

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Α. Γεωργόπουλος και Χ. Ιωαννίδης
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, ΣΑΤΜ
Ε.Μ. Πολυτεχνείο
drag@central.ntua.gr

Περίληψη

Στη φωτογραμμετρική διαδικασία είναι γνωστό ότι υπαισέρχονται διάφορες μετρήσεις. Από τον ορισμό της, η φωτογραμμετρική διαδικασία ουσιαστικώς απαιτεί την εκτέλεση μετρήσεων -κυρίως μηκών- επάνω σε εικόνες, επάνω δηλαδή σε φωτογραφικές απεικονίσεις του αντικειμένου που πρόκειται να μετρηθεί.

Από τη φάση της συλλογής των πρωτογενών δεδομένων, δηλαδή τη φωτογράφιση, έως την τελική φάση της φωτογραμμετρικής απόδοσης εμπλέκονται μια σειρά συσκευών και συστημάτων καταγραφής και άντλησης των μετρητικών πληροφοριών από το αντικείμενο, τα οποία αναπόφευκτα εισάγουν σφάλματα. Όπως σε κάθε διαδικασία μέτρησης, έτσι και στις φωτογραμμετρικές μετρήσεις, οφείλουν τα όργανα μέτρησης να ελέγχονται ως προς την ακρίβεια και την αξιοπιστία καταγραφής τους.

Τα συστήματα αυτά, που ουσιαστικώς αποτελούν, με την ευρύτερη έννοια του όρου τα φωτογραμμετρικά όργανα, είναι επιγραμματικά τα εξής:

- Οι φωτογραφικές μηχανές
- Τα φωτογραμμετρικά όργανα απόδοσης και
- Οι σαρωτές

Τα όργανα αυτά, ως μετρητικά όργανα, παρουσιάζουν κάποιες ιδιαιτερότητες συγκρινόμενα με τα γεωδαιτικά και άλλα όργανα μέτρησης γωνιών και μηκών. Ο προφανής λόγος είναι ότι τα μεν γεωδαιτικά όργανα εκτελούν τις μετρήσεις με άμεσο και εύληπτο στο χρήστη τρόπο, ενώ τα φωτογραμμετρικά με έμμεσο και εν πολλοίς δυσνόητο. Για παράδειγμα η καταγραφή των διευθύνσεων προς τα σημεία του αντικειμένου στην περίπτωση των φωτογραμμετρικών λήψεων γίνεται με την απεικόνιση πρακτικώς άπειρων σημείων στο φιλμ και με έμμεσο τρόπο, δηλαδή με τη μέτρηση εικονοσυντεταγμένων, ο μετέπειτα προσδιορισμός τους κατά την υλοποίηση της φωτογραμμετρικής διαδικασίας.

Στην παρούσα ανακοίνωση εξετάζονται τα όργανα αυτά και ιδιαιτέρως για κάθε ομάδα οργάνων αναφέρονται οι πηγές σφαλμάτων και οι διαδικασίες ελέγχου και βαθμονόμησής τους, απαραίτητες για τη διασφάλιση της καλής λειτουργίας τους και της ποιότητας των αποτελεσμάτων.

1. Μηχανές λήψης

Το σημαντικότερο εργαλείο για την απόκτηση μιας φωτογραφίας είναι, αναμφίβολα, η φωτογραφική μηχανή, ο φωτογραφικός δέκτης. Η αποστολή της μηχανής είναι να αιχμαλωτίσει το φως και να το οδηγήσει μέσω του φακού στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια. Υπάρχουν οι αναλογικοί φωτογραφικοί δέκτες, δηλαδή οι φωτογραφικές μηχανές οι οποίες χρησιμοποιούν συμβατικό αναλογικό φιλμ για την καταγραφή της εικόνας και οι ψηφιακές μηχανές, δηλαδή οι μηχανές που καταγράφουν απευθείας την ψηφιακή πληροφορία χωρίς τη μεσολάβηση του φιλμ και οι οποίες ολοένα και περισσότερο διεκδικούν τη θέση τους στη φωτογραμμετρική διαδικασία. Η φωτογραφική μηχανή, αναλογική ή ψηφιακή, είναι το μετρητικό εργαλείο, με το οποίο καταγράφονται οι διευθύνσεις προς όλα τα σημεία που απεικονίζονται σε μια φωτογραφική εικόνα. Με άλλα λόγια αντιστοιχεί στο θεοδόλιχο των γεωδαιτικών μετρήσεων.

Οι αναλογικές, αλλά και οι ψηφιακές, φωτογραφικές μηχανές, ως όργανα μέτρησης, μπορεί να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- A. **Μη μετρητικές ή ερασιτεχνικές** μηχανές, οι οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν τόσο για φωτογραμμετρικές εφαρμογές μειωμένων απαιτήσεων ακριβείας και αυξημένου κόστους απόδοσης, όσο και - κυρίως - για την τεκμηρίωση της υπάρχουσας κατάστασης σε δεδομένη χρονική στιγμή.
- B. **Ημι-μετρητικές** μηχανές, οι οποίες αποτελούν μετρητική εξέλιξη μηχανών, που αρχικώς δεν είχαν σχεδιαστεί για φωτογραμμετρικούς σκοπούς.
- Γ. **Μετρητικές ή φωτογραμμετρικές** μηχανές, οι οποίες σχεδιάστηκαν για να καλύπτουν αυστηρώς φωτογραμμετρικές εφαρμογές.

1.1 Είδη και χαρακτηριστικά φωτογραφικών μηχανών

1.1.1 Μετρητικές μηχανές

Οι μετρητικές ή φωτογραμμετρικές μηχανές είναι μια ειδική κατηγορία μηχανών, που αναπτύχθηκε για εφαρμογές αποτυπώσεων οι οποίες συνήθως απαιτούν μετρήσεις ακριβείας. Η εσωτερική γεωμετρία των μηχανών αυτών πρέπει να είναι σταθερή και γνωστή. Με αυτό υπονοείται ότι πρέπει να είναι γνωστές οι παράμετροι του γεωμετρικού μοντέλου, το οποίο είναι συνήθως η Κεντρική Προβολή, με το προβολικό κέντρο του φακού τη στιγμή της λήψης να μην ταυτίζεται με το φυσικό κέντρο του φακού, αλλά κάποιο άλλο σημείο μέσα στο φακό, του οποίου η θέση πρέπει να είναι γνωστή, για να μπορεί η φωτογραφία να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις. Έτσι, μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία της φωτογράφισης και είναι δυνατή η ακριβής μετρητική εκμετάλλευση των λήψεων. Η γνώση αυτής της εσωτερικής γεωμετρίας των φωτογραμμετρικών μηχανών είναι εντελώς αντίστοιχη με τον έλεγχο των οργάνων μέτρησης γωνιών (θεοδόλιχα) και προκύπτει από ειδικές διαδικασίες που συνιστούν τη βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών. Οι διαδικασίες αυτές είναι απαραίτητες για την επίτευξη ακρίβειας από τις σχετικές μετρήσεις. Συνήθως οι μετρητικές μηχανές συνοδεύονται από ένα πιστοποιητικό βαθμονόμησης ή διακρίβωσης, που δίνει ακριβώς όλα τα στοιχεία ποιότητας της γεωμετρικής απεικόνισης με τη συγκεκριμένη μηχανή, ώστε να εξασφαλίζεται η ακρίβεια των μετρήσεων και των εξ αυτών υπολογιζόμενων μεγεθών.

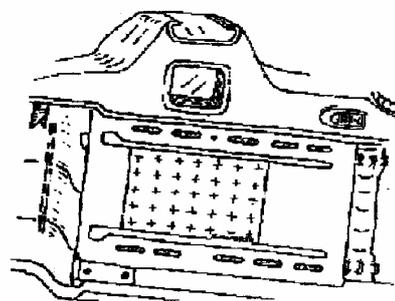
Εκτός από τη σταθερή και γνωστή γεωμετρία τα κυριότερα χαρακτηριστικά των μετρητικών μηχανών, που τις διαφοροποιούν από τις ερασιτεχνικές και τις ημι-μετρητικές μηχανές, είναι:

- α. Διαθέτουν τουλάχιστον τέσσερα εικονοσήματα ή σημεία πλαισίου, ώστε να διευκολύνουν τις μετρήσεις εικονοσυντεταγμένων αργότερα,
- β. Διαθέτουν τη δυνατότητα καταγραφής διαφόρων χρήσιμων πληροφοριών στη φωτογραφία, όπως π.χ. την τιμή της σταθεράς της μηχανής, την ώρα λήψης, αρίθμηση

Οι μετρητικές μηχανές είναι κυρίως δύο κατηγοριών: Οι μηχανές για αεροφωτογραφίες και οι επίγειες φωτογραμμετρικές μηχανές. Ιστορικά προηγήθηκαν οι τελευταίες, δεδομένου ότι δεν είχαν ακόμα εμφανιστεί τα αεροπλάνα, αλλά αργότερα επικράτησε με τον όρο μετρητικές μηχανές να εννοούνται κυρίως οι μηχανές αεροφωτογραφίσεων.

1.1.2 Ημι-μετρητικές μηχανές

Οι ημι-μετρητικές μηχανές είναι ουσιαστικώς ερασιτεχνικές μηχανές οι οποίες έχουν υποστεί κάποιες μετατροπές, ώστε να παρέχεται στο χρήστη μερική γνώση του εσωτερικού τους προσανατολισμού, της γεωμετρίας τους δηλαδή. Συνήθως είναι εξοπλισμένες με μια γυάλινη πλάκα προσαρμοσμένη στο εστιακό τους επίπεδο, η οποία φέρει χαραγμένο ένα πυκνό κάναβο (Σχήμα 1). Οι κορυφές του κανάβου είναι μετρημένες με πολύ μεγάλη ακρίβεια από το εργοστάσιο κατασκευής. Επίσης, πολλές φορές, οι μηχανές αυτές μετατρέπονται έτσι ώστε να εστιάζουν σε συγκεκριμένα βήματα, για κάθε ένα από τα οποία δίνεται η τιμή της σταθεράς της μηχανής και καμιά φορά και η τιμή της διαστροφής του φακού. Οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούνται για φωτογραμμετρικές εφαρμογές με σχετικώς μειωμένες απαιτήσεις ακριβείας. Με την εξάπλωση, ωστόσο, των αναλυτικών διαδικασιών, οι μηχανές αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθούν και για εφαρμογές με μεγαλύτερες απαιτήσεις ακριβείας.



Σχήμα 1. Κανάβος reseau σε ημι-μετρητική φωτομηχανή

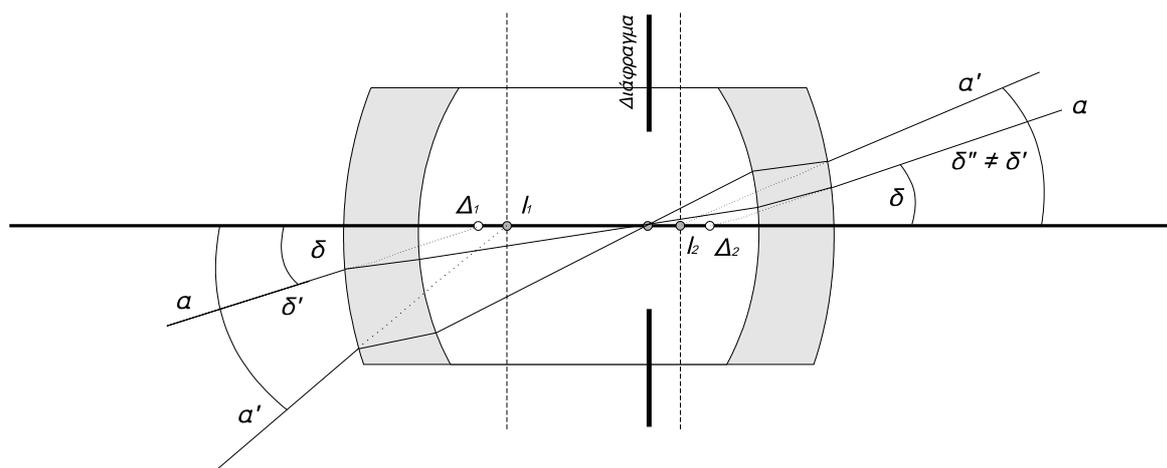
1.1.3 Μη μετρητικές μηχανές

Οι μη μετρητικές ή ερασιτεχνικές μηχανές χρησιμοποιούνται για φωτογραμμετρικές εφαρμογές, κυρίως επίγειες, σε πολύ περιορισμένη κλίμακα. Θεωρώντας τες ως μετρητικά εργαλεία αποτελούν αναμφισβητήτως χαμηλότερης ακριβείας όργανα και πρέπει η χρήση τους να γίνεται με σύνεση και όσο το δυνατόν καλύτερη γνώση των δυνατοτήτων τους. Ίσως οι διαδικασίες βαθμονόμησης να είναι περισσότερο απαραίτητες στην περίπτωση των μη μετρητικών μηχανών. Δεν πρέπει να ξεχνά κανείς ότι δεν έχει τόση σημασία η ονομαστική ακρίβεια του οργάνου μέτρησης, όση η ασφαλής γνώση αυτής της ανακρίβειας, που δίνει τη δυνατότητα διόρθωσης, ή καλύτερα αναγωγής, των μετρήσεων στις επιθυμητές.

1.2 Αρχές λειτουργίας

Είναι γενικώς γνωστή η αρχή λειτουργίας των φωτογραφικών μηχανών, η οποία είναι κοινή για όλα τα είδη μηχανών που χρησιμοποιούνται στις φωτογραμμετρικές εφαρμογές.

Με την απελευθέρωση του κλείστρου προκαθορισμένη ποσότητα φωτός αφήνεται να περάσει από προκαθορισμένου μεγέθους οπή για προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Η δέσμη των ακτίνων αυτών καταγράφει σημείο προς σημείο την εικόνα στο αρνητικό. Για να αντιστραφεί η διαδικασία απαιτείται η ανακατασκευή της δέσμης όσο πιστότερα είναι δυνατό. Για το λόγο αυτό απαιτείται να περιγραφεί η φυσική διαδικασία της φωτογράφισης με κάποιο γεωμετρικό - μαθηματικό μοντέλο. Μολονότι δεν είναι σε θέση να περιγράψει τη διαδικασία αυτή με τον καλύτερο τρόπο, έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτό το μοντέλο της Κεντρικής Προβολής.



Σχήμα 2. Πορεία των οπτικών ακτίνων μέσα από τον φακό

1.2.1 Η γεωμετρία της μηχανής - Εσωτερικός προσανατολισμός

1.2.1.1 Η Κεντρική Προβολή

Η Κεντρική Προβολή είναι το θεωρητικό μαθηματικό και γεωμετρικό μοντέλο που περιγράφει την ιδανική φωτογραφική απεικόνιση. Με ορισμένες παραδοχές το μοντέλο αυτό μπορεί να περιγράψει με ικανοποιητική ακρίβεια και προσέγγιση το εξεταζόμενο φαινόμενο.

Η φωτογραφική απεικόνιση πλησιάζει περισσότερο στην Προοπτική Απεικόνιση, δεδομένου ότι απεικονίζει τον τρισδιάστατο χώρο σε έναν διδιάστατο μέσω ενός κέντρου προβολής. Για την περίπτωση της Προοπτικής Απεικόνισης, η Κεντρική Προβολή ορίζεται - όπως είναι γνωστό - από τα παρακάτω:

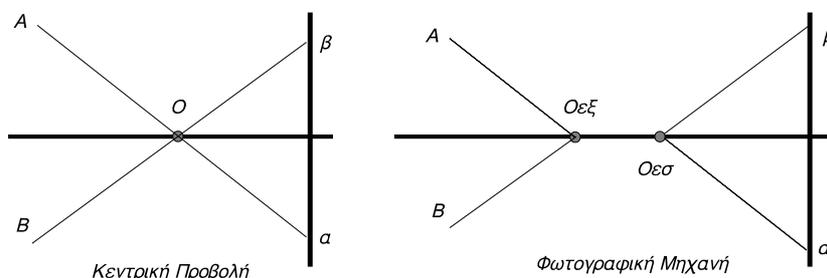
- Τη θέση του επιπέδου προβολής (προοπτικό επίπεδο)
- Την απόσταση του κέντρου προβολής (προοπτικό κέντρο) από το επίπεδο προβολής
- Τη θέση της ορθής προβολής του κέντρου πάνω στο επίπεδο.

Αρκεί, συνεπώς, να προσδιοριστούν οι παραπάνω παράμετροι, για να περιγραφεί η φωτογραφική απεικόνιση από το γεωμετρικό μοντέλο που επιλέχτηκε. Να μπορεί, δηλαδή, να εκφραστεί με μαθηματικές σχέσεις η γεωμετρία που ισχύει στη φωτογραφική μηχανή.

1.2.1.2 Η γεωμετρία των συστημάτων φακών

Στο θεωρητικά λεπτό φακό ορίζεται κάποιο κέντρο από το οποίο όλες οι ακτίνες διέρχονται χωρίς απόκλιση. Για ένα σύστημα φακών ορίζονται δύο σημεία με την παραπάνω ιδιότητα. Το εξωτερικό και το εσωτερικό δεσμικό σημείο. Μια προσπίπτουσα ακτίνα a (Σχήμα 2), που αν προεκταθεί συναντά τον άξονα στο εξωτερικό δεσμικό σημείο Δ_1 , βγαίνει από το σύστημα παράλληλη στην αρχική διεύθυνση. Αν προεκταθεί αυτή συναντά τον άξονα στο εσωτερικό δεσμικό σημείο Δ_2 . Καμμία άλλη ακτίνα, δυστυχώς, δεν έχει αυτή την ιδιότητα.

Για την εφαρμογή όμως της Κεντρικής Προβολής, χρειάζεται να οριστούν δύο άλλα σημεία στον άξονα του φακού. Είναι φανερό ότι το προοπτικό κέντρο της Κεντρικής Προβολής θα πρέπει κι αυτό να διαιρεθεί σε δυο σημεία, ένα εξωτερικό και ένα εσωτερικό (Σχήμα 3). Ως τέτοια θα χρησιμεύσουν οι ίριδες (ή κόρες) εισόδου και εξόδου.



Σχήμα 3

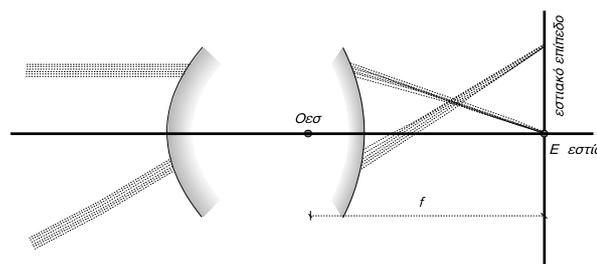
Αυτές ορίζονται ως τα είδωλα του διαφράγματος από την εξωτερική και εσωτερική πλευρά του φακού αντίστοιχα, και εν γένει δεν συμπίπτουν με τα αντίστοιχα δεσμικά σημεία (Σχήμα 3). Έχει αποδειχτεί (Scott 1977) ότι οι ίριδες συμπίπτουν με τα αντίστοιχα δεσμικά σημεία μόνον όταν ο φακός είναι εστιασμένος στο (φωτογραφικό) άπειρο, όπου η εστιακή του απόσταση έχει τη μικρότερη τιμή της. Δηλαδή αυτό συμβαίνει στο μεγαλύτερο ποσοστό των φωτογραμμετρικών εφαρμογών.

Ετσι ορίζονται δυο σημεία, οι ίριδες, που αντιπροσωπεύουν το εξωτερικό και εσωτερικό προοπτικό κέντρο και διευκολύνουν την αναλυτική εφαρμογή της Κεντρικής Προβολής στη φωτογραφική απεικόνιση. Με τον τρόπο αυτό καλύπτεται η πρώτη δυσκολία εφαρμογής του μαθηματικού - γεωμετρικού μοντέλου που θα περιγράψει το φυσικό φαινόμενο (Ορισμός προοπτικού κέντρου).

1.2.1.3 Γεωμετρική διερεύνηση της φωτογραφικής μηχανής

Στη συνέχεια θα επιχειρηθεί μια απλουστευμένη παρουσίαση των απαραίτητων παραμέτρων της φωτογραφικής απεικόνισης, σε συνδυασμό με τις γεωμετρικές σχέσεις της Κεντρικής Προβολής, που τελικά θα συνδέσουν τις μετρήσεις στη φωτογραφία με μεγέθη στη κλίμακα του αντικειμένου.

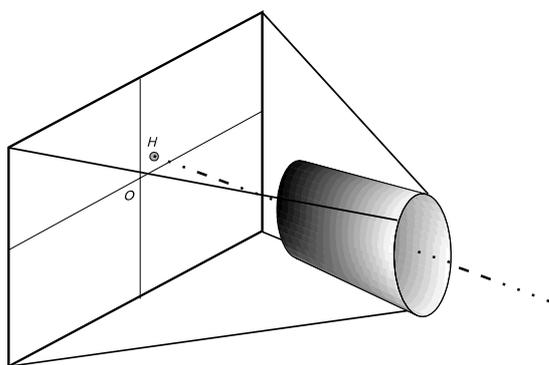
Κάθε φακός, ή σύστημα φακών, έχει την ιδιότητα να αναγκάζει μια παράλληλη φωτεινή δέσμη (από φωτεινή πηγή στο άπειρο) και αρχικά παράλληλη με τον άξονα του φακού, να συγκλίνει σε ένα σημείο E (Σχήμα 4), την εστία. Ισοδύναμα, κάθε παράλληλη δέσμη συγκλίνει σε ένα σημείο του επιπέδου κάθετου στον άξονα και στη θέση E . Η απόσταση του σημείου E από το κέντρο του φακού (για λεπτό φακό) ή από το εσωτερικό προοπτικό



Σχήμα 4

κέντρο (για σύστημα φακών), ορίζεται ως εστιακή απόσταση (f) του φακού ή του συστήματος. Είναι φανερό ότι το μέγεθος αυτό αποτελεί φυσική, αναλλοίωτη ιδιότητα του φακού, ή του συστήματος φακών, για τη δεδομένη εκάστοτε εστίασή του.

Με την τοποθέτηση του φακού σε μια μηχανή γεννιέται ένα άλλο γεωμετρικό μέγεθος. Η απόσταση του εσωτερικού προοπτικού κέντρου από το εστιακό επίπεδο της μηχανής, ή καλύτερα από το επίπεδο της φωτοευαίσθητης επιφάνειας. Η απόσταση αυτή λέγεται πρωτεύουσα απόσταση ή σταθερά (c) της μηχανής. Τα δυο μεγέθη αυτά έχουν περίπου την ίδια τιμή αλλά εντελώς διαφορετική φυσική σημασία. Ο προσδιορισμός της σταθεράς αποτελεί ένα ακόμα βήμα για την εφαρμογή της Κεντρικής Προβολής στη φωτογραφική απεικόνιση, δεδομένου ότι ορίζει την απόσταση του προοπτικού κέντρου από το επίπεδο προβολής.

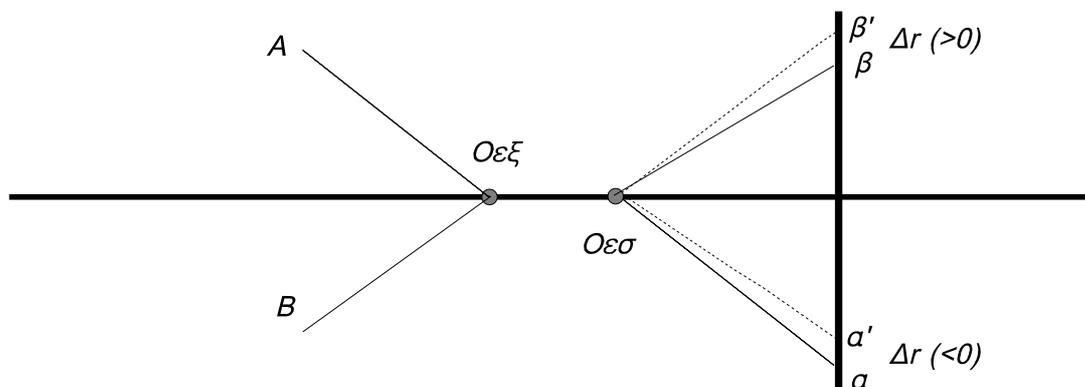


Σχήμα 5

Ατέλειες στην τοποθέτηση του φακού στη μηχανή προκαλούν και μια απόκλιση της τομής H του άξονα του φακού με το εστιακό επίπεδο της μηχανής από το εικονοκέντρο O που συνήθως ορίζεται από τα σημεία πλαισίου της μηχανής (Σχήμα 5). Το σημείο H λέγεται πρωτεύον σημείο του συστήματος μηχανή-φακός. Είναι απαραίτητο οι μετρήσεις στη φωτογραφία να αναφέρονται στο σημείο αυτό, ώστε η εφαρμογή της Κεντρικής Προβολής να είναι ολοκληρωμένη. Συνήθως προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του H ως προς το O , αφού το τελευταίο είναι ένα

σημείο που ορίζεται εύκολα από τα σημεία πλαισίου (εικονοσήματα).

Απομένει ο προσδιορισμός μιας ακόμα απόκλισης της φωτογραφικής απεικόνισης στην πραγματικότητα από το ιδανικό μαθηματικό μοντέλο της Κεντρικής Προβολής, που προκαλείται από την ακτινική διαστροφή του φακού. Στην Κεντρική Προβολή οι ακτίνες προβολής διέρχονται από το κέντρο προβολής χωρίς να αλλάξει η διεύθυνσή τους. Λόγω όμως της ακτινικής διαστροφής οι ακτίνες που εξέρχονται από το εσωτερικό προοπτικό κέντρο του φακού έχουν, γενικώς, διαφορετική διεύθυνση από τις προσπίπτουσες (Σχήμα 6). Ο προσδιορισμός αυτών των αποκλίσεων είναι απαραίτητος για την πιστή εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου.



Σχήμα 6. Ακτινική διαστροφή του φακού

1.3 Διακρίβωση (Βαθμονόμηση) φωτογραφικών μηχανών

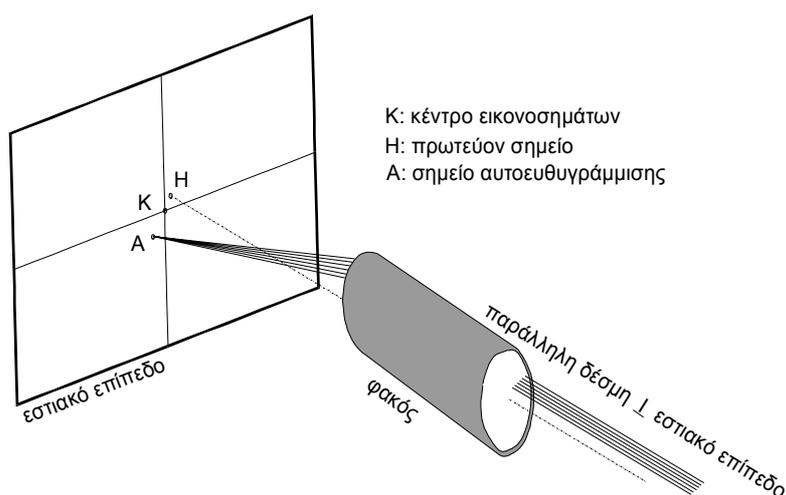
1.3.1 Ορισμοί

Εγινε φανερό από τα προηγούμενα ότι για τις φωτογραμμετρικές εφαρμογές απαιτείται ο προσδιορισμός του κατάλληλου, κάθε φορά, μοντέλου Κεντρικής Προβολής που να περιγράφει καλύτερα το σύστημα φωτογράφισης που χρησιμοποιείται. Έτσι θα πρέπει να προσδιορίζονται οι παράμετροι που την καθορίζουν, δηλαδή ο εσωτερικός προσανατολισμός. Τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού μιας φωτογραμμετρικής λήψης είναι :

- Η σταθερά της μηχανής (c)
- Η θέση του πρωτεύοντος σημείου στο σύστημα των σημείων πλαισίου (x_0, y_0)
- Η χαρακτηριστική καμπύλη της ακτινικής διαστοφής του φακού (Δr).

Ο προσδιορισμός των παραπάνω παραμέτρων λέγεται διακρίβωση ή βαθμονόμηση ή καλιμπράρισμα της μηχανής. Κάθε φωτογραφική μηχανή πρέπει να ελέγχεται, γιατί για την Φωτογραμμετρία αυτή αποτελεί το όργανο μέτρησης - καταγραφής της αρχικής πληροφορίας (Thompson 1957).

Η διακρίβωση ή έλεγχος ή βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών είναι το σύνολο των μετρητικών και υπολογιστικών διαδικασιών που προσδιορίζουν τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού τους. Οι διαδικασίες αυτές συγκρίνουν τη γεωμετρική συμπεριφορά του συστήματος μηχανή-φακός-φίλμ με το μαθηματικό μοντέλο της Κεντρικής Προβολής. Είναι προφανές ότι θεωρητικώς είναι αδιάφορο το πόσο κάθε σύστημα φακός-μηχανή-φίλμ παραμορφώνει γεωμετρικά την απεικόνιση, αρκεί να είναι με ακρίβεια γνωστή η παραμόρφωση αυτή ώστε οι μετρήσεις να ανάγονται κατάλληλα κατά τη διάρκεια των υπολογισμών (εξάλειψη των συστηματικών σφαλμάτων). Η ζητούμενη αυτή αναγωγή είναι ουσιαστικώς η προσαρμογή του γεωμετρικού μοντέλου της Κεντρικής Προβολής η οποία περιγράφει κατά τον καλύτερο τρόπο τη γεωμετρία της συγκεκριμένης μηχανής.



Σχήμα 7

Η βαθμονόμηση ολοκληρώνεται όταν:

α. έχει οριστεί πάνω στο εστιακό επίπεδο του αρνητικού (προβολής) ένα ικανοποιητικό σημείο αναφοράς, δηλαδή ένα σημείο αρχής των συντεταγμένων. Ως τέτοιο θα μπορούσε να θεωρηθεί η προβολή του κέντρου συμμετρίας του φακού πάνω στην εικόνα

β. για όλα τα σημεία του επιπέδου του αρνητικού έχει υπολογιστεί η τιμή της πρωτεύουσας απόστασης c (σταθερά της μηχανής).

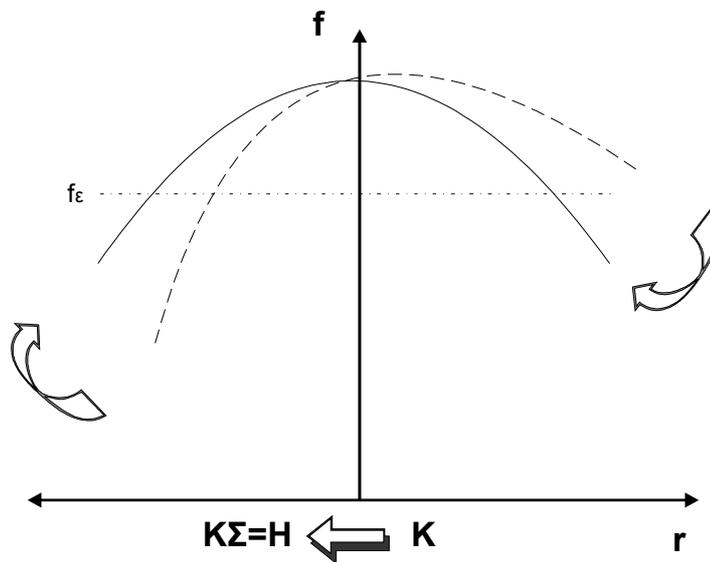
Κάθε φωτογραφική μηχανή μπορεί να θεωρηθεί ως ένα όργανο που καταγράφει διευθύνσεις. Για τη διακρίβωση της μηχανής θα πρέπει να συγκριθούν οι τιμές των διευθύνσεων που καταγράφηκαν από τη μηχανή με τις "αληθείς" τιμές τους. Ουσιαστικά αυτό ισοδυναμεί με τη σύγκριση της συμπεριφοράς της μηχανής με το μοντέλο της Κεντρικής Προβολής, από το οποίο διαφέρει λόγω, κυρίως, της επίδρασης της ακτινικής διαστροφής. Η επίδραση αυτή είναι τέτοια, ώστε να προκαλούνται διαφορές στην κλίμακα απεικόνισης. Ιδανικό θα ήταν να υπήρχε ένα σημείο στην πραγματικότητα για κάθε σημείο της εικόνας, ώστε η σύγκριση αυτή να είναι πλήρης. Επειδή όμως κάτι τέτοιο δεν είναι πρακτικό, καταγράφονται σημεία κατά μήκος των διαγωνίων της εικόνας (ευθείες με περισσότερη πληροφορία) και ενδεχομένως και κατά μήκος της οριζόντιας και της καθέτου του εστιακού επιπέδου.

Με τη βοήθεια των ακτινικών αποστάσεων πάνω στο αρνητικό ή τη γυάλινη πλάκα (reseau), που μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια σε κάποιο κατάλληλο όργανο και επίσης με τη συνεφαπτομένη των αντιστοίχων διευθύνσεων υπολογίζονται οι (ενεργές) τιμές της πρωτεύουσας απόστασης για όλα τα σημεία που παρατηρήθηκαν. Υπολογίζεται δηλαδή η αντίστοιχη κλίμακα σε κάθε σημείο. Για τις μετρήσεις αυτές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς κάποιο κατάλληλο και βολικό σημείο πάνω στην εικόνα. Στην εφαρμογή μιας οπτικής μεθόδου βαθμονόμησης μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί το σημείο αυτοευθυγράμμισης. Για βαθμονομήσεις με εστίαση σε κοντινές αποστάσεις θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το σημείο τομής των ευθειών που συνδέουν τα απέναντι σημεία πλαισίου ή, όταν αυτά δεν υπάρχουν, τις απέναντι γωνίες του αρνητικού.

1.3.2 Υπολογισμοί - Ερμηνεία

Για να γίνουν πιο κατανοητά και χρήσιμα τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάπτυξης της βαθμονόμησης, δίνεται παρακάτω μια διαδικασία υπολογισμών και ερμηνείας τους.

Αρχικά προσαρμόζεται στις παρατηρήσεις μια μαθηματική καμπύλη. Η καμπύλη αυτή, της πρωτεύουσας απόστασης (c) ως συνάρτηση των ακτινικών αποστάσεων (r), είναι στις περισσότερες περιπτώσεις δευτέρου βαθμού (παραβολή) και γενικώς μη συμμετρική ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Με την κατάλληλη μετατόπιση του σημείου αρχής, έτσι ώστε η καμπύλη να γίνει συμμετρική, προσδιορίζεται η θέση της προβολής του κέντρου συμμετρίας ($K\Sigma$) του φακού πάνω στη γραμμή (π.χ. διαγώνιο) στην οποία αναφέρεται η καμπύλη (Σχήμα 8). Προφανές είναι ότι αρκούν δύο γραμμές -έστω οι δύο διαγώνιοι- για τον ακριβή προσδιορισμό της προβολής του κέντρου συμμετρίας πάνω στην εικόνα.



Σχήμα 8

Μετά τη συμμετρικοποίηση των παρατηρήσεων (αναγωγή r, c) εκλέγεται κάποια τιμή για την πρωτεύουσα απόσταση. Μια τέτοια τιμή, αρκετά αντιπροσωπευτική, μπορεί να είναι ο γενικευμένος μέσος όρος όλων των τιμών της πρωτεύουσας απόστασης, που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις με βάρη τις εφαπτόμενες των αντιστοίχων διεθύνσεων. Αυτό έχει ως σκοπό να δοθεί πιο πολύ βάρος στις ακραίες παρατηρήσεις, που είναι και μαθηματικώς πιο σταθερές. Κατόπιν υπολογίζονται οι τιμές της ακτινικής διαστροφής στα σημεία (i) που παρατηρήθηκαν. Προς τούτο χρησιμοποιείται η σχέση:

$$dr_i = \frac{r_i}{f_\varepsilon} (f_\varepsilon - f_i)$$

όπου: f_ε η εκλεγμένη τιμή για τη πρωτεύουσα απόσταση και

f_i η υπολογισμένη τιμή της πρωτεύουσας απόστασης στο σημείο i.

Με τις τιμές αυτές είναι πλέον δυνατό να διορθωθούν οι x και y συντεταγμένες ακόμη και με παρεμβολή, ή να προσδιοριστεί η παραμόρφωση του μοντέλου (Γεωργόπουλος, 1984).

Αυτά τα καθαρά γεωμετρικά στοιχεία του οπτικού συστήματος χρειάζονται κάποια επεξεργασία, ώστε να προκύψουν πιο πρακτικά και κατανοητά αποτελέσματα: να γίνει αναλυτικός υπολογισμός των τιμών της ακτινικής - και ενδεχομένως και της εφαπτομενικής - διαστροφής όλου του συστήματος. Κατόπιν είναι δυνατό να διορθωθούν οι συντεταγμένες που μετρήθηκαν πάνω στο αρνητικό, να αναχθούν δηλαδή στις εικονοσυντεταγμένες που θεωρητικά θα προέκυπταν εάν ίσχυε το συγκεκριμένο μοντέλο Κεντρικής Προβολής, που επιλέχτηκε για να περιγράψει τη φωτογραφική απεικόνιση από το συγκεκριμένο σύστημα φακός-μηχανή-φιλμ.

1.3.3 Ταξινόμηση μεθόδων διακρίβωσης

Στη Φωτογραμμετρία και ιδιαίτερα στην επίγεια γίνεται η διάκριση μεταξύ εστίασης στο άπειρο και εστίασης σε κοντινές αποστάσεις. Ως "άπειρο" νοούνται εκείνες οι αποστάσεις του αντικειμένου, στις οποίες οι φακοί, για να εστιάσουν το αντικείμενο στο επίπεδο προβολής (αρνητικό) χρησιμοποιούν τη μικρότερη τιμή της εστιακής τους απόστασης. Ισοδύναμα, οι αποστάσεις είναι τέτοιες ώστε οι οπτικές δέσμες που προέρχονται από τα σημεία του αντικειμένου να μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες με ικανοποιητική ακρίβεια. Στην πράξη πρόκειται για αποστάσεις μεγαλύτερες από 25 m. Οι παράλληλες φωτεινές δέσμες που προσπίπτουν στο φακό εστιάζονται (συγκλίνουν σε σημείο) πάνω στο εστιακό επίπεδο (αρνητικό). Από αυτό συνάγεται ότι μπορεί να οριστεί μονοσήμαντα το Σημείο Αυτοευθυγράμμισης (Autocollimation), δηλαδή εκείνο το σημείο του εστιακού επιπέδου πάνω στο οποίο εστιάζεται από το φακό μια παράλληλη δέσμη με αρχική διεύθυνση κάθετη στο εστιακό επίπεδο (Σχήμα 7). Αυτό είναι πολύ σημαντικό, γιατί με αυτόν τον καθαρά οπτικό τρόπο, είναι δυνατό να ορίζεται πάντοτε το ίδιο σημείο ως αρχή του συστήματος συντεταγμένων, στο οποίο θα αναφερθούν οι παραπέρα μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει ακόμα το βασικό πλεονέκτημα ότι είναι ανεξάρτητη από κάθε φωτογραφική διαδικασία που ενδεχομένως θα ήταν πηγή και άλλων σφαλμάτων.

Είναι αυτονόητο ότι πρόκειται για μια τελείως διαφορετική κατάσταση, όταν πρέπει να προσδιοριστούν οι ιδιότητες του συστήματος μηχανή-φακός για εστίασεις σε κοντινές αποστάσεις (<25 m). Η μεταβολή της εστίασης επιφέρει μια αναδιάταξη στα οπτικά στοιχεία του φακού και κατά συνέπεια μεταβάλλει και τις οπτικές ιδιότητες του

συστήματος. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται στην περίπτωση αυτή είναι φυσικά η αδυναμία ορισμού του Σημείου Αυτοευθυγράμμισης, αφού οι προσπίπτουσες δέσμες δεν είναι δυνατό πλέον να θεωρηθούν παράλληλες. Είναι συνεπώς αναγκαίο να περιληφθεί στη διακρίβωση η φωτογραφική διαδικασία και, φυσικά, να οριστεί κάποιο άλλο σημείο ως αρχή του συστήματος. Ως τέτοιο μπορεί να χρησιμεύσει το σημείο τομής των ευθειών που συνδέουν τα απέναντι σημεία πλαισίου, ή στην περίπτωση απουσίας τους (μη μετρητικές μηχανές) τις διαγωνίως απέναντι γωνίες του πλαισίου, που ορίζει το εστιακό επίπεδο.

Έγινε ήδη μια βασική διάκριση των διαδικασιών διακρίβωσης, δηλαδή για εστίαση στο άπειρο και για εστίαση σε κοντινές αποστάσεις. Ακόμα έγινε η διάκριση της καθαρά οπτικής διαδικασίας και εκείνης που περικλείει και τη φωτογραφική διαδικασία. Όταν υπάρχει η δυνατότητα επιλογής κάποιας μεθόδου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι με καθαρά οπτική διαδικασία παρέχονται πληροφορίες για τη συμπεριφορά του φακού και μόνο, δηλαδή για τη διαστροφή, την επαναληπτικότητα κ.τ.λ. Για τον έλεγχο όμως όλου του συστήματος, δηλαδή της οπτικής συμπεριφοράς του φακού, αλλά και τυχόν σφαλμάτων που προκαλούνται λόγω της παρουσίας του φιλμ, π.χ. ελλιπής επιπεδότητα, θα πρέπει να εκλέγεται κάποια μέθοδος, που να περιλαμβάνει και τη φωτογραφική διαδικασία. Αυτό συμβαίνει κυρίως με τις μη μετρητικές μηχανές, που στο 99% των περιπτώσεων δεν έχουν κάποιο - έστω και υποτυπώδες - σύστημα επιπέδωσης του φιλμ. Ας σημειωθεί ότι το αποτέλεσμα των πρόσθετων αυτών ατελειών είναι μια ακτινική μετατόπιση των ειδώλων πάνω στο εστιακό επίπεδο, όπως ακριβώς και η επίδραση της ακτινικής διαστροφής. Ουσιαστικά φαίνεται ότι έτσι προκαλείται μια αύξηση (ή μείωση) της ακτινικής διαστροφής του φακού.

Στη συνέχεια θα επιχειρηθεί μια παραπέρα σύντομη ταξινόμηση των "φωτογραφικών" πλέον ελέγχων. Η ταξινόμηση καλύπτει τις διάφορες διαδικασίες, από τη μετατροπή μιας μη μετρητικής μηχανής σε μετρητική (ή ημι-μετρητική) έως τον υπολογισμό των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού και κατ' επέκταση των διορθώσεων στις μετρήσεις ταυτόχρονα με τους υπόλοιπους αναλυτικούς υπολογισμούς.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει μετασκευές, τεχνικές επεμβάσεις στη μηχανή, όπως π.χ. εισαγωγή σημείων πλαισίου, χρήση γυάλινης πλάκας με κάναβο (teseau), ή ακόμα χρήση πρόσθετων συστημάτων επιπεδότητας του φιλμ.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τη χρήση καθαρά αναλυτικών μεθόδων όπου, με κατάλληλο προγραμματισμό, δεν είναι αναγκαίος ο υπολογισμός των αγνώστων της βαθμονόμησης, αλλά η διόρθωση των συντεταγμένων γίνεται με τη βοήθεια ορισμένων παραμέτρων που πρέπει να υπολογιστούν. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με την εφαρμογή του άμεσου γραμμικού μετασχηματισμού (Direct Linear Transformation, DLT).

Μεταξύ αυτών των δύο θα μπορούσαν να αναφερθούν οι εξής κατηγορίες βαθμονόμησης:

- *Η βαθμονόμηση εργαστηρίου*, κατά την οποία γίνεται χρήση ενός πεδίου ελέγχου που ιδρύεται, μετράται και προσδιορίζεται ειδικά για τη βαθμονόμηση.
- *Η αυτοβαθμονόμηση*, κατά την οποία γίνεται ο προσδιορισμός των παραμέτρων της γεωμετρίας της μηχανής με τη βοήθεια πολλαπλών λήψεων, μέτρηση μεγάλου αριθμού αγνώστων σημείων και χρησιμοποίηση ενός πεδίου ελέγχου στο χώρο του αντικειμένου.

- Η ταυτόχρονη βαθμονόμηση, κατά την οποία τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού προσδιορίζονται ταυτόχρονα με τους άλλους αγνώστους (εξωτερικού προσανατολισμού, συντεταγμένων σημείων του αντικειμένου). Οι ταυτόχρονες βαθμονομήσεις και οι αυτοβαθμονομήσεις χρησιμοποιούν για τον προσδιορισμό των παραμέτρων τις ίδιες λήψεις στις οποίες γίνονται και οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό στοιχείων του αντικειμένου. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφονται και οι τυχόν επιδράσεις της αστάθειας της μηχανής.

Το ποιά μέθοδος ενδείκνυται για κάθε εφαρμογή, εξαρτάται από τη φύση της εργασίας. Οι μέθοδοι που απλώς υπολογίζουν τους αγνώστους του προσανατολισμού είναι πιο ακριβείς, δεν λαμβάνουν όμως υπόψη τις διάφορες συνθήκες εργασίας.

Γενικώς όλες οι μέθοδοι διακρίβωσης φωτογραφικών μηχανών κάνουν τη σύγκριση μεταξύ ενός συνόλου διευθύνσεων στον αντικειμενικό χώρο με το αντίστοιχο σύνολο, όπως αυτό καταγράφεται (παραμορφώνεται γεωμετρικά) από τον φακό (ή το σύστημα φακός-μηχανή-φιλμ). Από τη σύγκριση αυτή και με σχετικά απλή μεθοδολογία προσδιορίζονται κάθε φορά οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού. Είναι συνεπώς δυνατό, εφαρμόζοντας τις θεμελιακές φωτογραμμετρικές σχέσεις (εξισώσεις συγγραμμικότητας, συνεπιπεδότητας κ.λ.π.) στις διορθωμένες μετρήσεις, να γίνει με πιστότητα και ακρίβεια η αναγωγή σε μεγέθη του αντικειμένου. Έτσι μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι, ακόμα και εάν η απόκλιση του συστήματος φακός - μηχανή - φιλμ από το ιδανικό μοντέλο της κεντρικής προβολής είναι μεγάλη, δεν επηρεάζονται οι μετρήσεις, αρκεί οι αποκλίσεις αυτές να είναι γνωστές με την απαιτούμενη κάθε φορά ακρίβεια. Επισημαίνεται ότι, παρόλο που ορισμένες μη μετρητικές μηχανές παρουσιάζουν κάποια ικανότητα επαναληπτικότητας, πρέπει κανονικά να γίνεται βαθμονόμηση κάθε λήψης. Γενικώς πάντως, οι μη μετρητικές μηχανές είναι σταθερότερες από όσο θεωρούνται και μπορούν να χρησιμοποιούνται για εργασίες με απαιτήσεις μικρής ή μεγάλης ακρίβειας, με την προϋπόθεση φυσικά ότι γίνεται κατάλληλη επεξεργασία στις μετέπειτα μετρήσεις. Συνοψίζοντας, οι διάφορες μέθοδοι (Σχήμα 10) για τη διακρίβωση και βαθμονόμηση των μηχανών διακρίνονται σε:

- Εργαστηριακές ή πεδίου, ανάλογα με τον τόπο διεξαγωγής τους
- Οπτικές ή φωτογραφικές, ανάλογα αν συμμετέχει ή όχι η φωτογραφική διαδικασία
- Απειρης ή κοντινής εστίασης, ανάλογα με την απόσταση εστίασης του φακού.

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ - ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ



Σχήμα 10

1.3.4 Διακρίβωση ψηφιακών μηχανών

Η βαθμονόμηση των ψηφιακών μηχανών δεν διαφέρει εν γένει από την βαθμονόμηση των συμβατικών αναλογικών μηχανών, δεδομένου ότι οι μηχανές αυτές συμπεριφέρονται, εν πολλοίς, όπως οι αναλογικές. Η βασική διαφορά τους είναι η απουσία της φωτοευαίσθητης επιφάνειας, το ρόλο της οποίας αναλαμβάνει το σύστημα CCD. Έτσι οι ψηφιακές λήψεις εξ ορισμού δεν παρουσιάζουν μη επιπεδότητα της φωτοευαίσθητης επιφάνειας. Αντ' αυτού οι ψηφιακές μηχανές πρέπει να ελέγχονται για το μέγεθος και το σχήμα του εικονοστοιχείου, καθώς και για ενδεχόμενες γεωμετρικές αλλοιώσεις οι οποίες οφείλονται στην ηλεκτρονική μεταφορά του σήματος από το CCD στη μνήμη του υπολογιστή. Το σύνολο αυτών των γεωμετρικών παραμορφώσεων εισάγεται στο μαθηματικό μοντέλο ως δύο συντελεστές αφινικού μετασχηματισμού. Έτσι ένα συχνά χρησιμοποιούμενο μαθηματικό μοντέλο για την βαθμονόμηση ψηφιακών μηχανών (CCD, βιντεοκάμερες κ.τ.λ.) είναι (Georgopoulos, Tournas 1995):

$$\Delta x = x_p + \bar{x}(r^2 - 1) \alpha_1 + \bar{x}(r^4 - 1) \alpha_2 + (r^2 - 2\bar{x}^2) \alpha_3 + 2\bar{x}\bar{y} \alpha_4 + \bar{x} \alpha_5 + \bar{y} \alpha_6$$

$$\Delta y = y_p + \bar{y}(r^2 - 1) \alpha_1 + \bar{y}(r^4 - 1) \alpha_2 + 2\bar{x}\bar{y} \alpha_3 + (r^2 - 2\bar{y}^2) \alpha_4 + \bar{y} \alpha_5$$

όπου:

x_p, y_p οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου

\bar{x}, \bar{y} οι εικονοσυντεταγμένες ως προς το πρωτεύον σημείο

r η ακτινική απόσταση του μετρούμενου σημείου από το πρωτεύον σημείο

α_1, α_2 παράμετροι ακτινικής διαστρόφης

α_3, α_4 παράμετροι έκκεντρης διαστρόφης

α_5, α_6 παράμετροι αφινικού μετασχηματισμού.

2. Φωτογραμμετρικά όργανα

Τα φωτογραμμετρικά όργανα στερεοσκοπικής απόδοσης είναι τα βασικά εργαλεία που εκτελούν - σε πραγματικό χρόνο - τον μετασχηματισμό της κεντρικής προβολής σε ορθή, που είναι και το κυριότερο ζητούμενο από τη φωτογραμμετρική διαδικασία.

Τα φωτογραμμετρικά όργανα διακρίνονται σε αναλογικά, αναλυτικά και ψηφιακά. Τα αναλογικά θεωρούνται πλέον παρωχημένα, δεδομένου ότι σήμερα όλες οι λειτουργίες τους έχουν αντικατασταθεί από προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή, με φυσική συνέπεια να έχουν αντικατασταθεί από τα αναλυτικά. Τα τελευταία λειτουργούν σε συνεχή επικοινωνία με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και το κυριότερο πλεονέκτημά τους, εκτός από την ταχύτητα και αυξημένη ακρίβεια, είναι η έλλειψη πολλών και πολύπλοκων μηχανικών μερών.

Τα ψηφιακά όργανα, ή καλύτερα ψηφιακοί σταθμοί, αποτελούν την πλέον πρόσφατη εξέλιξη των φωτογραμμετρικών οργάνων στερεοσκοπικής απόδοσης. Η βασική διαφορά τους από τα αναλυτικά όργανα είναι το γεγονός ότι χρησιμοποιούν ψηφιακές εικόνες, αλλά, κυρίως, ότι προσφέρουν στους χρήστες αυξημένες δυνατότητες αυτοματοποίησης των διαφόρων λειτουργιών.

2.1 Αρχές λειτουργίας

Σε κάθε περίπτωση φωτογραμμετρικού οργάνου, η αρχή λειτουργίας τους είναι περίπου η ίδια. Ουσιαστικώς τα φωτογραμμετρικά όργανα καλούνται να εκτελέσουν σε πραγματικό χρόνο φωτογραμμετρικές εμπροσθοτομίες. Ως παρατηρήσεις για τις εμπροσθοτομίες αυτές χρησιμοποιούνται μετρήσεις εικονοσυντεταγμένων απευθείας επάνω στις εικόνες κάθε στερεοζεύγους. Ακολούθως, το ίδιο το όργανο, είτε με τα μηχανικά ή οπτικά του ανάλογα, είτε με τα κατάλληλα προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή εκτελεί τον σχετικό υπολογισμό για τον προσδιορισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σκοπευόμενων σημείων.

Είναι προφανής η σημασία της ακρίβειας των μετρήσεων των εικονοσυντεταγμένων για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας των τελικών υπολογισμών. Κατά συνέπεια η βασική πηγή σφαλμάτων είναι το ίδιο το όργανο και η σκοπευτική του διάταξη με την οποία εκτελούνται οι μετρήσεις των εικονοσυντεταγμένων. Το μέγεθος του σημείου της σκοπευτικής διάταξης (ιπτάμενη μάρκα), η ποιότητα των οπτικών, η διαχωριστική ικανότητα και οι δυνατότητες μεγέθυνσης διαφοροποιούνται σημαντικά, ανάλογα με το όργανο που διατίθεται. Σημαντικός παράγοντας είναι και το είδος του οργάνου. Όταν πρόκειται για **μονο-** ή **στερεοσυγκριτή** είναι προφανές ότι η ακρίβεια σκόπευσης είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα σε **στερεοσκοπικό όργανο απόδοσης** αυτή είναι χαμηλότερη και εξαρτάται και από το εάν το όργανο είναι ψηφιακό, αναλυτικό ή αναλογικό. Συμπερασματικά λοιπόν, τα συστηματικά σφάλματα που εισάγονται από τα όργανα είναι δυνατό να προλαμβάνονται με τον συχνό έλεγχο - βαθμονόμηση - των οργάνων, ο οποίος είναι εξίσου σημαντικός με τη βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών.

2.2 Διαδικασίες βαθμονόμησης φωτογραμμετρικών οργάνων

Από τα παραπάνω εκτεθέντα συμπεραίνεται ότι η κυριότερη πηγή σφαλμάτων στα φωτογραμμετρικά όργανα στερεοσκοπικής απόδοσης είναι η αξιοπιστία μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων. Συνεπώς οι διαδικασίες βαθμονόμησης και ελέγχου των οργάνων αυτών πρέπει να επικεντρωθούν στη διακρίβωση της ακρίβειας με την οποία αυτά μετρούν τις εικονοσυντεταγμένες. Στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε στα αναλυτικά και ψηφιακά όργανα, καθώς πρακτικά τα αναλογικά όργανα (αλλά και οι συγκριτές) δεν χρησιμοποιούνται πλέον.

2.2.1 Αναλυτικά όργανα στερεοαπόδοσης

Τα μηχανικά μέρη των αναλυτικών οργάνων είναι πολύ απλούστερα από τα αντίστοιχα των αναλογικών. Αυτό συνέβαλε στην αύξηση της ακρίβειας, που, σε συνδυασμό με την αυτοματοποίηση των υπολογισμών τα κατέστησε αναμφισβήτητα ιδιαίτερως προσφιλή και ελκυστικά για τους χρήστες. Ωστόσο παραμένει ιδιαίτερα σημαντική η διαπίστωση της ακρίβειας με την οποία μετρώνται οι εικονοσυντεταγμένες στα αναλυτικά όργανα. Για το σκοπό αυτό όλοι οι κατασκευαστές συστήνουν τη συχνή βαθμονόμησή τους.

Η διαδικασία βαθμονόμησης περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενες σχολαστικές μετρήσεις σε ειδικές καναβόπλακες, οι οποίες έχουν μετρηθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια από τον κατασκευαστή τους. Οι μετρήσεις πρέπει να εκτελούνται με προκαθορισμένο τρόπο και οπωσδήποτε να περιλαμβάνουν σκοπεύσεις, όπου κάθε σημείο του κανάβου να προσεγγίζεται τουλάχιστον από τέσσερις διαφορετικές διευθύνσεις, ώστε να

καταγραφούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την αναγωγή των φωτογραμμετρικών μετρήσεων. Από τις μετρήσεις αυτές και σε συνδυασμό με τις ακριβείς συντεταγμένες των κορυφών του κανάβου των πλακών, προσδιορίζεται ένα μαθηματικό μοντέλο διόρθωσης των φωτογραμμετρικών μετρήσεων για κάθε περιοχή του εικονοφορέα. Η διόρθωση αυτή γίνεται αναλυτικά στον υπολογιστή του οργάνου και ο χρήστης δεν αντιλαμβάνεται τίποτε. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφονται τα τυχόν συστηματικά, αλλά και χονδροειδή σφάλματα, που μπορεί να παρουσιάζονται στους ηλεκτρονικούς καταγραφείς του αναλυτικού οργάνου.

2.2.3 Ψηφιακά φωτογραμμετρικοί σταθμοί

Για τα ψηφιακά όργανα οι κατασκευαστές δεν προκαθορίζουν σχετική διαδικασία βαθμονόμησης, προφασίζόμενοι ότι, εφόσον οι μετρήσεις γίνονται ψηφιακά, δεν μεσολαβούν καθόλου μηχανικά ή ηλεκτρονικά μέρη και έτσι εκπίπτει η ανάγκη αυτή. Δεδομένου όμως ότι τα ψηφιακά όργανα είναι σχετικώς νέα στην αγορά και η εξάπλωσή τους υπήρξε ραγδαία, και ως ένα βαθμό ανεξέλεγκτη, υπάρχει η εκτίμηση ότι ίσως οι δυνατότητές τους να έχουν υπερεκτιμηθεί και να απαιτείται κάποια, ίσως διαφορετικής φύσεως, διαδικασία βαθμονόμησης. Είναι ωστόσο βέβαιο ότι παίζουν σημαντικό ρόλο στη μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων τόσο η ανάλυση σάρωσης των ψηφιακών εικόνων (που θα εξεταστεί στο επόμενο εδάφιο περί σαρωτών), όσο και η ανάλυση της χρησιμοποιούμενης οθόνης. Ένα εμφανές παράδειγμα για το γεγονός αυτό, είναι η μειωμένη κατά y ανάλυση που παρουσιάζουν όλα τα ψηφιακά όργανα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο της ενεργητικής πόλωσης για την επίτευξη της στερεοσκοπικής αντίληψης. Αυτό συμβαίνει γιατί εκπίπτουν οι μισές γραμμές σάρωσης σε κάθε εικόνα, ώστε να είναι δυνατό να πλεχθούν αργότερα στο στερεοζεύγος.

3. Σαρωτές αναλογικών φωτογραφιών

Προς το παρόν οι σαρωτές αναλογικών φωτογραφιών αποτελούν την κυριότερη πηγή ψηφιακών αρχείων, τουλάχιστον για την περίπτωση αεροφωτογραφιών. Πάντως ήδη χρησιμοποιούνται παγκοσμίως σε επίπεδο πρακτικών εφαρμογών, ψηφιακές αερομηχανές (όπως οι: ADS40 της Leica, DMC της Z/I Imaging, UltraCam D της VEXCEL, DiMAC, 3-DAS-1 της Wehrli κ.ο.κ.), οι οποίες είναι βέβαιο ότι στο άμεσο μέλλον θα αντικαταστήσουν σταδιακά τις συμβατικές μηχανές αεροφωτογραφίσεων, παρέχοντας πρωτογενώς ψηφιακές εικόνες.

3.1 Αρχές λειτουργίας

Οι σαρωτές αναλογικών φωτογραφιών είναι συσκευές, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να ψηφιοποιούν αναλογικά εκτυπωμένες φωτογραφίες ή αρνητικά (και διαθετικά) αναλογικών φιλμ. Λειτουργούν περίπου όπως τα φωτοαντιγραφικά μηχανήματα και ουσιαστικά ψηφιοποιούν το ανακλώμενο ή διερχόμενο, αντιστοίχως, φώς.

Στο Σχήμα 11 φαίνονται οι αρχές λειτουργίας ενός επιτραπέζιου σαρωτή, όπως αυτοί διατίθενται σήμερα στο εμπόριο. Το πρωτότυπο φωτίζεται από μια κατάλληλη πηγή φωτός και το ανακλώμενο φώς - ή διερχόμενο στην περίπτωση σάρωσης διαθετικού - κατευθύνεται μέσω μιας σειράς οπτικών διατάξεων (κατόπτρων και φακών) προς τον συνήθως γραμμικό αισθητήρα, εφοδιασμένο με τα φωτοευαίσθητα στοιχεία. Το σήμα που

καταγράφεται κατευθύνεται ακολούθως σε μια συσκευή (ένα μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό), όπου μετατρέπεται σε ψηφιακό και τέλος καθοδηγείται προς την οθόνη του συστήματος και προς το μέσο αποθήκευσης.

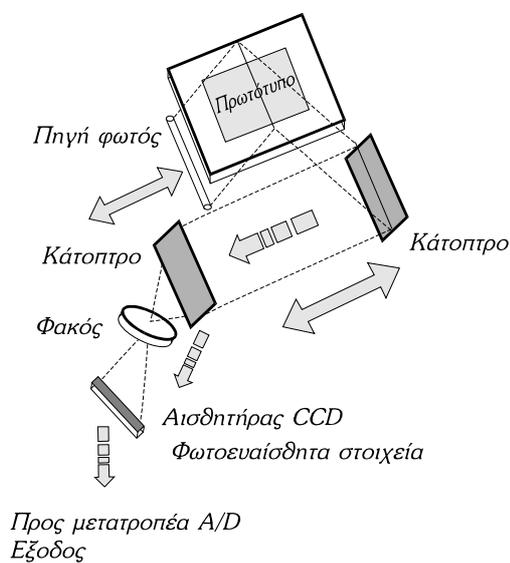
Σήμερα διατίθενται πολλά είδη σαρωτών για όλες τις εφαρμογές. Οι σαρωτές του εμπορίου διακρίνονται σε σαρωτές χειρός και επιτραπέζιους, μεγέθους πρωτοτύπου A4 (210x297mm²) ή A3 (420x297mm²). Οι σαρωτές αυτοί του εμπορίου απευθύνονται κυρίως σε εφαρμογές επιτραπέζιας τυπογραφίας (Desktop Publishing, DTP) και ψηφιακής φωτογραφίας (Digital Photography). Για τις τοπογραφικές εφαρμογές παρίσταται η ανάγκη σάρωσης αεροφωτογραφιών, δορυφορικών εικόνων, χαρτών, διαγραμμάτων κ.α

Οι απαιτήσεις σάρωσης εξαρτώνται σε κάθε περίπτωση από το είδος του πρωτοτύπου αλλά και τη χρήση του. Ειδικότερα για τις αεροφωτογραφίες, που η σάρωση γίνεται είτε έγχρωμη, είτε ασπρόμαυρη, απαιτείται μέγεθος πρωτοτύπου 230x230mm², χωρική ανάλυση τουλάχιστον 600 dpi, αλλά συνήθως 1200-1700 dpi, γεωμετρική ακρίβεια 2 - 5 μm για υψηλής ακριβείας εφαρμογές, ραδιομετρική ανάλυση τουλάχιστον 8 bit και εύρος πυκνότητας 2.5 D (παγχρωματικές εικόνες) ή 3.5 D (έγχρωμες εικόνες). Οι δορυφορικές εικόνες είναι συνήθως μεγαλύτερες (300x450 mm²). Παράλληλα για τα διαγράμματα και τα σχέδια απαιτείται μεγαλύτερο μέγεθος σάρωσης (π.χ. A1 ή A0), σάρωση στο 1 ή 4 bit και το πρωτότυπο είναι αδιαφανές. Δεν διατίθεται σήμερα σαρωτής που να καλύπτει όλες αυτές τις απαιτήσεις. Περισσότερο στις απαιτήσεις αυτές πλησιάζουν οι σαρωτές μεγέθους A3 υψηλών προδιαγραφών, με κυριότερα προβλήματα στη γεωμετρική ακρίβεια στην ανάλυση και στο μέγεθος του πρωτοτύπου. Παράλληλα οι σαρωτές τυμπάνου, που έχουν τη δυνατότητα σάρωσης μεγαλύτερου μεγέθους πρωτοτύπων, παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα γεωμετρικής αξιοπιστίας λόγω κυρίως της λειτουργίας και της μη επιπεδότητας του τυμπάνου, ενώ δεν διαθέτουν τη δυνατότητα σάρωσης φωτογραφικών πλακών.

Συμπερασματικά οι επιτραπέζιοι σαρωτές του εμπορίου δεν ενδείκνυνται για φωτογραμμετρικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Ωστόσο με τη βοήθεια κατάλληλων διαδικασιών βαθμονόμησης, που περιγράφονται παρακάτω, είναι δυνατόν να αντικαταστήσουν τους ειδικούς φωτογραμμετρικούς σαρωτές και να αποτελέσουν έτσι μια οικονομική εναλλακτική λύση στο πρόβλημα της μετατροπής αναλογικών πρωτοτύπων σε ψηφιακά δεδομένα.

3.2 Φωτογραμμετρικοί σαρωτές

Τα τελευταία χρόνια, παράλληλα με την εξάπλωση των ψηφιακών φωτογραμμετρικών σταθμών, έχουν εμφανιστεί στην διεθνή αγορά ειδικοί σαρωτές για φωτογραμμετρικούς σκοπούς. Οι σαρωτές αυτοί έχουν τις εξής κύριες χαρακτηριστικές ιδιότητες, οι οποίες τους διαφοροποιούν από τους κοινούς σαρωτές:



Σχήμα 11

- α. Διαθέτουν τη δυνατότητα σάρωσης σε πολύ υψηλές αναλύσεις, π.χ. 3000 dpi, χωρίς να χρησιμοποιούν ραδιομετρική παρεμβολή.
- β. Τα ψηφιακά αρχεία που παράγουν είναι διορθωμένα από τυχόν γεωμετρικές παραμορφώσεις της σάρωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ειδικών αλγορίθμων οι οποίοι αποκαθιστούν το μοντέλο διόρθωσης των σφαλμάτων του σαρωτή.
- γ. Παρέχουν τη δυνατότητα σάρωσης εικόνων έως και 23x23cm², σε πολλές περιπτώσεις με ταυτόχρονη αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού τους.

Είναι προφανές ότι οι σαρωτές αυτοί απευθύνονται αποκλειστικώς σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές και καλύπτουν το προσωρινό κενό της ψηφιακής αερομηχανής μεγάλου μεγέθους αρνητικού. Τέτοιοι σαρωτές είναι, για παράδειγμα, ο DSW της Leica-Helava, ο SCAI της Zeiss, ο Vexcel, και ο Wehrli. Στον Πίνακα 1 φαίνονται τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Leica DSW200	ZEISS PhotoScan 1	Vexcel VX3000	Wehrli RM-1
Μέγεθος Πρωτοτύπου τμήματος (tile)	265x265 (mm ²)	250x275 (mm ²)	254x508 (mm ²)	245x245 (mm ²)
Τύπος αισθητήρα	Kodak Megaplug 2029x2044 pix	γραμμικό CCD 2048 pixel	τυπικό επιφανειακό CCD	γραμμικό CCD 2048 pixel
Πρότυπο αποθήκευσης		Zeiss-TLD, TIF, SGI		BMP, TIF, GIF
Τρόπος σάρωσης	επίπεδος ακίνητο φορείο	επίπεδος κινούμενο φορείο	επίπεδος ακίνητο φορείο	επίπεδος κινούμενο φορείο
Ανάλυση	5 - 15 μm	7.5 - 120	8.5 - 160	12.5 - 100
Ραδιομετρική ανάλυση	8 - 10 bit	8 - 10 bit	8 bit (B/W) 24 bit (c)	8 bit (B/W) 24 bit (c)
Ακρίβεια (μm)	3	2	4-5	3
Επαναληψιμότητα (μm)			3	2
Ταχύτητα σάρωσης	1 Mpixel/s	4 Mpixel/s	31Kpixel/s	0,5 Mpixel/s
Υπολογιστής	SUN Sparcstation	Silicon Graphics	UNIX W/S	Pentium PC
Λειτουργικό	Solaris 2.x	Unix	Unix	MS-DOS
Κόστος (δρχ.)	30.000.000	40.000.000	20.000.000	16.000.000

Πίνακας 1 (πηγή: Baltasvias & Bill, 1996)

Οι περισσότεροι από τους φωτογραμμετρικούς σαρωτές καταγράφουν την ψηφιακή εικόνα σε τμήματα με τη βοήθεια μιας ψηφιακής μηχανής ακριβείας. Τα κομμάτια αυτά (tiles) συντίθενται αργότερα με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού σε ενιαίο σύνολο, ώστε να σχηματισθεί η τελική ψηφιακή εικόνα. Ωστόσο και παρ' όλο που από την κατασκευή τους εγγυώνται αναμφισβήτητα υψηλή γεωμετρική ακρίβεια, πρέπει κατά καιρούς να βαθμονομούνται, ώστε αυτή να εξασφαλίζεται στο μέγιστο δυνατό βαθμό.

3.3 Διαδικασίες βαθμονόμησης σαρωτών

Μια βασική ιδιότητα των σαρωτών είναι η ανάλυση σάρωσης, ή απλούστερα η πυκνότητα των φωτοευαίσθητων στοιχείων στον αισθητήρα. Η ανάλυση σάρωσης έχει άμεση σχέση με την τελική χωρική ανάλυση της ψηφιακής εικόνας. Πολλοί σύγχρονοι σαρωτές έχουν τη δυνατότητα παρεμβολής μεγαλύτερης χωρικής ανάλυσης στα πρωτογενώς ψηφιοποιημένα στοιχεία. Η χρήση των σαρωτών εμπορίου για φωτογραμμετρικές εφαρμογές είναι καταχρηστική και από αυτήν προκύπτουν διάφορα προβλήματα στα ψηφιακά δεδομένα, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Τα προβλήματα αυτά είναι τόσο γεωμετρικά όσο και ραδιομετρικά. Στα γεωμετρικά προβλήματα, που ενδιαφέρουν περισσότερο τις εφαρμογές φωτογραμμετρίας, επιγραμματικώς περιλαμβάνονται:

- η καθετότητα σάρωσης, δηλαδή κατά πόσο η διεύθυνση κίνησης του γραμμικού αισθητήρα είναι ακριβώς κάθετη στον αισθητήρα
- το σχήμα του κάθε φωτοευαίσθητου στοιχείου (τετράγωνο ή ορθογώνιο), δηλαδή εάν το κατά τη διεύθυνση σάρωσης βήμα του γραμμικού αισθητήρα είναι ίσο με το μέγεθος του κάθε φωτοευαίσθητου στοιχείου του
- οι διάφορες παραμορφώσεις που προκαλούνται από τα οπτικά στοιχεία (όπως διαστροφή κ.α).

Έτσι προκύπτει η ανάγκη γεωμετρικής κυρίως, αλλά και ραδιομετρικής, βαθμονόμησης των επιτραπέζιων και των φωτογραμμετρικών σαρωτών, όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές με απαιτήσεις ακριβείας. Η γεωμετρική βαθμονόμηση ενός επιτραπέζιου σαρωτή μπορεί απλώς να εκτελεστεί με τη σάρωση ενός κανάβου ακριβώς μετρημένου και τη μέτρηση κατόπιν της παραγόμενης ψηφιακής του εικόνας. Η σύγκριση των πραγματικών με τις θεωρητικές τιμές των συντεταγμένων των κορυφών του κανάβου έχει ως αποτέλεσμα ένα μοντέλο διόρθωσης των παραγόμενων ψηφιακών δεδομένων από τον συγκεκριμένο σαρωτή. Το μαθηματικό αυτό μοντέλο, για παράδειγμα ένα πολυώνυμο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναλυτική διόρθωση - αναγωγή - των ψηφιοποιημένων εικόνων σε εικόνες απαλλαγμένες από αυτά τα γεωμετρικά σφάλματα, ή για την διόρθωση των μετρήσεων στις ψηφιακές εικόνες κατά την εφαρμογή της φωτογραμμετρικής διαδικασίας. Καλό είναι οι μετρήσεις αυτές να εκτελούνται αρκετές φορές, ώστε να διαπιστώνεται και η επαναληπτικότητα των σφαλμάτων του σαρωτή. Σε περίπτωση που δεν διαπιστώνεται ικανοποιητική επαναληπτικότητα, θα πρέπει να βαθμονομείται **κάθε** σάρωση ξεχωριστά, γεγονός που καθιστά την διαδικασία αντισυμβατική.

Η ραδιομετρική βαθμονόμηση αντιστοίχως απαιτεί τη χρήση ενός ραδιομετρικού προτύπου, όπως για παράδειγμα μιας βαθμονομημένης κλίμακας γκριζών τόνων. Η διαδικασία είναι εντελώς αντίστοιχη με αυτήν της γεωμετρικής βαθμονόμησης (Baltsavias and Waegli, 1996).

Βιβλιογραφία

1. Baltasvias, E.P., Bill, R., 1996. Scanners - A survey of current technology and future needs. International Archives of Photogrammetry, Vienna.
2. Γεωργόπουλος, Α., 1984. Καλιμπράρισμα μη μετρητικών μηχανών. Τεχνικά Χρονικά, Ιούνιος 1984.
3. Georgopoulos, A., 1977. Camera Calibration and Film Flatness. Msc Thesis, University College London.
4. Georgopoulos, A., Tournas, E., 1995. Determination of seismic movements of monuments using stereoscopic video. Proceedings of Conference on 3D-Optical measurement techniques. Vienna, October 1995.
5. Jenkins, F.& White,H. 1976. Fundamentals of Optics. McGraw Hill, 4.ed. 746 pp.
6. Ray, S. 1977. The Lens and All its Jobs. Focal Press, 158 pp.
7. Scott, P.J., 1977 The pupil in perspective. Photogrammetric Record, 9(49):83-92.
8. Thompson, E.H. 1957. The geometrical theory of the camera and its application in photogrammetry. Photogrammetric Record. 2(10):240-263.