ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΦΑΚΟΥ

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

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση αρχιτεκτονικών φακών σε κοινές φωτογραμμετρικές εφαρμογές και περιγράφεται η βαθμονόμηση του φακού *Canon TS-E 24 mm II* σε τρισδιάστατο πεδίο ελέγχου με δύο διαφορετικές μεθόδους, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται, αξιολογούνται και αξιοποιούνται για τη διερεύνηση της επίδρασης των φυσικών κινήσεων του φακού στα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού. Τέλος, σχολιάζεται η μετρητική αξία των αρχιτεκτονικών φακών και διερευνάται η δυνατότητα ευρύτερης αξιοποίησής τους.

Λέξεις-Κλειδιά: Βαθμονόμηση, Αρχιτεκτονικός Φακός, Εσωτερικός Προσανατολισμός.

Abstract

In this paper, the advantages of the use of tilt/shift lenses in common photogrammetric applications are mentioned. *Canon TS-E 24 mm II* was calibrated in a known 3D test field using two different methods. Calibration results are presented and analyzed in order to highlight how interior orientation is affected by lens movements. Finally, tested lens' metric potential is evaluated and suggestions for further exploitation are made.

Keywords: Calibration, Tilt/Shift Lens, Interior Orientation.

1. Εισαγωγή

Οι αρχιτεκτονικοί φακοί χρησιμοποιούνται με σκοπό την οπτική βελτίωση των παραγόμενων εικόνων κυρίως στον περιορισμό των προοπτικών παραμορφώσεων. Η φωτογραμμετρική τους αξιοποίηση δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, παρότι μπορεί να φανούν χρήσιμοι σε πολλές ειδικές φωτογραμμετρικές αποτυπώσεις (Rieke-Zapp & Ebert, 2009). Σε πολλές εφαρμογές Φωτογραμμετρίας, προτιμάται η μετωπική φωτογράφηση αντικειμένων, ώστε να εξασφαλίζεται η απεικόνισή τους σε ενιαία κλίμακα και να αποφεύγεται η προοπτική παραμόρφωση της εικόνας. Σε συνθήκες που τα πραγματικά σημεία θέασης δεν προσφέρουν κάλυψη του συνόλου της επιφάνειας ενδιαφέροντος, η παράλληλη κίνηση του φακού ως προς το επίπεδο προβολής διευρύνει το πεδίο θέασης της απεικόνισης και καθιστά εφικτή τη λήψη μετωπικών φωτογραφιών διατηρώντας ταυτόχρονα τη φωτογραφική μηχανή κατά το δυνατόν αυστηρά 'κατακόρυφη' ως προς το επίπεδο του αντικειμένου (Meydenbauer, 1919). Τότε, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ εικονοψηφίδων (κλίμακα, σχήμα, μέγεθος) ελαχιστοποιούνται και επιτυγχάνεται η μέγιστη κάλυψη του *format* της εικόνας.

Στην εγγύς Φωτογραμμετρία, είναι συχνή η ανάγκη λήψης φωτογραφιών πολύ μικρής απόστασης λήψης για την αποτύπωση μικρών αντικειμένων σε πολύ μεγάλη κλίμακα. Σε τέτοιες περιπτώσεις παρατηρείται, όχι σπάνια, μία ανεπιθύμητη τοπική απο-εστίαση της τελικής εικόνας. Η κλίση του φακού ως προς το επίπεδο του αισθητήρα επιδρά στην κατανομή του βάθους πεδίου στην εικόνα και, έτσι, εξασφαλίζεται ορθή εστίαση στο σύνολο του αντικειμένου. Κατά συνέπεια, διευκολύνεται η διεξαγωγή μετρήσεων στην εικόνα και βελτιώνεται η αναμενόμενη ακρίβειά τους.

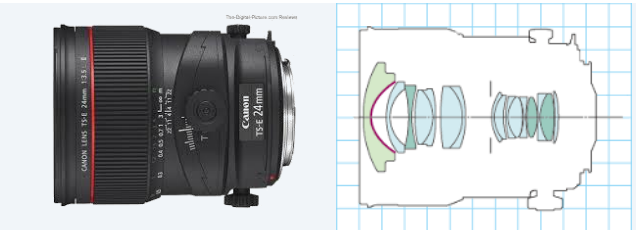
Ένας αρχιτεκτονικός φακός μπορεί εκ σχεδιασμού να κινείται παράλληλα (*shift*) ή υπό γωνία (*tilt*) ως προς τον αισθητήρα, επιδρώντας στα στοιχεία της προοπτικής απεικόνισης. Ως αποτέλεσμα, η θέση του πρωτεύοντος σημείου, η τιμή της πρωτεύουσας απόστασης και η κατανομή των διαστροφών του φακού στην εικόνα μεταβάλλονται ανάλογα με το είδος της επιβαλλόμενης κίνησης. Συνεπώς, ένας αρχιτεκτονικός φακός μπορεί να αξιοποιηθεί μετρητικά εφόσον έχουν αποτυπωθεί οι μεταβολές που κάθε κίνησή του επιφέρει στα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού.

Η βαθμονόμηση του αρχιτεκτονικού φακού *Canon TS-E 24mm II* πραγματοποιήθηκε σε τρισδιάστατο πεδίο ελέγχου, όπου ελήφθησαν τρεις συγκλίνουσες εικόνες για κάθε θέση κίνησης που ελέγχθηκε. Τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού κάθε λήψης υπολογίστηκαν με φωτογραμμετρική οπισθοτομία κάθε τριάδας λήψεων της ίδιας θέσης με αυτοβαθμονόμηση. Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συγκρίθηκαν και εξετάστηκε η επίπτωση κάθε κίνησης στον εσωτερικό προσανατολισμό.

2. Αρχικές Εκτιμήσεις – Προσεγγίσεις – Υπολογισμοί

2.1 Ο Φακός

Η κίνηση του φακού επιτυγχάνεται με χρήση του αντίστοιχου κοχλία και το μέτρο της κίνησης επιλέγεται σε κάθε περίπτωση μέσω της βαθμονομημένης κλίμακας. Οι λειτουργίες *shift* και *tilt* του φακού επιβάλλονται σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Η εναλλαγή στη διεύθυνση κάθε κίνησης πραγματοποιείται ανεξάρτητα της άλλης με στροφή του αντίστοιχου μηχανισμού περί τον μηχανικό άξονα του φακού (*rotation*).



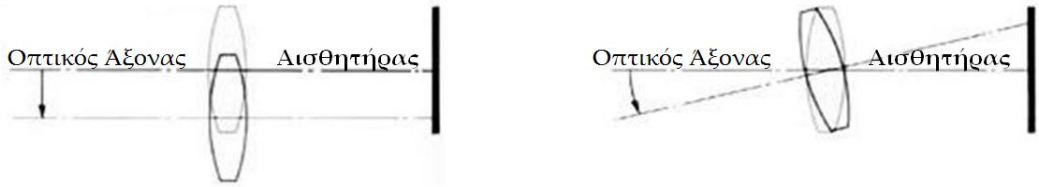
Εικόνα 2.1: Ο φακός *Canon TS-E 24mm II* και η διάταξη των εσωτερικών οπτικών του στοιχείων

Πίνακας 2.1: Τα χαρακτηριστικά κίνησης του φακού *Canon TS-E 24mm II*

Είδος Κίνησης	Εύρος Κίνησης	Ακρίβεια Κλίμακας
shift	±12mm	0.5mm
tilt	±8.5°	0.5°

2.2 Αρχές Λειτουργίας

Οι αρχές λειτουργίας ενός αρχιτεκτονικού φακού μπορεί να γίνουν περισσότερο κατανοητές από τα παρακάτω σχήματα, εάν ως θέση αναφοράς θεωρηθεί η 'ουδέτερη θέση' του φακού. Η απόκλιση του οπτικού άξονα από την αρχική του θέση, συνεπάγεται αλλαγή της πορείας των φωτεινών δεσμών που καταλήγουν στον αισθητήρα, με αποτέλεσμα τη μεταβολή του εσωτερικού προσανατολισμού. Εάν θεωρηθεί ότι ο αρχιτεκτονικός φακός είναι βαθμονομημένος στην ουδέτερη θέση (c, x_o, y_o), τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού μπορεί να εκτιμηθούν για κάθε θέση κίνησης. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο σχηματισμός μίας μαθηματικής σχέσης που θα προσεγγίζει ικανοποιητικά τη φυσική κίνηση του φακού.



Σχήμα 2.1: Οι κινήσεις ενός αρχιτεκτονικού φακού ως προς τον αισθητήρα (παράλληλη μετατόπιση, *shift* – κλίση, *tilt*)

Παράλληλη Μετατόπιση (*shift*)

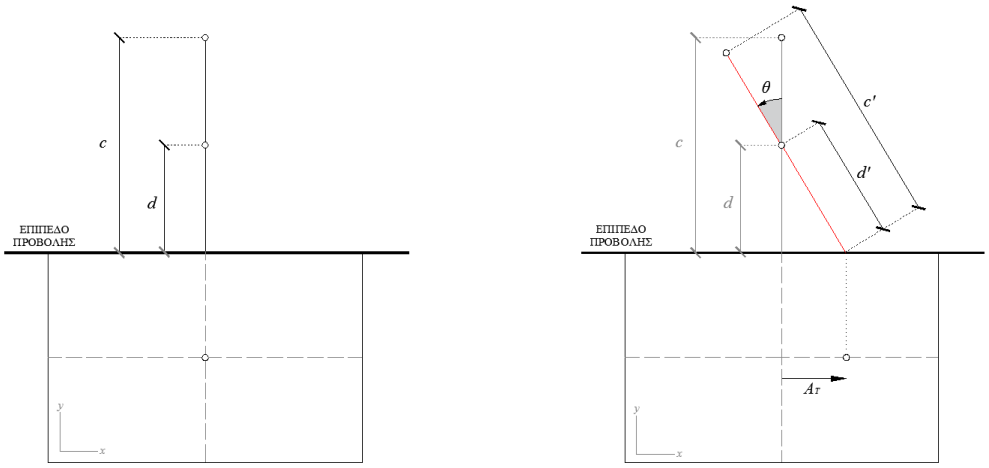
Η μετατόπιση του φακού παράλληλα στο επίπεδο του αισθητήρα προκαλεί αντίστοιχη μετακίνηση του οπτικού άξονα. Κατά τη διεύθυνση της κίνησης, το πεδίο θέασης της απεικόνισης αυξάνεται, ενώ, στην αντίθετη πλευρά, αναμένεται πτώση της φωτεινότητας και αύξηση της επίπτωσης της διαστροφής των φακών (Jacobson et al., 2000). Η εστιακή απόσταση δεν μεταβάλλεται και το πρωτεύον σημείο κινείται στην εικόνα κατά το μέτρο και τη διεύθυνση της κίνησης.

Κλίση (*tilt*)

Κατά την κλίση του φακού, ο οπτικός άξονας πίπτει υπό γωνία (θ) στο επίπεδο του αισθητήρα και το κοινό σημείο του με τον οπτικό άξονα στην 'ουδέτερη θέση' θεωρείται ότι ορίζει το κέντρο περιστροφής του φακού. Η πρωτεύουσα απόσταση αυξάνεται (c') και το πρωτεύον σημείο μετατοπίζεται στην εικόνα (A_T) συναρτήσει της απόστασης του κέντρου περιστροφής από το επίπεδο προβολής (d). Από το παραπάνω σχήμα, προκύπτει:

$$\frac{c}{c'} = \cos\theta \tag{2.1}$$

$$A_T = d \cdot \tan\theta \tag{2.2}$$



Σχήματα 2.2α,β: Η απόσταση του προοπτικού κέντρου και του κέντρου περιστροφής από το επίπεδο προβολής πριν και μετά την κλίση του φακού ως προς αυτό

Όπως και στην παράλληλη μετατόπιση, η επίπτωση της διαστροφής των φακών αυξάνεται αντιδιαμετρικά της κίνησης. Κατά τη διεύθυνση κλίσης αναμένεται αμελητέα μεγαλύτερη διαστροφή λόγω της αυξημένης γωνίας πρόσπτωσης των ακτίνων στον αισθητήρα. Όπως θα δειχθεί (§4.1.4), στην περίπτωση κλίσης του φακού ως προς τον αισθητήρα, μπορεί να γίνει λόγος για κλίμακα κατά διεύθυνση (c_x,c_y), όπου η αρχική τιμή εστιακής απόστασης αυξάνεται κατά τη διεύθυνση κίνησης, ενώ, κάθετα σε αυτήν, παραμένει σταθερή.

Στροφή (*rotation*)

Ο οπτικός άξονας του φακού δεν ταυτίζεται με τον άξονα μηχανικής ισορροπίας του. Συνεπώς, η στροφή του φακού περί το μηχανικό του άξονα αναμένεται να επιφέρει μετακίνηση της θέσης του πρωτεύοντος σημείου στην εικόνα και να επηρεάσει τη βαθμονόμηση του φακού στην 'ουδέτερη θέση'.

Με βάση τα παραπάνω, εάν ο φακός είναι βαθμονομημένος στην ουδέτερη θέση (c,x_o,y_o), τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού του, μετά από θεωρητική μετατόπιση (A_s) ή κλίση (θ) του φακού θα είναι:

Πίνακας 2.2: Προσδιορισμός προσεγγιστικών τιμών στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού για λήψεις σε *shift* ή *tilt* με βάση τη βαθμονομημένη 'ουδέτερη θέση' του φακού

Ουδέτερη Θέση	*shift*		*tilt*	
	κατά x	κατά y	κατά x	κατά y
x_o	x_o+A_s	x_o	$x_o+d\tan\theta$	x_o
y_o	y_o	y_o+A_s	y_o	$y_o+d\tan\theta$
c_x	c	c	$c/\cos\theta$	c
c_y	c	c	c	$c/\cos\theta$

3. Μέθοδος Βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε σε τρισδιάστατο πεδίο ελέγχου αποτελούμενο από 130 σημεία αναφοράς επισημασμένα με αυτοκόλλητους στόχους και ομοιόμορφα κατανεμημένα στο διαθέσιμο χώρο (περίπου 7m x 4m). Η γεωδαιτική μέτρηση των σημείων είχε ολοκληρωθεί προ της παρούσας εργασίας με ακρίβεια προσδιορισμού 0.05mm κατά X,Y και 0.1mm κατά Z.

Εικόνα 3.1: Το τρισδιάστατο πεδίο ελέγχου

Για κάθε θέση του φακού που εξετάστηκε ελήφθησαν τρεις συγκλίνουσες εικόνες του πεδίου ελέγχου επιδιώκοντας την καταγραφή του μέγιστου αριθμού στόχων. Ελήφθησαν συνολικά 102 φωτογραφίες με μηχανή *Canon EOS 1Ds MIII.*

Πίνακας 3.1: Γεωμετρικά και οπτικά χαρακτηριστικά του φωτογραφικού συστήματος λήψης

Ονομαστικά χαρακτηριστικά εικόνων από φωτογραφικές λήψεις που ελήφθησαν κατά τον έλεγχο του φακού *Canon TS-E 24 mm* με τη φωτογραφική μηχανή *Canon EOS 1Ds MIII*		
Εστιακή Απόσταση Φακού	24	*mm*
Διαστάσεις Αισθητήρα	36 × 24	mm^2
Διαστάσεις Εικόνας	5616 × 3744	*pixel*
Μέγεθος Εικονοστοιχείου (pixel)	6.4	*μm*

Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης, ο φακός ελέγχθηκε σε τέσσερις θέσεις μετατόπισης, τέσσερις θέσεις κλίσης και τρεις θέσεις περιστροφής (διαφορετική διεύθυνση των αξόνων κίνησης) σε τέσσερις, χρονικά διαφορετικές, περιόδους.

Εικόνα 3.2: Οι θέσεις περιστροφής του φακού στις οποίες ελήφθησαν φωτογραφίες

Πίνακας 3.2: Θέσεις του φακού που εξετάστηκαν ανά φάση φωτογράφησης και θέση περιστροφής

	Φάση 1		Φάση 2			Φάση 3		Φάση 4	
shift	8	-	-	12	-	2,5	8	-	-
tilt	-	5	3	-	8,5	-	-	3	5
rot	β		α			β	α	β	α

Τα στοιχεία βαθμονόμησης υπολογίστηκαν αρχικά για κάθε λήψη με φωτογραμμετρική οπισθοτομία. Σε δεύτερη φάση, τριάδες εικόνων με *shift* και *tilt* συνορθώθηκαν ως μπλοκ με τη μέθοδο των δεσμών και τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού υπολογίστηκαν με αυτοβαθμονόμηση. Ελέγχθηκε η ποιότητα προσαρμογής του συνορθωμένου μοντέλου στο δίκτυο των σημείων αναφοράς και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων.

4. Αποτελέσματα

4.1 Φωτογραμμετρική Οπισθοτομία

Ο εσωτερικός προσανατολισμός κάθε λήψης υπολογίστηκε με το πρόγραμμα *calibration ccd* (Σαμαρά, 2004). Οι αρχικές τιμές εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού υπολογίστηκαν με Άμεσο Γραμμικό Μετασχηματισμό (DLT) και τα στοιχεία βαθμονόμησης προσδιορίστηκαν επαναληπτικά με ελαχιστοτετραγωνική επίλυση φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας με αυτοβαθμονόμηση. Προσδιορίστηκαν, εκτός της πρωτεύουσας απόστασης και της θέσης του πρωτεύοντος σημείου, η ακτινική και έκκεντρη διαστροφή των φακών, αλλά και οι αφινικές παραμορφώσεις του εικονοστοιχείου στο σύστημα της φωτογραφίας.

4.1.1 Ουδέτερη Θέση

Πρωτεύουσα Απόσταση

Η πρωτεύουσα απόσταση ελέγχεται για τις λήψεις που πραγματοποιήθηκαν με το φακό στην ουδέτερη θέση (42). Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται σε τέσσερις φάσεις, για τις οποίες οι μέσες τιμές είναι πλήρως ασυσχέτιστες μεταξύ τους καθώς αναφέρονται σε διαφορετικές τιμές εστίασης του φακού.

Πίνακας 4.1: Η πρωτεύουσα απόσταση (c) στην ουδέτερη θέση κίνησης ανά φάση λήψης

Φάση Λήψης	Μέση Τιμή (mm)	Μέση Απόκλιση (mm)	Μέγιστο Εύρος Τιμών (mm)	Αριθμός Λήψεων
1	24.261	0.003	0.014	6
2	24.225	0.003	0.010	6
3	24.198	0.004	0.018	18
4	24.344	0.004	0.020	12

Η μέση απόκλιση των τιμών αποκαλύπτει ανεξαρτησία της πρωτεύουσας απόστασης από τον αριθμό των λήψεων και την, μικρή έστω, διαφορά εστίασης (≈0.5pixel). Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τις τέσσερις φάσεις φωτογράφησης για τις οποίες υπολογίστηκαν οι παραπάνω τιμές, έγινε εκτεταμένη κίνηση και δοκιμή του φακού για διάφορες θέσεις μετατόπισης και κλίσης. Ειδικά στις δύο τελευταίες φάσεις, πραγματοποιήθηκε και στροφή του φακού που ενδεχομένως συνδέεται με την παρατηρούμενη αύξηση της μέσης απόκλισης και της διασποράς στην τιμή της πρωτεύουσας απόστασης.

Πρωτεύον Σημείο

Στον έλεγχο του πρωτεύοντος σημείου, ο κρίσιμος παράγοντας είναι ο προσανατολισμός των αξόνων *shift* και *tilt*. Ο προσανατολισμός αυτός εξαρτάται από τη θέση περιστροφής του φακού, η οποία, μεταβαλλόμενη, επιφέρει μία συστηματική μετατόπιση του πρωτεύοντος σημείου στο επίπεδο της εικόνας. Οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου στην ουδέτερη θέση λήψης παρουσιάζονται στη συνέχεια για κάθε προσανατολισμό των αξόνων *shift* και *tilt* που εξετάστηκε.

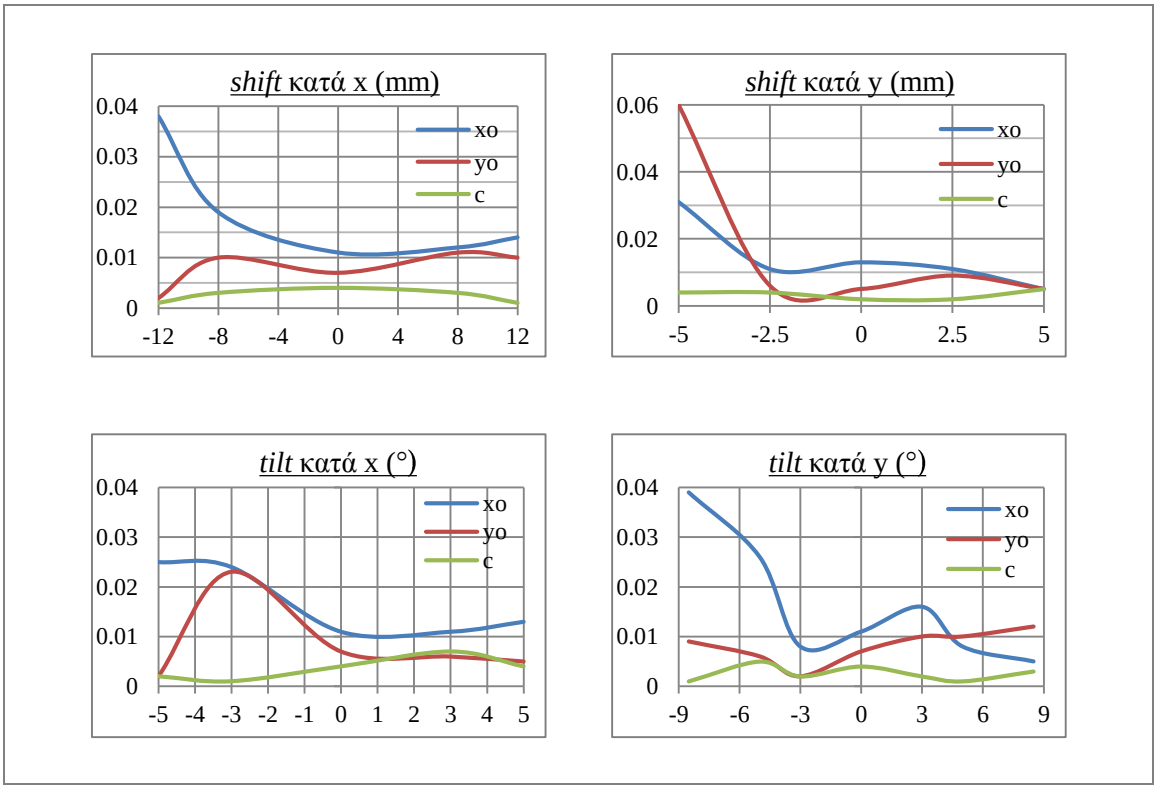
Πίνακας 4.2: Το πρωτεύον σημείο στην ουδέτερη θέση κίνησης για μεταβαλλόμενο προσανατολισμό των αξόνων *shift* και *tilt*

Θέση Αξόνων		Μέση Τιμή (mm)	Μέση Απόκλιση (mm)	Μέγιστο Εύρος Τιμών (mm)	Αριθμός Λήψεων
α	xo	17.892	0.040	0.147	21
	yo	12.268	0.010	0.040	
β	xo	17.567	0.047	0.125	18
	yo	11.831	0.030	0.138	
γ	xo	18.320	0.009	0.024	3
	yo	11.889	0.010	0.026	

Η περιστροφή του φακού έχει εμφανή επίπτωση στον ορισμό του πρωτεύοντος σημείου επιβεβαιώνοντας την απόκλιση του οπτικού άξονα από τον άξονα μηχανικής ισορροπίας. Στις θέσεις (α) και (β), η αβεβαιότητα καλύπτει τις επιδράσεις λόγω περιστροφής, αλλά και όλων των άλλων κινήσεων που ελέγχθηκαν. Στη θέση (γ), η θέση του πρωτεύοντος σημείου έχει υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια, αλλά μικρή αξιοπιστία (3 λήψεις).

4.1.2 Βαθμονόμηση *shift / tilt*

Ακολούθως της ουδέτερης θέσης, υπολογίστηκαν τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού για τις εικόνες που ελήφθησαν στις θέσεις *shift* και *tilt* του φακού. Οι αβεβαιότητες που υπολογίστηκαν σε κάθε θέση για τον προσδιορισμό των παραμέτρων βαθμονόμησης παρατέθηκαν σε ενιαίο διάγραμμα ανά είδος και διεύθυνση κίνησης. Σε σχέση με την ουδέτερη θέση, παρατηρείται γενικά αύξηση στην αβεβαιότητα της πρωτεύουσας απόστασης, χωρίς αυτό να γίνεται ανάλογα με το ποσό της κίνησης. Η αβεβαιότητα στη θέση του πρωτεύοντος σημείου παραμένει στα ίδια επίπεδα.



Σχήμα 4.1: Οι αποκλίσεις των παραμέτρων εσωτερικού προσανατολισμού από τις υπολογισμένες μέσες τιμές για όλο το εύρος της εξεταζόμενης κίνησης

Παρατηρείται ότι η απόκλιση της x-συνιστώσας του πρωτεύοντος σημείου είναι σχεδόν για όλο το εύρος της κίνησης μεγαλύτερη της απόκλισης για την y-συνιστώσα. Η αβεβαιότητα της πρωτεύουσας απόστασης είναι κάτω από 0.05mm (8 pixel).

4.1.3 Διαγράμματα Διαστροφών

Κατά τη μετακίνηση του πρωτεύοντος σημείου λόγω κίνησης του φακού μεταβάλλεται η τιμή της μέγιστης ακτινικής απόστασης. Θεωρείται ότι η μετατόπιση του πρωτεύοντος σημείου κατά την κλίση του φακού δεν υπερβαίνει την αντίστοιχη μέγιστη μετατόπιση λόγω *shift*. Τότε, οι νέες μέγιστες ακτινικές αποστάσεις σχεδιασμού θα είναι οι παρακάτω:

Πίνακας 4.3: Η διαφοροποίηση της μέγιστης ακτινικής απόστασης λόγω κίνησης του φακού

	Ουδέτερη Θέση	Μέγιστο shift κατά x	Μέγιστο shift κατά y
Ακτινική Απόσταση (mm)	22	32	30

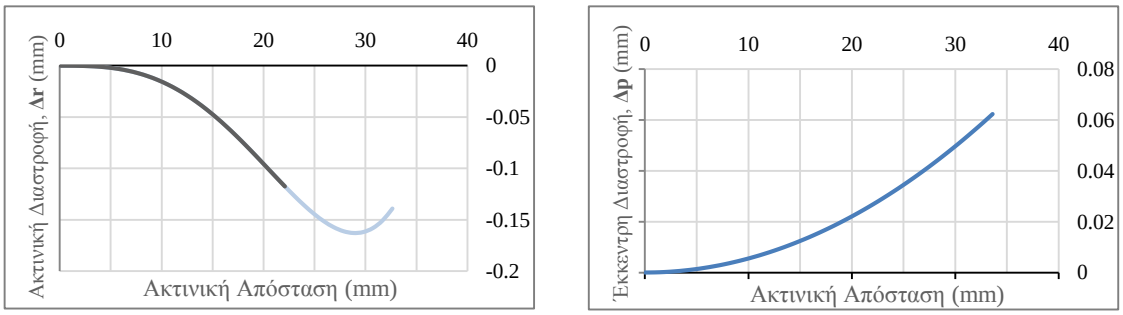
Οι τιμές που υπολογίστηκαν για τις παραμέτρους της ακτινικής (K_1,K_2) και έκκεντρης (P_1,P_2) διαστροφής ήταν ίδιες για κάθε κίνηση του φακού. Αυτό καθιστά δυνατή την απεικόνιση κάθε τύπου διαστροφής σε κοινό διάγραμμα για όλες τις θέσεις κίνησης του φακού με χρήση των σχέσεων:

$$\Delta r(r) = K_1 r^3 + K_2 r^5 \tag{4.1}$$

$$\Delta p(r) = (P_1^2 + P_2^2)^{1/2} r^2 \tag{4.2}$$

Η πληροφορία διαστροφής για κάθε θέση κίνησης δίνεται από τα διαγράμματα αρκεί να είναι προσεγγιστικά γνωστή η θέση του πρωτεύοντος σημείου. Για τις θέσεις *shift*, η θέση του πρωτεύοντος σημείου είναι ουσιαστικά γνωστή, αλλά στην περίπτωση *tilt* εκκρεμεί ο προσδιορισμός της απόστασης του κέντρου περιστροφής του φακού από τον αισθητήρα.

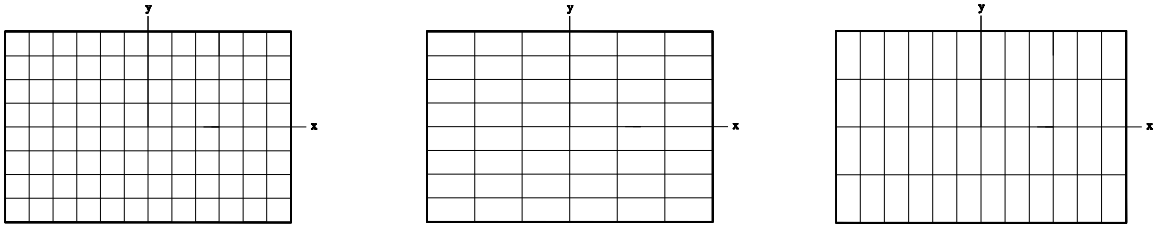
Η ακτινική διαστροφή του φακού που παρατηρείται παρακάτω καλείται κυματοειδούς τύπου, λόγω της αλλαγής στη μονοτονία της καμπύλης. Προβλέπεται από το σχεδιασμό του φακού, ώστε να ανακόπτεται η αύξηση της διαστροφής σε μεγάλες ακτινικές αποστάσεις και δεν είναι ασυνήθιστη σε ευρυγώνιους *retrofocus* φακούς, όπως ο εξεταζόμενος (Hönlinger & Nasse, 2009). Γενικά, οι παρατηρούμενες τιμές διαστροφών που παρατηρούνται κυμαίνονται εντός αποδεκτών ορίων.



Σχήμα 4.2: Καμπύλες ακτινικής και ασύμμετρης διαστροφής του φακού

4.1.4 Αφινικές Παραμορφώσεις

Οι αφινικές παραμορφώσεις εικονοστοιχείου σχετίζονται με σφάλματα του αισθητήρα της μηχανής και όχι με τον φακό. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί μία παρατήρηση για την παραμόρφωση κλίμακας και πώς αυτή διαφοροποιείται σε συνθήκες κλίσης του φακού ως προς τον αισθητήρα. Η μεταβολή της σταθεράς του φακού κατά τη διεύθυνση κλίσης ισοδυναμεί με μεταβολή της κλίμακας της απεικόνισης μόνο κατά τη διεύθυνση αυτή. Έτσι, η εικόνα με βάση την διαφοροποίηση στον παράγοντα κλίμακας παρουσιάζει διαφορετική μορφή που εξαρτάται από τη διεύθυνση κλίσης.



Εικόνα 4.1: Επίδραση της κλίσης του φακού στην φωτογραφική απεικόνιση. Στην πρώτη περίπτωση η απεικόνιση είναι συμμετρική (χωρίς *tilt*), στην δεύτερη έχει εφαρμοσθεί *tilt* κατά την οριζόντια διεύθυνση (κατά x) και στην τρίτη κατά την κατακόρυφη (κατά y)

Η ορθότητα της παραπάνω θεώρησης μπορεί να ελεγχθεί με βάση τις τιμές κλιμάκων που προσδιορίστηκαν κατά τη βαθμονόμηση για τις διάφορες γωνίες κλίσης του φακού. Η θεωρητική γωνία κλίσης δεν επαληθεύεται κάθε φορά με την ίδια ακρίβεια. Ωστόσο, είναι σαφής η διαφορά κλίμακας ανά διεύθυνση της εικόνας ανάλογα με τη γωνία κλίσης.

Πίνακας 4.4: Λόγοι κλίμακας (x/y) εικόνων με *tilt*.

Η γωνία κλίσης (θ) προκύπτει στην περίπτωση οριζόντιας κίνησης (κατά x) θ=arctan(λ), ενώ για κλίση κατά την κατακόρυφη (κατά y), θ=arctan(1/λ)

tilt	κατά x				κατά y					
	-3	+3	-5	+5	-3	+3	-5	+5	-8.5	+8.5
λ	0.9987	0.9985	0.9966	0.9965	1.0012	1.0011	1.0033	1.0035	1.0109	1.0096
θ°	2.865	3.086	4.761	4.795	2.806	2.688	4.613	4.753	8.402	7.887

4.2 Αυτοβαθμονόμηση με Συνόρθωση κατά Δέσμες

Στο στάδιο αυτό, ο υπολογισμός των στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού επετεύχθη με αυτοβαθμονόμηση. Ειδικότερα, κάθε τριάδα εικόνων συνορθώθηκε ως μπλοκ με τη μέθοδο της δέσμης και προσδιορίστηκαν οι παράμετροι ενδιαφέροντος (c,x_o,y_o), χωρίς να είναι εξ αρχής γνωστός ο εσωτερικός προσανατολισμός. Δύο τριάδες εικόνων (*shift* και *tilt*) εισήχθησαν στον ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό *Photomod* και για κάθε μία πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:

<u>Αποκατάσταση εσωτερικού προσανατολισμού</u>

Ως στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού ορίστηκαν τα ονομαστικά στοιχεία (c,x_o,y_o)~(24,0,0).

<u>Αποκατάσταση σχετικού προσανατολισμού των τριών εικόνων</u>

Σκοπεύθηκαν τα κοινά σημεία των τριών εικόνων. Περίπου τα μισά ορίστηκαν ως φωτοσταθερά για τη συνόρθωση του μοντέλου και τα υπόλοιπα αξιοποιήθηκαν για τον έλεγχο προσαρμογής του (σημεία ελέγχου).

Συνόρθωση μπλοκ

Το μπλοκ των εικόνων συνορθώθηκε με τη μέθοδο των δεσμών και τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού υπολογίστηκαν με αυτοβαθμονόμηση. Ελέγχθηκαν τα υπόλοιπα (εναπομένοντα σφάλματα) στα σημεία ελέγχου και υπολογίστηκε ο βαθμός ελευθερίας της συνόρθωσης.

Η συνόρθωση κατά δέσμες ολοκληρώθηκε κατά τα παραπάνω για τις θέσεις *shift* (8mm κατά x) και tilt (3° κατά y). Ο αριθμός των σκοπευθέντων σημείων και ο βαθμός ελευθερίας κάθε συνόρθωσης, συνυπολογίζοντας ως αγνώστους και τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού των λήψεων, ήταν:

Πίνακας 4.5:Διαχείριση ορατών σημείων αναφοράς για σχετικό προσανατολισμό των εικόνων, συνόρθωση και έλεγχο του μπλοκ.

	Σκοπευθέντα Σημεία	Φωτοσταθερά	Σημεία Ελέγχου	r
shift	120	60	60	159
tilt	108	62	48	213

Τα σκοπευθέντα σημεία ήταν πολλά λόγω του μεγάλου αριθμού σημείων αναφοράς στο πεδίο ελέγχου και της μεγάλης επικάλυψης των εικόνων. Συνεπώς, ο βαθμός ελευθερίας της συνόρθωσης προκύπτει μεγάλος ενισχύοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 4.6: Εναπομένοντα σφάλματα στα σημεία ελέγχου
για εδαφοψηφίδα 1.42mm και μέση κλίμακα φωτογραφιών 1:210

	shift			*tilt*		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Μέση Απόκλιση (m)	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001
RMS (m)	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001
Μέγιστη Απόκλιση(m)	0.002	0.003	0.003	0.001	0.003	0.003

Τα εναπομένοντα σφάλματα στα σημεία ελέγχου καταδεικνύουν υψηλή ακρίβεια προσαρμογής του μπλοκ των εικόνων στο γεωδαιτικό δίκτυο του πεδίου ελέγχου. Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά για τη μετρητική αξία των σχετικών εικόνων.

4.3 Σύγκριση Μεθόδων

Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων βαθμονόμησης συγκρίνονται με βάση τις παραμέτρους εσωτερικού προσανατολισμού που υπολογίστηκαν για τις ίδιες εικόνες.

Πίνακας 4.7: Συγκριτικά αποτελέσματα ανάλογα με τη μέθοδο βαθμονόμησης του φακού

	shift			*tilt*		
	x_0	y_0	c	x_0	y_0	c
calibration ccd	25.902	12.246	24.199	17.994	13.208	24.238
photomod	25.893	11.988	24.195	17.975	12.648	24.237
ΔΙΑΦΟΡΑ	0.009	0.258	0.004	0.019	0.560	0.001

Όπως φαίνεται, η x-συνιστώσα του πρωτεύοντος σημείου και η πρωτεύουσα απόσταση παρουσιάζουν μικρότερες αποκλίσεις απ' ότι η y-συνιστώσα του πρωτεύοντος σημείου. Δεδομένου ότι η διεθνής εμπειρία ανιχνεύει την εξάρτηση της παραμέτρου αυτής από τις υπόλοιπες, προτείνεται στο μέλλον η βαθμονόμηση του φακού με περιστροφή της μηχανής κατά 90° περί τον άξονα λήψης (Wester-Ebbinghaus, 1981).

5. Συμπεράσματα

Με αφορμή τη βαθμονόμηση του αρχιτεκτονικού φακού *Canon TS-E 24 mm II*, σημειώθηκαν τα πλεονεκτήματα που παρέχουν οι φακοί τέτοιου τύπου σε απλές φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Αναφέρθηκαν οι αρχές λειτουργίας των αρχιτεκτονικών φακών και η επίδραση της κίνησής τους στα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού. Για κλίση του φακού ως προς τον αισθητήρα, δείχτηκε ότι η κλίμακα της τελικής εικόνας δεν είναι ενιαία, αλλά μεταβάλλεται κατά τη διεύθυνση της κίνησης ανάλογα με τη γωνία κλίσης, ενώ καθέτως της κίνησης παραμένει σταθερή. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη επεξεργασίας της εικόνας, ώστε η εν λόγω αφινική παραμόρφωση να μηδενιστεί. Ένα άλλο θέμα που χρήζει προσοχής στην περίπτωση κλίσης του φακού είναι ο προσδιορισμός του κέντρου περιστροφής, όπως αυτό ορίστηκε παραπάνω. Η βαθμονόμηση καταδεικνύει σταθερότητα του εξεταζόμενου φακού και συνηγορεί ως προς τη δυνατότητα μετρητικής εκμετάλλευσής του, παρά τους έως σήμερα αντίθετους ισχυρισμούς.

6. Βιβλιογραφία

Hönlinger, B., Nasse, H.H., 2009: ‘Distortion’.Carl Zeiss,Camera Lens Division,pp.11-18.

Jacobson, R. E., Ray, S. F., Attridge, G., Axford, N. A., 2000: ‘The Manual of Photography’. 9th edn., Focal Press, Oxford, ISBN 0-8212-2184-1, pp.48-50.

Meydenbauer, A., 1912: ‘Handbuch der Meßbildkunst in Anwendung auf Baudenkmäler und Reiseaufnahmen’. Knapp Verlag, Halle.

Rieke-Zapp, D. H., Ebert, A., 2009: ‘Photogrammetrie mit Shift und Tilt –Nahbereich-sanwendungen aus den Geowissenschaften’. Geomatik Schwiz; 107,9; pp. 452-457.

Σαμαρά, Α., 2004: ‘Διερεύνηση Βαθμονόμησης Ψηφιακής Μηχανής’. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, σελ. 10, 17-27.

Wester-Ebbinghaus, W., 1981: ‘Zur Verfahrensentwicklung in der Nahbereichs-photogrammetrie’. PhD Dissertation, Institut für Photogrammetrie der Universität, 101 pages.