



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

**Διερεύνηση συνδυαστικής χρήσης γεωδαιτικών σταθμών
και μηχανών μέτρησης συντεταγμένων αρθρωτού βραχίονα
για εφαρμογές βιομηχανικής γεωδαισίας**



Παππάς Σπύρος

Διπλωματική εργασία

Επιβλέπων: Γκίκας Βασίλειος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπήρξαν πρόσωπα τα οποία βοήθησαν για την επιτυχή ολοκλήρωση της, τα οποία αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω.

Καταρχάς, τον κ. Γκίκα Βασίλειο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π, για την ανάθεση του θέματος της εργασίας, την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου και την καθοδήγησή του. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για το ενδιαφέρον του και τη βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας τόσο σε πρακτικά όσο και θεωρητικά θέματα.

Ακόμα, τον κ. Καϊσαρλή Γιώργο, διδάκτορα Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη συμμετοχή του στην υλοποίηση της εργασίας και για τις συμβουλές του σε θέματα σε όλη την διάρκεια. Τον ευχαριστώ θερμά για την διάθεση του εξοπλισμού του εργαστηρίου της σχολής του, όπως και για την καίρια συμμετοχή του στις μετρήσεις αλλά και στις προπαρασκευαστές εργασίες.

Επίσης, τον κ. Ξενάκη Θωδωρή, διπλωματούχο Αγρονόμο και Τοπογράφο Μηχανικό Ε.Μ.Π., για την ουσιαστική του βοήθεια, για τις καίριες παρατηρήσεις του και τη συνδρομή του με πολλούς τρόπους σε όλα τα στάδια της εργασίας. Επίσης να τον ευχαριστήσω για την προθυμία που είχε πάντα να με βοηθήσει σε ότι χρειαστώ.

Τους κ. Δογγούρη Στέφανο, Πηνιώτη Γεώργιο, Μπίμη Αθανάσιο για την βοήθεια που μου παρείχαν και τις λύσεις που μου έδωσαν σε θέματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην εταιρεία METRICA για την δυνατότητα πρόσβασης στους χώρους τους και την εκτέλεση προπαρασκευαστικών εργασιών.

Τέλος ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για την υποστήριξη που μου παρείχε σε όλη αυτή τη διαδρομή. Ακόμα τους φίλους μου Βάσω, Παύλο, Παναγιώτη, Κλεάνθη, που ο καθένας με τον τρόπο του τελικά με βοήθησε ώστε να φέρω εις πέρας αυτή εδώ την εργασία. Κάθε εμπόδιο για καλύτερο!!!

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις περισσότερες σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές, απαιτείται υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και αξιοπιστία συνδυασμένες με αυξημένη ταχύτητα λήψης και επεξεργασίας δεδομένων για την παραγωγή οικονομολογικά άρτιων κατασκευών και εξαρτημάτων. Έτσι αναζητούνται συνεχώς υβριδικές λύσεις, όπου συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα του κάθε εξοπλισμού θα προσεγγίσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα όσο το καλύτερο δυνατόν. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ενός υβριδικού συστήματος που συνδυάζει τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού και αρθρωτού μετρητικού βραχίονα, χρησιμοποιώντας ως απαραίτητο παρελκόμενο το κυκλικό πρίσμα CCR.

Η προτεινόμενη προσέγγιση ελέγχεται πειραματικά σε αίθουσα κατάλληλη διαμορφωμένη στη Σχολή των Τοπογράφων και Αγρονόμων Μηχανικών και συμπεριλαμβάνει τρία σετ μετρήσεων για τρεις θέσεις του αρθρωτού βραχίονα, ενώ ο γεωδαιτικός σταθμός παραμένει ακλόνητος.

Η διεξαγωγή της πειραματικής εφαρμογής έγινε με την βοήθεια δύο λογισμικών σε πραγματικό χρόνο. Ο γεωδαιτικός σταθμός ήταν συνδεδεμένος με το πρόγραμμα Axyz, ενώ ο αρθρωτός βραχίονας με το λογισμικό PcDmis. Η ανάλυση πραγματεύεται το μαθηματικό μοντέλο σύνδεσής τους, την κατάστρωση ενός μεθοδολογικού πλαισίου και το μετασχηματισμό των δεδομένων σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς. Η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων έγιναν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Axyz. Τέλος έγινε η ανάλυση και ο προγραμματισμός στην γλώσσα Matlab του γενικού μαθηματικού μοντέλου διασύνδεσης (3-D αφινικός μετασχηματισμός).

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα, διαπιστώθηκε πως η συνδυασμένη χρήση του γεωδαιτικού σταθμού με τον αρθρωτό βραχίονα αποτελεί μία βιώσιμη υβριδική λύση για βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς η ακρίβεια της μεθόδου κρίνεται αρκετά ικανοποιητική.

ABSTRACT

In the majority of modern industrial applications, tight geometrical tolerances and reliability are required, combined with fast data acquisition / processing in order to establish the production of techno-economical constructions and assemblies. For that reason, 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 the best result. This diploma thesis aims to study 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 corner cube reflector.

The approach is experimentally verified on the premises of school of rural and surveying engineering, including three sets of measures for three positions of the articulated arm, while the total station remains fixed.

The conduction of the experimental application was undertaken using 2 softwares in real-time mode. The total station was combined with the software Leica Axyz and the articulated arm used the PcDmis software. 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. Data analysis was undertaken using the Axyz software. Lastly, the generic mathematic interconnection model (3D affine transformation) was implement using Matlab software environment.

The evaluation showed that the combination of a total station and an articulated arm, is a viable hybrid solution for industrial applications, because of the precision of this method which is found to be quite satisfactory.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT	5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η επιστήμη και οι Κλάδοι της Γεωδαισίας	17
1.2 Βιομηχανική Γεωδαισία	17
1.2.1 Ορισμός.....	17
1.2.2 Ιστορική αναδρομή	17
1.2.3 Βασικά χαρακτηριστικά Βιομηχανικής Γεωδαισίας.....	18
1.2.4 Περιοχές Εφαρμογών.....	18
1.3 Σκοπός της εργασίας.....	19
1.4 Δομή της εργασίας.....	20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ 3Δ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.1 Γενικά – Εφαρμοζόμενες Μεθοδολογίες	21
2.2 Όργανα μέτρησης.....	22
2.2.1 Μηχανές μέτρησης συντεταγμένων	22
2.2.2 Laser trackers.....	23
2.2.3 Σύγχρονοι γεωδαιτικοί σταθμοί.....	26
2.2.4 Laser scanners	27
2.3 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι.....	31
2.4 Μετρητικά συστήματα πολλαπλών αισθητήρων	31
2.4.1 Global positioning systems	32
2.4.2 Σύστημα γεωδαιτικών σταθμών	32
2.4.3 Σύστημα Laser tracker	33
2.4.4 Indoor GPS	33
2.5 Υβριδικά Συστήματα	34
2.5.1 Σύγχρονοι εικονογεωδαιτικοί σταθμοί.....	34
2.5.2 Μηχανές μέτρησης συντεταγμένων και Laser scanners.....	35
2.5.3 Εγγύς φωτογραμμετρία και Laser σαρωτές	35
2.6 Κριτήρια επιλογής μετρολογικού εξοπλισμού	36
2.6.1 Απαιτήσεις/προδιαγραφές εργασίας.....	36
2.6.2 Χαρακτηριστικά αντικειμένου μέτρησης	37
2.6.3 Περιβαλλοντικά κριτήρια.....	38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΙ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή	39
3.2 Αρχή λειτουργίας Γεωδαιτικών σταθμών.....	39
3.3 Παρελκόμενα Γεωδαιτικών σταθμών	40
3.3.1 Ανακλαστήρες.....	40
3.3.2 Τρίποδας βιομηχανικής γεωδαισίας.....	40
3.3.3 Ράβδος κρυφού σημείου	41
3.3.4 Προσοφθάλμιο με laser.....	41
3.3.5 Ράβδος κλίμακας.....	42
3.3.6 Λογισμικό επεξεργασίας	42
3.4 Μέθοδοι προσδιορισμού συντεταγμένων	43
3.4.1 Μέθοδος πολικών συντεταγμένων	43
3.4.2 Μέθοδος γωνιακής εμπροσθοτομίας	45
3.4.3 Μέθοδος Hansen	48
3.5 Γεωδαιτικοί σταθμοί που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία	51
3.6 Πηγές σφαλμάτων	52
3.6.1 Σφάλματα χειριστών.....	52
3.6.2 Σφάλματα οργάνων	52
3.6.3 Σφάλματα περιβάλλοντος.....	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ (CMM)

4.1 Εισαγωγή	54
4.2 Αρχή λειτουργίας CMM	55
4.3 Τύποι μετρητικών μηχανών CMM	56
4.3.1 Φορητές CMM	56
4.3.2 Σταθερές CMM	58
4.3.3 Σύγκριση- πεδία εφαρμογής.....	60
4.4. Παρελκόμενα CMM.....	61
4.4.1 Αισθητήρες.....	61
4.4.1α Αισθητήρες με επαφή	61
4.4.1β Αισθητήρες χωρίς επαφή.....	63
4.4.2 Λογισμικό CMM.....	65
4.5 Μέθοδοι προσδιορισμού συντεταγμένων	65
4.5.1 Μέθοδος με επαφή	65
4.5.2 Μέθοδος Laser.....	65
4.5.3 Μέθοδος εικόνας.....	66
4.6 Μετρητικές μηχανές CMM που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία.....	66
4.7 Πηγές σφαλμάτων	67

4.7.1 Σφάλματα χειριστών.....	67
4.7.2 Σφάλματα οργάνων.....	67
4.7.3 Σφάλματα περιβάλλοντος.....	67
4.8 Έλεγχος της αβεβαιότητας των μηχανών μέτρησης συντεταγμένων.....	68
4.8.1 Έλεγχος της αβεβαιότητας του αρθρωτού βραχίονα κατά ASME B89.4.22.....	69
4.8.1α Έλεγχος διαμέτρου κεφαλής σφαίρας.....	70
4.8.1β Έλεγχος μέτρησης ενός σημείου.....	71
4.8.1γ Έλεγχος όγκου.....	71
4.8.2 Έλεγχος της αβεβαιότητας κατά ISO 10360.....	72
4.8.2α ISO 10360-2.....	73
4.8.2β ISO 10360-4.....	74
4.8.3 Έλεγχος της αβεβαιότητας κατά VDI/VDE 2617.....	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ CMM ΣΕ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 Περιπτώσεις συνδυαστικής χρήσης γεωδαιτικού σταθμού και CMM.....	76
5.2 Διασύνδεση με χρήση ράβδου κρυφού σημείου.....	76
5.2.1 Ράβδος κρυφού σημείου και γεωδαιτικός σταθμός.....	77
5.2.1α Περίπτωση 1 ^η : Μέτρηση γωνιών και αποστάσεων με ένα γεωδαιτικό σταθμό.....	78
5.2.1β Περίπτωση 2 ^η : Μέτρηση γωνιών με ένα θεοδόλιχο.....	79
5.2.1γ Περίπτωση 3 ^η : Μέτρηση γωνιών με δύο θεοδόλιχα.....	82
5.2.2 Ράβδος κρυφού σημείου και CMM.....	82
5.3 Διασύνδεση με χρήση κυκλικού πρίσματος CCR.....	83
5.3.1 Κυκλικό πρίσμα CCR και γεωδαιτικός σταθμός.....	84
5.3.2 Κυκλικό πρίσμα CCR και CMM.....	84
5.4 Μαθηματικό μοντέλο διασύνδεσης των δύο εξοπλισμών (3D μετασχηματισμός).....	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

6.1 Περιγραφή εξοπλισμού και εγκαταστάσεων.....	87
6.1.1 Γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005.....	87
6.1.1α Παρελκόμενα TDA5005.....	89
6.1.2 Φορητή CMM με αρθρωτό βραχίονα – Platinum Faro Arm.....	95
6.1.2α Παρελκόμενα CMM.....	98
6.2 Προπαρασκευαστικές εργασίες.....	102
6.2.1 Εκμάθηση Λογισμικού AXYZ.....	102
6.2.2 Εξοικείωση με τον αρθρωτό βραχίονα και το λογισμικό PcDmis - Διακρίβωση της σφαιρικότητας των πρισμάτων.....	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ: ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

7.1 Διαμόρφωση πειραματικής διάταξης και διεξαγωγή μετρήσεων.....	107
7.2 Επεξεργασία δεδομένων	116
7.2.1 Τελικές Συντεταγμένες.....	116
7.2.2 Μετασχηματισμοί συστημάτων αναφοράς	117
7.2.3 Προσαρμογή επιπέδων.....	123
7.3 Παρουσίαση ακριβειών και έλεγχος αποτελεσμάτων	126
7.3.1 Ακρίβεια γεωδαιτικού σταθμού	126
7.3.2 Ακρίβεια αρθρωτού βραχίονα	128
7.3.3 Ακρίβεια προσαρμογής επιπέδων	128
7.3.4 Ακρίβεια μετασχηματισμών	129

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Συμπεράσματα.....	131
8.2 Προτάσεις	132

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 : Συγκριτική αντιπαραβολή συμβολόμετρου – αποστασιομέτρου (Σπύρου., 2013)...	25
Πίνακας 2.2 : Σύγκριση των Laser tracker (Σπύρου, 2013).....	27
Πίνακας 2.3 : Ακρίβειες και εύρος χρήσης για κάθε αρχή λειτουργίας σάρωσης (Siderberry, 2007).....	30
Πίνακας 2.4 : Όργανα βιομηχανικής γεωδαισίας - απαιτούμενες ακρίβειες (Peggs et. al., 2009)...	39
Πίνακας 3.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωδαιτικών σταθμών (www.geo-matching.com).....	52
Πίνακας 4.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων μετρητικών μηχανών CMM (www.faro.com, www.hexagonmetrology.com, www.helmel.com).....	67
Πίνακας 4.2 : Τα στοιχεία για τον ογκομετρικό έλεγχο (Mutilba et. al., 2013).....	72
Πίνακας 6.1 : Οι αρθρωτοί βραχίονες της σειράς Faro και η ακρίβειά τους κατά ASME B89.4.22 (www.faro.com).....	97
Πίνακας 6.2 : Τύποι αισθητήρων που συνδυάζονται με τον Faro Platinum Arm (www.faro.com).	98
Πίνακας 6.3 : Αποτελέσματα μέσης τυπικής απόκλισης κατά ASME B89.4.10-2000 για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.....	101
Πίνακας 6.4 : Αποτελέσματα μέγιστων αποκλίσεων κατά ASME B89.4.10-2000.....	102
Πίνακας 6.5 : Οι τυπικές αποκλίσεις των μετρημένων σημείων από το βέλτιστο επίπεδο.....	104
Πίνακας 6.6 : Οι τυπικές αποκλίσεις των μετρημένων σημείων από το βέλτιστο κύκλο.....	105
Πίνακας 7.1 : Τα μετρούμενα στοιχεία από το γεωδαιτικό σταθμό που προέκυψαν από το Axyz για την πρώτη σειρά μετρήσεων.....	111
Πίνακας 7.2 : Τα μετρούμενα στοιχεία από το φορητό βραχίονα που προέκυψαν από το PcDmis για την πρώτη σειρά μετρήσεων.....	111
Πίνακας 7.3 : Τα μετρούμενα στοιχεία από το γεωδαιτικό σταθμό για το ορθογώνιο βάθρο που προέκυψαν από το Axyz για την πρώτη σειρά μετρήσεων.....	113
Πίνακας 7.4 : Τα μετρούμενα στοιχεία από το γεωδαιτικό σταθμό που προέκυψαν από το Axyz για τη δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	113
Πίνακας 7.5 : Τα μετρούμενα στοιχεία από το φορητό βραχίονα που προέκυψαν από το PcDmis για τη δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	114
Πίνακας 7.6 : Τα μετρούμενα στοιχεία από το γεωδαιτικό σταθμό για το ορθογώνιο βάθρο που προέκυψαν από το Axyz για τη δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	114

Πίνακας 7.7 : Τα μετρούμενα στοιχεία από το φορητό βραχίονα για το ορθογώνιο βάθρο που προέκυψαν από το PcDmis για τη δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	115
Πίνακας 7.8 : Τα μετρούμενα στοιχεία από το γεωδαιτικό σταθμό που προέκυψαν από το Axyz για την τρίτη σειρά μετρήσεων.....	116
Πίνακας 7.9 : Τα μετρούμενα στοιχεία από το φορητό βραχίονα που προέκυψαν από το PcDmis για την τρίτη σειρά μετρήσεων.....	116
Πίνακας 7.10 : Τα μετρούμενα στοιχεία από το γεωδαιτικό σταθμό για το ορθογώνιο βάθρο που προέκυψαν από το Axyz για την τρίτη σειρά μετρήσεων.....	116
Πίνακας 7.11 : Τα μετρούμενα στοιχεία από το φορητό βραχίονα για το ορθογώνιο βάθρο που προέκυψαν από το PcDmis για την τρίτη σειρά μετρήσεων.....	117
Πίνακας 7.12 : Οι τελικές συντεταγμένες των σημείων.....	117
Πίνακας 7.13 : Οι τελικές συντεταγμένες των έξι κοινών σημείων στα δύο συστήματα αναφοράς.....	120
Πίνακας 7.14 : Οι τελικές συντεταγμένες των έξι κοινών σημείων στα δύο συστήματα αναφοράς.....	121
Πίνακας 7.15 : Οι τελικές συντεταγμένες των έξι κοινών σημείων στα δύο συστήματα αναφοράς.....	123

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 : Κατασκευή αεροπλάνων στις εγκαταστάσεις της EAB τύπου καναντέρ (αριστερά) και μαχητικού αεροσκάφους (δεξιά) (www.haicorp.com).....	20
Εικόνα 2.1 : Ο αρθρωτός βραχίονας Romer Omega 2025 με αισθητήρα R-SCAN (αριστερά) και η σταθερή υψηλής ακρίβειας Leitz PMM-C Infinity (δεξιά) (www.hexagonmetrology.us).....	24
Εικόνα 2.2 : Από αριστερά: Leica AT901, Faro Vantage και API Omnitrac2 (Σπύρου, 2013).....	26
Εικόνα 2.3 : Ο σημειακός σαρωτής Surphaser 25HSX (www.laserscanning-europe.com).....	29
Εικόνα 2.4 : Σαρωτής πολωμένου φωτός Steinbichler Comet L3D (www.inspect-online.com).....	30
Εικόνα 2.5 : Ο επίγειος σαρωτής ScanStation P20 της Leica (www.leica-geosystems.us).....	31
Εικόνα 2.6 : Μέθοδος εμπροσθοτομίας με χρήση έξι θεοδολίχων (Δογγούρης, 2005).....	33
Εικόνα 2.7 : Ο φορητός δέκτης-ανιχνευτής του συστήματος Indoor GPS (Peggs et.al., 2009).....	34
Εικόνα 2.8 : Ο εικονογεωδαιτικός ρομποτικός σταθμός της Leica Viva TS15 (www.leica-geosystems.com).....	36
Εικόνα 3.1 : Στόχοι βιομηχανικής γεωδαισίας (www.leica-geosystems.com).....	41
Εικόνα 3.2 : Τρίποδας βιομηχανικής γεωδαισίας (www.leica-geosystems.com).....	42
Εικόνα 3.3 : Η ράβδος κρυφού σημείου (www.leica-geosystems.com).....	42
Εικόνα 3.4 : Το DL2 Diode Laser Pointer (www.leica-geosystems.com).....	42
Εικόνα 3.5 : Η ράβδος κλίμακας (www.leica-geosystems.com).....	43
Εικόνα 4.1 : Μέτρηση εξαρτήματος προπέλας με τη χρήση CMM (www.navair.navy.mil).....	55
Εικόνα 4.2 : Η μηχανή μέτρησης συντεταγμένων Daisy (www.candidmicron.com).....	56
Εικόνα 4.3 : Αρχή λειτουργίας CMM (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007).....	56
Εικόνα 4.4 : Διαδικασία μέτρησης διάστασης (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007).....	57
Εικόνα 4.5 : Φορητές μηχανές τύπου αρθρωτού βραχίονα (www.temco-tool.com).....	58
Εικόνα 4.6 : Οι άξονες που σχηματίζει ο αρθρωτός βραχίονας (Santolaria et.al., 2010).....	58
Εικόνα 4.7 : Οι έξι βαθμοί ελευθερίας που προκύπτουν από τις αρθρώσεις του βραχίονα (Santolaria et.al., 2010).....	59
Εικόνα 4.8 : Οι βασικοί τύποι σταθερών μετρητικών μηχανών CMM (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007).....	60
Εικόνα 4.9 : Ο αισθητήρας επαφής (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007).....	62

Εικόνα 4.10 : Αισθητήρας με επαφή κατά τη μέτρηση (Μανσούρ & Καραχάλιου,2007).....	63
Εικόνα 4.11 : Διάφοροι τύποι αισθητήρων επαφής (www.hexagonmetrology.com).....	64
Εικόνα 4.12 : Αισθητήρες χωρίς επαφή τύπου Laser (www.directindustry.com).....	65
Εικόνα 4.13 : Τηλεοπτικοί αισθητήρες (www.directindustry.com).....	65
Εικόνα 4.14 : Η πρότυπη σφαίρα (Mutilba et. al, 2013).....	70
Εικόνα 4.15 : Η τρίεδρη βάση (Mutilba et. al, 2013).....	70
Εικόνα 4.16 : Η ράβδος σφαιρών (Mutilba et. al, 2013).....	71
Εικόνα 4.17: Διακρίβωση κεφαλής αισθητήρα (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007).....	71
Εικόνα 4.18 : Έλεγχος σφάλματος του μήκους (www.hexagonmetrology.com).....	74
Εικόνα 4.19 : Έλεγχος σφάλματος του αισθητήρα (www.hexagonmetrology.com).....	75
Εικόνα 4.20 : Έλεγχος σφάλματος του αισθητήρα σάρωσης (www.hexagonmetrology.com).....	75
Εικόνα 5.1 : Η ράβδος κρυφού σημείου (www.store.hexagonmetrology.us).....	78
Εικόνα 5.2 : Μέτρηση γωνιών και αποστάσεων στη ράβδο κρυφού σημείου.....	79
Εικόνα 5.3 : Μετρήσεις με τη ράβδο κρυφού σημείου (Teskey and Radovanovic, 2003).....	80
Εικόνα 5.4 : Το κυκλικό πρίσμα CCR (http://metrology.leica-geosystems.com).....	85
Εικόνα 5.5 : Μετρήσεις στο κυκλικό πρίσμα CCR.....	86
Εικόνα 6.1 : Η αίθουσα Υ23 της Σχολής των Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ.....	88
Εικόνα 6.2 : Ο γεωδαιτικός σταθμός TDA 5005 της εταιρίας Leica (www.leica-geosystems.com).89	89
Εικόνα 6.3 : Ο στόχος CCR 1.5in τοποθετημένος πάνω στη βάση του.....	91
Εικόνα 6.4 : Ο βιομηχανικός τρίποδας με το TDA5005.....	91
Εικόνα 6.5 : Ο στόχος CCR 1.5in τοποθετημένος πάνω στη βάση του.....	92
Εικόνα 6.6 : Το περιβάλλον του STM του λογισμικού Axyz.....	93
Εικόνα 6.7 : Η επιφάνεια εργασίας του CDM.....	94
Εικόνα 6.8 : Ο αρθρωτός βραχίονας Faro Platinum Arm.....	99
Εικόνα 6.9 : Ο τρίποδας στήριξης του αρθρωτού βραχίονα.....	100
Εικόνα 6.10 : Διαφοροποιήσεις του λογισμικού PC-DMIS ανάλογα με την εφαρμογή (Brown and Sharpe, 2003).....	100
Εικόνα 6.11 : Ο Η επιφάνεια εργασίας του λογισμικού PC-DMIS.....	102

Εικόνα 6.12 : Ορθογώνιο βάθρο στην αίθουσα Υ23.....	103
Εικόνα 6.13 : Κυκλικό βάθρο στην αίθουσα Υ23.....	105
Εικόνα 6.14 : Κέντρο Ο1 που προκύπτει από την τομή των τριών επιπέδων (αριστερά) και κέντρο Ο2 που προκύπτει από το κέντρο του κύκλου (δεξιά).....	106
Εικόνα 7.1 : Εισαγωγή παραμέτρων στο Axyz.....	109
Εικόνα 7.2 : Το πρίσμα CCR τοποθετημένο στη θέση παρατήρησης.....	110
Εικόνα 7.3 : Διάταξη γεωδαιτικού σταθμού, αρθρωτού βραχίονα και πρίσματος CCR για την πρώτη θέση του βραχίονα.....	110
Εικόνα 7.4 : Μέτρηση στο ορθογώνιο βάθρο με τον αρθρωτό βραχίονα.....	114
Εικόνα 7.5 : Η μορφή του αρχείου txt για την εισαγωγή δεδομένων στο Axyz.....	119
Εικόνα 7.6 : Ο μετασχηματισμός έξι παραμέτρων για την πρώτη θέση του βραχίονα.....	120
Εικόνα 7.7 : Ο μετασχηματισμός επτά παραμέτρων για την πρώτη θέση του βραχίονα.....	121
Εικόνα 7.8 : Ο μετασχηματισμός έξι παραμέτρων για τη δεύτερη θέση του βραχίονα.....	122
Εικόνα 7.9 : Ο μετασχηματισμός επτά παραμέτρων για τη δεύτερη θέση του βραχίονα.....	122
Εικόνα 7.10 : Ο μετασχηματισμός έξι παραμέτρων για τη δεύτερη θέση του βραχίονα.....	123
Εικόνα 7.11 : Ο μετασχηματισμός επτά παραμέτρων για την τρίτη θέση του βραχίονα.....	123
Εικόνα 7.12 : Ο μετασχηματισμός έξι παραμέτρων για την τρίτη θέση του βραχίονα.....	124
Εικόνα 7.13 : Ορθογώνιο βάθρο στην αίθουσα Υ23.....	124
Εικόνα 7.14 : Προσαρμογή επίπεδου από μετρήσεις του γεωδαιτικού σταθμού για τη θέση 1 (αριστερά) και 2 (δεξιά).....	125
Εικόνα 7.15 : Προσαρμογή επίπεδου από μετρήσεις του γεωδαιτικού σταθμού για τη θέση 3 με όλα τα σημεία (αριστερά) και χωρίς το πρώτο σημείο (δεξιά).....	126
Εικόνα 7.16 : Προσαρμογή επίπεδου από μετρήσεις του αρθρωτού βραχίονα για τη θέση 2 (αριστερά) και 3 (δεξιά).....	126

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 : Η αρχή λειτουργίας του τριγωνισμού (Siderberry, 2007).....	31
Σχήμα 2.2 : Η διάταξη του συστήματος Indoor GPS (Peggs et. al., 2009).....	35
Σχήμα 3.1 : Η μέθοδος των πολικών συντεταγμένων.....	44
Σχήμα 3.2 : Η μέθοδος της εμπροσθοτομίας στο χώρο.....	46
Σχήμα 3.3 : Το γραμμικό σφάλμα δ λόγω σ_{γ}	48
Σχήμα 3.4 : Περιοχή αβεβαιότητας στην εμπροσθοτομία λόγω σφαλμάτων των γωνιών.....	48
Σχήμα 3.5 : Μέθοδος Hansen.....	50
Σχήμα 5.1 : Η διάταξη της μεθόδου (Teskey and Radovanovic, 2003).....	81
Σχήμα 5.2 : Η σχηματιζόμενη γεωμετρία της μεθόδου (Teskey and Radovanovic, 2003).....	82
Σχήμα 5.3 : Τομή επιπέδου και άξονα κυλίνδρου (Ξενάκης et al., 2012).....	84
Σχήμα 7.1 : Η διάταξη της πειραματικής εφαρμογής.....	109
Σχήμα 7.2 : Απεικόνιση του νοητού εξαπλεύρου από κοινές μετρήσεις έξι σημείων.....	112
Σχήμα 7.3 : Οι θέσεις των σημείων πάνω στο βάθρο μετρημένα από το γεωδαιτικό σταθμό.....	112
Σχήμα 7.4 : Οι θέσεις των σημείων πάνω στο βάθρο μετρημένα από τους δύο εξοπλισμούς.....	115

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4.1 : Σύγκριση δυό CMM κατά ISO 10360-2 (www.hexagonmetrology.com).....	74
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Εισαγωγή

1.1 Η επιστήμη και οι Κλάδοι της Γεωδαισίας

Γεωδαισία είναι η επιστήμη που ασχολείται με παρατηρήσεις, μετρήσεις και υπολογισμούς, με σκοπό να προσδιορίσει το σχήμα (μορφή), το μέγεθος (διαστάσεις), και το πεδίο βαρύτητας της Γης και τις μεταβολές αυτών με το χρόνο. Αυτό φαίνεται και από την ετυμολογία της λέξης, που προέρχεται από το "γη + δαίω", που σημαίνει "μοιράζω τη γη". Αποτελεί λοιπόν, στο πρακτικό της μέρος, μια συνδυασμένη εφαρμογή της γεωμετρίας και της γεωγραφίας με χρήση ανώτερων μαθηματικών, και κυρίως στατιστικών μεθόδων. Η Γεωδαισία χωρίζεται σε κλάδους, από τους οποίους οι σημαντικότεροι είναι:

- *Φυσική Γεωδαισία*
- *Δορυφορική Γεωδαισία*
- *Τοπογραφία*
- *Υδρογραφία*
- *Τεχνική Γεωδαισία*

1.2 Βιομηχανική Γεωδαισία

1.2.1 Ορισμός

Η δυνατότητα των γεωδαιτικών μεθοδολογιών και τεχνικών να προσδιορίζουν τις συντεταγμένες σημείων του χώρου με μεγάλη προδιαγεγραμμένη και ελέγξιμη ακρίβεια, έχει δώσει την δυνατότητα στους γεωδαιτές να αποτυπώνουν, εκτός από τα τμήματα της φυσικής γήινης επιφάνειας, και αντικείμενα όπως μέρη βιομηχανικών κατασκευών και να είναι σε θέση να προσδιορίζουν το σχήμα και το μέγεθος ενός βιομηχανικού εξαρτήματος με μεγάλη ακρίβεια.

Αυτός ο κλάδος της γεωδαισίας, δηλαδή ο κλάδος που υπολογίζει τη μορφή και το μέγεθος κάποιου αντικειμένου (βιομηχανικό παράγωγο), ονομάζεται Βιομηχανική Γεωδαισία και αποτελεί μέρος της Τεχνικής Γεωδαισίας.

1.2.2 Ιστορική αναδρομή

Η ιστορία της βιομηχανικής γεωδαισίας ξεκινάει περίπου το 1980. Αρχικά τα όργανα που υπήρχαν δεν μπορούσαν να προσδιορίσουν αποστάσεις με μεγάλη ακρίβεια και έτσι

πραγματοποιούνταν κυρίως μετρήσεις γωνιών με θεοδολίχα και μετρούνταν μόνο τα απαραίτητα μήκη ώστε να μπορεί να δοθεί και η κλίμακα στο δίκτυο μετρήσεων. Η μεθοδολογία που ακολουθούταν ήταν η αρχή της εμπροσθοτομίας που μπορούσε να επιτύχει αρκετά ικανοποιητικές ακρίβειες. Ένας άλλος τρόπος που ακολουθούταν ήταν οι έμμεσες μετρήσεις χρησιμοποιώντας τη φωτογραμμετρία. Χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της συνόρθωσης κατά δέσμες, υπολογιζόταν η θέση και ο προσανατολισμός ορισμένων επιλεγμένων σημείων σε ένα καρτεσιανό τρισδιάστατο οριζοντιωμένο σύστημα συντεταγμένων. Έτσι ήταν εφικτό να δοθούν οι τρισδιάστατες συντεταγμένες και να γίνει η εκτίμηση των σφαλμάτων.

Τα παραπάνω συστήματα ήταν τα πρώτα που μπορούσαν να επιτύχουν αρκετά ικανοποιητικές ακρίβειες, ωστόσο η διαδικασία ήταν χρονοβόρα και οικονομικά ασύμφορη. Έτσι επανήλθε η ιδέα ένταξης στις μεθοδολογίες και μετρήσεις αποστάσεων με μεγάλη ακρίβεια. Χρησιμοποιήθηκαν κάποια πειραματικά συμβολόμετρα και ταινίες invar, ωστόσο η πραγματική επανάσταση έγινε λίγο αργότερα με την ανάπτυξη των Laser trackers και των Μηχανών μέτρησης συντεταγμένων που μπορούσαν να μετράνε αποστάσεις με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Το πρώτο εμπορικό laser tracker με τέτοια τεχνολογία παραδόθηκε από τη Leica το 1991 με την ονομασία SMART 310. Βασιζόταν στην απ' ευθείας μέτρηση ενός σημείου με το καθορισμό μιας γωνίας και μιας απόστασης μετρημένης με συμβολόμετρο σε ένα ανακλαστικό στόχο ο οποίος ήταν τοποθετημένος κατάλληλα πάνω στο σημείο ενδιαφέροντος. Μειονέκτημα βέβαια αποτελεί το γεγονός πως όλα τα σημεία πρέπει να είναι προσβάσιμα ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί ο ανακλαστικός στόχος. Αργότερα ο συνδυασμός του θεοδολίχου και του EDM, δηλαδή ο γνωστός σε όλους μας ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός (Total Station), και η βελτίωση στις ακρίβειες μέτρησης του οργάνου, θα το καταστήσουν ικανό να συμμετέχει σε ορισμένες εργασίες της βιομηχανικής γεωδαισίας.

1.2.3 Βασικά χαρακτηριστικά Βιομηχανικής Γεωδαισίας

Ο σκοπός της Βιομηχανικής Γεωδαισίας είναι να προσδιορίσει τις συντεταγμένες X , Y , Z , σημείων κάποιου αντικειμένου (βιομηχανικό παράγωγο), είτε σε τοπικό αυθαίρετο σύστημα, είτε στο σύστημα του αντικειμένου, με μεγάλη ακρίβεια, ώστε με κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων να προκύψουν οι διαστάσεις, η μορφή και το σχήμα του αντικειμένου. Κατόπιν είναι δυνατόν, με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού να βρεθούν οι σχετικές αποκλίσεις σε σχέση με τις θεωρητικές θέσεις των σημείων, καθώς επίσης να γίνει και προσαρμογή κάποιου μαθηματικού μοντέλου στο σύνολο των σημείων. Σε αυτό το σημείο τονίζεται πως ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην επιλογή του οργάνου ή οργάνων και της μεθοδολογίας που θα ακολουθηθεί. Συνήθως οι επιδιωκόμενες ακρίβειες για τον κλάδο της βιομηχανικής γεωδαισίας είναι της τάξης των 0.5 mm ή και εκατοστών του χιλιοστού. Η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού και της μεθοδολογίας που θα ακολουθηθεί θα πρέπει να βασίζεται σε ένα συνδυασμό παραγόντων, όπως η επίτευξη των επιθυμητών ακριβειών, η τήρηση του χρονοδιαγράμματος και η εξοικονόμηση πόρων.

1.2.4 Περιοχές Εφαρμογών

Οι εφαρμογές της Βιομηχανικής Γεωδαισίας είναι πάρα πολλές και ποικίλες. Οι τεχνικές της πρωτοεμφανίστηκαν στις εργασίες εξόρυξης φυσικών πόρων ανοιχτής θαλάσσης (Σοφής, 2008) και σήμερα έχουν εξαπλωθεί σε πάρα πολλούς τομείς της βιομηχανίας, όπως:

- *Αεροναυπηγική*
- *Ναυπηγική*
- *Έλεγχος διαστάσεων*
- *Αυτοκινητοβιομηχανία*
- *Ρομποτική*



Εικόνα 1.1: Κατασκευή αεροπλάνων στις εγκαταστάσεις της EAB τύπου καναντέρ (αριστερά) και μαχητικού αεροσκάφους (δεξιά) (www.haicorp.com)

1.3 Σκοπός της εργασίας

Στο πλαίσιο της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας τέθηκαν δυο στόχοι: Πρώτος στόχος ήταν η μελέτη των αρχών λειτουργίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών του γεωδαιτικού σταθμού TDA5005 και του αρθρωτού βραχίονα Platinum Faro Arm. Η διερεύνηση των δυνατοτήτων των δύο αυτών εξοπλισμών που χρησιμοποιούνται για βιομηχανικές εφαρμογές, έγινε τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και μέσα από πρακτικές εφαρμογές.

Δεύτερος στόχος της εργασίας ήταν η συνδυαστική χρήση των εξοπλισμών χρησιμοποιώντας το κυκλικό πρίσμα CCR. Ο σκοπός της πειραματικής εφαρμογής ήταν η χρησιμοποίηση του πρίσματος CCR ως μέσο διασύνδεσης των δύο εξοπλισμών ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο η υβριδική αυτή λύση θα μπορούσε να βρει εφαρμογή σε βιομηχανικές εργασίες εκμεταλλευόμενα τα πλεονεκτήματα του κάθε εξοπλισμού

Για την ταυτόχρονη ικανοποίηση και των δυο στόχων, εκτελέστηκε η πειραματική εφαρμογή που συμπεριλάμβανε 3 σειρές μετρήσεων τόσο στο κυκλικό πρίσμα όσο και στα ορθογώνια βάθρα της σχολής των Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών και έγιναν οι απαραίτητες συγκρίσεις.

1.4 Δομή της εργασίας

Αναλυτικότερα, σε συνέχεια με τα παραπάνω, η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε οχτώ κεφάλαια, των οποίων το περιεχόμενο παρουσιάζεται συνοπτικά ως εξής:

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στη Βιομηχανική Γεωδαισία ως κλάδο της εφαρμοσμένης Τεχνικής Γεωδαισίας, περιγράφοντας τα βασικά χαρακτηριστικά της και τις περιοχές που βρίσκει εφαρμογή. Επίσης δίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή του κλάδου αυτού από την δημιουργία του έως σήμερα και τέλος παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας και η δομή της.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναλύει τα συστήματα και τις μεθόδους 3D προσδιορισμού της θέσης και διαστασιολόγησης σε βιομηχανικές εφαρμογές και παρουσιάζονται τα κριτήρια επιλογής του κατάλληλου μετρολογικού εξοπλισμού.

Το τρίτο κεφάλαιο πραγματεύεται το γεωδαιτικό σταθμό ξεκινώντας από την αρχή λειτουργίας του, τις μεθόδους μέτρησης μήκους και την παρουσίαση των παρελκόμενων. Κατόπιν αναφέρεται στην ανάλυση των κύριων πηγών σφαλμάτων και στους περιορισμούς που προκύπτουν από τη χρήση του οργάνου.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τις μηχανές μέτρησης τρισδιάστατων συντεταγμένων (CMM), αναλύοντας τους τύπους των μετρητικών μηχανών, την αρχή λειτουργίας τους καθώς και τα παρελκόμενά τους. Τέλος γίνεται αναφορά στις πηγές σφαλμάτων των μηχανών αυτών και παρουσιάζονται αναλυτικά οι αβεβαιότητες και οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται στις CMM.

Το πέμπτο κεφάλαιο πραγματεύεται τη συνδυασμένη χρήση του γεωδαιτικού σταθμού και της CMM σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εφαρμογές. Αναλύει τις περιπτώσεις που ενδείκνυται αυτή η μέθοδος, τον τρόπο διασύνδεσης των δύο εξοπλισμών και το μαθηματικό μοντέλο.

Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται αρχικά στη διαμόρφωση της πειραματικής διάταξης. Επίσης στις προπαρασκευαστικές εργασίες που έγιναν και στην πλήρη περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε και των εγκαταστάσεων που έλαβε χώρα η πειραματική εφαρμογή.

Το έβδομο κεφάλαιο αναλύει τη διεξαγωγή της πειραματικής εφαρμογής. Αρχικά αναφέρεται στη διαδικασία των μετρήσεων και ύστερα στην επεξεργασία των δεδομένων που έγινε. Τέλος παρουσιάζονται οι ακρίβειες των αποτελεσμάτων και γίνεται ο τελικός έλεγχος.

Το όγδοο κεφάλαιο αναφέρει τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και δίνονται προτάσεις για μελλοντική συνέχισή της αλλά και για έρευνα στη συνδυασμένη χρήση των δύο εξοπλισμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ 3Δ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.1 Γενικά – Εφαρμοζόμενες Μεθοδολογίες

Η αύξηση των απαιτήσεων στον κλάδο της βιομηχανίας για οικονομικότερες μεθόδους παραγωγής και συναρμολόγησης όλο και μεγαλύτερων βιομηχανικών παραγώγων, έχει καταστήσει την ανάγκη για γρήγορες και ακριβέστερες μεθόδους μέτρησης. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από σημαντικές τεχνικές μετρήσεων, κάποιες από τις οποίες βασίζονται στην υφιστάμενη τεχνολογία, ενώ κάποιες άλλες είναι καινοτόμες και μπορεί να χαρακτηριστούν επαναστατικές για τον κλάδο. Νέες τεχνικές είναι ο αισθητήρας έξι βαθμών ελευθερίας των φορητών μηχανών μέτρησης συντεταγμένων και το εξελιγμένο συμβολόμετρο μέτρησης απόλυτων αποστάσεων των Laser trackers, που επιτρέπει σε καινούργια όργανα να κρίνονται κατάλληλα για μετρήσεις μεγάλης ακρίβειας, που συνήθως ήταν προνόμιο των μεγάλων παραδοσιακών μηχανών μέτρησης συντεταγμένων (CMMs).

Πρόσφατα έχει επίσης σημειωθεί πρόοδος στην αξιολόγηση των μετρητικών επιδόσεων των Laser trackers σύμφωνα με τα διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα ISO. Επιπλέον έχουν γίνει σημαντικά βήματα στην ανάπτυξη μεθόδων εκτίμησης των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τα δεδομένα μέτρησης που προέρχονται από περισσότερα από ένα όργανα μέτρησης (Wanli and Zhankui, 2010).

Το τελευταία 10 χρόνια, οι τεχνικές του παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης (GPS) έχουν αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό που το έχουν καταστήσει μία βιώσιμη επιλογή για την παρακολούθηση και μέτρηση μεγάλων κατασκευών σε ένα ανοιχτό βιομηχανικό περιβάλλον με αξιοπρόσεχτα επίπεδα ακρίβειας. Η αξιοποίησή του ωστόσο σε εφαρμογές βιομηχανικής γεωδαισίας υστερεί λόγω της περιορισμένης ακρίβειάς του και της αδυναμίας λειτουργίας του σε κλειστούς χώρους.

Η ανάπτυξη νέων τεχνικών και μεθοδολογιών μέτρησης με μεγάλη ακρίβεια σε συνδυασμό με τις αυξημένες απαιτήσεις του κατασκευαστή, κάνουν την επιλογή του οργάνου και της μετρητικής διαδικασίας μία πολύ δύσκολη επιλογή. Η επιλογή μπορεί να γίνει ακόμα πιο δύσκολη καθώς σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να γίνει συνδυασμός δύο οργάνων, όπως CMM και Laser tracker, CMM εξοπλισμένα με laser scanners κ.ά. Η τελική επιλογή πρέπει να λαμβάνει υπόψη το κόστος, τον χρόνο αλλά και τις απαιτήσεις ακρίβειας που θέτει ο κατασκευαστής με την λύση της χρησιμοποίησης ενός υβριδικού συστήματος να κρίνεται συνήθως η καταλληλότερη.

2.2 Όργανα μέτρησης

2.2.1 Μηχανές μέτρησης συντεταγμένων

Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM) χρησιμοποιούνται ήδη αρκετά χρόνια και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών. Αποτελούν μία λύση μεγάλης ακρίβειας για τον προσδιορισμό της 3D θέσης και πρόκειται για ψηφιοποιητές που χρησιμοποιούν κωδικοποιητές προκειμένου να ελέγχουν τις διάφορες φάσεις υπολογισμού των συντεταγμένων. Είναι κατάλληλες για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια ή για περιπτώσεις όπου τα αντικείμενα προς μέτρηση μπορούν να μετακινηθούν. Πρόσφατα εξελίσσονται και πιο ελαφριές μηχανές με δυνατότητα μεταφοράς στο προς μέτρηση αντικείμενο. Οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούν αρθρωτούς βραχίονες και παρά την μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με τις σταθερές και αρκετά βαριές μηχανές μέτρησης συντεταγμένων, συμπληρώνουν το πεδίο των φορητών οργάνων με εργόσφαιρα λίγα μέτρα (< 5 - 6 m).

Οι πρώτες μηχανές μέτρησης συντεταγμένων κατασκευάστηκαν στα μέσα του 1950 και ονομάζονταν γενικές μετρητικές μηχανές (Universal measuring machines). Λειτουργούσαν μόνο χειροκίνητα με τον χειριστή να κινεί και τα τοποθετεί τον αισθητήρα στα προς μέτρηση σημεία. Τα μετρούμενα στοιχεία καταγραφόντουσαν στη μικρομετρική κλίμακα βερνιέρου (Vernier scale) και μετά απαιτούνταν από τον χρήστη να διαβάσει τα δεδομένα, να τα καταγράψει σε ένα χαρτί και ύστερα να εκτελέσει όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς. Μια σημαντική εξέλιξη των CMM συνέβη στις αρχές της δεκαετίας του 1960 με την εισαγωγή της πρώτης ηλεκτρονικής CMM, που ήταν εφοδιασμένη με έναν καταγραφέα που εμφάνιζε τα αποτελέσματα ψηφιακά απαλλάσσοντας έτσι τον χρήστη από την ανάγνωση της κάθε μέτρησης ξεχωριστά (Genest, 1999).

Η έλευση των υπολογιστών για εμπορική και βιομηχανική χρήση στις αρχές του 1970 έφεραν την επανάσταση στη χρήση της CMM στις μετρήσεις και στην επεξεργασία μετέπειτα. Με το κατάλληλο λογισμικό ο υπολογιστής ήταν σε θέση να λαμβάνει τα δεδομένα από τη CMM, να τα επεξεργάζεται, και να τα μετατρέπει στην πληροφορία που θέλει ο χρήστης, κάνοντας έτσι την διαδικασία πάρα πολύ γρήγορη. Στα μέσα της δεκαετίας του 1970 πλέον ο υπολογιστής ήταν σε θέση να χειρίζεται μόνος του την μηχανή και έτσι οι μετρήσεις ήταν απαλλαγμένες από τον παράγοντα ανθρώπινο-σφάλμα.

Οι κατασκευαστές των μηχανών CMM επικεντρώθηκαν στην διαμάχη μεταξύ της διατήρησης ή και αύξησης της ακρίβειας των μηχανών, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα εργονομική σχεδίαση ώστε να ενσωματωθούν στις βιομηχανικές συνθήκες. Για να το επιτύχουν αυτό επικεντρώθηκαν κυρίως σε τρεις τομείς :

- Απεξάρτηση των δυνατοτήτων λειτουργίας από τις μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος
- Υψηλή ταχύτητα στη συλλογή δεδομένων
- Βελτιώσεις των δυνατοτήτων του λογισμικού που τις συνοδεύουν

Η πρόοδος σε όλους τους παραπάνω τομείς βελτίωσαν τις δυνατότητες των CMM και κατάφεραν να είναι ανθεκτικές στις δύσκολες συνθήκες που επικρατούν σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, διατηρώντας και βελτιώνοντας παράλληλα την ακρίβεια μέτρησης.

Επίσης δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη και βελτίωση των αισθητήρων που αποτελούν απαραίτητο μέρος για μία CMM (Genest, 1999). Αυτοί οι αισθητήρες συνδυάζουν στοιχεία από τεχνολογίες και τεχνικές της οπτικής, των lasers και του video. Καινούργιοι αισθητήρες με περισσότερες δυνατότητες κατασκευάζονται συνεχώς κάνοντας δυνατό να μετρούν μέχρι και 200 points/s, με την ακρίβεια μέτρησης ενός τέτοιου αισθητήρα να φτάνει μέχρι και τα 2 μm .

Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων εξελίσσονται συνέχεια και σήμερα διατίθενται στο εμπόριο διάφορα μοντέλα τέτοιων μηχανών και παρελκόμενων-αισθητήρων που καλύπτουν όλο το φάσμα των βιομηχανικών εφαρμογών. Οι μηχανές τύπου αρθρωτού βραχίονα μετράνε με ακρίβεια που μπορεί να φτάσει τα 0.02mm, οι σταθερές φτάνουν συνήθως τα 0.003mm, ενώ η ακριβέστερη σταθερή μηχανή με το όνομα Leitz PMM-C Infinity που συμμετέχει στις μετρήσεις του μεγαλύτερου σε έκταση κέντρου πυρηνικών ερευνών (CERN) φτάνει τα 0.0003mm, δηλαδή λιγότερο από μισό μικρόμετρο.



Εικόνα 2.1: Ο αρθρωτός βραχίονας Romer Omega 2025 με αισθητήρα R-SCAN (αριστερά) και η σταθερή υψηλής ακρίβειας Leitz PMM-C Infinity (δεξιά) (www.hexagonmetrology.us)

2.2.2 Laser trackers

Τα Laser trackers χρησιμοποιούνται εκτενώς στις μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εφαρμογές. Εφευρέθηκαν το 1980 από τους Lau και Hocken και η λειτουργία τους βασίζεται στο συνδυασμό επιμέρους μηχανισμών. Έχουν ενσωματωμένο μηχανισμό για την μέτρηση αποστάσεων

και μπορεί να είναι είτε ένα Laser συμβολόμετρο (IFM – interferometer), είτε ένα αποστασιόμετρο (ADM – absolute distance measurement), είτε συνδυασμός και των δύο συστημάτων. Το συμβολόμετρο διακρίνεται για την υψηλή ταχύτητα και ακρίβεια μέτρησης, που είναι της τάξης των $\pm 0.4\mu\text{m} + 0.3\mu\text{m}/\text{m}$. Το αποστασιόμετρο χαρακτηρίζεται από εν γένει χαμηλότερη ταχύτητα και ακρίβεια ($\pm 15\mu\text{m} + 1\mu\text{m}/\text{m}$), αλλά έχει τη δυνατότητα μέτρησης απόλυτων αποστάσεων σε αντίθεση με το συμβολόμετρο που μπορεί να προσδιορίσει μόνο σχετικές μετακινήσεις. Ως εκ τούτου στις μετρήσεις με αποστασιόμετρο δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη γνωστών σταθερών σημείων και η απόσταση μετριέται με την εκπομπή μίας δέσμης laser από το όργανο σε ένα στρεφόμενο αντανakλαστικό στόχο. Ταυτόχρονα, αισθητήρες γωνιών στους δύο περιστρεφόμενους άξονες του οργάνου, υπολογίζουν την οριζόντια και κατακόρυφη γωνία, ώστε να μπορούν να προσδιορισθούν οι πολικές συντεταγμένες του σημείου που είναι προς μέτρηση.

	Συμβολόμετρο (IFM)	Αποστασιόμετρο (ADM)
Τρόπος μέτρησης μήκους	Μέτρηση φάσεων κύματος	Μέτρηση διαφορών φάσεων κύματος
Είδος μέτρησης	Σχετικές αποστάσεις	Απόλυτες αποστάσεις
Ταχύτητα*	>1000σημεία/sec	~1σημείο/sec
Ακρίβεια* **	$\pm 0.4\mu\text{m} + 0.3\mu\text{m}/\text{m}$	$\pm 15\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}/\text{m}$
Πηγές σφάλματος	Ατμοσφαιρικές συνθήκες. Έκκεντρη σκόπευση	Ατμοσφαιρικές συνθήκες
Βασικό πλεονέκτημα	Ταχύτητα, ακρίβεια, επαναληψιμότητα	Ανεξάρτητες μετρήσεις
Βασικό μειονέκτημα	Ανάγκη μέτρησης γνωστού μήκους για αρχικοποίηση	Περιορισμένη ταχύτητα παρακολούθησης, ακατάλληλο για δυναμικά φαινόμενα

Πίνακας 2.1: Συγκριτική αντιπαραβολή συμβολόμετρου – αποστασιομέτρου (Σπύρου, 2013)

*Οι τιμές της ταχύτητας και της ακρίβειας κάθε μεθόδου διαφοροποιούνται ανάλογα το όργανο, οπότε δίνεται μια τυπική τιμή των δυο χαρακτηριστικών για συγκριτικούς λόγους.

**Οι τιμές της ακρίβειας αναφέρονται σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αντικατάσταση του IFM με το ADM. Ιστορικά το ADM ήταν κάποιες φορές προσαρμοσμένο στο Laser tracker επειδή είχε την δυνατότητα να αποκαταστήσει τα δεδομένα της απόστασης του συμβολόμετρου και να συνεχίσει να μετράει μετά από τυχόν διακοπή της δέσμης, π.χ. παρεμβολή ενός εμποδίου ανάμεσα στο όργανο και τον ανακλαστικό στόχο. Πλέον τα περισσότερα laser trackers κατασκευάζονται και με τα δύο (ADM και IFM). Στο παρελθόν κατά την λειτουργία του ADM για να γίνει η μέτρηση ήταν αναγκαίο ο στόχος να είναι εντελώς ακίνητος, κάτι που περιόριζε τις δυνατότητες του οργάνου σε πολλές

πρακτικές εφαρμογές. Ωστόσο μετατροπές και βελτιώσεις στην ταχύτητα και συχνότητα λειτουργίας του εκπεμπόμενου σήματος του ADM έδωσαν καινούργιες δυνατότητες. Κατασκευάστηκαν Laser trackers με μοναδικό σύστημα το ADM και πλέον ήταν σε θέση να παρακολουθούν τον στόχο και να καταγράφουν μικρομετακινήσεις και μετατοπίσεις. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει η παρακολούθηση μιας κατασκευής, χωρίς να χρειάζεται να είναι κοντά στο όργανο ο χειριστής, με ακρίβεια της τάξης των 50 μm .

Ένα Laser tracker χρησιμοποιείται με έναν ανακλαστικό στόχο σφαιρικού σχήματος, το κέντρο του οποίου συμπίπτει με το κέντρο του ανακλαστήρα. Στις περισσότερες των περιπτώσεων το πραγματικό σημείο ενδιαφέροντος στην επιφάνεια του ανακλαστήρα πρέπει να αναχθεί χρησιμοποιώντας την τιμή της ακτίνας του ανακλαστήρα και τις συντεταγμένες γειτονικών σημείων. Ειδικοί ανακλαστήρες κατασκευάζονται για περιπτώσεις μέτρησης δυσπρόσιτων σημείων, όπως μία μικρή τρύπα.

Για την σφαιρική μελέτη των τεχνικών χαρακτηριστικών και των ακριβειών μέτρησης γωνιών και μήκους των laser tracker, παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2 τρία σύγχρονα όργανα: το AT901 της εταιρείας Leica Geosystems, το Vantage της εταιρείας Faro και το Omnitrac2 της εταιρείας API (βλ. εικόνα 2.2).

Οι τιμές για την γωνιακή ακρίβεια και την ακρίβεια μέτρησης μήκους που δίνονται στον πίνακα 2.2 είναι υπολογισμένες σύμφωνα με τον κανονισμό B89.4.19 της ASME (American Society of Mechanical Engineers) για τον έλεγχο των επιδόσεων των laser trackers. Ο έλεγχος περιλαμβάνει μετρήσεις διαφόρων γνωστών μηκών και σύγκριση των πραγματικών και των αντίστοιχων ονομαστικών τιμών. Οι τιμές της ακρίβειας που προκύπτουν αναφέρονται σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4% (τιμές 2 σ).



Εικόνα 2.2: Από αριστερά: Leica AT901, Faro Vantage και API Omnitrac2 (Σπύρου, 2013)

Μοντέλο	AT901 (Leica)	Vantage (Faro)	Omnitrac2 (API)
Εμβέλεια	160m	80m	160m
Οριζόντιο εύρος	± 300°	± 360°	± 320°
Κατακόρυφο εύρος	±45° (90°)	+77.9°/-52.1° (130°)	+79°/-59° (138°)
Γωνιακή ακρίβεια*	±15μm + 6μm/m	±20μm + 5μm/m	±18μm + 5μm/m
Συμβολόμετρο	NAI	OXI	OXI
Ακρίβεια συμβολόμετρου*	±0.4μm + 0.3μm/m	-	-
Αποστασιόμετρο	NAI **	NAI	NAI
Ακρίβεια αποστασιομέτρου*	±10μm	±16μm + 0.8μm/m	±15μm + 1.5μm/m
Βάρος laser tracker	22kg	12.6kg	10.9kg
Διαστάσεις laser tracker	620/290/240mm	416/211/214mm	430/198/198mm
Εύρος θερμοκρασίας	0°C - +40°C	-15°C - +50 °C	-10°C - +45 °C

Πίνακας 2.2: Σύγκριση των Laser tracker (Σπύρου, 2013)

*σύμφωνα με τους κανονισμό B89.4.19 (για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4% - τιμές 2σ)

**μόνο για αρχικοποίηση συμβολόμετρου

Η δυνατότητα αρκετά γρήγορης μέτρησης με ακρίβεια μερικών μικρών σε αποστάσεις λίγων δεκάδων μέτρων έχουν καταστήσει τα Laser trackers τα επικρατέστερα όργανα στο χώρο των βιομηχανικών μετρολογικών συστημάτων. Στα μειονεκτήματά τους συμπεριλαμβάνονται το σχετικά μεγάλο τους βάρος και μέγεθος, καθώς και το υψηλό τους κόστος αγοράς. Στις μέρες μας τα Laser trackers κατέχουν σημαντικό μέρος της αγοράς, ενώ η τεχνολογία τους συνεχώς αναβαθμίζεται.

2.2.3 Σύγχρονοι γεωδαιτικοί σταθμοί

Η εξέλιξη των γεωδαιτικών σταθμών και η δυνατότητα να μετράνε αποστάσεις και γωνίες ταυτόχρονα με αρκετά καλή ακρίβεια τα κατατάσσει σε όργανα ικανά για βιομηχανικές εφαρμογές. Η εξέλιξη αυτή αφορά στον συνδυασμό του αποστασιομέτρου (EDM) και του ψηφιακού θεοδολίχου στο ίδιο όργανο.

Όλοι οι σύγχρονοι γεωδαιτικοί σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με οθόνη που μπορεί να γίνει η ανάγνωση των μετρήσεων και διαθέτουν ενσωματωμένα μέσα αποθήκευσης των δεδομένων (καταγραφικά) που απαλλάσσουν τον χειριστή από την καταγραφή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με το χέρι. Έτσι, τα δεδομένα αποθηκεύονται στο εσωτερικό του οργάνου και στη συνέχεια, είναι προσβάσιμα μέσω ενός υπολογιστή όπου μπορούν πλέον να επεξεργαστούν και να παράγουν το τελικό αποτέλεσμα. Έχουν αρκετά μεγάλο εύρος μέτρησης (μέχρι και 200 m για τις

σύνηθες βιομηχανικές εργασίες) και η ακρίβεια στον προσδιορισμό των συντεταγμένων μπορεί να φτάσει τα 0.5 mm. Επίσης γεγονός που τα κάνει αρκετά εύχρηστα είναι το σχετικά μικρό βάρος τους (6 ως 7 kg) και έτσι μπορούν να μεταφερθούν πολύ εύκολα στο χώρο διεξαγωγής των μετρήσεων. Τέλος η δυνατότητα σύνδεσής τους με υπολογιστή επιτρέπει σε όλη τη διαδικασία να γίνεται σε πραγματικό χρόνο (real time).

Τα τελευταία 15 χρόνια (Weyman-Jones A., 2010) έχουν κατασκευαστεί γεωδαιτικοί σταθμοί οι οποίοι διαθέτουν τη δυνατότητα αυτόματης αναγνώρισης του στόχου ATR (Automatic Target Recognition). Ο γεωδαιτικός σταθμός είναι εξοπλισμένος με μία CCD κάμερα (Charge Couple Devise), η οποία λαμβάνει την ανακλώμενη ακτίνα Laser που έχει εκπέμψει ο σταθμός προς ένα σημείο. Για να βρεθεί το σημείο αυτό, ο γεωδαιτικός σταθμός σαρώνει σπειροειδώς το πεδίο όρασης του τηλεσκοπίου μέχρι να βρεθεί και να αναγνωριστεί ένας ανακλαστήρας. Αφού βρεθεί, υπολογίζονται οι αποκλίσεις της οριζόντιας και κατακόρυφης θέσης του ίχνους της ανακλώμενης ακτινοβολίας από το κέντρο της κάμερας. Ανάλογα το μέγεθος αυτών των αποκλίσεων γίνεται η αντίστοιχη μεταφορά του τηλεσκοπίου οριζόντια και κατακόρυφα και με την βοήθεια ενός σερβομηχανισμού που διαθέτουν οι συγκεκριμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί επιτυγχάνεται αυτόματα η διόρθωση των δύο γωνιών. Επίσης ο σερβομηχανισμός αυτός επιτρέπει την αυτόματη αναστροφή-περιστροφή του οργάνου και αναγνώριση του στόχου που είχε σκοπευθεί στην 1^η θέση με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του να είναι της τάξης του 180 degrees/sec.

Τέλος μία άλλη εξέλιξη των σύγχρονων γεωδαιτικών σταθμών είναι η δυνατότητα να λειτουργούν και ως ρομποτικοί. Ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός παρακολουθεί τον ανακλαστήρα και μόλις δώσει εντολή ο χρήστης από ένα πληκτρολόγιο, η μέτρηση εκτελείται και τα δεδομένα αποθηκεύονται. Επίσης η δυνατότητα αυτή απαλλάσσει τη διαδικασία των μετρήσεων από το χονδροειδές σφάλμα της λάθος στόχευσης σημείου και οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιούνται από ένα μόνο άτομο.

2.2.4 Laser scanners

Αυτά τα όργανα μέτρησης μπορούν να διαχωριστούν στις συσκευές που μετρούν μόνο σημεία (σημειακοί οπτικοί σαρωτές), στις συσκευές που μπορούν να μετρήσουν γραμμές (γραμμικοί οπτικοί σαρωτές), και στα όργανα που αποτυπώνουν ολόκληρη την επιφάνεια (σαρωτές επιφανειών). Ανάλογα την περίπτωση επιλέγεται το κατάλληλο όργανο που θα ανταποκριθεί καλύτερα στις απαιτήσεις της εργασίας.

Οι σημειακοί οπτικοί σαρωτές λειτουργούν ουσιαστικά ως αποστασιόμετρα εκπέμποντας μια διαμορφωμένη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προς το αντικείμενο μέτρησης, η οποία όταν επιστρέφει στο όργανο μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Η ζητούμενη απόσταση υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό του χρόνου διαδρομής της δέσμης και της ταχύτητας του φωτός. Ανάλογα την εταιρεία κατασκευής του σημειακού σαρωτή, ο τρόπος διαμόρφωσης της ακτινοβολίας διαφέρει με αποτέλεσμα κάθε σαρωτής να έχει διαφορετικό ρυθμό συλλογής δεδομένων και διαφορετική ακρίβεια. Σε κάθε περίπτωση, ο όγκος των δεδομένων είναι τεράστιος καθώς οι ταχύτητες των σημειακών σαρωτών κυμαίνονται από 190.000 ως 1.000.000 σημεία/sec. Η ακρίβεια της μέτρησης μπορεί να φτάσει τα 3mm στα 25m (Peggs et.al., 2009).



Εικόνα 2.3: Ο σημειακός σαρωτής Surphaser 25HSX (www.laserscanning-europe.com)

Οι γραμμικοί σαρωτές έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά και λειτουργία με τους σημειακούς σαρωτές. Η βασική διαφορά είναι ότι σε αυτούς τους σαρωτές υπάρχει μια ενσωματωμένη κάμερα CCD που παρακολουθώντας την εκπεμπόμενη δέσμη, αποτυπώνει και μεταφέρει την εικόνα στον υπολογιστή. Ολοκληρωμένοι οπτικοί κωδικοποιητές μετρούν τις γωνίες ανάκλασης και το χρόνο μετάβασης και επιστροφής τη δέσμης και έτσι υπολογίζεται η απόσταση για κάθε σημείο. Η σάρωση του αντικειμένου γίνεται από απόσταση και οι ακτίνες που εκπέμπονται από το Laser scanner είναι χαμηλής ισχύος και κατά αυτόν τον τρόπο δεν είναι σε θέση να βλάψουν την κατάσταση του αντικειμένου που σαρώνεται, κάτι που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα σε περιπτώσεις σάρωσης ευαίσθητων επιφανειών. Μέσα από τη σάρωση χιλιάδων σημείων το δευτερόλεπτο προκύπτει το νέφος σημείων το οποίο ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εργασίας επεξεργάζεται μέχρι την τελική μορφή της μοντελοποίησης επιφάνειας. Η ακρίβεια των γραμμικών σαρωτών μπορεί να φτάσει το $\pm 0.1\text{mm}$ (Chow et al.).

Οι σαρωτές επιφανειών ή αλλιώς σαρωτές πολωμένου φωτός (structured light scanners – white line scanning) δεν χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία για να μετρήσουν, αλλά δέσμες αλογόνου οι οποίες εκπέμπονται σε μια συστοιχία γραμμών σε μορφή καννάβου καλύπτοντας έτσι, αν όχι όλο το αντικείμενο μέτρησης, μεγάλο μέρος αυτού. Όπως γίνεται αντιληπτό, αποτελεί την ταχύτερη κατηγορία σαρωτών καθώς σαρώνει ακαριαία ολόκληρες επιφάνειες με ακρίβειες της τάξης των $\pm 30\mu\text{m}$. Τα μειονεκτήματα των σαρωτών πολωμένου φωτός είναι ότι αδυνατούν να αποδώσουν όλες τις πιθανές λεπτομέρειες της επιφάνειας (οπές, εσοχές κ.λπ.) λόγω της επιφανειακής σάρωσης που πραγματοποιούν. Τέλος λόγω της ευαισθησίας της δέσμης αλογόνου στο φως, συνίσταται η χρήση των σαρωτών αυτών σε χώρους με χαμηλό φωτισμό για να αποφεύγονται οι παραμορφώσεις.



Εικόνα 2.4: Σαρωτής πολωμένου φωτός Steinbichler Comet L3D

(www.inspect-online.com)

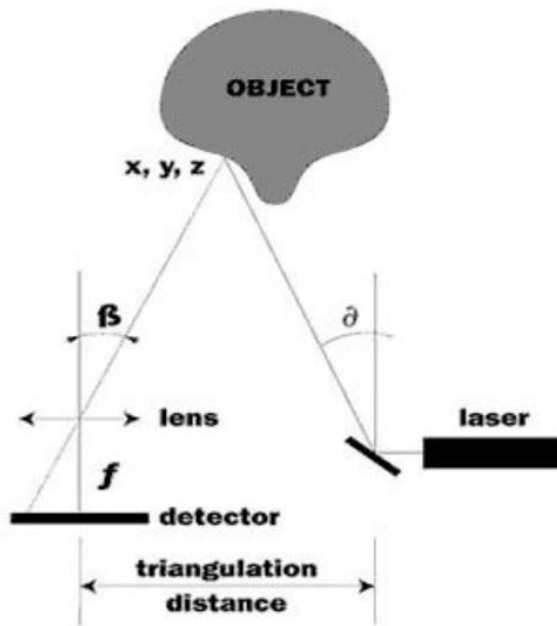
Ένας άλλος διαχωρισμός που μπορεί να γίνει για τους οπτικούς σαρωτές είναι ανάλογα την αρχή λειτουργίας τους.

Αρχή λειτουργίας Laser σαρωτή	Εύρος μέτρησης (m)	Ακρίβεια (mm)
Triangulation	< 5	<1
Phase Based	<100	<10
Time of Flight	<100	<10
	<1000	<20

Πίνακας 2.3: Ακρίβειες και εύρος χρήσης για κάθε αρχή λειτουργίας σάρωσης

(Sinderberry, 2007)

Στην βιομηχανική γεωδαισία χρησιμοποιείται η πρώτη μέθοδος, δηλαδή η μέθοδος του τριγωνισμού (Triangulation), που για τις συνήθεις μικρές αποστάσεις που επικρατούν, η ακρίβεια μπορεί να φτάσει κάτω από το 1mm. Ονομάζεται έτσι εξαιτίας του τριγώνου που δημιουργείται από τον πομπό της ακτίνας Laser, την επιφάνεια που σαρώνεται και της ψηφιακής κάμερας CCD. Η κάμερα και ο πομπός βρίσκονται σε δύο σημεία που γνωρίζουμε τις συντεταγμένες σχηματίζοντας την βάση του τριγώνου. Το αποτύπωμα της ακτίνας Laser που εκπέμπεται από τον πομπό εντοπίζεται και καταγράφεται από την κάμερα CCD και έτσι υπολογίζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες αυτού του σημείου επιλύοντας το τρίγωνο που σχηματίζεται.



Σχήμα 2.1: Η αρχή λειτουργίας του τριγωνισμού (Sinderberry, 2007)

Η ακρίβεια της μεθόδου μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης και κρίνεται κατάλληλη για την μέτρηση μικρών αντικειμένων στα οποία χρειάζεται να αναδειχθούν λεπτομέρειες (Sinderberry, 2007).

Η τάση που επικρατεί είναι τα Laser scanners να εξελίσσονται συνεχώς ως προς την ακρίβεια αλλά και ως προς την ταχύτητα σάρωσης. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο υψηλής ταχύτητας Laser σαρωτής ScanStation P20 που έχει την δυνατότητα σάρωσης μέχρι και ενός εκατομμυρίου points/s.



Εικόνα 2.5: Ο επίγειος σαρωτής ScanStation P20 της Leica (www.leica-geosystems.us)

2.3 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι

Η ψηφιακή φωτογραμμετρία συνιστά τη μεθοδολογία και τις τεχνικές που μέσω αυτών μπορεί να προσδιοριστεί το σχήμα, η θέση και ο προσανατολισμός μιας επιφάνειας, υπολογίζοντας τις 3D συντεταγμένες των σημείων αυτών χωρίς να έρχεται σε επαφή με τα μετρούμενα σημεία. Είναι κατάλληλο εργαλείο για παρακολούθηση μετακινήσεων.

Η τεχνική μέτρησης που στηρίζεται στις αρχές της ψηφιακής φωτογραμμετρίας, κρίνεται η πλέον κατάλληλη όταν πρόκειται για μέτρηση πολλών χιλιάδων σημείων που πρέπει να μετρηθούν ταυτόχρονα. Οι δυνατότητες της τεχνικής αυτής έχουν εξελιχτεί με το πέρασμα των χρόνων με την ακρίβεια σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι της τάξης λίγων δεκάδων μικρομέτρων. Για παράδειγμα, σε μία κατασκευή πέντε μέτρων με σωστή επίλυση και προσεκτική επεξεργασία των δεδομένων μπορούμε να επιτύχουμε ακρίβεια της τάξης των 0.05 mm (Peggs et al, 2009). Για να επιτύχουμε αυτή την ακρίβεια πρέπει να γίνουν με πολύ προσοχή η επιλογή του κατάλληλου φακού και η βαθμονόμηση της μηχανής και να γίνουν ακριβείς μετρήσεις πάνω στην εικόνα ώστε να αποδοθούν οι σωστές συντεταγμένες στα σωστά σημεία. Η τελική επίλυση θα γίνει με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων που θα δώσει και τις τελικές αβεβαιότητες των συντεταγμένων.

Για εφαρμογές όπου το αντικείμενο μέτρησης είναι ασταθές ή υποβάλλεται σε συνεχείς παραμορφώσεις, η μεθοδολογία μέτρησης αλλάζει και χρησιμοποιείται μια ομάδα από συγχρονισμένες φωτομηχανές. Τα συστήματα αυτά δημιουργούνται επί τούτου και αποτελούνται συνήθως από δυο ως οκτώ ψηφιακές φωτομηχανές. Στο αντικείμενο μέτρησης τοποθετούνται στόχοι ή κάποιο γεωμετρικό μοτίβο ή ακόμα και κάποια ειδική ράβδος και κατόπιν φωτογραφίζεται από όλες τις μηχανές ταυτόχρονα. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται οι τρισδιάστατες συντεταγμένες του αντικειμένου μέτρησης σε πραγματικό χρόνο. Οι φωτομηχανές που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εργασίες είναι ήδη καλιμπραρισμένες και θεωρείται ότι έχουν σταθερή εσωτερική γεωμετρία (γεγονός που αν δεν ισχύει αποτελεί σημαντική πηγή σφάλματος). Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με αυτή τη μέθοδο σε αντικείμενο 5m, είναι της τάξης του $\pm 0.1\text{mm}$ (Peggs et al, 2009).

Τάση στις φωτογραμμετρικές μεθόδους αποτελεί η αύξηση της αυτοματοποίησης και η ελαχιστοποίηση της συμμετοχής του χρήστη, για την αποφυγή χονδροειδών σφαλμάτων. Η ταχεία πρόοδος στην ταχύτητα επεξεργασίας των υπολογιστών και στους διαθέσιμους αλγόριθμους επιτρέπει στα νέα φωτογραμμετρικά συστήματα να εξελίσσουν τα παράγωγά τους από τρισδιάστατες συντεταγμένες, σε μοντέλα CAD σε πραγματικό χρόνο.

2.4 Μετρητικά συστήματα πολλαπλών αισθητήρων

Η ιδέα της συλλογής των μετρητικών δεδομένων από περισσότερα από ένα όργανα για ένα σημείο, κερδίζει συνεχώς έδαφος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το σύστημα GPS, που ο προσδιορισμός των συντεταγμένων ενός σημείου επιτυγχάνεται από πολλαπλές μετρήσεις.

2.4.1 Global positioning systems

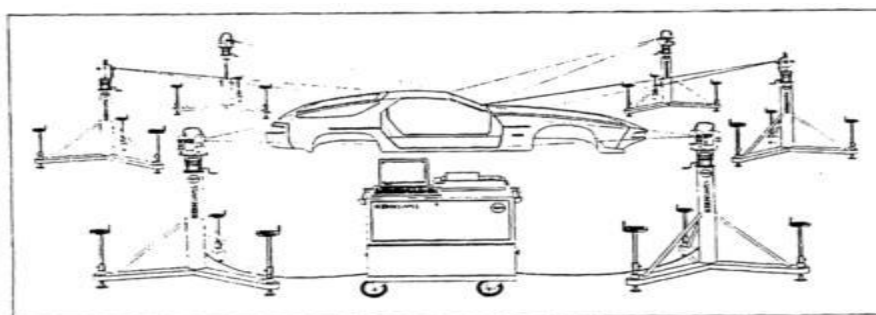
Το Global Positioning System (GPS) ή παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού θέσης ξεκίνησε να λειτουργεί το 1983. Τα τελευταία χρόνια η εφαρμογή καινούργιων τεχνικών σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας του συστήματος GPS, έχουν βελτιώσει κατά πολύ μεγάλο βαθμό την ακρίβεια έτσι ώστε να αποτελεί μια ασφαλής εναλλακτική λύση για ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές. Ο δέκτης προσδιορίζει τις συντεταγμένες του σημείου που βρίσκεται εφόσον είναι ορατός από τουλάχιστον 4 δορυφόρους οι οποίοι λειτουργούν σαν πομποί και διαγράφουν τροχιά γύρω από την γη σε υψόμετρο περίπου 20.000km. Κάθε δορυφόρος μεταδίδει ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα – μία δέσμη μικροκυμάτων – το οποίο λαμβάνεται από το δέκτη εάν είναι ορατός. Ο ενσωματωμένος ηλεκτρονικός υπολογιστής χρησιμοποιεί αυτά τα σήματα για να υπολογίσει την ακριβή απόσταση από καθένα από τους τέσσερις δορυφόρους και στη συνέχεια να υπολογίσει την ακριβή θέση επί του πλανήτη. Στις μέρες μας η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 0.1mm.

Στις βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιούνται δύο οι περισσότεροι δέκτες για να προσδιορισθεί το διάνυσμα βάσης. Επίσης εφαρμόζονται τεχνικές γραμμικών συνδυασμών στους πολλαπλούς δέκτες ώστε να απαλειφθούν ή να μειωθούν τα περισσότερα από τα πιθανά σφάλματα του συστήματος GPS, όπως η ακρίβεια μέτρησης του χρόνου, το ιονοσφαιρικό σφάλμα, το τροποσφαιρικό σφάλμα, κ.ά..

Καινούργιες τεχνικές και μεθοδολογίες ανακαλύπτονται και ερευνώνται συνεχώς. Επίσης καινούριοι δορυφόροι εκτοξεύονται με αποτέλεσμα την δημιουργία καινούργιων συστημάτων (το σύστημα Galileo στην Ευρώπη), όποτε τα επόμενα χρόνια αναμένεται περαιτέρω βελτίωση στις δυνατότητες και την ακρίβεια των δορυφορικών συστημάτων.

2.4.2 Σύστημα γεωδαιτικών σταθμών

Σύστημα που ήταν ευρέως διαδεδομένο τα παλαιότερα χρόνια καθώς πρόσφερε πολύ μεγάλη ακρίβεια. Ένα σύστημα θεοδολίχων μπορεί να αποτελείται από δύο έως έξι θεοδολίχα (ή Total stations) και οι μοναδικές μετρήσεις που γίνονται είναι μετρήσεις γωνιών. Ο προσδιορισμός των συντεταγμένων γίνεται με την μέθοδο της εμπροσθοτομίας και η ακρίβεια προσδιορισμού τους μπορεί να φτάσει τα 0.1mm. Ωστόσο ο μεγάλος αριθμός στους απαιτούμενους χειριστές για τα θεοδολίχα και η κατασκευή άλλων οργάνων που μετράνε με τις ίδιες ή και καλύτερες ακρίβειες έχουν σχεδόν καταργήσει το σύστημα θεοδολίχων στις συνήθεις βιομηχανικές εφαρμογές.



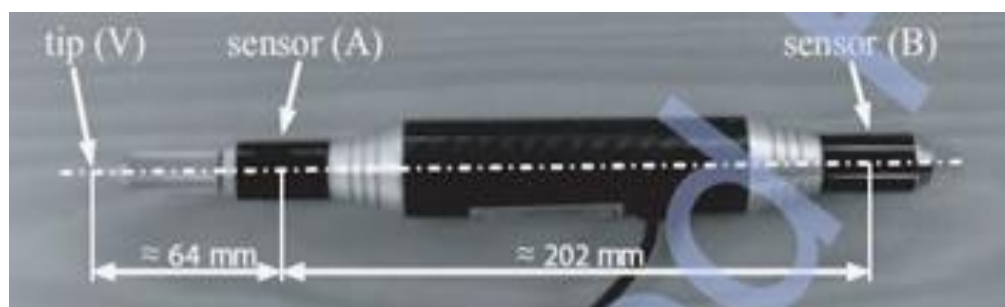
Εικόνα 2.6: Μέθοδος εμπροσθοτομίας με χρήση έξι θεοδολίχων (Δογγούρης, 2005)

2.4.3 Σύστημα Laser tracker

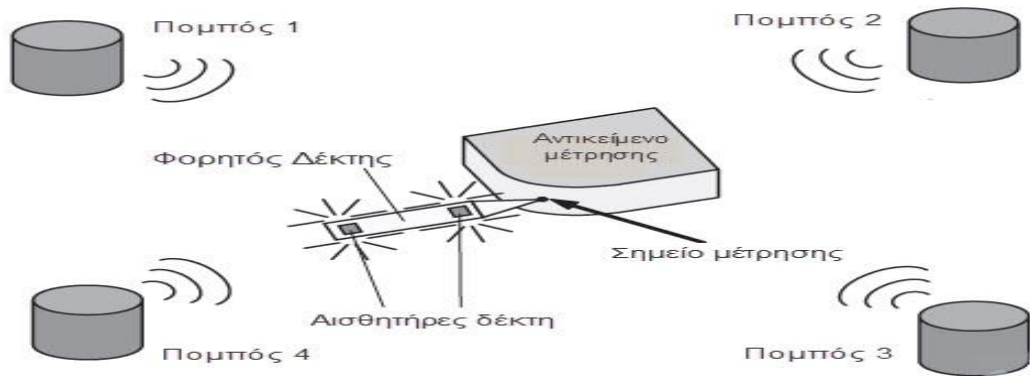
Για κάποιες εφαρμογές είναι συμφέρουσα η χρησιμοποίηση δύο ή περισσότερων laser trackers για τη μέτρηση ενός μόνο αντικειμένου. Ο συνδυασμός αυτός και η ταυτόχρονη μέτρηση μπορούν να εξασφαλίσουν πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια ενώ απαιτείται ειδικό λογισμικό που θα είναι σε θέση να δέχεται τα δεδομένα και να τα επεξεργάζεται ταυτόχρονα υπολογίζοντας τις τελικές αβεβαιότητες. Οι τεχνικές μέτρησης και το μαθηματικό μοντέλο αυτού του συστήματος για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων βρίσκονται υπό διερεύνηση (Wanli and Zhankui, 2010).

2.4.4 Indoor GPS

Το Indoor GPS (iGPS) είναι ένα σχετικά καινούργιο (2008) σύστημα μέτρησης εκπομπής δέσμης laser. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στους πομπούς - αναμεταδότες που εκπέμπουν περιστρεφόμενες ακτίνες Laser και μία υπέρυθη ακτινοβολία. Το σύστημα αυτό έχει αρκετές ομοιότητες με ένα σύστημα που αποτελείται από ένα θεοδόλιχο και ένα GPS. Οι ειδικοί πομποί παραμένουν σταθερά εγκατεστημένοι σε γνωστές τοποθεσίες (δηλαδή με γνωστές τις συντεταγμένες X,Y,Z,) και εκπέμπουν συνεχώς τρία σήματα: δυο υπέρυθρες ακτίνες laser σε σχήμα βεντάλιας από την περιστρεφόμενη κεφαλή του πομπού και ένα υπέρυθρο παλλόμενο φως. Τα σήματα αυτά ανιχνεύονται ασύρματα από τους δέκτες με την βοήθεια των ειδικών προσαρμοσμένων φωτουποδοχών. Οι μετρήσεις στο σύστημα iGPS εκτελούνται ακουμπώντας τον δέκτη στην επιφάνεια του αντικειμένου μέτρησης. Κάθε πομπός παρέχει σε κάθε δέκτη την τιμή της οριζόντιας θ και ζενίθιας γωνίας φ που σχηματίζεται μεταξύ τους, συνεπώς οι συντεταγμένες του δέκτη υπολογίζονται μέσω της μεθόδου της εμπροσθοτομίας. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ορατότητας προς δυο ή περισσότερους πομπούς κάθε φορά, ενώ υπάρχει η δυνατότητα χρήσης απεριόριστου αριθμού δεκτών που θα μετράνε και θα υπολογίζουν συντεταγμένες ανεξάρτητα. Όπως γίνεται αντιληπτό, η χρήση δυο δεκτών ταυτόχρονα, μειώνει στο μισό το χρόνο παραμονής στο πεδίο σε σχέση με την χρήση ενός δέκτη. Οι συντεταγμένες της θέσης του δέκτη με το Indoor GPS μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια που φτάνει τα 0.25mm (Akcan et al., 2006).



Εικόνα 2.7: Ο φορητός δέκτης-ανιχνευτής του συστήματος Indoor GPS (Peggs et al., 2009)



Σχήμα 2.2: Η διάταξη του συστήματος Indoor GPS (Peggs et al., 2009)

2.5 Υβριδικά Συστήματα

Στην πληθώρα των εφαρμογών μεγάλης κλίμακας υπάρχουν αρκετά παραδείγματα όπου δύο όργανα έχουν συνδυαστεί σε ένα, έτσι ώστε το μετρητικό σύστημα που προκύπτει να είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα του καθενός εξοπλισμού.

2.5.1 Σύγχρονοι εικονογεωδαιτικοί σταθμοί

Οι σύγχρονοι εικονογεωδαιτικοί σταθμοί (Imaging Total station) αποτελούν ένα υβριδικό σύστημα μέτρησης, καθώς βασίζονται στον συνδυασμό του παραδοσιακού Total station και μιας κάμερας στο φακό του τηλεσκοπίου. Βρίσκονται διαθέσιμοι στο εμπόριο τα τελευταία χρόνια και κατασκευάζονται κυρίως από τις εταιρίες Topcon, Trimble, Leica και Pentax.

Οι εικονογεωδαιτικοί σταθμοί φέρουν μία ή περισσότερες κάμερες σε συγκεκριμένη θέση, ώστε να μεταφέρεται στην οθόνη του οργάνου η εικόνα που παρατηρείται από το τηλεσκόπιο. Η κάμερα των σταθμών αυτών βρίσκεται μέσα στο τηλεσκόπιο (όπως στα μοντέλα GPT 7000i και IS της εταιρείας Topcon), είτε λίγο έξω από αυτό (στο μοντέλο VX της εταιρείας Trimble) είτε και στις δύο θέσεις, με γνωστή την εκκεντρότητα τοποθέτησής της ως προς το κέντρο του τηλεσκοπίου του εικονογεωδαιτικού σταθμού (σημείο τομής των αξόνων). Με το σταθμό αυτόν είναι δυνατή η μέτρηση των μηκών και των γωνιών μέσω σκόπευσης σε ειδική οθόνη και ενδείκνυται σε απαιτητικές εφαρμογές όπως σήραγγες, μνημεία, ναυπηγεία, βιομηχανικές / μηχανολογικές αποτυπώσεις, κλπ.

Οι εικονογεωδαιτικοί σταθμοί διαθέτουν λειτουργικό σύστημα Windows CE, οθόνες αφής, δυνατότητα σύνδεσης με περιφερειακά μέσω θύρας RS232 και USB θύρες αλλά και ασύρματα μέσω bluetooth. Είναι δυνατή η σύνδεσή τους στο διαδίκτυο για λήψη και αποστολή στοιχείων σε πραγματικό χρόνο, ενώ καταγράφουν κατ' επιλογή του χρήστη την εικόνα κάθε σημείου που μετράται ή οποιαδήποτε άλλη επιλεγεί. Η σκόπευση μπορεί να γίνει από οθόνη και όχι από το τηλεσκόπιο, εφόσον ότι "βλέπει" το τηλεσκόπιο μεταφέρεται άμεσα στην οθόνη είτε του εικονογεωδαιτικού σταθμού είτε ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η ανάλυση των καμερών που φέρουν, ενώ αρχικά ήταν ιδιαίτερα χαμηλή (640×480 ή 580×1260 εικονοψηφίδες) για

φωτογραμμετρική (μετρητική) χρησιμοποίηση των συλλεγομένων εικόνων, στα τελευταία μοντέλα έχει αυξηθεί, φθάνοντας τις 2048×1536 εικονομηφίδες.



Εικόνα 2.8: Ο εικονογεωδαιτικός ρομποτικός σταθμός της Leica Viva TS15

(www.leica-geosystems.com)

2.5.2 Μηχανές μέτρησης συντεταγμένων και Laser scanners

Ένα πολύ σύγχρονο και ενδιαφέρον υβριδικό σύστημα αποτελεί αυτό που συνδυάζει τους σαρωτές πολωμένου φωτός και τις σταθερές ΜΜΣ. Με τον σαρωτή αποτυπώνεται η επιφάνεια στο σύνολο της και κατόπιν με την ΜΜΣ μετρούνται τα σημεία λεπτομέρειας για μεγαλύτερη ακρίβεια. Με τη μέθοδο αυτή γίνεται όσο το δυνατόν πιο πιστή αποτύπωση όλων των χαρακτηριστικών του αντικειμένου όσο πολύπλοκο και αν είναι το σχήμα του, διατηρώντας και την ταχύτητα συλλογής δεδομένων των οπτικών σαρωτών και την υψηλή ακρίβεια των ΜΜΣ. Φυσικά η ακρίβεια του υβριδικού αυτού συστήματος δεν είναι τόσο καλή όσο αυτή των απλών ΜΜΣ λόγω της συμμετοχής των δεδομένων των σαρωτών. Παρόλα αυτά ο συνδυασμός των δυο συστημάτων αποδίδει συντεταγμένες με ακρίβεια της τάξης των $\pm 0.030\text{mm}$ (Xie et al., 2005). Τέλος προσοχή απαιτείται στο πλήθος των συλλεχθέντων δεδομένων, καθώς μπορεί να δημιουργηθεί μεγάλος θόρυβος και απαιτείται εφαρμογή ειδικών αλγορίθμων απλοποίησης.

2.5.3 Εγγύς φωτογραμμετρία και Laser σαρωτές

Ο συνδυασμός της εγγύς φωτογραμμετρίας και των Laser σαρωτών (Beraldin, 2004) έχει εφαρμοστεί στην δημιουργία του 3-D αστικού μοντέλου ολόκληρης της πόλης της Κωνσταντινούπολης, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των δύο συστημάτων. Η τεχνική αποτύπωσης λεπτομερειών με αυτό το υβριδικό σύστημα προτάθηκε από τον Erqun (Erqun, 2007).

2.6 Κριτήρια επιλογής μετρολογικού εξοπλισμού

Κάθε όργανο ή σύστημα οργάνων συνοδεύεται από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού για την εκτέλεση μιας εργασίας είναι δύσκολη και περίπλοκη διαδικασία καθώς η επιλογή αυτή πρέπει να βασιστεί σε πολλούς παράγοντες. Πέρα από το κόστος αγοράς του κάθε εξοπλισμού, οι παράγοντες αυτοί μπορούν να χωριστούν στις εξής τρεις κατηγορίες:

- Στις απαιτήσεις/προδιαγραφές της εργασίας
- Στα χαρακτηριστικά του αντικειμένου μέτρησης
- Στους περιβαλλοντικούς παράγοντες

Υπό ανάπτυξη είναι η δημιουργία αλγορίθμων που μετά την εισαγωγή όλων των κριτηρίων υπό τη μορφή παραμέτρων, θα προτείνει τον κατάλληλο προς χρήση εξοπλισμό (Muelaner et. al., 2009).

2.6.1 Απαιτήσεις/προδιαγραφές εργασίας

Βασικό κριτήριο επιλογής μετρολογικού εξοπλισμού συνήθως είναι η απαιτούμενη ακρίβεια. Οι προδιαγραφές της ακρίβειας μπορεί να είναι αποτρεπτικός παράγοντας για την χρήση ενός οργάνου ή καθοριστικός για την επιλογή ενός άλλου. Για παράδειγμα, σε μια εργασία όπου οι αβεβαιότητες πρέπει να διατηρούνται σε επίπεδο μικρών (μm) η χρήση γεωδαιτικών σταθμών δεν αποτελεί επιλογή και απορρίπτεται, καθώς η ακρίβειά τους (σύστημα γεωδαιτικών σταθμών) μπορεί να φτάσει στην καλύτερη περίπτωση τα 0.1mm.

Ένα άλλο σημαντικό κριτήριο είναι το πλήθος των σημείων που θα μετρηθούν. Ανάλογα τις απαιτήσεις της κάθε εργασίας, τα προς μέτρηση σημεία μπορεί να είναι από ένα ως εκατοντάδες. Στην περίπτωση π.χ. που πρέπει να μετρηθούν εκατοντάδες σημεία δεν θα προτιμηθούν τα όργανα που λαμβάνουν σημειακές μετρήσεις (θεοδόλιχα, γεωδαιτικοί σταθμοί), ενώ στην περίπτωση που χρειάζεται να μετρηθούν λίγα σημεία είναι ασύμφορο αυτό να γίνει με φωτογραμμετρικές μεθόδους.

Ένα ακόμα κριτήριο είναι η θέση των σημείων μέτρησης, αφού στα περισσότερα συστήματα πρέπει να εξασφαλίζεται η οπτική επαφή τους με το όργανο. Η ανάγκη για εξοπλισμό που θα έχει τη δυνατότητα μέτρησης κρυφών σημείων στο αντικείμενο, όπως οπές, εσοχές κ.α. επηρεάζει την τελική επιλογή οργάνου.

Η διάσταση της μετρητικής πληροφορίας διαδραματίζει επίσης ρόλο στην επιλογή οργάνου. Για παράδειγμα υπάρχουν μετρητικά όργανα τα οποία δίνουν πληροφορία μιας διάστασης, δηλαδή μετρούν ένα μεμονωμένο μήκος. Άλλα όργανα παρέχουν πληροφορία δυο διαστάσεων, ώστε να μπορεί να εντοπιστεί ένα σημείο σε μια επίπεδη επιφάνεια, ενώ υπάρχουν και όργανα που παρέχουν τρισδιάστατη πληροφορία (Laser tracker, MMΣ), με τα οποία προσδιορίζεται η ακριβής θέση ενός σημείου στο χώρο. Τέλος υπάρχει η δυνατότητα, είτε με ειδικά παρελκόμενα, είτε με φωτογραμμετρικές μεθόδους να προσδιορισθούν τόσο οι τρισδιάστατες συντεταγμένες ενός

σημείου όσο και οι τρεις στροφές του στο χώρο. Εφόσον λοιπόν από τις απαιτήσεις της εργασίας προκύπτει ανάγκη για τρισδιάστατη πληροφορία, τα όργανα που δίνουν τρισδιάστατες ή παραπάνω πληροφορίες αποτελούν πιθανές επιλογές, ενώ αυτά που προσφέρουν πληροφορία σε μια ή δυο διαστάσεις είναι ακατάλληλα.

Άλλος καθοριστικός παράγοντας είναι η ευκολία επανάληψης των μετρήσεων. Εφόσον η εργασία θα πρέπει να επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (περιοδικός έλεγχος), δόκιμο είναι να χρησιμοποιηθεί κάποιο σύστημα με το οποίο μετά την πρώτη εκτέλεση της μέτρησης, θα απαιτεί λιγότερο χρόνο για την ίδια εργασία, όπως π.χ. οι Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων.

Τέλος, όσον αφορά στα κριτήρια που σχετίζονται με τις απαιτήσεις εργασίας, ρόλο στην επιλογή οργάνου παίζει και ο διαθέσιμος χρόνος που στον βιομηχανικό χώρο είναι συνήθως περιορισμένος και πολύτιμος. Συνεπώς πρέπει να βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ της ακριβέστερης μεθόδου μέτρησης και του χρόνου που απαιτείται για την περάτωση της εφαρμογής.

2.6.2 Χαρακτηριστικά αντικειμένου μέτρησης

Από τους σημαντικότερους παράγοντες κατά την επιλογή οργάνου είναι οι διαστάσεις του αντικειμένου μέτρησης να καλύπτονται από την εργόσφαιρα του εκάστοτε οργάνου. Για παράδειγμα οι σταθερές μηχανές μέτρησης συντεταγμένων έχουν ορισμένη εργόσφαιρα που φτάνει έως λίγα μέτρα, οπότε κρίνονται ακατάλληλες για την μέτρηση μεγάλων αντικειμένων.

Συναφές με το προηγούμενο κριτήριο είναι αυτό της φορητότητας του αντικειμένου μέτρησης. Μερικά όργανα είναι φορητά και μπορούν να μεταφερθούν εύκολα στο χώρο που βρίσκεται το αντικείμενο μέτρησης, όπως οι γεωδαιτικοί σταθμοί, τα Laser tracker, οι σαρωτές κ.α. Άλλα μετρολογικά όργανα, όπως η μηχανή μέτρησης συντεταγμένων ή το iGPS είναι σταθερά, συνεπώς το αντικείμενο μέτρησης πρέπει να μεταφερθεί στο χώρο που αυτά είναι εγκατεστημένα. Η δυνατότητα του αντικειμένου να μεταφερθεί ή όχι λοιπόν είναι βασικό κριτήριο στην επιλογή οργάνου.

Το υλικό της επιφάνειας του αντικειμένου διαδραματίζει επίσης ρόλο στην επιλογή οργάνου. Μερικά από τα μετρολογικά συστήματα απαιτούν την εφαρμογή στόχων πάνω στο αντικείμενο όπως πχ το laser tracker, το iGPS και οι φωτογραμμετρικές μέθοδοι. Εφόσον το αντικείμενο έχει κάποια ευαίσθητη επιφάνεια, η εφαρμογή στόχων είναι δύσκολη καθώς μπορεί να προκαλέσει ζημιά στο αντικείμενο μέτρησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να προτιμηθούν συστήματα που δεν απαιτούν φυσική επαφή με το αντικείμενο.

Σημασία έχει ακόμα και η υφή της επιφάνειας, μιας και στην περίπτωση μέτρησης κάποιας πολύ γυαλιστερής επιφάνειας, η επιλογή ενός σαρωτή πιθανό είναι άστοχη καθώς θα ήταν αδύνατη η ανάκλαση της δέσμης και η επιστροφή της στο όργανο. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση που η επιφάνεια του αντικειμένου μέτρησης έχει έντονο ανάγλυφο η προσαρμογή στόχων πέρα από δύσκολη, ενέχει κινδύνους για την τελική ακρίβεια. Συνεπώς, θα πρέπει να προτιμηθεί κάποια μεθοδολογία μέτρησης που δεν απαιτεί προσαρμογή στόχου.

Η προσβασιμότητα του αντικειμένου μέτρησης είναι ένας ακόμα παράγοντας επιλογής αφού εφόσον αυτό είναι απρόσιτο θα πρέπει να προτιμηθεί κάποιο όργανο που δεν χρειάζεται την εφαρμογή στόχου. Ακόμα σε αρκετές περιπτώσεις στον βιομηχανικό χώρο το αντικείμενο μέτρησης δεν πρέπει να προσεγγίζεται για λόγους ασφαλείας. Η επιλογή της εμπροσθοτομίας με θεοδόλιχα ή η σάρωση του αντικειμένου αποτελούν τις ενδεδειγμένες λύσεις σε αυτή την περίπτωση.

2.6.3 Περιβαλλοντικά κριτήρια

Οι συνθήκες στο περιβάλλον εργασίας επηρεάζουν το όργανο μέτρησης και την εκπεμπόμενη δέσμη εφόσον αυτή υπάρχει. Όλα τα όργανα κατασκευάζονται για να λειτουργούν σε συγκεκριμένα όρια θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας. Για άλλα όργανα οι ανοχές αυτές είναι αρκετά μεγάλες, επιτρέποντας χρήση του οργάνου ακόμα και σε εξωτερικό χώρο, ενώ για άλλα όργανα οι ανοχές είναι περιορισμένες και εφόσον δεν ικανοποιούνται, τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι υποκείμενα σε σφάλματα. Εξίσου σημαντικό με την θερμοκρασία στο πεδίο μέτρησης είναι η διακύμανση της θερμοκρασίας, καθώς αλλιώς λειτουργεί ένα όργανο σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία και αλλιώς όταν αυτή παρουσιάζει μεγάλες διαφορές κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Σημαντικό κριτήριο στην επιλογή οργάνου είναι και ο διαθέσιμος χώρος στο πεδίο των μετρήσεων. Πρέπει να εξεταστεί η δυνατότητα στάσης του εκάστοτε οργάνου σε σωστό σημείο και η ελευθερία κινήσεων στο χώρο για την απρόσκοπτη μετρητική διαδικασία. Παραδείγματος χάριν, εφόσον στο πεδίο μέτρησης ενός αντικειμένου δεν υπάρχει περιμετρικά διαθέσιμος χώρος, αυτό δεν γίνεται να μετρηθεί με φωτογραμμετρικές μεθόδους καθώς δεν θα μπορεί να στηθεί η φωτογραφική μηχανή σε σωστή απόσταση από το αντικείμενο.

Αν και η σημασία τους δεν είναι το ίδιο μεγάλη με τα υπόλοιπα κριτήρια, ρόλο στην επιλογή οργάνου παίζουν και τυχόν δονήσεις στο περιβάλλον εργασίας. Οι μετρολογικές εφαρμογές συνήθως πραγματοποιούνται σε βιομηχανικούς χώρους όπου οι δονήσεις από διάφορες άλλες εργασίες είναι συχνό φαινόμενο. Ως εκ τούτου, το όργανο μέτρησης δεν παραμένει συνεχώς σταθερό.

Συγκεντρωτικά τα βασικά όργανα και οι ακρίβειες που μπορούν να επιτευχθούν είναι:

Όργανα	Ακρίβεια μετρήσεων	Εύρος μετρήσεων	Αριθμός χρηστών
CMM	0.0005 mm	0.5 – 6 m	1
Laser tracker	0.001 mm	160 m	1-2
Total station	0.5 mm	200 m	1-2
Laser scanners	0.03 mm	<5 m	1
2 Θεοδόλιχα	0.2 mm	40 m	2
Φωτογραμμετρία	0.05 mm	100 m	1
Global positioning systems	0.1 mm		1
Σύστημα γεωδαιτικών σταθμών	0.1 mm	40 m	1-6
Indoor GPS	0.25 mm	20 m	1

Πίνακας 2.4: Όργανα βιομηχανικής γεωδαισίας - απαιτούμενες ακρίβειες (Peggs et al., 2009)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΙ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Ένας γεωδαιτικός σταθμός χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συντεταγμένων σημείων μετρώντας την απόσταση και την οριζόντια και κεκλιμένη γωνία σε τοπικό σύστημα αναφοράς και είναι το πλέον διαδεδομένο όργανο μέτρησης στην τοπογραφία. Οι γεωδαιτικοί σταθμοί βρίσκουν εφαρμογή και στον κλάδο της βιομηχανικής γεωδαισίας καθώς μπορούν ανάλογα την μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί, να προσφέρουν μετρήσεις υψηλής ποιότητας.

3.2 Αρχή λειτουργίας Γεωδαιτικών σταθμών

Τα όργανα αυτά είναι η εξέλιξη των παλαιότερων συστημάτων μηχανικών θεοδολίχων και επιβατικών EDM, όπου πλέον φέρουν το αποστασιόμετρο ενσωματωμένο με το ψηφιακό θεοδολίχο. Δηλαδή είναι σε θέση να μετράνε ταυτόχρονα διευθύνσεις και αποστάσεις.

Η μέτρηση μήκους με τη χρήση EDM γίνεται μέσω της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, βασισμένη στη γενική αρχή της φυσικής ότι η απόσταση μεταξύ δύο σημείων προκύπτει ως γινόμενο της ταχύτητας διάδοσης της ακτινοβολίας επί τον απαιτούμενο χρόνο μετάβασης. Έτσι με το πάτημα ενός πλήκτρου από το πληκτρολόγιο του γεωδαιτικού σταθμού, εκπέμπεται μια διαμορφωμένη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, γνωστής συχνότητας και μήκους κύματος, η οποία εφόσον διανύσει την απόσταση μέχρι τον ανακλαστήρα που βρίσκεται στο άλλο άκρο της προς μέτρηση απόστασης, ανακλάται και επιστρέφει στον γεωδαιτικό σταθμό. Με γνωστή τη ταχύτητα διάδοσης του σήματος μέσα στην ατμόσφαιρα, προκειμένου να υπολογιστεί η ζητούμενη απόσταση αρκεί να μετρηθεί ο χρόνος που απαιτήθηκε για να διανύσει το σήμα αυτή την απόσταση καθώς και να ληφθεί υπόψη η καθυστέρηση διάδοσης του σήματος στον ανακλαστήρα. Ο χρόνος αυτός είναι γνωστός και προκύπτει ως συνάρτηση της σταθεράς του ανακλαστήρα. Η σταθερά του ανακλαστήρα είναι γνωστή και δίνεται από τον κατασκευαστή με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια.

Η μέτρηση διευθύνσεων γίνεται με την βοήθεια του θεοδολίχου. Η αρχή λειτουργίας του θεοδολίχου βασίζεται στη σωστή θέση τριών μηχανικών αξόνων. Οι άξονες αυτοί είναι:

- Ο πρωτεύων άξονας ΠΠ΄, που θα πρέπει να είναι κατακόρυφος
- Ο δευτερεύων άξονας ΔΔ΄, που θα πρέπει να είναι κάθετος στον ΠΠ΄
- Ο σκοπευτικός άξονας ΣΣ΄, που θα πρέπει να είναι κάθετος στον ΔΔ΄

Η οριζοντίωση του οργάνου είναι πάντα απαραίτητη και πρέπει να γίνεται με πολύ μεγάλη προσοχή. Η κέντρωση του οργάνου, που στην κλασική γεωδαισία είναι απαραίτητη, στον κλάδο της βιομηχανικής γεωδαισίας μπορεί να μην χρειαστεί ή να αντιμετωπιστεί με βάθρα εξαναγκασμένης κέντρωσης, γεγονός που βελτιώνει την ακρίβεια της μέτρησης.

3.3 Παρελκόμενα Γεωδαιτικών σταθμών

3.3.1 Ανακλαστήρες

Οι στόχοι είναι οι ανακλαστικές επιφάνειες που επιτρέπουν στο σήμα που εκπέμπει ο γεωδαιτικός σταθμός να επιστρέψει στο όργανο ώστε να μετρηθεί η απόσταση. Η επιλογή του κατάλληλου πρίσματος μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια της μέτρησης και στο εμπόριο διατίθενται πολλών ειδών στόχοι με κύρια το κυκλικό πρίσμα και τους επίπεδους ανακλαστικούς στόχους που χρησιμοποιούνται σε συνήθεις εφαρμογές. Στην Εικόνα 3.1 φαίνονται με τη σειρά από τα αριστερά προς τα δεξιά το κυκλικό πρίσμα Corner Cube Reflector (CCR) 1.5", το πρίσμα ακριβείας GPH1P και οι ειδικοί αυτοκόλλητοι στόχοι GZM29 διαστάσεων 20x20 για μετρήσεις μέχρι 100m, GZM30 διαστάσεων 40x40mm για μετρήσεις μέχρι 200m και GZM31 διαστάσεων 60x60mm για μετρήσεις μέχρι και 250m κατάλληλοι για εφαρμογές βιομηχανικής γεωδαισίας.



Εικόνα 3.1: Στόχοι βιομηχανικής γεωδαισίας (www.leica-geosystems.com)

3.3.2 Τρίποδας βιομηχανικής γεωδαισίας

Οι τρίποδες της βιομηχανικής γεωδαισίας είναι στιβαρές κατασκευές μεγάλου βάρους και σταθερές ώστε να αποφεύγονται τυχόν μετακινήσεις. Επίσης διαθέτουν ειδικό μηχανισμό ανόρθωσης που επιτρέπει την ανύψωση ή ταπείνωση του οργάνου ώστε να προσαρμόζεται στο ύψος του παρατηρητή.



Εικόνα 3.2: Τρίποδας βιομηχανικής γεωδαισίας (www.leica-geosystems.com)

3.3.3 Ράβδος κρυφού σημείου

Η ράβδος κρυφού σημείου (*hidden point bar*) χρησιμοποιείται για θέσεις σημείων που δεν είναι ορατές από τη θέση του οργάνου. Τοποθετείται με την βοήθεια βάσης στήριξης ώστε να παραμένει σταθερή ενώ το ένα άκρο της ακουμπά στο σημείο ενδιαφέροντος. Είναι διαιρημένη συνήθως σε πέντε διαστήματα με γνωστή την απόσταση μεταξύ τους (συνήθως ανά 10cm). Προκειμένου να υπολογισθούν οι συντεταγμένες του κρυφού σημείου απαιτούνται τουλάχιστον σκοπεύσεις σε δύο από τα πέντε σημεία της ράβδου που φέρουν ανακλαστικούς στόχους.



Εικόνα 3.3: Η ράβδος κρυφού σημείου (www.leica-geosystems.com)

3.3.4 Προσοφθάλμιο με laser

Πρόκειται για συσκευή εκπομπής ορατού laser που τοποθετείται στο προσοφθάλμιο φακό του γεωδαιτικού σταθμού ώστε να υλοποιεί το σκοπευτικό του άξονα. Με αυτό τον τρόπο το άλλο όργανο σκοπεύει απευθείας τη σημειακή κουκίδα με αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας.



Εικόνα 3.4: Το DL2 Diode Laser Pointer (www.leica-geosystems.com)

3.3.5 Ράβδος κλίμακας

Η ράβδος κλίμακας είναι μια ειδικά κατασκευασμένη ράβδος από κράμα μετάλλων με πολύ μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής και τοποθετείται πάνω σε ένα τρίποδα. Το μήκος της είναι μετρημένο εργαστηριακά με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια της τάξης του $\pm 0,002$ mm ενώ στα άκρα της φέρει ευκρινείς στόχους ώστε να διευκολύνεται η σκόπευση από τους γεωδαιτικούς σταθμούς. Χρησιμοποιείται στην μέθοδο της εμπροσθοτομίας ώστε να δοθεί η κλίμακα στο δίκτυο.



Εικόνα 3.5: Η ράβδος κλίμακας (www.leica-geosystems.com)

3.3.6 Λογισμικό επεξεργασίας

Απαραίτητο εργαλείο για την βελτιστοποίηση της εργασίας είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής, ο οποίος θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με το κατάλληλο λογισμικό ώστε να μπορεί να δέχεται τις μετρήσεις και να κάνει ταυτόχρονα όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς. Συνήθως το λογισμικό που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τον κατασκευαστή του οργάνου. Για παράδειγμα η εταιρεία SokkiaHellas προτείνει το λογισμικό 3-DIM ενώ η Trimble το λογισμικό TBC Advanced Edition. Το XYZ είναι λογισμικό κατάλληλο για γεωμετρικούς ελέγχους που προσαρμόζεται ιδανικά σε όλες τις εργασίες μετρολογίας και στα δεδομένα των οργάνων της Leica Geosystems. Έχει σχεδιαστεί για τη διευκόλυνση των καθημερινών βιομηχανικών εφαρμογών που απαιτούν online μετρήσεις και καταγραφή δεδομένων, παρέχοντας ταυτόχρονα και λειτουργίες επεξεργασίας γραφείου.

Βασικά Χαρακτηριστικά:

- Απόλυτη συμβατότητα στην εισαγωγή δεδομένων από έναν ως δεκαέξι γεωδαιτικούς σταθμούς ή από ένα ως εννιά Laser Trackers που βρίσκονται σε σύνδεση με το φορητό υπολογιστή που εκτελεί την εφαρμογή.
- Παραγωγή συστημάτων συντεταγμένων από τα δεδομένα των μετρήσεων, με όλες τις διαθέσιμες επιλογές (προσανατολισμός, κλίμακα, μετάθεση κλπ.).
- Προσαρμογή "best-fit" αντικειμένων σε επιλεγμένες ομάδες καταγεγραμμένων σημείων: γραμμές, κύλινδροι, σφαίρες, επίπεδα, κώνοι κλπ.
- Γεωμετρικοί υπολογισμοί πολλαπλών επιπέδων: μήκη, γωνίες, νοητές τομές αντικειμένων, αποκλίσεις σημείων κλπ. με αυτόματη διόρθωση σφαλμάτων.
- Επίλυση του δικτύου των συνδεδεμένων σταθμών.

- Επιλογή, απόρριψη ή "μερική αποδοχή" σημείων κατά τις γεωμετρικές προσαρμογές με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων και με συντελεστές βαρύτητας.

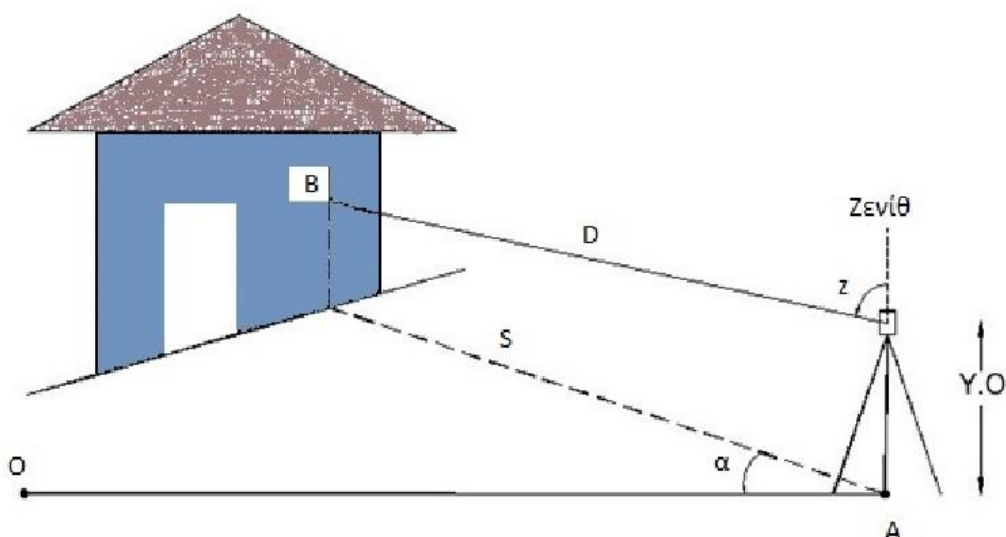
3.4 Μέθοδοι προσδιορισμού συντεταγμένων

Βασικός σκοπός της Βιομηχανικής γεωδαισίας αποτελεί ο προσδιορισμός του σχήματος και των διαστάσεων ενός αντικειμένου. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό απαιτείται ο υπολογισμός των συντεταγμένων του αντικείμενου ώστε να μπορεί μετά να γίνεται σύγκριση με τις δοσμένες συντεταγμένες του κατασκευαστή και να υπολογιστούν τυχόν αποκλίσεις.

Οι σύγχρονοι γεωδαιτικοί σταθμοί είναι σε θέση να υπολογίζουν τις συντεταγμένες με υψηλή ακρίβεια που μπορεί να ξεπεράσει τα 0.5mm. Στην Βιομηχανική Γεωδαισία τα συστήματα των γεωδαιτικών σταθμών χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων, ενώ τα συστήματα με δύο ή περισσότερα θεοδόλγια χρησιμοποιούν τη μέθοδο της εμπροσθοτομίας.

3.4.1 Μέθοδος πολικών συντεταγμένων

Με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων υπολογίζονται οι συντεταγμένες ενός σημείου μετρώντας την απόσταση, την οριζόντια και κατακόρυφη γωνία από ένα σημείο γνωστών συντεταγμένων σε τοπικό σύστημα αναφοράς.



Σχήμα 3.1: Η μέθοδος των πολικών συντεταγμένων

Θεωρώντας το σημείο A γνωστό, οι συντεταγμένες x, y, z , ενός σημείου B υπολογίζονται από τις σχέσεις :

$$x_B = x_A + S \sin a \quad (3.1)$$

$$y_B = y_A + S \cos a \quad (3.2)$$

$$z_B = z_A + D \cos z \quad (3.3)$$

όπου a = μετρημένη οριζόντια γωνία

z = μετρημένη κατακόρυφη γωνία

D = μετρημένη (κεκλιμένη) απόσταση

$$S = D \sin z \quad (3.4)$$

Η ακρίβεια της μεθόδου των πολικών συντεταγμένων εξαρτάται πάρα πολύ από την ακρίβεια της μέτρησης της απόστασης ενώ επηρεάζεται πολύ λιγότερο από την αβεβαιότητα των μετρήσεων διευθύνσεων. Αυτό προκύπτει με βάση το νόμο μετάδοσης των σφαλμάτων. Θεωρώντας το σημείο Α χωρίς σφάλμα, το σφάλμα της τετμημένης x για το σημείο Β είναι :

$$\sigma_{x_B} = \pm \sqrt{\sin^2 \alpha \sigma_s^2 + (S * \cos \alpha)^2 \sigma_a^2} \quad (3.5)$$

Δηλαδή όσο μεγαλώνει το S , η ακρίβεια της συντεταγμένης εξαρτάται από το σφάλμα της γωνίας σ_a , ενώ όσο μικραίνει η απόσταση, μεγαλύτερο ρόλο στην ακρίβεια της συντεταγμένης παίζει το σφάλμα της απόστασης σ_s . Οπότε στην βιομηχανική γεωδαισία που επικρατούν μικρές αποστάσεις (της τάξης των 5-10 m) η ακρίβεια υπολογισμού των συντεταγμένων ενός σημείου εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια του οργάνου στον υπολογισμό της απόστασης.

Τα σφάλματα σ_x και σ_y είναι αντίστροφα, δηλαδή αν το σφάλμα της τετμημένης x είναι μεγάλο, το σφάλμα της τεταγμένης y θα είναι μικρό. Αυτό αποδεικνύεται από τον τύπο υπολογισμού του σφάλματος για την τεταγμένη Y :

$$\sigma_{y_B} = \pm \sqrt{\cos^2 \alpha \sigma_s^2 + (S * \sin \alpha)^2 \sigma_a^2} \quad (3.6)$$

Το πιο από τα δύο θα είναι μεγαλύτερο εξαρτάται από το ποια συντεταγμένη του αγνώστου σημείου είναι κοντύτερα στους άξονες του συστήματος αναφοράς.

Για την αβεβαιότητα του z ισχύει ότι για μικρές αποστάσεις, δηλαδή σαν αυτές που επικρατούν συνήθως στην βιομηχανική γεωδαισία και είναι της τάξης λίγων μέτρων, το σφάλμα είναι μικρό για ζενίθιες γωνίες γύρω στα 100 g, ενώ σε μεγάλες αποστάσεις το σφάλμα μειώνεται για μικρές ζενίθιες γωνίες. Ο τύπος υπολογισμού του σφάλματος είναι:

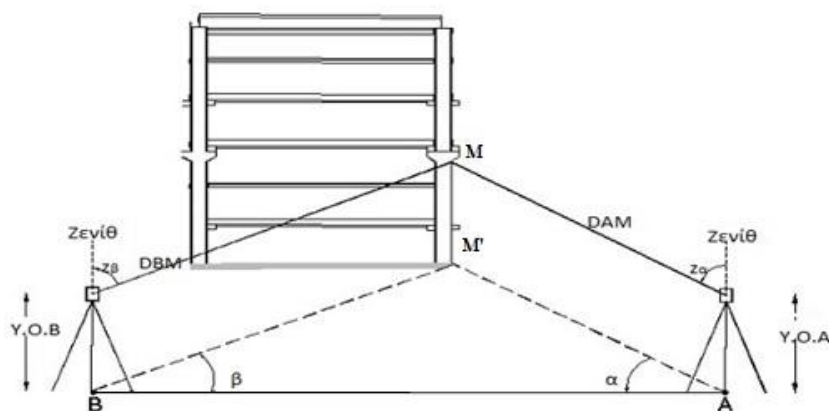
$$\sigma_{z_B} = \pm \sqrt{\cos^2 z \sigma_D^2 + (D * \sin z)^2 \sigma_z^2} \quad (3.7)$$

Τέλος η ακρίβεια μπορεί να επηρεαστεί και από την χρήση κατάφωτου που λόγω των διαστάσεων του η ακρίβεια της μέτρησης μειώνεται. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται είτε με αντικατάσταση των κλασικών κατάφωτων από ειδικούς αυτοκόλλητους στόχους, είτε με μετρήσεις αποστάσεων χωρίς την χρήση κατάφωτου (*reflectorless*) που ωστόσο μειώνει την ακρίβεια των μετρήσεων.

3.4.2 Μέθοδος γωνιακής εμπροσθοτομίας

Στη μέθοδο της εμπροσθοτομίας δεν γίνεται καμία μέτρηση αποστάσεων, μετρούνται μόνο οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες από δύο γνωστά σημεία προς το άγνωστο σημείο που θέλουμε να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες του. Για να δοθεί η κλίμακα στο δίκτυο αρκεί να είναι γνωστή η απόσταση των δύο σημείων από τα οποία θα γίνουν οι μετρήσεις.

Η μεθοδολογία της εμπροσθοτομίας αποτελεί την αρχή στην οποία βασίστηκαν τα πρώτα συστήματα βιομηχανικής γεωδαισίας. Η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη στον τομέα της βιομηχανικής γεωδαισίας καθώς επιτρέπει την εύρεση των συντεταγμένων ενός σημείου M, εφ' όσον είναι γνωστές οι συντεταγμένες δυο άλλων σημείων A και B ή οι συντεταγμένες ενός σημείου και η μεταξύ τους απόσταση και από τα οποία μπορούν να γίνουν μετρήσεις προς το σημείο M. Σχηματίζεται δηλαδή το τρίγωνο ABM και το τρίγωνο ABM' που φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 3.2: Η μέθοδος της εμπροσθοτομίας στο χώρο

Με γνωστά στοιχεία:

τις τιμές των 2 οριζόντιων γωνιών μετρημένες από το θεοδόλιχο α και β

τις τιμές των 2 κατακόρυφων γωνιών μετρημένες από το θεοδόλιχο z_α και z_β

τις συντεταγμένες των σημείων A και B

την υψομετρική διαφορά των δύο οργάνων

ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Από τις συντεταγμένες των σημείων A και B υπολογίζονται, σύμφωνα με το 2^ο θεμελιώδες πρόβλημα, το μήκος D_{AB} και οι γωνίες α_{AB} και α_{BA} . Έτσι με γνωστά το μήκος D_{AB} και τις μετρημένες οριζόντιες γωνίες α και β , υπολογίζονται τα οριζόντια μήκη D_{AM} και D_{BM} , από το νόμο των ημιτόνων.

$$D_{BM} = \frac{D_{AB} \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (3.8)$$

$$D_{AM} = \frac{D_{AB} \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (3.9)$$

Με τις γνωστές γωνίες διεύθυνσης α_{AB} και α_{BA} και τις μετρημένες γωνίες α , β υπολογίζονται οι γωνίες διεύθυνσης των πλευρών AM και BM από τις σχέσεις :

$$\alpha_{AM} = \alpha_{AB} + 400 - \alpha \quad \text{ή} \quad \alpha_{AM} = \alpha_{AB} + \alpha \quad (3.10)$$

$$\alpha_{AM} = \alpha_{AB} + 400 - \alpha \quad \text{ή} \quad \alpha_{AM} = \alpha_{AB} + \alpha \quad (3.11)$$

Οι παραπάνω σχέσεις για τον υπολογισμό της γωνίας διεύθυνσης ισχύουν εναλλακτικά, ανάλογα με τη θέση του σημείου M ως προς την πλευρά AB

Έτσι με δεδομένα τις συντεταγμένες των A και B, τα μήκη D_{AM} και D_{BM} και τις γωνίες διεύθυνσης των AM και BM, από το 1^ο θεμελιώδες πρόβλημα, προκύπτουν οι συντεταγμένες του Σ, είτε από το A είτε από το B, δηλαδή :

Από το A :

$$X_M = X_A + D_{AM} \sin \alpha_{AM} \quad (3.12)$$

$$Y_M = Y_A + D_{AM} \cos \alpha_{AM} \quad (3.13)$$

$$Z_M = Z_A + D_{AM} \cos Z_{AM} \quad (3.14)$$

Από το B:

$$X_M = X_B + D_{BM} \sin \alpha_{BM} \quad (3.15)$$

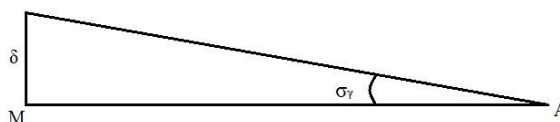
$$Y_M = Y_B + D_{BM} \cos \alpha_{BM} \quad (3.16)$$

$$Z_M = Z_B + D_{BM} \cos Z_{BM} \quad (3.17)$$

Σαν λύση λαμβάνεται τελικά ο μέσος όρος των δύο λύσεων.

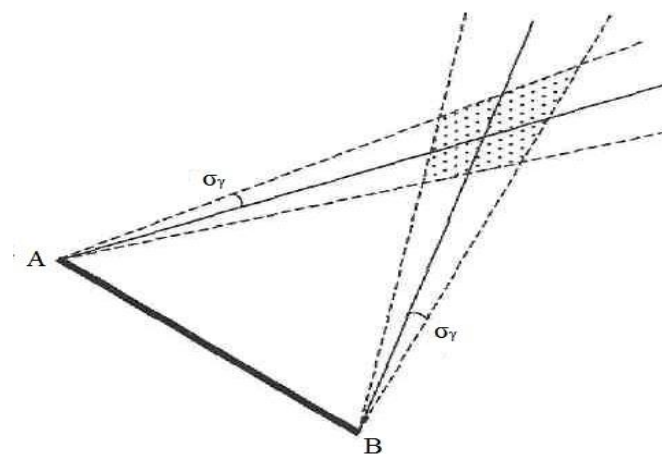
Η ακρίβεια της μεθόδου μπορεί να βελτιωθεί αν γίνουν μετρήσεις από περισσότερα σημεία και γίνει συνόρθωση με τα ελάχιστα τετράγωνα. Στην περίπτωση αυτή η μέθοδος ονομάζεται πολλαπλή εμπροσθοτομία και είναι αυτή που εφαρμόζεται στην βιομηχανική γεωδαισία.

Η μέθοδος της πολλαπλής εμπροσθοτομίας είναι αρκετά δημοφιλής στην βιομηχανική γεωδαισία καθώς μπορεί να προσδιορίσει τις συντεταγμένες ενός σημείου το οποίο δεν είναι προσβάσιμο - χρειάζεται απλά να είναι ορατό ώστε να σκοπευθεί. Η ακρίβεια της μεθόδου επηρεάζεται από την απόσταση, καθώς όσο μεγαλώνει η απόσταση ανάμεσα στο όργανο μέτρησης και το άγνωστο σημείο τόσο μεγαλώνει το γραμμικό σφάλμα δ της αβεβαιότητας σ_γ .



Σχήμα 3.3: Το γραμμικό σφάλμα δ λόγω σ_γ

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ακρίβεια της μεθόδου είναι η γωνία τομής της διεύθυνσης σκόπευσης. Όσο η γωνία τομής των δυο ευθειών γίνεται πιο αμβλεία ή πιο οξεία τόσο περισσότερο αυξάνεται η αβεβαιότητα με ιδανική την περίπτωση που οι ευθείες τέμνονται κάθετα. Πρακτικά οι αποδεκτές τιμές των γωνιών κυμαίνονται από 65 έως 130°.



Σχήμα 3.4: Περιοχή αβεβαιότητας στην εμπροσθοτομία λόγω σφαλμάτων των γωνιών

Στην παραπάνω μεθοδολογία της εμπροσθοτομίας, οι συντεταγμένες των δύο κορυφών είναι γνωστές και έτσι δεν απαιτείται η μέτρηση κάποιου μήκους, καθώς η κλίμακα του δικτύου δίνεται από την απόσταση που υπολογίζεται μεταξύ των δύο σημείων. Συνήθως σε αυτές τις περιπτώσεις τα σημεία υλοποιούνται με βάθρα που έχουν εξαναγκασμένες κεντρώσεις έτσι ώστε να αποφεύγονται τα σφάλματα από τις κεντρώσεις των οργάνων. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται σταθερά δίκτυα και χρησιμοποιούνται κυρίως από βιομηχανίες που διαθέτουν χώρους εργαστηρίων και πραγματοποιούν ελέγχους σε αντικείμενα σταθερών διαστάσεων και σχήματος.

Πλεονέκτημα των δικτύων αυτών είναι ότι οι συντεταγμένες των δύο στάσεων είναι γνωστές οπότε τα όργανα τοποθετούνται εύκολα πάνω στα βάθρα κάνοντας την διαδικασία πολύ απλή και γρήγορη. Μειονέκτημα αυτών των δικτύων είναι το κόστος κατασκευής των βάσεων κέντρωσης. Επίσης η εγκατάσταση των βάθρων πρέπει να γίνει σε εργαστηριακό και καλά ελεγχόμενο χώρο ώστε να αποφευχθούν τυχόν φθορές και μικρομετακινήσεις και απαιτείται συνεχώς έλεγχος των συντεταγμένων των σημείων για τον εντοπισμό πιθανών αποκλίσεων από τις αρχικές δοσμένες συντεταγμένες.

Ο δεύτερος τρόπος υλοποίησης των σημείων μπορεί να γίνει μέσα από τυχαία σημεία τα οποία υλοποιούνται σε ελεύθερες θέσεις και σχηματίζουν ελεύθερο δίκτυο. Στα ελεύθερα δίκτυα δεν απαιτούνται βάθρα και έτσι εξασφαλίζεται η καλύτερη γεωμετρία με τα προς σκόπευση σημεία. Η κλίμακα του δικτύου θα δοθεί με την βοήθεια μιας ειδικής ράβδου γνωστού μήκους μετρούμενου με πολλή μεγάλη ακρίβεια από τον κατασκευαστή της. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται συνδυασμένη μέθοδος εμπροσθοτομίας – μέθοδος Hansen.

3.4.3 Μέθοδος Hansen

Στην περίπτωση των ελευθέρων δικτύων οι θέσεις των κορυφών μπορούν να επιλεγούν τυχαία και υλοποιούνται πάνω σε ειδικούς τρίποδες βιομηχανικής γεωδαισίας. Η επιλογή των σημείων και η τοποθέτηση των οργάνων σε αυτά γίνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη γεωμετρία με τα προς σκόπευση σημεία. Τα όργανα συνδέονται με ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος είναι εφοδιασμένος με το κατάλληλο λογισμικό για την επεξεργασία των μετρήσεων. Η επεξεργασία αυτή γίνεται σε πραγματικό χρόνο και έτσι μπορούν να αναγνωριστούν και να εξαλειφθούν εγκαίρως τα χονδροειδή σφάλματα. Έτσι όλη η διαδικασία γίνεται πολύ γρήγορα και απαιτείται το ελάχιστο ανθρώπινο δυναμικό.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, μπορεί τα όργανα να τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις, αλλά γίνεται προσπάθεια οι θέσεις αυτές να σχηματίζουν μαζί με τα σκοπευόμενα σημεία κατά το δυνατόν ισόπλευρο τρίγωνο ώστε να μεγιστοποιηθούν οι ακρίβειες της μεθόδου. Αυθαίρετα στο ένα όργανο (σημείο A) θα δοθούν οι συντεταγμένες (X, Y, Z) $(0, 0, 0)$ και θεωρείται ότι ο άξονας X του τοπικού αυθαίρετου συστήματος είναι αυτός που συνδέει τα δύο όργανα. Έτσι το δεύτερο όργανο (σημείο B) θα έχει τις συντεταγμένες $(SAB, 0, \Delta h)$.

Αρχικά πρέπει να γίνει ο μηδενισμός των οριζοντίων διευθύνσεων στα δύο όργανα. Αυτό θα γίνει με την διαδικασία της αυτοσκόπευσης που αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέρος της διαδικασίας, για αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή προκειμένου να γίνει σωστά και με τη μέγιστη

δυνατή ακρίβεια. Αυτό θα γίνει με την βοήθεια μια απλής μεταλλικής κατασκευής που ονομάζεται κονάκι.

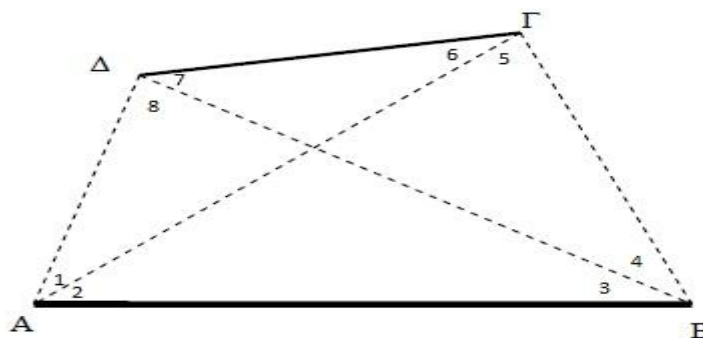
Τοποθετείται το κονάκι στο σημείο Β και από το σημείο Α στοχεύεται στη μύτη ψηλά ώστε να γίνει ο μηδενισμός στον οριζόντιο δίσκο. Μετά το κονάκι αφαιρείται και επανατοποθετείται στο γεωδαιτικό σταθμό. Ύστερα σκοπεύεται ένα τυχαίο αλλά σταθερό σημείο εντός του χώρου ώστε να γίνει ο μηδενισμός των οριζοντίων γωνιών. Για να ολοκληρωθεί ο μηδενισμός, μετά το τέλος όλων των μετρήσεων, τοποθετείται το κονάκι στο σημείο Α στη θέση του οργάνου. Από το Β στοχεύεται το κονάκι και μετριέται η γωνία. Αυτή είναι η γωνία μηδενισμού η οποία αφαιρείται από τις μετρούμενες οριζόντιες γωνίες που μέτρησε το όργανο Β.

Υπάρχουν και άλλοι τρόποι για να γίνει ο μηδενισμός των οριζοντίων γωνιών των δύο οργάνων:

- Με τοποθέτηση ειδικών στόχων πάνω στο τηλεσκόπιο των οργάνων. Η τοποθέτηση αυτή θα έχει γίνει νωρίτερα στο εργαστήριο και θα είναι πάνω στον πρωτεύοντα άξονα του οργάνου.
- Με πρίσμα αυτοσκόπευσης που είναι προσαρμοσμένο στο τηλεσκόπιο ενός οργάνου και κάθετα στον σκοπευτικό άξονά του. Το πρίσμα αυτό στοχεύεται από το δεύτερο όργανο εστιασμένο στο άπειρο. Όταν το όργανο μπορέσει να στοχεύσει το δικό του σταυρόνημα θα σημαίνει πως οι δύο σκοπευτικοί άξονες των οργάνων έχουν ταυτιστεί.

Η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα δύο όργανα μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Οι κατακόρυφοι δίσκοι των οργάνων τοποθετούνται και πακτώνονται στους 100^s έτσι ώστε οι γεωδαιτικοί σταθμοί να λειτουργούν πλέον ως χωροβάτες. Κατόπιν γίνεται η στόχευση προς μία κατακόρυφα τοποθετημένη σταδία και η διαφορά στις αναγνώσεις είναι η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα δύο όργανά.

Το επόμενο βήμα είναι να δοθεί η κλίμακα στο δίκτυο, ο υπολογισμός δηλαδή της απόστασης μεταξύ των δύο οργάνων. Η απόσταση αυτή προκύπτει με την βοήθεια της ειδικής ράβδου γνωστού μήκους και με μετρήσεις στα άκρα της. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην τοποθέτηση της ράβδου ώστε να εξασφαλισθεί η καλύτερη δυνατή γεωμετρία με τα δύο όργανα. Η διάταξη της ράβδου και οι γωνίες που σχηματίζονται φαίνονται στο σχήμα.



Σχήμα 3.5: Μέθοδος Hansen

όπου ,

A, B τα σημεία που τοποθετούνται τα όργανα

$S_{\Gamma\Delta}$ το γνωστό μήκος της ράβδου

1,2,3,4 οι γωνίες που μετρούνται με τα Total stations

S_{AB} το ζητούμενο μήκος

Από τη γεωμετρία του σχήματος ισχύουν:

$$1 + 2 + 3 + 8 = 200g \text{ και έτσι υπολογίζεται την τιμή της γωνίας } 8$$

$$2 + 3 + 4 + 5 = 200g \text{ και έτσι υπολογίζεται την τιμή της γωνίας } 5$$

$$6 + 7 = 400g - (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 8) \quad (3.18)$$

Επίσης από τον νόμο των ημιτόνων στο τετράπλευρο ισχύει:

$$\frac{\sin 2 \sin 4 \sin 6 \sin 8}{\sin 1 \sin 3 \sin 5 \sin 7} = 1 \quad (3.19)$$

οπότε προκύπτει

$$\frac{\sin 7}{\sin 6} = k \quad (3.20)$$

Επιλύοντας τις σχέσεις 3.18 και 3.20 υπολογίζονται οι τιμές των γωνιών 6 και 7. Έτσι έχοντας γνωστές ποσότητες όλες τις γωνίες του σχηματιζόμενου τετραπλεύρου, εφαρμόζοντας τον νόμο των ημιτόνων προσδιορίζεται η ζητούμενη πλευρά AB, δηλαδή η απόσταση των δύο οργάνων από την σχέση :

$$S_{AB} = \frac{A\Delta * \sin 8}{\sin 3} \quad (3.21)$$

Έτσι προκύπτουν και οι τελικές συντεταγμένες των σημείων A και B με $A=(0,0,0)$ και $B=(S_{AB},0,\Delta h)$ και το δίκτυο γίνεται ορισμένο.

3.5 Γεωδαιτικοί σταθμοί που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία

Οι γεωδαιτικοί σταθμοί, σαν το κατεξοχήν κλασικό όργανο στη γεωδαισία, διατίθενται στο εμπόριο από αρκετές κατασκευαστικές εταιρίες προσφέροντας ένα μεγάλο φάσμα επιλογής του κατάλληλου εξοπλισμού. Οι κυριότερες εταιρίες κατασκευής είναι:

- Topcon/Sokkia
- Leica
- Suzhou
- Trimble
- Nikon
- Spectra Precision
- CST/berger
- Guangdong Kolida
- Geomax
- Sanding

Για της αυξημένες απαιτήσεις σε ακρίβεια για τον κλάδο της βιομηχανικής γεωδαισίας η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού μειώνεται αρκετά, ωστόσο υπάρχουν πολλές διαθέσιμες συσκευές οι οποίες φαίνονται αναλυτικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους στον παρακάτω πίνακα:

Τύπος γεωδαιτικού σταθμού	Εταιρεία	Ακρίβεια μέτρησης γωνιών	Απόδοση γωνιών	Ακρίβεια μέτρησης μηκών με πρίσμα	Ακρίβεια μέτρησης μηκών χωρίς πρίσμα	Απόδοση μήκους	Εύρος	Βάρος
Viva TS15/TS11	Leica	1 ^{cc} .0	0 ^{cc} .1	±1 mm ±1.5 ppm	±2 mm ±2 ppm	0.1mm	2km-10km	6.5kg/6.1kg
TDA5005	Leica	1 ^{cc} .5	0 ^{cc} .1	±1 mm ±2 ppm	–	0.01mm	5km	7.5kg
TS30/TM30	Leica	0 ^{cc} .5	0 ^{cc} .1	±0.6 mm ±1 ppm	±2 mm ±2 ppm	0.1mm	2km-10km	11.75kg
MS AX	Topcon /Sokkia	0 ^{cc} .5	0 ^{cc} .1	±0.8 mm ±1 ppm	±1 mm ±1 ppm	0.01mm	0.8-3.5km	7.7kg
S6	Trimble	2 ^{cc} .0	0 ^{cc} .1	±1 mm ±2 ppm	±2 mm ±2 ppm	0.1mm	5.5km	5.6kg
S8	Trimble	0 ^{cc} .5	0 ^{cc} .1	±0.8 mm ±1 ppm	±2 mm ±2 ppm	0.1mm	5.5km	5.6kg
RTS010	Suzhou	1 ^{cc} .0	0 ^{cc} .5	±1 mm ±1 ppm	±2 mm ±2 ppm	0.1mm	2km-3.5km	6.5kg

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωδαιτικών σταθμών (www.geo-matching.com)

3.6 Πηγές σφαλμάτων

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η υψηλή ακρίβεια που απαιτείται σε εφαρμογές βιομηχανικής γεωδαισίας είναι σημαντικό να εκτιμηθούν τα σφάλματα που μπορεί να επηρεάσουν την τελική ακρίβεια των μετρήσεων. Οι πηγές των σφαλμάτων μπορούν να αναλυθούν σε αυτά που οφείλονται στους χειριστές του οργάνου, στα σφάλματα του περιβάλλοντος και στα σφάλματα που προέρχονται από το όργανο.

3.6.1 Σφάλματα χειριστών

Είναι τα σφάλματα που οφείλονται αποκλειστικά στον χρήστη του οργάνου και είναι σχετικά εύκολο να αναγνωριστούν και να εξαλειφθούν. Πρόκειται για χονδροειδή σφάλματα τα οποία οφείλονται κυρίως σε απειρία ή απροσεξία του χειριστή. Τέτοια σφάλματα μπορεί να είναι η λάθος στόχευση και μέτρηση σημείου και ο ορισμός λανθασμένων παραμέτρων στο όργανο (π.χ. λανθασμένη μέτρηση του ύψους οργάνου).

3.6.2 Σφάλματα οργάνων

Τα μετρητικά όργανα πρέπει να βαθμονομούνται και να ελέγχονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Με βάση το σκεπτικό αυτό, η κατασκευάστρια εταιρεία από μόνη της παρέχει τη δυνατότητα αυτοελέγχου των γεωδαιτικών σταθμών. Μετρώντας αντίστοιχες αποκλίσεις, έπειτα επιβάλει διορθώσεις στις οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες. Αυτές οι δυνατότητες δεν απαλλάσσουν το όργανο όμως από τις βαθμονομήσεις στις οποίες πρέπει να υποβάλλεται. Οι έλεγχοι αφορούν σε:

- Έλεγχος κατακορυφότητας του πρωτεύοντος άξονα ΠΠ' που γίνεται με τον υπολογισμό των αποκλίσεων (l,t) του άξονα από το κανονικό σημείο της αεροστάθμης οριζοντίωσης.
- Έλεγχος της μηδενικής ανάγνωσης του κατακόρυφου κύκλου δηλαδή, ελέγχεται εάν η μηδενική ένδειξη του κατακόρυφου δίσκου συμπίπτει με το πρωτεύοντα άξονα του οργάνου.
- Έλεγχος καθετότητας της γραμμή σκόπευσης ΣΣ' ως προς τον δευτερεύοντα άξονα ΔΔ'.
- Έλεγχος καθετότητας του άξονα περιστροφής του τηλεσκοπίου ΔΔ' ως προς τον άξονα περιστροφής του οργάνου ΠΠ'.
- Έλεγχος της λειτουργίας ATR, που ελέγχεται κατά πόσο το κέντρο της σκοπευτικής γραμμής ΣΣ' συμπίπτει με το κέντρο της κάμερας CCD.

Οι παραπάνω έλεγχοι, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων ακρίβειας στον κλάδο της βιομηχανικής γεωδαισίας, πρέπει να γίνονται πριν από κάθε εργασία και απαιτούν μεγάλες αποστάσεις (~100 m) ή μεγάλες κατακόρυφες γωνίες (60°, 70°) και να γίνονται πάντα σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου.

Ένα άλλο σφάλμα που μπορεί να μειώσει την ακρίβεια των μετρήσεων είναι η λάθος

επιλογή του κατάφωτου ή τυχόν φθορά του. Για παράδειγμα ο γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005 προτείνεται από την εταιρία κατασκευής να συνοδεύεται με το πρίσμα CCR για μεγιστοποίηση των ακριβειών. Τέλος πρέπει να γίνεται έλεγχος στην σταθερά του κατάφωτου και κατά πόσο ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές που έχει δώσει ο κατασκευαστής.

3.6.3 Σφάλματα περιβάλλοντος

Ο χώρος στον οποίο διεξάγονται οι μετρήσεις είναι σημαντικό να είναι ελεγχόμενος. Μεταβολές στη θερμοκρασία και στην πίεση της ατμόσφαιρας έχουν σημαντική επίδραση στη μέτρηση αποστάσεων, καθώς το φως (ακτίνα του EDM) διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα και δίνει άλλα αποτελέσματα. Για παράδειγμα προκειμένου να διατηρηθεί η δοσμένη ακρίβεια του οργάνου ± 1 ppm στη μέτρηση της απόστασης, η θερμοκρασία πρέπει να είναι γνωστή με ακρίβεια ± 1 βαθμό °C και η πίεση με ακρίβεια ± 3 mb.

Ένα άλλο σφάλμα του περιβάλλοντος είναι η τοπική αλλαγή στην πυκνότητα της ατμόσφαιρας από όπου περνάει η ακτίνα μέτρησης του οργάνου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διεξαγωγή μετρήσεων κοντά σε σωλήνες θερμότητας (πράγμα όχι σπάνιο σε εγκαταστάσεις βιομηχανιών) που προκαλούν καμπύλωση στην ακτίνα μέτρησης και άρα μείωση της ακρίβειας των μετρούμενων σημείων.

Τέλος πρέπει να δίνεται προσοχή ο χώρος που διεξάγονται οι μετρήσεις να είναι απαλλαγμένος από δονήσεις ή μικρομετακινήσεις ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα του οργάνου. Αυτό μπορεί να ελεγχθεί με επιπλέον μετρήσεις πριν και στο τέλος της εργασίας προς κάποια προσημασμένα σημεία ελέγχου με γνωστές τις συντεταγμένες τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ (CMM)

4.1 Εισαγωγή

Οι Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων (*Coordinate Measuring Machines, CMMs*) καταγράφουν με ακρίβεια τη μορφή και τις διαστάσεις ενός μηχανολογικού τεμαχίου. Κάνουν μετρήσεις ακριβείας και είναι οι πλέον κατάλληλες για τις περισσότερες σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές για την παραγωγή οικονομοτεχνικά άρτιων κατασκευών, εξαρτημάτων και συναρμολογημένων μηχανολογικών συνόλων. Εκτός από την μεγάλη ακρίβεια που προσφέρει, η χρήση της CMM περιορίζει στο ελάχιστο το ανθρώπινο σφάλμα κατά τη διεξαγωγή και ανάγνωση των μετρήσεων και προσφέρει το πλεονέκτημα αποτύπωσης σύνθετων γεωμετρικών σχημάτων, όπως η προπέλα ενός πλοίου. Επίσης, οι CMM έχουν κριθεί ως το πλέον κατάλληλο εργαλείο για τον Αντίστροφο Μηχανολογικό Σχεδιασμό (ΑΜΣ).



Εικόνα 4.1: Μέτρηση εξαρτήματος προπέλας με τη χρήση CMM (www.navair.navy.mil)

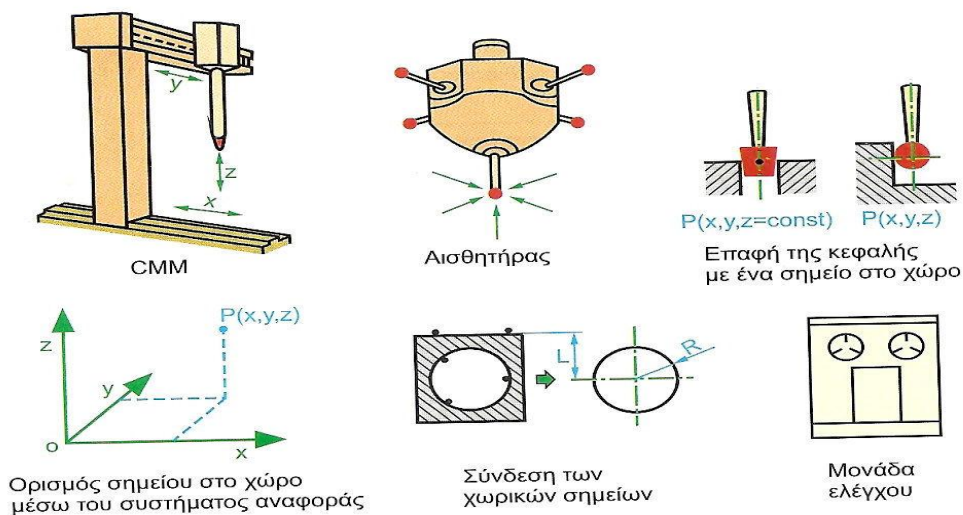
Οι μετρητικές μηχανές CMM είτε έρχονται σε επαφή με το προς μέτρηση αντικείμενο (Mechanical Contact Measurement) είτε αυτό επιτυγχάνεται με οπτική ανάγνωση (Non-Contact Measurement). Λόγω των υψηλών απαιτήσεων ακριβείας, συνήθως οι μετρήσεις και η εγκατάσταση μιας CMM πραγματοποιείται σε ειδικούς χώρους όπου επικρατούν ελεγχόμενες συνθήκες. Η ακρίβεια εξαρτάται από τον τύπο της μηχανής και μπορεί να φτάσει και το μισό μικρόμετρο. Στην εικόνα 4.2 απεικονίζεται μια σταθερή CMM με ακρίβεια της τάξης του 0,003mm και εύρος αντικείμενου 1000mm x 1500mm x 800mm.



Εικόνα 4.2: Η μηχανή μέτρησης συντεταγμένων Daisy (www.candidmicron.com)

4.2 Αρχή λειτουργίας CMM

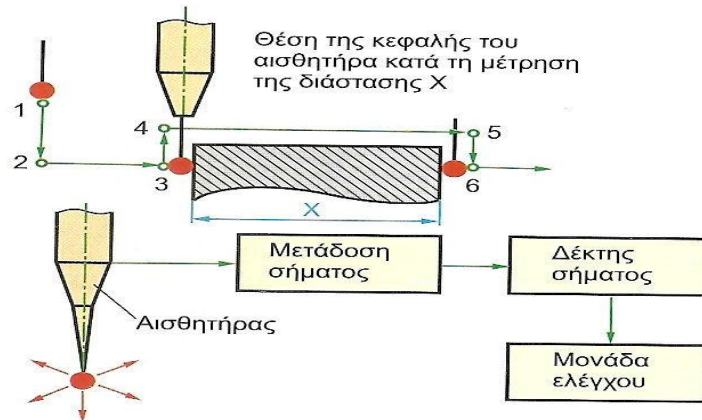
Η υψηλής ακρίβειας μηχανολογική κατασκευή αποτελείται από ένα σύνολο ανεξάρτητων υποσυστημάτων (σταθερά και κινούμενα μηχανικά μέρη, στοιχεία μετάδοσης της κίνησης, οπτικές κλίμακες, σερβοκινητήρες, κ.α.) που είναι υπεύθυνα για τη μετακίνηση και την τοποθέτηση ενός υπερευαίσθητου αισθητήρα (probe) στα προς μέτρηση σημεία. Με την διάταξη αυτή επιτυγχάνεται η καταγραφή των συντεταγμένων με υψηλή ακρίβεια κι επαναληψιμότητα στον τρισδιάστατο χώρο μέτρησης. Για κάθε σημείο επαφής του αισθητήρα με το τεμάχιο, καταγράφονται οι συντεταγμένες X,Y,Z του σημείου ως προς το σύστημα αναφοράς του οργάνου.



Εικόνα 4.3: Αρχή λειτουργίας CMM (Μανσούρ & Καραχάλιου,2007)

Κάθε μετατόπιση του αισθητήρα ως προς σύστημα αναφοράς που έχει προκαθοριστεί, αντιστοιχεί σε μεταβολή τάσης. Ειδικά ηλεκτρονικά κυκλώματα μετατρέπουν την μεταβολή τάσης (που βρίσκεται σε αναλογική μορφή) σε ψηφιακό σήμα και στη συνέχεια με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού γίνεται η καταγραφή των συντεταγμένων του κέντρου της ακίδας του μηχανικού αισθητήρα σε κάθε θέση. Όταν ο επαφίας-αισθητήρας ακουμπήσει σε ένα σημείο, δημιουργείται το σήμα ελέγχου, το οποίο διακόπτει ακαριαία την κίνηση του αισθητήρα στο συγκεκριμένο άξονα

μέτρησης. Την ίδια στιγμή το συγκεκριμένο σήμα μεταφέρεται μέσω της μονάδας ελέγχου, στο μετρητικό σύστημα θέσης της μηχανής, όπου καταγράφεται η τιμή των συντεταγμένων του σημείου μέτρησης.



Εικόνα 4.4: Διαδικασία μέτρησης διάστασης (Μανσούρ & Καραχάλιου,2007)

Όλα τα αποτελέσματα μεταφέρονται στον υπολογιστή ή άλλες εξειδικευμένες μηχανές καταγραφής για ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων και με τη χρήση ειδικού λογισμικού υπολογίζονται το σχήμα και οι διαστάσεις του αντικειμένου.

4.3 Τύποι μετρητικών μηχανών CMM

Οι μετρητικές μηχανές CMM μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: τις σταθερές και τις φορητές. Οι φορητές CMM είναι εύκολο να μεταφερθούν και έχουν μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με τις σταθερές οι οποίες είναι ογκώδεις και πρέπει να εγκαθίστανται σε ελεγχόμενο και σταθερό περιβάλλον. Ωστόσο και οι δύο τύποι παρέχουν τη δυνατότητα στον αισθητήρα να κινείται και στους τρεις κάθετους άξονες : X, Y και Z.

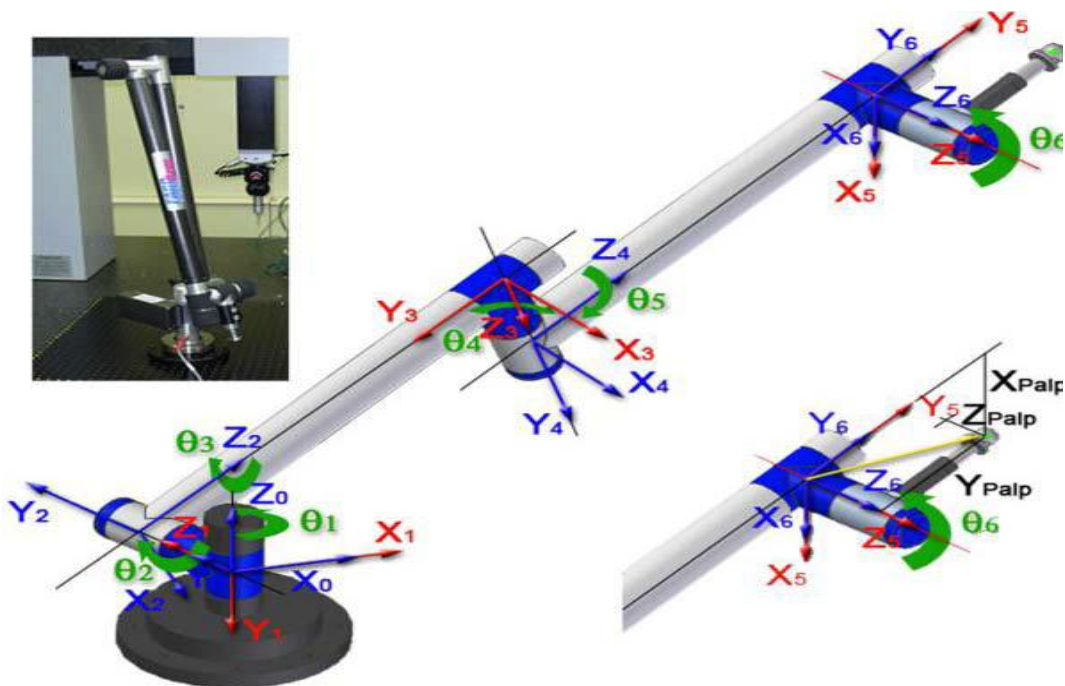
4.3.1 Φορητές CMM

Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων τύπου Φορητού αρθρωτού Βραχίονα (ΜΜΣ-ΦΒ) έχουν ως βασικό τεχνικό χαρακτηριστικό την ύπαρξη ενός αρθρωτού βραχίονα, που αποτελείται συνήθως από τρία στελέχη στερεωμένα σε σταθερή βάση. Ο αισθητήρας λήψης που είναι υπεύθυνος για την μέτρηση των σημείων βρίσκεται στην απόληξη του ακραίου στελέχους. Σαν αισθητήρα λήψης ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει είτε κεφαλή σημειακών μετρήσεων, δηλαδή ακίδα επαφής, είτε κεφαλή σάρωσης (*laser scanning*) είτε κεφαλή ελέγχου και αντιγραφής.



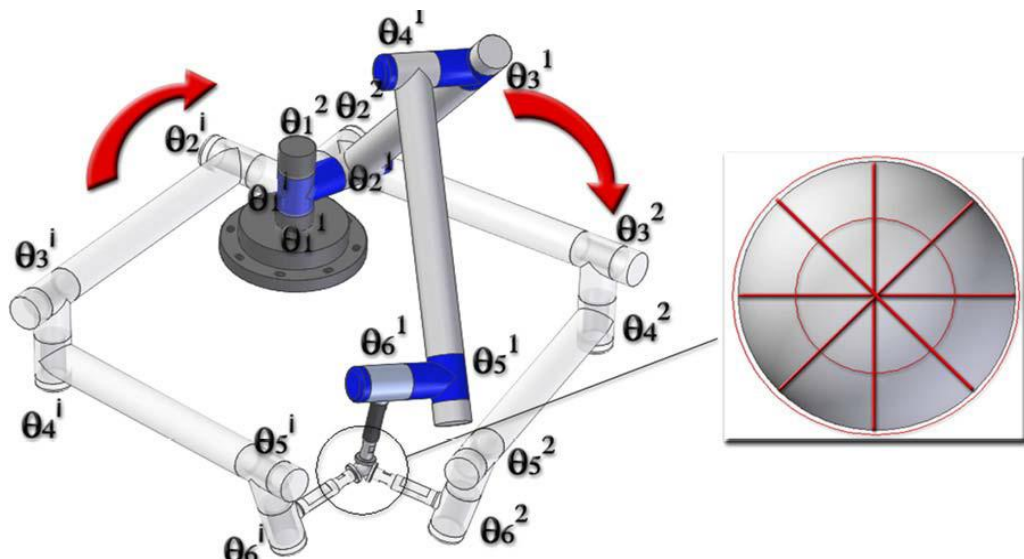
Εικόνα 4.5: Φορητές μηχανές τύπου αρθρωτού βραχίονα (www.temco-tool.com)

Ο τρόπος λειτουργίας των φορητών CMM απαιτεί από τον χρήστη την μετακίνηση της κεφαλής μέτρησης χειροκίνητα (π.χ. την ακίδα επαφής) ώστε να ακουμπήσει το σημείο που θέλει να μετρήσει ή να αντιγράψει. Ο βραχίονας αποτελείται από μια σειρά σωλήνων ενωμένων με συνδέσμους οι οποίοι αποτελούν τους άξονες της CMM.



Εικόνα 4.6: Οι άξονες που σχηματίζει ο αρθρωτός βραχίονας (Santolaria et.al., 2010)

Οι σύνδεσμοι είναι κατασκευασμένοι από υψηλής ποιότητας ρουλεμάν με σκοπό να διασφαλιστεί η περιστροφή 360° γύρω από τον άξονα. Επίσης κάθε σύνδεσμος διαθέτει ένα γωνιακό κωδικοποιητή υψηλής ακριβείας ώστε να μετράται η απόλυτη γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους οι άξονες. Οι περισσότερες μηχανές διαθέτουν 6 άξονες οι οποίοι καταλήγουν σε μια σταθερή βάση η οποία μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα και γρήγορα πάνω σε ένα τρίποδα, σε ένα σταθερό τραπέζι ή ακόμα και πάνω στο ίδιο το αντικείμενο που πρόκειται να μετρηθεί.



Εικόνα 4.7: Οι έξι βαθμοί ελευθερίας που προκύπτουν από τις αρθρώσεις του βραχίονα

(Santolaria et.al., 2010)

Οι βαθμοί ελευθερίας που προκύπτουν είναι έξι και οφείλονται στις γωνίες που σχηματίζουν οι αρθρώσεις, καθώς και στην περιστροφή των στελεχών του βραχίονα. Όταν ο αισθητήρας έρθει σε επαφή με το μετρούμενο αντικείμενο η ΜΜΣ-ΦΒ είναι σε θέση να καταγράψει τη θέση ενός σημείου στον χώρο με βάση τις γωνίες που σχηματίζουν οι άξονες του βραχίονα. Τα δεδομένα αυτά μεταφέρονται σε έναν Η/Υ και έτσι αποδίδεται η θέση (συντεταγμένες X-Y-Z) του μετρούμενου σημείου στο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

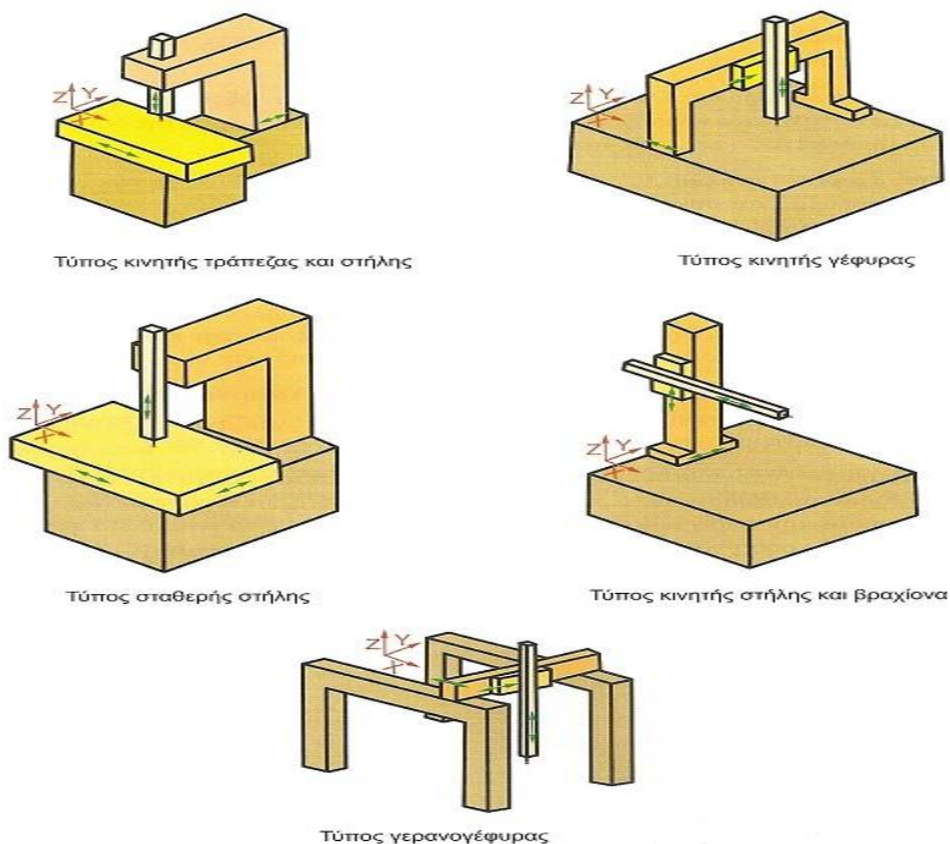
4.3.2 Σταθερές CMM

Σε αντίθεση με τις φορητές μετρητικές μηχανές οι σταθερές CMM είναι αρκετά βαριές κατασκευές και εγκαθίσταται σε βιομηχανικούς ελεγχόμενους χώρους και συνθήκες ώστε να προστατεύονται από εξωτερικούς παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν φθορά και αλλοιώσεις στον τρόπο λειτουργίας τους. Μία σταθερή CMM αποτελείται από την τράπεζα μέτρησης (table), τη στήλη (column) ή τη γέφυρα (bridge) ή το ικρίωμα (gantry), ανάλογα με τον τύπο της μηχανής, και το βραχίονα (ram). Υπάρχουν 10 τύποι μετρητικών μηχανών κατά το πρότυπο ANSI/ASME B89.1.12M, ωστόσο στο εμπόριο οι πιο συνήθεις τύποι σταθερών CMM που μπορούμε να συναντήσουμε είναι:

- Ο τύπος κινητής γέφυρας που αποτελείται από οριζόντια γέφυρα η οποία μπορεί και κινείται στον άξονα X. Η κίνηση στους άξονες Y και Z γίνεται με την βοήθεια μιας κάθετη δοκού της γέφυρας, που έχει προσαρμοσμένο στο κάτω μέρος της τον επαφέα – αισθητήρα.
- Ο τύπος της σταθερής στήλης είναι παρόμοιος με τον τύπο κινητής γέφυρας και συχνά αναφέρεται και ως γενική μετρητική μηχανή (universal measurement machine). Διακρίνεται για την εξαιρετική στιβαρότητα της κατασκευής της και για την μεγάλη ακρίβεια των

μετρήσεων.

- Ο τύπος της στήλης με κινητή τράπεζα, η οποία τράπεζα κινείται κατά τον άξονα X. Η στήλη αποτελείται από έναν βραχίονα που κινείται κατά τον άξονα Y ο οποίος με την σειρά του έχει στην άκρη τον αισθητήρα ο οποίος μπορεί και κινείται κατά τον άξονα Z.
- Ο τύπος της κινητής στήλης συνδυασμένος με βραχίονα ο οποίος προσφέρει αρκετά μεγάλο εύρος μέτρησης και για αυτό το λόγο κρίνεται ο πλέον κατάλληλος τύπος για μέτρηση πολύ μεγάλων κομματιών (π.χ. αυτοκίνητα).
- Ο τύπος γερανογέφυρας που το προς μέτρηση κομμάτι τοποθετείται στο έδαφος καθώς δεν υπάρχει τράπεζα μηχανής.



Εικόνα 4.8: Οι βασικοί τύποι σταθερών μετρητικών μηχανών CMM

(Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Η βάση της μηχανής είναι μία στιβαρή και αρκετά ογκώδης κατασκευή όπου τοποθετούνται οι κλίμακες μέτρησης (scales), το σύστημα κίνησης (transmission) και οι μεταλλάκτες μετατόπισης (displacement transducers), ο μηχανισμός δηλαδή που μετατρέπει τη μετατόπιση σε αλλαγή τάσης. Βρίσκεται πάνω σε αντικραδασμικά πέλματα και συνήθως κατασκευάζεται από χάλυβα ενώ πάνω της τοποθετείται η τράπεζα μέτρησης, ο χώρος δηλαδή που διεξάγονται οι μετρήσεις.

Οι σύγχρονες τράπεζες μέτρησης κατασκευάζονται από γρανίτη το οποίο κρίνεται το πλέον κατάλληλο υλικό λόγω των ιδιοτήτων του. Αρχικά η κατασκευή τους ήταν από χάλυβα ο οποίος διαπιστώθηκε πως οξειδώνεται εύκολα, ενώ λόγω των πολυάριθμων επαφών και της εξάσκησης δυνάμεων, μπορούσε επίσης εύκολα να καμφθεί. Επίσης η χρήση του γρανίτη ελαχιστοποιεί τις

πιθανότητες παραμόρφωσης της βάσης λόγω διαφορετικής θερμικής διαστολής (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007).

Οι σερβοκινητήρες εδράζονται στην τράπεζα μέτρησης με αεροέδρανα και είναι υπεύθυνοι για την κίνηση στους άξονες X-Y-Z, ενώ με τη χρήση των κατάλληλων μεταλλακτών μετατόπισης (displacement transducers) προσαρμοσμένων συνήθως σε γραμμικές οπτικές κλίμακες (optical linear scales) είναι δυνατή σε κάθε θέση η καταγραφή των συντεταγμένων του κέντρου της ακίδας (tip) του μηχανικού αισθητήρα. Για την ομαλή λειτουργία της μηχανής ο αέρας πρέπει να είναι καλά φιλτραρισμένος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η τριβή των παραπάνω στοιχείων. Τέλος, αρκετές εταιρείες παραγωγής κατασκευάζουν τις τράπεζες με εσωτερική κοχλίωση, έτσι ώστε να διευκολύνεται η σύσφιξη και η τοποθέτηση των μετρούμενων αντικειμένων.

4.3.3 Σύγκριση- πεδία εφαρμογής

Τα τελευταία χρόνια οι ΜΜΣ-ΦΒ κερδίζουν διαρκώς έδαφος στις διάφορες περιοχές της βιομηχανικής μετρολογίας διαστάσεων. Είναι κατάλληλες για οποιοδήποτε τεμάχιο ή κατασκευή, μεγέθους μέχρι και 6 m για το οποίο απαιτείται τρισδιάστατη μέτρηση ή αντιγραφή. Οι σταθερές CMM σε αρκετές περιπτώσεις κρίνονται ακατάλληλες, όπως για παράδειγμα στη μέτρηση αντικειμένων πολύ μεγάλου μεγέθους που είτε είναι πρακτικά αδύνατο τα μετακινηθούν από τον χώρο στον οποίο είναι εγκατεστημένα ή δεν μπορούν να τοποθετηθούν στην σταθερή τράπεζα μιας ΜΜΣ (π.χ. άτρακτος υποβρυχίου).

Τα υψηλά επίπεδα ακρίβειας των συμβατικών ΜΜΣ, προς το παρόν, δεν μπορούν να συγκριθούν με αυτά των ΜΜΣ-ΦΒ, όμως οι φορητές μετρητικές μηχανές μπορούν πολύ εύκολα να μεταφερθούν σε οποιονδήποτε χώρο απαιτείται και να μετρήσουν αντικείμενα πολύ μεγάλου μεγέθους μέσω της τεχνικής “leap frog”. Με την μέθοδο αυτή η μηχανή τοποθετείται σε διαδοχικές θέσεις μέσα στον χώρο εργασίας, οι οποίες θέσεις συνδέονται μεταξύ τους μέσω κοινών αναφορών (datums) και έτσι είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε αντικείμενα που είναι μεγαλύτερα από την εργόσφαιρα των ΜΜΣ-ΦΒ.

Μειονέκτημα των ΜΜΣ-ΑΒ αποτελεί το γεγονός ότι όλες οι μετρήσεις γίνονται με την απαραίτητη συμβολή του χειριστή, σε αντίθεση με τις συμβατικές ΜΜΣ όπου παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός προγράμματος μετρήσεων τις οποίες η μηχανή αναλαμβάνει να εκτελέσει αυτοματοποιημένα. Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά όταν πρόκειται για τον ποιοτικό έλεγχο ενός μοναδικού ή/και περιορισμένου πλήθους αντικειμένων, οι ΜΜΣ-ΑΒ πλεονεκτούν, καθώς ο χειροκίνητος χειρισμός υπερτερεί τελικά σε ευκολία από τη σχετικά πολύπλοκη δημιουργία προγράμματος για αυτοματοποιημένες μετρήσεις.

Γενικά τα πλεονεκτήματα των φορητών CMM φανερώνουν τις αδυναμίες για τις σταθερές CMM αλλά και το αντίστροφο. Στα πλεονεκτήματα των φορητών CMM μπορούν να συγκαταλεγούν τα εξής:

- Φορητότητα – ευκολία στην μεταφορά λόγω της αρκετά ελαφριάς κατασκευής
- Απλή και γρήγορη τοποθέτηση του εξοπλισμού

- Ταχύτατη αντιγραφή με τη κεφαλή 3D Laser scanner
- Δυνατότητα μέτρησης δυσπρόσιτων και ακλόνητων σημείων
- Μεγάλο εύρος μέτρησης με την διαδικασία leap-frog

4.4. Παρελκόμενα CMM

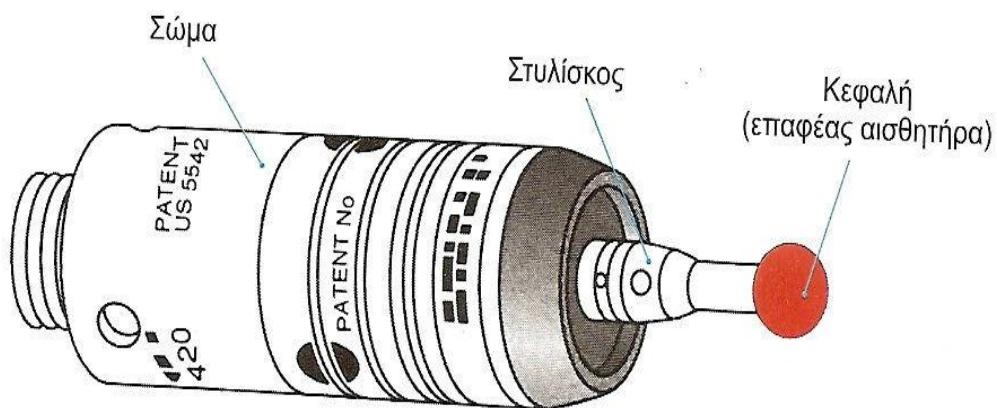
4.4.1 Αισθητήρες

Ανάλογα τις απαιτήσεις των μετρήσεων, την διαδικασία μέτρησης που θα ακολουθηθεί και το αντικείμενο προς μέτρηση επιλέγεται κάθε φορά μέσα από μία σειρά αισθητήρων που βρίσκονται διαθέσιμοι στο εμπόριο ο κατάλληλος τύπος. Οι τύποι των αισθητήρων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 2 κατηγορίες:

- Αισθητήρας με επαφή (contact probe)
- Αισθητήρας χωρίς επαφή (non contact probe)

4.4.1α Αισθητήρες με επαφή

Οι αισθητήρες με επαφή είναι οι αισθητήρες που ακουμπάνε το σημείο στο οποίο θα δώσουν συντεταγμένες και ανάλογα το είδος της επαφής που κάνουν μπορούν να διακριθούν σε αισθητήρες στιγμιαίας επαφής και σε αισθητήρες συνεχούς επαφής. Κάθε αισθητήρας επαφής αποτελείται από τρία κομμάτια: την κεφαλή, το στυλίσκο και το σώμα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.9: Ο αισθητήρας επαφής (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Ο τρόπος λειτουργίας ενός αισθητήρα στιγμιαίας επαφής βασίζεται στη συνύπαρξη τριών ηλεκτρικών συνδεσμολογιών οι οποίες βρίσκονται συνέχεια σε επαφή μεταξύ τους. Όταν ο επαφίας εφάπτεται με το αντικείμενο προς μέτρηση, τότε τουλάχιστον μία συνδεσμολογία χάνει επαφή και έτσι η μηχανή καταλαβαίνει πως αυτό είναι το σημείο που θέλουμε να μετρήσουμε και έτσι καταγράφει τις συντεταγμένες X,Y,Z του κέντρου της ακίδας τη στιγμή της επαφής. Πρακτικά δηλαδή κάθε επαφή του αισθητήρα με κάποιο εμπόδιο που προξενεί μεταβολή τάσης, είναι και μία μέτρηση.

Σε αντίθεση με τον αισθητήρα στιγμιαίας επαφής, ο αισθητήρας συνεχούς επαφής διατηρεί συνεχώς την επαφή του με την επιφάνεια την οποία ιχνηλατεί και παίρνει μέτρηση ανά καθορισμένη διακριτή απόσταση. Κρίνεται κατάλληλο σε σχέση με τον αισθητήρα στιγμιαίας επαφής για τη μέτρηση πολύπλοκων επιφανειών και για τον αντίστροφο σχεδιασμό αντικειμένων καθώς αποδίδει στο ίδιο χρονικό διάστημα ως και 50 φορές περισσότερα σημεία από έναν αισθητήρα με στιγμιαία επαφή.

Για να μετρηθεί ένα σημείο και να δοθούν οι συντεταγμένες, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πρέπει ο αισθητήρας επαφής να έρθει σε επαφή με το προς μέτρηση σημείο. Η επαφή αυτή δηλαδή είναι μία τιμή δύναμης που ασκεί ο αισθητήρας στο σημείο ενδιαφέροντος και η οποία μπορεί να ξεκινάει από τα 10 mg και να φτάνει και το γραμμάριο ή και περισσότερο. Το στέλεχος του αισθητήρα περιέχει έναν κρύσταλλο που δημιουργεί μια δόνηση στο στυλίσκο έτσι ώστε ο αισθητήρας να είναι συντονισμένος πάντα σε συχνότητα 20 – 25 KHz. Η αλλαγή αυτής της συχνότητας σημαίνει ότι ο στυλίσκος είναι σε επαφή με κάποιο σημείο. Έτσι με τη βοήθεια ενός μικροεπεξεργαστή η αλλαγή αυτή ανιχνεύεται και το σημείο καταγράφεται.

Εικόνα 4.10: Αισθητήρας με επαφή κατά τη μέτρηση (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Κάθε αισθητήρας έχει ορισμένη δυνατότητα μέτρησης κατά τους άξονες X, Y, Z. Έτσι ο αισθητήρας που έχει δυνατότητα μέτρησης κατά τους άξονες X, Y ονομάζεται αισθητήρας τεσσάρων κατευθύνσεων. Αν έχει δυνατότητα μέτρησης και σε μία κατεύθυνση του άξονα Z, ονομάζεται αισθητήρας πέντε κατευθύνσεων ενώ όταν μετράει και στις δύο κατευθύνσεις του άξονα Z, καλείται αισθητήρας έξι κατευθύνσεων. Η σωστή επιλογή του κατάλληλου στυλίσκου και της κεφαλής είναι πολύ σημαντικός καθώς μπορεί να αυξηθεί η ακρίβεια μέτρησης των σημείων.

Η κεφαλή του αισθητήρα μπορεί να περιστρέφεται, ενώ για εξασφαλισθεί η ακρίβεια των μετρήσεων απαιτείται η διακρίβωση της κεφαλής. Δεδομένου ότι ο αισθητήρας ασκεί δύναμη στο προς μέτρηση σημείο μπορεί να προκληθούν φθορές και ζημιά σε ένα ευαίσθητο και εύκαμπτο αντικείμενο, οπότε σε αυτή τη περίπτωση η χρήση του αισθητήρα επαφής κρίνεται ακατάλληλη και ενδείκνυται ο αισθητήρας χωρίς επαφή.

Ένα άλλο πρόβλημα που μπορεί να εμφανιστεί, είναι να δημιουργηθεί στην άκρη του αισθητήρα η ελάχιστη δύναμη που απαιτείται ώστε να καταγραφούν οι συντεταγμένες ενός σημείου αλλά ο αισθητήρας να μην έχει έρθει σε πραγματική επαφή με κάποιο σημείο. Αυτή η λεγόμενη ψευτο-επαφή μπορεί να οφείλονται στη μετακίνηση του αισθητήρα, όπου η δόνηση ή η επιτάχυνση προκαλεί μία μικρή δύναμη επαφής και αυτό καταγράφεται ως ένα σημείο μέτρησης ενώ ο αισθητήρας στην πραγματικότητα βρίσκεται στον αέρα. Τελευταία, έχει εξελιχθεί και είναι διαθέσιμος αισθητήρας επαφής που χρησιμοποιεί στυλίσκο υψηλής συχνότητας με δύναμη επαφής μικρότερη των 10 mg.

Για την αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων ο χώρος πρέπει να είναι ελεγχόμενος από πλευράς δόνησεων, υγρασίας, θερμοκρασίας, σκόνης και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν την αβεβαιότητα των μετρητικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.11: Διάφοροι τύποι αισθητήρων επαφής (www.hexagonmetrology.com)

4.4.1β Αισθητήρες χωρίς επαφή

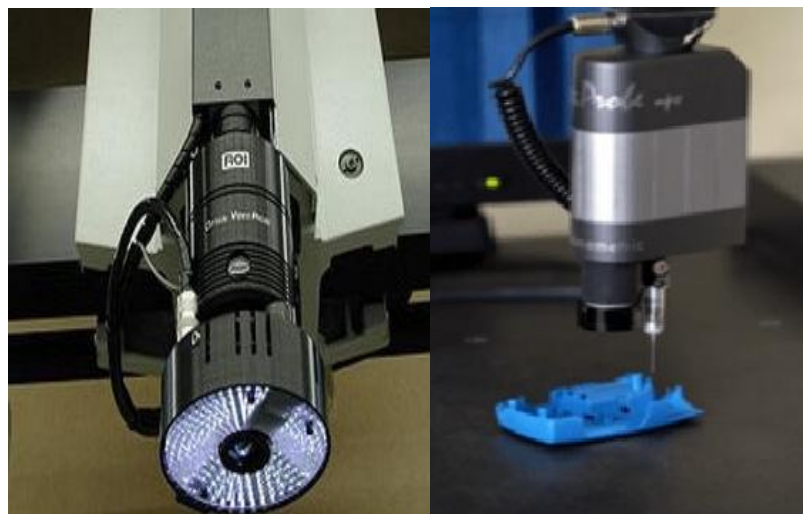
Όπως αναλύθηκε ήδη, σε πολλές περιπτώσεις οι αισθητήρες επαφής κρίνονται ακατάλληλοι και έτσι κρίνεται αναγκαία η χρησιμοποίηση των αισθητήρων χωρίς επαφή. Διαχωρίζονται σε τηλεοπτικούς αισθητήρες (Video probes) και σε αισθητήρες Laser (Laser probes).

Ο αισθητήρας Laser εκπέμπει μία ακτίνα φωτός επάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Η θέση του σημείου μέτρησης όπου προσπίπτει η ακτινοβολία αναγνωρίζεται τριγωνομετρικά με τη βοήθεια φακού, ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο δέκτη του αισθητήρα. Η απόσταση αυτή, δηλαδή μεταξύ της κεφαλής του αισθητήρα Laser και του σημείου μέτρησης, ονομάζεται δρώσα απόσταση (standoff). Οι αισθητήρες Laser είναι ταχύτατοι, καθώς μπορούν να μετρούν μέχρι και 200 points/s, και ιδιαίτερα ακριβείς, με την ακρίβεια μέτρησης ενός τέτοιου αισθητήρα να φτάνει μέχρι και τα 2 μm .



Εικόνα 4.12: Αισθητήρες χωρίς επαφή τύπου Laser (www.directindustry.com)

Ο τηλεοπτικός αισθητήρας βασίζεται στην λειτουργία μίας κάμερας η οποία μπορεί να συλλέξει με μία μόνο λήψη αρκετά σημεία σε μία εικόνα. Η εικόνα αυτή ενισχύεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρονική μορφή δίνοντάς της αρκετά υψηλή ανάλυση. Οι συντεταγμένες των σημείων του μετρούμενου αντικειμένου προκύπτουν από την επεξεργασία των ψηφίδων (pixels) της εικόνας.



Εικόνα 4.13: Τηλεοπτικοί αισθητήρες (www.directindustry.com)

4.4.2 Λογισμικό CMM

Απαραίτητο εργαλείο είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής, ο οποίος θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με το κατάλληλο λογισμικό ώστε να μπορεί να δέχεται τις μετρήσεις και να κάνει ταυτόχρονα όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς. Το λογισμικό μέτρησης με CMM και επεξεργασίας δεδομένων, PC-DMIS, είναι ίσως το περισσότερο χρησιμοποιούμενο και παγκοσμίως αναγνωρίσιμο λογισμικό για CMM. Υπάρχει στη γενική του έκδοση, αλλά και σε ειδικότερες εκδόσεις, καθεμιά από τις οποίες εστιάζει στα αντικείμενα που πρόκειται να μετρηθούν με CMM, καθώς και στην απαιτούμενη επεξεργασία τους (π.χ. PC-DMIS Gear, PC-DMIS Tool, PC-DMIS Planner κ.α.).

Παράλληλα διαθέτει Πιστοποιητικό από το Γερμανικό Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) και το NIST (National Institute of Standards and Technology), σχετικά με την ακρίβεια στην προσαρμογή σημείων σε features (γεωμετρίες), μέσα από τους μαθηματικούς αλγόριθμους που διαθέτει.

4.5 Μέθοδοι προσδιορισμού συντεταγμένων

Ο σκοπός της χρησιμοποίησης μιας μετρητικής μηχανής CMM στην βιομηχανική γεωδαισία είναι ο προσδιορισμός των συντεταγμένων και άρα του σχήματος και των διαστάσεων ενός βιομηχανικού παραγώγου ώστε να γίνει σύγκριση με τα δοσμένα στοιχεία του κατασκευαστή και να προσδιορισθούν τυχόν αποκλίσεις. Αυτός ο προσδιορισμός των συντεταγμένων μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους και εξαρτάται από τον τύπο του αισθητήρα που είναι προσαρμοσμένος στη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων.

4.5.1 Μέθοδος με επαφή

Η μέθοδος αυτή απαιτεί την επαφή του αντικειμένου προς μέτρηση με τον αισθητήρα. Για κάθε ένα σημείο που ακουμπά ο αισθητήρας μετρούνται και καταγράφονται οι συντεταγμένες. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως όταν το ζητούμενο είναι η μέτρηση αποστάσεων και η καταγραφή απλών γεωμετρικών επιφανειών.

4.5.2 Μέθοδος Laser

Οι κεφαλές σάρωσης εκπέμπουν ακτίνες Laser προς το μέτρηση αντικείμενο σαρώνοντας όλη την επιφάνειά του. Έτσι είναι σε θέση να καταγράφουν όλα τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά του δίνοντας συντεταγμένες με ακρίβεια. Επιτυγχάνεται δηλαδή η πιστή αντιγραφή του τεμαχίου και η απεικόνιση του με το κατάλληλο λογισμικό στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Είναι ο πλέον κατάλληλος συνδυασμός για τον Αντίστροφο Μηχανολογικό Σχεδιασμό (ΑΜΣ).

4.5.3 Μέθοδος εικόνας

Οι κεφαλές αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως από τις σταθερές CMM και διαθέτουν κάμερα ακριβείας. Η φωτογραφία που προκύπτει επεξεργάζεται και έτσι μπορούν να προκύψουν τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου σε δύο διαστάσεις. Ο περιορισμός αυτός, δηλαδή η μη δυνατότητα καταγραφής των τρισδιάστατων συντεταγμένων ενός αντικειμένου, καθιστά τη μέθοδο εικόνας στην βιομηχανική γεωδαισία ανεπαρκής και για αυτό χρησιμοποιείται σπάνια.

4.6 Μετρητικές μηχανές CMM που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία

Υπολογίζεται πως υπάρχουν περίπου 70 εταιρίες που ειδικεύονται στην κατασκευή των μετρητικών μηχανών CMM (www.directindustry.com). Μεταξύ αυτών είναι η εταιρεία Hexagon metrology που ειδικεύεται στην ανάπτυξη και προμήθεια οργάνων υψηλής ακρίβειας κατάλληλα για τον κλάδο της βιομηχανικής γεωδαισίας. Ανάλογα με την ακρίβεια, το απαιτούμενο μέγεθος των εξαρτημάτων μέτρησης και τη φύση της εργασίας μπορεί να επιλεγεί ο κατάλληλος εξοπλισμός μέσα από μία μεγάλη ποικιλία επιλογών.

Μοντέλο	Τύπος CMM	Εταιρεία	Εύρος μέτρησης σε mm	Ακρίβεια μέτρησης μήκους
Absolute Arm	Φορητή	ROMER (Hexagon metrology)	1500mm έως 4500mm (σφαιρική διάμετρος)	>0.023mm (κατά ASME B89.4.22)
Multi Gage	Φορητή	ROMER (Hexagon metrology)	1200mm (σφαιρική διάμετρος)	>0.005mm (κατά ASME B89.4.22)
PMM-C Infinity	Σταθερή	Leitz (Hexagon metrology)	700mm x 1200mm x 950mm (κατά τους άξονες X, Y, Z)	$MPE_E = 0.3\mu\text{m} + L\text{mm}/1000\text{mm}$ (κατά ISO 10360-2)
Microgage	Σταθερή	Helmel	200mm x 300mm x 200mm (κατά τους άξονες X, Y, Z)	$MPE_E = 2.9\mu\text{m} + L\text{mm}/1000\text{mm}$ $MPE_p = 2.6\mu\text{m}$ (κατά ISO 10360-2)
MH3D 454, Recorder	Σταθερή	TESA (Hexagon metrology)	440mm x 490mm x 390mm (κατά τους άξονες X, Y, Z)	$MPE_E = 2.5\mu\text{m} + 3.9L\text{mm}/1000\text{mm}$ $MPE_p = 2\mu\text{m}$ (κατά ISO 10360-2)
Gage Plus	Φορητή	Faro	1200mm (σφαιρική διάμετρος)	0.005mm (κατά ASME B89.4.22)

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων μετρητικών μηχανών CMM (www.faro.com, www.hexagonmetrology.com, www.helmel.com)

4.7 Πηγές σφαλμάτων

Για να εξασφαλιστεί η υψηλή ακρίβεια που απαιτείται στην βιομηχανική Γεωδαισία εκτός από την σωστή διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί, είναι σημαντικό να ελεγχθούν τα σφάλματα που μπορεί να επηρεάσουν την τελική ακρίβεια των μετρήσεων. Οι πηγές των σφαλμάτων μπορούν να αναλυθούν σε αυτά που οφείλονται στους χειριστές του οργάνου, στα σφάλματα του περιβάλλοντος και στα σφάλματα που προέρχονται από το όργανο.

4.7.1 Σφάλματα χειριστών

Τα σφάλματα αυτά οφείλονται στον χρήστη του οργάνου και μπορούν να αναγνωριστούν συνήθως εύκολα. Κυρίως προέρχονται από την απειρία του χειριστή και μπορεί να είναι ή λάθος μέτρηση σημείου ή ο ορισμός λανθασμένων παραμέτρων στο όργανο (π.χ. λανθασμένη εισαγωγή της τιμής της θερμοκρασίας).

4.7.2 Σφάλματα οργάνων

Κάθε καινούργιο όργανο είναι ελεγμένο από τον κατασκευαστή και συνοδεύεται από τις εργοστασιακές ακρίβειές του. Δηλαδή με τι ακρίβεια μπορεί να προσδιορίσει και να καταγράψει τις συντεταγμένες ενός αντικειμένου. Στην πράξη όμως όλα τα όργανα παρουσιάζουν αποκλίσεις από τις μέγιστες ακρίβειές τους ειδικά όσο αυξάνεται η χρήση τους και η διάρκεια ζωής τους. Προς αποφυγή τέτοιων φαινομένων, πρέπει τα μετρητικά όργανα να βαθμονομούνται και να ελέγχονται κατά περιοδικά χρονικά διαστήματα. Με βάση το σκεπτικό αυτό, η κατασκευάστρια εταιρεία συνοδεύει το όργανο με μία πρότυπη σφαίρα ώστε να μπορεί ο χρήστης μόνος του να διακρίβώσει τη κεφαλή του αισθητήρα που θα χρησιμοποιήσει για τις μετρήσεις του. Η διακρίβωση της κεφαλής του αισθητήρα πρέπει να γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα ή πριν από τις μετρήσεις καθώς η ακρίβεια μέτρησης εξαρτάται κατά πολύ από την ακρίβεια διακρίβωσης.

4.7.3 Σφάλματα περιβάλλοντος

Οι καλά ελεγχόμενες συνθήκες του χώρου διεξαγωγής των μετρήσεων είναι πάρα πολύ σημαντικό για τον κλάδο της βιομηχανικής γεωδαισίας και για την επίτευξη των ακριβειών που απαιτούνται. Οι δύο βασικότεροι περιβαλλοντικές παράμετροι που μπορούν να μειώσουν την ακρίβεια των μετρήσεων είναι οι η θερμοκρασία και οι ταλαντώσεις.

Ο έλεγχος στην θερμοκρασία μπορεί εύκολα να ρυθμιστεί από ένα κατάλληλο σύστημα κλιματισμού που είναι εγκατεστημένο στο χώρο διεξαγωγής των μετρήσεων. Έτσι η θερμοκρασία είναι δυνατόν να διατηρείται στο όριο των 20 °C με απόκλιση ± 0.5 °C. Για το σκοπό αυτό, ακριβή θερμόμετρα τοποθετούνται σε διάφορα σημεία του χώρου μετρήσεων για έλεγχο του παραπάνω αυτόματου συστήματος ρύθμισης της θερμοκρασίας. Τέλος επιβάλλεται οι τοίχοι, τα δάπεδα και η οροφή να είναι κατάλληλα θερμομονωμένοι.

Ο έλεγχος των δονήσεων και των ταλαντώσεων που μπορεί να συμβούν και να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων, μπορεί να μετρηθούν με την εγκατάσταση επιταχυνσιομέτρων στο

χώρο. Για την εξάλειψη των δονήσεων και ταλαντώσεων, συνήθως το δάπεδο κατασκευάζεται από αντικραδασμικό υλικό, και η τοποθέτηση της CMM γίνεται πάνω ειδικό υλικό που μπορεί να αποσβέσει δονήσεις έως και 100Hz.

Τέλος, το σύστημα κλιματισμού πρέπει να είναι σε θέση να μετράει και να κρατά σε χαμηλά και σταθερά επίπεδα την υγρασία του αέρα στο χώρο και να είναι εφοδιασμένο με τα κατάλληλα φίλτρα ώστε να καθαρίζεται ο αέρας και να αφαιρείται η περιεχόμενη σε αυτόν σκόνη.

4.8 Έλεγχος της αβεβαιότητας των μηχανών μέτρησης συντεταγμένων

Στη δημοσίευση *Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines – AACMM*, 2004 καθορίζονται οι απαιτήσεις και οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό και την δοκιμή των επιδόσεων των ΜΜΣ-ΦΒ ενώ επιχειρείται τυποποίηση της ορολογίας, κατηγοριοποίηση των μηχανών, αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθώς και ανάλυση των δεδομένων. Εστιάζεται στις πιο συνήθεις διατάξεις που ήταν τότε διαθέσιμες στο εμπόριο (2004) και ασχολείται μόνο με χειροκίνητες υλοποιήσεις ανιχνευτών επαφής (ακίδες επαφής) ενώ δεν αναφέρεται καθόλου σε μηχανοκίνητες διατάξεις και οπτικές μη-επαφής, όπως οι laser κάμερες. Αυτό το πιστοποιητικό ελέγχου είναι γνωστό ως ASME B89.4.22. Το 2009 ο αντίστοιχος γερμανικός οργανισμός καθιέρωσε το πρότυπο VDI(Verein Deutscher Ingenieure) / VDE(Verband den Elektrotechnik) 2617-9 (VDI/VDE 2617 Part 9, 2009), που αποτελεί αναθεώρηση του VDI/ VDE 2617 που δημιουργήθηκε στα μέσα του 1980. Τέλος υπάρχει και ένα τρίτο πιστοποιητικό ελέγχου, το διεθνές πρότυπο ISO 10360 που αρχικά βασίστηκε στο πρότυπο VDI/ VDE 2617. Συγκεντρωτικά τα τρία πιστοποιητικά που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την διακρίβωση της μετρητικής απόδοσης των μηχανών μέτρησης συντεταγμένων είναι:

- Εθνικό πρότυπο Αμερικής ASME B89.4.1
- Διεθνές πρότυπο ISO 10360
- Εθνικό πρότυπο Γερμανίας VDI/VDE 2617

Το πρότυπο VDI/ VDE 2617 τείνει να εκλείψει καθώς μοιάζει αρκετά με το Διεθνές πρότυπο ISO 10360 το οποίο περιλαμβάνει επιπλέον ελέγχους και έτσι πλεονεκτεί. Από τότε έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες και σε κάποιες δημοσιεύσεις (González et al. 2013), (Mutilba et al. 2013), (Santolaria et al. 2009), (Santolaria et al. 2010), προτείνονται νέες μεθοδολογίες για την θέσπιση και άλλων προτύπων για την αξιολόγηση των μηχανών CMM σταθερών και φορητών. Πολλές χώρες (κυρίως στην Ασία) ακολουθούν το ιαπωνικό πρότυπο JIS B 7440-2 του 1997 που έχει αρκετά κοινά σημεία με το ISO και το οποίο αποτελεί αναθεώρηση του JIS B 7440 που δημοσιεύτηκε το 1987 και βασίστηκε στο VDI/VDE. Τέλος στην Ευρώπη υπήρχε από το 1980 το ευρωπαϊκό πρότυπο CMMA το οποίο επειδή ήταν παρόμοιο με το VDI/VDE και το ISO, δεν χρησιμοποιείται πια.

4.8.1 Έλεγχος της αβεβαιότητας του αρθρωτού βραχίονα κατά ASME B89.4.22

Το πιστοποιητικό ASME B89.4.22 αναφέρεται μόνο στις μηχανές τύπου αρθρωτού βραχίονα και αποτελείται από τρία μέρη:

- έλεγχος διαμέτρου (Effective diameter test)
- έλεγχος μέτρησης ενός σημείου (Single-Point Articulation Test, SPAT)
- έλεγχος όγκου (Volumetric test)

Προκειμένου να γίνουν οι παραπάνω έλεγχοι θα χρησιμοποιηθούν τρεις εξοπλισμοί που θα πρέπει να είναι πιστοποιημένοι κατά τα πρότυπα UNE-EN ISO/IEC 17025' (General requirements for the competence of testing and calibration laboratories) με ISO9002 ή ISO9001 από την εθνικό φορέα πιστοποίησης ENAC (National Accreditation Entity). Οι τρεις αυτοί εξοπλισμοί είναι:

Πρότυπη σφαίρα ακριβείας: Η σφαίρα χρησιμοποιείται για τους δύο πρώτους ελέγχους (έλεγχος διαμέτρου, έλεγχος σημείου) στην περίπτωση του ειδικού αισθητήρα επαφής (switching probe) . Η διάμετρός της είναι 30mm και είναι κατασκευασμένη από χάλυβα.



Εικόνα 4.14: Η πρότυπη σφαίρα (Mutilba et al., 2013)

Τρίεδρη βάση: Η βάση αποτελείται από τρεις σφαίρες που είναι τοποθετημένες στο ίδιο επίπεδο. Οι μετρήσεις γίνονται και στις τρεις σφαίρες και χρησιμοποιείται για τον δεύτερο έλεγχο (SPAT) χρησιμοποιώντας σημειακούς αισθητήρες. Η πιστοποίηση της βάσης γίνεται κατά τα πρότυπα ENAC χρησιμοποιώντας μία μηχανή CMM.



Εικόνα 4.15: Η τρίεδρη βάση (Mutilba et al., 2013)

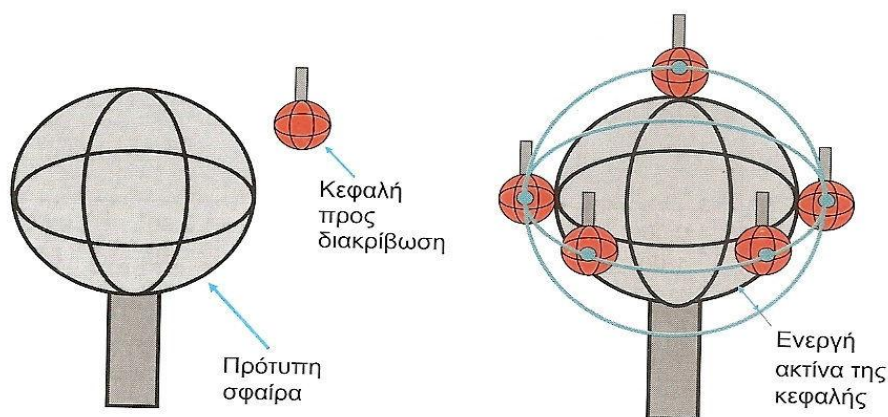
Ράβδος σφαιρών: Η ράβδος έχει μήκος 2400mm και χρησιμοποιείται για τον ογκομετρικό έλεγχο. Είναι φτιαγμένη από ανθρακονήματα και αποτελείται από 13 σφαίρες με την απόσταση μεταξύ των σφαιρών να είναι γνωστή (200mm) και πιστοποιημένη κατά τα πρότυπα ENAC. Η ράβδος τοποθετείται πάνω σε ένα περιστρεφόμενο τραπέζι ακριβείας που μπορεί να την περιστρέψει σε οριζόντιο, κατακόρυφο και 45° μοιρών προσανατολισμό.



Εικόνα 4.16: Η ράβδος σφαιρών (Mutilba et al., 2013)

4.8.1α Έλεγχος διαμέτρου κεφαλής σφαίρας

Η διαδικασία αυτή (Effective diameter test) καθορίζει το κέντρο και την ακτίνα του αισθητήρα με την βοήθεια μια μεταλλικής μετρημένης με μεγάλη ακρίβεια σφαίρας. Γίνονται εννέα μετρήσεις πάνω στη σφαίρα, και έτσι η διάμετρος της κεφαλής του αισθητήρα υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ της διαμέτρου της πρότυπης σφαίρας και της διαμέτρου της σφαίρας που σχηματίζουν τα μετρημένα σημεία (ASME B89.4.22, 2004).



Εικόνα 4.17: Διακρίβωση κεφαλής αισθητήρα (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Στην περίπτωση των αισθητήρων Laser όπου η μέτρηση γίνεται χωρίς επαφή, για την παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιείται σφαίρα η οποία είναι κατασκευασμένη από χάλυβα και είναι καλυμμένη με στρώση λευκής βαφής, γεγονός που αυξάνει τον συντελεστή διάθλασης κάνοντάς την κατάλληλη για διακρίβωση αυτού του τύπου των αισθητήρων.

4.8.1β Έλεγχος μέτρησης ενός σημείου

Ο έλεγχος αυτός (Single-Point Articulation Test, SPAT) επιδιώκει να αξιολογήσει την ικανότητα του βραχίονα της CMM να μετρήσει το ίδιο σημείο δίνοντας τα ίδια αποτελέσματα μέτρησης για τις συντεταγμένες του για όλες τις πιθανές γωνίες και κινήσεις που μπορεί να κάνει ένας αρθρωτός βραχίονας. Στην περίπτωση του σημειακού αισθητήρα ο έλεγχος γίνεται με την βοήθεια της τριέδρης βάσης, ενώ στην περίπτωση του ειδικού αισθητήρα (switching probe) ο έλεγχος γίνεται με τη βοήθεια της πρότυπης σφαίρας. Οι δύο παραπάνω εξοπλισμοί τοποθετούνται σε τρεις διαφορετικές θέσεις εντός της εργόσφαιρας της CMM και για κάθε θέση μετρώνται δέκα σημεία. Έτσι με τη βοήθεια της στατιστικής από τη μέση τιμή και τη τυπική απόκλιση της θέσης του σημείου υπολογίζεται η μέγιστη απόκλιση (maximum deviation) όλων των μετρούμενων σημείων (ASME B89.4.22, 2004).

4.8.1γ Έλεγχος όγκου

Ο έλεγχος αυτός (Volumetric test) θα αξιολογήσει την ακρίβεια του αρθρωτού βραχίονα ως προς την γραμμική και ογκομετρική επίδοση. Η μετρητική διαδικασία λαμβάνει υπόψη πέντε μεταβλητές για είκοσι μετρούμενες θέσεις της ράβδου. Οι μεταβλητές αυτές είναι το μήκος της ράβδου, ο σφαιρικός τομέας που θα μετρηθεί, ο προσανατολισμός της ράβδου, η απόσταση της ράβδου από τον αρθρωτό βραχίονα, και η διεύθυνση της μέτρησης. Η ράβδος τοποθετείται σε δύο κάθετες, δέκα οριζόντιες και οχτώ των σαράντα πέντε μοιρών διευθύνσεις ως προς το έδαφος, για δύο αποστάσεις του αρθρωτού βραχίονα (κοντά και μακριά) και μετρώνται σε κάθε σφαίρα της ράβδου πέντε σημεία.

Μέτρηση	Μήκος ράβδου	Οκτημόριο	Προσανατολισμός ράβδου	Απόσταση αρθρωτού βραχίονα-ράβδου	Κατεύθυνση αρθρωτού βραχίονα
1	μικρό	8ο	οριζόντια	κοντά	κάθετα
2	μικρό	5ο	οριζόντια	κοντά	κάθετα
3	μικρό	1ο & 2ο	οριζόντια	μακριά	εφαπτόμενα
4	μικρό	4ο & 7ο	45 μοιρών	μακριά	εφαπτόμενα
5	μικρό	7ο & 3ο	κατακόρυφα	μακριά	εφαπτόμενα
6	μικρό	1ο & 5ο	κατακόρυφα	μακριά	εφαπτόμενα
7	μικρό	2ο	οριζόντια	κοντά	κάθετα
8	μεγάλο	2ο & 8ο	45 μοιρών	κοντά	εφαπτόμενα
9	μικρό	3ο	οριζόντια	κοντά	κάθετα
10	μεγάλο	1ο & 7ο	45 μοιρών	κοντά	εφαπτόμενα
11	μικρό	1ο & 6ο	45 μοιρών	μακριά	εφαπτόμενα
12	μικρό	6ο & 3ο	45 μοιρών	μακριά	εφαπτόμενα
13	μικρό	5ο & 4ο	45 μοιρών	μακριά	εφαπτόμενα
14	μικρό	3ο & 8ο	45 μοιρών	μακριά	εφαπτόμενα
15	μικρό	5ο & 2ο	45 μοιρών	μακριά	εφαπτόμενα
16	μικρό	1ο & 8ο	45 μοιρών	μακριά	εφαπτόμενα
17	μικρό	2ο & 7ο	45 μοιρών	μακριά	εφαπτόμενα
18	μεγάλο	3ο & 4ο	οριζόντια	κοντά	εφαπτόμενα
19	μεγάλο	2ο & 6ο	κατακόρυφα	μακριά	εφαπτόμενα
20	μεγάλο	4ο & 8ο	κατακόρυφα	κοντά	εφαπτόμενα

Πίνακας 4.2: Τα στοιχεία για τον ογκομετρικό έλεγχο (Mutilba et al., 2013)

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τον παραπάνω έλεγχο θα είναι η μέγιστη απόκλιση από τη ράβδο, το εύρος αυτών των αποκλίσεων και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (root-mean-square, RMS) (Mutilba et al., 2013).

4.8.2 Έλεγχος της αβεβαιότητας κατά ISO 10360

Η ολοκληρωμένη σειρά ISO 10360 αποτελείται από 10 μέρη τα οποία παρατίθενται παρακάτω ακριβώς όπως έχουν δημοσιευθεί από τον επίσημο οδηγό ISO:

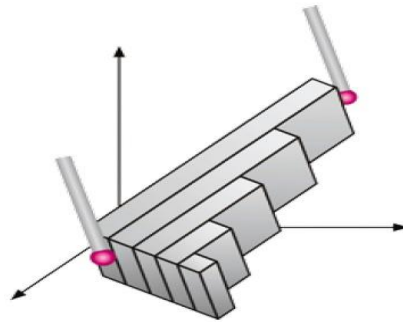
- **ISO 10360-1** (2000): Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 1: Vocabulary
- **ISO 10360-2** (2009): Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions
- **ISO 10360-3** (2000): Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 3: CMMs with the axis of a rotary table as the fourth axis
- **ISO 10360-4** (2000): Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 4: CMMs used in scanning measuring mode
- **ISO 10360-5** (2010): Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 5: CMMs using multiple-stylus probing systems
- **ISO 10360-6** (2001): Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 6: Estimation of errors in computing Gaussian associated features
- **ISO 10360-7** (2011): Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMMs) – Part 7: CMMs equipped with imaging probing systems
- **ISO/CD 10360-8** (2011): Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 8: CMMs with optical distance sensors
- **ISO/DIS 10360-9** (2011): Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 9: CMMs with multiple probing systems
- **ISO 10360-10** (2011): Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) – part 10: Laser trackers for measuring point-to-point distances.

Όλοι οι παραπάνω έλεγχοι αναφέρονται σε σταθερές CMM, ενώ υπό διερεύνηση είναι η ανάπτυξη του πρότυπου ελέγχου κατά ISO για την μηχανές μέτρησης συντεταγμένων τύπου αρθρωτού βραχίονα.

4.8.2α ISO 10360-2

Το πιστοποιητικό ISO 10360-2 περιλαμβάνει 2 έλεγχους:

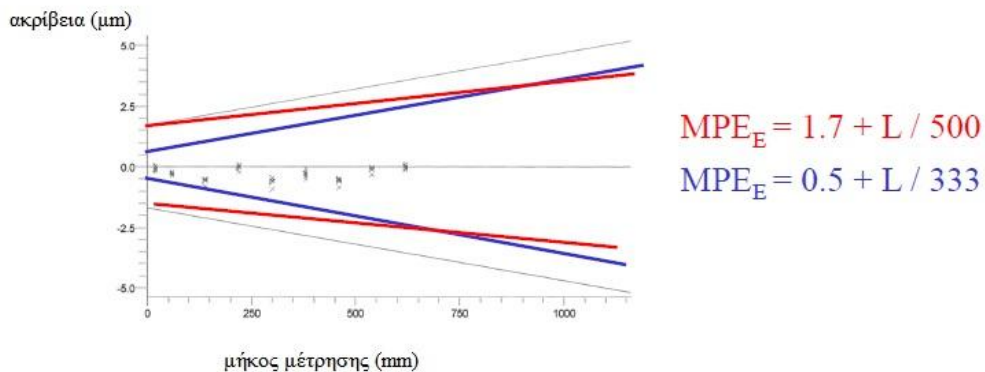
Έλεγχος σφάλματος του μήκους (σφάλμα E): Με αυτόν τον έλεγχο επαληθεύεται η επίδοση της CMM ως προς την αβεβαιότητα μέτρησης του μήκους για οποιαδήποτε διεύθυνση εντός του χώρου εργασίας της. Γίνονται συνολικά εκατό πέντε μετρήσεις σε πέντε πλακίδια τρεις φορές σε επτά διαφορετικές θέσεις. Για να γίνει δοθεί το πιστοποιητικό πρέπει η κάθε μέτρηση να είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή των πλακιδίων. Ο έλεγχος αυτός είναι γνωστός και σαν MPE_E (Maximum Permitted Error E).



Εικόνα 4.18: Έλεγχος σφάλματος του μήκους (www.hexagonmetrology.com)

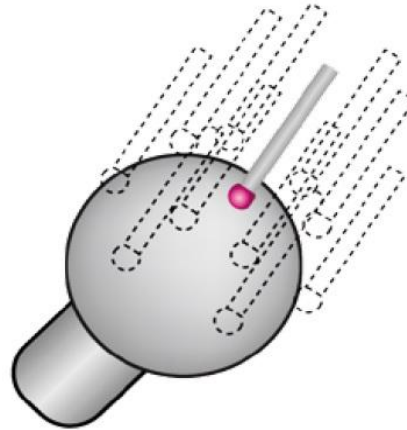
Μετά από την επεξεργασία των μετρήσεων μπορεί να υπολογιστεί η τιμή MPE_E που θα εξαρτάται από το μήκος προς μέτρηση. Η σχέση έχει την μορφή $U = A + L / B$, όπου A, B σταθεροί όροι και L το μετρούμενο μέγεθος σε mm.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται δύο γραμμικές σχέσεις της MPE_E συναρτήσει του μήκους που έχουν προκύψει μετά από έλεγχο κατά ISO 10360-2 σε δύο διαφορετικές CMM. Η κόκκινη MPE_E δηλώνει πως η συγκεκριμένη μηχανή που αντιστοιχεί σε αυτήν είναι ακριβέστερη για μεγαλύτερα αντικείμενα, σε σχέση με την μπλε MPE_E που είναι κατάλληλη για μετρήσεις μικρών αποστάσεων (μέχρι 0.5 m).



Διάγραμμα 4.1: Σύγκριση δύο CMM κατά ISO 10360-2 (www.hexagonmetrology.com)

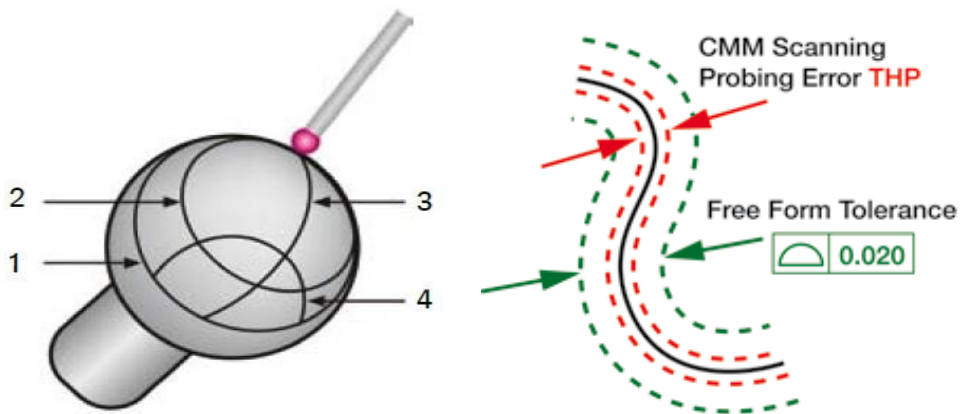
Έλεγχος σφάλματος του σημειακού αισθητήρα (σφάλμα P) : Γίνονται 25 μετρήσεις πάνω σε μία πρότυπη σφαίρα σε όλο το εύρος της. Η διάμετρος της κεφαλής του αισθητήρα υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ της διαμέτρου της πρότυπης σφαίρας και της διαμέτρου της σφαίρας που σχηματίζουν τα μετρημένα σημεία. Ο έλεγχος αυτός είναι γνωστός και σαν MPE_P (Maximum Permitted Error P).



Εικόνα 4.19: Έλεγχος σφάλματος του αισθητήρα (www.hexagonmetrology.com)

4.8.2β ISO 10360-4

Το πιστοποιητικό ISO 10360-4 περιλαμβάνει τον **έλεγχο του σφάλματος του αισθητήρα σάρωσης (σφάλμα THP)**. Μία πρότυπη σφαίρα διαμέτρου 25mm σαρώνεται για 4 διαφορετικές γραμμές σάρωσης όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.20: Έλεγχος σφάλματος του αισθητήρα σάρωσης (www.hexagonmetrology.com)

Στον συγκεκριμένο έλεγχο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η ταχύτητα σάρωσης. Για αυτό το λόγο η τιμή THP συνοδεύεται από τον χρόνο που χρειάστηκε για να σαρωθεί η επιφάνεια (π.χ. THP=1.5μm στα 45 s).

4.8.3 Έλεγχος της αβεβαιότητας κατά VDI/VDE 2617

Το πρότυπο αυτό θεσπίστηκε στη Γερμανία στα μέσα του 1980. Ο έλεγχος κατά ISO βασίστηκε στο πρότυπο αυτό και έτσι τα δύο πρότυπα παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με τα αποτελέσματα σε αρκετές περιπτώσεις να είναι ακριβώς τα ίδια. Ο έλεγχος κατά VDI/VDE 2617 περιλαμβάνει για την μέτρηση της αβεβαιότητας μήκους τρία ξεχωριστά test, σε αντίθεση με τον ISO που αποτελείται μόνο από το test E. Αυτοί οι τρεις έλεγχοι ονομάζονται U1, U2, U3, και αντιστοιχούν σε μετρήσεις μήκους κατά 1-D, 2-D, 3-D. Όλοι οι έλεγχοι πραγματοποιούνται με τη βοήθεια πρότυπων πλακιδίων, ακριβώς όπως γίνεται και με τον ISO έλεγχο. Όπως γίνεται αντιληπτό τα αποτελέσματα του U3 συνήθως ταυτίζονται με τον έλεγχο E.

Το πρότυπο VDI/VDE 2617 περιλαμβάνει επίσης τους ελέγχους V1, V2, V3 για τον σημειακό αισθητήρα και γίνονται σε 1-D, 2-D, και 3-D. Ο έλεγχος V3 είναι παρόμοιος με τον έλεγχο R κατά ISO και με τον αντίστοιχο έλεγχο κατά ASME B89.4.22. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός πως ο VDI/VDE χρησιμοποιεί μετρήσεις 50 σημείων, ο ISO μετράει 25 σημεία, ενώ ο ASME 49 σημεία.

Ο έλεγχος V2 χρησιμοποιεί έναν δακτύλιο μεγάλης ακριβείας αντί για τα πρότυπα πλακίδια και μετρούνται πάνω σε αυτόν 50 σημεία. Τέλος ο έλεγχος V1 περιλαμβάνει 50 μετρήσεις της ίδιας απόστασης πάνω σε ένα μοναδικό πλακίδιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ : ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ CMM ΣΕ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1 Περιπτώσεις συνδυαστικής χρήσης γεωδαιτικού σταθμού και CMM

Οι υψηλές επιδιωκόμενες ακρίβειες αλλά και οι σύνθετες απαιτήσεις στις περισσότερες σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές, έχουν οδηγήσει στην τάση αναζήτησης υβριδικών λύσεων και πολλαπλών συστημάτων μέτρησης. Ένα από τα υβριδικά συστήματα που μπορούν να εξεταστούν οι δυνατότητές του, είναι η χρήση ενός γεωδαιτικού σταθμού μαζί με CMM συνδυάζοντας έτσι τα πλεονεκτήματα του καθενός εξοπλισμού.

Σε αρκετά εξαρτήματα και τμήματα πολύ μεγάλων κατασκευών, π.χ. άτρακτος υποβρυχίου, σκαρί πλοίου κ.ά. η χρήση του CMM κρίνεται δύσκολη καθώς το μέγεθος των παραπάνω είναι πολύ μεγαλύτερο από την εργοσφαιρα των CMM (5 ~ 6 m). Το πρόβλημα θα μπορούσε να λυθεί από έναν γεωδαιτικό σταθμό που μπορεί να μετρήσει σημεία που βρίσκονται σε απόσταση άνω των 100 m, ωστόσο οι καλύτερες ακρίβειες που μπορεί να επιτευχθούν στις συντεταγμένες είναι της τάξης του μισού χιλιοστού, ακρίβεια που συνήθως δεν είναι αρκετή σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Έτσι η συνδυαστική χρήση γεωδαιτικού σταθμού και CMM μπορεί να αποδειχθεί πολύ χρήσιμο εργαλείο μέτρησης στην περίπτωση κατασκευών, εξαρτημάτων και συναρμολογημένων μηχανολογικών συνόλων που απαιτείται υψηλή ακρίβεια στην καταγραφή της γεωμετρικής του μορφής, ή και μεγάλο πλήθος μετρητικών στοιχείων για την πληρότητα της αποτύπωσής του, ενώ παράλληλα απαιτείται η αναφορά σε ενιαίο σύστημα συντεταγμένων που εξάγεται συνήθως από τη συνολική γεωμετρία του αντικειμένου.

Επίσης η μέθοδος ενδείκνυται και στις περιπτώσεις που υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις ακρίβειας στο ίδιο το βιομηχανικό παράγωγο. Παράδειγμα της περίπτωσης αυτής είναι μέτρηση τμήματος μιας ατράκτου ενός αεροπλάνου που πρέπει να συνδεθεί μετά με τα υπόλοιπα τμήματα. Έτσι χρειάζεται αυξημένη ακρίβεια στα τμήματα που πρόκειται να γίνει η σύνδεση (κυλινδρικές σπές), ενώ οι απαιτήσεις ακρίβειας μειώνονται όσον αφορά τις γεωμετρικές προδιαγραφές του τμήματος.

5.2 Διασύνδεση με χρήση ράβδου κρυφού σημείου

Για την σύνδεση των δύο αυτών εξοπλισμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ράβδος κρυφού σημείου που θα επιτρέψει την στόχευση κοινών σημείων διατηρώντας την ακρίβεια του κάθε εξοπλισμού. Γενικά η ράβδος κρυφού σημείου (*hidden point bar*) είναι παρελκόμενο των γεωδαιτικών σταθμών και χρησιμοποιείται για την σκόπευση σημείων που δεν είναι ορατά από το

όργανο. Τοποθετείται με την βοήθεια ενός στηρίγματος ώστε να παραμένει σταθερή και το άκρο της ακουμπά το σημείο που θα υπολογιστούν οι συντεταγμένες του. Είναι διαιρημένη σε πέντε διαστήματα με γνωστή την απόσταση μεταξύ τους (συνήθως ανά 10 cm) με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια. Τα πέντε αυτά σημεία φέρουν ανακλαστικούς στόχους και υλοποιούν μια ευθεία στο χώρο που διέρχεται από το σημείο απόληξης/ακίδα τη ράβδου.



Εικόνα 5.1: Η ράβδος κρυφού σημείου (www.store.hexagonmetrology.us)

5.2.1 Ράβδος κρυφού σημείου και γεωδαιτικός σταθμός

Η ράβδος όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελείται από πέντε σημεία με γνωστή την απόσταση μεταξύ τους που φέρουν ανακλαστικούς στόχους. Το άκρο της ράβδου ακουμπάει το σημείο ενδιαφέροντος που θα υπολογιστούν οι συντεταγμένες του και για να γίνει αυτό απαιτούνται τουλάχιστον σκοπεύσεις σε δύο από τα πέντε σημεία της ράβδου. Με τις δύο αυτές σκοπεύσεις θα μετρηθούν δύο αποστάσεις, δύο οριζόντιες και δύο κατακόρυφες γωνίες, σύνολο έξι μετρημένα στοιχεία. Τα άγνωστα στοιχεία θα είναι τα τρία που προκύπτουν από τις συντεταγμένες (X,Y,Z,) του σημείου ενδιαφέροντος και άλλα δύο που είναι τα στοιχεία που ορίζουν τον προσανατολισμό της ράβδου (αζιμούθιο και κατακόρυφη γωνία). Έτσι με την μέτρηση δύο μόνο σημείων της ράβδου είναι δυνατό να υπολογιστούν οι ζητούμενες συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος.

Ωστόσο ο υπολογισμός των βέλτιστων συντεταγμένων του κρυφού σημείου επιτυγχάνεται με μετρήσεις και στα πέντε σημεία της ράβδου. Ο υπολογισμός θα γίνει με σχέσεις αναλυτικής γεωμετρίας ενώ η ακρίβεια τους με εφαρμογή του νόμου μετάδοσης των μεταβλητοτήτων στις παρατηρήσεις των πέντε σημείων/στόχων της ράβδου. Η ακρίβεια είναι ίδια με αυτή που μπορεί να επιτευχθεί με τη τοποθέτηση ενός ανακλαστικού στόχου πάνω στο σημείο. Για παράδειγμα ο υψηλής ακριβείας γεωδαιτικός σταθμός TDA5005 μπορεί να υπολογίσει τις συντεταγμένες του κρυφού σημείου με την χρήση της ράβδου με ακρίβεια στις συντεταγμένες 0.5 mm.

Ο υπολογισμός των συντεταγμένων του κρυφού σημείου μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους :

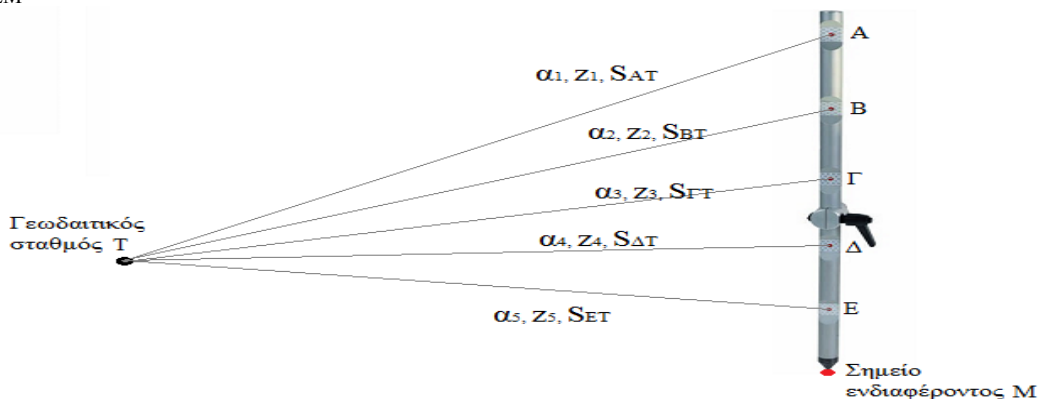
5.2.1a Περίπτωση 1^η: Μέτρηση γωνιών και αποστάσεων με ένα γεωδαιτικό σταθμό

Η περίπτωση αυτή περιλαμβάνει μετρήσεις αποστάσεων και γωνιών από ένα γεωδαιτικό σταθμό. Τα δεδομένα δηλαδή που προκύπτουν από το γεωδαιτικό σταθμό είναι πέντε ζεύγη μετρήσεων για τα πέντε σημεία της ράβδου. Δηλαδή εάν ονομάσουμε τα σημεία της ράβδου Α, Β, Γ, Δ, Ε, με πιο κοντά στο σημείο ενδιαφέροντος το σημείο Ε, σημείο Τ το σημείο που βρίσκεται ο Γ.Σ. και σημείο Μ το άγνωστο σημείο που θα υπολογιστούν οι συντεταγμένες, προκύπτουν τα εξής δεδομένα:

- Σημείο Α : α_1 (οριζόντια γωνία), z_1 (κατακόρυφη γωνία), S_{AT} (απόσταση)
- Σημείο Β : α_2 (οριζόντια γωνία), z_2 (κατακόρυφη γωνία), S_{BT} (απόσταση)
- Σημείο Γ : α_3 (οριζόντια γωνία), z_3 (κατακόρυφη γωνία), S_{GT} (απόσταση)
- Σημείο Δ : α_4 (οριζόντια γωνία), z_4 (κατακόρυφη γωνία), S_{DT} (απόσταση)
- Σημείο Ε : α_5 (οριζόντια γωνία), z_5 (κατακόρυφη γωνία), S_{ET} (απόσταση)

Επίσης λόγω των γνωστών γεωμετρικών στοιχείων της ράβδου, γνωστά μεγέθη είναι οι αποστάσεις:

- $S_{AB} = 10\text{cm}$
- $S_{BG} = 10\text{cm}$
- $S_{\Gamma\Delta} = 10\text{cm}$
- $S_{\Delta E} = 10\text{cm}$
- $S_{EM} = 10\text{cm}$

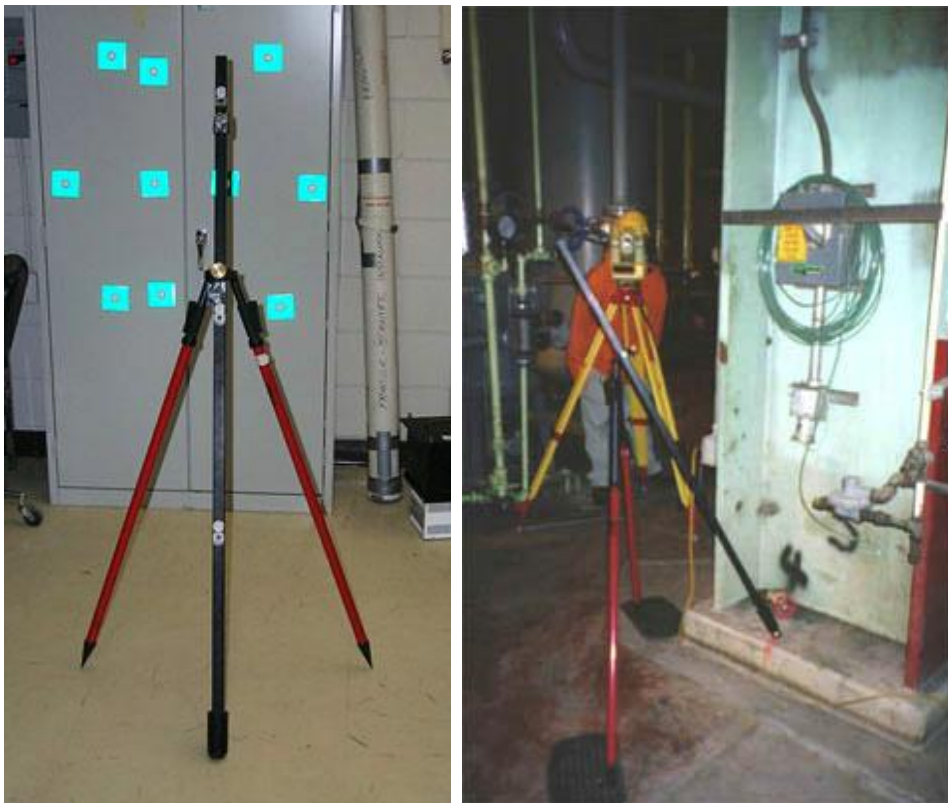


Εικόνα 5.2: Μέτρηση γωνιών και αποστάσεων στη ράβδο κρυφού σημείου

Οι συντεταγμένες της ράβδου υπολογίζονται με την μέθοδο των πολικών συντεταγμένων (βλ. κεφ. 3.4.1). Ύστερα αφού υπολογιστεί η εξίσωση της ευθείας που υλοποιείται από τα πέντε μετρημένα σημεία με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων, υπολογίζονται οι συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος το οποίο ανήκει στην ευθεία αυτή (άξονας της ράβδου). Η επίλυση όλων των παραπάνω γίνεται με τη βοήθεια του κατάλληλου λογισμικού (π.χ. πρόγραμμα Axyz) το οποίο με την εισαγωγή των αρχικών μετρούμενων δεδομένων, εκτελεί όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς και επιστρέφει τις συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος συνοδευόμενο από το σφάλμα προσδιορισμού του

5.2.1β Περίπτωση 2^η: Μέτρηση γωνιών με ένα θεοδόλιχο

Σε αυτή τη περίπτωση γίνονται μόνο μετρήσεις γωνιών. Η μεθοδολογία αυτή προτάθηκε από τους Teskey W. F. και Radovanovic R. S. το 2003 στο άρθρο με τίτλο ‘*A novel method of high precision height determination for industrial applications*’ και βασίζεται στο γεγονός πως τα σημεία της ράβδου υλοποιούν μία ευθεία στο χώρο. Μετρώντας τις γωνίες τριών μόνο σημείων πάνω στη ράβδο, προκύπτουν έξι παρατηρήσεις που είναι οι δύο μετρημένες γωνίες για κάθε ένα από τα τρία σημεία της ράβδου (2 γωνίες x 3 σημεία = 6 παρατηρήσεις). Άγνωστοι είναι οι συντεταγμένες X,Y,Z ενός σημείου της ράβδου (π.χ. του A) και ο προσανατολισμός της ράβδου (αζιμούθιο θ και κατακόρυφη γωνία Z), οπότε προκύπτουν σύνολο πέντε άγνωστοι παράμετροι.



Εικόνα 5.3: Μετρήσεις με τη ράβδο κρυφού σημείου (Teskey and Radovanovic, 2003)

Για κάθε ζεύγος μετρημένων γωνιών από το θεοδόλιχο προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$a_i = \text{atan} \left(\frac{x_i}{y_i} \right) \quad (5.1)$$

$$z_i = \text{acos} \left(\frac{z_i}{x_i^2 \sqrt{b_i^2 + z_i^2}} \right) \quad (5.2)$$

Ενώ για τα 3 σημεία ισχύει:

$$x_i = x_A + d_{Ai} \sin\theta * \sin Z \quad (5.3)$$

$$y_i = y_A + d_{Ai} \cos\theta * \sin Z \quad (5.4)$$

$$z_i = z_A + d_{Ai} \cos Z \quad (5.5)$$

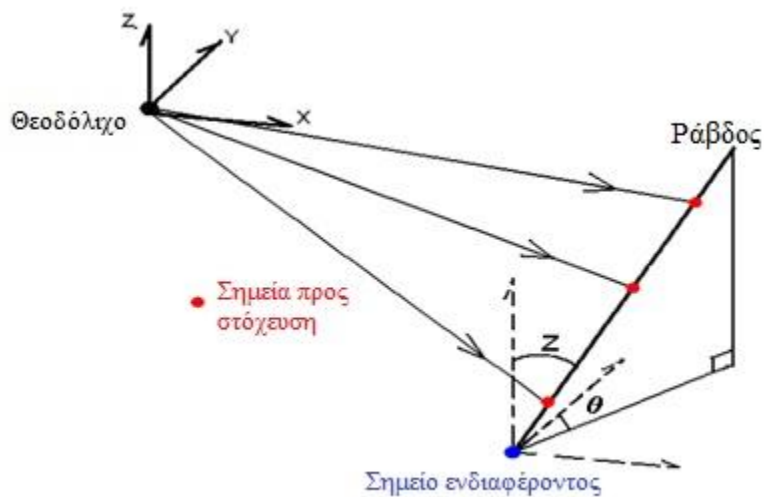
Όπου,

x, y, z , οι συντεταγμένες του i σημείου της ράβδου

x_A, y_A, z_A , οι συντεταγμένες του σημείου A της ράβδου

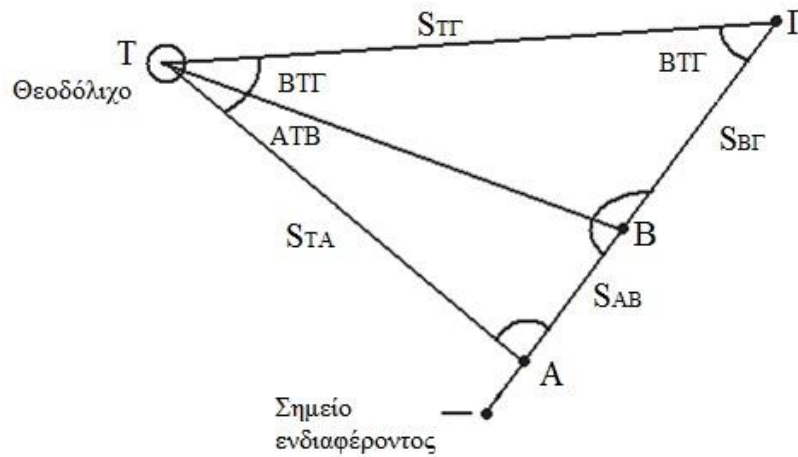
d_{Ai} , η απόσταση του σημείου A από κάθε σημείο i

Η διάταξη που σχηματίζεται φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.1: Η διάταξη της μεθόδου (Teskey and Radovanovic, 2003)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι μετρήσεις είναι έξι, ενώ οι άγνωστοι πέντε, οπότε η λύση θα δοθεί με εφαρμογή της μεθόδου των ελάχιστων τετραγώνων. Επειδή οι παραπάνω σχέσεις δεν είναι γραμμικές, απαιτείται ο υπολογισμός των προσωρινών τιμών των πέντε αυτών μεγεθών.



Σχήμα 5.2: Η σχηματιζόμενη γεωμετρία της μεθόδου (Teskey and Radovanovic, 2003)

Αρχικά υπολογίζεται η κατεύθυνση του διανύσματος της σκοπευτικής γραμμής του θεοδολίχου προς τα σημεία της ράβδου από την σχέση :

$$n_i = \begin{bmatrix} n_{ix} \\ n_{iy} \\ n_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin a_i \sin z_i \\ \cos a_i \sin z_i \\ \cos z_i \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Οι γωνίες ATB και BTΓ μπορούν να υπολογιστούν από το εσωτερικό γινόμενο των αντίστοιχων διανυσμάτων :

$$\psi_i = \arccos(n_i * n_j) \quad (5.7)$$

Η γωνία BTC θα υπολογιστεί από την σχέση:

$$BT\Gamma = \arctan \left[\frac{\sin BT\Gamma}{\frac{(AB + B\Gamma) * \sin ATB}{AB * \sin(ATB + BT\Gamma)} - \cos BT\Gamma} \right] \quad (5.8)$$

Η απόσταση μεταξύ του θεοδολίχου και του σημείου A θα υπολογιστεί :

$$TA = \frac{(AB + B\Gamma) * \sin B\Gamma T}{\sin (ATB + B\Gamma T)} \quad (5.9)$$

Και όμοια η απόσταση του θεοδολίχου από το σημείο Γ:

$$TG = \frac{(AB + BG) * \sin(\pi - ATB - BTG - BGT)}{\sin(ATB + BTG)} \quad (5.10)$$

Με γνωστές τις αποστάσεις S_{TA} και S_{TG} και τις γωνίες που έχουν μετρηθεί με το όργανο, υπολογίζονται οι προσωρινές συντεταγμένες των σημείων Α και Γ της ράβδου. Οι προσωρινές τιμές για το προσανατολισμό της ράβδου (αζιμούθιο θ και κατακόρυφη γωνία Z) θα υπολογιστούν από τις συντεταγμένες των σημείων Α και Γ. Τέλος οι προσωρινές συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος θα υπολογιστούν από τις συντεταγμένες του σημείου Α, τα στοιχεία του προσανατολισμού της ράβδου, και τη δοσμένη απόσταση μεταξύ του σημείου ενδιαφέροντος και του σημείου Α.

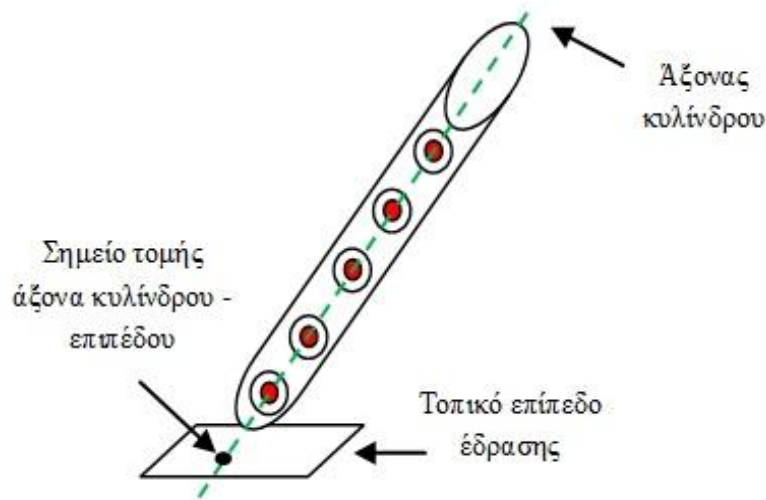
Η μεθοδολογία αυτή προτείνεται για μικρές αποστάσεις (2 ~ 4.5m), δηλαδή για τις συνήθεις μικρές αποστάσεις που επικρατούν στη βιομηχανική γεωδαισία, υπολογίζει τις συντεταγμένες X,Y,Z του σημείου ενδιαφέροντος με ακρίβειες 0.24mm, 0.44mm και 0.10mm αντίστοιχα.

5.2.1γ Περίπτωση 3^η: Μέτρηση γωνιών με δύο θεοδόλιχα

Στην περίπτωση αυτή γίνονται μόνο μετρήσεις γωνιών, αλλά από δύο θεοδόλιχα (έως και έξι) και για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων της ράβδου εφαρμόζεται η μέθοδος της εμπροσθοτομίας (βλ. κεφ. 3.4.2 και 3.4.3). Αφού υπολογιστούν οι συντεταγμένες των σημείων της ράβδου, εφαρμόζεται ότι και στην πρώτη περίπτωση (μέτρηση γωνιών και αποστάσεων με ένα Total station). Όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται αυτοματοποιημένα μέσω κατάλληλου λογισμικού το οποίο υπολογίζει τις συντεταγμένες και το σφάλμα του σημείου ενδιαφέροντος.

5.2.2 Ράβδος κρυφού σημείου και CMM

Η CMM τύπου αρθρωτού βραχίονα με σημειακό αισθητήρα επαφής υπολογίζει τις συντεταγμένες ενός σημείου εφόσον έρθει σε επαφή μαζί του. Δηλαδή θα μετρηθούν αρκετά σημεία πάνω στην ράβδο έτσι ώστε να σχηματισθεί η μαθηματική εξίσωση του κυλινδρικού σχήματος της ράβδου. Επίσης θα γίνουν μετρήσεις στο επίπεδο (επίσης μπορεί να περιγραφεί από μαθηματική εξίσωση) που εδράζεται η ράβδος. Έτσι οι συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος μπορούν να παραχθούν γεωμετρικά μέσα από την τομή του άξονα του κυλίνδρου της ράβδου και του τοπικού (στοιχειώδους) επιπέδου έδρασής της. Όλες οι παραπάνω μετρήσεις εισάγονται σαν δεδομένα στο κατάλληλο λογισμικό το οποίο θα εξάγει τις συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος και το σφάλμα του.



Σχήμα 5.3: Τομή επιπέδου και άξονα κυλίνδρου (Ξενάκης et al., 2012)

Η ακρίβεια στις συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος μπορεί να είναι οριακά υποδιαίστερη 0.1 mm με την CMM Faro Platinum Arm- 2.4m - 7DoF, εργόσφαιρας διαμέτρου 2400 mm. 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.

5.3 Διασύνδεση με χρήση κυκλικού πρίσματος CCR

Για την σύνδεση των δύο αυτών εξοπλισμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κυκλικό πρίσμα CCR που επιτρέπει την παρατήρηση κοινών σημείων διατηρώντας την ακρίβεια του κάθε εξοπλισμού. Γενικά το πρίσμα CCR είναι παρελκόμενο των γεωδαιτικών σταθμών και χρησιμοποιείται για μετρήσεις υψηλών απαιτήσεων, καθώς είναι ο πιο ακριβής ανακλαστήρας.

Αποτελείται ένα μεταλλικό ανοξείδωτο σφαιρικό περίβλημα που εσωκλείει τρία πρίσματα κατάλληλα τοποθετημένα μεταξύ τους. Ο συγκεκριμένος στόχος (Εικόνα 5.4) είναι ανθεκτικός σε τυχόν πτώσεις (BRR – Break Resistant Retroreflector), ενώ η διάμετρος του είναι 38.1mm (1.5in) με ακρίβεια $\pm 0.0025\text{mm}$. Η εκκεντρότητα των οπτικών συστημάτων είναι καλύτερη από $\pm 0.010\text{mm}$, ενώ το σφαιρικό σχήμα του στόχου προσεγγίζεται με ακρίβεια καλύτερη από $\pm 0.015\text{mm}$. Το εύρος λειτουργίας του είναι $\pm 30^\circ$ και το μεταλλικό περίβλημα δεν δημιουργεί κανένα περιορισμό στις εισερχόμενες δέσμες.



Εικόνα 5.4: Το κυκλικό πρίσμα CCR (<http://metrology.leica-geosystems.com>)

5.3.1 Κυκλικό πρίσμα CCR και γεωδαιτικός σταθμός

Ο υπολογισμός των συντεταγμένων του σημείου ενδιαφέροντος μπορεί να γίνεται με τη μέτρηση της οριζόντιας γωνίας α , της κατακόρυφης γωνίας z και της κεκλιμένης απόστασης D με χρήση γεωδαιτικού σταθμού. Η παρατήρηση από το γεωδαιτικό σταθμό γίνεται προς το κέντρο της σφαίρας-πρίσματος και οι συντεταγμένες του σημείου προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη τη κατάλληλη σταθερή μετάθεση (offset). Η επίλυση όλων των παραπάνω γίνεται με το κατάλληλο λογισμικό το οποίο με την εισαγωγή των αρχικών μετρούμενων δεδομένων, εκτελεί όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς και επιστρέφει τις συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος συνοδευόμενο από το σφάλμα προσδιορισμού του.

5.3.2 Κυκλικό πρίσμα CCR και CMM

Η CMM τύπου αρθρωτού βραχίονα με σημειακό αισθητήρα επαφής υπολογίζει τις συντεταγμένες ενός σημείου εφόσον έρθει σε επαφή μαζί του. Δηλαδή θα μετρηθούν αρκετά σημεία περιμετρικά της σφαίρας έτσι ώστε να σχηματισθεί η μαθηματική εξίσωση του σφαιρικού σχήματος του πρίσματος ώστε να υπολογιστεί το κέντρο της σφαίρας. Ύστερα εφαρμόζοντας τη κατάλληλη σταθερά (offset), θα υπολογιστεί το σημείο ενδιαφέροντος. Όλες οι παραπάνω μετρήσεις εισάγονται σαν δεδομένα στο κατάλληλο λογισμικό το οποίο θα εξάγει τις συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος και το σφάλμα του.



- Μετρήσεις CMM
- Σημείο ενδιαφέροντος
- Κέντρο κύκλου

Εικόνα 5.5: Μετρήσεις στο κυκλικό πρίσμα CCR

Η ακρίβεια στις συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος μπορεί να είναι λίγο κάτω από 0.1mm. Οι κυριότερες πηγές αβεβαιότητας προέρχονται εδώ από πιθανά σφάλματα στη γεωμετρική μορφή του πρίσματος καθώς επίσης και από την πιθανότητα να μη συμπίπτουν τα δύο κέντρα μεταξύ τους (το πραγματικό από το υπολογισμένο). Για αυτό το λόγο επιχειρείται να εξασφαλιστεί ένας υψηλός βαθμός ελευθερίας για την περιγραφή της γεωμετρίας πρίσματος, ενώ παράλληλα η λήψη των σημείων πάνω στο πρίσμα γίνεται περιμετρικά σε όλη την επιφάνειά του.

5.4 Μαθηματικό μοντέλο διασύνδεσης των δύο εξοπλισμών (3D μετασχηματισμός)

Χρησιμοποιώντας κάποιον από τους τρόπους διασύνδεσης, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των συντεταγμένων κοινών σημείων με δύο διαφορετικούς εξοπλισμούς. Ωστόσο τα δύο όργανα μετρούν σε διαφορετικά συστήματα αναφοράς και έτσι δημιουργείται η ανάγκη μεταξύ τους συσχετισμού. Η διασύνδεση αυτή θα γίνει με τη βοήθεια των μαθηματικών μετασχηματισμών.

Ο 3D αφινικός μετασχηματισμός έχει συνήθως 9 παραμέτρους οι οποίες είναι :

- 3 παράμετροι στροφών
- 3 παράμετροι κλίμακας
- 3 παράμετροι μετάθεσης

Στην περίπτωση αυτή το αντικείμενο θα αλλάξει θέση, προσανατολισμό, σχήμα και μέγεθος. Μπορεί να έχει και 8 παραμέτρους, δηλαδή αντί για 3 κλίμακες να έχει 2. Η λογική βασίζεται στο γεγονός πως συνήθως στην γεωδαισία ο προσδιορισμός της τετμημένης X και τεταγμένης Y γίνεται με τον ίδιο τρόπο άρα έχουν και την ίδια κλίμακα, ενώ του υψόμετρου Z

αλλάζει. Επίσης υπάρχει η περίπτωση που η κλίμακα είναι ίδια, οπότε οι παράμετροι γίνονται 7. Ο μετασχηματισμός αυτός είναι γνωστός και σαν μετασχηματισμός ομοιότητας. Ακόμα υπάρχει και ο αφινικός με 12 παραμέτρους που στους γνωστούς 9, προστίθενται και οι 3 παράμετροι της λοξότητας (skew). Ο 6παραμετρικός μετασχηματισμός (3 στροφές και 3 μεταθέσεις) που θεωρεί την κλίμακα ίση με τη μονάδα, θεωρείται ο πιο πρακτικός μετασχηματισμός στη Γεωδαισία, καθώς διατηρεί τις αποστάσεις αναλλοίωτες.

Η γενική μορφή του μοντέλου μετασχηματισμού είναι :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu 1 \\ \mu 2 \\ \mu 3 \end{bmatrix} * R(a1, a2, a3) * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

όπου

- $\mu 1, \mu 2, \mu 3$, οι συντελεστές κλίμακας κατά τους άξονες X, Y , και Z αντίστοιχα
- R είναι ο πίνακας στροφής
- $\delta x, \delta y, \delta z$ τα στοιχεία του πίνακα μετάθεσης
- x, y, z , οι συντεταγμένες στο σύστημα συντεταγμένων του ΓΣ
- X, Y, Z , συντεταγμένες στο σύστημα συντεταγμένων του ΜΜΣ-ΦΒ

Η επίλυση του αφινικού μετασχηματισμού και η μαθηματική διαδικασία χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Matlab, αναλύεται στο παράρτημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

6.1 Περιγραφή εξοπλισμού και εγκαταστάσεων

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των εφαρμογών αποτελείται από τα δύο όργανα μετρήσεων και τα παρελκόμενά τους. Χρησιμοποιήθηκε ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός ακριβείας TDA5005 της εταιρείας Leica Geosystems και η μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM) με αρθρωτό βραχίονα Platinum Faro Arm. Οι μετρήσεις λάβανε χώρα στην αίθουσα Υ23 του κτιρίου Λαμπαδαρίου της Σχολής των Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ.



Εικόνα 6.1: Η αίθουσα Υ23 της Σχολής των Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ.

6.1.1 Γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005

Ο Γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005 κατασκευάζεται από την εταιρία Leica Geosystems και αποτελεί μέρος της σειράς TPS5000 που περιλαμβάνει επίσης το γεωδαιτικό σταθμό TDM 5005 και το ψηφιακό θεοδόλιχο TM 5100A. Ο Leica TDA 5005 είναι σερβοκινούμενος γεωδαιτικός σταθμός μεγάλης ακρίβειας. Ξεχωρίζει για την ευχρηστία του και την παραγωγικότητα του ενώ αποτελεί το βασικό εργαλείο για πολυάριθμες εφαρμογές μέτρησης στην βιομηχανία.



Εικόνα 6.2: Ο γεωδαιτικός σταθμός TDA 5005 της εταιρίας Leica

(www.leica-geosystems.com)

Η ακρίβεια μέτρησης των αποστάσεων είναι $1\text{mm} + 2\text{ ppm}$ με ανάλυση 0.01mm . Η ακρίβεια μέτρησης των οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι $1.5''$ με ανάλυση $0.1''$. Μιας και οι αποστάσεις στον κλάδο της βιομηχανικής γεωδαισίας είναι αρκετά μικρές, πρακτικά αυτό μεταφράζεται σαν μέγιστο γραμμικό σφάλμα τα 0.12mm (για μία απόσταση 50m) ενώ για μικρότερες αποστάσεις (τάξης 5m), το σφάλμα είναι της τάξης του 0.012mm .

Ο φακός του τηλεσκοπίου είναι 42mm με ικανότητα μεγέθυνσης $32\times$. Επίσης σε απόσταση 50m ο φακός μπορεί να διακρίνει αντικείμενα που απέχουν τουλάχιστον 0.7mm ενώ για μια συνήθη απόσταση στη βιομηχανική γεωδαισία της τάξης των 5m , αντικείμενα που βρίσκονται σε απόσταση 0.07mm μπορούν να ξεχωρίσουν.

Επίσης διαθέτει κυκλική αεροστάθμη ευαισθησίας $4\frac{1}{2}\text{ mm}$ και ηλεκτρονική αεροστάθμη με ευαισθησία $2''$. Η εμβέλεια που μπορεί να μετρήσει μία απόσταση μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 5000m (για εξαιρετικές συνθήκες) ενώ σαν ελάχιστη ορίζονται τα 1200m . Βέβαια η απόσταση μέτρησης εξαρτάται και από τον τύπο του ανακλαστήρα, με την εταιρία κατασκευής να προτείνει ως κατάλληλο ανακλαστήρα τον “swoxed” CCR 1.5". Τέλος, ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός χαρακτηρίζεται σχετικά βαρύς, καθώς φτάνει τα 7.5 κιλά που του προσδίδει ευστάθεια σε σχετικά δυσχερείς καιρικές συνθήκες (π.χ. άνεμος).

Μπορεί να συνδεθεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή, έχει ενσωματωμένα προγράμματα και μπορεί να εκτελέσει διάφορες λειτουργίες, όπως οπισθοτομία. Έχει τη δυνατότητα να δεχτεί επιπλέον προγράμματα από τον χρήστη και διαθέτει κάρτα μνήμης χωρητικότητας 3MB που μπορεί να αποθηκεύσει μέχρι και 18000 points .

Τέλος έχει την δυνατότητα της αυτόματης αναγνώρισης στόχου (*Automatic Target Recognition - ATR*) με ακρίβεια $1.5''$ και εμβέλεια αναγνώρισης στόχου έως και 1000m . Μπορεί δηλαδή να βρίσκει ένα στόχο – σημείο το οποίο έχει οριστεί από το χρήστη από πριν και να παίρνει μέτρηση. Στη συνέχεια μπορεί να ακολουθήσει τον στόχο εάν αυτός μετακινηθεί και να πάρει

μέτρηση σε περίπτωση που ο στόχος μείνει ακίνητος (λειτουργία *stop and go*). Αυτό είναι πολύ χρήσιμο καθώς με αυτή τη λειτουργία δεν απαιτείται χειριστής στο όργανο.

Συγκεντρωτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του TDA 5005 είναι:

- Ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων 1 mm+ 2 ppm
- Ανάλυση αποστάσεων 0,01 mm
- Ακρίβεια μέτρησης οριζόντιων & κατακόρυφων 1,5^{cc}
- Ανάλυση οριζόντιων & κατακόρυφων 0,1^{cc}
- Μέγιστη απόσταση μέτρησης 5000 m
- Ελάχιστη απόσταση μέτρησης 1.7 m
- Ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων με πρίσμα CCR ±0.2mm/120m
- Εμβέλεια μέτρησης με πρίσμα CCR έως 600m
- Εύρος διπλού αντισταθμιστή 7^c
- Ακρίβεια διπλού αντισταθμιστή 1^c
- Ευαισθησία κυκλικής αεροστάθμης 4' / 2 mm
- Ευαισθησία ηλεκτρονικής αεροστάθμης 2"
- Διάμετρος αντικειμενικού φακού 42 mm
- Ικανότητα μεγέθυνσης 32x
- Μέγιστη ακρίβεια ATR 1,5^{cc}
- Μέγιστη απόσταση μέτρησης με ATR 1000 m
- Βάρος 7.5 kg
- Διάρκεια λειτουργίας με 1 μπαταρία 600 μετρήσεις γωνιών & αποστάσεων
- Χωρητικότητα μνήμης αποθήκευσης 3MB

6.1.1α Παρελκόμενα TDA5005

Για την εκτέλεση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε μια σειρά από παρελκόμενα, σχεδιασμένα ειδικά για συνδυαστική χρήση με το TDA5005. Ειδικότερα, τα παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- **Στόχος CCR 1.5in.** Ο στόχος είναι της Leica Geosystems, σχεδιασμένος ειδικά για χρήση με γεωδαιτικούς σταθμούς και laser trackers της ίδιας εταιρείας. Ανήκει στην κατηγορία στόχων CCR (Corner Cube Reflector), δηλαδή αποτελείται ένα μεταλλικό ανοξείδωτο σφαιρικό περίβλημα που εσωκλείει τρεις κάθετους μεταξύ τους καθρέφτες. Ο συγκεκριμένος στόχος είναι ανθεκτικός σε τυχόν πτώσεις (BRR – Break Resistant Retroreflector), ενώ η διάμετρος του είναι 1.5in. ή 38.1mm με ακρίβεια ±0.0025mm. Η εκκεντρότητα των οπτικών συστημάτων είναι καλύτερη από ±0.010mm, ενώ το σφαιρικό σχήμα του στόχου προσεγγίζεται με ακρίβεια καλύτερη από ±0.015mm. Το εύρος λειτουργίας του είναι ±30^o και το μεταλλικό περίβλημα δεν δημιουργεί κανένα περιορισμό στις εισερχόμενες δέσμες.
- **Βάσεις στόχων.** Για τις ανάγκες των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε μία οριζόντια βάση στόχου στην οποία προσαρμόστηκε το πρίσμα CCR. Πρόκειται για μία μαγνητική βάση, η οποία προσφέρει στο πρίσμα CCR σταθερότητα για μεγιστοποίηση της ακρίβειας.



Εικόνα 6.3: Ο στόχος CCR 1.5in τοποθετημένος πάνω στη βάση του

- **Βιομηχανικός τρίποδας.** Για την συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο βιομηχανικοί τρίποδες και στον έναν τοποθετήθηκε ο γεωδαιτικός σταθμός όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 6.4: Ο βιομηχανικός τρίποδας με το TDA5005

Στον δεύτερο βιομηχανικό τρίποδα τοποθετήθηκε το πρίσμα CCR με την μεταλλική του βάση προσαρμοσμένα σε μία μεταλλική ιδιοκατασκευή (εξάρτημα θεοδολίχου) ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη σταθερότητα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.5:



Εικόνα 6.5: Ο στόχος CCR 1.5in τοποθετημένος πάνω στη βάση του

- **Φορητός υπολογιστής με εγκατεστημένο το λογισμικό επεξεργασίας Axyz.** Το λογισμικό επεξεργασίας στις βιομηχανικές εργασίες, αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του εξοπλισμού, καθώς απλοποιεί τις διαδικασίες μέτρησης και επεξεργασίας και επεκτείνει το πεδίο εφαρμογών χάρη σε αυτοματοποιημένες διεργασίες.

Το λογισμικό επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των εφαρμογών της διπλωματικής εργασίας είναι το Axyz της εταιρείας Leica Geosystems. Το Axyz αποτελεί ένα εξειδικευμένο λογισμικό που συνεργάζεται με τα όργανά της Leica Geosystems και ανταποκρίνεται στο σύνολο των αναγκών μιας μετρολογικής εργασίας. Η χρήση του λογισμικού καλύπτει τόσο το στάδιο των μετρήσεων (μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο και καταγραφή δεδομένων) όσο και το στάδιο επεξεργασίας. Σε περιπτώσεις μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο το λογισμικό μπορεί να υποστηρίξει από 1 ως 16 γεωδαιτικούς σταθμούς και από 1 ως 9 laser trackers ταυτόχρονα (Kyle, 2000).

Από τη πληθώρα των διαφορετικών εργασιών που μπορούν να γίνουν με το Axyz αναφέρονται ενδεικτικά οι σημαντικότερες:

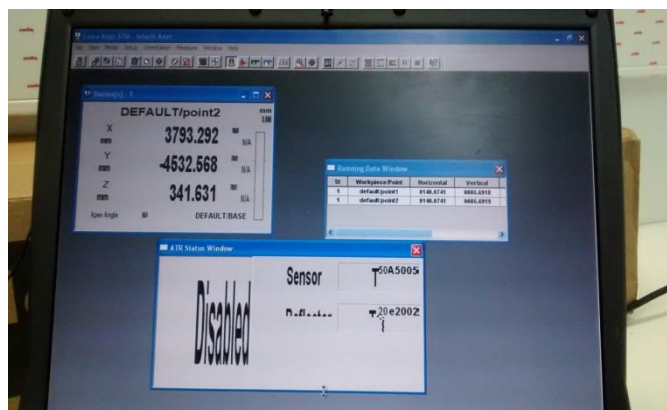
- Ορισμός και μετασχηματισμός συστημάτων αναφοράς (στροφή, κλίμακα, μετάθεση).
- Προσδιορισμός συντεταγμένων σημείων είτε με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων είτε με της απλής ή πολλαπλής εμπροσθοτομίας.
- Εκτέλεση γεωμετρικών υπολογισμών (υπολογισμός γωνιών, αποστάσεων κ.α.)
- Προσαρμογή βέλτιστου γεωμετρικού σχήματος (γραμμή, επίπεδο, κύκλος, σφαίρα, κύλινδρος, κώνος, παραβολοειδές) σε ομάδες σημείων-δεδομένων, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.
- Περιβάλλον CAD για τρισδιάστατη απεικόνιση και επεξεργασία δεδομένων.

Όσον αφορά στη δομή του λογισμικού, αυτό αποτελείται από ένα βασικό υποπρόγραμμα

και μια σειρά δευτερευόντων υποπρογραμμάτων. Το βασικό πρόγραμμα καλείται CDM (*Core Data Module*) και είναι αυτό στο οποίο γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων, η διαχείριση των δεδομένων, η εκτέλεση των γεωμετρικών προσαρμογών κ.α. Από τα δευτερεύοντα υποπρογράμματα, αναφέρονται ενδεικτικά το STM (*Single Theodolite Module*) για εργασία με έναν γεωδαιτικό σταθμό, το MTM (*Multiple Theodolite Module*) για εργασία με δύο και παραπάνω σταθμούς, το LTM (*Laser Tracker Module*) για εργασίες με Laser trackers, το View στο οποίο παρουσιάζονται γραφικά οι μετρήσεις και το CAD που περιλαμβάνει σχεδιαστικά εργαλεία (2Δ και 3Δ) για την γραφική επεξεργασία των δεδομένων.

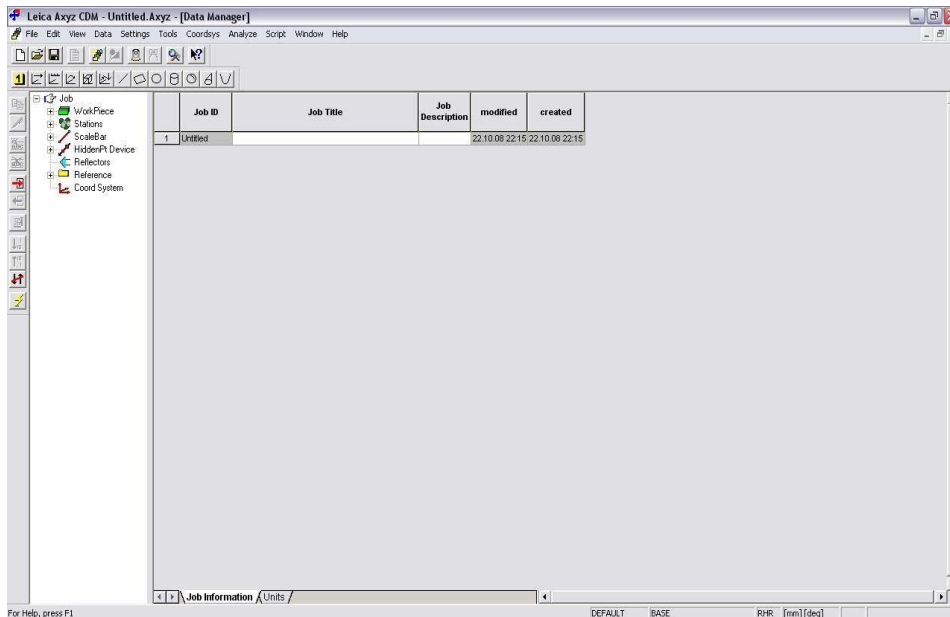
Μέσω του υποπρογράμματος STM (*Single Theodolite Module*) γίνεται δυνατή η σύνδεση ενός μοναδικού γεωδαιτικού σταθμού με τον Η/Υ. Αρχικά γίνεται η επιλογή του γεωδαιτικού σταθμού που θα συνδεθεί με τον πρόγραμμα XYZ. Εκεί δίνεται η επιλογή για την εισαγωγή των ατμοσφαιρικών συνθηκών (θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση) και για το είδος του πρίσματος που θα χρησιμοποιηθεί στις μετρήσεις. Όλα τα παραπάνω μπορούν να επεξεργαστούν και μετά τις μετρήσεις ενώ οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν είτε μέσω του οργάνου είτε μέσω του λογισμικού. Επίσης, μπορεί να ορισθεί ο τρόπος που θα μετρηθεί το σημείο, δηλαδή αν π.χ. θα χρησιμοποιηθεί ράβδος κρυφού σημείου ή άλλο ειδικό παρελκόμενο.

Ακόμα, είναι δυνατή η επιλογή ενεργοποίησης του ATR (*Automatic target recognition*), που επιτρέπει την αυτόματη παρατήρηση και μέτρηση σημείου που έχει εισαχθεί από τον χειριστή. Τέλος, είναι δυνατό να καταγράφονται στην οθόνη του υπολογιστή μέσω του προγράμματος STM οι συντεταγμένες του μετρούμενου σημείου, όπως φαίνεται και στην εικόνα. Όλα τα δεδομένα που συλλέγονται από το STM καταγράφονται αυτόματα στο CDM για περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 6.6: Το περιβάλλον του STM του λογισμικού Axyz

Το CDM(*Core Data Module*) αποτελεί το σημαντικότερο υποπρόγραμμα του Axyz. Μέσα από αυτό γίνεται η διαχείριση όλων των δεδομένων. Τα δεδομένα μπορούν είτε να έχουν μετρηθεί είτε να έχουν εισαχθεί. Μετρημένα δεδομένα είναι αυτά έχουν μεταφερθεί από υποπρογράμματα όπως το STM, το MTM και το LTM και είναι προϊόντα μετρήσεων. Τα δεδομένα μπορούν επίσης να έχουν εισαχθεί είτε πληκτρολογώντας τις συντεταγμένες τους είτε με την εισαγωγή κάποιου αρχείου.



Εικόνα 6.7: Η επιφάνεια εργασίας του CDM

Στο περιβάλλον του CDM περιλαμβάνονται όλες οι εντολές επεξεργασίας των δεδομένων, όπως η βέλτιστη προσαρμογή δεδομένων σε γεωμετρικά σχήματα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, υπολογισμός γεωμετρικών στοιχείων μεταξύ δεδομένων (γωνία, απόσταση κ.α.) και μετασχηματισμοί συστημάτων αναφοράς.

Ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει για τη μέθοδο που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα Axyz v1.4.3 κατά τη διαδικασία συνόρθωσης με τα ελάχιστα τετράγωνα, καθώς και για την ποιοτική πληροφορία που παρέχεται. Όταν ζητείται ο υπολογισμός κάποιου γεωμετρικού στοιχείου ή προσδιορισμός ενός σχήματος με την προσαρμογή μαθηματικής επιφάνειας, το υποπρόγραμμα CDM συγκεντρώνει τα αρχικά δεδομένα και αν είναι περισσότερα από τα απαραίτητα, τότε εκτελεί απευθείας την υπολογιστική διαδικασία με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (MET). Για παράδειγμα, για τον υπολογισμό ενός κύκλου απαιτούνται τρία σημεία γνωστών συντεταγμένων της περιφέρειάς του. Σε περίπτωση που υπάρχει επιπλέον πληροφορία (π.χ. περισσότερα σημεία ή μετρημένη ακτίνα κτλ.) το πρόγραμμα εκτελεί τη διαδικασία της συνόρθωσης και υπολογίζει τις αποκλίσεις από τον προσαρμοσμένο κύκλο.

Κατά την εφαρμογή των ελαχίστων τετραγώνων στην επίλυση ενός γεωμετρικού προβλήματος προσφέρεται η δυνατότητα επιλογής χρησιμοποίησης ή όχι βαρών. Ουσιαστική σημασία έχει η διαδικασία της ανισοβαρούς επίλυσης η οποία και επιλέγεται στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων. Οι επιλύσεις με ισοβαρείς εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν οι ακρίβειες των μετρημένων μεγεθών δεν είναι γνωστές ή είναι περίπου ίσες ή για σύγκριση της λύσης με κάποιο άλλο πρόγραμμα. Στις επιλύσεις αυτές χρησιμοποιείται ο δείκτης μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) που δίνεται από τη σχέση:

$$RMS = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{r}} \quad (6.1)$$

οπού v_i τα υπόλοιπα των συντεταγμένων των σημείων (pointing errors), N : ο αριθμός των μετρήσεων, r : ο βαθμός ελευθερίας του συστήματος.

Το RMS (Root Mean Square) αποτελεί το συνολικό μέσο όρο των υπολοίπων στο χώρο που εκφράζεται ανά άξονα, στο επιλεγμένο σύστημα αναφοράς. Οι συνιστώσες αυτές είναι τα RMS_x , RMS_y , RMS_z . Το total RMS ορίζεται ως εξής:

$$RMS_{total} = \sqrt{RMS_x^2 + RMS_y^2 + RMS_z^2} \quad (6.2)$$

Όσον αφορά στον μετασχηματισμό μεταξύ διαφορετικών συστημάτων αναφοράς, εκτελείται ουσιαστικά ένας μετασχηματισμός ομοιότητας. Από ένα (τυχαίο) σύστημα συντεταγμένων, γίνεται μεταφορά σε επιθυμητό σύστημα με συγκεκριμένη αρχή και προσανατολισμό. Προκειμένου να μπορεί να εκτελεστεί η υπόψη μεταφορά, υπολογίζονται οι απαραίτητοι παράμετροι. Οι παράμετροι του μετασχηματισμού είναι 6 ή 7: τρεις παράμετροι για τις μεταθέσεις των αξόνων (ΔX , ΔY , ΔZ), τρεις στροφές (ω , ϕ , κ) και σε ορισμένες περιπτώσεις μια παράμετρος για την κλίμακα (λ). Για τον υπολογισμό των παραμέτρων απαιτούνται σημεία με γνωστές συντεταγμένες X , Y , Z ή έστω με γνωστή μια από τις τρεις τιμές. Δυο σημεία με γνωστές συντεταγμένες (συνολικά 6 παρατηρήσεις) αρκούν για την επίλυση του μετασχηματισμού (εφόσον δεν χρειάζεται να υπολογιστεί και η παράμετρος της κλίμακας). Εναλλακτικά, μπορούν να γίνονται μετρήσεις προς σημεία των οποίων είναι γνωστές δύο ή μόνο μία από τις συντεταγμένες τους αρκεί ο συνολικός αριθμός των γνωστών τιμών να είναι τουλάχιστον 6. Εφόσον βρεθεί ο απαραίτητος αριθμός γνωστών δεδομένων, εκτελούνται μετρήσεις προς τα σημεία αυτά και προσδιορίζονται οι συντεταγμένες τους στο αρχικό σύστημα αναφοράς. Κατόπιν, εφαρμόζεται η γενική μέθοδος συνόρθωσης μέσω της οποίας υπολογίζονται οι παράμετροι του μετασχηματισμού και κατ'επέκταση οι αντίστοιχες εξισώσεις. Το σύστημα εξισώσεων του μετασχηματισμού είναι της μορφής:

$$\begin{bmatrix} X_{\tau\epsilon\lambda} \\ Y_{\tau\epsilon\lambda} \\ Z_{\tau\epsilon\lambda} \end{bmatrix} = \lambda * \mathbf{R} * \begin{bmatrix} X_{\alpha\rho\chi} \\ Y_{\alpha\rho\chi} \\ Z_{\alpha\rho\chi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

όπου, $X_{\tau\epsilon\lambda}$, $Y_{\tau\epsilon\lambda}$, $Z_{\tau\epsilon\lambda}$ οι συντεταγμένες ενός σημείου στο τελικό σύστημα αναφοράς, $X_{\alpha\rho\chi}$, $Y_{\alpha\rho\chi}$, $Z_{\alpha\rho\chi}$ οι συντεταγμένες ενός σημείου στο αρχικό σύστημα αναφοράς, ΔX , ΔY , ΔZ οι μεταθέσεις κάθε άξονα, λ η παράμετρος της κλίμακας και \mathbf{R} ο πίνακας στροφής όπου αναλύεται στους παρακάτω τρεις πίνακες (έναν για κάθε στροφή):

$$R_x(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \sin\omega \\ 0 & -\sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

$$R_z(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Η μη χρήση της παραμέτρου της κλίμακας ($\lambda=1$) οδηγεί σε αποτελέσματα μειωμένης ακρίβειας. Παρόλα αυτά στις περισσότερες εφαρμογές συνηθίζεται να μην λαμβάνεται υπ' όψιν λόγω της δυσκολίας υπολογισμού της πραγματικής της τιμής.

Τέλος, το View & CAD αποτελεί το γραφικό εργαλείο του Axyz. Σε αυτό εμφανίζονται στο τρισδιάστατο χώρο τα δεδομένα που βρίσκονται στο CDM (μετρημένα ή εισαγμένα). Με την επιλογή ενός αντικειμένου στο σχέδιο εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά του (συντεταγμένες κλπ.), ενώ είναι δυνατός και ο υπολογισμός της απόστασής τους από άλλα στοιχεία του σχεδίου. Σημαντικό χαρακτηριστικό του View & CAD είναι η δυνατότητα εισαγωγής και μοντέλου CAD από άλλη πηγή. Το μοντέλο που εισάγεται αναλύεται σε σημεία, καμπύλες και επιφάνειες και κατόπιν είναι δυνατή η αλληλεπίδρασή του με τα υπόλοιπα στοιχεία του σχεδίου. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εξής διεργασίες που εκτελούνται με το View & CAD: μεταφορά του μοντέλου σε άλλο σύστημα αναφοράς είτε μέσω μετασχηματισμού ομοιότητας είτε μέσω βέλτιστης προσαρμογής στα δεδομένα (με υπολογισμό της αβεβαιότητας του μετασχηματισμού ή της προσαρμογής), σύγκριση σημείων με επιφάνεια και υπολογισμός αποκλίσεων, εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος για επεξεργασία σε άλλο πρόγραμμα. Σημειώνεται ότι μέσω του View & CAD δεν γίνεται να διαγραφούν ή να τροποποιηθούν τα δεδομένα που βρίσκονται αποθηκευμένα στο CDM.

6.1.2 Φορητή CMM με αρθρωτό βραχίονα – Platinum Faro Arm

Η μηχανή μέτρησης συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική είναι φορητού τύπου με αρθρωτό βραχίονα. Ανήκει στην οικογένεια Faro Platinum Arm της σειράς φορητών βραχιόνων που κατασκευάζονται από την Faro. Το παρών μοντέλο είναι το Faro Platinum Arm 7 αξόνων και διάμετρο εργόσφαιρας 2.4m.

Τύπος-Εύρος μέτρησης σε mm	Επαναληψιμότητα σε mm (σημειακός έλεγχος)		Επαναληψιμότητα σε mm (έλεγχος σφαίρας)		Βάρος	
	6 Άξονες	7 Άξονες	6 Άξονες	7 Άξονες	6 Άξονες	7 Άξονες
4ft. (1.2m)	± 0.0005in (±0.013mm)	± 0.0007in (±0.018mm)	± 0.0007in (±0.018mm)	± 0.0010in (±0.018mm)	20lbs. (9.1kg)	20.5lbs. (9.3kg)
6ft. (1.8m)	± 0.0008in (±0.020mm)	± 0.0010in (±0.026mm)	± 0.0011in (±0.029mm)	± 0.0015in (±0.037mm)	20.5lbs. (9.3kg)	20.5lbs. (9.5kg)
8ft. (2.4m)	± 0.0010in (±0.025mm)	± 0.0012in (±0.030mm)	± 0.0014in (±0.036mm)	± 0.0017in (±0.043mm)	21lbs. (9.5kg)	21.5lbs. (9.75kg)
10ft. (3.0m)	± 0.0017in (±0.043mm)	± 0.0020in (±0.052mm)	± 0.0024in (±0.061mm)	± 0.0029in (±0.073mm)	21.5lbs. (9.75kg)	22lbs. (9.98kg)
12ft. (3.7m)	± 0.0024in (±0.061mm)	± 0.0029in (±0.073mm)	± 0.0034in (±0.086mm)	± 0.0041in (±0.103mm)	22lbs. (9.98kg)	22.5lbs. (10.21kg)

Πίνακας 6.1: Οι αρθρωτοί βραχίονες της σειράς Faro και η ακρίβειά τους κατά ASME B89.4.22
(www.faro.com)

Πρόκειται για ένα χειροκίνητο φορητό μετρητικό βραχίονα τελευταίας τεχνολογίας με έτος κατασκευής το 2007, που διαθέτει 7 βαθμούς ελευθερίας και διάμετρο εργοσφαιρας 2.4 m. Η ακρίβεια μέτρησης της απόστασης μπορεί να φτάσει τα 0.030 mm (κατά ASME B89.4.22). Είναι αρκετά ελαφρύ καθώς ζυγίζει μόνο 9.75 kg, κάτι που το κάνει πολύ εύκολο στην μεταφορά. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή μπορεί να λειτουργεί σε θερμοκρασίες από +10 C έως +40 C και σε εύρος υγρασίας από 0% ως 95% ώστε να εξασφαλίζεται η απουσία υδρατμών.

Ο Faro Platinum Arm αξιοποιεί ειδικούς υψηλής ανάλυσης μετατροπείς (*rotary transducers*) οι οποίοι μέσω διαδοχικών μετασχηματισμών του συστήματος συντεταγμένων των επιμέρους τμημάτων του, υπολογίζει τις τρισδιάστατες συντεταγμένες της μετρητικής κεφαλής. Ο τρόπος λειτουργίας της εν λόγω CMM, απαιτεί από τον χρήστη την μετακίνηση της κεφαλής μέτρησης χειροκίνητα (π.χ. την ακίδα επαφής) ώστε να ακουμπήσει το σημείο που θέλει να μετρήσει ή να αντιγράψει.

Ο αρθρωτός βραχίονας, αποτελείται από τρία στελέχη και στερεώνεται σε σταθερή βάση. Οι τρεις αυτοί σωλήνες είναι κατασκευασμένοι από ανθρακονήματα και ενώνονται με συνδέσμους οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από υψηλής ποιότητας ρουλεμάν με σκοπό να διασφαλιστεί η περιστροφή 360 μοιρών γύρω από τον άξονα. Κάθε σύνδεσμος διαθέτει ένα γωνιακό κωδικοποιητή μεγάλης ακριβείας ώστε να μετρίεται η απόλυτη γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους οι άξονες. Διαθέτει 7 άξονες οι οποίοι καταλήγουν σε μια σταθερή βάση η οποία μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα και γρήγορα πάνω σε ένα τρίποδα, σε ένα σταθερό τραπέζι ή ακόμα και πάνω στο ίδιο το αντικείμενο που πρόκειται να μετρηθεί.

Ο αισθητήρας λήψης που είναι υπεύθυνος για την μέτρηση των σημείων βρίσκεται στην άκρη του τελευταίου στελέχους. Σαν αισθητήρα λήψης ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει στο συγκεκριμένο μοντέλο είτε κεφαλή σημειακών μετρήσεων, δηλαδή ακίδα επαφής, είτε κεφαλή σάρωσης (Laser Scanning) είτε κεφαλή ελέγχου και αντιγραφής.

Ενδείκνυται ο συνδυασμός του Faro Platinum Arm με την κεφαλή σάρωσης Faro Laser Line Probe, που είναι τύπου Laser, και είναι κατάλληλη για εφαρμογές αποτύπωσης αντικειμένων χωρίς επαφή όπως ο ποιοτικός/μετροτεχνικός έλεγχος, ο αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός (*reverse engineering*), η τρισδιάστατη μοντελοποίηση (3-D modelling) και η αντιπαραβολή νέφους σημείων με ονομαστική γεωμετρία μοντέλου CAD. Αυτός ο Laser αισθητήρας είναι προσαρτημένος στην απόληξη του βραχίονα και προσθέτει ένα επιπλέον βαθμό ελευθερίας στη CMM.

Συγκεντρωτικά, το εν λόγω μοντέλο μπορεί να συνδυαστεί με ακίδα επαφής, κεφαλή σάρωσης laser και την κεφαλή ελέγχου και αντιγραφής, όπως φαίνεται παρακάτω:

Σημειακοί αισθητήρες (ακίδα επαφής)	Κεφαλή σάρωσης Laser	Κεφαλή ελέγχου και αντιγραφής σωληνώσεων
		

Πίνακας 6.2: Τύποι αισθητήρων που συνδυάζονται με τον Faro Platinum Arm (www.faro.com)

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, η επαναληψιμότητα μιας μέτρησης σε μία σφαίρα είναι $\pm 0.036 \text{ mm}$ (κατά ASME B89.4.22). Η επαναληψιμότητα (repeatability) ή πιστότητα επαναληψιμότητας, εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση, περιγράφει την εγγύτητα των αποτελεσμάτων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, όταν εφαρμόζεται για μια σύντομη χρονική περίοδο η ίδια τιμή στην είσοδο του οργάνου (ίδιο μετρούμενο μέγεθος), διατηρώντας ταυτόχρονα σταθερές τις συνθήκες μέτρησης.

Τέλος η CMM Faro Platinum Arm- 2.4m - 7DoF μπορεί να επικοινωνεί μέσω θύρας USB με H/Y στον οποίο είναι εγκατεστημένο το κατάλληλο εξειδικευμένο λογισμικό. Έτσι όλα τα δεδομένα της μέτρησης μπορούν να αποθηκεύονται σε πραγματικό χρόνο στον H/Y. Στην εικόνα 6.8 απεικονίζεται ο Faro Platinum Arm και τα χαρακτηριστικά του.



Αισθητήρες θερμοκρασίας και ελέγχου

Εγκατεστημένοι σε κάθε άρθρωση, επιτρέπουν στο βραχίονα να "καταλαβαίνει" τυχόν μεταβολές της θερμοκρασίας και κακό χειρισμό, για μεγιστοποίηση της ακρίβειας

Λειτουργία Bluetooth

Ασύρματη λειτουργία έως και 10 μέτρα

Επιλογή λειτουργίας 7 αξόνων

Παρέχει έναν επιπρόσθετο άξονα περιστροφής για αισθητήρες χωρίς επαφή τύπου Laser

Εσωτερικός αντισταθμιστής

Ο εσωτερικός ανποταθμιστής συμβάλει στην άνετη και χωρίς πιέσεις χρήση του βραχίονα

Δυνατότητα πολλαπλών αισθητήρων

Συμπεριλαμβανομένων διαφόρων σφαιρών, υπερευαίσθητων αισθητήρων και επεκτάσεων

Παρατεταμένη διάρκεια μπαταρίας

Λειτουργία αδράνειας

Αυτόματη απενεργοποίηση για εξοικονόμηση ενέργειας

Εικόνα 6.8: Ο αρθρωτός βραχίονας Faro Platinum Arm

Τέλος, όλα τα όργανα της σειράς Faro Platinum Arm συνοδεύονται από τα εξής πιστοποιητικά και έχουν δοθεί από τον κατασκευαστή:

- CE compliance
- Directive 73/23/EEC, Low Voltage Directive
- Directive 93/68/EEC, (CE Marking)
- Directive 89/336/EEC, (EMC)
- FDA CDRH, Subchapter J of 21 CFR 1040.10
- Electrical Equipment for Measurement, Control & Lab Use
- EN 61010-1:2001, IEC 60825-1, EN 61326
- Electromagnetic Compatibility (EMC)
- EN 55011, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3
- EN 61000-4-4, EN 61000-4-5
- EN 61000-4-6, EN 61000-4-8, EN 61000-4-11

6.1.2α Παρελκόμενα CMM

- **Τρίποδας στήριξης**

Πρόκειται για κατασκευή με μεγάλο βάρος και έτσι είναι αρκετά σταθερός ώστε να αποφεύγονται τυχόν μετακινήσεις. Ο αρθρωτός βραχίονας προσαρμόζεται πολύ εύκολα μέσω κοχλίωσης που διαθέτει όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.9:

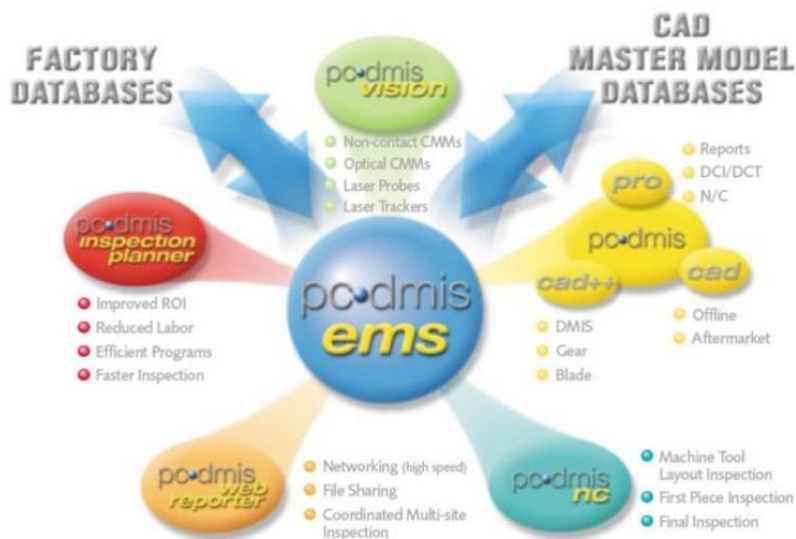


Εικόνα 6.9: Ο τρίποδας στήριξης του αρθρωτού βραχίονα

- **Φορητός υπολογιστής με εγκατεστημένο το λογισμικό Επεξεργασίας PcDmis**

Το λογισμικό μέτρησης με CMM και επεξεργασίας δεδομένων, PC-DMIS, είναι ένα παγκοσμίως αναγνωρίσιμο λογισμικό για χρήση CMM. Πρόκειται για ένα DCC λογισμικό, το οποίο προσφέρει και τη δυνατότητα της χειροκίνητης μέτρησης. Το συγκεκριμένο λογισμικό ήταν το πρώτο που εισήγαγε πολύ χρήσιμες καινοτομίες, όπως η χρησιμοποίηση μοντέλων CAD στον έλεγχο ποιότητας, η απευθείας σύνδεση συστημάτων CAD με το λογισμικό μέτρησης, η δημιουργία ολοκληρωμένου συστήματος ρουτινών μέτρησης εξαρτημάτων για την αυτοκινητοβιομηχανία, κ.α. Μπορεί να συνεργαστεί με τις Μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (σταθερές και φορητές), με Laser trackers, αλλά και με γεωδαιτικούς σταθμούς.

Το λογισμικό υπάρχει στη γενική του έκδοση, αλλά και σε ειδικότερες εκδόσεις, καθεμιά από τις οποίες εστιάζει στα αντικείμενα που πρόκειται να μετρηθούν με CMM, καθώς και στην απαιτούμενη επεξεργασία τους (π.χ. PC-DMIS Gear, PC-DMIS Tool, PC-DMIS Planner κ.α.).



Εικόνα 6.10: Διαφοροποιήσεις του λογισμικού PC-DMIS ανάλογα με την εφαρμογή

(Brown and Sharpe, 2003)

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική είναι το PC-DMIS v.2012 της Hexagon (Wilcox). Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στο ότι είναι διαπιστευμένο κατά ISO 10360-6 από το Γερμανικό Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) και το NIST (National Institute of Standards and Technology), σχετικά με την ακρίβεια στην προσαρμογή σημείων σε features (γεωμετρίες), μέσα από τους μαθηματικούς αλγόριθμους που διαθέτει.

Όσον αφορά το πρώτο πιστοποιητικό από το NIST, ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε σε 240 ζεύγη δεδομένων χρησιμοποιώντας την επίλυση των ελαχίστων τετραγώνων. Οι γεωμετρίες που ελέχθησαν ήταν οι εξής:

- Γραμμές
- Γραμμές 2-D
- Κύκλοι
- Κύκλοι 2-D
- Επίπεδα
- Σφαίρες
- Κύλινδροι
- Κώνοι

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS όλων των παραπάνω γεωμετριών:

Τύπος γεωμετρίας	Μέση τυπική απόκλιση (RMS)			
	Διαφορά (μm)	Tilt (arc sec)	Ακτίνα/Απόσταση (μm)	Κορυφή (arc sec)
Γραμμές	$< 10^{-5}$	$< 10^{-7}$	-	-
Γραμμές 2-D	$< 10^{-5}$	$< 10^{-7}$	-	-
Επίπεδα	$< 10^{-5}$	6×10^{-6}	-	-
Κύκλοι	4×10^{-5}	2.8×10^{-6}	3×10^{-5}	-
Κύκλοι 2-D	7×10^{-5}	2.2×10^{-6}	6×10^{-5}	-
Σφαίρες	2.5×10^{-4}	-	1×10^{-4}	-
Κύλινδροι	$< 10^{-5}$	1.7×10^{-4}	$< 10^{-5}$	-
Κώνοι	1.9×10^{-2}	2.4×10^{-1}	1×10^{-2}	4×10^{-2}

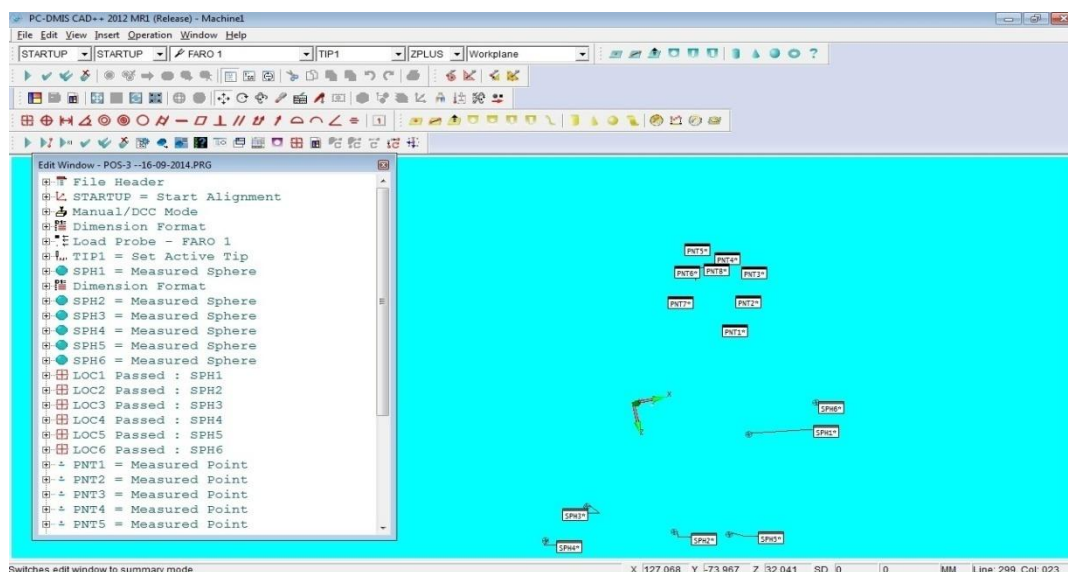
Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα μέσης τυπικής απόκλισης κατά ASME B89.4.10-2000 για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

Τύπος γεωμετρίας	Μέγιστες αποκλίσεις					
	Διαφορά (μm)	Tilt (arc sec)	Ακτίνα / Απόσταση under(μm)	Ακτίνα / Απόσταση over (μm)	Κορυφή under (arc sec)	Κορυφή over (arc sec)
Γραμμές	$< 10^{-5}$	$< 10^{-7}$	-	-	-	-
Γραμμές 2-D	$< 10^{-5}$	$< 10^{-7}$	-	-	-	-
Επίπεδα	$< 10^{-5}$	2.4×10^{-5} data set 18	-	-	-	-
Κύκλοι	1.8×10^{-4} data set 17	9.4×10^{-6} data set 24	5.2×10^{-5} data set 30	1.5×10^{-4} data set 17	-	-
Κύκλοι 2-D	3.6×10^{-4} data set 13	1.2×10^{-5} data set 14	3.2×10^{-4} data set 13	$< 10^{-5}$	-	-
Σφαίρες	8.2×10^{-4} data set 26	-	2.3×10^{-4} data set 25	3.6×10^{-4} data set 26	-	-
Κύλινδροι	4.4×10^{-5} data set 4	7.9×10^{-4} data set 24	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$	-	-
Κώνοι	9.8×10^{-2} data set 14	1.1×10^0 data set 14	5.6×10^{-2} data set 14	9.9×10^{-4} data set 20	2.1×10^{-1} data set 20	9.9×10^{-2} data set 14

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα μέγιστων αποκλίσεων κατά ASME B89.4.10-2000

Για το δεύτερο πιστοποιητικό από το PTB πραγματοποιήθηκε έλεγχος σε 44 πακέτα δεδομένων και έγινε για ευθείες, επίπεδα, κύκλους, κυλίνδρους, κώνους και σφαίρες. Η επίλυση έγινε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν πιστοποίησαν πως το λογισμικό έχει τη δυνατότητα να πετυχαίνει γραμμικές ακρίβειες καλύτερες του 0.1μm και γωνιακές ακρίβειες καλύτερες του 0.1”.

Η επιφάνεια εργασίας του λογισμικού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 6.11: Ο Η επιφάνεια εργασίας του λογισμικού PC-DMIS

Συνοψίζοντας, το λογισμικό PC-DMIS είναι σε θέση να προσφέρει εύκολο και γρήγορο καθορισμό της διαδικασίας μέτρησης (για απλές εφαρμογές μετρήσεων), όσο και πλήρη παραμετροποίηση της διαδικασίας και των παραγόντων της μέτρησης, για χρήση σε πολύπλοκα εξαρτήματα ή σε ερευνητικά προγράμματα .

6.2 Προπαρασκευαστικές Εργασίες

6.2.1 Εκμάθηση Λογισμικού AXYZ

Για την εκμάθηση του λογισμικού επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκε πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις. Σκοπός των μετρήσεων αυτών ήταν η εξοικείωση με το περιβάλλον και τις βασικές λειτουργίες του λογισμικού.

Οι στόχοι των σχετικών εργασιών ήταν δυο: πρώτον, η χρήση του υποπρογράμματος STM (*Single Theodolite Module*) του Axyz. Αυτό σημαίνει σύνδεση του οργάνου με τον H/Y και δυνατότητα εποπτείας και επεξεργασίας των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο στην οθόνη του H/Y. Δεύτερον, η επεξεργασία των μετρήσεων στο υποπρόγραμμα CDM (*Core Data Module*) και η εκτέλεση βασικών εντολών όπως βέλτιστη προσαρμογή γεωμετρικών σχημάτων (π.χ. κύκλος, επίπεδο) σε ομάδες μετρημένων σημείων.

Οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν στην αίθουσα Y23 του κτιρίου Λαμπαδαρίου της ΣΑΤΜ ΕΜΠ. Για τις ανάγκες των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός TDA5005 της εταιρείας Leica Geosystems, ένας αυτοκόλλητος ανακλαστικός στόχος και ένας H/Y με εγκατεστημένο το λογισμικό Axyz.

Προκειμένου να γίνει σωστά η σύνδεση του γεωδαιτικού σταθμού με το λογισμικό πρέπει αρχικά να ρυθμιστούν σωστά οι παράμετροι μέσα από τις επιλογές του οργάνου. Από τις κεντρικές επιλογές του οργάνου (main menu) πατώντας το F3 (επιλογή conf), μπορούν να ρυθμιστούν οι παράμετροι από την επιλογή GeoCOM Communication param., εισάγοντας την τιμή 4800 για το Band rate, και 8 για τα Data bits.



Εικόνα 6.12: Ορθογώνιο βάθρο στην αίθουσα Y23

Η πρώτη σειρά μετρήσεων περιελάμβανε την μέτρηση σημείων για τον προσδιορισμό ενός επιπέδου. Για τον ορισμό ενός επιπέδου απαιτούνται τουλάχιστον 3 σημεία, αλλά στην προκειμένη περίπτωση μετρήθηκαν 5 ώστε να υπάρχει πλεονασμός παρατηρήσεων. Τα σημεία που μετρήθηκαν ήταν τυχαία και ομοιόμορφα κατανομημένα στην επιφάνεια ενός ορθογώνιου βάθρου στην Υ23.

Τα στοιχεία που μετρήθηκαν ήταν η οριζόντια γωνία, η κατακόρυφη γωνία και η κεκλιμένη απόσταση από το όργανο προς το στόχο. Τα στοιχεία αυτά μεταφέρθηκαν στο CDM, όπου αυτόματα υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων οι 3Δ συντεταγμένες των σημείων (X, Y, Z) σε σύστημα αναφοράς με αρχή στο εσωτερικό του οργάνου. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε να γίνει βέλτιστη προσαρμογή επιπέδου στις συντεταγμένες αυτές. Η βέλτιστη προσαρμογή εκτελείται από το λογισμικό εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Υπάρχει η δυνατότητα να δοθούν βάρη στις παρατηρήσεις, κάτι που δεν έγινε στην περίπτωση αυτή καθώς οι μετρήσεις ήταν ισοβαρείς. Για τον υπολογισμό των προσωρινών συντεταγμένων του επιπέδου, επιλέχθηκε τυχαία να χρησιμοποιηθούν τα τρία πρώτα σημεία. Μετά την προσαρμογή οποιουδήποτε σχήματος, από το Axyz υπολογίζονται οι τυπικές αποκλίσεις κάθε συντεταγμένης κάθε σημείου από το επίπεδο που δημιουργήθηκε. Ακόμα υπολογίζεται το τυπικό σφάλμα (σ_δ) των αποκλίσεων που προκύπτει ως εξής:

$$\sigma_\delta = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_i)^2}{N}} \quad (6.7)$$

όπου, $\sum_{i=1}^N (\delta_i)^2$ το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων και N το πλήθος των παρατηρήσεων (15). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.5:

Σημείο	δX (mm)	δY (mm)	δZ (mm)
point1	0.000	0.000	-0.067
point2	0.000	0.000	-0.005
point3	0.000	0.000	0.012
point4	0.000	0.000	0.007
point5	0.000	0.000	0.053
	σ_δ	±0.039mm	

Πίνακας 6.5: Οι τυπικές αποκλίσεις των μετρημένων σημείων από το βέλτιστο επίπεδο

Τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά, καθώς οι αποκλίσεις δεν ξεπερνούν τα 0.050mm. Δεδομένου του πλήθους των σημείων (μόλις δύο περισσότερα από τα απαιτούμενα) και του στόχου που χρησιμοποιήθηκε (ο αυτοκόλλητος στόχος κρατήθηκε κατακόρυφος κατά προσέγγιση), η ακρίβεια της προσαρμογής είναι ικανοποιητική.

Η δεύτερη σειρά μετρήσεων περιελάμβανε την μέτρηση σημείων στην ακτίνα ενός κύκλου, και προσαρμογή ανάλογου σχήματος σε αυτά. Τα σημεία που απαιτούνται για τον ορισμό ενός κύκλου είναι τρία, συνεπώς μετρήθηκαν τέσσερα (point6 - point9) ώστε να υπάρχει πλεονασμός παρατηρήσεων. Σε περίπτωση που μετρηθούν μόνο τρία σημεία για τον ορισμό του κύκλου, το Axyz δίνει και πάλι λύση, αλλά δεν υπάρχει ένδειξη για την ακρίβεια της προσαρμογής. Τα σημεία που μετρήθηκαν ανήκαν στην περιφέρεια ενός βάθρου στην Υ23 που για τις εκπαιδευτικές ανάγκες

της εφαρμογής θεωρείται κυλινδρικό (βλ. εικόνα 6.13).



Εικόνα 6.13: Κυκλικό βάθρο στην αίθουσα Y23

Η διαδικασία συλλογής των δεδομένων ήταν ακριβώς ίδια με αυτή της προηγούμενης σειράς μετρήσεων. Τα σημεία που μετρήθηκαν μεταφέρθηκαν στο CDM και υπολογίστηκαν οι 3Δ συντεταγμένες τους στο σύστημα αναφοράς του TDA5005. Κατόπιν, δόθηκε εντολή προσαρμογής κύκλου στα τέσσερα μετρημένα σημεία. Για τον υπολογισμό των αρχικών τιμών χρησιμοποιήθηκαν τυχαία τα τρία πρώτα σημεία. Στον πίνακα 6.6 παρουσιάζονται οι τυπικές αποκλίσεις κάθε συντεταγμένης κάθε σημείου, όπως υπολογίστηκαν από το Axyz και το συνολικό τυπικό σφάλμα τους σ_δ .

Σημείο	δX (mm)	δY (mm)	δZ (mm)
point6	1.536	0.000	0.365
point7	0.653	-0.499	-0.204
point8	-0.883	-1.376	0.391
point9	1.297	1.860	-0.552
	σ_δ	$\pm 1.694\text{mm}$	

Πίνακας 6.6: Οι τυπικές αποκλίσεις των μετρημένων σημείων από το βέλτιστο κύκλο

Η ακρίβεια προσαρμογής του κύκλου δεν είναι το ίδιο καλή όπως αυτή προσαρμογής του επιπέδου, αλλά παραμένει σε υψηλά επίπεδα ($\sigma_\delta = \pm 1.694\text{mm}$). Η μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με πριν οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στο γεγονός πως ο στόχος τοποθετήθηκε σε σημεία στην περιφέρεια του κύκλου κατά προσέγγιση. Παράλληλα με τα παραπάνω, από το Axyz υπολογίζονται και άλλα στοιχεία, όπως οι συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου και η ακτίνα του. Τα σχήματα που δημιουργούνται υπάρχει η δυνατότητα να αποθηκευτούν στο Axyz ώστε να χρησιμοποιηθούν για άλλες εργασίες.

6.2.2 Εξοικείωση με τον αρθρωτό βραχίονα και το λογισμικό PcDmis - Διακρίβωση της σφαιρικότητας των πρισμάτων

Αρχικά έγινε ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας της σταθερής CMM στο Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Προτοτύπων – Εργαλείων και Αντίστροφου Σχεδιασμού (ΤΚΠ-Ε&ΑΣ), Σχολή

Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Πρόκειται για ΜΜΣ-ΤΓ τύπου Mistral 070705 (s/n 00808) του οίκου DEA – Brown & Sharpe Inc. με αβεβαιότητα μέτρησης για μικρές αποστάσεις 3-4 μm σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10360 – 2:

$$U3 (\mu\text{m}) = \text{MPEE} = 3 + L(\text{mm})/250 \text{ (Volumetric length measuring uncertainty)}$$

$$R (\mu\text{m}) = \text{MPEP} = 3 \text{ (Volumetric probing uncertainty)}$$

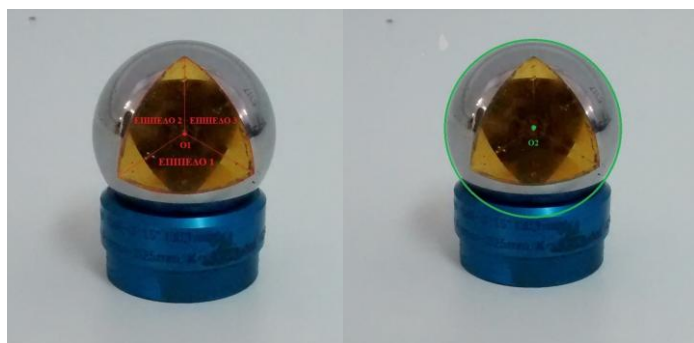
όπου, L (σε mm) η μετρούμενη διάσταση και U3, R (σε μm) η αβεβαιότητα στο χώρο μέτρησης, ανεξαρτήτως διευθύνσεως, κατά τη μέτρηση διαστάσεων και σφάλματος μορφής αντίστοιχα (Πιστοποιητικό διακρίβωσης MI808070705297 – DEA).

Για την καταγραφή των σημείων επαφής χρησιμοποιήθηκε η αυτόματη (motorized) κεφαλή τύπου PH10M (s/n L96618) του οίκου Renishaw Ltd. με απόληξη τύπου “ruby-ball tips” μήκους 20 mm και διαμέτρου 4mm. Η διαπίστωση του κέντρου της ακίδας έγινε με μετρήσεις στην επιφάνεια της σφαίρας του κυκλικού πρίσματος RRR1.5” – Red Ring Reflector.

Εφόσον εξασφαλίστηκε η ορθή χρήση της σταθερής CMM, έγιναν μετρήσεις στα δύο κυκλικά πρίσματα ώστε να διαπιστωθεί αν η γεωμετρία τους ανταποκρίνεται στην δοσμένη από τον κατασκευαστή ακρίβεια. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί πως η σταθερή ΜΜΣ αποδίδει καλύτερα όταν οι μετρήσεις γίνουν με προγραμματισμό και όχι χειροκίνητα καθώς ακόμα και η μεταβλητή ταχύτητα της ακίδας μπορεί να επηρεάσει στις τελικές ακρίβειες.

Η γεωμετρία του πρίσματος RRR1.5” (διάμετρος ίση με 1.5 ίντσες ή 38.1mm) ελέγχθηκε μετρώντας 29 φορές στην επιφάνεια της σφαίρας από την σταθερή CMM. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν πιστοποίησαν την διάμετρο ίση με 38.106mm ή 1.50025 ίντσες με το σφάλμα να υπολογίζεται στα 8 μm .

Το κέντρο του πρίσματος προκύπτει από την τομή των τριών κομμένων επιπέδων τα οποία συγκλίνουν και τέμνονται σε αυτό. Για να διαπιστωθεί κατά πόσο το κέντρο του πρίσματος που σχηματίζεται από την γεωμετρία της σφαίρας συμπίπτει με αυτό που σχηματίζουν τα τρία επίπεδα έγιναν επιπλέον μετρήσεις στο πρίσμα RRR. Συγκεκριμένα μετρήθηκαν τα τρία επίπεδα αυτά ξεχωριστά από την σταθερή CMM (δέκα μετρήσεις για το κάθε ένα) και ύστερα με την βοήθεια του λογισμικού υπολογίστηκε η τομή των τριών αυτών επιπέδων που είναι και το κέντρο της σφαίρας. Τα αποτελέσματα πιστοποίησαν την ορθή λειτουργία του πρίσματος, καθώς τα δύο κέντρα (O1 και O2) συμπίπτουν με ακρίβεια 2, 5 και 3 μm στους άξονες X, Y και Z αντίστοιχα.



Εικόνα 6.14: Κέντρο O1 που προκύπτει από την τομή των τριών επιπέδων (αριστερά) και κέντρο O2 που προκύπτει από το κέντρο του κύκλου (δεξιά)

Στη συνέχεια μέσω του λογισμικού ελέγχθηκε αν τα επίπεδα είναι ανά δύο κάθετα μεταξύ τους όπως και την επιπεδότητα της κάθε επιφάνειας. Στο παράρτημα φαίνονται όλες οι παραπάνω μετρήσεις και τα αποτελέσματά τους όπως έχουν προκύψει από το λογισμικό PCDMIS.

Τέλος, ελέγχθηκε το πρίσμα CCR ακολουθώντας την διαδικασία λήψης μετρήσεων στην περιφέρεια του κύκλου όπως παραπάνω. Τα αποτελέσματα κρίθηκαν απολύτως ικανοποιητικά καθώς η διάμετρος υπολογίστηκε στις 1.501 ίντσες με το σφάλμα στα 0.011mm.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο εν λόγω χώρος είναι επίσης ελεγχόμενος από πλευράς δονήσεων, υγρασίας, σκόνης κ.α. παραγόντων που επηρεάζουν την διευρυμένη αβεβαιότητα των μετρητικών αποτελεσμάτων.

Μετά τον έλεγχο των πρισμάτων, έγινε η σύνδεση του αρθρωτού βραχίονα με το λογισμικό PcDmis. Αφού ορίστηκε η ακίδα στο πρόγραμμα στα 6 mm, πάρθηκαν κάποιες τυχαίες μετρήσεις σε ένα επίπεδο. Οι συντεταγμένες του κάθε σημείου καταγραφόντουσαν αυτόματα στο πρόγραμμα και εμφανιζόντουσαν στην οθόνη. Ο αρθρωτός βραχίονας θεωρήθηκε αρκετά εύχρηστος στην διαδικασία των μετρήσεων καθώς με το πάτημα ενός κουμπιού στη λαβή κατέγραφε τις συντεταγμένες της ακίδας. Λόγω χρονικών περιορισμών δεν έγινε περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ- ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

7.1 Διαμόρφωση πειραματικής διάταξης και διεξαγωγή μετρήσεων

Οι μετρήσεις λάβανε χώρα στην αίθουσα Υ23 του κτιρίου Λαμπαδαρίου της ΣΑΤΜ ΕΜΠ. Ο στόχος της πειραματικής εφαρμογής είναι να εξεταστεί η δυνατότητα χρήσης του πρίσματος CCR ως μέσο σύνδεσης των δύο εξοπλισμών (ΓΣ και ΜΜΣ-ΦΒ).

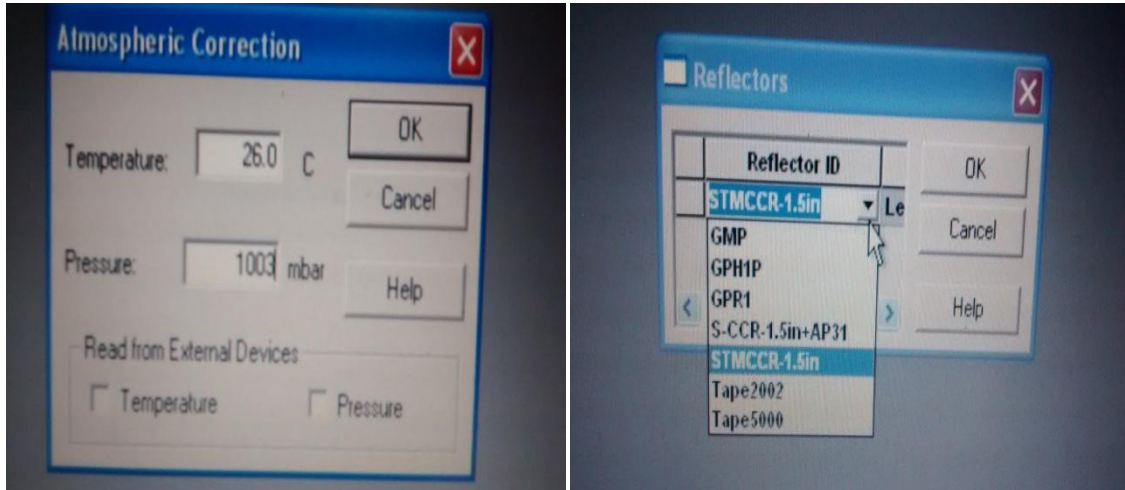
Για αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ο εξής εξοπλισμός:

- Ένας γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005
- Δύο τρίποδες βιομηχανικής γεωδαισίας
- Μεταλλική ιδιοκατασκευή (εξάρτημα θεοδολίχου)
- Ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής εφοδιασμένος με το λογισμικό Leica Axyz v1.4.3 για την σύνδεσή του με το γεωδαιτικό σταθμό.
- Ο αρθρωτός βραχίονας Faro Platinum Arm
- Τρίποδας στήριξης για το αρθρωτό βραχίονα
- Ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής εφοδιασμένος με το λογισμικό PcDmis για την σύνδεσή του με τον αρθρωτό βραχίονα.
- Τα κατάλληλα καλώδια ώστε να συνδεθεί ο κάθε υπολογιστής με το αντίστοιχο όργανο
- Ένας στόχος CCR 1.5in. και μία βάση στόχου.

Αρχικά τοποθετήθηκε και οριζοντιώθηκε ο γεωδαιτικός σταθμός πάνω στον ειδικό τρίποδα βιομηχανικής γεωδαισίας, ο οποίος είναι πιο βαρύς και με σταθερό άνοιγμα των ποδιών του, ώστε να παραμένει σταθερός κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Δίπλα του τοποθετήθηκε ο φορητός υπολογιστής με εγκατεστημένο το λογισμικό επεξεργασίας Leica Axyz v1.4.3 και συνδέθηκε με το κατάλληλο καλώδιο. Στη συνέχεια επιλέγεται από το μενού του γεωδαιτικού σταθμού η επιλογή Axyz και ύστερα γίνεται η εκκίνηση του προγράμματος από τον φορητό υπολογιστή και μέσα από αυτό του υποπρογράμματος STM (*Single Theodolite Module*).

Η σύνδεση του οργάνου με το λογισμικό γίνεται μέσα από την επιλογή “Station” του παραθύρου επιλογών “Setup” οπου ορίζονται οι παράμετροι. Στο παράθυρο “atmospheric correction” εισάγονται οι τιμές θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.1. Επίσης στο παράθυρο “Reflectors” επιλέγεται το πρίσμα STMCCR-1.5in. Έτσι με την

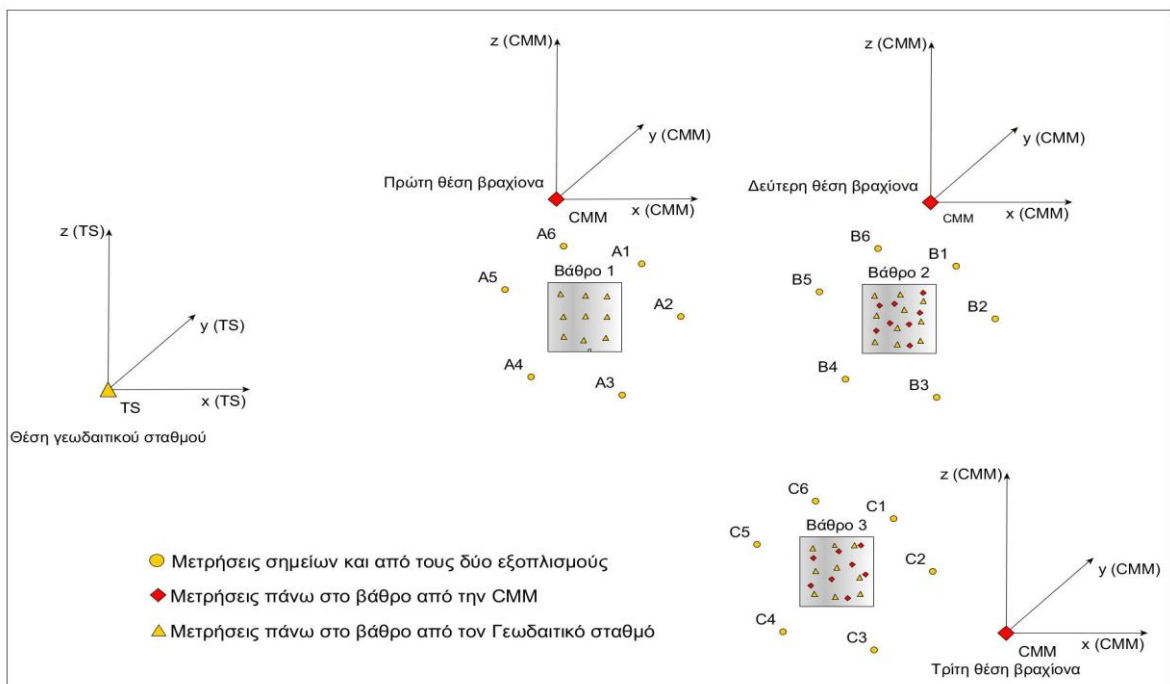
ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, το όργανο έχει επιτυχώς συνδεθεί με το λογισμικό.



Εικόνα 7.1: Εισαγωγή παραμέτρων στο Axyz

Ο αρθρωτός βραχίονας Faro Platinum Arm τοποθετήθηκε στον ειδικό τρίποδα στήριξης για να παραμένει σταθερός κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Κοντά του τοποθετήθηκε ο φορητός υπολογιστής με εγκατεστημένο το λογισμικό επεξεργασίας PcDmis και συνδέθηκε με το κατάλληλο καλώδιο. Στη συνέχεια έγινε η έναρξη του προγράμματος και ορίστηκε η ακίδα στα 6 mm.

Η πειραματική εφαρμογή εξετάζει κατά πόσο το πρίσμα CCR μπορεί να λειτουργήσει ως μέσο διασύνδεσης του γεωδαιτικού σταθμού με τον αρθρωτό βραχίονα. Για τον σκοπό αυτό εξετάστηκαν τρεις θέσεις για τον αρθρωτό βραχίονα, ενώ ο γεωδαιτικός σταθμός παρέμεινε ακλόνητος. Οι μετρήσεις έγιναν χρησιμοποιώντας το πρίσμα CCR ώστε τα δύο όργανα να είναι σε θέση να μετρήσουν το ίδιο σημείο.



Σχήμα 7.1: Η διάταξη της πειραματικής εφαρμογής

α) Πρώτη θέση βραχίονα

Με την επιτυχημένη σύνδεση του κάθε οργάνου με τον αντίστοιχο φορητό υπολογιστή γίνεται η έναρξη των μετρήσεων της πειραματικής εφαρμογής. Το πρίσμα CCR τοποθετείται πάνω στην μαγνητική του βάση και όλο αυτό σε μία μεταλλική κατασκευή που αποτελεί εξάρτημα ενός θεοδολίχου. Το εξάρτημα αυτό βιδώνεται σε ένα βιομηχανικό τρίποδα που θα εξασφαλίσει την σταθερότητά του κατά την διάρκεια των μετρήσεων, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 7.2: Το πρίσμα CCR τοποθετημένο στη θέση παρατήρησης

Οι μετρήσεις θα γίνουν και από τα δύο όργανα για έξι θέσεις του πρίσματος μέσα στον χώρο, σχηματίζοντας έτσι ένα νοητό εξάπλευρο.



Εικόνα 7.3: Διάταξη γεωδαιτικού σταθμού, αρθρωτού βραχίονα και πρίσματος CCR για την πρώτη θέση του βραχίονα

Για την πρώτη θέση του πρίσματος, αρχικά έγινε η μέτρηση από τον γεωδαιτικό σταθμό. Η στόχευση έγινε στο κέντρο του πρίσματος και σε δύο περιόδους για καλύτερα αποτελέσματα. Μετρήθηκαν οι τιμές της οριζόντιας γωνίας, της κατακόρυφης γωνίας και της κεκλιμένης απόστασης. Οι συνταγμένες του κέντρου του πρίσματος υπολογίστηκαν κατευθείαν από το πρόγραμμα Axyz που είναι συνδεδεμένο το όργανο. Ύστερα χωρίς να αλλάξει θέση το πρίσμα, έγιναν οι μετρήσεις από τον αρθρωτό φορητό βραχίονα για να υπολογιστούν οι συντεταγμένες του ίδιο σημείου. Για να γίνει αυτό ο βραχίονας μέτρησε περιμετρικά του κυκλικού πρίσματος καταγράφοντας τις συντεταγμένες δέκα περίπου σημείων, ώστε να εξασφαλιστεί απαραίτητος βαθμός ελευθερίας. Με γνωστή την γεωμετρία του πρίσματος (κύκλος με ακρίβεια $\pm 0.015\text{mm}$) κάνοντας συνόρθωση μπορούν να υπολογιστούν οι συντεταγμένες του κέντρου του πρίσματος. Οι συντεταγμένες αυτές υπολογίστηκαν απευθείας από το λογισμικό PcDmis, συνοδευόμενες και από τα σφάλματά τους.

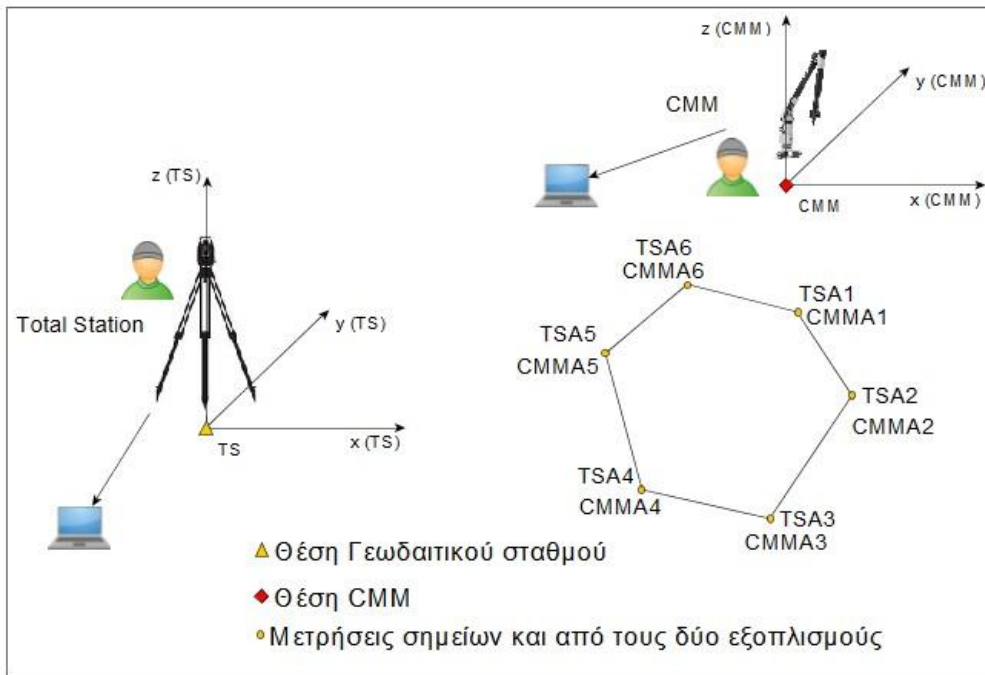
Η παραπάνω μεθοδολογία επαναλήφθηκε και για τις άλλες πέντε θέσεις του πρίσματος μέσα στο χώρο, σχηματίζοντας έτσι ένα νοητό εξάπλευρο (σχήμα 7.2) ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία. Τα αποτελέσματα των συντεταγμένων που προέκυψαν από τα δύο λογισμικά παρουσιάζονται παρακάτω.

Σημείο	Περίοδος	Hz(deg)	V(deg)	D(deg)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X (mm)	STD Y (mm)	STD Z (mm)
TSA1	I	235,000	88,782	5021,680	-4112,595	-2879,658	106,791	0.819	0.574	0.032
	II	55,001	271,216	5021,680	-4112,619	-2879,632	106,552	0.819	0.574	0.032
TSA2	I	241,523	90,560	4295,270	-3775,397	-2047,917	-41,964	0.879	0.477	0.023
	II	61,523	269,438	4295,270	-3775,412	-2047,884	-42,155	0.879	0.477	0.023
TSA3	II	51,976	269,526	5175,680	-4077,025	-3188,055	-42,855	0.788	0.616	0.026
	I	231,976	90,472	5175,680	-4077,043	-3188,036	-42,599	0.788	0.616	0.026
TSA4	I	216,606	91,404	4112,870	-2451,820	-3300,625	-100,748	0.596	0.803	0.032
	II	36,607	268,594	4112,870	-2451,833	-3300,610	-100,930	0.596	0.803	0.032
TSA5	I	227,794	91,698	3365,750	-2492,036	-2260,107	-99,728	0.740	0.672	0.034
	II	47,794	268,300	3365,750	-2492,024	-2260,114	-99,872	0.740	0.672	0.034
TSA6	I	237,502	89,393	4077,670	-3438,948	-2190,699	43,199	0.843	0.538	0.022
	II	57,502	270,605	4077,670	-3438,954	-2190,694	43,018	0.843	0.538	0.022

Πίνακας 7.1: Τα μετρούμενα στοιχεία από τον γεωδαιτικό σταθμό που προέκυψαν από το Axyz για την πρώτη σειρά μετρήσεων

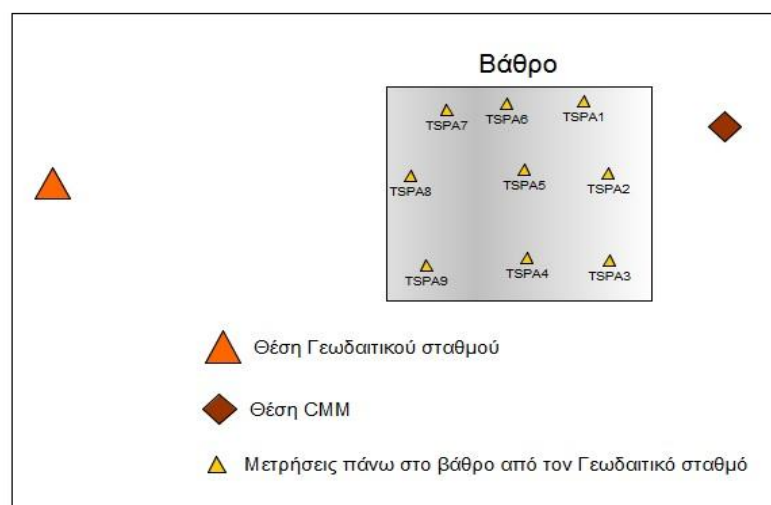
Σημείο	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X (mm)	STD Y (mm)	STD Z (mm)
CMMA1	-306,113	623,317	-768,796	0,030	0,030	0,030
CMMA2	580,530	498,281	-928,109	0,030	0,030	0,030
CMMA3	-544,426	465,986	-575,946	0,030	0,030	0,030
CMMA4	227,706	414,108	859,091	0,030	0,030	0,030
CMMA5	1086,157	442,233	270,735	0,030	0,030	0,030
CMMA6	636,596	581,333	-566,442	0,030	0,030	0,030

Πίνακας 7.2: Τα μετρούμενα στοιχεία από τον φορητό βραχίονα που προέκυψαν από το PcDmis για την πρώτη σειρά μετρήσεων



Σχήμα 7.2: Απεικόνιση του νοητού εξαπλεύρου από κοινές μετρήσεις έξι σημείων

Ύστερα χωρίς να μετακινηθεί κανένα όργανο από τη θέση σου, έγιναν μετρήσεις στο κοντινό ορθογώνιο βάθρο το οποίο η γεωμετρία του προσομοιάζεται με ένα επίπεδο. Το πρίσμα διαχωρίστηκε από την μεταλλική ιδιοκατασκευή (εξάρτημα θεοδολίχου) και χωρίς να χρησιμοποιηθεί ο βιομηχανικός τρίποδας τοποθετήθηκε μαζί με τη μαγνητική του βάση επάνω στο ορθογώνιο βάθρο. Για να εξασφαλιστεί ο απαραίτητος βαθμός ελευθερίας μετέπειτα στην επίλυση του επιπέδου, το πρίσμα μετρήθηκε από τον γεωδαιτικό σταθμό για εννιά θέσεις πάνω στο ορθογώνιο βάθρο. Οι μετρήσεις έγιναν στο κέντρο του πρίσματος και για μία περίοδο. Μετρήθηκαν η οριζόντια γωνία, η κατακόρυφη γωνία και η κεκλιμένη απόσταση. Έτσι με την βοήθεια του λογισμικού Axyz προέκυψαν οι συντεταγμένες των εννιά σημείων με τα σφάλματά τους που ανήκουν όλα επάνω στο επίπεδο του ορθογώνιου βάθρου.



Σχήμα 7.3: Οι θέσεις των σημείων πάνω στο βάθρο μετρημένα από το γεωδαιτικό σταθμό

Για την εξαγωγή της γεωμετρικής επιφάνειας του επιπέδου μέσω μετρήσεων από τον αρθρωτό βραχίονα, δεν χρησιμοποιήθηκε το πρίσμα CCR. Οι μετρήσεις έγιναν κατευθείαν πάνω στο επίπεδο, μετρώντας τις συντεταγμένες οχτώ σημείων και τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν από το λογισμικό PcDmis. Λόγω χρονικών περιορισμών, παραλήφθηκε η μέτρηση του συγκεκριμένου επιπέδου από τον αρθρωτό βραχίονα και η συγκεκριμένη διαδικασία έγινε μόνο για τις επόμενες δύο βάσεις.

Οι τιμές των συντεταγμένων των μετρούμενων σημείων από τον γεωδαιτικό σταθμό συνοδευόμενα από τα σφάλματά τους φαίνονται παρακάτω:

Σημείο	Περίοδος	Hz(deg)	V(deg)	D(deg)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X (mm)	STD Y (mm)	STD Z (mm)
TSPA1	I	234,599	101,319	3774,060	-3016,469	-2143,766	-740,750	0.799	0.568	0.197
TSPA2	I	237,710	101,492	3722,560	-3083,783	-1948,756	-741,676	0.828	0.524	0.200
TSPA3	I	240,707	101,653	3676,160	-3139,993	-1761,616	-742,497	0.854	0.479	0.203
TSPA4	I	239,948	102,130	3535,060	-2991,526	-1730,786	-742,834	0.846	0.490	0.211
TSPA5	I	238,274	102,555	3416,960	-2836,857	-1753,894	-742,773	0.830	0.513	0.218
TSPA6	I	235,857	102,245	3498,360	-2829,510	-1918,817	-741,981	0.809	0.549	0.213
TSPA7	I	233,111	102,096	3538,160	-2767,007	-2076,667	-741,419	0.782	0.587	0.210
TSPA8	I	232,428	102,659	3383,650	-2616,639	-2013,059	-741,540	0.773	0.595	0.220
TSPA9	I	235,338	102,674	3382,350	-2714,266	-1876,789	-742,100	0.803	0.555	0.220

Πίνακας 7.3: Τα μετρούμενα στοιχεία από το γεωδαιτικό σταθμό για το ορθογώνιο βάθρο που προέκυψαν από το Axxyz για την πρώτη σειρά μετρήσεων

β) Δεύτερη θέση βραχίονα

Για την δεύτερη σειρά των μετρήσεων, μετακινήθηκε ο αρθρωτός βραχίονας σε καινούργια θέση, ενώ ο γεωδαιτικός σταθμός έμεινε ακλόνητος. Προκειμένου να γίνει ένας σχετικός έλεγχος επαναληψιμότητας της διαδικασίας και μετέπειτα συγκρίσεων που θα παρουσιαστούν παρακάτω, η μεθοδολογία των μετρήσεων που ακολουθήθηκε ήταν ακριβώς η ίδια όπως περιγράφηκε ακριβώς για την πρώτη θέση βραχίονα.

Οι τιμές των συντεταγμένων των μετρούμενων σημείων από τους δύο εξοπλισμούς συνοδευόμενα από τα σφάλματά τους φαίνονται παρακάτω:

Σημείο	Περίοδος	Hz(deg)	V(deg)	D(deg)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X (mm)	STD Y (mm)	STD Z (mm)
TSB1	I	240,219	89,716	9771,360	-8480,758	-4853,233	48,388	0.868	0.498	0.048
	II	60,219	270,281	9771,360	-8480,766	-4853,224	47,973	0.868	0.498	0.048
TSB2	I	243,794	89,730	10564,570	-9478,588	-4665,194	49,705	0.897	0.444	0.051
	II	63,794	270,267	10564,570	-9478,571	-4665,234	49,182	0.897	0.444	0.051
TSB3	II	242,747	90,362	11076,480	-9846,695	-5072,092	-69,893	0.889	0.460	0.054
	I	62,747	269,636	11076,480	-9846,720	-5072,038	-70,315	0.889	0.460	0.054
TSB4	I	238,243	90,728	11228,680	-9546,881	-5909,310	-142,726	0.851	0.528	0.056
	II	58,243	269,270	11228,680	-9546,857	-5909,341	-143,051	0.851	0.528	0.056
TSB5	I	237,317	90,770	10649,070	-8962,181	-5749,915	-143,105	0.842	0.542	0.053
	II	57,317	269,228	10648,970	-8962,065	-5749,902	-143,453	0.842	0.542	0.053
TSB6	I	239,050	90,888	9728,260	-8342,128	-5002,519	-150,826	0.858	0.516	0.050
	II	59,050	269,109	9728,160	-8342,040	-5002,458	-151,266	0.858	0.516	0.050

Πίνακας 7.4: Τα μετρούμενα στοιχεία από τον γεωδαιτικό σταθμό που προέκυψαν από το Axxyz για την δεύτερη σειρά μετρήσεων

Σημείο	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X (mm)	STD Y (mm)	STD Z (mm)
CMMB1	825,250	575,040	148,942	0,030	0,030	0,030
CMMB2	76,427	569,579	-521,036	0,030	0,030	0,030
CMMB3	-448,937	436,416	-374,128	0,030	0,030	0,030
CMMB4	-638,839	348,134	493,234	0,030	0,030	0,030
CMMB5	-58,167	358,235	669,810	0,030	0,030	0,030
CMMB6	863,625	375,393	366,178	0,030	0,030	0,030

Πίνακας 7.5: Τα μετρούμενα στοιχεία από τον φορητό βραχίονα που προέκυψαν από το PcDmis για την δεύτερη σειρά μετρήσεων

Σημείο	Περίοδος	Hz(deg)	V(deg)	D(deg)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X (mm)	STD Y (mm)	STD Z (mm)
TSPB1	I	244,043	94,193	10111,160	-9066,809	-4413,846	-739,249	0.897	0.439	0.088
TSPB2	I	245,191	94,193	10107,660	-9150,249	-4229,837	-739,067	0.906	0.421	0.088
TSPB3	I	246,248	94,200	10096,960	-9216,892	-4055,943	-739,474	0.913	0.404	0.088
TSPB4	I	246,142	94,257	9951,960	-9076,461	-4014,175	-738,758	0.912	0.406	0.088
TSPB5	I	245,205	94,269	9927,560	-8987,365	-4151,814	-739,025	0.906	0.420	0.089
TSPB6	I	243,865	94,261	9937,960	-8897,240	-4365,432	-738,364	0.896	0.441	0.088
TSPB7	I	243,879	94,264	9938,060	-8898,369	-4363,276	-738,843	0.896	0.441	0.089
TSPB8	I	243,837	94,340	9748,660	-8724,781	-4286,057	-737,759	0.895	0.442	0.089
TSPB9	I	245,016	94,366	9696,460	-8763,601	-4083,604	-738,117	0.904	0.423	0.089
TSPB10	I	246,075	94,376	9680,960	-8823,364	-3914,523	-738,743	0.912	0.407	0.090

Πίνακας 7.6: Τα μετρούμενα στοιχεία από τον γεωδαιτικό σταθμό για το ορθογώνιο βάθρο που προέκυψαν από το Axyz για την δεύτερη σειρά μετρήσεων



Εικόνα 7.4: Μέτρηση στο ορθογώνιο βάθρο με τον αρθρωτό βραχίονα

Σημείο	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X (mm)	STD Y (mm)	STD Z (mm)
CMMPB1	985,954	-229,752	-415,136	0,030	0,030	0,030
CMMPB2	982,027	-228,543	-584,564	0,030	0,030	0,030
CMMPB3	888,587	-229,211	-764,631	0,030	0,030	0,030
CMMPB4	762,238	-231,123	-867,596	0,030	0,030	0,030
CMMPB5	632,740	-234,123	-866,418	0,030	0,030	0,030
CMMPB6	628,595	-235,615	-733,349	0,030	0,030	0,030
CMMPB7	597,120	-238,543	-546,085	0,030	0,030	0,030
CMMPB8	777,674	-233,276	-631,359	0,030	0,030	0,030

Πίνακας 7.7: Τα μετρούμενα στοιχεία από τον φορητό βραχίονα για το ορθογώνιο βάθρο που προέκυψαν από το PcDmis για την δεύτερη σειρά μετρήσεων



Σχήμα 7.4: Οι θέσεις των σημείων πάνω στο βάθρο μετρημένα από τους δύο εξοπλισμούς

γ) Τρίτη θέση βραχίονα

Σε αυτή την περίπτωση ο βραχίονας τοποθετήθηκε σε μία καινούργια αλλά δυσμενέστερη θέση (μεγαλύτερη απόσταση από τον γεωδαιτικό σταθμό), και ακολουθήθηκε και πάλι η ίδια μεθοδολογία όπως περιγράφηκε παραπάνω. Οι τιμές των συντεταγμένων των μετρούμενων

σημείων από τους δύο εξοπλισμούς συνοδευόμενα από τα σφάλματά τους φαίνονται παρακάτω:

Σημείο	Περίοδος	Hz(deg)	V(deg)	D(deg)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X (mm)	STD Y (mm)	STD Z (mm)
TSC1	I	264,725	90,717	12752,110	-12697,106	-1172,343	-159,466	0.996	0.111	0.063
	II	84,725	269,281	12752,110	-12697,104	-1172,275	-160,131	0.996	0.111	0.063
TSC2	I	261,206	90,710	12757,510	-12606,575	-1950,222	-158,021	0.988	0.165	0.063
	II	81,206	269,288	12757,410	-12606,476	-1950,161	-158,547	0.988	0.165	0.063
TSC3	II	260,638	90,676	13289,420	-13111,495	-2161,662	-156,859	0.987	0.175	0.065
	I	80,638	269,321	13289,420	-13111,497	-2161,608	-157,394	0.987	0.175	0.066
TSC4	I	259,248	90,088	13402,820	-13167,496	-2500,443	-20,683	0.983	0.197	0.065
	II	79,248	269,909	13402,820	-13167,489	-2500,473	-21,342	0.983	0.197	0.065
TSC5	I	261,916	90,098	12490,100	-12365,955	-1756,506	-21,326	0.990	0.153	0.061
	II	81,916	269,900	12490,100	-12365,962	-1756,449	-21,897	0.990	0.153	0.061
TSC6	I	266,585	90,937	12551,100	-12527,139	-747,516	-205,248	0.998	0.085	0.063
	II	86,585	269,060	12551,100	-12527,127	-747,537	-205,912	0.998	0.085	0.063

Πίνακας 7.8: Τα μετρούμενα στοιχεία από το γεωδαιτικό σταθμό που προέκυψαν από το Axyz για την τρίτη σειρά μετρήσεων

Σημείο	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X (mm)	STD Y (mm)	STD Z (mm)
CMMC1	580,024	366,407	323,632	0,030	0,030	0,030
CMMC2	17,936	348,009	869,402	0,030	0,030	0,030
CMMC3	-457,028	343,312	597,203	0,030	0,030	0,030
CMMC4	-762,677	470,598	761,798	0,030	0,030	0,030
CMMC5	315,220	489,538	944,552	0,030	0,030	0,030
CMMC6	1020,904	331,576	199,866	0,030	0,030	0,030

Πίνακας 7.9: Τα μετρούμενα στοιχεία από το φορητό βραχιόνα που προέκυψαν από το PcDmis για την τρίτη σειρά μετρήσεων

Σημείο	Περίοδος	Hz(deg)	V(deg)	D(deg)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X (mm)	STD Y (mm)	STD Z (mm)
TSPC1	I	266,673	93,166	13654,720	-13610,899	-791,311	-754,073	0.997	0.088	0.086
TSPC2	I	267,407	93,146	13716,620	-13681,925	-619,581	-752,797	0.997	0.080	0.086
TSPC3	I	268,146	93,130	13781,230	-13753,467	-445,133	-752,524	0.998	0.074	0.086
TSPC4	I	268,257	93,177	13600,120	-13572,935	-413,121	-753,677	0.998	0.072	0.086
TSPC5	I	267,500	93,187	13557,020	-13523,164	-590,484	-753,761	0.998	0.079	0.086
TSPC6	I	266,740	93,197	13502,020	-13459,187	-766,595	-753,103	0.997	0.086	0.086
TSPC7	I	267,060	93,247	13303,320	-13264,486	-681,143	-753,505	0.997	0.082	0.086
TSPC8	I	267,855	93,240	13341,120	-13310,462	-498,662	-753,935	0.998	0.075	0.086
TSPC9	I	268,491	93,222	13406,520	-13380,686	-352,450	-753,531	0.998	0.070	0.086

Πίνακας 7.10: Τα μετρούμενα στοιχεία από το γεωδαιτικό σταθμό για το ορθογώνιο βάθρο που προέκυψαν από το Axyz για την τρίτη σειρά μετρήσεων

Σημείο	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X (mm)	STD Y (mm)	STD Z (mm)
CMMPC1	660,899	-246,488	-381,748	0,030	0,030	0,030
CMMPC2	775,839	-241,553	-556,915	0,030	0,030	0,030
CMMPC3	848,182	-237,240	-740,808	0,030	0,030	0,030
CMMPC4	709,314	-238,056	-864,524	0,030	0,030	0,030
CMMPC5	545,637	-239,598	-958,412	0,030	0,030	0,030
CMMPC6	459,132	-243,559	-828,834	0,030	0,030	0,030
CMMPC7	377,664	-248,317	-637,890	0,030	0,030	0,030
CMMPC8	566,230	-243,592	-698,435	0,030	0,030	0,030

Πίνακας 7.11: Τα μετρούμενα στοιχεία από το φορητό βραχίονα για το ορθογώνιο βάθρο που προέκυψαν από το PcDmis για την τρίτη σειρά μετρήσεων

7.2 Επεξεργασία δεδομένων

7.2.1 Τελικές Συντεταγμένες

Οι μετρήσεις από το γεωδαιτικό σταθμό για τα σημεία έγιναν σε δύο περιόδους για μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι τελικές συντεταγμένες θα προκύψουν από το μέσο όρο, ενώ οι τελικές συντεταγμένες από τον αρθρωτό βραχίονα δεν θα υποστούν περεταίρω επεξεργασία. Οπότε οι τελικές συντεταγμένες προκύπτουν όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

		Γ.Σ.						CMM						
		X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X(mm)	STD Y(mm)	STD Z(mm)		X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X(mm)	STD Y(mm)	STD Z(mm)
A1	TSA1	-4112,607	-2879,645	106,672	0.819	0.574	0.032	CMMA1	-306,113	623,317	-768,796	0,030	0,030	0,030
A2	TSA2	-3775,405	-2047,901	-42,060	0.879	0.477	0.023	CMMA2	580,530	498,281	-928,109	0,030	0,030	0,030
A3	TSA3	-4077,034	-3188,046	-42,727	0.788	0.616	0.026	CMMA3	-544,426	465,986	-575,946	0,030	0,030	0,030
A4	TSA4	-2451,827	-3300,618	-100,839	0.596	0.803	0.032	CMMA4	227,706	414,108	859,091	0,030	0,030	0,030
A5	TSA5	-2492,030	-2260,111	-99,800	0.740	0.672	0.034	CMMA5	1086,157	442,233	270,735	0,030	0,030	0,030
A6	TSA6	-3438,951	-2190,697	43,109	0.843	0.538	0.022	CMMA6	636,596	581,333	-566,442	0,030	0,030	0,030
B1	TSB1	-8480,762	-4853,229	48,181	0.868	0.498	0.048	CMMB1	825,250	575,040	148,942	0,030	0,030	0,030
B2	TSB2	-9478,580	-4665,214	49,444	0.897	0.444	0.051	CMMB2	76,427	569,579	-521,036	0,030	0,030	0,030
B3	TSB3	-9846,708	-5072,065	-70,104	0.889	0.460	0.054	CMMB3	-448,937	436,416	-374,128	0,030	0,030	0,030
B4	TSB4	-9546,869	-5909,326	-142,889	0.851	0.528	0.056	CMMB4	-638,839	348,134	493,234	0,030	0,030	0,030
B5	TSB5	-8962,123	-5749,909	-143,279	0.842	0.542	0.053	CMMB5	-58,167	358,235	669,810	0,030	0,030	0,030
B6	TSB6	-8342,084	-5002,489	-151,046	0.858	0.516	0.050	CMMB6	863,625	375,393	366,178	0,030	0,030	0,030
C1	TSC1	-12697,105	-1172,309	-159,799	0.996	0.111	0.063	CMMC1	580,024	366,407	323,632	0,030	0,030	0,030
C2	TSC2	-12606,526	-1950,192	-158,284	0.988	0.165	0.063	CMMC2	17,936	348,009	869,402	0,030	0,030	0,030
C3	TSC3	-13111,496	-2161,635	-157,127	0.987	0.175	0.065	CMMC3	-457,028	343,312	597,203	0,030	0,030	0,030
C4	TSC4	-13167,493	-2500,458	-21,013	0.983	0.197	0.065	CMMC4	-762,677	470,598	761,798	0,030	0,030	0,030
C5	TSC5	-12365,959	-1756,478	-21,612	0.990	0.153	0.061	CMMC5	315,220	489,538	944,552	0,030	0,030	0,030
C6	TSC6	-12527,133	-747,527	-205,580	0.998	0.085	0.063	CMMC6	1020,904	331,576	199,866	0,030	0,030	0,030

Πίνακας 7.12: Οι τελικές συντεταγμένες των σημείων

Χρησιμοποιώντας το πρίσμα CCR ως μέσο διασύνδεσης των δύο εξοπλισμών, κατέστη δυνατό να μετρηθεί το ίδιο σημείο με δύο διαφορετικούς εξοπλισμούς. Ωστόσο το κάθε όργανο

μετρούσε στο δικό του σύστημα συντεταγμένων. Ο συσχετισμός μεταξύ τους θα γίνει βρίσκοντας τις παραμέτρους ενός μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων αυτών.

7.2.2 Μετασχηματισμοί συστημάτων αναφοράς

Υπάρχουν αρκετοί μαθηματικοί μετασχηματισμοί, που ο καθένας χρησιμοποιείται ανάλογα την περίπτωση. Ο 3D αφινικός μετασχηματισμός έχει συνήθως εννιά παραμέτρους οι οποίες είναι :

- 3 παράμετροι στροφών
- 3 παράμετροι κλίμακας
- 3 παράμετροι μετάθεσης

Το λογισμικό Axyz, μας δίνει την δυνατότητα να εφαρμόσουμε τους μετασχηματισμούς των έξι παραμέτρων (η κλίμακα δεν αλλοιώνεται και είναι ίση με την μονάδα) και των επτά παραμέτρων (υπάρχει ενιαίος συντελεστής κλίμακας διαφορετικός από την μονάδα). Οι δύο παραπάνω μετασχηματισμοί αποτελούν απλούστερες μορφές του 9-παραμετρικού αφινικού μετασχηματισμού, του οποίου το μαθηματικό μοντέλο αναλύεται στο παράρτημα και γίνεται ο προγραμματισμός του στη γλώσσα Matlab. Οι δύο μετασχηματισμοί αυτοί, θα γίνουν και για τις τρεις φάσεις των μετρήσεων (διαφορετική θέση βραχίονα).

Κάνοντας εκκίνηση στο πρόγραμμα Axyz ανοίγει το CDM (Core Data Module). Εκεί γίνονται οι γενικές ρυθμίσεις, οι μαθηματικοί υπολογισμοί και οι διάφορες εργασίες (γεωμετρικές προσαγωγές, διαχειρίσεις των συστημάτων αναφοράς, γεωμετρικοί υπολογισμοί), ενώ εκτελεί και τα «scripts» (αυτοματοποίηση και διαχωρισμός συγκεκριμένων σταθερών διαδικασιών σε βήματα). Στο υποπρόγραμμα αυτό, οι μαθηματικές διεργασίες που μπορούν να γίνουν υπάρχουν σαν εικονίδια στο μενού 1 και 2. Αυτές όπως εμφανίζονται στο Axyz είναι:

Μενού 1:



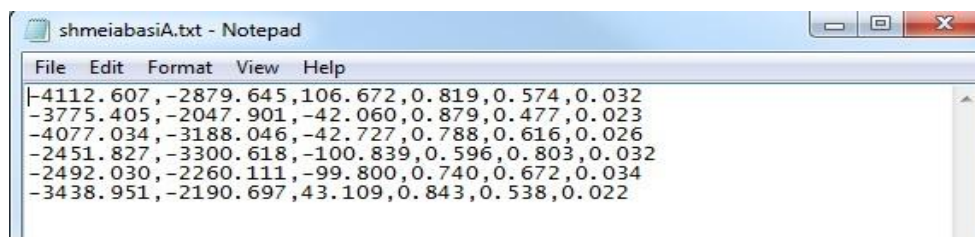
- Translation
- Scaling
- Rotation
- Axis Alignment
- **Best-Fit Transformation**
- Line Best-Fit
- **Plane Best-Fit**
- Circle Best-Fit
- Cylinder Best-Fit
- Sphere Best-Fit
- Cone Best-Fit
- Paraboloid Best-Fit

Στο Μενού 2 υπάρχουν οι επιλογές:



- Intersection
- Perpendicular Element
- Parallel Element
- Bisection
- Projection
- Hidden Point
- Divide Line
- Point Solution
- Compare Points
- Two Point
- Angle
- Distance
- Arc Distance

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τους μετασχηματισμούς στο πρόγραμμα Axyz ήταν καταρχάς να δοθεί ένα όνομα σε μία καινούργια εργασία (job), ώστε να ανοίξει το «Data Manager» (DM) που βρίσκεται σε άμεση συνεργασία με το CDM. Αυτό είναι υπεύθυνο για την διαχείριση της βάσης δεδομένων, δηλαδή εισάγονται και εξάγονται δεδομένα. Επιλέγοντας την εντολή import από το πλάγιο μενού, εισάγονται οι συντεταγμένες σε μορφή .txt για το ένα σύστημα αναφοράς (στην συγκεκριμένη περίπτωση για το σύστημα συντεταγμένων του γεωδαιτικού σταθμού). Οι συντεταγμένες εισάγονται σαν reference_in και η μορφή του αρχείου txt παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 7.5: Η μορφή του αρχείου txt για την εισαγωγή δεδομένων στο Axyz

Εφόσον εισαχθούν οι συντεταγμένες, επιλέγονται, και από το κεντρικό μενού η επιλογή tools → swap points → ok. Έτσι τα σημεία έχουν αντιγραφεί στο Work Piece στην καρτέλα DEFAULT. Ύστερα διαγράφονται από το Reference και εισάγονται πάλι με την εντολή import τα σημεία του άλλου συστήματος συντεταγμένων σαν Reference_in (στη συγκεκριμένη περίπτωση το σύστημα συντεταγμένων του αρθρωτού βραχίονα). Επιλέγοντας αυτά τα σημεία και πατώντας το εικονίδιο Best-Fit Transformation από το μενού 1, ανοίγει το παράθυρο του μετασχηματισμού με τα επιλεγμένα σημεία και δίνεται η επιλογή να συμπεριληφθεί η κλίμακα στην επίλυση (7-παραμετρικός μετασχηματισμός) ή να θεωρηθεί μονάδα (6-παραμετρικός μετασχηματισμός).

Επίσης δίνεται η επιλογή να αποκλειστούν κάποια σημεία, εάν δυσχεράνουν την επίλυση λόγω μεγάλου σφάλματος. Η διαδικασία ολοκληρώνεται πατώντας το εικονίδιο solve, και έτσι προκύπτουν οι παράμετροι του μετασχηματισμού και τα σφάλματα των συντεταγμένων. Τέλος ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στα ονόματα των συντεταγμένων που έχουν εισαχτεί από τα txt, καθώς κάθε κοινό σημείο στα δύο συστήματα πρέπει να έχει το ίδιο όνομα ώστε να το καταλάβει το λογισμικό και να το αντιστοιχίσει κατάλληλα.

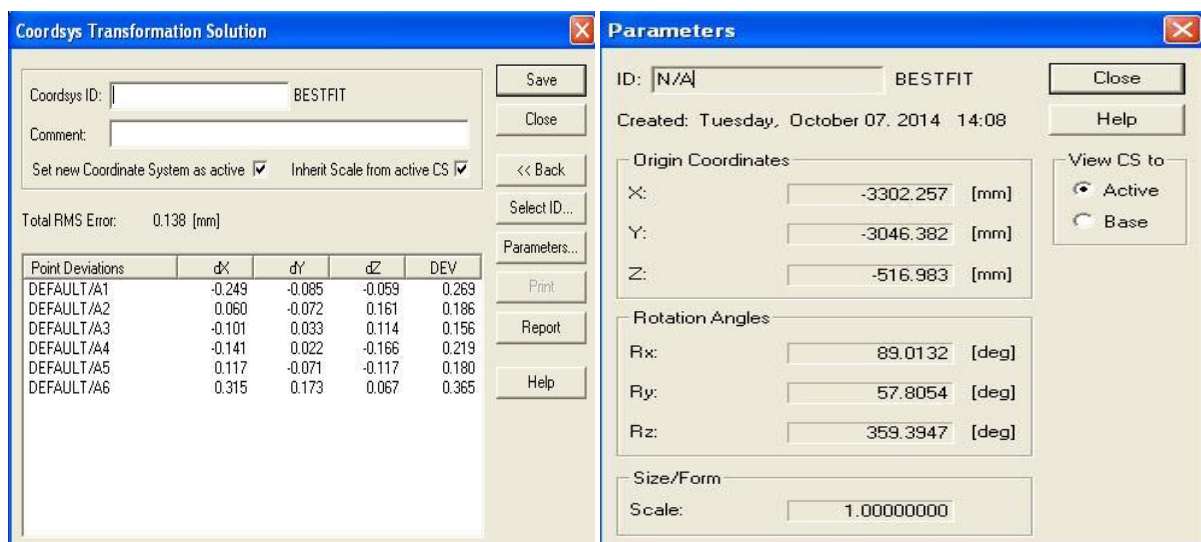
α) Πρώτη θέση βραχίονα

Για την πρώτη θέση του βραχίονα τα ζεύγη των συντεταγμένων για τα έξι μετρούμενα σημεία είναι τα παρακάτω όπως φαίνονται και στον πίνακα:

		Γ.Σ.						CMM						
		X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X(mm)	STD Y(mm)	STD Z(mm)		X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X(mm)	STD Y(mm)	STD Z(mm)
A1	TSA1	-4112,607	-2879,645	106,672	0.819	0.574	0.032	CMMA1	-306,113	623,317	-768,796	0,030	0,030	0,030
A2	TSA2	-3775,405	-2047,901	-42,060	0.879	0.477	0.023	CMMA2	580,530	498,281	-928,109	0,030	0,030	0,030
A3	TSA3	-4077,034	-3188,046	-42,727	0.788	0.616	0.026	CMMA3	-544,426	465,986	-575,946	0,030	0,030	0,030
A4	TSA4	-2451,827	-3300,618	-100,839	0.596	0.803	0.032	CMMA4	227,706	414,108	859,091	0,030	0,030	0,030
A5	TSA5	-2492,030	-2260,111	-99,800	0.740	0.672	0.034	CMMA5	1086,157	442,233	270,735	0,030	0,030	0,030
A6	TSA6	-3438,951	-2190,697	43,109	0.843	0.538	0.022	CMMA6	636,596	581,333	-566,442	0,030	0,030	0,030

Πίνακας 7.13: Οι τελικές συντεταγμένες των έξι κοινών σημείων στα δύο συστήματα αναφοράς

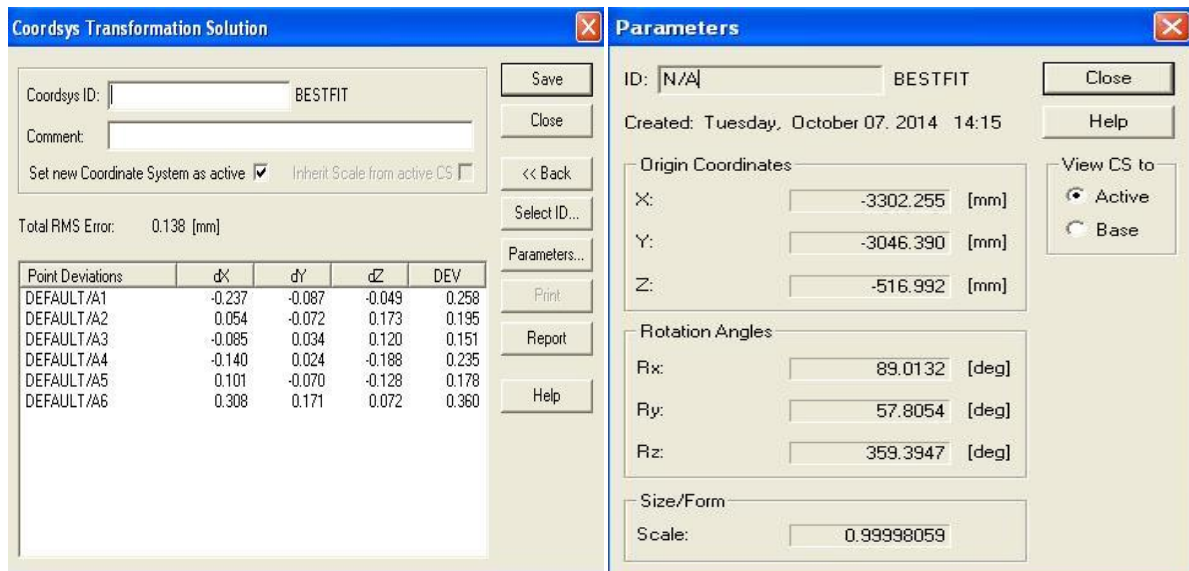
Ακολουθώντας τη διαδικασία όπως περιγράφηκε παραπάνω, θα γίνει ο μετασχηματισμός (6 και 7 παράμετροι) μεταξύ των κοινών σημείων για όλες τις σειρές των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα για την πρώτη θέση του βραχίονα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 7.6: Ο μετασχηματισμός έξι παραμέτρων για την πρώτη θέση του βραχίονα

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) είναι 0.138mm, το οποίο δηλώνει ότι η συνόρθωση έγινε επιτυχημένα, και πως το σύστημα του γεωδαιτικού σταθμού μπορεί να μετασχηματιστεί στο σύστημα του αρθρωτού φορητού βραχίονα χρησιμοποιώντας τις έξι παραμέτρους με υψηλή

ακρίβεια. Υπολογίστηκαν οι έξι παράμετροι του μετασχηματισμού, δηλαδή οι τρεις γωνίες στροφής (ω , ϕ , κ) και οι τρεις μεταθέσεις στους άξονες (d_x , d_y , d_z) καθώς και οι αποκλίσεις των συντεταγμένων (dX , dY , dZ). Στην συνέχεια εάν θεωρηθεί πως η κλίμακα μεταβάλλεται, πραγματοποιείται ο 7παραμετρικός μετασχηματισμός, ο οποίος όπως φαίνεται από τις παρακάτω εικόνες παρουσιάζει την ίδια ακρίβεια με τον 6παραμετρικό.



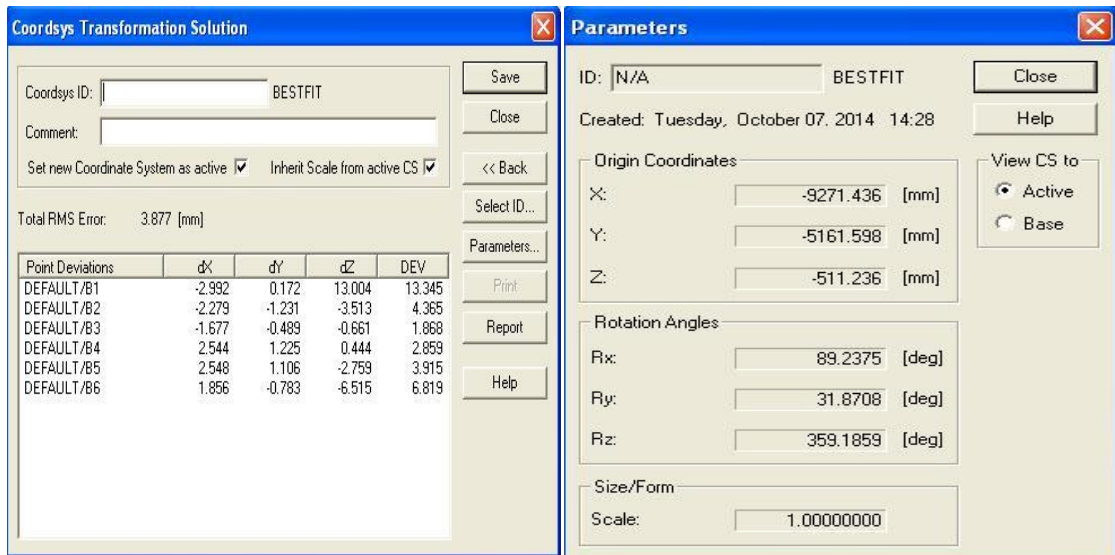
Εικόνα 7.7: Ο μετασχηματισμός επτά παραμέτρων για την πρώτη θέση του βραχίονα

β) Δεύτερη θέση βραχίονα

		Γ.Σ.						CMM						
		X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X(mm)	STD Y(mm)	STD Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X(mm)	STD Y(mm)	STD Z(mm)	
B1	TSB1	-8480,762	-4853,229	48,181	0.868	0.498	0.048	CMMB1	825,250	575,040	148,942	0,030	0,030	0,030
B2	TSB2	-9478,580	-4665,214	49,444	0.897	0.444	0.051	CMMB2	76,427	569,579	-521,036	0,030	0,030	0,030
B3	TSB3	-9846,708	-5072,065	-70,104	0.889	0.460	0.054	CMMB3	-448,937	436,416	-374,128	0,030	0,030	0,030
B4	TSB4	-9546,869	-5909,326	-142,889	0.851	0.528	0.056	CMMB4	-638,839	348,134	493,234	0,030	0,030	0,030
B5	TSB5	-8962,123	-5749,909	-143,279	0.842	0.542	0.053	CMMB5	-58,167	358,235	669,810	0,030	0,030	0,030
B6	TSB6	-8342,084	-5002,489	-151,046	0.858	0.516	0.050	CMMB6	863,625	375,393	366,178	0,030	0,030	0,030

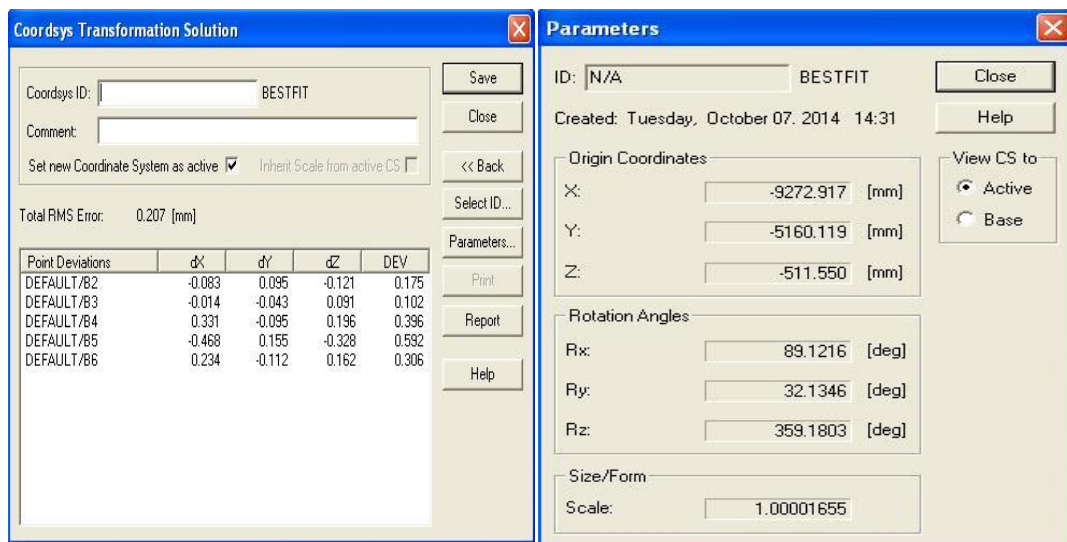
Πίνακας 7.14: Οι τελικές συντεταγμένες των έξι κοινών σημείων στα δύο συστήματα αναφοράς

Για την δεύτερη θέση του βραχίονα πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία κάνοντας αρχικά τον 6παραμετρικό μετασχηματισμό και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

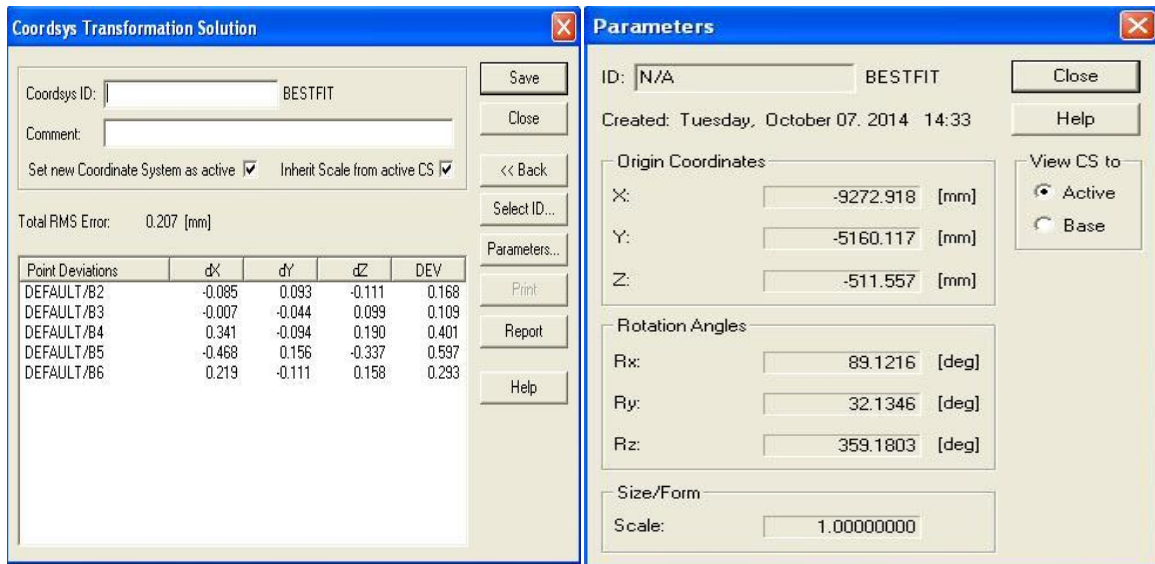


Εικόνα 7.8: Ο μετασχηματισμός έξι παραμέτρων για τη δεύτερη θέση του βραχίονα

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρήθηκε ότι το RMS πλησιάζει τα 4mm, που σημαίνει ότι ο μετασχηματισμός δε συνορθώθηκε με την ακρίβεια που αναμενόταν. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα, διαπιστώνεται πως το πρώτο σημείο παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση και σφάλμα στην συνιστώσα Z. Αυτό προέρχεται από κάποιο χονδροειδές σφάλμα στις μετρήσεις (πιθανώς λάθος σκόπευση). Το λογισμικό Axyz δίνει την δυνατότητα να αποκλείσουμε αυτό το σημείο από την συνόρθωση, και εκτελώντας την ξανά χωρίς το πρώτο σημείο καταλήγουμε σε RMS=0.207, που είναι αποδεκτό. Τα αποτελέσματα των δύο μετασχηματισμών παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 7.9: Ο μετασχηματισμός εφτά παραμέτρων για τη δεύτερη θέση του βραχίονα



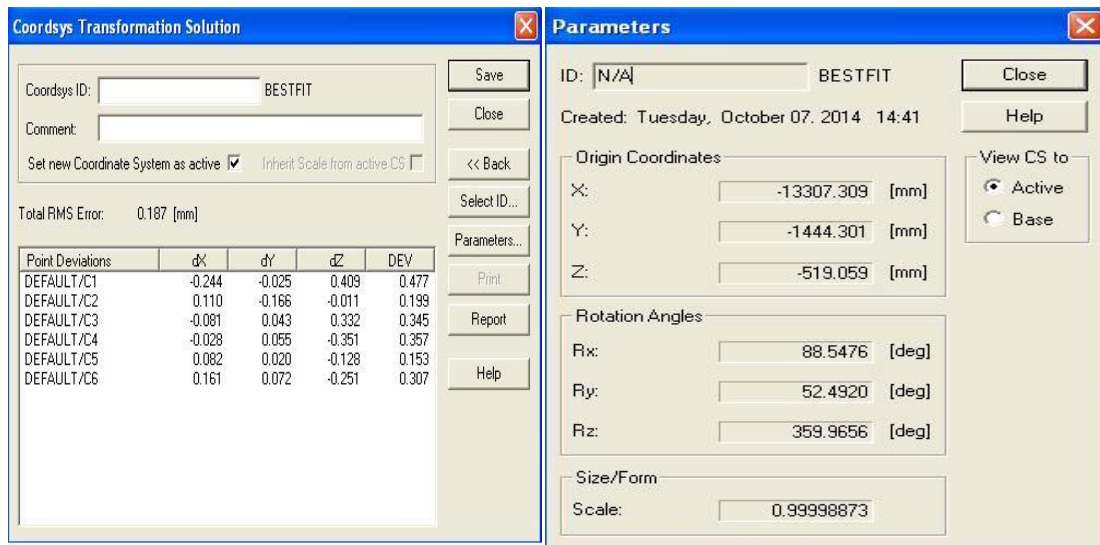
Εικόνα 7.10: Ο μετασχηματισμός έξι παραμέτρων για τη δεύτερη θέση του βραχίονα

γ) Τρίτη θέση βραχίονα

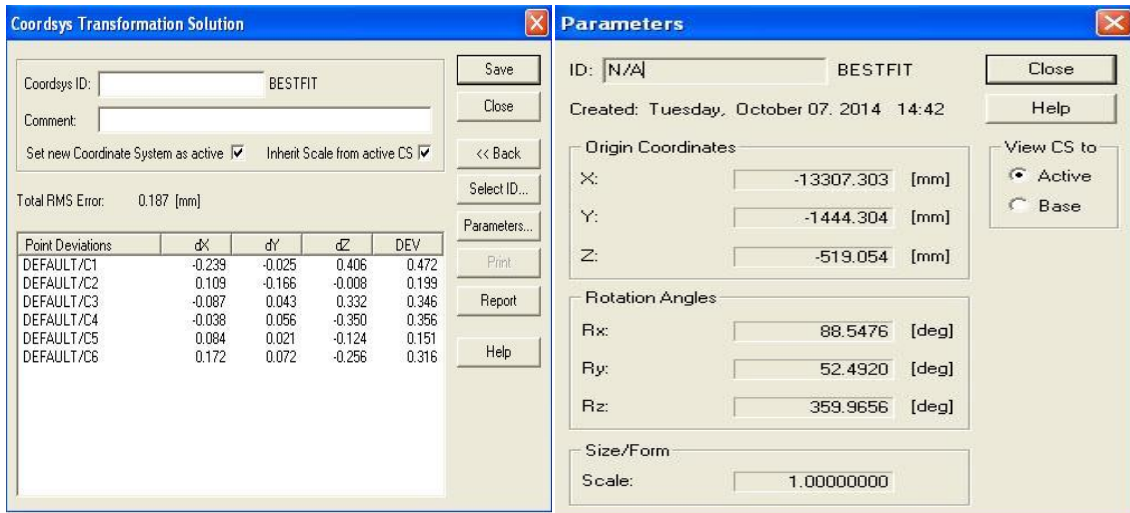
		Γ.Σ.					CMM							
		X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X(mm)	STD Y(mm)	STD Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	STD X(mm)	STD Y(mm)	STD Z(mm)	
C1	TSC1	-12697,105	-1172,309	-159,799	0.996	0.111	0.063	CMMC1	580,024	366,407	323,632	0,030	0,030	0,030
C2	TSC2	-12606,526	-1950,192	-158,284	0.988	0.165	0.063	CMMC2	17,936	348,009	869,402	0,030	0,030	0,030
C3	TSC3	-13111,496	-2161,635	-157,127	0.987	0.175	0.065	CMMC3	-457,028	343,312	597,203	0,030	0,030	0,030
C4	TSC4	-13167,493	-2500,458	-21,013	0.983	0.197	0.065	CMMC4	-762,677	470,598	761,798	0,030	0,030	0,030
C5	TSC5	-12365,959	-1756,478	-21,612	0.990	0.153	0.061	CMMC5	315,220	489,538	944,552	0,030	0,030	0,030
C6	TSC6	-12527,133	-747,527	-205,580	0.998	0.085	0.063	CMMC6	1020,904	331,576	199,866	0,030	0,030	0,030

Πίνακας 7.15: Οι τελικές συντεταγμένες των έξι κοινών σημείων στα δύο συστήματα αναφοράς

Για την τελευταία θέση του βραχίονα ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις δύο παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 7.11: Ο μετασχηματισμός επτά παραμέτρων για την τρίτη θέση του βραχίονα



Εικόνα 7.12: Ο μετασχηματισμός έξι παραμέτρων για την τρίτη θέση του βραχίονα

7.2.3 Προσαρμογή επιπέδων

Όπως ήδη αναφέρθηκε, έγιναν και ξεχωριστές μετρήσεις για κάθε θέση του βραχίονα στο αντίστοιχο ορθογώνιο βάθρο, του οποίου η γεωμετρία του προσομοιάζεται με ένα επίπεδο. Οι μετρήσεις από τον γεωδαιτικό σταθμό έγιναν με απευθείας σκόπευση στο κέντρο του πρίσματος το οποίο μαζί με την μεταλλική του βάση τοποθετούνταν επάνω στο ορθογώνιο βάθρο. Για να εξασφαλιστεί ο απαραίτητος βαθμός ελευθερίας μετέπειτα στην επίλυση του επιπέδου, το πρίσμα μετρήθηκε από τον γεωδαιτικό σταθμό για εννιά θέσεις πάνω στο ορθογώνιο βάθρο. Μετρήθηκαν η οριζόντια γωνία, η κατακόρυφη γωνία και η κεκλιμένη απόσταση σε μία θέση τηλεσκοπίου. Έτσι με την βοήθεια του λογισμικού Axyz προέκυψαν οι συντεταγμένες των σημείων με τα σφάλματά τους που ανήκουν όλα επάνω στο επίπεδο του ορθογώνιου βάθρου.

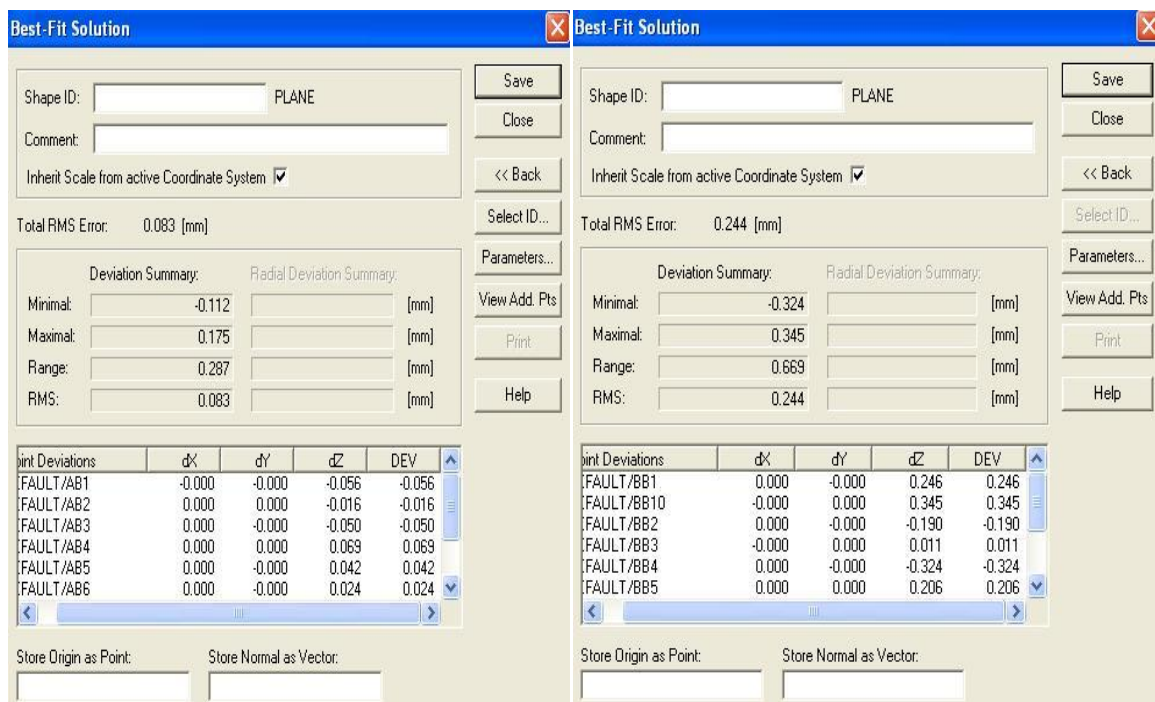


Εικόνα 7.13: Ορθογώνιο βάθρο στην αίθουσα Y23

Για την εξαγωγή της γεωμετρικής επιφάνειας του επιπέδου μέσω μετρήσεων από τον αρθρωτό βραχίονα, δεν χρησιμοποιήθηκε το πρίσμα CCR. Οι μετρήσεις έγιναν κατευθείαν πάνω στο επίπεδο, μετρώντας τις συντεταγμένες οχτώ σημείων και τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν από το λογισμικό PcDmis.

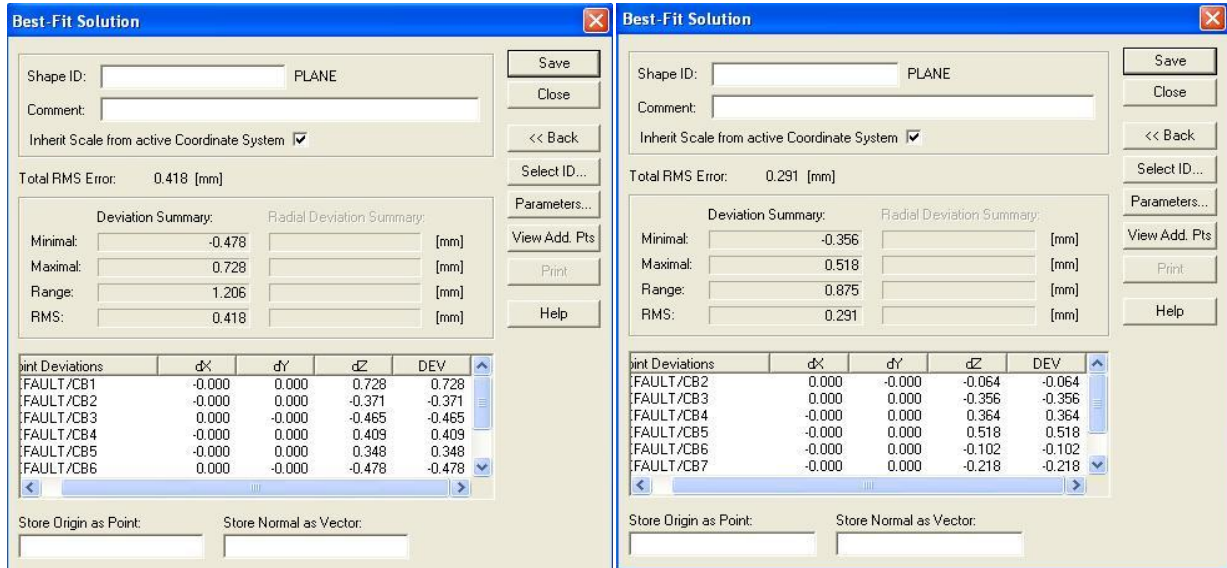
Ο έλεγχος της επιπεδότητας των ορθογωνίων βάθρων έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό Axyz. Αρχικά εισάγονται τα σημεία πατώντας το εικονίδιο import σε μορφή Point_in. Επιλέγοντάς τα από το DEFAULT του WorkPiece, από το μενού 1 επιλέχθηκε το εικονίδιο Plane Best-Fit. Ύστερα άνοιξε η καρτέλα Plane Best-Fit, όπου γίνεται η επιλογή των τριών αρχικών σημείων που θα χρησιμοποιηθούν για να οριστεί το επίπεδο, ώστε μετέπειτα να γίνει η συνόρθωση με όλα τα σημεία. Πατώντας το εικονίδιο Solve, λύνεται η συνόρθωση και ανοίγει η καρτέλα Best-Fit Solution με τα αποτελέσματα. Η καρτέλα αυτή περιλαμβάνει το RMS, και επίσης το σφάλμα αποχής από το επίπεδο της συνιστώσας Z. Τονίζεται πως η επιλογή των τριών αρχικών σημείων που θα χρησιμοποιηθούν για την αρχική επίλυση του επιπέδου, δεν έχουν σημασία στην τελική συνόρθωση του επιπέδου. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στις παρακάτω εικόνες:

Στην πρώτη περίπτωση έγινε η προσαρμογή των μετρούμενων σημείων σε επίπεδο από τον γεωδαιτικό σταθμό για τις βάσεις ένα και δύο (πρώτη και δεύτερη θέση βραχίονα). Το RMS για την πρώτη βάση είναι 0.083mm, που κρίνεται εξαιρετικό ενώ για την δεύτερη βάση είναι 0.244mm.



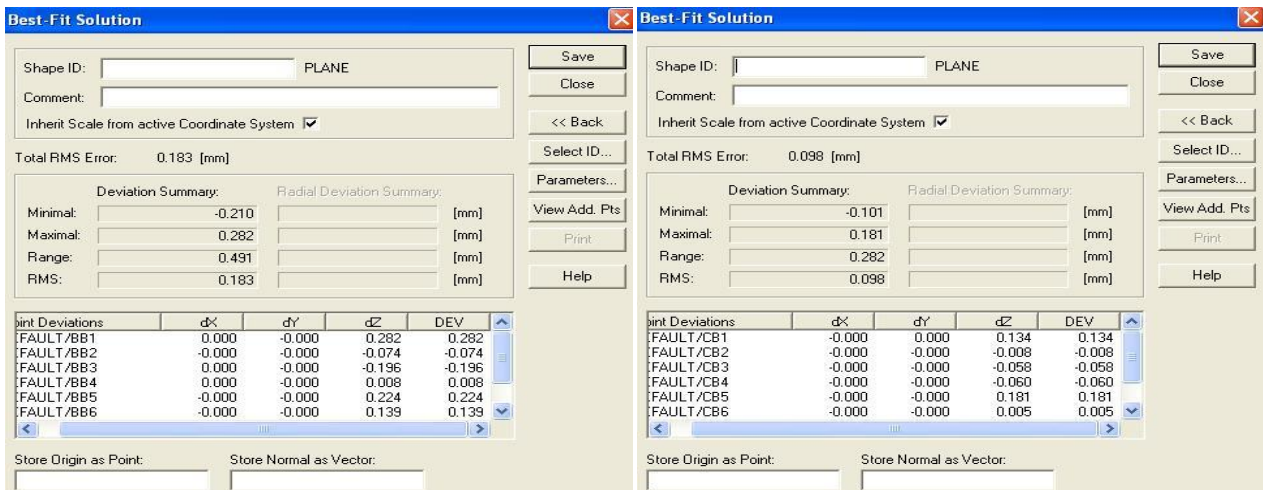
Εικόνα 7.14: Προσαρμογή επιπέδου από μετρήσεις του γεωδαιτικού σταθμού για τη θέση 1 (αριστερά) και 2 (δεξιά)

Στην περίπτωση της τρίτης βάσης, το RMS είναι 0.418. Εύκολα αναγνωρίζεται πως το πρώτο σημείο που μετείχε στη συνόρθωση, παρουσιάζει σε σχέση με τα άλλα μεγάλο σφάλμα στην συνιστώσα Z της τάξης των 0.7mm. Το Axyz μας δίνει την δυνατότητα να επαναληφθεί η συνόρθωση εξαιρώντας το από την επίλυση, οπότε στη δεύτερη εικόνα παρουσιάζονται τα βελτιωμένα αποτελέσματα και το RMS που ισούται με 0.291mm.



Εικόνα 7.15: Προσαρμογή επίπεδου από μετρήσεις του γεωδαιτικού σταθμού για τη θέση 3 με όλα τα σημεία (αριστερά) και χωρίς το πρώτο σημείο (δεξιά)

Η διαδικασία προσαρμογής των σημείων σε επίπεδο έγινε και για τις βάσεις 2 και 3 με τα μετρούμενα στοιχεία να προέρχονται από το CMM. Και σε αυτές τις περιπτώσεις η προσαρμογή των επιπέδων κρίνεται απολύτως ικανοποιητική, καθώς στην πρώτη περίπτωση (βάση 2) το RMS είναι ίσο με 0.183mm, ενώ στη δεύτερη (βάση 3) λιγότερο από ένα δέκατο του χιλιοστού (0.098mm).



Εικόνα 7.16: Προσαρμογή επίπεδου από μετρήσεις του αρθρωτού βραχίονα για τη θέση 2 (αριστερά) και 3 (δεξιά)

7.3 Παρουσίαση ακριβειών και έλεγχος αποτελεσμάτων

7.3.1 Ακρίβεια γεωδαιτικού σταθμού

Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων από τον γεωδαιτικό σταθμό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πολικών συντεταγμένων, όπου υπολογίστηκαν για κάθε σημείο η οριζόντια γωνία α , η κατακόρυφη γωνία β και η κεκλιμένη απόσταση D . Οι τύποι υπολογισμού είναι οι εξής:

$$x_B = x_A + S \sin \alpha \quad (7.1)$$

$$y_B = y_A + S \cos \alpha \quad (7.2)$$

$$z_B = z_A + D \cos \beta \quad (7.3)$$

όπου α = μετρημένη οριζόντια γωνία

β = μετρημένη κατακόρυφη γωνία

D = μετρημένη (κεκλιμένη) απόσταση

$S = D \sin \alpha$

Το σφάλμα του υπολογισμού της απόστασης δίνεται από τον κατασκευαστή με την μορφή δύο παραμέτρων, γ και δ . Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι συντελεστές αυτοί για το TDA5005 είναι οι εξής:

$$\gamma = 1 \text{ mm}$$

$$\delta = 2 \text{ ppm}$$

Το σφάλμα αυτό υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\sigma_D = \pm \sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{\delta \cdot D}{1000000}\right)^2} \quad (7.4)$$

όπου για τις μετρήσεις που έγιναν το D κυμαινόταν από 3 ως 14 m.

Έτσι προκύπτει ότι το σ_D 1,000018mm ως 1,000392mm

Το σφάλμα υπολογισμού των γωνιών, δίνεται και αυτό από τον κατασκευαστή και ορίζεται για το TDA5005 στα 2^{cc} (οριζόντιες και κατακόρυφες), οπότε προκύπτει:

$$\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 2^{\text{cc}}$$

Η ακρίβεια της μεθόδου των πολικών συντεταγμένων εξαρτάται πάρα πολύ από την ακρίβεια της μέτρησης της απόστασης και επηρεάζεται πολύ λιγότερο από τις γωνιομετρικές ακρίβειες. Αυτό αποδεικνύεται από το νόμο μετάδοσης των σφαλμάτων. Θεωρώντας το σημείο Α χωρίς σφάλμα, το σφάλμα της τετμημένης x για το σημείο Β είναι :

$$\sigma_x = \pm \sqrt{\sin^2 \alpha \sigma_s^2 + (S * \cos \alpha)^2 \sigma_a^2} \quad (7.5)$$

Δηλαδή όσο μεγαλώνει το S, η ακρίβεια της συντεταγμένης εξαρτάται από το σφάλμα της γωνίας σ_a , ενώ όσο μικραίνει η απόσταση, μεγαλύτερο ρόλο στην ακρίβεια της συντεταγμένης παίζει το σφάλμα της απόστασης σ_s . Οπότε στην παρούσα διπλωματική εργασία που οι αποστάσεις κυμάνθηκαν από 3 έως 14 μέτρα, η ακρίβεια υπολογισμού των συντεταγμένων ενός σημείου εξαρτάται από την ακρίβεια του οργάνου στον υπολογισμό της απόστασης.

Τα σφάλματα σ_x και σ_y είναι αντίστροφα, δηλαδή αν το σφάλμα της τετμημένης x είναι μεγάλο, το σφάλμα της τεταγμένης y θα είναι μικρό. Αυτό φάνηκε και στα αποτελέσματα καθώς το σ_x ήταν κοντά στην μονάδα (0.6-1 mm), ενώ το σ_y κυμάνθηκε από 0.1-0.7 mm. Επίσης αυτό αποδεικνύεται από τον τύπο υπολογισμού του σφάλματος για την τεταγμένη y:

$$\sigma_y = \pm \sqrt{\cos^2 \alpha \sigma_s^2 + (S * (-\sin \alpha))^2 \sigma_a^2} \quad (7.6)$$

Το πιο από τα δύο θα είναι μεγαλύτερο εξαρτάται από το ποια συντεταγμένη του αγνώστου σημείου είναι κοντύτερα στους άξονες του συστήματος αναφοράς και στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν ο άξονας y.

Για την αβεβαιότητα του z ισχύει ότι για μικρές αποστάσεις, δηλαδή σαν αυτές που επικρατούν συνήθως στην βιομηχανική γεωδαισία και είναι της τάξης λίγων μέτρων, το σφάλμα είναι μικρό για ζενίθιες γωνίες γύρω στους 100 grad, ενώ σε μεγάλες αποστάσεις το σφάλμα μειώνεται για μικρές ζενίθιες γωνίες. Οι μετρήσεις έγιναν υπό γωνία 100grad, οπότε το σφάλμα στο z κυμάνθηκε σε πολύ χαμηλά επίπεδα (0.02-0.07 mm). Ο τύπος υπολογισμού του σφάλματος είναι:

$$\sigma_z = \pm \sqrt{\cos^2 \beta \sigma_D^2 + (D * (-\sin \beta))^2 \sigma_\beta^2} \quad (7.7)$$

Τέλος το σφάλμα του S προκύπτει από τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στην σχέση $S = D \sin \alpha$ και κυμάνθηκε ομοίως με το σ_D .

$$\sigma_S = \pm \sqrt{\sin^2 \alpha \sigma_D^2 + (D * \cos \alpha)^2 \sigma_\alpha^2} \quad (7.8)$$

Συγκεντρωτικά οι ακρίβειες της μεθόδου στο υπολογισμό των συντεταγμένων κρίνονται απαλλαγμένες από χονδροειδή σφάλματα και μέσα στα όρια των δυνατοτήτων μετρήσεων του γεωδαιτικού σταθμού συνδυασμένος με το πρίσμα CCR. Οι ακρίβειες αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

Ακρίβεια γεωδαιτικού σταθμού στον άξονα x: 0.6-1 mm

Ακρίβεια γεωδαιτικού σταθμού στον άξονα y: 0.1-0.7 mm

Ακρίβεια γεωδαιτικού σταθμού στον άξονα z: 0.02-0.07 mm

7.3.2 Ακρίβεια αρθρωτού βραχίονα

Ο Faro Platinum Arm αξιοποιεί ειδικούς υψηλής ανάλυσης μετατροπείς (rotary transducers) οι οποίοι μέσω διαδοχικών μετασχηματισμών του συστήματος συντεταγμένων των επιμέρους τμημάτων του, υπολογίζει τις τρισδιάστατες συντεταγμένες της μετρητικής κεφαλής. Η ακρίβεια για κάθε άξονα είναι η ίδια, μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και δίνεται από τον κατασκευαστή. Έτσι όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4.2 οι σημειακές ακρίβειες είναι οι εξής:

Ακρίβεια στον άξονα x: 0.03 mm

Ακρίβεια στον άξονα y: 0.03 mm

Ακρίβεια στον άξονα z: 0.03 mm

7.3.3 Ακρίβεια προσαρμογής επιπέδων

Κάθε επίπεδο στο τρισδιάστατο χώρο ορίζεται από τρία σημεία. Στην περίπτωση των ορθογωνίων βάθρων μετρήθηκαν περισσότερα από τα απαιτούμενα σημεία ώστε η επίλυση να γίνει με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ο δείκτης που δείχνει εάν τα σημεία προσεγγίζουν ικανοποιητικά το επίπεδο είναι η τιμή του RMS (μέσο τετραγωνικό σφάλμα ή τυπικό σφάλμα των αποκλίσεων). Αυτό υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\sigma_{\delta} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_i)^2}{N}} \quad (7.9)$$

όπου N το πλήθος των σημείων που μετείχαν στην συνόρθωση

δι τα υπόλοιπα ή αποκλίσεις της συνιστώσας Z από την εξίσωση του επιπέδου

Τα σφάλματα αυτά όπως υπολογίστηκαν είναι:

Τυπικό σφάλμα των αποκλίσεων του ορθογωνίου βάθρου 1 από μετρήσεις του γεωδαιτικού σταθμού για το επίπεδο : RMS=0.083mm

Τυπικό σφάλμα των αποκλίσεων του ορθογωνίου βάθρου 2 από μετρήσεις του γεωδαιτικού

σταθμού για το επίπεδο : RMS=0.244mm

Τυπικό σφάλμα των αποκλίσεων του ορθογωνίου βάθρου 3 από μετρήσεις του γεωδαιτικού σταθμού για το επίπεδο : RMS=0.291mm

Τυπικό σφάλμα αποκλίσεων του ορθογωνίου βάθρου 2 από μετρήσεις του αρθρωτού βραχίονα για το επίπεδο : RMS=0.183

Τυπικό σφάλμα αποκλίσεων του ορθογωνίου βάθρου 3 από μετρήσεις του αρθρωτού βραχίονα για το επίπεδο : RMS=0.098

Τα αποτελέσματα κρίνονται απολύτως ικανοποιητικά καθώς οι αποκλίσεις κυμαίνονται από 0.08 έως 0.3mm. Δεδομένου ότι οι επιφάνειες των ορθογωνίων βάθρων δεν είναι κατεργασμένες μηχανουργικά η ακρίβεια της προσαρμογής είναι ικανοποιητική. Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η ακρίβεια προσαρμογής του επιπέδου από τις μετρήσεις του αρθρωτού βραχίονα είναι ελαφρώς καλύτερη, πράγμα το οποίο αναμενόταν λόγω της καλύτερης ακρίβειας στον προσδιορισμό των συντεταγμένων του εξοπλισμού αυτού.

7.3.4 Ακρίβεια μετασχηματισμών

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μετρήθηκαν κοινά σημεία σε δύο διαφορετικά συστήματα αναφοράς (σύστημα αναφοράς του γεωδαιτικού σταθμού και σύστημα αναφοράς του αρθρωτού βραχίονα) και μετέπειτα έγινε ο συσχετισμός των δύο αυτών συστημάτων μέσω μαθηματικών μετασχηματισμών. Επιλέγεται ο 6-παραμετρικός μετασχηματισμός που διατηρεί την κλίμακα ίση με μονάδα, και ο 7-παραμετρικός που την μεταβάλλει. Ο δείκτης που φανερώνει κατά πόσο το ένα σύστημα αναφοράς είναι δυνατόν να μετασχηματιστεί στο άλλο, είναι το τυπικό σφάλμα των αποκλίσεων των συντεταγμένων (πραγματική τιμή – ονομαστική τιμή) κάθε σημείου. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sigma_{\delta} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_i)^2}{N}} \quad (7.10)$$

όπου N το πλήθος των παρατηρήσεων που μετείχαν στην συνόρθωση

δι τα υπόλοιπα ή αποκλίσεις της κάθε συντεταγμένης του κάθε σημείου

Οι τιμές αυτές για τους μετασχηματισμούς που πραγματοποιήθηκαν φαίνονται παρακάτω:

Μετασχηματισμός 1^{ης} βάσης με 6 παραμέτρους: RMS=0.138 mm

Μετασχηματισμός 1^{ης} βάσης με 7 παραμέτρους: RMS=0.138 mm

Μετασχηματισμός 2^{ης} βάσης με 6 παραμέτρους: RMS=0.207 mm

Μετασχηματισμός 2^{ης} βάσης με 7 παραμέτρους: RMS=0.207 mm

Μετασχηματισμός 3^{ης} βάσης με 6 παραμέτρους: RMS=0.187 mm

Μετασχηματισμός 3^{ης} βάσης με 7 παραμέτρους: RMS=0.187 mm

Στα αποτελέσματα παρατηρείται ότι το σφάλμα των υπολοίπων παραμένει ίδιο για την κάθε βάση είτε ο μετασχηματισμός γίνεται με έξι παραμέτρους είτε με επτά. Τα αποτελέσματα κρίνονται απολύτως ικανοποιητικά καθώς το τυπικό σφάλμα των αποκλίσεων του μετασχηματισμού δεν ξεπερνάει τα 0.207mm σε καμία περίπτωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΩΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Συμπεράσματα

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τέθηκαν δύο βασικοί στόχοι: Πρώτον η μελέτη των αρχών λειτουργίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών του γεωδαιτικού σταθμού και του φορητού αρθρωτού βραχίονα σε θεωρητικό επίπεδο, και δεύτερον, η διερεύνηση της συνδυαστικής χρήσης των δύο αυτών οργάνων σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εφαρμογές. Στα πλαίσια ικανοποίησης των δύο αυτών στόχων, σημειώνονται τα επόμενα.

Ως προς την ακρίβεια των μετρήσεων, η χρήση του γεωδαιτικού σταθμού TDA5005 με το πρίσμα CCR κρίνεται ιδιαίτερα ανταγωνιστική σε σχέση με την χρήση σαρωτών laser ή laser trackers είτε σε μεθοδολογίες που πραγματοποιούνται φωτογραμμετρικές μέθοδοι. Η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων που μπορεί να επιτευχθεί είναι της τάξης μερικών δεκάτων του χιλιοστού, η οποία είναι η σύνηθες απαιτούμενη ακρίβεια σε αρκετές βιομηχανικές εργασίες υψηλής ακρίβειας. Αξίζει να αναφερθεί ότι η ακρίβεια του γεωδαιτικού σταθμού για τις μικρές αποστάσεις που συνήθως επικρατούν στο χώρο της βιομηχανικής γεωδαισίας εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια του υπολογισμού της απόστασης. Όσον αφορά την χρήση της φορητής μηχανής μέτρησης συντεταγμένων, κρίνεται η πλέον κατάλληλη ως προς την ακρίβεια προσδιορισμού συντεταγμένων, αποστάσεων και υπολογισμό γεωμετρικών σχημάτων, καθώς η ακρίβεια φτάνει σε πολλές περιπτώσεις τα 30 μm . Επίσης η συνολική ακρίβεια διατηρείται σε υψηλά επίπεδα ακόμα και στην περίπτωση της συνδυαστικής χρήσης της CMM με το πρίσμα CCR. Τέλος το πρίσμα CCR, κρίνεται το πλέον κατάλληλο μέσο διασύνδεσης των δύο εξοπλισμών, καθώς όπως φαίνεται στο κεφάλαιο 7 οι μετασχηματισμοί μεταξύ των δύο συστημάτων επιτυγχάνονται με ακρίβειες της τάξης των 0.2 mm.

Η απλότητα χρήσης των δύο εξοπλισμών είναι σχετικά εύκολη. Η στόχευση στο κέντρο του πρίσματος από τον γεωδαιτικό σταθμό κρίνεται αρκετά εύκολη, ενώ για της συνήθεις βιομηχανικές εργασίες που ελέγχονται αποστάσεις και η γεωμετρία των βιομηχανικών παραγώγων, δεν απαιτείται η διαδικασία της κέντρωσης του οργάνου. Όσον αφορά τον αρθρωτό βραχίονα, μπορεί εύκολα να μεταφερθεί στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις καθώς το βάρος του είναι σχετικά μικρό, ενώ ο εργονομικός σχεδιασμός του μετατρέπει την εκτέλεση των μετρήσεων σε εύκολη διαδικασία. Στα μειονεκτήματα της συνδυαστικής χρήσης των δύο αυτών εξοπλισμών, συγκαταλέγεται το υψηλό κόστος απόκτησης μαζί με τα κατάλληλα παρελκόμενα αλλά και η ανάγκη καταρτισμένων χειριστών. Τέλος για να διατηρείται η ακρίβεια των δύο εξοπλισμών, πρέπει οι συνθήκες του περιβάλλοντος να ελέγχονται (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία) και ο χώρος να είναι απαλλαγμένος από δονήσεις.

Η ταχύτητα διεκπεραίωσης της εργασίας με τους δύο αυτούς εξοπλισμούς μειώνεται κατά πολύ όταν είναι συνδεδεμένοι με Η/Υ. Έτσι οι μετρήσεις γίνονται σε πραγματικό χρόνο μέσω του

λογισμικού Axyz για το γεωδαιτικό σταθμό και του λογισμικού PcDmis για τον αρθρωτό βραχίονα. Στο υποπρόγραμμα Axyz CDM μεταφέρονται τα μετρημένα στοιχεία, υπολογίζονται οι συντεταγμένες τους με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων, γίνονται βέλτιστες προσαρμογές σημείων σε γεωμετρικά σχήματα, μετασχηματισμοί συστημάτων αναφοράς, ενώ διαθέτει και περιβάλλον CAD. Έτσι δεν απαιτείται επιπλέον χρόνος μετά τις μετρήσεις για την μεταφόρτωση τους, και με τις αυτοματοποιημένες διαδικασίες που προσφέρονται από τα αντίστοιχα λογισμικά, είναι δυνατό σε μερικές απλές εφαρμογές, να έχει ολοκληρωθεί και η επεξεργασία. Επίσης, έτυχε σχολιασμού το γεγονός ότι δεν ορίστηκαν οι συντεταγμένες της στάσης του γεωδαιτικού σταθμού, αλλά ιδρύθηκε τοπικό αυθαίρετο δίκτυο, γεγονός που επιτρέπει να τοποθετείται το όργανο σε οποιοδήποτε σημείο είναι καλύτερο για να διεξαχθούν οι μετρήσεις, χωρίς να απαιτείται ορατότητα σε σημεία γνωστών συντεταγμένων που θα περιέπλεκε την όλη διαδικασία.

Ο συνδυασμός των δύο αυτών εξοπλισμών αποτελεί μια αξιόπιστη υβριδική λύση για αρκετές εφαρμογές στην βιομηχανική γεωδαισία καθώς συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του κάθε εξοπλισμού. Η μέθοδος κρίνεται αρκετά ελκυστική στις περιπτώσεις που υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις ακρίβειας στο ίδιο το βιομηχανικό παράγωγο, πράγμα σύνηθες για το πλήθος των μηχανολογικών προϊόντων που παράγονται. Επίσης η συνδυαστική χρήση γεωδαιτικού σταθμού και CMM μπορεί να αποδειχθεί πολύ χρήσιμο εργαλείο μέτρησης στην περίπτωση κατασκευών, εξαρτημάτων και συναρμολογημένων μηχανολογικών συνόλων που απαιτείται υψηλή ακρίβεια στην καταγραφή της γεωμετρικής του μορφής, ή και μεγάλο πλήθος μετρητικών στοιχείων για την πληρότητα της αποτύπωσης του, ενώ παράλληλα απαιτείται η αναφορά σε ενιαίο σύστημα συντεταγμένων που εξάγεται συνήθως από τη συνολική γεωμετρία του αντικειμένου. Στηρίζεται έτσι η άποψη ότι αυτοί οι δύο εξοπλισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη επιτυχία με εφαρμογές Βιομηχανικής Γεωδαισίας,

8.2 Προτάσεις

- Μοντελοποίηση των σφαλμάτων του αρθρωτού βραχίονα.
- Εισαγωγή στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων ορισμένων δεσμεύσεων (σταθερών σημείων ή κάποιων αποστάσεων υπολογισμένα με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια όπως βιομηχανική ράβδος κλίμακας με ακρίβεια τα 2 μm).
- Εισαγωγή βαρών στην συνόρθωση.
- Η δημιουργία και ο πειραματικός έλεγχος εξειδικευμένης ιδιοκατασκευής, αντί του πείσματος CCR, η οποία θα αποδίδει γεωμετρική αναφορά σε κοινό σημείο, μέσα από παρατηρήσεις γεωδαιτικών σταθμών και αρθρωτών βραχιόνων.
- Αντικατάσταση του γεωδαιτικού σταθμού με άλλο όργανο όπως Laser tracker.
- Χρήση και αξιολόγηση ενός αφινικού μετασχηματισμού και σύγκριση με τους μετασχηματισμούς που χρησιμοποιήθηκαν.
- Εφαρμογή της διάταξης σε πιστοποιημένο βιομηχανικό παράγωγο υψηλής ακρίβειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αγάτζα-Μπαλοδήμου Α. Μ. , « **Θεωρία σφαλμάτων και συνορθώσεις I** » , Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2000
- [2] Αγάτζα-Μπαλοδήμου Α. Μ. , « **Θεωρία σφαλμάτων και συνορθώσεις II** » , Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2000
- [3] Μπαλοδήμος Δ.Δ. , Σταθάς Δ. , « **Γεωδαιτικά όργανα και μέθοδοι μέτρησης γωνιών και μηκών** » , Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 1993
- [4] Δογγούρης Σ. , « **Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας** » , Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2005
- [5] Σοφής Α. « **Γεωμετρική τεκμηρίωση νομέων Y/B με μεθόδους Βιομηχανικής Γεωδαισίας** » , Διπλωματική Εργασία , Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας , ΣΑΤΜ , ΕΜΠ , Αθήνα 2008
- [6] Α. Δερμάνης , Α. Φωτίου , « **Μέθοδοι και Εφαρμογές Συνόρθωσης Παρατηρήσεων** » , εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1995
- [7] Θ. Ξενάκης , Γ. Καϊσαρλής , Β. Γκίκας , Δ. Σταθάς , Χ. Προβατίδης , « **Διερεύνηση συνδυαστικής χρήσης γεωδαιτικών σταθμών και μηχανών μέτρησης συντεταγμένων σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εφαρμογές** » Ελληνικά Ναυπηγεία Α.Ε., ΣΜΜ, Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτ. Ελέγχου, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2012
- [8] 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** » , Part B: J. Engineering Manufacture, UK , 2009
- [9] Radovanovic R. S. , Teskey W. F. , « **A novel method of high precision height determination for industrial applications** » , Precise Engineering and Deformation Surveys Group, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary 2003
- [10] Andrei C. O. , « **3D affine coordinate transformations** » , School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology (KTH) , Stockholm 2006
- [11] Τσίγκος Π. , « **Τρισδιάστατη CAD μοντελοποίηση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με χρήση Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων τύπου Αρθρωτού Βραχίονα** » Διπλωματική Εργασία , Τομέας μηχανολογικών κατασκευών & αυτόματου ελέγχου , ΣΜΜ , ΕΜΠ, Αθήνα 2010
- [12] Ζήσος Γ. , « **Μέτρηση δακτυλίων , στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων και ανάπτυξη σχετικής οδηγίας μέτρησης σε μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM)** » , Διπλωματική Εργασία , Τομέας βιομηχανικής διοίκησης και επιχειρησιακής έρευνας, ΣΜΜ , ΕΜΠ , Αθήνα 2009
- [13] Παπαδόπουλος Δ. , « **Μέθοδος μέτρησης διαμέτρου δακτυλίων continuous scanning σε μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM): Μελέτη επίδρασης στην ακρίβεια λόγω αλλαγής**

θέσεως και μεγέθους μετρούμενου αντικειμένου » , Διπλωματική Εργασία , Τομέας βιομηχανικής διοίκησης και επιχειρησιακής έρευνας, ΣΜΜ , ΕΜΠ , Αθήνα 2011

[14] Καραχάλιου Χ. , Μανσούρ Γ. , « **Διαστατική Μετρολογία** » , εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2007

[15] Chow J., Xu T. Lee S. M., Kengskool K. « **Development of an integrated laser-based reverse engineering and machining system** » Int. J. Advd Mfg Technol., 2000

[16] Akcan H., Kriakov V., Broennimann H., Delis A. « **GPS free node localization in mobile wireless sensor networks** » In Proceedings of MobiDE'06 Session on Mobile and sensor data management, Chicago, 2006

[17] Xie Z., Wang J., Zhang Q. « **Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system** » Int. J. Mach. Tools Mf., 2005

[18] Weyman-Jones A. « **An investigation into the accuracy and limitations of automatic target recognition in total stations** » Διπλωματική Εργασία, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying, Queensland 2010

[19] González-Madruga D., Cuesta E, Patiño H., Barreiro J., Martínez-Pellitero S., « **Evaluation of AACMM using the virtual circles method** » , 5th Manufacturing Engineering Society International Conference, Zaragoza 2013

[20] Mutilba U., Kortaberria G., Olarra A.r. Gutiérrez A., Gomez-Acedo E., Zubieta M., Solas J. A. « **Performance Calibration of Articulated Arm Coordinate Measuring Machine** » , 5th Manufacturing Engineering Society International Conference, Zaragoza 2013

[21] Santolaria J., Aguilar J. J., Brau A., Brosed F. J. « **Performance evaluation of probing systems in data capture for kinematic parameter identification and verification of articulated arm coordinate measuring** » , XIX imeko world congress fundamental and applied metrology, Lisbon 2009

[22] Santolaria J., Aguilar J. J., « **Kinematic calibration of articulated arm coordinate measuring machines and robot arms using passive and active self-centering probes and multipose optimization algorithm based in point and length constrains** » , XIX imeko world congress fundamental and applied metrology, Lisbon 2010

[23] VDI/VDE 2617 Part 9, « **Acceptance and reverification test for articulated arm measuring machines** » , Verein Deutscher Ingenieure, 2009

[24] ASME B89.4.22-2004. « **Methods for performance evaluation of articulated arm coordinate measuring machines** » , 2004

[25] ISO 10360 « **Acceptance and re-verification tests for Coordinate Measuring Machines** » Hexagon Metrology GmbH, Germany, July 2008

[26] Erqun B. « **Creating a 3D urban model by terrestrial laser scanners and photogrammetry techniques: A case study on the historical Peninsula of Istanbul** » In Proceedings of SPIE, The

International Society for Optical Engineering, Munich 20–22 June 2007

[27] Beraldin J. A. « **Integration of laser scanning and close range photogrammetry – the last decade and beyond** » In Proceedings of the XXth International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Congress, 2004

[28] Muelaner J. E., Cai B., Maropoulos P. G., « **Large Volume Metrology Instrument Selection and Measurability Analysis** » Department of Mechanical Engineering, The University of Bath, UK 2009

[29] Χατζηστέλιος Γ., Λούντζης Γ., Καϊσαρλής Γ., Λεώπουλος Β., Προβατίδης Χ. « **Διεξαγωγή διεργαστηριακής σύγκρισης σε μετρήσεις μήκους πρότυπων πλακιδίων με τη χρήση μηχανών μέτρησης συντεταγμένων** » Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχ/κών, Τομέας Μηχ/κών Κατασκευών & Αυτ. Ελέγχου, Αθήνα 2012

[30] James Dr., Salsbury G. « **Performance of CMMs: Testing, Calibration, and Uncertainty** » Muntinlupa City, Philippines 2011

[31] Σπύρου Α. « **Γεωμετρικός έλεγχος εργαλείων αεροκατασκευών με χρήση τεχνολογίας Laser tracker** » , Διπλωματική Εργασία , Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας , ΣΑΤΜ , ΕΜΠ , Αθήνα 2013

[32] Γκουντινάκος Γ. « **Ο Γεωδαιτικός σταθμός Leica TDA 5005 – Εργαστηριακοί έλεγχοι – Συνδυασμένη χρήση με το λογισμικό Βιομηχανικής Γεωδαισίας Axyz** » , Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ , Αθήνα 2004

[33] Maisano D., Jamshidi J., Franceschini F., Maropoulos P.G., Mastrogiacomo L., Mileham A.R., Owen G.W., « **Comparison of two distributed large volume measurement systems: MScMS and iGPS** » Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part b. Journal of Engineering Manufacture, 223(5), 511-521, 2009.

[34] Galetto M., Mastrogiacomo L., Pralio B. « **A Wireless Sensor Network-Based Approach to Large Scale Dimensional Metrology** » International Journal of Computer Integrated Manufacturing, DISPEA, Torino 2010

[35] Paláncz B., Pirooska Z., « **A Symbolic Solution of a 3D Affine Transformation** » The Mathematica Journal 13, 2011

[36] Kenta U., Ryosyu F., Sonko O., Toshiyuki T., Tomizo K., « **Geometric calibration of a coordinate measuring machine using a laser tracking system** » Tokyo Denki University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan 2005

[37] Ouyang J. F., Liu W. L., Sun D. X., Yan Y. G., « **Laser Tracker Calibration Using Coordinate Measuring Machine** » Precision Engineering Institute, Henan Polytechnic University, Jiaozuo City, China

[38] UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE National Institute of Standards and Technology « **REPORT OF SPECIAL TEST NIST Test No: 683/282470-12** » Gaithersburg,

Maryland, May 31, 2012

[39] Physikalisch-Technische Bundesanstalt « **Evaluation software for coordinate measuring machines** » Braunschweig, January 24, 2012

[40] ASME B89.4.10-2000, « **Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring System Software, B89.4.10** » American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 2000

Διαδικτυακοί τόποι

[1] <http://www.telstar-lifesciences.com>

[2] <http://www.leitz-metrology.com>

[3] <http://www.hexagonmetrology.com>

[4] <http://en.wikipedia.org/wiki/ASME>

[5] <http://www.helmel.com>

[6] <http://www.satech8.com>

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC_17025

[8] <http://www.asme.org>

[9] <http://www.haicorp.com> , Ελληνική αεροπορική βιομηχανία

[10] <http://www.qcontrol.gr> , Τεχνική εταιρεία qcontrol , εμπορία & υπηρεσίες - εξοπλισμού ποιοτικού ελέγχου

[11] <http://www.geo-matching.com>

[12] [http://en.wikipedia.org/wiki/Octant_\(solid_geometry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Octant_(solid_geometry))

[13] <https://store.hexagonmetrology.us/>

[14] <http://www.nist.gov/>

[15] <http://brownandsharpe.com/> , BROWN & SHARPE is a brand of: Hexagon Metrology, Inc.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

3D αφινικός μετασχηματισμός

Α' μέρος : Συνόρθωση

Ο 3D αφινικός μετασχηματισμός έχει 9 παραμέτρους (3 στροφές, 3 κλίμακες και 3 μεταθέσεις). Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του χρειάζονται τουλάχιστον 3 κοινά σημεία γνωστά και στα 2 συστήματα αναφοράς.

Θεωρώντας X, Y, Z τις συντεταγμένες του πρώτου συστήματος και x, y, z τις συντεταγμένες του δεύτερου, η γενική μορφή του μοντέλου μετασχηματισμού είναι :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(2)} = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_1 & & \\ & \mu_2 & \\ & & \mu_3 \end{bmatrix} * \mathbf{R} \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(1)}$$

Σε απλούστερη μορφή μπορεί να γραφτεί:

$$\mathbf{X}_2 = \Delta \mathbf{x} + \mathbf{S} * \mathbf{R} * \mathbf{X}_1$$

Όπου

$\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ είναι οι συντεταγμένες του σημείου στα δύο συστήματα αναφοράς

$\Delta \mathbf{x}$ είναι το διάνυσμα της μετάθεσης

\mathbf{S} είναι ο πίνακας που περιέχει τους 3 συντελεστές κλίμακας μ_1, μ_2, μ_3 κατά τους άξονες $X, Y,$ και Z αντίστοιχα.

\mathbf{R} είναι ο πίνακας στροφής που αποτελείται από τις γωνίες στροφής ω (η στροφή στον άξονα X), φ (η στροφή στον άξονα Y) και κ (η στροφή στον άξονα Z).

Στις συντεταγμένες του πρώτου συστήματος υπεισέρχεται και το σφάλμα με το οποίο προσδιορίστηκαν, οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\mathbf{X}_2 - \varepsilon = \Delta \mathbf{x} + \mathbf{S}(\mu_1, \mu_2, \mu_3) * \mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) * \mathbf{X}_1$$

με το σφάλμα να είναι:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

Οι σχέσεις δεν είναι γραμμικές, οπότε θα πρέπει να γίνει η γραμμικοποίησή τους. Για να γίνει αυτό θα πρέπει αρχικά να υπολογιστούν οι προσωρινές τιμές της κλίμακας μ_1, μ_2, μ_3 και οι τρεις στροφές ω, φ, κ (βλ. β' μέρος).

Γραμμικοποίηση του πίνακα στροφής

Έχοντας γνωστές τις προσωρινές τιμές των τριών γωνιών στροφής $\omega^0, \varphi^0, \kappa^0$, οι σωστές γωνίες είναι:

$$\omega = \omega^0 + \delta\omega$$

$$\varphi = \varphi^0 + \delta\varphi$$

$$\kappa = \kappa^0 + \delta\kappa$$

με $\delta\omega, \delta\varphi, \delta\kappa$ οι διορθώσεις ώστε να προκύψουν οι πραγματικές τιμές των γωνιών.

Με την βοήθεια των προσωρινών τιμών υπολογίζεται ο προσωρινός πίνακα στροφής \mathbf{R}^0 :

$$\mathbf{R}^0 = \begin{bmatrix} r_{11}^0 & r_{12}^0 & r_{13}^0 \\ r_{21}^0 & r_{22}^0 & r_{23}^0 \\ r_{31}^0 & r_{32}^0 & r_{33}^0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\kappa & \sin\kappa & 0 \\ -\sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \sin\omega \\ 0 & -\sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\varphi * \cos\kappa & \cos\omega * \sin\kappa + \sin\omega * \sin\varphi * \cos\kappa & \sin\omega * \sin\kappa - \cos\omega * \sin\varphi * \cos\kappa \\ -\cos\varphi * \sin\kappa & \cos\omega * \cos\kappa - \sin\omega * \sin\varphi * \sin\kappa & \sin\omega * \cos\kappa + \cos\omega * \sin\varphi * \sin\kappa \\ \sin\varphi & -\sin\omega * \cos\varphi & \cos\omega * \cos\varphi \end{bmatrix}$$

Όλα τα στοιχεία του πίνακα \mathbf{R}^0 $r_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$ είναι συναρτήσεις των προσωρινών γωνιών και γραμμικοποιούνται με την βοήθεια αυτών ως εξής:

$$\begin{aligned} r_{ij} &= r_{ij}(\omega, \varphi, \kappa) = r_{ij}(\omega^0 + \delta\omega, \varphi^0 + \delta\varphi, \kappa^0 + \delta\kappa) \approx r_{ij}(\omega^0, \varphi^0, \kappa^0) + \frac{\partial r_{ij}}{\partial \omega} * \delta\omega + \frac{\partial r_{ij}}{\partial \varphi} * \delta\varphi + \frac{\partial r_{ij}}{\partial \kappa} * \delta\kappa = \\ &= r_{ij}^0 + e_{ij} * \delta\omega + f_{ij} * \delta\varphi + g_{ij} * \delta\kappa \end{aligned}$$

Όπου

$$r_{ij}^0 = r_{ij}(\omega^0, \varphi^0, \kappa^0)$$

$$e_{ij} = \frac{\partial r_{ij}}{\partial \omega}$$

$$f_{ij} = \frac{\partial r_{ij}}{\partial \varphi}$$

$$g_{ij} = \frac{\partial r_{ij}}{\partial \kappa}$$

Οπότε ο γραμμικοποιημένος πίνακας \mathbf{R} είναι:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) = \mathbf{R}^0 + \mathbf{E}\delta\omega + \mathbf{F}\delta\varphi + \mathbf{G}\delta\kappa$$

με τους πίνακες \mathbf{E} , \mathbf{F} , \mathbf{G} να είναι οι εξής:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix}$$

Και να περιέχουν τα εξής στοιχεία:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & -r_{13}^0 & r_{12}^0 \\ 0 & -r_{23}^0 & -r_{22}^0 \\ 0 & -r_{33}^0 & r_{32}^0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi^0 * \cos\kappa^0 & -r_{32}^0 * \cos\kappa^0 & -r_{33}^0 * \cos\kappa^0 \\ \sin\varphi^0 * \sin\kappa^0 & r_{32}^0 * \sin\kappa^0 & r_{33}^0 * \sin\kappa^0 \\ \cos\varphi^0 & \sin\omega^0 * \sin\varphi^0 & -\sin\varphi^0 * \cos\kappa^0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} r_{21}^0 & r_{22}^0 & r_{23}^0 \\ -r_{11}^0 & -r_{12}^0 & -r_{13}^0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Γραμμικοποίηση του πίνακα κλίμακας

Έχοντας γνωστές τις προσωρινές τιμές των τριών συντελεστών κλίμακας ω^0 , φ^0 , κ^0 , οι σωστές κλίμακες είναι:

$$\mu_1 = \mu_1^0 + \delta\mu_1$$

$$\mu_2 = \mu_2^0 + \delta\mu_2$$

$$\mu_3 = \mu_3^0 + \delta\mu_3$$

Ο γραμμικοποιημένος πίνακας S που σχηματίζεται είναι:

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}(\mu_1, \mu_2, \mu_3) = \begin{bmatrix} \mu_1^0 + \delta\mu_1 & & \\ & \mu_2^0 + \delta\mu_2 & \\ & & \mu_3^0 + \delta\mu_3 \end{bmatrix} = \mathbf{S}^0 + \mathbf{M} \delta\mu_1 + \mathbf{N} \delta\mu_2 + \mathbf{P} \delta\mu_3$$

με τους πίνακες \mathbf{S}^0 , \mathbf{M} , \mathbf{N} , \mathbf{P} να είναι οι εξής:

$$\mathbf{S}^0 = \begin{bmatrix} \mu_1^0 & & \\ & \mu_2^0 & \\ & & \mu_3^0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Γραμμικοποίηση των παρατηρήσεων

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_2 - \varepsilon &= \Delta\mathbf{x} + (\mathbf{R}^0 + \mathbf{E} \delta\omega + \mathbf{F} \delta\varphi + \mathbf{G} \delta\kappa) * (\mathbf{S}^0 + \mathbf{M} \delta\mu_1 + \mathbf{N} \delta\mu_2 + \mathbf{P} \delta\mu_3) * \mathbf{X}_1 \\ &\approx \Delta\mathbf{x} + (\mathbf{R}^0 \mathbf{S}^0 + \mathbf{R}^0 \mathbf{M} \delta\mu_1 + \mathbf{R}^0 \mathbf{N} \delta\mu_2 + \mathbf{R}^0 \mathbf{P} \delta\mu_3 + \mathbf{E} \mathbf{S}^0 \delta\omega + \mathbf{F} \mathbf{S}^0 \delta\varphi + \mathbf{G} \mathbf{S}^0 \delta\kappa) * \mathbf{X}_1 \end{aligned}$$

Οπού οι όροι $\delta_{\omega, \varphi, \kappa} * \delta_{\mu_1, \mu_2, \mu_3}$ έχουν επαλειφθεί.

Η παραπάνω σχέση σε μορφή πινάκων μπορεί να γραφτεί ως:

$$\mathbf{L}_i \quad - \quad \varepsilon_i \quad = \quad \mathbf{A}_i * \delta_{\mathbf{x}}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Οπού \mathbf{L}_i οι παρατηρήσεις, ε_i τα εναπομείναντα σφάλματα, \mathbf{A}_i ο πίνακας σχεδιασμού και $\delta_{\mathbf{x}}$ το διάνυσμα που περιέχει τις 9 παραμέτρους του αφινικού μετασχηματισμού.

$$\mathbf{L}_i = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} = \mathbf{X}_2 - \mathbf{R}^0 \mathbf{S}^0 \mathbf{X}_1$$

$$\varepsilon_i = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_{14} & \alpha_{15} & \alpha_{16} & \alpha_{17} & \alpha_{18} & \alpha_{19} \\ 0 & 1 & 0 & \alpha_{24} & \alpha_{25} & \alpha_{26} & \alpha_{27} & \alpha_{28} & \alpha_{29} \\ 0 & 0 & 1 & \alpha_{34} & \alpha_{35} & \alpha_{36} & \alpha_{37} & \alpha_{38} & \alpha_{39} \end{bmatrix}$$

$$\delta_x = [\delta x \quad \delta y \quad \delta z \quad \delta \mu_1 \quad \delta \mu_2 \quad \delta \mu_3 \quad \omega \quad \varphi \quad \kappa]^T$$

Τα στοιχεία του πίνακα Li μπορούν να υπολογιστούν από τις σχέσεις:

$$l_1 = X_i^{(2)} - (\mu_1^o * r_{11}^o * X_i^{(1)} + \mu_2^o * r_{12}^o * Y_i^{(1)} + \mu_3^o * r_{13}^o * Z_i^{(1)})$$

$$l_2 = Y_i^{(2)} - (\mu_1^o * r_{21}^o * X_i^{(1)} + \mu_2^o * r_{22}^o * Y_i^{(1)} + \mu_3^o * r_{23}^o * Z_i^{(1)})$$

$$l_3 = Z_i^{(2)} - (\mu_1^o * r_{31}^o * X_i^{(1)} + \mu_2^o * r_{32}^o * Y_i^{(1)} + \mu_3^o * r_{33}^o * Z_i^{(1)})$$

Και τα στοιχεία του πίνακα A προκύπτουν:

$$\begin{aligned} \alpha_{14} &= r_{11}^o X_i^{(1)} & \alpha_{15} &= r_{12}^o X_i^{(1)} & \alpha_{16} &= r_{13}^o X_i^{(1)} \\ \alpha_{24} &= r_{21}^o X_i^{(1)} & \alpha_{25} &= r_{22}^o X_i^{(1)} & \alpha_{26} &= r_{23}^o X_i^{(1)} \\ \alpha_{34} &= r_{31}^o X_i^{(1)} & \alpha_{35} &= r_{32}^o X_i^{(1)} & \alpha_{36} &= r_{33}^o X_i^{(1)} \end{aligned}$$

$$\alpha_{17} = -\mu_2^o r_{13}^o Y_i^{(1)} + \mu_3^o r_{12}^o Z_i^{(1)}$$

$$\alpha_{27} = -\mu_2^o r_{23}^o Y_i^{(1)} + \mu_3^o r_{22}^o Z_i^{(1)}$$

$$\alpha_{37} = -\mu_2^o r_{33}^o Y_i^{(1)} + \mu_3^o r_{32}^o Z_i^{(1)}$$

$$\alpha_{18} = -\cos \kappa^o * (\mu_1^o \sin \varphi^o X_i^{(1)} + \mu_2^o r_{32}^o Y_i^{(1)} + \mu_3^o r_{33}^o Z_i^{(1)})$$

$$\alpha_{28} = \sin \kappa^o * (\mu_1^o \sin \varphi^o X_i^{(1)} + \mu_2^o r_{32}^o Y_i^{(1)} + \mu_3^o r_{33}^o Z_i^{(1)})$$

$$\alpha_{38} = \mu_1^o \cos \varphi^o X_i^{(1)} + \mu_2^o \sin \omega^o \sin \varphi^o Y_i^{(1)} - \mu_3^o \cos \omega^o \sin \varphi^o Z_i^{(1)}$$

$$\alpha_{19} = \mu_1^o r_{21}^o X_i^{(1)} + \mu_2^o r_{22}^o Y_i^{(1)} + \mu_3^o r_{23}^o Z_i^{(1)}$$

$$\alpha_{29} = -(\mu_1^o r_{11}^o X_i^{(1)} + \mu_2^o r_{12}^o Y_i^{(1)} + \mu_3^o r_{13}^o Z_i^{(1)})$$

$$\alpha_{39} = 0$$

Τα παραπάνω ισχύουν για το πρώτο σημείο i. Για όλα τα σημεία n, οι διαστάσεις των πινάκων γίνονται:

$$\mathbf{L}_{3n \times 1} - \boldsymbol{\varepsilon}_i_{3n \times 1} = \mathbf{A}_{3n \times 9} * \boldsymbol{\delta}_x_{9 \times 1}$$

Συνόρθωση με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων

Οι διορθώσεις στις προσωρινές τιμές των παραμέτρων υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\delta \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{L}$$

όπου:

$\delta \hat{\mathbf{x}}$ περιέχει τις διορθώσεις των 9 παραμέτρων του αφινικού μετασχηματισμού

\mathbf{C} ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των συντεταγμένων του συστήματος (1)

Έτσι οι τιμές των 9 παραμέτρων του αφινικού είναι:

- Οι μεταθέσεις : $\delta x, \delta y, \delta z$
- Οι συντελεστές κλίμακας : $\hat{\mu}_1 = \mu_1^o + \delta \hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2 = \mu_2^o + \delta \hat{\mu}_2, \hat{\mu}_3 = \mu_3^o + \delta \hat{\mu}_3$
- Οι γωνίες στροφής : $\hat{\omega}_1 = \omega_1^o + \delta \hat{\omega}_1, \hat{\varphi}_2 = \varphi_2^o + \delta \hat{\varphi}_2, \hat{\kappa}_3 = \kappa_3^o + \delta \hat{\kappa}_3$

Η συνόρθωση μπορεί να επαναληφθεί με τις διορθωμένες τιμές των γωνιών και των συντελεστών κλίμακας. Συνήθως η λύση συγκλίνει μετά από 2 ή 3 επαναλήψεις.

Εκτίμηση των σφαλμάτων με τα ελάχιστα τετράγωνα

Τα εναπομείναντα σφάλματα μπορούν να υπολογιστούν από την σχέση:

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{L} - \mathbf{A} \delta \hat{\mathbf{x}}$$

Το a posteriori τυπικό σφάλμα $\hat{\sigma}_o^2$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \mathbf{C}^{-1} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}}{3n - 9}$$

Και ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των 9 παραμέτρων του αφινικού μετασχηματισμού υπολογίζεται από:

$$\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{A})^{-1}$$

Β' μέρος : Υπολογισμός αρχικών προσωρινών τιμών

Οι προσωρινές τιμές των παραμέτρων του αφινικού μετασχηματισμού θα υπολογιστούν από τις συντεταγμένες τριών σημείων που είναι κοινά και για τα δύο συστήματα αναφοράς. Οπότε προκύπτουν:

Για το πρώτο σύστημα:

- Σημείο 1 (X_1, Y_1, Z_1)
- Σημείο 2 (X_2, Y_2, Z_2)
- Σημείο 3 (X_3, Y_3, Z_3)

Για το δεύτερο σύστημα:

- Σημείο 1 (x_1, y_1, z_1)
- Σημείο 2 (x_2, y_2, z_2)
- Σημείο 3 (x_3, y_3, z_3)

Αρχικά υπολογίζονται όλες οι διαφορές ως εξής:

$$\begin{cases} x_{12} = x_1 - x_2, & x_{13} = x_1 - x_3, & x_{23} = x_2 - x_3, \\ y_{12} = y_1 - y_2, & y_{13} = y_1 - y_3, & y_{23} = y_2 - y_3, \\ z_{12} = z_1 - z_2, & z_{13} = z_1 - z_3, & z_{23} = z_2 - z_3, \\ X_{12} = X_1 - X_2, & X_{13} = X_1 - X_3, & X_{23} = X_2 - X_3, \\ Y_{12} = Y_1 - Y_2, & Y_{13} = Y_1 - Y_3, & Y_{23} = Y_2 - Y_3, \\ Z_{12} = Z_1 - Z_2, & Z_{13} = Z_1 - Z_3, & Z_{23} = Z_2 - Z_3 \end{cases}$$

Θα υπολογιστούν τα μεγέθη $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ τα οποία ισούνται με $1/\mu_1, 1/\mu_2$ και $1/\mu_3$ αντίστοιχα.

Το σ_1 υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sigma_1 = \frac{(\sqrt{(X_{23}^2 y_{13} z_{13} + y_{13} Y_{23}^2 z_{13} + X_{13}^2 y_{23} z_{23} + Y_{13}^2 y_{23} z_{23} + y_{23} Z_{13}^2 z_{23} - X_{13} X_{23} (y_{23} z_{13} + y_{13} z_{23}) - Y_{13} Y_{23} (y_{23} z_{13} + y_{13} z_{23}) - y_{23} z_{13} Z_{13} Z_{23} - y_{13} Z_{13} z_{23} Z_{23} + y_{13} z_{13} Z_{23}^2)})}{(\sqrt{(x_{23} y_{13} - x_{13} y_{23}) (x_{23} z_{13} - x_{13} z_{23})})}$$

Το σ_2 υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sigma_2 = \frac{(\sqrt{(-X_{13}^2 x_{23} z_{23} + X_{13} X_{23} (x_{23} z_{13} + x_{13} z_{23}) + x_{23} (Y_{13} Y_{23} z_{13} - Y_{13}^2 z_{23} - Z_{13}^2 z_{23} + z_{13} Z_{13} Z_{23}) - x_{13} (X_{23}^2 z_{13} + Y_{23}^2 z_{13} - Y_{13} Y_{23} z_{23} - Z_{13} z_{23} Z_{23} + z_{13} Z_{23}^2)})}{(\sqrt{-(x_{23} y_{13} - x_{13} y_{23}) (-y_{23} z_{13} - y_{13} z_{23})})}$$

Και το σ_3 από την σχέση:

$$\sigma_3 = \frac{(\sqrt{(X_{13}^2 x_{23} y_{23} + X_{13} X_{23} (x_{23} y_{13} + x_{13} y_{23}) + x_{23} (Y_{13}^2 y_{23} - y_{13} Y_{13} Y_{23} + y_{23} Z_{13}^2 - y_{13} Z_{13} Z_{23}) + x_{13}(X_{23}^2 y_{13} - Y_{13} y_{23} Y_{23} + y_{13} Y_{23}^2 - y_{23} Z_{13} Z_{23} + y_{13} Z_{23}^2)})}{(\sqrt{(x_{23} z_{13} - x_{13} z_{23}) (y_{23} z_{13} - y_{13} z_{23})})}$$

Με αυτό τον τρόπο μπορούν να υπολογιστούν οι 3 κλίμακες:

$$\mu_1 (\text{κλίμακα κατά } x) = 1/\sigma_1$$

$$\mu_2 (\text{κλίμακα κατά } y) = 1/\sigma_2$$

$$\mu_3 (\text{κλίμακα κατά } z) = 1/\sigma_3$$

Για να υπολογιστούν οι προσωρινές τιμές των τριών γωνιών στροφής (ω , ϕ , κ) θα προσδιοριστούν τα μεγέθη a , b , c :

Το a από την σχέση:

$$a = \frac{(X_{23} Z_{13} - X_{13} Z_{23} + (-X_{23} z_{13} + X_{13} z_{23}) \sigma_3 + \sigma_1 (x_{23} Z_{13} - x_{13} Z_{23} + (-x_{23} z_{13} + x_{13} z_{23}) \sigma_3))}{(-X_{23} Y_{13} + X_{13} Y_{23} + (-X_{23} y_{13} + X_{13} y_{23}) \sigma_2 + \sigma_1 (-x_{23} Y_{13} + x_{13} Y_{23} + (-x_{23} y_{13} + x_{13} y_{23}) \sigma_2))}$$

Το b :

$$b = (a Y_{13} + Z_{13} + a y_{13} \sigma_2 - z_{13} \sigma_3) / (X_{13} + x_{13} \sigma_1)$$

Και το c :

$$c = (X_{13} + b Z_{13} - x_{13} \sigma_1 + b z_{13} \sigma_3) / (Y_{13} + y_{13} \sigma_2)$$

Βρίσκοντας τις τιμές των a , b , c υπολογίζεται ο πίνακα στροφής R_s ο οποίος είναι ίδιος με τον πίνακα στροφής R του αφινικού μετασχηματισμού εκφρασμένος ως προς τις γωνίες ω , ϕ , κ . Δηλαδή ισχύει:

$$R_{\text{symbolic}} = \begin{bmatrix} \frac{1+a^2-b^2-c^2}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{2ab-2c}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{2(b+ac)}{1+a^2+b^2+c^2} \\ \frac{2(ab+c)}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{1-a^2+b^2-c^2}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{2(a-bc)}{1+a^2+b^2+c^2} \\ \frac{2(-b+ac)}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{2(a+bc)}{1+a^2+b^2+c^2} & \frac{1-a^2-b^2+c^2}{1+a^2+b^2+c^2} \end{bmatrix} =$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi * \cos\kappa & \cos\omega * \sin\kappa + \sin\omega * \sin\varphi * \cos\kappa & \sin\omega * \sin\kappa - \cos\omega * \sin\varphi * \cos\kappa \\ -\cos\varphi * \sin\kappa & \cos\omega * \cos\kappa - \sin\omega * \sin\varphi * \sin\kappa & \sin\omega * \cos\kappa + \cos\omega * \sin\varphi * \sin\kappa \\ \sin\varphi & -\sin\omega * \cos\varphi & \cos\omega * \cos\varphi \end{bmatrix}$$

Οπότε οι προσωρινές τιμές των γωνιών υπολογίζονται:

- $\varphi = \sin^{-1} \frac{2(-b+ac)}{1+a^2+b^2+c^2}$ (στροφή ως προς τον άξονα Y)
- $\omega = -\sin^{-1} \frac{2(a+bc)}{\frac{1+a^2+b^2+c^2}{\cos\varphi}}$ (στροφή ως προς τον άξονα X)
- $\kappa = \cos^{-1} \frac{\frac{1+a^2-b^2-c^2}{1+a^2+b^2+c^2}}{\cos\varphi}$ (στροφή ως προς τον άξονα Z)

Γ' μέρος : Προγραμματισμός στη Matlab

```
% Χρησιμοποιώντας την εντολή format long κρατάμε 15 ψηφία
format long;

% Τα δεδομένα που πρέπει να δίνονται από τον χρήστη είναι οι
% συντεταγμένες των 2 συστημάτων και το σφάλμα των συντεταγμένων του ενός
% συστήματος!!!!!!

% Με τις παρακάτω εντολές διαβάζονται 3 αρχεία Txt που περιέχουν τις
% συντεταγμένες του πρώτου συστήματος, τις συντεταγμένες του δεύτερου
% συστήματος και το σφάλμα προσδιορισμού των συντεταγμένων του δεύτερου συστήμα-
% τος.

XR=dlmread('XYZCMM.txt',';'); % Ο πίνακας που περιέχει τις συντεταγμένες του CMM
XT=dlmread('XYZTotalStation.txt',';'); % Ο πίνακας που περιέχει τις συντεταγμέ-
% νες του Total Station
es=dlmread('sfalma.txt'); % es είναι το σφάλμα προσδιορισμού στις συντεταγμένες
% του Total station

% Και έτσι προκύπτει οι πίνακες XR και XT διαστάσεων 1 x 3*p , όπου p είναι όσα
% σημεία έχουμε μετρήσει και θα συμμετάσχουν στον αφινικό μετασχηματισμό. Η
% μεταβλητή p θα οριστεί παρακάτω

%-----
%-----

% Εκκινάει η διαδικασία υπολογισμού των προσωρινών τιμών των παραμέτρων του
% αφινικού μετασχηματισμού.
% ΠΡΟΣΟΧΗ θα χρησιμοποιηθούν μόνο μία τριάδα σημείων (τα πρώτα 3 πρώτα σημεία που
% δίνει ο χρήστης)!!!

% Υπολογίζουμε τις διαφορές που θα μας βοηθήσουν στους υπολογισμούς
XR12=XR(1)-XR(4);
XR13=XR(1)-XR(7);
XR23=XR(4)-XR(7);
YR12=XR(2)-XR(5);
YR13=XR(2)-XR(8);
YR23=XR(5)-XR(8);
ZR12=XR(3)-XR(6);
ZR13=XR(3)-XR(9);
ZR23=XR(6)-XR(9);

TETXR12=XR12^2;
TETXR13=XR13^2;
TETXR23=XR23^2;
TETYR12=YR12^2;
TETYR13=YR13^2;
TETYR23=YR23^2;
TETZR12=ZR12^2;
TETZR13=ZR13^2;
TETZR23=ZR23^2;

XT12=XT(1)-XT(4);
XT13=XT(1)-XT(7);
XT23=XT(4)-XT(7);
YT12=XT(2)-XT(5);
YT13=XT(2)-XT(8);
YT23=XT(5)-XT(8);
ZT12=XT(3)-XT(6);
ZT13=XT(3)-XT(9);
```

```

ZT23=XT(6)-XT(9);

% Η μέθοδος του υπολογισμού των προσωρινών περιέχει ρίζα και πρέπει να
% εξασφαλιστεί το γεγονός πως η ποσότητα μέσα στην ρίζα είναι θετική. Οπότε
% θα γίνει έλεγχος και αν δεν είναι θετική, θα ζητείται από τον χρήστη να
% δώσει άλλο set δεδομένων..
% Η δομή if ολοκληρώνεται στο τέλος του προγράμματος
qq=3;
if (XT23*YT13-XT13*YT23)*(XT23*ZT13-XT13*ZT23)<=0
    disp(sprintf('Η μέθοδος με αυτά τα %1.0f σημεία δεν μπορεί να υπολογίσει τις
    αρχικές τιμές. Ξαναδώσε τα δεδομένα αλλάζοντας την σειρά τους!! ',qq));
    break;
elseif
    (TETXR23*YT13*ZT13+YT13*TETZR23*ZT13+TETXR13*YT23*ZT23+TETZR13*YT23*ZT23+YT23*TE
    TZR13*ZT23-XT13*XR23*(YT23*ZT13+YT13*ZT23)-YR13*YR23*(YT23*ZT13+YT13*ZT23)-
    YT23*ZT13*ZR13*ZR23-YT13*ZR13*ZT23*ZR23+YT13*ZT13*TETZR23)<=0
    disp(sprintf('Η μέθοδος με αυτά τα %1.0f σημεία δεν μπορεί να υπολογίσει τις
    αρχικές τιμές. Ξαναδώσε τα δεδομένα αλλάζοντας την σειρά τους!! ',qq));
    break;

elseif (- (XT23*YT13-XT13*YT23) * (-YT23*ZT13+YT13*ZT23)) <=0
    disp(sprintf('Η μέθοδος με αυτά τα %1.0f σημεία δεν μπορεί να υπολογίσει τις
    αρχικές τιμές. Ξαναδώσε τα δεδομένα αλλάζοντας την σειρά τους!! ',qq));
    break;
elseif (-TETXR13*XT23*ZT23+XR13*XR23*(XT23*ZT13+XT13*ZT23)+XT23*(YR13*YR23*ZT13-
    TETZR13*ZT23-TETZR13*ZT23+ZT13*ZR13*ZR23)-XT13*(TETXR23*ZT13+TETZR23*ZT13-
    YR13*YR23*ZT23-ZR13*ZT23*ZR23+ZT13*TETZR23)) <=0
    disp(sprintf('Η μέθοδος με αυτά τα %1.0f σημεία δεν μπορεί να υπολογίσει τις
    αρχικές τιμές. Ξαναδώσε τα δεδομένα αλλάζοντας την σειρά τους!! ',qq));
    break;

elseif (XT23*ZT13-XT13*ZT23)*(YT23*ZT13-YT13*ZT23)<=0
    disp(sprintf('Η μέθοδος με αυτά τα %1.0f σημεία δεν μπορεί να υπολογίσει τις
    αρχικές τιμές. Ξαναδώσε τα δεδομένα αλλάζοντας την σειρά τους!! ',qq));
    break;
elseif (TETXR13*XT23*YT23-XT13*XR23*(XT23*YT13+XT13*YT23)+XT23*(TETZR13*YT23-
    YT13*YR13*YR23+YT23*TETZR13-YT13*ZR13*ZR23)+XT13*(TETXR23*YT13-
    YR13*YT23*YR23+YT13*TETZR23-YT23*ZR13*ZR23+YT13*TETZR23)) <=0
    disp(sprintf('Η μέθοδος με αυτά τα %1.0f σημεία δεν μπορεί να υπολογίσει τις
    αρχικές τιμές. Ξαναδώσε τα δεδομένα αλλάζοντας την σειρά τους!! ',qq));
    break;

else
% Το σώμα της else είναι όλο το υπόλοιπο πρόγραμμα!!!

%Υπολογίζουμε τα μεγέθη s1,s2,s3,a,b,c για να υπολογίσουμε τις
%3 στροφές και τις 3 κλίμακες σύμφωνα με:
s1=(sqrt(TETXR23*YT13*ZT13+YT13*TETZR23*ZT13+TETXR13*YT23*ZT23+TETZR13*YT23*ZT23
+YT23*TETZR13*ZT23-XT13*XR23*(YT23*ZT13+YT13*ZT23)-
YR13*YR23*(YT23*ZT13+YT13*ZT23)-YT23*ZT13*ZR13*ZR23-
YT13*ZR13*ZT23*ZR23+YT13*ZT13*TETZR23))/(sqrt((XT23*YT13-XT13*YT23)*(XT23*ZT13-
XT13*ZT23)));

s2=(sqrt(-
TETXR13*XT23*ZT23+XR13*XR23*(XT23*ZT13+XT13*ZT23)+XT23*(YR13*YR23*ZT13-
TETZR13*ZT23-TETZR13*ZT23+ZT13*ZR13*ZR23)-XT13*(TETXR23*ZT13+TETZR23*ZT13-
YR13*YR23*ZT23-ZR13*ZT23*ZR23+ZT13*TETZR23)))/(sqrt(-(XT23*YT13-XT13*YT23)*(-
YT23*ZT13+YT13*ZT23)));

s3=(sqrt(TETXR13*XT23*YT23-XT13*XR23*(XT23*YT13+XT13*YT23)+XT23*(TETZR13*YT23-
YT13*YR13*YR23+YT23*TETZR13-YT13*ZR13*ZR23)+XT13*(TETXR23*YT13-
YR13*YT23*YR23+YT13*TETZR23-YT23*ZR13*ZR23+YT13*TETZR23)))/(sqrt((XT23*ZT13-
XT13*ZT23)*(YT23*ZT13-YT13*ZT23)));

```

```

a=(XR23*ZR13-XR13*ZR23+(-XR23*ZT13+XR13*ZT23)*s3+s1*(XT23*ZR13-XT13*ZR23+(-
XT23*ZT13+XT13*ZT23)*s3))/(-XR23*YR13+XR13*YR23+(-XR23*YT13+XR13*YT23)*s2+s1*(-
XT23*YR13+XT13*YR23+(-XT23*YT13+XT13*YT23)*s2));

b=(a*YR13+ZR13+a*YT13*s2-ZT13*s3)/(XR13+XT13*s1);

c=(XR13+b*ZR13-XT13*s1+b*ZT13*s3)/(YR13+YT13*s2);

% Τις μεταθέσεις XO YO ZO δεν χρειάζεται να τις υπολογίσουμε(αν και μπορούμε)
% και θα τις αρχικοποιήσουμε ως μηδέν. Δεν συμμετέχουν στην συνόρθωση
dx=0;
dy=0;
dz=0;

% Ο συμβολικός πίνακας RS (R Symbolic) χρειάζεται να υπολογίσουμε μόνο συγκεκρι-
μένα
% στοιχεία του, ώστε να τον ταυτίσουμε με τον πραγματικό R και να υπολογίσουμε
τις
% πραγματικές γωνίες και στροφές:
RS11=(1+a^2-b^2-c^2)/(1+a^2+b^2+c^2);
RS12=1;
RS13=1;
RS21=1;
RS22=1;
RS23=1;
RS31=(2*(-b+a*c))/(1+a^2+b^2+c^2);
RS32=(2*(a+b*c))/(1+a^2+b^2+c^2);
RS33=1;

RS = [RS11 RS12 RS13; RS21 RS22 RS23; RS31 RS32 RS33];

% Έτσι υπολογίσουμε σε ακτίνια(rad)τις 3 προσωρινές γωνίες w=ω , f=φ και k=κ:
f=asin(RS(3,1)); % Η γωνία φ κατά τον άξονα Y
w=- (asin(RS(3,2)/cos(f))); % Η γωνία ω κατά τον άξονα X
k=acos(RS(1,1)/cos(f)); % Η γωνία κ κατά τον άξονα Z

% Οι γωνίες σε μοίρες προκύπτουν:
wo=w*180/pi(); % Η γωνία ω κατά τον άξονα X
fo=f*180/pi(); % Η γωνία φ κατά τον άξονα Y
ko=k*180/pi(); % Η γωνία κ κατά τον άξονα Z

% Για τους συντελεστές κλίμακας ισχύουν:
m1=1/s1; % Ο συντελεστής κλίμακας στον άξονα X
m2=1/s2; % Ο συντελεστής κλίμακας στον άξονα Y
m3=1/s3; % Ο συντελεστής κλίμακας στον άξονα Z

% Οπότε μπορούμε να υπολογίσουμε τον πίνακα VAL που περιέχει τις 9 προσωρινές
% τιμές των παραμέτρων του αφινικού και είναι διαστάσεων 9x1
VAL=[dx;dy;dz;m1;m2;m3;w;f;k];

% Σε αυτό το σημείο ξεκινάει η διαδικασία της συνόρθωσης (δομή while). Έχει
% οριστεί μετά από 10 επαναλήψεις (μετρητής q) το πρόγραμμα να σταματάει και να
βγάζει
% μήνυμα πως η μέθοδος δεν συγκλίνει. Επίσης έχει οριστεί το πρόγραμμα να σταμα-
τήσι στην
% επανάληψη που η διαφορά δύο so a posteriori σφαλμάτων 2 επαναλήψεων είναι
% μικρότερη του 0.0000001. Αυτό θα γίνει με την εντολή break!!

q=1;

```

```

while q<10

    VAL(1)=0;
    VAL(2)=0;
    VAL(3)=0;
    m1=VAL(4);
    m2=VAL(5);
    m3=VAL(6);
    w=VAL(7);
    f=VAL(8);
    k=VAL(9);

% Γέμισμα πίνακα στροφής R χρησιμοποιώντας τις προσωρινές τιμές ω=w , φ=f
% και κ=k
R11 = cos(f)*cos(k);
R12 = cos(w)*sin(k)+sin(w)*sin(f)*cos(k);
R13 = sin(w)*sin(k)-cos(w)*sin(f)*cos(k);
R21 = -cos(f)*sin(k);
R22 = cos(w)*cos(k)-sin(w)*sin(f)*sin(k);
R23 = sin(w)*cos(k)+cos(w)*sin(f)*sin(k);
R31= sin(f);
R32 = -sin(w)*cos(f);
R33 = cos(w)*cos(f);

% Οπότε ο πίνακας στροφής R είναι 3x3
R = [R11 R12 R13; R21 R22 R23; R31 R32 R33];

% Στο συγκεκριμένο σημείο θα ορίσουμε το p , που είναι το πλήθος των σημείων:
p=(length(XT))/3;

% Γέμισμα του πίνακα A. Θα χρησιμοποιήσουμε 2 μετρητές n και m. Ο πίνακας A
% είναι διαστάσεων 3*p x 9, με p το πλήθος των σημείων που θα χρησιμοποιηθούν
για την συνόρθωση.
% Το 9 προκύπτει από τις 9 παραμέτρους του αφινικού μετασχηματισμού
n=1;
m=1;
while n<3*p
    A(n,1)=1;
    A(n,2)=0;
    A(n,3)=0;
    A(n,4)=R(1,1)*XT(1,m);
    A(n,5)=R(1,2)*XT(1,m+1);
    A(n,6)=R(1,3)*XT(1,m+2);
    A(n,7)=-m2*R(1,3)*XT(1,m+1)+m3*R(1,2)*XT(1,m+2);
    A(n,8)=-cos(k)*(m1*sin(f)*XT(1,m)+R(3,2)*XT(1,m+1)+m3*R(3,3)*XT(1,m+2));
    A(n,9)=m1*R(2,1)*XT(1,m)+m2*R(2,2)*XT(1,m+1)+m3*R(2,3)*XT(1,m+2);
    n=n+1;
    A(n,1)=0;
    A(n,2)=1;
    A(n,3)=0;
    A(n,4)=R(2,1)*XT(1,m);
    A(n,5)=R(2,2)*XT(1,m+1);
    A(n,6)=R(2,3)*XT(1,m+2);
    A(n,7)=-m2*R(2,3)*XT(1,m+1)+m3*R(2,2)*XT(1,m+2);
    A(n,8)=sin(k)*(m1*sin(f)*XT(1,m)+R(3,2)*XT(1,m+1)+m3*R(3,3)*XT(1,m+2));
    A(n,9)=- (m1*R(1,1)*XT(1,m)+m2*R(1,2)*XT(1,m+1)+m3*R(1,3)*XT(1,m+2));
    n=n+1;
    A(n,1)=0;
    A(n,2)=0;
    A(n,3)=1;
    A(n,4)=R(3,1)*XT(1,m);

```

```

A(n,5)=R(3,2)*XT(1,m+1);
A(n,6)=R(3,3)*XT(1,m+2);
A(n,7)=-m2*R(3,3)*XT(1,m+1)+m3*R(3,2)*XT(1,m+2);
A(n,8)=m1*cos(f)*XT(1,m)+m2*sin(w)*sin(f)*XT(1,m+1)-
m3*cos(w)*sin(f)*XT(1,m+2);
A(n,9)=0;
n=n+1;
m=m+3;
end

% Γέμισμα του πίνακα L που θα έχει διαστάσεις 3*p x 1. Θα εφαρμόσουμε
% παρόμοια διαδικασία όπως με το γέμισμα του πίνακα A
n=1;
m=1;
while n<3*p
    L(n,1)=XR(1,m)-(m1*R(1,1)*XT(1,m)+m2*R(1,2)*XT(1,m+1)+m3*R(1,3)*XT(1,m+2));
    n=n+1;
    L(n,1)=XR(1,m+1)-
(m1*R(2,1)*XT(1,m)+m2*R(2,2)*XT(1,m+1)+m3*R(2,3)*XT(1,m+2));
    n=n+1;
    L(n,1)=XR(1,m+2)-
(m1*R(3,1)*XT(1,m)+m2*R(3,2)*XT(1,m+1)+m3*R(3,3)*XT(1,m+2));
    n=n+1;
    m=m+3;
end

% Γέμισμα του πίνακα C
% Όπου es το σφάλμα των συντεταγμένων που δίνεται από τον χρήστη
% ή υπολογίζεται με τη Matlab και αποθηκεύεται. Εδώ είναι 0.5 mm και
% έχει δοθεί αρχικά..
for i=1:1:3*p
for j=1:1:3*p
if i==j
    C(i,j)=es^2;
else
    C(i,j)=0;
end
end
end

% Εδώ θα υπολογιστεί ο πίνακας C-1 (δηλαδή ο αντίστροφος του C). Έχει
% διαστάσεις 3*p x 3*p και όλα τα στοιχεία του εκτός από την κύρια διαγώνιο,
% είναι μηδενικά.
for i=1:1:3*p
for j=1:1:3*p
if i==j
    Px(i,j)=1/(es^2);
else
    Px(i,j)=0;
end
end
end

% Τώρα θα υπολογίσουμε την ποσότητα dx = (AT*C-1*A)-1 * AT*C-1*L
WW=A'*Px*A;
W=inv(WW);
DX=W*A'*Px*L;

% Οπότε οι καινούργιες τιμές των 9 παραμέτρων είναι:
VAL=VAL+DX;

```

```

% Το σφάλμα ε θα υπολογιστεί από την σχέση  $\varepsilon = L - A * \delta x$ 
e=L-A*DX;

% Το aposteriori τυπικό σφάλμα θα υπολογιστεί από:
so(q)=sqrt((e'*P*x*e)/(3*p-9));

% Και ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας θα υπολογιστεί από:
Cxx=(so(q)^2)*W;

fprintf('Αποτελέσματα για την επανάληψη %1.0f\n',q)

% Εκτύπωση των παραμέτρων του αφινικού
fprintf('H μετάθεση κατά τον άξονα X είναι:%+1.4f\n',VAL(1));
fprintf('H μετάθεση κατά τον άξονα Y είναι:%+1.4f\n',VAL(2));
fprintf('H μετάθεση κατά τον άξονα Z είναι:%+1.4f\n',VAL(3));
fprintf('O συντελεστής κλίμακας στον άξονα X είναι:%+1.8f\n',VAL(4));
fprintf('O συντελεστής κλίμακας στον άξονα Y είναι:%+1.8f\n',VAL(5));
fprintf('O συντελεστής κλίμακας στον άξονα Z είναι:%+1.8f\n',VAL(6));
fprintf('H γωνία στροφής ω (άξονας X) είναι:%+1.4f\n',VAL(7)*180/pi);
fprintf('H γωνία στροφής φ (άξονας Y) είναι:%+1.4f\n',VAL(8)*180/pi);
fprintf('H γωνία στροφής κ (άξονας Z) είναι:%+1.4f\n',VAL(9)*180/pi);

% Εκτύπωση των σφαλμάτων των παραμέτρων του αφινικού
sdmetathesix = sprintf('To σφάλμα της μετάθεσης κατά τον άξονα X εί-
vai:%+1.5f',sqrt(Cxx(1,1)));
sdmetathesiy = sprintf('To σφάλμα της μετάθεσης κατά τον άξονα Y εί-
vai:%+1.5f',sqrt(Cxx(2,2)));
sdmetathesiz = sprintf('To σφάλμα της μετάθεσης κατά τον άξονα Z εί-
vai:%+1.1f',sqrt(Cxx(3,3)));
sdklimakax = sprintf('To σφάλμα του συντελεστή κλίμακας στον άξονα X εί-
vai:%+1.5f',sqrt(Cxx(4,4)));
sdklimakay = sprintf('To σφάλμα του συντελεστή κλίμακας στον άξονα Y εί-
vai:%+1.5f',sqrt(Cxx(5,5)));
sdklimakaz = sprintf('To σφάλμα του συντελεστή κλίμακας στον άξονα Z εί-
vai:%+1.5f',sqrt(Cxx(6,6)));
sdstrofifix = sprintf('To σφάλμα της γωνίας στροφής ω (γύρω από τον άξονα X) εί-
vai:%+1.5f',sqrt(Cxx(7,7)));
sdstrofiy = sprintf('To σφάλμα της γωνίας στροφής φ (γύρω από τον άξονα Y) εί-
vai:%+1.5f',sqrt(Cxx(8,8)));
sdstrofiz = sprintf('To σφάλμα της γωνίας στροφής κ (γύρω από τον άξονα Z) εί-
vai:%+1.5f',sqrt(Cxx(9,9)));

% Εκτύπωση του aposteriori τυπικού σφάλματος
disp(sprintf('H τιμή του aposteriori τυπικού σφάλματος είναι:%+1.10f\n',so(q)));

q=q+1;

if q>2
    if abs(abs(so(q-1))-abs(so(q-2)))<0.0000001
        disp(sprintf('H συνόρθωση έγινε και τερματίστηκε επιτυχώς στην %1.0fη
επανάληψη ',q-1));
        break % Το σημείο που η while τερματίζεται αν ικανοποιείται η συνθήκη
    end
end

end

if q==10
    disp(sprintf('H μέθοδος μετά από %1.0f επαναλήψεις δεν συγκλίνει. Ξαναδώσε
τα δεδομένα και έλεγξε για πιθανό λάθος!! ',q));
end

```


end

end

Αποτελέσματα Μετρήσεων CMM

Πρώτο πρίσμα



```
DATE=6/12/2014                TIME=7:30:12 PM
PART NAME   : SPHERE GAGE - TEST 1 -050514
REV NUMBER  :
SER NUMBER  :
STATS COUNT : 1

STARTUP     =ALIGNMENT/START,RECALL:USE_PART_SETUP,LIST=YES
            ALIGNMENT/END
            MODE/MANUAL
            FLY/ON,3
            FORMAT/TEXT,OPTIONS, ,HEADINGS,SYMBOLS, ;NOM,TOL,MEAS,DEV,OUTTOL, ,
            LOADPROBE/ETEM PROBE
            TIP/T1A0B0, SHANKIJK=0, 0, 1, ANGLE=90
PNT1        =FEAT/POINT,CARTESIAN
            THEO/<428.973,425.102,-508.394>,<0,0,1>
            ACTL/<428.973,425.102,-508.394>,<0,0,1>
            MEAS/POINT,1,WORKPLANE
            HIT/BASIC,NORMAL,<428.973,425.102,-508.394>,<0,0,1>,<428.973,425.102,-508.394>,USE THEO=
YES
            ENDMEAS/
A1          =ALIGNMENT/START,RECALL:STARTUP,LIST=YES
            ALIGNMENT/TRANS,XAXIS,PNT1
            ALIGNMENT/TRANS,YAXIS,PNT1
            ALIGNMENT/TRANS,ZAXIS,PNT1
            ALIGNMENT/END
            MODE/DCC
            MOVESPEED/ 120
            CLEARP/ZPLUS,50,ZPLUS,0,ON
SPH1        =FEAT/SPHERE,CARTESIAN,OUT
            THEO/<2.945,-1.026,-18.82>,<0,0,1>,38.11
            ACTL/<2.945,-1.026,-18.818>,<0,0,1>,38.105
            MEAS/SPHERE,29
            MOVE/CLEARPLANE
            HIT/BASIC,NORMAL,<2.94,-20.075,-18.379>,<-0.0002587,-0.9997694,0.0214728>,<2.939,-20.073
,-18.383>,USE THEO=YES
            MOVE/CIRCULAR
            HIT/BASIC,NORMAL,<-8.704,-16.452,-18.379>,<-0.5669527,-0.8234703,0.0214803>,<-8.496,-16.
254,-18.388>,USE THEO=YES
            MOVE/CIRCULAR
            HIT/BASIC,NORMAL,<-12.296,-12.94,-18.379>,<-0.8144651,-0.5798148,0.0214802>,<-12.097,-12
.711,-18.389>,USE THEO=YES
            MOVE/CIRCULAR
            HIT/BASIC,NORMAL,<-15.923,-3.763,-18.379>,<-0.9908572,-0.1331945,0.021475>,<-15.908,-3.7
44,-18.383>,USE THEO=YES
            MOVE/CIRCULAR
            HIT/BASIC,NORMAL,<-14.182,7.652,-18.379>,<-0.9062054,0.4222924,0.0214682>,<-14.066,7.548
,-18.386>,USE THEO=YES
            MOVE/CIRCULAR
            HIT/BASIC,NORMAL,<-5.987,15.975,-18.38>,<-0.4347983,0.9002722,0.0214593>,<-5.869,15.857,
-18.387>,USE THEO=YES
            MOVE/CIRCULAR
            HIT/BASIC,NORMAL,<6.04,17.797,-18.38>,<0.1505566,0.988369,0.0214362>,<6.017,17.776,-18.3
84>,USE THEO=YES
            MOVE/CIRCULAR
            HIT/BASIC,NORMAL,<17.872,11.314,-18.38>,<0.7992451,0.6006226,0.021442>,<17.652,11.077,-1
8.39>,USE THEO=YES
            MOVE/CIRCULAR
            HIT/BASIC,NORMAL,<20.919,5.554,-18.38>,<0.9471338,0.320122,0.0214329>,<20.841,5.493,-18.
385>,USE THEO=YES
```

```

MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<21.41,3.861,-18.38>,<0.971078,0.2377984,0.0214354>,<21.363,3.825,-18.3
85>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<20.347,3.867,-12.405>,<0.9196713,0.2381642,0.312222>,<20.251,3.822,-12
.486>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<17.261,3.866,-6.644>,<0.7694763,0.2381075,0.5926306>,<17.036,3.764,-6.
925>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<14.168,3.867,-3.812>,<0.5461594,0.2381228,0.8031235>,<13.955,3.78,-4.0
32>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<7.033,3.867,-0.779>,<0.1989058,0.2381141,0.9506515>,<6.992,3.83,-0.844
>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-0.497,0.836,-0.14>,<-0.1675026,0.0906144,0.9816985>,<-0.477,0.825,-0.
166>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-6.333,0.837,-2.072>,<-0.4514729,0.0906578,0.8876674>,<-6.216,0.813,-2
.213>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-10.9,0.837,-5.244>,<-0.673736,0.0906538,0.7333906>,<-10.574,0.792,-5.
516>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-13.076,0.836,-8.232>,<-0.8522772,0.0906056,0.5151837>,<-12.912,0.806,
-8.415>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-14.587,0.836,-11.286>,<-0.9259281,0.0906333,0.3666644>,<-14.498,0.82,
-11.378>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<1.684,-18.434,-10.856>,<-0.061388,-0.9198047,0.3875445>,<1.7,-18.335,-
10.954>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<0.616,-14.998,-5.495>,<-0.1133848,-0.7527146,0.6485095>,<0.667,-14.751
,-5.801>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<0.616,-8.763,-1.421>,<-0.1133562,-0.3764958,0.9194571>,<0.638,-8.683,-
1.526>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<0.617,6.351,-1.276>,<-0.1132907,0.3589707,0.9264477>,<0.64,6.272,-1.37
1>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<0.617,11.256,-3.754>,<-0.113292,0.6704719,0.7332342>,<0.685,10.975,-4.
196>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<0.618,15.886,-10.001>,<-0.1133198,0.8960172,0.4293155>,<0.646,15.77,-1
0.128>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<12.215,11.072,-6.512>,<0.451138,0.6615379,0.5990343>,<11.945,10.788,-6
.886>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-2.875,-10.662,-3.123>,<-0.2832514,-0.4689107,0.8365951>,<-2.776,-10.5
04,-3.313>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-2.869,4.878,-1.508>,<-0.2829121,0.2873028,0.9151054>,<-2.802,4.816,-1
.615>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-8.405,-0.377,-2.794>,<-0.6250797,0.0316031,0.7799209>,<-8.105,-0.398,
-3.315>,USE THEO=YES
ENDMEAS/
A2 =ALIGNMENT/START,RECALL:A1,LIST=YES
ALIGNMENT/TRANS,XAXIS,SPH1
ALIGNMENT/TRANS,YAXIS,SPH1
ALIGNMENT/TRANS,ZAXIS,SPH1
ALIGNMENT/END
DISPLAYPRECISION/5
FORMAT/TEXT,OPTIONS, ,HEADINGS,SYMBOLS, ;MEAS, , , , ,
DIM LOC1= LOCATION OF SPHERE SPH1 UNITS=IN , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH HALF ANGLE=NO
AX MEAS
D 1.50020 -#--
END OF DIMENSION LOC1
DIM CIRTY1= CIRCULARITY OF SPHERE SPH1 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 ARROWDENSITY=100 OUTPUT=BOTH
AX MEAS
M 0.00783 ---#
PLN1 =FEAT/PLANE,CARTESIAN,TRIANGLE
THEO/<0.98838,-7.05916,9.67384>,<0.9908764,0.1347343,-0.0032613>
ACTL/<0.96066,-6.85874,9.66891>,<0.9908777,0.1347265,-0.0031873>

```

```

MEAS/PLANE,10
MOVE/CLEARPLANE
HIT/BASIC,NORMAL,<1.8175,-13.16851,5.11038>,<0.9908764,0.1347343,-0.0032613>,<1.80402,-1
3.16723,5.11033>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<1.34466,-9.68132,5.11035>,<0.9908764,0.1347343,-0.0032613>,<1.33019,-9
.68354,5.11029>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<0.54994,-3.842,5.11029>,<0.9908764,0.1347343,-0.0032613>,<0.53597,-3.8
4322,5.11073>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<0.5585,-3.84182,7.95176>,<0.9908764,0.1347343,-0.0032613>,<0.54552,-3.
84704,7.9517>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<1.02734,-7.28951,7.95229>,<0.9908764,0.1347343,-0.0032613>,<1.01386,-7
.29223,7.95224>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<1.4797,-10.59564,8.71982>,<0.9908764,0.1347343,-0.0032613>,<1.46622,-1
0.59986,8.71976>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<1.05994,-7.40218,13.06274>,<0.9908764,0.1347343,-0.0032613>,<1.04496,-
7.4014,13.06218>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<0.51562,-3.40446,13.0627>,<0.9908764,0.1347343,-0.0032613>,<0.50165,-3
.40169,13.06264>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<0.52517,-3.40882,15.30468>,<0.9908764,0.1347343,-0.0032613>,<0.50969,-
3.40504,15.30462>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<0.86905,-5.94396,15.3047>,<0.9908764,0.1347343,-0.0032613>,<0.85457,-5
.94618,15.30465>,USE THEO=YES
ENDMEAS/
PLN2 =FEAT/PLANE,CARTESIAN,TRIANGLE
THEO/<7.18805,1.17652,10.09533>,<0.1346484,-0.9906992,0.0196205>
ACTL/<7.38864,1.20338,10.12267>,<0.1348058,-0.9906725,0.019882>
MEAS/PLANE,10
MOVE/CLEARPLANE
HIT/BASIC,NORMAL,<3.47861,0.76119,15.30462>,<0.1346484,-0.9906992,0.0196205>,<3.48104,0.
77585,15.30259>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<5.71356,1.0662,15.30458>,<0.1346484,-0.9906992,0.0196205>,<5.71448,1.0
7936,15.30255>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<3.71003,0.71845,11.59665>,<0.1346484,-0.9906992,0.0196205>,<3.70445,0.
73211,11.59462>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<7.19245,1.19346,11.59659>,<0.1346484,-0.9906992,0.0196205>,<7.19387,1.
20612,11.59506>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<12.03983,1.85198,11.5965>,<0.1346484,-0.9906992,0.0196205>,<12.04276,1
.86614,11.59497>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<14.49319,2.0992,7.2635>,<0.1346484,-0.9906992,0.0196205>,<14.49512,2.1
1337,7.26147>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<10.76128,1.59119,7.26357>,<0.1346484,-0.9906992,0.0196205>,<10.7577,1.
60435,7.26104>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<6.77737,1.05017,7.26364>,<0.1346484,-0.9906992,0.0196205>,<6.77479,1.0
6184,7.26211>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<4.86043,0.80572,8.14067>,<0.1346484,-0.9906992,0.0196205>,<4.85586,0.8
1839,8.13864>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<4.86588,0.76658,5.91619>,<0.1346484,-0.9906992,0.0196205>,<4.86631,0.7
7624,5.91366>,USE THEO=YES
ENDMEAS/
PLN3 =FEAT/PLANE,CARTESIAN,TRIANGLE
THEO/<8.76642,-7.19485,0.14389>,<0.0005585,0.0201207,0.9997974>
ACTL/<8.76807,-7.1578,0.14212>,<0.0005752,0.0200907,0.999798>
MEAS/PLANE,10
MOVE/CLEARPLANE
HIT/BASIC,NORMAL,<5.32068,-3.1442,0.06439>,<0.0005585,0.0201207,0.9997974>,<5.3192,-3.14
063,0.06338>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<5.31701,-6.8994,0.14044>,<0.0005585,0.0201207,0.9997974>,<5.31603,-6.9
0033,0.13892>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<5.31727,-12.43169,0.2515>,<0.0005585,0.0201207,0.9997974>,<5.31479,-12
.43012,0.24999>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<8.46718,-12.4237,0.24945>,<0.0005585,0.0201207,0.9997974>,<8.4722,-12.
41413,0.24794>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<8.46331,-9.46005,0.18992>,<0.0005585,0.0201207,0.9997974>,<8.46433,-9.
44847,0.1884>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<8.46351,-4.8113,0.09636>,<0.0005585,0.0201207,0.9997974>,<8.46454,-4.7
9723,0.09484>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<12.00641,-4.81682,0.0943>,<0.0005585,0.0201207,0.9997974>,<12.01193,-4
.80524,0.09279>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<12.00125,-8.58001,0.17035>,<0.0005585,0.0201207,0.9997974>,<12.00277,-
8.57994,0.16883>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<13.44738,-4.54031,0.08827>,<0.0005585,0.0201207,0.9997974>,<13.45291,-
4.53273,0.08676>,USE THEO=YES
HIT/BASIC,NORMAL,<8.86851,-4.54029,0.09085>,<0.0005585,0.0201207,0.9997974>,<8.86204,-4.
52921,0.08934>,USE THEO=YES
ENDMEAS/
DISPLAYPRECISION/3
PNT2 =FEAT/POINT,CARTESIAN,NO
THEO/<-0.003,-0.001,0.004>,<-0.9908933,-0.1346102,0.0032625>
ACTL/<-0.002,-0.005,0.003>,<-0.9908719,-0.1347671,0.0032782>
CONSTR/POINT,CORNER,PLN1,PLN2,PLN3

```

```

DIM LOC2= LOCATION OF POINT PNT2 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH HALF ANGLE=NO
AX      MEAS
X      -0.002 --#-
Y      -0.005 -#--
Z      0.003 -#--
END OF DIMENSION LOC2
DIM PERP1= PERPENDICULARITY OF PLANE PLN3,RFS TO PLANE PLN2,RFS UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH
AX      MEAS
M      0.001 #---
DIM PERP2= PERPENDICULARITY OF PLANE PLN3,RFS TO PLANE PLN1,RFS UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH
AX      MEAS
M      0.001 #---
DIM PERP3= PERPENDICULARITY OF PLANE PLN2,RFS TO PLANE PLN1,RFS UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH
AX      MEAS
M      0.001 #---
DIM PERP4= PERPENDICULARITY OF PLANE PLN2,RFS TO PLANE PLN3,RFS UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH
AX      MEAS
M      0.001 #---
DIM FLAT1= FLATNESS OF PLANE PLN1 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 ARROWDENSITY=100 OUTPUT=BOTH
AX      MEAS
M      0.001 #---
DIM FLAT2= FLATNESS OF PLANE PLN2 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 ARROWDENSITY=100 OUTPUT=BOTH
AX      MEAS
M      0.001 #---
DIM FLAT3= FLATNESS OF PLANE PLN3 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 ARROWDENSITY=100 OUTPUT=BOTH
AX      MEAS
M      0.000 #---

                                END OF MEASUREMENT FOR
PN=SPHERE GAGE - TEST 1 -050514          DWG=          SN=
TOTAL # OF MEAS =0          # OUT OF TOL =0          # OF HOURS =00:00:00

```

Δεύτερο πρίσμα



```

DATE=6/12/2014          TIME=7:28:31 PM
PART NAME   : SPHERE GAGE - TEST 1 -050514
REV NUMBER  :
SER NUMBER  :
STATS COUNT : 1

STARTUP     =ALIGNMENT/START,RECALL:USE_PART_SETUP,LIST=YES
            ALIGNMENT/END
            MODE/MANUAL
            FLY/ON,3
            FORMAT/TEXT,OPTIONS, ,HEADINGS,SYMBOLS, ;NOM,TOL,MEAS,DEV,OUTTOL, ,
            LOADPROBE/ETEM PROBE
            TIP/T1A0B0, SHANKIJK=0, 0, 1, ANGLE=90
PNT1        =FEAT/POINT,CARTESIAN
            THEO/<428.973,425.102,-508.394>,<0,0,1>
            ACTL/<428.973,425.102,-508.394>,<0,0,1>
            MEAS/POINT,1,WORKPLANE
            HIT/BASIC,NORMAL,<428.973,425.102,-508.394>,<0,0,1>,<428.973,425.102,-508.394>,USE THEO=
YES
            ENDMEAS/

```

```

A1      =ALIGNMENT/START,RECALL:STARTUP,LIST=YES
        ALIGNMENT/TRANS,XAXIS,PNT1
        ALIGNMENT/TRANS,YAXIS,PNT1
        ALIGNMENT/TRANS,ZAXIS,PNT1
        ALIGNMENT/END
        MODE/DCC
        MOVESPEED/ 120
        CLEARP/ZPLUS,50,ZPLUS,0,ON
SPH1    =FEAT/SPHERE,CARTESIAN,OUT
        THEO/<2.949,-0.95,-18.693>,<0,0,1>,38.574
        ACTL/<2.945,-0.933,-18.773>,<0,0,1>,38.124
        MEAS/SPHERE,30
        MOVE/CLEARPLANE
        HIT/BASIC,NORMAL,<15.885,-15.414,-18.956>,<0.6639546,-0.747656,-0.0132182>,<15.642,-15.1
51,-18.956>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<9.103,-19.057,-18.956>,<0.3201752,-0.9472637,-0.0133892>,<9.087,-18.98
3,-18.958>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<-0.895,-19.636,-18.956>,<-0.2004054,-0.9796213,-0.0134108>,<-0.89,-19.
607,-18.959>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<-5.981,-17.954,-18.956>,<-0.4627166,-0.8864061,-0.0133242>,<-5.905,-17
.814,-18.958>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<-7.599,-17.592,-18.955>,<-0.538903,-0.8422677,-0.0129866>,<-7.246,-17.
035,-18.95>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<-14.667,-8.507,-18.956>,<-0.9197102,-0.3923701,-0.0133727>,<-14.565,-8
.455,-18.958>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<-16.089,-1.924,-18.956>,<-0.998613,-0.0509044,-0.0134441>,<-16.087,-1.
925,-18.959>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<-13.023,9.919,-18.956>,<-0.8283223,0.5600948,-0.0132636>,<-12.827,9.77
4,-18.956>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<-9.865,13.653,-18.956>,<-0.6569607,0.7538092,-0.0132024>,<-9.632,13.39
2,-18.955>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<-2.68,17.347,-18.956>,<-0.2925638,0.9561522,-0.0133918>,<-2.658,17.286
,-18.958>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<7.613,17.593,-18.956>,<0.242699,0.9700089,-0.013416>,<7.605,17.548,-18
.959>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<0.724,16.694,-11.556>,<-0.1155327,0.9214568,0.3709037>,<0.739,16.598,-
11.62>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<0.727,13.618,-6.112>,<-0.1141959,0.7539411,0.6469406>,<0.766,13.364,-6
.354>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<0.728,6.954,-1.41>,<-0.1154982,0.4109544,0.90431>,<0.741,6.903,-1.534>
,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<0.726,-0.291,0.16>,<-0.1163442,0.0344612,0.9926109>,<0.725,-0.291,0.14
8>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<0.727,-6.428,-0.584>,<-0.1160247,-0.2861213,0.9511429>,<0.733,-6.404,-
0.648>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<0.727,-12.845,-3.661>,<-0.114612,-0.6138092,0.7810905>,<0.759,-12.66,-
3.904>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<0.725,-16.217,-7.082>,<-0.1146631,-0.7924963,0.5990008>,<0.758,-15.99,
-7.285>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<0.726,-19.317,-13.996>,<-0.1158264,-0.9625644,0.2450591>,<0.733,-19.26
8,-14.031>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<13.254,-14.733,-9.052>,<0.5210231,-0.6968935,0.4928229>,<12.884,-14.22
8,-9.41>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<13.255,-6.914,-3.522>,<0.5320433,-0.3079614,0.7887266>,<13.098,-6.827,
-3.762>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<13.256,5.439,-3.66>,<0.5313786,0.3292948,0.7805137>,<13.095,5.344,-3.9
1>,USE THEO=YES
        MOVE/CIRCULAR
        HIT/BASIC,NORMAL,<13.256,13.57,-11.01>,<0.5293758,0.7508912,0.3948717>,<13.075,13.308,-1

```

```

1.168>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-6.11,10.155,-5.05>,<-0.4617619,0.5597537,0.6880783>,<-5.769,9.726,-5.
589>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-10.833,0.103,-5.049>,<-0.7120487,0.0539244,0.7000563>,<-10.559,0.083,
-5.354>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-7.519,-10.486,-5.049>,<-0.5359058,-0.4835933,0.6920567>,<-7.169,-10.1
75,-5.522>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-7.556,-0.313,-2.604>,<-0.543896,0.0329072,0.8385072>,<-7.445,-0.317,-
2.799>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-7.564,8.253,-5.172>,<-0.5386315,0.4714896,0.6982647>,<-7.336,8.062,-5
.476>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-1.226,-9.866,-2.229>,<-0.2165871,-0.4626218,0.8596925>,<-1.186,-9.775
,-2.401>,USE THEO=YES
MOVE/CIRCULAR
HIT/BASIC,NORMAL,<-1.224,-1.147,-0.137>,<-0.218169,-0.0103442,0.9758562>,<-1.22,-1.147,-
0.173>,USE THEO=YES
ENDMEAS/
FORMAT/TEXT,OPTIONS, ,HEADINGS,SYMBOLS, ;MEAS, , , , ,
DIM LOC1= LOCATION OF SPHERE SPH1 UNITS=IN , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH HALF ANGLE=NO
AX MEAS
D 1.501 <---
END OF DIMENSION LOC1
DIM CIRTY1= CIRCULARITY OF SPHERE SPH1 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 ARROWDENSITY=100 OUTPUT=BOTH
AX MEAS
M 0.011 --->
END OF MEASUREMENT FOR
PN=SPHERE GAGE - TEST 1 -050514 DWG= SN=
TOTAL # OF MEAS =0 # OUT OF TOL =0 # OF HOURS =00:00:00

```