ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΚΑΜΕΡΑΣ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΕΙΚΟΝΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ TRIMBLE V10

Αναστάσιος-Γραμματάς Καμπούρης
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ
e-mail: tasan144@hotmail.com

Περίληψη

Το ολοκληρωμένο εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10 (V10 imaging rover) της εταιρείας Trimble παρουσιάστηκε πρώτη φορά το 2013 στο συνέδριο INTERGEO και κυκλοφόρησε εμπορικά στις αρχές του επόμενου έτους. Το V10 είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα δώδεκα ψηφιακών καμερών το οποίο συλλέγει πανοραμικές φωτογραφίες 360° από τη θέση που τοποθετείται. Οι λήψεις των πανοραμάτων αυτών αποσκοπούν στην οπτική τεκμηρίωση και μέτρηση του περιβάλλοντα χώρου που επιλέγει ο χρήστης.

Στην εργασία αυτή επιχειρείται η βαθμονόμηση της τέταρτης και κεντρικής ψηφιακής κάμερας του συστήματος V10 (cam 4) και συμπληρωματικά της τρίτης κάμερας (cam 3). Σκοπός της βαθμονόμησης είναι η διερεύνηση της μετρητικής ικανότητας των καμερών, με τον προσδιορισμό των στοιχείων του εσωτερικού τους προσανατολισμού και τον έλεγχο της σταθερότητας και της επαναληπτικότητάς τους.

Η σταθερά της μηχανής συγκρίνεται με την ονομαστική τιμή που δίνει ο κατασκευαστής, ενω προσδιορίζεται μια εκτίμηση της κατακορύφωσης του οργάνου κατά τη χρήση του στο πεδίο από την ψηφιακή αεροστάθμη. Για την διεξαγωγή του πειράματος αξιοποιούνται τα τριδιάστατα πεδία ελέγχου που διαθέτει η ΣΑΤΜ ΕΜΠ και το λογισμικό “Calibration_CCD” που έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας της ΣΑΤΜ.

Λέξεις-Κλειδιά: Βαθμονόμηση, Ψηφιακή κάμερα, Ολοκληρωμένο εικονοσύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10.

Abstract

The integrated camera system Trimble V10 Imaging Rover initially presented at INTERGEO conference in 2013 and was commercially released early in 2014. The V10 consists of 12 digital cameras which collect 360 degrees panoramic images from the position that is placed. The data acquisition and the generated panoramas are utilized for the visual documentation and measurement of the object and the surrounding environment which are chosen by the user.

In this paper the calibration of the central camera of the system (cam 4) is attempted as long as with the calibration of the third camera (cam 3). The purpose of the calibration process is to investigate the cameras’ metering ability, through the determination of the parameters of their interior orientation and the justification of their stability and repetitiveness.

The calibrated focal length of the cameras' is compared to the nominal value that is given by the manufacturer. Moreover the system's deviation from verticality is estimated during its use on the field with respect to the accepted values of the digital bubble level. The implementation of this experimental test took place by the use of the three-dimensional calibration fields of the School of Rural and Surveying Engineering of NTUA and the software "Calibration_CCD" which has been developed as part of the research activities of the Laboratory of Photogrammetry.

Keywords: Calibration, Digital camera, V10 Imaging Rover

1.Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας του επίγειου φωτογραμμετρικού και γεωδαιτικού εξοπλισμού έχει οδηγήσει στη δημιουργία του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10, το οποίο αξιοποιεί τόσο δεδομένα θέσης όσο και εικόνες για τη διεξαγωγή και την αντιμετωπίση της αποτύπωσης (Καμπούρης 2015). Έτσι ο συνολικός χρόνος για την ολοκλήρωση της αποτύπωσης μειωνεται και συντελεί στην ταχεία κατασκευή τριδιάστατων μοντέλων με φωτορεαλιστική υφή (Park and Um 2015).

Από την εποχή της αναλογικής φωτογραμμετρίας έκαναν την εμφάνισή τους οι στερεοκάμερες, οι οποίες εξασφάλιζαν μια γνωστή και σταθερή διάταξη (κανονική) των φωτομηχανών. Το μειονέκτημα της χρήσης των οργανων αυτών αφορούσε στον περιορισμό του λόγου της βάσης λήψης προς την απόσταση του αντικειμένου, που είναι καθοριστικής σημασίας σε τέτοιες εφαρμογές. Η λύση δόθηκε από τα φωτοθεοδόλιχα, τα οποία τοποθετούνταν σε γνωστές θέσεις, με τη διαδικασία της κέντρωσης και οριζοντίωσης ενώ μετρούσαν τον προσανατολισμό του άξονα λήψης σε σχέση με τον πρωτεύωντα και δευτερεύοντα άξονά τους (Kraus 2010).

Στη σημερινή ψηφιακή εποχή τα φωτοθεοδόλιχα έχουν αντικατασταθεί πλήρως από τους σύγχρονους ολοκληρωμένους εικονογεωδαιτικούς σταθμούς (Scherer and Lerma 2009). Τα συγκεκριμένα αυτά όργανα πέρα από τις μετρήσεις γωνιών και μηκών φέρουν ενσωματωμένους αισθητήρες CCD για τη λήψη μετρητικών εικόνων (Barakou et al. 2008) ενώ προσφέρουν ένα πλήθος εφαρμογών όπως για παράδειγμα ο απομακρυσμένος έλεγχος (Lambrou 2013) και η σάρωση επιφανειών (Pantazis et al. 2013). Αντίστοιχα η επιτομή τής τεχνολογίας των επίγειων μετρητικών μηχανών αναφέρεται σε σφαιρικά η πανοραμικά συστήματα καμερών υψηλής ανάλυσης, για τις ανάγκες κινητής τριδιάστατης χαρτογράφησης από όχημα. Στο όχημα είναι επίσης εγκατεστημένοι αισθητήρες κλίσεων (IMU: inertial measurements units) και δέκτες GNSS (κυρίως GPS) για την καταγραφή της θέσης και του προσανατολισμού του στο χρόνο (Ellum and El-Sheimy 2002).

Το ολοκληρωμένο σύστημα τριδιάστατης απεικόνισης V10, όπως και κάθε φωτομηχανή που χρησιμοποιείται σε φωτογραμμετρικές διαδικασίες, λειτουργεί ως όργανο καταγραφής διευθύνσεων (Γεωργόπουλος και Ιωαννίδης 2007). Έτσι η γνώση της μετρολογικής συμπεριφοράς τους κρίνεται απαραίτητη για τη διασφάλιση της ποιότητας και την εξαγωγή γεωμετρικών παραγώγων συγκεκριμένης ακρίβειας. Η εικόνα περιγράφεται από το μαθηματικό μοντέλο της κεντρικής προβολής και καθορίζεται από τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής, δηλαδή της σταθεράς της μηχανής ή της βαθμονομημένης εστιακής απόστασης (**c**), τη θέση του πρωτεύοντος

σημείου (x_0, y_0) στο σύστημα της εικόνας και το μέγεθος της ακτινικής διαστροφής του φακού (**Δr**) (Γεωργόπουλος κ.α. 2010).

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού της κάμερας πραγματοποιείται με τη διαδικασία της βαθμονόμησης, η οποία χρειάζεται να γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει είτε εργαστηριακά, είτε στο πεδίο με τη φωτογράφιση προτύπων ή με τη διαδικασία της αυτοβαθμονόμησης που στηρίζεται στην ύπαρξη μεγάλου αριθμού φωτοσταθερών από διαφορετικές αποστάσεις λήψης (Πατιάς 1991). Σήμερα η διαδικασία τη αυτοβαθμονόμησης μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως με τη χρήση κωδικοποιημένων στόχων και αλγορίθμους ψηφιακής συνταύτισης.

2.Το Εικονοσύστημα Τριδιάστατης Απεικόνισης V10

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος V10 στηρίζεται στην εμπροσθοτομία στο χώρο τουλάχιστον δύο ομόλογων ακτίνων από τουλάχιστον δύο πανοράματα. Η τεχνολογία του κινείται στους επιστημονικούς χώρους της γεωδαισίας, της φωτογραμμετρίας και της όρασης υπολογιστών. Το V10 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία τυπική κάμερα με τη χρήση φωτοσταθερών σημείων πάνω στο αντικειμένο. Διαφορετικά η χρήση φωτοσταθερών σημείων μπορεί να μειωθεί ή ακόμα και να εξαλειφθεί με την αξιοποίηση των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λήψης και των πρωτογενών μετρήσεων των εσωτερικών αισθητήρων που βρίσκονται στη κεφαλή του (Καμπούρης 2015).

Εικόνα 1: Τα μέρη του ολοκληρωμένου εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10.

Οι συντεταγμένες των σημείων λήψης και οι μετρήσεις των αισθητήρων χρησιμοποιούνται είτε ως παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού των πανοραμάτων είτε ως προσωρινές τιμές, σε σχέση με το μαθηματικό μοντέλο που επιλέγεται κατά την επίλυση του φωτοτριγωνισμού. Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων λήψης μπορούν είτε να είναι γνωστές, δηλαδή να έχουν μετρηθεί σε προγενέστερο χρόνο, είτε να μετρούνται σε πραγματικό χρόνο στο πεδίο με τη χρήση επιβατηγού αισθητήρα θέσης. Αυτός μπορεί να είναι είτε δέκτης GNSS, σε λειτουργία VRS, είτε πρίσμα 360° για την παρακολούθηση του συστήματος από ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό σε λειτουργία “autolock”.

Το κυρίως μέρος του V10 αποτελείται από το στυλεό του, το δίποδο κατακορύφωσής του, το χειριστήριο πεδίου και την κεφαλή του. Σε αυτήν ενσωματώνεται επιβατηγά ένας αισθητήρας θέσης. Το σύστημα V10 ολοκληρώνεται από τα λογισμικά υποστήριξής του,

το Trimble Access για τις εργασίες πεδίου και το Trimble Business Center για τις εργασίες γραφείου (Εικόνα 1) (Trimble 2015).

Η κεφαλή του συστήματος V10 περιλαμβάνει 12 ευρυγώνιους φακούς (τύπου f-theta) σταθερής εστίασης, από απόσταση 0.1m και θεωρητικά ως το άπειρο. Αυτοί χωρίζονται στην άνω σειρά, η οποία λαβάνει το πανόραμα και αποτελείται από 7 κάμερες με οριζόντιο προσανατολισμό του οπτικού τους πεδίου, και την κάτω σειρά, η οποία εμπλουτίζει την πληροφορία που βρίσκεται μπροστά από το χρήστη και αποτελείται από 5 κάμερες κεκλιμένες προς τα κάτω με κατακόρυφο προσανατολισμό του οπτικού τους πεδίου (Trimble 2014).

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακρηριστικά καμερών και αισθητήρων του V10.

	τεχνικά χαρακτηριστικά	
κάμερες	σταθερά (c)	3.63mm
	οπτικό πεδίο κάμερας	$57^o.5\times43^o$
	οπτικό πεδίο (άνω σειράς)	$360^o\times43^o$
	οπτικό πεδίο (κάτω σειράς)	$210^o\times57^o.5$
	ανάλυση εικόνας	5Mp (2592×1944)
	ανάλυση πανοράματος	60Mp
	το μέγεθος αρχείου ανά πανόραμα	10~20Mb
	μέγεθος εικονοστοιχείου	1.4μm
	γωνία ανά εικονοστοιχείο	1'20".44 (0.39mrad)
ενσωματωμένοι αισθητήρες	εύρος μέτρησης αισθητήρων κλίσης	15°
	ακρίβεια μέτρησης αισθητήρων κλίσης	±1'48"($0^o.03$)
	ακρίβεια μέτρησης μαγνητικής πυξίδας	$\pm1^o$

Οι βασικοί αισθητήρες για τη λειτουργία του συστήματος αφορούν σε 2 αισθητήρες κλίσεων, οι οποίοι μετρούν την απόκλιση του V10 από την κατακόρυφη θέση σε δύο οριζόντιους άξονες, και σε έναν μαγνητικό αισθητήρα, ο οποίος προσδιορίζει το μαγνητικό αζιμούθιο του πανοράματος. Επιπλέον συμπληρωματικά λειτουργούν 3 γυροσκόπια και ένα επιταχυνσιόμετρο. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των καμερών και των αιθητήρων του V10 παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 (Trimble V10 Datasheet 2015).

Σε μια τυπίκη εφαρμογή με το ολοκληρωμένο εικονοσύστημα V10 οι εργασίες ξεκινούν με την απόκτηση των δεδομένων στο πεδίο. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η διαμόρφωση των στάσεων λήψης, με την κατάλληλη επιλογή της απόστασης αντικειμένου και των βάσεων λήψης, η λήψη των πανοραμάτων, η μέτρηση των γεωδαιτικών συντεταγμένων των στάσεων λήψης, των φωτοσταθερών σημείων και των σημείων ελέγχου. Η διαδικασία αυτή πραγματοποείται μέσω του λογισμικού πεδίου Trimble Access.

Στη συνέχεια σε δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η επεξεργασία των δεδομένων. Η ενότητα αυτή ολοκληρώνεται με την επίλυση του επίγειου φωτοτριγωνισμού των πανοραμάτων με τη μέθοδο της δέσμης μέσω του λογισμικού γραφείου Trimble Business Center. Το τελικό στάδιο της εκάστοτε εφαρμογής αφορά στην μέτρηση διακριτών σημείων μέσα στο μονέλο, που διεξάγεται στο TBC, και στη σχεδίαση των τελικών γεωμετρικών παραγώγων.

Η βαθμονόμηση των καμερών του V10 κατά την κατασκευή πραγματοποιείται εργαστηριακά με τη χρήση τριδιάστατου πεδίου ελέγχου στο οποίο είναι κατανεμημένοι τεχνητοί στόχοι σε 360° τόσο οριζοντιογραφικά όσο και κατακόρυφα, δηλαδή σε ολόκληρο το οπτικό πεδίο του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται οι

παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού κάθε κάμερας αλλά και οι μεταξύ τους σχετικές θέσεις, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στα πανοράματα να συνθέτονται αυτόματα.

3.Βαθμονόμηση των Καμερών του V10

3.1 Πεδία ελέγχου

Στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου, στο πλαίσιο εκπαιδευτικών και ερευνητικών δραστηριοτήτων σε θέματα μετρολογίας και διακρίβωσης επίγειων φωτομηχανών, έχουν αναπτυχθεί δύο τριδιάστατα πεδία ελέγχου.

Το εσωτερικό πεδίο ελέγχου (Εικόνα 2α) είναι εγκατεστημένο σε αίθουσα κτιρίου και αποτελείται από 131 συνολικά σημεία κυκλικών στόχων. Το συγκεκριμένο πεδίο εξυπηρετεί τη βαθμονόμηση φωτομηχανών για λήψεις με απόσταση εστίασης μικρότερης των 12m (Γεωργόπουλος Α. κ.α. 2010). Αντίστοιχα το εξωτερικό πεδίο ελέγχου (Εικόνα 2β) βρίσκεται εγκατεστημένο σε όψη κτιρίου. Αποτελείται από 44 κυκλικούς στόχους ομοιόμορφα κατανεμημένους σε τρία επίπεδα της όψης. Το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται στη βαθμονόμηση φωτομηχανών για λήψεις με απόσταση εστίασης μεγαλύτερης των 12m.

(α) (β)

Εικόνα 2: Το εσωτερικό (α) και το εξωτερικό (β) πεδίο ελέγχου της ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες (X_i, Y_i, Z_i) των στόχων των πεδίων ελέγχου προσδιορίστηκαν από το κέντρο Μετρολογίας του τομέα Τοπογραφίας σε τοπικό αυθέραιτο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, το οποίο υλοποιείται από δύο βάθρα εξαναγκασμένης κέντρωσης σε κάθε πεδίο. Ο προσδιορισμός τους προέκυψε από την επίλυση τριδιάστατου δικτύου με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων, χρησιμοποιώντας ως εξισώσεις παρατήρησης αυτές των οριζόντιων και ζενίθιων γωνιών. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τα δύο βάθρα αναφοράς με τη χρήση ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών πρώτης τάξης.

Οι τελικές γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων του εξωτερικού πεδίου προέκυψαν με αβεβαιότητα των X, Y της τάξης των ±0.1mm και των Z ±0.5mm. Αντίστοιχα οι τελικές συντεταγμένες των στόχων του εσωτερικού πεδίου έχουν αβεβαιότητα προσδιορισμού των X της τάξης των ±0.2mm και των Y, Z ±0.05mm.

3.2 Λογισμικό Calibration CCD

Ο υπολογισμός των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού της τέταρτης και της τρίτης κάμερας του εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 πραγματοποιήθηκε με τη διαδικασία της αυτοβαθμονόμησης χρησιμοποιώντας το λογισμικό ΄΄Calibration

CCD΄΄. Το εν λόγω λογισμικό αναπτύχθηκε στο πλαίσιο μεταπτυχιακής εργασίας (Σαμαρά 2004) της ΣΑΤΜ ΕΜΠ σε περιβάλλον Matlab.

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για τη βαθμονόμηση μιας κάμερας αφορά σε ενιαία συνόρθωση κατά δέσμες με αγνώστους τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού μιας εικόνας. Ως εξίσωση παρατήρησης χρησιμοποιεί τη συνθήκη συγγραμμικότητας (σχέση 1) ενώ ο προσδιορισμός προσεγγιστικών τιμών των αγνώστων πραγματοποιείται μέσω του Άμεσου Γραμμικού Μετασχηματισμού (DLT) 11 παραμέτρων (Γεωργόπουλος Α. κ.α. 2010).

Οι άγνωστοι της βαθμονόμησης που υπολογίζονται με το λογισμικό ΄΄Calibration CCD΄΄ είναι:

- η σταθερά της μηχανής (**c**),
- οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου (**x_0**, **y_0**) στο σύστημα της εικόνας,
- οι δύο πρώτοι συντελεστές του πολυωνύμου της ακτινικής διαστροφής ($\delta r=\mathbf{K_1}r^3+\mathbf{K_2}r^5$) (Brown 1968),
- οι συντελεστές της συνάρτησης της ασύμμετρης παραμόρφωσης ($P(r)=(\mathbf{P_1}^2+\mathbf{P_2}^2)^{1/2}r^2$) (Brown 1966),
- οι αφινικές παραμορφώσεις των εικονοστοιχείων ως προς δύο παραμέτρους (**λ**, **ε**) (Fraser 1997) όπου:
  - **λ**: για τη διαφοροποίηση στην κλίμακα του άξονα y των εικονοσυντεταγμένων θεωρώντας την κλίμακα του άξονα x ως μοναδιαία.
  - **ε**: για την γωνιακή απόκλιση των αξόνων από την ορθογωνονικότητα.

Παράλληλα με τις 9 παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού που περιγράφηκαν το πρόγραμμα υπολογίζει και τους 6 αγνώστους του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας, 3 για τις γεωδαιτικές συντεταγμένες του προβολικού κέντρου και 3 για τις στροφές του άξονα λήψης ως προς το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Έτσι οι εξισώσεις παρατήρησης διαμορφώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c\frac{A_1}{\Pi} + \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_{af} \\ y &= y_0 - c\frac{A_2}{\Pi} + \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_{af} \end{aligned} \qquad (1)$$

Όπου με A_1, A_2 συμβολίζονται οι αριθμητές και με Π ο παρανομαστής της συνθήκης συγγραμμικότητας. Οι τρείς τελευταίοι όροι της σχέσης (1) αφορούν σε διορθώσεις των εικονοσυντεταγμένων λόγω της ακτινικής διαστροφής, της ασύμμετρης παραμόρφωσης και των αφινικών παραμορφώσεων σύμφωνα με τις σχέσεις (2), (3) και (4) αντίστοιχα.

$$\begin{aligned} \Delta x_r &= (x - x_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4) \\ \Delta y_r &= (y - y_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4) \end{aligned} \qquad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_d &= P_1(r^2 + 2(x - x_0)^2) + 2P_2(x - x_0)(y - y_0) \\ \Delta y_d &= 2P_1(x - x_0)(y - y_0) + P_2(r^2 + 2(y - y_0)^2) \end{aligned} \qquad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_{af} &= \varepsilon(y - y_0) \\ \Delta y_{af} &= \lambda(y - y_0) \end{aligned} \qquad (4)$$

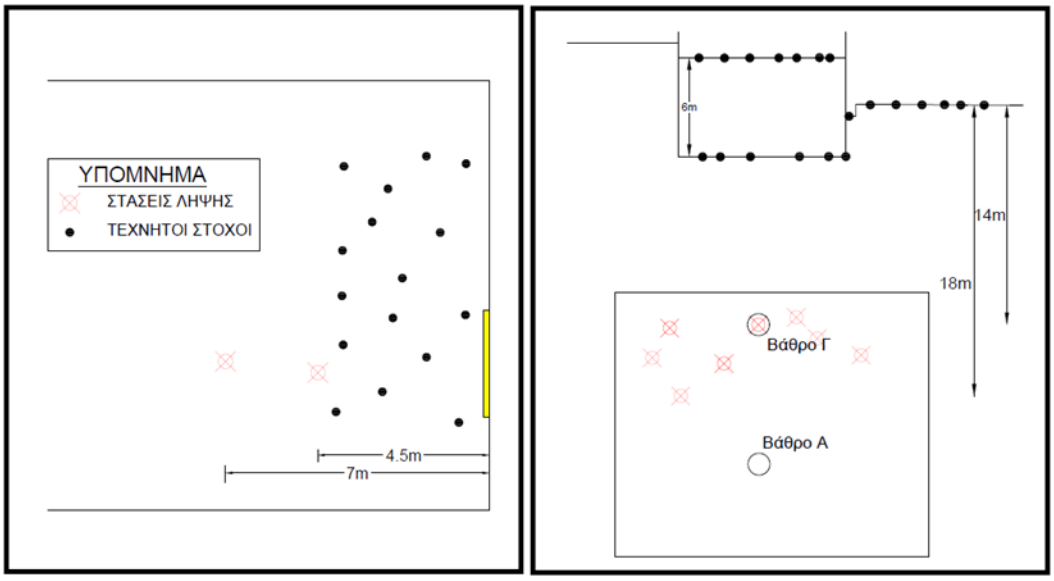
Όπου $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ η απόσταση του μετρούμενου σημείου από το πρωτεύον σημείο στο σύστημα συντεταγμένων της εικόνας.

3.3 Εφαρμογή βαθμονόμησης

Σκοπός της βαθμονόμησης είναι η αξιολόγηση της σταθερότητας και της επαναληπτικότητας των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού και εν τέλει της μετρητικής ικανότητας των καμερών. Για το λόγο αυτό βαθμονομήθηκαν ενδεικτικά η κεντρική κάμερα (cam 4) του V10 και η τρίτη κάμερα (cam 3). Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης των 2 καμερών του συστήματος στα πεδία ελέγχου (εσωτερικό και εξωτερικό) της ΣΑΤΜ που περιγράφηκαν σε προηγούμενη παράγραφο ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

Το σύστημα V10, όπως έχει προαναφερθεί, θεωρητικά έχει σχεδιασθεί για αποστάσεις εστίασης από 0.1m έως το άπειρο. Βέβαια η απόσταση λήψης αποτελεί τον κρισιμότερο παράγοντα σε σχέση με τις επιλογές του χρήστη, η οποία επηρεάζει την τελική ακριβεια της αποτύπωσης. Έχει αποδειχθεί ότι για την απόκτηση γεωδαιτικών συντεταγμένων σημείων με ακρίβεια ±1-2cm, τότε οι αποστάσεις λήψης πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ 10-20m με τον κατάλληλο κάθε φορά σχεδιασμό (Καμπούρης 2015).

Επομένως δόθηκε έμφαση στο εξωτερικό πεδίο ελέγχου για την βαθμονόμηση των 2 ψηφιακών καμερών του συστήματος επειδή οι αποστάσεις λήψεις είναι μεγαλύτερες. Επιπλέον οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό πεδίο αντιστοιχούν σε πραγματικές συνθήκες εργασίας του συστήματος V10.



(α) (β)

Σχήμα 1: Οριζοντιογραφία των θέσεων λήψης του V10 σε σχέση με το εσωτερικό (α) και το εξωτερικό (β) πεδίο ελέγχου της ΣΑΤΜ.

Στο εξωτερικό πεδίο ελέγχου αξιοποιήθηκαν 9 λήψεις για την τέταρτη κάμερα και 2 λήψεις για την τρίτη κάμερα του V10 με τις αποστάσεις των λήψεων να κυμαίνονται μεταξύ 12-20m όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 1 β. Αντίστοιχα στο εσωτερικό πεδίο ελέγχου αξιοποιήθηκαν 1 λήψη για την τέταρτη κάμερα από απόσταση

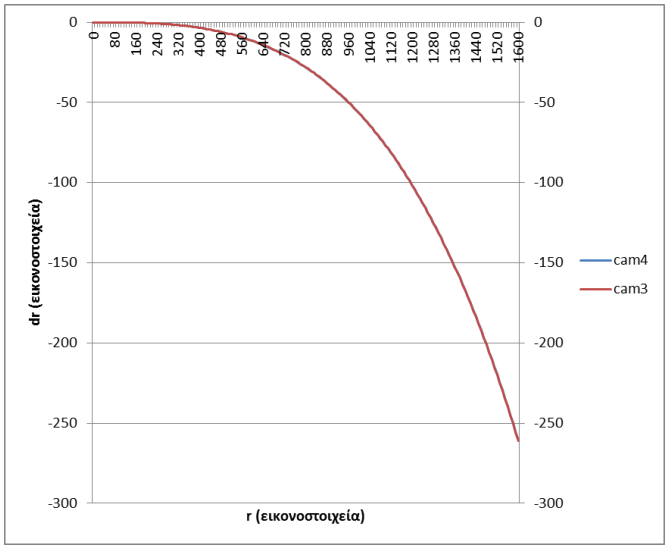
7m και 1 λήψη για την τρίτη κάμερα από απόσταση 4.5m όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 α. Έτσι συνολικά αξιοποιήθηκαν 13 φωτογραφίες από τις οποίες 10 αφορούσαν στην τέρτατη κάμερα και 3 στην τρίτη κάμερα.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης για την κεντρική κάμερα (cam 4) του εικονοσυστήματος τριδιάστατης απεικόνισης V10 πραγματοποιήθηκε από 10 διαφορετικές επιλύσεις με μέσο a-posteriori τυπικό σφάλμα $\boldsymbol{\sigma_0=\pm 0.35}$ εικονοστοιχείων. Αντίστοιχα η βαθμονόμηση της τρίτης κάμερας του V10 πραγματοποιήθηκε από τρεις διαφορετικές επιλύσεις με μέσο a-posteriori τυπικό σφάλμα της τάξης των $\boldsymbol{\sigma_0=\pm 0.37}$ εικονοστοιχείων.Οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων για τις 9 παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού των 2 καμερών με τις αβεβαιότητες προσδιορισμού τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού των καμερών του V10.

	cam 4		**cam 3**		μονάδες
$\mathbf{x_o}$	1285.5	±5.8	1292.2	±5.0	pixel
$\mathbf{y_o}$	976.5	±5.1	976.0	±4.0	
c	2592.2	±3.0	2589.6	±2.2	
$\mathbf{K_1}$	-5.21×10^{-8}	$\pm1.12\times10^{-9}$	-5.19×10^{-8}	$\pm8.66\times10^{-9}$	-
$\mathbf{K_2}$	-4.53×10^{-15}	$\pm4.37\times10^{-16}$	-4.63×10^{-15}	$\pm3.32\times10^{-16}$	
$\mathbf{P_1}$	1.22×10^{-8}	$\pm4.27\times10^{-7}$	7.62×10^{-8}	$\pm3.18\times10^{-7}$	
$\mathbf{P_2}$	1.42×10^{-7}	$\pm3.18\times10^{-7}$	3.39×10^{-8}	$\pm2.55\times10^{-7}$	
ε	-0.0767	±0.0004	-0.0491	±0.0003	grad
λ	1.0004	±0.0005	0.9999	±0.0003	-

Από τις τιμές του Πίνακα 2 σχεδιάστηκαν οι καμπύλες της ακτινικής διαστροφής της κάθε κάμερας (Σχήμα 2), όπου τα δύο διαγράμματα ταυτίζονται. Αυτό συμβαίνει καθώς οι διαφορές των δύο πολυωνύμων είναι της τάξης των 0.02 pixel για ακτίνα μικρότερη των 500 pixel και 0.05 pixel για ακτίνα μικρότερη των 1000 pixel, δηλαδή στο μεγαλύτερο μέρος του καρέ της εικόνας. Ενώ η διαφορά τους φτάνει τα 0.1pixel σε ακτίνα 1300 pixel, με μέγιστη διαφορά 0.4 pixel καθώς η ακτίνα φτάνει στις μέγιστες τιμές της.



Σχήμα 2 Διάγραμμα της ακτινικής διαστροφής των καμερών του συστήματος V10.

Επίσης από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα βαθμονόμησης περιλαμβάνεται ο προσδιορισμός των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού και πιο συγκεκριμένα τις γωνίες **ω** και **κ**. Δίνεται έτσι μια εκτίμηση για την αβεβαιότητα της κατακορύφωσης του συστήματος V10 στο πεδίο, σε σχέση με τις αποδεκτές τιμές της ψηφιακής αεροστάθμης.

Έτσι προσθέτοντας στην γωνία **ω** την επίκληση που έχει η κάμερα από την κατασκευή της ίση με $2^o = 2^g.2222$, υπολογίστηκε η μέση απόκλιση σε απόλυτες τιμές και βρέθηκε ίση με 12^c. Αντίστοιχα η μέση τιμή στα απόλυτα μεγέθη της γωνίας **κ**, που θεωρητικά παίρνει την τιμή 0, υπολογίστηκε στα 42^c. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσδιοριστεί το μέγεθος του διανύσματος της εκκεντρότητας που επιτυγχάνεται οριζοντιογραφικά ανάμεσα στο φωτογραμμετρικό κέντρο του V10 και το σημείο λήψης, το οποίο είναι 14mm κατά μέση τιμή στα περίπου 2m ύψους του στυλεού.

4. Συμπεράσματα

Τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού που προέκυψαν από τις επιλύσεις με το λογισμικό calibration_CCD παρουσιάζουν εξαιρετική σταθερότητα και επαναληπτικότητα τόσο στις διαφορετικές επιλύσεις όσο και μεταξύ των διαφορετικών καμερών με μικρές αβεβαιότητες προσδιορισμού. Παράλληλα οι διαφορές που προέκυψαν στις τιμές των παραμέτρων δεν ήταν στατιστικά σημαντικές, γεγονός που αποδεικνύει την υψηλή μετρητική ικανότητα των καμερών του συστήματος.

Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές της σταθεράς της μηχανής που και στις 13 επιλύσεις συγκλίνει στα 3.63mm (με μέγεθος εικονοστοιχείου στα 1.4μm) με μέση αβεβαιότητα ±4μm. Η οποία αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή που δίνει ο κατασκευαστής.

Οι μόνες τιμές των υπολογισθέντων παραμέτρων που δεν συγκλίνουν αφορούν στους συντελεστές της συνάρτησης της ασύμμετρης παραμόρφωσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι αβεβαιότητες προσδιορισμού τους είναι μεγαλύτερες από τα ίδια τα μεγέθη ακόμη και μεγαλύτερης τάξης. Παρόλα αυτά το συνολικό της μέγεθος παραμένει μικρό, δηλαδή 0.1-0.2 pixel κατά μέση τιμή. Επιπρόσθετα όσον αφορά στις αφινικές παραμορφώσεις των εικονοστοιχείων αυτές θεωρούνται αμελητέες.

Αυτό που υπολογίζεται στη συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελεί μια εκτίμηση του μοντέλου της κεντρικής προβολής που εκφράζει την κάθε κάμερα αντίστοιχα. Με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε δεν μπορεί να υπολογιστεί το μέτρο της σταθερότητας της εσωτερικής γεωμετρίας των μηχανών, το οποίο ο κατασκευαστής προσδιορίζει στα 2 εικονοστοιχεία, καθώς χρειάζονται περισσότερες συγκλίνουσες λήψεις από διαφορετικές αποστάσεις.

Επιπλέον με τη χρήση των συγκεκριμένων πεδίων ελέγχου δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστεί η σχετική θέση ανάμεσα σε δύο κάμερες. Αυτό συναίβει επειδή δε μπορούσε να ληφθεί ταυτόχρονα ικανός αριθμός φωτοσταθερών ανάμεσα στο οπτικό πεδίο 2 καμερών του V10, με την επιθυμητή κάθε φορά απόσταση λήψης.

5. Βιβλιογραφία

Γεωργόπουλος Α., Ιωαννίδης Χ., Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. και Νικολίτσας Κ., "*Πρόταση Μεθοδολογίας Βαθμονόμησης Της Ψηφιακής Κάμερας Εικονογεωδαιτικού Σταθμού*", ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, 3ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, 2010, Λάρνακα, Κύπρος.

Γεωργόπουλος Α. και Ιωαννίδης Χ., "*Διακρίβωση επίγειων ψηφιακών Φωτομηχανών*", 2ο Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, 2007, Θεσσαλονίκη.

Καμπούρης Α.-Γ., "*Αξιολόγηση του Ολοκληρωμένου Εικονοσυστήματος Τριδιάστατης Απεικόνισης V10*", Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, 2015, Αθήνα.

Kraus K., "*Φωτογραμμετρία Βασικές Έννοιες και Μέθοδοι*", Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 3 ed., Vol. 1, Α. Γεωργόπουλος & Ε. Βοζίκης Trans., 2010, Αθήνα (ISBN 960-7018-90-7).

Πατιάς Π., "*Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία*", Έκδόσεις Ζήτη, 1991, Θεσσαλονίκη (ISBN 960-431-021-6).

Σαμαρά Α., "*Διερεύνηση Βαθμονόμησης Ψηφιακής Μηχανής*", Διπλωματική Εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορικής», ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, 2004, Αθήνα.

Barakou A., Georgopoulos A. and Pantazis G., "*Exploiting the contemporary Topcon imaging total station for cultural heritage recording.*", Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM), 2008, Lemesos, Cyprus.

Brown D.C., "*Advanced Methods for the Calibration of Metric Cameras*", Final report, Part 1, U.S. Army Contact: DA-44-009-AMC-1457,(X), DBA Systems Inc., 1968, Florida.

Brown D.C., "*Decentering Distortion of Lenses*", Photometric Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 444-462, 1966.

Ellum C. and El-Sheimy N., "*Land-based mobile mapping systems.*", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 68 (I), 13-17 (and 28), 2002.

Fraser C., "*Digital camera self-calibration*", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 52(1997): 149-159, 1997.

Lambrou E., "*Remote Survey: Alternative Method for Capturing Data.*" Journal of Surveying Engineering, 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000115, 60-64, 2013 Online publication date: 1-Feb-2014.

Pantazis G., Lambrou E., Polydoras S. and Gotsis V., "*3D Digital Terrestrial Model Creation Using Image Assisted Total Station and Rapid Prototyping Technology.*" International Journal of Heritage in the Digital Era, 10.1260/2047-4970.2.2.245, 245-262, 2013, Online publication date: 1-Jun-2013.

Park J.K. and Um D.Y., "*Accuracy Analysis of Structure Modeling using Continuous Panoramic Image*", International Journal of Smart Home, Vol. 9, No. 5, pp. 165-174, May 2015, (http://dx.doi.org/10.14257/ijsh.2015.9.5.16).

Scherer M. and Lerma J.L., "*From the Conventional Total Station to the Prospective Image Assisted Photogrammetric Scanning Total Station: Comprehensive Review.*", Journal of Surveying Engineering, Vol. 135, No. 4, pp. 173-178, November 2009, (doi: http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2009)135:4(173)).

Trimble, "*Trimble V10 Imaging Rover User Guide*", revision A, Part Number 57047029, February 2014, (www.trimble.com).

Trimble, "*Trimble Access General Survey Help*", version 2015.10, revision A, April 2015, (www.trimble.com).

Trimble, "*Trimble V10 Imaging Rover Datasheet*", April 2015, (www.trimble.com).