

1.1.1 Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεγάλου μεγέθους

Στην κατηγορία αυτή αναφερόμαστε σε αντικείμενα μεγαλύτερα από 2 μέτρα (μπορεί να φτάνουν τα 100 μέτρα). Ενώ υπάρχουν πολλές τεχνικές για τη μέτρηση μεσαίων αντικειμένων στην εν λόγω κλίμακα, υπάρχει γενικά μια έλλειψη μεθόδων στην κατηγορία αυτή. Στο τέλος της κλίμακας το πρόβλημα ανάγεται σε τεχνικές ψηφιοποίησης χώρων.

Εδώ υπάρχουν δύο βασικές οικογένειες μεθόδων:

Στην πρώτη οικογένεια, οι μέθοδοι βασίζονται στην ιδέα του «οπτικού radar». Στην απλούστερη περίπτωση μια πηγή εκπέμπει ακτίνες λέιζερ οι οποίες είναι διαμορφωμένες είτε κατά πλάτος είτε κατά συχνότητα. Η ακτίνα ανακλάται από το στόχο προς μέτρηση και ανιχνεύεται από το σύστημα μέτρησης. Με εξέταση της κατάστασης διαμόρφωσης της ακτίνας που ανιχνεύεται είναι δυνατός ο υπολογισμός του χρόνου που χρειάστηκε για να διανυθεί η αντίστοιχη απόσταση της ακτίνας από τον πομπό στο αντικείμενο και πίσω στο δέκτη. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του φωτός στον αέρα είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης που διανύθηκε. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως συστήματα «χρόνου πτήσης» (“time of flight” - TOF). Στην κατηγορία αυτή υπάρχουν διαθέσιμες εμπορικές συσκευές με δυνατότητα μέτρησης πολλαπλών σημείων και ακολουθιακής σύνθεσης μιας ολοκληρωμένης 3Δ σκηνής. Οι καλύτερες τεχνικές έχουν ακρίβεια περί τα 5 χιλιοστά για αποστάσεις λειτουργίας περί τα 3 μέτρα και άνω. Το προφανές μειονέκτημα είναι ότι πρόκειται για σύστημα που βασίζεται σε σημεία, δηλαδή αποτελούν μια μεγέθυνση των συστημάτων τριγωνισμού και συνεπώς απαιτείται σημαντικός χρόνος για τη συλλογή του συνόλου των απαιτούμενων δεδομένων.

Στη δεύτερη οικογένεια μέτρησης μεγάλων αντικειμένων ανήκουν τεχνικές φωτογραμμετρίας. Η βασικότερη των τεχνικών αυτών είναι η γνωστή «καθοδηγούμενη στερεο-φωτογραμμετρία». Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται σημεία αναφοράς, τα οποία ορίζονται στην επιφάνεια των προς μέτρηση αντικειμένων και λαμβάνεται τουλάχιστον ένα ζεύγος φωτογραφιών από διαφορετικές γωνίες. Μέσω της ταύτισης των σημείων αναφοράς, είτε αυτόματα είτε όχι, καθίσταται δυνατή η ανάκτηση πληροφορίας 3Δ γεωμετρίας με τη μέτρηση απόστασης από το επίπεδο λήψης των φωτογραφιών. Η μέθοδος δίνει, προφανώς, καλύτερα αποτελέσματα όταν στα αντικείμενα ή, γενικά, στη σκηνή υπάρχουν επίπεδες επιφάνειες με λίγα σημεία αναφοράς. Είναι, γενικότερα, μέθοδος που ενδείκνυται περισσότερο για την ψηφιοποίηση μνημείων ή χώρων.

1.2 Μέθοδοι ψηφιοποίησης μνημείων

Η αποτύπωση των μνημείων και γενικά των ανθρώπινων κατασκευών μπορεί να γίνει με πολλούς δυνατούς τρόπους. Το παρόν κείμενο προσπαθεί να αναδείξει τις πλέον ενδεδειγμένες και αξιόπιστες μεθόδους για τη ψηφιοποίηση των αρχαιολογικών και αρχιτεκτονικών μνημείων με τη μέγιστη δυνατή αυτοματοποίηση και το ελάχιστο δυνατό κόστος. Συγκεκριμένα αναφέρονται όλοι οι δυνατοί τρόποι δημιουργίας ψηφιακών αρχείων αρχαιολογικών και αρχιτεκτονικών μνημείων αλλά δίνεται έμφαση και περιγράφονται αναλυτικά οι δύο περισσότερο εφαρμοσμένες και συμφέρουσες τεχνικές που είναι είτε φωτογραμμετρικές είτε ακολουθούν μεθοδολογίες σάρωσης με Λέιζερ. Οι μέθοδοι που θα οδηγήσουν στην αποτύπωση – ψηφιοποίηση ενός μνημείου διακρίνονται σε:

- Εμπειρικές
- Τοπογραφικές
- Φωτογραμμετρικές
- Ανίχνευσης (σάρωσης) με χρήση τεχνικών λέιζερ-τριγωνισμού
- Εναλλακτικές-υβριδικές (που αποτελούν συνδυασμό ή παραλλαγή των παραπάνω κλασικών μεθόδων)

1.2.1 Εμπειρικές μέθοδοι

Η πρώτη κατηγορία αποτύπωσης συνίσταται από εμπειρικές ή τοπομετρικές μεθόδους συνήθως των Αρχιτεκτόνων Μηχανικών που πραγματοποιούνται με μηκομετρήσεις τριγώνων (τριπλευρισμούς), διαγωνίων, πλευρών, αποκλίσεων και υψομετρικών διαφορών χρησιμοποιώντας νήμα στάθμης, αλφαδολάστιχο και μετροταινία. Η αρχική καταγραφή των μετρήσεων γίνεται σε σκαρίφημα και η μελλοντική μεταφορά των χαρακτηριστικών του μνημείου σε ψηφιακή μορφή (ψηφιοποίηση) γίνεται σε ένα δεύτερο στάδιο με χειροκίνητη εισαγωγή των στοιχείων συνήθως σε ένα αρχείο σχεδίασης σε περιβάλλον CADD (Computer Aided Design and Drafting). Οι μετρήσεις στηρίζονται σε μια αυθαίρετα ορισμένη αρχή και διεύθυνση ενός άξονα του συστήματος συντεταγμένων. Όλες οι μετρήσεις των σημείων αναφέρονται σε αυτές τις παραδοχές ενώ είναι εξαιρετικά δύσκολη η καταγραφή ενός 3Δ (όχι επίπεδου) αντικειμένου καθώς η τρίτη διάσταση δεν είναι δυνατόν να προέλθει με απλά μέσα γνωρίζοντας μόνο την αρχή και έναν από τους δύο άξονες του συστήματος συντεταγμένων.

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα και Χαρακτηριστικά

Χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι:

- η υποκειμενική σχέση του αποτυπωτή με το αντικείμενο
- η απαιτούμενη άμεση προσπελασιμότητα προς το αντικείμενο
- τα απλά και φτηνά όργανα μετρήσεων (πχ. μετροταινία, λέιζερ αποστασιόμετρο).
- η αδυναμία ελέγχου με κάποια επιστημονική μεθοδολογία άρα αδυναμία αντικειμενικής αξιολόγησης της αποτύπωσης



Εικόνα 1 Απλά όργανα μετρήσεων. Αποστασιόμετρο λέιζερ και μεταλλικό μέτρο

Αν και η μέθοδος υστερεί σε ακρίβεια και επιστημονικότητα από τις άλλες τεχνικές ωστόσο ενδείκνυται πολλές φορές χάριν της ταχύτητας και του χαμηλού κόστους, όταν βέβαια οι απαιτήσεις ακρίβειας του τελικού προϊόντος δεν είναι μεγάλες.

Εξοπλισμός

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της εμπειρικής μεθόδου για τη μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός χώρου είναι το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού. Συνήθως μια μετροταινία αποτελεί το κύριο εργαλείο για την εφαρμογή της. Ωστόσο, η καταγραφή σωστών μετρήσεων απαιτεί η μέτρηση των χαρακτηριστικών σημείων να γίνεται στο οριζόντιο ή κατακόρυφο επίπεδο που παρουσιάζει την κάτοψη ενός χώρου ή ενός σκάμματος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται αλφαδολάστιχα, νήματα της στάθμης ή ακόμα και απλά στη χρήση τοπογραφικά όργανα (όπως χωροβάτες με αυτόματη οριζοντίωση) ιδιαίτερα σε εφαρμογές αποτύπωσης

αρχαιολογικών σκαμμάτων. Τα τελευταία χρόνια, κυκλοφορούν στο εμπόριο ηλεκτρονικές διατάξεις μέτρησης αποστάσεων και γωνιών κλίσεων με δυνατότητα οριζοντίωσης (κάνοντας χρήση ενσωματωμένης αεροστάθμης) για τη μέτρηση της οριζόντιας απόστασης ή γωνίας ανάμεσα σε χαρακτηριστικά σημεία της κάτοψης ενός χώρου. Το ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο (Εικόνα 2) εφαρμόζεται στο σημείο που θα αποτελέσει την αρχή της μετρημένης απόστασης και μια δέσμη λέιζερ ή υπερήχων εκπέμπεται από το πομπό του και ανακλάται από το χαρακτηριστικό σημείο του οποίου η απόσταση από το σημείο εφαρμογής του επιθυμείται να μετρηθεί. Η δέσμη λέιζερ είναι ορατή και παρατηρείται το ίχνος της στο σημείο που αποτελεί το τέλος της μετρημένης απόστασης με αρχή το σημείο εφαρμογής του αποστασιόμετρου. Επίσης στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η τεχνική υπερήχων μια ορατή δέσμη λέιζερ (χωρίς τη δυνατότητα μέτρησης) συνοδεύει τη δέσμη υπερήχων ώστε να συμπίπτουν στο σημείο ανάκλασής/μέτρησης τέλους της απόστασης. Το μέγεθος του αποστασιόμετρου είναι μικρό (Εικόνα 2) και η λειτουργία του ιδιαίτερα εύκολη καθώς η χρήση του μπορεί να γίνει από ένα μόνο αποτυπωσή και δεν είναι απαραίτητη η συνεργασία τουλάχιστον δυο ατόμων, όπως είναι φυσικό να γίνεται κατά την εφαρμογή της συμβατικής μεθόδου μέτρησης με χρήση μετροταινίας (ή/και αλφαδολάστιχου). Επίσης, το αποστασιόμετρο μπορεί να διαθέτει ενσωματωμένη μνήμη για την καταγραφή των μετρήσεων, οι οποίες μπορεί να μεταφερθούν σε Η/Υ αργότερα ή επιτόπου σε υπολογιστικές συσκευές χειρός (Palmtop). Οι μετρήσεις μπορεί να οδηγήσουν στην πλήρη καταγραφή των αποστάσεων που ορίζουν τις διαστάσεις ενός χώρου και να δημιουργηθεί το 3Δ μοντέλο του.

1.2.2 Τοπογραφικές μέθοδοι

Η επιστήμη που ασχολείται με την απεικόνιση των τμημάτων της γήινης επιφάνειας συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπινων κατασκευών είναι η επιστήμη της Τοπογραφίας. Η τεχνολογική ανάπτυξη και εξέλιξη των τοπογραφικών οργάνων καθώς και των προγραμμάτων επεξεργασίας των μετρήσεων του πεδίου αύξησε σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία και ακρίβεια τόσο των μετρήσεων όσο και των αποτελεσμάτων [100]-[102].

Η χρήση τοπογραφικών οργάνων και συγκεκριμένα θεοδόλιχων και αποστασιόμετρων για αποτύπωση σημείων του 3Δ χώρου έχει ξεκινήσει από πολύ παλιά και μπορούμε να πούμε ότι η σημερινή τεχνολογία των οργάνων μέτρησης είναι αρκετά ικανοποιητική ώστε να είναι σε θέση να αποτυπώνει με σημαντική ακρίβεια μετρήσεων αρχαιολογικά και αρχιτεκτονικά μνημεία.

Ωστόσο αν και η τοπογραφική αποτύπωση μπορεί να προσδιορίσει με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια τα σημεία ενός αντικειμένου στο χώρο υπολείπεται της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης για τους παρακάτω λόγους:

θα πρέπει να τηρείται στο πεδίο ένα αρκετά λεπτομερές σκαρίφημα-κροκί των μετρήσεων με σκοπό την πλήρη ανακατασκευή του μοντέλου στον Η/Υ που γίνεται με χειροκίνητο τρόπο. Το γεγονός αυτό καθιστά υπερβολικά χρονοβόρα τη διαδικασία των μετρήσεων ενός αντικειμένου και ταυτόχρονα αντικοινωνική λόγω του αυξημένου αριθμού των εργατωρών των χειριστών των οργάνων.

Ο προσδιορισμός των 3Δ συντεταγμένων των σημείων που προσδιορίζονται στο χώρο δεν οδηγούν άμεσα στην κατασκευή του 3Δ μοντέλου του μνημείου-χώρου. Περαιτέρω επεξεργασία σε ένα πακέτο 3Δ σχεδίασης πρέπει να ακολουθήσει, προκειμένου να συνδεθούν τα προσδιορισμένα σημεία στο χώρο, ώστε να σχηματιστούν τα επίπεδα των εξωτερικών επιφανειών που περιγράφουν το μνημείο-χώρο.

Τα όργανα μετρήσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και είναι σε θέση να ορίσουν ένα 3Δ σύστημα συντεταγμένων, στο οποίο αναφέρονται όλες οι μετρήσεις των σημείων, θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν μέτριου κόστους (μέχρι 10.000€) και η χρήση τους πρέπει να γίνεται από έμπειρους μηχανικούς (συνήθους Αγρονόμους Τοπογράφους Μηχανικούς, Πολιτικούς Μηχανικούς ή Αρχιτέκτονες Μηχανικούς) ή τεχνολόγους. Το όργανο που κατά κόρον χρησιμοποιείται σήμερα στην τοπογραφική αποτύπωση είναι ο Γεωδαιτικός Σταθμός (Total Station) που αποτελεί τη μετεξέλιξη του θεοδόλιχου (όργανο για τη μέτρηση των γωνιών) που είναι το παραδοσιακό όργανο για τη μέτρηση γωνιών και του ηλεκτρονικού αποστασιόμετρου (που συνδυάζεται με χρήση κάτοπτρων, ή άλλης ανακλαστικής επιφάνειας ή υπέρυθρης ακτίνας ή ακτίνας λέιζερ) για τη μέτρηση αποστάσεων.

Πολλές φορές η πολυπλοκότητα του αντικειμένου και η μεγάλη λεπτομέρεια που εμφανίζουν τα αρχιτεκτονικά και αρχαιολογικά μνημεία καθιστούν ασύμφορη οικονομικά αλλά και χρονικά την τοπογραφική μέθοδο αποτύπωσης. Για το λόγο αυτό μπορεί η τοπογραφική αποτύπωση να συνδυαστεί με την φωτογραμμετρική μεθοδολογία ώστε να ληφθούν μόνο οι ελάχιστες τοπογραφικές μετρήσεις (μέτρηση φωτοσταθερών) που είναι απαραίτητες για τον καθορισμό του επίγειου τρισσορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων στο οποίο θα αναφερθούν οι φωτογραφίες των στερεομοντέλων που θα επεξεργαστούν φωτογραμμετρικά και θα αποδώσουν το τελικό προϊόν. Άλλωστε η μέθοδος αποτύπωσης που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται τόσο από το τελικό παραδοτέο προϊόν, που θα

προδιαγράφει και την ακρίβεια του σχεδιαγράμματος αποτύπωσης-ψηφιοποίησης όσο και από το κόστος της εφαρμοσμένης τεχνικής [103].

Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα και Χαρακτηριστικά

Κύρια χαρακτηριστικά της τοπογραφικής μεθόδου είναι:

- Η τοπογραφική αποτύπωση είναι αντικειμενική
- Ορίζει ένα σύστημα αναφοράς βάσει του οποίου γίνεται ο προσδιορισμός των μετρήσεων
- Η ανακατασκευή γεωμετριών στην αναπαράσταση γίνεται μέσω συγκεκριμένων σημείων, που προσδιορίζονται αυστηρά
- Υπάρχει δυνατότητα επιστημονικού ελέγχου του αποτελέσματος και ικανοποίηση των απαιτήσεων ακρίβειας και αξιοπιστίας.
- Υπάρχει δυνατότητα και έμμεσων μετρήσεων, ως παράγωγων των πρωτογενών άμεσων μετρήσεων.
- Λόγω της πεπερασμένης ικανότητας για ικανοποίηση συνθηκών πυκνότητας, υπάρχει δυσκολία παρακολούθησης της συνέχειας γεωμετρικών στοιχείων (π.χ., γραμμές και κυρίως επιφάνειες).
- Το μέγεθος της πυκνότητας, που επηρεάζει την πιστότητα της αναπαράστασης, συναρτάται από τον χρόνο παραμονής στο πεδίο.
- Είναι δυνατή η τοποθέτηση, στην αναπαράσταση, περισσότερων αντικειμένων σε αμοιβαία σχέση μεταξύ τους.
- Υπάρχει ανάγκη για στοιχειώδη σχεδιαστική ικανότητα στο πεδίο, για τη σύνταξη σκαριφημάτων, κλπ.)
- Αντιμετωπίζονται δύσκολα και μόνο μετά από κατάλληλη μαθηματική στατιστική επεξεργασία (στο γραφείο), περιπτώσεις μη-επιπεδότητας.
- Υπάρχει σημαντικό πρόβλημα χρόνου και κόστους εργασιών πεδίου, που εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του αντικειμένου.
- Ο εξοπλισμός πεδίου είναι, κατ' αρχήν, μέτριου κόστους.
- Ο απαραίτητος εξοπλισμός για τις επεξεργασίες γραφείου είναι ο συνηθισμένος των τοπογραφικών εφαρμογών.
- Η αλγοριθμική επεξεργασία των δεδομένων είναι εύκολη.
- Δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν λεπτομέρειες και πολύπλοκα αρχιτεκτονικά (κυρίως μη-γραμμικά) ή δύσκολα προσπελάσιμα στοιχεία του προς αποτύπωση αντικειμένου.

- Υπάρχει ανάγκη για πρόσθετες εργασίες, που χρησιμοποιούνται στην εμπειρική μέθοδο, όπως είναι π.χ. μετρήσεις με μετροταινία, ερασιτεχνικές φωτογραφίες κ.α.
- Η στερεομετρία του αντικειμένου ανακατασκευάζεται έμμεσα.

Εξοπλισμός

Για να γίνει εφικτή η μέτρηση των σημείων στο χώρο είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν ακριβή όργανα μετρήσεων. Το πλέον κοινό όργανο που χρησιμοποιείται στην τοπογραφία τόσο για την αποτύπωση μεσαίας αλλά και μικρής κλίμακας αντικειμένων είναι ο θεοδόλιχος ή ταχύμετρο. Ο θεοδόλιχος είναι σε θέση να μετρά με μεγάλη ακρίβεια την οριζόντια και κατακόρυφη γωνία που σχηματίζεται από τη νοητή οπτική γραμμή που συνδέει ένα χαρακτηριστικό σημείο του οργάνου (κέντρο σκόπευσης) και το σημείο λεπτομέρειας (σημείο σκόπευσης) επί του αντικειμένου που παρατηρείται μέσω του οπτικού συστήματος του. Έμμεσα με χρήση των εξισώσεων τριγωνομετρίας και της μέτρησης των κατακόρυφων γωνιών είναι εφικτό να μετρηθούν και οι κατακόρυφες αποστάσεις μεταξύ σημείων στον 3Δ χώρο. Με την επίλυση των θεμελιωδών θεωρημάτων της τοπογραφίας όλες οι μετρήσεις των γωνιών που γίνονται μέσω του θεοδόλιχου μπορούν να οδηγήσουν σε υπολογισμό των 3Δ συντεταγμένων των παρατηρούμενων σημείων στο επίγειο καρτεσιανό τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων.

Αν και οι θεοδόλιχοι αρχικά κατασκευάστηκαν μόνο για κάνουν μετρήσεις γωνιών, τα σύγχρονα όργανα συνοδεύονται από αποστασιόμετρα οπότε ονομάζονται Γεωδαιτικοί Σταθμοί (Total Station) και επιτρέπουν με μία μόνο σκόπευση (δηλαδή μέτρηση της οριζόντιας και κατακόρυφης γωνίας) και την ταυτόχρονη μέτρηση της απόστασης του σημείου λεπτομέρειας από το θεοδόλιχο να παράγουν τις απ' ευθείας 3Δ συντεταγμένες σημείων στο χώρο εφόσον είναι απόλυτα προσδιορισμένη η θέση (ονομάζεται και στάση του οργάνου στην τοπογραφική ορολογία) του τοπογραφικού οργάνου σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων.

Συγκεκριμένα για τη μέτρηση αποστάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τρεις παρακάτω τρόποι:

Μηχανική μέθοδος. Γίνεται με τη χρήση ειδικών μεταλλικών μετροταινιών και συρμάτων invar.

Οπτική μέθοδος. Γίνεται με την παρατήρηση μέσω του οπτικού συστήματος ενός οργάνου μιας ειδικής μετρητικής διάταξης.

Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος. Για τη μέτρηση της απόστασης με χρήση του τοπογραφικού οργάνου απαιτείται συνήθως η εφαρμογή ενός ανακλαστήρα που εφάπτεται του σημείου που απαιτείται να μετρηθεί. Υπάρχουν οι εξής τρόποι για τον υπολογισμό της απόστασης:

Παλμού. Βασίζεται στο χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού σήματος μεταξύ του οργάνου που φέρει και την πηγή του Η/Μ κύματος και του σημείου που επιθυμείται η μέτρηση της απόστασής του από αυτό.

Σύγκριση φάσεων. Ο πομπός του οργάνου παράγει ένα ημιτονοειδές μετρικό σήμα το οποίο αντανακλάται και επιστρέφει με διαφορετική φάση. Η διαφορά φάσης καταγράφεται και μετατρέπεται σε απόσταση.

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη και εξέλιξη των αποστασιόμετρων **λίζερ** και των οργάνων μέτρησης απόστασης με χρήση της τεχνολογίας των **υπέρουθρων ακτίνων** έδωσε τη δυνατότητα να γίνονται οι μετρήσεις χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση ανακλαστήρα (πρίσμα ή κάτοπτρο).

Βασική Τοπογραφική Ορολογία

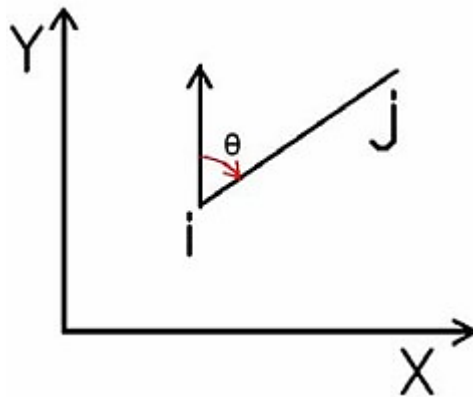
Τα θεμελιώδη προβλήματα της τοπογραφίας μπορούν να οδηγήσουν στον υπολογισμό των 3Δ συντεταγμένων των σημείων που παρατηρήθηκαν μέσω του οπτικού συστήματος τους και καταγράφηκαν οι γωνίες προσανατολισμού τους σε σχέση με μια γνωστή διεύθυνση που συνήθως είναι ο γεωγραφικός βορράς.

Προτού οριστούν τα θεμελιώδη προβλήματα και η βασική μαθηματική επεξεργασία που οδηγεί στον προσδιορισμό των συντεταγμένων στο χώρο, εξηγούνται ορισμένοι όροι που θα συναντηθούν παρακάτω:

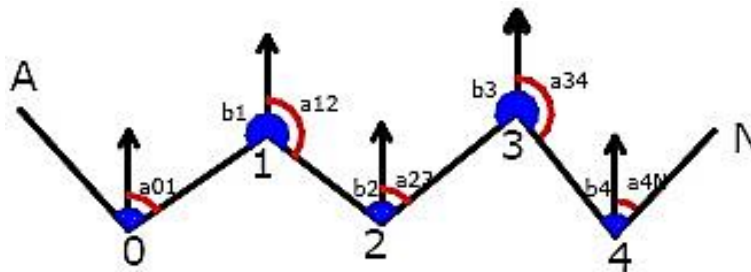
Μονάδα μέτρησης γωνιών grad: Η μονάδα μέτρησης των γωνιών σε προβλήματα τοπογραφίας είναι ο βαθμός ($\text{grad}=1g$) όπου ο πλήρης κύκλος αποτελείται από 400g και οι υποδιαίρέσεις του είναι το c και το cc. 1g αποτελείται από 100c και ένα 1c από 100cc. Η μεγάλη ακρίβεια και το ισχυρό πλεονέκτημα της Τοπογραφίας σε σχέσεις με τις υπόλοιπες μεθόδους μετρήσεων οφείλεται στην υψηλή ακρίβεια μετρήσεων των γωνιών με χρήση των τοπογραφικών οργάνων και μπορεί να αγγίζει τα μερικά cc.

Γωνία διεύθυνσης G: Η γωνία που λαμβάνεται με αφετηρία τη διεύθυνση του βορρά (που συμπίπτει συνήθως με το θετικό ημιάξονα Y του συστήματος αναφοράς καρτεσιανών συντεταγμένων) και καταλήγει μέχρι τη διεύθυνση (i->j) που συνδέει δύο σημεία στο επίπεδο (Εικόνα 2). Η φορά

διαγραφής της γωνίας διεύθυνσης είναι δεξιόστροφη δηλαδή σύμφωνα με την κίνηση των δεικτών του ρολογιού και παίρνει τιμές από 0ο μέχρι 400g.



Εικόνα 2 Ορισμός της γωνίας διεύθυνσης



Εικόνα 3 Πολυγωνική όδευση

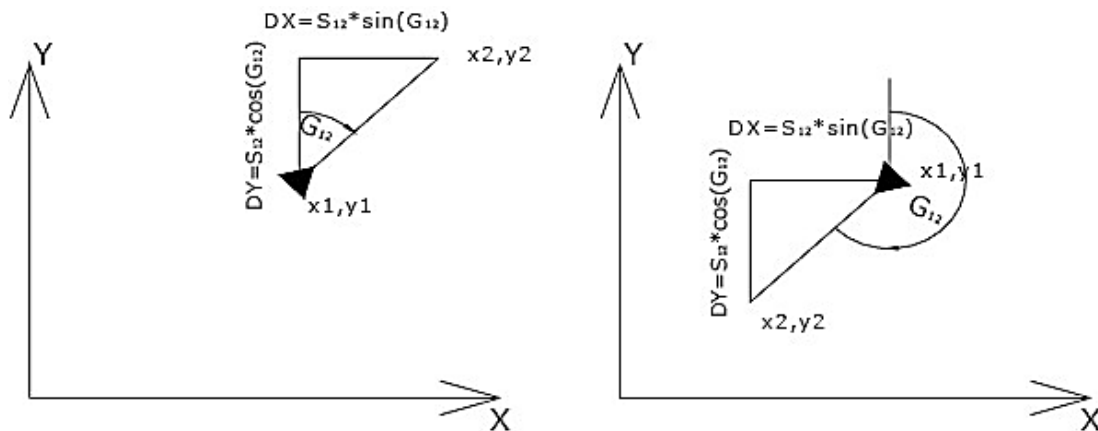
Πολυγωνική Όδευση: Η όδευση αποτελείται από μια σειρά διαδοχικών σημείων που σχηματίζουν στην οριζόντια προβολή τους μια τεθλασμένη γραμμή (ανοικτή ή κλειστή). Η επίλυση της όδευσης οδηγεί στον προσδιορισμό των συντεταγμένων όλων των σημείων που την αποτελούν (κορυφών της όδευσης) σε ένα καρτεσιανό σύστημα αναφοράς που μπορεί να είναι το Εθνικό Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ) ή ένα ανεξάρτητο τοπικό σύστημα αναφοράς ανάλογα με τα σημεία εξάρτησης και προσανατολισμού. Η διαδικασία προσδιορισμού των συντεταγμένων των κορυφών της όδευσης ονομάζεται πολυγωνομετρία.

Είδη οδεύσεων: Ανάλογα με το είδος του πολυγώνου που σχηματίζουν οι τεθλασμένες γραμμές της όδευσης διακρίνονται οι οδεύσεις σε ανοικτές και κλειστές. Ανεξάρτητες ονομάζονται οι οδεύσεις που δεν συνδέονται οι συντεταγμένες των κορυφών τους με ένα τοπικό ή εθνικό γεωγραφικό σύστημα αναφοράς. Διαφορετικά, αν η θέση τουλάχιστον μιας κορυφής της όδευσης είναι δεδομένη σε ένα τοπικό εθνικό σύστημα γεωγραφικής αναφοράς ονομάζεται εξαρτημένη. Υπάρχει περίπτωση η όδευση να

συνοδεύεται από μια εξάρτηση που αφορά στον προσανατολισμό οπότε η εξαρτημένη όδευση ονομάζεται προσανατολισμένη κατά το ένα ή κατά τα δύο άκρα της.

Γωνίες θλάσεως: Είναι οι γωνίες μεταξύ των πλευρών της όδευσης που βρίσκονται στα αριστερά κατά την πορεία επίλυσης.

Βασική επεξεργασία – Θεμελιώδη προβλήματα τοπογραφίας



Εικόνα 4 Πρώτο θεμελιώδες πρόβλημα

Το πρώτο θεμελιώδες πρόβλημα της τοπογραφίας οδηγεί σε υπολογισμό των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων ενός σημείου όταν είναι γνωστά τα παρακάτω

Οι οριζοντιογραφικές (ή επίπεδες) συντεταγμένες (x_1, y_1) ενός σημείου

Η γωνία διεύθυνσης G_{12} από το σημείο 1 προς το σημείο 2

Η οριζόντια απόσταση (S_{12}) ανάμεσα στα δύο σημεία.

Η εφαρμογή του πρώτου θεμελιώδους προβλήματος γίνεται όταν μετά από την επίλυση της όδευσης είναι γνωστές οι συντεταγμένες των κορυφών της όδευσης.

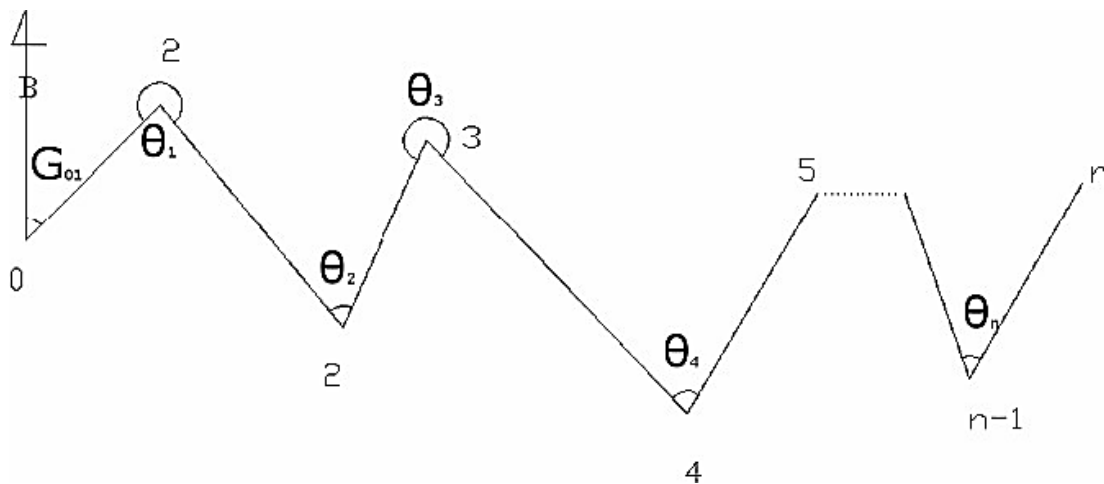
Αν ο θεοδόλιχος έχει τοποθετηθεί στη θέση με οριζοντιογραφικές συντεταγμένες (x_1, y_1) ο υπολογισμός των συντεταγμένων (x_2, y_2) του σημείου που παρατηρείται από το οπτικό σύστημα του οργάνου μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$X_2 = X_1 + Dx = X_1 + S_{12} * \sin(G_{12})$$

$$Y_2 = Y_1 + Dy = Y_1 + S_{12} * \cos(G_{12})$$

όπου G_{12} είναι η γωνία που θα διαγράψει ο άξονας των Y (βορράς) αν κινηθεί σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού ώστε να συμπέσει με τη νοητή γραμμή που συνδέει τα δυο σημεία και S_{12} η οριζόντια απόσταση ανάμεσα στο σημείο στάσης του οργάνου και το σημείο σκόπευσης (x_2, y_2).

Το **αντίστροφο ή δεύτερο θεμελιώδες πρόβλημα** της τοπογραφίας μπορεί να οδηγήσει σε υπολογισμό της απόστασης (S_{12}) δύο σημείων και της γωνίας διεύθυνσης (G_{12}) που σχηματίζει η νοητή ευθεία που τα ενώνει με το θετικό ημιάξονα των τεταγμένων, εφόσον είναι γνωστές οι συντεταγμένες του σημείου.



Εικόνα 5 Τρίτο θεμελιώδες πρόβλημα ή μεταφορά γωνίας διεύθυνσης

Το τρίτο θεμελιώδες πρόβλημα της τοπογραφίας (μεταφορά γωνίας διεύθυνσης) (Εικόνα 5) οδηγεί στον προσδιορισμό της γωνίας διεύθυνσης μιας οποιασδήποτε πλευράς της τεθλασμένης γραμμής (ή πολυγωνικής όδευσης) $G_{n(n+1)}$ όταν είναι γνωστές οι προηγούμενες γωνίες θλάσεις και η γωνία διεύθυνσης της πρώτης πλευράς.

Η σχέση που δίνει τη γωνία διεύθυνσης είναι:

$$G_{n(n+1)} = G_{(n-1)n} + \theta_1 + 200^g$$

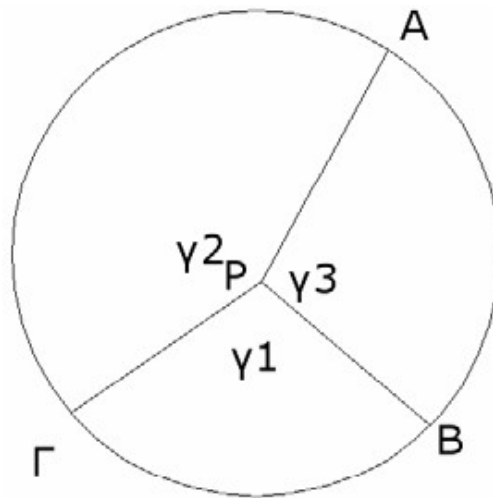
Εφαρμόζοντας τη σχέση για όλες τις μετρήσεις των γωνιών μιας όδευσης προκύπτει τελικά η σχέση που αποδίδει τη γωνία διεύθυνσης μιας πλευράς

$$G_{n(n+1)} = G_{01} + \sum_{i=1}^n \theta_i + (n \times 200^g) - (k \times 400^g)$$

όταν είναι γνωστές οι γωνίες θλάσεις των προηγούμενων πλευρών και η γωνία διεύθυνσης της πρώτης πλευράς.

Οπισθοτομία: Η διαδικασία υπολογισμού των συντεταγμένων του σημείου στάσης του οργάνου μετά από μέτρηση των διευθύνσεων προς τρία τουλάχιστον γνωστά σημεία Α,Β,Γ. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι για τον υπολογισμό των συντεταγμένων της στάσης του οργάνου με οπισθοτομία οι Βαρυκεντρική, Collins και Τομής δύο κύκλων, ωστόσο για λόγους συντομίας περιγράφεται η πιο κοινή (Βαρυκεντρική).

Βαρυκεντρική (Tienstra) μέθοδος οπισθοτομίας: Η στάση που τοποθετείται το τοπογραφικό όργανο (οπισθοτομικό σημείο) πρέπει να εντοπίζεται κατά προτίμηση στο κέντρο βάρους των γνωστών σημείων και σε κάθε περίπτωση εντός του τριγώνου. Μετρούνται οι διευθύνσεις προς τρία γνωστά σημεία από τις οποίες προκύπτουν οι γωνίες $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ (Εικόνα 6) και οι σχέσεις που δίνουν τις οριζόντιες συντεταγμένες του σημείου P είναι:



Εικόνα 6 Βαρυκεντρική μέθοδος οπισθοτομίας

$$x_p = \frac{k_1 \cdot x_A + k_2 \cdot x_B + k_3 \cdot x_\Gamma}{k_1 + k_2 + k_3}$$

$$y_p = \frac{k_1 \cdot y_A + k_2 \cdot y_B + k_3 \cdot y_\Gamma}{k_1 + k_2 + k_3}$$

όπου

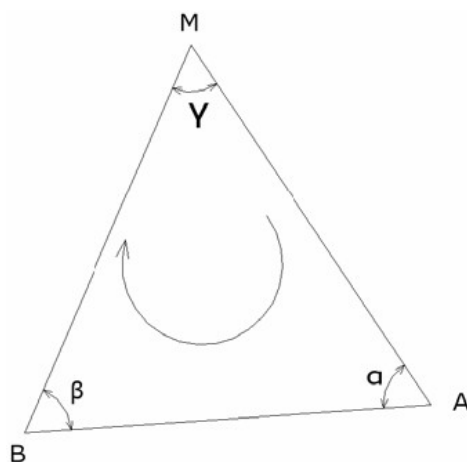
$$\frac{1}{k_1} = \sigma\varphi(\gamma_A) - \sigma\varphi(\gamma_1)$$

$$\frac{1}{k_2} = \sigma\varphi(\gamma_B) - \sigma\varphi(\gamma_2)$$

$$\frac{1}{k_3} = \sigma\varphi(\gamma_\Gamma) - \sigma\varphi(\gamma_3)$$

Οι γωνίες γ_A , γ_B και γ_Γ προκύπτουν από το δεύτερο και τρίτο θεμελιώδες πρόβλημα με γνωστές τις συντεταγμένες των σημείων. Το αλγεβρικό άθροισμα των γωνιών γ_1, γ_2 και γ_3 είναι 400g.

Εμπροσθοτομία: Είναι η μέθοδος προσδιορισμού των συντεταγμένων ενός σημείου με μετρήσεις μόνο των γωνιών από άλλα δύο σημεία (τις στάσεις του οργάνου). Υπάρχουν τρεις μέθοδοι επίλυσης της εμπροσθοτομίας (επίλυση τριγώνου και θεμελιώδη προβλήματα, με μετρημένες γωνίες και με γωνίες διεύθυνσης). Ωστόσο για λόγους συντομίας περιγράφονται η πρώτη και δεύτερη μέθοδοι που είναι η πιο κοινές.



Εικόνα 7 Εφαρμογή εμπροσθοτομίας

Μέθοδος εμπροσθοτομίας με επίλυση τριγώνου και θεμελιώδη προβλήματα:

Τα σημεία A,B έχουν γνωστές συντεταγμένες X_A, Y_A και X_B, Y_B και με εφαρμογή του πρώτου θεμελιώδους προβλήματος υπολογίζονται η απόσταση S_{AB} και η γωνία διεύθυνσης G_{AB} . Σύμφωνα με το νόμο των ημίτονων οι αποστάσεις S_{AM} και S_{BM} προκύπτουν από τις σχέσεις

$$S_{AM} = S_{AB} \frac{\eta\mu(\beta)}{\eta\mu(\alpha + \beta)}$$

$$S_{BM} = S_{AB} \frac{\eta\mu(\alpha)}{\eta\mu(\alpha + \beta)}$$

Με εφαρμογή του 3ου θεμελιώδους προβλήματος της τοπογραφίας υπολογίζονται οι γωνίες διευθύνσεις G_{AM} και G_{BM}

$$X_M = X_A + S_{AM} \eta\mu(G_{AM})$$

$$Y_M = Y_A + S_{AM} \sigma\upsilon\nu(G_{AM})$$

Για έλεγχο και μόνο υπολογίζονται οι συντεταγμένες του σημείου M (X_M, Y_M) και από το σημείο B:

$$X_M = X_B + S_{BM} \eta\mu(G_{BM})$$

$$Y_M = Y_B + S_{BM} \sigma\upsilon\nu(G_{BM})$$

Μέθοδος εμπροσθοτομίας με μετρημένες γωνίες: Απ' ευθείας από τις σχέσεις (χωρίς επίλυση του τριγώνου) έχουμε:

$$X_M = \frac{Y_B - Y_A + X_A \cdot \sigma\varphi(\beta) + X_B \cdot \sigma\varphi(\alpha)}{\sigma\varphi(\alpha) + \sigma\varphi(\beta)}$$

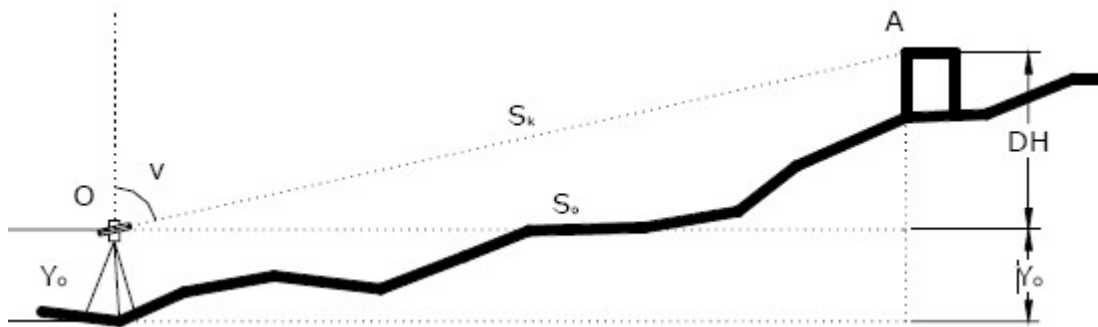
$$Y_M = \frac{X_A - X_B + Y_A \cdot \sigma\varphi(\beta) + Y_B \cdot \sigma\varphi(\alpha)}{\sigma\varphi(\alpha) + \sigma\varphi(\beta)}$$

Με χρήση των προηγούμενων προβλημάτων ή της μεθόδου οπισθοτομίας μπορεί να δημιουργηθεί ένα δίκτυο μετρημένων σημείων γύρω από το χώρο ή το κτίριο μελέτης και στη συνέχεια με χρήση μεθόδων εμπροσθοτομίας ή του πρώτου θεμελιώδους προβλήματος να υπολογιστούν οι

συντεταγμένες όλων των σημείων που παρατηρούνται από το σύστημα σκόπευσης του οργάνου (γεωδαιτικού σταθμού).

Υπολογισμός υψομέτρων των παρατηρούμενων σημείων

Οι τοπογραφικές μέθοδοι που παρουσιάστηκαν αφορούσαν τον υπολογισμό της οριζοντιογραφικής θέσης των σημείων στο χώρο. Ο προσδιορισμός της τρίτης διάστασης, που συμπίπτει με το υψόμετρο, κάθε χαρακτηριστικού σημείου στο χώρο μπορεί να γίνει χρήση της μεθόδου της Τριγωνομετρικής Υψομετρίας ή με την εφαρμογή της Γεωμετρικής Χωροστάθμησης εφόσον βέβαια υπάρχουν μετρήσεις από ένα άλλο τοπογραφικό όργανο το χωροβάτη.



Εικόνα 8 Τριγωνομετρική υψομετρία

Θα αναφερθούμε για λόγους συντομίας στον υπολογισμό των υψομέτρων με την πρώτη μέθοδο.

Η **Τριγωνομετρική Υψομετρία** εκμεταλλεύεται τη μέτρηση των κατακόρυφων γωνιών που μετρώνται από ένα γεωδαιτικό σταθμό και της κεκλιμένης απόστασης του οργάνου από το σημείο που θέλουμε να υπολογιστεί το υψόμετρό του. Εξετάζοντας το σχήμα και εφαρμόζοντας το πυθαγόρειο θεώρημα εύκολα προκύπτει η σχέση που δίνει την υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο κέντρο σκόπευσης O του γεωδαιτικού σταθμού και το σημείο A:

$$\Delta H_{OA} = S_k \sin(\nu)$$

όπου S_k είναι η κεκλιμένη απόσταση του οργάνου από το σημείο, ν η κατακόρυφη γωνία που σχηματίζει το ζενίθ με την οπτική γραμμή που συνδέει το όργανο με το σημείο A.

Το τελικό αποτέλεσμα που θα δώσει και τη συντεταγμένη Z του σημείου A πρέπει να προστεθεί το ύψος τοποθέτησης του οργάνου Y_0 και το υψόμετρο του σημείου στο έδαφος που έχει προκύψει από προηγούμενη **Τριγωνομετρική Υψομετρία ή Γεωμετρική Χωροστάθμιση**.

Σε περίπτωση που δεν μπορεί να μετρηθεί η κεκλιμένη απόσταση του κέντρου σκόπευσης του οργάνου από το σημείο A αλλά αν είναι γνωστή η οριζόντια απόσταση S_0 του οργάνου από το σημείο η σχέση που δίνει τη διαφορά ΔH_{0A} είναι:

$$\Delta H_{0A} = S_0 \cdot \sigma_f(v)$$

1.2.3 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι

Η φωτογραμμετρία είναι η Τέχνη, η Επιστήμη και η Τεχνική που σκοπό έχει την εξαγωγή αξιόπιστης μετρικής πληροφορίας φυσικών αντικειμένων και του περιβάλλοντος μέσω των διαδικασιών της καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων και άλλων πρότυπων Ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και φαινομένων».

Ιστορικά στοιχεία

Η ιστορία της Φωτογραμμετρίας ξεκινάει από πολύ παλιά. Εμπνευστής της χρήσης της φωτογραφίας για την τεκμηρίωση των αρχιτεκτονικών κατασκευών σημαντικής πολιτιστικής αξίας, ήταν ο Albrecht Meydenbauer, γερμανός αρχιτέκτων που στα 1858 μετά από ένα ατύχημα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων που έκανε στον καθεδρικό ναό της πόλης Wetzlar και μπορούσε να στοιχίσει τη ζωή του, σκέφτηκε ότι θα μπορούσαν οι μετρήσεις στην όψη ενός κτηρίου να πραγματοποιηθούν με έμμεσο τρόπο και όχι απ' ευθείας. Ο καλύτερος τρόπος για την εξαγωγή των μετρήσεων έμμεσα ήταν με χρήση φωτογραφικής εικόνας. Οι κοινές φωτογραφικές μηχανές της εποχής δεν ήταν σε θέση να αποδώσουν ορθά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων και για το λόγο αυτό αποφάσισε να κατασκευάσει μια φωτογραφική μηχανή που θα ενσωμάτωνε και μια μετρητική συσκευή ικανή να δώσει εκτός από την εικόνα του αντικειμένου και κάποια γεωμετρική πληροφορία του. Η συσκευή αυτή κατασκευάστηκε το 1867 και αποτελούνταν από ένα ευρυγώνιο φακό (εστιακής απόστασης 25cm) με μέγεθος αρνητικού 30x30cm. Ο Meydenbauer έδωσε το όνομα στην επιστήμη που ονομάστηκε φωτογραμμετρία και προέρχεται από τρεις ελληνικές λέξεις: «Φως – γραμμή – μέτρηση» που περιγράφουν πολύ λιτά την ιδιότητα που έχει το φως να πορεύεται πάντα σε ευθεία γραμμή και να μπορεί να δίνει μετρήσεις κάνοντας χρήση αυτής της ιδιότητας. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι

ο Meydenbauer ήταν ο πρώτος που διαπίστωσε ότι τα μνημεία – αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς είναι σε κίνδυνο από τις βλάβες που υφίστανται με το πέρασμα του χρόνου και πρότεινε τη δημιουργία του “Denkmälerarchiv” δηλαδή του αρχείου της πολιτιστικής κληρονομιάς που θα χρησιμοποιούνταν σε περίπτωση καταστροφής του αρχικού μνημείου. Η δραστηριότητα του οδήγησε στην καταγραφή περίπου 2600 μνημείων και 20000 φωτογραφιών. Μερικά μάλιστα από τα μνημεία που αποτύπωσε ανήκουν και στη χώρα μας.

Από τότε η Φωτογραμμετρία έχει εξελιχθεί παράλληλα με την τεχνική της φωτογραφίας και σε συνεργασία με τις επιστήμες των μετρήσεων όπως π.χ. της τοπογραφίας, της γεωδαισίας και της χαρτογραφίας για τη δημιουργία χαρτών της γήινης επιφάνειας αλλά και της αρχιτεκτονικής για τη δημιουργία των σχεδιαγραμμάτων των όψεων των κτιρίων και των αρχαιολογικών ανασκαφών.

Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα και Χαρακτηριστικά

Τα κύρια χαρακτηριστικά της Φωτογραμμετρικής Μεθοδολογίας αποτύπωσης είναι:

- Η αποτύπωση είναι αντικειμενική
- Ορίζεται σύστημα αναφοράς.
- Η ανακατασκευή των γεωμετριών του αντικειμένου, στο χώρο, γίνεται μέσω συνεχούς απόδοσης ή/και σημειακής.
- Υπάρχει δυνατότητα επιστημονικού ελέγχου του αποτελέσματος ως προς την ακρίβεια και αξιοπιστία.
- Δεν υπάρχει ανάγκη σχεδίων πεδίου (σκαριφήματα-κροκί).
- Υπάρχει δυνατότητα έμμεσων μετρήσεων.
- Μπορεί να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες της νέας σχεδιαστικής τεχνολογίας (π.χ., CAD), αλλά και της ψηφιακής τεχνολογίας ανάλυσης εικόνας (image processing). Επιπλέον είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν εύκολα οι νέες ολοκληρωμένες τεχνικές ψηφιακής τεκμηρίωσης (αλφαριθμητικά, γραφικά και εικόνες). Αντιμετωπίζονται άμεσα λεπτομέρειες και πολύπλοκα αρχιτεκτονικά ή δύσκολα προσπελάσιμα στοιχεία.
- Στη διαδικασία των φωτογραμμετρικών αποτυπώσεων, ενσωματώνεται εύκολα η λογική της διαχρονικής παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς του αντικειμένου, εφόσον είναι εύκολη, φθηνή και "πληθωρική" η συλλογή δεδομένων.
- Γίνεται άμεση ανακατασκευή της στερεομετρίας του αντικειμένου.

- Αξιοποιούνται γεωμετρικές ιδιότητες (π.χ., σημεία φυγής, προοπτικό-τητας, κλπ.) τα οποία διευκολύνουν ή/και πλουτίζουν τις επεξεργασίες.
- Η αλγοριθμική επεξεργασία των δεδομένων είναι δύσκολη.
- Υπάρχει ανάγκη για πρόσθετες εργασίες της τοπογραφικής μεθόδου (στις περιπτώσεις χρήσης φωτοσταθερών, ή τοποθέτησης του αντικειμένου σε αμοιβαία σχέση με άλλα αντικείμενα)
- Ο εξοπλισμός πεδίου είναι από χαμηλού κόστους μέχρι μέτριου.
- Ο απαραίτητος εξοπλισμός για τις επεξεργασίες γραφείου είναι εξειδικευμένος είτε μέτριου είτε υψηλού κόστους. Η φωτογραμμετρία ανάλογα με τον τρόπο του υπολογισμού και τον αριθμό των συντεταγμένων των σημείων των λεπτομερειών διακρίνεται σε μονοσκοπική και σε στερεοσκοπική φωτογραμμετρία και ανάλογα με τη θέση της φωτομηχανής, σχετικά με το αντικείμενο, σε επίγεια και από αέρα.

Στάδια εξέλιξης της φωτογραμμετρίας

Σημαντικότερα στάδια εξέλιξής της φωτογραμμετρίας ήταν:

- i. Αναλογική φωτογραμμετρία, όπου με χρήση των οπτικομηχανικών μέσων κατέστη δυνατή η εξαγωγή της θέσης στις τρεις διαστάσεις λεπτομερειών ενός εικονιζόμενου αντικειμένου που εικονίζεται σε ένα στερεοζεύγος φωτογραφιών που έχουν ληφθεί από διαφορετικές θέσεις με σημαντική επικάλυψη.
- ii. Αναλυτική φωτογραμμετρία, όπου οι φωτογραμμετρικές διαδικασίες γίνονται με υπολογιστικά μέσα και για πρώτη φορά χρησιμοποιούνται Η/Υ για τον υπολογισμό των παραμέτρων των φωτογραφικών εικόνων και των προσανατολισμών τους καθώς και ο προσδιορισμός στον 3Δ χώρο της θέσης των λεπτομερειών των αντικειμένων.
- iii. Ψηφιακή φωτογραμμετρία, όπου σταματά η επεξεργασία των αναλογικών φωτογραφιών και η επεξεργασία γίνεται με υπολογιστικά μέσα σε ψηφιακές απεικονίσεις (σκαναρισμένες εικόνες ή πρωτογενείς ψηφιακές εικόνες) όχι μόνο του ορατού φάσματος της Η/Μ ακτινοβολίας αλλά και άλλων προτύπων της όπως πχ. στο μήκος κύματος των μικροκυμάτων, υπέρυθρων ακτίνων κλπ.

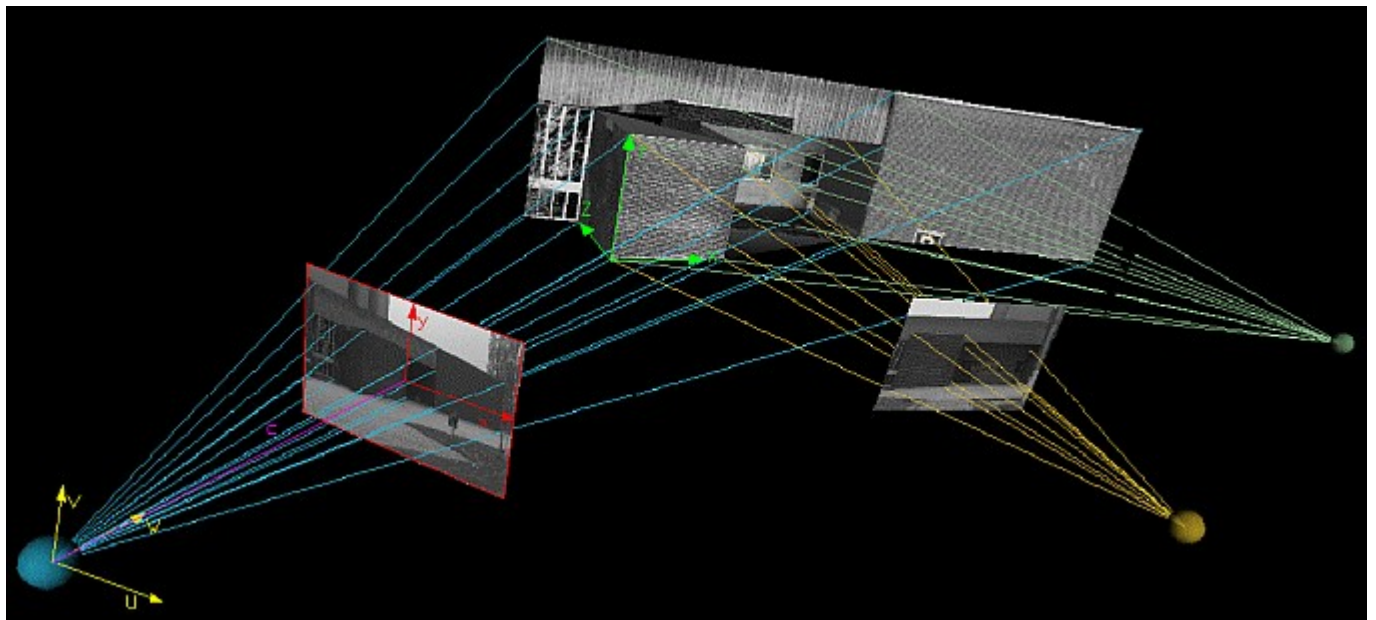
Συστήματα Συντεταγμένων

Προτού αναλυθεί το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη βασική επεξεργασία της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας θα γίνει μια μικρή αναφορά στα διάφορα συστήματα συντεταγμένων που

συμμετέχουν στην φωτογραμμετρική επεξεργασία (του 3D χώρου, του φωτογραφικού επιπέδου και της φωτογραφικής εικόνας) και της σχέσης που τα συνδέει.

Σύστημα συντεταγμένων του φωτογραφικού επιπέδου: Η μέτρηση των συντεταγμένων των εικονιζόμενων σημείων σε μια φωτογραμμετρική εικόνα γίνεται στο σύστημα της φωτογραφίας ή αλλιώς του φωτογραφικού επιπέδου. Πρόκειται για ένα 2D (x,y) σύστημα συντεταγμένων που σαν αρχή έχει το κέντρο της εικόνας ή μάλλον την προβολή του κέντρου (x0,y0) των φακών της φωτομηχανής στο επίπεδο του αρνητικού ή του ψηφιακού αισθητήρα. Το κέντρο των φακών αποτελεί και το κέντρο προβολής από το οποίο διέρχονται όλες οι οπτικές γραμμές που αποτυπώνουν τα αντικείμενα του 3D χώρου στον 2D χώρο του φωτογραφικού επιπέδου. Οι μετρήσεις στο φωτογραφικό επίπεδο ανάγονται μετά από κατάλληλη επεξεργασία στον υπολογισμό των 3D συντεταγμένων των 3D αντικειμένων της φωτογραφίας.

Σύστημα συντεταγμένων της φωτομηχανής: Πρόκειται για ένα 3D σύστημα συντεταγμένων που έχει σαν αρχή το κέντρο των φακών με τον άξονα του βάθους W κάθετο προς το φωτογραφικό επίπεδο και τους άξονες U,V παραλλήλους προς τους άξονες x,y του συστήματος συντεταγμένων του φωτογραφικού επιπέδου.



Εικόνα 9 Φωτογραμμετρικά συστήματα μέτρησης συντεταγμένων

Σύστημα συντεταγμένων του 3D χώρου: Πρόκειται για ένα σύστημα συντεταγμένων (X,Y,Z) που υλοποιείται από το τοπογραφικό όργανο μετρήσεων των φωτοσταθερών που εικονίζονται στις

φωτογραμμετρικές εικόνες. Η σύνδεση μεταξύ του επίγειου συστήματος συντεταγμένων και του συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής προκύπτει αν υποθέσουμε ότι για τη μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο αρκεί να γίνουν τρεις μεταθέσεις (παράλληλα προς τους τρεις άξονες X_0, Y_0, Z_0 που ορίζουν στο επίγειο σύστημα τις συντεταγμένες του κέντρου των φακών και αρχή του 3D συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής) τρεις στροφές (ω, ϕ, κ γύρω από κάθε άξονα) και μία μεταβολή της κλίμακας των μετρήσεων. Σε μορφή πινάκων η σχέση ορίζεται από τη μορφή

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \lambda \cdot R(\omega, \phi, \kappa) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

όπου $R(\omega, \phi, \kappa)$ είναι ένα μητρώο 3×3 που αποτελείται από αθροίσματα τριγωνομετρικών συναρτήσεων των γωνιών στροφής ω, ϕ και κ των αξόνων X, Y, Z ώστε να συμπέσουν με τους άξονες U, V, W και λ είναι ο συντελεστής κλίμακας της σμίκρυνσης των ειδώλων στη φωτογραφία. Κάθε σημείο που μετράται στην εικόνα στο σύστημα συντεταγμένων της φωτογραφικής μηχανής (U, V, W) έχει σταθερή συντεταγμένη βάθους

$$W = -c$$

όπου c είναι η εστιακή απόσταση της φωτογραφικής μηχανής, δηλαδή η απόσταση του κέντρου των φακών της από το φωτογραφικό επίπεδο και (x_0, y_0) η προβολή του κέντρου των φακών στο φωτογραφικό επίπεδο. Οι παράμετροι (c, x_0, y_0) μαζί με τις διαστάσεις του αρνητικού ή του ψηφιακού αισθητήρα ορίζουν τις παραμέτρους της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτομηχανής. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτομηχανής ονομάζεται εσωτερικός προσανατολισμός. Αντίθετα η θέση (X_0, Y_0, Z_0) του κέντρου των φακών και οι στροφές (ω, ϕ, κ) των αξόνων του επίγειου συστήματος ώστε να συμπέσουν με τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής, αποτελούν στοιχεία της θέσης και προσανατολισμού της φωτογραφικής λήψης στο επίγειο σύστημα συντεταγμένων και ο προσδιορισμός των 6 αυτών παραμέτρων ονομάζεται εξωτερικός προσανατολισμός. Η σχέση (21) μετατρέπεται στη μορφή:

$$\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix} = \lambda \cdot R(\omega, \phi, \kappa) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

λόγω της παραλληλίας με των αξόνων U,V του συστήματος της φωτογραφικής μηχανής με τους x,y του φωτογραφικού επιπέδου.

Από τις τρεις εξισώσεις που προκύπτουν μπορούμε να οδηγηθούμε με διαίρεση των δύο πρώτων από την τρίτη σε ένα σύστημα δύο εξισώσεων απαλείφοντας με τον τρόπο αυτό το συντελεστή κλίμακας λ, που χαρακτηρίζονται ως εξισώσεις συγγραμμικότητας και είναι η βάση της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρικής επεξεργασίας:

$$x = x_0 - c \cdot \frac{(X - X_0) \cdot R_{11} + (Y - Y_0) \cdot R_{12} + (Z - Z_0) \cdot R_{13}}{(X - X_0) \cdot R_{31} + (Y - Y_0) \cdot R_{32} + (Z - Z_0) \cdot R_{33}}$$
$$y = y_0 - c \cdot \frac{(X - X_0) \cdot R_{21} + (Y - Y_0) \cdot R_{22} + (Z - Z_0) \cdot R_{23}}{(X - X_0) \cdot R_{31} + (Y - Y_0) \cdot R_{32} + (Z - Z_0) \cdot R_{33}}$$

Οι σχέσεις αυτές συνδέουν τις φωτογραφικές συντεταγμένες (x,y) της εικόνας ενός σημείου στο φωτογραφικό επίπεδο, με τις επίγειες συντεταγμένες του(X,Y,Z) μέσω των στοιχείων της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτομηχανής (c,x0,y0) και των συντεταγμένων στάσης (X0,Y0,Z0) της φωτογραφικής μηχανής στο επίγειο σύστημα συντεταγμένων και των γωνιών στροφής ανάμεσα στα δύο 3Δ συστήματα συντεταγμένων (στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού).

Στερεοσκοπική Φωτογραμμετρία

Με χρήση δυο εικόνων δηλαδή μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων x,y του ίδιου σημείου σε δύο εικόνες (που ονομάζονται ομόλογα σημεία), προκύπτουν δύο ζεύγη εξισώσεων της παραπάνω μορφής (23) που μπορούν να λυθούν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και να εξαγουν τη θέση του σημείου στο χώρο δηλαδή τις συντεταγμένες X,Y,Z. Η τεχνική αυτή ονομάζεται φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία κατά αντιστοιχία της τοπογραφικής εμπροσθοτομίας που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Βασική προϋπόθεση για την επίλυση της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας είναι να έχει προσδιοριστεί προηγουμένως η θέση και στροφή της φωτομηχανής (δηλαδή η σχέση των αξόνων της φωτομηχανής με τους άξονες του επίγειου συστήματος συντεταγμένων). Ο προσδιορισμός της θέσης των φωτογραφικών στάσεων και των γωνιών στροφής των αξόνων ονομάζεται φωτογραμμετρική οπισθοτομία και είναι δυνατόν να γίνει και πάλι με επίλυση εξισώσεων της μορφής (21) εφόσον είναι γνωστή η θέση τριών τουλάχιστον σημείων που εικονίζονται σε κάθε εικόνα στο τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων του εδάφους. Η επάρκεια των τριών σημείων για την επίλυση της φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας οφείλεται στο γεγονός ότι οι έξι άγνωστοι παράμετροι του

προσανατολισμού των εικόνων X,Y,Z,ω,φ,κ μπορούν να υπολογιστούν καθώς κάθε ένα από τα τρία σημεία συνεισφέρει στο προς επίλυση σύστημα εξισώσεων με 2 εξισώσεις άρα συνολικά έχουμε 6 εξισώσεις για 6 αγνώστους.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας οφείλεται στην 3Δ όραση και παρατήρηση των λεπτομερειών της επικαλυπτόμενης περιοχής του 3Δ χώρου στις δύο εικόνες σε εξειδικευμένους Η/Υ που ονομάζονται Ψηφιακοί Φωτογραμμετρικοί Σταθμοί (ΨΦΣ). Η παρουσίαση γίνεται μέσω ενός συστήματος στερεοσκοπικής όρασης του στερεοζεύγους και μετρήσεων, όπου μετά από κατάλληλη επεξεργασία που ονομάζεται σχετικός προσανατολισμός και κατόπιν της δημιουργίας κατάλληλων εικόνων (επιπολικές εικόνες) είναι δυνατή η 3Δ όραση του συνόλου των λεπτομερειών της επικαλυπτόμενης περιοχής των εικόνων του στερεοζεύγους. Η μέτρηση των σημείων μέσω του 3Δ συστήματος εξασφαλίζει

- μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων
- συντομότερη επεξεργασία με τη μέτρηση δύο ομόλογων σημείων ταυτόχρονα σε δύο διαφορετικές εικόνες
- αποφυγή χονδροειδών σφαλμάτων από λανθασμένη επιλογή παρόμοιων αλλά διαφορετικών σημείων στις δύο εικόνες.

Μονοσκοπική φωτογραμμετρία

Σε μερικές περιπτώσεις η απλότητα της γεωμετρίας ενός αντικειμένου μπορεί να οδηγήσει σε χρήση μίας μόνο φωτογραμμετρικής εικόνας για τον προσδιορισμό της θέσης των εικονιζόμενων λεπτομερειών. Σε ένα κτίριο, για παράδειγμα, όλα τα χαρακτηριστικά σημεία μιας όψης βρίσκονται σε ένα κατακόρυφο επίπεδο οπότε, αν θεωρήσουμε ότι η μια από τις τρεις συντεταγμένες του επίγειου συστήματος είναι το βάθος κάθετα στο κατακόρυφο αυτό επίπεδο, προκύπτει ότι για κάθε σημείο λεπτομερειών υπάρχουν μόνο δύο άγνωστες τιμές συντεταγμένων δηλ. η απόσταση οριζόντια και κάθετα επάνω στην όψη του. Μαθηματικά η σχέση που συνδέει το κατακόρυφο επίπεδο της όψης π.χ. ενός κτιρίου και της φωτογραμμετρικής εικόνας του ορίζεται από τις σχέσεις:

$$x = \frac{a1 \cdot X + a2 \cdot Y + a3}{c1 \cdot X + c2 \cdot Y + 1} \quad y = \frac{b1 \cdot X + b2 \cdot Y + b3}{c1 \cdot X + c2 \cdot Y + 1}$$

όπου x,y οι εικονοσυντεταγμένες των λεπτομερειών και X,Y οι αντίστοιχες συντεταγμένες στο επίγειο σύστημα και a1,a2,a3,b1,b2,b3,c1,c2 άγνωστοι παράμετροι. Αν είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι

οκτώ άγνωστες παράμετροι που συνδέουν τα δύο επίπεδα (το επίπεδο της όψης και το φωτογραφικό επίπεδο στο οποίο γίνεται η καταγραφή) μπορεί να δημιουργηθεί μια εικόνα που αποτελεί την ορθή προβολή της όψης του κτιρίου, δηλαδή ένα χάρτη της όψης που κάθε σημείο του αντιστοιχεί βάσει των παραπάνω παραμέτρων σε γνωστά σημεία στο χώρο που υλοποιεί το κατακόρυφο επίπεδο.



Εικόνα 10 (α). Αρχική εικόνα. Είναι εμφανής η παραμόρφωση που υφίσταται το κτίριο λόγω της κεντρικής προβολής. (β). Τα σφάλματα λόγω κεντρικής προβολής και κλίσης έχουν απαλειφθεί

Ο προσδιορισμός των αγνώστων παραμέτρων πραγματοποιείται με την επίλυση ενός συστήματος τουλάχιστον 8 εξισώσεων άρα αν υπάρχουν 4 τουλάχιστον γνωστά σημεία στον πραγματικό χώρο και μετρηθούν οι εικονοσυντεταγμένες τους, μπορεί να δημιουργηθεί ένα σύστημα εξισώσεων που θα οδηγεί στην εύρεση των παραπάνω τιμών. Η εικόνα που δημιουργείται ονομάζεται ανηγμένη (=διορθωμένη) και η διαδικασία ονομάζεται φωτογραμμετρική αναγωγή. Η φωτογραμμετρική αναγωγή εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα καθώς μπορεί με ελάχιστο κόστος (μέτρηση ορισμένων μόνο σημείων που βρίσκονται στο οριζόντιο ή κατακόρυφο επίπεδο και μπορεί να προσδιοριστούν ακόμα και με χρήση των εμπειρικών τεχνικών αποτύπωσης) και χρόνο να δώσουν ένα προστιθέμενης αξίας προϊόν με τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Παρουσιάζει ένα συνεχές προϊόν
- Ενσωματώνεται με μεγάλη ευκολία σε ένα σύστημα ψηφιοποίησης CAD και οδηγεί πολύ εύκολα στο γραμμικό σχέδιο του μνημείου
- Με αναγωγή πολλών συνεχώς επικαλυπτόμενων εικόνων μπορεί να δημιουργηθεί ένα μωσαϊκό ανηγμένων εικόνων (φωτομωσαϊκό)

- Δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις σε υλικό του Η/Υ καθώς δεν είναι απαραίτητη η χρήση στερεοσκοπικού συστήματος παρατήρησης
- Μπορεί να χρησιμοποιηθούν φωτογραφικές εικόνες που έχουν ληφθεί από κοινές φωτογραφικές μηχανές (ακόμα και αναλογικές compact φωτογραφικές μηχανές)
- Μπορεί και μια μετροταινία να οδηγήσει στην υλοποίηση και μέτρηση των απαιτούμενων φωτοσταθερών για την τελική αναγωγή των εικόνων

Επίσης, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί η ανηγμένη εικόνα μιας φωτογραφικής λήψης έχοντας στη διάθεσή μας μία ή δύο το πολύ μετρήσεις με την προϋπόθεση ότι στην αρχική εικόνα παρουσιάζεται ένα αντικείμενο στο οποίο είναι υλοποιημένα δύο ζεύγη παράλληλων γραμμών στους άξονες του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων του χώρου. Στην περίπτωση αυτή γίνεται η χρήση των σημείων φυγής και της γεωμετρίας της κεντρικής προβολής για τον προσδιορισμό της θέσης της φωτογραφικής μηχανής σε σχέση με το αντικείμενο που εμφανίζει τα δύο ζεύγη των παράλληλων γραμμών των αξόνων. Επίσης, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν και οι γωνίες στροφής (ω, ϕ, κ) που σχηματίζουν οι άξονες της φωτογραφικής μηχανής σε σχέση με το επίπεδο αναγωγής και εφόσον είναι γνωστό ένα ευθύγραμμο τμήμα που εμφανίζεται παράλληλο σε ένα από τα δύο ζεύγη των αξόνων μπορεί να προσδιοριστούν οι 8 παράμετροι της εξίσωσης (24) που οδηγούν στη δημιουργία της ανηγμένης εικόνας. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει ανάγκη για μέτρηση φωτοσταθερών και υλοποίηση τους σε ένα 2D σύστημα συντεταγμένων. Έτσι η χρήση μιας φωτογραφικής μηχανής και μιας μετροταινίας μπορεί να οδηγήσει άμεσα και σε ελάχιστο χρόνο σε ένα προστιθέμενης αξίας φωτογραμμετρικό προϊόν που έχει τα ίδια πλεονεκτήματα με αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Ακόμα και σε περιπτώσεις που το αντικείμενο δεν είναι επίπεδο και υπάρχει ένα μικρό ανάγλυφο, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί η ψηφιακή αναγωγή των μεμονωμένων εικόνων ακόμα και με μικρή απώλεια μέρους της ακρίβειας του τελικού προϊόντος, προκειμένου να αποφευχθεί

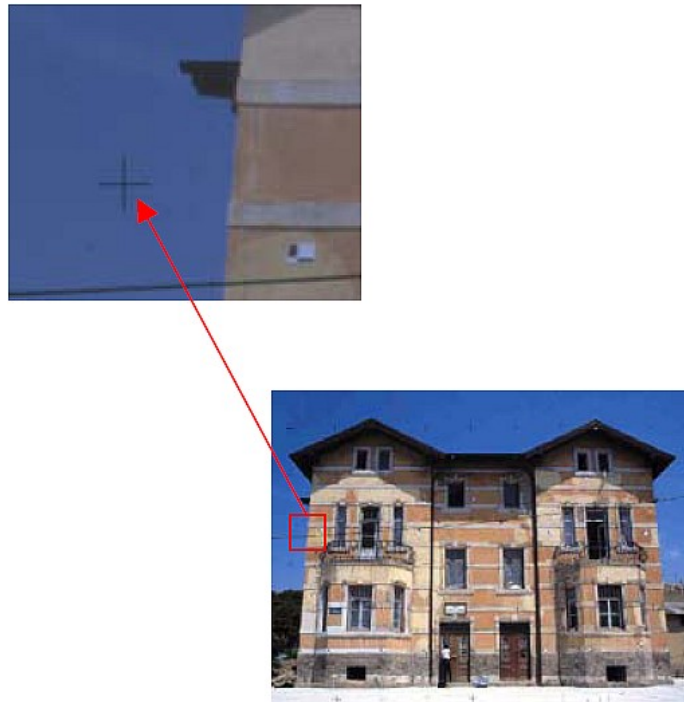
- η χρήση της στερεοσκοπικής επεξεργασίας εικόνων σε ψηφιακούς φωτογραμμετρικούς σταθμούς (ή σε προγράμματα πολυεικονικών συγκλινουσών λήψεων) αλλά και
- η μέτρηση φωτοσταθερών σημείων και την υλοποίηση ενός 3Δ συστήματος αναφοράς που αναπόφευκτα θα οδηγήσει στη χρήση των ακριβών μετρητικών οργάνων.

Οι τεχνικές που περιγράφηκαν παραπάνω αποτελούν τη βάση όλων των φωτογραμμετρικών εφαρμογών που μπορούν με χρήση μιας ή περισσότερων εικόνων να οδηγήσουν στην εξαγωγή αξιόπιστης μετρικής πληροφορίας του 3Δ χώρου.

Φωτογραμμετρικός Εξοπλισμός

Ο απαραίτητος υλικοτεχνικός εξοπλισμός για την εφαρμογή φωτογραμμετρικών τεχνικών για την ψηφιοποίηση μνημείων περιλαμβάνει τόσο φωτογραφικές μηχανές όσο και μετρητικές διατάξεις και εξειδικευμένα υπολογιστικά συστήματα που ονομάζονται Ψηφιακοί Φωτογραμμετρικοί Σταθμοί, αλλά και εφαρμογές λογισμικού με δυνατότητα επεξεργασίας εικόνας και δημιουργίας 3Δ μοντέλων από συγκλίνουσες φωτογραμμετρικές λήψεις εικόνων (convergent photogrammetry systems) ή δημιουργίας ανηγμένων εικόνων από προγράμματα ψηφιακής αναγωγής. Ο συνδυασμός των απαιτούμενων συσκευών και προγραμμάτων που θα οδηγήσει σε βέλτιστη και οικονομικότερη ψηφιοποίηση των μνημείων εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του μνημείου (π.χ. τις διαστάσεις, την υφή και το ανάγλυφό του) την τελική κλίμακα και τα απαιτούμενα φωτογραμμετρικά προϊόντα απόδοσης του.

Φωτομηχανές



Εικόνα 11 Σημεία resau και τεχνητά φωτοσταθερά σημεία

Μετρικές φωτογραφικές μηχανές είναι ο τεχνικός όρος που χρησιμοποιείται για να δηλώσει τις εξειδικευμένες αναλογικές (με χρήση φιλμ) φωτογραφικές μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές πριν την εμφάνιση της ψηφιακής τεχνολογίας και των ψηφιακών

αισθητήρων σε φωτογραφικές μηχανές. Η χρήση τους μάλιστα γινόταν σε ειδικά συστήματα αναλογικής επεξεργασίας (στους μονοσυγκριτές και στερεοσυγκριτές) ή αναλυτικά συστήματα (στερεοαναγωγείς). Η χρήση των συστημάτων αυτών διατηρήθηκε μέχρι τις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας (1990-2) οπότε σταδιακά αντικαταστάθηκαν από τους Ψηφιακούς Φωτογραμμετρικούς Σταθμούς και τα λογισμικά συγκλίνουσας μη στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας ή μονοσκοπικής επεξεργασίας φωτογραμμετρικών εικόνων. Η χρήση όμως των εικόνων από μετρικές μηχανές διατηρείται ακόμη και σήμερα καθώς με την ψηφιοποίηση των φωτογραφιών τους από μεγάλης ακρίβειας σαρωτές φωτογραφιών (ή αρνητικών) μπορεί να επεξεργαστούν σε σύγχρονα φωτογραμμετρικά συστήματα.

Οι μετρικές φωτογραφικές μηχανές διαφέρουν από τις κοινές φωτογραφικές μηχανές λόγω των υψηλών προδιαγραφών στην ποιότητα των φακών και στη σταθερότητα της εσωτερικής γεωμετρίας που αποτελεί προϋπόθεση για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας φωτογραμμετρικών προϊόντων. Σε εφαρμογές επίγειας φωτογραμμετρίας οι φωτογραφικές μηχανές χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη διάσταση του αρνητικού και από την καλή ποιότητα των φακών που στερούνται σχεδόν κάθε παραμόρφωσης σε αντιδιαστολή με τις κοινές φωτογραφικές μηχανές που παρουσιάζουν μεγάλη παραμόρφωση ιδιαίτερα στην άκρη του format. Μια από τις πλέον συνηθισμένες φωτομηχανές που χρησιμοποιήθηκαν είναι η WILD P31 με μέγεθος αρνητικού 10x12.5 cm και η WILD P32 με μικρότερη διάσταση αρνητικού (6x12 cm). Χαρακτηριστικό στοιχείο κάθε μετρικής φωτογραφικής μηχανής είναι σταθερή εστιακή απόσταση των φακών (δεν είναι δυνατόν να μεταβληθεί η εστιακή απόσταση ώστε να είναι περισσότερο ευδιάκριτα τα αντικείμενα και να γίνει σωστή εστίαση του ειδώλου) και η ύπαρξη ειδικών σημαδιών που ονομάζονται εικονοσήματα και χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του συστήματος μέτρησης των συντεταγμένων επάνω στο φωτογραφικό επίπεδο. Τα εικονοσήματα είναι υλοποιημένα χαρακτηριστικά σημάδια (σταυρονήματα) σε μία γυάλινη πλάκα που παρεμβάλλεται ανάμεσα στο σύστημα των φακών και το αρνητικό. Σε κάθε έκθεση του φιλμ στο φως μαζί με το αντικείμενο αποτυπώνεται στην ίδια πάντα θέση και το σταυρόνημα κάθε ενός από τα 4-5 εικονοσήματα που θα καθορίσουν την εσωτερική γεωμετρία της φωτομηχανής. Οι μετρικές μηχανές βαθμονομούνται πριν παραδοθούν στον τελικό τους χρήστη. Η διαδικασία βαθμονόμησης οδηγεί στον ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της και πρέπει να επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα στα εργαστήρια της εταιρείας.

Η χρήση των φωτογραφικών εικόνων που προέρχονται από μια μετρική φωτογραφική μηχανή πρέπει να ψηφιοποιηθούν προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε ένα σύγχρονο ψηφιακό φωτογραμμετρικό

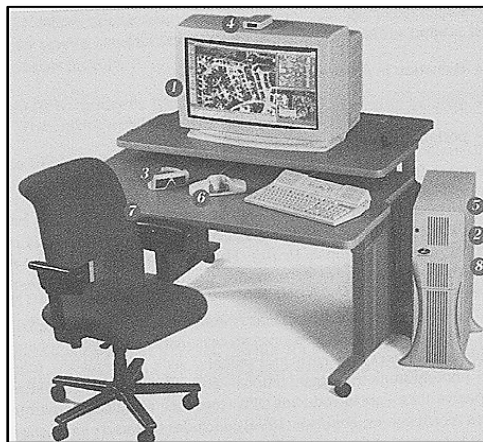
σύστημα. Η ψηφιοποίηση γίνεται από σαρωτές με ανάλυση της τάξης μέχρι και 4000dpi. Η ψηφιοποίηση είναι προτιμότερο να γίνεται απευθείας από το αρνητικό ή διαθετικό (slide) της φωτογράφισης, επειδή τυχόν εκτύπωση σε χαρτί της φωτογραφικής εικόνας μπορεί να οδηγήσει σε παραμορφώσεις των ειδώλων και ενδεχόμενα σφάλματα μετρήσεων.

Εκτός από τις μετρικές κάμερες μπορεί να χρησιμοποιηθούν και οι ημίμετρικές μηχανές που μοιάζουν με τις κοινές φωτογραφικές μηχανές (μεσαίου format, με διάσταση φιλμ 6x6 cm, π.χ. RolleiMetric 6008 series, <http://www.rollei.de>), στις οποίες όμως έχει προστεθεί μια γυάλινη πλάκα με ιδικά σταυρονήματα παρόμοια με αυτά των εικονοσημάτων που παίζουν τον ίδιο ρόλο (προσδιορίζουν την εσωτερική γεωμετρία της φωτομηχανής). Τα σημάδια αυτά ονομάζονται σημεία gesau και απέχουν απόσταση 1 ή 2 cm στο αρνητικό. Η θέση τους έχει προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια επάνω στη γυάλινη πλάκα (περίπου 1μm) και επομένως εμφανίζονται σε απόλυτα προσδιορισμένες θέσεις στην εκτυπωμένη φωτογραφία, το αρνητικό ή το διαθετικό (slide). Ο φακός των ημίμετρικών φωτομηχανών έχει σταθερές προσδιορισμένες θέσεις εστίασης για τις οποίες έχει προσδιοριστεί σχεδόν απόλυτα η εστιακή τους απόσταση. Επίσης έχει εκ των προτέρων προσδιοριστεί και η παραμόρφωση που επιφέρουν σε κάθε φωτογραφία. Οι ημίμετρικές φωτομηχανές έχουν βαθμονομηθεί πριν την πώληση τους σε ειδικά εργαστήρια της κατασκευάστριας εταιρείας ώστε να προσδιοριστούν όλες οι παράμετροι παραμορφώσεις των φωτογραφικών ειδώλων κατά τη στιγμή της αποτύπωσης της φωτογραφικής εικόνας. Τελευταία, η γερμανική εταιρεία Rollei έχει κατασκευάσει και ψηφιακές ημίμετρικές φωτογραφικές μηχανές με υψηλή ποιότητα φακών και σταθερή εσωτερική γεωμετρία. Ωστόσο, ακόμα και κοινές φωτογραφικές μηχανές και μάλιστα οι ψηφιακές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, λόγω της απουσίας του μηχανισμού κίνησης του αρνητικού και της σταθερής θέσης του ψηφιακού αισθητήρα, μπορούν μετά από μια διαδικασία βαθμονόμησης να οδηγήσουν σε ακριβή φωτογραμμετρικά προϊόντα. Η εστιακή απόσταση που χρησιμοποιείται στις φωτογραφικές λήψεις μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια εφόσον είναι αμετάβλητη από λήψη σε λήψη (επεξεργασία στερεοζεύγους εικόνων) και υπάρχουν αρκετά σημεία ελέγχου (φωτοσταθερά) ώστε να οδηγηθούμε μέσω της διαδικασίας που ονομάζεται αυτοβαθμονόμηση στον προσδιορισμό όχι μόνο της εσωτερικής γεωμετρίας της μηχανής και των παραμέτρων ακτινικής παραμόρφωσης των φακών (παράμετροι βαθμονόμησης) αλλά και της θέσης (εξωτερικού προσανατολισμού) στο χώρο που είναι απαραίτητη για την εξαγωγή μετρήσεων από στερεοσκοπικές φωτογραφικές εικόνες ενός στερεομοντέλου.

Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές που προτιμώνται είναι οι dSLR(digital Single Lens Reflex) μηχανές. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η ανταγωνιστικότητα μεταξύ των κατασκευαστριών εταιρειών έχει ωθήσει στην κατασκευή αισθητήρων υψηλής ανάλυσης και ποιότητας. Η επιλογή της φωτομηχανής που θα χρησιμοποιηθεί (μετρική, ημιμετρική, ψηφιακή, αναλογική) εξαρτάται από τη χρήση της σε στερεοσκοπική ή μονοσκοπική εφαρμογή και την απαιτούμενη τελική ακρίβεια των φωτογραμμετρικών προϊόντων. Σημαντικό ρόλο παίζει η ανάλυση της ψηφιακού αισθητήρα εφόσον είναι ψηφιακή ή το μέγεθος του format αν πρόκειται για αναλογική (μετρική, ημιμετρική ή απλή αναλογική). Η μέση κλίμακα της φωτογράφισης που συνδέεται άμεσα με την ανάλυση της φωτογραφικής εικόνας σε μονάδες εδάφους, θα καθορίσει και την απόσταση φωτογράφισης, δηλαδή τη μέση απόσταση του αντικειμένου από το φωτογραφικό φακό. Συνήθως η κλίμακα φωτογράφισης είναι της τάξης του 1:200 ή μεγαλύτερη με σκοπό να δημιουργηθούν φωτογραμμετρικά προϊόντα κλίμακας 1:50 ή μεγαλύτερης. Μια προσεγγιστική σχέση που δίνει την κλίμακα της φωτογράφισης προκύπτει από το λόγο της εστιακής απόστασης προς την απόσταση του φακού από το προς μελέτη αντικείμενο ($1/H = c/H$). Για μια φωτογραφική μηχανή με εστιακή απόσταση 28mm η κλίμακα φωτογράφισης 1:200 ορίζει απόσταση από το αντικείμενο περίπου $0.028*200= 5.6m$.

Ψηφιακοί Φωτογραμμετρικοί Σταθμοί

Οι Ψηφιακοί Φωτογραμμετρικοί Σταθμοί (ΨΦΣ) είναι εξειδικευμένοι Η/Υ που έχουν τη δυνατότητα να επεξεργάζονται στερεομοντέλα φωτογραμμετρικών εικόνων και να παρέχουν σχεδιαστικές λεπτομέρειες με τη χρήση ενός ειδικού υποσυστήματος υλικού (hardware module) στερεοσκοπικής παρατήρησης.



Εικόνα 12 Ψηφιακός Φωτογραμμετρικός Σταθμός

Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι

- Αρχαιοθήτηση (archiving): μπορούν να αποθηκεύουν και να διαχειρίζονται αρχεία εικόνων και να εκτελούν συμπίεση και αποσυμπίεση τους.
- Επεξεργασία (processing): μπορούν να εκτελούν βασικές διαδικασίες επεξεργασίας εικόνων όπως βελτίωση και δειγματοληψία (resampling).
- Εμφάνιση (display) και μετακίνηση (roaming): μπορούν να εμφανίσουν εικόνες ή τμήματά τους, να εκτελούν μεγέθυνση και σμίκρυνση τους και να μετακινούν τη θέση παρατήρησης στα στερεομοντέλα των εικόνων
- 3Δ μέτρηση σημείων (3D measurement): διαδραστική μέτρηση σημείων και χαρακτηριστικών με σφάλμα μικρότερο του μεγέθους του εικονοστοιχείου
- Σχεδίαση: Τοποθέτηση των μετρημένων σημείων και των χαρακτηριστικών λεπτομερειών επάνω στο στερεομοντέλο των εμφανιζόμενων εικόνων.

Το εξειδικευμένο υλικό είναι σε θέση να προβάλλει 3Δ τις εικόνες ενός στερεομοντέλου κάνοντας χρήση ειδικού οπτικού συστήματος με χρήση ενεργητικής ή παθητικής πόλωσης εικόνων (polarization). Η στερεοσκοπική όραση επίσης είναι σε θέση να αποτρέψει λανθασμένη ψηφιοποίηση από πλευράς χειριστή του Ψηφιακού Φωτογραμμετρικού Σταθμού καθώς είναι σχεδόν απίθανο να γίνει λανθασμένη στερεοσκοπική παρατήρηση και να οδηγήσει σε λάθος υπολογισμό των μετρήσεων στο εικονιζόμενο αντικείμενο.

Οι Ψηφιακοί Φωτογραμμετρικοί Σταθμοί ενσωματώνουν εφαρμογές αυτόματης σχεδίασης και με κατάλληλο χειρισμό οδηγούν σε πλήρη ψηφιοποίηση των λεπτομερειών ενός μνημείου. Έτσι μπορεί να παραχθούν άμεσα τα αρχεία σχεδίασης που με εκτύπωσή τους υπό κλίμακα περιγράφουν το 3Δ μοντέλο του υπό μελέτη αντικειμένου.

Επίσης, συνοδεύονται από λογισμικό που αυτοματοποιεί πολλές διαδικασίες όπως πχ. αυτόματο προσανατολισμό ή αυτόματη δημιουργία του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους που αποτελεί ένα σύνηθες φωτογραμμετρικό προϊόν, κυρίως σε εφαρμογές χαρτογραφήσεων μεγάλης και μικρής κλίμακας (σε ένα μεγάλο αρχαιολογικό χώρο ή σκάμμα). Οι περισσότερες φωτογραμμετρικές εφαρμογές που επιλύονται σε ΨΦΣ είναι από αέρα (με την φωτογραφική μηχανή να ίπταται πάνω από το αντικείμενο μελέτης – αεροφωτογράφιση) αλλά υπάρχουν και αρκετές περιπτώσεις που επίγειες λήψεις μπορεί να ψηφιοποιηθούν σε ένα ΨΦΣ.

Πολλοί επεξεργαστικά πανίσχυροι φωτογραμμετρικοί σταθμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές επίγειας και από αέρα φωτογραμμετρίας έχουν κατασκευαστεί και χρησιμοποιούνται παγκοσμίως από τις εταιρείες Z/I Imaging (ImageStation SSK), Bae Systems (SocketSet), DVP GS, Inc (DVP).

Λογισμικό Συγκλίνουσας Φωτογραμμετρίας (Convergent Photogrammetry) ή Πολυεικονικής Μη Στερεοσκοπικής Φωτογραμμετρίας

Η στερεοσκοπική όραση δεν είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ψηφιοποίηση ενός 3Δ αντικειμένου. Χρησιμοποιείται για την αποφυγή χονδροειδών σφαλμάτων κατά την ψηφιοποίηση σε ΨΦΣ λόγω της δυνατότητας στερεοσκοπικής όρασης των προς ψηφιοποίηση σημείων και βελτιώνει την ακρίβεια στη συλλογή των ομόλογων σημείων. Εφόσον έχει προσδιοριστεί ο εξωτερικός προσανατολισμός για κάθε εικόνα και είναι γνωστή η εσωτερική γεωμετρία της μηχανής λήψης μπορεί με χρήση δύο ζευγών εξισώσεων της μορφής (23) να οδηγηθούμε στον προσδιορισμό των σημείων λεπτομερειών ενός αντικειμένου στον 3Δ χώρο. Επιπλέον, είναι δυνατόν να εκμεταλλευτούμε μερικά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που πιθανόν μοντελοποιούνται με τη μορφή μαθηματικών εξισώσεων για μερικά σημεία λεπτομερειών. Πολλά σημεία για παράδειγμα δημιουργούν ένα κατακόρυφο επίπεδο (XZ ή YZ) μιας όψης ενός κτηρίου. Πολλά προγράμματα συγκλίνουσας φωτογραμμετρικής επεξεργασίας ή αλλιώς μη στερεοσκοπικής επεξεργασίας φωτογραμμετρικών εικόνων χαρακτηρίζονται από την απλότητα του χειρισμού και είναι σε θέση με ελάχιστες μετρήσεις (π.χ. τη μέτρηση μιας οριζόντιας ή κατακόρυφης απόστασης) να δώσουν το πλήρες 3Δ μοντέλο του εικονιζόμενου αντικειμένου. Ένα αρκετά δημοφιλές φωτογραμμετρικό πρόγραμμα συγκλίνουσας φωτογραμμετρίας είναι το CDW της RolleiMetric που έχει σχεδιαστεί ειδικά για την φωτογραμμετρική επεξεργασία εξειδικευμένων μετρικών φωτομηχανών μεσαίου format (μέγεθος αρνητικού 6x6cm) και διαθέτουν ιδιαίτερα κατασκευαστικά στοιχεία για περισσότερη ακρίβεια μετρήσεων. Επίσης, το PhotoModeler της εταιρείας EOS Systems Inc©, το 3D Builder της 3D Construction Company, το FotoG™ της Εταιρείας Vexcel, το iWitness της PhotoMetrix, το ShapeCapture της ShapeQuest Inc., και το Image Modeler 4.0 της Εταιρείας RealVis ενσωματώνουν όλες τις φωτογραμμετρικές τεχνικές και επιπλέον ενισχύονται με γεωμετρικές συνθήκες (συνεπιπεδότητας, κ.α.) που μερικά σημεία, γραμμές ή επίπεδα υλοποιούν έτσι ώστε να ενισχύεται η ακρίβεια στον υπολογισμό των σημείων χωρίς να είναι απαραίτητες ακριβείς μετρήσεις (φωτοσταθερών) όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ΨΦΣ. Τα προγράμματα συγκλίνουσας φωτογραμμετρίας συνοδεύονται από βασικές διαδικασίες ψηφιοποίησης, αυτοματοποιημένης

σχεδίασης (εξαγωγή σε αρχείο DXF) και δημιουργίας Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, ενώ μερικά από αυτά έχουν τη δυνατότητα επιπλέον να δημιουργούν και να εξαγουν το 3Δ μοντέλο σε αρχείο VRML.

Γενικές παρατηρήσεις για την εφαρμογή φωτογραμμετρικών μεθόδων για την αποτύπωση μνημείων - χώρων

Η φωτογραμμετρία είναι μια επιστήμη έμμεσης μέτρησης μεγεθών ενός πραγματικού αντικειμένου μέσω της παρατήρησης της εικόνας του (ή των εικόνων του για την περίπτωση της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας). Ωστόσο για την εφαρμογή της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας που οδηγεί σε υπολογισμό των συντεταγμένων πρέπει να προηγηθεί η φωτογραμμετρική οπισθοτομία. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η γνώση της θέσης τριών τουλάχιστον σημείων στο χώρο και η παρατήρησή τους σε μία εικόνα δημιουργεί ένα σύστημα με έξι εξισώσεις και έξι αγνώστους που είναι οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας, δηλαδή της θέσης της μηχανής (και συγκεκριμένα του κέντρου του φακού της) και στροφής των αξόνων της ως προς τους άξονες του επίγειου συστήματος. Τα σημεία που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης και των στροφών της φωτομηχανής και μετρώνται με μεγάλη ακρίβεια σε ένα αυθαίρετο τρισσορθόγωνιο επίγειο σύστημα συντεταγμένων λέγονται φωτοσταθερά. Τα φωτοσταθερά μπορεί να είναι είτε ευδιάκριτες λεπτομέρειες (χαρακτηριστικά σημεία του κτιρίου πχ γωνία ενός παραθύρου στην όψη ενός κτιρίου) στην επιφάνεια του αντικειμένου ή προσημασμένοι στόχοι υλοποιημένοι σε χαρτί ή άλλο φορέα (πχ αλουμίνιο) και τοποθετημένοι πάνω στο αντικείμενο ώστε να καλύπτουν το σύνολο της περιοχής του αντικειμένου που εμφανίζεται στις εικόνες. Το επίγειο σύστημα συντεταγμένων μπορεί να είναι αυθαίρετο και υλοποιείται από τη θέση των φωτοσταθερών που είναι δυνατόν να μετρηθούν με χρήση ενός τοπογραφικού οργάνου (γεωδαιτικού σταθμού) όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η ίδια απαίτηση για την ύπαρξη φωτοσταθερών αφορά και τον προσδιορισμό των οκτώ άγνωστων παραμέτρων των εξισώσεων της μορφής (23) που εφαρμόζονται στην μονοσκοπική φωτογραμμετρία.

Είναι απαραίτητο λοιπόν για τη χρήση οποιασδήποτε φωτογραμμετρικής διαδικασίας να υπάρχει ένας ελάχιστος αριθμός μετρημένων σημείων στο χώρο που παρατηρούνται στις εικόνες. Γιατί, λοιπόν εφόσον γίνονται κάποιες μετρήσεις να μην αποτυπώνεται ολοκληρωτικά ένα αντικείμενο με χρήση κοινών τοπογραφικών οργάνων ή άλλων μετρήσεων;

Το σύνολο των μετρήσεων που γίνονται με τη βοήθεια του Η/Υ στις εικόνες είναι πολύ μεγαλύτερο από τις ελάχιστες μετρήσεις και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνονται οι μετρήσεις είναι πολύ

καλύτερες. Οι συνθήκες είναι πολύ πιο ευνοϊκές όταν γίνονται στο γραφείο μπροστά στην οθόνη του Η/Υ με όλες τις ανέσεις που αυτό παρέχει (κλιματισμός, άνεση, κατάλληλος φωτισμός, κ.α.) παρά όταν γίνονται κάτω από τον καλοκαιρινό ήλιο του Αυγούστου ή κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων σε μια αρχαιολογική ανασκαφή με χρήση μετροταινίας και αλφαδολάστιχου.

Οι μετρήσεις που απαιτούνται για την φωτογραμμετρική επίλυση των εικόνων γίνονται συνήθως με τη χρήση τοπογραφικών οργάνων (γεωδαιτικών σταθμών) έτσι ώστε η ακρίβεια μέτρησης να είναι αρκετά υψηλή και της ίδιας τάξης μεγέθους με τη διάσταση του εικονοστοιχείου (pixel) στο έδαφος ώστε να μην υποβαθμίζεται η τελική ακρίβεια των φωτογραμμετρικών προϊόντων.

Εάν το μέγεθος του εικονοστοιχείου (pixel) στο έδαφος που καθορίζεται από τη μέση κλίμακα των εικόνων (δηλαδή από το λόγο της εστιακής απόστασης προς την απόσταση της φωτογράφισης) και την ανάλυση του αισθητήρα (ή της ανάλυσης σάρωσης της φωτογραφίας ή του αρνητικού) είναι 1cm τότε η μεταβλητότητα που εκφράζει την ακρίβεια των μετρήσεων δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή αυτή. Σε πολλές περιπτώσεις μεταβλητότητες πάνω από 1cm, μπορεί να οδηγήσουν σε αποδεκτά φωτογραμμετρικά προϊόντα αν η τελική εκτύπωση των σχεδίων γίνεται σε τέτοια κλίμακα που το σφάλμα των μετρήσεων να μην είναι ορατό. Το μέγιστο ανεκτό σχεδιαστικό σφάλμα ενός υπό κλίμακα σχεδίου είναι της τάξης των 0.2-0.3 mm οπότε, για κλίμακα απόδοσης 1:50 το σφάλμα του 1cm οδηγεί σε σχεδιαστικό σφάλμα 0.2 mm που είναι μικρότερο του κάτω ορίου του σχεδιαστικού σφάλματος και επομένως είναι αποδεκτό. Τα σημεία που μετρώνται πρέπει να καλύπτουν όσο το δυνατόν καλύτερα το σύνολο του αντικειμένου που είναι ορατό στην επικαλυπτόμενη περιοχή του στερεοζεύγους (αν πρόκειται για στερεοσκοπική εφαρμογή) ή το κτίριο συνολικά σε μια μονοσκοπική εφαρμογή. Λόγω της χρήσης τοπογραφικών μεθόδων για τη μέτρηση των φωτοσταθερών η επιστήμη της τοπογραφίας έχει παίξει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της επιστήμης της Φωτογραμμετρίας. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι η επιστήμη της Φωτογραμμετρίας ονομάζεται και Φωτοτοπογραφία στην ελληνική ορολογία και διδάσκεται ως επί το πλείστον στα τμήματα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών των Πολυτεχνικών Σχολών της χώρας. Τα τελευταία χρόνια όμως λόγω της εξέλιξης των Η/Υ και της χρήσης τους για την επίλυση φωτογραμμετρικών προβλημάτων η Φωτογραμμετρία αποτελεί ένα κοινό τόπο μελέτης και εφαρμογών για πολλές επιστήμες κυρίως των Τμημάτων των Πολυτεχνικών Σχολών όπως πχ. Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, Αρχιτεκτόνων Μηχανικών και Πολιτικών Μηχανικών. Σε πολλές περιπτώσεις βέβαια που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, δεν είναι απαραίτητη η χρήση ενός ακριβούς τοπογραφικού οργάνου για τη συλλογή μετρήσεων για την φωτογραμμετρική επίλυση αλλά αρκούν ελάχιστες μετρήσεις

αποστάσεων στην όψη ενός μνημείου που γίνονται με χρήση μετροταινίας ενώ ταυτόχρονα γίνονται μερικές παραδοχές συνθηκών (καθετότητα και παραλληλία γραμμών και επιπέδων) που ικανοποιούν χαρακτηριστικά σημεία του αντικειμένου. Στην περίπτωση αυτή η ακρίβεια είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή που επιτυγχάνεται με χρήση τοπογραφικών οργάνων αλλά και πάλι αν οι απαιτήσεις της ακρίβειας του τελικού προϊόντος είναι σχετικά μικρές είναι δυνατόν οι συγκεκριμένες μετρήσεις να αποδώσουν ικανοποιητικά το τελικό φωτογραμμετρικό προϊόν.

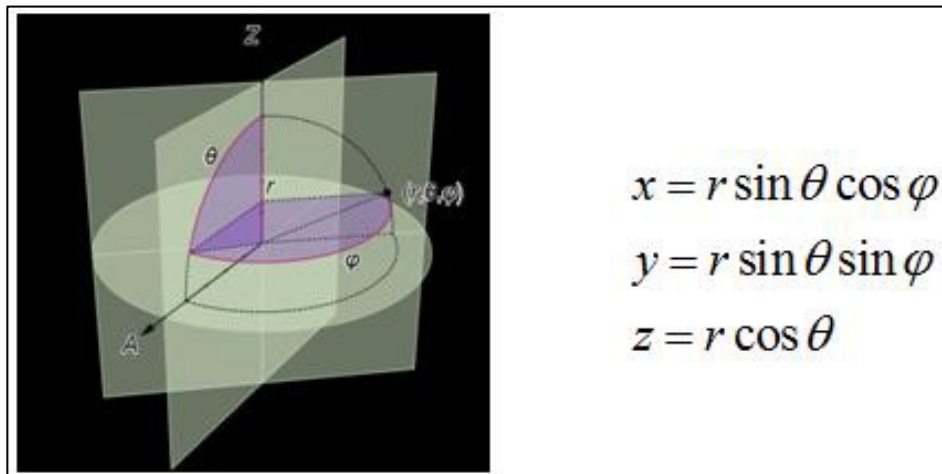
Επίγεια και από αέρα φωτογραμμετρία

Η φωτογραμμετρική επιστήμη μπορεί να διαχωριστεί σε επίγεια και από αέρα φωτογραμμετρία. Η από αέρα φωτογραμμετρία ασχολείται με θέματα που αφορούν τη χαρτογράφηση σε μικρές συνήθως κλίμακες της γήινης επιφάνειας με χρήση φωτογραφιών που προέρχονται από φωτομηχανές που ίπτανται σε μεγάλο σχετικό ύψος πάνω από τη επιφάνεια της Γης. Η επίγεια φωτογραμμετρία ασχολείται με ψηφιοποίηση αντικειμένων που βρίσκονται σε μικρή απόσταση (κάτω από 100m) από το φωτογραφικό φακό και οι κλίμακες αποτύπωσης είναι μεγαλύτερη ή ίση του 1:100. Οι 3Δ ψηφιοποιήσεις των ακίνητων μνημείων αφορούν μεγάλες κλίμακες και αντικείμενα που η φωτογράφησή τους γίνεται (συνήθως) όχι από αέρα αλλά επίγεια. Ωστόσο, οι τεχνικές της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας που χρησιμοποιούνται συνήθως δεν διαφέρουν αν τα αντικείμενα και η φωτογράφησή είναι επίγεια. Η αποτύπωση μνημείων – χώρων γίνεται συνήθως με χρήση επίγειων φωτογραμμετρικών τεχνικών. Ωστόσο, και στη καταγραφή μνημείων – χώρων είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές αεροφωτογραμμετρίας ιδιαίτερα όταν απαιτείται η δημιουργία τοπογραφικών διαγραμμάτων/χαρτών για μεγάλους αρχαιολογικούς χώρους – κάστρα κ.λ.π. οπότε και η κλίμακα αποτύπωσης είναι σχετικά μικρή (1:2000, 1:500).

1.2.4 Ψηφιοποίηση με χρήση τεχνικών σάρωσης λέιζερ ή τριγωνισμού

Τα τελευταία χρόνια νέα όργανα μετρήσεων έχουν εισαχθεί στις επιστήμες των αποτυπώσεων χώρων τα οποία είναι σε θέση να μετρήσουν και να ανακατασκευάσουν τον 3Δ χώρο και τα αντικείμενα των διάφορων μορφών και μεγεθών με έναν γρήγορο και οικονομικό τρόπο. Αυτά τα όργανα, βασισμένα στην τεχνολογία λέιζερ, είναι συνήθως γνωστά ως επίγειοι 3Δι Ανιχνευτές Λέιζερ (3D λέιζερ scanner). Εκτός από τους 3Δ ανιχνευτές λέιζερ υπάρχουν και συσκευές που σαρώνουν μόνο οριζόντια ή κατακόρυφα ένα μνημείο – χώρο και μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι συσκευές ονομάζονται λέιζερ profilers και χρησιμοποιούνται με σημαντική επιτυχία για τη δημιουργία σχεδιαγραμμάτων κατόψεων και

τομών των εσωτερικών χώρων των μνημείων. Η βασική λειτουργία ενός σαρωτή λέιζερ είναι η συλλογή σημείων από το προς μελέτη αντικείμενο. Αυτό επιτυγχάνεται με την εκπομπή ακτινοβολίας προς το αντικείμενο και την καταγραφή των πολικών συντεταγμένων (θ , ϕ , r) σε ένα σύστημα αναφοράς με αρχή των αξόνων το μηχανικό κέντρο του σαρωτή. Συνήθως υπάρχει ένα σύστημα κατόπτρων τα οποία εκτρέπουν την ακτινοβολία και την κατευθύνουν προς το αντικείμενο. Η οριζόντια γωνία ϕ και η κατακόρυφη θ είναι γνωστές, καθώς είναι γωνίες στροφής των περιστρεφόμενων τμημάτων του σαρωτή. Έτσι με τη μέτρηση της απόστασης r είναι γνωστή η θέση του σημείου στο σφαιρικό σύστημα αναφοράς το οποίο μετασχηματίζεται σε ένα 3Δ καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με την αρχή των αξόνων του να ταυτίζεται με αυτή του σφαιρικού συστήματος. Στη πραγματικότητα η αρχή λειτουργίας ενός σαρωτή λέιζερ είναι ίδια με αυτή ενός γεωδαιτικού σταθμού (total station), με τη διαφορά ότι για την απόδοση του αντικειμένου καταγράφεται πλήθος σημείων (νέφος) και όχι μεμονωμένα σημεία. Στο εσωτερικό των σύγχρονων σαρωτών λέιζερ βρίσκεται μία ψηφιακή φωτογραφική μηχανή για τη διευκόλυνση των μετρήσεων και την απόδοση της χρωματικής υφής στα σημεία.



Εικόνα 13 Σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων και εξισώσεις μετασχηματισμού σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα και Χαρακτηριστικά

- Κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου ανίχνευσης λέιζερ είναι:
- Είναι ταχύτατη και αξιόπιστη μέθοδος αποτύπωσης
- Παρέχει ακριβέστερα προϊόντα από οποιαδήποτε άλλη μεθοδολογία
- Απαιτεί λιγότερη προεπεξεργασία αλλά και μικρότερο χρόνο εργασίας στο γραφείο

- Συνδυάζει την ακρίβεια της τοπογραφικής αποτύπωσης και την πληρότητα και συνέχεια αποτύπωσης της φωτογραμμετρικής
- Παρέχουν μεταβλητή ανάλυση στο έδαφος ανάλογα με την απαιτούμενη ακρίβεια του τελικού προϊόντος
- Παρέχει συνολική αποτύπωση των 3D αντικειμένων χωρίς επιπλέον κόπο ή χρόνο εργασίας
- Το κόστος αγοράς εξοπλισμού είναι μεγάλο ενώ το κόστος της αποτύπωσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα χαμηλό λόγω του μειωμένου χρόνου παραμονής των ειδικευμένων επιστημόνων στο τόπο καταγραφής και του περιορισμένου αριθμού εργατωρών που απαιτούνται για τη δημιουργία του συνολικού 3D μοντέλου

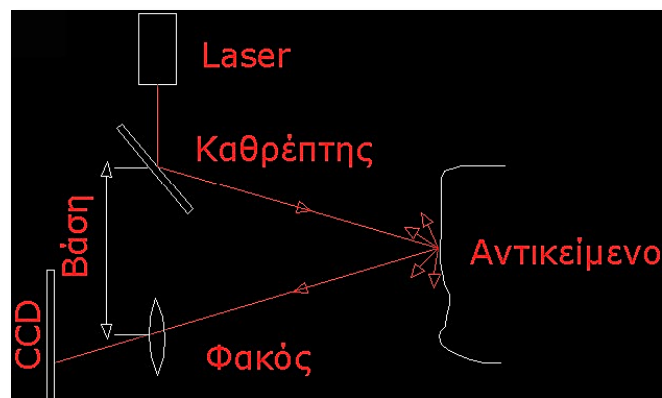
Τα σημεία που θα μετρηθούν δεν προσδιορίζονται από το χειριστή του οργάνου αλλά προκύπτουν τυχαία και το μόνο που καθορίζεται είναι το βήμα της οριζόντιας και κατακόρυφης ανάλυσης μετρήσεων.

Τεχνικές ανίχνευσης

Οι γωνίες διεύθυνσης της ακτίνας λέιζερ μαζί με τη μετρημένη απόσταση ανάμεσα στον πομπό της ακτίνας και του σημείου που την ανακλά πίσω στο δέκτη του ανιχνευτή μπορεί να οδηγήσει με χρήση του πρώτου θεμελιώδους προβλήματος της Τοπογραφίας και των σχέσεων της Τριγωνομετρικής Υψομετρίας σε υπολογισμό των καρτεσιανών συντεταγμένων των σημείων στα οποία προσπίπτει η ακτίνα λέιζερ, εφόσον είναι γνωστή η στάση (θέση του οργάνου) στο καρτεσιανό τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων.

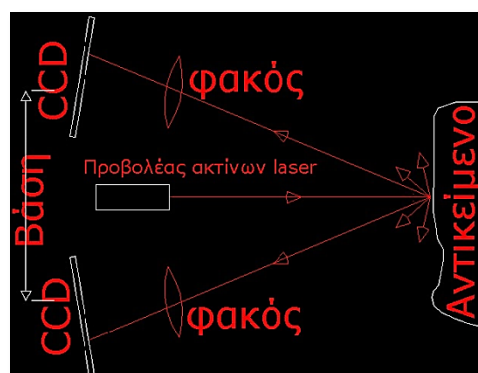
Οι τεχνικές ανίχνευσης διαχωρίζονται ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στην πηγή της ακτίνας λέιζερ και τα σαρωμένα σημεία του χώρου. Ο τρόπος προσδιορισμού της απόστασης μπορεί να είναι ένας από τους τρεις παρακάτω:

- **Τριγωνισμού.** Ο ανιχνευτής κάνοντας χρήση της μεγάλης οπτικής ευκρίνειας μιας δέσμης λέιζερ που προβάλλεται επί του αντικειμένου και με χρήση εξισώσεων φωτογραμμετρίας υπολογίζει τη θέση του κάθε σημείου που φωτίζεται από την ακτίνα λέιζερ στον 3Δ χώρο. Σημαντικό ρόλο στην επιτυχημένη λειτουργία του ανιχνευτή λέιζερ είναι η ύπαρξη των κατάλληλων συνθηκών φωτισμού του αντικειμένου καθώς η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στον εντοπισμό του στίγματος της ακτίνας λέιζερ στην εικόνα του αντικειμένου που συλλαμβάνεται από τον ενσωματωμένο οπτικό αισθητήρα CCD.



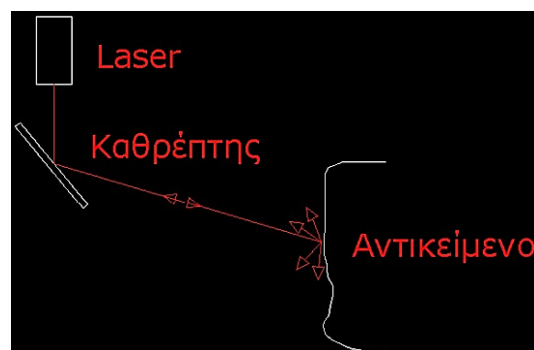
Εικόνα 14 Μέθοδος τριγωνισμού για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων

Σε μερικές μάλιστα περιπτώσεις υπάρχουν δύο οπτικοί αισθητήρες CCD που με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας μπορεί να εντοπίσει στο χώρο ένα σημείο εφόσον ανιχνευτούν οι εικονοσυντεταγμένες του σε δύο εικόνες των οποίων η σχετική θέση είναι γνωστή (απέχουν κατά μία γνωστή απόσταση που ονομάζεται και βάση).



Εικόνα 15 Μέθοδος τριγωνισμού για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων στο 3Δ χώρο με χρήση δύο οπτικών αισθητήρων.

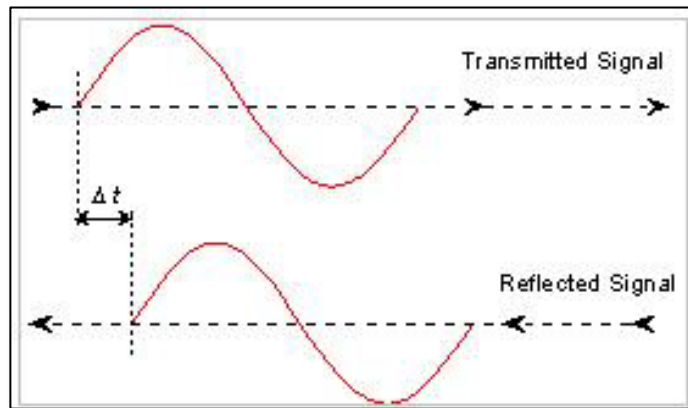
- **Χρόνος της πτήσης ενός παλμού λέιζερ.** Ένας παλμός λέιζερ εκπέμπεται προς το αντικείμενο και η απόσταση μεταξύ της συσκευής αποστολής σημάτων και της επιφάνειας του αντικειμένου υπολογίζεται από το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της μετάδοσης και της υποδοχής του παλμού. Αυτή η αρχή είναι ευρέως γνωστή από τα ηλεκτρονικά ταχύμετρα (Γεωδαιτικός Σταθμός). Στην πραγματικότητα, ένα ταχύμετρο θα μπορούσε να προγραμματιστεί ώστε να λειτουργεί όπως η συσκευή σάρωσης. Η ταχύτητα μέτρησης όμως θα ήταν πολύ χαμηλή, λόγω της χαμηλής απόκρισης του οργάνου. Οι σαρωτές χρησιμοποιούν μικρά περιστρεφόμενα κάτοπτρα για τη γωνιακή εκτροπή της ακτίνας λέιζερ (τουλάχιστον για μια από τις δύο γωνίες) και απλούστερους αλγορίθμους χρήσης για τον υπολογισμό της απόστασης που μπορεί να οδηγήσει σε υπολογισμό της μετρημένης απόστασης με μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι χαρακτηριστικές τιμές της απόκλισης των μετρήσεων απόστασης από τους ανιχνευτές που χρησιμοποιούν την τεχνική Time of Flight είναι της τάξεως μερικών χιλιοστών. Δεδομένου ότι οι αποστάσεις είναι σχετικά μικρές, αυτή η ακρίβεια είναι σχεδόν η ίδια για ολόκληρο τον 3Δ χώρο. Η 3Δ ακρίβεια επηρεάζεται επίσης από την ακρίβεια της γωνιακής μέτρησης της ακτίνας που είναι της τάξης των εκατοστών του βαθμού (g).



Εικόνα 16 Αρχή λειτουργίας της Time of flight τεχνικής 3Δ ανίχνευσης

- **Σύγκριση φάσης.** Αυτή η μέθοδος είναι επίσης ευρέως γνωστή από τα ταχυμετρικά όργανα. Σε αυτήν την περίπτωση, η εκπεμπόμενη ακτίνα διαμορφώνεται από ένα αρμονικό κύμα και η απόσταση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη διαφορά φάσης μεταξύ του κύματος αποστολής και λήψης. Από άποψη λειτουργικότητας, η μέθοδος δεν είναι πολύ διαφορετική από τη μέθοδο χρόνου πτήσης (Time of Flight). Λόγω της πολυπλοκότερης ανάλυσης των σημάτων, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι ακριβέστερα (σε βάρος όμως του συνολικού αριθμού των μετρούμενων σημείων αλλά και της μέγιστης μετρούμενης απόστασης). Δεδομένου ότι απαιτείται ένα καλά καθορισμένο σήμα επιστροφής για τον υπολογισμό των αποστάσεων, οι

ανιχνευτές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο σύγκρισης φάσης μπορεί να έχουν μειωμένη εμβέλεια και να τείνουν να παράγουν περισσότερα λανθασμένα ή αποκλεισμένα από τις ανοχές σε σφάλματα μετρήσεων.



Εικόνα 17 Αρχή λειτουργίας της phase comparison μεθόδου

Ενώ τα όργανα ανιχνευτών λέιζερ βασισμένα στη αρχή του τριγωνισμού (triangulation) και τους υψηλούς βαθμούς ακρίβειας (λιγότερο από 1 χιλιοστόμετρο σφάλμα απόδοσης) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από τη δεκαετία του '80, τα όργανα που στηρίζονται στην τεχνική του υπολογισμού του χρόνου πτήσης (Time of Flight) και σύγκρισης φάσης (Phase Comparison) έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί ευρέως για μετρικές εφαρμογές σάρωσης μόνο τα τελευταία 5 χρόνια.

Στην ουσία ο ανιχνευτής λέιζερ αποτελεί τη φυσική μετεξέλιξη των γεωδαιτικών σταθμών (Total station) με δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων χωρίς ανακλαστήρα. Η χρήση ενός μηχανισμού περιστροφής της μετρητικής διάταξης γύρω από των οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα περιστροφής του οργάνου έδωσε τη δυνατότητα της αυτόματης μέτρησης εκατομμυρίων σημείων χωρίς να είναι απαραίτητη η σκόπευση τους από το χειριστή του οργάνου.

Για όλα τα σαρωμένα σημεία του 3Δ χώρου στα οποία προσπίπτει η ακτίνα λέιζερ επιτυγχάνεται μια μέτρηση της απόστασης σε σχέση με μια γνωστή διεύθυνση: Οι συντεταγμένες X, Y και Z ενός σημείου μπορούν να υπολογιστούν για κάθε καταγραμμένη απόσταση-διεύθυνση.

Οι ανιχνευτές λέιζερ επιτρέπουν την καταγραφή εκατομμυρίων σημείων του χώρου σε λίγα μόνο λεπτά. Λόγω της πρακτικότητας και της ευκολίας χρήσης τους, αυτά τα είδη των οργάνων

χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα στον τομέα της αρχιτεκτονικής, αρχαιολογικής και περιβαλλοντικής έρευνας.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι επίγειοι ανιχνευτές λέιζερ μπορεί να θεωρηθούν ως εξειδικευμένοι αυτόματοι γεωδαιτικοί σταθμοί. Αντίθετα όμως από τους κοινούς Γεωδαιτικούς Σταθμούς, όπου ο χειριστής επιλέγει άμεσα τα σημεία που μετρώνται, οι ανιχνευτές λέιζερ ανακτούν τυχαία ένα πυκνό σύνολο μετρημένων σημείων. Ο χειριστής επιλέγει μόνο το τμήμα του αντικειμένου που επιθυμεί να σαρωθεί και την πυκνότητα των σημείων που επιθυμεί στην σάρωση αυτή (συνήθως το γωνιακό βήμα της ανίχνευσης στα κάθετα και οριζόντια επίπεδα μπορεί να επιλεγεί από το χειριστή).

Μόλις δοθούν αυτές οι τιμές, η σάρωση ξεκινά αυτόματα. Από τα αποτελέσματα και μετά από κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία των μετρήσεων των γωνιών οριζόντιας και κατακόρυφης διεύθυνσης και της απόστασης που διήνυσε η ακτίνα λέιζερ, προκύπτουν οι καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων της σάρωσης που αποτελείται από ένα πολύ πυκνό σύννεφο μετρημένων σημείων (που καλείται και DDSM – Dense Digital Surface Model δηλαδή πυκνό ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας). Για κάθε σημείο του μοντέλου του αντικειμένου παράγονται οι συντεταγμένες X, Y, Z και η τιμή της ανακλαστικότητάς του. Δεδομένου ότι το σύνολο σημείων του μοντέλου σαρώνεται με έναν απολύτως αυθαίρετο τρόπο (με εξαίρεση τις παραμέτρους της ανάλυσης σάρωσης που δίνονται από το χειριστή) είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν με όσο το δυνατό πιο λογικό τρόπο οι αρχικές παράμετροι αυτής της σάρωσης. Ιδιαίτερη προσοχή λοιπόν πρέπει να δοθεί στην τιμή των αρχικών στοιχείων σάρωσης που δίνονται από το χρήστη του οργάνου. Η επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από τους ανιχνευτές λέιζερ αποτελείται από ένα σύνολο ενεργειών που είναι απαραίτητες για να προκύψει το σωστό ψηφιακό μοντέλο του μνημείου ξεκινώντας από το νέφος των μετρημένων σημείων. Αυτό το σύνολο ενεργειών μπορεί να διαιρεθεί σε 2 διαφορετικά στάδια:

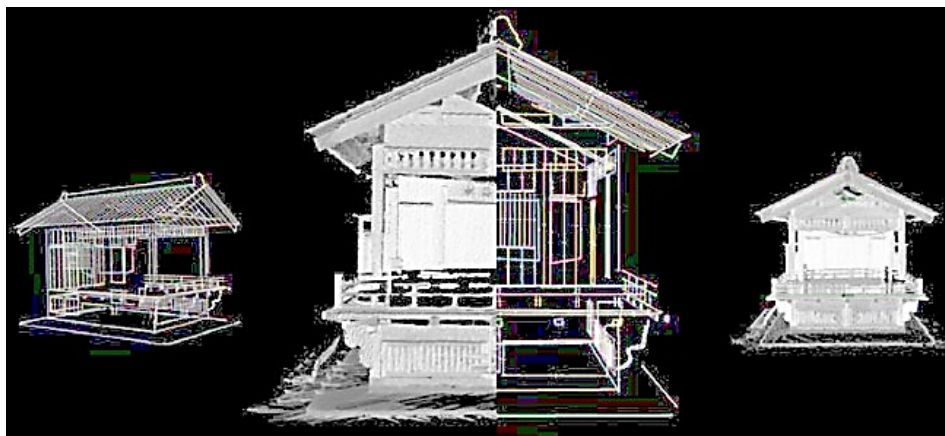
- την προεπεξεργασία (ή προκαταρκτική επεξεργασία) των δεδομένων λέιζερ
- τη διαμόρφωση της επιφάνειας από το νέφος σημείων.

Με τον όρο "προκαταρκτική επεξεργασία" ορίζουμε όλες τις απαραίτητες διαδικασίες που εφαρμόζονται άμεσα στο νέφος σημείων, όπως, παραδείγματος χάριν, το φιλτράρισμα των σημείων (μείωση θορύβου), την καταγραφή των σημείων και τις διαδικασίες γεωαναφοράς (georeferencing). Το αποτέλεσμα αυτών των διαδικασιών είναι ένα σύνθετο "χωρίς θόρυβο" νέφος σημείων (χωρίς outliers, δηλαδή χονδροειδή και συστηματικά σφάλματα) και αυτό αποτελεί τη βάση για το επόμενο στάδιο που

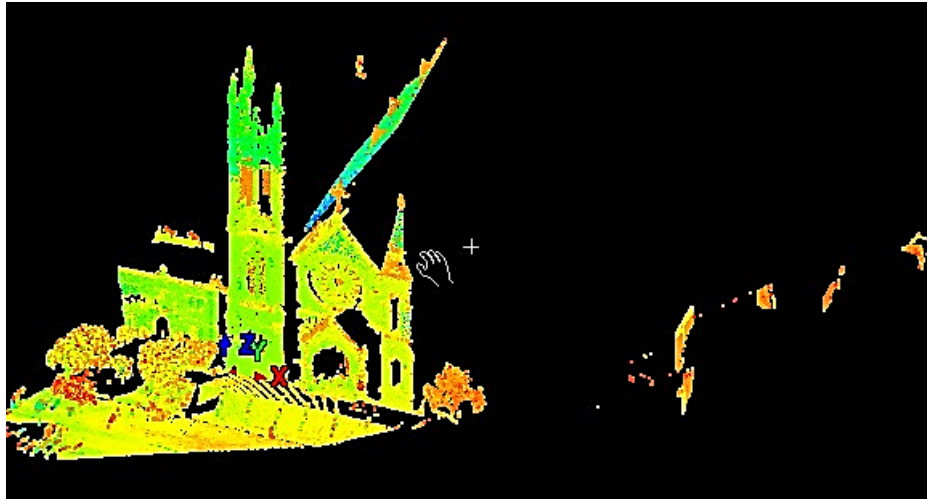
είναι η διαμόρφωση του μοντέλου της επιφάνειας που απαρτίζουν αυτά τα μετρημένα σημεία του χώρου. Το δεύτερο μέρος της διαχείρισης των δεδομένων που προέρχονται από τον ανιχνευτή λέιζερ, η διαμόρφωση της 3Δ επιφάνειας, είναι ένα σύνολο διαδικασιών, που αρχίζουν από οποιοδήποτε νέφος σημείων, και οδηγεί στη διαμόρφωση του 3Δ μοντέλου επιφάνειας του αντικειμένου που ανιχνεύεται. Αν και υπάρχει μια μεγάλη συλλογή διαφορετικών προϊόντων λογισμικού στην αγορά για την πραγματοποίηση της στερεάς διαμόρφωσης των σαρωμένων αντικειμένων (μοντελοποίηση), υπάρχουν πολύ λίγες εφαρμογές λογισμικού που να ορίζουν μια σωστή προκαταρκτική επεξεργασία των επίγειων στοιχείων των ανιχνευτών λέιζερ. Συνήθως, η κατασκευάστρια εταιρεία του ανιχνευτή λέιζερ προμηθεύει μαζί με το υλικό και κατάλληλο λογισμικό που αναλαμβάνει

- Να “κατεβάζει” σαρωμένο νέφος σημείων
- Να προεπισκοπεί την περιοχή σάρωσης και να δίνει τη δυνατότητα της σάρωσης μέρους του μνημείου – χώρου
- Να παράγει τα αρχεία με τα μετρημένα σημεία που στη συνέχεια θα επεξεργαστούν και θα αποδώσουν τις επιφάνειες που περιγράφουν το σχήμα, μέγεθος και μορφή του μνημείου – χώρου.

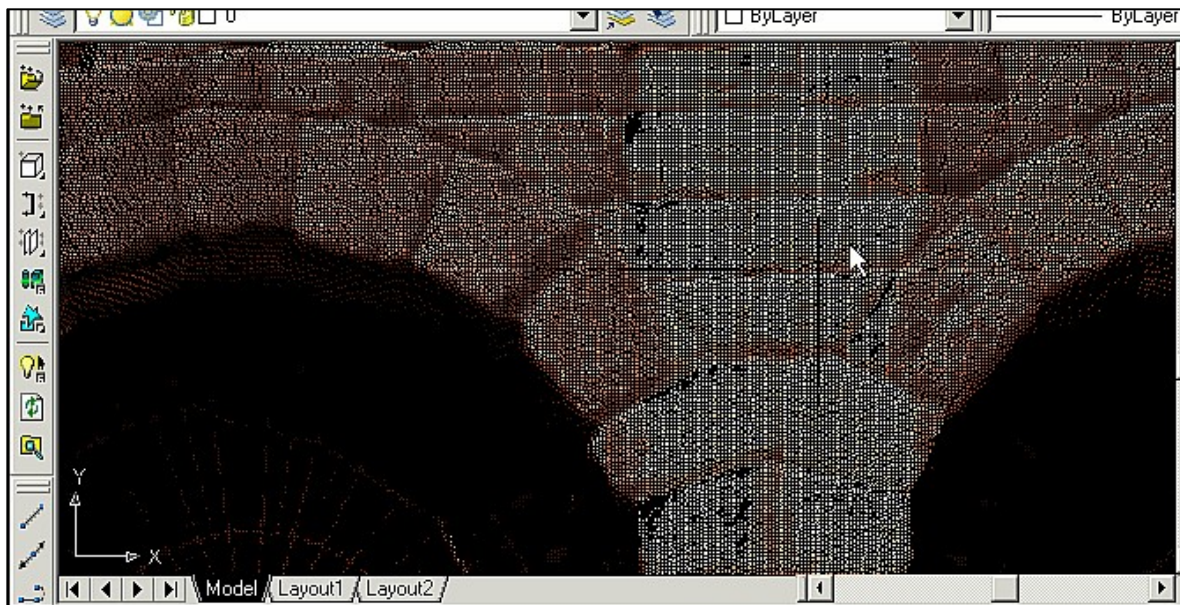
Επίσης δίνεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης του λογισμικού επεξεργασίας των νεφών των σημείων σε περιβάλλον CADD (πχ. AutoCAD ή Microstation), όπου με χρήση των κοινών σχεδιαστικών εντολών μπορεί να δημιουργηθεί το γραμμικό σχέδιο απόδοσης των όψεων, τομών και κατόψεων του μνημείου –χώρου ή το 3Δ (φωτορεαλιστικό) μοντέλο του κτιρίου.



Εικόνα 18 Νέφος σημείων και 3Δ απόδοση ναού στην Ιαπωνία με χρήση του λέιζερ scanner ILRIS-3D της εταιρείας OPTECH.



Εικόνα 19 Το λογισμικό Cyclone viewer παρέχει τη δυνατότητα στο χειριστή της επικοινωνίας και προεπισκόπησης του νέφους των μετρημένων σημείων που σαρώθηκαν με τους λέιζερ scanner Cyra.



Εικόνα 20 Φωτορεαλιστική παρουσίαση τους νέφους των σημείων σε περιβάλλον CAD (PointCloud της εταιρείας Kubit GmbH).

1.2.5 Εναλλακτικές μέθοδοι

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων πολλοί επιστήμονες που ασχολούνται με την καταγραφή και τεκμηρίωση μνημείων Πολιτιστικής Κληρονομιάς προσπάθησαν να αναπτύξουν καινοτόμες

μεθοδολογίες που έχουν σα σκοπό την αυτοματοποίηση των μετρήσεων για την καταγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους. Συνήθως οι προσπάθειες αυτές είχαν σα σκοπό τη χρήση τεχνικών τοπογραφικών μετρήσεων και σύλληψης της εικονικής πληροφορίας με χρήση υβριδικών συστημάτων.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται το παράδειγμα των (T. Kakiuchi, H. Chikatsu, 2004) που κατευθύνθηκαν στην κατασκευή και χρήση ενός γεωδαιτικού σταθμού με ενσωματωμένη ψηφιακή κάμερα.

Ένα άλλο παράδειγμα υβριδικού συστήματος τοπογραφίας – φωτογραμμετρίας προτάθηκε από τον M. Scherer. Η συγκεκριμένη ερευνητική πρόταση περιγράφει τη χρήση του «έξυπνου ταχύμετρου» ενός γεωδαιτικού σταθμού που οδηγείται (περιστρέφεται μηχανοκίνητα) από φορητό Η/Υ και μετρά χωρίς τη χρήση κάτοπτρου αλλά με μια δέσμη ακτίνας λέιζερ, τα χαρακτηριστικά σημεία που περιγράφουν το σχήμα του μνημείου. Η χρήση μιας CCD κάμερας που συνδέεται σε πραγματικό χρόνο με τον Η/Υ μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την καταγραφή on-line της εικονικής πληροφορίας που μετράται από το γεωδαιτικό σταθμό ή για την καθοδήγηση του μηχανισμού μέτρησης μέσω ειδικού λογισμικού προς το σημείο του αντικειμένου που επιθυμείται να μετρηθεί.

Στο ίδιο ερευνητικό πεδίο κινείται και το Archimedes 3D. Πρόκειται για ένα λογισμικό που εκτελείται σε φορητό Η/Υ που κατευθύνει το σύστημα μέτρησης ενός γεωδαιτικού σταθμού με δυνατότητα μετρήσεων χωρίς τη βοήθεια κάτοπτρου (μέτρηση απόστασης με ακτίνα λέιζερ) για την καταγραφή των χαρακτηριστικών σημείων στην όψη ενός αρχιτεκτονικού μνημείου. Ο έξυπνος τρόπος λειτουργίας και προσδιορισμού των χαρακτηριστικών σημείων που μετρώνται είναι δύο από τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας.

Επίσης, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος HAZMAP (Masood Varshosaz, et.al, 2000) που πραγματοποιήθηκε από το τμήμα Geomatic Engineering του University College London, διερευνήθηκε η χρήση ενός μηχανοκίνητου θεοδόλιχου (Geotronics 510 SN) που περιστρέφεται μέσω σερβομηχανισμών σε συνδυασμό με δύο CCD κάμερες Pulnix TM 256 για τη λήψη και ταυτόχρονη αναφορά και εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων που χρησιμοποιούνται ως υφή σε προϊόντα τεκμηρίωσης μνημείων – χώρων. Το σύστημα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση ή/και μέτρηση φωτοσταθερών για την φωτογραμμετρική επεξεργασία εικόνων των μνημείων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ερευνητική εργασία των L. VanGool, M. Waelkens, P. Mueller, T. Vereenooghe, M. Vergauwen (L. Van Gool, et.al, 2004) που σκοπό είχε την καταγραφή των ερειπίων του νυμφαίου της αρχαίας πόλης της Σαγαλασού (Ελληνιστικής περιόδου) και της εικονικής

αναστήλωσης και οπτικοποίησής τους. Η καταγραφή έγινε με χρήση τεχνικών video-γραμμετρίας (videogrammetry) όπου με χρήση αυτόματων τεχνικών προσανατολισμού των εικόνων μπόρεσε να παραχθεί το επενδυμένο μοντέλο (draped model) του υπάρχοντος κτίσματος. Σε πολλές περιπτώσεις χρειάστηκε να ψηφιοποιηθεί μέρος της διακόσμησης του κτιρίου σε πολύ μεγάλη κλίμακα (>1:50) και απαιτήθηκε μια γρήγορη και αξιόπιστη τεχνική κάνοντας χρήση μιας φορητής συσκευής που ονομάζεται ShapeCam (<http://www.eyetronics.com>). Η τεχνική χαρακτηρίστηκε από τους ερευνητές «ενεργητική» καθώς προβάλλει από γνωστή και σταθερή θέση ένα κάρναβο ευδιάκριτων φωτεινών σημαδιών επάνω στη διακόσμηση, που αυτόματα αναγνωρίζονται σε εικόνες που λαμβάνονται από φωτομηχανή υψηλής ανάλυσης που φέρει το σύστημα και με χρήση φωτογραμμετρικών εξισώσεων προσδιορίζεται η θέση των σημαδιών αυτών στο 3D χώρο. Παράλληλα δημιουργείται και η εικόνα (ορθοεικόνα) που προβάλλεται ως υφή στο 3D μοντέλο της επιφάνειας.

Μια πολύ ενδιαφέρουσα πρόταση ψηφιοποίησης από εικόνες και ιδιαίτερα για εφαρμογή σε καταγραφή αρχιτεκτονικών – αρχαιολογικών μνημείων και συνόλων αποτελεί η πρόταση της εταιρείας MetaCreations, το λογισμικό Canoma (<http://www.canoma.com>). Το συγκεκριμένο λογισμικό ενσωματώνει μια σειρά από εργαλεία τοποθέτησης κανονικών στερεών σχημάτων (κύβος, παραλληλόγραμμο, πυραμίδα, αψίδα κ.α.) σε μια ή περισσότερες ψηφιακές εικόνες με σκοπό την εξαγωγή των εικόνων υφής και της γεωμετρίας τους από αυτές. Επίσης, συνεργάζεται με προγράμματα σχεδίασης CAD ώστε με την εισαγωγή των 3D αντικειμένων να εξαχθεί η υφή από τις εικόνες και να δημιουργηθεί το 3D μοντέλο σε μορφή αρχείου εικονικής πραγματικότητας.

1.3 Επιλογή βέλτιστης μεθοδολογίας αποτύπωσης μνημείων

Παρουσίαση των κανόνων και κριτηρίων που θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν για την επιλογή της μεθόδου ψηφιοποίησης.

Κριτήρια επιλογής ή απόρριψης για την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποτύπωσης

Η εμπειρική μεθοδολογία ενδείκνυται όταν το μνημείο – χώρος δεν έχει πολύπλοκο σχήμα και μπορεί να αποτυπωθεί με λίγες μόνο μετρήσεις που διασφαλίζουν ωστόσο την τελική ακρίβεια του προϊόντος (σε κλίμακα 1:50 ή μικρότερες). Επίσης είναι ιδανική για την αποτύπωση κατόψεων ή όψεων-τομών εσωτερικών χώρων και όταν οι άλλες μέθοδοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν για διάφορους λόγους πχ δεν υπάρχει απαραίτητος χώρος για τη λήψη των φωτογραφιών (φωτογραμμετρική μεθοδολογία) ή για την τοποθέτηση τοπογραφικού οργάνου σε κατάλληλη θέση και τη μέτρηση χαρακτηριστικών σημείων

(τοπογραφική μεθοδολογία). Χρησιμοποιείται με μεγάλη επιτυχία από Αρχιτέκτονες Μηχανικούς για την αποτύπωση εσωτερικών συνήθως χώρων και πρέπει να συνοδεύονται οι μετρήσεις πάντα από ένα καλό σχεδιάγραμμα του χώρου και των μετρήσεων που υλοποιήθηκαν.

Κριτήρια επιλογής ή απόρριψης μεθόδου της τοπογραφικής μεθόδου αποτύπωσης

Η εφαρμογή της τοπογραφικής μεθοδολογίας για την αποτύπωση ενδείκνυται όταν το μνημείο-χώρος δεν έχει πολύπλοκο σχήμα οπότε ο αριθμός των μετρημένων σημείων για τον προσδιορισμό της θέσης, της μορφής και του σχήματος είναι μικρός αλλά και η προσβασιμότητα των σημείων που χρειάζεται να μετρηθούν είναι δύσκολη. Είναι ιδανική για δημιουργία προϊόντων υψηλής ακρίβειας σε κλίμακες 1:50 ή μικρότερες και επιπλέον απαιτεί σημαντικό χρόνο παραμονής στο πεδίο για μετρήσεις. Επίσης, χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μεγάλης έκτασης του αντικειμένου και συνήθως για την αποτύπωση εξωτερικών χώρων – όψεων κτιρίων αλλά και αρχαιολογικών χώρων ή σκαμμάτων. Σε περίπτωση που απαιτείται η καταγραφή της υψής της εξωτερικής επιφάνειας του μνημείου είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τη φωτογραμμετρική μεθοδολογία για τη δημιουργία ενός εικονικού προϊόντος (πχ. ανοιγμένη εικόνα ή ορθοεικόνα) ή τεχνική ανίχνευσης ακτίνας λέιζερ.

Κριτήρια επιλογής βέλτιστης τεχνικής και καταλληλότερου λογισμικού φωτογραμμετρικής επεξεργασίας για την αποτύπωση μνημείων - χώρων

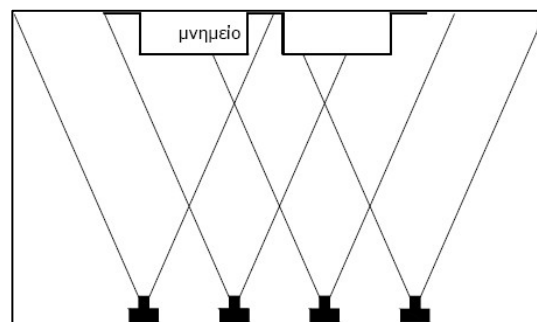
Η φωτογραμμετρική μεθοδολογία είναι κατάλληλη σε περιπτώσεις πολύπλοκων αντικειμένων όταν υπάρχει πληθώρα λεπτομερειών που αποτυπώνονται σε ψηφιακές εικόνες και χρήζουν αποτύπωσης (πχ όψεις διατηρητέων κτιρίων, κατόψεις κτιρίων - αρχαιολογικών σκαμμάτων). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί εφόσον υπάρχει ο απαραίτητος χώρος μπροστά ή πάνω από το μνημείο – χώρο που θα αποδοθεί φωτογραμμετρικά. Ενδείκνυται όταν υπάρχει δυσκολία στην προσπέλαση των λεπτομερειών του μνημείου ή όταν απαγορεύεται η άμεση επαφή με το αντικείμενο μελέτης. Είναι ιδανική για τη διαχρονική παρακολούθηση των μνημείων ή όταν απαιτείται συστηματική καταγραφή των φάσεων εξέλιξης σε εργασίες αναστήλωσης – ανασκαφής. Δίνει άμεσα αποτελέσματα και με χρήση στερεοσκοπικών μεθόδων μπορεί να προβληθεί το μοντέλο του μνημείου-χώρου 3Δ. Με χρήση μετρήσεων υψηλής ακρίβειας που προέρχονται πάντα από τοπογραφικές μετρήσεις με χρήση γεωδαιτικού σταθμού ή αντίστοιχης ακρίβειας τοπογραφικό όργανο, μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή ακρίβειας αποτελέσματα-τελικά διαγράμματα αποτύπωσης σε κλίμακες 1:50 ή και μικρότερες.

Ωστόσο, υπάρχουν διάφορες φωτογραμμετρικές τεχνικές που μπορεί να χρησιμοποιηθούν και να οδηγήσουν σε διαφορετικής μορφής φωτογραμμετρικά προϊόντα με χρήση διαφορετικού εξοπλισμού και λογισμικού.

Σε όλες τις περιπτώσεις η χρήση της φωτομηχανής είναι απαραίτητη όπως επίσης και η υλοποίηση μετρήσεων με χρήση τοπογραφικών οργάνων. Εάν, απαιτείται εξαιρετική ακρίβεια αποτελεσμάτων πρέπει να χρησιμοποιηθεί μετρική ή ημί-μετρική φωτομηχανή ή τουλάχιστον μια βαθμονομημένη κοινή (αναλογική ή ψηφιακή) φωτογραφική μηχανή. Πολλά φωτογραμμετρικά πακέτα παρέχουν τη δυνατότητα με χρήση προτύπων βαθμονόμησης να οδηγήσουν σε υψηλής ακρίβειας φωτογραμμετρικές εικόνες με χρήση τεχνικών αυτοβαθμονόμησης (πχ PhotoModeler).

Ενδείξεις και Προϋποθέσεις για τη Χρήση Φωτογραμμετρικών Τεχνικών Ψηφιοποίησης Μνημείων - Χωρών

Στερεοσκοπική φωτογραμμετρική επεξεργασία σε ΨΦΣ: Η βέλτιστη τεχνική φωτογραμμετρικής επεξεργασίας εικόνων είναι χωρίς αμφισβήτηση η στερεοσκοπική που όχι μόνο παρέχει στους σύγχρονους Ψηφιακούς Φωτογραμμετρικούς Σταθμούς (ΨΦΣ) στερεοσκοπική παρατήρηση με αποτέλεσμα την αποφυγή χονδροειδών σφαλμάτων απόδοσης των λεπτομερειών του μνημείου – χώρου, αλλά παρέχει και αρκετούς αυτοματισμούς όπως, αυτόματη αναγνώριση προτύπων για τον υπολογισμό του εσωτερικού – εξωτερικού και σχετικού προσανατολισμού των εικόνων ενός στερεομοντέλου αλλά και αυτοματισμούς στη συλλογή των ομόλογων σημείων για την εξαγωγή των λεπτομερειών του αντικειμένου με εμπροσθοτομία.



Εικόνα 21 Γεωμετρία στερεοσκοπικών λήψεων

Βασική προϋπόθεση για τη στερεοσκοπική επεξεργασία των εικόνων είναι η λήψη των φωτογραφιών με τρόπο ώστε οι άξονες της φωτογραφικής μηχανής στις δύο στάσεις να είναι παράλληλοι μεταξύ τους

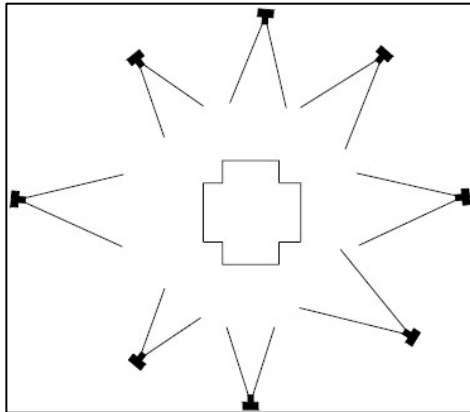
και κάθετοι στην επιφάνεια του προς μελέτη αντικειμένου. Επίσης, θα πρέπει κάθε λεπτομέρεια που χρήζει μέτρησης να είναι ορατή σε τουλάχιστον δύο εικόνες ενός στερεομοντέλου. Η κοινή περιοχή μεταξύ δύο εικόνων του στερεομοντέλου θα πρέπει να είναι της τάξης του 60% του συνολικού format των εικόνων και σε περίπτωση που δεν καλύπτεται το αντικείμενο με ένα στερεοζεύγος θα πρέπει να δημιουργηθούν περισσότερα συνεχιζόμενα στερεομοντέλα. Τα φωτοσταθερά στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να καλύπτουν πλήρως τα στερεομοντέλα των εικόνων που δημιουργούν μια ή περισσότερες λωρίδες (strips) φωτογραμμετρικών στερεοσκοπικών εικόνων. Όταν οι λήψεις για τη δημιουργία των εικόνων ενός στερεομοντέλου δεν είναι παράλληλες είναι πιθανό να μην είναι εφικτή η επίτευξη της στερεοσκοπικής όρασης οπότε και η στερεοσκοπική παρατήρηση και συλλογή των λεπτομερειών του αντικειμένου.



Εικόνα 22 Στερεοσκοπικά ζεύγη για την επεξεργασία σε ΨΦΣ

Συγκλίνουσα ή μη Στερεοσκοπική Φωτογραμμετρική Επεξεργασία:

Όταν η απόσταση φωτογράφισης μπροστά από το αντικείμενο μελέτης είναι μικρή και επομένως αδύνατη η λήψη κατάλληλων εικόνων για στερεοσκοπική επεξεργασία (με τους άξονες της φωτομηχανής παράλληλους μεταξύ τους και κάθετους στην επιφάνεια του αντικειμένου) είναι προτιμότερο να γίνεται χρήση της συγκλίνουσας μη στερεοσκοπικής φωτογραμμετρικής επεξεργασίας. Στην περίπτωση αυτή οι άξονες της φωτογραφικής μηχανής συγκλίνουν προς το κέντρο βάρους του μνημείου – χώρου και η επεξεργασία των εικόνων γίνεται σε ειδικά φωτογραμμετρικά πακέτα (Photomodeler, Image-Modeler, ShapeCapture, iWhitness, 3DBuilder) που το κόστος τους μάλιστα είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό των ΨΦΣ καθώς το υλικό στερεοσκοπικής παρατήρησης και επεξεργασίας (εξειδικευμένοι Η/Υ, σύστημα στερεοσκοπικής παρουσίασης) δεν είναι απαραίτητο για τη συλλογή των λεπτομερειών του αντικειμένου.



Εικόνα 23 Συγκλίνουσα φωτογραμμετρική λήψη εικόνων



Εικόνα 24 Φωτογραμμετρικές λήψεις για την εφαρμογή συγκλίνουσας μη στερεοσκοπικής επεξεργασίας

Φωτογραμμετρική Αναγωγή: Όταν το αντικείμενο μελέτης αποτελείται από επίπεδες οριζόντιες ή κατακόρυφες επιφάνειες είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί η μονοσκοπική φωτογραμμετρική επεξεργασία εικόνων με χρήση της ψηφιακής Φωτογραμμετρικής Αναγωγής. Και πάλι απαιτείται η χρήση φωτοσταθερών για την επίλυση των εξισώσεων της μορφής (23) και τη δημιουργία της ανηγμένης εικόνας. Η εισαγωγή της ανηγμένης εικόνας σε ένα περιβάλλον CADD είναι εύκολη υπόθεση και η συλλογή και σχεδίαση των λεπτομερειών της όψης ή κάτοψης του χώρου μπορεί να γίνει χωρίς να είναι απαραίτητη η στερεοσκοπική παρατήρηση (επομένως και το ακριβό σύστημα στερεοσκοπικής όρασης και μέτρησης). Ο χρόνος της ψηφιοποίησης είναι πολύ μικρότερος με συνέπεια να μειώνεται και το τελικό κόστος της αποτύπωσης –ψηφιοποίησης του μνημείου.



Εικόνα 25 Αρχική και προοπτικά διορθωμένη εικόνα

Όταν επί του αντικείμενου είναι ορατά δύο τουλάχιστον ζεύγη οριζόντιων και κατακόρυφων γραμμών ίσως να είναι αρκετή η μέτρηση μιας ή δύο αποστάσεων παράλληλα προς το οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για να δημιουργηθεί με επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων της προοπτικής γεωμετρίας η ανηγμένη εικόνα (Εικόνα 25) .

Καταλήγοντας θα πρέπει να τονιστεί ότι η φωτογραμμετρική μεθοδολογία δεν μπορεί να αποδώσει την ακρίβεια που επικαλείται ότι επιτυγχάνει στην αποτύπωση μνημείων χωρίς την επικουρία της Τοπογραφίας για τη μέτρηση των φωτοσταθερών (εκτός ίσως από την περίπτωση της προοπτικής διόρθωσης των εικόνων και των εφαρμογών συγκλίνουσας φωτογραμμετρίας). Συμπληρώνει όμως την Τοπογραφική Μεθοδολογία στην αποτύπωση μνημείων ως μια πλήρης και συνεχής (λόγω της εικονικής παρουσίας των ανοιγμένων εικόνων και ορθοεικόνων) απεικόνιση των μνημείων – χώρων και παρέχει μια σειρά από νέα προϊόντα 3Δ παρουσίασης (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, Ορθοεικόνα, Επενδυμένο Μοντέλο) που μπορούν με κατάλληλη επεξεργασία να αποδώσουν στο γραφικό περιβάλλον εξειδικευμένου λογισμικού το εικονικό μοντέλο (virtual model) των μνημείων – χώρων με δυνατότητα διαδραστικότητας και πλοήγησης.

Κριτήρια επιλογής ή απόρριψης μεθόδου της ανίχνευσης λέιζερ για αποτύπωση

Η τεχνική ενδείκνυται σε όλες τις περιπτώσεις 3Δ ψηφιοποίησης μνημείων – χώρων με ιδιαίτερα ακριβή αποτελέσματα. Οδηγεί στην παραγωγή προϊόντων υψηλής ακρίβειας παρόμοιας με αυτά των τοπογραφικών μεθόδων αλλά με την πληρότητα και τη συνέχεια των προϊόντων της φωτογραμμετρικής μεθόδου. Σε μερικές περιπτώσεις και κάτω από συνθήκες έντονου φωτισμού μπορεί να παρουσιάζονται σφάλματα ή αδυναμία μετρήσεων.

Όταν το αντικείμενο έχει σχετικά απλό σχήμα ή/και μικρό μέγεθος είναι ασύμφορη η χρήση της μεθόδου σάρωσης λόγω του υψηλού κόστους του τεχνικού εξοπλισμού και της επεξεργασίας που θα ακολουθήσει τη διαδικασίας των μετρήσεων.

Η χρήση του λέιζερ scanner στο πεδίο είναι απλούστερη από τη χρήση οποιουδήποτε άλλου τοπογραφικού οργάνου καθώς το όργανο λειτουργεί με αυτόματο τρόπο και η οδήγησή του από το χειριστή γίνεται συνήθως με τη βοήθεια Η/Υ μέσω ενός αρκετά φιλικού διαδραστικού περιβάλλοντος επικοινωνίας. Η περαιτέρω όμως επεξεργασία για τη μορφοποίηση των επιφανειών του μοντέλου – χώρου απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις και έμπειρο χειρισμό από κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό σε περιβάλλον σχεδίασης CAD.

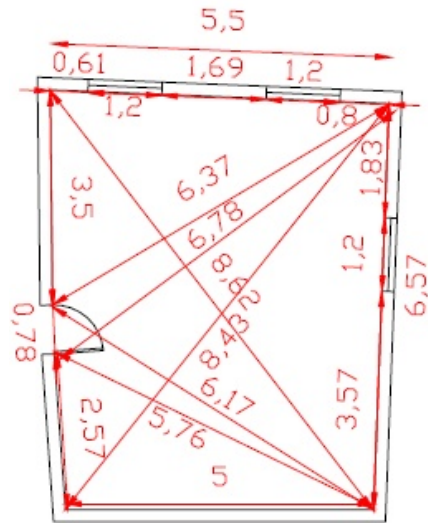
Η χρήση των λέιζερ profilers μπορεί να εφαρμοστεί για την αποτύπωση όχι τόσο του πλήρους 3Δ μοντέλου του μνημείου – χώρου αλλά για τη δημιουργία διαγραμμάτων τομών και κατόψεων υπό κλίμακα.

1.4 Περιγραφή των παραγόμενων ψηφιακών δεδομένων

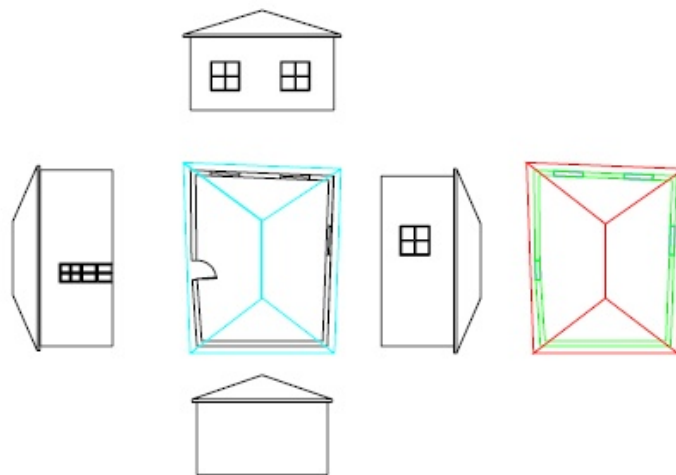
Προϊόντα αποτύπωσης εμπειρικής μεθόδου

Για την καταγραφή της κάτοψης ενός εσωτερικού χώρου ο Αρχιτέκτων Μηχανικός ή Τοπογράφος Μηχανικός χρησιμοποιεί μια απλή μετροταινία για τη μέτρηση αποστάσεων μεταξύ χαρακτηριστικών σημείων του χώρου με την προϋπόθεση ότι όλα τα σημεία βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο (στο ύψος που προβάλλονται οι λεπτομέρειες της κάτοψης στο σχέδιο). Μετρώνται ανά δύο όλα τα χαρακτηριστικά σημεία και δημιουργούνται με τον τρόπο αυτό ακτίνες κύκλων που η τομή τους θα δώσει τη θέση όλων των σημείων σε σχέση με μια προκαθορισμένη βάση (δηλαδή απόσταση δύο χαρακτηριστικών σημείων της κάτοψης που ορίζει τη διεύθυνση ενός από τους δύο άξονες του συστήματος συντεταγμένων όπου θα υλοποιηθεί το σχέδιο). Η χρήση της μεθόδου μπορεί να συνδυαστεί με τη σχεδίαση σε Η/Υ σε περιβάλλον CAD όπου λόγω της εργασίας σε κλίμακα 1:1 επιφέρει και μεγαλύτερη ακρίβεια από τη κλασική αναλογική αποτύπωση (Εικόνα 26).

Με παρόμοια τεχνική μπορεί να δημιουργηθεί το σχέδιο των όψεων και των τομών του κτηρίου και τελικά με χρήση εντολών 3Δ σχεδίασης σε περιβάλλον CADD μπορεί να δημιουργηθεί το εικονικό 3Δ μοντέλο του κτιρίου (Εικόνα 27, Εικόνα 28). Επίσης, το αρχείο σχεδίασης μπορεί να μετατραπεί σε μορφή VRML (Virtual Reality Modeling Language) που μπορεί να προβληθεί μέσω ειδικών προγραμμάτων (viewer) σε περιβάλλον δικτύου (Internet και Intranet).

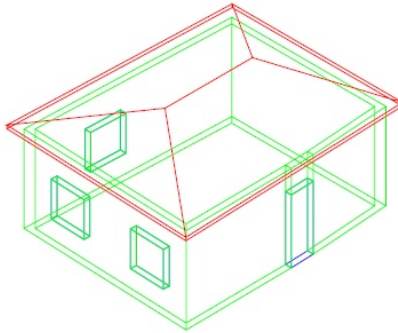


Εικόνα 26 Οι μετρήσεις της κάτοψης ενός χώρου κατά την εμπειρική μέθοδο αποτύπωσης



Εικόνα 27 Δημιουργία του εικονικού μοντέλου σε περιβάλλον CAD

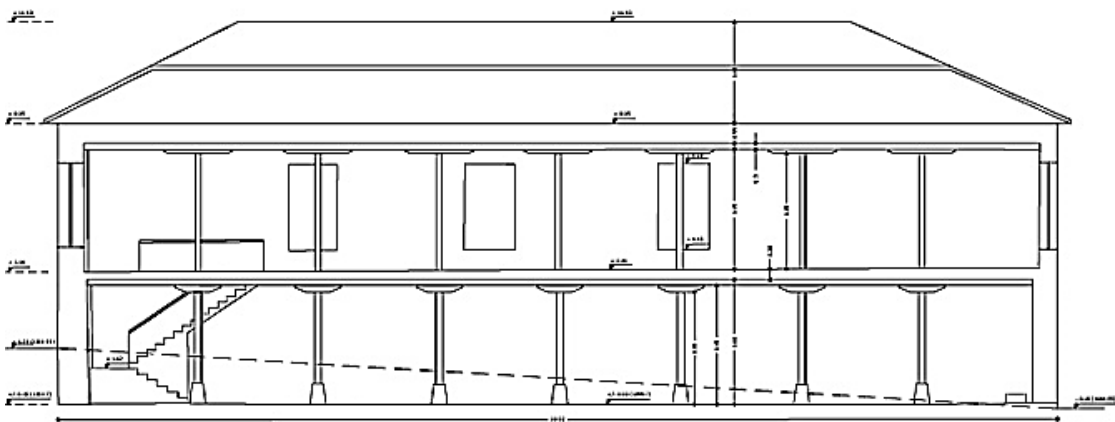
Νέες τεχνολογικές εξελίξεις βοηθούν στη μερική αυτοματοποίηση των μεθόδων καταγραφής της εμπειρικής μεθοδολογίας όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Η κοινή μετροταινία που απαιτεί τη συνεργασία τουλάχιστον δύο ανθρώπων μπορεί να αντικατασταθεί από τα αποστασιόμετρα λέιζερ που είναι δυνατόν να χειριστούν από ένα μόνο άνθρωπο και επιπλέον έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουν ένα αρκετά σημαντικό αριθμό μετρήσεων και να μεταφερθούν οι μετρημένες αποστάσεις απευθείας στον Η/Υ με χρήση σειριακής θύρας επικοινωνίας (ή ακόμη και ασύρματης Blue Tooth θύρας). Επιπλέον έχουν τη δυνατότητα να υπολογίσουν με χρήση βασικών τριγωνομετρικών εξισώσεων έμμεσα κάποιες τιμές αποστάσεων μεταξύ χαρακτηριστικών σημείων που δεν είναι εφικτό να μετρηθούν με απ' ευθείας εφαρμογή του οργάνου.



Εικόνα 28 Wireframe σχεδίαση παρουσίαση του 3Δ μοντέλου που αποτυπώθηκε με χρήση εμπειρικών μεθόδων

Προϊόντα τοπογραφικής αποτύπωσης

Για τη δημιουργία των προϊόντων αποτύπωσης δεν αρκεί η μέτρηση των σημείων στο πεδίο αλλά θα πρέπει να ακολουθήσουν οι εργασίες γραφείου. Οι τοπογραφικές μετρήσεις όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως δεν είναι άμεσες αλλά έμμεσες. Αυτό που μετράται από το γεωδαιτικό σταθμό είναι οι αποστάσεις και οι γωνίες σκόπευσης από συγκεκριμένα σημεία στάσης του οργάνου. Ο προσδιορισμός των συντεταγμένων της στάσης του οργάνου και των χαρακτηριστικών σημείων που περιγράφουν τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία του μνημείου – χώρου προκύπτουν μετά από μαθηματική (τριγωνομετρική) επεξεργασία των μετρήσεων που αποθηκεύονται σε εσωτερική μνήμη του γεωδαιτικού σταθμού. Υπάρχουν ειδικά προγράμματα επεξεργασίας των μετρήσεων που «κατεβάζουν» τις μετρήσεις από την εσωτερική μνήμη του τοπογραφικού οργάνου και παράγουν με αυτοματοποιημένο τρόπο ένα πρώτο προϊόν τοπογραφικής αποτύπωσης που είναι ένα 3Δ αρχείο σχεδίασης (DXF, DWG κ.α.) με τα σημεία που μετρήθηκαν αλλά και τις στάσεις του οργάνου.



Εικόνα 29 Σχεδιάγραμμα τοπογραφικής αποτύπωσης – τομής καπναποθήκης στην πόλη της Ξάνθης

Στη συνέχεια θα πρέπει ο Τοπογράφος, Πολιτικός ή Αρχιτέκτων Μηχανικός να συνδέσει τα διάφορα σημεία (που παρουσιάζονται ως κωδικοί σε περιβάλλον CADD, στη θέση που υπολογίστηκαν στο χώρο μετά από τις εργασίες γραφείου) μεταξύ τους και να κατασκευάσει τις γραμμές και τις επιφάνειες που περιγράφουν το σχήμα, το μέγεθος και τη μορφή του προς μελέτη αντικείμενου. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή και σύντομη εργασία στο γραφείο είναι η τήρηση ενός βασικού σχεδιαγράμματος στο πεδίο που παρουσιάζει το σκαρίφημα του μνημείου – χώρου με την κωδικοποίηση των σημείων που μετρήθηκαν με το τοπογραφικό όργανο. Τόσο οι εργασίες γραφείου όσο και οι εργασίες πεδίου είναι σημαντικές και θα πρέπει να είναι όσο γίνεται συντομότερες. Η καλή και οργανωμένη μέτρηση των σημείων στο πεδίο με το τοπογραφικό όργανο μπορεί να οδηγήσει τόσο στη μείωση του χρόνου μετρήσεων όσο και της επεξεργασίας που ακολουθεί στο γραφείο. Σημαντικό ρόλο παίζει και η εμπειρία των μηχανικών που θα ασχοληθούν με τη μέτρηση και την τελική δημιουργία του 3Δ μοντέλου του μνημείου – χώρου. Η χρήση τόσο των τοπογραφικών οργάνων όσο και των προγραμμάτων σχεδίασης απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό αλλά και σημαντική εμπειρία.

Για να περιοριστεί ο χρόνος των μετρήσεων και της παραμονής στο πεδίο πολλές φορές η τοπογραφική μεθοδολογία σταματά στη μέτρηση συγκεκριμένων και ελαχίστων μόνο σημείων του μνημείου – χώρου που είναι απαραίτητα για την περαιτέρω εφαρμογή της άλλης ευρέως διαδεδομένης μεθοδολογίας για την αποτύπωση μνημείων - χώρων, τη φωτογραμμετρική. Τα σημεία που μετρώνται ονομάζονται φωτοσταθερά και χρησιμοποιούνται για τον προσανατολισμό των φωτογραμμετρικών εικόνων και την εξαγωγή με παρόμοιες τεχνικές, όπως αυτές των θεμελιωδών και τριγωνομετρικών προβλημάτων της τοπογραφίας, στον προσδιορισμό των καρτεσιανών συντεταγμένων των σημείων λεπτομερειών της εξωτερικής επιφάνειας ενός μνημείου.

Τα σχέδια των τοπογραφικών διαγραμμάτων (DXF, DWG) μπορεί πολύ εύκολα να μετατραπούν σε μορφή που να είναι άμεσα ορατή σε περιβάλλον δικτύου (Internet και Intranet). Έχει μάλιστα καθιερωθεί ένα ειδικό πρότυπο αρχείων σχεδίασης που να μπορεί να προβληθεί μέσω του Internet Explorer και ειδικής plug-in εφαρμογής. Το πρότυπο ονομάζεται SVG (Scalable VectorGraphics) που δημιουργήθηκε από World Wide Web Consortium και βελτιστοποιεί τον τρόπο ανάκτησης της πληροφορίας σχεδίασης μέσω του διαδικτύου (<http://www.w3.org/TR/SVG/>). Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των αρχείων αυτών είναι το μικρό μέγεθος καθώς αποτελείται μόνο από διανυσματική (vector) πληροφορία που σε γενικές γραμμές καταλαμβάνει μικρότερο όγκο από ότι ένα αρχείο εικονικής (raster) πληροφορίας και υπάρχει η δυνατότητα δυναμικής προβολής του (δυνατότητα zoom-

in και zoom-out, εμφάνιση επιπλέον πληροφορίας με χρήση hyperlink και αναδυόμενων παραθύρων κα).

Προϊόντα φωτογραμμετρικής επεξεργασίας εικόνων

Τα ψηφιακά προϊόντα που τεκμηριώνουν την αποτύπωση των μνημείων - χώρων και ορίζουν την 3Δ ψηφιοποίηση τους είναι τα 3Δ μοντέλα που δημιουργούνται είτε σε περιβάλλον CADD ή προκύπτουν από την άμεση ψηφιοποίηση – συλλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους στο περιβάλλον του λογισμικού φωτογραμμετρικής επεξεργασίας εικόνων.

Η καταγραφή των 3Δ γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μνημείου γίνεται συνήθως σε αρχεία σχεδίασης (DWG, DXF, DGN κα). Τα σχεδιαστικά αντικείμενα που ενσωματώνονται σε ένα αρχείο σχεδίασης για την καταγραφή ενός 3Δ αντικειμένου μπορεί να είναι μεμονωμένα (κωδικοποιημένα) σημεία στην εξωτερική επιφάνεια του μνημείου που προκύπτουν από τη φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία ή με χρήση των εξισώσεων της ψηφιακής αναγωγής γραμμές, που τα σημεία της αρχής και το τέλος τους έχουν προκύψει και αυτά από τη φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία ή με χρήση των εξισώσεων της ψηφιακής αναγωγής και οριοθετούν τις ακμές -πλευρές των επιφανειών του μνημείου επιφάνειες που προκύπτουν από μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών σημείων (υπολογισμένα από τη φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία) στην εξωτερική επιφάνεια του μνημείου.

Όλα τα προηγούμενα σχεδιαστικά αντικείμενα που περιγράφουν με ψηφιακό τρόπο το σχήμα, μέγεθος και μορφή του μνημείου – χώρου μπορεί να προέλθουν και από την τοπογραφική αποτύπωση. Ωστόσο, η φωτογραμμετρική επεξεργασία υπερέχει της τοπογραφικής στο γεγονός ότι μαζί με τη γεωμετρία του αντικειμένου καταγράφεται και η οπτική πληροφορία της επιφάνειας των μνημείων. Η εικόνα μπορεί να εφαρμοστεί στις επιφάνειες του μνημείου ως υφή και να προκύψει ένα εικονικό μοντέλο του μνημείου που αποτελεί το πιο πλήρες ψηφιακό προϊόν 3Δ αποτύπωσης μνημείου – χώρου.

Ωστόσο, η εικόνα που καταγράφεται από τις φωτομηχανές δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στην επιφάνεια που ψηφιοποιείται από μία ή περισσότερες φωτογραμμετρικές εικόνες. Για το λόγο αυτό δημιουργούνται προϊόντα παράγωγων εικόνων όπως είναι η ανηγμένη εικόνα που αποτελεί από μόνη της την ορθή προβολή και λεπτομερή καταγραφή του μνημείου - χώρου.



Εικόνα 30 Φωτογραμμετρική απόδοση και τελικό διάγραμμα όψης διατηρητέου κτιρίου

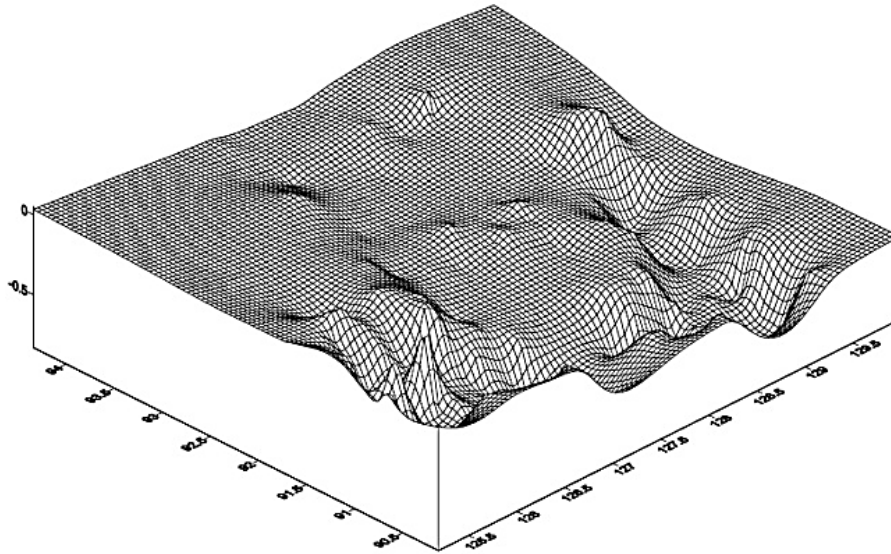
Όταν το 3Δ μοντέλο του μνημείου – χώρου αποτελείται από οριζόντιες ή κατακόρυφες επίπεδες επιφάνειες με μικρό ή καθόλου ανάγλυφο κάθε μια από τις επιφάνειες του μπορεί να επενδυθεί (να εφαρμοστεί δηλ. εικόνα υφής) με την ανηγμένη εικόνα που αποτελεί την ορθή προβολή της αντίστοιχης κεντρικής προβολής (αρχικής φωτογραμμετρικής εικόνας) και τα όρια της συμπίπτουν με τα όρια της επιφάνειας του αντικειμένου. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει ένα ακριβές φωτογραμμετρικό προϊόν που μπορεί να εξαχθεί σε αρχείο εικονικής πραγματικότητας (VRML) και να περιεργαστεί σε ένα δυναμικό περιβάλλον ή να δημιουργηθεί μια εικονική πλοήγηση (fly through video) στο χώρο γύρω από το μνημείο ή και στο εσωτερικό του. Οι τεχνικές εικονικής πλοήγησης και παρουσίασης 3Δ αντικειμένων έχουν εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και έχουν ενσωματωθεί σε πολλά προγράμματα CADD.



Εικόνα 31 Εικονικό μοντέλο φωτογραμμετρικής αποτύπωσης επίπεδων όψεων κτιρίου

Ακόμη και όταν το αποτυπωμένο αντικείμενο δεν αποτελείται από επίπεδες επιφάνειες αλλά είναι δυνατόν να μοντελοποιηθεί το σχήμα της εξωτερικής του επιφάνειας από κάποιο απλό γεωμετρικό στερεό (πχ. κύλινδρος) μπορεί και πάλι να δημιουργηθεί μία εικόνα που με κατάλληλες τεχνικές να εφαρμοστεί στην μοντελοποιημένη επιφάνεια και να δημιουργηθεί και πάλι το εικονικό 3Δ μοντέλο του μνημείου – χώρου.

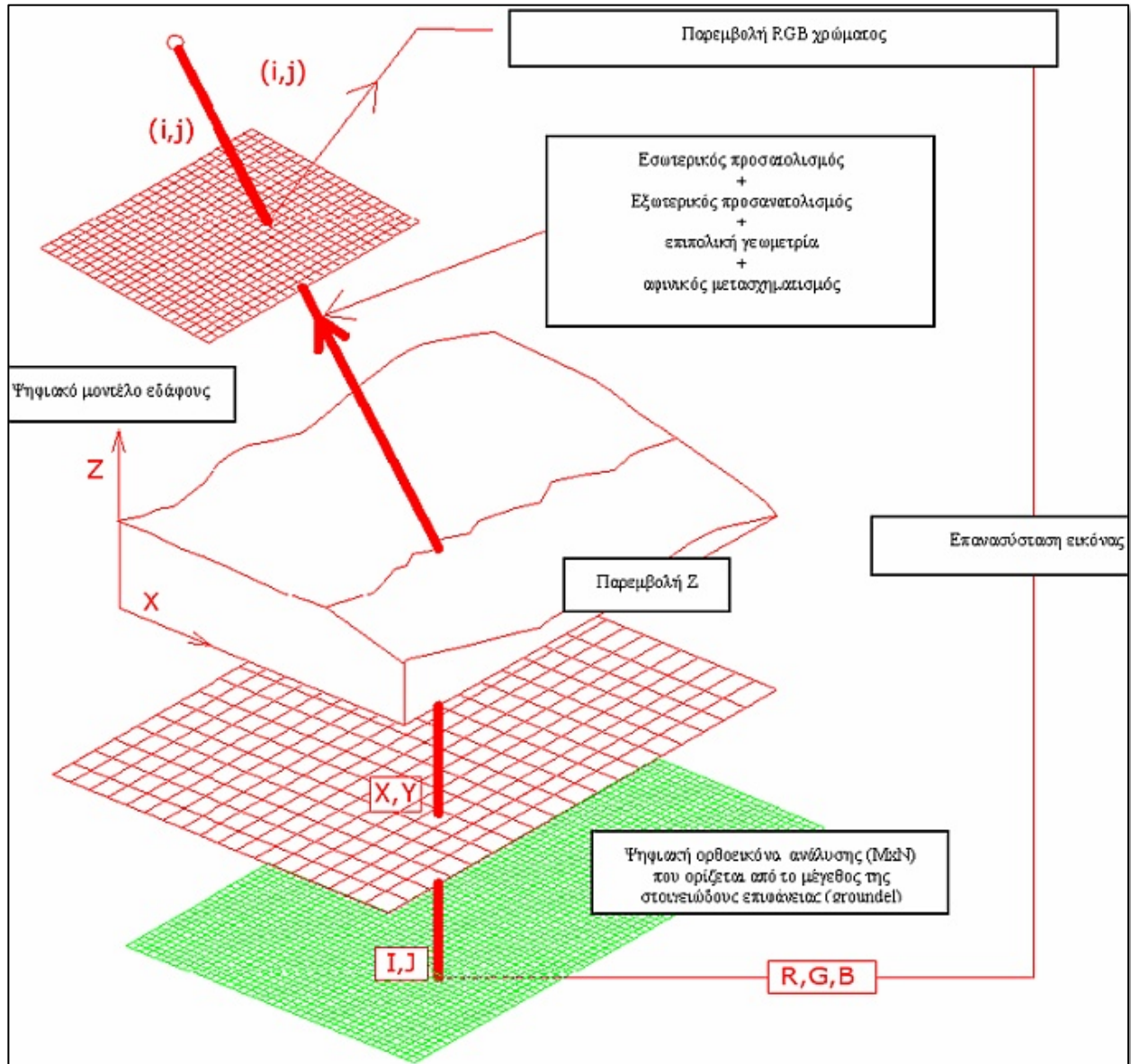
Όταν όμως το αντικείμενο της ψηφιοποίησης δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί από εξωτερικές επιφάνειες απλών σχημάτων (πχ. αρχαιολογικό σκάμμα) το ψηφιακό προϊόν που περιγράφει και αποδίδει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το σχήμα, μέγεθος και μορφή του είναι το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους- Digital Terrain Model (ΨΜΕ-DTM). Το ΨΜΕ προκύπτει από τη συλλογή και εμπροσθοτομικό υπολογισμό των συντεταγμένων των χαρακτηριστικών σημείων της επιφάνειας του μνημείου και δημιουργεί με χρήση τεχνικών τριγωνισμού τα ελάχιστα τμήματα (τρίγωνα ή τετράπλευρα) των επιφανειών που αποδίδουν με το βέλτιστο τρόπο την εξωτερική του επιφάνεια. Το ΨΜΕ αποτελείται από μεγάλο αριθμό σημείων που προκύπτουν από τη γεωμετρική παρεμβολή των υψομέτρων σε προκαθορισμένες οριζοντιογραφικές συντεταγμένες ενός κάρναβου που οριοθετούν την επιφάνεια του μνημείου – χώρου. Συνήθως, το ΨΜΕ περιγράφεται από το διάγραμμα των ισοϋψών καμπύλων της επιφάνειας σε ένα τοπογραφικό διάγραμμα κλίμακας 1:50 (ή μικρότερης), αλλά στο περιβάλλον ενός προγράμματος διαχείρισης 3Δ μοντέλων περιγράφεται από το σχεδιαστικό αντικείμενο ενός 3Δ κάρναβου σημείων (3D mesh). Η εικόνα που θα πρέπει να εφαρμοστεί σαν υφή στην επιφάνεια ενός τέτοιου σχεδιαστικού αντικειμένου δεν μπορεί να είναι ούτε η παραμορφωμένη κεντρική προβολή της αρχικής φωτογραφικής λήψης αλλά ούτε και η ανηγμένη εικόνα καθώς δεν είναι δυνατόν να αποδοθεί με ακρίβεια η γεωμετρία του πολύπλοκου σχήματος του ΨΜΕ επειδή στη δημιουργία της ανηγμένης εικόνας δε λαμβάνεται υπ' όψη η μετατόπιση των σημείων λόγω του ανάγλυφου της επιφάνειας. Η θέση όμως των σημείων στο χώρο που περιγράφουν την επιφάνεια του αντικειμένου μπορεί να προβληθούν στην αρχική εικόνα και να εξαχθεί η φωτεινότητα (ή RGB πληροφορία χρώματος) που θα πρέπει να εφαρμοστεί ως υφή στην επιφάνεια του μοντέλου. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να δημιουργηθεί η ορθοεικόνα που αποτελεί το πλέον ακριβές και πλήρες φωτογραμμετρικό προϊόν.



Εικόνα 32 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους αρχαιολογικού σκάμματος

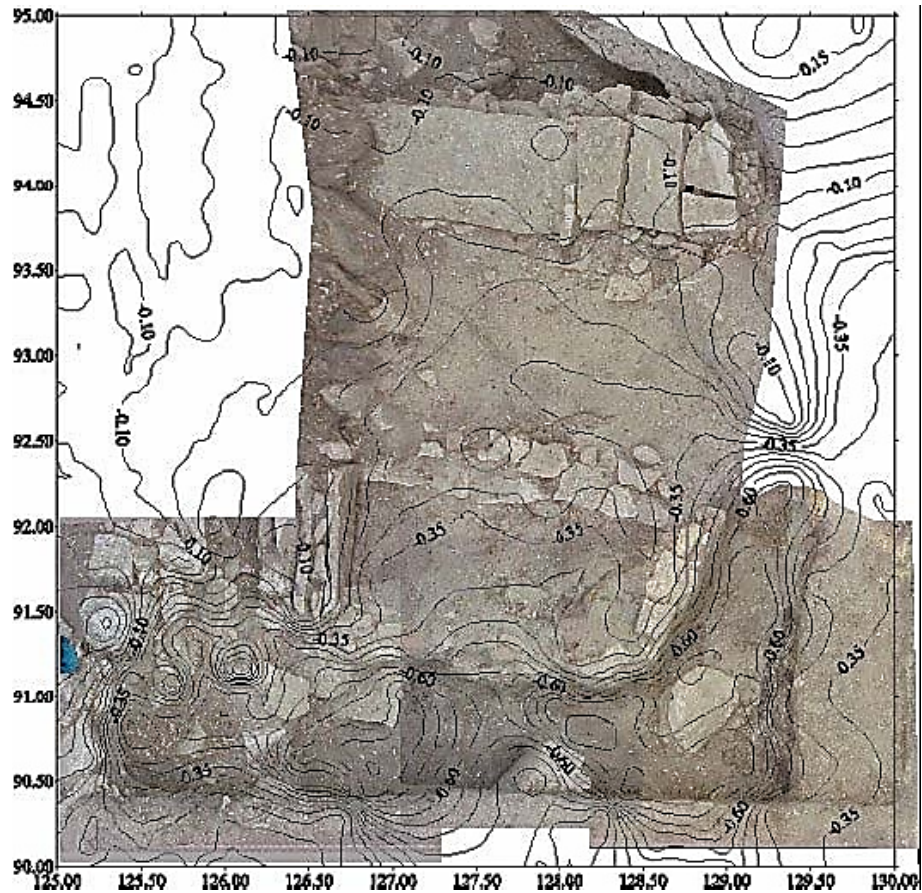
Προϊόντα αποτύπωσης με ανίχνευση λέιζερ

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως κατά την περιγραφή της βασικής επεξεργασίας της ανίχνευσης λέιζερ, το βασικό προϊόν της εφαρμογής της μεθόδου είναι ένα πολύ πυκνό σύννεφο μετρημένων σημείων (που καλείται και DDSM – Dense Digital Surface Model δηλαδή πυκνό ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας). Από την επεξεργασία του νέφους των σημείων μπορεί να προκύψει είτε το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) σε μορφή κάναβου ή τριγώνων, της σαρωμένης περιοχής αλλά και την ορθοεικόνα από τη στιγμή που ανιχνευτής φέρει οπτικό αισθητήρα και γίνεται καταγραφή και της εικόνας του μνημείου – χώρου.



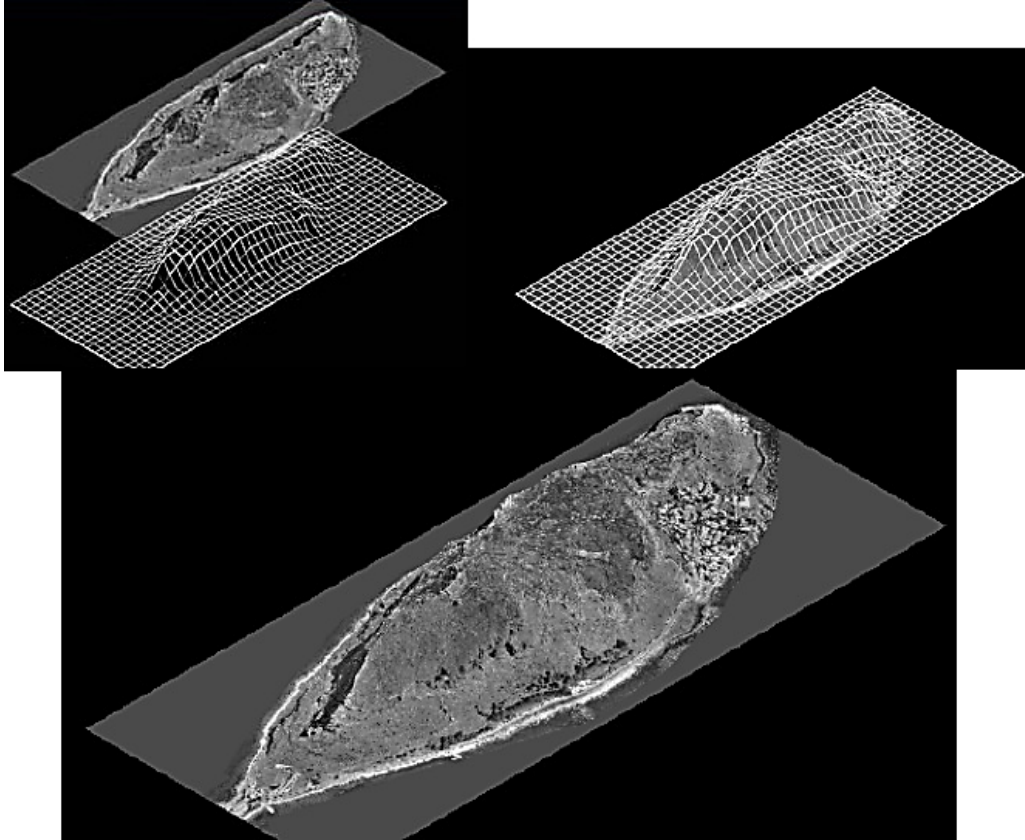
Εικόνα 32. Δημιουργία ορθοεικόνας

Επίσης με την εισαγωγή του νέφους των σημείων σε περιβάλλον CADD είναι δυνατόν να παραχθεί το 3Δ μοντέλο του μνημείου με χρήση εντολών σχεδίασης και γενίκευσης των σημείων σε γραμμές ακμών και των ακμών σε επιφάνειες. Το 3Δ φωτορεαλιστικό μοντέλο του μνημείου- κτιρίου είναι εύκολο να παραχθεί και να προβληθεί ακόμα και σε φτηνά σύστημα στερεοσκοπικής παρουσίασης ή σε άλλο περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Επίσης, η σχεδίαση του 3Δ μοντέλου μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία που είναι ειδικά σχεδιασμένα για την προβολή 3Δ πληροφορίας σε δικτυακό περιβάλλον (Internet και Intranet).



Εικόνα 33 Προβολή ισοψών καμπύλων στην ορθοεικόνα. Η εκτύπωση υπό κλίμακα αποτελεί την πληρέστερη τεκμηρίωση της αποτύπωσης ενός αρχαιολογικού σκάμματος

Η φωτορεαλιστική παρουσίαση της ορθοεικόνας επάνω στο σχεδιαστικό αντικείμενο που περιγράφει το ΨΜΕ είτε σε περιβάλλον CADD ή σε περιβάλλον εικονικής ή/και δικτυακής πλοήγησης (VRML player, 3D Studio Max) ονομάζεται draped model (επενδυμένο μοντέλο) και μπορεί να οδηγήσει στη δυναμική πλοήγηση και μελέτη του αντικειμένου από ένα μελετητή αρχαιολόγο-αρχιτέκτονα ή γενικά οποιονδήποτε θελήσει να εξετάσει το εν λόγω μνημείο – χώρο είτε σε περιβάλλον διαδραστικής επικοινωνίας ή μέσω του διαδικτύου (Internet). Το μέγεθος των αρχείων εικονικής πλοήγησης είναι μεγαλύτερο από αυτό των αρχείων σχεδίασης λόγω του μεγάλου μεγέθους των εικόνων που παρουσιάζεται ως υφή επάνω στις επιφάνειες των αντικειμένων. Γενικά η προβολή των εικονικών αρχείων VRML είναι προβληματική λόγω των χαμηλών ταχυτήτων σύνδεσης.



Εικόνα 34 Αποτύπωση των Ενετικών Κάστρων της Πελοποννήσου (Μονεμβασιά). (α). Δημιουργία ορθοεικόνας και εφαρμογή της στο ΨΜΕ. (β). Προβολή του κάναβου και της ορθοεικόνας. (γ). Φωτορεαλιστικό μοντέλο.

2 Οργάνωση και διαχείριση 3Δ αποτύπωσης

Οι εργασίες ψηφιοποίησης απαιτούν αναλυτική και προσεκτική σχεδίαση όλων των επιμέρους ενεργειών για την επίτευξη του τελικού τους στόχου. Οι μελέτες ψηφιοποίησης βασίζονται σε ένα πλάνο που καλύπτει με σαφήνεια θέματα όπως:

- ο βασικός σκοπός και στόχος της εργασίας
- το κοινό όπου απευθύνεται το τελικό προϊόν
- τα οφέλη και παράγωγα από μια τέτοια δραστηριότητα
- το προσωπικό που θα συμμετέχει
- η ασφάλεια του πολιτιστικού αποθέματος
- η οργάνωση-χρονικός προγραμματισμός των επιμέρους εργασιών
- ο χώρος πραγματοποίησης της συλλογής δεδομένων
- τα αναμενόμενα αποτελέσματα
- χρονοδιαγράμματα όλων των εργασιών
- διαδικασίες διαχείρισης δεδομένων

Ο κύκλος ζωής ενός τεχνικού έργου 3Δ αποτύπωσης αποτελείται από διαφορετικά στάδια. Αυτά είναι τα εξής:

- Προετοιμασία για τη διαδικασία ψηφιοποίησης
- Διαχείριση αυθεντικών χειροτεχνημάτων
- Δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας - αδειοδοτήσεις
- Η διαδικασία της ψηφιοποίησης (συλλογή δεδομένων)
- Συλλογή μεταδεδομένων (metadata) για το αντικείμενο προς ψηφιοποίηση αλλά και της διαδικασίας ψηφιοποίησης (paradata)
- Αποθήκευση και διαφύλαξη του ψηφιακού πρωτότυπου υλικού
- Δημοσίευση υλικού και διάδοση της πληροφορίας-παράγωγα

Κατά την πρακτική εφαρμογή των σταδίων αυτών παρατηρούνται σχέσεις και εξαρτήσεις ανάμεσα τους, ενώ η σειρά που εμφανίζονται παραπάνω δεν θα πρέπει να θεωρηθεί απόλυτη. Πολλές φορές παρόμοιες εργασίες αποτελούν πηγή γνώσης και εμπειρίας. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι αποτελούν έναν πρακτικό οδηγό αφού τα λάθη και οι αδυναμίες που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενες προσπάθειες έχουν αναγνωρισθεί και έχουν αντιμετωπιστεί.

Ιδιαίτερα στο χώρο της 3Δ αποτύπωσης, η αναφορά σε άλλες εργασίες αποτελεί μια απόλυτα ενδεικνυόμενη κίνηση αφού ο χώρος δεν είναι ακόμη πραγματικά ώριμος, και πολλά νέα θέματα και προκλήσεις αναδεικνύονται συνεχώς. Οι πιο πρόσφατες εργασίες αποτελούν πραγματικό θησαυρό ιδεών για πιθανές υλικοτεχνικές και διαδικαστικές λύσεις. Η αναζήτηση απαντήσεων σε προηγούμενες εργασίες απαιτεί αρκετό χρόνο, αλλά συνήθως αποφέρει οφέλη και αποδεικνύεται πολύτιμη. Είναι πλέον κοινά αποδεκτό πως ο χρόνος που αφιερώνεται για τη σχεδίαση και οργάνωση μιας ψηφιοποίησης σχετίζεται απόλυτα με την ευκολία διαχείρισης και εκτέλεσής της.

Ένα έργο 3Δ αποτύπωσης δεν θα πρέπει να ξεκινά πριν τον καθορισμό των τελικών στόχων και τη μορφή των παραδοτέων. Για παράδειγμα ένα έργο που έχει στόχο την προβολή αρχαιολογικών εκθεμάτων χωρίς να έχει από πριν εξασφαλίσει την άδεια για τη Διαδικτυακή δημοσίευση τους ίσως να καταλήξει σε αποτυχία. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση εφαρμογής μιας ανάρμοστης μεθόδου ψηφιοποίησης. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων και ίσως να οδηγήσει σε 3Δ μοντέλα που δεν πληρούν τις αρχικές προδιαγραφές του έργου.

Η τεκμηρίωση των τελικών στόχων είναι απαραίτητη. Η απάντηση στην ερώτηση «Γιατί;» είναι σημαντική, και θα πρέπει να απαντηθεί πριν την έναρξη της ψηφιοποίησης. Ο βασικός στόχος και ο σκοπός ενός έργου 3Δ ψηφιοποίησης παίζουν τον καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της μεθόδου ψηφιοποίησης. Οι μέθοδοι αποτύπωσης κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις διαστάσεις των αντικειμένων και τις απαιτήσεις που έχουμε ως χρήστες των τελικών δεδομένων.

Η αξία των αντικειμένων που προέρχονται από το χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς είναι ανυπολόγιστη λόγω της μοναδικότητας, της σπανιότητας τους αλλά και της πληροφορίας που μεταφέρουν. Τα δομικά τους υλικά τις περισσότερες φορές είναι εύθραυστα και αυτό επιβάλλει τη φύλαξη τους σε ειδικούς χώρους, εφόσον πρόκειται για αντικείμενα που μπορούν να μετακινηθούν. Είναι πολύ σημαντικό κατά την εκτέλεση μιας μελέτης ψηφιοποίησης να μην προκληθεί η παραμικρή φθορά στα αντικείμενα. Η επιλογή του κατάλληλου χώρου ψηφιοποίησης είναι μια βασική διαδικασία για την απόλυτη προστασία των αντικειμένων. Σε περιπτώσεις που το επιτρέπει ο προϋπολογισμός του έργου θα πρέπει να οριστεί ένας χώρος ως «Χώρος Ψηφιοποίησης». Μόνο εκεί θα πρέπει να πραγματοποιούνται οι αποτυπώσεις των αντικειμένων και πουθενά αλλού. Αυτός ο χώρος θα πρέπει να πληρεί όλες τις προϋποθέσεις (π.χ. περιβάλλον φωτισμός, υγρασία, θερμοκρασία κτλ) που καταδεικνύουν οι αρχαιολόγοι ως σημαντικές απαιτήσεις για τη διασφάλιση της ακεραιότητας των αντικειμένων. Σε πολλές περιπτώσεις η έκθεση σε ηλιακό φως απαγορεύεται. Το κάπνισμα, το φαγητό

και το ποτό στο χώρο ψηφιοποίησης επίσης θα πρέπει να απαγορεύεται. Σε περιπτώσεις όπου ο προϋπολογισμός του έργου δεν επιτρέπει την οργάνωση ενός χώρου ψηφιοποίησης, τότε θα πρέπει να ακολουθηθούν άλλες διαδικασίες, οι οποίες θα περιορίζουν στο ελάχιστο τις μετακινήσεις των αντικειμένων. Η διαχείριση και η ασφάλεια των αντικειμένων ανατίθεται σε άτομα με ειδική εμπειρία που να μπορούν να αναγνωρίζουν τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα πολιτιστικά αντικείμενα. Η αναγνώριση του επιπέδου ικανοτήτων και η εμπειρία του προσωπικού που θα εργαστεί για το συγκεκριμένο τεχνικό έργο αποτελεί σημαντικό βήμα προς την επιτυχία. Το ανθρώπινο δυναμικό θα πρέπει να είναι ενημερωμένο για τα σενάρια διαχειρίσεις των αντικειμένων. Η παρακολούθηση εκπαιδευτικών σεμιναρίων αποτρέπει πιθανές καταστάσεις καταστροφής αναντικατάστατων πολιτιστικών αντικειμένων.

Κάθε έργο 3Δ αποτύπωσης οφείλει να ακολουθεί κάποια μεθοδολογία διασφάλισης των πολιτισμικών αντικειμένων. Η μεθοδολογία αυτή θα πρέπει να περιέχει εναλλακτικά σενάρια, τα οποία θα περιγράφουν τρόπους αντιμετώπισης απρόσμενων καταστάσεων. Σε περιπτώσεις που η παρούσα κατάσταση ενός αντικειμένου αφήνει πολλές πιθανότητες για φθορά κατά τη μεταφορά του, τότε προτιμότερο θα ήταν να επιλεγεί μια μέθοδος που δεν απαιτεί τη μετακίνηση των αντικειμένων.

Πριν την έναρξη της αποτύπωσης, ειδικοί (αρχαιολόγοι) εξετάζουν κάθε αντικείμενο και αποφασίζουν αν επιτρέπεται να ψηφιοποιηθεί με τη μέθοδο που έχει επιλεγεί. Επιπρόσθετα, αναφέρουν όλες τις ιδιαίτερες διαδικασίες διαχείρισης που θα πρέπει να ακολουθηθούν. Ένας κατάλογος με τα αντικείμενα και τις μεθόδους διαχείρισης συντάσσεται και ακολουθείται πιστά από το προσωπικό που θα πραγματοποιήσει την ψηφιοποίηση. Ο κατάλογος αυτός αποτελεί μέρος μιας σύνθετης βάσης γνώσεων που αφορούν το συγκεκριμένο έργο ψηφιοποίησης και τις μεθοδολογίες ψηφιοποίησης που θα ακολουθηθούν.

Η επιτυχία ενός τεχνικού έργου 3Δ αποτύπωσης βασίζεται στην προετοιμασία αποτελεσματικής αντιμετώπισης όλων των ενδεχόμενων. Όπως και οποιοδήποτε άλλο τεχνικό έργο έτσι και αυτά της αποτύπωσης πολιτισμικής κληρονομιάς βασίζονται σε μια ανάλυση κινδύνων. Η μετάδοση των ψηφιακών 3Δ μοντέλων πάνω από το διαδίκτυο είναι μια μορφή δημοσίευσης. Τα μοντέλα μπορεί να προστατεύονται από νομικά πλαίσια δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Τέτοια προβλήματα καλύπτονται από την ανάλυση κινδύνων που συνήθως περιέχει ερωτήματα σχετικά με τις συνέπειες χρήσης του υλικού χωρίς άδεια αλλά και ποιες ενέργειες θα μπορούσαν να ακολουθηθούν για να

βρεθούν οι δικαιούχοι ή κάτοχοι. Άλλοι πιθανοί κίνδυνοι σχετίζονται με την εξασφάλιση της αυθεντικότητας του πολιτισμικού θησαυρού.

Ο κατάλληλος υλικοτεχνικός εξοπλισμός και το λογισμικό θα πρέπει να είναι διαθέσιμα και έτοιμα προς χρήση πριν την έναρξη του έργου. Κάποιες δοκιμές του εξοπλισμού θα ήταν συνετό να πραγματοποιηθούν. Κανένα αντικείμενο δεν θα πρέπει να μεταφερθεί στο χώρο ψηφιοποίησης πριν από την εξακρίβωση της λειτουργικότητας του εξοπλισμού. Η επιλογή του καταλληλότερου εξοπλισμού μπορεί να θεωρηθεί ως το βασικότερο σημείο αυτού του κειμένου. Είναι ευρέως αποδεκτό πως τα καλύτερα αποτελέσματα αποφέρει ο ενδελεχής έλεγχος της παραμικρής λεπτομέρειας που διέπει τη διαδικασία συλλογής δεδομένων καθώς και την μετέπειτα αλυσίδα διαδικασιών επεξεργασίας τους.

Η συνδυαστική χρήση μεθοδολογιών που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες ψηφιοποίησης είναι κάθε άλλο παρά απαγορευτική. Έχει αποδειχθεί άλλωστε ως μια από τις πιο αποτελεσματικές προσεγγίσεις για σύνθετα έργα ψηφιοποίησης.

Σε μια προσπάθεια συγκέντρωσης των βασικών προβλημάτων που παρουσιάζουν τα έργα 3Δ αποτύπωσης ο καθηγητής Marc Levoy του πανεπιστημίου Stanford κατέληξε σε οκτώ βασικά προβλήματα. Αυτά είναι:

- Οπτικά μη-συνεργάσιμες / μη-φιλικές προς τη μέθοδο ψηφιοποίησης επιφάνειες
- Αδυναμία σάρωσης σε σημεία που δεν υπάρχει άμεση οπτική επαφή
- Εξασφάλιση των ευαίσθητων αντικείμενων
- Ψηφιοποίηση μεγάλων αντικειμένων με υψηλή ακρίβεια
- Μεταβολή της ακρίβειας σάρωσης στο ίδιο οπτικό πεδίο
- Διόρθωση γεωμετρικών ασυνεχειών στα 3Δ δεδομένα (π.χ. πυκνά πολυγωνικά πλέγματα)
- Διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων

3 Αναφορές

- [1] A. Marbs, Experiences with laser Scanning at i3mainz, CIPA, September 2002, Corfu, Greece, Proceedings of 'Scanning for Cultural Heritage Recording', pp.110 -11
- [2] D. Laboury, Y. Renotte, B. Tilken, M. Dominique, R. Billen, B. Cornelis, Y. Cornet, "The OSIRIS Project (Optical Systems for Interferometric-Photogrammetric Relief Investigation and Scanning). Development of a device for 3D numerical recording of archaeological and epigraphic documents by optoelectronic processes", in W. Boehler (éd.), Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording - Complementing or Replacing Photogrammetry (September, 1-2, 2002, Corfu, Greece), Corfu, 2002, pp. 139-142.
- [3] Traunecker C. 1987. Les Techniques d'épigraphie de terrain. Principes et pratique. In Assmann J., Burkard G, Davies V. 1987, pp. 261-298
- [4] Loeben C.E. 1996, Anmerkungen zu jungsten Arbeiten ägyptischer Epigraphik. ARCUS – Berichte aus Archäologie, Baugeschichte und Nachbargebieten, 3, pp. 15-27.
- [5] W. Boehler, Adreas Marbs, Scanning for Cultural Heritage Recording, September 1-2, 2002
- [6] Josep Forest, Joaquim Salvi, Enric Cabruja and Carles Pous, 'laser stripe peak detector for 3D Scanners. A FIR filter approach', 17th International Conference on Pattern Recognition, ICPR 2004, Cambridge, UK, 23-26 August 2004.
- [7] M. Sgrenzaroli, E. Wolfart, 'Accurate texture-mapped 3D models for documentation, surveying and presentation purposes', CIPA, September 2002, Corfu, Greece, Proceedings of 'Scanning for Cultural Heritage Recording', pp.148 -155.
- [8] M. Ioannides, A. Wehr, '3D Reconstruction & Re-production in Archaeology', 2002, Scanning for Cultural Heritage Recording, September 1-2, 2002.
- [9] J-Angelo Beraldin, Francois Blais, Luc Cournoyer, Guy Godin and Marc Rioux, Active 3D sensing, 2000, SCUOLA NORMALE SUPERIORE PISA, Centro di Ricerche Informatiche per i Beni Culturali.
- [10] M. Gaiani, 'Translating the Architecture of the Real into the virtual: Sever Years of Experimentation with "Conservation and Representation"', Milan 2000, Conference of Cataloguing to Planned Presentation.
- [11] A. Streilein, F. a.van den Heuvel, 'Potential and limitation for the 3D documentation of cultural heritage from a single image', CIPA International Symposium 1999, Οκτώβριος 3-6, 1999, Recife/Olinda - PE- Brazil.
- [12] Guy Godin, Marc Rioux, J. Angelo Beraldin, Marc Levoy, Luc Cournoyer, Francois Blais, 'An assessment of laser range measurement on marble surfaces', 5th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, October 1 -4, 2001, Vienna, Austria.
- [13] Tim Hawkins Jonathan Cohen Paul Debevec, A Photometric Approach to Digitizing Cultural Artifacts, University of Southern California Institute for Creative Technologies, 2001.
- [14] James E. Cutting and Peter M. Vishton, Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth, In W. Epstein & S. Rogers (eds.) Handbook of perception and cognition, Vol 5; Perception of space and motion. (pp. 69-117). San Diego, CA: Academic Press.
- [15] Rioux, M., 1994. Digital 3-D Imaging: Theory and Applications. SPIE Proceedings, Videometrics III, International Symposium on Photonic and Sensors and Controls for Commercial Applications, Boston, 2650, pp. 2-15.
- [16] Wolfgang Boehler, Adreas Marbs, Scanning for Cultural Heritage Recording, September 1-2, 2002.

- [17] Wolfgang Boehler, Guido Heinz, Andreas Marbs, Mirko Siebold, 3D Scanning software: An introduction, CIPA Heritage Documentation, Proceedings of the CIPE WG 6 international workshop on scanning for cultural heritage recording, September 2002.
- [18] Curless, B.; Levoy, Better optical triangulation through spacetime analysis, *M Computer Vision*, 1995. Proceedings, 5th International Conference o, 20-23 June 1995, pp.987 – 994.
- [19] Cortelazzo, G.M.; Marton, F. About modeling cultural heritage objects with limited computers resources *Image Analysis and Processing*, 1999. Proceedings. International Conference on , 27-29 Sept. 1999, pp.848–853.
- [20] Z. Zhang, "Modeling Geometric Structure and Illumination Variation of a Scene from Real Images", In Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV'98), Bombay, India, January 4–7, 1998.
- [21] P. J. Besl and N. D. McKay, A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 12, February 1992.
- [22] Tosovic S., Sablatnig R., Kampel M., "On combining shape from silhouette and shape from structured light", in: H. Wildenauer and W. Kropatsch, (Eds.), "Proc. of 7th Computer Vision Winter Workshop", pp. 108-118, 2002.
- [23] A. Laurentini, The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v.16 n.2, p.150-162, February 1994
- [24] Sablatnig R., Tosovic S., Kampel M., " Next View Planning for Shape from silhouette", in: Drbohlav O., (Ed.), "Proc. of 8th Computer Vision Winter Workshop 2003, Valtice, Czech Republic", pp. 77-82, 2003.
- [25] Adam Baumberg, Alex Lyons, Richard Taylor, 3D S.O.M. – A commercial software solution to 3D scanning, *Vision, Video, and Graphics (2003)*, The Eurographics Association 2003. Eurographics Partner Event Vision, Video, and Graphics 2003. Bath UK.
- [26] Potmesil, M. "Generating Octree Models of 3D Objects from their Silhouettes in a Sequence of Images." *CVGIP* 40 (1987), pp. 1-29.
- [27] Noborio et al.:Construction of the octree approximating three-dimensional objects by using multiple views, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol.10, pp.769-782,1988.
- [28] N. Ahuja and J. Veenstra, Generating Octrees from Object Silhouettes in Orthographic Views, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, February 1989, pp. 137-149.
- [29] Y. Matsumoto, H. Terasaki, K.Sugimoto and T. Arakawa, A Portable Three-dimensional Digitizer, *IEEE 1997, 3-D Digital Imaging and Modelling*, 1997. Proceedings., International Conference.
- [30] Hendrik P.A. Lensch, Wolfgang Heidrich, Hans-Peter Seidel, 'A silhouette-Based algorithm for texture registration and stitching', 2001, Elsevier Science (USA), 1524-0703/01
- [31] Salvi, Joaquim, Pages, Jordi, Batlle, Joan, Pattern codification strategies in structured light systems, *PR* (37), No. 4, April 2004, pp. 827-849.
- [32] J. L. Posdamer, M. D. Altschuler, Surface measurement by space-encoded projected beam systems, *Computer Graphics and Image Processing* 18 (1) (1982) pp. 1–17.
- [33] S. Inokuchi, K. Sato, F. Matsuda, Range imaging system for 3-D object recognition, in: Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, 1984, pp. 806–808.
- [34] M. Trobina, Error model of a coded-light range sensor, Technical report, Communication Technology Laboratory, ETH Zentrum, Zurich (1995).

- [35] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, R. Scopigno, A low cost 3D scanner based on structured light, in A. Chalmers, T.-M. Rhyne (Eds.), EG 2001 Proceedings, Vol. 20(3), Blackwell Publishing, 2001, pp. 299–308.
- [36] D. Caspi, N. Kiryati, J. Shamir, Range imaging with adaptive color structured light, *Pattern analysis and machine intelligence* 20 (5) (1998) 470–480.
- [37] J. Gühring, Dense 3-d surface acquisition by structured light using off-the-shelf components, *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement* 4309 (2001) pp. 220–231.
- [38] O. Hall-Holt, S. Rusinkiewicz, Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects, in: *The 8th IEEE International Conference on Computer Vision*, 2001, pp. II: 359–366.
- [39] M. Maruyama and S. Abe, Range sensing by projecting multiple slits with random cuts, *IEEE Trans. Pattern. Anal. Mach. Intell.* 15, pp. 647–651 (1993).
- [40] N. G. Durdle, J. Thayoor, V. J. Raso, An improved structured light technique for surface reconstruction of the human trunk, in: *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2, 1998, pp. 874–877.
- [41] J. Salvi, J. Batlle, E. Mouaddib, A robust-coded pattern projection for dynamic 3d scene measurement, *International Journal of Pattern Recognition Letters* (19) (1998) 1055–1065.
- [42] E. M. Petriu, Z. Sakr, S. H. J. W., A. Moica, Object recognition using pseudo-random color encoded structured light, in: *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement technology Conference*, Vol. 3, 2000, pp.1237–1241.
- [43] P. Lavoie, D. Ionescu, E. Petriu, A high precision 3D object reconstruction method using a color coded grid and nurbs, in: *Proceedings of the International Conference on Image Analysis and Processing*, Venice, Italy, 1999, pp. 370–375.
- [44] L. Zhang, B. Curless, S. M. Seitz, Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming, in: *Int. Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, Padova, Italy, 2002.
- [45] E. M. Petriu, T. Bieseman, N. Trif, W. S. McMath, S. K. Yeung, Visual object recognition using pseudo-random grid encoding, in: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1992, pp.1617–1624.
- [46] H. J.W. Spoelder, F. M. Vos, E. M. Petriu, F. C. A. Groen, Some aspects of pseudo random binary array-based surface characterization, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement* 49 (6) (2000) pp. 1331–1336.
- [47] P. Griffin, L. Narasimhan, S. Yee, Generation of uniquely encoded light patterns for range data acquisition, *Pattern Recognition* 25 (6) (1992) pp. 609–616.
- [48] R. A. Morano, C. Ozturk, R. Conn, S. Dubin, S. Zietz, J. Nissanov, Structured light using pseudorandom codes, *Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20 (3) (1998) pp. 322–327.
- [49] B. Carrhill, R. Hummel, Experiments with the intensity ratio depth sensor, in: *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 32, Academic Press, 1985, pp. 337–358.
- [50] T. Miyasaka, K. Kuroda, M. Hirose, K. Araki, High speed 3-D measurement system using incoherent light source for human performance analysis, in: *Proceedings of the 19th Congress of The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, The Netherlands, Amsterdam, 2000, pp. 65–69.
- [51] G. Chazan, N. Kiryati, Pyramidal intensity-ratio depth sensor, Technical report 121, Center for Communication and Information Technologies, Department of Electrical Engineering, Technion, Haifa, Israel (October 1995).

- [52] J. Tajima, M. Iwakawa, 3-D data acquisition by rainbow range finder, in: International Conference on Pattern Recognition, 1990, pp. 309–313.
- [53] T. Sato, Multispectral pattern projection range finder, in: Proceedings of the Conference on Three-Dimensional Image Capturer and Applications II, Vol. 3640, SPIE, San Jose, California, 1999, pp. 28–37.
- [54] J. Salvi, J. Pagès, J. Batlle, Pattern codification strategies in structured light systems, Pattern Recognition. Volume 37, Issue 4, April 2004, pp. 827-849.
- [55] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, R. Scopigno, A low cost 3D scanner based on structured light, in: A. Chalmers, T.-M. Rhyne (Eds.), EG 2001 Proceedings, Vol. 20(3), Blackwell Publishing, 2001, pp. 299–308.
- [56] C. Chen, Y. Hung, C. Chiang, J. Wu, Range data acquisition using color structured lighting and stereovision, Image and Vision Computing 15 (1997) pp. 445–456.
- [57] C. Wust, D.W. Capson, Surface profile measurement using color fringe projection, Machine Vision and Applications 4 (1991) pp. 193–203.
- [58] M. Bertozzi, A. Broggi, G.Conte and A. Fascioli, ‘Stereo-Vision System performance analysis, Enabling Technologies for the PRASSI Autonomous Robot, pages 68-73. ENEA, Rome, Italy, January 2002, ISBN 8882860248.
- [59] D. Scharstein and R. Szeliski. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms, IJCV, 2002.
- [60] Ruo Zhang, Ping-Sing Tsai, James Edwin Cryer, Mubarak Shah, Shape from Shading: A Survey, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence August 1999 (Vol. 21, No. 8).
- [61] D.A. Forsyth, Shape from texture without boundaries, Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part III table of contents,pp. 225 - 239,2002,ISBN:3-540-43746-0.
- [62] E. Horn, N. Kiryati, Towards optimal structured light patterns, Image and Vision Computing 17 (2) (1999) pp. 87-97.
- [63] Aaron Hertzmann, Steven M. Seitz, Shape and Materials by Example: A Photometric Stereo Approach, Proceedings of CVPR 2003. IEEE Computer Society Conference on. Computer Vision and Pattern Recognition
- [64] P.J. Besl. Active, optical range imaging sensors. Machine Vision and Applications, 1.127-152, 1988.
- [65] Aaron Hertzmann, Steven M. Seitz. Example-Based Photometric Stereo: Shape Reconstruction with General, Varying BRDFs. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 27, no. 8, pp. 1254-1264, August 2005.
- [66] Chia-Yen Chen, Reinhard Klette, Chi-Fa Chen, 3D Reconstruction Using Shape from Photometric Stereo and Contours, November 2003, Image and Vision Computing.
- [67] R. Basri and D. Jacobs, ``Photometric Stereo with General, Unknown Lighting," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2001.
- [68] Yoav. Y. Schechner Depth from Defocus vs. Stereo: How different really are they? International Journal of Computer Vision 89 pp. 141-162 (2000).
- [69] Paolo Favaro, Shape from Focus/Defocus, Washington University Department of Electrical Engineering Electronic Signals and Systems Research Lab, June 25th, 2002, http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/FAVARO1/dfdutorial.html
- [70] Jean-Yves Bouguet, Pietro Perona, ‘3D Photography on your desk’, in Proc. Of the Int. Conf. On Computer Vision, Bombay, India, January 1998.

- [71] M. Nashman. , T. Hong. , W. Rippey. , M. Herman. , "An Integrated Vision Touch-Probe System for Dimensional Inspection Tasks", Proceedings of the SME Applied Machine Vision '96 Conference, Cincinnati, OH, June 3-6, 1996.
- [72] G. Vozikis, A. Haring, E. Vozikis and K.Kraus, 'laser Scanning: A new method for recording and documentation in Archaeology', FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27,2004 Archaeological Surveys.
- [73] H. D. Park, G.H. Shin, Y.S. Chang, 'Three dimensional modeling and visualization of weathered rock surface', Proceedings of the International Workshop on Visualization and Animation Of Landscape Kunming, China 26 - 28 February 2002 ISSN: 1682-1777, Volume: XXX IV Part No.: 5/W3.
- [74] W. Bohler, M. Bordas Vicent, G. Heinz, A. Marbs and H.Muller, 'High quality Scanning and modeling of Monuments and Artifacts', FIG, Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27, 2004, Modeling and Visualization.
- [75] Carlos Hernandez Esteban, Frances Schmitt, 'Multi-Stereo 3D Object Reconstruction', Proceeding of 3D Data Processing , Visualization & Transmission Conference, June 2002, Padova, Italy.
- [76] Stephen J. Marshall, John H. Gilby, 'New Opportunities in Non-Contact 3D Measurement', Proc. National Measurement Conf. 2001, Harrogate, UK, 2001.
- [77] J.A. Beraldin, C. Atzeni, G. Guidi, M. Pieraccini and S. Lazzari, 'Establishing a Digital 3D Imaging Laboratory for Heritage Applications: First Trials', Proceeding of the Italy-Canada 2001 Workshop of 3D Digital Imaging and Modelling Applications, Padova, Italy, April 3-4,2001
- [78] F.Berardini και H. Rushmeier. The 3D Model acquisition pipeline. Computer Graphics Forum, 21(2):149-172, June 2002.
- [79] M. Alexa, J Behr, D. Cohen-Or, S. Fleishman, D. Levin και C.T. Silva, Point set surfaces, IEEE Visualisation 2001, p. 21-28,Oct.2001.
- [80] W.T. Correa, S. Fleishman and C.T. Silva, Towards point-based acquisition and rendering of large real-world environments. In Proceedings of the 15th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, 2002.
- [81] Matteo Sgrenzaroli, Erik Wolfart, 'Accurate texture-mapped 3D models for documentation, surveying and presentation purposes', CIPA, September 2002,Corfu, Greece, Proceedings of 'Scanning for Cultural Heritage Recording', pp.148 -155.
- [82] Lorensen, W.E. and Cline H. (1987), Marching Cubes: A high resolution 3D surface reconstruction algorithm, ACM computer graphics (Proceedings of SIGGRAPH '87), Vol. 21(4), p.163-170.
- [83] F. Bernardini, J. Mittleman, H. Rushmeier, C. Silva and G. Taubin, The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 5(4):349-359, Oct.-Dec. 1999.
- [84] M .Garland and P.S. Heckbert. Surface simplification using quadric error metrics. In SIGGRAPH '97 Conference Proceedings, Annual Conference Series, p. 209-216, Addison Wesley, August 1997.
- [85] Cingoni, P., Montani C. and Scopigno R., A comparison of mesh simplification algorithms, Computers & Graphics 22 (1), pp.37-54.
- [86] Michael Garland, Paul S. Heckbert, Surface Simplification Using Quadric Error Metrics, SIGGRAPH 1997.
- [87] Stan Melax, A Simple, Fast, and Effective Polygon Reduction Algorithm, November 1998, Game Developer Magazine.

- [88] Jeff Somers, A simplification algorithm based on shortest edge first. 2002, <http://users.rcn.com/liusomers>
- [89] J. Wang and M.M. Oliveira. A hole filling strategy for surface reconstruction from range images. Technical Report TR02.07.18, SUNY at Stony Brook, 2002.
- [90] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. Cherrie, T.J. Mitchell, W.R. Fright, B.C. McCallum, and T.R. Evans. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions. In Proceedings of SIGGRAPH 2001, pp. 67-76.
- [91] Malzbender T., Gelb, D., and Wolters H. Polynomial texture maps, Proceeding of SIGGRAPH 2001, August 2001, 519-528, ISBN 1-58113-292-1.
- [92] Levoy M. Pulli, K, Curless B, Rusinkiewicz S, Koller D, Pereira L, Ginzton M, Anderson S, Davis J, Shade, J, Fulk D. The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. Proceedings of SIGGRAPH 2000, July, 131-144, ISBN 1-58113-208-5.
- [93] Dana, K.J.; Nayar, S.K., Computer Vision, 1999. The Proceedings of the 7th IEEE International Conference on , Volume: 2 , 20-27 Sept. 1999, Pages:1061 - 1066 vol.2.
- [94] Jeffrey Abouaf, Michael J. Potel, 'The Florentine Pieta': Can Visualisation Solve the 450-Year-old Mystery?' IEEE Computer Graphics and Applications, January/February 1999, pp.6-10.
- [95] Ioannidis, C., M. Tsakiri 'laser Scanning and Photogrammetry for the Documentation of a Large Statue, Experiences in the Combined Use', Proceedings of CIPA XIX International Symposium, Antalya, Turkey, 30 Sept. 4 Oct., pp. 517-523, 2003.
- [96] Gabriele Guidi, J.-Angelo Beraldin and Carlo Atzeni, 'High-Accuracy 3D modeling of Cultural Heritage: The Digitizing of Donatello's 'Maddalena'', IEEE Transactions on Image processing, Vol.13, No.3 March 2004.
- [97] Henz G., 'Pharaoh Pepi I: Documentation of the oldest known life-size metal sculpture using laser scanning in surveying and photogrammetry. In proceedings of CIPA WG6 International Workshop, September 1-2, Corfu, Greece.
- [98] Luc Van Goo, Marc Pollefeys, Marc Proesmans, and Alexey Zalesny, 'The MURALE project: Image-based 3D modeling for archaeology', Proceedings of VAST 2001, Glyfada, Athens, Greece, 28-30 November 2001.
- [99] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, R. Scopigno, R. Fontana, M. Greco, E. Pampaloni, L. Pezzati, M. Cygielman, R. Giachetti, G. Gori, M. Miccio, R. Pecchioli, '3D Scanning the Minerva of Arezzo', In ICHIM'2001 Conf. Proc., Vol.2, pages 265-272. Politecnico di Milano, 2001.
- [100] Πατιάς, Π., Φωτογραμμετρική Αποτύπωση Και Τεκμηρίωση Αρχιτεκτονικών Μνημείων Και Αρχαιολογικών Χωρών, Σημειώσεις για το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών με τίτλο "Συστήματα Πολιτισμικών Αγαθών & Διαχείρισης της Πολιτισμικής Κληρονομιάς" του Πανεπιστημίου Κρήτης, 1999.
- [101] Τζιαβός Η., Σ. Σπαταλάς, Εφαρμογές ρυμοτομικών σχεδίων και τοπογραφικές μελέτες, 2004, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων ΑΠΘ.
- [102] Σπαταλάς, Σ., Τοπογραφία και Τοπογραφικές Αποτυπώσεις του χώρου, Σημειώσεις μαθήματος, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, ΔΠΘ, 2004.
- [103] Βλάχος, Δ., "Αρχές και Μέθοδοι Τοπογραφικής Αποτύπωσης - Προδιαγραφές Σημειώσεις Μαθήματος "Μέθοδοι Αποτύπωσης Μνημείων, Ιστορικών Συνόλων Και Έργων Τέχνης", 1998.
- [104] CloudCompare <http://www.danielgm.net/cc/>

[105] Γ. Παπαίωαννου, Ψηφιακές Τεχνολογίες Συνθετικής Εικόνας, Παρουσίαση, Εργαστήριο Τρισδιάστατων Γραφικών Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών Πανεπιστημίου Αθηνών.