

ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΑΡΘΡΩΤΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΕΠΤΑ ΑΞΟΝΩΝ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Ιωαννίδου Στεφανία¹ και Πανταζής Γεώργιος¹

¹ Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Ζωγράφου, Αθήνα.
e-mail: crefu17@mail.ntua.gr

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η ανάγκη για μετρήσεις ακριβείας έχει οδηγήσει στη δημιουργία όλο και πιο πολύπλοκων μετρητικών συστημάτων, τα οποία μπορούν να μετρήσουν ένα ή περισσότερα μεγέθη ταυτόχρονα. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων αυτών, διασφαλίζεται με τον μετρολογικό έλεγχο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες (περιβαλλοντικές και μη) αλλά και τη βαθμονόμηση και διακρίβωση των συστημάτων μέτρησης.

Επιπλέον, είναι σημαντικός ο διαχωρισμός της εσωτερικής και της εξωτερικής ακριβείας που παρέχεται σε μία μέτρηση αλλά και η μεταξύ τους συσχέτιση.

Η εσωτερική ακρίβεια εκφράζει το βαθμό εγγύτητας μεταξύ επαναλαμβανόμενων μετρήσεων του ίδιου παρατηρούμενου μεγέθους, δηλαδή το πόσο κοντά βρίσκονται μεταξύ τους οι τιμές των μετρήσεων. Αντίθετα η εξωτερική ακρίβεια εκφράζει το βαθμό εγγύτητας μιας παρατήρησης ως προς την (άγνωστη) πραγματική της τιμή.

Στη συγκεκριμένη εργασία, πραγματοποιούνται & παρουσιάζονται πειράματα βαθμονόμησης αρθρωτού βραχίονα μέτρησης επτά (7) αξόνων, υπό συγκεκριμένες μετρολογικές συνθήκες. Παράλληλα πραγματοποιείται, διακρίβωση βιομηχανικών πλακιδίων διαφόρων μεγεθών με σκοπό να διαπιστωθεί αν και πως η αβεβαιότητα της τελικής μέτρησης επηρεάζεται από την ακρίβεια της βαθμονόμησης, αλλά και ποιες συνθήκες πρέπει να πληρούνται για, όσο το δυνατόν, πιο ακριβές αποτέλεσμα.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων με απότερο σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων, που αφορούν τόσο στην παρεχόμενη τελική ακρίβεια των μετρούμενων μεγεθών όσο και στην επίδραση της βαθμονόμησης τέτοιων συστημάτων στην ορθότητα του τελικού αποτελέσματος.

Λέξεις-Κλειδιά: Βαθμονόμηση, Αρθρωτοί βραχίονες μέτρησης, Εσωτερική και Εξωτερική ακρίβεια.

SEVEN-AXIS ARM CALIBRATION METHODS AND CORRELATION OF INTERNAL AND EXTERNAL PRECISION

Abstract

In recent years, the development of technology and the need of precision measurements has led to the creation of increasingly complex measuring systems, which can measure one or more quantities simultaneously. The accuracy of the results of these measurements

is ensured by the metrological control under specific conditions (environmental and non-environmental) but also the calibration of the measurement systems.

In addition, it is important to demarcation internal and external accuracy provided in a measurement and the correlation between them. Internal accuracy expresses the degree of proximity between repeated measurements of the same observed magnitude, i.e. how close the measurement values are to each other. On the other hand, external accuracy expresses the degree of proximity of an observation to its (unknown) true value.

In this paper, calibration experiments of a seven (7) axle modular arm are performed and presented, under specific metrological conditions. At the same time, industrial tiles of various sizes are calibrated in order to determine whether and how the uncertainty of the final measurement is affected by the accuracy of the calibration, but also what conditions must be met for the most accurate result.

The results are presented in the form of diagrams with the ultimate goal of drawing conclusions, which relate not only to the provided final accuracy of the measured quantities, but also to the effect of the calibration of such systems on the correctness of the final result.

Key-words: Calibration, Coordinate Measuring Arm, Internal and External accuracy.

1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, ο βιομηχανικός χώρος χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία και μικρή ανοχή κατασκευής αντικειμένων, που απαιτούν τη χρήση τεχνολογίας μέτρησης συντεταγμένων (Coordinate Measuring Technology -CMT), η οποία παρέχει γρήγορη και ακριβή μέτρηση πολύ περίπλοκων προϊόντων. [Kupiec M., 2012]

Η μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machine - CMM), σύμφωνα με το ISO 10360-1, είναι μία συσκευή όπου τα στοιχεία μέτρησης της μετακινούνται εντός ενός καθορισμένου εύρους συντεταγμένων, αλλά τουλάχιστον μία εξ αυτών αντιλαμβάνεται μια μετατόπιση. (σχήμα 1α) Πρόκειται, δηλαδή, για ηλεκτρομηχανικά συστήματα, τα οποία διαθέτουν έναν αισθητήρα. Με την τοποθέτηση του, σε διάφορα σημεία του αντικειμένου μελέτης, μπορούν να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες τους στο χώρο με ακρίβεια που μπορεί να φτάσει και το μισό μm (0.0005mm). [ISO 10360-1, Παπιάς Σ., 2015 και Γιαννάτσης Ι. κ.α., 2015]

Ωστόσο η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η ανάγκη για πιο ευρείς μετρήσεις οδήγησε στην εξέλιξη των συγκεκριμένων μηχανών και στη δημιουργία αρθρωτών βραχιόνων μέτρησης (Coordinate Measuring Arm – CMA) που αποτελούν μία φορητή λύση, η οποία χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροδιαστημική, τις σιδηροδρομικές και ενεργειακές βιομηχανίες κτλ.. [Kupiec M., 2012 και Kovač I., 2001]

Οι αρθρωτοί βραχιόνες μέτρησης συντεταγμένων (σχήμα 1β) αποτελούνται συνήθως από τρεις απλούς σωλήνες, κατασκευασμένους από κράματα αλουμινίου ή ίνες άνθρακα. Περιλαμβάνουν από έξι έως οκτώ αρθρώσεις, με ενσωματωμένους γωνιακούς κωδικοποιητές (Encoders), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της γωνίας περιστροφής του βραχίονα. [Kupiec M., 2012] Με το άγγιγμα του αισθητήρα (Probe) στο αντικείμενο, οι γωνιακές συντεταγμένες διαβάζονται από το σύστημα μέτρησης και μετατρέπονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες x, y, z, με ακρίβεια από $\pm 25\mu\text{m}$. [Kupiec M., 2012 και Γιαννάτσης Ι. κ.α., 2015]

Για την πραγματοποίηση ορθών μετρήσεων και εξαγωγή έγκυρων αποτελεσμάτων, απαιτείται μετρολογικός έλεγχος της εκάστοτε συσκευής μέτρησης. Στην περίπτωση των αρθρωτών βραχιόνων, έχει παρατηρηθεί πως η πλειοψηφία των σφαλμάτων έχουν συστηματικό χαρακτήρα, ενώ αυτό μπορεί να βελτιωθεί μέσω της βαθμονόμησής τους, είτε εργαστηριακά, από τον κατασκευαστή, είτε από τον ίδιο τον χρήστη πριν την έναρξη των μετρήσεων. [Kovač I., 2001]



Σχήμα 1: (α) Μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (β) Αρθρωτός βραχίονας μέτρησης συντεταγμένων

Δυστυχώς, λόγω της ταχείας ανάπτυξης τους δεν υπάρχει καθιερωμένο πρότυπο ISO που να πιστοποιεί την αξιοπιστία των μετρήσεων αρθρωτών βραχιόνων. Μια πρώτη προσπάθεια τυποποίησης έγινε με την επέκταση του ISO 10360, που αφορά στις μηχανές CMM, και τη δημιουργία του ISO 10360-12 που εστιάζει στις CMA και αφορά στη μέτρηση βαθμονομημένων μηκών δοκιμής και στην επαλήθευση της απόδοσής τους από το χρήστη. Επιπλέον τα πρότυπα ASME B89.4.22-2004 και VDI/VDE 2617-9 προσανατολίζονται στη βαθμονόμηση με τη χρήση σφαιρών ακριβείας. Εκτός από τη δοκιμή μεμονωμένων σημείων (Single Point Articulation Test-SPAT) με τη χρήση ειδικού κώνου βαθμονόμησης (Compensation cone), η συνολική ακρίβεια αξιολογείται με βάση όλο το εύρος εργασιών, από τη δοκιμή του αισθητήρα (Volumetric Probing Test) έως τις δοκιμές μέτρησης αβεβαιότητας του μήκους (Volumetric Length Measuring Uncertainty Test). [ASME 2005 B89.4.22-2004, VDI/VDE 2617-9 και Cuesta E. κ.α., 2016]

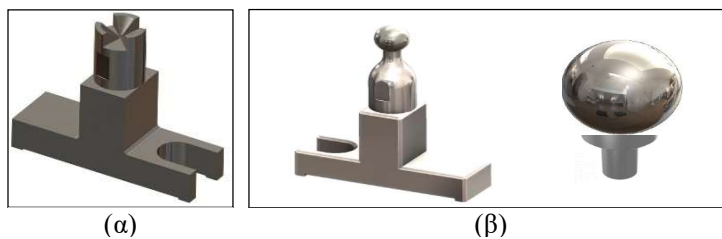
Παγκοσμίως, αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει το σφάλμα της μέτρησης και τη βαθμονόμηση των μηχανών με τη χρήση διαφόρων διαδικασιών. Η διερεύνηση του ρεύματος της συσκευής με τη χρήση ιντερφερόμετρων [Kovac I., 2001], η συσχέτιση του κινηματικού μοντέλου του βραχίονα με τη θερμική διέγερσή του [Santolaria J. κ.α., 2008], αλλά και η επιρροή της δυναμικής συμπεριφοράς του στην αβεβαιότητα της μέτρησης [Aguilar JJ κ.α. 2011, Gao GB. κ.α. 2013 και Gatti G. και Danieli G., 2007] είναι μερικές από αυτές, και λαμβάνουν υπόψη την παραμόρφωση των αρθρώσεων σε σχέση με τη βαρύτητα και τη δύναμη που ασκεί ο χρήστης.

Ωστόσο, η συσχέτιση της αβεβαιότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας του βραχίονα κατά τη χρήση, αποτελεί μία ακόμα ανησυχία η οποία μελετάται στη συγκεκριμένη εργασία. Πιο συγκεκριμένα, για έναν αρθρωτό βραχίονα 7 αξόνων-κωδικοποιητών, αφού παρουσιαστούν εκτενώς διαφορετικές μέθοδοι βαθμονόμησης του αισθητήρα του, από το χρήστη, πραγματοποιείται εφαρμογή τους συσχετίζοντας τη θερμοκρασία της βάσης του οργάνου και των επιμέρους αρθρώσεών του. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων και η παρουσίαση τους με τη μορφή διαγραμμάτων θα οδηγήσει σε σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με το ποιες συνθήκες πρέπει να πληρούνται για, όσο το δυνατόν, πιο ακριβές αποτέλεσμα.

Επιπλέον, πραγματοποιείται διακρίβωση βιομηχανικών πλακιδίων διαφόρων μεγεθών με σκοπό να διαπιστωθεί αν και πως η αβεβαιότητα της τελικής μέτρησης επηρεάζεται από την ακρίβεια της βαθμονόμησης.

2. Μέθοδοι βαθμονόμησης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, υπάρχουν διάφοροι τρόποι βαθμονόμησης ενός αισθητήρα επαφής. Ο κάθε κατασκευαστής προτείνει κάποια διαφορετική μεθοδολογία [Santolaria J. κ.α. 2008] ωστόσο οι πιο γνωστές περιλαμβάνουν τη χρήση τυποποιημένων σφαιρών (Sphere Compensation) ή συγκεκριμένων κώνων βαθμονόμησης για τη μέτρηση πολλαπλών σημείων (Hole Compensation), όπως φαίνονται και στο σχήμα 2. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία κάθε μίας εξ αυτών ενώ προκύπτουν και σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή τους.



Σχήμα 2: (α) Κώνος βαθμονόμησης (β) Σφαίρες βαθμονόμησης

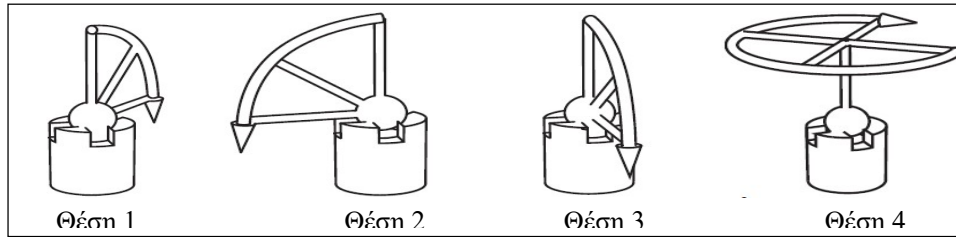
Για να είναι επιτυχής μια βαθμονόμηση, κάθε φορά, εξετάζεται η τιμή 2σ , όπου είναι διπλάσια από την τυπική απόκλιση όλων των σημείων που λαμβάνονται κατά τη διαδικασία. Η τιμή αυτή, πρέπει να είναι μικρότερη από την ακρίβεια που παρέχει ο βραχίονας για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου, προκειμένου να θεωρηθεί αποδεκτή. Σε αντίθετη περίπτωση πρέπει η βαθμονόμηση να επαναληφθεί από την αρχή, μέχρι τα αποτελέσματα να είναι ικανοποιητικά.

2.1 Βαθμονόμηση με τη χρήση κώνου βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση με τη χρήση ειδικού κώνου, αποτελεί μία μέθοδο κατά την οποία μετριοούνται πολλαπλά σημεία για διαφορετική κίνηση του βραχίονα. Πιο συγκεκριμένα, ο αισθητήρας επαφής εφάπτεται πλήρως στον ειδικό κώνο και ενώ πραγματοποιούνται κινήσεις του βραχίονα λαμβάνονται πολλαπλά σημεία. Τα βήματα που ακολουθούνται περιγράφονται παρακάτω και απεικονίζονται στο σχήμα 3.

- Τοποθέτηση του αισθητήρα κάθετα στον κώνο βαθμονόμησης.
- Συνεχής μέτρηση σημείων καθώς πραγματοποιείται μετακίνηση του βραχίονα σε μία από τις οριζόντιες θέσεις-εγκοπές του κώνου (Θέση 1).
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τις άλλες δύο οριζόντιες θέσεις (Θέση 2-3).
- Με το πέρας των θέσεων αυτών πραγματοποιείτε περιστροφή του $7^{ου}$ άξονα του βραχίονα για τη μέτρηση ενός πλήρους κύκλου (Θέση 4).

Είναι σημαντικό ο αισθητήρας να παραμένει σταθερός, καθισμένος στον κώνο καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων ενώ οι αρθρώσεις πρέπει να σχηματίζουν μεταξύ τους όσο το δυνατόν πιο ορθές γωνίες για τη βελτιστοποίηση του αποτελέσματος.



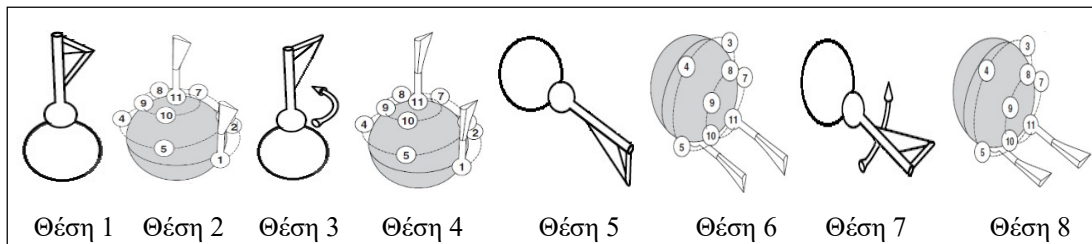
Σχήμα 3: Βήματα-Θέσεις για τη βαθμονόμηση με τη χρήση κώνου βαθμονόμησης

2.2 Βαθμονόμηση με τη χρήση τυποποιημένης σφαίρας

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί μια σφαίρα γνωστών ή άγνωστων διαστάσεων, μετρούνται σημεία της σε διαφορετικές διευθύνσεις, ενώ προκύπτει ένα σφάλμα (2σ) και μια προσέγγιση της τιμής της διαμέτρου της (αν αυτή δεν είναι γνωστή).

Τα βήματα που ακολουθούνται περιγράφονται παρακάτω και απεικονίζονται στο σχήμα 4, ενώ είναι σημαντικό ο αισθητήρας να παραμένει σε συνεχή επαφή με τη σφαίρα καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι αν χαθεί η επαφή, δίνεται η δυνατότητα ακύρωσης του λανθασμένου σημείου. Επιπλέον για μεγαλύτερη ορθότητα πρέπει για κάθε σύνολο σημείων να διατηρείται η κατεύθυνση και ο προσανατολισμός του αισθητήρα.

- Τοποθέτηση του αισθητήρα σε κάθετη διεύθυνση και μέτρηση 11 σημείων περιμετρικά από το πάνω ημισφαίριο της σφαίρας. (Θέση 1-2)
- Περιστροφή της έβδομης άρθρωσης κατά 90° και μέτρηση ξανά 11 σημείων περιμετρικά από το πάνω ημισφαίριο της σφαίρας. (Θέση 3-4)
- Τοποθέτηση του αισθητήρα στην παράλληλη διεύθυνση και μέτρηση 11 σημείων περιμετρικά από το μπροστινό ημισφαίριο της σφαίρας. (Θέση 5-6)
- Περιστροφή την έβδομης άρθρωσης κατά 90° και μέτρηση ξανά 11 σημείων περιμετρικά από το πάνω μπροστινό της σφαίρας, πατώντας το πράσινο κουμπί. (Θέση 7-8)



Σχήμα 4: Βήματα-Θέσεις για τη βαθμονόμηση με τη χρήση σφαίρας βαθμονόμησης

3. Πειραματική διάταξη και βαθμονόμηση

Για να εντοπιστεί η καταλληλότερη μέθοδος βαθμονόμησης, πραγματοποιήθηκαν επιμέρους πειράματα για κάθε μια από αυτές, προκειμένου να εντοπιστεί ο καταλληλότερος τρόπος και χρόνος βαθμονόμησης, από τη στιγμή που θα ενεργοποιηθεί η συσκευή.

Αφού ο χρόνος λειτουργίας επηρεάζει τη θερμοκρασία των αρθρώσεων του οργάνου, η διαδικασία βαθμονόμησης επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί με βήμα 0.5°C από 18°C έως

25°C (θερμοκρασία δωματίου). Λόγω των διαφορετικών θερμοκρασιών ανά άρθρωση ο έλεγχος έγινε στη θερμοκρασία της βάσης, ενώ η διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε μια παράμετρο που δίνει το λογισμικό ως επιλογή.

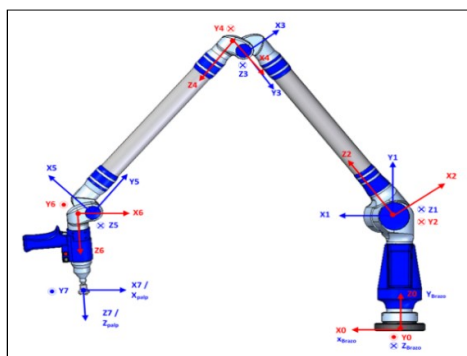
Στην περίπτωση της χρήσης του κώνου, το λογισμικό, δίνει τη δυνατότητα ενεργοποίησης του οδηγού (Guidance) όπου ο χρήστης πρέπει να επαναλάβει τη διαδικασία όχι μόνο στις εγχοπές του κώνου αλλά σε όλες τις 6 κατευθύνσεις. Επιπλέον μπορεί να επιλεγεί ο γωνιακός προσαρμογέας (Angular Adapter), όπου μετά το πέρας της διαδικασίας, ζητείται η κάθετη τοποθέτηση του αισθητήρα στον κώνο και η καταγραφή ενός σημείου. Με τον τρόπο αυτό εντοπίζονται τυχόν αποκλίσεις από την κατακόρυφο για πιο ακριβές αποτέλεσμα. Αντίθετα στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται τυποποιημένες σφαίρες, εκτός από τις παραπάνω δυνατότητες μπορεί να οριστεί και η διάμετρος εάν η σφαίρα είναι γνωστών διαστάσεων.

Παρακάτω, αφού παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά του βραχίονα που χρησιμοποιήθηκε, δίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με σχετική στατιστική ανάλυση.

3.1 Αρθρωτός βραχίονας επτά αξόνων

Για τη μελέτη της βαθμονόμησης, στη συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιήθηκε ένας αρθρωτός βραχίονας 7 αξόνων. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για έναν βραχίονα βάρους 10.9 kg, και μήκους 2.7m, ο οποίος αποτελείται από μία βάση, τρεις απλούς σωλήνες και επτά κωδικοποιητές, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.

Σύμφωνα με το πρότυπο ASME B89.4.22-2004, για το συγκεκριμένο βραχίονα, η αβεβαιότητα της επαναληψιμότητας μιας μέτρησης ενός σημείου (Single Point Repeatability) είναι $\pm 0.029\text{mm}$ ($\pm 29\mu\text{m}$), ενώ η ογκομετρική αβεβαιότητα για τριδιάστατες μετρήσεις (Volumetric Accuracy) είναι $\pm 0.041\text{mm}$ ($\pm 41\mu\text{m}$). Έτσι για να είναι αποδεκτή μια βαθμονόμηση πρέπει η αβεβαιότητα της να είναι μικρότερη των $\pm 29\mu\text{m}$. Επίσης ο κατασκευαστής ορίζει την επανάληψη της διαδικασίας σε περίπτωση αποτυχίας, έως και δυο επιπλέον φορές, πριν την εξαγωγή συμπερασμάτων για τυχόν βλάβη.



Σχήμα 5: Σύστημα αναφοράς συντεταγμένων για κάθε άρθρωση

Επιπλέον, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η συγκεκριμένη συσκευή παραμένει αναλλοίωτη σε υγρασία έως και 95%, ενώ η μεταβολή θερμοκρασίας για ορθή χρήση, δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 3°C ανά 5 λεπτά της ώρας.

3.2 Αποτελέσματα βαθμονόμησης με τη χρήση ειδικού κώνου

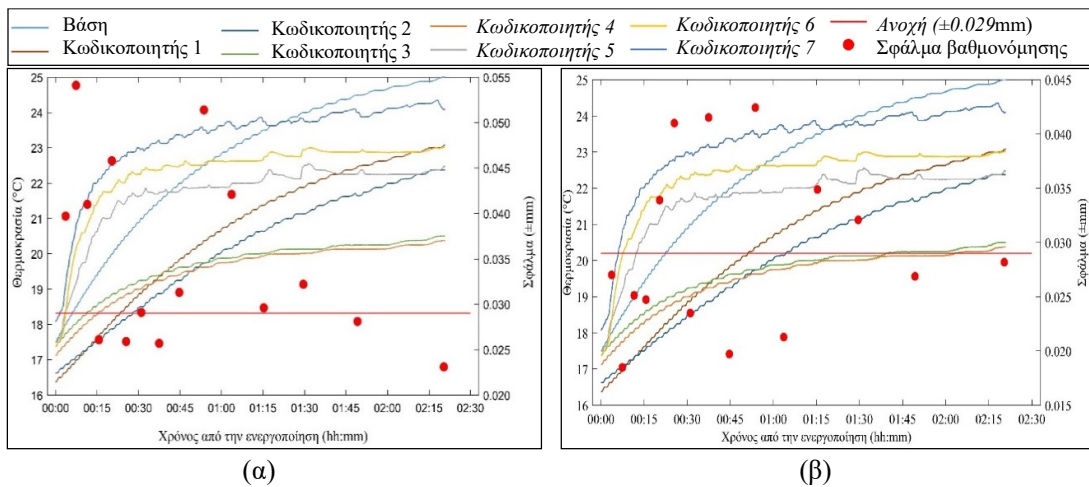
Ιωαννίδου Στεφανία, Πανταζής Γεώργιος, ΕΜΠ

Μέθοδοι βαθμονόμησης αρθρωτού βραχίονα επτά αξόνων και συσχέτιση εσωτερικής και εξωτερικής ακρίβειας

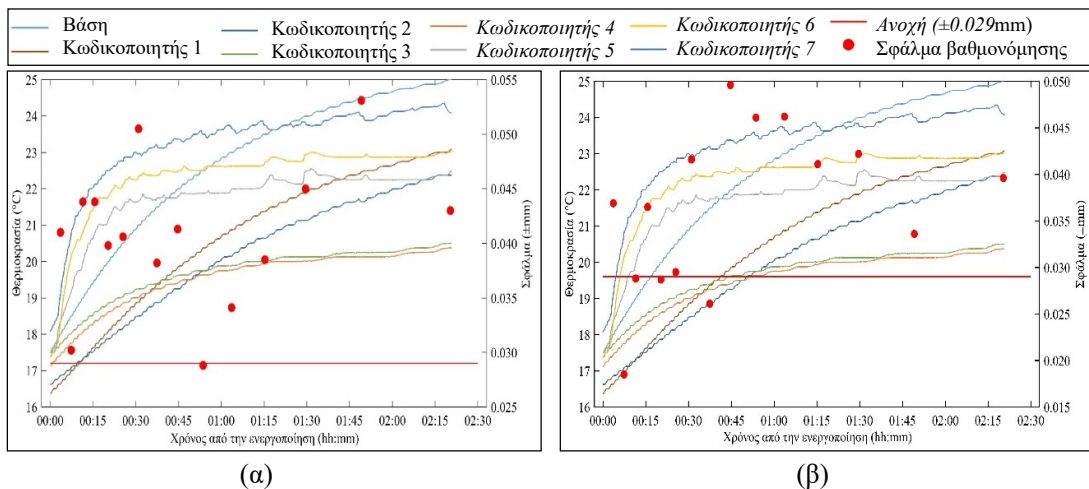
8^ο Συνέδριο Μετρολογίας, Θεσσαλονίκη, 01 & 02 Ιουλίου 2022

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε για συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών αλλά και για συνδυασμό των επιλογών του λογισμικού. Στα σχήματα 6-7 παρουσιάζεται η συνάρτηση της θερμοκρασίας των αρθρώσεων-κωδικοποιητών με το χρόνο ενεργοποίησης της συσκευής, ενώ δίνονται και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης για κάθε μία επιλογή.

Παρατηρείται πως στην περίπτωση επιλογής του γωνιακού προσαρμογέα, το ποσοστό επιτυχίας αγγίζει το 60%, ενώ στην περίπτωση που επιλεγεί μόνο η καθοδήγηση αυτό είναι μόλις 7%. Αν δεν επιλεγεί κάποια εντολή τότε το ποσοστό είναι περίπου 33%, ενώ αν ενεργοποιηθούν και οι δύο επιλογές αυτό αγγίζει το 27%. Έτσι ο καλύτερος τρόπος βαθμονόμησης είναι επιλέγοντας την εντολή Angular Adapter με τη χαμηλότερη τιμή να είναι $\pm 0.0185\text{mm}$.



Σχήμα 6: (α) Βαθμονόμηση με τη χρήση κώνου χωρίς την επιλογή παραμέτρων
(β) Βαθμονόμηση με τη χρήση κώνου και επιλογή του γωνιακού προσαρμογέα

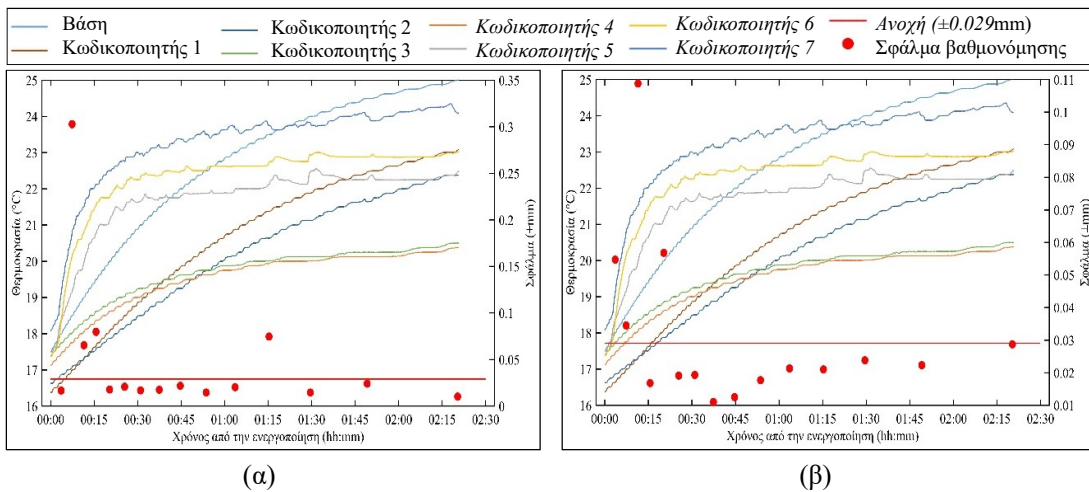


Σχήμα 7: (α) Βαθμονόμηση με τη χρήση κώνου και επιλογή της καθοδήγησης (β) Βαθμονόμηση με τη χρήση κώνου και επιλογή του γωνιακού προσαρμογέα και της καθοδήγησης

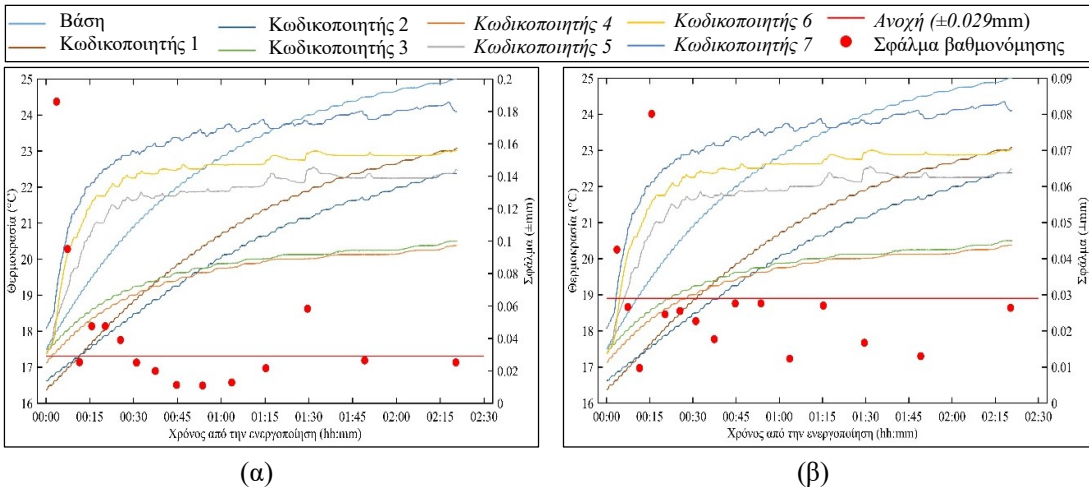
3.3 Αποτελέσματα βαθμονόμησης με τη χρήση σφαίρας

Στην περίπτωση της βαθμονόμησης με τη χρήση της σφαίρας, χρησιμοποιήθηκε σφαίρα άγνωστων διαστάσεων, ενώ και εδώ η διαδικασία επαναλήφθηκε σε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών αλλά και για συνδυασμό των επιλογών του λογισμικού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 8-9 αντίστοιχα.

Παρατηρείται πως η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μεγαλύτερα ποσοστά επιτυχίας από την προηγούμενη. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση επιλογής του γωνιακού προσαρμογέα καθώς και στην μη επιλογή παραμέτρων, το ποσοστό επιτυχίας αγγίζει το 73%. Αντίθετα στην περίπτωση μόνο της καθοδήγησης το ποσοστό είναι μόλις 60% ενώ αν επιλεγεί τόσο η καθοδήγηση όσο και η γωνιακή προσαρμογή αυτό είναι 87%. Έτσι ο καλύτερος τρόπος βαθμονόμησης είναι επιλέγοντας και την εντολή Angular Adapter και την εντολή Guidance, με τη χαμηλότερη τιμή να είναι $\pm 0.0097\text{mm}$.



Σχήμα 7: (α) Βαθμονόμηση με τη χρήση σφαίρας χωρίς την επιλογή παραμέτρων (β) Βαθμονόμηση με τη χρήση σφαίρας και επιλογή του γωνιακού προσαρμογέα



Σχήμα 9: (α) Βαθμονόμηση με τη χρήση σφαίρας και επιλογή της καθοδήγησης (β) Βαθμονόμηση με τη χρήση σφαίρας και επιλογή του γωνιακού προσαρμογέα και της καθοδήγησης

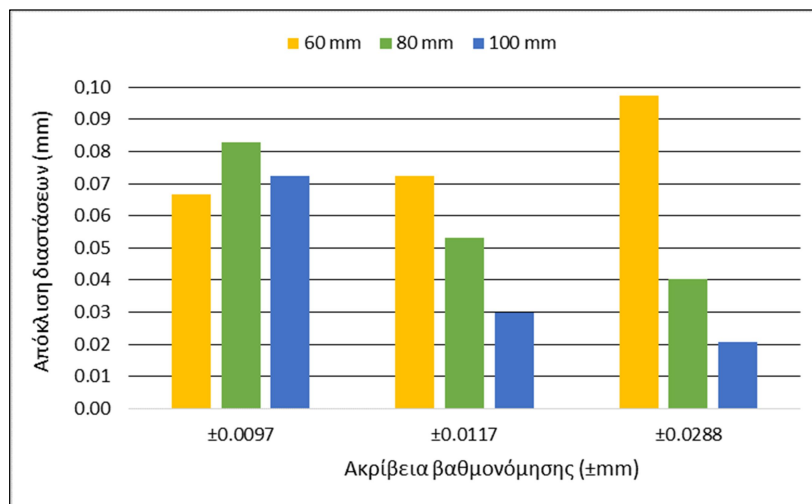
4. Διακρίβωση βιομηχανικών πλακιδίων και συσχέτιση εσωτερικής και εξωτερικής ακρίβειας

Για τον εντοπισμό της συσχέτισης εσωτερικής και εξωτερικής ακρίβειας, πραγματοποιείται μέτρηση βιομηχανικών πλακιδίων. Πιο συγκεκριμένα, μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας βαθμονόμησης, και του προσδιορισμού του σφάλματός της, έγινε μέτρηση πλακιδίων γνωστών διαστάσεων (60mm, 80mm και 100mm) για να εντοπιστούν τυχόν αποκλίσεις. Οι διαστάσεις αυτών προέκυψαν από μετρήσεις του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας με τη χρήση του προτύπου ISO 3650 1998, το 2011, ενώ διατέθηκαν από το Μετροτεχνικό Εργαστήριο της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Δεδομένου πως η μέθοδος βαθμονόμησης με τη χρήση σφαίρας επέφερε καλύτερα αποτελέσματα, επιλέγεται για το συγκεκριμένο έλεγχο, ενώ χρησιμοποιούνται οι τιμές $\pm 0.0097\text{mm}$, $\pm 0.0177\text{mm}$ και $\pm 0.0287\text{mm}$ για θερμοκρασίες 19°C , 21°C και 25°C αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό και την εξαγωγή των διαστάσεων του εκάστοτε πλακιδίου μετρήθηκαν τέσσερα σημεία, με ακρίβεια αυτή της βαθμονόμησης, σε τέσσερις από τις έξι έδρες του πλακιδίου. Στη συνέχεια γνωρίζοντας τις συντεταγμένες των σημείων και εφαρμόζοντας τη γενική μέθοδο συνόρθωσης προσαρμόστηκαν επιφάνειες με μέσο τετραγωνικό σφάλμα της τάξης του 10^{-5}mm , και από την τομή των επιφανειών αυτών προέκυψαν οι συν/νες των ακμών του κάθε δοκιμίου, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των διαστάσεών του. Αξίζει να σημειωθεί πως σε κάθε περίπτωση η αβεβαιότητα των συν/νων των σημείων αυτών των ακμών που προέκυψαν δεν ξεπερνά τα $\pm 0.040\text{mm}$, ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις που αυτή είναι μικρότερη από $\pm 0.005\text{mm}$.

Πραγματοποιήθηκαν δύο ανεξάρτητες σειρές μετρήσεων, ενώ έγινε σύγκριση της τελικής διάστασης με τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή μήκους που δίνεται από το έντυπο διακρίβωσης. Παρατηρείται πως παρότι η αβεβαιότητα των μετρημένων διαστάσεων είναι της τάξης των $\pm 0.03\text{mm}$, στην πλειοψηφία (56%), οι αποκλίσεις είναι μη αποδεκτές για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.



Σχήμα 8: Αποκλίσεις πλακιδίων για διάφορες τιμές βαθμονόμησης

Στην περίπτωση της βαθμονόμησης με ακρίβεια $\pm 0.0097\text{mm}$ οι αποκλίσεις για τα δοκίμια των 60mm 80mm και 100mm είναι της τάξης των 0.06-0.08mm, ενώ στη βαθμονόμηση με ακρίβεια $\pm 0.0177\text{mm}$ και $\pm 0.0288\text{mm}$ είναι της τάξης των 0.02-0.09mm.

Επιπλέον παρατηρείται πως οι μικρότερες αποκλίσεις εμφανίζονται στη περίπτωση που η βαθμονόμηση πλησιάζει την αβεβαιότητα της επαναληψιμότητας μιας μέτρησης που παρέχει ο βραχίονας ($\pm 0.029\text{mm}$), ενώ οι τελικές αποκλίσεις είναι της ίδιας ή μεγαλύτερης τάξης.

5. Συμπεράσματα-Προτάσεις

Όπως είναι γνωστό η βαθμονόμηση των μετρητικών μηχανών αποτελεί τη σπουδαιότερη διαδικασία για την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας τους. Υπάρχουν ποικίλοι παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα αλλά και διάφορες μεθοδολογίες. Στην περίπτωση του αρθρωτού βραχίονα 7-αξόνων οι μέθοδοι με τη χρήση κώνου βαθμονόμησης και σφαίρας είναι οι πιο γνωστοί. Έτσι, αφού δοκιμάστηκαν και οι δύο, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, διαπιστώθηκε πως η μέθοδος της σφαίρας οδηγεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια σε ποσοστό 73%. Σε σύγκριση με τη χρήση του κώνου όπου η ελάχιστη αβεβαιότητα που επιτεύχθηκε ήταν $\pm 0.0185\text{mm}$, η μέθοδος αυτή επέφερε έως και $\pm 0.0097\text{mm}$.

Ωστόσο με τη μέτρηση γνωστών πλακιδίων και τη συσχέτισή τους με την ακρίβεια βαθμονόμησης διαπιστώνεται πως αυτή δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα καθώς επικρατεί η αβεβαιότητα της επαναληψιμότητας μιας μέτρησης που παρέχει ο βραχίονας. Έτσι υπάρχει μικρή συσχέτιση μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής ακρίβειας.

Προτείνεται να γίνει περαιτέρω έλεγχος τόσο στη χρήση διαφορετικών αισθητήρων (με ή χωρίς επαφή) όσο και στη μέτρηση κάτω από διαφορετικές μετρολογικές συνθήκες.

Βιβλιογραφία

1. Kupiec M. Coordinate measurement systems CMM and CMA—characteristic and methods of their accuracy evaluation. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2012; 6(16):18-23.
2. ISO 10360-1: 2000 Geometrical Product Specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 1: Vocabulary
3. Παππάς Σ. Διερεύνηση συνδυαστικής χρήσης γεωδαιτικών σταθμών και μηχανών μέτρησης συντεταγμένων αρθρωτού βραχίονα για εφαρμογές βιομηχανικής γεωδαισίας, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2015.
4. Γιαννάτσος Ι., Δεδούση Β., Κανελλίδης Β. Τεχνολογίες Μέτρησης και Αντίστροφου Σχεδιασμού. Κεφάλαιο του βιβλίου: Σύγχρονες τεχνολογίες κατασκευής με τη βοήθεια H/Y. Ελεύθερες Ακαδημαϊκές Εκδόσεις Κάλλιπος. 2015
5. Kovač I., Frank A. Testing and calibration of coordinate measuring arms. *Precision Engineering*. 2001 Apr 1;25(2):90-9.
6. ASME 2005 B89.4.22-2004: Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines (New York: The American Society of Mechanical Engineers)
7. VDI/VDE 2617:2009 Part 9: Acceptance and reverification test for articulated arm measuring machines (Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure)

8. Cuesta E, Alvarez BJ, Patiño H, Telenti A, Barreiro J. Testing coordinate measuring arms with a geometric feature-based gauge: in situ field trials. *Measurement Science and Technology*. 2016 Mar 22; 27(5):055003.
9. Santolaria J, Aguilar JJ, Yagüe JA, Pastor J. Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines. *Precision Engineering*. 2008 Oct 1; 32(4):251-68.
10. Aguilar JJ, Santolaria J, Yagüe JA, Majarena AC. Calibration, non-geometric error modelling and correction methods for articulated arm coordinate measuring machines. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. 2011 Jan 1; 4(1):49-60.
11. Gao GB, Wang W, Li HQ, Zhou JJ. Kinematic modeling and analysis of articulated arm coordinate measuring machines. In *Applied Mechanics and Materials 2013* (Vol. 241, pp. 494-497). Trans Tech Publications Ltd.
12. Gatti G, Danieli G. A practical approach to compensate for geometric errors in measuring arms: application to a six-degree-of-freedom kinematic structure. *Measurement science and technology*. 2007 Dec 17; 19(1):015107.



ΕΛΙΔΕΚ
Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας & Καινοτομίας

Η ερευνητική εργασία υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της «3ης Προκήρυξης ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για Υποψήφιους/ες Διδάκτορες» (Αριθμός Υποτροφίας: 6326)