

**ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ  
ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ:  
ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΕΜΠ**

**B. Γκίκας**

**Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε. Μ. Πολυτεχνείο**  
vgikas@central.ntua.gr

**Περίληψη**

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες και πρότυπα για την διακρίβωση και την πιστοποίηση γεωδαιτικών οργάνων (μετροταινίες, χωροβάτες, γεωδαιτικοί σταθμοί, δορυφορικοί δέκτες GPS, κ.α.) για συνήθεις τοπογραφικές εργασίες καθώς και για ειδικότερες εφαρμογές γεωμετρικής τεκμηρίωσης αντικειμένων και κατασκευών. Ωστόσο, οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των γεωδαιτικών οργάνων επιτρέπει τη χρήση τους σε εφαρμογές κινηματικού εντοπισμού και πλοήγησης όπως, η ρομποτική, η οδήγηση μηχανημάτων εργοταξίων και η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων (π.χ. ταλαντώσεις υψηλών κατασκευών) και φυσικών διεργασιών (π. χ. κατολισθήσεις). Μολαταύτα, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας των γεωδαιτικών οργάνων σε εφαρμογές υψηλής δυναμικής άρχισαν να μελετώνται μόλις πρόσφατα από την επιστημονική κοινότητα με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν καθιερωμένες διαδικασίες διακρίβωσης και βαθμονόμησης.

Η εργασία αυτή χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται εκτεταμένη αναφορά στην αρχή λειτουργίας, τις δυνατότητες και τις πηγές σφαλμάτων των συμβατικών και δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού σε κινηματικές εφαρμογές. Στο δεύτερο μέρος, παρουσιάζονται οι διατάξεις (ηλεκτροκίνητο φορείο ευθύγραμμης κύλισης, σύστημα περιστρεφόμενης ράβδου και ταλαντωτής μονής διεύθυνσης) που χρησιμοποιήθηκαν για την διακρίβωση των οργάνων, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας, η μεθοδολογία ανάλυσης των μετρήσεων, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για εναλλακτικά σενάρια προσομοίωσης ειδικών κινήσεων (ευθύγραμμη κίνηση, κυκλική κίνηση και δυναμικές ταλαντώσεις γνωστών χαρακτηριστικών) πραγματικών εφαρμογών. Τα αποτελέσματα της διακρίβωσης (κινηματικά, φασματικά χαρακτηριστικά) κωδικοποιούνται με τη μορφή διαγραμμάτων και παραμετρικών καμπύλων και αξιολογούνται για κάθε κατηγορία εφαρμογών.

**Abstract:**

Until recently, the geodetic community has focused in the development of calibration processes and the sanction of metrological standards of geodetic (topographic) instruments that relate to static positioning. However, the rapid expansion of the technology in the field of geodetic sensors in kinematic applications necessitates expanding the calibration methods and standards of geodetic instruments in kinematic mode too.

This paper entitled: “*Metrological Assessment of Conventional and Satellite Geodetic Instruments in Kinematic Positioning: Current Research Activities at NTUA, GREECE*”, attempts to address that need through experimental analysis of robotic total stations (RTS) and GPS receivers in kinematic positioning. The article is organized in two parts. In the first part, a detailed overview of the potential (i.e. the error sources, the capabilities and limitations) of RTS and GPS in kinematic applications is provided. In the second part, the experimental setup (calibration track line, rotating arm and oscillator is presented). This is followed by a detailed description of the individual experiments, the processing techniques used as well as data analysis and assessment. The results obtained from the comparisons of the kinematics (position, velocity, acceleration and modal characteristics) between nominal (straight, circular and sinusoidal) and measured tracks are summarized in various forms and evaluated with regard to specific application areas needs.

## 1. Εισαγωγή

Στη γεωδαισία, ο όρος “εντοπισμός” ή “προσδιορισμός θέσης” αναφέρεται στον καθορισμό της θέσης (συντεταγμένες) ενός ή περισσότερων σημείων στον τρισδιάστατο χώρο ως προς ένα αυθαίρετο (τοπικό) ή προκαθορισμένο (κρατικό / παγκόσμιο) σύστημα αναφοράς. Οι συνήθεις τοπογραφικές εργασίες (π.χ. αποτυπώσεις, χαράξεις, γεωμετρική τεκμηρίωση αντικειμένων / κατασκευών) αφορούν στον εντοπισμό σταθερών σημείων στο χώρο. Σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία προσδιορισμού θέσης αναφέρεται ως στατικός εντοπισμός (static positioning). Σε αντίθεση, όταν ο προσδιορισμός της θέσης αναφέρεται σε σημεία που κινούνται στο χώρο (π.χ. πλοήγηση οχημάτων), τότε αναφερόμαστε σε κινηματικό εντοπισμό (kinematic positioning). Ο προσδιορισμός της θέσης ενός σημείου τόσο σε στατικό όσο και σε κινηματικό εντοπισμό μπορεί να γίνει με συμβατικές ή δορυφορικές μεθόδους. Στην πρώτη περίπτωση, η θέση ενός σημείου προσδιορίζεται συνήθως μετρώντας τις πολικές συντεταγμένες (οριζόντια / κατακόρυφη γωνία και απόσταση) με τη βοήθεια γεωδαιτικού σταθμού (total station), ενώ στη δεύτερη προσδιορίζεται άμεσα η θέση του σημείου μέσω παρατηρήσεων προς τεχνητούς δορυφόρους.

Όπως ισχύει για κάθε μετρητική διάταξη, η διακρίβωση των γεωδαιτικών οργάνων αποσκοπεί στον έλεγχο και την επιβολή κατάλληλων διορθώσεων προκειμένου να λειτουργούν σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Σε εθνικό επίπεδο, μεταξύ άλλων ξεχωρίζουν τα πρότυπα του Γερμανικού Οργανισμού Τυποποίησης (DIN standards). Σε διεθνές επίπεδο, ο καθορισμός προτύπων για την διακρίβωση τοπογραφικών οργάνων προέρχεται από τον οργανισμό ISO (International Organization for Standardization) σε συνεργασία με την Επιτροπή 5 (Positioning and Measurement) της FIG (International Federation of Surveyors) (FIG Standards Network 2005). Η αρμόδια τεχνική επιτροπή του ISO (TC172/SC6: Geodetic and Surveying Instruments) έχει συντάξει μία σειρά προτύπων για ελέγχους τοπογραφικών οργάνων στο πεδίο (ISO/TC 172/SC 6). Ωστόσο, οι περισσότεροι έλεγχοι αφορούν κυρίως συμβατικά τοπογραφικά όργανα (μετροταινίες, χωροβάτες, γεωδαιτικούς σταθμούς, κ.α.), και αναφέρονται αποκλειστικά στη λειτουργία των οργάνων στο πεδίο σε στατικό εντοπισμό (Δούκας 2005).

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία εξέλιξη των τοπογραφικών οργάνων τα καθιστά κατάλληλα για κινηματικές εφαρμογές, ακόμη και σε προβλήματα υψηλής δυναμικής. Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν έχουν καθιερωθεί αποδεκτά πρότυπα για την διακρίβωση τους σε κινηματικές εφαρμογές. Μεμονωμένες προσπάθειες γίνονται σε ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια (Nickitroulou et al 2006, Kijewski-Correa et al 2006, Gikas and Daskalakis 2008a). Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία αποβλέπει στην παρουσίαση σχετικών ελέγχων και δοκιμών που διενεργούνται ως μέρος της ερευνητικής δραστηριότητας στη ΣΑΤΜ του ΕΜΠ.

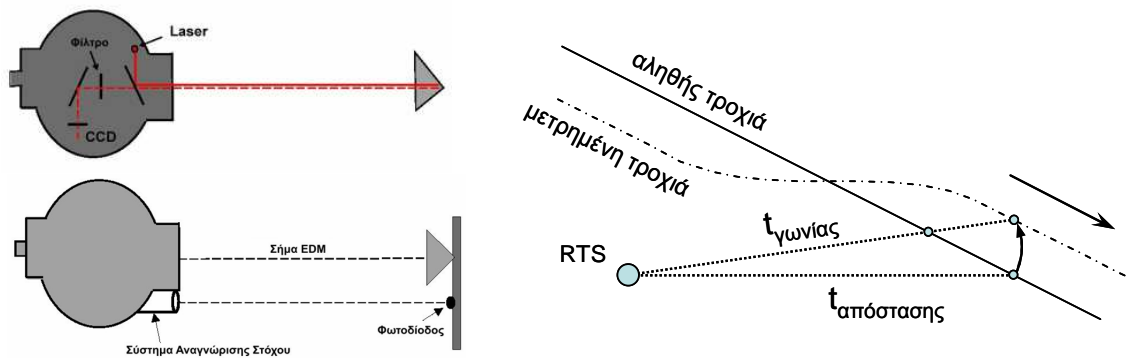
## 2. Σύγχρονα Πεδία Εφαρμογών και Απαιτήσεις Ακρίβειας

Αναμφίβολα, η κύρια και μαζική χρήση των τοπογραφικών οργάνων σε (ημι-)κινηματικό εντοπισμό αφορά συνήθεις εργασίες αποτυπώσεων και χαράξεων στο πλαίσιο κτηματολογικών / χαρτογραφικών εφαρμογών καθώς και της κατασκευής τεχνικών έργων. Σε εφαρμογές αυτού του είδους, καθώς ο στόχος ενός γεωδαιτικού σταθμού ή ο δέκτης GPS κινείται, αυτό που ενδιαφέρει είναι ο εντοπισμός μεμονωμένων σημείων (χαρακτηριστικά σημεία), τα οποία είτε περιγράφουν τη γεωμετρία της περιοχής αποτύπωσης είτε υλοποιούν τα σημεία ενδιαφέροντος μίας κατασκευής.

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί νέα πεδία εφαρμογών στα οποία απαιτείται η καταγραφή είτε η οδήγηση ενός σημείου κατά μήκος μίας τροχιάς κίνησης. Το πρόβλημα γίνεται ιδιαίτερα περίπλοκο σε εφαρμογές υψηλής δυναμικής, όπου οι απαιτήσεις ακρίβειας εντοπισμού είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αποτελεί η οδήγηση μηχανημάτων έργων οδοποιίας (*navigation of construction machinery*). Η υλοποίηση υψομετρικών αφετηριών κατά την εκσκαφή, των κλίσεων του καταστρώματος και των πρανάων μιας οδού, καθώς και η στρώση ασφαλτικού υλικού με χωρική ομοιογένεια και ακρίβεια αποτελούν τυπικές περιπτώσεις εφαρμογής (Stempfhuber 2008). Η ψηφιακή καταγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών

(π.χ. στοιχεία χάραξης) έργων οδοποιίας και σιδηροδρομικής κατά τον έλεγχο συντήρησης και αποκατάστασης / βελτίωσης τους αποτελούν ανάλογα παραδείγματα (Gikas and Daskalakis 2008b). Ένα άλλο, ταχύτατα εξελισσόμενο πεδίο εφαρμογών, αναφέρεται σε αγροτικές εργασίες μεγάλων εκτάσεων, όπου λόγοι “βελτιστοποίησης” στη γεωργική διαδικασία (οικονομία σποράς, λίπανσης, φυτοφαρμάκων, προστασία του περιβάλλοντος, κ.α.) καθιστούν αναγκαία την αξιοποίηση της καλλιεργήσιμης γης μέσω της ακριβούς πλοήγησης των γεωργικών μηχανημάτων όπως προβλέπεται από τις γεωπονικές μελέτες (*precise farming*) (Stempfhuber 2008).

Τέλος, μία ακόμη μεγάλη κατηγορία εφαρμογών με ιδιαίτερες απαιτήσεις ακρίβειας, αφορά στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων (*structural health monitoring*) που εμφανίζουν περιοδικές / κυκλικές κινήσεις (ταλαντώσεις) λόγω εξωτερικής φόρτισης (ανέμου, θερμοκρασιακών αλλαγών, κ.α.). Υψηλά κτίρια, ιστοί τηλεφωνίας και γέφυρες αποτελούν τυπικά παραδείγματα σε αυτή την κατηγορία (Gikas 2008, Yigit et al 2008, Yigit et al 2009). Ειδικότερα, σε αυτό το πεδίο εφαρμογών ιδιαίτερη σημασία αποκτά ο έλεγχος των δυνατοτήτων και των περιορισμών που εμφανίζουν τα γεωδαιτικά όργανα να καταγράφουν τα κινηματικά χαρακτηριστικά των κατασκευών, βάσει των οποίων μπορεί να προκύψουν αξιόπιστες εκτιμήσεις για φασματικά χαρακτηριστικά της κίνησης (ιδιοσυχνότητες, εύρος κίνησης, κ.α.).



Σχήμα 1: Αρχή λειτουργίας ενεργητικών (π) και παθητικών (κ) συστημάτων RTS (αριστερά), σχηματική αναπαράσταση επίδρασης χρονικής υστέρησης μετρήσεων γωνιών και αποστάσεων RTS (δεξιά).

### 3. Αρχή Λειτουργίας και Πηγές Σφαλμάτων Γεωδαιτικών Οργάνων σε Κινηματικές Εφαρμογές

#### 3.1 Ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί (RTS)

Η χρήση των γεωδαιτικών σταθμών σε κινηματικές εφαρμογές στηρίζεται στην δυνατότητα αυτόματης αναγνώρισης, παρακολούθησης και εκτέλεσης μετρήσεων προς κινούμενο στόχο (πρίσμα / κατάφωτο). Η αρχή εντοπισμού σημείων στο χώρο με πολικές συντεταγμένες ως προς αυθαίρετο σύστημα αναφοράς, επιτυγχάνεται μέσω μετρήσεων αποστάσεων και γωνιών και τη βοήθεια κάμερας CCD. Τα συστήματα διακρίνονται σε ενεργητικά και παθητικά. Η αρχή λειτουργίας των ενεργητικών συστημάτων προϋποθέτει την εκπομπή μιας ακτίνας laser και τον εντοπισμό του ίχνους της επιστροφής της από το κατάφωτο, μέσω μιας ενσωματωμένης CCD κάμερας. Στα συστήματα αυτά, στον τηλεσκοπικό σωλήνα του οργάνου συνυπάρχουν, ομοαξονικά με το σκοπευτικό οπτικό σύστημα και η διάταξη μέτρησης απόστασης (EDM), η διάταξη εκπομπής της ακτινοβολίας παρακολούθησης του στόχου και η κάμερα ανίχνευσής της (Σχήμα 1). Αντίθετα, τα παθητικά συστήματα στηρίζονται στην ανίχνευση της ακτινοβολίας προκαθορισμένου μήκους κύματος που προέρχεται από τον ίδιο τον στόχο (“ενεργός στόχος”). Χαρακτηριστικό των παθητικών συστημάτων είναι η παράλληλα μετατοπισμένη θέση του άξονα της αυτόματης αναγνώρισης στόχου (Σχήμα 1). Η διαδικασία μέτρησης εκτελείται επαναλαμβανόμενα με αυτοματοποιημένο τρόπο και μεγάλη συχνότητα καταγραφής (έως 10 Hz), χωρίς να δημιουργείται ανάγκη χειροκίνητης σκόπευσης / μέτρησης ή άλλης παρέμβασης του παρατηρητή.

Εκτός από τα κοινά σφάλματα μέτρησης μηκών και γωνιών των συμβατικών γεωδαιτικών σταθμών τα όργανα αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου επηρεάζονται από πρόσθετους παράγοντες σφαλμάτων, οι οποίοι σχετίζονται με το περιβάλλον και τη γεωμετρία λήψης των μετρήσεων (Stathas and Karabelas 2001). Η βασικότερη πηγή σφαλμάτων είναι εγγενής και συνίσταται στην χρονική υστέρηση μεταξύ γωνιομετρήσεων (σχεδόν ακαριαία παρατήρηση) και μετρήσεων αποστάσεων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, αποτέλεσμα αυτής της χρονικής διαφοράς είναι ο εσφαλμένος υπολογισμός της τροχιάς του στόχου. Αξιοσημείωτος παράγοντας που εν μέρει υποβαθμίζει τη λειτουργικότητα αυτών των συστημάτων είναι και η δυσκολία (ή αδυναμία) τους να παρακολουθήσουν στόχους που κινούνται με μεγάλες πλευρικές ταχύτητες ή επιταχύνσεις σε μικρή απόσταση από το όργανο. Ανάλογα προβλήματα προκύπτουν λόγω ταχείας κίνησης του στόχου και φωτεινών ανακλάσεων από άλλες πηγές. Επίσης, σε ορισμένα όργανα, η αδυναμία άμεσης και αξιόπιστης λειτουργίας των ισοσταθμιστών οριζοντίωσης του οργάνου ενδέχεται να υποβαθμίσει την τελική ακρίβεια εντοπισμού σε συνθήκες κυκλικών κινήσεων. Τα πιο σύγχρονα όργανα εφαρμόζουν “ευφυείς” αλγόριθμους πρόβλεψης και αναζήτησης της τροχιάς του στόχου (Kirschner and Stempfhuber 2008). Ωστόσο, το πλήθος και τα χαρακτηριστικά αυτών των σφαλμάτων στο σύνολό τους καθιστούν δύσκολη (αν όχι αδύνατη) την μοντελοποίηση και τον αποτελεσματικό περιορισμό τους με αναλυτικές μεθόδους. Έτσι, γίνεται εμφανές ότι οι προδιαγραφές ακρίβειας που παρέχουν οι κατασκευαστές είναι συχνά ελλιπείς και δεν προσφέρουν ουσιαστικές πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη χρήση και την απόδοση των οργάνων σε εξειδικευμένες εφαρμογές.

### **3.2 Δέκτες δορυφορικού εντοπισμού (GPS)**

Σε εφαρμογές κινηματικού εντοπισμού με υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας, το δορυφορικό σύστημα εντοπισμού GPS στηρίζεται σε μετρήσεις της φάσης του φέροντος σήματος, το οποίο λαμβάνουν ταυτόχρονα δύο επίγειοι δέκτες από τους δορυφόρους του συστήματος. Ο ένας δέκτης (σταθμός αναφοράς) τοποθετείται σε σταθερό σημείο και ο δεύτερος (κινούμενος) στη θέση ενδιαφέροντος (π.χ. όχημα ή σημείο ελέγχου κατασκευής), χωρίς ωστόσο να απαιτείται οπτική επαφή μεταξύ τους. Με την τεχνική του σχετικού κινηματικού εντοπισμού, τόσο με εκ των υστέρων ανάλυση των παρατηρήσεων (PPK-GPS), όσο και με τη δυνατότητα επεξεργασίας τους σε πραγματικό χρόνο (RTK-GPS), προσδιορίζεται η θέση του κινούμενου δέκτη ως προς το σταθερό με ακρίβεια της τάξης του 0.01 m και συχνότητα καταγραφής που φτάνει τα 20 Hz, ανεξάρτητα από τις συνθήκες του περιβάλλοντος ή άλλους εξωγενείς παράγοντες. Βασικοί εγγενείς περιορισμοί του συστήματος που υποβαθμίζουν την ακρίβεια της μεθόδου, είτε την καθιστούν ολοκληρωτικά ανεφάρμοστη, αποτελεί η απαίτηση για “ανοικτό ορίζοντα” (ώστε να εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη λήψη του δορυφορικού σήματος από τουλάχιστον τέσσερις κοινούς δορυφόρους), η απουσία ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, καθώς και συνθήκες που προκαλούν πολλαπλές διαδρομές στο σήμα GPS (multipath). Το τελευταίο διάστημα, στο πλαίσιο ερευνητικής δραστηριότητας από διάφορα κέντρα (e.g. Nickitopoulou et al 2006, Gikas and Daskalakis 2008a), εξετάζονται συστηματικά οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του συστήματος για την καταγραφή των κινηματικών και φασματικών χαρακτηριστικών ειδικών κινήσεων, όπως ταλαντώσεις και περιστροφικές κινήσεις.

### **4. Διακρίβωση Γεωδαιτικών Οργάνων σε Ειδικές Περιπτώσεις Κίνησης**

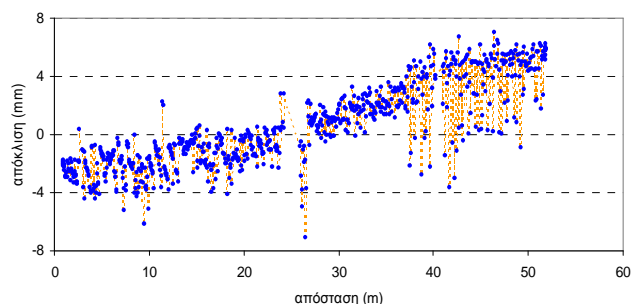
Όπως επισημάνθηκε, αυτή η εργασία εξετάζει τις δυνατότητες και τους περιορισμούς λειτουργίας δύο βασικών γεωδαιτικών οργάνων (ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός και δορυφορικοί δέκτες GPS) σε ειδικές περιπτώσεις κινηματικών εφαρμογών. Ο πειραματικός έλεγχος στηρίζεται στην χρήση ειδικών διατάξεων μέσω των οποίων ο στόχος (κατάφωτο RTS ή κεραία GPS) υποχρεούται σε εξαναγκασμένη κίνηση. Τα χαρακτηριστικά αυτής της κίνησης είναι γνωστά και ορίζουν την τροχιά αναφοράς έναντι της οποίας συγκρίνονται και αξιολογούνται τα μετρημένα μεγέθη (θέσεις, κινηματικά και φασματικά χαρακτηριστικά). Στη συνέχεια δίνονται τα αποτελέσματα (πειραματική διαδικασία και ανάλυση) από τρεις κατηγορίες ελέγχων διακρίβωσης.

#### 4.1 Διακρίβωση RTS σε συνθήκες ελεγχόμενης ευθύγραμμης και περιστροφικής κίνησης

Αντικείμενο αυτής της ομάδας ελέγχων αποτελεί η διερεύνηση της συμπεριφοράς γεωδαιτικών σταθμών αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου στην περίπτωση που ο στόχος διαγράφει εξαναγκασμένη ευθύγραμμη και κυκλική τροχιά κίνησης. Ειδικότερα, ο κύριος σκοπός της πειραματικής διαδικασίας αφορά τη μελέτη της επίδρασης της χρονικής υστέρησης μεταξύ των μετρήσεων διευθύνσεων και αποστάσεων στον προσδιορισμό θέσης, καθώς και τη μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας παρατήρησης και της ταχύτητας κίνησης του στόχου στο τελικό αποτέλεσμα. Στην εργασία αυτή δίνονται καταρχήν αποτελέσματα για τους γεωδαιτικούς σταθμούς Leica TCA 1800 (5mm + 2ppm / 3<sup>cc</sup>) και Trimble DR200+ 5600 (10mm + 3ppm / 15<sup>cc</sup>). Επισημαίνεται ότι, προκειμένου να εξασφαλιστεί η δυνατότητα αδιάλειπτης παρακολούθησης του κινούμενου στόχου χρησιμοποιήθηκε περιβλεπτο (360 deg) κατάφωτο.

##### 4.1.1 Εξαναγκασμένη ευθύγραμμη κίνηση

Στο Σχήμα 2 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την ομάδα πειραμάτων ευθύγραμμης κίνησης. Η διάταξη περιλαμβάνει ένα ειδικό ηλεκτροκίνητο φορείο κύλισης το οποίο κινείται σε ευθύγραμμη τροχιά με ταχύτητα ελεγχόμενη από τον χειριστή του φορείου. Προκειμένου να εξακριβωθεί η γεωμετρία της τροχιάς αναφοράς, ιδρύθηκε περιμετρικά της πειραματικής διάταξης μικροτριγωνομετρικό δίκτυο από τις κορυφές του οποίου υπολογίστηκε η “βέλτιστη” ευθεία προσαρμογής στις γραμμές κύλισης. Το συνολικό μήκος της γραμμής κύλισης είναι της τάξης των 80 m. Από αυτό, χρησιμοποιήθηκε μήκος ~ 50 m για το οποίο διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια υλοποίησης της ευθυγραμμίας καλύπτει τις προδιαγραφές ακρίβειας των οργάνων σε λειτουργία “tracking”. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της γεωμετρίας παρατήρησης στην καταγραφή της τροχιάς κίνησης, τα πειράματα διεξήχθησαν για δύο θέσεις του γεωδαιτικού σταθμού. Στην πρώτη περίπτωση ο γεωδαιτικός σταθμός τοποθετήθηκε στην προέκταση της τροχιάς κίνησης, ενώ στη δεύτερη εκτός αυτής. Επιμέρους πειράματα διεξήχθησαν για διαφορετικές ταχύτητες κύλισης (Γεωργίου 2007). Στο Σχήμα 2 δίνεται ενδεικτικά το διάγραμμα αποκλίσεων (κάθετη απόσταση) της τροχιάς κίνησης από την τροχιά αναφοράς στην περίπτωση που το όργανο (Leica TCA 1800) βρίσκεται εκτός της ευθυγραμμίας κίνησης και ο στόχος κινείται με ταχύτητα 2 m/sec. Από αυτό το διάγραμμα είναι εμφανής η επίδραση της χρονικής υστέρησης των μετρήσεων γωνιών και αποστάσεων (κυματοειδής μορφή). Ωστόσο, η διακύμανση της απόστασης μεταξύ των δύο τροχιών αντανακλά και την επίδραση άλλων φαινομένων, όπως η μεταβολή στη σταθερά του κατάφωτου που οφείλεται στη μεταβολή της διεύθυνσης σκόπευσης ως προς την επιφάνεια του πρίσματος.



Σχήμα 2: Πειραματική διάταξη ελέγχου RTS σε ευθύγραμμη κίνηση (αριστερά), διάγραμμα αποκλίσεων μεταξύ ονομαστικής και μετρημένης τροχιάς (Leica TCA-1800) για  $v=2$  m/sec (δεξιά).

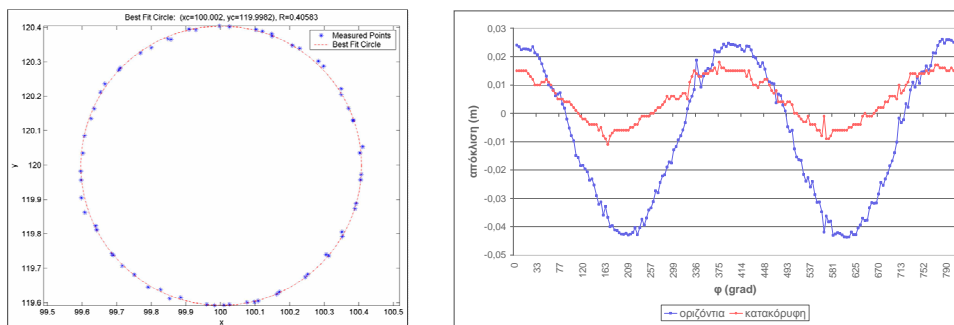
##### 4.1.2 Εξαναγκασμένη κυκλική κίνηση

Η διακρίβωση των οργάνων RTS σε συνθήκες περιστροφικής κίνησης βρίσκει χρησιμότητα σε εφαρμογές ρομποτικής καθώς και μελέτης της δυναμικής συμπεριφοράς υψηλών κατασκευών. Για την

διεξαγωγή των πειραμάτων κατασκευάστηκε ειδική διάταξη η οποία επιτρέπει την τοποθέτηση του κατάφωτου σε περιστρεφόμενο βραχίονα και εξασφαλίζει συνθήκες ελεγχόμενης κυκλικής κίνησης με γωνιακή ταχύτητα που ρυθμίζεται από τον χειριστή της διάταξης (Σχήμα 3). Ειδικότερα, ο πειραματικός μηχανισμός αποτελείται από μια αριθμημένη ράβδο αλουμινίου, η οποία τοποθετείται σε κατάλληλη υποδοχή κινητήρα μέσω του οποίου τίθεται σε ελεγχόμενη περιστροφική κίνηση. Το όλο σύστημα τοποθετείται σε τρίποδα βιομηχανικής γεωδαισίας προκειμένου να εξασφαλίζεται σταθερότητα κατά την περιστροφή. Η διαχείριση του μηχανισμού γίνεται μέσω ειδικού λογισμικού με την βοήθεια Η/Υ. Προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία των δύο γεωδαιτικών σταθμών διεξήχθησαν πειράματα για διαφορετικές αποστάσεις παρατήρησης και γωνιακές ταχύτητες περιστροφής του ρότορα (Βρούτας 2007). Στο Σχήμα 4, δίνονται ενδεικτικά οι τροχιές (αληθής και μετρημένη) και η απόκλιση μεταξύ των δύο τροχιών ως προς τη γωνία παρατήρησης για το όργανο Leica TCA 1800, απόσταση παρατήρησης 20 m, ακτίνα περιστροφής 0.4 m και ταχύτητα περιστροφής 7 στροφές /sec. Από αυτά τα διαγράμματα είναι εμφανές ότι η αποχή της μετρημένης τροχιάς από την αληθή μεταβάλλεται περιοδικά ως απόρροια της περιοδικής μεταβολής στη γεωμετρία παρατήρησης.



Σχήμα 3: Διάταξη περιστρεφόμενου βραχίονα ελέγχου RTS σε εξαναγκασμένη κυκλική κίνηση.



Σχήμα 4: Ονομαστική και μετρημένη τροχιά (αριστερά), και διάγραμμα αποκλίσεων ως προς τη γωνία παρατήρησης (δεξιά) για το Leica TCA-1800  $d= 20$  m,  $r= 0.4$  m,  $\omega= 7$  στροφές/min.

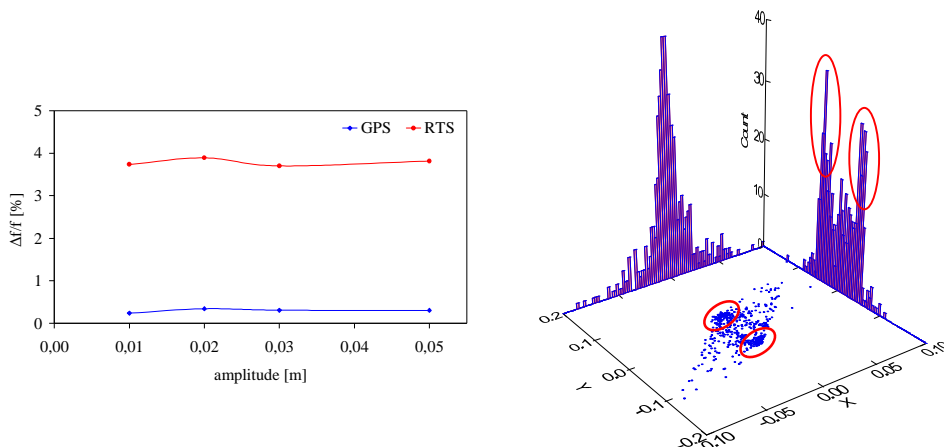
#### 4.2 Πειραματικός έλεγχος RTS και GPS σε συνθήκες ελεγχόμενης ταλάντωσης

Η δημιουργία συνθηκών εξαναγκασμένης ταλάντωσης έγινε με τη βοήθεια κατάλληλα διαμορφωμένης διάταξης σεισμικής τράπεζας μονής διεύθυνσης. Ο ταλαντωτής που χρησιμοποιήθηκε εξασφαλίζει την παραγωγή σημάτων υψηλής αξιοπιστίας ( $\pm 1 \times 10^{-6}$  Hz,  $\pm 0.02$  mm). Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκε ειδικός προσαρμογέας στήριξης του κατάφωτου RTS (Leica TCA 1800) και της κεραίας GPS (Leica GX1230), ενώ κατά τη συλλογή των μετρήσεων ο γεωδαιτικός σταθμός τοποθετήθηκε σε απόσταση  $\sim 350$  m από τον ταλαντωτή (Σχήμα 5). Είναι γνωστό ότι οι περισσότερες υψηλές κατασκευές εμφανίζουν φασματικά χαρακτηριστικά ταλάντωσης λόγω μεταβολών του ανέμου και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μεταξύ 0.1 Hz και 2 Hz. Προκειμένου να προσομοιωθούν με

πραλιστικό τρόπο εναλλακτικά σενάρια παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών έγιναν συνολικά είκοσι επιμέρους πειράματα για πέντε ονομαστικές τιμές συχνοτήτων (0.1, 0.2, 0.5, 1.0 και 2.0 Hz) και τέσσερις μέγιστες τιμές εύρους κίνησης ( $\pm 0.01$ ,  $\pm 0.02$ ,  $\pm 0.03$ ,  $\pm 0.05$  m) διάρκειας  $\sim 1.5$  min. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση του RTS, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της διεύθυνσης σκόπευσης σε σχέση με την διεύθυνση ταλάντωσης, κάθε ένα από τα είκοσι πειράματα διενεργήθηκε για πέντε γωνίες σκόπευσης (0 deg (σκόπευση κατά την διεύθυνση ταλάντωσης), 30 deg, 45 deg, 60 deg, 90 deg (σκόπευση κάθετα στη διεύθυνση ταλάντωσης)).



Σχήμα 5: Γεωμετρία παρατήρησης RTS και GPS σε συνθήκες εξαναγκασμένης ταλάντωσης .



Σχήμα 6: Ποσοστιαία διαφορά μεταξύ ονομαστικής - μετρημένης συχνότητας ταλάντωσης (αριστερά), καταγραφή ταλαντώσεων RTS ( $\alpha = 0.05$  m,  $f = 2$  Hz, twist ang. = 60 deg) (δεξιά).

Η επεξεργασία των μετρήσεων και η ανάλυση των αποτελεσμάτων οδήγησε σε μία σειρά παραμετρικών διαγραμμάτων, τα οποία απεικονίζουν τις αναμενόμενες διαφορές μεταξύ των ονομαστικών (από τον ταλαντωτή) και υπολογισμένων (από τις μετρήσεις) τιμών στα φασματικά χαρακτηριστικά (συχνότητα και εύρος) της ταλάντωσης (Gikas and Daskalakis 2008a, Νησωτάκης 2008). Εδώ (Σχήμα 6), παρατίθεται ενδεικτικά η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ ονομαστικής (1 Hz) και μετρημένης συχνότητας για διαφορετικά εύρη ( $\pm 0.01$  έως  $\pm 0.05$  m) ταλάντωσης για τα συστήματα RTS και GPS. Με απλή επισκόπηση του διαγράμματος προκύπτει ότι σε κάθε περίπτωση, η απόκλιση της μετρημένης από την ονομαστική συχνότητα είναι  $< 4\%$  (τιμή που εν γένει καλύπτει τις απαιτήσεις της τεχνικής μηχανικής (Chopra 2007)). Στο Σχήμα 6 απεικονίζεται η καταγραφή του συστήματος RTS (0.05 m, 2 Hz, 60 deg). Όπως είναι φανερό, σε αυτή την περίπτωση, η επίδραση της χρονικής υστέρησης μεταξύ των μετρήσεων γωνιών και αποστάσεων έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία δύο περιοχών με πλασματικά υψηλό αριθμό καταγραφών. Διαγράμματα αυτής της μορφής είναι ιδιαίτερα χρήσιμα δεδομένου ότι παρέχουν πληροφορίες ως προς την ικανότητα των οργάνων να παρακολουθήσουν και να αναπαράγουν κινήσεις με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

## 5. Σύνοψη και Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία επιχειρήθηκε η πειραματική διακρίβωση συμβατικών και δορυφορικών γεωδαιτικών οργάνων σε κινηματική λειτουργία. Για αυτό το σκοπό προσομοιώθηκαν βασικές κινήσεις (ευθύγραμμη κίνηση, κυκλική κίνηση και ταλαντώσεις μονής διεύθυνσης) με τη βοήθεια ειδικών διατάξεων. Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τις δυνατότητες και τους περιορισμούς των οργάνων να περιγράψουν με πληρότητα και ακρίβεια τα κινηματικά / φασματικά χαρακτηριστικά αντίστοιχων εφαρμογών.

## Βιβλιογραφία

- Δούκας Ι., 2005: Περί Διακρίβωσης των Γεωδαιτικών (Τοπογραφικών) Οργάνων, 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα, Νοε 2005.
- Γεωργίου Κ. “Πειραματικός Έλεγχος Γεωδαιτικών Σταθμών Αυτόματης Αναγνώρισης και Παρακολούθησης Στόχου”, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, 2007.
- Βρούτας Π. “Μελέτη Λειτουργίας Αυτόματης Παρακολούθησης Στόχου σε Συνθήκες Ελεγχόμενης Περιστροφικής Ταλάντωσης”, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, 2007.
- Νησωτάκης Γ. “Διερεύνηση Λειτουργίας γεωδαιτικού Σταθμού Leica TCA-1800 με Χρήση Σεισμικής Τράπεζας και Μεθόδων Φασματικής Ανάλυσης”, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, 2008.
- FIG Standards Network, [http://www.fig.net/standards\\_network/index.htm](http://www.fig.net/standards_network/index.htm), 2005
- ISO/TC 172/SC 6, Standards and Drafts: Geodetic and Surveying Instruments, <http://iso.org/en/CatalogueListPage>.
- Nickitopoulou A., Protopsalti K., Stiros S., “Monitoring Dynamic and Quasi-Static Deformations of Large Flexible Engineering Structures with GPS: Accuracy, Limitations and Promises”, Engineering Structures, 28 (2006) p.1471-1482.
- Kijewski-Correa T., Kareem A. and Kochly M., “Experimental Verification and Full-Scale development of Global Positioning Systems to Monitor the Dynamic Response of Tall Buildings”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 132 (2006) 8.
- Gikas V. and Daskalakis S. 2008a: Comparative Testing and Analysis of RTS versus GPS for Structural Monitoring Using Calibration Measurements Upon Sinusoidal Excitation, 13<sup>th</sup> Symp. on Deformation Measurement and Analysis, Lisbon, May 12-15, 2008.
- Stempfhuber W., “Navigation of Construction and Agriculture Machinery”, Geodezija ir Kartografija (Geodesy and Cartography), Research Journal of Vilnius Gediminas Technical University, 34 (2008) 3, p 83-87.
- Gikas V. and Daskalakis S., “Determining Rail Track Axis Geometry Using Satellite and Terrestrial Geodetic Data”, Survey Review, 40 (2008b) 310, p 392-405.
- Gikas V. “Monitoring Highly Dynamic Structures: Smart RTS”, GIM International, 22 (2008) 6.
- Yigit C. O., Inal C., Yetkin M. 2008: Monitoring of Tall Building’s Dynamic Behaviour Using Precision Inclinometer Sensors, 13<sup>th</sup> Symp. on Deformation Measurement and Analysis, Lisbon, May 12-15, 2008.
- Yigit C.O., Inal C., Li X., Rizos C., Yetkin M., Arslan M. H., Doganalp S. 2009: Analysis of Wind-Induced Response of Rixos Hotel Building Based on Data Collected by GPS and Precise Inclinometer Sensors and Comparison of the Sensors, 4<sup>th</sup> Turkish Symposium on Eng. Surveying, Oct. 14-16, Trabzon, Turkey.
- Stathas D. and Karabelas J. “The Use of Robotic Total Station in Testing the Trajectory of a Moving Object” Geomatics Research Australasia, 74 (2001), p 27-42.
- Kirschner H. and Stempfhuber W., 2008: The Kinematic Potential of Modern Tracking Total Stations – A State of the Art Report on Leica TPS1200+, 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Machine Control & Guidance 2008, ETH Zurich, June 24-26, 2008.
- Chopra A. “Dynamics of Structures”, Pearson Prentice Hall, 2007.