

# Η ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ (ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ) ΚΑΙ Η ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Ιωάννης Α. Δούκας

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## Περίληψη

Η με μεγάλη ακρίβεια δημιουργία ή μέτρηση τρισδιάστατων μοντέλων περίπλοκων επιφανειών και γενικότερα αντικειμένων, είναι αντικείμενο της Μετρολογίας τριών διαστάσεων (3D-Metrology). Προκειμένου η 3D-Μετρολογία να συνδέσει τον πραγματικό με το θεωρητικό κόσμο (και αντιστρόφως), απαιτούνται μετρήσεις και βέβαια ανάλογες μεθοδολογίες μέτρησης και υπολογισμών. Στον τομέα αυτό, η συμβολή της επιστήμης της Γεωδαισίας, μιας κατεξοχήν επιστήμης μετρήσεων, είναι εξαιρετικά σημαντική. Στην παρούσα εργασία, εξετάζονται και αναλύονται μέθοδοι (ή αρχές) μέτρησης και όργανα που, ενώ ανήκουν στη Γεωδαισία (συγκεκριμένα σε κλάδο αυτής γνωστό και ως: Γεωδαιτική Μετρολογία, Τεχνική Γεωδαισία, Βιομηχανική Γεωδαισία), αποτελούν βασικές παραμέτρους της 3D-Μετρολογίας.

*Λέξεις-Κλειδιά: γεωδαιτική μετρολογία, 3D-Μετρολογία, μετρολογία μεγάλης κλίμακας, μετρολογία μεγάλου όγκου, βιομηχανική γεωδαισία, τεχνική γεωδαισία*

## Abstract

The very accurate measurement or creating three-dimensional models of complex surfaces and objects in general are subject of three dimensional Metrology (3D-Metrology). In order 3D-Metrology to connect effectively the physical world with the virtual world (and vice versa), there is a need of measurements, methodologies of measurements and calculations. In this area, the contribution of the science of Geodesy, a science of spatial measurements, is extremely important. In this paper, a review and analysis of methods (or principles) and measuring instruments is carried out. These methods and instruments, although they belong to Geodesy (specifically in a branch of it, known also as: Geodetic Metrology, Technical Geodesy or Industrial Geodesy), they also form fundamental parameters and components of 3D-Metrology.

*Keywords: geodetic metrology, 3D-Metrology, massive metrology, large scale metrology, large volume metrology, industrial geodesy, technical geodesy*

## 1. Εισαγωγικά – Ορολογία

Η Γεωδαισία ασχολείται με τη θεωρητική και πρακτική σπουδή οργάνων και μεθόδων για την εκτέλεση μετρήσεων, υπολογισμών και απεικονίσεων που είναι χρήσιμες για τον προσδιορισμό της μορφής και του μεγέθους, τμημάτων ή ολόκληρης της γήινης επιφάνειας (Δούκας α 2005). Επειδή πρόκειται για μια τεράστια σε έκταση επιστήμη, με πολλές διεπιστημονικές προεκτάσεις, διακρίνεται σε αρκετούς επί μέρους κλάδους (όπως π.χ. Φυσική Γεωδαισία, Μαθηματική Γεωδαισία, Ηλεκτρονική Γεωδαισία κ.λπ.). Έτσι, υπάρχει και ο κλάδος της *Τεχνικής Γεωδαισίας*.

ας – *Technical Geodesy* (που μπορεί να συναντηθεί, στην αγγλική γλώσσα και με την ονομασία: *Βιομηχανική Γεωδαισία, Μηχανική Γεωδαισία- Industrial Geodesy, Engineering Geodesy, Engineering Surveying*, στη δε γερμανική γλώσσα ως: *Ingenieurgeodäsie*). Πρόκειται για το γεωδαιτικό κλάδο που έχει να κάνει με την παρακολούθηση διαφόρων φυσικών και τεχνικών έργων, μαζί με τις εκτελούμενες μετρήσεις (κατά το σχεδιασμό, χάραξη και κατασκευή έργων) (Δούκας κ.ά. 1990).

Ενώ η Γεωδαισία γενικά ασχολείται με πολύ μεγάλες επιφάνειες (για παράδειγμα, με τη Γη στο σύνολό της, με μια χώρα ή ένα τμήμα μιας χώρας), η *Τεχνική Γεωδαισία* έχει ως αντικείμενο πολύ μικρότερες "περιοχές", όπως είναι π.χ. μέσα σε μια σήραγγα, οι δε μετρήσεις της έχουν να κάνουν εύλογα με μικρότερα αντικείμενα, όπως είναι π.χ. μαγνήτες και άλλα δομικά στοιχεία ενός επιταχυντή σωματιδίων. Ακόμη περισσότερο, η Τεχνική Γεωδαισία περιλαμβάνει επίσης ένα ευρύτερο φάσμα τεχνικών και μεθόδων που κείνται και σε άλλους σημαντικούς κλάδους της Γεωδαισίας, τη *Γεωματική (Geomatics)* (δηλ. την επιστήμη της συλλογής, αποθήκευσης, επεξεργασίας και διάδοσης γεωγραφικών πληροφοριών) και τη *Φωτογραμμαμετρία*. Σε κάθε περίπτωση, καθώς συχνά τέτοιοι γεωδαιτικοί κλάδοι έχουν πλέον ασαφή όρια μεταξύ τους, η Τεχνική Γεωδαισία περιλαμβάνει επίσης νέες μεθόδους που αναπτύσσονται με τη χρήση ηλεκτρονικών, και/ή βασίζονται σε μηχανικά ή οπτικά όργανα μέτρησης ή τέλος, σε διάφορους συνδυασμούς όλων αυτών.

Με τον όρο *Τρισδιάστατη Μετρολογία* ή *3D-Μετρολογία (3D-Metrology)* νοείται η επιστήμη και τέχνη, της με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια δημιουργίας τρισδιάστατων αντικειμένων και επιφανειών μεγάλης πολυπλοκότητας, με τη μέτρηση και χρήση δεδομένων τριών διαστάσεων (κατά  $x, y, z$ ). Πρόκειται για μια "γέφυρα" που οδηγεί από το πραγματικό αντικείμενο στο θεωρητικό μοντέλο και αντιστρόφως, από το θεωρητικό μοντέλο στο νέο – και με ακρίβεια κατασκευασμένο – αντικείμενο.

Η *Βιομηχανική Μετρολογία* (που σε αρκετά κράτη ταυτίζεται με την *Επιστημονική Μετρολογία*) στοχεύει στην άρτια λειτουργία των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία αλλά και σε διαδικασίες παραγωγής προϊόντων και ελέγχου αυτών (Δούκας b 2005). Η Βιομηχανική Μετρολογία δηλώνει *χωρικές μετρήσεις διαστάσεων*, κάτι το οποίο "ακριβώς" κάνουν και οι γεωδαίτες (αγρονόμοι & τοπογράφοι μηχανικοί). Στο χώρο της Βιομηχανικής Μετρολογίας, οι ακρίβειες μετρήσεων κυμαίνονται κατά κανόνα από την τάξη του  $\mu\text{m}$  (0.001mm) μέχρι mm.

Συνδυάζοντας τα παραπάνω με μια απλουστευμένη προσέγγιση, η τομή των συνόλων Τεχνικής Γεωδαισίας, 3D-Μετρολογίας και Βιομηχανικής Μετρολογίας οδηγεί στο σύνολο *Γεωδαιτική Μετρολογία*, δηλ. τη χρήση γεωδαιτικών τεχνικών και οργάνων για τη μέτρηση αντικειμένων όπου όμως τα θέματα ακριβείας θα υπακούουν στις απαιτήσεις της Βιομηχανικής Μετρολογίας (και της 3D-Μετρολογίας). Έτσι, ανάλογα με τις διαστάσεις του μετρούμενου αντικειμένου, επιτυγχάνονται ακρίβειες καλύτερες από 1mm μέχρι και ελάχιστα cm. Όταν πρόκειται για μηχανές και γενικά άλλες μεγάλες δομές (όπως π.χ. ένα πετρελαιοφόρο πλοίο, ένα αεροσκάφος), τότε ο όρος της Γεωδαιτικής Μετρολογίας μπορεί να συναντηθεί και ως *Μετρολογία Μεγάλου Όγκου ή Μεγάλης Κλίμακας (Large Volume (ή Large Scale) Metrology)*. Στο ένα άκρο της βρίσκονται οι εργαστηριακές μετρήσεις και στο άλλο άκρο της οι γεωδαιτικές μετρήσεις, χωρίς να είναι σαφώς καθορισμένα τα δύο αυτά άκρα (Estler et al. 2002). Η γενική σύγχρονη εικόνα της βιομηχανίας διεθνώς δείχνει ευρύτατη χρήση γεωδαιτικών μεθόδων, καθώς είναι εξαιρετικά αποτελεσματικές και ταχύτατες σε θέματα μετρήσεων ποιοτικού ελέγχου. Όταν τα κατασκευαζόμενα προϊόντα (και τμήματα αυτών) είναι αντικείμενα τριών διαστάσεων, τότε προφανώς και οι μετρήσεις πρέπει να είναι τριών διαστάσεων. Εκτός όμως από τις αμιγείς βιομηχανικές εφαρμογές, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, οι εφαρμογές της Γεωδαιτικής Μετρολογίας είναι πολυποίκιλες. Μεταφορικά, οι γεωδαιτικές μέθοδοι (και όργανα αυτών) θεωρούνται ως ένα είδος μηχανών μέτρησης συντεταγμένων, ένα δε θεμελιώδες βασικό πλεονέκτημά τους είναι η *παρο-*

χή απόλυτων συντεταγμένων (Δούκας 1988), (Kavvadas 2005). Από εδώ και πέρα στην παρούσα εργασία, ως συνισταμένη των παραπάνω όρων Μετρολογίας, θα χρησιμοποιηθεί ο γενικευμένος όρος: Γεωδαιτική Μετρολογία (ΓΜ).

Λόγω της πληθώρας διαφορετικών εφαρμογών που συναντώνται στο χώρο της ΓΜ, είναι λογικό και αναμενόμενο η κάθε περίπτωση να αποτελεί κάτι το ξεχωριστό, όπως επίσης κατά κανόνα τα αντικείμενα μεγάλου όγκου αν απαιτούν διαφορετική αντιμετώπιση (ως προς τις μεθόδους, τα όργανα και τα σενάρια μετρήσεων) σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μικρά σε μέγεθος-όγκο. Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι τυπικές απαιτήσεις της ΓΜ είναι:

- ✓ Αυτοματοποίηση μετρήσεων για μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας.
- ✓ Δυνατότητα μετρήσεων δυσπρόσιτων και απρόσιτων σημείων.
- ✓ Λήψη (μέτρηση) πληροφοριών σχετικά με τη γεωμετρία, μορφή, θέση κ.λπ.
- ✓ Υψηλή ακρίβεια λήψης (μέτρησης) δεδομένων.
- ✓ Υψηλή ταχύτητα λήψης (μέτρησης) δεδομένων.

## **2. Κατηγορίες μετρολογικών οργάνων (συστημάτων)**

Η κατηγοροποίηση των μετρολογικών οργάνων (και συστημάτων) είναι εξαιρετικά δύσκολη, λόγω των πολλαπλών λειτουργιών (multimode) που συναντώνται στα περισσότερα από αυτά. Με βάση διάφορες απόψεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία (Muelaner and Maropoulos 2008, Μπαντέλας κ.ά. 2005, Μπαντέλας κ.ά. 1999, Estler et al. 2002, Kavvadas 2005, Kahmen and Reiterer 2004, Khan 2009, Leica 2009, Savio et al. 2007, Vasilash 2009, Δούκας a 2005, Δούκας b 2005, Stempfhuber 2006), επιχειρείται εδώ ένας συγκερασμός που καταλήγει σε δύο ειδών κατηγοροποιήσεις, χωρίς βέβαια αυτές να είναι και οι μοναδικές που μπορούν να γίνουν. Πιο συγκεκριμένα:

### **2.1.Κατηγοροποίηση με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους και χαρακτηριστικά**

Η εν λόγω κατηγοροποίηση έχει να κάνει με ειδικές παραμέτρους και χαρακτηριστικά των μετρολογικών οργάνων, όπως ενδεικτικά είναι:

1. *Η κλίμακα (με την έννοια του μεγέθους, του όγκου του αντικειμένου):* Είναι εύλογο ότι γενικά στη μετρολογία η ακρίβεια (με την έννοια της ορθότητας, accuracy) είναι αντιστρόφως ανάλογη της κλίμακας στην οποία γίνονται οι μετρήσεις. Στις συνηθισμένες εργασίες πολύ υψηλών απαιτήσεων ακριβείας (π.χ. στην αεροναυπηγική, στη βιομηχανία οχημάτων κ.λπ.) είναι εφικτές ακρίβειες  $7\mu\text{m} \div 145\mu\text{m}$ , ανάλογα με το όργανο, κατασκευαστή, μοντέλο, σύνθεση και σενάριο μετρήσεων.

2. *Η δυνατότητα μετρήσεων κατά τμήματα ή συνολικά:* Άλλα όργανα μετράνε πολλαπλά σημεία διαδοχικά στη σειρά και άλλα όργανα μετράνε πολλά σημεία μαζικά και ταυτόχρονα.

3. *Η ακρίβεια (ορθότητα, accuracy), η πιστότητα (ποιότητα μέτρησης, precision), η επαναληψιμότητα (repeatability).*

4. *Η συχνότητα και το πλήθος μετρήσεων:* Το πλήθος και η συχνότητα μετρήσεων είναι δύσκολο να καθοριστεί καθώς τα περισσότερα μετρολογικά όργανα μπορούν να επιδείξουν υψηλές επιδόσεις (πολλές και ταχύτερες μετρήσεις σε μικρά χρονικά διαστήματα) στον εν λόγω τομέα. Από την άλλη μεριά όμως, μια και μοναδική μέτρηση μπορεί να είναι φτωχή σε ακρίβεια. Κατά κανόνα, για να βελτιωθεί η ακρίβεια χρησιμοποιούνται μέσοι όροι πολλών μετρήσεων, αλλά η μέγιστη ακρίβεια ποτέ δεν επιτυγχάνεται ταυτόχρονα με τη μέγιστη συχνότητα (πλήθος) μετρήσεων.

5. Ο πλούτος παρεχόμενων πληροφοριών: Κάθε όργανο (και σύστημα) μέτρησης προσφέρει διαφορετικές πληροφορίες, ειδικά ως προς τις τρεις διαστάσεις. Πιο συγκεκριμένα:

5.1. *Συστήματα μιας διάστασης (1D)*: Εδώ συναντώνται και "παραδοσιακά" μετρολογικά όργανα όπως π.χ. το μικρόμετρο, το παχύμετρο κ.λπ. αλλά και πολύ πιο μοντέρνα όργανα όπως είναι το κινούμενο σε ράγες συμβολόμετρο (interferometer) Laser.

5.2. *Συστήματα δύο διαστάσεων (2D)*: Αφενός υπάρχουν όργανα-συσσκευές ικανά στο να εντοπίσουν δισδιάστατα αντικείμενα (π.χ. να εντοπίσουν έναν αισθητήρα ή να τοποθετήσουν έναν αισθητήρα πάνω σε μια επιφάνεια ή κάθετα σε αυτήν), αφετέρου όργανα-συσσκευές με την ικανότητα μέτρησης σπών και άλλων χαρακτηριστικών.

5.3. *Συστήματα τριών διαστάσεων (3D) μέτρησης συγκεκριμένων θέσεων στο χώρο.*

5.4. *Συστήματα τριών διαστάσεων (3D) χαρακτηρισμού επιφάνειας*: Συστήματα, που με την κατάλληλη εξασφάλιση ορατότητας, είναι ικανά να "εντοπίσουν-προσδιορίσουν" την πλήρη μορφή ενός αντικειμένου και να την ψηφιοποιήσουν.

5.5. *Συστήματα έξι (6) βαθμών ελευθερίας (6 DOF – Degrees Of Freedom)*: Μετράνε και τις συντεταγμένες αλλά και την περιστροφή του αντικειμένου (εξαιρετικά χρήσιμα στην παροχή ανάδρασης στον αυτοματισμό).

6. *Η λειτουργία σε συγκεκριμένη θέση ή σε κατανομή στο χώρο*: Για παράδειγμα ένας ανιχνευτής Laser (Laser tracker) (βλ. Σχ. 1) είναι ένα όργανο που μπορεί μόνο του να πραγματοποιήσει μετρήσεις, βρισκόμενο σε συγκεκριμένη θέση. Από την άλλη μεριά, μπορεί να υπάρχουν σε κάποιο χώρο καταναμημένοι θεοδόλιχοι για μετρήσεις συντεταγμένων σημείων. Ακόμη περισσότερο, μπορεί να υπάρχουν όργανα συγκεκριμένης θέσης που να αποτελούν ένα καταναμημένο δίκτυο με στόχο τη βελτίωση της επιτυγχανόμενης ακριβείας, την επέκταση ενός δικτύου μετρήσεων πέρα από το βεληγεκές ορατότητας ενός και μοναδικού οργάνου ή τέλος, με στόχο τη βελτίωση των πληροφοριών που παρέχονται από συσκευές 1D ώστε η κατάλληλη να είναι συντεταγμένες τριών διαστάσεων.

7. : Σχετίζεται με την μεταφορά πληροφορίας, είτε από το μετρούμενο σημείο προς το σύστημα αναφοράς (datum) του χρησιμοποιούμενου οργάνου, είτε από τη μια μέτρηση στην επόμενη.

8. *Αν οι μετρήσεις απαιτούν "φυσική επαφή" ή γίνονται εξ αποστάσεως.*

9. *Η συνολική υποστήριξη λογισμικού (όργανο, επικοινωνία, ανάλυση κ.λπ.).*

10. *Το λειτουργικό περιβάλλον.*

## 2.2. Κατηγοροποίηση με βάση τους αυτοματισμούς και τη Γεωδαιτική Μετρολογία

Στα γεωδαιτικά όργανα υπάρχει ποικιλομορφία αυτοματισμών, όπως:

- ❖ Απλά ηλεκτρονικά συστήματα (π.χ. ηλεκτρονικοί θεοδόλιχοι, γεωδαιτικοί σταθμοί) τα οποία "απαιτούν" τη συνδρομή παρατηρητή, συνοδεύονται δε από H/Y (που ελέγχει άμεσα τη διαδικασία μετρήσεων, αποθηκεύει τα δεδομένα και εκτελεί υπολογισμούς).
- ❖ Ηλεκτρονικοί γεωδαιτικοί σταθμοί ή ηλεκτρονικοί σερβοθεοδόλιχοι, που τους "διδάσκειται" μια σειρά κινήσεων-μετρήσεων, την οποία επαναλαμβάνουν χωρίς τη συνδρομή παρατηρητή.
- ❖ Ηλεκτρονικοί γεωδαιτικοί σταθμοί ή ηλεκτρονικοί σερβοθεοδόλιχοι, που δέχονται οδηγίες για τη διαδικασία μετρήσεων από συνδεδεμένο H/Y που "τρέχει" κατάλληλο λογισμικό.



- ❖ "Εξυπνα" ή "ρομποτικά" συστήματα στα οποία, συνδυάζονται διάφοροι αισθητήρες (όπως π.χ. CCD κάμερα – Charge-Coupled Device) για τον αυτόματο εντοπισμό στόχων (Automatic Target Recognition – ATR). Τέτοια συστήματα είναι ικανά να εκτελούν μετρήσεις, να εντοπίζουν ταλαντώσεις, να παρακολουθούν (μέσω ATR) στόχο που κινείται με ταχύτητα π.χ. ως 5m/sec, να υπολογίζουν (σε πραγματικό χρόνο), να δίδουν τα αποτελέσματα, να τροποποιούν μόνα τους το αρχικά δοσμένο "σενάριο" μετρήσεων.

Με την έννοια *ρομποτικό σύστημα μέτρησης* (που συνηθέστερα χρησιμοποιείται σε πολλές και διαφορετικές εφαρμογές) νοείται αυτό που έχει τις εξής ιδιότητες:

- Κινείται αυτόματα πέριξ των κύριων αξόνων του (με βάση κατάλληλες εντολές), μπορεί δεν να εκτελεί επαναλαμβανόμενα "σενάρια" μετρήσεων.
- Αποθηκεύει στη μνήμη του "σενάρια" κινήσεων και μετρήσεων, τα οποία και εκτελεί αυτόματα.
- Μπορεί να "μάθει", τη δε γνώση που αποκτά την αποθηκεύει στη μνήμη του και κατόπιν τη χρησιμοποιεί, αναπροσαρμόζοντας κατά περίπτωση το πρόγραμμα λειτουργίας του.

Σε πολλές περιπτώσεις σήμερα, η συμμετοχή της Τεχνητής Νοημοσύνης αρχίζει και γίνεται αισθητή σε όργανα και εφαρμογές της ΓΜ (IAG 2009).

Με γνώμονα τη ΓΜ, τα σχετικά με αυτήν γεωδαιτικά όργανα και συστήματα θα μπορούσαν να έχουν μια τέτοια κατηγοροποίηση:

#### **A. Όργανα μέτρησης γωνιών, αποστάσεων και υψομετρικών διαφορών:**

Για γωνίες: Θεοδόλιχοι (μηχανικοί ή συνηθέστερα σήμερα ηλεκτρονικομηχανικοί).

Για αποστάσεις: Ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης αποστάσεων (EDMI), που χρησιμοποιούν υπέρυθη ακτινοβολία ή Laser (μονοχρωματικά, πολυχρωματικά). Στην κατηγορία ύψιστης ακριβείας συναντώνται τα συμβολόμετρα Laser.

Για υψομετρικές διαφορές: Χωροβάτες (μηχανικοί ή συνηθέστερα σήμερα ηλεκτρονικομηχανικοί), στις δε κατηγορίες υψηλής ακριβείας με χρήση Laser, σε συνδυασμό με ειδικές σταδίες ραβδωτού κώδικα.

Πολλαπλών χρήσεων: Οι γεωδαιτικοί σταθμοί (total stations) που συνδυάζουν μέτρηση γωνιών και ηλεκτρομαγνητική μέτρηση αποστάσεων.

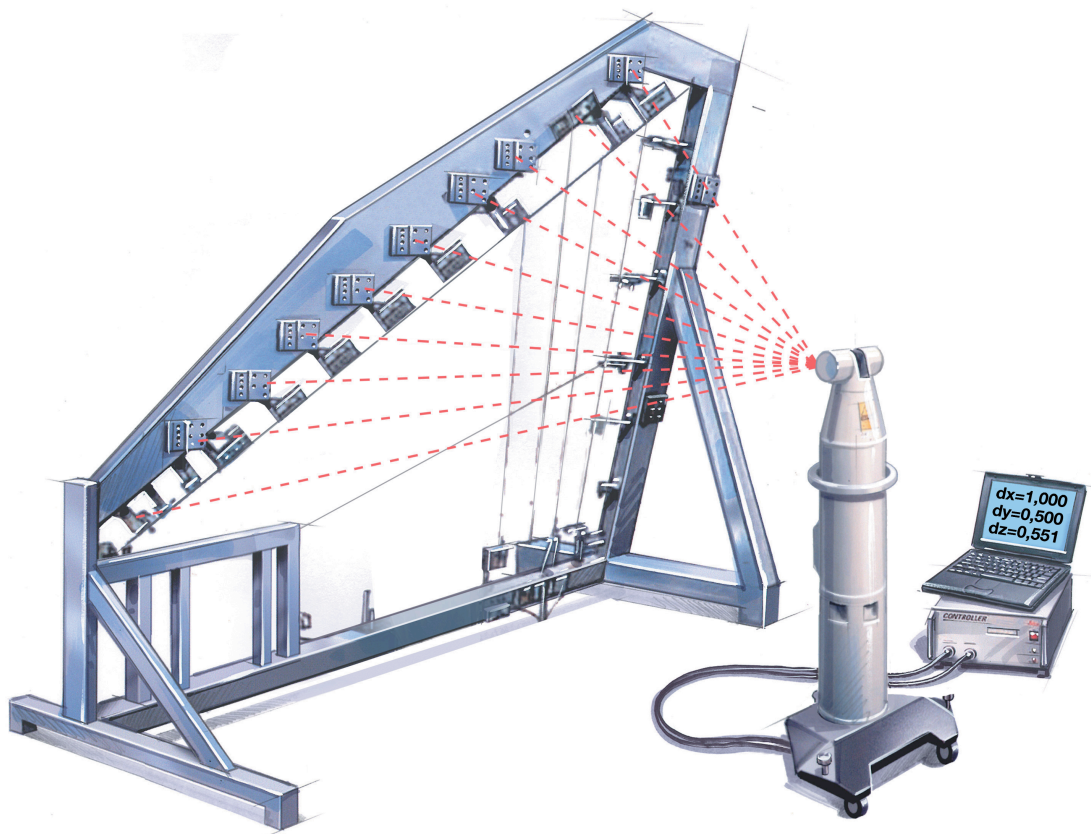
**B. Συστήματα προσδιορισμού σημείων στο χώρο:** Ο τομέας αυτός είναι και ο πολυπληθέστερος (από όργανα, μεθόδους, υψηλή τεχνολογία κ.λπ.). Όλες οι γνωστές εταιρείες γεωδαιτικών (τοπογραφικών) οργάνων (π.χ. Leica, Nikon, Sokkia, Topcon, Trimble) έχουν να επιδείξουν μεγάλη ποικιλία μοντέλων και τιμών, στις δε ιστοσελίδες τους μπορούν να βρεθούν πολλές και λεπτομερείς πληροφορίες. Στην παρούσα εργασία δεν αναφέρονται συγκεκριμένα μοντέλα και τεχνικά χαρακτηριστικά διότι, εκτός του ότι η ταχύτητα εξέλιξης και απόσυρσης παλιών αλλά και παραγωγής νέων μοντέλων είναι μεγάλη, ο περιορισμένος χώρος αφήνει περιθώρια μόνο για γενικά χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας.

**B1. Βασιζόμενα στη μέθοδο της 3D-εμπροσθοτομίας:** Με τη μέθοδο αυτή, ελάχιστη απαίτηση είναι να χρησιμοποιηθούν δύο ηλεκτρονικομηχανικοί θεοδόλιχοι (είτε αυτοκινούμενοι είτε όχι), οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με υπολογιστή. Τα δύο όργανα τοποθετούνται σε ειδικούς τρίποδες και για να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες (x, y, z) ενός σημείου στο χώρο, σκοπεύεται αυτό ταυτοχρόνως από τους δύο θεοδολίχους και μετρούνται οι δύο κατακόρυφες και οι δύο οριζόντιες γωνίες προς αυτό. Για τη μέτρηση μιας επιφάνειας (π.χ. πρόσοψη μνημείου) δύο θεοδολίχοι είναι αρκετοί. Για την μέτρηση-αποτύπωση ακριβείας ενός στερεού (π.χ. ενός κτιρίου, μιας γέφυρας) απαιτείται η δημιουργία τριγωνομετρικού δικτύου

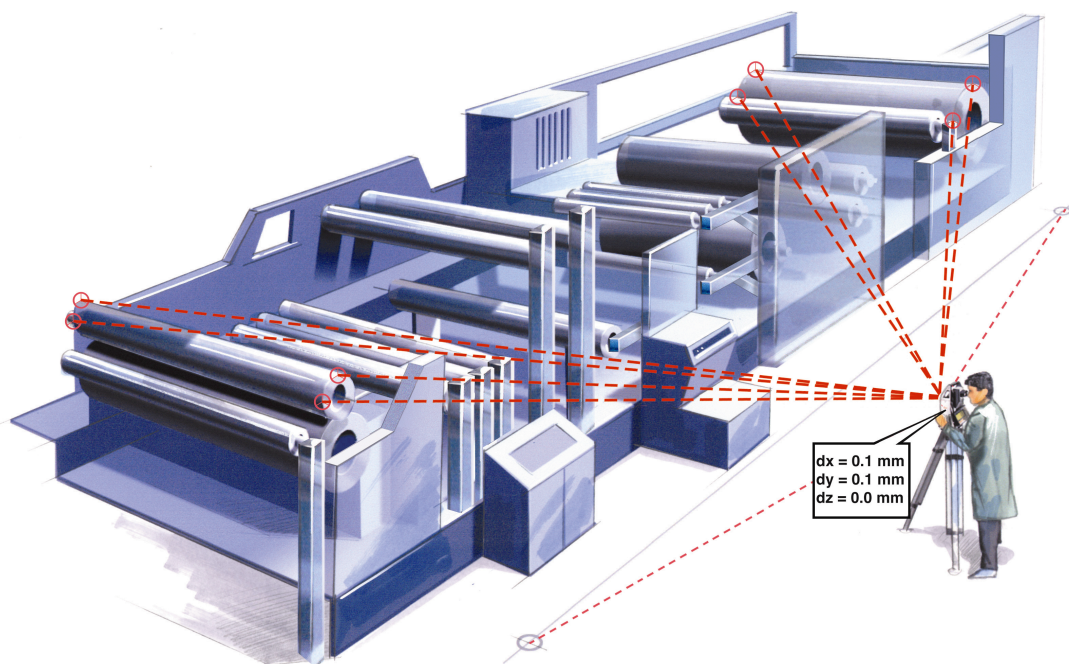
ακριβείας και η χρήση πολλών γωνιομετρήσεων από περισσότερους των δύο θεοδολίχους. Σήμερα ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να φτάσει και τους οκτώ (8) συνεργαζόμενους θεοδολίχους, η ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση των παρατηρήσεων των οποίων δίδει τις συντεταγμένες και των μετρημένων σημείων αλλά και των σημείων στάσης των θεοδολίχων.

- Με θεοδολίχους χωρίς σερβοκίνηση: Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να αποτελείται από δύο (2) ως οκτώ (8) θεοδολίχους, με ειδικό λογισμικό και, για τη διευκόλυνση σκόπευσης, ένας από τους θεοδολίχους μπορεί να εξοπλιστεί με πρόσθετη συσκευή εκπομπής Laser, η ακτίνα της οποίας (με ίχνος κουκίδας) βοηθά στον προσδιορισμό και σκόπευση στόχων από τους υπόλοιπους θεοδολίχους. Η ακρίβεια μέτρησης γωνιών σε τέτοια συστήματα ποικίλει από  $\pm 0.005gon$  ως  $\pm 0.00015gon$ , η δε μέση ταχύτητα μέτρησης υπό κανονικές συνθήκες είναι της τάξης των πενήντα (50) σημείων την ώρα.
- Με θεοδολίχους σερβοκίνησης (αυτοκινούμενους) εξοπλισμένους με CCD κάμερα: Είναι σύνολα θεοδολίχων (2 ως 8 όργανα), καθώς και τουλάχιστον ένας Η/Υ. Συνηθέστερα υπάρχει ένας βασικός Η/Υ (με το λογισμικό υπολογισμών και ανάλυσης καθώς και τα αρχεία μετρήσεων) και ένας τουλάχιστον βοηθητικός Η/Υ – σε δίκτυο με τον βασικό Η/Υ - για τον έλεγχο των σεναρίων μέτρησης των θεοδολίχων που συνδέονται μαζί του. Η ακρίβεια γωνιομετρήσεων είναι της τάξης των  $\pm 0.00010gon \div \pm 0.00015gon$ . Στους θεοδολίχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί μοντέλο εξοπλισμένο με συσκευή εκπομπής Laser για την καλύτερη στόχευση και/ή μοντέλο εφοδιασμένο με CCD κάμερα για την – με χρήση τεχνητής νοημοσύνης – αυτόματη αναγνώριση των στόχων. Γενικότερα, με τη μέθοδο της 3D-εμπροσθοτομίας, είτε οι θεοδολίχοι είναι αυτοκινούμενοι είτε όχι, η τελική επιτυγχανόμενη ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων (x, y, z) είναι της τάξης των  $\pm 0.05mm \div \pm 0.1mm$ .

**B2. Βασιζόμενα στη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων:** Με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένας θεοδολίχος υψηλής ακριβείας (βλ. Σχ. 2), συνδυαζόμενος με ένα όργανο EDM επίσης υψηλής ακριβείας. Οι συντεταγμένες των υπό έλεγχο σημείων είναι πολικές (και όχι ορθογώνιες), καθώς προκύπτουν από μετρήσεις γωνιών και μηκών. Ως "στόχοι" επί των σημείων που ενδιαφέρουν χρησιμοποιούνται ειδικά ανακλαστικά σώματα (ανακλαστήρες ή ταινίες). Σε εξέλιξη της μεθόδου αυτής, γίνεται χρήση ηλεκτρονικού σερβοθεοδολίχου ή τέλος γεωδαιτικού σταθμού υψηλής ακριβείας (που μπορεί να είναι συμβατικός ή με σερβοκίνηση). Σήμερα ο κανόνας είναι η χρήση ηλεκτρονικών θεοδολίχων, σε σύνδεση με φορητό Η/Υ (όπου ενυπάρχει το κατάλληλο λογισμικό). Αναφορικά με τα όργανα EDM, σήμερα είναι δυνατή και η χρήση ειδικών τέτοιων οργάνων μέτρησης αποστάσεων χωρίς την απαίτηση ανακλαστήρων (γεγονός που επιτρέπει την απρόσκοπτη μέτρηση και σε σημεία που βρίσκονται σε απρόσιτες επιφάνειες). Γενικότερα, με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων, είτε οι θεοδολίχοι είναι αυτοκινούμενοι είτε όχι, οι γωνίες μπορούν να μετρηθούν με θεωρητική ακρίβεια  $\pm 0.15gon \div \pm 0.5gon$ , τα μήκη με θεωρητική ακρίβεια  $[(\pm 1.0mm \div \pm 3.0mm) \div (\pm 1.0ppm \div \pm 3.0ppm)]$  η δε τελική επιτυγχανόμενη ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων (x, y, z), για αποστάσεις μεταξύ οργάνου-στόχου  $100m \div 1000m$ , μπορεί να φτάσει στο  $\pm 1.0mm \div \pm 1.5mm$ . Γενικά, συγκρίνοντας τα συστήματα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο 3D-εμπροσθοτομίας με τα συστήματα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων, σε πολλές περιπτώσεις δρουν συμπληρωματικά.



Σχήμα 1: Χρήση ανιχνευτή Laser στη βιομηχανία (Leica AG)



Σχήμα 2: Χρήση θεοδολίχου στη βιομηχανία (Leica AG)

Επίσης, για μικρές αποστάσεις οι προσφερόμενες ακρίβειες είναι λίγο-πολύ του ίδιου επιπέδου, αλλά ο γενικός κανόνας είναι: για μικρές αποστάσεις και εξαιρετικά αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας, επιλέγεται η μέθοδος της 3D-εμπροσθοτομίας. Για μεγάλες αποστάσεις και όχι εξαιρετικά αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας, επιλέγεται η μέθοδος των πολικών συντεταγμένων.

**Γ. Όργανα Φωτογραμμετρίας:** Η Φωτογραμμετρία με απλά λόγια σημαίνει την αποτύπωση με τη χρήση φωτογραφιών (που λαμβάνονται από αέρος ή επί του εδάφους). Ουσιαστικά μετρώνται αντικείμενα τριών διαστάσεων μέσα από τη σύγκριση δύο ή περισσότερων δισδιάστατων εικόνων, οι οποίες ελήφθησαν από διαφορετικές θέσεις. Κοινά σημεία που προσδιορίζονται επάνω στις εικόνες επιτρέπουν τον προσδιορισμό της γραμμής σκόπευσης (από κάθε σημείο προς τη θέση κάθε κάμερας). Οπότε, γνωρίζοντας τη θέση κάθε κάμερας, με τριγωνισμούς (και τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων) υπολογίζονται οι θέσεις των σημείων. Η "στοχοποίηση" σημείων (προσιτών ή απρόσιτων) για τη φωτογραμμετρική μέτρηση (αποτύπωσή τους) μπορεί να γίνεται με ειδικούς στόχους ή με χρήση βοηθητικών οργάνων Laser (κουκίδα ακτίνας Laser).

**Δ. Βασιζόμενα στη μέθοδο της Βιντεομετρίας-Βιντεογραμμετρίας:** Βιντεομετρία (*Videometry*) και, σήμερα πλέον, Βιντεογραμμετρία (*Videogrammetry*) είναι μια τεχνολογία μέτρησης κατά την οποία προσδιορίζονται οι συντεταγμένες (x, y, z) σημείων ενός αντικειμένου με τη χρήση εικόνων βίντεο που λαμβάνονται από διαφορετικές κάμερες (και γωνίες, αντίστοιχα). Έτσι, "ψηφιοποιούνται" ταχύτατα τα αποτυπούμενα στερεά αντικείμενα (ή παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο ως προς τις παραμορφώσεις τους). Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται ειδικές CCD βιντεοκάμερες. Η ακρίβεια προσδιορισμού σημείου μπορεί να φτάσει το  $\pm 0.1\text{mm}$ , με βασικό μειονέκτημα της μεθόδου τη μικρή σε διαστάσεις λαμβανόμενη εικόνα και φυσικά το υψηλό κόστος.

**Ε. Όργανα (συστήματα) που βασίζονται στην τεχνολογία Laser** (Estler et al. 2002, Jacobs 2009, Khan 2009, Lemmens 2009, Monserrat et al. 2008, Savio et. al 2007, Vasilash 2009):

**E1. Ο ανιχνευτής Laser (Laser tracker):** Η αρχή λειτουργίας του ανιχνευτή Laser μοιάζει πολύ με εκείνη του γεωδαιτικού σταθμού (καθώς μετρά αποστάσεις με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία Laser (ουσιαστικά με συμβολόμετρο Laser), χρησιμοποιεί δε μηχανισμούς για τη μέτρηση οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών) (βλ. Σχ. 1). Ειδικά για τη μέτρηση των αποστάσεων, απαιτείται και η χρήση ειδικού ανακλαστήρα σφαιρικής έδρας (Spherically Mounted Retroreflector - SMR), επιτυγχάνεται δε ταχύτητα συλλογής 3000 σημεία/sec. Συνδυάζοντας αυτές τις μετρήσεις, είναι εφικτός ο προσδιορισμός των συντεταγμένων (x, y, z) ενός σημείου, με μια θέση μόνο του ανιχνευτή Laser (όταν για ένα θεοδόλιχο απαιτούνται τουλάχιστον δύο θέσεις του για το ίδιο σημείο). Οι ακρίβειες για τις γωνίες είναι της τάξης των  $\pm 0.00015\text{gon}$ , για δε τις αποστάσεις  $\pm 2\text{ppm}$ . Με μια απλοποιημένη άποψη, ο ανιχνευτής Laser είναι μια φορητή μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM - Coordinate Measuring Machine), με πολύ περισσότερες δυνατότητες και ευελιξία.

**E2. Ο σαρωτής Laser (Laser scanner, γνωστό και ως: LIDAR-Light Detetction And Ranging):** Η αρχή λειτουργίας μοιάζει πολύ με εκείνη του γεωδαιτικού σταθμού, ανάλογα δε με το μοντέλο και κατασκευαστή μπορούν να λειτουργούν με ρυθμό συλλογής 100,000 3-D συντεταγμένων/sec. Με το συγκεκριμένο όργανο, σαρώνεται με την ακτίνα Laser το υπόψη αντικείμενο, το δε διαχεόμενο φως ανιχνεύεται από το όργανο. Οι ψηφιακές εικόνες που προκύπτουν αποθηκεύονται αυτόματα σε έναν H/Y και με το κατάλληλο λογισμικό προκύπτουν 3D συντεταγμένες (συνεπαγωγικά, 3D εικόνες και σχέδια, με ακρίβεια της τάξης των  $\pm 5\text{mm}$ ) του στερεού που αποτυπώνεται.

- **Ομοιότητες ανιχνευτών και σαρωτών Laser:** Εκπέμπουν ακτινοβολία Laser από ειδικά διαμορφωμένη κεφαλή (η οποία στηρίζεται σε ειδική σφαιρική διάταξη όπως

αυτή της πυξίδας ή του γυροσκοπίου). Προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια και είναι απο-τελεσματικά σε μεγάλο εύρος αποστάσεων.

- *Διαφορές ανιχνευτών και σαρωτών Laser:* Κατά τη χρήση των ανιχνευτών Laser, λόγω της απαραίτητης σχέσης οργάνου-ανακλαστήρα SMR, απαιτείται επαφή με το αντικείμενο καθώς ο ειδικός ανακλαστήρας SMR πρέπει να τοποθετηθεί επάνω στα υπό μέτρηση σημεία του αντικείμενου. Εκτός αυτού, απαιτείται πρόσθετη εργασία για τις μετακινήσεις και τοποθετήσεις των ανακλαστήρων. Αντίθετα, οι σαρωτές Laser είναι παντελώς "μή-επαφής με το αντικείμενο" και λειτουργούν αυτόματα. Δεν απαιτούνται στόχοι, καθώς απλά αρκεί η επιφάνεια που πρόκειται να σαρωθεί να έχει μεγαλύτερη του 10% ανακλαστικότητα.

*E3. Άλλα σχετικά όργανα τεχνολογίας Laser:* ο φορητός βραχίονας CMM (portable CMM Arm) είναι όργανο για την επιθεώρηση αντικειμένων, συναρμολογήσεων, για τη λεγόμενη *αντίστροφη μηχανική (Reverse Engineering)*, με ακρίβειες της τάξης των  $\pm 0.25\text{mm}$ . Εδώ και τουλάχιστον είκοσι (20) χρόνια εξοπλίζεται με ειδική συσκευή σαρωτή Laser.

**ΣΤ. GPS εσωτερικού χώρου (Indoor GPS):** Με βάση την αρχή λειτουργίας του GPS, με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται ειδικοί πομποί τοποθετημένοι γύρω από το προς μέτρηση (ή επιθεώρηση) αντικείμενο και, επικοινωνούν με ειδικούς αισθητήρες (όπου δηλ. οι αισθητήρες κατέχουν το ρόλο των "δορυφόρων" του συστήματος GPS). Η μονόδρομη αυτή επικοινωνία αισθητήρα-προς-δέκτη μέσω σημάτων, παρέχει τη θέση των αισθητήρων. Σύγχρονα εξελιγμένα τέτοια συστήματα δείχνουν ότι η ακρίβεια που επιτυγχάνεται μπορεί να είναι της τάξης των  $\pm 0.1\text{mm}$ .

Όλες αυτές οι σημαντικές σύγχρονες τεχνολογίες (όργανα, μέθοδοι κ.λπ.) που παλινδρομούν μεταξύ διαφόρων κλάδων της Γεωδαισίας (και της Μετρολογίας), με προεξάρχουσες τις εφαρμογές Laser και GPS (σε συνδυασμό με τη Γεωματική), δημιουργούν πλέον μια νέα τάση στα γεωδαιτικά πράγματα, καθώς παρουσιάζεται πλέον (εύλογα) μια νέα διάσταση της Γεωδαισίας-Γεωματικής, η λεγόμενη *Τοπογραφία Υψηλής Ευκρίνειας (High-Definition Surveying, HDS)* (Khan 2009).

### 3. Πρότυπα και Προδιαγραφές

Αναφορικά με τα γεωδαιτικά όργανα, υπάρχει η ISO Τεχνική επιτροπή TC172/SC6, υπεύθυνη παραγωγής των νεότερων προτύπων ISO 17123. Πολλές από τις "βασικές αρχές" που διέπουν τον χώρο της Γεωδαισίας δεν έχουν γίνει παντού αποδεκτές ως πρότυπα. Γενικά, σε ό,τι αφορά τα περισσότερα είδη γεωδαιτικών οργάνων πεδίου, συνήθως τα πρότυπα που επικρατούν είναι τα αντίστοιχα τοπικά-εθνικά. Σχετικά με τα παραπάνω, εντοπίζονται τα εξής (Δούκας α 2005, Muelaner and Maropoulos, 2008):

- ❖ *Πρότυπα ISO 10360-2:2002:* Οι έλεγχοι και προδιαγραφές κατά ISO 10360 (BSI 2002) αποτελούν καλά θεμελιωμένο πλαίσιο αναφορικά με τις μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMMs). Εδώ απλά αναφέρονται αλλά δεν αναλύονται περισσότερο, ως μη σχετικοί με τα γεωδαιτικά όργανα της ΓΜ.
- ❖ *Πρότυπα ASME B89.4.19:* Σχετίζονται με τα "Συστήματα Μέτρησης Σφαιρικών Συντεταγμένων", τα οποία βέβαια σχετίζονται με τους ανιχνευτές Laser και τους σαρωτές Laser. Καθορίζει δύο τύπους ελέγχων, τους συστημικούς ελέγχους (υποσύστημα γωνιομετρήσεων, υποσύστημα μηκομετρήσεων) και τους ελέγχους εμβέλειας, αντίστοιχα.
- ❖ *Πρότυπα ISO 17123:* Τα πρότυπα ISO 17123 (μέρος 1 έως 4) που έχουν ως πηγή τα γερμανικά πρότυπα DIN 18723 (μέρος 1 έως 8). Το εν λόγω πρότυπο έχει να κάνει με όργανα τύπου θεοδολίχου. Το Part 1 (ISO 2002) καλύπτει όλη τη θεωρία σχετικά με τους ελέγχους πεδίου γεωδαιτικών (τοπογραφικών) οργάνων, το δε Part 3 (ISO 2001)

ασχολείται ειδικά με τους θεοδολίχους. Η γενική εικόνα δείχνει πως τα υπάρχοντα πρότυπα ISO 17123 εστιάζονται σε ελέγχους γεωδαιτικών οργάνων μόνον στο πεδίο και δεν άπτονται τυποποιημένων μετρολογικών διαδικασιών που θα έπρεπε να σχετίζονται με ενδοεργαστηριακές διακριβώσεις τέτοιων οργάνων. Οι έλεγχοι του πρότυπου αυτού στην πραγματικότητα μετράνε την επαναληπτικότητα (repeatability) των συγκεκριμένων οργάνων και όχι την ορθότητα (accuracy). Τέτοιου είδους προβλήματα οδήγησαν τη Διεθνή Ομοσπονδία Τοπογράφων (Fédération Internationale des Géomètres - FIG) να δραστηριοποιηθεί εντονότερα στο θέμα των προτύπων και της τυποποίησης, σε συνεργασία με τον ISO. Έτσι, προέκυψε η ομάδα εργασίας 5.1 (FIG Working Group 5.1), η οποία υπάγεται στην Επιτροπή 5 (Commission 5 – που ασχολείται με τους προσδιορισμούς θέσης και τις μετρήσεις).

#### 4. Τεχνικές και Εφαρμογές

Χρησιμοποιώντας τα προαναφερθέντα όργανα (και συστήματα) σε διάφορους συνδυασμούς, είναι αποδεδειγμένη η σημαντική βελτίωση των επιτυγχανόμενων ακριβειών, σε συνδυασμό πάντα με αντίστοιχη μείωση του κόστους (λόγω αντίστοιχης μείωσης των ανακριβειών και γενικότερα προβληματικών μετρήσεων). Παράλληλα (Jacobs 2009), διαπιστώνεται βελτίωση της ασφάλειας του προσωπικού στο χώρο μετρήσεων (π.χ. λόγω της μή-επαφής κατά την αποτύπωση επικίνδυνων (ή δυσπρόσιτων ή απρόσιτων) αντικειμένων ή χώρων).

Οι βασικές τεχνικές της Μετρολογίας (και φυσικά της ΓΜ) έχουν να κάνουν με:

- Εντοπισμό σημείων στο χώρο (χωρίς ή με γεωμετρικές παραμέτρους) (Data localization).
- Προσαρμογή ζώνης σε δεδομένα (Zone fitting και Minimum zone fitting).
- Βελτιστοποίηση παραμέτρων με τη χρήση μετρητικών δεδομένων.

Οι τεχνικές αυτές συμβάλουν θεμελιωδώς σε καίριους τομείς εμπλοκής (γενικά) της Μετρολογίας, όπως:

- *Εξειδικευμένες κατασκευές (Custom manufacturing)*: Είναι πλέον εύκολη, ταχεία, ακόμη και σε μεγάλους αριθμούς, η παραγωγή (κατασκευή) εξειδικευμένων προϊόντων (rapid prototyping) με ταχύτητα και οικονομία (σε σύγκριση με τη μαζική παραγωγή τυποποιημένων προϊόντων).
- *Ψηφιακή αρχειοθέτηση*: Καταγράφονται (καταχωρούνται) τα φυσικά χαρακτηριστικά υπαρκτών φυσικών αντικειμένων και άλλων μορφωμάτων και κατασκευών, εξαιρετικό όφελος ειδικά όταν απαιτούνται 3D-αναπαραστάσεις και δεν υφίστανται σχετικά CAD αρχεία.
- *Βιομηχανικός σχεδιασμός*: Μεγάλη ευκολία στη μετάβαση από τις "φυσικές" ή τις "σχεδιασμένες – σκαλισμένες με το χέρι" φόρμες, στην παραγωγή τελικών προϊόντων.
- *Έλεγχος ποιότητας*: Με βάση καθορισμένες προδιαγραφές ακριβείας, ποιότητας και ανοχών, γίνεται άνετα σύγκριση ψηφιακών μοντέλων ακριβείας με αντίστοιχα σχέδια CAD.
- *Αντίστροφη Μηχανική (Reverse Engineering)*: Δημιουργία ψηφιακών μοντέλων ακριβείας από υπάρχοντα αντικείμενα, επανασχεδιασμός και βελτίωση υπάρχοντων προϊόντων.
- *Οπτικοποίηση (Visualization)*: Ψηφιακή απόδοση ("έκφραση") περίπλοκων 3D-μοντέλων, δυνατότητα συνεργασίας και διανομής "3D-περιγραφών φυσικών αντικειμέ-

νων" μεταξύ τεχνικών και άλλων υπαλλήλων, για να βελτιωθεί η στρατηγική και η λήψη αποφάσεων.

Οι εφαρμογές της ΓΜ είναι πολλές και ποικίλες, η δε σχετική βιβλιογραφία είναι πραγματικά απέραντη. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες αντιπροσωπευτικές τέτοιες εφαρμογές (κυρίως ως μεγάλες ομάδες). Με βάση κάποια επιλεγμένη σχετική βιβλιογραφία, τέτοιες εφαρμογές μπορούν να διακριθούν σε δύο γενικές κατηγορίες:

**Γεωδαιτικές εφαρμογές** (π.χ. Δούκας 1988, Δούκας κ.ά. 1990, Μπαντέλας κ.α. 2005, Doukas et al. 2004, El-Hakim et al. 2008, ETH 2009, FIG 2009, Kavvadas 2004, Moullou et al. 2008, Psimoulis and Stiros 2007, Stiros 2009, Wang et al. 2009):

- Μετρήσεις και παρακολούθηση μικρομετακινήσεων και παραμορφώσεων σε φυσικές κατασκευές (π.χ. έδαφος, πρηνή εδάφους, σεισμικά ρήγματα κ.λπ.).
- Μετρήσεις μικρομετακινήσεων και παραμορφώσεων σε τεχνητές κατασκευές (π.χ. φράγματα, ορυχεία, σήραγγες, γέφυρες, κτίρια, καμινάδες, βιομηχανικά δάπεδα, υδραγωγεία κ.λπ.).
- Αποτυπώσεις κτιρίων και άλλων δομικών έργων.
- Ειδικές αποτυπώσεις μνημείων και αρχαιολογικών χώρων.
- Ειδικές γεωδαιτικές εργασίες για μελέτη και κατασκευή υπόγειων επιταχυντών σωματιδίων, μια ιδιαίτερα υψηλών απαιτήσεων ακριβείας κατηγορία ΓΜ (Bocean 1993, CERN-SU Group 2009, Glaus and Ingensand 2002, Greenwood and Wojcik 2006, Leica 2009, Mayoud 2004, Quesnel 1997).

**Βιομηχανικές εφαρμογές** (π.χ. Estler et al. 2002, IAG 2009, Jacobs 2009, Leica 2009, McClenathen et al. 2008, Monserrat et al. 2008, Δούκας κ.ά. 1990, Μπαντέλας κ.ά. 2005, Muelaner and Maropoulos 2008, Muske et al. 1999, Savio et al. 2007, Wang et al. 2009):

- *Αεροναυπηγική, ναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία (και γενικά βιομηχανία οχημάτων):* Έλεγχος διατομών, διαστάσεων, σχήματος και μορφής, συναρμολόγησης, κλίσεων, συμμετριών, εντοπισμός και έλεγχος θέσης και συνδέσεων επί μέρους τμημάτων, τοποθέτηση κινητήρων κ.λπ. Σήμερα πλέον είναι δυνατοί και έλεγχοι προσομοίωσης πειραματικών μοντέλων, φορτίων και πτήσης με δοκιμές "εφαρμογής" ιδεατών εξαρτημάτων πριν καν αυτά κατασκευαστούν.
- *Διαστημική βιομηχανία:* Έλεγχοι μορφής, κίνησης, αντοχής, παραμορφώσεων τμημάτων, έλεγχοι γεωμετρικών χαρακτηριστικών αντενών, κατόπτρων, τηλεσκοπίων, ραδιοτηλεσκοπίων, δορυφόρων κ.λπ.
- *Άλλη βιομηχανία, γενικά:* Έλεγχοι επιπεδότητας, κυλινδρικότητας, σφαιρικότητας κ.λπ., εγκατάσταση – συναρμολόγηση - τοποθέτηση μεγάλων μηχανών, προσδιορισμοί κίνησης από σημείο σε σημείο, ειδικοί έλεγχοι σε "ειδικές βιομηχανίες" (πυρηνικά εργοστάσια κ.λπ.), έλεγχοι υψικαμίνων, τοποθέτηση και συναρμολόγηση ανεμογεννητριών κ.λπ.

## 5. Αντί επιλόγου

Η βιομηχανία, η τεχνολογία, η εξέλιξη της επιστήμης, των οργάνων, των μετρήσεων δημιουργούν μια αυξανόμενη απαίτηση για ταχύτερες, πιο ευέλικτες, ασφαλέστερες και ακριβέστερες μετρολογικές λύσεις σε συνδυασμό βέβαια με την έντονη τάση απαιτήσεων για καλύτερα και



ελκυστικότερα προϊόντα, με μείωση βέβαια του κόστους παραγωγής. Συνεχώς στη βιομηχανία οι επιφάνειες και τα εξαρτήματα γίνονται πιο περίπλοκα, τα υλικά αλλάζουν, ο πήχυς στις ανοχές ακριβείας ανεβαίνει και έτσι, η παραμικρή απόκλιση από τις αποδεκτές ανοχές οδηγεί σε δυσλειτουργίες, ανεπάρκειες, αύξηση δαπανών και φυσικά αύξηση ενεργειακής κατανάλωσης. Οι παραδοσιακές CMM μηχανές δεν αρκούν πλέον, μεγάλες βιομηχανίες (ποικίλου φάσματος) επιδεικνύουν αυξημένη ζήτηση για in-situ μετρήσεις ακριβείας (αντικειμένων, εξαρτημάτων, ολοκληρωμένων πολύπλοκων κατασκευών κ.ο.κ.), σε όλες τις φάσεις παραγωγής. Είναι λοιπόν ευνόγητη η μεγάλη και με αυξανόμενη ταχύτητα διεξόδου συστημάτων μέτρησης της Γεωδαιτικής Μετρολογίας (όπως π.χ. το indoor-GPS, οι σαρωτές Laser, οι ανιχνευτές Laser, συστήματα 3D-οπισθοτομίας κ.λπ.). Το θέμα γίνεται ακόμη πιο ενδιαφέρον και περίπλοκο καθώς συχνά είναι απαραίτητο να συνδυαστούν (ολοκληρωθούν) μετρητικά δεδομένα πολλών και διαφορετικών μετρητικών συστημάτων, όπου εύλογο είναι ότι υπάρχει μια ευρεία ποικιλία αποδιδόμενης ακριβείας (ανάλογα με το όργανο – σύστημα μέτρησης). Γενικότερα, η τάση σε όλη τη βιομηχανία δείχνει νέες έρευνες και εφαρμογές που ουσιαστικά προσπαθούν να φέρουν όλο και πλησιέστερα μεταξύ τους το προϊόν (από τη σύλληψη και σχεδίαση μέχρι την κατασκευή του) με τη Βιομηχανική Μετρολογία (σοβαρότατο τμήμα της οποίας κυριαρχείται εδώ και καιρό από όργανα και μεθόδους της Γεωδαιτικής Μετρολογίας).

Σε κάθε περίπτωση στον τομέα αυτό, επιβεβαιώνεται κατά γράμμα η ρήση:

*« Η αξία μιας μέτρησης βρίσκεται στην εφαρμογή του αποτελέσματός της »*

## **Βιβλιογραφία Ελληνική**

Δούκας, Ι.Δ.: "Η Γεωδαιτική Προσέγγιση στο Πρόβλημα των Παραμορφώσεων". Έκδοση Εργαστηρίου Γεωδαισίας Νο 12, σελ. 1-28, Θεσσαλονίκη 1988.

Δούκας, Ι.Δ., Μπαντέλας, Α.Γ., Σαββαΐδης, Π. και Υφαντής, Ι.: "Τεχνική Γεωδαισία: Πεδία εφαρμογών και προοπτικές". Συνέδριο: Ο Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός προς το 2000. Εξέλιξη - Προοπτικές – Δυνατότητες, σελ. 247-260, 6-7-8 Δεκεμβρίου 1990.

Δούκας, Ι.Δ. α: "Περί της διακρίβωσης των γεωδαιτικών (τοπογραφικών) οργάνων". 1ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας Metrologia 2005: Η μετρολογία στην Ελλάδα. Έρευνα, εφαρμογές, προτεραιότητες και προοπτικές, σελ. 78-93, 11-12 Νοεμβρίου, Αθήνα, 2005.

Δούκας, Ι.Δ. β: "Η ιστορική εξέλιξη της επιστήμης της μετρολογίας". Επιστημονικό Συνέδριο: Η εξέλιξη των οργάνων, των μεθόδων και των συστημάτων μετρήσεων των επιστημών της αποτύπωσης στην Ελλάδα, 15 και 16 Απριλίου 2005, Θεσσαλονίκη, σελ. 133-156, 2005.

Μπαντέλας, Α.Γ., Σαββαΐδης, Π.Δ., Υφαντής, Ι.Μ. και Δούκας, Ι.Δ.: "Σύγχρονα Συστήματα Μετρήσεων και Επεξεργασίας Γεωδαιτικών Δεδομένων". Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωματικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Θεσσαλονίκη, 2005.

## **Βιβλιογραφία Ξενόγλωσση**

Bocean, V.: "Geodesy and Alignment Concepts for the Fermi Main Injector". Fermilab Gurvey, Alignment, and Geodesy Group, October 1, 1993.

Cern-SUGroup: "Large Scale Metrology", <http://ts-dep.web.cern.ch/ts%2Ddep/groups/su/su.htm> (accessed 12-11-2009).

Doukas, I.D., Fotiou, A., Ifadis I., Katsambalos, K., Lakakis, K., Petridou-Chrysochoidou, N., Pikridas, C., Rossikopoulos, D., Savvaidis, P., Tokmakidis, K. and Tziavos, I.N.: "Displacement



Field Estimation from GPS Measurements in the Volvi Area". FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27, 2004.

El-Hakim, S., Beraldin, J.-A., Picard, M., and Cournoyer, L.: "Surface Reconstruction of Large Complex Structures from Mixed Range Data - The Erechtheion Experience". XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS 2008). July 3, 2008.

Estler, W. T., Edmundson, K. L., Peggs, G. N. and Parker, D. H.: "Large-Scale Metrology - An Update". CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 51, Issue 2, Pages 587-609, 2002.

ETH: <http://www.geometh.ethz.ch/about/objectives> (accessed 12-11-2009).

FIG: "Commission 6 - Task force 6.1.3-Applications of Laser Scanning Technology in Deformation Measurements", [https://www.fig.net/commission6/wgroups/6\\_1\\_3\\_02\\_06.htm](https://www.fig.net/commission6/wgroups/6_1_3_02_06.htm) (accessed 12-11-2009).

Glaus, R. and Ingensand, H.: "Tunnel Surveys for New CERN Particle Accelerators". FIG XXII International Congress Washington, D.C. USA, April 19-26, 2002.

Greenwood, J.A. and Wojcik, G.J.: "Massive Metrology: Development and Implementation of a 3D Reference Frame for the Realignment of Fermilab's Tevatron". 9th International Workshop on Accelerator Alignment, September 26-29, 2006.

IAG: "WG 4.2.3 - Application of Artificial Intelligence in Engineering Geodesy", [http://info.tuwien.ac.at/ingeo/sc4/wg423/wg\\_423.html](http://info.tuwien.ac.at/ingeo/sc4/wg423/wg_423.html) (accessed on 10-12-2009).

Jacobs, G.: "3D Scanning: Deliverables...with Competitive Advantage". Professional Surveyor Magazine, April, 2009.

Kahmen, H. and Reiterer, A.: "High-precision Object Monitoring With Image Assisted Theodolites-State Of The Art". 8th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA 2004), Geneva, 9-11 October, 2004.

Kavvas, M.J.: "Monitoring Ground Deformation in Tunnelling: Current Practice in Transportation Tunnels". Engineering Geology 79, pp. 93-113, 2005.

Khan, F.: "High-definition Surveying". Coordinates, Vol. 5, Issue 9, September 2009.

Leica AG: <http://metrology.leica-geosystems.com/en/index.htm> (accessed 12-11-2009)

Lemmens, M.: "Terrestrial Laser Scanners, Product Overview". GIM International, Vol. 23, Issue 8, August 2009.

Mayoud, M.: "Large Scale Metrology for Research and Industry – Application to Particle Accelerators and Recent Developments". FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27, 2004.

McClenathen, K., Suth, J. and Taylor, P.: "Faster Nascar Race Cars Through Better Metrology". Quality Digest, September 24, 2008.

Monserrat, O. and Crosetto, M.: "Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanning Data and Least Squares 3D Surface Matching". ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 63 (2008) 142-154

Moullou, D., Mavromati, D., Tsingas, V., Liapakis, C., Grammatikopoulos, L., Raikos, S., Sarris, A., Baltasvias, F., Remondino, F., and Beraldin, J.-A., El-Hakim, S., Cournoyer, L. and Picard, M.: "Recording, Modelling, Visualisation and GIS Applications Development for the Acropolis of Athens". Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B5-2, pp. 1073-1076 (I1) July 2008.

Muelaner, J. And Maropoulos, P.G.: "Large Scale Metrology In Aerospace Assembly". 5th Intl. Conference on Digital Enterprise Technology, Nantes, France, 22-24 October, 2008.

Muske, S., Salisbury, D., Salerno, R. and Calkins, J.: "747 Data Management System Development and Implementation". The Boeing Co., 1999.

Psimoulis, P.A. and Stiros, S.C.: "Measurement of Deflections and of Oscillation Frequencies of Engineering Structures Using Robotic Theodolites (RTS)". Engineering Structures 29, pp. 3312–3324, 2007.

Quesnel, J.P.: "Review of the Metrology Aspects of the LHC Alignment". 5th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA 1997), 13-17 October, ANL/FNAL, Argonne, Illinois, 1997.

Savio, E., de Chiffre, L. and Schmitt, R.: "Metrology Of Freeform Shaped Parts". CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 56, Issue 2, pp. 810-835, 2007.

Stempfhuber, W.: "1D and 3D Systems in Machine Automation". 3<sup>rd</sup> IAG/12<sup>th</sup> FIG Symposium, Baden May 22-24, 2006.

Stiros, S.C.: "Alignment and Breakthrough Errors in Tunneling". Tunnelling and Underground Space Technology 24, pp. 236–244, 2009.

Vasilash, G.S.: "An Array of Measuring Options, Zeiss System: Speed Meets Certainty", <http://www.autofieldguide.com/articles/050408.html> (accessed 12-11-2009).

Wang, T., Jaw, J., Chang, Y. and Jeng, F.: "Application and Validation of Profile–Image Method for Measuring Deformation of Tunnel Wall". Tunnelling and Underground Space Technology 24 (2009) 136–147.