ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ LASER ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Τσακίρη Μ.[1], Παγούνης Β.[2], Αραμπατζή Ο.[1] , Ανδριτσάνος Β.[2]

[1] Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχ/κων, ΕΜΠ
[2] Τμήμα Τοπογραφίας, ΤΕΙ Αθήνας

e-mail: mtsakiri@central.ntua.gr, mail@pagounis.gr, arabazti@survey.ntua.gr, vdandri@ateiath.gr

Περίληψη

Η διαδικασία της βαθμονόμησης των επίγειων σαρωτών laser μπορεί να πραγματοποιηθεί άμεσα (αυτοβαθμονόμηση) ή έμμεσα (μέσω πρότυπων μετρήσεων). Και για τις δύο προσεγγίσεις απαραίτητη είναι η επιλογή στόχων ελέγχου στους οποίους εκτελούνται μετρήσεις από μία ή περισσότερες θέσεις σάρωσης. Αυτοί είναι συνήθως ειδικοί ανακλαστικοί στόχοι όπου εξάγεται το κέντρο τους από το νέφος σημείων. Ωστόσο, στο περιβάλλον σάρωσης συναντώνται σχεδόν πάντα γεωμετρικές επιφάνειες (π.χ. επίπεδα) οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στόχοι από το χρήστη. Στο άρθρο γίνεται συγκριτική αξιολόγηση της χρήσης σημειακών και επιφανειακών στόχων ελέγχου σε διαδικασίες βαθμονόμησης των επίγειων σαρωτών laser του τύπου TOF (time-of-flight) βάσει των προτύπων ISO. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι δεν υπάρχει στατιστική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μεθόδων, ενώ κατά τη χρήση επιφανειών, ο έλεγχος μπορεί να διεξαχθεί με ένα σημείο νέφους χαμηλής πυκνότητας.

Abstract

The process of calibration for terrestrial laser scanners can be performed either directly (auto-calibration) or indirectly (via standard measurements). In both approaches it is essential to choose a number of control points which are scanned from various locations. The most common approach is in the form of distinct signalized targets where the centroids of these targets must be determined with great accuracy. Alternatively, geometric features such as planes can be used instead of signalized targets. This is a less labour-intensive and more efficient method that is also more suitable for in-situ calibration. The calibration of a TOF type terrestrial laser scanner based on the ISO philosophy using either methods showed no significantly different results and illustrated that the plane-based calibration can be carried out with a low density point cloud.

Λέξεις-Κλειδιά: επίγειος σαρωτής laser, βαθμονόμηση, στόχοι, προδιαγραφές ISO

1. Εισαγωγή

Οι επίγειοι σαρωτές laser (Terrestrial Laser Scanners, TLS) είναι ιδιαίτερα εξελιγμένα όργανα και έχουν χρησιμοποιηθεί με εξαιρετική απόδοση σε ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών και σε διαφορετικές επιστημονικές περιοχές όπως στην τοπογραφία, στην παρακολούθηση παραμορφώσεων κατασκευών (φραγμάτων, κτιρίων, κατολισθήσεων κλπ), στη γεωλογία, αρχαιολογία και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση. Έχουν βρει επίσης εφαρμογές στην εγκληματολογία, και πιο πρόσφατα κατά τη σάρωση κινηματογραφικών πλατό.

Το αποτέλεσμα της σάρωσης μιας επιφάνειας είναι ένα πυκνό νέφος σημείων με τρισδιάστατες συντεταγμένες στο χώρο οι οποίες προκύπτουν βάσει μετρήσεων αποστάσεων και γωνιών, όπως γίνεται στους ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς (total stations). Η βασική μονάδα ενός επίγειου σαρωτή laser είναι το σύστημα μέτρησης αποστάσεων, το οποίο ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική, καθορίζει το εύρος μέτρησης της απόστασης, την ανάλυση, την ακρίβεια και την απόδοση των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων απόστασης. Οι οπτικές μέθοδοι μέτρησης αποστάσεων που χρησιμοποιούνται στους επίγειους σαρωτές laser διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: μέθοδος παλμού (time-of-flight, TOF), συμβολομετρία και μέθοδος τριγωνισμού (Bosch & Lescure, 1995). Επίσης, σύμφωνα με τον Staiger (2003) οι TOF σαρωτές ταξινομούνται σε υβριδικού τύπου και πανοραμικού τύπου με βάση το οπτικό πεδίο καταγραφής τους (field-of-view, FOV). Η βαθμονόμηση των σαρωτών πανοραμικού τύπου είναι καλύτερα κατανοητή, διότι επιτρέπει την καταγραφή δεδομένων σε δύο επίπεδα (δηλαδή μπροστά και πίσω από τη μονάδα) κάτι που είναι συγκρίσιμο με τους γεωδαιτικούς σταθμούς οι οποίοι μετράνε σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου.

Για μεγάλο αριθμό εφαρμογών του TLS μπορεί να θεωρηθεί ότι το νέφος σημείων είναι σχεδόν χωρίς σφάλματα, χάρη στις προσπάθειες των κατασκευαστριών εταιρειών να παράγουν νέα και βελτιωμένα φίλτρα και αλγορίθμους μέτρησης με αποτέλεσμα να έχουν περιορίσει σε μεγάλο βαθμό τις ακραίες τιμές και το θόρυβο στις μετρήσεις. Εντούτοις, κάτι τέτοιο απέχει πολύ από τη πραγματικότητα δεδομένου ότι οι μετρήσεις του σαρωτή επηρεάζονται από συστηματικά σφάλματα (Gielsdorf et al. 2004, Lichti 2007, Kersten et al. 2008, Pfeifer et al. 2007). Αυτό μπορεί να αποδοθεί σε μια αστάθεια των παραμέτρων που προσδιορίζονται κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, ή στην περιορισμένη κατανόηση των πηγών σφάλματος των οργάνων αυτών. Είναι επομένως, επιτακτική η διαδικασία της βαθμονόμησης προκειμένου να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία μέτρησης ενός σαρωτή. Ωστόσο, η διαδικασία της βαθμονόμησης οργάνων προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα προτύπων. Ενώ για τα παραδοσιακά γεωδαιτικά και φωτογραμμετρικά όργανα υπάρχουν τυποποιημένες ρουτίνες βαθμονόμησης, όπως η σειρά των προτύπων ISO "Οπτική και όργανα οπτικής - διαδικασίες για τη δοκιμή πεδίων γεωδαιτικών και τοπογραφικών οργάνων "[ISO-17123-(1-8)], κάτι παρόμοιο δεν ισχύει για τους σαρωτές laser. Οι βασικοί λόγοι είναι η πολύπλοκη κατασκευή τους με πολλά ηλεκτρονικά, μηχανικά και οπτικά στοιχεία τα οποία εισάγουν τα δικά τους σφάλματα στις μετρήσεις, η διαφοροποίηση της ακρίβειάς τους ακόμα και μεταξύ των οργάνων της ίδιας σειράς και ο πατενταρισμένος σχεδιασμός των οργάνων κάθε κατασκευάστριας εταιρείας όπου χρησιμοποιεί δικές της διαδικασίες βαθμονόμησης.

Η διεθνής βιβλιογραφία έχει να επιδείξει πολυάριθμες προσπάθειες από ανεξάρτητους ερευνητές προκειμένου να βαθμονομήσουν συστήματα σαρωτών laser. Οι μέθοδοι βαθμονόμησης δύναται να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αυτές που χρησιμοποιούν κάποια μορφή πρότυπου εξωτερικού ελέγχου και αυτές που χρησιμοποιούν μεθόδους αυτο-βαθμονόμησης. Και οι δύο κατηγορίες βασίζονται στην καταγραφή μεγάλου αριθμού παρατηρήσεων από διαφορετικές θέσεις και προσανατολισμούς. Ωστόσο, στην πρώτη προσέγγιση απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός (π.χ total stations, βάσεις βαθμονόμησης) ενώ στη δεύτερη προσέγγιση γίνεται προσδιορισμός όλων των συστηματικών σφαλμάτων (παράμετροι βαθμονόμησης) ταυτόχρονα με όλες τις άλλες παραμέτρους του συστήματος.

Ανεξάρτητα του τρόπου βαθμονόμησης, οι διαδικασίες ελέγχου πρέπει να γίνονται συστηματικά ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια του σαρωτή δεδομένου ότι οι παράμετροι αλλάζουν μόνο οριακά από τη μία βαθμονόμηση στην επόμενη. Το πλεονέκτημα αυτό βέβαια χάνεται όταν οι συνθήκες μιας εργασίας (π.χ. περιβαλλοντικές συνθήκες, ιδιότητες αντικειμένου, ανακλαστικότητα κλπ) διαφέρουν σημαντικά από αυτές που ίσχυαν κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι παράμετροι που προσδιορίζονται κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης δεν είναι κατάλληλες για τα πραγματικά δεδομένα του έργου. Για παράδειγμα, προηγούμενες εμπειρίες με το σαρωτή Faro880 έχουν εντοπίσει χρονική αστάθεια στις παραμέτρους βαθμονόμησης, γεγονός που υποδηλώνει ότι χρειάζεται (on-site) βαθμονόμηση κάθε φορά που το όργανο χρησιμοποιείται. Υπό αυτές τις συνθήκες , απαιτείται βαθμονόμηση στο πεδίο (on-the -job) κατά την οποία υπολογίζονται άμεσα οι παράμετροι βαθμονόμησης ταυτόχρονα με τα δεδομένα που αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια του έργου. Με αυτή τη προσέγγιση οι παράμετροι βαθμονόμησης προσαρμόζονται στα δεδομένα του έργου, επιτρέποντας έτσι βέλτιστη ελαχιστοποίηση των υπολοίπων των συστηματικών σφαλμάτων. Ωστόσο, οι παράμετροι βαθμονόμησης που εκτιμώνται με αυτόν τον τρόπο δεν ισχύουν απαραίτητα από τη μία εργασία στην επόμενη. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η συχνή και γρήγορη βαθμονόμηση του σαρωτή και η ευκολία του χρήστη να διασφαλίσει την ποιότητα της συλλογής των δεδομένων σε κάθε εργασία.

Όλες οι τεχνικές βαθμονόμησης βασίζονται είτε στη χρήση χαρακτηριστικών σημείων είτε επιπέδων. Κατά τη βαθμονόμηση με χρήση σημείων απαιτείται ένα καλά κατανεμημένο δίκτυο το οποίο υλοποιείται με ειδικούς επίπεδους ή σφαιρικούς στόχους (συχνά ανακλαστικούς) γνωστών συντεταγμένων και κατά συνέπεια, η παραμετροποίηση των σφαλμάτων του οργάνου εξαρτάται από την ακρίβεια του δικτύου. Χαρακτηριστικές αναφορές για τη χρήση σημείων αποτελούν η προσπάθεια του Lichti (2000) όπου γίνεται μια πρώτη προσέγγιση για τον προσδιορισμό της ακρίβειας και των συστηματικών σφαλμάτων στους σαρωτές συγκρίνοντας μετρήσεις σε βαθμονομημένη βάση EDM. Επίσης, στους Lichti et al. (2007) Lichti και Licht (2006) γίνεται χρήση σημείων σε διαδικασία αυτοβαθμονόμησης όπου διαχωρίζονται τα σφάλματα ανάλογα σε φυσικά και εμπειρικά. Στους Lichti (2010), Reshetyuk (2009, 2010), Schneider (2009) προτείνονται βελτιωμένες διαδικασίες αυτο-βαθμονόμησης λαμβάνοντας ειδική μέριμνα για το σχεδιασμό του δικτύου σημείων με σκοπό τη μείωση της αυτο-συσχέτισης των παραμέτρων εκτίμησης σφαλμάτων. Οι Kersten et α al. (2005) υλοποίησαν πεδίο ελέγχου με επίπεδες σφαίρες και στόχους και έγινε σύγκριση των μετρούμενων αποστάσεων με τις αντίστοιχες του σαρωτή, και παρόμοια οι Gonzalez - Jorge et al. (2011) προτείνουν ένα πεδίο ελέγχου με σφαίρες και κύβους όπου

συγκρίνουν τις μετρήσεις μεταξύ τους τόσο για τον προσδιορισμό της ακρίβειας όσο και της επαναληψιμότητας. Η χρήση επιπέδων για την βαθμονόμηση αντιμετωπίζεται στους Bae & Lichti (2007) όπου χρησιμοποιούν φυσικές χαρακτηριστικές επίπεδες επιφάνειες ή ειδικά πάνελ (Gielsdorf et al., 2004, Molnár, 2009, Glennie & Lichti, 2010). Στους Dorninger et al. (2008) το κυκλικό σφάλμα στις μετρήσεις απόστασης του σαρωτή διορθώνεται βάσει μετρήσεων σε επίπεδα.

Συχνά, για την αποφυγή τοποθέτησης ειδικών σημειακών στόχων, γίνεται επιλογή κατάλληλων φυσικών γεωμετρικών επιφανειών οι οποίες δύναται να χρησιμοποιηθούν ως στόχοι και εμφανίζονται στα νέφη σημείων που προκύπτουν από τη σάρωση. Επομένως, το πρόβλημα ανάγεται στην εξαγωγή των κατάλληλων επιφανειών από τα νέφη των σημείων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές μοντελοποίησης (π.χ. Goshtasby, 2005, Seo et al. 2005, Böhm & Becker, 2007). Η προσέγγιση αυτή φαίνεται να κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια δεδομένου ότι η τοποθέτηση ειδικών ανακλαστικών στόχων είναι μια χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία. Σε αντίθεση με τη χρήση σημειακών στόχων όπου απαιτείται μεγάλη πυκνότητα σημείων προκειμένου να εξαχθούν οι τρισδιάστατες συντεταγμένες του κέντρου κάθε στόχου, η αυθαίρετη θέση των σαρωμένων σημείων στις επίπεδες επιφάνειες δεν προκαλεί δυσκολία. Συνήθως, η υψηλή πυκνότητα σαρώσεων είναι πιο πιθανό να αξιοποιηθεί κατά τη χρήση επιπέδων που κατά ομολογία συναντώνται στο πεδίο και κυρίως σε περιβάλλοντα με τεχνικά έργα όπου είναι και συχνότερη η χρήση των επίγειων σαρωτών laser.

Η εργασία αυτή αποσκοπεί να παρουσιάσει μια διαδικασία ελέγχου στο πεδίο (on-the -job) επίγειων σαρωτών laser η οποία βασίζεται στις επίσημες διεθνείς προδιαγραφές κατά ISO για τους ελέγχους των μηκών και διευθύνσεων. Η εργασία αποτελεί συνέχεια της προσπάθειας των Τσακίρη κ.α. (2012) όπου έγινε χρήση μόνο σημειακών στόχων. Το βασικό μειονέκτημα της χρήσης σημειακών στόχων είναι η απαίτηση χειροκίνητης τοποθέτησής τους αλλά και σε περιπτώσεις αυτο-βαθμονόμησης απαιτείται μεγάλος αριθμός που να καλύπτουν ολόκληρο το πεδίο (FOV) του σαρωτή ώστε να εξασφαλιστεί η ισχυρή γεωμετρία του δικτύου των στόχων. Εναλλακτικά, χαρακτηριστικές επιφάνειες που βρίσκονται στο πεδίο σάρωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των σημειακών ανακλαστικών στόχων σε διαδικασίες βαθμονόμησης. Στην ενότητα 2 της εργασίας γίνεται μια συνοπτική σύγκριση της χρήσης των σημειακών και επιφανειακών στόχων κατά τις διαδικασίες της βαθμονόμησης και στην ενότητα 3 περιγράφονται οι πειραματικές διαδικασίες ελέγχου των μηκών, διευθύνσεων και κατακορύφων γωνιών ενός σαρωτή στο πεδίο με χρήση τόσο σημειακών όσο και επιφανειακών στόχων και γίνεται η σύγκριση των δύο μεθόδων. Τα συμπεράσματα της εργασίας δίνονται στην ενότητα 4.

2. Σύγκριση σημειακών και επιφανειακών στόχων

Οι σημειακοί στόχοι είναι αυτοί που κυρίως χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες βαθμονόμησης. Το μεγαλύτερο πρόβλημα διακρίνεται στην αυτο-βαθμονόμηση γιατί κάθε άγνωστος σημειακός στόχος δημιουργεί τρεις επιπλέον αγνώστους στη μαθηματική συνόρθωση προσδιορισμού των παραμέτρων. Ως εκ τούτου, εσωτερικές δεσμεύσεις στο μαθηματικό μοντέλο μπορούν να προκύψουν μόνο εάν το ίδιο σημείο μετράται σε περισσότερες από μία σαρώσεις με αποτέλεσμα αυτό να οδηγεί σε τρεις επιπλέον ανεξάρτητες δεσμεύσεις, οι οποίες με τη σειρά τους μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να

εκτιμηθούν περαιτέρω άγνωστοι (όπως ο προσανατολισμός των σαρώσεων και των παραμέτρων βαθμονόμησης του οργάνου). Όμως για να γίνει η ταυτοποίηση του σημείου από τις διαφορετικές σαρώσεις πρέπει να γίνει η εξαγωγή των συντεταγμένων του κέντρου του σημειακού στόχου από κάθε νέφος σημείων με διάφορους αλγόριθμους που περιγράφονται στη βιβλιογραφία ή συνηθέστερα γίνεται αυτόματη εξαγωγή για τους στόχους που συνοδεύουν το όργανο μιας κατασκευάστριας εταιρείας από το αντίστοιχο λογισμικό της. Το βασικότερο μειονέκτημα της χρήσης σημειακών στόχων είναι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χειρωνακτική τοποθέτηση ειδικών στόχων (επίπεδα, σφαίρες) ανακλαστικού τύπου σε όλο το αντικείμενο της σάρωσης κάτι που είναι δαπανηρό και χρονοβόρο. Επιπλέον, ανάλογα με τον τύπο των στόχων μπορεί να προκύψουν διάφορα προβλήματα ως προς τον προσδιορισμό του κέντρου και συνεπώς της βαθμονόμησης. Για παράδειγμα, όταν η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας laser κατά τη σάρωση του στόχου είναι οξεία θα έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία πλήρους μοντελοποίησης του και επομένως εξαγωγής του κέντρου του στόχου. Σε επίπεδους ανακλαστικούς στόχους η απόσταση που προκύπτει μεταξύ οργάνου-στόχου μπορεί να είναι συστηματικά πιο μικρή, λόγω της υψηλής ενέργειας της οπισθοσκεδαζόμενης ακτίνας laser.

Κατά τη χρήση επιφανειών ως στόχων ακολουθείται όπως και παραπάνω, διαδικασία μοντελοποίησης προκειμένου να προσαρμοσθεί κάποια μαθηματική εξίσωση επιπέδου και να προκύψουν οι συντεταγμένες ενός σημείου που θα θεωρηθεί ως κέντρο. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των επιφανειών είναι ότι συναντώνται πολύ συχνά φυσικές επίπεδες επιφάνειες στα περιβάλλοντα όπου γίνεται χρήση του TLS. Η σάρωση των επιφανειών με μεγάλη πυκνότητα είναι καλύτερα αξιοποιήσιμη σε σχέση με τους σημειακούς στόχους. Το βασικό μειονέκτημα των επιφανειακών στόχων μπορεί να είναι η περιορισμένη επιπεδότητά τους και το υλικό της επιφάνειας. Έτσι, ορισμένα συστηματικά σφάλματα που μπορεί να φανούν κατά τη διαδικασία ελέγχου του οργάνου πιθανόν να οφείλονται είτε στις αποκλίσεις από την επιπεδότητα ή την ανακλαστικότητα του υλικού.

Οι μετρήσεις με οπτικές μεθόδους όπως στους σαρωτές laser, είναι επιρρεπείς στις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία, σκόνη) και επιπλέον η ανακλαστικότητα των αντικειμένων επηρεάζει τις μετρήσεις του σαρωτή. Συγκεκριμένα, η αναλογία του ανακλώμενου παλμού που δέχεται το σύστημα του σαρωτή εξαρτάται από γεωμετρικούς παράγοντες, τις φυσικές ιδιότητες της επιφάνειας ανάκλασης και από το μήκος κύματος του ανακλώμενου παλμού laser. Οι γεωμετρικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τη γωνία πρόσπτωσης και την τραχύτητα της επιφάνειας. Οι φυσικές ιδιότητες της επιφάνειας (απόχρωση, πυκνότητα, ηλεκτρική αγωγιμότητα, μαγνητική διαπερατότητα) είναι η αιτία των απωλειών του παλμού κατά την ανάκλαση και έχουν γίνει προσπάθειες ελέγχου της επίδρασης της. Σύμφωνα με τη μελέτη χρώματος και υλικού για σαρώσεις με όργανο τύπου TOF, οι Κοσμάς κ.α. (2007) έδειξαν ότι οι επιφάνειες με τη μεγαλύτερη ανακλαστικότητα (π.χ. λευκές) παρουσιάζουν το μεγαλύτερο θόρυβο μετρημένων αποστάσεων για μεγάλες αποστάσεις (πάνω από 100m) αλλά και καλύτερη εσωτερική και εξωτερική ακρίβεια από χρώματα μικρότερης ανακλαστικότητας (μαύρο). Η ίδια μελέτη για την επίδραση του υλικού έδειξε ότι για διάφορα υλικά δεν εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις στην ίδια απόσταση από το σαρωτή. Ωστόσο για ορισμένα υλικά δημιουργείται μεγαλύτερος θόρυβος, όπως για παράδειγμα ο χαλκός ο οποίος εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις και θόρυβο για 5-50m απόσταση από το σαρωτή και το αλουμίνιο, που έχει μεγαλύτερο θόρυβο και μικρότερη εξωτερική ακρίβεια από το σίδηρο για αποστάσεις 5-50m από το σαρωτή.

3. Πειραματικοί έλεγχοι πεδίου

Οι σαρωτές laser αποτελούν τα μόνα γεωδαιτικά συστήματα μέτρησης για τα οποία δεν υπάρχουν επίσημες τυποποιημένες μέθοδοι ελέγχου. Σύμφωνα με τη βασική φιλοσοφία του ISO 17123 προτύπου, γίνεται προσπάθεια ώστε τα πειράματα που αναπτύσσονται να είναι ανεξάρτητα από την αρχή λειτουργίας του οργάνου, να μη γίνεται χρήση άλλων συστημάτων για αναφορά και η διαδικασία συλλογής των μετρήσεων και η αξιολόγησή των αποτελεσμάτων να έχουν μικρή χρονική διάρκεια. Οι τρεις πειραματικοί έλεγχοι (διευθύνσεων, κατακορύφων γωνιών και αποστάσεων) που πραγματοποιήθηκαν περιγράφονται παρακάτω αναλυτικά. Υλοποιήθηκε κατάλληλο πεδίο ελέγχου σύμφωνα με το πρότυπο ISO και η διάταξη των στόχων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε για τον έλεγχο μηκών να γίνονται παρατηρήσεις με μικρές γωνίες πρόσπτωσης ενώ για τον έλεγχο γωνιών να υπάρχουν περιπτώσεις με μεγάλη γωνία πρόσπτωσης (Chow et al., 2011). Ωστόσο, στην πράξη ίσως μια τέτοια διάταξη να μην είναι ιδανική δεδομένου ότι τα σημεία με μεγάλη γωνία πρόσπτωσης έχουν σημαντικά χαμηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Σε όλα τα πειράματα έγινε χρήση των εδικών ανακλαστικών σφαιρών cyra sphere target (σημειακοί στόχοι) και αυτοκόλλητων ετικετών λευκού χρώματος διαστάσεων 7×4.8cm (επιφανειακοί στόχοι).

3.1. Ακρίβεια μέτρησης διευθύνσεων

Ο έλεγχος της ακρίβειας μέτρησης διευθύνσεων βασίσθηκε στη διαδικασία που περιγράφεται στις διεθνείς προδιαγραφές ISO/DIS 12857-2 για τα όργανα μέτρησης γωνιών (θεοδολίχων και total stations). Για την πραγματοποίηση του πειράματος διαμορφώθηκε κατάλληλο πεδίο ελέγχου (Εικόνα 1) για το οποίο η απόσταση των στόχων από το σαρωτή βρίσκονταν εντός του εύρους της απόστασης που μπορεί να μετρήσει ο σαρωτής και οι στόχοι ήταν κατανεμημένοι πάνω από τον ορίζοντα και σε διαφορετικά ύψη. Η υλοποίηση του πεδίου πραγματοποιήθηκε από πέντε σφαιρικούς στόχους και πέντε λευκές αυτοκόλλητες ετικέτες τοποθετημένοι σε διάταξη σχεδόν κανονικού πενταγώνου.

Εικόνα 1. Πεδίο μετρήσεων του σαρωτή

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις σειρές μετρήσεων και για τα δύο είδη στόχων. Κάθε σειρά μετρήσεων περιλαμβάνει τρία πλήρη σετ παρατηρήσεων. Το πρώτο σετ παρατηρήσεων αποτελείται από τη σάρωση των στόχων 1, 2, 3, 4, 5 και ολοκληρώνεται με τη σάρωση των στόχων αντιστρόφως 5, 4, 3, 2, 1. Τα δύο άλλα σετ παρατηρήσεων πραγματοποιούνται με την ίδια διαδικασία με χρονική καθυστέρηση 2 λεπτών μεταξύ τους. Όλες οι σαρώσεις των στόχων πραγματοποιήθηκαν με τη μέγιστη ανάλυση του 1×1mm.

Σφαιρικός Στόχος	Απόσταση (m)	Αυτοκόλλητη Ετικέτα	Απόσταση (m)
1	17	1	17
2	33	2	33
3	49	3	49
4	53	4	53
5	64	5	34

Πίνακας 1. Αποστάσεις οργάνου – στόχων

Κατόπιν πραγματοποιήθηκε αυτόματη μοντελοποίηση των στόχων και υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες τους για όλα τα σετ και όλες τις σειρές μετρήσεων. Έπειτα υπολογίστηκαν οι γωνίες διεύθυνσης για κάθε στόχο καθώς και ο μέσος όρος των διευθύνσεων για κάθε σετ μετρήσεων. Υπολογίστηκαν οι αναγμένες τιμές των παρατηρήσεων, οι οποίες προέκυψαν ως οι διαφορές της μέτρησης στον πρώτο στόχο από καθεμία από τις μετρήσεις των διευθύνσεων που ανήκουν στο ίδιο σετ. Τέλος, υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον αλγόριθμο που περιγράφεται στους κανονισμούς ISO/DIS 12857-2 το τυπικό σφάλμα για τη μέτρηση διευθύνσεων σε κάθε σετ παρατηρήσεων και το τελικό σφάλμα στη μέτρηση διευθύνσεων κατά ISO/DIS 12857-2. Στον Πίνακα 2 παρατίθενται τα τυπικά σφάλματα για κάθε σετ παρατηρήσεων που προέκυψαν τόσο με τους ανακλαστικούς σφαιρικούς στόχους όσο και με τις ετικέτες.

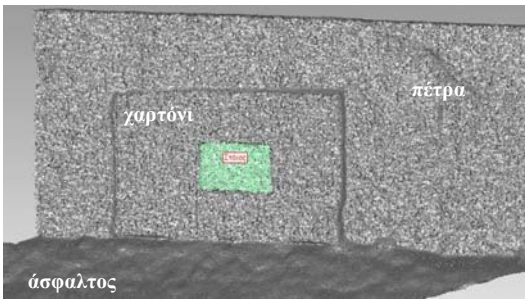
Σφαιρικοί στόχοι- σετ παρατηρήσεων	**Τυπικό σφάλμα S_i (cc)**	**Ετικέτες - σετ παρατηρήσεων**	**Τυπικό σφάλμα S_i (cc)**
1^o	± 17 cc	1^o	± 23 cc
2^o	± 21 cc	2^o	± 19 cc
3^o	± 24 cc	3^o	± 26 cc
4^o	± 25 cc	4^o	± 21 cc
Τελικό S_o: $S_o = \pm\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}{4}}$	**± 22.0 cc**	**Τελικό S_o:** $S_o = \pm\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}{4}}$	**± 22.4 cc**

Πίνακας 2. Σφάλμα στη μέτρηση διευθύνσεων με χρήση ανακλαστικών στόχων και ετικετών

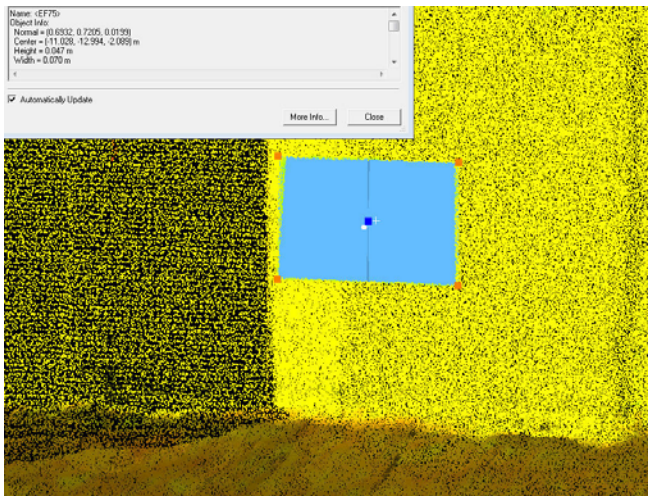
Η ακρίβεια που δίνουν οι κατασκευαστές για τον προσδιορισμό διευθύνσεων είναι ± 38cc (± 3.8 mgon). Στα 4 σετ παρατηρήσεων, ο βαθμός ελευθερίας με τον οποίο προσδιορίζεται το αντίστοιχο a posteriori S_{oi} είναι 8. Τα αποτελέσματα για τους δύο τύπους στόχων, και για τα 4 σετ, περνούν το test X^2 για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%:

$$\frac{\hat{\sigma}_{0i}^2}{\sigma_0^2} \le \frac{X_{95\%}^2}{r} \rightarrow \hat{\sigma}_{0i}^2 \le X_{95\%}^2 \bullet \frac{38^2}{8} \rightarrow \hat{\sigma}_{0i} \le 52.9^{cc}$$

Η μοντελοποίηση των αυτοκόλλητων ετικετών πραγματοποιήθηκε αυτόματα με χρήση της τιμής ανακλαστικότητας τους. Με χρήση των τιμών της ανακλαστικότητας συναρτήσει της απόστασης και της γωνίας πρόσπτωσης (λογισμικό INSO) απομονώθηκαν οι αυτοκόλλητες ετικέτες από τα νέφη σημείων και στη συνέχεια μοντελοποιήθηκαν με ένα επίπεδο (Εικόνα 2). Μια από τις συνηθέστερες τεχνικές ανίχνευσης και μοντελοποίησης επιφάνειας σε νέφος σημείων είναι η χρήση του αλγορίθμου Hough (Hough, 1962) ωστόσο συχνά επιστρέφει λανθασμένες λύσεις κυρίως όταν υπάρχουν πολλά επίπεδα και άλλα σχήματα μέσα στο νέφος. Επομένως, προτιμήθηκε η μέθοδος της ανακλαστικότητας και η μοντελοποίηση των ετικετών επιτεύχθηκε με ακρίβεια ±1mm. Από τη μοντελοποιημένη ετικέτα υπολογίζονται οι συντεταγμένες του κέντρου του παραλληλόγραμμου επιπέδου.



(α)



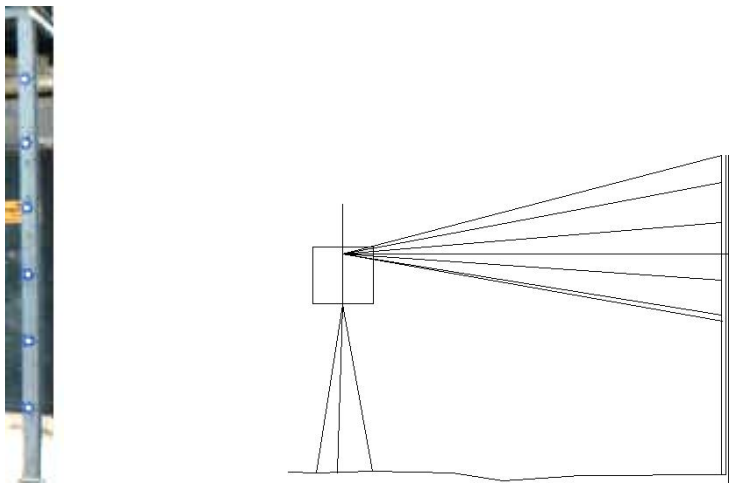
(β)

Εικόνα 2. (α) Σαρωμένη επιφάνεια πέτρας (β) Μοντελοποιημένη επιφάνεια ετικέτας

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι τόσο τα επιμέρους S_{oi} όσο και το τελικό S_o που υπολογίστηκαν με βάση τη διαδικασία του ISO/DIS 12857-2 για γωνιομετρικά όργανα, είναι μέσα στο θόρυβο της μέτρησης. Επιπλέον, στην απόσταση των 70m, το S_o = ± 22.4cc αντιστοιχεί σε γραμμική μετατόπιση ± 2.5mm, αποτέλεσμα συμβατό με τη γραμμική ακρίβεια που δίνουν οι κατασκευαστές των ± 4mm.

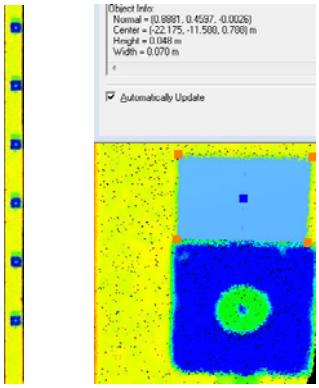
3.2 Ακρίβεια μέτρησης κατακόρυφων γωνιών

Ο έλεγχος της ακρίβειας μέτρησης των κατακόρυφων γωνιών, στηρίχθηκε στον έλεγχο κατά DIN 17123 του κατακόρυφου κύκλου ενός γεωδαιτικού σταθμού. Για την πραγματοποίηση του ελέγχου διαμορφώθηκε κατάλληλο πεδίο μετρήσεων. Η υλοποίηση του πραγματοποιήθηκε από έξι επίπεδους στόχους (cyra planar target) και έξι αυτοκόλλητες ετικέτες τοποθετημένους σε κατακόρυφο πήχη σε απόσταση 25 m περίπου από το σημείο που τοποθετείται ο σαρωτής. Οι στόχοι απέχουν μεταξύ τους 50cm περίπου ενώ ο πρώτος στόχος απέχει περίπου 50 cm από το έδαφος.



Εικόνα 3. Πεδίο ελέγχου κατακόρυφων γωνιών

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις σειρές μετρήσεων. Κάθε σειρά μετρήσεων περιλαμβάνει δώδεκα σαρώσεις των επίπεδων στόχων χωρισμένες σε δύο σετ. Το πρώτο σετ σαρώσεων αποτελείται από τη σάρωση των στόχων 1, 2, 3, 4, 5, 6 και ολοκληρώνεται με τη σάρωση των στόχων αντιστρόφως 6, 5, 4, 3, 2, 1. Οι υπόλοιπες σαρώσεις πραγματοποιούνται με την ίδια διαδικασία σε άλλη θέση του σαρωτή (περίπου ανά 60^g). Όλες οι σαρώσεις των στόχων πραγματοποιήθηκαν με τη μέγιστη ανάλυση του 1×1mm. Οι τρεις από τις έξι σαρώσεις πραγματοποιούνται κάτω από τον ορίζοντα του σαρωτή ενώ οι άλλες τρεις πάνω από αυτόν.



Εικόνα 4. Μοντελοποιημένες επιφάνειες ανακλαστικού στόχου και ετικέτας

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αυτόματη μοντελοποίηση των στόχων και υπολογίσθηκαν οι συντεταγμένες τους για όλες τις σειρές μετρήσεων με την ίδια διαδικασία που αναλύθηκε στην περίπτωση των οριζόντιων γωνιών και υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες γωνίες για κάθε σειρά μετρήσεων. Υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον αλγόριθμο που περιγράφεται στους κανονισμούς ISO/DIS 12857-2 το τυπικό σφάλμα για τη μέτρηση κατακορύφων γωνιών σε κάθε σετ παρατηρήσεων και το τελικό σφάλμα στη μέτρηση κατακορύφων γωνιών κατά ISO/DIS 12857-2 (Πίνακας 3).

Επίπεδοι ανακλαστικοί στόχοι - Σετ παρατηρήσεων	**Τυπικό σφάλμα S_i (cc)**	**Ετικέτες - Σετ παρατηρήσεων**	**Τυπικό σφάλμα S_i (cc)**
1^o	± 26 cc	1^o	± 28 cc
2^o	± 22 cc	2^o	± 31 cc
3^o	± 24 cc	3^o	± 21 cc
4^o	± 22 cc	4^o	± 25 cc
Τελικό S_o: $S_o = \pm\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}{4}}$	± 23.6 cc	Τελικό S_o: $S_o = \pm\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}{4}}$	± 26.5 cc

Πίνακας 3. Σφάλμα στη μέτρηση κατακορύφων γωνιών με χρήση ανακλαστικών στόχων και ετικετών

Στα 4 σετ παρατηρήσεων, ο βαθμός ελευθερίας με τον οποίο προσδιορίζεται το αντίστοιχο a posteriori S_{oi} είναι 8. Τα αποτελέσματα για τους δύο τύπους στόχων, και για τα 4 σετ, περνούν το test X^2 για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%:

$$\frac{\hat{\sigma}_{0i}^2}{\sigma_0^2} \le \frac{X_{95\%}^2}{r} \rightarrow \hat{\sigma}_{0i}^2 \le X_{95\%}^2 \bullet \frac{38^2}{8} \rightarrow \hat{\sigma}_{0i} \le 53^{cc}$$

Από τα αποτελέσματα προκύπτει τόσο τα επιμέρους S_{oi} όσο και το τελικό S_o που υπολογίστηκαν με βάση τη διαδικασία του ISO/DIS 12857-2 για γωνιομετρικά όργανα, είναι μέσα στο θόρυβο της μέτρησης. Επιπλέον, στην απόσταση των 70m, το S_o = ± 26.5cc αντιστοιχεί σε γραμμική μετατόπιση ± 3mm δηλαδή εντός του ορίου του κατασκευαστή.

3.3 Ακρίβεια μέτρησης μηκών

Ο έλεγχος της ακρίβειας μέτρησης αποστάσεων, στηρίχθηκε στη σύγκριση των σχετικών αποστάσεων μεταξύ στόχων με τις σχετικές αποστάσεις των ίδιων στόχων όπως αυτές προέκυψαν μετά από μέτρηση τους με τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού. Έξι λευκές αυτοκόλλητες ετικέτες, τοποθετήθηκαν σε απόσταση περίπου είκοσι πέντε μέτρων από το σαρωτή και το γεωδαιτικό σταθμό. Η θέση των στόχων από τα σημεία στάσης του σαρωτή και του γεωδαιτικού σταθμού φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 5).

Πραγματοποιήθηκαν δύο σετ μετρήσεων προς τους στόχους τόσο με το σαρωτή όσο και με το γεωδαιτικό σταθμό. Το πρώτο σετ παρατηρήσεων αποτελείται από τη σάρωση των στόχων 1, 2, 3, 4, 5 και συνεχίζεται με τη σάρωση των στόχων αντιστρόφως 5, 4, 3, 2, 1. Οι αποστάσεις του οργάνου από τους στόχους δίνονται στον Πίνακα 4. Το επόμενο σετ παρατηρήσεων πραγματοποιήθηκε με την ίδια διαδικασία με χρονική καθυστέρηση 5 λεπτών. Όλες οι σαρώσεις των στόχων πραγματοποιήθηκαν με τη μέγιστη ανάλυση του 1×1mm. Αντίστοιχα, η μέτρηση των αποστάσεων με το γεωδαιτικό σταθμό έγινε με την επιλογή «fine».

Εικόνα 5. Πεδίο ελέγχου μετρήσεων μηκών

Στόχος	Απόσταση (m)	Αυτοκόλλητη Ετικέτα	Απόσταση (m)
1	17	1	17
2	33	2	33
3	49	3	49
4	53	4	53
5	64	5	34

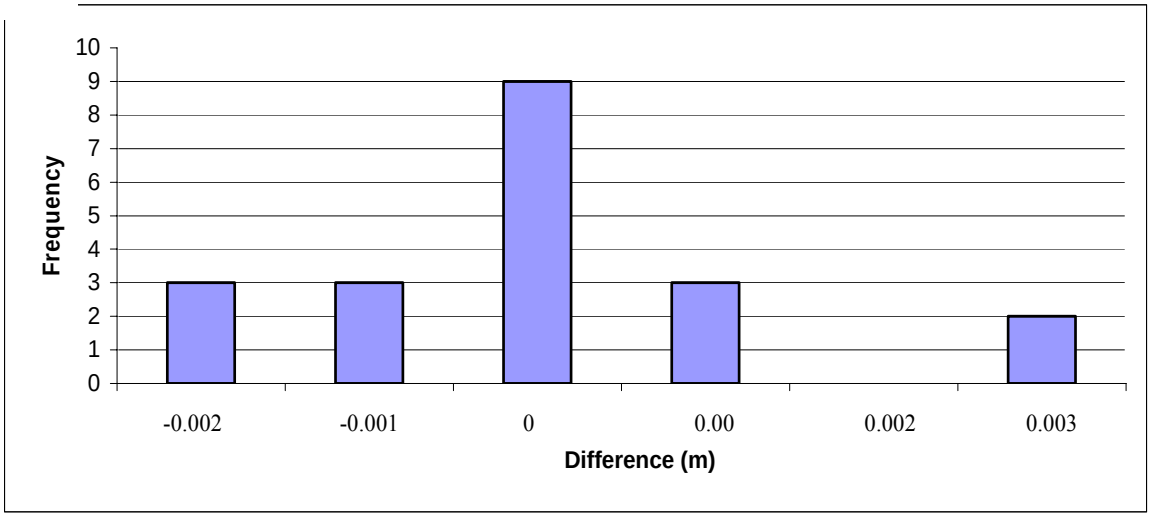
Πίνακας 4. Αποστάσεις οργάνου – στόχων

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αυτόματη μοντελοποίηση των στόχων και υπολογίσθηκαν οι συντεταγμένες τους για όλες τις σειρές μετρήσεων. Έπειτα υπολογίστηκαν οι σχετικές αποστάσεις μεταξύ των στόχων. Η μοντελοποίηση των αυτοκόλλητων ετικετών πραγματοποιήθηκε αυτόματα με χρήση της τιμή ανακλαστικότητας τους. Με χρήση των τιμών της ανακλαστικότητας συναρτήσει της απόστασης και της γωνίας πρόσπτωσης (λογισμικό INSO) απομονώθηκαν οι αυτοκόλλητες ετικέτες από τα νέφη σημείων και στη συνέχεια μοντελοποιήθηκαν με ένα επίπεδο. Η μοντελοποίηση των ετικετών πραγματοποιήθηκε με ακρίβεια ±1mm. Από τη μοντελοποιημένη ετικέτα υπολογίζονται οι συντεταγμένες του κέντρου του παραλληλόγραμμου επιπέδου. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6) δίνονται οι σχετικές αποστάσεις μεταξύ των στόχων όπως αυτές προέκυψαν από τη σάρωση και τη μέτρησή τους με το γεωδαιτικό σταθμό.

Στόχοι	Σχετικές Αποστάσεις (m)							
	Επίγειος Τρισδιάστατος Σαρωτής				Γεωδαιτικός Σταθμός			
	1ο σετ		2ο σετ		1ο σετ		2ο σετ	
	A	B	A	B	A	B	A	B
1-2	0.503	0.502	0.502	0.502	0.503	0.503	0.503	0.503
2-3	0.497	0.498	0.500	0.499	0.498	0.498	0.498	0.498
3-4	0.497	0.497	0.495	0.495	0.498	0.498	0.498	0.498
4-5	0.500	0.500	0.500	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501
5-6	0.493	0.494	0.494	0.493	0.492	0.492	0.492	0.492

Πίνακας 6. Σχετικές αποστάσεις οργάνων – στόχων

Οι διαφορές των σχετικών αποστάσεων μεταξύ του σαρωτή και του γεωδαιτικού οργάνου δεν υπερβαίνουν κατ' απόλυτη τιμή τα 3mm, που βρίσκεται εντός των ορίων του κατασκευαστή. Επίσης, η συχνότητα των διαφορών έχει τη μορφή της κανονικής κατανομής (Σχήμα 1), κάτι που υποδηλώνει ότι δεν υπάρχουν συστηματικά σφάλματα μέτρησης απόστασης στον σαρωτή.



Σχήμα 1. Συχνότητα των διαφορών μεταξύ TLS - γεωδαιτικού οργάνου

4. Συμπεράσματα

Ο έλεγχος της ακρίβειας των επίγειων σαρωτών laser δεν είναι πάντα εύκολος διότι δεν ακολουθείται τυποποιημένη διαδικασία δεδομένης της έλλειψης πρότυπων προδιαγραφών ISO για τα όργανα αυτά. Ο βασικός στόχος της εργασίας αυτής είναι η διαδικασία ελέγχου βάσει των επίσημων διεθνών προδιαγραφών ISO που αναπτύχθηκε με χρήση σημειακών στόχων και η αντίστοιχη γνώση που αποκτήθηκε να μεταφερθεί σε διαδικασία ελέγχου με χρήση επιφανειακών στόχων.

Λόγω της πολύπλοκης κατασκευής των οργάνων αυτών είναι σημαντικό να ελέγχονται πριν από κάθε εφαρμογή. Σε τέτοιες περιπτώσεις, γίνεται έλεγχος στο πεδίο (on-the -job) κατά τον οποίο υπολογίζονται άμεσα οι παράμετροι βαθμονόμησης ταυτόχρονα με τα δεδομένα που αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια του έργου και με τη χρήση επιφανειακών στόχων που βρίσκονται στα περισσότερα περιβάλλοντα σάρωσης.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών έδειξαν ότι ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές ακρίβειας του κατασκευαστή, τόσο για τα γωνιακά μεγέθη όσο και για το μήκος. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι τα συστηματικά σφάλματα που ανακτώνται με σημειακούς στόχους ή με επιφάνειες δεν είναι σημαντικά διαφορετικά και επιπλέον, ο έλεγχος που βασίζεται στις επιφάνειες μπορεί να διεξαχθεί με ένα νέφος σημείων χαμηλής πυκνότητας.

Βιβλιογραφία

Bae, K., and Lichti, D., 2007. On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners. The international Archives of the Photogrammery, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W52), 14-19.

Böhm, J., Becker, S., 2007. Auto matic marker-free registration of terrestrial laser scans using reflectance features. In: 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zürich, pp. 338–344.

Bosch, T. (Editor)/ M. Lescure (Editor), 1995. Selected Papers on Laser Distance Measurements. Electronics Eng. & Communications Eng., SPIE Milestone Series, ISBN 9780819420107.

Chow, J.C.K., D.D. Lichti, and C. Glennie, 2011. Point based versus plane-based self-calibration od static terrestrial laser scanners. Int. Arch. of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W12, ISPRS, Calgary 2011 Workshop, 29-31,Calgary, Canada.

Dorninger, P., Nothegger, C., Pfeifer, N., & Molnár, G., 2008. On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners. Journal of Applied Geodesy 2 (4), 191-204.

Gielsdorf, F., Rietdorf, A. & Gruendig, L., 2004. A Concept for the calibration of terrestrial laser scanners. – Proceedings FIG Working Week, Athens, Greece, on CD-ROM.

Glennie, C., & Lichti, D., 2010. Static calibration and analysis of the Velodyne HDL-64E S2 for high accuracy mobile scanning. Remote Sensing 2 (6), 1610-1624.

Gonzαlez-Jorge, H., Rodriguez-Gonzαlvez, P., Gonzαlez-Aguilera, D., Varela- Gonzαlez, M., 2011. Metrological comparison of terrestrial laser scanning systems Riegl LMS Z390i and Trimble GX. Optical Engineering 50 (11), 116201.

Goshtasby, A. A., 2005. 2-D and 3-D Image Registration: for Medical, Remote Sensing, and Industrial Applications. Wiley Interscience.

Hough, P.V.C., 1962. US Patent 3066054, Method and means for recognizing complex patterns.

Κοσμάς Χ, Μ Τσακίρη, Κ Τοκμακίδης, Κ Ανδρίτσος, 2007. Επίδραση της ανακλαστικότητας στις μετρήσεις σαρωτών Laser. Πρακτικά *2ου Τακτικού Εθνικού Συνεδρίου Μετρολογίας,* Θεσσαλονίκη, 19-20 Οκτωβρ.

Kersten, Th., Mechelke, K., Lindstaedt, M. & Sternbernberg, H., 2008. Geometric Accuracy Inves-tigations of Latest Terrestrial Laser Scanning Systems. – Proceedings FIG Working Week, Stockholm, Sweden.

Lichti, D. D., 2007. Error modeling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 61 (5): 307-324.

Lichti. D.D., Licht, M.G., 2007. Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. In: Proc. of ISPRS Commission V Symposium, Dresden, Germany, 25 – 27 September.

Lichti, D.D., Brustle, S., Franke, J., 2007. Self-calibration and analysis of the surphaser 25HS 3D scanner. In: Proceedings of FIG Working Week, Hong Kong SAR, China, 13–17 May.

Molnár, G., Pfeifer, N., Ressl, C., Dorninger, P., & Nothegger, C., 2009. Range calibration of terrestrial laser scanners with piecewise linear functions. Photogr., Fernerkundung, Geoinformation 1, 9-21.

Pfeifer N., Dorninger P., Haring A., Fan H., 2007. Investigating terrestrial laser scanning intensity data: quality and functional relations. 8th Conf. on Optical 3-Measurement Techniques, pp. 328 - 337, Zurich.

Reshetyuk, Y.,2009. Self-Calibration and Direct Georeferencing in Terrestrial Laser Scanning. Ph.D Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Reshetyuk, Y., 2010. A unified approach to self-calibration of terrestrial laser scanners. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65 (5), 445–456.

Seo J. K., Sharp G. C., Lee S. W., 2005. Range Data Registration Using Photometric Features. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 20-25, 2(1140–1145).

Schneider, D., 2009. Calibration of a Riegl LMS-Z420i based on a multi-station adjustment and a geometric model with additional parameters. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38 (3/W8), 177–182.

Staiger, R., 2003. Terrestrial Laser Scanning — Technology, Systems and Applications. In Proc. of the 2nd FIG Regional Conference; Marrakech, Morocco, 2–5 December.

Τσακίρη, Μ., Ο. Αραμπατζή, Β. Παγούνης, Δ. Σταθάς, Β. Ανδριτσάνος, 2012. Βαθμονόμηση επίγειων σαρωτών laser στο πλαίσιο των διεθνών προδιαγραφών ISO. Πρακτικά 4ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου.