

1.1.1 Δομή από κίνηση

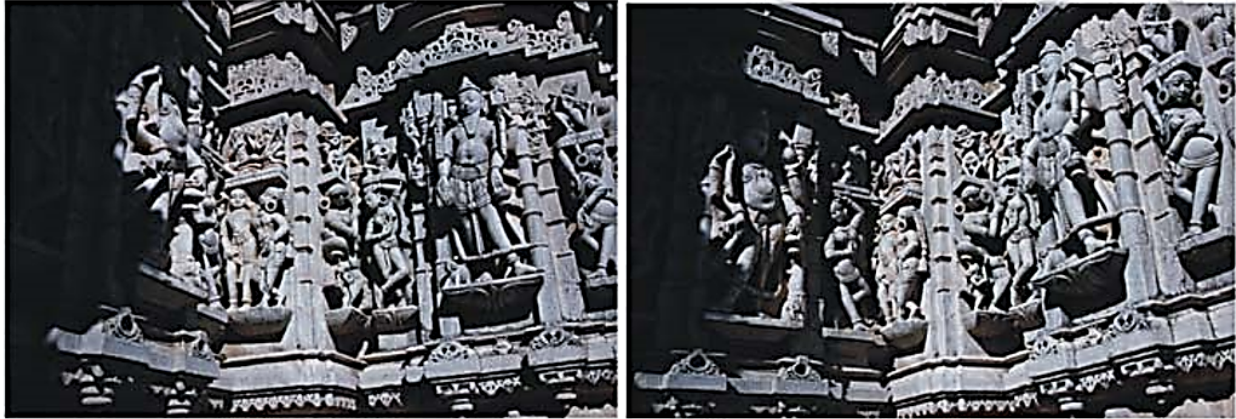
Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια παραλλαγή της Σχήμα-Από-Στερεο-φωτογράφιση, κατά την οποία οι δύο φωτογραφικές μηχανές έχουν αντικατασταθεί από μια μηχανή λήψης κινούμενης εικόνας που καταγράφει το αντικείμενο από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η απόλυτη ακινησία του αντικειμένου ενώ θεωρείται δεδομένο ότι δεν υπάρχουν κινητά μέρη πάνω του. Φυσικά κάτι τέτοιο ισχύει για όλες τις μεθόδους 3Δ ψηφιοποίησης. Η ακινησία του αντικειμένου προς ψηφιοποίηση είναι προαπαιτούμενο.

Οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται είναι παρόμοιοι με αυτούς της Σχήμα-Από-Στερεοφωτογράφιση και είναι ευαίσθητοι στο θόρυβο που παρουσιάζει το περιεχόμενο της ακολουθία εικόνων. Όπως είναι αναμενόμενο και η Σχήμα-Από-Κίνηση (Structure from Motion – SFM) αντιμετωπίζει το πρόβλημα αντιστοίχισης των κοινών (ομόλογων) σημείων ανάμεσα στις εικόνες. Όταν οι εικόνες που χρησιμοποιούνται είναι από διαφορετικές οπτικές γωνίες ο υπολογισμός του προσανατολισμού συνεχίζει να είναι μια σχετικά απλή διαδικασία δεδομένου ότι υπάρχει αρκετή πληροφορία αντιστοίχισης στα ομόλογα σημεία που συναντούμε ανάμεσα στα διαδοχικά καρέ. Παλαιότερα η λύση του προβλήματος αντιστοίχισης σε διαφορετικές οπτικές γωνίες κατέληγε να γίνεται χειροκίνητα σήμερα η διαδικασία έχει αυτοματοποιηθεί πλήρως με τη χρήση αλγορίθμων όπως οι SIFT και SURF.

Και με αυτή τη μέθοδο ένας από τους θεμελιώδεις περιορισμούς της 3Δ ψηφιοποίησης δε δύναται να ξεπεράσει αφού η συγκεκριμένη μέθοδος λειτουργεί μόνο για τα σημεία του αντικειμένου που είναι ορατά στο φωτογραφικό φακό. Γενικά για όλες τις μεθόδους ψηφιοποίησης ισχύει πως αν δεν υπάρχει οπτική επαφή με την επιφάνεια τότε αυτή δεν μπορεί να αποτυπωθεί. Γενικά τα αποτελέσματα της μεθόδου παρουσιάζουν αρκετές ασάφειες αφού η ανάκτηση του 3Δ μοντέλου βασίζεται στον εντοπισμό τη θέσης λήψης της φωτογραφικής μηχανής χωρίς να υπάρχει κάποια προηγούμενη γνώση για αυτή. Οι μαθηματικοί υπολογισμοί που πραγματοποιούνται επηρεάζονται από ασαφείς παραμέτρους όπως είναι το πραγματικό σύστημα συντεταγμένων και τη θέση του αντικειμένου μέσα σε αυτό και ο προσδιορισμός της κλίμακας του αντικειμένου.

Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται δύο εικόνες (από τις 6 που χρησιμοποιήθηκαν συνολικά) από έναν ναό όπου έχει εφαρμοσθεί η τεχνική Σχήμα-Από-Κίνηση για την 3Δ αποτύπωσή του. Το χαρακτηριστικό όλων των εικόνων είναι ότι έχουν αποτυπωθεί από το ίδιο επίπεδο. Στην εικόνα παρατίθεται επίσης και μία φωτορεαλιστική 3Δ αναπαράσταση του αποτυπωμένου χώρου. Αξίζει να σημειωθεί πως η

συγκεκριμένη μέθοδος παράγει χαμηλής πυκνότητας νέφη σημείων (sparse point clouds) έτσι αυτό που προβάλετε στην παρακάτω εικόνα είναι η οργάνωση των σημείων σε τριγωνικό πλέγμα και η χαρτογράφηση τμημάτων των εικόνων πάνω σε αυτό.



α) Δύο από τις έξι φωτογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν για την 3D ανακατασκευή



β) Διαφορετικές οπτικές γωνίες από το ανακατασκευασμένο τρισδιάστατο μοντέλο

Εικόνα 1 Παράδειγμα 3D ανακατασκευής με τη συγκεκριμένη μέθοδο

Από την άλλη, η σχήμα-από-κίνηση σε συνδυασμό με αλγορίθμους δημιουργίας πυκνών νεφών σημείων που προκύπτουν από εφαρμογή της στερεοφωτογράφισης (Παρ. 3.6.10) ή πολυεικονικής στερεοφωτογράφισης (Multiple View Stereo) (περισσότερες από 2 γειτονικές εικόνες) αποτελεί σήμερα μια πολύ πρόσφατη επιτυχία στο χώρο της φωτογραμμετρίας και τείνει να γίνει η πλέον διαδεδομένη μέθοδο αποτύπωσης κινητών αλλά και ακίνητων μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς.

Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων (Structure from Motion / Multiple View Stereo – SfM-MVS) είναι αποτέλεσμα πρόσφατης έρευνας που αφορά στην ανάπτυξη μεθόδων 3D αποτύπωσης με φωτογραφικές μεθόδους. Αποτελεί μια χαμηλού κόστους λύση με υψηλά όμως επίπεδα ποιότητας και ακρίβειας στα παραγόμενα δεδομένα όταν βέβαια εφαρμόζεται σωστά. Η δημιουργία 3D ψηφιακών

αντιγράφων αντικειμένων που προέρχονται από το χώρο της πολιτιστικής μας κληρονομιάς με τη συγκεκριμένη μέθοδο τείνει τα τελευταία πέντε χρόνια να γίνει η πλέον δημοφιλής λύση ξεπερνώντας τις μεθόδους τριγωνισμού λέιζερ και σχήμα-από-δομημένο-φως. Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η λόγος κόστους – αποτελεσματικότητας σε σχέση με τις υλικοτεχνικές απαιτήσεις (εξοπλισμός) και οι σχετικά χαμηλές απαιτήσεις σε γνωσιακό υπόβαθρο για την εφαρμογή της μεθόδου.

Φυσικά, όπως και σε όλες τις προηγούμενες μεθόδους, η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της και των περιορισμών της είναι προαπαιτούμενο για την ορθή εφαρμογή της τόσο κατά τη διαδικασία συλλογής δεδομένων όσο και κατά την επεξεργασία τους για την παραγωγή του 3Δ μοντέλου. Από την άλλη, η ποιότητα των δεδομένων που προκύπτουν από την ορθή εφαρμογή της συγκεκριμένης συνδυαστικής μεθόδου τη χαρακτηρίζει ως μία λύση η οποία δύναται να εξυπηρετήσει ένα μεγάλο εύρος έργων ψηφιοποίησης (μικρά κινητά ευρήματα, αγάλματα, μνημεία, αρχιτεκτονικά σύνολα, αρχαιολογικούς χώρους, αστικές περιοχές με πολιτιστική-αρχιτεκτονική δυναμική, κ.α.).

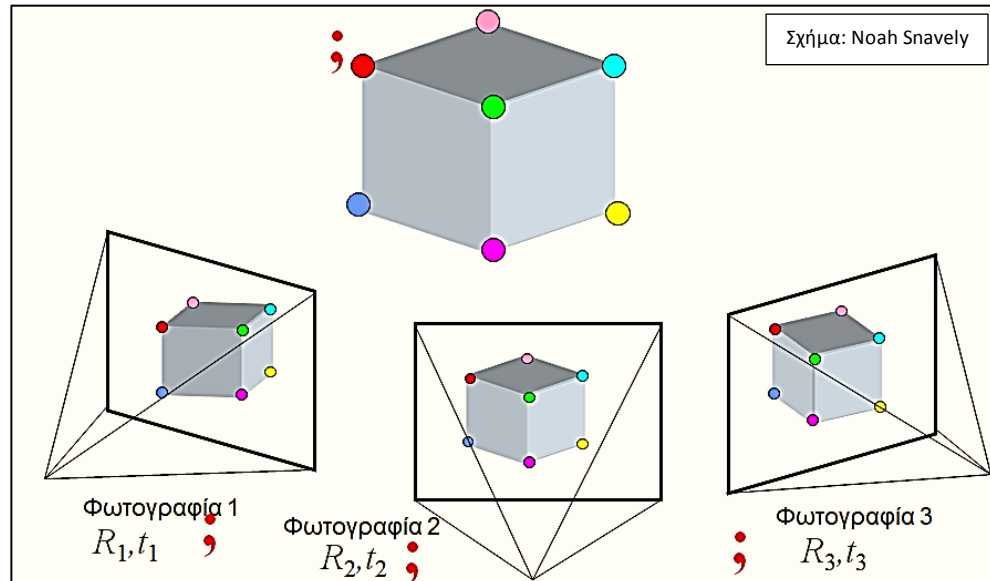
Πίσω από την SFM-MVS κρύβεται ένας συνδυασμός από πολύπλοκους και απαιτητικούς σε υπολογιστική ισχύ και μνήμη αλγορίθμους που συμβάλουν στη δημιουργία του 3Δ μοντέλου μέσα από μια σειρά μη-ταξινομημένων φωτογραφιών που προβάλλουν το αντικείμενο από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Η μέθοδος προσπαθεί μέσα από το σύνολο των φωτογραφιών να ανακτήσει μια σειρά από εσωτερικές (intrinsic) και εξωτερικές (extrinsic) παραμέτρους της φωτογραφικής μηχανής που χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθούν οι συγκεκριμένες φωτογραφίες. Για να το πετύχει αυτό βασίζεται πάνω σε χαρακτηριστικά σημεία (π.χ. σημεία όπου συναντούνται δύο ευθύγραμμα τμήματα) που μπορεί να αναγνωρίσει ανάμεσα στο περιεχόμενο του σύνολο των φωτογραφιών που παρουσιάζουν υποχρεωτικά μεγάλα ποσοστά αλληλοεπικάλυψης. Επίσης δεν απαιτεί τη χρήση φωτογραμμετρικών σταθερών (στόχων) και ως εκ τούτου εντάσσεται στην ευρύτερη οικογένεια των *targetless* φωτογραμμετρικών μεθόδων.

Η μέθοδος παρουσιάζει ευρωστία απέναντι σε μικρές μεταβολές φωτισμού και έντασης των χρωμάτων που εμφανίζονται μέσα στις φωτογραφίες και αυτό την κάνει ακόμα πιο φιλική για αποτυπώσεις που πραγματοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους ή σε χώρους όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα ελεγχόμενου φωτισμού.

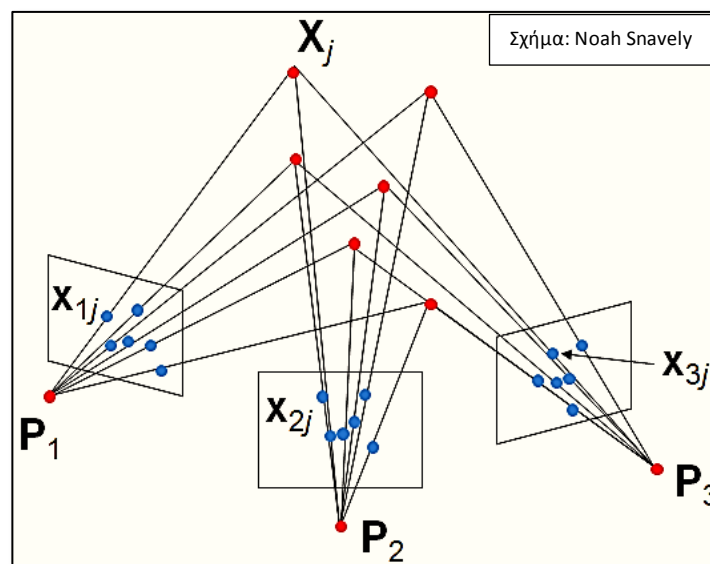
Πιο συγκεκριμένα, τα βασικά βήματα που εκτελούνται κατά την επεξεργασία των φωτογραφιών για τη δημιουργία του 3Δ μοντέλου μέσα από αυτές είναι τα παρακάτω:

- i. Ανίχνευση σημείων και περιοχών ενδιαφέροντος (χαρακτηριστικών σημείων) πάνω στις εικόνες με την εφαρμογή αλγορίθμων όπως ο SIFT και ο SURF. Στη συνέχεια η μεταβολές των θέσεων των σημείων αυτών θα αναζητηθούν και στις υπόλοιπες φωτογραφίες.
- ii. Εφαρμογή αλγορίθμου σύγκρισης και αναγνώρισης αντίστοιχων (ανάλογων) σημείων που έχουν εξάγει οι αλγόριθμοι SIFT και SURF μέσω της ανάλυσης όλων των δυνατών συνδυασμών εικόνων χρησιμοποιώντας αυστηρές διαδικασίες όπως είναι η τετραγωνική αντιστοίχιση (quadratic matching) ή γρήγορη προσέγγιση όπως η αναζήτηση κατά k-d tree.
- iii. Εφαρμογή του αλγορίθμου Bundle Adjustment ο οποίος είναι και η καρδιά της μεθόδου και λύνει ένα γεωμετρικό πρόβλημα βασιζόμενος σε δεδομένα όπως οι συντεταγμένες των ομόλογων σημείων που αναγνωρίστηκαν στο προηγούμενο βήμα, η θέση της φωτογραφικής μηχανής στο χώρο για κάθε μια φωτογραφία και οι συντελεστές βαθμονόμησης της φωτογραφικής μηχανής. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως μια μέθοδος 3Δ ανακατασκευής όπου λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες παραμέτρους θα οδηγήσει στη βέλτιστη (βασιζόμενη σε μια συνάρτηση κόστους) 3Δ δομή και οπτικοποίηση της (εκτίμηση των θέσεων και προσανατολισμού των φωτογραφικών μηχανών στο χώρο και των παραμέτρων βαθμονόμησης τους). Ως αποτέλεσμα υπολογίζει τις θέσεις των φωτογραφικών μηχανών στο χώρο καθώς και ένα αραιό νέφος σημείων που αποτελείται από τα σημεία που αναγνωρίστηκαν από τους αλγορίθμους SIFT και SURF.

Πιο συγκεκριμένα κατά την εφαρμογή του bundle adjustment υποθέτουμε πως υπάρχει ένα πλήθος m σημείων στον 3Δ χώρο που είναι ορατά από ένα πλήθος n διαφορετικών οπτικών γωνιών (φωτογραφίες). Με δεδομένο ένα σύνολο ομόλογων σημείων σε δύο ή περισσότερες εικόνες, μπορούμε να υπολογίσουμε τον εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό της φωτογραφικής μηχανής καθώς και τις συντεταγμένες (θέσεις) των ομόλογων σημείων στο 3Δ χώρο. Είναι ένα πρόβλημα το οποίο προσπαθεί να υπολογίσει τους μετασχηματισμούς περιστροφής (rotation – R) και μετατόπισης (translation – t) των θέσεων όπου πραγματοποιήθηκε η λήψη των φωτογραφιών στο 3Δ χώρο καθώς και τις θέσεις των ομόλογων σημείων στο χώρο μέσω μίας μη-γραμμικής συνάρτησης κόστους ελαχίστων τετραγώνων.



Έστω ένα σύνολο εικόνων m με ένα σύνολο ομόλογων σημείων n τότε ισχύει πως $x_{ij} = P_i X_j$, $i=1, \dots, m$ και $j=1, \dots, n$ με P_i να είναι ο πίνακας μετασχηματισμού και X_j το διάνυσμα των συντεταγμένων του σημείου j στον 3Δ χώρο. Το πρόβλημα απαιτεί να υπολογίσουμε του πίνακες μετασχηματισμού P_i και τις συντεταγμένες στον 3Δ χώρο (X_j) όλων των ομόλογων σημείων x_{ij} σε όλες τις φωτογραφίες.

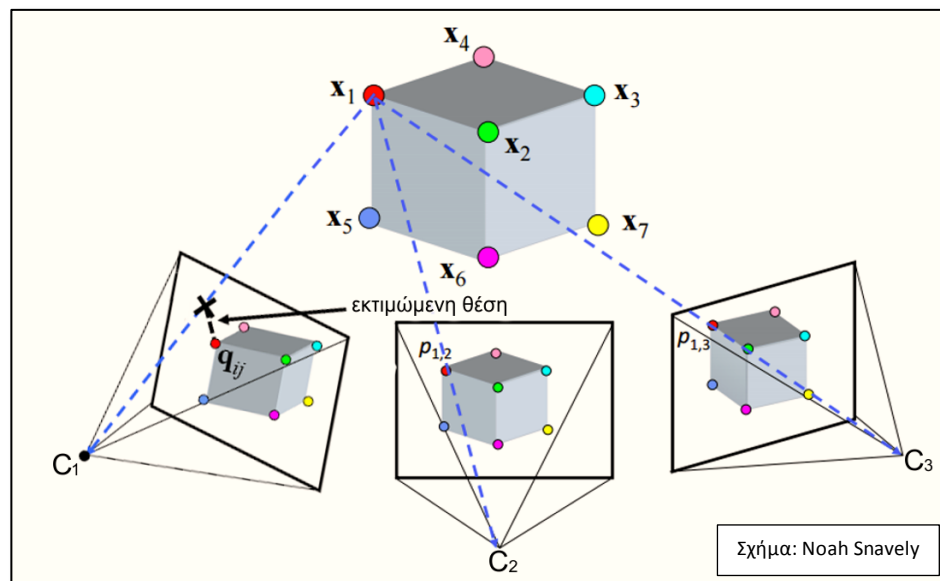


Έστω x_{ij} είναι η προβολή του σημείου j στην εικόνα i τότε η μεταβλητή w_{ij} είναι ίση με τη μονάδα (1) αν το σημείο j υπάρχει στην εικόνα i και ίση με το μηδέν (0) σε διαφορετική περίπτωση (μη ορατό). Όπως προαναφέρθηκε, το bundle adjustment

εκφράζεται από μία συνάρτηση κόστους που προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το συνολικό σφάλμα επαναπροσδιορισμού (re-projection) όλων των σημείων και όλων των παραμέτρων της φωτογραφικής μηχανής (εξωτερικός και εσωτερικός προσανατολισμός) και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$g(C, X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} \|q_{ij} - P(C_i, X_j)\|^2$$

Όπου C_i η κάθε φωτογραφία και X_j η θέση του σημείου στον 3Δ χώρο. Η σχέση $\|q_{ij} - P(C_i, X_j)\|^2$ εκφράζει το τετραγωνικό σφάλμα της απόστασης ανάμεσα στην εκτιμώμενη θέση (q_{ij}) του σημείου j στην φωτογραφία i και του αποτελέσματος της σχέσης $x_{ij} = P_i X_j$.



- iv. Εφαρμογή της πυκνής πολυεικονικής στερεοφωτογράφισης (MVS) χρησιμοποιώντας γειτονικές (χωρικά) εικόνες ώστε να προκύψει το πυκνό νέφος σημείων που θα αποτελέσει και την αρχική 3Δ δομή με την οποία στη συνέχεια θα μετασχηματίσουμε σε τριγωνικό πλέγμα.

Πίσω από κάθε βήμα υπάρχει μια πληθώρα μαθηματικών υπολογισμών που καθώς το πλήθος και η ανάλυση των φωτογραφιών αυξάνεται, απαιτούνται περισσότερη υπολογιστική ισχύ και μνήμη.

Όπως και με κάθε άλλη μέθοδο, έτσι και η SFM-MVS έχει τα όρια της. Καθώς βασίζεται στην αναγνώριση σημείων πάνω στην επιφάνεια των αντικειμένων, η ποιότητα της 3Δ ανακατασκευής σχετίζεται με την ύπαρξη έντονων μορφολογικών χαρακτηριστικών στην επιφάνεια του αντικειμένου.

Τέτοια μορφολογικά χαρακτηριστικά είναι και οι συχνές χρωματικές-έντασης μεταβολές και η χαμηλή ανακλαστικότητα. Για την εφαρμογή της μεθόδου σε ανακλαστικές επιφάνειες απαιτείται η χρήση φίλτρων (π.χ. πολωτικών) στις φωτογραφικές μηχανές για την ελαχιστοποίηση των ανακλάσεων και της τυχαίας σκέδασης του φωτός (abstract light scattering). Η εφαρμογή της μεθόδου σε επιφάνειες χωρίς έντονα χαρακτηριστικά (featureless surfaces) μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες αντιστοιχίες σημείων ανάμεσα στις φωτογραφίες λόγω της ασάφειας αναγνώρισης των ομόλογων σημείων και τελικά στην εμφάνιση έντονου θορύβου στα δεδομένα (άρα και σε χαμηλής ποιότητας 3D ανακατασκευή). Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος έχουν γίνει διάφορες μελέτες όπου σε μια πρόσφατη προτείνεται η προβολή μοτίβων θορύβου (ψηφιογραφικές εικόνες όπου κάθε εικονοστοιχείο παίρνει μια τιμή που προκύπτει από κάποιο μαθηματικό μοντέλο π.χ. perlin noise, wavelet noise, Gaussian noise, κλπ) πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου με κάποιο προβολικό σύστημα ώστε να εμπλουτιστεί η επιφάνεια με τις απαιτούμενες συνθετικές χρωματικές-έντασης μεταβολές.

Τα 3D δεδομένα που προκύπτουν από τα λογισμικά που υλοποιούν τη μέθοδο SFM-MVS είναι υψηλής ποιότητας με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται σήμερα στο χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς. Σε συνδυασμό με τη σχεδόν αυτοματοποιημένη διαδικασία των προηγούμενων βημάτων υλοποίησης της SFM-MVS αποτελούν αποτελεσματικές και χαμηλού κόστους λύσεις. Φυσικά δεν αποτελεί πανάκεια καθώς όπως και κάθε άλλη μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Οι 3D σαρωτές πεδίου έχουν αποδείξει εδώ και χρόνια την αξία τους από την άλλη όμως η συγκεκριμένη μέθοδος αν χρησιμοποιηθεί σωστά προσφέρει ανάλογης ποιότητας δεδομένα με εξοπλισμό χαμηλότερου κόστους. Ο συνδυασμός των δύο αλλά και άλλων μεθόδων τοπογραφίας προτείνεται ανεπιφύλακτα για έργα ψηφιοποίησης που αφορούν ακίνητα μνημεία καθώς επιτρέπει την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της SFM-MVS μεθόδου με μετρήσεις που προκύπτουν από βαθμονομημένα μετρητικά συστήματα όπως είναι ένας σαρωτής πεδίου ή ένας γεωδαιτικός σταθμός.

Σήμερα, υπάρχουν εμπορικά και ανοικτού κώδικα λογισμικά που υλοποιούν την SFM-MVS μέθοδο. Πρόσφατα χρηματοδοτήθηκε το ερευνητικό έργο (3D-COFORM) από την Ευρωπαϊκή ένωση για τη δημιουργία ενός Διαδικτυακού συστήματος που προσφέρει τη συγκεκριμένη μέθοδο ως υπηρεσία. Ο χρήστης ανεβάζει την ακολουθία των φωτογραφιών του και η υπηρεσία αναλαμβάνει να τον ενημερώσει για την ολοκλήρωση της 3D ανακατασκευής και να του προωθήσει ένα σύνδεσμο για τη μεταφόρτωση του 3D μοντέλου που προέκυψε από τις φωτογραφίες του. Παρόμοια συστήματα έχουν αναπτυχθεί από εταιρίες όπως είναι η Autodesk, Viztu Technologies και η Insight3D. Η EOS Systems Inc

προσφέρει το λογισμικό Photomodeler Scanner το οποίο όμως απαιτεί την χρήση φωτογραμμετρικών σταθερών (στόχοι) Αντίθετα, η Agisoft προσφέρει το Photoscan το οποίο αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση από το σημείο της συλλογής, επεξεργασίας των δεδομένων μέχρι και την εξαγωγή τους σε διαφορετικούς μορφότυπους και αναλύσεις είτε πρόκειται για τη γεωμετρία ή την υφή του μοντέλου. Παρόμοιά λύση με υψηλής ποιότητας αποτελέσματα αποτελεί και το CapturingReality της ομώνυμης εταιρίας. Επιπλέον, η Pix4D ανέπτυξε το λογισμικό Pix4UAV που είναι σε θέση να δημιουργήσει 3D ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα από τις συλλογές εναέριων φωτογραφιών.

Παρακάτω υπάρχει μια λίστα από υλοποιήσεις της μεθόδου SFM-MVS οργανωμένες ανάλογα με τον τρόπο που αυτές διατίθενται (ανοικτού κώδικα, εμπορικά, γλώσσα προγραμματισμού, κλπ).

Ανοικτού Λογισμικού

C++

[Bundler - Structure from Motion for Unordered Photo Collections](#) by Noah Snavely

[openMVG](#) An Open Multiple View Geometry library + Structure from Motion demonstrators

[Libmv](#) - A Structure from Motion library

[Theia](#): A Fast and scalable structure-from-motion library released under the BSD license

[MicMac](#), a SFM open-source code released by the [Institut national de l'information géographique et forestière](#)

[LSD-SLAM](#): Large-Scale Direct Monocular SLAM in real-time, by Jakob Engel

[MVE - The Multi-View Environment](#) by Simon Fuhrmann, TU Darmstadt

[SBA](#) for generic bundle adjustment by Manolis Lourakis

Matlab

[Structure from Motion toolbox for Matlab](#) by Vincent Rabaud

[Matlab Functions for Multiple View Geometry](#) by Andrew Zissermann

[Structure and Motion Toolkit](#) by Phil Torr

[Matlab Code for Non-Rigid Structure from Motion](#) by Lorenzo Torresani

Python

[Python Photogrammetry Toolbox GUI](#) - an open-source SFM GUI (Easy SfM and dense point cloud estimation launcher) by Pierre Moulon and Arc-Team

Εμπορικά και μη με έτοιμα εκτελέσιμα

[Smart3DCapture](#), a complete photogrammetry solution by Acute3D.

[3DF Samantha - Command line structure from Motion pipeline for Windows](#), by 3Dflow srl. [Automatic Camera Tracking System \(ACTS\)](#) A structure-from-motion system for Microsoft Windows, by State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University.

[VisualSFM: A Visual Structure from Motion System](#), by Changchang Wu

[SFMToolkit](#) a complete photogrammetry solution based on open-source software

[MountainsMap SEM](#) software for [Scanning Electron Microscopes](#). 3D is obtained by tilting the specimen + photogrammetry.

[Voodoo Camera Tracker](#), non-commercial tool for the integration of virtual and real scenes.

Original site, archived: [Laboratorium für Informationstechnologie, University of Hannover](#)

[MetalIO Toolbox](#) SfM for augmented reality on mobile devices.

[TacitView](#) by [2d3 Sensing](#)

[Catena](#) Python Abstract Workflow Framework with SfM components.

[123D Catch](#) by [Autodesk](#)

[3DF Zephyr](#) by [3DFLOW](#)

[3Dsom](#) by [Big Object Base](#)

[4E Software](#) by [4e Software](#)

[ARC3D](#) by [KU Leuven](#)

[Australis](#) by [Photometrix](#)

[Correlator3D](#) by [SimActive Inc.](#)

[DroneMapper](#) by [DroneMapper](#)

[ELCOVISION 10](#) by [PMS AG](#), [Leica Geosystems](#)

[EnsoMOSAIC](#) by [MosaicMill](#)

[Enwii](#) by [Banzai Pipeline Ltd](#)

[ImageModeler](#) by [Autodesk](#)

[iWitness](#) by [Photometrix](#)

[Linearis3D](#) Photogrammetry by [Linearis3D](#)

[Match Photo](#) by [Trimble Navigation](#)

[Memento](#) by [Autodesk](#)

[PHOTOMOD](#) by [Racurs](#)

[PhotoModeler](#) by [Eos Systems](#)

[PhotoScan](#) by [Agisoft](#)

[PhotoSculpt](#) by [Hippolyte Mounier](#)

[PhotoSketch](#) by [Brainstorm Technology LLC](#)

[Pix4Dmapper Discovery](#) by [Pix4D SA](#)

[Pix4Dmapper Pro](#) by [Pix4D SA](#)

[RealityCapture](#) by [Capturing Reality](#)

[ReCap](#) by [Autodesk](#)

[RhinoPhoto](#) by [Qualup SAS](#)

[SMART3DCAPTURE](#) by [ACUTE3D](#)

[Metrology Engine](#) by [VisualSize](#)

[VI3DIM](#) by [Vi3Dim](#)

[VideoTrace](#) by [Australian Center for Visual Technology \(AVCT\)](#), [PunchCard](#)

[WebDLT](#) by [B. Molnar](#), [BME FMT](#)

Εφαρμόζοντας την SFM-MVS για την ψηφιοποίηση κινητών και ακινήτων αντικειμένων

Σε αυτή την παράγραφο γίνεται μια προσπάθεια συγκέντρωσης όλων των βασικών κανόνων εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου. Παρατίθενται παρακάτω με τη μορφή σημείων ώστε να δώσουν στον αναγνώστη τη δυνατότητα να εφαρμόσει τη συγκεκριμένη μέθοδο μόνος του. Επιβάλετε η αρχική εφαρμογή της σε μικρής κλίμακας έργα ώστε να ορίζονται βέλτιστα οι διάφορες παράμετροι αλλά και να εφαρμόζονται οι κανόνες που σχετίζονται με τη διαδικασία συλλογής δεδομένων. Όπως και με τις προηγούμενες μεθόδους που περιγράφονται στο παρόν κείμενο προβλέπετε η χρήση υλικοτεχνικού και λογισμικού εξοπλισμού μόνο που για τη συγκεκριμένη μέθοδο (SFM-MVS) ο υλικοτεχνικός εξοπλισμός μπορεί να περιοριστεί απλά και μόνο σε μία ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και ως εκ τούτου ενδείκνυται για πρακτική εφαρμογή δεδομένης της ύπαρξης λογισμικού από την παραπάνω λίστα.

- Χρησιμοποιήστε μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή με σχετικά υψηλή ανάλυση (>8 MPix). Η εμπειρία έχει δείξει πως για μεγάλα ακίνητα αντικείμενα σε συνδυασμό με τις τρέχουσες προδιαγραφές ενός μέσου υπολογιστικού συστήματος (σε σχέση με τη διαθέσιμη μνήμη του και την υπολογιστική ισχύ επεξεργαστή-κάρτας γραφικών) μια DSLR ή compact mirrorless DSLR με αισθητήρα περισσότερο από 10Mpix είναι αποδεκτή λύση. Οι DSLR φωτογραφικές μηχανές προσφέρουν επιλογές συμπίεσης των εικόνων σε επίπεδα όπου ο θόρυβος (compression artefacts) της συμπίεσης παραμένει χαμηλός και δεν επηρεάζει την 3Δ ανακατασκευή. Γενικά οι DSLR φωτογραφικές μηχανές προσφέρουν πιο ποιοτικά δεδομένα σε σύγκριση με τις compact ψηφιακές μηχανές. Ο αριθμός των εικονοστοιχείων είναι σημαντικός καθώς με μεγαλύτερη ανάλυση αποτυπώνουμε περισσότερη πληροφορία αλλά το ίδιο σημαντική είναι και η ποιότητα των οπτικών τμημάτων μίας φωτογραφικής μηχανής. Ένας χαμηλής ποιότητας φακός μειώνει την ευκρίνεια ανεξάρτητα της ανάλυσης. Επίσης, οι DSLR προσφέρουν περισσότερες παραμέτρους που σχετίζονται με τη λήψη και τον τρόπο αποθήκευσης μίας φωτογραφίας με αποτέλεσμα να μπορεί κανείς να διαχειριστεί ένα μεγαλύτερο εύρος φωτογραφικών προκλήσεων.
- Επίσης οι DSLR αποδίδουν καλύτερα από τις compact ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές σε υψηλές τιμές ISO το οποίο επιτρέπει τη χρήση τους σε εσωτερικούς χώρους χωρίς την ανάγκη

για επιπρόσθετο εξοπλισμό όπως είναι οι τρίποδες, τα φλας ή τη μείωση του διαφράγματος για την αύξηση του βάθους πεδίου.

- Οι ευρυγώνιοι φακοί ταιριάζουν καλύτερα σε εργασίες ανακατασκευής χωρικών συσχετισμών ανάμεσα σε σημεία σε σύγκριση με τους τηλεφακούς.
- Οι fisheye φακοί καθώς και οι υπερ-ευρυγώνιοι (ultra wide angle) δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν μαθηματικά με αποτέλεσμα να αποφέρουν κακής ποιότητας 3Δ ανακατασκευές. Ένα από τα χαρακτηριστικά που συμβάλουν αρνητικά στην 3Δ ανακατασκευή με φωτογραφικές μεθόδους είναι η υπερβολική ακτινική παραμόρφωση (radial distortion) στα όρια του φακού που μειώνει δραματικά την ακρίβεια υπολογισμού θέσης αλλά και των εσφαλμένων παραμέτρων που προκύπτουν κατά την προσπάθεια βαθμονόμησης των συγκεκριμένων τμημάτων του φακού.
- Οι στρεβλώσεις προβολής που σχετίζονται με μία σταθερή εστιακή απόσταση (fixed focal length) μοντελοποιούνται και διατηρούνται πιο εύκολα σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από φακούς με μεταβλητή εστιακή απόσταση (zoom lenses).
- Από την άλλη, οι φακοί με μεταβλητή εστιακή απόσταση (π.χ. 18-70mm) είναι πιο ευέλικτοι στη χρήση και χρησιμοποιούνται ακόμα και για πολύ κοντινές αποστάσεις (close range digital photogrammetry). Σε κάποια σημεία της βιβλιογραφίας έχει προταθεί η χρήση μονωτικής ταινίας για τη διατήρηση της εστιακής απόστασης σε τέτοιου τύπου φακούς. Επίσης προτείνεται να χρησιμοποιούνται τα άκρα της εστιακής απόστασης ως πιο σταθερές θέσεις του φακού.
- Επίπεδα αντικείμενα χωρίς πλούσια υφή (featureless επιφάνειες) καλό είναι να αποφεύγονται. Η μέθοδος είναι φιλική με αντικείμενα που παρουσιάζουν χρωματικές-έντασης μεταβολές.
- Το ίδιο ισχύει και για διαφανή – γυαλιστερά αντικείμενα που χαρακτηρίζονται ως μη-φιλικά προς τη μέθοδο. Τα αντικείμενα προς ψηφιοποίηση θα πρέπει πάντα να μη διαθέτουν έντονες φυσικές ή τεχνητές (λόγο φωτισμού) αντανακλάσεις.
- Προτείνεται η αποφυγή αποτύπωσης αντικειμένων με κινητά μέρη τα οποία δεν μπορούν να σταθεροποιηθούν αλλά και τμημάτων τους τα οποία δε σχετίζονται με το αντικείμενο προς αποτύπωση.
- Αν θα πρέπει να αποτυπώσετε γυαλιστερά αντικείμενα σε εξωτερικούς χώρους όπου δεν μπορεί να υπάρξει ελεγχόμενος φωτισμός τότε η συλλογή δεδομένων πρέπει να γίνει σε ημέρα με έντονη συννεφιά. Προτείνεται η χρήση φωτογραφικού lightbox όπου όμως αυτό επιτρέπεται.

- Οι φωτογραφίες θα πρέπει να παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό επικάλυψης (τουλάχιστον 60% ανάμεσα σε δύο γειτονικές φωτογραφίες. Για την εξασφάλιση ενός βαθμού επικάλυψης 66% ανάμεσα σε δύο γειτονικές φωτογραφίες, η φωτογραφική μηχανή θα πρέπει να κινηθεί σε μια απόσταση ανάλογη του 34% του οπτικού της πεδίου από αριστερά προς δεξιά.
- Στο κάδρο της κάθε φωτογραφίας το αντικείμενο θα πρέπει να βρίσκεται στο κέντρο και καλύπτει τα 3/5 της φωτογραφίας (image plane).
- Για την επίτευξη μίας ποιοτικής 3Δ ανακατασκευής, το αντικείμενο θα πρέπει να βρίσκεται στο κέντρο της φωτογραφίας.
- Για την επίτευξη καλής γεωμετρικής ανάλυσης του αντικειμένου θα πρέπει να αποφεύγετε η λήψη φωτογραφιών από υπερβολικές γωνίες θέασης (υπερβολική προοπτική).
- Απαραίτητη είναι η κάλυψη ενός τμήματος του αντικειμένου από τουλάχιστον τρεις διαφορετικές γωνίες θέασης. Βεβαία οι τρεις γωνίες θέασης είναι και ο ελάχιστος αριθμός που απαιτείται από τη μέθοδο για την 3Δ ανακατασκευή.
- Αποφύγετε τη χρήση ενσωματωμένου φλας και αποφύγετε τις πολύ φωτεινές φωτογραφίες. Εάν επιθυμείτε περισσότερο φως μπορείτε να φωτογραφίσετε το αντικείμενο ρυθμίζοντας την έκθεση (exposure), τις τιμές ISO και το χρώμα της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής.
- Θα πρέπει να αποφεύγονται οι φωτογραφίες με χαμηλή φωτεινότητα. Και πάλι σημαντική είναι η ρύθμιση των παραμέτρων της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής.
- Είναι γνωστό πως η φωτογραμμετρία είναι ταυτόχρονα επιστήμη και τέχνη. Το κομμάτι της τέχνης σχετίζεται εκτός των άλλων και με την κατανόηση των παραμέτρων μίας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής. Καθώς η επιτυχία της συγκεκριμένης μεθόδου βασίζεται στην ποιότητα των φωτογραφιών είναι σημαντικό να αναπτύξει κανείς τις φωτογραφικές του δεξιότητες του ξεκινώντας από το να καταφέρνει να συλλέγει καθαρές και σωστά φωτισμένες εικόνες κάτω από διαφορετικές συνθήκες φωτισμού.
- Χρησιμοποιήστε τη χαμηλότερη δυνατή ρύθμιση ISO. Όσο υψηλότερη είναι η ρύθμιση του ISO, τόσο πιο πολύ ηλεκτρονικό θόρυβο παράγουμε στον αισθητήρα της μηχανής. Αυτός ο θόρυβος επηρεάζει δραματικά τη διαδικασία αντιστοίχισης σημείων ανάμεσα στις διαφορετικές φωτογραφίες.
- Απενεργοποιήστε λειτουργίες της κάμερας όπως είναι η σταθεροποίηση εικόνας (image stabilisation) και η αυτόματη περιστροφή. Η θέση του κάθε εικονοστοιχείου είναι σημαντικό να είναι σταθερή κατά την εφαρμογή της SFM-MVS μεθόδου και οι παραπάνω μέθοδοι αλλάζουν τη θέση τους για να δημιουργήσουν μια οπτικά μόνο καλύτερη φωτογραφία.

- Η μείωση της ανάκλασης των επιφανειών επιταχύνεται με τη χρήση πολωτικών φίλτρων κυκλικής πόλωσης φίλτρων (PL-CIR). Το φίλτρο αυτό πολώνει το φως κατά τη λήψη της φωτογραφίας με στόχο να εξαλείφονται οι ανακλάσεις, να έχει ζωντανότερα (πιο κορεσμένα) χρώματα αλλά και καλύτερη αντίθεση - διαύγεια η τελική φωτογραφία.
- Αποφύγετε τη λήψη φωτογραφιών απέναντι από πηγή φωτός (είτε πρόκειται για τον ήλιο ή για κάποια άλλη τεχνητή πηγή) καθώς θα δημιουργήσει έντονες σκιές αλλά και περιοχές με υψηλή αντίθεση.
- Για την αποφυγή λήψης θολών εικόνων προτείνεται η χρήση τρίποδα και τηλεχειριστηρίου. Χαμηλά επίπεδα θολώματος (blurring) οδηγούν στην μείωση της ανάλυσης της εικόνας αλλά τα μεγάλα επίπεδα αποτρέπουν την ορθή λειτουργία των αλγορίθμων αναγνώρισης ομόλογων σημείων ανάμεσα στο σύνολο των φωτογραφιών.
- Ένα γενικός κανόνας είναι πως η ρύθμιση του διαφράγματος του φακού θα πρέπει να παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διαδικασία συλλογής δεδομένων. Σε έναν $35mm$ φακό ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής (όχι full frame), θεωρείτε καλή πρακτική να μην ρυθμίζετε το διάφραγμα σε τιμές μικρότερες του $f/11$ καθώς μετά εμφανίζονται φαινόμενα περίθλασης που θολώνουν το περιεχόμενο της φωτογραφίας και μειώνουν την ανάλυση της.
- Κατά τη φωτογράφιση μικρών αντικειμένων ρυθμίστε το διάφραγμα του φακού της φωτογραφικής μηχανής σε σημείο όπου επιτυγχάνετε το μέγιστο δυνατό βάθος πεδίου (εστιασμένα δεδομένα σε όσο το δυνατό μεγαλύτερη απόσταση από τη θέση της μηχανής).
- Εντοπίστε την ταχύτερη τιμή κίνησης του κλείστρου λαμβάνοντας υπόψη της εκάστοτε συνθήκες φωτισμού.
- Πριν την εφαρμογή των αλγορίθμων 3Δ ανακατασκευής εντοπίστε τις θολές και με κακή εστίαση φωτογραφίες και αφαιρέστε τις από το σύνολο.
- Φωτογραφίστε τα σημαντικά σημεία και τις λεπτομέρειες από πολλές διαφορετικές οπτικές γωνίες.
- Αποφύγετε το κόψιμο (cropping) ή οποιαδήποτε γεωμετρικό μετασχηματισμό των φωτογραφιών. Η ανάλυση της φωτογραφίας σε συνδυασμό με κάποια χαρακτηριστικά του φακού της φωτογραφικής μηχανής αποθηκεύονται στο EXIF header του αρχείου το οποίο και χρησιμοποιεί το λογισμικό ως μεταβλητές κατά τη διαδικασία του bundle adjustment. Έτσι οποιαδήποτε μεταβολή της γεωμετρίας της φωτογραφίας αναιρεί την πληροφορία που φιλοξενεί ο EXIF header με αποτέλεσμα να προκύπτουν λανθασμένες 3Δ ανακατασκευές.

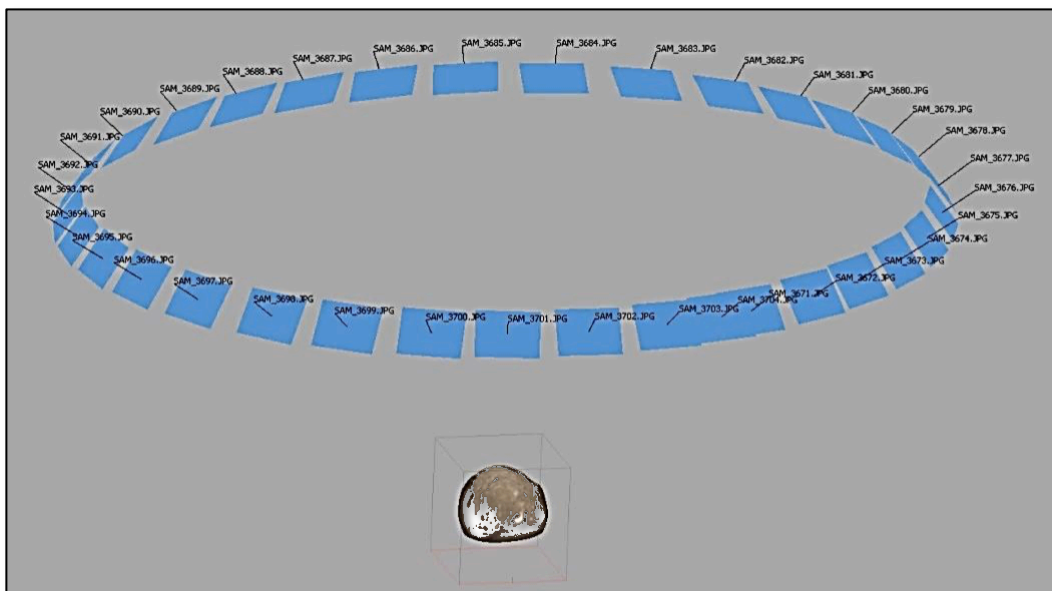
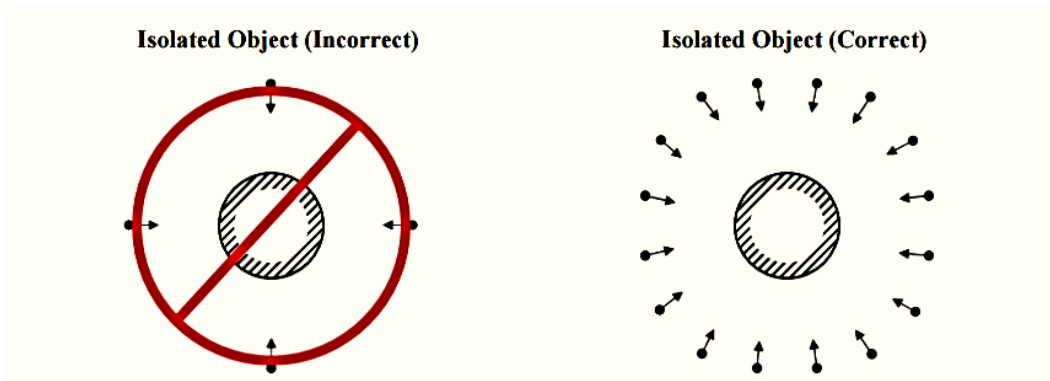
- Για τον υπολογισμό του οπτικού πεδίου της κάθε φωτογραφίας το λογισμικό χρησιμοποιεί την πληροφορία που είναι αποθηκευμένη στο EXIF header του κάθε αρχείου. Μόνο όταν υπάρχει αυτή η πληροφορία θα επιτυγχάνετε η βέλτιστη ποιότητα 3Δ ανακατασκευής. Σε περιπτώσεις όπου η συγκεκριμένη πληροφορία απουσιάζει τότε κάποια λογισμικά κάνουν υποθέσεις ώστε να καταφέρουν να πετύχουν μια 3Δ ανακατασκευή. Στην περίπτωση του Agisoft Photoscan, το λογισμικό υποθέτει τη χρήση φακού με εστιακή απόσταση (focal length) 35mm (αντίστοιχο 50mm σε full frame μηχανές) και προσπαθεί να λύσει το πρόβλημα με αυτά τα δεδομένα. Η μεγάλη απόκλιση από τη συγκεκριμένη τιμή οδηγεί σε σφάλματα ή ακόμα και σε αδυναμία ανακατασκευής.
- Σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει η κατάλληλη πληροφορία στο EXIF header του κάθε αρχείου τότε αυτή μπορεί να υπολογιστεί μέσα από διαδικασίες βαθμονόμησης της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής όπου προκύπτουν όλοι παράμετροι παραμόρφωσης που εισάγει ένας φακός.
- Οι φωτομετρικές αλλαγές (π.χ. Brightness, contrast, κλπ) στις φωτογραφίες δεν επηρεάζουν την 3Δ ανακατασκευή όταν αυτές βέβαια εφαρμόζονται σε όλο το σύνολο φωτογραφιών και δεν εισάγουν έντονες αντιθέσεις και απώλεια λεπτομέρειας σε περιοχές της εικόνας.
- Καθώς η συλλογή δεδομένων είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείτε σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, κάτω από διαφορετικές συνθήκες αλλά και με βαριά χρήση του εξοπλισμού θα πρέπει κανείς να δώσει έμφαση στην ποιότητα αλλά και στην ευρωστία του.
- Ως γενικός κανόνας είναι προτιμότερο να συλλέξετε περισσότερα δεδομένα παρά να επιστρέψετε στο γραφείο και να έχετε ότι έχετε δεν επαρκούν για μια ολοκληρωμένη ανακατασκευή. Οι επιπλέον φωτογραφίες οδηγούν στη βελτίωση του πλεονασμού δεδομένων (data redundancy).
- Εξοπλισμός όπως τα περιστρεφόμενα τραπέζια και οι μπάρες ολίσθησης συμβάλλουν στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής δεδομένων.
- Όταν υπάρχει ανάγκη για λήψη εναέριων φωτογραφιών τότε απαιτείται και μια επιπλέον προσπάθεια προσδιορισμού του βέλτιστου τρόπου λήψης ανάλογα με τις ανάγκες του έργου ψηφιοποίησης. Τέτοιοι τρόποι είναι τα μεταβλητού μήκους μονόποδα, ανυψωτικές πλατφόρμες και επανδρωμένα και μη- επανδρωμένα πτητικά μέσα (UAV, ελικόπτερα, κλπ).
- Η σχεδίαση της διαδικασίας συλλογής δεδομένων είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία και αφορά τον επίγειο και εναέριο τρόπο συλλογής. Όπου είναι εφικτό, επισκεφτείτε το μνημείο ή το χώρο όπου φυλάσσετε το αντικείμενο και πραγματοποιήστε δοκιμαστικές λήψεις οι οποίες

θα βοηθήσουν στην καλύτερη ανάπτυξη του σχεδίου συλλογής δεδομένων. Λάβετε υπόψη σας τις συνθήκες εργασίας και άλλες πιθανές προκλήσεις όπως τα καιρικά φαινόμενα, την προσβασιμότητα του μνημείου ή του χώρου όπου φυλάσσετε το αντικείμενο, τον εξοπλισμό που πρέπει να μεταφέρετε μαζί σας, τις απαιτήσεις για το πλήθος ατόμων της ομάδας ψηφιοποίησης, τους κανονισμούς ασφαλείας, τις νομικές ευθύνες και τις έγγραφες άδειες που απαιτούνται κατά την ψηφιοποίηση τμημάτων του πολιτιστικού μας αποθέματος.

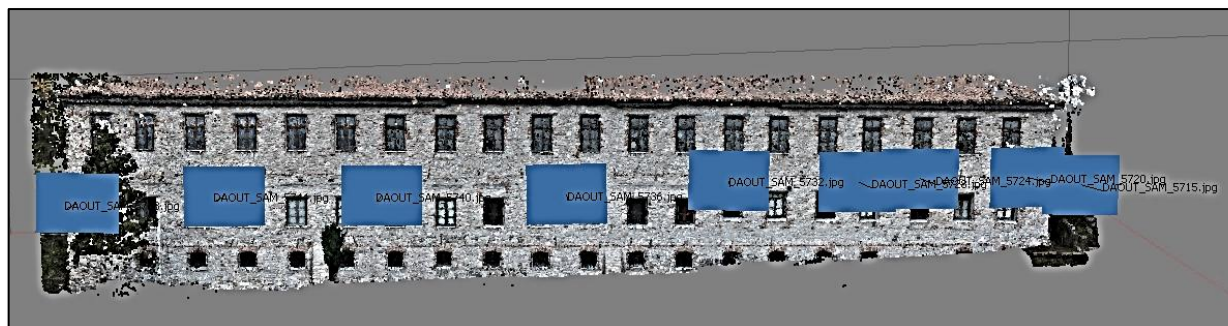
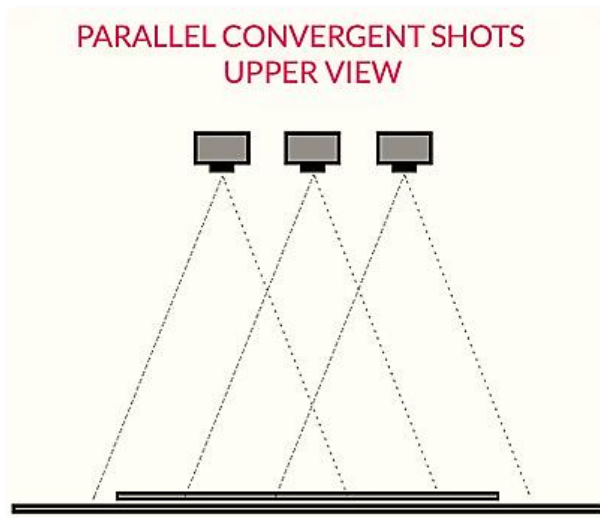
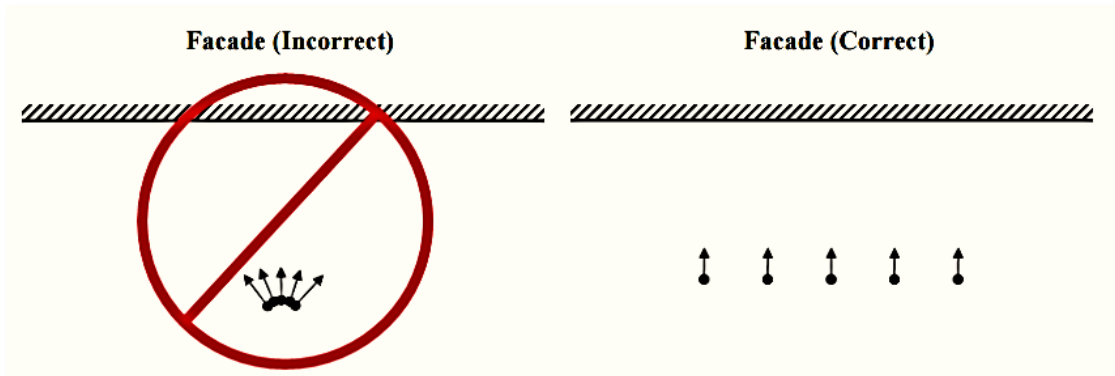
- Κατά τη συλλογή δεδομένων υπάρχει ανάγκη για τον καθορισμό ενός συστήματος συντεταγμένων αναφοράς για την κλιμάκωση του 3Δ μοντέλου σε πραγματικές διαστάσεις. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο χρειάζεται η τοποθέτηση φωτοσταθερών (φωτογραμμετρικών στόχων) οι οποίοι θα αποτελούν σημείο αναφοράς του συστήματος συντεταγμένων και της κλίμακας. Πάντα φροντίστε για την ποιότητα των μετρήσεων που αφορούν το συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων και κλίμακας αφού όποιο σφάλμα υπάρχει εκεί θα εμφανίζεται σε κάθε μέτρηση που πραγματοποιείται πάνω στο 3Δ μοντέλο.

Είναι σημαντικό να γνωρίζει κανείς τον τρόπο λειτουργίας της SFM-MVS μεθόδου πριν ξεκινήσει τη διαδικασία συλλογής δεδομένων. Επίσης θα πρέπει να κατανοεί τα 3Δ μορφολογικά χαρακτηριστικά και τη δομή ενός αντικειμένου ή ενός μνημείου ώστε να μπορεί να εντοπίσει το βέλτιστο τρόπο συλλογής δεδομένων είτε αυτός είναι γύρω από το αντικείμενο κατά 360° είτε κατά 180°. Λόγω της ευελιξίας της μεθόδου είναι δυνατό κανείς να ανακατασκευάσει σε τρεις διαστάσεις αντικείμενα συλλέγοντας δεδομένα ακολουθώντας διαφορετικές προσεγγίσεις (οριζόντια, κάθετα, εναέρια, κλπ). Παρακάτω παραθέτονται μια σειρά από προσεγγίσεις επίγειας συλλογής δεδομένων με στόχο την 3Δ ανακατασκευή με τη μέθοδο SFM-MVS.

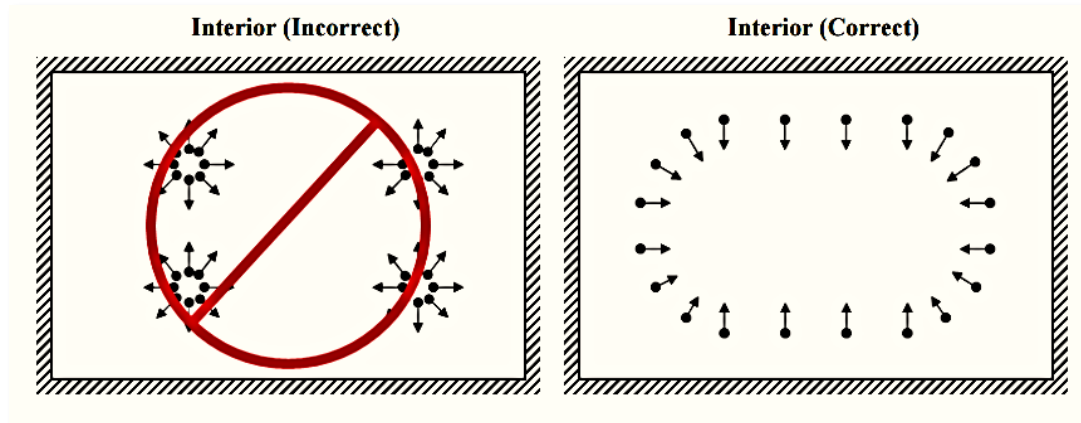
- ι. **Φωτογράφιση κινητού αντικειμένου** : Δημιουργία πολλαπλών κλειστών βρόχων από φωτογραφίες που προβάλλουν το αντικείμενο από διαφορετικές οπτικές γωνίες τοποθετημένες πάνω σε ένα νοητό κύκλο. Για κυλινδρικά αντικείμενα θα πρέπει να υπάρχει μια απόσταση 10° - 15° ανάμεσα σε δύο γειτονικές φωτογραφίες ώστε να εξασφαλισθεί η απαιτούμενη αλληλοεπικάλυψη του περιεχομένου της κάθε φωτογραφίας. Φυσικά η απόσταση αυτή μπορεί να μειωθεί ανάλογα με τις ανάγκες που προκύπτουν και σχετίζονται με την πολυπλοκότητα της επιφάνειας του αντικειμένου και τις κοιλότητες που αυτό φέρει.



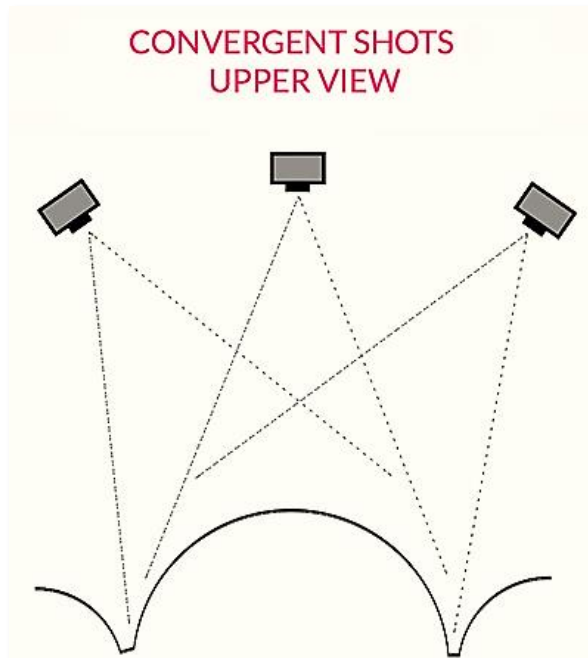
- ii. **Φωτογράφιση πρόσοψης κτιρίου:** Παράλληλες συγκλίνουσες λήψεις με χρήση τρίποδα ή μεταβλητού ύψους μονόποδο. Η φωτογραφική μηχανή μετακινείται πάνω σε μία νοητή γραμμή και σε τακτά διαστήματα (ανάγκη για 60% επικάλυψη) πραγματοποιούμε λήψη φωτογραφίας. Η κίνηση πρέπει να γίνει γίνεται συστηματικά αριστερά προς δεξιά και δεξιά προς αριστερά καθώς το λογισμικό μπορεί να εκμεταλλευτεί το συγκεκριμένο τρόπο λήψης και να μειώσει το συνολικό χρόνο ανακατασκευής.



- iii. **Φωτογράφιση εσωτερικού χώρου:** Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται για την ανακατασκευή ενός δωματίου ή του εσωτερικού χώρου ενός μνημείου. Ένα σύνολο από φωτογραφίες θα πρέπει να συλλεχθούν με τον τρόπο που προβάλλει η παρακάτω εικόνα σε διαφορετικά ύψη.



- iv. **Φωτογράφιση με συγκλίνουσες λήψεις:** Η μέθοδος εφαρμόζεται για την ανακατασκευή αντικειμένων ή μνημείων με έντονο ανάγλυφο στις εξωτερικές επιφάνειες του ώστε να επιτευχθεί πλήρη κάλυψη των πτυχών χωρίς να υπάρχουν έντονες γωνίες προοπτικής κατά τη λήψη.



Απόσταση φωτογράφισης και διαστασιολόγηση αντικειμένων

Σε αυτή την παράγραφο συγκεντρώνονται κάποιες γενικές κατευθυντήριες γραμμές σχετικές με το ποιες πρέπει να είναι οι αποστάσεις φωτογράφισης από το αντικείμενο και προτείνονται κάποια παραδείγματα που σχετίζονται με το μέγεθος αυτού αντικειμένου.

Για μικρά αντικείμενα που κυμαίνονται από μερικά εκατοστά έως και 30cm ύψος, μία αποδεκτή απόσταση (πάντα σχέση με το φακό και τις απαιτήσεις του έργου ψηφιοποίησης) μπορεί να είναι μεταξύ 10cm και 50cm συνδυασμένη με μια εστιακή απόσταση ανάμεσα στα 3mm με 12mm και φωτογράφιση με συγκλίνουσες λήψεις. Από την άλλη, για μεγαλύτερα αντικείμενα όπως ένα άγαλμα ή ακόμα μεγαλύτερα όπως ένα μνημείο θα πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του τους περιορισμούς των σημερινών υπολογιστικών συστημάτων σε επίπεδο διαθέσιμης μνήμης. Ένα εφαρμοσμένο εύρος αποστάσεων για τέτοια αντικείμενα κυμαίνεται μεταξύ των 3 και 6 μέτρων.

Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να γίνει μια αναφορά στη μετρική *απόσταση δείγματος εδάφους* (Ground Sampling Distance - GSD). Η μετρική αντιπροσωπεύει την απόσταση από το κέντρο ενός εικονοστοιχείου μίας φωτογραφίας έως την επιφάνεια του αντικειμένου (π.χ. έδαφος). Αρχικά η μετρική χρησιμοποιήθηκε για να ορίζεται το υψόμετρο πτήσης κατά το οποίο θα πραγματοποιούνται αεροφωτογραφίσεις στο πλαίσιο κάποιου έργου εναέριας φωτογραμμετρίας. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της GSD τόσο μικρότερη είναι η χωρική ανάλυση (spatial resolution) της φωτογραφίας και άρα λιγότερες λεπτομέρειες θα εμφανίζονται στις φωτογραφίες. Για παράδειγμα μία GSD στα 5cm υποδεικνύει πως το ένα εικονοστοιχείο αναπαριστά 5cm του εδάφους (στον πραγματικό κόσμο). Θα πρέπει να σημειωθεί πως σε ένα σύνολο από φωτογραφίες η GSD είναι αδύνατο να παραμείνει σταθερή. Αφού ακόμα και στην περίπτωση της μίας φωτογραφίας η μορφολογία της επιφάνειας ενός αντικειμένου μεταβάλλεται με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα εύρος αποστάσεων (ελάχιστο και μέγιστο) μέσα στο οποίο ορίζεται η GSD. Ως εκ τούτου κατά τη διάρκεια της συλλογής των δεδομένων (ακολουθίες φωτογραφιών) θα πρέπει να γίνεται μια προσπάθεια περιορισμού αυτού του εύρους καθώς αυτό σχετίζεται με την ανάλυση του 3D μοντέλου που θα ανακατασκευαστεί. Ως ένας γενικός κανόνας είναι πως η τιμή της GSD πρέπει να είναι 2-3 φορές μικρότερη από το μέγεθος της μικρότερης λεπτομέρειας της οποίας πρέπει να αποτυπώσουμε. Επίσης, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του 3D μοντέλου με τη χρήση λογισμικού μπορεί κανείς να κανονικοποιήσει την απόσταση ανάμεσα στις κορυφές του πλέγματος ώστε να υπάρχει μια μέση απόσταση που καθορίζει και την τελική ανάλυση

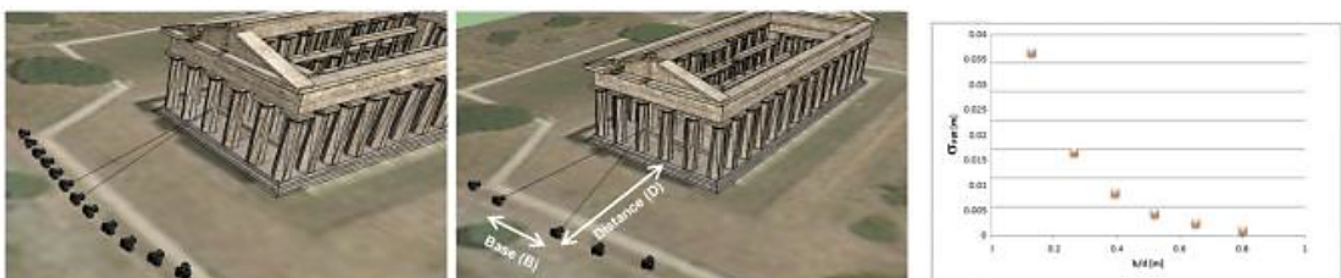
του μοντέλου. Για τον υπολογισμό της GSD για φωτογραφικές μηχανές μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τον παρακάτω τύπο :

$$GSD = h_g / c_k \times \text{CCD μέγεθος εικονοστοιχείου αισθητήρα}$$

όπου h_g = ύψος πτήσης από το έδαφος (απόσταση από την επιφάνεια του αντικειμένου) και c_k = εστιακή απόσταση (focal length)

Το μέγεθος του εικονοστοιχείου του αισθητήρα της φωτογραφικής μηχανής μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τη μεγάλη διάσταση του ίδιου του αισθητήρα. Για παράδειγμα μία ψηφιακή φωτογραφική μηχανή διαθέτει έναν αισθητήρα με μέγεθος **23.5 x 15.7mm** και η ανάλυση της φωτογραφίας που παράγει είναι **5472 x 3647** (λόγος 3:2) τότε το μέγεθος του εικονοστοιχείου πάνω στον αισθητήρα είναι $23.5/5472 = 0.0042945 \text{ mm} = 4.2945 \mu\text{m}$. Ανάλογα με τον κατασκευαστή των αισθητήρων το μέγεθος ενός εικονοστοιχείου κυμαίνεται μεταξύ 4 και 12 μm . Για κάθε ψηφιακή φωτογραφική μηχανή ο συνδυασμός της εστιακής απόστασης και το μέγεθος του εικονοστοιχείου χαρακτηρίζουν το προφίλ λειτουργίας της.

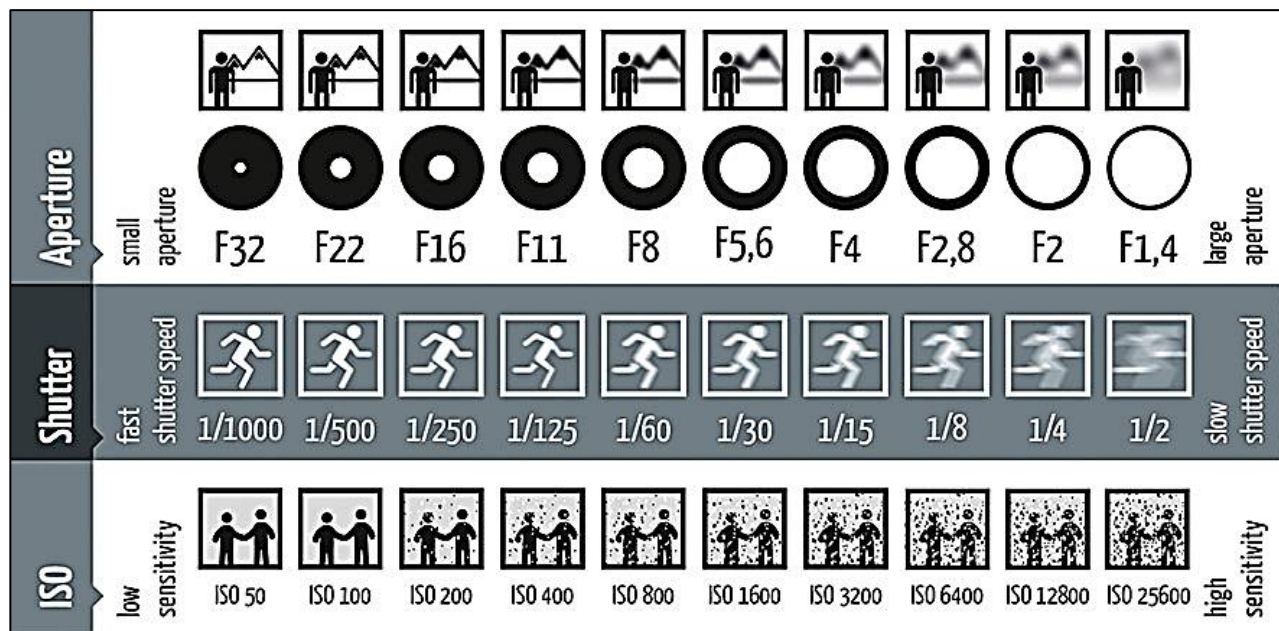
Επιπρόσθετα, ακόμα μια μετρική που επηρεάζει τη συλλογή δεδομένων είναι ο λόγος B/D, δηλαδή η σχέση της απόστασης ανάμεσα στα κέντρα λήψης δύο φωτογραφιών (image base line) και της απόστασης τους από το αντικείμενο (Distance). Σε ένα έργο φωτογραμμετρίας μια μεγάλη τιμή B/D είναι σημαντική για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων από την άλλη όμως οδηγεί σε μεγάλες αποκλίσεις του περιεχομένου της φωτογραφίας καθώς και σε έντονες αποφράξεις περιοχών με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποιότητα την 3Δ ανακατασκευής όταν χρησιμοποιούμε την SFM-MVS μέθοδο. Ένα εύρος τιμών της B/D μετρικής το οποίο έχει αναφερθεί σε αρκετές επιστημονικές εργασίες βρίσκεται ανάμεσα στις 0.16 και 0.5 ή ίσως και ακόμα μεγαλύτερες. Αυτό που θα πρέπει κανείς να έχει ως γενικό κανόνα είναι ότι η ακρίβεια υπολογισμού του βάθους μειώνεται αισθητά όταν οι τιμές της μετρικής B/D είναι μικρότερη από 0.3.



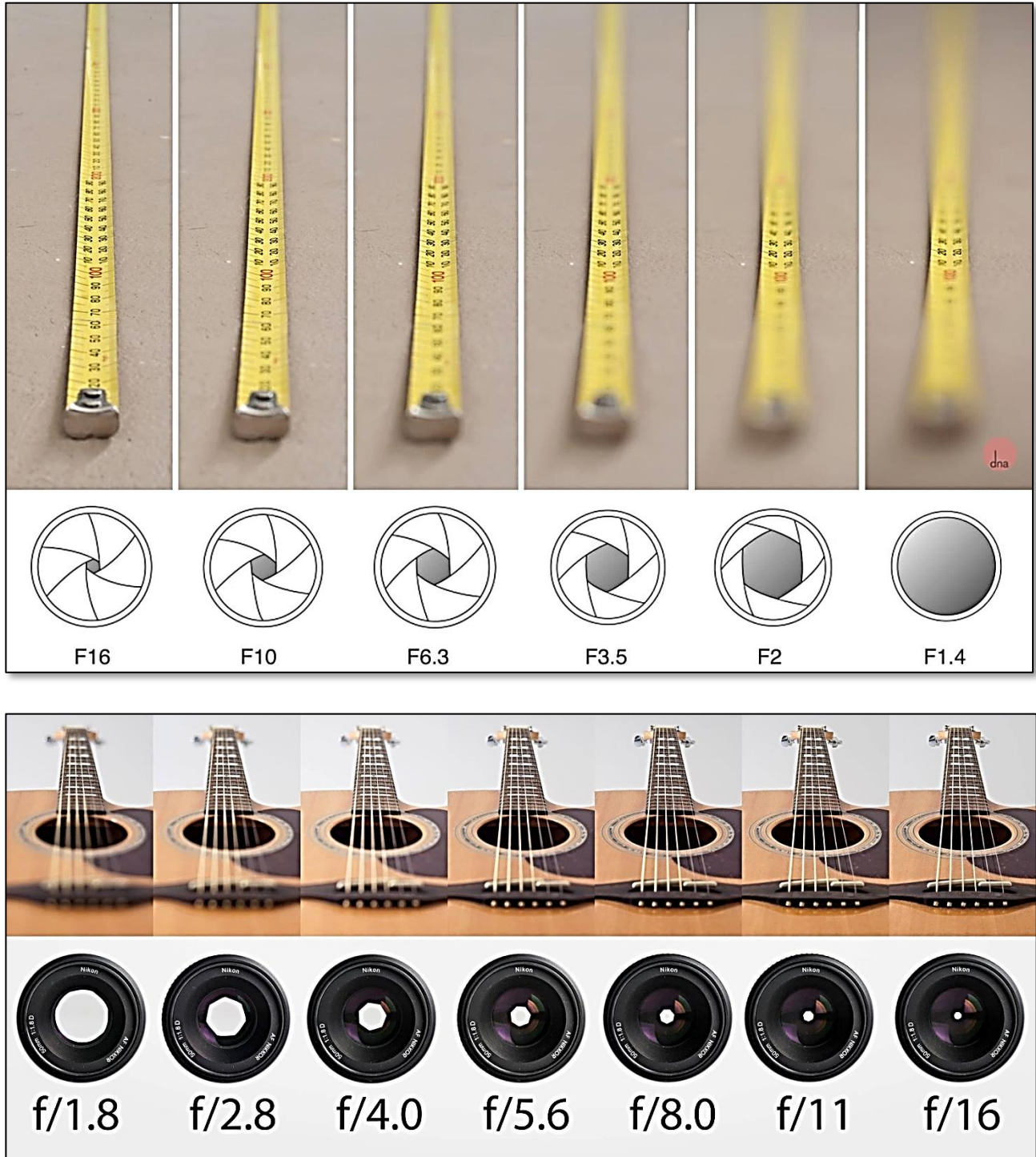
Εικόνα 2 Ο λόγος ανάμεσα σε δύο κέντρα λήψης φωτογραφιών και η απόσταση τους από το αντικείμενο

Βασικές παράμετροι μίας φωτογραφικής μηχανής

Κάποιες παράμετροι της φωτογραφικής μηχανής σχετίζονται άμεσα με την απόσταση ανάμεσα στο αντικείμενο και την ίδια. Τέτοιες παράμετροι είναι το διάφραγμα, η ταχύτητα του κλείστρου και οι τιμές ISO. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι παράμετροι αυτοί και η επιρροή τους πάνω στο περιεχόμενο της φωτογραφίας. Αξίζει να σημειωθεί η επίδραση του μικρού διαφράγματος (aperture) σε σχέση με το βάθος πεδίου και την ταχύτητα του κλείστρου (χρόνος έκθεσης) (shutter speed). Εν συντομία, το διάφραγμα είναι το μέγεθος του ανοίγματος στο φακό, μέσω του οποίου το φως ταξιδεύει προς τον αισθητήρα της φωτογραφικής μηχανής ενώ η ταχύτητα του κλείστρου (επίσης γνωστό και ως χρόνος έκθεσης) καθορίζει το χρονικό διάστημα που το κλείστρο της φωτογραφικής μηχανής παραμένει ανοικτό. Κατά τη διάρκεια που το κλείστρο παραμένει ανοικτό το φως φτάνει στον αισθητήρα της κάμερας.



Εικόνα 3 Βασικές παράμετροι μίας φωτογραφικής μηχανής



Εικόνα 4 Οπτικοποίηση σχέσης διαφράγματος και βάθους πεδίου

Μοντέλο Κάμερας Οπής (Pinhole Camera) και εστιακή απόσταση

Αποτελεί το πιο κοινό γεωμετρικό μοντέλο δομής του εσωτερικού μιας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται σε όλες στις φωτογραμμετρικές μεθόδους και δεν αφορά μόνο την SFM μέθοδο. Στη πραγματικότητα το συγκεκριμένο μοντέλο προσεγγίζει την λειτουργία των περισσότερων φωτογραφικών μηχανών και αποτελεί ένα καλό παράδειγμα για την κατανόηση της εσωτερικής τους γεωμετρίας. Σύμφωνα με το μοντέλο προβολής της κάμερας οπής, η σχέση ανάμεσα σε ένα σημείο στον πραγματικό κόσμο (3Δ) και μίας αναπαράστασης (προβολής) του πάνω σε μία εικόνα (2Δ εικονοστοιχείο) εξαρτάται από τρεις συνιστώσες. Αυτές είναι οι εξής:

1. Μετασχηματισμός στερεού σώματος οποίος αφορά την μετατόπιση και την περιστροφή της φωτογραφικής μηχανής στο 3Δ χώρο.

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

όπου R είναι ένας πίνακας περιστροφής 3×3 της φωτογραφικής μηχανής και T το διάνυσμα που περιγράφει την μετατόπιση στο χώρο σε σχέση με κάποια αρχική ή προηγούμενη θέση.

2. Ο μετασχηματισμός προβολή από τρεις σε δύο διαστάσεις που βασίζεται και πάλι στην αρχή

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

των όμοιων τριγώνων. όπου f είναι η εστιακή απόσταση (focal length).

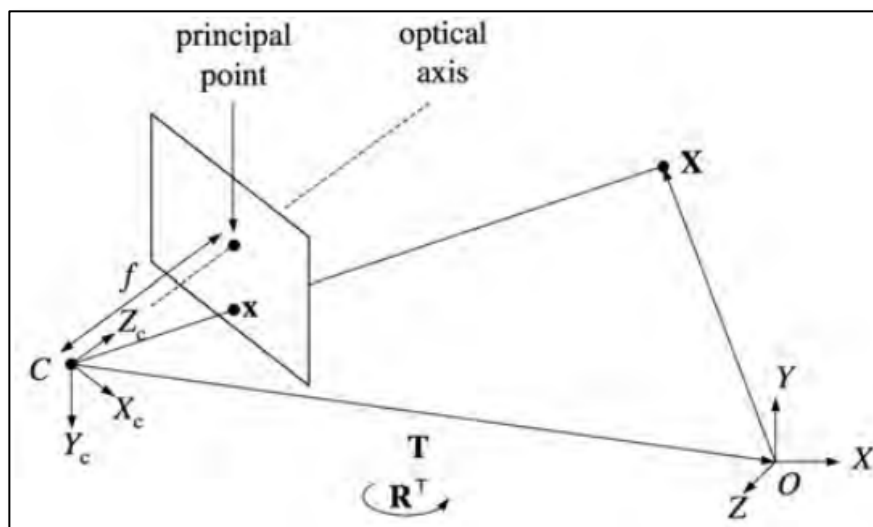
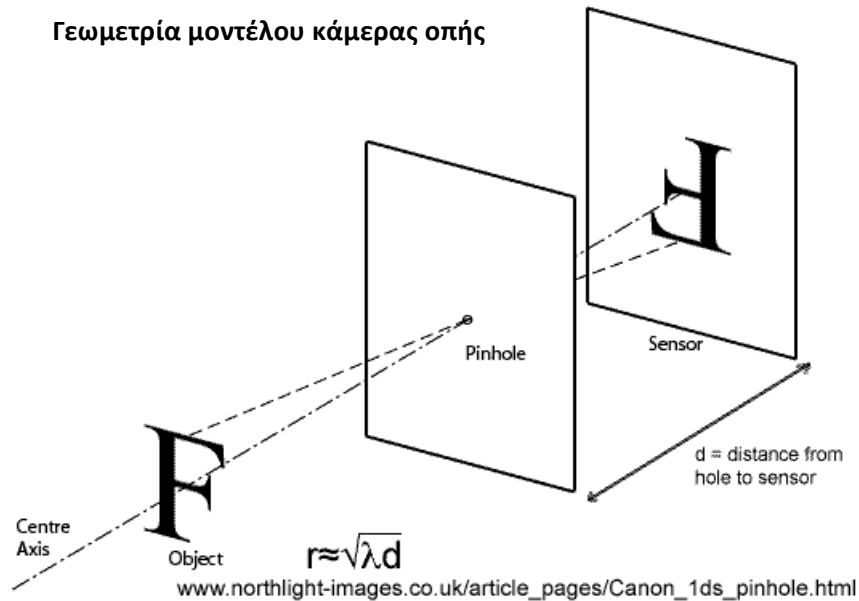
3. Ο μετασχηματισμός $\tilde{u} \sim K\tilde{x}$ που συσχετίζει τις ακέραιες θέσεις (συντεταγμένες) των εικονοστοιχείων στην εικόνα $\tilde{u} \sim [u \ v \ 1]^T$, με τις διορθωμένες συντεταγμένες τους λαμβάνοντας υπόψη την απόκλιση του πρωτεύοντος σημείου πάνω στον αισθητήρα της

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_u & s & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

με α_u, α_v οι συντελεστές κλιμάκωσης σε δύο

διαστάσεις, s ο βαθμός στρέβλωσης και $u_0 = [u_0 \ v_0]^T$. Αυτές είναι οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού μίας φωτογραφικής μηχανής που ακολουθεί το μοντέλο οπής. Να σημειωθεί ότι το σχήμα των εικονοστοιχείων θεωρείτε πάντα ότι είναι τετράγωνο και ως εκ τούτου ισχύει πως με $\alpha_u = \alpha_v = \alpha$ και $s=0$. Άρα ως τιμή του α ορίζεται η εστιακή απόσταση

του φακού το οποίο εκφράζεται σε εικονοστοιχεία. Ως πρωτεύον σημείο (principal point) ορίζεται το κέντρο του αισθητήρα της φωτογραφικής μηχανής.

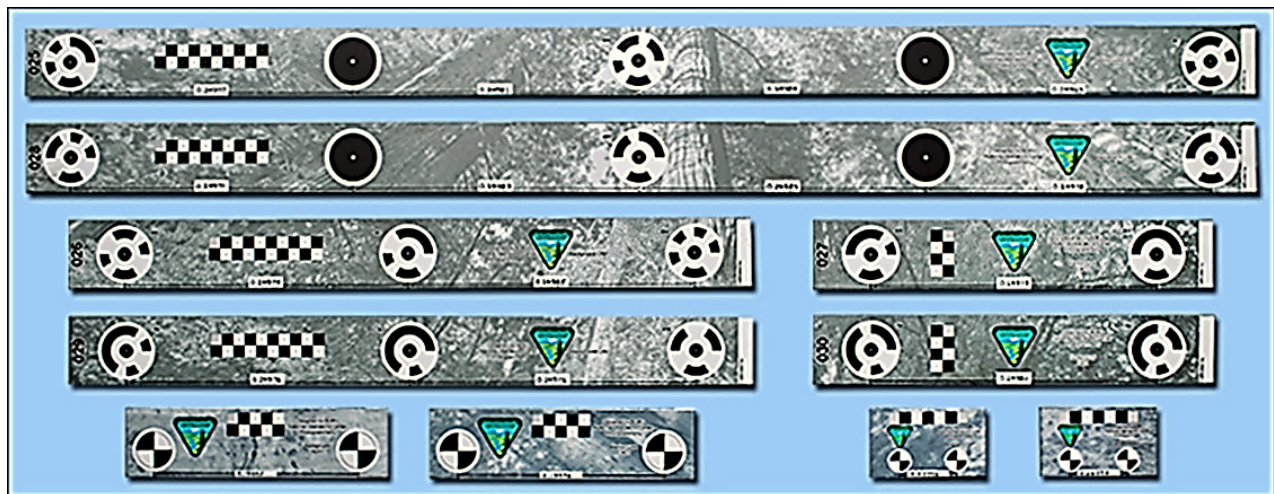


Εικόνα 5 Προβολή σημείου X από τον 3D χώρο μέσω της κάμερας που ακολουθεί μοντέλο οπής

Φωτοσταθερά, στόχοι και κλίμακες

Η SFM-MVS μέθοδος παράγει 3D μοντέλα τα οποία έχουν σωστές αναλογίες αλλά βρίσκονται σε ένα αφηρημένο σύστημα συντεταγμένων αναφοράς. Με τη χρήση φωτοσταθερών, στόχων και κάποιων κλιμάκων μπορούμε να κλιμακώσουμε το 3D μοντέλο ώστε οι αποστάσεις ανάμεσα στις κορυφές του να ταυτίζονται με αυτές του πραγματικού κόσμου. Υπάρχει μια πληθώρα από σχετικά προϊόντα τα

οποία μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει είτε σε εσωτερικού χώρου είτε εξωτερικού χώρου έργα 3Δ ψηφιοποίησης. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων προϊόντων είναι η ακρίβεια τους και η βαθμονόμηση κατά την κατασκευή τους, η ποιότητα κατασκευής και η αντοχή τους στο χρόνο, στο νερό καθώς και οι διαφορετικές εκδόσεις τους (κλίμακες) που θα μπορέσουν καλύψουν τις ανάγκες διαφορετικών έργων ψηφιοποίησης. Πολλές φορές, συναντούμε κλίμακες που φέρουν επάνω πληροφορία υψής που είναι φιλική με τη μέθοδο SFM-MVS έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η 3Δ ανακατασκευή ολόκληρης της κλίμακας. Επίσης κάποια λογισμικά SFM-MVS (π.χ. Agisoft Photoscan) διαθέτουν δικά του φωτοσταθερά που μπορεί κανείς να εκτυπώσει ακόμα και μόνος του. Το πλεονέκτημα με αυτά είναι ότι αναγνωρίζονται αυτόματα από το λογισμικό μέσα στις φωτογραφίες με αποτέλεσμα να παράγει αυτόματα σωστά κλιμακωμένα μοντέλα αφού ο χρήστης εισάγει τις αποστάσεις ανάμεσα στα κέντρα των φωτοσταθερών.



Εικόνα 6 Παραδείγματα από φωτοσταθερά κλιμάκωσης με χαρακτηριστικά υψής φιλικά προς τη μέθοδο SFM-MVS

Επίσης, κατά την ψηφιοποίηση αρχαιολογικών χώρων ή μνημείων συνήθως ορίζονται σημεία ελέγχου εδάφους (ground control points - GCPs) όπου οι θέσεις τους (συντεταγμένες) υπολογίζονται με συστήματα GNSS – Global Navigation Satellite System. Η ύπαρξη των GCPs επιτρέπει τη γεωαναφορά του 3Δ μοντέλου έτσι ώστε εκτός από τη δυνατότητα υπολογισμού αποστάσεων ανάμεσα σε σημεία πάνω στο μοντέλο μπορεί κανείς να εντοπίσει και τη θέση αυτών των σημείων στο κόσμο αφού μπορεί να εξάγει το γεωγραφικό μήκος και πλάτος.

Φιλικά και μη-φιλικά υλικά με τη μέθοδο SFM-MVS

Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά μια σειρά από υλικά που χαρακτηρίζονται ως φιλικά και ως μη-φιλικά για ψηφιοποίηση με τη μέθοδο SFM-MVS. Η αναφορά τους σε μία από τις δύο κατηγορίες δεν είναι απόλυτη και ως εκ τούτου οι παρακάτω λίστες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μόνο ενδεικτικά και για κάθε έργο ψηφιοποίησης θα πρέπει να γίνεται επιτόπιος έλεγχος του αντικειμένου προς ψηφιοποίηση.

Φιλικά υλικά: φυσική πέτρα, επεξεργασμένη πέτρα, έδαφος, μάρμαρο (όχι λευκό), κόκκαλο, ξύλο, δέρμα, ψαμμίτης, σίδηρο, μπρούντζος, χαλκός, χρυσό, γύψος, κεραμικά, τούβλα

Μη-φιλικά υλικά: νερό, γυαλί, βλάστηση, φυτά (σε ελεγχόμενο περιβάλλον μπορούν να αποτυπωθούν), βερνίκι, ασάλι, μονοχρωματικές πλαστικές-γυαλιστερές επιφάνειες, γυαλιστερός χρυσός-χαλκός-μπρούντζος-σίδηρο.

Παράδειγμα φωτογραφιών που παρουσιάζουν προβλήματα κατά την επεξεργασία τους από τη μέθοδο SFM-MVS

Παρακάτω παρουσιάζονται μια σειρά από φωτογραφίες που επηρεάζουν αρνητικά την 3Δ ανακατασκευή του περιεχομένου τους με τη μέθοδο SFM-MVS. Δίπλα σε κάθε φωτογραφία αναφέρονται τα διάφορα προβλήματα ώστε να τα εντοπίσει ο αναγνώστης και να τα αποφύγει κατά την εκτέλεση των δικών του πειραμάτων / έργων 3Δ ψηφιοποίησης.



- Χρήση flash – Έντονα λευκά χρώματα και σκιές
- Κακό φόντο με ανακλαστικές επιφάνειες



- Πολύ σκούρα χρώματα
- Έντονες σκιές
- Ανακλάσεις



- Υπερβολική γωνία λήψης (προοπτική)
- Φωτογράφιση απέναντι σε ηλιακό φως
- Αντηλιά και ανακλάσεις σε γυάλινες επιφάνειες



- Φωτογράφιση απέναντι σε ηλιακό φως
- Αντηλιά και ανακλάσεις του φακού
- Μη-κεντραρισμένο αντικείμενο



- Το αντικείμενο εμφανίζεται πολύ μακριά
- Το μνημείο είναι πολύ μεγάλο για να ανακατασκευαστεί σωστά με μικρό πλήθος φωτογραφιών (βλέπε απόσταση λήψης) Θα μπορούσε να προκύψει ένα χαμηλής ποιότητας 3Δ μοντέλο



- Ανακλαστική επιφάνεια
- Επιφάνεια χωρίς χρωματικές μεταβολές (λευκό)



- Χαμηλός φωτισμός
- Χρήση φλας – Δημιουργία υπερφωτισμένων / υποφωτισμένων περιοχών



- Χαμηλός φωτισμός Low brightness
- Υψηλές τιμές ISO
- Πρόβλημα στο βάθος πεδίου – εστίαση
- Κακή εξισορρόπηση του λευκού χρώματος



- Χαμηλός φωτισμός
- Το αντικείμενο εμφανίζεται πολύ μακριά

2 Αναφορές

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

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

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

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

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

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

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