

# ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΒΙΝΤΕΟΚΑΜΕΡΑΣ

Γ. Δρακωνάκης, Α. Μυλωνάς, Μ. Τρύφωνα, Σ. Ψωμαδάκη,  
Π. Αγραφιώτης, Α. Γεωργόπουλος  
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ  
email: [pagraf@central.ntua.gr](mailto:pagraf@central.ntua.gr)

## Περίληψη

Η χρήση μη μετρητικών ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών και καμερών στη Φωτογραμμετρία αποτελεί μία τάση των τελευταίων ετών λόγω του μικρού τους κόστους και της εύκολης χρήσης τους. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων τους προϋποθέτει τη σωστή ανάπλαση της δέσμης των ακτίνων στο σύστημα μηχανής-φακού, κάτι που επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται διαφορετικές μέθοδοι βαθμονόμησης μιας εμπορικής μη μετρητικής -βιντεοκάμερας (Turbox Action Camera ACT-20) με απώτερο στόχο τη χρήση της στη Φωτογραμμετρική αποτύπωση αρχαιολογικού χώρου. Η ιδιαιτερότητα της εφαρμογής αυτής οφείλεται στη χαμηλή ανάλυση του βίντεο στην ελλιπή πληροφορία των χαρακτηριστικών του φακού και του αισθητήρα αλλά και στην συνεχή και ακανόνιστη κίνηση της πλατφόρμας αεροφωτογράφισης, εν προκειμένω αετού, που την μετέφερε κατά τη διάρκεια των λήψεων. Στο πλαίσιο της διερεύνησης χρησιμοποιήθηκαν διάφορα λογισμικά βαθμονόμησης, κάποια από τα οποία απαιτούν λήψεις σε διαφορετικά πεδία ελέγχου και αποστάσεις. Μέσω της χρήσης αυτών των λογισμικών επιτυγχάνεται η προσέγγιση της εσωτερικής γεωμετρίας της κάμερας με διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω βαθμονομήσεων, αναλύονται και εντοπίζονται οι διαφορές τους. Τέλος, αξιολογούνται και διατυπώνονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη μετρητική χρήση τέτοιων αισθητήρων.

*Λέξεις κλειδιά: Βαθμονόμηση, Ψηφιακή βιντεοκάμερα, Εσωτερική γεωμετρία φακού, Αετός αεροφωτογράφισης.*

## Abstract

The use of non-metric digital cameras for photogrammetric purposes has been increased in recent years due to low cost and convenient usage. Correct beam reconstruction within the camera-lens system ensures image reliability, which is achieved by a suitable calibration process. This paper presents a variety of calibration methods, applied to a non-metric digital camera "Turbox Action Camera ACT-20", which was used for the geometrical documentation of an archaeological site. Low video resolution, lack of lens and sensor specifications and irregular constant movement of the photography platform (kite) made image processing for the documentation especially difficult. Different software were used for the camera calibration. Some of them required different control fields and distances.

---

Γ. Δρακωνάκης, Α. Μυλωνάς, Μ. Τρύφωνα, Σ. Ψωμαδάκη, Π. Αγραφιώτης, Α. Γεωργόπουλος  
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, ΣΑΤΜ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Διερεύνηση βαθμονόμησης ψηφιακής βιντεοκάμερας

Thus, interior geometry of the camera was approximated by different mathematical models. Finally, the calibration results are analyzed and compared.

*Keywords: Calibration, Digital video camera, Interior geometry of the camera, photography platform (kite)*

## 1. Εισαγωγή

Οι φωτογραφικές μηχανές είναι για τη φωτογραμμετρική διαδικασία το μοναδικό μετρητικό εργαλείο, με το οποίο καταγράφονται οι διευθύνσεις προς όλα τα σημεία που απεικονίζονται σε μια φωτογραφική εικόνα. Συνεπώς πρέπει απαραίτητως να συνοδεύονται πάντοτε από τις απαραίτητες μετρολογικές πληροφορίες για την διασφάλιση της μετρητικής κυρίως ποιότητας της γεωμετρικής συμπεριφοράς τους (Γεωργόπουλος & Ιωαννίδης, 2007)

### 1.1. Η γεωμετρία της μηχανής - Κεντρική Προβολή

Η κεντρική προβολή αποτελεί το μαθηματικό μοντέλο που προσεγγίζει γεωμετρικά την εικόνα και τον μηχανισμό δημιουργίας της. Από αυστηρά γεωμετρική άποψη μια εικόνα θεωρείται ότι είναι το προϊόν μιας κεντρικής προβολής. Στην φωτογραμμετρία, επομένως, η εικόνα προσεγγίζεται γεωμετρικά με το μοντέλο της κεντρικής προβολής.

### 1.2. Εσωτερικός Προσανατολισμός

Για να καταστεί δυνατή η εφαρμογή του μοντέλου της Κεντρικής Προβολής στη φωτογραφική λήψη, θα πρέπει να αποκατασταθεί ο εσωτερικός προσανατολισμός της, δηλαδή να προσδιοριστεί η σταθερά της μηχανής ( $c$ ), η θέση του πρωτεύοντος σημείου στο εστιακό επίπεδο  $(x_o, y_o)$  και το μέγεθος της ακτινικής διαστρωφής του φακού ( $\Delta r$ ) (Γεωργόπουλος & Χλιβερού 2003). Αποκατάσταση του Εσωτερικού προσανατολισμού είναι η διαδικασία αναγωγής των μετρήσεων στην εικόνα, έτσι ώστε να «υπακούν» καλύτερα στο μοντέλο της Κεντρικής Προβολής που περιγράφει την συγκεκριμένη μηχανή. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού γίνεται με τη διαδικασία της *βαθμονόμησης*. Κατά την οποία προσδιορίζονται τα στοιχεία της εσωτερικής γεωμετρίας της μηχανής ( $c$ ,  $(x_o, y_o)$ ,  $\Delta r$ ).

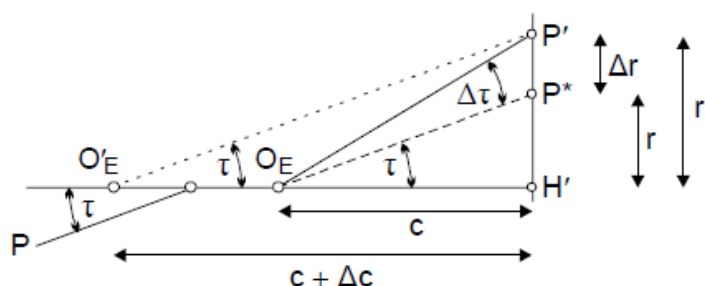
### 1.3. Σφάλματα φακών

Οι φακοί των φωτογραφικών μηχανών προκαλούν διάφορα *σφάλματα* στην απεικόνιση, που οφείλονται στις οπτικές ιδιότητες του κρυστάλλου, στην κατασκευή τους και στα κινούμενα μέρη τους. Τα σφάλματα αυτά παίζουν μεγάλο ρόλο για τις μετρητικές εφαρμογές και μπορεί να επιδράσουν αρνητικά στην ορθή αναγνώριση των αντικειμένων και εμμέσως στην τελική ακρίβεια των μετρήσεων.

### 1.3.1 Ακτινική Διαστροφή

Η ακτινική διαστροφή οφείλεται στην ιδιότητα των φακών να διαφοροποιούν τη μεγέθυνση των ειδώλων στο εστιακό πεδίο τους. Η διαφοροποίηση αυτή είναι γενικώς συμμετρική ως προς το κέντρο του φακού λόγω της εκ περιστροφής κατασκευής του.

Διακρίνεται σε θετική ή πιθοειδή και αρνητική ή μηνοειδή. Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι ότι οι ευθείες γραμμές του αντικειμένου απεικονίζονται ως καμπύλες, γεγονός που επηρεάζει τις μετρήσεις και προφανώς τον προσδιορισμό του σχήματος του αντικειμένου με φωτογραμμετρικές μεθόδους (Γεωργόπουλος & Χλιβερού 2003).



Εικόνα 1: Απεικόνιση ακτινικής διαστροφής  
Πηγή: Πέτσα, 2000

Η ακτινική διαστροφή εκφράζεται ως πολυώνυμο περιττών δυνάμεων του  $r$  ως εξής (Brown, 1968):

$$\Delta r = K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5 + K_3 \cdot r^7 + \dots \quad (1)$$

Όπου  $r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}$ , η ακτινική απόσταση

$x_o, y_o$  οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου

$x, y$  οι παρατηρούμενες εικονοσυντεταγμένες ενός σημείου

$K_1, K_2, K_3, \dots$  οι συντελεστές της ακτινικής διαστροφής

### 1.3.2 Ασύμμετρη ή έκκεντρη διαστροφή

Η αδυναμία κέντρωσης των στοιχείων των φακών κατά μήκος του οπτικού άξονα οδηγεί στην εμφάνιση μιας δεύτερης κατηγορίας διαστροφής φακών, η οποία έχει μετρητικές συνέπειες στην αναλυτική αποκατάσταση και η οποία ονομάζεται ασύμμετρη ή έκκεντρη διαστροφή. Η μη ευθυγράμμιση των στοιχείων του φακού δημιουργεί τόσο ακτινικές όσο και εφαπτομενικές μετατοπίσεις, οι οποίες μπορούν να μοντελοποιηθούν από τις εξισώσεις διόρθωσης του Brown (1966), (Fraser, 1997).

Ο Brown το 1968 έδειξε ότι η διόρθωση της ασύμμετρης παραμόρφωσης εκκεντρότητας στις  $x$  και  $y$  συνιστώσες εκφράζεται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$\begin{aligned}\Delta x_d &= [1 + P_3 r^2 + \dots] [P_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x}\bar{y}] \\ \Delta y_d &= [1 + P_3 r^2 + \dots] [2P_1 \bar{x}\bar{y} + P_2 (r^2 + 2\bar{y}^2)]\end{aligned}\quad (2)$$

$$\text{Όπου: } P_1 = -J_1 \sin \varphi_o, P_2 = J_1 \cos \varphi_o, P_3 = \frac{J_2}{J_1}, P_4 = \frac{J_3}{J_1} \quad (3)$$

$\bar{x} = x - x_o, \bar{y} = y - y_o$ , οι εικονοσυντεταγμένες με αρχή το πρωτεύον σημείο

Το μοντέλο αυτό από το σύνολο σχεδόν των συγγραφέων χρησιμοποιείται μόνο κατά τις δυο παραμέτρους  $P_1$  και  $P_2$ :

$$\begin{aligned}\Delta x_d &= [P_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x}\bar{y}] \\ \Delta y_d &= [P_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1 \bar{x}\bar{y}]\end{aligned}\quad (4)$$

## 2. Η Ψηφιακή Βιντεοκάμερα Turbo X ACT-20

Στο πλαίσιο των Μεγάλων Θερινών Ασκήσεων Φωτογραμμετρίας και κατά τη διάρκεια της διοργάνωσης του Εντατικού Προγράμματος Erasmus **HERICT 2013**, “ICT at the Service of Cultural Heritage” στην Κυμισάλα της Ρόδου, έγινε χρήση της εμπορικής-μη μετρητικής-βιντεοκάμερας “TurboX Action Camera ACT-20”. Τα χαρακτηριστικά της βιντεοκάμερας, που παρέχει ο κατασκευαστής είναι: διαστάσεις καρέ 1280x720, αισθητήρας CMOS, συχνότητα καρέ 30 fps και υποστήριξη αρχείων AVI (*Audio Video Interleave*).

Η πλατφόρμα που τη μετέφερε κατά τη διάρκεια των λήψεων ήταν κατάλληλα τροποποιημένος αετός αεροφωτογράφισης. Οι λόγοι που οδήγησαν στη χρήση της συγκεκριμένης μηχανής είναι το μικρό της βάρος και το χαμηλό της κόστος. Η βαθμονόμηση κρίθηκε απαραίτητη καθώς, κατά τη διάρκεια του προγράμματος HERICT 2013, στόχος ήταν η παραγωγή ορθοφωτογραφίας τμήματος του αρχαιολογικού χώρου. Η ακανόνιστη κίνηση της πλατφόρμας αεροφωτογράφισης κατέστησε τη διαδικασία της αυτοβαθμονόμησης ιδιαίτερα δύσκολη. Επομένως, κρίθηκε απαραίτητη η διεξαγωγή εργαστηριακών μεθόδων βαθμονόμησης, οι οποίες απαιτούν λήψεις σε διαφορετικά πεδία ελέγχου και αποστάσεις.

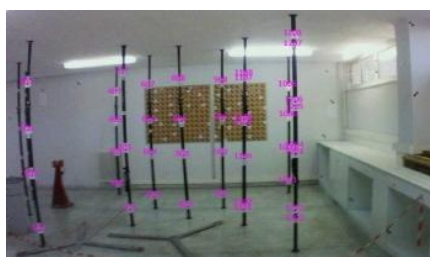
## 3. Εφαρμογή

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού της βιντεοκάμερας TurboX Action Camera Act-20 με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και αξιοπιστία, πραγματοποιήθηκαν βαθμονομήσεις με τέσσερις διαφορετικές μεθόδους.

### 3.1. Επίλυση βαθμονόμησης σε περιβάλλον Calibration CCD

Το λογισμικό βαθμονόμησης “Calibration\_CCD” έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σε περιβάλλον Matlab (Σαμαρά 2004). Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί τη συνθήκη συγγραμμικότητας και τη μέθοδο συνόρθωσης με δέσμες για την εύρεση των παραμέτρων. Οι προσεγγιστικές τιμές των αγνώστων προσδιορίζονται με χρήση Αμέσου Γραμμικού Μετασχηματισμού (DLT) 11 παραμέτρων.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιήθηκαν δυο προεγκατεστημένα τρισδιάστατα πεδία ελέγχου που βρίσκονται στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οι συντεταγμένες των φωτοσταθερών των πεδίων είναι μετρημένες με αβεβαιότητα 0.1 mm για το εσωτερικό και 1mm για το εξωτερικό.



Εικόνα 2α:Εσωτερικό πεδίο ελέγχου-  
Απόσταση εστίασης 4m



Εικόνα 2β:Εξωτερικό πεδίο ελέγχου -  
Απόσταση εστίασης 15m

Το πρώτο, έχει ιδρυθεί για βαθμονόμηση μηχανών σε κοντινές αποστάσεις εστίασης. Αποτελείται από 12 κατακόρυφους στύλους, ομοιόμορφα κατανεμημένους στο χώρο, και ένα κατακόρυφο επίπεδο. Σε κάθε στύλο υπάρχουν οκτώ κυκλικοί στόχοι, ενώ στο κατακόρυφο επίπεδο υπάρχουν 42 κυκλικοί στόχοι. Το δεύτερο έχει ιδρυθεί για βαθμονόμηση με εστίαση σε μακρινές αποστάσεις, μεγαλύτερες των 12m, και αποτελείται από 42 κυκλικούς στόχους ομοιόμορφα κατανεμημένους σε διαφορετικά επίπεδα.

Για τη βαθμονόμηση της βιντεοκάμερας φωτογραφήθηκαν τα δύο πεδία με απόσταση εστίασης 4m για το πρώτο και 15 και 20m για το δεύτερο. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 3 εικόνες από το εσωτερικό πεδίο ελέγχου και 2 από το εξωτερικό για την επίλυση των βαθμονομήσεων.

### 3.2. Επίλυση βαθμονόμησης σε περιβάλλον PhotoModeler Scanner

Το λογισμικό PhotoModeler Scanner διαθέτει ενσωματωμένη ρουτίνα αυτοματοποιημένης βαθμονόμησης των φωτογραφικών μηχανών. Όσον αφορά στην παραμόρφωση των φακών, το PhotoModeler χρησιμοποιεί μία τυπική διατύπωση με τέσσερις παραμέτρους, οι οποίες είναι υποσύνολο των παραμέτρων που εισήγαγε ο Brown το 1971.

Η διαδικασία της αυτοματοποιημένης βαθμονόμησης πραγματοποιείται με τη χρήση ενός δισδιάστατου καννάβου, διαστάσεων 90cm x 90cm, που περιέχει 100 σημεία, συμπεριλαμβανομένων και τεσσάρων κωδικοποιημένων σημείων ελέγχου. Η υψηλή αντίθεση των στόχων επιτρέπει στο PhotoModeler την αυτόματη σκόπευσή τους, που

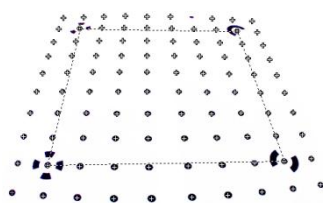
---

Γ. Δρακωνάκης, Α. Μυλωνάς, Μ. Τρύφωνα, Σ. Ψωμαδάκη, Π. Αγραφιώτης, Α. Γεωργόπουλος  
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, ΣΑΤΜ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Διερεύνηση βαθμονόμησης ψηφιακής βιντεοκάμερας

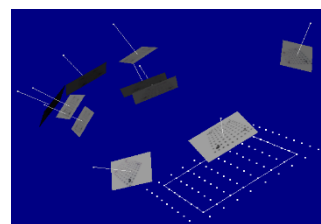
γνωρίζοντας την σχετική θέση τους καθώς και τις αποστάσεις μεταξύ τους, η βαθμονόμηση μπορεί να γίνει αυτόματα, χρησιμοποιώντας τεχνικές συνταύτισης προτύπων.



Εικόνα 3α: Αρχική λήψη



Εικόνα 3β: Επεξεργασμένη εικόνα



Εικόνα 3γ: Θέσεις λήψης

Για τη βαθμονόμηση της βιντεοκάμερας χρησιμοποιήθηκαν 10 εικόνες (Εικόνα 3α). Για την αποφυγή θορύβου πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των εικόνων σε περιβάλλον Photoshop (Εικόνα 3β). Για την αναγωγή του αντικειμένου στη σωστή κλίμακα, ορίστηκαν ως δεσμεύσεις οι αποστάσεις μεταξύ των τεσσάρων κωδικοποιημένων στόχων.

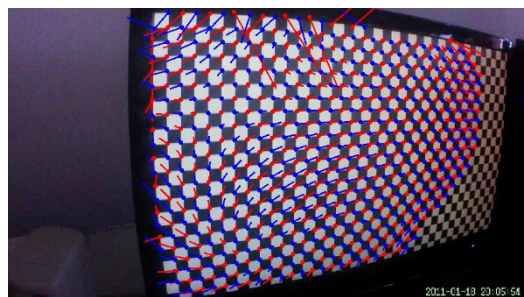
### 3.3. Επίλυση βαθμονόμησης σε περιβάλλον Agisoft Lens

Το Agisoft Lens είναι ένα ελεύθερα διαθέσιμο λογισμικό αυτόματης βαθμονόμησης φακού, το οποίο υποστηρίζει την εκτίμηση του ολοκληρωμένου πίνακα βαθμονόμησης, συμπεριλαμβανομένων και των μη γραμμικών συντελεστών παραμόρφωσης. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιεί το μοντέλο της σημειακής μηχανής. Οι παραμορφώσεις μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας το μοντέλο παραμόρφωσης του Brown.

Η διαδικασία της αυτόματης βαθμονόμησης στο λογισμικό Agisoft Lens πραγματοποιείται με τη χρήση δισδιάστατου κανάβου, ο οποίος έχει σχήμα σκακιέρας και διαστάσεις ανάλογες με τις διαστάσεις της επίπεδης οθόνης από την οποία γίνεται η έκθεση. Ο ελάχιστος αριθμός φωτογραφιών για μία δεδομένη εστιακή απόσταση είναι τρεις. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν 15 εικόνες (Εικόνα 4α). Παραπροϊόν της βαθμονόμησης με το Agisoft Lens αποτελεί ο υπολογισμός των σφαλμάτων μεταξύ των ανιχνευμένων και των βελτιστοποιημένων γωνιών της σκακιέρας (Εικόνα 4β).



Εικόνα 4α: Λήψη κανάβου Lens



Εικόνα 4β: Υπολογισμός σφαλμάτων

### 3.4. Επίλυση βαθμονόμησης σε περιβάλλον PHOTOMOD 5

Το PHOTOMOD 5 είναι ένας ολοκληρωμένος ψηφιακός φωτογραμμετρικός σταθμός, ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις λειτουργίες για τη δημιουργία και διαχείριση έργων και την πραγματοποίηση όλων των φωτογραμμετρικών διαδικασιών. Η εύρεση των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού σε περιβάλλον PHOTOMOD 5 επιτυγχάνεται με την εκτέλεση αυτοβαθμονόμησης κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του αεροτριγωνισμού. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται εφόσον διατίθενται αρκετά φωτοσταθερά, έτσι ώστε στην συνόρθωση να μπορούν να εισέλθουν οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού ως άγνωστες μεταβλητές.

Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε ένα στερεοζεύγος (2 εικόνες) του εσωτερικού πεδίου ελέγχου της παραγράφου 3.1 με 56 φωτοσταθερά και 6 σημεία σύνδεσης, 54 εκ των οποίων είναι κοινά και για τις δύο εικόνες. Για την εύρεση των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού με τη μέθοδο της δέσμης είναι απαραίτητη η εισαγωγή αρχικών τιμών για την τιμή της σταθεράς της μηχανής και του μεγέθους του εικονοστοιχείου. Μια εικόνα απαλλαγμένη από την ακτινική διαστρόφη παρουσιάζεται στην εικόνα 5α, ενώ στην εικόνα 5β εμφανίζεται η ορθοφωτογραφία που παράχθηκε κατά τη διάρκεια της εφαρμογής.



Εικόνα 5α: Διορθωμένη εικόνα



Εικόνα 5β: Ορθοφωτογραφία

## 4. Παρουσίαση & Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

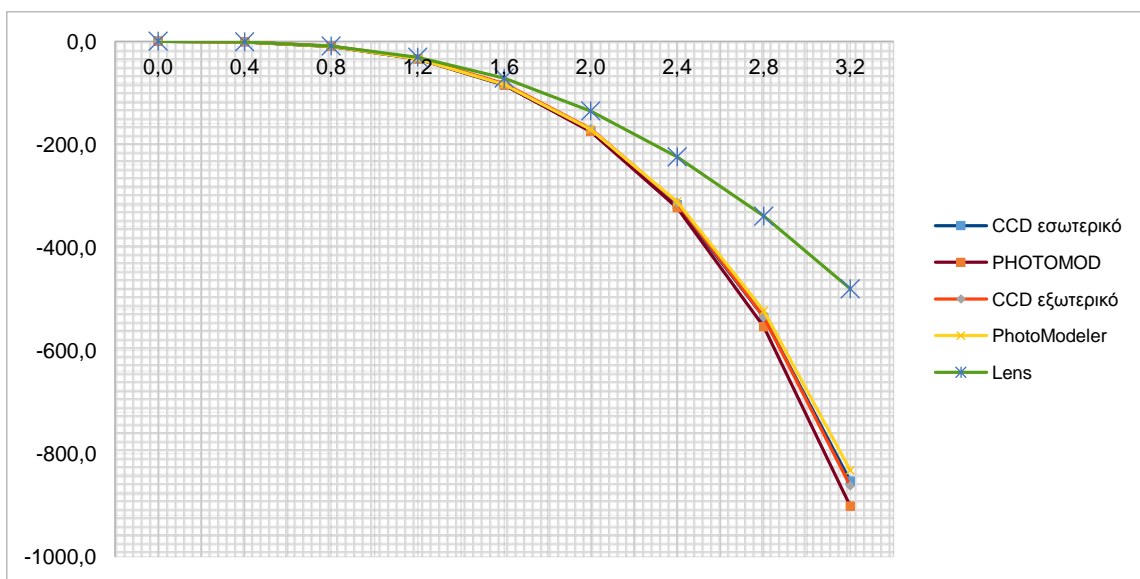
Είναι φανερό ότι κάθε διαδικασία που ακολουθήθηκε σε κάθε μέθοδο είναι διαφορετική από τις υπόλοιπες, τόσο σε πρακτικά ζητήματα, όπως το πεδίο ελέγχου, όσο και στα αποτελέσματα που τελικά εξάγονται. Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των παραπάνω μεθόδων:

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και τυπικές αποκλίσεις σε pixel

	CCD εσωτερικό	CCD εξωτερικό	PhotoModeler	Lens	PHOTOMOD
$x_o$	667.95 ±2.644	686.91 ±8.341	680.10 ±0.851	662.49 ±0.680	538.5
$y_o$	356.84 ±1.388	353.20 ±4.679	352.02 ±1.703	370.07 ±0.450	358.4
$c$	973.88 ±0.967	982.59 ±4.049	980.45 ±1.490	974.06 ±0.585	981.8
$K_1$	$-4.20 \cdot 10^{-07} \pm 9.00 \cdot 10^{-09}$	$-3.96 \cdot 10^{-07} \pm 2.00 \cdot 10^{-08}$	$-4.19 \cdot 10^{-07} \pm 5.74 \cdot 10^{-09}$	$-4.12 \cdot 10^{-07} \pm 2.10 \cdot 10^{-09}$	$-4.14930 \cdot 10^{-07}$
$K_2$	$-3.34 \cdot 10^{-13} \pm 2.00 \cdot 10^{-14}$	$-3.98 \cdot 10^{-13} \pm 3.00 \cdot 10^{-14}$	$-2.90 \cdot 10^{-13} \pm 3.56 \cdot 10^{-14}$	$2.28 \cdot 10^{-13} \pm 1.10 \cdot 10^{-14}$	$-3.50715 \cdot 10^{-13}$
$K_3$	-	-	$-3.65 \cdot 10^{-20} \pm 6.88 \cdot 10^{-20}$	$-8.04 \cdot 10^{-20} \pm 1.40 \cdot 10^{-20}$	$-1.394 \cdot 10^{-19}$

Γενικά παρατηρείται ότι:

- Οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου συγκλίνουν για τις μεθόδους με το “CCD”, το “PhotoModeler” και το “Lens”, ενώ τα αποτελέσματα του “PHOTOMOD” αποκλίνουν έως και  $\approx 150$  pixel κατά τη  $x$  συνιστώσα σε σχέση με τα προηγούμενα.
- Οι τιμές της σταθεράς της μηχανής συγκλίνουν για όλες τις μεθόδους.
- Το λογισμικό “CCD” δεν εμφανίζει τιμές  $K_3$ .
- Οι τιμές των  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  στο “PHOTOMOD” διαφέρουν κατά τάξη μεγέθους σε σχέση με τα αποτελέσματα των υπολοίπων λογισμικών.



Σχήμα 1: Διάγραμμα ακτινικής διαστρώσης (μη κανονικοποιημένης)

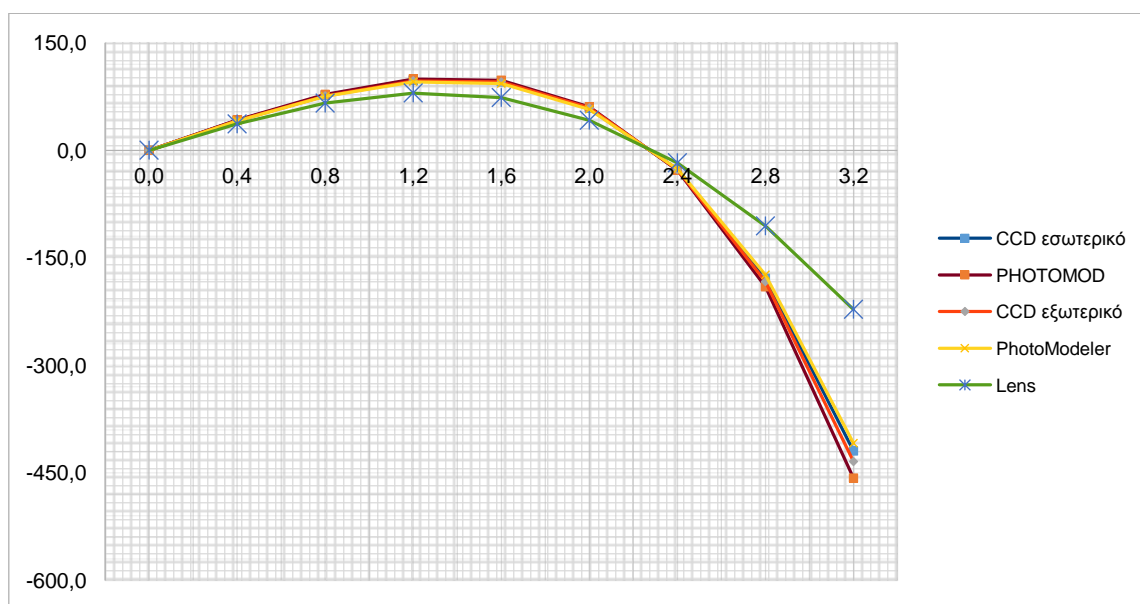
Από τις παραπάνω τιμές (Πίνακας 1), σχεδιάζονται τα διαγράμματα της ακτινικής διαστρώσης (Σχήμα 1). Παρατηρείται ταύτιση των διαγραμμάτων του “CCD”, του “Photomodeler” και του “PHOTOMOD”, ενώ το διάγραμμα του “Lens” πέρα από τα 1,6mm αποκλίνει σε σημαντικό βαθμό από τα υπόλοιπα.

Δεδομένου ότι υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί  $\Delta r$  και  $c$ , που να ικανοποιούν τις



ισοδύναμες εκφράσεις της συνάρτησης της εικόνας, μια αυθαίρετα εκλεγμένη τιμή του  $c$  δίνει κάποιες τιμές του  $\Delta r$ , ενώ μεταβολή του  $c$  κατά  $\Delta c$ , θα επιφέρει μεταβολή του  $\Delta r$  κατά  $\delta_{\Delta r}$ . Επομένως, η αλλαγή του ενός όρου οδηγεί στην αλλαγή και του άλλου για να περιγράφεται σωστά η διαδικασία της απεικόνισης με την συγκεκριμένη μηχανή. Για την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται κανονικοποίηση της ακτινικής διαστρόφης του φακού σε απόσταση μηδενισμού τα  $\frac{2}{3}$  της ημιδιαγωνίου της εικόνας.

Μετά τον μηδενισμό οπτικοποιούνται τα νέα διαγράμματα στο συγκεντρωτικό διάγραμμα της ακτινικής διαστρόφης (Σχήμα 2), στο οποίο επιβεβαιώνονται οι παραπάνω παρατηρήσεις.



Σχήμα 2: Σύνθεση διαγραμμάτων της ακτινικής διαστρόφης

## 5. Βιβλιογραφία

Πρακτικά Συνεδρίου:

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

Άρθρο σε περιοδικό:

Brown, D.C., “*The Simultaneous Determination of Lens Distortion of a Photogrammetric Camera*”, AF Missile Test Center Technical Report No. 56-20, Patrick AFB, Florida, 1956.

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

---

Γ. Δρακωνάκης, Α. Μυλωνάς, Μ. Τρύφωνα, Σ. Ψωμαδάκη, Π. Αγραφιώτης, Α. Γεωργόπουλος  
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, ΣΑΤΜ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Διερεύνηση βαθμονόμησης ψηφιακής βιντεοκάμερας

5<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

Brown, D.C., Close-range camera calibration, PE&RS, Vol. 37(8), pp.855-866, 1971.  
Clive S. Fraser, “*Digital camera self-calibration*”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 52, Issue 4, , Pages 149-159, August 1997

Βιβλίο:

Πέτσα Έ., “*Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας*”, Διδακτικές Σημειώσεις, ΤΕΙ Αθήνας, 2000.

Σαμαρά Α., “*Διερεύνηση Βαθμονόμησης Ψηφιακής Μηχανής*”. Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορικής», Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2004.

Atkinson K.B., “*Close range Photogrammetry and Machine Vision*”, Whittles Publishing, ISBN 1-870325-46-X, 1996.

---

Γ. Δρακωνάκης, Α. Μυλωνάς, Μ. Τρύφωνα, Σ. Ψωμαδάκη, Π. Αγραφιώτης, Α. Γεωργόπουλος  
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, ΣΑΤΜ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Διερεύνηση βαθμονόμησης ψηφιακής βιντεοκάμερας

5<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014