ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΑΕΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ LASER TRACKER

Σπύρου Λεωνίδας

Επιβλέπων: Γκίκας Βασίλειος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα μπορούσε να είχε εκπονηθεί χωρίς τη βοήθεια κάποιων ατόμων, τους οποίους θέλω 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 καθοδήγηση του.

Επίσης, τον κ. Ξενάκη Θοδωρή, διπλωματούχο Αγρονόμο και Τοπογράφο Μηχανικό Ε.Μ.Π., για τις καίριες παρατηρήσεις του και τη συνδρομή του με πολλούς τρόπους σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία, για την συνεργασία της στην εκτέλεση των πρακτικών εφαρμογών της εργασίας. Ειδικότερα, ευχαριστώ τον κ. Ράφα Αθανάσιο, προϊστάμενο του τομέα Συναρμολόγησης/Παραγωγής Σύνθετων Υλικών για την άδεια εκτέλεσης εργασιών στους χώρους του Εργοστασίου Αεροκατασκευών και το ειλικρινές ενδιαφέρον του για τη παρούσα εργασία, τον κ. Σταυριανάκη Κωνσταντίνο, προϊστάμενο της Υπηρεσίας Επικοινωνίας & Δημοσίων Σχέσεων για την χορήγηση των αδειών εισόδου και την ξενάγηση στους χώρους της Ε.Α.Β, τον κ. Χατζηδάκη Ανδρέα, για την άδεια εκτέλεσης εργασιών με το laser tracker παρά το πιεσμένο πρόγραμμα και τέλος τους κ.κ. Αυγέρη Χρήστο, Μακρή Χρυσόστομο, Παπαδημητρίου Βασίλη, Τουλούμη Αντώνη και Τούντα Τάσο, για τις ειδικές τεχνικές γνώσεις που μου παρείχαν και την άψογη συνεργασία τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη και παρουσίαση της τεχνολογίας laser tracker που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση μετρολογικών εφαρμογών και εφαρμογών βιομηχανικής γεωδαισίας. Δεδομένου ότι η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί την πρώτη (σε γνώση του συγγραφέα) στο αντικείμενο, αποβλέπει σε δυο βασικούς στόχους: Πρώτον, στη μελέτη των αρχών λειτουργίας και των βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών της τεχνολογίας laser tracker και δεύτερον, στην πειραματική εφαρμογή του εξοπλισμού σε πραγματικές συνθήκες. Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκαν σε θεωρητικό επίπεδο οι βασικές αρχές λειτουργίας, οι μέθοδοι μέτρησης μήκους, εντοπισμού και παρακολούθησης στόχου που διαθέτει, οι κύριες πηγές σφαλμάτων και οι περιορισμοί του εξοπλισμού, καθώς επίσης και οι συνεργαζόμενοι στόχοι και τα παρελκόμενα. Σε πρακτικό επίπεδο, εκτελέστηκαν πειραματικές εφαρμογές με laser tracker στους χώρους της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (Ε.Α.Β.). Οι σχετικές εφαρμογές αποτελούν δυο γεωμετρικούς ελέγχους εργαλείων για τη συναρμολόγηση αεροκατασκευών. Η πρώτη αφορά σε περιοδικό έλεγχο εργαλείου που χρησιμοποιείται για την κατασκευή πλευρικού τμήματος της ατράκτου του αεροσκάφους C130J. Στο εργαλείο πραγματοποιήθηκαν τρεις ξεχωριστοί έλεγχοι: ένας σημειακός, ένας επιπέδου και ένας θέσης σημείων ως προς επιφάνεια κυλίνδρου. Και στους τρεις ελέγχους διαπιστώθηκαν αποκλίσεις που υπερέβαιναν τα καθορισμένα όρια, οπότε πραγματοποιήθηκε επιδιόρθωση και επανέλεγχος του εργαλείου. Η δεύτερη εφαρμογή, αφορά τριδιάστατο έλεγχο εργαλείου που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τμήματος του δαπέδου του αεροσκάφους C130J. Σκοπός ήταν ο έλεγχος της μορφής (σχήματος) του, που επετεύχθη μέσω της σάρωσης της επιφάνειας του και της σύγκρισης της με μοντέλο CAD της ονομαστικής επιφάνειας. Οι αποκλίσεις που προέκυψαν, δεν ήταν μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες τιμές οπότε τεκμηριώθηκε η ορθότητα της μορφής του εργαλείου. Και στις δυο εφαρμογές έγινε χρήση του λογισμικού Leica Axyz, που χρησιμεύει στην καταγραφή των μετρήσεων και την επεξεργασία τους σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, μέσω της πρακτικής ενασχόλησης με το laser tracker, διαπιστώθηκε ότι αποτελεί έναν μετρητικό εξοπλισμό εξαιρετικής ακριβείας (της τάξης των λίγων μm), υψηλής ταχύτητας συλλογής δεδομένων (της τάξης των 1000 σημείων/sec) που διακρίνεται για την ευκολία λήψης και διαχείρισης μετρήσεων.

ABSTRACT

This diploma thesis aims to study and present the laser tracker technology and equipment used to perform metrological and industrial geodesy applications. Since this final year's dissertation thesis is the first (to the author's knowledge) on the subject in Greece, aims at two main objectives: Firstly, to provide a thorough study on the principles of operation and the technical characteristics of laser tracker technology and secondly, to present the findings of the use of the equipment in practical applications. For this purpose, the laser tracker technology was studied theoretically; specifically, its principles of operation, the methods used for length measurement, target recognition and tracking, the main error sources and limitations of the equipment, as well as the associated targets and accessories. On a practical level, experiments were performed with the laser tracker in the premises of Hellenic Aerospace Industry (HAI). The applications that were undertaken are two geometric controls in aerospace assembly jigs. The first application is a periodic inspection in a jig used for the construction of a side part of the fuselage of aircraft C130J. In this jig three separate inspections were made: a point inspection, a plane inspection and an inspection of point's position with regard to a cylinder surface. In all three inspections, deviations were found, in excess of specified limits, so the jig was repaired and re-inspected. The second application refers to a three-dimensional control of a jig used for the construction of a floor section of the aircraft C130J. In this case, the control measurements aimed to check the jig's shape. This task was accomplished through scanning its surface and comparing it with the CAD model of the nominal surface. The deviations resulted, weren't exceeding the permitted values, so the correctness of the jig's form was documented. Both applications were performed using the software Leica Axyz, used to record measurements and their real time processing. Finally, through practical avocation with laser tracker, it is noted that it is an extremely high precision measurement equipment (on the order of a few microns), able of high-speed data collection (1000 points/sec), which is distinguished for the ease of measuring processes.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ i

ΠΕΡΙΛΗΨΗ iii

ABSTRACT v

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ vii

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ x

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ xii

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

2 ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΛΙΜΑΚΩΝ 5

2.1 Βασικοί Ορισμοί – Έννοιες 5

2.2 Μέθοδοι Υπολογισμού Συντεταγμένων 8

2.2.1 Μέθοδος των Πολικών Συντεταγμένων 8

2.2.2 Εμπροσθοτομία 10

2.2.3 Φωτογραμμετρική Εμπροσθοτομία 17

2.3 Μετρολογικοί Εξοπλισμοί 18

2.3.1 Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων 19

2.3.2 Θεοδόλιχοι - Ολοκληρωμένοι Γεωδαιτικοί Σταθμοί 20

2.3.3 Laser Tracker 22

2.3.4 Οπτικοί Σαρωτές 23

2.3.5 iGPS 26

2.3.6 Αυτόματα Φωτογραμμετρικά Συστήματα 27

2.3.7 Υβριδικά Συστήματα 29

2.4 Κριτήρια Επιλογής Μετρολογικού Εξοπλισμού 30

2.4.1 Απαιτήσεις Εργασίας 30

2.4.2 Χαρακτηριστικά Αντικειμένου Μέτρησης 32

2.4.3 Περιβαλλοντικά Κριτήρια 33

3 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ LASER TRACKER 35
3.1 Αρχή Λειτουργίας 35
3.2 Μέθοδοι Μέτρησης Μήκους 36
3.2.1 Αρχή Συμβολομετρίας 37
3.2.2 Τεχνική Μέτρησης Απόλυτων Αποστάσεων 39
3.2.3 Συγκριτική Αντιπαραβολή Μεθόδων 41
3.3 Λειτουργία Παρακολούθησης Στόχου 42
3.4 Στόχοι και Παρελκόμενα 43
3.4.1 Στόχοι 43
3.4.2 Παρελκόμενα 47
3.5 Κύριες Πηγές Σφαλμάτων 52
3.6 Περιορισμοί στη χρήση του Laser Tracker 54
3.7 Ακρίβειες Laser Tracker 56
3.8 Τυπικές Εφαρμογές 60
4 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ 63
4.1 Εξοπλισμός 63
4.1.1 Όργανο Μετρήσεων 63
4.1.2 Παρελκόμενα 66
4.1.3 Λογισμικό Επεξεργασίας 67
4.2 Προκαταρκτικές Εργασίες 71
4.2.1 Εκμάθηση Λογισμικού 71
4.2.2 Εκμάθηση Εξοπλισμού 74
5 ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ C130J 79
5.1 Περιγραφή Εφαρμογής 79
5.1.1 Περιγραφή Αντικειμένου Μέτρησης 79
5.1.2 Περιγραφή Διαδικασίας Ελέγχου 82

5.2 Αρχικός Έλεγχος 85
5.2.1 Μετασχηματισμός Συστήματος Αναφοράς 85
5.2.2 Έλεγχος Σημείων Ως Προς Συνιστώσα Z 87
5.2.3 Έλεγχος Επιπέδων Μεταλλικών Λωρίδων 88
5.2.4 Έλεγχος Προσαρμογής Σημείων σε Επιφάνεια Κυλίνδρου 92
5.3 Τελικός Έλεγχος 95
5.3.1 Μετασχηματισμός Συστήματος Αναφοράς 96
5.3.2 Έλεγχος Σημείων Ως Προς Συνιστώσα Z 98
5.3.3 Έλεγχος Επιπέδων Μεταλλικών Λωρίδων 99
6 ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΔΑΠΕΔΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ C130J 101
6.1 Περιγραφή Εφαρμογής 101
6.2 Μετασχηματισμός Συστήματος Αναφοράς 103
6.3 Συλλογή Δεδομένων 106
6.4 Επεξεργασία Δεδομένων 108
6.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων 110
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 119
7.1 Συμπεράσματα 119
7.2 Προτάσεις 123
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 127

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Πολικές συντεταγμένες 9
Σχήμα 2.2 Εφαρμογή εμπροσθοτομίας από τα A,B στο P 11
Σχήμα 2.3 Διάταξη των οργάνων στα σημεία A, B και της ράβδου κλίμακας P_1P_2 14
Σχήμα 2.4 Φωτογραμμετρική Εμπροσθοτομία από δυο εικόνες [Πέτσα, 2000] 18
Σχήμα 2.5 Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων COORD3 Kronos 15.30.13 19
Σχήμα 2.6 Ολοκληρωμένος Γεωδαιτικός Σταθμός ακριβείας Leica TS30 22
Σχήμα 2.7 Σαρωτής 1Δ Surphaser® 25HSX 24
Σχήμα 2.8 Σαρωτής πολωμένου φωτός Steinbichler Comet L3D 25
Σχήμα 2.9 Σχηματική Αναπαράσταση Λειτουργίας iGPS [Peggs et al., 2009] 27
Σχήμα 3.1 Αρχή λειτουργίας των Laser Trackers [Muelaner, 2008] 36
Σχήμα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του συμβολόμετρου [Muelaner, 2008] 37
Σχήμα 3.3 Στόχος CCR 44
Σχήμα 3.4 Γράφημα της σχέσης της γωνίας εισόδου της δέσμης στον στόχο με την απόκλιση στην απόσταση [Kyle, 1997] 45
Σχήμα 3.5 Στόχος Cateye 45
Σχήμα 3.6 Στόχοι επαναληψιμότητας 46
Σχήμα 3.7 Ο ActiveTarget της εταιρείας API 47
Σχήμα 3.8 Άποψη του στόχου από την ενσωματωμένη μηχανή 48
Σχήμα 3.9 Η ράβδος κρυφού σημείου 49
Σχήμα 3.10 Το Leica T-Probe 50
Σχήμα 3.11 Το Probe I-360 της API 51
Σχήμα 3.12 Ο σαρωτής χειρός T-Scan της εταιρείας Leica 51
Σχήμα 3.13 Κύριοι Τύποι Βάσεων Στόχων 52
Σχήμα 3.14 Από αριστερά: Leica AT901, Faro Vantage και API Omnitrac2 56
Σχήμα 3.15 Γραφική παράσταση του τυπικού γωνιακού σφάλματος των AT901, Vantage, Omnitrac2 58
Σχήμα 3.16 Γραφική παράσταση του τυπικού σφάλματος απόστασης των AT901, Vantage, Omnitrac2 58
Σχήμα 3.17 Ελλείψεις σφάλματος των οργάνων AT901, Vantage και Omnitrac2 για μετρήσεις σε αποστάσεις 1m, 5m και 10m. 59
Σχήμα 4.1 Το laser tracker LTD640 της εταιρείας Leica 64

Σχήμα 4.2 Οριζόντια και κατακόρυφη βάση στόχων CCR 67
Σχήμα 4.3 Ορθογώνιο βάθρο στην αίθουσα Y23 71
Σχήμα 4.4 Βάθρο στην αίθουσα Y23 73
Σχήμα 4.5 Σύστημα αξόνων xyz του αεροσκάφους F16 [Wikipedia] 74
Σχήμα 4.6 Σκαρίφημα εργαλείου για την κατασκευή τμήματος της ατράκτου αεροσκάφους F16 75
Σχήμα 5.1 Πρόγραμμα διεθνούς παραγωγής C130J 80
Σχήμα 5.2 Σκαρίφημα εργαλείου για κατασκευή πλευρικού τμήματος της ατράκτου αεροσκάφους C130 J 81
Σχήμα 5.3 Σύστημα αξόνων xyz του αεροσκάφους C130J [Wikipedia] 82
Σχήμα 6.1 Τριδιάστατο σχέδιο του αντικειμένου μέτρησης 102
Σχήμα 6.2 Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον μετασχηματισμό αναφοράς 104
Σχήμα 6.3 Σκαρίφημα της βάσης με το στόχο κατά την μέτρηση των μεταλλικών λωρίδων 107
Σχήμα 6.4 Γραφική απεικόνιση των μετρημένων σημείων πάνω στις μεταλλικές λωρίδες (με μπλε χρώμα) 108
Σχήμα 6.5 Γραφική απεικόνιση των αποκλίσεων των σημείων στις μεταλλικές λωρίδες από το λογισμικό Axyz CAD. 112
Σχήμα 6.6 Διαγράμματα συνολικής απόκλισης των λωρίδων 116

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Συγκριτική αντιπαραβολή συμβολόμετρου – αποστασιόμετρου 41
Πίνακας 3.2 Σύγκριση των Laser Tracker των εταιρειών Leica, Faro, API 57
Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του LTD640 της εταιρείας Leica..... 65
Πίνακας 4.2 Οι τυπικές αποκλίσεις των μετρημένων σημείων από το βέλτιστο επίπεδο... 72
Πίνακας 4.3 Οι τυπικές αποκλίσεις των μετρημένων σημείων από το βέλτιστο κύκλο 73
Πίνακας 4.4 Αποκλίσεις σημείων αναφοράς μετά τον μετασχηματισμό 77
Πίνακας 4.5 Αποκλίσεις πραγματικών και ονομαστικών συντεταγμένων σημείων ελέγχου 78
Πίνακας 5.1 Παράμετροι μετασχηματισμού ομοιότητας 86
Πίνακας 5.2 Αποκλίσεις σημείων αναφοράς μετά τον μετασχηματισμό 87
Πίνακας 5.3 Έλεγχος αποκλίσεων σημείων WL 88
Πίνακας 5.4 Συντεταγμένες σημείων για τον ορισμό του επιπέδου της κάτω λωρίδας..... 89
Πίνακας 5.5 Συντεταγμένες σημείων για τον ορισμό του επιπέδου της άνω λωρίδας..... 89
Πίνακας 5.6 Αποκλίσεις σημείων ελέγχου κάτω λωρίδας κατά τον αρχικό έλεγχο 90
Πίνακας 5.7 Αποκλίσεις σημείων ελέγχου άνω λωρίδας κατά τον αρχικό έλεγχο 91
Πίνακας 5.1 Συντεταγμένες σημείων για τον ορισμό κυλίνδρου 93
Πίνακας 5.2 Αποκλίσεις σημείων τοποθέτησης εξαρτημάτων 95
Πίνακας 5.3 Παράμετροι μετασχηματισμού ομοιότητας 97
Πίνακας 5.4 Αποκλίσεις σημείων ελέγχου μετά τον μετασχηματισμό 97
Πίνακας 5.5 Επανέλεγχος αποκλίσεων σημείων WL..... 98
Πίνακας 5.6 Αποκλίσεις σημείων ελέγχου κάτω λωρίδας κατά τον τελικό έλεγχο..... 99
Πίνακας 5.7 Αποκλίσεις σημείων ελέγχου πάνω λωρίδας κατά τον τελικό έλεγχο..... 100
Πίνακας 6.1 Ονομαστικές τιμές των συντεταγμένων των σημείων που χρησιμοποιηθήκαν για τον μετασχηματισμό ομοιότητας 105
Πίνακας 6.2 Αποκλίσεις των σημείων που υπερέβησαν την επιτρεπόμενη τιμή..... 111
Πίνακας 6.3 Μέσοι όροι των απόλυτων τιμών των αποκλίσεων των σημείων ανά μεταλλική λωρίδα. 111

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εποχή της μαζικής παραγωγής και του έντονου ανταγωνισμού στον σχεδιασμό και στην παραγωγή προϊόντων και υπηρεσιών, δημιουργήθηκε η ανάγκη εξέλιξης των υφιστάμενων Συστημάτων Διαχείρισης Ποιότητας, τα οποία οφείλουν να εξασφαλίζουν την τήρηση προκαθορισμένων απαιτήσεων ποιότητας μέσω της εφαρμογής πολλαπλών ελέγχων τόσο στη φάση κατασκευής όσο και σε αυτή της λειτουργίας. Σκοπός αυτών των συστημάτων είναι η τυποποίηση της παραγωγικής διαδικασίας, μέσω της καθιέρωσης προδιαγραφών που ορίζουν την σύνθεση και τις ιδιότητες που πρέπει να φέρει ένα προϊόν ή μια υπηρεσία. Η τυποποίηση προϋποθέτει την ύπαρξη προτύπων υπό τη μορφή κειμένων που παρέχουν κανόνες, οδηγίες και χαρακτηριστικά για κοινή και επαναλαμβανόμενη χρήση. Τα πρότυπα μπορεί να αφορούν την ονοματολογία, τη μετρολογία, τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του προϊόντος, τις μεθόδους ελέγχου, ανάλυσης και μέτρησης συναφών χαρακτηριστικών κ.α. Στόχος της διαδικασίας της τυποποίησης είναι η πιστοποίηση, δηλαδή η διασφάλιση ότι το προϊόν ή η υπηρεσία συμμορφώνεται με τις καθορισμένες απαιτήσεις. Η πιστοποίηση χορηγείται από εθνικούς ή παγκόσμιους οργανισμούς και δίνει μια αδιαμφισβήτητη αξία στο προϊόν, γεγονός που αποτελεί αντικείμενο επιδίωξης από κάθε εταιρεία.

Μεγάλο μέρος των διαδικασιών τυποποίησης σχετίζεται άμεσα με τη Μετρολογία, δηλαδή με τις μετρήσεις και την αξιοπιστία τους. Οι μετρήσεις αυτές μπορεί να αφορούν την διαστασιολόγηση ενός προϊόντος, τον έλεγχο του σε διάφορα στάδια της παραγωγής, τον έλεγχο των μέσων παραγωγής κ.λπ. Βασικό χαρακτηριστικό των μετρολογικών εφαρμογών είναι ότι χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές απαιτήσεις ακριβείας προϋποθέτοντας εν γένει ειδικό εξοπλισμό και ειδική μεθοδολογία μετρήσεων, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να εκτελούνται σε όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο με απώτερο σκοπό την ελάττωση του κόστους. Η αξιοπιστία και η επαναληψιμότητα των μετρήσεων είναι στοιχεία που επίσης απαιτούνται σε αυτές τις εφαρμογές. Τέλος, στη βιομηχανία οι κλίμακες των εργασιών είναι συνήθως μεγάλες, καθώς τα αντικείμενα μέτρησης μπορεί να είναι ολόκληρα πλοία, υποβρύχια, αεροπλάνα, αυτοκίνητα κ.λπ. Οι διαστάσεις των αντικειμένων αυξάνουν το βαθμό δυσκολίας των εργασιών καθώς εισάγουν επιπλέον πρακτικές απαιτήσεις.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα προηγούμενα, οι μετρολογικές εφαρμογές και κυρίως αυτές των μεγάλων κλιμάκων αποτελούν ένα ιδιαίτερο δύσκολο τομέα μετρήσεων που απαιτεί ειδικές γνώσεις και προσεκτική προσέγγιση. Ο Τοπογράφος Μηχανικός ως μια ειδικότητα που εστιάζει στη συλλογή και την ανάλυση των μετρήσεων και των σφαλμάτων τους, οφείλει να αναλαμβάνει σημαντικό ρόλο σε αυτές τις εφαρμογές, δρώντας συμπληρωματικά με άλλες ειδικότητες (π.χ. Μηχανολόγοι Μηχανικοί) που απασχολούνται σε αυτόν τον τομέα σήμερα. Η ολοκληρωμένη γνώση του Τοπογράφου γύρω από τη μεθοδολογία των μετρήσεων, τα όργανα και ιδιαίτερα τα σφάλματα τους, τον καθιστά πλέον κατάλληλο για την εκτέλεση τέτοιων εφαρμογών αφού οι αρχές της Μετρολογίας, της Βιομηχανικής Γεωδαισίας, της Θεωρίας Σφαλμάτων και των άλλων επιστημών που κατέχει μπορούν να καλύψουν τις ολοένα αυξανόμενες απατήσεις ακριβείας που ανακύπτουν.

Αναπόσπαστο μέρος των διαδικασιών ελέγχου και πιστοποίησης αποτελεί πέρα από τις μεθόδους μέτρησης, ο εξοπλισμός. Όσον αφορά στα όργανα μετρήσεων, συναντώνται τρεις αδιαμφισβήτητα βασικές κατηγορίες: Πρώτον, οι εξοπλισμοί συμβατικού τύπου (θεοδόλιχοι, ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί) με την χρήση των οποίων εκτελούνταν μέχρι πρόσφατα το σύνολο σχεδόν των μετρολογικών εφαρμογών από Τοπογράφους. Τα υπόψη όργανα παρότι εξελίσσονται συνεχώς και είναι εύχρηστα και οικονομικά, δεν μπορούν να καλύψουν τις σημερινές απαιτήσεις ακριβείας των περισσότερων μετρολογικών εφαρμογών. Δεύτερη κατηγορία είναι τα "νέα" όργανα, όπως οι οπτικοί σαρωτές (1Δ, 2Δ, 3Δ διαστάσεων), το iGPS και τα φωτογραμμετρικά συστήματα, τα οποία έχουν εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια και βρίσκουν ολοένα και πιο πολύ χρήση σε μετρολογικές εφαρμογές. Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν τα όργανα που αν και συναντώνται στις βιομηχανίες για την εκτέλεση μετρολογικών εφαρμογών εδώ και αρκετά χρόνια, εν γένει δεν χρησιμοποιούνται από Τοπογράφους Μηχανικούς, όπως η Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων και το Laser Tracker, όργανα που μπορούν να αποδώσουν αποτελέσματα με ακρίβεια μm. Η μη διαδεδομένη ενασχόληση του Τοπογράφου στο βιομηχανικό χώρο, έχει ως αποτέλεσμα να μην γνωρίζει πολλά για αυτή τη κατηγορία οργάνων και συνεπώς να αποτελεί ένα πολύ ενδιαφέρον πεδίο ερευνών για αυτόν.

Λαμβάνοντας υπ'όψιν τα προηγούμενα, στο πλαίσιο της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας τέθηκαν δυο στόχοι: Πρώτος στόχος ήταν η μελέτη των αρχών λειτουργίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος laser tracker. Δεδομένου ότι η παρούσα διπλωματική αποτελεί την πρώτη (σε γνώση του συγγραφέα) εργασία στο αντικείμενο και

ότι οι αναφορές στην ελληνική και ξένη βιβλιογραφία για το laser tracker είναι ελάχιστες, αποσπασματικές και ολιγοσέλιδες, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των δυνατοτήτων της υπόψη τεχνολογίας τόσο θεωρητικά όσο και μέσα από πρακτικές εφαρμογές.

Δεύτερος στόχος της εργασίας, ήταν η πειραματική εφαρμογή του laser tracker σε πραγματικές συνθήκες για την εξαγωγή ιδίων συμπερασμάτων από τη χρήση του. Παράλληλα μέσα από αυτήν την πρακτική εφαρμογή, δόθηκε η δυνατότητα εκμάθησης των μετρητικών διαδικασιών ελέγχου που εφαρμόζονται σε μια βιομηχανία. Ειδικότερα, μέσα από την παρούσα διπλωματική παρουσιάζεται η μεθοδολογία πραγματοποίησης των ποιοτικών ελέγχων σε μια βιομηχανία, η φύση των μετρολογικών εφαρμογών που συναντώνται, οι απαιτήσεις ακριβείας τους και οι διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων.

Για την ταυτόχρονη ικανοποίηση και των δυο στόχων, εκτελέστηκαν και παρουσιάζονται δυο εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν με το μοναδικό (σε γνώση του συγγραφέα) laser tracker στην Ελλάδα στους χώρους της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (Ε.Α.Β.). Αναλυτικότερα, η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε επτά κεφάλαια των οποίων το περιεχόμενο παρουσιάζεται συνοπτικά ως εξής:

Το *πρώτο* κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας και περιλαμβάνει το γενικότερο προβληματισμό γύρω από το αντικείμενο της εργασίας, την αιτία επιλογής του συγκεκριμένου θέματος, ενώ διατυπώνονται και οι στόχοι της.

Το *δεύτερο* κεφάλαιο περιλαμβάνει τους βασικούς ορισμούς και τις έννοιες της Μετρολογίας και της Βιομηχανικής Γεωδαισίας, παρουσιάζει τις μεθόδους υπολογισμού συντεταγμένων και τους εξοπλισμούς που βρίσκουν χρήση σε αυτούς τους τομείς, και τέλος, αναλύει τα κριτήρια επιλογής εξοπλισμού.

Το *τρίτο* κεφάλαιο πραγματεύεται το laser tracker ξεκινώντας από την αρχή λειτουργίας του, τις μεθόδους μέτρησης μήκους, την λειτουργία παρακολούθησης του στόχου, και την παρουσίαση των στόχων και των παρελκόμενων για laser tracker. Κατόπιν αναφέρεται στην ανάλυση των κύριων πηγών σφαλμάτων και στους περιορισμούς που προκύπτουν από τη χρήση του οργάνου και καταλήγει με μια ανάλυση των ακριβειών των σύγχρονων laser tracker, καθώς και στις τυπικότερες εφαρμογές που εκτελούνται με αυτό.

Το *τέταρτο* κεφάλαιο παρουσιάζει τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των εφαρμογών στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή το όργανο μετρήσεων, τα παρελκόμενα και το λογισμικό επεξεργασίας, ενώ περιλαμβάνει ακόμα τις προκαταρκτικές

εργασίες που αφορούν στην εκμάθηση του οργάνου και του λογισμικού μέσα από δυο απλές εφαρμογές.

Το *πέμπτο* κεφάλαιο περιέχει την πρώτη εφαρμογή που εκτελέστηκε και αποτελεί έναν περιοδικό έλεγχο με χρήση laser tracker σε ένα εργαλείο (jig) της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας που χρησιμοποιείται για την συναρμολόγηση πλευρικού τμήματος της ατράκτου του αεροσκάφους C130J. Στην εφαρμογή αυτή παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαδικασίες μέτρησης και επεξεργασίας με το σύστημα του laser tracker, όπως επίσης και η φύση των εργασιών που γίνονται στα πλαίσια ενός ποιοτικού ελέγχου μιας βιομηχανίας. Πιο συγκεκριμένα, στην εφαρμογή πραγματοποιούνται τρεις ξεχωριστοί έλεγχοι, ένας σημειακός, ένας έλεγχος επιπέδων και ένας έλεγχος προσαρμογής σημείων σε γεωμετρικό σχήμα.

Το *έκτο* κεφάλαιο περιλαμβάνει την δεύτερη εφαρμογή που αποτελεί έναν τριδιάστατο έλεγχο σε εργαλείο που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τμήματος του δαπέδου του αεροσκάφους C130J. Στην εφαρμογή αυτή γίνεται έλεγχος της μορφής του εργαλείου, μέσα από σύγκριση μετρημένων σημείων της επιφάνειας του με μοντέλο CAD της ονομαστικής επιφάνειας. Στόχος του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει διαφορετικές τεχνικές χρήσης του laser tracker από αυτές που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5.

Τέλος στο *έβδομο* κεφάλαιο, δίνονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την διπλωματική εργασία και αφορούν το laser tracker και τις δυνατότητες του Τοπογράφου Μηχανικού στη βιομηχανία, ενώ παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

2 ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΛΙΜΑΚΩΝ

Αντικείμενο του Κεφαλαίου 2 είναι η Μετρολογία Μεγάλων Κλιμάκων και η σχέση της με τον βιομηχανικό χώρο. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στις έννοιες και τις περιοχές της επιστήμης της Μετρολογίας καθώς και τη σύνδεση της με την παραγωγική διαδικασία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τεχνικές υπολογισμού συντεταγμένων και τα είδη των μετρητικών εξοπλισμών που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές αυτές. Το κεφάλαιο καταλήγει με την ανάλυση των κριτηρίων επιλογής του μετρολογικού εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί για μια εφαρμογή.

2.1 Βασικοί Ορισμοί – Έννοιες

Η **Μετρολογία** είναι η επιστήμη των μετρήσεων. Δεν υπάρχει διεθνής ορισμός της μετρολογίας, αλλά συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ως αναφορά στο υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας των μετρήσεων σε έναν επιστημονικό κλάδο. Ασχολείται με τις μετρήσεις, τα όργανα μέτρησης, την ποιότητα των οργάνων και των μετρήσεων, τις μονάδες μέτρησης και γενικότερα με ότι αφορά στον ακριβή και αποδεκτό προσδιορισμό των τιμών των μεγεθών που προσδιορίζουν τις ιδιότητες των σωμάτων ή των συστημάτων. Οι αρχές της βρίσκουν εφαρμογή σε όλες τις επιστήμες που χρησιμοποιούν τη μέτρηση αλλά και σε τομείς της καθημερινής ζωής, στις συναλλαγές, στη βιομηχανία, στην ασφάλεια, στην υγεία, κ.α. Αντικείμενο της μετρολογίας αποτελεί η εξαγωγή ποσοτικής πληροφορίας αναφορικά με τις ιδιότητες των αντικειμένων και των διαδικασιών για προδιαγραφόμενο επίπεδο ακρίβειας και αξιοπιστίας. Μέσα της μετρολογίας είναι το σύνολο των μετρητικών προτύπων, τα οποία διασφαλίζουν την ορθολογική χρήση της. Η μετρολογία μπορεί να χωριστεί σε τρεις γενικούς τομείς: στη Θεμελιώδη ή Επιστημονική ή Θεωρητική μετρολογία, στη Νομική μετρολογία και στην Εφαρμοσμένη ή Βιομηχανική μετρολογία.

Η **Θεμελιώδης ή Επιστημονική ή Θεωρητική μετρολογία,** έχει να κάνει με την οργάνωση, ανάπτυξη και υποστήριξη των προτύπων μέτρησης (Αθανασιάδης, 2006). Το αντικείμενο της είναι πολύπλευρο, με τις σημαντικότερες εφαρμογές να αφορούν το τμήμα της σύστασης, όπου αναπτύσσονται οι έννοιες, οι ορισμοί και τα αξιώματα της μετρολογίας, δημιουργούνται νέες μεθοδολογίες μετρήσεων, επεξεργάζονται και μελετώνται τα συστήματα μονάδων μέτρησης, ενώ περιλαμβάνει και την βασική έρευνα. Άλλο τμήμα είναι αυτό της ιχνηλασιμότητας των μετρήσεων, όπου κύριο μέλημα είναι η

θεωρία αναπαραγωγής των μονάδων φυσικών ποσοτήτων και η μετάδοση των μεγεθών τους με τη δημιουργία προτύπων. Για τα πρότυπα των βασικών φυσικών μονάδων πρωταρχικό μέλημα θεωρείται η επίτευξη του μέγιστου επιπέδου για όλα τα μετρολογικά χαρακτηριστικά τους. Η θεωρητική μετρολογία μπορεί επίσης, να περιγραφεί ως η επιστημονική μετρολογία εμπλουτισμένη με όλα εκείνα τα μέρη της Νομικής και Βιομηχανικής Μετρολογίας που απαιτούν επιστημονική επάρκεια.

Η **Νομική μετρολογία** εμπλέκεται με τις μετρήσεις και την αβεβαιότητα των μετρήσεων όπου αυτές έχουν επίδραση στη διαφάνεια οικονομικών συναλλαγών, στην υγεία και την ασφάλεια (Αθανασιάδης, 2006). Στη νομική μετρολογία αναπτύσσονται οι μονάδες μέτρησης, οι μέθοδοι μετρήσεων και οι μετρητικές συσκευές, που συσχετίζονται με υποχρεωτικές τεχνικές και νομικές απαιτήσεις και ερευνώνται το σύνολο των αλληλένδετων και αλληλοκαθορισμένων κοινών κανόνων, απαιτήσεων και νόμων, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ενότητα και η ομοιογένεια των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, η νομική μετρολογία περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο τις μετρήσεις που σχετίζονται με θέματα προστασίας του πολίτη, για τις οποίες ευθύνη φέρει η πολιτεία όπως στις εμπορικές συναλλαγές, στα θέματα ασφάλειας, στην προστασία του περιβάλλοντος και στο σύστημα υγείας.

Τέλος, η **Εφαρμοσμένη ή Βιομηχανική μετρολογία** ως αντικείμενο έχει την επαρκή λειτουργία των μετρητικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, καθώς επίσης και στις διαδικασίες ελέγχου και παραγωγής (Αθανασιάδης, 2006). Ασχολείται με την επιβεβαίωση της καταλληλότητας των μετρητικών συσκευών και τον έλεγχο ποιότητας των μετρήσεων. Ακόμα εξετάζει τα ερωτήματα της πρακτικής εφαρμογής των θεωρητικών ερευνών (θεωρητικής μετρολογίας) σε διάφορα πεδία των επιστημονικών δραστηριοτήτων.

Ως μέρος της Βιομηχανικής Μετρολογίας μπορεί να θεωρηθεί η **Μετρολογία Μεγάλων Κλιμάκων** που αφορά στην εφαρμογή γεωδαιτικών ή\και φωτογραμμετρικών τεχνικών για ακριβείς μετρήσεις μεγάλων αντικειμένων. Το βασικό χαρακτηριστικό των εφαρμογών αυτής της κατηγορίας είναι ότι ελέγχουν την γεωμετρία ενός αντικειμένου, δηλαδή το σχήμα, το μέγεθος και τη μορφή του. Οι μετρολογικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας έχουν μεγάλο βαθμό απαιτήσεων, καθώς οι επιδιωκόμενες ακρίβειες είναι πολύ υψηλές. Ως αποτέλεσμα αυτού, προκύπτει η αναγκαιότητα χρήσης εξοπλισμών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (ακρίβεια, ορθότητα) και εξειδικευμένων τεχνικών μέτρησης και

επεξεργασίας. Αυτός ο τομέας εργασιών αναπτύσσεται σταθερά τα τελευταία χρόνια, ενώ ακόμα και η έρευνα του παρουσιάζει πολύ ενδιαφέρουσες εφαρμογές.

Η μετρολογία μεγάλων κλιμάκων σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με βιομηχανικές εφαρμογές. Καθώς τα βιομηχανικά παράγωγα γίνονται όλο και πιο σύνθετα, ενώ ταυτόχρονα ο χρόνος της παραγωγής πρέπει να ελαχιστοποιείται χωρίς όμως επίδραση στην ποιότητα, η μετρολογία γίνεται ολοένα και πιο σημαντική στην παραγωγική διαδικασία. Η εφαρμογή της δεν αφορά μόνο τα τελικά παράγωγα, αλλά επεκτείνεται σε όλο το φάσμα της παραγωγής και περιλαμβάνει εργασίες όπως έλεγχος ποιότητας εργαλείων κατασκευής, πιστοποίηση της ορθής τους λειτουργίας, έλεγχος ποιότητας παραγώγων, παρακολούθηση παραγωγής και δημιουργίας αυτοματισμών.

Οι έλεγχοι αυτοί δεν οφείλουν να εξασφαλίζουν μόνο την ορθότητα του προϊόντος, αλλά και να είναι όσο το δυνατόν πιο γρήγοροι. Για το λόγο αυτό, σε όλων των ειδών τις βιομηχανίες είτε αυτές είναι αυτοκινητοβιομηχανίες είτε αεροναυπηγικές κ.λπ. χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα **“εργαλεία”(jigs)**. Τα εργαλεία αποτελούν κατασκευές που χρησιμεύουν ως καλούπια για την κατασκευή κάποιου προϊόντος ή τμήματος προϊόντος. Αντί η εκάστοτε βιομηχανία να πρέπει να μετράει και να ελέγχει κάθε παράγωγο μετά την κατασκευή του, δημιουργεί εργαλεία για κάθε προϊόν τα οποία υποβάλλει σε έλεγχο ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Αν ο έλεγχος στο εργαλείο είναι επιτυχής, εξασφαλίζεται η ορθότητα του κάθε προϊόντος που συναρμολογείται σε αυτό.

Η δημιουργία ενός τέτοιου εργαλείου είναι μια αρκετά περίπλοκη διαδικασία. Έχοντας τα σχέδια του αντικειμένου το οποίο θα συναρμολογείται στο εργαλείο, πραγματοποιείται μια ανάλυση του με την οποία εντοπίζονται όλα τα χαρακτηριστικά σημεία και οι λεπτομέρειες του αντικειμένου. Ο σχεδιασμός του εργαλείου πρέπει να εξασφαλίζει την αμφιμονοσήμαντη τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων που απαιτούνται για την κατασκευή του αντικειμένου ελαχιστοποιώντας την περίπτωση πιθανού λάθους. Η συναρμολόγηση των μερών μιας κατασκευής στο εργαλείο και η αποκοπή τους στο τέλος σαν ενιαίο προϊόν πρέπει να γίνεται εύκολα και γρήγορα. Ακόμα το εργαλείο πρέπει να είναι σχεδιασμένο κατάλληλα ώστε να εξυπηρετείται όσο το δυνατόν περισσότερο η διαδικασία ελέγχου του. Εφόσον συνυπολογιστούν όλα τα προηγούμενα, το εργαλείο κατασκευάζεται, ελέγχεται το κατά πόσο κατασκευάστηκε σύμφωνα με το σχεδιασμό του και εφόσον είναι λειτουργικό τελικά τοποθετείται στην διαδικασία παραγωγής. Η περιοδικότητα ελέγχου του εργαλείου συνήθως προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή.

Πέρα από την οικονομία χρόνου στις διαδικασίες ελέγχου των παραγώγων, τα εργαλεία εμφανίζουν και άλλα πλεονεκτήματα, όπως την εξοικονόμηση χρόνου στην κατασκευή των παραγώγων, μέσω της απλούστευσης και τυποποίησης των διαδικασιών. Ακόμα η χρήση εργαλείων προσδίδει ακρίβεια και αξιοπιστία στο τελικό παράγωγο και ελαχιστοποιεί την εξάρτηση από την επιδεξιότητα του συναρμολογητή.

Ο περιοδικός έλεγχος των εργαλείων κατατάσσεται και αυτός στις μετρολογικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και για την διεργασία αυτή χρησιμοποιούνται εξειδικευμένοι μετρητικοί εξοπλισμοί όπως αυτοί θα παρουσιαστούν στο υποκεφάλαιο 2.3.

2.2 Μέθοδοι Υπολογισμού Συντεταγμένων

Οι μετρολογικές εφαρμογές, όπως προαναφέρθηκε, απαιτούν υψηλή ακρίβεια. Η ακρίβεια αυτή εξαρτάται τόσο από το χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό όσο και από τη μεθοδολογία μέτρησης και επεξεργασίας που χρησιμοποιείται. Οι μέθοδοι υπολογισμού συντεταγμένων που κυριαρχούν στις μετρολογικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας οφείλουν να εξασφαλίζουν υψηλή ακρίβεια, αξιοπιστία και επαναληψιμότητα της διαδικασίας. Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή των πολικών συντεταγμένων και η δεύτερη αυτή της εμπροσθοτομίας με τις διάφορες παραλλαγές της (πολλαπλή, φωτογραμμετρική κ.α.).

2.2.1 Μέθοδος των Πολικών Συντεταγμένων

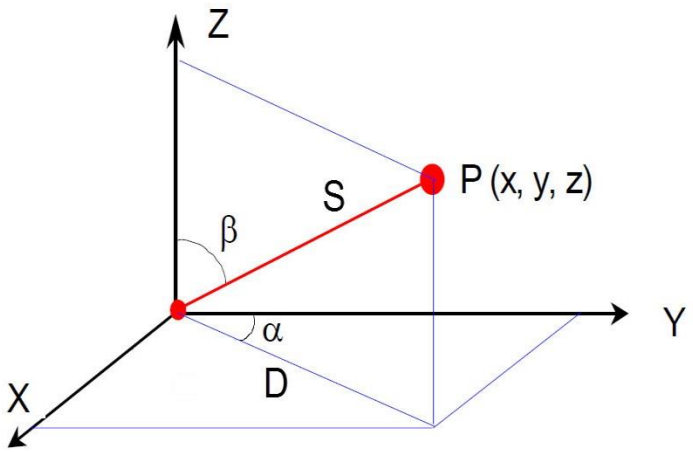
Η μέθοδος των πολικών συντεταγμένων είναι μια μέθοδος υπολογισμού συντεταγμένων που τόσο η μετρητική διαδικασία όσο και η επεξεργασία, χαρακτηρίζονται από ταχύτητα και ευκολία. Τα στοιχεία που μετρούνται σε αυτή τη μέθοδο είναι η οριζόντια γωνία (α), η κατακόρυφη γωνία (β) και η κεκλιμένη απόσταση (S) από ένα γνωστό σημείο προς ένα άγνωστο. Στην περίπτωση του σχήματος 2.1 αν οι μετρήσεις γίνονται από το γνωστό σημείο A (x_A, y_A, z_A) προς το άγνωστο σημείο P (x, y, z), τότε οι συντεταγμένες του δεύτερου δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$x = x_A + D*\sin\alpha \tag{2.1}$$

$$y = y_A + D*\cos\alpha \tag{2.2}$$

$$z = z_A + S*\cos\beta \tag{2.3}$$

όπου, D η οριζόντια απόσταση που προκύπτει από τη σχέση:



Σχήμα 2.1 Πολικές συντεταγμένες
Figure 2.1 Polar Coordinates

$$D = S * \sin\beta \tag{2.4}$$

Η ακρίβεια της μεθόδου αυτής στις εφαρμογές μεγάλης κλίμακας εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ακρίβεια της μέτρησης του μήκους παρά των γωνιών κάτι που εξηγείται εφαρμόζοντας το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στις σχέσεις 2.1, 2.2, 2.3. 2.4. Θεωρώντας το σημείο Α γνωστό χωρίς σφάλμα και τις μετρήσεις γωνιών και μήκους στατιστικά ανεξάρτητες το σφάλμα π.χ. της συντεταγμένης x είναι:

$$\sigma_x = \pm\sqrt{\sin\alpha^2\sigma_D^2 + (D * \cos a)^2\sigma_a^2} \tag{2.5}$$

Όσο μεγαλώνει η απόσταση μέτρησης D, η ακρίβεια της συνιστώσας x εξαρτάται περισσότερο από την ακρίβεια μέτρησης της γωνίας α. Όσο η απόσταση μέτρησης μικραίνει δραστικό ρόλο παίζει η ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων σ_D. Επειδή κατά κανόνα στις μετρολογικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας οι αποστάσεις είναι μικρές, η ακρίβεια των συντεταγμένων επηρεάζεται κυρίως από την ακρίβεια μέτρησης των μηκών. Αυτό βέβαια, δεν απαλλάσσει τη μέθοδο από την ανάγκη για μεγάλη ακρίβεια και στις γωνιομετρήσεις (Δογγούρης, 2005).

Η μέθοδος των πολικών συντεταγμένων χρησιμοποιείται μόνο όταν είναι δυνατή η άμεση μέτρηση μήκους προς το ζητούμενο σημείο. Για την άμεση μέτρηση μήκους μπορεί να χρησιμοποιείται είτε κατάφωτο είτε αυτοκόλλητος ανακλαστικός στόχος είτε ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός με δυνατότητα μέτρησης μήκους χωρίς ανακλαστήρα (reflectorless). Στην πρώτη περίπτωση η ακρίβεια μέτρησης είναι μειωμένη

λόγω της διάστασης του απλού καταφώτου. Η τοποθέτηση αυτοκόλλητου στόχου βελτιώνει την ακρίβεια μέτρησης, αλλά εισάγει αβεβαιότητα για την σωστή τοποθέτηση του στόχου πάνω στο επιθυμητό σημείο. Η χρήση οργάνων χωρίς χρήση ανακλαστήρα (reflectorless) βελτιώνει την ακρίβεια στόχευσης των σημείων, αλλά όχι και την ακρίβεια μέτρησης μιας και, προς το παρόν, οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται με χρήση τέτοιων οργάνων δεν καλύπτουν τις απαιτούμενες από τη Βιομηχανική Γεωδαισία ακρίβειες. Η πιο αξιόπιστη λύση, είναι η χρήση ενός ειδικού στόχου, ενός CCR (Corner Cube Reflector). Οι στόχοι αυτοί έχουν υψηλή ακρίβεια κατασκευής και χρησιμοποιούνται κατά κόρον για τέτοιου είδους εφαρμογές καθώς είναι οι μόνοι που δύνανται να ικανοποιούν τις απαιτήσεις σε ακρίβεια (βλ. 3.4.1).

Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου των πολικών συντεταγμένων είναι η αδυναμία ελέγχου των αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Στη περίπτωση ίδρυσης κάποιου δικτύου ή όδευσης, μπορεί να υπάρχει έλεγχος της ακρίβειας των μετρήσεων αφού γίνεται συνόρθωση του δικτύου ή γωνιακός και γραμμικός έλεγχος της όδευσης (αν είναι κλειστή). Στις πολικές συντεταγμένες, πραγματοποιούνται μοναδικές και ανεξάρτητες μετρήσεις προς κάθε σημείο και δεν μπορούν να ελεγχθούν μεταξύ τους τα διάφορα μετρημένα στοιχεία.

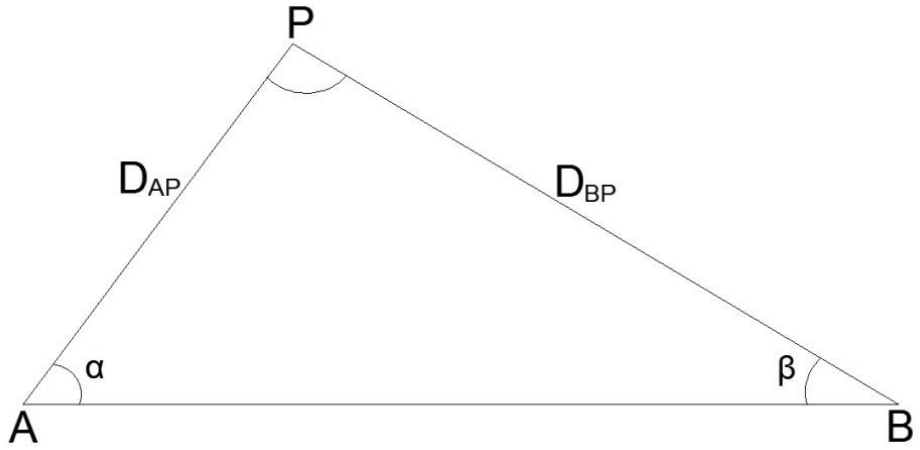
2.2.2 Εμπροσθοτομία

Εμπροσθοτομία είναι η μέθοδος η οποία εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου από τουλάχιστον δυο άλλα γνωστά σημεία και είναι αυτή στην οποία βασίστηκαν τα πρώτα συστήματα βιομηχανικής γεωδαισίας. Βασική αρχή της μεθόδου είναι η υλοποίηση ενός τριγώνου στο χώρο, όπου οι δυο κορυφές του είναι τα δυο γνωστά σημεία και η τρίτη κορυφή το άγνωστο σημείο. Με μετρήσεις οριζοντίων και ζενίθιων γωνιών από τα γνωστά σημεία προς το άγνωστο είναι δυνατός ο προσδιορισμός των συντεταγμένων του τελευταίου. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής παρουσιάζει αρκετές παραλλαγές, τόσο στην μετρητική διαδικασία όσο και στην επεξεργασία, με την κατάλληλη παραλλαγή να επιλέγεται κάθε φορά ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες κάθε περίπτωσης και το διαθέσιμο εξοπλισμό. Μερικές από αυτές τις παραλλαγές, αναλύονται στις επόμενες ενότητες, όπως η εμπροσθοτομία με μετρήσεις από σημεία με γνωστές συντεταγμένες (σταθερό δίκτυο) ή με μετρήσεις από τυχαία σημεία (ελεύθερο δίκτυο). Ακόμα παρουσιάζεται μια ειδική περίπτωση εμπροσθοτομίας, αυτή της πολλαπλής, όπου οι μετρήσεις προς το άγνωστο σημείο γίνονται από περισσότερες των δυο στάσεων. Τέλος, άλλες παραλλαγές της εμπροσθοτομίας μπορεί να αφορούν την εύρεση συντεταγμένων

από εξισώσεις ευθειών ή από την τομή δυο κύκλων ή με την μέτρηση οριζοντίων μηκών αντί για οριζόντιες γωνίες. Οι περιπτώσεις αυτές, συναντώνται πιο σπάνια, ειδικά στις σύγχρονες εφαρμογές ακριβείας και ως εκ τούτου δεν παρουσιάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

α. Εμπροσθοτομία με γωνιομετρήσεις σε σταθερό δίκτυο

Για την εφαρμογή εμπροσθοτομίας σε σταθερό δίκτυο απαιτείται η ύπαρξη δυο τουλάχιστον σημείων με γνωστές συντεταγμένες. Για το σκοπό αυτό δημιουργούνται βάθρα με εξαναγκασμένες κεντρώσεις ούτως ώστε να αποφεύγονται τα σφάλματα από τις κεντρώσεις των οργάνων. Στα δυο βάθρα τοποθετούνται τα όργανα μέτρησης, που συνήθως είναι θεοδόλιχοι ή ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί. Έστω Α και Β τα γνωστά σημεία και Ρ το σημείο του οποίου οι συντεταγμένες αναζητούνται (βλ. σχήμα 2.2). Η μετρητική διαδικασία περιλαμβάνει τις μετρήσεις δυο οριζόντιων γωνιών, των α και β όπως αυτές διακρίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.2 Εφαρμογή εμπροσθοτομίας από τα Α,Β στο Ρ
Figure 2.2 Intersection from points A, B to point P

Η επίλυση του προβλήματος περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

i. Από τις γνωστές συντεταγμένες των σημείων Α και Β, υπολογίζονται μέσω του 2^{ου} θεμελιώδους προβλήματος το μήκος D_{AB} και οι γωνίες διεύθυνσης α_{AB} και α_{BA}.

$$D_{AB} = \sqrt{(x_B - x_{A)}{}^2 + (y_B - y_A)^2} \qquad (2.6),$$

$\alpha_{AB} = \arctan \frac{x_B - x_A}{y_B - y_A}$ (2.7) και $\alpha_{BA} = \arctan \frac{x_A - x_B}{y_A - y_B}$ (2.8)

ii. Εφαρμόζοντας νόμο ημιτόνων στο τρίγωνο ABP, υπολογίζονται τα μήκη D_{AP} και D_{BP} ως εξής:

$D_{BP} = \frac{D_{AB} * sina}{\sin(a+\beta)}$ (2.9) και $D_{AP} = \frac{D_{AB} * sin\beta}{\sin(a+\beta)}$ (2.10)

iii. Με χρήση του 3ου θεμελιώδους προβλήματος υπολογίζονται οι γωνίες διεύθυνσης α_{AP} και α_{BP}:

$\alpha_{AP} = \alpha_{AB} + 400^g - \alpha$ (2.11)

$\alpha_{BP} = \alpha_{BA} + \beta$ (2.12)

iv. Από το 1ο θεμελιώδες πρόβλημα προκύπτουν οι συντεταγμένες του Σ, και από το σημείο A και από το σημείο B:

$x_{P1} = x_A + D_{AP} * \sin\alpha_{AP}$ (2.13)

$y_{P1} = y_A + D_{AP} * \cos\alpha_{AP}$ (2.14)

και

$x_{P1} = x_B + D_{BP} * \sin\alpha_{BP}$ (2.15)

$y_{P1} = y_B + D_{BP} * \cos\alpha_{BP}$ (2.16)

Οι τελικές συντεταγμένες του σημείου P προκύπτουν ως ο μέσος όρος των δυο λύσεων.

Προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι τα δυο όργανα κατά την διάρκεια των μετρήσεων σκοπεύουν κάθε φορά το ίδιο σημείο, προσαρμόζεται στο προσοφθάλμιο φακό ενός εκ των οργάνων μια συσκευή εκπομπής ορατής ακτίνας laser (laser pointer). Αυτή η ακτίνα επισημαίνει το σκοπευόμενο σημείο και λειτουργεί ως “οδηγός” για τον χειριστή του δεύτερου οργάνου. Η σύνδεση των οργάνων σε Η/Υ με εγκατεστημένο κατάλληλο λογισμικό, μπορεί να προσφέρει αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων υπολογίζονται οι συντεταγμένες των ζητούμενων σημείων, όπως επίσης

και το σφάλμα υπολογισμού τους, γεγονός πολύ χρήσιμο για τον χρήστη καθώς μπορεί να επαναλάβει επιτόπου όποια μέτρηση υπερέβη τα προκαθορισμένα όρια ανοχής.

Βασικό πλεονέκτημα της εφαρμογής εμπροσθοτομίας μόνο με γωνιομετρήσεις είναι ότι δεν απαιτείται φυσική επαφή με τα μετρούμενα σημεία. Αυτό καθιστά δυνατή τη μέτρηση απρόσιτων σημείων όπως π.χ. στην όψη ενός κτηρίου.

Άλλο χαρακτηριστικό των σταθερών δικτύων είναι η ταχύτητα των μετρήσεων δεδομένου ότι έχει γίνει η εγκατάσταση των βάθρων. Εφόσον οι συντεταγμένες των στάσεων είναι γνωστές, το μόνο που χρειάζεται είναι να κεντρωθούν και να οριζοντιωθούν τα όργανα πάνω στα βάθρα και να προσανατολιστούν μηδενίζοντας σε σημεία με γνωστές συντεταγμένες, Κατόπιν, με την μέτρηση μιας οριζόντιας γωνίας από κάθε όργανο υπολογίζονται άμεσα οι συντεταγμένες του επιθυμητού σημείου.

Μειονέκτημα των σταθερών δικτύων αποτελεί η ανάγκη κατασκευής των βάθρων και των πλακιδίων κέντρωσης που προσθέτει επιπλέον κόστος στη σχετική εργασία. Τα βάθρα οφείλουν να παρέχουν αξιόπιστη πληροφορία, γεγονός που απαιτεί αφενός μεγάλη ακρίβεια κατά την κατασκευή τους, αλλά και περιοδικό έλεγχο για τυχόν μετακινήσεις τους. Άλλο σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι το αντικείμενο μέτρησης πρέπει να μεταφέρεται στο χώρο όπου είναι εγκατεστημένα τα βάθρα, με αποτέλεσμα αντικείμενα μη φορητά να μην μπορούν να μετρηθούν με αυτόν τον τρόπο.

β. Εμπροσθοτομία με γωνιομετρήσεις σε ελεύθερο δίκτυο

Η εμπροσθοτομία σε ελεύθερο δίκτυο χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα σημεία με γνωστές συντεταγμένες. Στην περίπτωση αυτή οι στάσεις είναι τυχαίες. Αρχικά δημιουργείται ένα τοπικό αυθαίρετο δίκτυο με αρχή ένα από δύο σημεία από τα οποία θα εκτελεστεί η εμπροσθοτομία. Ο άξονας xx΄ του νέου δικτύου ορίζεται ως αυτός που ενώνει τα δυο σημεία. Έτσι αν το σημείο Α είναι το (0,0,0), το σημείο Β θα είναι το (D_{AB},0,ΔH_{AB}) με D_{AB} την απόσταση των δυο σημείων και ΔH_{AB} την υψομετρική τους διαφορά.

Από την στιγμή που δεν είναι δυνατή η μέτρηση μήκους ή έχει επιλεχθεί να μην μετρηθεί κάποιο μήκος και το D_{AB} δεν είναι γνωστό όπως στην προηγούμενη περίπτωση, χρησιμοποιείται ένας έμμεσος τρόπος προσδιορισμού της απόστασης των σημείων Α,Β. Ο τρόπος αυτός περιλαμβάνει μετρήσεις στα άκρα μιας ειδικής ράβδου (ράβδος κλίμακας) γνωστού με πολύ μεγάλη ακρίβεια μήκους. Η ράβδος αυτή τοποθετείται σε κατάλληλη θέση ώστε να έχει την καλύτερη δυνατή γεωμετρία με τα δυο σημεία-στάσεις και

μετρώνται οριζόντιες γωνίες από τα δυο σημεία προς τα άκρα της ράβδου όπου είναι τοποθετημένοι στόχοι. Η αναλυτική διαδικασία του προσδιορισμού μήκους με την ειδική ράβδο έχει ως εξής:

i. Τοποθέτηση των οργάνων σε τυχαία σημεία Α, Β με καλή γεωμετρία προς το αντικείμενο μέτρησης (βλ. σχήμα 2.3).

ii. Τοποθέτηση της ράβδου κλίμακας σε θέση με καλή γεωμετρία προς τις δυο στάσεις

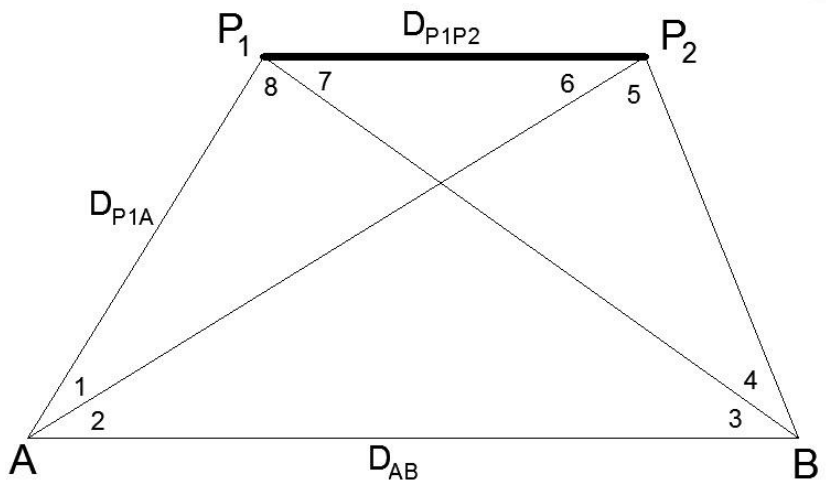
iii. Μέτρηση οριζοντίων γωνιών από τα σημεία Α και Β προς άκρα της ράβδου (γωνίες 1,2,3,4 όπως αυτές φαίνονται στο παρακάτω σχήμα)

iv. Προσδιορισμός της γωνίας 8 από το τρίγωνο ABP_1

$$1+2+3+8 = 200^g \tag{2.17}$$

v. Προσδιορισμός της γωνίας 5 από το τρίγωνο ABP_2

$$2+3+4+5 = 200^g \tag{2.18}$$



Σχήμα 2.3 Διάταξη των οργάνων στα σημεία Α, Β και της ράβδου κλίμακας P_1P_2
Figure 2.3 Arrangements of the instruments in positions A, B and the scale bar P_1P_2

vi. Προσδιορισμός των γωνιών 6 και 7 από το σύστημα σχέσεων:

Συνολικό άθροισμα γωνιών στο τετράπλευρο ABP_1P_2

$$1+2+3+4+5+6+7+8 = 400 \Leftrightarrow 6+7 = 400 - (1+2+3+4+5+8) \quad (2.19)$$

Νόμος ημιτόνων στο τετράπλευρο ABP_1P_2

$$\frac{sin1*sin3*sin5*sin7}{sin2*sin4*sin6*sin8} = 1 \Leftrightarrow \frac{sin7}{sin6} = \frac{sin2*sin4*sin8}{sin1*sin3*sin5} \quad (2.20)$$

vii. Με γνωστό το μήκος P_1P_2 (το μήκος της ράβδου) και όλες τις γωνίες του τετραπλεύρου, με διαδοχικούς νόμους ημιτόνων στα τρίγωνα P_1P_2A και P_1AB υπολογίζονται οι αποστάσεις P_1A και η ζητούμενη απόσταση AB

$$\frac{D_{P1P2}}{sin1} = \frac{D_{P1A}}{sin6} \Leftrightarrow D_{P1A} = \frac{D_{P1P2}*sin6}{sin1} \quad (2.21)$$

$$\frac{D_{P1A}}{sin3} = \frac{D_{AB}}{sin8} \Leftrightarrow \mathbf{D_{AB}} = \frac{A\Delta*sin8}{sin3} \quad (2.22)$$

Με γνωστό πλέον το μήκος D_{AB} ακολουθείται η διαδικασία της εμπροσθοτομίας με γωνιομετρήσεις ακριβώς όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η γωνία διεύθυνσης α_{AB} είναι προφανώς 0^g.

Η υψομετρική διαφορά των δυο οργάνων που έχουν στηθεί στα τυχαία σημεία υπολογίζεται τοποθετώντας τους κατακόρυφους δίσκους των οργάνων στους 100^g και λαμβάνοντας ανάγνωση σε μια βαθμονομημένη σταδία. Η διαφορά των δυο αναγνώσεων είναι η υψομετρική διαφορά των δυο οργάνων.

Σημαντικό πλεονέκτημα των ελεύθερων δικτύων είναι η ευελιξία που παρέχουν στις μετρήσεις. Καθώς δεν απαιτούνται βάθρα, δεν χρειάζεται να μεταφέρεται το αντικείμενο στο χώρο μετρήσεων, αλλά μεταφέρονται τα όργανα στο χώρο του αντικειμένου. Ακόμα τα όργανα αφού τοποθετούνται ελεύθερα στο χώρο εξασφαλίζεται η καλή γεωμετρία με το αντικείμενο και η καλή ορατότητα προς αυτό.

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ανάγκη μέτρησης επιπλέον στοιχείων, προκειμένου να εισαχθεί η κλίμακα στις μετρήσεις, δηλαδή η μέτρηση των οριζοντίων γωνιών προς τα άκρα της ειδικής ράβδου.

γ. Πολλαπλή εμπροσθοτομία

Οι εφαρμογές της μετρολογίας, όπως και οι εφαρμογές βιομηχανικής γεωδαισίας έχουν αυστηρές προδιαγραφές και ως εκ τούτου απαιτούν υψηλή ακρίβεια. Η μέθοδος της εμπροσθοτομίας όπως περιγράφηκε παραπάνω, αν και ακριβής, δεν μπορεί να ανταποκριθεί πολλές φορές στις απαιτήσεις των εφαρμογών αυτών με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται η μέθοδος της πολλαπλής εμπροσθοτομίας.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ταυτόχρονη σκόπευση και μέτρηση οριζόντιων γωνιών από τρία ή και περισσότερα σημεία. Σε αντιπαραβολή με τα προηγούμενα που οι μετρήσεις γίνονταν από δύο στάσεις με δύο όργανα, στην πολλαπλή εμπροσθοτομία χρησιμοποιούνται τρία ή περισσότερα όργανα με αποτέλεσμα να υπάρχουν πλεονάζουσες παρατηρήσεις και οι συντεταγμένες του άγνωστου σημείου να υπολογίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η τοποθέτηση των επιπλέον οργάνων έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς πρέπει να εξασφαλίζεται ορατότητα προς όλα τα σημεία του αντικειμένου και ταυτόχρονα να διατηρείται μια ικανοποιητική γεωμετρία με το αντικείμενο μέτρησης και τα υπόλοιπα όργανα. Φυσικά, παρίσταται και εδώ η ανάγκη επισήμανσης του σκοπούμενου σημείου με χρήση ακτίνας laser (laser pointer) ώστε να σκοπεύουν όλα τα όργανα ακριβώς το ίδιο σημείο.

Στα σταθερά δίκτυα για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής απαιτείται η κατασκευή επιπλέον βάθρων, ενώ στα ελεύθερα δίκτυα το κάθε επιπλέον όργανο εντάσσεται στο δίκτυο με μετρήσεις προς τα άλλα όργανα και προς τη ράβδο.

δ. Ακρίβεια εμπροσθοτομίας

Η ακρίβεια του προσδιορισμού της θέσης ενός σημείου με εμπροσθοτομία με γωνιομετρήσεις εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Κύριος παράγοντας είναι η ακρίβεια γωνιομετρικής μέτρησης του οργάνου. Όσο υψηλότερη είναι η ακρίβεια ενός οργάνου στις γωνιομετρήσεις, τόσο υψηλότερη είναι και η ακρίβεια στο τελικό αποτέλεσμα. Είναι λογικό λοιπόν πως η ακρίβεια των αποτελεσμάτων θα είναι χειρότερη αν οι μετρήσεις γίνουν με ένα οπτικομηχανικό θεοδόλιχο με ακρίβειες της τάξης των 25^{cc} στις γωνίες από ότι αν αυτές γίνουν με ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό με ακρίβεια $1\text{-}3^{cc}$.

Σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια έχει επίσης η γεωμετρία του τριγώνου που σχηματίζουν τα όργανα με το σκοπούμενο σημείο. Στις περιπτώσεις εφαρμογής εμπροσθοτομίας επιδιώκεται το τρίγωνο που σχηματίζεται να πλησιάζει το ορθογώνιο-ισοσκελές ή το

ισόπλευρο, καθώς τότε οι αβεβαιότητες κατά x και κατά y είναι περίπου ίσες και ταυτόχρονα μικρότερες από ότι σε κάθε άλλη μορφή τριγώνου. Σε περιπτώσεις πολλαπλής εμπροσθοτομίας, όπου δεν σχηματίζεται τρίγωνο, αλλά πολύγωνο επιδιώκεται η προσέγγιση του σχήματος του κανονικού πολύγωνου.

Παράγοντας ακρίβειας στα σταθερά δίκτυα, είναι η ακρίβεια με την οποία κατασκευάστηκαν τα βάθρα και φυσικά ο σωστός περιοδικός έλεγχος τους για την ανίχνευση αποκλίσεων στις τιμές των συντεταγμένων τους. Οι κεντρώσεις των οργάνων στα βάθρα δεν εισάγουν αβεβαιότητα καθώς αυτά διαθέτουν πλακίδια για εξαναγκασμένες κεντρώσεις.

2.2.3 Φωτογραμμετρική Εμπροσθοτομία

Η μέθοδος της εμπροσθοτομίας που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα χρησιμοποιείται και σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Η γενική ιδέα είναι ίδια, ωστόσο η μετρητική διαδικασία είναι τελείως διαφορετική, όπως επίσης και η επεξεργασία της

Η φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία αφορά στο προσδιορισμό συντεταγμένων σημείων του χώρου από μετρήσεις σε δυο (απλή εμπροσθοτομία) ή παραπάνω (πολλαπλή εμπροσθοτομία) εικόνες γνωστού προσανατολισμού, εσωτερικού και εξωτερικού (Πέτσα, 2000). Τα γνωστά στοιχεία είναι αυτά του εσωτερικού προσανατολισμού των εικόνων, δηλαδή οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου x_0, y_0 (μαζί με τις διορθώσεις τους Δx και Δy και οι συντελεστές της ακτινικής διαστροφής) και η σταθερά c της μηχανής. Γνωστά είναι επίσης και τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού, δηλαδή οι τρεις γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου λήψης X_0, Y_0, Z_0, που ορίζουν τις τρεις μεταθέσεις, και οι τρείς στροφές περί τους άξονες − στροφή ω περί τον X, στροφή φ περί τον Y, στροφή κ περί τον Z − που ορίζουν την διεύθυνση του άξονα λήψης και την στροφή της εικόνας περί αυτού. Τα άγνωστα στοιχεία είναι οι συντεταγμένες X,Y,Z ενός σημείου στο χώρο και το οποίο απεικονίζεται σε τουλάχιστον δύο ή παραπάνω φωτογραφίες.

Από την συνθήκη συγγραμμικότητας, σύμφωνα με την οποία ένα τυχαίο σημείο P του χώρου, το αντίστοιχο εικονοσημείο ρ και το σημείο λήψης O είναι συνευθειακά ή συγγραμικά, προκύπτουν δυο εξισώσεις για κάθε σημείο που απεικονίζεται σε μια εικόνα (Πέτσα, 2000). Καθώς τα ζητούμενα στοιχεία είναι τρία (οι συντεταγμένες του σημείου στο χώρο - X,Y,Z) η πληροφορία από μια μόνο εικόνα δεν είναι αρκετή, αλλά απαιτείται μια δεύτερη εικόνα στην οποία απεικονίζεται το ίδιο σημείο. Η δεύτερη εικόνα προσφέρει δύο νέες εξισώσεις, οπότε συνολικά προκύπτουν τέσσερις εξισώσεις με τρεις αγνώστους

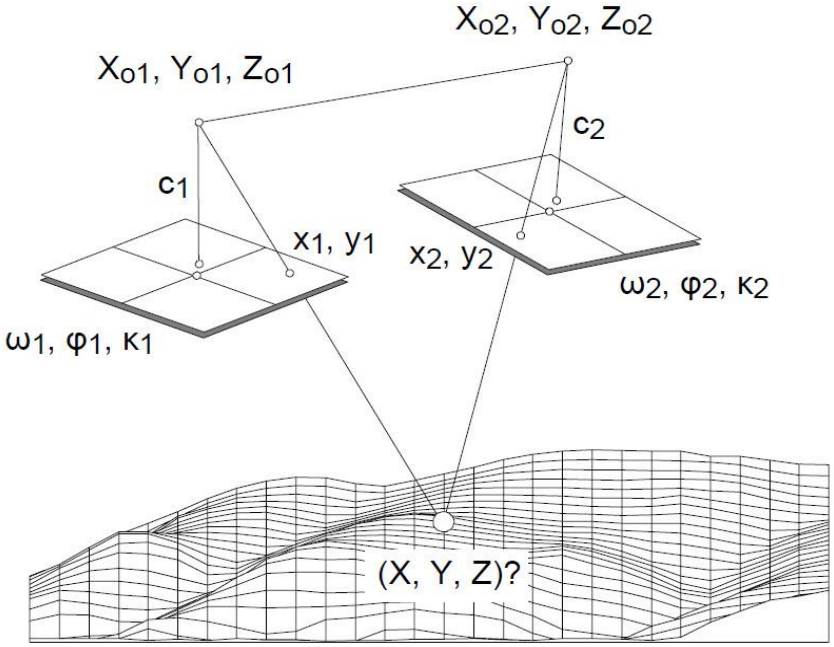
(ένας βαθμός ελευθερίας) και το σύστημα έχει λύση. Για κάθε επιπλέον εικόνα στην οποία απεικονίζεται το ίδιο σημείο, ο αριθμός των εξισώσεων και ο βαθμός ελευθερίας αυξάνονται κατά δυο (πολλαπλή εμπροσθοτομία).

Η λύση από την οποία προκύπτουν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου με βάση τα γνωστά στοιχεία δίνεται από το παρακάτω σύστημα εξισώσεων, που ουσιαστικά αποτελεί την έκφραση της συνθήκης συγγραμμικότητας λυμένης ως προς τα στοιχεία X,Y,Z.

$$\begin{bmatrix} X-X_0 \\ Y-Y_0 \\ Z-Z_0 \end{bmatrix} = k*R^{T*} \begin{bmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \\ -c \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} X-X_0 \\ Y-Y_0 \\ Z-Z_0 \end{bmatrix} = k* \begin{bmatrix} r_{11}(x-x_0)+r_{21}(y-y_0)-r_{31}c \\ r_{12}(x-x_0)+r_{22}(y-y_0)-r_{32}c \\ r_{13}(x-x_0)+r_{23}(y-y_0)-r_{33}c \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

,όπου R^T ο ανάστροφος πίνακας στροφής και k η κλίμακα που εκφράζεται ως

$$\frac{1}{k} = \frac{r_{13}(x-x_0)+r_{23}(y-y_0)-r_{33}c}{(Z-Z_0)} \quad (2.24)$$



Σχήμα 2.4 Φωτογραμμετρική Εμπροσθοτομία από δυο εικόνες [Πέτσα, 2000]
Figure 2.4 Photogrammetric Intersection from two images [Petsa, 2000]

2.3 Μετρολογικοί Εξοπλισμοί

Οι διαθέσιμοι μετρητικοί εξοπλισμοί είναι αρκετά διαφορετικοί μεταξύ τους με σκοπό να μπορούν να καλυφθούν όλων των ειδών οι ανάγκες, ενώ συνεχώς δημιουργούνται νέοι εξοπλισμοί και εξελίσσονται οι ήδη υπάρχοντες. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται χαρακτηριστικοί μετρολογικοί εξοπλισμοί που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλων κλιμάκων. Όργανα που οι μετρήσεις τους αφορούν μια μόνο διάσταση (βερνιέρος,

μικρόμετρο κ.α.) ή δεν είναι αρκούντως ακριβή για μετρολογικές εφαρμογές δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας ενότητας και δεν εξετάζονται.

2.3.1 Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων

Οι Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων (ΜΜΣ) είναι συστήματα κατάλληλα για ακριβείς και επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε αντικείμενα μικρού ως μεσαίου μεγέθους. Αποτελούνται από τέσσερα βασικά στοιχεία: την κυρίως μηχανή μαζί με την επιφάνεια μέτρησης, έναν αισθητήρα, το υπολογιστικό σύστημα και το κατάλληλο λογισμικό.

Η αρχή λειτουργίας τους είναι η εξής: Το αντικείμενο μέτρησης τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια μέτρησης όπου το διατρέχει ένας υπερευαίσθητος φορέας-αισθητήρας. Για κάθε σημείο επαφής του αισθητήρα με το αντικείμενο, στέλνεται ένα σήμα στο μετρητικό σύστημα θέσης της μηχανής και αναγνωρίζονται οι τιμές των συντεταγμένων της θέσης του αισθητήρα, δηλαδή της θέσης του σημείου μέτρησης ως προς προκαθορισμένο σύστημα αναφοράς. Οι συντεταγμένες αυτές εισάγονται στο υπολογιστικό σύστημα και μέσω κατάλληλου λογισμικού αποτυπώνεται το σχήμα και οι διαστάσεις του αντικειμένου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αντιστραφεί, δηλαδή να εισαχθεί το σχέδιο του αντικειμένου στο λογισμικό και με έναν ειδικό αλγόριθμο καθοδήγησης ο αισθητήρας μετακινείται διαδοχικά στα επιθυμητά σημεία μέτρησης (Ζήσος, 2009).

Σχήμα 2.5 Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων COORD3 Kronos 15.30.13
Figure 2.5 Coordinate Measuring Machine COORD3 Kronos 15.30.13

Το βασικό πλεονεκτήματα των μηχανών αυτών είναι η πολύ υψηλή ακρίβεια που παρέχουν, που είναι της τάξης των εκατοστών του χιλιοστού, ενώ υπό ειδικές συνθήκες

μπορεί να προσεγγίσει ακόμα και το 1μm. Διακρίνονται ακόμα για την δυνατότητα αποτύπωσης οποιασδήποτε λεπτομέρειας του αντικειμένου μέτρησης (οπές, εσοχές κ.λπ.) δίνοντας έτσι μια πλήρη και ολοκληρωμένη λύση. Η υψηλή ταχύτητα συλλογής δεδομένων, η αυτόματη διαδικασία μέτρησης και η εγγενής επαναληψιμότητα της διαδικασίας, αποτελούν στοιχεία που καθιστούν τις ΜΜΣ κατάλληλες για βιομηχανικές μετρητικές εργασίες.

Από την άλλη οι ΜΜΣ παρουσιάζουν και αρκετά μειονεκτήματα. Καταρχάς είναι μια ακίνητη συσκευή που απαιτεί το αντικείμενο μέτρησης να μεταφερθεί στο χώρο που βρίσκεται η ΜΜΣ (συνήθως ένας χώρος με ελεγχόμενες συνθήκες). Αυτός είναι αποτρεπτικός παράγοντας για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας καθώς το αντικείμενο μέτρησης μπορεί να μην είναι φορητό. Επιπρόσθετα το μέγεθος του αντικειμένου μέτρησης αποτελεί περιοριστικό παράγοντα καθώς πρέπει να χωράει πάνω στην επιφάνεια της ΜΜΣ. Οι δυο παραπάνω περιορισμοί αντιμετωπίζονται –ως ένα βαθμό- με την προσθήκη ενός αρθρωτού βραχίονα, με τον οποίο η εμβέλεια μετρήσεων αυξάνεται κατά μερικά μέτρα, μειώνοντας όμως την ακρίβεια. Τέλος, η πολυπλοκότητα της ΜΜΣ καθιστά δύσκολο τον χειρισμό της, απαιτώντας έναν έμπειρο και καταρτισμένο χρήστη.

Παρά τα μειονεκτήματα τους, οι ΜΜΣ έχουν καθιερωθεί για μετρολογικές εφαρμογές και χρησιμοποιούνται κυρίως για διαδικασίες γεωμετρικής τεκμηρίωσης και ανάστροφου σχεδιασμού. Η τάση των τελευταίων χρόνων είναι η ανάπτυξη φορητών ΜΜΣ, όπως είναι το laser tracker που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.3.3 και ο αρθρωτός βραχίονας. Οι φορητές ΜΜΣ διατηρούν την πολύ υψηλή ακρίβεια μιας σταθερής μηχανής και συνδυάζοντας τη με φορητότητα και ευελιξία.

2.3.2 Θεοδόλιχοι - Ολοκληρωμένοι Γεωδαιτικοί Σταθμοί

Ο θεοδόλιχος είναι ένα οπτικομηχανικό όργανο σχεδιασμένο να μετράει οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες. Με τη βοήθεια ειδικών παρελκόμενων είναι δυνατό να μετρηθούν και μήκη αν και φυσικά όχι με ακρίβεια ικανοποιητική για μετρολογικές εφαρμογές. Βασικό χαρακτηριστικό του οργάνου είναι οι τρεις μηχανικοί του άξονες, ο πρωτεύον ΠΠ΄, που πρέπει να είναι κατακόρυφος, ο δευτερεύων ΔΔ΄ κάθετος στον ΠΠ΄ και ο σκοπευτικός άξονας ΣΣ΄ που πρέπει να είναι κάθετος στον ΔΔ΄. Το όργανο απαιτεί οριζοντίωση που γίνεται μέσω δυο αεροσταθμών, μιας σφαιρικής και μιας σωληνωτής.

Κατά κύριο λόγο ο προσδιορισμός συντεταγμένων με θεοδόλιχο στις τοπογραφικές εργασίες γίνεται με πολικές συντεταγμένες. Στην Μετρολογία Μεγάλων Κλιμάκων όμως,

λόγω της μη ακριβούς μέτρησης αποστάσεων χρησιμοποιείται η μέθοδος της εμπροσθοτομίας. Χρησιμοποιώντας δυο ή και παραπάνω θεοδόλιχους σκοπεύεται κοινό σημείο στον χώρο και μόνο με γωνιομετρήσεις προσδιορίζεται η απόσταση του σημείου από τα όργανα.

Στα πλεονεκτήματα αυτών των οργάνων συγκαταλέγεται η δυνατότητα τους για εκτέλεση εργασιών μεγάλης κλίμακας. Ακόμα το γεγονός ότι δεν χρειάζεται φυσική επαφή με το αντικείμενο μέτρησης τα καθιστά ικανά για εργασίες σε μη προσβάσιμα αντικείμενα. Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι η διαδικασία μέτρησης είναι εξαιρετικά χρονοβόρα με μηδαμινή επαναληψιμότητα, καθώς για λίγες εκατοντάδες σημεία απαιτούνται πολλές ημέρες εργασίας. Ακόμα, η απουσία δυνατότητας αυτόματης καταγραφής των μετρήσεων αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης χονδροειδών σφαλμάτων.

Στο παρελθόν οι θεοδόλιχοι είχαν ευρεία χρήση σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και αποτελούσαν το κύριο όργανο μετρήσεων τέτοιων εφαρμογών. Η απουσία όμως ενσωματωμένης συσκευής μέτρησης μήκους αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για την περιθωριοποίηση τους και την σταδιακή αντικατάσταση τους από τους Ολοκληρωμένους Γεωδαιτικούς Σταθμούς.

Οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί Σταθμοί ή αλλιώς Total Stations ουσιαστικά αποτελούν θεοδόλιχους με δυνατότητα μέτρησης μηκών. Διαθέτουν ψηφιακούς κύκλους αναγνώσεων για μετρήσεις οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών και αποστασιόμετρα (EDM) για μέτρηση μηκών. Η οριζοντίωση των οργάνων αυτών είναι ψηφιακή, διαθέτουν καταγραφική μονάδα για την αποφυγή χονδροειδών σφαλμάτων και υποστηρίζονται από λογισμικό για τον υπολογισμό οριζόντιων μηκών και υψομετρικών διαφορών.

Για την μέτρηση μηκών απαιτείται η τοποθέτηση ανακλαστικού στόχου στο σημείο μέτρησης, καθιστώντας απαραίτητη τη φυσική επαφή με το αντικείμενο μέτρησης. Αρκετοί σύγχρονοι σταθμοί βέβαια έχουν τη δυνατότητα μέτρησης μηκών χωρίς ανακλαστήρα ξεπερνώντας τον παραπάνω περιορισμό, αλλά με αυτόν τον τρόπο ελαττώνεται η ακρίβεια μέτρησης του μήκους. Οι σύγχρονοι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί έχουν ακρίβεια μέτρησης γωνιών ως και 1.5^{cc} ενώ η ακρίβεια μέτρησης μηκών μπορεί να προσεγγίζει ακόμα και το 0.5mm±1ppm.

Η συνηθέστερη μέθοδος που ακολουθείται με την χρήση των Ολοκληρωμένων Γεωδαιτικών Σταθμών είναι αυτή των πολικών συντεταγμένων. Σε μετρολογικές εργασίες

που απαιτούν ιδιαίτερη ακρίβεια χρησιμοποιούνται συστήματα δύο ή και παραπάνω σταθμών σε συνδυασμό με την μέθοδο της εμπροσθοτομίας.

Το μειονέκτημα των γεωδαιτικών σταθμών είναι η χαμηλή ταχύτητα εκτέλεσης εργασιών. Μπορεί η καταγραφή των μετρήσεων να είναι ψηφιακή βελτιώνοντας τον χρόνο κάθε μέτρησης σε σχέση με ένα θεοδόλιχο, αλλά η συλλογή δεδομένων παραμένει σημειακή υστερώντας έναντι άλλων μετρολογικών εξοπλισμών.

Σχήμα 2.6 Ολοκληρωμένος Γεωδαιτικός Σταθμός ακριβείας Leica TS30
Figure 2.6 High Precision Total Station Leica TS30

Ωστόσο, οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί διαθέτουν όλα τα πλεονεκτήματα των θεοδόλιχων, δηλαδή μεγάλη εμβέλεια , ακρίβεια κ.α., η οποία διατηρείται σε υψηλά επίπεδα ανεξαρτήτως του περιβάλλοντος λειτουργίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά, όπως επίσης και το χαμηλό τους κόστος κάνουν τους γεωδαιτικούς σταθμούς ιδιαίτερα ελκυστικούς έναντι άλλων εξοπλισμών.

2.3.3 Laser Tracker

Το laser tracker είναι μια φορητή Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων η οποία παρακολουθεί και καταγράφει τις διαδοχικές θέσεις ενός ανακλαστικού στόχου. Με την μέτρηση δυο γωνιών (οριζόντια, κατακόρυφη) και του μήκους προς τον στόχο είναι σε θέση να προσδιορίσει τις τριδιάστατες συντεταγμένες του κέντρου του στόχου με ακρίβεια λίγων μικρών (μm). Βασικό χαρακτηριστικό ενός laser tracker είναι η συσκευή μέτρησης μήκους που διαθέτει η οποία μπορεί να είναι είτε ένα αποστασιόμετρο (ADM) είτε ένα συμβολόμετρο (IFM) είτε και τα δυο μαζί. Το συμβολόμετρο προτιμάται συνήθως για την υψηλότερη ταχύτητα του και την ακρίβεια που παρέχει, που είναι της τάξης των ± 0.4μm +

0.3μm/m. Το αποστασιόμετρο χαρακτηρίζεται από εν γένει χαμηλότερη ταχύτητα και ακρίβεια (± 15μm + 1μm/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.

Στα πλεονεκτήματα των laser trackers συγκαταλέγονται η ταχύτητα συλλογής δεδομένων (1000 σημεία/sec), η εξαιρετική τους ακρίβεια στον προσδιορισμό συντεταγμένων και η φορητότητα τους, καθώς τα σύγχρονα tracker έχουν το μέγεθος ενός γεωδαιτικού σταθμού). Έχουν τη δυνατότητα τόσο σημειακών όσο και συνεχόμενων μετρήσεων, ενώ με τη χρήση ειδικών παρελκόμενων επεκτείνονται ακόμα περισσότερο οι λειτουργίες τους καθώς μπορούν είτε να σαρώσουν επιφάνειες είτε να μετρήσουν ταυτόχρονα τις τρεις συντεταγμένες και τις τρεις στροφές ενός σημείου ως προς τους άξονες αναφοράς παρέχοντας πληρέστερη πληροφορία (6 Degrees Of Freedom). Η εμβέλεια μέτρησης τους είναι αρκετά μεγάλη (ως και 160m) με αποτέλεσμα να είναι ικανά για μετρολογικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως ευθυγραμμίσεις, γεωμετρικές τεκμηριώσεις κ.α. (βλ. αναλυτικά κεφ. 3.8).

Το κυριότερο ελάττωμα των laser tracker είναι η συμπεριφορά τους σε μη ιδανικό περιβάλλον λειτουργίας. Η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία στο πεδίο μετρήσεων επηρεάζουν σημαντικά τις μετρήσεις συνεπώς είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των παραπάνω στοιχείων και η διόρθωση των υπολογισμένων συντεταγμένων. Στην περίπτωση που το laser tracker είναι εξοπλισμένο με συμβολόμετρο, προσοχή πρέπει να δίνεται στον να μην χάνεται η οπτική επαφή του οργάνου με το στόχο γιατί τότε το συμβολόμετρο αδυνατεί να μετρήσει και χρειάζεται αρχικοποίηση. Τέλος ένα άλλο μειονέκτημα είναι η ανάγκη φυσικής επαφής με το αντικείμενο ώστε να τοποθετηθεί ο στόχος και το υψηλό κόστος αγοράς του.

Η θέση των laser tracker στις μετρολογικές εφαρμογές σήμερα είναι διαρκώς επεκτεινόμενη με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται στη αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική, τη ρομποτική, τις τηλεπικοινωνίες, ακόμα και στην εφαρμοσμένη φυσική (Η συσκευή του laser tracker παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 3)

2.3.4 Οπτικοί Σαρωτές

Οι οπτικοί σαρωτές είναι όργανα τα οποία είναι ικανά να συλλέγουν πληροφορία στις τρεις διαστάσεις για τα σημεία μιας επιφάνειας και να παράγουν ακριβή τριδιάστατα

ψηφιακά μοντέλα πιο γρήγορα από π.χ. μια ΜΜΣ. Η βασική αρχή λειτουργίας των οπτικών σαρωτών περιλαμβάνει την εκπομπή δέσμης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προς το αντικείμενο μέτρησης, υπολογισμό της απόστασης και προσδιορισμό των συντεταγμένων του σημείου. Με την συλλογή μεγάλου αριθμού σημείων μιας επιφάνειας, τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την γραφική αναπαράσταση της σε περιβάλλον ψηφιακής σχεδίασης (CAD). Οι οπτικοί σαρωτές μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: σημειακοί σαρωτές (μια διάστασης), γραμμικοί σαρωτές (δυο διαστάσεων) και σαρωτές επιφανειών (τριών διαστάσεων).

Οι σαρωτές της πρώτης κατηγορίας, λειτουργούν ουσιαστικά ως αποστασιόμετρα εκπέμποντας μια διαμορφωμένη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προς το αντικείμενο μέτρησης, η οποία όταν επιστρέφει στο όργανο μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Ο χρόνος διαδρομής της δέσμης πολλαπλασιάζεται με την ταχύτητα του φωτός και προσδιορίζεται η ζητούμενη απόσταση. 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. Οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται είναι συνήθως της τάξης των λίγων χιλιοστών (±2mm στα 25m).

Σχήμα 2.7 Σαρωτής 1Δ Surphaser® 25HSX
Figure 2.7 Laser Scanner 1D Surphaser® 25HSX

Εν συγκρίσει με το laser tracker οι αβεβαιότητες των μετρήσεων είναι σαφώς υψηλότερες, όμως η πυκνότητα των δεδομένων που συλλέγονται αποζημιώνει για την μειωμένη ακρίβεια. Το συγκριτικό πλεονέκτημα των οργάνων αυτών είναι η σάρωση ανώμαλων επιφανειών και η μέτρηση προς απρόσιτα σημεία, διαδικασίες που δεν μπορούν να γίνουν

εύκολα με τα υπόλοιπα όργανα. Επίσης είναι ικανοί για μετρήσεις κάτω από οποιοδήποτε φωτισμό εσωτερικού χώρου και προς σχεδόν οποιαδήποτε επιφάνεια Οι οπτικοί σαρωτές πέρα από τις ανώμαλες και απρόσιτες επιφάνειες βρίσκουν επίσης εφαρμογή στις αποτυπώσεις μνημείων και σε σκηνές εγκλήματος.

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 που παρακολουθεί την εκπεμπόμενη δέσμη. Μέσω συνεχών τριγωνισμών υπολογίζεται η απόσταση κάθε σημείου από τον σαρωτή και τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του τριδιάστατου μοντέλου της επιφάνειας. Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνονται καλύτερες ακρίβειες από ότι με τους σημειακούς σαρωτές, καθώς οι ακρίβειες σε αυτή την περίπτωση κυμαίνονται στο ±0.1mm. Η άλλη διαφορά είναι ότι η εκπεμπόμενη δέσμη δεν είναι σημειακή, αλλά γραμμική με αποτέλεσμα η σάρωση να εκτελείται ταχύτερα.

Σχήμα 2.8 Σαρωτής πολωμένου φωτός Steinbichler Comet L3D
Figure 2.8 Structured Light Scanner Steinbichler Comet L3D

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 ±30μm. 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.

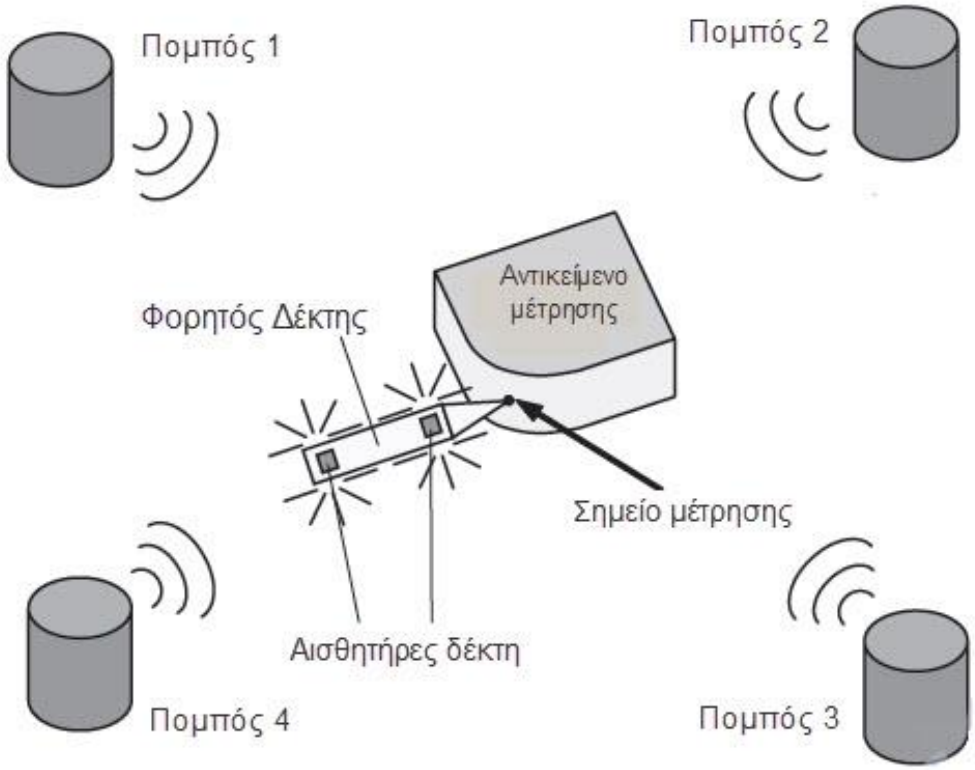
Συνοψίζοντας, οι σαρωτές είναι όργανα που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων για την αναπαράσταση επιφανειών. Με την πυκνότητα των σημείων που μετρούνται αποδίδεται κάθε λεπτομέρεια του αντικειμένου μέτρησης με μεγάλη ακρίβεια, και αποτελεί μια ακόμα λύση για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Βέβαια, χρειάζεται προσοχή καθώς η μεγάλη ποσότητα δεδομένων δυσχεραίνει την επεξεργασία και μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην ανάλυση. Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται ειδικοί αλγόριθμοι για τη μείωση των δεδομένων, κάνοντας τα δεδομένα εύκολα αξιοποιήσιμα

2.3.5 iGPS

Το Indoor GPS(iGPS) είναι ένα νέο σύστημα μετρήσεων του οποίου οι αρχές του βασίζονται στο κλασσικό GPS και στους θεοδόλιχους. Στο iGPS χρησιμοποιούνται πομποί τοποθετημένοι γύρω από το πεδίο μετρήσεων, με τους οποίους προσδιορίζεται η ακριβής θέση ενός δέκτη που κινείται στο πεδίο. Η επικοινωνία πομπού-δέκτη δεν είναι αμφίδρομη, καθώς ο δέκτης δεν επιστρέφει πληροφορία στον πομπό. Υπό αυτήν την έννοια το παρόν σύστημα μοιάζει με αυτό του GPS, όπου επίγειοι δέκτες προσδιορίζουν τη θέση τους μέσω δορυφόρων. Σε κάθε άλλη λειτουργία των δυο συστημάτων υπάρχουν θεμελιώδεις διαφορές.

Πριν εκτελεστεί οποιαδήποτε μέτρηση, πρέπει να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των πομπών στο τοπικό σύστημα, κάτι που γίνεται συνήθως κατά την αρχική τοποθέτηση τους. Οι πομποί παραμένουν σταθερά εγκατεστημένοι, ενώ η θέση τους ελέγχεται τακτικά για τυχόν μετακινήσεις. Λειτουργώντας ως σημεία αναφοράς των μετρήσεων, εκπέμπουν συνεχώς 3 σήματα: δυο υπέρυθρες ακτίνες laser σε σχήμα βεντάλιας από την περιστρεφόμενη κεφαλή του πομπού και ένα υπέρυθρο παλλόμενο φως. Οι δέκτες έχουν φωτοϋποδοχείς που μπορούν να ανιχνεύσουν ασύρματα τα εκπεμπόμενα σήματα παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο κινητικότητα στον χρήστη. Οι μετρήσεις στο σύστημα iGPS εκτελούνται ακουμπώντας τον δέκτη στην επιφάνεια του αντικειμένου μέτρησης. Κάθε πομπός παρέχει σε κάθε δέκτη πληροφορία οριζόντιας και ζενίθιας γωνίας, συνεπώς οι συντεταγμένες του δέκτη υπολογίζονται μέσω της μεθόδου της εμπροσθοτομίας (βλ. 2.2.2). Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ορατότητας προς δυο ή περισσότερους πομπούς κάθε φορά. Ακόμα, αφού η επικοινωνία πομπού-δέκτη είναι μονόδρομη, υπάρχει

δυνατότητα χρήσης πρακτικά 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 ακρίβειες που μπορούν να επιτευχθούν με το iGPS είναι της τάξης των ±0.25mm και εξαρτάται από τον αριθμό και τη διάταξη των πομπών (Wang et al., 2008).



Σχήμα 2.9 Σχηματική Αναπαράσταση Λειτουργίας iGPS [Peggs et al., 2009]
Figure 2.9 Representation scheme of an iGPS measurement [Peggs et al., 2009]

Στα μειονεκτήματα του συστήματος iGPS συγκαταλέγεται η ανάγκη μεταφοράς των αντικειμένων μέτρησης στο χώρο όπου είναι εγκατεστημένοι οι πομποί και το υψηλό κόστος εγκατάστασης.

2.3.6 Αυτόματα Φωτογραμμετρικά Συστήματα

Οι ψηφιακές φωτομηχανές είναι το κατεξοχήν όργανο που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή φωτογραμμετρικών μεθόδων σε εργασίες μεγάλης κλίμακας. Οι φωτομηχανές αποτελούν ένα ευέλικτο και ακριβές μετρητικό εργαλείο με το οποίο φωτογραφίζεται το αντικείμενο μέτρησης και κατόπιν με εφαρμογή φωτογραμμετρικών μεθόδων και τεχνικών εξάγεται από τις φωτογραφίες μετρητική πληροφορία. Οι φωτομηχανές βρίσκουν χρήση εδώ και αρκετές δεκαετίες σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, αρχικά με τη χρήση

φωτογραφικών πλακών, στη συνέχεια με τα φιλμ και πλέον ψηφιακά. Σήμερα χρησιμοποιούνται μόνο ψηφιακές φωτομηχανές λόγω της ψηφιοποίησης της όλης διαδικασίας και της καλύτερης ακρίβειας που παρέχουν. Η ακρίβεια των μετρήσεων γενικά κυμαίνεται από τα λίγα εκατοστά του χιλιοστού ως και μερικά εκατοστά ανάλογα την κλίμακα των εργασιών, την χρησιμοποιούμενη μέθοδο λήψης και επεξεργασίας της εικόνας κ.α.

Προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές ακρίβειες, φωτογραφίζεται με μια ψηφιακή φωτομηχανή από διάφορες θέσεις το αντικείμενο μέτρησης, πάνω στο οποίο έχουν προσαρμοσθεί προσημασμένοι στόχοι. Εφαρμόζοντας την μέθοδο της πολλαπλής εμπροσθοτομίας στις φωτογραφίες, υπολογίζονται οι τριδιάστατες συντεταγμένες των στόχων στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς, η θέση της φωτομηχανής και ο προσανατολισμός της ως προς την εικόνα και τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού της (αυτοβαθμονόμηση). Με προσεκτική εφαρμογή αυτής της μεθόδου μπορούν να επιτευχθεί ακρίβεια 0.05mm για ένα αντικείμενο μεγάλου μεγέθους. Οι κύριες πηγές σφαλμάτων είναι ο εσωτερικός προσανατολισμός της μηχανής (για αυτό και απαιτείται τακτικό καλιμπράρισμα της), οπτικές παραμορφώσεις που οφείλονται π.χ. στην ατμοσφαιρική διάθλαση, κατασκευαστικές ατέλειες στα οπτικά συστήματα της μηχανής και τέλος σφάλματα που πηγάζουν από τους στόχους.

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 και σε αυτήν την περίπτωση 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 είναι της τάξης του ±0.1mm.

Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης φωτογραμμετρικών συστημάτων είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής στο πεδίο. Αρκεί η τοποθέτηση των στόχων, το στήσιμο των φωτομηχανών και η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται άμεσα. Σε περίπτωση επαναλαμβανόμενων εργασιών οι στόχοι προϋπάρχουν κάνοντας ακόμα

ταχύτερη την όλη διαδικασία. Άλλα πλεονεκτήματα των φωτομηχανών είναι η φορητότητα τους και η ταυτόχρονη μέτρηση πρακτικά άπειρου αριθμού σημείων. Στα μειονεκτήματα του εξοπλισμού αυτού είναι ότι απαιτείται αρκετός χρόνος για την επεξεργασία των δεδομένων και την εξαγωγή αποτελεσμάτων, που συνεπάγεται την ανάγκη ύπαρξης ειδικευμένου προσωπικού. Ακόμα μειονέκτημα αποτελεί η ανάγκη προσβασιμότητας στο αντικείμενο μέτρησης για την προσαρμογή των στόχων.

Η τάση στις φωτογραμμετρικές μεθόδους είναι 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 εξελίξουν τα παράγωγα τους από τριδιάστατες συντεταγμένες, σε μοντέλα CAD σε πραγματικό χρόνο.

2.3.7 Υβριδικά Συστήματα

Στην πληθώρα των εφαρμογών μεγάλης κλίμακας υπάρχουν αρκετά παραδείγματα όπου δύο από τα προαναφερθέντα όργανα έχουν συνδυαστεί σε ένα κοινό σύστημα που εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα των υποσυστημάτων του.

Το πρώτο παράδειγμα υβριδικού συστήματος είναι αυτό των γεωδαιτικών εικονοσταθμών, ενός συστήματος που κυκλοφορεί εδώ και αρκετά χρόνια και ήδη βρίσκει ευρεία εφαρμογή. Οι εικονοσταθμοί συνδυάζουν έναν ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό με μια ψηφιακή φωτομηχανή. Όσο ο γεωδαιτικός σταθμός μετράει την οριζόντια γωνία, την κατακόρυφη γωνία και το μήκος προς τον στόχο, η ενσωματωμένη σε αυτόν ψηφιακή φωτομηχανή φωτογραφίζει τον στόχο. Με το συνδυασμό των στοιχείων από το σταθμό και της φωτογραφίας είναι δυνατός ο προσδιορισμός όχι μόνο των τριών συντεταγμένων του στόχου, αλλά και των τριών στροφών του ως προς τον εικονοσταθμό. Όπως γίνεται αντιληπτό το υβριδικό αυτό σύστημα παρέχει τον ίδιο πλούτο πληροφορίας που παρέχει ο συνδυασμός ενός laser tracker και ενός ειδικού παρελκόμενου, σε χαμηλότερη τιμή, αλλά με μειωμένη ακρίβεια.

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 ±0.030mm. Τέλος προσοχή απαιτείται στο πλήθος των συλλεχθέντων δεδομένων, καθώς δύναται να δημιουργηθεί μεγάλος θόρυβος και απαιτείται εφαρμογή ειδικών αλγορίθμων απλοποίησης.

2.4 Κριτήρια Επιλογής Μετρολογικού Εξοπλισμού

Καθένα από τα μετρολογικά όργανα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο έχει τα πλεονεκτήματα του, τα μειονεκτήματα του και τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού για την εκτέλεση κάποιας συγκεκριμένης εργασίας αποδεικνύεται κάθε άλλο παρά εύκολη διαδικασία καθώς είναι πολλοί οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή αυτή. Μάλιστα, 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, Cai, Maropoulos, 2009). Πέρα από το κόστος αγοράς του κάθε εξοπλισμού, οι παράγοντες αυτοί μπορούν να χωριστούν σε τρείς κατηγορίες: αυτούς που έχουν σχέση με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εργασίας, αυτούς που έχουν σχέση με τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου μέτρησης και στους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

2.4.1 Απαιτήσεις Εργασίας

Το πρώτο κριτήριο επιλογής μετρολογικού εξοπλισμού που έχει άμεση σχέση με τις απαιτήσεις της εργασίας είναι η απαιτούμενη **ακρίβεια**. Το μέγεθος 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 η αβεβαιότητες πρέπει να διατηρούνται σε επίπεδο μικρών (μm) η χρήση γεωδαιτικών σταθμών δεν αποτελεί επιλογή και απορρίπτεται. Στη γενική περίπτωση η ακρίβεια των μετρήσεων σχετίζεται με τη συχνότητα μέτρησης. Συστήματα που εκτελούν χιλιάδες μετρήσεις το δευτερόλεπτο (σαρωτές), δεν έχουν καλή μεμονωμένη ακρίβεια. Ο μέσος όρος όμως που προκύπτει από το πλήθος της πληροφορίας σταδιακά βελτιώνει την ακρίβεια και την καθιστά καλύτερη από αυτή ενός οργάνου που εκτελεί μεμονωμένες μετρήσεις. Η απαιτούμενη ακρίβεια μπορεί ακόμα να καθορίσει την τεχνική χρήσης ενός εξοπλισμού ώστε αυτός να ανταποκριθεί στις ιδιαίτερες ανάγκες μιας εργασίας.

Το **πλήθος των σημείων** που θα μετρηθεί είναι ένα άλλο σημαντικό κριτήριο. Ανάλογα τις απαιτήσεις κάθε εργασίας τα προς μέτρηση σημεία μπορεί να είναι από ένα ως εκατοντάδες. Φυσικά δεν είναι όλα τα συστήματα κατάλληλα για κάθε περίπτωση, αφού στην περίπτωση που πρέπει να μετρηθούν εκατοντάδες σημεία δεν θα προτιμηθούν τα όργανα που λαμβάνουν σημειακές μετρήσεις (θεοδόλιχα, γεωδαιτικοί σταθμοί), ενώ στην περίπτωση που χρειάζεται να μετρηθεί ένα μόνο σημείο 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 **ποιότητα της μετρητικής πληροφορίας** διαδραματίζει επίσης ρόλο στην επιλογή οργάνου. Για παράδειγμα υπάρχουν μετρητικά όργανα (που δεν αναφέρονται στην παρούσα διπλωματική εργασία καθώς χρησιμοποιούνται μόνο για εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως τα μικρόμετρα) 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 τριδιάστατη πληροφορία (laser tracker, ΜΜΣ), 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 τριδιάστατες συντεταγμένες ενός σημείου όσο και οι τρεις στροφές του στο χώρο. Εφόσον λοιπόν από τις απαιτήσεις της εργασίας προκύπτει ανάγκη για τριδιάστατη πληροφορία, τα όργανα που δίνουν τριδιάστατες 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**. Στον βιομηχανικό χώρο ο χρόνος 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.

2.4.2 Χαρακτηριστικά Αντικειμένου Μέτρησης

Από τους σημαντικότερους παράγοντες κατά την επιλογή οργάνου είναι οι **διαστάσεις του αντικειμένου μέτρησης**. Το μέγιστο μέγεθος του πρέπει να καλύπτεται από την εμβέλεια του εκάστοτε οργάνου. Κανονικά όλα οι μετρολογικοί εξοπλισμοί που προαναφέρθηκαν είναι κατάλληλοι για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, αλλά στην πράξη μερικά συστήματα αποδίδουν με μειωμένη ακρίβεια όταν το αντικείμενο μέτρησης είναι πολύ μεγάλο.

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 (κάτοπτρο), η εφαρμογή στόχων είναι δύσκολή 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,** αφού στην περίπτωση μέτρησης κάποιας πολύ γυαλιστερής επιφάνειας, η επιλογή ενός σαρωτή θα ήταν άστοχη αφού 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 δύσκολή, 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 επιλογής της εμπροσθοτομίας με θεοδόλιχα ή η σάρωση του αντικειμένου αποτελούν τις ενδεδειγμένες λύσεις σε αυτή την περίπτωση.

2.4.3 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 διαστήματα τιμών **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 οι **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. Αν αυτό κριθεί ότι αποτελεί σημαντικό πρόβλημα θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος παραμονής στο πεδίο, χρησιμοποιώντας π.χ. φωτογραμμετρία για την εκτέλεση της εργασίας.

3 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ LASER TRACKER

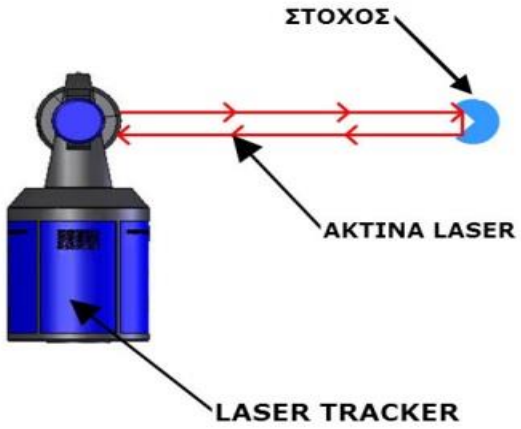
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το Laser Tracker, μια φορητή μηχανή μέτρησης συντεταγμένων που αναπτύχθηκε το 1986 και έφερε επανάσταση στις μετρολογικές εφαρμογές (Vera, 2011). Το laser tracker βρήκε αρχικά χώρο στη βιομηχανία, αφενός λόγω της δυνατότητας μεταφοράς του στο χώρο μετρήσεων και όχι το αντίθετο όπως απαιτούσε μια σταθερή Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων και αφετέρου λόγω της υψηλής του ακρίβειας που το έκανε να υπερτερεί έναντι άλλων φορητών μετρητικών εξοπλισμών (π.χ. θεοδόλιχοι). Καθώς οι περισσότερες βιομηχανίες στράφηκαν στη λύση των συστημάτων αυτών, η αυξανόμενη ζήτηση ώθησε τις εταιρείες κατασκευής laser tracker να εξελίσσουν συνεχώς τα μηχανήματα κάνοντας τα από πιο φορητά, πιο ακριβή, πιο ανθεκτικά. Σήμερα, τα laser tracker συναντώνται σε όλες τις βιομηχανίες που ασχολούνται με την αεροναυπηγική, την αεροδιαστημική, την ναυπηγική και την αυτοκινητοβιομηχανία, όπως επίσης και σε κάθε άλλη βιομηχανία που έχει να ελέγξει ή να συναρμολογήσει κατασκευές μεγάλης κλίμακας ή ακόμα και σε εργαστήρια Φυσικής για την ευθυγράμμιση επιταχυντών ηλεκτρονίων ή μαγνητών.

3.1 Αρχή Λειτουργίας

Ένα τυπικό σύστημα Laser Tracker αποτελείται από το κυρίως σώμα, την μονάδα ελέγχου, τους ειδικούς στόχους, έναν υπολογιστή και το κατάλληλο λογισμικό. Ακόμα, υπάρχει ένας μικρός μετεωρολογικός σταθμός είτε εξωτερικός είτε ενσωματωμένος στο όργανο, προκειμένου να ενημερώνει το σύστημα για την θερμοκρασία, την πίεση και την υγρασία του περιβάλλοντος των μετρήσεων.

Η αρχή λειτουργίας του Laser Tracker είναι η εξής: Η κεφαλή του laser tracker εκπέμπει μια ακτίνα laser, η οποία προσπίπτει πάνω σε έναν ανακλαστικό στόχο που τοποθετείται στο σημείο ενδιαφέροντος. Η ανακλώμενη ακτίνα επιστρέφει στο όργανο επιτρέποντας έτσι να γίνει ο υπολογισμός της απόστασης από το στόχο μέσω κάποιας συσκευής μέτρησης μήκους (βλ. σχήμα 3.1). Η συσκευή αυτή μπορεί να είναι είτε ένα αποστασιόμετρο (ADM – Absolute Distance Meter) οπότε η μετρημένη απόσταση είναι απόλυτη είτε ένα συμβολόμετρο (IFM – InterFeroMeter) οπότε υπολογίζεται σχετική απόσταση (βλ. κεφ. 3.2).

Επίσης στο laser tracker βρίσκονται δυο κωδικοποιητές γωνιών, βάσει των οποίων επιτυγχάνεται ο προσανατολισμός των δυο βασικών μηχανικών αξόνων του οργάνου, του οριζόντιου και του κατακόρυφου (ζενίθιου). Η πληροφορία για την οριζόντια και κατακόρυφη γωνία του στόχου, καταγράφεται για να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των συντεταγμένων του κέντρου του στόχου, ενώ χρησιμεύει και στην παρακολούθηση (tracking) του στόχου από το όργανο.



Σχήμα 3.1 Αρχή λειτουργίας των Laser Trackers [Muelaner, 2008]
Figure 3.1 Laser Trackers' operation principal [Muelaner, 2008]

Με χρήση του κατάλληλου λογισμικού, από τα μετρημένα στοιχεία (ένα μήκος και δυο γωνίες) υπολογίζονται –κατά κανόνα- τριδιάστατες ορθογώνιες συντεταγμένες X,Y,Z με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων (βλ.2.2.1) από τους τύπους 2.1, 2.2, 2.3.

Οι συντεταγμένες που προκύπτουν αναφέρονται στο κέντρο του στόχου, συνεπώς απαιτείται ακριβής γνώση της ακτίνας του, προκειμένου να γίνει η κατάλληλη μετατόπιση των συντεταγμένων και αυτές να αναφέρονται στο σημείο επαφής του στόχου με το μετρούμενο αντικείμενο, δηλαδή στο επιθυμητό σημείο.

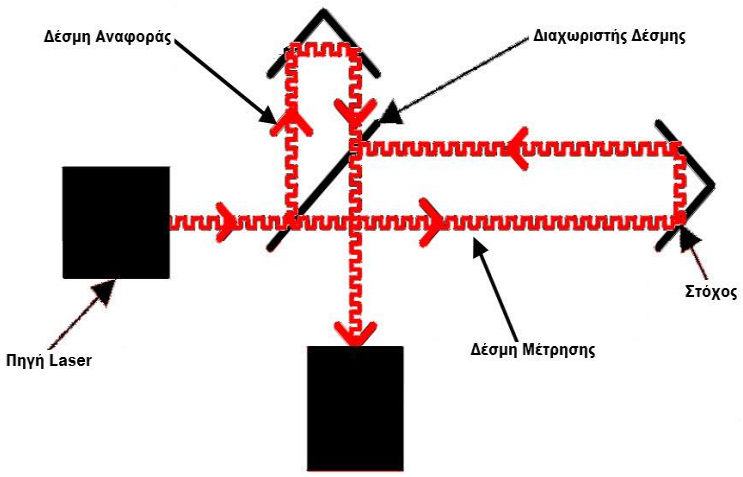
3.2 Μέθοδοι Μέτρησης Μήκους

Στα συστήματα laser tracker επικρατούν δύο τρόποι μέτρησης μηκών, μέτρηση σχετικής απόστασης με συμβολόμετρο (IFM) και μέτρηση απόλυτης απόστασης με αποστασιόμετρο (ADM). Κάθε μια από τις δυο τεχνικές έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ως εκ τούτου υπάρχουν laser tracker που διαθέτουν μόνο συμβολόμετρο, άλλα που έχουν μόνο αποστασιόμετρο, και άλλα που διαθέτουν και τις δύο συσκευές, ώστε να καλύπτει η μία τα μειονεκτήματα της άλλης.

3.2.1 Αρχή Συμβολομετρίας

Το συμβολόμετρο ήταν η συσκευή μέτρησης μήκους που χρησιμοποιήθηκε τα πρώτα χρόνια ύπαρξης του laser tracker και βασικά ο λόγος που διαχώρισε το όργανο αυτό από τους γεωδαιτικούς σταθμούς. Χαρακτηριστικά του συμβολόμετρου είναι η μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση μηκών (<1μm) και η ταχύτητα συλλογής δεδομένων (>1000 σημεία/sec). Η δυνατότητα πραγματοποίησης μόνο γραμμικών μετρήσεων με το συμβολόμετρο περιόριζε σημαντικά την ευελιξία του και εν τέλει τη χρησιμότητα του. Με την προσαρμογή του στο laser tracker ξεπεράστηκε αυτή η αδυναμία και μπορεί να πραγματοποιήσει μετρήσεις σε ένα ευρύ φάσμα κατευθύνσεων, αφού συνεργάζεται με το σύστημα κατόπτρων και κινητήρων του οργάνου.

Η αρχή λειτουργίας του συμβολόμετρου είναι η εξής: Δέσμη σταθερής συχνότητας He-Ne laser εκπέμπεται από την συσκευή και προσπίπτει πάνω σε ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο, το οποίο διαχωρίζει τη δέσμη. Το ένα τμήμα της, ονομαζόμενο δέσμη αναφοράς ανακλάται κατά 90 μοίρες και προσπίπτει σε σταθερό κάτοπτρο εντός της συσκευής. Το άλλο τμήμα της δέσμης, ονομαζόμενο δέσμη μέτρησης, κατευθύνεται προς τον στόχο, στον οποίο ανακλάται. Κατόπιν επιστρέφει στη συσκευή και συμβάλλει με την δέσμη αναφοράς (βλ. σχήμα 3.2). Στο σημείο της συμβολής παρατηρείται η ένταση του φωτός, όπου σύμφωνα με τις αρχές της συμβολομετρίας, αυτή είναι μέγιστη όταν οι δυο δέσμες βρίσκονται σε φάση (σύμπτωση) και ελάχιστη όταν έχουν διαφορά φάσης $\pi/2$ (Βοσνιάκος, 2009).



Σχήμα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του συμβολόμετρου [Muelaner, 2008]
Figure 3.2 Representation scheme of interferometer`s operation principle [Muelaner, 2008]

Καθώς ο στόχος μετακινείται, η απόσταση που διασχίζει η δέσμη μέτρησης μεταβάλλεται και η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο δεσμών αυξομειώνεται συνεχώς. Όταν ο στόχος κινηθεί σε απόσταση ίση με το μισό του μήκους του κύματος εκπομπής του laser, τότε το μήκος της δέσμης μέτρησης μεταβάλλεται κατά ένα μήκος κύματος και η ένταση του φωτός διανύει ένα πλήρη κύκλο (μέγιστο-ελάχιστο-μέγιστο). Μετρώντας λοιπόν τον αριθμό των πλήρων κύκλων μπορεί να υπολογισθεί η μετατόπιση του στόχου, η οποία θα είναι ίση με το γινόμενο του αριθμού των κύκλων αυτών, πολλαπλασιασμένων με το ½ του μήκους κύματος της δέσμης.

Η διακριτική ικανότητα ενός τυπικού συμβολόμετρου είναι ίση με το μισό του μήκους κύματος της δέσμης που για τη δέσμη He-Ne laser είναι 0.32μm. Πιο σύγχρονα συμβολόμετρα, μετράνε πόσες φορές η κυματομορφή έτμησε τον οριζόντιο άξονα υπολογίζοντας έτσι και τους μισούς κύκλους, βελτιώνοντας την διακριτική τους ικανότητα στο ¼ του μήκους κύματος, δηλαδή στα 0.16μm (Βοσνιάκος, 2009).

Βασικό χαρακτηριστικό του συμβολόμετρου είναι ότι μετράει σχετικές μετατοπίσεις και όχι απόλυτες θέσεις. Προκειμένου να υπερκεραστεί αυτό το πρόβλημα χρειάζεται αρχικοποίηση, δηλαδή η μέτρηση ενός σημείου με γνωστή απόσταση από το όργανο. Αυτό είναι συνήθως είτε ένα σημείο πάνω στο laser tracker -το λεγόμενο «birdbath»- είτε κάποιο άλλο σημείο αναφοράς. Κατόπιν αυτού το συμβολόμετρο, μέσω της λειτουργίας ανίχνευσης του οργάνου, παρακολουθεί το κέντρο του στόχου και υπολογίζει κάθε στιγμή την σχετική του μετατόπιση. Στη συνέχεια, βάσει της αρχικής απόστασης υπολογίζεται η απόλυτη απόσταση σε κάθε σημείο. Στην περίπτωση που η δέσμη χάσει τον στόχο είτε λόγω παρεμβολής κάποιου αντικειμένου είτε γιατί η ανακλαστική επιφάνεια του στόχου δεν είναι στραμμένη προς την κεφαλή του οργάνου, η μέτρηση των ακαριαίων κύκλων μηδενίζεται με αποτέλεσμα να μην μπορούν πλέον να προσδιοριστούν αποστάσεις. Το σύστημα του laser tracker ειδοποιεί τον χειριστή ότι έχει παρουσιαστεί σφάλμα, και ότι απαιτείται η εκ νέου αρχικοποίηση της δέσμης.

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες στο πεδίο μέτρησης επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα των μετρήσεων με το συμβολόμετρο. Οι ακραίες τιμές θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας, αλλοιώνουν την πορεία της δέσμης μέτρησης από και προς το όργανο, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η κυματομορφή των δύο δεσμών και εν τέλει να εισάγονται σφάλματα στο υπολογισμένο μήκος. Ως εκ τούτου, πρέπει να ελέγχονται οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και

οι μετρήσεις να διεξάγονται μόνο στο εύρος των προκαθορισμένων από τον κατασκευαστή τιμών θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας.

3.2.2 Τεχνική Μέτρησης Απόλυτων Αποστάσεων

Η δεύτερη συσκευή μέτρησης μήκους που συναντάται στα συστήματα laser tracker είναι το αποστασιόμετρο (ADM – Absolute Distance Meter). Η αρχή λειτουργίας του είναι παρόμοια με αυτή των EDM που διαθέτουν οι γεωδαιτικοί σταθμοί. Στα αποστασιόμετρα χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού του μήκους.

Ο πρώτος τρόπος είναι ο υπολογισμός του "χρόνου πτήσης" της δέσμης. Το ADM εκπέμπει ακτίνα υπέρυθρου laser η οποία διαμορφώνεται από ένα ημιτονοειδές κύμα και αφού συνδυαστεί με ένα laser He-Ne κόκκινου φωτός (προκειμένου η δέσμη να είναι ορατή) εξέρχεται από το όργανο και ανακλάται στο κέντρο του στόχου. Η δέσμη επιστρέφει στο laser tracker, όπου η υπέρυθρη ακτίνα αφότου διαχωριστεί από την ορατή ακτίνα, μετατρέπεται σε ηλεκτρονικό σήμα. Κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα αναλύουν το σήμα αυτό και προσδιορίζουν το "χρόνο πτήσης" του κύματος. Αυτός πολλαπλασιασμένος με την ταχύτητα της ακτίνας στον αέρα δίνει την απόσταση του laser tracker από το στόχο.

Μια παραλλαγή της μεθόδου, που χρησιμοποιείται στα laser tracker της εταιρείας Leica Geosystems, είναι δανεισμένος από το σύστημα Kern Mekometer 5000 (ME5000) που αποτελούσε στις αρχές του '90 το πιο ακριβές μεγάλης εμβέλειας ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο, παρέχοντας ακρίβειες της τάξης του 0.2mm ± 0.2ppm. Η μεθοδολογία μέτρησης βασίζεται στον υπολογισμό των διαφορών φάσης. Η εκπεμπόμενη ακτίνα διαχωρίζεται στη δέσμη αναφοράς που παραμένει στο εσωτερικό του οργάνου και στη δέσμη μέτρησης που ανακλάται στον στόχο.

Αν και η διαδικασία μοιάζει με αυτή του συμβολόμετρου, η βασική διαφορά είναι ότι στη προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται ένα διαμορφωμένο σήμα αντί για την κυματομορφή της ίδιας της ακτίνας (Muelaner, 2008). Οι δυο δέσμες (μέτρησης και αναφοράς) μετατρέπονται σε σήματα και οι συχνότητες τους διαμορφώνονται ούτως ώστε τα δυο σήματα να είναι σε φάση. Κατόπιν οι δυο συχνότητες αυξάνονται ως την επόμενη τιμή τους για την οποία τα δυο σήματα θα βρίσκονται σε φάση, οπότε και θα ισχύει:

$$d = \frac{\lambda_1}{2} * N_1 \qquad (3.1) \qquad \text{και} \qquad d = \frac{\lambda_2}{2} * N_2 \qquad (3.2)$$

όπου, d είναι η ζητούμενη απόσταση, λ_1 και λ_2 τα δυο μήκη κύματος για τα οποία οι δυο δέσμες είναι σε φάση και N_1, N_2 οι αριθμοί των ακέραιων κύκλων του κύματος ως την στιγμή της φάσης. Όπως ειπώθηκε τα δυο σημεία όπου τα κύματα είναι σε φάση είναι διαδοχικά, άρα ισχύει:

$$N_2 = N_1 + 1 \tag{3.3}$$

Από την θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{3.4}$$

όπου, c η ταχύτητα της δέσμης και f η συχνότητα της. Οι (3.1) και (3.2) αν λυθούν ως προς N δίνουν:

$$N_1 = \frac{2*d*f_1}{c} \quad (3.5) \quad \text{και} \quad N_2 = \frac{2*d*f_2}{c} \tag{3.6}$$

Από την (3.3) έχουμε

$$N_2 = N_1 + 1 \Leftrightarrow \frac{2*d*f_2}{c} = \frac{2*d*f_1}{c} + 1 \Leftrightarrow d = \frac{c}{2*(f_2 - f_1)} \tag{3.7}$$

Με βάση λοιπόν τις δυο τιμές των συχνοτήτων (f_1, f_2) και την ταχύτητα της δέσμης (c) υπολογίζεται κάθε φορά η απόσταση (d) από τον στόχο.

Η ακρίβεια ενός αποστασιόμετρου, ανεξαρτήτως της μεθόδου μέτρησης, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα διάδοσης της δέσμης στον αέρα. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επηρεάζουν την ταχύτητα αυτή συνεπώς και με τη χρήση αποστασιόμετρου η ακριβής μέτρηση της θερμοκρασίας, της πίεσης και της υγρασίας είναι καθοριστική. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων με αποστασιόμετρο είναι η μεθοδολογία και η συχνότητα διαμόρφωσης του σήματος. Εν κατακλείδι, παρότι κανένα EDM δεν μπορεί να επιτύχει ακρίβειες καλύτερες από δέκατα του χιλιοστού, με τους δύο αυτούς τρόπους και χρησιμοποιώντας εξειδικευμένες τεχνικές διαμόρφωσης του σήματος, τα ADM καταφέρνουν να προσεγγίσουν τα εκατοστά του χιλιοστού. Τα σύγχρονα laser tracker διαθέτουν αποστασιόμετρα με ακρίβεια μέτρησης της τάξης των ±15μm ± 1μm/m.

3.2.3 Συγκριτική Αντιπαραβολή Μεθόδων

Οι δυο μέθοδοι μέτρησης μήκους που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες έχουν η καθεμία τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της. Συνοπτικά το συμβολόμετρο είναι ικανό για ταχύτερες και πιο ακριβείς μετρήσεις από το αποστασιόμετρο, αλλά υπολογίζει μόνο σχετικές μετακινήσεις και όχι απόλυτες αποστάσεις όπως το δεύτερο. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου, όπως αυτά αναλύθηκαν στα υποκεφάλαια 3.2.1 και 3.2.2 παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 3.1.

	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* **	±0.4μm + 0.3μm/m	±15μm ± 1μm/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

*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%

Πίνακας 3.1 Συγκριτική αντιπαραβολή συμβολόμετρου – αποστασιόμετρου
Table 3.1 Comparative comparison of IFM and ADM

Τα προηγούμενα χαρακτηριστικά είναι αυτά που καθορίζουν εν πολλοίς την επιλογή κάθε κατασκευάστριας εταιρείας στο να τοποθετήσει στο laser tracker συμβολόμετρο ή αποστασιόμετρο ή και τις δυο συσκευές. Τα σύγχρονα laser tracker διαφοροποιούνται κυρίως σε αυτόν ακριβώς τον τομέα και κάθε εταιρεία χρησιμοποιεί το δικό της τρόπο για να συνδυάσει τα δυο συστήματα και να υπερκεράσει τις αδυναμίες του ενός με το άλλο και αντίστροφα (βλ. Κεφ. 3.7).

3.3 Λειτουργία Παρακολούθησης Στόχου

Ένα από τα βασικά γνωρίσματα του laser tracker είναι η δυνατότητα του να ανιχνεύει τον στόχο και να τον παρακολουθεί χωρίς να χρειάζεται σκόπευση από τον χρήστη. Η λειτουργία παρακολούθησης προς το παρόν (2013) γίνεται κυρίως με χρήση συμβολόμετρου καθώς τα αποστασιόμετρα, όσο και αν έχουν βελτιωθεί δεν έχουν κατορθώσει να προσεγγίσουν την ταχύτητα ενός συμβολόμετρου.

Όπως προαναφέρθηκε στην Ενότητα 3.2.1, κατά την μέτρηση μήκους με το συμβολόμετρο μια ακτίνα laser εκπέμπεται από το όργανο και εφόσον ανακλαστεί από τον στόχο επιστρέφει στο όργανο, για να διαμορφωθεί με την δέσμη αναφοράς. Πριν γίνει η συμβολή των δυο δεσμών, με χρήση ειδικών διαχωριστών δέσμης, ένα μέρος της δέσμης μέτρησης (περίπου 15%) αποσπάται και κατευθύνεται σε έναν αισθητήρα θέσης (Position Sensing Detector – PSD). Σε ένα ρυθμισμένο σύστημα, εφόσον έχει στοχευθεί το κέντρο του στόχου, η δέσμη που καταλήγει στον αισθητήρα θέσης προσπίπτει στην μηδενική του θέση.

Η κίνηση του στόχου έχει ως αποτέλεσμα η δέσμη μέτρησης να μην χτυπήσει το κέντρο του στόχου και να μην καταλήξει στη μηδενική θέση του αισθητήρα, αλλά σε μια άλλη θέση πάνω σε αυτόν. Η διαφορά της θέσης αυτής με τη μηδενική θέση καταδεικνύει την κίνηση του στόχου. Ο αισθητήρας υπολογίζει αυτές τις μετατοπίσεις (offsets) και τις μεταφράζει σε κινήσεις για το "σύστημα οδήγησης" του οργάνου (κινητήρες και κάτοπτρα) που στρίβουν την κεφαλή του οργάνου έτσι ώστε η ακτίνα να στοχεύσει το στόχο στο κέντρο του.

Η συχνότητα της παραπάνω διόρθωσης εξαρτάται από τη ταχύτητα μέτρησης του οργάνου και μπορεί να λαμβάνει χώρα ως και 3000 φορές/sec. Οι διορθώσεις αυτές, ανάλογα το σύστημα χρησιμοποιούνται είτε για να στρέφεται το όργανο στο κέντρο του στόχου είτε και για να διορθώνονται παράλληλα οι μετρημένες τιμές των γωνιών. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται ότι ο στόχος δεν θα βρεθεί εκτός του πεδίου του οργάνου. Η χρήση της λειτουργίας παρακολούθησης σε περίπτωση που το σύστημα δεν διαθέτει συμβολόμετρο, αλλά μόνο αποστασιόμετρο, καθιστά αναγκαία την πιο αργή κίνηση του στόχου καθώς η ταχύτητα συλλογής δεδομένων είναι σαφώς μικρότερη με αυτό τον τρόπο.

Ο περιοριστικός παράγοντας της εμβέλειας ενός συστήματος laser tracker (περίπου 100-160m, βλ. κεφ. 3.7) οφείλεται σε δυσλειτουργία του συστήματος της ανίχνευσης. Όσο απομακρύνεται ο στόχος από το όργανο, η ποσότητα της ακτίνας που ανακλάται και

επιστρέφει ελαττώνεται. Η ποσότητα αυτή από μια απόσταση και μετά δεν είναι πλέον αρκετή για να μπορεί ο αισθητήρας να την ανιχνεύσει οπότε το σύστημα χάνει την δυνατότητα παρακολούθησης του στόχου.

3.4 Στόχοι και Παρελκόμενα

Προκειμένου να λειτουργήσει ένα σύστημα laser tracker χρειάζεται και ο κατάλληλος στόχος ή παρελκόμενο. Μπορεί το laser tracker να είναι το μέρος του συστήματος στο οποίο δίνεται περισσότερη προσοχή τόσο από τους κατασκευαστές όσο και από τους χρήστες, αλλά η ποιότητα και ο τρόπος κατασκευής του στόχου είναι εξίσου σημαντικά για την μετρητική διαδικασία. Στο παρόν υποκεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση των συμβατών με το laser tracker στόχων, όπως επίσης και ειδικών παρελκόμενων που εξυπηρετούν συγκεκριμένες μετρητικές διεργασίες.

3.4.1 Στόχοι

Οι ανακλαστικοί στόχοι είναι εργαλεία στα οποία ανακλάται η ακτίνα (δέσμη μέτρησης) και παράγεται η μέτρηση από το laser tracker. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι απαιτείται οπτική επαφή με το όργανο. Κύριος σκοπός τους είναι να επιστρέφουν την ακτίνα με τη μεγαλύτερη δυνατή ένταση και με τη μικρότερη δυνατή παραμόρφωση παρά τις διαθλάσεις στην ανακλαστική τους επιφάνεια. Προκειμένου αυτό να επιτευχθεί με ακρίβεια, οι στόχοι οφείλουν να είναι σχεδιασμένοι και κατασκευασμένοι με ακρίβεια και παράλληλα κατάλληλοι για εργασία σε εργοστασιακό περιβάλλον. Αυτό εξασφαλίζεται με τη χρήση οπτικών ακριβείας, ακριβών μετάλλων, υψηλής απόδοσης συγκολλητικών και άρτια γεωμετρία. Ακόμα λόγω της φύσης της χρήσης τους, δόκιμο είναι να είναι ανθεκτικοί σε τυχόν ατυχήματα. Παρακάτω θα γίνει αναφορά στην κατασκευή και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των τριών πιο δημοφιλών στόχων, δηλαδή των στόχων τύπου CCR (ή SMR), τύπου Cateye και των στόχων επαναληψιμότητας.

α. CCR (Corner Cube Reflector)

Οι στόχοι CCR (Corner Cube Reflector) ή αλλιώς SMR (Spherically Mounted Retroreflectors) είναι αυτοί που συναντώνται συχνότερα σε ένα σύστημα laser tracker. Δεδομένου ότι η επιδιωκόμενη ακρίβεια σε εργασίες που χρησιμοποιείται αυτό το σύστημα είναι της τάξης των λίγων δεκάδων μικρών (μm) και κάθε λεπτομέρεια έχει σημασία οι στόχοι CCR διαφοροποιούνται από τους απλούς ανακλαστικούς στόχους που

χρησιμοποιούνται στις συνήθεις τοπογραφικές εργασίες λόγω της πολύ υψηλής ακρίβειας στην εσωτερική τους γεωμετρία, στην σφαιρικότητα τους και στα οπτικά τους.

Οι συγκεκριμένοι στόχοι αποτελούνται από μια μεταλλική σφαίρα που στο εσωτερικό της βρίσκεται η ανακλαστική επιφάνεια. Η μεταλλική σφαίρα παρέχει την επιφάνεια επαφής του στόχου και προστατεύει το οπτικό σύστημα στο εσωτερικό της. Κατασκευάζεται από κράματα ανοξείδωτου ατσαλιού για να προφυλάσσεται από τη διάβρωση. Η ακρίβεια στη σφαιρικότητα του μεταλλικού περιβλήματος είναι μικρότερη από ±0.6μm, η ανοχή τραχύτητας της επιφάνειας είναι 0.05μm ενώ η ανοχή της διαμέτρου είναι 2.54μm (Faro white paper – understanding laser tracker targets).

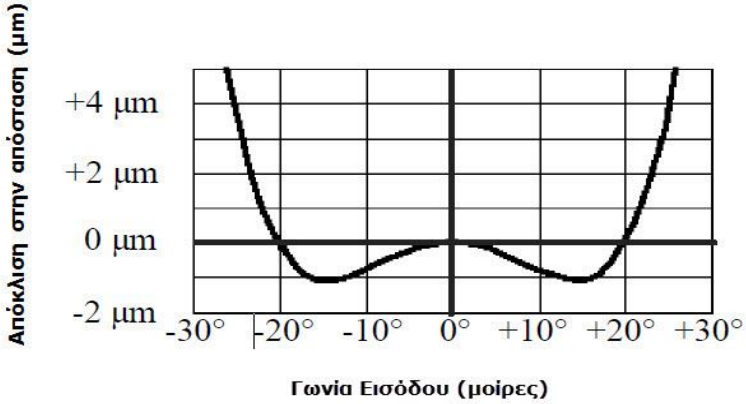
Όπως προαναφέρθηκε στο εσωτερικό της σφαίρας βρίσκεται η ανακλαστική επιφάνεια που αποτελείται από τρεις κάθετους μεταξύ τους καθρέφτες που τέμνονται σε ένα σημείο, το κέντρο της σφαίρας (βλ. σχήμα 3.3).

Σχήμα 3.3 Στόχος CCR
Figure 3.3 CCR Target

Η ακτίνα ανακλάται πάνω σε κάθε ένα από τους τρείς καθρέφτες και επιστρέφει παράλληλα με την αρχική ακτίνα, αλλά μετατοπισμένα. Η παραμόρφωση της ακτίνας είναι ελάχιστη και ως αποτέλεσμα προκύπτουν αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας. Το βασικό μειονέκτημα των στόχων CCR είναι ότι είναι ευαίσθητοι σε χτυπήματα και πτώσεις. Για αυτό το λόγο, πλέον κατασκευάζονται και ανθεκτικοί στόχοι CCR (break resistant SMR) των οποίων όμως η ακρίβεια κεντραρίσματος στη μεταλλική σφαίρα είναι χειρότερη. Τα συνήθη μεγέθη στα οποία κατασκευάζονται οι στόχοι CCR είναι με διάμετρο 1.5in. (3.81cm), 0.875in. (2.2cm) και 0.5in. (1.27cm).

Το εύρος λειτουργίας είναι από τα σημαντικά χαρακτηριστικά του στόχου με το τυπικό εύρος λειτουργίας ενός στόχου CCR να είναι ±30°, τιμή που τον καθιστά λειτουργικό και παρέχει ελευθερία στις μετρήσεις. Όπως γίνεται αντιληπτό, μια μεγάλη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης δεν θα ανακλαστεί, ενώ μια τιμή κοντά στις ακραίες τιμές αναμένεται να

εμφανίσει μεγάλα σφάλματα. Στο σχήμα 3.4 φαίνεται η σχέση που έχει η γωνία εισόδου της δέσμης στον στόχο με την απόκλιση στη μετρημένη απόσταση. Για γωνίες εισόδου ως ±20° οι αποκλίσεις είναι μικρές και δεν υπερβαίνουν το -1μm. Για μεγαλύτερες γωνίες εισόδου η απόκλιση αυξάνεται φτάνοντας ακόμα και τα +5μm για γωνίες ±25° (Kyle, 1997).



Σχήμα 3.4 Γράφημα της σχέσης της γωνίας εισόδου της δέσμης στον στόχο με την απόκλιση στην απόσταση [Kyle, 1997]
Figure 3.4 Chart of the relevance between beam`s entry angle to the target and the difference in distance [Kyle, 1997]

β. Cateye

Οι στόχοι Cateye (σχήμα 3.5) έχουν μεγάλο εύρος λειτουργίας καθώς η σφαιρική τους γεωμετρία είναι τέτοια που επιτρέπει την ανάκλαση δέσμης ακόμα και από γωνία ±60° δηλαδή διπλάσιο εύρος από αυτό των υπολοίπων στόχων.

Σχήμα 3.5 Στόχος Cateye
Figure 3.5 Cateye target

Όσον αφορά στο σχεδιασμό τους, αποτελούνται από δυο ημισφαίρια από συμπαγές γυαλί. Το μπροστινό, που είναι μικρότερο, διαθλά την ακτίνα προς το κέντρο της σφαίρας, όπου συναντά το δεύτερο μεγαλύτερο ημισφαίριο που συγκεντρώνει την ακτίνα σε ένα πολύ μικρό σημείο στην πίσω επιφάνεια του στόχου. Εκεί ανακλάται και διαπερνώντας ξανά τα δυο ημισφαίρια εξέρχεται του στόχου και επιστρέφει στο laser tracker σαν μια

ευθυγραμμισμένη δέσμη φωτός (Faro white paper – understanding laser tracker targets). Η διάμετρος ενός στόχου Cateye είναι περίπου 6in. (150mm) και η ακρίβεια των οπτικών του παρόμοια με αυτή των στόχων CCR. Η τιμή τους, λόγω του μεγαλύτερου εύρους λειτουργία τους, είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή των στόχων CCR.

Παρά τη μεγάλη ευελιξία που παρέχει στο χρήστη ο στόχος Cateye, πρέπει να αποφεύγονται οι περιπτώσεις όπου η γωνία μεταξύ του στόχου και του laser tracker είναι πολύ μεγάλη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, υπάρχει πιθανότητα η δέσμη να προσκρούσει στην άκρη του στόχου, από όπου αν και ανακλάται επιστρέφει στο όργανο παραμορφωμένη. Το σύστημα laser tracker από την στιγμή που λαμβάνει επιστροφή της δέσμης δεν αντιλαμβάνεται το πρόβλημα, δεν ειδοποιεί τον χρήστη και καταγράφει μια εσφαλμένη μέτρηση.

γ. Στόχοι επαναληψιμότητας

Οι στόχοι επαναληψιμότητας έχουν την ίδια γεωμετρία με τους στόχους CCR (σχήμα 3.6). Η βασική διαφορά των στόχων επαναληψιμότητας με τους στόχους CCR είναι ότι η δεύτερη κατηγορία στόχων είναι κατασκευασμένη με μικρή ανοχή, ενώ στους στόχους επαναληψιμότητας η κατασκευαστική ανοχή είναι σαφώς μεγαλύτερη. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι πρωτίστως οικονομικός. Οι στόχοι αυτοί χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες για την μελέτη ενός δυναμικού φαινομένου ή για την μόνιμη παρακολούθηση της τάσης μιας κατασκευής και σε πολλές περιπτώσεις αφήνονται στο πεδίο για μελλοντικές μετρήσεις. Αφού το ζητούμενο αυτών των εργασιών είναι η ακρίβεια προσδιορισμού της σχετικής θέσης του στόχου και όχι η ορθότητα της απόλυτης θέσης του, δεν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις στην ακρίβεια με αποτέλεσμα η τιμή κόστους να είναι χαμηλότερη.

Σχήμα 3.6 Στόχοι επαναληψιμότητας
Figure 3.6 Repeatability targets

Στους στόχους επαναληψιμότητας, η σφαιρικότητα μπορεί να έχει τις διπλάσιες ανοχές, να μην δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επένδυση ή στη διαδικασία συγκόλλησης, αλλά παρόλα αυτά ο στόχος οφείλει να ανακλά την ακτίνα με την ίδια ένταση και ποιότητα όπως ένας στόχος CCR ή Cateye. Ακόμα οι στόχοι αυτοί είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζονται πολύ από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες ή τις δονήσεις καθώς η χρήση τους είναι τέτοια που μπορεί να απαιτεί την παραμονή τους για μεγάλο χρονικό διάστημα σε περιβάλλον ακραίων συνθηκών.

δ. Άλλοι στόχοι

Ειδική μνεία απαιτείται για έναν ειδικό στόχο που ανέπτυξε πρόσφατα η εταιρεία API, τον ActiveTarget (σχήμα 3.7). Η ανακλαστική επιφάνεια δεν διαφέρει σε τίποτα από έναν τυπικό στόχο CCR. Η διαφορά είναι ότι διαθέτει μηχανισμό παρακολούθησης του laser tracker, παρόμοιο με αυτόν του οργάνου. Ως εκ τούτου ο στόχος κλειδώνει στην κατεύθυνση του οργάνου και με τη χρήση σερβοκινητήρων στρέφεται συνεχώς η κεφαλή του στόχου προς το όργανο. Αποτέλεσμα είναι να μην χάνεται η δέσμη λόγω λάθους χειρισμού του χρήστη και να γίνεται ευκολότερη η μετρητική διαδικασία. Η εμβέλεια του στόχου είναι 40m, η κίνηση στον οριζόντιο άξονα είναι πλήρης (360°), ενώ στον κατακόρυφο άξονα το εύρος κίνησης είναι από +80° έως -55°.

Σχήμα 3.7 Ο ActiveTarget της εταιρείας API
Figure 3.7 API's ActiveTarget

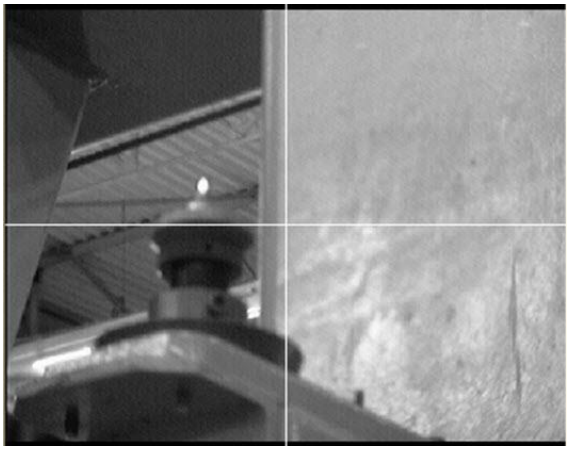
3.4.2 Παρελκόμενα

Η ευελιξία που παρέχει ένα όργανο σαν το laser tracker παράγει αυξημένες απαιτήσεις από αυτό με αποτέλεσμα να πρέπει να ανταποκρίνεται σε πολλές διαφορετικής φύσεως

ανάγκες. Για τον σκοπό αυτό πέρα από το όργανο και τους στόχους που προαναφέρθηκαν, έχουν αναπτυχθεί από τις κατασκευάστριες εταιρείες ειδικά παρελκόμενα.

α. Ενσωματωμένη ψηφιακή μηχανή (OverView Camera - OVC)

Σχεδόν σε κάθε σύστημα laser tracker υπάρχει και μια μηχανή η οποία είναι είτε ενσωματωμένη στη κεφαλή του οργάνου (Leica laser tracker) είτε αποσπώμενη (API laser tracker). Η χρησιμότητα της ψηφιακής αυτής κάμερας είναι πολλαπλή. Καταρχάς δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να δει στην οθόνη του υπολογιστή του συστήματος, όποιο στόχο βρίσκεται στο οπτικό πεδίο του laser tracker. Αυτό γίνεται μέσω μια εγγύς υπέρυθρης ακτίνας laser η οποία εμφανίζει τον στόχο να αναβοσβήνει στην οθόνη (βλ. σχήμα 3.8). Κατόπιν ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μέσω της εικόνας του υπολογιστή τον στόχο, και το laser tracker, εφόσον διαθέτει αποστασιόμετρο, θα πάρει αυτόματα μέτρηση προς αυτόν. Αυτή η δυνατότητα αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη σε περιπτώσεις που είναι δύσκολο να προσεγγίσει ο στόχος το σημείο μέτρησης χωρίς να χαθεί η δέσμη στην πορεία. Ακόμα στα σύγχρονα όργανα η μηχανή βοηθάει στην λειτουργία παρακολούθησης του στόχου. Έχοντας στο οπτικό της πεδίο συνεχώς τον στόχο, σε περίπτωση που η δέσμη τον χάσει, ενημερώνει τους κινητήρες του οργάνου για τη θέση του στόχου και επανασκοπεύεται αυτόματα. Η παρακολούθηση του στόχου με τον τρόπο αυτό, επιτρέπει στον στόχο να κινείται ταχύτερα, καθιστώντας τη λειτουργία ιδανική για παρακολούθηση υψίσυχνων φαινομένων.

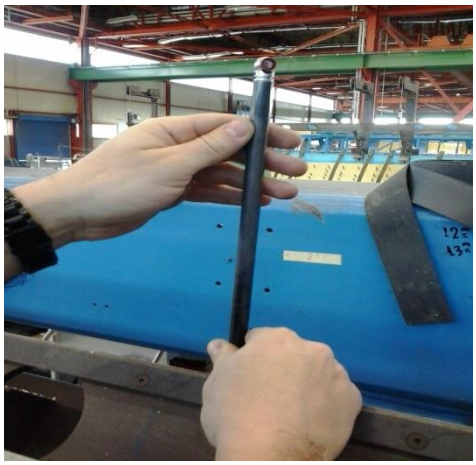


Σχήμα 3.8 Άποψη του στόχου από την ενσωματωμένη μηχανή
Figure 3.8 View of the target through the integrated camera

Μια άλλη εξίσου σημαντική λειτουργία της ψηφιακής μηχανής είναι η δυνατότητα αξιοποίησης άλλων παρελκόμενων, που περιγράφονται στη συνέχεια, όπως οι ηλεκτρονικοί ράβδοι κρυφού σημείου και οι σαρωτές χειρός.

β. Ράβδος κρυφού σημείου

Στο πεδίο εργασίας πολλές είναι οι φορές που το επιθυμητό σημείο μέτρησης δεν είναι ορατό από το όργανο με αποτέλεσμα να μην μπορεί να μετρηθεί απευθείας. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση ενός ειδικού παρελκόμενου, της ράβδου κρυφού σημείου. Το μήκος της ράβδου αυτής είναι σταθερό και γνωστό με μεγάλη ακρίβεια. Η μια άκρη της ράβδου τοποθετείται στο σημείο μέτρησης και στην άλλη άκρη της προσαρμόζεται ο στόχος (βλ. σχήμα 3.9).. Κρατώντας σταθερή την άκρη στο σημείο μέτρησης ο χειριστής περιστρέφει κυκλικά την ράβδο και το laser tracker καταγράφει όλες τις διαδοχικές θέσεις του στόχου. Οι θέσεις αυτές ανήκουν όλες σε μια σφαίρα με ακτίνα ίση με το μήκος της ράβδου, προσαυξημένη κατά την ακτίνα του στόχου, και κέντρο το ζητούμενο σημείο. Με χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζονται οι συντεταγμένες του κέντρου της σφαίρας, δηλαδή του σημείου μέτρησης, μέσω μιας διαδικασίας που διαρκεί ελάχιστα.



Σχήμα 3.9 Η ράβδος κρυφού σημείου
Figure 3.9 Hidden point bar

γ. Ηλεκτρονική ράβδος κρυφού σημείου (Probe)

Οι ηλεκτρονικές ράβδοι κρυφού σημείου αποτελούν την εξέλιξη των απλών ράβδων που περιγράφηκαν στην ενότητα 3.4.2β. Σε αυτές τις ράβδους υπάρχουν ενσωματωμένοι στόχοι όπως επίσης και μηχανισμοί για να μπορούν να μετρώνται οι γωνίες στροφής των αξόνων της ράβδου ως προς τους άξονες του οργάνου. Ο μηχανισμός υπολογισμού των στροφών σε κάθε ηλεκτρονική ράβδο διαφέρει αρκετά από εταιρεία σε εταιρεία οπότε θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση κάθε probe ξεχωριστά.

Σχήμα 3.10 Το Leica T-Probe
Figure 3.10 Leica's T-Probe

Το probe της Leica Geosystems, το επονομαζόμενο T-Probe (σχήμα 3.10), αποτελείται από μια ράβδο για την προσέγγιση των κρυφών σημείων και μια κεφαλή στην οποία είναι τοποθετημένες λυχνίες LED γύρω από ένα συμβατικό -για laser tracker- στόχο. Με την ενσωματωμένη κάμερα του laser tracker και με χρήση ειδικών λογισμικών επεξεργασίας εικόνας δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού των τριών γωνιών στροφής (ω, φ, κ) της ράβδου αναλύοντας τη θέση των LED στη φωτογραφία. Σε συνδυασμό με τη μέτρηση των τριών συντεταγμένων (X, Y, Z) του κέντρου του στόχου της ράβδου είναι δυνατός ο προσδιορισμός των τριδιάστατων συντεταγμένων του κρυφού σημείου. Η διαδικασία γίνεται αυτόματα από το λογισμικό και προσθέτει ταχύτητα στις μετρήσεις. Η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων του κρυφού σημείου με χρήση του T-probe είναι της τάξης των ±30μm ± 5μm, η εμβέλεια του είναι 30m, ενώ έχει τη δυνατότητα μέτρησης γωνιών στροφής ως και ±45° στους άξονες x και y, και 360° στον άξονα z.

Στην αντίστοιχη ηλεκτρονική ράβδο της εταιρείας API (Intelliprobe 360 – σχήμα 3.11), το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο, αλλά ο μηχανισμός μέτρησης των γωνιών στροφής είναι διαφορετικός. Στο στόχο που βρίσκεται στη κεφαλή της ράβδου υπάρχει ένα ειδικό άνοιγμα στο οποίο η εισερχόμενη ακτίνα δημιουργεί ένα στίγμα, το οποίο διαβάζεται από μια συσκευή συζευγμένου φορτίου (CCD) προσδιορίζοντας έτσι τα δυο από τα τρία γωνιακά μεγέθη. Το τρίτο μέγεθος προσδιορίζεται από έναν αισθητήρα που βρίσκεται πάνω στη ράβδο. Η εμβέλεια μέτρησης του συγκεκριμένου παρελκόμενου είναι 40m και οι γωνίες στροφής που έχει τη δυνατότητα να μετρήσει είναι 360° στον άξονα y και στον άξονα z παρέχοντας πρακτικά απεριόριστη ευελιξία. Η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων του σημείου με χρήση του I-360 είναι της τάξης των ±65μm ± 5μm αν χρησιμοποιείται σε οριζόντια θέση και ±90μm ± 5μm εάν χρησιμοποιείται σε κατακόρυφη θέση.

Σχήμα 3.11 Το Probe I-360 της API
Figure 3.11 API's Probe I-360

δ. Σαρωτές Χειρός

Με σκοπό την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων ενός συστήματος laser tracker, έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Leica Geosystems ένας σαρωτής χειρός (Leica T-Scan – σχήμα 3.12). Η λειτουργία του είναι παρόμοια με αυτή ενός σαρωτή laser. Ο χρήστης κρατώντας την συσκευή μπροστά από το αντικείμενο ενδιαφέροντος σαρώνει όλη την επιφάνεια του και υπολογίζονται οι τριδιάστατες συντεταγμένες κάθε σημείου. Παράλληλα, ο σαρωτής διαθέτει στόχους και στις τέσσερις πλευρές του ώστε να εντοπίζεται από το laser tracker ανά πάσα στιγμή. Υπολογίζοντας την απόσταση του σαρωτή από το laser tracker, μπορούν να μετασχηματιστούν οι συντεταγμένες της υπό σάρωση επιφάνειας στο σύστημα συντεταγμένων του laser tracker και από εκεί σε οποιοδήποτε άλλο τοπικό σύστημα. Η εμβέλεια της συσκευής φτάνει τα 30m, και έχει την δυνατότητα μέτρησης ακόμα και 20.000 σημείων/sec. Η ακρίβεια των συντεταγμένων της σαρωμένης επιφάνειας είναι της τάξης των ±80μm ± 3μm/m. Σε συνδυασμό με την ευκολία, την ταχύτητα και την φορητότητα που προσφέρει καθίσταται ως μια εξαιρετική λύση για μετρολογικές εργασίες μεγάλης κλίμακας.

Σχήμα 3.12 Ο σαρωτής χειρός T-Scan της εταιρείας Leica
Figure 3.12 Leica's T-Scan

ε. Βάσεις Στόχων

Οι βάσεις των στόχων αποτελούν ένα ακόμα κομμάτι του συστήματος ενός laser tracker. Η χρήση τους περιλαμβάνει την στήριξη των στόχων laser tracker για την ευκολότερη και ακριβέστερη μέτρηση ειδικών σημείων, όπως ακμών, οπών κλπ. Κατασκευάζονται από ατσάλι, αλουμίνιο και τιτάνιο και είναι εξοπλισμός υψηλής ακρίβειας. Με υποδοχές για στόχους CCR διαμέτρου 1.5in. , 0.875in. και 0.5in. , παράγονται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν σε κάθε πιθανή ανάγκη στο πεδίο μετρήσεων και να προσαρμοστούν πάνω σε κάθε επιφάνεια (βλ. σχήμα 3.13).

Σχήμα 3.13 Κύριοι Τύποι Βάσεων Στόχων
Figure 3.13 Main Types of Target Holders

Οι βάσεις αυτές παρεμβάλλονται ανάμεσα στην επιφάνεια του σημείου μέτρησης και του στόχου, συνεπώς απαιτείται να είναι γνωστό με μεγάλη ακρίβεια το πάχος της βάσης προκειμένου να γίνουν κατά την επεξεργασία οι κατάλληλες διορθώσεις. Σε κάποιες περιπτώσεις οι αναγραφόμενες διαστάσεις της βάσης μπορεί να μην είναι ακριβείς είτε από την κατασκευή της είτε λόγω κακής χρήσης. Αυτό το γεγονός επηρεάζει την μετρητική διαδικασία με αποτέλεσμα την εμφάνιση συστηματικών σφαλμάτων που μπορεί να προσεγγίζουν και τα λίγα εκατοστά του χιλιοστού.

3.5 Κύριες Πηγές Σφαλμάτων

Στις μετρήσεις με laser tracker όπου οι επιδιωκόμενες ακρίβειες είναι της τάξης των μερικών δεκάδων μικρών του μέτρου, κάθε παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την μετρητική διαδικασία εξετάζεται ώστε να διαπιστωθεί το μέγεθος του σφάλματος που εισάγει. Στο παρόν υποκεφάλαιο εξετάζονται οι σημαντικότερες πηγές σφαλμάτων, που αφορούν κυρίως τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, την έκκεντρη σκόπευση κ.α. και έχουν την

δυνατότητα να επηρεάσουν περισσότερο το αποτέλεσμα. Άλλες πηγές σφαλμάτων που δεν αναφέρονται στην παρούσα εργασία, αφορούν στο κατασκευαστικό-μηχανικό μέρος του οργάνου, δηλαδή την εσωτερική του γεωμετρία.

Οι ακριβείς μετρήσεις μήκους είναι το χαρακτηριστικό που κάνει το laser tracker να ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα όργανα. Έτσι λοιπόν είναι πολύ σημαντική η γνώση και ο υπολογισμός των σφαλμάτων που μπορούν να υπεισέρθουν στις μετρήσεις αυτές. Είτε η μέτρηση γίνεται με συμβολόμετρο είτε με αποστασιόμετρο ο παράγοντας του μήκους του κύματος συμμετέχει στον υπολογισμό της απόστασης. Το μήκος κύματος της δέσμης έχει μια δεδομένη τιμή για το κενό, ενώ μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία, την πίεση και την υγρασία. Προκειμένου λοιπόν να γίνει η σωστή διόρθωση στο μήκος κύματος της δέσμης, είναι απαραίτητο να μετρώνται οι τιμές των ατμοσφαιρικών συνθηκών στο πεδίο των μετρήσεων. Η αβεβαιότητα προσδιορισμού της θερμοκρασίας, της πίεσης και της υγρασίας μεταφέρεται ως αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του μήκους κύματος της δέσμης και τελικώς στην υπολογισμένη απόσταση. Όσον αφορά το συμβολόμετρο, σύμφωνα με σχετικά πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί (Umetsu, 2005), η αβεβαιότητα που μεταδίδεται στο μήκος λόγω των συνθηκών μέτρησης δεν ξεπερνά το ±0.1μm.

Μια σημαντική πηγή σφαλμάτων στις μετρήσεις με τεχνολογία laser tracker, είναι η έκκεντρη σκόπευση του στόχου. Το laser tracker χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα θέσης (βλ. κεφ. 3.3) μπορεί να προσδιορίζει αν σκόπευσε το στόχο στο κέντρο του ή όχι. Εφόσον ο στόχος δεν έχει σκοπευθεί στο κέντρο, ο αισθητήρας θέσης υπολογίζει την απόκλιση της σκόπευσης και την χρησιμοποιεί για να διορθώσει την επόμενη σκόπευση. Αν ο στόχος είναι στατικός, τότε οι επόμενες σκοπεύσεις θα είναι όλες στο κέντρο του στόχου. Εφόσον ο στόχος μετακινείται, το laser tracker δεν είναι ικανό να σκοπεύει το κέντρο του στόχου βασιζόμενο στην διόρθωση από την προηγούμενη σκόπευση. Συνεπώς, όλες οι σκοπεύσεις προς κινούμενο στόχο είναι έκκεντρες και εισάγουν σφάλμα στον προσδιορισμό των συντεταγμένων εκάστου σημείου. Το σφάλμα αυτό εξαρτάται από την ακρίβεια μέτρησης του laser tracker, από την ταχύτητα κίνησης του στόχου και την απόσταση του από το όργανο. Σύμφωνα με πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί (Umetsu, 2005), οι έκκεντρες σκοπεύσεις εισάγουν μια αβεβαιότητα της τάξης των ±0.3μm. Πλέον στα σύγχρονα laser tracker η πληροφορία από τον αισθητήρα θέσης δεν χρησιμοποιείται μόνο για την διόρθωση της επόμενης σκόπευσης, αλλά και για την διόρθωση της ίδιας της μέτρησης, ελαχιστοποιώντας το σφάλμα από αυτόν τον παράγοντα.

Οι κατασκευαστικές ατέλειες των στόχων που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την τεχνολογία laser tracker είναι άλλη μια πηγή σφαλμάτων. Οι στόχοι μπορούν να εισάγουν σφάλματα στις μετρήσεις με δυο τρόπους: ο πρώτος, αφορά σε κάποια ατέλεια στο εσωτερικό του στόχου, η οποία θα παραμορφώνει την δέσμη μέτρησης και θα αλλοιώνει το μετρημένο μήκος. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω κάποιας ατέλειας στο σχήμα τους. Στις μετρήσεις με laser tracker δεν σκοπεύεται το σημείο ενδιαφέροντος, αλλά το κέντρο του στόχου που βρίσκεται προσαρμοσμένος πάνω σε αυτό. Έτσι, οι 3Δ συντεταγμένες που προσδιορίζονται, δεν αφορούν το επιθυμητό σημείο, αλλά το κέντρο του στόχου και συνεπώς οι συντεταγμένες απαιτούν διόρθωση που έχει συνολικό μέτρο ίσο με την ακτίνα του στόχου. Εφόσον η πραγματική τιμή της ακτίνας του στόχου αποκλίνει από την ονομαστική τιμή (η οποία χρησιμοποιείται για τη διόρθωση), τότε η απόκλιση αυτή μεταδίδεται ως σφάλμα σε όλες τις μετρήσεις.

Τέλος, πρέπει να τονιστεί πως για την εξαγωγή βέλτιστων αποτελεσμάτων καλό είναι να τοποθετείται το όργανο γραμμικά με το αντικείμενο μέτρησης. Η ακρίβεια που διαθέτει ένα laser tracker στις μετρήσεις μήκους είναι συγκριτικά καλύτερη από τις αντίστοιχες γωνιομετρήσεις. Με την τοποθέτηση του οργάνου κατά μήκος του αντικειμένου μέτρησης τα σφάλματα των γωνιομετρήσεων ελαχιστοποιούνται και η τελική ακρίβεια καθορίζεται στο μεγαλύτερο βαθμό από την ακρίβεια του μήκους.

3.6 Περιορισμοί στη χρήση του Laser Tracker

Βασικός περιορισμός που αφορά τα συστήματα laser tracker είναι ότι απαιτείται οπτική επαφή του οργάνου με τον στόχο. Καθώς οι μετρήσεις γίνονται με δέσμες που εκπέμπονται από το όργανο και ανακλώνται στον στόχο δεν θα μπορούσε να μην τηρείται αυτή η δέσμευση. Όσον αφορά στα συστήματα που διαθέτουν συμβολόμετρο, ένας επιπλέον περιορισμός είναι ότι απαιτείται συνεχής και αδιάλειπτη οπτική επαφή της κεφαλής του οργάνου με τον στόχο.

Άλλος περιορισμός είναι η ταχύτητα κίνησης του στόχου, η οποία έχει άμεση σχέση με τη δυνατότητα ανίχνευσης και παρακολούθησης του από το όργανο. Η συχνότητα συλλογής δεδομένων ενός συμβολόμετρου επιτρέπει στον χειριστή του στόχου να κινείται με ελεύθερη ταχύτητα εφόσον όμως βρίσκεται σε μια απόσταση από το laser tracker. Όσο πιο κοντά βρίσκεται ο στόχος στο όργανο τόσο χαμηλότερη πρέπει να είναι η ταχύτητα κίνησης του πρώτου γιατί οι γωνίες στροφής μεγαλώνουν. Εκεί που απαιτείται περισσότερη προσοχή όσον αφορά τη ταχύτητα κίνησης είναι στα συστήματα laser tracker

που χρησιμοποιούν μόνο αποστασιόμετρο. Η ταχύτητα συλλογής δεδομένων ενός ADM δεν είναι προς το παρόν μεγάλη οπότε ο χρήστης πρέπει να ελέγχει τον ρυθμό κίνησης του. Σε αντίθετη περίπτωση η δέσμη θα χάνει τον στόχο και θα κωλυσιεργεί την διαδικασία μέτρησης.

Η εμβέλεια του οργάνου είναι ακόμα ένας παράγοντας που χρήζει προσοχής. Με τα σύγχρονα όργανα να έχουν εμβέλεια 150m, οι περισσότερες βιομηχανικές εργασίες μεγάλης κλίμακας είναι σε θέση να καλυφθούν από το laser tracker. Παρόλα αυτά μπορεί για τις ανάγκες κάποιας εργασίας να απαιτείται μεγαλύτερη εμβέλεια συνεπώς το laser tracker να μην μπορεί να εξυπηρετήσει το χρήστη. Ο λόγος που υπάρχει περιοριστική εμβέλεια αναφέρθηκε στην ενότητα 3.3 και αφορά την έλλειψη δυνατότητας παρακολούθησης του στόχου στις μακρινές αποστάσεις.

Περιοριστικός παράγοντας, ειδικά όσον αφορά στον προγραμματισμό μιας εργασίας, είναι η ανάγκη προθέρμανσης του οργάνου πριν την έναρξη των μετρήσεων. Η διαφορά στην θερμοκρασία των διαφόρων υποσυστημάτων του laser tracker (ηλεκτρονικά, συμβολόμετρο, κινητήρες) δύναται να επιφέρει σημαντικά σφάλματα στις μετρήσεις. Για την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του οργάνου, μια προθέρμανση περίπου 30min. είναι απαραίτητη, αλλά για εργασίες όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια το χρονικό διάστημα αυτό μπορεί να προσεγγίσει και τις 2h. Τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα, διαθέτουν μηχανισμό ειδοποίησης για το πότε είναι έτοιμα να ξεκινήσουν την μετρητική διαδικασία, σε αντίθεση με τα πρώτα laser tracker που απαιτούνταν εκτίμηση του χρόνου προθέρμανσης από το χρήστη.

Τα laser tracker περιορίζονται επίσης από τις συνθήκες στο περιβάλλον εργασίας. Όπως προαναφέρθηκε οι τιμές των ατμοσφαιρικών συνθηκών που επικρατούν στο πεδίο των εργασιών μετρώνται και συμμετέχουν στον υπολογισμό του μήκους για μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρόλα αυτά οι πολύ υψηλές ή χαμηλές τιμές θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας, επηρεάζουν σημαντικά τα υποσυστήματα του laser tracker που αδυνατούν να πραγματοποιήσουν μετρήσεις. Βέβαια σε αντίθεση με τα πρώτα συστήματα που απαιτούσαν εργαστηριακές συνθήκες για να μετρήσουν, τα σημερινά όργανα έχουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα και δουλεύουν σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών (-10°C - 50°C), πίεσης (200-900mm Hg) και υγρασίας (0%-95%).

Η φορητότητα του laser tracker είναι ένας περιορισμός που με τα χρόνια ελαχιστοποιείται. Τα πρώτα συστήματα ήταν αρκετά ογκώδη και απαιτούσαν την παρουσία δυο και τριών

υπολογιστικών μονάδων, όπως επίσης και παροχής ρεύματος για να λειτουργήσουν (Schertenleib, 1995). Τα σημερινά όργανα είναι σαφώς πιο φορητά, έχουν μέγεθος ανάλογο με αυτό ενός γεωδαιτικού σταθμού, ο χειρισμός μπορεί να γίνει από έναν υπολογιστή χειρός, ενώ δουλεύουν και με μπαταρίες.

Ο τρόπος εκτέλεσης των μετρήσεων με laser tracker έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μερικών ακόμα περιορισμών. Καταρχάς απαιτείται φυσική επαφή με το αντικείμενο. Ο στόχος πρέπει να ακουμπάει στο σημείο ενδιαφέροντος προκειμένου αυτό να μετρηθεί με αποτέλεσμα την αδυναμία πραγματοποίησης μετρήσεων σε σημεία ή επιφάνειες που δεν προσεγγίζονται (αυτός ο περιορισμός δεν ισχύει όταν χρησιμοποιείται ο σαρωτής χειρός – βλ. κεφ. 3.4.2δ). Τέλος ένας περιοριστικός παράγοντας χρήσης του laser tracker είναι το κόστος αγοράς του, το οποίο είναι αρκετά υψηλό σε σύγκριση με άλλους βιομηχανικούς εξοπλισμούς.

3.7 Ακρίβειες Laser Tracker

Για την σφαιρική μελέτη των τεχνικών χαρακτηριστικών και των ακριβειών μέτρησης γωνιών και μήκους των laser tracker, παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2 τρία σύγχρονα όργανα: το AT901 της εταιρείας Leica Geosystems, το Vantage της εταιρείας Faro και το Omnitrac2 της εταιρείας API (βλ. σχήμα 3.14).

Οι τιμές για την γωνιακή ακρίβεια και την ακρίβεια μέτρησης μήκους που δίνονται στον πίνακα 3.2 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 2σ).

Σχήμα 3.14 Από αριστερά: Leica AT901, Faro Vantage και API Omnitrac2
Figure 3.14 From left: Leica AT901, Faro Vantage and API Omnitrac2

Μοντέλο	AT901 (Leica)	Vantage (Faro)	Omnitrac2 (API)
Εμβέλεια	160m	80m	160m
Οριζόντιο εύρος	± 300°	Απεριόριστο	± 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	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ
Ακρίβεια συμβολόμετρου*	±0.4μm + 0.3μm/m	-	-
Αποστασιόμετρο	ΝΑΙ **	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Ακρίβεια αποστασιόμετρου*	±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

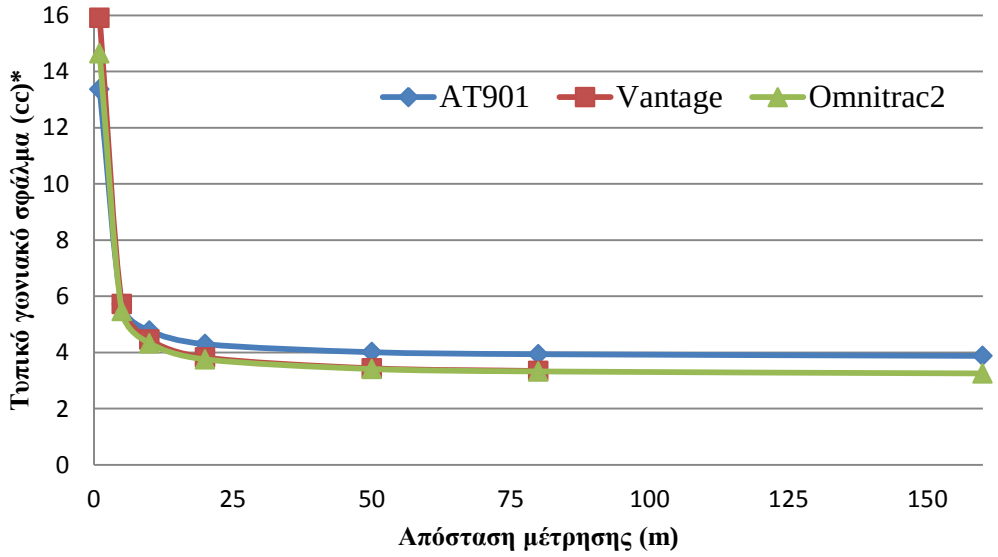
*σύμφωνα με τους κανονισμό B89.4.19 (για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4% - τιμές 2σ)
**μόνο για αρχικοποίηση συμβολόμετρου

Πίνακας 3.2 Σύγκριση των Laser Tracker των εταιρειών Leica, Faro, API
Table 3.2 Comparison of Leica's, Faro's and API's Laser Trackers

Η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ των laser tracker των διαφόρων εταιρειών είναι ο τρόπος μέτρησης αποστάσεων. Οι εταιρείες FARO και API χρησιμοποιούν στα σύγχρονα laser trackers τους μόνο αποστασιόμετρο, ενώ το AT901 της εταιρείας Leica Geosystems διαθέτει και αποστασιόμετρο και συμβολόμετρο. Στο εν λόγω όργανο τα δυο συστήματα δουλεύουν ταυτόχρονα και συνδυαστικά. Μόλις το όργανο "κλειδώσει" στον στόχο το αποστασιόμετρο αρχίζει να υπολογίζει την απόλυτη απόσταση. Ταυτόχρονα και ενόσω ο στόχος αρχίζει να κινείται, υπολογίζονται σχετικές μετακινήσεις με το συμβολόμετρο. Η αρχική απόλυτη απόσταση από το αποστασιόμετρο προστίθεται στη συνέχεια, αφού τελειώσει ο υπολογισμός της από το σύστημα. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι ο στόχος δεν χρειάζεται να ακινητοποιείται εφόσον χαθεί η δέσμη μέτρησης εξοικονομώντας έτσι χρόνο.

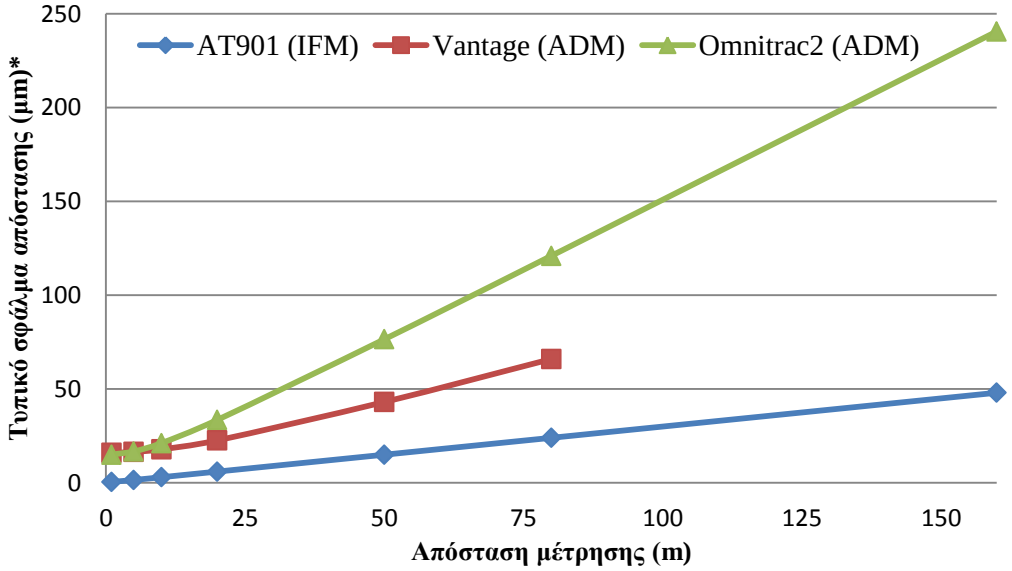
Για την πλήρη κατανόηση των μεγεθών της ακρίβειας μέτρησης γωνιών και μήκους των σύγχρονων laser tracker και για την ευκολότερη σύγκριση μεταξύ των τριών οργάνων, υπολογίστηκαν τα τυπικά γωνιακά σφάλματα σ_α και τα τυπικά σφάλματα της απόστασης σ_s για μετρήσεις σε αποστάσεις 1m, 5m, 10m, 20m, 50m, 80m και 160m και επίπεδο

εμπιστοσύνης 95.4%. Οι υπολογισμοί έγιναν βάσει των ακριβειών που αναγράφονται στον πίνακα 3.2 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στα σχήματα 3.15 για το τυπικό γωνιακό σφάλμα και στο σχήμα 3.16 για το τυπικό σφάλμα της απόστασης. Για το laser tracker Vantage, δεν δίνονται τιμές για απόσταση 160m, καθώς η εμβέλεια του είναι 80m. Επίσης, δεν υπολογίζεται το σφάλμα απόστασης του αποστασιόμετρου (ADM) του laser tracker AT901 γιατί αυτό χρησιμοποιείται μόνο για την αρχικοποίηση της δέσμης και όχι για μετρήσεις.



*για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%

Σχήμα 3.15 Γραφική παράσταση του τυπικού γωνιακού σφάλματος των AT901, Vantage, Omnitrac2
Figure 3.15 Chart of the angular standard error of AT901, Vantage, Omnitrac2



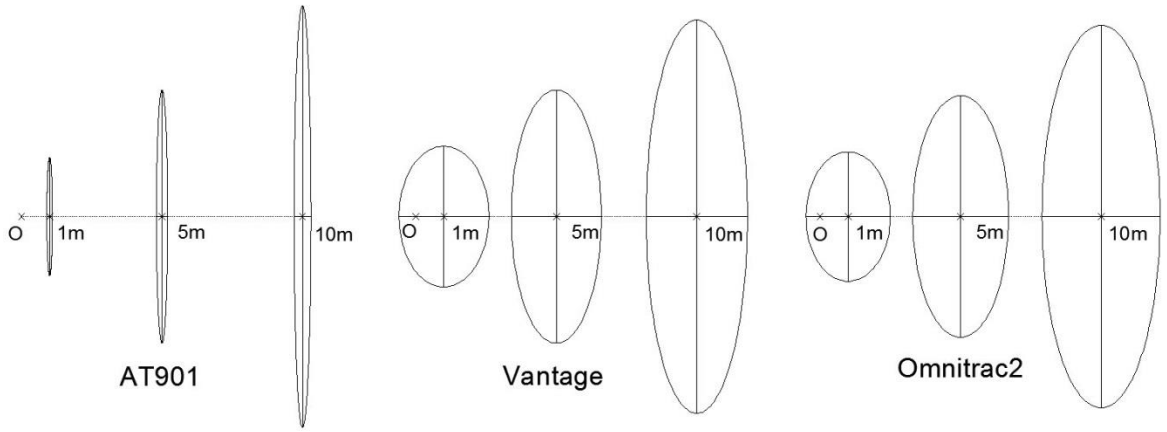
*για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%

Σχήμα 3.16 Γραφική παράσταση του τυπικού σφάλματος απόστασης των AT901, Vantage, Omnitrac2
Figure 3.16 Chart of the distance standard error of AT901, Vantage, Omnitrac2

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15, τα τυπικά γωνιακά σφάλματα των τριών laser tracker εμφανίζουνε παρόμοια συμπεριφορά και είναι αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση μέτρησης. Για μικρές αποστάσεις μέτρησης (ως 1-2m) το γωνιακό σφάλμα είναι της τάξης των $\pm 15^{cc}$. Όσο η απόσταση μεγαλώνει, το σφάλμα ελαττώνεται, ώσπου τελικά σχεδόν σταθεροποιείται για αποστάσεις >20m στα επίπεδα των $\pm 3\text{-}4^{cc}$. Γεγονός είναι πως η γωνιακή ακρίβεια και των τριών laser tracker δεν κρίνεται υψηλή, δεδομένου ότι ένας ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός ακριβείας υπολογίζει γωνίες με ακρίβεια $\pm 1^{cc}$ ή και ακόμα λιγότερο. Από την έκφραση της τυπικής γωνιακής ακρίβειας στον πίνακα 3.2, διαπιστώνεται πως για μικρές αποστάσεις, το σταθερό μέρος της ακρίβειας επιδρά περισσότερο στην τελική ακρίβεια, ενώ όσο η απόσταση μέτρησης μεγαλώνει, η επίδραση του σταθερού μέρους φθίνει και υπερισχύει το μεταβλητό.

Όσον αφορά στη γραμμική ακρίβεια, από το σχήμα 3.16 επιβεβαιώνεται η πολύ υψηλή ακρίβεια μέτρησης μηκών που αναφέρθηκε ότι διαθέτουν τα laser tracker. Ακόμα διαπιστώνεται, η σημαντική διαφορά της ακρίβειας του συμβολόμετρου που διαθέτει το AT901 με τα αποστασιόμετρα που διαθέτουν τα άλλα δυο όργανα. Χαρακτηριστικό είναι πως για μια απόσταση 50m, το AT901 υπολογίζει το μήκος με τυπικό σφάλμα ±15μm, το Vantage με ±43μm και το Omnitrack με ±76μm.

Για την σύγκριση των δυο ακριβειών, σχεδιάστηκαν ελλείψεις σφάλματος για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%, για μετρήσεις από σημείο Ο σε 1m, 5m και 10m και με τα τρία όργανα βάσει των τυπικών τους σφαλμάτων και παρουσιάζονται στο σχήμα 3.17.



*Η αναλογία των αποστάσεων προς τους άξονες των ελλείψεων είναι 1:100.000

Σχήμα 3.17 Ελλείψεις σφάλματος των οργάνων AT901, Vantage και Omnitrac2 για μετρήσεις σε αποστάσεις 1m, 5m και 10m.

Figure 3.17 Error Ellipses of instruments AT901, Vantage και Omnitrac2 for measures of 1 m , 5m and 10m.

Από την μορφή των ελλείψεων αυτών, γίνονται δυο βασικές παρατηρήσεις. Πρώτον, παρατηρείται απουσία αρμονικής ακρίβειας, ειδικά στο AT901 και στις αποστάσεις 5m και 10m για όλα τα όργανα. Δεύτερον, οι σχεδόν εκφυλισμένες σε ευθείες ελλείψεις για το AT901, που οφείλονται στην ύπαρξη συμβολόμετρου που παρέχει ακρίβεια 0.4μm ± 0.3μm/m.

Οι τάσεις του τομέα ανάπτυξης των laser trackers, αφορούν κυρίως στην βελτίωση του αποστασιόμετρου. Στόχος είναι να γίνει ακριβές και γρήγορο όπως ένα συμβολόμετρο, προκειμένου να καταργηθεί η χρήση του δεύτερου. Η ανάγκη ύπαρξης και των δυο συστημάτων στο laser tracker πέρα από την πολυπλοκότητα ανεβάζει και το κόστος αγοράς του. Ήδη έχουν γίνει βήματα προς αυτήν την κατεύθυνση, αλλά με την υπάρχουσα τεχνολογία, όπως φαίνεται και στην παραπάνω ανάλυση, το αποστασιόμετρο δεν μπορεί ακόμα να αντικαταστήσει το συμβολόμετρο από άποψη ακρίβειας. Έμφαση δίνεται επίσης στην βελτίωση της λειτουργίας παρακολούθησης των στόχων ώστε να μπορούν να μετρώνται ακόμα και τα πιο υψίσυχνα φαινόμενα, ενώ λαμβάνεται μέριμνα και για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων λόγω ατμοσφαιρικών συνθηκών, ώστε τα laser tracker να μπορούν να μετρήσουν χωρίς σημαντικά σφάλματα στην ακρίβεια και σε εξωτερικό περιβάλλον.

3.8 Τυπικές Εφαρμογές

Σε έναν βιομηχανικό χώρο οι τοπογραφικές εφαρμογές είναι αρκετά συγκεκριμένες και απαιτούν υψηλή ακρίβεια, ευελιξία εκ μέρους του οργάνου, επαναληψιμότητα και σε πολλές περιπτώσεις ταχύτητα. Η ικανοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων σε συνδυασμό με την πολυμορφία των αποτελεσμάτων που παράγει (3-Δ συντεταγμένες, επιφάνειες, μοντέλα CAD, παραμορφώσεις, κίνηση αντικειμένου) καθιστούν το laser tracker ιδανική επιλογή για πολλές διαφορετικές εφαρμογές σε όλα τα στάδια της παραγωγής. Οι συνηθέστερες από αυτές τις εφαρμογές παρουσιάζονται παρακάτω:

Η πρώτη τυπική εφαρμογή είναι η **Γεωμετρική Τεκμηρίωση**, δηλαδή η διαδικασία σύγκρισης των πραγματικών τιμών του μεγέθους, του σχήματος, της θέσης και του προσανατολισμού μιας κατασκευής με τις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές που εξάγονται συνήθως από το σχέδιο της. Κάθε αντικείμενο που κατασκευάζεται σε μια βιομηχανία, υπόκεινται σε συνεχείς ποιοτικούς ελέγχους. Μάλιστα, επειδή η γεωμετρική τεκμηρίωση κάθε παραγώγου ξεχωριστά είναι χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία, προτιμάται να ελέγχονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα τα εργαλεία (καλούπια) κατασκευής των

παραγώγων (περιοδικός έλεγχος). Σε αρκετές περιπτώσεις (όπως και στην εφαρμογή που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5), οι οδηγίες ελέγχου του εργαλείου είναι κατάλληλα προσαρμοσμένες ώστε να εκτελούνται από laser trackers.

Άλλη τυπική εφαρμογή μεγάλης κλίμακας στην οποία βρίσκει εφαρμογή το laser tracker είναι η **συναρμολόγηση** μεγάλων κατασκευών. Το ζητούμενο είναι η ένωση διαφόρων τμημάτων σε μηχανικά σύνολα, όπως π.χ. συναρμολόγηση πτερυγίων αεροσκάφους στο σώμα του. Για τις ανάγκες των εργασιών συναρμολόγησης τοποθετούνται στόχοι στα μέρη που πρέπει να ενωθούν. Με ένα laser tracker που διαθέτει αποστασιόμετρο, σκοπεύονται οι στόχοι αυτοί και παρακολουθείται η σχετική τους θέση. Όταν αυτή ταυτιστεί με την επιθυμητή τιμή τότε η συναρμολόγηση είναι επιτυχής.

Μια εφαρμογή που συναντάται όχι μόνο σε βιομηχανικούς χώρους, αλλά και σε επιστημονικά εργαστήρια είναι ο **έλεγχος ευθυγράμμισης**. Σκοπός του ελέγχου είναι ο εξαναγκασμός διαφόρων αντικειμένων σε συγκεκριμένο προσανατολισμό. Το laser tracker χρησιμοποίεται σε πάσης φύσεως τέτοιες εργασίες, από την ευθυγράμμιση εργαλείων παραγωγής και αγωγών ως ακόμα και επιταχυντών σωματιδίων και μαγνητών, λόγω των αποτελεσμάτων υψηλής ακρίβειας που μπορεί να παράγει.

Το laser tracker βρίσκει εφαρμογή και στην αντίστροφή διαδικασία από αυτή της γεωμετρικής τεκμηρίωσης, δηλαδή στον **ανάστροφο σχεδιασμό.** Στον ανάστροφο σχεδιασμό σκοπός είναι η δημιουργία ενός σχεδίου συγκεκριμένης ακρίβειας από μετρήσεις σε πραγματικό αντικείμενο. Οι μετρήσεις αυτές εξαρτώνται από την φύση, το σχήμα και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε αντικειμένου. Τα σημεία των μετρήσεων μπορεί να είναι είτε περιορισμένα και σε μορφή καννάβου είτε να συλλεχθεί μεγάλος αριθμός σημείων εν είδει σάρωσης.

Μια διαφορετική κατηγορία εφαρμογών είναι οι **μετρήσεις δυναμικών φαινομένων**. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την μέτρηση και την ανάλυση αντικειμένων σε κίνηση. Αυτές οι μετρήσεις συναντώνται κυρίως σε εφαρμογές ρομποτικής για την ανίχνευση και τον προγραμματισμό της κίνησης μηχανικών μερών ή για την παρακολούθηση διαφόρων φαινομένων. Κλασσικό αντικείμενο εφαρμογής, είναι οι εργαλειομηχανές όπου σκοπός είναι η εξακρίβωση της ορθής τους λειτουργίας. Στις εργαλειομηχανές ο συνήθης τρόπος ελέγχου είναι με την προσαρμογή ενός στόχου σε κατάλληλο σημείο πάνω σε αυτές και ο εξαναγκασμός τους σε προκαθορισμένες κινήσεις (σχεδιασμός γραμμών, κύκλων κ.λπ.). Το laser tracker παρακολουθεί και καταγράφει τις διαδοχικές θέσεις του στόχου,

αποδίδοντας την κίνηση της εργαλειομηχανής. Κατόπιν ελέγχεται η συμφωνία των δεδομένων από το laser tracker με τις προκαθορισμένες κινήσεις και εξάγεται συμπέρασμα για την ορθή λειτουργία της μηχανής ή όχι. Σε περίπτωση που προκύψει ασυμφωνία στα δεδομένα η μηχανή επιδιορθώνεται. Η παραπάνω διαδικασία είναι γνωστή ως "καλιμπράρισμα". Με την προσαρμογή στόχων (συνήθως στόχων επαναληψιμότητας) μπορεί να παρακολουθείται από το laser tracker οποιαδήποτε κατασκευή για λόγους πέρα του καλιμπραρίσματος που αναφέρθηκε παραπάνω. Οι λόγοι αυτοί μπορεί να είναι για την ανίχνευση παραμορφώσεων σε μια κατασκευή ή προληπτικοί έλεγχοι της συμπεριφοράς μιας γέφυρας. Η υψηλή ταχύτητα συλλογής δεδομένων που επιτυγχάνεται με το laser tracker καθιστά δυνατή την παρακολούθηση υψίσυχνων φαινομένων και την ανίχνευση παραμορφώσεων της τάξης των εκατοστών του χιλιοστού.

Ένα ακόμα στάδιο βιομηχανικής παραγωγής όπου συμμετέχει το laser tracker είναι αυτό της κατασκευής, όπου χρησιμοποιείται για **χαράξεις** γραμμών, σημείων και άλλων γεωμετρικών στοιχείων πάνω σε μια επιφάνεια. Σε πολλές περιπτώσεις όπου η κατασκευή είναι εξειδικευμένη και δεν υπάρχει το κατάλληλο καλούπι είναι δύσκολη η ακριβής χάραξη των διαφόρων χαρακτηριστικών σημείων (π.χ. οπές για βίδες) και η χρήση του laser tracker επιβεβλημένη. Η διαδικασία της χάραξης είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθείται σε μια τυπική χάραξη με ένα γεωδαιτικό σταθμό.

Οι παραπάνω εφαρμογές laser tracker συναντώνται σε όλες των ειδών τις βιομηχανίες είτε στο σύνολο τους είτε μεμονωμένα. Στην αεροναυπηγική πραγματοποιούνται κυρίως περιοδικοί έλεγχοι στα εργαλεία των τμημάτων του σώματος του αεροσκάφους και εφαρμογές συναρμολόγησης, όπως προσαρμογή πτερυγίων στο κυρίως σώμα του αεροσκάφους. Στην αυτοκινητοβιομηχανία η χρήση του laser tracker είναι ακόμα πιο διαδεδομένη. Οι σχεδιαστές του αυτοκινήτου δημιουργούν από πηλό ένα μοντέλο του αυτοκινήτου σε κλίμακα. Με το laser tracker ψηφιοποιούν αυτό το μοντέλο και παράγουν το σχέδιο του σε ηλεκτρονική μορφή (ανάστροφος σχεδιασμός). Με τα δεδομένα αυτά κατασκευάζεται το καλούπι του αυτοκινήτου το οποίο ελέγχεται από το laser tracker τόσο κατά την κατασκευή του όσο και ανά τακτά χρονικά διαστήματα για την ορθότητα της λειτουργίας του (περιοδικός έλεγχος). Οι δυναμικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές ρομποτικής για την ανίχνευση και τον προγραμματισμό της κίνησης μηχανικών μερών. Στον τομέα των τηλεπικοινωνιών οι κύριες εφαρμογές που εκτελούνται είναι σαρώσεις επιφανειών κεραιών και ευθυγραμμίσεις.

4 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Το κεφάλαιο 4 χωρίζεται σε δυο μέρη. Στο πρώτο μέρος, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραματικών εφαρμογών που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια. Ο εξοπλισμός αυτός αποτελεί ιδιοκτησία της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (Ε.Α.Β.), όπου και πραγματοποιήθηκε το πρακτικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας. Το δεύτερο μέρος του κεφαλαίου περιλαμβάνει τις προκαταρκτικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την εξοικείωση με το λογισμικό επεξεργασίας και με τον εξοπλισμό.

4.1 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των εφαρμογών αποτελείται από το όργανο μετρήσεων, ένα laser tracker LTD640 της εταιρείας Leica Geosystems, διάφορα παρελκόμενα, όπως στόχοι, ράβδοι κρυφού σημείου κ.α. και το λογισμικό επεξεργασίας Axyz. Κάθε ένα από τα τμήματα του εξοπλισμού παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια.

4.1.1 Όργανο Μετρήσεων

Το όργανο μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε ήταν το laser tracker LTD640 της εταιρείας Leica Geosystems (σχήμα 4.1). Το συγκεκριμένο όργανο έχει εμβέλεια μήκους 0-40m, ενώ το εύρος των γωνιομετρήσεων είναι ±235° για τις οριζόντιες γωνίες και ±45° για τις κατακόρυφες. Συνεργάζεται με τους ειδικούς στόχους για laser tracker (βλ. κεφ. 3.4.1), δηλαδή με στόχους τύπου SMR, Cateye και στόχους επαναληψιμότητας, ενώ η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει ο στόχος, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση του από το όργανο, είναι 6m/s όταν ο στόχος κινείται κατά μήκος της δέσμης και 4m/s όταν κινείται κάθετα σε αυτήν. Η ακρίβεια των γωνιομετρήσεων κυμαίνεται από 6^{cc} για μετρήσεις προς στατικούς στόχους και από 12^{cc} - 25^{cc} για μετρήσεις προς κινούμενο στόχο, ανάλογα την ταχύτητα κίνησης (για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%).

Το όργανο είναι εξοπλισμένο με δυο συσκευές μέτρησης μήκους, ένα συμβολόμετρο (IFM) και ένα αποστασιόμετρο (ADM). Το μεν συμβολόμετρο χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση του στόχου και τον υπολογισμό σχετικών μετακινήσεων. Το δε αποστασιόμετρο για τον υπολογισμό της απόλυτης απόστασης του οργάνου από το κέντρο του στόχου όταν αυτός είναι στατικός. Το συμβολόμετρο χρησιμοποιεί μια ορατή ακτίνα

laser τάξης (class) 2, μήκους κύματος 633nm και διαμέτρου 4.5mm. Η ακρίβεια με την οποία υπολογίζεται μια σχετική μετακίνηση είναι ±10μm ± 0.5μm/m (για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%). Στο αποστασιόμετρο χρησιμοποιείται η τεχνική του διαμορφωμένου σήματος και μια υπέρυθρη ακτίνα laser τάξης 1, μήκους κύματος 780nm και διαμέτρου 10mm.Η εμβέλεια του αποστασιόμετρου κυμαίνεται από 1.5-40m και η απόδοση του είναι 1μm. Η ακρίβεια προσδιορισμού μιας απόστασης με αυτό είναι ±25μm , που ελαττώνεται όσο μεγαλώνει η κατακόρυφη γωνία φτάνοντας ακόμα και τα ±100μm για γωνίες ±45° (για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%).

Σχήμα 4.1 Το laser tracker LTD640 της εταιρείας Leica
Figure 4.1 Leica's laser tracker LTD640

Επιπρόσθετα το LTD640 διαθέτει ενσωματωμένη ψηφιακή φωτομηχανή που χρησιμεύει στον εντοπισμό του στόχου χειροκίνητα όταν αυτό κριθεί απαραίτητο. Σε περίπτωση που διακοπεί η οπτική επαφή της δέσμης μέτρησης με το στόχο (π.χ. λόγω κάποιου εμποδίου), το όργανο χάνει τη δυνατότητα παρακολούθησης του στόχου. Για να ξαναβρεί το στόχο και να "κλειδώσει" σε αυτόν, ενεργοποιείται η ψηφιακή φωτομηχανή που δίνει ζωντανή εικόνα του χώρου. Στην εικόνα αυτή μπορεί να εντοπιστεί ο στόχος και να σκοπευθεί μέσω του λογισμικού. Κατόπιν το όργανο στρέφεται προς τη θέση του στόχου, όπως αυτή δόθηκε από τον χρήστη και κλειδώνει σε αυτόν. Απαραίτητη είναι η σύνδεση του οργάνου με Η/Υ με σκοπό την εκτέλεση και την επεξεργασία των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο μέσω κατάλληλου λογισμικού (π.χ. Axyz, PolyWorks κ.α.).

Οι συνθήκες υπό τις οποίες προτείνεται να λειτουργεί το όργανο είναι για θερμοκρασίες +5-40°C και για υγρασία 0-90%. Βέβαια δεν αρκεί οι τιμές των παραπάνω να είναι μέσα

στα προτεινόμενα όρια, αλλά επίσης να μην παρουσιάζουν έντονη διακύμανση κατά την διάρκεια των εργασιών. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία κατά την διάρκεια των μετρήσεων καλό είναι να κυμαίνεται το πολύ ±5°C από την θερμοκρασία που επικρατούσε κατά την έναρξη των μετρήσεων, γεγονός που ελέγχεται συνέχεια από το λογισμικό. Το LTD640 απαιτεί περίπου 20-30min. προθέρμανση πριν την έναρξη των μετρήσεων, ώστε να ζεσταθούν όλοι οι εσωτερικοί του μηχανισμοί και ειδοποιεί το χρήστη πότε είναι έτοιμο για μετρήσεις είτε μέσω του συνοδευόμενου λογισμικού είτε μέσω μιας φωτεινής ένδειξης πάνω στο όργανο.

Το βάρος του οργάνου είναι 30kg και οι διαστάσεις του είναι 220x280x855mm αντίστοιχα. Η βάση του είναι αποσπώμενη ώστε να υπάρχει δυνατότητα ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εργασίας να χρησιμοποιείται βάση με κατάλληλο ύψος. Τα παραπάνω μεγέθη συνηγορούν για την φορητότητα του LTD640, καθώς μεταφέρεται εύκολα στο χώρο εργασίας. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου που περιγράφηκαν παραπάνω.

Μοντέλο	**LTD640 (Leica)**
Εμβέλεια	40m
Οριζόντιο εύρος	± 235°
Κατακόρυφο εύρος	±45°(90°)
Ταχύτητα μετρήσεων	4-6m/s
Γωνιακή ακρίβεια*	$\pm 6^{cc}$ - 25^{cc} (±10-40μm/m)
Συμβολόμετρο	ΝΑΙ
Ακρίβεια συμβολόμετρου*	±10μm + 0.5μm/m
Αποστασιόμετρο	ΝΑΙ
Ακρίβεια αποστασιόμετρου*	±25μm – ±100μm
Βάρος	30kg
Διαστάσεις	220/280/855mm
Εύρος θερμοκρασίας	+5°C - +40°C

*Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4% - τιμές 2σ

Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του LTD640 της εταιρείας Leica
Table 4.1 Leica's LTD640 specifications

4.1.2 Παρελκόμενα

Για την εκτέλεση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε μια σειρά από παρελκόμενα, σχεδιασμένα ειδικά για συνδυαστική χρήση με το laser tracker. Ειδικότερα, τα παρελκόμενα που χρησιμοποιήθηκαν για την περάτωση των εφαρμογών ήταν:

- **Στόχος CCR 1.5in**. Ο στόχος είναι της Leica Geosystems, σχεδιασμένος ειδικά για χρήση με τα laser tracker της ίδιας εταιρείας. Ανήκει στην κατηγορία στόχων CCR, 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° και το μεταλλικό περίβλημα δεν δημιουργεί κανένα περιορισμό στις εισερχόμενες δέσμες.
- **Στόχος CCR 0.5 in.** Και αυτός ο στόχος είναι της εταιρείας Leica Geosystems, παρόμοιος στην κατασκευή με τον παραπάνω με τη διαφορά πως η διάμετρος του είναι 0.5 in. ή 12.7mm με ακρίβεια ±0.0025mm. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του στόχου, όπως ακρίβεια κατασκευής, γωνίες εισόδου κλπ., είναι ίδια με αυτά του στόχου CCR 1.5in.
- **Ράβδος κρυφού σημείου**. Για την μέτρηση προς σημεία όπου δεν υπήρχε άμεση ορατότητα, χρησιμοποιήθηκε μια ράβδος κρυφού σημείου μήκους 10in. ή 25.4cm. Για την προσαρμογή της ράβδου στο σημείο μέτρησης, χρησιμοποιείται ειδική βάση με αποτέλεσμα το συνολικό μήκος της ράβδου από το σημείο εφαρμογής ως το κέντρο του στόχου να είναι 12in. όταν χρησιμοποιείται με τον στόχο CCR 1.5in. και 11.5in. με το στόχο CCR 0.5in.
- **Βάσεις στόχων**. Για τις ανάγκες των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν οριζόντιες και γωνιακές βάσεις στόχων (σχήμα 4.2). Οι μεν οριζόντιες βάσεις χρησιμεύουν για την τοποθέτηση του στόχου σε σταθερό σημείο σε ένα οριζόντιο επίπεδο. Οι δε γωνιακές βάσεις προσαρμόζονται σε ορθογώνιες ακμές του αντικειμένου μέτρησης έτσι ώστε το κέντρο του στόχου να βρίσκεται παράλληλα στην ακμή. Οι βάσεις για τον στόχο CCR 1.5in. επιφέρουν συνολικά (μαζί με τον στόχο) παράλληλη μετατόπιση (offset) 1in., ενώ η βάση του στόχου CCR 0.5in. μετατόπιση 0.5in.

Σχήμα 4.2 Οριζόντια και κατακόρυφη βάση στόχων CCR
Figure 4.2 Pin nest and vector target holder for CCR targets

- **Μετεωρολογικός σταθμός**. Για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών συνθηκών στο χώρο εργασίας και συγκεκριμένα της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της πίεσης του αέρα χρησιμοποιήθηκε ο μετεωρολογικός σταθμός Meteo Station HM30. Ο εν λόγω σταθμός, συνδέεται με τον Η/Υ του συστήματος και τροφοδοτεί το λογισμικό με συνεχείς πληροφορίες για τις τιμές των παραπάνω μεγεθών ώστε να γίνονται οι κατάλληλες διορθώσεις στα μετρημένα μήκη.

4.1.3 Λογισμικό Επεξεργασίας

Το λογισμικό επεξεργασίας στις εργασίες με laser tracker αποτελεί πολύ σημαντικό κεφάλαιο, καθώς μπορεί να απλοποιήσει τις διαδικασίες μέτρησης και επεξεργασίας και να 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 τριδιάστατη 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 2 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. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα υποπρογράμματα του Axyz τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή το LTM, το CDM και το CAD.

Μέσω του υποπρογράμματος **LTM (Laser Tracker Module)** γίνεται δυνατή η σύνδεση του laser tracker με τον Η/Υ. Οι μετρήσεις με τεχνολογία laser tracker δεν γίνονται μέσω του οργάνου (όπως π.χ. σε ένα γεωδαιτικό σταθμό), αλλά αποκλειστικά μέσω του λογισμικού. Από το LTM αρχικά ορίζεται το όνομα του σημείου που θα μετρηθεί, ο στόχος που θα χρησιμοποιηθεί και αν πρέπει να εφαρμοσθεί κάποια παράλληλη μετατόπιση στην μέτρηση (λόγω του στόχου ή κάποιας βάσης). Όλα τα παραπάνω μπορούν να επεξεργαστούν και μετά τις μετρήσεις. Ακόμα από την πλατφόρμα του LTM επιλέγεται αν θα εκτελεστεί μια μεμονωμένη μέτρηση ή αν οι μετρήσεις θα είναι συνεχόμενες. Σε περίπτωση που επιλεχθούν οι συνεχόμενες μετρήσεις, ορίζεται από τον χρήστη το διάστημα μεταξύ δυο μετρήσεων και το οποίο μπορεί να είναι είτε χρονικό (εκτέλεση μέτρησης ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα) είτε βάσει της απόστασης του ενός σημείου από το επόμενο. Επίσης, ορίζεται ο τρόπος που θα μετρηθεί το σημείο, δηλαδή αν π.χ. θα χρησιμοποιηθεί ράβδος κρυφού σημείου ή άλλο ειδικό παρελκόμενο.

Άλλη λειτουργία του υποπρογράμματος αυτού, είναι η χειροκίνητη σκόπευση του στόχου όταν χαθεί η δέσμη μέτρησης και το όργανο χάσει τον στόχο. Τέλος, σημαντική λειτουργία του LTM είναι η δυνατότητα εισαγωγής σχημάτων από το CDM και η χρήση

των δεδομένων στη μετρητική διαδικασία. Παραδείγματος χάριν, αν έχει δημιουργηθεί ένα επίπεδο στο CDM, εισάγοντας το στο LTM και επιλέγοντας την ανάλογη λειτουργία, στην οθόνη θα εμφανίζεται η απόλυτη απόσταση του σημείου που μετράται από το επίπεδο. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για εργασίες συναρμολόγησης και για εργασίες ελέγχου. Τα δεδομένα που συλλέγονται από το LTM καταγράφονται αυτόματα στο CDM για περαιτέρω επεξεργασία.

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 φόρτωση κάποιου αρχείου.

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.

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: τρείς 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 δυο ή μόνο μια από τις συντεταγμένες τους αρκεί ο συνολικός αριθμός των γνωστών τιμών να είναι τουλάχιστον 6. Αφού 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:

$$\begin{bmatrix} X_{\tau\varepsilon\lambda} \\ Y_{\tau\varepsilon\lambda} \\ Z_{\tau\varepsilon\lambda} \end{bmatrix} = \lambda * R * \begin{bmatrix} X_{\alpha\rho\chi} \\ Y_{\alpha\rho\chi} \\ Z_{\alpha\rho\chi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

όπου, $X_{\tau\varepsilon\lambda}$, $Y_{\tau\varepsilon\lambda}$, $Z_{\tau\varepsilon\lambda}$ 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 R ο πίνακας στροφής όπου αναλύεται στους παρακάτω τρεις πίνακες (έναν για κάθε στροφή):

$$Rx\ (\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\omega & sin\omega \\ 0 & -sin\omega & cos\omega \end{bmatrix} \quad (4.2),$$

$$Ry\ (\varphi) = \begin{bmatrix} cos\varphi & 0 & -sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ sin\varphi & 0 & cos\varphi \end{bmatrix} \quad (4.3),$$

$$Rz\ (\kappa) = \begin{bmatrix} cos\kappa & sin\kappa & 0 \\ sin\kappa & cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Η μη χρήση της παραμέτρου της κλίμακας (λ=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 τριδιάστατο 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 απόστασης 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 αλληλεπίδραση 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.

4.2 Προκαταρκτικές Εργασίες

4.2.1 Εκμάθηση Λογισμικού

Για την εκμάθηση του λογισμικού επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των εφαρμογών της παρούσας διπλωματικής εργασίας 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 Η/Υ και δυνατότητα εποπτείας και επεξεργασίας των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο στην οθόνη του Η/Υ. 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 Υ23 του κτιρίου Λαμπαδαρίου της Σ.Α.Τ.Μ. Ε.Μ.Π. Για τις ανάγκες των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένας ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός TDA5005 της εταιρείας Leica Geosystems, ένας αυτοκόλλητος ανακλαστικός στόχος και ένας Η/Υ με εγκατεστημένο το λογισμικό Axyz.

Σχήμα 4.3 Ορθογώνιο βάθρο στην αίθουσα Υ23
Figure 4.3 Rectangular pedestal in room Y23

Η πρώτη σειρά μετρήσεων περιελάμβανε την μέτρηση σημείων που ορίζουν ένα οριζόντιο επίπεδο. 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 κατανεμημένα στην επιφάνεια ενός ορθογώνιου βάθρου στην Y23 (βλ. σχήμα 4.3).

Τα στοιχεία που μετρήθηκαν ήταν μια οριζόντια γωνία, μια 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 3 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:

$$\sigma_\delta = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (\delta_i)^2}{N}} \tag{4.5}$$

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 4.2:

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 4.2 Οι τυπικές αποκλίσεις των μετρημένων σημείων από το βέλτιστο επίπεδο
Table 4.2 Standard deviations of measured points from the best-fit plane

Τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά, καθώς οι αποκλίσεις δεν ξεπερνούν τα 0.050mm. Δεδομένου του πλήθους των σημείων (μόλις 2 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 3, συνεπώς μετρήθηκαν 4 (point6 - point9) ώστε να υπάρχει πλεονασμός παρατηρήσεων. Σε περίπτωση που μετρηθούν μόνο 3 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 Y23 που για τις εκπαιδευτικές ανάγκες της εφαρμογής θεωρείται κυλινδρικό (βλ. εικόνα 4.4).

Σχήμα 4.4 Βάθρο στην αίθουσα Y23
Figure 4.4 Pedestal in room 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 4 μετρημένα σημεία. Για τον υπολογισμό των αρχικών τιμών χρησιμοποιήθηκαν τυχαία τα 3 πρώτα σημεία. Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι τυπικές αποκλίσεις κάθε συντεταγμένης κάθε σημείου, όπως υπολογίστηκαν από το Axyz και το συνολικό τυπικό σφάλμα τους σ_δ από τον τύπο 4.5.

Σημείο	**δX (mm)**	**δY (mm)**	**δZ (mm)**
point1	1.536	0.000	0.365
point2	0.653	-0.499	-0.204
point3	-0.883	-1.376	0.391
point4	1.297	1.860	-0.552
	σ_δ	**±1.694mm**	

Πίνακας 4.3 Οι τυπικές αποκλίσεις των μετρημένων σημείων από το βέλτιστο κύκλο
Table 4.3 Standard deviations of measured points from the best-fit circle

Η ακρίβεια προσαρμογής του κύκλου δεν είναι το ίδιο καλή όπως αυτή προσαρμογής του επιπέδου, αλλά παραμένει σε υψηλά επίπεδα (σ_δ = ±1.694mm). Η μειωμένη ακρίβεια σε

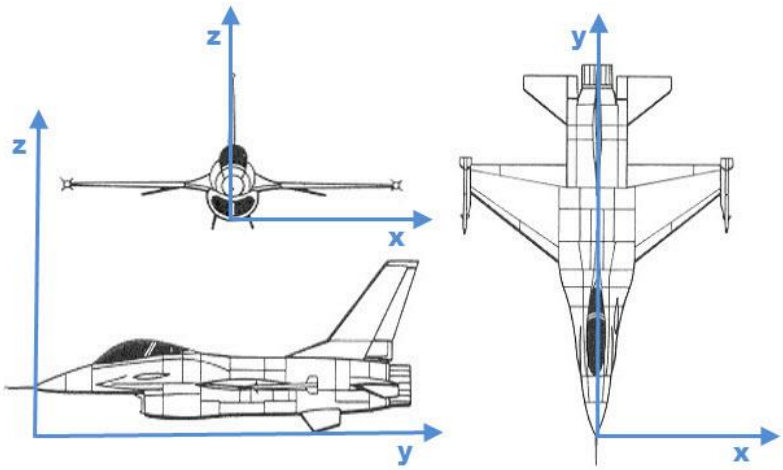
σχέση με πριν οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στο γεγονός πως ο στόχος τοποθετήθηκε σε σημεία στην περιφέρεια. του κύκλου κατά προσέγγιση. Παράλληλα με τα παραπάνω, από το Axyz υπολογίζονται και άλλα στοιχεία, όπως οι συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου και η ακτίνα του. Τα σχήματα που δημιουργούνται υπάρχει η δυνατότητα να αποθηκευτούν στο Axyz ώστε να χρησιμοποιηθούν για άλλες εργασίες.

4.2.2 Εκμάθηση Εξοπλισμού

Για λόγους εξοικείωσης με τον εξοπλισμό, πραγματοποιήθηκαν αρχικά αναγνωριστικές επισκέψεις στους χώρους της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (Ε.Α.Β.) και παρακολούθηση της λειτουργίας του οργάνου. Σκοπός ήταν η εκμάθηση της μετρητικής διαδικασίας με laser tracker και της επεξεργασίας των μετρήσεων. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μια απλή εφαρμογή περιοδικού ελέγχου ενός εργαλείου.

α. Περιγραφή εφαρμογής

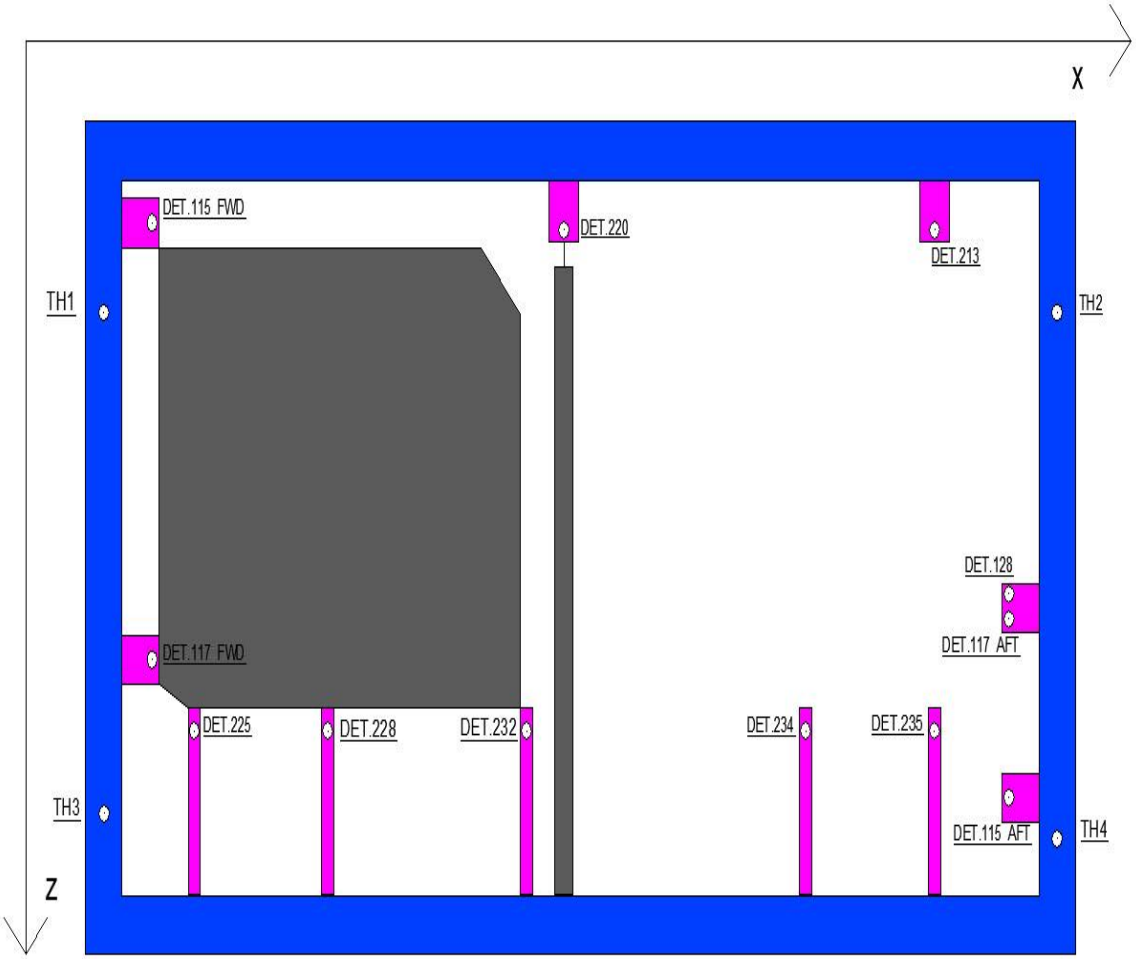
Το αντικείμενο της εφαρμογής είναι ένα εργαλείο (βλ. κεφ. 2.1) που χρησιμεύει στην κατασκευή τμήματος της ατράκτου πολεμικού αεροσκάφους F16. Το εργαλείο, έχει συγκεκριμένο προσανατολισμό στον χώρο που ορίζεται από ένα τριδιάστατο ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Για πρακτικούς λόγους, το σύστημα αναφοράς του εργαλείου ταυτίζεται με αυτό του αεροσκάφους. Στο σχήμα 4.5, διακρίνονται τρία διδιάστατα σκαριφήματα του αεροσκάφους F16, σε καθένα από τα οποία έχουν σχεδιαστεί οι άξονες του συστήματος συντεταγμένων του αεροσκάφους. Το σύστημα αναφοράς του εργαλείου μελέτης προκύπτει από μετάθεση του συστήματος αναφοράς του αεροσκάφους.



Σχήμα 4.5 Σύστημα αξόνων xyz του αεροσκάφους F16 [Wikipedia]
Figure 4.5 Axis system xyz of aircraft F16 [Wikipedia]

Η διαδικασία ελέγχου περιλαμβάνει έναν μετασχηματισμό ομοιότητας στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου, μέτρηση των απαραίτητων σημείων ελέγχου, υπολογισμό των συντεταγμένων τους και σύγκριση των προσδιορισμένων συντεταγμένων με τις αντίστοιχες ονομαστικές που δίνονται από τα σχέδια του εργαλείου. Αν η διαφορά των δυο τιμών είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων απόκλισης σημαίνει πως το εργαλείο λειτουργεί σωστά και ο έλεγχος είναι επιτυχής. Σε αντίθετη περίπτωση απαιτείται επιδιόρθωση του εργαλείου.

Φωτογραφία του αντικειμένου μέτρησης δεν παρατίθεται καθώς εμπίπτει σε θέματα απορρήτου, αλλά παρουσιάζεται σκαρίφημα του στο σχήμα 4.6, όπως διακρινόταν από το σημείο όπου τοποθετήθηκε το laser tracker. Στο εργαλείο αυτό υπάρχουν επισημασμένα σημεία (σημεία αναφοράς) των οποίων οι συντεταγμένες είναι γνωστές με μεγάλη ακρίβεια (σημεία TH_1, TH_2, TH_3, TH_4).



Σχήμα 4.6 Σκαρίφημα εργαλείου για την κατασκευή τμήματος της ατράκτου αεροσκάφους F16
Figure 4.6 Sketch of the jig used in the construction of part of the fuselage of aircraft F16

Ο έλεγχος του εργαλείου γίνεται με μετρήσεις προς τα σημεία ελέγχου (σημεία “DET.xxx” στο σχήμα 4.6). Στα σημεία αυτά τοποθετούνται διάφορα εξαρτήματα κατά την κατασκευή του τμήματος της ατράκτου, συνεπώς η ορθότητα της θέσης τους έχει μεγάλη σημασία. Στα σημεία αυτά τοποθετείται ο στόχος ο οποίος σκοπεύεται αυτόματα από το όργανο και μετά την μέτρηση προσδιορίζονται οι τριδιάστατες συντεταγμένες των σημείων.

Οι τιμές των αποκλίσεων για τις διαφορές των συντεταγμένων, καθορίζονται από τον κατασκευαστή του εργαλείου και κυμαίνονται από ±0.127mm - ±0.762mm, ανάλογα με την λειτουργική σημασία κάθε σημείου. Επισημαίνεται ότι στο συγκεκριμένο εργαλείο, δεν απαιτήθηκε ο έλεγχος και των τριών τιμών των συντεταγμένων (X, Y, Z) σε κάθε σημείο, αλλά κάθε φορά, ελεγχόταν μόνο μια από τις τρεις συντεταγμένες (όποια ζητούνταν από τις οδηγίες ελέγχου). Παραδείγματος χάριν, για το σημείο ελέγχου DET.128 ζητήθηκε ο έλεγχος μόνο της τιμή της συντεταγμένης X, ενώ των τιμών Y και Z όχι.

β. Μετρητική διαδικασία

Το όργανο τοποθετήθηκε σε απόσταση της τάξης των 2m από το αντικείμενο μέτρησης σε κατάλληλη θέση ώστε να εξασφαλίζεται απρόσκοπτη ορατότητα προς όλα τα σημεία μέτρησης. Κατόπιν στον συνδεδεμένο με το laser tracker H/Y και πιο συγκεκριμένα στο λογισμικό Axyz, έγινε εισαγωγή του αρχείου με τις ονομαστικές τιμές των σημείων αναφοράς και των σημείων ελέγχου του εργαλείου.

Πρώτο βήμα της διαδικασίας των μετρήσεων ήταν η μεταφορά από το σύστημα αναφοράς του laser tracker στο σύστημα αναφοράς του αεροπλάνου. Για να γίνει αυτό, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προς τρία σημεία αναφοράς, τα TH1, TH2, TH3 και επιλέχθηκε στο λογισμικό Axyz να γίνει βέλτιστη προσαρμογή των μετρημένων τιμών στις αντίστοιχες ονομαστικές. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια μεταφορά του συστήματος συντεταγμένων που περιλαμβάνει τρεις μεταθέσεις (μια κατά x, μια κατά y και μια κατά z) και τρείς στροφές (ω, φ, κ).

Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι τιμές των αποκλίσεων (πραγματική τιμή - ονομαστική τιμή) κάθε συντεταγμένης καθενός από τα τρία σημεία, όπως επίσης και το τυπικό σφάλμα (σ_δ) των αποκλίσεων που προκύπτει από τον τύπο 4.5. Η προσαρμογή κρίθηκε επιτυχής καθώς οι διαφορές των τιμών των συντεταγμένων ήταν μικρότερες από την τιμή της επιτρεπόμενης απόκλισης (±0.127mm).

Σημείο	δX (mm)	δY (mm)	δZ (mm)
TH1	-0.001	0.000	-0.043
TH2	-0.023	0.000	0.008
TH3	0.024	0.000	0.035
	σ_δ	**±0.022**	

Πίνακας 4.4 Αποκλίσεις σημείων αναφοράς μετά τον μετασχηματισμό
Table 4.4 Deviations of reference points after the best-fit transformation

Στη συνέχεια μετρήθηκαν τα δώδεκα (12) σημεία ελέγχου του εργαλείου –τα οποία διακρίνονται και στο σχήμα 4.6 (σημεία "DET.xxx"). Σε κάθε σημείο τοποθετούνταν ο στόχος CCR 0.5 in. και καταγράφονταν οι συντεταγμένες X, Y, Z του κέντρου του. Να σημειωθεί πως οι ονομαστικές τιμές των σημείων αναφοράς και ελέγχου που δίνονται από τον κατασκευαστή, δεν αναφέρονται σε σημείο στην επιφάνεια του εργαλείου, αλλά στο κέντρο στόχου CCR 0.5 in. που έχει τοποθετηθεί στο συγκεκριμένο σημείο. Εφόσον για κάποιο λόγο χρησιμοποιηθεί διαφορετικός στόχος θα πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις τόσο στις ονομαστικές τιμές όσο και στις μετρήσεις ώστε να αναφέρονται στο ίδιο σημείο.

γ. Επεξεργασία μετρήσεων

Για κάθε ένα από τα μετρημένα σημεία, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των συντεταγμένων του και σύγκριση με τις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές. Σύμφωνα με τις οδηγίες του ελέγχου, αν η διαφορά των τιμών είναι μικρότερη της ανοχής τότε το σημείο είναι αποδεκτό, αν η διαφορά είναι από ίση ως και διπλάσια της ανοχής τότε γίνεται οριακά δεκτό, ενώ αν η διαφορά υπερβαίνει το διπλάσιο της ανοχής τότε απορρίπτεται. Επιλέγοντας τις δυο ομάδες τιμών στο λογισμικό και με την προϋπόθεση ότι τα αντίστοιχα σημεία έχουν την ίδια ονομασία, το Axyz μπορεί να συγκρίνει τις δυο τιμές σε κάθε σημείο, να υπολογίσει την διαφορά τους και σύμφωνα με την ανοχή που έχει οριστεί να επιδείξει ποια σημεία υπερβαίνουν τα όρια των αποκλίσεων και ποια όχι.

Στον πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα 12 σημεία ελέγχου, οι μετρημένες τιμές των συντεταγμένων τους στο σύστημα αναφοράς του αεροπλάνου, οι αντίστοιχες ονομαστικές τιμές τους, η απόκλιση των δυο τιμών και η επιτρεπόμενη απόκλιση σε κάθε σημείο. Για κάθε σημείο, δίνεται μόνο η τιμή της συντεταγμένης που ζητήθηκε να ελεγχθεί και όχι οι άλλες δυο που δεν αποτελούν αντικείμενο ελέγχου.

Σημείο	Πραγματική τιμή X (mm)	Ονομαστική τιμή X (mm)	Απόκλιση (mm)	Επιτρεπόμενη απόκλιση (mm)
DET.128	6250.879	6251.575	-0.696	±0.762
DET.115_AFT	6296.505	6296.406	0.099	±0.254
DET.115_FWD	4775.020	4775.200	-0.180	±0.254

Σημείο	Πραγματική τιμή Y (mm)	Ονομαστική τιμή Y (mm)	Απόκλιση(mm)	Επιτρεπόμενη απόκλιση (mm)
DET.213	480.044	480.060	-0.016	±0.127
DET.220	480.083	480.060	0.023	±0.127
DET.225	479.971	480.060	-0.089	±0.254
DET.228	480.094	480.060	0.034	±0.254
DET.232	480.216	480.060	0.156	±0.254
DET.234	480.154	480.060	0.094	±0.254
DET.235	480.308	480.060	0.248	±0.254
DET.117_AFT	480.137	480.060	0.077	±0.254
DET.117_FWD	479.950	480.060	-0.110	±0.254

Πίνακας 4.5 Αποκλίσεις πραγματικών και ονομαστικών συντεταγμένων σημείων ελέγχου
Table 4.5 Deviations between actual and nominal coordinates of control points

Παρατηρείται ότι όλες οι τιμές βρίσκονται εντός των ανοχών συνεπώς ο έλεγχος είναι επιτυχής και το εργαλείο κρίνεται λειτουργικό χωρίς να απαιτείται κάποια επιδιόρθωση.

5 ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ C130J

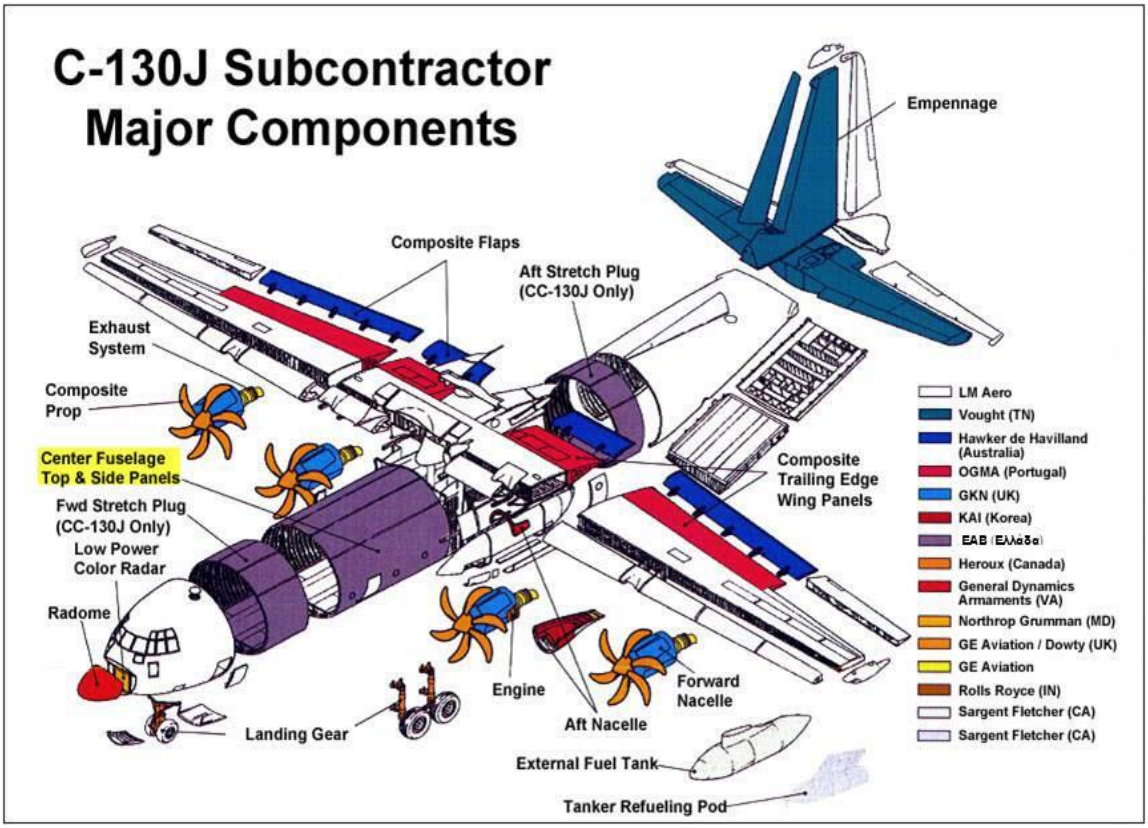
Η πρώτη εφαρμογή αποτελεί έναν περιοδικό έλεγχο σε ένα εργαλείο που χρησιμεύει στην κατασκευή πλευρικού τμήματος της ατράκτου μεταγωγικού αεροσκάφους τύπου C130J. Η εφαρμογή αυτή εκτελέστηκε στους χώρους της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας στα πλαίσια του ετήσιου υποχρεωτικού ελέγχου του εργαλείου. Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση οργάνου laser tracker και ειδικότερα με τον εξοπλισμό που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.1. Η εφαρμογή παρουσιάζεται αναλυτικά στα επόμενα υποκεφάλαια, όπου αρχικά γίνεται μια περιγραφή της εφαρμογής και του αντικειμένου μέτρησης, κατόπιν περιγράφονται και παρουσιάζονται οι μετρητικές διαδικασίες κατά τον αρχικό έλεγχο και τέλος οι διαδικασίες του τελικού ελέγχου.

5.1 Περιγραφή Εφαρμογής

5.1.1 Περιγραφή Αντικειμένου Μέτρησης

Η εφαρμογή αφορά τον περιοδικό έλεγχο ενός εργαλείου για την κατασκευή πλευρικού τμήματος αεροσκάφους τύπου C130J. Το υπ'όψιν αεροσκάφος είναι ένα μεταγωγικό αεροσκάφος και αποτελεί κύριο τακτικό αερομεταγωγικό πολλών αεροποριών σε όλο τον κόσμο. Η παραγωγή του δεν συντελείται αποκλειστικά σε μια αεροβιομηχανία, αλλά είναι αποτέλεσμα σύμπραξης βιομηχανιών από διάφορες χώρες (Η.Π.Α, Ηνωμένο Βασίλειο, Καναδάς, Αυστραλία, Κορέα, Πορτογαλία, Ελλάδα κ.α.). Κάθε μία από αυτές τις χώρες αναλαμβάνει την παραγωγή διαφορετικών τμημάτων του κελύφους του αεροσκάφους, τα οποία κατόπιν στέλνονται στις Η.Π.Α όπου και συναρμολογούνται. Κάθε τμήμα του αεροσκάφους κατασκευάζεται πάνω σε ειδικά εργαλεία (καλούπια – jigs) ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια και η ορθότητα της κατασκευής του (βλ. Κεφ. 2.1). Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το διεθνές πρόγραμμα παραγωγής C130J και τα τμήματα του αεροσκάφους που κατασκευάζει κάθε βιομηχανία.

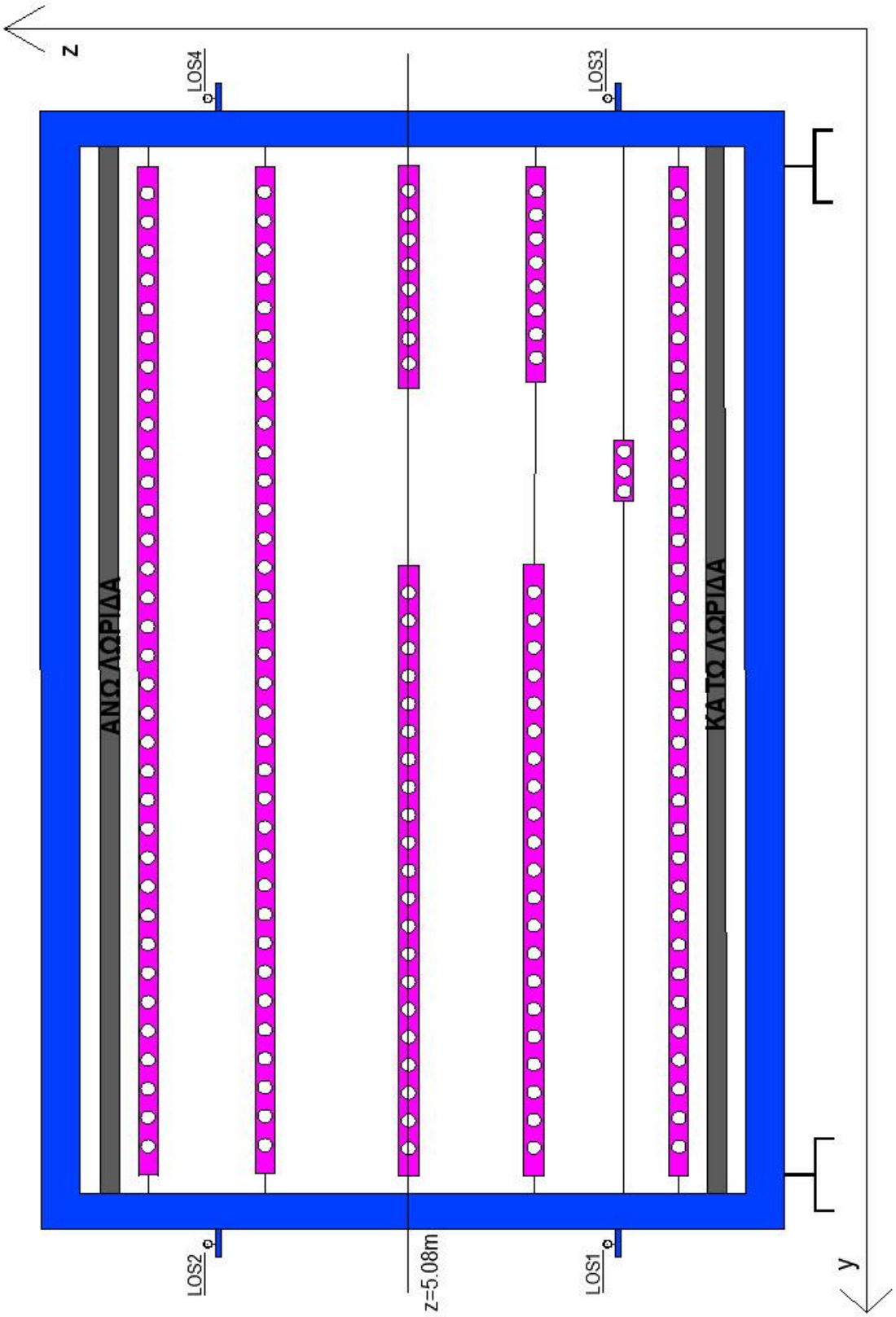
Στη παρούσα εφαρμογή ελέγχεται το εργαλείο που είναι υπεύθυνο για την κατασκευή τμήματος της δεξιάς πλευράς του αεροσκάφους μπροστά από την περιοχή των πτερυγίων (το υπ'όψιν τμήμα είναι υπογραμμισμένο στο σχήμα 5.1 – Center Fuselage Top & Side Panels).



Σχήμα 5.1 Πρόγραμμα διεθνούς παραγωγής C130J
Figure 5.1 The international manufacturing program of C130J

Το εργαλείο αποτελεί μια μεταλλική κατασκευή, διαστάσεων περίπου 1m x 7m x 3m που περιβάλλεται από μεταλλικό πλαίσιο. Σε κατάλληλες θέσεις πάνω σε αυτό υπάρχουν οι υποδοχές για τα ελάσματα και τα συναφή εξαρτήματα που συγκροτούν το υπόψη τμήμα του αεροσκάφους. Ακόμα, στο εργαλείο υπάρχουν δυο μεταλλικές λωρίδες, μια στο άνω μέρος και μια στο κάτω, που ορίζουν που θα κοπεί το έλασμα που θα τοποθετηθεί πάνω σε αυτό. Στο πλαίσιο του εργαλείου, υπάρχουν τέσσερις σταθερές βάσεις, όπου τοποθετούνται στόχοι, υλοποιώντας έτσι τέσσερα σημεία αναφοράς.

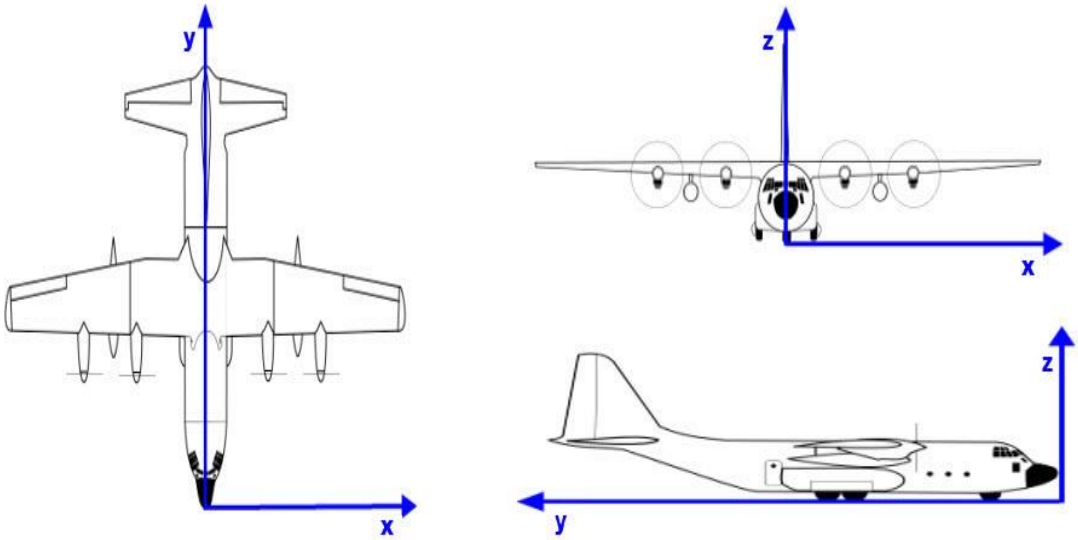
Φωτογραφία του εργαλείου δεν παρατίθεται καθώς εμπίπτει σε θέματα απορρήτου, αλλά παρουσιάζεται σκαρίφημα της όψης του (σχήμα 5.2), όπως φαινόταν από το σημείο όπου τοποθετήθηκε το laser tracker για την εκτέλεση των μετρήσεων. Σε αυτό διακρίνεται με μπλε χρώμα το πλαίσιο, με γκρι οι δυο μεταλλικές λωρίδες κοπής, ενώ οι κύκλοι στις ροζ λωρίδες συμβολίζουν τα σημεία τοποθέτησης των εξαρτημάτων. Τέλος, αριστερά και δεξιά του πλαισίου διακρίνονται οι βάσεις και οι θέσεις των τεσσάρων σημείων αναφοράς (LOS1, LOS2, LOS3, LOS4).



Σχήμα 5.2 Σκαρίφημα εργαλείου για κατασκευή πλευρικού τμήματος της ατράκτου αεροσκάφους C130 J

Figure 5.2 Sketch of the jig used in the construction of a side part of the fuselage of aircraft C130J

Το εργαλείο έχει συγκεκριμένο προσανατολισμό στον χώρο που ορίζεται από ένα τριδιάστατο ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Για πρακτικούς λόγους, το σύστημα αναφοράς του εργαλείου ταυτίζεται με αυτό του αεροσκάφους. Στο σχήμα 5.3, διακρίνονται τρία διδιάστατα σκαριφήματα του αεροσκάφους C130J. Σε καθένα από αυτά τα σκαριφήματα έχουν σχεδιαστεί οι άξονες του συστήματος συντεταγμένων του αεροσκάφους.



Σχήμα 5.3 Σύστημα αξόνων xyz του αεροσκάφους C130J [Wikipedia]
Figure 5.3 Axis system xyz of aircraft C130J [Wikipedia]

Το σύστημα αναφοράς του εργαλείου μελέτης προκύπτει από μετάθεση του συστήματος αναφοράς του αεροσκάφους. Έτσι, στο εργαλείο, ο άξονας z΄z αυξάνεται από το κάτω μέρος του εργαλείου προς τα πάνω, ο άξονας y΄y προς τα αριστερά, δηλαδή τα σημεία LOS4 και LOS3 είναι πιο κοντά στο μπροστινό μέρος του αεροσκάφους από τα LOS1 και LOS2 και ο άξονας x΄x(που δεν διακρίνεται στο σκαρίφημα) αυξάνεται προς τα πίσω, με τα σημεία του εργαλείου να έχουν όλα αρνητικές τιμές αφού βρίσκονται στην δεξιά πλευρά της ατράκτου.

5.1.2 Περιγραφή Διαδικασίας Ελέγχου

Στόχος του ελέγχου είναι η γεωμετρική τεκμηρίωση του εργαλείου και πιο συγκεκριμένα, ο έλεγχος της θέσης ορισμένων χαρακτηριστικών στοιχείων του. Η τεκμηρίωση της γεωμετρίας του εργαλείου διασφαλίζει ότι τα παραγόμενα πλευρικά τμήματα του αεροσκάφους είναι γεωμετρικά άρτια και κατά συνέπεια το υπόψη εργαλείο υπόκειται σε περιοδικό έλεγχο. Σε περίπτωση που εντοπιστεί κάποια απόκλιση στα στοιχεία του

εργαλείου, στόχος της διαδικασίας είναι ακόμα να κατευθύνει τις εργασίες επιδιόρθωσης και κατόπιν να επανελεγχθεί το εργαλείο προκειμένου να διαπιστωθεί η επιτυχία αυτών. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του περιοδικού ελέγχου, στο εργαλείο, πρέπει να ελεγχθούν τρεις ομάδες στοιχείων:

1. Τα 27 σημεία τοποθέτησης εξαρτημάτων που βρίσκονται στο μέσον του εργαλείου και τα οποία οφείλουν να έχουν τιμή z = 5.0800m (στο σύστημα αναφοράς του αεροσκάφους). Η επιτρεπόμενη απόκλιση της τιμής z των σημείων αυτών από την ονομαστική τιμή είναι $\delta_z = \pm 0.3810$mm. Τα σημεία αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά κατά την συναρμολόγηση του συγκεκριμένου τμήματος του αεροσκάφους, καθώς σε αυτά προσαρμόζεται βασικό δομικό στοιχείο της ατράκτου.
2. Οι δυο μεταλλικές λωρίδες κοπής, η μια στο άνω και η άλλη στο κάτω μέρος του εργαλείου. Το επίπεδο που σχηματίζουν οφείλει να ταυτίζεται με το ονομαστικό με μέγιστη απόκλιση $\delta_d = \pm 0.3810$mm. Το έλασμα που τοποθετείται πάνω στο εργαλείο έχει μεγαλύτερο μέγεθος από ότι απαιτείται. Οι υπ'όψιν λωρίδες καθορίζουν τα επίπεδα κοπής του ελάσματος, ώστε αυτό να έχει τις σωστές διαστάσεις. Σε αντίθετη περίπτωση, το τμήμα που παράγεται ενδέχεται να δημιουργήσει πρόβλημα στην συναρμολόγηση του με άλλα τμήματα του αεροσκάφους.
3. Όλα τα σημεία τοποθέτησης εξαρτημάτων του εργαλείου οφείλουν να ανήκουν σε επιφάνεια ιδεατού κυλίνδρου με απόκλιση $\delta_c = \pm 0.3810$mm. Το σχήμα του πλευρικού τμήματος του αεροσκάφους είναι κυλινδρικό, συνεπώς καθένα από τα σημεία του εργαλείου, ως καλούπι του κελύφους, οφείλει να ικανοποιεί αυτή τη συνθήκη.

Οι επιτρεπόμενες αποκλίσεις και ο αναλυτικός τρόπος των διαδικασιών ελέγχου υπαγορεύονται από τον κατασκευαστή του εργαλείου και τις αντίστοιχες οδηγίες.

Πριν τη εκτέλεση των διαδικασιών ελέγχου, πραγματοποιήθηκε μετασχηματισμός του συστήματος αναφοράς από το τυχαίο σύστημα του laser tracker σε αυτό του εργαλείου μέσω μετρήσεων στα σημεία αναφοράς. Προκειμένου να γίνει αποδεκτός ο μετασχηματισμός, σύμφωνα με τις προδιαγραφές ακρίβειας του εργαλείου, η μετατροπή των συντεταγμένων πρέπει να γίνει με ακρίβεια καλύτερη από ±0.1270mm.

Όσον αφορά στην ακρίβεια προσδιορισμού συντεταγμένων που μπορεί να επιτευχθεί με το παρόν σύστημα laser tracker, αυτή μπορεί να υπολογισθεί εφαρμόζοντας νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στους τύπους των πολικών συντεταγμένων (τύποι 2.1, 2.2, 2.3) ως εξής:

$$\sigma_x = \pm\sqrt{\sin\alpha^2\sigma_D^2 + (D * \cos a)^2\sigma_a^2} \quad (5.1)$$

$$\sigma_y = \pm\sqrt{\cos\alpha^2\sigma_D^2 + (D * (-\sin\alpha))^2\sigma_a^2} \quad (5.2)$$

$$\sigma_z = \pm\sqrt{\cos\beta^2\sigma_S^2 + (S * (-\sin\beta))^2\sigma_\beta^2} \quad (5.3)$$

Για πρακτικούς λόγους, δεν είναι δυνατό να παρουσιαστεί ο πλήρης πίνακας με τις αβεβαιότητες των τιμών των συντεταγμένων για όλα τα σημεία που μετρήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εφαρμογής. Αντί αυτού, υπολογίζεται η μέγιστη αβεβαιότητα με την οποία μπορεί να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των σημείων, για τυχαίες τιμές γωνιών α=β=45°.

Η αβεβαιότητα προσδιορισμού των γωνιών α και β είναι $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 6^{cc}$. Οι αποστάσεις μέτρησης είναι το πολύ S_{max} = 4m. Η αβεβαιότητα προσδιορισμού του κεκλιμένου μήκους είναι: $\sigma_S = \pm 10\mu m \pm 0.5\mu m/m$, άρα $\sigma_{Smax} = \pm$ 0.010mm. Εφαρμόζοντας νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στον τύπο 2.4 προκύπτει πως το σφάλμα της οριζόντιας απόστασης είναι:

$$\sigma_D = \pm\sqrt{\sin\beta^2\sigma_S^2 + (S * \cos\beta)^2\sigma_\beta^2} \quad (5.4)$$

Συνεπώς η μέγιστη αβεβαιότητα προσδιορισμού οριζόντιου μήκους είναι:

$\sigma_{Dmax} = \pm$ 0.029mm

Από τους τύπους 5.1, 5.2, 5.3, προκύπτει πως το μέγιστο σφάλμα προσδιορισμού των συντεταγμένων για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4% είναι:

$\sigma_{x/max}$ = ± 0.024mm

$\sigma_{y/max}$ = ± 0.024mm

$\sigma_{z/max}$ = ± 0.016mm

Το μέτρο του συνολικού σφάλματος προσδιορισμού είναι:

$$\sigma_{total} = \pm \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (5.5)$$

, από όπου προκύπτει πως: $\boldsymbol{\sigma_{total} = \pm 0.037mm}$

Στις μετρήσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια, τα διάφορα μεγέθη δίνονται σε m ή mm. Σε αρκετές περιπτώσεις αναγράφεται εντός παρενθέσεως η αντίστοιχη τιμή σε in. Αυτό γίνεται γιατί το εργαλείο που ελέγχεται είναι κατασκευασμένο σύμφωνα με το αγγλικό μετρητικό σύστημα και στο οποίο έγιναν όλες οι μετρήσεις.

5.2 Αρχικός Έλεγχος

Ο αρχικός έλεγχος περιλαμβάνει τις εξής εργασίες: μεταφορά στο σύστημα αναφοράς του αεροσκάφους, έλεγχος σημείων ως προς τη συνιστώσα z, έλεγχος δυο επιπέδων και τέλος έλεγχος προσαρμογής σημείων σε επιφάνεια κυλίνδρου.

5.2.1 Μετασχηματισμός Συστήματος Αναφοράς

Πριν τη διενέργεια των διαδικασιών ελέγχου το όργανο τοποθετήθηκε σε τυχαία θέση κάθετα στον άξονα y του εργαλείου και σε απόσταση της τάξης των 4m από αυτό. Το laser tracker τοποθετήθηκε σε υπερυψωμένη βάση ώστε να εξασφαλίζεται η ορατότητα προς όλα τα σημεία ενδιαφέροντος, ενώ δεν πραγματοποιήθηκε οριζοντίωση του οργάνου. Στη συνέχεια και αφού το όργανο συνδέθηκε με Η/Υ έγινε στο λογισμικό Axyz εισαγωγή του αρχείου με τις ονομαστικές τιμές των συντεταγμένων των σημείων αναφοράς και ελέγχου του εργαλείου.

Πρώτο βήμα της διαδικασίας ήταν η μεταφορά από το σύστημα αναφοράς του laser tracker στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου. Η μεταφορά αυτή έγινε μέσω των τεσσάρων (4) σημείων αναφοράς LOS1, LOS2, LOS3, LOS4 (βλ. σχήμα 5.2), που είναι εγκατεστημένα στο πλαίσιο του εργαλείου, όπου είναι λιγότερο πιθανό να εμπλακούν σε κάποιο ατύχημα και να μετακινηθούν. Στα σημεία αυτά υπάρχουν εγκατεστημένες μόνιμες βάσεις όπου προσαρμόζεται στόχος CCR 0.5in. ώστε να εκτελούνται μετρήσεις, ενώ βρίσκονται διατεταγμένα ομοιόμορφα γύρω από το εργαλείο.

Για τα σημεία αυτά είναι γνωστές οι συντεταγμένες τους στο σύστημα αναφοράς του αεροσκάφους από τα σχέδια του εργαλείου. Μετρώντας αυτά τα σημεία με το laser tracker υπολογίζονται αυτόματα οι συντεταγμένες τους στο σύστημα αναφοράς του οργάνου. Από τις ομόλογες τιμές των συντεταγμένων είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι παράμετροι του

μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ των δυο συστημάτων, δηλαδή οι τρεις μεταθέσεις των αξόνων (ΔX, ΔY, ΔZ) και οι τρεις στροφές (ω, φ, κ). Με γνωστές τις παραμέτρους, για κάθε σημείο που θα μετριέται, μέσω του συστήματος εξισώσεων του μετασχηματισμού (βλ. εξ. 4.1), θα υπολογίζονται οι συντεταγμένες του στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου. Από την στιγμή που πρέπει να υπολογιστούν 6 παράμετροι (η κλίμακα δεν λαμβάνεται υπ'όψιν, θεωρείται μοναδιαία), τα ελάχιστα απαιτούμενα γνωστά στοιχεία είναι 6. Στην περίπτωση μας, είναι γνωστά 4 σημεία, άρα οι παρατηρήσεις είναι 4 σημεία x 3 συντεταγμένες = 12 παρατηρήσεις. Συνεπώς ο μετασχηματισμός όχι μόνο επιλύεται, αλλά λόγω της περίσσειας των παρατηρήσεων (βαθμός ελευθερίας r = 6) είναι δυνατόν να υπολογιστούν και οι αβεβαιότητες προσδιορισμού των παραμέτρων. Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι μεταθέσεις και οι στροφές των αξόνων του νέου συστήματος ως προς αυτό του οργάνου μαζί με τα σφάλματα τους (σ) για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4% .

Παράμετρος	**Τιμή (m, deg)**	**σ (m, deg)***
ΔX	-9.936481	0.000252
ΔY	-2.120018	0.000599
ΔZ	-5.345944	0.000034
ω	359.5622	0.0058
φ	0.4801	0.0025
κ	251.2926	0.0018

*για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%

Πίνακας 5.1 Παράμετροι μετασχηματισμού ομοιότητας
Table 5.1 Parameters of best-fit transformation

Μετά τον υπολογισμό των παραμέτρων, οι τιμές των συντεταγμένων των σημείων αναφοράς στο σύστημα του laser tracker, μετασχηματίζονται στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου και οι τιμές που προκύπτουν συγκρίνονται με τις ονομαστικές. Προκειμένου να γίνει αποδεκτός ο μετασχηματισμός ομοιότητας, σύμφωνα με τις προδιαγραφές για τον έλεγχο του συγκεκριμένου εργαλείου θα πρέπει οι ομόλογες συντεταγμένες να μην διαφέρουν περισσότερο από ±0.127mm (±0.005in.). Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι τιμές των αποκλίσεων (πραγματική τιμή - ονομαστική τιμή) κάθε σημείου. Σκιασμένες είναι οι τιμές των διαφορών που υπερβαίνουν την επιτρεπόμενη τιμή. Ακόμα υπολογίστηκε το τυπικό σφάλμα (σ) των αποκλίσεων που προκύπτει ως εξής:

$$\sigma_\delta = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(\delta_i)^2}{N}} \qquad (5.6)$$

όπου, $\sum_{i=1}^{N}(\delta_i)^2$ το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων και N το πλήθος των παρατηρήσεων (12).

Σημείο	δX (mm)	δY (mm)	δZ (mm)
LOS1	-0.124	-0.229	-0.019
LOS2	0.124	-0.228	0.039
LOS3	0.124	0.160	-0.043
LOS4	-0.124	0.298	0.023
	σ_δ	**±0.154mm**	

Πίνακας 5.2 Αποκλίσεις σημείων αναφοράς μετά τον μετασχηματισμό
Table 5.2 Deviations of reference points after the best-fit transformation

Η προσαρμογή κρίθηκε εν μέρει επιτυχής καθώς κατά x και κατά z οι αποκλίσεις των μετασχηματισμένων τιμών ήταν εντός των επιτρεπόμενων ορίων, αλλά κατά y οι διαφορές έφτασαν τα +0.298mm. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά πάσα περίπτωση στην θέση του οργάνου ως προς το εργαλείο. Στις μετρήσεις με laser tracker επιδιώκεται το αντικείμενο μέτρησης να είναι σχεδόν συνευθειακό με το όργανο, καθώς έτσι η τελική ακρίβεια εξαρτάται λιγότερο από την ακρίβεια μέτρησης των γωνιών και περισσότερο από αυτή των μηκών (όπου υπερτερεί το laser tracker). Στην συγκεκριμένη περίπτωση το όργανο τοποθετήθηκε απέναντι από το εργαλείο με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται μειωμένες ακρίβειες στον άξονα y. Επειδή όμως το τυπικό σφάλμα των αποκλίσεων (±0.154mm) δεν υπερβαίνει κατά πολύ το καθορισμένο όριο (±0.127mm), τελικώς η προσαρμογή έγινε δεκτή. Τα δεδομένα του νέου συστήματος που δημιουργήθηκε αποθηκεύτηκαν στο λογισμικό και όλες οι μετρήσεις του αρχικού ελέγχου αναφέρονται σε αυτό.

Σημειώνεται ότι οι ονομαστικές τιμές των συντεταγμένων του κάθε σημείου δεν αναφέρονται στο σημείο αυτό καθεαυτό, αλλά στο κέντρο στόχου CCR 0.5in. που είναι τοποθετημένος σε αυτά. Συνεπώς, εφόσον χρησιμοποιείται ο στόχος που ορίζεται από τις οδηγίες δεν χρειάζεται η εφαρμογή κάποιας μετατόπισης ώστε οι μετρήσεις να αναφέρονται στο επιθυμητό σημείο.

5.2.2 Έλεγχος Σημείων Ως Προς Συνιστώσα Z

Ο πρώτος έλεγχος που πραγματοποιήθηκε αφορούσε ορισμένα από τα σημεία τοποθέτησης εξαρτημάτων που βρίσκονται στο μέσον του εργαλείου (σημεία WL1 - W27). Σύμφωνα με τα σχέδια του εργαλείου, τα σημεία αυτά πρέπει να εμφανίζουν τιμή στη συντεταγμένη **z = 5.0800m (z = 200in.)**. Η επιτρεπόμενη απόκλιση από την ονομαστική τιμή είναι $\boldsymbol{\delta_z = \pm 0.3810}$**mm**.

Για τις μετρήσεις των σημείων αυτών χρησιμοποιήθηκε στόχος CCR 0.5in. σε συνδυασμό με ειδικές βάσεις για την προσαρμογή του στόχου στα σημεία ενδιαφέροντος. Με αυτόν τον τρόπο μετρήθηκαν τα 27 σημεία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον

πίνακα 5.3, όπου παρουσιάζονται κατά σειρά: η ονομασία του σημείου, η μετρημένη τιμή z και η απόκλιση της από την ονομαστική τιμή. Η απόκλιση υπολογίζεται ως η διαφορά της ονομαστικής τιμής από την μετρημένη. Σκιασμένα εμφανίζονται τα σημεία στα οποία η απόκλιση υπερέβη την επιτρεπόμενη τιμή.

Σημείο	**Μετρημένη Τιμή z (m)**	**Απόκλιση δz (mm)**	**Σημείο**	**Μετρημένη Τιμή z (m)**	**Απόκλιση δz (mm)**
WL1	5.0798	0.2000	WL15	5.0798	0.2000
WL2	5.0796	0.4000	WL16	5.0800	0.0000
WL3	5.0797	0.3000	WL17	5.0796	0.4000
WL4	5.0796	0.4000	WL18	5.0799	0.1000
WL5	5.0797	0.3000	WL19	5.0798	0.2000
WL6	5.0795	0.5000	WL20	5.0795	0.5000
WL7	5.0792	0.8000	WL21	5.0796	0.4000
WL8	5.0795	0.5000	WL22	5.0791	0.9000
WL9	5.0796	0.4000	WL23	5.0793	0.7000
WL10	5.0799	0.1000	WL24	5.0788	1.2000
WL11	5.0799	0.1000	WL25	5.0792	0.8000
WL12	5.0799	0.1000	WL26	5.0790	1.0000
WL13	5.0801	-0.1000	WL27	5.0789	1.1000
WL14	5.0801	-0.1000			
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Επιτρεπόμενη απόκλιση **δz = ±0.3810mm**					

Πίνακας 5.3 Έλεγχος αποκλίσεων σημείων WL
Table 5.3 Check of the deviations of WL points

Από τα στοιχεία του πίνακα 5.3 διαπιστώνεται ότι υπάρχουν αποκλίσεις μεγαλύτερες από τα επιτρεπόμενα σε 15 από τα 27 σημεία που ελέγχθηκαν. Το σημαντικότερο πρόβλημα εντοπίζεται από το σημείο WL20 και μετά, όπου όλα τα σημεία βρίσκονται εκτός των ανοχών. Εμφανίζουν μάλιστα τις μεγαλύτερες αποκλίσεις που φτάνουν ακόμα και το +1.2mm (σημείο WL24) έναντι του επιτρεπόμενου +0.381mm. Ως εκ τούτου, δόθηκε εντολή να επιδιορθωθούν τα προβληματικά σημεία (με μη μετρητικές διαδικασίες που δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας) και στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί επανέλεγχος.

5.2.3 Έλεγχος Επιπέδων Μεταλλικών Λωρίδων

Ο επόμενος έλεγχος αφορά τις δυο μεταλλικές λωρίδες σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου, που βρίσκονται η μια στο άνω και η άλλη στο κάτω μέρος του εργαλείου. Τα ελάσματα που τοποθετούνται πάνω στο εργαλείο κατασκευάζονται σε μεγέθη μεγαλύτερα από τα απαιτούμενα. Έτσι, κατά την τοποθέτηση τους στο εργαλείο πρέπει να αφαιρεθεί μέρος τους, ώστε να αποκτήσουν την σωστή διάσταση. Σε αντίθετη

περίπτωση, το παράγωγο ενδέχεται να δημιουργήσει πρόβλημα κατά την συναρμολόγηση του με άλλα τμήματα του αεροσκάφους. Οι δυο μεταλλικές λωρίδες του εργαλείου ορίζουν τα επίπεδα κοπής του ελάσματος, συνεπώς η θέση τους πρέπει να είναι ιδιαίτερα ακριβής. Ειδικότερα, το κάτω επίπεδο κοπής ταυτίζεται με το όριο της κάτω λωρίδας και το άνω επίπεδο κοπής βρίσκεται +3.175mm (+0.125in.) ψηλότερα από το όριο της άνω λωρίδας. Στόχος του ελέγχου είναι να ελεγχθεί αν τα επίπεδα που σχηματίζουν οι δυο λωρίδες ταυτίζονται με τα αντίστοιχα ονομαστικά επίπεδα με μέγιστη απόκλιση δ_d = ±0.3810mm. Η διαδικασία ελέγχου των δυο λωρίδων είναι η εξής:

- Ορισμός του ονομαστικού επιπέδου κάθε μεταλλικής λωρίδας στο λογισμικό
- Μέτρηση επισημασμένων σημείων πάνω στις λωρίδες με το laser tracker
- Υπολογισμός των τριδιάστατων συντεταγμένων των σημείων στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου
- Υπολογισμός της απόστασης των σημείων από το αντίστοιχο ονομαστικό επίπεδο κάθε λωρίδας
- Έλεγχος αν η απόσταση κάθε σημείου υπερβαίνει ή όχι την τιμή της επιτρεπόμενης απόκλισης

Για τον ορισμό ενός επιπέδου απαιτούνται τουλάχιστον τρία (3) σημεία. Σε άλλες εφαρμογές, χρησιμοποιούνται τέσσερα ή περισσότερα σημεία για τον ορισμό ενός επιπέδου, ώστε να υπάρχει δυνατότητα ελέγχου. Στη δεδομένη περίπτωση όμως, το επίπεδο θεωρείται γνωστό χωρίς σφάλμα (ονομαστικό επίπεδο) οπότε τρία σημεία αρκούν. Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό του επιπέδου της κάτω λωρίδας διακρίνονται στον πίνακα 5.4 και αυτά για τον ορισμό της άνω λωρίδας στον πίνακα 5.5.

Σημείο	X(m)	Y(m)	Z(m)
LOWER_EOP_PL_1	-1.6167	6.2229	3.5548
LOWER_EOP_PL_2	-1.5243	6.2229	3.6420
LOWER_EOP_PL_3	-1.6166	11.4299	3.5547

Πίνακας 5.4 Συντεταγμένες σημείων για τον ορισμό του επιπέδου της κάτω λωρίδας
Table 5.4 Coordinates of points to define the plane of the lower bar

Σημείο	X(m)	Y(m)	Z(m)
UPPER_PLANE_1	-1.6194	6.2230	6.6022
UPPER_PLANE_2	-1.5268	6.2230	6.5152
UPPER_PLANE_3	-1.6194	11.4300	6.6022

Πίνακας 5.5 Συντεταγμένες σημείων για τον ορισμό του επιπέδου της άνω λωρίδας
Table 5.5 Coordinates of points to define the plane of the upper bar

Για τον έλεγχο κάθε λωρίδας μετρήθηκαν 34 επισημασμένα σημεία, ομοιόμορφα κατανεμημένα πάνω σε αυτές. Σε όλα τα σημεία χρησιμοποιήθηκε στόχος CCR 0.5in., ενώ όπου χρειάστηκε χρησιμοποιήθηκε και ράβδος κρυφού σημείου συνολικού μήκους 29.2mm (11.5in.). Μετά τον προσδιορισμό των τριδιάστατων συντεταγμένων κάθε σημείου στο σύστημα αναφοράς του αεροσκάφους, υπολογίστηκε η κάθετη απόσταση καθενός από αυτά από το επίπεδο της λωρίδας. Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις δ_d των μετρημένων σημείων από το επίπεδο της κάτω λωρίδας. Σκιασμένα είναι τα σημεία των οποίων η απόκλιση υπερέβη το επιτρεπόμενο όριο ($\delta_d = \pm 0.3810$mm).

Σημείο	**Απόκλιση δd (mm)**	**Σημείο**	**Απόκλιση δd (mm)**
LOWER_PLANE_FS1	-2.6727	LOWER_PLANE_FS18	-2.7164
LOWER_PLANE_FS2	-2.7283	LOWER_PLANE_FS19	-2.6708
LOWER_PLANE_FS3	-2.7932	LOWER_PLANE_FS20	-2.6051
LOWER_PLANE_FS4	-2.7998	LOWER_PLANE_FS21	-2.5092
LOWER_PLANE_FS5	-2.7179	LOWER_PLANE_FS22	-2.5128
LOWER_PLANE_FS6	-2.6679	LOWER_PLANE_FS23	-2.6024
LOWER_PLANE_FS7	-2.6509	LOWER_PLANE_FS24	-2.6791
LOWER_PLANE_FS8	-2.6333	LOWER_PLANE_FS25	-2.7772
LOWER_PLANE_FS9	-2.5876	LOWER_PLANE_FS26	-2.8167
LOWER_PLANE_FS10	-2.6452	LOWER_PLANE_FS27	-2.9040
LOWER_PLANE_FS11	-2.6545	LOWER_PLANE_FS28	-2.8670
LOWER_PLANE_FS12	-2.6480	LOWER_PLANE_FS29	-2.7484
LOWER_PLANE_FS13	-2.6515	LOWER_PLANE_FS30	-2.6718
LOWER_PLANE_FS14	-2.7160	LOWER_PLANE_FS31	-2.5321
LOWER_PLANE_FS15	-2.7115	LOWER_PLANE_FS32	-2.4472
LOWER_PLANE_FS16	-2.7432	LOWER_PLANE_FS33	-2.3592
LOWER_PLANE_FS17	-2.7296	LOWER_PLANE_FS34	-2.3551
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Επιτρεπόμενη απόκλιση **δd = ±0.3810mm**			

Πίνακας 5.6 Αποκλίσεις σημείων ελέγχου κάτω λωρίδας κατά τον αρχικό έλεγχο
Table 5.6 Deviations of lower`s bar control points during initial check

Σύμφωνα με τον πίνακα 5.6 οι αποκλίσεις όλων των σημείων ελέγχου της κάτω λωρίδας ήταν μεγαλύτερες από την επιτρεπόμενη, φτάνοντας ακόμα και τα -2.9mm. Παρατηρείται ότι όλα τα σημεία εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, δηλαδή οι αποκλίσεις τους έχουν περίπου την ίδια τιμή και την ίδια φορά (το αρνητικό πρόσημο των αποκλίσεων υποδεικνύει ότι τα μετρημένα σημεία βρίσκονται χαμηλότερα από το ονομαστικό επίπεδο). Συμπεραίνεται ότι οι εμφανιζόμενες αποκλίσεις οφείλονται σε ενιαία μετατόπιση προς τα κάτω της μεταλλικής λωρίδας και ότι δεν οφείλονται σε τοπικές παραμορφώσεις. Βάσει των στοιχείων αυτών δόθηκε εντολή για επιδιόρθωση της κάτω λωρίδας και κατόπιν επανέλεγχος της.

Όσο αφορά στην άνω λωρίδα, πραγματοποιήθηκε η ίδια ακριβώς μετρητική διαδικασία, που περιελάμβανε τη μέτρηση 34 επισημασμένων σημείων και προσδιορισμό των συντεταγμένων τους. Ο υπολογισμός της απόκλισης των σημείων από το επίπεδο της λωρίδας διαφοροποιείται σε αυτή τη περίπτωση, καθώς τα σημεία του πίνακα 5.5 δεν ορίζουν το ονομαστικό επίπεδο της λωρίδας, αλλά το επίπεδο κοπής των ελασμάτων. Τα δυο αυτά επίπεδα είναι παράλληλα μεταξύ τους και απέχουν 3.1750mm. Συνεπώς, υπολογίζεται αρχικά η κάθετη απόσταση κάθε σημείου από το επίπεδο κοπής και κατόπιν αφαιρείται η διαφορά των δυο επιπέδων για να προσδιοριστεί η απόκλιση των μετρημένων σημείων από το ονομαστικό επίπεδο της άνω λωρίδας. Στον πίνακα 5.7 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις δ_d των μετρημένων σημείων από το επίπεδο της άνω λωρίδας. Σκιασμένα είναι τα σημεία των οποίων η απόκλιση υπερέβη το επιτρεπόμενο όριο ($\delta_d = \pm 0.3810$mm).

Σημείο	**Απόκλιση δd (mm)**	**Σημείο**	**Απόκλιση δd (mm)**
UPPER_PLANE_FS1	24.3590	UPPER_PLANE_FS18	24.2324
UPPER_PLANE_FS2	24.4257	UPPER_PLANE_FS19	24.2099
UPPER_PLANE_FS3	24.4923	UPPER_PLANE_FS20	24.1003
UPPER_PLANE_FS4	24.7090	UPPER_PLANE_FS21	24.2189
UPPER_PLANE_FS5	24.5087	UPPER_PLANE_FS22	24.0659
UPPER_PLANE_FS6	24.6240	UPPER_PLANE_FS23	23.9362
UPPER_PLANE_FS7	24.7296	UPPER_PLANE_FS24	23.9528
UPPER_PLANE_FS8	24.7849	UPPER_PLANE_FS25	24.0503
UPPER_PLANE_FS9	24.8720	UPPER_PLANE_FS26	23.9430
UPPER_PLANE_FS10	24.8683	UPPER_PLANE_FS27	24.1201
UPPER_PLANE_FS11	24.8577	UPPER_PLANE_FS28	23.9728
UPPER_PLANE_FS12	24.8146	UPPER_PLANE_FS29	24.0429
UPPER_PLANE_FS13	24.8746	UPPER_PLANE_FS30	23.9272
UPPER_PLANE_FS14	24.8861	UPPER_PLANE_FS31	24.0096
UPPER_PLANE_FS15	24.7798	UPPER_PLANE_FS32	24.0976
UPPER_PLANE_FS16	24.7161	UPPER_PLANE_FS33	24.1449
UPPER_PLANE_FS17	24.6360	UPPER_PLANE_FS34	24.1606
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Επιτρεπόμενη απόκλιση **δd = ±0.3810mm**			

Πίνακας 5.7 Αποκλίσεις σημείων ελέγχου άνω λωρίδας κατά τον αρχικό έλεγχο
Table 5.7 Deviations of upper`s bar control points during initial check

Σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 5.7, οι αποκλίσεις όλων των σημείων ελέγχου που μετρήθηκαν υπερέβησαν την επιτρεπόμενη τιμή $\delta_d = \pm 0.3810$mm, φτάνοντας ως και τα +24mm. Και σε αυτή τη λωρίδα, παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις είναι παρόμοιες, δηλαδή έχουν περίπου την ίδια τιμή και την ίδια φορά (το θετικό πρόσημο των αποκλίσεων υποδεικνύει ότι τα μετρημένα σημεία βρίσκονται ψηλότερα από το ονομαστικό επίπεδο).

Συνεπώς έχουμε μια ενιαία μετατόπιση της λωρίδας προς τα πάνω. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την μετακίνηση της κάτω λωρίδας έχει ως αποτέλεσμα το κομμάτι του ελάσματος να κόβεται μεγαλύτερο από όσο πρέπει, δημιουργώντας έτσι πιθανό πρόβλημα στην τελική συναρμολόγηση με τα υπόλοιπα τμήματα του αεροσκάφους. Και σε αυτήν την περίπτωση δόθηκε εντολή για επιδιόρθωση της λωρίδας και κατόπιν επανέλεγχος της.

5.2.4 Έλεγχος Προσαρμογής Σημείων σε Επιφάνεια Κυλίνδρου

Ο τελευταίος έλεγχος που πραγματοποιήθηκε στο εργαλείο αφορούσε το σύνολο των σημείων τοποθέτησης εξαρτημάτων. Τα σημεία αυτά βρίσκονται πάνω σε οριζόντιες λωρίδες κατά μήκος του άξονα y και χρησιμεύουν στην συναρμολόγηση διαφόρων εξαρτημάτων πάνω στο έλασμα που συγκροτεί το συγκεκριμένο τμήμα της ατράκτου. Το έλασμα που τοποθετείται πάνω στο εργαλείο, έχει κυλινδρικό σχήμα και αποτελεί την εξωτερική επιφάνεια του αεροσκάφους. Τα σημεία τοποθέτησης εξαρτημάτων, όπως και το εργαλείο στο σύνολο του, βρίσκονται στο εσωτερικό του ιδεατού κυλίνδρου που σχηματίζεται, και πιο συγκεκριμένα εφάπτονται της εσωτερικής επιφάνειας του ελάσματος. Η απόσταση καθενός σημείου από την επιφάνεια του ιδεατού κυλίνδρου εξαρτάται από το τοπικό πάχος του ελάσματος και δίνεται στα σχέδια του εργαλείου. Η διαδικασία ελέγχου της ορθής θέσης των σημείων τοποθέτησης εξαρτημάτων είναι η εξής:

- Ορισμός του ιδεατού κυλίνδρου στο λογισμικό
- Μέτρηση όλων των σημείων τοποθέτησης εξαρτημάτων με το laser tracker
- Υπολογισμός των τριδιάστατων συντεταγμένων των σημείων στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου
- Υπολογισμός της κάθετης απόστασης των σημείων από την επιφάνεια του κυλίνδρου
- Έλεγχος αν η απόσταση κάθε σημείου διαφέρει από την τιμή της ονομαστικής απόστασης περισσότερο από $\delta_c = \pm 0.3810$mm.

Για τον ορισμό ενός κυλίνδρου απατούνται τουλάχιστον 5 σημεία. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν 6 σημεία που αποτελούν χαρακτηριστικά μέρη της ατράκτου και υπεδείχθησαν από τα σχέδια του αεροσκάφους. Τα 6 σημεία που χρησιμοποιήθηκαν σχηματίζουν ανά 3 ένα κύκλο (η πρώτη τριάδα C1, C2, C3 τον πρώτο κύκλο, η δεύτερη τριάδα C4, C5, C6 τον δεύτερο κύκλο) σε διαφορετικό πλάτος του εργαλείου (διαφορετικό y), ορίζοντας με αυτόν τον τρόπο μονοσήμαντα τον ζητούμενο

κύλινδρο. Οι συντεταγμένες των σημείων αυτών όπως εισήχθησαν στο λογισμικό Axyz δίνονται στον πίνακα 5.8.

Σημείο	X(m)	Y(m)	Z(m)
C1	2.1590	6.2230	5.0800
C2	0.0000	6.2230	7.2390
C3	0.0000	6.2230	2.9210
C4	2.1590	12.1920	5.0800
C5	0.0000	12.1920	2.9210
C6	0.0000	12.1920	7.2390

Πίνακας 5.1 Συντεταγμένες σημείων για τον ορισμό κυλίνδρου
Table 5.8 Coordinates of point to define a cylinder

Μετρήθηκαν 161 σημεία τοποθέτησης εξαρτημάτων με τον στόχο CCR 0.5in. και ειδική γωνιακή βάση για την προσαρμογή του στόχου στο κατάλληλο σημείο που επέφερε συνολική μετατόπιση +25.4mm (1 inch). Για καθένα από τα μετρημένα σημεία, προσδιορίστηκαν οι τριδιάστατες συντεταγμένες του στο σύστημα αναφοράς του αεροσκάφους και κατόπιν υπολογίστηκε η κάθετη απόσταση τους από την επιφάνεια του κυλίνδρου. Από τις αποστάσεις αυτές αφαιρέθηκε η μετατόπιση λόγω της βάσης του στόχου (25.4mm) ώστε να βρεθεί η πραγματική απόσταση των σημείων από την επιφάνεια του κυλίνδρου. Κατόπιν πραγματοποιήθηκε σύγκριση της πραγματικής απόστασης με την αντίστοιχη ονομαστική και ελέγχθηκε η απόκλιση τους δ_c.

Στον πίνακα 5.9 παρουσιάζονται όλα τα σημεία τοποθέτησης εξαρτημάτων, η ονομαστική τιμή της απόστασης τους από την επιφάνεια του κυλίνδρου (από τα σχέδια), η προσδιορισμένη από τις μετρήσεις πραγματική τους απόσταση και η απόκλιση των δυο τιμών. Σκιασμένα είναι τα σημεία των οποίων η διαφορά πραγματικής και ονομαστικής απόστασης υπερέβη την επιτρεπόμενη τιμή (δ_c = ±0.3810mm).

Σημείο	**Ονομαστική απόσταση (mm)**	**Πραγματική απόσταση (mm)**	**Απόκλιση δc (mm)**	**Σημείο**	**Ονομαστική απόσταση (mm)**	**Πραγματική απόσταση (mm)**	**Απόκλιση δc (mm)**
ASSY601_1	-0.635	-1.3157	-0.6807	ASSY616_6	-1.6256	-1.3691	0.2565
ASSY601_2	-1.2954	-1.4656	-0.1702	ASSY616_7	-1.8288	-1.9787	-0.1499
ASSY601_3	-1.2954	-1.1379	0.1575	ASSY616_8	-1.6256	-1.6078	0.0178
ASSY601_4	-1.2954	-1.3589	-0.0635	ASSY616_9	-1.6256	-1.9304	-0.3048
ASSY601_5	-1.2954	-1.1024	0.1930	ASSY616_10	-3.0988	-3.1217	-0.0229
ASSY601_6	-3.4544	-3.2715	0.1829	ASSY616_11	-1.6256	-2.0295	-0.4039
ASSY601_7	-1.6256	-1.1913	0.4343	ASSY616_12	-1.6256	-2.0269	-0.4013

ASSY601_8	-1.6256	-1.5088	0.1168	ASSY616_13	-1.8288	-2.2504	-0.4216
ASSY601_9	-3.8354	-3.7973	0.0381	ASSY616_14	-1.6256	-1.6586	-0.0330
ASSY601_10	-1.8288	-1.8212	0.0076	ASSY616_15	-1.6256	-1.2548	0.3708
ASSY601_11	-1.8288	-1.7729	0.0559	ASSY616_16	-3.0988	-2.8854	0.2134
ASSY601_12	-1.8288	-1.6586	0.1702	ASSY616_17	-1.6256	-1.9710	-0.3454
ASSY601_13	-3.8354	-3.5230	0.3124	ASSY616_18	-1.6256	-1.9583	-0.3327
ASSY601_14	-1.6256	-1.1379	0.4877	ASSY616_19	-1.8288	-1.7856	0.0432
ASSY601_15	-1.6256	-1.1354	0.4902	ASSY616_20	-1.6256	-1.6891	-0.0635
ASSY601_16	-1.6256	-0.9474	0.6782	ASSY616_21	-1.6256	-1.7221	-0.0965
ASSY601_17	-3.4544	-2.8423	0.6121	ASSY_604_1	-0.635	-1.3132	-0.6782
ASSY601_18	-1.6256	-1.5240	0.1016	ASSY_604_2	-1.2954	-1.2065	0.0889
ASSY601_19	-1.6256	-0.9550	0.6706	ASSY_604_3	-1.2954	-1.2598	0.0356
ASSY601_20	-1.8288	-1.7221	0.1067	ASSY_604_4	-1.2954	-1.2675	0.0279
ASSY601_21	-1.6256	-1.2522	0.3734	ASSY_604_5	-1.2954	-1.3183	-0.0229
ASSY601_22	-1.6256	-1.0211	0.6045	ASSY_604_6	-3.4544	-3.3249	0.1295
ASSY601_23	-3.0988	-2.6695	0.4293	ASSY_604_7	-1.6256	-1.5570	0.0686
ASSY601_24	-1.6256	-1.4453	0.1803	ASSY_604_8	-1.6256	-2.0726	-0.4470
ASSY601_25	-1.6256	-1.3919	0.2337	ASSY_605_1	-0.635	-1.3335	-0.6985
ASSY601_26	-1.8288	-1.6789	0.1499	ASSY_605_2	-1.2954	-0.8814	0.4140
ASSY601_27	-1.6256	-1.2090	0.4166	ASSY_605_3	-1.2954	-1.5850	-0.2896
ASSY601_28	-1.6256	-1.0795	0.5461	ASSY_605_4	-1.2954	-1.6637	-0.3683
ASSY601_29	-3.0988	-2.5400	0.5588	ASSY_605_5	-1.2954	-1.6739	-0.3785
ASSY601_30	-1.6256	-1.5519	0.0737	ASSY_605_6	-3.4544	-3.5966	-0.1422
ASSY601_31	-1.6256	-1.5697	0.0559	ASSY_605_7	-1.6256	-1.8567	-0.2311
ASSY601_32	-1.8288	-1.6078	0.2210	ASSY_605_8	-1.6256	-1.8974	-0.2718
ASSY601_33	-1.6256	-1.5773	0.0483	ASSY_605_9	-1.8288	-2.2200	-0.3912
ASSY601_34	-1.6256	-1.4935	0.1321	ASSY_605_10	-1.8288	-2.2073	-0.3785
ASSY602_1	-0.635	-1.2878	-0.6528	ASSY_605_11	-1.8288	-2.1717	-0.3429
ASSY602_2	-1.2954	-1.3513	-0.0559	ASSY_617_1	-1.6256	-1.7678	-0.1422
ASSY602_3	-1.2954	-1.3665	-0.0711	ASSY_617_2	-1.6256	-1.9558	-0.3302
ASSY602_4	-1.2954	-1.3716	-0.0762	ASSY_617_3	-1.6256	-2.0422	-0.4166
ASSY602_5	-1.2954	-1.3157	-0.0203	ASSY_617_4	-3.4544	-3.8862	-0.4318
ASSY602_6	-3.4544	-3.4823	-0.0279	ASSY_617_5	-1.6256	-1.5342	0.0914
ASSY602_7	-1.6256	-1.6891	-0.0635	ASSY_617_6	-1.6256	-1.6383	-0.0127
ASSY602_8	-1.6256	-2.2327	-0.6071	ASSY_617_7	-1.8288	-2.2022	-0.3734
ASSY606_1	-0.635	-1.5723	-0.9373	ASSY_617_8	-1.6256	-1.8212	-0.1956
ASSY606_2	-1.2954	-1.4808	-0.1854	ASSY_617_9	-1.6256	-1.8745	-0.2489
ASSY606_3	-1.2954	-2.1260	-0.8306	ASSY_617_10	-3.0988	-3.3731	-0.2743
ASSY606_4	-1.2954	-1.3208	-0.0254	ASSY_617_11	-1.6256	-2.1844	-0.5588
ASSY606_5	-1.2954	-1.4757	-0.1803	ASSY_617_12	-1.6256	-2.1539	-0.5283
ASSY606_6	-3.4544	-3.7287	-0.2743	ASSY_617_13	-1.8288	-2.0879	-0.2591
ASSY606_7	-1.6256	-1.4503	0.1753	ASSY_617_14	-1.6256	-1.6180	0.0076
ASSY606_8	-1.6256	-1.8161	-0.1905	ASSY_617_15	-1.6256	-0.0838	1.5418
ASSY606_9	-4.2926	-4.7600	-0.4674	ASSY_617_16	-3.0988	-3.5001	-0.4013
ASSY606_10	-1.8288	-1.9380	-0.1092	ASSY_617_17	-1.6256	-1.8440	-0.2184
ASSY606_11	-1.8288	-2.7330	-0.9042	ASSY_617_18	-1.6256	-1.7729	-0.1473
ASSY606_12	-1.8288	-2.1361	-0.3073	ASSY_617_19	-1.8288	-1.8110	0.0178

ASSY606_13	-4.2926	-5.5296	-1.2370	ASSY_617_20	-1.6256	-1.8669	-0.2413
ASSY606_14	-1.6256	-2.2733	-0.6477	ASSY_617_21	-1.6256	-1.8466	-0.2210
ASSY606_15	-1.6256	-1.6231	0.0025	ASSY_618_1	-1.6256	-2.3774	-0.7518
ASSY606_16	-1.6256	-2.1463	-0.5207	ASSY_618_2	-1.6256	-1.5646	0.0610
ASSY606_17	-3.4544	-3.9218	-0.4674	ASSY_618_3	-1.6256	-1.9279	-0.3023
ASSY606_18	-1.6256	-2.0168	-0.3912	ASSY_618_4	-3.4544	-4.1326	-0.6782
ASSY606_19	-1.6256	-2.2784	-0.6528	ASSY_618_5	-1.6256	-2.2733	-0.6477
ASSY606_20	-1.8288	-2.1565	-0.3277	ASSY_618_6	-1.6256	-2.2631	-0.6375
ASSY606_21	-1.6256	-2.2225	-0.5969	ASSY_618_7	-1.8288	-2.3012	-0.4724
ASSY606_22	-1.6256	-1.9406	-0.3150	ASSY_618_8	-1.6256	-1.7297	-0.1041
ASSY606_23	-3.0988	-3.4290	-0.3302	ASSY_618_9	-1.6256	-1.7221	-0.0965
ASSY606_24	-1.6256	-2.3190	-0.6934	ASSY_618_10	-3.0988	-3.0531	0.0457
ASSY606_25	-1.6256	-2.3800	-0.7544	ASSY_618_11	-1.6256	-2.4994	-0.8738
ASSY606_26	-1.8288	-2.1234	-0.2946	ASSY_618_12	-1.6256	-2.4409	-0.8153
ASSY606_27	-1.6256	-1.9101	-0.2845	ASSY_618_13	-1.8288	-2.6035	-0.7747
ASSY606_28	-1.6256	-2.4486	-0.8230	ASSY_618_14	-1.6256	-2.1641	-0.5385
ASSY606_29	-3.0988	-3.4366	-0.3378	ASSY_618_15	-1.6256	-1.9914	-0.3658
ASSY606_30	-1.6256	-2.2733	-0.6477	ASSY_618_16	-3.0988	-3.3807	-0.2819
ASSY606_31	-1.6256	-2.2657	-0.6401	ASSY_618_17	-1.6256	-2.1158	-0.4902
ASSY606_32	-1.8288	-2.1996	-0.3708	ASSY_618_18	-1.6256	-2.0345	-0.4089
ASSY606_33	-1.6256	-2.0091	-0.3835	ASSY_618_19	-1.8288	-2.0549	-0.2261
ASSY606_34	-1.6256	-1.9634	-0.3378	ASSY_618_20	-1.6256	-1.9660	-0.3404
ASSY616_1	-1.6256	-1.2598	0.3658	ASSY_618_21	-1.6256	-1.9558	-0.3302
ASSY616_2	-1.6256	-1.5646	0.0610	DET_619_1	-1.8288	-2.0676	-0.2388
ASSY616_3	-1.6256	-1.4707	0.1549	DET_619_2	-1.8288	-1.9710	-0.1422
ASSY616_4	-3.4544	-2.9515	0.5029	DET_619_3	-1.8288	-1.7653	0.0635
ASSY616_5	-1.6256	-1.2751	0.3505				
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Επιτρεπόμενη απόκλιση **δc = ±0.3810mm**							

Πίνακας 5.2 Αποκλίσεις σημείων τοποθέτησης εξαρτημάτων
Table 5.9 Deviations of index points

Από τη διενέργεια του ελέγχου διαπιστώθηκε ότι σε 57 σημεία οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες. Οι τιμές τους προσεγγίζουν ως και το +1.5mm, ενώ οι περισσότερες κυμαίνονται γύρω στα 0.6mm. Ως εκ τούτου δόθηκε εντολή για επιδιόρθωση των σημείων που παρουσίασαν πρόβλημα και κατόπιν επανέλεγχος όλων των σημείων.

Λόγω του προγραμματισμού εργασιών που έγινε στην Ε.Α.Β, η επιδιόρθωση των σημείων τοποθέτησης εξαρτημάτων σχεδιάστηκε να πραγματοποιηθεί σε μεταγενέστερη περίοδο, για αυτό και δεν παρουσιάζεται η αντίστοιχη διαδικασία επανελέγχου στην ενότητα 5.3.

5.3 Τελικός Έλεγχος

Μετά το πέρας του αρχικού ελέγχου και τον εντοπισμό των προβλημάτων, το εργαλείου επιδιορθώθηκε. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε επανάληψη των διαδικασιών ελέγχου,

ώστε να εξακριβωθεί η επιτυχία των επιδιορθώσεων. Ο επανέλεγχος περιλαμβάνει: την εκτέλεση μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ των συστημάτων αναφοράς του laser tracker και του εργαλείου, τον έλεγχο ορισμένων σημείων ως προς της συνιστώσα z και τέλος τον έλεγχο των επιπέδων των δυο μεταλλικών λωρίδων.

5.3.1 Μετασχηματισμός Συστήματος Αναφοράς

Για την εκτέλεση του τελικού ελέγχου, δεν απαιτήθηκε κάποιος νέος μετασχηματισμός ομοιότητας, καθώς κατά τις εργασίες επιδιόρθωσης δεν μετακινήθηκε ούτε το όργανο ούτε το εργαλείο. Συνεπώς η σχετική θέση μεταξύ των δυο συστημάτων (του οργάνου και του εργαλείου) δεν μεταβλήθηκε. Παρόλα αυτά, πριν ξεκινήσει η μετρητική διαδικασία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προς τα σημεία LOS1, LOS2, LOS3, LOS4, ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν υπήρξε κάποια τυχαία μετακίνηση του οργάνου.

Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου σημείων ως προς συνιστώσα z και του ελέγχου του επιπέδου της κάτω λωρίδας, χρειάστηκε να γίνει αλλαγή στάσης του οργάνου λόγω άλλων εργασιών που λάμβαναν χώρα στο πεδίο των μετρήσεων. Το laser tracker τοποθετήθηκε σε νέα θέση στο πλάι του εργαλείου. Το πλεονέκτημα της νέας θέσης είναι η αυξημένη ακρίβεια που αναμένεται, λόγω μεγαλύτερης συμμετοχής της ακρίβειας των μηκών στην τελική ακρίβεια των συντεταγμένων (βλ. κεφ. 2.2.1). Το μειονέκτημα της νέας στάσης είναι ότι απωλέσθηκε η ορατότητα με δυο από τα τέσσερα σημεία αναφοράς (τα LOS1, LOS2), και άρα ήταν αδύνατο να γίνει μεταφορά στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν.

Το πρόβλημα λύθηκε με μετρήσεις προς 19 σημεία ελέγχου του εργαλείου (τα οποία υπάρχουν για άλλους ελέγχους που δεν αναφέρονται στη παρούσα εργασία), των οποίων οι συντεταγμένες είναι γνωστές από τα σχέδια του εργαλείου. Ως εκ τούτου εκτελέστηκαν μετρήσεις και υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες των 19 σημείων στο σύστημα αναφοράς του laser tracker ώστε στη συνέχεια να εκτελεστεί ο μετασχηματισμός ομοιότητας. Από το Axyz υπολογίστηκαν οι μεταθέσεις και οι στροφές των αξόνων του νέου συστήματος ως προς αυτό του οργάνου μαζί με τα σφάλματα τους (για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%) και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.10. Σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα, οι τιμές των σφαλμάτων των παραμέτρων είναι εξαιρετικά μικρές και παρατηρείται ότι ο μετασχηματισμός ομοιότητας εκτελέσθηκε με μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι στον αρχικό έλεγχο.

Παράμετρος	Τιμή (m, deg)	σ (m, deg)*
ΔX	2.169707	0.000070
ΔY	4.908428	0.000080
ΔZ	-5.455991	0.000006
ω	359.8249	0.0007
φ	359.9924	0.0006
κ	124.6911	0.0004

*για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%

Πίνακας 5.3 Παράμετροι μετασχηματισμού ομοιότητας
Table 5.10 Parameters of best-fit transformation

Στον πίνακα 5.11 παρουσιάζονται οι τιμές των αποκλίσεων (πραγματική τιμή - ονομαστική τιμή) κάθε συντεταγμένης κάθε σημείου μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού ομοιότητας. Σκιασμένες είναι οι τιμές των διαφορών που υπερβαίνουν την τιμή της επιτρεπόμενης απόκλισης (±0.127mm). Ακόμα υπολογίστηκε το τυπικό σφάλμα (σ) των αποκλίσεων από τον τύπο 5.6.

Σημείο	δX(mm)	δY(mm)	δZ(mm)
TB1	0.086	-0.108	-0.288
TB2	0.003	-0.042	-0.078
TB4	0.022	-0.051	0.039
TB5	-0.064	-0.044	-0.062
TB10	-0.040	0.027	0.033
TB11	-0.027	-0.004	0.023
TB13	0.0089	-0.089	-0.013
TB14	-0.006	0.056	-0.008
TB18	-0.060	0.127	-0.024
TB19	-0.049	0.032	-0.069
TB22	-0.005	0.021	-0.053
TB23	0.021	0.029	0.064
TB25	0.012	-0.190	-0.053
TB27	0.008	0.053	0.058
TB28	-0.021	0.146	-0.031
TB29	-0.041	-0.123	-0.010
TB30	0.033	-0.002	0.013
TB31	0.140	-0.081	0.148
TB32	-0.022	0.052	0.023
	σ_δ	**±0.060mm**	

Πίνακας 5.4 Αποκλίσεις σημείων ελέγχου μετά τον μετασχηματισμό
Table 5.11 Deviations of control points after the best-fit transformation

Παρατηρείται ότι όλες σχεδόν οι διαφορές των συντεταγμένων είναι εντός των ορίων. Εκτός ορίων βρέθηκαν 5 μόνο τιμές, με τη μεγαλύτερη διαφορά να εμφανίζεται στην συντεταγμένη z του σημείου TB1 (-0.288mm). Το τυπικό σφάλμα των αποκλίσεων είναι

σ_δ = ±0.060mm, σημαντικά μικρότερο από το καθορισμένο όριο (±0.127mm). Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω η προσαρμογή κρίνεται επιτυχημένη και ακριβής.

5.3.2 Έλεγχος Σημείων Ως Προς Συνιστώσα Z

Ο πρώτος επανέλεγχος αφορούσε τα σημεία WL1 - W27, τα οποία πρέπει να εμφανίζουν τιμή z=5.0800m (z=200in.). Στον αρχικό έλεγχο (βλ. κεφ. 5.2.2) βρέθηκαν 15 σημεία να υπερβαίνουν το όριο της απόκλισης (δ_z = ±0.3810mm) και ως εκ τούτου επιδιορθώθηκαν. Η μετρητική διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή του αρχικού ελέγχου, δηλαδή χρησιμοποιήθηκε ο στόχος CCR 0.5in. σε συνδυασμό με ειδικές βάσεις και προσδιορίστηκε η τιμή της συντεταγμένης z των σημείων. Ο επανέλεγχος δεν πραγματοποιήθηκε μόνο για τα σημεία που εμφάνισαν αποκλίσεις στον αρχικό έλεγχο, αλλά για όλα τα σημεία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 5.12, όπου παρουσιάζονται κατά σειρά: η ονομασία του σημείου, η μετρημένη τιμή z και η απόκλιση της δ_z από την ονομαστική τιμή.

Σημείο	**Μετρημένη Τιμή z (m)**	**Απόκλιση δz (mm)**	**Σημείο**	**Μετρημένη Τιμή z (m)**	**Απόκλιση δz (mm)**
WL1	5.0798	0.2000	WL15	5.0797	0.3000
WL2	5.0797	0.3000	WL16	5.0801	-0.1000
WL3	5.0798	0.2000	WL17	5.0799	0.1000
WL4	5.0800	0.0000	WL18	5.0800	0.0000
WL5	5.0797	0.3000	WL19	5.0799	0.1000
WL6	5.0799	0.1000	WL20	5.0799	0.1000
WL7	5.0799	0.1000	WL21	5.0797	0.3000
WL8	5.0800	0.0000	WL22	5.0799	0.1000
WL9	5.0799	0.1000	WL23	5.0799	0.1000
WL10	5.0799	0.1000	WL24	5.0800	0.0000
WL11	5.0799	0.1000	WL25	5.0799	0.1000
WL12	5.0799	0.1000	WL26	5.0799	0.1000
WL13	5.0801	-0.1000	WL27	5.0800	0.0000
WL14	5.0799	0.1000			
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Επιτρεπόμενη απόκλιση **δz = ±0.3810mm**					

Πίνακας 5.5 Επανέλεγχος αποκλίσεων σημείων WL
Table 5.12 Rechecking of the deviations of WL points

Σύμφωνα με τον πίνακα 5.12, κανένα σημείο δεν παρουσιάζει πια πρόβλημα καθώς οι διαφορές της ονομαστικής και της πραγματικής τιμής δεν υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια. Συνεπώς, η επιδιόρθωση ήταν επιτυχής και αυτό το σκέλος του ελέγχου ολοκληρώνεται με επιτυχία.

5.3.3 Έλεγχος Επιπέδων Μεταλλικών Λωρίδων

Ο επόμενος επανέλεγχος πραγματοποιείται στις δυο μεταλλικές λωρίδες του εργαλείου (άνω και κάτω) και αφορά τον έλεγχο των επιπέδων τους. Στον αρχικό έλεγχο (βλ. κεφ. 5.2.3) είχε διαπιστωθεί ότι και οι δυο μεταλλικές λωρίδες εμφανίζανε σημαντική μετατόπιση. Η μεν κάτω λωρίδα ήταν περίπου 2mm χαμηλότερα από την ονομαστική της θέση και η άνω μεταλλική λωρίδα 24mm ψηλότερα.

Η διαδικασία μέτρησης και ελέγχου των δυο λωρίδων είναι πανομοιότυπη με αυτή που περιγράφεται στην ενότητα 5.2.3. Στον πίνακα 5.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του επανελέγχου και ειδικότερα τα σημεία που μετρήθηκαν και η απόκλιση τους δ_d από το ονομαστικό επίπεδο.

Σημείο	**Απόκλιση δd (mm)**	**Σημείο**	**Απόκλιση δd (mm)**
RWKD_LWR_BAR_1	0.1368	RWKD_LWR_BAR_18	-0.0701
RWKD_LWR_BAR_2	0.0969	RWKD_LWR_BAR_19	-0.1136
RWKD_LWR_BAR_3	0.0373	RWKD_LWR_BAR_20	-0.0731
RWKD_LWR_BAR_4	-0.0101	RWKD_LWR_BAR_21	0.0022
RWKD_LWR_BAR_5	0.0493	RWKD_LWR_BAR_22	0.0234
RWKD_LWR_BAR_6	0.0645	RWKD_LWR_BAR_23	0.0684
RWKD_LWR_BAR_7	0.0899	RWKD_LWR_BAR_24	0.0431
RWKD_LWR_BAR_8	0.0882	RWKD_LWR_BAR_25	0.0328
RWKD_LWR_BAR_9	0.1300	RWKD_LWR_BAR_26	0.0614
RWKD_LWR_BAR_10	0.0637	RWKD_LWR_BAR_27	0.0131
RWKD_LWR_BAR_11	0.0700	RWKD_LWR_BAR_28	0.1167
RWKD_LWR_BAR_12	0.0713	RWKD_LWR_BAR_29	0.1904
RWKD_LWR_BAR_13	0.0750	RWKD_LWR_BAR_30	0.2420
RWKD_LWR_BAR_14	-0.0129	RWKD_LWR_BAR_31	0.2680
RWKD_LWR_BAR_15	0.0055	RWKD_LWR_BAR_32	0.2557
RWKD_LWR_BAR_16	-0.0703	RWKD_LWR_BAR_33	0.1868
RWKD_LWR_BAR_17	-0.0821	RWKD_LWR_BAR_34	0.0733
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Επιτρεπόμενη απόκλιση **δd = ±0.3810mm**			

Πίνακας 5.6 Αποκλίσεις σημείων ελέγχου κάτω λωρίδας κατά τον τελικό έλεγχο
Table 5.13 Deviations of lower`s bar control points during final check

Σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 5.13, η επιδιόρθωση της κάτω λωρίδας ήταν επιτυχής καθώς οι αποκλίσεις όλων των σημείων από το ονομαστικό τους επίπεδο βρίσκονται εντός των καθορισμένων ορίων.

Αντίστοιχα για την άνω λωρίδα, τα αποτελέσματα του επανελέγχου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.14. Σκιασμένα είναι τα σημεία που υπερβαίνουν την επιτρεπόμενη απόκλιση (δ_d = ±0.3810mm).

Σημείο	**Απόκλιση δd (mm)**	**Σημείο**	**Απόκλιση δd (mm)**
REWORK_UPPER_1	0.2113	REWORK_UPPER_18	-0.3625
REWORK_UPPER_2	0.1229	REWORK_UPPER_19	-0.4069
REWORK_UPPER_3	-0.1028	REWORK_UPPER_20	-0.5182
REWORK_UPPER_4	-0.0541	REWORK_UPPER_21	-0.3799
REWORK_UPPER_5	-0.0612	REWORK_UPPER_22	-0.3047
REWORK_UPPER_6	-0.1275	REWORK_UPPER_23	-0.3317
REWORK_UPPER_7	-0.0166	REWORK_UPPER_24	-0.2853
REWORK_UPPER_8	-0.1998	REWORK_UPPER_25	-0.2031
REWORK_UPPER_9	-0.1507	REWORK_UPPER_26	-0.0428
REWORK_UPPER_10	-0.2339	REWORK_UPPER_27	-0.1517
REWORK_UPPER_11	-0.1336	REWORK_UPPER_28	-0.0953
REWORK_UPPER_12	-0.1462	REWORK_UPPER_29	-0.0140
REWORK_UPPER_13	-0.132	REWORK_UPPER_30	0.0304
REWORK_UPPER_14	-0.1279	REWORK_UPPER_31	0.1231
REWORK_UPPER_15	-0.1521	REWORK_UPPER_32	0.1967
REWORK_UPPER_16	-0.1932	REWORK_UPPER_33	0.2162
REWORK_UPPER_17	-0.2039	REWORK_UPPER_34	0.2890
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Επιτρεπόμενη απόκλιση **δd = ±0.3810mm**			

Πίνακας 5.7 Αποκλίσεις σημείων ελέγχου πάνω λωρίδας κατά τον τελικό έλεγχο
Table 5.14 Deviations of upper`s bar control points during final check

Η αστοχία που είχε διαπιστωθεί στην πρώτη σειρά μετρήσεων έχει επιδιορθωθεί, καθώς όλα τα σημεία που μετρήθηκαν βρέθηκαν να είναι εντός των ορίων. Εξαίρεση αποτελούν δυο σημεία που εμφανίσανε ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές (τα σημεία _19 και _20). Η απόκλιση τους δεν κρίνεται σημαντική καθώς δεν φαίνεται να επηρεάζει το συνολικό επίπεδο της μεταλλικής λωρίδας.

Μετά την ολοκλήρωση όλων των διαδικασιών και την επιτυχία σε όλους τους μεμονωμένους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν, το εργαλείο επιτυχαίνει συνολικά στον περιοδικό έλεγχο.

6 ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΔΑΠΕΔΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ C130J

Το κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει μια πειραματική εφαρμογή της τεχνολογίας laser tracker που αφορά το μετρολογικό έλεγχο εργαλείου που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο τμήματος του δαπέδου του μεταγωγικού αεροσκάφους τύπου C130J. Η υπόψη εφαρμογή διαφοροποιείται σημαντικά από αυτή του κεφαλαίου 5. Στην τελευταία, στόχος ήταν η γεωμετρική τεκμηρίωση της θέσης των σημείων ελέγχου, ενώ στην εφαρμογή του κεφαλαίου 6, στόχος είναι η γεωμετρική τεκμηρίωση της μορφής του εργαλείου. Ως εκ τούτου, εφαρμόστηκε διαφορετική μέθοδος συλλογής δεδομένων, και ενώ στο κεφάλαιο 5 έγιναν μεμονωμένες μετρήσεις σημείων, στο κεφάλαιο 6 πραγματοποιήθηκε σάρωση της επιφάνειας του εργαλείου. Ακόμα, λόγω της διαφορετικής φύσης των δυο ελέγχων και λόγω της διαφορετικής λειτουργίας των δυο εργαλείων (το μεν εργαλείο της προηγούμενης εφαρμογής συμβάλλει στη συναρμολόγηση τμήματος της ατράκτου, το δε εργαλείο της παρούσας εφαρμογής στον έλεγχο της μορφής των ελασμάτων) διαφέρουν και οι απαιτήσεις ακριβείας των δυο εφαρμογών. Στην εφαρμογή του κεφαλαίου 5, η ζητούμενη ακρίβεια κυμαινόταν από ±0.127mm – ±0.381mm, ενώ στη εφαρμογή του κεφαλαίου 6 απαιτείται ακρίβεια ±1.524mm. Στα επόμενα υποκεφάλαια, αρχικά γίνεται μια περιγραφή της εφαρμογής και του αντικειμένου μέτρησης, κατόπιν περιγράφεται η διαδικασία του μετασχηματισμού ομοιότητας, στη συνέχεια ακολουθεί η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων και τέλος παρουσιάζεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

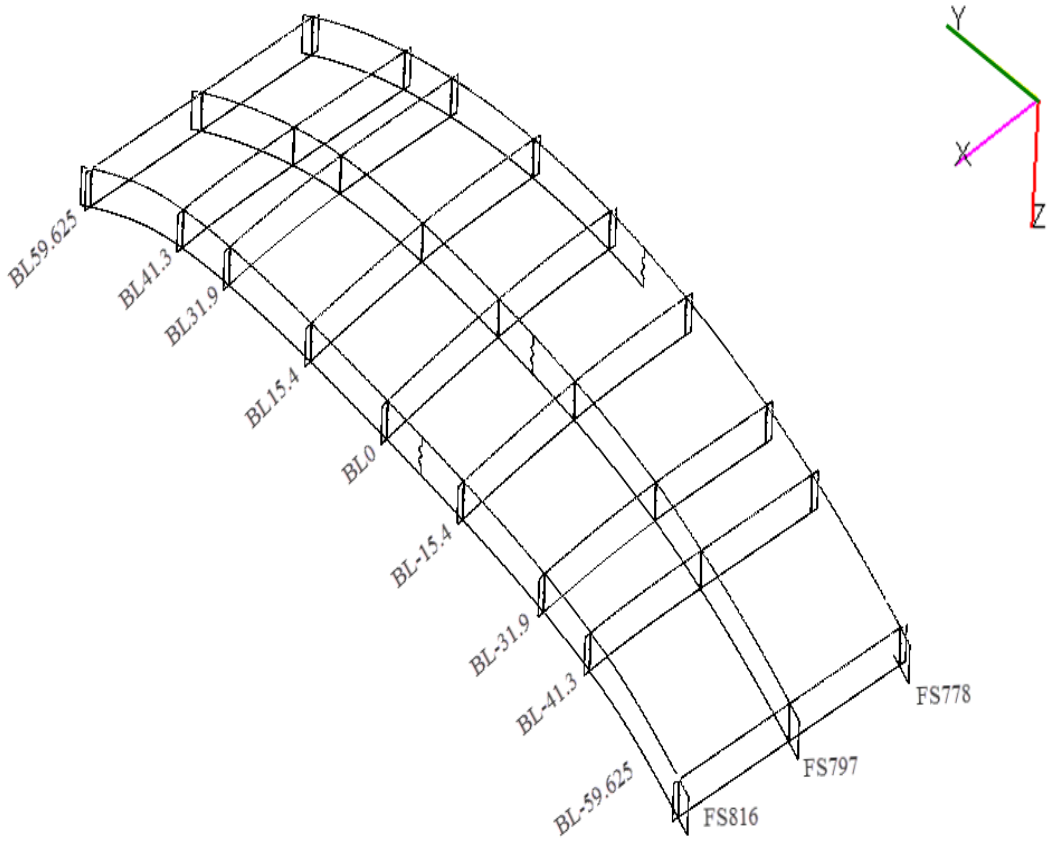
6.1 Περιγραφή Εφαρμογής

Η εφαρμογή αυτή εκτελέστηκε στους χώρους της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (Ε.Α.Β.). Το αντικείμενο μέτρησης είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μορφής ενός ελάσματος που συμμετέχει στην κατασκευή τμήματος του δαπέδου του μεταγωγικού αεροσκάφους C130J.

Πριν την τοποθέτηση του ελάσματος στο εργαλείο συναρμολόγησης και την κατασκευή του τμήματος του δαπέδου του αεροσκάφους, το έλασμα επεξεργάζεται στο ελασματουργείο. Αρχικά κόβεται στο επιθυμητό μέγεθος και στη συνέχεια του δίνεται το κατάλληλο σχήμα σε μια πρέσα (το σχήμα του ελάσματος είναι σύνθετο, αλλά μπορεί να ειπωθεί ότι προσεγγίζει το παραβολικό). Το τελευταίο στάδιο της προεπεξεργασίας του,

περιλαμβάνει τον έλεγχο του σχήματος του, δηλαδή αν από την πρέσα δόθηκε η κατάλληλη μορφή στο έλασμα ή αν υπήρξαν αποκλίσεις. Για τη διενέργεια του ελέγχου αυτού δημιουργήθηκε ένα εργαλείο βασισμένο στα σχέδια του αεροπλάνου, στο οποίο δόθηκε το σχήμα που οφείλει να έχει το έλασμα. Τοποθετώντας το έλασμα στην επιφάνεια του εργαλείου και ασκώντας της δύναμη έως 1Newton, αυτό πρέπει να έρχεται σε επαφή με το εργαλείο στο σύνολο του. Αν δεν συμβαίνει αυτό, σημαίνει ότι το έλασμα δεν έχει διαμορφωθεί σωστά και το κομμάτι απορρίπτεται. Σημειώνεται ότι ο έλεγχος αυτός, αφορά μόνο το σχήμα του ελάσματος και όχι το μέγεθος του.

Το εργαλείο ελέγχου του σχήματος του ελάσματος, το οποίο εξετάζεται στον παρόν κεφάλαιο, είναι μια μεταλλική κατασκευή από χάλυβα, η οποία απαρτίζεται από δώδεκα μεταλλικές λωρίδες, σχηματίζοντας ένα είδος καννάβου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.1. Κάθε μια από τις μεταλλικές λωρίδες του εργαλείου είναι παράλληλη είτε στον άξονα x΄x είτε στον y΄y του συστήματος αναφοράς του αεροσκάφους. Πιο συγκεκριμένα, εννέα από τις μεταλλικές λωρίδες είναι παράλληλες στον x΄x (σταθερό y) και τρεις από αυτές είναι παράλληλες στον y΄y (σταθερό x). Η μεσαία από τις εννέα λωρίδες έχει την τιμή y=0, με τις υπόλοιπες να είναι συμμετρικές ως προς αυτή.



Σχήμα 6.1 Τριδιάστατο σχέδιο του αντικειμένου μέτρησης
Figure 6.1 Three dimensional drawing of the measuring object

Η ονομασία των λωρίδων που διακρίνεται στο σχήμα 6.1 σχηματίζεται είτε από τα αρχικά FS (Fuselage Station) που στα βιομηχανικά σχέδια παριστάνουν τον άξονα x΄x είτε από τα αρχικά BL (Baseline) που παριστάνουν τον άξονα y΄y. Ο αριθμός δίπλα από τα αρχικά κάθε λωρίδας δίνει την αντίστοιχη τιμή της (την τιμή x για τα αρχικά FS και την τιμή y για τα αρχικά BL) σε ίντσες. Για παράδειγμα, ο κωδικός FS778 υποδηλώνει ότι η λωρίδα αυτή είναι παράλληλη στον y΄y και η συντεταγμένη x όλων των σημείων της είναι x =778in. =19.761m. Φυσικά, οι μεταλλικές λωρίδες έχουν πάχος συνεπώς οι τιμές που δίνονται είτε για το x είτε για το y, αναφέρονται κάθε φορά σε ορισμένη πλευρά τους.

Προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι η επιφάνεια του εργαλείου αντιπροσωπεύει την θεωρητική επιφάνεια και ότι πραγματοποιείται με ορθό τρόπο ο έλεγχος των ελασμάτων που τοποθετούνται σε αυτή, το εργαλείο μετράται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Στο εργαλείο μας ενδιαφέρει μόνο η επιφάνεια στην οποία τοποθετείται το έλασμα και είναι αυτή που διακρίνεται στο σχήμα 6.1. Η διαδικασία ελέγχου περιλαμβάνει κατά σειρά τα εξής βήματα: μετασχηματισμό του συστήματος αναφοράς και ένταξη στο σύστημα του εργαλείου, μέτρηση σημείων πάνω στις μεταλλικές λωρίδες, υπολογισμό των τριδιάστατων συντεταγμένων τους, έλεγχο των αποκλίσεων μεταξύ της θεωρητικής επιφάνειας και των μετρημένων σημείων και τέλος ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

6.2 Μετασχηματισμός Συστήματος Αναφοράς

Αρχικά ο εξοπλισμός του laser tracker τοποθετήθηκε σε απόσταση της τάξης των 2m από το εργαλείο σε ειδική υπερυψωμένη βάση. Δεν πραγματοποιήθηκε ούτε κέντρωση ούτε οριζοντίωση του οργάνου, αφού από το τυχαίο τριδιάστατο σύστημα του laser tracker γίνεται μεταφορά στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου.

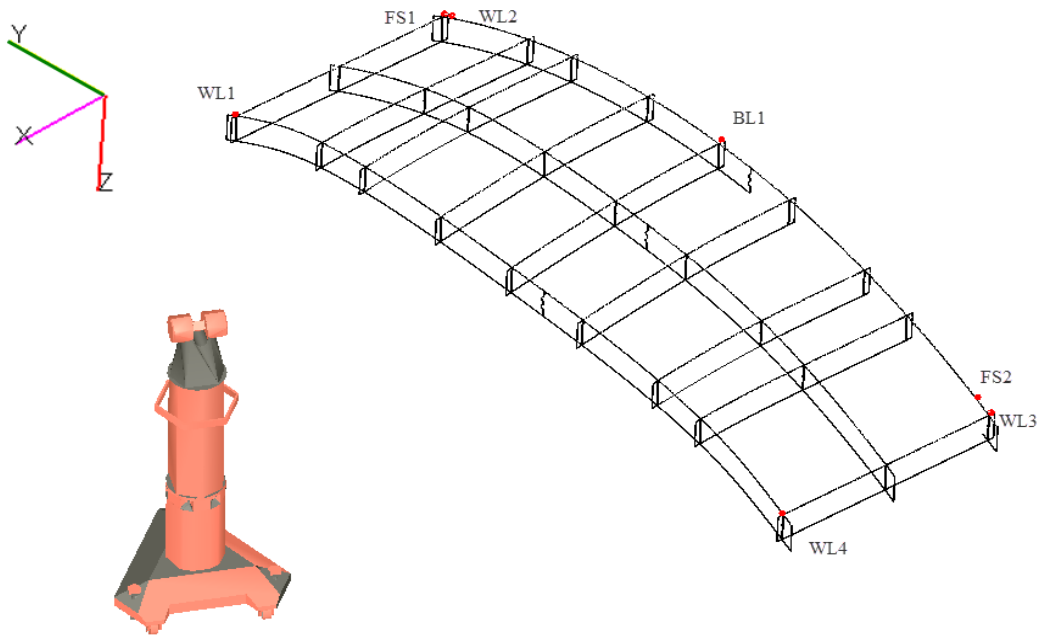
Προκειμένου να εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός ομοιότητας μεταξύ των δυο συστημάτων αναφοράς πρέπει να υπολογιστούν 6 παράμετροι μετασχηματισμού (3 μεταθέσεις ΔX, ΔY, ΔZ και 3 στροφές ω, φ, κ). Η παράμετρος της κλίμακας δεν λαμβάνεται υπ`όψιν και θεωρείται μοναδιαία. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων απαιτούνται συνολικά 6 γνωστές τιμές συντεταγμένων. Από τα σχέδια του εργαλείου είναι γνωστά τα εξής στοιχεία: οι τετμημένες των λωρίδων FS, οι τεταγμένες των λωρίδων BL και η τιμή Z σε τέσσερα σημεία(WL1, WL2, WL3, WL4) του εργαλείου. Στα σημεία τομής των οριζόντιων και κάθετων μεταλλικών λωρίδων είναι γνωστή και η τιμή X και η Y, αλλά

στα σημεία αυτά δεν γίνεται να προσαρμοστεί ο στόχος ώστε να πραγματοποιηθεί μέτρηση οπότε δεν λαμβάνονται υπ`όψιν.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν σημεία αναφοράς στο εργαλείο, ούτε άλλα σημεία με γνωστές και τις τρεις τιμές συντεταγμένων, για την ένταξη στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Αρχικά μετρήθηκαν τα τέσσερα σημεία με γνωστή την τιμή Z, μέσω των οποίων ορίστηκε το επίπεδο XY (μάλιστα αυτό έγινε με πλεονασμό παρατηρήσεων καθώς κανονικά απαιτούνται 3 σημεία). Τα σημεία αυτά είναι τα WL1,WL2, WL3, WL4 των οποίων η τιμή Z είναι γνωστή από το σχέδιο και ίση με Z_{WL}= 3.440887m.
- Για τον ορισμό του άξονα y΄y μετρήθηκαν 2 σημεία, τα FS1 και FS2, τα οποία είναι τυχαία σημεία και ανήκουν στην λωρίδα FS778. Τα σημεία αυτά έχουν γνωστή τιμή X ίση με X_{FS1}=X_{FS2}= 19.761200m(778in.).
- Ο άξονας x΄x ορίστηκε με τη μέτρηση ενός σημείου και τη συνθήκη να είναι κάθετος στον άξονα y. Το σημείο αυτό είναι το BL1, τυχαίο σημείο της λωρίδας BL0 και η τιμή του Y είναι Y_{BL1} = 0m.

Οι θέσεις των παραπάνω σημείων διακρίνονται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 6.2). Τα σημεία αυτά μετρήθηκαν με το laser tracker και έναν στόχο CCR 0.5in. προσαρμοσμένο σε γωνιακή βάση και υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες τους στο σύστημα αναφοράς του οργάνου.



Σχήμα 6.2 Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον μετασχηματισμό αναφοράς
Figure 6.2 The point used for the best-fit transformation

Για την εφαρμογή του μετασχηματισμού, εισήχθησαν στο Axyz οι ονομαστικές τιμές των σημείων. Για όσες συντεταγμένες δεν ήταν γνωστές, δόθηκαν προσεγγιστικές τιμές. Στις τιμές Z των σημείων WL1 - WL4 η τιμή που εισήχθηκε στο λογισμικό ήταν 12.7mm (0.5in.) μικρότερη από την ονομαστική γιατί οι συντεταγμένες που υπολογίζεται από τις μετρήσεις αναφέρονται στο κέντρο του στόχου και όχι στο σημείο της επιφάνειας του εργαλείου. Η απόσταση των δυο σημείων είναι ίση με το άθροισμα της ακτίνας του στόχου και του ύψους της βάσης (συνολική μετατόπιση ds =12.7mm) και είναι κατά μήκος του άξονα z΄z. Προκειμένου οι ονομαστικές συντεταγμένες να αναφέρονται στο σημείο μέτρησης, η τιμή Z που εισάχθηκε για τα σημεία WL1 - WL4, είναι μικρότερη κατά 12.7mm (ο άξονας Z αυξάνεται προς τα κάτω και ο στόχος βρισκόταν πάνω από το εργαλείο). Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι ονομασίες των σημείων και οι τιμές των συντεταγμένων τους X,Y,Z όπως αυτές εισήχθησαν στο λογισμικό Axyz. Όποιες τιμές είναι γνωστές και σταθερές σημειώνονται με πράσινο χρώμα. Οι υπόλοιπες τιμές είναι προσεγγιστικές.

Σημείο	**X(m)**	**Y(m)**	**Z(m)**
WL1	20.739100	1.498600	3.424187
WL2	19.748500	1.498600	3.424187
WL3	19.748500	-1.498600	3.424187
WL4	20.739100	-1.498600	3.428187
FS1	19.761200	1.397000	3.352800
FS2	19.761200	-1.397000	3.352800
BL1	19.748500	0.000000	3.048000

Πίνακας 6.1 Ονομαστικές τιμές των συντεταγμένων των σημείων που χρησιμοποιηθήκαν για τον μετασχηματισμό ομοιότητας

Table 6.1 Nominal coordinate values of the points used for the best-fit transformation

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε στο λογισμικό Axyz να εκτελεστεί ο μετασχηματισμός ομοιότητας. Στις προσεγγιστικές τιμές, δόθηκε αυτόματα από το πρόγραμμα μικρό βάρος, ώστε να μην επηρεάζουν την επίλυση όσο οι σταθερές τιμές. Αποτέλεσμα ήταν ο προσδιορισμός των παραμέτρων για το μετασχηματισμό από το σύστημα του οργάνου στο σύστημα του εργαλείου. Το σύστημα που δημιουργήθηκε αποθηκεύτηκε στο Axyz ούτως ώστε όλες οι συντεταγμένες που θα εμφανίζονται στο πρόγραμμα να αναφέρονται κατευθείαν σε αυτό.

Η χρήση των παραπάνω σημείων για την μεταφορά του συστήματος αναφοράς ναι μεν επιλύει τον μετασχηματισμό, αλλά δεν παρέχει τον απαραίτητο αριθμό παρατηρήσεων ώστε να υπολογιστεί και η ακρίβεια με την οποία αυτός έγινε.. Προκειμένου λοιπόν να υπάρχει έλεγχος της ακρίβειας του μετασχηματισμού, θα έπρεπε να είχαν μετρηθεί

περισσότερα σημεία (κυρίως με γνωστό X και Y, όπου οι παρατηρήσεις ήταν οι ελάχιστες δυνατές) κάτι που δεν έγινε για λόγους οικονομίας χρόνου της εφαρμογής. Κατόπιν, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων θα ήταν δυνατό να υπολογιστεί η ακρίβεια των παραμέτρων μετασχηματισμού (ΔX, ΔY, ΔZ, ω, φ, κ) και τελικώς η ακρίβεια μετασχηματισμού των συντεταγμένων ενός σημείου από το ένα σύστημα στο άλλο.

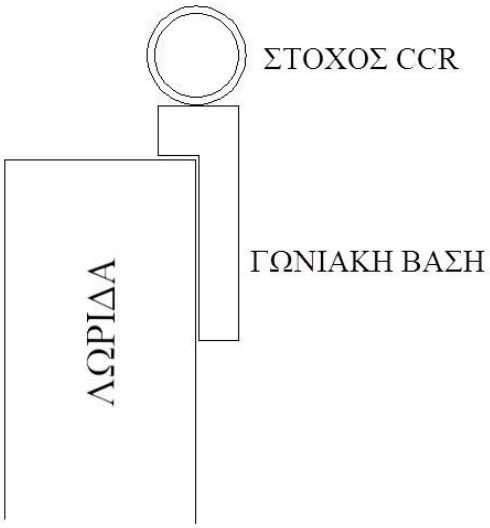
6.3 Συλλογή Δεδομένων

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά το σύνολο των μετρητικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν ώστε να συλλεχθούν τα απαραίτητα δεδομένα για τον έλεγχο του εργαλείου. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτός που αναφέρεται στο κεφάλαιο 4: ένα laser tracker Leica LTD640, ένας στόχος CCR 0.5in., γωνιακή βάση στόχου συνολικής μετατόπισης 0.5in. και ένας Η/Υ με το λογισμικό Axyz.

Στόχος του ελέγχου είναι η γεωμετρική τεκμηρίωση του εργαλείου και πιο συγκεκριμένα ο τριδιάστατος έλεγχος της μορφής της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με το έλασμα. Ο τρόπος εκτέλεσης του ελέγχου περιλαμβάνει μετρήσεις σημείων πάνω στις μεταλλικές λωρίδες που σχηματίζουν το εργαλείο, υπολογισμό των συντεταγμένων τους και κατόπιν σύγκριση αυτών με την ονομαστική επιφάνεια. Καθώς πρόκειται να συγκριθούν σημεία με επιφάνεια, απαραίτητη είναι η συλλογή μεγάλου αριθμού δεδομένων, με πυκνή κατανομή πάνω στις λωρίδες, γεγονός που θα αποδώσει με μεγάλη ακρίβεια την υπάρχουσα κατάσταση. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε οι μετρήσεις πάνω στις μεταλλικές λωρίδες να μην είναι σημειακές, αλλά συνεχόμενες, σαρώνοντας με αυτόν τον τρόπο την επιφάνεια τους.

Καταρχάς επιλέχθηκε στο Axyz και πιο συγκεκριμένα στο υποπρόγραμμα LTM η συλλογή συνεχόμενων μετρήσεων. Το διάστημα μεταξύ της εκτέλεσης δυο διαδοχικών μετρήσεων μπορεί να οριστεί να είναι είτε χρονικό, δηλαδή συλλογή δεδομένων ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είτε βάσει της σχετικής μετακίνησης του στόχου, δηλαδή συλλογή δεδομένων όταν ο στόχος μετακινηθεί κατά ορισμένη απόσταση (προς οποιαδήποτε κατεύθυνση) από την προηγούμενη του θέση. Στην προκειμένη περίπτωση, επιλέχθηκε ο δεύτερος τρόπος συλλογής δεδομένων. Η απόσταση που ορίστηκε ως μεσοδιάστημα μεταξύ δυο μετρήσεων ήταν 1.016mm (0.04in.), απόσταση που κρίθηκε κατάλληλη ώστε να αποδοθούν με μεγάλη λεπτομέρεια οι μεταλλικές λωρίδες. Οι μετρήσεις έγιναν σε κάθε λωρίδα από συγκεκριμένη πλευρά της, ώστε μετέπειτα κατά την σύγκριση με την επιφάνεια να επιλεχθεί η αντίστοιχη ακμή της. Ο στόχος CCR 0.5in.

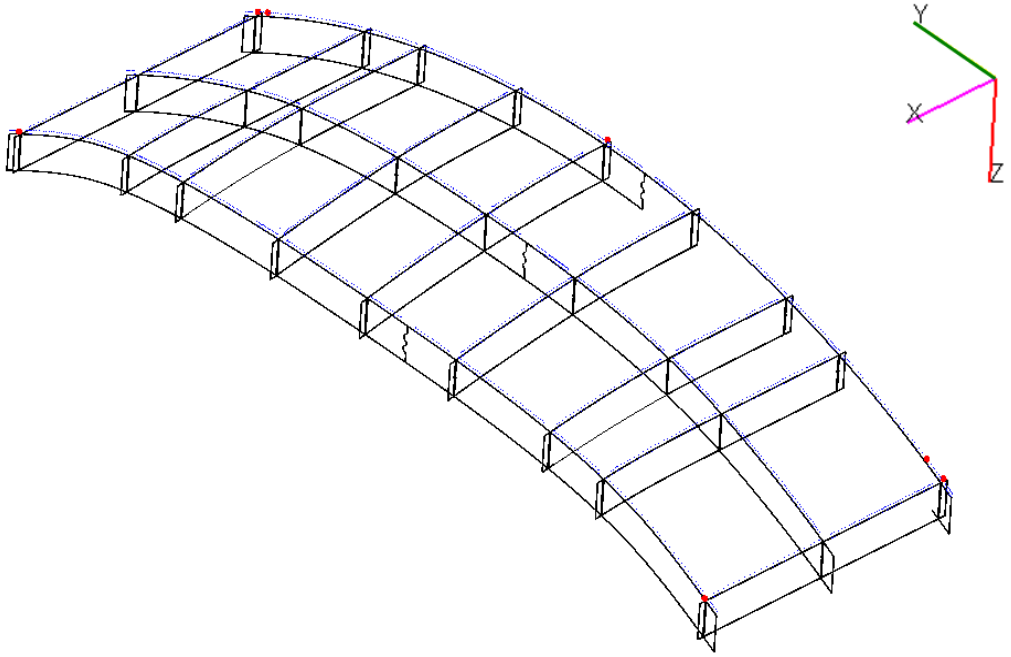
προσαρμόστηκε σε γωνιακή βάση, καθώς μόνο έτσι μπορεί να εξασφαλιστεί ότι το κέντρο του στόχου είναι στην προέκταση της ακμής της λωρίδας. Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα της βάσης με το στόχο CCR όπως τοποθετήθηκε επάνω στις μεταλλικές λωρίδες. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η βάση εφαρμόζεται πάνω στη λωρίδα, διατηρώντας το κέντρο του στόχου στη σωστή θέση.



Σχήμα 6.3 Σκαρίφημα της βάσης με το στόχο κατά την μέτρηση των μεταλλικών λωρίδων
Figure 6.3 Sketch of the base with the target as used for measuring the metal strips

Ο στόχος με τη βάση τοποθετήθηκαν στη μια άκρη της μεταλλικής λωρίδας και χωρίς να χάνεται η επαφή της βάσης με την επιφάνεια μέτρησης, κινούνταν με το χέρι προς την άλλη άκρη της. Σε κάθε σημείο τομής δυο λωρίδων, λόγω αδυναμίας της βάσης να συνεχίσει την πορεία της πάνω στην επιφάνεια χωρίς να χαθεί η επαφή, οι συνεχόμενες μετρήσεις διακοπτόντουσαν, ο στόχος και η βάση τοποθετούνταν από την άλλη πλευρά της τομής και η διαδικασία ξανάρχιζε ώσπου να συλλεχθούν δεδομένα σε όλο το μήκος της μεταλλικής λωρίδας. Σε όλη τη διάρκεια της διεργασίας αυτής, το laser tracker παρακολουθούσε το στόχο και εκτελούσε μετρήσεις προς αυτόν (οριζόντια γωνία, κατακόρυφη γωνία και κεκλιμένη απόσταση) στις καθορισμένες θέσεις. Τα μετρημένα στοιχεία μεταφερθήκαν αυτόματα στο υποπρόγραμμα CDM για περαιτέρω επεξεργασία.

Με τον τρόπο αυτό συλλέχθηκαν περίπου 300 σημεία σε κάθε μεταλλική λωρίδα παράλληλη στον άξονα x΄x (FS) και 70 σημεία σε κάθε λωρίδα παράλληλη στον άξονα y΄y (BL). Για την συλλογή των παραπάνω δεδομένων χρειάστηκαν περίπου 30min, γεγονός που αναδεικνύει το πλεονέκτημα του laser tracker όσον αφορά στη ταχύτητα των μετρήσεων. Τα σημεία που μετρήθηκαν διακρίνονται στην παρακάτω εικόνα (σχήμα 6.4) από το υποπρόγραμμα Axyz View & CAD με μπλε χρώμα.



Σχήμα 6.4 Γραφική απεικόνιση των μετρημένων σημείων πάνω στις μεταλλικές λωρίδες (με μπλε χρώμα)
Figure 6.4 Graphical display of measured points on metal strips (in blue)

Η ακρίβεια μέτρησης των γωνιών με το LTD640 προς κινούμενο στόχο, κυμαίνεται από $\pm 12^{cc}$ για στόχο που κινείται με χαμηλή ταχύτητα ως $\pm 25^{cc}$ για στόχο που κινείται με υψηλή ταχύτητα. Δεδομένου ότι ο στόχος κινούνταν με χαμηλή ταχύτητα (ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα απώλειας της επαφής του στόχου με την επιφάνεια μέτρησης), η γωνιακή ακρίβεια εκτιμάται ότι είναι $\pm 12^{cc}$ (±20μm/m). Για την μέτρηση των μηκών, λόγω του κινούμενου στόχου, χρησιμοποιείται το συμβολόμετρο του laser tracker που η ακρίβεια του είναι ±10μm ± 0.5μm/m.

6.4 Επεξεργασία Δεδομένων

Παράλληλα με την εκτέλεση των μετρήσεων προς τα σημεία, τα μετρημένα στοιχεία (οριζόντια γωνία, κατακόρυφη γωνία, κεκλιμένη απόσταση) μεταφερόντουσαν στο υποπρόγραμμα CDM του λογισμικού Axyz. Εκεί, με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων υπολογίζονταν αυτόματα οι τριδιάστατες συντεταγμένες των σημείων στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου.

Η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων των σημείων εξαρτάται από την ακρίβεια μέτρησης γωνιών και μήκους και υπολογίζεται μέσω νόμου μετάδοσης σφαλμάτων στους τύπους των πολικών συντεταγμένων (βλ. εξ. 2.1, 2.2, 2.3) σύμφωνα με τους τύπους 5.1,

5.2, 5.3. Για πρακτικούς λόγους, δεν είναι δυνατό να παρουσιαστεί ο πλήρης πίνακας με τις αβεβαιότητες των τιμών των συντεταγμένων. Αντί αυτού, προσδιορίστηκε η μέγιστη αβεβαιότητα με την οποία μπορεί να υπολογιστούν οι συντεταγμένες των σημείων, για τυχαίες τιμές γωνιών α=β=45°.

Η αβεβαιότητα προσδιορισμού των γωνιών α και β είναι $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 12^{cc}$ γιατί ο στόχος είναι κινούμενος. Οι αποστάσεις μέτρησης είναι το πολύ S_{max} = 3.5m. Η αβεβαιότητα προσδιορισμού του κεκλιμένου μήκους είναι: $\sigma_S = \pm 10\mu m \pm 0.5\mu m/m$, άρα $\sigma_{Smax} = \pm$ 0.010mm. Σύμφωνα με τον τύπο 5.4 προκύπτει πως η μέγιστη αβεβαιότητα προσδιορισμού οριζόντιου μήκους είναι:

$\sigma_{Dmax} = \pm$ 0.026mm

Από τους τύπους 5.1, 5.2, 5.3, προκύπτει πως το μέγιστο σφάλμα προσδιορισμού των συντεταγμένων για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4% είναι:

$\boldsymbol{\sigma_{x/max} = \pm 0.042}$**mm**

$\boldsymbol{\sigma_{y/max} = \pm 0.042}$**mm**

$\boldsymbol{\sigma_{z/max} = \pm 0.027}$**mm**

Το μέτρο του συνολικού σφάλματος προσδιορισμού προκύπτει από τον τύπο 5.5 και είναι:

$\boldsymbol{\sigma_{total} =\pm 0.065}$**mm**

Για τον προσδιορισμό των αποκλίσεων των σημείων από την ονομαστική επιφάνεια επιλέχθηκε πέρα από τον αναλυτικό τρόπο, να χρησιμοποιηθεί και γραφικός τρόπος που θα βοηθήσει στην καλύτερη εξαγωγή συμπεράσματος για την κατάσταση του εργαλείου. Η γραφική επίλυση έγινε στο περιβάλλον του Axyz View & CAD, το οποίο διαθέτει τα κατάλληλα εργαλεία για μια τέτοια εργασία. Πρώτο βήμα λοιπόν, ήταν η εισαγωγή των μετρημένων σημείων στο Axyz CAD. Επόμενο βήμα ήταν η εισαγωγή της θεωρητικής επιφάνειας, δηλαδή του ψηφιακού σχεδίου του εργαλείου. Το Axyz CAD παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής μοντέλων CAD από άλλες πηγές, αναλύοντας τα περιεχόμενα του μοντέλου σε σημεία, γραμμές και επιφάνειες. Σε αρκετές περιπτώσεις χρειάζεται να γίνει κάποιος μετασχηματισμός στο εισαγόμενο σχήμα ώστε αυτό να αναφέρεται στο ίδιο σύστημα αναφοράς με τα υπόλοιπα στοιχεία, αλλά κάτι τέτοιο δεν χρειάστηκε στην συγκεκριμένη περίπτωση.

Μετά την εισαγωγή όλων των δεδομένων στο Axyz CAD, ορίστηκε στο λογισμικό η ποσότητα της παράλληλης μετατόπισης (offset) που πρέπει να εφαρμοστεί στα μετρημένα σημεία λόγω της βάσης και του στόχου. Το μέτρο της μετατόπισης είναι 12.7mm (το άθροισμα του ύψους της βάσης του στόχου και της ακτίνας του στόχου CCR 0.5in.) και η φορά της από το μετρημένο σημείο προς την θεωρητική επιφάνεια. Εφόσον δεν συνυπολογιζόταν η μετατόπιση αυτή, οι αποκλίσεις θα εμφανίζονταν μεγαλύτερες από τις πραγματικές και τα αποτελέσματα θα ήταν αναληθή. Μετά τις παραπάνω διεργασίες, το Axyz είναι σε θέση να υπολογίσει τις ζητούμενες αποκλίσεις. Ο τρόπος που γίνεται αυτό είναι προβάλλοντας το μετρημένο σημείο στην επιφάνεια με την οποία συγκρίνεται και υπολογίζοντας την απόσταση των δυο σημείων. Η απόσταση αυτή αναλύεται σε αποκλίσεις κατά τον κάθε άξονα ξεχωριστά ή και ως ένα συνολικό διάνυσμα απόκλισης στο τριδιάστατο χώρο. Ακόμα δίνονται οι συντεταγμένες X, Y, Z του σημείου προβολής κάθε μετρημένου στοιχείου. Τέλος, εφόσον εισαχθεί η ανοχή των αποκλίσεων, το λογισμικό υπολογίζει πόσα σημεία βρίσκονται εντός της ανοχής και πόσα την υπερβαίνουν. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η επιτρεπόμενη απόκλιση των μετρημένων σημείων από την ονομαστική επιφάνεια είναι $\boldsymbol{\delta_s = \pm 1.524}$**mm** (0.060in.), ποσότητα που μπορεί να ανιχνευθεί εύκολα δεδομένου ότι η αβεβαιότητα προσδιορισμού των συντεταγμένων υπολογίστηκε προηγουμένως το πολύ σε $\sigma_{total} = \pm$ 0.065mm.

6.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Ως αποτέλεσμα της προηγούμενης διαδικασίας προέκυψε ότι σχεδόν όλα τα μετρημένα σημεία βρίσκονται εντός των ανοχών, συνεπώς το εργαλείο πληροί τον περιοδικό έλεγχο και δεν χρειάζεται κάποια επιδιόρθωση. Αναλυτικότερα, μετρήθηκαν 1612 σημεία πάνω στις μεταλλικές λωρίδες του εργαλείου, εκ των οποίων τα 1609 βρίσκονται εντός των ανοχών. Τα 3 σημεία που υπερβαίνουν τις ανοχές (συνεχόμενα σημεία μέτρησης) φαίνονται στον Πίνακα 6.2. Τα σημεία αυτά θεωρούνται αποτέλεσμα χονδροειδών σφαλμάτων, καθώς αφενός οι αποκλίσεις τους είναι πολύ υψηλότερες από αυτές των υπόλοιπων σημείων (ως και 20mm με όριο το 1.5mm), αφετέρου τα γειτονικά σημεία τους είναι εντός της ανοχής και δεν συνηγορούν για κάποια τοπική παραμόρφωση του εργαλείου. Πιθανότερη αιτία αυτών των χονδροειδών σφαλμάτων είναι η απώλεια της επαφής της βάσης με την επιφάνεια μέτρησης σε εκείνη την περιοχή. Οι μετρήσεις αυτές θεωρούνται εφεξής ως μη γενόμενες και τα σημεία αυτά δεν συμμετέχουν στην ανάλυση των δεδομένων που γίνεται παρακάτω.

Σημείο	Απόκλιση κατά X(mm)	Απόκλιση κατά Y(mm)	Απόκλιση κατά Z(mm)	Μέτρο Διανύσματος Απόκλισης(mm)
FS816_5:17	3.761	2.808	-19.741	20.291
FS816_5:18	-0.972	0.367	-14.931	14.967
FS816_5:19	0.125	0.109	-4.454	4.457

Πίνακας 6.2 Αποκλίσεις των σημείων που υπερέβησαν την επιτρεπόμενη τιμή
Table 6.2 Deviations of points exceeded the allowed value

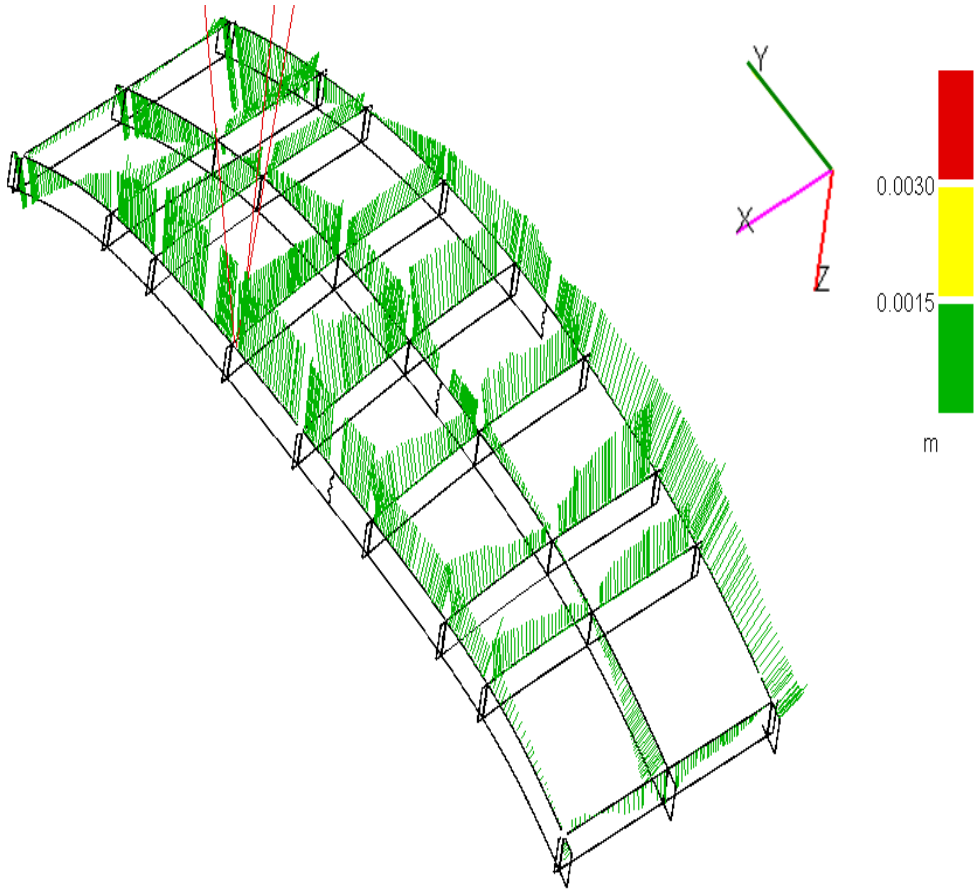
Από το λογισμικό Axyz προκύπτει ένας πίνακας που περιλαμβάνει τις αποκλίσεις κάθε σημείου τόσο κατά κάθε άξονα ξεχωριστά όσο και συνολικά. Για πρακτικούς λόγους, δεν παρατίθενται αναλυτικά τα στοιχεία για όλα τα σημεία, αλλά ένας πίνακας (πίνακας 6.3) που περιλαμβάνει το μέσο όρο των απόλυτων τιμών των αποκλίσεων όλων των σημείων που ανήκουν σε μια λωρίδα. Στην πρώτη στήλη αναγράφεται το όνομα της λωρίδας, στις επόμενες τρεις οι μέσες αποκλίσεις κατά X, Y, Z των σημείων από το σημείο προβολής (δηλαδή την επιφάνεια του εργαλείου) και τέλος το μέτρο του διανύσματος της απόκλισης των σημείων.

Μεταλλική λωρίδα	Απόλυτη Απόκλιση κατά X (mm)	Απόλυτη Απόκλιση κατά Y (mm)	Απόλυτη Απόκλιση κατά Z (mm)	Μέτρο Διανύσματος Απόκλισης (mm)
BL-59.625	0.000	0.027	0.121	0.125
BL-41.3	0.008	0.071	0.379	0.385
BL-31.9	0.021	0.098	0.522	0.532
BL-15.4	0.055	0.092	0.491	0.503
BL0	0.102	0.140	0.753	0.774
BL15.4	0.078	0.050	0.623	0.632
BL31.9	0.042	0.044	0.516	0.521
BL41.3	0.006	0.028	0.306	0.307
BL59.625	0.000	0.012	0.099	0.100
FS778	0.014	0.147	0.547	0.573
FS797	0.005	0.057	0.261	0.271
FS816	0.023	0.059	0.582	0.591
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Επιτρεπόμενη απόκλιση **δs = ±1.524mm**				

Πίνακας 6.3 Μέσοι όροι των απόλυτων τιμών των αποκλίσεων των σημείων ανά μεταλλική λωρίδα.
Table 6.3 Average of the deviation`s absolute values per metal strip

Ακόμα, οι αποκλίσεις κάθε σημείου παρουσιάζονται και γραφικά μέσω του λογισμικού Axyz CAD στο σχήμα 6.5. Οι γραμμές που εμφανίζονται, αναπαριστούν το διάνυσμα της τριδιάστατης απόκλισης (μέτρο και κατεύθυνση) με αρχή του κάθε διανύσματος τη θεωρητική επιφάνεια και συγκεκριμένα το αντίστοιχο σημείο προβολής και τέλος του διανύσματος την πραγματική θέση του σημείου. Με πράσινο χρώμα φαίνονται τα

διανύσματα των σημείων που βρέθηκαν εντός της ανοχής και με κόκκινο χρώμα των τριών σημείων που ήταν εκτός. Για καλύτερη εποπτεία των διανυσμάτων, η κλίμακα σχεδίασης τους είναι 300:1.

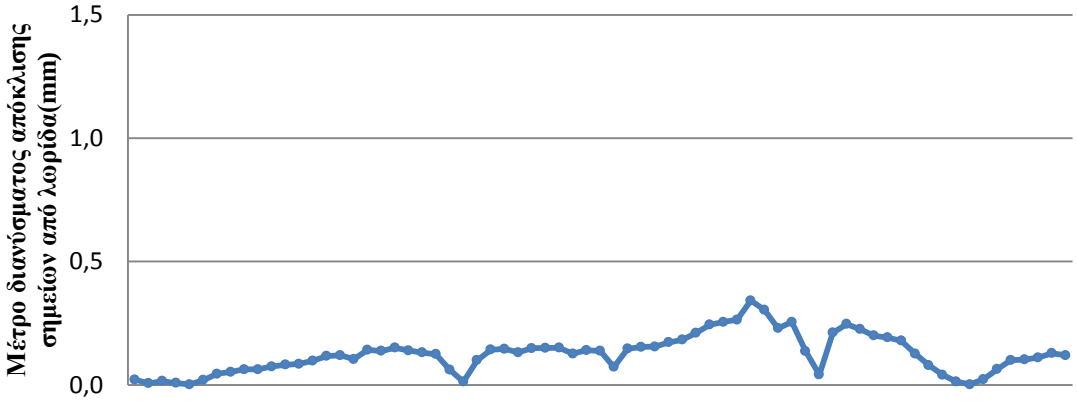


* Τα διανύσματα των αποκλίσεων είναι σε κλίμακα 300:1

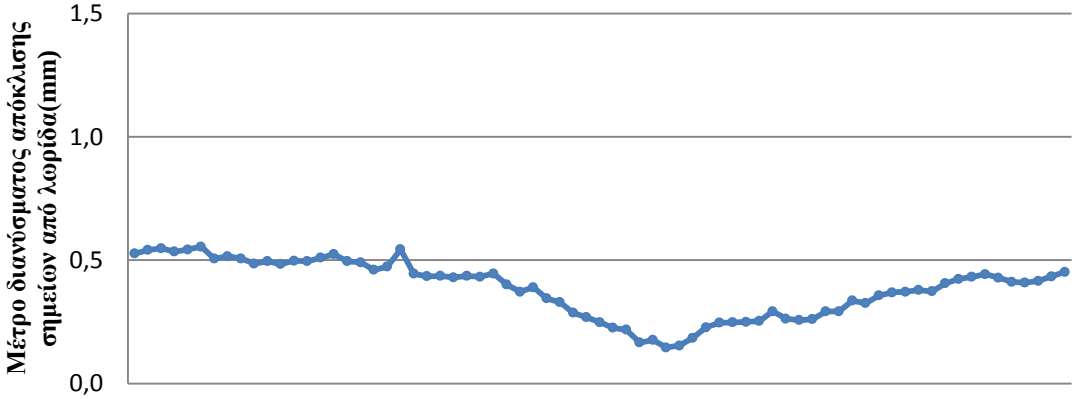
Σχήμα 6.5 Γραφική απεικόνιση των αποκλίσεων των σημείων στις μεταλλικές λωρίδες από το λογισμικό Axyz CAD.

Figure 6.5 Graphical display of the deviations of the points on the metal strips by software Axyz CAD.

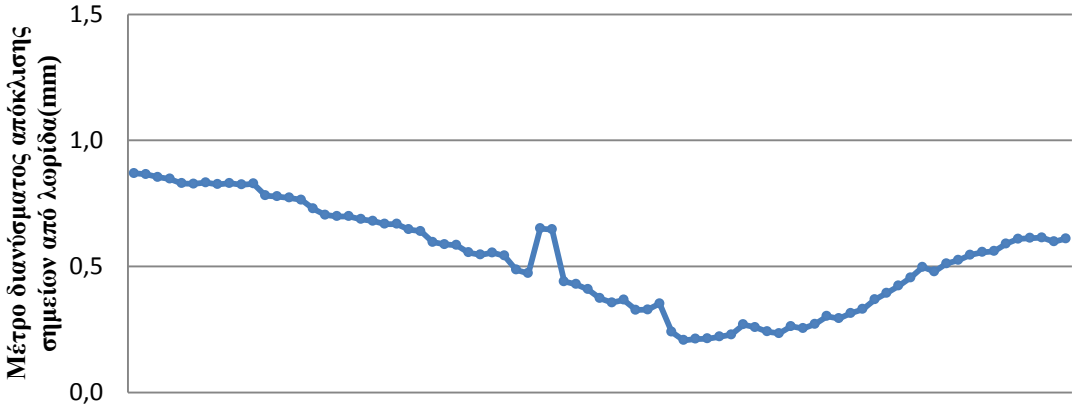
Για την ολοκληρωμένη κατανόηση του μεγέθους των αποκλίσεων και της διακύμανσης τους στα διάφορα σημεία του εργαλείου, σχεδιάστηκαν διαγράμματα αποκλίσεων, ένα για κάθε μεταλλική λωρίδα (σχήμα 6.6). Στα διαγράμματα, κατά μήκος του άξονα x΄x βρίσκεται η εκάστοτε λωρίδα και στον άξονα y΄y το μέτρο του διανύσματος της απόκλισης των σημείων που ανήκουν σε αυτή.



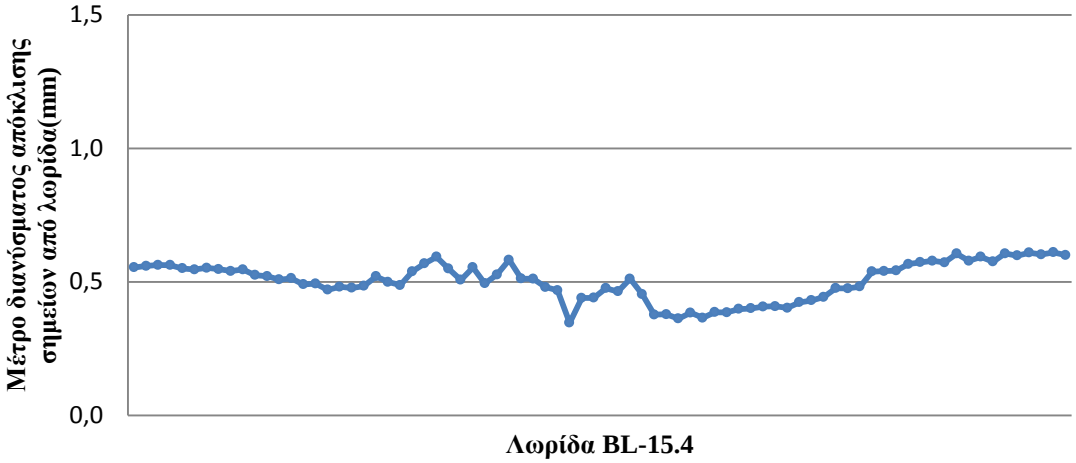
Λωρίδα BL-59.625

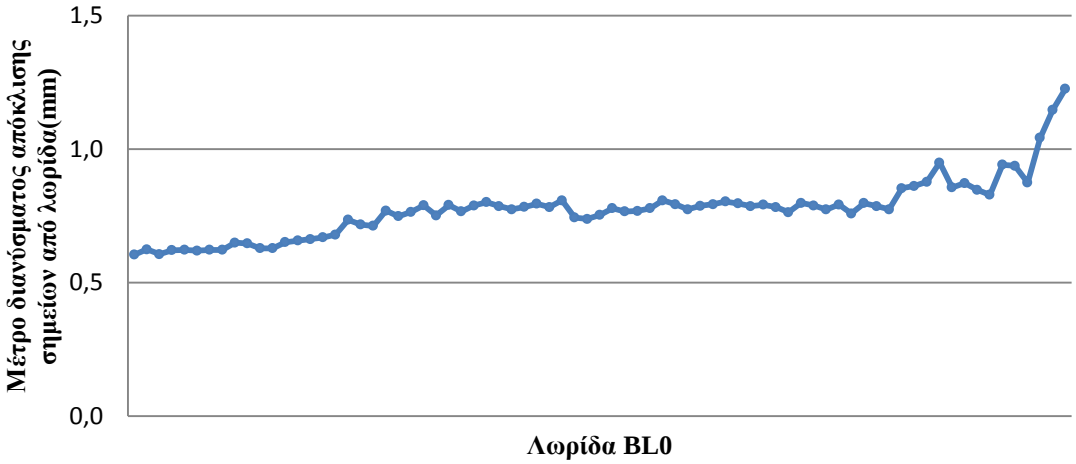


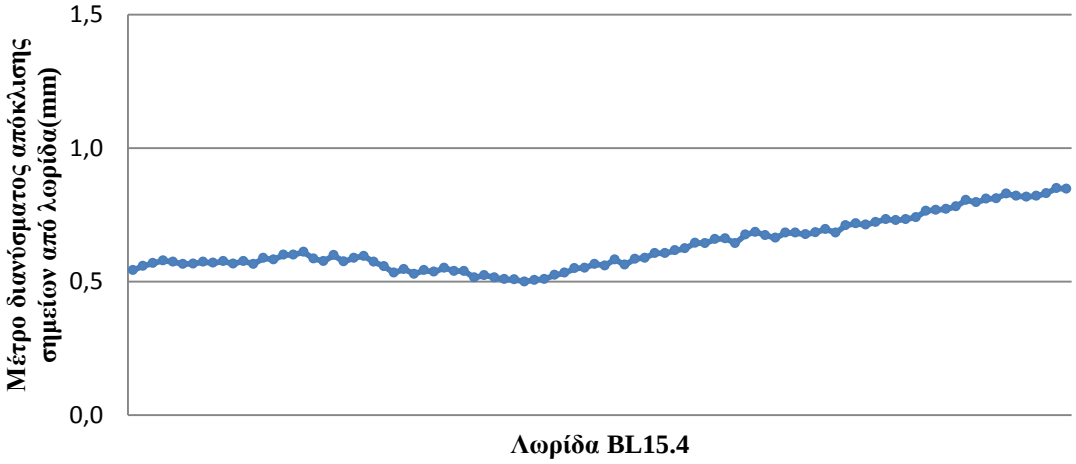
Λωρίδα BL-41.3

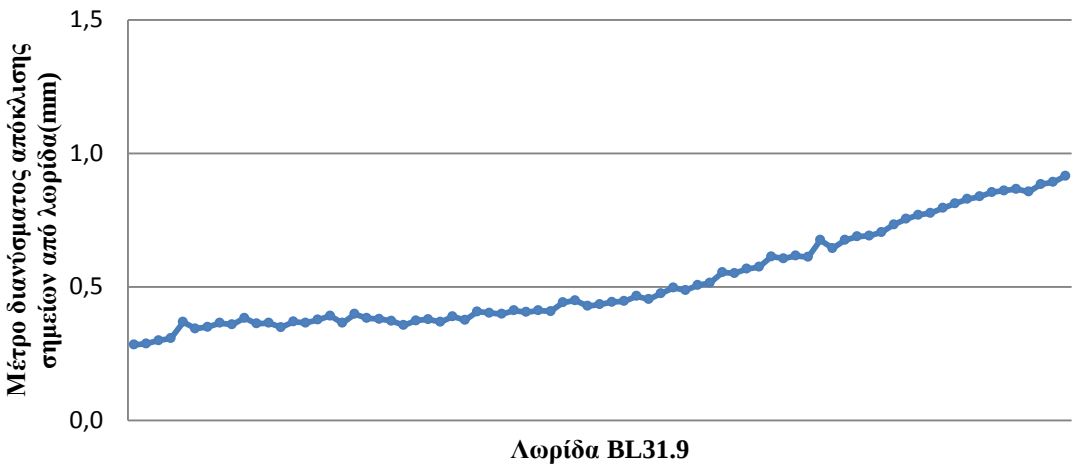


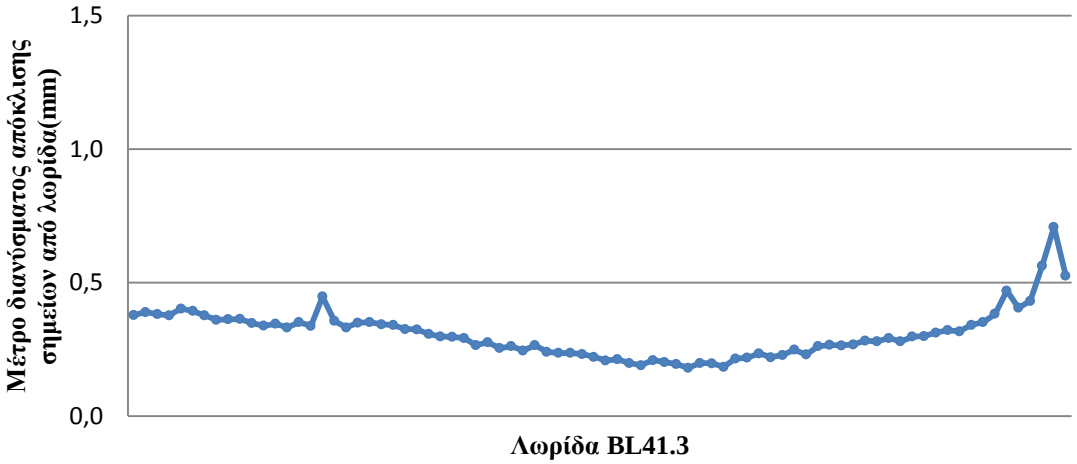
Λωρίδα BL-31.9

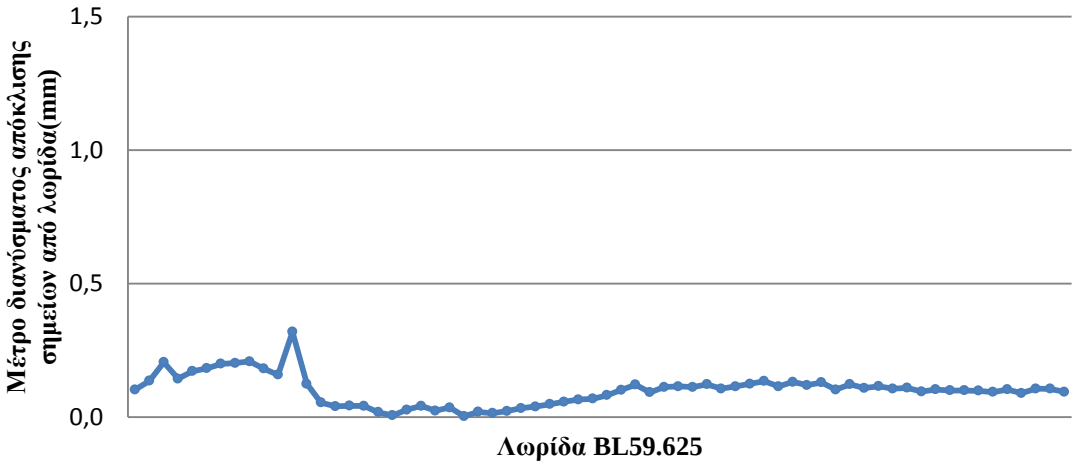

1,5
1,0
0,5
0,0
Μέτρο διανύσματος απόκλισης σημείων από λωρίδα(mm)
Λωρίδα BL-15.4

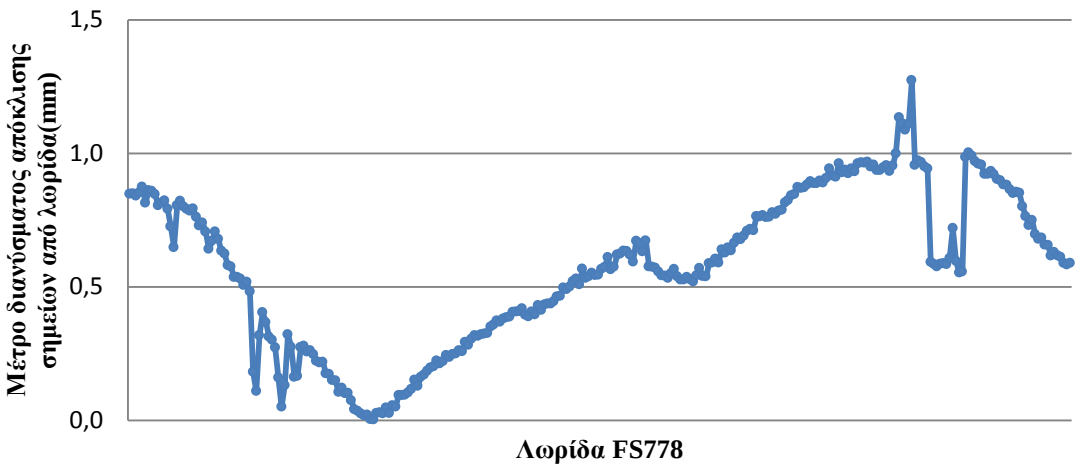

1,5
1,0
0,5
0,0
Μέτρο διανύσματος απόκλισης σημείων από λωρίδα(mm)
Λωρίδα BL0

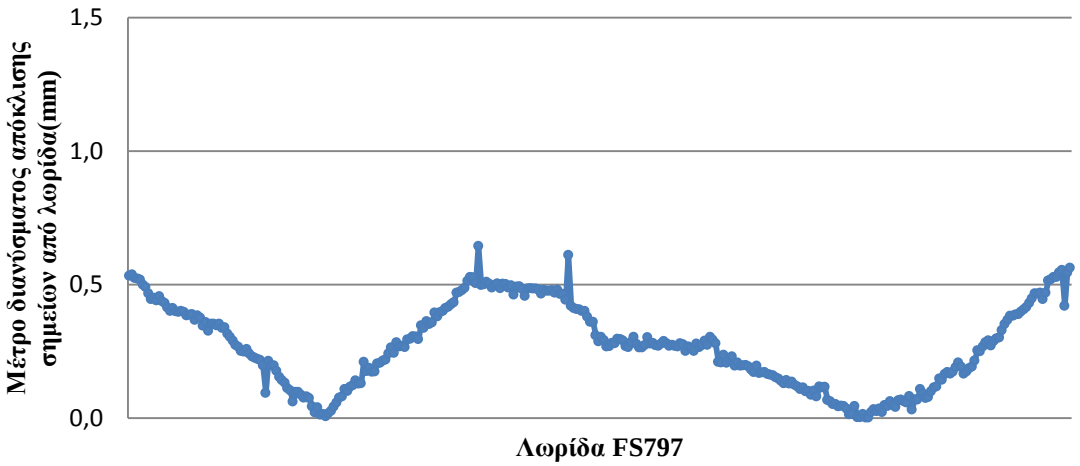

1,5
1,0
0,5
0,0
Μέτρο διανύσματος απόκλισης σημείων από λωρίδα(mm)
Λωρίδα BL15.4

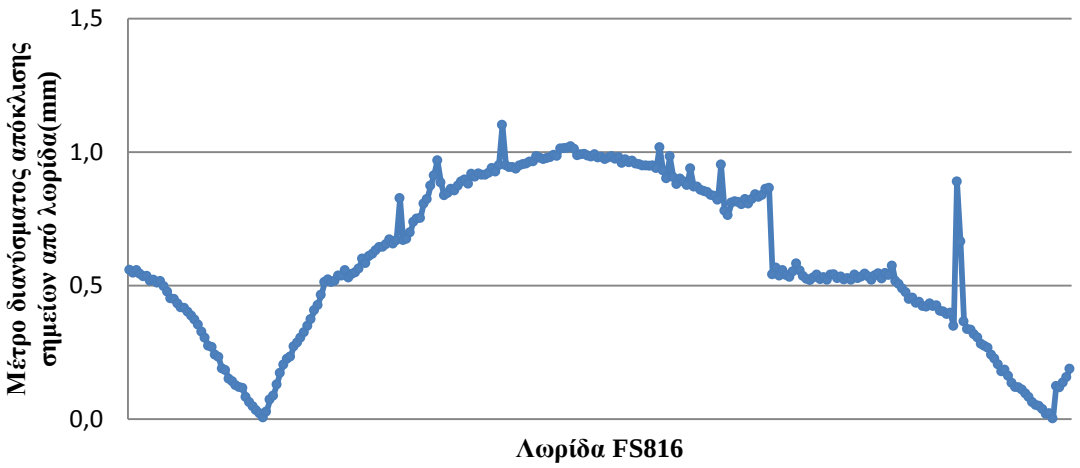

1,5
1,0
0,5
0,0
Μέτρο διανύσματος απόκλισης σημείων από λωρίδα(mm)
Λωρίδα BL31.9


1,5
1,0
0,5
0,0
Μέτρο διανύσματος απόκλισης σημείων από λωρίδα(mm)
Λωρίδα BL41.3


1,5
1,0
0,5
0,0
Μέτρο διανύσματος απόκλισης σημείων από λωρίδα(mm)
Λωρίδα BL59.625







Σχήμα 6.6 Διαγράμματα συνολικής απόκλισης των λωρίδων
Table 6.6 Diagrams of the total deviations per stripe

Από όλα τα προηγούμενα στοιχεία, δηλαδή τον πίνακα 6.3 με τους μέσους όρους των αποκλίσεων ανά λωρίδα, το σχήμα 6.5 με τη γραφική απεικόνιση τους και τα 12 διαγράμματα του σχήματος 6.6 παρατηρούνται τα εξής:

- Οι αποκλίσεις όλων των σημείων είναι ιδιαίτερα μικρές, ικανοποιώντας το όριο του ±1.524mm, ενώ οι περισσότερες τιμές δεν υπερβαίνουν ούτε το ±1mm. Οι ικανοποιητικές αποκλίσεις από τη θεωρητική επιφάνεια υποδηλώνουν την καλή κατάσταση στην οποία βρίσκεται το εργαλείο. Ακόμα αναδεικνύει την ακρίβεια του laser tracker καθώς με άλλους εξοπλισμούς (π.χ. Ολοκληρωμένος Γεωδαιτικός Σταθμός) δεν θα ήταν δυνατή η ανίχνευση αποκλίσεων τέτοιου μεγέθους και δεν θα μπορούσε να εξαχθεί συμπέρασμα για το σχήμα του εργαλείου.
- Οι αποκλίσεις των σημείων κατά τους άξονες X και Y είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές κατά τον άξονα Z. Ενδεικτικά αναφέρεται πως κατά μέτρο ο μέσος όρων των αποκλίσεων όλων των σημείων κατά X είναι 0.023mm, κατά Y είναι 0.080mm, ενώ κατά Z είναι 0.415mm. Μάλιστα, οι αποκλίσεις κατά X είναι μέσα στα όρια της αβεβαιότητας του οργάνου και μπορούν να χαρακτηριστούν και ως θόρυβος για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4% (η ακρίβεια των συντεταγμένων υπολογίστηκε στην ενότητα 6.4 ότι είναι $\sigma_{x/max} = \sigma_{y/max} = \pm$ 0.042mm και $\sigma_{z/max} = \pm$ 0.027mm). Αυτό δείχνει ότι το εργαλείο έχει παραμορφωθεί κυρίως κατά τον άξονα Z, όπως άλλωστε φαίνεται και από το σχήμα 6.5, καθώς τα διανύσματα των αποκλίσεων είναι κατά κύριο λόγο στην διεύθυνση του άξονα z΄z.
- Από τον πίνακα με τα πλήρη στοιχεία των αποκλίσεων, παρατηρείται ότι το σύνολο σχεδόν των αποκλίσεων κατά Z (που ουσιαστικά αποτελεί και την συνολική απόκλιση) έχει αρνητικό πρόσημο, δηλαδή τα μετρημένα σημεία βρίσκονται ψηλότερα από τη θεωρητική επιφάνεια (υπενθυμίζεται ότι όπως είναι τοποθετημένο το εργαλείο, ο άξονας των z αυξάνεται προς τα κάτω). Αυτό διακρίνεται και από το σχήμα 6.5, όπου παρατηρείται ότι τα περισσότερα από τα διανύσματα των αποκλίσεων έχουν κατεύθυνση προς τα αρνητικά του άξονα z΄z. Οι πιθανότερες αιτίες αυτού του φαινομένου είναι δυο: πρώτον, να οφείλονται σε κάποιο λάθος κατά την κατασκευή του εργαλείου, καθώς από την χρήση του δεν δικαιολογείται τέτοια παραμόρφωση. Δεύτερον, οι αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται στη βάση στόχου που χρησιμοποιήθηκε. Εφόσον η βάση έχει υποστεί κάποια παραμόρφωση, τότε η παράλληλη μετατόπιση που εφαρμόστηκε εξαιτίας

της δεν ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα, με αποτέλεσμα η απόκλιση αυτή να εμφανίζεται ως συστηματικό σφάλμα στις μετρήσεις.

- Από την γραφική απεικόνιση των διανυσμάτων των αποκλίσεων (σχήμα 6.5), παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις των σημείων στη μέση του εργαλείου είναι μεγαλύτερες σε μέγεθος συγκριτικά με τις αποκλίσεις στις άκρες του. Ακόμα οι μεσαίες λωρίδες βρίσκονται ψηλότερα από την ονομαστική τους θέση, ενώ οι ακριανές λωρίδες χαμηλότερα. Αυτή η συμπεριφορά, υποδεικνύει ότι το εργαλείο έχει υποστεί μια μικρού μεγέθους κάμψη. Αυτή η παρατήρηση μπόρεσε να γίνει χάρις στο πλήθος των μετρημένων σημείων και χάρις στην γραφική απεικόνιση του Axyz.
- Από τα διαγράμματα του σχήματος 6.6 που αφορούν τις λωρίδες BL, παρατηρείται ότι κατά μέτρο οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εντοπίζονται στη μεσαία μεταλλική λωρίδα (BL0), ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτή, οι αποκλίσεις ελαττώνονται, τόσο από τη μια πλευρά όσο και από την άλλη. Αυτό μεταξύ άλλων που αναφέρθηκαν παραπάνω, δείχνει και μια συμμετρικότητα στις παραμορφώσεις.
- Στις λωρίδες FS, παρατηρείται το αντίθετο καθώς στην μεσαία λωρίδα (FS797) εντοπίζονται οι μικρότερες παραμορφώσεις, ενώ στις άλλες δυο λωρίδες (FS778 και FS816) επικρατούν μεγαλύτερες τιμές.
- Τέλος, ενώ στις λωρίδες BL οι τιμές των αποκλίσεων των σημείων σχηματίζουν μια ομαλή γραφική παράσταση, στις λωρίδες FS παρατηρούνται πολλά σημεία με έντονη διαφορά από τα υπόλοιπα. Πιθανή αιτία αυτού του φαινομένου είναι η συχνή παύση και επανέναρξη των συνεχόμενων μετρήσεων σε αυτές τις λωρίδες λόγω της χρήσης βάσης για το στόχο (βλ. κεφ.6.3). Η εντολή διακοπής των μετρήσεων στο Axyz LTM μπορεί να γινόταν με καθυστέρηση με αποτέλεσμα ο χειριστής του στόχου να είχε ήδη σηκώσει τον στόχο από την επιφάνεια του εργαλείου και να καταγράφονταν ορισμένες λανθασμένες μετρήσεις.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Τέλος, περιλαμβάνει κάποιες προτάσεις για μελλοντική ενασχόληση στο ευρύτερο αντικείμενο.

7.1 Συμπεράσματα

Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία αποτελεί την πρώτη (σε γνώση του συγγραφέα) διπλωματική εργασία στο αντικείμενο, τέθηκαν δυο βασικοί στόχοι: Πρώτον, η μελέτη των αρχών λειτουργίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών της τεχνολογίας laser tracker και δεύτερον, η πειραματική εφαρμογή του εξοπλισμού σε πραγματικές συνθήκες. Στο πλαίσιο ικανοποίησης των στόχων, εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα ειδικά όσον αφορά στα laser trackers.

α. Ακρίβεια μετρήσεων

Το laser tracker αποτελεί έναν μετρητικό εξοπλισμό υψηλής ακρίβειας κυρίως λόγω των συσκευών μέτρησης μήκους που διαθέτει και οι οποίοι εξασφαλίζουν υψηλή ακρίβεια προσδιορισμού αποστάσεων. Στην περίπτωση χρήσης αποστασιόμετρου οι ακρίβειες στο μήκος είναι της τάξης των ±15μm + 1μm/m, ενώ στην περίπτωση χρήσης συμβολόμετρου οι ακρίβειες είναι ακόμα καλύτερες, της τάξης των ± 0.4μm + 0.3μm/m (για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%). Οι τιμές της ακρίβειας των μηκών, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια προσδιορισμού των συνθηκών μέτρησης (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία). Ως εκ τούτου τα laser tracker συνοδεύονται από μετεωρολογικούς σταθμούς ακριβείας.

Η γωνιακή δε ακρίβεια των laser tracker δεν είναι αντίστοιχα υψηλή. Αντιθέτως, είναι χειρότερη από αυτή των περισσότερων γεωδαιτικών σταθμών, καθώς κυμαίνεται από 3^{cc} ως 15^{cc}, ανάλογα την απόσταση μέτρησης. Παρόλα αυτά η συνολική ακρίβεια διατηρείται σε υψηλά επίπεδα εφόσον αποφεύγεται η μέτρηση σε πολύ κοντινές αποστάσεις (1 - 2m), όπου το γωνιακό σφάλμα είναι μέγιστο. Ακόμα, τοποθετώντας το όργανο συνευθειακά με το αντικείμενο μέτρησης, τα σφάλματα προσδιορισμού των συντεταγμένων των σημείων του αντικειμένου, εξαρτώνται περισσότερο από την ακρίβεια μέτρησης των μηκών παρά από αυτή των γωνιών, οδηγώντας έτσι σε αποτελέσματα υψηλότερης ακρίβειας.

Όπως υπολογίστηκε και στις εφαρμογές των κεφαλαίων 5 και 6, με χρήση συστήματος laser tracker είναι δυνατό να προσδιορίζονται οι τριδιάστατες συντεταγμένες ενός σημείου με ακρίβειες μικρότερες από ±50μm. Χάρις στις ακρίβειες αυτές, κατέστη δυνατή η εκτέλεση των εφαρμογών στα εργαλεία συναρμολόγησης, όπου πραγματοποιήθηκαν μεταξύ άλλων μετασχηματισμοί συστημάτων αναφοράς με επιτρεπόμενη απόκλιση ±0.127mm (βλ. κεφ. 5.2.1 και 5.3.1), έλεγχοι θέσης σημείων με ακρίβεια καλύτερη από ±0.381mm και συγκρίσεις σημείων με μοντέλα CAD με μέση ακρίβεια της τάξης των ±0.750mm.

β. Απλότητα λήψης μετρήσεων

Η τεχνολογία laser tracker έχει ως αποτέλεσμα οι διαδικασίες μέτρησης και επεξεργασίας να είναι ιδιαίτερα απλές. Όπως φάνηκε και στις εφαρμογές των κεφαλαίων 5 και 6, για την εκτέλεση των μετρήσεων δεν απαιτήθηκε ούτε κέντρωση ούτε οριζοντίωση του οργάνου. Η εκτέλεση μετασχηματισμών από ένα τυχαίου προσανατολισμού και θέσης σύστημα αναφοράς (αυτό που ορίζεται από το laser tracker) σε αυτό του αντικειμένου μέτρησης, αφαιρεί την ανάγκη ύπαρξης σημείων με γνωστές συντεταγμένες προκειμένου να κεντρωθεί το όργανο ή την ανάγκη οριζοντίωσης του (η μόνη περίπτωση να χρειαστεί να οριζοντιωθεί το όργανο -γίνεται με ειδικό παρελκόμενο- είναι προκειμένου να ελεγχθεί κάποια κατακορυφότητα). Επιπρόσθετα λόγω της λειτουργίας παρακολούθησης του στόχου και της αυτόματης σκόπευσης δεν απαιτείται κάποιος χειριστής για το όργανο. Αυτά τα στοιχεία εξαλείφουν κάποια από σφάλματα των συνήθων μετρητικών διαδικασιών (κέντρωσης, οριζοντίωσης, σκόπευσης) και κάνουν την διαδικασία μέτρησης πολύ εύκολη ακόμα και για έναν ανειδίκευτο χρήστη.

Για την εκτέλεση των μετρήσεων απαιτείται ένας χειριστής του στόχου, που θα τον τοποθετεί στα διαδοχικά σημεία μέτρησης και ένας που θα χειρίζεται τον Η/Υ. Με την χρήση τηλεχειριστηρίου ή Η/Υ χειρός (που συνοδεύει τα σύγχρονα συστήματα laser tracker) απαιτείται ουσιαστικά ένας μόνο χειριστής. Η μόνη δυσκολία των μετρητικών διαδικασιών με laser tracker είναι ότι οι συμμετέχοντες στις μετρήσεις πρέπει να έχουν ισχυρή αντίληψη του τριδιάστατου χώρου και των συστημάτων αναφοράς που έχουν οριστεί.

γ. Ταχύτητα μετρήσεων

Άμεση συνέπεια των προηγουμένων είναι και η **ταχύτητα** με την οποία εκτελείται μια εφαρμογή με laser tracker. Το σύνολο των μετρητικών διαδικασιών για την εφαρμογή του

κεφαλαίου 6, δηλαδή η μεταφορά στο σύστημα αναφοράς του εργαλείου και η μέτρηση 1600 σημείων, διήρκεσε περίπου 1h. Χαρακτηριστική είναι η αναφορά από τη χρήση laser tracker σε εφαρμογή σε υδροηλεκτρικό εργοστάσιο, όπου εργασίες που απαιτούσαν 6-8h για την εκτέλεση τους, χρειάστηκαν μόνο 5-10min με το laser tracker (Turner & Ursel, 2008).

Η απουσία σκοπεύσεων είναι ένα στοιχείο που κάνει τη μετρητική διαδικασία σημαντικά γρηγορότερη, ενώ αξιοσημείωτη είναι και η ταχύτητα εκτέλεσης των μετρήσεων αφού τα laser tracker είναι ικανά να μετρήσουν ακόμα και 1000σημεία/sec. Ακόμα, τα μετρημένα στοιχεία μεταφέρονται αυτόματα σε Η/Υ, οπότε 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, όπως σε αυτή του υποκεφαλαίου 4.2.2, φεύγοντας από το πεδίο μετρήσεων, να έχει ολοκληρωθεί και η επεξεργασία.

Οι πηγές καθυστέρησης των μετρήσεων είναι δυο: η απαιτούμενη προθέρμανση του οργάνου πριν την έναρξη των μετρήσεων, διάρκειας περίπου 20-25min και η απώλεια του στόχου από τη δέσμη μέτρησης. Αν κατά την διάρκεια των μετρήσεων η δέσμη μέτρησης χάσει την οπτική επαφή με το στόχο, τότε πρέπει αυτός να σταθεροποιηθεί σε κάποιο σημείο και να γίνει χειροκίνητη σκόπευση του. Αν χρησιμοποιείται δε συμβολόμετρο, το σημείο αυτό πρέπει να είναι και γνωστών συντεταγμένων. Η χρήση ενσωματωμένων ψηφιακών μηχανών στα laser tracker, συμβάλλει στον αυτόματο εντοπισμό του στόχου από το όργανο, μειώνοντας έτσι τον χρόνο της καθυστέρησης.

δ. Λογισμικό Επεξεργασίας

Σημαντικό κεφάλαιο ενός συστήματος laser tracker αποτελεί το **λογισμικό**. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το Leica Axyz, το οποίο βρίσκεται εγκατεστημένο στον Η/Υ που είναι συνδεδεμένος με το όργανο. Χωρίς το λογισμικό και ειδικότερα το υποπρόγραμμα Axyz LTM, είναι αδύνατο να εκτελεστούν μετρήσεις, αφού ο χειρισμός του οργάνου γίνεται αποκλειστικά μέσα από αυτό (εντολή εκτέλεσης μέτρησης, ορισμός τύπου μετρήσεων, ορισμός στόχου ή παρελκόμενων κ.α.). Εκτός από την πλατφόρμα που αφορά τη μετρητική διαδικασία, το Axyz αποτελεί και ένα πολύ πλήρες και χρήσιμο λογισμικό επεξεργασίας. 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.

Στην εφαρμογή του κεφαλαίου 5, ζητήθηκε μεταξύ άλλων ο έλεγχος του επιπέδου δυο μεταλλικών λωρίδων. Ορίζοντας το ονομαστικό επίπεδο των λωρίδων στο Axyz και μέσω σχετικής εντολής, στην οθόνη του Η/Υ κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, εμφανιζότανε η απόσταση του μετρούμενου σημείου από το ονομαστικό επίπεδο. Η πληροφορία της απόστασης σε πραγματικό χρόνο κρίθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη για την εξαγωγή κάποιων πρώτων συμπερασμάτων. Στην εφαρμογή του κεφαλαίου 6, έγινε χρήση του Axyz CAD, μέσω του οποίου συγκρίθηκαν μετρημένα σημεία της επιφάνειας ενός εργαλείου με ένα μοντέλο CAD που αναπαριστούσε την ονομαστική επιφάνεια. Η γραφική απεικόνιση των αποκλίσεων που εμφανίστηκε από το λογισμικό (βλ. σχήμα 6.5) ήταν καθοριστικής σημασίας για την αντίληψη των παραμορφώσεων της υπό έλεγχο επιφάνειας.

ε. Χρήση laser tracker για συνήθεις τοπογραφικές εργασίες

Όσον αφορά στο κατά πόσο ο Τοπογράφος Μηχανικός μπορεί να αξιοποιήσει την τεχνολογία laser tracker σε άλλες εργασίες συναντώνται δυο προβληματισμοί. Ο πρώτος προβληματισμός έγκειται στο γεγονός πως, προς το παρόν τουλάχιστον, τα laser tracker είναι ακατάλληλα για εργασία σε εξωτερικό χώρο. Οι ασταθείς περιβαλλοντικές συνθήκες προκαλούν μεγάλα σφάλματα στις μετρήσεις του συμβολόμετρου οπότε οι μετρήσεις δεν θα χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια (βασικά δεν θα μπορούν καν να εκτελεστούν λόγω των περιορισμών που εισάγονται στο λογισμικό των οργάνων). Ο δεύτερος προβληματισμός αφορά στην ακρίβεια του οργάνου. Γεγονός είναι πως οι ακρίβειες που παρέχει είναι κατά πολύ καλύτερες από αυτές που συναντώνται συνήθως σε τοπογραφικές εργασίες. Από την στιγμή που οι συνήθεις απαιτήσεις καλύπτονται από άλλα όργανα, όπως οι γεωδαιτικοί σταθμοί, η απόκτηση ενός laser tracker κρίνεται πολυτέλεια για τον Τοπογράφο, δεδομένου και του υψηλού κόστους αγοράς του. Παρόλα αυτά, για εργασίες σε εσωτερικό χώρο με σταθερές συνθήκες, η χρήση ενός tracker θα οδηγούσε σε αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας με πολύ ευκολότερο τρόπο και σε πολύ λιγότερο χρόνο από το να χρησιμοποιηθούν 2 ή και παραπάνω γεωδαιτικοί σταθμοί.

στ. Η θέση του Τοπογράφου Μηχανικού στο βιομηχανικό χώρο

Τέλος, από την επαφή με το βιομηχανικό χώρο και τις μετρητικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτόν ,εξάχθηκαν κάποια συμπεράσματα όσον αφορά στη θέση του Τοπογράφου Μηχανικού στον τομέα αυτό. Στις βιομηχανίες επικρατούν τυποποιημένες

διαδικασίες οι οποίες υπαγορεύουν πλήρως τον τρόπο ελέγχου μιας κατασκευής. Στις οδηγίες περιγράφεται λεπτομερώς, τι πρέπει να ελεγχθεί, ποια σημεία πρέπει να μετρηθούν, με ποιο τρόπο να μετρηθούν, τι ακρίβεια επιδιώκεται, με ποιο τρόπο ελέγχεται το τελικό αποτέλεσμα κλπ. Αυτή η τυποποίηση κάνει ευκολότερες τις κατά τα άλλα σύνθετες και απαιτητικές διαδικασίες ελέγχου. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως ανακύπτουν θέματα που δεν σχετίζονται με τις συνηθισμένες διαδικασίες ελέγχου, όπως λόγου χάριν η εμφάνιση παραμορφώσεων σε κάποια κατασκευή λόγω ατυχήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι υπεύθυνοι των μετρήσεων πρέπει να σχεδιάσουν μόνοι τους την διαδικασία ελέγχου που θα αποφανθεί για την κατάσταση του αντικειμένου. Ο Τοπογράφος Μηχανικός ως μια ειδικότητα που εστιάζει στη συλλογή και την ανάλυση των μετρήσεων και των σφαλμάτων τους, αποτελεί την κατάλληλη επιλογή για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων, καθώς αντιλαμβάνεται καλύτερα από τον καθένα τον χώρο και τις ιδιότητες του. Ακόμα, μπορεί να συμβάλλει στην βελτίωση των τωρινών διαδικασιών ελέγχου, συμβάλλοντας στην ταχύτερη και αποτελεσματικότερη εκτέλεση τους.

7.2 Προτάσεις

Σε συνέχεια της έρευνας που έγινε σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο σχετικά με την τεχνολογία laser tracker, γίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

α. Εναλλακτικές εφαρμογές με χρήση laser tracker

Καταρχάς, προτείνεται να πραγματοποιηθούν και άλλες εφαρμογές με laser tracker, διαφορετικής φύσεως από αυτές που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας αυτής. Ενδεικτικά, θα μπορούσαν να εκτελεστούν ορισμένες τυπικές εφαρμογές για laser tracker (βλ. κεφ. 3.8) όπως: εφαρμογές συναρμολόγησης, εφαρμογές χαράξεων σε κατασκευές (σε εσωτερικό χώρο), εφαρμογές ευθυγραμμίσεων (μαγνητών η επιταχυντών σωματιδίων) και εφαρμογές που θα περιλαμβάνουν μετρήσεις δυναμικών φαινομένων. Η εκτέλεση όλων αυτών των εφαρμογών θα συντελέσει στην ολοκληρωμένη και πλήρη κατανόηση της τεχνολογίας laser tracker.

β. Διερεύνηση εναλλακτικών τεχνικών λειτουργίας

Άλλη κατηγορία προτάσεων για περαιτέρω έρευνα που αφορά τα laser trackers είναι η συνεργασία τους με τα νέα παρελκόμενα, όπως οι ηλεκτρονικοί ράβδοι κρυφού σημείου

και οι σαρωτές χειρός (βλ. κεφ. 3.4.2). Με τη χρήση αυτών των παρελκόμενων οι δυνατότητες του laser tracker διευρύνονται σημαντικά και το σύστημα αποδεσμεύεται από την ανάγκη για άμεση επαφή με το αντικείμενο μέτρησης. Σκοπός της διερεύνησης, είναι ο τρόπος συνεργασίας με το όργανο, η αρχή λειτουργίας των παρελκόμενων αυτών και οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται με τη χρήση τους.

γ. Ακρίβεια σκοπεύσεων και λειτουργία παρακολούθησης

Ακόμα σκόπιμο κρίνεται να ερευνηθεί η ακρίβεια με την οποία σκοπεύεται κάθε φορά το κέντρο του στόχου, κάτι που έχει άμεσο αντίκτυπο και στην λειτουργία παρακολούθησης. Κάποιες πρώτες έρευνες έχουν γίνει σε αυτή τη κατεύθυνση, όπου και βρέθηκε ότι οι έκκεντρες σκοπεύσεις εισάγουν αβεβαιότητα γύρω στα ±0.3μm (Umetsu K. et al, 2005). Αρκετά σημαντικό θα είναι επίσης να προσδιοριστεί η επίδραση της ταχύτητας του στόχου στην ακρίβεια σκόπευσης, προκειμένου να βρεθεί το πόσο υψίσυχνα φαινόμενα μπορούν να παρακολουθούνται με ένα laser tracker και με τι ακρίβεια γίνεται αυτό. Τέλος, επίδραση στην ποιότητα σκόπευσης και την μέγιστη ταχύτητα του στόχου έχει και η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ αυτού και του laser tracker. Αν και κάτι τέτοιο δεν έχει αποδειχθεί μέσα από έρευνα, διαφαίνεται ότι στις πολύ πλάγιες σκοπεύσεις ή όταν η κατακόρυφη γωνία είναι πολύ μεγάλη (από ±70° και πάνω) η ακρίβεια μέτρησης των γωνιών με laser tracker ελαττώνεται.

δ. Διερεύνηση συνδυαστικής χρήσης laser tracker με άλλους εξοπλισμούς

Αντικείμενο έρευνας μπορεί να είναι επίσης και η συνδυαστική χρήση του laser tracker με άλλους εξοπλισμούς είτε για την εκτέλεση σύνθετων μετρήσεων είτε για τον έλεγχο του ενός από τους δυο εξοπλισμούς. Για παράδειγμα, έχουν γίνει πειραματικές διαδικασίες για τον υπολογισμό των γωνιακών σφαλμάτων ενός laser tracker από μια σταθερή Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων (Ouyang J.F. et al, 2004). Η σύνδεση των δυο εξοπλισμών μπορεί να γίνει προσαρμόζοντας ένα στόχο CCR πάνω στη ράβδο του αισθητήρα της ΜΜΣ. Κατόπιν αυτή προγραμματίζεται να εκτελέσει συγκεκριμένες κινήσεις (π.χ. να διαγράψει ένα πλήρη κύκλο), ενώ το laser tracker παρακολουθεί και καταγράφει τις συνεχόμενες θέσεις του στόχου. Συγκρίνοντας τις συντεταγμένες των σημείων, όπως υπολογίζονται από κάθε εξοπλισμό και αν θεωρηθούν οι συντεταγμένες από τη ΜΜΣ ορθές, η διαφορά των δυο τιμών θα αποτελεί το σφάλμα προσδιορισμού του laser tracker. Τα δυο συστήματα θα μπορούσαν επίσης να συνδυαστούν για την εκτέλεση από κοινού μετρήσεων. Θεωρητικά, οι δυνατότητες που προκύπτουν από τη σύνδεση δυο εξοπλισμών

με τόσο υψηλή ακρίβεια και τόσο ιδιαίτερα χαρακτηριστικά είναι πολλές και απομένει να δοκιμαστούν και σε πρακτικό επίπεδο.

ε. Καθιέρωση μετρολογικών ελέγχων για το σύστημα laser tracker

Τέλος, προτείνεται να καθιερωθεί μια πλήρης σειρά μετρολογικών ελέγχων στα συστήματα laser tracker με τους οποίους θα προσδιορίζονται οι πραγματικές τους προδιαγραφές. Οι κανονισμοί B89.4.19 που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.7, ορίζουν ελέγχους για τον προσδιορισμό της ακρίβειας μέτρησης γωνιών και μήκους για επίπεδο εμπιστοσύνης 95.4%. Πέραν των ελέγχων που ορίζουν οι κανονισμοί αυτοί θα πρέπει να αναπτυχθούν διαδικασίες ελέγχου για την επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία) στον χώρο των μετρήσεων στην ακρίβεια του μήκους και για την ακρίβεια των μετρήσεων προς κινούμενο στόχο για διάφορες ταχύτητες κίνησης. Σε αυτό αναμένεται να βοηθήσουν αρκετά οι επίσημες οδηγίες ISO10360 που αφορούν τους μετρητικούς εξοπλισμούς που χρησιμοποιούνται σε μετρολογικές εφαρμογές και ειδικά το μέρος 10 αυτών των οδηγιών που πρόκειται να συνταχθεί στο εγγύς μέλος και θα αφορά αποκλειστικά τους μετρολογικούς ελέγχους για ένα laser tracker (Peggs et al., 2009).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αθανασιάδης Κ. Ν., Μέτρηση, Μετρολογία και Αξιώματα της Μετρολογίας, Τεχνικά Χρονικά, Μάρτιος-Απρίλιος 2006
2. Βοσνιάκος Γ. Χ., Μετρολογία Εργαλειομηχανών CNC, 2009
3. Δογγούρης Σ, Βιομηχανική Γεωδαισία, Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2005
4. Ζήσος Γεώργιος, Μέτρηση Δακτυλίων, Στατιστική Επεξεργασία των Μετρήσεων και Ανάπτυξη Σχετικής Οδηγίας Μέτρησης σε Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων(CMM), Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2009
5. Καραχάλιου Χ., Μανσούρ Γκ., Διαστατική Μετρολογία, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2010
6. Μπαλοδήμος Δ. Δ., Σταθάς Δ., Αραμπατζή Ο., Γεωδαισία-Δίκτυα-Αποτυπώσεις-Χαράξεις, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2006
7. Μπαλοδήμος Δ. Δ., Σταθάς Δ., Γεωδαιτικά Όργανα και Μέθοδοι Μέτρησης Γωνιών και Μηκών, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 1993
8. Πανταζής Γ., Γεωμετρική Τεκμηρίωση Τεχνητών και Φυσικών Κατασκευών σε μεγάλες κλίμακες, Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2010
9. Πέτσα Ε., Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας, Τμήμα Τοπογραφίας, ΤΕΙ Αθήνας, 2000
10. Σόφης Α., Γεωμετρική Τεκμηρίωση Νομέων Υ/Β με Μεθόδους Βιομηχανικής Γεωδαισίας, ΕΜΠ, Αθήνα, 2008
11. Σταμπουλόγλου Ε., Καράντζαλος Κ., Γεωργόπουλος Α., Συστήματα Διαχείρισης Ποιότητας, Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2005
12. Bridges B., Hagan K., Laser Tracker Maps Three-Dimensional Features, The Industrial Physicist, American Institute of Physics, August/September 2001
13. Cuypers W. et al., Optical Measurement Techniques for Mobile and Large-Scale Dimensional Metrology, Optics and Lasers in Engineering 47, 2009
14. Kyle S., Axyz Modules: Software Reference Manual, Hardware Installation Manual, Leica Geosystems, 2000
15. Kyle S., Loser R., Warren D., Automated part positioning with the laser tracker, 1997

16. Liu W., Wang Z., Coordinate Uncertainty Analyses of Coupled Multiple Measurement Systems, Measurement Science and Technology, IOP Publishing, 2010
17. Mayoud Michel, Large Scale Metrology for Research and Industry – Application to Particle Accelerators and Recent Developments, FIG Working Week 2004, Athens, Greece, 22-27 May 2004
18. Muelaner J. E., Cai B., Maropoulos P. G., Large Volume Metrology Instrument Selection and Measurability Analysis, Department of Mechanical Engineering, The University of Bath, Bath, UK, 2009
19. Muelaner J., Maropoulos P. G., Large Scale Metrology in Aerospace Assembly, 5th International Conference on Digital Enterprise Technology, Nantes, France, 22-24 October 2008
20. Niemeier Wolfgang, Tutorial: Error Theory and Adjustment of Networks, Part: Laser Tracker, Technische Universitat Braunschweig, Hamburg, 2010
21. Suter N., Laser Tracker 6DoF Technology in Automated Solutions, Leica Geosystems AG, 2009
22. Ouyang J.F. et al, Laser Tracker Calibration Using Coordinate Measuring Machine, Precision Engineering Institute, Henan Polytechnic University, China, 2004
23. Peggs G. N., Maropoulos P. G., Hughes E. B., Forbes A. B., Robson S., Ziebart M., Muralikrishnan B., Recent Developments in Large-Scale Dimensional Metrology, Proc. IMechE Vol. 223 Part B: J. Engineering Manufacture, 2009.
24. Ruland R. E., The Chesapeake Laser Tracker in Industrial Metrology, Proceedings of the Third International Workshop on Accelerator Alignment, Annecy, September/October 1993
25. Schertenleib W., Measurement of Structures (Surfaces) Utilizing the Smart 310 Laser-Tracking-System, Contribution to this Fourth International Workshop on Accelerator Alignment, Tsukuba, 1995
26. Suter N., Laser Tracker 6DOF Technology in Automated Solutions, Leica Geosystems AG, 2009
27. Turner H., Ursel D., Innovative Use of a Laser Tracker System in Hydro Turbine and Generator Refurbishment, Hydrovision, HCI Publications, 2008
28. Umetsu K. et al, Geometric Calibration of a Coordinate Measuring Machine using a Laser Tracking System, Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, 2005

29. Wang Z., Jamshidi J., Maropoulos P., Owen G., Mileham T., Experimental Deployment of the Indoor GPS Large Volume Metrology System in a Large Scale Production Facility, Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering, Chalkidiki, Greece, 1-3 October 2008
30. Zobrist T., Laser Tracker Systems for Optical Alignment and Metrology, Practical Optics, The University of Arizona, 2006

WHITE PAPERS

1. An Alternative to Check Fixtures, FARO
2. Bob Bridges, Laser Tracker, FARO
3. Coordinate measurement technology: An introduction to dealing with microns, FARO
4. Defining Accuracy, FARO
5. Understanding Laser Tracker Targets, FARO
6. Laser Trackers Shrink Aircraft – Sized Manufacturing Problems, FARO
7. Leica Absolute Tracker AT401, Leica Geosystems
8. The Leica Absolute Interferometer: A New Approach to Laser Tracker Absolute Distance Meters, Leica Geosystems
9. Technical Brief – Laser Tracker, Optical Metrology Center

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

1. Optical 3D Scanning: Laser Beam or Structured Light? http://blog.shapegrabber.com/2012/06/optical-3d-scanning-laser-beam-or-structured-light.html 06/03/2013
2. Typical Applications for Laser Tracker http://www.qualitydigest.com/feb98/html/tracside.html 17/02/2013
3. Vera J., Care and Feeding of the Laser Tracker, Tracker Handbook, 2011 http://www.qualitydigest.com/inside/metrology-column/care-and-feeding-laser-tracker.html 15/02/2013
4. API http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm
5. FARO http://www.faro.com/en-gb
6. Leica Geosystems http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm
7. Metrology Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Metrology 03/03/2013