



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

## ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

# Βελτίωση τεχνικών ψηφιοποίησης και μοντελοποίησης

*Ενότητα Εργασίας 2. Τεχνικές βέλτιστης ψηφιοποίησης και  
μοντελοποίησης εκθεμάτων και χώρων  
Παραδοτέο 2.2. Βελτίωση του τρόπου και των μεθόδων επεξεργασίας των  
ψηφιακών δεδομένων για τις ανάγκες του 3D CMS*

ΙΕΛ – Ινστιτούτο Επεξεργασίας του Λόγου

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

Υπεύθυνοι Σύνταξης:

Γεώργιος Παυλίδης

Βασίλειος Σεβετλίδης

Μαρία Χαραλαμπίδου

Μάρτιος 2014

# ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ 2.2

## Βελτίωση τεχνικών ψηφιοποίησης και μοντελοποίησης

### Πίνακας Περιεχομένων

<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>4</b>
<b>Τρισδιάστατη ψηφιοποίηση.....</b>	<b>6</b>
<b>Σκοπός της έκθεσης.....</b>	<b>11</b>
<b>Σύνοψη συστημάτων τρισδιάστατης ψηφιοποίησης.....</b>	<b>12</b>
<b>Συστήματα τριγωνισμού ακτίνων λέιζερ μικρών αποστάσεων.....</b>	<b>12</b>
<b>Ψηφιοποίηση με χρήση τεχνικών σάρωσης λέιζερ ή τριγωνισμού.....</b>	<b>14</b>
<b>Σχήμα από κίνηση - Structure from Motion (SFM).....</b>	<b>17</b>
<b>Βασικές αρχές λειτουργίας.....</b>	<b>18</b>
Σημειογραφία.....	18
Pinhole camera.....	18
Ακτινική παραμόρφωση.....	19
Ρύθμιση της κάμερας.....	20
Το πρόβλημα της αντιστοίχισης.....	20
Γεωμετρία δύο όψεων: ουσιώδης πίνακας.....	22
Τριγωνισμός.....	22
Δομή από κίνηση μέσω πολλαπλών οπτικών γωνιών.....	23
Διαδοχικές μέθοδοι.....	23
Παραγοντικές μέθοδοι.....	24
Ρύθμιση δέσμης.....	24
<b>Ροή εργασιών.....</b>	<b>25</b>
<b>Επισκόπηση του χώρου.....</b>	<b>27</b>
Επιλογή της μεθόδου και του αισθητήρα.....	28
<b>Τοποθέτηση του αισθητήρα.....</b>	<b>30</b>
<b>Συλλογή δεδομένων.....</b>	<b>30</b>
Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή συλλογής δεδομένων.....	30
<b>Επεξεργασία δεδομένων.....</b>	<b>32</b>
Α. Επεξεργασία δεδομένων εικόνας.....	32
Β. Σειρά επεξεργασίας δεδομένων.....	32
<b>Περαιτέρω επεξεργασία.....</b>	<b>33</b>
<b>Μοντελοποίηση με τη μέθοδο SFM.....</b>	<b>34</b>
<b>Μελέτη περίπτωσης: Κυκλαδίτικο ειδώλειο γυναικείας μορφής.....</b>	<b>34</b>
Συλλογή δεδομένων.....	35
Αξιολόγηση μοντέλων.....	36
<b>Μελέτη περίπτωσης: Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke.....</b>	<b>37</b>
Η συλλογή των δεδομένων.....	37

Σύγκριση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης.....	37
<b>Επίλογος .....</b>	<b>40</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>41</b>

## Εισαγωγή

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 αρχαιολογικά αντικείμενα εκτίθενται σε μια προοδευτική και συχνά μη αντιστρέψιμη διαδικασία αλλοίωσης που μπορεί να καταλήξει σε μερική ή και σε ολική καταστροφή [1]. Η αρχαιολογική έρευνα έχει σκοπό τόσο τη δημιουργία ενός μέσου που θα επιτρέπει την υψηλής πιστότητας δημοσίευση του αντικειμένου όσο και την εικονική διατήρηση του αντικειμένου [1]. Η διαδικασία της προστασίας και της διατήρησης αρχαιολογικών – πολιτιστικών αντικειμένων δεν είναι ένα απλό θεωρητικό πρόβλημα. 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 [1]. Για την αντιμετώπιση αυτής της προοδευτικής και ανίατης φθοράς, οι αρχαιολόγοι χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές καταγραφής και αρχειοθέτησης. Οι τεχνικές αυτές αποτελούνται από την απεικόνιση του αντικειμένου μέσω σχεδίασης, ζωγραφικής, και φωτογράφισης. Παρόλα αυτά η δισδιάστατη απεικόνιση, η οπτική γωνία, και το μέσο απεικόνισης εμπεριέχουν ένα βαθμό σφάλματος (οπτικές παραμορφώσεις). Επίσης, η πραγματοποίηση αυτών των σχεδίων γίνεται με αργούς ρυθμούς, παρουσιάζοντας το μειονέκτημα της δύσκολης προσαρμογής σε τεχνικές διαχείρισης και οργάνωσης [2],[3]. Η τεκμηρίωση της πολιτισμικής κληρονομιάς επιβάλλει την καταγραφή των αντικειμένων από κοντινές αποστάσεις. Τα πολιτιστικά αντικείμενα ποικίλουν σε μέγεθος, σχήμα, μορφολογική πολυπλοκότητα και ο χρόνος για τις απαραίτητες μετρήσεις είναι τις περισσότερες φορές ελάχιστος. Επομένως, η αρχειοθέτηση στην Αρχαιολογία και στην Ιστορία Τέχνης έχει να αντιμετωπίσει δύο βασικά προβλήματα τα όποια σχετίζονται απόλυτα μεταξύ τους. Αυτά είναι [1]:

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

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα τόσο της πιστότητας όσο και της χρονικής καθυστέρησης κατά την παραγωγή του αντίτυπου, οι φορείς που είναι υπεύθυνοι για την αρχειοθέτηση και την διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς στρέφονται προς την αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών. Οι απαντήσεις που προσφέρουν οι νέες τεχνολογίες στον τομέα της καταγραφής και προβολής πολιτιστικού υλικού είναι ο συνδυασμός φωτορεαλιστικών μοντέλων και τα ειδικά λογισμικά τρισδιάστατης απεικόνισης. Η χρήση τρισδιάστατων φωτορεαλιστικών μοντέλων και η παρουσίαση τους μέσω εικονικής πραγματικότητας στο διαδίκτυο ή με το κατάλληλο λογισμικό μπορεί να βοηθήσει σημαντικά τόσο στην εκπαίδευση όσο και στη διάδοση της γνώσης σε πολύ ευρύτερο κοινό [5].

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 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 [6].

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. Οι τρισδιάστατοι σαρωτές λέιζερ μπορούν, λοιπόν, να εφαρμοστούν με επιτυχία στην αρχαιολογία ως ένα σημαντικό εργαλείο για τρισδιάστατες αναπαραστάσεις και ψηφιακές αποδόσεις [7]. 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.

- 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 πήλινων 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 μεσαίου<sup>1</sup> μεγέθους αντικείμενα, οι σαρωτές ακτίνων λέιζερ κοντινών αποστάσεων μπορούν να προσφέρουν λεπτομερή τρισδιάστατα μοντέλα. Από την άλλη όμως, το κόστος των σαρωτών παραμένει υψηλό [6]. Μια διαφορετική τοποθέτηση στο πρόβλημα της τεκμηρίωσης έχει δοθεί από το Marco Gaiani (2000) [8]. Ο Gaiani αναφέρει πως στην πραγματικότητα δεν είναι τίποτα διαφορετικό από ένα ακόμα πρόβλημα «μετάφρασης» ή «προβολής». Μια δύσκολη μετάφραση της

---

<sup>1</sup> Από μερικά εκατοστά (το μέγεθος ενός κοσμήματος) έως και μερικά μέτρα (το μέγεθος ενός ανθρώπου ή ενός αγάλματος).

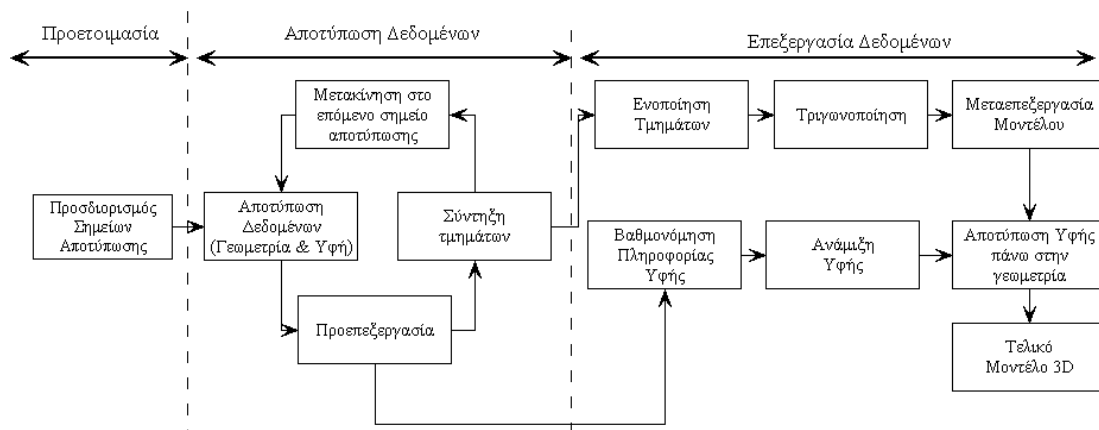
αρχιτεκτονικής πραγματικού κόσμου σε εικονικό-ψηφιακό. Η λέξη «μετάφραση» στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται για να δηλώσει τη μεταφορά κάποιου αντικειμένου από ένα χώρο σε κάποιον άλλο, χωρίς να δεχθεί την παραμικρή μεταβολή. Κάτι τέτοιο βέβαια δεν είναι απόλυτο, ακόμα και σε γλωσσικό επίπεδο, 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.

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 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.

## **Τρισδιάστατη ψηφιοποίηση**

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 [9]. 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

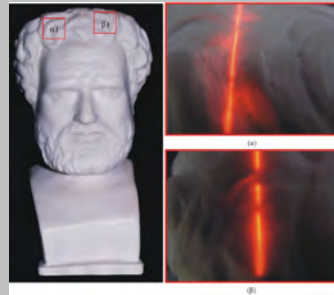
Όπως είναι εμφανές από την εικόνα, η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση είναι, στη γενική περίπτωση, μια πολυσύνθετη διαδικασία που αποτελείται από τρεις βασικές φάσεις:

- *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 I 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 I. Μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης

### Απεικόνιση Περιγραφή μεθόδου



#### **Σάρωση με ακτίνες λέιζερ (laser triangulation)**

Προβολή δέσμης ή μοτίβου ακτίνων λέιζερ, ανίχνευσή τους και εφαρμογή γεωμετρικών σχέσεων τριγωνισμού για την αναγνώριση γεωμετρίας



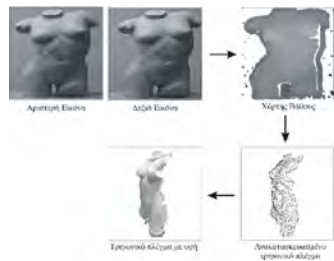
#### **Σχήμα από δομημένο φωτισμό (shape from structured light)**

Προβολή χρωματικού (ή όχι) μοτίβου, δισδιάστατη φωτογράφιση και αναγνώριση γεωμετρίας από τις παραμορφώσεις στο μοτίβο



#### **Σχήμα από σιλουέτες (shape from silhouette)**

Πολλαπλή δισδιάστατη φωτογράφιση και ανακατασκευή γεωμετρίας από τις πολλαπλές σιλουέτες



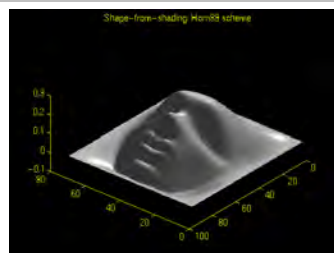
#### **Σχήμα από στερεοφωτογράφιση (shape from stereo)**

Αναγνώριση γεωμετρίας από ζεύγος δισδιάστατων φωτογραφιών με χρήση κανόνων στερεοσκοπικής όρασης



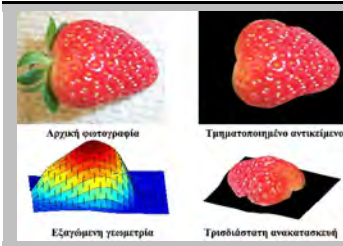
#### **Σχήμα από κίνηση (shape/structure from motion)**

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



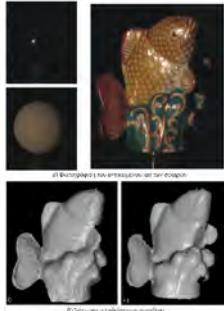
#### **Σχήμα από φωτοσκίαση (shape from shading)**

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



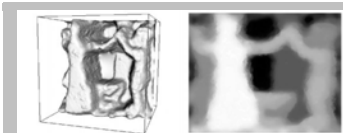
### Σχήμα από υφή (*shape from texture*)

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



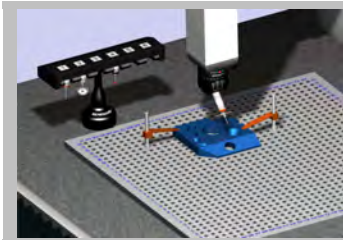
### Σχήμα από μεταβαλλόμενη εστίαση (*shape from focus*)

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



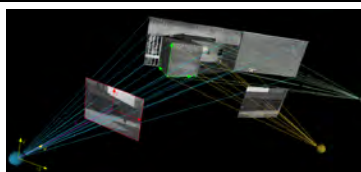
### Εμπειρικές ή τοπομετρικές μέθοδοι

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 [10]. Γενικότερα, ως *τρειςδιάστατο 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 [10]:

- 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. 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 [11].

Από όλες τις παραπάνω μεθόδους τρισδιάστατης ψηφιοποίησης η επίγεια σάρωση με λέιζερ (TLS) φαίνεται να είναι μία από τις πιο σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις της τελευταίας δεκαετίας, η οποία προκάλεσε σημαντικές αλλαγές στον τομέα της 3-διάστατης μοντελοποίησης. Κατά τα τελευταία χρόνια, συχνά χρησιμοποιήθηκαν σαρωτές λέιζερ για τη δημιουργία 3D μοντέλων που απαιτούνταν για διάφορες εφαρμογές, όπως την τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς, την πλοήγηση, την εξερεύνηση του διαστήματος, κλπ. Όταν πρωτοεμφανίστηκε η τεχνολογία της ψηφιοποίησης με λέιζερ ξεπέρασε τις παραδοσιακές μεθόδους φωτογραμμετρίας close-range, λόγω της υψηλής ακρίβειας της και του επίπεδου του αυτοματισμού κατά την ψηφιοποίηση. Οι Boehler κα. (2004) ανέφεραν ότι οι παραδοσιακές φωτογραμμετρικές μέθοδοι μπορεί να αντικατασταθούν πλήρως από την 3D σάρωση στο μέλλον. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια η αντιστοίχιση πολλών εικόνων (multi-image matching) έγινε ένας από τους πιο δραστήριους ερευνητικούς τομείς της στην φωτογραμμετρία και την υπολογιστική όραση. Πολλές βελτιώσεις έχουν γίνει στην αυτοματοποιημένη εξαγωγή και αντιστοίχισης εικόνων, καθώς και έχει αναπτυχθεί ένας σημαντικός αριθμός αλγορίθμων για την μοντελοποίηση βασισμένη σε εικόνες (IBM). Σήμερα, η παραγωγή εικόνων υψηλής ακρίβειας και συμπαγών μοντέλων μέσα από ένα ικανοποιητικό επίπεδο αυτοματοποίησης είναι γεγονός. Σύμφωνα με Remondino κα. (2006), η IBM εξακολουθεί να παραμένει η πιο ολοκληρωμένη, οικονομική, φορητή, ευέλικτη και ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση.

Γενικότερα έχει επικρατήσει, η 3D ανακατασκευή να εκτελείται με μία από τις δύο μεθόδους, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν παράγοντες που μπορούν να περιορίσουν την αποτελεσματικότητα της καθεμιάς. Από τη μία πλευρά, οι σαρωτές λέιζερ είναι σε θέση να παράγουν πυκνά σύννεφα σημείων, με υψηλή γεωμετρική ακρίβεια σε ένα σχεδόν πλήρως αυτοματοποιημένο περιβάλλον, χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένη γνώση από τους χειριστές. Κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι το υψηλό επίπεδο κόστους, η φορητότητα, η χρονοβόρα απόκτηση δεδομένων, ο θόρυβος που προκύπτει από τα κινούμενα αντικείμενα, και η χαμηλή ποιότητα των πληροφοριών του χρώματος. Επιπλέον, η σάρωση με λέιζερ είναι μια μη-επεκτάσιμη μέθοδος και εξαρτάται από το υλικό της επιφάνειας του αντικειμένου που πρόκειται να σαρωθεί. Από την άλλη πλευρά, η μοντελοποίηση βάση εικόνων προσφέρει μια εναλλακτική λύση χαμηλού κόστους που εφαρμόζεται σε μια ευρεία ποικιλία κλιμάκων, με μικρό χρόνο απόκτησης δεδομένων. Η γεωμετρική ακρίβεια και το επίπεδο αυτοματοποίησης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του αντικειμένου, την υφή της επιφάνειας, την ανάλυση των εικόνων και της γεωμετρίας του δικτύου του. Σύμφωνα με τους Skarlatos κα., το ζήτημα ποιας μεθόδου υπερτερεί της άλλης από την άποψη των διαφορετικών κριτηρίων παραμένει.

## **Σκοπός της έκθεσης**

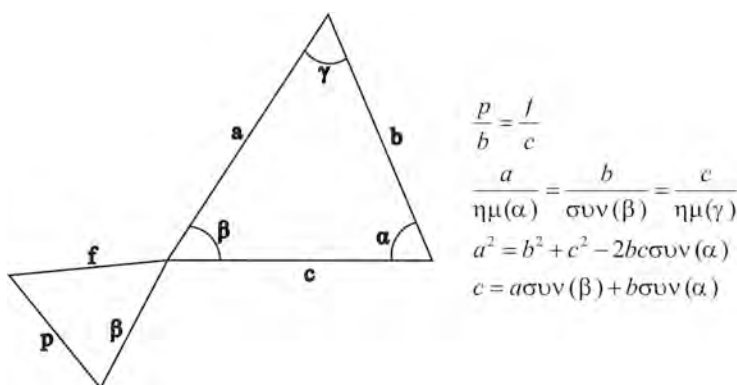
Στην παρούσα τεχνική έκθεση, γίνεται αναφορά στις δύο βασικές μεθόδους 3D ψηφιοποίησης, την μέθοδο με τη χρήση laser σαρωτή και την μέθοδο παραγωγής μοντέλων μέσω κίνησης. Αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των δύο αυτών

μεθόδων, των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται, των αλγορίθμων που υποστηρίζουν τη σωστή λειτουργία τους, και τέλος των λογισμικών που τους συνοδεύουν. Στη συνέχεια αναφέρονται παραδείγματα σύγκρισης της ποιότητας των μοντέλων που παρείχθησαν από τις δύο αυτές μεθόδους. Τα παραδείγματα αναφέρονται τόσο σε μοντέλα μικρού-μεσαίου μεγέθους όσο και σε μνημεία μεγάλου μεγέθους. Τέλος, αναλύεται το διάγραμμα ροής εργασιών (workflow), σύμφωνα με το οποίοπραγματοποιείται μια εργασία ψηφιοποίησης.

## 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<sup>ος</sup> 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 2 παρουσιάζεται το *θεώρημα των αντίθετων γωνιών σε δύο τεμνόμενες ευθείες* και ο *νόμος των συνημίτονων*.

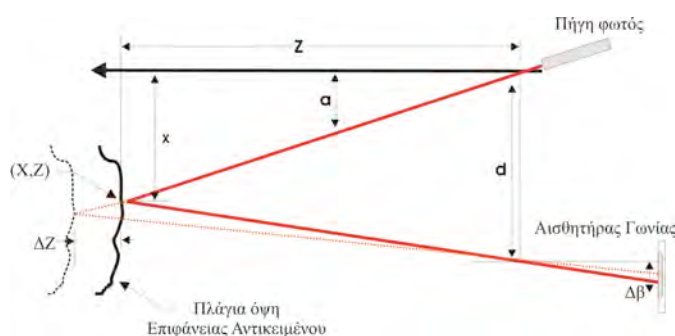


Εικόνα 2. Όμοια τρίγωνα και νόμος συνημίτονων

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 αντικείμενων 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<sup>2</sup> 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 αντικειμένου. 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 αντικειμένου που αντανακλά την ακτίνα μπορεί να βρεθεί από το ιδεατό τρίγωνο που δημιουργείται. Η ακρίβεια μέτρησης βάθους μειώνεται ανάλογα με την 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 3. Η αρχή του τριγωνισμού**

Στην Εικόνα 3 επεξηγείται το πρόβλημα του τριγωνισμού σε δύο διαστάσεις. Η θέση του κέντρου του παλμού της δέσμης φωτός που αντανακλάται 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

<sup>2</sup> 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.

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 αντικείμενου αλλά και εξαιτίας των χαρακτηριστικών της ίδιας της επιφάνειας [12].

## **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:

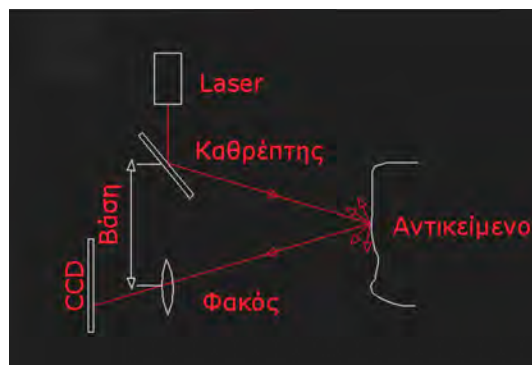
- Είναι ταχύτατη και αξιόπιστη μέθοδος αποτύπωσης
- Παρέχει ακριβέστερα προϊόντα από οποιαδήποτε άλλη μεθοδολογία
- Απαιτεί λιγότερη προεπεξεργασία αλλά και μικρότερο χρόνο εργασίας στο γραφείο
- Συνδυάζει την ακρίβεια της τοπογραφικής αποτύπωσης και την πληρότητα και συνέχεια αποτύπωσης της φωτογραμμετρικής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

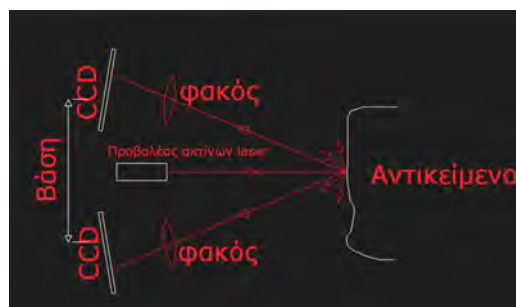
μπορεί να οδηγήσει με χρήση του πρώτου θεμελιώδους προβλήματος της Τοπογραφίας και των σχέσεων της Τριγωνομετρικής Υψομετρίας σε υπολογισμό των καρτεσιανών συντεταγμένων των σημείων στα οποία προσπίπτει η ακτίνα λέιζερ εφόσον είναι γνωστή η στάση (θέση του οργάνου) στο καρτεσιανό τρισσορθογώνιο σύστημα 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. **Τριγωνισμό.** 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 τρισδιάστατο 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.



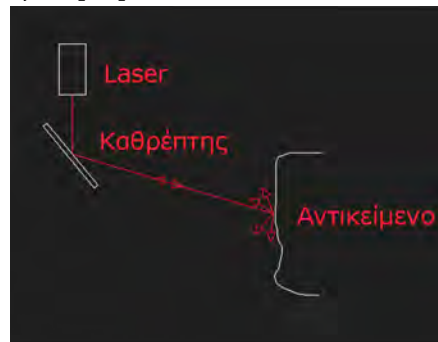
Εικόνα 4. Μέθοδος τριγωνισμού για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων στο 3D χώρο

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) [13].



Εικόνα 5. Μέθοδος τριγωνισμού για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων στο 3D χώρο με χρήση δύο οπτικών αισθητήρων

2. **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 [13].



Εικόνα 6. Αρχή λειτουργίας της Time of flight τεχνικής τρισδιάστατης ανίχνευσης

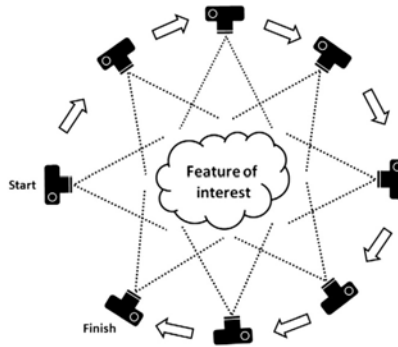
3. **Σύγκριση φάσης.** Αυτή η μέθοδος είναι επίσης ευρέως γνωστή από τα ταχυμετρικά όργανα. Σε αυτήν την περίπτωση, η εκπεμπόμενη ακτίνα διαμορφώνεται από ένα αρμονικό κύμα και η απόσταση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη διαφορά φάσης μεταξύ του κύματος αποστολής και λήψης. Από άποψη λειτουργικότητας, 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 [13].

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 απόστασης σε σχέση με μια γνωστή διεύθυνση: Οι συντεταγμένες  $X$ ,  $Y$  και  $Z$  ενός σημείου μπορούν να υπολογιστούν για κάθε καταγραμμένη απόσταση-διδύθυνση. 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.

### **Σχήμα από κίνηση - Structure from Motion (SFM)**

Η Δομή μέσω Κίνησης (SFM)[22] λειτουργεί υπό τις ίδιες βασικές αρχές που στηρίζεται η στερεοσκοπική φωτογραμμετρία, δηλαδή η 3D δομή ενός αντικειμένου ή μιας σκηνής προσεγγίζεται από μια σειρά από επικαλυπτόμενων εικόνων, Εικόνα 7. Η τεχνική αυτή, διαφέρει ριζικά από τη συμβατική φωτογραμμετρία, αφού η γεωμετρία της σκηνής, οι θέσεις της κάμερας, και ο προσανατολισμός της λύνονται αυτόματα, χωρίς τον εκ των προτέρων καθορισμό ενός δίκτυο στόχων με γνωστές θέσεις στον 3D χώρο. Αντίθετα, όλα τα παραπάνω επιλύονται ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας μία επαναληπτική διαδικασία ρύθμισης της δέσμης, η οποία βασίζεται σε μια βάση δεδομένων χαρακτηριστικών που εξάγονται αυτόματα από ένα σύνολο πολλαπλών και επικαλυπτόμενων εικόνων [20]. Όπως περιγράφεται παρακάτω, η προσέγγιση αυτή είναι καταλληλότερη για σύνολα εικόνων με υψηλό βαθμό επικάλυψης, καθώς η σύλληψη της τρισδιάστατη δομής της σκηνής υπολογίζεται από ένα ευρύ φάσμα των θέσεων, ή από εικόνες που προέρχονται από ένα κινούμενο αισθητήρα. Η τεχνική αυτή προήλθε από τον τομέα της μηχανικής όρασης τη δεκαετία του 1990, και οι αλγόριθμοι αυτόματης εξαγωγής και αντιστοίχισης χαρακτηριστικών αναπτύχθηκαν κυρίως την δεκαετία του '80 [15],[16],[17],[18]. Η διάδοση αυτής της προσέγγισης προέκυψε κυρίως μέσω του λογισμικού χειρισμού νέφους σημείων (Microsoft® Photosynth™,[19]). Το Photosynth χρησιμοποιεί SFM προσεγγίσεις και τεκμηριώνεται από τον Snavely[20] και τους Snavely et al. [14],[21]. Αυτά τα εργαλεία μπορούν να κάνουν άμεση χρήση εικόνων που παρήχθησαν από απλούς χρήστες ή προέκυψαν από crowd-source φωτογραφίες. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την δημιουργία της απαραίτητης κάλυψης ενός σκηνικού, και παράγονται αυτόματα αραιά 3D σύννεφα σημείων[activetectonics.com]. Οι δυνατότητες του SFM φαίνεται απεριόριστες, καθώς σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως στην ψηφιακή αποτύπωση κειμηλίων, μνημείων, έργων τέχνης και γενικότερα από τους φορείς διάσωσης και διατήρησης υλικού Πολιτιστικής κληρονομιάς.



Εικόνα 7 Structure From Motion (SFM). Αντίθετα με τη στερεοφωτογράφιση, εδώ χρειάζεται η πολλαπλή αλληλοκαλυπτόμενη φωτογράφιση του αντικειμένου

## Βασικές αρχές λειτουργίας

Σύμφωνα με όσα αναφέρει ο Cipolla [23] η ενότητα αυτή ξεκινάει με την αναθεώρηση του μοντέλου προβολής, και επεξηγείται πως μπορεί να προσδιοριστεί εργαστηριακά ένας πίνακας προβολής φωτογραφίζοντας προσχεδιασμένους στόχους. Έχοντας αναγνωρίσει τα κατάλληλα σημεία από δύο οπτικές γωνίες, είναι πλέον δυνατόν να υπολογιστεί η επιπολική γεωμετρία τους. Αυτή η σχέση εκφράζεται αλγεβρικά από μια θεμελιώδη μήτρα, μέσω της οποίας προκύπτει ένα ζευγάρι πινάκων προβολής. Στη συνέχεια συνδέονται τα 3D σημεία, τα οποία λαμβάνονται μέσω τριγωνοποίησης. Έπειτα περιγράφονται μέθοδοι για την απόκτηση παραμέτρων δομής και κίνησης για περισσότερες από δύο εικόνες. Τέλος, όπως στους περισσότερους αλγορίθμους Δομής μέσω Κίνησης, είναι η ρύθμιση της δέσμης, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάκτηση των τιμών μέγιστης πιθανότητας με μη γραμμική βελτιστοποίηση.

**Σημειογραφία** Για την ευκολότερη κατανόηση των παρακάτω σχέσεων χρησιμοποιούνται ομογενείς και Ευκλείδειες συντεταγμένες. Κατά τις ομογενείς συντεταγμένες, ένα σημείο στον  $N$ -διάστατο χώρο εκφράζεται από ένα διάνυσμα  $N+1$  στοιχείων, το οποίο ορίζεται ως κλίμακα, δηλαδή εάν πολλαπλασιαστεί με ένα μη μηδενικό συντελεστή κλίμακας, τότε το νόημα του δεν θα αλλάξει. Έστω ότι το  $N+1$  στοιχείο δεν είναι μηδενικό, μια ομογενής συντεταγμένη μπορεί να αναπαρασταθεί αντίστοιχα ως Ευκλείδεια συντεταγμένη διαιρώντας τα πρώτα  $N$  στοιχεία με το στοιχείο  $N+1$ . Σε αντίθετη περίπτωση η συντεταγμένη περιγράφει ένα σημείο στο άπειρο. Για παράδειγμα ένα διάνυσμα ομογενών συντεταγμένων  $\tilde{X} \sim [\tilde{X} \ \tilde{Y} \ \tilde{Z} \ \tilde{W}]^T$  με  $\tilde{W} \neq 0$ , εκφράζεται ως Ευκλείδεια συντεταγμένη όπως παρακάτω:  $X = \begin{bmatrix} x & y & z \\ w & w & w \end{bmatrix}^T$ .

## Pinhole camera

Το πιο κοινό μοντέλο κάμερας είναι η κάμερα οπής. Το μοντέλο αυτό είναι μια καλή προσέγγιση της λειτουργίας των περισσότερων φωτογραφικών μηχανών, αν και σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμο να συμπεριλαμβάνονται υπόψιν και τα μη γραμμικά φαινόμενα (ακτινική παραμόρφωση). Σύμφωνα με το μοντέλο προβολής της κάμερας οπής, η σχέση μεταξύ ενός σημείου 3D και ενός 2D εξαρτάται από τρεις συνιστώσες.

1. Το πρώτο στοιχείο είναι ο μετασχηματισμός της άκαμπτης παραμόρφωση του σώματος. Ο μετασχηματισμός αυτός γράφεται ως:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

όπου R είναι ένας 3x3 πίνακας περιστροφής που εκπροσωπεί την περιστροφή της κάμερας και T είναι ένα διάνυσμα που περιγράφει την μετάφραση της κάμερας.

2. Το δεύτερο στοιχείο είναι ο μετασχηματισμός από τις τρεις στις δύο διαστάσεις. Μέσω των όμοιων τριγώνων, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

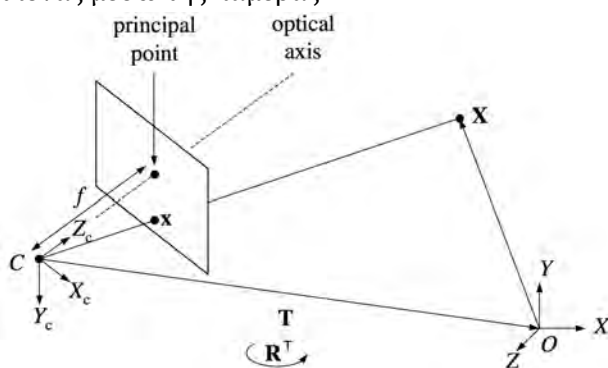
$$x = \frac{fX_c}{Z_c}, y = \frac{fY_c}{Z_c}$$

όπου το f είναι η εστιακή απόσταση.

3. Το τρίτο και τελευταίο στοιχείο είναι ο μετασχηματισμός που συσχετίζει τα σημεία από την εικόνα της κάμερας σε συντεταγμένες των pixel  $\tilde{u} \sim [u \ v \ 1]^T$ , το οποίο γράφεται ως:

$$\tilde{u} \sim K\tilde{x}, \text{ όπου } K = \begin{bmatrix} \alpha_u & s & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ με } \alpha_u, \alpha_v \text{ να είναι διανύσματα κλίμακας, } s \text{ είναι η}$$

στρέβλωση και το κύριο σημείο  $u_0 = [u_0 \ v_0]^T$ . Αυτοί είναι οι εγγενείς παράμετροι της κάμερας. Συνήθως, οι περιοχές των pixels θεωρούνται πως είναι τετράγωνα έτσι  $\alpha_u = \alpha_v = \alpha$  και  $s = 0$ . Ως εκ τούτου, το  $\alpha$  μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το εστιακό μήκος του φακού, το οποίο εκφράζεται σε μονάδες της διάστασης pixel. Το κύριο σημείο είναι εκεί που ο οπτικός άξονας τέμνει το πλάνο της εικόνας μέσω της κάμερας.



Εικόνα 8 Προβολή ενός σημείου X του τρισδιάστατου χώρου, μέσω κάμερας οπής

### Ακτινική παραμόρφωση

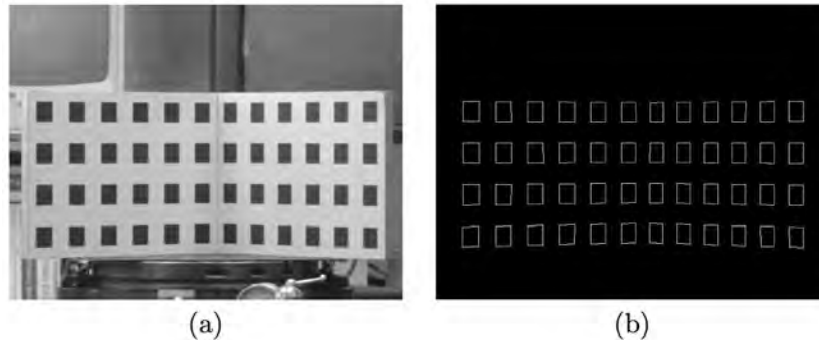
Ως παραμόρφωση του φακού ορίζονται τα σημεία της εικόνας που μετατοπίζονται από τη θέση που προέβλεψε ιδανικά το μοντέλο προβολής μέσω οπής. Υπό ακτινική παραμόρφωση, τα σημεία εικόνας μετατοπίζεται σε μία ακτινική διεύθυνση από το κέντρο της παραμόρφωσης. Σε κάποιες περιπτώσεις, η γραμμική προβολή μπορεί να βελτιωθεί εάν ληφθεί ο παράγοντας της ακτινικής παραμόρφωσης. Εάν υποθέσουμε πως το κέντρο της παραμόρφωσης είναι το ίδιο με το κύριο σημείο, τότε η παραμόρφωση διορθώνεται σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις [24],[25]:

$$\hat{x} = x + L(r)x, \quad \hat{y} = y + L(r)y$$

όπου  $[\hat{x} \hat{y}]^\top$  το διορθωμένο σημείο  $[x y]^\top$ ,  $r^2 = x^2 + y^2$ , και  $L(r) \approx k_1 r^2 + k_2 r^4$

## Ρύθμιση της κάμερας

Ως ενδογενείς και εξωγενείς παράμετροι σε σχέση με την κάμερα μπορούν να προσδιοριστούν ο συγκεκριμένος συνδυασμός μηχανής και φακού για την φωτογράφιση μιας ελεγχόμενης σκηνής. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να τοποθετηθεί η κάμερα σε θέση τέτοια ώστε να φανεί το αντικείμενο βαθμονόμησης όπως στην Εικόνα 9 και αυτόματα να εξαχθούν οι θέσεις της εικόνας των γνωστών 3D σημείων.



Εικόνα 9 Βαθμονόμηση κάμερας μέσω γνωστών σημείων (a), τα οποία εξαγονται αυτόματα (b)

Έστω  $[u_i v_i]^\top$  είναι η μετρούμενη θέση της εικόνας του 3D σημείου  $[X_i Y_i Z_i]$ . Από τις προηγούμενες εξισώσεις, κάθε νέα απόκριση δημιουργεί δύο νέες εξισώσεις, που τα στοιχεία του πίνακα προβολής P πρέπει να ικανοποιούν:

$$u_i = \frac{(p_{11}X_i + p_{12}Y_i + p_{13}Z_i + p_{14})}{(p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{33}Z_i + p_{34})}$$

$$v_i = \frac{(p_{21}X_i + p_{22}Y_i + p_{23}Z_i + p_{24})}{(p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{33}Z_i + p_{34})}$$

Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να επανατοποθετηθούν, έτσι ώστε να προκύψουν δύο γραμμικές εξισώσεις 12 αγνώστων στοιχείων του πίνακα P. Για την ρύθμιση n στοιχείων χρειάζονται 2n εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_1 & -u_1 Y_1 & -u_1 Z_1 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -u_1 X_1 & -u_1 Y_1 & -u_1 Z_1 & -u_1 \\ & & & & & & & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & & & & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_n & -u_n Y_n & -u_n Z_n & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -u_n X_n & -u_n Y_n & -u_n Z_n & -u_n \end{bmatrix}$$

## Το πρόβλημα της αντιστοίχισης

Η γεωμετρική θεωρία της δομής από την κίνηση υποθέτει ότι το ένα είναι σε θέση να λύσει το πρόβλημα της αντιστοίχισης, δηλαδή να προσδιορίσει τα σημεία σε δύο ή περισσότερες οπτικές γωνίες τις προβολές του ίδιου σημείου στο χώρο. Μια λύση είναι να προσδιοριστούν διαδραστικά τα αντίστοιχα σημεία σε κάθε άποψη. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι οι επιφάνειες μπορεί να οριστούν ταυτόχρονα με αντιστοιχίες, π.χ. έχοντας ο χρήστης εντοπίσει γεωμετρικά μοτίβα, όπως ορθογώνια

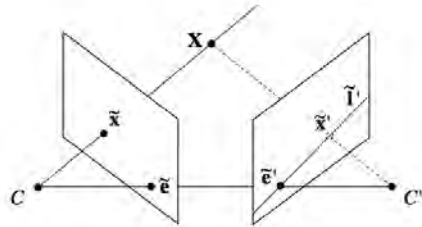
παραλληλεπίπεδα και πρίσματα [26]. Το μειονέκτημα είναι ότι η διαδραστική προσέγγιση είναι χρονοβόρα. Επίσης, η ακρίβεια της προκύπτουσας ανασυγκρότησης θα εξαρτηθεί πρωτίστως από το πόσο προσεκτικά ο χρήστης τοποθετεί τα σημεία της εικόνας. Χρόνια έρευνας [27],[28],[29],[30],[31],[32],[33] έδειξαν ότι, σε γενικές γραμμές, το πρόβλημα της αντιστοίχισης είναι δύσκολο να λυθεί αυτόματα. Αυτόματοι αλγόριθμοι λειτουργούν υπολογίζοντας κάποιο μέτρο συμφωνίας μεταξύ των pixels της εικόνας. Συνήθως, είναι αδύνατο να συγκρίνουν κάθε εικονοστοιχείο μιας εικόνας με κάθε εικονοστοιχείο της επόμενης λόγω της συνδυαστικής πολυπλοκότητας. Σε κάθε περίπτωση, δεν είναι όλα τα σημεία εξίσου κατάλληλα για να ταιριάζουν. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται τοπικά χαρακτηριστικά της εικόνας. Η αντιστοίχιση χαρακτηριστικών λειτουργεί με την ανίχνευση σημείων ενδιαφέροντος στις εικόνες, π.χ. σημεία γωνιών Harris [34] βρίσκονται στα μέγιστα της τοπικής συνάρτησης αυτοσυσχέτισης της εικόνας. Οι τοπικές γειτονιές των εν λόγω σημείων περιέχουν πολλές αυξομειώσεις στην ένταση και ως εκ τούτου είναι συγκριτικά πιο εύκολο να διαφοροποιηθούν. Αφού εντοπιστούν τα σημεία ενδιαφέροντος, η εμφάνιση της εικόνας στην τοπική περιοχή τους χαρακτηρίζεται από ένα κατάλληλο περιγραφέα. Τα χαρακτηριστικά με τις περισσότερες παρόμοιες περιγραφές θεωρείται ότι είναι πιο πιθανό να ταιριάζουν. Οι τεχνικές αντιστοίχισης χαρακτηριστικών μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: στενής και ευρείας βάσης.

Στενή βάση αντιστοίχισης. Υπό την προϋπόθεση ότι η αλλαγή της θέσης της κάμερας και του προσανατολισμού της είναι μικρή, η τοπική περιοχή των σημείων ενδιαφέροντος θα μοιάζουν. Ως εκ τούτου, τα χαρακτηριστικά της εικόνας μπορεί να χαρακτηρίζονται απλά με ένα σύνολο τιμών έντασης των pixel του δείγματος από ένα ορθογώνιο παράθυρο με κέντρο το σημείο ενδιαφέροντος. Οι τιμές έντασης των pixel σε σύγκριση με την ομαλοποιημένη συσχέτιση ή το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών [35]. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο υπολογισμός του βάθους, ο οποίος είναι ευαίσθητος στον θόρυβο. Ωστόσο, με την παρακολούθηση των αντιστοιχιών στις ακολουθίες των βίντεο, είναι δυνατόν να ανακτηθεί η δομή και η κίνηση των παραμέτρων με ακρίβεια.

Ευρεία βάση αντιστοίχισης. Η προηγούμενη μέθοδος είναι αποδοτική για τις οπτικές γωνίες που λαμβάνονται με μικρές αποστάσεις. Αντίθετα, εάν οι οπτικές γωνίες έχουν μεγάλη απόσταση, τια τις εικόνες που λαμβάνονται από τις απόψεις σε πιο γενική διαμόρφωση. Όταν η αρχική τιμή είναι μεγάλη, οι επιφάνειες στις δύο εικόνες μπορούν να παρουσιάζουν ουσιαστική μεταβολή της κλίμακας, διαφορετικούς βαθμούς της βράχυνσης, διαφορετικά πρότυπα απόφραξης, καθώς και μεγάλες διαφορές στις θέσεις τους. Όλοι αυτοί οι παράγοντες καθιστούν πολύ πιο δύσκολο να προσδιοριστούν οι σωστές αντιστοιχίες αυτόματα. Για παράδειγμα, οι Schmid et al. [36] χρησιμοποιούν για την περιγραφή της εικόνας χαρακτηριστικά τα οποία είναι αμετάβλητα στην περιστροφή. Οι Dufournaud et al. [37] χρησιμοποιούν ένα πλαίσιο πολλαπλών διαστάσεων για να αντιστοιχίσουν εικόνες, οι οποίες έχουν διαφορετική κλίμακα. Επίσης, ο Lowe [38] επιτυγχάνει τη σταθερότητα της κλίμακας ανιχνεύοντας χαρακτηριστικά σε τοπικά μέγιστα στην κλίμακα της εικόνας [39],[40].

## Γεωμετρία δύο όψεων: ουσιώδης πίνακας

Δεδομένης της προβολής ενός 3D σημείου σε μία εικόνα, η προβολή του σε μια δεύτερη εικόνα περιορίζεται στο αντίστοιχο της επιπολικής γραμμής. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 10. Η επιπολική γραμμή  $l$  μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η προβολή της ακτίνας που πηγαίνει από το οπτικό κέντρο  $C$  μέσω της εικόνας το σημείο  $x$  στο πρώτο επίπεδο της εικόνας. Αυτό είναι ισοδύναμο με το την τέμνουσα του επιπέδου που παράγεται από το οπτικά κέντρα  $C, C'$  και του σημείου της εικόνας  $x$  (επιπολικό επίπεδο) με το δεύτερο επίπεδο εικόνας. Όλες οι επιπολικές γραμμές σε μια εικόνα έχουν ένα κοινό σημείο: την προβολή του δεύτερου οπτικού κέντρου. Αυτό το σημείο ονομάζεται *epipole* και συμβολίζεται ως  $E$  και  $E'$ , αντίστοιχα για την πρώτη και δεύτερη κάμερα στην Εικόνα 10. Ο επιπολικός περιορισμός μπορεί να μορφοποιηθεί αλγεβρικά χρησιμοποιώντας την ουσιώδη μήτρα  $E$ , η οποία αναφέρεται στα αντίστοιχα σημεία της εικόνας σε δύο προβολές[41].



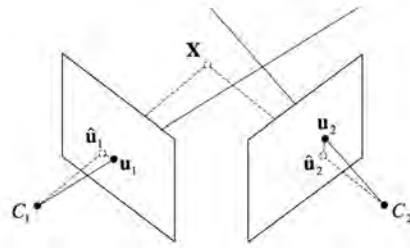
Εικόνα 10 Επιπολική γεωμετρία για δύο κάμερες

## Τριγωνισμός

Με δεδομένες τις μήτρες προβολής, τα 3D σημεία μπορεί να υπολογιστούν από τις μετρημένες θέσεις της εικόνας σε δύο ή περισσότερες προβολές. Αυτό είναι τριγωνισμός [42]. Στην ιδανική περίπτωση, τα 3D σημεία πρέπει να βρίσκονται στο σημείο τομής των προβλεπόμενων ακτίνων. Ωστόσο, λόγω του θορύβου της μέτρησης, οι προβλεπόμενες ακτίνες στη γενική περίπτωση δεν τέμνονται. Έτσι τα 3D σημεία πρέπει να επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το μέτρο σφάλματος. Το «χρυσό πρότυπο» αλγόριθμου της ανακατασκευής ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων μεταξύ της μετρούμενης και προβλεπόμενης θέσης στην εικόνα του 3D σημείου σε όλες τις προβολές στις οποίες είναι ορατό, δηλαδή

$$X = \arg \min_x \sum_i \|u_i - \hat{u}_i(P_i, X)\|^2$$

όπου  $u_i$  και  $u_i(P_i, X)$  είναι οι μετρούμενες και προβλεπόμενες θέσεις εικόνων στην προβολή  $i$  (Εικόνα 11). Με βάση την παραδοχή ότι η εικόνα συντεταγμένων της μέτρησης παρουσιάζει θορύβο κατανομής Gauss, η προσέγγιση αυτή δίνει ως λύση τη μέγιστη πιθανότητα για το  $X$ . Οι Hartley και Sturm [42] περιγράφουν μια μη επαναληπτική λύση για δύο οπτικές γωνίες. Για περισσότερες από δύο οπτικές γωνίες, η ελαχιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί επαναληπτικά με μη γραμμική βελτιστοποίηση. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή απαιτεί μια αρκετά καλή αρχικοποίηση, αλλιώς θα μπορούσε να αποτύχει με την εύρεση ενός τοπικού ελάχιστου.



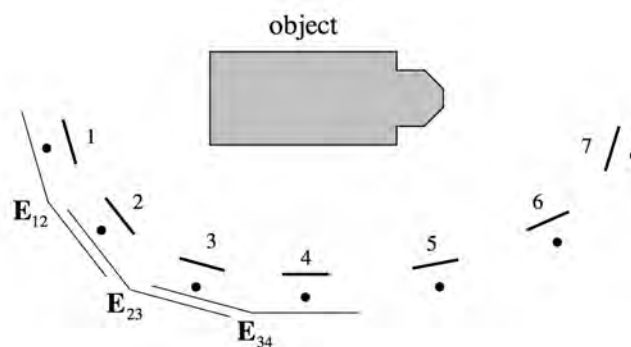
Εικόνα 11 Αναπαράσταση τριγωνισμού ενός σημείου στον χώρο

### Δομή από κίνηση μέσω πολλαπλών οπτικών γωνιών

Έχουμε δει ότι η βασική ή η θεμελιώδης μήτρα συμπυκνώνουν το γεωμετρικό περιορισμό που αφορούν τα ζεύγη των οπτικών γωνιών. Παρόλλα αυτά υπάρχει και η περίπτωση της επίλυσης του προβλήματος της ανάκτησης της δομής και κίνησης για έναν αυθαίρετο αριθμό οπτικών γωνιών. Το τελικό στάδιο είναι συνήθως η δέσμη προσαρμογής, η οποία χρησιμοποιείται επαναληπτικά για να βελτιωθεί η δομή και οι παραμέτροι κίνησης από την ελαχιστοποίηση μιας κατάλληλης συνάρτησης κόστους. Ωστόσο, η δέσμη προσαρμογής εξαρτάται σημαντικά από την κατάλληλη αρχικοποίηση, αλλιώς ο αλγόριθμος μπορεί να αποτύχει συγκλίνοντας σε ένα τοπικό ελάχιστο. Οι παρακάτω ενότητες περιγράφονται οι αλγόριθμοι για τη διαδοχική και τη παραγοντική δομής μέσω κίνησης από  $m$ -οπτικές γωνίες.

### Διαδοχικές μέθοδοι

Οι διαδοχικοί αλγόριθμοι είναι οι πιο δημοφιλείς. Λειτουργούν με την ενσωμάτωση διαδοχικών οπτικών γωνιών ανά επανάληψη (Εικόνα 12). Όπως έχει καταχωρηθεί κάθε οπτική γωνία, μια μερική ανακατασκευή επεκτείνεται υπολογίζοντας τις θέσεις όλων των 3D σημείων που είναι ορατά σε δύο ή περισσότερες προβολές με τη χρήση τριγωνισμού. Μία κατάλληλη αρχικοποίηση τυπικά λαμβάνεται με την αποσύνθεση της θεμελιώδους μήτρας που αφορούν τις δύο πρώτες οπτικές γωνίες της αλληλουχίας.



Εικόνα 12 Ακολουθιακή καταχώρηση εικόνων

Υπάρχουν διάφορες στρατηγικές για την εγγραφή διαδοχικών προβολών:

- Επιπολικό περιορισμοί. Μια πιθανότητα είναι να χρησιμοποιηθούν οι δύο οπτικές γωνίες επιπολικής γεωμετρίας που συσχετίζονται με τις προκάτοχούς τους. Για παράδειγμα, όταν είναι γνωστοί οι εγγενείς παράμετροι της κάμερας, οι βασικές μήτρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Οι βασικές μήτρες

υπολογίζεται γραμμικά χρησιμοποιώντας 8 ή περισσότερες αντιστοιχίες σημείων και αποσυντίθεται για να δώσει τον σχετικό προσανατολισμό της κάμερας και την κατεύθυνση της μετάφρασης της κάμερας. Το μέγεθος της μετάφρασης μπορεί να καθορίζεται με βάση την εικόνα στη νέα οπτική γωνία ενός και μοναδικού γνωστού σημείου 3D, δηλαδή ένα σημείο που έχει ήδη ανακατασκευαστεί από την εικόνα του σε προηγούμενες προβολές.

- Εκτομή. Μια εναλλακτική λύση είναι να καθοριστεί η στάση των επιπρόσθετων προβολών, χρησιμοποιώντας τα ήδη ανακατασκευασμένα 3D σημεία [43],[44],[45],[46]. Όπως έχουμε δει, 6 ή περισσότερες 3D σε 2D αντιστοιχίες επιτρέπουν γραμμική λύση για τα 12 στοιχεία ενός πίνακα προβολής.
- Συγχώνευση μερικής ανακατασκευής. Μία άλλη εναλλακτική λύση είναι να συγχωνευτούν μερικές ανακατασκευές με την χρήση αντιστοιχιών 3D σημείων [47],[48]. Συνήθως, δύο ή τρεις οπτικές γωνίες αποκτώνται με τη χρήση γειτονικών ζευγών, τότε συγχωνεύονται με την χρήση αντίστοιχων 3D σημείων. Μεγαλύτερες ανακατασκευές είναι πλέον δυνατόν να δημιουργηθούν ιεραρχικά από τη σταδιακή συγχώνευση υπακολουθιών.

## Παραγοντικές μέθοδοι

Σε αντίθεση με τις διαδοχικές μεθόδους, οι ομαδικές μέθοδοι λειτουργούν με τον υπολογισμό της στάσης της κάμερας, και της γεωμετρίας της σκηνής, κάνοντας όλες τις μετρήσεις ταυτόχρονα. Ένα πλεονέκτημα είναι πως η κατανομή σφάλματος κατά την ανακατασκευή μεταφέρεται σε όλες τις μετρήσεις, έτσι μπορεί να αποφευχθούν λάθη που σχετίζονται με το κλείσιμο μιας ακολουθίας. Μία οικογένεια από αλγόριθμους ομαδικής επεξεργασίας ονομάζονται μέθοδοι παραγοντοποίησης [50]. Δυστυχώς, καμία από αυτές τις μεθόδους δεν είναι γενικών εφαρμόσιμες σε σκηνές του πραγματικού κόσμου επειδή οι φακοί της κάμερας είναι αρκετά ευρυγώνιοι για να πραγματοποιηθεί γραμμική προσέγγιση. Πιο πρόσφατα, ερευνητές έχουν περιγράψει παρόμοιους αλγόριθμους για κάμερες προοπτικής [49]. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι είναι επαναληπτικές και δεν υπάρχει εγγύηση ότι θα συγκλίνουν προς την βέλτιστη λύση. Και πάλι, ένας περιορισμός όλων αυτών των αλγορίθμων, είναι ότι υπάρχει δεδομένη εκφυλισμένη διαμόρφωση δομή και κίνηση στην οποία θα αποτύχουν. Ένας άλλος λόγος είναι ότι δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα των δεδομένων που λείπουν, δηλαδή κάθε 3D σημείο πρέπει να είναι ορατό σε κάθε άποψη. Ως εκ τούτου, δεν ισχύουν για αραία προβλήματα μοντελοποίησης (εκτός ίσως ως μέσο αρχειοποίησης ακολουθιακών αλγορίθμων, όπως στο [49]).

## Ρύθμιση δέσμης

Η προσαρμογή δέσμης είναι το πρόβλημα της βελτίωσης της οπτικής ανακατασκευής για την παραγωγή 3D δομής και των παραμέτρων κίνησης. Η βελτίωση αποσκοπεί στις εκτιμήσεις των παραμέτρων που βρέθηκαν ελαχιστοποιώντας κάποια συνάρτηση κόστους που ποσοτικοποιεί το μοντέλο τοποθέτησης σφάλματος, και παράλληλα εξασφαλίζει ότι η λύση είναι ταυτόχρονα βέλτιστη τόσο ως προς τη δομή όσο και προς τις παραλλαγές της κάμερας. Το όνομα παραπέμπει στις «δέσμες» των ακτίνων φωτός που αφήνει κάθε 3D χαρακτηριστικό να συγκλίνει στο κέντρο της κάμερας, η οποία είναι προσαρμοσμένη βέλτιστα όσον αφορά τη λειτουργία και τις θέσεις της. Ισοδύναμα η δομή και το σύνολο των παραμέτρων της κάμερας ρυθμίζονται από κοινού «σε ένα

πακέτο». Το πρόβλημα αυτό πρόκειται για τον υπολογισμό μιας γεωμετρικής παραμέτρου, με επιμέρους παραμέτρους τον συνδυασμό των 3D συντεταγμένων των χαρακτηριστικών, η στάση της κάμερα και οι ρυθμίσεις της. Οι υπολογισμοί της προσαρμογής είναι ένα σημαντικό θέμα σε όλες τις επιστήμες των μετρήσεων, και αφού η βασική θεωρία και οι μέθοδοι προσαρμογής γίνουν κατανοητοί, είναι εύκολο να εφαρμοστούν σε μια ευρεία ποικιλία των προβλημάτων. Η προσαρμογή είναι σε μεγάλο βαθμό θέμα της επιλογής ενός αριθμητικού συστήματος βελτιστοποίησης που εκμεταλλεύεται τη δομή του προβλήματος. Η ρύθμιση της δέσμης και παρόμοιοι υπολογισμοί προσαρμογής διαμορφώνονται ως μη γραμμικά προβλήματα ελαχίστων τετραγώνων. Η συνάρτηση κόστους υποτίθεται ότι είναι τετραγωνική ως προς τα σφάλματα των χαρακτηριστικών επαναπροβολής. Αν και το μοντέλο αυτό είναι ήδη πολύ ευέλικτο, δεν περιγράφει την γενική περίπτωση. Συχνά τα σύγχρονα συστήματα χρησιμοποιούν μη τετραγωνικές εκτιμήσεις για τον χειρισμό των περιγραμμάτων[51].

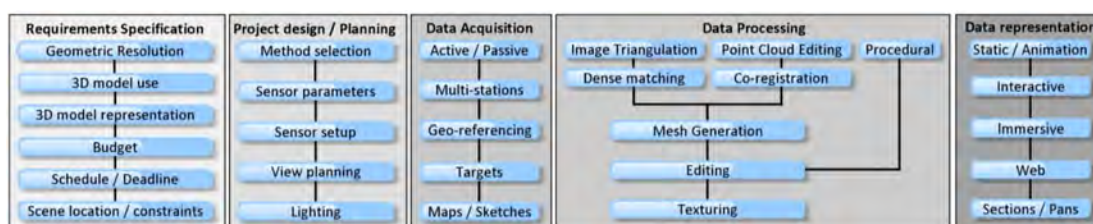
## Ροή εργασιών

Πολλοί άνθρωποι συχνά εκτελούν 3D ψηφιοποίηση με αποτελέσματα κατώτερα από εκείνα που αρχικά αναμένονταν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι χωρίς την ορθή τεχνική συλλογής 3D δεδομένων, χωρίς την κατανόηση της συμπεριφοράς, των δυνατοτήτων, της ακρίβειας και της ποιότητας των δεδομένων που είναι εφικτή υπό ορισμένες προϋποθέσεις. Έτσι, πρέπει να ακολουθηθεί ένας συγκεκριμένος τρόπος για να αποφασιστεί ποια τεχνική ταιριάζει καλύτερα σε μια συγκεκριμένη κατάσταση. Σωστή μεθοδολογία για την πρόβλεψη και τη μέτρηση της ποιότητας της παραγωγής θα πρέπει επίσης να σχεδιάζονται και να εφαρμόζονται. Όπως ακριβώς και σε κάθε άλλο πρότζεκτ, το οποίο προσφέρει κάποιο τελικό προϊόν η ροή εργασιών της 3D ψηφιοποίησης αποτελείται από φάσεις όπως για παράδειγμα ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η παράδοση. Κατά τη διάρκεια του τελευταίου, ο πελάτης αξιολογεί κατά πόσον το προϊόν πληροί τις προδιαγραφές των απαιτήσεων και τον σκοπό της χρήσης. Φυσικά, είναι απαραίτητη προϋπόθεση ότι η οικονομική πτυχή του έργου έχει νόημα τόσο για τον εργολάβο και υπεργολάβο. Έτσι, ο κύριος στόχος είναι να παράγει μια εμπεριστατωμένο σχέδιο ψηφιοποίησης και υλοποίησης, που θα λαμβάνει υπόψιν όχι μόνο τις προδιαγραφές του επιθυμητού παραδοτέου (π.χ. μοντέλο 3D), αλλά και την ελαχιστοποίηση του κόστους και την διάρκεια εκτέλεσης. Τόσο ο σχεδιασμός και ο προγραμματισμός της υλοποίησης απαιτούν όχι μόνο την εμπειρογνώμοσύνη σε διάφορους κλάδους, αλλά και την κατανόηση της εφαρμογής και του περιβάλλοντός της. Ωστόσο, αυτό δεν είναι εύκολο έργο, όταν πρόκειται για 3D ψηφιοποίηση Πολιτιστικής Κληρονομιάς, δεδομένου οι πτυχές της τεχνολογίας που χρησιμοποιούνται είναι ακόμη σε ερευνητικά εργαστήρια και δεν έχουν ωριμάσει επαρκώς ή δεν προσφέρονται στο εμπόριο. Σύμφωνα με μια μελέτη [53], η οποία συνοψίζει τη διαδικασία σχεδιασμού ψηφιοποίησης και της επιλογής των κατάλληλων μεθόδων, δηλαδή ένα σχέδιο που αποσκοπεί στη δημιουργία 3D στοιχείων, αρχής γενομένης από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με ενεργητικούς ή παθητικούς αισθητήρες, μοντελοποίηση μέσω απόστασης, ή μοντελοποίηση μέσω εικόνων (IBM), αντίστοιχα [54]-[57]. Ο κατάλληλος οδηγός πρέπει να περιγράφει εργασίες όπως η επιλογή των κατάλληλων τεχνικών, οι διαμορφώσεις τους, οι σχετικές μεταβλητές σχεδιασμού και ποιες είναι οι μέθοδοι επεξεργασίας, προκειμένου να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις

του έργου. Η Εικόνα 13 απεικονίζει μία γενικευμένη εκδοχή των φάσεων που απαντώνται σε ένα 3D πρόγραμμα ψηφιοποίησης. Ειδικότερα, οι δράσεις που πρέπει να προγραμματιστούν, να σχεδιάζοστούν και να υλοποιηθούν προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ενός έργου, είναι :

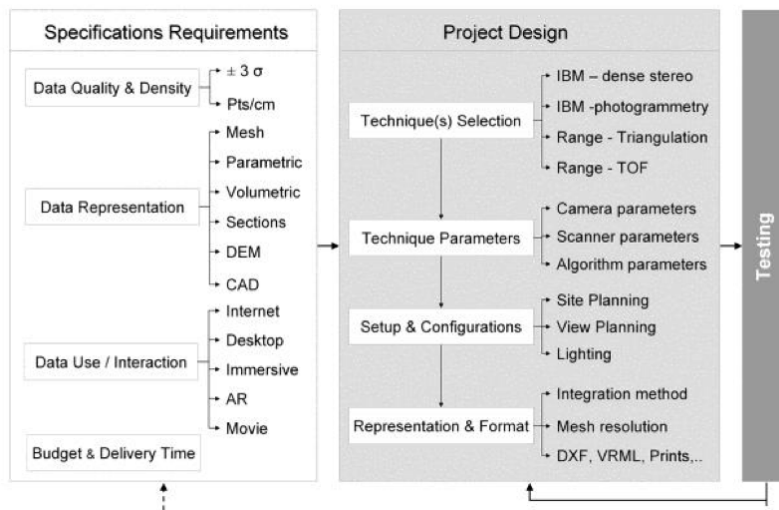
1. Επισκόπηση του πεδίου καταγραφής και ο σχεδιασμός της πορείας κάλυψης του χώρου ή την εξέταση αντικειμένου.
2. Επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας και παραμέτρων, ή συνδυασμός πολλαπλών τεχνολογιών.
3. Προσδιορισμός των θέσεων συλλογής των δεδομένων, και σχεδιασμός της διαμόρφωσης.
4. Ροή διεργασιών για την απόκτηση δεδομένων με βάση τις βέλτιστες πρακτικές.
5. Επιλογή των εργαλείων επεξεργασίας δεδομένων, της μεθόδου αναπαράστασης του 3D μοντέλου, και τις κατάλληλες μορφές αρχείων.
6. Επιλογή εργαλείων λογισμικού που είναι σε θέση να χειριστούν όλη την επεξεργασία και οπτικοποίηση χρειάζεται.

Τα τρία πρώτα στοιχεία μπορούν να ομαδοποιηθούν κάτω από τη φάση σχεδιασμού του έργου. Σχεδιασμός (Εικόνα 14) είναι μια επαναληπτική διαδικασία που συχνά περιλαμβάνει συμβιβασμούς μεταξύ ανταγωνιστικών κριτηρίων απόδοσης. Καθώς η διαδικασία σχεδιασμού εξελίσσεται, οι αρχικοί στόχοι, οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί συχνά μεταβάλλονται προκειμένου να επιτευχθεί μια βιώσιμη λύση.



Εικόνα 13 Άποψη διαγράμματος ροής μίας εργασίας ψηφιοποίησης

Χωρίς να είναι γνωστό εκ των προτέρων το ακριβές αποτέλεσμα ενός αλγορίθμου ή μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας και τους πραγματικούς περιορισμούς του έργου, δεν μπορεί κανείς να εκτελέσει σωστά τη διαδικασία σχεδιασμού της ψηφιοποίησης. Η επαναληπτική μεταβολή της φάσης σχεδιασμού του έργου είναι στις περισσότερες περιπτώσεις αναπόφευκτη, καθώς μετά την εκτέλεση μιας προκαταρκτικής συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, ο σχεδιασμός πρέπει να ελεγχθεί ξανά. Μερικές φορές δεν είναι εφικτό να ληφθούν υπόψη όλες οι παράμετροι, ακόμη και με μια καλή λειτουργία πρόβλεψης. Έτσι, ακόμη και μετά όλα τα δεδομένα που συλλαμβάνονται και ενσωματώνονται, υπάρχει μια πιθανότητα ορισμένα τμήματα να πρέπει να ληφθούν ξανά χρησιμοποιώντας μια διαφορετική διαμόρφωση συλλογής δεδομένων. Τέλος, υπάρχει η πιθανότητα να χρειαστεί να επιστρέψει κανείς στις προδιαγραφές των απαιτήσεων και να κάνει κάποιες αλλαγές.

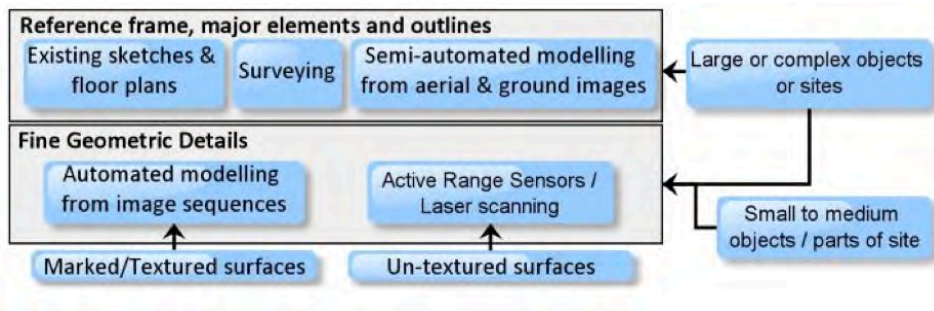


Εικόνα 14 Κύκλος ζωής του σχεδιασμού του έργου

## Επισκόπηση του χώρου

Μια διεξοδική περιήγηση αναγνώρισης του χώρου είναι ένα από τις πρώτες εργασίες που γίνονται. Κατά την επίσκεψη αυτή, σχεδιάζονται σκίτσα, να κρατούνται σημειώσεις, φωτογραφίες, βίντεο και εκτελούνται κάποιες αρχικές μετρήσεις. Τα δύο σκίτσα και οι σημειώσεις θα πρέπει επίσης να καλύπτουν τη γύρω περιοχή. Όλα αυτά συμβάλλουν στη δημιουργία μιας πολύτιμης πηγής πληροφοριών που μπορούν να επηρεάσουν τις αποφάσεις σχετικά με τον εξοπλισμό ψηφιοποίησης, την ρύθμιση των παραμέτρων και τη συλλογή των δεδομένων, καθώς συμβάλλουν και στην αντιμετώπιση θεμάτων ασφάλειας, όπως για παράδειγμα ετοιμόροπα κτήρια. Επίσης, καθορίζεται το μέγεθος του ανθρώπινου δυναμικού και τον εξοπλισμό που απαιτείται να στηθεί στον χώρο. Είναι σημαντικό κατά την σχεδίαση να δίνεται βάση στις οπτικές γωνίες, τη διάταξη του χώρου, και τα υλικά που αποτελούν την σκηνή και το έδαφος όπου βρίσκεται. Σε κάποιους χώρους επιβάλλουν αυστηρούς χρόνους πρόσβασης και περιορισμούς, οι οποίες αναπόφευκτα έχουν αντίκτυπο στην φάση της συλλογής των δεδομένων. Είναι επιτακτική ανάγκη να διασφαλιστεί ότι πηγές ενέργειας είναι επίσης προσιτές. Ορισμένες μέθοδοι ψηφιοποίησης απαιτούν την τοποθέτηση στοιχείων όπως στόχους ή κλίμακες, και ασφαλώς τοποθετούνται στις κατάλληλες θέσεις πριν από τη φάση της συλλογής των δεδομένων. Επιπλέον, η ομάδα ψηφιοποίησης πρέπει να εξασφαλίσει πρόσβαση σε μορφολογικά περίπλοκους τομείς, πολλές φορές χρησιμοποιώντας προσωρινές σκαλωσιές, γεραμούς ή μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV). Η χρήση κατόπτρων θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν για αντικείμενα και χώρους που έχουν επιφάνειες που φράσσονται ή δεν μπορούν να έχουν άμεση πρόσβαση από τον αισθητήρα[58]. Το υλικό της επιφάνειας, η αστάθεια, οι συνθήκες φωτισμού και άλλες ιδιότητες πρέπει να επιβλέπονται κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης. Σε περίπτωση ενός ενιαίου μικρού τεχνουργήματος, είναι σημαντικό να γίνει γνωστό αν μπορεί να μετακινηθεί σε ένα εργαστήριο ή θα πρέπει να ψηφιοποιηθεί στην τρέχουσα θέση του.

## Επιλογή της μεθόδου και του αισθητήρα



Εικόνα 15 Επιλογή της κατάλληλης τεχνικής, σύμφωνα με τις απαιτήσεις

Η επιλογή μιας ενιαίας ή μικτής τεχνολογίας για την συλλογή των δεδομένων είναι το επόμενο βήμα στη φάση σχεδιασμού του έργου. Η Εικόνα 15 παρέχει οδηγίες για τον προσδιορισμό της κατάλληλης τεχνικής. Η επιλογή μίας ακατάλληλης τεχνολογίας μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία του έργου. Αυτός είναι ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους η 3D ψηφιοποίηση δεν έχει ακόμη φτάσει στο μέγιστο των δυνατοτήτων της. Στην εργασία [59] αναφέρεται ως άτυπος κανόνας ότι η απόσταση μεταξύ σημείων στη σάρωση φάσματος πρέπει να ισούται με το 5% του χαρακτηριστικού μεγέθους. Έτσι, χαρακτηριστικό 10 χιλιοστών απαιτήσει τουλάχιστον 0,5 mm απόσταση σημείων, να είναι σαφώς ορατά και κατάλληλα ψηφιοποιημένα. Αυτό συνδέεται επίσης με την ακρίβεια του σαρωτή που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, θα πρέπει να αποφεύγεται ένας σαρωτής με 5 χιλιοστά ανοχή στις μετρήσεις, όταν η ανάλυση πρέπει να είναι κοντά στα 2 mm. Προφανώς, η αβεβαιότητα της μέτρησης του σαρωτή θα πρέπει να είναι μικρότερη από την απαιτούμενη ανάλυση τουλάχιστον κατά ένα παράγοντα. Το ίδιο ισχύει και για την απεικόνιση, όπου η GSD πρέπει να είναι τουλάχιστον 2-3 φορές μικρότερη από τη μικρότερη γεωμετρική λεπτομέρεια. Επίσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πως η καταγραφή μεγάλων αντικειμένων και χώρων σε υψηλές αναλύσεις θα έχει ως αποτέλεσμα μεγάλους χρόνους συλλογής δεδομένων και ένα μη διαχειρίσιμο ποσό των δεδομένων. Η επιλογή ανάμεσα σε μια παθητική έμμεση τεχνική 3D ψηφιοποίησης όπως η IBM ή μια ενεργητική άμεση τεχνική όπως η RBM, είναι μια σημαντική απόφαση που βασίζεται σε διάφορους παράγοντες:

1. Μέγεθος αντικειμένου και γεωμετρικά στοιχεία: για μικρά αντικείμενα, οι τεχνικές εύρους μπορούν να παρέχουν ακριβείς λεπτομέρειες με υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης. Τεχνικές που βασίζονται σε εικόνες μπορεί να αντιμετωπίζουν προβλήματα εστίασης, την έλλειψη υψής ή προβλήματα βάθους[60].
2. Κόστος: οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές που χρησιμοποιούνται στην Μοντελοποίηση μέσω Εικόνων έχουν χαμηλό κόστος ως καταναλωτικό προϊόν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα ευρύ φάσμα έργων ψηφιοποίησης (είτε για αντικείμενα είτε για σκηνές). Οι αισθητήρες ενεργούς περιοχής εξακολουθούν να θεωρούνται εξειδικευμένος εξοπλισμός και έτσι παραμένουν δαπανηρή επένδυση, ιδίως σε περιπτώσεις που περισσότεροι από ένας αισθητήρας διαφορετικών δυνατοτήτων απαιτούνται. Τα στοιχεία/εικόνες που

έχουν καταγραφεί με την μέθοδο IBM μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν όταν αναπτυχθούν καινούργιοι αλγόριθμοι.

3. **Φορητότητα:** οι περισσότεροι ενεργοί αισθητήρες, δεν είναι αποτελεσματικοί για μακρύ ταξίδι ή για απομακρυσμένες περιοχές σε σύγκριση με τις ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές. Αυτό μπορεί να είναι ένας παράγοντας απόφασης για ορισμένα έργα.
4. Ταχύτητα συλλογής δεδομένων: φωτογράφιση παραμένει πιο αποτελεσματική και γρήγορη από την ευρεία σάρωση. Οι αισθητήρες εύρους παρέχουν άμεσα τα 3D σημεία, ενώ οι τεχνικές IBM απαιτούν περαιτέρω επεξεργασίες, που μπορεί να επιμηκύνουν τις εργασίες επεξεργασίας.
5. Αιχμή της τεχνολογίας: οι μέθοδοι RBM και IBM είναι σε θέση να παράγουν φωτορεαλιστικά μοντέλα με υψηλή γεωμετρική ακρίβεια. Τα ζητήματα που παραμένουν άλυτα στην μέθοδο IBM είναι η αδυναμία να συλλάβουν λεπτομέρειες σχετικά χαμηλών χαρακτηριστικών ή επιφάνειες δίχως υφή, με αποτέλεσμα να παράγονται υψηλά επίπεδα θορύβου. Οι σαρωτές λέιζερ είναι σε θέση να χειριστούν ένα ευρύτερο φάσμα επιφανειών. Παρ' όλα αυτά, πολλά εμπορικά συστήματα έχουν προβλήματα με συγκεκριμένους τύπους επιφανειών (π.χ. ημιδιαφανείς επιφάνειες) ή κακό φωτισμό (συστήματα τριγωνισμού). Και οι δύο τεχνικές θα πρέπει να αντιμετωπίσουν τις αποφράξεις, τις κατοπτρικές επιφάνειες, τις ακμές. Ως εκ τούτου, και οι δύο απαιτούν ένα σημαντικό ποσό της μετα-επεξεργασίας, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα φωτορεαλιστικό αποτέλεσμα.
6. Διαθεσιμότητα εργαλείων: τόσο η IBM όσο και οι τεχνικές RBM έχουν ωριμάσει σε σημείο που ο απαραίτητος εξοπλισμός και το λογισμικό είναι διαθέσιμα ως open-source είτε ως εμπορικά προϊόντα.

Αρκετές πρόσφατες δημοσιεύσεις συγκρίνουν τις δύο τεχνολογίες που βασίζονται σε παράγοντες όπως η ακρίβεια και η ανάλυση [61]-[63]. Σύμφωνα με την εργασία δύο τεχνολογίες είναι σε θέση να παρέχουν παρόμοια ακρίβεια και ανάλυση, όταν υποστηρίζεται από ένα καλά σχεδιασμένο πρόγραμμα ψηφιοποίησης. Έτσι, πριν από την επιλογή μεταξύ των δύο, πρέπει να καθοριστούν οι παράμετροι σχεδιασμού για κάθε τεχνική, έτσι ώστε να ταιριάζουν με την απαιτούμενη ακρίβεια και ανάλυση. Θα πρέπει να υπολογίζονται οι έξι παράγοντες που περιγράφηκαν προηγουμένως, προκειμένου να καθοριστεί η πλέον κατάλληλη.

Το επόμενο βήμα είναι να επιλεγεί ψηφιακή φωτογραφική μηχανή ή το μοντέλο ενεργού αισθητήρα που ταιριάζει με τις απαιτήσεις του έργου. Ο αναγνώστης μπορεί να συμβουλευθεί αξιόπιστες και ενημερωμένες πηγές στο διαδίκτυο που διατηρούν πληροφορίες για τα μοντέλα και τα εργαλεία [π.χ. [www.dpreview.com](http://www.dpreview.com), [www.geo-matching.com](http://www.geo-matching.com), [www.ceti.gr/3d-icons/tools](http://www.ceti.gr/3d-icons/tools), [www.laserscanning-europe.com](http://www.laserscanning-europe.com)].

Όσον αφορά τις προδιαγραφές του υλικού ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής, τα σημαντικά μέρη είναι το μέγεθος του αισθητήρα (CCD/CMOS), η ποιότητα της εικόνας, η διαθεσιμότητα των αρχείων με μορφή RAW, η ποιότητα του φακού, το εστιακό μήκος μέτρησης, η απόδοση σε χαμηλό φωτισμό ή υψηλό ISO, και η διεπαφή όταν χρησιμοποιούνται σε UAVs.

## Τοποθέτηση του αισθητήρα

Το επόμενο βήμα είναι η ρύθμιση του επιλεγμένου αισθητήρα και η συλλογή των δεδομένων με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, ώστε να είναι επιτυχής η διεργασία της μετεπεξεργασίας. Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός της τοποθέτησης του αισθητήρα είναι ακόμη ένας ενεργός τομέας της έρευνας[64]. Κύριος στόχος είναι η εξασφάλιση των καλύτερων θέσεων τοποθέτησης, ώστε να καλύπτεται το αντικείμενο και ταυτόχρονα να αποκτάται η γεωμετρική πληροφορία. Η διαδικασία της τοποθέτησης του αισθητήρα στον χώρο μπορεί να προσεγγιστεί με δύο τρόπους:

1. Σχεδιασμός πολλών οπτικών γωνιών (MVP): σύμφωνα με τις εργασίες [65]-[67], απαιτείται η γνώση της δομής του σκηνικού εκ των προταίρων, ώστε να υπολογιστούν ταυτόχρονα όλες οι θέσεις βέλτιστης τοποθέτησης.
2. Τοποθέτηση βάσει επόμενου βήματος (NBV): σύμφωνα με τις εργασίες [68]-[70], η τοποθέτηση του αισθητήρα και ο προσανατολισμός του, καθορίζεται από τις προηγούμενες οπτικές γωνίες, χωρίς να χρειάζεται εκ των προταίρων γνώση της δομής του σκηνικού. Για μεγάλα και σύνθετα σκηνικά ή προσέγγιση αυτή ταιριάζει και εφαρμόζεται περισσότερο.α

Η εργασία [71], συστήνει ένα μέτρο αποδοτικότητας για την σύγκριση ανακατεσκευασμένων μοντέλων που ψηφιοποιήθηκαν βάσει της προσέγγισης NBV.

## Συλλογή δεδομένων

Διάφορες έρευνες έγιναν για την απόδοση βέλτιστων πρακτικών και οδηγιών για εφαρμογές ψηφιοποίησης στον τομέα της Πολιτιστικής Κληρονομιάς[72]-[75].

### Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή συλλογής δεδομένων

Πρόσφατα έργα κατέδειξαν τη δυνατότητα να αντλήσουν πυκνή 3D πληροφορία από εικόνες που προήλθαν από διαδικτυακές πηγές [77]-[79]. Η ακρίβεια και η κάλυψη του αντικειμένου δεν μπορούν να προβλεφθούν με αυτές τις προσεγγίσεις. Για να παραδοθούν αποτελέσματα και να ανταποκρίνονται στις ειδικές απαιτήσεις, κάποιος πρέπει να προγραμματίσει τη φάση της συλλογής εικόνων και να ακολουθήσει τις κατευθυντήριες γραμμές βέλτιστης πρακτικής. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται προσαρμοσμένες οι κανόνες 3x3 [80] και έχουν τροποποιηθεί σύμφωνα με τις τεχνολογικές εξελίξεις

Πίνακας 2 Τροποποιημένος 3x3 κανόνας για την τεκμηρίωση μέσω ψηφιακής κάμερας

GEOMETRIC	PHOTOGRAPHIC	ORGANISATIONAL
Acquire control / ground information	Keep a constant interior geometry of the camera	Make proper sketches
Multiple & convergent image coverage with adequate B/D ratio	Keep homogeneous illumination	Write proper protocols and keep metadata
Separate calibration & orientation	Select a stable combination of large format camera & lenses	Perform a final check

Χρησιμοποιώντας τον Πίνακα 2 ως αφετηρία, οι ακόλουθες κατευθυντήριες γραμμές ισχύουν για κάθε έργο IBM :

1. Βαθμονόμηση εκ των προταίρων της μηχανής και διατήρηση της βαθμονόμησης σε όλη την φάση της συλλογής δεδομένων. Παρόλο που οι τρέχοντες αλγόριθμοι επιτρέπουν να ρυθμιστούν ταυτόχρονα η κάμερα και ο προσανατολισμός είναι πάντα καλύτερο να διατηρούνται αυτές οι δύο διαδικασίες χωριστά προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια [81]. Ταυτόχρονα ο προσδιορισμός όλων των άγνωστων παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα [82]. Επιπλέον, είναι σημαντικό το λογισμικό βαθμονόμησης να χρησιμοποιεί το ίδιο μαθηματικό μοντέλο, όπως αυτό που χρησιμοποιείται για την προσαρμογή της δέσμης, ώστε να ταιριάζουν προκειμένου να αποφευχθούν τα λάθη μετατροπής.
2. Οι εικόνες δεν πρέπει να αλλάζουν γεωμετρικά (π.χ. μείωση άκρων, αλλαγή κλίμακας), ή να συμπιεστούν. Για λόγους υφής, ίσως να αξίζει να αποκτήσουν υψηλό δυναμικό εύρος (HDR).
3. Για ανακατασκευές μεγάλης κλίμακας, είναι καλό να χρησιμοποιείται μεγάλο βάθος πεδίου σε σχέση με τις οπτικές γωνίες, ώστε οι με σημαντική οι αλγόριθμοι να υπολογίζουν τη διακύμανση του βάθους. Αυτό επιτυγχάνεται με τον καθορισμό υψηλών f-τιμών (π.χ. f11-f14), χρησιμοποιώντας ένα τρίποδο λόγω της αργής ταχύτητας κλείστρου.
4. Παρά το γεγονός ότι τα επίπεδα θορύβου εξαρτώνται από την ποιότητα της κάμερας, είναι γενικά προτιμότερο να μην γίνεται χρήση υψηλών τιμών ISO, αν και οι περισσότερες επαγγελματικές φωτογραφικές μηχανές είναι σήμερα σε θέση να παράγουν σχεδόν χωρίς θόρυβο εικόνες σε υψηλές τιμές ISO (800). Ο στόχος είναι να επιτευχθεί ελάχιστο θόρυβο στη μέγιστη ευκρίνεια / εστίαση σε όλες τις επιφάνειες ενδιαφέροντος με κάθε δεδομένη κατάσταση φωτισμού.
5. Αν δεν υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με το πού να τοποθετηθεί η κάμερα σε σχέση με το αντικείμενο, μία μέση εστιακή απόσταση (ισοδύναμη με 50 mm σε πλήρες πλαίσιο φωτογραφικής μηχανής) είναι η πιο ευνοϊκή. Αυτό μειώνει την πιθανή στρέβλωση λόγω προοπτικής. Αυτοί οι φακοί παράγουν λιγότερο γεωμετρική παραμόρφωση και δημιουργούν σκιηνές κοντά σε αυτό που βλέπουν τα ανθρώπινα μάτια. Εάν είναι απαραίτητο, τότε να χρησιμοποιείται έναν ευρυγώνιο φακό ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη επικάλυψη μεταξύ των εικόνων.
6. Οι ρυθμίσεις χρωμάτων πρέπει να είναι ίδιες μεταξύ των διαδοχικών συνόδων απεικόνισης. Είναι μια καλή πρακτική να χρησιμοποιείται
  - ένα φωτόμετρο για τον έλεγχο φωτισμού του περιβάλλοντος,
  - ένα πρότυπο χρωματολόγιο για να ελέγξετε τη συνέπεια των χρωμάτων
  - μία πρότυπη γκρι κάρτα (18 % γκρι), η οποία τοποθετείται στη σκηνή για τη διόρθωση της ισορροπίας λευκού.Η χειροκίνητη ρύθμιση ισορροπίας λευκού είναι μια καλύτερη προσέγγιση, καθώς η αυτόματη ρύθμιση μπορεί να παρέχει λανθασμένες τιμές λόγω των διαφορετικών πηγών φωτός.
7. Οι εξωτερικές συλλογές δεδομένων θα πρέπει να γίνονται, κατά το δυνατόν, σε διάχυτο φωτισμό, για να παρέχουν ενιαία χρωματική ένταση. Η λήψη εικόνων

σε επίπεδο φωτισμό είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν άλλα αντικείμενα ή κτίρια είναι πολύ κοντά και μπορεί να δημιουργήσουν έντονες σκιές πάνω στο αντικείμενο ενδιαφέροντος. Από την άλλη πλευρά, η λήψη εικόνων σε εσωτερικό χώρο μπορεί να επηρεαστεί από κατοπτρικές ανακλάσεις και από τεχνητό φωτισμό. Για να αποφευχθούν αυτές οι παραμορφώσεις, χρησιμοποιούνται ειδικά φίλτρα πόλωσης φωτός.

8. Σχεδιασμός της εικόνας GSD σύμφωνα με τις ανάγκες του έργου και του αισθητήρα, λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι το μικρότερο στοιχείο εικόνας (pixel) δεν είναι συνήθως αρκετό για να ανακατασκευάσει πλήρως και σωστά τη λεπτομέρεια ενός αντικειμένου.
9. Στη περίπτωση της απουσίας των σημείων ελέγχου εδάφους (total station ή GNSS με ακρίβεια 3-4 φορές καλύτερη από ό, τι η εικόνα GSD), μια γραμμική κλίμακας γνωστού μήκους θα πρέπει να τοποθετείται σε ορισμένες εικόνες, για να προσδιοριστεί το μέγεθος. Εάν το μοντέλο απαιτεί γεωγραφική αναφορά, τουλάχιστον τρία σημεία που καταγράφηκαν πρέπει να χρησιμοποιούνται και να είναι σαφώς ορατά στις εικόνες. Η λειτουργία κλιμάκωσης πρέπει να πραγματοποιείται κατά το στάδιο της τριγωνοποίησης της εικόνας (προσαρμογή δέσμης) και όχι εκ των υστέρων, αλλιώς είναι δυνατόν να παραμορφωθεί η εικόνα ή το μοντέλο[82].

## Επεξεργασία δεδομένων

### A. Επεξεργασία δεδομένων εικόνας

Η βαθμονόμηση της κάμερας και ο προσανατολισμός της εικόνας είναι δύο θεμελιώδεις διαδικασίες που απαιτούνται για όλες τις αναπαραστάσεις με βάση την εικόνα. Και οι δύο βασίζονται στην προοπτική ή στις προβολικές μεθόδους [83] [84], ξεκινώντας από ένα σύνολο κοινών χαρακτηριστικών ορατά σε όσες εικόνες που ακολούθησαν μια διαδικασία προσαρμογής δέσμης [85], δηλαδή μια μη γραμμική διαδικασία βελτιστοποίησης που προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει η κατάλληλη συνάρτηση κόστους (Gauss-Markov, Gauss-Newton ή Levenberg-Marquardt). Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την ρύθμιση της δέσμης πρέπει να είναι ισχυρός, και να είναι σε θέση να χειριστεί πιθανές ακραίες τιμές, προκειμένου το αποτέλεσμα να είναι εγκυρο. Αφού ρυθμιστούν οι εσωτερικοί και εξωτερικοί παράμετροι της μηχανής, τα βήματα των διαδοχικών μετρήσεων της επιφάνειας και η εξαγωγή των χαρακτηριστικών γίνονται κυρίως με τη χρήση χειροκίνητων ή ημιαυτόματων προσεγγίσεων. Ωστόσο, οι τελευταίες εξελίξεις στην αυτοματοποιημένη παραγωγή πυκνού σύννεφου σημείων [86]-[90] κατέδειξαν υψηλή ευελιξία και αποτελέσματα υψηλής ποιότητας 3D δεδομένων πολύπλοκων σκηνών. Τέτοιες μέθοδοι έχουν οδηγήσει σε open-source και εμπορικές λύσεις, που μπορούν να προσφέρουν 3D σύννεφα σημείων παρόμοιας ποιότητας σε σχέση με τους ενεργούς αισθητήρες.

### B. Σειρά επεξεργασίας δεδομένων

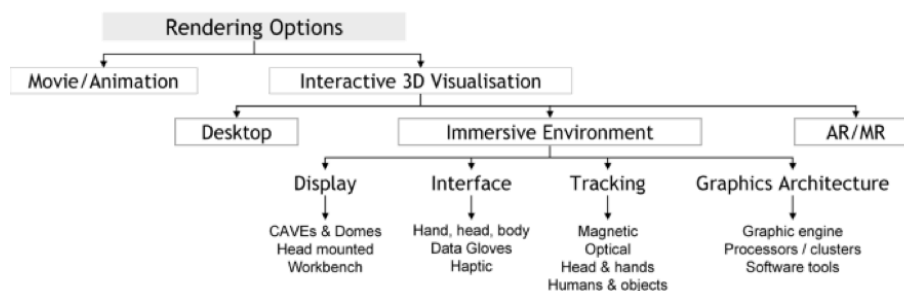
Για να δημιουργηθεί ένα πλήρες 3D μοντέλο, πρέπει να γίνουν αρκετές επιμέρους σαρώσεις. Μόλις αποκτηθεί μια μερική σάρωση (ένα σύννεφο σημείων) από μια συγκεκριμένη οπτική γωνία, ορίζεται ένα σύστημα συντεταγμένων σύμφωνα με το

πεδίο βάθους του αισθητήρα. Η προσέγγιση αυτή υποδηλώνει τη συλλογή 3D δεδομένων που αντιπροσωπεύουν την ίδια γεωμετρία σε διαφορετικά συστήματα αναφοράς, των οποίων ο προσανατολισμός είναι γενικά άγνωστος. Έτσι, είναι απαραίτητο να εναρμονίζονται όλες οι επιμέρους σαρώσεις σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων μέσω της ομοιότητας του μετασχηματισμού. Η μέθοδος μπορεί να επιτευχθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους [91] [92] :

1. με την χρήση μιας συμπληρωματικής συσκευής όπως CMM
2. με την χρήση στόχων αναφοράς
3. με την εφαρμογή επαναληπτικών κοντινών σημείων (ICP)[93], δηλαδή μια επαναληπτική διαδικασία για την ελαχιστοποίηση της μέσης απόστασης μεταξύ δύο συνόλων δεδομένων, ξεκινώντας από μια προσέγγιση ευθυγράμμισης, η οποία δεν είναι πολύ μακριά από τη βελτιστοποιημένη.

## Περαιτέρω επεξεργασία

Μόλις ληφθεί ένα σύννεφο σημείων, ένα πολυγωνικό μοντέλο παράγεται συνήθως με ad-hoc αλγορίθμους [95]. Αν και κάποια έρευνα συνεχίζεται για τη βελτίωση της απόδοσης αυτών των αλγορίθμων, η διαδικασία αυτή είναι ήδη διαθέσιμη σε διάφορα πακέτα λογισμικού 3D μοντελοποίησης και αποτελείται από διάφορα βήματα που μπορεί να ολοκληρωθούν σε μία διαφορετική σειρά [96]. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να σχεδιαστεί η δομή δεδομένων ή η αναπαράσταση (π.χ. με βάση το σημείο [97], πλέγματα [98], πολυαρμονικές ακτινικές συναρτήσεις(RBF) [98], κλπ.). Κάθε μία μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της και η ανάλυση τους θα πρέπει να θεωρηθεί ως μέρος των απαιτήσεων και των προδιαγραφών του έργου. Ένα μοντέλο με υφή (photo-realistic) είναι ίσως η πιο επιθυμητή μορφή 3D τεκμηρίωσης αντικειμένου, δεδομένου ότι αναπαριστά μια πλήρη γεωμετρική και διαδραστική απεικόνιση. Για την οπτικοποίηση και την αλληλεπίδραση ενός 3D ψηφιακού μοντέλου, διάφορες μέθοδοι είναι σήμερα διαθέσιμες (Εικόνα 16). Ένα φωτο-ρεαλιστικό 3D μοντέλο προσφέρει στον χρήστη την ελευθερία να το παρατηρήσει από διάφορες οπτικές γωνίες και με διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, σε αντίθεση με τα κινούμενα σχέδια ή τις ταινίες, όπου οι οπτικές γωνίες και οι συνθήκες φωτισμού είναι στατικές και προκαθορισμένες. Μια ταινία ή ένα animation προσφέρει επίσης τη δυνατότητα να κρύψει σημεία που λείπουν ή λιγότερο λεπτομερή μέρη του μοντέλου. Ορισμένες εφαρμογές, ιδίως για τις μεγάλες εκθέσεις, την αρχιτεκτονική ή τα μοντέλα πόλης μπορούν επίσης να απαιτήσουν 2D σχέδια, όπως διατομές, ή ορθοφωτογραφίες. Στις περιπτώσεις της ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων, συνήθως απαιτείται ένα στεγανό μοντέλο σε μορφή STL.



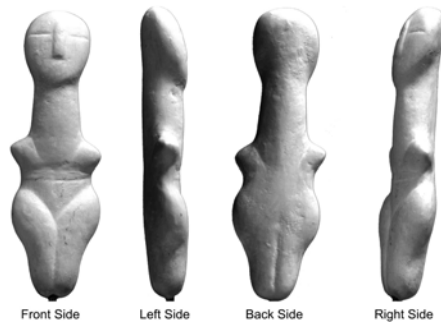
## Μοντελοποίηση με τη μέθοδο SFM

Η χρήση του 3D περιεχομένου που προέρχεται από τον τομέα της Πολιτιστικής Κληρονομιάς έχει αυξηθεί δραματικά την τελευταία δεκαετία. Προς το παρόν, μια σειρά από πρωτοβουλίες, με τη μορφή των έργων έρευνας και ανάπτυξης που επικεντρώνονται στη δημιουργία 3D τεκμηρίωσης. Η 3D μοντελοποίηση λειτουργεί ως μηχανισμός οικονομικά προσιτών πρακτικών και αποτελεσματικών λύσεων, και επιτρέπει τον εμπλουτισμό του περιεχομένου της πολιτιστικής κληρονομιάς με τον εμπλουτισμό ψηφιακών βιβλιοθηκών με 3D αντίγραφα [99]-[101]. Σήμερα, η 3D ψηφιοποίηση θεωρείται ως μια κοινή πρακτική στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς [102]. Οι περισσότερες από τις επί του παρόντος διαθέσιμες λύσεις hardware παράγουν αποτελέσματα υψηλής ποιότητας. Ωστόσο, εισάγουν την αύξηση του προϋπολογισμού του έργου, όχι μόνο λόγω του εξοπλισμού που χρησιμοποιεί, αλλά και εξαιτίας των διαδικασιών επεξεργασίας των δεδομένων που απαιτούν προχωρημένες γνώσεις σε τομείς, όπως η επίγεια τοπογράφηση και την επεξεργασία των δεδομένων 3D [102]. Για ένα έργο ψηφιοποίησης, χρειάζονται βασικές γνώσεις που αφορούν τη σχετική τεχνολογία και τον χειρισμό του εξοπλισμού, καθώς και πολλές εργατοώρες για την παραγωγή υψηλής ποιότητας 3D αντιγράφων.

Σύμφωνα με τις εργασίες [103] και [104] τα αποτελέσματα των φωτορεαλιστικών 3D μοντέλων που παράγονται από μεθόδους βασισμένες στην λήψη εικόνων (IBM), είναι ποιοτικά συγκρίσιμα με εκείνα που προέρχονται από τη ψηφιοποίηση με τη χρήση laser σαρωτών. Στα δύο επόμενα παραδείγματα απεικονίζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των ψηφιοποιήσεων ενός αντικειμένου και ενός μνημείου Πολιτιστικής Κληρονομιάς.

### Μελέτη περίπτωσης: Κυκλαδίτικο ειδώλιο γυναικείας μορφής

Για την αξιολόγηση του λογισμικού SFM-DMVR έχουμε επιλέξει ένα ακριβές αντίγραφο κυκλαδικού γυναικείου ειδωλίου, που παρήχθη από το Ελληνικό Ταμείο Αρχαιολογικών Πόρων. Τα Κυκλαδικά ειδώλια είναι συγκεκριμένα αντικείμενα όσον αφορά το στυλ και το σχήμα (Εικόνα 17). Αυτό που χρησιμοποιήθηκε έχει ύψος 16 εκατοστά και είναι αντίγραφο ενός αντικειμένου που παρήχθησε σε κάποιο σημείο μεταξύ 2800 και 2300 π.Χ. στο νησί της Σίφνου (Κυκλάδες). Τα γυναικεία ειδώλια έχουν ερμηνευθεί ως απεικονίσεις των νεκρών, υποκατάστατο παλλακίδων, υπηρέτες, πρόγονοι ή ακόμα και υποκατάστατα για ανθρωποθυσίες. Άλλοι μελετητές προσπαθούν να εξηγήσουν τους ως σύμβολα μιας μητέρας-θεάς, που συσχετίζεται με τη γονιμότητα και την αναγέννηση, αγωγοί των ψυχών ή ακόμα και προσκυνητές. Παρ'όλα αυτά, υπάρχει μια γενική συναίνεση ότι η γυμνότητα των ειδωλίων και η εμφατική απόδοση του μαστού και το ηβικό τρίγωνο αναφέρονται στη γονιμότητα. Αυτό ενισχύεται επίσης από ορισμένα παραδείγματα με φουσκωμένη κοιλιά που πιστεύεται ότι συμβολίζουν τον τοκετό.

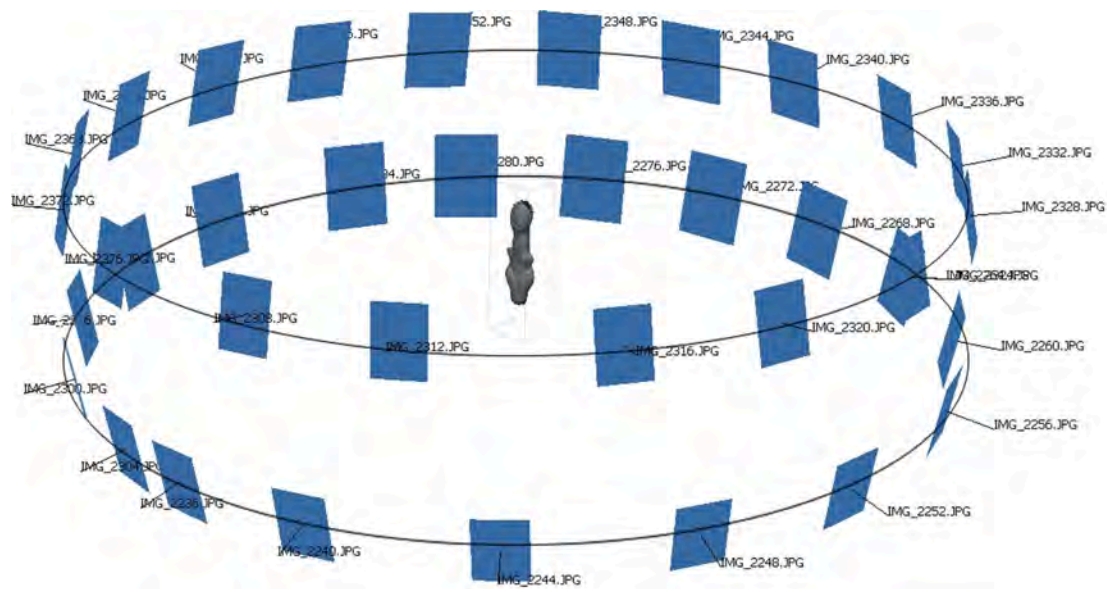


Εικόνα 17 Κυκλαδίτικο γυναικείο ειδώλιο

### Συλλογή δεδομένων

Η φάση της συλλογής των δεδομένων αποτελείται από δύο συνεδρίες. Η πρώτη συνεδρία αφορούσε την 3D ψηφιοποίηση του ειδωλίου με τη χρήση του Arius 3D Foundation 100 3D scanner με λέιζερ, ενώ η δεύτερη καλύπτει φωτογράφιση του αντικειμένου από πολλαπλές οπτικές γωνίες, χρησιμοποιώντας μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Canon PowerShot A630 8 Mp.

Η φωτογράφιση διεξήχθη χωρίς τη χρήση περιστρεφόμενου τραπεζιού. Με αυτό τον τρόπο αξιολογείται ένα σενάριο που μπορεί εύκολα να γίνει επί τόπου με τη χρήση μόνο εξοπλισμού χαμηλού κόστους (π.χ. μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και ένα τρίποδο). Συνολικά 142 εικόνες συλλέχθηκαν από διαφορετικές οπτικές γωνίες γύρω από δύο φανταστικούς τροχιές με κατακόρυφο προσανατολισμό. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την χωρική κατανομή των οπτικών γωνιών που έχουν χρησιμοποιηθεί για να συλληφθεί το τεχνούργημα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συνολικός αριθμός των οπτικών γωνιών που απεικονίζεται στο σχήμα μειώθηκε για σκοπούς παρουσίασης (Εικόνα 18).



Εικόνα 18 Εικονικές τροχιές λήψης εικόνων

## Αξιολόγηση μοντέλων

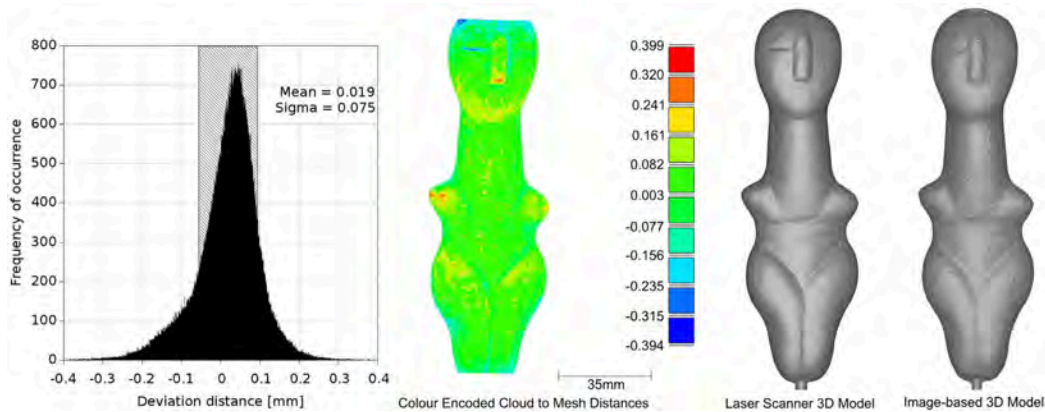
Η μέση απόσταση μεταξύ του αντικειμένου και της κάμερας ήταν 70 εκατοστά. Για τη διατήρηση όλης την επιφάνεια του μοντέλου, εφαρμόστηκαν υψηλές τιμές διαφράγματος. Δεν χρησιμοποιήθηκε πρόσθετο φως εκτός από το φωτισμό φθορισμού που προϋπήρχε στο εργαστήριο. Μόλις η φωτογράφιση ολοκληρώθηκε, το σύνολο των δεδομένων της εικόνας χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος στο λογισμικό SFM-DMVR. Είναι γεγονός ότι οι μέθοδοι SFM-DMVR έχουν ως προϋπόθεση ένα σύστημα υπολογιστή με μεγάλη ποσότητα μνήμης και επεξεργαστική ισχύ. Η βαθμονόμηση της κάμερας έγινε αποκλειστικά από το λογισμικό.

Η αξιολόγηση των δεδομένων που παράγονται με τη μέθοδο βάσει της εικόνας (SFM-DMVR) συγκρίθηκαν σε σχέση με τα δεδομένα που παρήχθησαν από το CMM-based 3D scanner με λέιζερ. Τα δεδομένα που παρήχθησαν από το σαρωτή λέιζερ θεωρήθηκαν ως το μέτρο αληθείας, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η απόκλιση της επιφάνειας των 3D μοντέλων. Η σύγκριση των δεδομένων που ακολουθήθηκε περιελάμβανε τη χρήση του λογισμικού ανοικτού κώδικα MeshLab [105] και του CloudCompare [106]. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 3) απεικονίζει τη μέση απόσταση και την τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ) μεταξύ του μοντέλου του σαρωτή λέιζερ.

Πίνακας 3 Τυπική απόκλιση επιφάνειας μεταξύ των μοντέλων

LOD	Triangulation method	Case 2 36 images	Case 3 71 images	Case 4 142 images	Metric
High detail	Sharp	0.023 0.092	0.033 0.076	0.042 0.076	Mean Distance Standard deviation ( $\sigma$ )
	Smooth	0.008 0.098	0.019 0.075	0.025 0.076	Mean distance Standard deviation ( $\sigma$ )
Ultra-high detail	Sharp	0.027 0.093	0.033 0.070	0.032 0.083	Mean distance Standard deviation ( $\sigma$ )
	Smooth	0.005 0.104	0.017 0.077	0.020 0.079	Mean distance Standard deviation ( $\sigma$ )

Το υψηλό επίπεδο ποιότητας απαιτεί λιγότερη επεξεργαστική ισχύ (μικρότερη χρονική 3D ανακατασκευή), σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της Ultra-High ανάλυσης για να παράγει παρόμοια αποτελέσματα ποιότητας. Η Εικόνα 19 απεικονίζει τη συχνότητα απόκλισης των αποστάσεων μεταξύ του σαρωτή 3D με λέιζερ και το 3D μοντέλο βάσει εικόνων (71 εικόνες, υψηλού LOD, τριγωνισμού).



**Εικόνα 19** Cloud to mesh απόκλιση απόσταση, κωδικοποιημένη με χρώμα η απόσταση μεταξύ των μοντέλων και τα συγκρινόμενα μοντέλα

### Μελέτη περίπτωσης: Κιουτουκλου Baba Bekctashic Tekke

Το μνημείο βρίσκεται στη μέση μιας καλλιεργήσιμης περιοχής στη δυτική ακτή της λίμνης Βιστωνίδας στην Ξάνθη, (Ελλάδα). Θεωρείται ως ένα από τα πιο σημαντικά οθωμανικά μνημεία στην περιοχή και υπολογίζεται πως έχει κατασκευαστεί στα τέλη του 15ου αιώνα. Πιθανότατα χτίστηκε πάνω στα ερείπια ενός ορθόδοξου χριστιανικού ναού που ήταν αφιερωμένος στον Αγίο Γεωργίο Καλαμιτζιώτη [107], ενώ για τους μουσουλμάνους θεωρείται ως ο τάφος των Περιστρεφόμενων Δερβίσιδων, που ονομάζεται Κιουτουκλου Baba. Σύμφωνα με τον Lowry [108] ο όρος τεκέ (τύπος συγκέντρωσης για τους Δερβίσηδες) είναι εσφαλμένη, δεδομένου ότι το μνημείο είναι ένας τάφος.

#### Η συλλογή των δεδομένων

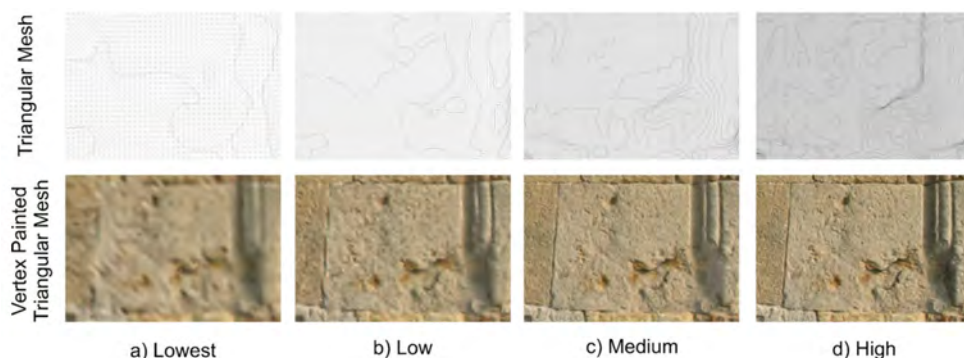
Η έρευνα στο πεδίο χωρίστηκε σε πέντε συνεδρίες. Οι δύο πρώτες αφορούσαν την επίγεια και εναέρια φωτογράφιση του μνημείου. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η συνολική μελέτη του σταθμού, οι εμπειρικές μετρήσεις, και η επίγεια 3D σάρωση με λέιζερ. Για την επίγεια φωτογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί μια DSLR Nikon D40 στα 6,1 MP με φακό 18-55 mm μαζί με ένα τρίποδο. Από την άλλη πλευρά, για την αεροφωτογραφία, έχει χρησιμοποιηθεί ένα τηλεκατευθυνόμενο ελικόπτερο. Το UAV ήταν εξοπλισμένο με μια τριών αξόνων pan-tilt-roll τηλεκατευθυνόμενη κεφαλή κάμερας (360° στον οριζόντιο άξονα, 220° στον κατακόρυφο άξονα και μια τροχια ικανότητας των 60°). Μια DSLR Canon EOS350d σε 8.1MP με φακό 18-55 mm έχει χρησιμοποιηθεί για την αεροφωτογραφία. Ο συνολικός αριθμός των φωτογραφιών που έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του μοντέλου 3D του μνημείου ήταν 652 (469 επίγειες φωτογραφίες και 183 αεροφωτογραφίες). Η μέση απόσταση της κάμερας από την επιφάνεια του μνημείου εκτιμάται σε 4 m.

#### Σύγκριση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης

Επιλέχθηκε να αξιολογήθηκε η μέση ανάλυση της 3D ανακατασκευής που προσφέρεται από το λογισμικό. Οι ιδιότητες των παραγόμενων πλεγμάτων θεωρούνται οι πιο κοντινές με τις προδιαγραφές και τις ικανότητες που προσφέρεται από μια τρέχουσα μέση κάρτα γραφικών. Συνολικά 11 single-view σαρώνει σειρά χρησιμοποιήθηκαν ως

δεδομένα εδάφους αλήθεια. Τα κριτήρια επιλογής για αυτές τις σαρώσεις στη σειρά ήταν: η σχεδόν παράλληλη τοποθέτηση του αισθητήρα του σαρωτή απέναντι στις μεγάλες επίπεδες επιφάνειες του μνημείου και η σχετικά μικρή απόσταση του μέσου όρου μεταξύ της θέσης του σαρωτή και το μνημείου[103]. Η σύγκριση των δεδομένων που ακολουθήθηκε περιελάμβανε το λογισμικό ανοιχτού κώδικα, MeshLab και του CloudCompare.

Το λογισμικό προσφέρει μια σειρά από προκαθορισμένα επίπεδα 3D ανακατασκευής της λεπτομέρειας (LOD). Το επίπεδο λεπτομέρειας επηρεάζει την πυκνότητα του ανακατασκευασμένου 3D mesh. Η Εικόνα 20 απεικονίζει τις διαφορετικές LODs από ένα μικρό μέρος της εξωτερικής επιφάνειας του μνημείου. Το PhotoScan μπορεί επίσης να παράγει υφή και να χαρτογραφηθεί με ανάμειξη από μέρη των εικόνων, έτσι ώστε ένα φωτορεαλιστικό αποτέλεσμα να μπορεί να επιτευχθεί με χαμηλή πολυπλοκότητα. Επιπλέον, ο συνολικός χρόνος που απαιτείται από το λογισμικό για την ευθυγράμμιση των εικόνων σε 3D χώρο ήταν 26 ώρες.



**Εικόνα 20 Διαφορετικά επίπεδα ανάλυσης μοντέλων από τριγωνισμό πλέγματος**

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σύστημα του υπολογιστή που χρησιμοποιείται δεν πέτυχε τη δημιουργία ενός πλήρους υπερ-υψηλού LOD 3D πλέγματος. Μία πλήρης 3D ανακατασκευή του εξωτερικού του μνημείου παρουσιάζεται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21 Οπτικές γωνίες από το ανακατασκευασμένο μνημείο

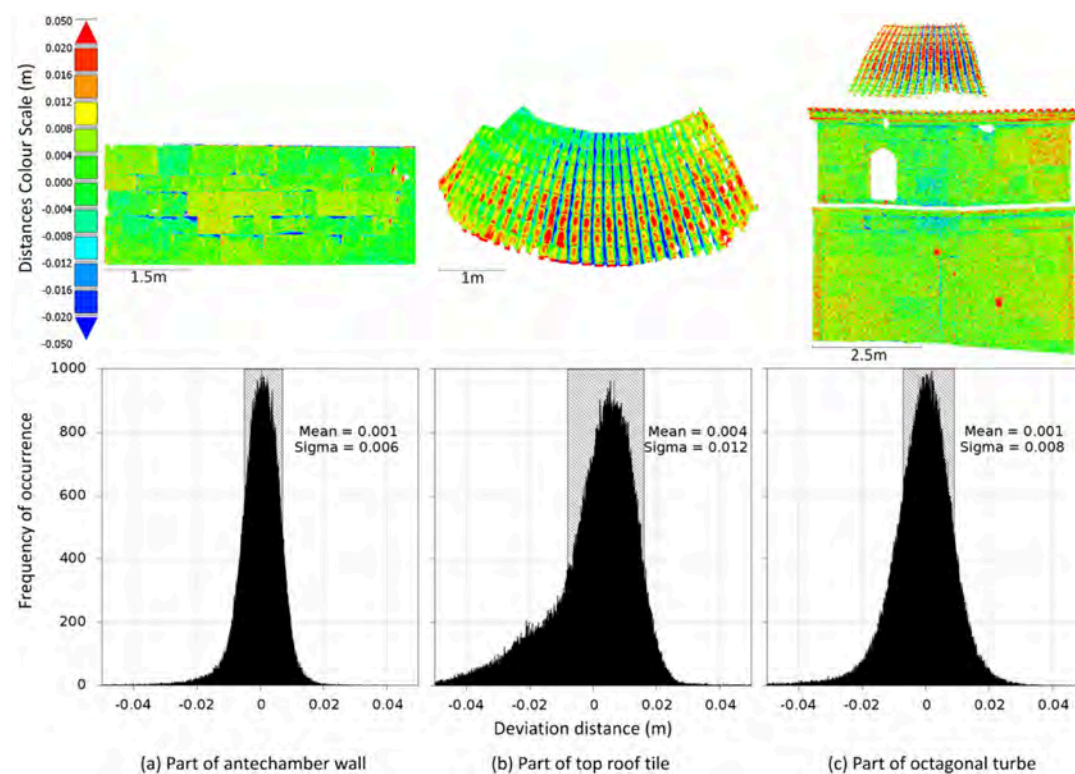
Επιπλέον, ο Πίνακας 4 δείχνει όλες τις μέσες αποστάσεις και τις τυπικές αποκλίσεις των σαρώσεων στην περιοχή που έχουν συγκρίνεται με το πλέγμα που παράγεται από το PhotoScan. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι συγκρίσεις οδήγησαν σε Gaussian όπως κατανομές. Κάθε σάρωση καλύπτει μια περιοχή με διαφορετικό μέγεθος, ο συνολικός αριθμός των κορυφών που συνθέτουν κάθε σάρωση, χρησιμοποιήθηκε στην μέση μέση απόσταση και την τυπική απόκλιση, ως συντελεστής βάρους. Όπως φαίνεται στον Πίνακας 4, η συνολική μέση απόσταση μεταξύ των δύο τύπων δεδομένων είναι 2 mm και η συνολική τυπική απόκλιση 14 mm.

Πίνακας 4 σύγκριση μοντέλων μέσω Μέση Απόστασης και Τυπικής Απόκλισης

Scan No.	Mean distance	Standard deviation ( $\sigma$ )
1	0.001	0.008
2	0.000	0.005
3	0.003	0.017
4	0.001	0.010
5	0.001	0.010
6	0.003	0.020
7	0.004	0.012
8	0.001	0.006
9	0.003	0.018
10	0.002	0.013
11	0.002	0.014
Weighted averages (in meters)	0.002	0.014

Η Εικόνα 22 απεικονίζει το χρώμα που κωδικοποιείται ως αποκλίσεις στην επιφάνεια. Πρόκειται για ένα βόρειο τοίχο του προθαλάμου, που θεωρείται ως μια σχεδόν επίπεδη επιφάνεια χαμηλής καμπυλότητας, ένα μέρος των κεραμιδιών της στέγης του προθαλάμου ως περιοχή υψηλής καμπυλότητας και ο συνδυασμός και των δύο. Κάθε απεικόνιση της απόκλισης στην επιφάνεια ακολουθείται από μια γραφική παράσταση που δείχνει τη συχνότητα απόκλισης της εμφάνισης μαζί με την μέση απόσταση και την

τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ) των αντιπροσωπευτικών σαρώσεων. Μια αύξηση της μέσης απόστασης και της τυπικής απόκλισης μπορεί να φανεί στο τμήμα του κεραμιδιού της στέγης. Αυτό είναι μια ένδειξη της αδυναμίας των μεθόδων SFM-DMVR να ανακατασκευάσουν χαμηλών χαρακτηριστικών επιφάνειες.



Εικόνα 22 Χρωματική κωδικοποίηση απόστασης και η κατανομή της απόκλισης διάφορων κομματιών του μνημείου

## Επίλογος

Η ψηφιοποίηση αντικειμένων Πολιτιστικής Κληρονομιάς ολοένα και περισσότερο τραβάει το ενδιαφέρον τόσο των ερευνητών, των ακαδημαϊκών και των φορέων Πολιτιστικής Κληρονομιάς όσο και της βιομηχανίας. Διάφορες τεχνικές ψηφιοποίησης αναπτύχθηκαν και εξελίχθηκαν με το πέρασμα των χρόνων, και άλλες είναι ακόμη σε πειραματικό στάδιο στα ερευνητικά εργαστήρια. Από τις τεχνικές ψηφιοποίησης, εκείνη που τις περισσότερες φορές αποδίδει με μεγάλη πιστότητα το αντικείμενο ενδιαφέροντος είναι η σάρωση με laser. Τα τελευταία χρόνια δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στις φωτογραμμετρικές μεθόδους, όπως η απόκτηση δομής μέσω κίνησης (SFM). Η SFM μέθοδος έχει τη δυνατότητα να παρέχει τρισδιάστατα μοντέλα υψηλής πιστότητας, και χαμηλού κόστους, σε αντίθεση με τη σάρωση laser. Όπως κάθε εργασία, έτσι και εκείνη της ψηφιοποίησης αποτελεί ένα σύνολο διεργασιών. Το σύνολο των διεργασιών με τον κατάλληλο σχεδιασμό, οδηγούν στην επιτυχία της δραστηριότητας και στην εκ των προταίρων αντιμετώπιση προβλημάτων. Ως επιτυχής δραστηριότητα θεωρείται όταν το τρισδιάστατο αντίγραφο που προκύπτει, είναι τόσης καλής ποιότητας. Έρευνες στράφηκαν στην ανάδειξη της ικανότητας της μεθόδου SFM να παράγει υψηλής πιστότητας αποτελέσματα. Μάλιστα τα αποτελέσματα αυτά είναι άμεσα συγκρίσιμα με εκείνα που προέρχονται από τους σαρωτές laser. Επομένως συστήνεται η χρήση

ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών για την ψηφιοποίηση αντικειμένων τόσο μικρής όσο και μεγάλης κλίμακας, λόγω της οικονομικότερης λύσης ως τεχνική ψηφιοποίησης και των ανταγωνιστικών αποτελεσμάτων που έχουν παρατηρηθεί.

## Βιβλιογραφία

1. 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.
2. Traunecker C. 1987. Les Techniques d'épigraphie de terrain. Principes et pratique. In Assmann J., Burkard G, Davies V. 1987, pp. 261-298
3. Loeben C.E. 1996, Anmerkungen zu jungsten Arbeiten agyptischer Epigraphik. ARCUS – Berichte aus Archäologie, Baugeschichte und Nachbargebieten, 3, pp. 15-27.
4. Wolfgang Boehler, Adreas Marbs, Scanning for Cultural Heritage Recording, September 1-2, 2002
5. 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
6. 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
7. M. Ioannides, A. Wehr, '3D Reconstruction & Re-production in Archaeology', 2002, Scanning for Cultural Heritage Recording, September 1-2, 2002
8. M. Gaiani, 'Translating the Architecture of the Real into the virtual: Seven Years of Experimentation with "Conservation and Representation"', Milan 2000, Conference of Cataloguing to Planned Presentation.
9. 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
10. Wolfgang Boehler, Adreas Marbs, Scanning for Cultural Heritage Recording, September 1-2, 2002
11. A. Marbs, Experiences with Laser Scanning at i3mainz, CIPA, September 2002, Corfu, Greece, Proceedings of 'Scanning for Cultural Heritage Recording', p.110-114
12. 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.
13. Boehler, W., A. Marbs, 3D Scanning Instruments, "Proceedings Of The CIPA WG 6 International Workshop On Scanning For Cultural Heritage Recording", Corfu, 2002

14. Snavely, N., Seitz, S.N., Szeliski, R., 2008. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80, 189–210
15. Boufama, B., Mohr, R., Veillon, F., 1993. Euclidean constraints on uncalibrated reconstruction. *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision*, Berlin, Germany, pp. 466–470.
16. Szeliski, R., Kang, S.B., 1994. Recovering 3-D shape and motion from image streams using nonlinear least squares. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 5, 10–28.
17. Förstner, W., 1986. A feature-based correspondence algorithm for image matching. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 26, 150–166.
18. Harris, C., Stephens, M., 1988. A combined corner and edge detector. *Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference*, Manchester, pp. 147–151.
19. Microsoft®, 2010. Photosynth™. Available: <http://www.photosynth.net>.
20. Snavely, N., 2008. Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections, unpublished PhD thesis, University of Washington, USA.
21. Snavely, N., Seitz, S.N., Szeliski, R., 2006. Photo Tourism: Exploring Image Collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics*, New York, pp. 1–12.
22. M.J. Westoby, J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey, J.M. Reynolds, 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, Volume 179, 15 December 2012, Pages 300-314
23. Robertson, D. P., and R. Cipolla. "Structure from motion." (2008).
24. R. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(4):323–344, 1987.
25. J. Weng, P. Cohen, and M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(10):965–980, 1992.
26. P. E. Debevec, C. J. Taylor, and J. Malik. Modelling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry-and image-based approach. In *Computer Graphics (SIGGRAPH'96)*, pages 11–20, 1996.
27. H. H. Baker and T. O. Binford. Depth from edge and intensity based stereo. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 631–636, 1981.
28. D. J. Fleet, A. D. Jepson, and M. R. M. Jenkin. Phase-based disparity measurement. *Computer Vision, Graphics and Image Processing: Image Understanding*, 53(2):198–210, 1991.
29. W. E. L. Grimson. *From Images to Surface*. MIT Press, 1981.
30. D. Jones and J. Malik. Computational framework for determining stereo correspondence from a set of linear spatial filters. *Image and Vision Computing*, 10(10):699–708, 1992.
31. D. Marr and T. Poggio. A computational theory of human stereo vision. In *Royal Society of London*, volume 204, pages 301–328, 1979.
32. H. K. Nishihara. Practical real-time imaging stereo matcher. *Optical Engineering*, 23(5):536–545, 1984.

33. S. B. Pollard, J. E. W. Mayhew, and J. P. Frisby. A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit. *Perception*, 14:449–470, 1985.
34. C. Harris and M. Stephens. A combined corner and edge detector. In *Alvey Vision Conference*, pages 189–192, 1988.
35. T. Kanade and M. Okutomi. A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and experiment. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(9):920–932, 1994.
36. C. Schmid, R. Mohr, and C. Bauckhage. Comparing and evaluating interest points. In *International Conference on Computer Vision (ICCV'98)*, pages 230–235, 1998.
37. Y. Dufournaud, C. Schmid, and R. Horaud. Matching images with different resolutions. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'00)*, pages 612–618, 2000.
38. D. G. Lowe. Object recognition from local scale-invariant features. In *International Conference on Computer Vision (ICCV'99)*, pages 1150–1157, 1999.
39. K. Mikolajczyk and C. Schmid. Indexing based on scale invariant interest points. In *International Conference on Computer Vision (ICCV'01)*, pages 525–531, 2001.
40. K. Mikolajczyk and C. Schmid. An affine invariant interest point detector. In *European Conference on Computer Vision (ECCV'02)*, pages 128–142, 2002.
41. O. D. Faugeras. *Three Dimensional Computer Vision: A Geometric View-point*. MIT Press, Boston, 1993.
42. R. I. Hartley and P. Sturm. Triangulation. In *American Image Understanding Workshop*, pages 957–966, 1994.
43. P. A. Beardsley, P. Torr, and A. Zisserman. 3D model acquisition from extended image sequences. In *European Conference on Computer Vision (ECCV'96)*, pages 683–695, 1996.
44. P. A. Beardsley, A. Zisserman, and D. Murray. Sequential updating of projective and affine structure from motion. *International Journal of Computer Vision*, 23(3):235–259, 1997.
45. R. I. Hartley. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras. In *European Conference on Computer Vision (ECCV'92)*, pages 579–587, 1992.
46. M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen, and L. Van Gool. Hand-held acquisition of 3D models with a video camera. In *International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, pages 14–23, 1999.
47. O. D. Faugeras, L. Robert, S. Laveau, G. Csurka, C. Zeller, C. Gauclin, and I. Zoghliami. 3-D reconstruction of urban scenes from image sequences. *Computer Vision and Image Understanding*, 69(3):292–309, 1998.
48. A. W. Fitzgibbon and A. Zisserman. Automatic camera recovery for closed or open image sequences. In *European Conference on Computer Vision (ECCV'98)*, pages 311–326, 1998.
49. F. Schaffalitzky, A. Zisserman, R. I. Hartley, and P. H. S. Torr. A six point solution for structure and motion. In *European Conference on Computer Vision (ECCV'00)*, pages 632–648, 2000.
50. C. Tomasi and T. Kanade. Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method. *International Journal of Computer Vision*, 9(2):137–154, 1992.

51. D.G. Lowe, Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, International Journal of Computer Vision, Kluwer Academic Publishers, pp. 91-110, 2004
52. Koenderink, J.J. 1984. The structure of images. Biological Cybernetics, 50:363–396.
53. Remondino, F., Menna, F., Koutsoudis, A., Chamzas, C. and S. El-Hakim: "Design and implement a reality-based 3D digitisation and modelling project". Digital Heritage 2013 Int. Congress, IEEE Proceedings.
54. Remondino, F., El-Hakim, S., 2006. Image-based 3D modelling: a review. The Photogrammetric Record, Vol.21 (115): 269-291.
55. El-Hakim, S.F., Beraldin, J.-A., 2007. Sensor integration and visualisation. In "Applications of 3D Measurements from Images" (Fryer, J., Mitchell, H., Chandler, J., ed.), Whittles Publishing, Caithness, Scotland, Chapter 10, pp. 259-298.
56. Vosselman, G., Maas, H.-G., 2010. Airborne and Terrestrial Laser Scanning; CRC: Boca Raton, FL, USA, 318 pages.
57. Guidi, G., Remondino, F., 2012. 3D modeling from real data. In "Modeling and Simulation in Engineering" (C. Alexandru, ed.), InTech Publisher.
58. Beraldin, J.-A., Picard, M., El-Hakim, S. F., Godin, G., Valzano, V., Bandiera, A., 2005. Combining 3D technologies for cultural heritage interpretation and entertainment. Proc. SPIE-IS&T Electronic Imaging: Videometrics VIII, Vol. 5665, pp. 108-118.
59. Barber, D. (ed.), 2007. 3D laser scanning for heritage: advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture. English Heritage, <http://www.english-heritage.org.uk/publications> (accessed Sept. 2013).
60. Menna, F., Rizzi, A., Nocerino, E., Remondino, F., Gruen, A., 2012. High resolution 3D modeling of the Behaim globe. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 39(5), pp. 115-120
61. Opitz, R., Simon, K., Barnes, A., Fisher, K., Lippiello, L., 2012. Close-range photogrammetry vs. 3D scanning: Comparing data capture, processing and model generation in the field and the lab. Proc. CAA.
62. Doneus, M., Verhoeven, G., Fera, M., Briese, Ch., Kucera, Neubauer, W., 2011. From deposit to point cloud – A study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. Proc. CIPA.
63. Nguyen, M.H., Wuensche, B., Delmas, P., Lutteroth, C., 2012. 3D models from the black box: investigating the current state of image-based modelling. Proc. WSCG.
64. Alsadik, B., Remondino, F., Menna, F., Gerke, M., Vosselman, G., 2013. Robust extraction of image correspondences exploiting the image scene geometry and approximate camera orientation. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.40(5/W1), pp. 1-7
65. Tarabanis, K.A., Allen, P.K., Tsai, R.Y., 1995. A survey of sensor planning in computer vision. IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 11(1), pp. 86-104.
66. Munkelt, C., Breitbarth, A., Notni, G., Denzler, J., 2010. Multi-view planning for simultaneous coverage and accuracy optimisation. Proc. British Machine Vision Conference.
67. Alsadik, B.S., Gerke, M., Vosselman, G., 2013. Automated camera network design for 3D modeling of cultural heritage objects. Journal of Cultural Heritage, in press.

68. Scott, W.R., Roth, G., Riverst, J.-F., 2003. View planning for automated three-dimensional object reconstruction and inspection. *ACM Computing Surveys*, Vol. 35(1), pp. 64-96.
69. Dunn, E., van den Berg, J., Frahm, J.-M., 2009. Developing visual sensing strategies through next best view planning. *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4001-4008.
70. Trummer, M., Munkelt, C., Denzler, J., 2010. Online next-best-view planning for accuracy optimization using an extended e-criterion. *Proc. IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR'10)*, pp. 1642-1645.
71. Munkelt, C., Trummer, M., Denzler, J., Wenhardt, S., 2007. Benchmarking 3D reconstructions from next best view planning. *Proc. IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA)*, pp. 552-555.
72. Wenzel, K., Rothmel, M., Fritsch, D., Haala, N., 2013. Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.40 (5/W1), pp. 251-258.
73. Bryan, P., Blake, B., Bedford, J., 2009. Metric survey specifications for cultural heritage. *English Heritage*. [www.english-heritage.org.uk/publications](http://www.english-heritage.org.uk/publications) (accessed Sept 2013).
74. Beraldin, J. A., Picard, M., Bandiera, A., Valzano, V. and Negro, F., 2011. Best practices for the 3D documentation of the Grotta dei Cervi of Porto Badisco, Italy. *Proc. of SPIE*, Vol. 7864, pp. 78640J-78640J-15.
75. ADS, 2011. Guide to Good Practice, [guides.archaeologydataservice.ac.uk](http://guides.archaeologydataservice.ac.uk) (accessed Sept.2013).
76. Brown, A., 2008. Selecting file formats for long-term preservation. *The National Archives*. <http://www.nationalarchives.gov.uk/documents/selecting-file-formats.pdf> (accessed Sept 2013).
77. Goesele, M., Snavely, N., Seitz, S. M., Curless, B., Hoppe, H., 2007. Multi-view stereo for community photo collections. *Proc. ICCV*, Vol. 2, pp. 265-270.
78. Pollefeys, M., Nister, D., Frahm, J.-M., Akbarzadeh, A., Mordohai, P., Clipp, B., Engels, C., Gallup, D., Kim, S.-J., Merrell, P., Salmi, C., Sinha, S., Talton, B., Wang, L., Yang, Q., Stewenius, H., Yang, R., Welch, G., Towles, H., 2008. Detailed real-time urban 3D reconstruction from video. *Int. Journal of Computer Vision*, Vol. 78(2), pp. 143-167.
79. Snavely, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008. Modeling the world from Internet photo collections. *Int. Journal of Computer Vision*, Vol. 80(2), pp. 189-210.
80. Waldhäusl, P., Ogleby, C., 1994. 3-by-3-Rules for simple photogrammetric documentation of architecture. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 30(5), pp. 426-429.
81. Remondino, F., Fraser, C., 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36(5), pp. 266-272.
82. Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T., Troisi, S., 2012. Low-cost and open-source solutions for automated image orientation – A critical overview. *Proc. EuroMed 2012 Conference*, LNCS 7616, pp. 40-54.
83. Gruen, A., Huang, T.S., 2001. *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 239 pages.

84. Sturm, P., Ramalingam, S., Tardif, J.-P., Gasparini, S., Barreto, J., 2011. Camera models and fundamental concepts used in geometric Computer Vision. *Foundation and Trends in Computer Graphics and Vision*, Vol. 6, pp. 1-183.
85. Barazzetti, L., Scaioni, M., Remondino, F., 2010. Orientation and 3D modeling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. *The Photogrammetric Record*, 25(132), pp. 356–381.
86. Pierrot-Deseilligny, M., Paparoditis, N., 2006. A multiresolution and optimization-based image matching approach: an application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36(1/W41).
87. Hirschmuller, H., 2008. Stereo processing by semi-global matching and mutual information. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 30, pp. 328-341.
88. Furukawa, Y., Ponce, J., 2010. Accurate, dense and robust multiview stereopsis. *IEEE Trans. PAMI*, Vol.32: 1362-1376.
89. Haala, N., Rothermel, M., 2012. Dense Multi-stereo matching for high quality digital elevation models. *PGF Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*. Vol. 4, p. 331-343.
90. Hoang-Hiep Vu, Labatut, P., Pons, J.-P., Keriven, R., 2012. High accuracy and visibility-consistent dense multiview stereo. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 34(5), pp. 889-901.
91. Salvi, J., Matabosch, C., Fofi, D., Forest, J., 2007. A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation. *Image and Vision computing*, Vol.25, pp. 578-596.
92. Deng, F., 2011. Registration between multiple laser scanner data sets. *Laser Scanning Theory and Applications*, Chau-Chang Wang (Ed.), ISBN: 978-953-307-205-0, InTech.
93. Besl, P.J., McKay, N.D., 1992. A Method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 14(2), pp. 239-256.
94. Tombari, F., Salti, S., Di Stefano, L., 2013. Performance evaluation of 3D keypoint detectors. *Int. Journal of Computer Vision*, Vol. 102(1-3), pp. 198-220.
95. Remondino, F., 2003. From point cloud to surface: the modeling and visualization problem. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34(5/W10).
96. Berger, M., Levine, J.A., Nonato, L.G., Taubin, G., Silva, C.T., 2011. An end-to-end framework for evaluating surface reconstruction. *SCI Technical Report*, No. UUSCI-2011-001, SCI Institute, University of Utah, USA.
97. Kobbelt L., Botsch, M., 2004. A survey of point-based techniques in computer graphics. *Computers and Graphics*, Vol. 28(6) pp. 801-814.
98. Botsch, M., 2005. High quality surface generation and efficient multiresolution editing based on triangle meshes. *Shaker Verlag Aachen GmbH, Germany*, ISBN: 3832243143, 180 pages.
99. CARARE Best Practise Network, <http://www.carare.eu>
100. 3D-ICONS pilot project <http://3dicons-project.eu>
101. 3D-COFORM. consortium <http://3dcoform.eu>

102. A.Koutsoudis,K.Stavroglou,G.Pavlidis,C.Chamzas,3DSSE–A3Dscenesearch engine: exploring 3D scenes using keywords, J Cult Heritage 13 (2012) 187–194.
103. Anestis Koutsoudis, Blaž Vidmar, George Ioannakis, Fotis Arnaoutoglou, George Pavlidis, Christodoulos Chamzas, Multi-image 3D reconstruction data evaluation, Journal of Cultural Heritage, Volume 15, Issue 1, January–February 2014, Pages 73-79
104. Anestis Koutsoudis, Blaž Vidmar, Fotis Arnaoutoglou, Performance evaluation of a multi-image 3D reconstruction software on a low-feature artefact, Journal of Archaeological Science, Volume 40, Issue 12, December 2013, Pages 4450-4456
105. Meshlab, <http://meshlab.sourceforge.net> (last accessed 01.04.2014)
106. CloudCompare, <http://www.danielgm.net/cc> (last accessed 01. 04.2014)
107. G. Tsigaras, Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke, online at <http://www.xanthi.ilsp.gr/cultureportalweb/print.php?articleid=140&lang=gr&printmode=article>
108. H.W. Lowry, In the footsteps of the Ottomans: a search for sacred spaces and architectural monuments in northern Greece, Mary Martin Booksellers,Bahcesehir University Publications, 2009.