

ΠΡΟΤΑΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ ΕΙΚΟΝΟΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

Α. Γεωργόπουλος, Χ. Ιωαννίδης, Ε. Λάμπρου, Γ. Πανταζής, Κ. Νικολίτσας

Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
e-mail: litsal@central.ntua.gr

Περίληψη

Οι εικονογεωδαιτικοί ολοκληρωμένοι σταθμοί αποτελούν μια από τις πρόσφατες εξελίξεις των τοπογραφικών οργάνων, με δυνατότητα μέτρησης γωνιών και μηκών μέσω σκόπευση σε ειδικής οθόνης. Ο νέος τρόπος σκόπευσης καθώς και η ενσωμάτωση ψηφιακής φωτομηχανής στο εσωτερικό του τηλεσκοπίου του οργάνου χρήζουν ελέγχου και βαθμονόμησης. Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν μεθοδολογίες για τη βαθμονόμησης της ψηφιακής κάμερας (CCD) και τον προσδιορισμό των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού της, δηλαδή της σταθεράς c , της θέσης του πρωτεύοντος σημείου (x_0, y_0), της χαρακτηριστικής καμπύλης ακτινικής διαστρόφης του φακού Δr και της αφινικότητας (γεωμετρική αλλοίωση του εικονοστοιχείου).

Με την προτεινόμενη μεθοδολογία διερευνάται η δυνατότητα και η αξιοπιστία προσδιορισμού των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού της ψηφιακής κάμερας, με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων καθώς και η επαναληπτικότητά τους. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις ονομαστικές τιμές που δίνει ο κατασκευαστής. Παρουσιάζονται διάφορες πειραματικές δοκιμές, για διάφορες αποστάσεις μεταξύ του σταθμού και του αντικειμένου λήψης της εικόνας – μέτρησης, ώστε να διαπιστωθούν τυχόν μεταβολές στις παραμέτρους και να μοντελοποιηθούν οι παράμετροι του συστήματος.

Abstract

In recent years imaging total stations appeared, offering the possibility of measuring angles and distances through pointing enabled via a digital screen. These innovative ways of pointing as well as the incorporation of a digital camera in the total station need calibration and thorough control.

In this paper a methodology both for calibrating the digital (CCD) camera of the imaging total stations as well as for determining the elements of their interior orientation is developed and presented. The main aim is the determination of the calibrated focal length of the CCD camera, the position of the principal point (x_0, y_0), the characteristic curve of the radial distortion (Δr) and the affinity, i.e. the geometric distortion of the pixel.

The proposed methodology serves to investigate the possibility and the reliability of determining the parameters of the interior orientation of the digital camera using suitable algorithms, as well as their repeatability. The results are compared with the nominal values given by the manufacturer. Finally, several experimental tests are presented for various taking distances between the total station and the object, in order to establish possible variations of the parameter values and help towards their modeling.

1. Εισαγωγή

Ο υπολογισμός των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού της μηχανής λήψης μιας εικόνας αποτελεί πρωταρχικό αντικείμενο για κάθε φωτογραμμετρική εφαρμογή, προκειμένου να διευκολυνθούν οι υπολογισμοί.

Από την εποχή της αναλογικής φωτογραμμετρίας είχαν κατασκευαστεί μετρητικές φωτομηχανές, επονομαζόμενες φωτοθεοδόλιχα, οι οποίες είχαν τη δυνατότητα να δίνουν πληροφορία σχετικά με τη θέση του σημείου λήψης και τον προσανατολισμό του οπτικού άξονα σε κάθε λήψη. Οι μηχανές αυτές, όπως οι P31 και P32 της εταιρείας Wild ή UMK της εταιρείας Carl Zeiss Jena, ήταν ιδιαίτερα χρήσιμες στις επίγειες εφαρμογές, αλλά και σε εναέριες λήψεις, π.χ. σε αρχαιολογικές εφαρμογές.

Σήμερα η ιδέα αυτή υλοποιείται με την κατασκευή των σύγχρονων ολοκληρωμένων εικονογεωδαιτικών σταθμών (Imaging Total station). Οι σταθμοί αυτοί ενσωματώνουν μια ή περισσότερες κάμερες σε συγκεκριμένη θέση, ώστε να μπορούν απευθείας ή με ελάχιστους υπολογισμούς να καταγράφονται οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού σε κάθε λήψη εικόνας. Η κάμερα των σταθμών αυτών βρίσκεται μέσα στο τηλεσκόπιο (όπως στα μοντέλα GPT 7000i και IS της εταιρείας Topcon), είτε λίγο έξω από αυτό (στο μοντέλο VX της εταιρείας Trimble) είτε και στις δύο θέσεις, με γνωστή την εκκεντρότητα τοποθέτησής της ως προς το κέντρο του τηλεσκοπίου του εικονογεωδαιτικού σταθμού (σημείο τομής των αξόνων).

Έτσι, οι γωνίες στροφής του κέντρου λήψης της κάμερας αντιστοιχίζονται απευθείας με τις γωνίες που αναγράφονται στην οθόνη του γεωδαιτικού σταθμού:

- η ζενίθια γωνία z αντιστοιχεί στη γωνία ω ,
- η οριζόντια γωνία αντιστοιχεί στη γωνία ϕ και
- η γωνία κ είναι μηδενική, αφού το όργανο είναι πάντα οριζοντιωμένο.

Επιπλέον, οι συντεταγμένες του κέντρου λήψης της εικόνας είναι γνωστές σε επίγειο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων.

Οι εικονογεωδαιτικοί σταθμοί διαθέτουν λειτουργικό σύστημα Windows CE, οθόνες αφής, δυνατότητα σύνδεσης με περιφερειακά μέσω θύρας RS232 και USB θύρες αλλά και ασύρματα μέσω bluetooth. Είναι δυνατή η σύνδεσή τους στο διαδίκτυο για λήψη και αποστολή στοιχείων σε πραγματικό χρόνο, ενώ καταγράφουν κατ' επιλογή του χρήστη την εικόνα κάθε σημείου που μετράται ή οποιαδήποτε άλλη επιλεγεί. Η σκόπευση μπορεί να γίνει από οθόνη και όχι από το τηλεσκόπιο, εφόσον ότι "βλέπει" το τηλεσκόπιο μεταφέρεται άμεσα στην οθόνη είτε του εικονογεωδαιτικού σταθμού είτε ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η ανάλυση των καμερών που φέρουν, ενώ αρχικά ήταν ιδιαίτερα χαμηλή (640×480 ή 580×1260 εικονοψηφίδες) για φωτογραμμετρική (μετρητική) χρησιμοποίηση των συλλεγομένων εικόνων, στα τελευταία μοντέλα έχει αυξηθεί, φθάνοντας τις 2048×1536 εικονοψηφίδες, που είναι ικανοποιητική για μεγάλο εύρος εφαρμογών εγγύς φωτογραμμετρίας. Συνεπώς, η ύπαρξη της κάμερας στους εικονογεωδαιτικούς σταθμούς, πέραν της διευκόλυνσης που παρέχει στην εκτέλεση των καθαρά γεωδαιτικών-τοπογραφικών μετρήσεων, παρέχει πλέον την δυνατότητα για ταυτόχρονη συλλογή των απαραίτητων εικόνων για την εκτέλεση καθαρά φωτογραμμετρικών διαδικασιών, π.χ. αναγωγών, στερεοαποδόσεων κ.ο.κ.

Ομως, η χρήση των σταθμών αυτών στις επίγειες φωτογραμμετρικές εφαρμογές, προϋποθέτει τον έλεγχο και τη βαθμονόμηση των καμερών τους, ώστε να είναι γνωστές οι απαραίτητες παράμετροι, προκειμένου αφενός να γίνεται ο προγραμματισμός των λήψεων και αφετέρου να πραγματοποιείται με ακρίβεια η φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων τους.

2. Βαθμονόμηση ψηφιακών φωτομηχανών

Στις φωτογραμμετρικές εφαρμογές απαιτείται ο προσδιορισμός του κατάλληλου, κάθε φορά, μοντέλου κεντρικής προβολής που περιγράφει καλύτερα το σύστημα φωτογράφησης που

χρησιμοποιείται. Οι παράμετροι που την καθορίζουν αποτελούν τον εσωτερικό προσανατολισμό, τα βασικά στοιχεία του οποίου για μια φωτογραμμετρική λήψη είναι η σταθερά της μηχανής (c) ή η βαθμονομημένη εστιακή απόσταση, η θέση του πρωτεύοντος σημείου στο σύστημα των σημείων πλαισίου (x_0, y_0) και η χαρακτηριστική καμπύλη της ακτινικής διαστρόφης του φακού (Δr). Ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών λέγεται διακρίβωση ή βαθμονόμηση της φωτομηχανής. Κάθε φωτογραφική μηχανή πρέπει να ελέγχεται, γιατί για την Φωτογραμμετρία αυτή αποτελεί το όργανο μέτρησης - καταγραφής της αρχικής πληροφορίας.

Η βαθμονόμηση θεωρητικά ολοκληρώνεται όταν:

- α. έχει οριστεί πάνω στο εστιακό επίπεδο 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 και
- β. για όλα τα σημεία του επιπέδου προβολής έχει υπολογιστεί η τιμή της πρωτεύουσας απόστασης (σταθερά της μηχανής) c . Αυτές οι τιμές έχουν νόημα, δεδομένου ότι λόγω της επίδρασης της ακτινικής διαστρόφης, παρατηρείται μικρο-διαφοροποίηση της κλίμακας απεικόνισης από σημείο σε σημείο επάνω στο εστιακό επίπεδο. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μετασχηματίζονται σε διαφοροποιήσεις της σταθεράς c .

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 διαστρόφης. Ιδανικό θα ήταν να υπήρχε ένα σημείο στο αντικείμενο 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 την ψηφιακή εικόνα, που μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια σε κάποιο κατάλληλο όργανο και επίσης με τη συνεφαπτομένη των αντιστοιχών διευθύνσεων υπολογίζονται οι (ενεργές) τιμές της πρωτεύουσας απόστασης για όλα τα σημεία που παρατηρήθηκαν. Υπολογίζεται δηλαδή η επίδραση της αντίστοιχης κλίμακας 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.

Η βαθμονόμηση των ψηφιακών μηχανών δεν διαφέρει εν γένει από την βαθμονόμηση των 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 επιτεδότητα της φωτοευαίσθητης επιφάνειας. Όμως στις ψηφιακές μηχανές πρέπει να ελέγχεται το μέγεθος και το σχήμα της εικονοψηφίδας (pixel) και 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:

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

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

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 διαστρωφής

α_3, α_4 παράμετροι έκκεντρης διαστρωφής

α_5, α_6 παράμετροι αφινικού μετασχηματισμού.

Η διαδικασία αυτοβαθμονόμησης ψηφιακών μηχανών μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως, με την χρήση κατάλληλα κωδικοποιημένων στόχων στο πεδίο ελέγχου, οι οποίοι ανιχνεύονται, αποκωδικοποιούνται και μετρώνται χωρίς την επέμβαση χειριστή. Έτσι, αποφεύγεται σημαντικός όγκος εργασίας, λόγω του μεγάλου αριθμού σημείων που πρέπει να μετρηθούν σε κάθε εικόνα για την διαδικασία βαθμονόμησης ιδιαίτερα των μη μετρητικών μηχανών, ή επιτυγχάνεται εξαγωγή αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο κατά την παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων.

Το ποια μέθοδος ενδείκνυται για κάθε εφαρμογή, εξαρτάται από τη φύση της εργασίας. Εκείνες οι μέθοδοι που απλώς υπολογίζουν τους αγνώστους του προσανατολισμού είναι πιο ακριβείς, δεν λαμβάνουν όμως υπόψη τις διαφορές συνθήκες εργασίας. Θα έπρεπε τέλος να επισημανθεί ότι, παρόλο που ορισμένες μη μετρητικές μηχανές παρουσιάζουν κάποια ικανότητα επαναληπτικότητας, θα πρέπει κανονικά κανείς να κάνει βαθμονόμηση κάθε λήψης. Γενικώς πάντως, οι μη μετρητικές μηχανές είναι σταθερότερες από όσο θεωρούνται και μπορούν να χρησιμοποιούνται για εργασίες με απαιτήσεις ακρίβειας, με την προϋπόθεση ότι γίνεται κατάλληλη επεξεργασία στις μετέπειτα μετρήσεις εικονοσυντεταγμένων.

3. Μεθοδολογία βαθμονόμησης της φωτομηχανής εικονογεωδαιτικού σταθμού

3.1 Πεδία ελέγχου

Η Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου έχει μακρόχρονη δραστηριότητα σε θεωρητικά, ερευνητικά και πρακτικά θέματα διακρίβωσης επίγειων, αναλογικών και ψηφιακών φωτομηχανών. Στο πλαίσιο της δραστηριότητας αυτής δημιουργήθηκαν δύο (2) ειδικών προδιαγραφών τρισδιάστατα πεδία ελέγχου. Το ένα βρίσκεται σε εσωτερική αίθουσα του κτιρίου, για βαθμονόμηση με εστίαση σε κοντινές αποστάσεις, μέχρι 12m, και αποτελείται από 46 στόχους τοποθετημένους σε 12 κατακόρυφους στύλους και 36 στόχους σε τοίχο στο βάθος του πεδίου (Σχήμα 1 αριστερά). Το δεύτερο είναι εξωτερικού χώρου, για βαθμονόμηση με εστίαση σε μακρινές αποστάσεις, μεγαλύτερες των 12m, και αποτελείται από 72 διάσπαρτους στόχους σε 5 επίπεδα εξωτερικών όψεων του κτιρίου (Σχήμα 1 δεξιά).

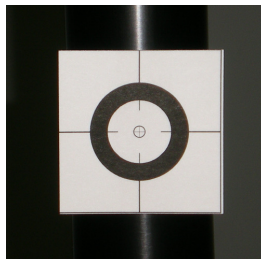
Η επιλογή της μορφής των στόχων (Σχήμα 2), που τοποθετήθηκαν, έγινε με κριτήριο την εξασφάλιση της μέγιστης διακριτικής ικανότητας κατά την σκόπευσή τους από το γεωδαιτικό σταθμό για τις μετρήσεις γωνιών, αλλά και κατά την αναγνώρισή τους σε κάθε εικόνα που λαμβάνεται για το πεδίο ελέγχου.

Ο προσδιορισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων (X, Y, Z) των στόχων έγινε σε τοπικό σύστημα αναφοράς, πραγματοποιώντας μετρήσεις οριζόντιων και ζενίθιων γωνιών και εφαρμόζοντας τη μέθοδο της εμπροσθοτομίας στο χώρο. Σε κάθε πεδίο ελέγχου το σύστημα ορίσθηκε από δύο σημεία, υλοποιημένα με κατάλληλα βάθρα που φέρουν κεφαλή με εξαναγκασμένη κέντρωση (Σχήμα 3). Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο ολοκληρωμένος

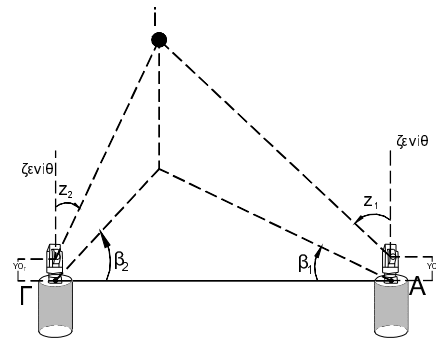
γεωδαιτικός σταθμός TDA 5005 της εταιρείας Leica, ο οποίος παρέχει ακρίβεια στη μέτρηση γωνιακών μεγεθών $\pm 1.5''$. Έτσι, οι συντεταγμένες X_i , Y_i , Z_i κάθε στόχου υπολογίστηκαν με ακρίβεια $\pm 0.1\text{mm}$ σε κάθε άξονα. Ο υπολογισμός γίνεται επιλύοντας ένα τριδιάστατο δίκτυο με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (περίπτωση μεταβολής συντεταγμένων), χρησιμοποιώντας ως εξισώσεις παρατήρησης αυτές των οριζόντιων και των ζενίθιων γωνιών.



Σχήμα 1. Το εσωτερικό (αριστερά) και τμήμα του εξωτερικού (δεξιά) πεδίου ελέγχου, του Εργ. Φωτογραμμετρίας ΣΑΤΜ ΕΜΠ, για διακρίβωση επίγειων φωτομηχανών



Σχήμα 2. Η μορφή του επιλεγέντος στόχου



Σχήμα 3. Σχηματική παράσταση των γεωδαιτικών μετρήσεων για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των πεδίων ελέγχου

3.2 Λογισμικό

Για τις ανάγκες βαθμονόμησης ψηφιακών φωτομηχανών, το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, έχει αναπτύξει το ειδικό λογισμικό βαθμονόμησης “Calibration_CCD”, σε περιβάλλον MatLab, με ταυτόχρονο προσδιορισμό των παραμέτρων εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού μιας εικόνας, με χρήση της συνθήκης συγγραμμικότητας. Η επίλυση γίνεται με εφαρμογή της μεθόδου της δέσμης, ενώ οι προσεγγιστικές τιμές των αγνώστων προσδιορίζονται με χρήση του Αμεσου Γραμμικού Μετασχηματισμού (DLT) 11 παραμέτρων. Το πρόγραμμα συμπληρώνεται από βιβλιοθήκη που αναπτύχθηκε, για την αυτοματοποίηση των μετρήσεων των σημείων του πεδίου ελέγχου, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ειδικά κωδικοποιημένοι στόχοι.

Οι παράμετροι βαθμονόμησης που προσδιορίζονται με το λογισμικό “Calibration_CCD”, είναι η σταθερά της μηχανής, οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου, οι συντελεστές των πολωνύμων της ακτινικής διαστρόφης και της ασύμμετρης παραμόρφωσης και οι αφινικές παραμορφώσεις. Για την μοντελοποίηση της ακτινικής διαστρόφης χρησιμοποιήθηκαν οι δύο πρώτες παράμετροι του πολωνύμου K_1 και K_2 ($\delta r = K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5$), για την ασύμμετρη

παραμόρφωση οι παράμετροι P_1 και P_2 της συνάρτησης: $P(r) = (P_1^2 + P_2^2)^{1/2} \cdot r^2$ και για τις αφινικές παραμορφώσεις δύο παράμετροι:

λ : για την διαφορετική κλίμακα μεταξύ των αξόνων, δηλαδή ο συντελεστής κλίμακας του άξονα y θεωρώντας ότι ο άξονας x έχει συντελεστή κλίμακας 1, και

ε : για την μη καθετότητα των αξόνων, δηλαδή η απόκλιση από την καθετότητα του άξονα y από τον x .

Όλοι οι άγνωστοι παράμετροι υπολογίζονται σε ενιαία συνόρθωση με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της δέσμης, με εξίσωση παρατήρησης τη συνθήκη συγγραμμικότητας:

$$x = x_0 - c \cdot \frac{A_1}{\Pi N} + \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_{af}, y = y_0 - c \cdot \frac{A_2}{\Pi N} + \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_{af}$$

όπου: $\Delta x_r, \Delta y_r$: διορθώσεις των εικονοσυντεταγμένων λόγω ακτινικής διαστροφής

$\Delta x_d, \Delta y_d$: διορθώσεις των εικονοσυντεταγμένων λόγω ασύμμετρης παραμόρφωσης

$\Delta x_{af}, \Delta y_{af}$: διορθώσεις των εικονοσυντεταγμένων λόγω αφινικών παραμορφώσεων

$$\Delta x_r = (x - x_0) \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6 + \dots)$$

$$\Delta y_r = (y - y_0) \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6 + \dots)$$

$$\Delta x_d = P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot (x - x_0)^2) + 2 \cdot P_2 \cdot (x - x_0) \cdot (y - y_0) \quad \text{και} \quad \Delta x_{af} = \varepsilon \cdot (y - y_0)$$

$$\Delta y_d = 2 \cdot P_1 \cdot (x - x_0) \cdot (y - y_0) + P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot (y - y_0)^2) \quad \Delta y_{af} = \lambda \cdot (y - y_0)$$

Εναλλακτικά της παραπάνω διαδικασίας, η βαθμονόμηση φωτομηχανών μπορεί να γίνει μέσω του λογισμικού “BINGO-F”, που διαθέτει το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, και το οποίο είναι ένα από τα πλέον διαδεδομένα διεθνώς προγράμματα επίλυσης φωτοτριγωνισμού. Χρησιμοποιώντας μπλοκ (επικαλυπτόμενων) εικόνων, προσδιορίζει ταυτόχρονα τις παραμέτρους προσανατολισμού τους και τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων σύνδεσης, με εφαρμογή της μεθόδου συνόρθωσης με δέσμες. Αν τα σημεία σύνδεσης έχουν γνωστές συντεταγμένες (εικόνες από πεδίου ελέγχου) είναι δυνατόν στις άγνωστες παραμέτρους των (εξωτερικών) προσανατολισμών των εικόνων να προστεθούν οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού της φωτομηχανής, οπότε ακολουθείται η διαδικασία επίλυσης φωτοτριγωνισμού με αυτοβαθμονόμηση. Το λογισμικό “BINGO-F” παρέχει την δυνατότητα εισαγωγής ως αγνώστων της σταθεράς της μηχανής, των συντεταγμένων του πρωτεύοντος σημείου και μεγάλου αριθμού (περίπου 30) πρόσθετων παραμέτρων, που απορροφούν κάθε πιθανή διαστροφή των φακών ή παραμόρφωση των εικόνων.

4 Εφαρμογή

Αμφότερες οι παραπάνω διαδικασίες βαθμονόμησης εφαρμόστηκαν στη ψηφιακή κάμερα του εικονογεωδαιτικού σταθμού VX της εταιρείας Trimble, με χρήση και των δύο πεδίων ελέγχου της ΣΑΤΜ. Ο σταθμός VX της Trimble (Σχήμα 4), πέραν των καθαρά τοπογραφικών χαρακτηριστικών του για τη διενέργεια μετρήσεων διευθύνσεων, με ακρίβεια $\pm 3''$, και μηκών, με ακρίβεια $\pm 3\text{mm}$, διαθέτει ενσωματωμένη ψηφιακή φωτομηχανή (Color Digital Image Sensor) για συλλογή εικόνων και αποθήκευσή τους σε μορφή JPEG. Τα χαρακτηριστικά της κάμερας, που παρέχει ο κατασκευαστής, είναι:

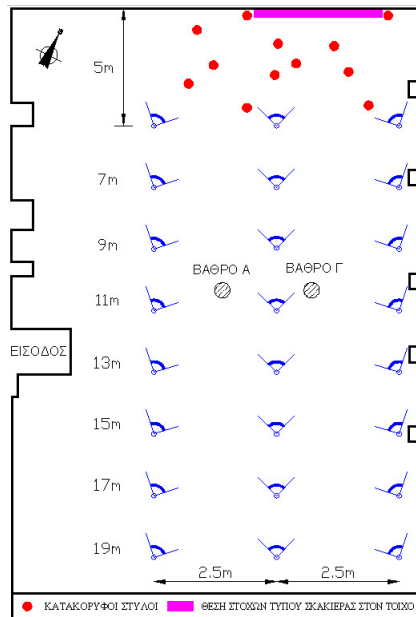
- ανάλυση 2048x1536 pixels και FOV $16.5^\circ \times 12.3^\circ$
- σταθερά της μηχανής 23mm, που αντιστοιχεί σε 7219 pixels (διάσταση pixel $3.2\mu\text{m}$)
- βάθος πεδίου από 3m μέχρι άπειρο.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων βαθμονόμησης της κάμερας του σταθμού VX, έγιναν:

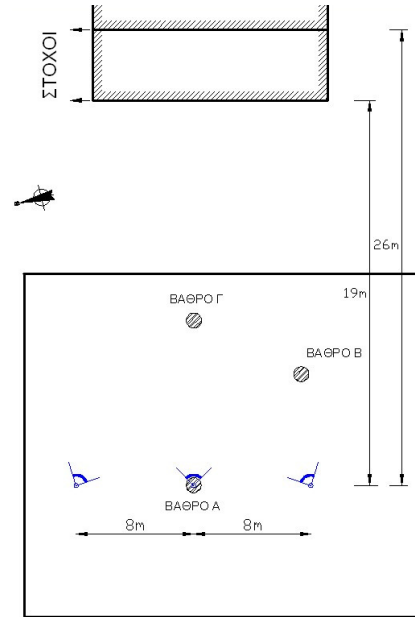
- 24 λήψεις εικόνων του εσωτερικού πεδίου ελέγχου, από 8 διαφορετικές αποστάσεις, σε 3 θέσεις και προσανατολισμούς του οργάνου κάθε φορά (Σχήμα 5) και
- 8 λήψεις εικόνων του εξωτερικού πεδίου ελέγχου, από 3 θέσεις του οργάνου (Σχήμα 6).



Σχήμα 4. Ο εικονογεωδαιτικός σταθμός Trimble VX



Σχήμα 5. Σχηματική παράσταση των θέσεων λήψης των εικόνων, στο εσωτερικό πεδίο ελέγχου



Σχήμα 6. Σχηματική παράσταση των θέσεων λήψης των εικόνων, στο εξωτερικό πεδίο ελέγχου

Η βαθμονόμηση με το λογισμικό “Calibration_CCD” έγινε με τις εικόνες του εσωτερικού πεδίου ελέγχου. Για κάθε εικόνα έγινε διαφορετική επίλυση και προσδιορίστηκαν οι 9 παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού της φωτομηχανής και (ως παραπροϊόν) τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας. Τα συνολικά αποτελέσματα των 24 επιλύσεων, για τις παραμέτρους βαθμονόμησης της κάμερας του συγκεκριμένου εικονογεωδαιτικού σταθμού και τις αβεβαιότητες προσδιορισμού τους, είναι:

$$c = 7223 \text{ pixel} \pm 4 \text{ pixel}$$

$$x_0 = 13 \text{ pixel} \pm 17 \text{ pixel}$$

$$K1 = 1.44 \text{ E-09}$$

$$P1 = 2.62 \text{ E-07}$$

$$\lambda = 1.000084$$

$$y_0 = -38 \text{ pixel} \pm 14 \text{ pixel}$$

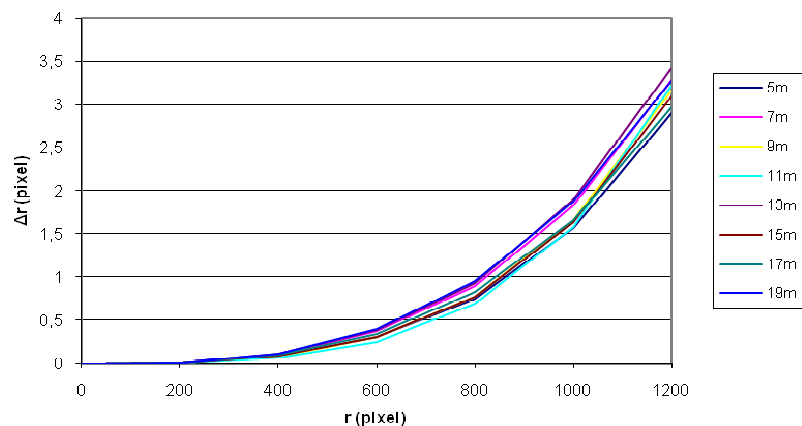
$$K2 = 2.77 \text{ E-16}$$

$$P2 = 3.67 \text{ E-07}$$

$$\varepsilon = 0^{\circ}.00514$$

Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα για την κάμερα του εικονογεωδαιτικού σταθμού:

- εμφανίζει μεγάλη σταθερότητα για όλες τις παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού, εκτός από τις συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου
- διατηρείται η ίδια απόσταση εστίασης (προφανώς στο άπειρο) της κάμερας, ανεξάρτητα από την απόσταση σκόπευσης του οργάνου στον κύριο οπτικό άξονα (εξάλλου διαθέτει μεγάλο βάθος πεδίου)
- η σταθερά της μηχανής προσδιορίζεται με ιδιαίτερα μικρή αβεβαιότητα και η τιμή της δεν διαφέρει από το μέγεθος που δίνει πάγια ο κατασκευαστής (για όλα τα παραγόμενα όργανα VX), καθώς είναι μέσα στο εύρος αβεβαιότητας 1σ
- πρακτικά εμφανίζεται αδυναμία υπολογισμού τιμών για τις συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου (τόσο του x_0 όσο και του y_0), λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας προσδιορισμού τους
- η ακτινική διαστρόφη είναι αμελητέα, καθώς δεν υπερβαίνει τα 3.5 pixel σε όλη την εικόνα (Σχήμα 7). Στην περίπτωση βαθμονόμησης της ακτινικής διαστρόφης, ώστε να μηδενίζεται σε ακτίνα 1000 pixel (οπότε η σταθερά της μηχανής γίνεται 7224.8 pixel, άρα επίπτωση μικρότερη από 2 pixel), η απόλυτη τιμή της είναι μικρότερη από 0.7 pixel σε όλη την εικόνα.



Σχήμα 7. Διάγραμμα ακτινικής διαστροφής

Οι εικόνες του εξωτερικού πεδίου ελέγχου αξιοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του ίδιου εικονογεωδαιτικού σταθμού, με την διαδικασία της αυτοβαθμονόμησης μέσω του λογισμικού “BINGO-F”. Στις έξι (6) εικόνες του πεδίου απεικονίζονται (συνολικά) 30 στόχοι, διατεταγμένοι σε 3 επίπεδα-τοίχους (Σχήμα 6). Έγιναν διάφορες επιλύσεις του μπλοκ των 6 εικόνων στο “BINGO-F”, εισάγοντας ως αγνώστους του εσωτερικού προσανατολισμού της κάμερας διάφορους συνδυασμούς των αγνώντων που παρέχει το λογισμικό. Τα καλύτερα αποτελέσματα (με τη μικρότερη αβεβαιότητα στον προσδιορισμό των αγνώντων) προέκυψαν για τις επιλύσεις:

- Με αγνώστους παραμέτρους βαθμονόμησης τη σταθερά της μηχανής (c) και δύο συντελεστές (K1, K2) του πολωνύμου της ακτινικής διαστροφής. Η τιμή της σταθεράς προσδιορίστηκε: $c = 7223 \text{ pixel} \pm 7 \text{ pixel}$, ενώ η απόλυτη τιμή της διαστροφής διατηρήθηκε μικρότερη από 1 pixel σε όλη την εικόνα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ακρίβεια συνόρθωσης των γεωδαιτικών συντεταγμένων στο πεδίο ελέγχου ήταν καλύτερη από $\pm 4\text{mm}$ οριζοντιογραφικά και $\pm 7\text{mm}$ υψομετρικά.
- Με αγνώστους παραμέτρους βαθμονόμησης τη σταθερά της μηχανής (c), τις συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου (x_o , y_o) και δύο συντελεστές (K1, K2) του πολωνύμου της ακτινικής διαστροφής. Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα ήταν:
 $c = 7222 \text{ pixel} \pm 8 \text{ pixel}$, $x_o = -33 \text{ pixel} \pm 16 \text{ pixel}$, $y_o = -23 \text{ pixel} \pm 29 \text{ pixel}$ και η απόλυτη τιμή της διαστροφής μικρότερη από 1 pixel σε όλη την εικόνα.

Πάντως, δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική αλλαγή στις τιμές των βασικών παραμέτρων βαθμονόμησης όπως υπολογίστηκαν και στις υπόλοιπες επιλύσεις που επιχειρήθηκαν. Για παράδειγμα, με χρήση εννέα (9) αγνώντων εσωτερικού προσανατολισμού, προέκυψαν:

$c = 7226 \text{ pixel} \pm 11 \text{ pixel}$, $x_o = -34 \text{ pixel} \pm 16 \text{ pixel}$, $y_o = -20 \text{ pixel} \pm 29 \text{ pixel}$, $|dr| < 1 \text{ pixel}$.

Συνεπώς, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη (διαφορετική) διαδικασία βαθμονόμησης με τις εικόνες του εσωτερικού πεδίου ελέγχου (λήψεις από αποστάσεις 5-19m), συμφωνούν πλήρως με τα εξαχθέντα από την εφαρμογή φωτοτριγωνισμού με αυτοβαθμονόμηση, με το λογισμικό “BINGO-F”, με χρήση των εικόνων του εξωτερικού πεδίου ελέγχου (λήψεις από αποστάσεις 19-26m).

5. Συμπεράσματα

Οι εικόνες που λαμβάνονται από τους εικονογεωδαιτικούς σταθμούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για φωτογραμμετρικές εφαρμογές, αξιοποιώντας τη δυνατότητα, που παρέχει το όργανο, για ταυτόχρονη πραγματοποίησης και των αναγκαίων τοπογραφικών μετρήσεων. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού της ενσωματωμένης κάμερας, μέσω εκτέλεσης διαδικασιών βαθμονόμησης της. Στο άρθρο αυτό αναπτύχθηκε η μεθοδολογία για την βαθμονόμηση της φωτομηχανής και ελέγχθηκε η

αποτελεσματικότητά της για την περίπτωση του εικονογεωδαιτικού σταθμού VX της Trimble, που διαθέτει μια κάμερα 3Mpixel.

Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, καθώς διαπιστώθηκε μεγάλη σταθερότητα στη γεωμετρία της φωτομηχανής. Προσδιορίστηκαν, πρακτικά, οι ίδιες τιμές των παραμέτρων βαθμονόμησης σε όλες τις επιχειρηθείσες δοκιμές, με εφαρμογή διαφορετικών διαδικασιών και διαφορετικών αποστάσεων λήψης. Σημαντική είναι η διαπίστωση ότι η ακτινική διαστρόφη του φακού είναι αμελητέα, με δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων ακριβείας με την εφαρμογή φωτογραμμετρικής αναγωγής.

Η επανάληψη της διαδικασίας βαθμονόμησης της κάμερας ανά τακτά διαστήματα, ανάλογα με την ένταση και τις συνθήκες χρήσης του σταθμού, διασφαλίζει την διαρκή επίτευξη φωτογραμμετρικών αποτελεσμάτων συγκεκριμένης ακρίβειας.

Βιβλιογραφία

- Γεωργόπουλος, Α. και Ιωαννίδης Χ., 2007. Διακρίβωση επιγείων ψηφιακών φωτομηχανών. Πρακτικά (CD) 2^ο Τακτικού Εθνικού Συνεδρίου Μετρολογίας, Θεσσαλονίκη.
- Barakou A., Georgopoulos A. and Pantazis G., 2008, Exploiting the contemporary Topcon imaging total station for cultural heritage recording. Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM), Lemesos, Cyprus.
- Σαμαρά Α., 2004. Διερεύνηση Βαθμονόμησης Ψηφιακής Μηχανής. Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορικής», Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Τριάντου Ε., 2009. Γεωμετρική Τεκμηρίωση του Ι.Ν. Γέννησης του Χριστού – Διερεύνηση δυνατοτήτων του εικονογεωδαιτικού σταθμού GPT-7003i της TOPCON. Διπλωματική εργασία, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
- http://www.korecgroup.com/files/downloads_file-69.pdf
- http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-348124/022543-261F_TrimbleVX_DS_0110_lr.pdf
- Atkinson K.B., 1996. Close range Photogrammetry and Machine Vision. Whittles Publishing, ISBN 1-870325-46-X.
- Fraser C., 1997. Digital camera self-calibration, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 52(1997): 149-159.
- Gruen A., Huang T.S., 2001. Calibration and orientation of cameras in Computer Vision, Springer, New York.
- McGlone J.C. (ed.), 2004. Manual of Photogrammetry, 5th edition, ASPRS.
- Walser B., 2004. Development and Calibration of an Image Assisted Total Station. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- Zhang Z., Zheng S. and Zhan Z., 2004. Digital Terrestrial Photogrammetry with Photo Total Station. In: Proceedings of the XX ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, vol. XXXV, part B5, pp. 232-237, <http://www.isprs.org/congresses/istanbul2004/comm5/papers/555.pdf>