soluzioni già esistenti e presenti sul mercato è stata dettata dalla volontà di gestire dei sistemi più facilmente modificabili per le variegate esigenze, che le diverse tipologie di rilievo richiedono.

Si sta procedendo a sviluppare due diverse piattaforme: un sistema ad ala fissa ed un multi rotore. Questi due sistemi sono orientati a due diversi ambiti operativi, il primo più adatto al rilievo del territorio per la restituzione di medie e grandi scale di aree medio-grandi, il secondo focalizzato al rilievo di piccole porzioni di territorio e la restituzione di grandi e grandissime scale.

Tutti gli Aerei a Pilotaggio Remoto (APR), così come vengono definiti nella bozza di regolamento dell'ENAC, sono dotati di un sistema di autopilota. Tale sistema, oltre a permettere in alcuni casi la realizzazione di missioni di volo autonome preimpostate, ha la primaria funzione di provvedere alla

stabilizzazione del velivolo sia nelle fasi di volo autonomo che in quelle in cui l'operatore agisce sul sistema tramite il radiocomando.

I sistemi di autopilota utilizzati dai prototipi sviluppati a Pisa sono l'Ardupilot Mega (progettato su piattaforma open source Arduino) nelle due versioni per elicotteri e per aerei ed il sistema WooKong M Waypoint della DJInnovation.

Entrambe le soluzioni non dispongono, però, di efficienti procedure integrate per la progettazione di un piano di volo dedicato alle prese fotogrammetriche. Si è reso quindi necessario predisporre questi piani di volo tramite delle procedure esterne ed importarli nei sistemi di autopilota tramite gli standard opportuni. Viene, quindi, riportata la sequenza di operazioni condotte e le equazioni utilizzate per produrre i file standard di impostazione dei piani di volo.

### Definizione dell'area da rilevare

Per compilare il piano di volo bisogna innanzitutto individuare l'area da rilevare. Per le caratteristiche di fruibilità, completezza ed integrabilità, la piattaforma Google Earth è stata individuata come l'ambiente più opportuno in cui definire il perimetro dell'area da rilevare. Come è noto, Google Earth è un software liberamente accessibile, che genera un mappamondo virtuale utilizzando immagini satellitari, fotografie aeree e dati topografici memorizzati in una piattaforma GIS. Nelle principali città, e in quasi tutte le parti del pianeta, il programma è in grado di mostrare immagini con una risoluzione spaziale inferiore al metro quadrato.

In particolare di questa piattaforma si sfrutta la sintassi del linguaggio KML (*Keyhole Markup Language*). Esso usa una struttura basata su *tag* con elementi e attributi nidificati e permette, una volta definiti nell'interfaccia grafica di Google Earth, punti, linee e poligoni, di esportarli in un file ASCII standard (Fig.1).

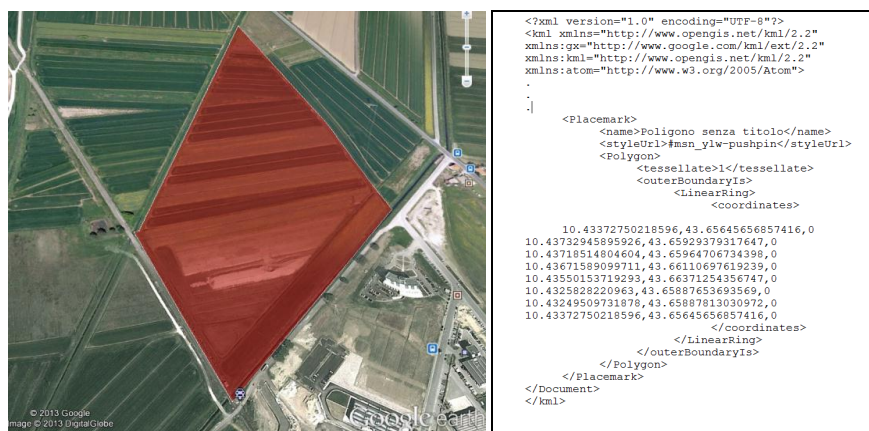


Figura 1. Definizione dell'area di rilievo in Google Earth ed esportazione del file KML.

Il file KML così creato è quindi utilizzabile come input delle procedure sviluppate per la stesura del progetto fotogrammetrico e la definizione del piano di volo.

### Progetto fotogrammetrico

Come in un qualsiasi rilievo fotogrammetrico bisogna partire dalla scala di restituzione ( $S_r$ ), che si vuole ottenere. Fissata la scala si ottiene il GSD (*Ground Sample Distance*) teorico, ovvero il valore massimo della dimensione dell'impronta del singolo pixel a terra, come prodotto di  $S_r$  per lo spessore convenzionale del tratto grafico (0.2mm). Volendo, ad esempio, ottenere una restituzione in scala 1:50 l'impronta del singolo pixel a terra potrà avere una dimensione massima di 1cm.

Scelta, quindi, la camera fotografica ed il relativo obiettivo da utilizzare, restano fissati le dimensioni in mm ed in pixel del sensore (rispettivamente  $D_x$ ,  $D_y$  e  $d_x$ ,  $d_y$ ) e la distanza focale  $f$ .

Riferendosi, ad esempio, alla fotocamera *full frame* reflex Nikon D700, utilizzata nei nostri primi rilievi test, essa ha una dimensione fisica del sensore in rapporto 1:1 con la pellicola fotografica ( $D_x=36\text{mm}$  e  $D_y=24\text{mm}$ ) e la dimensione in pixel pari  $d_x=4256\text{px}$  e  $d_y=2832\text{px}$ . Tramite la [1] si determina quindi la massima quota di volo  $H$  che permette di ottenere il GSD teorico calcolato.

$$H = \frac{f \cdot d_x}{D_x} \cdot \text{GSD} \quad [1]$$

Per ottenere delle stereo coppie adatte alla restituzione tridimensionale si stabiliscono, ipotizzando il terreno pianeggiante, dei valori di sovrapposizione longitudinale  $\eta=0.6-0.7$  (60%-70%) e trasversale  $\varepsilon=0.1-0.3$  (10%-30%). Con tali valori si determinano, tramite la [2], la base di presa  $B$ , ovvero la distanza fra i singoli punti di presa lungo una strisciata, e l'interasse fra le strisciate  $I$ . Ipotizzando di considerare la presa nadirale ed il lato corto del sensore CCD parallelo alla direzione della strisciata di volo:

$$B = \frac{H \cdot D_y}{f} \cdot (1 - \eta)$$

$$I = \frac{H \cdot D_x}{f} \cdot (1 - \varepsilon) \quad [2]$$

Infine, fissata la velocità ideale del velivolo si determina tramite la [3] l'intervallo di scatto  $\Delta t$  da impostare sulla fotocamera.

$$\Delta t = \frac{H \cdot D_y}{v \cdot f} \cdot (1 - \eta) \quad [3]$$

Il valore di  $\Delta t$  ottenuto sarà sicuramente un numero non intero. I software standard integrati nelle fotocamere permettono di impostare una temporizzazione di una serie di scatti secondo intervalli di tempo impostabili come multipli interi del secondo. Il  $\Delta t$  calcolato rappresenta il massimo valore dell'intervallo che permette di ottenere il valore minimo di sovrapposizione fra fotogrammi contigui stabilito. A favore di sicurezza viene scelto il valore intero in secondi minore e più vicino al valore reale calcolato. Resta, quindi, fissato anche un nuovo valore di  $B$ .

Tutte queste relazioni sono state implementate in un programma Matlab ed è stata predisposta una GUI (*Guided User Interface*) per facilitare l'immissione e la gestione dei parametri che regolano il progetto fotogrammetrico (Fig.2).



Figura 2. GUI per il progetto fotogrammetrico.

### Progetto del piano di volo

I velivoli ad ala fissa volano grazie alla portanza sviluppata dalle ali. Questo favorisce una notevole autonomia, dato il minor consumo energetico, ma crea svantaggi in fase di virata in quanto si ha la necessità di ampi spazi per far sì che l'aereo, dopo tale virata, si reindirizzi nella corretta traiettoria. Considerato che le strisciate fotogrammetriche seguono traiettorie rettilinee parallele e che il drone ad ala fissa ha necessità di ampi spazi di virata e di riposizionamento in traiettoria, nel progetto di volo, oltre alla determinazione dei centri di scatto, è stato necessario determinare ulteriori punti, esterni all'area strettamente da rilevare, che permettano all'aereo di arrivare all'inizio delle strisciate già allineato con esse.

I multi rotore, invece, non hanno simili problemi di virata, in quanto possono cambiare l'azimut della prua restando in *hovering* su di un punto. Questo comporta che il piano di volo non dovrà prevedere in questo caso dei punti esterni all'area del rilievo.

Bisogna poi considerare che la bozza della normativa ENAC, che dovrebbe a breve essere emanata definitivamente, limita l'altezza di volo a 70m rispetto alla quota del terreno sottostante. Questo implica il fatto che, qualora l'altezza di volo calcolata tramite le equazioni fotogrammetriche fosse superiore a quella consentita, il progetto di volo viene elaborato rispettando l'altezza imposta dalla normativa. Come conseguenza, un'eventuale restrizione della quota di volo, porta ad un aumento del numero dei fotogrammi e delle strisciate rispetto quelle strettamente necessarie senza vincoli.

Dall'elaborazione del piano di volo si ottengono in output una serie di punti, definiti dalle proprie coordinate geografiche WGS84, che costituiscono i punti teorici di presa fotografica. Questi punti, assieme ai poligoni rappresentanti l'impronta a terra del fotogramma, anch'essi derivanti dall'elaborazione del piano di volo, possono essere definiti nuovamente tramite lo standard KML e visualizzati su Google Earth (Fig.3). In questo modo si ha un riscontro del buon esito della procedura adottata e si ha una visualizzazione qualitativa della distribuzione teorica dei fotogrammi sull'area da rilevare.



Figura 3. Visualizzazione della distribuzione teorica delle strisciate e dei fotogrammi.

Inizialmente, ogni centro di presa veniva considerato come un *waypoint* del piano di volo (Fig.4). Questo perché si pensava di associare ad ogni punto raggiunto l'azionamento di un servo comando che andasse a realizzare la fotografia. Si è però sperimentato in seguito che è molto più efficiente fornire al velivolo la traiettoria dove si trovano i centri di presa di progetto ed impostare un intervallo fisso di tempo per lo scatto automatico in serie della fotocamera.



Figura 4. Esempio su Arduplane dove ogni centro di prese costituisce un waypoint.

Per impostare il piano di volo sono stati individuati, nell'insieme complessivo dei centri di presa, quelli che, in particolare, definiscono i due estremi delle singole strisciate e, di conseguenza, la direzione che il velivolo deve seguire durante le prese fotografiche. Bisogna sottolineare però che il velivolo non è sempre in grado di compiere il percorso fra un *waypoint* e l'altro in modo perfettamente rettilineo. Le motivazioni di un comportamento simile sono spesso dovute alla presenza di vento. Nel caso, quindi, che le singole strisciate siano molto lunghe, si è visto che è consigliabile aggiungere alcuni ulteriori *waypoint* intermedi per vincolare maggiormente la traiettoria del velivolo. Verrebbe da pensare, quindi, di inserire direttamente tutti i centri di presa calcolati. In tale direzione si sono fatte delle prove, che però non hanno sempre avuto un esito soddisfacente. Ad ogni *waypoint* è associata, infatti, una tolleranza con cui il velivolo deve passare per il *waypoint* stesso. Se, durante il passaggio, la distanza del velivolo dal punto supera la tolleranza, il velivolo torna indietro per ritentare il passaggio corretto. Ovviamente, un tale comportamento comporta sia un'irregolarità delle prese lungo la strisciata sia un allungamento del tempo di missione. Vista la limitata autonomia di volo che hanno attualmente i velivoli, soprattutto se si tratta di multi rotor, è preferibile evitare una tale evenienza e quindi limitare il numero di punti, che definiscono il piano di volo.

Definiti, quindi, i *waypoint* necessari, sono stati compilati i file ASCII in formato standard, che permettono di importare il piano di volo nel sistema di autopilota.

Per quanto riguarda l'ArduPilot il file di testo da creare deve semplicemente riportare in forma tabellare i singoli *waypoint* con le rispettive etichette e coordinate tridimensionali. Per il sistema WooKong, con cui sono equipaggiati i multi rotor sviluppati, va compilato invece un particolare standard (Fig.6). Il file ASCII da creare ha estensione *\*awm* e presenta una struttura a *tag* contenente tutti i dati utili a definire i *waypoint* (*latitude*, *longitude*), la quota relativa di volo (*altitude*), le velocità verticale ed orizzontale massime (*speedlimit*), la modalità di raggiungimento dei punti (*start\_to\_end*) e di virata (*turnmode*) e l'azimut che deve avere la prua del velivolo (*yawdegree*). Inoltre, lo stesso file contiene le informazioni relative agli eventi legati al raggiungimento del singolo *waypoint*, che possono essere pilotati dal controller. In particolare può essere definito un tempo di stazionamento sul punto (*holdtime*), il ritardo, il numero di serie ed il numero di eventi per serie (*startdelay*, *period* e *repeattime*)

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-16" standalone="yes"?>
<Mission MissionTimeLmt="65535" IsPatrol="Start_to_End"
StartWayPointIndex="0" VerticalSpeedLimit="5">
  <WayPoint id="0">
    <Latitude>43.8197368639889</Latitude>
    <Longitude>10.8036710166667</Longitude>
    <Altitude>70</Altitude>
    <Speed>3</Speed>
    <TimeLimit>36000</TimeLimit>
    <YawDegree>64</YawDegree>
    <HoldTime>0</HoldTime>
    <StartDelay>0</StartDelay>
    <Period>1</Period>
    <RepeatTime>1</RepeatTime>
    <RepeatDistance>0</RepeatDistance>
    <TurnMode>StopAndTurn</TurnMode>
  </WayPoint>
  <WayPoint id="1">
    <Latitude>43.8199863833333</Latitude>
    <Longitude>10.8044156583333</Longitude>
    <Altitude>70</Altitude>
    <Speed>3</Speed>
    <TimeLimit>36000</TimeLimit>
    <YawDegree>64</YawDegree>
    <HoldTime>0</HoldTime>
    <StartDelay>0</StartDelay>
    <Period>1</Period>
    <RepeatTime>1</RepeatTime>
    <RepeatDistance>0</RepeatDistance>
    <TurnMode>StopAndTurn</TurnMode>
  </WayPoint>
</Mission>
```

Figura 6. Sintassi standard (file \*.awm) per i piani di volo del sistema WooKong.

## Bibliografia

- DJInnovation (2013), "WooKong Multi-Rotor User Manual v.3.6 2013/01/30 Revision"
- DIYDrones (2013), "ArduPlane 2.74 WIKI", <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/home?tm=6> (last access 15/07/2013)

## Ringraziamenti

Si ringrazia la CAM per il supporto nelle fasi operative di rilievo e sperimentazione.