

Φωτογραμμετρική Απόδοση με Η/Υ: Αναλυτικοί Προσανατολισμοί

Χ. ΠΟΤΣΙΟΥ, Γ. ΜΠΑΝΤΕΚΑΣ

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία ερευνήθηκε η χρήση, με τη βοήθεια συστήματος υπολογιστή, ημιαυτόματων μεθόδων αποκατάστασης του προσανατολισμού, που έχουν σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση κόστους και χρόνου μιας φωτογραμμετρικής απόδοσης. Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι: α) ο στεροπλανιγράφος C8 της Zeiss Oberkochen υψηλής ακρίβειας, β) η μονάδα ψηφιακής μέτρησης και καταγραφής συντεταγμένων X, Y, Z το RSS-4 της Dell Foster Co, γ) micro υπολογιστής HP 9845 του Εργαστηρίου Φωτομετραμμετρίας του ΕΜΠ. Συντάχθηκαν τέσσερα προγράμματα υπολογισμού των παραμέτρων σχετικού και απόλυτου προσανατολισμού.

Computer Assisted Photogrammetry: Analytical Orientations

CH. POTSIU, J. BADEKAS

Abstract

The present work deals with the research on improving the procedure of orientation of stereopairs on analogue photogrammetric instruments using semiautomated methods. This approach brings a considerable time and cost-saving. This approach brings a considerable time and cost-saving. The system of the NTU of Athens consisted of Zeiss Oberkochen Stereoplanigraph C8, RSS-4 Dell Foster digitizing unit for X, Y, Z coordinates and the micro computer HP 9845S has been used for this work. Four different programmes for calculation of relative and absolute orientation, using either approximate or full formulas to fit in any kind of application, were written.

Εισαγωγή

Ο Η/Υ έχει ανατρέψει και εκσυγχρονίσει πάρα πολλές γνωστές τεχνικές διαδικασίες. Ουσιαστική είναι τώρα η συμμετοχή του σ' όλο το φάσμα των εργασιών της Γεωδαισίας, της Φωτογραμμετρίας και της Χαρτογραφίας. Μιά συγκεκριμένη περιοχή χρήσης του Η/Υ στη Φωτογραμμετρία είναι η φωτογραμμετρική απόδοση.

Η μελέτη αυτή στοχεύει στην αξιοποίηση του Η/Υ για το πρώτο μέρος της διαδικασίας αυτής, τους Φωτογραμμετρικούς προσανατολισμούς και αποτελεί μέρος ευρύτερης μελέτης αναλυτικών φωτογραμμετρικών αποδόσεων και ψηφιακών καταγραφών. Πιο συγκεκριμένα αφορά αναλυτικούς υπολογισμούς των στοιχείων προσανατολισμού ενός ζεύγους αεροφωτογραφιών και την αποκατάσταση των προσανατολισμών σε αναλογικά φωτογραμμετρικά όργανα με άμεση σύνδεση με ηλεκτρονικές υπολογιστικές μονάδες. Το συγκεκριμένο σύστημα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας του ΕΜΠ περιλαμβάνει : α) το στεροπλανιγράφο C8 της Zeiss Oberkochen, αναλογικό όργανο φωτογραμμετρικών αποδόσεων υψηλής ακρίβειας, β) μονάδα ψηφιακής μέτρησης και καταγραφής συν/νων X,Y,Z το RSS-4 της Dell Foster Co, γ) micro υπολογιστή HP9845.

Στο στάδιο αυτό υπολογίζονται αναλυτικά οι παράμετροι του σχετικού και απόλυτου προσανατολισμού με χρήση είτε προσεγγιστικού είτε πλήρους μαθηματικού μοντέλου και στη συνέχεια υπολογίζονται συντεταγμένες εδάφους μεμονωμένων σημείων με δυνατότητα επιλογής αναλυτικής ή αναλογικής διαδικασίας.

Στην εργασία αυτή εκτός από τη θεωρητική ανάπτυξη της όλης διαδικασίας δίνεται και πρακτική εφαρμογή από την οποία προκύπτει ότι η ακρίβεια στον προσδιορισμό των συντεταγμένων εδάφους σημείων είναι καλλίτερη από 20 μμ στην κλίμακα των εικόνων.

1. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Συνήθως για την αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού στα αναλογικά όργανα ακολουθείται η εμπειρική μέθοδος των διαδοχικών προσεγγίσεων. Διορθώνεται, δηλαδή, η παράλλαξη στα 6 χαρακτηριστικά σημεία του μοντέλου και επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι πλήρους εξάλειψής της.

Αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια του απόλυτου προσανατολισμού ακολουθείται εμπειρική γραφική μέθοδος, στο πρώτο στάδιο της οποίας

πραγματοποιείται μιά παράλληλη μεταφορά και στρόφη k γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του σχεδίου σχεδιάσεως, και έν συνεχεία η υψομετρία αυτού.

Η προσέγγιση του προβλήματος του εκφυγχρονισμού και της επιτάχυνσης των μεθόδων αυτών έγινε σταδιακά. Αρχικά μεν, χρησιμοποιήθηκε διαδικασία παρόμοια με τις εμπειρικές μεθόδους και ένα προσεγγιστικό μαθηματικό μοντέλο, βασισμένο σε ορισμένες παραδοχές, όπως π.χ. την επιπεδότητα του μοντέλου και την περίπου κατακόρυφη λήψη. Έν συνεχεία, χρησιμοποιήθηκε γενικό μαθηματικό μοντέλο, που ασφαλώς εκφράζεται με πιο σύνθετες μαθηματικές σχέσεις δεν παρουσιάζει όμως περιορισμούς.

1.1. Προσεγγιστικό μαθηματικό μοντέλο

Η πορεία που ακολουθεί το μαθηματικό αυτό μοντέλο είναι η εξής:

- α) Υπολογιστικός προσδιορισμός των στοιχείων του σχετικού προσανατολισμού
- β) Υπολογιστικός προσδιορισμός κλίμακας του μοντέλου και γενικών στρωφών Ω και Φ .

Για τον σχετικό προσανατολισμό χρησιμοποιήθηκε σαν εξίσωση παρατήρησης, η εξίσωση της παράλλαξης:

$$P_{\psi} = -p_y = d\psi_1 - d\psi_2$$

Η γενική μορφή της εξίσωσης αυτής είναι:

$$\begin{aligned} -P_{\psi} = & db\psi_1 - db\psi_2 - \frac{\psi_1}{H} dbz_1 + \frac{\psi_2}{H} dbz_2 + x_1 dk_1 - x_2 dk_2 + \frac{x_1 \psi_1}{H} d\phi_1 - \\ & - \frac{x_2 \psi_2}{H} d\phi_2 - \left(1 + \frac{\psi_1^2}{H^2}\right) H d\omega_1 + \left(1 + \frac{\psi_2^2}{H^2}\right) H d\omega_2 \end{aligned}$$

ένώ για τα παρατηρούμενα μεγέθη υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ:

- α) των συντεταγμένων μοντέλου X, Y συνήθως των 6 χαρακτηριστικών σημείων του μοντέλου (με δυνατότητα χρησιμοποίησης περισσότερων σημείων εάν τούτο θεωρηθεί χρήσιμο) και της παράλλαξης P_{ψ} που λαμβάνεται από μετρητή στο CB . Οι συντεταγμένες μετρώνται με αρχή την προβολή του πρώτου σημείου λήψεως, επομένως οι συντεταγμένες της δεύτερης εικόνας μεταφερόμενες στη προβολή του δεύτερου σημείου λήψεως γίνονται $(x-b)$ και ψ , όπου b η βάση των φωτογραφιών στο όργανο.
- β) των συντεταγμένων οργάνου x_1, y_1, x_2, y_2 με αρχή την προβολή του πρώτου και δεύτερου σημείου λήψεως αντίστοιχα οπότε η τιμή της

παράλλαξης υπολογίζεται ως η διαφορά $\psi_1 - \psi_2$ (Στη περίπτωση αυτή οι σκοπεύσεις γίνονται φυσικά, μονοσκοπικά).

Ο αριθμός των εξισώσεων παρατήρησης είναι ίσος με τον αριθμό των σκοπευθέντων σημείων (σε κάθε σημείο αντιστοιχεί μία εξίσωση παρατήρησης), ο δε αριθμός των αγνώστων είναι 5 (οι 5 παράμετροι του σχετικού προσανατολισμού). Συνήθως σκοπεύονται η σημεία όπου $\eta \geq 6$ και ο προσδιορισμός των στοιχείων γίνεται με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.

Στο στάδιο αυτό υπάρχει η δυνατότητα επιλογής των 5 εκείνων στοιχείων του σχετικού προσανατολισμού που θα ληφθούν σαν άγνωστοι μεταξύ των $\omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2, k_1, k_2, b_\psi, b_z$. Υπάρχει δηλαδή και εδώ η δυνατότητα εφαρμογής στο όργανο (8) εξαρτημένου ή ανεξάρτητου προσανατολισμού, οπότε βέβαια και η εξίσωση παρατήρησης εφαρμόζεται ανάλογα. Ο προσδιορισμός των στοιχείων του σχετικού προσανατολισμού απαιτεί κατά κανόνα ένα αριθμό επαναλήψεων για την εύρεση των τελικών τιμών.

Ο απόλυτος προσανατολισμός ενός ζεύγους αεροφωτογραφιών συνίσταται στην αποκατάσταση α) της κλίμακας του μοντέλου και β) της υψομετρίας αυτού. Η ακολουθούμενη πορεία περιλαμβάνει τα δύο αυτά στάδια:

α) Επιλέγεται η επιθυμητή κλίμακα του μοντέλου και υπολογίζεται ο λόγος της τιμής της απόστασης μεταξύ δύο φωτοσταθερών στην επιθυμητή κλίμακα προς τη μετρηθείσα τιμή της ίδιας απόστασης στην υπάρχουσα κλίμακα του μοντέλου. Υπολογίζονται όλοι οι δυνατοί λόγοι ανάλογα με τον αριθμό των διατιθέμενων φωτοσταθερών και ο συντελεστής κλίμακας σαν μέσος όρος των λόγων αυτών. Η ρύθμιση των συνιστωσών της βάσης b_x, b_ψ, b_z στο όργανο γίνεται με πολλαπλασιασμό της τιμής κάθε μίας συνιστώσας με τον συντελεστή κλίμακας και τοποθέτηση των προκύπτουσών τιμών τους στους αντίστοιχους μετρητές του οργάνου.

β) για την οριζοντίωση του μοντέλου χρειάζονται τουλάχιστον 3 φωτοσταθερά και ακολουθείται η εξής διαδικασία. Για απλούστευση των υπολογισμών μηδενίζεται η απόκλιση υψομέτρου μοντέλου από το πραγματικό υψόμετρο εδάφους στο φωτοσταθερό 1, ήτοι, σκοπεύεται το σημείο 1 και τοποθετείται στο μετρητή των υψομέτρων η ένδειξη που πρέπει να υπάρχει σε περίπτωση που το μοντέλο έχει προσανατολισθεί απόλυτα, δηλαδή το πραγματικό υψόμετρο. Αρα, στο σημείο 1, έχουμε $dh_1 = 0$. Εν συνεχεία σκοπεύονται τα τρία φωτοσταθερά και λαμβάνονται από την καταγραφική μονάδα οι συντεταγμένες μοντέλου αυτών. Από τις συντεταγμένες αυτές, καθορίζονται οι εξισώσεις των ευθειών 1-2 και 2-3:

$$1-2 : \psi = a_1 x + \beta_1 \quad (1.1)$$

$$2-3 : \psi = a_2 x + \beta_2 \quad (1.2)$$

θεωρείται ευθεία 3-3' παράλληλη προς τον άξονα ψ και ευθεία 1-1' παράλληλη προς τον άξονα x .

$$3-3' : \psi = a_3 x \quad (1.3)$$

$$1-1' : \psi = \beta \quad (1.4)$$

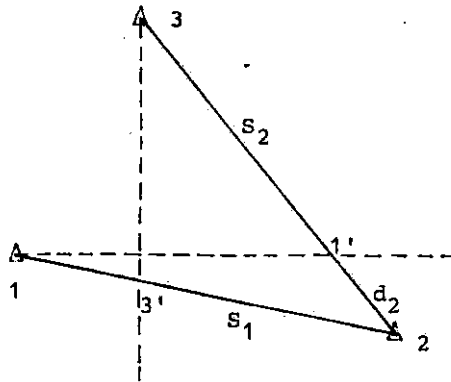
Έτσι, υπολογίζονται οι οριζόντιες συντεταγμένες των σημείων 3' και 1': από σχ.(1.1), σχ.(1.3): x_3^u, ψ_3^u ,

από σχ.(1.2), σχ.(1.4): x_1^u, ψ_1^u ,

ακολούθως υπολογίζονται οι αποστάσεις $(13')=d_1$ και $(31')=d_2$ (βλ.σχήμα 1.1/). θεωρείται τρισσορθογώνιο σύστημα $x\psi z$ με αρχή το σημείο 1 (βλ.σχήμα 1.2/). Στο επίπεδο που ορίζεται από τον άξονα z και την ευθεία 1-2, με αρχή το σημείο 1, άξονα των τετμημένων την ευθεία που ορίζεται από το 1 και την προβολή του σημείου 2 στο οριζόντιο επίπεδο (x,ψ) και άξονα των τεταγμένων τον άξονα z , οι συντεταγμένες των σημείων είναι:

$$1(0,0), \quad 2(s_1, dh_2), \quad 3'(d_1, dh_3) \quad (1.5)$$

Σε ανάλογο σύστημα με αρχή την προβολή του φωτοσταθερού 3, άξονα των τετμημένων των ευθεία των οριζόντιων προβολών του 3 και 2 και άξονα των τεταγμένων τον z , οι συντεταγμένες των σημείων είναι:



Σχ.1.1

$$3(0, dh_3), \quad 2(s_2, dh_2), \quad 1'(d_2, dh_1) \quad (1.6)$$

όπου: $dh_1 = h_{\text{πραγματικό}} - h_{\text{μοντέλου}}$

$S_1 = \text{απόσταση } 1,2$, $S_3 = \text{απόσταση } 3,3'$

$S_2 = \text{" } 2,3$, $S_4 = \text{" } 1,1'$

εκ των (1.5) συνεπάγεται ότι:

$$dh'_3 = \frac{dh_2}{S_1} \cdot d_1$$

ομοίως εκ των (1.6) συνεπάγεται ότι:

$$dh'_1 = \frac{dh_2 - dh_3}{S_2} \cdot d_2 + dh_3$$

επομένως: $\Delta\Omega = \frac{dh'_3 - dh_3}{S_3} \cdot \rho^c$

$$\Delta\Phi = \frac{dh'_1 - dh_1}{S_4} \cdot \rho^c$$

οι δε διορθωτικές τιμές των συνιστωσών της βάσης λόγω της τοποθέτησης των Ω και Φ στο όργανο, είναι:

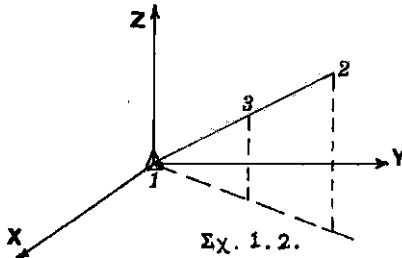
$$\Delta bx = bz \cdot \Delta\Phi$$

$$\Delta b\psi = bz \cdot \Delta\Omega$$

$$\Delta bz = bx \cdot \Delta\Phi + b\psi \cdot \Delta\Omega \quad (\text{βλέπε 2 της βιβλιογραφίας})$$

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου οι διορθωτικές τιμές $\Delta\Omega$ και $\Delta\Phi$ φθάσουν την επιθυμητή τάξη μεγέθους π.χ. μικρότερες από 1^c που αντιστοιχεί σε μία χαραγή του μετρητή του C8.

Στη περίπτωση που διατίθενται φωτοσταθερά περισσότερα από 3, τότε γίνονται επιλύσεις με συνδιασμούς ανά τρία και υπολογίζονται οι μέσες τιμές των στροφών Ω και Φ .



1.2. Το γενικό μαθηματικό μοντέλο

Τα σφάλματα του προσεγγιστικού μαθηματικού μοντέλου αυξάνονται σε περίπτωση που το ανάγλυφο του εδάφους είναι μεγάλο ή σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται φωτογραμμετρικές λήψεις που αποκλί- νουν πολύ από τις κατακόρυφες λήψεις, από τη λεγόμενη δηλαδή κανονι- κή περίπτωση. Στις περιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται σφάλματα στο σχετικό προσανατολισμό, τα οποία μεταδίδονται και στον απόλυτο. Έτσι, συντάχτηκε το μοντέλο που θα αναπτυχθεί κατωτέρω, που έχει τη δυνα- τότητα και υπολογισμού συντεταγμένων εδάφους σημείων, χρησιμοποιεί- τέ πλήρεις μαθηματικούς τύπους. Για την επίλυση του προσανατολισμού ακολουθήθηκε η πορεία του αναλυτικού προσδιορισμού του σχετικού και στη συνέχεια του απόλυτου προσανατολισμού. Για το σχετικό προ- σανατολισμό χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση της συνεπιπεδότητας: (βλέπε Albertz/Kreiling).

$$\Delta = \begin{vmatrix} bx & by & bz \\ x_1 & \psi_1 & z_1 \\ x_2 & \psi_2 & z_2 \end{vmatrix} = 0$$

η τιμή της συνιστώσας της βάσης ως προς άξονα x, bx θεωρείται μονα- διαία. Επομένως, η συνθήκη της συνεπιπεδότητας παίρνει τη μορφή:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \bar{x}_2 \\ b\psi & \psi_1 & \bar{\psi}_2 \\ bz & z_1 & \bar{z}_2 \end{vmatrix}$$

όπου πλέον $b\psi, bz$ οι τιμές των συνιστωσών της βάσης ως προς τους άξονες ψ και Z αντί- στοιχα, διηρημένες με την τιμή bx .

x_1, ψ_1, z_1 συντεταγμένες αριστερής εικόνας ($z' = -c$)

$$\text{και} \quad \begin{bmatrix} \bar{x}_2 \\ \bar{y}_2 \\ \bar{z}_2 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -c \end{bmatrix}$$

όπου M_2 ο πίνακας στροφής των αρχικών τιμών γωνιών ω_2, φ_2, k_2 .

Εφ' όσον οι παράμετροι του σχετικού προσανατολισμού είναι 5 μπορούμε να τις προσδιορίσουμε εφαρμόζοντας τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων σε ελαχιστοτετραγωνική επίλυση για αριθμό παρατηρούμε- νων σημείων στις δύο εικόνες $n > 5$.

Σαν εξισώσεις παρατηρήσεως θεωρείται η για κάθε σημείο γραμμικοποιημένη συνάρτηση Δ , ήτοι η ανάπτυξη της σε σειρά κατά Taylor γύρω από κατάλληλα εκλεγμένες προσεγγιστικές τιμές των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού. Έτσι, θεωρώντας σαν τέτοιες παραμέτρους τα $b\psi, bz, \omega_2, \varphi_2, k_2$ και αναπτύσσοντας ως προς αυτές τη συνάρτηση Δ έχουμε για το σημείο i :

$$U_i = a_1 \cdot db\psi + a_2 \cdot dbz + a_3 \cdot d\omega_2 + a_4 \cdot d\varphi_2 + a_5 \cdot dk_2 + \Delta_0$$

όπου : a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 οι συντελεστές των αγνώστων που είναι βέβαια οι μερικές παράγωγοι της Δ ως προς τον αντίστοιχο άγνωστο.

$$a_1 = \frac{\partial \Delta}{\partial b\psi} = \begin{vmatrix} 0 & x_1 & \bar{x}_2 \\ 1 & \psi_1 & \bar{\psi}_2 \\ 0 & z_1 & \bar{z}_2 \end{vmatrix}$$

$$a_2 = \frac{\partial \Delta}{\partial bz} = \begin{vmatrix} 0 & x_1 & \bar{x}_2 \\ 0 & \psi_1 & \bar{\psi}_2 \\ 1 & z_1 & \bar{z}_2 \end{vmatrix} \quad a_3 = \frac{\partial \Delta}{\partial \omega_2} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & 0 \\ b\psi & \psi_1 & -\bar{z}_2 \\ bz & z_1 & \bar{\psi}_2 \end{vmatrix}$$

$$a_4 = \frac{\partial \Delta}{\partial \varphi} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & -\bar{\psi}_2 \sin\omega + \bar{z}_2 \cos\omega \\ b\psi & \psi_1 & \bar{x}_2 \sin\omega \\ bz & z_1 & -\bar{x}_2 \cos\omega \end{vmatrix}$$

$$a_5 = \frac{\partial \Delta}{\partial k} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & -\bar{\psi}_2 \cos\omega \cdot \cos\varphi - \bar{z}_2 \sin\omega \cos\varphi \\ b\psi & \psi_1 & \bar{x}_2 \cos\omega \cdot \cos\varphi - \bar{z}_2 \sin\varphi \\ bz & z_1 & \bar{x}_2 \sin\omega \cdot \cos\varphi + \bar{\psi}_2 \sin\varphi \end{vmatrix}$$

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \bar{x}_2 \\ b\psi & \psi_1 & \bar{\psi}_2 \\ bz & z_1 & \bar{z}_2 \end{vmatrix}$$

Επιλέγονται προσεγγιστικές τιμές των αγνώστων $b\psi, bz, \omega_2, \varphi_2, k_2$, επιλύεται το σύστημα και υπολογίζονται διορθωτικές τιμές $db\psi, dbz, d\omega, d\varphi, dk$. Σαν νέες προσεγγιστικές τιμές λαμβάνονται οι:

$$b\psi^{v+1} = b\psi^v + db\psi$$

$$bz^{v+1} = bz^v + dbz$$

$$\omega_2^{v+1} = \omega_2^v + d\omega_2$$

$$\varphi_2^{v+1} = \varphi_2^v + d\varphi_2$$

$$k_2^{v+1} = k_2^v + dk_2$$

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου οι νέες διορθώσεις γίνουν μικρότερες από κάποιο προκαθορισμένο όριο. Έτσι, τοποθετούνται οι τελικές τιμές των στροφών ω_2, φ_2, k_2 στους μετρητές του στερεοπλανιγράφου. Διορθώνεται η παράλλαξη ψ στο σημείο 1 (κεντρικό σημείο αριστερής εικόνας) και τοποθετείται στο μετρητή του bz του στερεοπλανιγράφου η υπολογισθείσα από την ανωτέρω διαδικασία τιμή του bz πολλαπλασιασμένη όμως με την τιμή της συνιστώσας της βάσης bx (η τιμή αυτή λαμβάνεται από την ανάγνωση του αντίστοιχου μετρητή bx του στερεοπλανιγράφου).

Για τον υπολογισμό των εικονοσυντεταγμένων, που είναι τα παρατηρούμενα μεγέθη στη παραπάνω επίλυση έχει διατυπωθεί ένα συναρτησιακό μοντέλο που συνδέει τις μετρήσεις στο χώρο του μοντέλου του C8 με το σύστημα συντεταγμένων εικόνας. Ήτοι: οι μετρηθείσες συντεταγμένες μέσω του συστήματος RSS-4, υφίστανται τους ακόλουθους μετασχηματισμούς: 1) αναγωγή σε ενιαία κλίμακα των συντεταγμένων X, Y, Z , 2) μετατροπή από πλαγιογώνιο σύστημα σε τρισσορθογώνιο, 3) στροφή κατά τις γωνίες φ, ω, k ούτως ώστε το σύστημα να γίνει παράλληλο προς το σύστημα των συντεταγμένων εικόνας και 4) αποκατάσταση της κλίμακας και παράλληλη μετάθεση για να ταυτιστεί το σύστημα μέτρησης με το σύστημα των εικονοσυντεταγμένων.

Η σύνθεση των μετασχηματισμών αυτών δίνει τη σχέση που συνδέει τα δύο συστήματα συντεταγμένων:

$$(x \ \psi \ -c)' = K.A. (X_m \ Y_m \ Z_m)' + K (X_0 \ Y_0 \ Z_0)'$$

Οι μετρήσεις συντεταγμένων για το σχετικό προσανατολισμό γίνονται σε σταθερό ύψος προβολής, συνεπώς σταθερό λόγο $\frac{-c}{Z_0}$, οπότε έχουμε:

$$x_i = \frac{P_1 X_m + P_2 Y_m + P_3}{P_7 X_m + P_8 Y_m + 1}$$

$$\psi_i = \frac{P_4 X_m + P_5 Y_m + P_6}{P_7 X_m + P_8 Y_m + 1}$$

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών P_1, \dots, P_8 ακολουθείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, δηλαδή σκοπεύονται σημεία (≥ 4) σε ειδικές διατάξεις (π.χ. σε γυάλινες πλάκες με χαραγμένο κάρναβο ακριβείας), των οποίων είναι γνωστές οι εικονοσυντεταγμένες (x_1, ψ_1), οπότε για κάθε μέτρηση αντιστοιχούν δύο εξισώσεις παρατήρησης.

Μετά τον προσδιορισμό του σχετικού προσανατολισμού, δημιουργία μοντέλου, ακολουθεί ο υπολογισμός του απόλυτου με καθαρά αναλυτική διαδικασία που είναι δυνατόν να ακολουθήσει τα εξής δύο ισόδυναμα μαθηματικά μοντέλα:

α) Με μία σειρά σκοπεύσεων στα φωτοσταθερά λαμβάνονται οι συντεταγμένες μοντέλου αυτών, x_1, ψ_1, z_1 .

Εστω X_1, Y_1, Z_1 οι συντεταγμένες εδάφους τους.

Υπολογίζονται οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους μοντέλου και εδάφους ως εξής:

$$X_S = \frac{[X_1]}{n}, \quad Y_S = \frac{[Y_1]}{n}, \quad Z_S = \frac{[Z_1]}{n} \quad x_S = \frac{[x_1]}{n}, \quad \psi_S = \frac{[\psi_1]}{n}, \quad z_S = \frac{[z_1]}{n}$$

όπου η - αριθμός των φωτοσταθερών και $i=1 \div n$ επομένως,

$$\bar{X}_1 = X_1 - X_S, \quad \bar{Y}_1 = Y_1 - Y_S, \quad \bar{Z}_1 = Z_1 - Z_S$$

$$\bar{x}_1 = x_1 - x_S, \quad \bar{\psi}_1 = \psi_1 - \psi_S, \quad \bar{z}_1 = z_1 - z_S$$

Από τον πίνακα στροφής M και τις συντεταγμένες μοντέλου, $\bar{x}_1, \bar{\psi}_1, \bar{z}_1$ υπολογίζονται οι προκύπτουσες συντεταγμένες εδάφους κάθε φωτοσταθερού.

$$\begin{aligned} \bar{X}'_1 &= \mu (m_{11}\bar{x}_1 + m_{12}\bar{\psi}_1 + m_{13}\bar{z}_1) \\ \bar{Y}'_1 &= \mu (m_{21}\bar{x}_1 + m_{22}\bar{\psi}_1 + m_{23}\bar{z}_1) \\ \bar{Z}'_1 &= \mu (m_{31}\bar{x}_1 + m_{32}\bar{\psi}_1 + m_{33}\bar{z}_1) \end{aligned} \quad (2.1)$$

οι συντεταγμένες αυτές $\bar{X}'_1, \bar{Y}'_1, \bar{Z}'_1$ διαφέρουν από τις πραγματικές $\bar{X}_1, \bar{Y}_1, \bar{Z}_1$ λόγω του ότι οι τιμές των Ω, Φ, K και μ είναι προσεγγιστικές. Συνεπώς, υπολογίζονται οι διορθωτικές τιμές των στροφών και της κλίμακας μ από την ακόλουθη σχέση:

$$(\bar{X}_1 - dX_0 \quad \bar{Y}_1 - dY_0 \quad \bar{Z}_1 - dZ_0)' = (1 + d\mu) M' (\bar{X}'_1 \quad \bar{Y}'_1 \quad \bar{Z}'_1)'$$

όπου M λαμβάνεται ο διαφορικός πίνακας στροφών, γιατί και αν ακόμα οι γωνίες είναι μεγάλες, με διαδοχικές επαναλήψεις καταλήγουμε στο

σωστό αποτέλεσμα. Έτσι, οι προκύπτουσες εξισώσεις παρατήρησης είναι γραμμικές:

$$\bar{X}-\bar{X}' = 0 \cdot d\Omega + \bar{Z}' \cdot d\Phi + (-\bar{Y}') \cdot dK + \bar{X}' \cdot d\mu + 1 \cdot dX_0 + 0 \cdot dY_0 + 0 \cdot dZ_0$$

$$\bar{Y}-\bar{Y}' = (-\bar{Z}') \cdot d\Omega + 0 \cdot d\Phi + (\bar{X}') \cdot dK + \bar{Y}' \cdot d\mu + 0 \cdot dX_0 + 1 \cdot dY_0 + 0 \cdot dZ_0$$

$$\bar{Z}-\bar{Z}' = (\bar{Y}') \cdot d\Omega + (-\bar{X}') \cdot d\Phi + 0 \cdot dK + \bar{Z}' \cdot d\mu + 0 \cdot dX_0 + 0 \cdot dY_0 + 1 \cdot dZ_0$$

Έτσι, με εφαρμογή της ΜΕΤ υπολογίζονται τα $d\Omega, d\Phi, dK, d\mu, dX_0, dY_0, dZ_0$. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου οι υπολογιζόμενες από τις σχέσεις (2.1) συντεταγμένες εδάφους συμπίσουν με τις πραγματικές. Επειδή οι παράμετροι του απόλυτου προσανατολισμού είναι 7, και από κάθε σημείο λαμβάνονται 3 εξισώσεις παρατήρησης, ο αριθμός των διατιθέμενων φωτοσταθερών η πρέπει να είναι $\eta \geq 3$.

β) Πάλι με μιιά σειρά σκοπεύσεων στα φωτοσταθερά λαμβάνονται οι συντεταγμένες μοντέλου αυτών και επιχειρείται ταύτιση των δύο συστημάτων (μοντέλου και εδάφους) με ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων παρατήρησης:

$$(\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{z}_1)' = \mu.M. (X_1 - X_0, Y_1 - Y_0, Z_1 - Z_0)' = F$$

όπου: M - ο πλήρης πίνακας στροφής Ω, Φ, K .

Οι γραμμικοποιημένες εξισώσεις παρατήρησης είναι:

$$\begin{aligned} x_m^p - x_m^u &= a_{11}d\Omega + a_{12}d\Phi + a_{13}dK + a_{14}d\mu + a_{15}dX_0 + a_{16}dY_0 + a_{17}dZ_0 \\ y_m^p - y_m^u &= a_{21}d\Omega + a_{22}d\Phi + a_{23}dK + a_{24}d\mu + a_{25}dX_0 + a_{26}dY_0 + a_{27}dZ_0 \\ z_m^p - z_m^u &= a_{31}d\Omega + a_{32}d\Phi + a_{33}dK + a_{34}d\mu + a_{35}dX_0 + a_{36}dY_0 + a_{37}dZ_0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

όπου a οι μερικές παράγωγοι της F ως προς τους αντίστοιχους αγνώστους.

Με επίλυση του κανονικού συστήματος υπολογίζονται οι διορθώσεις $d\Omega, d\Phi, dK, d\mu, dX_0, dY_0, dZ_0$, οπότε με διαδοχικές επαναλήψεις της διαδικασίας υπολογίζονται οι τελικές τιμές των παραμέτρων του απόλυτου προσανατολισμού.

Οι ανωτέρω περιγραφείσες μέθοδοι (α) και (β) αποτελούν στην πραγματικότητα δύο διαφορετικές προσεγγίσεις του ίδιου τρόπου επίλυσης, δίνουν συνεπώς τα ίδια αποτελέσματα και εφαρμόζονται σε περιπτώσεις που δεν είναι απαραίτητη η τοποθέτηση του απόλυτου προσανατολισμού.

νατολισμού του μοντέλου στον στερεοπλανιγράφο C8. Στις περιπτώσεις αυτές, τα αναλυτικώς υπολογιζόμενα στοιχεία του απόλυτου αποθηκεύονται στη μνήμη του υπολογιστή για να ακολουθήσει αναλυτική διαδικασία απόδοσης. Στο δε όργανο, παραμένει το μοντέλο όπως έχει δημιουργηθεί από το σχετικό προσανατολισμό.

γ) Αντίθετα, όταν χρειάζεται να υπολογιστούν οι τιμές των στροφών Ω και Φ που πρέπει να τοποθετηθούν στους μετρητές του στερεοπλανιγράφου, η επίλυση του απόλυτου προσανατολισμού πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Κατ' αρχάς γίνεται μία σειρά μετρήσεων των συντεταγμένων μοντέλου των φωτοσταθερών και εξ αυτών υπολογίζονται η στροφή K και η κλίμακα του μοντέλου, χρησιμοποιώντας τις δύο πρώτες οριζοντιογραφικές εξισώσεις του συστήματος (2.2) παραλείποντας τους όρους που αφορούν τις στροφές Ω και Φ και το Z_0 .

Μετά τον υπολογισμό αυτό, επιλέγεται μία κλίμακα μοντέλου για τον C8 και υπολογίζεται ένας συντελεστής κλίμακας βάσει του οποίου βρίσκονται οι νέες τιμές των συνιστωσών της βάσης και αποκαθίστανται. Λόγω αυτής της αλλαγής κλίμακας λοιπόν, είναι απαραίτητη μία νέα σειρά μετρήσεων συντεταγμένων μοντέλου των φωτοσταθερών. Χρησιμοποιώντας τις νέες αυτές συντεταγμένες γίνεται επίλυση με χρήση της 3ης εξίσωσης του συστήματος και έτσι αποκαθίστανται και η υψομετρία του μοντέλου.

$$\bar{Z}_m^T - \bar{Z}_m^U = a_{11} d\Omega + a_{12} d\Phi + a_{17} dz_0$$

αντίστοιχα, από την εξίσωση αυτή παραλείπονται οι όροι που έχουν σχέση με την οριζοντιογραφία (στροφή K , κλίμακα, X_0, Y_0).

Η πορεία αυτή του απόλυτου ακολουθείται γιατί η αδυναμία τοποθέτησης της γενικής K στο στερεοπλανιγράφο C8 καθιστά απαγορευτική την σε ένα στάδιο ταύτιση των συστημάτων μοντέλου-εδάφους, αφού οι προσδιοριζόμενες γωνίες Ω και Φ , μη μπορώντας βεβαίως να αναπληρώσουν την K , δεν σχηματίζουν το σωστό μοντέλο στο όργανο. Αντίθετα, όταν προσδιορίζεται πρώτα η οριζοντιογραφία (δηλαδή, αποκαθίσταται η κλίμακα) και μετά η υψομετρία (την οποία αφήνει ανεπηρέαστη η ύπαρξη ή μη της K), οι προσδιοριζόμενες γωνίες K, Ω, Φ είναι διαφορετικές από αυτές της ταυτόχρονης επίλυσης, αφού παραλείπονται ορισμένοι όροι π.χ. οι Ω και Φ και υπολογίζονται μόνο από την εξίσωση των Z αδιαφορώντας για τους αντίστοιχους όρους στις οριζοντιογραφικές εξισώσεις. Όμως, οι μ' αυτόν τον τρόπο υπολογιζόμενες

γενικές γωνίες σχηματίζουν το πραγματικό μοντέλο στο όργανο, αφού "κλείνουν" τόσο οι οριζοντιογραφικές όσο και οι υψομετρικές συντεταγμένες των χρησιμοποιούμενων φωτοσταθερών.

Μετά τον υπολογισμό των γενικών στροφών Ω και Φ που πρέπει να τοποθετηθούν στο στερεοπλανιγράφο, υπολογίζονται και οι διορθωτικές τιμές των συνιστωσών της βάσης προς αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού που με τις νέες επεμβάσεις διαταράσσεται.

$$\begin{aligned} \Delta bx &= bz \cdot \Delta\Phi & \Delta bz &= bx \cdot \Delta\Phi + bz \cdot \Delta\Omega \\ \Delta b\psi &= bz \cdot \Delta\Omega \end{aligned}$$

Για αναλυτικές αποδόσεις, το στάδιο της ολοκλήρωσης των διαδικασιών σχετικού και απόλυτου προσανατολισμού, ακολουθεί αυτό του αναλυτικού υπολογισμού συντεταγμένων εδάφους τυχόντων σημείων για τον οποίο χρειάζονται πολύ πιο απλές διαδικασίες. Έτσι, στην περίπτωση μεν της ταυτόχρονης επίλυσης του απόλυτου προσανατολισμού, όπου όλες οι υπολογισθείσες παράμετροι φυλάσσονται στη μνήμη του υπολογιστή, για κάθε σκοπευθέν σημείο με συντεταγμένες μοντέλου $\bar{X}_m, \bar{Y}_m, \bar{Z}_m$ χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \mu \cdot M' \begin{bmatrix} \bar{X}_m \\ \bar{Y}_m \\ \bar{Z}_m \end{bmatrix}$$

όπου X, Y, Z , οι συντεταγμένες εδάφους του σημείου, X_0, Y_0, Z_0 , μ οι προσδιορισθείσες παράμετροι και M ο πίνακας στροφής που προκύπτει από τις υπολογισθείσες τιμές των στροφών Ω, Φ, K . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε σημείο της απόδοσης.

Στη περίπτωση δε, που το μοντέλο έχει προσανατολισθεί στο όργανο κατά γενικές Ω και Φ στη μνήμη του υπολογιστή έχουν φυλαχθεί η υπολογισθείσα γενική στροφή K , τα X_0, Y_0, Z_0 και η εκλεγείσα κλίμακα μοντέλου μ . Έτσι για κάθε σκοπευθέν σημείο με συντεταγμένες μοντέλου $\bar{X}_m, \bar{Y}_m, \bar{Z}_m$ χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + \mu \cdot M'_K \begin{bmatrix} \bar{X}_m \\ \bar{Y}_m \end{bmatrix} \quad \text{και}$$

$$Z = Z_0 + \mu \cdot \bar{Z}_m$$

όπου M'_K ο πίνακας στροφής που προκύπτει από την υπολογισθείσα γενική στροφή K .

Φυσικά, για αναλογικές αποδόσεις με τον στερεοπλανιγράφο C8, ακολουθούνται οι γνωστές διαδικασίες, που αναφέρονται και στο παρ. 1 του οργάνου, με την προϋπόθεση βεβαίως ότι το μοντέλο έχει προσανατολισθεί κατά γενικές στροφές Ω και Φ στο όργανο, και έχουν εκλεγεί οι κλίμακες μοντέλου και σχεδίασης.

2. ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΕΝΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

Εφαρμόζοντας την ανωτέρω αναπτυχθείσα μεθοδολογία συντάχθηκαν τέσσερες παραλλαγές προγραμμάτων σε γλώσσα BASIC για τον μικρο υπολογιστή HP 9845S, του εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας.

Συντάχθηκε το πρόγραμμα που εφαρμόζει το προσεγγιστικό μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρ. 1.1. Στο πρόγραμμα αυτό δόθηκε το όνομα RAGRAF (Relative-Absolute-Graphically). Αρχικά, επιλύεται ο σχετικός προσανατολισμός και υπολογίζονται έτσι οι τιμές που πρέπει να τοποθετηθούν στους μετρητές $b\psi, b_z, \omega_2, k_2$ ή $\omega_2, \phi_1, \phi_2, k_1, k_2$ του στερεοπλανιγράφου C8.

Η ηλεκτρονική καταγραφική μονάδα συντεταγμένων RSS-4 χρησιμοποιεί σαν μονάδα μέτρησης την ίντσα. Προκειμένου όμως να δίνονται συντεταγμένες σε κλίμακα εικόνας με μονάδα μέτρησης το mm υπολογίζεται ένας συντελεστής κλίμακας τηλετύπου μετά από σκόπευση γνωστής απόστασης στην εικόνα (π.χ. απόσταση εικονοσημάτων). Έτσι, η είσοδος των δεδομένων στην περίπτωση μεν που τα παρατηρούμενα μεγέθη είναι οι συντεταγμένες x', ψ', x'', ψ'' (αριστερού και δεξιού εικονοφορέα αντίστοιχα) γίνεται αυτόματα, μέσω της RSS-4 που καταγράφει τις συντεταγμένες X, Y κάθε σκοπευθέντος σημείου στις αντίστοιχες φωτεινές της οθόνες και με ένα ποδοδιακόπτη μεταβιβάζονται οι τιμές αυτές των συντεταγμένων X, Y στον υπολογιστή. Εάν δε τα παρατηρούμενα μεγέθη είναι οι συντεταγμένες μοντέλου x, ψ και η τιμή της παράλλαξης ψ σε κάθε σκοπευθέν σημείο, τότε η είσοδος των x, ψ γίνεται αυτόματα η δε τιμή της παράλλαξης πληκτρολογείται διότι δεν είναι δυνατή η ηλεκτρονική της καταγραφή.

Η πορεία αυτή ακολουθείται τόσες φορές όσες είναι οι διαδοχικές επαναλήψεις που απαιτούνται για να πέσουν οι τιμές των διορθώσεων των στοιχείων του σχετικού προσανατολισμού κάτω από προκαθορισθείσες τιμές (π.χ. 10^{-5} rad για γωνιακά μεγέθη).

Σε κάθε επανάληψη εκτός από τις απαιτούμενες διορθώσεις των 5 παραμέτρων δίνονται και διαγνωστικά στοιχεία της πορείας της επί-

λυσης, όπως απομένουσες παραλλάξεις κ.α. Μετά την ολοκλήρωση του σχετικού προσανατολισμού, επιχειρείται η επίλυση του απόλυτου. Έτσι, ο συντελεστής του τηλετύπου τοποθετείται στο 2.54 (mm/ίντσα), αφού θα γίνουν πλέον μετρήσεις συντεταγμένων μοντέλου και όχι εικόνας. Ενώ, ο μοχλός καθορισμού της κλίμακας υψομέτρων στο στερεοπλανιγράφο καλό είναι, και αυτό ισχύει για όλα τα δημιουργηθέντα προγράμματα να τοποθετείται στην ένδειξη 1:10.000, διότι τότε οι ενδείξεις του μετρητικού συστήματος του στερεοπλανιγράφου για τις συντεταγμένες X,Y,Z μοντέλου είναι της ίδιας κλίμακας και μετρούνται με μονάδα μέτρησης το mm. Έτσι, έχοντας τοποθετήσει σαν συντελεστή κλίμακας της ηλεκτρονικής μονάδας τον αριθμό 2.54, οι ενδείξεις X,Y,Z μοντέλου της ηλεκτρονικής μονάδας μετρούνται σε mm και επομένως είναι δυνατός ανά πάσα στιγμή ο έλεγχος της σωστής λειτουργίας της ηλεκτρονικής μονάδας, αφού πλέον οι ενδείξεις της και οι ενδείξεις του μετρητικού συστήματος του στερεοπλανιγράφου πρέπει να ταυτίζονται.

Στο πρώτο στάδιο παρατηρούνται στερεοσκοπικά τα διατιθέμενα φωτοσταθερά των οποίων οι συντεταγμένες μοντέλου X,Y,Z μεταβιβάζονται αυτόματα στο πρόγραμμα. Επιλέγεται κάποια επιθυμητή κλίμακα μοντέλου και σαν έξοδος λαμβάνονται οι διορθωτικές τιμές των συνιστωσών της βάσης b_x, b_y, b_z , που τοποθετούνται στον στερεοπλανιγράφο. Σε δεύτερο στάδιο εισάγονται οι νέες συντεταγμένες μοντέλου X,Y,Z, των φωτοσταθερών και λαμβάνονται οι διορθωτικές τιμές των γενικών στροφών Ω και Φ και οι διορθωτικές τιμές των συνιστωσών της βάσης προς αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού από την επίδραση που επιφέρουν οι στροφές αυτές. Έτσι, οι τιμές των γενικών στροφών Ω και Φ τοποθετούνται στους μετρητές του στερεοπλανιγράφου, διορθώνεται ανάλογα η βάση και επαναλαμβάνεται η διαδικασία του δεύτερου σταδίου, έως ότου οι διορθωτικές αυτές τιμές γίνουν μικρότερες κάποιας επιθυμητής τάξης μεγέθους, π.χ. του 0.5 που είναι εκτίμηση στους μετρητές του C8.

Δεύτερο συντάχθηκε το πρόγραμμα ARANAB (Approximate Relative-ANalytical ABSolute). Το πρόγραμμα αυτό ακολουθεί για μεν τον υπολογισμό του σχετικού προσανατολισμού το προσεγγιστικό μαθηματικό μοντέλο (παρ.1.1), για δε τον υπολογισμό του απόλυτου το πλήρες μοντέλο ταυτόχρονου προσδιορισμού των στοιχείων του προσανατολισμού με διαφορικό πίνακα στροφών M (παρ.1.2 (α)). Κατά το στάδιο του απόλυτου προσανατολισμού εισάγονται άπαξ οι συντεταγμένες μοντέλου

X, Y, Z των (οσωνδήποτε) υπαρχόντων φωτοσταθερών και λαμβάνεται σαν έξοδος η κλίμακα του μοντέλου, οι συντεταγμένες X_0, Y_0, Z_0 , και οι γενικές στροφές Ω, Φ και K .

Τα αποτελέσματα αυτά φυλάσσονται στη μνήμη του υπολογιστή. Μετά, απευθύνεται ερώτηση προς το χρήστη εάν πρόκειται να προχωρήσει σε υπολογισμό συντεταγμένων εδάφους σημείων και σε περίπτωση καταφατικής απάντησης εισάγονται από την RSS-4 οι συντεταγμένες μοντέλου X, Y, Z κάθε σημείου και λαμβάνονται οι αντίστοιχες X, Y, Z εδάφους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε σημείο και σταματά με σχετική επέμβαση του χρήστη.

Στο τρίτο πρόγραμμα που δημιουργήθηκε δόθηκε το όνομα RAOFF1 (Relative-Absolute-Orientation-using Full Formulas-1version). Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί το γενικό μαθηματικό μοντέλο που περιγράφηκε στην παρ.1.2., για το σχετικό και στην παρ. 1.2 (β) για το απόλυτο.

Αρχικά, υπολογίζονται οι παράμετροι του μετασχηματισμού συντεταγμένων από τη μορφή που δίνονται από την ηλεκτρονική καταγραφική μονάδα σε συντεταγμένες εικόνας ακολουθώντας την εξής διαδικασία:

Χρησιμοποιούνται οι γυάλινες πλάκες με τον χαραγμένο κάρναβο και γίνεται επ'αυτών ένας ωρισμένος αριθμός σκοπεύσεων, σε σταθερό ύψος Z , των σημείων του κάρναβου, και με ελαχιστοτετραγωνική επίλυση υπολογίζονται οι παράμετροι μετασχηματισμού. Τότε, πλέον τοποθετείται στους εικονοφορείς το στερεοζεύγος και γίνονται σκοπεύσεις των 6 χαρακτηριστικών (ή και περισσότερων) σημείων, στο ίδιο πάντα ύψος Z , οι τιμές δε των συντεταγμένων x, ψ που δίνει η ηλεκτρονική μονάδα μετασχηματίζονται, βάσει των ανωτέρω υπολογισθέντων συντελεστών σε συντεταγμένες εικόνας, οι οποίες εισάγονται σαν δεδομένα για την επίλυση του σχετικού προσανατολισμού.

Για να αποφευχθεί η σχετική ταλαιπωρία της διπλής τοποθέτησης πλακών στους εικονοφορείς του στερεοπλανιγράφου, και η σχετική αργοπορία από τη διαδικασία αυτή, είναι δυνατόν οι παράμετροι του μετασχηματισμού να υπολογιστούν με σκοπεύσεις σε 4 μόνο σημεία γνωστών εικονοσυντεταγμένων, ήτοι στα 4 εικονοσήματα κάθε εικόνας. Εν συνεχεία, γίνεται η οριζως επίλυση του σχετικού προσανατολισμού με δεδομένα τις συντεταγμένες εικόνας x, ψ και x', ψ' αριθ-

στερης και δεξιάς αντίστοιχα, για αριθμό σκοπευθέντων σημείων η≥6. Σαν έξοδος λαμβάνονται οι τιμές των μετρητών $bz, \omega_2, \phi_2, k_2$. Λαμβάνεται επίσης η τιμή της συνιστώσας της βάσης, που όμως δεν είναι η τιμή που πρέπει να τοποθετηθεί στον μετρητή του οργάνου, αλλά μία "διαφορική τιμή" της συνιστώσας της βάσης στην οποία πρέπει να προστεθεί μία ποσότητα που εξαρτάται από σύστημα μέτρησης. Το θέμα αντιμετωπίζεται με μία στερεοσκοπική παρατήρηση στο κέντρο του μοντέλου (χαρακτηριστικό σημείο 1) αφού έχουν τοποθετηθεί οι υπόλοιπες τιμές στους μετρητές του οργάνου. Αντίστοιχα σαν είσοδος για τον απόλυτο χρησιμοποιούνται οι συντεταγμένες μοντέλου των φωτοσταθερών (x,ψ,z) και σαν έξοδος λαμβάνονται οι τιμές της κλίμακας και των γενικών στροφών K,Ω και Φ. Σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί υπολογισμό συντεταγμένων εδάφους ακολουθείται η αντίστοιχη διαδικασία που περιγράφηκε και στο πρόγραμμα ARANAB.

Στο πρόγραμμα αυτό, κατά τη διάρκεια επίλυσης τόσο του σχετικού όσο και του απόλυτου προσανατολισμού, σαν συντελεστής κλίμακας της ηλεκτρονικής καταγραφικής μονάδας λαμβάνεται ο αριθμός 2.54 (mm/ίντσα).

Τέλος, το τέταρτο πρόγραμμα με το όνομα RAOFF2 (Relative-Absolute-Orientation-using Full Formulas-2 version), δημιουργήθηκε ακολουθώντας το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφηκε στην παρ.1.2 για το σχετικό, δηλαδή όμοια με το πρόγραμμα RAOFF1, και για τον απόλυτο χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παρ.1.2 (γ). Δηλαδή, μετά τη δημιουργία του μοντέλου στο όργανο, εισάγεται μία σειρά μετρήσεων συντεταγμένων μοντέλου των φωτοσταθερών, υπολογίζεται η υπάρχουσα κλίμακα μ και η γενική στροφή K. Επιλέγεται μία κλίμακα στο όργανο 1/Sc και εισάγεται στο πρόγραμμα ο παρανομαστής Sc. Λαμβάνονται οι νέες τιμές των συνιστωσών της βάσης προς αποκατάσταση της επιλεγμένης κλίμακας και τοποθετούνται στους μετρητές του οργάνου. Εισάγεται νέα σειρά μετρήσεων των συντεταγμένων των φωτοσταθερών και υπολογίζονται και τοποθετούνται οι τιμές των μετρητών των γενικών στροφών Ω και Φ, καθώς και οι διορθωτικές τιμές των συνιστωσών της βάσης, Δbx, Δbψ, Δbz ώστε να εξαλειφθεί το σφάλμα που επιφέρουν στον σχετικό προσανατολισμό οι Ω και Φ με την τοποθέτησή τους στο όργανο. Η επιλεγμένη κλίμακα και η υπολογισθείσα στροφή K φυλάσσονται στον υπολογιστή και απευθύνεται ερώτηση στον χρήστη εάν πρόκειται να συνεχίσει, με αναλυτικό προσδιορισμό συντεταγμένων εδάφους σημείων, σε αυτόματη σχε-

δίαση. Στη περίπτωση αυτή εισάγονται οι συντεταγμένες μοντέλου κάθε σημείου και λαμβάνονται από το πρόγραμμα οι συντεταγμένες εδάφους αυτού.

3. ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΕΝΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ (θεωρητικά πεδία ελέγχου)

3.1. Αμέσως μετά τη δημιουργία και τη σύνταξη των προγραμμάτων που περιγράφηκαν ανωτέρω, επιχειρήθηκε η εφαρμογή τους με θεωρητικά δεδομένα ούτως ώστε να γίνει έλεγχος της ορθότητας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων τους.

Κατ' αρχάς έγινε έλεγχος των αποτελεσμάτων του σχετικού προσανατολισμού του προγράμματος RAGRAF (παρ.1.1). Προς τούτο θεωρήθηκαν σαν δεδομένα τα αποτελέσματα με τη μορφή "εικοσυντεταγμένων" του προγράμματος CØLLIN της βιβλιοθήκης προγραμμάτων του εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας. Το CØLLIN δέχεται σαν είσοδο στις συντεταγμένες εδάφους των σημείων του πεδίου ελέγχου καθώς και τα στοιχεία προσανατολισμού των (πλασματικών) "εικόνων" και εφαρμόζοντας τη συνθήκη συγγραμμικότητας, υπολογίζει συντεταγμένες εικόνας. Συνεπώς, δεν μένει παρά να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του σχετικού του RAGRAF με τα στοιχεία προσανατολισμού που δόθηκαν σαν δεδομένα στο CØLLIN για να πραγματοποιηθεί ο ζητούμενος έλεγχος.

Ετσι, χρησιμοποιήθηκε σαν πεδίο ελέγχου (σημεία παρατήρησης για το σχετικό προσανατολισμό) τα 9 σημεία με τις παρακάτω συντεταγμένες εδάφους (σε m):

a/a	X	Y	Z
1	0	2000	300
2	0	0	300
3	1000	2000	300
4	1000	0	300
5	0	1000	300
6	500	2000	100
7	500	1000	100
8	500	0	100
9	1000	1000	300

θεωρήθηκαν δύο σειρές στροφών ω, φ, κ (μικρές και μεγάλες σχετικές γωνίες):

$$\begin{array}{llll} \alpha) & \omega_1 = 0^{\circ}5 & \omega_2 = 1^{\circ} & \text{και } \beta) & \omega_1 = 0^{\circ} & \omega_2 = 5^{\circ} \\ & \varphi_1 = 0^{\circ}5 & \varphi_2 = 0^{\circ} & & \varphi_1 = 0^{\circ} & \varphi_2 = 6^{\circ} \\ & \kappa_1 = 1^{\circ} & \kappa_2 = 0^{\circ}5 & & \kappa_1 = 0^{\circ} & \kappa_2 = 4^{\circ} \end{array}$$

Ο έλεγχος μπορεί να γίνει για την πρώτη μόνο επανάληψη της διαδικασίας επιλύσεως και τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά για τις μικρές σχετικές γωνίες (α), (υπάρχουν διαφορές από τις πραγματικές τιμές μέχρι 4° που προφανώς θα εξαλειφθούν στις αμέσως επόμενες επαναλήψεις), ενώ στη (β) περίπτωση παρουσιάζονται σφάλματα αρκετών πρώτων λεπτών που αναμένονται λόγω του προσεγγιστικού χαρακτήρα του μαθηματικού μοντέλου και τα οποία βεβαίως θα μετριασθούν αισθητά με τις διαδοχικές επαναλήψεις χωρίς όμως, όταν οι γωνίες είναι μεγάλες, να είναι δυνατή η πλήρης εξάλειψή τους.

Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων για τον γραφικό απόλυτο γίνεται πειραματικά με σύγκριση αποτελεσμάτων διαφόρων εφαρμογών στερεοζευγών (π.χ. Αιγαίου, Κορίνθου κ.α.) με τα αποτελέσματά της εμπειρικής αποκατάστασης του απόλυτου στα ίδια στερεοζεύγη.

3.2. Το πρώτο τμήμα του προγράμματος "ARANAB", που ασχολείται με το σχετικό προσανατολισμό, είναι όμοιο με το αντίστοιχο του προγράμματος "RAGRAF" και συνεπώς δεν επαναλήφθη ο θεωρητικός του έλεγχος.

Για τον έλεγχο του δεύτερου τμήματος του προγράμματος τον απόλυτο προσανατολισμό, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα της βιβλιοθήκης προγραμμάτων του εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας, "RAC2", για τον υπολογισμό συντεταγμένων μοντέλου 4 σημείων (των φωτοσταθερών). Σαν δεδομένα στο "RAC2" δόθηκαν οι συντεταγμένες εδάφους των 4 αυτών σημείων και τα στοιχεία του προσανατολισμού των φωτογραφιών οπότε μετά τον υπολογισμό του σχετικού προσανατολισμού δημιουργήθηκε αναλυτικά το μοντέλο.

Συνεπώς, έχοντας πλέον και συντεταγμένες των φωτοσταθερών, αφ' ενός μεν στο έδαφος αφ' ετέρου δε σε ένα άλλο τρισσορθογώνιο σύστημα, αυτό του μοντέλου, είναι δυνατός ο έλεγχος του τμήματος αυτού του "ARANAB". Πράγματι, τα αποτελέσματα του προγράμματος για οιασδήποτε τιμές των γωνιών Ω, Φ, κ αποδεικνύουν την ορθότητα του εφαρμοσθέντος μαθηματικού μοντέλου.

3.3. Για την πραγματοποίηση του ελέγχου του σχετικού προσανατολισμού στο πρόγραμμα "RAOFF1", πρέπει να προηγηθεί έλεγχος του υποπρογράμματος "coeff" που μετατρέπει τις απαιτούμενες μονοσκοπικές σκοπεύσεις στο στερεοπλανιγράφο, σε συντεταγμένες εικόνας (βλέπε παρ. 1.2).

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν ειδικές γυάλινες πλάκες με χαραγμένο κάρναβο ανά 2.25cm, με τοποθέτηση των εικονοφορέων σε ύψος $Z=542.5\text{mm}$. Για την επίλυση του προβολικού μετασχηματισμού έγιναν σκοπεύσεις αφ' ενός μεν σε 9, αφ' ετέρου δε σε 4 μόνο σημεία, ώστε να διαπιστωθεί αν, σε εφαρμογές, οι σκοπεύσεις μόνο των εικονοσημάτων των φωτογραφιών επαρκούν για την επίτευξη της απαιτούμενης ακρίβειας. Έτσι, οι αποκλίσεις των υπολογισθέντων εικονοσυντεταγμένων από τις πραγματικές τους τιμές για σκοπεύσεις στα 81 υπάρχοντα σε κάθε πλάκα σημεία ελέγχου, στη περίπτωση που οι εικονοφορείς ήταν στραμμένοι π.χ. με γωνίες $\omega=2^g$, $\varphi=1^g$ και $k=-5^g$ ήταν:

για επίλυση με 9 σημεία :	για 4 σημεία:
$r_{msx} = 14 \mu\text{m}$	$r_{msx} = 1124 \mu\text{m}$
$r_{ms\psi} = 16 \mu\text{m}$	$r_{ms\psi} = 188 \mu\text{m}$

Δηλαδή, η δεύτερη επίλυση δίνει τελείως απαγορευτικά αποτελέσματα, ενώ αυτά της πρώτης σφειλόμενα κυρίως σε σφάλματα σκοπεύσεως, αφού οι σκοπεύσεις έγιναν χωρίς το ειδικό προσοφθάλμιο zoom και συνεπώς υπάρχει ανοχή αρκετών μm , μπορούν να θεωρηθούν ότι ικανοποιούν τις απαιτήσεις ακριβείας στο όργανο.

Όμως, στη πραγματικότητα, οι απαιτούμενες σκοπεύσεις για το σχετικό προσανατολισμό στο "RAOFF1" γίνονται άπαξ, στην αρχή του προγράμματος και όταν οι εικονοφορείς δεν έχουν λόγους να είναι στραμμένοι (εκτός της περιπτώσεως αεροτριγωνισμών, προσανατολισμών πολλών διαδοχικών μοντέλων). Μ' αυτές τις συνθήκες όμως $\omega=\varphi=k=0^g$, μιά επόμενη επίλυση του "coeff" με χρήση των 4 μόνο σημείων έδωσε αποκλίσεις:

$$\begin{aligned} r.m.s.x &= 16 \mu\text{m} \\ r.m.s.\psi &= 22 \mu\text{m} \quad (\text{για τα 81 σημεία ελέγχου}) \end{aligned}$$

Συνεπώς, πρακτικά δεν απαιτείται η χρησιμοποίηση των γυάλινων πλακών, αφού η αύξηση των σημείων από 4 σε 9 καλυτερεύει την ακρίβεια και τα 2+6 μm ενώ ο απαιτούμενος χρόνος είναι δυσανάλογα μεγαλύτερος. Και ακόμα παραπέρα η σκόπευση περισσότερων σημείων

στις πλάκες βελτιώνει τόσο αργά το αποτέλεσμα ώστε δεν συνιστάται.

Για τον περαιτέρω έλεγχο της επίλυσης του προσανατολισμού με το "RAOFF1" θεωρήθηκε ένα ζευγάρι φωτογραφιών με μεγάλες στροφές:

$$\begin{array}{ll} \omega_1 = 20^{\circ} & \omega_2 = 25^{\circ} \\ \varphi_1 = 15^{\circ} & \varphi_2 = 8^{\circ} \\ \kappa_1 = 45^{\circ} & \kappa_2 = 60^{\circ} \end{array}$$

Χρησιμοποιήθηκε πάλι το πρόγραμμα "CØLLIN" για τον υπολογισμό συντεταγμένων εικόνας των 9 σημείων του πεδίου ελέγχου του προγράμματος "ARANAB".

Η επίλυση με το "RAOFF1" έδωσε αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές στις παραμέτρους του σχετικού προσανατολισμού 2-8^{cc} που πρακτικά είναι αμελητέες και προφανώς οφείλονται στη διαδικασία των υπολογισμών. Ακολούθως αφού από το πρόγραμμα "RAC2", όπως και για το "ARANAB", υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες συντεταγμένες μοντέλου, έγινε ο έλεγχος του απόλυτου προσανατολισμού που ομοίως δεν έδωσε σφάλματα.

3.4. Για το πρόγραμμα "RAOFF2" απαιτείται ο έλεγχος μόνο του απόλυτου προσανατολισμού, αφού ο σχετικός είναι ίδιος με αυτόν του "RAOFF1".

Όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση του μαθηματικού του μοντέλου, ο απόλυτος χωρίζεται σε δύο στάδια: την οριζοντιογραφία και την υψομετρία. Συνεπώς, και ο έλεγχος ακολουθώντας τα δύο αυτά στάδια απαιτεί δύο σειρές συντεταγμένων μοντέλου των φωτοσταθερών, που υπολογίζονται από το πρόγραμμα "RAC2" με τις διαδικασίες που περιγράφθηκαν σε ελέγχους προηγούμενων προγραμμάτων.

Πιο αναλυτικά, για την οριζοντιογραφία θεωρήθηκε μοντέλο του οποίου οι γενικές Ω και Φ είναι μηδενικές, έτσι ώστε να έχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της "σωστής" K και βέβαια της κλίμακας μοντέλου-εδάφους. Πράγματι, παρατίθεται παράδειγμα που με δεδομένα $\Omega = \Phi = 0^{\circ}$ και $K = 45^{\circ}$ υπολογίζει μετά το τέλος του α' σταδίου του απόλυτου τις ακριβείς τιμές των K, X_0, Y_0 και κλίμακας.

Στη συνέχεια για την υψομετρία στο ίδιο μοντέλο δώθηκαν στροφές Ω και Φ ενώ η K έμεινε μηδενική (αφού στις πρακτικές εφαρμογές

θεωρείται ότι η οριζοντιογραφία έχει αποκατασταθεί). Έτσι, με δεδομένα στο "RA0FF2" : $\Omega = 20^g$, $\Phi = 15^g$ και κλίμακα την υπολογισθείσα από την επίλυση με το "RAC2", υπολογίσθηκαν στο τέλος του β' σταδίου οι τιμές των Ω , Φ και Z_0 χωρίς σφάλματα.

Αντίθετα, εάν θεωρηθεί ότι το μοντέλο έχει ταυτόχρονα στροφές Ω , Φ , K όπως συμβαίνει πράγματι, δίνονται τα αποτελέσματα του απόλυτου που λαμβάνονται για το πεδίο ελέγχου από το πρόγραμμα και τα οποία είναι οι τιμές που πρέπει να τοποθετηθούν στο στερεοπλανιγράφο C8, αφού έχει ελεγχθεί ανωτέρω η ορθότητα των χρησιμοποιούμενων μαθηματικών τύπων. Παρατηρείται ότι οι τιμές των στροφών είναι διαφορετικές από αυτές που δίνονται αρχικά σαν δεδομένα και που λαμβάνονται από την ταύτιση των συστημάτων μοντέλου και εδάφους (πρόγραμμα RA0FF1).

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΣΤΕΡΕΟΖΕΥΓΟΣ ΤΟΥ ΑΙΓΙΟΥ

Από τον έλεγχο των προγραμμάτων με θεωρητικά δεδομένα επιβεβαιώθηκε η αποδοτικότητα του μαθηματικού μοντέλου αυτών, και η σωστή τους λειτουργία. Έτσι, σαν επόμενο βήμα, επιχειρήθηκε μία εφαρμογή τους σ' ένα πραγματικό πεδίο. Χρησιμοποιήθηκαν τα διαθετικά Νο 140918 και 140919 κλίμακας περίπου 1:8000, της περιοχής του Αιγίου. Οι φωτογραφίες και ταδιαθετικά ελήφθησαν από το ΥΧΟΠ.

Η εφαρμογή έγινε στα 3 προγράμματα "RAGRAF", "RA0FF1", και "RA0FF2" με τα οποία καλύπτονται όλες οι δυνατές περιπτώσεις προσαντολισμών και γενικών μαθηματικών μοντέλων σχετικού και απόλυτου προσανατολισμού (η εφαρμογή στο "ARANAB" είναι πλεονασμός).

Τα αποτελέσματα είναι:

α) 2 επιλύσεις εξηρημένου σχετικού με το "RAGRAF", χρησιμοποιώντας αφ' ενός μεν μετρήσεις εικονοσυντεταγμένων στην αριστερή και δεξιά εικόνα και αφ' ετέρου εικονοσυντεταγμένες αριστερής και μετρήσεις της παράλλαξης πάντα για τα 6 χαρακτηριστικά σημεία. Η διαδικασία "έκλεισε" στις 4 επαναλήψεις και για τις 2 περιπτώσεις με ελάχιστα διαφέρονται αποτελέσματα, ήτοι αντίστοιχα:

$$\begin{array}{ll} \alpha) & \omega_2 = -0^g.3214 & \beta) & \omega_2 = -0^g.2949 \\ & \varphi_2 = -0^g.4488 & & \varphi_2 = -0^g.4911 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} k_2 = - 2.0289 & k_2 = - 2.0631 \\ bz_2 = 34.960\text{mm} & bz_2 = 34.9205\text{mm} \\ b\psi_2 = 33.295\text{mm} & b\psi_2 = 33.435 \text{ mm} \end{array}$$

Οι διαφορές στα αποτελέσματα οφείλονται στο ότι στη β' περίπτωση οι συντεταγμένες της δεξιάς εικόνας θεωρούνται στον μεν άξονα των ψ ίσες με της αριστερής, στον δε άξονα των χ διαφέρουσες από εκείνες της αριστερής κατά τη βάση bx.

Ο απόλυτος προσανατολισμός έγινε για κλίμακα μοντέλου 1:4000 και έδωσε γενικές στροφές $\Omega = -1^{\circ}83$, $\Phi = 1^{\circ}84$.

β) Ο σχετικός προσανατολισμός έγινε στο πρόγραμμα "RAOFF1" (όπου χρησιμοποιείται η συνθήκη συνεπιπεδότητας) μιά φορά με 6 και μιά με 9 χαρακτηριστικά σημεία, τα δε αποτελέσματα είναι ουσιαστικά, για την ακρίβεια των μετρητών του στερεοπλανιγράφου, ίδια και στις δύο περιπτώσεις, ήτοι:

$$\begin{array}{ll} \omega_2 = - 0^{\circ}30 & bz_2 = 35.05\text{mm} \\ \phi_2 = - 0^{\circ}525 & b\psi_2 = 33,435\text{mm} \\ k_2 = - 2^{\circ}05 & \end{array}$$

Τα αποτελέσματα του απόλυτου προσανατολισμού που γίνεται με ταυτόχρονη επίλυση και των 7 παραμέτρων και τα οποία δεν είναι κατ'άλληλα για να τοποθετηθούν στον στερεοπλανιγράφο, αλλά για να αποθηκευθούν στη μνήμη του υπολογιστή για αναλυτικό προσδιορισμό συντεταγμένων σημείων (βλέπε ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου), είναι: $\Omega = -1^{\circ}55$, $\Phi = 2^{\circ}17$, και $K = 41^{\circ}65$.

γ) Η εφαρμογή στο πρόγραμμα "RAOFF2" έγινε μόνο για το στάδιο του απόλυτου προσανατολισμού, αφού ο σχετικός είναι ίδιος με του προηγούμενου προγράμματος "RAOFF1".

Τα αποτελέσματα παρατίθενται σε δύο στάδια (βλέπε output "RAOFF2").

- 1) για την οριζοντιογραφία και
- 2) για την υψομετρία,

οι δε υπολογισθείσες τιμές των μετρητών του στερεοπλανιγράφου είναι:

$$\Omega = - 1^{\circ}87 \quad \text{και} \quad \Phi = -1^{\circ}855$$

δηλαδή διαφέρουν από τις προσδιορισθείσες με το "RAGRAF" 3^c και 1^c.5 αντίστοιχα.

Τμήμα output του "RAOFF2"

Α' ΣΤΑΔΙΟ ΑΠΟΛΥΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ

4 ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ

dkappa=-.0000

Kappa= 41.6183

d-scale= .000

ΚΑΙΜΑΚΑ=1: 4265.121

Xo = 320940.353

Yo = -470556.870

So= 8.51433026966E-05 m in model scale

ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΚΑΙΜΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 1:4000

Bx=160.632

Byl= 29.755

Bz1= 29.649

Β' ΣΤΑΔΙΟ ΑΠΟΛΥΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ
ΥΨΟΜΕΤΡΙΑ

3 ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ

domega=-.0000

Omega=-1.8692

dphi= .0000

Phi= 1.8563

Zo = 36.100

So= 1.96299093833E-10 m

ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ

ΔBx= -.865

ΔBy= .871

ΔBz= 5.559

5. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Επιχειρώντας να κάνουμε μιά σύγκριση μεταξύ των προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει ένα πρόγραμμα το "RAOFF1" που πλεονεκτεί έναντι των υπολοίπων.

α) σε ακρίβεια, δεδομένου ότι χρησιμοποιεί πλήρεις μαθηματικούς τύπους και συνεπώς δεν υπεισέρχονται συστηματικά σφάλματα στη διαδικασία υπολογισμού του προσανατολισμού.

β) σε ταχύτητα, αφού απαιτούνται συνολικά τρεις σειρές μετρήσεων: στα εικονοσημεία ή στις ειδικές γυάλινες πλάκες (4±9 σημεία/φωτογραφία), στα χαρακτηριστικά σημεία κάθε εικόνας για το σχετι-

κό, και στερεοσκοπική παρατήρηση των φωτοσταθερών για τον απόλυτο.

γ) σε ευκολία χρήσης, μιά και η σε ένα στάδιο επίλυση τόσο του σχετικού όσο και του απόλυτου με την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των μετρήσεων περιορίζει στο ελάχιστο τις απαιτούμενες κινήσεις του χειριστή: το μόνο που χρειάζεται εκτός των σκοπεύσεων είναι η τοποθέτηση των αποτελεσμάτων του σχετικού από την οθόνη του υπολογιστή στους μετρητές του οργάνου, και

δ) σε δυνατότητα εφαρμογής, αφού δεν μπαίνει κανένας περιορισμός χρήσης του, όσον αφορά τις διατάξεις λήψεως ή τη μορφή του εδάφους: είναι δυνατόν να εφαρμοστεί με τα ίδια θετικά αποτελέσματα σε οιαδήποτε εφαρμογή αεροφωτογραφιών ή επίγειων λήψεων.

Όμως, τα πλεονεκτήματα αυτά, δεν αποδυναμώνουν τη χρησιμότητα των υπολοίπων προγραμμάτων, αφού κάθε ένα από αυτά μπορεί να παρατείνει τον απαιτούμενο χρόνο ή να έχει περιορισμένες δυνατότητες εφαρμογής. Όμως κάθε ένα με τα χαρακτηριστικά του καλύπτει κάποιες ειδικές επιθυμίες του χρήστη, που δεν είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν από το "RAOFF1". Πράγματι, το συγκεκριμένο αυτό πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν δεν απαιτείται η τοποθέτηση του απόλυτου στο στερεοπλανιγράφο αλλά είναι αρκετή η διατήρησή σ' αυτόν του σχετικού μόνο μοντέλου. Κάτι τέτοιο, συμβαίνει όταν επιθυμείται αναλυτική επεξεργασία των στοιχείων και αυτόματη σχεδίαση του αντικειμένου απόδοσης.

Σε περίπτωση όμως, που είναι επιθυμητή η δυνατότητα είτε γραφικής είτε αναλυτικής απόδοσης του αντικειμένου και περαιτέρω επεξεργασία των στοιχείων (π.χ. συντεταγμένων κ.λ.π), καθώς επίσης και η δυνατότητα on-line και off-line απόδοσης, είναι απαραίτητη η αποκατάσταση του απόλυτου προσανατολισμού στο στερεοπλανιγράφο, συνεπώς ενδείκνυται η χρησιμοποίηση του προγράμματος "RAOFF2".

Σ' αυτό διατηρούνται όλα τα πλεονεκτήματα του "RAOFF1" με τη διαφορά ότι ο απόλυτος γίνεται σε δύο στάδια και συνεπώς απαιτείται μιά παραπάνω σειρά μετρήσεων στα φωτοσταθερά.

Είναι όμως δυνατόν, να έχουμε περίπου κανονικές διατάξεις λήψεων και ομαλά πεδία, ή εφαρμογές που απαιτείται μικρή σχετικά ακρίβεια και συνεπώς δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων (όπως αυτά των προηγούμενων προγραμμάτων) ή η χρησιμοποίηση ειδικών γυάλινων πλακών. Στις περιπτώσεις αυτές

είναι προτιμότερο να εφαρμοστούν τα άλλα σχηματισθέντα προγράμματα με τους προσεγγιστικούς μαθηματικούς τύπους, αφού θα είναι λίγες πλέον οι απαιτούμενες επαναλήψεις για την ολοκλήρωση της επίλυσης. Από αυτά, το "RAGRAF" χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που η απόδοση θα γίνει στο συντεταγμένογράφο του στερεοπλανιγράφου και οι απαιτούμενες μετρήσεις είναι:

1) μιά σειρά μετρήσεων συντεταγμένων $(x, \psi, x', \psi', \eta \text{ ή } x, \psi, \rho, \psi)$ για κάθε επανάληψη του σχετικού προσανατολισμού, 2) μιά σειρά μετρήσεων X, Y, Z μοντέλου των διατιθέμενων φωτοσταθερών για αποκατάσταση κλίμακας μοντέλου, 3) μιά σειρά μετρήσεων X, Y, Z μοντέλου των φωτοσταθερών για κάθε επανάληψη υπολογισμού των τιμών $\Delta\Omega$ και $\Delta\Phi$.

Όσον αφορά την επιτυγχανόμενη ακρίβεια στον προσδιορισμό των στοιχείων των προσανατολισμών, για περιπτώσεις μικρών γωνιών στροφής, όπως του στερεοζεύγους της εφαρμογής του Αιγίου, προσεγγίζει αυτή του προγράμματος "RABFF2", όπως φαίνεται από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνονται στο κεφάλαιο 4 και όπου οι διαφορές των εξόδων των δύο προγραμμάτων είναι της τάξης των λίγων πρώτων του βαθμού (μέχρι 5° στις γωνίες).

Αντίστοιχα, το πρόγραμμα "ARANAB" χρησιμοποιείται στη περίπτωση που, όσον αφορά μεν το σχετικό προσανατολισμό, η διάταξη προσεγγίζει την κανονική λήψη, όσον αφορά δε τον απόλυτο, υπάρχουν μεγάλες γενικές στροφές (π.χ. επίγειες λήψεις) και όπου ζητείται αναλυτική και όχι αναλογική απόδοση. Στη πραγματικότητα δηλαδή αποτελεί κάποιο συνδυασμό των παραπάνω προγραμμάτων και συνεπώς τα αποτελέσματά του είναι ανάλογα των αντίστοιχων τμημάτων αυτών.

Τέλος, αν θέλουμε να κάνουμε μια σύγκριση των συνήθως εμπειρικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση του σχετικού και απόλυτου προσανατολισμού στα αναλογικά όργανα, με τις ανωτέρω αναφερθείσες υπολογιστικές μεθόδους, είναι εμφανές ότι οι δεύτερες υπερτερούν σε όλους τους τομείς:

α) στο θέμα της ταχύτητας, είναι φανερό ότι γίνεται μεγάλη εξοικονόμηση χρόνου αφού ως γνωστό στις εμπειρικές μεθόδους γίνεται ο μεν σχετικός προσανατολισμός με επαναληπτική μέθοδο μιάς διαδικασίας που απαιτεί κάθε φορά μεμονωμένες διορθώσεις των μετρητών του οργάνου μετά από στερεοσκοπική παρατήρηση των χαρακτηριστικών σημείων πράγμα το οποίο αποφεύγεται με τις υπολογιστικές μεθόδους όπου το μόνο που απαιτείται είναι η σε μιά φάση σκόπευση των σημείων, ο δε απαιτούμενος χρόνος για την επίλυση του προγράμματος

είναι μερικά δευτερόλεπτα. Για δε τον απόλυτο η χρονοβόρα χρησιμοποίηση των γραφικών μεθόδων στο συντεταγμενογράφο του οργάνου, όπου πάλι απαιτούνται διαδοχικές προσεγγίσεις για την εύρεση των τελικών τιμών των μετρητών, αντικαθίσταται από στερεοσκοπική παρατήρηση των φωτοσταθερών και υπολογισμό των αγνώστων από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

β) με τις νέες μεθόδους είναι αξιολογημένη η ευκολία χρήσης τόσο των προγραμμάτων, διότι δεν απαιτούνται ιδιαίτερες γνώσεις προγραμματισμού για τη χρησιμοποίησή τους από τον χειριστή, όσο και του ίδιου του οργάνου αποδόσεως δεδομένου ότι απαιτούνται ολιγώτερες ενέργειες και απλούστεροι χειρισμοί απ'ότι στις εμπειρικές μεθόδους.

γ) όσον αφορά το θέμα της ακρίβειας είναι επόμενο οι εμπειρικές και πρακτικές μέθοδοι να συσσωρεύουν σφάλματα που ακόμα και με τα προσεγγιστικά μαθηματικά μοντέλα αποφεύγονται, ενώ όσο περισσότερο αναλυτικές γίνονται οι διαδικασίες τόσο τα σφάλματα στα στοιχεία των προσανατολισμών και κατά συνέπεια και στο προσδιορισμό των τελικών συντεταγμένων εδάφους σημείων ελαχιστοποιούνται. Υπάρχει δε η δυνατότητα αύξησης της ακρίβειας με τη χρησιμοποίηση περισσότερων σημείων για τον σχετικό προσανατολισμό (αντι των συνηθισμένων χαρακτηριστικών) και την αξιοποίηση όλων των διαθέσιμων φωτοσταθερών για τον απόλυτο.

δ) η χρήση των υπολογιστικών αυτών μεθόδων, δίνει τη δυνατότητα για αξιοποίηση και επεξεργασία των στοιχείων που λαμβάνονται από την απόδοση π.χ. συντεταγμένων εδάφους σημείων, για τη δημιουργία Data Banks και DTM.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Albert, J. and Kreiling, W., Photogrammetric Guide, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1975.
2. Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας Ε.Μ.Π., Προσανατολισμοί Φωτογραμμετρικών οργάνων, Αθήνα 1978.
3. Ιωαννίδης, Χ. και Πότσιου, Χ., Αναλυτική απόδοση με το Stereocord, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1982.
4. Zeiss, C-8 Stereoplanigraph , Oberkochen, West Germany

ΧΡΥΣΗ ΠΟΤΣΙΟΥ

Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ
Μεταπτυχιακή σπουδάστρια
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα

ΓΙΑΝΝΗΣ ΜΠΑΝΤΕΚΑΣ

Καθηγητής, Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας και Κτηματολόγιου
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα

COMPUTER ASSISTED PHOTOGRAMMETRY : ANALYTICAL ORIENTATIONS

By Chrissy Potsiou - John Badekas

An extended summaryIntroduction

The recent generation of photogrammetric instruments has been developed into a generation of analytical instruments. The main reason for this, is the high improvement of technology and computer science. The automatic analytical procedures offer improved accuracy, time and cost saving. Yet, the analogue instruments, which had been developed into high accuracy instruments by the early '60^s, are still in full use.

The object of this study was the analytical calculation and setting of orientation of stereopairs in analogue instruments. This was an attempt to simplify the traditional procedure for saving time and improving accuracy. Zeiss Oberkochen stereoplanigraph C8 has been used connected with the RSS 4 Dell Foster digitizing unit for X,Y,Z coordinates and a micro computer HP 9845S.

The usual method of performing orientations on analogue instruments is the elimination of y parallax by successive approximations at the 6 characteristic points of the model and the repetition of the procedure until y parallax will be completely eliminated. Then, the graphic method for the completion of the absolute orientation follows, which intergrates in 2 parts. During the first, the desired model scale, and during the second, the model elevation is fixed. The analytical relative and absolute orientations have been performed by using an approximate and later or a complete and accurate mathematical model.

1. The mathematical models

1.1. Approximate Mathematical Model

This model was created by: a) determination of the parameters of relative orientation by using the parallax equation. The use of this equation allows the choice of dependant or independant relative orientation. The parallax equation:

$$-P_y = db\psi_1 - db\psi_2 - \frac{\psi_1}{H} dbz_1 + \frac{\psi_2}{H} dbz_2 + x_1 dk_1 - x_2 dk_2 +$$

$$\frac{x_1\psi_1}{H} d\varphi_1 - \frac{x_2\psi_2}{H} d\varphi_2 - \left(1 + \frac{\psi_1^2}{H^2}\right) Hd\omega_1 + \left(1 + \frac{\psi_2^2}{H^2}\right) Hd\omega_2$$

can be expressed either as function of model coordinates x , usually of the 6 (or more) characteristic points of the model, or the plate coordinates (x_1, ψ_1) , (x_2, ψ_2) . Since the unknowns of relative orientation are 5, more than 5 points must be observed, so that a solution by using the method of Least Squares could be applied.

b) determination of the scale factor as the mean of the quotient between the nominal distance (real distance/desired model scale) divided by the measured distance on C8 between the control points.

Also, calculation of the new values of the base components (and fixing them on the C8). The procedure of elevation of the model by using at least 3 control points is: after setting the elevation counter to the nominal height of points number 1 (see Fig. 1.1/) the differences between nominal heights and height reading at the other two points are computed. The equations of the lines (1-2), (2-3), (3-3'), (1-1') are calculated - the lines (3-3') and (1-1') are parallel to the y and x directions. So, the horizontal coordinates of points 3' and 1' are computed, then the Δh -values (height differences) for points 3' and 1' can be obtained by linear interpolation and the values of $\Delta\Omega$ and $\Delta\Phi$ and the corrections for the base components are calculated.

1.2. The general mathematical model

A full analytical determination of the relative orientation is performed by using the equation of coplanarity.

$$\Delta = \begin{vmatrix} bx & b\psi & bz \\ x_1 & \psi_1 & z_1 \\ x_2 & \psi_2 & z_2 \end{vmatrix} \approx 0$$

The observation equation was linearized by Taylor's serie and takes the form

$$\Delta : U_1 = a_1 db\psi + a_2 dbz + a_3 d\omega_2 + a_4 d\phi_2 + a_5 dk_2 + \Delta_0$$

where a_1, \dots, a_5 - the coefficients of Δ for each unknown and

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \bar{x}_2 \\ b\psi & \psi_1 & \bar{\psi}_2 \\ bz & z_1 & \bar{z}_2 \end{vmatrix}$$

The coefficients in the above equation are plate coordinates taken from measurements on the digitizing unit RSS-4. These coordinates are obtained from a 4 step transformation: 1) rectification to a common scale of the X,Y,Z coordinates 2) transformation to a Cartesian system 3) rotation of the system by ω, ϕ, k rotations to make it parallel to the system of the image coordinates and 4) scale and parallel transfer of the system so that the measuring system is identical with the image-coordinate system.

For the absolute orientation an analytical expression relating the Ground system and the model system of the C8 is used for these case the known formulae of space transformation is used. The unknowns of the absolute orientation are 7 ($\Omega, \Phi, K, X_0, Y_0, Z_0, S_c$). Each observed point gives 3 observation equations (X,Y,Z) so there is a need for 3 or more control points to be observed. The analytically calculated values of the parametres of the absolute orientation, from a simultaneous solution of the 3 equations (X,Y,Z) of the system, are sotred in the computer's memory in case an analytical procedure of restitution follows. When there is a need for the values of the measuring gears of the C8 to be calculated for the common rotations Ω and Φ , the solution of the sytem is completed in two parts: First, a measurement of the coordinates of the control points is obtained and the values of the K rotation and the scale are computed by using only the first two equations (X,Y) of the system omitting the parts referring to the unknowns Ω, Φ and Z_0 . The model scale is selected and fixed on the C8, and because of this

change a new measurement of the coordinates of the control points is obtained. Now, by using only the third equation of the system(2) which refers to the elevation of the model-while the other parts refer to the scale, the rotation k and the X_0, Y_0 are omitted the absolute orientation is completed. The above procedure is followed because of the inability of fixing the general rotation k on the instrument. The computer values of the parameters necessary for the analytical determination of ground-coordinate of points to be used when they are needed in the computer's memory.

2. The programmes written

According to the methods mentioned above, 4 programmes have been written in BASIC for the micro computer HP 9845S. The programme "RAGRAF" (Relative-Absolute-GRAFically) follows the approximate mathematical model. The input of the data, if the observed parameters are coordinates, is achieved automatically by means of a foot-switch connected with the RSS-4, after the fixing of a scale factor between its measuring unit (inch) and the desired measuring unit (mm) of the coordinates. If the Py-parallax is observed, since no automatic electronic facility for measuring it exists, its value is entered through the Keyboard. The programme "ARANAB" (Approximate Relative - ANalytical - ABSolute) follows the approximate and the complete mathematical model for relative and absolute orientation. If calculation of the unknown ground-coordinates of points is needed the model coordinates of these points are read from the RSS-4 and the ground coordinates are taken as output. The programme "RAOFF 1" (Relative-Absolute-Orientation using Full Formulaes, version 1), follows the general mathematical model with simultaneous solution of all the observation equations for the calculation of the parameters of the absolute orientation. For the calculation of image coordinates a subprogramme named "Coeff" (transformation Coefficients) was incorporated in the main programme. The observed parameters are the measurements of the C8, at a prefixed altitude Z , of the observed cross-points of a grid inscribed on special glass plates. The calculation is done by using the Least Squares Theory. According to the desired accuracy, the number of the observed points can be reduced to four. In that case, the points can be the four fiducial marks of each plate of the Steropair. At the end the-

re is a choice of calculating ground coordinates of points. The programme "RAØFF 2" (second version) follows the same procedure as "RAØFF 1", but the absolute orientation is completed in the two steps already described. In this case the values which are set on the dials of the C8 for the common lateral tilt Ω and longitudinal tip Φ are calculated. The following step has the flexibility of either the analogical or an analytical restitution of the model and, of course, the ability of calculating ground coordinates.

3. Testing the written programmes

To test the relative orientation by RAGRAF, a testing field of 9 points (coordinates are shown on page 17) was assumed. For a group of relatively small rotations (p.17,a) the maximum deviations from the real values (on the first repetition) are about 4^c , but for a group of greater rotations (p.17,b) the errors are, as was expected, a few hundredths of a grad and gradually they reduce as the procedure is repeated. When the values of the rotations are great the errors cannot be reduced to zero.

The testing of the absolute orientation by ARANAB for any group of common tilts Ω, Φ, K achieved very satisfying accuracy.

The suprogramme Coeff which is incorporated in RAØFF1 and 2 was tested by using the Special glass plates with the inscribed grid. The deviations of the calculated coordinates of 81 points and of the rotated photo-carrier : $\omega = 2^g, \phi = 1^g, k = -5^g$ had a rms $x = 14 \mu m$, rms $\psi = 16 \mu m$ for a solution using 9 points and rms $x = 1124 \mu m$. rms $\psi = 188 \mu m$ for a solution using only the 4 fiducial points. One can conclude, that in the case of aerotriangulation with dependant orientation of successive models, the use of special glass-plates is necessary. In any other case, when $\omega = \phi = k = 0^g$ the glass-plates need not be used. The parameters of the relative orientation by RAØFF1 and 2 were calculated to an accuracy of $2-3^{cc}$ which was due to calculating procedure and the parameters of the absolute by RAØFF1 were calculated with no errors. Obviously, the testing of the absolute by "RAØFF2" was done in two steps.

4. Application of the programmes to a steropair of Aigion

Since the testing of the programmes has proved the efficiency

of the mathematical models, an application of the programmes, RAGRAF, RAØFF 1 and 2 was attempted. Diapositives of the Aigion area were used (N.140918 and 140919) of 1:8000 scale.

5. Comparisons-Conclusions

One can say that "RAØFF1" is superior to the others, as it is:
a) more accurate (it uses full formulae and not systematic errors interfere in the process of calculating), b) quicker (since only 3 series of observations are needed), c) more easy to use (the only necessary action of the user is to set the calculated values on the instrument's dials), d) very broadly applicable (there is no limit to the morphology of the model and to the value of the rotations of the stereopair), e) it also provides on-line and off-line restitution. Yet, the above advantages don't weaken the usefulness of the other programmes, since each of them satisfies some special need of the user, i.e. when an analog restitution is wanted one must use RAØFF2 which takes a little more time but conserves all the other flexibilities of RAØFF1. When one has exposures in the normal case and a field with no abrupt contours the use of RAGRAF, when an analogical restitution is needed, is advisable. But when an analytical restitution is needed or when exposures are terrestrial, ARANAB should be used.

In principal, it can be noticed that all the above methods are superior to the empirical one, which are usually followed in analog instruments. They are quicker, they don't require special training, they are more accurate since the process is done analytically and above all, they allow of the ability for further manipulation of the aquired data i.e. the creation of data banks and D.T.Ms.

C. Potsiou,
Surveyor Engineer N.T.U.
Zographou Campus, Athens

J. Badekas
Professor, Laboratory of Photogrammetry
Zographou Campus, Athens