

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Π. Αγραφιώτης και Α. Γεωργόπουλος
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Τομέας Τοπογραφίας ΣΑΤΜ
Ε. Μ. Πολυτεχνείο
e-mail: drag@central.ntua.gr

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται και ταξινομούνται οι κυριότερες μέθοδοι βαθμονόμησης ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών, ενώ τονίζονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Περιγράφεται επίσης η εφαρμογή συγκεκριμένων μεθόδων για την βαθμονόμηση ψηφιακής, μη μετρητικής, φωτογραφικής μηχανής κάτω από διαφορετικές συνθήκες και συγκεκριμένα μέσα και έξω από το νερό. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων αυτών, ενώ αναδεικνύονται οι πρακτικές δυσκολίες κάθε μιας μεθόδου. Τέλος, αξιολογούνται οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν και εφαρμόστηκαν για την αποτελεσματικότητά τους, την εφαρμοσιμότητά τους και την οικονομικότητά τους.

Λέξεις – κλειδιά

Βαθμονόμηση, Ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, εσωτερικός προσανατολισμός.

Abstract

In this paper the main digital camera calibration methods are presented and classified. At the same time their merits and disadvantages are briefly discussed. The implementation of certain methods is also presented for the calibration of a digital non-metric camera under different working conditions involving two media. The results are presented and discussed, while the difficulties for each method are stressed. Finally the various methods used are evaluated for their efficiency, applicability and cost.

Keywords

Calibration, Digital cameras, Interior orientation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τις εφαρμογές της Φωτογραμμετρίας οι φωτογραφικές μηχανές θεωρούνται όργανα μέτρησης και καταγραφής διευθύνσεων στον χώρο. Ως τέτοια οφείλουν να ελέγχονται για την ακρίβεια μέτρησης, την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία τους. Ο έλεγχος των φωτογραφικών μηχανών πραγματοποιείται με την διαδικασία της βαθμονόμησης, η οποία έχει ήδη περιγραφεί εκτενώς στην βιβλιογραφία (Γεωργόπουλος κ.ά. 2010, Γεωργόπουλος & Ιωαννίδης 2007). Για την βαθμονόμηση φωτογραφικών μηχανών και ειδικότερα ψηφιακών, υπάρχουν σήμερα στην ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία πολλές και διαφορετικές μέθοδοι.

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

Για τις εφαρμογές της Φωτογραμμετρίας και ειδικότερα για αυτές της εγγύς Φωτογραμμετρίας έχουν κατά καιρούς διατυπωθεί και χρησιμοποιηθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα για την αντιμετώπιση του προβλήματος του προσδιορισμού της εσωτερικής γεωμετρίας των

Π. Αγραφιώτης, Α. Γεωργόπουλος, ΣΑΤΜ ΕΜΠ
Αξιολόγηση και σύγκριση μεθόδων βαθμονόμησης ψηφιακών μηχανών
4ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

φωτογραφικών μηχανών. Όλα όμως βασίζονται στο γεωμετρικό μοντέλο της προοπτικής απεικόνισης, δηλαδή στην εφαρμογή της κεντρικής προβολής, συνήθως μέσω αλγορίθμων συνόρθωσης δέσμης (Brown, 1971). Το βασικό μαθηματικό μοντέλο παρέχεται από τις μη γραμμικές εξισώσεις συγγραμμικότητας, συνήθως συμπληρωμένες με διορθωτικούς όρους (π.χ. πρόσθετες παραμέτρους) για τον Εσωτερικό Προσανατολισμό και την ακτινική και έκκεντρη διαστροφή των φακών (Fraser, 1997; Gruen & Beyer, 2001). Η συνόρθωση δέσμης παρέχει την δυνατότητα ταυτόχρονου προσδιορισμού όλων των παραμέτρων του συστήματος εκτιμώντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία των παραμέτρων βαθμονόμησης που υπολογίζονται. Επίσης, μπορούν να ποσοτικοποιηθούν και οι ενδεχόμενες συσχετίσεις ανάμεσα στις παραμέτρους του Εσωτερικού και του Εξωτερικού προσανατολισμού καθώς και τις προσδιοριζόμενες γεωδαιτικές συντεταγμένες.

Για τον ορθό προσδιορισμό των παραμέτρων της βαθμονόμησης είναι απαραίτητη η ευνοϊκή γεωμετρία του δικτύου, δηλαδή θα πρέπει να αποκτώνται συγκλίνουσες και στραμμένες εικόνες ενός τρισδιάστατου αντικειμένου, με καλά κατανομημένα σημεία σε όλη την επιφάνεια της εικόνας. Εάν το δίκτυο είναι αδύναμο γεωμετρικά, οι συσχετίσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αστάθειες κατά την ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση. Η χρήση ακατάλληλων πρόσθετων παραμέτρων μπορεί να αποδυναμώσει την επίλυση της συνόρθωσης δέσμης οδηγώντας σε υπερπαραμετροποίηση, ιδίως στην περίπτωση των συνορθώσεων με ελάχιστες δεσμεύσεις (Fraser, 1982). Η συνόρθωση δέσμης στην αυτοβαθμονόμηση μπορεί να εφαρμοστεί με ή χωρίς περιορισμούς στο χώρο του αντικειμένου, οι οποίοι υλοποιούνται συνήθως με τη μορφή γνωστών σημείων ελέγχου.

Το πιο κοινό σύνολο πρόσθετων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την αντιστάθμιση των συστηματικών σφαλμάτων στις ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές είναι το φυσικό μοντέλο των 8 όρων που διατυπώθηκε από τον Brown (1971). Αυτό περιλαμβάνει τη θέση του πρωτεύοντος σημείου (x_p, y_p), την σταθερά της μηχανής καθώς και τις τρεις συνηστώσεις της ακτινικής και τις δύο της έκκεντρης διαστροφής.

Οι τρεις πρόσθετες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν την ακτινική διαστροφή Δr γενικά εκφράζονται μέσω του περιττής τάξης πολυωνύμου $\Delta r = K_1 R^3 + K_2 R^5 + K_3 R^7$, όπου r είναι η ακτινική απόσταση. Οι συντελεστές K_i έχουν συνήθως υψηλό βαθμό συσχέτισης, με το μεγαλύτερο μέρος του σφάλματος να περιγράφεται από τον κυβικό όρο $K_1 R^3$. Οι K_2 και K_3 συμπεριλαμβάνονται τυπικά για φωτογραμμετρικούς και ευρυγώνιους φακούς καθώς και για υψηλότερης ακρίβειας μετρήσεις σε εφαρμογές μετρολογίας.

Η έκκεντρη διαστροφή οφείλεται στην ατελή ευθυγράμμιση των στοιχείων του φωτογραφικού φακού. Οι παράμετροι P_1 και P_2 που την περιγράφουν, εκφράζονται από τις εξισώσεις (Brown, 1966)

$$dx_D = p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2xy \text{ και } dy_D = p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1xy \quad (1)$$

και είναι πάντα συχτισμένοι με τα x_p και y_p . Αυτή η σύζευξη μεταξύ P_1 και P_2 και της προβολής του πρωτεύοντος σημείου αυξάνεται όσο αυξάνεται η εστιακή απόσταση και μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα για φακούς μεγάλης εστιακής απόστασης. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί τόσο με τη χρήση μίας τρισδιάστατης συστοιχίας σημείων όσο και με την υιοθέτηση μεγαλύτερων γωνιών σύγκλισης των εικόνων.

3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Τόσο οι αποκλίσεις από τη συγγραμμικότητα, δηλαδή το αυστηρό μοντέλο της κεντρικής προβολής, όσο και οι εξισώσεις της προοπτικής γεωμετρίας μπορούν μοντελοποιηθούν και να εφαρμοστούν για τη βαθμονόμηση φωτογραφικών μηχανών. Η φύση της εφαρμογής καθώς και η

Π. Αγραφιώτης, Α. Γεωργόπουλος, ΣΑΤΜ ΕΜΠ

Αξιολόγηση και σύγκριση μεθόδων βαθμονόμησης ψηφιακών μηχανών

4ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

απαιτούμενη ακρίβεια είναι οι παράγοντες που θα καθορίζουν ποιό από τα δύο αυτά μοντέλα θα επιλεγεί κάθε φορά. Μια αδρή ταξινόμηση των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες μεθόδους βαθμονόμησης ψηφιακών μηχανών είναι η ακόλουθη (Remondino & Fraser, 2006).

Μοντέλο βασισμένο στην εξίσωση της συγγραμμικότητας: Πρόκειται για ένα μοντέλο βασισμένο στην προοπτική προβολή, όπου ο Εσωτερικός Προσανατολισμός είναι σταθερός και όλες οι αποκλίσεις από την συγγραμμικότητα, γραμμικές και μη, μπορούν να συμπεριληφθούν. Στο μοντέλο αυτό απαιτούνται γενικά 5 ή περισσότερες αντιστοιχίσεις σημείων σε ένα δίκτυο πολλών εικόνων και χάρη στη μη γραμμική φύση του απαιτούνται προσεγγιστικές τιμές για την ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση δέσμης στην οποία και ανακτώνται οι παράμετροι της βαθμονόμησης.

Μοντέλο βασισμένο στις εξισώσεις της προοπτικής γεωμετρίας : Ένα προβολικό μοντέλο που υποστηρίζει την προβολική επανασύσταση της εικόνας. Στο μοντέλο αυτό, που χαρακτηρίζεται από τον επιπολικό πίνακα, μπορούν να συμπεριληφθούν μεταβλητές και άγνωστες εστιακές αποστάσεις, αλλά χρειάζονται κατ' ελάχιστο 6-8 αντιστοιχίσεις σημείων ώστε να διευκολύνουν μία γραμμική και αρκετά ασταθή λύση. Μη γραμμικές παραμορφώσεις στην εικόνα, όπως η διαστρόφη των φακών, δεν αντιμετωπίζονται εύκολα με μοντέλα τέτοιου είδους.

Άλλα κριτήρια για την ταξινόμηση των μεθόδων βαθμονόμησης φωτογραφικών μηχανών :

Έμμεσα και άμεσα μοντέλα. Η φωτογραμμετρική προσέγγιση, με το φυσικός άμεσο στην ερμηνεία του μοντέλο βαθμονόμησης, αντιπαραβάλλεται με έμμεσα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην ανακατασκευή από κίνηση και που διορθώνουν την θέση των σημείων στην εικόνα σύμφωνα με τις απαιτήσεις ευθυγράμμισης μίας πραγματικής προβολικής απεικόνισης (Hall et al., 1982; Wei & De Ma, 1994).

Μέθοδοι που χρησιμοποιούν τρισδιάστατα (3D) αντί για επίπεδα πεδία ελέγχου (Triggs, 1998; Zhang, 2000). Ενώ κάποιες μέθοδοι όρασης υπολογιστών και μέθοδοι αυτοβαθμονόμησης μπορούν να χειριστούν και τις δύο περιπτώσεις – με την κατάλληλη γεωμετρία του δικτύου – μοντέλα όπως του επιπολικού πίνακα αδυνατούν να συμπεριλάβουν επίπεδες επιφάνειες σημείων.

Μέθοδοι βασισμένες σε σημεία έναντι μεθόδων βασισμένων σε γραμμικά στοιχεία (Fryer and Brown, 1986; Caprile & Torre, 1990). Οι μέθοδοι βαθμονόμησης που βασίζονται σε σημεία είναι ευρύτερα διαδεδομένες στην φωτογραμμετρία. με μόνες αξιοσημείωτες μεθόδους βασισμένες σε γραμμικά στοιχεία την βαθμονόμηση με κατακόρυφες γραμμές (*plumbline method*) και την πρόσφατη μέθοδο των Habib and Morgan, 2004.

Πιό συγκεκριμένη ταξινόμηση μπορεί να επιτευχθεί με βάση τον τρόπο εκτίμησης των παραμέτρων καθώς και τη μέθοδο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται:

Γραμμικές έναντι μη γραμμικών μεθόδων. Οι πρώτες, είναι αρκετά απλές και εύκολες, αλλά γενικά δεν μπορούν να χειριστούν την παραμόρφωση των φακών και χρειάζονται σημεία ελέγχου ή γνωστές συντεταγμένες. Συνήθως απλοποιούν το μοντέλο της φωτογραφικής μηχανής και οδηγούν σε αποτελέσματα χαμηλής ακρίβειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας μεθόδου είναι ο Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός DLT (Abdel-Aziz & Karara, 1971). Οι μη γραμμικές μέθοδοι είναι πιό γνωστές στη φωτογραμμετρική κοινότητα. Παρέχουν μία αυστηρή και ακριβή μοντελοποίηση του Εσωτερικού Προσανατολισμού της φωτομηχανής καθώς και των παραμέτρων της διαστρόφης των φακών (Brown, 1971) μέσω μίας επαναληπτικής ελαχιστοτετραγωνικής διαδικασίας εκτίμησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το μοντέλο της επεκτεταμένης συνθήκης συγγραμμικότητας που αποτελεί τη βάση της αυτοβαθμονόμησης με συνόρθωση δέσμης.

Συνδυασμός γραμμικών και μή γραμμικών τεχνικών. Για την ανάκτηση των αρχικών προσεγγίσεων των παραμέτρων χρησιμοποιείται αρχικά μία γραμμική μέθοδος και στη συνέχεια ο προσανατολισμός και η βαθμονόμηση βελτιστοποιούνται επαναληπτικά (Faugeras & Toscani, 1986; Tsai, 1987; Weng et al., 1992; Heikkilä & Silven, 1997). Αυτή η δύο βημάτων μέθοδος στις περισσότερες περιπτώσεις έχει αντικατασταθεί από τη μέθοδο της συνόρθωσης δέσμης.

4. ΚΛΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

4.1 Τρισδιάστατα (3D) Πεδία Ελέγχου

Η βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών απαιτεί μετρητική πληροφορία, που πολλές φορές βρίσκεται υπό μορφή ενός πεδίου ελέγχου. Τα πεδία αυτά αποτελούνται από διακριτά σημεία - στόχους εγκατεστημένους και μετρημένους με ακριβείς τοπογραφικές μεθόδους. Σημειώνεται πως η ύπαρξη ενός μεγάλου αριθμού σημείων καταναμημένων σε περισσότερα του ενός επίπεδα με διαφορετικές αποστάσεις από την φωτογραφική μηχανή είναι ζωτικής σημασίας για την αποκατάσταση των στοιχείων του Εσωτερικού Προσανατολισμού των λήψεων.

Για τη βαθμονόμηση φωτογραφικής μηχανής με αυτή τη μέθοδο πραγματοποιούνται λήψεις εικόνων του πεδίου ελέγχου. Στη συνέχεια, μετράται ένας μεγάλος αριθμός σημείων-στόχων πάνω στην εικόνα και χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις της Συνθήκης Συγγραμμικότητας για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ των εικονοσυντεταγμένων και των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων της εικόνας. Ένα αξιοσημείωτο αρνητικό της βαθμονόμησης φωτογραφικών μηχανών με πεδία ελέγχου είναι πως απαιτείται χώρος για την εγκατάσταση του πεδίου ενώ απαιτούνται και ακριβείς τοπογραφικές μετρήσεις για την μέτρησή του

4.2 Βαθμονόμηση μηχανών με επίπεδους στόχους.

Μία εναλλακτική μορφή του πεδίου βαθμονόμησης ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών αποτελείται από ένα σύνολο κάθετων και παράλληλων μεταξύ τους ευθειών καθώς και μικρό αριθμό σημείων. Η χρήση των ευθύγραμμων χαρακτηριστικών προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι της χρήσης σημείων-στόχων, αφού μπορούν εύκολα και γρήγορα να εντοπιστούν στο πεδίο ελέγχου. Οι γραμμές μπορούν να εξαχθούν από την εικόνα με ακρίβεια χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας εικόνας. Επιπλέον, τα γραμμικά χαρακτηριστικά, που ουσιαστικά αποτελούνται από σύνολα ενωμένων σημείων, αυξάνουν τον βαθμό ελευθερίας του συστήματος και κατά συνέπεια ενισχύουν τη δυνατότητα ανίχνευσης σφαλμάτων. Οι ευθείες γραμμές στο χώρο του αντικειμένου, θα πρέπει να εμφανίζονται ευθείες και στην εικόνα, χωρίς καμμία παραμόρφωση. Ως εκ τούτου, οι αποκλίσεις από την ευθειακότητα στην εικόνα μπορούν να μοντελοποιηθούν και να αποδοθούν σε παραμέτρους παραμόρφωσης όπως η ακτινική διαστρόφη κ.ά.

4.3 Βαθμονόμηση μηχανών με χρήση ειδικών πεδίων.

4.3.1 Βαθμονόμηση με τη μέθοδο του Zhang

Πραγματοποιείται με τη χρήση μίας επίπεδης «σκακιάρας» η οποία τοποθετείται και φωτογραφίζεται από διαφορετικές γωνίες λήψης (περισσότερες των 2). Ο αναπτυγμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί τα εξαγόμενα σημεία από τις γωνίες των τετραγώνων της σκακιάρας ώστε να υπολογισθεί ένας προβολικός μετασχηματισμός ανάμεσα στα σημεία των εικόνων. Έπειτα, οι εσωτερικές και εξωτερικές παράμετροι της φωτογραφικής μηχανής ανακτώνται με τη χρήση λύσης κλειστής μορφής, ενώ οι τρίτης και πέμπτης τάξης όροι της ακτινικής διαστρόφης αποκαθίστανται με μία γραμμική ελαχιστοτετραγωνική λύση. Μία τελική, μη γραμμική, ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων, πραγματοποιείται με τη χρήση της μεθόδου Levenberg-Marquardt, βελτιώνοντας όλες τις ανακτηθείσες παραμέτρους. Η παραπάνω προσέγγιση του

Π. Αγραφιώτης, Α. Γεωργόπουλος, ΣΑΤΜ ΕΜΠ

Αξιολόγηση και σύγκριση μεθόδων βαθμονόμησης ψηφιακών μηχανών

4ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Zhang είναι παρόμοια με αυτή του Triggs, στην οποία απαιτούνται τουλάχιστον 5 εικόνες μίας επίπεδης επιφάνειας-στόχου, όπως η σκακιέρα.

4.3.2 Βαθμονόμηση με τη μέθοδο των Heikkila & Siliven (1997)

Αρχικά υπολογίζονται προσεγγιστικές τιμές των παραμέτρων της φωτογραφικής μηχανής χρησιμοποιώντας μία επίλυση κλειστής μορφής (*DLT*) και στη συνέχεια εφαρμόζεται μία μη γραμμική ελαχιστοτετραγωνική εκτίμηση μέσω του αλγόριθμου Levenberg-Marquardt ώστε να βελτιωθεί ο Εσωτερικός Προσανατολισμός και να υπολογιστούν οι παράμετροι παραμόρφωσης. Το μοντέλο χρησιμοποιεί δύο συντελεστές για την ακτινική και την έκκεντρη παραμόρφωση.

5. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ

Βαθμονόμηση με τη χρήση των επίπεδων στόχων του Photomodeler 6: Το λογισμικό Photomodeler είναι ένα φωτογραμμετρικό σύστημα παραγωγής τρισδιάστατων μοντέλων από πολλαπλές εικόνες του αντικειμένου, που χρησιμοποιεί ένα σχετικά απλουστευμένο τρόπο επικοινωνίας με τον χρήστη, καθιστώντας το έτσι ελκυστικό στους μη ειδικούς. Διαθέτει ενσωματωμένη ρουτίνα αυτοματοποιημένης βαθμονόμησης των φωτογραφικών μηχανών που χρησιμοποιούν οι χρήστες. Η βαθμονόμηση αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση ενός δισδιάστατου (2D) πεδίου ελέγχου, διαστάσεων 90 cm x 90 cm, που περιέχει ακριβώς 100 σημεία, συμπεριλαμβανομένων και 4 κωδικοποιημένων σημείων ελέγχου (Εικόνα 1).



Εικόνα 1 : Παράδειγμα κωδικοποιημένου στόχου

Τα σημεία ελέγχου είναι τα σημεία με την ειδική κωδικοποίηση γύρω τους. Η υψηλή αντίθεση των στόχων-κουκίδων επιτρέπει στο Photomodeler την αυτόματη σκόπευση τους που γνωρίζοντας την σχετική θέση τους καθώς και τις αποστάσεις μεταξύ τους, η βαθμονόμηση μπορεί να γίνει αυτόματα, χρησιμοποιώντας τεχνικές συνταύτισης προτύπων (*template matching techniques*).

Για καλύτερα αποτελέσματα, είναι απαραίτητος ένας ελάχιστος αριθμός οκτώ εικόνων. Το πεδίο βαθμονόμησης θα πρέπει να καλύπτει σημαντικό ποσοστό της έκτασης της εικόνας και οι εικόνες να λαμβάνονται από διαφορετικές γωνίες, διαφορετικές αποστάσεις από το αντικείμενο και από τις 4 πλευρές του πεδίου (90° στροφή), τόσο σε οριζόντια, όσο και σε κατακόρυφη διάταξη. Για την αναγωγή του αντικειμένου στη σωστή κλίμακα, πρέπει να οριστούν κάποιες δεσμεύσεις όπως οι αποστάσεις μεταξύ των τεσσάρων κωδικοποιημένων στόχων.

Διατύπωση παραμόρφωσης φακών: Το Photomodeler χρησιμοποιεί μία τυπική διατύπωση της παραμόρφωσης των φακών με τέσσερις παραμέτρους, οι οποίες είναι υποσύνολο των παραμέτρων που εισήγαγε ο Brown το 1971. Οι παρακάτω σχέσεις περιγράφουν πώς το Photomodeler εφαρμόζει τις διορθώσεις παραμόρφωσης. Η διόρθωση για κάθε σημείο (x,y) της εικόνας δίνεται από τις σχέσεις :

$$\begin{aligned}x_c &= x + \Delta r_x + \Delta p_x \\y_c &= y + \Delta r_y + \Delta p_y\end{aligned}\quad (2)$$

όπου x_c, y_c είναι το διορθωμένο σημείο της εικόνας,

Δr_x είναι η x συνιστώσα της διόρθωσης της ακτινικής διαστρόφης των φακών,

Δr_y είναι η y συνιστώσα της διόρθωσης της ακτινικής διαστρόφης των φακών,

Δp_x είναι η x συνιστώσα της διόρθωσης της έκκεντρης διαστρόφης, και

Δp_y είναι η y συνιστώσα της διόρθωσης της έκκεντρης διαστρόφης των φακών.

Διόρθωση ακτινικής διαστροφής των φακών: Η σημαντικότερη επιρροή στην παραμόρφωση των φακών είναι αυτή της ακτινικής διαστροφής.

$$\begin{aligned}x_c &= x \left(1 + \frac{\Delta r_b}{r} \right) \\y_c &= y \left(1 + \frac{\Delta r_b}{r} \right)\end{aligned}\tag{3}$$

όπου αν διαιρεθεί η ακτινική διαστροφή με το r :

$$\begin{aligned}\Delta r &= \frac{\Delta r_b}{r} \\x_c &= x(1 + \Delta r) \\y_c &= y(1 + \Delta r)\end{aligned}\tag{4}$$

Η κλασική σχέση που μοντελοποιεί την ακτινική διαστροφή Δr είναι :

$$\Delta r = A_0 + A_1 r^2 + A_2 r^4\tag{5}$$

Ενώ η σχέση που χρησιμοποιείται από το Photomodeler είναι :

$$\Delta r = K_1 r^2 + K_2 r^4\tag{6}$$

Όπου $r^2 = x^2 + y^2$

Για να μετατραπεί η κλασική σχέση, σε αυτή που χρησιμοποιεί το Photomodeler χρησιμοποιούνται τα παρακάτω :

$$\begin{aligned}s &= (1 - A_0) \\f &= \frac{f_2}{s} \\K_1 &= \frac{A_1}{s} \\K_2 &= \frac{A_2}{s}\end{aligned}\tag{7}$$

Έκκεντρη διαστροφή των φακών: Η διαστροφή αυτή, συχνά δεν μοντελοποιείται διότι η συνεισφορά της είναι πολύ μικρότερη από αυτή της ακτινικής διαστροφής, όμως για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν. Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται από το Photomodeler για την έκκεντρη διαστροφή είναι :

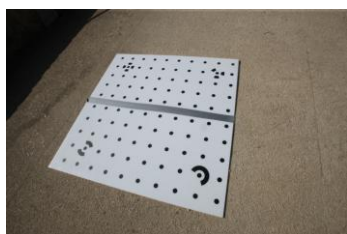
$$\begin{aligned}\Delta p_x &= P_1(r_2 + 2x_2) + 2P_2xy \\ \Delta p_y &= P_2(r_2 + 2x_2) + 2P_1xy\end{aligned}\tag{8}$$

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Επρόκειτο να γίνει χρήση ψηφιακής μηχανής (DSLR Canon EOS MIII full frame 21MP) για την φωτογραμμετρική αποτύπωση βυθισμένου μνημείου στην περιοχή της Επιδάουρου. Συνεπώς απαιτήθηκε η βαθμονόμησή της τόσο για το κανονικό περιβάλλον (λήψεις στην ατμόσφαιρα), όσο και σε περιβάλλον δύο μέσων, δηλ. αέρα και νερό. Για την πραγματοποίηση των απαιτούμενων λήψεων για την πραγματοποίηση των βαθμονομήσεων χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη ψηφιακή φωτογραφική μηχανή σε πραγματικές συνθήκες. Ως πεδίο ελέγχου χρησιμοποιήθηκε ταμπλώ διαστάσεων 0,9m x 0,9m από Plexiglas, του οποίου χαρακτηριστικά είναι η αρνητική πλευστότητα καθώς και η ανθεκτικότητα.

6.1 Βαθμονόμηση στο περιβάλλον αέρα.

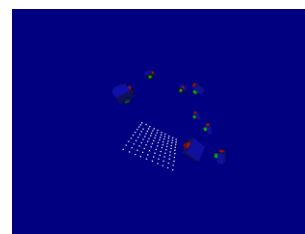
Ελήφθησαν 9 εικόνες (Εικόνα 2α), του δισδιάστατου (2D) πεδίου ελέγχου σύμφωνα με τη μέθοδο και τη διάταξη που περιγράφεται στην Παράγραφο 5. Στη συνέχεια τέθηκαν υπό επεξεργασία στο λογισμικό Adobe Photoshop, ώστε να είναι διακριτοί μόνο οι στόχοι και τα σημεία ελέγχου (Εικόνα 2β) και εισήχθησαν στο περιβάλλον του Photomodeler Scanner 6 όπου και επιλύθηκε η βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής.



Εικόνα 2α: Αρχική εικόνα



Εικόνα 2β: Διορθωμένη εικόνα



Εικόνα 2γ: Θέσεις λήψης

6.2 Βαθμονόμηση στο περιβάλλον αέρα-νερού.

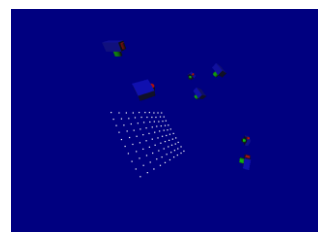
Αφού το δισδιάστατο πεδίο ελέγχου βυθίστηκε στον πυθμένα της θάλασσας σε βάθος 0.5 m, ελήφθησαν 9 εικόνες (Εικόνα 3α), εκτός νερού, σύμφωνα με τη μέθοδο και τη διάταξη που περιγράφεται στην Παράγραφο 5. Και εδώ, οι εικόνες τέθηκαν υπό επεξεργασία στο λογισμικό Adobe Photoshop. Σκοπός αυτής της βελτιστοποίησης ήταν εκτός από την αναγνώριση μόνο των επιθυμητών στόχων και η απαλλαγή των εικόνων από τις οπτικές παραμορφώσεις εξαιτίας του νερού και των ηλιακών ανακλάσεων παρουσία του νερού και των αντικατοπτρισμών του ήλιου στην υδάτινη επιφάνεια (Εικόνα 3β). Στη συνέχεια οι επεξεργασμένες εικόνες εισήχθησαν στο περιβάλλον του Photomodeler Scanner 6 όπου και επιλύθηκε η βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής στο περιβάλλον αέρα-νερού.



Εικόνα 3α: Αρχική εικόνα



Εικόνα 3β: Διορθωμένη εικόνα



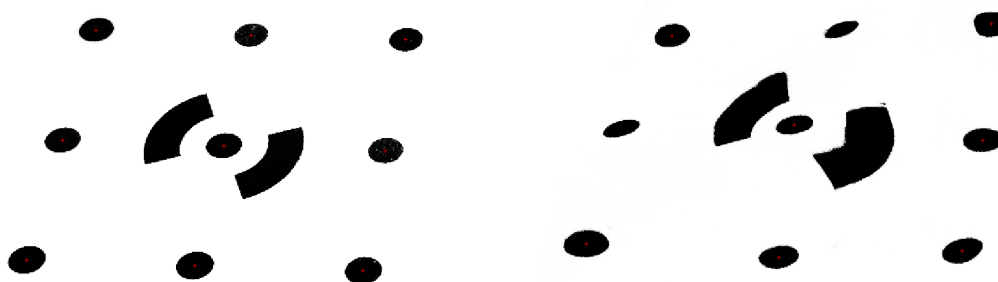
Εικόνα 3γ: Θέσεις λήψης

6.3 Σύγκριση των Βαθμονομήσεων

Οι σημαντικές διαφορές που παρατηρούνται στον Πίνακα 1 μεταξύ των υπολογισμένων εστιακών αποστάσεων c καθώς και των συντεταγμένων του πρωτεύοντος σημείου οφείλονται σε κάποια πρακτικά προβλήματα που δημιουργούνται από την παρουσία του νερού κατά τη βαθμονόμηση στο περιβαλλον αέρα- νερού.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα βαθμονόμησης στον αέρα και με αέρα - νερό						
Περιβάλλον βαθμονόμησης	Εστιακή απόσταση c (mm)	x_p (mm)	y_p (mm)	RMS xy (pixel)	RMS XYZ (mm)	εικόνες
αέρας	16.519	17.901	12.045	0.212	0.061	9
αέρας-νερό	15.479	17.743	11.683	6.262	2.310	7

Αρχικά, λόγω του φαινομένου της διάθλασης της οπτικής ακτίνας στην επιφάνεια της θάλασσας προκαλείται φαινομενική ανύψωση των αντικειμένων που βρίσκονται κάτω από αυτήν, ακόμα και σε βάθη 0,5 m. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μεταβολή της κλίμακας του δισδιάστατου πεδίου. Επιπλέον, το μέγεθος της φαινομενικής αυτής ανύψωσης εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης καθώς και την ακτινική απόσταση από το προοπτικό κέντρο των φακών. Συνεπώς στις εικόνες που ελήφθησαν με μεγάλες γωνίες, παρατηρούνται μεγάλα μεγέθη φαινομενικής ανύψωσης τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν σημαντικά τις σχετικές θέσεις των στόχων και των σημείων ελέγχου του πεδίου βαθμονόμησης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μειωμένη ακρίβεια ή και αποτυχία των τεχνικών ταύτισης προτύπων (template matching techniques). Ακόμα, λόγω της σχετικά μικρής απόστασης φωτογραφικής μηχανής από την επιφάνεια της θάλασσας (περίπου 1 m), επιδράσεις όπως η διατάραξη της επιφάνειας του νερού, οι διαφορές μεταξύ της απεικόνισής της από εικόνα σε εικόνα λόγω της χρονικής υστέρησης μεταξύ των λήψεων, καθώς και η μειωμένη διαύγεια του νερού προκαλούν προβλήματα στην αυτόματη σκόπευση των κέντρων των στόχων από το Photomodeler Scanner 6, αφού αλλοιώνεται το κυκλικό σχήμα τους και παραμορφώνονται τα σημεία ελέγχου (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Τμήμα του πεδίου ελέγχου απουσία (αριστερά) και παρουσία (δεξιά) νερού

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Lavest et al. 2000), όταν η φωτογραφική μηχανή βρίσκεται κάτω από το νερό, η εστιακή της απόσταση είναι περίπου ίση με αυτήν που έχει όταν βρίσκεται στον αέρα, πολλαπλασιασμένη με τον δείκτη διάθλασης του νερού. Η αναλογία αυτή εξαρτάται και από την σύσταση του νερού (αλατότητα, θερμοκρασία κ.α.) και κυμαίνεται συνήθως από 1,10 έως 1,34. Συνεπώς, και εδώ αναμένεται να είναι μεγαλύτερη, κάτι που όμως δεν συμβαίνει απολύτως. Αιτία αυτού φαίνεται να είναι κυρίως το ποσοστό του νερού στην συνολική απόσταση λήψης αλλά και η επίδραση της διαταραγμένης επιφάνειας της θάλασσας, φαινόμενο που δεν απαντάται

στις υποβρύχιες λήψεις. Μια σχέση που θα μπορούσε να συνδέει το ποσοστό αέρα και νερού με την μεταβολή της ενεργούς εστιακής απόστασης είναι η

$$P_{\text{αέρα}} * 1 + P_{\text{νερού}} * 1.33 \quad (9)$$

Όπου, $P_{\text{αέρα}}$ και $P_{\text{νερού}}$ τα ποσοστά αέρα και νερού αντίστοιχα που μεσολαβούν μεταξύ μηχανής και αντικειμένου.

Στην διεθνή βιβλιογραφία δεν φαίνεται να έχει πραγματοποιηθεί κανείς την διαφοροποίηση της εστιακής απόστασης c όταν μεσολαβούν δύο ή περισσότερα μέσα μεταξύ αντικειμένου-στόχου και φωτογραφικής μηχανής.

6.4 Συμπερασματικά σχόλια

Με την περιγραφείσα εφαρμογή καταδείχθηκε ότι το ζήτημα της βαθμονόμησης των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών είναι θεμελιώδες, δεδομένου ότι διασφαλίζονται η ακρίβεια και η αξιοπιστία των μετρήσεων για τις φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Για τον λόγο αυτό άλλωστε, έχουν αναπτυχθεί και κατά καιρούς δοκιμαστεί πάρα πολλές μέθοδοι για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος με διαφορετικούς βαθμούς επιτυχίας. Οι προσπάθειες των τελευταίων ετών εστιάζονται κυρίως στην αυτοματοποίηση των μεθόδων βαθμονόμησης, ώστε να καταστούν ελκυστικότερες και απλούστερες για τους χρήστες.

Ειδικότερα για την βαθμονόμηση μηχανών υπό συνθήκες λήψεις σε δύο μέσα (π.χ. αέρα και νερό) το πρόβλημα γίνεται συνθετότερο και δυσχεραίνει τις εφαρμογές. Οι απλούστερες μέθοδοι που αναπτύσσονται ίσως δεν είναι οι καταλληλότερες, τουλάχιστον προς το παρόν, για να επιλύσουν το ζήτημα. Επομένως θα πρέπει η έρευνα να εστιαστεί προς την ανάπτυξη αποτελεσματικότερων μεθόδων για την βαθμονόμηση ψηφιακών μηχανών σε υδάτινο περιβάλλον ή σε περιβάλλον λήψεων από δύο μέσα.

Βιβλιογραφία

Άρθρα σε περιοδικά

Brown, D.C., "Decentering distortion of lenses", *Photogrammetric Engineering*, 32(3):444-462, 1966.

Brown, D.C., "Close-range camera calibration", *PE&RS*, Vol. 37(8), pp.855-866, 1971.

Caprile, B., Torre, V., 1990. Using vanishing points for camera calibration. *International Journal of Computer Vision* 4(2): 127-139.

Faugeras, O. and Toscani, G., "The calibration problem for stereo. *IEEE CVPR*, pp. 15-20, 1986.

Fraser, C.S., "Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*", Vol. 52, pp. 149-159, 1997

Fryer, J. and Brown, D., "Lens distortion for close-range photogrammetry", *PE&RS*, Vol. 52(1), pp.51-58, 1986.

Gruen A. and Beyer, H.A., "System calibration through self-calibration. In 'Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision'" Gruen and Huang (Eds.), *Springer Series in Information Sciences* 34, pp. 163-194, 2001.

Habib, A., M. Morgan, “Stability Analysis and Geometric Calibration of off-the-shelf digital cameras”, Accepted for publication in the Journal of Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004.

Hall, E.L., Tio, J.B.K., McPherson, C.A. and Sadjadi, F.A., “ Measuring curved surfaces for robot vision”, Computing Journal, Vol. 15, pp. 42-54, 1982.

Heikkilä, J. and Silven, O., “A four-step camera calibration procedure with implicit image correction”, CVPR97, 1997.

Triggs, B., “ Autocalibration from planar scenes”, ECCV 98, pp. 89-105, 1998.

Tsai, R.Y., “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses”, IEEE Int. Journal Robotics and Automation, Vol. 3(4), pp. 323-344, 1987.

Weng, J., Cohen, P. and Herniou, M., “Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation”, IEEE Trans. On PAMI, Vol. 14(10), pp. 965-980, 1992.

Wei, G. and De Ma, S., “Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments”, IEEE Trans. on PAMI, Vol. 16(5), pp. 469-479, 1994.

Zhang, Z., “A flexible new technique for camera calibration. IEEE Trans”, on PAMI, Vol. 22(11), pp. 1330-1334, 2000.

Πρακτικά Συνεδρίων

Abdel-Aziz, Y.I. and Karara, H.M., “Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry”, Proc. Symposium on Close-Range Photogrammetry, pp. 1-18, 1971.

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

Γεωργόπουλος, Α., Ιωαννίδης, Χ., Λάμπρου, Ε., Πανταζής, Γ., Νικολίτσας, Κ., 2010. Πρόταση μεθοδολογίας βαθμονόμησης της ψηφιακής κάμερας εικονογεωδαιτικού σταθμού. 3^ο Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Κύπρος, 2010.

Fraser, C.S., “On the use of non-metric cameras in analytical non-metric photogrammetry”, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 24(5), pp. 156-166, 1982.

Lavest, J.M., Rives, G., Laprest J.T., 2000. Underwater Camera Calibration. ECCV 2000: European conference on computer vision N^ο6, Dublin, [Lecture notes in computer science](#) ISSN [0302-9743](#)

Remondino, F., Fraser, C.S. 2006. “Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Comparisons”, ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology, Part 5, 2006, Dresden.