

# Διερεύνηση συνδυαστικής χρήσης γεωδαιτικών σταθμών και μηχανών μέτρησης συντεταγμένων σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εφαρμογές

Θ. Ξενάκης<sup>1</sup>, Γ. Καϊσαρλής<sup>2</sup>, Β. Γκίκας<sup>3</sup>, Δ. Σταθάς<sup>3</sup>, Χ. Προβατίδης<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε., <sup>2</sup>Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτ. Ελέγχου, <sup>3</sup>Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Κτίριο Μ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου, Αθήνα  
E-mail: gkaiss@central.ntua.gr

## Περίληψη

Στο πλαίσιο των περισσότερων σύγχρονων βιομηχανικών εφαρμογών προδιαγράφονται απαιτήσεις υψηλής γεωμετρικής ακρίβειας για την παραγωγή οικονομοτεχνικά άρτιων κατασκευών, εξαρτημάτων και συναρμολογημένων μηχανολογικών συνόλων. Η τάση αυτή συμβαδίζει με την εξέλιξη μετρητικών μέσων / διατάξεων τα οποία συνδυάζουν ευκολία στη χρήση, ταχύτητα λήψης κι επεξεργασίας δεδομένων και υψηλή αξιοπιστία. Εξαιτίας των εγγενών περιορισμών τους, κανένας από τους υπάρχοντες εξοπλισμούς δεν αποδεικνύεται ως ο καταλληλότερος για την πλήρη κάλυψη του εύρους όλων των απαιτούμενων μετρητικών εργασιών. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη διερεύνησης υβριδικών εξοπλιστικών λύσεων, όπου μέσα από τον συσχετισμό των πλεονεκτικότερων τεχνικών χαρακτηριστικών των επιμέρους συστημάτων, προσεγγίζεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αντικείμενο του άρθρου είναι η μελέτη υβριδικού μετρητικού συστήματος που ενσωματώνει τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού και αρθρωτού μετρητικού βραχίονα, χρησιμοποιώντας ως απαραίτητο παρελκόμενο τη ράβδο κρυφού σημείου. Η ανάλυση πραγματεύεται το μαθηματικό μοντέλο σύνδεσής τους, την κατάστροψη ενός μεθοδολογικού πλαισίου και το μετασχηματισμό των δεδομένων σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς. Η προτεινόμενη προσέγγιση ελέγχεται πειραματικά σε τυπική βιομηχανική κατασκευή μεγάλων διαστάσεων η οποία υλοποιείται στους χώρους των Ελληνικών Ναυπηγείων Α.Ε..

## Abstract

In the majority of modern industrial applications, tight geometrical tolerances are specified in order to establish the production of techno-economical robust constructions, mechanical components and assemblies. That trend is conformed to the development of measuring instruments that combine ergonomics, fast data acquisition / processing and high reliability. Nevertheless, due to their inherent limitations, none of the currently available instruments can be considered as universally suitable for all measurement tasks. Research on the implementation of hybrid instrument fusion is currently focused on the combination of the advantageous technical characteristics for each instrument in order to accomplish specific targets. This article studies the potential use of a hybrid system that combines a total station and an articulated arm CMM by utilizing a commonly-used industrial accessory, the hidden point bar tool. The analysis is focused on the formulation of the mathematical model that allows the interconnection of the two systems, the development of a traceable methodology frame and the transformation of data in a common reference system. The approach is experimentally verified on a typical industrial large scale component that is manufactured on the premises of Hellenic Shipyards S.A.

Θ. Ξενάκης, Γ. Καϊσαρλής, Β. Γκίκας, Δ. Σταθάς, Χ. Προβατίδης,  
Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε., Ε.Μ.Π.

Διερεύνηση συνδυαστικής χρήσης γεωδαιτικών σταθμών και μηχανών μέτρησης συντεταγμένων σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εφαρμογές

**Λέξεις Κλειδιά:** *Ολοκληρωμένοι Γεωδαιτικοί Σταθμοί, Αρθρωτοί Μετρητικοί Βραχίονες, Βιομηχανική Μετρολογία Μεγάλης Κλίμακας*

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πλαίσιο των περισσότερων σύγχρονων βιομηχανικών εφαρμογών προδιαγράφονται υψηλές απαιτήσεις για την παραγωγή οικονομοτεχνικά άρτιων κατασκευών, εξαρτημάτων και συναρμολογημένων μηχανολογικών συνόλων. Ανάλογα με την περίπτωση, προκειμένου να επιτευχθούν οι ειδικότεροι στόχοι κάθε έργου εφαρμόζονται εναλλακτικές μέθοδοι που στηρίζονται σε ένα ευρύ φάσμα μετρητικών τεχνικών / εξοπλισμού, όπως: οι σταθερές ή/και φορητές Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων (ΜΜΣ), (*coordinate measuring machines*), τα συμβολόμετρα σχετικού και απόλυτου μήκους (*laser trackers*), οι οπτικοί και laser σαρωτές (*optical and laser scanners*), οι σύγχρονοι εικονογεωδαιτικοί σταθμοί (*digital imaging total stations*), τα συστήματα εντοπισμού εσωτερικών χώρων (*indoor GPS*) και οι τεχνολογικές εφαρμογές της αυτοματοποιημένης ψηφιακής φωτογραμμετρίας (*digital photogrammetry*), (Ruhm 2009). Η ίδια εξέλιξη παρουσιάζεται σε έρευνες αυτοματοποιημένης λήψης και ασύρματης μεταφοράς δεδομένων (Omari and Moselhi 2010), όπως επίσης, και στα λογισμικά ανάλυσης και απεικόνισης της σχετικής πληροφορίας. Ορισμένοι παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή των παραπάνω μεθόδων / εξοπλισμών είναι:

- *οι γεωμετρικές προδιαγραφές ακρίβειας (ανοχές) της κατασκευής,*
- *η μορφή, το μέγεθος, το πλήθος και άλλες ιδιαιτερότητες των προς έλεγχο εξαρτημάτων/ συναρμολογημένων συνόλων,*
- *τα ιδιαίτερα τεχνικά πλεονεκτήματα του μετρητικού εξοπλισμού,*
- *οικονομικοί / χρονικοί εταιρικοί στόχοι παραγωγής.*

Πρόσφατα, ειδικότερα σε εφαρμογές βιομηχανικής μετρολογίας μεγάλης κλίμακας, διερευνάται η παραγωγή υπολογιστικών εργαλείων που συνυπολογίζουν το σύνολο των παραπάνω παραγόντων με στόχο τη βέλτιστη επιλογή μετρητικού εξοπλισμού (Muelaner et al. 2010) καθώς και η χρήση υβριδικών μετρητικών συστημάτων (Peggs et al. 2009). Η παράλληλη χρήση δύο ή περισσότερων μετρητικών εξοπλισμών προσφέρει αξιοποίηση των επιμέρους πλεονεκτημάτων ενώ ο ενδεχόμενος συνδυασμός τους παρέχει πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση της εφαρμογής ενδιαφέροντος. Αντικείμενο του παρόντος άρθρου αποτελεί η διερεύνηση των δυνατοτήτων υβριδικών συστημάτων στο πεδίο της βιομηχανικής μετρολογίας. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται πειραματική διερεύνηση της συνδυασμένης χρήσης Γεωδαιτικού Σταθμού (ΓΣ) με ΜΜΣ τύπου Φορητού αρθρωτού Βραχίονα, (ΜΜΣ-ΦΒ) (*articulated arm CMM*) σε περιβάλλον 3D-CAD για μετρολογικές εργασίες εξαρτημάτων μεγάλης κλίμακας. Με δεδομένες τις διαφορές των δύο συστημάτων (ως προς την ακρίβεια και εύρος δράσης τους) επιχειρείται η ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου συνδυαστικής χρήσης τους με απώτερο στόχο το μετασχηματισμό των μετρούμενων στοιχείων της ΜΜΣ-ΦΒ στο ευρύτερο σύστημα αναφοράς του προς μέτρηση αντικειμένου (*object coordinate frame*). Η πειραματική διερεύνηση πραγματοποιείται σε τυπική βιομηχανική κατασκευή, η οποία υλοποιείται στους χώρους των Ελληνικών Ναυπηγείων Α.Ε.

## 2. ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΚΑΙ ΑΡΘΡΩΤΟΙ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΙ ΒΡΑΧΙΟΝΕΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες παρουσιάζεται διαρκώς αυξανόμενη τάση στην αξιοποίηση 3D μετρητικών συστημάτων στους βιομηχανικούς χώρους. Τόσο οι ΓΣ, όσο και οι ΜΜΣ-ΦΒ είναι από τα πλέον σύγχρονα μετρητικά συστήματα που αξιοποιούνται στη βιομηχανική μετρολογία διαστάσεων μεγάλης κλίμακας με απώτερο στόχο τη γεωμετρική τεκμηρίωση βιομηχανικών προϊόντων και κατασκευών με ελεγχόμενη ακρίβεια (Μπαλοδήμου 2000, Peggs 2009). Παρότι και οι δύο μετρητικές πλατφόρμες αξιοποιούνται σε επικαλυπτόμενα πεδία εφαρμογών (π.χ. στον έλεγχο ιδιοσυσκευών συναρμολόγησης στην αεροβιομηχανία και τη ναυπηγική), εντούτοις, εμφανίζουν ουσιαστικές διαφορές τόσο στις βασικές αρχές λειτουργίας τους, όσο και στην ακρίβεια που επιτυγχάνουν, με αποτέλεσμα τον αποκλεισμό τους από ορισμένα πεδία εφαρμογών. Στον Πίνακα 1 αντιπαραβάλλονται τα υπόψη μετρητικά συστήματα ανά συγκεκριμένη παράμετρο εξέτασης.

Πίνακας 1 Συγκριτική αντιπαραβολή τεχνικών χαρακτηριστικών γεωδαιτικών σταθμών και αρθρωτών μετρητικών βραχιόνων

Χαρακτηριστικό	Γεωδαιτικός Σταθμός	Μετρητικός Βραχίονας
<i>Αβεβαιότητα προσδιορισμού συντεταγμένων</i>	$\geq 0,5 \text{ mm}$ (μεταβάλλεται ανάλογα με τη γωνία και την απόσταση, με το είδος του ανακλαστικού στόχου, την απαλοιφή πιθανών συστηματικών σφαλμάτων που σχετίζονται με το όργανο, ανακλαστήρα, ατμόσφαιρας)	$> 0,03 \text{ mm}$ και $< 0,1 - 0,2 \text{ mm}$ (μεταβάλλεται ανάλογα με την ακρίβεια των δομικών στοιχείων της ΜΜΣ, του αισθητήρα λήψης σημείων, τις συνθήκες του περιβάλλοντος λειτουργίας (θερμοκρασιακή σταθερότητα, δονήσεις, διεύθυνση λήψης σημείου επαφής), κ.α.).
<i>Κλίμακα μεγέθους εφαρμογών</i>	Έως 150 – 200 m για συνήθεις βιομηχανικές εφαρμογές	$< 5 - 6 \text{ m}$
<i>Παρελκόμενα εργαλεία</i>	Ανακλαστικοί στόχοι (retro reflective tapes), πρισματικοί στόχοι (corner cube reflectors), χωρίς τη χρήση στόχων (λειτουργία reflectorless)	Απευθείας επαφή στο προς μέτρηση αντικείμενο (touching probe) ή ψηφιακή σάρωση του (non-contact scanning).
<i>Ρομποτική λειτουργία</i>	Λειτουργία αυτόματης αναγνώρισης στόχου (automatic target recognition & target lock) και σερβοκίνησης (servo-motorized)	Συνήθως όχι, εκτός από σταθερούς μετρητικούς βραχίονες, ρομποτικές διατάξεις στην αυτοκινητοβιομηχανία, ή σε εργαλειομηχανές.
<i>Ταχύτητα λήψης σημείων</i>	$\sim 3 - 4 \text{ sec}$ (precise mode)	Άμεση λήψη σημείων επαφής / μέτρησης (χειρισμός μέσω ειδικών κομβίων)
<i>Μέτρηση δυσπρόσιτων σημείων</i>	Δύσκολη και αβέβαιη. Επιτυγχάνεται με χρήση ράβδου κρυφού σημείου (hidden point bar)	Εφικτή, με περιορισμούς ως προς το εύρος των δυνατών γωνιών και των αποστάσεων λήψης σημείου.

Οι ΓΣ με χρήση ειδικών κωδικοποιημένων δίσκων (για τη μέτρηση γωνιών) και την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (για τη μέτρηση αποστάσεων) παρέχουν τη θέση σημείων σε 3D τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς. Η μέτρηση μηκών γίνεται

προς τοπογραφικούς στόχους (παθητικοί στόχοι, πρίσματα) με απευθείας σκόπευση των σημείων ενδιαφέροντος. Αυτό το χαρακτηριστικό προσδίδει το ιδιαίτερο πλεονέκτημα αξιοποίησής τους σε μετρολογικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο τα χαρακτηριστικά των σφαλμάτων τους στις πρωτογενείς μετρήσεις περιορίζουν τη χρήση τους σε βιομηχανικά πεδία που δεν απαιτούν ιδιαίτερα υψηλές ακρίβειες (αβεβαιότητα > 0.5 – 0.7 mm).

Οι ΜΜΣ-ΦΒ αξιοποιούν ειδικούς μετατροπείς (*rotary transducers*) οι οποίοι μέσω διαδοχικών μετασχηματισμών των συστημάτων συντεταγμένων των επιμέρους τμημάτων τους υπολογίζουν τις τρισδιάστατες συντεταγμένες της μετρητικής κεφαλής (Sladek et al. 2009). Οι ΜΜΣ-ΦΒ υπερβαίνουν το ουσιαστικό μειονέκτημα των σταθερών ΜΜΣ, με την ευελιξία μεταφοράς τους και τη δυνατότητα επιτόπου μέτρησης σε αντικείμενα των οποίων η μετακίνηση είναι δυσχερής ή/και απαγορευτική (Shortis and Fraser 1998). Η χρήση τους καθιστά πλήρως εφικτή την επιτόπια μέτρηση πρακτικά σε οποιαδήποτε θέση του αντικειμένου με επιδόσεις ακρίβειας που υπερβαίνουν κατά πολύ εκείνες των ΓΣ (< 0.1 mm). Παράλληλα, εξειδικευμένα μετρητικά λογισμικά (π.χ. PC-DMIS, Spatial Analyzer, Metrolog) οπτικοποιούν άμεσα την τρισδιάστατη πληροφορία και τα παράγωγα γεωμετρικά μεγέθη (*σημεία, γραμμές, επιφάνειες, παραβολές κ.α.*) σε περιβάλλον 3D-CAD.

### **3. ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ ΑΡΘΡΩΤΟΥ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ**

Η κατάλληλη επιλογή ενός μεμονωμένου μετρητικού εξοπλισμού για εργασίες σε βιομηχανικό περιβάλλον αποτελεί εξαιρετικά σύνθετη διεργασία και μπορεί να εξαρτάται από πολλές παραμέτρους – όπως, το μέγεθος και οι προδιαγραφές ακρίβειας του αντικειμένου που πρόκειται να μετρηθεί, οι δυνατοί βαθμοί ελευθερίας που θα παρέχει ο μετρητικός εξοπλισμός, κ.α. Η σημασία της ορθής επιλογής της μεθόδου και του εξοπλισμού έχει διττό χαρακτήρα, καθώς από την πλευρά του σχεδιαστή επιδιώκεται τόσο η εγγύτητα με το επιθυμητό προϊόν, όσο και η εξασφάλιση της δυνατότητας μέτρησης του αντικειμένου, ενώ από την πλευρά του μηχανικού παραγωγής επιδιώκεται ικανοποιητική ροή διεξαγωγής των μετρήσεων.

Η λύση της συνδυαστικής χρήσης ΓΣ και ΜΜΣ-ΦΒ προτείνεται σε αυτή την εργασία για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια στην καταγραφή της γεωμετρικής μορφής ενός αντικειμένου, ή/και μεγάλο πλήθος μετρητικών στοιχείων για την πληρότητα αποτύπωσης της υφιστάμενης κατάστασης, ενώ παράλληλα απαιτείται η αναφορά σε ενιαίο σύστημα συντεταγμένων που εξάγεται συνήθως από τη συνολική γεωμετρία του αντικειμένου και η οποία, στις εφαρμογές μετρολογίας μεγάλης κλίμακας, μπορεί να είναι της τάξης των μερικών δεκάδων μέτρων. Επίσης, ο συνδυασμός επιτρέπει την κάλυψη προβλημάτων που σχετίζονται με την πιθανή παρουσία ανομοιογενούς τάξεως μεγέθους προδιαγραφών ακρίβειας στο ίδιο κατασκευαστικό σχέδιο, π.χ. υψηλής ακρίβειας προδιαγραφή θέσης για διάταξη κυλινδρικών οπών που καθορίζουν την πρόσδεση εξαρτήματος και την τελική του συναρμογή στο υπόλοιπο συναρμολογημένο σύνολο σε αντιδιαστολή με χαμηλότερης ακρίβειας γεωμετρικές προδιαγραφές μορφής για τα υπόλοιπα στοιχεία του.

Η προτεινόμενη υβριδική μέθοδος επιχειρεί την αξιοποίηση επιμέρους πλεονεκτημάτων των δύο εξοπλισμών. Ειδικότερα, στην περίπτωση των ΓΣ υψηλής ακριβείας αυτό σχετίζεται με τη δυνατότητα εντοπισμού σημείων σε μεγάλες αποστάσεις (της τάξης των δεκάδων μέτρων) τελικής ακρίβειας έως και δεκάτων του χιλιοστού, ενώ η χρήση ΜΜΣ-ΦΒ συνδέεται κυρίως με τις εξαιρετικές δυνατότητες τους ως προς την ακρίβεια και εργονομία που παρέχουν σε εργασίες, όπου απαιτείται η λήψη αυξημένου όγκου πληροφορίας ιδιαίτερα υψηλής ακρίβειας.

### 3.1 ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΓΕΩΛΑΙΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ ΑΡΘΡΩΤΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ

Όπως ήδη επισημάνθηκε, η χρήση ΓΣ επιτρέπει τη λήψη μετρήσεων χωρίς ο μετρητικός εξοπλισμός να έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο ενδιαφέροντος. Αντίθετα, η χρήση ΜΜΣ-ΦΒ προϋποθέτει την τοποθέτηση του εξοπλισμού (ακίδα επαφής) στα σημεία ενδιαφέροντος. Επομένως, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας διερευνώνται και αξιολογούνται εναλλακτικές τεχνικές υλοποίησης κοινών σημείων / στόχων με τους δύο μετρητικούς εξοπλισμούς, μέσω πειραματικών εφαρμογών.

Στο πρώτο πείραμα επιχειρείται αξιολόγηση της τεχνικής άμεσης μέτρησης των κοινών σημείων με τα δύο μετρητικά συστήματα. Σε αυτή την περίπτωση, το κέντρο του ανακλαστικού στόχου αποτελεί την κοινή αναφορά (σημείο μέτρησης) και για τους δύο τύπους εξοπλισμού. Η υλοποίηση του σημείου, για τον ΓΣ γίνεται με απευθείας σκόπευση στο υπόψη σημείο, ενώ για το ΜΜΣ-ΦΒ τοποθετείται η ακίδα (hard point probe) στο κέντρο του στόχου. Για τις ανάγκες του πειράματος τοποθετήθηκαν δύο ανακλαστικοί στόχοι (retro reflective tapes) διαστάσεων 20 X 20 mm σε μικρή απόσταση και λήφθηκαν παρατηρήσεις με τους δύο τύπους εξοπλισμού (ΓΣ Leica TDA 5005 και ΜΜΣ-ΦΒ Romer Arm Omega 2030 – hard point probe). Οι μετρήσεις για κάθε σύστημα θεωρήθηκαν ισοβαρείς, ενώ λήφθηκε αξιόλογος πλεονασμός παρατηρήσεων. Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2, από τα υπολογιζόμενα τυπικά σφάλματα, στις μετρήσεις με τον ΜΜΣ-ΦΒ δεν παρατηρείται η ίδια επαναληψιμότητα ως προς την υλοποίηση του σημείου, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του ΓΣ. Αυτό αποδίδεται κυρίως στη μεγάλη εξάρτηση από τον χειριστή της ΜΜΣ-ΦΒ ως προς την υλοποίηση του κέντρου του στόχου, καθιστώντας τη μέθοδο επισφαλή.

Πίνακας 2 Μέτρηση απόστασης μεταξύ δύο ανακλαστικών στόχων με ΓΣ και ΜΜΣ-ΦΒ

Μετρήσεις με ΓΣ				Μετρήσεις με ΜΜΣ-ΦΒ			
A/A	Τιμές Απόστασης (mm)	A/A	Τιμές Απόστασης (mm)	A/A	Τιμές Απόστασης (mm)	A/A	Τιμές Απόστασης (mm)
1	681.7	6	681.6	1	681.46	6	682.60
2	681.6	7	681.6	2	681.51	7	682.83
3	681.7	8	681.6	3	681.75	8	681.36
4	681.6	9	681.6	4	682.07	9	681.86
5	681.6			5	682.52		
$\bar{x}_D = 681.6mm$		$\sigma_D = 0.05mm$		$\bar{x}_D = 682.00mm$		$\sigma_D = 0.18mm$	

Προκειμένου να ξεπεραστούν τα προβλήματα από την άμεση σκόπευση των κοινών σημείων στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η χρήση της ράβδου κρυφού σημείου (hidden bar point). Ο υπόψη εξοπλισμός βρίσκει εφαρμογή σε αντικείμενα βιομηχανικής μετρολογίας και αποτελείται από μεταλλική κυλινδρική ράβδο που φέρει από 2 έως 5 κατάλληλα υλοποιημένους στόχους οι οποίοι υλοποιούν μία ευθεία στο χώρο που διέρχεται από το σημείο απόληξης / ακίδα της ράβδου (Εικόνα 1). Η αναφορά στην ακίδα απόληξης γίνεται με διαφορετικό τρόπο για κάθε τύπο εξοπλισμού. Οι αποστάσεις μεταξύ των στόχων είναι προκαθορισμένες από τον κατασκευαστή και προσδιορισμένες με μεγάλη ακρίβεια.

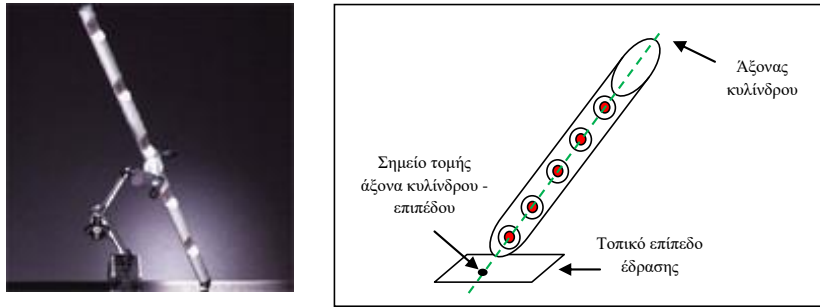
Στην περίπτωση του ΓΣ, ο υπολογισμός των βέλτιστων συντεταγμένων του κρυφού σημείου επιτυγχάνεται με σχέσεις αναλυτικής γεωμετρίας ενώ η ακρίβεια τους με εφαρμογή του Νόμου Μετάδοσης των Μεταβλητοτήτων στις παρατηρήσεις των πέντε σημείων / στόχων παρατήρησης της ράβδου. Η ακρίβεια υπολογισμού των συντεταγμένων κρυφού σημείου είναι περίπου της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή που παρατηρείται στη μέτρηση ενός ανακλαστικού στόχου.

Σε ότι αφορά το ΜΜΣ-ΦΒ, οι συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος παράγονται γεωμετρικά μέσα από την τομή του άξονα του κυλίνδρου της ράβδου και του τοπικού (στοιχειώδους) επιπέδου έδρασης της (Σχήμα 1). Η ακρίβεια μέτρησης (αβεβαιότητα λήψης συντεταγμένων) του βραχίονα είναι αισθητά καλύτερη από εκείνη του γεωδαιτικού σταθμού. Επομένως, οι κυριότερες πηγές αβεβαιότητας προέρχονται εδώ από πιθανά σφάλματα στη γεωμετρική μορφή της ράβδου και του εγγύς επιπέδου επαφής, καθώς επίσης και από την πιθανότητα μικρομετακίνησης της ράβδου κατά τη διάρκεια επαφής της ακίδας του οργάνου (χονδροειδές σφάλμα). Για αυτό το λόγο επιχειρείται να εξασφαλιστεί ένας υψηλός βαθμός ελευθερίας για την περιγραφή της γεωμετρίας της ράβδου και του επιπέδου, ενώ παράλληλα η λήψη των σημείων πάνω στη ράβδο πραγματοποιείται πλησιέστερα ως προς την επιφάνεια έδρασης.

Επομένως, στη δεύτερη πειραματική εφαρμογή εξετάζεται η λύση της αξιοποίησης της ράβδου κρυφού σημείου ως μέσο σύνδεσης. Πιο συγκεκριμένα, για πέντε διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης της ράβδου κρυφού σημείου (Position 1 – 5) εξετάζονται τα αποτελέσματα των σχετικών θέσεων των σημείων τόσο με μετρήσεις ΓΣ, όσο και ΜΜΣ-ΦΒ, ακολουθώντας τη μεθοδολογία λήψης / υπολογισμού που περιγράφηκε προηγουμένως. Ο μετρητικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ίδιος με αυτόν του πρώτου πειράματος. Οι μικρές διαφορές των σχετικών θέσεων μεταξύ των δύο τρόπων μέτρησης δείχνουν τη δυνατότητα αξιοποίησης της ράβδου για την επιτέλεση της σύνδεσης (Πίνακας 3).

Πίνακας 3 Σύγκριση σχετικών αποστάσεων μεταξύ των σημείων σύνδεσης (ΤΣ και ΜΜΣ-ΦΒ)

IDs	Σχετικές αποστάσεις (ΤΣ) (mm)	$\sigma_{D(TS)}$ (mm)	Σχετικές Αποστάσεις (ΜΜΣ-ΦΒ) (mm)	$\sigma_{D(MMS-\Phi B)}$ (length accuracy) (mm)	Διαφορές μεταξύ σχετικών αποστάσεων (mm)
POS1 - POS 2	298.0	0.3	298.2	0.11	-0.2
POS 2 - POS 3	252.9	0.5	252.5	0.11	0.4
POS 3 - POS 4	242.5	0.4	242.3	0.11	0.2
POS 4 - POS 5	407.2	0.4	407.3	0.11	-0.1



Εικόνα 1. Άποψη ράβδου κρυφού σημείου

Σχήμα 1. Η αναφορά στο κοινό σημείο επιτυγχάνεται, αφενός, με τη βοήθεια μετρήσεων προς τους πέντε ανακλαστικούς στόχους της ράβδου (ΓΣ), και αφετέρου, στην περίπτωση της ΜΜΣ-ΦΒ από τη λήψη σημείων στην εξωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου και του επιπέδου του αντικείμενου στην περιοχή επαφής της ράβδου με το αντικείμενο ενδιαφέροντος. Η σχετική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών στόχων της ράβδου είναι της τάξης των 100 mm.

### 3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ – ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις μεταξύ ΜΜΣ-ΦΒ και ΓΣ παρουσιάζουν ανομοιογένεια ως προς την ακρίβεια τους. Συγκεκριμένα, ο ΜΜΣ-ΦΒ παρέχει ακρίβεια που κυμαίνεται στα 0.08 – 0.09 mm εντός του εύρους λειτουργίας του. Σε ότι αφορά το ΓΣ οι ακρίβειες για τη μεμονωμένη διεύθυνση, αλλά και για το κεκλιμένο μήκος δίδονται από τον κατασκευαστή του οργάνου (ακρίβεια μερικών δεκάτων του χιλιοστού). Επίσης, σε αυτή την περίπτωση, τα τυπικά σφάλματα των συντεταγμένων εκτιμώνται με χρήση του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων, ενώ διαφοροποιούνται ανάλογα με τη θέση του σημείου ως προς το τοπικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (Σόφης, 2008).

Προκειμένου να μετασχηματιστούν οι παρατηρήσεις του βραχίονα στο σύστημα αναφοράς του ΓΣ χρησιμοποιείται το μαθηματικό μοντέλο ενός τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας. Τα δύο συστήματα διαφοροποιούνται κατά τρεις συνιστώσες παράλληλης μετάθεσης, τρεις γωνίες στροφής και ένα συντελεστή κλίμακας. Η γενική μορφή του μοντέλου μετασχηματισμού δίνεται από τη σχέση 1:

$$\begin{pmatrix} X^a \\ Y^a \\ Z^a \end{pmatrix} = \mu * R \begin{pmatrix} x^b \\ y^b \\ z^b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

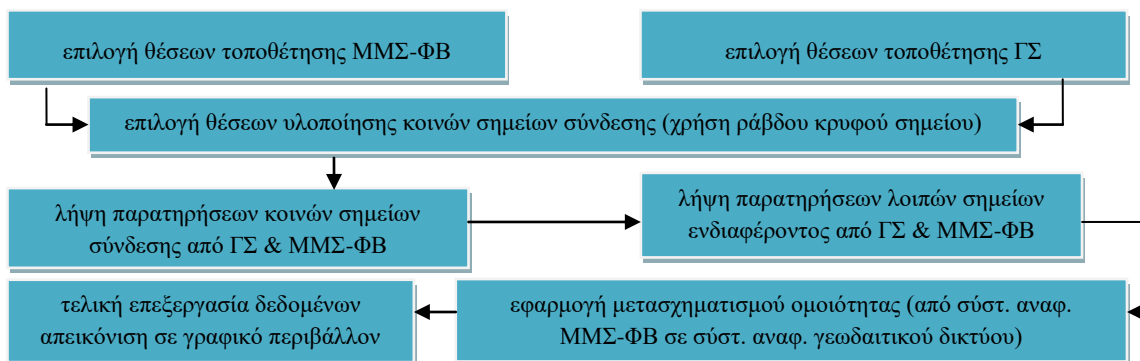
όπου:  $\mu$  είναι ο συντελεστής κλίμακας,  $R$  ο πίνακας στροφής,  $t_x$ ,  $t_y$ ,  $t_z$  τα στοιχεία πίνακα μετάθεσης,  $x^b$ ,  $y^b$ ,  $z^b$  οι συντεταγμένες στο σύστημα συντεταγμένων του ΜΜΣ-ΦΒ και  $X^a$ ,  $Y^a$ ,  $Z^a$  οι συντεταγμένες στο σύστημα συντεταγμένων του ΓΣ.

Οι συντεταγμένες του συστήματος του βραχίονα θεωρούνται γνωστές ποσότητες, χωρίς σφάλματα ως οι ακριβέστερες. Επομένως, ως μέθοδος συνόρθωσης επιλέγεται η μέθοδος των εμμέσων παρατηρήσεων βάσει της οποίας υπολογίζονται οι καλύτερες τιμές των αγνώστων καθοριστικών παραμέτρων, η *a-posteriori* μεταβλητότητα της μονάδας βάρους καθώς και οι αντίστοιχοι πίνακες μεταβλητότητας / συμμεταβλητότητας. Ιδιαίτερη σημασία κατά την εφαρμογή της διαδικασίας αποτελεί ο υπολογισμός των προσεγγιστικών τιμών των αγνώστων καθοριστικών παραμέτρων (παράμετροι ενός τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας).

Οι συντεταγμένες (X, Y) που προκύπτουν από το γεωδαιτικό σταθμό αναφέρονται σε οριζόντιο επίπεδο, η Z συνιστώσα κατά την κατακόρυφη διάσταση, ενώ αυτές του βραχίονα στο δικό του σύστημα συντεταγμένων.

### 3.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ ΑΡΘΡΩΤΟΥ ΒΡΑΧΙΩΝΑ

Η πραγματοποίηση της συνδυαστικής χρήσης των δύο εξοπλισμών γίνεται με χρήση της ράβδου κρυφού σημείου. Επομένως, λόγω της πολυπλοκότητας που εισάγει η χρήση της, είναι σημαντικό να καθοριστεί η διαδικασία που θα πρέπει να ακολουθείται κατά την υλοποίηση της μεθόδου. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθήθηκε προκειμένου να επιτευχθεί η συνδυασμένη χρήση των δύο συστημάτων.



Σχήμα 2. Γενικευμένο διάγραμμα ροής συνδυασμένης χρήσης ΓΣ και ΜΜΣ-ΦΒ

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΔΥΣΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η προτεινόμενη θεωρητική προσέγγιση συνδυασμένης χρήσης ΓΣ και ΜΜΣ-ΦΒ ελέγχεται πειραματικά σε πραγματικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε πειραματική εφαρμογή στους χώρους των Ελληνικών Ναυπηγείων Α.Ε. με αντικείμενο μια ιδιοσυσκευή (jig), Εικόνα 2(α), που προορίζεται για την ανέγερση τμήματος μεταλλικού δικτύματος, το οποίο αποτελεί κρίσιμο υποσύνολο μηχανολογικής κατασκευής με υψηλές προδιαγραφές διαστασιολογικής και γεωμετρικής ακρίβειας.

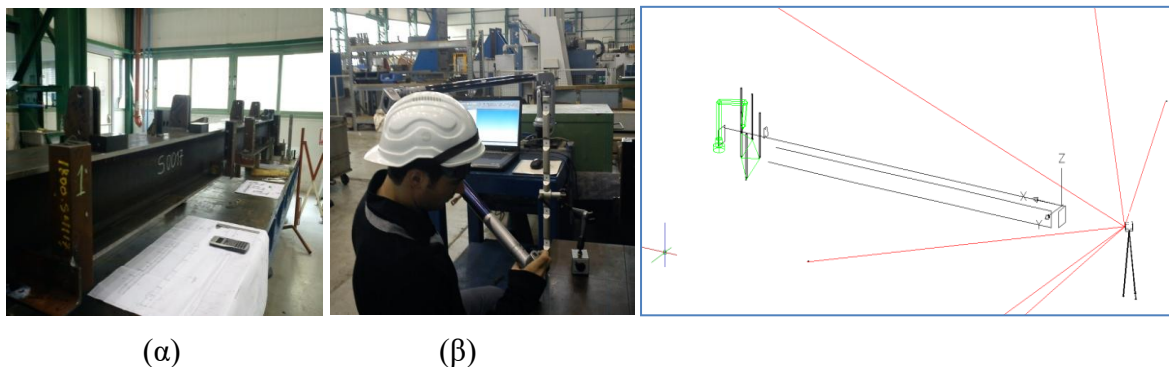
Μια σημαντική απαίτηση που πρέπει να εξασφαλίζεται πριν από την παράδοση μιας ιδιοσυσκευής στην παραγωγή αποτελεί η συμμόρφωση της με τις προδιαγραφόμενες



κατασκευαστικές ανοχές. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το αντικείμενο βρίσκεται στους χώρους του μηχανουργείου των Ελληνικών Ναυπηγείων Α.Ε.. Η διαμήκης διάσταση του αντικειμένου είναι ~6m, ποσότητα μεγαλύτερη από την εργόσφαιρα της ΜΜΣ-ΦΒ – ωστόσο, οι απαιτήσεις του έργου προϋποθέτουν τον γεωμετρικό έλεγχο της παραλληλίας των δύο ακραίων επιφανειών του αντικειμένου.

Οι μετρήσεις, σε ότι αφορά το γεωδαιτικό σταθμό, πραγματοποιήθηκαν με ΓΣ TDA 5005 της εταιρείας Leica Geosystems ακρίβειας γωνιών 0.5'' και αποστάσεων 0.5 mm σε ανακλαστικούς στόχους (retro – reflective). Επιπρόσθετα, αξιοποιήθηκε και ο αρθρωτός βραχίονας Romer Arm Omega 2030, εργόσφαιρας διαμέτρου 3000 mm και ακρίβειας  $\pm 0.07$  mm (κατά ANSI B89.4.22 -2004), με σφαιρικό αισθητήρα επαφής  $\varnothing 6$  mm. Παράλληλα, για την ανάλυση των δεδομένων πεδίου αξιοποιήθηκε τόσο μια προγραμματιστική πλατφόρμα που δημιουργήθηκε εντός του λογισμικού Matlab R2009b, όσο και τα μετρολογικά λογισμικά PC-DMIS v 3.7 της Wilcox Assoc. - Hexagon Metrology και Axyz Leica CDM v 1.4.1.

Η σύνδεση των συστημάτων ΜΜΣ-ΦΒ και ΓΣ έγινε με τη λήψη παρατηρήσεων σε πέντε διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης της ράβδου κρυφού σημείου (Εικόνα 2). Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων εξασφαλίστηκαν κατάλληλες συνθήκες ώστε να αποφευχθούν σφάλματα από δονήσεις, μετακινήσεις προσωπικού και υλικών, απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές, διενέργεια θερμών εργασιών. Επιπρόσθετα, πριν από τη διεξαγωγή των μετρήσεων ελέγχθηκε η γεωμετρία της ράβδου με χρήση σταθερής ΜΜΣ τύπου γέφυρας (CMM TESA Micro – Hite 3D, ακρίβειας  $\pm 0.007$  mm). Συνολικά οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από μια θέση στάσης του ΓΣ, καθώς και από μια τοποθέτηση του βραχίονα. Κατόπιν ακολούθησε η επεξεργασία / συνόρθωση των αποτελεσμάτων στο κοινό σύστημα συντεταγμένων του αντικειμένου (Σχήμα 3), το οποίο υλοποιείται από συγκεκριμένα σημεία που έχουν επισημανθεί πάνω στις κύριες επιφάνειες του.



Εικόνα 2. (α) Άποψη του αντικειμένου ενδιαφέροντος της πειραματικής εφαρμογής  
 (β) Υλοποίηση συστήματος σύνδεσης με χρήση της ράβδου κρυφού σημείου – ΜΜΣ-ΦΒ  
 Σχήμα 3. Απεικόνιση θέσεων τοποθέτησης της ράβδου κρυφού, τοποθέτησης ΓΣ και ΜΜΣ-ΦΒ και τμήματος του αντικειμένου ενδιαφέροντος σε περιβάλλον 3D-CAD

## 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η επεξεργασία των συνολικών παρατηρήσεων διακρίνεται σε τρία μέρη: το ΜΜΣ-ΦΒ, το ΓΣ και το συνδυασμό τους. Σε ότι αφορά το βραχίονα, η εύρεση των κοινών σημείων σύνδεσης έγινε από την τομή κυλίνδρων με τα τοπικά επίπεδα. Γενικά, διαπιστώθηκε η πολύ καλή προσαρμογή των σημειακών μετρήσεων στις ιδεατές γεωμετρίες, με ελαφρά χειρότερα αποτελέσματα στην βέλτιστη προσαρμογή επιπέδου, καθώς οι επιφάνειες έδρασης της ράβδου δεν ήταν κατεργασμένες μηχανουργικά και εμφάνιζαν ελαφρά ανομοιομορφία ( $RMS_{plane} \sim 0.08 \text{ mm}$ ).

Τα αποτελέσματα σύνδεσης εμφανίζουν μια ικανοποιητική προσαρμογή μεταξύ ΜΜΣ-ΦΒ και ΓΣ. Αυτό προκύπτει από τον πίνακα των υπολοίπων, βάσει της μέθοδου εμμέσων παρατηρήσεων, όπου οι τιμές δεν υπερβαίνουν τα 0.2 mm. Το  $a_{posteriori}$  τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους είναι ίσο με  $\hat{\sigma}_0 = 1.02$ , ενώ το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, όπως υπολογίζεται από τον πίνακα των υπολοίπων είναι ίσο με  $RMS_{residual} = 0.19 \text{ mm}$ . Οι τελικές συντεταγμένες μετασχηματίζονται πλέον στο σύστημα αναφοράς του αντικειμένου.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η συνδυαστική χρήση ΜΜΣ-ΦΒ και ΓΣ χαρακτηρίζεται εφικτή μέσω της αξιοποίησης της ράβδου κρυφού σημείου. Τα έως τώρα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά για την περαιτέρω διερεύνηση της δυνατότητας συνδυασμού και εφαρμογής τους σε εργασίες μετρολογίας μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ιχνηλασιμότητα της μεθόδου στη γενικότητά της υπάρχουν αρκετά σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Ένα από αυτά είναι η δημιουργία και ο πειραματικός έλεγχος εξειδικευμένης ιδιοσκευούς, αντί της ράβδου κρυφού σημείου, η οποία θα αποδίδει γεωμετρική αναφορά σε κοινό σημείο, μέσα από παρατηρήσεις γεωδαιτικών σταθμών και αρθρωτών βραχιόνων. Η ράβδος κρυφού σημείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις - ωστόσο, η αναγκαιότητα άμεσης επαφής της ράβδου με την κεφαλή του βραχίονα μπορεί να επιφέρει χονδροειδή σφάλματα, εξαιτίας της πρόκλησης μικρομετακινήσεων.

Επιπρόσθετα, καθοριστικής σημασίας είναι η μοντελοποίηση των πιθανών πηγών σφαλμάτων - κυρίως σε ότι αφορά αποκλίσεις από την ιδεατή γεωμετρία (σε αυτή την περίπτωση κύλινδρος και επίπεδο). Επιπρόσθετα, προτείνεται να δοκιμαστεί και να αξιολογηθεί η χρήση ενός τρισδιάστατου αφινικού μετασχηματισμού, έναντι του μετασχηματισμού ομοιότητας που αξιοποιήθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί κατά περίπτωση, η ανάγκη για αυτοματοποιημένη – ασύρματη μετάδοση των δεδομένων σε κάποια κοινή πλατφόρμα ανάλυσης – συνόρθωσης δεδομένων, η οποία δέον να αποτελεί μια εξειδικευμένη προγραμματιστική εφαρμογή, που θα επιτρέπει την άμεση επεξεργασία και απεικόνιση των δεδομένων, μέσα από μια εύχρηστη και φιλική διεπιφάνεια χρήστη.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Αγάτζα – Μπαλοδήμου Α.Μ., “*Θεωρία σφαλμάτων & συνορθώσεις Ι*”, 2005, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αγάτζα – Μπαλοδήμου Α.Μ., “*Θεωρία σφαλμάτων & συνορθώσεις ΙΙ*”, 2005, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δερμάνης Α., “*Συνορθώσεις παρατηρήσεων και θεωρία εκτίμησης*”, 1992, Εκδόσεις Ζήτη

Δερμάνης Α., Φωτίου Α., “*Μέθοδοι και εφαρμογές συνόρθωσης παρατηρήσεων*”, 1995, Εκδόσεις Ζήτη

Λάμπρου Ε. και Πανταζής Γ. , “*Εφαρμοσμένη Γεωδαισία*”, 2010, Εκδόσεις Ζήτη

Μπαλοδήμου Α, Μπαλοδήμος Δ., Σταθάς Δ., Αραμπατζή Ο., “*Γεωδαιτικά δίκτυα ελέγχου βιομηχανικών παραγωγών. Εφαρμογή σε σκάφος του Π.Ν.* ”, Τεχνικά χρονικά επιστ. εκδ. ΤΕΕ, 13 σελ, 2000, Αθήνα

Σόφης Α., Γκίκας Β., “*Γεωμετρική τεκμηρίωση νομέων Υ/Β με μεθόδους βιομηχανικής γεωδαισίας*”, Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008, Αθήνα

Φωτίου Α., “*Γεωμετρική Γεωδαισία – Θεωρία και Πράξη*”, 2007, Εκδόσεις Ζήτη

Cuypers W., Gestel N.V., Voet A., Kruth J. P., Mingneau J., Bleys P., “*Optical measurement techniques for mobile and large – scale dimensional metrology*”, Optics and Lasers in Engineering, Elsevier, pp 292 – 300, 2009

Dewitt B.A., “*Initial approximations for the three – dimensional conformal coordinate transformation*”, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 62, pp. 79 – 83, 1996, University of Florida

Koelman H.J., “*Application of a photogrammetry – based system to measure and re – engineer ship hulls and ship parts: An industrial practices – based report*”, Computer – Aided Design 42, Elsevier, pp. 731 – 743, 2010, Netherlands

Kraus K., “*Φωτογραμμετρία*”, Τόμος Ι, 2003, Αθήνα, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας

Kyle S., “*Large – scale metrology*”, Handbook of Measuring Systems Design, 2005, John Wiley & Sons

Muelaner J.E., Cai B., Maropoulos P.G., “*Large – volume metrology instrument selection and measurability analysis*”, Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture, Vol 224, pp. 853-868, 2010, UK

Omari S., Moselhi O, “*Integrating automated data acquisition technologies for progress reporting of construction projects*”, Automation in Construction, Elsevier, pp. 7, 2010

Peggs G.N., Maropoulos P.G., Hughes E.B., Forbes A.B., Robson S., Ziebart M., Muralikrishnan B., “*Recent developments in large – scale dimensional metrology*”, Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture, Vol 224, pp. 571-595, 2009, UK

Radovanovic R.S., Teskey W.F., “*A novel method of high precision height determination for industrial applications*”, Proceedings, 11<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation Measurements, 2003, Santorini, Greece

Ruhm K.H., “*What is metrology? A survey*”, Internet portal “Measurement Science and Technology”, ETH Zurich, Institute of Machine Tools and Manufacturing, 2009, Switzerland

Shimojima K., Furutani R., Takamasu K., Araki K., “*The estimation method of uncertainty of articulated coordinate measuring machine*”, XVII IMEKO World Congress, June 2003, Dubrovnik, Croatia

Shortis M.R. and Fraser C.S., “*State of the art of 3D measurements systems for industrial and engineering applications*”, FIG, University of Melbourne, Parkville, Victoria 3052, 1998, Australia

Sladek J, Ostrowska K, Gacek K., “*Kinematic metrological model of the coordinate measuring arm (MCMA)*”, XIX IMEKO World Congress, Fundamental and Applied Metrology, September 6-11, 2009, Lisbon, Portugal

Tasic T., Ackoa B., “*Integration of a laser interferometer and a CMM into a measurement system for measuring internal dimensions*”, Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor, 2010, Slovenia