

PROGRESSI NELLA TECNICA DELL'ORTOFOTOGRAFIA

di W. Brucklacher (*)

Nel 1897 Theodor Scheimpflug enunciò probabilmente per primo nel corso di una conferenza svolta a Brunsviga l'idea dell'aerofotografia come mappa topografica, cercando di svilupparla successivamente con diverse pubblicazioni e brevetti riguardanti la trasformazione di immagini e di zone d'immagine. La costruzione di stereorestitutori che ebbe inizio verso l'anno 1910 fece però sì che l'idea della fotomappa non venne ulteriormente perseguita. Nel 1929, Lacmann a Berlino s'occupò nuovamente di questo argomento e con il suo prototipo di un « Raddrizzatore per terreno accidentato » indicò la via che condusse all'evoluzione odierna. Soltanto nel 1955 però s'iniziò la costruzione di apparecchi tecnicamente maturi secondo le esigenze dell'impiego pratico. Questi strumenti dell'ultimo decennio(**), gli « apparecchi della prima generazione », sono caratterizzati dal fatto che l'ortofoto nasce *contemporaneamente* al processo d'esplorazione del modello stereoscopico. Per rendere ben chiare le differenze rispetto agli apparecchi della seconda generazione che descriveremo più avanti, siano citati innanzitutto alcuni rappresentanti caratteristici della « I^a generazione ».

1. Apparecchi della « I^a generazione »

L'ortofotoscopio di Bean utilizza come apparecchio fondamentale il ben noto Balplex, il cui tavolo di proiezione venne trasformato in chassis per la pellicola con un diaframma traslabile in direzione *x*. L'immagine proiettata con tonalità azzurra durante la proiezione ad anaglifici produce durante l'esplorazione del modello con questo diaframma l'ortofoto sul materiale fotografico sensibilizzato all'azzurro. Nell'ortofotografo 693 della SFOM, il tavolo

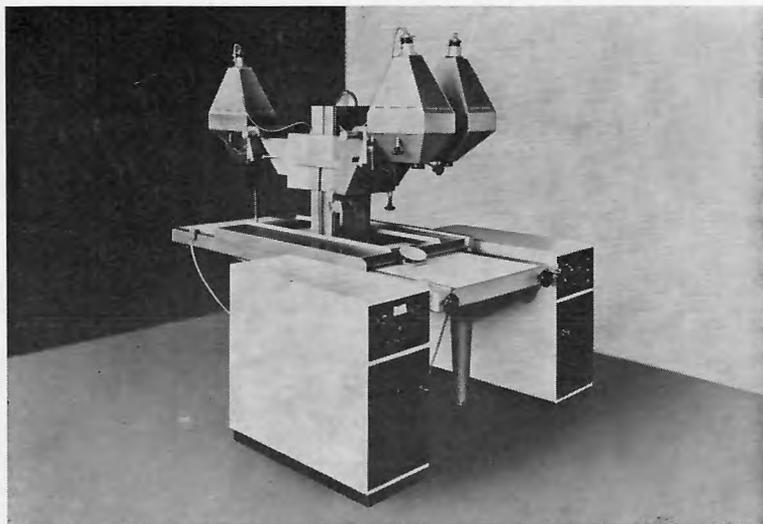


Fig. 1: Orto-3-proiettore di Carl Zeiss.

(*) Carl Zeiss, Oberkochen.

(**) Gli apparecchi super-automatici costruiti negli USA per rilevamenti di genere militare ed extraterrestre non hanno finora per motivi di prezzo alcuna importanza per i rilevamenti convenzionali e perciò non verranno discussi in questo luogo.

a chassis costituisce una unità speciale adatta all'impiego sul tavolo di proiezione di vari tipi di plotters simili a quello di Kelsh. In ambedue questi tipi viene da recente utilizzato, come nell'*Orto-3-proiettore di Zeiss* un terzo proiettore per l'ortofotoproiezione vera e propria. (Fig. 1). L'apparecchio di Zeiss si distingue inoltre per la traslazione a meandro completamente automatica del diaframma nelle due direzioni e per la direzione principale delle strisce in direzione di y — anziché in direzione di x — e la conseguente eliminazione dell'effetto di Fertsch. Lo spazio ridotto del modello consente inoltre un modo di lavoro molto comodo all'operatore seduto, contrariamente agli apparecchi di Bean e della SFOM. La misurazione altimetrica avviene in tutti e tre gli apparecchi mediante valutazione stereoscopica secondo procedimenti tradizionali.

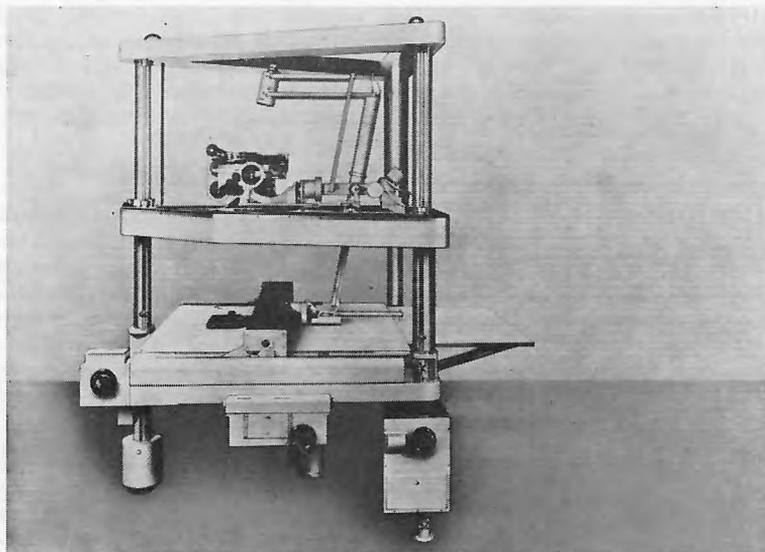


Fig. 2: Ortoproiettore GZ 1.

Nell'*ortoproiettore GZ 1* di Zeiss, l'apparecchio di proiezione forma una unità autonoma che viene collocata separatamente dal restitutore nella camera oscura (fig. 2). L'esplorazione a strisce parallele — procedimento che del resto si può ricondurre al Lacmann — si svolge mediante collegamento degli alberelli di comando per i moti nelle varie coordinate nell'apparecchio di restituzione e nel proiettore attraverso trasduttori rotanti. Sul tavolo di proiezione bipartito dell'*ortoproiettore GZ 1* avviene contemporaneamente ma separatamente l'elaborazione planimetrica e quella altimetrica, quest'ultima nella forma delle cosiddette «dropped lines» (fig. 3). La messa a fuoco automatica fornisce, contrariamente agli apparecchi prima citati con formazione d'immagine secondo profondità di campo, la migliore qualità dell'immagine per l'uso immediato dell'ortofotomappa come prodotto finale di questo processo.

Nell'apparecchio *Topokart di Jena* e nell'*A 8-Ortophoto-Attachment di Wild* simile a quello, l'immagine ortoscopica è derivata dal percorso dei raggi nell'oculare e dopo adeguata trasformazione proiettata sulla pellicola fotografica

stesa su un tamburo a tenuta di luce trovantesi sul retro dell'apparecchio. Le linee curve del tamburo rappresentano in questi apparecchi la direzione delle strisce. Mediante l'ortografo si registrano le dropped lines sul coordinatografo normale del Topokart.



Fig. 3: Mappa altimetrica a dropped lines prodotta con il dispositivo addizionale per dropped lines dell'ortoproiettore GZ 1 (rapporto d'interpolazione 1/6).

Nello *Stereomat B 8* di Wild-Raytheon con esplorazione completamente automatica del modello mediante correlazione elettronica si proietta l'immagine ortoscopica per mezzo di un tubo televisivo sulla pellicola che si trova in un contenitore a tenuta di luce collegato all'apparecchio. La qualità dell'immagine è perciò meno favorevole di quella ottenuta con la proiezione ottica. La valutazione altimetrica si svolge con un secondo processo d'elaborazione, con il quale si ottengono immediatamente le curve di livello. A questo proposito si fa notare che è stato abbandonato il metodo di generare le curve altimetriche di volta in volta per l'intero percorso di queste e ciò a causa degli svantaggi sistematici con ciò manifestantisi. L'automatismo non riconosce la « chiusura » di una curva altimetrica, ossia esso ripete questa medesima curva fintanto che non venga fermato da un operatore umano. Colline o avvallamenti isolati non vengono in certe circostanze riconosciuti dall'automatismo e perciò esclusi dall'elaborazione. Nell'apparecchio *Stereomat A 2000* è stata perciò abbandonata la riproduzione diretta delle curve altimetriche e in sua vece si procede a riprodurre in tinta rossa sull'ortofotografia in colore blu per le singole strisce brevi tratti di tangenti alle curve altimetriche. Per l'ulteriore impiego si devono poi separare anzitutto con un processo fotografico selettivo i segmenti di tangenti e l'ortofoto dalla pellicola sensibile per il blu e il rosso. La qualità dell'immagine è stata migliorata rispetto allo *Stereomat B 8* con un rimpicciolimento dell'immagine del tubo televisivo.

2. Apparecchi della « II^a generazione »

Gli apparecchi e metodi per la produzione immediata di ortofotografie con cosiddetto processo « on-line » vengono oggi praticamente applicati presso

numerosi enti utilizzatori, anzi essi sono oggetto di continua ulteriore evoluzione. Nei luoghi di produzione però che devono far fronte a una *produzione in massa* si passa tuttavia sempre di più al cosiddetto «procedimento a memoria», il quale supera notevolmente i «metodi on-line», sia riguardo al lato economico, ma sia anche riguardo a precisione e completezza del risultato.

La misurazione del profilo nel modello da una parte e la produzione di ortofotografie vera e propria dall'altra vengono con questo procedimento separate sia *temporalmente che localmente*, con interposizione di una memoria per i profili e del corrispondente dispositivo di lettura. Già molto presto, ancora durante la progettazione del metodo «on-line» è stata presa in considerazione presso la Casa Zeiss la soluzione tecnica che prevede l'impiego di un sistema di memoria. Da vari progetti è risultata infine la soluzione oggi realizzata, cioè il sistema della *memoria analogica* con incisione continua dei profili (fig. 4). Mediante l'esplorazione dei profili in un apparecchio di lettura a cellule fotoelettriche si trasmette l'informazione altimetrica memorizzata all'ortoproiettore (figura 5). Questo funziona a sua volta completamente automatico senza intervento dell'operatore. Le caratteristiche particolari dell'apparecchio di lettura sono le seguenti:

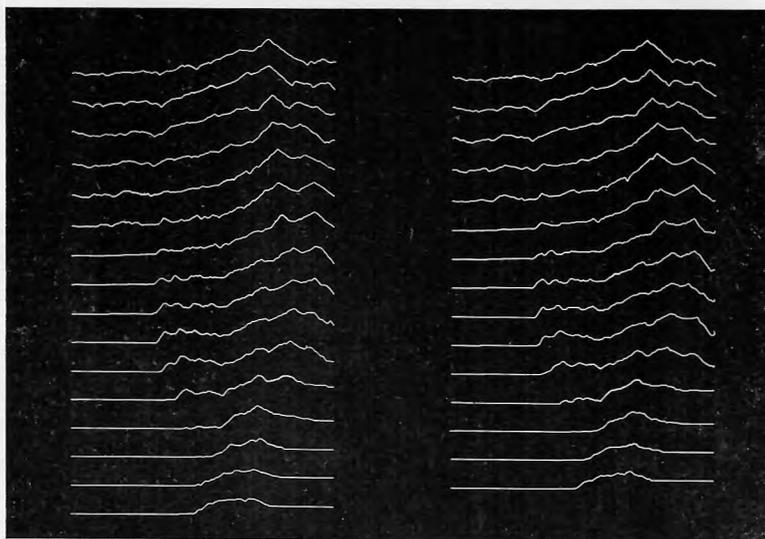


Fig. 4: Lastra di memoria con profili altimetrici.

La fotocellula è in grado di leggere i profili a una velocità notevolmente maggiore di quella possibile ad un operatore umano durante lo scanning.

Si possono esplorare *contemporaneamente due profili successivi* in zone adiacenti delle strisce. Con ciò si dispone però dell'informazione altimetrica anche in *direzione trasversale alla direzione delle strisce*.

La precisione dell'esplorazione per mezzo delle fotocellule è, come la precedente precisione d'incisione durante il processo di memorizzazione, tanto elevata da poter escludere ogni possibilità di manifestazione di errori addizionali.

Per l'impiego pratico ne risultano le seguenti possibilità:

2.1 A causa dell'accelerazione del processo di lettura nell'apparecchio di lettura e dell'eliminazione del tempo improduttivo per l'orientamento dei modelli viene aumentata la *resa dell'ortoproiettore* in misura tale da consentire la lavorazione continua delle lastre a memoria provenienti da più, p. es. 4, restitutori. Il che conduce, nell'allestimento di opere cartografiche complete, ad un notevole aumento della produzione.

2.2 Nella cosiddetta « soluzione diretta » si è sempre legati per motivi economici a una larghezza più o meno grande delle strisce. Dato che la misurazione del profilo si riferisce sempre alla linea mediana del profilo si manifestano, in caso di pendenze del terreno trasversalmente alla direzione d'esplorazione, degli errori sistematici lungo gli orli delle strisce, le cosiddette discontinuità: quanto più strette le strisce, tanto minori le discontinuità, ma tanto maggiore il tempo d'esplorazione! Durante la lettura della memoria è ora possibile, senza accrescere in misura notevole il tempo-macchina, ridurre col *metodo dell'interpolazione* mediante dimezzamento, divisione per tre e perfino per sei della larghezza di striscia, gli errori sistematici e precisamente con funzionamento completamente automatico — *senza operatore*.

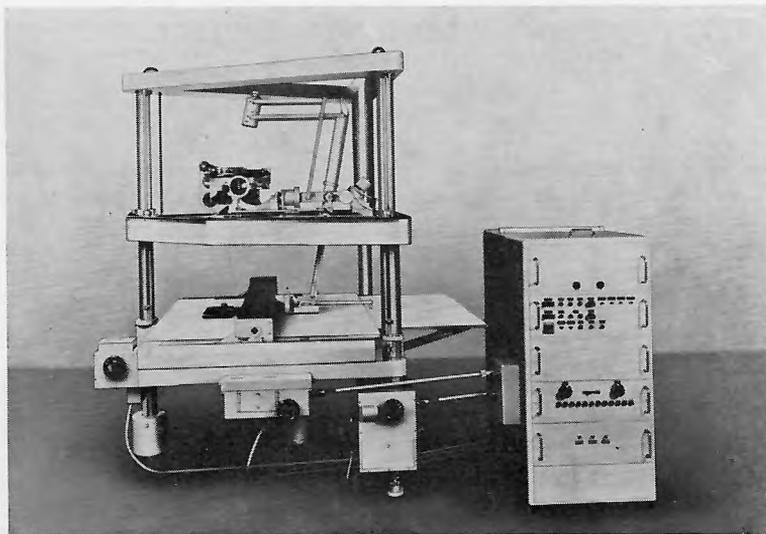


Fig. 5: Ortoproiettore GZ 1 con apparecchio di lettura.

Però non ci si è fermati a questo procedimento d'interpolazione. Siccome con la lettura contemporanea di due profili adiacenti si conosce esattamente la *pendenza del terreno trasversalmente alla direzione d'esplorazione*, si presenta quasi spontanea l'idea di un *raddrizzamento ottico* affine dei singoli elementi dell'immagine. Questa poteva essere realizzata con impiego delle cosiddette fibre ottiche. L'ottica a fibre, ossia un fascio di fibre di vetro di spessore microscopico aventi differenti indici di rifrazione nella parete e nel nucleo, consente di trasportare per effetto della riflessione nell'interno della fibra dei punti luminosi da un'estremità all'altra del conduttore ottico. Impiegando dei fasci di fibre « ordinati » è possibile trasportare delle immagini complete. Il di-

positivo speciale creato a questo scopo consiste in un corpo anulare a fibre ottiche, il cui lato inferiore è piano, mentre quello superiore rappresenta una specie di superficie spiraloide che comprende tutte le pendenze possibili del terreno fra 0° e $\pm 35^\circ$ (fig. 6). Il corpo anulare viene fatto ruotare in modo tale che nel percorso dei raggi di proiezione venga a trovarsi sempre quella parte della superficie spiraloide che presenta la medesima pendenza (o inclinazione) come quella riscontrata per il terreno coll'esplorazione contemporanea dei profili adiacenti. L'immagine incidente sulla superficie obliqua della spirale è poi riflessa affinemente attraverso l'ottica a fibre sull'apertura del diaframma alla base dell'anello di fibre.

Mentre finora la misurazione dei profili avveniva al centro del diaframma, essa viene ora spostata verso gli orli delle strisce. I successivi collegamenti lungo gli orli delle strisce coincidono pertanto perfettamente e permangono soltanto gli errori causati dalle ondulazioni del terreno fra le singole strisce, i quali però, essendo minori di un intero ordine di grandezza, non hanno più alcuna importanza pratica. A prescindere dall'eliminazione delle discontinuità, ma anche delle zone difettose o delle doppie immagini, si ottiene con questo dispositivo un vero aumento della precisione. Lavori comparativi svolti con e senza interpolazione ottica nella regione sperimentale « Reichenbach » dell'OEEPE hanno fornito i seguenti risultati:

| | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| senza interpolazione ottica | $m_x = m_y = \pm 0,21 \text{ mm}$ |
| con interpolazione ottica | $m_x = m_y = \pm 0,16 \text{ mm.}$ |

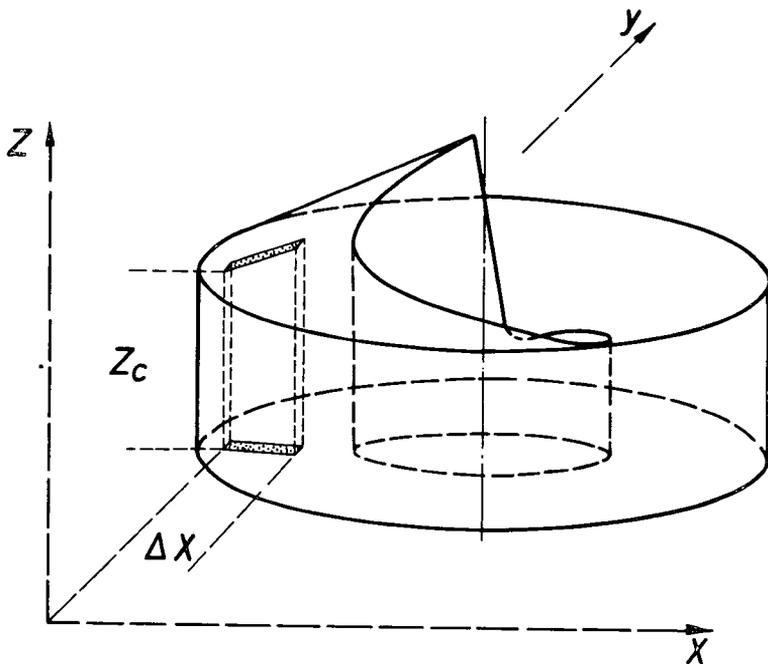


Fig. 6: Anello di fibre ottiche per l'interpretazione ottica (= restituzione affine degli elementi dell'immagine) per il GZ 1.

Dato che con questo metodo si elimina la esplorazione ripetuta entro una

striscia, necessaria nei precedenti metodi di dimezzamento, divisione per tre e così via, si riduce notevolmente il tempo macchina all'ortoproiettore. P. es. per un modello per l'ortofotomappa 1:5000 esso è di all'incirca 38 minuti.

2.3 La *misurazione altimetrica* si svolge nella « soluzione diretta » con una rappresentazione delle linee altimetriche secondo la giusta posizione e utilizzando diversi simboli per le linee altimetriche susseguentisi. Queste linee di varia larghezza vengono proiettate otticamente su una pellicola per mezzo di un disco a simboli accoppiato all'alberello della direzione z. Si formano così le ben note *dropped lines*, in base alle quali, collegando le estremità dei medesimi simboli nelle strisce successive si costruiscono manualmente le curve altimetriche. Questa successiva elaborazione delle linee altimetriche richiede bensì delle ore lavorative, ma non delle ore macchina. Dato che le *dropped lines* vengono generate durante l'allestimento dell'ortofoto senza impegno supplementare di ore lavorative, si continuerà a produrle anche per progetti per i quali inizialmente si richiede la sola planimetria, per conservarle in vista di eventuali necessità successive d'utilizzazione. Durante il processo di interpolazione della soluzione « a memoria » anche le distanze fra le *dropped lines* vengono dimezzate, divise per tre ecc., secondo il grado d'interpolazione previsto, semplificando in tal modo in misura notevole la costruzione delle linee altimetriche.

Insieme a quello dell'interpolazione ottica automatica è stato però ora trovato un procedimento atto a produrre *immediatamente, striscia per striscia, le linee altimetriche* (fig. 7). Coll'esplorazione contemporanea di due profili ai

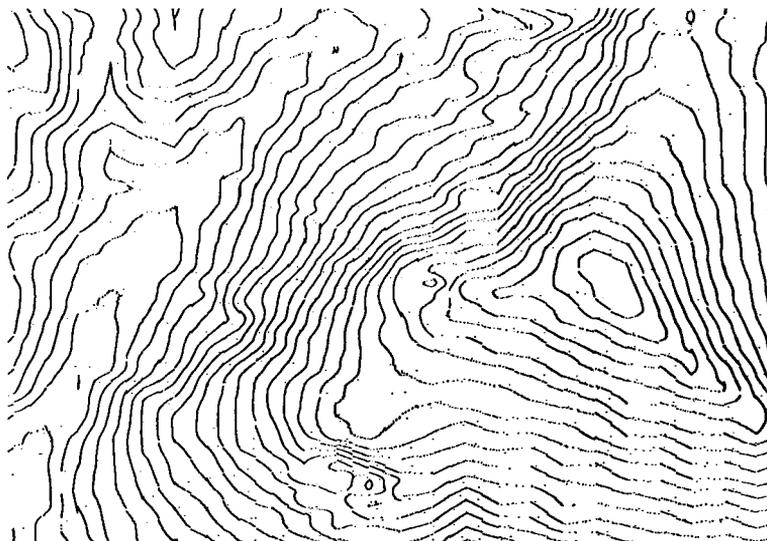


Fig. 7: Mappe di linee altimetriche automaticamente generate con il dispositivo per linee altimetriche dell'ortoproiettore GZ 1.

due orli di una striscia si ottiene la pendenza del terreno fra due punti direttamente opposti degli orli delle strisce. Un sistema particolare di conteggio fornisce una rappresentazione digitale dell'andamento del profilo trasversale e

simo punto anche le loro fasi sono temporalmente in coincidenza, il retino « poggia » stereoscopicamente sulla superficie del modello. Se invece esiste uno sfasamento temporale, le tensioni differenziali formatesi provocano per mezzo di un servomotore sull'asse z l'innalzamento o l'abbassamento del piano di proiezione del restitutore fino a raggiungere la compensazione a zero. Dato che si confrontano delle fasi e non già delle ampiezze, una eventuale differenza della luminosità totale delle due immagini non ha nessun effetto sulla correlazione.

Il correlatore lavora in modo rigidamente « obbiettivo » seguendo i dettagli visibili del terreno. Esso perciò non è in grado, contrariamente ad un operatore che ragiona « soggettivamente », di traslare la marca di misura sulla superficie del terreno in un bosco, astraendo per modo di dire dagli alberi. Esso sormonta ogni singola casa, ma fallisce quando deve esplorare degli specchi d'acqua uniformemente anneriti nei fotogrammi. Perciò esso troverà utile applicazione per l'elaborazione di terreni aridi, per l'allestimento di mappe in grandi scale di zone prive di boschi oppure quando è richiesta la sola planimetria ed infine per lavori in piccola scala, quando le altezze degli alberi non hanno più alcun significato rispetto all'intervallo fra le linee altimetriche.

Il correlatore modello EC 5 costruito dalla Ditta ITEK Corp. in stretta collaborazione con la Casa Zeiss può essere applicato a qualsiasi restitutore Planimat prodotto in serie (fig. 9). In connessione al sistema a memoria è stato ora creato il seguente dispositivo molto importante: non appena la correlazione diventa incerta per i motivi sopra elencati, si distacca il bulino per l'incisione del tracciato del profilo, ossia il profilo viene interrotto. Nel contempo si abbassa la matita del coordinatografo interno del Planimat e traccia una linea retta



Fig. 9: Planimat con correlatore e memoria per i profili.

per tutta la lunghezza della zona d'incertezza. Al termine dell'esplorazione dell'intero modello esiste quindi una mappa dei punti difettosi. Questa potrà essere esplorata dall'operatore passando di profilo in profilo e con continua osservazione stereoscopica questi potrà completare manualmente i tratti man-

canti del profilo. Ossia non occorre più, come nella « soluzione diretta », p. es. nel caso dello Stereomat, la presenza continua di un operatore per tutta la durata del processo d'esplorazione per poter intervenire immediatamente nei casi critici. Il correlatore EC 5 lavora del resto con la stessa esattezza, ma con una velocità notevolmente maggiore di un ben allenato operatore.

2.5 Aggiornamento di mappe

Infine venga ancora menzionato un vantaggio decisivo dal punto di vista della metodica di lavoro della soluzione a memoria. Per l'aggiornamento delle ortofotomappe si potrà utilizzare ripetute volte la memoria dei profili creata durante la prima elaborazione. Dato che il rilievo fondamentale del terreno praticamente non varia anche entro periodi di tempo più lunghi, si potrà risparmiare in caso di voli fotografici svolti in epoche successive il tempo necessario per la produzione delle memorie di profilo. Condizione essenziale per raggiungere lo scopo è che i successivi voli coprano pressoché gli spazi modello dei voli precedenti. Ciò potrà essere ottenuto con voli a distanze ravvicinate fra le singole strisce. Tentativi di questo genere sono già stati svolti con successo da vari enti, fra gli altri p.es. l'Ente Nazionale di Rilevamenti Topografici Svedese.

2.6 Grazie alla possibilità di produzione finora realizzata soltanto nell'ortoproiettore GZ 1 di doppie ortofotografie in *successione senza discontinuità di due modelli* si possono produrre direttamente delle mappe, senza dover ricorrere alla compilazione che richiede un notevole dispendio di tempo e riduce nel contempo la precisione. Condizione per questo metodo è che la base delle immagini da restituire sia uguale a metà del formato della mappa e che le relative serie di fotogrammi possano essere scelte da riprese ottenute durante voli fotografici con distanze ristrette fra le strisce. (*)

Riassunto:

Gli apparecchi della « II generazione » per la produzione di ortofotografie che si basano sull'impiego di una memoria per l'informazione altimetrica consentono l'allestimento decisamente più rapido e più economico delle ortofoto. Grazie alla successione senza discontinuità di modelli doppi si possono produrre delle mappe complete senza dover ricorrere alla compilazione. L'informazione altimetrica si può ottenere dalla memoria in due direzioni, di modo che da un lato diventa possibile il raddrizzamento dei singoli elementi dell'immagine, ossia si evitano i precedenti errori del sistema, mentre dall'altro vengono generate automaticamente le linee altimetriche e precisamente « striscia per striscia ». Con questi due processi viene aumentata non soltanto la precisione, ma si migliora anche la qualità dell'ortofotografia in una misura tale da non poterla più distinguere dalla stampa a contatto di una aerofotografia. L'aggiornamento delle mappe che oggi, a parte l'allestimento di nuove mappe, rappresenta ovunque il problema principale degli enti topografici, si può considerare risolto in maniera soddisfacente per le opere cartografiche a base di ortofotografie, grazie alla ripetuta utilizzazione della memoria dei dati altimetrici e all'accelerazione dell'allestimento delle planimetrie da ciò consentita. Per una lavorazione completamente automatica infine è disponibile il correlatore EC 5.

(Traduzione a cura di E. G. Kaetzler)

(*) In riguardo ai particolari relativi ai voli fotografici razionali vedasi la pubblicazione di W. Brucklacher, Oberkochen « Zur Frage des optimalen Bildmasstabes bei der Herstellung von Orthophotokarten » su *Bildmessung und Luftbildwesen* 1970, fascicolo 3.