

Proposta metodologica per la progettazione di traiettorie di avvicinamento ed atterraggio aereo CDA supportata da analisi spaziale in ambiente GIS

Vittorio Di Vito^(a), Angela Errico^(a), Claudio Parente^(b), Giovanni Petruzzi^(b)

(a) Dipartimento di Sostenibilità del Trasporto Aereo, Centro Italiano Ricerche Aerospaziali (CIRA), Via Maiorise, 81043 Capua (CE), tel. +39 0823 623950,
e-mail v.divito@cira.it; a.errico@cira.it

(b) Dipartimento di Scienze e Tecnologie, Università degli Studi di Napoli "Parthenope", Centro Direzionale di Napoli, 80143 Napoli, tel. +39 081-5476608,
e-mail claudio.parente@uniparthenope.it; giovanni.petruzzi.90@gmail.com

Riassunto

La tecnica del *Continuous Descent Approach (CDA)* consente di eseguire una traiettoria di volo ottimizzata che, nella fase di avvicinamento ed accesso all'aeroporto, non presenta o riduce al minimo i segmenti di volo livellato. In tal modo diviene possibile ridurre il consumo di carburante e le emissioni. La definizione delle traiettorie richiede che si tenga adeguatamente conto dei vincoli ambientali esterni che limitano le operazioni aeroportuali, quali, ad esempio, gli ostacoli costituiti dagli edifici più alti o dalle montagne situate vicino all'aeroporto, i confini nazionali adiacenti alla *Terminal Manoeuvring Area (TMA)* e gli spazi aerei militari vicino o le prenotazioni dello spazio aereo destinate a necessità militari. Un valido supporto per la mappatura degli ostacoli e la ricerca degli spazi percorribili può essere fornito dai GIS.

In questo articolo viene descritta una proposta metodologica per la progettazione di traiettorie di avvicinamento ed atterraggio aereo basate sull'approccio CDA, con particolare attenzione alle possibilità operative fornite dalle funzioni GIS. La mappatura degli ostacoli viene eseguita in ambiente GIS tenendo conto dei vincoli da rispettare: utilizzando grafici aeronautici opportunamente vettorializzati e georiferiti, Modelli Digitali del Terreno (DTM) e della superficie (DSM), vengono generate automaticamente traiettorie che rimangono, con opportune distanze di sicurezza, nei limiti dello spazio aereo fruibile. La metodologia proposta è validata sull'area aeroportuale di Napoli Capodichino. I risultati confermano l'efficienza dell'approccio adottato, ovvero dimostrano come sia possibile progettare traiettorie CDA, garantendo un significativo risparmio del carburante e quindi una riduzione delle emissioni.

Abstract

Continuous Descent Approach (CDA) allows to perform an optimized flight trajectory that cancels or minimizes level flight segments when approaching and accessing the airport. This approach reduces fuel consumption and emissions. The definition of trajectories requires to consider external environmental constraints that limit airport operations, such as obstacles like

high buildings or mountains near the airport, national boundaries adjacent to the Manoeuvring Area Terminal (TMA) and nearby military air spaces or airspace reservations destined for military needs. Good support for mapping obstacles and searching accessible spaces can be provided by GIS.

This article describes a methodological proposal for the design of approach and landing trajectories based on the CDA, with particular attention to the operational possibilities provided by the GIS functions. Obstacle map is carried out in GIS environment, taking into account the constraints to be observed: by using appropriately vectorized and geo-referred aerodynamic charts, DTMs and DSMs, automatically generated trajectories remain, with appropriate safety distances, within the limits of the available airspace. The proposed methodology is validated on the airport area of Naples Capodichino. The results confirm the efficiency of the approach adopted, in other words they demonstrate how it is possible to design CDA trajectories, ensuring a significant fuel saving and therefore a reduction in emissions.

Introduzione

In virtù delle loro prerogative derivanti dalla strutturazione dell'informazione basata sul principio della georeferenziazione, i Sistemi Informativi Geografici (GIS), fornendo ampie possibilità operative per la delineazione di scenari predittivi e valutativi, la modellazione 3d e la realizzazione di analisi spaziali anche particolarmente complesse, hanno assunto oramai da tempo il ruolo di strumenti potenti ed efficaci per affrontare problematiche scientifiche, tecniche e pratiche. Gli approcci metodologici proposti dal mondo accademico e non, sono molteplici e in continuo divenire. Basti pensare, ad esempio, alla introduzione della variabile temporale che ha prodotto la modifica del tradizionale approccio statico portando alla definizione di nuovi modelli spazio-temporali ampiamente descritti in letteratura (Pelekis et al., 2004; Ott, Swiaczny, 2001), capaci di cogliere le dinamiche evolutive del territorio e dell'ambiente (Gebbertc, Pebesma, 2014).

L'utilizzo dei GIS non è rimasto estraneo al settore aeronautico: essi si prestano anche per scopi formativi e possono essere utilizzati come strumento per agevolare il processo di familiarizzazione con immagini e video concernenti aeroporti e piste di atterraggio per i piloti destinati agli aeroporti più importanti individuati dalla statunitense Federal Aviation Administration's (FAA) (Zimmer et al, 2007). Molteplici sono le applicazioni per lo studio dell'impatto ambientale connesso alla realizzazione, gestione e potenziamento di aeroporti: le simulazioni numeriche per generare scenari "*what-if*" trovano un utile ambiente di lavoro nei GIS che forniscono anche un mezzo per visualizzare e comunicare i risultati delle analisi condotte; un interessante esempio di integrazione tra il modello gaussiano di diffusione degli inquinanti in atmosfera e le funzioni GIS è costituito da uno studio svolto per l'aeroporto internazionale di Atene (Theophanides, Anastassopoulou, 2009). Non mancano applicazioni per l'ottimizzazione del flusso aereo per i voli di arrivo e di partenza da un aeroporto, garantendo adeguati standard di sicurezza (Rong, Songchen, 2005). Questo articolo è volto ad illustrare le possibilità di impiego delle funzioni GIS per mitigare l'impatto connesso alle procedure di avvicinamento e atterraggio degli aerei. In particolare si dimostra come sia possibile utilizzare la

modellazione 3d per supportare la scelta di percorsi alternativi al tradizionale *step-down*: l'utilizzo di DSM (*Digital Surface Model*) permette di individuare, e quindi evitare, gli ostacoli alla navigazione aerea, così da definire la fattibilità di un approccio discendente continuo (*Continuous Descent Approach, CDA*), grazie al quale un tipico aereo commerciale con motore a jet può volare in fase di discesa con minima spinta motore, risparmiando carburante e quindi limitando le emissioni inquinanti.

L'articolo è organizzato nel seguente modo. Dopo l'introduzione al CDA, si descrive la metodologia proposta per la realizzazione di curve continue discendenti basate sull'impiego congiunto dei software MatLab e ArcGIS. Si passa poi alla presentazione del caso studio relativo all'Aeroporto di Napoli Capodichino. Alle conclusioni è affidato il compito di evidenziare l'efficacia dell'approccio proposto e la possibilità di impiego dello stesso in riferimento a qualsiasi altra realtà aeroportuale.

Continuous Descent Approach

Nel documento della International Civil Aviation Organisation ICAO 9931, le operazioni discendenti continue (*Continuous Descent Operations, CDO*) sono definite come una tecnica operativa che permette di eseguire una traiettoria di volo ottimizzata, volta a ridurre il consumo di carburante e quindi le emissioni; questo importante risultato si può ottenere implementando il CDO in un opportuno spazio aereo, tramite appropriate autorizzazioni ATC (*Air Traffic Control*) e implementando il settaggio minimo della spinta motore. La traiettoria ottimale risulta continua discendente, con un numero minimo di segmenti di livelli di volo, che risultano necessari solo per configurare il velivolo o stabilizzarsi su un sistema guidato per l'atterraggio.

Nella figura 1 è evidente la differenza tra l'approccio tradizionale *step-down* e quello CDA.

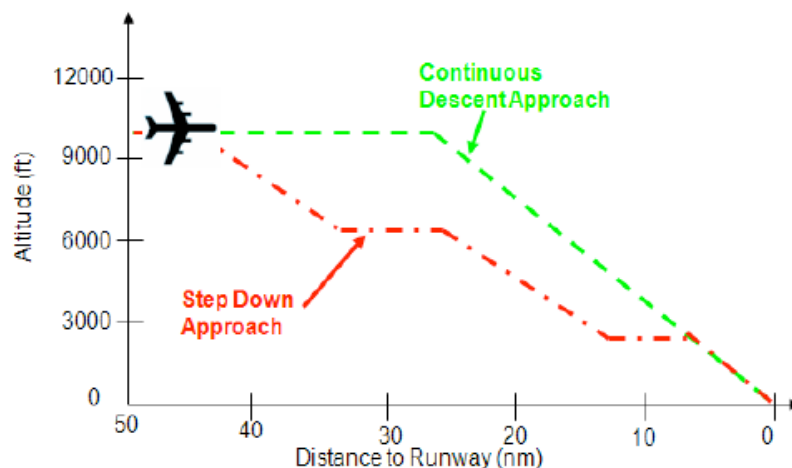


Figura 1 – Confronto tra traiettorie ottenute da Step Down Approach e Continuous Descent Approach (fonte: Alam et al, 2010)

Il CDA è tuttora oggetto di ricerca e di approfondimento in ambito internazionale, soprattutto europeo e statunitense. In molti progetti vengono mostrati i benefici del CDA, come l'abbattimento del rumore, il miglioramento

della durata del volo (in termini di ritardo), la riduzione del consumo di carburante e delle emissioni di gas (AIRE, 2011; ERAT, 2012).

La proposta metodologica

L'obiettivo del sistema sviluppato è quello di generare e confrontare traiettorie *CCDA (Curved Continuous Descent Approach)* a partire da traiettorie standard prefissate, ricalcolare ogni traiettoria per evitare una potenziale collisione con gli ostacoli, valutarne il consumo di carburante mediante il modello dell'energia totale *BADA Total Energy Model (TEM)*, ed infine scegliere tra queste, in maniera automatica, quella considerata ottimale in termini di riduzione del consumo di carburante. In questo articolo si prendono in esame gli aspetti metodologici relativi alla prima parte del sistema realizzato, riguardante la generazione delle traiettorie e la mappatura degli ostacoli. Il sistema è basato sull'utilizzo del software MATLAB per l'implementazione degli algoritmi di generazione e valutazione delle traiettorie, mentre la mappatura degli ostacoli è effettuata tramite il software ArcGIS 10.3.

L'algoritmo prevede che vengano assegnati i seguenti parametri:

1. il set di angoli di discesa consentiti e le relative tipologie CDA;
2. la minima area di rispetto dagli ostacoli;
3. le coordinate ed i parametri della pista (scenario);
4. il passo di discretizzazione della traiettoria.

In particolare gli input sono dati dalle procedure di arrivo standard (STAR) e la navigazione P-RNAV pubblicate sulla circolare informativa aeronautica (AIC), considerando le restrizioni come la velocità e la distanza minima dagli ostacoli. Gli ostacoli alla navigazione comprendono anche gli edifici e le zone di restrizione dello spazio aereo considerato, e vengono identificati e classificati attraverso i modelli digitali della superficie.

La minima area di rispetto dagli ostacoli viene fornita dal punto di vista planimetrico come distanza orizzontale dagli ostacoli, e altimetrico come distanza verticale secondo la normativa ICAO.

Le coordinate della pista sono impostate in base allo scenario prescelto e fanno parte dei vincoli spaziali che la traiettoria deve rispettare.

Sulla base dei suddetti dati, acquisiti ed elaborati, il sistema genera come prima traiettoria la discesa convenzionale di riferimento basata sulla tecnica *step-down* utilizzando i *waypoint* fino ad intercettare il sistema ILS a 3,5 gradi.

Il passo di discretizzazione della traiettoria è il passo con il quale l'algoritmo genera e valuta i punti della traiettoria; esso è variabile e viene impostato in funzione dello scenario. Al variare dell'angolo di *glide path*, il sistema CCDA genera automaticamente un insieme di diverse discese continue.

Le variabili di input dell'algoritmo, invece, sono le seguenti:

- a. i punti in 3D della traiettoria standard di riferimento;
- b. l'altitudine nel punto finale;
- c. le coordinate dei possibili ostacoli alla navigazione.

I punti 3D della traiettoria standard di riferimento servono per creare una base spaziale per lo sviluppo della traiettoria CCD.

L'altitudine nel punto finale è il valore di altitudine che l'algoritmo assegnerà all'ultimo punto della traiettoria (potrebbe essere l'altitudine della pista nel caso in cui la traiettoria finisca sul THR della pista).

Le coordinate dei possibili ostacoli alla navigazione servono a valutare la fattibilità della traiettoria CCDA generata. In caso di potenziale collisione con gli ostacoli, l'algoritmo esegue automaticamente manovre correttive identificando le intercettazioni tra piano contenente la traiettoria e il buffer degli ostacoli e circumnavigando l'ostacolo con il percorso minimo. La nuova traiettoria viene controllata iterativamente per identificare altre possibili collisioni.

L'algoritmo per la generazione della traiettoria fornisce in output le seguenti variabili:

- numero e posizione delle collisioni con gli ostacoli alla navigazione;
- i punti 3D ed i parametri delle diverse tipologie di traiettoria CDA;
- i punti 3D ed i parametri della traiettoria standard.

Per individuare e classificare gli ostacoli attinenti alla traiettoria CCDA, occorre acquisire i DSM e i DTM con una risoluzione geometrica adeguata allo scenario analizzato. Nelle vicinanze dell'aeroporto considerato la risoluzione geometrica deve essere elevata, poiché in questa zona l'aeromobile sarà maggiormente esposto a potenziali ostacoli, a causa delle minori altezze di volo.

La creazione della mappa degli ostacoli alla navigazione viene realizzata in ambiente GIS a partire dalle informazioni planoaltimetriche. In particolare la comparazione tra DSM e DTM permette di individuare l'altezza dei manufatti (edifici, torri, ecc.) che possono costituire potenziali impedimenti per il volo aereo. I pixel classificati come ostacoli alla navigazione vengono trasformati in punti 3D e, tenendo conto delle distanze di sicurezza previste dalla normativa e/o dalla pratica operativa, consentono di generare, in ambiente MATLAB, i volumi che impediscono la rotta aerea.

Caso studio: aeroporto di Napoli Capodichino

La metodologia proposta è stata applicata alla realtà aeroportuale di Napoli Capodichino. I limiti laterali operativi dell'aeroporto sono definiti dalla zona di traffico aeroportuale ATZ, ovvero un cerchio con raggio di 3.2 [NM] centrato sul punto [40°53'04"N, 014°17'27"E] in coordinate WGS84, mentre il limite verticale è stabilito a 2000 [ft] AGL (*Above Ground Level*). Lo spazio aereo di Napoli Capodichino è classificato come uno spazio aereo controllato di classe D. L'altitudine di transizione per esso è di 8000 [ft].

Le procedure per i flussi di decollo/salita e quelli di avvicinamento/atterraggio sono influenzati da una serie di costrizioni che vengono rappresentate sulla carta aeronautica della CTR (Control Zone) di Napoli Capodichino. Tali costrizioni possono classificarsi in terreno e relativi ostacoli alla navigazione, spazio aereo e relative restrizioni di spazi aerei non consentiti. Inoltre a questi si aggiungono dati sui valori di inquinamento acustico, sulla struttura aeroportuale e sulle informazioni meteorologiche.

I dati utilizzati per la realizzazione dell'inquadramento territoriale e della mappa degli ostacoli, qualora riferiti ad un sistema geodetico-cartografico diverso, sono stati riportati in UTM-WGS84. L'utilizzo del sistema WGS84 è obbligatorio per qualsiasi trattazione in ambito aeronautico a partire dal 2000, come indicato nel "DOC 9674/AN 946 - WGS84 Manual" ICAO. Le carte aeronautiche oggetto del nostro studio fanno parte del Foglio n.7 NAPOLI della

Carta Aeronautica Ufficiale dello Stato italiano e sono identificate dai seguenti codici: AD 2 LIRN 5-27; AD 2 LIRN 5-23; AD 2 LIRN 4-5.

I modelli digitali DSM e DTM utilizzati in questo caso studio sono prodotti dalla città metropolitana di Napoli, hanno una risoluzione geometrica di un metro e sono già riferiti al sistema UTM-WGS84.

La traiettoria nominale definita come "traiettoria con *fixed-flight-pathangle* e *constant-speed*" segue la STAR per ISKIA in accordo con l'Instrumental Approach Chart ILS Z RWY 06, con i punti riportati nella tabella in figura 2.

FIX/POINT	Coordinate ellissoidiche (WGS 84)	
Initial Approach FIX - IAF (ISKIA)	40° 41' 27" N	13° 53' 27" E
INT RDL236 POM/18NM NPC DME	40° 43' 15" N	13° 57' 09" E
IAF - (OLEVA)	40° 45' 35" N	14° 03' 00" E
Intermediate Fix - IF	40° 47' 18" N	14° 06' 15" E
Final Approach Fix - FAF	40° 48' 51" N	14° 09' 10" E

Figura 2 - Waypoints della STAR per ISKIA in accordo con IAP ILS Z RWY 06

Per la generazione della traiettoria sono stati considerati inoltre punti addizionali riportati nella tabella in figura 3.

FIX/POINT	Coordinate ellissoidiche (WGS 84)	
Intermediate point	40° 44' 06" N	13° 59' 36" E
Missed Approach point - MA	40° 51' 08" N	14° 13' 29" E
THR	40° 52' 54" N	14° 16' 53" E

Figura 3 - Punti addizionali utilizzati per la generazione della traiettoria

In accordo con le *Arrival Procedures*, la traiettoria considerata definisce un percorso dal punto iniziale ISKIA, come *IAF (Initial approach Fix)*, alla pista dell'aeroporto attraverso le transizioni definite nella STAR raggiungendo il punto di *instrument approach*. Le coordinate ellissoidiche WGS84, dei punti della traiettoria nominale, sono state trasformate in coordinate piane UTM-WGS84 (tramite software GIS) per renderle compatibili con l'algoritmo.

Nella figura 4 è riportato un particolare del raster differenza DSM-DTM sovrapposto alle ortofoto ad alta risoluzione della zona.



Figura 4 - Sovrapposizione del raster differenza DSM-DTM sulle ortofoto a colori dell'area aeroportuale di Napoli Capodichino e dintorni

Nelle figure successive sono riportati i profili verticali della traiettoria di discesa convenzionale *step-down* (Figura 5) e di una CCDA ottimale fornita dal sistema (Figura 6).

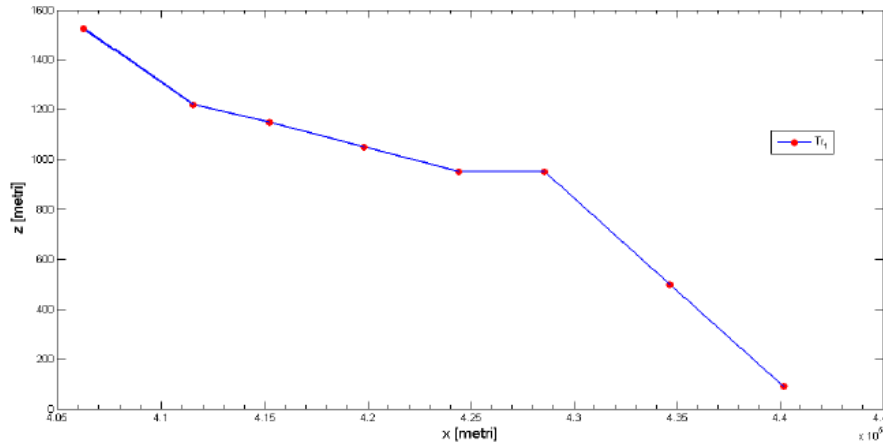


Figura 5 - Profilo verticale della traiettoria step down nominale

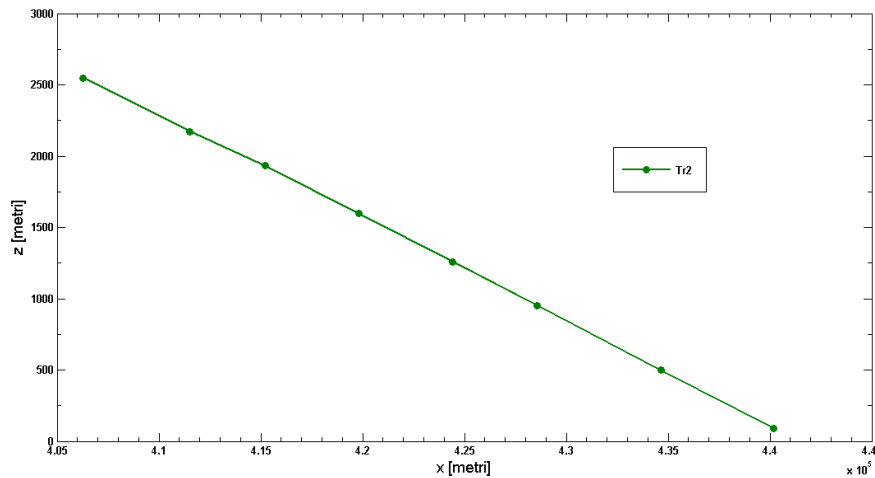


Figura 6 - Profilo verticale di una traiettoria CCDA ottimale fornita dal sistema

Rispetto alla traiettoria convenzionale, la traiettoria CDA con angolo costante di 3,5 gradi ottiene il 47% del risparmio di carburante. Le altre discese continue, al variare del *glide path* forniscono rispettivamente un miglioramento dello 0,5% e del 33% rispetto a quella di riferimento. La traiettoria CDA con *glide path* a 4 gradi ha un risparmio di carburante fino al 62%. La tecnica CDA che parte da un angolo di 3,5 gradi fino a 4 gradi ha portato ad una percentuale di risparmio di carburante del 38%. Nell'analisi la massa dell'aeromobile è considerata costante, il profilo verticale è assunto come perfetto non considerando la variabilità della velocità e della massa dei velivoli. Pertanto, il consumo di carburante è sovrastimato. Inoltre l'integrazione di tali traiettorie con tecniche diverse sono out-of-scope per questo studio.

Conclusioni

Lo studio realizzato ha consentito di mettere a punto una metodologia per l'implementazione di efficienti profili verticali e laterali di discesa di un aereo nella fase di avvicinamento e di atterraggio. Il sistema CCDA è stato realizzato attraverso la generazione di traiettorie curve e continue, e loro ricalcolo automatico, mediante algoritmi in grado di determinare i potenziali conflitti con gli ostacoli alla navigazione nell'area terminale di manovra, e successivamente apportare efficienti manovre correttive per ogni singolo impedimento.

La mappatura degli ostacoli alla navigazione è stata realizzata mediante l'utilizzo di funzioni GIS che hanno permesso operazioni fondamentali quali la riconduzione dei layers ad un unico datum e tipo di rappresentazione cartografica (UTM-WGS84), la comparazione tra DSM e DTM, la conversione dei pixel relativi agli ostacoli in punti 3d.

Il *tool* sviluppato in MATLAB può essere considerato di tipo aperto, ovvero migliorabile in relazione al continuo evolversi della tecnologia, così da adeguarsi alle variazioni ed innovazioni della strumentazione *on ground* e *on board*; in definitiva esso potrà essere implementato in prospettiva di applicazioni future delle procedure CCDA in aeroporti dove non esiste alcuna traiettoria di riferimento.

Riferimenti bibliografici

AIRE (2011), *Atlantic Interoperability Initiative to Reduce Emissions - Final Report*

Alam S., Nguyen M. H., Abbass H. A., Lokan C., Ellejmi M., Kirby S. (2010), "A dynamic continuous descent approach methodology for low noise and emission", in *Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2010 IEEE/AIAA 29th*

ERAT (2012), *Environmentally Responsible Air Transport - Final Report*

EUROCONTROL (2004), *BADA User Manual*

Gebbert S., Pebesma E. (2014), "A temporal GIS for field based Environmental modeling", *Environmental Modelling & Software*, 53, 1-12

International Civil Aviation Organisation (2010), *ICAO DOC 9931 - Continuous Descent Operations (CDO) Manual*

Ott T., Swiaczny F. (2001), *Time-integrative Geographic Information Systems: Management and Analysis of Spatio-temporal Data*, Springer

Pelekis N., Theodoulidis B., Kopanakis I., Theodoridis Y. (2004), "Literature review of spatio-temporal database models", *Knowl. Eng. Rev.* 19:3, 235-274

Rong J., Songchen H. (2005), "Route optimizing algorithm of airport surface based on GIS", *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 22:1, 71-77

Theophanides M., Anastassopoulou J. (2009), "Air pollution simulation and geographical information systems (GIS) applied to Athens International Airport", *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 44:8, 758-766

Zimmer N., Wiplinger P., Schiefele J. (2007), "Synthetic generation of airport familiarization using geo information systems", *Proc. SPIE 6749, Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology VII*, 67491X