

# ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΑΒΒÉ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ CNC

Ε. Πάλλα και Γ.-Χ. Βοσνιάκος

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου  
e-mail: vosniak@central.ntua.gr

## Περίληψη

Η συνολική ογκομετρική ακρίβεια μιας εργαλειομηχανής περιλαμβάνει πληροφορίες για την σχετική θέση εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου σε κάθε τυχαίο σημείο του χώρου εργασίας, με την μορφή αλληλεπιδρώντων σφαλμάτων. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι συνιστώσες του ογκομετρικού σφάλματος και οι δυνατότητες μέτρησής του με εξοπλισμό μετρολογίας εργαλειομηχανών τύπου laser doppler. Διερευνάται η αλληλοσυσχέτιση των σφαλμάτων και αναπτύσσεται η μεθοδολογία για την εκμετάλλευση της επίδρασης των γωνιακών σφαλμάτων μέσω του απορρέοντος σφάλματος Abbé.

*Λέξεις-Κλειδιά: εργαλειομηχανές CNC, ογκομετρικό σφάλμα, σφάλμα Abbé, laser*

## Abstract

The total volumetric machine tool accuracy includes information on the position of the tool tip with respect to the workpiece in any point of the work volume, given in the form of interacting errors. In this paper, the components of the volumetric error and the procedure of their measurement using laser doppler equipment have been studied. We focused in the interrelationship of errors and developed a method for assessing the effect of angular errors through their resulting Abbé error.

*Keywords: CNC machine tools, volumetric error, Abbé error, laser*

## 1. Εισαγωγή

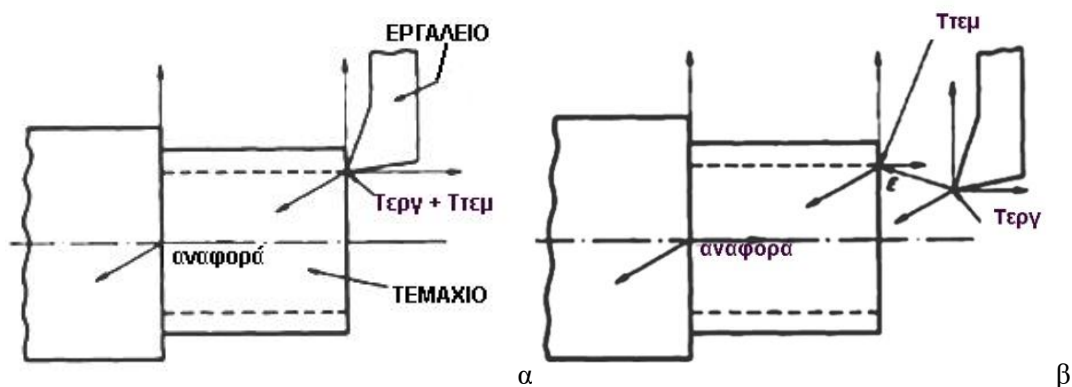
Η μετρολογία εργαλειομηχανών έχει σκοπό την καταγραφή της ικανότητάς τους για επίτευξη δεδομένων ανοχών του κατεργαζόμενου τεμαχίου και την αντιστάθμιση των μετρούμενων σφαλμάτων μέσω hardware / software. Η ακρίβεια μπορεί να οριστεί ως ο βαθμός συμφωνίας της μορφής και των διαστάσεων του κατεργασμένου τεμαχίου με αυτές που απαιτούνταν. Το σφάλμα ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της πραγματικής απόκρισης της μηχανής σε μία εντολή που δίδεται σύμφωνα με το αποδεκτό πρωτόκολλο της λειτουργίας της μηχανής και της απόκρισης σε αυτή την εντολή που αναμενόταν σύμφωνα με το πρωτόκολλο αυτό. Διακρίνονται (Ni, 1997): α) γεωμετρικά σφάλματα της δομής της μηχανής και των μερών της, β) κινηματικά σφάλματα, γ) σφάλματα που εισάγονται από θερμικές παραμορφώσεις, δ) σφάλματα που προκαλούνται από τις κοπτικές δυνάμεις, ε) σφάλματα λόγω της μη-ομοιογένειας των υλικών, στ) σφάλματα που οφείλονται στην συναρμολόγηση της μηχανής, ζ) σφάλματα οργάνων, η) σφάλματα λόγω της φθοράς των εργαλείων, θ) σφάλματα συγκράτησης, ι) σφάλματα λόγω του συστήματος αριθμητικού ελέγχου, (σερβομηχανισμού, προφίλ και παρεμβολής. Τα Ε. Πάλλα, Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Εκμετάλλευση σφαλμάτων Abbé στην εκτίμηση του ογκομετρικού σφάλματος εργαλειομηχανών CNC

παραπάνω σφάλματα ομαδοποιούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: γεωμετρικά-κινηματικά, θερμικά και αυτά που οφείλονται στις δυνάμεις της κατεργασίας. Περισσότερο από το 50% του ολικού σφάλματος κάθε εργαλειομηχανής οφείλεται στις δύο πρώτες κατηγορίες (Weck et al., 1995).

Τα γεωμετρικά σφάλματα είναι αυτά που υπάρχουν στην μηχανή σαν αποτέλεσμα του βασικού σχεδιασμού της. Ενσωματώνονται στη μηχανή κατά την διάρκεια της συναρμολόγησης αλλά εμπεριέχονται και στα στοιχεία που συνέθεσαν την μηχανή. Εκδηλώνονται με διαφορετικές μορφές, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι το σφάλμα γραμμικής μετατόπισης, ευθύτητας, επιπεδότητας, γωνίας κλίσης ατράκτου, καθετότητας, και αξονικής χάρης του κοχλία κίνησης. Η επίδραση των γεωμετρικών σφαλμάτων είναι η δημιουργία σφαλμάτων καθετότητας και παραλληλίας μεταξύ των κινούμενων μερών της εργαλειομηχανής. Παρουσιάζονται σαν σφάλματα θέσης και προσανατολισμού του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο (Ramesh et al, 2000).

Η ξεχωριστή τιμή για κάθε σφάλμα δεν μπορεί να είναι άμεσα χρήσιμη διότι δεν παρέχει καμία πληροφορία για το σφάλμα σε ένα τυχαίο σημείο του τρισδιάστατου χώρου εργασίας, για αυτό κατά τη φάση της αντιστάθμισης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση όλων αυτών των σφαλμάτων κι όχι να αναλύεται κάθε ένα μεμονωμένα. Υπάρχουν πέντε μέθοδοι μοντελοποίησης των σφαλμάτων που επιτρέπουν αντιστάθμιση, αλλά μόνο το μοντέλο της μεθόδου Σύνθεσης Σφάλματος προσφέρει μία συνολική απεικόνιση του σφάλματος και καθιστά δυνατή τη συνολική διόρθωση των σφαλμάτων (Ramesh et al, 2000).

Στη μέθοδο Σύνθεσης Σφάλματος μοντελοποιούνται τα γεωμετρικά και θερμικά σφάλματα και παρουσιάζεται το ολικό σφάλμα σε αντιστοιχία με τα επιμέρους σφάλματα. Το σφάλμα αυτό ονομάζεται ογκομετρικό σφάλμα και ουσιαστικά δίνει την δυνατότητα της καθολικής εποπτείας μιας συνισταμένης αντί για την ανεξάρτητη παρατήρηση των επιμέρους συνιστωσών. Το κρίσιμο κατά την κατεργασία είναι το κοπτικό εργαλείο- σε κάθε κίνηση- να βρίσκεται στην επιθυμητή θέση ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Συνεπώς, όταν συντίθενται όλα τα σφάλματα της εργαλειομηχανής σε ένα συνολικό με τη μέθοδο σύνθεσης σφαλμάτων, ενδιαφέρει να υπάρχει μία σχέση που να εκφράζει το σχετικό σφάλμα ε ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το προς κατεργασία τεμάχιο, βλ. Σχήμα 1 για κατεργασία σε τόρνο.



Σχήμα 1: Σχετική θέση εργαλείου - τεμαχίου (α) ιδανική κοπή (β) πραγματική κοπή

Ε. Πάλλα, Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Εκμετάλλευση σφαλμάτων Abbé στην εκτίμηση του ογκομετρικού σφάλματος εργαλειομηχανών CNC

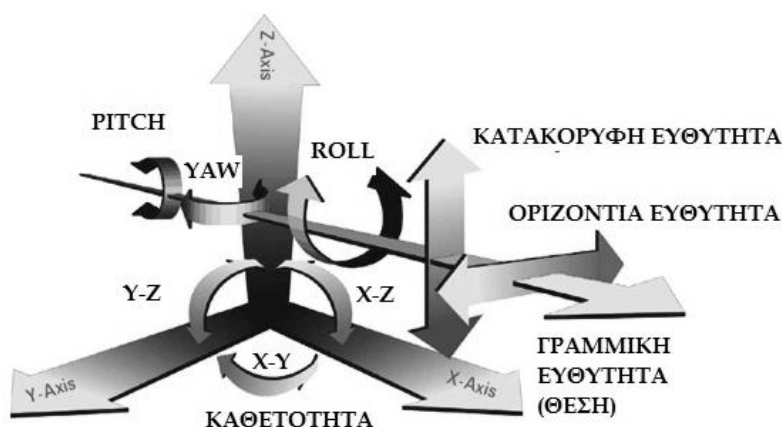
4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Πρώιμες ερευνητικές εργασίες μελέτησαν τα σφάλματα των εργαλειομηχανών θεμελιωδώς ως προς την γεωμετρία τους και δημιούργησαν τα σχετικά μοντέλα χρησιμοποιώντας τριγωνομετρικές σχέσεις. Ο Schultschik (1977) διατύπωσε έναν μαθηματικό τύπο για την σύνθεση των σφαλμάτων βασισμένο σε μία διανυσματική απεικόνιση του ογκομετρικού σφάλματος. Γενικά μέχρι το 1980 οι περισσότερες μεθοδολογίες χρησιμοποιούσαν αναλυτική γεωμετρία, διανυσματική απεικόνιση και πίνακες σφαλμάτων. Η πλειονότητα των μέχρι το 1986 τεχνικών μπορεί εν τέλει να καταλήγει σε ένα συνολικό μοντέλο σφάλματος που έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στην αντιστάθμιση των σφαλμάτων των εργαλειομηχανών, όμως υστερεί στην διατύπωση ενός απλού και γενικού μοντέλου που θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε εργαλειομηχανή οποιασδήποτε διάταξης (Eman et al, 1987).. Ο Portman εισήγαγε τις αρχές της κινηματικής στερεού σώματος για να οδηγηθεί στην έκφραση του γεωμετρικού σφάλματος (Reshetov and Portman, 1988). Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν γενικές μεθοδολογίες που αφορούσαν στα σφάλματα που προέρχονται από την γεωμετρία και τη σχετική κίνηση μεταξύ των αρθρώσεων και διατυπώθηκαν έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε πολυαξονική εργαλειομηχανή (Donmez et al., 1986). Αργότερα, θεωρώντας πως οι συνιστώσες του συνολικού σφάλματος είναι όλες γραμμικές κατασκευάστηκε ένα παραμετρικό μοντέλο σφάλματος (Ferreira and Liu, 1993). Πιο πρόσφατα, τα 18 γεωμετρικά σφάλματα μίας μικροεργαλειομηχανής μοντελοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας την μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων (Lee et al., 2006).

Στη συνέχεια της εργασίας παρουσιάζεται προσπάθεια να γίνει εκμετάλλευση της επίδρασης των γωνιακών σφαλμάτων στα αποτελέσματα των μετρήσεων γραμμικών σφαλμάτων θέσης για τον προσδιορισμό των συνιστωσών του συνολικού σφάλματος.

### 3. Κατηγορίες σφαλμάτων

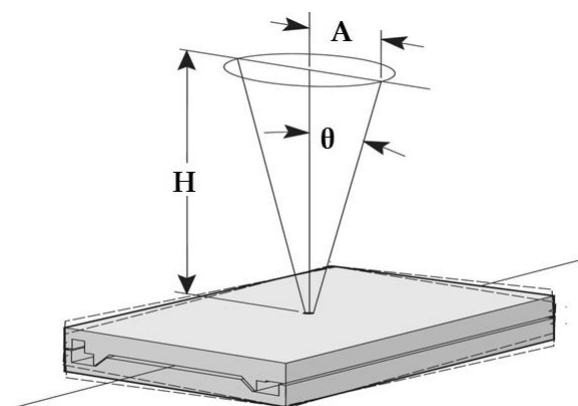
Η παρούσα ανάλυση αφορά τριαξονικό κάθετο κέντρο κατεργασιών για το οποίο υπάρχουν 21 παράγοντες γεωμετρικών σφαλμάτων (Okafor et al, 2000): 3 σφάλματα θέσεως (μετατόπισης), 6 σφάλματα ευθύτητας (3 οριζόντια ευθύτητας και 3 κάθετη ευθύτητας), 9 γωνιακά σφάλματα και 3 σφάλματα καθετότητας (Σχήμα 2).



Σχήμα 2 : Συμβολική απεικόνιση των παραγόντων σφάλματος της μελετώμενης εργαλειομηχανής

Ε. Πάλλα, Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
 Εκμετάλλευση σφαλμάτων Abbé στην εκτίμηση του ογκομετρικού σφάλματος εργαλειομηχανών CNC

Οι παράγοντες του ογκομετρικού σφάλματος της μηχανής είναι θεωρητικά ανεξάρτητοι, αλλά υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των σφαλμάτων αυτών στην πρακτική της μέτρησης τους. Κάθε σφάλμα γωνιακής περιστροφής προκαλεί και σφάλμα θέσης σε κάθε μετρούμενο σημείο. Αυτό, λοιπόν, σημαίνει πως το «καθαρό» σφάλμα θέσης, δηλαδή χωρίς την επίδραση των γωνιακών σφαλμάτων, δεν είναι αυτό που εμφανίζεται άμεσα με την μέτρηση κατά μήκος του άξονα της διαδρομής. Με τα επίπεδα ακριβείας που επιτυγχάνουν οι σύγχρονες εργαλειομηχανές, τις περισσότερες φορές είναι αναγκαστικό να μιλάμε σε επίπεδα ογκομετρικού σφάλματος, διότι όλα τα γεωμετρικά σφάλματα είναι τόσο μικρά που η ανεξάρτητη μελέτη τους δεν δίνει επιπλέον πληροφορίες.



Σχήμα 3 : Σφάλμα Abbé (A) λόγω μετατόπισης Abbé (H) και γωνιακού σφάλματος  $\theta$

Η ουσιαστική επίπτωση που έχουν τα γωνιακά σφάλματα είναι το απορρέον σφάλμα Abbé, το οποίο επηρεάζει τη γραμμική ακρίβεια θέσης. Το γωνιακό σφάλμα σε συνδυασμό με την υπάρχουσα απόσταση μεταξύ του σημείου που γίνεται η μέτρηση και του στοιχείου που χρησιμοποιείται ως αναφορά για τον καθορισμό της ακρίβειας (μετατόπιση Abbé) προκαλεί γραμμικό σφάλμα στον άξονα της κίνησης, βλ. Σχήμα 3.

Μετατόπιση Abbé ίση με 1 m, κάτι που δεν είναι ασυνήθιστο σε μεγάλες εργαλειομηχανές, και γωνιακό σφάλμα  $0,00027^\circ$  μπορεί να προκαλέσει έως και 5μm σφάλμα θέσεως. Η επιφάνεια αναφοράς για τα σφάλματα θέσης εξαρτάται από τη δομή της μηχανής, τον τρόπο της σχετικής κίνησης των αξόνων και το χώρο εργασίας της. Το σφάλμα Abbé μπορεί να γίνει και εργαλείο για τον προσδιορισμό των σφαλμάτων μίας εργαλειομηχανής.

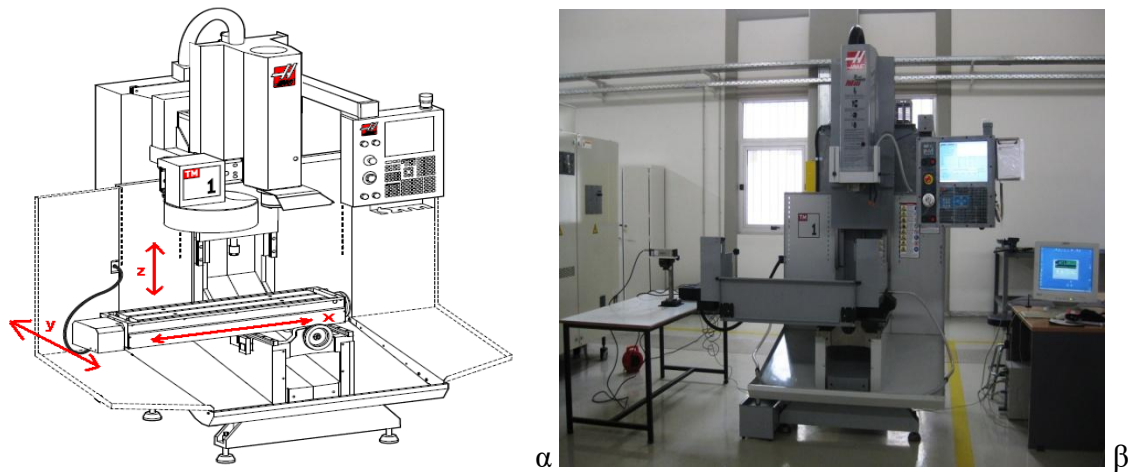
#### 4. Διαδικασία και αποτελέσματα μετρήσεων

##### 4.1 Εργαλειομηχανή

Η κατανόηση της δομής της μηχανής είναι απαραίτητη αφενός για να αναγνωρισθούν οι πηγές των σφαλμάτων και η επίδραση αυτών στην λειτουργία της μηχανής και αφετέρου για να εντοπισθούν οι πηγές της μετατόπισης Abbé.

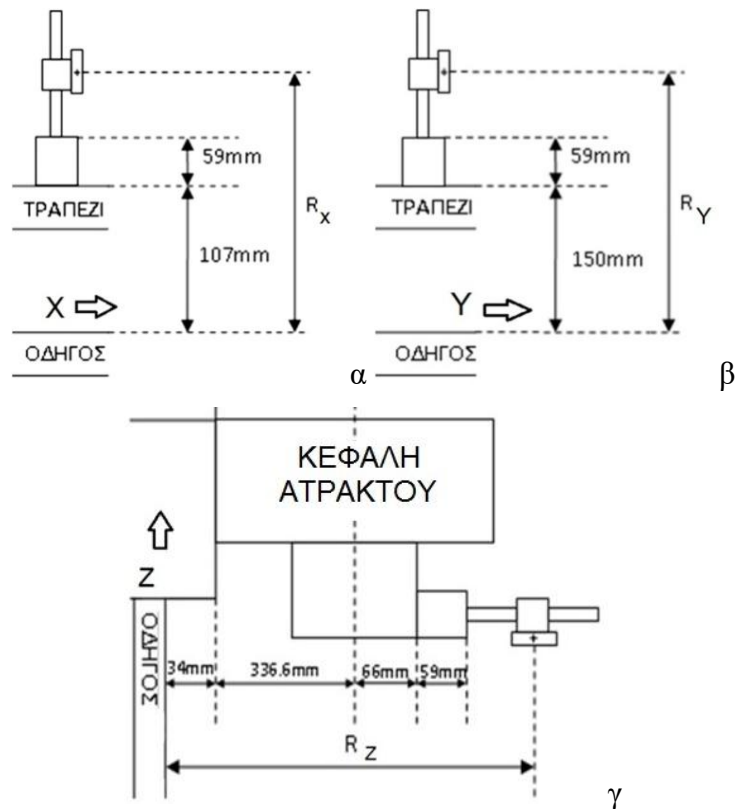
Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στο εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ, σε κέντρο κατεργασιών HAAS TM -1. Η κίνηση κατά x και y υλοποιείται από το τραπέζι της εργαλειομηχανής δηλαδή από το προς κατεργασία τεμάχιο, ενώ η κίνηση κατά z από την κεφαλή της ατράκτου, δηλαδή από το κοπτικό εργαλείο (Σχήμα 4).

Ε. Πάλλα, Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Εκμετάλλευση σφαλμάτων Abbé στην εκτίμηση του ογκομετρικού σφάλματος εργαλειομηχανών CNC



Σχήμα 4: Η μετρηθείσα μηχανή (α) συγκρότηση και άξονες (β) Μετρητική διάταξη

Το τραπέζι κινείται σε δύο παράλληλους οδηγούς κατά μήκος του άξονα  $y$  και η επιφάνεια του είναι σε απόσταση 150mm από αυτούς, βλ. Σχήμα 5(α). Πάνω από τους οδηγούς για την κίνηση  $y$  βρίσκονται δύο παράλληλοι οδηγοί κατά μήκος του άξονα  $x$ , δηλαδή κάθετα στους προηγούμενους. Η επιφάνεια του τραπεζιού απέχει 107mm από αυτούς, βλ. Σχήμα 5(β). Η κεφαλή της ατράκτου κινείται επίσης πάνω σε δύο παράλληλους οδηγούς κάθετα στο τραπέζι. Η απόσταση της επιφάνειας των οδηγών από τον άξονα της ατράκτου είναι 370.6 mm, βλ. Σχήμα 5(γ).



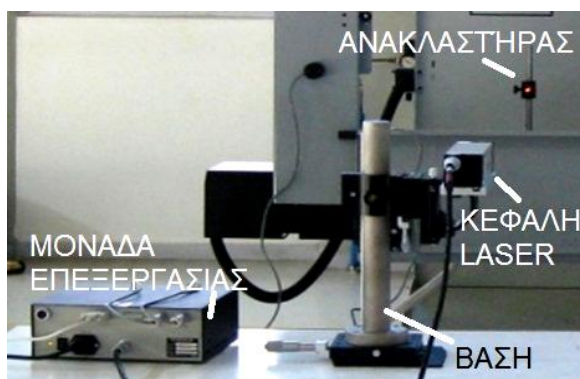
Σχήμα 5: Μετατόπιση Abbé για τη μετρηθείσα μηχανή (α) άξονας  $x$  (β) άξονας  $y$  (γ) άξονας  $z$

Ε. Πάλλα, Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Εκμετάλλευση σφαλμάτων Abbé στην εκτίμηση του ογκομετρικού σφάλματος εργαλειομηχανών CNC

Η μετατόπιση Abbé δημιουργείται από την απόσταση μεταξύ των οδηγών πάνω στους οποίους κινείται το τραπέζι ή η άτρακτος της μηχανής και του κατόπτρου όπου γίνονται οι μετρήσεις, με αποτέλεσμα κάποια γωνιακά σφάλματα να επιβαρύνουν το αντίστοιχο γραμμικό. Το καθαρό σφάλμα θέσης εμφανίζεται στο επίπεδο των οδηγών, ενώ το γραμμικό σφάλμα που μετράται αλλοιώνεται από τα γωνιακά σφάλματα εξαιτίας της μετατόπισης Abbé. Στο Σχήμα 5 ορίζεται η μετατόπιση Abbé για κάθε άξονα της μηχανής.

#### 4.2 Μετρητικός εξοπλισμός

Για την εργασία χρησιμοποιήθηκε σύστημα μέτρησης μετατοπίσεων με laser MCV-500 της Optodyne Inc. Βασίζεται στη χρήση ηλεκτρο-οπτικής συσκευής η οποία ανιχνεύει την μεταβολή σε μία συχνότητα laser, που προκαλείται από ένα κινούμενο στόχο λόγω του φαινομένου Doppler (Βοσνιάκος et al, 2006). Τα βασικά στοιχεία του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 1. Συμπεριλαμβάνονται αισθητήρες θερμοκρασίας και πίεσης του περιβάλλοντος για αντιστάθμιση συνθηκών μέτρησης.



Εικόνα 1: Το σύστημα LDDM που χρησιμοποιήθηκε.

#### 4.3 Ανάλυση διαδικασίας μετρήσεων

Σκοπός είναι να γίνουν οι μετρήσεις με τέτοιον τρόπο ώστε να απομονωθούν: (α) το γραμμικό σφάλμα του άξονα x από το σφάλμα Abbé που αντιστοιχεί στο γωνιακό σφάλμα για δεδομένη μετατόπιση Abbé στον άξονα z (μέτρηση  $\Delta x$ , pitch  $\epsilon_{yx}$ ), (β) το γραμμικό σφάλμα του άξονα y από το σφάλμα Abbé που αντιστοιχεί στο γωνιακό σφάλμα για δεδομένη μετατόπιση Abbé ορισμένη στον άξονα z (μέτρηση  $\Delta y$ , pitch  $\epsilon_{xy}$ ) και (γ) το γραμμικό σφάλμα του άξονα z από το σφάλμα Abbé που αντιστοιχεί στο γωνιακό σφάλμα για δεδομένη μετατόπιση Abbé ορισμένη στον άξονα y (μέτρηση  $\Delta z$ , pitch  $\epsilon_{xz}$ ).

Για να απομονωθεί το pitch  $\epsilon_{yx}$ , βλ. Σχήμα 8, ενώ μετράται το γραμμικό σφάλμα κατά x χρειάζονται δυο μετρήσεις κατά μήκος του άξονα x με το τραπέζι σε σταθερή θέση y και το κάτοπτρο σε δύο διαφορετικά ύψη ώστε να επιτευχθούν δύο διαφορετικές μετατοπίσεις Abbé  $R_1$  και  $R_2$  όπου με R συμβολίζεται η συνολική απόσταση του κέντρου του κατόπτρου από την επιφάνεια των οδηγών. Κατά το δυνατόν πρέπει οι δυο μετρήσεις να εξασφαλίζουν μέγιστη διαφορά  $R_1-R_2$ . Αν δεν υπήρχε το γωνιακό σφάλμα pitch  $\epsilon_{yx}$  το laser μετά κάθε μετατόπιση του τραπέζιου θα μετρούσε μόνο το γραμμικό σφάλμα της μετατόπισης  $Dx$ . Αντ' αυτού, το laser μετράει μετατόπιση  $D_1$  επειδή το  $\epsilon_{yx}$  προσθέτει έναν ακόμη όρο στην μετρούμενη μετατόπιση, δηλαδή:  $R_1 \sin \epsilon_{yx}$ . Επειδή η γωνία pitch  $\epsilon_{yx}$  είναι πολύ μικρή δικαιολογείται να θεωρηθεί ότι  $\sin \epsilon_{yx} = \epsilon_{yx}$ , δηλαδή ισχύει:

Ε. Πάλλα, Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Εκμετάλλευση σφαλμάτων Abbé στην εκτίμηση του ογκομετρικού σφάλματος εργαλειομηχανών CNC

$$D_1 = D_x + R_1 \varepsilon_{yx} \quad (1)$$

Στην συνέχεια, αυξάνεται η απόσταση μεταξύ κατόπτρου και τραπεζιού από  $R_1$  σε  $R_2$ , και έτσι το laser μετρά απόσταση  $D_2$  για την οποία αναλόγως ισχύει:

$$D_2 = D_x + R_2 \varepsilon_{yx} \quad (2)$$

Παίρνοντας μετρήσεις σε σημεία του άξονα x με διαφορετικές μετατοπίσεις Abbé  $R_1$  και  $R_2$  το σύστημα των εξισώσεων (1) και (2) δίνει:

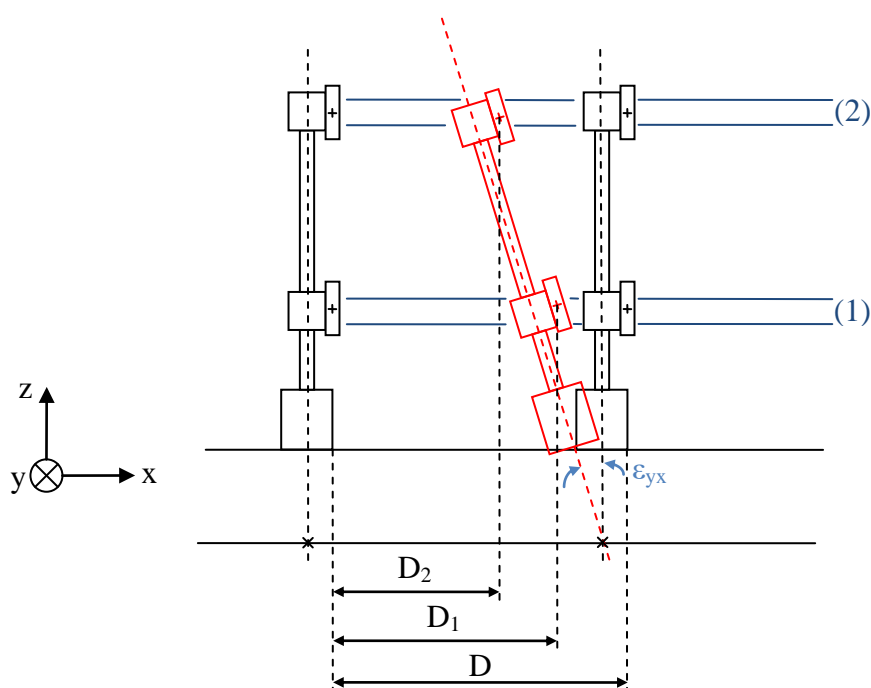
$$\varepsilon_{yx} = (D_1 - D_2) / (R_1 - R_2) \quad (3)$$

$$D_x = D_1 - R_1 \varepsilon_{yx} \quad (4)$$

Η έκφραση (3) ισχύει και για τον υπολογισμό των  $\varepsilon_{xy}$  και  $\varepsilon_{xz}$  με ανάλογη ερμηνεία των  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ , ενώ για τα  $D_y$  και  $D_z$  ισχύει :

$$D_y = D_1 - R_1 \varepsilon_{xy} \quad (5)$$

$$D_z = D_1 - R_1 \varepsilon_{xz} \quad (6)$$



Σχήμα 8: επίδραση γωνιακού σφάλματος  $\varepsilon_{yx}$  κατά την μετατόπιση στον άξονα x

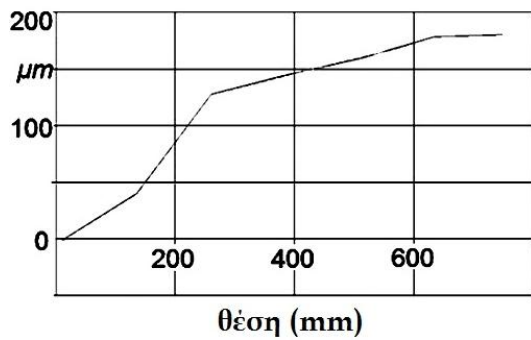
#### 4.4 Αποτελέσματα μετρήσεων και ανάλυση.

Κατά την πειραματική διαδικασία διεξάχθηκαν 2 σειρές μετρήσεων με 5 επαναλήψεις για κάθε σειρά κατά μήκος κάθε άξονα σύμφωνα με τις οδηγίες του ISO-230-2 (ISO, 1999). Ελήφθησαν μετρήσεις για 7, 6 και 7 σημεία κατά μήκος των αξόνων x,y και z αντίστοιχα. Από αυτές προέκυψαν οι τιμές του σφάλματος θέσης και του γωνιακού σφάλματος pitch βάσει των εξισώσεων (3)-(6). Στα Σχήματα 9 και 10 παρουσιάζονται ενδεικτικά χαρακτηριστικά αποτελέσματα.

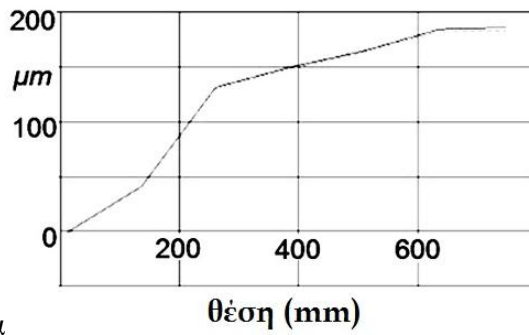
Ε. Πάλλα, Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Εκμετάλλευση σφαλμάτων Abbé στην εκτίμηση του ογκομετρικού σφάλματος εργαλειομηχανών CNC

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012



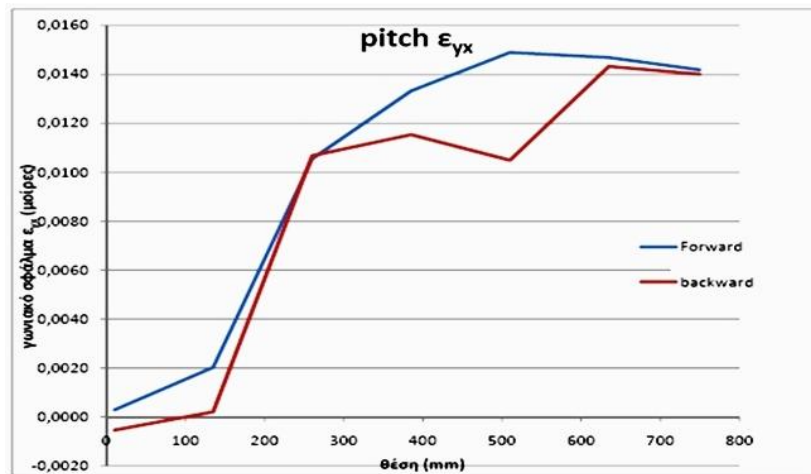


α

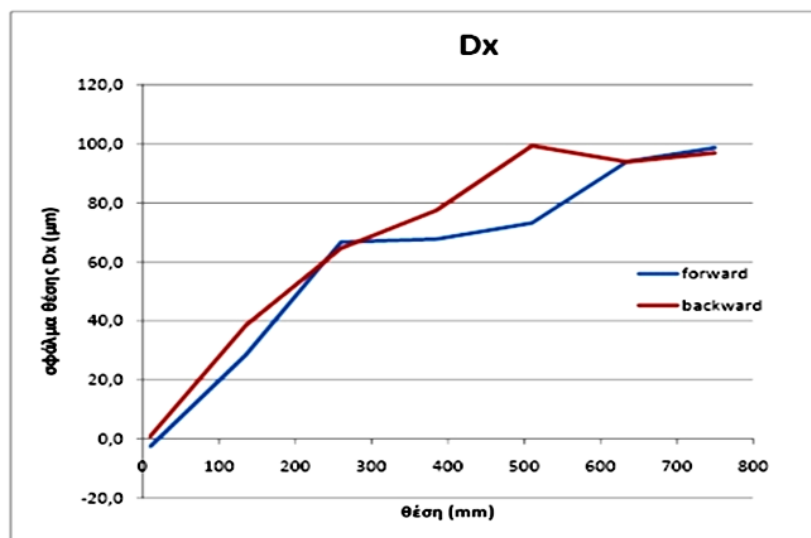


β

Σχήμα 9: μέσο σφάλμα θέσης κατά μήκος του άξονα x για τα δύο σετ μετρήσεων (α) και (β)



α



β

Σχήμα 10: Σφάλματα κατά μήκος του άξονα x σχετικά με τη μετατόπιση  $Abbi$  και για τις δύο κατευθύνσεις προσέγγισης (α) γωνιακό σφάλμα pitch  $\epsilon_{\gamma\chi}$  (β) σφάλμα θέσης  $Dx$

Το σφάλμα θέσης κυμαίνεται από  $-2.6\mu\text{m}$  έως  $99.3\mu\text{m}$ . Το εύρος αυτό ξεπερνά την ενδεικτική τιμή του κατασκευαστή για την ακρίβεια, η οποία είναι  $\pm 10\mu\text{m}$ . Παρατηρείται η τάση αύξησης του σφάλματος κατά μήκος του άξονα. Η δι-κατευθυντική ακρίβεια της πρώτης μέτρησης είναι  $185.3\mu\text{m}$  ενώ της δεύτερης  $193.1\mu\text{m}$ , η δε διαφορά  $7.8\mu\text{m}$

Ε. Πάλλα, Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Εκμετάλλευση σφαλμάτων Abbé στην εκτίμηση του ογκομετρικού σφάλματος εργαλειομηχανών CNC



δικαιολογείται από την ύπαρξη γωνιακού σφάλματος pitch. Το γωνιακό σφάλμα  $\varepsilon_{yx}$  κυμαίνεται από  $0.00028^\circ$  έως  $0,014894^\circ$ , και αυξάνεται κατά μήκος του άξονα. Γενικά, θεωρείται πως σφάλματα που κυμαίνονται έως τις  $0,0111^\circ$  έχουν ελέγξιμες επιπτώσεις στην εργαλειομηχανή (Weck et al, 1995).

Η μέτρηση αποκλειστικά των γραμμικών σφαλμάτων θέσης δεν μπορεί να αποτελέσει χαρακτηρίσει το ογκομετρικό σφάλμα της εργαλειομηχανής, αλλά. Παρόλα αυτά, προσδιορίστηκαν 6 από τις 21 συνιστώσες του ογκομετρικού σφάλματος που παρέχουν μια αρχική εικόνα για το μέγεθος του ογκομετρικού σφάλματος της εργαλειομηχανής.

Με βάση τις μετρήσεις και την ανάλυση τους μπορεί να ορισθεί μία υπο-περιοχή του όγκου εργασίας στην οποία η μηχανή λειτουργεί βέλτιστα. Για το κέντρο κατεργασιών που εξετάστηκε, στον άξονα x η περιοχή εκτείνεται από  $x=0\text{mm}$  ως  $x=-250\text{mm}$  με μέγιστο σφάλμα  $60\mu\text{m}$ . Στον άξονα y εκτείνεται από  $y=-200\text{mm}$  ως  $y=-304.800\text{mm}$  με μέγιστο σφάλμα  $20\mu\text{m}$ . Στον άξονα z εκτείνεται μεταξύ  $z=-405.779\text{mm}$  και  $z=-125\text{mm}$  με μέγιστο σφάλμα θέσης  $85\mu\text{m}$ .

## 5. Συμπεράσματα

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε αναφέρεται στη μέτρηση συνιστωσών του ογκομετρικού σφάλματος κέντρου κατεργασιών με τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- το γραμμικό σφάλμα θέσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το σφάλμα εξαιτίας της μετατόπισης Abbi
- είναι απαραίτητο να κατανοηθεί πλήρως η δομή κι η λειτουργία της μηχανής ώστε να εντοπισθούν οι πηγές μετατόπισης Abbi και με σωστές επιλογές στη διάταξη μέτρησης να απομονωθούν τα σφάλματα Abbi που επιδρούν
- προσδιορίστηκαν 6 συνιστώσες του ογκομετρικού σφάλματος που δίνουν καταρχήν μία εικόνα για το μέγεθος του συνολικού σφάλματος, αρκούν δε για να ορίσουν το σφάλμα κατά την εκτέλεση συγκεκριμένων κινήσεων /κατεργασιών
- για το συγκεκριμένο κέντρο κατεργασιών όπου έγιναν οι μετρήσεις ορίστηκε μία υποπεριοχή του όγκου εργασίας στην οποία η μηχανή λειτουργεί βέλτιστα.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι χρειάζεται να τεθεί κάποιο κριτήριο για την ογκομετρική ακρίβεια εργαλειομηχανής ώστε να κατηγοριοποιούνται οι εργαλειομηχανές με βάση την ογκομετρική ακρίβεια τους. Η έλλειψη αυτή είναι αιτία σύγχυσης, διότι οι κατασκευαστές μηχανών προτιμούν να χαρακτηρίζουν την ακρίβεια της εργαλειομηχανής με την τιμή εκείνης της συνιστώσας ή εκείνου του συνδυασμού συνιστωσών του ογκομετρικού σφάλματος που προσφέρει συγκριτικό πλεονέκτημα.

## Βιβλιογραφία

Γ. Βοσνιάκος, Π. Κατσούδας, Θ. Ψαθάς “Μέτρηση σφάλματος θέσης αξόνων εργαλειομηχανών CNC με σύστημα laser doppler”, Πρακτικά 1ου Τακτικού Εθνικού Συνεδρίου Μετρολογίας, Αθήνα, 11-12 Νοεμβρίου 2005, σελ. 68-77.

M. A. Donmez, D. S. Blomquist, R. J. Hocken, C. R. Liu, M. M. Barash “A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation”, Precision Engineering, vol. 8, p.187-196, 1986.

Ε. Πάλλα, Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Εκμετάλλευση σφαλμάτων Abbe στην εκτίμηση του ογκομετρικού σφάλματος εργαλειομηχανών CNC

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

K. F. Eman, B. T. Wu, M. F. De Vries “*A generalized geometric error model for multi-axis machines*”, Annals of the CIRP, vol.36, p.253-256, 1987.

P.M. Ferreira, C. R Liu “*A method for estimating and compensating quasi-static errors of machine tools*”, Journal of Engineering for Industry, v.115, p. 149-159, 1993.

ISO 230-2(1997) /Cor 1:1999, Test code for machine tools -- Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes.

J. Lee, Y. Liu, S. Yang “*Accuracy improvement of miniaturized machine tool: Geometric error modeling and compensation*” International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 46, p. 1508-1516, 2006.

J. Ni., “*CNC machine accuracy enhancement through real-time error compensation*”, ASME Trans Journal of Manufacturing Science and Engineering 119, p. 717-724, 1997.

D.N. Reshetov, V.T. Portman, “*Accuracy of Machine Tools*”, New York, NY, ASME-Press, 1988, 304 p.

A. C Okafor, Y. M. Ertekin, “*Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining centre using rigid body kinematics*”, International Journal of Machine Tools and Manufacture 40, p. 1199-1213, 2000.

R. Ramesh, M. A. Mannan, A.N. Poo “*Error compensation in machine tools - a review. Part I : geometric, cutting force induced and fixture-dependent errors*”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40, p.1235-1256, 2000.

R. Schultschik “*The components of the volumetric accuracy*”, Annals of the CIRP, vol.25, p.445-448, 1977.

M. Weck, P. McKeown, R. Bonse, “*Reduction and Compensation of Thermal Errors in machine tools*”, CIRP Annals, vol. 44 (2), p. 589-598, 1995.

Ε. Πάλλα, Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Εκμετάλλευση σφαλμάτων Abbé στην εκτίμηση του ογκομετρικού σφάλματος εργαλειομηχανών CNC

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

---