



3D CMS - Ολοκληρωμένη Πλατφόρμα Ανάπτυξης
και διαχείρισης 3D Εφαρμογών Πολιτιστικού
Περιεχομένου

ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ 2.1.1

Μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης αντικειμένων και χώρων

*Ενότητα Εργασίας 2. Τεχνικές βέλτιστης ψηφιοποίησης και μοντελοποίησης
εκθεμάτων και χώρων*

Παραδοτέο 2.1. Αξιολόγηση τεχνικών ψηφιοποίησης και μοντελοποίησης

ΙΕΛ – Ινστιτούτο Επεξεργασίας του Λόγου

ΑΘΗΝΑ – Ερευνητικό Κέντρο Καινοτομίας στις Τεχνολογίες της Πληροφορικής των
Επικοινωνιών και της Γνώσης

Υπεύθυνοι Σύνταξης:

Γεώργιος Παυλίδης

Βασίλειος Σεβελίδης

Μαρία Χαραλαμπίδου

Φεβρουάριος 2014

ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ 2.1.1

Μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης αντικειμένων και χώρων

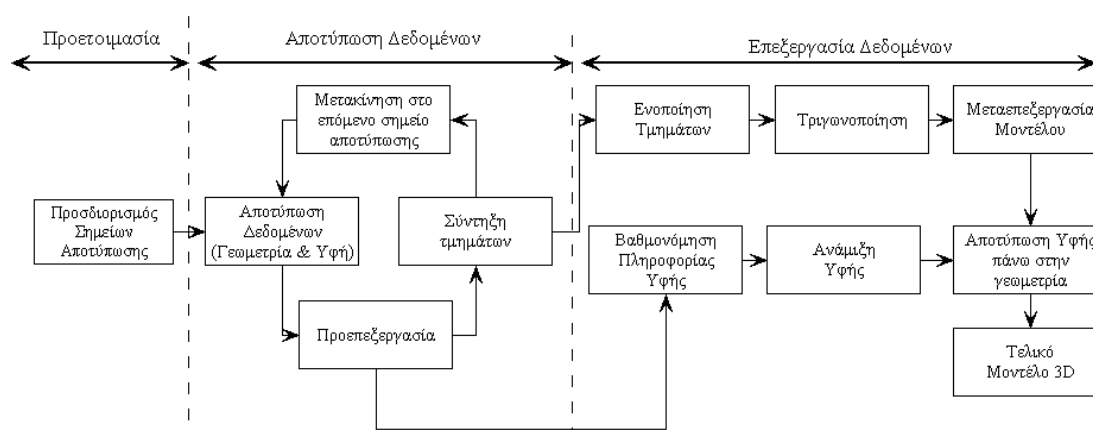
Πίνακας Περιεχομένων

Εισαγωγή	4
Ψηφιακή οπτική τεκμηρίωση πολιτιστικών αντικειμένων	8
Ψηφιακή οπτική τεκμηρίωση πολιτιστικών αντικειμένων	11
Αναπαράσταση τρισδιάστατων επιφανειών	14
Χάρτης βάθους	14
Νέφος σημείων	14
Πολυγωνικό – τριγωνικό πλέγμα	14
Ογκομετρικά εικονοστοιχεία	14
Ψηφιοποίηση των κινητών πολιτιστικών αντικειμένων	15
Ψηφιοποίηση των ακίνητων μνημείων	19
Μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης	20
Τεχνολογική επισκόπηση	22
Τεχνικές ψηφιοποίησης μικροσκοπικών αντικειμένων	22
Τεχνικές ψηφιοποίησης μικρών αντικειμένων	24
Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεσαίου μεγέθους	24
Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεγάλου μεγέθους	29
Σύνοψη συστημάτων τρισδιάστατης ψηφιοποίησης	30
Συστήματα τριγωνισμού ακτίνων λέιζερ μικρών αποστάσεων	30
Συστήματα εξαγωγής σχήματος από σιλουέτες	32
Σχήμα από Δομημένο Φως	35
Σχήμα από Στερεοσκοπική Φωτογράφιση (Στερεοφωτογράφιση)	37
Σχήμα από Κίνηση - Σχήμα από ακολουθία εικόνων (βίντεο)	39
Σχήμα από Φωτοσκίαση	41
Σχήμα από υφή	41
Σχήμα από φωτομετρική στερεοσκοπική φωτογράφιση	42
Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση	44
Σχήμα από σκιά	46
Συστήματα μέτρησης συντεταγμένων	47
Εμπειρικές μέθοδοι ψηφιοποίησης ακίνητων μνημείων	49
Τοπογραφικές μέθοδοι	50
Φωτογραμμετρικές μέθοδοι	54
Στερεοσκοπική Φωτογραμμετρία	55
Μονοσκοπική φωτογραμμετρία	56
Ψηφιοποίηση με χρήση τεχνικών σάρωσης λέιζερ ή τριγωνισμού	58
Εναλλακτικές μέθοδοι	61

Γενικά χαρακτηριστικά συστημάτων και η συμβολή τους στη διαδικασία ψηφιοποίησης	62
.....	62
Εισαγωγή	62
Η ταχύτητα ψηφιοποίησης	62
Οι τεχνικές βαθμονόμησης	62
Η επαλήθευση της ακρίβειας	63
Όρια απόστασης για ορθή λειτουργία	64
Το οπτικό πεδίο	64
Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές	64
Η μεταφορά του συστήματος ψηφιοποίησης	65
Η τροφοδοσία ισχύος του συστήματος	65
Βέλτιστη μεθοδολογία αποτύπωσης κινητών αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς ..	65
Βέλτιστη μεθοδολογία αποτύπωσης ακίνητων μνημείων	67
Εμπειρική μέθοδος αποτύπωσης	67
Τοπογραφική μέθοδος αποτύπωσης	68
Φωτογραμμετρία.....	68
Μέθοδοι ανίχνευσης λέιζερ	71
Κανόνες επιλογής της βέλτιστης μεθόδου	71
Κριτήρια επιλογής εμπορικού συστήματος τρισδιάστατης σάρωσης	74
Βιβλιογραφία.....	78
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Συγκεντρωτικοί πίνακες χαρακτηριστικών μεγεθών	82

Εισαγωγή

Η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση νοείται, ουσιαστικά, ως το πρώτο βήμα της συνολικής διαδικασίας πλήρους ψηφιακής αποτύπωσης ενός πολιτιστικού αντικειμένου ή χώρου. Ψηφιοποίηση ενός μνημείου μπορεί να οριστεί η ακριβής αποτύπωση και καταγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του με τρόπο ώστε να αναπαρίσταται αξιόπιστα η γεωμετρική μορφή και θέση του στο χώρο με τη χρήση διαγραμμάτων και δισδιάστατων απεικονίσεων αλλά και τρισδιάστατων εικονικών μοντέλων στη μνήμη αλλά και στη οθόνη ενός Η/Υ [1]. Αποτελείται από πολλαπλά βήματα διαδικασιών και παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ανάλογα με το αντικείμενο της ψηφιοποίησης το σκοπό της και την εφαρμογή. Λόγω της πολυπλοκότητας των αναγκών που προκύπτουν από τα ίδια τα αντικείμενα της ψηφιοποίησης υπάρχει σήμερα μια πληθώρα μεθοδολογιών και τεχνολογιών. Ο στόχος κάθε τεχνικής είναι να αντιμετωπίσει με επιτυχία τα θέματα που αφορούν τόσο στην τρισδιάστατη ψηφιοποίηση ενός συγκεκριμένου τύπου αντικειμένων ή χώρων, όσο και στην ικανοποίηση συγκεκριμένων αναγκών και στόχων ενός συγκεκριμένου έργου ψηφιοποίησης (π.χ. πλήρης αποτύπωση, αποτύπωση για προβολή, αποτύπωση για τουριστική εκμετάλλευση, κοκ). Ένα γενικευμένο διάγραμμα των διαδικασιών που εμπλέκονται σε μια τρισδιάστατη ψηφιοποίηση φαίνεται στην Εικόνα 1.



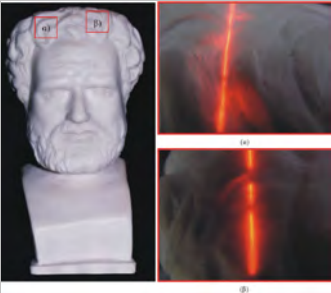


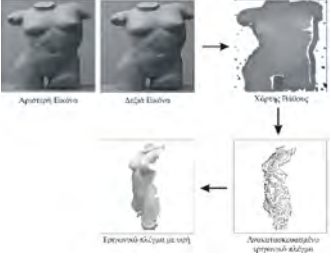
Εικόνα 1. Διάγραμμα διαδικασιών τρισδιάστατης ψηφιοποίησης

Όπως είναι εμφανές από την εικόνα, η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση είναι, στη γενική περίπτωση, μια πολυσύνθετη διαδικασία που αποτελείται από *τρεις βασικές φάσεις*:

- *Προετοιμασία*: κατά την οποία γίνονται οι απαιτούμενες προκαταρκτικές ενέργειες της ψηφιοποίησης, οι οποίες αφορούν από την τεχνική και τη μεθοδολογία ψηφιοποίησης που θα υιοθετηθεί έως το χώρο που θα πραγματοποιηθεί, θέματα ασφάλειας, προγραμματισμού εργασιών, κοκ
- *Αποτύπωση δεδομένων*: κατά την οποία πραγματοποιούνται οι κύριες διαδικασίες ψηφιοποίησης ακολουθώντας τη μεθοδολογία που καταρτίζεται στη φάση της προετοιμασίας
- *Επεξεργασία δεδομένων*: κατά την οποία γίνεται η τελική μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων της ψηφιοποίησης με διαδικασίες όπως ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων, επεξεργασία γεωμετρικών δεδομένων, επεξεργασία υφής, ενσωμάτωση υφής στην πληροφορία γεωμετρίας

Το γενικό αυτό πλαίσιο δεν είναι αναγκαίο να ισχύει πάντοτε. Οι ιδιαιτερότητες των αντικειμένων και χώρων που ψηφιοποιούνται είναι αυτές που καθορίζουν, τις περισσότερες φορές, το τελικό πλαίσιο εφαρμογής των διαδικασιών ψηφιοποίησης. Ακόμη πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι ιδιαιτερότητες αυτές μπορεί να συμβάλλουν σημαντικότερα ή, ακόμη, και να καθορίζουν την επιλογή της τεχνικής που θα πρέπει να ακολουθηθεί. Ο κανόνας είναι ότι *δεν υπάρχει μία γενικής χρήσης άριστη μέθοδος τρισδιάστατης ψηφιοποίησης*. Για την ακρίβεια, υπάρχουν περιπτώσεις όπου καμία από τις διαθέσιμες μεθόδους δεν μπορεί να οδηγήσει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα τρισδιάστατης αποτύπωσης. Ο Πίνακας Ι συγκεντρώνει όλες τις διαθέσιμες τεχνικές τρισδιάστατης ψηφιοποίησης. Στον πίνακα δίνεται ο τίτλος της μεθόδου, μια συνοπτική περιγραφή της καθώς και μια χαρακτηριστική εικόνα που αναπαριστά τη διαδικασία.

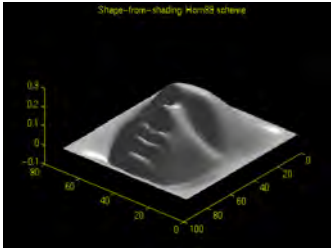
Πίνακας Ι. Μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης

Απεικόνιση	Περιγραφή μεθόδου
	<p>Σάρωση με ακτίνες λέιζερ (laser triangulation) Προβολή δέσμης ή μοτίβου ακτίνων λέιζερ, ανίχνευσή τους και εφαρμογή γεωμετρικών σχέσεων τριγωνισμού για την αναγνώριση γεωμετρίας</p>
	<p>Σχήμα από δομημένο φωτισμό (shape from structured light) Προβολή χρωματικού (ή όχι) μοτίβου, δισδιάστατη φωτογράφιση και αναγνώριση γεωμετρίας από τις παραμορφώσεις στο μοτίβο</p>
	<p>Σχήμα από σιλουέτες (shape from silhouette) Πολλαπλή δισδιάστατη φωτογράφιση και ανακατασκευή γεωμετρίας από τις πολλαπλές σιλουέτες</p>
	<p>Σχήμα από στερεοφωτογράφιση (shape from stereo) Αναγνώριση γεωμετρίας από ζεύγος δισδιάστατων φωτογραφιών με χρήση κανόνων στερεοσκοπικής όρασης</p>



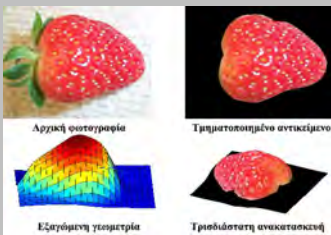
Σχήμα από κίνηση (*shape/structure from motion*)

Αναγνώριση γεωμετρίας από πλήθος δισδιάστατων φωτογραφιών με χρήση αλγορίθμων αναγνώρισης της τρίτης διάστασης παρόμοιους με τη μέθοδο Σχήμα από στερεοφωτογράφιση



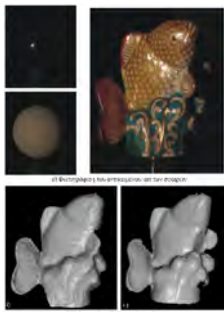
Σχήμα από φωτισκίαση (*shape from shading*)

Μέθοδος δημιουργίας τεχνητής, μεταβλητής και ελεγχόμενης φωτισκίασης για την εξαγωγή τρισδιάστατης γεωμετρίας με εφαρμογή κανόνων οπτικής σε πλήθος δισδιάστατων φωτογραφιών



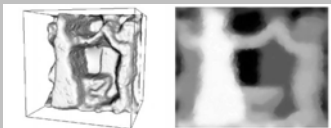
Σχήμα από υφή (*shape from texture*)

Ανάκτηση πληροφορίας τρίτης διάστασης σε δισδιάστατες φωτογραφίες με την εκμετάλλευση πληροφορίας προσανατολισμού και διάχυσης δομικών στοιχείων επιφανειακής υφής



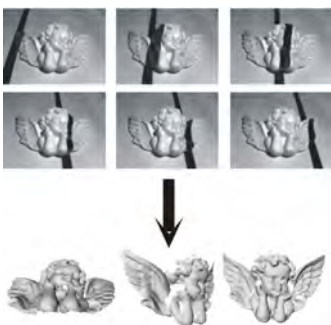
Σχήμα από φωτομετρία (*shape from photometry*)

Μέθοδος λήψης δισδιάστατων φωτογραφιών υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού και ανάκτηση τρισδιάστατης γεωμετρίας μέσω αλγορίθμων οπτικής



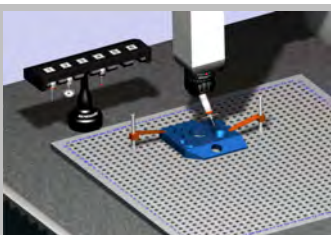
Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση (*shape from focus*)

Ανάκτηση τρίτης διάστασης σε επιφάνειες μέσω σειράς δισδιάστατων φωτογραφιών με ελεγχόμενα μεταβαλλόμενη εστίαση



Σχήμα από σκιά (*shape from shadow*)

Ανάκτηση γεωμετρίας μέσω παρακολούθησης της σκιάς σε διαδοχική δισδιάστατη φωτογράφιση σε συνθήκες όπου υπάρχει μετακινούμενη πηγή φωτός



Σάρωση με συστήματα αφής (*measuring systems*)

Ανάκτηση γεωμετρίας μέσω συνεχούς επαφής ειδικού αισθητηρίου αφής με το αντικείμενο που ψηφιοποιείται



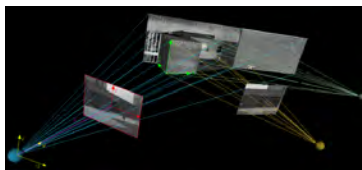
Εμπειρικές ή τοπομετρικές μέθοδοι

Ανάκτηση γεωμετρίας με μηκομετρήσεις τριγώνων (τριπλευρισμούς), διαγωνίων, πλευρών, αποκλίσεων και υψομετρικών διαφορών χρησιμοποιώντας νήμα στάθμης, αλφαδολάστιχο και μετροταινία



Τοπογραφικές μέθοδοι

Τυπικές μέθοδοι ανάκτησης γεωμετρίας με χρήση τοπογραφικών οργάνων, όπως ο θεοδόλιχος, τα αποστασιόμετρα, οι γεωδαιτικοί σταθμοί



Φωτογραμμετρία

Μέθοδοι ανάκτησης γεωμετρίας μέσω καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων και άλλων προτύπων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



Σάρωση με λέιζερ πεδίου

Ανάκτηση γεωμετρίας χώρου από μέτρηση του χρόνου πτήσης (διαφορά χρόνου αποστολής από το χρόνο επιστροφής λόγω ανάκλασης) δέσμης λέιζερ (είτε στο ορατό είτε στο υπέρυθρο φάσμα)

Η ποικιλία των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των τρισδιάστατων συντεταγμένων της επιφάνειας ενός αντικειμένου έχει οδηγήσει σε μια άστοχη φιλονικία για το αν τελικά η *Τρισδιάστατη Σάρωση*, ως έννοια, ανήκει στις γεωδαιτικές μελέτες ή στη φωτογραμμετρία και την όραση υπολογιστών. Βλέποντας όμως το θέμα από την πλευρά του χρήστη το αποτέλεσμα είναι αυτό που μετράει ανεξάρτητα της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε [2]. Γενικότερα, ως τρισδιάστατο σαρωτή θα μπορούσαμε να ορίσουμε οποιαδήποτε συσκευή δύναται να συλλέξει τρισδιάστατες συντεταγμένες από μία δεδομένη περιοχή πάνω στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, η οποία πληρεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ακολουθεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που βασίζεται σε κάποιο πρότυπο
- Πραγματοποιεί δειγματοληψία υψηλού ρυθμού (εκατοντάδες ή χιλιάδες σημεία ανά δευτερόλεπτο)
- Επιταχύνει τη διαδικασία, ώστε να πραγματοποιείται σε πραγματικό (σχεδόν) χρόνο
- Δύναται ή και όχι να διακρίνει χρωματική πληροφορία της εκάστοτε επιφάνειας σε συνδυασμό με την τρισδιάστατη γεωμετρία της

Ο τρόπος χρήσης μια τέτοιας συσκευής είναι [2]:

- είτε σταθερός σε κάποια συγκεκριμένη θέση
- είτε πάνω σε κάποιον κλασικό, φωτογραφικού τύπου, τρίποδα
- είτε σε μεταφερόμενες βάσεις
- είτε εν πτήση όταν πρόκειται για τοπογραφικές εφαρμογές

Αξίζει να τονιστεί ότι η σάρωση ενός αντικειμένου είναι πολλές φορές το εύκολο τμήμα μιας εργασίας ψηφιοποίησης. Η δημιουργία πιστών τρισδιάστατων αναπαραστάσεων που αποτελούνται από ακανόνιστες επιφάνειες απαιτούν συνήθως πολύ χρόνο και εργασία. Η τρισδιάστατη σάρωση είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Ως λύση, δεν αποτελεί πανάκεια, όπως πολλοί υποστηρίζουν (κυρίως οι εταιρίες ανάπτυξης τέτοιων συστημάτων). Χωρίς αμφιβολία οι τρισδιάστατοι σαρωτές ταιριάζουν απόλυτα σε εφαρμογές μετρήσεων ανώμαλων επιφανειών και πιθανότατα να έχει αποδειχτεί μια από τις καλύτερες διαθέσιμες μεθόδους. Ωστόσο η αμιγής και μόνο συλλογή δεδομένων δεν είναι επαρκής. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί και στη μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων. Ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία ενός υψηλής πιστότητας τρισδιάστατου μοντέλου είναι πολλές φορές πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο σάρωσης [3].

Ψηφιακή οπτική τεκμηρίωση πολιτιστικών αντικειμένων

Ο πολιτισμός και ειδικότερα η αρχαιολογία βρίσκεται μονίμως αντιμέτωπη με το πρόβλημα της καταγραφής και μελέτης αντικειμένων ανυπολόγιστης αξίας. Από τη στιγμή της ανασκαφής τα κειμήλια εκτίθενται σε μια προοδευτική και συχνά ανίατη διαδικασία παραμόρφωσης που μπορεί να καταλήξει και σε ολική καταστροφή [4]. Τα δεδομένα που καταγράφονται για μία αρχαιολογική έρευνα έχουν διττό σκοπό: τη δημιουργία ενός μέσου που θα επιτρέπει την υψηλής πιστότητας δημοσίευση του αντικειμένου αλλά και την εικονική διατήρηση του ακόμα και στο απλούστερο επίπεδο της διάσωσης της ίδιας της πολιτιστικής πληροφορίας που εμπεριέχει [4]. Η προστασία και διατήρηση αρχαιολογικών – πολιτιστικών αντικειμένων δεν είναι ένα απλό θεωρητικό πρόβλημα. Η αρχαιολογία είναι, εξ ορισμού, καταστροφική κατά τη διάρκεια της αποκάλυψης του παρελθόντος. Η απαραίτητη καταστροφή του ανασκαφικού συνόλου¹ αποβλέπει στην αποκάλυψη του εκάστοτε αντικειμένου. Μετά την ανασκαφή, το αντικείμενο εκτίθεται σε ένα πλήθος νέων περιβαλλοντικών επιθέσεων (φυσικοχημική και τουριστική μόλυνση). Σε πολλές περιπτώσεις είναι αναπόφευκτη η φθορά του και πραγματοποιείται σε πολύ σύντομο σε σχέση με την ηλικία του χρονικό διάστημα [4]. Για την αντιμετώπιση αυτής της προοδευτικής και ανίατης φθοράς, οι αρχαιολόγοι χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές καταγραφής και αρχειοθέτησης. Σε αντίθεση με μια γενικότερη άποψη που επικρατεί, η φωτογραφία δεν πληρεί τις ανάγκες καταγραφής της Αρχαιολογίας και της Ιστορίας Τέχνης. Προβάλλει πάντα το αντικείμενο από μία οπτική γωνία, μειώνοντας τον όγκο του αντικειμένου σε δύο διαστάσεις, εισάγοντας συχνά οπτικές παραμορφώσεις. Από την άλλη, οι ερμηνευτικές παραστάσεις, οι οποίες βοηθούν στη μελέτη του αντικειμένου, είναι πολλές φορές αδύνατο να πραγματοποιηθούν πάνω στη φωτογραφία. Τα αποτελέσματα² της παραδοσιακής φωτογράφισης ξεθωριάζουν με τον καιρό. Για όλους τους προηγούμενους λόγους οι αρχαιολόγοι και οι ιστορικοί τέχνης βασίζονται συνήθως και σε άλλες μεθόδους αρχειοθέτησης όπως είναι η σχεδίαση και η ζωγραφική. Τις περισσότερες φορές τα σχέδια αυτά γίνονται με αργούς ρυθμούς, ώστε να έχουν μεγάλη ακρίβεια, παρουσιάζοντας το μειονέκτημα να προσαρμόζονται δύσκολα σε τεχνικές διαχείρισης και οργάνωσης [5],[6]. Η αρχειοθέτηση στην Αρχαιολογία και στην Ιστορία Τέχνης έχει να αντιμετωπίσει δύο ουσιώδη προβλήματα τα όποια σχετίζονται απόλυτα μεταξύ τους. Αυτά είναι [4]:

¹ Περιβάλλον χώρος γύρω από το αντικείμενο.

² Γαλακτώματα από αλογονούχες ενώσεις του αργύρου, διαφάνειες, φωτοαντίγραφα, κ.α.

-
- Η αντικειμενικότητα περιγραφής του αντικειμένου (πιστότητα)
 - Η ταχύτητα και η προσαρμοστικότητα της πραγματοποίησης της καταγραφής

Η τεκμηρίωση της πολιτισμικής κληρονομιάς επιβάλλει την καταγραφή των αντικειμένων από κοντινές αποστάσεις. Τα πολιτιστικά αντικείμενα ποικίλουν σε διαστάσεις. Τα ακανόνιστα σχήματα και η μορφολογική πολυπλοκότητα των επιφανειών τους είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο. Ο διαθέσιμος χρόνος για μετρήσεις είναι τις περισσότερες φορές ελάχιστος και στο παρελθόν η φωτογραμμετρία ήταν η μόνη μέθοδος που μπορούσε να εφαρμοστεί σε στενά χρονικά περιθώρια [2]. Η αρχειοθέτηση με σκοπό τη μόνιμη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς αντιμετωπίζει μεγάλες προκλήσεις στη νέα χιλιετία. Νέες τεχνολογίες έρχονται να δώσουν απαντήσεις στο πρόβλημα της καταγραφής και προβολής του πολιτιστικού θησαυρού. Η οπτική αναπαράσταση και η μετάδοση της ψηφιακής πληροφορίας είναι από τα πλέον σημαντικά ερευνητικά πεδία που επιτρέπουν σε όλους τους φορείς που ασχολούνται με τον πολιτισμό να προβάλουν τα αποτελέσματα της δουλειά τους με πολλαπλούς νέους και δυναμικούς τρόπους. Άλλωστε, πολλά αρχαιολογικά μνημεία είναι κλειστά προς το ευρύ κοινό για την αποφυγή πιθανών ζημιών. Η χρήση τρισδιάστατων φωτορεαλιστικών μοντέλων και η παρουσίαση τους μέσω εικονικής πραγματικότητας στο διαδίκτυο ή σε οπτικούς δίσκους μπορεί να βοηθήσει σημαντικά τόσο στην εκπαίδευση όσο και στη διάδοση της γνώσης σε πολύ ευρύτερο κοινό [7]. Οι τρισδιάστατοι σαρωτές λέιζερ μπορούν, λοιπόν, να εφαρμοστούν με επιτυχία στην αρχαιολογία ως ένα σημαντικό εργαλείο για τρισδιάστατες αναπαραστάσεις και ψηφιακές αποδόσεις [8]. Η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση αποτελεί στις μέρες μας ένα αναπόσπαστο πλέον κομμάτι της προσπάθειας αρχειοθέτησης της πολιτιστικής κληρονομιάς. Προσφέρει δυνατότητες καταγραφής αρχιτεκτονικών δημιουργιών, αρχαιολογικών ευρημάτων, ιστορικών μνημείων και μνημείων τέχνης. Η επικράτηση των τρισδιάστατων σαρωτών αλλά και φωτογραφικών τεχνικών τα τελευταία χρόνια έχει επιφέρει την αύξηση του ενδιαφέροντος στη χρήση τρισδιάστατων μοντέλων σε πλήθος αρχαιολογικών μελετών. Την ίδια στιγμή η αύξηση στις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων αλλά και επεξεργασίας τρισδιάστατων γραφικών επιτρέπουν στο μέσο χρήστη να έχει πρόσβαση σε υψηλού επιπέδου υλικοτεχνική υποδομή και να διαθέτει την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ για την προβολή τόσο μεγάλου όγκου τρισδιάστατης πληροφορίας. Τα κίνητρα για την τρισδιάστατη ανακατασκευή πολιτιστικών αντικειμένων και μνημείων είναι πολλά:

- Η καταγραφή ιστορικών κτηρίων, τοποθεσιών και αντικειμένων για ανακατασκευή ή αναπαλαίωση σε περιπτώσεις που έχουν υποστεί καταστροφές από φωτιές, σεισμούς, πλημμύρες, πολέμους ή, όπως, είναι φυσικό από διάβρωση
- Η δημιουργία εκπαιδευτικού υλικού για ερευνητές και μαθητές της ιστορίας και του πολιτισμού
- Η εικονική ανακατασκευή ιστορικών μνημείων και αντικειμένων που πλέον δεν υπάρχουν ή υπάρχουν μερικώς
- Η εικονική τρισδιάστατη εξομίωση μνημείων και αντικειμένων με επιλογές επανόρθωσης και ανάπλασης τμημάτων του τρισδιάστατου μοντέλου
- Η εικονική τρισδιάστατη απόδοση αρχαιολογικών ανασκαφών
- Η ανάλυση κατασκευαστικών και επανορθωτικών τεχνικών
- Η αναπαράσταση χώρων από οπτικές γωνίες που είναι αδύνατον να πραγματοποιηθούν στον πραγματικό κόσμο εξαιτίας των μεγεθών ή της θέσης
- Η αλληλεπίδραση με τα πολιτιστικά αντικείμενα (σε εικονικό περιβάλλον) χωρίς το φόβο για κάποια ζημιά

- Οι εφαρμογές προβολής του πολιτιστικού πλούτου π.χ. εικονικός τουρισμός και εικονικά μουσεία
- Η κατασκευή ρεαλιστικών τρισδιάστατων μοντέλων που μπορούν να βοηθήσουν ουσιαστικά στη μελέτη αντικειμένων από απόσταση, καθώς και στη διεύρυνση του πλήθους ατόμων που μπορούν να μελετήσουν ταυτόχρονα κάθε αντικείμενο
- Η συγκέντρωση και παρουσίαση όλων των πληροφοριών που απαιτούνται για την τεκμηρίωση μέσω μίας βάσης δεδομένων τρισδιάστατης πληροφορίας

Στην πραγματικότητα κάθε ένα από τα παραπάνω κίνητρα καθορίζει και ένα πλήθος απαιτήσεων. Μερικές από αυτές είναι οι εξής:

- Η γεωμετρική ακρίβεια
- Η δυνατότητα αποτύπωσης τυχόν λεπτομερειών
- Ο φωτορεαλισμός
- Το χαμηλό κόστος
- Η φορητότητα
- Η προσαρμοστικότητα
- Τα μεγέθη πληροφορίας που φέρουν τα τρισδιάστατα μοντέλα
- Ο χρόνος ψηφιοποίησης και μοντελοποίησης
- Η εξειδίκευση προσωπικού και η τεχνική υποστήριξη

Η σειρά προτεραιότητας των απαιτήσεων αυτών μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Διαφορετική σημασία θα είχε ο φωτορεαλισμός σε μια εφαρμογή ψηφιοποίησης πηλινών αντικειμένων και διαφορετική στη δημιουργία ενός εικονικού μουσείου. Μπορούμε να πούμε με σιγουριά πως δεν έχει, ακόμα, αναπτυχθεί κάποιο εμπορικό σύστημα σάρωσης που να καλύπτει τις απαιτήσεις όλων των περιπτώσεων. Για μικρά και μεσαίου³ μεγέθους αντικείμενα, οι σαρωτές ακτίνων λέιζερ κοντινών αποστάσεων μπορούν να προσφέρουν λεπτομερή τρισδιάστατα μοντέλα. Από την άλλη όμως, το κόστος των σαρωτών παραμένει υψηλό [9]. Μια διαφορετική τοποθέτηση στο πρόβλημα της τεκμηρίωσης έχει δοθεί από το Marco Gaiani (2000) [10]. Ο Gaiani αναφέρει πως στην πραγματικότητα δεν είναι τίποτα διαφορετικό από ένα ακόμα πρόβλημα «μετάφρασης» ή «προβολής». Μια δύσκολη μετάφραση της αρχιτεκτονικής πραγματικού κόσμου σε εικονικό-ψηφιακό. Η λέξη «μετάφραση» στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται για να δηλώσει τη μεταφορά κάποιου αντικειμένου από ένα χώρο σε κάποιον άλλο, χωρίς να δεχθεί την παραμικρή μεταβολή. Κάτι τέτοιο βέβαια δεν είναι απόλυτο, ακόμα και σε γλωσσικό επίπεδο, αφού ίδιες λέξεις διαφέρουν σημασιολογικά από γλώσσα σε γλώσσα. Η άποψη αυτή δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα, αφού η τρισδιάστατη αποτύπωση αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις στο χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Η δισδιάστατη όραση (πχ. κλασική φωτογράφιση) προσπαθεί να ερμηνεύσει ένα τρισδιάστατο περιβάλλον χρησιμοποιώντας προβολές που δημιουργούνται από τα οπτικά αισθητήρια στις κάμερες (στατικές ή βίντεο). Η δισδιάστατη όραση προσφέρει περιορισμένη πληροφορία σχετικά με τις λεπτομέρειες του σχήματος ενός αντικειμένου. Αντίθετα, η τρισδιάστατη όραση υπολογιστών ασχολείται πρωτίστως με την κατανόηση οπτικής πληροφορίας, όπως αυτή συλλέγεται από

³ Από μερικά εκατοστά (το μέγεθος ενός κοσμήματος) έως και μερικά μέτρα (το μέγεθος ενός ανθρώπου ή ενός αγάλματος).

εξειδικευμένα ηλεκτρονικά οπτικά αισθητήρια. Συνεπώς, ασχολείται με την εξαγωγή, πρόσκτηση και κατανόηση δεδομένων από τη γεωμετρία και την υφή των επιφανειών των αντικειμένων που βρίσκονται μέσα σε μία σκηνή. Ο όγκος της πληροφορίας αυτής είναι τεράστιος, καθώς ο πραγματικός κόσμος περιέχει πλούσια γεωμετρική πληροφορία. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη όραση παρέχουν άμεσα γεωμετρική πληροφορία ενός αντικειμένου ή ολόκληρου του χώρου εντός του οπτικού πεδίου τους. Η πληροφορία που προσφέρουν οι τρισδιάστατοι αισθητήρες για τα αντικείμενα έχουν να κάνουν με τη θέση τους στον τρισδιάστατο χώρο. Η πληροφορία αυτή έρχεται να εξαλείψει όλες τις ασάφειες που παρουσιάζουν τα δισδιάστατα συστήματα απεικόνισης [9].

Ψηφιακή οπτική τεκμηρίωση πολιτιστικών αντικειμένων

Η αναγκαιότητα της καταγραφής των ιστορικών μνημείων της πολιτιστικής κληρονομιάς αιτιολογείται από τη σύσταση και λειτουργία διεθνών οργανισμών που έχουν σαν κύριο στόχο τη διατήρησή τους αφού κατά πολλούς αποτελούν θεμέλιο λίθο του πολιτισμού. Αυτό είναι ορατό και από τον τίτλο του διεθνούς συνεδρίου που διοργανώθηκε το 2000 στην Κρακοβία⁴ όπου συστήθηκε και το καταστατικό της Διεθνούς Επιτροπής Διαχείρισης της Αρχαιολογικής Κληρονομιάς (ICAHM - Int'l Committee for Archaeological Heritage Management)⁵ με τίτλο *“Cultural Heritage as the Foundation of the Development of Civilisation”*. Η ICAHM αποτελεί έναν από τους βασικούς κλάδους του ICOMOS⁶, δηλαδή του διεθνούς συμβουλίου των μνημείων και των τοποθεσιών (ICOMOS international Committee of Monuments and Sites) που έχει σαν στόχο τη διάσωση των πολιτιστικών αγαθών σε παγκόσμιο επίπεδο. Το ελληνικό τμήμα του ICOMOS δημιουργήθηκε μετά από πρωτοβουλία του ΤΕΕ το 1972 και έχει σαν κύριο στόχο τη διάσωση και προστασία των πολιτιστικών αγαθών τόσο στην Ελλάδα όσο και στο διεθνή χώρο. Συγκεκριμένα δραστηριοποιείται συστηματικά στην περιοχή της Νοτιοανατολικής Ευρώπης και της Μεσογείου προωθώντας διμερείς σχέσεις και συνεργασίες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνονται στη διάσωση των μνημείων της Βαλκανικής Χερσονήσου που κινδυνεύουν από πολέμους και φυσικά αίτια όπως πχ σεισμοί, πλημμύρες κ.α.

Σύμφωνα με την έκθεση "Principles for the Recording of Monuments, Groups of Buildings and Sites"⁷ του ICOMOS κάθε υπεύθυνος εθνικός ή διεθνής οργανισμός που έχει υπό την άμεση εποπτεία του μνημεία αναλαμβάνει την καταγραφή τους. Η δε καταγραφή πρέπει να γίνεται σύμφωνα με το άρθρο 16 της διακήρυξης της Βενετίας: *«Οι εργασίες συντήρησης, αποκατάστασης και ανασκαφής θα πρέπει να βασίζονται σε εξακριβωμένη τεκμηρίωση, δηλαδή σε αναλυτικές και κριτικές εκθέσεις, εικονογραφημένες με σχέδια και φωτογραφίες»*. Στην προσπάθεια της τεκμηρίωσης των μνημείων με τελικό στόχο τη διατήρηση των μνημείων συμμετέχουν ειδικευμένοι επιστήμονες πολλών διαφορετικών ειδικοτήτων καθώς *«η συντήρηση και η αποκατάσταση των μνημείων αποτελεί έναν επιστημονικό κλάδο, ο οποίος πρέπει να αποτελείται στη συνεργασία όλων*

⁴ Η χάρτα της Κρακοβίας στη διεύθυνση <http://www.triestecontemporanea.it/pag5-e.htm>

⁵ Ιστοσελίδα της ICAHM στη διεύθυνση <http://www.icomos.org/ica hm/>

⁶ Η ιστοσελίδα του ICOMOS στη διεύθυνση <http://www.icomos.org/en/>

⁷ Διαθέσιμη online στη διεύθυνση <http://www.icomos.org/charters/archives-e.pdf>

των επιστημών και όλων των τεχνών που μπορούν να συνεισφέρουν στη μελέτη και τη διάσωση της πολιτιστικής κληρονομιάς» (άρθρο 2 της χάρτας της Βενετίας⁸).

Το 1968 ιδρύθηκε μια από τις διεθνείς επιτροπές του ICOMOS, η CIPA (Comité International de Photogrammétrie Architecturale)⁹ σε συνεργασία με την Διεθνή Ένωση Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης (ISPRS-International Society of Photogrammetry and Remote Sensing)¹⁰. Η αρχικός στόχος της CIPA ήταν η μετάδοση της τεχνογνωσίας από τις επιστήμες των μετρήσεων σε εκείνους τους επιστημονικούς κλάδους που είναι υπεύθυνοι για την καταγραφή και τεκμηρίωση των αρχιτεκτονικών (και μη) μνημείων. Το αρχικό προσωνύμιο της CIPA δεν ανταποκρίνεται πλήρως στις δραστηριότητες της επιτροπής και για το λόγο αυτό καθιερώθηκε διεθνώς το όνομα “CIPA Heritage Documentation” για να περιγράψει τις δραστηριότητες της επιτροπής που υλοποιούνται στα πλαίσια ομάδων εργασίας (Working Groups) και ομάδων καθηκόντων (Task Groups) που καλύπτουν τις παρακάτω θεματικές περιοχές.

- Καταγραφή, Τεκμηρίωση και Διαχείριση Πληροφοριών
- Πληροφοριακά Συστήματα Πολιτιστικής Κληρονομιάς
- Απλές Μέθοδοι Αρχιτεκτονικής Φωτογραμμετρίας
- Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας
- Αρχαιολογία
- Τοπογραφικές μέθοδοι
- Φωτογραφία και Πολιτισμικά Τοπία

Πολλά ενεργά μέλη και εθνικοί εκπρόσωποι της CIPA είναι ειδικευμένοι επιστήμονες με εμπειρία στην καταγραφή-τεκμηρίωση μνημείων αλλά και στα συστήματα διαχείρισης πληροφορίας πολιτιστικής κληρονομιάς και ειδικότερα σε τομείς όπως:

- Τοπογραφικών μετρήσεων χώρου
- Laser scanning
- Τοπογραφικών αποτυπώσεων κτιρίων
- Τεκμηρίωση αρχαιολογικών χώρων
- Δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων
- Συντήρηση μνημείων
- Αρχαιολογικών ανασκαφών
- Συστήματα πληροφοριών
- Επίγειας φωτογραμμετρίας
- Ανάλυση και χρήση αρχειακού φωτογραφικού υλικού
- Πολυμέσα και συστήματα εικονικής πραγματικότητας
- Τεκμηρίωσης πετρογλυφικών και ζωγραφικών μνημείων

Μέχρι πριν από μερικά χρόνια, όταν η τεχνολογία των υπολογιστών και των μετρητικών διατάξεων δεν ήταν τόσο εξελιγμένη όσο σήμερα, η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων μνημείων όπως και μικροαντικειμένων (αρχαιολογικών ευρημάτων και αντικειμένων τέχνης και πολιτισμού) ήταν μια

⁸ Χάρτα της Βενετίας στη διεύθυνση <http://www.international.icomos.org/venicecharter2004/greek.pdf>, στη Wikipedia στις διευθύνσεις http://el.wikipedia.org/wiki/Χάρτης_της_Βενετίας, http://en.wikipedia.org/wiki/Venice_Charter

⁹ Η διεύθυνση της CIPA <http://cipa.icomos.org>

¹⁰ Στη διεύθυνση <http://www.isprs.org>

πολύ δύσκολη εργασία. Η δυσκολία αυτή οφειλόταν τόσο στη διαδικασία της αποτύπωσης με ικανοποιητική ακρίβεια του υπό μελέτη τρισδιάστατου αντικειμένου όσο και στην οπτικοποίηση του μοντέλου του. Η κοινή πρακτική για την αποτύπωση βασιζόταν στη χρήση μη αυτοματοποιημένων διαδικασιών για τη μέτρηση χαρακτηριστικών σημείων χρησιμοποιώντας απλές μετρητικές διατάξεις όπως μιας μετροταινίας ή ενός γεωδαιτικού σταθμού. Τα παραγόμενα προϊόντα σε αυτή την περίπτωση δεν παρουσίαζαν το συνολικό τρισδιάστατο μοντέλο του αντικειμένου αλλά συνήθως παρουσίαζαν την αποτύπωση σε ένα χάρτινο φορέα υπό κλίμακα των χαρακτηριστικών όψεων, κατόψεων και τομών του αντικειμένου. Η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου ενός τρισδιάστατου αντικειμένου έγινε πραγματικότητα με την εισαγωγή των ψηφιακών τεχνικών και των υπολογιστών για την αναπαράσταση των αντικειμένων στις επιστήμες που ασχολούνταν με τη μελέτη τους (πχ. τοπογραφία, αρχιτεκτονική, αρχαιολογία). Ειδικότερα, η ανάπτυξη εφαρμογών τρισδιάστατης παρουσίασης και οπτικοποίησης στην οθόνη υπολογιστή ενός τρισδιάστατου μοντέλου, ώθησε τη χρήση ψηφιακών τεχνικών τρισδιάστατης αποτύπωσης και μετρήσεων με χρήση νέων εξελιγμένων μετρητικών διατάξεων που είναι σε θέση να παρέχουν με αυτοματοποιημένες διαδικασίες τη θέση στο χώρο ενός μεγάλου αριθμού χαρακτηριστικών σημείων που απαρτίζουν την εξωτερική επιφάνεια και οριοθετούν το αντικείμενο. Τα οφέλη που προκύπτουν από τη δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς είναι πάρα πολλά και σημαντικά και ωθούν ολοένα και περισσότερο στη χρήση νέων ψηφιακών τεχνικών αποτύπωσης από τα ινστιτούτα και τους οργανισμούς που ασχολούνται με τη μελέτη και συντήρηση τους. Θα μπορούσαν να αναφερθούν μερικά από αυτά τα οφέλη που ενισχύουν την τρισδιάστατη καταγραφή τους:

1. Καθώς πολλά από τα αντικείμενα της πολιτιστικής κληρονομιάς είναι παλαιά και εν μέρη ή στο σύνολό τους υπό κατάρρευση η δημιουργία του μοντέλου οδηγεί
 - a. Στη μελέτη για πιθανή αποκατάσταση τους
 - b. Στη μελέτη του μοντέλου αντί του ίδιου αντικειμένου με σκοπό την αποφυγή ενεργειών που θα επιφέρουν σημαντικές βλάβες στο ίδιο
2. Τα τρισδιάστατα μοντέλα που δημιουργούνται μπορούν να αποτελέσουν ένα επιπλέον στοιχείο καταγραφής τους που είναι δυνατόν να ενσωματώνεται σε μια συλλογή (Βάση Δεδομένων) όλων των παρόμοιων αντικειμένων που παρουσιάζουν μια συγκεκριμένη μορφή ή ανήκουν σε συγκεκριμένη ανασκαφή ενός αρχαιολογικού χώρου. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό για ένα αρχαιολόγο ή γενικά μελετητή να έχει συγκεντρωμένα όλα τα στοιχεία που αφορούν το αντικείμενο της μελέτης του. Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που θα πρέπει να έχει ο μελετητής στη διάθεσή του είναι και η μορφή και η γεωμετρία του αντικειμένου που μελετά και ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος είναι η χρήση τρισδιάστατων μοντέλων. Η απλή φωτογραφική απεικόνιση των αντικειμένων δεν είναι σε θέση να προβάλει σε ικανοποιητική ακρίβεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων καθώς δεν παρουσιάζουν συνολικά τη μορφή τους και δεν παρέχουν την πληροφορία της κλίμακας και οπότε και τις διαστάσεις τους. Για το λόγο αυτό το τρισδιάστατο εικονικό μοντέλο των αντικειμένων είναι το πλέον κατάλληλο εργαλείο για τη μελέτη τους από ένα έμπειρο επιστήμονα.
3. Η δημιουργία ενός μιας εικονικής έκθεσης, ενός εικονικού μουσείου ή και μιας εικονικής περιήγησης μέσω του διαδικτύου, που θα περιέχει τα τρισδιάστατα μοντέλα αντικειμένων μεγάλης αρχαιολογικής και αρχιτεκτονικής αξίας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προϊόντα για την ανάδειξη της πολιτιστικής κληρονομιάς. Δίνεται η δυνατότητα σε ένα

μεγάλο μέρος πολιτών να έρθουν σε επαφή και να γνωρίσουν τον πολιτιστικό πλούτο χωρίς να είναι υποχρεωμένοι να ταξιδεύσουν στο χώρο που φιλοξενούνται τα ίδια τα αντικείμενα.

Αναπαράσταση τρισδιάστατων επιφανειών

Χάρτης βάθους

Ο απλούστερος τρόπος αναπαράστασης και αποθήκευσης τρισδιάστατων συντεταγμένων της επιφάνειας ενός αντικειμένου είναι με τη χρήση *χαρτών βάθους* (depth maps). Ο χάρτης βάθους (Εικόνα 2α) είναι μια δισδιάστατη «εικόνα βεληνεκούς», όπου κάθε εικονοστοιχείο της παίρνει μια χρωματική τιμή από τις διαβαθμίσεις του γκρι, η οποία υποδηλώνει την απόσταση του σημείου από τον οπτικό αισθητήρα στον τρισδιάστατο χώρο. Δύο είναι οι πιο γνωστές μεθοδολογίες δημιουργίας χαρτών βάθους: με την εκπομπή σήματος (Radar) και με τριγωνισμό.

Νέφος σημείων

Ως νέφος σημείων ορίζεται ένα σύνολο σημείων που μοιράζονται το ίδιο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Κάθε σημείο φέρει πληροφορία που το τοποθετεί σε μία συγκεκριμένη θέση μέσα στον τρισδιάστατο χώρο και αντιστοιχεί σε μια θέση πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου που ψηφιοποιήθηκε. Η πληροφορία αυτή είναι τρεις διαφορετικές τιμές, μία για κάθε άξονα (x,y,z) (Εικόνα 2β), ενώ όταν η γεωμετρική πληροφορία συνοδεύεται από πληροφορία χρώματος συνολικά αποθηκεύονται έξι διαστάσεις.

Πολυγωνικό – τριγωνικό πλέγμα

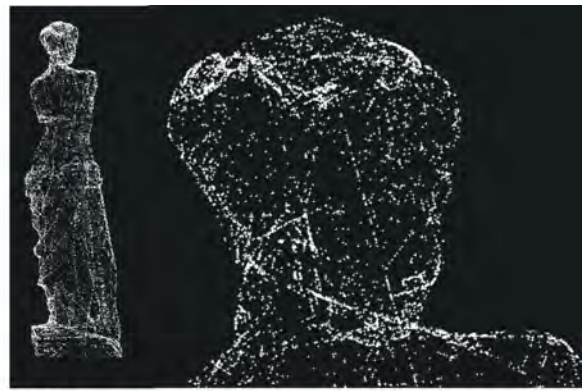
Η απόδοση μίας επιφάνειας από ένα πλήθος τριγώνων είναι μια πολύ διαδεδομένη τεχνική για τρισδιάστατες αναπαραστάσεις. Κάθε τρίγωνο ορίζεται από τρεις κορυφές στο χώρο που και αυτές φέρουν πληροφορία θέσης σε κάθε άξονα (x,y,z). Από ένα νέφος σημείων ή ένα χάρτη βάθους δύναται να γίνει η εξαγωγή πολυγωνικού πλέγματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2γ. Με το πολυγωνικό πλέγμα δημιουργείται μια εικόνα με τεχνητή φωτοσκίαση που απώτερο σκοπό έχει να τονίσει τις λεπτομέρειες της επιφάνειας (Εικόνα 2δ). Το πολυγωνικό πλέγμα μπορεί να συνδεθεί με πληροφορία υφής χαρτογραφημένη πάνω σε κάθε τρίγωνο τις επιφάνειας. Το πεδίο που γίνεται η χαρτογράφηση ονομάζεται UV. Η πιο ρεαλιστική αναπαράσταση είναι αυτή που περιλαμβάνει και την πληροφορία υφής (χρώματος), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2στ.

Ογκομετρικά εικονοστοιχεία

Πολλές φορές γίνονται αναφορές σε εικονοστοιχεία στον τρισδιάστατο χώρο. Ένα εικονοστοιχείο (pixel από *Picture element*), σύμφωνα με το βασικό ορισμό, αναπαριστά τις χρωματικές ιδιότητες ενός σημείου σε ένα δισδιάστατο χώρο. Στις τρεις διαστάσεις μπορούμε να πούμε πως ένα σημείο αναπαριστά πλέον, άλλοτε σημειακή ή στοιχειώδη επιφάνεια και άλλοτε σημειακό ή στοιχειώδη όγκο (εξ ου και ο διαχωρισμός τους ως στοιχεία επιφάνειας ή *surfel* από *Surface Element* και στοιχεία όγκου ή *voxel* από *Volumetric pixel*). Οι δύο αυτές οντότητες εμπεριέχουν και την πληροφορία της τρίτης διάστασης. Το voxel αναπαρίσταται ως ένας «στοιχειώδης» κύβος στον τρισδιάστατο χώρο (Εικόνα 2ε), ενώ το surfel αναπαριστά ένα «στοιχειώδες» τμήμα από το φλοιό μιας επιφάνειας. Το surfel απαντάται πολύ σπάνια στο χώρο της τρισδιάστατης αποτύπωσης.



α) Χάρτης Βάθους



β) Νέφος Σημείων



γ) Πολυγωνικό Πλέγμα



δ) Τεχνητή Φωτοσκίαση Πολυγωνικού Πλέγματος



ε) Σύνολο ογκομετρικών στοιχείων (Voxels)



στ) Πολυγωνικό Πλέγμα με πληροφορία υψής

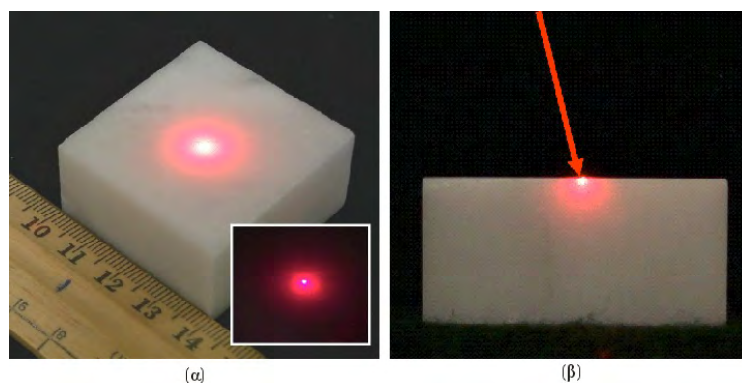
Εικόνα 2. Δημοφιλείς μέθοδοι οπτικής αναπαράστασης τρισδιάστατων δεδομένων

Ψηφιοποίηση των κινητών πολιτιστικών αντικειμένων

Η ποικιλία των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του πολιτιστικού πλούτου καθώς και η μορφολογική πολυπλοκότητα που συναντούμε σε πληθώρα αντικειμένων, αποτελούν τμήμα ενός ευρύτερου συνόλου χαρακτηριστικών που δημιουργούν προβλήματα στις διάφορες μεθόδους αποτύπωσης. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους η διαδικασία της σάρωσης πολιτιστικών αντικειμένων πρέπει να γίνεται με το μέγιστο δυνατό βαθμό ακρίβειας. Στην πραγματικότητα, όμως, η ακρίβεια της αποτύπωσης επηρεάζεται από το αντικείμενο αυτό καθαυτό. Μερικά από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στην ελάττωση της ακρίβειας είναι η πολυμορφία του αντικειμένου, οι αντανάκλασεις των επιφανειών του, ο ιριδισμός

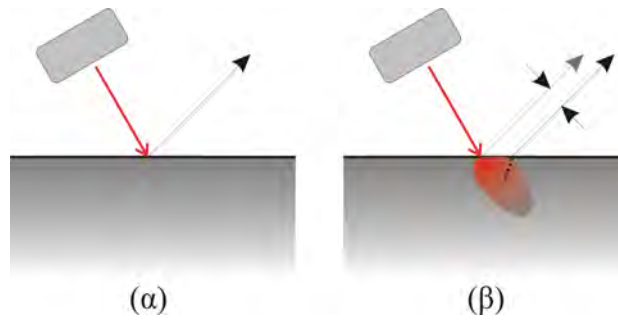
και η διάχυση του φωτός, με το φαινόμενο της διάχυσης να απαντάται εντονότερα σε μαρμάρινες επιφάνειες.

Προϋπόθεση στην τρισδιάστατη ψηφιοποίηση με ακτίνες λέιζερ είναι το ότι η επιφάνεια του αντικειμένου είναι αδιαφανής και δε διαχέει το ανακλώμενο φως. Το μάρμαρο όμως, για παράδειγμα, απέχει πολύ από αυτή την υπόθεση, εμφανίζοντας δύο σημαντικές οπτικές ιδιότητες. Αυτές είναι η ημιδιαφάνεια και η ανομοιογενής επιφανειακή τραχύτητα. Οι ιδιότητες αυτές αποτελούν πηγές θορύβου και επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων [11]. Η επιφάνεια του μαρμάρου είναι δομημένη από πυκνά συσσωρευμένους κρυστάλλους. Η μεταβλητή πυκνότητα των κρυστάλλων προκαλεί ανομοιογένεια στα υποστρώματα και αλλοιώνει τα οπτικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Καθώς η ακτίνα φωτός διαπερνά το μάρμαρο η ανομοιομορφία των υποστρωμάτων αναγκάζει το διασκορπισμό της δέσμης. Ο διασκορπισμός αυτός εντοπίζεται, δυστυχώς, και στο ορατό φάσμα. Οι Godin et al. [11] προσέγγισαν σε μια εργασία τους το μέγεθος του σφάλματος που προκαλεί ο διασκορπισμός της δέσμης. Σε ένα πείραμα τους προβάλλουν μια ακτίνα λέιζερ μήκους κύματος 633nm πάνω σε ένα κομμάτι λευκού μαρμάρου τύπου *Carrara Statuario*. Στα υποστρώματα του μαρμάρου αλλά και στην επιφάνειά του εμφανίζονται κάποιοι φωτεινοί ομόκεντροι δίσκοι γύρω από το σημείο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση φωτός (Εικόνα 3α). Στην Εικόνα 3β η δέσμη φωτός συγκεντρώνεται σε απόσταση ενός χιλιοστού από την άκρη του μαρμάρου. Η φωτογράφιση έγινε από τέτοια οπτική γωνία, ώστε να είναι εμφανές το βάθος διεύθυνσης του φωτός στα υποστρώματα.



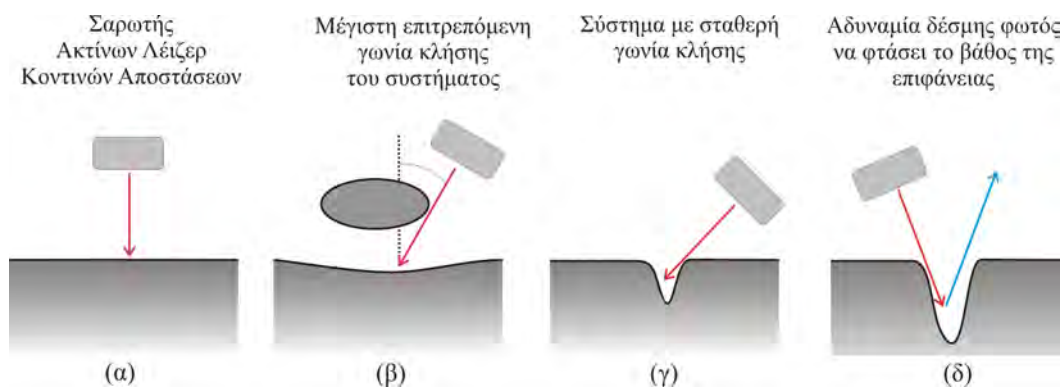
Εικόνα 3. Διάχυση φωτός σε μάρμαρο

Άλλα είδη μαρμάρων επιτρέπουν τη διάχυση του περιβάλλοντος φωτισμού στο εσωτερικό τους και εμφανίζουν ιδιαίτερα χρωματικά χαρακτηριστικά. Με τη σημερινή τεχνολογία αυτά τα χαρακτηριστικά είναι αδύνατο να ψηφιοποιηθούν. Ακόμα και η απλή εξομείωση τους απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Κλασικό παράδειγμα ενός τέτοιου λίθου είναι ο ακτινόλιθος γνωστός και ως νεφρίτης. Ένα γλυπτό από ακτινόλιθο παρουσιάζει σημαντικό διασκορπισμό της ακτίνας στα υποστρώματα της επιφάνειάς του. Το ανακλώμενο φως προσπίπτει στην επιφάνεια του αντικειμένου και τη διαπερνάει προς τα έξω με μια υπολογίσιμη απόκλιση, την οποία μπορεί να συλλάβει ο σαρωτής (Εικόνα 4). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως κάτι τέτοιο επηρεάζει τη διαδικασία σάρωσης. Επίσης, η τελική ψηφιακή τρισδιάστατη απόδοση του γλυπτού θα έχει τη μορφή μιας πράσινης πετράς και όχι την πραγματική φωτοβόλα όψη που έχει ο νεφρίτης.



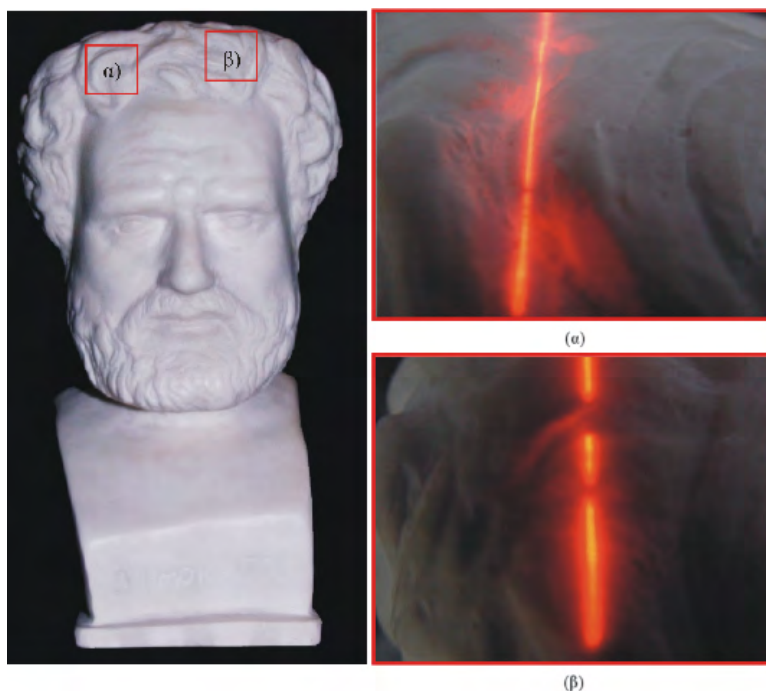
Εικόνα 4. Δημιουργία απόκλισης της δέσμης φωτός

Οι δυσκολίες που παρουσιάζουν τα πολιτισμικά αντικείμενα δεν περιορίζονται μόνο σε αντικείμενα που είναι φτιαγμένα από μάρμαρο. Ένα πολύπλοκα λαξευμένο γλυπτό ελεφαντοστού με σύνθετη εσωτερική γεωμετρία θα αποτελούσε άλλη μια πρόκληση για την ψηφιοποίηση, εξαιτίας της εμφάνισης έντονων σκιάσεων που προέρχονται από το ίδιο το αντικείμενο. Η σάρωση της γεωμετρίας θα ήταν δύσκολη λόγω των περίπλοκων εσωτερικών επιφανειών. Οι στενές σχισμές είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν με μεθόδους τριγωνισμού. Η δυσκολία εντοπίζεται στα σημεία της επιφάνειας που οφείλουν να είναι ταυτόχρονα εμφανή προς την πηγή της δέσμης φωτός αλλά και προς τον φωτογραφικό αισθητήρα. Στην Εικόνα 5 απεικονίζονται κάποιες δύσκολες καταστάσεις που επιβεβαιώνουν αυτούς που υποστηρίζουν ότι η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση είναι μια πραγματικά δύσκολη διαδικασία. Η επιφάνεια στην Εικόνα 5α είναι επίπεδη και επιτρέπει την ομαλή διεξαγωγή τριγωνισμού σε αντίθεση με την Εικόνα 5β, όπου ο σαρωτής εκμεταλλεύεται τη μέγιστη γωνία κλίσης για να φτάσει στην κάτω επιφάνεια. Όταν η γωνία κλίσης δεν το επιτρέπει (Εικόνα 5γ) τότε καθίσταται αδύνατη η σάρωση του συγκεκριμένου σημείου. Η σμίλη που χρησιμοποιεί ο γλύπτης μπορεί και φτάσει σε σημεία που η δέσμη φωτός αδυνατεί (Εικόνα 5δ).



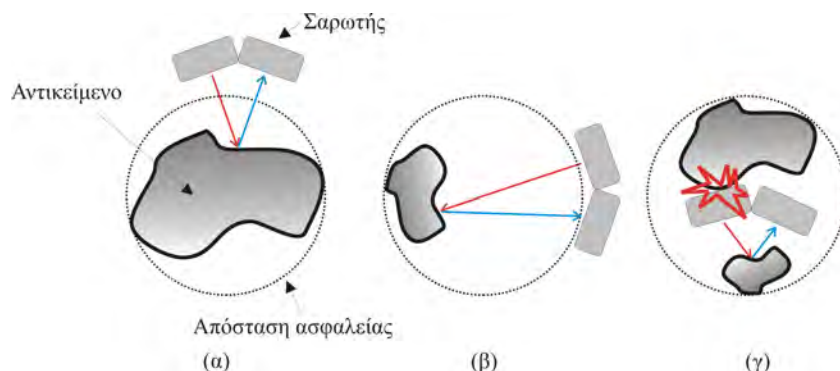
Εικόνα 5. Σάρωση κατά την παρουσία αποφράξεων

Η διάχυση της δέσμης ανάμεσα στις επιφάνειες και στις ανακλαστικές κοιλότητες του αντικειμένου είναι αναπόφευκτο φαινόμενο (Εικόνα 6). Οι ασυνέχειες που εμφανίζει η δέσμη φωτός απαιτούν την επανάληψη της σάρωσης στην ίδια περιοχή με τοποθέτηση του σαρωτή σε διαφορετική οπτική γωνία.



Εικόνα 6. Ανακλάσεις και ασυνέχειες της δέσμης φωτός

Η ανυπολόγιστη αξία των πολιτιστικών αντικείμενων δεν αφήνει περιθώρια φθοράς. Η επαφή του συστήματος σάρωσης με τα αντικείμενα είναι απαγορευμένη. Η ίδια γεωμετρική πολυπλοκότητα που επηρεάζει τη συλλογή δεδομένων ανεβάζει και τον πήχη δυσκολίας στο χειρισμό του σαρωτή. Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή της θέσης του συστήματος ως προς το αντικείμενο. Στην Εικόνα 7 απεικονίζονται κάποιες περιπτώσεις όπου ο σαρωτής δεν μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια. Η εξασφάλιση της ακεραιότητας του αντικειμένου πραγματοποιείται με τον ορισμό μιας περιοχής την οποία δε θα πρέπει να παραβιάζει το σύστημα ψηφιοποίησης. Τα περισσότερα εμπορικά συστήματα έχουν μια συγκεκριμένη απόσταση λειτουργίας που περιορίζουν την απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο. Αρκετές φορές όμως, αυτή η μέθοδος αποδεικνύεται αναποτελεσματική, καθώς πολύπλοκα αντικείμενα δεν μπορούν να ψηφιοποιηθούν πλήρως με το σαρωτή μονίμως έξω από την περιοχή ασφαλείας (Εικόνα 7γ).



Εικόνα 7. Αδυναμία αποφυγής πρόσκρουσης

Τα κοσμήματα αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της πολιτιστικής κληρονομιάς και ταυτόχρονα άλλο ένα παράδειγμα όπου οι σαρωτές με ακτίνες λέιζερ αδυνατούν να παρέχουν ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, η προσπάθεια ψηφιοποίησης με σύστημα ακτίνων λέιζερ ενός

ασημένιου περιδέριου που καλύπτεται με πολύτιμους λίθους θα αποβεί μάταιη. Η μικρή σε διάχυση επιφάνεια του ασημιού σε συνδυασμό με τις εσωτερικές ανακλάσεις των πολύτιμων λίθων θα έκαναν αδύνατη τη σύλληψη της γεωμετρίας με μεθόδους τριγωνισμού. Ακόμα και με παθητικές φωτογραφικές μεθόδους, όπως η μέθοδος *Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως*, η ψηφιοποίηση πάλι θα ήταν ανεπιτυχής. Η ρεαλιστική απόδοση των ανακλάσεων σε πολύτιμους λίθους, όπως τα διαμάντια, απαιτούν ειδικούς αλγορίθμους φωτορεαλισμού.

Η ψηφιοποίηση ενός γούνινου κεφαλόδεσμου είναι επίσης αδύνατη. Για άλλη μια φορά, η πολυπλοκότητα της επιφάνειας του αντικειμένου προκαλεί μεγάλη διασπορά στη δέσμη φωτός καθώς αυτή εισχωρεί μέσα στις πτυχώσεις. Η ψηφιοποίηση της επιφάνειας θα οδηγούσε σε ένα νέφος σημείων με πολύ θόρυβο¹¹. Από την άλλη, ακόμα και αν μπορούσε να πραγματοποιηθεί η αποτύπωση της επιφάνειας του συγκεκριμένου αντικειμένου, η γεωμετρική αναπαράσταση εκατομμυρίων μοναδικών τριχών σε πραγματικό χρόνο θα ήταν πρακτικά αδύνατη. Όσον αφορά στη φωτορεαλιστική απεικόνιση τέτοιων αντικειμένων απαιτούνται αλγόριθμοι *καθολικού φωτισμού* (global illumination) με υψηλό υπολογιστικό φορτίο.

Αντίστοιχα προβλήματα παρουσιάζονται με όλες τις τεχνικές ψηφιοποίησης, είτε ενεργητικές είτε παθητικές καθώς η φύση των αντικειμένων και οι δυνατότητες των μεθόδων δε συναντώνται πάντοτε σε κοινό τόπο. Ένα μεγάλο πλήθος πολιτισμικών αντικειμένων εμφανίζει περίπλοκη γεωμετρία και επιφανειακές ιδιότητες που είτε δημιουργούν προβλήματα είτε καθιστούν αδύνατη την ψηφιοποίηση με τις διαθέσιμες τεχνικές [12].

Ψηφιοποίηση των ακίνητων μνημείων

Τα ακίνητα αντικείμενα είναι κτίσματα και γενικά ανθρώπινες κατασκευές που εμφανίζουν ιδιαίτερη αξία από αρχαιολογική και αρχιτεκτονική πλευρά. Μπορεί να πρόκειται για υφιστάμενα κτίσματα αλλά και για μεγάλους ή μικρούς αρχαιολογικούς χώρους που προέρχονται από ανασκαφές. Η χρήση μιας τεχνικής ψηφιοποίησης οδηγεί στο εικονικό μοντέλο των αντικειμένων αυτών αλλά τα σημαντικά προϊόντα που αποτελούν τα εργαλεία της μελέτης των αντικειμένων αυτών είναι σχέδια υπό κλίμακα που παρουσιάζουν χαρακτηριστικές όψεις, κατόψεις ή τομές τους. Για τον αρχιτέκτονα μηχανικό αλλά και για τον έμπειρο αρχαιολόγο ένα διάγραμμα υπό κλίμακα μιας όψης ενός κτιρίου ή ενός αρχαιολογικού σκάμματος είναι το υπόβαθρο της μελέτης που θα οδηγήσει είτε σε μία μελέτη συντήρησης και ανάδειξης του κτιρίου ή σε εξαγωγή σημαντικών αρχαιολογικών συμπερασμάτων από μία ανασκαφή. Η δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου με εξωτερική υφή την εικόνα των όψεων του μνημείου αποτελεί ένα επιπλέον προϊόν επισκόπησης του αντικειμένου και η παρουσίασή του στην οθόνη του υπολογιστή γίνεται με χρήση ειδικών τεχνικών τρισδιάστατης παρουσίασης (πχ. OpenGL, VRML αρχεία, WebGL). Συνήθως όμως, μόνο ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά εμφανίζονται στην τρισδιάστατη παρουσίαση των αντικειμένων αυτών, ώστε η χρήση τους να βοηθά στην οπτικοποίηση του ίδιου του αντικειμένου και τη σύνδεση του με τον περιβάλλοντα χώρο.

¹¹ Ο θόρυβος στα πραγματικά δεδομένα νοείται ως μια τυχαία ποσότητα που αθροίζεται στα δεδομένα και δημιουργεί ανεπιθύμητες αποκλίσεις.

Μια γενική κατηγοριοποίηση που οδηγεί στο διαχωρισμό των μνημείων και τον τρόπο τεκμηρίωσης και ψηφιοποίησης του μπορεί να καθοριστεί αν απαντηθούν τα παρακάτω γενικά ερωτήματα που αφορούν στα μνημεία:

- Αποτελούνται από μία ή περισσότερες επίπεδες (οριζόντιες – κατακόρυφες επιφάνειες);
- Συνθέτουν ένα πολύπλοκο τρισδιάστατο αντικείμενο με επιφάνειες που δεν είναι δυνατό να μοντελοποιηθούν από απλά σχήματα;
- Αποτελούνται από εσωτερικούς χώρους και εξωτερικούς χώρους;
- Βρίσκονται σε κατάσταση συνεχούς μεταβολής της μορφής και του σχήματος τους (ανασκαφές);
- Είναι δυσπρόσιτα, δηλαδή είναι δύσκολη η μετάβαση των ειδικών επιστημόνων για τη μέτρηση των μεγεθών τους λόγω της θέσης τους (πχ. στο χείλος ενός γκρεμού) ή της κατάστασής τους (ευπαθές ή τελεί υπό κατάρρευση);

Υπάρχουν και περιπτώσεις που το μνημείο – χώρος δεν υφίσταται αλλά μπορεί να γίνει η ψηφιοποίηση του με χρήση τεχνικών φωτογραμμετρίας από φωτογραφίες ιστορικών αρχείων του μνημείου – χώρου. Μνημεία – χώροι που υπόκεινται σε ψηφιακή οπτική τεκμηρίωση μπορεί να είναι:

- Χριστιανικοί ναοί (παλαιοχριστιανικοί, βυζαντινοί κ.α.)
- Ανασκαφές (επίγειες και ενάλιες)
- Κτίρια ιδιαίτερης αρχιτεκτονικής αξίας (νεοκλασικά, κ.α.)
- Γλυπτά ή άλλες μεγάλες κατασκευές
- Μεσαιωνικά κάστρα
- Εκτενείς Αρχαιολογικοί χώροι
- Και άλλα

Η βέλτιστη τεχνική που θα ακολουθηθεί για την ψηφιοποίηση του μνημείου κρίνεται από

- τεχνικά στοιχεία, δηλαδή την ευχρηστία και λειτουργικότητα της προτεινόμενης μεθόδου, το είδος των παραγόμενων προϊόντων αποτύπωσης και την τελική ακρίβεια του προϊόντος και από
- οικονομικά στοιχεία, που αφορούν τόσο την αγορά του εξοπλισμού που θα απαιτηθεί για την εφαρμογή της βέλτιστης τεχνικής αλλά και τον χρόνο που μεταφράζεται σε κόστος απασχόλησης έμπειρων επιστημόνων που θα αναλάβουν τη συγκεκριμένη εργασία

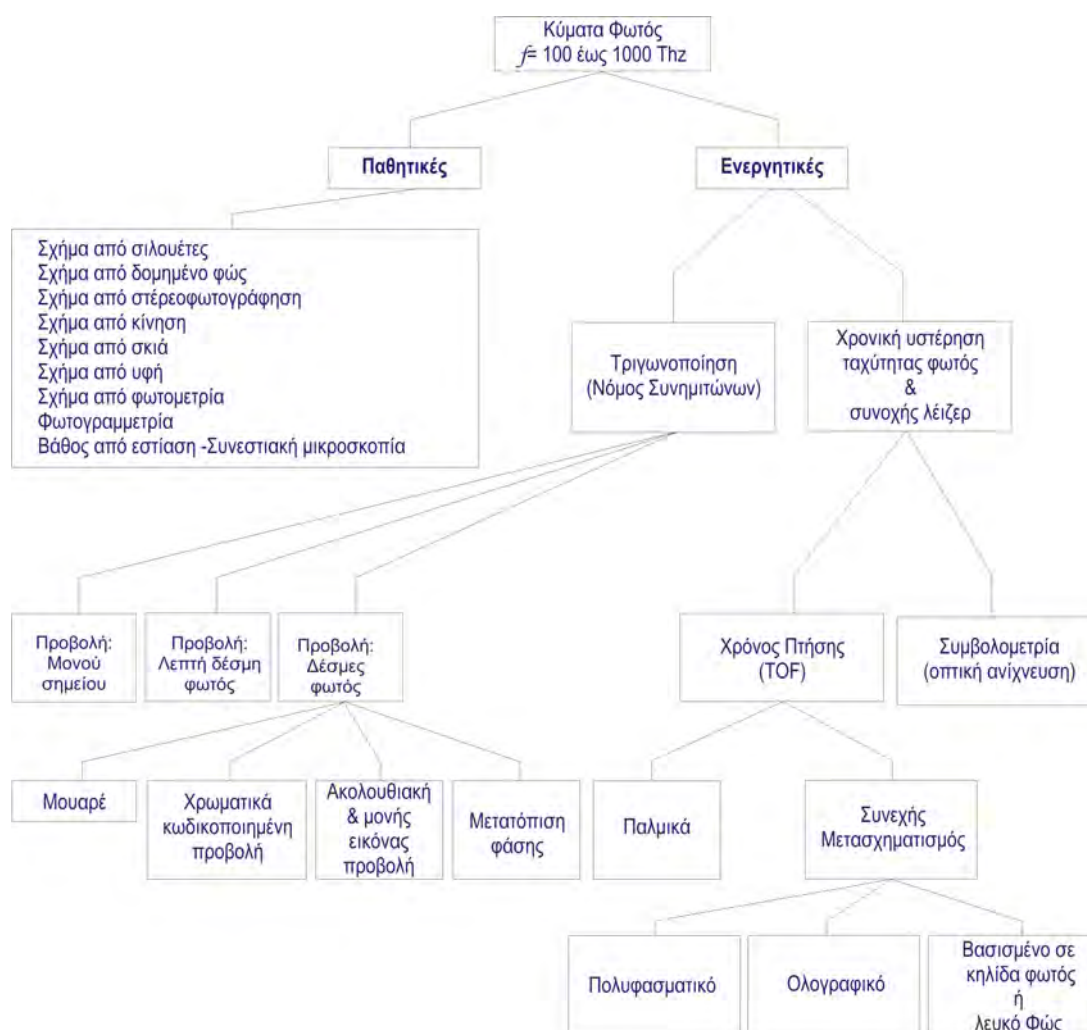
Μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης

Το πλήθος των διαφορετικών μεθοδολογιών προδίδει το μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο χώρο. Από την άλλη, η διαφορετική λύση που προσφέρει η κάθε μεθοδολογία δείχνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Σημαντική είναι εδώ η συμβολή αλγορίθμων από το χώρο της τρισδιάστατης όρασης των υπολογιστών. Ο πρώτος και βασικότερος διαχωρισμός που μπορεί να γίνει στις μεθοδολογίες τρισδιάστατης ψηφιοποίησης είναι η διάκρισή τους σε:

- παθητικές μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης: γίνεται συνήθως χρήση του περιβαλλοντικού φωτισμού και τα μοναδικά χαρακτηριστικά που αποτυπώνονται είναι αυτά που είναι εμφανή σε ψηφιακές εικόνες

- ενεργητικές μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης: τα ενεργητικά συστήματα που βασίζονται σε ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων αποτυπώνουν τις παραμορφώσεις που δέχεται η δέσμη φωτός καθώς ανακλάται πάνω σε επιφάνειες. Δημιουργούν ένα πυκνό χάρτη βάθους ή ένα νέφος σημείων από όλες τις εμφανείς επιφάνειες

Στην Εικόνα 8 παρουσιάζονται οι επικρατέστερες τεχνικές σάρωσης που έχουν εφαρμογή στην αποτύπωση τόσο κινητών πολιτιστικών αντικειμένων αλλά και μνημείων. Οι περισσότερες από αυτές έχουν ήδη εφαρμοστεί σε διάφορα ερευνητικά έργα και μελέτες. Όλες οι μέθοδοι «Σχήμα-Από-Χ» επιτυγχάνουν την πρόσκτηση της τρίτης διάστασης μέσα από ένα σύνολο ψηφιακών φωτογραφιών. Το κοινό στοιχείο ανάμεσα στις δύο κατηγορίες είναι η ύπαρξη κάποιας διαδικασίας βαθμονόμησης. Η διαδικασία της βαθμονόμησης αποτελεί το κλειδί στην ορθή εξαγωγή της τρισδιάστατης γεωμετρίας και της πληροφορίας υψής, και, σε πολλές περιπτώσεις, αποτελείται από μια σειρά από μαθηματικές σχέσεις που αντιστοιχούν ένα σημείο από τη δισδιάστατη φωτογραφία σε ένα σημείο στον πραγματικό χώρο, του οποίου η θέση είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια. Αυτή η αντιστοίχιση εφαρμόζεται στη συνέχεια για την ανάκτηση της τρίτης διάστασης όλων των σημείων που εμφανίζονται μέσα στις φωτογραφίες.



Εικόνα 8. Βασικός διαχωρισμός τεχνικών οπτικής τρισδιάστατης σάρωσης

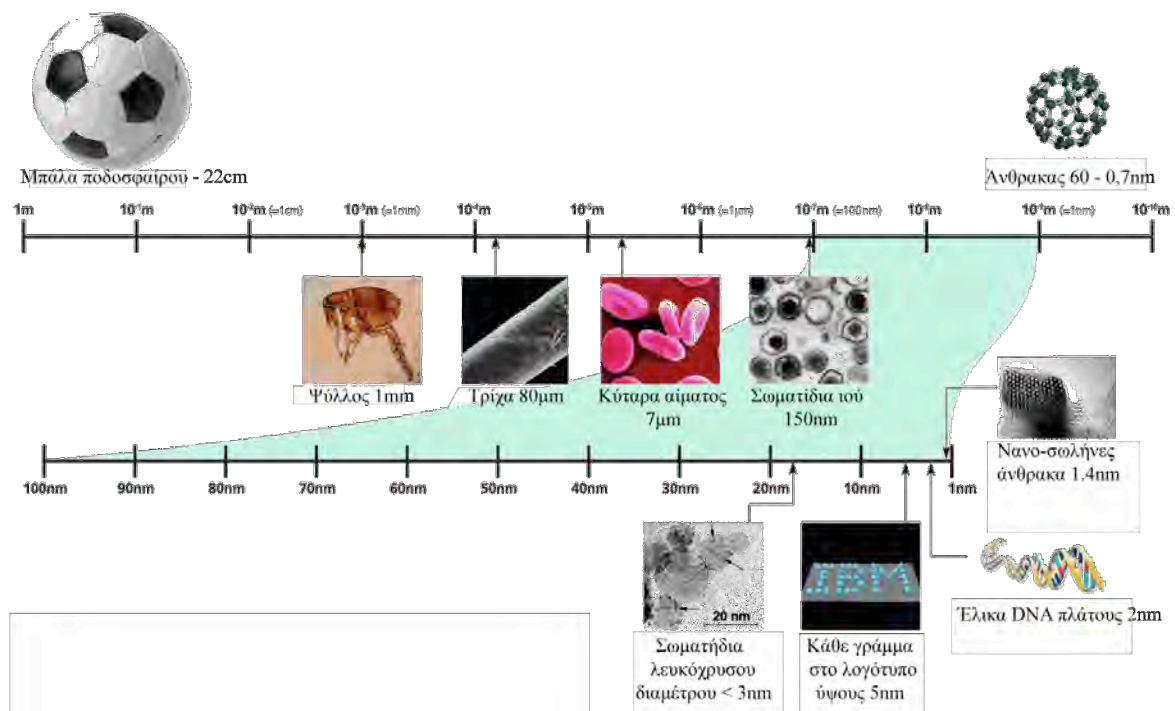
Τεχνολογική επισκόπηση

Η διαθέσιμη τεχνολογία, σήμερα, για την τρισδιάστατη ψηφιοποίηση αποτελεί ένα μεγάλο θέμα. Συγκεκριμένα, στην τελευταία δεκαετία, μια μεγάλη πληθώρα από εμπορικά συστήματα έκανε την εμφάνισή της, με στόχο τη διάχυση της τεχνολογίας που αναπτύχθηκε κατά την έρευνα των προηγούμενων είκοσι περίπου χρόνων. Η έρευνα όμως στο χώρο συνεχίζεται και τόσο βελτιώσεις όσο και νέα συστήματα κάνουν την εμφάνισή τους μέρα με τη μέρα. Είναι πρακτικά αδύνατο να καταλογογραφηθούν πλήρως όλα τα διαθέσιμα συστήματα και μέθοδοι. Η επισκόπηση των μεθόδων που ακολουθεί γίνεται με βάση το μέγεθος των αντικειμένων προς ψηφιοποίηση από το μικροσκοπικό επίπεδο έως το επίπεδο πολύ μεγάλων διαστάσεων και επιχειρείται μια προσέγγιση στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Τεχνικές ψηφιοποίησης μικροσκοπικών αντικειμένων

Είναι πλέον δυνατή η σύλληψη τρισδιάστατης πληροφορίας σε πάρα πολύ μικρή κλίμακα. Τεχνικές όπως η "Atomic Force Microscopy" και η "Stereo Scanning Electron Microscopy" μας επιτρέπουν να αναγνωρίσουμε και να καταγράψουμε χαρακτηριστικά σε κλίμακα μερικών δεκάδων νανομέτρων (nm). Άλλες τεχνικές, όπως η "Confocal Microscopy" και η "White Light Scanning Interferometry" παρέχουν ανάλυση της κλίμακας μερικών εκατοντάδων νανομέτρων. Το μειονέκτημα που υπάρχει στη χρήση τέτοιων μεθόδων υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης είναι ότι αυτές οι συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ψηφιοποίηση πολύ μικρών επιφανειών (τυπικά μικρότερων του ενός τετραγωνικού χιλιοστού). Το εύλογο ερώτημα στο σημείο αυτό θα ήταν εάν υπάρχει, πραγματικά, κάποια πρακτική αξία στη χρήση τέτοιων τεχνικών και εξοπλισμού για την ψηφιοποίηση πολιτιστικής κληρονομιάς. Η απάντηση μπορεί να είναι μόνον υποθετική: ίσως. Όταν το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι αυτό της «απόλυτης» αποτύπωσης τότε σαφέστατα υπάρχει μια εφαρμογή. Για συγκεκριμένα πολιτιστικά αντικείμενα τα μικροσκοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιφανείας είναι δυνατό να είναι πολύ σημαντικά. Η πληροφορία γι' αυτά μπορεί να βοηθήσει διαδικασίες όπως έλεγχος κατάσταση και αυθεντικότητας, μέθοδος δημιουργίας, κ.ο.κ. Από τις τεχνικές που αναφέρθηκαν, η τεχνική της Stereo Scanning Electron Microscopy είναι μάλλον περιορισμένης εφαρμογής στο χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς. Στην τεχνική αυτή, τα δείγματα πρέπει να εισαχθούν σε ειδικούς χώρους υπό συνθήκες κενού και απαιτείται ειδική προετοιμασία, συνήθως επικάλυψη με μέταλλο. Έτσι, η τεχνική μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις καταστρεπτικές τεχνικές και είναι, συνεπώς, ακατάλληλη για εφαρμογή στη γενική περίπτωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Υπάρχουν, βέβαια, περιπτώσεις όπως θραυσμάτων κεραμικών, απολιθωμάτων ή γυάλινων αντικειμένων, όπου θα μπορούσε να εφαρμοστεί η εν λόγω τεχνική. Η τεχνική Confocal microscopy είναι κυρίως «βιολογική τεχνική» και δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τεχνικές όπως φθορισμός. Δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ημιδιάφανα αντικείμενα και επιτρέπει την καταγραφή εσωτερικής πληροφορίας. Θα μπορούσε να είναι περιορισμένης χρήσης στην παρατήρηση διάφανων αντικειμένων. Επίσης, είναι δυνατή η σκιαγράφιση επιφάνειας π.χ. για την ψηφιοποίηση επιφανειακής υφής, έχοντας το πλεονέκτημα ότι είναι μια τεχνική που δε στηρίζεται σε επαφή με τα αντικείμενα. Τη σκιαγράφιση επιφάνειας μπορεί επίσης να παρέχει και η τεχνική White Light Scanning Interferometry και μάλιστα με σημαντικά μικρότερο κόστος. Συστήματα όπως το Veeco RST επιτρέπουν τη μέτρηση τρισδιάστατων επιφανειών σε κλίμακα κάτω του μικρομέτρου και θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ιδιαίτερα χρήσιμα για την επισταμένη μελέτη επιφανειών. Η τεχνική είναι χωρίς επαφή και δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη επιφανειακή προετοιμασία. Η τεχνική Atomic Force

Microscopy είναι η νεότερη στην κατηγορία των τεχνικών μικροσκοπικής κλίμακας και, ενώ υπάρχουν διαθέσιμα εμπορικά συστήματα, είναι ακόμη στη φάση σημαντικής ανάπτυξης. Η βασική αρχή είναι στη χρήση ενός πάρα πολύ μικρού μετρητικού συστήματος με μέγεθος που δεν ξεπερνά τα δέκα άτομα το οποίο φέρεται πάρα πολύ κοντά στην επιφάνεια προς μέτρηση χωρίς όμως να υπάρχει επαφή. Ενδοατομικές δυνάμεις έλκουν το σύστημα προς την επιφάνεια. Το μικροσκόπιο μπορεί να ανιχνεύσει το σύστημα μέτρησης στην κίνησή του κατά μήκος και πλάτος πάνω στην επιφάνεια που μετράται και να ρυθμίσει την απόστασή του από αυτήν μέσω της μέτρησης της δύναμης έλξης που ασκείται. Με τον τρόπο αυτό μετράται μια επιφάνεια μέσω της μέτρησης της ελκτικής δύναμης. Η μέθοδος μπορεί να παρέχει πολύ μεγάλη ακρίβεια (απαιτώντας, βέβαια, ιδιαίτερη επιδεξιότητα χειρισμού) που μπορεί να φτάσει κάτω του ενός νανόμετρου σε ειδικές περιπτώσεις.



Εικόνα 9. Συγκριτικό γράφημα διαστάσεων πραγματικών αντικειμένων

Είναι, βέβαια, σημαντικό να κατανοηθεί η κλίμακα μεγεθών για την οποία γίνεται λόγος στις παραγράφους που προηγήθηκαν. Για το λόγο αυτό δίνεται μια ενδεικτική συγκριτική απεικόνιση χαρακτηριστικών αντικειμένων γνωστών μεγεθών από 1 μέτρο έως 1 μικρόμετρο (Εικόνα 9). Στα 30 περίπου εκατοστά υπάρχει η ποδοσφαιρική μπάλα ενώ στα 0,1 νανόμετρα υπάρχουν μεμονωμένα άτομα. Από διάφορες μελέτες, εργασίες και ερευνητικά έργα σε πανευρωπαϊκό επίπεδο είναι γνωστό ότι η ανάκτηση πληροφορίας στην κλίμακα του μικρομέτρου για πολιτιστικά αντικείμενα μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη. Με τη χρήση τεχνικών όπως αυτών που περιγράφηκαν στις παραπάνω παραγράφους, γίνεται δυνατή η μετάβαση στην κλίμακα των 100 νανομέτρων και ακόμη πιο κάτω. Το εύλογο, βέβαια, ερώτημα θα ήταν αν υπάρχει κάτι στην κλίμακα αυτή που να είναι ενδιαφέρον. Στις κλίμακες αυτές ανακτάται η μικρο-υφή μιας επιφάνειας, ή η τραχύτητά της, η οποία είναι δυνατό να έχει σημαντική συμμετοχή στη συνολική παρουσία της μορφής του αντικειμένου. Μεταβολές στην τραχύτητα της επιφάνειας θα μπορούσαν να είναι χαρακτηριστικές για την κατάσταση της επιφάνειας (πχ. διάβρωση). Η συνολική απάντηση είναι ότι, πράγματι, στην

μικρο-κλίμακα υπάρχει σημαντική πληροφορία. Έτσι, από τις τέσσερις τεχνικές που αναφέρθηκαν, οι τεχνικές Atomic Force Microscopy και White Light Scanning Microscopy έχουν πραγματικά κάτι να συνεισφέρουν στο χώρο της τρισδιάστατης ψηφιοποίησης της πολιτιστικής κληρονομιάς. Ποια είναι όμως τα μειονεκτήματα των τεχνικών αυτών;

- μπορούν να μετρήσουν πολύ μικρές επιφάνειες ή μικρά δείγματα από τα πραγματικά αντικείμενα
- είναι σημαντικά σύνθετες και απαιτούν γνώσεις, εξειδίκευση και επιδεξιότητα
- ενώ ο εξοπλισμός είναι μεταφερόμενος απαιτούνται ιδιαίτερα ελεγχόμενες συνθήκες μέτρησης (πχ. θερμοκρασία, υγρασία) αν και πολλά μουσεία μπορούν να παρέχουν αυτές τις συνθήκες.

Όλα αυτά καταδεικνύουν το γεγονός ότι τέτοια συστήματα μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο σε μια διαδικασία ψηφιοποίησης ιδιαίτερα σε συνθήκες όπου η μικρο-δομή της επιφάνειας αντικειμένων έχει σημαντική πληροφορία να δώσει τόσο για τη σωστή απεικόνιση όσο και τον έλεγχο της κατάστασής του.

Τεχνικές ψηφιοποίησης μικρών αντικειμένων

Με τον όρο «μικρά αντικείμενα» εννοούνται εδώ αντικείμενα διάστασης έως 100x100 χιλιοστών (10x10 εκατοστά). Στην κατηγορία αυτή οι αδιαμφισβήτητα προτιμητέες τεχνικές είναι αυτές που βασίζονται σε συστήματα τριγωνισμού ακτίνων λέιζερ. Υπάρχει σήμερα πληθώρα τέτοιων εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων, και είναι μια απολύτως βατή διαδικασία για ένα εξειδικευμένο εργαστήριο που σχετίζεται με το χώρο της τρισδιάστατης όρασης να κατασκευάσει μια τέτοια συσκευή. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι σχετικά απλή: μια σημειακή πηγή λέιζερ σημαδεύει την επιφάνεια προς μέτρηση και ανιχνεύεται από έναν οπτικό αισθητήρα. Καθώς το λέιζερ μετακινείται πάνω στην επιφάνεια, συναντά διαφορετικά ύψη. Αυτά τα μεταβαλλόμενα ύψη αλλάζουν την ανάκλαση του laser στον οπτικό αισθητήρα. Αν και το σύστημα αυτό μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά, τα περισσότερα συστήματα βασίζονται σε εμπειρική βαθμονόμηση με χρήση προτυποποιημένων διαβαθμίσεων ύψους για την αναγνώριση της σχέσης μεταξύ της μεταβολής στο επιφανειακό ύψος και της θέσης της ακτίνας. Με δεδομένο ότι η προς μέτρηση περιοχή περιορίζεται σε 100x100mm τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν μια ακρίβεια μέτρησης της τάξης μερικών μικρομέτρων. Παρόλα αυτά, εάν η επιφάνεια του αντικειμένου είναι μεγαλύτερη, τότε η ακρίβεια μέτρησης μειώνεται, και μάλιστα πολλές φορές σημαντικά. Τέτοια συστήματα είναι χρήσιμα για τη μέτρηση αντικειμένων όπως νομίσματα και μετάλλια, εγχάρακτες ή ανάγλυφες ταμπέλες και μικρά αντικείμενα χρυσοχοΐας. Είναι συνήθως φορητά, σχετικώς φθηνά και εμπορικά διαθέσιμα.

Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεσαίου μεγέθους

Στην κατηγορία αυτή απαντώνται τα πιο ενδιαφέροντα πολιτιστικά αντικείμενα, και όπου διατίθενται οι περισσότερες τεχνικές ψηφιοποίησης. Τα αντικείμενα είναι διαστάσεων άνω των 10 εκατοστών και μπορεί να φτάνουν έως και 1 με 2 μέτρα. Εδώ μπορεί να περιληφθούν ακόμη και αγάλματα φυσικού μεγέθους. Τα πλέον χρησιμοποιούμενα συστήματα στην κατηγορία αυτή χρησιμοποιούν τεχνικές «δομημένου φωτισμού» και «σχήματος από κίνηση».

Η λειτουργία των συστημάτων δομημένου φωτισμού βασίζεται σε μια επέκταση της αρχής της τριγωνισμού. Η διαφορά είναι ότι η σημειακή πηγή έχει πλέον αντικατασταθεί από ένα δισδιάστατο

μοτίβο φωτός το οποίο προβάλλεται στην προς μέτρηση επιφάνεια. Διάφορες είναι οι μέθοδοι παραγωγής αυτού του μοτίβου φωτός, άλλοτε με τη συμβολή φωτός από πηγή λέιζερ και άλλοτε με απλή προβολή του μοτίβου με φωτογραφική μέθοδο. Συνήθως γίνεται χρήση ενός μοτίβου, το οποίο μετακινείται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου για να επιτευχθεί η συνολική μέτρησή του. Υπάρχουν όμως και τεχνικές που χρησιμοποιούν πολλαπλά μοτίβα καθώς και τεχνικές Moiré. Το σημαντικό, όμως, σημείο εδώ είναι ότι με οποιονδήποτε τρόπο και εάν παράγονται τα μοτίβα φωτός η διαδικασία ανίχνευσης και ανάλυσής τους είναι η ίδια. Ένα σύνηθες μοτίβο δεν αποτελείται από δύο απλές καταστάσεις τύπου on/off αλλά, τις περισσότερες φορές, από ημιτονοειδείς μεταβάσεις. Το σημαντικό εδώ είναι ότι καθίσταται δυνατός ο καθορισμός της θέσης όπου παρατηρούνται τα μέγιστα των μοτίβων οδηγώντας σε βελτίωση της ακρίβειας της μέτρησης, παρέχοντας τη δυνατότητα εντοπισμού σε τμήμα μικρότερο ενός κροσσού συμβολής του μοτίβου. Εμπορικά, τα συστήματα αυτά είναι ικανά να επιτύχουν ακρίβεια μέτρησης περί το 1/100 των διαστημάτων μεταξύ των κροσσών του μοτίβου. Έτσι εάν το διάκενο αυτό είναι για παράδειγμα 1 cm τότε η αναμενόμενη ακρίβεια μέτρησης είναι της τάξης του 0,1 mm. Τα συστήματα αυτά βασίζονται συνήθως σε μία από δύο βασικές αρχές λειτουργίας: είτε με χρήση μετασχηματισμού Fourier, είτε με χρονική μετατόπιση φάσης. Κάθε προσέγγιση έχει τα πλεονεκτήματα και τους υποστηρικτές της. Τα περισσότερα εμπορικά συστήματα αυτής της κατηγορίας βασίζονται στη χρονική μετατόπιση φάσης, καθώς η τεχνική αυτή έχει αναλυθεί σημαντικά σε ερευνητικό επίπεδο και είναι σε μερικές περιπτώσεις ευκολότερη στην εφαρμογή της έναντι της άλλης μεθόδου. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των τεχνικών στην κατηγορία αυτή είναι ότι σε γενικές γραμμές η ακρίβειά τους είναι κλιμακούμενη. Αυτό σημαίνει ότι τείνουν να μετρούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα μικρά από ότι τα μεγάλα αντικείμενα. Για τα περισσότερα συστήματα το χαρακτηριστικό αυτό είναι συνυφασμένο με τον τρόπο που σχεδιάστηκαν. Περιορισμοί στην ακρίβειά τους πηγάζουν από το γεγονός ότι μια ψηφιακή εικόνα του μοτίβου φωτός έχει περιορισμένο εύρος ζώνης. Το εύρος αυτό ορίζεται από την ανάλυση που παρέχει το οπτικό αισθητήριο που χρησιμοποιεί το εκάστοτε σύστημα και το βάθος χρώματος με το οποίο ψηφιοποιείται η εικόνα. Βασικά, όσο μεγαλύτερο το πλήθος των εικονοστοιχείων στον οπτικό αισθητήρα τόσο καλύτερη η ανάλυση και τόσο μικρότερο μπορεί να είναι το διάκενο μεταξύ των κροσσών του μοτίβου για δεδομένο μέγεθος αντικειμένων. Καθώς η ακρίβεια των συστημάτων είναι στενά δεμένη με το μέγεθος των κροσσών του μοτίβου, μικρότεροι κροσσοί οδηγούν σε μεγαλύτερη ακρίβεια. επίσης καθώς το βάθος χρώματος ψηφιοποίησης μεγαλώνει γίνεται όλο και μεγαλύτερη η ικανότητα διαχωρισμού σημείων εντός του κροσσού μοτίβου οδηγώντας σε περαιτέρω αύξηση της ακρίβειας. Πολλά από τα συστήματα της κατηγορίας εφαρμόζουν την τεχνική τμηματικής ψηφιοποίησης για μεγάλες επιφάνειες (για μεγαλύτερη ακρίβεια) και στη συνέχεια χρησιμοποιούν λογισμικά για συνένωση των τμηματικών σαρώσεων. Φυσικά και εδώ υπάρχουν όρια και η διαδικασία απαιτεί περισσότερο χρόνο ψηφιοποίησης. Άλλοι σημαντικοί περιορισμοί αυτών καθώς και κάθε οπτικού συστήματος που βασίζεται σε διασκορπισμό φωτός από μια επιφάνεια είναι:

- Συνήθως αποτυγχάνουν στη μέτρηση σκούρων ή μαύρων αντικειμένων. Η απολύτως συμβατή προς αυτά επιφάνεια μέτρησης είναι μια ομαλή λευκή επιφάνεια χωρίς αντανakλάσεις. Έτσι καθίστανται καλή επιλογή για τα περισσότερα από τα έργα γλυπτικής
- Τις περισσότερες φορές, τα γυαλιστερά αντικείμενα με ανακλαστικές επιφάνειες αποτελούν σημαντικό πρόβλημα. Σήμερα, βέβαια, υπάρχουν ειδικές τεχνικές που

αντιμετωπίζουν και το πρόβλημα αυτό. Στη γενικό όμως περίπτωση, δεν είναι δυνατή η μέτρηση αντικειμένων με υψηλή ανακλαστικότητα ή διάφανων αντικειμένων

- Η ύπαρξη μοτίβων ή σημαδιών στην επιφάνεια όπως για παράδειγμα ζωγραφική πάνω σε κεραμικά μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στο σύστημα οδηγώντας σε καταστάσεις ασάφειας εντοπισμού των προβαλλόμενων μοτίβων
- Επιφάνειες με μεγάλη γκάμα καμπυλοτήτων μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα. Πολύ απότομες ακμές μπορεί επίσης να εισάγουν δυσκολίες
- Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων είναι ότι παράγουν αυτό που καλείται «νέφος σημείων» και όχι ολοκληρωμένες επιφάνειες. Στα παραγόμενα δεδομένα δεν υπάρχει κάποιου είδους πληροφορία αποκλειστικής σύνδεσης μεταξύ των σημείων, η οποία πρέπει να οριστεί στη συνέχεια

Από την άλλη, η λειτουργία των συστημάτων που εφαρμόζουν τεχνικές σχήματος από κίνηση βασίζεται στη διαδοχική φωτογραφική αποτύπωση των αντικειμένων από πολλαπλές γωνίες λήψης με στόχο την πλήρη κάλυψη όλης της ψηφιοποιούμενης επιφάνειας και μάλιστα με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει σημαντική επικάλυψη επιφανειών μεταξύ των διαδοχικών φωτογραφιών. Στον πυρήνα των συστημάτων αυτών βρίσκεται αλγόριθμος εντοπισμού χαρακτηριστικών σημείων σε κάθε φωτογραφία (τυπικά κυρίως salient points) και ταύτισής τους με σημεία σε άλλες φωτογραφίες που παρουσιάζουν γειτονικές όψεις της επιφανείας. Ως αποτέλεσμα αυτής της ταύτισης αναγνωρίζεται η θέση της φωτογραφικής μηχανής στο χώρο καθώς και ο προσανατολισμός της κάθε φωτογραφίας ως επίπεδο προβολής του τρισδιάστατου χώρου που ψηφιοποιήθηκε. Με τη διαδοχική επίλυση των εν λόγω ταυτίσεων καθίσταται δυνατή η ανάκτηση της γεωμετρίας του αντικειμένου, πολλές φορές με εντυπωσιακή ακρίβεια που μπορεί να συγκριθεί ακόμη και με την ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί με τεχνικές τριγωνισμού λέιζερ ή σχήματος από δομημένο φωτισμό. Εγγενής περιορισμός της μεθόδου είναι η ανάγκη ύπαρξης ανάγλυφων επιφανειών για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών σημείων που αποτελούν τη βάση για την ορθή λειτουργία του αλγορίθμου. Έτσι λείες επιφάνειες χωρίς χαρακτηριστικά σημεία είναι αδύνατο να ψηφιοποιηθούν με τη μέθοδο αυτή, ενώ θα ήταν πολύ εύκολο να μετρηθούν με μεθόδους πχ. τριγωνισμού λέιζερ. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σε συνδυασμό με μηχανισμό περιστρεφόμενης τράπεζας και ακίνητη φωτογραφική μηχανή είτε απλά με κίνηση της φωτογραφικής μηχανής γύρω από το αντικείμενο ή μνημείο ενδιαφέροντος με ιδιαίτερη προσοχή στην επίτευξη πλήρους επιφανειακής κάλυψης. Με δεδομένο ότι οι σύγχρονες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές επιτυγχάνουν αποτύπωση με πολύ υψηλή ποιότητα εικόνας και μεγάλη ανάλυση που προσεγγίζει και ξεπερνά σε πολλές περιπτώσεις την ανάλυση της αναλογικής φωτογραφίας, η μέθοδοι που εκμεταλλεύονται την τεχνική σχήμα-από-κίνηση απέκτησαν τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερα μεγάλη δυναμική και έχουν χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα νέων έργων ψηφιακής αποτύπωσης, καθώς επιτυγχάνουν ιδιαίτερα υψηλό βαθμό παραγωγικότητας χωρίς να θυσιάζεται η ποιότητα του τελικού αποτελέσματος (το οποίο βέβαια εξαρτάται κατά πολύ από την εμπειρία του προσωπικού ψηφιοποίησης).

Στην κατηγορία αυτή μπορούν να ενσωματωθούν και άλλες τεχνικές, μία εκ των οποίων γνωρίζει σημαντική άνθηση τα τελευταία χρόνια και δεν είναι άλλη από την ολογραφία με χρήση υπολογιστών. Η ολογραφία είναι ήδη ώριμη (φτάνει τα 50 περίπου χρόνια), αλλά δεν έχει ακόμη

καταφέρει να αποδώσει τους καρπούς της τουλάχιστον σε εμπορικό επίπεδο. Έτσι η ολογραφία παραμένει ακόμη σε επίπεδο ερευνητικής ή πολύ ειδικής χρήσης. Παρουσιάζεται ως μια πολύ ακριβή, τεχνικά πολύπλοκη μέθοδος με μη σημαντικά αποτελέσματα για τον κόσμο του πολιτισμού, λίγο-πολύ ως ένα αξιοπερίεργο. Αυτό όμως αρχίζει να αλλάζει. Μερικά από τα προβλήματα που σχετίζονται με την ολογραφία είναι η απαίτηση για χρήση υγρών χημικών για την έκθεση των εικόνων και οι σημαντικοί περιορισμοί στη δυνατότητα απεικόνισης. Η ολογραφία με χρήση υπολογιστών δίνει μια παράπλευρη λύση σε όλα αυτά τα προβλήματα. Θα επιχειρήσουμε εδώ να κάνουμε μια απλή εισαγωγή στην ολογραφία, η οποία βασίζεται στη θεμελιώδη παρατήρηση το φως έχει τρεις σημαντικές ιδιότητες: ένταση, συχνότητα και φάση. Μια ασπρόμαυρη εικόνα αναπαριστά μόνο την ένταση. Μια έγχρωμη εικόνα αναπαριστά τις δύο πρώτες ιδιότητες, ένταση και συχνότητα. Μόνο το ολόγραμμα μπορεί να συλλάβει και να αναπαραστήσει και τις τρεις ιδιότητες. Το φως που προέρχεται από διαφορετικά σημεία του αντικειμένου έχει διανύσει διαφορετικό μήκος αποστάσεων και έχει, συνεπώς, διαφορετική φάση. Έτσι, η πληροφορία της τρισδιάστατης δομής του αντικειμένου βρίσκεται στη φάση. Με έλεγχο της φάσης του φωτός που προσπίπτει στο αντικείμενο μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι όλη η πληροφορία φάσης στο ολόγραμμα προέρχεται από το αντικείμενο, που σημαίνει ότι θα έχουμε καταγράψει τη συνολική πληροφορία τρισδιάστατης μορφής του αντικειμένου. Κατά την απεικόνιση, το ολόγραμμα εμφανίζει παράλλαξη, δηλαδή βλέπουμε ένα τρισδιάστατο αντικείμενο και εάν μετακινήσουμε τη θέση θέασής του φέρνουμε άλλα τμήματα της επιφάνειάς του στο οπτικό μας πεδίο. Ακριβώς όπως θα γινόταν εάν το αντικείμενο είχε φυσική παρουσία. Δύο είναι οι προσεγγίσεις στην ολογραφία με υπολογιστές: η ψηφιακή ολογραφία και η τεχνητά δημιουργημένη ολογραφία (μέσω υπολογιστή). Και οι δύο έχουν σημαντικές προοπτικές στη σύλληψη και απεικόνιση τρισδιάστατων πολιτιστικών αντικειμένων.

Ψηφιακή ολογραφία (digital holography) είναι η διαδικασία της καταγραφής ολογράμματος με οπτικά αισθητήρια και η αποθήκευσή του σε υπολογιστή. Στη διαδικασία δεν εμπλέκεται πλέον κάποιο υγρό χημικό. Η προοπτική της μεθόδου είναι πολύ μεγάλη. Επειδή η εικόνα μπορεί να αποκατασταθεί μέσω λογισμικού είναι δυνατή η εξαγωγή του τρισδιάστατου σχήματος με μαθηματικές μεθόδους. Τα ψηφιακά ολογράμματα είναι δυνατό να απεικονιστούν με δύο τρόπους:

- Ως πραγματικά ολογράμματα με όλες τις ιδιότητες παράλλαξης των τυπικών ολογραμμάτων, μέσω της «εγγραφής» των δεδομένων των ολογραμμάτων σε μια συσκευή που ονομάζεται χωρικός διαμορφωτής φωτός (spatial light modulator) και με τον φωτισμό τους είτε με φως από λέιζερ είτε με φως από σημειακή πηγή λευκού φωτός.
- Μέσω του υπολογισμού της κυματομορφής από το ολόγραμμα εντός του υπολογιστή και στη συνέχεια υπολογισμού της εικονικής αναπαράστασής του σε οθόνη υπολογιστή με τυπικές μεθόδους απεικόνισης τρισδιάστατων γραφικών.

Πέραν του σημαντικού πλεονεκτήματος της μαθηματικής αναπαράστασης των δεδομένων ενός ψηφιακού ολογράμματος, άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής του και η δυνατότητα αντιγραφής και αναπαραγωγής του. Από τη στιγμή που ένα ολόγραμμα κατασκευάζεται έχει πλέον τη μορφή ψηφιακών δεδομένων. Στη γενική περίπτωση είναι δυνατή η μετάδοσή του ή ακόμη και η επεξεργασία του (πχ. κλιμάκωση). Μπορούμε να δανειστούμε ένα αντίστοιχο παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων από το χώρο της ψηφιακής μουσικής. Από τη στιγμή που έχουμε τη μουσική σε ψηφιακή μορφή είναι δυνατή η επεξεργασία της, η αλλαγή της μορφής δεδομένων, η αποστολή της μέσω πχ. e-mail, η εγγραφή της σε CD, η

μεταφόρτωση μέσω διαδικτύου, η μετάδοση μέσω ψηφιακού ραδιοφώνου, κ.ο.κ. Παρόμοια ευελιξία παρέχεται και από το ψηφιακό ολόγραμμα. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των ψηφιακών ολογραμμάτων είναι ότι βασίζεται στη χρήση φωτός λέιζερ, το οποίο αποτελεί πρότυπο. Αυτό σημαίνει ότι από τη στιγμή που αποθηκευθεί ένα ψηφιακό ολόγραμμα πολιτιστικού αντικειμένου σήμερα και η διαδικασία επαναληφθεί αργότερα, είναι δυνατή η απόλυτη σύγκριση μεταξύ των ολογραμμάτων. Το μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου λέιζερ HeNe δεν πρόκειται να μεταβληθεί με το πέρασμα του χρόνου (παρέχοντας με τον τρόπο αυτό μέθοδο συγκριτικής μελέτης αντικειμένων στο πέρασμα του χρόνου).

Τα *τεχνητά δημιουργημένα ολογράμματα (με χρήση υπολογιστών)* (Computer generated holograms) είναι στην ουσία η άλλη όψη του ίδιου νομίσματος. Για τη δημιουργία τους γίνεται σύλληψη τρισδιάστατων δεδομένων και στη συνέχεια ακολουθεί προσομοίωση της διαδικασίας δημιουργίας ολογράμματος εντός ενός υπολογιστή. Έχοντας υπολογίσει πώς θα είναι το ολόγραμμα, η διαδικασία προχωρά στην τελική κατασκευή του ολογράμματος. Πρόσφατες πρόοδοι στην τελευταία αυτή διαδικασία, ειδικότερα στη λιθογραφία ηλεκτρονίων, δίνουν πλέον αυτή τη δυνατότητα και σε αρκετά μεγάλη κλίμακα – έως και αρκετά μέτρα. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να δημιουργήσουμε το ολόγραμμα ενός αντικειμένου που δεν έχει, με την τυπική έννοια, ολογραφηθεί. Η ποιότητα αποκατάστασης είναι εξαιρετική καθώς τα τεχνητά δημιουργημένα ολογράμματα μπορούν να έχουν πλήρη πληροφορία χρώματος.

Γιατί, λοιπόν, δεν είναι γεμάτος ο κόσμος μας με τεχνητά ολογράμματα; Υπάρχουν, βέβαια, μερικά αλλά στην πλειοψηφία τους είναι ειδικές εφαρμογές και ειδικευμένες τεχνικές υλοποιήσεις. Η συγκεκριμένη επιστήμη είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης. Οι οπτικοί αισθητήρες (CCD) δεν είναι ακόμη ικανοποιητικά μεγάλης ανάλυσης για την πραγματική σύλληψη του τεράστιου όγκου οπτικών δεδομένων που απαιτούνται. Αυτό, βέβαια, πρόκειται να αλλάξει. Όλη η εμπορική πίεση στην περαιτέρω ανάπτυξη με χρήση πυριτίου (silicon κατά τα γνωστά) οδηγεί σε όλο και μεγαλύτερης κλίμακας σμίκρυνση των ηλεκτρονικών υλικών. Και όχι μόνο για παρόμοιες εφαρμογές αλλά σε όλη την κλίμακα των βιομηχανικών κατασκευών. Προφανώς και η συγκεκριμένη εφαρμογή θα έχει σημαντικά οφέλη από την ανάπτυξη αυτή. Εάν εξετάσουμε τη μέθοδο σε μεγάλο βάθος χρόνου μπορούμε να πούμε ότι *η ολογραφία τεχνητά δημιουργημένων ολογραμμάτων είναι αδιαμφισβήτητη η απόλυτη λύση στην ψηφιοποίηση, αποθήκευση και απεικόνιση τρισδιάστατων πολιτιστικών αντικειμένων.*

Τέλος, μία ακόμη τεχνική που μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για τα αντικείμενα της κλίμακας που μελετούμε στη συγκεκριμένη παράγραφο είναι η τομογραφία. Τομογραφία είναι η διαδικασία συλλογής τρισδιάστατων ογκομετρικών δεδομένων από σειρά δισδιάστατων εικόνων τομών. Η μέθοδος βρίσκει σήμερα μεγαλύτερη εφαρμογή στην ιατρική και την αεροδιαστημική. Είναι ικανή για υψηλή ακρίβεια, ειδικά για μικρά αντικείμενα. Το βασικό πλεονέκτημά της έγκειται στην ικανότητα σύλληψης και αναδημιουργίας εσωτερικής πληροφορίας. Η πλέον διαδεδομένη μορφή της εκφράζεται με τη χρήση ακτίνων Χ, όπου γίνεται χρήση ενός πομπού ακτίνων Χ χαμηλής ενέργειας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν επίσης και μέθοδοι οπτικής και ακουστικής τομογραφίας, αλλά είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης σε σχέση με την τομογραφία ακτίνων Χ. Η τομογραφία όταν εφαρμόζεται σε ανθρώπους βασίζεται στο ότι το σώμα των ανθρώπων παρουσιάζει διαφοροποίηση ως προς το υλικό, π.χ. κόκαλα, μύες, υγρά, αέρια, κλπ. Καθένα από τα υλικά αυτά απορροφά μέρος των ακτίνων Χ σε διαφορετικό ποσοστό, και, συνεπώς, καθώς οι ακτίνες διατρέχουν το σώμα προκύπτει εικόνα χαρακτηριστική της διαδρομής που διανύθηκε και των

υλικών που συναντήθηκαν. Για το λόγο αυτό η τομογραφία ακτίνων Χ ανθρώπινου σώματος θεωρείται πλούσια σε πληροφορία. Γενικά, όμως, δεν μπορεί να λεχθεί το ίδιο και για τα πολιτιστικά αντικείμενα. Υπάρχουν εξαιρέσεις, αλλά παίρνοντας για παράδειγμα τα αγάλματα, υπάρχει πολύ μικρή διαφοροποίηση στα εσωτερικά υλικά και, έτσι, η τομογραφία μπορεί να συλλάβει μικρά ποσοστά πληροφορίας. Φυσικά υπάρχουν και εξαιρέσεις, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές ανοίγματος σαρκοφάγων.

Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεγάλου μεγέθους

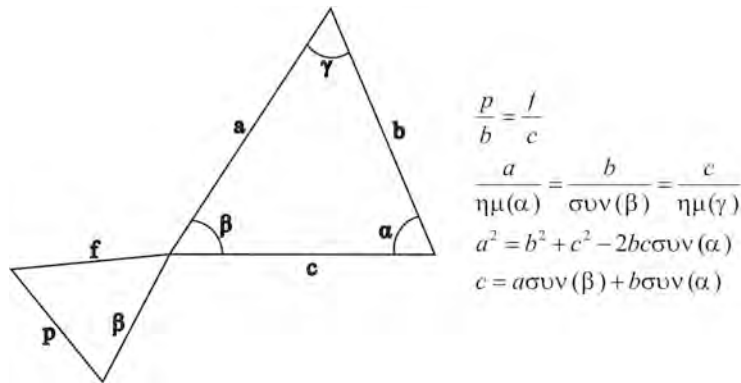
Στην κατηγορία αυτή αναφερόμαστε σε αντικείμενα μεγαλύτερα από 2 μέτρα (μπορεί να φτάνουν τα 100 μέτρα). Ενώ υπάρχουν πολλές τεχνικές για τη μέτρηση μεσαίων αντικειμένων στην εν λόγω κλίμακα, υπάρχει γενικά μια έλλειψη μεθόδων στην κατηγορία αυτή. Στο τέλος της κλίμακας το πρόβλημα ανάγεται σε τεχνικές 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”). Στην κατηγορία αυτή υπάρχουν διαθέσιμες εμπορικές συσκευές με δυνατότητα μέτρησης πολλαπλών σημείων και ακολουθιακής σύνθεσης μιας ολοκληρωμένης τρισδιάστατης σκηνής. Οι καλύτερες τεχνικές έχουν ακρίβεια περί τα 5 χιλιοστά για αποστάσεις λειτουργίας περί τα 30 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 στερεοφωτογραμμετρία». 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 τρισδιάστατης 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.

Σύνοψη συστημάτων τρισδιάστατης ψηφιοποίησης

Συστήματα τριγωνισμού ακτίνων λέιζερ μικρών αποστάσεων

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τριγώνων αποτελούν την βάση για πολλές τεχνικές μετρήσεων. Από τις βασικές μετρήσεις γεωδαισίας που πραγματοποιούνταν στην αρχαία Ελλάδα μέχρι και σήμερα με τους τρισδιάστατους σαρωτές λέιζερ, η χρήση των τριγώνων είναι θεμελιώδης. Ο Θαλής (6^{ος} π.Χ. αιώνας) διακρίθηκε για την ανακάλυψη πέντε γεωμετρικών θεωρημάτων. Δύο από αυτά εφαρμόζονται μέχρι και σήμερα αφού αποτελούν την λύση στο πρόβλημα του τριγωνισμού. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται το *θεώρημα των αντίθετων γωνιών σε δύο τεμνόμενες ευθείες* και ο *νόμος των συνημίτονων*.



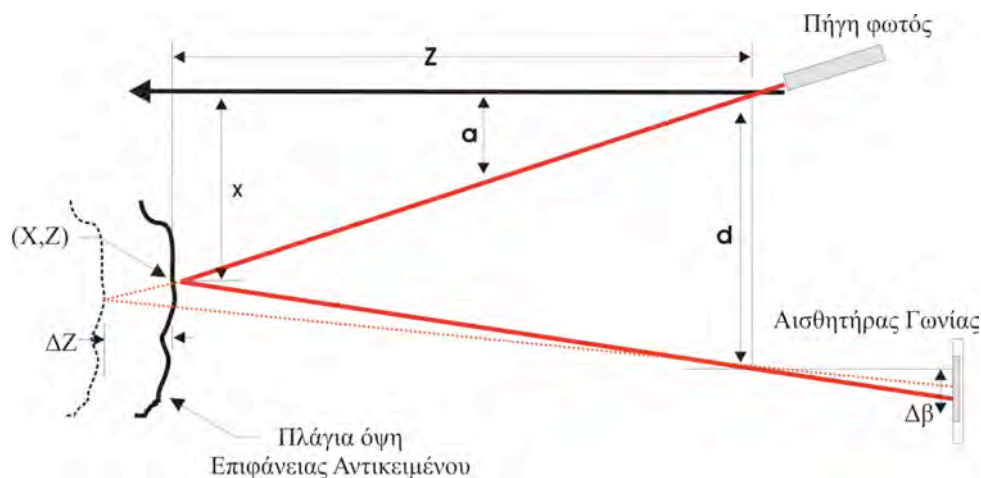
Εικόνα 10. Όμοια τρίγωνα και νόμος συνημίτονων

Οι πηγές ακτίνων λέιζερ έχουν μεγάλη εφαρμογή στην τρισδιάστατη σάρωση. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά μια δέσμης λέιζερ είναι η έντονη φωτεινότητα που την καθιστά εύκολα αντιληπτή από οπτικούς αισθητήρες. Σε γενικές γραμμές, το φως που παράγουν οι πηγές λέιζερ είναι μονοχρωματικό, κατευθυντικό (σε αρκετά υψηλό βαθμό) και σε φάση. Η ιδιότητα της δέσμης να βρίσκεται σε φάση επιτρέπει στην ακτίνα λέιζερ να μένει εστιασμένη όταν προβάλλεται πάνω στην επιφάνεια αντικείμενου. Τα συστήματα που βασίζονται στην εκπομπή ακτίνων λέιζερ χρησιμοποιούν διαφορετικά μοτίβα φωτός. Οι σαρωτές αντικειμένων που βασίζονται σε ακτίνες λέιζερ χρησιμοποιούνται κυρίως σε αποστάσεις μικρότερες των δέκα μέτρων και θα μπορούσαμε να τους κατατάξουμε σε κατηγορίες ανάλογα με το πλήθος οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούν. Έτσι σε σαρωτές με έναν αισθητήρα εικόνας υπάρχει μια πηγή που προβάλλει την ακτίνα λέιζερ σε μια συγκεκριμένη και μεταβαλλόμενη προς την επιφάνεια του αντικείμενου γωνία. Ένας αισθητήρας εικόνας *CCD* ή *CMOS*¹² βρίσκεται στην άλλη άκρη της βάσης του συστήματος και αναλαμβάνει τον εντοπισμό του σημείου ή της περιοχής που περιγράφει η ακτίνα λέιζερ καθώς ανακλάται στην επιφάνεια του αντικείμενου. Η προβολή της ακτίνας μπορεί να σχηματίζει απλά ένα φωτεινό σημείο, μια γραμμή, ένα μοτίβο από ρίγες ή ακόμα και ένα στατικό τυχαίο πλέγμα. Η τρισδιάστατη θέση της επιφάνειας του αντικείμενου που αντανακλά την ακτίνα μπορεί να βρεθεί από το ιδεατό τρίγωνο που δημιουργείται. Η ακρίβεια μέτρησης βάθους μειώνεται ανάλογα με την

¹² Τα CCD και CMOS είναι τα πλέον διαδεδομένα είδη ηλεκτρονικών οπτικών αισθητήρων. Είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης με χιλιάδες ή εκατομμύρια εικονοστοιχεία ανά μονάδα επιφάνειας, τα οποία μετατρέπουν την ενέργεια του φωτός σε ηλεκτρονικά σήματα.

απόσταση ανάμεσα στο σαρωτή και το αντικείμενο. Για πρακτικούς λόγους, η απόσταση ανάμεσα στους οπτικούς αισθητήρες και στην πηγή της ακτίνας λέιζερ δεν μπορεί να μεταβάλλεται ανεξέλεγκτα. Η χρήση δύο οπτικών αισθητήρων αποτελεί μια παραλλαγή της αρχικής ιδέας τριγωνισμού. Οι αισθητήρες βρίσκονται στα δύο άκρα της βάσης του σαρωτή. Το σημείο αντανάκλασης της ακτίνας λέιζερ γίνεται αντιληπτό και από τους δύο αισθητήρες. Η γεωμετρική λύση είναι ίδια με αυτήν του ενός αισθητήρα άρα και τα αποτελέσματα έχουν την ίδια ακρίβεια. Ο δεύτερος αισθητήρας χρησιμοποιείται για την γρηγορότερη σάρωση αφού η πολυμορφία της επιφάνειας των αντικειμένων προκαλεί συχνά την αδυναμία του ενός αισθητήρα να ανιχνεύσει το λέιζερ σε κάποια σημεία που την ίδια στιγμή μπορεί να είναι εμφανή στο δεύτερο αισθητήρα λόγω της διαφορετικής του θέσης και γωνίας. Ο οπτικός τριγωνισμός είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται για περισσότερο από τριάντα χρόνια στη μέτρηση αποστάσεων. Τα τελευταία χρόνια όμως η ανάπτυξη γεωμετρικά σταθερών αισθητήρων και διόδων φωτός βελτίωσε κατά πολύ την ακρίβεια και την ταχύτητα της εν λόγω τεχνικής. Η ποικιλία στους σαρωτές τριγωνισμού βασίζεται κυρίως στη

- *δομή του φωτισμού* (απλό σημείο, ακτίνα λέιζερ, πολλαπλός πίνακας σημείων ή πολλαπλές δέσμες ακτίνων)
- *μορφή του αισθητήρα* (γραμμικός πίνακας ή πλέγμα CCD ή CMOS)
- *μέθοδο σάρωσης* (μετακίνηση του αντικειμένου μπροστά από την πηγή φωτός ή μετακίνηση του ίδιου του συστήματος γύρω από το αντικείμενο).



Εικόνα 11. Η αρχή του τριγωνισμού

Στην Εικόνα 11 επεξηγείται το πρόβλημα του τριγωνισμού σε δύο διαστάσεις. Η θέση του κέντρου του παλμού της δέσμης φωτός που αντανάκλαται στην επιφάνεια αποτυπώνεται πάνω στον αισθητήρα εικόνας. Ο σαρωτής με τη σειρά του υπολογίζει τη νοητή γραμμή που τέμνει τη δέσμη σε ένα ακριβώς σημείο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάκτηση του βάθους. Το τρισδιάστατο σχήμα του αντικειμένου προκύπτει από τη μετακίνηση και περιστροφή του αντικείμενου μπροστά από την σταθερή ακτίνα που προβάλλει ο σαρωτής. Υπάρχει όμως και η παραλλαγή της μεθόδου όπου η σάρωση του αντικείμενου πραγματοποιείται με την ακτίνα λέιζερ να μετακινείται γύρω από το αντικείμενο. Η ακρίβεια του οπτικού τριγωνισμού βασίζεται στην ικανότητα εντοπισμού του κέντρου του παλμού της δέσμης σε κάθε χρονική στιγμή. Σε συστήματα οπτικού τριγωνισμού κοντινών αποστάσεων, όπου το βάθος υπολογίζεται από έναν και μόνο παλμό φωτός, παράγεται

ένα καθορισμένο εύρος σφαλμάτων. Τα σφάλματα αυτά εμφανίζονται λόγω της ανάκλασης της δέσμης στην επιφάνεια του αντικειμένου αλλά και εξαιτίας των χαρακτηριστικών της ίδιας της επιφάνειας [13].

Συστήματα εξαγωγής σχήματος από σιλουέτες

Η τεχνική *Σχήμα-Από-Σιλουέτες* ανήκει στην κατηγορία *παθητικών τεχνικών* και βασίζεται μόνο στην πληροφορία που προσφέρει ένα σύνολο από δισδιάστατες φωτογραφίες. Στην ίδια κατηγορία με την τεχνική αυτή συναντάμε και την μεθοδολογία *Σχήμα-Από-Στερεοσκοπική-Φωτογράφιση*, καθώς και άλλες γνωστές τεχνικές, όπως οι *Σχήμα-Από-Κίνηση*, *Σχήμα-Από-Σκίαση*, *Σχήμα-Από-Μεταβολή-Εστίασης*, κάποιες από τις οποίες βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο, καθώς οι υπάρχουσες υλικοτεχνικές λύσεις δεν έχουν ξεπεράσει τα σύνορα των ερευνητικών εργαστηρίων.

Το 1960 ο Francois Villeme επινόησε μια μέθοδο γνωστή ως *Φωτογλυπτική*. Χρησιμοποίησε 24 κάμερες για να αποκτήσει ένα σύνολο από σιλουέτες του αντικειμένου φωτογραφημένο από διαφορετικές γωνίες. Η αποτύπωση τους γινόταν πάνω σε φωτογραφικές πλάκες της εποχής και προβαλλόταν σε μια σκηνή με την βοήθεια μιας συσκευής προβολής στατικών φωτεινών εικόνων (magic lantern). Στη συνέχεια οι σιλουέτες μεταφέρονταν πάνω σε κομμάτια από πηλό με την χρήση ενός *παντογράφου*. Εμπορικές εφαρμογές αναπτύχθηκαν πολύ γρήγορα, όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ σε μεγάλες πρωτεύουσες όπως Παρίσι, Λονδίνο και Νέα Υόρκη άνοιξαν εξειδικευμένα στούντιο, τα οποία λειτούργησαν για λίγα μόνο χρόνια (από το 1863 έως και το 1867), αφού η διαδικασία της *Φωτογλυπτικής* δεν ήταν οικονομικότερη από παραδοσιακές μεθόδους. Ήταν εμφανές το πρόβλημα πως ακόμα και με τις 24 σιλουέτες η διαδικασία απαιτούσε την ανθρώπινη παρέμβαση σε υψηλό βαθμό. Από την άλλη, μεγάλο ήταν και το κόστος του απαραίτητου εξοπλισμού (κάμερες, προβολείς στατικών εικόνων). Τελευταία, αλλά εξίσου σημαντική, ήταν η ανάγκη πρακτικής εξάσκησης του γλύπτη στη χρήση αυτών των συστημάτων, η οποία καθυστέρουσε ακόμα περισσότερο τη διαδικασία. Μετά από 100 χρόνια περίπου, με την έλευση των υπολογιστών η διαδικασία σύλληψης σχημάτων με οπτικές μεθόδους ξανακέρδισε το ενδιαφέρον των ερευνητών. Η *Σχήμα-Από-Σιλουέτες* είναι μια αυτοματοποιημένη μέθοδος κατασκευής τρισδιάστατων μοντέλων από φυσικά αντικείμενα. Είναι μια πολύ δημοφιλής τεχνική τρισδιάστατων ανακατασκευών για κινητά αντικείμενα. Η ιδέα πρωτοπαρουσιάστηκε από τον Baumgart το 1974 στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής. Πρωτοποριακή έρευνα στη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων από πολλαπλές οπτικές γωνίες με χρήση ογκομετρικών στοιχείων έγινε από τους Martin και Aggarwal το 1983. Παρουσίασαν τη μέθοδο των «*κρυφών περιγραμμάτων*», κατά την οποία εξήγαγαν σιλουέτες αντικειμένων από σύνολα φωτογραφιών ενώ δημιουργούσαν το τρισδιάστατο μοντέλο με την ορθογραφική προβολή των σιλουετών. Ο ελεγχόμενος χώρος που χρησιμοποίησαν αποτελούνταν από μια σταθερή κάμερα πάνω σε ένα τρίποδο τοποθετημένο μπροστά από ένα τραπέζι με ελεγχόμενο βήμα περιστροφής. Το φόντο πίσω από το τραπέζι ήταν μονοχρωματικό, ώστε να επιτρέπει τον εύκολο διαχωρισμό του από το αντικείμενο [14]. Η συμβατική μέθοδος *Σχήμα-Από-Σιλουέτες* (Shape from silhouette) προϋποθέτει σιλουέτες χωρίς λάθη και αποτελείται από τα παρακάτω βήματα, ενώ υπό την μορφή διαγράμματος ροής αναπαριστάνεται στην Εικόνα 12:

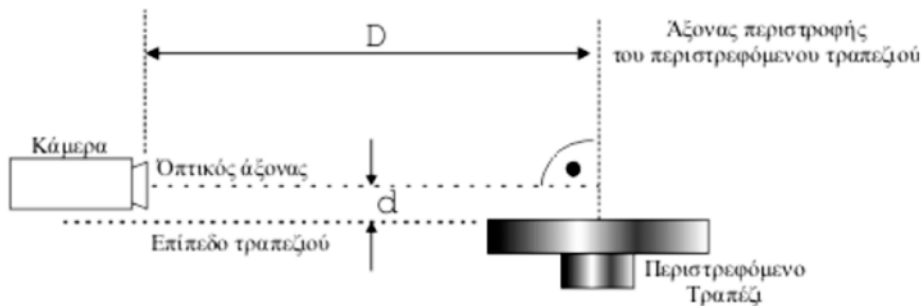
1. καθορισμός των παραμέτρων του οπτικού συστήματος
2. λήψη εικόνων

3. εξαγωγή σιλουετών
4. ανακατασκευή της τρισδιάστατης γεωμετρίας - μοντελοποίηση



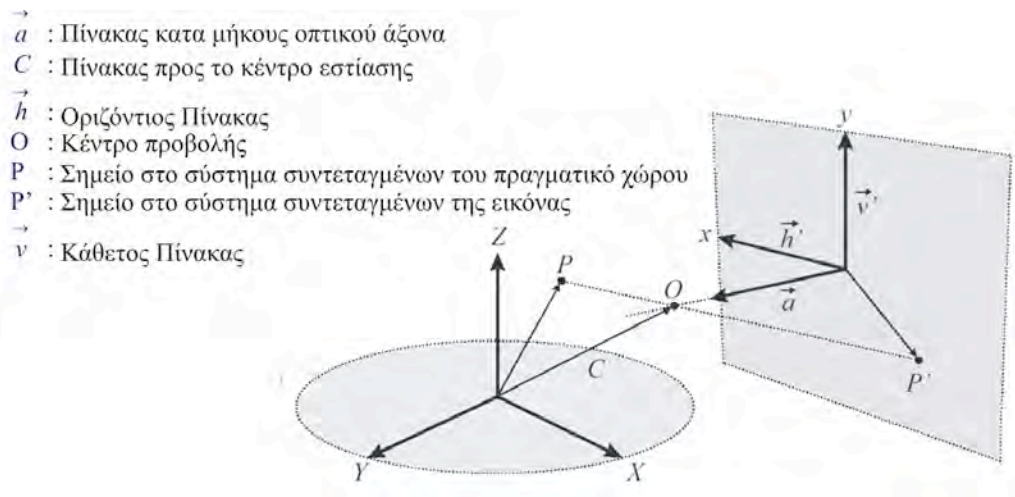
Εικόνα 12. Διάγραμμα ροής ανακατασκευής τρισδιάστατου μοντέλου

Στην Εικόνα 13 αναπαριστάται το ελεγχόμενο περιβάλλον ενός τυπικού συστήματος τρισδιάστατης σάρωσης, βασισμένο στην τεχνική Σχήμα-Από-Σιλουέτες.



Εικόνα 13. Οργάνωση ελεγχόμενου περιβάλλοντος

Σύμφωνα με τους Tosonic και Sablatnig [15] η παράμετρος D κατά μέσο όρο κυμαίνεται στα 120 cm ενώ η παράμετρος d βρίσκεται κοντά στα 3 mm ενώ σε ιδανικές καταστάσεις είναι μηδέν. Ο συνολικός αριθμός των σιλουετών παίζει σημαντικό ρόλο στην πιστότητα του ανακατασκευασμένου αντικειμένου καθώς λεπτομέρειες του αντικειμένου είναι εμφανείς από συγκεκριμένες οπτικές γωνίες. Πριν τη λήψη των φωτογραφιών, πρέπει να βρεθεί η γεωμετρική σχέση ανάμεσα στην θέση της κάμερας και του τραπέζιου, έτσι, ώστε το τελικό μοντέλο να ανταποκρίνεται στις διαστάσεις του πραγματικού αντικειμένου. Αυτό προϋποθέτει την ορθή βαθμονόμηση όλου του συστήματος. Η βαθμονόμηση της κάμερας παρέχει όλες τις εξωτερικές παραμέτρους, όπως τη θέση και τον προσανατολισμό της στο χώρο, αλλά και τις εσωτερικές παραμέτρους, όπως την εστιακή απόσταση και τη μετατόπιση του οπτικού κέντρου. Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης χρησιμοποιείται ένα δοκιμαστικό αντικείμενο που φέρει συγκεκριμένο μοτίβο. Το πιο συνηθισμένο μοτίβο είναι η σκακιέρα της οποίας οι διαστάσεις είναι γνωστές. Το μέγεθος και η θέση του δοκιμαστικού μοτίβου υπολογίζονται βάση μαθηματικών θεωρημάτων και οπτικής. Οι μεταβολές που εμφανίζονται πάνω στη φωτογραφία συγκρίνονται με της πραγματικές διαστάσεις τις σκακιέρας και όλες οι πιθανές αποκλίσεις υπολογίζονται. Στην Εικόνα 14 παρουσιάζεται η γεωμετρική περιγραφή της κεντρικής προβολής σιλουετών χωρίς παραμορφώσεις (προερχόμενες από το φακό).



Εικόνα 14. Μαθηματικό μοντέλο κάμερας για κεντρικές προβολές

Ο Zhang προτείνει μια διαδικασία βαθμονόμησης με τα παρακάτω βήματα:

1. σχεδίαση και εκτύπωση ενός μοτίβου (πχ. σκακιέρα)
2. λήψη φωτογραφιών του μοτίβου από διαφορετικές οπτικές γωνίες και μετακίνηση του μοτίβου
3. αναγνώριση σημείων πάνω στην εικόνα
4. υπολογισμός των πέντε εσωτερικών και όλων των εξωτερικών παραμέτρων χρησιμοποιώντας τον *ευθύ γραμμικό μετασχηματισμό* (Direct Linear Transformation, DTL)

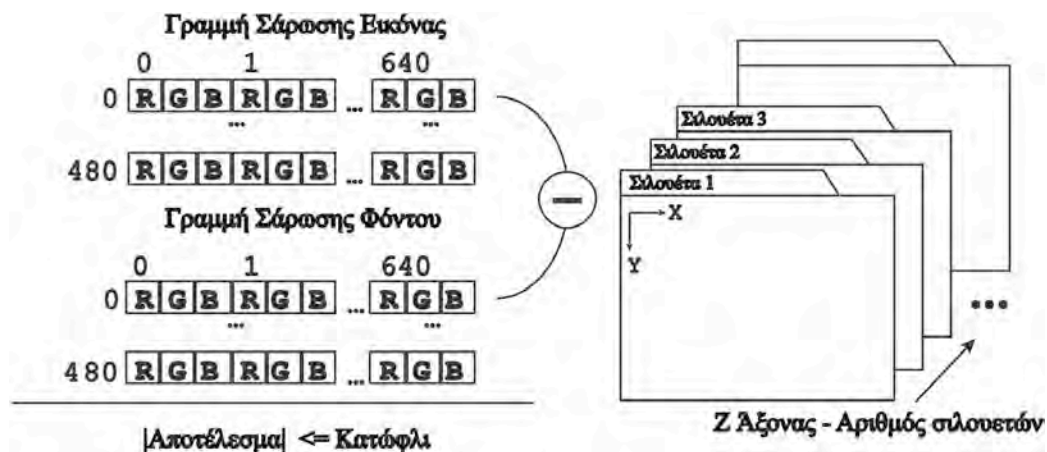
Ο μετασχηματισμός DTL βασίζεται στο μοντέλο κάμερας οπής (pinhole camera model) και στην αρχή της συσχέτισης των συντεταγμένων ενός τρισδιάστατου χώρου (X, Y, Z) και των συντεταγμένων δισδιάστατης εικόνας με χρήση απλών γραμμικών εξισώσεων.

Το επόμενο βήμα είναι η απόκτηση των σιλουετών. Οι σιλουέτες, ή αλλιώς περιγράμματα, είναι εμφανείς στην εικόνα και μπορούν να εξαχθούν σχετικά εύκολα και αξιόπιστα. Οι σιλουέτες παρέχουν πλούσια πληροφορία για το σχήμα του αντικειμένου. Μπορούν να αποκτηθούν από δισδιάστατες ψηφιακές εικόνες με απλούς και εύρωστους αλγορίθμους από το χώρο της εφαρμοσμένης επεξεργασίας εικόνας. Σύμφωνα με τον Aldo Laurentini [16], «*Η λέξη σιλουέτα υποδεικνύει την περιοχή της δισδιάστατης εικόνας όπου εμφανίζονται όλα τα ορατά σημεία που ανήκουν σε ένα αντικείμενο O*». Θεωρώντας ότι δεν υπάρχει καμία περαιτέρω γνώση για την θέση του O στον πραγματικό χώρο, τότε όλη η πληροφορία που δίνει η σιλουέτα S_i είναι επίπεδη πάνω σε μια περιοχή του χώρου C_i . Την περιοχή αυτή την αποκτούμε με την οπίσθια προβολή της S_i από το αντίστοιχο οπτικό σημείο V_i . Έστω τώρα ότι υπάρχουν n σιλουέτες, τότε αυτές περιορίζουν το αντικείμενο O μέσα σε έναν όγκο R_n . Κατά συνέπεια ισχύει ότι:

$$R_n = \bigcap_{i=1}^n C_i.$$

Η εξαγωγή της σιλουέτας από τις εικόνες μπορεί να επιτευχθεί με την αφαίρεση σε επίπεδο εικονοστοιχείων. Η αφαίρεση αυτή πραγματοποιείται ανάμεσα στις εικόνες που εμφανίζουν το αντικείμενο και την εικόνα του φόντου όπου εμφανίζεται ο ίδιος χώρος χωρίς το αντικείμενο. Εάν η απόλυτη τιμή της διαφοράς αυτής σε κάποια περιοχή είναι μεγαλύτερη από ένα δεδομένο κατώφλι, τότε αυτή η περιοχή θεωρείται μέρος της σιλουέτας. Όπως περιγράφεται και στην Εικόνα

15 η αφαίρεση πραγματοποιείται στις χρωματικές τιμές κάθε εικονοστοιχείου. Έστω λοιπόν ότι έχουμε εικόνες ανάλυσης 640x480 εικονοστοιχείων με βάθος χρώματος 24 bpp. Για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας σιλουέτας πραγματοποιούνται τρεις αφαιρέσεις, λόγω των τριών χρωματικών καναλιών που περιγράφουν την κάθε εικόνα. Η απόλυτη τιμή του αποτελέσματος της αφαίρεσης συγκρίνεται με μια τιμή (κατώφλι) και, αν την ξεπερνά, τότε το εικονοστοιχείο αυτό ανήκει στη σιλουέτα, ενώ αντίθετα αφαιρείται.



Εικόνα 15. Εξαγωγή σιλουέτας σε επίπεδο εικονοστοιχείων

Εκτός, όμως, από την απλή μέθοδο εξαγωγής σιλουέτας (επίπεδο εικονοστοιχείων), υπάρχει και η εξαγωγή σε επίπεδο περιοχών, με την οποία μπορεί να βελτιωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Τα βήματα που ακολουθούνται στη μέθοδο αυτή είναι τα παρακάτω:

1. τμηματοποίηση σε κάθε αντικείμενο της εικόνας
2. επανάληψη για κάθε τμήμα:
 - a. υπολογίζεται ο μέσος όρος της απόλυτης τιμής της διαφοράς κάθε εικονοστοιχείου της περιοχής
 - b. εάν ο μέσος όρος είναι μεγαλύτερος από το ορισμένο κατώφλι τότε όλα τα στοιχεία της συγκεκριμένης περιοχής αποτελούν τμήμα της σιλουέτας του αντικειμένου.

Η μέθοδος της εξαγωγής σιλουέτας σε επίπεδο τμημάτων μπορεί να αντιμετωπίσει ένα βασικό πρόβλημα όταν ένα εικονοστοιχείο, ενώ ανήκει στο αντικείμενο, εμφανίζεται με χρωματική πληροφορία παρόμοια με αυτή του φόντου. Η μέθοδος εικονοστοιχείων δεν μπορεί να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα. Τα συστήματα που εφαρμόζουν την εξαγωγή σιλουέτας σε επίπεδο τμημάτων είναι φορητά και μπορούν να λειτουργήσουν σε περιβάλλοντα με διαφορετικό φόντο.

Σχήμα από Δομημένο Φως

Η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου είναι απλή. Η ανάκτηση της πληροφορίας βάθους πραγματοποιείται με την προβολή ενός μοτίβου φωτός πάνω σε ένα αντικείμενο, από γνωστή οπτική γωνία. Η Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως βασίζεται στον τριγωνισμό, όπως και η σάρωση με ακτίνες λέιζερ μικρών αποστάσεων. Οι δύο μεθοδολογίες έχουν παρεμφερή χαρακτηριστικά ενώ οι

εμπορικές υλικοτεχνικές κατασκευές πολλές φορές ταυτίζονται μεταξύ τους. Εξάιρεση αποτελεί η αντικατάσταση της πηγής λέιζερ από μια συσκευή προβολής εικόνας¹³. Για την τρισδιάστατη ανακατασκευή πραγματοποιούνται προβολές από φωτεινά μοτίβα που περιέχουν πολλαπλές ρίγες, πλέγματα ή ακόμα και ελλείψεις. Σε κάποιες περιπτώσεις συναντούμε και χρωματικά κωδικοποιημένα μοτίβα (Εικόνα 16). Η χρωματική κωδικοποίηση βοηθά το σαρωτή να ξεχωρίσει ευκολότερα τις μεταβολές που δέχεται το μοτίβο, καθώς προβάλλεται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Η κωδικοποίηση μπορεί να γίνει με ποικίλες μεθόδους. Δημοφιλέστερες είναι η μεταβλητή φωτεινότητα χρωμάτων και η μεταβλητή πυκνότητα των σχημάτων που φέρει ένα μοτίβο. Ο κύριος στόχος της προβολής των κωδικοποιημένων μοτίβων είναι ο εύκολος διαχωρισμός των εικονοστοιχείων. Από τη στιγμή λοιπόν που το μοτίβο είναι κωδικοποιημένο, οι αντιστοιχίες ανάμεσα στις θέσεις των εικονοστοιχείων που αποτυπώνει ο σαρωτής και των αρχικών σημείων του μοτίβου μπορούν να συγκριθούν. Με τη σύγκριση υπολογίζονται όλες οι αποκλίσεις στα αντιστοιχα σημεία και μπορεί, με τον έμμεσο αυτό τρόπο, να ανακτηθεί η τρίτη διάσταση.



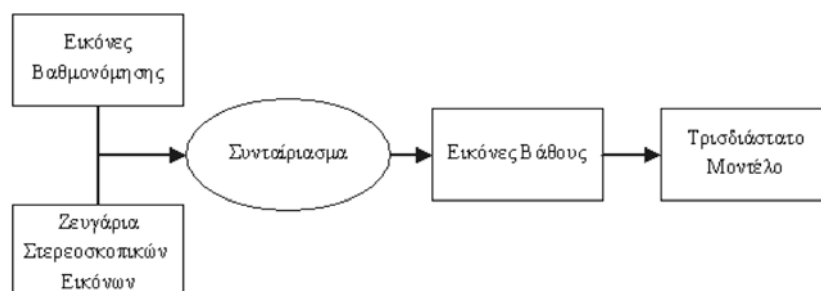
Εικόνα 16. Προβολή χρωματικά κωδικοποιημένου μοτίβου

Όπως ήδη αναφέρθηκε ένα σύστημα προβολής κωδικοποιημένων μοτίβων χρησιμοποιεί ειδικά σχεδιασμένα μοτίβα. Η κωδικοποίηση γίνεται με την απόδοση λέξεων κλειδιών (codewords) σε σύνολα εικονοστοιχείων. Ως εκ τούτου, τα εικονοστοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα μοτίβο οργανώνονται σαν ένας δισδιάστατος πίνακας, όπου το κάθε κελί περιέχει μία λέξη κλειδί. Οι λέξεις κλειδιά είναι απλοί αριθμοί, οι οποίοι χαρτογραφούνται στο μοτίβο με τη χρήση γκριζών χρωματικών τόνων ή γεωμετρικών αναπαραστάσεων. *Το πλήθος των σημείων που πρέπει να κωδικοποιηθούν είναι ανάλογο με το πλήθος των λέξεων κλειδιών που απαιτούνται. Όσο το πλήθος των σημείων αυξάνεται τόσο αυξάνεται και η δυσκολία χαρτογράφησης τους πάνω στο μοτίβο.* Η κωδικοποίηση μπορεί να πραγματοποιείται άλλοτε σε έναν από τους δύο καρτεσιανούς άξονες του μοτίβου x ή y και άλλοτε και στους δύο. Η χρήση μεθοδολογιών κωδικοποίησης επιτρέπει κάποιες φορές την τρισδιάστατη σάρωση ακόμη και αντικειμένων που κινούνται με μικρές ταχύτητες.

¹³ Σε πολλά εμπορικά συστήματα συναντούμε απλοποιημένες εκδόσεις συμβατικών συστημάτων προβολής εικόνων (home video projectors). Οι πιο συνηθισμένες συσκευές προβολής σήμερα είναι οι βίντεο προβολείς LCD, ενώ παλαιότερα οι κλασικοί προβολείς διαφανειών.

Σχήμα από Στερεοσκοπική Φωτογράφιση (Στερεοφωτογράφιση)

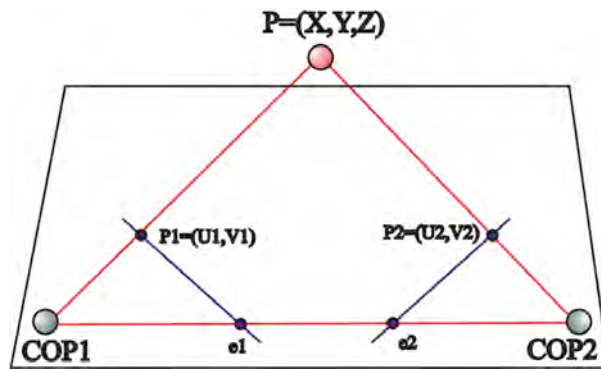
Η ιδέα απόκτησης τρισδιάστατων μοντέλων από ζεύγη φωτογραφιών υπάρχει εδώ και πολλές δεκαετίες. Βασικός στόχος της μεθόδου είναι η εξαγωγή όσο το δυνατό περισσότερης γεωμετρικής πληροφορίας από ένα ζεύγος φωτογραφιών με γνωστή τοποθέτηση στο χώρο. Η εξαγόμενη πληροφορία χρησιμοποιείται για την τρισδιάστατη ανακατασκευή του περιεχομένου των εικόνων. Η στερεοσκοπική φωτογράφιση έχει σημαντική εφαρμογή στο χώρο της όρασης υπολογιστών. Αποτελεί μια υλικοτεχνική προσπάθεια εξομίωσης του τρόπου λειτουργίας του ανθρώπινου συστήματος όρασης. Πράγματι, η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται σε ζεύγος φωτογραφιών που παρουσιάζουν ένα αντικείμενο από διαφορετικές οπτικές γωνίες, προσεγγίζοντας τις εικόνες που λαμβάνονται από τα ανθρώπινα μάτια. Συγκεκριμένα τμήματα του αντικειμένου είναι εμφανή και στις δύο φωτογραφίες. Οι εσωτερικές και εξωτερικές παράμετροι των οπτικών συστημάτων χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση επιτρέπει την ανάκτηση της τρίτης διάστασης ενός σημείου που είναι κοινό ανάμεσα στις δύο φωτογραφίες. Η αναγνώριση των κοινών σημείων πάνω στις εικόνες πραγματοποιείται με μεθόδους αυτόματες ή χειροκίνητες. Η ανάκτηση του βάθους γίνεται με μαθηματικούς αλγορίθμους που χρησιμοποιούν παραμέτρους από τη βαθμονόμηση και τη διαφορά θέσης των κοινών σημείων ανάμεσα στις δύο εικόνες. Μια απλοποιημένη μορφή της διαδικασίας, σε μορφή διαγράμματος ροής, που ακολουθείται για την ανακατασκευή γεωμετρίας από στερεοφωτογράφιση φαίνεται στην Εικόνα 17.



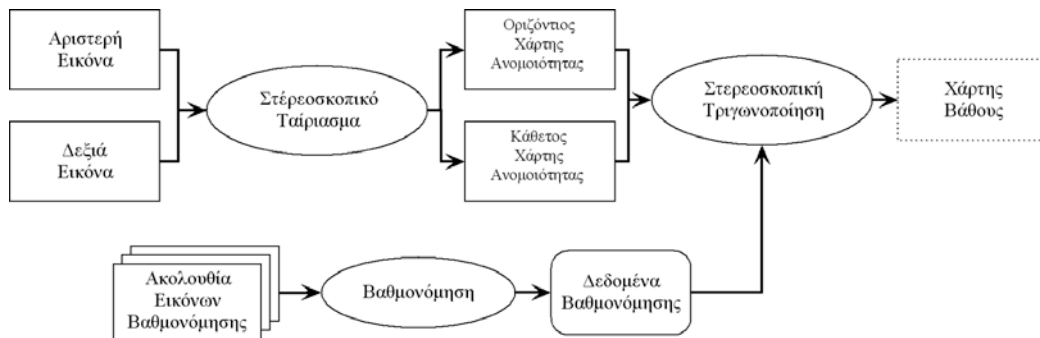
Εικόνα 17. Διάγραμμα ροής ανάκτησης βάθους από στερεοφωτογράφιση

Οι μαθηματικές αρχές που διέπουν τη διαδικασία προέρχονται από το χώρο της προβολικής γεωμετρίας. Η λύση του προβλήματος απεικονίζεται απλοποιημένα στην Εικόνα 18. Τα τρία σημεία $COP1$, $COP2$ και P σχηματίζουν ένα επιπολικό πεδίο. Τα κέντρα προβολής των σημείων ($COP1$ και $COP2$) συνδέονται από μία νοητή γραμμή που τέμνει τα επίπεδα πάνω στα οποία βρίσκονται οι φωτογραφίες. Τα συζυγή σημεία τομής είναι τα $e1$ και $e2$, τα οποία ονομάζονται *επιπολικά*. Το σημείο P υπολογίζεται από την εύρεση του σημείου όπου τέμνονται, στον τρισδιάστατο χώρο, οι προβολές των $P1$ και $P2$.

Το πιο δύσκολο πρόβλημα της στερεοσκοπικής ανάλυσης είναι η εξακρίβωση των εικονοστοιχείων ανάμεσα στις δύο εικόνες που αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο στο χώρο. Αυτό το πρόβλημα είναι γνωστό και ως *πρόβλημα αντιστοιχίας*. Διάφοροι αλγόριθμοι αναλαμβάνουν να αντιστοιχήσουν τη πληροφορία που προσφέρουν οι εικόνες, ώστε να κατασκευάσουν τους *χάρτες ανομοιότητας*, από όπου θα υπολογισθεί, με τη μέθοδο του τριγωνισμού, η γεωμετρία της επιφάνειας του αντικειμένου. Στην Εικόνα 19 δείχνονται τα κύρια βήματα μιας γενικευμένης διαδικασίας αντιστοίχισης.

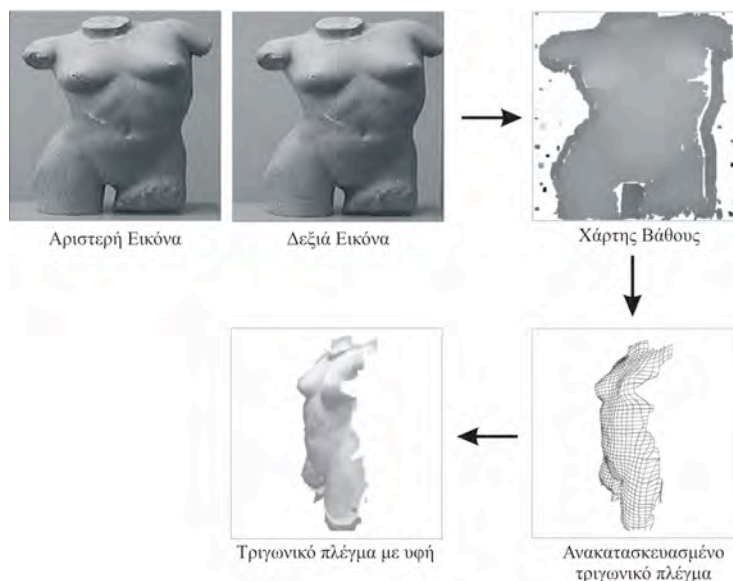


Εικόνα 18. Επιτολικό επίπεδο και στερεοσκοπική αντιστοίχιση



Εικόνα 19. Γενική περιγραφή διαδικασίας δημιουργίας χάρτη βάθους

Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας χάρτης βάθους (depth map). Κάθε εικονοστοιχείο του χάρτη περιγράφει την απόσταση (σε κάποια μετρική μονάδα) από την επιφάνεια του αντικειμένου έως το κέντρο του φακού της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής. Στην Εικόνα 20 εξηγούνται τα βήματα ανακατασκευής ενός αγάλματος. Η αριστερή και η δεξιά εικόνα χρησιμοποιούνται ως πηγές πληροφορίας για τη δημιουργία του χάρτη βάθους, από όπου θα προκύψει το πολυγωνικό πλέγμα πάνω στο οποίο θα προβληθεί η πληροφορία υψής.



Εικόνα 20. Αποτύπωση τρισδιάστατου αντικειμένου από στερεοφωτογράφιση

Το ερευνητικό ενδιαφέρον στο συγκεκριμένο χώρο είναι μεγάλο και αυτό φαίνεται από το πλήθος των αλγορίθμων που επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη διαδικασία αναγνώρισης κοινών σημείων ανάμεσα σε δύο φωτογραφίες. Ένας από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά που αναγνωρίζει πάνω στο ζεύγος φωτογραφιών (feature-based stereo matching). Ο αλγόριθμος αναλαμβάνει να ανακαλύψει όλα εκείνα τα ευδιάκριτα χαρακτηριστικά του αντικειμένου που εμφανίζονται και στις εικόνες και μπορεί να είναι γωνίες, πλευρές, ευθείες ή ακόμα και καμπύλες. Η επιπολική γεωμετρία εφαρμόζεται για την εύρεση των καλύτερων αντιστοιχιών ανάμεσα σε αυτά σημεία. Η τεχνική αυτή είναι εύρωστη στην εκτίμηση του βάθους αλλά η ανάκτηση του βάθους πραγματοποιείται μόνο για τα σημεία της εικόνας που έχουν αναγνωρισθεί ως κοινά.

Από την άλλη, υπάρχουν αλγόριθμοι που βασίζονται στην ιδέα του διαχωρισμού της εικόνας σε τμήματα. Ο διαχωρισμός αυτός επιτρέπει στον αλγόριθμο να ελέγξει μικρές γειτονιές εικονοστοιχείων για να εντοπίσει τις αντιστοιχίες ανάμεσα στις δύο φωτογραφίες. Η βέλτιστη αντιστοιχία των τμημάτων βασίζεται στην επιπολική γεωμετρία και σε μεγέθη όπως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και το σφάλμα απόλυτης διαφοράς. Οι αλγόριθμοι τμηματικού διαχωρισμού αποφέρουν πολύ πυκνό χάρτη βάθους. Το μέγεθος των τμημάτων που χωρίζεται η εικόνα αποτελεί κριτήριο στην ποιότητα της ανακατασκευής και στο χρόνο επεξεργασίας που απαιτείται.

Δύο είναι τα *πλεονεκτήματα* της τεχνικής:

- ανήκει στην κατηγορία των παθητικών τεχνικών τρισδιάστατης αποτύπωσης και,
- βασίζεται σε φτηνό εξοπλισμό που μπορεί να περιορισθεί σε δύο μόνο ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές

Από την άλλη, *σημαντικά μειονεκτήματα* της τεχνικής είναι:

- το βάθος υπολογίζεται μόνο σε σημεία που περιέχουν αναγνωρίσιμα χαρακτηριστικά και,
- οι χάρτες βάθους περιέχουν συχνά θόρυβο αφού η ποικιλία της πληροφορίας των φωτογραφιών κάνει την διαδικασία αντιστοίχισης πολύ δύσκολη

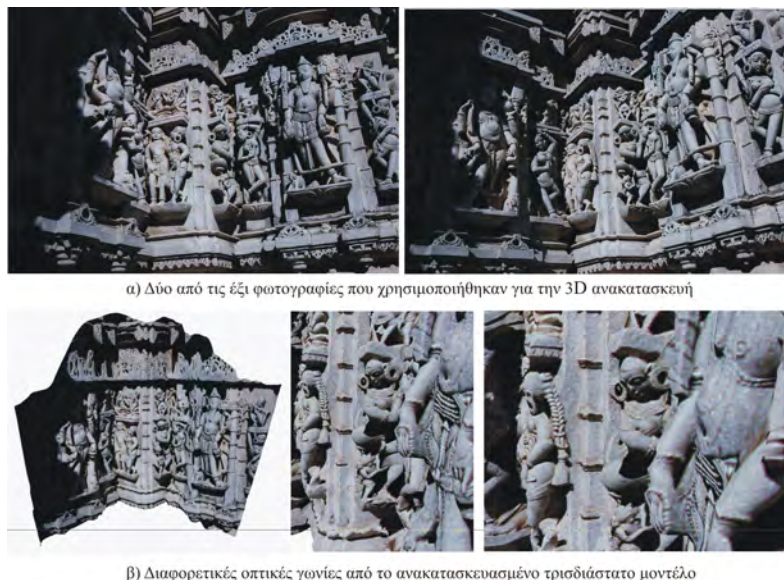
Τα αποτελέσματα της μεθόδου γύρω από πιθανές σιλουέτες που εμφανίζουν τα αντικείμενα δεν είναι ενθαρρυντικά. Εκτός από αυτό αντιμετωπίζει και προβλήματα σε επιφάνειες όπου η διάχυση του φωτός δεν είναι ομαλή. Η πληροφορία βάθους που εξάγεται από τα ζεύγη φωτογραφιών χαρακτηρίζεται 2½D (διάστασης 2,5) αντί για 3D και αυτό γιατί το αντικείμενο χαρτογραφείται τρισδιάστατα σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς που είναι σχεδόν κάθετο στους δύο οπτικούς άξονες των εικόνων. Για μια πλήρως τρισδιάστατη απεικόνιση ενός αντικειμένου απαιτούνται πολλά ζεύγη φωτογραφιών [11]. Οι Bertozzi et al. [17] πρότειναν έναν αλγόριθμο για την ανάλυση των επιδόσεων των συστημάτων που βασίζονται στη στερεοφωτογράφιση. Οι Scharstein και Szeliski [18] σε μια πρόσφατη μελέτη τους κατάφεραν να οργανώσουν σε ένα συγκριτικό πίνακα τους διάφορους αλγορίθμους στερεοφωτογράφισης.

Σχήμα από Κίνηση - Σχήμα από ακολουθία εικόνων (βίντεο)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια παραλλαγή της *Σχήμα-Από-Στερεοφωτογράφιση*, κατά την οποία οι δύο φωτογραφικές μηχανές έχουν αντικατασταθεί από μια μηχανή λήψης κινούμενης εικόνας που καταγράφει το αντικείμενο από διαφορετικές οπτικές γωνίες (ή στη γενική περίπτωση από φωτογραφική μηχανή που λαμβάνει διαδοχικά φωτογραφίες καθώς κινείται μπροστά και γύρω από

το αντικείμενο ενδιαφέροντος). Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η απόλυτη ακινησία του αντικειμένου ενώ θεωρείται δεδομένο ότι δεν υπάρχουν κινητά μέρη πάνω του. Οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται είναι παρόμοιοι με αυτούς της *Σχήμα-Από-Στερεοφωτογράφιση* και είναι ευαίσθητοι στο θόρυβο που παρουσιάζει η ακολουθία εικόνων. Όπως είναι αναμενόμενο και η *Σχήμα-Από-Κίνηση* αντιμετωπίζει το πρόβλημα αντιστοίχισης των κοινών σημείων ανάμεσα στις εικόνες. Όταν οι εικόνες που χρησιμοποιούνται είναι από διαφορετικές οπτικές γωνίες ο υπολογισμός του προσανατολισμού συνεχίζει να είναι μια σχετικά απλή διαδικασία δεδομένου ότι υπάρχει αρκετή πληροφορία αντιστοίχισης. Τις περισσότερες φορές η λύση του προβλήματος αντιστοίχισης σε διαφορετικές οπτικές γωνίες καταλήγει να δίνεται χειροκίνητα [19]. Ένας θεμελιώδης περιορισμός τον οποίο δε δύναται να ξεπεράσει η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ότι ο χάρτης βάθους λειτουργεί μόνο για τα σημεία του αντικειμένου που είναι ορατά στο φωτογραφικό φακό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν αρκετές ασάφειες αφού η μέθοδος προσπαθεί να ανακτήσει το τρισδιάστατο μοντέλο του αντικειμένου αλλά και τη θέση της μηχανή λήψης χωρίς να υπάρχει κάποια προηγούμενη γνώση για αυτή. Οι μαθηματικοί υπολογισμοί που πραγματοποιούνται επηρεάζονται από ασαφείς παραμέτρους. Μια από αυτές είναι η Ευκλείδεια ασάφεια και σχετίζεται με το πραγματικό σύστημα συντεταγμένων και τη θέση του αντικείμενου μέσα σε αυτό. Η ασάφεια στην κλίμακα του αντικειμένου είναι ένα πρόβλημα που προέρχεται από τον *προοπτικό φακό* της μηχανή λήψης. Από την άλλη, η χρήση *ορθογραφικών φακών* εμφανίζει ασάφεια βάθους. Και στις δύο περιπτώσεις η απάντηση δίνεται μαθηματικά με την πρόσθετη γνώση της απόστασης ανάμεσα στις δύο θέσεις λήψης των εικόνων.

Στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται δύο εικόνες (από τις 6 που χρησιμοποιήθηκαν συνολικά) από έναν Ινδιάνικο ναό όπου έχει εφαρμοσθεί η τεχνική *Σχήμα-Από-Βίντεο* για την τρισδιάστατη αποτύπωσή του. Το χαρακτηριστικό όλων των εικόνων είναι ότι έχουν αποτυπωθεί από το ίδιο επίπεδο. Στην εικόνα παρατίθεται επίσης και μία τρισδιάστατη αναπαράσταση του αποτυπωμένου χώρου [20].



Εικόνα 21. Αποτύπωση τρισδιάστατου μοντέλου με την τεχνική *Σχήμα-Από-Βίντεο*

Σχήμα από Φωτοσκίαση

Η φωτοσκίαση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αντίληψη του βάθους. Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να εξομοιώσουν τον τρόπο που λειτουργεί το ανθρώπινο σύστημα όρασης για να ανακτήσουν το βάθος με τη βοήθεια των φωτοσκιάσεων. Η ανάκτηση βάθους με τη μέθοδο *Σχήμα-Από-Φωτοσκίαση* απαιτεί μία μόνο οπτική γωνία λήψης. Φυσικά για την πλήρη αποτύπωση του αντικειμένου απαιτούνται περισσότερες. Η τεχνική αυτή χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες:

- τεχνικές ελαχιστοποίησης
- τεχνικές μετάδοσης
- τεχνικές περιοχής
- γραμμικές τεχνικές

Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με βάση τις εννοιολογικές διαφορές που παρουσιάζει η κάθε αλγοριθμική προσέγγιση της βασικής ιδέας. Οι μέθοδοι ελαχιστοποίησης καταλήγουν σε λύση του προβλήματος με την εφαρμογή μίας συνάρτησης ενέργειας, ενώ οι τεχνικές μετάδοσης μελετούν τη μετάδοση της πληροφορίας των σχημάτων από ένα σύνολο σημείων που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Από την άλλη, οι τεχνικές περιοχής παράγουν το βάθος βασιζόμενες σε υποθέσεις που αφορούν τον τύπο της επιφάνειας. Οι γραμμικές μέθοδοι υπολογίζουν την λύση του προβλήματος βασιζόμενες σε μαθηματικούς χάρτες αντανάκλασης. Οι περισσότερες τεχνικές υποθέτουν ότι η πηγή φωτός ακολουθεί μια γνωστή και συγκεκριμένη πορεία και δημιουργεί πολύ συγκεκριμένες ανακλάσεις. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των αλγορίθμων είναι ότι δεν μπορούν να ανακτήσουν πληροφορία από σκιασμένες περιοχές καθώς αυτές δεν προσφέρουν αρκετής έντασης χρωματική πληροφορία. Μέσα από μια εκτενή μελέτη που πραγματοποίησαν οι Zhang et al. [21] κατέληξαν στα παρακάτω συμπεράσματα που αφορούν όλες τις τεχνικές φωτοσκίασης:

1. Όλοι οι αλγόριθμοι παράγουν γενικά μη ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν τους δίνονται τεχνητά δεδομένα
2. Τα αποτελέσματα τους είναι ακόμα χειρότερα σε πραγματικές εικόνες
3. Τα αποτελέσματα σε τεχνητά δεδομένα γενικά δεν λειτουργούν προβλεπτικά για τα αποτελέσματα σε πραγματικά δεδομένα

Υπάρχουν αρκετές ερευνητικές κατευθύνσεις για μελλοντική μελέτη και έρευνα της εν λόγω τεχνικής. Τα μαθηματικά μοντέλα ανάκλασης φωτός που χρησιμοποιούνται είναι απλοϊκά, ενώ νέα, πιο σύνθετα, έχουν ήδη προταθεί. Σύνηθες φαινόμενο είναι ο συνδυασμός δύο διαφορετικών τεχνικών, ώστε να επιτευχθεί το συνταίριασμα των πλεονεκτημάτων τους που θα οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα. Οι Zhang et al [21] προτείνουν τον συνδυασμό της τεχνικής *Σχήμα-Από-Φωτοσκίαση* με τη μέθοδο *Σχήμα-Από-Στερεοφωτογράφιση*. Ένας άλλος συνδυασμός που προτείνεται είναι αυτός με την τεχνική *Σχήμα-Από-Σκιά* που προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα στα σημεία του αντικειμένου που καλύπτονται από σκιές.

Σχήμα από υφή

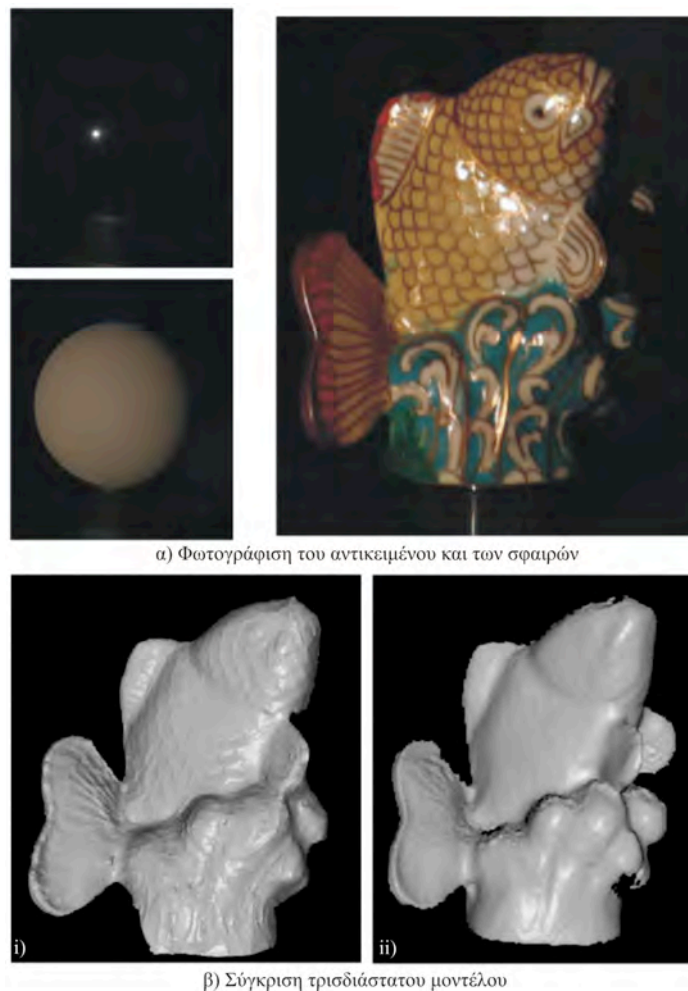
Η υφή αποτελεί μια σημαντική πηγή πληροφορίας για να αντιληφθεί κάποιος το σχήμα του αντικειμένου. Ο υπολογισμός σχημάτων τριών διαστάσεων είναι εφικτός όταν υπάρχει κάποια προηγούμενη γνώση για την υφή. Είναι γνωστό ότι όταν η υφή είναι ομοιογενής το ανθρώπινο μάτι μπορεί εύκολα να αντιληφθεί το σχήμα. Προσπάθειες έχουν γίνει για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας από υπολογιστικά συστήματα. Η μέθοδος είναι γνωστή με την ονομασία *Σχήμα-Από-*

Υφή και παραμένει, ουσιαστικά, ένα άλυτο πρόβλημα. Η βασική αρχή πίσω από την τεχνική αυτή είναι οι παραμορφώσεις που δέχονται μεμονωμένα τα εικονοστοιχεία υφής (texels). Οι μεταβολές της υφής πάνω στην εικόνα επιτρέπουν την εκτίμηση του τρισδιάστατου σχήματος της επιφάνειας που βρίσκεται υπό μελέτη. Η ανακατασκευή βασίζεται σε παραμορφώσεις προοπτικής βάθους αλλά και σε προοπτική σμίκρυνσης (καθώς τα αντικείμενα πλησιάζουν το επίπεδο της εικόνας παύουν να είναι παράλληλα προς αυτό). Το ποσοστό αυτών των παραμορφώσεων μπορεί να υπολογισθεί από την ίδια την εικόνα. Ο υπολογισμός των καμπύλων της επιφάνειας σε οποιοδήποτε σημείο είναι κάθε άλλο παρά τετριμμένο. Για το λόγο αυτό ο υπολογισμός της επιφάνειας γίνεται από τον προσανατολισμό της εκάστοτε επιφάνειας. Ένας χάρτης καθέτων ευθειών σε επιφάνεια προσδιορίζει τον προσανατολισμό της επιφάνειας στα σημεία όπου οι κάθετες υπολογίζονται. Αν υποθέσουμε ότι οι κάθετες είναι αρκετά πυκνές και η επιφάνεια είναι ομαλή, τότε ο χάρτης αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τρισδιάστατη ανακατασκευή του αντικειμένου. Υπάρχει μια αναλογία ανάμεσα στις τεχνικές *Σχήμα-Από-Υφή* και *Σχήμα-Από-Κίνηση* [22]. Η τεχνική *Σχήμα-Από-Υφή* αποτελεί ένα βασικό πρόβλημα στο χώρο της όρασης υπολογιστών. Δεν υπάρχει κάποια άμεση πρακτική εφαρμογή που να σχετίζεται με την αποτύπωση αντικειμένων πολιτισμικής κληρονομιάς, και γενικότερα χαρακτηρίζεται ως μια τεχνική που σχετίζεται με την ανακατασκευή επιφανειών από υφάσματα ή ανθρώπινα δέρματα [22].

Σχήμα από φωτομετρική στερεοσκοπική φωτογράφιση

Η *Σχήμα-Από-Φωτομετρική-Στερεοφωτογράφιση* βασίζεται σε μια παραλλαγή της τεχνικής *Σχήμα-Από-Φωτοσκίαση*. Η διαφορά τους βρίσκεται στο πλήθος φωτογραφιών που χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή του βάθους. Στην παρούσα μεθοδολογία οι εικόνες εμφανίζουν το αντικείμενο από την ίδια οπτική γωνία αλλά υπό μεταβλητές συνθήκες φωτισμού. Η φωτομετρική μέθοδος δύναται να ανακτήσει γρήγορα τον προσανατολισμό της επιφάνειας του αντικειμένου από εικόνες φωτεινότητας (διαβαθμίσεις του γκρι). Για να πετύχει κάτι τέτοιο χρησιμοποιεί άλλοτε βαθμονομημένες πηγές φωτός και άλλοτε όχι. Η επιλογή γίνεται ανάλογα με την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου που εφαρμόζεται [23]. Οι βαθμονομημένες συνθήκες φωτισμού είναι εφικτές μονό σε περιβάλλον εργαστηρίου. Ερευνητικές προσπάθειες γίνονται, ώστε να μπορεί να λειτουργήσει η τεχνική σε περιβάλλον με γενικό φωτισμό [24],[25]. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η πρόσφατη ερευνητική εργασία των Hertzmann και Seitz [25] στην οποία γίνεται χρήση γνωστών γεωμετρικών αντικειμένων τα οποία φωτογραφίζονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού δίπλα στο πραγματικό αντικείμενο που πρόκειται να αποτυπωθεί. Σε ένα από τα πειράματα τους φωτογραφίζουν ένα αντικείμενο που παρουσιάζει την μορφή ενός ψαριού και φέρει πολύπλοκη πληροφορία υφής. Ως αντικείμενα οδηγούς χρησιμοποιούν δύο σφαίρες. Η πρώτη σφαίρα είναι χρώματος γκρι και η επιφάνειά της επιτρέπει την ομαλή διάχυση του φωτός. Η δεύτερη είναι μαύρη με επιφάνεια υψηλής ανακλαστικότητας. Για την ανακατασκευή του αντικειμένου χρησιμοποιήθηκαν δεκατέσσερις (14) φωτογραφίες κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού. Τα αποτελέσματα της τεχνικής τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 22. Καθώς το τρισδιάστατο μοντέλο είναι εντυπωσιακά ρεαλιστικό αποφάσισαν να το συγκρίνουν με ένα τρισδιάστατο μοντέλο του ίδιου αντικειμένου κατασκευασμένο από σαρωτή ακτίνων λέιζερ

κοντινών αποστάσεων. Χρησιμοποιήθηκε, λοιπόν, ένας σαρωτής της εταιρίας Cyberware¹⁴. Τα συμπεράσματα των ερευνητών καταλήγουν στο ότι η μέθοδος τους καταφέρνει και εξάγει μεγαλύτερο όγκο πληροφορίας από την επιφάνεια του αντικειμένου σε σύγκριση με τον σαρωτή λέιζερ (Εικόνα 22ii). Επισημαίνουν επίσης την πιθανότητα πως κάποια από την γεωμετρική πληροφορία που φέρει το φωτομετρικό μοντέλο να οφείλεται στο γεγονός της υψηλότερης ανάλυσης της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής που χρησιμοποίησαν. Άλλη μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι πως το συγκεκριμένο αντικείμενο είναι καλυμμένο με ένα λεπτό στρώμα από βερνίκι. Η μέθοδος τους είναι πολύ πιθανό να αντιλαμβάνεται την επιφάνεια κάτω από το βερνίκι σε αντίθεση με τον σαρωτή που αντιλαμβάνεται την ομαλοποιημένη και βερνικωμένη εξωτερική επιφάνεια [25]. Θα πρέπει ακόμα σημειωθεί ότι για να ψηφιοποιηθεί το αντικείμενο με το σαρωτή λέιζερ χρειάστηκε να καλυφθεί με ένα στρώμα λευκής σκόνης που επιτρέπει την αναγνώριση της δέσμης φωτός. Αυτός είναι άλλος ένας παράγοντας της έντονης διαφοροποίησης ανάμεσα στα δύο τελικά τρισδιάστατα μοντέλα.

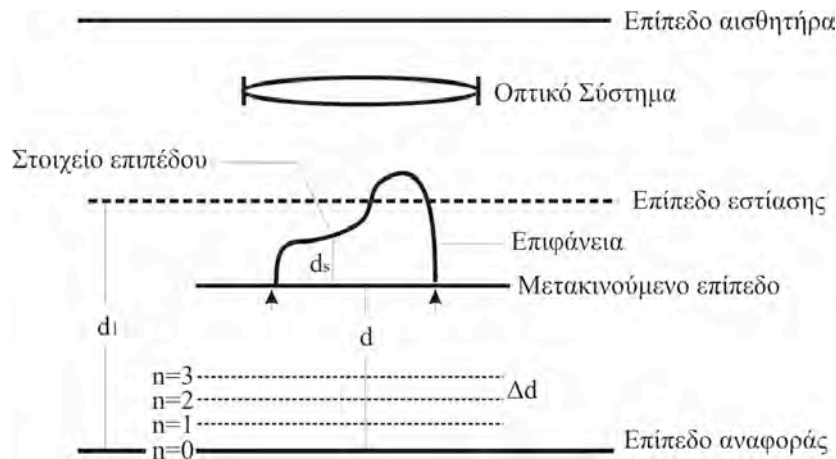


Εικόνα 22. Αποτελέσματα της φωτομετρικής μεθόδου

¹⁴ Το σύστημα τρισδιάστατης σάρωσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το *Model 15* της Cyberware. Για περισσότερες πληροφορίες ανατρέξτε στον αναλυτικό κατάλογο συστημάτων ψηφιοποίησης κινητών αντικειμένων.

Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών έχει επικεντρωθεί σε μια τεχνική που ανακτά την τρίτη διάσταση από μια εικόνα χρησιμοποιώντας το βάθος πεδίου [27]. Ας δούμε την αρχή λειτουργίας της μέσα από την Εικόνα 23.



Εικόνα 23. Σύστημα ψηφιοποίησης με τη μέθοδο Σχήμα-Από-Μεταβαλλόμενη-Εστίαση

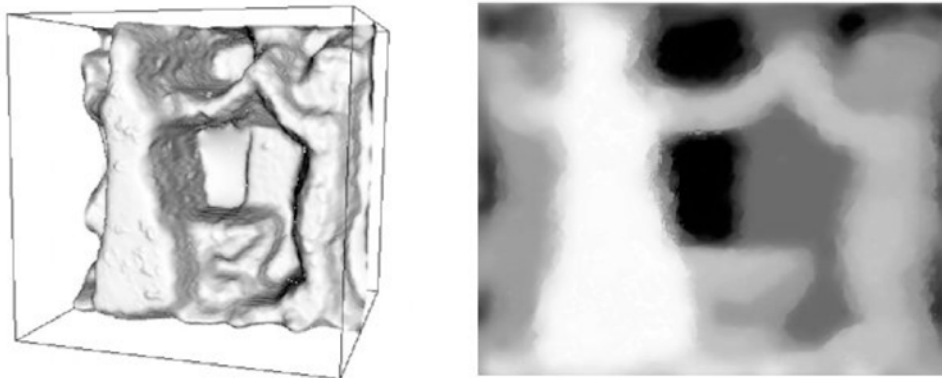
Ένα αντικείμενο με άγνωστα γεωμετρικά χαρακτηριστικά έχει τοποθετηθεί πάνω σε μία επίπεδη βάση που δύναται να μετατοπιστεί σε ύψος. Το χαμηλότερο επίπεδο που μπορεί να μετακινηθεί η βάση παρουσιάζεται ως *επίπεδο αναφοράς*. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αποτελεί και το αρχικό σημείο από όπου ξεκίνησε η κίνηση της βάσης που μεταφέρει το αντικείμενο προς ψηφιοποίηση. Η διαμόρφωση του οπτικού συστήματος και του αισθητήρα (CCD) ορίζουν ένα νοητό επίπεδο που ονομάζεται *επίπεδο εστίασης* και παρουσιάζεται με τη μορφή διακεκομμένης γραμμής. Στο επίπεδο εστίασης βρίσκονται κάποια από τα τμήματα της επιφάνειας του αντικειμένου. Το οπτικό σύστημα επιτρέπει την αποτύπωση των τμημάτων αυτών από τον αισθητήρα με τη μέγιστη δυνατή εστίαση. Η απόσταση d_1 ανάμεσα στο επίπεδο εστίασης και το επίπεδο αναφοράς είναι πάντα γνωστή. Έστω τώρα ότι s ονομάζουμε το στοιχείο επιπέδου που βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου S . Αν το μετακινούμε επίπεδο προχωρήσει και άλλο προς το επίπεδο εστίασης τότε το s θα αυξήσει τον βαθμό εστίασης του και θα εστιαστεί τέλεια όταν βρεθεί στο ίδιο ακριβώς επίπεδο με το επίπεδο εστίασης. Οποιαδήποτε περαιτέρω κίνηση προς το οπτικό σύστημα θα φέρει το σημείο s και πάλι εκτός εστίασης. Παρατηρώντας τις μεταβολές που δέχονται οι εικόνες στο σημείο που βρίσκεται το s και καταγράφοντας το *επίπεδο μετατόπισης* d στο σημείο της μέγιστης εστίασης, τότε το ύψος d_s του σημείου s μπορεί να υπολογισθεί με βάση το επίπεδο αναφοράς. Έτσι ισχύει ότι $d_s = d_1 - \text{επίπεδο μετατόπισης}$. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα σημεία της επιφάνειας του αντικειμένου S . Με τον τρόπο αυτό ανακτάται το βάθος της επιφάνειας του αντικειμένου. Οι ακόλουθες παρατηρήσεις είναι κοινά αποδεκτές από όλους τους ερευνητές που έχουν συμμετάσχει στη μελέτη και ανάπτυξη τέτοιων σαρωτών [27].

- Η ανάλυση και η ακρίβεια των τεχνικών Σχήμα-Από-Μεταβαλλόμενη-Εστίαση είναι περιορισμένες σε σύγκριση με τις τεχνικές τριγωνισμού
- Αντίθετα με τις μεθόδους τριγωνισμού, αποφεύγουν την τεχνική ταιριάσματος και αντιστοίχισης σημείων
- Τα αποτελέσματα της χαρακτηρίζονται, γενικά, αξιόπιστα

Υπάρχουν αρκετές πειραματικές υλικοτεχνικές λύσεις που επιτρέπουν τον υπολογισμό του βάθους σε πραγματικό χρόνο. Η τεχνική έχει αποδειχθεί ότι λειτουργεί αποτελεσματικά μόνο σε μικρές αποστάσεις (πχ. μικροσκοπία) [28]. Παρακάτω μπορείτε να δείτε φωτογραφίες εκτός εστίασης και τις ανακατασκευασμένες τρισδιάστατες επιφάνειες. Στην Εικόνα 24 παρουσιάζονται δύο φωτογραφίες με εστίαση σε διαφορετικό βάθος (ή επίπεδο). Η φωτογραφία στα αριστερά είναι εστιασμένη στο βάθος ενώ η φωτογραφία στα δεξιά είναι εστιασμένη στα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στην κάμερα. Στην Εικόνα 25 παρουσιάζεται ο ανακτώμενος χάρτης βάθους (δεξιά) και η αναγνωρισμένη γεωμετρική δομή (αριστερά).

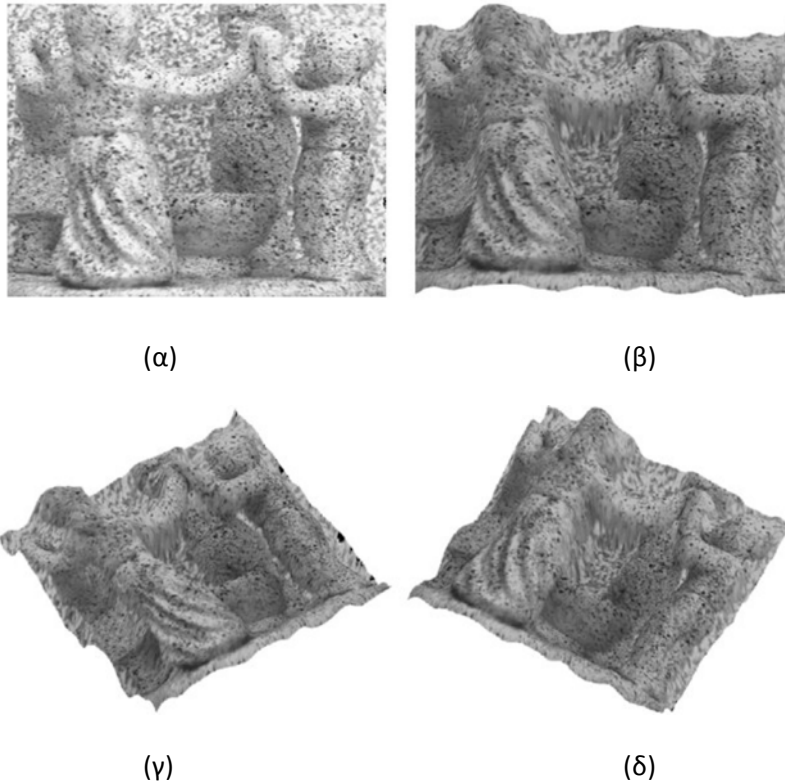


Εικόνα 24. Εστίαση σε διαφορετικά επίπεδα



Εικόνα 25. Η ανακτημένη γεωμετρική δομή και ο χάρτης βάθους του αντικειμένου

Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας όπου στη γεωμετρία έχει προστεθεί και η πληροφορία υψής της επιφάνειας. Στην Εικόνα 26α παρουσιάζεται η ανακατασκευασμένη εικόνα, ενώ στις υπόλοιπες εικόνες παρουσιάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο από διάφορες οπτικές γωνίες [28].



Εικόνα 26. Ανακατασκευασμένο τρισδιάστατο μοντέλο με πληροφορία υψής

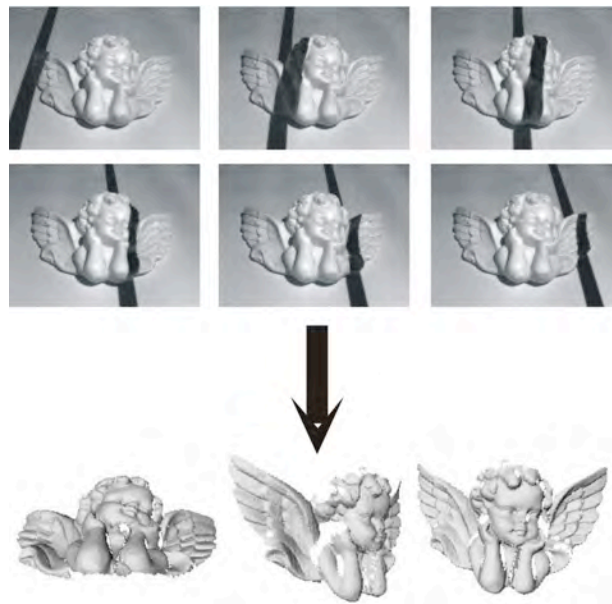
Σχήμα από σκιά

Η μέθοδος *Σχήμα-Από-Σκιά* ανήκει στην κατηγορία των παθητικών μεθοδολογιών ανακατασκευής τρισδιάστατων επιφανειών. Το τρισδιάστατο μοντέλο δημιουργείται από τη μελέτη της πληροφορίας που περιέχει η διάχυση της σκιάς που δημιουργεί το ίδιο το αντικείμενο, καθώς αυτό φωτίζεται από μια κινούμενη πηγή φωτός. Φανταστείτε για παράδειγμα τις μεταβολές στη σκιά ενός στύλου καθώς ο ήλιος κινείται. Με την παρατήρηση των μεταβολών που δέχεται το σχήμα των σκιών μπορούμε να συμπεράνουμε την γεωμετρία της επιφάνειας του αντικειμένου. Μια απλοποιημένη μορφή συστήματος που υλοποιεί τη μέθοδο φαίνεται στην Εικόνα 27. Καθώς η πηγή φωτός μετακινείται, η φωτογραφική μηχανή καταγράφει τις μεταβολές που δέχεται η σκιά, όπως προβάλλεται πάνω στις επιφάνειες του κύβου. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στο χαμηλό κόστος του τεχνολογικού εξοπλισμού: απαιτείται μία ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και μία τυπική πηγή φωτός ικανή να δημιουργήσει έντονες σκιές. Επίσης χαμηλή είναι και η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς. Η μέθοδος λειτουργεί βάση κάποιων απλοϊκών υποθέσεων που αφορούν στην επιφάνεια των αντικειμένων. Επί πλέον, έχει αποδειχθεί πως η μέθοδος μπορεί να ανακατασκευάσει περιοχές της επιφάνειας του αντικειμένου που δεν είναι ορατές στην ψηφιακή φωτογραφική μηχανή. Στην πραγματικότητα, η τεχνική δεν έχει ξεφύγει ποτέ τα σύνορα των ερευνητικών εργαστηρίων. Στο Διαδίκτυο μπορεί να εντοπιστεί λογισμικό ανοικτού κώδικα που υλοποιεί τη μέθοδο. Η δυσκολία που παρουσιάζει η τεχνική εντοπίζεται στο σημείο αυτόματης αναγνώρισης των σκιών μέσα στις φωτογραφίες.



Εικόνα 27. Απλοποιημένη αναπαράσταση συστήματος

Στην Εικόνα 28 παρουσιάζεται σταδιακά η μετακίνηση της σκιάς πάνω στο αντικείμενο κατά τη διαδικασία, καθώς και η τελική ανακατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου [29].



Εικόνα 28. Ανάκτηση γεωμετρίας με την τεχνική Σχήμα-Από-Σκιά

Συστήματα μέτρησης συντεταγμένων

Πολύ συχνά συναντούμε συστήματα ψηφιοποίησης με ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων να συνεργάζονται με κάποιον μηχανικό βραχίονα, ο οποίος έχει έναν υψηλό βαθμό ελευθερίας κινήσεων. Ο βραχίονας τις περισσότερες φορές είναι χειροκίνητος, και μέσω δικού του, υψηλής ακρίβειας, καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων μεταφέρει πληροφορία θέσης προς το λογισμικό που διαχειρίζεται την όλη διαδικασία για να ανακτήσει τη θέση της πηγής του λέιζερ στον πραγματικό χώρο. Η επίσημη ονομασία των βραχιόνων είναι *Συστήματα Μέτρησης Συντεταγμένων* (Coordinate Measuring Machines-CMM). Εκτός από την συνδυαστική τους χρήση με σαρωτές λέιζερ, λειτουργούν και αυτόνομα. Σαν σημείο μέτρησης έχουν την κορυφή μιας ακίδας ή ενός αισθητήρα αφής που τοποθετείται στην άκρη του βραχίονα. Εφαρμογές βρίσκουν κυρίως στην επιθεώρηση βιομηχανοποιημένων μηχανικών εξαρτημάτων. Η επιθεώρηση των διαστάσεων

αποσκοπεί στην μέτρηση της γεωμετρίας του αντικειμένου και των χαρακτηριστικών της επιφάνειάς του. Η εφαρμογή τους περιορίζεται στο χώρο της βιομηχανίας και της αντίστροφης μηχανικής. Για τη λειτουργία των συστημάτων αυτών απαιτείται η επαφή του αισθητήρα ή της ακίδας με την επιφάνεια του αντικειμένου που εξετάζεται [30]. Η ακρίβεια τους αγγίζει την τάξη των 25 μm. Η διαδικασία συλλογής δεδομένων είναι πολύ αργή. Ένας μέσος όρος ρυθμού αποτύπωσης συντεταγμένων αγγίζει μόλις ένα σημείο ανά δευτερόλεπτο. Τα συστήματα αυτά δε χρησιμοποιούνται για τη συλλογή μεγάλου όγκου πληροφορίας κάτι που τα καθιστά, σε γενικές γραμμές, μια όχι και τόσο ελκυστική επιλογή για εργασίες αποτύπωσης αντικειμένων πολιτισμικής κληρονομιάς [30]. Στην Εικόνα 29 δίνεται περιγραφή της αρχής λειτουργίας του αισθητήρα αφής που χρησιμοποιείται για την αποτύπωση τρισδιάστατων συντεταγμένων. Ο αισθητήρας αγγίζει την επιφάνεια του αντικειμένου και μετακινείται προς μια κατεύθυνση. Η μεταβολές της επιφάνειας του αντικειμένου αλλάζουν την θέση του αισθητήρα. Η αλλαγή αυτή καταλήγει σε μια μεταβολή φορτίου που καταγράφεται διαρκώς. Η μεταβολές του φορτίου μεταφράζονται σε τρισδιάστατες γεωμετρικές συντεταγμένες και αφορούν εκείνα τα σημεία, τα οποία άγγιξε προηγουμένως ο αισθητήρας. Η πληροφορία αυτή, σε συνδυασμό με το σύστημα συντεταγμένων του βραχίονα, αποδίδει με μεγάλη ακρίβεια την γεωμετρική θέση του αντικειμένου στον χώρο.



Εικόνα 29. Αποτύπωση τρισδιάστατης γεωμετρίας με χρήση αισθητήρα αφής

Συστήματα που χρησιμοποιούν αισθητήρες αφής ή ακίδες για την συλλογή της τρισδιάστατης γεωμετρίας βασίζονται και σε άλλες μεθόδους ανάκτησης της θέσης. Εκτός από βραχίονες συναντούμε και συστήματα που βασίζονται στην αρχή μετάδοσης του ήχου. Είναι γνωστό πως τα κύματα του ήχου μεταδίδονται ακτινικά στο χώρο με συγκεκριμένη ταχύτητα. Ο χρόνος που κάνει ένα ηχητικό σήμα για να ταξιδέψει, από ένα γνωστό σημείο (πηγή ηχητικού σήματος) σε κάποιο άλλο, μπορεί να υπολογιστεί. Ο χρόνος αυτός αποτελεί και τη βάση για τον υπολογισμό των συντεταγμένων της θέσης του σαρωτή στο χώρο. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται, πολλές φορές, από γραφίστες, σχεδιαστές κινουμένων σχεδίων, προγραμματιστές παιχνιδιών, αλλά και μηχανικούς ως μια πολύ οικονομική λύση ψηφιοποίησης. Κάτι τέτοιο βασίζεται στο γεγονός ύπαρξης εμπορικών συστημάτων των οποίων οι διαστάσεις τα καθιστούν ικανά να λειτουργούν πάνω σε ένα κοινό γραφείο. Η αναφορά τους στη εδώ γίνεται, κυρίως, για λόγους πληρότητας των διαθέσιμων εμπορικών συστημάτων τρισδιάστατης ψηφιοποίησης και όχι λόγω της εφαρμοσιμότητάς τους σε κινητά αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς.

Εμπειρικές μέθοδοι ψηφιοποίησης ακίνητων μνημείων

Η πρώτη κατηγορία αποτύπωσης που βρίσκει εφαρμογή στην ψηφιοποίηση ακίνητων μνημείων 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 τρισδιάστατου (όχι επίπεδου) αντικείμενου 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. 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 30. 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. Συνήθως μια μετροταινία αποτελεί το κύριο εργαλείο για την εφαρμογή της (Εικόνα 30). 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 την μέτρηση της οριζόντιας απόστασης ή γωνίας ανάμεσα σε χαρακτηριστικά σημεία της κάτοψης ενός χώρου. Το ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο (Εικόνα 30) 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 πρόκειται 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 και στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η τεχνική υπερήχων μια ορατή δέσμη λέιζερ (χωρίς τη δυνατότητα μέτρησης) συνοδεύει τη δέσμη υπερήχων ώστε να συμπίπτουν στο σημείο ανάκλασης/μέτρησης τέλους της απόστασης. Το μέγεθος του αποστασιόμετρου είναι μικρό (Εικόνα 30) και η λειτουργία του ιδιαίτερα εύκολη καθώς η χρήση του μπορεί να γίνει από ένα μόνο αποτυπωτή 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. Οι μετρήσεις μπορεί να οδηγήσουν στην πλήρη καταγραφή των αποστάσεων που ορίζουν τις διαστάσεις ενός χώρου και να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο του.

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 [31]-[33]. Η χρήση τοπογραφικών οργάνων και συγκεκριμένα θεοδόλιχων και αποστασιόμετρων για αποτύπωση σημείων του τρισδιάστατου 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:

1. 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.
2. ο προσδιορισμός των τρισδιάστατων συντεταγμένων των σημείων που προσδιορίζονται στο χώρο δεν οδηγούν άμεσα στην κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου του μνημείου-χώρου. Περαιτέρω επεξεργασία σε ένα πακέτο τρισδιάστατης 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 τρισδιάστατο 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 την μετεξέλιξη του θεοδόλιχου που είναι το παραδοσιακό όργανο για τη μέτρηση γωνιών και του ηλεκτρονικού αποστασιόμετρου (που συνδυάζεται με χρήση κατόπτρων, ή άλλης

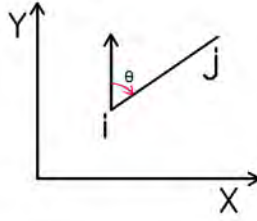
ανακλαστικής επιφάνειας ή υπέρυθρης ακτίνας ή ακτίνας λέιζερ) για τη μέτρηση αποστάσεων. Πολλές φορές η πολυπλοκότητα του αντικειμένου και η μεγάλη λεπτομέρεια που εμφανίζουν τα αρχιτεκτονικά και αρχαιολογικά μνημεία καθιστούν ασύμφορη οικονομικά αλλά και χρονικά την τοπογραφική μέθοδο αποτύπωσης. Για 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 προδιαγράψει και την ακρίβεια του σχεδιαγράμματος αποτύπωσης-ψηφιοποίησης όσο και από το κόστος της εφαρμοσμένης τεχνικής [34]. Κύρια χαρακτηριστικά της τοπογραφικής μεθόδου είναι:

- Η τοπογραφική αποτύπωση είναι αντικειμενική
- Ορίζει ένα σύστημα αναφοράς βάσει του οποίου γίνεται ο προσδιορισμός των μετρήσεων στο χώρο
- 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 (πχ., 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 πχ. μετρήσεις με μετροταινία, ερασιτεχνικές φωτογραφίες κ.α.
- Η στερεομετρία του αντικειμένου ανακατασκευάζεται έμμεσα

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 τρισδιάστατο 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 τρισδιάστατων 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 τις τρισδιάστατες 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:

1. Μηχανική μέθοδος: γίνεται με τη χρήση ειδικών μεταλλικών μετροταινιών και συρμάτων invar
2. Οπτική μέθοδος: γίνεται με την παρατήρηση μέσω του οπτικού συστήματος ενός οργάνου μιας ειδικής μετρητικής διάταξης.
3. Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος: για την 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:
 - a. Παλμού: βασίζεται στο χρόνο που απαιτείται για την 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.
 - b. Σύγκρισης 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.
 - c. Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη και εξέλιξη των αποστασιόμετρων λέιζερ και των οργάνων μέτρησης απόστασης με χρήση της τεχνολογίας των υπέρυθρων ακτίνων έδωσε τη δυνατότητα να γίνονται οι μετρήσεις χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση ανακλαστήρα (πρίσμα ή κάτοπτρο).

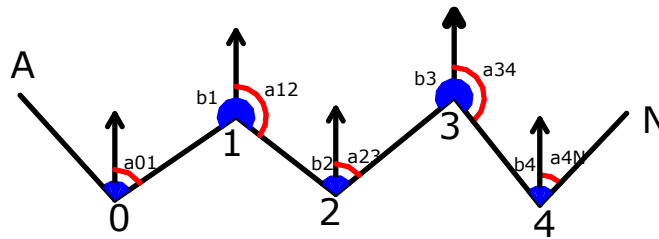
Τα θεμελιώδη προβλήματα της τοπογραφίας μπορούν να οδηγήσουν στον υπολογισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων των σημείων που παρατηρήθηκαν μέσω του οπτικού συστήματος τους και καταγράφηκαν οι γωνίες προσανατολισμού τους σε σχέση με μια γνωστή διεύθυνση που συνήθως είναι ο γεωγραφικός βορράς.



Εικόνα 31. Ορισμός της γωνίας διεύθυνσης

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** ($grad=1^g$) όπου ο πλήρης κύκλος αποτελείται από 400^g και οι υποδιαιρέσεις του είναι το c και το cc . 1^g αποτελείται από 100^c και ένα 1^c από 100^{cc} . 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 .



Εικόνα 32. Πολυγωνική όδευση

Γωνία διεύθυνσης G: Η γωνία που λαμβάνεται με αφετηρία τη διεύθυνση του βορρά (που συμπίπτει συνήθως με τον θετικό ημιάξονα Y του συστήματος αναφοράς καρτεσιανών συντεταγμένων) και καταλήγει μέχρι τη διεύθυνση ($i \rightarrow j$) που συνδέει δύο σημεία στο επίπεδο (Εικόνα 31). Η φορά διαγραφής της γωνίας διεύθυνσης είναι δεξιόστροφη δηλαδή σύμφωνα με την κίνηση των δεικτών του ρολογιού και παίρνει τιμές από 0^g μέχρι 400^g .

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.

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» [35]-[38]. 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. Από τότε η Φωτογραμμετρία έχει εξελιχθεί παράλληλα με την τεχνική της φωτογραφίας και σε συνεργασία με τις επιστήμες των μετρήσεων όπως πχ. 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. 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 (πχ., 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 (πχ., σημεία φυγής, προοπτικής, 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.

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 εξάγουν 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 στροφές των αξόνων ονομάζεται **φωτογραμμετρική οπισθοτομία** και είναι δυνατόν να γίνει και πάλι με επίλυση εξισώσεων 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 $X, Y, Z, \omega, \varphi, \kappa$ 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 τρισδιάστατη όραση και παρατήρηση των λεπτομερειών της επικαλυπτόμενης περιοχής του τρισδιάστατου 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 τρισδιάστατη όραση του συνόλου των λεπτομερειών της επικαλυπτόμενης περιοχής των εικόνων του στερεοζεύγους. Η μέτρηση των σημείων μέσω του τρισδιάστατου 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 δηλαδή η απόσταση οριζόντια και κάθετα επάνω στην όψη του. Μαθηματικά η σχέση που συνδέει το κατακόρυφο επίπεδο της όψης πχ. 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 33. (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 οδηγή 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 δε 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 [39] 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 παραπάνω εξίσωσης 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

1. η χρήση της στερεοσκοπικής επεξεργασίας εικόνων σε ψηφιακούς φωτογραμμετρικούς σταθμούς (ή σε προγράμματα πολυεικονικών συγκλινουσών λήψεων) αλλά και
2. η μέτρηση φωτοσταθερών σημείων και την υλοποίηση ενός τρισδιάστατου 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 τρισδιάστατου χώρου.

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 τρισδιάστατο 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 τρισδιάστατοι ανιχνευτές λέιζερ (3D laser scanner). Εκτός από τους τρισδιάστατους 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 laser profilers και χρησιμοποιούνται με σημαντική επιτυχία για τη δημιουργία σχεδιαγραμμάτων κατόψεων και τομών των εσωτερικών χώρων των μνημείων. Κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου ανίχνευσης λέιζερ είναι:

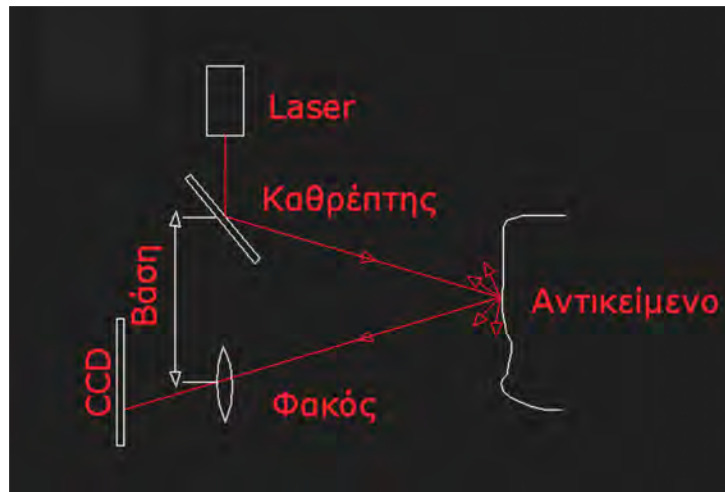
- Είναι ταχύτατη και αξιόπιστη μέθοδος αποτύπωσης
- Παρέχει ακριβέστερα προϊόντα από οποιαδήποτε άλλη μεθοδολογία
- Απαιτεί λιγότερη προεπεξεργασία αλλά και μικρότερο χρόνο εργασίας στο γραφείο
- Συνδυάζει την ακρίβεια της τοπογραφικής αποτύπωσης και την πληρότητα και συνέχεια αποτύπωσης της φωτογραμμετρικής
- 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.

Οι γωνίες διεύθυνσης της ακτίνας λέιζερ μαζί με την 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:

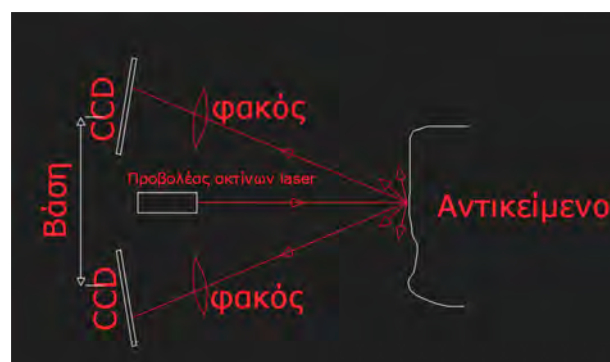
1. **Τριγωνισμού.** Ο ανιχνευτής κάνοντας χρήση της μεγάλης οπτικής ευκρίνειας μιας δέσμης λέιζερ που προβάλλεται επί του αντικειμένου και με χρήση εξισώσεων φωτογραμμετρίας υπολογίζει η θέση του κάθε σημείου που φωτίζεται από την ακτίνα λέιζερ στον

τρισεδιάστατο 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 34. Μέθοδος τριγωνισμού για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων στο 3D χώρο

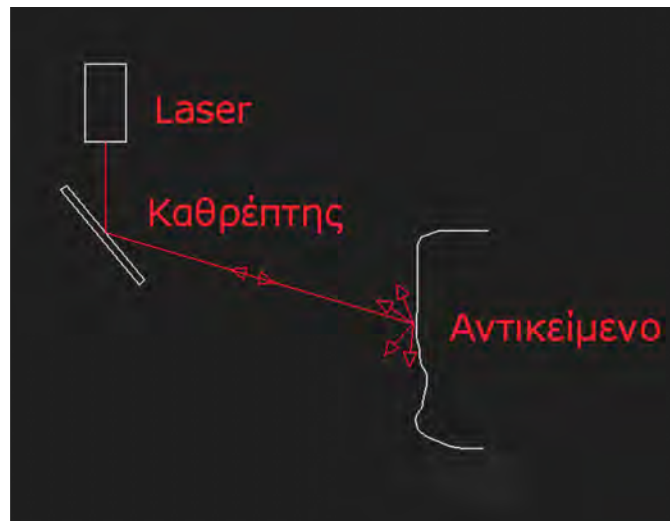
Σε μερικές μάλιστα περιπτώσεις υπάρχουν δύο οπτικοί αισθητήρες CCD που με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας μπορεί να εντοπίσει στο χώρο ένα σημείο εφόσον ανιχνευτούν οι εικονοσυντεταγμένες του σε δύο εικόνες των οποίων η σχετική θέση είναι γνωστή (απέχουν κατά μία γνωστή απόσταση που ονομάζεται και βάση) [40].



Εικόνα 35. Μέθοδος τριγωνισμού για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων στο 3D 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 μεγάλου όγκου του οργάνου και της χαμηλής απόκρισης του οργάνου. Οι σαρωτές χρησιμοποιούν μικρές περιστρεφόμενες συσκευές (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 τρισδιάστατο χώρο. Η τρισδιάστατη ακρίβεια επηρεάζεται επίσης από την ακρίβεια της γωνιακής μέτρησης της ακτίνας που είναι της τάξης των εκατοστών του βαθμού (⁸) [40].



Εικόνα 36. Αρχή λειτουργίας της Time of flight τεχνικής τρισδιάστατης ανίχνευσης

- 3. 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). Δεδομένου ότι απαιτείται ένα καλά καθορισμένο σήμα επιστροφής για την 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 [40].

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 τρισδιάστατου χώρου στα οποία προσπίπτει η ακτίνα λέιζερ επιτυγχάνεται μια μέτρηση

της απόσταση 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.

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 σαν σκοπό την αυτοματοποίηση των μετρήσεων για την καταγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους. Συνήθως οι προσπάθειες αυτές είχαν σαν 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 [41]. 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 κατόπτρου 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 πρόκειται να μετρηθεί. Στο ίδιο ερευνητικό πεδίο κινείται και το Archimedes 3D [42]. Πρόκειται για ένα λογισμικό που εκτελείται σε φορητό Η/Υ που κατευθύνει το σύστημα μέτρησης ενός γεωδαιτικού σταθμού με δυνατότητα μετρήσεων χωρίς τη βοήθεια κατόπτρου (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 την 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. Van Gool, 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 βιντεογραμμετρίας (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. Η τεχνική χαρακτηρίστηκε από τους ερευνητές «ενεργητική»

καθώς προβάλλει από γνωστή και σταθερή θέση έναν 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 τρισδιάστατων αντικειμένων να εξαχθεί η υφή από τις εικόνες και να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο σε μορφή αρχείου εικονικής πραγματικότητας (VRML).

Γενικά χαρακτηριστικά συστημάτων και η συμβολή τους στη διαδικασία ψηφιοποίησης

Εισαγωγή

Η ακρίβεια ψηφιοποίησης μπορεί να θεωρηθεί ως το επικρατέστερο κριτήριο για την επιλογή ενός σαρωτή. Υπάρχει, όμως, στην πραγματικότητα, ένα πλήθος άλλων χαρακτηριστικών, τα όποια πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά την πρακτική εφαρμογή συστημάτων ψηφιοποίησης και μπορεί να παίζουν καθοριστικό ρόλο σε μια εργασία ψηφιοποίησης. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα γενικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν μια διαδικασία ψηφιοποίησης.

Η ταχύτητα ψηφιοποίησης

Η διαδικασία σάρωσης μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρα, ιδιαίτερα όταν απαιτούνται υψηλής πυκνότητας νέφη σημείων. Ένας ρυθμός κοντά στα 10.000-30.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο θεωρείται, γενικά, επαρκής για πολλές εφαρμογές. Ο ρυθμός απόκτησης δεδομένων δε συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του συνολικού χρόνου που απαιτεί μια εργασία. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα εμφανές αφού στο συνολικό χρόνο αποπεράτωσης συνυπολογίζονται και οι χρόνοι άλλων εργασιών, όπως η μετεγκατάσταση του σαρωτή σε διαφορετικά σημεία, η βαθμονόμηση του και πιθανοί έλεγχοι. Έτσι, μια δραματική αύξηση στο ρυθμό απόκτησης δεδομένων δεν αναμένεται να προσφέρει σημαντική μείωση στο συνολικό χρόνο της διαδικασίας συλλογής των δεδομένων.

Οι τεχνικές βαθμονόμησης

Για τον προσδιορισμό των επιδόσεων ενός τρισδιάστατου σαρωτή είναι απαραίτητη η βαθμονόμησή του. Θεωρητικά η βαθμονόμηση πρέπει να βασίζεται σε τυποποιημένες διαδικασίες, οι οποίες, δυστυχώς, δεν υπάρχουν ακόμη για συστήματα τρισδιάστατης σάρωσης [43]. Το ISO 10360-2:1994 περιγράφει τις μεθόδους για την εκτίμηση των επιδόσεων ενός *Συστήματος Μέτρησης Συντεταγμένων*. Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν αισθητήρα

αφής σε συνδυασμό με γνώση ενός καρτεσιανού συστήματος αξόνων. Η βαθμονόμηση τους πραγματοποιείται με την απομόνωση και αποτύπωση σημείων σε γνωστές θέσεις. Στα *συστήματα τρισδιάστατης σάρωσης από απόσταση* δεν υπάρχει κάποια μέθοδος απομόνωσης σημείων και συνεπώς, η ανεξάρτητη βαθμονόμηση είναι αδύνατη. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος μη εφαρμογής του συγκεκριμένου προτύπου ISO. Η γεωμετρική πολυπλοκότητα και η μη-γραμμική φύση των οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στους τρισδιάστατους σαρωτές επιβάλλει κάποιες μορφής βαθμονόμηση πριν από οποιαδήποτε μέτρηση. Κάποιες από τις κλασικές μεθόδους βαθμονόμησης περιλαμβάνουν χαρτογραφήσεις ή μετασχηματισμούς προοπτικής πάνω σε δεδομένα που έχουν αποτυπώσει οι οπτικοί αισθητήρες. Τα δεδομένα έχουν την μορφή δισδιάστατων εικόνων. Η πολυπλοκότητα και η ποικιλία των αλγορίθμων βαθμονόμησης εξαρτάται σε μέγιστο βαθμό από τους διαφορετικούς αισθητήρες που χρησιμοποιούνται. Δύο βασικοί τύποι μεθόδων βαθμονόμησης είναι:

- μέθοδος σημείων αναφοράς (*reference artifact*)
- μέθοδος γεωμετρίας συστήματος (*system geometry*)

Η βαθμονόμηση του συστήματος αποτελεί τη βάση μιας θεωρητικής προσέγγισης των επιδόσεων ενός συστήματος. Οι πραγματικές επιδόσεις επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων που ψηφιοποιούνται αλλά και από τους ίδιους τους οπτικούς αισθητήρες. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να προσδιορίζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις (ανακλάσεις, απορρόφηση και διάθλαση δέσμης φωτός, κοκ). Από την άλλη, το λογισμικό που συνοδεύει το σαρωτή παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ο υπολογισμός της πραγματικής επίδοσης ακρίβειας μέτρησης ενός σαρωτή πρέπει να υποστηρίζεται από τα χαρακτηριστικά του λογισμικού που αναλαμβάνει να ανακτήσει την πληροφορία βάρους.

Η επαλήθευση της ακρίβειας

Είναι γεγονός ότι δεν υπάρχει κάποιο πρότυπο ή διεθνώς αναγνωρισμένη μέθοδος για την εκτίμηση της ακρίβειας των συστημάτων σάρωσης [44]. Πολλές φορές ο χρήστης αναγκάζεται να αναπτύξει τις δικές τους μεθόδους επαλήθευσης. Ο Beraldin το 1997 [44] παρουσίασε μια μέθοδο μέτρησης της ακρίβειας του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου που βασίζεται σε *ψηφιακούς θεοδόλιχους και φωτογραμμετρία*. Το αντικείμενο που ψηφιοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της μελέτης του Beraldin ήταν το άγαλμα της Μαγδαληνής¹⁵ ενώ το σύστημα ψηφιοποίησης ήταν της Orptonet Srl¹⁶. Ο Πίνακας II περιγράφει το βαθμό αβεβαιότητας σ που φέρει το τρισδιάστατο μοντέλο. Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης ήταν παρόμοια με αυτά που υπολογίσθηκαν κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης [44].

¹⁵ Μαγδαληνή του Donatello (1446 – 1450). Το ύψος του αγάλματος είναι γύρω στα 180 cm.

¹⁶ OPTO 3D-RANGER. Το σύστημα εφαρμόζει την τεχνική Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως. Για περισσότερες πληροφορίες δείτε στον αναλυτικό κατάλογο συστημάτων ψηφιοποίησης κοντινών αποστάσεων.

Πίνακας II. Παράδειγμα ασάφειας μετρήσεων

	Άξονας X σχ(μm)	Άξονας Y σγ(μm)	Άξονας Z σζ(μm)	Περιοχή σάρωσης (mm ²)	Βάθος (mm)
Αρχική Πρόχειρη Σάρωση	35	20	125	310x230	140
Στάδιο Γεμίματος Κενών	18	11	75	225x165	100
Υψηλής Ανάλυσης Σάρωση	10	6	21	80x58	50

Όρια απόστασης για ορθή λειτουργία

Οι προδιαγραφές για το βεληνεκές των σαρωτών κοντινής απόστασης πρέπει πάντα να τίθενται υπό αμφισβήτηση [45]. Οι πιθανές αποστάσεις κάλυψης σχετίζονται πάντα από την ανακλαστικότητα του ίδιου του αντικειμένου και από άλλους παράγοντες όπως η διαύγεια της ατμόσφαιρας, ο περιβάλλον φωτισμός και οποιαδήποτε άλλη επιπρόσθετη ακτινοβολία φυσική (πχ. ήλιος) ή τεχνηκή (ακτινοβολία από παρεμβαλλόμενες πηγές).

Το οπτικό πεδίο

Οι σταθεροί σαρωτές χωρίς μηχανοκίνητους άξονες περιστροφής έχουν ένα περιορισμένο οπτικό πεδίο. Τυπικά, μπορούν να σαρώσουν μια περιοχή 40⁰ επί 40⁰ που αντιστοιχεί σχεδόν σε 0,5 ακτίνια στερεάς γωνίας (μια πλήρης σφαίρα έχει περίπου 12,6 ακτίνια στερεάς γωνίας). Από την άλλη, σαρωτές με έναν άξονα κίνησης μπορούν να σαρώσουν περίπου 450⁰ επί 320⁰ ή 4,5 ακτίνια στερεάς γωνίας, ενώ συστήματα με δύο άξονες (πανοραμικής άποψης) μπορούν να σαρώσουν τα πάντα εκτός από μια κωνική περιοχή κοντά στις 300⁰ γύρω από το ναδίρ. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπουν τη σάρωση σε ένα οπτικό πεδίο που πλησιάζει τα 11,7 ακτίνια στερεάς γωνίας. Τα μεγάλα οπτικά πεδία παίζουν σημαντικό ρόλο σε περιπτώσεις κλειστών χώρων όπως σε ένα δωμάτιο. Γενικότερα, οι σαρωτές τριγωνισμού εισάγουν ένα μεγαλύτερο πλήθος προβλημάτων, που οφείλεται κυρίως στο γεγονός της αδυναμίας πλήρους οπτικής επαφής με το σύνολο της απαιτούμενης πληροφορία. Σε ορισμένες περιπτώσεις τίθεται, συνεπώς, το ερώτημα του κατά πόσο είναι εύκολη ή εφικτή η απόκτηση πληροφορίας όταν αυτή είναι διαθέσιμη από μία και μόνο οπτική γωνία. Πρόσφατα, ερευνητές από το πανεπιστήμιο του Οχάιο σε συνεργασία με την Cyberware¹⁷ ανέπτυξαν λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του οπτικού μονοπατιού που πρέπει να ακολουθήσει ο σαρωτής τους για να καλύψει πλήρως το αντικείμενο [46].

Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές

Κάποιοι χρήστες καθώς και συγκεκριμένες εφαρμογές απαιτούν την ύπαρξη υψηλής ποιότητας φωτογραφικών ψηφιακών συστημάτων μέσα στον ίδιο το σαρωτή, αυξάνοντας πολύ σημαντικά το συνολικό κόστος της απαιτούμενης υλικοτεχνικής υποδομής. Καθώς το αγοραστικό κοινό των τρισδιάστατων σαρωτών είναι ακόμη περιορισμένο, η μέση οδός που προτείνουν οι εταιρείες ανάπτυξης είναι η τοποθέτηση εξωτερικής φωτογραφικής μηχανής πάνω στο σαρωτή μόνο όταν

¹⁷ Cyberware – Εταιρία ανάπτυξης συστημάτων τρισδιάστατης σάρωσης – <http://www.cyberware.com/>.

αυτό ζητείται από τον αγοραστή. Η τοποθέτηση γίνεται με τη χρήση κάποιου βαθμονομημένου μετατροπέα.

Η μεταφορά του συστήματος ψηφιοποίησης

Ένας εύκολος στη μεταφορά σαρωτής θα πρέπει να είναι μικρός σε διαστάσεις και ελαφρύς. Πολλές από τις εμπορικές προτάσεις που ενδείκνυνται για αποτύπωση πολιτιστικών αντικείμενων είναι σχετικά ογκώδεις και δεν μπορούν να μεταφερθούν (πχ. ως αποσκευές σε χώρο επιβατών ενός αεροπλάνου). Σε αρκετές εργασίες τεκμηρίωσης πολιτισμικής κληρονομιάς όπου οι μακρινές αποστάσεις είναι κάτι συνηθισμένο, θα πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στην κατασκευή του εξοπλισμού αλλά και στους ειδικούς τρόπους μεταφοράς του συστήματος που προτείνει η εκάστοτε εταιρεία κατασκευής. Ο χρόνος μεταφοράς των συστημάτων περιλαμβάνεται στον χρονοδιάγραμμα εργασιών ψηφιοποίησης ως χρόνος που ο σαρωτής δεν είναι διαθέσιμος [47].

Η τροφοδοσία ισχύος του συστήματος

Οι σαρωτές που λειτουργούν με μπαταρίες είναι σαφώς πιο ευπροσάρμοστοι σε σύγκριση με αυτούς που χρειάζονται μια μόνιμη γραμμή παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Οι φορητές γεννήτριες μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο σε τέτοιες περιπτώσεις. Ένα βασικό θέμα που προκύπτει είναι οι πιθανές απαιτούμενες καλωδιώσεις και η εγκατάσταση τους σε χώρους όπως είναι ένα μουσείο. Οι φορητές γεννήτριες ανήκουν στην κατηγορία του επιπρόσθετου εξοπλισμού που αποφέρει αύξηση στο συνολικό όγκο του συστήματος ψηφιοποίησης.

Βέλτιστη μεθοδολογία αποτύπωσης κινητών αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

Η σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και από την υποκειμενική κατηγοριοποίηση της ποιότητας των τρισδιάστατων μοντέλων. *Η μέθοδος ψηφιοποίησης με ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων αποφέρει τα ακριβέστερα γεωμετρικά αποτελέσματα.* Από την άλλη, *η μέθοδος προβολής δομημένου φωτισμού αποδίδει καλύτερη γεωμετρία από τη μέθοδο Σχήμα-Από-Σιλουέτες αλλά όχι καλύτερη από τα συστήματα λέιζερ.* Τα αποτελέσματα της *Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως* είναι ανώτερα από αυτά της μεθόδου *Σχήμα-Από-Σιλουέτες* αφού καταφέρνει να ανακτήσει γεωμετρία από κοίλες επιφάνειες. Θα μπορούσαμε να πούμε πως η μέθοδος *Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως* είναι η τεχνική που συνδυάζει κάποια από τα στοιχεία αυτοματισμού της *Σχήμα-Από-Σιλουέτες* με τη δυνατότητα αποδεκτής ακρίβειας γεωμετρικών αποτελεσμάτων. Επίσης, «συμπεριφέρεται» καλύτερα από τους σαρωτές λέιζερ σε ημιδιαφανή και χρωματιστά αντικείμενα αλλά όχι καλύτερα από ότι η *Σχήμα-Από-Σιλουέτες*.

Η μέθοδος της *Στερεοφωτογράφισης* (Stereo-Close Range Photogrammetry) αποτελεί το κύριο εργαλείο, εδώ και αρκετές δεκαετίες, στο χώρο της αρχαιολογικής τεκμηρίωσης. Έχει αποδεχτεί αποτελεσματική όταν υπάρχει περιορισμένος χρόνος πρόσβασης στο αντικείμενο [48]. Είναι μια *παθητική μέθοδος*, η οποία βασίζεται περισσότερο σε λογισμικό παρά σε υλικοτεχνικό εξοπλισμό. Ο όγκος της γεωμετρικής πληροφορίας που θα εξαχθεί από τις φωτογραφίες σχετίζεται με τις σωστές οπτικές γωνίες που έχουν επιλεγεί. Η *στερεοφωτογράφιση* προσφέρει ένα γρήγορο τρόπο

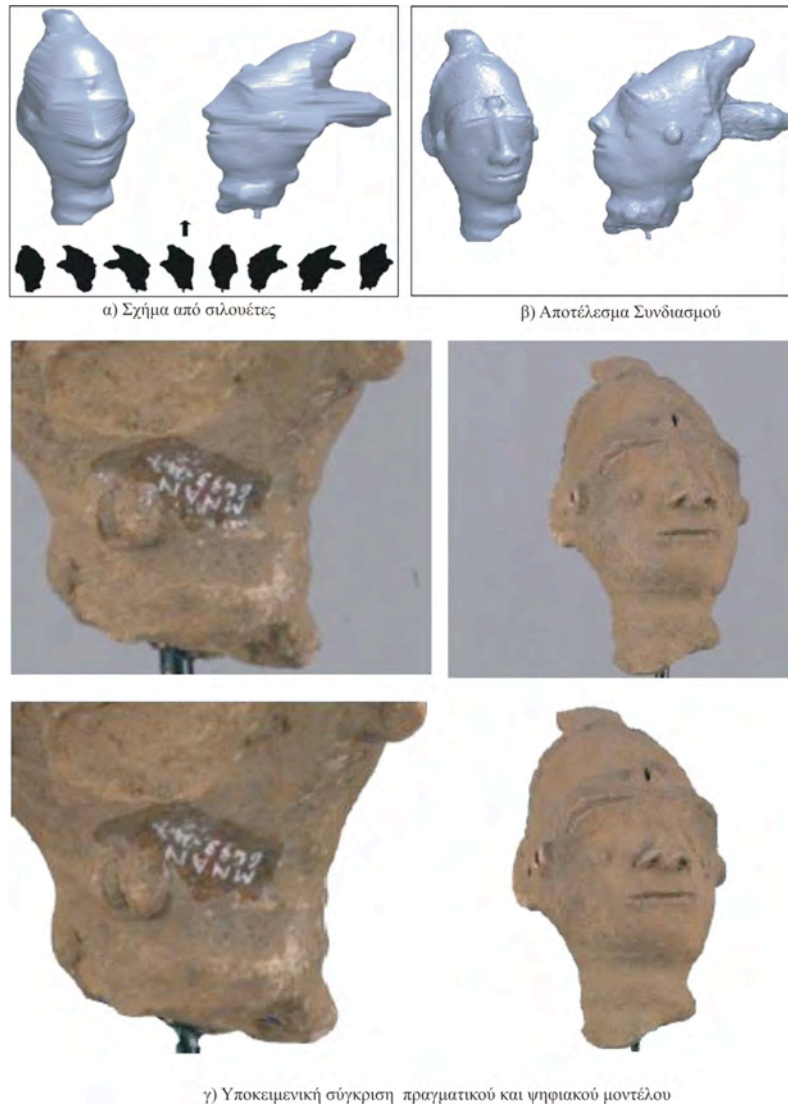
«αντίστροφης μοντελοποίησης» αντικειμένων από φωτογραφίες, όπου, όμως, η πυκνότητα των σημείων του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου δεν είναι συνήθως μεγάλη, με αποτέλεσμα να μην αποφέρει τα αποτελέσματα που φέρει η σάρωση με δομημένο φως. Βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής είναι η απόκρυψη της χαμηλής ποιότητας γεωμετρικής πληροφορίας μετά τη χρήση πληροφορίας υψής. Αυτό το συναντούμε και στη *Σχήμα-Από-Σιλουέτες*.

Οι Park, Shin και Chang [49] σε μια μελέτη προσδιορισμού της φθοράς λίθινων αρχαίων μνημείων συγκρίνουν τη δυνατότητα εφαρμογής της αποτύπωσης με λέιζερ και της ψηφιακής *Στερεοφωτογράφισης*. Ο βασικός τους προβληματισμός είναι ότι, ενώ η *Στερεοφωτογράφιση* είναι γρήγορη και εύκολη κατά την διαδικασία συγκέντρωσης δεδομένων, η επεξεργασία για την απόκτηση της τρίτης διάστασης είναι αρκετά δύσκολη. Πόσο μάλλον, στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου η επιφάνεια των λίθων είναι τρομερά πολύπλοκη. Στην πραγματικότητα τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των λίθων δεν αφήνουν και πολλά περιθώρια επιλογής. Η ψηφιοποίηση με ακτίνες λέιζερ απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο για τη συλλογή των δεδομένων αλλά σε αντίθεση με τη *Στερεοφωτογράφιση* δεν χρειάζεται τόσο μεγάλο χρόνο μετά-επεξεργασίας. Αυτό την κάνει πιο «συμβατή» με την ακανόνιστη και τραχιά επιφάνεια των λίθων [49].

Οι Bohler et al [50] αναφέρουν σε μια δημοσίευση τους πως η *Στερεοφωτογράφιση* δε λειτουργεί με αποδεκτά αποτελέσματα σε περιπτώσεις ανάγλυφων σε λευκό μάρμαρο, καθώς δεν ανακτούν μεγάλη ποσότητα πληροφορίας υψής. Οι ορθογραφικές φωτογραφίες από *Στερεοφωτογράφιση* μπορούν να φανούν χρήσιμες για κάποιους σκοπούς αλλά όχι για την τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση του μοντέλου. Οι Bohler et al [50] επισημαίνουν επίσης το γεγονός ότι η ψηφιοποίηση με ακτίνες λέιζερ είναι χρονοβόρα αλλά είναι και η μοναδική με τόσο καλά αποτελέσματα.

Πολλές φορές συναντούμε και συνδυασμούς δύο μεθόδων για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων. Ένας συνδυασμός, ο οποίος αποφέρει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα καλύπτοντας υψηλής ανάλυσης γεωμετρία και πληροφορία υψής είναι η μέθοδος που προτείνουν οι Hernandez και Schmitt [51]. Η μέθοδος συνδυάζει τον αυτοματισμό της *Σχήμα-Από-Σιλουέτες* και την ποιότητα τρισδιάστατης γεωμετρίας που προσφέρει η *Στερεοφωτογράφιση*. Η μέθοδος ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες, καθώς προσφέρει σχεδόν αυτοματοποιημένα αποτελέσματα χωρίς την ανάγκη μετά-επεξεργασίας του τρισδιάστατου μοντέλου. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων έρχεται να δώσει απάντηση στο πρόβλημα της *Σχήμα-Από-Σιλουέτες* στη μοντελοποίηση κοίλων επιφανειών. Ίσως είναι η μοναδική μέθοδος που ξεχωρίζει για την ποιότητα των αποτελεσμάτων της και της αυτοματοποιημένης διαδικασίας αποτύπωσης. Δυστυχώς δεν υπάρχει ακόμα κάποιο εμπορικό σύστημα που να βασίζεται στην συγκεκριμένη τεχνική. Στην Εικόνα 37 μπορείτε να διακρίνετε τη βελτίωση των αποτελεσμάτων με το συνδυασμό των δύο τεχνικών.

Γενικότερα, οι υπάρχουσες μέθοδοι τρισδιάστατης αποτύπωσης υποφέρουν από πολλούς περιορισμούς. Ακόμα και με τη χρήση των πιο σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων και λογισμικού, συγκεκριμένα βήματα επεξεργασίας γίνονται μόνο όταν ο όγκος πληροφορίας δεν ξεπερνά κάποια συγκεκριμένα όρια. Αν η ανάπτυξη του εξοπλισμού και του λογισμικού συνεχίσουν στους ρυθμούς των προηγούμενων χρόνων τότε αρκετά προβλήματα θα έχουν ξεπεραστεί μέσα στα επόμενα χρόνια. Ίσως ακόμα επιτευχθεί και ο συνδυασμός της ψηφιοποίησης ακτίνων λέιζερ με φωτογραμμετρικά δεδομένα υψής για αποτύπωση μεγάλων και πολύπλοκων πολιτιστικών αντικειμένων που οι διαστάσεις τους ξεπερνάνε τα 5 m [52]. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων μπορεί να αποφέρει πολλά πλεονεκτήματα [53][54].



Εικόνα 37. Συνδυασμός των μεθόδων Σχήμα-Από-Σιλουέτες και Στερεοφωτογράφιση

Βέλτιστη μεθοδολογία αποτύπωσης ακίνητων μνημείων

Εμπειρική μέθοδος 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.

Τοπογραφική μέθοδος αποτύπωσης

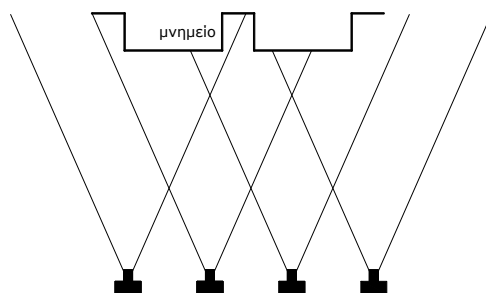
Η εφαρμογή της τοπογραφικής μεθοδολογίας για την αποτύπωση ενδείκνυται όταν το μνημείο – χώρος δεν έχει πολύπλοκο σχήμα οπότε ο αριθμός των μετρημένων σημείων για τον προσδιορισμό της θέσης, της μορφής και του σχήματος είναι μικρός αλλά και η προσπελασιμότητα των σημείων που χρειάζεται να μετρηθούν είναι 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 υφής της εξωτερικής επιφάνειας του μνημείου είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τη φωτογραμμετρική μεθοδολογία για τη δημιουργία ενός εικονικού προϊόντος (πχ. ανηγμένη εικόνα ή ορθοεικόνα) ή τεχνική ανίχνευσης ακτίνας λέιζερ.

Φωτογραμμετρία

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 την 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 τρισδιάστατα. 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 ημιμετρική 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). Ακολουθούν οι ενδείξεις και προϋποθέσεις για τη χρήση κάθε μιας από τις προαναφερόμενες φωτογραμμετρικές τεχνικές ψηφιοποίησης μνημείων.

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 38. Γεωμετρία στερεοσκοπικών λήψεων

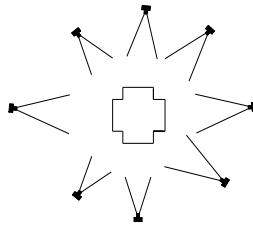
Βασική προϋπόθεση για την στερεοσκοπική επεξεργασία των εικόνων είναι η λήψη των φωτογραφιών με τρόπο ώστε οι άξονες της φωτογραφικής μηχανής στις δύο στάσεις να είναι παράλληλοι μεταξύ τους και κάθετοι στην επιφάνεια του προς μελέτη αντικειμένου. Επίσης, θα πρέπει κάθε λεπτομέρεια που χρήζει μέτρησης 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 δημιουργηθούν περισσότερα συνεχιζόμενα στερεομοντέλα (Εικόνα 38, Εικόνα 39). 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 39. 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 (Εικόνα 40, Εικόνα 41) και η επεξεργασία των εικόνων γίνεται σε ειδικά φωτογραμμετρικά πακέτα (Photomodeler, ImageModeler, 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.

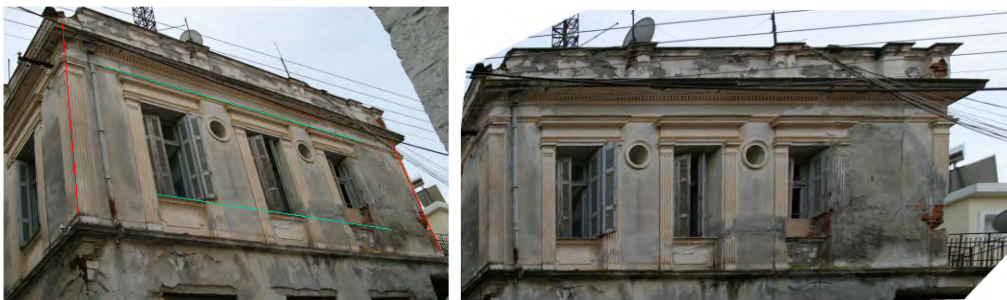


Εικόνα 40. Συγκλίνουσα φωτογραμμετρική λήψη εικόνων



Εικόνα 41. 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 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 42. 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 42) [55].

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 παρουσίασης των ανηγμένων εικόνων και ορθοεικόνων) απεικόνιση των μνημείων – χώρων και παρέχει μια σειρά από νέα προϊόντα τρισδιάστατης 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.

Μέθοδοι ανίχνευσης λείζερ

Η τεχνική ενδείκνυται σε όλες τις περιπτώσεις τρισδιάστατης 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 [56]. 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 διαδικασία των μετρήσεων. Η χρήση του laser 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 H/Y 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 CADD. Η χρήση των laser profilers μπορεί να εφαρμοστεί για την αποτύπωση όχι τόσο του πλήρους τρισδιάστατου μοντέλου του μνημείου – χώρου αλλά για την δημιουργία διαγραμμάτων τομών και κατόψεων υπό κλίμακα.

Κανόνες επιλογής της βέλτιστης μεθόδου

Για λόγους ακρίβειας πρέπει να επαναλάβουμε πως ως *κινητά πολιτιστικά αντικείμενα* ορίζονται όλα τα πολιτιστικής ή ιστορικής αξίας αντικείμενα που οι διαστάσεις τους ποικίλουν μεταξύ μερικών εκατοστών έως και μερικών μέτρων. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα αντικειμένων που εντάσσονται σε αυτήν την κατηγορία είναι τα ακόλουθα:

- Νομίσματα
- Εργαλεία και αντικείμενα από ξύλο
- Σκεύη καθημερινής χρήσης και άλλα κεραμικά
- Κοσμήματα

-
- Αγγεία
 - Γλυπτά
 - Ειδώλια
 - Ενδυμασίες
 - Έπιπλα
 - Διακοσμήσεις σε τοιχία
 - Επιγραφές
 - Επιτύμβιες στήλες
 - Προτομές
 - Όπλα
 - Μουσικά όργανα
 - Αντικείμενα εκκλησιαστικής τέχνης
 - Πίνακες ζωγραφικής

Είναι κοινώς αποδεκτό πως καμία από τις υπάρχουσες μεθόδους τρισδιάστατης ψηφιοποίησης δεν μπορεί να καλύψει όλες τις περιπτώσεις. Κάτι τέτοιο οφείλεται κυρίως στην ποικιλομορφία που παρουσιάζει ο πολιτιστικός μας θησαυρός. Το πλήθος των διαφορετικών μεθόδων αποτύπωσης που συναντούμε σε εμπορικά και ερευνητικά συστήματα είναι αποτέλεσμα συνεχούς έρευνας για την ανακάλυψη εκείνης της γενικευμένης υλικοτεχνικής μεθόδου που θα επιτρέπει, με ελάχιστες τροποποιήσεις, την αντιμετώπιση όλων των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν τα πολιτιστικά αντικείμενα. Με τα σημερινά δεδομένα είναι αδύνατη η ανάδειξη μιας μεθοδολογίας ως βέλτιστη. Κύριο αντικείμενο σύγκρισης αποτελούν οι μέθοδοι που επικράτησαν ως εμπορικές λύσεις. Αυτές είναι οι εξής:

- Σαρωτές ακτίνων λέιζερ μικρών αποστάσεων
- Σαρωτές προβολής μοτίβου (Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως)
- Σαρωτές φωτογραφικών μεθόδων (Σχήμα-Από-Σιλουέτες)
- Συστήματα Μέτρησης Συντεταγμένων με αισθητήρες αφής

Πολλές φορές συναντούμε αυτές τις μεθόδους να εφαρμόζονται και σε αντικείμενα (πχ. αγάλματα, επιγραφές. κ.α.) που το μέγεθος τους ξεπερνά ακόμα και τα πέντε μέτρα. Αυτό οφείλεται στην ανάγκη ψηφιοποίησης τους με υψηλή ακρίβεια, την οποία μπορούν να αποδώσουν μόνο οι συγκεκριμένες μέθοδοι. Έχουν εμφανιστεί πολύπλοκες μελέτες ψηφιοποίησης όπου ο συνδυασμός μεθόδων και από τις δύο κατηγορίες απόφερε καλύτερα αποτελέσματα. Οι επιστημονικές δημοσιεύσεις που προκύπτουν από τέτοιες μελέτες προβάλλουν εντυπωσιακά αποτελέσματα. Οι συνδυαστικές κινήσεις για την αποπεράτωση έργων ψηφιοποίησης σχετίζονται απόλυτα με το περιεχόμενο και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φυσικού αντικείμενου. Η ανάγκη αποτύπωσης κάποιων τμημάτων με υψηλή ακρίβεια αλλά και το αντίστροφο είναι μια απόφαση που θα πρέπει να λαμβάνεται από τους επιστημονικούς υπεύθυνους των αντίστοιχων έργων, αφού ληφθούν υπόψη και όλοι οι αλληλένδετοι παράγοντες¹⁸. Πρακτικά είναι αδύνατο να προταθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί. Τα έργα ψηφιοποίησης με επίκεντρο τη γεωμετρική ακρίβεια είναι γνωστά και ως «Έργα Αρχαιοθέτησης», αφού απώτερο σκοπό έχουν την ψηφιακή αρχειοθέτηση και διαφύλαξη. Με αυτό τον τρόπο ακόμα και αν καταστραφεί το πραγματικό αντικείμενο θα υπάρξει

¹⁸ Αρχικός σκοπός έργου, χρονικά πλαίσια αποπεράτωσης, επιπρόσθετος χρόνος επεξεργασίας δεδομένων.

αποθηκευμένη η τρισδιάστατη ψηφιακή μορφή του. Η υψηλή ακρίβεια που θα διέπει το τρισδιάστατο μοντέλο θα επιτρέπει στις επόμενες γενιές να αντλήσουν πληροφορίες παρόμοιας ποιότητας με αυτή που θα αντλούσαν από το αυθεντικό αντικείμενο. Αν πραγματικά χρειάζεται να επιβάλουμε μια και μόνο μέθοδο ψηφιοποίησης τότε αυτή είναι η τεχνική τριγωνισμού με ακτίνες λέιζερ μικρών αποστάσεων. Παρέχει πολύ μεγάλο όγκο πληροφορίας και είναι εφαρμόσιμη σε αρκετές περιπτώσεις. Τα συστήματα αυτά αποδεδειγμένα αποτυπώνουν τα αντικείμενα με την υψηλότερη δυνατή ακρίβεια που μπορεί να περιμένει κανείς σήμερα. Ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δοθεί στο εξής αναπόφευκτο γεγονός: όταν εκτελούμε μια ψηφιοποίηση με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια¹⁹ ενός συστήματος λέιζερ, στην πραγματικότητα κάνουμε δειγματοληψία της πληροφορίας που φέρει η επιφάνεια του αντικειμένου. Ίσως το *θεώρημα του Nyquist* σχετικά με τους ρυθμούς δειγματοληψίας μιας κυματομορφής να έχει εφαρμογή και στην συγκεκριμένη περίπτωση. Αν τα τρισδιάστατα μοντέλα που θα προκύψουν από την ψηφιοποίηση θα χρησιμοποιηθούν για έρευνα και μελέτη από επιστήμονες τότε ίσως η μέθοδος αποτύπωσης με ακτίνες λέιζερ να είναι η καλύτερη λύση. Για παράδειγμα η ψηφιοποίηση του St. Matthew του Michelangelo έγινε με σκοπό την αναγνώριση του ίχνους που άφησε πάνω στο μάρμαρο η σμίλη του γλύπτη. Έχοντας σαν γνώμονα την παράγραφο αυτή καταλήγουμε στον πρώτο κανόνα επιλογής μιας μεθόδου αποτύπωσης.

Το επίπεδο της γεωμετρικής ακρίβειας αποτελεί κριτήριο επιλογής μιας μεθόδου.

Στον αντίποδα της αποτύπωσης με υψηλή ακρίβεια έρχονται οι τρισδιάστατες αναπαραστάσεις που περιέχουν *ελλείψεις*²⁰. Είναι βέβαιο πως ψηφιοποιημένα αντικείμενα που προκύπτουν από μεθόδους όπως η *Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως* και η *Σχήμα-Από-Σιλουέτες* συνεχίζουν να είναι χρήσιμα για μελέτη αφού οι αρχαιολόγοι πολλές φορές μπορούν να αντλήσουν πληροφορίες από κάποια πολύ βασικά χαρακτηριστικά που φέρουν τα αντικείμενα. Σε αυτές τις περιπτώσεις όπου η γεωμετρική λεπτομέρεια δεν είναι το πρωτεύον κριτήριο τότε το βάρος της επιλογής πέφτει σε άλλα κριτήρια.

Παράγοντες όπως ο συνολικός απαιτούμενος χρόνος ψηφιοποίησης και οι απαιτούμενες εργασιές για την περαιτέρω επεξεργασία τους, αποτελούν σημαντικότερα κριτήρια επιλογής μεθόδου ψηφιοποίησης.

Από τον δεύτερο κανόνα προκύπτει το σημαντικό κριτήριο του συνολικού χρόνου που απαιτεί η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων. Όταν εφαρμόζονται τεχνικές ψηφιοποίησης ακτίνων λέιζερ ή δομημένου φωτισμού είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα χρειαστούν πολλαπλές σαρώσεις για την πλήρη κάλυψη του αντικειμένου. Τεχνικές όπως η *Σχήμα-Από-Σιλουέτες* δημιουργεί απευθείας μοντέλα πολυγωνικού πλέγματος χωρίς γεωμετρικές ασυνέχειες. Το παραγόμενο μοντέλο φέρει αυτόματα και την πληροφορία υψής. Ίσως είναι η μοναδική μέθοδος που η απαιτούμενη μετά-επεξεργασία των μοντέλων της περιορίζεται στην απλοποίηση της γεωμετρίας τους. Οι ιδιότητες της μεθόδου αυτής δικαίως την κατατάσσουν στην κατηγορία των πλέον αυτοματοποιημένων. Με αυτό καταλήγουμε και στο τρίτο κριτήριο επιλογής μιας μεθόδου.

¹⁹ Μεγέθη κλάσης που αγγίζουν μερικά μικρόμετρα (μm) βάσει της σημερινής τεχνολογίας.

²⁰ Μέθοδοι που βασίζονται σε ένα σύνολο από δισδιάστατες εικόνες συνήθως παράγουν τρισδιάστατα μοντέλα που περιέχουν ελλείψεις και σφάλματα στη γεωμετρία τους.

Ο βαθμός αυτοματοποίησης μιας μεθόδου αποτελεί σημαντικό κριτήριο για το χρόνο αποπεράτωσης της ψηφιοποίησης και την εξειδίκευση του προσωπικού.

Παρόλο που οι τρεις προηγούμενοι κανόνες επιτρέπουν τη δρομολόγηση επιλογής κάποιας μεθόδου υπάρχει άλλο ένα σημαντικό κριτήριο, το οποίο πολύ εύκολα μπορεί να ανατρέψει τα πάντα. Τα χαρακτηριστικά επιφάνειας που φέρουν τα πολιτιστικά αντικείμενα προκαλούν ασυμβατότητες στην εφαρμογή ορισμένων μεθόδων. Προτείνονται, βέβαια, διάφορες λύσεις, ώστε να ξεπεραστούν αυτές οι ασυμβατότητες. Δυστυχώς, οι λύσεις αυτές δεν είναι πάντα εφαρμόσιμες, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για πολιτιστικά αντικείμενα. Κάποιοι κατασκευαστές σαρωτών προτείνουν την κάλυψη των αντικειμένων με συγκεκριμένο είδος σκόνης που θα αυξήσει την συμβατότητα της επιφάνειας του αντικειμένου με τη μέθοδό τους. Καταλήγουμε λοιπόν στο ότι:

Ο δείκτης συμβατότητας των χαρακτηριστικών της επιφάνειας ενός αντικειμένου και μιας μεθόδου ψηφιοποίησης αποτελεί βασικό κριτήριο επιλογής.

Το θέμα της φθοράς των πολιτιστικών αντικειμένων στενεύει τα περιθώρια εφαρμογής των συστημάτων μέτρησης συντεταγμένων με αισθητήρες αφής. Η απόλυτα τεχνική μέθοδος έρχεται να απαντήσει αρνητικά στο κρίσιμο ερώτημα της ασφάλειας και ακεραιότητας των πολιτιστικών αντικειμένων. Η επαφή με την επιφάνεια του αντικειμένου που αποτυπώνεται είναι απαραίτητη. Η κατάσταση των πολιτιστικών αντικειμένων δεν επιτρέπει τέτοιου είδους διαχείριση και αυτό θέτει άμεσα τα συστήματα της κατηγορίας αυτής εκτός συναγωνισμού. Φυσικά το θέμα της φθοράς των αντικειμένων κατά τη διάρκεια της τρισδιάστατης αποτύπωσης δεν αφήνει εντελώς «ανέγγιχτες» και τις τεχνικές που βασίζονται στην προβολή κάποιας μορφής φωτός, αλλά εκεί οι συνέπειες είναι αποδεδειγμένα λιγότερο επιβλαβείς.

Τα τέσσερα βασικότερα κριτήρια επιλογής αποτελούν μερική απάντηση στο πρόβλημα. Το θεωρητικό υπόβαθρο μαζί με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου συνδυάζονται με τις ικανότητες των διαθέσιμων εμπορικών συστημάτων. Το κλειδί στον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης αποτελεί το συνταίριασμα της θεωρητικής πλευράς μιας μεθόδου με τις επιδόσεις της υλικοτεχνικής της ολοκλήρωσης. Με άλλα λόγια, θα πρέπει να γίνει μια σύγκριση των χαρακτηριστικών των διαθέσιμων εμπορικών συστημάτων της κάθε μεθόδου, ώστε να αναγνωριστεί το σύστημα με την μεγαλύτερη συσχέτιση με το συγκεκριμένο, κάθε φορά, πρόβλημα.

Κριτήρια επιλογής εμπορικού συστήματος τρισδιάστατης σάρωσης

Η ποικιλία των σημερινών εμπορικών συστημάτων τρισδιάστατης σάρωσης καταφέρνει να περιπλέξει ακόμα περισσότερο τις συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται η επιλογή τους. Είναι δεδομένο πως η απόκτηση ενός εμπορικού συστήματος βασίζεται σε έρευνα αγοράς και εντοπισμό των διαθέσιμων επιλογών. Ακριβώς το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση των τρισδιάστατων σαρωτών. Στις επόμενες παραγράφους καταβάλλεται μια προσπάθεια προσδιορισμού των τεχνικών χαρακτηριστικών που σε συνδυασμό με τους τέσσερις βασικούς κανόνες επιλογής μιας μεθόδου, όπως διατυπώθηκαν, αποτελούν μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία επιλογής.

Ξεκινώντας από το θέμα του αυτοματισμού μπορούμε και διακρίνουμε ότι πολλοί εμπορικοί σαρωτές²¹ επικοινωνούν με ένα περιστρεφόμενο τραπέζι και επιτρέπουν την αυτόματη ενοποίηση των τμηματικών σαρώσεων, αφού γνωρίζουν την οπτική γωνία που έχει αποτυπωθεί το κάθε τμήμα. Με άλλα λόγια, η μετά-επεξεργασία δεν περιλαμβάνει διαδικασίες ευθυγράμμισης και ενοποίησης τμηματικών σαρώσεων. Με αυτά τα συστήματα εύκολα μπορεί να χαρακτηρίσει κανείς τη διαδικασία αποτύπωσης ως μια *ρουτίνα* με μοναδικό σημείο τροποποίησης τη μέθοδο ασφαλούς τοποθέτησης των αντικειμένων πάνω στο περιστρεφόμενο τραπέζι. Τέτοια συστήματα επιτρέπουν ρυθμούς ψηφιοποίησης που αγγίζουν πολλές φορές και τα πέντε αντικείμενα σε μια εργάσιμη μέρα.

Στον αντίποδα της αυτοματοποίησης βρίσκεται το γεγονός ότι αυτά τα συστήματα περιορίζουν ως προς τις διαστάσεις των αντικειμένων που μπορούν να ψηφιοποιήσουν. Πιο γενικευμένες τεχνικές λύσεις, που δεν υποστηρίζουν τη διαχείριση περιστρεφόμενων τραπεζιών, δίνουν την ελευθερία στο χρήστη να αποφασίσει αυτός ποια μεθοδολογία θα ακολουθήσει για να συλλέξει το σύνολο των τμηματικών σαρώσεων που απαιτούνται για την ανακατασκευή του μοντέλου. Η διαδικασία σάρωσης χάνει, στην πραγματικότητα, το χαρακτηρισμό της *αυτοματοποιημένης* αλλά διευρύνεται σημαντικά το πεδίο εφαρμογής του συστήματος.

Η ευκολία χειρισμού οποιασδήποτε συσκευής παίζει σημαντικό ρόλο στην εμπορική της επιτυχία. Πολλές φορές η επιλογή ενός σαρωτή γίνεται βάσει της φιλικότητας τους συστήματος προς το χρήστη. Κάποιος μπορεί να διακρίνει εύκολα τις διαφορές στον τρόπο λειτουργίας ανάμεσα σε παλαιότερα και νεότερα συστήματα. Το γεγονός ότι μπορούμε να διακρίνουμε διαφορές σε μια τόσο νέα εμπορική αγορά είναι μια σημαντική ένδειξη για τη βελτίωση των σαρωτών στο μέλλον.

Το επίπεδο δυσκολίας της διαδικασίας ψηφιοποίησης μεταβάλλεται ανάλογα με το αντικείμενο που αποτυπώνεται. Το σύστημα σάρωσης είναι ο βασικός καταλύτης που καθορίζει τη διάρκεια της ψηφιοποίησης αλλά και την απαιτούμενη ανθρώπινη προσπάθεια. Είναι σημαντικό ο χειριστής του συστήματος ψηφιοποίησης να μπορεί να το χρησιμοποιήσει εύκολα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η σύγκριση ανάμεσα σε συστήματα ακτίνων λέιζερ που βασίζονται σε χειροκίνητους βραχίονες και σε άλλα ποιο σύγχρονα που εφαρμόζουν την θεωρία μετάδοσης ραδιοκυμάτων²². Ενώ τα πρώτα απαιτούν ακόμα και μυϊκές ικανότητες για τον χειρισμό τους, τα ποιο σύγχρονα, με διαστάσεις λίγο μεγαλύτερες από το μέγεθος μιας ανθρώπινης παλάμης επιτρέπουν την ψηφιοποίηση με τρόπο παρόμοιο με αυτό της χρήσης ενός πινέλου.

Το πλήθος των τμηματικών σαρώσεων ορίζεται από το οπτικό πεδίο ή τον ωφέλιμο όγκο λειτουργίας του εκάστοτε σαρωτή. Όσο μεγαλύτερο είναι το οπτικό πεδίο του συστήματος τόσο λιγότερες τμηματικές σαρώσεις απαιτούνται. Το εύρος του βάθους πεδίου σε συνδυασμό με το εύρος του οπτικού πεδίου επιτρέπουν την ευκολότερη σάρωση των *δύσκολων σημείων*²³.

²¹ Συστήματα τρισδιάστατης σάρωσης LPX της Roland.

²² Το μοντέλο FastScan Cobra της Polhemus θεωρείται ένα από τα πιο εύκολα στην χρήση συστήματα ψηφιοποίησης που βασίζεται σε ακτίνες λέιζερ.

²³ Ως *δύσκολα σημεία* ορίσουμε όλες τις περιοχές στην επιφάνεια των αντικειμένων που απαιτούν τη μεταβολή εστίασης της ακτίνας λέιζερ λόγω της θέσης τους. Θεωρούνται επίσης όλα τα σημεία των επιφανειών με υψηλές γεωμετρικές μεταβολές που προκαλούν διάχυση στη δέσμη φωτός και απαιτούν τη μεταβολή της ισχύος της δέσμης λέιζερ, ώστε να σαρωθούν χωρίς θόρυβο.

Συστήματα που απαιτούν βαθμονόμηση κάθε φορά που μεταβάλλεται η θέση τους στο χώρο δεν προτείνονται, καθώς η διάρκεια της ψηφιοποίησης αυξάνεται δραματικά. Η αύξηση του χρόνου υπολογίζεται από το γινόμενο του χρόνου διαδικασίας βαθμονόμησης επί το πλήθος των διαφορετικών θέσεων που θα λάβει ο σαρωτής. Υπάρχουν συστήματα που ο χρόνος βαθμονόμησης μπορεί να ξεπερνάει ακόμα και τις δύο ώρες. Η διαδικασία βαθμονόμησης των συστημάτων καθορίζει την πιστότητα των τρισδιάστατων μοντέλων. Συνήθως προτιμώνται συστήματα όπου η βαθμονόμηση γίνεται μια φορά για ένα αρκετά μεγάλο εύρος αντικείμενων με διαφορετικές διαστάσεις. Ευχής έργο θα ήταν η επιλογή ενός συστήματος με αυτοματοποιημένη διαδικασία βαθμονόμησης.

Σημειώνεται ότι σε κάποιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η αγορά εμπορικού λογισμικού επεξεργασίας των ψηφιακών μοντέλων το οποίο μπορεί ακόμη και να προέρχεται από τρίτες εταιρείες. Αυτό το λογισμικό αποτελεί επιπρόσθετο κόστος για ένα έργο ψηφιοποίησης. Πολλοί σαρωτές συνοδεύονται από λογισμικό αμφιβόλου ποιότητας και λειτουργικότητας. Είναι πολύ πιθανό το λογισμικό που συνοδεύει τους σαρωτές να μην καλύπτει όλες τις ανάγκες ενός έργου. Φιλότιμες προσπάθειες έχουν γίνει από διάφορες εταιρείες, ώστε να παρέχουν τουλάχιστον κάποιους από τους βασικούς αλγόριθμους επεξεργασίας. Το φιλικό γραφικό περιβάλλον του λογισμικού καθώς και η λειτουργικότητα, η σταθερότητα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του, συμβάλουν στο χρόνο επεξεργασίας και στα τελικά αποτελέσματα της ψηφιοποίησης. Με τον ίδιο τρόπο που εξετάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός σαρωτή για να εξακριβωθεί αν καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες ενός έργου, με τον ίδιο τρόπο θα πρέπει να εξασφαλισθεί και η λειτουργικότητα του λογισμικού.

Τα βασικότερα κριτήρια για την επιλογή ενός συστήματος τρισδιάστατης αποτύπωσης για κινητά πολιτιστικά αντικείμενα προκύπτουν από το ίδιο το έργο, την ανάλυση και την οργάνωσή του. Ο Πίνακας III παρουσιάζει, οργανωμένα, κάποια από αυτά τα κριτήρια. Σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να θεωρηθούν ως τα μοναδικά κριτήρια επιλογής καθώς η βαρύτητάς τους μεταβάλλεται κατά περίπτωση.

Πίνακας III. Βασικά κριτήρια επιλογής τρισδιάστατου σαρωτή

Βασικά κριτήρια επιλογής ενός τρισδιάστατου σαρωτή για την αποτύπωση κινητών πολιτιστικών αντικειμένων
1. Οπτικό πεδίο σάρωσης και ταχύτητα αποτύπωσης
2. Ακρίβεια αποτύπωσης τρισδιάστατης γεωμετρίας
3. Ανάλυση αποτύπωσης του σαρωτή
4. Αποτύπωση πληροφορίας υφής και ποιότητα αυτής
5. Ακρίβεια αντιστοίχισης γεωμετρικής πληροφορίας και πληροφορίας υφής
6. Επίπεδο φιλικότητας προς το χρήστη
7. Διαδικασία βαθμονόμησης (απαιτούμενος χρόνος και ευκολία αποπεράτωσης)
8. Περιβαλλοντολογικά χαρακτηριστικά για ορθή λειτουργία του σαρωτή
9. Μέσος όρος συνολικού χρόνου αποτύπωσης ενός αντικειμένου
10. Μέσος όρος συνολικού χρόνου επεξεργασίας του τρισδιάστατου μοντέλου
11. Ανάγκη χρήσης λογισμικού από άλλες εταιρείες για επεξεργασία
12. Φορητότητα του συστήματος
13. Υπολογιστικές απαιτήσεις
14. Υποστηριζόμενα format τρισδιάστατων αρχείων για εξαγωγή μοντέλων
15. Προσωπικό που απαιτείται για την διαδικασία αποτύπωσης
16. Απαιτήσεις μεταφοράς αντικειμένων (χρήση περιστρεφόμενου τραπεζιού)
17. Επιπρόσθετος εξοπλισμός που απαιτείται στον χώρο της αποτύπωσης

-
18. Υποκειμενικό κριτήριο συμπεριφοράς και απόδοσης σαρωτή ανάλογα με τα χαρακτηριστικά επιφάνειας των αντικειμένων (αντανακλάσεις, χρωματισμοί, κοκ)
 19. Μέσος όρος συνολικού χρόνου εγκατάστασης και τοποθέτηση του σαρωτή
 20. Αντιμέτωπιση πιθανών δυσκολιών κατά την διαδικασία αποτύπωσης
 21. Κόστος συστήματος
 22. Εγγύηση συστήματος σάρωσης
 23. Προαιρετικός εξοπλισμός που συνοδεύει το σαρωτή
 24. Ειδικές ρυθμίσεις του σαρωτή που επιτρέπει η κατασκευάστρια εταιρεία για την καλύτερη προσαρμογή του συστήματος στις ανάγκες του εκάστοτε έργου
-

Ένας πιο συνοπτικός πίνακας χαρακτηριστικών που μπορεί να αποτελέσουν κριτήρια επιλογής μεθόδου και συστήματος τρισδιάστατης ψηφιοποίησης κινητών πολιτιστικών αντικειμένων είναι ο Πίνακας IV, στον οποίο αναφέρονται και οι πιθανές ρεαλιστικές επιλογές για κάθε κριτήριο.

Πίνακας IV. Τα 9 βασικότερα κριτήρια επιλογής μεθόδου και συστήματος ψηφιοποίησης

Κριτήριο	Πιθανές ρεαλιστικές επιλογές
1. Κόστος	Κλάση 10.000 € Κλάση 20.000 € Κλάση 50.000 € Κλάση 100.000 € Κλάση 200.000 € Κλάση 500.000 €
2. Υλικό	Μάρμαρο Μέταλλο Κεραμικό Υφασμα
3. Μέγεθος	Μικρό (<20cm) Μεσαίο (25-60cm) Μεγάλο (65cm-)
4. Φορητότητα	Ναι/Όχι
5. Ακρίβεια	Χαμηλή (Σχήμα-Από-Σιλουέτες) Μεσαία (Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως) Μεγάλη (Λέιζερ)
6. Υφή	Ναι/Όχι
7. Παραγωγικότητα	Μικρή (1-2 αντικείμενα/ημέρα) Μεσαία (3-5 αντικείμενα/ημέρα) Μεγάλη (6+ αντικείμενα/ημέρα)
8. Εξειδίκευση	Ελάχιστη Μικρή Μεγάλη
9. Συμβατότητα με πρότυπα	Ναι/Όχι

Ο πίνακας αυτός είναι κατάλληλα εκφρασμένος, έτσι ώστε να μπορεί πολύ εύκολα να διαμορφωθεί ως μια check-list από όποιον είναι κάτοχος πολιτιστικής κληρονομιάς και ενδιαφέρεται να επιλέξει μεθοδολογία και σύστημα ψηφιοποίησης, ή, ακόμη, να μπορεί να παράγει εύκολα προδιαγραφές για την προμήθεια συστήματος τρισδιάστατης ψηφιοποίησης κινητών αντικειμένων.

Βιβλιογραφία

- [1] 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
- [2] Wolfgang Boehler, Adreas Marbs, Scanning for Cultural Heritage Recording, September 1-2, 2002
- [3] A. Marbs, Experiences with Laser Scanning at i3mainz, CIPA, September 2002, Corfu, Greece, Proceedings of 'Scanning for Cultural Heritage Recording', p.110 -114
- [4] D. Laboury, Y. Renotte, B. Tilkens, 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, p. 139-142.
- [5] Traunecker C. 1987. Les Techniques d'épigraphie de terrain. Principes et pratique. In Assmann J., Burkard G, Davies V. 1987, pp. 261-298
- [6] Loeben C.E. 1996, Anmerkungen zu jungsten Arbeiten ägyptischer Epigraphik. ARCUS – Berichte aus Archäologie, Baugeschichte und Nachbargebieten, 3, pp. 15-27.
- [7] 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', p.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] 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
- [12] Tim Hawkins Jonathan Cohen Paul Debevec, A Photometric Approach to Digitizing Cultural Artifacts, University of Southern California Institute for Creative Technologies, 2001
- [13] Curless, B.; Levoy, Better optical triangulation through spacetime analysis, M Computer Vision, 1995. Proceedings., Fifth International Conference on , 20-23 June 1995 Pages: 987 – 994.
- [14] 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.
- [15] 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.

-
- [16] 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
- [17] 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
- [18] D. Scharstein and R. Szeliski. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms, IJCV, 2002.
- [19] A. Chiuso, H. Jin, P. Favaro and S. Soatto (2000). 'MFm' : 3-D Motion and Structure from 2-D Motion Causally Integrated Over Time: Implementation. In Computer Vision - ECCV 2000, D. Vernon ed., Lect. Notes in Computer Science 1843, pp. 734-750.
- [20] L. Van Gool, Filip Defoort, Marc Pollefeys, Reinhard Koch, Marc Proesmans, Maarten Vergauwen, Special Lecture: 3D Modeling for Communications, p. 482, Computer Graphics International 1998, June 22 - 26, 1998, Hannover, Germany
- [21] 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).
- [22] D.A. Forsyth, Shape from texture without boundaries, Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part III table of contents, p.225 - 239, 2002, ISBN:3-540-43746-0
- [23] Chia-Yen Chen, Reinhard Klette, Chi-Fa Chen, 3D Reconstruction Using Shape from Photometric Stereo and Contours, November 2003, Image and Vision Computing.
- [24] R. Basri and D. Jacobs, "Photometric Stereo with General, Unknown Lighting," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2001.
- [25] 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
- [26] P.J. Besl. Active, optical range imaging sensors. Machine Vision and Applications, 1.127-152, 1988.
- [27] Yoav. Y. Schechner Depth from Defocus vs. Stereo: How different really are they? International Journal of Computer Vision 89 pp. 141-162 (2000).
- [28] 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/dfdtutorial.html
- [29] Jean-Yves Bouguet, Pietro Perona, '3D Photography on your desk', in Proc. Of the Int. Conf. On Computer Vision, Bombay, India, January 1998
- [30] 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
- [31] Καλτσίκης, Χ., Ι., Α., Φωτίου, Γενική Τοπογραφία, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2000
- [32] Τζιαβός Η., Σ, Σπαταλάς, Εφαρμογές ρυμοτομικών σχεδίων και τοπογραφικές μελέτες, 2004, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων ΑΠΘ
- [33] Σπαταλάς, Σ., Τοπογραφία και Τοπογραφικές Αποτυπώσεις του χώρου, Σημειώσεις μαθήματος, , Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, ΔΠΘ, 2004

-
- [34] Βλάχος, Δ., "Αρχές και Μέθοδοι Τοπογραφικής Αποτύπωσης - Προδιαγραφές Σημειώσεις Μαθήματος "Μέθοδοι Αποτύπωσης Μνημείων, Ιστορικών Συνόλων Και Έργων Τέχνης", 1998
- [35] Manual of Photogrammetry, V edition, 2004, ASPRS,
- [36] Δερμάνης, Α. Αναλυτική Φωτογραμμετρία, Εκδόσεις Ζήτη, 1991
- [37] Πατιάς, Π., Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία, 1991, Εκδόσεις Ζήτη
- [38] Πατιάς, Π., Σύγχρονες Φωτογραμμετρικές Πρακτικές σε εφαρμογές Αρχιτεκτονικής και Αρχαιολογίας, 1995, Θεσσαλονίκη
- [39] Καρράς, Γ., Πέτσα, Ε., Η χρήση της προοπτικής σε μη μετρικές φωτογραφίες αγνώστου προσανατολισμού για την τεκμηρίωση προσόψεων ιστορικών κτιρίων χωρίς φωτοσταθερά, Πρακτικά Συνεδρίου "Επίγεια Φωτογραμμετρία και Συστήματα Πληροφοριών Χώρου για την Τεκμηρίωση του Μνημειακού πλούτου της Χώρας μας", Θεσσαλονίκη 1992
- [40] Boehler, W., A. Marbs, 3D Scanning Instruments, "Proceedings Of The CIPA WG 6 International Workshop On Scanning For Cultural Heritage Recording", Corfu, 2002
- [41] Scherer, M., How To Optimise The Recording Of Geometrical Data And Image Data For The Purpose Of Architectural Surveying, International Archives Of Photogrammetry And Remote Sensing, Vol. XXXV, Part B, Istanbul, 2004
- [42] Tauch, R., And A. Wiedemann, Generation Of Digital Surface Models For Architectural Applications With Archimedes3D, International Archives Of Photogrammetry And Remote Sensing, Vol. XXXV, Part B, Istanbul, 2004
- [43] Tokmakidis, K., D. Scarlatos, Mapping Excavation And Archaeological Sites Using Close Range Photos, International Archives Of Photogrammetry And Remote Sensing, Vol. XXXIV, Part 5, Corfu, 2002
- [44] Tokmakidis, K., Kalyvioti M.-E., Nanakou, P., Geographic Information System Applied In Archaeological Site, FIG Working Week 2004, Athens, 2004
- [45] Andreozzi, L., L. Barnodi, A. Goiffrida, C. Santagati, New Frontiers To Architectural Survey, International Archives Of Photogrammetry And Remote Sensing, Vol. XXXIV, Part 5, Corfu, 2002
- [46] Theodoridou, S., K. Tokmakidis, D. Scarlatos, Use Of Radio-Controlled Model Helicopters In Archaeology Surveying And In Building Construction Industry, International Archives Of Photogrammetry And Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B5, Amsterdam, 2000
- [47] Van Gool, L., M. Waelkens, P. Mueller, T. Vereenooghe, M. Vergauwen, Total Recall: A Plea For Realism In Models Of The Past,
- [48] 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
- [49] 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
- [50] 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

-
- [51] Carlos Hernandez Esteban, Frances Schmitt, 'Multi-Stereo 3D Object Reconstruction', Proceeding of 3D Data Processing , Visualization & Transmission Conference, June 2002, Padova, Italy
- [52] 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
- [53] Bitelli G., A. Carpa, A. Zanutta, 'Digital photogrammetry and laser scanning in surveying the Numphea in Pompei.' Proceedings of CIPA WG6 Int. Workshop, Sept 1-2, Corfu, Greece (CD-ROM)
- [54] 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
- [55] Καρράς, Γ., Πέτσα, Ε., Η χρήση της προοπτικής σε μη μετρικές φωτογραφίες αγνώστου προσανατολισμού για την τεκμηρίωση προσόψεων ιστορικών κτιρίων χωρίς φωτοσταθερά, Πρακτικά Συνεδρίου "Επίγεια Φωτογραμμετρία και Συστήματα Πληροφοριών Χώρου για την Τεκμηρίωση του Μνημειακού πλούτου της Χώρας μας", Θεσσαλονίκη 1992
- [56] Lichti D. D., S.J. Gordon, Error Propagation In Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds For Cultural Heritage Recording, FIG Working Week 2004, Athens, 2004

February 28, 2014

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών μεγεθών

Πίνακας V. Πίνακας προδιαγραφών συστημάτων προβολής ακτίνων λέιζερ κοντινών αποστάσεων

Πεδίο Εφαρμογής	Αντικείμενα μερικώς εκατοστών (≤ 20cm)	Αντικείμενα με μέγεθος μέγιστης πλευράς (20cm – 60cm)	Αντικείμενα με μέγεθος μέγιστης πλευράς (≥60cm)
Κατηγορία ακτίνων λέιζερ	Class I (FDA) ή Class II (IEC) Ασφαλές για το ανθρώπινο μάτι	Class I (FDA) ή Class II (IEC) Ασφαλές για το ανθρώπινο μάτι	Class I (FDA) ή Class II (IEC) Ασφαλές για το ανθρώπινο μάτι
Αυτόματη εστίαση	Επιθυμητό	Επιθυμητό	Επιθυμητό
Ανταλλάξιμοι οπτικοί φακοί	Επιθυμητό	Επιθυμητό	Επιθυμητό
Οπτικό πεδίο σάρωσης	1 cm έως 20cm και στους τρεις άξονες	20cm έως 60cm και στους τρεις άξονες	60cm έως 5m και στους τρεις άξονες
Βήμα δειγματοληψίας	Z: 25μm – 100μm Y: 100μm - 500μm X: 100μm - 500μm	Z: 100μm – 400μm Y: 100μm - 700μm X: 100μm - 700μm	Z: 100μm – 1cm Y: 100μm – 1cm X: 100μm – 1cm
Πληροφορία υψής	Επιθυμητό - Βάθος χρωμάτων 24bit, Ανάλυση περιοχής ελάχιστο 640x480 εικονοστοιχεία	Επιθυμητό - Βάθος χρωμάτων 24bit, Ανάλυση περιοχής ελάχιστο 640x480 εικονοστοιχεία	Επιθυμητό - Βάθος χρωμάτων 24bit, Ανάλυση περιοχής ελάχιστο 640x480 εικονοστοιχεία
Υγυότητα δειγματοληψίας	Ελάχιστο: 3000 σημεία ανά δευτερόλεπτο	Ελάχιστο: 3000 σημεία ανά δευτερόλεπτο	Ελάχιστο: 3000 σημεία ανά δευτερόλεπτο
Μεταβολή έντασης ακτίνων λέιζερ	Επιθυμητό	Επιθυμητό	Επιθυμητό
Συνθήκες φωτισμού λειτουργίας σε εξωτερικό χώρο	Προαιρετική λειτουργία ακόμα και σε καταστάσεις έντονης ηλιοφάνειας	Προαιρετική λειτουργία ακόμα και σε καταστάσεις έντονης ηλιοφάνειας	Προαιρετική λειτουργία ακόμα και σε καταστάσεις έντονης ηλιοφάνειας
Συνθήκες φωτισμού λειτουργίας σε εσωτερικό χώρο	Τυπικές συνθήκες γραφείου/εργαστηρίου	Τυπικές συνθήκες γραφείου/εργαστηρίου	Τυπικές συνθήκες γραφείου/εργαστηρίου
Θερμοκρασία λειτουργίας	0° έως 50°	0° έως 50°	0° έως 50°
Υγρασία περιβάλλοντος λειτουργίας	65% - 80%	65% - 80%	65% - 80%
Υγρασία περιβάλλοντος αποθήκευσης	75% - 95%	75% - 95%	75% - 95%
Λειτουργικό σύστημα	Microsoft Windows 2000, XP	Microsoft Windows 2000, XP	Microsoft Windows 2000, XP
Υπολογιστικές απαιτήσεις για έλεγχο δεδομένων	RS-232,USB 1.0,USB 2.0,IEEE 1394,Ethernet 100Mbps,1GBit	RS-232,USB 1.0,USB 2.0,IEEE 1394,Ethernet 100Mbps,1GBit	RS-232,USB 1.0,USB 2.0,IEEE 1394,Ethernet 100Mbps,1GBit
Φορητότητα	Επιθυμητή	Επιθυμητή	Επιθυμητή
Αυτοματοποιημένη διαδικασία σάρωσης	Επιθυμητή	Επιθυμητή	Επιθυμητή
Αυτοματοποιημένη διαδικασία βαθμονόμησης	Επιθυμητή	Επιθυμητή	Επιθυμητή
Τροφοδοσία	100V – 240V , 50 – 60 Hz	100V – 240V , 50 – 60 Hz	100V – 240V , 50 – 60 Hz
Εγγύηση	Τουλάχιστον ένας χρόνος και προαιρετικά επεκτάσιμη	Τουλάχιστον ένας χρόνος και προαιρετικά επεκτάσιμη	Τουλάχιστον ένας χρόνος και προαιρετικά επεκτάσιμη

3D CMS Technical Report 2.1.1

February 28, 2014

Πίνακας VI. Πίνακας προδιαγραφών συστημάτων προβολής δομημένου φωτισμού

Πεδίο Εφαρμογής	Αντικείμενα μερικώς εκατοστών (≤ 20cm)	Αντικείμενα με μέγεθος μέγιστης πλευράς (20cm – 60cm)	Αντικείμενα με μέγεθος μέγιστης πλευράς (60cm – 5m)
Αυτόματη εστίαση	Επιθυμητό	Επιθυμητό	Επιθυμητό
Αναλλάξιμοι οπτικοί φακοί	Επιθυμητό	Επιθυμητό	Επιθυμητό
Οπτικό πεδίο σάρωσης	1 cm έως 20cm και στους τρεις άξονες Z: 25μm – 400μm Y: 100μm - 400μm X: 100μm - 400μm	20cm έως 60cm και στους τρεις άξονες Z: 100μm – 700μm Y: 100μm - 700μm X: 100μm - 700μm	60cm έως 5m και στους τρεις άξονες Z: 100μm – 1cm Y: 100μm – 1cm X: 100μm – 1cm
Βήμα δειγματοληψίας			
Πληροφορία υφής	Επιθυμητό - Βάθος χρωμάτων 24bit, Ανάλυση περιοχής ελάχιστο 640x480 εικονοστοιχεία Ελάχιστο: 3000 σημεία ανά δευτερόλεπτο	Επιθυμητό - Βάθος χρωμάτων 24bit, Ανάλυση περιοχής ελάχιστο 640x480 εικονοστοιχεία Ελάχιστο: 3000 σημεία ανά δευτερόλεπτο	Επιθυμητό - Βάθος χρωμάτων 24bit, Ανάλυση περιοχής ελάχιστο 640x480 εικονοστοιχεία Ελάχιστο: 3000 σημεία ανά δευτερόλεπτο
Μεταβολή έντασης ακτίνας λέιζερ	Επιθυμητό	Επιθυμητό	Επιθυμητό
Συνθήκες φωτισμού λειτουργίας σε εξωτερικό χώρο	Προαιρετική λειτουργία ακόμα και σε καταστάσεις έντονης ηλιοφάνειας	Προαιρετική λειτουργία ακόμα και σε καταστάσεις έντονης ηλιοφάνειας	Προαιρετική λειτουργία ακόμα και σε καταστάσεις έντονης ηλιοφάνειας
Συνθήκες φωτισμού λειτουργίας σε εσωτερικό χώρο	Τυπικές συνθήκες γραφείου/εργαστηρίου	Τυπικές συνθήκες γραφείου/εργαστηρίου	Τυπικές συνθήκες γραφείου/εργαστηρίου
Θερμοκρασία Λειτουργίας	0° έως 50°	0° έως 50°	0° έως 50°
Υγρασία περιβάλλοντος Λειτουργίας	65% - 80%	65% - 80%	65% - 80%
Υγρασία περιβάλλοντος Αποθήκευσης	75% - 95%	75% - 95%	75% - 95%
Λειτουργικό Σύστημα	Microsoft Windows 2000, XP	Microsoft Windows 2000, XP	Microsoft Windows 2000, XP
Υπολογιστικές απαιτήσεις για έλεγχο δεδομένων	RS-232,USB 1.0,USB 2.0,IEEE 1394,Ethernet 100Mbps,1Gbit	RS-232,USB 1.0,USB 2.0,IEEE 1394,Ethernet 100Mbps,1Gbit	RS-232,USB 1.0,USB 2.0,IEEE 1394,Ethernet 100Mbps,1Gbit
Φορητότητα	Επιθυμητή	Επιθυμητή	Επιθυμητή
Αυτοματοποιημένη διαδικασία σάρωσης	Επιθυμητή	Επιθυμητή	Επιθυμητή
Αυτοματοποιημένη διαδικασία βαθμονόμησης	Επιθυμητή	Επιθυμητή	Επιθυμητή
Τροφοδοσία	100V – 240V , 50 – 60 Hz	100V – 240V , 50 – 60 Hz	100V – 240V , 50 – 60 Hz
Εγγύηση	Τουλάχιστον ένας χρόνος και προαιρετικά επεκτάσιμη	Τουλάχιστον ένας χρόνος και προαιρετικά επεκτάσιμη	Τουλάχιστον ένας χρόνος και προαιρετικά επεκτάσιμη