

# UNA APPARECCHIATURA ELETTRONICA « OFF-LINE » PER LA GENERAZIONE DI ORTOFOTOPIANI

B. Makarovic (\*)

*PREMESSA - Si descrive un sistema elettronico per la produzione di ortofotogrammi che è stato concepito per combinare le possibilità dei calcolatori numerici con la flessibilità dei sistemi di stampa elettronica.*

*Il procedimento è diviso in due fasi: la preparazione e la stampa; entrambi queste fasi possono essere automatizzate. Nella prima un calcolatore genera i dati necessari per comandare la seconda fase (stampa). Si utilizzano come dati di ingresso i dati del D.T.M. (modello numerico del terreno) nonché i dati di orientamento delle fotografie. La stampa avviene per aree singole, che possono essere di dimensione considerevole. Ciò perchè la scansione del fotogramma è trasformata da una matrice in piccole zone, la densità delle quali può essere adattata al rilievo del terreno.*

*Il sistema è molto flessibile e pertanto è applicabile anche a fotografie non convenzionali. Oltre alle trasformazioni metriche, anche il contenuto fotografico può essere trattato secondo un programma dato. Inoltre si possono stampare dati cartografici di qualunque genere; in linea di principio il sistema può anche essere usato solamente come un'apparecchiatura cartografica. Si prevede che il sistema stesso sia altamente efficiente e conveniente.*

## *Sistema di stampa elettronica off-line*

### *I. - Introduzione*

Dopo una nascita iniziale più o meno spontanea lo sviluppo delle apparecchiature ortofotografiche comincia ora a mostrare aspetti meglio definiti. Allo scopo di specificare le esigenze per un'apparecchiatura ottimale sarà opportuno chiarire innanzi tutto alcuni problemi fondamentali. Questi problemi riguardano in primo luogo la scelta dalla seguente lista di alternative: operazione on-line oppure off-line, stampa continua o stazionaria, immagine ottica o elettronica.

Queste proprietà sono in qualche modo interdipendenti perciò dovranno essere trattate secondo una successione appropriata.

Il problema della operazione on-line o off-line è stato recentemente chiarito. Per la produzione di massa la versione off-line è superiore per le seguenti ragioni: possono essere usati dati di rilievo del terreno già disponibili, il personale e le apparecchiature possono essere impiegate più convenientemente, i componenti e le operazioni dell'apparecchiatura, possono essere combinate in modo modulare, e l'operatore può intervenire nel processo dopo ciascuna fase. Tutte queste caratteristiche si risolvono in una più elevata flessibilità e una maggiore produzione nonché un miglior rendimento rispetto al caso delle operazioni on-line.

L'alternativa fra tracciamento continuo (scansione) e tracciamento sta-

---

(\*) Istituto Internazionale dei Rilevamenti Aerei e delle Scienze della Terra (I.T.C. - Enschede).

zionario (per zone) è stata presa in considerazione meno che la questione on-line off-line. La stampa per scansione (continua) sembra essere inferiore dal punto di vista dell'efficienza e della precisione. La stampa stazionaria (per zone) è scevra da errori dinamici e può operare trasformazioni di immagini complesse.

La scelta della trasformazione e trasmissione di immagine ottica oppure elettronica si riferisce al modo di stampa. Nella stampa continua la trasformazione metrica dell'immagine non richiede di essere rigorosa perchè il limite superiore di precisione è imposto dagli errori dinamici. Ne segue che la trasformazione dell'immagine non esige la perfezione. Ciò tuttavia consente l'impiego di sistemi ottici che comprendono una semplice trasformazione di scala (1) o una trasformazione simile (2) o una trasformazione affine (3). La trasformazione durante la stampa è continua. Allo scopo di mantenere gli errori entro limiti prefissati la larghezza delle strisciate deve essere opportunamente variata: per terreno movimentato la larghezza della strisciata deve essere inferiore il che riduce la produttività.

Una soluzione più efficiente è probabilmente la stampa stazionaria di elementi superficiali (4), (5). In questo caso non si producono errori dinamici epperò si hanno trasformazioni più rigorose dell'immagine. La superficie degli incrementi di immagine può essere aumentata. Poichè i mezzi ottici non sono adatti per trasformazione non lineare di immagine, la sola soluzione possibile è quella elettronica.

Un riassunto delle considerazioni di cui sopra ci dà le seguenti specifiche generali per lo sviluppo di una apparecchiatura ortofotografica ottimale: le operazioni dovrebbero essere off-line e stazionarie e dovrà essere impiegato un sistema di scansione e di stampa elettronico.

Scopo di questa memoria è lo sviluppo concettuale di un sistema ortoprinter che dovrebbe rispondere alle esigenze di cui sopra. Un aspetto fondamentale di questo sistema, assieme con altre varianti, venne formulato la prima volta in (6). Nel frattempo la versione elettronica off-line ha acquistato maggiore importanza a causa dei progressi fatti recentemente nell'area dell'acquisizione dati del D.T.M. Questi dati possono essere ottenuti automaticamente (5) (7), semiautomaticamente (8), o manualmente. I dati D.T.M. insieme ai parametri di orientamento e alle fotografie corrispondenti rendono possibile la generazione dei dati di comando per la fase di stampa.

Nei seguenti paragrafi sarà accennato ai sistemi e ai procedimenti per fasi. Inoltre le due fasi principali: la preparazione e la stampa, come pure gli aspetti operativi, saranno descritti in maggiore dettaglio.

## II. - *Considerazioni generali*

L'intero processo della produzione ortofotografica può essere suddiviso nelle seguenti fasi: acquisizione dei dati, preparazione e procedimento; queste ovviamente sono interdipendenti. Benchè la fase di acquisizione dei dati esorbiti dallo scopo di questa memoria, converrà fare qui una distinzione tra due serie di dati di ingresso: i dati D.T.M. e i dati che determinano la geometria dei fotogrammi (parametri di orientamento). I dati D.T.M. pos-

sono essere ottenuti fotogrammetricamente, dalle curve di livello di una carta esistente o per rilevamento sul terreno. I parametri dell'orientamento possono essere generati per triangolazione aerea o associati con l'acquisizione dei dati D.T.M. Se si usano altre fotografie (dello stesso terreno) per la stampa i parametri di orientamento potranno essere determinati, nello stadio di preparazione, per esempio per intersezione spaziale.

Le tre fasi (acquisizione dati, preparazione e stampa) sono sequenziali e off-line. I limiti fra queste fasi sono alquanto flessibili cosicchè consentono lo spostamento di alcune operazioni di collegamento da una fase all'altra. La possibilità di separare le fasi nello spazio e nel tempo permette un impiego ottimale del personale e della apparecchiatura. Quest'ultima presenta un alto grado di flessibilità.

La generazione dei dati di comando e il processo di stampa sono ovviamente interdipendenti. La stampa stazionaria per zone può essere effettuata in due modi differenti:

1) gli spostamenti fra zone sono controllati meccanicamente;

2) le zone sono posizionate elettronicamente sul video di un tubo catodico di grandi dimensioni.

La prima alternativa 1) esige un apparecchio meccanico posizionatore abbastanza preciso e capace di stampare a differenti scale. La seconda soluzione non richiede posizionamento meccanico; tuttavia la scala della stampa è limitata dalla superficie utile dello schermo del tubo catodico. Inoltre la precisione del posizionamento elettronico è inferiore alla precisione meccanica. Pertanto per stampe ortofotografiche di media o di grande scala il posizionamento delle zone dovrebbe essere meccanico. Perciò non sarà qui ulteriormente considerata la versione puramente elettronica 2).

I dati di comando per la stampa sono generati nella fase preparatoria. Questa fase comprende la massa del lavoro di calcolo che deve essere fornito da un calcolatore digitale. Oltre ad offrire una alta efficienza, il calcolatore digitale rende possibile l'uso di qualunque tipo di fotogramma con geometria sufficientemente definita. Inoltre possono essere effettuate correzioni per qualsiasi errore determinabile, la proiezione cartografica ed anche qualche lavoro di preparazione della carta (p.e. reticolo cartografico, simboli).

Si noti infine che, oltre alla elevata flessibilità nel trattamento dei dati metrici, la stampa elettronica presenta la possibilità del trattamento del contenuto fotografico, cioè filtraggio, modifiche o anche inversione del contrasto ecc. Altre informazioni (p.e. cartografiche) possono essere aggiunte durante la fase di stampa.

### III. - *Preparazione*

Nell'intero procedimento la fase preparatoria è probabilmente la più delicata. Riguarda in primo luogo la generazione di dati metrici per il procedimento di stampa. Gli elementi di ingresso sono i dati del D.T.M. e i parametri di orientamento delle fotografie. La preparazione può anche inclu-

dere i contenuti fotografici e la stampa di dati cartografici. La generazione dei dati metrici può essere suddivisa in due tempi. Il primo concerne i dati di localizzazione di ciascuna zona mentre il secondo riguarda la trasformazione della traccia luminosa. A differenza del primo stadio che è abbastanza lineare, il secondo è più sofisticato e richiede considerevole lavoro di calcolo. Esaminiamo più dettagliatamente le due fasi.

### III.1 Localizzazione della zona.

Poichè gli ortofotogrammi sono stampati staticamente per zone è necessario determinare per ciascuna zona le corrispondenti posizioni nell'ortofotopiano e nel fotopiano. La localizzazione delle zone nell'ortofotopiano è usata come dato di ingresso. Il modello è definito dalla localizzazione dei punti centrali delle zone e dalla loro dimensione e forma. Dal punto di vista dell'efficienza è desiderabile applicare la massima dimensione possibile. Tuttavia questa dimensione è limitata dal numero di linee del raster di scansione\* e dalla risoluzione richiesta. La localizzazione di ciascuna zona nello ortofotopiano è determinata dalle coordinate  $X_p, Y_p$  del suo punto centrale. Le localizzazioni corrispondenti nel fotopiano sono definite dalla appropriata tra-

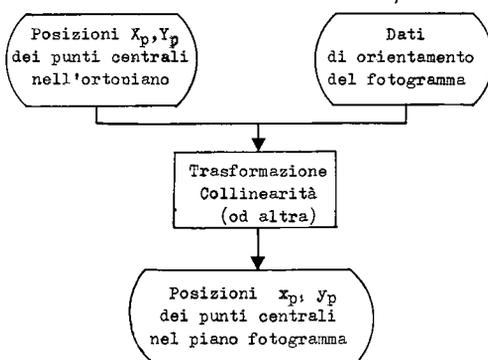


Fig. 1. - Trasformazione di posizione per zone

sformazione metrica (fig. 1); per fotografie convenzionali (metriche) la trasformazione è collineare.

L'uscita della trasformazione è la lista delle coordinate  $x_p, y_p$ . Entrambi le liste assieme ( $X_p, Y_p$  e  $x_p, y_p$ ) servono per comando dell'apparecchio di posizionamento meccanico durante la fase di stampa.

\* Percorso del punto tracciante entro l'area esplorata: nel caso presente una serie di linee orizzontali o verticali parallele del tipo TV (Trad.)

### III.2 Dati di trasformazione della scansione.

Nel secondo stadio di preparazione, i dati vengono generati per trasformare la ortoscansione non distorta nella scansione distorta per ciascuna zona separatamente. Detta trasformazione naturalmente viene eseguita durante la stampa. Il punto centrale della zona serve come origine (punto di riferimento) per la trasformazione. I dati di controllo per la trasformazione possono essere generati in due fasi sequenziali:

i. calcolo delle distorsioni  $\delta_x, \delta_y$  per tutti i punti con altezze date in una zona.

ii. Completamento e raffittimento della matrice di distorsione  $[\delta_x, \delta_y]$  p.e. per mezzo di trasformazioni lineari. Poichè la prima fase impone un considerevole carico di calcolo, è conveniente generare le distorsioni  $\delta_x, \delta_y$ , soltanto per i punti D.T.M. e di raffittire le distorsioni in uno stadio successivo. Un procedimento inverso condurrebbe ad un molto maggior lavoro di calcolo. Il processo di calcolo del primo stadio concernente la trasformazione di scansione è mostrato in fig. 2.

Dai dati D.T.M., conoscendo i parametri di orientamento e la localizzazione della zona si determinano per tutti i punti sia la posizione ortocorretta (nella scala del fotogramma) sia le corrispondenti posizioni distorte per tutti i punti. Il rapporto di scala  $\lambda_p$  è definito per il punto centrale della zona secondo  $\lambda_p = c/Z_p$  dove  $c$  è la distanza principale e  $Z_p$  la distanza di proiezione del punto centrale. Entrambi i gruppi di coordinate sono ridotte al punto centrale della zona come l'origine (questa ultima essendo stata determinata nel primo step).

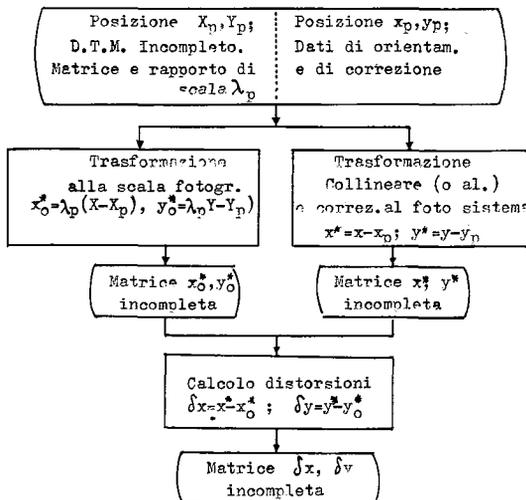


Fig. 2. - Diagramma di calcolo per la trasformazione a zone

Poichè il carico di calcolo per determinare le distorsioni di ciascun punto è considerevole, è preferibile determinarle per un minimo numero di punti che possono essere irregolarmente distribuiti e dovrebbero perciò essere raffittiti allo scopo di ottenere elementi adatti per la trasformazione della scansione.

Il completamento e il raffittimento della matrice di distorsione [ $\delta_x, \delta_y$ ] possono in linea di principio essere effettuati off-line oppure on-line rispetto alla stampa. In questo ultimo caso si dovrà impiegare un calcolatore di maggior potenza per comandare il processo di stampa. Nella figura 3 è mostrato il diagramma di flusso per il raffittimento.

Il calcolo comprende due parti distinte: il completamento della matrice e il suo raffittimento. Il risultato finale può essere registrato in forma digitale o analogica dipendentemente dal tipo di unità di comando per la stampatrice.

Quando i dati D.T.M. sono sistemati in un reticolo regolare di punti la matrice non richiede di essere completata. In caso contrario si dovrà da prima generare un reticolo di punti con una densità pari alla massima densità locale del D.T.M. Sorge allora la questione di quale sia la densità richiesta per la matrice del [ $\delta_x, \delta_y$ ].

Per rispondere a questa questione saranno considerati i due casi estremi. La massima densità utile non dovrà eccedere la risoluzione della scan-

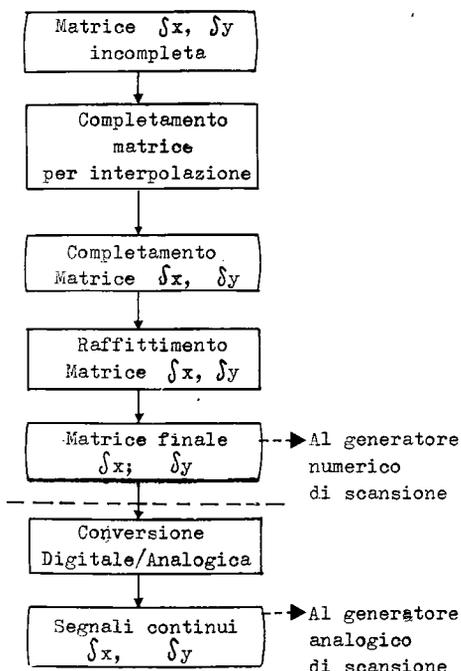


Fig. 3. - Completamento e raffittimento della matrice di distorsione

sione elettronica nel fotopiano. Così quando si applica una scansione di tipo TV la massima densità dei punti dovrà essere uguale alla densità delle linee di scansione. Poichè la risoluzione della scansione deve essere molto elevata allo scopo di ottenere una immagine accettabile (p.e. 50 linee/mm) il numero dei punti richiesti sarebbe enorme (p.e.  $\geq 10^6$  punti per zona di  $20 \times 20$  mm).

La minima densità del reticolo di punti è limitata dalla precisione geometrica richiesta  $\sigma$  (in x o y) per ortofotografie, dall'inclinazione del terreno (in direzione radiale) dalle distanze ( $x_n$  o  $y_n$ ) dal punto nadirale e la distanza principale c. La corrispondente relazione è (si veda l'appendice)

$$\Delta x = \sigma \frac{c}{x_n} \cot \alpha_x; \quad \Delta y = \sigma \frac{c}{y_n} \cot \alpha_y.$$

dove  $\alpha_x$  e  $\alpha_y$  sono le componenti della pendenza nelle direzioni x e y. In condizioni normali la separazione fra i punti adiacenti può essere anche più di 0,5 mm. Perciò l'intera area di scansione (zona) può essere suddivisa in un numero di zone di  $0.5 \times 0.5$  mm o maggiore cosicchè ciascuna zona coprirebbe p.e. oltre 25 linee di scansione. Quando il punto di scansione si muove durante la stampa attraverso una zona, tutti i punti della scansione fotografica hanno uguale spostamento ( $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ). Viene assegnata a ciascuna parte della zona un singolo vettore di distorsione. In questa guisa il numero totale di vettori di distorsione che deve essere generato per ogni zona può essere sostanzialmente ridotto (p.e. 1600 vettori, o meno, per zona di  $20 \times 20$  mm). In condizioni estreme (p.e. terreno montagnoso e fotografia supergrandangolare) la densità dovrà essere conseguentemente più alta.

### III.3 Altre preparazioni.

Oltre ai dati metrici per il comando del procedimento di stampa, la preparazione dovrà anche comprendere i dati per il trattamento del contenuto fotografico e per le indicazioni cartografiche.

E' importante scegliere propriamente la banda di frequenza del canale usata per il trasferimento elettronico dell'immagine. Le frequenze al disopra e al disotto della banda sono tagliate dal segnale video. Eliminando le alte frequenze si può ridurre l'effetto di disturbi non desiderati, ed eliminando le basse frequenze si ottiene qualche scarto. Il contrasto può essere regolato modificando il guadagno del segnale video. Lo scarto e l'aumento in contrasto possono provocare una intensificazione ai bordi.

Se dalle diapositive si devono ricavare dei positivi la polarità del segnale video dovrà essere invertita. Si possono applicare correzioni per densità ad esempio variando dal centro verso la periferia del fotogramma. Si può anche in principio applicare una deconvoluzione per compensare ad esempio l'effetto del movimento dell'immagine. Per tutti i trattamenti dell'immagine dovranno essere predeterminati i corrispondenti dati di comando.

Un altro importante vantaggio degli stampatori elettronici è la possibilità di generare e registrare informazioni cartografiche addizionali come p.e. dati aerei, linee, nomi ecc. I corrispondenti ingressi (p.e. dati di curve di livello, reticolo cartografico ecc.) per l'unità di comando della stampante (la quale può agire come apparecchio cartografico) dovranno essere acquisiti durante la fase di preparazione.

#### IV. - Scansione e stampa elettronica

La configurazione di una stampante elettronica off-line comprende tre moduli di base: unità di comando, sistema di scansione e stampante. L'unità di comando dirige le operazioni del sistema di scansione e della stampante. Il procedimento può essere suddiviso in tre fasi: esplorazione, scansione e stampa dei contenuti fotografici e di altri dati cartografici. Dapprima l'unità di comando trasporta il portalastre e il carrello dell'ortofoto alle posizioni  $x_p, y_p$  e  $X_p, Y_p$  predeterminate (fig. 4).

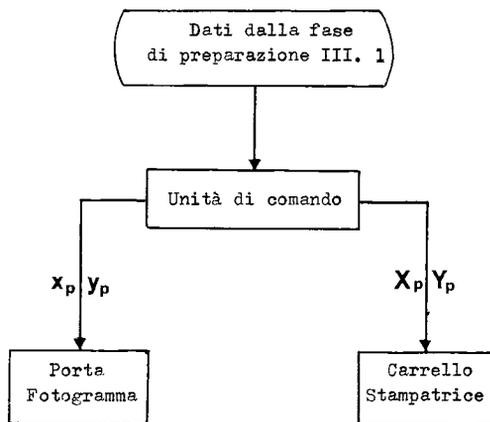


Fig. 4. - Configurazione dei componenti per il posizionamento meccanico

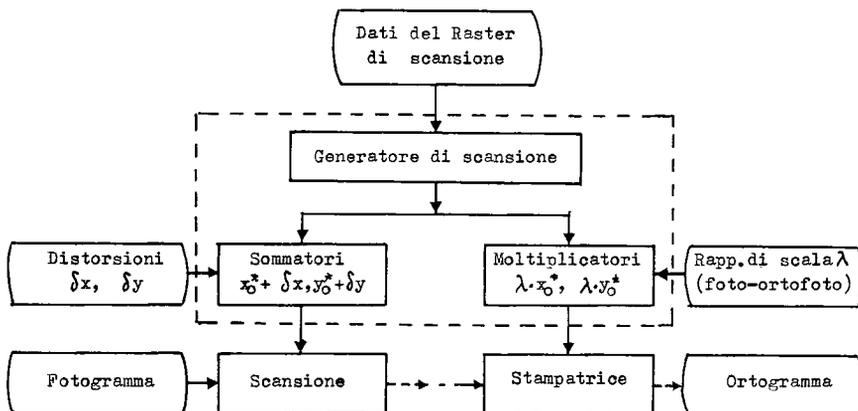


Fig. 5. - Generazione e trasformazione della scansione

La scansione è poi iniziata assieme alla scansione di trasformazione della stampa (fig. 5). La stampa può essere congiunta con il procedimento del segnale video (fig. 6) come si è detto nel paragrafo III.3.

La fig. 6 vale, con qualche semplificazione, anche per la stampa dei dati cartografici addizionali. La fig. 7 mostra un diagramma di flusso così modificato. I diagrammi n. 4, 5, 6 e 7 illustrano le differenti funzioni che debbono compiere i tre moduli di base. Tuttavia una semplice versione in ortoprinter elettronico non richiede che tutte queste funzioni siano compiute. Poichè molti dei sottoprocedimenti accennati nelle fig. 6 e 7 esorbitano dallo scopo di questa memoria, non vi daremo ulteriore considerazione.

Il problema centrale nella ortostampa elettronica è la trasformazione di scansione (fig. 5). La scansione generata è trasformata sia nella fotoscansione che nella scansione di stampa. La prima trasformazione include tutte le distorsioni causate dal rilievo del terreno e dalla geometria del fotogramma

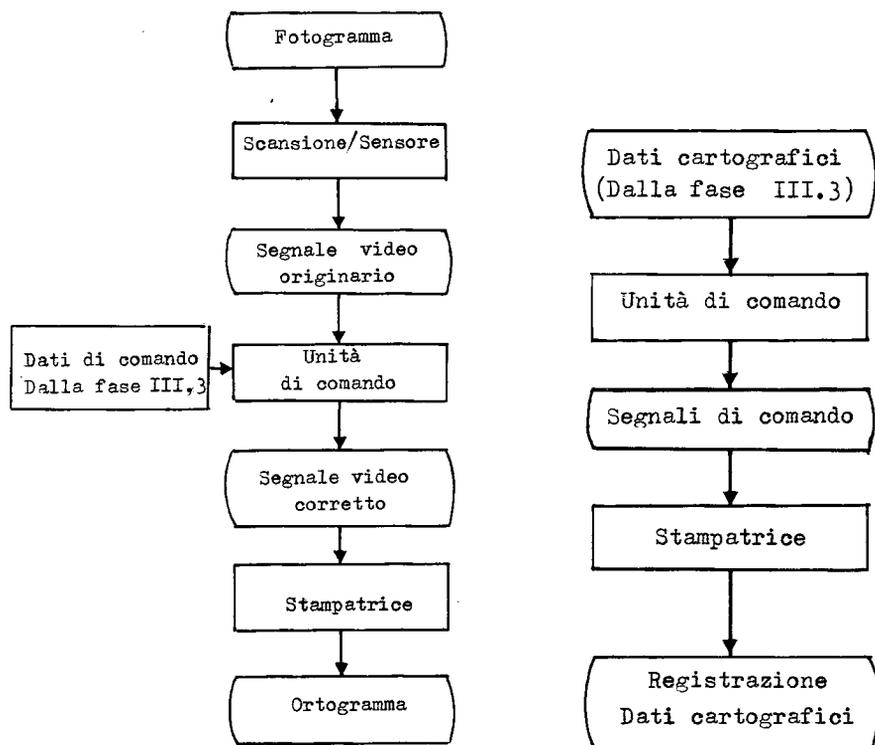


Fig. 6. - Flusso del contenuto fotografico durante scansione e stampa  
Fig. 7 - Flusso dei dati cartografici durante la stampa

mentre la seconda è semplicemente un cambio di scala. Le distorsioni per la fotoscansione sono aggiunte alla scansione originariamente generata. A questo scopo sia i segnali della scansione originale che quelli della scansione di distorsione dovranno essere presentati serialmente agli addizionatori e devono essere combinati. La matrice di distorsione raffittita  $[\delta_x, \delta_y]$  generata nello stadio preparatorio III.2 dovrà perciò essere convertita in segnali serializzati, ordinati lungo le linee di scansione. La conversione della matrice di distorsione in segnali serializzati può essere eseguita sia nella fase preparatoria che durante la stampa on-line. Entrambi le coppie di segnali  $X^*, Y^*$  e  $\delta_x, \delta_y$  dovranno essere generati in modo sincrono e convogliati agli addizionatori. Poichè una piccola zona dell'area di scansione è assegnata a ciascun elemento della matrice di distorsione  $[\delta_x, \delta_y]$  (paragr. III.2) i brevi segmenti delle linee di scansione passanti attraverso la zona ricevono uguale distorsione. Ciascuna linea di scansione attraversa un certo numero di zone e le distorsioni corrispondenti variano in conformità. I sistemi di scansione elettronica generanti un raster di tipo TV sembrano appropriati. Allo scopo di evitare notevoli perdite nella trasmissione elettronica dell'immagine, la macchia di scansione deve essere piccola e deve essere elevata la densità delle linee. In più le scansioni possono essere ridotte per via ottica sia per la scansione che per la stampa. L'area di una scansione quadrata nel fotopiano può essere da 10 X 10 a 20 X 20 mm. Il film sistemato nel carrello (o tamburo) del gruppo di stampa deve essere protetto contro la luce ambiente. La zona di stampa è limitata da una maschera che è posta davanti al film. Quando si usa una maschera quadrata vengono a contatto tra le zone dei limiti rettilinei cosicchè le strisciate possono essere visibili sull'ortofotogramma. Questo inconveniente di natura estetica può essere eliminato facendo delle maschere con i lati ondulati o irregolari (fig. 8).

La sola condizione è che i lati opposti siano identici. In questo caso le

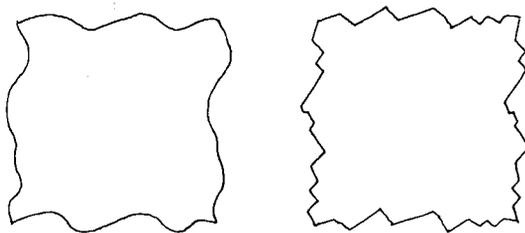


Fig. 8. - Esempi di zone irregolari

zone adiacenti dovranno leggermente sovrapporsi nel fotopiano il che riduce alquanto l'efficienza.

## V. - *Aspetti operativi*

Le due fasi principali del procedimento (preparazione e stampa) sono condotte automaticamente. La misura dei punti di controllo necessari per l'orientamento costituisce naturalmente una eccezione. Altre operazioni non automatiche sono: la scelta dei dati e la loro introduzione nel computer o nella stampatrice, il trasferimento dei dati da un componente all'altro, la sorveglianza sul pannello dei comandi, gli interventi quando si verifica una situazione imprevista e l'ispezione dei risultati intermedi o finali. Alcune di queste operazioni possono esigere una limitazione di velocità nell'operazione.

L'operazione automatica richiede un'accurata preparazione dei dati di ingresso, dei materiali e dello strumento. Vi sono elevate probabilità che cattivo funzionamento e/o imperfezioni possano non manifestarsi prima che il prodotto finale (ortofotografia) sia terminato.

La riuscita dipende in larga misura dalla densità finale della matrice di distorsione  $[\delta_x, \delta_y]$  una matrice di alta densità aumenta la precisione metrica ma diminuisce l'efficienza dell'operazione e viceversa. Realizzando un raster di scansione ad alta risoluzione, la caduta della qualità della immagine può essere resa trascurabile. La velocità di stampa è limitata dalla esplorazione stazionaria tra zona e zona. Secondo una valutazione il tempo necessario per la stampa di un intero fotogramma (equivalente a un doppio modello) dovrebbe richiedere pochi minuti.

## VI. - *Conclusioni*

Gli ortofotoprinter presentano considerevole flessibilità per quanto riguarda gli elementi di ingresso, le trasformazioni e le correzioni metriche, il trattamento del contenuto fotografico e quello dei dati cartografici addizionali. Uno dei principali vantaggi di tale sistema è la semplicità concettuale. L'ordine logico delle operazioni riduce al minimo il carico di calcolo mentre le operazioni off-line consentono un efficiente impiego del personale e della strumentazione. Poiché il procedimento è essenzialmente automatico, l'operatore può prestare la massima attenzione alla preparazione dei dati di ingresso, alla strumentazione e ai materiali nonché alla supervisione del procedimento.

La precisione metrica dipende in primo luogo dalla densità della matrice di distorsione che può essere adattata alle caratteristiche del terreno. L'operazione di tipo stazionario (zona per zona) impedisce il verificarsi di errori dinamici. Applicando un raster di scansione di densità elevata, l'immagine può essere trasmessa con una minima perdita di qualità. Contrariamente agli strumenti automatici on-line, i sistemi off-line dovrebbero essere più attendibili poiché gli errori grossolani sono corretti dai dati D.T.M.

La trasformazione a mezzo di matrici consente la stampa di grandi zone, il che comporta una più rapida operazione. Il tempo previsto per la stampa di un intero fotogramma è di pochi minuti; dipende ovviamente dalla dimensione delle zone.

## Appendice

La relazione fra un errore planimetrico determinato  $\sigma$  (in x o y) l'inclinazione del terreno  $\alpha$ , e la distanza radiale  $r$ , è mostrata in fig. 9

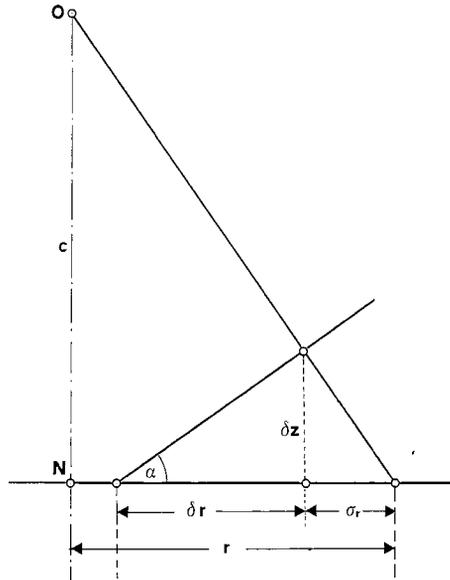


Fig. 9 - Relazioni fra errori planimetrici ed altimetrici

Dalla similitudine dei triangoli segue:

$$\sigma_r = \frac{r}{c} \delta Z = \frac{r}{c} \Delta_r \tan \alpha$$

cioè

$$\Delta_r = \sigma_r \frac{c}{r} \cot \alpha$$

Risolvendo questa equazione nelle componenti x e y, segue

$$\Delta_x = \sigma \frac{c}{x_n} \cot \alpha_x; \quad \Delta_y = \sigma \frac{c}{y_n} \cot \alpha_y$$

### Esempio

Dati:  $\sigma = 50 \div 100 \mu\text{m}$ , cosicchè  $\sigma_{\max} = 3\sigma = 150 \div 300 \mu\text{m}$

$c/x_n = c/y_n = 1$  (supergrandang.),  $\alpha_{\max} = 27^\circ$

Risultato:  $\Delta x_{\min} = \Delta y_{\min} = 0.3 \div 0.6 \text{ mm}$