



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών -
Μηχανικών Γεωπληροφορικής
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας

Η συμβολή της Υπολογιστικής Φωτογραφίας στη Σύγχρονη Φωτογραμμετρία

Διπλωματική Εργασία
του
Δημήτρη Γερογιαννάκη

Επιβλέπων: Ανδρέας Γεωργόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

14 Μαρτίου 2023

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επιρροή της Υπολογιστικής Φωτογραφίας σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Για να επιτευχθεί αυτό, αρχικά θα παρουσιαστούν οι κατηγορίες και θα αναλυθούν τα κριτήρια που χαρακτηρίζουν ένα σύνολο τεχνικών και μεθοδολογιών ως “υπολογιστική φωτογραφία”. Έπειτα από την ανασκόπηση των γενικών εφαρμογών υπολογιστικής φωτογραφίας, ακολουθεί μια σειρά από φωτογραμμετρικές εφαρμογές που εξετάζουν την επίδραση της μεθόδου σε προϊόντα τοπογραφικής μεθοδολογίας. Για παράδειγμα, η αύξηση του δυναμικού εύρους σε περιπτώσεις φωτογραφικής καταγραφής πολιτιστικής κληρονομιάς επιτρέπει την υπέρβαση προβλημάτων και φυσικών περιορισμών που απαντώνται κατά τις προσπάθειες για φωτογραμμετρική απεικόνιση π.χ. λόγω ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των ίδιων των αντικειμένων, του περιβάλλοντος και των συνθηκών. Με τη διαδικασία παραγωγής “ενισχυμένων” εικόνων κάνοντας χρήση τεχνικών υπολογιστικής φωτογραφίας, καθίσταται δυνατή η συλλογή περισσότερης πληροφορίας. Κατά συνέπεια, εφαρμόζοντας φωτογραμμετρικές διαδικασίες σε εικόνες πιο πλούσιες σε πληροφορία, αναμένεται βελτίωση των αποτελεσμάτων. Το κατά πόσο και με ποιόν τρόπο επηρεάζεται τόσο η φωτογραφία και τα ενδιάμεσα στάδια αρχικώς αλλά ακόμα περισσότερο τα προϊόντα τελικώς θα πρέπει να ερευνηθούν στην παρούσα εργασία. Διάφορες εφαρμογές παρουσιάζονται για τη λήψη, την επεξεργασία, σύνθεση και τελικά την παραγωγή μιας εικόνας, η οποία έχει προκύψει από τεχνικές και μεθόδους υπολογιστικής φωτογραφίας. Η παρούσα ανάλυση επιχειρεί μια καταγραφή των τεχνικών υπολογιστικής φωτογραφίας, για την καλύτερη κατανόηση των διαθέσιμων ψηφιακών εργαλείων που προσφέρει και πώς αυτά μπορούν να βελτιώσουν φωτογραμμετρικές εφαρμογές.

Λέξεις-κλειδιά: Υπολογιστική φωτογραφία, φωτογραμμετρία, υψηλό δυναμικό εύρος· ενίσχυση εικόνας

Abstract

This thesis studies the effect of Computational Photography on photogrammetric applications. To achieve this, the categories must be presented, and the criteria must be analysed to characterise a group of techniques and methodologies as “computational photography”. After a review of the general applications of computational photography, a series of photogrammetric applications follow, which examine the effect of the method on products of topographical methodologies. For instance, the increase of the dynamic range in case studies pertaining to cultural heritage sites allows the overcoming of problems and physical limitations which are faced during the efforts for photogrammetric acquisition, e.g. due to special features of the objects themselves, of the environment and the conditions present at the site. With the process to produce “enhanced” images via computational photography, it becomes feasible to collect an increased amount of information. Therefore, applying photogrammetric processes on images richer in terms of information is expected to improve the achieved results. The extent and the ways in which the acquired images and their processing stages are improved on one hand, as well as the produced results, are of interest in this present thesis. Various techniques are presented for the acquisition, the processing and the production of an image using computational photography. The present study attempts a documentation of the techniques to apply computational photography, to improve the understanding of the reader on the available digital tools it offers and how these can be used to improve applications of a photogrammetric nature.

Keywords: Computational photography; photogrammetry; high dynamic range; image-enhancement

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, θέλω να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συντέλεσαν στη μέχρι τώρα πορεία μου. Αρχικά, τον επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ κ. Ανδρέα Γεωργόπουλο, για τη στήριξη και ευγενική καθοδήγηση καθ'όλη τη διάρκεια της εργασίας. Θέλω να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και στην οικογένειά μου, για τη συμβολή τους στην προσωπική και επαγγελματική μου εξέλιξη.

Δημήτρης Γερογιαννάκης,
Αθήνα, Μάρτιος 2023

Η Συμβολή της Υπολογιστικής Φωτογραφίας στη Σύγχρονη Φωτογραμμετρία

Δημήτρης Γερογιαννάκης

14 Μαρτίου 2023

Περιεχόμενα

1 Σκοπός και διάρθρωση της εργασίας	1
1.1 Εισαγωγή στην Υπολογιστική Φωτογραφία (ΥΦ)	1
1.2 Ορισμός του προβλήματος	2
1.3 Πεδίο εφαρμογής / Σκοπιά της ανάλυσης	3
1.4 Χρησιμότητα της παρούσας έρευνας	3
1.5 Διάρθρωση της εργασίας	3
2 Στοιχεία υπολογιστικής φωτογραφίας	5
2.1 Ορισμοί	5
2.2 Ιστορική εξέλιξη της φωτογραφίας	6
2.2.1 Φωτογραφίες βασικού επιπέδου (Film-like/Digital Photography) .	8
2.2.2 1ου Βαθμού Επεξεργασίας ΥΦ (Epsilon Photography)	10
2.2.3 2ου Βαθμού Επεξεργασίας ΥΦ (Coded Photography)	13
2.2.4 3ου Βαθμού Επεξεργασίας ΥΦ (Essence Photography)	15
2.3 Ανάλυση της υπολογιστικής φωτογραφίας	16
2.3.1 Τομείς και επιστημονικά πεδία	21
2.3.2 Όραση Υπολογιστών (Computer Vision)	23
2.3.3 Υλοποιημένες πρώιμες εφαρμογές	25
2.4 Μέθοδοι βελτίωσης της φωτογραφίας	33
2.5 Οφέλη της υπολογιστικής φωτογραφίας	51
2.6 Μειονεκτήματα της υπολογιστικής φωτογραφίας	51
3 Οπτικά μέσα απεικόνισης στην επιστήμη του Αγρονόμου και Τοπογράφου μηχανικού- Μηχανικού Γεωπληροφορικής	53
3.1 Γεωμετρική τεκμηρίωση	59
3.1.1 Η γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων	59
3.1.2 Γεωμετρική τεκμηρίωση σπηλαίων	60
3.2 Μέθοδοι γεωμετρικής τεκμηρίωσης	60
3.3 Συμπεράσματα προηγούμενων εργασιών επιλογή μεθόδων και οργάνων .	61
3.4 Ανάκτηση της τρίτης διάστασης με παθητικές μεθόδους	63
3.4.1 Στερεοσκοπική μέθοδος	64
3.4.2 Δομή από Κίνηση (SfM)	64
3.5 Ερευνητικές εφαρμογές	66
4 Εφαρμογή της υπολογιστικής φωτογραφίας στη σύγχρονη φωτογραμμε- τρία	71
4.1 Σύγχρονη Φωτογραμμετρία	71
4.2 Υψηλό Δυναμικό Εύρος (HDR)	73

4.3	HDR και απεικόνιση	74
4.4	HDR και γεωμετρική αξιοπιστία	75
4.4.1	Εξέταση εσωτερικού προσανατολισμού	77
4.4.2	Εξέταση φωτογραμμετρικών προϊόντων	78
4.5	HDR και τελεστές εντοπισμού χαρακτηριστικών σημείων	80
4.5.1	Τελεστές ανίχνευσης και περιγραφής	80
4.6	Βάθος πεδίου (DoF) και τρισδιάστατη ψηφιοποίηση	81
4.7	Πειραματικές μέθοδοι από τη βιβλιογραφία	83
4.7.1	Ορθοφωτογραφία - ορθοφωτομωσαϊκό και HDR	83
4.7.2	Χαρτογράφηση Τόνων και HDR	84
4.7.3	Ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων και HDR	86
4.7.4	Στοιβάξη εστίασης BF - FS	87
4.7.5	Στοιβάξη εστίασης FS - AF vs GD	91
4.8	Ανάλυση των αποτελεσμάτων των εφαρμογών	93
4.8.1	Επίδραση τελεστών χαρτογράφησης τόνων HDR σε 3D μοντέλα	93
4.8.2	Βελτίωση ορθοφωτομωσαϊκών με εικόνες HDR	97
4.8.3	Βελτίωση της ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων με εικόνες HDR	98
4.8.4	Αξιολόγηση FS vs BF vs Reference - 3D μοντέλων (focus stacking)	100
4.8.5	Αξιολόγηση τρισδιάστατων μοντέλων FS - AF vs GD	102
4.8.6	Φωτογραμμετρική απεικόνιση κατολισθήσεων με χρήση ΥΦ	104
4.9	Περιορισμοί	111
5	Συμπεράσματα	113
5.1	Συμπεράσματα	113
5.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	114
A'	Ακρωνύμια και συντομογραφίες	115

Κατάλογος Σχημάτων

2.1 Υπολογιστική Φωτογραφία και πρόοδος (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).	10
2.2 Εφαρμογές φωτογραφίας Epsilon, (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).	11
2.3 Συστοιχία καμερών σε μορφή πινάκα, από το πανεπιστήμιο του Stanford, που λαμβάνουν πολλαπλές φωτογραφίες ταυτόχρονα (με μερικώς διαφοροποιημένες θέσης λήψης - epsilon changes in parameters over sensors), (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).	12
2.4 Κατηγοριοποίηση Coded Photography, (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).	14
2.5 Παραδείγματα από Essence Photography στις οποίες αποτυπώνεται ένα σημαντικό υποσύνολο της οπτικής και συναισθηματικής εμπειρίας, (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).	15
2.6 Μωσαϊκό Bayer (αριστερά) και Fevon (δεξιά) sensors, (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).	20
2.7 Computational photography (πάνω) Computational illumination (κάτω), (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).	22
2.8 Υπολογιστική Φωτογραφία - Pre: Optics & Sensors - Post: Computer vision & machine learning, (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).	23
2.9 Σχέσεις σύνδεσης επιστημονικών πεδίων, Πηγή: Διαφάνειες διαλέξεων (Φωτογραμμετρία II, ΣΑΤΜ-ΕΜΠ)	24
2.10 Η F2 της Frankencamera (Πηγή: Adams et al. (2010)).	26
2.11 Η A Nokia N900, (Πηγή: Adams et al. (2010)).	27
2.12 Η αρχιτεκτονική της Frankencamera (Πηγή: Adams et al. (2010)).	28
2.13 Τα κύρια μέρη που απαρτίζουν το Kinect, Πηγή: Weerasinghe et al. (2012).	29
2.14 RGB εικόνα (αριστερά) και χάρτης βάθους/ανθρώπινη φιγούρα (δεξιά), Πηγή: Weerasinghe et al. (2012).	30
2.15 Microsoft Kinect Sensor, Πηγή: Σημειώσεις Φωτογραμμετρία I (ΣΑΤΜ-ΕΜΠ).	31
2.16 PrimeSense Light Coding Technology, Πηγή: Popescu and Lungu (2014).	32
2.17 (a) Τελικό νέφος σημείων, (b) τελικό πλέγμα, Πηγή: Popescu and Lungu (2014).	34
2.18 (a) Τελικό εκτυπωμένο μοντέλο, Πηγή: Popescu and Lungu (2014).	35
2.19 Σχηματική απόδοση καταγραφής της πληροφορίας, Πηγή: Lukac (2017).	37
2.20 Παραδείγματα μοντέλων CFAs: (a) Bayer, (b) Lukac, (c) Hamilton, (d) Hirakawa, Πηγή: Lukac (2017), IEEE 2009.	38

2.21 Παράδειγμα του διάγραμματος του συστήματος μίας κάμερας, Πηγή: Lukac (2017).	39
2.22 (a) (LDR) εικόνα, (b) HDR εικόνα, (c) TM HDR εικόνα, Πηγή: Lukac (2017).	40
3.1 Διάγραμμα φωτογραμμετρικής παραγωγής (διαχρονική εξέλιξη), Πηγή: Γεωργούλα (2021).	54
3.2 Τοπογραφικές Μέθοδοι και Τεχνικές - Böhler and Heinz (1999) (Πηγή: Βρεττού, 2016).	62
4.1 Παράδειγμα δυσμενών συνθήκων φωτισμού, Ntregka et al. (2013).	75
4.2 Εικόνες με έκθεση: -2EV, 0EV, +2EV, (Ntregka et al., 2013).	76
4.3 HDR εικόνες (αριστερή: "Global" - δεξιά: "Local") (Ntregka et al., 2013).	77
4.4 (α) Φωτογραφία με 0EV στο πεδίο ελέγχου βαθμονόμησης με φακό 24mm, (β) η αντίστοιχη HDR εικόνα (Ntregka et al., 2013).	78
4.5 Ορθοφωτομωσαϊκά με από τις (a) κανονικές και (b) HDR εικόνες (Ntregka et al., 2013).	79
4.6 Η HDR εικόνα που δημιουργήθηκε από την σύνθεση των 5, Ntregka et al. (2013).	84
4.7 Εικόνα HDR από I.M. Καισαριανής tone-mapped με διαφορετικούς TMOs: a) Fattal b) Mantiuk c) ReinhardGlobal d) ReinhardLocal e) εικόνα LDR (0 EV), πηγή: Suma et al. (2016).	85
4.8 Τοιχογραφία από I.N.Π της Ασίνου εφαρμόζοντας την τεχνική bracketing: όπου a,b,c,d,e) με τιμές έκθεσης (EV: -2, 1, 0, 1, 2). Η εικόνα f) είναι το αποτέλεσμα των συγχωνευμένων τιμών φωτεινότητας που αναπαρίστανται με "ψευδοχρώματα", πηγή: Suma et al. (2016).	86
4.9 Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων με SIFT (a) για SDR εικόνα και (b) για HDR εικόνα (Kontogianni et al., 2015).	87
4.10 Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων με FAST (a) για SDR εικόνα (14073 points) και (b) για HDR εικόνα (68001 points) (Kontogianni et al., 2015).	87
4.11 Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων με ORB (a) για SDR εικόνα (8144 points) και (b) για HDR εικόνα (20000 points) (Kontogianni et al., 2015).	88
4.12 Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων με SURF (a) για SDR εικόνα (5047 points) και (b) για HDR εικόνα (16843 points) (Kontogianni et al., 2015).	89
4.13 Μερικές σαρώσεις και ολοκληρωμένες μοντέλα αναφοράς (Kontogianni et al., 2017b).	90
4.14 Αποτελέσματα από Agisoft Photoscan (Kontogianni et al., 2017a).	90
4.15 Παράδειγμα με focus stacked εικόνα (Kontogianni et al., 2017b).	91
4.16 Αποτελέσματα από Agisoft Photoscan (MetaShape) (Kontogianni et al., 2017b).	92
4.17 Σημεία επιλογής για ευθυγράμμιση των συγκρινόμενων μοντέλων (Kontogianni et al., 2017b).	92
4.18 Το σφάλμα RMS που εκτιμήθηκε μετά την ευθυγράμμιση καθενός από τα δύο ζεύγη μοντέλων, Kontogianni et al. (2017b).	93
4.19 Σύγκριση μέσου όρου σημείων κλειδιών που ανιχνεύθηκαν με FAST, SIFT, SURF για τις LDR, Mantiuk, ReinhardGlobal, ReinhardLocal εικόνες (Suma et al., 2016).	94

4.20	Σημεία κλειδιά που εντοπίστηκαν για κάθε TMO εικόνα σε συνδυασμό με τους ανιχνευτές FAST, SURF, SIFT για τοιχογραφία από τον I.N.Π της Ασίνου (Suma et al., 2016).	95
4.21	Σημεία κλειδιά που εντοπίστηκαν για κάθε LDR εικόνα σε συνδυασμό με τους ανιχνευτές FAST, SURF, SIFT για τοιχογραφία από τον I.N.Π της Ασίνου (Suma et al., 2016).	96
4.22	Στην δεξιά εικόνα (Mantiuk) εμφανίζονται εμφανώς περισσότερα εντοπισμένα σημεία κλειδιά στην σκοτεινή περιοχή (της σκιάς) σε σχέση με την αριστερή (LDR) εικόνα - Château des Baux (Suma et al., 2016).	97
4.23	Πλήθος σημείων συντάυτησης (Suma et al., 2016).	98
4.24	Πλήθος καλών σημείων συντάυτησης (Suma et al., 2016).	99
4.26	Μέσος όρος σημείων που εντοπίστηκαν σε SDR και HDR εικόνες και για τις δύο σκηνές. Πίνακας 2: Μέσος χρόνος που χρειάστηκε (σε δευτ.) για να ανιχνευθούν χαρακτηριστικά σημεία σε SDR και HDR εικόνες για τις δυο σκηνές (Kontogianni et al., 2015).	99
4.25	Ποσοστό επαναληψιμότητας που υπολογίζεται για διαφορετικές μεθόδους χαρτογράφησης τόνων με $\epsilon=10$ εικονοστοιχεία. Ο αριθμός των βασικών σημείων που εντοπίστηκαν σε κάθε εικόνα περιορίστηκε σε 1000 σημεία (Suma et al., 2016).	100
4.27	Υποκειμενική σύγκριση ως προς το επίπεδο θορύβου για τα FS - Reference - BF μοντέλα (Kontogianni et al., 2017a).	101
4.28	Σφάλματα σε mm κατά την ευθυγράμμιση και την καταχώρηση (Kontogianni et al., 2017a).	101
4.29	Πίνακας: Επιφανειακές αποκλίσεις των BF, FS 3D μοντέλων σε σχέση με το 3D μοντέλο αναφοράς (Kontogianni et al., 2017a).	102
4.30	Απόκλιση επιφανειών των AF, FS σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς GD (Kontogianni et al., 2017b).	103
4.31	Ιστογράμμο σημειακών τιμών απόκλισης μεταξύ AF, SF σε σύγκριση με το GD (Kontogianni et al., 2017b).	103
4.32	Διαδική αναπαράσταση των τιμών με μικρότερες αποστάσεις. Η τιμή 1 δίνεται όταν το SF μοντέλο έχει μικρότερη απόσταση, ενώ αντίθετα η τιμή 0 δίνεται όταν το AF μοντέλο έχει μικρότερη απόσταση από το μοντέλο αναφοράς (Kontogianni et al., 2017b).	104
4.33	Σχεδιάγραμμα ροής εργασιών βάση της μεθολογίας που ακολουθήθηκε και των τεχνικών και εφαρμογών πουπραγραμματοποιήθηκαν - εδαφική ανίχνευση με ανάλυσης εικόνας βασιζόμενη σε αντικείμενα (Karantanellis et al., 2021).	106
4.34	Στάδια ταξινόμησης (Karantanellis et al., 2021).	107
4.35	Επιλεγμένο υποσύνολο της περιοχής υπό διερεύνηση που δείχνει τα αποτελέσματα τμηματοποίησης για διαφορετικές παραμέτρους κλίμακας (SPs) (Karantanellis et al., 2021).	108
4.36α)	Ορθοφωτογραφία που επικαλύπτεται από τα δεδομένα αναφοράς, β) το αποτέλεσμα τμηματοποίησης και γ) η τελική ταξινόμηση μετά την τελειοποίηση της μεθόδου που βασίζεται σε κανόνες για τη δομή RGB-DSM (πράσινο: μη επηρεασμένο, ανοιχτό καφέ: εξάντληση, σκούρο καφέ: scarp) (Karantanellis et al., 2021).	109
4.38	Λεπτομέρεια ταξινόμησης για τρία SPs κάνοντας χρήση των δομών RGB και RGB+DSM (Πηγή: Karantanellis et al. (2021)).	109

4.37	Παράδειγμα αποτελεσμάτων ταξινόμησης με βάση τη δομή RGB+DSM για διαφορετικούς αλγόριθμους και SPs (Σχήμα: 0,6) (πράσινο: μη επηρεασμένο, σκούρο καφέ: scarp, ανοιχτό καφέ: εξάντληση). Το κόκκινο πολύγωνο υποδεικνύει το καλύτερο αποτέλεσμα ταξινόμησης μεταξύ των διαφορετικών ρυθμίσεων (Karantanellis et al., 2021).	110
4.39	(α) Ορθοφωτογραφία με τις ζώνες επιρροής σε αλληλεπικάλυψη, (β) Αποτέλεσμα ταξινόμησης KNN, (γ) Αποτέλεσμα ταξινόμησης DT, (δ) Αποτέλεσμα ταξινόμησης RF (Πηγή: Karantanellis et al. (2021)).	110

Κεφάλαιο 1

Σκοπός και διάρθρωση της εργασίας

1.1 Εισαγωγή στην Υπολογιστική Φωτογραφία (ΥΦ)

Τα ψηφιακά μέσα βελτιώνουν τη ζωή σε διάφορα επίπεδα σε όλον τον κόσμο. Τα σχετικά παραδείγματα για διαφορετικές εκφάνσεις της καθημερινής ζωής είναι πολλά και αφορούν την κάλυψη αναγκών σε προσωπικό και επαγγελματικό επίπεδο. Η λήψη εικόνων, βίντεο και η ανταλλαγή πληροφοριών τείνει να είναι συνεχής. Πέραν των αμιγώς καθημερινών εφαρμογών, όπως τις αντιλαμβάνεται ο καθένας, η ανάπτυξη των μέσων που σχετίζονται με την οπτική πληροφορία καθίσταται εξίσου συνεχής σε όλους τους τομείς. Η εξέλιξη της τεχνολογίας γίνεται εμφανής από τις ιατρικές εφαρμογές, την βελτίωση του αστικού ιστού, την μελέτη και ανάπτυξη ενεργειών για την αξιοποίηση-προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, έως ακόμα και την υποστήριξη διαστημικών προγραμμάτων.

Η ανάγκη του ανθρώπου για απαθανάτιση της στιγμής υπήρχε από πάντα. Πρώτα σχεδίαζε με κάθε τρόπο σε διάφορες επιφάνειες. Με το πέρασμα των χρόνων παρατηρήθηκε ότι η απόδοση μιας εξωτερικής σκηνής μπορούσε να αποδοθεί, ζωγραφίζοντας την μέσα σε ένα σκοτεινό δωμάτιο, έτσι όπως οι ηλιακές ακτίνες προβάλλονται σε ένα επίπεδο τοίχο όταν διέρχονται μέσα από μια μικρή οπή. Σήμερα πραγματοποιείται απεικόνιση φαινομένων που συμβαίνουν σε απομακρυσμένα σημεία του γνωστού ως τώρα σύμπαντος, όπως είναι οι γαλαξίες, οι μελανές οπές κ.ά. Πρόκειται για ένα πάγωμα του χωροχρόνου, που περικλείει τις μεταβλητές που καθορίστηκαν μοναδικά για τα μέσα επιλογής και τις παραμέτρους ρύθμισης. Καταγράφοντας τις συνθήκες που περιβάλλουν τον κόσμο αναπτύσσεται η αντίληψη και έτσι παράγεται νέα γνώση, που με την σειρά της θα επιτρέψει την συνέχιση της έρευνας. Ο τροχός και η φωτιά αποτέλεσαν μοχλό για την εξέλιξη του ανθρώπινου είδους αφού κατέστησαν ευκολότερη την μεταφορά και επιβίωση. Αναλογικά και αφηρημένα η φωτογραφία (ως ένα μέσο εξασφάλισης) και οι επικοινωνίες (μεταφορά) επέτρεψαν την παραγωγή, αποθήκευση, την μελέτη, τη γνώση και την διάδοση των πληροφοριών μεταξύ των ανθρώπων ταχύτερα. Σήμερα, σε σχέση με το παρελθόν, ο άνθρωπος κατέχει στα χέρια του τα τεχνολογικά μέσα που του επιτρέπουν την πρόσβαση σε πληροφορία. Ο ρυθμός της ανάπτυξης της τεχνολογίας αυξάνεται εκθετικά όπως και η ανταλλαγή δεδομένων. Στο σημείο αυτό η διαχείριση (δηλαδή η συλλογή, η επεξεργασία και αξιολόγηση) της πληροφορίας παίζει καθορι-

στικό ρόλο, έτσι ώστε, να αξιοποιείται στο έπακρο ο μεγάλος όγκος πληροφοριών που κυκλοφορούν. Το επιστημονικό κοινό μπορεί να επωφεληθεί αντλώντας περισσότερες πληροφορίες για την ανάπτυξη του ερευνητικού κλάδου.

Η ψηφιακή φωτογραφία ενισχύεται συνεχώς αφού τα υλικά της μέρη βελτιώνονται αδιάκοπα. Επίσης η είσοδος των υπολογιστών στην φωτογραφία επεκτείνει καίρια τις δυνατότητές για μια βέλτιστη λήψη. Ο έλεγχος και ο προγραμματισμός μιας λήψης, με τις καταλληλότερες των παραμέτρων, καθίσταται δυνατός και μάλιστα αυτοματοποιημένα. Παράλληλα με την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος (Hardware) παρατηρείται αλματώδης ανάπτυξη των λογισμικών (software) τα τελευταία χρόνια. Οι αλγόριθμοι, οι μέθοδοι και τεχνικές που εφαρμόζονται σε διάφορα επιστημονικά πεδία δύνανται να τρέξουν πολύπλοκους υπολογισμούς και διεργασίες που παλαιότερα δεν ήταν εφικτό. Η είσοδος όλων των παραπάνω κατά την λήψη, επεξεργασία, σύνθεση και τελικώς στην παραγωγή μιας εικόνας καταφέρνει να δημιουργήσει μια εικόνα που με την κλασσική διαδικασία φωτογράφισης δεν θα μπορούσε να δημιουργηθεί. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη δημιουργία εικόνων με εξαιρετικά υψηλό δυναμικό εύρος, τη λήψη εικόνων από νέες οπτικές γωνίες ή τη δημιουργία διαδραστικών οπτικών εμπειριών. Ένα πλήθος εικόνων διαφορετικών χρονικά, χωρικά ή των παραμέτρων κατά τη λήψη μπορεί συσσωρευτικά να αξιοποιηθεί ως μία ενισχυμένη σύνθεση αλλά και ως εκτίμηση των μεταβολών ανά διακριτές χρονικές περιόδους. Επιπλέον, συνδυάζονται διαφορετικού τύπου δεδομένα για την σύνθεση βελτιωμένης απεικόνισης ενός αντικειμένου. Οι επιλογές σύνθεσης πλέον όπως έχουν αναπτυχθεί οι τεχνολογικοί κλάδοι επιτρέπουν την επαύξηση της πληροφορίας κατά τη συλλογή των δεδομένων, κατά την αποκωδικοποίηση, την επεξεργασία και την αποθήκευση. Παραδείγματα τεχνικών που εφαρμόζονται με τη χρήση υπολογιστικών μέσων στην διαδικασία παραγωγής εικόνων περιλαμβάνουν την απεικόνιση υψηλού δυναμικού εύρους, τη φωτογράφιση φωτεινού πεδίου και την απόδοση βάσει εικόνας. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, όπως η καταναλωτική φωτογραφία, η επιστημονική απεικόνιση και η επαυξημένη πραγματικότητα. Η επιστήμη αυτής ακριβώς της ανάλυσης, της επεξεργασίας και της ενίσχυσης εικόνων χρησιμοποιώντας υπολογιστές ονομάζεται Υπολογιστική Φωτογραφία (computational photography).

1.2 Ορισμός του προβλήματος

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ποιες εφαρμογές υπολογιστικής φωτογραφίας επηρεάζουν την επιστήμη της φωτογραμμετρίας. Το πρόβλημα που καλείται να επιλυθεί είναι να εντοπιστεί ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν θετικά την ακρίβεια και την αξιοπιστία των φωτογραμμετρικών παραγώγων. Για παράδειγμα, εφαρμόζοντας φωτογραμμετρικές τεχνικές σε εικόνες αυξημένου δυναμικού εύρους, γίνεται δυνατή η συλλογή πληροφορίας υψηλότερου επιπέδου, αφού περισσότερες λεπτομέρειες γίνονται διακριτές. Από την άλλη, τροποποίηση της εικόνας κάνοντας χρήση τεχνικών υπολογιστικής φωτογραφίας μπορεί να επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα, αντί βελτίωσης. Η παρούσα εργασία αναλύει κάποιες από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές υπολογιστικής φωτογραφίας και διερευνά βιβλιογραφικά τη επίδραση της μεθόδου στη φωτογραμμετρία.

1.3 Πεδίο εφαρμογής / Σκοπιά της ανάλυσης

Η ανάλυση σε αυτή την εργασία επικεντρώνεται στην υπολογιστική φωτογραφία σε εφαρμογές του Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού και Μηχανικού Γεωπληροφορικής. Ακόμα, πραγματοποιείται αναζήτηση των συγγενών επιστημονικών πεδίων που αναπτύσσονται για την διεκπεραίωση ευρύτερων έργων. Η ανάλυση και αξιολόγηση της επιδραστικότητας των μέσων και των διαδικασιών που ακολουθούνται γίνεται μέσω δοκιμαστικών και εμπειρικών ερευνών.

1.4 Χρησιμότητα της παρούσας έρευνας

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να επιτελέσει μια κριτική βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις επιρροές της υπολογιστικής φωτογραφίας στην επιστήμη της φωτογραμμετρίας. Την παρούσα χρονική στιγμή, πραγματοποιείται ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών τόσο σε υπολογιστική ισχύ (hardware) όσο και σε λογισμικά (software). Κατά συνέπεια μεγαλώνουν τα περιθώρια για την ανάπτυξη υπολογιστικών εφαρμογών που βασίζονται στην επιστήμη της πληροφορικής. Οι υπολογιστικές εφαρμογές αναβαθμίζονται επειδή δημιουργήθηκε ο χώρος για την ανάπτυξη καθώς διευκολύνεται η διαχείριση, αποθήκευση και η μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων. Οπότε ο τρόπος και ο βαθμός που η υπολογιστική φωτογραφία επηρεάζει την επιστήμη της φωτογραμμετρίας είναι το ζητούμενο στην παρούσα εργασία. Σύγχρονες τεχνικές υπολογιστικής φωτογραφίας ωφελούν τις φωτογραμμετρικές διαδικασίες για δημιουργία ακριβέστερων και λεπτομερέστερων τρισδιάστατων μοντέλων και χαρτών, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητά τους, επιτρέποντας νέες δυνατότητες και μειώνοντας το κόστος.

1.5 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια και ένα παράρτημα.

Το κεφάλαιο 2 παρέχει εισαγωγικές πληροφορίες σχετικά με την υπολογιστική φωτογραφία. Αρχικά παρατίθεται μια ιστορική ανασκόπηση της φωτογραφίας και ορισμοί σχετικά με το αντικείμενο μελέτης. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των πεδίων που επηρεάζουν και επηρεάζονται από την υπολογιστική φωτογραφία, μέθοδοι βελτίωσης της φωτογραφίας και οφέλη της μεθόδου, όπως και μειονεκτήματά της.

Το κεφάλαιο 3 αναλύει πώς τα οπτικά μέσα απεικόνισης υπεισέρχονται στην επιστήμη του Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού-Μηχανικού Γεωπληροφορικής. Η σημασία τους περιγράφεται με παραδείγματα την αποτύπωση, οι σχετικές μέθοδοι γεωμετρικής τεκμηρίωσης αναλύονται και δίνονται σχόλια σχετικά με μεθόδους ανάκτησης της τρίτης διάστασης με συνδυαστικές μεθόδους, για 3D απεικόνιση του χώρου.

Το κεφάλαιο 4 πραγματεύεται εφαρμογές της υπολογιστικής φωτογραφίας στη σύγχρονη φωτογραμμετρία. Πειραματικές μέθοδοι από τη βιβλιογραφία σχετικές με την υπολογιστική φωτογραφία παρατίθενται, μαζί με ποσοτικά αποτελέσματα από πραγματικές εφαρμογές από την επιστήμη της φωτογραμμετρίας.

Το κεφάλαιο 5 αναλύει τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και προτείνει αντικείμενα ενδιαφέροντος για μελλοντική δουλειά.

Το Παράρτημα Α' παρέχει μια λίστα με ακρωνύμια και συντομογραφίες.

Κεφάλαιο 2

Στοιχεία υπολογιστικής φωτογραφίας

Η υπολογιστική φωτογραφία είναι ένας τομέας μελέτης που συνδυάζει την παραδοσιακή φωτογραφία με προηγμένες υπολογιστικές τεχνικές για τη δημιουργία εικόνων που υπερβαίνουν τις δυνατότητες της παραδοσιακής φωτογραφίας. Περιλαμβάνει τη χρήση αλγορίθμων, λογισμικού και υλικού για τη βελτίωση ή επεξεργασία εικόνων με διάφορους τρόπους, συμπεριλαμβανομένης της βελτίωσης της ποιότητας της εικόνας, της προσθήκης ή αφαίρεσης αντικειμένων, της δημιουργίας πανοραμικών εικόνων και της προσομοίωσης διαφόρων συνθηκών φωτισμού. Η υπολογιστική φωτογραφία είναι ένας διεπιστημονικός τομέας που αντλεί στοιχεία από την επιστήμη των υπολογιστών, την οπτική, τη φωτογραφία κ.α. Έχει πολυάριθμες εφαρμογές σε τομείς όπως η φωτογραμμετρία, η όραση υπολογιστών και η ιατρική απεικόνιση, μεταξύ άλλων.

2.1 Ορισμοί

Φωτογραφία είναι, κατά το λεξικό Merriam-Webster (2023), η τέχνη ή η διαδικασία της παραγωγής εικόνων με την επίδραση της ακτινοβόλας ενέργειας και ειδικά του φωτός, σε μια ευαίσθητη επιφάνεια όπως αυτή του φιλμ ή του οπτικού αισθητήρα.

Σύμφωνα και με την Βικιπαίδεια (Φεβρουάριος 2023), με τον όρο φωτογραφία γίνεται αναφορά στην επιστήμη και στην τέχνη κατά την οποία δημιουργούνται εικόνες, καταγράφοντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Πρόκειται για την απόδοση μιας σκηνής καταγράφοντας τις ακτίνες φωτός χρησιμοποιώντας χημικά φωτο-ευαίσθητα υλικά όπως το φωτογραφικό φιλμ (Film Photography) ή ηλεκτρονικούς αισθητήρες (Digital Photography).

Μπορεί πιο αφηρημένα να ειπωθεί ότι πρόκειται για ζωγραφική με φως και να εμπλουτιστεί με την άποψη του Garry Winogrand (σύμφωνα με τον Ριβέλης (2023) ότι Φωτογραφία είναι η ψευδαίσθηση μιας ακριβούς περιγραφής ενός κομματιού χρόνου και ενός κομματιού χώρου.

Εξίσου πολλοί ορισμοί έχουν διατυπωθεί για την υπολογιστική φωτογραφία. Σύμφωνα με Microsoft-Research (2023), η υπολογιστική φωτογραφία είναι ένας τομέας της φωτογραφίας στον οποίο οι τεχνικές της όρασης υπολογιστών και των γραφικών αποτελούν ουσιώδη στάδια επεξεργασίας κατά τη διαδικασία απεικόνισης. Στην συνέχεια

προσπαθώντας εμπλουτίσουν τον αναφέρεται χαρακτηριστικά: "Σήμερα, πολλές εφαρμογές υπολογιστικής φωτογραφίας για smartphone χρησιμοποιούν την ενσωματωμένη κάμερα ή τις κάμερες του τηλεφώνου. Αυτές οι εφαρμογές μπορούν να παράγουν εξόδους όπως πανοράματα ή smooth timelapses που δεν αποτελούν τυπικές εξόδους της κάμερας".

2.2 Ιστορική εξέλιξη της φωτογραφίας

Η φωτογραφία είναι η τέχνη της δημιουργίας ακίνητων ή κινούμενων εικόνων με την καταγραφή του φωτός ή άλλης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, είτε χημικά μέσω ενός φωτοευαίσθητου υλικού, όπως το φιλμ, είτε ηλεκτρονικά μέσω ενός αισθητήρα εικόνας. Η φωτογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτύπωση αναμνήσεων, την καταγραφή γεγονότων, την αφήγηση ιστοριών και την επικοινωνία ιδεών. Υπάρχουν πολλά είδη φωτογραφίας, όπως η φωτογραφία πορτραίτου, τοπίου, αθλητική, γάμου, μόδας, άγριας ζωής κλπ. Οι φωτογράφοι χρησιμοποιούν μια ποικιλία τεχνικών και εξοπλισμού για τη δημιουργία φωτογραφιών, συμπεριλαμβανομένων φωτογραφικών μηχανών, φακών, ειδών και πηγών φωτισμού, λογισμικών και υπολογιστών μέσων. Η φωτογραφία έχει μακρά ιστορία που χρονολογείται από τις αρχές του 19ου αιώνα και συνεχίζει να εξελίσσεται και να αλλάζει με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Σήμερα, η φωτογραφία είναι μία δημοφιλής δημιουργική ενασχόληση, επάγγελμα και καλλιτεχνική έκφραση. Επίσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε πολλούς τομείς όπως στη τέχνη, στα μέσα ενημέρωσης και δικτύωσης, στη διαφήμιση και αποτύπωση της υπάρχουσας κατάστασης για τεκμηριωτικούς σκοπούς.

Πιο αναλυτικά οι Raskar and Tumblin (2009) αναφέρουν ότι, η σύλληψη και η απόδοση είναι διोδιόστατη στις παραδοσιακές εικόνες, δηλαδή τις ψηφιακές, που ακολουθούν τις ίδιες αρχές με τις προηγούμενες φωτογραφικές που χρησιμοποιούσαν φιλμ. Παρόλο που ο φωτογραφικός εξοπλισμός έχει γνωρίσει συνεχή βελτίωση τον τελευταίο αιώνα, η βασική προσέγγιση για τη δημιουργία φωτογραφιών παραμένει αμετάβλητη. Ένας φακός συλλέγει και εισάγει φως σε ένα κατά τα άλλα σκοτεινό κουτί και σχηματίζει μια εικόνα σε μια επιφάνεια στο εσωτερικό του κουτιού. Αυτή η πρώιμη ιδέα της φωτογραφικής μηχανής, γνωστή ως camera obscura, έχει γίνει κατανοητή και εξερευνηθεί για πάνω από χίλια χρόνια, αλλά έγινε γνωστή ως "φωτογραφία" μόλις τον 19ο αιώνα, όταν το σύστημα απεικόνισης συνδυάστηκε με φωτοευαίσθητα υλικά για την καταγραφή του προσπίπτοντος φωτός για μεταγενέστερη αναπαραγωγή. Με κάθε σειρά τεχνικών βελτιώσεων, οι φωτογράφοι διεύρυναν τις δημιουργικές επιλογές που επηρέαζαν την εμφάνιση της αποτυπωμένης εικόνας. Επίσης επισημαίνουν, ότι οι πρώτες φωτογραφικές μηχανές δεν διέθεταν ούτε κλείστρα ούτε μηχανισμούς διαφράγματος. Οι φωτογράφοι επέλεγαν έναν φακό (ή τη φωτογραφική μηχανή που ήταν προσαρτημένη σε αυτόν), ρύθμιζαν την εστίαση σε έναν θεατή με γυαλί εδάφους, αντικαθιστούσαν το γυαλί εδάφους με μια φωτοευαίσθητη πλάκα, ξεκλείδωναν τον φακό και περίμεναν τη φωτογραφική μηχανή να συγκεντρώσει αρκετό φως για να καταγράψει την εικόνα. Καθώς βελτιώνονταν τα φωτοευαίσθητα υλικά, ο χρόνος έκθεσης μειώθηκε από λεπτά σε δευτερόλεπτα και στη συνέχεια σε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Τα ρυθμιζόμενα κλείστρα έκαναν τους χρόνους έκθεσης πιο ακριβείς και τα ρυθμιζόμενα διαφράγματα φακών ρύθμιζαν την ποσότητα του φωτός που περνούσε από το φακό κατά τη διάρκεια της έκθεσης. Μέχρι τη δεκαετία του 1880, οι βασικές ρυθμίσεις της φωτογραφικής μηχανής που χρησιμοποιούνταν για τη φωτογραφική έκθεση ήταν σαφώς

καθορισμένες.

Σύμφωνα με τον Δημήτριο Ζευγώλη (Εφαρμοσμένη Οπτική - Β' Έκδοση - σελίδα 478) μια camera obscura είναι ένας σκοτεινός θάλαμος που στη μία άκρη του έχει μία γυαλιστερή επιφάνεια και στην ακριβώς απέναντι μία πολύ μικρή οπή (pinhole). Οι ακτίνες του φωτός ακολουθούν γεωμετρική πορεία, διέρχονται δια της οπής και σχηματίζουν στην αντικρινή επιφάνεια ανάστροφο είδωλο. Με το φαινόμενο αυτό είχαν ασχοληθεί οι αρχαίοι Έλληνες παρατηρώντας την έκλειψη του ηλίου. Τον 11ο αιώνα ο Άραβας Αλ-Χαζέν περιέγραψε το ίδιο φαινόμενο και πολύ αργότερα οι Roger Bacon (1214-1294) και Leonardo da Vinci το προσέγγισαν με πιο σύνθετο και μαθηματικό τρόπο. Οπτικές αρχές του σκοτεινού θαλάμου αναφέρονται σε έργο του Αριστοτέλη και απαντούν σε κινεζικά κείμενα του 9ου π.Χ. αιώνα. Θα αναφέρουμε μερικές σημαντικές ημερομηνίες στην εξέλιξη της φωτογραφικής μηχανής και της φωτογραφίας.

- 1545 Ο Gemma Frisius δημοσίευσε ένα σχέδιο της camera obscura.
- 1550 Προσθήκη ενός κοίλου φακού στην είσοδο της camera obscura.
- 1568 Προσθήκη ενός διαφράγματος που επέτρεπε την εστίαση της εικόνας.
- 1636 Εφεύρεση ενός συστήματος φακών, διαφορετικών εστιακών αποστάσεων, πρόδρομο του σημερινού τηλεφακού.
- 1676 Προσθήκη κατόπτρου σκόπευσης υπό γωνία 45 μοιρών δημιουργώντας την πρώτη μηχανή reflex στον κόσμο.
- 1826 Ο Niepce (1765-1833) χρησιμοποίησε χλωριούχο άργυρο και κατάφερε να αποτυπώσει απευθείας σε θετική εικόνα την πρώτη φωτογραφία στην ιστορία της ανθρωπότητας.
- 1844 Ο Henry Fox Talbot (1800-1877) θεωρείται ο πατέρας της σύγχρονης φωτογραφίας, επειδή ανακάλυψε τη σχέση μεταξύ της αρνητικής και θετικής φωτογραφίας και κατάλαβε τη σημασία της. Για πρώτη φορά ήταν δυνατή η αναπαραγωγή της εικόνας σε πολλά αντίτυπα.
- 1879 Η εφεύρεση της ξηράς πλάκας ζελατίνας οδήγησε σε σημαντική σμίκρυνση των διαστάσεων των φωτογραφικών μηχανών.
- 1888 Ο George Eastman (1854-1932) κατασκεύασε την πρώτη συμπαγή φωτογραφική μηχανή και την ονόμασε Kodak. Ήταν φορτωμένη με ρολό φωτοευαίσθητου χαρτιού, πάνω στο οποίο μπορούσε κανείς να αποτυπώσει εκατό στρογγυλές φωτογραφίες με διάμετρο 6,2cm.
- 1924 Η γερμανική εταιρεία Leitz έθεσε σε παραγωγή την πρώτη Leica (εκ του LEItz-CAmera) σε φιλμ 35mm, με κλείστρο στο επίπεδο του φιλμ και ταχύτητα μέχρι 1/1000s.
- 1928 Μία καινοτομία στην τεχνολογία της φωτογραφίας έγινε με την εφεύρεση της Polaroid-camera από τον αμερικανό μηχανικό Edwin H. Land. Το βασικό σε αυτήν την κάμερα ήταν η άμεση εμφάνιση του αρνητικού φιλμ, που βρισκόταν μέσα στην φωτογραφική μηχανή και εμφανιζόταν περίπου 10 δευτερόλεπτα μετά τη φωτογράφιση.

Η εξέλιξη των φακών στις φωτογραφικές μηχανές βασίστηκε κυρίως στην έρευνα και τις μελέτες γερμανών επιστημόνων. Η εταιρεία Voigtländer κατασκεύασε τον πρώτο φακό

μέγιστης φωτεινότητας με αποτέλεσμα να μειωθεί χρόνος φωτοέκθεσης. Η σχεδίαση φακών των εταιρειών Voigtlander, Leitz, Zeiss κ.ά. παραμένουν υπόδειγμα τελειότητας και ποιότητας, παρά την εκπληκτική εξέλιξη της ιαπωνικής τεχνολογίας. Οι συνήθεις εμπορικές φωτογραφικές μηχανές δέχονται φιλμ διπλής διάτρησης και πλάτους 35mm. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες φωτογραφικών μηχανών: οι μονοπτικές reflex και compact. Στις reflex ένας καθρέπτης (που βρίσκεται πάνω από το φακό) ανακλά την εικόνα στην οθόνη εστίασης και στη συνέχεια στο πεντάπρισμα που αναστρέφει την εικόνα. Πατώντας το κουμπί λήψης, ο καθρέπτης ανασηκώνεται και το κλείστρο ανοίγει. Μια μηχανή τύπου compact διαθέτει σκόπευτρο ακριβώς πάνω από το φακό. Αυτός ο σχεδιασμός καθιστά το πεντάπρισμα περιττό. Κοιτώντας μέσα από το σκόπευτρο η εικόνα παρουσιάζεται πάντα ευκρινής, αλλά δεν ταυτίζεται ακριβώς με την εικόνα που απεικονίζεται στο φιλμ.

2.2.1 Φωτογραφίες βασικού επιπέδου (Film-like/Digital Photography)

Στην πρώτη κατηγορία, που αντιστοιχεί σε "μηδενικού" βαθμού επεξεργασίας, περιλαμβάνονται απλές φωτογραφίες που προέρχονται από "Παραδοσιακές" μηχανές (film like photography). Το αποτέλεσμα είναι δισδιάστατες εικόνες που περιέχουν πληροφορία που προκύπτει από τα αρχικά δεδομένα των συμβατικών ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών και κατατάσσονται ως πρώτου επιπέδου φωτογραφίες.

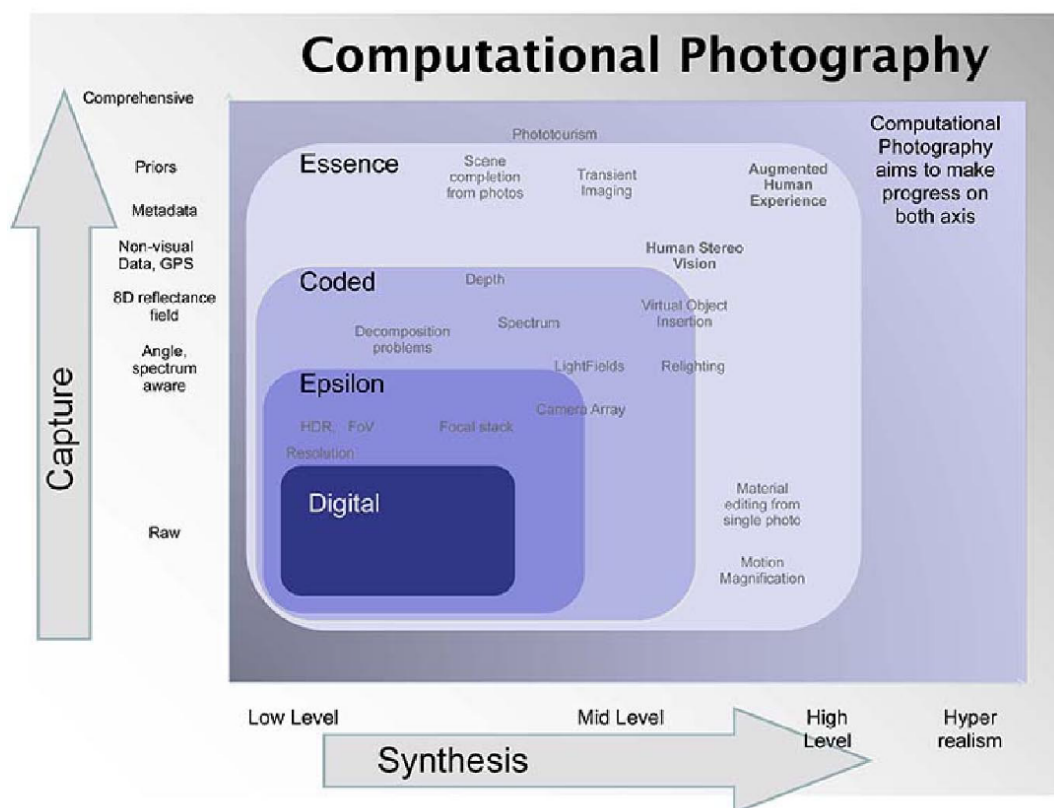
Οι Raskar and Tumblin (2009) αναφέρουν ότι οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές που στην αρχή τους μοιάζουν με εκείνες που διέθεταν φιλμ μπορούν να καθορίσουν αυτόματα την εστίαση, το διάφραγμα, την ταχύτητα κλείστρου, την ευαισθησία του αισθητήρα και τις ρυθμίσεις φωτισμού κατά τη στιγμή της λήψης μιας εικόνας. Μόλις ο χρήστης πατήσει το κλείστρο, οι ρυθμίσεις αυτές σταθεροποιούνται και η εικόνα που προκύπτει είναι μία εκ των πολλών διαφορετικών παραλλαγών που θα μπορούσαν να έχουν ληφθεί ως συνάρτηση των διαφόρων συνδυασμών όλων των παραμέτρων. Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές συνεχίζουν να χρησιμοποιούν αυτές τις βασικές ρυθμίσεις αν και τις έχουν βελτιώσει και επεκτείνει. Οι βασικές ρυθμίσεις της φωτογραφικής μηχανής της ψηφιακής φωτογραφίας είναι το κλείστρο, το διάφραγμα και η ευαισθησία (τιμή ISO). Βασικά στάδια για τη δημιουργία μιας Φωτογραφίας αποτελούν ο φωτισμός (Illumination), η οπτική (Optics), οι αισθητήρες (Sensors), την επεξεργασία (Processing) και την παρουσίαση (Display). Τα στάδια αυτά είναι η ακολουθία της φυσικής πορείας που ακολουθείται από την πηγή φωτός ως και το τελικό προϊόν. Τη στιγμή που ανοίγει το κλείστρο και γίνεται η έκθεση, έχουν καθοριστεί οι ακόλουθες ρυθμίσεις της φωτογραφικής μηχανής:

- Οπτικό πεδίο - (Field of View - FoV). Η εστιακή απόσταση του φακού καθορίζει τη γωνιακή έκταση της εικόνας, μια μικρή εστιακή απόσταση (ευρυγώνιος φακός) δίνει μια ευρεία προοπτική της σκηνής. Αντιθέτως μια μεγάλη εστιακή απόσταση (τηλεφακός) δίνει μια περιορισμένη γωνία στο οπτικό πεδίο. Για σταθερή ανάλυση αισθητήρα, το οπτικό πεδίο υπαγορεύει τη γωνιακή ανάλυση της σκηνής. Αν και η εικόνα μπορεί να περικοπεί για να μειωθεί η προοπτική (με αντίστοιχη απώλεια ανάλυσης), δεν μπορεί να γίνει ευρύτερη.
- Έκθεση και δυναμικό εύρος - (Exposure and dynamic range). Το επιλεγμένο διάφραγμα του φακού, ο χρόνος έκθεσης και η ευαισθησία ISO του αισθητήρα συμβάλλουν στον τρόπο με τον οποίο απεικονίζεται το φως, στις τονικές τιμές των

μεμονωμένων εικονοστοιχείων. Οι μεγαλύτερες ρυθμίσεις διαφράγματος, οι μεγαλύτεροι χρόνοι έκθεσης και οι υψηλότερες ευαισθησίες μετατρέπουν τις αμυδρά φωτισμένες σκηνές, εν τέλει σε αποδεκτές εικόνες, ενώ τα μικρότερα διαφράγματα, οι μικρότεροι χρόνοι έκθεσης και οι χαμηλότερες ευαισθησίες μειώνουν την έκθεση των πολύ έντονα φωτισμένων σκηνών. Κακές επιλογές σε αυτές τις ρυθμίσεις μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια ορατών λεπτομερειών της εικόνας σε υπέρ φωτισμένες περιοχές ή σε αμυδρά φωτισμένες περιοχές ή και τα δύο.

- Βάθος πεδίου - (Depth of Field - DoF). Το βάθος πεδίου είναι η περιοχή εντός της εικόνας της οποίας τα σημεία εμφανίζονται εστιασμένα και επηρεάζεται από το διάφραγμα και την εστιακή απόσταση του φακού (f). Όσο μικρότερο είναι το άνοιγμα του διαφράγματος τόσο καλύτερη είναι η εστίαση. Όσο μεγαλύτερη είναι η εστιακή απόσταση του φακού, τόσο πιο περιορισμένο είναι το βάθος πεδίου και το αντίστροφο. Για αύξηση του βάθους πεδίου απαιτείται μικρό διάφραγμα, το οποίο κατ' επέκταση σημαίνει λιγότερο εισερχόμενο φως. Το μειωμένο φως αντιμετωπίζεται με αύξηση του χρόνου έκθεσης.
- Χωρική ανάλυση - (Spatial resolution). Το μέγεθος των εικονοστοιχείων σε πραγματικές διαστάσεις είναι η χωρική διακριτική ικανότητα της εικόνας. Το κάθε pixel αντιστοιχεί στα πραγματικά μέτρα της επιφάνειας την οποία αντιπροσωπεύει. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που μια εικόνα έχει χωρική ανάλυση ένα μέτρο, αυτό σημαίνει ότι 1 pixel στην εικόνα, αντιστοιχεί σε ένα μέτρο στον πραγματικό χώρο. Πρακτικά, η χωρική ανάλυση θέτει τις ελάχιστες διαστάσεις των αντικειμένων ώστε αυτά να μπορούν να αποτυπωθούν στη ψηφιακή εικόνα.
- Ανάλυση μήκους κύματος - (Wavelength resolution). Οι ρυθμίσεις ισορροπίας χρώματος και κορεσμού στη φωτογραφική μηχανή ορίζουν την ευαισθησία στο χρώμα. Οι "παραδοσιακές" ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές αντιλαμβάνονται το χρώμα μετρώντας τα τρία βασικά (συνήθως στο ορατό φάσμα - RGB) με σταθερές επικαλυπτόμενες καμπύλες φασματικής απόκρισης. Διαφορετικοί αισθητήρες προσφέρουν διαφορετικές φασματικές καμπύλες, αλλά σε καμιά φωτογραφική μηχανή αυτής της κατηγορίας δεν επιτρέπει επέμβαση στις ρυθμίσεις για τις καμπύλες για έναν συγκεκριμένο αισθητήρα.

Η υπολογιστική φωτογραφία είναι ένας διεπιστημονικός τομέας που αναδύεται στη διασταύρωση της οπτικής, της επεξεργασίας σήματος, των γραφικών υπολογιστών, της όρασης υπολογιστών, του ηλεκτρονικού υλικού, της τέχνης και της διαδικτυακής ανταλλαγής σε κοινωνικά δίκτυα. Μπορεί να απεικονιστεί γραφικά η έκταση της υπολογιστικής φωτογραφίας με τη βοήθεια δύο αξόνων, αναπαριστώντας τη διαδικασία λήψης έναντι των στόχων σύνθεσης (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Υπολογιστική Φωτογραφία και πρόοδος (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).

Από τη μία, ο ένας άξονας αναπαριστά τη διαδικασία λήψης υψηλότερων διαστάσεων, η οποία παρέχει μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας σε μια αναγνώσιμη από μηχανήματα αναπαράσταση της σκηνής. Από την άλλη, ο άλλος άξονας αντιστοιχεί στον στόχο της οπτικής σύνθεσης. Οι διάφορες τεχνικές και τεχνολογίες εμφανίζονται ονομαστικά και τοποθετημένες στην θέση που τους αντιστοιχεί, σε μία διαδικασία που επιχειρείται η προβολής της έκτασης, της σύλληψης έναντι των στόχων σύνθεσης (σχήμα 2.1).

Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση των τεσσάρων κατηγοριών της (υπολογιστικής) φωτογραφίας, όπως αναφέρουν οι Raskar and Tumblin (2009) και αρχικά αναφέρονται οι μέθοδοι για την επέκταση των δυνατοτήτων της φωτογραφικής μηχανής με την επεξεργασία δεδομένων από μια συμβατική ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, η οποία αντιστοιχεί ουσιαστικά σε οπτική επεξεργασία χαμηλού επιπέδου των εικονοστοιχείων και των τοπικών χαρακτηριστικών της σκηνής.

2.2.2 1ου Βαθμού Επεξεργασίας ΥΦ (Epsilon Photography)

Σύμφωνα με τους Raskar and Tumblin (2009), η κατηγοριοποίηση εικόνων πρώτου βαθμού επεξεργασίας περιλαμβάνει την ραδιοφασματική επεξεργασία φωτογραφίας και δημιουργία εικόνων αποτελέσματος σύνθεσης με φωτογραφίες διαφορετικών παραμέτρων. Στόχος είναι η βελτίωση της απεικόνισης, αξιοποιώντας την ικανότητα σύνθεσης και επεξεργασίας εικόνων που έχουν ληφθεί από "παραδοσιακές" φωτογραφικές μηχανές με διαφοροποίηση των παραμέτρων της φωτογραφίας, όπως το δυναμικό εύρος, το οπτικό πεδίο ή το βάθος πεδίου. Λόγω των συμβιβασμών που είναι εγγενείς

στις υπάρχουσες κάμερες, η διαδικασία συνήθως περιλαμβάνει τη δειγματοληψία της σκηνής μέσω πολλαπλών φωτογραφιών, καθεμία από τις οποίες έχει ληφθεί με μια μικρή παραλλαγή των παραμέτρων της κάμερας.

Οι κάμερες στην καλύτερη περίπτωση, κατά τους Raskar and Tumblin (2009), ορίζουν ένα κουτί στον πολυδιάστατο χώρο των παραμέτρων απεικόνισης, όπως το δυναμικό εύρος, το οπτικό πεδίο ή το βάθος πεδίου. Το πρώτο και πιο προφανές πράγμα που μπορεί να γίνει για να βελτιωθούν οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές είναι να διευρυνθεί αυτό το κουτί σε κάθε διάσταση παραμέτρων. Ο στόχος είναι να κατασκευαστεί μια σούπερ κάμερα με βελτιωμένη απόδοση σε κάθε μία από τις παραδοσιακές παραμέτρους. Κατά τη νέα απεικόνιση της σκηνής πραγματοποιείται ανασύνθεση με συντελεστές τις ετεροβαρείς τιμές των φωτογραφικών λήψεων για κάθε μικρή περιοχή. Ονομάζουμε αυτή τη διευρυμένη απόδοση φωτογραφία (Epsilon) αποτελεί μια δυνατή εκτίμηση μιας εικόνας από δείγματα σε μια γειτονιά epsilon τα οποία προκύπτουν από τις απλές (film-like) φωτογραφικές παραμέτρους.

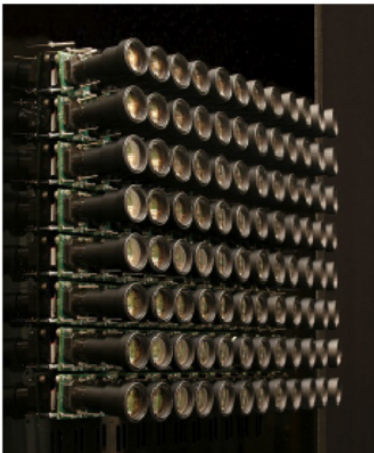
Για παράδειγμα, η κανονικοποιημένη ένταση εικονοστοιχείου (τιμή έντασης διαιρεμένη με το χρόνο έκθεσης) μπορεί να είναι δύσκολο να εκτιμηθεί λόγω κορεσμού ή υποέκθεσης. Αντίθετα ο χρόνος έκθεσης μπορεί να έχει μεγάλες διακυμάνσεις. Στην πράξη μπορούν να αξιοποιηθούν μια σειρά φωτογραφιών κάνοντας μικρές αλλαγές γύρω από το χρόνο έκθεσης, εντός ενός πολύ μικρού σχετικά διαστήματος (που συχνά αναφέρεται ως "epsilon"). Η τεχνική είναι ευρέως γνωστή ως exposure bracketing. Μία ακόμα χαρακτηριστική περίπτωση είναι η αύξηση του οπτικού πεδίου μιας εικόνας με τη δημιουργία ενός πανοράματος που περιλαμβάνει την αλλαγή της θέσης και του προσανατολισμού της κάμερας με την αλλαγή των μεταβλητών για τη θέση (x, y, z) και τον προσανατολισμό (ω , ϕ , κ) εντός μιας μικρής γειτονιάς τιμών. Γενικότερα, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα 2.2, διαδοχικές εικόνες (ή ακόμη και γειτονικά εικονοστοιχεία) μπορεί να έχουν διαφορετικές ρυθμίσεις για παραμέτρους όπως η έκθεση, η εστίαση, το διάφραγμα, η προβολή, ο φωτισμός ή ο χρόνος της στιγμής λήψης. Κάθε ρύθμιση epsilon επιτρέπει την καταγραφή μερικών πληροφοριών σχετικά με τη σκηνή και η τελική εικόνα ανακατασκευάζεται συνδυάζοντας όλα τα χρήσιμα μέρη αυτών των πολλαπλών παρατηρήσεων.

Application	Epsilon over sensors	Epsilon over time	Epsilon over pixels
	Parameter Major	Time Major	Position Major
	Cost/space trade-off	Time trade-off	Sensor resolution trade-off
	Space uniform; parameter varying	Time uniform; parameter varying	Space varying
HDR	SAMP (different ND filter)	Bracketing	Assorted Pixels
Color	3 CCD	Color wheel in the aperture	Bayer mosaic; Foveon
Field of View	Camera Array with telephoto lens	Unstructured panoramas	
Resolution		Shift based superresolution	
Depth of Field	SAMP (focused at different depths)	Focal Stacks	
Frame Rate	Camera Array [Irani]		Mosaic (virtual exposure)
Noise Reduction	SAMP (same camera settings)	Multiple photos	

Σχήμα 2.2: Εφαρμογές φωτογραφίας Epsilon, (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).

Η φωτογραφία epsilon είναι συνεπώς, κατά τους Raskar and Tumblin (2009), η συνένωση πολλών τέτοιων κομματιών στο χώρο των παραμέτρων, όπου πολλαπλές φωτογραφίες συγχωνεύονται υπολογιστικά για να κάνουν μια πιο ακριβή φωτογραφική περιγραφή. Η συγχωνευμένη φωτογραφία μπορεί να θεωρείται ανώτερη, όμως η κάθε μία από τις μεμονωμένες φωτογραφίες παραμένει χρήσιμη και ανεξάρτητα κατανοητή. Η συγχωνευμένη φωτογραφία περιέχει τα καλύτερα χαρακτηριστικά από κάθε φωτογραφία της ομάδας. Η φωτογραφία epsilon αντιστοιχεί στην όραση χαμηλού επιπέδου. Η διαδικασία εκτιμά και συγχωνεύει εικονοστοιχεία βάσει των χαρακτηριστικών τιμών από πολλαπλές παρατηρήσεις και επιλέγει εκείνα με τον καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο.

Η φωτογράφιση πολλαπλών εικόνων με μεταβολή των παραμέτρων της κάμερας μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Παραδείγματος χάρη, οι εικόνες μπορούν να ληφθούν με μία μόνο κάμερα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Εναλλακτικά, οι εικόνες μπορούν να ληφθούν ταυτόχρονα με τη χρήση της τεχνικής των ανάμεικτων εικονοστοιχείων, όπου κάθε εικονοστοιχείο είναι προσαρμοσμένο σε διαφορετική τιμή για μια δεδομένη παράμετρο. Ακριβώς όπως κάποιες πρώιμες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές αποτύπωναν μια ακολουθία γραμμών σάρωσης, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που κινούνταν με μια ενιαία γραμμική συστοιχία ανιχνευτών αισθητήρων κατά μήκος του επιπέδου εικόνας, μπορούμε να φανταστούμε ανιχνευτές αισθητήρες που σκόπιμα τυχαιοποιούν το χρόνο έκθεσης κάθε εικονοστοιχείου για να διαμορφώσουν ένα συμβιβασμό μεταξύ θολότητας κίνησης και ανάλυσης. Η τεχνική αυτή διερευνήθηκε προηγουμένως για τη διαδραστική απόδοση γραφικών στον υπολογιστή. Η ταυτόχρονη λήψη πολλαπλών δειγμάτων μπορεί επίσης να επιτευχθεί με τη χρήση πολλαπλών καμερών (εικόνα 2.3), με κάθε κάμερα να έχει διαφορετικές τιμές για μια δεδομένη παράμετρο.



Σχήμα 2.3: Συστοιχία καμερών σε μορφή πινάκα, από το πανεπιστήμιο του Stanford, που λαμβάνουν πολλαπλές φωτογραφίες ταυτόχρονα (με μερικώς διαφοροποιημένες θέσης λήψης - epsilon changes in parametr over sensors), (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).

Τέλος παρουσιάζεται, εν συντομία, ο λόγος για τον οποίο ονομάζονται εικόνες Epsilon. Πρόκειται για εκείνες, που έχουν προκύψει από συμβολή επεξεργασμένων (ραδιομετρικά) φωτογραφιών που απεικονίζουν την ίδια σκηνή με διαφοροποιημένες παραμέτρους

κατά τη λήψη. Η ονομασία αυτή προκύπτει από τη διευρυμένη απόδοση, παραλληλίζοντάς την, σύμφωνα με τους Raskar and Tumblin (2009), με την έννοια της "γεωμετρίας-epsilon", η οποία υπολογίζει μια λύση ακριβείας για οποιαδήποτε διαταραγμένη εκδοχή της εισόδου εντός μιας μικρής γειτονιάς. Γενικά, μια ενιαία σκηνή καταγράφεται με τη λήψη πολλαπλών εικόνων που μεταβάλλουν μία ή περισσότερες από τις παραμέτρους της φωτογραφικής μηχανής κατά κάποια μικρή τιμή. Η Epsilon φωτογραφία ασχολείται με τη σύνθεση omnipictures και προχωρά με το παράδειγμα πολλαπλών λήψεων μιας εικόνας.

2.2.3 2ου Βαθμού Επεξεργασίας ΥΦ (Coded Photography)

Η επόμενη κατηγορία σύνθεσης (Coded Photography) αξιοποιεί εργαλεία που υπερβαίνουν τις δυνατότητες της υψηλότερης ποιότητας συμβατικής ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής. Αντιστοιχεί σε τεχνικές μεσαίου επιπέδου οπτικής επεξεργασίας και συμπεριλαμβάνει την κατηγοριοποίηση-διαχωρισμό (κατάτμηση), την οργάνωση και την εξαγωγή συμπερασμάτων για σχήματα, αντικείμενα και ακμές. Αυτές οι μέθοδοι εκτελούν αντιστρεπτή κωδικοποίηση πληροφοριών σχετικά με τη σκηνή σε μία μόνο φωτογραφία (ή σε πολύ λίγες φωτογραφίες συγκριτικά την προηγούμενη κατηγορία "Epsilon"), έτσι ώστε η αντίστοιχη αποκωδικοποίηση να μπορεί να ανακτήσει φωτεινά πεδία, εικόνες που έχουν θολώσει από την κίνηση, συνιστώσες καθολικού και άμεσου φωτισμού ή διακρίσεις μεταξύ γεωμετρικών και υλικών ασυνεχειών. Ο στόχος της κωδικοποιημένης υπολογιστικής φωτογραφίας, αντί για εικονοστοιχεία υψηλής ποιότητας, είναι η τροποποίηση της οπτικής, του φωτισμού ή των αισθητήρων κατά τη στιγμή της λήψης, έτσι ώστε οι ιδιότητες της σκηνής να κωδικοποιούνται σε μία ή έστω λίγες φωτογραφίες (Raskar (2009)).

Η σύλληψη σημάτων μεγαλύτερης διάστασης σε δισδιάστατους αισθητήρες απαιτεί κάποια ταχυδακτυλουργικά τεχνάσματα στην οπτική και την ανίχνευση, καθώς και προσεκτικό χειρισμό και κωδικοποίηση της συνάρτησης διασποράς σημείου. Σε μια τεχνική κωδικοποιημένης έκθεσης, το κλείστρο μιας φωτογραφικής μηχανής μπορεί να ανοίγει και να κλείνει γρήγορα με μια προσεκτικά επιλεγμένη δυαδική ακολουθία καθώς καταγράφει μια φωτογραφία. Το κλείστρο κλείστρο κωδικοποιεί την κίνηση που συμβατικά εμφανίζεται θολή και αυτή η αναστρέψιμη κωδικοποίηση επιτρέπει στη συνέχεια να υπολογιστεί μια κινούμενη αλλά μη θολή εικόνα. Παρομοίως, συμπληρώνουν οι Raskar and Tumblin (2009), τεχνικές κωδικοποιημένου διαφράγματος, εμπνευσμένες από εργασίες στην αστρονομική απεικόνιση, διατηρούν τις υψηλές χωρικές συχνότητες του φωτός που περνάει μέσα από το φακό, έτσι ώστε οι θολές - εκτός εστίασης- εικόνες να μπορούν να επαναεστιαστούν ψηφιακά ή να γίνει ανάλυση βάθους.

Μια σημαντική πτυχή για τον χειρισμό μετά τη σύλληψη είναι η ικανότητα διάσπασης της σκηνής σε χρήσιμα στοιχεία. Αυτά τα προβλήματα αποσύνθεσης βρίσκονται στην καρδιά πολλών νέων τεχνικών κωδικοποίησης. Με την κωδικοποίηση του φωτισμού, είναι δυνατή η αποσύνθεση της ακτινοβολίας σε μια σκηνή σε άμεσες και σφαιρικές συνιστώσες. Επίσης δύναται να διαχωριστεί το προσκήνιο από το φόντο χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές. Άλλα παραδείγματα περιλαμβάνουν την απεικόνιση με χρήση συνθετικού διαφράγματος που επιτρέπει την όραση μέσα από ποικίλα υλικά και τεχνικές ανάκτησης της θάμβωσης με τη λήψη επιλεγμένων ακτίνων μέσω ενός βαθμονομημένου πλέγματος ή πολλαπλών υποδιαφραγμάτων φακών. Η κωδικοποίηση του αισθητήρα για

	Old	New	Future
People and time	Cheap	Precious	Collaborative
Each photo	Precious	Free	Shared globally
Camera form-factor	Bulky	Portable	Imperceptible
Goal	Momentous occasions	Any visual information	Beyond eye, superhuman visual processing abilities
Lighting	Critical	Automated	Programmable and relightable
External sensor (metering)	No	Few	Dense
Stills versus video	Disjoint	Merged on camera	Chosen for display & user preferences
Sharing	After printing, local	Online, instantaneous, distant	Global
Photographer	Highly skilled	Modestly skilled	All can participate
Moment	“Kodak moment” all pristine	“Nokia moment” candid, instant, and casual	Essence moment, reconstructable
Trigger decision	Manual	Social context	Automated
Exposure time and HDR setting	Pre-select	Post-process	Per-pixel, or per-feature
Resolution vs. noise	Pre-select	Post-process	Auto-optimizing
Amount of light vs. depth of field setting (capture)	Pre-select	Post-process	Attention-driven
Photo manipulation	Edit pixels	Edit scene content	Edit attention

Σχήμα 2.4: Κατηγοριοποίηση Coded Photography, (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).

διαφορική μέτρηση, όπως με μια κάμερα κλίσης, παρέχει υψηλότερο δυναμικό εύρος. Στον αναδυόμενο τομέα της κωδικοποιημένης φωτογραφίας, συνεχίζεται η αναζήτηση κι άλλων εκπληκτικών δυνατοτήτων που προκύπτουν όταν συνδυαστεί ο υπολογιστική ισχύς με μεθόδους και τεχνικές ανίχνευσης και εμφάνισης της σκηνής.

Η μετατροπή των ακατέργαστων αποτελεσμάτων του αισθητήρα σε τιμές εικόνας περιλαμβάνει εξελιγμένη επεξεργασία. Οι εξελίξεις στην υπολογιστική φωτογραφία εξελίσσονται, ενώ οι υπάρχουσες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές εκτελούν “de-mosaicking” (παρεμβάλλοντας το πλέγμα Bayer), αφαιρούν το θόρυβο σταθερού μοτίβου και “καμένα” εικονοστοιχεία του αισθητήρα. Η κύρια ιδέα δομείται πάνω στον συνδυασμό των οπτικών μέσων και της υπολογιστικής επεξεργασίας για βέλτιστη λήψη αφενός και αφετέρου ανασύνθεση. Αυτός ο σχεδιασμός έχει αναδειχθεί στην κωδικοποιημένη φωτογραφία. Στην συνέχεια ακολουθούν τέσσερα χαρακτηριστικά παραδείγματα όπως αυτά αναφέρονται από τον Raskar (2009):

- **Coded exposure:** Μπλοκάροντας το φως στο χρόνο, ανοίγοντας και κλείνοντας το κλείστρο με μια προσεκτικά επιλεγμένη δυαδική ακολουθία, γίνεται εφικτό να διατηρηθούν οι υψηλές χωρικές συχνότητες των ταχέως κινούμενων αντικειμένων για να επιτευχθεί υψηλής ποιότητας αντιμετώπιση της θόλωσης λόγω κίνησης.
- **Coded aperture optical heterodyning:** Μπλοκάροντας το φως κοντά στον αισθητήρα με μια μάσκα, είναι σε θέση να καταγράψει φωτεινό πεδίο 4D σε αισθητήρα

2D. Και με την παρεμπόδιση του φωτός με μια μάσκα στο διάφραγμα, θα μπορούσε να επεκτείνει το βάθος πεδίου και να επιτύχει ψηφιακή επανασύνδεση πλήρους ανάλυσης.

- Coded illumination: Παρατηρώντας το μπλοκαρισμένο φως σε σκιαγραφίες, μια κάμερα πολλαπλών φλας μπορεί να εντοπίσει ασυνέχειες βάθους σε δύσκολες σκηνές χωρίς ανάκτηση βάθους.
- Coded sensing: Με την ανίχνευση των εντάσεων, μια κάμερα ανίχνευσης κλίσης μπορεί να καταγράψει μεγάλες αλλά και ανεπαίσθητες αλλαγές στην ένταση για να ανακτήσει μια εικόνα υψηλού δυναμικού εύρους.

2.2.4 3ου Βαθμού Επεξεργασίας ΥΦ (Essence Photography)

Στο επόμενο στάδιο, δηλαδή εκείνο του 3ου βαθμού επεξεργασίας, οι Raskar and Tumblin (2009) κατατάσσουν την διαδικασία επεξεργασίας που περιγράφει τις προσπάθειες με τη βοήθεια μηχανών για τον προσδιορισμό της σημασιολογίας της εικόνας και του οπτικού περιεχομένου της σκηνής. Η ωραιοποίηση των φωτογραφιών με άμεσο χειρισμό των στοιχείων της σκηνής θα γίνει μια επιλογή με τη χρήση της βελτίωσης οπτικών χαρακτηριστικών με βάση τα δεδομένα, όπως η ελκυστικότητα του προσώπου. Η φωτογραφία Essence, με ένα νέο πεδίο ανακάλυψης μπροστά της, γεννάει νέες και απροσδόκητες μορφές οπτικής και καλλιτεχνικής έκφρασης και επικοινωνίας. Η μη φωτορεαλιστική σύνθεση γίνεται ένα νέο καλλιτεχνικό εργαλείο, για παράδειγμα για την καταγραφή της κίνησης μέσω ενός μικροσκοπίου κίνησης ή για την ανάδειξη λεπτών χαρακτηριστικών μέσω του φωτισμού.



Σχήμα 2.5: Παραδείγματα από Essence Photography στις οποίες αποτυπώνεται ένα σημαντικό υποσύνολο της οπτικής και συναισθηματικής εμπειρίας, (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).

Η "Essence" φωτογραφία, η οποία δεν περιορίζεται μόνο στην ανίχνευση φωτονίων και στις μετρήσεις φωτός, ούτε στηρίζεται σε μία μόνο απομονωμένη συσκευή καταγραφή, υπερβαίνει την απλή καταγραφή των ραδιομετρικών μεγεθών της σκηνής και αμφισβητεί την αντίληψη ότι μια φωτογραφική μηχανή πρέπει να μιμείται απλώς ένα διατεταγμένο σύνολο αισθητήρων καταγραφής φωτός (Εικόνα 2.5). Αντί να βασίζεται

αποκλειστικά στην ανάκτηση φυσικών παραμέτρων, η διαδικασία αξιοποιεί μη οπτικά μεταδεδομένα και άλλα προγνωστικά. Στοχεύει στην κατανόηση του περιεχομένου της σκηνής ως γνωστικό βοήθημα για την ανθρώπινη όραση. Έτσι λοιπόν, η υπολογιστική φωτογραφία αποτυπώνει μια μηχανικά αναγνώσιμη απεικόνιση του κόσμου, δίνοντάς την δυνατότητα να δημιουργηθεί κατ' ουσίαν μια υπερρεαλιστική εικονική εμπειρία. Τα αποτελέσματά της μπορεί να μοιάζουν σε γενικές γραμμές με την απεικόνιση του κόσμου μετά από οπτική επεξεργασία υψηλού επιπέδου.

2.3 Ανάλυση της υπολογιστικής φωτογραφίας

Η υπολογιστική φωτογραφία είναι ένας τομέας που συνδυάζει την επιστήμη των υπολογιστών και τη φωτογραφία για τη δημιουργία νέων τρόπων λήψης, χειρισμού και ανάλυσης εικόνων και βίντεο. Περιλαμβάνει τη χρήση αλγορίθμων και λογισμικού για την επεξεργασία και ανάλυση οπτικών δεδομένων, καθώς και τη χρήση εξειδικευμένου υλικού, όπως αισθητήρες εικόνας και φακούς για τη σύλληψη και τον χειρισμό του φωτός. Ένας από τους κύριους στόχους της υπολογιστικής φωτογραφίας είναι να ξεπεράσει τους περιορισμούς της παραδοσιακής φωτογραφίας και να επιφέρει νέες δυνατότητες που δεν ήταν εφικτές. Με την υπολογιστική φωτογραφία επιτρέπεται παραγωγή εικόνων που υπερβαίνουν το δυναμικό εύρος παραδείγματος χάρη, καθιστώντας περιοχές της σκηνής που ήταν περισσότερο ή λιγότερο εκτεθειμένες να μπορούν εμφανίζονται λεπτομερώς ταυτόχρονα. Επιπλέον τροποποιούνται-ενισχύονται μεταβλητές όπως η εστίαση, το βάθος πεδίου, η ανάλυση και ο φωτισμός (χρώμα, ανακλαστικότητα κλπ).

Η χρησιμοποίηση υπολογιστικών μέσων ενσωματώνεται σε κάθε πτυχή των στοιχείων με σκοπό την υποστήριξη της φωτογραφικής κάμερα με αποτέλεσμα μία πιο σύνθετη απεικόνιση της πραγματικότητας που δεν θα ήταν ικανή να παραχθεί προηγουμένως. Ο καινοτόμος φωτισμός της σκηνής διαφοροποιείται καθώς η ποσότητα, η διεύθυνση, η ποιότητα και χρόνος που θα ακτινοβολεί το αντικείμενο είναι ελεγχόμενα πλέον. Τα οπτικά μέσα δύνανται να αιχμαλωτίσουν και βοηθητικές ακτίνες. Το σύνολο των διατεταγμένων αισθητήρων καταγράφει την πλούσια εισερχόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και στην συνέχεια μετατρέπουν αυτήν την πληροφορία σε ηλεκτρικά σήματα και ακολούθως την αποθηκεύουν σε ψηφιακή μορφή. Εν συνεχεία ακολουθεί το στάδιο της επεξεργασίας το οποίο είναι και από τα πιο σημαντικά, κατά το οποίο διεξάγεται η ψηφιακή επεξεργασία με την βοήθεια των υπολογιστικών μονάδων συνδυάζοντάς και στοιχεία από τις ήδη καταγεγραμμένες πληροφορίες συνοδευόμενες με τις αντίστοιχες παραμέτρους που περιγράφουν τις συνθήκες κατά το διάστημα της λήψης. Ιδιαίτεροι τύποι εικόνων χρειάζονται και καινοτόμες μορφές απεικόνισης, όπως για παράδειγμα αντικείμενα επαυξημένης πραγματικότητας καθώς και η μετέπειτα επικοινωνία τους και διανομή της παραχθείσας πληροφορίας.

Η υπολογιστική φωτογραφία περιλαμβάνει:

- **computating:** η πληροφορία είναι πλέον σε ψηφιακή μορφή και ικανή για υπολογισμούς
- **digital sensors:** προωθεί την ψηφιακή πληροφορία και την καθιστά ικανή για υπολογισμούς
- **morden optics:** δίνει την επιλογή να συλλεχθούν οι ακτίνες φωτός βάσει των επιθυμητών επιλογών

- actuators: δυνατότητα ελέγχου μηχανισμών των οπτικών παραμέτρων και συγχρονισμού
- smart lights: ελεγχόμενες πηγές φωτισμού που μπορούν να διαφοροποιήσουν τις συνθήκες φωτισμού της σκηνής.

Καταγράφοντας μια μηχανικά αναγνώσιμη αναπαράσταση μιας σκηνής, χρησιμοποιούνται σύγχρονες τεχνικές υπολογιστικής φωτογραφίας και με αυτό τον τρόπο ξεπερνούνται οι περιορισμοί των παραδοσιακών φωτογραφικών μηχανών και των διαστάσεων του εικόνων. Με αυτή την ιδέα, για το τι μπορεί να κάνει η υπολογιστική φωτογραφία, οι Raskar and Tumblin (2009) επιχείρησαν να ταξινομήσουν σε γενικές γραμμές σημαντικά θέματα στην ψηφιακή λήψη και τη σύνθεση εικόνων. Τρία σημαντικά θέματα στην ψηφιακή σύλληψη συνοψίζονται εδώ :

A. Η υπολογιστική φωτογραφία εκμεταλλεύεται την πληροφορική, τη μνήμη, την αλληλεπίδραση και επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών αντικειμένων για να ξεπεράσει τους εγγενείς περιορισμούς της μηχανικής της αναλογικής φωτογραφικής μηχανής, οι οποίοι διατηρούνται στην ψηφιακή φωτογραφία που μοιάζει στην λογική που εφαρμόζονταν και στις προηγούμενες (που διέθεταν φιλμ). Αυτοί οι περιορισμοί εμφανίζονται στο δυναμικό εύρος, την ανάλυση της εικόνας, το βάθος πεδίου και το οπτικό πεδίο.

B. Η υπολογιστική φωτογραφία επιχειρεί να καταγράψει μια πλούσια πολυεπίπεδη οπτική εμπειρία, καταγράφοντας περισσότερες πληροφορίες από απλώς ένα σύνολο εικονοστοιχείων. Παρέχει την καταγεγραμμένη αναπαράσταση της σκηνής ως αφηρημένο τύπο δεδομένων σε πιο προσβάσιμη από τη αναλογική μορφή και περιέχει πολύ περισσότερα από ένα απλό οπτικό πλέγμα τιμών εικονοστοιχείων. Τα νέα μεταδεδομένα μπορεί να περιλαμβάνουν το βάθος της σκηνής ή πιθανά χαρακτηριστικά, που θα οδηγήσουν μετέπειτα στην πληροφορία βάθους και που μπορεί να μοιράζονται μεταξύ πολλαπλών οπτικών γωνιών, συγχωνευμένες αναπαραστάσεις φωτο-βίντεο ή πολυφασματικές εικόνες. Η αναπαράσταση μπορεί επίσης να περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες περιβάλλοντος αλλά και παραμέτρους κατά τη λήψη όσον αφορά την ίδια την κάμερα, οι οποίες μπορεί να βοηθήσουν στη μεταγενέστερη επεξεργασία. Κάποια παραδείγματα αποτελούν τα μοτίβα διαμόρφωσης, αρχεία θέσης και προσανατολισμού του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης (GPS) και εξειδικευμένες πληροφορίες φωτισμού. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να συλλέγονται ασύρματα από τη σκηνή ή από επικουρικές συσκευές και συστήματα υποβοήθησης, εξωτερικές συσκευές μέτρησης του χρήστη ή ακόμα και από άλλες συνεργαζόμενες κοντινές κάμερες.

Γ. Η υπολογιστική φωτογραφία επιτρέπει την καταγραφή νέων κατηγοριών οπτικού σήματος και παρέχει αποσύνθεση του οπτικού σήματος σε καίριες συνιστώσες. Τα νέα οπτικά σήματα περικλείουν τη "στιγμή", όρια σχήματος για μη φωτορεαλιστική απεικόνιση, εκτιμήσεις τριών διαστάσεων και τμήματα φωτεινών πεδίων πολλαπλών προβολών. Τα ικανά προς αποσύνθεση σήματα περιέχουν πληροφορία που περιλαμβάνουν διαχωρισμό της σκηνής σε φόντο και αντικείμενα μπροστά από αυτό, τον άμεσο έναντι του έμμεσου φωτισμού και πληροφορίες περί διάχυσης και ανάκλασης. Με την προσθήκη ελάχιστων επιπλέον πληροφοριών, ο κατάλογος των φωτογραφικών δυνατοτήτων μπορεί αυξάνεται σημαντικά. Ένα παράδειγμα είναι η απαλοιφή των ανεπιθύμητων-περιττών ανακλάσεων που απεικονίζονται στην φωτογραφία κατά τη διάρκεια λήψης μέσω μιας διάφανης επιφάνειας όπως ένα παράθυρο ή μια βιτρίνα.

Η υπολογιστική φωτογραφία δίνει ποικίλες επιλογές για σύνθεση εικόνων, οι οποίες

συνοψίζονται στις ακόλουθες τρεις ευρείες κατηγορίες, όπως περιγράφουν οι Raskar and Tumblin (2009):

1) Η υπολογιστική φωτογραφία επιτρέπει έναν άνευ προηγουμένου έλεγχο της σύνθεσης μετά τη λήψη, όπως φωτογραφίες με ικανότητα επαναπροσδιορισμού των ακτίνων και διαδραστικές απεικονίσεις που επιτρέπουν στους χρήστες να αλλάζουν το φωτισμό, το σημείο θέασης και την εστίαση.

2) Η υπολογιστική φωτογραφία επιτρέπει τη σύνθεση "αδύνατων" φωτογραφιών που δεν θα μπορούσαν να αποτυπωθούν με μία μόνο έκθεση με μια παραδοσιακή φωτογραφική μηχανή. Επιτρέπει επίσης τη σύνθεση "αληθοφανών" σκηνών. Τέτοιες αδύνατες φωτογραφίες περιλαμβάνουν κυκλικές-κυλινδρικές προβολές που χρησιμοποιούν πολλαπλά κέντρα προβολής, συγχώνευση χρονικών γεγονότων, μικρο-κινήσεις, βίντεο με υφές και πανοράματα.

3) Η υπολογιστική φωτογραφία παρέχει εύκολη πρόσβαση σε μέχρι πρότινος ασυνήθιστες μορφές απεικόνισης και τεχνικές συλλογής δεδομένων στην αστρονομία, τη μικροσκοπία, την τομογραφία και άλλα επιστημονικά πεδία. Αυτές οι μέθοδοι δημιουργούν εικόνες με προηγμένους υπολογισμούς, αξιοποιώντας εξελιγμένους αλγορίθμους και αποκαλύπτουν ότι δεν μπορεί να φανεί από τις ανθρώπινες παρατηρήσεις.

Σύμφωνα με τη διορατική επισκόπηση της υπολογιστικής φωτογραφίας του Shree Narayar το 2005, μπορούσαν να ενοποιηθούν οι εξελίξεις σε τέσσερις μεγάλους τομείς:

1. γενικευμένη οπτική - (generalized optics)
2. γενικευμένοι αισθητήρες - (generalized sensors)
3. υπολογιστικές μέθοδοι φωτισμού - (computational illumination methods)
4. γενικευμένη επεξεργασία, ανακατασκευή και απεικόνιση - (generalized processing, reconstruction, and display).

1.Generalized Optics (γενικευμένη οπτική):

Στην υπολογιστική φωτογραφία, κάθε οπτικό στοιχείο του φακού αντιμετωπίζεται ως ένας μετασχηματιστής ακτίνων 4D που τροποποιεί ένα πεδίο φωτός μεταξύ σκηνής και αισθητήρα κατά τους Raskar and Tumblin (2009). Το προσπίπτον πεδίο φωτός 4D για ένα δεδομένο μήκος κύματος μετασχηματίζεται από το οπτικό στοιχείο σε ένα νέο πεδίο φωτός 4D. Τα γενικευμένα οπτικά στοιχεία μπορούν να ταξινομηθούν με τρεις γενικούς τρόπους, με βάση το πού και πώς το οπτικό στοιχείο επηρεάζει τη διάδοση του φωτός. Κάθε οπτικό στοιχείο διαχέει, αναδιαμορφώνει και αναδιανέμει τις προσπίπτουσες ακτίνες. Ο τρόπος με τον οποίο η δομή των ακτίνων αναδύονται από ένα σημείο της σκηνής, επηρεάζει τον αισθητήρα με διαφορετικούς τρόπους.

- Όταν το οπτικό στοιχείο διαχέει τις ακτίνες από ένα στοιχείο της σκηνής σε ένα μεγάλο τμήμα του αισθητήρα, τότε θεωρείται ότι το οπτικό στοιχείο είναι ένα πρώτο στοιχείο μετασχηματισμού. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν συστοιχίες καμερών και άλλα οπτικά στοιχεία στη θέση τους πριν από τους παραδοσιακούς φακούς.
- Όταν το οπτικό στοιχείο επηρεάζει το μεγαλύτερο μέρος της σκηνής με παρόμοιο τρόπο, τότε ονομάζεται μεσαίο στοιχείο μετασχηματισμού. Στην κατηγορία ανήκουν οι συμβατικοί λεπτοί φακοί, κωδικοποιημένες μάσκες πλάτους ή φάσης καθώς και πλέγματα στο διάφραγμα.

- Όταν το οπτικό στοιχείο επηρεάζει τον αισθητήρα τοπικά, κοντά στην επιφάνεια του αισθητήρα, τότε ονομάζεται τελευταίο στοιχείο μετασχηματισμού. Σε αυτά περιλαμβάνονται οι πίνακες φακών lenslet και τα μωσαϊκά φίλτρα Bayer.

Η γενικευμένη οπτική, από την άλλη πλευρά, μπορεί σκόπιμα να περιλαμβάνει διάθλαση, ανάκλαση, απόσβεση, σκέδαση. Τα διαθλαστικά στοιχεία, όπως αυτά των παραδοσιακών φακών, είναι πρωτίστως εκτροπείς ακτίνων, δηλαδή αντιστοιχούν μια εισερχόμενη κατεύθυνση σε μια εξερχόμενη κατεύθυνση. Ως αποτέλεσμα, οι παραδοσιακοί φακοί να έχουν τετραγωνικού πάχους προφίλ για την εκτροπή όλων των ακτίνων από την ίδια κατεύθυνση προς ένα ενιαίο εστιασμένο σημείο στον αισθητήρα.

Ωστόσο, κανένα μεμονωμένο διαθλαστικό στοιχείο φακού δεν μπορεί να επιτύχει τα υψηλά οπτικά πρότυπα των σύγχρονων σχεδιασμών φακών. Αντιθέτως, οι σχεδιαστές οπτικών στοιχείων σχεδιάζουν, συνδυάζουν πολλά υλικά και διαθλαστικά στοιχεία με γραμμικά προφίλ (πρίσματα), κυβικά προφίλ (κωδικοποίηση μετώπου κύματος), κυρτά και κοίλα προφίλ κ.ά. Σκοπός τους είναι να σχηματίσουν ένα ρυθμιζόμενο οπτικό σύνολο με εξαιρετικές ικανότητες σχηματισμού εικόνας. Συγκεκριμένα, τα πρίσματα επιφέρουν πρόσθετο οπτικό άξονα και το βάθος πεδίου επεκτείνεται υπολογιστικά με την οπτική κωδικοποιημένου μετώπου κύματος.

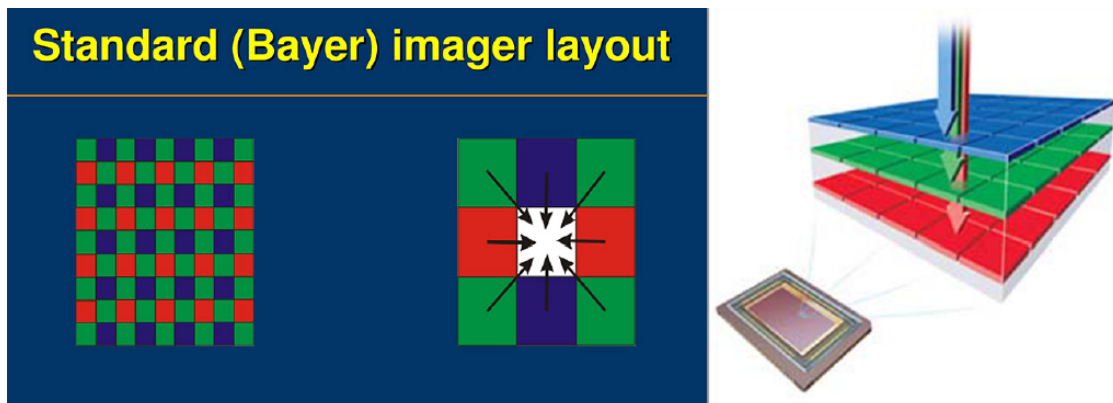
Ένα πρόβλημα που επιλύεται με την βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων είναι ότι δείκτης διάθλασης οποιουδήποτε φακού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος, καθιστώντας την κατασκευή παραδοσιακών οπτικών μεγάλου φάσματος δύσκολη έως αδύνατη. Οι υπολογιστικές μέθοδοι μπορούν να βοηθήσουν με την προσθήκη ανακλαστικών στοιχείων την αποκωδικοποίηση ή την αναδιάταξη των ακτίνων και τέλος τη διαμόρφωση πιο συνεκτικών εικόνων. Επιπλέον, η ανάκλαση παίζει σημαντικό ρόλο στα διχρωμικά φίλτρα που διαπερνούν επιλεκτικά φως ενός μικρού εύρους χρωμάτων ενώ ανακλούν άλλα χρώματα. Τα διχρωμικά υλικά χρησιμοποιούν την αρχή της παρεμβολής για τη διέλευση ή τη μείωση του φωτός σε διαφορετικές συχνότητες, γεγονός που οδηγεί σε οπτικές επιστροφές που ενισχύουν ή καταστέλλουν την ελεγχόμενη ανάκλαση. Επιπρόσθετα, κάτοπτρα εκτός της κάμερας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναπροσαρμογή των γραμμικών συνδυασμών των δεσμών ακτίνων που φθάνουν στον αισθητήρα του κάθε εικονοστοιχείου. Τα διαφράγματα, τα στοπ διαφράγματος και οι κωδικοποιημένες μάσκες μπλοκάρουν ή εξασθενούν το φως. Σε ορισμένες μεθόδους απεικόνισης και στην απεικόνιση με κωδικοποιημένο διάφραγμα, που χρησιμοποιείται στην αστρονομία (για ακτίνες- γ και ακτίνες-X), ο παραδοσιακός φακός απουσιάζει εντελώς.

Στη σύγχρονη φωτογραφία κατά τους Raskar and Tumblin (2009), οι φακοί συνδυάζονται με κωδικοποιημένα διαφράγματα για την επίτευξη αναστροφής θολώματος για περιοχές που βρίσκονται εκτός εστίασης. Στοιχεία που διαχέουν το φως χρησιμοποιούνται σπάνια επειδή προκαλούν "θολούρα" στο χώρο των ακτίνων, αν και τα φυσικά μέσα σκέδασης αποτελούν μερικές φορές μέρος της οπτικής διαδρομής. Τα πλέγματα περίθλασης και τα ολογράμματα με φυσικά χαρακτηριστικά συγκρίσιμα με το μήκος κύματος του φωτός μπορούν να επιτύχουν ελεγχόμενη σκέδαση του φωτός. Οι συνδυασμοί περιθλαστικών και διαθλαστικών στοιχείων μπορούν να δημιουργήσουν χρήσιμες προγραμματιζόμενες κάμερες φάσματος ή να μειώσουν τη χρωματική εκτροπή με τη χρήση φακών περιθλαστικής οπτικής. Τα ολογράμματα όγκου μπορούν να δημιουργήσουν εικόνες από τις οποίες τα μη εστιασμένα μέρη δεν ήταν μόνο θολά αλλά και σκοτεινά.

2. Generalized Sensors (γενικευμένοι αισθητήρες):

Οι αισθητήρες φωτός μετράνε την προβολή ενός φωτεινού πεδίου 4D μαζί με τις πρόσθετες διαστάσεις του μήκους κύματος, του χρόνου και της πόλωσης. Οι παραδοσιακοί αισθητήρες καταγράφουν μόνο μια διακριτή διδιάστατη προβολή αυτού του φωτεινού πεδίου, ενσωματώνοντας τις διαστάσεις της γωνίας και του χρόνου για να δημιουργήσουν μια διδιάστατη φωτογραφία. Οι βιντεοκάμερες καταγράφουν επίσης τη διάσταση του χρόνου.

Οι παραδοσιακοί αισθητήρες ανταλλάσσουν τη χωρική ανάλυση με τη μέτρηση του μήκους κύματος (δηλαδή του χρώματος), χρησιμοποιώντας ένα πλέγμα Bayer με κόκκινα, πράσινα και μπλε φίλτρα σε μεμονωμένα εικονοστοιχεία. Ένας άλλος σύγχρονος σχεδιασμός αισθητήρα, από τη Foveon, προσδιορίζει το μήκος κύματος των φωτονίων με τη διείσδυση του αισθητήρα, επιτρέποντας διάφορες φασματικές εκτιμήσεις σε μία μόνο θέση εικονοστοιχείου.



Σχήμα 2.6: Μωσαϊκό Bayer (αριστερά) και Foveon (δεξιά) sensors, (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).

Η υπολογιστική φωτογραφία επιχειρεί να αποτυπώσει μια πιο πλούσια, υψηλότερης διάστασης αναπαράσταση χρησιμοποιώντας επίπεδες, μη επίπεδες ή ακόμη και ογκομετρικές συστοιχίες αισθητήρων. Οι γενικευμένοι αισθητήρες μπορούν να επεκτείνουν το δυναμικό εύρος χρησιμοποιώντας έναν επεξεργαστή κλίσης που μετρά τη διαφορετική ένταση μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων. Οι ανιχνευτές υψηλής ταχύτητας επιτυγχάνουν ακριβή χρονική προσαρμογή για τη μέτρηση του χρόνου ταξιδιού της μεταφοράς του φωτός για την ανίχνευση βάθους. Οι κάμερες ZCam (3DV Systems) ήταν τα πρώτα εμπορικά παραδείγματα.

Στην υπολογιστική φωτογραφία, τέτοιες κάμερες που ανιχνεύουν βάθος χρησιμοποιούνται για ισχυρό έλεγχο μετά τη λήψη. Οι προσεκτικές ακολουθίες χρονικής ολοκλήρωσης μπορούν να αντιμετωπίσουν το θόλωμα της κίνησης διατηρώντας πληροφορίες σχετικά με τις υψηλές χωρικές συχνότητες. Μπορούν να υπολογίσουν ευκρινείς εικόνες ενός ταχύτατα κινούμενου αντικείμενου από μία μόνο εικόνα που έχει ληφθεί από μια φωτογραφική μηχανή με κλείστρο που "φιτερουγίζει". Μέσα σε μία μόνο έκθεση, η ελεγχόμενη κίνηση του αισθητήρα μέσα ή έξω από το επίπεδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διατήρηση των χωρικών συχνοτήτων της εικόνας ή τη δημιουργία μικρότερου βάθους πεδίου. Στο μέλλον, η οπτική και οι ανάπτυξη των αισθητήρων θα συγχωνευόταν σε υβριδικά στοιχεία. Αυτό προέβλεπαν οι Raskar and Tumblin (2009) και επεσήμαιναν

πως οι σύγχρονες τους κάμερες σε επίπεδο πλακέτας κατασκευάζονται σε γυάλινα πλακίδια με τρόπο παρόμοιο με αυτόν της κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε πλακίδια πυριτίου.

3. Computational Illumination (υπολογιστικές μέθοδοι φωτισμού):

Στις πρώιμες ημέρες της ηλεκτροχημικής φωτογράφισης με φλας, ο έλεγχος της διάρκειας και της έντασης του φλας ήταν δύσκολος. Όμως στην συνέχεια οι πηγές φωτισμού εξελίχθηκαν και μάλιστα με εξαιρετική ικανότητα προγραμματισμού, χάρη στην πρόοδο των τεχνολογιών φωτισμού για την εκπομπή φωτός. Μια ποικιλία θεμάτων κάτω από διαφορετικές συνθήκες φωτισμού και παραμέτρων απαθανατίζουν διαφορετική εικόνα της σκηνής. Σημαντικότερο συντελεστή αποτελούν οι συνθήκες φωτισμού. Η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων γίνεται για κάθε σκηνή με προσεκτική μέτρηση της έντασης του φωτός με φωτόμετρο (χειροκίνητα ή αυτόματα) καθώς και με τον χειρισμό των μεταβλητών έκθεσης.

Οι μεταβλητές έκθεσης είναι η ευαισθησία ISO, το διάφραγμα του φακού και η ταχύτητα κλείστρου έτσι ώστε να καταγράψει το φως με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια. Στις ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, αυτές οι ρυθμίσεις έκθεσης μπορούν να αυτοματοποιηθούν ή και να προγραμματιστούν, έτσι ώστε ο χειριστής να μη χρειάζεται να "σκέφτεται" τις επιλογές έκθεσης. Για παράδειγμα, ακμές που θα αποκρύπτονταν υπό φυσιολογικές συνθήκες μιας απλής φωτογράφισης είναι δυνατόν να συλληφθούν χρησιμοποιώντας πολλαπλά φλας. Αξιοποιώντας δηλαδή πλήθος μηχανισμών που επιτρέπουν με συντονισμό των παραμέτρων έκθεσης και φωτισμού να επιτευχθεί μια φωτεινή και ευδιακριτή λήψη. Σε κάθε περίπτωση, ο καλύτερος έλεγχος του φωτισμού κατά τη λήψη εικόνας επιτρέπει πλουσιότερες αναπαραστάσεις των προς φωτογράφιση σκηνών.

4. Generalized Processing, Reconstruction and Display (γενικευμένη επεξεργασία, ανακατασκευή και απεικόνιση):

Αρκετές τεχνικές επεξεργασίας εικόνας και όρασης υπολογιστών παρέχουν ήδη νέους τρόπους αλληλεπίδρασης με τις υπάρχουσες φωτογραφίες, όπως αυτόματα παραγόμενες προτάσεις αξιοποιώντας μεταδεδομένα. Ορισμένες "εξυπνότερες" φωτογραφικές μηχανές υιοθετούν γρήγορες μεθόδους φιλτραρίσματος, αναγνώρισης και μέτρησης εικόνας για να προσαρμόζουν αυτόματα τις ρυθμίσεις τους ώστε να ταιριάζουν με το περιεχόμενο της σκηνής. Ανιχνεύουν χαμόγελα και να λαμβάνουν λογικές αποφάσεις χαμηλού επιπέδου.

Η αυξανόμενη ικανότητα πράξεων για μεγάλα σύνολα φωτογραφιών επιτρέπουν ακόμη και, σε πλέον αρχάριους να εξερευνούν το περιεχόμενο των εικόνων τους σε 3D. Σε ένα περιβάλλον τόσο πλούσιο σε δεδομένα, όπου εκατομμύρια φωτογραφίες κάθε αντικείμενου μπορούν να αρχειοθετηθούν και να ανακτηθούν εύκολα και με μικρό κόστος, οι Raskar and Tumblin (2009) θεωρούν ότι η αυτόματη επεξεργασία θα πρέπει να γίνει κεντρικό χαρακτηριστικό της υπολογιστικής φωτογραφίας.

2.3.1 Τομείς και επιστημονικά πεδία

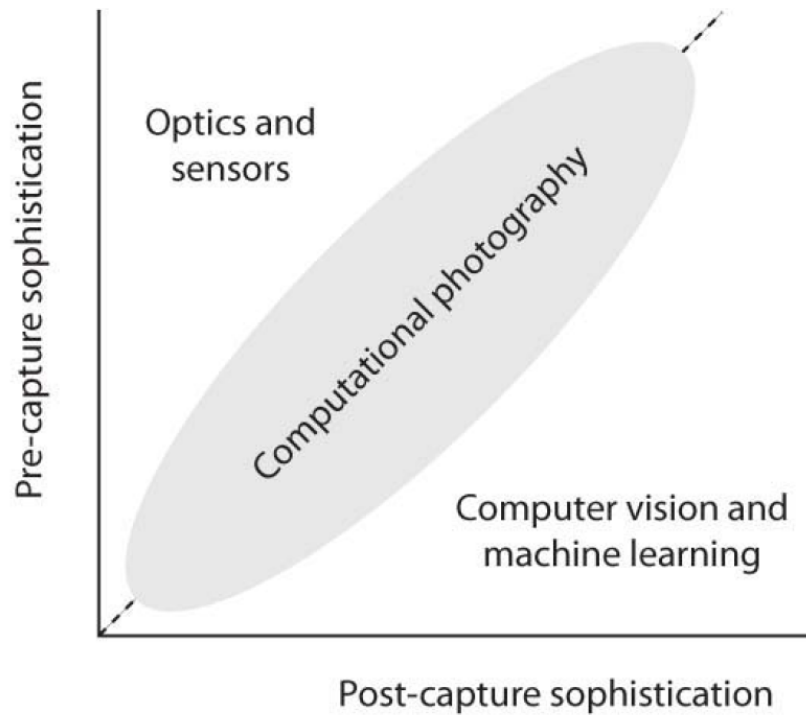
Η υπολογιστική φωτογραφία είναι ένας τομέας της φωτογραφίας στον οποίο οι τεχνικές της υπολογιστικής όρασης και των γραφικών αποτελούν βασικά στάδια επεξεργασίας στην αλυσίδα απεικόνισης Fiss (2022). Επίσης σύμφωνα με τους Raskar and Tumblin (2009), η υπολογιστική φωτογραφία είναι στενά συνδεδεμένη με την όραση υπολογι-



Σχήμα 2.7: Computational photography (πάνω) Computational illumination (κάτω), (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).

στών, τη μηχανική μάθηση, την εφαρμοσμένη οπτική και την οπτική αισθητική. Επιπλέον η υπολογιστική φωτογραφία χρησιμοποιεί πριν από τη λήψη τεχνικές της οπτικής και των αισθητήρων καθώς επίσης τεχνικές μετά τη λήψη της όρασης υπολογιστών και της μηχανικής μάθησης, αλλά είναι διακριτή από αυτά τα ερευνητικά πεδία.

Στις μεθόδους υπολογιστικής όρασης, η επικύρωση της μεθοδολογίας είναι κρίσιμη για την απόδειξη της αποτελεσματικότητάς της σε εργασίες όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση. Για παράδειγμα μπορεί μια εικόνα να αποτελεί δείγμα στην διαδικασία ελέγχου. Έτσι, η αρχική εικόνα υπόκειται σε υποβάθμιση ποιότητας-ανάλυση. Εν συνεχεία εφαρμόζονται τεχνικές υπερ-ανάλυσης έτσι ώστε να αυξηθεί η ανάλυση, προσεγγίζοντας και στοχεύοντας το αρχικό μέγεθος. Τέλος συγκρίνεται η αρχική εικόνα με την παραχθείσα. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Μέσω της διαδικασίας αυτής προκύπτουν μετρήσιμα στοιχεία, σχετικά με το πόσο ακριβής είναι ο αλγόριθμος στη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας. Αυτός λοιπόν, είναι ο τρόπος επικύρωσης και σύγκρισης με τα εμπειρικά δεδομένα. Καθώς οι αλγόριθμοι αναπτύσσονται όλο και περισσότερο, αυξάνεται και η αποτελεσματικότητά τους σε εφαρμογές υπερ-ανάλυσης (και όχι μόνο) εικόνων. Επιπροσθέτως σε μια πιο ειδική περίπτωση, μια εικόνα μπορεί επεξεργαστεί, κατά πάσα πιθανότητα, ενώ προηγουμένως αυτή η εικόνα έχει ήδη βελτιωθεί από την μέθοδο της όξυνσης της ευκρίνειας (pan-sharpening) και τέλος να βελτιωθεί περαιτέρω με υψηλότερη ανάλυση. Η ραγδαία αύξηση των μεθόδων της όρασης υπολογιστών βρίσκεται



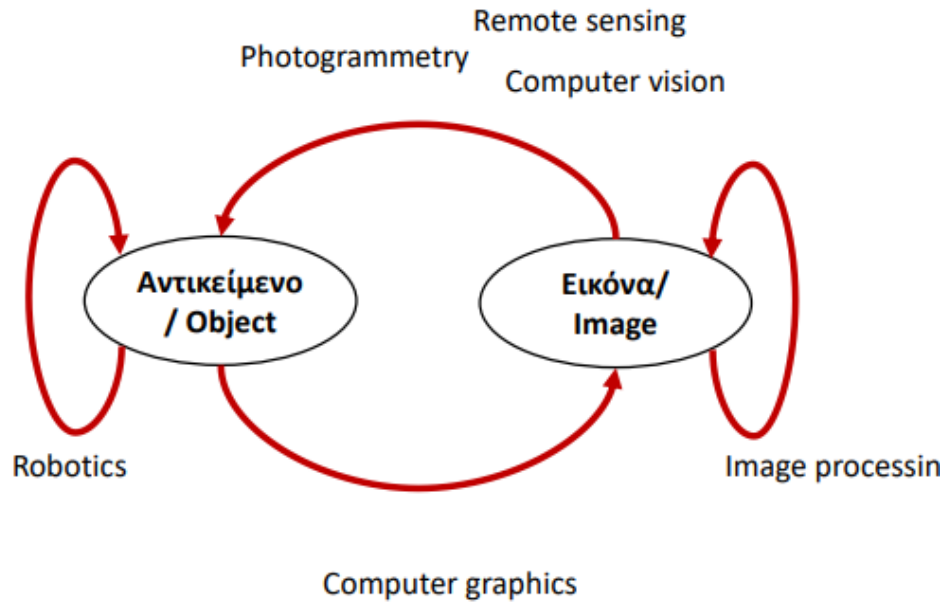
Σχήμα 2.8: Υπολογιστική Φωτογραφία - Pre: Optics & Sensors - Post: Computer vision & machine learning, (Πηγή: Computational Photography Raskar-Tumblin).

εφαρμογή σε διάφορα πεδία, μεταξύ αυτών' στην τηλεπισκόπηση ή ακόμα και σε γεωχωρικές διεργασίες. Τα ευρύτερα πεδία της επιστήμης των δεδομένων (data science) και της όρασης υπολογιστών οδηγούν τη μεθοδολογία και τις εξελίξεις. Αυτό ισχύει επίσης για τις τεχνικές και τις μεθόδους τμηματοποίησης (segmentation) και υπερ-ανάλυσης με προσεγγίσεις βαθιάς μάθησης (deep learning). Σύμφωνα λοιπόν με Mapscaping (2022), η βαθιά μάθηση είναι εξαιρετική σε προβλήματα που δεν έχουν επιλυθεί με άλλους τρόπους, όπως η αναγνώριση προβλημάτων, συγκεκριμένες εργασίες όρασης υπολογιστή ή περίπλοκες βελτιστοποιήσεις. Τα μοντέλα μηχανικής εκμάθησης είναι εξαιρετικά στην επεξεργασία εξαρτημάτων που περνούν από μια γραμμή παραγωγής και κάνουν εξαιρετική δουλειά με την ανίχνευση ακμών.

2.3.2 Όραση Υπολογιστών (Computer Vision)

Η όραση υπολογιστών ή αλλιώς Computer Vision όπως συνηθίζεται να λέγεται, είναι η ικανότητα των υπολογιστών να "βλέπουν". Επικάλυπτόμενα πεδία εφαρμογής και παραλλαγές είναι τα εξής:

- Image Understanding,
- Machine Vision,
- Robot Vision,
- Image Analysis,
- Video Understanding κ.α.



Σχήμα 2.9: Σχέσεις σύνδεσης επιστημονικών πεδίων, Πηγή: Διαφάνειες διαλέξεων (Φωτογραμμετρία II, ΣΑΤΜ-ΕΜΠ)

Κατά τη λήψη μιας κλασικής φωτογραφίας (κεντρική προβολή), η τρισδιάστατη πληροφορία του χώρου εκλείπει καθώς "αιχμαλωτίζεται" ως δισδιάστατη φωτογραφία δηλαδή μια επίπεδη απεικόνιση. Η τρίτη διάσταση έχει χαθεί εφόσον πρόκειται για μια προβολή των αντικειμένων του τρισδιάστατου χώρου στο επίπεδο. Παρ' όλα αυτά, επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο σχετίζονται τα απεικονιζόμενα αντικείμενα. Εμμέσως λοιπόν υπάρχουν "κρυμμένες" πληροφορίες που συνδέουν την προβαλλόμενη σκηνή και τις αρχικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά. Η όραση υπολογιστών καλείται να επαναφέρει την χαμένη πληροφορία της τρίτης διάστασης από την εικόνα (ή εικόνες) των δύο διαστάσεων και να επαναδημιουργήσει τρισδιάστατα σχήματα (3D-Shape).

Η επανάκτηση της πληροφορίας αυτής πραγματοποιείται εμμέσως εφαρμόζοντας τεχνικές στις εικόνες μέσω της στερεοσκοπικής παρατήρησης, της κίνησης βάση παράλλαξης, των σκιών και του τρόπου με τον οποίο απεικονίζονται γνωστά αντικείμενα-σύμβολα-μοτίβα. Επιπλέον αξιοποιώντας ισοϋψείς με την βοήθεια αλγορίθμων και ακολουθώντας τα κατάλληλα στάδια δημιουργούνται χάρτες βάθους. Βασικοί παράγοντες σε εφαρμογές όρασης υπολογιστών είναι ο φωτισμός, η κάμερα (με τις παραμέτρους του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού) καθώς επίσης και η σκηνή (η ανακλαστικότητα, το σχήμα και η υφή των αντικειμένων).

Από την άλλη με "computer graphics" επιχειρείται η ανάποδη διαδικασία. Δοσμένου του τρισδιάστατου μοντέλου μια σκηνή (σχήμα και πληροφορίες) παράγεται δισδιάστατη απεικόνιση. Πιο συγκεκριμένα παράγεται μια εικόνα, έτσι όπως θα φαινόταν ένα αντικείμενο/σκηνή από συγκεκριμένη θέση σε μια οθόνη. Οι εφαρμογές είναι πάμπολλες πάνω από μια δεκαετία και ακολουθούν μερικές από τις πιο γνωστές:

- Face Recognition
- Object Recognition

- Video Surveillance and Monitoring (object detection, tracking and behavior analysis)
- Remote Sensings (UAV)
- Robotic

Τα τρισδιάστατα σχήματα που δημιουργούνται με την βοήθεια της όρασης υπολογιστών προκύπτουν επεξεργάζοντας δεδομένα από εικόνες και βίντεο. Κατ' αυτόν τον τρόπο τα απεικονιζόμενα αντικείμενα ενδιαφέροντος μετατρέπονται σε μορφές διαφόρων 3D τύπων, όπως ένα νέφος σημείων, τρισδιάστατο μοντέλο κλπ. Τα προϊόντα από τη σύνθεση φωτογραφιών που δημιουργούνται τελικώς μπορεί να είναι ορθοφωτογραφίες, χάρτες, μωσαϊκά, κ.ά. Οι γνώριμες αυτοματοποιημένες φωτογραμμετρικές εργασίες, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή 3D της σκηνής μέσω εικόνων, πραγματοποιούνται με τη βοήθεια επίλυσης με τη μέθοδο των δεσμών (Bundle Adjustment). Ο συνδυασμός εφαρμογών της υπολογιστικής φωτογραφίας μπορεί να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα της όρασης υπολογιστών και κατά συνέπεια να αυξηθεί η ποιότητα και η αποδοτικότητα των μετέπειτα διαδικασιών.

Μια διάκριση των βημάτων που ακολουθούνται για την εύρεση οντοτήτων είναι η εξής:

- Object Detection, αναζήτηση για τι αντικείμενα υπάρχουν σε κάθε εικόνα
- Object Tracking, παρακολούθηση των εντοπισμένων οντοτήτων
- Categration and Classification, προσδιορισμό χαρακτηριστικών και ταξινόμηση
- Event or Activities Recongition, εκτίμηση γενικότερης συμπεριφοράς

2.3.3 Υλοποιημένες πρώιμες εφαρμογές

Η υπολογιστική φωτογραφία αναφέρεται ευρέως σε στρατηγικές ανίχνευσης και αλγοριθμικές τεχνικές που βελτιώνουν ή επεκτείνουν τις δυνατότητες της ψηφιακής φωτογραφίας. Πολλές εφαρμογές υπολογιστικής φωτογραφίας για smartphone χρησιμοποιούν την ενσωματωμένη κάμερα ή τις κάμερες του τηλεφώνου. Αυτές οι εφαρμογές μπορούν να παράγουν εξόδους όπως πανοράματα ή ομαλά timelapses που δεν είναι τυπικές έξοδοι της κάμερας (Microsoft-Research, 2023). Παρόλο που αρχικά υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον για την υπολογιστική φωτογραφία στην ερευνητική και φωτογραφική κοινότητα, η πρόοδος εμποδίστηκε από την έλλειψη μιας φορητής, προγραμματιζόμενης φωτογραφικής μηχανής με επαρκή ποιότητα εικόνας και υπολογιστική ισχύ (κατά τα πρώιμα χρόνια).

Frankencamera

Για να αντιμετωπιστεί αυτό ακριβώς το πρόβλημα, σύμφωνα με τους Adams et al. (2010), σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν κάμερες όπως η Frankencamera. Καινοτομία αποτέλεσε το γεγονός ότι περιλάμβανε πολλαπλό φλας και ελεγχόμενο κλείστρο καθώς και ότι τελικώς επέτρεπε την "αιχμαλώτιση" της σκηνής, διαφοροποιώντας τις συνθήκες φωτισμού. Πρωτοπόρος ήταν F2 - Frankencamera (εικόνα 2.10), η οποία αποτελούνταν από ένα συνονθύλευμα έτοιμων εξαρτημάτων και γι' αυτό ονομάστηκε έτσι.

Η αρχιτεκτονική της επιτρέπει τον έλεγχο και το συγχρονισμό του αισθητήρα και της διαδικασίας επεξεργασίας εικόνας σε χρονική κλίμακα μικροδευτερολέπτων, καθώς και



Σχήμα 2.10: Η F2 της Frankencamera (Πηγή: Adams et al. (2010)).

τη δυνατότητα ενσωμάτωσης και συγχρονισμού επιπλέον μερών, όπως τους φακούς και τα φλας. Η συγκεκριμένη αποτέλεσε από τις πρώτες ολοκληρωμένες προσπάθειες - εφαρμογές για δημιουργία "σταθμού-συσκευή" που ανήκει στο πεδίο της υπολογιστικής φωτογράφισης. Αργότερα η εμφάνιση μίας εξελιγμένης της μορφής πραγματοποιήθηκε στις κάμερες των smartphones, όπως για παράδειγμα το Nokia N900 (σχήμα 2.11), που συνδύασαν τις αυξημένες δυνατότητες σε υπολογιστικής ισχύς που παρείχαν λόγω των εξελιγμένων hardware και software. Τα πλεονεκτήματα της Frankencamera ήταν πολυάριθμα.

- Επρόκειτο για ένα εργαλείο φορητό, αυτοτροφοδοτούμενο και αυτόνομο. Κατά συνέπεια επέτρεπε στον χρήστη να πάρει την κάμερα σε εξωτερικούς χώρους σε φωτογραφικά προβλήματα του πραγματικού κόσμου.
- Διέθετε μεγάλο εύρος σκόπευσης της σκηνής σε μια οθόνη αφής υψηλής ποιότητας που επέτρεπε τον πειραματισμό και την αλληλεπίδραση του χειριστή της φωτογραφικής μηχανής, προσφέροντας μία ξεχωριστή εμπειρία.
- Παρείχε ευκολίες στον προγραμματισμό, γι' αυτό έτρεχε ένα βασικό λειτουργικό σύστημα και επέτρεπε προγραμματιστεί, υποστηρίζοντας τυπικές γλώσσες προγραμματισμού, βιβλιοθήκες, μεταγλωτιστές και εργαλεία εντοπισμού και απαλοιφής (επιδιόρθωσης) σφαλμάτων - debugging.
- Διέθετε τη δυνατότητα διαχείρισης αισθητήρα, φακών και ρυθμίσεων της μηχανής ανά καρτέ βάσει του ρυθμού του βίντεο, έτσι ώστε οι ριπές εικόνων να λαμβάνονται με μοναδικές παραμέτρους λήψης για κάθε μια ξεχωριστή φωτογραφία.
- Για κάθε καρτέ που παράχθηκε έχουν δημιουργηθεί οι αντίστοιχες ετικέτες που περιγράφουν τις τιμές των ρυθμίσεων της κάμερας κατά την στιγμή της λήψης, επιτρέποντας έτσι την αξιοποίηση των δεδομένων με τον καταλληλότερο τρόπο.

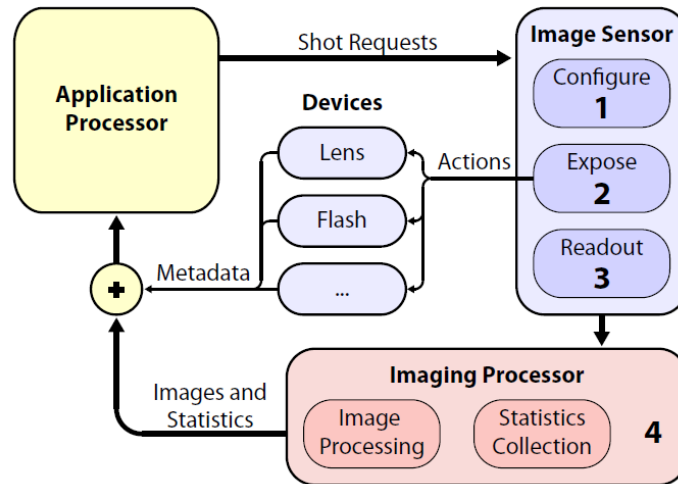


Σχήμα 2.11: A Nokia N900, (Πηγή:Adams et al. (2010)).

- Επέτρεπε ακόμα την πρόσβαση στις ακατέργαστες(raw) τιμές των εικονοστοιχείων με τη μέγιστη ταχύτητα έως τους περιορισμούς κατασκευής του αισθητήρα (δηλαδή ασυμπιεστα, μη διαμορφωμένα εικονοστοιχεία).
- Παρείχε αρκετή επεξεργαστική ισχύ πέραν της απαιτούμενης για τη βασική λειτουργία της φωτογραφικής μηχανής, ώστε να επιτρέπει την εφαρμογή σχεδόν οποιουδήποτε αλγορίθμου υπολογιστικής φωτογραφίας από την πρόσφατη βιβλιογραφία, και αρκετή μνήμη για την αποθήκευση στοιχεία εισόδου και εξόδου (συχνά ριπές εικόνων "φουλ" ανάλυσης).
- Τέλος, επέτρεπε τη αξιοποίηση και συγχρονισμό βασικών αξεσουάρ κάμερας, όπως εξωτερικό φλας ή απομακρυσμένους πυροκροτητές. Ακόμα, περιλάμβανε καινοτόμες για την τότε εποχή συσκευές, όπως για παράδειγμα δορυφορικό σύστημα εντοπισμού θέσης - (GPS), αδρανειακό σύστημα (IMU) ή ακόμα και hardware σε πειραματικό στάδιο.

Συγκεντρωτικά οι δυνατότητες υπολογιστικής φωτογραφίας που επιτεύχθηκαν χρησιμοποιώντας την Frankencamera είναι:

- **HDR viewfinding and capture:** Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιεί μια σειρά από τεχνικές και αλγόριθμους που επιτρέπουν την ενσωμάτωση πολλών εικόνων με διαφορετικές τιμές έκθεσης σε μια μόνο εικόνα, προκειμένου να διατηρηθούν και να εμφανιστούν τα φωτεινά και σκοτεινά σημεία της σκηνής.
- **low-light viewfinding and capture:** Η οποία χρησιμοποιεί αλγόριθμους επεξεργασίας εικόνας για να αυξήσει τη φωτεινότητα της εικόνας χωρίς να αυξηθεί ο θόρυβος.
- **automated acquisition of extended dynamic range panoramas:** Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη δημιουργία πανοραμικών εικόνων, καθώς επιτρέπει



Σχήμα 2.12: Η αρχιτεκτονική της Frankencamera (Πηγή: Adams et al. (2010)).

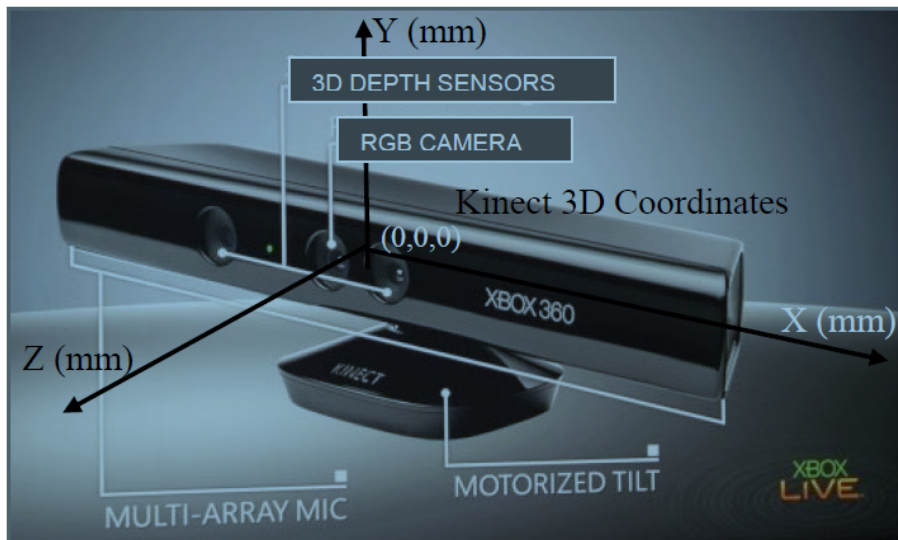
στον χρήστη να αποτυπώσει περισσότερες λεπτομέρειες και να δημιουργήσει εικόνες με πιο φυσικά χρώματα και περισσότερη φωτεινότητα.

- **foveal imaging:** Η τεχνική αυτή, αναφέρεται στη δυνατότητα των υπολογιστικών συστημάτων να αντιγράφουν τη λειτουργία του φωτογραφικού συστήματος του ανθρώπου, όπου η εικόνα που βλέπει ο χρήστης είναι πιο αναλυτική και λεπτομερής στο κέντρο της όρασής του (ενώ γίνεται λιγότερο σαφής προς τα άκρα της οπτικής αντίληψης).
- **IMU-based hand shake detection:** Η τεχνολογία χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα ανίχνευσης κίνησης μέσω ενός αδρανειακού συστήματος (IMU) για να ανιχνεύσει τις δονήσεις που προκαλούνται από τον χειρισμό της μηχανής κατά την λήψη και να προσαρμόσει αυτόματα τις ρυθμίσεις της μηχανής, όπως η ταχύτητα κλείστρου και η ευαισθησία ISO, για να αποτραπεί η δημιουργία ασαφών ή θολών φωτογραφιών λόγω του "τρέμουλου" των χεριών.
- **rephotography:** Η τεχνική αυτή αναφέρεται στο να λαμβάνεται μια νέα φωτογραφία ενός σκηνικού ή αντικειμένου που έχει ήδη φωτογραφηθεί στο παρελθόν. Συνήθως, η νέα φωτογραφία τραβιέται από την ίδια θέση ή κάποια άλλη κοντινή θέση, με τον ίδιο ή παρόμοιο φακό, ώστε να είναι εύκολο να συγκριθούν οι δύο φωτογραφίες και να εντοπιστούν οι διαφορές ή οι αλλαγές στο χώρο και το χρόνο. Συνήθως χρησιμοποιούνται φωτογραφίες με διαφορετικές γωνίες λήψης και επιτυγχάνεται ένας πλήρης τρισδιάστατος χάρτη του σκηνικού με τη χρήση τεχνικών στερεοσκοπικής απεικόνιση και πραγματοποιείται η ανακατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου.

Kinect

Ο Microsoft Kinect Sensor είναι μια συσκευή ανίχνευσης κίνησης και βάθους που αναπτύχθηκε από τη Microsoft για την κονσόλα παιχνιδιών Xbox. Η συσκευή χρησιμοποιεί τεχνολογία εικόνας βάθους για να ανιχνεύει την κίνηση του χρήστη και να την μεταφράζει σε εντολές για την κονσόλα ή για άλλες εφαρμογές υπολογιστών. Στην δημοσίευση των Popescu and Lungu (2014) αναφέρεται ότι, η ανάπτυξη της τεχνολογίας οδήγησε τη Microsoft να κυκλοφορήσει το 2012 το Kinect Software Development Kit (SDK) για Windows, που περιλαμβάνει τη τρισδιάστατη κάμερα βάθους. Το σύστημα

επέτρεπε στο χρήστη να περιστρέφεται γύρω από μια περιοχή και να βλέπει ένα συνεχώς ενημερωμένο τρισδιάστατο μοντέλο. Για τη δημιουργία του τελικού μοντέλου, έπρεπε να αποκτηθούν διάφορες οπτικές γωνίες και να συγχωνευθούν σε μία ενιαία αναπαράσταση. Βάσει λοιπόν των αισθητήρων που διαθέτει, δίνεται η δυνατότητα να καταγράφεται από το περιβάλλον η συμπεριφορά των απεικονιζόμενων στοιχείων που συμμετέχουν στην σκηνή και εν συνεχεία να αλληλεπιδρούν σε άμεσο χρόνο με εφαρμογές (π.χ. βιντεοπαιχνίδια). Ο στόχος αυτού του είδους εργαλείων ήταν να εμφανιστούν αρχικά (επικουρικά) σε πολλούς επαγγελματικούς κλάδους και στην συνέχεια να εισέλθουν στην καθημερινότητα.



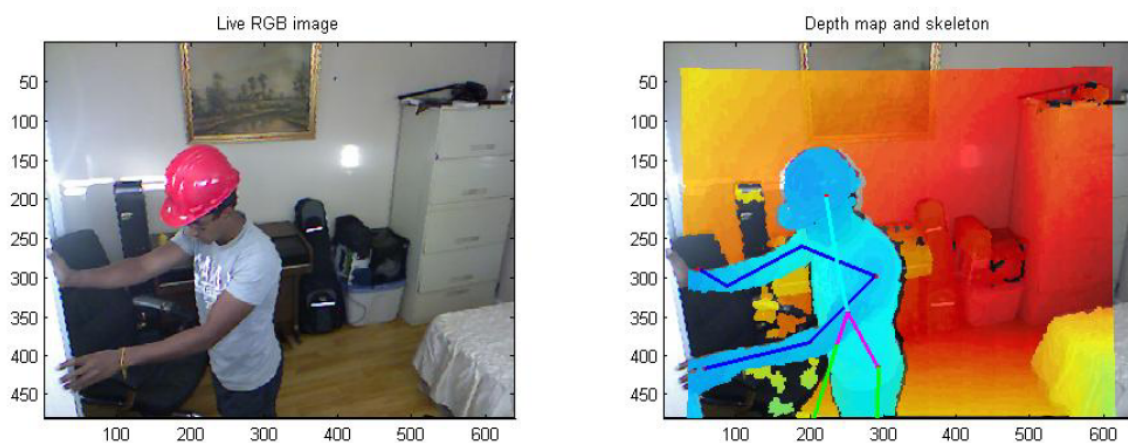
Σχήμα 2.13: Τα κύρια μέρη που απαρτίζουν το Kinect, Πηγή: Weerasinghe et al. (2012).

Ο Microsoft Kinect Sensor αποτελείται από διάφορα μέρη (εικ. 2.13 που λειτουργούν από κοινού για να ανιχνεύουν τις κινήσεις και τη θέση του χρήστη στον χώρο. Τα βασικά συστατικά του Kinect Sensor περιλαμβάνουν:

- Ο αισθητήρας βάθους (3D Depth sensor) που αποτελείται από ένα σαρωτή λέιζερ δομημένου φωτός (υπέρυθρης ακτινοβολίας) και μια κάμερα (CMOS) για την ανίχνευση βάθους των αντικειμένων στο χώρο και τη δημιουργία ενός 3D μοντέλου.
- Η RGB κάμερα (CMOS) παρέχει μια εικόνα των αντικειμένων στον χώρο με χρήση των έγχρωμων αισθητήρων της.
- Ο μηχανισμός που ορίζει τη γωνία κλίση της κάμερας και βρίσκεται στη βάση του συστήματος.
- Ο μικροφωνικός αισθητήρας (Microphone Array), ο οποίος περιλαμβάνει πολλαπλά μικρόφωνα που λειτουργούν σε συνδυασμό με το λογισμικό αναγνώρισης φωνής για την αναγνώριση και επεξεργασία των φωνητικών εντολών του χρήστη.

Πιο αναλυτικά στο Kinect, χρησιμοποιείται ένα λέιζερ για την εκπομπή φωτός στο περιβάλλον για τη συλλογή δεδομένων βάθους. Το λέιζερ εκπέμπει φωτεινή δέσμη που κατευθύνεται προς το περιβάλλον και ανακλάται πίσω στον αισθητήρα. Η χρήση του λέιζερ επιτρέπει στον αισθητήρα να μετράει το χρόνο που χρειάζεται για να επιστρέψει

το ανακλώμενο φως στον αισθητήρα και να υπολογίσει την απόσταση από τα αντικείμενα στο περιβάλλον. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση δεν επηρεάζει τη λειτουργία άλλων συσκευών στο περιβάλλον (π.χ. τηλεοράσεων και υπολογιστών), καθώς δεν εκπέμπει ακτινοβολία που μπορεί να προκαλέσει παρενέργειες σε αυτές τις συσκευές. Φυσικά είναι ασφαλής στη χρήση του από τον άνθρωπο, καθώς λειτουργεί σε χαμηλό επίπεδο ισχύος και σε μη επιβλαβές μήκος κύματος. Συνεχίζοντας σχετικά με την λειτουργία, ο αισθητήρας βάθους συνδυάζει τη χρήση του λέιζερ με μια κάμερα RGB για την καταγραφή χρωματικών εικόνων και τη διευκόλυνση της αναγνώρισης των αντικειμένων στο περιβάλλον. Επίσης διαθέτει δυνατότητα αυτόματης προσαρμογής του βάθους ανάλογα με τη φωτεινότητα και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Αυτό επιτρέπει στο Kinect Sensor να λειτουργεί αποτελεσματικά ακόμα και σε δωμάτια με διαφορετικό ή ελλιπή φωτισμό.



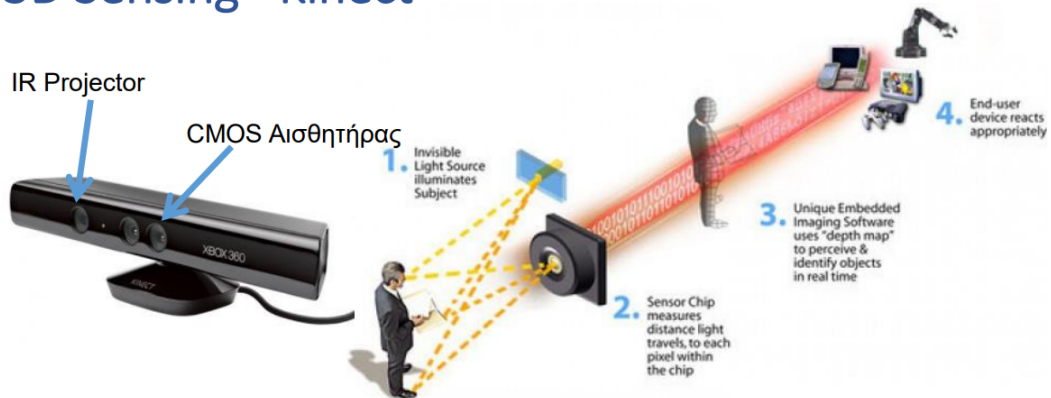
Σχήμα 2.14: RGB εικόνα (αριστερά) και χάρτης βάθους/ανθρώπινη φιγούρα (δεξιά), Πηγή: Weerasinghe et al. (2012).

Ο αισθητήρας βάθους συνδυάζει τις πληροφορίες που λαμβάνει από το λέιζερ και την κάμερα RGB για τον εντοπισμό των αρθρώσεων του σώματος του χρήστη κατά τη διάρκεια της κίνησης, με σκοπό να ανιχνεύσει και να δημιουργήσει μία ανθρώπινη φιγούρα (εικ. 2.14). Ο Kinect περιλαμβάνει λογισμικό που διαχειρίζεται και συγχρονίζει τα δεδομένα από όλα τα μέρη που το απαρτίζουν. Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με τον υπολογιστή και τις εφαρμογές μέσω χειρονομιών, φωνητικών εντολών και κινήσεων του σώματος. Ο μηχανισμός κίνησης ελέγχεται από το λογισμικό και καθοδηγείται με βάση το σύστημα εντοπισμού κίνησης. Αυτός ο αλγόριθμος επιτρέπει στον αισθητήρα βάθους να ανιχνεύει την ακριβή θέση του στον χώρο, καθώς και τις αλλαγές στη θέση του χρήστη και του περιβάλλοντος.

Οι αρχές λειτουργίας του Kinect Sensor βασίζονται σε μια συνδυαστική χρήση ειδικών καμερών και αισθητήρων βάθους (κάμερα και σαρωτή λέιζερ δομημένου φωτός). Οι κάμερες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των χρωμάτων και της φωτεινότητας στον χώρο, ενώ οι αισθητήρες βάθους χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της απόστασης από τον χρήστη στον χώρο. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των περιοχών ενδιαφέροντος (POI) για τη διαδικασία αναγνώρισης. Το Kinect (εικόνα 2.15) είναι ένας σαρωτής λέιζερ δομημένου φωτός (ή αλλιώς structured light laser scanner) που παράγει χάρτες βάθους σε πραγματικό χρόνο. Η συσκευή λαμβάνει ένα έγχρωμο τρισδιάστατο νέφος σημείων που ονομάζεται επίσης

RGB-D εικόνα, με περισσότερα από 300.000 σημεία με ρυθμό καρτέ 30 Hz. Το Kinect αποτελείται από 3 διαφορετικά συστήματα που συνεργάζονται μεταξύ τους και τα οποία διαθέτουν εξελιγμένους παράλληλους υπολογιστικούς αλγορίθμους (sophisticated parallel computational algorithms), προκειμένου να παράγουν μια εικόνα βάθους VGA (με ανάλυση 640x480 από ακατέργαστες τιμές απόστασης που λαμβάνονται με ανάλυση 1600x1200).

3D Sensing - Kinect



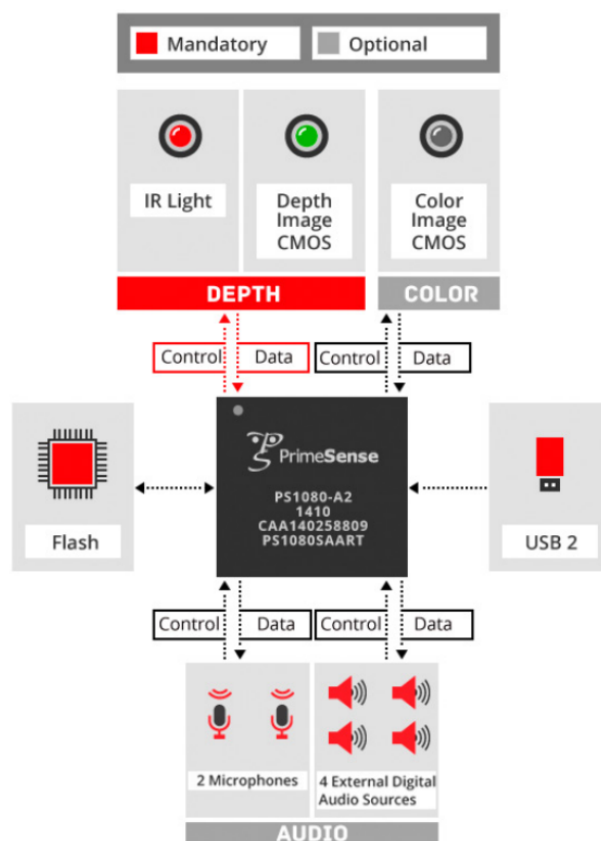
Σχήμα 2.15: Microsoft Kinect Sensor, Πηγή: Σημειώσεις Φωτογραμμετρία I (ΣΑΤΜ-ΕΜΠ).

Τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου αποτελούνται από μία ακολουθία χαρτών βάθους σε πραγματικό χρόνο που επιστρέφονται από τον αισθητήρα. Λόγω του ότι ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μόνο τους χάρτες βάθους και δεν χρειάζεται πληροφορίες χρώματος, επιτρέπει την εκτέλεση ακόμη και στο σκοτάδι. Η ανίχνευση και η ανακατασκευή επιφάνειας υλοποιείται σε τέσσερα κύρια στάδια από τον ακατέργαστο χάρτη βάθους έως την απόδοση της τρισδιάστατης προβολής της σκηνής:

- **surface extraction:** στο βήμα αυτό, υπολογίζονται οι τρισδιάστατες θέσεις της επιφάνειας (3D surface positions),
- **alignment:** στο επόμενο στάδιο, εκτιμάται η θέση και ο προσανατολισμός του αισθητήρα,
- **volumetric integration:** στη συνέχεια, συμπληρώνεται ένας τρισδιάστατος όγκος με τις πληροφορίες επιφάνειας,
- **ray-casting:** και τέλος, επιτυγχάνεται η τρισδιάστατη αναπαράσταση της σκηνής.

Ο αισθητήρας βάθους αποτελείται από ένα σαρωτή λέιζερ υπερύθρων σε συνδυασμό με ένα μονοχρωματικό αισθητήρα (CMOS) και καταγράφει τρισδιάστατα δεδομένα μορφής βίντεο ακόμα και κάτω από δυσμενείς συνθήκες φωτισμού. Αυτό το 3-D σύστημα σάρωσης που καλείται "κωδικοποιημένου φωτός" (Light Coding) βασίζεται στην μέθοδο δομημένου φωτός. Η τεχνολογία συνίσταται στη διάδοση στη σκηνή ενός κωδικοποιημένου φωτός που είναι πολύ κοντά στην υπέρυθη ακτινοβολία (αόρατη στο ανθρώπινο μάτι).

Η διαδικασία αυτή λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο, καθώς τα δεδομένα συλλέγονται και επεξεργάζονται ανά τακτά διαστήματα, επιτρέποντας στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με τις εφαρμογές χωρίς καθυστέρηση. Οι αρχές λειτουργίας του Kinect Sensor



Σχήμα 2.16: PrimeSense Light Coding Technology, Πηγή: Popescu and Lungu (2014).

έχουν επεκταθεί σε πολλές άλλες εφαρμογές εκτός από τα παιχνίδια, όπως στην ιατρική, τη βιομηχανία και τον εκπαιδευτικό τομέα. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι αναγνώρισης μοτίβων που χρησιμοποιούνται στο Kinect Sensor έχουν εφαρμοστεί σε άλλες συσκευές και εφαρμογές που απαιτούν ανίχνευση κίνησης και αναγνώριση μοτίβων, όπως στα κινητά τηλέφωνα και τις κάμερες ασφαλείας. Συνολικά, ο Kinect Sensor αποτελεί ένα παράδειγμα επιτυχημένης χρήσης της τεχνολογίας βαθιάς μάθησης και της αναγνώρισης μοτίβων για τη δημιουργία μιας εξαιρετικά αποτελεσματικής και ευέλικτης συσκευής αλληλεπίδρασης χρήστη.

Ο αλγόριθμος KinFu υλοποιείται σε τρία βήματα, κατά τους Popescu and Lungu (2014):

- **filtering:** αρχικά, χρησιμοποιείται ένα φίλτρο και αριθμός των σημείων στο νέφος μειώνεται για μελλοντικό υπολογισμό (down-sampling, crop-box filter, RANSAC, radius outlier removal filter),
- **alignment:** σε αυτό το βήμα, τα νέφη σημείων ευθυγραμμίζονται προκειμένου να ενοποιηθούν και έτσι να δημιουργηθεί το επιθυμητό αντικείμενο (SAC-IA, transform matrix is estimated, loop for best results),
- **reconstruction:** στο τελικό βήμα, χρησιμοποιώντας μια μέθοδο εξαγωγής επιφάνειας, θα εξαχθεί ένα τρισδιάστατο πλέγμα από το νέφος σημείων.

Στην μελέτη τους οι Popescu and Lungu (2014), στην σύγκριση μεταξύ των αλγορίθ-

μων KinectFusion και KinFu που προέβησαν, παρατήρησαν ότι ο δεύτερος εισάγει ορισμένες βελτιώσεις:

- Σε αντίθεση με το KinectFusion, που μπορεί να λειτουργήσει μόνο με μια συσκευή ή Kinect, το KinFu μπορεί να λειτουργήσει με οποιονδήποτε αισθητήρα βάθους συμβατό με το OpenNI (Natural Interaction).
- Οι πληροφορίες χρώματος μπορούν να αποδοθούν στην ανακατασκευασμένη επιφάνεια.
- Το KinFu μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακατασκευή μεγάλων σκηνών - όπως ολόκληρα δωμάτια (έκδοση KinFu μεγάλης κλίμακας), παρέχοντας μια αναπαράσταση νέφους σημείων ολόκληρης της σκηνής.
- Το βήμα της εκτίμησης της επιφάνειας γίνεται με τη χρήση εκτίμησης ιδιοτιμών (eigen-value) σε αντίθεση με τον απλό διανυσματικό υπολογισμό cross-vector.
- Στο τελευταίο βήμα, η απόδοση γίνεται με τη χρήση ενός αλγόριθμου marching cubes αντί για ray-casting.

Επίσης η βιβλιοθήκη, όπως αναφέρουν οι Popescu and Lungu (2014), περιείχε αλγόριθμους τελευταίας τεχνολογίας για την εποχή τους:

- filtering
- feature estimation
- surface reconstruction
- registration
- model fitting
- segmentation

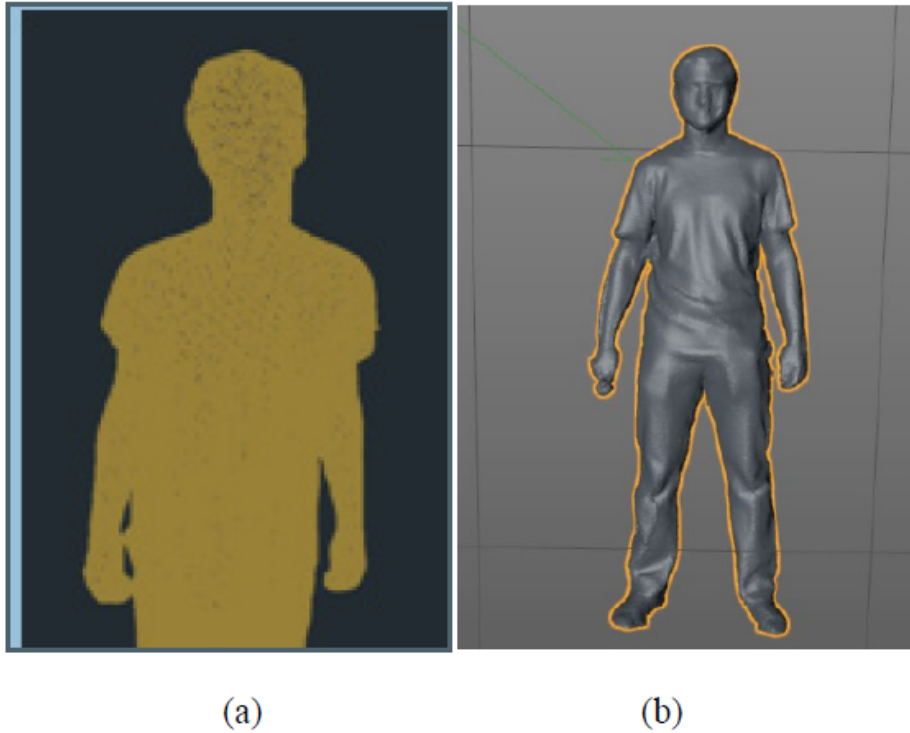
Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου, επιτεύχθηκε ρυθμός καρέ 8-10 (fps). Σε σύγκριση με τις απαιτήσεις του KinectFusion, πρόκειται για χαμηλό ρυθμό, αλλά η προσέγγιση KinFu το επέτρεψε για τη σάρωση μοντέλων. Ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας ήταν 23 λεπτά. Το τελικό νέφος σημείων με ανάλυση 0,5 mm περιέχει περίπου 4,5 εκατομμύρια σημεία, ενώ το πλέγμα που προέκυψε περιλαμβάνει 1,5 εκατομμύρια πολύγωνα. Το νέφος που προκύπτει δεν παρουσιάζει θόρυβο και το επίπεδο του δαπέδου έχει τμηματοποιηθεί, καθώς και όλα τα άλλα αντικείμενα που υπήρχαν στη σκηνή (εικόνα 2.17).

Επειδή ο αριθμός των πολυγώνων ήταν πραγματικά τεράστιος, εφαρμόστηκε ένα φίλτρο πάνω στο πλέγμα. Έτσι, στο τέλος, διαμορφώθηκαν 197.112 πολύγωνα και 109.527 σημεία.

2.4 Μέθοδοι βελτίωσης της φωτογραφίας

Τα μειονεκτήματα - περιορισμοί της κλασικής φωτογραφίας που καλούνται να αντιμετωπιστούν είναι συνοπτικά τα εξής:

- θολότητα λόγω κίνησης
- δόνηση κάμερας



Σχήμα 2.17: (a) Τελικό νέφος σημείων, (b) τελικό πλέγμα, Πηγή: Popescu and Lungu (2014).

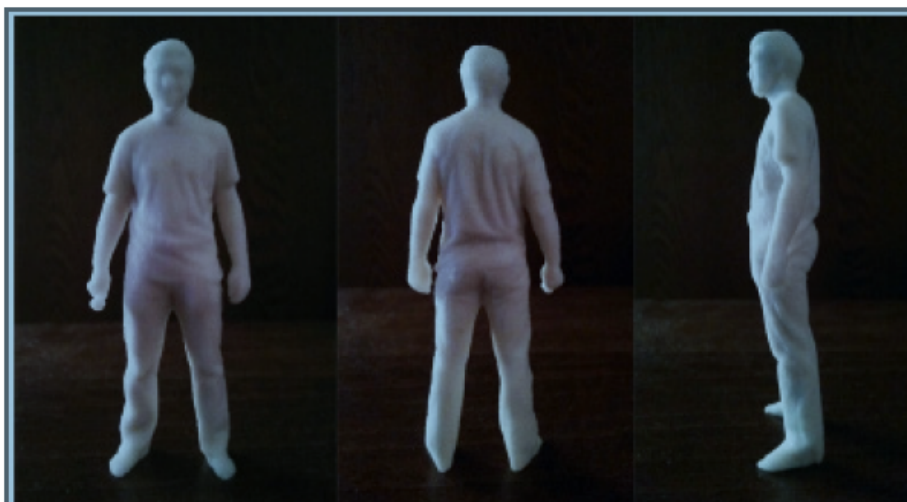
- θόρυβος
- ορισμένη ανάλυση
- πιστή απόδοση χρώματος (ή έλλειψη αυτών)
- ανεπιθύμητα αντικείμενα - φαινόμενα
- ορισμένη δυναμικό εύρος
- μοναδικό σημείο λήψης
- ορισμένο πεδίο λήψης
- περιορισμένο εύρος εστίασης

Demosaicking είναι η διαδικασία ανακατασκευής της πλήρους έγχρωμης αναπαράστασης μιας εικόνας που λαμβάνεται από μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή εξοπλισμένη με συστοιχία έγχρωμων φίλτρων (Color Filter Array - CFA).

Ακολουθούν η περιγραφή μεθόδων και τεχνικών υπολογιστικής φωτογραφίας σύμφωνα με Lukac (2017).

Single Capture Image Fusion - James E. Adams, Jr., John F. Hamilton, Jr., Mrityunjay Kumar, Efra'ín O. Morales, Russell Palum, and Bruce H. Pillman - μέθοδος σύντηξης εικόνας

Οι κλασικές φωτογραφικές μηχανές συλλέγουν πληροφορία φωτεινότητας και χρώματος με τη βοήθεια των τριών βασικών καναλιών. Με την μέθοδο σύντηξης εικόνας προστίθεται ένα τέταρτο κανάλι παγχρωματικό ή πολυφασματικό στον αισθητήρα της



Σχήμα 2.18: (a) Τελικό εκτυπωμένο μοντέλο, Πηγή: Popescu and Lungu (2014).

ψηφιακής κάμερας. Κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας τα 4 κανάλια μετατρέπονται σε πληροφορία 3 καναλιών, με τρόπο τέτοιο όπου το αποτέλεσμα βελτιώνει τον λόγο του σήματος προς τον θόρυβο και επιτυγχάνει να αποδώσει τα χρώματα πιο πιστά. Η έξοδος είναι μια βελτιωμένη εικόνα όπου έχει παραχθεί από μόνο μια λήψη από τον αισθητήρα της φωτογραφικής μηχανής. Τέλος οι ακμές, οι υφές και γενικότερα τα λεπτομερή αντικείμενα αποδίδονται πιο ολοκληρωμένα και με σαφήνεια.

Single Capture Image Fusion with Motion Consideration - James E. Adams, Jr., Aaron Deever, John F. Hamilton, Jr., MrityunjayKumar, Russell Palum, and Bruce H. Pillman

Το θόλωμα λόγω κίνησης είναι ένα σύνηθες πρόβλημα στην ψηφιακή φωτογραφία που εμφανίζεται όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ της σκηνής και της κάμερας κατά την στιγμή της λήψης. Η πρώτη αντιμετώπιση του θέματος γίνεται με την μείωση της διάρκειας έκθεσης, όπου κατά συνέπεια μειώνεται και η ποσότητα του εισερχόμενου φωτός. Συνήθως για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα λαμβάνονται αρκετές εικόνες και γίνεται μια σύνθεση κατόπιν επεξεργασίας για την παραγωγή μια εικόνας με λιγότερο θόλωμα λόγω κίνησης, λιγότερο θόρυβο και περισσότερη φωτεινότητα. Με την παρούσα μέθοδο δημιουργείται μια έγχρωμη φωτογραφία, που έχει προκύψει από μία μοναδική λήψη με επεξεργασία από αποτελεσματικούς υπολογιστικούς αλγορίθμους σύντηξης εικόνας, που χρησιμοποιούν αισθητήρες αρχιτεκτονικής τεσσάρων καναλιών. Τα παγχρωματικά εικονοστοιχεία είναι πιο ευαίσθητα στο φως σε σχέση με εκείνα που καταγράφουν χρώμα (RGB) και απαιτούν λιγότερο χρόνο για να συλλέξουν μια ποσότητα φωτός, με αποτέλεσμα ο λόγος σήματος προς θόρυβο να είναι βελτιωμένος. Η "αιχμηρή" πληροφορία από τον παγχρωματικό αισθητήρα συνδυάζεται με την την όχι και τόσο "αιχμηρή" πληροφορία των αισθητήρων χρώματος για την δημιουργία εικόνας απαλλαγμένη από θάμπωμα λόγω κίνησης και βελτιωμένης στον λόγο σήματος προς θόρυβο.

Lossless Compression of Bayer Color Filter Array Images - King-Hong Chung and Yuk-Hee Chan

Οι περισσότερες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές μειώνουν το κόστος, το μέγεθος και

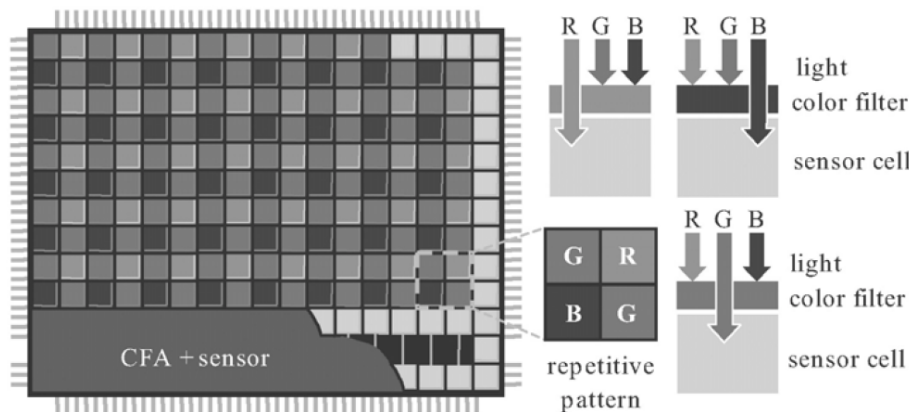
την πολυπλοκότητά τους χρησιμοποιώντας ένα σύστημα λήψης εικόνας με έναν αισθητήρα για την απόκτηση μιας σκηνής σε ψηφιακή μορφή. Σε ένα τέτοιο σύστημα, ένας αισθητήρας εικόνας επικαλύπτεται με μια συστοιχία χρωματικών φίλτρων Color Filter Array - (CFA), όπως το μοτίβο Bayer, για την καταγραφή μιας από τις τρεις κύριες χρωματικές συνιστώσες σε κάθε θέση εικονοστοιχείου. Κατά συνέπεια, παράγεται ως έξοδος μια εικόνα που μοιάζει με ένα μωσαϊκό με τιμές στην κλίμακα του γκρι. Οι εικόνες συνήθως συμπιέζονται για τη μείωση των απαιτήσεων αποθήκευσης. Συνήθως, απλουστευμένα, στην διαδικασία παραγωγής περιλαμβάνεται αρχικά, η μετατροπή της CFA εικόνας σε full-color χρησιμοποιώντας color demosaicking και στην συνέχεια συμπιέζεται η demosaicked full-color εικόνα για να την αποθήκευση. Με αυτή την προσέγγιση επιτυγχάνεται μείωση του όγκου διαφοροποιώντας την σειρά και αποσκοπεί στη συμπίεση της εικόνας CFA πριν από το demosaicking. Ως αποτέλεσμα, εξελιγμένοι demosaicking αλγόριθμοι μπορούν να εφαρμοστούν σε έναν υπολογιστή για την παραγωγή μιας βελτιωμένης οπτικά και πλήρως έγχρωμης εικόνας. Η προσέγγιση αυτή μειώνει τον φόρτο συμπίεσης, δεδομένου ότι μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει οποιοδήποτε υπάρχον μοντέλο κωδικοποίησης εικόνας για να συμπίεσει τα "demosaicked" δεδομένα χρώματος είτε χωρίς απώλειες είτε με απώλειες.

Color Restoration and Enhancement in the Compressed Domain - Jayanta Mukherjee and Sanjit K. Mitra

Η ποιότητα μιας εικόνας μπορεί να ειπωθεί ότι επηρεάζεται πρωταρχικά από τα αντικείμενα που βρίσκονται στον τρισδιάστατο χώρο, το φωτισμό και την ακτινοβολία που περιέχει η σκηνή και τέλος από χαρακτηριστικά όπως την οπτική, τους φακούς και τους αισθητήρες. Το ζητούμενο με την υπολογιστική σταθερότητα των χρωμάτων είναι η απόδοση της σκηνής πειστικά, χωρίς να επηρεάζεται από της συνθήκες φωτισμού. Το πρόβλημα στην περίπτωση, έχει δύο σκέλη, αφενός η εκτίμησή των φασματικών συνιστωσών του φωτισμού και αφετέρου στην απόδοση του χρώματος. Ένας άλλος παράγοντας που εμπλέκεται στην διαδικασία έγχρωμης απεικόνισης μιας σκηνής είναι η ικανότητα αναπαραγωγής χρωμάτων της συσκευής απεικόνισης, ανάλογα με το απεικονιζόμενο εύρος της χρωματικής γκάμας και το εύρος φωτεινότητας που μπορεί να χειριστεί. Ωστόσο, για την προβολή έγχρωμων εικόνων μπορεί να χρειαστεί να εφαρμοστεί τόσο η διόρθωση όσο και η βελτίωση των χρωμάτων, όταν η σκηνή πάσχει τόσο από ευρέως μεταβαλλόμενες φασματικές συνιστώσες όσο και από τη φωτεινότητα λόγω των συνθηκών φωτισμού. Η προσέγγιση αυτή, ασχολείται με την αποκατάσταση των χρωμάτων υπό διαφορετικούς φωτιστικούς παράγοντες και με τον φωτισμό στο μπλοκ discrete cosine transform - (DCT) του τομέα. Η βασική υπολογιστική εργασία που εμπλέκεται σε αυτή τη διαδικασία είναι να επιτευχθεί μια ανεξάρτητη από το φωτισμό αναπαράσταση με την επίλυση του προβλήματος της χρωματικής σταθερότητας. Αφού υπολογιστούν οι φασματικές συνιστώσες του ("καθολικού") φωτισμού μιας σκηνής, απαιτείται η μεταφορά της εικόνας υπό έναν κανονικό φωτισμό. Αυτή η υπολογιστική εργασία χαρακτηρίζεται ως διόρθωση χρώματος. Ωστόσο, λόγω της μεγάλης διακύμανσης του φωτισμού σε μια σκηνή και του περιορισμένου δυναμικού εύρους της απεικόνισης των χρωμάτων, θα έπρεπε να τροποποιηθεί περαιτέρω η τα χρώματα των εικονοστοιχείων με τη διαδικασία της βελτίωσης. Μπορεί να σημειωθεί ότι σε μια συνηθισμένη κατάσταση, το στάδιο βελτίωσης χρώματος δεν είναι απαραίτητο να ακολουθεί εκείνο της διόρθωσης του.

Principal Component Analysis-Based Denoising of Color Filter Array Images - Rastislav Lukac and Lei Zhang

Η προσέγγιση αυτή επικεντρώνεται στην αφαίρεση θορύβου μιας εικόνας που έχει ληφθεί με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή εξοπλισμένη με φίλτρο χρώματος σε μορφή πίνακα (color filter array) και μονοχρωματικό αισθητήρα. Βασίζεται στην ανάλυση κύριων συνιστωσών, η οποία εκμεταλλεύεται τις τοπικές ομοιότητες που υπάρχουν μεταξύ των μπλοκ των δεδομένων εικόνας προκειμένου να βελτιώσει την ακρίβεια εκτίμησης του πίνακα μετασχηματισμού. Αυτός ο προσαρμοστικός υπολογισμός ενός πίνακα συνδιακύμανσης και η αξιοποίηση τόσο των χωρικών όσο και των φασματικών χαρακτηριστικών συσχετίζει μια εικόνας CFA επιτρέπον την αποτελεσματική ομαδοποίηση της ενέργειας του σήματος και την αποτελεσματική αφαίρεση του θορύβου με ταυτόχρονη διατήρηση των τοπικών δομών της εικόνας, όπως οι ακμές και οι λεπτές λεπτομέρειες.



Σχήμα 2.19: Σχηματική απόδοση καταγραφής της πληροφορίας, Πηγή: Lukac (2017).

Η προσέγγιση αυτή, χρησιμοποιεί τόσο τα χωρικά όσο και τα φασματικά χαρακτηριστικά συσχετίζει της ληφθείσας εικόνας και εκμεταλλεύεται τις τοπικές ομοιότητες που υπάρχουν μεταξύ των μπλοκ των ψηφιδωτών δεδομένων της συστοιχίας έγχρωμων φίλτρων, προκειμένου να βελτιώσει την ακρίβεια εκτίμησης του πίνακα μετασχηματισμού της ανάλυσης κύριων συνιστωσών.

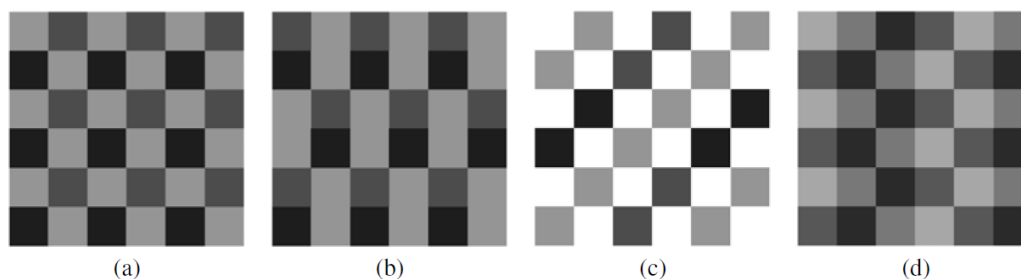
Regularization-Based Color Image Demosaicking - Daniele Menon and Giancarlo Calvagno

Οι περισσότερες προσεγγίσεις demosaicking έχουν σχεδιαστεί για το μοντέλο Bayer. Ωστόσο τότε, προτάθηκε ένας αριθμός διαφορετικών μοτίβων για τη βελτίωση των διαδικασιών απόκτησης και αποκατάστασης έγχρωμων εικόνων.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν μέθοδοι demosaicking που βασίζονται στην έννοια της κανονικοποίησης. Οι μέθοδοι που βασίζονται στην κανονικοποίηση είναι εύκολα εφαρμόσιμες σε οποιαδήποτε CFA και αποδίδουν στο demosaicking εικόνες που έχουν ληφθεί με αισθητήρες με μη ιδανική απόκριση παλμού, καθώς τα χαρακτηριστικά του point spread function - PSF λαμβάνονται υπόψη στη μέθοδο ανακατασκευής. Τέλος, η στρατηγική που βασίζεται στην κανονικοποίηση επιτρέπει τη σύζευξη της demosaicking με άλλα συχνά προβλήματα στην ανακατασκευή και αποκατάσταση εικόνων.

Super-Resolution Imaging - Bahadir K. Gunturk

Η αποκατάσταση εικόνων υπερ-ανάλυσης (Super-resolution SR) είναι η διαδικασία πα-



Σχήμα 2.20: Παραδείγματα μοντέλων CFAs: (a) Bayer, (b) Lukac, (c) Hamilton, (d) Hirakawa, Πηγή: Lukac (2017), IEEE 2009.

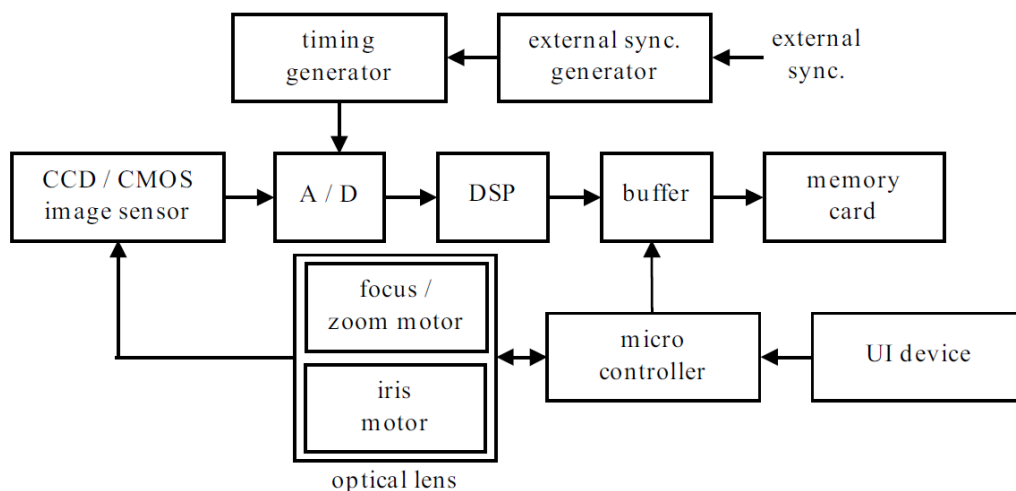
ραγωγής μιας εικόνας υψηλής ανάλυσης (ή μιας ακολουθίας εικόνων υψηλής ανάλυσης) από ένα σύνολο εικόνων χαμηλής ανάλυσης. Η διαδικασία απαιτεί ένα μοντέλο απόκτησης εικόνας που συσχετίζει μια εικόνα υψηλής ανάλυσης με πολλαπλές εικόνες χαμηλής ανάλυσης και περιλαμβάνει την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος που προκύπτει. Το μοντέλο απόκτησης περιλαμβάνει τον αντικατοπτρισμό (aliasing), τη θάμβωση (blurring) και το θόρυβο (noise) ως τις κύριες πηγές απώλειας πληροφορίας. Ένας αλγόριθμος υπερ-ανάλυσης αυξάνει τη χωρική λεπτομέρεια σε μια εικόνα και, ισοδύναμα, ανακτά τις πληροφορίες υψηλής συχνότητας που χάνονται κατά τη διαδικασία απεικόνισης. Υπάρχει μια ευρεία ποικιλία πεδίων εφαρμογής για την αποκατάσταση εικόνων υψηλής ανάλυσης μέσω της τεχνικής Super-Resolution (SR). Στη βιοϊατρική απεικόνιση, πολλαπλές εικόνες μπορούν να συνδυαστούν για να βελτιώσουν την ανάλυση, η οποία μπορεί να βοηθήσει στη διάγνωση. Σε συστήματα ελέγχου, η ανάλυση μιας ακολουθίας βίντεο μπορεί να αυξηθεί για να ληφθούν κρίσιμες πληροφορίες, όπως πινακίδες κυκλοφορίας ή δεδομένα προσώπου. Οι συσκευές τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας (HDTV) μπορούν να χρησιμοποιούν αποκατάσταση εικόνας SR για την παραγωγή και προβολή υψηλότερης ποιότητας βίντεο από ένα σήμα εισόδου χαμηλότερης ευκρίνειας. Επιγραμμικά εφαρμογές της απαντώνται σε εκτύπώσεις, βίντεο, μικροσκοπία, σε προβολές όλων των ειδών, σε δορυφορικές και αέριες φωτογραφίες, αστρονομία και σε εικόνες ραντάρ κ.α.

Η υπερ-ανάλυση (**Super resolution image**) κατά το GIS-LOUNGE (2022), είναι μια προσέγγιση που προέρχεται από μεθόδους υπολογιστικής όρασης που στοχεύει στη βελτίωση της ποιότητας μιας εικόνας με την εφαρμογή αλγορίθμων και τη βελτίωση της δειγματοληψίας εικόνας χρησιμοποιώντας αυτό που ονομάζεται *upsampling*. Αυτό βελτιώνει τόσο αισθητικά την εμφάνιση της φωτογραφίας, όσο και στην διευκόλυνση εύρεσης επιθυμητών αντικειμένων για χρησιμοποίηση. Το τελευταίο βελτιώνει την εξ' αποστάσεως εποπτείας με στόχο την καλύτερη αναγνώριση στοιχείων σε μια δεδομένη εικόνα και πρακτικά βοηθάει στην τηλεπισκόπηση και στις φωτογραμμετρικές μεθόδους παρατήρησης. Η αύξηση της ανάλυσης εικόνων με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης εφαρμόζουν τεχνικές βαθιάς εκμάθησης (deep Learning), τυπικών μορφών συνελκτικών νευρωνικών δικτύων (CNN). Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος μπορεί να επαναλάβει τη δειγματοληψία αυτών των εικονοστοιχείων για να βελτιώσει στη συνέχεια την ποιότητά τους. Αυτό είναι παρόμοιο με το Pansharpening (που είναι μια διαδικασία συγχώνευσης παγχρωματικών εικόνων υψηλής ανάλυσης και πολυφασματικών εικόνων χαμηλότερης ανάλυσης για τη δημιουργία μιας ενιαίας έγχρωμης εικόνας υψηλής ανάλυσης). Η κύρια διαφορά είναι ότι η ανάλυση όχι μόνο βελτιώνει τη συνολική ποιότητα, αλλά βελτιώνεται και η αρχική ανάλυση. Παρατηρείται λοιπόν, σύμφωνα

με το GIS-LOUNGE (2022) (2022), ότι η τεχνική της υπερ-ανάλυσης να εφαρμόζεται ιδιαίτερα στον χώρο της τηλεπισκόπησης. Η βελτίωση των αποτελεσμάτων επιτρέπει τον εντοπισμό αντικειμένων, με έως και τέσσερις φορές βελτίωση στην ανάλυση των εικόνων. Επίσης επιτρέπει σε αντικείμενα που δεν αναγνωρίζονται εύκολα να γίνουν ανιχνεύσιμα και πιο εμφανή για χειροκίνητες ή αυτοματοποιημένες τεχνικές ανίχνευσης αντικειμένων. Στην πραγματικότητα, αυτό λαμβάνει λεπτομέρειες σε επίπεδο υπο-pixel και επιτρέπει την ανακατασκευή αντικειμένων σε λεπτομερείς κλίμακες.

Image Deblurring Using Multi-Exposed Images - Seung-Won Jung and Sung-Jea Ko

Το θόλωμα της εικόνας προκύπτει όταν ένα σημείο ενός αντικειμένου εξαπλώνεται σε πολλά εικονοστοιχεία της εικόνας. Αυτό το φαινόμενο προκαλείται κυρίως από την κίνηση της φωτογραφικής μηχανής κατά τη διάρκεια της έκθεσης ή από έναν φακό που δεν είναι εστιασμένος. Η συμβατική προσέγγιση για την αφαίρεση της θολότητας εικόνας είναι η κατασκευή ενός μοντέλου υποβάθμισης της εικόνας και στη συνέχεια η επίλυση του ανάστροφου προβλήματος του μοντέλου αυτού. Μια προσέγγιση εκμεταλλεύεται τις πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία ανίχνευσης εικόνας που επιτρέπουν τη κατάτμηση ή τον έλεγχο του χρόνου έκθεσης. Αυτή η προσέγγιση εκμεταλλεύεται τις μεταξύ τους διαφορετικές πληροφορίες από πολλαπλά εκτεθειμένες εικόνες της ίδιας σκηνής για την παραγωγή μιας μη θολωμένης εικόνας. Οι εικόνες πολλαπλής έκθεσης (multi-exposed images) υποτίθεται ότι έχουν ληφθεί από μία κάμερα ή από πολλαπλές κάμερες τοποθετημένες σε διαφορετικές τοποθεσίες.



Σχήμα 2.21: Παράδειγμα του διαγράμματος του συστήματος μίας κάμερας, Πηγή: Lukac (2017).

Ένας αισθητήρας σύζευξης φορτίου (charge-coupled device - CCD) ή συμπληρωματικού ημιαγωγού οξειδίου μετάλλου (complementary metal oxide semiconductor - CMOS) χρησιμοποιείται για την ηλεκτρονική καταγραφή σκηνών της πραγματικής ζωής. Τα ψηφιοποιημένα καρέ αποθηκεύονται διαδοχικά στον προσωρινό χώρο αποθήκευσης (buffer) στον οποίο έχει πρόσβαση ο επεξεργαστής ψηφιακού σήματος (digital signal processor - DSP). Ο χρόνος έκθεσης ελέγχεται από τον μηχανισμό συγχρονισμού (timing generator). Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των αισθητήρων επέτρεψαν τη λήψη υψηλής ταχύτητας έως και χιλιάδων καρέ ανά δευτερόλεπτο. Μια λήψη, με σχετική

κίνηση μεταξύ κάμερας και σκηνής, με μακρά διάρκεια έκθεσης εισάγει θολότητας στην εικόνα. Από την άλλη, η ρύθμιση του χρόνου έκθεσης σε αρκετά μικρό χρονικό διάστημα μειώνει το θόλωμα, όμως εισάγει θόρυβο, χρωματικές εκτροπές, καθώς και μειωμένη φωτεινότητα. Λόγω αυτής της σχέσης, η ρύθμιση του χρόνου έκθεσης αποτελεί καθοριστικής σημασίας στην εξάλειψη θορύβου και θολώματος σε εικόνες από λήψεις πολλαπλών εκθέσεων. Οι πληροφορίες χρώματος και φωτεινότητας μπορούν να αποκτηθούν θαμπές εικόνες, ενώ οι πληροφορίες ακμών και λεπτομέρειας μπορούν να αντληθούν από εικόνες με χαμηλή φωτεινότητα και θόρυβο. Επιπρόσθετα κατά την διαδικασία παραγωγής μιας εικόνας χωρίς θολότητα με την μέθοδο ενοποίησης πολλαπλών εικόνων διαφορετικών εκθέσεων, βελτιώνεται (αυξάνεται) και το δυναμικό εύρος των τιμών.

Color High-Dynamic Range Imaging: Algorithms for Acquisition and Display - Ossi Pirinen, Alessandro Foi, and Atanas Gotchev

Δυναμικό εύρος είναι ο όρος που χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς για να περιγράψει τον λόγο μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης τιμής μιας μεταβλητής ποσότητας. Στην απεικόνιση και ιδιαίτερα στην τεχνολογία των απεικονίσεων, το δυναμικό εύρος είναι επίσης γνωστό ως λόγος αντίθεσης (ή πιο απλά ως αντίθεση), που δηλώνει την αναλογία φωτεινότητας μεταξύ μαύρων και λευκών εικονοστοιχείων που είναι ορατά στην οθόνη ταυτόχρονα. Για φυσικές σκηνές, το δυναμικό εύρος είναι ο λόγος μεταξύ της πυκνότητας της φωτεινής έντασης της πιο φωτεινής ακτίνας του ήλιου και της πιο σκοτεινής σκιάς. Στη φωτογραφία η μονάδα μέτρησης της φωτεινότητας cd/m^2 (δηλαδή, κεριά ανά τετραγωνικό μέτρο) είναι επίσης γνωστή ως "nit". Το πρόβλημα της απεικόνισης υψηλού δυναμικού εύρους (HDR) είναι διπλό. Αρχικά, πως θα αποτυπωθούν η πραγματική φωτεινότητα και η πλήρης χρωματική πληροφορία μιας σκηνής HDR, ενδεχομένως με μια συσκευή λήψης με δυναμικό εύρος μικρότερο από αυτό της σκηνής. Καθώς επίσης, πως είναι δυνατόν να αναπαρασταθούν, όσο πιο πιστά γίνεται, οι πληροφορίες σε μια συσκευή προβολής που δεν είναι ικανή να αναπαράγει τις πραγματικές εντάσεις φωτός, ούτε των πιο σκοτεινών ούτε των πιο φωτεινών σημείων αλλά ούτε και τις πιστές χρωματικές τιμές. Το ζήτημα αφενός έγκειται στη σύνθεση (composition), αποκατάσταση (recovery) του υψηλού δυναμικού εύρους και αφετέρου στη συμπίεση (compression) ή συνήθως στην χαρτογράφηση τόνων (tone mapping).



Σχήμα 2.22: (a) (LDR) εικόνα, (b) HDR εικόνα, (c) TM HDR εικόνα, Πηγή: Lukac (2017).

Η εικόνα 2.22 (a) δείχνει ότι το συμβατικό στιγμιότυπο χαμηλού δυναμικού εύρους Low-Dynamic Range - (LDR) έχει πολύ περιορισμένο δυναμικό εύρος, το οποίο φαίνεται να χάνει πληροφορία σε διάφορα σκοτεινά τμήματα ως υπο-εκτεθειμένα ή σε

πολύ φωτεινά ως υπερ-εκτεθειμένα. Η αναπαράσταση HDR που παρουσιάζεται στην 2.22 (b) έχει όλες τις πληροφορίες, αλλά μόνο ένα μέρος θα είναι ορατό σε ένα LDR μέσο προβολής. Η tone mapped HDR εικόνα που απεικονίζεται στην εικόνα 2.22 (c) περιλαμβάνει τη μεγαλύτερη ποσότητα της ορατής πληροφορίας.

Οι εικόνες HDR μπορούν να αποκτηθούν με τη λήψη πραγματικών σκηνών ή με την απόδοση τρισδιάστατων (3D) γραφικών στον υπολογιστή (χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως το radiosity και το ray tracing). Οι εικόνες HDR φυσικών σκηνών μπορούν να αποκτηθούν, είτε με τη λήψη πολλαπλών εικόνων της ίδιας σκηνής με διαφορετικές εκθέσεις, είτε με χρήση ειδικών φωτογραφικών μηχανών που λαμβάνουν απευθείας δεδομένα HDR. Η μέθοδος πολλαπλής έκθεσης βασίζεται στη σύνθεση εικόνων διαφορετικών εκθέσεων σε μια ενιαία εικόνα, η οποία καλύπτει όλο το δυναμικό εύρος της σκηνής. Οι τεχνικές χαρτογράφησης τόνων κυμαίνονται σε πολυπλοκότητα από μια απλή καμπύλη γάμμα έως εξελιγμένες μεθόδους εξισορρόπησης ιστογράμματος και περίπλοκα μοντέλα αντίληψης φωτισμού. Επίσης, εκείνη την περίοδο, πραγματοποίησαν την εμφάνιση τους συσκευές προβολής εξοπλισμένες με ικανότητα απόδοσης HDR. Οι μέθοδοι απεικόνισης HDR αναπτύχθηκαν αρχικά για χρωματικά μοντέλα RGB. Ωστόσο, όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά, τεχνικές που ασχολούνται με το κομμάτι της φωτεινότητας ή της χρωματικής απόδοσης φαίνονται πιο ουσιαστικές και προτιμητέες.

High-Dynamic Range Imaging for Dynamic Scenes - Celine Loscos and Katrien Jacobs

Η υπολογιστική φωτογραφία καθιστά δυνατή την ενίσχυση της παραδοσιακής ψηφιακής φωτογραφίας. Μία εφαρμογή της είναι η εικόνα με υψηλό δυναμικό εύρος HDR, η οποία επιτρέπει την πρόσβαση σε ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών χρώματος. Μια HDR εικόνα μπορεί να απεικονιστεί μέσω μιας ειδικής συσκευής που υποστηρίζει την HDR τεχνολογία ή να προσαρμόζεται αναλόγως σε LDR μέσα προβολής χρησιμοποιώντας χαρτογράφηση τόνων. Η λειτουργία αυτόματης λήψης (autobracketing) κάνει τη λήψη HDR λιγότερο δύσκολη και, ως εκ τούτου, πιο ελκυστική. Για την δημιουργία μιας εικόνας υψηλού δυναμικού εύρους από την σύνθεση ενός αριθμού LDR εικόνων απαιτούνται τα παρακάτω βήματα :

- Αρχικά απαιτείται ευθυγράμμιση εικόνων γιατί πάντοτε υπάρχουν μετακινήσεις και στροφές. Ορισμένες εικόνες μπορεί να απαιτούν μη γραμμικό μετασχηματισμό σε περίπτωση περιστροφής ή μετατόπισης της κάμερας κατά τη διάρκεια της λήψης. Για την ευθυγράμμιση αξιοποιούνται χαρακτηριστικά αντικείμενα που εντοπίζονται στις εικόνες.
- Εν συνεχεία, οι αποθηκευμένες εικόνες απέχουν αρκετά χρωματικά από τα πραγματικά της σκηνής. Ο κατασκευαστής της κάμερας έχει επιλέξει τον αισθητήρα που χρησιμοποιείται και αυτό επηρεάζει καίρια την τελική φωτογραφία. Στο βήμα αυτό, επιτυγχάνεται η αποκατάσταση της χρωματικής απόκρισης.
- Επόμενο βήμα αποτελεί η μετατροπή των τιμών έντασης της LDR εικόνας σε τιμές ακτινοβολίας.
- Στο τελικό στάδιο, οι τιμές ακτινοβολίας που είναι αποθηκευμένες στην LDR εικόνα συνθέτονται με τα κατάλληλα βάρη μέσω μιας συνάρτησης για την τελική σύνθεση της HDR εικόνας.

Οι δυναμικές σκηνές είναι και οι πιο συχνές. Οι μετακινήσεις των σκηνών αυτών δεν

μπορούν να ελεγχθούν καθώς τα αντικείμενα που περιέχουν κινούνται σχετικά την στιγμή της λήψης. Οι περιοχές που παρουσιάζουν κίνηση μπορούν να ανιχνευθούν πριν υποβληθούν σε επεξεργασία κατά τη διάρκεια της τελικής σύνθεσης. Αντιθέτως, γίνεται προσπάθεια να εντοπίζονται τα σταθερά αντικείμενα και να αξιοποιούνται για την ευθυγράμμιση. Η ανακατασκευή φόντου σχετίζεται με την ανακατασκευή HDR δυναμικών σκηνών και είναι η συμπληρωματική ενέργεια για την ανίχνευση κίνησης. Μια λύση για την εκτίμηση του φόντου από μια μη χρονική ακολουθία εικόνων από την ίδια οπτική γωνία μπορεί να ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και συνεπώς να περιέχει διαφορετικά αντικείμενα, διατηρώντας το ίδιο φόντο. Η μέθοδος λειτουργεί με την υπόθεση ότι οι περιοχές φόντου αποτελούν την πλειοψηφία της εικόνας, έχουν υψηλό αριθμό εμφανίσεων στο σύνολο των εικόνων και είναι ακίνητες στο σύνολο των εικόνων. Ειδικότερα, οι περισσότερες από τις μεθόδους απαιτούν μια καλά καθορισμένη περιοχή υποβάθρου με κινούμενα αντικείμενα στο προσκήνιο. Μία πρώτη μέθοδος, είναι η αφαίρεση της κίνησης με χρήση της διακύμανσης, όπου χρησιμοποιεί τη διακύμανση της ακτινοβολίας σε αυτές τις εκθέσεις ως δείκτη. Μια δεύτερη μέθοδος μετρά την αβεβαιότητα χρησιμοποιώντας την εντροπία ως δείκτη πιθανών κινήσεων. Μόνο η μέθοδος που βασίζεται στην εντροπία μπορεί να διαφοροποιήσει καλά τα κινούμενα αντικείμενα από ένα παρόμοιο φόντο.

Είναι δυνατή η επεξεργασία βίντεο HDR με τη χρήση οπτικής ροής για την ανίχνευση της κίνησης. Η οπτική ροή από μόνη της αποδεικνύεται ανεπαρκής λόγω της πολυπλοκότητας των διαφορετικών διαδρομών κίνησης και των λεπτομερειών της σκηνής. Υπάρχει ανάγκη ευθυγράμμισης εικόνων για ακολουθίες που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, οι οποίες, ωστόσο, έχουν κοινό χωρικό και χρονικό περιεχόμενο, όπου μπορεί να υπάρχουν διαφορές στη θέση των αντικειμένων ή στο φωτισμό της σκηνής. Οι δύο προσεγγίσεις που βασίζονται στην οπτική ροή είναι η μία βασίζεται στην hierarchical homography και warping και η άλλη στην αντιστοίχιση σημείων χαρακτηριστικών.

Shadow Detection in Digital Images and Videos - Csaba Benedek and Tamás Szirányi

Η ανίχνευση σκιών είναι μια σημαντική διεργασία και αποτελεί εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα στην όραση υπολογιστών. Υπάρχουν πολυάριθμες εφαρμογές που διαφέρουν ως προς τα κίνητρά τους σχετικά με την διαχείριση των σκιών σε ψηφιακές εικόνες και βίντεο. Για παράδειγμα, στην επιτήρηση με βίντεο, την αξιοποίηση από αέρος και την παρακολούθηση της κυκλοφορίας, οι σκιές αναφέρονται συνήθως ως επιβλαβή φαινόμενα, επειδή δυσχεραίνουν τον διαχωρισμό και την παρακολούθηση κινούμενων αντικειμένων μέσω της αφαίρεσης παρασκηνίου. Στην τηλεπισκόπηση, οι σκιές μπορούν να μειώσουν την απόδοση των τεχνικών ανίχνευσης αλλαγών. Συνήθως, η ύπαρξη σκιών δυσχεραίνουν την ανακατασκευή της σκηνής καθώς η ανίχνευση των ακμών των επιφανειών επηρεάζονται από τον φωτισμό. Από την άλλη πλευρά, οι σκιές μπορεί να είναι χρήσιμο φαινόμενο σε πολλές καταστάσεις. Οι λεγόμενες μέθοδοι shape from shading αντλούν τρισδιάστατη (3D) πληροφορία των αντικειμένων με βάση τις εκτιμώμενες επιδράσεις σκίασης. Οι σκιές επίσης, προσφέρουν γενικά στοιχεία, εμμέσως, για τις συνθήκες φωτισμού. Για παράδειγμα, ο βαθμός σκοτεινότητας μιας σκιάς υποδηλώνει αν μια εξωτερική λήψη έγινε σε ηλιόλουστο ή συννεφιασμένο καιρό, ενώ το μέγεθος και ο προσανατολισμός των σκιάσεων σχετίζονται με την ώρα και την ημερομηνία λήψης. Επιπλέον όταν παρατηρούνται πολλαπλές σκιές με διαφορετικό βαθμό κορεσμού με διαφορετικό προσανατολισμό, εννοείται η ύπαρξη πολλών πηγές φωτός.

Κάτι πολύ χρήσιμο είναι το γεγονός ότι η εξαγωγή αντικειμένων σε ακίνητες εικόνες μπορεί να διευκολυνθεί με την ανίχνευση σκιών.

Το πρόβλημα του φιλτραρίσματος σκιών έχει αντιμετωπιστεί με διάφορους τρόπους στη βιβλιογραφία. Οι προσεγγίσεις που βασίζονται στη γεωμετρία εκτιμούν τον χωρικό μετασχηματισμό μεταξύ των αντικειμένων και των σκιών τους στο επίπεδο της προβαλλόμενης εικόνας. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό σε συγκεκριμένες συνθήκες και τύπους αντικειμένων, οι τεχνικές φιλτραρίσματος με βάση το χρώμα χρησιμοποιούνται συχνότερα. Οι μέθοδοι μπορούν επίσης να διακριθούν με βάση την απαίτηση για την είσοδό τους. Οι μέθοδοι για ακίνητες εικόνες, οι οποίες προσπαθούν να βρουν και να αφαιρέσουν τις σκιές στα μεμονωμένα καρέ ανεξάρτητα, χρησιμοποιούνται συνήθως για φωτογραφίες υψηλής ποιότητας, όπου το φόντο έχει ομοιόμορφο χρώμα ή μοτίβο υφής. Ένα νέο προσαρμοστικό μοντέλο για την κατάτμηση σκιών χωρίς ισχυρούς περιορισμούς στις εκ των προτέρων πιθανότητες, την ποιότητα της εικόνας, τα σχήματα των αντικειμένων και την ταχύτητα επεξεργασίας εισήχθη.

Document Image Rectification Using Single-View or Two-View Camera Input - Hyung Il Koo and Nam Ik Cho

Για τη διόρθωση εικόνων εγγράφων, πολλές μέθοδοι εκτιμούν απευθείας μια τρισδιάστατη (3D) δομή. Ένας τρόπος είναι με μέτρηση του βάθους, χρησιμοποιώντας ένα σαρωτή δομημένου φωτός ή λέιζερ. Η τρισδιάστατη δομή μπορεί να εκτιμηθεί από πολλαπλές εικόνες χωρίς τη χρήση συσκευών μέτρησης βάθους. Για παράδειγμα, με ένα εξειδικευμένο σύστημα στερεοσκοπικής όραση. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος εξακολουθεί να έχει απαιτήσεις σε μηχανικό εξοπλισμό, παρά ταύτα είναι μικρότερες από εκείνες ενός μετρητή βάθους. Η μέθοδος στερεοσκοπικής όρασης, έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί σημεία αναφοράς. Ένας αλγόριθμος *dewarping* εγγράφων μετριάζει τα προβλήματα αξιοποιώντας δεδομένα βίντεο. Τα έγγραφα διορθώνονται χρησιμοποιώντας ένα στερεοζεύγος, με τη μέθοδο αυτή, δεν χρειάζεται ειδικός εξοπλισμός και χρησιμοποιούνται μόνο δύο εικόνες που έχουν ληφθεί από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Αν και η χρήση πολλαπλών εικόνων έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως ανεξαρτησία περιεχομένου και δυνατότητα αφαίρεσης της κατοπτρικής αντανάκλασης, οι μέθοδοι αυτές υπέφεραν από υπολογιστική πολυπλοκότητα στην τρισδιάστατη ανακατασκευή. Ως εκ τούτου, προτάθηκαν διάφορες μέθοδοι *Single-View* που δεν απαιτούσαν τρισδιάστατη ανακατασκευή. Οι περισσότερες από αυτές τις μεθόδους αποφεύγουν το πρόβλημα της τρισδιάστατης ανακατασκευής αξιοποιώντας τις ενδείξεις από τη δισδιάστατη δομή των γραμμών του κειμένου με ορισμένες πρόσθετες παραδοχές. Επιπλέον ήταν συνήθως υπολογιστικά αποδοτικές και εύχρηστες.

Σε αντίθεση με την περιοχή κειμένου, στα σχημάτων με τη χρήση μιας μόνο εικόνας απαιτείται προσδιορισμός των ορίων των παραμορφωμένων σχημάτων. Η εξαγωγή των ορίων είναι δυσχερής. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε μια μέθοδος που τμηματοποιεί σχήματα από μια ενιαία προβολή χρησιμοποιώντας μια διεπαφή κουτιού ενοποίησης, η οποία διευκολύνει ουσιαστικά τη διαδικασία τμηματοποίησης. Παρουσιάζεται επίσης μια νέα μέθοδος παρεμβολής ορίων που μπορεί να βελτιώσει την οπτική ποιότητα της εικόνας εξόδου. Η συνολική διαδικασία είναι πολύ αποτελεσματική, έτσι ώστε ένα διορθωμένο αποτέλεσμα να λαμβάνεται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα, ενώ οι στερεοσκοπικές μέθοδοι απαιτούν σχεδόν ένα λεπτό. Ένας αλγόριθμος διόρθωσης εγγράφων, ο οποίος χρησιμοποιεί δύο εικόνες που λαμβάνονται από δύο διαφορετικές όψεις. Με την συγκεκριμένη μέθοδο, η επιφάνεια ενός βιβλίου ανακατασκευάζεται από τα αντίστοιχα

σημεία σε δύο εικόνες και η γεωμετρική διόρθωση εκτελείται χρησιμοποιώντας την ανακατασκευασμένη επιφάνεια του βιβλίου. Τέλος, οι γεωμετρικά διορθωμένες εικόνες συρράπτονται για καλύτερη οπτική σύνθεση.

Συνοπτικά, η στερεοσκοπική μέθοδος που χρησιμοποιεί ρητή τρισδιάστατη ανακατασκευή και λειτουργεί ανεξάρτητα από το περιεχόμενο των εγγράφων και παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα (π.χ. η κατοπτρική αφαίρεση της αντανάκλασης). Επομένως, η μέθοδος αυτή να συνιστάται για εικόνες σε εσωτερικό περιβάλλον για optical character recognition - OCR και ψηφιοποίηση αριθμών. Η άλλη μέθοδος της μονής όψης διορθώνει ένα σχήμα από ένα πλαίσιο οριοθέτησης που παρέχει ο χρήστης. Η μέθοδος αυτή αποδεικνύεται αποτελεσματική, ισχυρή και εύχρηστη. Σημειώνεται ότι οι εικόνες που καταγράφονται με τη φωτογραφική μηχανή συχνά περιέχουν φωτομετρική και γεωμετρική παραμόρφωση. Επομένως, η απομάκρυνση του ανομοιόμορφου φωτισμού και του θολώματος της κίνησης/εκτός εστίασης είναι επίσης ουσιώδεις για τη βελτίωση των εικόνων που έχουν ληφθεί με κάμερα. Παρ' όλα αυτά, τα συστήματα ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής για την απόκτηση, ανάλυση και επεξεργασία εικόνων εγγράφων έχουν τη δυνατότητα να αντικαταστήσουν τους επίπεδους σαρωτές.

Bilateral Filter: Theory and Applications - Bahadir K. Gunturk

Το διμερές φίλτρο (Bilateral Filter), όπου προηγουμένως SUSAN (Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus), είναι ένα μη γραμμικό φίλτρο σταθμισμένου μέσου όρου, όπου τα βάρη εξαρτώνται τόσο από τη χωρική απόσταση όσο και από την απόσταση έντασης σε σχέση με το κεντρικό εικονοστοιχείο. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του φίλτρου, είναι η ικανότητά του να διατηρεί τις ακμές ενώ κάνει χωρικές εξομάλυνση. Οι παραλλαγές του, έχουν δημοσιευτεί ακόμη νωρίτερα ως φίλτρο sigma και neighborhood. Από τη σκοπιά του ιστογράμματος, μπορεί να ερμηνευτεί ως φίλτρο τοπικής λειτουργίας, επιστρέφοντας την αναμενόμενη τιμή των τοπικών ιστογραμμάτων. Μια εικόνα μπορεί να αναλυθεί σε συνιστώσες μεγάλης κλίμακας (βάση) και μικρής κλίμακας (λεπτομέρεια) με τη χρήση του φίλτρου. Η συνιστώσα μεγάλης κλίμακας είναι μια εξομαλυμένη έκδοση της εικόνας εισόδου με διατηρημένες τις κύριες ακμές, ενώ η συνιστώσα μικρής κλίμακας ερμηνεύεται ως έχουσα τις λεπτομέρειες της υψής ή το θόρυβο, ανάλογα με την εφαρμογή και την επιλογή των παραμέτρων. Η συνιστώσα μικρής κλίμακας λαμβάνεται με την αφαίρεση της φιλτραρισμένης εικόνας από την αρχική εικόνα. Το διμερές φίλτρο έχει βρει πολλές εφαρμογές στην επεξεργασία εικόνων και στην όραση υπολογιστών όπως αυτές παρουσιάζονται εν συντομία παρακάτω:

- **Image Denoising:** στην αποθορυβοποίηση εικόνων, επειδή αυτό το φίλτρο μπορεί να κάνει χωρικό μέσο όρο χωρίς να θολώνει τις ακμές.
- **Tone Mapping of High-Dynamic Range Images:** Μια πραγματική σκηνή μπορεί να έχει πολύ μεγαλύτερο δυναμικό εύρος από αυτό που μπορεί να καταγράψει μια φωτογραφική μηχανή, οι εικόνες συχνά παρουσιάζουν κορεσμό. Αφού δημιουργηθεί μια εικόνα HDR, πρέπει να γίνει χαρτογράφηση των τόνων για να εμφανιστεί σε μια οθόνη, η οποία συνήθως έχει μικρότερο δυναμικό εύρος από την εικόνα HDR.
- **Contrast Enhancement:** Οι μέθοδοι Retinex προσπαθούν να αφαιρέσουν τη συνιστώσα του φωτισμού με βάση την υπόθεση ότι ο φωτισμός μεταβάλλεται αργά σε σύγκριση με την ανάκλαση.
- **Image Fusion:** Η συγχώνευση διαφορετικών μορφών εικόνας, όπως εικόνες με

και χωρίς φλας και εικόνες ορατού φάσματος και υπέρυθρου φάσματος.

- **Compression Artifact Reduction:** Ο μετασχηματισμός διακριτού συνημιτόνου (cosine transform - DCT) με βάση το μπλοκ υιοθετείται από διάφορα πρότυπα συμπίεσης εικόνας και βίντεο. Τα φαινόμενα μπλοκαρίσματος και άλλα φαινόμενα συμπίεσης, όπως τα φαινόμενα "κουνουπιού" ή "δακτυλίου", γίνονται πιο σοβαρά με υψηλότερους ρυθμούς συμπίεσης. Μια χωρικά προσαρμοστική έκδοση του διμερούς φίλτρου για την αποτελεσματική μείωση των ασυνεχειών μπλοκ και των φαινομένων δακτυλίωσης, αποφεύγοντας παράλληλα την υπερβολική εξομάλυνση των περιοχών υψής.
- **Mesh Smoothing:** Δεδομένου ότι οι συσκευές τρισδιάστατης (3D) σάρωσης μπορεί να παράγουν θορυβώδεις παρατηρήσεις, η αποθορυβοποίηση των 3D πλεγμάτων είναι απαραίτητη σε πολλές εφαρμογές γραφικών υπολογιστών.
- **Image Interpolation:** Δεδομένου ότι το διμερές φίλτρο προσαρμόζει τους συντελεστές του φίλτρου για να διατηρήσει τις ακμές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε παρεμβολή εικόνας. Μια πολύ καλή εφαρμογή είναι το πρόβλημα του demosaicing.
- including optical flow estimation
- depth map estimation
- video stylization
- texture and illumination separation
- orientation smoothing
- medical imaging
- video enhancement

Painterly Rendering - Giuseppe Papari and Nicolai Petkov

Ακολουθεί, η ζωγραφική απόδοση χωρίς επίβλεψη, δηλαδή σε πλήρως αυτόματους αλγόριθμους που μετατρέπουν μια εικόνα εισόδου σε μια ζωγραφική εικόνα με συγκεκριμένο στυλ. Προτείνονται διάφορα μαθηματικά μοντέλα μιας πινελιάς και αναπτύσσονται ειδικοί αλγόριθμοι για την αυτόματη εξαγωγή χαρακτηριστικών της πινελιάς από την εικόνα εισόδου. Μια άλλη προσέγγιση προτείνει την αφαίρεση από τα κλασικά εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί από τους καλλιτέχνες και την εστίαση στις οπτικές ιδιότητες, όπως οι αιχμηρές ακμές ή η απουσία φυσικής υψής, που διακρίνουν τη ζωγραφική από τις φωτογραφικές εικόνες. Οι αλγόριθμοι για την απόδοση μιας πινελιάς μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει προσεγγίσεις που βασίζονται σε μια φυσική προσομοίωση της διαδικασίας μεταφοράς μελανιού από ένα πινέλο σε ένα φυσικό μέσο όπως το χαρτί ή ο καμβάς. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τεχνικές που προσπαθούν να μιμηθούν την εμφάνιση μιας πινελιάς αγνοώντας τη φυσική πίσω από αυτή. Εν συνεχεία μελετάται, μια διαφορετική κατηγορία αλγόριθμων, οι οποίοι εξετάζουν μόνο τις οπτικές ιδιότητες που διακρίνουν έναν πίνακα ζωγραφικής από μια φωτογραφική εικόνα, ανεξάρτητα από τα εργαλεία και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τους. Αυτή η κατηγορία αλγόριθμων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε προσεγγίσεις που βασίζονται στη διατήρηση των ακμών και στην εξομάλυνση με ενίσχυση των ακμών, σε τεχνικές που προσθέτουν

μια συνθετική υφή στην εικόνα εισόδου για να προσομοιώσουν το γεωμετρικό μοτίβο που προκαλείται από τις πινελιές, και σε αλγορίθμους που βασίζονται σε αναλογίες εικόνας. Μια αποτελεσματική και αποδοτική προσέγγιση στη ζωγραφική απόδοση είναι η εξομάλυνση της εικόνας εισόδου με ταυτόχρονη διατήρηση ή όξυνση των ακμών. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι οι υπάρχοντες τελεστές εξομάλυνσης, που διατηρούν και βελτιώνουν ακμές, δεν παράγουν όλοι ικανοποιητικές καλλιτεχνικές εικόνες. Παραδείγματα είναι το *bilateral filtering*, το *median filtering* και το *structural opening and closing*. Ένας άλλος ενδιαφέρων τρόπος παραγωγής καλλιτεχνικών εικόνων βασίζεται σε γυάλινα μοτίβα και συνδυάζει τρεις ουσιαστικές πτυχές της ζωγραφικής τέχνης: αντίληψη, τυχαιότητα και γεωμετρική δομή.

Σε γενικές γραμμές, μπορεί να ειπωθεί ότι η έξοδος των αλγορίθμων ζωγραφικής απόδοσης διαφέρει από την εικόνα εισόδου μόνο ως προς τις λεπτομέρειες της υφής. Επιπλέον, ένα τέτοιο αποτέλεσμα δεν δίνει την αίσθηση της τρισδιάστατης εικόνας που παρατηρείται στους πραγματικούς πίνακες ζωγραφικής, για παράδειγμα, λόγω του μεταβλητού πάχους του χρώματος ή της μη επιπεδότητας του χαρτιού σε υδατογραφίες. Μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι ένα μεγαλύτερο βήμα στη ζωγραφική απόδοση μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή τελεστών που πραγματοποιούν μια πιο ριζική τροποποίηση της εικόνας εισόδου, όπως κάποια μορφή υπερβολής που παρατηρείται στις καρικατούρες.

Machine Learning Methods for Automatic Image Colorization - Guillaume Charpiat, Ilya Bezrukov, Matthias Hofmann, Yasemin Altun, and Bernhard Schölkopf

Ο αυτόματος χρωματισμός εικόνας είναι το έργο της προσθήκης χρωμάτων σε μια εικόνα σε τόνους του γκρι χωρίς κάποια επέμβαση του χρήστη. Το πρόβλημα αυτό δεν είναι ορισμένο απόλυτα, υπό την έννοια ότι δεν υπάρχει μια μοναδική χρωματισμός μιας εικόνας κλίμακας του γκρι χωρίς καμία προηγούμενη γνώση. Οι περισσότερες μέθοδοι χρωματισμού εικόνας επιτρέπουν στο χρήστη να καθορίσει το χρώμα ορισμένων περιοχών και να επεκτείνει αυτή την πληροφορία σε ολόκληρη την εικόνα, είτε με την εκ των προτέρων τμηματοποίηση της εικόνας σε ομοιογενείς χρωματικές περιοχές, είτε με την εξάπλωση χρωματικών ροών από τα καθορισμένα από το χρήστη χρωματικά σημεία. Μια μέθοδος χρωματισμού εικόνας θα πρέπει να ενσωματώνει περιγραφείς υφής για ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι μέθοδοι μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν για να ενσωματώσουν πληροφορίες χρώματος που καθορίζει ο χρήστης. Η πρόβλεψη (Predicting) των χρωμάτων, δηλαδή ο πλήρως αυτόματος χρωματισμός της εικόνας, πριν από οποιαδήποτε πιθανή παρέμβαση του χρήστη, είναι ένα πολύ δύσκολο αλλά αναμφισβήτητο πιο χρήσιμο έργο. Ένας σημαντικός περιορισμός αυτών των μεθόδων είναι η χρήση τοπικών προβλεπτικών παραγόντων. Η πρόβλεψη χρώματος περιλαμβάνει πολλές ασάφειες που μπορούν να επιλυθούν μόνο στο καθολικό επίπεδο. Η πρόβλεψη χρώματος περιλαμβάνει πολλές ασάφειες που μπορούν να επιλυθούν μόνο στο καθολικό επίπεδο. Γενικά, οι τοπικές προβλέψεις που βασίζονται στην υφή είναι τις περισσότερες φορές πολύ θορυβώδεις και δεν είναι αξιόπιστες. Γενικότερα, φαίνεται ότι τα όρια του αντικειμένου περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες, όπως η παρουσία ακμών στον χρωματικό χώρο, και σημαντικές λεπτομέρειες που μπορούν να βοηθήσουν στην αναγνώριση ολόκληρου του αντικειμένου. Μια άλλη πηγή εκ των προτέρων πληροφοριών είναι η συνοχή κίνησης και χρόνου, όπως στην περίπτωση των βίντεο που πρόκειται να χρωματιστούν. Ως εκ τούτου, ένας επιτυχημένος αυτόματος προγνωστικός δείκτης χρώματος θα πρέπει να είναι αρκετά γενικός ώστε να ενσωματώνει διάφορες πηγές πληροφοριών με έναν καθολικό τρόπο.

Τρεις μέθοδοι μηχανικής μάθησης για την εκμάθηση τοπικών χρωματικών προβλέψεων και συναρτήσεων χωρικής συνοχής :

- Η μέθοδος παραθύρου Parzen είναι ένας μη παραμετρικός, κλιμακούμενος αλγόριθμος πιθανότητας μηχανικής μάθησης. Επίσης παρέχει φυσικό χρωματισμό, ειδικά όταν εκπαιδεύεται σε μικρά σύνολα δεδομένων, και αποδίδει αρκετά καλά σε μεγάλα σύνολα δεδομένων.
- Η δεύτερη προσέγγιση για τον αυτόματο χρωματισμό εικόνων και βασίζεται στις support vector machines - SVM, οι οποίες αποτελούν μια πιο εξελιγμένη μέθοδο μηχανικής μάθησης που μπορεί να μάθει μια πιο γενική κατηγορία προγνωστικών συναρτήσεων και έχει ισχυρότερες θεωρητικές εγγυήσεις. Σε μεγάλα δεδομένα εκπαίδευσης, οι SVM και οι δομημένοι SVM αξιοποιούν τις πληροφορίες πιο αποτελεσματικά και αποδίδουν πιο φυσικό χρωματισμό, με περισσότερες χρωματικές λεπτομέρειες, σε βάρος μεγαλύτερων χρόνων εκπαίδευσης.
- Η τρίτη προσέγγιση χρησιμοποιεί τεχνικές δομημένης πρόβλεψης εξόδου, όπου τα δύο μοντέλα εκπαιδεύονται από κοινού.

Machine Learning for Digital Face Beautification - Gideon Dror

Δεδομένου ενός προσώπου, μια ποικιλία προκαθορισμένων θέσεων του προσώπου προσδιορίζονται για τον υπολογισμό ενός συνόλου αποστάσεων. Ο κύριος στόχος είναι μια αυτόματη μηχανή αξιολόγησης της ομορφιάς του προσώπου, δηλαδή δύο παλινδρομητές διανυσμάτων υποστήριξης που εκπαιδεύονται χωριστά σε μια βάση δεδομένων γυναικείων και ανδρικών προσώπων με συνοδευτικές αξιολογήσεις της ελκυστικότητας του προσώπου που συλλέγονται από μια ομάδα ανθρώπινων αξιολογητών. Πραγματοποιείται μια προσπάθεια για την κατασκευή ενός μοντέλου ομορφιάς προσώπου χρησιμοποιώντας μεθόδους επιβλεπόμενης μάθησης με βάση την αξιολόγηση από ανθρώπους. Οι δύο μέθοδοι στην οποία βασίστηκε η έρευνα είναι η άμεση βελτιστοποίηση μιας συνάρτησης ομορφιάς και η άλλη βασίζεται σε ευρετικές μεθόδους με κίνητρο τα γνωστά ψυχολογικά αποτελέσματα της αντίληψης της ομορφιάς.

Μεγάλο μέρος της έρευνας στα γραφικά υπολογιστών και στην όραση υπολογιστών έχει επικεντρωθεί σε τεχνικές και εργαλεία ειδικά εστιασμένα στα ανθρώπινα πρόσωπα και πιο συγκεκριμένα στην μοντελοποίηση, ανίχνευση και στην αναγνώριση προσώπου. Η μέθοδος χρησιμοποιεί το Bayesian tangent shape model (BTSM), μια τεχνική που βελτιώνει το γνωστό active shape model (ASM). Το ASM αποτελείται από ένα μοντέλο κατανομής σημείων που αποτυπώνει τις παραλλαγές σχήματος των έγκυρων αντικειμένων και από ένα σύνολο μοντέλων κατανομής γκριζών κλίσεων που περιγράφουν την τοπική υφή κάθε σημείου αναφοράς. Για τον εξωραϊσμό μιας εικόνας προσώπου, πρώτα αναλύεται και έπειτα εξάγονται τα χαρακτηριστικά σημεία με τον ίδιο τρόπο που πραγματοποιείται για τις εικόνες εκπαίδευσης. Η διαδικασία ανάλυσης προσώπου απαιτεί ευθυγράμμιση και κανονικοποίηση του χώρου δεδομένων χαρακτηριστικών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ανάλυση της εικόνας εισόδου είναι πλήρως αυτόματη, ενώ σε σπάνιες περιπτώσεις απαιτείται κάποια παρέμβαση του χρήστη. Οι δυνατότητες ενός τέτοιου εργαλείου για τα ειδικά εφέ κινηματογραφικών ταινιών, τη διαφήμιση και τις υπηρεσίες γνωριμιών είναι επίσης προφανείς. Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή της τεχνικής είναι η κατασκευή κολάζ προσώπου κατά το σχεδιασμό ενός νέου προσώπου για ένα άβαταρ ή ένα τεχνητό πρόσωπο.

High-Quality Light Field Acquisition and Processing - Chia-Kai Liang and Homer

H. Chen

Η αναπαράσταση 4D φωτεινών πεδίων του χώρου ακτίνων προτάθηκε αρχικά για την απεικόνιση με βάση την εικόνα και στη συνέχεια εφαρμόστηκε σε διάφορα πεδία. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να αποτυπωθεί το πεδίο φωτός. Η απλούστερη μέθοδος χρησιμοποιεί μια μόνο κινούμενη κάμερα, της οποίας η θέση για κάθε έκθεση εντοπίζεται από μια πλατφόρμα κάμερας ή εκτιμάται από έναν αλγόριθμο "δομή από κίνηση" (SfM). Βέβαια, η μέθοδος αυτή, είναι αργή και λειτουργεί μόνο σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Εναλλακτικά, μια άλλη μέθοδος καταγράφει ταυτόχρονα το πλήρες σύνολο δεδομένων 4D με τη χρήση μιας συστοιχίας καμερών, η οποία φυσικά είναι δυσκίνητη και δαπανηρή. Η τρίτη μέθοδος, η οποία σχετίζεται περισσότερο με την προτεινόμενη προσέγγιση, εισάγει πρόσθετα οπτικά στοιχεία ή μάσκες στην κάμερα για την αποφυγή της γωνιακής ολοκλήρωσης του φωτεινού πεδίου. Μια plenoptic κάμερα (πανοπτική μιας και πρόκειται για μια σύνθετη λέξη από το λατινικό plenus δηλαδή ολόκληρο και optis που σχετίζεται με την όραση), για παράδειγμα, στην οποία μια συστοιχία μικροφακών τοποθετείται στο αρχικό επίπεδο εικόνας στο εσωτερικό της κάμερας. Η προκύπτουσα εικόνα πίσω από κάθε μικροφακό καταγράφει το γωνιακή κατανομή των ακτίνων φωτός. Εναλλακτικά, μπορεί κανείς να τοποθετήσει μια θετική συστοιχία φακών μπροστά από την κάμερα. Στην ίδια κατεύθυνση, η slit plate (διόπτρα διαχωρισμού) μπορεί να αντικατασταθεί με μια συνημιτονοειδής μάσκα για τη βελτίωση της απόδοσης. Όλες αυτές οι συσκευές έχουν τα ακόλουθα κοινά μειονεκτήματα. Πρώτον, η χωρική ανάλυση ή το φασματικό εύρος ανταλλάσσεται με τη γωνιακή ανάλυση. Δεύτερον, η εισαγωγή μασκών ή οπτικών στοιχείων σε μια φωτογραφική μηχανή επιβάλλει αυτόματα μια σταθερό μοτίβο δειγματοληψίας. Σημειώνεται ότι η multiplexing δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στις υπάρχουσες μεθόδους, όπως μια μεμονωμένη κινούμενη κάμερα, μια plenoptic κάμερα ή μια συστοιχία καμερών. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν μόνιμο οπτικό σχεδιασμό και δεν μπορούν να επιλέξουν δυναμικά τις ακτίνες φωτός για ενσωμάτωση.

Το κωδικοποιημένο διάφραγμα και η πολλαπλή λήψη αποτελούν δημοφιλείς τεχνικές. Το πρώτο αντιμετωπίζει το διάφραγμα (ή το κλείστρο) ως οπτικό διαμορφωτή για τη διατήρηση των συνιστωσών υψηλής συχνότητας των θολών εικόνων λόγω κίνησης για την παροχή απεικόνισης υψηλού δυναμικού εύρους ή πολυφασματικής απεικόνισης, για το διαχωρισμό του οπτικού πεδίου ή για τη λήψη στερεοσκοπικών εικόνων. Η τεχνική πολλαπλών λήψεων καταγράφει τη σκηνή πολλές φορές διαδοχικά ή ταυτόχρονα με τη χρήση διαχωριστών δέσμης και συστοιχιών καμερών. Σε κάθε έκθεση οι παράμετροι απεικόνισης, όπως ο φωτισμός, ο χρόνος έκθεσης, η εστίαση, τα σημεία θέασης ή η φασματική ευαισθησία, διαφοροποιούνται. Η τεχνική αυτή μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, δεδομένου ότι η διάρκεια ολοκλήρωσης του αισθητήρα μπορεί να ελεγχθεί ηλεκτρονικά. Πιο συγκεκριμένα, με τη τεχνική των πολλαπλών εκθέσεων αποφεύγεται η απώλεια χωρικής ανάλυσης, ενώ το κωδικοποιημένο διάφραγμα χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση για τη βελτίωση της ποιότητας.

Όσον αφορά τον υλικό εξοπλισμό, μια νέα συσκευή, που ονομάζεται προγραμματιζόμενο διάφραγμα (programmable aperture) για την απόκτηση φωτεινού πεδίου υψηλής ανάλυσης, αξιοποιεί τη δυνατότητα ταχείας πολλαπλής έκθεσης των ψηφιακών αισθητήρων χωρίς να μειώνει την ανάλυση του αισθητήρα για τη διαδοχική καταγραφή του φωτεινού πεδίου και επιτρέπει έτσι την πολλαπλή καταγραφή μιας δέσμης ακτίνων φωτός. Το προγραμματιζόμενο διάφραγμα έχει διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις

προηγούμενες συσκευές:

- Μπορεί να συλλάβει ένα φωτεινό πεδίο με πλήρη χωρική ανάλυση.
- Έχει καλύτερη απόδοση καταγραφής.
- Διαθέτει ρυθμιζόμενη γωνιακή ανάλυση.
- Η συσκευή είναι συμπαγής και οικονομική. Επιπλέον, μπορεί να τοποθετηθεί και να ενσωματωθεί σε μια συμβατική φωτογραφική μηχανή.

Σε σχέση με το λογισμικό, ένα αλγόριθμος βαθμονόμησης χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της φωτομετρικής παραμόρφωσης που χαρακτηρίζει ένα φωτεινό πεδίο. Η παραμόρφωση εκτιμάται απευθείας από το φωτεινό πεδίο που καταγράφεται. Ένας άλλος αλγόριθμος εκτίμησης βάθους, χρησιμοποιεί την ιδιότητα πολλών προβολών του φωτεινού πεδίου για τη δημιουργία χαρτών βάθους. Επίσης ένα σύνολο που απαρτίζεται από μία συσκευή και αλγόριθμους αποτελούν ένα πλήρες σύστημα για την απόκτηση φωτεινών πεδίων υψηλής ποιότητας, μέσω ανάλυσης της μεταφοράς φωτός των καμερών φωτεινού πεδίου. Η φωτομετρική βαθμονόμηση επιτρέπει πιο συνεπή απόδοση και πιο ακριβή εκτίμηση του βάθους. Η εκτίμηση βάθους πολλαπλών προβολών αυξάνει αποτελεσματικά τη γωνιακή ανάλυση για ομαλότερες μεταβάσεις μεταξύ των προβολών και καθιστά δυνατή την επεξεργασία εικόνας με γνώση του βάθους.

Οι εφαρμογές υπολογιστικής φωτογραφίας μπορούν να βοηθήσουν στη παραγωγή εικόνων που αντιπροσωπεύουν καλύτερα μια χρονική στιγμή ή ένα καλλιτεχνικό όραμα. Τη στιγμή της λήψης με ψηφιακές μηχανές που διαθέτουν ικανότητα δημιουργίας εικόνας έπειτα από εφαρμογή υπολογιστικών μεθόδων, καταγράφουν περισσότερες πληροφορίες από τις παραδοσιακές μηχανές. Κατά τη μεταγενέστερη επεξεργασία, οι εφαρμογές υπολογιστικής φωτογραφίας μπορούν να συνδυάσουν ή να επεξεργαστούν επιλεκτικά αυτές τις πληροφορίες (Fiss, 2022).

Ακολουθούν περιγραφές του τρόπου με τον οποίο η φωτογραφία **epsilon** μπορεί να βελτιώσει τις έξι παραμέτρους, σύμφωνα με τους Raskar and Tumblin (2009), όπως έχει προαναφερθεί:

- Οπτικό πεδίο (Field of view): Ένα πανόραμα με ευρύ οπτικό πεδίο επιτυγχάνεται με συρραφή εικόνων σε μωσαϊκό που λαμβάνονται με περιστροφή μιας κάμερας γύρω από ένα κοινό κέντρο προβολής ή με μετατόπιση μιας κάμερας σε μια επίπεδη σκηνή.
- Έκθεση και δυναμικό εύρος (Exposure and dynamic range): Μια εικόνα υψηλού δυναμικού εύρους (HDR) μπορεί να σχηματιστεί με ακριβή συγχώνευση φωτογραφιών που έχουν ληφθεί με μια επιλεγμένη σειρά τιμών έκθεσης.
- Βάθος πεδίου (Depth of field): Μια φωτογραφία που είναι πλήρως εστιασμένη, από το προσκήνιο έως το φόντο, κατασκευάζεται από μια σειρά εικόνων που λαμβάνονται με διαδοχική αλλαγή του επιπέδου βάθους εστίασης.
- Χωρική ανάλυση (Spatial resolution): Υψηλότερη ανάλυση επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση πολλαπλών καμερών και τη συναρμολόγηση ενός χωρικά μεταβαλλόμενου μωσαϊκού από μεμονωμένες εικόνες ή με τη μεταβολή της θέσης μιας μόνο κάμερας.

- Χρονική ανάλυση (Temporal resolution): Η απεικόνιση υψηλής ταχύτητας επιτυγχάνεται με την κλιμάκωση του χρόνου έκθεσης πολλαπλών καμερών χαμηλού ρυθμού καρτέ. Οι διάρκειες έκθεσης των επιμέρους καμερών μπορούν να επικαλύπτονται ή όχι.
- Ανάλυση μήκους κύματος (Wavelength resolution): Οι συμβατικές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές δειγματοληπτούν μόνο τα τρία βασικά χρώματα RGB. Η πολυφασματική απεικόνιση (με χρήση πολλαπλών χρωματικών συχνοτήτων στο ορατό φάσμα) ή η υπερφασματική απεικόνιση (με χρήση μηκών κύματος πέραν του ορατού φάσματος) μπορεί να επεκτείνει την ανάλυση μήκους κύματος με διαδοχική αλλαγή χρωματικών φίλτρων μπροστά από την κάμερα κατά τη διάρκεια της έκθεσης ή με τη χρήση συντονισιμων φίλτρων μήκους κύματος ή πλεγμαίων περίθλασης.

Έπεται ένα απλό παράδειγμα, από τους Raskar and Tumblin (2009), της μεθόδου της **Coded Photography**. Αντί να αυξηθεί το οπτικό πεδίο μόνο με την περιστροφή μιας κάμερας, μπορεί επίσης να δημιουργηθεί μια wrap-around προβολή ενός αντικείμενου. Η περιστροφή μιας κάμερας επιτρέπει τη σύνθεση και την επέκταση του πλαισίου στον χώρο παραμέτρων της κάμερας στη διάσταση του οπτικού πεδίου. Ωστόσο, μια άποψη wrap-around εκτείνεται σε πολλαπλά αποσπασματικά κομμάτια κατά μήκος αυτής της διάστασης. Μπορεί να οπτικοποιηθεί η έννοια της ίδιας της κάμερας αν θεωρηθεί ως μια συσκευή συλλογής δεσμών ακτίνων που εξέρχονται από ένα αντικείμενο προς πολλές κατευθύνσεις, όχι μόνο προς έναν μόνο φακό, και να οπτικοποιηθεί περαιτέρω συγκεντρώνοντας κάθε ακτίνα με το δικό της φάσμα μήκους κύματος. Για παράδειγμα, μια wrap-around view μπορεί να κατασκευαστεί από πολλαπλές εικόνες που λαμβάνονται από ένα δακτύλιο ή μια σφαίρα θέσεων κάμερας γύρω από το αντικείμενο, χρησιμοποιώντας μόνο μερικά εικονοστοιχεία από κάθε εικόνα εισόδου για το τελικό αποτέλεσμα. Μπορεί να βρεθεί ένας καλύτερος, λιγότερο "σπάταλος" τρόπος συλλογής πληροφοριών πέρα από τις εντάσεις των εικονοστοιχείων, ξεκινώντας με ένα στερεοφωνικό ζεύγος καμερών που κωδικοποιεί το βάθος μιας σκηνής ή με μια συστοιχία καμερών που καταγράφει ένα πεδίο φωτός σε μια σκηνή για τη σύνθεση μιας νέας άποψης.

Ένα ακόμα παράδειγμα υπολογιστικής φωτογραφικής τεχνικής είναι η απεικόνιση **Lucky imaging** (Levoy, 2014, AI Google Blog (2023)). Στην απεικόνιση αυτή, επιθυμητή έξοδος είναι μια εικόνα της σκηνής χωρίς να περιλαμβάνει "θολώματα" λόγω κίνησης. Αντί να καταγράψει μια ενιαία έκθεση, η φωτογραφική μηχανή καταγράφει μια σειρά (ριπή) από σύντομες (χρονικά) εκθέσεις και στη συνέχεια με τη βοήθεια του υπολογιστή εντοπίζονται οι εκθέσεις με τη μικρότερη ποσότητα "θαμπώματος" λόγω κίνησης. Η Lucky απεικόνιση χρησιμοποιείται συχνά στην αστροφωτογραφία για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης της ατμοσφαιρικής λάμψης. Στις εφαρμογές αστροφωτογραφίας συνδυάζονται οι εικόνες που εμφανίζονται πιο ευκρινείς και έχουν ληφθεί με τις μικρότερες τιμές έκθεσης έτσι ώστε να παραχθεί ως έξοδος μια εικόνα καθαρή και χαμηλή σε θόρυβο, σύμφωνα με τον Fiss (2022). Δηλαδή, καταγράφονται περισσότερες πληροφορίες κατά τη στιγμή της λήψης της εικόνας από αυτές που υπάρχουν στην φωτογραφία εξόδου. Ένας αλγόριθμος αναλύει, επιλέγει, φιλτράρει και συνδυάζει πολλαπλές εικόνες για την παραγωγή μιας βέλτιστης εικόνας ως αποτέλεσμα. Αυτή η μέθοδος ξεπερνάει την απλή αντιμετώπιση του θολώματος λόγω κίνησης ή την ανίχνευση χαμόγελου.

2.5 Οφέλη της υπολογιστικής φωτογραφίας

Η υπολογιστική φωτογραφία είχε σημαντικό αντίκτυπο στον τομέα της φωτογραφίας, επιτρέποντας τη δημιουργία εικόνων υψηλής ποιότητας, επιτρέποντας νέες δυνατότητες, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα και μειώνοντας το κόστος. Αρχικά βελτιώνεται η ποιότητα της εικόνας. Τεχνικές όπως η απεικόνιση υψηλού δυναμικού εύρους (HDR) και η μείωση του θορύβου έχουν καταστήσει δυνατή τη λήψη εικόνων με μεγαλύτερο εύρος τόνων και χρωμάτων και με λιγότερο θόρυβο, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας. Επιπλέον παρουσιάζονται νέες δυνατότητες, όπως η δημιουργία διαδραστικών οπτικών εμπειριών ή η λήψη εικόνων από νέες οπτικές γωνίες. Επίσης επωφελείται και η παραγωγικότητα, διότι πολλές εργασίες που εμπλέκονται στη φωτογραφία, όπως η επεξεργασία και ο χειρισμός εικόνων, μπορούν να αυτοματοποιηθούν με τη χρήση αλγορίθμων και λογισμικού υπολογιστή, πιο γρήγορα και αποτελεσματικά. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι με την αυτοματοποίηση πολλών εργασιών που εμπλέκονται στη φωτογραφία με τη χρήση υπολογιστικών τεχνικών έχει μειωθεί σημαντικά το κόστος δημιουργίας και επεξεργασίας φωτογραφιών.

Οι τεχνικές της εpsilon φωτογραφίας έχουν εξελιχθεί σημαντικά και ο τομέας παραμένει ένας ενεργός τομέας έρευνας με πλούσιες δυνατότητες. Ορισμένοι κατασκευαστές φωτογραφικών μηχανών έχουν ήδη εφαρμόσει πτυχές της στα καταναλωτικά τους προϊόντα. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας burst με προαιρετική αλλαγή των παραμέτρων μεταξύ διαδοχικών φωτογραφιών είναι ένα παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο η φωτογραφία epsilon έχει σημαντικό αντίκτυπο. Τα πανοράματα, τα μωσαϊκά, το εκτεταμένο βάθος πεδίου, η υπερ-ανάλυση και οι μέθοδοι λήψης HDR αποτελούν μέρος των νέων δυνατοτήτων. Πολλές από τις παραδοσιακές φωτογραφικές παραμέτρους και συμβιβασμούς αποτέλεσαν κατά το παρελθόν δελεαστικούς στόχους για νέες έξυπνες υπολογιστικές αξιοποιήσεις, όπως αναφέρεται από Raskar and Tumblin (2009).

2.6 Μειονεκτήματα της υπολογιστικής φωτογραφίας

Η υπολογιστική φωτογραφία έχει πολλά πλεονεκτήματα, έχει όμως και ορισμένα πιθανά μειονεκτήματα. Εξάρτηση από την τεχνολογία, για παράδειγμα είναι ένα από αυτά. Επειδή δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν τα ίδια αποτελέσματα με τη χρήση παραδοσιακών τεχνικών φωτογράφισης. Αυτό σημαίνει ότι οι φωτογράφοι μπορεί να περιορίζονται από την τεχνολογία που έχουν στη διάθεσή τους. Επίσης ένα ζήτημα είναι πολυπλοκότητα, αφού οι αλγόριθμοι και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην υπολογιστική φωτογραφία μπορεί να είναι πολύπλοκες και μπορεί να είναι δύσκολο να κατανοηθούν και να χρησιμοποιήσουν αποτελεσματικά. Επιπλέον, όταν απαιτείται εξειδικευμένο υλικό και λογισμικό που χρησιμοποιείται στην υπολογιστική φωτογραφία μπορεί να είναι υψηλό, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο για ορισμένες περιπτώσεις. Τέλος η ανάλυση και ο χειρισμός εικόνων και βίντεο μπορεί να εγείρει ανησυχίες σχετικά με την προστασία προσωπικών δεδομένων.

Ο Müller et al. (2020) τονίζει, ότι η υπερ-ανάλυση (Super Resolution imaging) έχει πλεονεκτήματα αρκετά, αλλά δεν είναι πάντα σκόπιμο να βελτιώνεται η ανάλυση. Για παράδειγμα, εάν το ζητούμενο είναι να μετρηθεί ο αριθμός των αντικειμένων σε μια σκηνή και πρέπει να παρθούν πολλά δείγματα της ίδιας περιοχής σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, τότε θα πρέπει να επισημανθεί, ότι πολλές εικόνες μπορεί απλώς να αλλάξουν στον αριθμό των αντικειμένων που υπάρχουν με την πάροδο του χρόνου (π.χ. ,

αυτοκίνητα που κινούνται σε μια σκηνή εικόνας), παραμορφώνοντας τα δείγματα.

Ο πιο προφανής κίνδυνος που σχετίζεται με τη δημιουργία εικόνων από μοντέλα μηχανικής μάθησης είναι ο κίνδυνος των ατόμων να χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία με κακόβουλο τρόπο. Οι βαθιές ψευδείς εικόνες (Deep Fake Image) μπορεί να επιτρέψουν αναπαράσταση ακραίων σενάριων σε ένα τοπίο. Μια δημοφιλής εφαρμογή κατασκευάζει το ίδιο τοπίο και στις τέσσερις εποχές, αλλά θα μπορούσε επίσης να δημιουργήσει πλημμύρες ή πυρκαγιές. Ευτυχώς δεν υπάρχει μεγάλος πραγματικός κίνδυνος παραπληροφόρησης (μεταξύ των ελεύθερων μέσων ενημέρωσης τουλάχιστον) σχετικά με γεγονότα καθώς αυτά τα πράγματα είναι τόσο εύκολα επαληθεύσιμα. Αναφέρεται χαρακτηριστικά στο (GIS-LOUNGE (2022)) ότι: "Εάν κάποιος αφιερώνει πραγματικά χρόνο για να προσομοιώσει την κάλυψη από τα μέσα ενημέρωσης ενός καταστροφικού γεγονότος κάπου χρησιμοποιώντας πλαστές εικόνες, οι ελεγκτές γεγονότων μπορούν να επαληθεύσουν από μισή ντουζίνα δημόσιες πηγές εικόνων εάν το συμβάν όντως συνέβη (ή απλά να καλέσουν κάποιον εκεί). Χαρακτηριστικά όπως η ομίχλη ή τα περίεργα χρώματα στις περιοχές δεν είναι αξιόπιστα στοιχεία για ψεύτικες εικόνες, καθώς αυτά τα στοιχεία είναι φυσιολογικά στις περισσότερες πραγματικές εικόνες, καθώς και λόγω των ατμοσφαιρικών επιδράσεων".

Κεφάλαιο 3

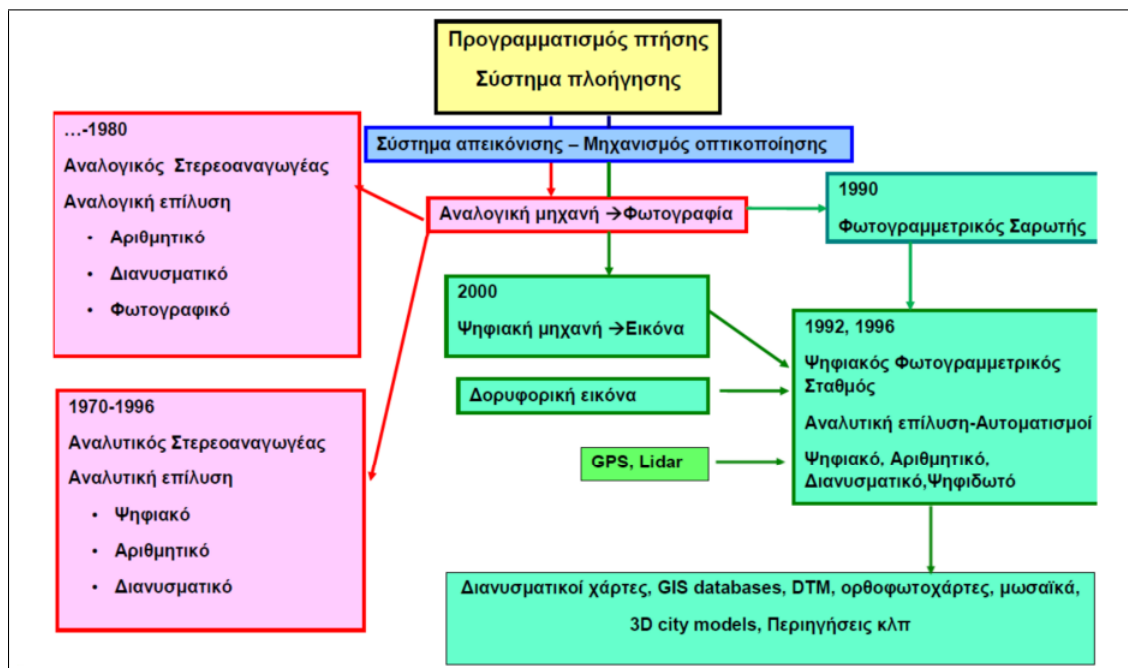
Οπτικά μέσα απεικόνισης στην επιστήμη του Αγρονόμου και Τοπογράφου μηχανικού- Μηχανικού Γεωπληροφορικής

Με τον όρο «αποτύπωση» μνημείου νοείται, η συλλογή των μετρικών εκείνων πληροφοριών που καθορίζουν αξιόπιστα την μορφή και την θέση του στον ευρύτερο χώρο τόσο του μνημείου. Επίσης του κάθε δομικού στοιχείου του όπως και η κατανομή των μνημείων στον αρχαιολογικό χώρο. Η λεπτομερής καταγραφή των ποιοτικών (ή θεματικών) πληροφοριών σχετικά με τα υλικά δομής και την παθολογία τους, (διάβρωση, αποσάθρωση, αντικατάσταση, κόπωση, αστοχία, αποτελέσματα εξωτερικών παραγόντων όπως σεισμοί κλπ.). Η παρουσίασή τους σε εύκολα αναγνώσιμα (κατάλληλη πυκνότητα πληροφορίας) και αξιόπιστα αλληλοσυμπληρώμενα τελικά προϊόντα (π.χ. όψεις, κατόψεις, τομές, αξονομετρικά, προοπτικά, ψηφιακά αρχεία, κλπ.). Η αρχειοθέτηση των παραπάνω στοιχείων, ώστε να γίνεται δυνατή η εύκολη ανεύρεση και χρησιμοποίησή τους, όταν το απαιτήσουν οι περιστάσεις. Οι αποτυπώσεις μνημείων διακρίνονται ανάλογα, με την έκταση, την επιδιωκόμενη μετρική αξιοπιστία (εκφρασμένη ως μέσο τετραγωνικό σφάλμα, ως λόγος αβεβαιότητας προς απόσταση, ως κλίμακα κλίμακες σχεδίων), τη θεματική πληρότητα των τελικών προϊόντων και τους στόχους της αποτύπωσης (τεκμηρίωση ή μελέτη παραμορφώσεων - μικρο-μετακινήσεων), στις εξής γενικές κατηγορίες:

- **Αναγνωριστικές αποτυπώσεις:** Στόχος τους είναι η απόκτηση γενικής εικόνας της κατανομής μνημείων στο χώρο και μια πρώτη τεκμηρίωση της πραγματικής μορφής κάθε μνημείου. Οι μέθοδοι αποτύπωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι η φωτοερμηνεία, οι γεωφυσικές διασκοπήσεις του εδάφους και εκείνες με απλές και γρήγορες τοπογραφικές μεθόδους, αποτυπώσεις ή εντάξεις σημαντικών στοιχείων του χώρου σε υπάρχοντα τοπογραφικά διαγράμματα.
- **Αποτυπώσεις τεκμηρίωσης:** Τεκμηρίωση ονομάζεται η πλήρης καταγραφή του μνημείου έτσι ώστε σε περίπτωση καταστροφής να μπορούμε να το ξαναφτιάξουμε όπως ήταν αρχικά. Στόχος τους είναι η καταγραφή της επικρατούσας κατάστασης όσον αφορά την πραγματική μορφή τόσο μεμονωμένων μνημείων, όσο και της κατανομής των μνημείων στον χώρο. Τα διαγράμματα στην πρώτη περίπτωση

είναι κλίμακας 1:100 - 1:50 και στην δεύτερη περίπτωση 1:1000 - 1:200. Οι μέθοδοι αποτύπωσης που χρησιμοποιούνται στην παραπάνω μέθοδο είναι οι επίγειες τοπογραφικές, οι φωτογραμμετρικές ή συνδυασμός τους, ανάλογα με το αντικείμενο και τον σκοπό της αποτύπωσης.

- **Ειδικές αποτυπώσεις υψηλής ακρίβειας:** Οι αποτυπώσεις αυτές γίνονται σε κλίμακα 1:20 - 1:5 και χρησιμοποιούνται για την μελέτη και παρακολούθηση μικρομετακινήσεων ή όταν πρόκειται να γίνει αποσυναρμολόγηση ενός μέρους του μνημείου και στην συνέχεια επανασυναρμολόγησή του. Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι είτε οι τοπογραφικές (π.χ. εκτέλεση μικροτριγωνισμού για την ανίχνευση μικρομεταβολών), είτε φωτογραμμετρικές, ανάλογα με την φύση του αντικειμένου αποτύπωσης.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα φωτογραμμετρικής παραγωγής (διαχρονική εξέλιξη), Πηγή: Γεωργούλα (2021).

Το μεγαλύτερο πρόβλημα παρουσιάζεται από την λάθος διαχείριση των δεδομένων, όσον αφορά την αποθήκευση τους, την αναζήτηση τους και την ανάκτηση τους καθώς τα στοιχεία που προκύπτουν από τις εργασίες στον χώρο του μνημείου είναι ανομοιογενή. Το μέγεθος της πληροφορίας που συλλέγεται αλλά και που παράγεται δημιουργεί επιπλέον προβλήματα που αφενός μεν δυσχεραίνουν τις εργασίες, αφετέρου δε, καθιστούν το τελικό αποτέλεσμα δύσχρηστο. Ένα επιπλέον πρόβλημα που προκύπτει, αφορά την χρονική διάρκεια του έργου. Για τη δημιουργία ενός φωτορεαλιστικού μοντέλου επιφανειών τριών διαστάσεων δύο είναι τα βασικά προβλήματα. Πρώτα το πώς λαμβάνονται υπόψη σε μια προβολή οι αποκρύψεις που αναμένονται στην περίπτωση του οποιουδήποτε αντικειμένου έχει ανάγλυφο (γεωμετρικό πρόβλημα). και κατά δεύτερο με ποιο τρόπο μπορεί να αποδοθεί στην προβολή της επιφάνειας τριών διαστάσεων η βέλτιστη φωτοϋφή από διαφορετικές κατά κανόνα εικόνες (ραδιομετρικό πρόβλημα). Η αρχική προσέγγιση όλων των προβολών είναι κατά κανόνα κοινή και απλά διαφέρει η γεωμετρική σχέση αντικειμένου-προβολής, ενώ η σχέση εικόνας-αντικειμένου παραμένει η ίδια. Η διαδικασία της φωτογραμμετρίας ξεκινά από την κατάλληλη για το σκοπό αυτό

εικόνα η οποία μπορεί να είναι είτε αναλογική, είτε ψηφιακή.

Η φωτογραμμετρική αποτύπωση περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια τα οποία συνοπτικά αναφέρονται:

1. στην απόκτηση δεδομένων μέσω κατάλληλων διατάξεων που καλούνται αισθητήρες και απεικονίζουν τον τρισδιάστατο χώρο,
2. στη φωτογραμμετρική επεξεργασία των δεδομένων η οποία καθορίζεται από τα τελικά προϊόντα και
3. στην απόκτηση των προϊόντων, τα οποία μπορεί να είναι δισδιάστατα και τρισδιάστατα διανυσματικά σχέδια, ορθοφωτογραφίες και ορθοφωτοχάρτες, καθώς και πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα αντικειμένων με πραγματική υφή.

Στις περιπτώσεις της αεροφωτογράφισης χρησιμοποιείται η αεροφωτογραφική μηχανή η οποία δεν έχει μηχανισμό ακριβούς εστίασης λόγω του ότι η εικόνα σχηματίζεται στο εστιακό επίπεδο και συνεπώς δημιουργεί εικόνες με παραδεκτή εστίαση. Οι σύγχρονες αεροφωτογραφικές μηχανές δεν χρησιμοποιούν φιλμ αλλά λαμβάνουν άμεσα ψηφιακές εικόνες. Είναι τοποθετημένες σε γυροσκοπική πλατφόρμα έτσι ώστε να διατηρούν τον άξονα του φακού κατακόρυφο και είναι συνδεδεμένες με το σύστημα πλοήγησης του αεροσκάφους ώστε να ευθυγραμμίζεται με τη γραμμή πτήσης. Η φωτογραμμετρία στην προσπάθεια της να αποσπάσει μεγάλης ακρίβειας μετρική πληροφορία από εικόνες χρησιμοποιεί ένα σύστημα αναφοράς, πάνω στη φωτογραφία. Το οποίο στις αναλογικές μηχανές ορίζεται από τη θέση των εικονοσημείων ενώ στις ψηφιακές μηχανές από τη θέση των εικονοστοιχείων που είναι διατεταγμένα σε προκαθορισμένες θέσεις που ορίζονται από τη γραμμή και τη στήλη για κάθε εικονοστοιχείο.

Η εξέλιξη της φωτογραμμετρίας με αναλυτικό τρόπο και η χρήση λογισμικού επιτρέπει την ελάχιστη χρήση φωτοσταθερών. Σχεδόν όλα τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται κάνουν συνόρθωση δέσμης ακόμη και με τρία φωτοσταθερά. Για να υπάρχει όμως καλύτερος έλεγχος της ακρίβειας είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα σχετικά πυκνό δίκτυο φωτοσταθερών σημείων.

Η μη συμβατική φωτογραμμετρία αναφέρεται στην απόσπαση μετρικής πληροφορίας με τη χρήση επίγειων λήψεων με οποιαδήποτε μετρική, ερασιτεχνική, συμβατική ή ψηφιακή φωτογραφική μηχανή. Η μη συμβατική φωτογραμμετρία δρα συμπληρωματικά προς την συμβατική και επίσης εισέρχεται σε νέα πεδία με εξειδικευμένες εφαρμογές όπως η τοπογράφιση μικρών αντικειμένων. Οι ψηφιακές ερασιτεχνικές μηχανές μπορούν να βαθμονομηθούν με μεθόδους πεδίου, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαστροφή του φακού. Η χρήση μεθόδων βαθμονόμησης πεδίου, με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, επιτρέπει τον πλήρη έλεγχο των παραμορφώσεων σε όλη την έκταση του πλαισίου της εικόνας.

Η έννοια της παραγωγής αληθούς ορθοφωτογραφίας αναφέρεται στην επανασύσταση απεικονίσεων όπου κάθε ορατό σημείο του αντικειμένου καταλαμβάνει την ορθή οριζοντιογραφική θέση του. Οι κύριες πηγές των γεωμετρικών παραμορφώσεων μιας συμβατικής ορθοφωτογραφίας είναι η μοντελοποίηση της επιφανείας και ο αλγόριθμος ορθοαναγωγής. Η ορθοφωτογραφία δεν εξαρτάται τόσο από την ακρίβεια του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου, όσο κυρίως από το ίδιο το περιεχόμενο του. Όταν κάποιος μοντελοποιεί μόνο την μορφολογία του εδάφους σε μορφή ψηφιακών μοντέλων εδάφους τα αντικείμενα που υπάρχουν πάνω στο έδαφος δεν λαμβάνονται υπόψη.

Κάθε τηλεσκοπική απεικόνιση προκύπτει ουσιαστικά με την κατάλληλη καταγραφή ποιοτικών και μετρητικών πληροφοριών, οι οποίες μεταφέρονται μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μετά από την αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα και τα αντικείμενα στην επιφάνεια της γης. Τα τελευταία χρόνια οι δορυφορικές ψηφιακές εικόνες χρησιμοποιούνται ευρέως για την αποτύπωση των αρχαιολογικών χώρων και μνημείων προσφέροντας πολυφασματικές πληροφορίες για μεγάλες εκτάσεις. Σε σχέση με τις συμβατικές αεροφωτογραφίες, η καταγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε διαφορετικά μήκη κύματος προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η ανάπτυξη των δορυφορικών τεχνικών της τηλεπισκόπησης έχει δώσει νέα δεδομένα σε σχέση με την αρχαιολογική έρευνα αλλά και με την περιβαλλοντική διαχείριση και την παρακολούθηση των οικοσυστημάτων καθώς παρέχει ένα μεγάλο όγκο πληροφοριών με σχετικά χαμηλό κόστος.

Ο όρος Γεωφυσική Διασκόπηση περιγράφει τη μελέτη της δομής των απρόσιτων στην άμεση παρατήρηση επιφανειακών στρωμάτων του γήινου φλοιού, με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και με την εφαρμογή θεμελιωδών νόμων της Φυσικής. Η τεχνολογία των γεωφυσικών διασκοπήσεων έχει συνεισφέρει σημαντικά στην αρχαιολογική έρευνα μέσω της χαρτογραφικής αποτύπωσης των υπεδάφινων μνημείων, της ανακατασκευής απειλούμενων πολιτισμικών χώρων, της απεικόνισης του δομημένου χώρου των αρχαιολογικών θέσεων και της αναβάθμισης του σχεδιασμού των ανασκαφών με κύριο ζητούμενο την προστασία της πολιτισμικής κληρονομιάς.

Οι μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης χωρίζονται ανάλογα με το μετρούμενο φυσικό μέγεθος, στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Βαρυτημετρικές
- Μαγνητικές
- Ηλεκτρικές
- Ηλεκτρομαγνητικές
- Σεισμικές μέθοδοι ανάκλασης και διάθλασης
- Γεωθερμικές
- Ραδιομετρικές
- Θερμικές

Οι θαλάσσιες γεωφυσικές μέθοδοι έρευνας διακρίνονται σε ηχητικές μεθόδους διασκόπησης του πυθμένα (ηχοβολιστικά συστήματα), μαγνητομετρικές μεθόδους, ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους και οπτική παρατήρηση του πυθμένα με κατευθυνόμενο υποβρύχιο όχημα.

Τομογράφος υποδομής πυθμένα (ηχοβολιστικών συστημάτων)

Ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης (δισδιάστατες αποτυπώσεις)

Πρωτονιακό μαγνητόμετρο (ροπών ατόμων)

Ηλεκτρομαγνητικός ανιχνευτής (πρωτεύον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο)

Κατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα (βιντεοσκόπηση)

Οι επίγειοι Τρισδιάστατοι Ανιχνευτές Laser (3D laser scanners) βασιζόμενοι στην τεχνολογία laser, χρησιμοποιούνται με μεγάλη επιτυχία στην αποτύπωση μνημείων. Κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου ανίχνευσης laser είναι:

- Είναι ταχύτερη 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 της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης.
- 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.

Ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού της απόστασης διακρίνονται στους παθητικούς ανιχνευτές (μέθοδος τριγωνισμού) και στους ενεργητικούς ανιχνευτές (time of flight, τριγωνισμός με μια ή δύο κάμερες CCD). Οι παθητικοί ανιχνευτές δεν εκπέμπουν κανένα είδος ακτινοβολίας αλλά βασίζονται στην ανίχνευση της ανακλώμενης από το αντικείμενο ακτινοβολίας του περιβάλλοντος. Οι ενεργοί ανιχνευτές για να αποτυπώσουν ένα αντικείμενο ή περιβάλλοντα χώρο εκπέμπουν κάποιο είδος ακτινοβολίας και ανιχνεύουν την ανάκλασή της. Οι επίγειοι σαρωτές laser είναι όργανα ενεργής απεικόνισης τα οποία δίνουν σε πραγματικό χρόνο τις τρισδιάστατες συντεταγμένες του αντικειμένου που αποτυπώνεται.

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την αποτύπωση ενός κτιρίου αποτελείται από τον τρισδιάστατο σαρωτή, τον τρίποδα του και από στόχους που είναι απαραίτητοι για την σύνδεση των επιμέρους σαρώσεων. Για να γίνει η πλήρης αποτύπωση του αντικειμένου απαιτούνται πολλαπλές σαρώσεις από διαφορετικές θέσεις (στάσεις). Μεταξύ αυτών των σαρώσεων πρέπει να υπάρχει αλληλοεπικάλυψη, ώστε να είναι δυνατή σύνδεσή τους στην μετέπειτα επεξεργασία. Το όργανο τοποθετείται κάθε φορά σε θέση αγνώστων συντεταγμένων και ρυθμίζονται στο software του οργάνου οι παράμετροι των μετρήσεων (πυκνότητα των σημείων προς αποτύπωση, προσεγγιστική απόσταση σαρωτή - αντικείμενου, κτλ.). Για να γίνει η σύνδεση των σαρώσεων πρέπει να τοποθετούνται στο χώρο που σαρώνουμε ένας αριθμός στόχων. Υπάρχουν δύο είδη στόχων, οι σφαιρικοί που είναι από φελιζόλ και έχουν διάμετρο 12 cm και οι στόχοι που είναι τυπωμένοι σε χαρτί, οι οποίοι αναγνωρίζονται αυτόματα από το λογισμικό επεξεργασίας.

Τα δεδομένα των μετρήσεων από το laser scanner είναι ανεξάρτητα νέφη σημείων με το δικό τους αυθαίρετο σύστημα αναφοράς τα οποία είναι σε αριθμό όσες και οι στάσεις κατά την αποτύπωση του μνημείου. Σκοπός της επεξεργασίας των δεδομένων είναι αυτά τα νέφη σημείων να τα μετατραπούν σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Τα στάδια της επεξεργασίας αυτής είναι η προ-επεξεργασία (ή προκαταρκτική επεξεργασία) των

δεδομένων laser και στη συνέχεια η διαμόρφωση της επιφάνειας από το νέφος σημείων. Συνήθως, η κατασκευάστρια εταιρεία του ανιχνευτή laser προμηθεύει μαζί με το υλικό και κατάλληλο λογισμικό που αναλαμβάνει:

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

Όργανα παρατήρησης διαφορετικού τύπου - για μέτρηση αποστάσεων. Οι αισθητήρες προσέγγισης χωρίζονται στις εξής κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο τεχνολογίας που χρησιμοποιούν κατά τη λειτουργία τους. Οι αισθητήρες υπερήχων λειτουργούν εκπέμποντας ηχητικά κύματα που ανακλούν σε μία επιφάνεια και επιστρέφουν στον αισθητήρα. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του ήχου στον αέρα και το χρόνο μετάδοσης του κύματος, υπολογίζεται η απόσταση του κινούμενου αντικειμένου από το εμπόδιο. Οι αισθητήρες υπερύθρων εκπέμπουν ακτίνες υπέρυθρου φωτός. Το φως ανακλάται στο εμπόδιο και ανιχνεύεται από μια φωτο-δίοδο. Μέσω μιας διαδικασίας γνωστή ως τριγωνισμός, υπολογίζεται η απόσταση από το εμπόδιο από τη γωνία της ανακλώμενης ακτίνας, ενώ οι χωρητικοί αισθητήρες μετράνε την απόσταση ενός ηλεκτρικά αγώγιμου αντικειμένου.

Εξ ορισμού, σύμφωνα με την ανάλυση της Τζωρτζάκου (2022), η φωτογραμμετρία κοντινής εμβέλειας (Close Range Photogrammetry - CRP) είναι απλώς συλλογή και επεξεργασία φωτογραμμετρικών δεδομένων όπου το θέμα απέχει λιγότερο από 1.000 πόδια. Οι μέθοδοι συλλογής μπορούν να είναι επίγειες ή εναέριας και η τελική έξοδος μπορεί να αποδοθεί είτε δισδιάστατα είτε τρισδιάστατα. Διάφοροι παράγοντες το έχουν καταστήσει ένα ισχυρό εργαλείο για τους επαγγελματίες γεωχωρικών. Το ισχυρότερο από αυτά είναι η πρόσφατη εμφάνιση της τρισδιάστατης φωτογραμμετρίας, που συχνά αναφέρεται ως «φωτογραμμετρία πολλαπλών ακτίνων»: μια τεχνική που λαμβάνει επικαλυπτόμενες, στερεοφωνικές φωτογραφίες και τις μετατρέπει σε τρισδιάστατα σύννεφα σημείων. Αυτά τα νέφη σημείων μπορούν στη συνέχεια να υποβληθούν σε επεξεργασία μέσω του ίδιου λογισμικού που χρησιμοποιείται για την τρισδιάστατη σάρωση. Ένας άλλος παράγοντας για αυξημένο ενδιαφέρον και χρήση της CRP είναι η διευρυμένη χρήση των UAVs. Η συντριπτική πλειοψηφία τους βασίζεται αποκλειστικά στο CRP. Δεδομένου ότι αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιήσει ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές σε λογικές τιμές, η τρισδιάστατη φωτογραμμετρία αποφέρει σημαντική μείωση στο κόστος υλικού σε σύγκριση με την τρισδιάστατη σάρωση με λέιζερ. Επιπλέον, οι τυπικές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές είναι μικρότερες και ελαφρύτερες από τους τυπικούς σαρωτές 3D, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για ενσωμάτωση σε πλατφόρμες UAVs. Οι εφαρμογές για αυτήν την τεχνολογία είναι πολλές. Πέρα από την εναέρια χαρτογράφηση, η βιομηχανία εξόρυξης εκμεταλλεύεται τη CRP. Η ογκομετρική ανάλυση τοποθεσίας ορυχείου είναι ένα παράδειγμα όπου η CRP μπορεί να προσφέρει μια γρήγορη και οικονομικά αποδοτική λύση. Ο μετριασμός της πτώσης βράχων είναι μια άλλη εφαρμογή. Ουσιαστικά, κάθε εφαρμογή που δεν απαιτεί την υπερ-ακρίβεια της σάρωσης με λέιζερ μπορεί να είναι υποψήφια για τεχνολογία CRP.

Ειδικά όσον αφορά την τρισδιάστατη φωτογραμμετρία, έχει ενδιαφέρον που ενσωμα-

τώνει κάμερες με ανίχνευση βάθους (Tango, MS Kinect, κ.α.) κάμερες ανίχνευσης κίνησης ακόμα και σε ένα smartphone (ΧΥΗΤ, 2022). Το αποτέλεσμα είναι ότι καθίσταται ικανό να συλλέγει τρισδιάστατα δεδομένα και να παράγει τρισδιάστατες φωτογραφίες. Αν και αυτές οι συσκευές δεν προσεγγίζουν τη λειτουργικότητα και την ακρίβεια των υπερσύγχρονων σαρωτών που βασίζονται σε λέιζερ, μπορούν να είναι χρήσιμες για έργα οπτικοποίησης και να δώσουν μια γεύση για το πού κατευθύνεται αυτή η τεχνολογία.

3.1 Γεωμετρική τεκμηρίωση

Λόγω του μη επεμβατικού χαρακτήρα τους, της ταχύτητας και της ακριβειάς τους, οι τεχνολογικές μέθοδοι αποτύπωσης συστήνονται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις τεκμηρίωσης σύνθετων μνημείων. Η φωτογραμμετρία είναι μια από τις τεχνικές που χρησιμοποιείται για την αποτύπωση της γεωμετρίας σύνθετων κατασκευών. Παρέχει ελεγχόμενες και ακριβείς μετρητικές πληροφορίες, εφαρμόζεται σε ένα εύρος κλιμάκων (Remondino, 2011). Ιστορικά, όπως συμπληρώνει η Βρεττού (2016), έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη ειδικά για την τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η τεχνολογία επέδρασε καταλυτικά στις εφαρμογές των κλάδων της τοπογραφίας, χαρτογραφίας, φωτογραμμετρίας και τηλεπισκόπησης. Οι μέθοδοι αποτύπωσης μνημείων ακολούθησαν αυτές τις αλλαγές, διευκολύνοντας την παραγωγή παραδοσιακών προϊόντων της φωτογραμμετρίας όπως οι ορθοεικόνες, δημιουργώντας νέες εφαρμογές όπως τα τρισδιάστατα μοντέλα υψής και παρέχοντας προϊόντα που τεχνικά, οικονομικά ή λόγω κλίμακας και πολυπλοκότητας των αντικειμένων δεν ήταν δυνατό να παραχθούν στο παρελθόν. Έτσι διανυσματικά και εικονιστικά φωτογραμμετρικά προϊόντα τεκμηρίωσης μνημείων οχρωματικής αρχιτεκτονικής αξιοποιούνται σε έρευνες ιστορικού, αρχαιολογικού ή αρχιτεκτονικού ενδιαφέροντος σε εργασίες συντήρησης-αποκατάστασης, στατικές μελέτες, μελέτες στρωματογραφίας αλλά και σε καινοτόμες εφαρμογές όπως τη 3D εκτύπωση μοντέλων, τη 3D ψηφιακή φωτορεαλιστική αναπαράσταση κατεστραμμένων ή μη μνημείων, τόσο για σκοπούς ιστορικής ερμηνείας, όσο και για την αναβάθμιση και τον εκσυγχρονισμό του τουριστικού προϊόντος της περιοχής. Η σταδιακή αντικατάσταση των γραμμικών σχεδίων από εικονιστικά προϊόντα και η εξέλιξη των τελευταίων είναι ξεκάθαρη. Οι ορθοφωτογραφίες εξελίσσονται σε ορθοφωτομωσαϊκά και 3D μοντέλα με υφή, η αναλυτική παραγωγή σχεδίων αρχικά στο χέρι, μετά σε plotter αντικαθίσταται σταδιακά από 3D ψηφιακά διανυσματικά προϊόντα που επιτρέπουν τη μέτρηση, οπτικοποίηση και αναπαραγωγή σε 3D περιβάλλον. Η προσθήκη διανυσματικής πληροφορίας πάνω στην εικόνα ή το 3D μοντέλο και η σύνδεσή της χωρικής με τη σημασιολογική που δίνει ο εξειδικευμένος χρήστης (π.χ. ιστορική, αρχιτεκτονική, τεχνική) αποτελεί ένα διαρκώς εξελισσόμενο πεδίο με στόχο τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου GIS συστήματος οργάνωσης και διαχείρισης της πληροφορίας (Bobek and Jedlička, 2011; Drap et al., 2005; Houshiar et al., 2015; Pinte et al., 2015)

3.1.1 Η γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων

Η γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων περιλαμβάνει τη συλλογή, επεξεργασία, αποθήκευση και παρουσίαση στοιχείων στον τρισδιάστατο χώρο, που τεκμηριώνουν τη θέση, το σχήμα και το μέγεθος ενός υλικού πολιτιστικού αγαθού για μια δεδομένη χρονική στιγμή (Γεωργόπουλος et al., 2013). Αποτελεί την αντικειμενική και ελεγχόμενη καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης ενός αντικειμένου σε δεδομένο χρόνο, χωρίς την

ερμηνεία της μελετώμενης μορφής του.

Η γεωμετρική τεκμηρίωση και ανάλυση παρέχει υψηλό επίπεδο ακρίβειας και αντικειμενικότητας, δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας των μετρήσεων, των σχεδίων και λοιπών προϊόντων ανά πάσα στιγμή και σε οποιαδήποτε θέση, τη σύγκριση της τοπολογίας μεταξύ παρόμοιων δομών (ανάπτυξη αυτοματοποιημένης τεχνικής), τη συνεχή επαφή με το αντικείμενο για την μελέτη και την ερμηνεία του, καλύτερη εποπτεία για την διατήρηση και προστασία του μνημείου, κατά την Βρεττού (2016).

3.1.2 Γεωμετρική τεκμηρίωση σπηλαίων

Στην εργασία της Τζωρτζάκου (2022), η γεωμετρική τεκμηρίωση ενός σπηλαίου αναφέρεται στη διαδικασία συλλογής δεδομένων, επεξεργασίας, απόδοσης, και καταχώρησης στοιχείων για τον προσδιορισμό της θέσης του και της πραγματικής μορφής του στο χώρο των τριών διαστάσεων σε μια χρονική στιγμή, του σχήματος και του μεγέθους αυτού. Με τον τρόπο αυτό ο ερευνητής έχει τη δυνατότητα να αντιληφθεί την εξέλιξη του μνημείου, το οποίο συνεχώς διαμορφώνεται μέσα στο χρόνο, και κατά συνέπεια να προάγει την επιστημονική έρευνα. Η δημιουργία λοιπόν αξιόπιστου και λεπτομερούς υποβάθρου θεωρείται βασική διαδικασία στη συστηματική μελέτη ενός σπηλαίου καθώς αυτό αποτελεί εργαλείο στα χέρια των επιστημόνων όλων των γνωστικών αντικειμένων που καταπιάνονται με τη μελέτη του μνημείου (Γεωργόπουλος, 2008). Οι μέθοδοι αποτύπωσης ενός σπηλαίου περιλαμβάνουν τόσο κλασικές πρακτικές όσο και χρήση τεχνολογιών αιχμής με αποκορύφωμα τη συμβολή και άλλων επιστημονικών πεδίων όπως είναι αυτό της όρασης υπολογιστών, όπου με χρήση προηγμένων τεχνολογικών συστημάτων και αλγορίθμων η αποτύπωση ακόμα και ενός τόσο ιδιαίτερου, ως προς την πολυπλοκότητα, περιβάλλοντος όπως είναι αυτό ενός σπηλαίου, να απλουστεύεται σε μεγάλο βαθμό.

3.2 Μέθοδοι γεωμετρικής τεκμηρίωσης

Η αναγνώριση της περιοχής και του αντικείμενου αποτύπωσης είναι σημαντική, κατά τη Βρεττού (2016), για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου, των κατάλληλων οργάνων και τον σωστό προγραμματισμό των εργασιών. Ο προγραμματισμός των εργασιών αποτύπωσης πρέπει να καταλήγει σε επιλογή της κατάλληλης μεθόδου συλλογής στοιχείων υπαίθρου και του αντίστοιχου εξοπλισμού που ικανοποιούν τις αρχές της αξιοπιστίας, της πληρότητας και της πιστότητας και αποτελούν τη βέλτιστη λύση για τους σκοπούς της αποτύπωσης λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος, την πολυπλοκότητα του αντικείμενου καθώς και τη διαθεσιμότητα ανθρώπινου δυναμικού, χρόνου, πόρων κλπ.

Οι κλασικές και σύγχρονες μέθοδοι απόδοσης του χώρου ενός σπηλαίου, σύμφωνα με Τζωρτζάκου (2022), περιγράφονται ως εξής:

Εμπειρική μέθοδος χαρτογράφησης με χρήση απλών οργάνων (μετροταινία ή αποστασιόμετρο, πυξίδα κ.α.) η οποία όμως, παρά το χαμηλό κόστος, μειονεκτεί στην αποτύπωση ενός πολυσύνθετου μνημείου καθώς επιφέρει μεγάλα σφάλματα στον προσδιορισμό των συντεταγμένων, με συνέπεια οι κατόψεις του σπηλαίου να είναι περιορισμένης ακρίβειας.

Η τοπογραφική μέθοδος αξιοποιεί εξειδικευμένα όργανα ακριβείας (π.χ. γεωδαιτικός σταθμός), τα οποία μετρούν οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες καθώς και κεκλιμένες

αποστάσεις. Πρόκειται για αξιόπιστη μέθοδο επιτυγχάνοντας αποτυπώσεις με υψηλή ακρίβεια, χωρίς να απαιτείται πολύς χρόνος εκτός πεδίου κατά την επεξεργασία των δεδομένων. Στα αρνητικά της μεθόδου αναφέρεται η χρονοβόρα διαδικασία λήψης μετρήσεων στο πεδίο, χωρίς ωστόσο να παραβλέπεται το γεγονός ότι αποτελεί τη μοναδική κλασική μέθοδο που προτείνεται ακόμα και για περιβάλλοντα μεγάλης πολυπλοκότητας, παράγοντας σχέδια υψηλής ακρίβειας ακόμα και σε κλίμακες της τάξης 1:50.

Η φωτογραμμετρική μέθοδος αποτύπωσης δίνει τη δυνατότητα απόδοσης πολύπλοκων αντικειμένων όταν υπάρχει πληθώρα λεπτομερειών (π.χ. πλούσιος λιθωματικός διάκοσμος) ενώ, αν συνδυαστεί με τοπογραφικές μεθόδους αποτύπωσης, παράγει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας και πληρότητας. Ουσιαστικά η εν λόγω μέθοδος ενδείκνυται για την ταχύτητα και την ευκολία απόδοσης του συνόλου του αντικειμένου ως ενιαίο μοντέλο. Η φωτογραμμετρική απόδοση του χώρου, ωστόσο, απαιτεί τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων αφού η γεωμετρία των αντικειμένων προκύπτει εμμέσως, από μετρήσεις πάνω σε εικόνες.

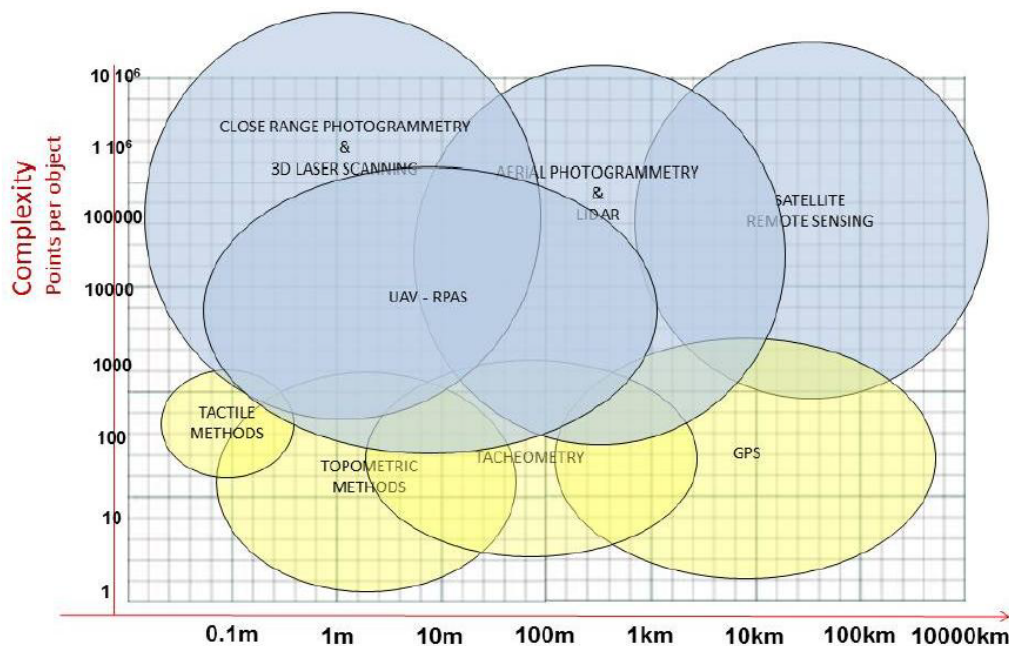
Η σάρωση με τρισδιάστατους σαρωτές laser αποτελεί μεθοδολογία αιχμής στην αποτύπωση ενός τόσο ιδιαίτερου περιβάλλοντος όσο είναι αυτό του σπηλαιίου. Η μέθοδος περιλαμβάνει όργανα που χρησιμοποιούν την τεχνολογία laser καταγράφοντας νέφος σημείων, το οποίο αντιπροσωπεύει την καθολική επιφάνεια του σπηλαιίου σε τρεις διαστάσεις. Ωστόσο, συγκριτικά με τη φωτογραμμετρική μέθοδο, ο όγκος των δεδομένων είναι συχνά μεγαλύτερος στην περίπτωση της σάρωσης του χώρου με σαρωτή laser ενώ η πληρότητα κάλυψης όλου του αντικειμένου είναι περιορισμένη.

3.3 Συμπεράσματα προηγούμενων εργασιών επιλογή μεθόδων και οργάνων

Συμπερασματικά, οι παραδοσιακές μέθοδοι αποτύπωσης ενός σπηλαιίου θεωρούνται χρονοβόρες και οικονομικά ασύμφωρες, σύμφωνα με Τζωρτζάκου (2022). Στις τοπογραφικές μεθόδους είναι αδύνατο να αποτυπωθούν όλα τα σημεία ενός πολύπλοκου αναγλύφου ενώ στη φωτογραμμετρία, αν και η καταγραφή του χώρου είναι πιο εύκολη. Φυσικά ο μεγάλος όγκος των δεδομένων προς επεξεργασία, ενδεχομένως να μπορεί να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα για κάποιον που δεν διαθέτει τα κατάλληλα μέσα. Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις στον τομέα της έρευνας των σπηλαίων σε συνδυασμό με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου χώρου, που αυξάνουν το βαθμό δυσκολίας σε οποιαδήποτε εργασία καλείται κάποιος να διενεργήσει μέσα σε αυτά, οδήγησαν τους ειδικούς στην ανεύρεση μεθόδων που καθιστούν πλέον την χαρτογράφηση τόσο πολύπλοκων περιβαλλόντων μία απλουστευμένη διαδικασία. Μία τέτοια μέθοδος που μπορεί να εφαρμοσθεί μέσα σε ένα σπήλαιο, όπου απαιτείται η ανάβαση ή κατάβαση με σχοινιά ή ακόμα και η διέλευση μέσα από στενά περάσματα και η οποία έχει φέρει επανάσταση στον τομέα της σπηλαιολογίας περιλαμβάνει χρήση του αλγορίθμου Simultaneous Localization and Mapping - (SLAM) και τεχνική σύμφωνα με την οποία αξιοποιεί διάφορα συστήματα καταγραφής και αλληλοσύνδεσης/επικοινωνίας με τους κατάλληλους αισθητήρες περιηγείται στο χώρο, δημιουργώντας σε πραγματικό χρόνο τον χάρτη αυτού ενώ ταυτόχρονα γίνεται και εντοπισμός της θέσης του κάθε χρονική στιγμή.

Παρακάτω διερευνούνται οι παράμετροι των διαθέσιμων (επίγειων) τεχνικών και τεχνολογιών γεωμετρικής τεκμηρίωσης προκειμένου να τεκμηριωθεί η επιλογή της κατάλ-

ληλης για τη εργασία της Βρεττού (2016). Για την παραγωγή 3D μοντέλων επιφάνειας και άλλων προϊόντων γεωμετρικής τεκμηρίωσης μνημείων, κτηρίων και αρχαιολογικών χώρων χρησιμοποιούνται ενεργητικές, παθητικές μέθοδοι και συνδυασμοί τους. Και οι δύο μέθοδοι πληρούν πολλά από τα χαρακτηριστικά της ιδανικής τεχνολογίας για την γεωμετρική αποτύπωση πολιτιστικών μνημείων και αντικειμένων. Στις ενεργητικές, η εκτίμηση της θέσης κάθε σημείου του αντικειμένου στο χώρο γίνεται άμεσα με μετρήσεις αποστάσεων και γωνιών χρησιμοποιώντας ακτινοβολία συγκεκριμένης συχνότητας. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ανακλάται πάνω στο αντικείμενο και επιστρέφοντας πίσω, υπολογίζεται η απόσταση κάθε σημείου του αντικειμένου βάσει του χρόνου διαδρομής της ακτίνας του φωτός. Στην περίπτωση των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών ο παλμός είναι στιγμιαίος και μοναδιαίος, ενώ στους σαρωτές λέιζερ (time-of-flight terrestrial laser scanner-ToF, συστήματα LiDar ή SAR) οι παλμοί είναι διαδοχικοί και πολλαπλοί. Αντίθετα στις παθητικές μεθόδους, τα τεχνικά μέσα (κάμερες ή φωτογραφικές μηχανές) καταγράφουν την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία ενός αντικείμενου σε μια ειδική επιφάνεια. Η τρίτη διάσταση δεν καταγράφεται, άλλωστε οι εικόνες είναι διδιάστατες και η πρόκληση σε αυτή την περίπτωση είναι η ανακατασκευή της τρίτης διάστασης χρησιμοποιώντας στοιχεία της εικόνας όπως ο φωτισμός, η σκιά και η απόσταση των σημείων και αντικειμένων σε αυτή. Οι τεχνικές που εφαρμόζουν τις παραπάνω μεθόδους καλύπτουν διακριτούς χώρους ανάλογα με το μέγεθος, την πολυπλοκότητα του προς αποτύπωση αντικείμενου και την κλίμακα των παραγόμενων προϊόντων, ενώ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τις εν γένει δυνατότητές τους ως προς το πλήθος των σημείων και την έκταση της επιφάνειας που μπορούν να καταγράψουν (Εικόνα boeler η heinz).



Σχήμα 3.2: Τοπογραφικές Μέθοδοι και Τεχνικές - Böhler and Heinz (1999) (Πηγή: Βρεττού, 2016).

Για την αποτύπωση ενός μνημείου διερευνώνται η προσβασιμότητα περιμετρικά του, θέματα ασφάλειας, η ορατότητα μεταξύ στάσεων, η μέγιστη απόσταση λήψης εικόνων, οι πιθανές αποκρύψεις. Επίσης καταγράφονται οι βασικές διαστάσεις, τα πιθανά εμπόδια και συντάσσονται τα αυτοσχέδια υπαίθρου. Στην περίπτωση που σκοπός είναι

η αποτύπωση ενός κάστρου αξιοποιούνται κυρίως φωτογραμμετρικές τεχνικές. Η χρήση επίγειου σαρωτή laser μπορεί να αποδίδει την απαιτούμενη ακρίβεια αποτύπωσης και την υφή, το απρόσιτο όμως ενδεχομένως της έκτασης δεν επιτρέπει την τοποθέτηση στάσεων περιμετρικά του κάστρου σε όλη του την έκταση ή τουλάχιστον μπορεί να υπάρχουν σε θέσεις με σημαντικές αποκρύψεις, όπως επισημαίνει η Βρεττού (2016) στην περίπτωση της. Συμπληρώνει ότι, το απρόσιτο της θέσης του κάστρου καθιστά τη μεταφορά και την τακτική φόρτιση του σαρωτή εξαιρετικά δύσκολη. Με την ελεύθερη χρήση της κάμερας απελευθερώνεται η διαδικασία από τη στατικότητα και το βάρος του επίγειου σαρωτή. Καθώς επίσης, ικανοποιεί τις προδιαγραφές ακρίβειας και πληροφορίας υψής. Εν τούτοις δεν επιτρέπει τη φυσική παρουσία σε όλες τις κατάλληλες θέσεις για την λήψη των εικόνων. Πλήρης κάλυψη του κάστρου θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνο με την χρήση εναέριων μέσων. Καθώς η χρήση UAV δεν ήταν δυνατή, η αποτύπωση του κάστρου με επίγεια φωτογραμμετρία αποτέλεσε τη δεύτερη καλύτερη λύση και τελικώς την επιλεγείσα, από την ίδια λόγω των προαναφερθέντων συνθηκών. Στην εργασία της Βρεττού (2016), χρησιμοποιούνται και οι δύο μέθοδοι. Βέβαια το κύριο βάρος της ανάλυσης δίνεται στις παθητικές μεθόδους που χρησιμοποιεί η φωτογραμμετρία. Επίσης συμπεριλαμβάνει πλούσια βιβλιογραφία με παραδείγματα από τον συνδυασμό των δύο μεθόδων (Al-Kheder et al., 2009; Bartoś et al., 2011; D'Urso and Russob, 2008; Lambers et al., 2007). Και διαδικασία εκτελείται βάση των βημάτων-αποφάσεων:

- Αναγνώριση περιοχής και αντικειμένου αποτύπωσης
- Επιλογή μεθόδου αποτύπωσης
- Επιλογή λογισμικού επεξεργασίας

Προφανώς υπάρχουν κατά τόπους αλληλοεπικαλύψεις και επαφίεται στην κρίση του ειδικού να επιλεχθεί η κατάλληλη μέθοδος και τεχνική για το πρόβλημα που καλείται να επιλύσει. Αξίζει να επισημανθεί ότι οι περιοχές που καλύπτονται από περισσότερες από μια τεχνικές, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες καθώς τα μειονεκτήματα της μιας μεθόδου μπορούν να καλυφθούν από τα πλεονεκτήματα της άλλης. Ο σαρωτής λέιζερ (laser scanner) δίνει λιγότερο θόρυβο σε χρωματιστά τμήματα. Οι φωτογραφικές μηχανές είναι ελαφρύτερες. Οι σαρωτές laser απαιτούν συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ αυτών και του αντικειμένου, που μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθεί (Giraud et al., 2013). Συνδυάζοντάς και τις δύο μεθόδους, οι οποίες απαιτούν ειδικό χειρισμό για την αποτύπωση εσοχών και κενών επιτυγχάνεται μια ακριβή και πλήρη απόδοση του αντικειμένου.

3.4 Ανάκτηση της τρίτης διάστασης με παθητικές μεθόδους

Όπως αναφέρει η Βρεττού (2016), η πρόκληση για τις παθητικές μεθόδους είναι η ανάκτηση της τρίτης διάστασης που χάνεται στο δισδιάστατο μέσο, δηλαδή την εικόνα. Για τον προσδιορισμό της τρίτης διάστασης με τη χρήση εικόνων έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, οι δύο κύριες που χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη οπτικοποίηση αντικειμένων για μετρητικούς σκοπούς στα φωτογραμμετρικά συστήματα, είναι η «Στερεοσκοπική» μέθοδος και η «Δομή από Κίνηση» structure from motion - SfM.

3.4.1 Στερεοσκοπική μέθοδος

Η στερεοσκοπική μέθοδος προσομοιώνει τη ανθρώπινη όραση με την χρήση στερεοσκοπικού ζεύγους εικόνων. Το βάθος γίνεται αντιληπτό από τη διαφορετική θέση ομόλογων σημείων σε δύο αλληλεπικαλυπτόμενες εικόνες που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο μετά από λήψη με (συνήθως) βαθμονομημένη φωτογραφική μηχανή. Σκοπός είναι η δημιουργία στερεοζεύγους και για την αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού. Απαιτεί αυστηρότητα στην θέση και την κλίση των μηχανών κατά την λήψη των εικόνων, στο ποσοστό αλληλεπικάλυψης των εικόνων, αλλά παρέχει υψηλή ακρίβεια. Οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων παράγονται από την επισήμανση ομόλογων σημείων σε ένα ζεύγος εικόνων και την μέτρηση της παράλλαξης x . Η γεωδαιτική θέση της κάμερας κατά την λήψη, καθώς και οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων ελέγχου είναι απαραίτητα στοιχεία για την τοποθέτηση των 3D μοντέλων στον χώρο (Αποκατάσταση Απόλυτου Προσανατολισμού). Συνδυασμός με γεωδαιτικές μετρήσεις αποδίδει σωστή θέση, προσανατολισμό και κλίμακα στο τρισδιάστατο μοντέλο που έχει παραχθεί.

Οι στερεοφωτογραμμετρικές μέθοδοι βασίζονται στη βασική αρχή λειτουργίας της διοφθαλμικής όρασης, η οποία ορίζει ότι η διάσταση του βάθους γίνεται αντιληπτή από δύο σημεία, η απόσταση μεταξύ των οποίων είναι γνωστή. Ωστόσο, κατά τη Τζωριζάκου (2022), η τρισδιάστατη άποψη των αντικειμένων μπορεί επίσης να γίνει αντιληπτή και από ένα μόνο σημείο παρατήρησης στην περίπτωση που είτε ο παρατηρητής είτε το προς αποτύπωση αντικείμενο κινείται. Η έννοια του στερεοζεύγους αναφέρεται σε δύο φωτογραφίες που έχουν ληφθεί από διαφορετικά σημεία αλλά παρουσιάζουν επικάλυψη. Το ποσοστό της επικάλυψης επιλέγεται συνήθως στο 60% κατά μήκος και 35% κατά πλάτος, με αποτέλεσμα να μπορεί να αποδοθεί η κοινή επικαλυπτόμενη περιοχή τρισδιάστατα.

3.4.2 Δομή από Κίνηση (SfM)

Η βασική ιδέα πίσω από την τρισδιάστατη ανακατασκευή με τις τεχνικές Structure from Motion (SfM) κατά τους Suma et al. (2016) είναι η λήψη πολλαπλών εικόνων ενός συγκεκριμένου αντικειμένου από διαφορετικές οπτικές γωνίες και στη συνέχεια η ανακατασκευή του αντικειμένου σε έναν τρισδιάστατο χώρο με τριγωνισμό της ακολουθίας εικόνων που ταιριάζουν με τα χαρακτηριστικά (Hartley and Zisserman, 2003). Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα για την απόκτηση ενός τρισδιάστατου αντικειμένου ξεκινώντας από εικόνες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: ανίχνευση, περιγραφή και εξαγωγή σημείων κλειδιών, αντιστοίχιση εικόνων και εκτίμηση της θέσης της κάμερας με χρήση προσαρμογής δέσμης. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένα αραιό τρισδιάστατο νέφος σημείων, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να πυκνωθεί περαιτέρω χρησιμοποιώντας τεχνικές Multi-View Stereo (MVS).

Η μέθοδος της «Δομή από Κίνηση» (Structure-from-Motion-SfM) είναι μια γενίκευση και αυτοματοποίηση της "Στερεοσκοπικής Όρασης" που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της Όρασης Υπολογιστών και επεξεργασίας εικόνας για την δημιουργία και ανακατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων (Βρεττού, 2016). Στην SfM οι εικόνες λαμβάνονται από μια ελεύθερη κινούμενη κάμερα συνδυάζοντας πολλές εικόνες ταυτόχρονα και όχι αυστηρά ζεύγη εικόνων. Η γνώση της γεωδαιτικής θέσης της κάμερας κατά την λήψη δεν είναι απαραίτητη. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα πλήθος μη προσανατολισμένων εικόνων από τυχαία σημεία λήψης για να παραχθεί ένα πυκνό νέφος σημείων που εκφράζει την

τριδιάστατη γεωμετρία ενός αντικείμενου. Με τα ομόλογα σημεία στα επικαλυπτόμενα τμήματα των εικόνων υπολογίζονται οι παράμετροι του εσωτερικού και σχετικού προσανατολισμού της κάμερας (Robertson and Cipolla, 2009). Ακολουθείται, επίσης και η μέθοδος των δεσμών για να βελτιώσουν την ακρίβεια της θέσης της κάμερας και να μειώσουν το σφάλμα επαναπροβολής [reprojection error] (Engels et al., 2006). Μέσα από μια σειρά διαδικασιών που αναφέρονται παρακάτω, παράγεται ένα μοντέλο αυθαίρετης θέσης, κλίμακας και προσανατολισμού, όπως το αποτέλεσμα του σχετικού προσανατολισμού κατά την στερεοσκοπική μέθοδο. Τα στοιχεία υπολογίζονται επαναληπτικά με τη χρήση μη γραμμικής τεχνικής ελαχίστων τετραγώνων (Βέργος, 2015). Χρησιμοποιώντας έναν ελάχιστο αριθμό σημείων ελέγχου με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες και μέσω ενός μετασχηματισμού ομοιότητας δίνεται κλίμακα και προσανατολισμός στο μοντέλο. Η ανάγκη πλεονασματικών παρατηρήσεων (σημείων με γνωστές συντεταγμένες) με καλή κατανομή στο χώρο διατηρείται και σε αυτή τη μέθοδο, χωρίς ωστόσο τον ίδιο βαθμό αυστηρότητας όπως στην στερεοσκοπική.

Η διαδικασία SfM δεν είναι απλώς μια τεχνική, κατά την Τζωρτζάκου (2022), αλλά το αποτέλεσμα ανάπτυξης αλληλοκαλυπτόμενων επιστημονικών πεδίων που συνδυάζει παραδείγματος χάρη μεθόδους φωτογραμμετρίας και αλγορίθμους όρασης υπολογιστών, με σκοπό να αυτοματοποιηθεί η απόδοση ενός τρισδιάστατου αντικείμενου από μία σειρά επικαλυπτόμενων εικόνων. Ουσιαστικά, λειτουργεί σύμφωνα με τις βασικές αρχές της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας, που σημαίνει, σε γενικές γραμμές, ότι η τρισδιάστατη ανακατασκευή ενός μοντέλου στηρίζεται στη δημιουργία στερεοζευγών από διαδοχικές εικόνες. Ωστόσο, διαφοροποιείται σε σχέση με την κλασική φωτογραμμετρική διαδικασία σε τρία βασικά σημεία :

- α. η αναγνώριση χαρακτηριστικών σημείων και η συνταύτιση των εικόνων γίνονται αυτόματα, με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων ακόμα και αν οι εικόνες έχουν διαφορετική κλίμακα και προσανατολισμό κατά λήψης, προσανατολισμό ή ενός αντικείμενου,
- β. η λειτουργία των αλγορίθμων δεν απαιτεί απαραίτητα τη γνώση της απόλυτης θέσης της κάμερας ή την ύπαρξη φωτοσταθερών σημείων και
- γ. η βαθμονόμηση της μηχανής γίνεται αυτόματα κατά τη διάρκεια εφαρμογής της διαδικασίας SfM από τους αντίστοιχους αλγορίθμους. Ειδικότερα, ο εσωτερικός και εξωτερικός προσανατολισμός εκτελούνται αυτόματα με τη μέθοδο δεσμών (Bundle adjustment).

Η μέθοδος επίλυσης κατά δέσμες επιδιώκει να εντάξει δύο ή περισσότερες δέσμες εικόνων απευθείας σε ενιαίο σύστημα αφού λάβει υπόψη τα κοινά τους σημεία. Αυτό σημαίνει ότι πραγματοποιείται ταυτόχρονος προσανατολισμός των εικόνων μεταξύ τους αλλά και ως προς το σύστημα. Στην πιο απλή της μορφή, η διαδικασία SfM περιλαμβάνει δύο εικόνες από τις οποίες ανακατασκευάζεται το 3D μοντέλο του αντικείμενου. Αυτό διαφέρει από το πραγματικό αντικείμενο κατά έναν τρισδιάστατο μετασχηματισμό ομοιότητας με επτά βαθμούς ελευθερίας (τρεις στροφές, τρεις μεταθέσεις και μία κλίμακα) και εκφράζεται από την συνθήκη συγγραμμικότητας (Καρράς, 1998). Βασική εξίσωση της εν λόγω διαδικασίας, περιγράφει μαθηματικά την ευθεία κάθε οπτικής ακτίνας στον χώρο. Σύμφωνα με τη συνθήκη συγγραμμικότητας το διάνυσμα που συνδέει το κέντρο προβολής της εικόνας με το σημείο στο χώρο, καθώς και το διάνυσμα που συνδέει το κέντρο προβολής με την εικόνα του σημείου πρέπει να είναι συνευθειακά.

Η ανακατασκευή ενός αντικειμένου από εικόνες μέσω της κλασικής φωτογραμμετρικής διαδικασίας θεωρείτο μέχρι πρότινος δύσκολη και επίπονη κυρίως λόγω της ανάγκης χειρωνακτικής παρέμβασης ενός χειριστή στα επιμέρους στάδια. Σήμερα, προσθέτει η Τζωρτζάκου (2022), η διαδικασία αυτή έχει απλοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό με τη συνδρομή της επιστήμης της Όρασης Υπολογιστών η οποία έχει αυτοματοποιήσει πολλά από τα στάδια υλοποίησης (διαδικασία SfM) με την εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων. Και παρόλο που η συνεχής εξέλιξη των αλγορίθμων σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα πληθώρας λογισμικών καθιστούν την τρισδιάστατη ανακατασκευή ενός αντικειμένου να φαίνεται μια απλή και εύκολη διαδικασία, η γνώση των βασικών αρχών που διέπουν την εν λόγω διαδικασία είναι απαραίτητη, προκειμένου το τελικό αποτέλεσμα να διαθέτει υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και οπτική πιστότητα, εξασφαλίζοντας την αποφυγή φαινομένων αστοχίας ή παρερμηνείας σε περιπτώσεις που αυτό χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω επιστημονική έρευνα.

Για τη επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, σύμφωνα με τη Βρεττού (2016), διατίθενται διάφορα ελεύθερα και εμπορικά λογισμικά Όρασης Υπολογιστών (Computer Vision - CV) ή Φωτογραμμετρίας (στερεοσκοπική φωτογραμμετρία) που βασίζονται σε αλγορίθμους των μεθόδων Structure from Motion (SfM) και Dense MultiView 3D Reconstruction (DMVR). Και τα δύο χρησιμοποιούν αλγορίθμους για τον εντοπισμό και τη συσχέτιση ομόλογων σημείων σε μια σειρά επικαλυπτόμενων εικόνων για την παραγωγή του νέφους σημείων, τη δημιουργία δικτύου τριγώνων [πολυγωνικό μοντέλο-mesh] μεταξύ των σημείων και την απόδοση χρώματος στην επιφάνεια των τριγώνων. Η διαφορά των δύο ομάδων λογισμικών είναι ότι στην περίπτωση των φωτογραμμετρικών λογισμικών SfM δίνεται μεγαλύτερος έλεγχος παρέμβασης στον χρήστη και εκδίδεται φύλλο ανάλυσης σφαλμάτων για κάποιες από τις παραπάνω διαδικασίες. Και οι δύο παραπάνω δυνατότητες είναι αναγκαίες για τον έλεγχο της γεωμετρίας του τελικού προϊόντος. Ενώ η τεχνική SfM στην ουσία αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο βήμα της ροής εργασιών που υπολογίζει τον εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων και τη βαθμονόμηση της μηχανής αποδίδοντας ένα αραιό νέφος σημείων (sparse point cloud) του αντικειμένου, στον όρο συμπεριλαμβάνεται και το στάδιο απόδοσης πυκνού νέφους σημείων (dense point cloud) μέσω κατάλληλων αλγορίθμων όπως ο MVS - Multi View Stereo.

3.5 Ερευνητικές εφαρμογές

Η επισκόπηση της βιβλιογραφίας παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τις δυνατότητες των σύγχρονων τοπογραφικών μεθόδων, την ιστορική πορεία εξέλιξής τους και τις διαφορετικές εφαρμογές τους -ιδιαίτερα των προϊόντων ψηφιοποίησης. Παρατηρείται ότι χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι στην αξιολόγηση, τεκμηρίωση και διαχείριση των πολιτιστικών αγαθών (Baltsavias et al., 2005; Böhler and Heinz, 1999; Ioannides et al., 2010; Kraus, 2003). Απλές τοπογραφικές, με απευθείας μετρήσεις πάνω στο αντικείμενο σε τοπικό σύστημα αναφοράς (με αλφαδολάστιχο, κλισιόμετρο, μετροταινία κ.ά.) χρησιμοποιούνται ακόμα στους κλάδους της αρχαιολογίας και αρχιτεκτονικής και μπορεί να είναι επαρκείς και συνιστώμενες όταν το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του αντικειμένου είναι περιορισμένα και η ακρίβεια και ο έλεγχος της δεν είναι πρωταρχικής σημασίας.

Σύμφωνα με τη Βρεττού (2016), συχνά απαιτείται λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε έργου, αλλά και για τη βέλτιστη αξιοποίηση πόρων, ο συνδυασμός διαφορετικών μεθόδων συλλογής δεδομένων, δηλαδή συνδυασμός χρήσης σαρωτών λέιζερ και φωτο-

γραμμαιτρικών εφαρμογών (Agosto et al., 2005; El-Hakim et al., 2007; Garfella Rubio et al., 2015; Gianniou et al., 2007; Kersten et al., 2015a,b; Landes et al., 2007; Rodríguez Navarro et al., 2015). Οι επίγειες γεωδαιτικές μετρήσεις για την ίδρυση ενός τρισδιάστατου γεωδαιτικού δικτύου παραμένουν αναντικατάστατες, ενώ υπάρχει πλέον η υποστήριξη των δορυφορικών εφαρμογών τους (GNSS) και βελτιωμένων σχεδιαστικών πακέτων (Chiabrando et al., 2009; Grussenmeyer and Jasmine, 2003; Pinte et al., 2015). Παραδοσιακά προϊόντα της αναλυτικής φωτογραμμετρίας, όπως οι αναγωγές εικόνων, συνεχίζουν και χρησιμοποιούνται και αποτελούν πολύτιμο εργαλείο σε κλάδους της αρχαιολογίας και των ιστορικών μελετών. Ο τρόπος παραγωγής τους, γίνεται πιο εύκολος και ταχύτερος ενώ παρέχεται η δυνατότητα αναπτυγμάτων από πιο σύνθετες μαθηματικές επιφάνειες (Agosto et al., 2005; C and C, 1999; Chazaly, 2001; Pinte et al., 2015; Vidman et al., 2011). Η εξέλιξη των λογισμικών διευκολύνει τη χρήση ιστορικών εικόνων και σχεδίων σε διάφορες εφαρμογές όπως για την ανασύνθεση της μορφής ενός κατεστραμμένου μνημείου ή για την ερμηνεία του σε σχέση με την τοπογραφία της περιοχής και τα πρωτότυπα κατασκευαστικά σχέδια του (Grussenmeyer and Jasmine, 2003; Pirinu, 2015; Ringle et al., 2005).

Όπως έχει αναλυθεί από την Βρεττού (2016), η σάρωση με laser έχει ευρύτατη εφαρμογή (Fiani and Siani, 2005), (Τζουβάρας ανδ Κιάκας, 2007), (Barreau et al., 2014; Fangi et al., 2013; Garfella Rubio et al., 2015; Křemen et al., 2011; Merlo and Navarro, 2012), (Πετρίδης, 2015). Όταν η αποτύπωση με σαρωτή laser δεν μπορεί να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα, λόγω εν γένει αδυναμιών της τεχνικής ή του απρόσιτου της θέσης της κατασκευής, χρησιμοποιείται αποκλειστικά αυτοματοποιημένη φωτογραμμετρία (Almagro and Orihuela, 2015; Rodríguez-Navarro and Verdiani, 2013). Ιδιαίτερα για την τελευταία περίπτωση κρίνεται αναγκαία η χρήση εναέριων μέσων αποτύπωσης (Almagro and Orihuela, 2015; El-Hakim et al., 2007; Grussenmeyer and Jasmine, 2003; Mayer et al., 2003; Rodríguez Navarro et al., 2015), (Σουγλέ, 2010). Σε αρκετές δημοσιεύσεις επιχειρείται σύγκριση των μεθόδων και έλεγχος της ακρίβειας μεταξύ των εναλλακτικών τεχνικών και των προϊόντων τους (El-Hakim et al., 2007; Fangi et al., 2013; Gianniou et al., 2007; Kersten et al., 2015b; Landes et al., 2007; Mayer et al., 2003), (Παυλίδης, 2011). Οι περισσότερες καταλήγουν στο ότι οι δυο τεχνικές εξασφαλίζουν την επιθυμητή ακρίβεια, ενώ άλλες επισημαίνουν ότι τα προϊόντα του επίγειου σαρωτή laser προσφέρουν καλύτερη ακρίβεια (Παυλίδης, 2011), (Kersten et al., 2015a). Η ακρίβεια της αυτοματοποιημένης φωτογραμμετρίας παραμένει ανοιχτό ζήτημα καθώς δεν μπορούν να αναγνωριστούν οι αλγόριθμοι που έχουν επιλεγεί στα εμπορικά λογισμικά που εφαρμόζουν τεχνικές όρασης υπολογιστών (CV) και τα οποία προφανώς δεν είναι ανοιχτού κώδικα και πολύ περισσότερο δεν επιτρέπουν να διατηρηθεί εύκολα ο έλεγχος κατά την παραγωγή των προϊόντων σε κάθε στάδιο της διαδικασίας, κάτι που συνέβαινε παλαιότερα με την αναλυτική φωτογραμμετρία.

Βιβλιογραφικά αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με έρευνα-σύγκριση της Βρεττού (2016) μεταξύ (σχεδόν) φωτογραμμετρικών λογισμικών [Agisoft-Photoscan (που αργότερα μετονομάστηκε σε Metashape) - Pix4UAV] και λογισμικών όρασης υπολογιστών [Erdas-LPS, EyeDEA (Univ. of Parma)] διαπιστώθηκε ότι και οι δύο κατηγορίες λογισμικών δίνουν πυκνά νέφη σημείων, ψηφιακά μοντέλα επιφανείας (DSM) και στερεομοντέλα με εξωτερικό προσανατολισμό σε καλή ποιότητα. Τα λογισμικά όρασης υπολογιστών είναι απολύτως αυτοματοποιημένα, αλλά απαιτούν περισσότερο χρόνο επεξεργασίας. Τα φωτογραμμετρικά λογισμικά έδωσαν μικρότερα σφάλματα RMSE στα σημεία ελέγχου, ίσως επειδή προβλέπεται μεγαλύτερος έλεγχος του χρήστη. Στην περίπτωση ορθοει-

κώνων και DSM, το Photoscan (Metashape) έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα ειδικά σε σκιασμένες περιοχές (Gini et al., 2013). Σε σύγκριση των παραγόμενων mesh μεταξύ του Agisoft Photoscan (Metashape) και το Autodesk 123D Catch δεν διαπιστώθηκαν σημαντικές (Rodríguez Navarro et al., 2015). Η εργασία των Koutsoudis et al. (2014) στην οποία συγκρίνεται το τρισδιάστατο mesh που παράγεται με laser scanner με προϊόντα που έχουν παραχθεί από το Photoscan Agisoft καταλήγει ότι το μοντέλο SfM δεν περιέχει αναλογικά σφάλματα (proportional errors). Σύγκριση νεφών σημείων και DSM που παρήχθησαν χρησιμοποιώντας τα λογισμικά Bundler/PMVS2, Visual SfM, Autodesk Web Service, 123DCatch beta, και Agisoft PhotoScan κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα προϊόντα του επίγειου σαρωτή λέιζερ πετυχαίνουν καλύτερη ακρίβεια (Kersten et al., 2015a). Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης αποτύπωσης χρησιμοποιήθηκε το διαθέσιμο λογισμικό Agisoft Photoscan (Metashape), λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς με τους οποίους συνοδεύεται.

Παρακάτω έχουν αποδοθεί σε γενικές γραμμές οι αλγόριθμοι που τρέχουν σε κάθε ένα από τα στάδια επεξεργασίας του Agisoft Photoscan (Metashape), ώστε να ερμηνεύονται καλύτερα τα όρια κάθε διαδικασίας και οι πιθανές πηγές προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν (Βρεττού, 2016). Καθώς δεν πρόκειται για ανοιχτά λογισμικά μόνο εικασίες μπορούσαν να γίνουν για τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούν. Τα διαδοχικά βήματα που ακολουθούνται στο Photoscan (Metashape) για την παραγωγή των προϊόντων περιλαμβάνουν τα εξής:

- Εύρεση ομόλογων σημείων: Κατά το πρώτο στάδιο το PhotoScan (Metashape) χρησιμοποιεί αλγόριθμους τύπου SIFT για να ανιχνεύσει ομόλογα σημεία στις εικόνες. Η αντιστοίχιση καθίσταται εφικτή παρά τις πιθανές διαφορές στη φωτεινότητα των εικόνων, στην κλίμακα και τις στροφές κάθε εικόνας, ή στην έντονη εκτροπή αναγλύφου στην περιοχή λήψης. Ο αλγόριθμος καταλήγει στη δημιουργία ενός διανύσματος περιγραφικών χαρακτηριστικών για κάθε σημείο ενδιαφέροντος (detector). Οι πίνακες διανυσμάτων χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την συνταύτιση των σημείων (Αδάμ, 2011).
- Εύρεση παραμέτρων εσωτερικού, σχετικού και εξωτερικού προσανατολισμού: Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο τύπου Bundler, δηλαδή χρησιμοποιεί τη μέθοδο των δεσμών για να αναπλάσει την εσωτερική γεωμετρία της κάμερας και τη θέση της στο χώρο τη στιγμή της λήψης, δηλαδή υπολογίζει τις τιμές του εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής, του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων.
- Ανακατασκευή επιφανειών (Dense surface reconstruction): Σε αυτό το βήμα χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι επεξεργασίας, όπως ο τριγωνισμός Delaunay ή η ανακατασκευή επιφάνειας Poisson κ.α. για να συσταθούν τριγωνικές και πολυγωνικές επιφάνειες που συνθέτουν έναν TIN μοντέλο.
- Απόδοση υφής (Texture mapping): το PhotoScan (Metashape) παραμετροποιεί μια επιφάνεια, «τεμαχίζοντας» την επιφάνεια του αντικειμένου και «αναμειγνύοντας» τα τεμάχια με τις εικόνες για να αποδώσει την υφή του αντικειμένου.

SLAM = Simultaneous Localization and Mapping (Ταυτόχρονη εύρεσης θέσης και δημιουργία χάρτη)

Σε εφαρμογές που χρησιμοποιείται ένα ρομπότ σε μια αχαρτογράφητη περιοχή με σκοπό την αποτύπωση της από το ίδιο, παρουσιάζεται ο εξής προβληματισμός: Πως

είναι δυνατόν να τοποθετηθεί ένα κινούμενο ρομπότ σε άγνωστη θέση σε ένα άγνωστο περιβάλλον και να δημιουργήσει σταδιακά έναν χάρτη του περιβάλλοντος αυτού, ενώ ταυτόχρονα υπολογίζει τη θέση του εντός του χάρτη. Το πρόβλημα χαρτογράφησης και ο ταυτόχρονος εντοπισμός της θέσης του ρομπότ, αντιμετωπίζεται με την μέθοδο SLAM. Τα υποπροβλήματα που απαιτείται να υπερκεραστούν είναι αρχικά, το γεγονός ότι για την εκτίμηση της θέσης του ρομπότ, απαιτείται ένας χάρτης. Επίσης για τη δημιουργία ενός χάρτη απαιτείται η γνώση της θέσης του ρομπότ. Επίσης ως δεδομένα εισόδου λαμβάνονται οι πραγματικές μετρήσεις (ανάλογα τον αισθητήρα) και οι εντολές κίνησης. Ακολουθεί η διάκριση βάσει των μέσων που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές.

Laser scanner

Χρήση αισθητήρα laser για τη δημιουργία, ανανέωση του χάρτη. Τον εντοπισμό της θέσης του ρομπότ, χρησιμοποιώντας τις αποστάσεις του ρομπότ από τα αντικείμενα του χώρου, που εκτιμώνται από τον αισθητήρα laser scanner. Η χρήση του δεν είναι δυνατή σε όλες τις εφαρμογές καθώς οι συνθήκες και το περιβάλλον, καθιστούν συχνά το κόστος πολύ υψηλό, παρά την μεγάλη ακρίβεια που διαθέτει.

Έτσι οι ακόλουθες 3 κατηγορίες που παρουσιάζονται (Stereo camera, RGB-D camera και RGB camera) χαρακτηρίζονται ως Visual SLAM, διότι ως αισθητήρας μέτρησης λαμβάνονται οι κάμερες:

Stereo camera

Επιτρέπει στο ρομπότ να γνωρίζει την απόσταση από τα αντικείμενα του χώρου χρησιμοποιώντας παρόμοια τεχνική με αυτήν των ανθρώπινων ματιών. Δηλαδή πρόκειται για ένα σετ-καμερών. Διαθέτει, επομένως δύο ή περισσότερους φακούς με ξεχωριστό αισθητήρα εικόνας για κάθε φακό. Αυτό επιτρέπει εμμέσως στην κάμερα να υπολογίζει δυνατότητα εκτίμησης της 3^{ης} διάστασης, προσομοιώνοντας την ανθρώπινη όραση.

RGB-D camera (depth camera)

Σε κάθε εικονοπηφίδα αντιστοιχεί και τιμή βάθους (depth).

Structured-light camera (Κάμερα δομημένου φωτός): Εκπέμπει υπέρυθρο παλμό λέιζερ που δημιουργεί ένα μοτίβο το οποίο προβάλλεται στον στόχο παραμορφωμένο. Οι συγκρίσεις μεταξύ του πρωτότυπου και του προβαλλόμενου (παραμορφωμένου) μοτίβου επιτρέπουν τον υπολογισμό τιμών βάθους.

Time-of-flight camera: Στηρίζεται στη γνώση της ταχύτητας του φωτός στον αέρα και υπολογίζει τις αποστάσεις από τα αντικείμενα (το βάθος - depth) εκπέμποντας ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα στη σκηνή και υπολογίζοντας τον χρόνο που έκανε για να ληφθεί από τον δέκτη (receiver). (π.χ. Kinect)

Active stereoscopic camera: Συνδυασμός stereo κάμερας και σαρωτή δομημένου φωτός ή laser σε δύο κάμερες και προβολέας μεταξύ τους, συνήθως στο εγγύς υπέρυθρο, που εκπέμπει μοτίβο φωτός συντελώντας στη διαδικασία της στερεο-συνταύτισης σε περιπτώσεις μικρής εναλλαγής της υψής.

RGB camera Περισσότερα προβλήματα: η φωτεινότητα του χώρου επηρεάζει τα αποτελέσματα

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογή της υπολογιστικής φωτογραφίας στη σύγχρονη φωτογραμμετρία

Η υπολογιστική φωτογραφία μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο στις φωτογραμμετρικές εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν τη μέτρηση και απεικόνιση αντικειμένων και επιφανειών από φωτογραφίες. Οι τεχνικές υπολογιστικής φωτογραφίας μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση της ποιότητας και ακρίβειας των μετρήσεων φωτογραμμετρίας βελτιώνοντας την ποιότητα και την ανάλυση των φωτογραφιών. Ένα παράδειγμα της χρήσης της υπολογιστικής φωτογραφίας στη φωτογραμμετρία είναι η χρήση της υψηλού δυναμικού εύρους (HDR) εικόνας. Η απεικόνιση υψηλού δυναμικού εύρους (HDRi) είναι μια τεχνική που επιτρέπει την απόκτηση, αποθήκευση και απεικόνιση ενός μεγαλύτερου εύρους τιμών φωτεινότητας από ό,τι επιτρέπουν οι κανονικές (ή χαμηλού δυναμικού εύρους LDR) φωτογραφικές μηχανές (Banterle, Artusi, Debattista, & Chalmers, 2011), κάτι που μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην φωτογραμμετρική διαδικασία για την αναπαράσταση περιβαλλόντων με ιδιαίτερες συνθήκες φωτισμού. Με τη λήψη πολλαπλών εικόνων σε διαφορετικά επίπεδα έκθεσης και τη συνένωσή τους σε μια μόνο εικόνα, η HDR φωτογραφία μπορεί να παράγει περισσότερες λεπτομερείς και ακριβείς μετρήσεις και να αξιοποιηθούν εν συνεχεία από φωτογραμμετρικές μεθόδους. Ένα άλλο παράδειγμα της χρήσης της υπολογιστικής φωτογραφίας είναι η τεχνική που περιλαμβάνει τη λήψη πολλαπλών εικόνων με διαφορετικές αποστάσεις εστίασης και τη συνένωσή τους σε μια μόνο εικόνα, αυξάνοντας το βάθος πεδίου εστίασης. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο στις φωτογραμμετρικές εφαρμογές όπου είναι σημαντικό να ληφθούν λεπτομερείς πληροφορίες σε όλη την επιφάνεια ενός αντικειμένου ενδιαφέροντος.

4.1 Σύγχρονη Φωτογραμμετρία

Φωτογραμμετρία είναι η επιστήμη που μελετά τεχνικές που αποσκοπούν στην απόδοση της μορφολογίας αντικειμένων του τρισδιάστατου χώρου από μετρήσεις σε εικόνες με όσο το δυνατό πιο πιστό τρόπο (ISPRS, 2022; Πέτσα, 2000). Η σύγχρονη φωτογραμμετρία μπορεί να επιβοηθηθεί από τεχνολογικά εργαλεία που εμπίπτουν στην υπολογιστική φωτογραφία, όπως η όραση υπολογιστών.

Η όραση υπολογιστών (ή μηχανική όραση ή υπολογιστική όραση) είναι πεδίο της επι-

στήμης των υπολογιστών που στοχεύει στο να επιτρέπει στους υπολογιστές να βλέπουν, να αναγνωρίζουν και να επεξεργάζονται εικόνες με τον ίδιο τρόπο που κάνει και η ανθρώπινη όραση. Μαθηματική τεχνική για την αυτόματη ανάκτηση του τρισδιάστατου σχήματος και εμφάνισης αντικειμένων σε εικόνες

Με την όραση υπολογιστών, γίνεται δυνατός ο εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων με αυτοματοποιημένες μεθόδους γίνεται χρήση Feature-Extractor αλγορίθμων. Σε κάθε φωτογραφία αναζητούνται σημεία που ξεχωρίζουν με τη βοήθεια αλγορίθμων όπως SHIFT, SURF, Binary Features κλπ. Πρόκειται για διακριτά τοπικά σημεία κατόπιν ανάλυσης και αναζήτησης επί της εικόνας ως προς τις τιμές των εικονοσυντεταγμένων δηλαδή την κατανομή και ένταση του φωτός. Είναι ιδιαίτερα πιθανό να βρίσκονται πάνω σε κάποιο αντικείμενο, γωνία ή εκεί που υπάρχει μεγάλη διαφορά τιμών (contrast). Τα key-points που είναι σημεία ενδιαφέροντος. Αυτά τα στοιχεία μαρκάρονται, αξιολογούνται και βάσει της ξεχωριστής υψής και των ιδιοτήτων ιδιαίτερης μορφής ικανό ώστε να ξεχωρίσει από τα κοντινά μοτίβα αλλά και ως προς την μοναδικότητα τους τοπικά και γενικά. Επίσης σε επόμενο στάδιο προκύπτουν τα Tie points, δηλαδή τα σημεία σύνδεσης, που είναι επιλεγμένα σημεία ενδιαφέροντος που απαντώνται σε δύο ή περισσότερες εικόνες. Συνεπώς, σημεία από το τρισδιάστατο χώρο επισημαίνονται στο δισδιάστατο επίπεδο της εικόνας και μπορούν να εφαρμοστούν οι φωτογραμμετρικοί υπολογισμοί. Σκοπός είναι να ξανά δημιουργηθούν 3D εικόνες τους σε κάποιο μοντέλο όπου θα συνακολουθήσουν με την σειρά και τα υπόλοιπα σημεία. Η χρήση αλγορίθμων που ανιχνεύουν και επιλύουν πολυδιάστατα γίνεται χάριν της όρασης υπολογιστών που έχει αναπτύξει τους κατάλληλα λογισμικά που είναι σε θέση να εκτελεστούν επιλύοντας εξισώσεις σε υπολογιστές αντίστοιχων δυνατοτήτων.

Το πως απεικονίζονται τα αντικείμενα έχει μεγάλη σημασία για την ποιότητα της απεικόνισης. Η ποιότητα των εικόνων καθώς και οι λεπτομέρειες με τις οποίες καταγράφεται η σκηνή έχουν σημαντικό ρόλο. Κατά την διάρκεια της φωτογράφισης τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν καθορίζουν και τις συνεπακόλουθες διαδικασίες και φυσικά το τελικό προϊόν. Η ενίσχυση και η αξιοποίηση των ήδη υπάρχοντων μέσων απεικόνισης με συνδυασμό των συντελεστών μπορεί να επιτρέψει βελτίωση. Η είσοδος των τεχνικών της υπολογιστικής φωτογραφίας υπό συνθήκες να ενισχύει τόσο την εικόνα και ενός έργου όσο και την ακρίβεια. Αξιοποιώντας δεδομένα που έχουν ληφθεί και με την βοήθεια των τεχνικών υπολογιστικής φωτογραφίας επιτυγχάνονται βελτιωμένα αποτελέσματα αφού αξιοποιούνται περαιτέρω δυνατότητες συνεργασιών και ξεπερνιούνται τα φυσικά όρια που διέπουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και κατ' επέκταση την απεικόνιση των αντικείμενων του χώρου στην φωτογραφία ή στην σύνθεση αυτών.

Η δημιουργία ενός συνόλου σημείων στο χώρο (με προσανατολισμό κ κλίμακα), στις φωτογραμμετρικές εφαρμογές, προϋποθέτει την είσοδο στοιχείων χωρικής αναφοράς, άμεσα ή έμμεσα, σε κάποιο στάδιο της διαδικασίας (όταν επιθυμείται φυσικά γεωαναφορά). Πολλές μέθοδοι όπως περιγράφεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η επιλογή χαρακτηριστικών σημείων γινόταν χειροκίνητα σε αρκετές εφαρμογές, ιδιαίτερα για χαρακτηριστικά σημεία, σύνδεσης, γνωστών συντεταγμένων, σημεία ελέγχου. Η όραση υπολογιστών συμβάλει στον σχηματισμό 3D Geometry Shapes και φωτογραμμετρικές απεικονίσεις μεταφέροντας την πληροφορία από τις εικόνες στο τρισδιάστατο χώρο. Η δυνατότητες που παρέχει το Computer Graphic είναι η σύνθεση πληροφοριών τρισδιάστατων απεικονίσεων και οντοτήτων του χώρου και η προβολή τους σε μορφή εικόνας.

Στις μέρες μας, οι δυνατότητες που προσφέρουν τα διάφορα μέσα με εργαλεία, λογισμικά και η συνεχής αύξηση της υπολογιστικής ισχύς επιτρέπουν την επεξεργασία των δεδομένων με εξελιγμένες τεχνικές που προέρχονται από την έμπρακτη εφαρμογή μεθόδων αλληλοεπικαλυπτόμενων επιστημονικών πεδίων. Βασικές φυσικομαθηματικές αρχές αιώνων ενισχύονται με την αξιοποίηση καινούργιων μεθόδων. Η ανάπτυξη των προγραμματιστικών εφαρμογών συμβάλλει σημαντικότερα στην διαχείριση νέων τύπων δεδομένων με διαρκώς αυξανόμενων (αλμάτων) σε όγκο και ταχύτητα τόσο κατά την επεξεργασία όσο και προηγουμένως στην προσβασιμότητα αλλά και μετέπειτα στην διάδοση προς τους υπόλοιπους.

Η ανάπτυξη των φωτογραμμετρίας συμπορεύεται με την ανάπτυξη των τεχνολογικών αλλά και θετικών επιστημών. Η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων περνάει πρωτίστως από αρκετά βήματα όπως η αυτοματοποιημένη εύρεση ομόλογων σημείων μεταξύ ζευγών εικόνων, την αναζήτηση χαρακτηριστικών σημείων σύνδεσης, σημεία κλειδιά.

4.2 Υψηλό Δυναμικό Εύρος (HDR)

Σύμφωνα με Suma et al. (2016), οι φωτογραμμετρικές μέθοδοι δεν είναι πάντοτε αποτελεσματικές στην ανακατασκευή εικόνων υπό δύσκολες συνθήκες φωτισμού, καθώς σημαντικές γεωμετρικές λεπτομέρειες ενδέχεται να μην έχουν καταγραφεί με ακρίβεια σε υπό ή υπέρ-εκτεθειμένες περιοχές της εικόνας. Η απεικόνιση HDR προσφέρει τη δυνατότητα να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα περιβάλλοντα πολιτιστικής κληρονομιάς (ΠΚ), τα οποία συχνά χαρακτηρίζονται από υλικά με υψηλή αντανάκλαση, παρουσία σκιών και φωτεινών περιοχών. Με ένα τόσο μεγάλο δυναμικό εύρος καμία παραδοσιακή κάμερα δεν μπορεί να αποτυπώσει όλες τις λεπτομέρειες, όπως για παράδειγμα τοίχους και σχήμα των παραθύρων και τοιχογραφίες. Μετά τη λήψη, κάθε εικόνα στην ακολουθία έχει καλά, υποεκτεθειμένα και υπερεκτεθειμένα εικονοστοιχεία. Η εικόνα HDR μπορεί στη συνέχεια να δημιουργηθεί με τη συγχώνευση των φωτογραφιών αυτών σε μία εικόνα, επιλέγοντας μόνο τα καλύτερα εκτεθειμένα εικονοστοιχεία. Αυτό επιτυγχάνεται με την εξαγωγή της συνάρτησης απόκρισης της κάμερας και στη συνέχεια με τη στάθμιση της συνεισφοράς κάθε εικονοστοιχείου στην τελική εικόνα HDR.

Στις φωτογραμμετρικές εφαρμογές, επισημαίνεται από την Ntregka et al. (2013), οι εικόνες πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας και να αναπαριστούν πιστά τη σκηνή που απεικονίζουν. Για εφαρμογές τεκμηρίωσης πολιτιστικής κληρονομιάς, όπου κατά τη λήψη εικόνων οι συνθήκες φωτισμού μπορεί να είναι δύσκολες, η τεχνολογία HDR μπορεί να συμβάλει θετικά στην απόκτηση εικόνων καλύτερης ποιότητας και εν συνεχεία στη δημιουργία ορθοφωτογραφιών χωρίς ραδιομετρικά προβλήματα. Για την ψηφιακή καταγραφή, αποτελεσματική λύση είναι οι εικόνες υψηλού δυναμικού εύρους (HDRI). Αυτές οι εικόνες δημιουργούνται με τη συγχώνευση πολλαπλών εικόνων της ίδιας σκηνής, καθεμία από τις οποίες έχει ληφθεί με διαφορετική ταχύτητα κλείστρου και έτσι παρέχεται ένα καλύτερο εύρος από εικόνες με διαφορετικές εκθέσεις. Αυτή η ειδική λήψη εικόνων απαιτεί συνήθως εκτεταμένη μνήμη αποθήκευσης λόγω του αριθμού των εικόνων που λαμβάνονται και, κατά προτίμηση, μια φωτογραφική μηχανή με λειτουργίες Auto Bracketing Exposure και Aperture Priority, οι οποίες επιτρέπουν τη λήψη μιας ακολουθίας "στοιβαγμένων" (bracketed) εκθέσεων με διαφορετική ταχύτητα κλείστρου και την επιλογή του διαστήματος έκθεσης (Nightingale, 2012). Μια εικόνα HDR υπερβαίνει την απώλεια πληροφοριών που προκαλούν οι δυσμενείς συνθήκες

φωτισμού.

4.3 HDR και απεικόνιση

Οι εικόνες πολλαπλής έκθεσης συγχωνεύονται και δημιουργούν μια μορφή εικόνας HDR βάθους 32 bit, γνωστή και ως χάρτης ακτινοβολίας, όπως αναφέρεται από την Ntregka et al. (2013). Για την επίτευξη χαρτογράφησης ακτινοβολίας, δηλαδή την απόδοση τιμών ακτινοβολίας σε κάθε εικονοστοιχείο, προτιμάται συνήθως η εργασία των Debevec & Malik, ο αλγόριθμος των οποίων λαμβάνει υπόψη την αμοιβαιότητα των τιμών και με τη χρήση φωτογραφιών διαφορετικής έκθεσης ανακτά τη συνάρτηση απόκρισης της διαδικασίας απεικόνισης, μέχρι έναν συντελεστή κλίμακας. Μετά την ανάκτηση της καμπύλης απόκρισης και τη μετατροπή των τιμών των εικονοστοιχείων σε σχετικές τιμές ακτινοβολίας, χρησιμοποιούνται όλες οι διαθέσιμες εκθέσεις προκειμένου να ανακτηθούν οι τιμές ακτινοβολίας υψηλού δυναμικού εύρους κάθε εικονοστοιχείου του χάρτη ακτινοβολίας. Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, οι εκθέσεις με τιμές εικονοστοιχείων που βρίσκονται πιο κοντά στη συνάρτηση απόκρισης λαμβάνουν μεγαλύτερη βαρύτητα (Debevec & Malik, 1997).

Οι εικόνες HDR δεν μπορούν να απεικονιστούν ή να εκτυπωθούν από συμβατικά μέσα, καθώς εμφανίζονται σύμφωνα με τις δυνατότητες της οθόνης για απόδοση δυναμικού εύρους. Με άλλα λόγια, δεν μπορεί εύκολα κανείς να δει ολόκληρο το δυναμικό εύρος της εικόνας και έτσι οι εικόνες HDR είναι συνήθως θαμπές και δεν φαίνεται να έχουν σημαντικές διαφορές από τις κανονικές εικόνες (Nightingale, 2012). Η χαρτογράφηση τόνων είναι η συμπίεση των δεδομένων εικόνας HDR σε ένα στενότερο εύρος ψηφιακών τιμών που μπορούν να απεικονιστούν σε κοινά μέσα. Ο βασικός στόχος είναι αυτές οι ψηφιακές τιμές να κλιμακωθούν και επίσης να χαρτογραφηθούν σύμφωνα με τις πραγματικές συνθήκες φωτισμού της σκηνής (Reinhard et al., 2010).

Οι παγκόσμιοι τελεστές αντιστοιχούν κάθε εικονοστοιχείο σύμφωνα με την έντασή του και τα παγκόσμια χαρακτηριστικά και τιμές της εικόνας. Κατά συνέπεια, κάθε εικονοστοιχείο απεικονίζεται με τον ίδιο τρόπο. Μια τονική καμπύλη είναι ένας παγκόσμιος τελεστής. Από την άλλη πλευρά, οι τοπικοί τελεστές είναι πιο πολύπλοκοι και χρησιμοποιούν τις τιμές των γύρω εικονοστοιχείων για να χαρτογραφήσουν ένα και μόνο εικονοστοιχείο. Ως αποτέλεσμα, τα εικονοστοιχεία σε φωτεινές περιοχές χαρτογραφούνται διαφορετικά από εκείνα σε σκοτεινές περιοχές. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί τελικές εικόνες με μεγαλύτερη αντίθεση και συνεπώς πιο λεπτομερείς (Pratyush, 2009). Σε γενικές γραμμές, οι καθολικοί τελεστές δημιουργούν πιο ρεαλιστικές εικόνες, ενώ οι τοπικοί τελεστές δημιουργούν πιο καλλιτεχνικές εικόνες, αλλά αυτό δεν ισχύει πάντα, καθώς η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την εφαρμογή.

Οι Mantiuk et al. δημιούργησαν έναν αλγόριθμο που μετασχηματίζει τις τιμές φωτεινότητας μιας εικόνας σε αντίθεση χρησιμοποιώντας κλίσεις σε όλα τα επίπεδα της πυραμίδας Gauss και κατά συνέπεια μετασχηματίζει τις τιμές αντίθεσης σε human visual system - HVS και κλιμακώνει την απόκριση. Τέλος, η εικόνα ανακατασκευάζεται ξανά σε τιμές φωτεινότητας (Mantiuk et al., 2006). Από την άλλη πλευρά, οι Drago κ.ά. πρότειναν έναν καθολικό τελεστή χαρτογράφησης τόνων που κλιμακώνει την εικόνα στο λογαριθμικό πεδίο, χρησιμοποιώντας μια παράμετρο μεροληψίας και περαιτέρω ραδιομετρικές διορθώσεις (Drago κ.ά., 2003). Ο αλγόριθμος των Durand και Dorsey αποσυνθέτει την εικόνα SDR σε δύο επίπεδα δηλαδή, στο επίπεδο βάσης

και στο επίπεδο λεπτομέρειας χρησιμοποιώντας ένα διμερές φίλτρο που διατηρεί τις ακμές. Στη συνέχεια, η αντίθεση του στρώματος βάσης συμπιέζεται, διατηρώντας όλες τις λεπτομέρειες (Durand and Dorsey, 2002).

4.4 HDR και γεωμετρική αξιοπιστία

Οι ειδικοί, ερευνητές και επαγγελματίες, που ασχολούνται με την τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς έρχονται συνήθως αντιμέτωποι με δύσκολες συνθήκες φωτισμού, όπως οι υποεκτεθειμένοι εσωτερικοί χώροι σε μεγάλη αντίθεση με το φυσικό φως που προέρχεται από το εξωτερικό (εικόνα 4.1). Αυτό αποδίδεται συνήθως στο υψηλό δυναμικό εύρος της σκηνής. Για παράδειγμα, η απώλεια που προκαλείται από τη λήψη μόνο χαμηλού δυναμικού εύρους είναι πολύ πιθανό να παρέχει ανεπαρκείς κατασκευαστικές και διακοσμητικές λεπτομέρειες (π.χ. ανάγλυφες διακοσμήσεις), καθώς και άλλες σημαντικές πληροφορίες (π.χ. ρωγμές, υγρασία, αποκολλήσεις υλικού), καθιστώντας τα τελικά φωτογραμμετρικά παραδοτέα εν μέρει αναξιόπιστα για τεκμηρίωση που χρησιμοποιείται για αποκαταστάσεις, χαρτογράφηση κινδύνων κλπ. Επιπλέον, προσθέτει η Ntregka et al. (2013), οι εικόνες χαμηλής αντίθεσης δυσχεραίνουν τη φωτογραμμετρική διαδικασία, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη γεωμετρική αξιοπιστία και ακρίβεια των φωτογραμμετρικών παραδοτέων.



Σχήμα 4.1: Παράδειγμα δυσμενών συνθηκών φωτισμού, Ntregka et al. (2013).

Αυτές οι εικόνες πολλαπλής έκθεσης συνδυάζονται ψηφιακά και υποβάλλονται σε επεξεργασία σε εξειδικευμένο λογισμικό HDR ή σε συνήθη λογισμικά επεξεργασίας εικόνας με λειτουργίες HDR, προκειμένου να δημιουργηθεί η τελική εικόνα υψηλού δυναμικού εύρους. Τα εν λόγω λογισμικά είναι επίσης ικανά να μειώσουν ή ακόμη και να εξαλείψουν τα συνήθη προβλήματα των εικόνων HDR, όπως η παρουσία θορύβου, τα φαινόμενα ghosting που προκαλούνται από κινούμενα αντικείμενα στη σκηνή κατά τη διάρκεια της λήψης, το φαινόμενο halo κλπ.

Η σκηνή του παραδείγματος στην εικόνα 4.2 διαδραματίζεται στη στοά του Αττάλου στην Αθηναϊκή Αγορά (Ntregka et al., 2013). Οι συνθήκες φωτισμού κατά τη φωτογράφιση ήταν δύσκολες, καθώς το φως που ερχόταν από το εξωτερικό είχε μεγάλη αντίθεση με

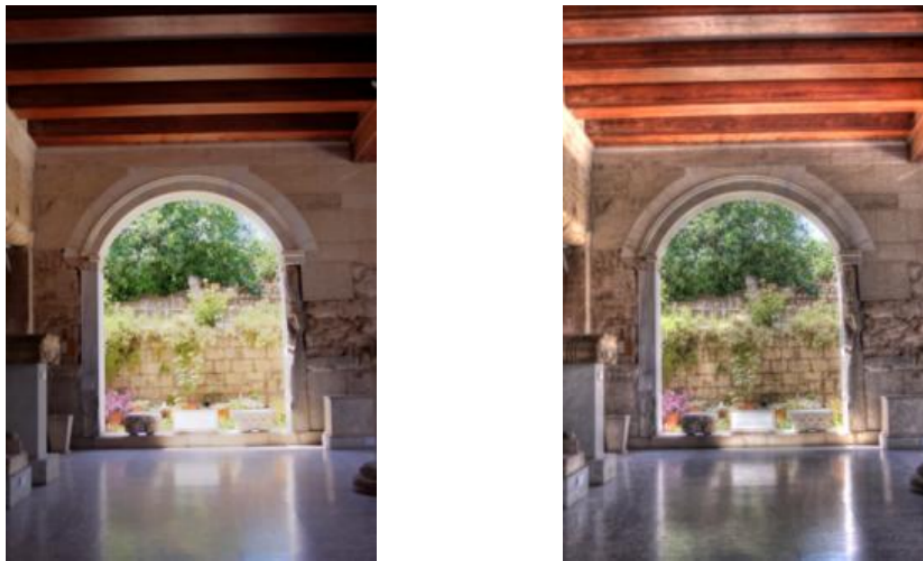
τον πιο σκοτεινό εσωτερικό χώρο, με άλλα λόγια το δυναμικό εύρος της σκηνής ήταν πολύ υψηλό. Επίσης, αυτή την ώρα της ημέρας υπήρχαν πολλοί επισκέπτες. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπήρχε αρκετός χρόνος και ελευθερία κινήσεων για τη χρήση ειδικών φώτων ή οποιουδήποτε άλλου εξοπλισμού για τη βελτίωση της φωτογράφισης. Με βάση αυτούς τους περιορισμούς, αποφασίστηκε η χρήση της τεχνικής HDRI. Οι bracketed φωτογραφίες τραβήχτηκαν μέσα σε λίγα μόλις δευτερόλεπτα. Λόγω της διαφορετικής έκθεσης, κάθε εικόνα της ακολουθίας στην εικόνα 4.2 απεικονίζει τη σκηνή με διαφορετικό τρόπο.



Σχήμα 4.2: Εικόνες με έκθεση: -2EV, 0EV, +2EV, (Ntregka et al., 2013).

Μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει ότι αυτές οι διαφορετικές εκθέσεις έχουν ως αποτέλεσμα να καταγράφονται επαρκώς κάθε φορά διαφορετικά τμήματα των σκηνών. Για παράδειγμα, η εξωτερική περιοχή καταγράφεται πολύ καλά, με υψηλή αντίθεση και λεπτομέρειες, σε χαμηλές εκθέσεις, ενώ είναι υπερεκτεθειμένη και συνεπώς σημαντικά λιγότερο λεπτομερής σε υψηλές εκθέσεις. Αντίθετα, σε υψηλές εκθέσεις η εσωτερική περιοχή έχει επαρκή φωτισμό και συνεπώς ικανοποιητική ποσότητα πληροφοριών. Το παράδειγμα αυτό είναι ενδεικτικό του περιορισμού στην καταγραφή υψηλού δυναμικού εύρους από συμβατικά μέσα και με συμβατικές μεθόδους. Οι εικόνες πολλαπλών εκθέσεων της ακολουθίας του παραδείγματος εισήχθησαν στο λογισμικό Photomatix Pro και δημιουργήθηκαν δύο εικόνες HDR (Εικόνα 4.3).

Η πρώτη εικόνα HDR δημιουργήθηκε με έναν καθολικό τελεστή. Το αποτέλεσμα είναι αρκετά ικανοποιητικό σε σύγκριση με τις αρχικές εικόνες, επειδή το φως είναι πιο ισορροπημένο σε όλη την εικόνα. Η άλλη (δεξιά) εικόνα HDR δημιουργήθηκε με τοπικό χειριστή χαρτογράφησης τόνων. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα είναι ακόμη πιο ικανοποιητικά. Η αντίθεση είναι υψηλότερη, παρέχοντας στον θεατή περισσότερες λεπτομέρειες τόσο από τα σκοτεινά όσο και από τα φωτεινά μέρη της σκηνής. Οι λεπτομέρειες της αντανάκλασης στο δάπεδο, της ξύλινης οροφής, του εξωτερικού χώρου και των τοίχων αναδεικνύονται αξιόσημια. Ειδικότερα, η ποσότητα πληροφοριών από τους τοίχους και το μαρμαρίνο δάπεδο είναι δραματικά βελτιωμένη συγκριτικά με τις μεμονωμένες φωτογραφίες και με την εικόνα HDR με καθολική χαρτογράφηση τόνων. Αυτό το παράδειγμα καταδεικνύει με επιτυχία την ευεργετική χρήση των εικόνων HDR που περιέχουν ολόκληρο το δυναμικό εύρος της απεικονιζόμενης σκηνής.



Σχήμα 4.3: HDR εικόνες (αριστερή: "Global" - δεξιά: "Local") (Ntregka et al., 2013).

Επιπλέον, δεδομένου ότι η σκηνή είναι τυπική για ένα μνημείο, αναδεικνύει επίσης την ικανότητα των εικόνων HDR να παρέχουν στο χρήστη, σε εφαρμογές τεκμηρίωσης πολιτιστικής κληρονομιάς, εικόνες που περιέχουν μεγάλο όγκο πληροφοριών σε όλη τη σκηνή. Αυτό είναι εφικτό ακόμη και όταν οι συνθήκες φωτισμού κατά τη φωτογράφιση είναι δύσκολες και η παρουσία επισκεπτών απαγορευτική για την εκτεταμένη χρήση τεχνικών λύσεων που βελτιώνουν τη φωτογράφιση.

4.4.1 Εξέταση εσωτερικού προσανατολισμού

Για την έρευνα των Ntregka et al. (2013), ο εσωτερικός προσανατολισμός τόσο των εικόνων HDR όσο και των κανονικών εικόνων προσδιορίστηκε μέσω μιας τυπικής διαδικασίας βαθμονόμησης και συγκρίθηκαν. Προκειμένου οι εικόνες HDR να θεωρηθούν γεωμετρικά αξιόπιστες, τα αποτελέσματα της βαθμονόμησής τους πρέπει να είναι σταθερά και κοντά σε αυτά των αρχικών εικόνων. Για την εργασία χρησιμοποιήθηκε το πεδίο δοκιμών βαθμονόμησης (Εικόνα 4.4), όπου περιέχει μεγάλο αριθμό σημείων με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες με ακρίβεια 0,1mm. Χρησιμοποιήθηκε μια τυπική διαδικασία αυτοβαθμονόμησης (Samara 2004). Προκειμένου οι εικόνες HDR να χρησιμοποιηθούν σε αυστηρές φωτογραμμετρικές εφαρμογές, είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί η γεωμετρική τους αξιοπιστία. Η μελέτη των (Ntregka et al. (2013)) ευρευνά κατά πόσον η δημιουργία εικόνων HDR εισάγει γεωμετρικά σφάλματα και μεταβάλλει την κεντρική προβολή των αρχικών εικόνων, δηλαδή τις παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού. Τα βασικά σφάλματα που αλλάζουν τη γεωμετρία μιας εικόνας είναι (Samara, 2004).

Για κάθε εικόνα το λογισμικό βαθμονόμησης δημιούργησε ένα αρχείο εξόδου με τις ακόλουθες τιμές:

- x_0, y_0 (σε mm): συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου

(a)



(b)



Σχήμα 4.4: (α) Φωτογραφία με ΟΕV στο πεδίο ελέγχου βαθμονόμησης με φακό 24mm, (β) η αντίστοιχη HDR εικόνα (Ntregka et al., 2013).

- c (σε mm): εστιακή απόσταση
- $K1, K2$: συντελεστές ακτινικής παραμόρφωσης
- $P1, P2$: συντελεστές μη συμμετρικής παραμόρφωσης
- Skewness (σε grad): απόκλιση της καθετότητας του άξονα y από τον άξονα x
- Κλίμακα: συντελεστής κλίμακας του άξονα y

Όλοι οι υπολογισμοί κατέληξαν σε εκ των υστέρων σφάλμα λιγότερο από 0,3 pixel και, κατά συνέπεια, συμπεριλήφθηκαν όλοι στα τελικά αποτελέσματα και συμπεράσματα. Συμπερασματικά, και μετά τη λεπτομερή έρευνα που περιγράφηκε (Ntregka et al., 2013), είναι ασφαλές να υποθέσουμε ότι η εσωτερική γεωμετρία μεταξύ των αρχικών φωτογραφιών και των HDR εικόνων είναι πρακτικά η ίδια και έτσι μπορούν να θεωρηθούν με ασφάλεια αξιόπιστες για χρήση σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές.

4.4.2 Εξέταση φωτογραμμετρικών προϊόντων

Τα τελικά ορθοφωτομωσαϊκά που αναλύθηκαν από την Ntregka et al. (2013) όπως φαίνονται στην εικόνα 4.5 δεν υπέστη περαιτέρω ψηφιακή επεξεργασία μετά τη συγχώνευση των ορθοφωτογραφιών προκειμένου να συγκριθούν αντικειμενικά. Αυτό που

παρατηρείται με την πρώτη ματιά στα ορθοφωτομωσαϊκά, είναι ότι το κανονικό χρειάζεται απαραίτητα ψηφιακή, ραδιομετρική μετεπεξεργασία, ώστε να μην διακρίνονται οι ξεχωριστές ορθοφωτογραφίες. Αντίθετα, η ορθοφωτογραφία HDR δεν χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία, διότι οι ξεχωριστές εικόνες δεν διακρίνονται. Επιπλέον, λόγω των διαφορετικών θέσεων λήψης και της διαφορετικής γωνίας φωτισμού, το χαμηλό δυναμικό εύρος που καταγράφηκε ήταν διαφορετικό για κάθε εικόνα. Αυτό κατέληξε σε πολύ διαφορετικές πρωταρχικές εικόνες και συνεπώς σε ένα ορθοφωτομωσαϊκό που χρειάζεται περισσότερη επεξεργασία. Αυτό το μεγάλο πλεονέκτημα των εικόνων HDR εξοικονομεί πολύτιμο χρόνο από την όλη εργασία και προσθέτει μια ακόμη θετική πτυχή στη χρήση τους και είναι ένα παράδειγμα του πώς η ψηφιακή φωτογραφία επιβιοηθά φωτογραμμετρικές εφαρμογές.



(a)



(b)

Σχήμα 4.5: Ορθοφωτομωσαϊκά με από τις (a) κανονικές και (b) HDR εικόνες (Ntregka et al., 2013).

Όσον αφορά την ίδια την πληροφορία, η εικόνα HDR έχει σημαντικά περισσότερες πληροφορίες από την κανονική και το φως είναι ισορροπημένο σε όλη την εικόνα. Για παράδειγμα, μπορεί κανείς να παρατηρήσει καλύτερα όχι μόνο διακοσμητικές λεπτομέρειες αλλά και στοιχεία της παθολογίας της εκκλησίας, όπως ρωγμές, εκτεταμένη ύπαρξη υγρασίας στους τοίχους και παθολογία των παραθύρων. Αυτές οι πληροφορίες στην κανονική εικόνα χάνονται λόγω της υποέκθεσης των τοίχων και της υπερέκθεσης των παραθύρων. Επίσης, ακόμη και στο κάτω δεξιό θόλο, όπου το φως δεν είναι αρκετό, στην εικόνα HDR υπάρχει αρκετό φως και συνεπώς πληροφορίες. Επιπλέον, τα γραμμικά στοιχεία στην εικόνα HDR είναι πιο ευδιάκριτα από ό,τι στην κανονική εικόνα, καθιστώντας την εικόνα HDR πιο αξιόπιστη για μετρήσεις.

4.5 HDR και τελεστές εντοπισμού χαρακτηριστικών σημείων

Η τρισδιάστατη ανακατασκευή, όπως αναφέρουν οι Kontogianni et al. (2015), αντικειμένων αρχιτεκτονικής και πολιτιστικής κληρονομιάς χρησιμοποιείται συνήθως για σκοπούς τεκμηρίωσης, οπτικοποίησης, πλοήγησης και διάδοσης. Οι διαθέσιμοι αλγόριθμοι Structure from Motion (SfM) είναι σε θέση να ανακατασκευάσουν μεγάλες τρισδιάστατες σκηνές σχετικά γρήγορα, με τη χρήση επακόλουθων ή τυχαία λαμβανόμενων εικόνων του αντικειμένου. Οι συνήθεις τεχνικές SfM βασίζονται στην ακριβή ανίχνευση, εξαγωγή, περιγραφή και αντιστοίχιση χαρακτηριστικών της εικόνας (π.χ. σημεία κλειδιά). Ένα τεράστιο πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι δεν απαιτείται καμία προηγούμενη πληροφορία σχετικά με τη σκηνή του αντικειμένου ή τη πορεία της κάμερας. Ωστόσο, οι εικόνες υψηλής ποιότητας είναι απαραίτητες για την απόδοση αυτών των αλγορίθμων. Η ανίχνευση σημείων κλειδιών μπορεί να είναι πλήρης και πιο ακριβής εάν χρησιμοποιούνται εικόνες υψηλού δυναμικού εύρους (HDR) της σκηνής, λόγω της παρουσίας πρόσθετων πληροφοριών σε σχέση με τις τυπικές εικόνες (Chermak and Aouf, 2012- Chermak et al. 2014- Jagadish and Sinzinger, 2008). Ο μεγαλύτερος αριθμός ανιχνευμένων σημείων κλειδιών θα αυξήσει ενδεχομένως την ποσότητα των χαρακτηριστικών σημείων κατά την αντιστοίχιση εικόνων και κατά συνέπεια, τη βελτίωση των αποτελεσμάτων του SfM.

4.5.1 Τελεστές ανίχνευσης και περιγραφής

Η ανίχνευση χαρακτηριστικών είναι ένα θεμελιώδες ερευνητικό θέμα σε πολλές εφαρμογές της όρασης υπολογιστών και της φωτογραμμετρίας. Η γεωμετρία της κάμερας μπορεί να υπολογιστεί όταν είναι γνωστός ένας επαρκής αριθμός σωστών αντιστοιχιών χαρακτηριστικών μεταξύ των εικόνων. Έτσι, η εκτίμηση διαδρομής και η τρισδιάστατη ανακατασκευή επηρεάζονται έντονα από την ποιότητα των αντιστοιχιών μεταξύ των ζευγών εικόνων και βασίζονται κατά συνέπεια στην αξιόπιστη εξαγωγή σημείων κλειδιών. Στο παρελθόν έχουν παρουσιαστεί διάφοροι τελεστές ανίχνευσης διακριτών σημείων (π.χ. Moravec, Forstner, Harris). Τα επόμενα χρόνια ακολούθησαν, επιπλέον έρευνες που διερευνούν την ανίχνευση και την περιγραφή χαρακτηριστικών σημείων. Παρουσιάζονται από Kontogianni et al. (2015), εν συντομία ορισμένοι ανιχνευτές (detectors) και περιγραφείς (descriptors) παρακάτω :

- Ο **SIFT** (Scale Invariant Feature Transformation) είναι ένας τελεστής που εισήγαγε ο Lowe (Lowe, 1999; Lowe, 2004), ο οποίος μπορεί να ανιχνεύσει, να περιγράψει και να εξάγει χαρακτηριστικά με τη χρήση πυραμίδων χώρου κλίμακας Gauss. Έτσι, ο SIFT δεν επηρεάζεται από την κλίμακα και την περιστροφή της εικόνας και μερικώς στις μεταβολές του φωτισμού.
- Ο **SURF** (Speed Up Robust Features) των Bay et al. (2006), πρότειναν έναν αλγόριθμο, που ξεπέρασε τους υπάρχοντες ανιχνευτές και περιγραφείς, όσον αφορά την επαναληψιμότητα, τη διακριτικότητα και την ευρωστία, καθώς και την ταχύτητα. Το τμήμα ανίχνευσης του αλγορίθμου χρησιμοποιεί καθολικές εικόνες μέσω προσέγγισης του πίνακα Hessian. Το τμήμα περιγραφής, από την άλλη πλευρά, περιγράφει την ένταση της γειτονιάς γύρω από το εικονοστοιχείο χρησιμοποιώντας κυματομορφές Haar.

- Ο **FAST** (Features from Accelerated Segment Test) προέρχεται από τον τομέα της μηχανικής μάθησης (Rosten and Drummond, 2006). Επιχειρεί μια γρήγορη προσπέλαση για να διακρίνει τα σημεία-κλειδιά από άλλα σημεία, εξετάζοντας τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται κατά μήκος ενός κύκλου γύρω από κάθε σημείο. Εάν τα εικονοστοιχεία βρεθούν πολύ πιο σκούρα ή πιο φωτεινά από το υποψήφιο σημείο, θεωρείται ότι πρόκειται για σημείο-κλειδί. Για λόγους ταχύτητας, αντί να ελέγχονται όλα τα εικονοστοιχεία, εξετάζονται μόνο τέσσερα από αυτά.
- Ο **BRIEF** (Binary Robust Independent Elementary Features) εισήχθη από τους Calonder et al. (Calonder et al., 2010) και είναι ένας σύντομος δυαδικός περιγραφέας που χρησιμοποιεί την απόσταση Hamming και επηρεάζεται από αλλαγές κλίμακας και περιστροφής (Alahi et al., 2012).
- Ο **ORB** (Oriented FAST and Rotated BRIEF), που εισήγαγε ο Rublee (Rublee et al., 2011), είναι ένας συνδυασμός του FAST (για τον εντοπισμό σταθερών σημείων) και του BRIEF (για την περιγραφή τους). Και οι δύο αυτοί τελεστές παράγουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σχετικά γρήγορα, αλλά ο BRIEF παρέχει επίσης ανθεκτικότητα στην περιστροφή και στο θόρυβο (Alahi et al., 2012).
- Στη βιβλιογραφία έχουν επίσης προταθεί άλλοι αποτελεσματικοί ανιχνευτές και περιγραφείς (π.χ. **DAISY**, **BRISK**, **FREAK** (Tola et al., 2010- Leutenegger et al., 2011- Alahi et al., 2012)).

4.6 Βάθος πεδίου (DoF) και τρισδιάστατη ψηφιοποίηση

Σύμφωνα με την ανάλυση των Kontogianni et al. (2017a), τρισδιάστατη ψηφιοποίηση μικρών αντικειμένων είναι μια πολύ περίπλοκη διαδικασία λόγω των πολύπλοκων μορφολογικών δομών των χαρακτηριστικών τους, των κοίλων, των πλούσιων διακοσμήσεων, της υψηλής συχνότητας αλλαγής χρώματος στην υφή, των αυξημένων απαιτήσεων πιστής απεικόνισης της πραγματικότητας κλπ. Οι μέθοδοι που βασίζονται στην εικόνα αποτελούν μια χαμηλού κόστους, γρήγορη και αποτελεσματική. Η εναλλακτική λύση, δηλαδή, η σάρωση με λέιζερ εν γένει υπερβαίνει τις απαιτήσεις κόστους. Οι εφαρμογές στη φωτογραμμετρία κοντινών αποστάσεων επηρεάζονται αρνητικά από ένα ρηχό DoF, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εμφανές. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση μικρών αντικειμένων, είναι πολύ δύσκολο να αποτυπωθούν όλες οι λεπτομέρειες των αντικειμένων και η διαδικασία ευθυγράμμισης με ρηχό DoF αναμένεται να βασίζεται σε περιορισμένο αριθμό ευδιάκριτων σημείων από περιοχές που βρίσκονται στο επίκεντρο. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τη διαδικασία αντιστοίχισης σημείων, τον αριθμό των συζυγών σημείων που προσδιορίζονται και την ανάλυση του τρισδιάστατου μοντέλου. Επιπλέον, μπορεί να οδηγήσει σε ένα πολύ αραιό σύνολο σημείων με περιοχές στην επιφάνεια ενός αντικειμένου χωρίς αντιστοιχίες σημείων.

Ένα μικρό βάθος πεδίου (DoF) επηρεάζει την τρισδιάστατη ανακατασκευή με βάση την εικόνα και ιδίως τη διαδικασία αντιστοίχισης σημείων. Αυτό είναι ορατό όχι μόνο στο συνολικό αριθμό των αντιστοιχών σημείων αλλά και στην ανάλυση του παραγόμενου τρισδιάστατου μοντέλου. Η επέκταση του DoF είναι μια πολύ σημαντική εργασία που πρέπει να ενσωματωθεί στη συλλογή δεδομένων για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας του συνόλου εικόνων και ενός καλύτερου τρισδιάστατου μοντέλου. Η επέκταση του

DoF μπορεί να επιτευχθεί με πολλές μεθόδους και ιδιαίτερα με τη χρήση της τεχνικής στοιβάξης εστίασης (stacking technique). Το βάθος πεδίου (DoF) ορίζει ένα εύρος αποστάσεων, στο οποίο μια σκηνή φαίνεται να είναι αποδεκτά ευκρινής και επηρεάζεται κυρίως από την εστιακή απόσταση της φωτογραφικής μηχανής, το διάφραγμα του φακού και την απόσταση εστίασης. Η ευκρίνεια στις εικόνες λόγω του DoF δεν αλλάζει απότομα, αλλά εμφανίζεται ως σταδιακή μετάβαση, πράγμα που σημαίνει ότι όλα όσα βρίσκονται μπροστά ή πίσω από το επίπεδο εστίασης φαίνεται να χάνουν σταδιακά σε ευκρίνεια. Το φαινόμενο δεν είναι πάντα ανιχνεύσιμο με γυμνό μάτι ή με την ανάλυση της φωτογραφικής μηχανής (ιδίως όταν το βήμα των εικονοστοιχείων είναι μεγάλο).

Ο κύκλος σύγχυσης (CoC) ορίζει τη μέγιστη διάμετρο ενός κύκλου που σχηματίζεται από ένα σημείο που απεικονίζεται θολό, πέρα από την οποία το σημείο γίνεται αντιληπτό ως μη ευκρινές. Όταν ο CoC είναι ορατός στο ανθρώπινο μάτι, η περιοχή βρίσκεται εκτός του βάθους πεδίου και απεικονίζεται θολή (Cambridge in Colour, 2017).

Η στοιβάξη εστίασης (Focus Stacking) είναι μια τεχνική στην υπολογιστική φωτογραφία, σύμφωνα με την οποία ένας αριθμός εικόνων με συνήθως μικρή DoF και τραβηγμένες με διαφορετικές αποστάσεις εστίασης χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μιας νέας εικόνας με μεγαλύτερο DoF (θεωρητικά στοχεύοντας σε μια εικόνα με άπειρο DoF). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στη φωτογραφία κοντινών λήψεων, μακροφωτογραφιών και τοπίων, επειδή η μικρότερη κατάλληλη τιμή διαφράγματος f (στενό διάφραγμα) είναι συχνά ανεπαρκής για την αποτύπωση όλου του εύρους των απαιτούμενων αποστάσεων (Cambridge in Colour, 2017). Η τεχνική της στοιβάξης εστίασης αποτελείται από τρία βασικά βήματα:

- στο πρώτο βήμα, λαμβάνονται πολλές εικόνες με διαφορετικές αποστάσεις εστίασης,
- στο δεύτερο βήμα οι εικόνες αυτές ευθυγραμμίζονται, δεδομένου ότι οι αλλαγές στην απόσταση εστίασης μπορεί να προκαλέσουν εσφαλμένες ευθυγραμμίσεις,
- το τελικό βήμα είναι η δημιουργία της τελικής εικόνας στοιβάξης εστίασης με τη χρήση της κατάλληλης μεθόδου και αλγορίθμου.

Εικόνες σε διαφορετικές αποστάσεις εστίασης μπορούν να ληφθούν με διάφορες μεθόδους. Ως πρώτη προσέγγιση, η φωτογραφική μηχανή στερεώνεται σε τρίποδο και η απόσταση εστίασης μπορεί να αλλάξει χειροκίνητα με την περιστροφή του δακτυλίου εστίασης. Η περιστροφή του δακτυλίου εστίασης μπορεί επίσης να αυτοματοποιηθεί. Και στις δύο περιπτώσεις, είναι απαραίτητο να γίνει εστίαση στο πλησιέστερο και στο πιο απομακρυσμένο σημείο για να εκτιμηθούν τα όρια της απόστασης εστίασης, με τη χρήση λογισμικού. Δεύτερον, η απόσταση εστίασης μπορεί να αλλάξει όταν η κάμερα μετακινείται σε μια μικρομετρική ράγα και χρησιμοποιείται φακός σταθερής εστίασης (Clini et al. 2016). Επίσης, η απόσταση εστίασης μπορεί να ρυθμιστεί με τη χρήση της κίνησης κλίσης ενός φακού tilt-shift.

Έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι και μέθοδοι για τη δημιουργία μιας στοιβαγμένης εικόνας εστίασης. Τα εμπορικά λογισμικά βασίζονται σε τρεις βασικές προσεγγίσεις (Dpreview, 2017):

- Η προσέγγιση της πυραμίδας: χρησιμοποιεί μια μέθοδο πυραμιδικής αποσύνθεσης από την επεξεργασία εικόνας, διαιρώντας τα σήματα της εικόνας σε υψηλές

και χαμηλές συχνότητες. Η μέθοδος αυτή δίνει καλά αποτελέσματα σε πολύπλοκες περιπτώσεις, αν και αυξάνει την αντίθεση και την αντανάκλαση.

- Η προσέγγιση του χάρτη βάθους: η μέθοδος επιλέγει την αρχική εικόνα που περιέχει το πιο ευκρινές εικονοστοιχείο και χρησιμοποιεί αυτή την πληροφορία για την ανακατασκευή του χάρτη βάθους. Σε αυτή τη μέθοδο οι εικόνες πρέπει να λαμβάνονται με διαδοχική σειρά από μπροστά προς τα πίσω ή αντίστροφα και μπορεί να αποδώσει τέλεια την υφή σε λείες επιφάνειες.
- Η προσέγγιση των εικονοστοιχείων βάρους: η προσέγγιση των εικονοστοιχείων βάρους υπολογίζει ένα βάρος για κάθε εικονοστοιχείο με βάση την αντίθεση του στο σύνολο των εικόνων και στη συνέχεια σχηματίζει τον σταθμισμένο μέσο όρο όλων των εικονοστοιχείων από όλες τις εικόνες. Αυτή η προσέγγιση λειτουργεί καλύτερα σε μικρές στοίβες και διατηρεί την αντίθεση και το χρώμα.

4.7 Πειραματικές μέθοδοι από τη βιβλιογραφία

4.7.1 Ορθοφωτογραφία - ορθοφωτομωσαϊκό και HDR

Οι Ntregka et al. (2013) δημιούργησαν δημιουργήθηκαν ορθοφωτογραφίες για την τεκμηρίωση ενός μνημείου πολιτιστικής κληρονομιάς με τη χρήση εικόνων HDR. Τα ορθοφωτομωσαϊκά απεικόνιζαν την ανύψωση τμήματος της βόρειας στοάς όπως φαίνεται από το εσωτερικό της εκκλησίας. Η λήψη εικόνας HDR, προκειμένου όχι μόνο να δημιουργηθεί μια εικόνα HDR αλλά και να διερευνηθεί η δυνατότητα χρήσης διαφορετικής από 0EV έκθεσης. Η φωτογραφική μηχανή διέθετε όλες τις απαραίτητες λειτουργίες για την αυτόματη έκθεση με bracketed exposure και επίσης ήταν διαθέσιμο ένα τρίποδο και μια τηλεχειριστήρια απελευθέρωση. Τέλος, λήφθηκαν δύο ακολουθίες έκθεσης με παρένθεση από -3EV έως 3EV με απόσταση 1,5EV. Αυτό σημαίνει 5 εικόνες ανά θέση λήψης. Για τη δημιουργία των εικόνων HDR (Εικόνα 4.6) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοικτού κώδικα HDR Luminance. Η χαρτογράφηση των τόνων έγινε με τοπικό τελεστή.

Οι Ntregka et al. (2013) περιέγραψαν λεπτομερώς τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία για την δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας (DSM) που πραγματοποιήθηκε με σάρωση λέιζερ, η επεξεργασία του νέφους σημείων και δημιουργήθηκε το τελικό DSM. Από το εν λόγω DSM εξήχθησαν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των GCP για να χρησιμοποιηθούν για τις φωτογραμμετρικές διαδικασίες. Οι προσανατολισμοί και η δημιουργία ορθοφωτογραφιών. Ένα σημαντικό χρήσιμο συμπέρασμα από αυτό το μέρος του έργου είναι ότι η ίδια η φωτογραμμετρική διαδικασία και ιδίως η μέτρηση των σημείων στις εικόνες ήταν εξαιρετικά ευκολότερη όταν χρησιμοποιήθηκαν εικόνες HDR λόγω της υψηλής τους αντίθεσης. Ο προσανατολισμός των κανονικών εικόνων χρειάστηκε διπλάσιο χρόνο από τον προσανατολισμό των εικόνων HDR. Τα παραδοτέα ήταν δύο ορθοφωτογραφίες οι οποίες στη συνέχεια συγχωνεύθηκαν σε ένα ενιαίο ορθοφωτομωσαϊκό. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για τις κανονικές εικόνες και τις εικόνες HDR αντίστοιχα. Τα ορθοφωτομωσαϊκά και για τους δύο τύπους εικόνων κατασκευάστηκαν από τα ίδια ακριβώς τμήματα των ορθοφωτογραφιών προκειμένου να συγκριθούν.



Σχήμα 4.6: Η HDR εικόνα που δημιουργήθηκε από την σύνθεση των 5, Ntregka et al. (2013).

4.7.2 Χαρτογράφηση Τόνων και HDR

Η χαρτογράφηση τόνων είναι μια τεχνική που μετατρέπει εικόνες HDR σε παραπλήσιες οπτικά εικόνες LDR και αποτελεί ενεργό ερευνητικό πεδίο για περισσότερα από 20 χρόνια (Suma et al., 2016). Η σύγκριση των TMO διεξήχθη με σκοπό την αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους για φωτογραμμετρικές εφαρμογές και πιο συγκεκριμένα για τρισδιάστατες ανακατασκευές με βάση την εικόνα. Δεδομένου ότι η αποτελεσματική τρισδιάστατη ανακατασκευή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακριβή ανίχνευση και αντιστοίχιση σημείων κλειδιών, τα κριτήρια βάσει των οποίων αξιολογήθηκαν οι τέσσερις TMO και οι αντίστοιχες εικόνες LDR μεσαίας έκθεσης είναι ο αριθμός των σημείων κλειδιών, το ποσοστό επαναληψιμότητας και ο αριθμός των αντιστοιχιών που επιτυγχάνονται μεταξύ στερεοζευγών (Suma et al., 2016). Όταν μια εικόνα HDR επεξεργάζεται με μια μέθοδο χαρτογράφησης τόνων, η ραδιομετρική της ποιότητα επηρεάζεται ρητά. Επιπλέον, οι μέθοδοι χαρτογράφησης τόνων τείνουν να αποκαλύπτουν λεπτομέρειες σε περιοχές που φωτίζονται ελάχιστα στις εικόνες LDR. Ως εκ τούτου, οι ανιχνευτές σημείων κλειδιών αναμένεται να αποδίδουν διαφορετικά, και ιδανικά καλύτερα, σε εικόνες χαρτογράφησης τόνων από ό,τι στις εικόνες LDR, όσο περισσότερες λεπτομέρειες διασφαλίζονται, τόσο πιο καλά καθορισμένα σημεία κλειδιά θα ανιχνεύονται ομοιόμορφα κατανομημένα στη σκηνή. Επομένως, η απόδοση των ανιχνευτών σημείων κλειδιών σε διαφορετικές εικόνες χαρτογράφησης τόνων είναι ένας καλός αρχικός δείκτης της αποτελεσματικότητας κάθε TMO όσον αφορά τη διατήρηση των λεπτομερειών (Suma et al., 2016). Οι χειριστές χαρτογράφησης τόνων ή Tone-mapping operator (TMOs) μπορούν

να χωριστούν σε γενικές γραμμές σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους: παγκόσμιοι και τοπικοί. Οι παγκόσμιοι TMO επεξεργάζονται την εικόνα ως σύνολο, εφαρμόζοντας τον ίδιο υπολογισμό σε κάθε εικονοστοιχείο. Οι τοπικοί TMO, από την άλλη πλευρά, επεξεργάζονται την εικόνα ανά εικονοστοιχείο, λαμβάνοντας υπόψη τα γειτονικά εικονοστοιχεία. Στο πλαίσιο του στόχου της τεκμηρίωσης, της επαναχρησιμοποίησης και της επεξεργασίας μέσω τεχνικών φωτογραμμετρίας και υπολογιστικής όρασης, είναι σημαντικό ο TMO να διατηρεί την αρχική εμφάνιση.

Στο άρθρο τους οι Suma et al. (2016), συγκρίνουν τέσσερις διαφορετικούς τελεστές αντιστοίχισης τόνου HDR (TMOs) που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή ακατέργαστων εικόνων HDR σε μορφή κατάλληλη για αλγόριθμους και ειδικότερα τεχνικές ανίχνευσης σημείων κλειδιών. Η σύγκριση εξετάζει δύο τοπικές και δύο παγκόσμιους TMOs. Οι εικόνες HDR που δημιουργήθηκαν χαρτογραφήθηκαν με κάθε μία από τους τέσσερις TMO:

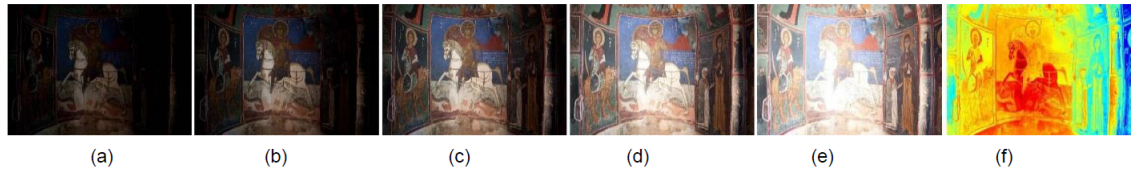
- Fattal
- ReinhardGlobal
- ReinhardLocal
- Mantiuk



Σχήμα 4.7: Εικόνα HDR από I.M. Καισαριανής tone-mapped με διαφορετικούς TMOs: a) Fattal b) Mantiuk c) ReinhardGlobal d) ReinhardLocal e) εικόνα LDR (0 EV), πηγή: Suma et al. (2016).

Αν και υπάρχουν κάμερες βίντεο HDR (Chalmers et al., 2009), το κόστος τους είναι απαγορευτικό. Μια λιγότερο δαπανηρή εναλλακτική λύση είναι η χρήση του exposure bracketing, όπως περιγράφεται από τους Debevec & Malik (1997). Η τεχνική περιλαμβάνει τη λήψη μιας ακολουθίας εικόνων με διαφορετικούς χρόνους έκθεσης από μια σταθερή θέση της κάμερας (4.8).

Το σχήμα 4.8 είναι το αποτέλεσμα των συγχωνευμένων τιμών φωτεινότητας που αναπαρίστανται με ψευδοχρώματα. Η τεχνική ψεύτικων χρωμάτων επιτρέπει την απεικόνιση του εύρους του φωτισμού σε μια εικόνα HDR σε μια οθόνη χωρίς την ικανότητα να υποστηρίξει απεικόνιση HDR.



Σχήμα 4.8: Τοιχογραφία από Ι.Ν.Π της Ασίνου εφαρμόζοντας την τεχνική bracketing: όπου a,b,c,d,e) με τιμές έκθεσης (EV: -2, 1, 0, 1, 2). Η εικόνα f) είναι το αποτέλεσμα των συγχωνευμένων τιμών φωτεινότητας που αναπαρίστανται με "ψευδοχρώματα"., πηγή: Suma et al. (2016).

4.7.3 Ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων και HDR

Οι Kontogianni et al. (2015) μελέτησαν τη χρήση εικόνων HDR για τη βελτιστοποίηση της ανίχνευσης χαρακτηριστικών σε εικόνες αρχιτεκτονικών σκηνών με μεγάλη λεπτομέρεια, όπως βωμοί εκκλησιών με πολύπλοκες τοιχογραφίες, έντονα διακοσμημένες αψίδες, κίονες και άλλα κτίρια ιδιαίτερου αρχιτεκτονικού στυλ. Πραγματοποιούνται δοκιμές για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των κοινών σύγχρονων ανιχνευτών χαρακτηριστικών κατά τη χρήση εικόνων HDR. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν, στην εργασία των Kontogianni et al. (2015), τα σύνολα δεδομένων δημιουργήθηκαν με τη χρήση bracketing exposure.

Η συγχώνευση εικόνων HDR υλοποιήθηκε σύμφωνα με τον αλγόριθμο των Debevec και Malik (Debevec and Malik, 2008). Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί τον περιορισμό της αμοιβαιότητας του αισθητήρα για τη γραμμική ανάκτηση της συνάρτησης απόκρισης της κάμερας και τη συγχώνευση των πολλαπλών εικόνων σε έναν χάρτη υψηλής δυναμικής ακτινοβολίας. Για τη χαρτογράφηση των τόνων χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος του Mantiuk (Mantiuk et al., 2006). Χρησιμοποιούν μια προσέγγιση πεδίου κλίσης, βασισμένη σε μια πυραμίδα χαμηλής διέλευσης (Gaussian) τιμών υψηλής αντίθεσης. Ο κύριος λόγος επιλογής αυτού του τελεστή ήταν ότι διατηρεί τις λεπτομέρειες που απαιτούνται για την ανίχνευση χαρακτηριστικών, ενώ παράλληλα ενισχύει τα χρώματα των εικόνων.

Παρακάτω παρουσιάζονται κατά την μελέτη των Kontogianni et al. (2015), των δοκιμασμένων ανιχνευτών χαρακτηριστικών σε εικόνες SDR και εικόνες HDR με χαρτογράφηση τόνων και για τις δύο σκηνές. Όσον αφορά την αντικειμενικότητα, οι εικόνες SDR που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις δοκιμές ήταν αυτές με 0 EV. Όπως φαίνεται εύκολα στα σχήματα 4.9 - 4.12, η χρήση εικόνων HDR για την ανίχνευση χαρακτηριστικών σίγουρα αυξάνει το πλήθος των εντοπισμένων χαρακτηριστικών. Στα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για τους ανιχνευτές και περιγραφείς χαρακτηριστικών σημείων που ακολουθούν:

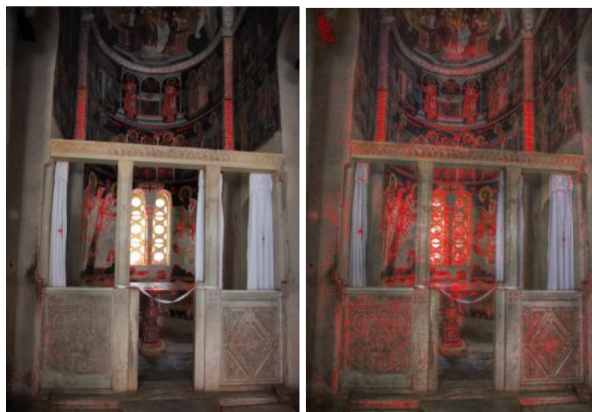
- ο SIFT (Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004),
- ο SURF (Speeded-Up Robust Features) (Bay et al., 2006),
- ο FAST (Features from Accelerated Segment Test) (Rosten and Drummond, 2006),
- ο ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) (Rublee et al., 2011).

Ο SIFT (εικ. 4.9) ανιχνεύει περίπου 200% περισσότερα χαρακτηριστικά στις εικόνες

HDR από ό,τι στις τυπικές, ενώ χρειάζεται τον ίδιο χρόνο. Το FAST (εικ. 4.10) έχει ακόμη καλύτερες επιδόσεις, καθώς εντοπίζει 350% περισσότερα χαρακτηριστικά, ενώ από άποψη χρόνου παραμένει στα ίδια επίπεδα (περίπου μισό δευτερόλεπτο). Η απεικόνιση HDR (σχήμα 4.11) αυξάνει τον αριθμό των εντοπισμένων σημείων κατά σχεδόν 70% με τη χρήση του ανιχνευτή ORB, ενώ χρειάζεται περίπου 14% περισσότερο χρόνο, αλλά εξακολουθεί να είναι μικρότερος από δύο δευτερόλεπτα. Ο SURF (σχήμα 4.12) αυξάνει την απόδοσή του κατά μέσο όρο κατά 100% όταν εφαρμόζεται σε εικόνες HDR. Ο χρόνος επεξεργασίας παραμένει σχεδόν σταθερός καθώς αυξάνεται ελαφρώς κατά 2%. Τα στατιστικά στοιχεία που αναφέρονται παραπάνω, προέκυψαν από τους πίνακες (σχήμα 4.26) που εμφανίζουν τον μέσο όρο των χαρακτηριστικών σημείων που ανιχνεύθηκαν και τον μέσο χρόνο που απαιτήθηκε για την διαδικασία.



Σχήμα 4.9: Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων με SIFT (a) για SDR εικόνα και (b) για HDR εικόνα (Kontogianni et al., 2015).



Σχήμα 4.10: Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων με FAST (a) για SDR εικόνα (14073 points) και (b) για HDR εικόνα (68001 points) (Kontogianni et al., 2015).

4.7.4 Στοίβαξη εστίασης BF - FS

Οι Kontogianni et al. (2017a) χρησιμοποίησαν τη στοίβαξη εστίασης για να διερευνήσουν την επίδραση της τεχνικής στην τρισδιάστατη ανακατασκευή SfM-MVS. Στην



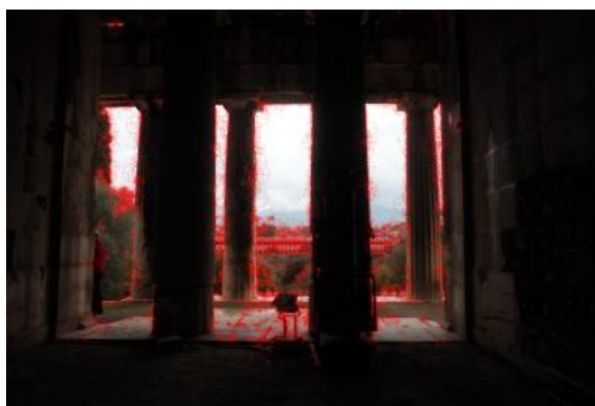
(a)



Σχήμα 4.11: Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων με ORB (a) για SDR εικόνα (8144 points) και (b) για HDR εικόνα (20000 points) (Kontogianni et al., 2015).

εργασία τους διερευνάται ακριβώς το αποτέλεσμα της τρισδιάστατης ανακατασκευής εφαρμόζοντας αυτόματη μοντελοποίηση με βάση την εικόνα χρησιμοποιώντας τεχνικές SfM και MVS σε εικόνες "βέλτιστης εστίασης" και σε εικόνες που δημιουργήθηκαν με τεχνικές στοίβαξης εστίασης. Η τεχνική στοίβαξης εστίασης δοκιμάστηκε σε ένα πραγματικό πείραμα για την τρισδιάστατη ψηφιοποίηση ενός μουσειακού αντικειμένου. Οι συνθήκες του πειράματος περιλαμβάνουν τη χρήση μιας φωτογραφικής μηχανής full frame, εξοπλισμένης με κανονικό φακό (50mm) και με την κάμερα να τοποθετείται κοντά στο αντικείμενο. Το έκθεμα έχει ήδη ψηφιοποιηθεί με σύστημα δομημένου φωτός και το μοντέλο αυτό χρησίμευσε ως μοντέλο αναφοράς στο οποίο συγκρίθηκαν τα τρισδιάστατα μοντέλα και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα. Οι δοκιμές αξιολόγησης βασίστηκαν στο τρισδιάστατο μοντέλο που δημιουργήθηκε με σαρωτή δομημένου φωτός.

Για την αποτελεσματική ψηφιοποίηση του αντιγράφου, χρησιμοποιήθηκε ένας περιστρεφόμενος δίσκος ελεγχόμενος από υπολογιστή για την ημι-αυτοματοποίηση της διαδικασίας λήψης και τη μείωση του χρόνου συλλογής δεδομένων. Για την παραγωγή ενός πλήρους τρισδιάστατου μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν αρκετές επιμέρους σαρώσεις, Συνολικά πραγματοποιήθηκαν δεκαοκτώ επιμέρους σαρώσεις. Η μετ-επεξεργασία πραγματοποιήθηκε καθαρισμός, ευθυγράμμιση και συγχώνευση. Η μέση απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων στο τρισδιάστατο μοντέλο ήταν 200μm και η ακρίβεια κάθε μέτρησης ήταν 40μm. Όπως φαίνεται 4.13 και στην εικόνα, τα χρώματα έχουν προ-



(a)



(b)

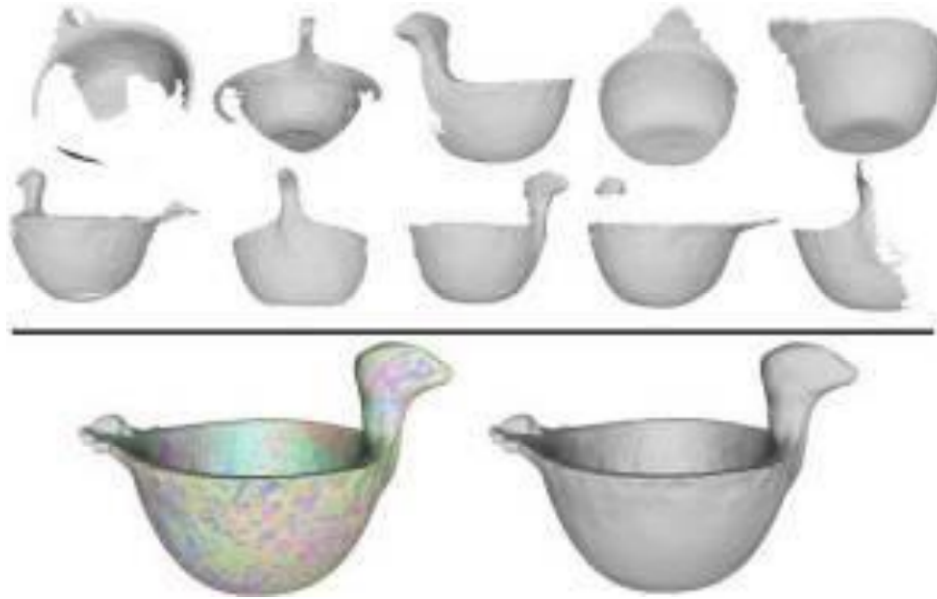
Σχήμα 4.12: Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων με SURF (a) για SDR εικόνα (5047 points) και (b) για HDR εικόνα (16843 points) (Kontogianni et al., 2015).

κύψει από τις διαφορετικές λήψεις.

Παρόλο που η χρήση ενός κανονικού φακού και το στενότερο διάφραγμα του συμβάλλουν σε μεγάλο βάθος πεδίου, ήταν εμφανές ότι τα πιο κοντινά και τα πιο απομακρυσμένα σημεία του αντικειμένου σε κάθε εικόνα που τραβήχτηκε δεν ήταν ευκρινή όπως εκείνα σε μεσαίες αποστάσεις (η τέλεια εστιασμένη απόσταση). Η στοίβαξη εστίασης επιλέχθηκε ως λύση για την επίτευξη τέλεια εστιασμένων εικόνων σε όλο το εύρος της απόστασης του αντικειμένου. Το λογισμικό Helicon Remote (Helicon Remote, 2017) χρησιμοποιήθηκε για την αυτοματοποίηση της τεχνικής στοίβαξης εστίασης. Η εφαρμογή υπολογίζει το DoF χρησιμοποιώντας το μοντέλο της φωτογραφικής μηχανής, την εστιακή απόσταση, την απόσταση εστίασης και την τιμή του διαφράγματος. Σε αυτό το πείραμα, το σετ φωτογραφιών με το επίπεδο εστίασης τοποθετημένο στη μέση του βάθους του τεχνουργήματος χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός άλλου τρισδιάστατου μοντέλου που χρησίμευσε ως μοντέλο "καλύτερης εστίασης- Best Focus" (BF) για σύγκριση. Για την ανάπτυξη της εικόνας στοίβαξης εστίασης χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση της πυραμίδας με τη βοήθεια ενός λογισμικού.

Το Agisoft Photoscan (Metashape) χρησιμοποιήθηκε από τους Kontogianni et al. (2017b) για τη δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων του αντικειμένου:

- της "καλύτερης εστίασης" (BF)



Σχήμα 4.13: Μερικές σαρώσεις και ολοκληρωμένες μοντέλα αναφοράς (Kontogianni et al., 2017b).

- από την τεχνική στοίβαξης εστίασης (FS).

Πραγματοποιήθηκε αντικειμενική αξιολόγηση της ποιότητας των τρισδιάστατων μοντέλων. Η αξιολόγηση αυτή βασίστηκε στον αριθμό των κορυφών που παρήχθησαν κατά:

- τη διαδικασία ευθυγράμμισης,
- τη δημιουργία πυκνού νέφους σημείων
- και τον αριθμό των όψεων που παρήχθησαν κατά τη δημιουργία τρισδιάστατου πλέγματος.

Το σχήμα 4.14 παρουσιάζει αυτές τις τιμές μεταξύ του μοντέλου BF και του μοντέλου FS του αραιού νέφους σημείων (αριστερά) και του πυκνού νέφους (δεξιά). Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι ο αλγόριθμος SFM μπορεί να ανιχνεύσει μεγαλύτερο αριθμό σημείων αντιστοίχισης και συνεπώς να οδηγήσει σε πυκνότερο και συνεπώς ακριβέστερο αραιό νέφος σημείων για την BF. Η σχετική διαφορά μεταξύ του συνολικού αριθμού κορυφών των δύο αραιών νεφών σημείων (BF και FS) είναι σχεδόν 10% (7,83). Από την άλλη πλευρά, το σχήμα 4.14 δείχνει ότι κατά τη δημιουργία πυκνού νέφους σημείων και τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα έχουν παράγει παρόμοιο αριθμό κορυφών. Από αυτό φαίνεται ότι η τεχνική στοίβαξης εστίασης επηρεάζει τη διαδικασία της αντιστοίχισης πυκνής εικόνας και του τρισδιάστατου τριγωνικού πλέγματος.

	Vertices in Sparse Point Cloud	Vertices in Dense Point Cloud
BF	63,706	7,932,385
FS	58,720	7,957,583

Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα από Agisoft Photoscan (Kontogianni et al., 2017a).

4.7.5 Στοίβαξη εστίασης FS - AF vs GD

Το αντικείμενο μελέτης στα πειράματά των Kontogianni et al. (2017b), συμπεριλαμβανομένου του βασικού τρισδιάστατου μοντέλου αναφοράς αλήθειας που χρησιμοποιήθηκε για την αντικειμενική σύγκριση των τρισδιάστατων μοντέλων που βασίζονται σε SfM-MVS. Μαζί με την προσέγγιση στοίβαξης εστίασης και τη δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων με στοίβαξη εστίασης (FS) και με πλήρη εστίαση (AF). Το αντικείμενο που χρησιμοποιείται στο πείραμά ως αντικείμενο ενδιαφέροντος είναι ένα "πιστό" αντίγραφο ενός κεραμικού μπολ και δημιουργήθηκε βάσει αρχικού αντικειμένου (που βρίσκεται στο μουσείο). Το τρισδιάστατο μοντέλο του αντικειμένου της μελέτης δημιουργηθεί με τη βοήθεια ενός σαρωτή δομημένου φωτός. Το πρώτο βήμα ήταν η δημιουργία των εστιασμένων εικόνων (Εικόνα 4.15) και χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση της πυραμίδας, με την οποία επιτεύχθηκε καλύτερο 3D μοντέλο. Δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα με τη χρήση του αλγορίθμου SfM-MVS που προσφέρει το λογισμικό, το πρώτο με τη χρήση των εικόνων με στοίβαξη της εστίασης (FS) και το δεύτερο με τη χρήση των εικόνων allfocus (AF).



Σχήμα 4.15: Παράδειγμα με focus stacked εικόνα (Kontogianni et al., 2017b).

Μια αντικειμενική αξιολόγηση της ποιότητας των παραγόμενων τρισδιάστατων μοντέλων μπορεί να βασίζεται στον αριθμό των κορυφών που παράγονται κατά τη χωρική ευθυγράμμιση των φωτογραφιών (προσαρμογή δέσμης) και στον αριθμό των κορυφών που παράγονται κατά την ανακατασκευή του πυκνού νέφους σημείων. Ο πίνακας 4.16 απεικονίζει αυτές τις τιμές. Η αύξηση του συνολικού αριθμού των κορυφών (αντιστοιχισμένα αντίστοιχα σημεία) που παράγονται κατά την συνόρθωση των εικόνων όταν χρησιμοποιείται το σύνολο εικόνων FS αποτελεί ένδειξη ότι η προσέγγιση στοίβαξης εστίασης επηρεάζει τη διαδικασία.

Από την διαδικασία προέκυψε, μεγαλύτερος αριθμός κορυφών μετά την εφαρμογή της πυκνής στερεοσκοπικής ανακατασκευής. Παρόλο που οι τιμές αυτές δεν χαρακτηρίζουν απαραίτητα την ποιότητα της μετρητικής εκτίμησης, μπορούν όμως να καταστήσουν σαφές ότι η στοίβαξη εικόνων επηρεάζει στην διαδικασία ανακατασκευής.

	All-focus (AF)	Focus stacking (FS)
Number of vertices in Sparse Point Cloud	41.799	47.623
Number of vertices in Dense Point Cloud	4.067.367	4.236.623
Meshes	813.473	847.324

Σχήμα 4.16: Αποτελέσματα από Agisoft Photoscan (MetaShape) (Kontogianni et al., 2017b).

Προκειμένου να συγκριθούν τα δύο μοντέλα SfM-MVS (AF και FS) με το μοντέλο αναφοράς (GD) που παρήχθη από το σύστημα structuredlight, ήταν απαραίτητο να μοιράζονται όλα το ίδιο σύστημα αναφοράς. Αφού έγινε αυτό, τα εν λόγω προσαρμοσμένα μοντέλα συγκρίθηκαν με το μοντέλο GD χρησιμοποιώντας το λογισμικό CloudCompare, προκειμένου να εκτιμηθούν τυχόν επιφανειακές αποκλίσεις. Φυσικά, τα μοντέλα έπρεπε να ευθυγραμμιστούν και επετεύχθη από το ίδιο λογισμικό. Επρόκειτο για μια ημι-αυτοματοποιημένη διαδικασία, καθώς τα αρχικά κοινά σημεία επιλέγονταν χειροκίνητα μεταξύ κάθε ζεύγους μοντέλων (AF-GD και FS-GD) (Εικόνα 4.17).



Σχήμα 4.17: Σημεία επιλογής για ευθυγράμμιση των συγκρινόμενων μοντέλων (Kontogianni et al., 2017b).

Το σχήμα 4.18 παρουσιάζει τα σφάλματα RMS που εκτιμήθηκαν μετά την ευθυγράμμιση καθενός από τα δύο ζεύγη μοντέλων.

Procedure	All Focus AF-GD	Focus Stacking FS-GD
Alignment	0,6854	0,7260
Registration	0,7542	0,8174

Σχήμα 4.18: Το σφάλμα RMS που εκτιμήθηκε μετά την ευθυγράμμιση καθενός από τα δύο ζεύγη μοντέλων, Kontogianni et al. (2017b).

4.8 Ανάλυση των αποτελεσμάτων των εφαρμογών

4.8.1 Επίδραση τελεστών χαρτογράφησης τόνων HDR σε 3D μοντέλα

Η ανακατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων βασίζεται στην ακριβή ανίχνευση, περιγραφή και αντιστοίχιση σημείων κλειδιών. Επομένως, πρέπει να εντοπιστούν τα τοπικά χαρακτηριστικά που θα αποτελέσουν σταθερά και καλά καθορισμένα σημεία. Σύμφωνα με τους Tuytelaars & Mikolajczyk (2008), η επαναληψιμότητα, η διακριτικότητα, η τοπικότητα, η ποσότητα, η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα είναι οι σημαντικότερες ιδιότητες για τους περιγραφείς τοπικών χαρακτηριστικών. Η παρούσα μελέτη επικεντρώθηκε σε ανιχνευτές χαρακτηριστικών που έχουν κατασκευαστεί με στόχο την υπολογιστική αποδοτικότητα, δεδομένου ότι πολύπλοκες μαθηματικές πράξεις πρέπει να εκτελούνται για κάθε θέση στο χώρο συντεταγμένων των χαρακτηριστικών (Tuytelaars & Mikolajczyk, 2008). Στην μελέτη των Suma et al. (2016), χρησιμοποιήθηκαν τρεις από τους πιο δημοφιλείς ανιχνευτές χαρακτηριστικών:

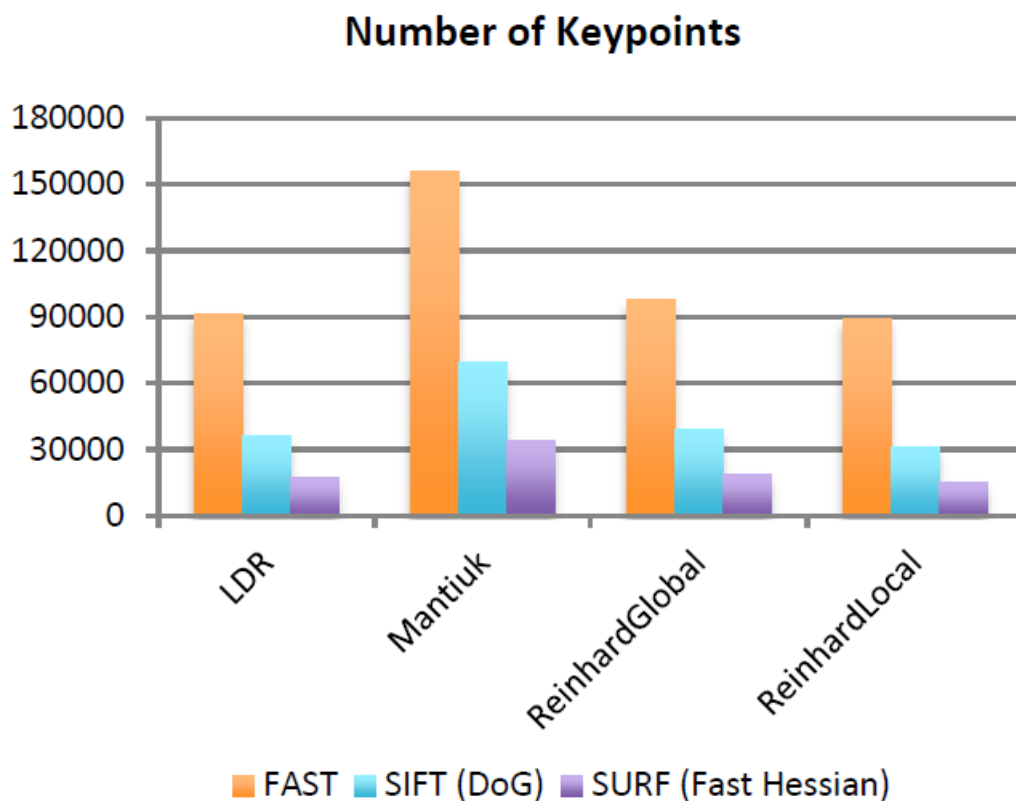
- **Difference of Gaussians - (DoG)**, μια μέθοδος ανίχνευσης σημείων κλειδιών που χρησιμοποιείται από το SIFT (Lowe, 1999- Lowe, 2004).
- **Fast Hessian approximation**, μια διαδικασία ενσωματωμένη στο πακέτο SURF (Speeded Up Robust Features) (Bay, Tuytelaars, & Van Gool, 2006).
- **Features from Accelerated Segment Test -(FAST)**, που βασίζεται στο Accelerated Segment Test (AST) (Rosten & Drummond, 2006).

Τα κριτήρια αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν ο αριθμός των χαρακτηριστικών σημείων, ο αριθμός των έγκυρων αντιστοιχιών που επιτυγχάνονται και το ποσοστό επαναληψιμότητας (Schmid, Mohr, & Bauckhage, 2000). Επιπλέον, διενεργήθηκε οπτικός έλεγχος με την απεικόνιση των σημείων στις εικόνες και την αξιολόγηση της πυκνότητας και της κατανομής τους στο χώρο των εικόνων. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα HDR από τέσσερις τοποθεσίες πολιτιστικής κληρονομιάς. Από την μονή Καισαριανής (Ελλάδα), εκκλησία Ασινού (Κύπρος), Château des Baux (Γαλλία) και κάστρο Buonconsiglio (Ιταλία).

Στην προκειμένη εργασία Suma et al. (2016), το RR δεν χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την αξιολόγηση των διαφόρων ανιχνευτών σημείων κλειδιών, αλλά περισσότερο για τη σύγκριση διαφορετικών μεθόδων χαρτογράφησης τόνων που εφαρμόζονται στο ίδιο ζεύγος εικόνων HDR. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα επίπεδης εικόνας από το κάστρο Buonconsiglio in Trento. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.24, η

τοιχογραφία έχει φωτογραφηθεί από διαφορετικά σημεία θέασης και οι δύο ακολουθίες έχουν υποστεί επεξεργασία και χαρτογράφηση τόνων. Για την ανίχνευση των σημείων κλειδιών χρησιμοποιήθηκε το SIFT (DoG). Η σύγκριση πραγματοποιείται μεταξύ ζευγών εικόνων tone-mapped με διαφορετικές θέσεις λήψης και υπολογίζεται ως ο λόγος των σημείων-κλειδιών μεταξύ μιας δεδομένης εικόνας και μιας εικόνας αναφοράς.

Σύμφωνα με το σχήμα 4.19 , η επίδραση των TMO ReinhardLocal και ReinhardGlobal σε σχέση με την LDR δεν είναι σημαντική, εφόσον οι τιμές και για τις τρεις μεθόδους ανίχνευσης αντιστοίχως είναι σχεδόν ίδιες. Αντιθέτως, στη σύγκριση της εικόνας Μαντιουκ με την ΛΔΡ παρατηρείται, σημαντικά αυξημένος αριθμός (σχεδόν διπλάσιος) ανιχνευμένων σημείων κλειδιών και για τις τρεις μεθόδους ανίχνευσης αντίστοιχα.

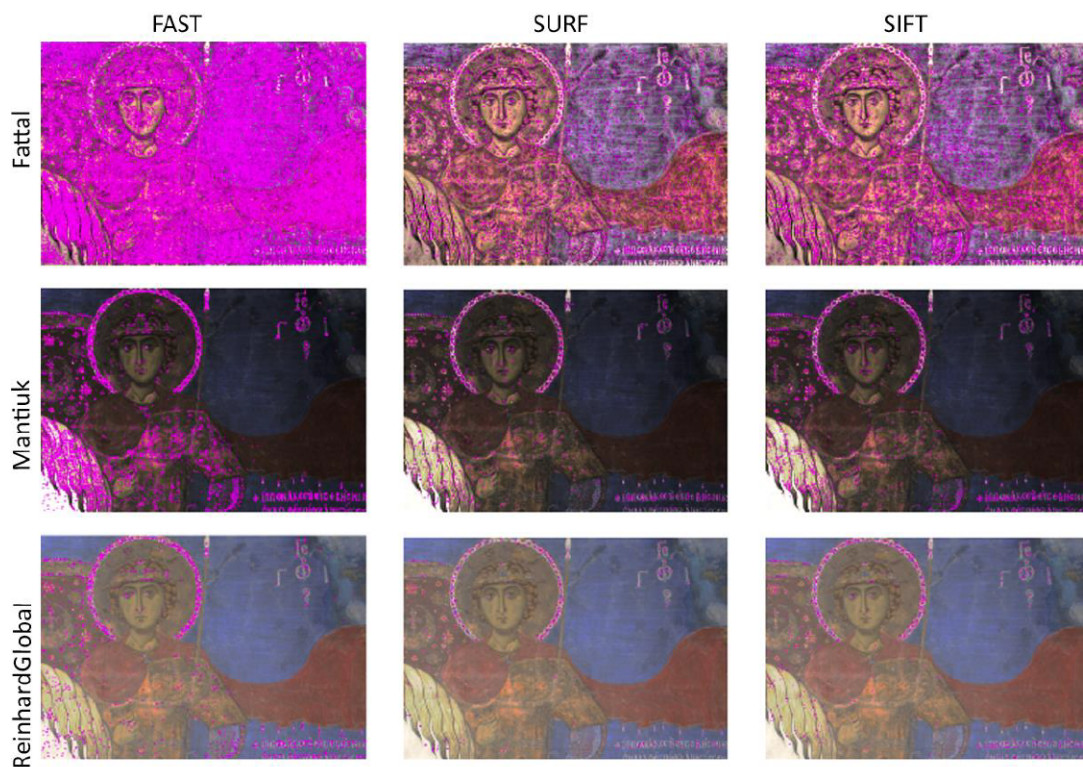


Σχήμα 4.19: Σύγκριση μέσου όρου σημείων κλειδιών που ανιχνεύθηκαν με FAST, SIFT, SURF για τις LDR, Mantiuk, ReinhardGlobal, ReinhardLocal εικόνες (Suma et al., 2016).

Επίσης στην σύγκριση των εικόνων του Mantiuk με τον Fattal, ο δεύτερος έχει ανιχνεύσει περίπου τετραπλάσιο αριθμό σημείων κλειδιών. Όπως αναφέρουν χαρακτηριστικά και οι συγγραφείς Suma et al. (2016), θεωρείται υπερβολικά μεγάλος αριθμός και συγκεκριμένα ο συνδυασμός με τον FAST υπερβαίνει το 5% των συνολικών εικονοστοιχείων της εικόνας. Πιθανώς να συμβαίνει λόγω της ικανότητας του Fattal να ενισχύει σημαντικά την αντίθεση ακόμα και σε περιοχές πολύ σκοτεινές, καθώς και στον αυξημένο θόρυβο της εικόνας.

Τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν επίσης οπτικά με την απεικόνιση όλων των σημείων που ανιχνεύθηκαν στις εικόνες. Στην εικ. 4.20, χρησιμοποιείται μια εικόνα μιας τοιχογραφίας στην εκκλησία του Ασινού για να απεικονιστεί η πυκνότητα των σημείων και

η κατανομή τους στην περιοχή της εικόνας σε διαφορετικούς συνδυασμούς TMO και ανιχνευτών. Η LDR σε σύγκριση με εκείνες τις ReinhardGlobal και ReinhardLocal φαίνεται πιο αποδοτική και για στις τρεις περιπτώσεις. Όμως η Mantiuk υπερτερεί έναντι της LDR, καθότι παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε περιοχές και για τους τρεις ανιχνευτές. Ίσως συνδυαστικά με τον Fast ανιχνεύει υπερβολικά σε ένα μικρό τμήμα της όπως φαίνεται χαρακτηριστικά. Τέλος όσον αφορά την πυκνότητα (όπως αναμενόταν) ο συνδυασμός FAST και Fattal παράγει υπερβολική ποσότητα σημείων που καλύπτει σχεδόν πλήρως την εικόνα. Ακόμα και στον συνδυασμό με τους άλλους δύο ανιχνευτές (SURF και SIFT) παράγει μεγάλο πλήθος ακόμα και σε περιοχές χωρίς ιδιαίτερη πληροφορία, ίσως λόγω της τοπικής δράσης του που βασίζεται σε μια μικρή γειτονιά γύρω από κάθε εικονοστοιχείο.



Σχήμα 4.20: Σημεία κλειδιά που εντοπίστηκαν για κάθε TMO εικόνα σε συνδυασμό με τους ανιχνευτές FAST, SURF, SIFT για τοιχογραφία από τον Ι.Ν.Π της Ασίνου (Suma et al., 2016).

Το σχήμα 4.22 (LDR - Mantiuk) επίσης αποδεικνύει την ικανότητα των εικόνων HDR να βελτιώνουν τις ελάχιστες ορατές λεπτομέρειες και στην συνέχεια να βελτιώνουν την κατανομή των σημείων κλειδιών σε πολύ σκοτεινές ή φωτεινές περιοχές.

Η συνταύτιση σημείων κλειδιών (matching) πραγματοποιήθηκε μεταξύ διαδοχικών εικόνων στο των συνόλων δεδομένων. Ο συνολικός μέσος όρος των αποτελεσμάτων σε όλα τα σύνολα δεδομένων για τον αριθμό των ταυτίσεων και τον αριθμό των καλών ταυτίσεων παρουσιάζεται στα σχήματα 4.23 και 4.24, αντίστοιχα.

Οι Fattal και Mantiuk ξεπερνούν το Reinhard μεθόδους και την εικόνα LDR όσον αφορά τον αριθμό των ταυτίσεων. Όπως αναμενόταν, για όλους τους τους τελεστές, ο ανιχνευτής FAST παράγαγε τον μεγαλύτερο αριθμό αντιστοιχιών, δεδομένου ότι ανιχνεύει περισσότερα σημεία.



Σχήμα 4.21: Σημεία κλειδιά που εντοπίστηκαν για κάθε LDR εικόνα σε συνδυασμό με τους ανιχνευτές FAST, SURF, SIFT για τοιχογραφία από τον Ι.Ν.Π της Ασίνου (Suma et al., 2016).

Όσο για καλές συνταυτίσεις και πάλι οι Mantiuk και Fattal υπερτερούν των Reinhard και LDR. Ωστόσο, ο SURF φαίνεται να παράγει αντιστοιχίσεις καλύτερης ποιότητας, ενώ η απόδοση του FAST μειώνεται σημαντικά. Παρατηρείται στις εικόνες HDR να δημιουργούνται περισσότερα συγκριτικά με την LDR τόσο σημεία συντάυτισης, όσο και “καλά” σημεία συντάυτισης.

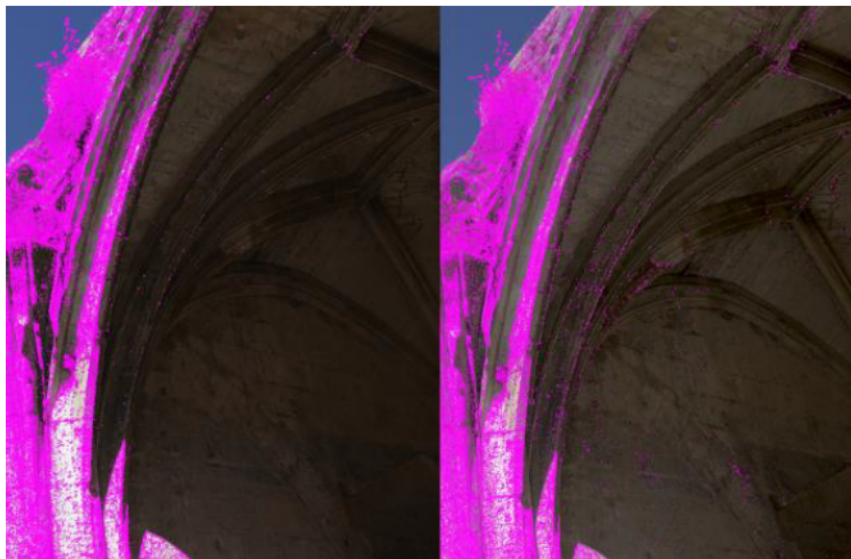
Ο ανιχνευτής SURF (Fast Hessian) αποδεικνύεται πιο αποτελεσματικός από τους FAST και SIFT - DoG. Πράγματι, ο συνδυασμός εικόνων με χαρτογράφηση τόνων με τον TMO του Mantiuk με Fast Hessian δίνει το καλύτερο ποσοστό καλών ταυτίσεων (σχήμα 4.24). Η ReinhardLocal είναι η λιγότερο ισχυρή μέθοδος, ενώ ο αριθμός των καλών ταυτίσεων εμφανίζεται συγκρίσιμος μεταξύ των εικόνων ReinhardGlobal και LDR.

Μια σημαντική παρατήρηση που γίνεται εμφανής από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.25 είναι το γεγονός ότι ο μεγάλος αριθμός των σημείων κλειδιών δεν αποτελεί απαραίτητα σύμπτωμα της ποιότητάς τους, όπως αποδείχθηκε στην περίπτωση του Fattal. Ο RR για το Fattal είναι, στην πραγματικότητα, ο δεύτερος χαμηλότερος RR, με μόλις 0,38.

Το ποσοστό επαναληψιμότητας (RR) υπολογίζεται, ως ο λόγος του συνολικού αριθμού των συντάυτισης προς τον ελάχιστο αριθμό σημείων κλειδιών που ανιχνεύονται μεταξύ των δύο εικόνων (Příbyl, Chalmers, & Zemčík, 2012). Εισήχθη για πρώτη φορά από τους Schmid κ.ά. (2000) και θεωρείται ως ένα τυπικό κριτήριο που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο οι ανιχνευτές χαρακτηριστικών σημείων επηρεάζονται από διάφορους μετασχηματισμούς εικόνας, όπως αλλαγές στην περιστροφή, την κλίμακα ή το σημείο λήψης. Η μέθοδος αυτή ελέγχει κατά πόσον τα ίδια σημεία-κλειδιά ανιχνεύονται και στις δύο όψεις. Το RR θεωρείται ανάλογο της ποιότητας του ανιχνευτή. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή RR τόσο πιο “ανθεκτικός” είναι ένας ανιχνευτής σε έναν συγκεκριμένο μετασχηματισμό.

Ως εκ τούτου, οι Suma et al. (2016) προτείνουν ότι, από τους τέσσερις εξεταζόμενους TMO, θα πρέπει να επιλεγεί ο TMO Mantiuk διότι:

- έχει πολύ καλές επιδόσεις σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν,



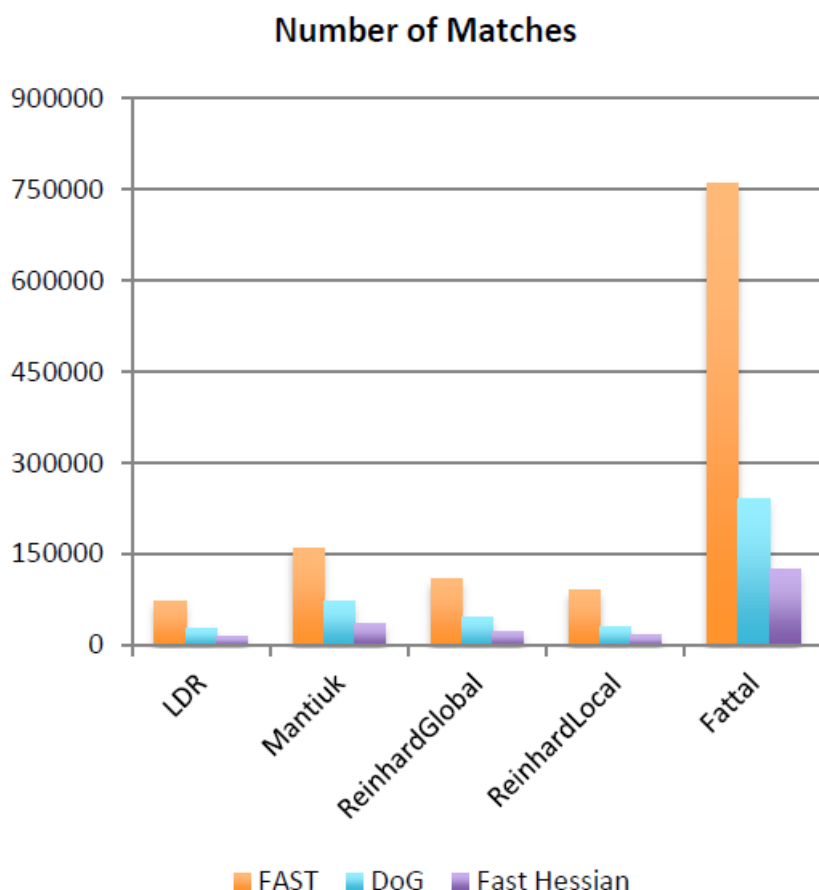
Σχήμα 4.22: Στην δεξιά εικόνα (Mantiuk) εμφανίζονται εμφανώς περισσότερα εντοπισμένα σημεία κλειδιά στην σκοτεινή περιοχή (της σκιάς) σε σχέση με την αριστερή (LDR) εικόνα - Château des Baux (Suma et al., 2016).

- προσφέρει πιο φυσική και ακριβή απόδοση χρωμάτων,
- δεδομένου ότι πρόκειται για video TMO, προσφέρει συνοχή και ομοιογένεια φωτεινότητας σε ολόκληρη την ακολουθία του συνόλου εικόνων,
- και φυσικά επειδή πρόκειται για ένα παγκόσμιο TMO, δεν υπάρχει κίνδυνος να αλλοιωθεί η γεωμετρία της εικόνας. Οπότε δεν διακυβεύεται η γεωμετρική ακρίβεια του παραγόμενου τρισδιάστατου μοντέλου.

4.8.2 Βελτίωση ορθοφωτομωσικών με εικόνες HDR

Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρική αξιοπιστία των εικόνων HDR οι Ntregka et al. (2013) καταλήγουν με ασφάλεια στο συμπέρασμα ότι για την εφαρμογή τους οι εικόνες HDR αποδείχθηκαν υψηλότερης ποιότητας από τις κανονικές εικόνες. Με άλλα λόγια, με την υπεροχή τους σε πληροφορίες μπορούν να είναι πιο αποτελεσματικές σε εφαρμογές πολιτιστικής κληρονομιάς όπως η αποκατάσταση ή η χαρτογράφηση κινδύνων. Υποθέτοντας ότι δεν υπήρχε δυνατότητα παρέμβασης στις συνθήκες φωτισμού του φωτός της σκηνής, η HDRi ήταν η καλύτερη λύση, καθώς αύξησε το υψηλό δυναμικό εύρος και, ως εκ τούτου, βελτίωσε την ποιότητα των πληροφοριών που καταγράφηκαν. Επιπλέον, η χρήση εικόνων HDR απαλλάσσει από την ανάγκη ψηφιακής ραδιομετρικής μετεπεξεργασίας των ορθοφωτομωσικών. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, δεδομένου ότι η ψηφιακή μετεπεξεργασία είναι συχνά μια σημαντικά χρονοβόρα εργασία.

Μια ακόμη θετική πτυχή της απεικόνισης HDR είναι ότι δεν αποκλείει τις συμβατικές ψηφιακές φωτογραφικές μεθόδους, δεδομένου ότι οι ακολουθίες έκθεσης με παρένθεση μπορούν να περιλαμβάνουν την προεπιλεγμένη εικόνα έκθεσης OEV. Έτσι, υπάρχει πάντα η επιλογή της απόρριψης μιας εικόνας HDR εάν το αποτέλεσμα δεν είναι το επιθυμητό και της χρήσης μιας συμβατικής εικόνας LDR. Ένα ακόμη αξιοσημείωτο



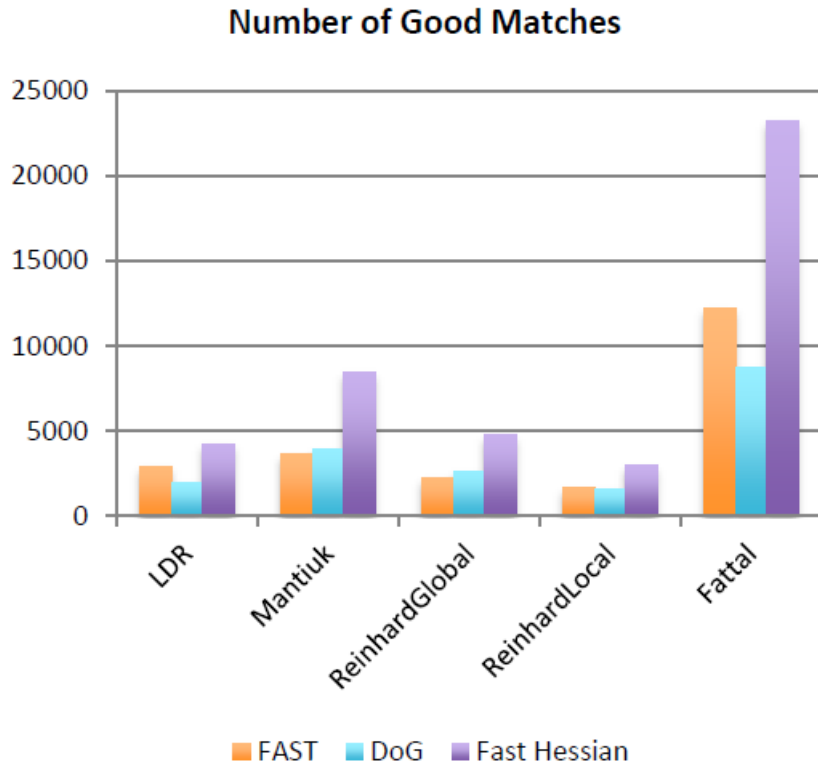
Σχήμα 4.23: Πλήθος σημείων συντάυξης (Suma et al., 2016).

πλεονέκτημα της HDR είναι ότι υπάρχει ευρεία επιλογή λογισμικού HDR, συμπεριλαμβανομένων εμπορικών, ελεύθερων και ανοικτού κώδικα. Αυτά τα λογισμικά είναι απλά και φιλικά προς το χρήστη και παρέχουν στο χρήστη μια ποικιλία μεθόδων χαρτογράφησης τόνων και λειτουργιών επεξεργασίας εικόνας. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει μια τελική εικόνα πολύ κοντά στην επιθυμία του.

4.8.3 Βελτίωση της ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων με εικόνες HDR

Στην εργασία της Kontogianni et al. (2015), μελετήθηκε η συμπεριφορά των εικόνων HDR σχετικά με ορισμένους τελεστές ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων. Έπειτα από τις πειραματικές δοκιμές προέκυψαν οι συγκρίσεις μεταξύ εικόνων SDR και εικόνων HDR με χαρτογράφηση τόνου όσον αφορά την απόδοση και την ταχύτητα. Η αξιολόγηση μπορεί να γίνει ποιοτικά (οπτικά) από τις εικόνες που προβάλλονται στην αντίστοιχη ενότητα. Όπως παρατηρήθηκε στα σχήματα 4.9 - 4.12, η κατανομή των σημείων χαρακτηριστικών που ανιχνεύονται παραμένει η ίδια τόσο για SDR όσο και για HDR. Το πλήθος όμως των σημείων αυξάνεται για τις εικόνες HDR σε κρίσιμες μάλιστα περιοχές, όπου σημαντική πληροφορία θα παρέμενε κρυμμένη.

καθώς επίσης και αριθμητικά από τα σχήματα 4.26 που ακολουθούν. Οι πίνακες περιέχουν, τον μέσο όρο των σημείων χαρακτηριστικών που ανιχνεύονται για όλες τις εικόνες που έχουν ληφθεί και τον χρόνο που απαιτείται για την ανίχνευση τους αντίστοιχα.



Σχήμα 4.24: Πλήθος καλών σημείων συντάυτησης (Suma et al., 2016).

Table 1: Average feature points detected on SDR and HDR images for both scenes.

		SIFT	SURF	FAST	ORB
Scene 1	<i>SDR</i>	7062	6292	2730	19106
	<i>HDR</i>	13639	7663	6752	32627
Scene 2	<i>SDR</i>	5722	6492	2385	16902
	<i>HDR</i>	19013	15391	9315	23893

Table 2: Average time needed (in sec.) to detect feature points on SDR and HDR images for both scenes.

		SIFT	SURF	FAST	ORB
Scene 1	<i>SDR</i>	84.59	27.20	0.31	1.56
	<i>HDR</i>	82.74	27.79	0.32	1.76
Scene 2	<i>SDR</i>	75.72	29.34	0.29	1.53
	<i>HDR</i>	79.84	30.09	0.33	1.76

Σχήμα 4.26: Μέσος όρος σημείων που εντοπίστηκαν σε SDR και HDR εικόνες και για τις δύο σκηνές. Πίνακας 2: Μέσος χρόνος που χρειάστηκε (σε δευτ.) για να ανιχνευθούν χαρακτηριστικά σημεία σε SDR και HDR εικόνες για τις τις δυο σκηνές (Kontogianni et al., 2015).

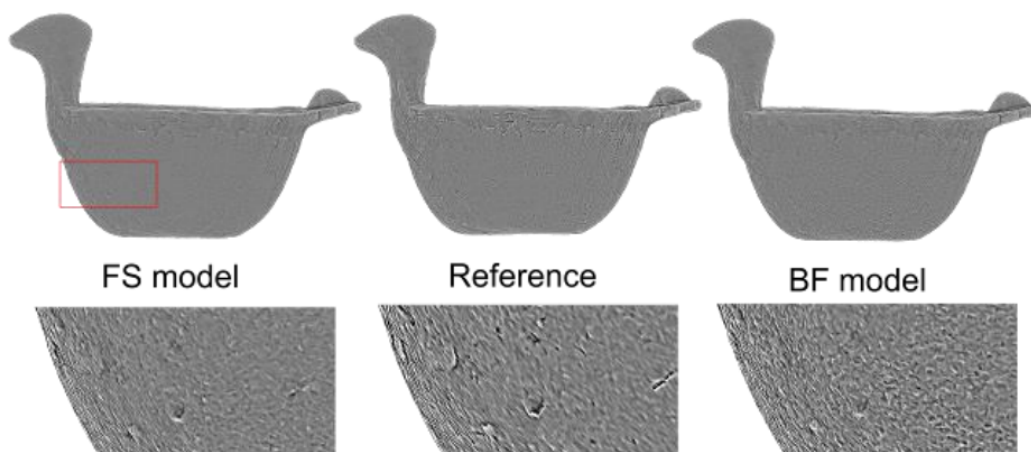
<i>TMO</i>	<i>RR</i>
Fattal	0.38
Mantiuk	0.5
ReinhardGlobal	0.45
ReinhardLocal	0.33
LDR	0.46

Σχήμα 4.25: Ποσοστό επαναληψιμότητας που υπολογίζεται για διαφορετικές μεθόδους χαρτογράφησης τόνων με $\epsilon=10$ εικονοστοιχεία. Ο αριθμός των βασικών σημείων που εντοπίστηκαν σε κάθε εικόνα περιορίστηκε σε 1000 σημεία (Suma et al., 2016).

Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική αύξηση του αριθμού των σημείων χαρακτηριστικών που ανιχνεύονται σε σχετικά ίδιο χρονικό διάστημα κατά τη χρήση εικόνων HRD σε σχέση με τις εικόνες SRD. Πιστεύεται ότι ένας μεγαλύτερος αριθμός σωστά εντοπισμένων σημείων κλειδιών θα αυξήσει ενδεχομένως την απόδοση αντιστοίχισης και στη συνέχεια τα παράγωγα όπως την τρισδιάστατη ανακατασκευή των σκηνών.

4.8.4 Αξιολόγηση FS vs BF vs Reference - 3D μοντέλων (focus stacking)

Σύμφωνα με τους Kontogianni et al. (2017a), βάσει οπτικής αξιολόγησης, των τρισδιάστατων μοντέλων, το τρισδιάστατο μοντέλο BF παρουσιάζει υψηλότερο επίπεδο θορύβου σε σύγκριση με το τρισδιάστατο μοντέλο FS. Το Σχήμα 4.27 απεικονίζει τα διαφορετικά επίπεδα επιφανειακού θορύβου μεταξύ του μοντέλου FS, του μοντέλου αναφοράς και του τρισδιάστατου μοντέλου BF. Παρατηρείται επίσης, στις μεγεθυμένες περιοχές που απεικονίζονται στο σχήμα 4.27 ότι το μοντέλο FS μοιάζει περισσότερο με το μοντέλο αναφοράς, καθώς τα επιφανειακά χαρακτηριστικά είναι περισσότερο ορατά από ό,τι στο μοντέλο BF.



Σχήμα 4.27: Υποκειμενική σύγκριση ως προς το επίπεδο θορύβου για τα FS - Reference - BF μοντέλα (Kontogianni et al., 2017a).

Για τη σύγκριση των μοντέλων SfM-MVS με το μοντέλο αναφοράς που παρήχθη από τον σαρωτή δομημένου φωτός ήταν απαραίτητο όλα να βρίσκονται στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων αναφοράς. Κατά τη διαδικασία ευθυγράμμισης, επιλέχθηκαν χειροκίνητα κοινά σημεία μεταξύ κάθε ζεύγους μοντέλων. Στον πίνακα 4.28 παρουσιάζονται τα σφάλματα που υπολογίστηκαν κατά τη διαδικασία ευθυγράμμισης και καταχώρισης.

Procedure	BF-reference	FS- reference
Alignment	0.43	0.40
Registration	0.07	0.06

Σχήμα 4.28: Σφάλματα σε mm κατά την ευθυγράμμιση και την καταχώριση (Kontogianni et al., 2017a).

Για τη σύγκριση της απόκλισης της επιφάνειας μεταξύ κάθε ζεύγους μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση της απόστασης μεταξύ νέφους και πλέγματος του λογισμικού (CloudCompare). Η συνάρτηση υπολογίζει τις αποστάσεις μεταξύ κάθε κορυφής του νέφους σημείων προς το πλησιέστερο τρίγωνο της επιφάνειας του πλέγματος. Η απόσταση αυτή υπολογίζεται ως εξής:

- εάν η ορθογώνια προβολή της κορυφής βρίσκεται εντός της επιφάνειας που ορίζεται από ένα τρίγωνο, υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ της κορυφής και του σημείου τομής της στην επιφάνεια,
- διαφορετικά οι αλγόριθμοι εκτιμούν την απόσταση μεταξύ της κορυφής και της προβολής της στην πλησιέστερη ακμή ή κορυφή του τριγώνου (Koutsoudis et al. 2013).

Τα τρισδιάστατα μοντέλα BF και FS χρησιμοποιήθηκαν ως νέφη σημείων, ενώ το τρισδιάστατο μοντέλο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ως τριγωνικό πλέγμα. Ο πίνακας 4.29 συνοψίζει τις επιφανειακές αποκλίσεις που υπολογίστηκαν για τα τρισδιάστατα μοντέλα BF και FS σε σύγκριση με το μοντέλο αναφοράς.

Procedure	BF-reference	FS- reference
Mean distance (mm)	0.003364	-0.002669
Std deviation (mm)	0.066985	0.074522

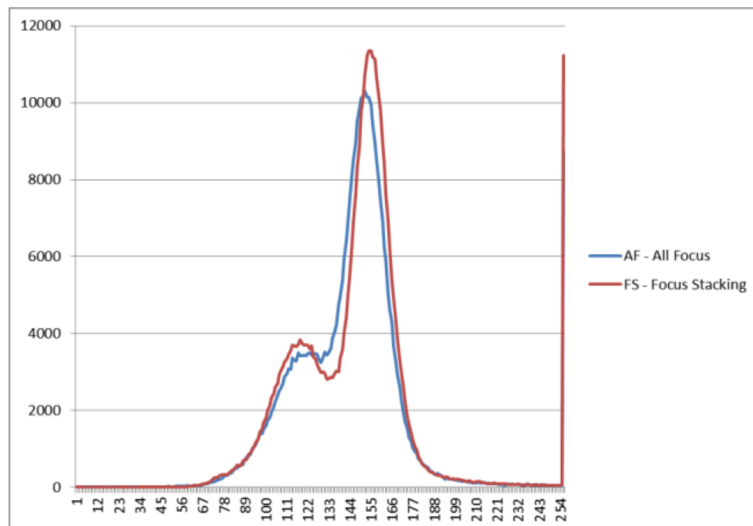
Σχήμα 4.29: Πίνακας: Επιφανειακές αποκλίσεις των BF, FS 3D μοντέλων σε σχέση με το 3D μοντέλο αναφοράς (Kontogianni et al., 2017a).

Από την εργασία των Kontogianni et al. (2017a), παρουσιάστηκε μια προσπάθεια να εξεταστεί κατά πόσον η τεχνική στοίβαξης εστίασης επηρεάζει την τρισδιάστατη ανακατασκευή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τροποποιεί και επηρεάζει θετικά σε κάποια σημαντικά φωτογραμμετρικά στάδια και συνεπώς οδηγεί σε ένα λιγότερο θορυβώδες τρισδιάστατο μοντέλο με περισσότερες εμφανείς λεπτομέρειες επιφάνειας. Η στοίβαξη εστίασης είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την βελτίωση σε περιπτώσεις όπως μακροφωτογραφία, όπου το πρόβλημα του ρηχού DoF είναι προφανές και επιδρά θετικά.

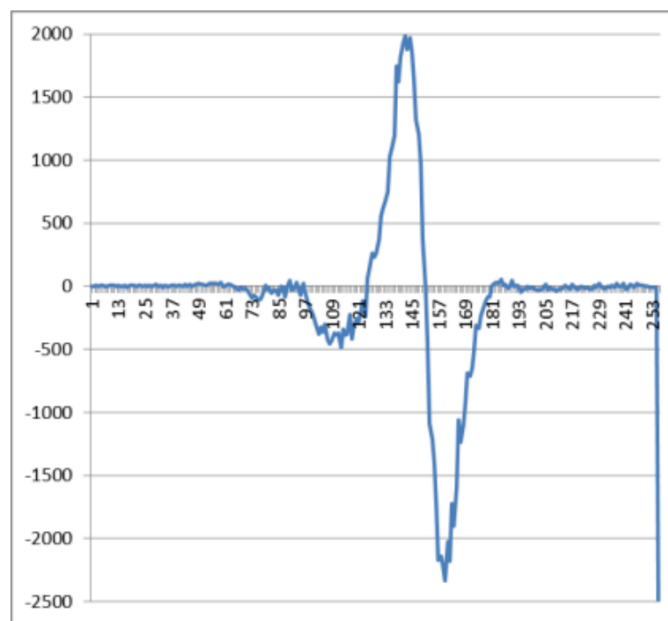
4.8.5 Αξιολόγηση τρισδιάστατων μοντέλων FS - AF vs GD

Για τη σύγκριση της απόκλισης της επιφάνειας μεταξύ κάθε ζεύγους μοντέλων (AF-GD και FS-GD) χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση απόστασης από το σύννεφο στο πλέγμα, καθώς θεωρείται πιο ασφαλής στον τοπικό θόρυβο. Η συνάρτηση σύγκρισης παρήγαγε ένα σύνολο ιστογραμμάτων (Σχήμα 4.30), ένα για κάθε ζεύγος συγκρινόμενων μοντέλων. Κάθε στήλη ιστογράμματος αντιπροσωπεύει μια δεδομένη ευκλείδεια απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και μιας όψης που κυμαίνεται από -1mm έως 1mm και κάθε στήλη περιέχει έναν συγκεκριμένο αριθμό αποστάσεων που εμπίπτουν σε ένα δεδομένο εύρος. Έτσι, μια υψηλότερη συγκέντρωση αποστάσεων κοντά στο μηδέν (στήλη 128) υποδηλώνει μικρότερη απόκλιση μεταξύ δύο μοντέλων και, ως εκ τούτου, μια προσέγγιση που αποδίδει πλησιέστερα προς τη αληθής βάση αναφοράς. Συνολικά αξιολογήθηκαν 407.554 αποστάσεις στη σύγκριση AF-GD και συνολικά 424.474 αποστάσεις στην περίπτωση του SF-GD. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο SF έχει μεγαλύτερο αριθμό κορυφών σε σχέση με το μοντέλο AF.

Το ιστόγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.31 περιλαμβάνει 256 θέσεις, όπου η μεσαία θέση (128) αντιπροσωπεύει το καλύτερο δυνατό εύρος αντιστοίχισης (- 0,007-0,001mm) μεταξύ δύο επιφανειών. Σε αυτό το μεσαίο πεδίο το μοντέλο AF κατέχει συνολικά 3.074 αποστάσεις, ενώ το μοντέλο FS κατέχει 3.309 αποστάσεις. Ένας μεγάλος αριθμός ακραίων τιμών υπάρχει στο πιο απομακρυσμένο πεδίο στη θετική πλευρά του ιστογράμματος. Πρόκειται για ακραίες τιμές που αποδίδονται κατά τη σύγκριση ενός πλήρους τρισδιάστατου μοντέλου (GD) με τμήματα. Τα μοντέλα AF και SF δεν είναι πλήρη - το εσωτερικό του αντιγράφου λείπει λόγω αποκρύψεων που υπήρχαν από τη μοναδική γωνία φωτογράφισης.



Σχήμα 4.30: Απόκλιση επιφανειών των AF , FS σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς GD (Kontogianni et al., 2017b).

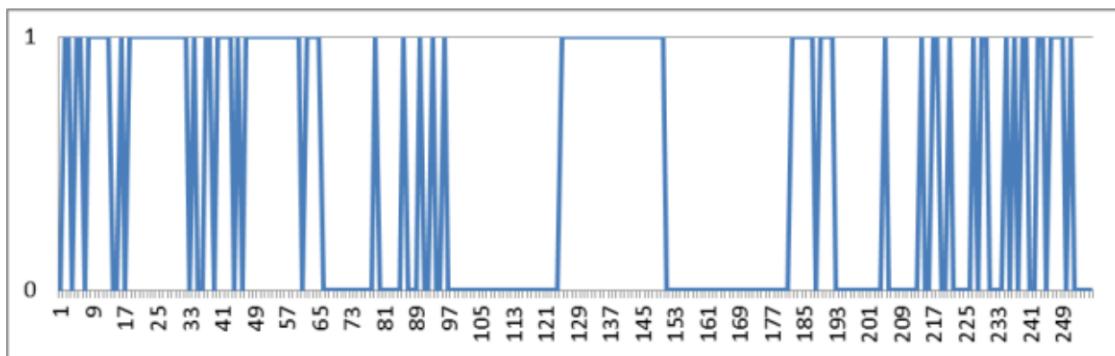


Σχήμα 4.31: Ιστογράμμο σημειακών τιμών απόκλισης μεταξύ AF, SF σε σύγκριση με το GD (Kontogianni et al., 2017b).

Επιπλέον, δεδομένου ότι που βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο του παραπάνω ιστογράμματος έχουν μεγαλύτερη σημασία λόγω του ότι αντιπροσωπεύουν επιφάνειες που είναι παρόμοιες με το GD, είναι επίσης σημαντικό να αξιολογηθεί η απόδοση των δύο προσεγγίσεων στην περιοχή αυτή. Στα πειράματά, επεκτάθηκε αυτή η σύγκριση και επιλέχθηκαν ως πιο σημαντικά πεδία εκείνα που αντιπροσωπεύουν αποστάσεις που κυμαίνονται από $-0,08$ έως $0,08$ mm (πεδία 118-138). Σε αυτή την περιοχή του ιστογράμματος το μοντέλο AF κατέχει συνολικά 75.500 αποστάσεις, ενώ το SF κατέχει 68.343. Στην περίπτωση της AF οι αποστάσεις αυτές χωρίζονται σε 31.102 που βρίσκονται στην αρνητική πλευρά ($-0,08 - 0$ mm) και 44.398 που βρίσκονται στη θετική πλευρά

(0-0,08mm). Αυτές οι ισοδύναμες τιμές της SF είναι 32,726 και 35,617. Σημειώστε ότι κάθε μοντέλο παρουσιάζει καλύτερη απόδοση προς μία κατεύθυνση.

Επιπλέον, το Σχήμα 4.32 απεικονίζει μια δυαδική αναπαράσταση ενώ ένα δυαδικό τμήμα του ιστογράμματος στο Σχήμα 4.30 κατέχει μικρότερο αριθμό αποστάσεων για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις (AF και SF). Στις περιπτώσεις όπου το μοντέλο SF έχει μικρότερο αριθμό αποστάσεων σε μια συγκεκριμένη θέση, τότε το ιστογράμματος που ακολουθεί έχει τιμή ένα. Από την άλλη πλευρά, έχει τιμή μηδέν. Σύμφωνα με το Σχήμα 4.32, το μοντέλο SF έχει συνολικά 112 θέσεις για τις οποίες υπάρχει μικρότερος αριθμός αποστάσεων.



Σχήμα 4.32: Δυαδική αναπαράσταση των τιμών με μικρότερες αποστάσεις. Η τιμή 1 δίνεται όταν το SF μοντέλο έχει μικρότερη απόσταση, ενώ αντίθετα η τιμή 0 δίνεται όταν το AF μοντέλο έχει μικρότερη απόσταση από το μοντέλο αναφοράς (Kontogianni et al., 2017b).

Η παρούσα εργασία Kontogianni et al. (2017b), αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια για μια σε βάθος ανάλυση και πειραματική αξιολόγηση των επιπτώσεων της στοίβαξης της εστίασης στις τρισδιάστατες ανακατασκευές με βάση το SfM-MVS. Η εργασία θεωρείται ως έργο σε εξέλιξη και απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση, καθώς τα επιτευχθέντα αποτελέσματα δεν δείχνουν σαφώς ενώ η μέθοδος επιτρέπει τη δημιουργία ακριβέστερων τρισδιάστατων μοντέλων.

Επί του παρόντος, το πείραμα αυτό επεκτείνεται με τη χρήση άλλων φακών και διατάξεων κάμερας, προκειμένου να αξιολογηθεί διεξοδικά εάν η στοίβαξη εστίασης είναι σε θέση να προσφέρει συστηματικά βελτίωση στη φωτογραμμετρική τρισδιάστατη ανακατασκευή. Επιπλέον, εξετάζονται πολλά διαφορετικά αντικείμενα για πειραματισμό, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή αντικειμενικών και γενικευμένων συμπερασμάτων.

4.8.6 Φωτογραμμετρική απεικόνιση κατολισθήσεων με χρήση ΥΦ

Η μελέτη και παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων του φυσικού περιβάλλοντος και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, χρήζει την καταγραφή πληροφοριών με χρήση Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (U.A.V.). Οι Karantanellis et al. (2021) επιχείρησαν την αξιοποίηση διαφορετικών σεναρίων ταξινόμησης σε ένα περιβάλλον βασισμένο σε αντικείμενα για την αυτοματοποιημένη αναγνώριση και τον χαρακτηρισμό κατολισθήσεων. Κατολίσηση είναι, σύμφωνα με Δημητρουλάκη (2010), το φαινόμενο της διατάραξης της ισορροπίας μιας μάζας εδάφους ή βράχου. Οι κατολισθήσεις αποτελούν, μέρος των

φυσικών διεργασιών εξέλιξης του γήινου ανάγλυφου, ωστόσο μπορούν να προκληθούν και από εξωτερικές παρεμβάσεις με την έμμεση ή άμεση συμβολή του ανθρώπου.

Το Μοντέλο προσέγγισης ήταν Object-Based Image Analysis, παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη ροή εργασίας βασισμένη σε αντικείμενα ανάλυσης εικόνας (OBIA) που ενσωματώνει ορθοφωτομωσαϊκά και ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας (DSM) με αλγορίθμους βασισμένους σε έμπειρους ειδικούς και μηχανικής μάθησης (ML). Σύμφωνα με τους ερευνητές, ισχύει ότι: "σε αντίθεση με τις προσεγγίσεις που βασίζονται σε οικονομοστοιχεία, οι προσεγγίσεις που βασίζονται σε αντικείμενα μιμούνται τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι ερμηνεύουν το αισθητό περιβάλλον. Επιλογή αυτού του μοντέλου προσέγγισης, έγινε επίσης, επειδή η ML προσφέρει τη δυνατότητα για αποτελεσματική και αποδοτική ταξινόμηση ετερογενών συνόλων δεδομένων υψηλής ακρίβειας. Η ταυτόχρονη επεξεργασία και διαχείριση διαφορετικών τύπου δεδομένων όπως τοπολογικές και φασματικές πληροφορίες τρισδιάστατων νεφών σημείων πλεονεκτεί στην περίπτωση του φυσικού περιβάλλοντος. Η ταξινόμηση πραγματοποιήθηκε εφαρμόζοντας K-Nearest Neighbor (KNN), Decision Tree (DT) και Random Forest (RF) αλγορίθμους. Αναφέρονται επίσης και οι Support Vector Machines-SVM και Artificial Neural Networks-ANN.

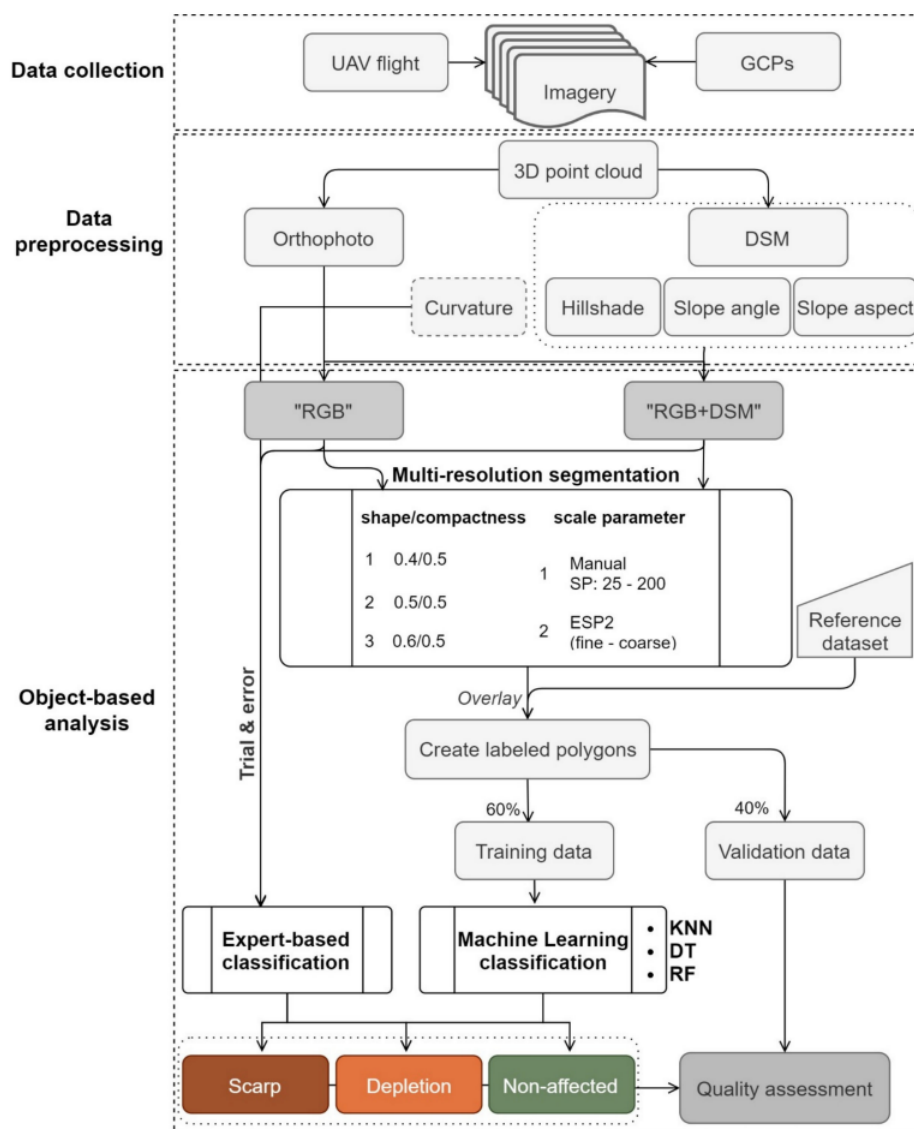
Τρεις προσεγγίσεις (KNN, DT και RF) ταξινόμησης ML αξιολογήθηκαν για την ταξινόμηση συνόλων δεδομένων εξαιρετικά υψηλής ανάλυσης που προέρχονται από φωτογραμμετρία UAV. Η μελέτη ανέλυσε τις διαφορές στη θεματική συμφωνία της χαρτογράφησης των ζωνών κατολισθήσεων με διαφορετικές μεθόδους και με βάση διάφορα χαρακτηριστικά.

Η έρευνα των Karantanellis et al. (2021) εστίασε στην ανάλυση διαφορετικών διαμορφώσεων κατάτμησης και στην παροχή μιας ημιαυτόματης ροής εργασίας που μπορεί να βελτιστοποιήσει την ατομική χαρτογράφηση των ζωνών με φαινόμενα κατολίπησης (scarp vs. depletion) και των μη επηρεαζόμενων περιοχών μέσω μεθόδων ML. Το εφαρμοζόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων UAV, τη δημιουργία των συνόλων δεδομένων εισόδου, τις φάσεις τμηματοποίησης και ταξινόμησης και τέλος, την αξιολόγηση του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο, στοχεύουμε να προσδιορίσουμε ποια διαδικασία ταξινόμησης είναι η πιο αποτελεσματική για τη χαρτογράφηση κατολισθήσεων σε κλίμακες συγκεκριμένων περιοχών. Οι κύριοι στόχοι ήταν:

- α. η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των δεδομένων UAV για τη διάκριση και χαρτογράφηση ζωνών κατολισθήσεων με τη χρήση OBIA, και
- β. η αξιολόγηση συχνά χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων ML έναντι ενός συνόλου κανόνων βασισμένων στη γνώση για την ταξινόμηση συγκεκριμένων ζωνών κατολισθήσεων.

Έπειτα από την συλλογή και την προεπεξεργασία των δεδομένων, το μοντέλο προσέγγισης OBIA στόχευσε στην δημιουργία ομογενών μη επικαλυπτόμενων αντικειμένων και τρέχει την ταξινόμηση χρησιμοποιώντας ποικίλες ημιαυτόματες προσεγγίσεις. Η συμπερίληψη πληροφοριών σχετικά με το πλαίσιο και το σχήμα καθίσταται σημαντική για την αναγνώριση μορφολογικών μοτίβων. Η ροή εργασίας με βάση το αντικείμενο περιλαμβάνει τέσσερις διακριτές φάσεις:

- (α) τμηματοποίηση,
- (β) δημιουργία δειγμάτων εκπαίδευσης,
- (γ) επιλογή και ρύθμιση χαρακτηριστικών και



Σχήμα 4.33: Σχεδιάγραμμα ροής εργασιών βάση της μετεωρολογίας που ακολουθήθηκε και των τεχνικών και εφαρμογών που προγραμματοποιήθηκαν - εδαφική ανίχνευση με ανάλυση εικόνας βασισμένη σε αντικείμενα (Karantanellis et al., 2021).

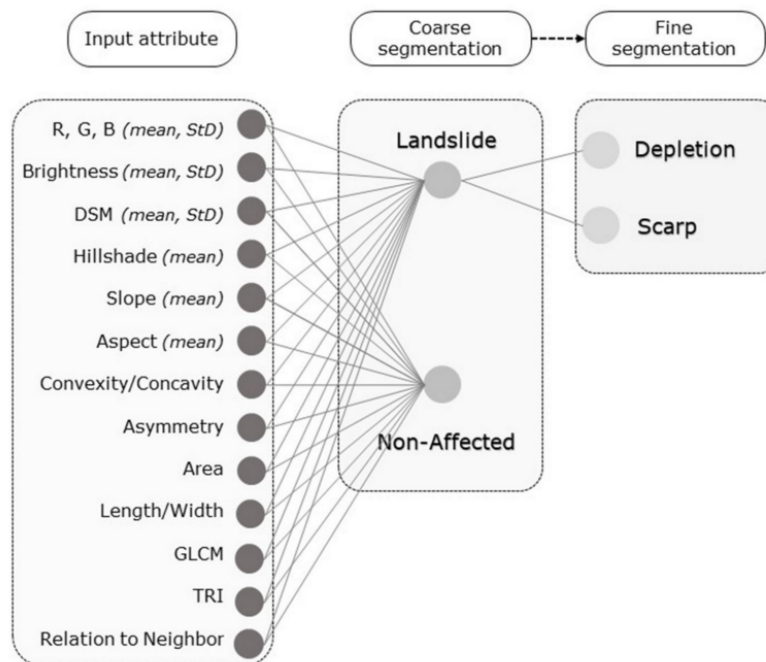
(δ) ταξινόμηση, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Cognition Network Language (CNL).

Διερευνήθηκαν δύο διαφορετικές δομές εισόδου για την τμηματοποίηση. Το κόκκινο, το πράσινο, και μπλε (R, G, B) ζώνες της ορθοφωτογραφίας χρησιμοποιήθηκαν για να επισημοποιηθεί η δομή "RGB". με βάση αποκλειστικά τις φασματικές τιμές, ενώ οι τρεις φασματικές ζώνες σε συνδυασμό με το DSM και τρία παράγωγα (σκιά λόφου-hillshade, κλίση-slope, όψη-slope) επισημοποιούν τη δομή "RGB + DSM".

Οι μέθοδοι που βασίζονται σε αντικείμενα χρησιμοποιούν ομοιογενείς ομάδες εικονοστοιχείων για την ταξινόμηση, οι οποίες μπορούν να μιμηθούν τον τρόπο με τον οποίο οι ειδικοί αντιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων ως οντότητες. Τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση βάσει κανόνων απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3. οι τρεις φασματικές ζώνες από την ορθοφω-

τογραφία και η τιμή φωτεινότητας χρησιμοποιήθηκαν ως οι φασματικές μετρικές. Ο λόγος μήκους/πλάτους, η ασυμμετρία και το μέγεθος του αντικειμένου χρησιμοποιήθηκαν ως χωρικές μετρικές. Η κλίση, η όψη και η καμπυλότητα χρησιμοποιήθηκαν ως μορφολογικές μετρικές.

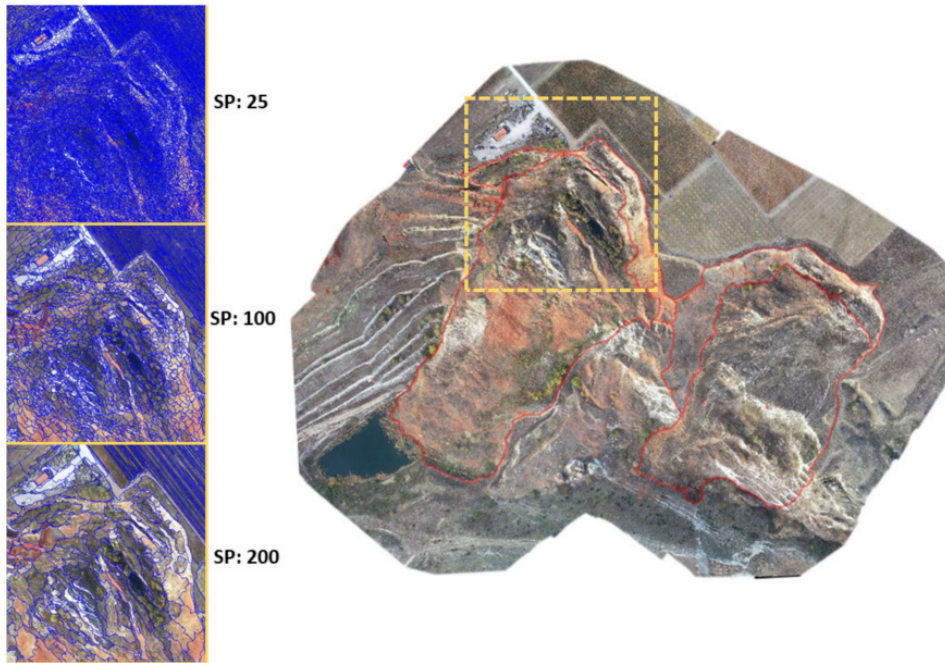
Ως μετρική υψής χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας συνύπαρξης γκρίζου επιπέδου (GLCM), ο οποίος υπολογίστηκε σε στο DSM, προς όλες τις κατευθύνσεις, όπως προτάθηκε από τους Χαραλιζκ et al. Ο δείκτης τραχύτητας εδάφους (TRI) υπολογίστηκε ως η διακύμανση της κλίσης εντός ενός αντικειμένου και προέκυψε λαμβάνοντας τη μέση τετραγωνική ρίζα (RMS) των υπομετρικών διαφορών και υποδεικνύει την μεταβολές του ανάγλυφου. Υιοθετήθηκαν επτά χαρακτηριστικά υψής, συμπεριλαμβανομένων του μέσου όρου, της εντροπίας, της ομοιογένειας, της διακύμανσης, της ανομοιότητας, της αντίθεσης και της συσχέτισης, χρησιμοποιώντας δύο μεγέθη παραθύρων (9×9 και 18×18).



Σχήμα 4.34: Στάδια ταξινόμησης (Karantanellis et al., 2021).

Η τμηματοποίηση είναι μια ουσιαστική φάση για την ακριβή παραγωγή χαρτών κατολισθήσεων μέσω του OBIA. Για το λόγο αυτό, ο αλγόριθμος MRS όπως υλοποιήθηκε στο eCognition ήταν εφαρμόστηκε στις δύο δομές δεδομένων εισόδου, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Ο αριθμός των αντικειμένων που προέκυψαν από τις ρυθμίσεις τμηματοποίησης και χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση (60%) και την επικύρωση (40%) κυμαινόταν από 2.500 αντικείμενα έως περισσότερα από 1.200.000 αντικείμενα.

Αρχικά, αναπτύχθηκε ένα σύνολο κανόνων βασισμένο στη γνώση με τη χρήση γνωστικών γνώσεων των χαρακτηριστικών των κατολισθήσεων και ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής για την αντιστοίχιση των τριών προκαθορισμένων κλάσεων. Οι συναρτήσεις συμμετοχής κατασκευάστηκαν με βάση τη γνώση των εμπειρογνομώνων και τις συγκεκριμένες παράμετροι επιλέχθηκαν μετά την ανάλυση των χαρακτηριστικών και τη σύγκριση με το σύνολο δεδομένων αναφοράς.



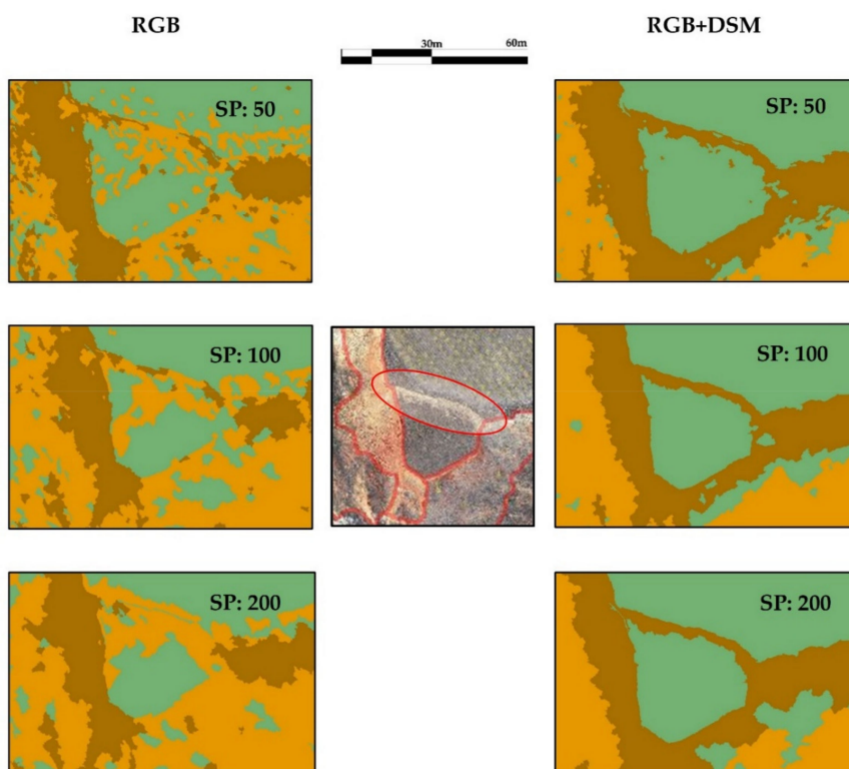
Σχήμα 4.35: Επιλεγμένο υποσύνολο της περιοχής υπό διερεύνηση που δείχνει τα αποτελέσματα τμηματοποίησης για διαφορετικές παραμέτρους κλίμακας (SPs) (Karananellis et al., 2021).

Τα εξαγόμενα ταξινομημένα αντικείμενα μεταφέρθηκαν σε έναν πίνακα σφαλμάτων για τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων ταξινόμησης από διαφορετικούς ταξινομητές σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς. Σε γενικές γραμμές, ο συνδυασμός των φασματικών (ορθοφωτογραφιών) και τοπολογικών δεδομένων (DSM και παράγωγα) υπερτερεί έναντι της δομής που περιλαμβάνει μόνο τη φασματική πληροφορία. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μεγαλύτερη πηγή σφαλμάτων υποδεικνύεται στις ζώνες απόκλισης που ταξινομούνται ως κατολίσθηση λόγω των ορίων των ζωνών διάχυσης.

Η RGB δομή (φασματική πληροφορία αποκλειστικά) έχει οδηγήσει σε μικτά αποτελέσματα ταξινόμησης και κρίθηκε αναποτελεσματική στην ταξινόμηση των διαφόρων υποζωνών κατολίσθησης. Συγκεκριμένα, η διάκριση μεταξύ των ζωνών γκρεμού και κατολίσθησης βρέθηκε να είναι η πιο δύσκολη λόγω των υφιστάμενων γεωμορφολογικών ομοιοτήτων σε σύγκριση με τις μη πληγείσες ζώνη και τις φυσικές διεργασίες της αποσάθρωσης. Ωστόσο, με την ενσωμάτωση της υψομετρικών δεδομένων και των παραγών του, η αποτελεσματικότητα της χαρτογράφησης θα μπορούσε να αυξηθεί σημαντικά. βλέπε σχήμα 10

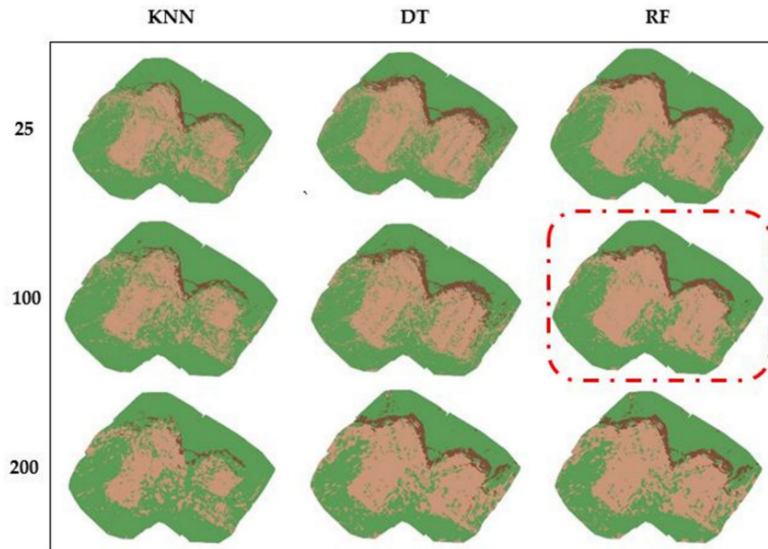


Σχήμα 4.36: α) Ορθοφωτογραφία που επικαλύπτεται από τα δεδομένα αναφοράς, β) το αποτέλεσμα τμηματοποίησης και γ) η τελική ταξινόμηση μετά την τελειοποίηση της μεθόδου που βασίζεται σε κανόνες για τη δομή RGB-DSM (πράσινο: μη επηρεασμένο, ανοιχτό καφέ: εξάντληση, σκούρο καφέ: scarp) (Karantanellis et al., 2021).

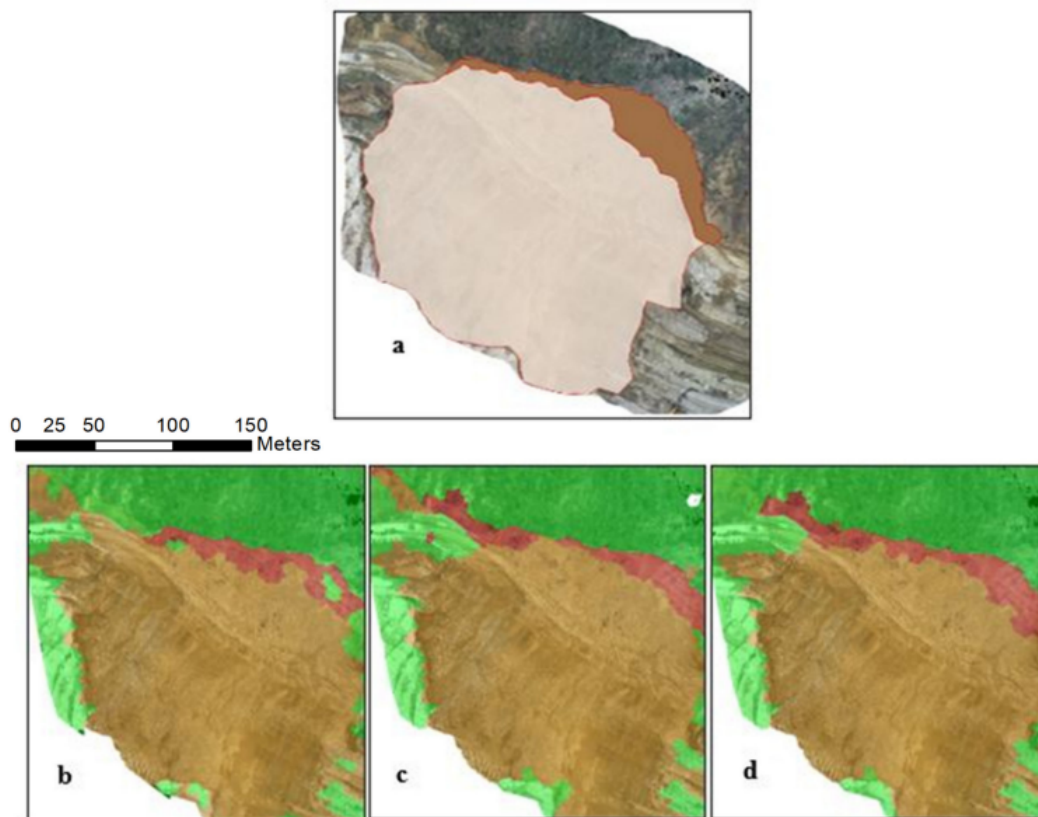


Σχήμα 4.38: Λεπτομέρεια ταξινόμησης για τρία SPs κάνοντας χρήση των δομών RGB και RGB+DSM (Πηγή: Karantanellis et al. (2021)).

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξαγόμενες μετρικές F1, το μοντέλο DT για τη δομή RGB+DSM παρουσίασε την καλύτερη συμφωνία ταξινόμησης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των KNN, DT και DT όπως παρουσιάζονται.



Σχήμα 4.37: Παράδειγμα αποτελεσμάτων ταξινόμησης με βάση τη δομή RGB+DSM για διαφορετικούς αλγόριθμους και SPs (Σχήμα: 0,6) (πράσινο: μη επηρεασμένο, σκούρο καφέ: scarp, ανοιχτό καφέ: εξάντληση). Το κόκκινο πολύγωνο υποδεικνύει το καλύτερο αποτέλεσμα ταξινόμησης μεταξύ των διαφορετικών ρυθμίσεων (Karantanellis et al., 2021).



Σχήμα 4.39: (α) Ορθοφωτογραφία με τις ζώνες επιρροής σε αλληλεπικάλυψη, (β) Αποτέλεσμα ταξινόμησης KNN, (γ) Αποτέλεσμα ταξινόμησης DT, (δ) Αποτέλεσμα ταξινόμησης RF (Πηγή: Karantanellis et al. (2021)).

Ωστόσο, σε σύγκριση με αερομεταφερόμενες πλατφόρμες και τα ακριβά δορυφορικά δεδομένα πολύ υψηλής ανάλυσης (VHR), η ταξινόμηση τα αποτελέσματα με βάση δεδομένα UAV υποδεικνύουν υψηλές δυνατότητες για την οριοθέτηση κατολισθήσεων σε συγκεκριμένες περιοχές με τη χρήση μια ροή εργασίας ταξινόμησης ML με βάση το αντικείμενο. Το DSM και τα παράγωγά του αποδείχθηκαν κρίσιμα για την ακριβή και ακριβή χαρτογράφηση στην οριοθέτηση της έκτασης της κατολίσθησης κατά τόπους λόγω των των χαρακτηριστικών μορφομετρικών προτύπων και υπογραφών τους. Αντίθετα, οι φασματικές πληροφορίες αποκλειστικά από τη ρύθμιση RGB δεν ήταν επαρκείς για την ταξινόμηση της τμηματοποιημένης σκηνής με εποπτευόμενες διαδικασίες με αποτελεσματικό τρόπο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το DT είναι μια ισχυρή μέθοδος για την ταξινόμηση κατολισθήσεων με σύνολα δεδομένων που προέρχονται από UAV και, γενικά, παρουσίασε καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με το KNN και το DT.

Η μελέτη αυτή κατέδειξε ότι οι πλατφόρμες UAV μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τη διάκριση συγκεκριμένων ζωνών κατολίσθησης. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου, δηλαδή μιας προσέγγισης βασισμένης σε εμπειρογνώμονες ή ML, εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα δεδομένων εκπαίδευσης και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Η ενσωμάτωση συνόλων δεδομένων UAV και SfM σε συνδυασμό με τις εξελίξεις στην OBIA και της τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να χρησιμεύσει ως απάντηση, επιτρέποντας την ακριβή και ακριβή ανάλυση των κατολισθήσεων και των αστοχιών από κατολισθήσεις και βραχοπτώσεις. Η παρούσα εφαρμογή αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα του πώς τα εργαλεία υπολογιστικής φωτογραφίας εφαρμόζονται στη σύγχρονη φωτογραμμετρία.

4.9 Περιορισμοί

Suma et al. (2016) Η απόδοση των ανιχνευτών στις διάφορες μεθόδους χαρτογράφησης τόνων αξιολογήθηκε αρχικά με βάση τον αριθμό των σημείων κλειδιών που ανιχνεύθηκαν σε κάθε εικόνα. Ωστόσο, αυτό το μέτρο από μόνο του μπορεί να είναι παραπλανητικό όταν πρόκειται για φωτογραμμετρικές εφαρμογές, καθώς ο μεγάλος αριθμός σημείων-κλειδιών δεν προσφέρει κατ' ανάγκη μια απαλλαγμένη από θόρυβο και ομοιογενή κάλυψη της εικόνας. Είναι πιο σημαντικό να επιτυγχάνονται καλές και επαρκείς αντιστοιχίες μεταξύ των εικόνων, προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία της ανακατασκευής. Έτσι, διενεργήθηκε επίσης οπτική επιθεώρηση, αξιολογώντας την κατανομή των σημείων κλειδιών και την πυκνότητά τους.

Στην πραγματικότητα, στην περίπτωση του Fattal TMO, η ποσότητα των εντοπισμένων σημείων κλειδιών είναι υψηλότερη, αλλά αυτό δεν συνεπάγεται καλύτερη ποιότητα στην ανακατασκευή σκηνής αλλά μάλλον υπολογιστικά απαιτητική, χρονοβόρα και επιρρεπή σε σφάλματα αντιστοίχιση και καταχώριση εικόνων.

Ntregka et al. (2013) Από την άλλη πλευρά, μολονότι η διαδικασία HDRi είναι χρονοβόρα, αλλά και πάλι απαιτεί λιγότερο από την ψηφιακή μετα-επεξεργασία εικόνων LDR, όπου η τελευταία μάλιστα δεν έχει πάντα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η απαίτηση για ειδικό εξοπλισμό δεν αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα, διότι συνήθως, στις περισσότερες επαγγελματικές φωτογραφίες, χρησιμοποιούνται μηχανές SLR και τρίποδα. Ίσως, η σημαντικότερη απαίτηση αυτής της μεθόδου είναι η έντονη ανάγκη για εκτεταμένη μνήμη, δεδομένου ότι για κάθε σκηνή οι εικόνες που λαμβάνονται είναι περισσότερες από μία.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή επιχείρησε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση του πώς η υπολογιστική φωτογραφία επηρεάζει τη σύγχρονη φωτογραμμετρία. Οι πιο συνήθεις μέθοδοι βελτίωσης εικόνας κάνοντας χρήση εργαλείων υπολογιστικής φωτογραφίας αναλύθηκαν, και καταγράφηκαν τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί τους. Τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας αυτής μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Η υπολογιστική φωτογραφία περικλείει ένα ευρύ φάσμα μεθόδων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της φωτογραφίας.
- Η ραγδαία βελτίωση των τεχνολογικών μέσων καθιστά την εφαρμογή της υπολογιστικής φωτογραφίας σε περισσότερες εφαρμογές φωτογραμμετρίας.
- Η υπολογιστική φωτογραφία έχει ξεκάθαρα οφέλη για την επιστήμη της φωτογραμμετρίας, π.χ. σε περιπτώσεις όπου ο φυσικός φωτισμός δεν ευνοεί την ομαλή εφαρμογή φωτογραμμετρικών τεχνικών στην ανεπεξέργαστη εικόνα.
- Η ολοένα αναπτυσσόμενη εφαρμογή της υπολογιστικής φωτογραφίας στη σύγχρονη φωτογραμμετρία αυξάνει
- Οι τεχνικές υπολογιστικής φωτογραφίας έχουν οδηγήσει σε υψηλότερα ποσοστά ακρίβειας για τη δημιουργία τρισδιάστατων προσομοιωμάτων σε σύγκριση με παραδοσιακές φωτογραμμετρικές μεθόδους.
- Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της υπολογιστικής φωτογραφίας είναι το υψηλό υπολογιστικό κόστος επεξεργασίας δεδομένων μεγάλου όγκου, όπως είναι σύνηθες σε πολλές φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο υπολογιστικό χρόνο, δυσχεραίνοντας την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
- Άλλος ένας περιορισμός της υπολογιστικής φωτογραφίας σε εφαρμογές φωτογραμμετρίας είναι η ανάγκη για εξοπλισμό κάμερας υψηλής ποιότητας και εξειδικευμένο λογισμικό για τη λήψη και την επεξεργασία των δεδομένων. Αυτό μπορεί να κάνει την υπολογιστική φωτογραφία μια δαπανηρή λύση, ιδιαίτερα για μικρότερους οργανισμούς ή ερευνητικά ιδρύματα με περιορισμένους προϋπολογισμούς.

- Επιπλέον, η ακρίβεια και η αξιοπιστία των δεδομένων μπορεί επίσης να επηρεαστεί από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως οι συνθήκες φωτισμού, ο καιρός και το έδαφος, μειονεκτήματα τα οποία ίσως να είναι κριτικής σημασίας για την ακρίβεια φωτογραμμετρικών μετρήσεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτοί οι παράγοντες μπορεί να οδηγήσουν σε ελλιπή ή ανακριβή δεδομένα, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα της τελικής μέτρησης.
- Τεχνικές όπως η απεικόνιση υψηλού δυναμικού εύρους (HDR) και η μείωση του θορύβου έχουν καταστήσει δυνατή τη λήψη εικόνων με μεγαλύτερο εύρος τόνων και χρωμάτων και με λιγότερο θόρυβο, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας και κατέπекταση των φωτογραμμετρικών διαδικασιών.
- Εφαρμογές της υπολογιστικής φωτογραφίας για την αποτύπωση μνημείων, σπηλαίων και κατολισθήσεων περιγράφηκαν, όπου διαφορετικές υπολογιστικές τεχνικές οδήγησαν σε βελτίωση της τελικής εικόνας σε παραδείγματα φωτογραμμετρικών διεργασιών διαφορετικής κλίμακας και συνθηκών φωτισμού.
- Η υπολογιστική φωτογραφία βρίσκει εφαρμογή σε προβλήματα βάθους πεδίου και τρισδιάστατης ψηφιοποίησης, μέσω βελτίωσης των εικόνων που χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη ανακατασκευή με σύγχρονα μέσα φωτογραμμετρίας.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Έχοντας ολοκληρώσει μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για την εφαρμογή της υπολογιστικής φωτογραφίας στη σύγχρονη φωτογραμμετρία, προτείνονται τα εξής αντικείμενα για μελλοντική έρευνα:

- Πρακτικές εφαρμογές υπολογιστικής φωτογραφίας σε περιβάλλοντα με διαφορετικές συνθήκες φωτισμού.
- Βιβλιογραφική ανασκόπηση ειδικά των μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στην υπολογιστική φωτογραφία, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξής τους.
- Περαιτέρω ποσοτικοποίηση της βελτίωσης ή χειροτέρευση της φωτογραφίας κάνοντας χρήση υπολογιστικής φωτογραφίας, για διαφορετικά εύρη παραμέτρων.
- Εξερεύνηση του πώς τεχνολογίες Internet of things συνδυασμένες με μέσα υπολογιστικής φωτογραφίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για φωτογραμμετρικές εφαρμογές.
- Αυτοματοποίηση μεθόδων υπολογιστικής φωτογραφίας για την παρακολούθηση μνημείων και άλλων περιοχών αυξημένου ενδιαφέροντος, με φωτογραμμετρικές τεχνικές.
- Χρήση έξυπνων τεχνολογιών (smart technologies) με το συνδυασμό υπολογιστικής φωτογραφίας, τεχνητής νοημοσύνης και φωτογραμμετρικών μετρήσεων για τη δημιουργία συστημάτων πρόωρης ενημέρωσης early warning systems στην περίπτωση φυσικών καταστροφών.

Παράρτημα Α΄

Ακρωνύμια και συντομογραφίες

AI Artificial Intelligence

ANN Artificial Neural Networks

CART Classification and Regression Trees

CNL Cognition Network Language

CRP Close Range Photogrammetry

CUDA Compute Unified Device Architecture

CV Computer Vision

DMVR Dense MultiView 3D Reconstruction

DoF Depth of Field

DoG Difference of Gaussians

DSM Digital Surface Model

DT Decision Tree

FN False Negative

FP False Positive

GLCM Gray-Level Co-Occurrence Matrix

GPGPU General Purpose Computation on Graphics Processing Unit

HDR High Dynamic Range

KNN K-Nearest Neighbor

LAN Local Area Network

LED Light-Emitting Diode

LiDar Light Detection and Ranging

OBIA Object-Based Image Analysis

RF Random Forest

RGB Red Green Blue
RMS Root Mean Square
RMSE Root Mean Square Error
SAR Synthetic Aperture Radar
SfM Structure from Motion
SIFT Scale Invariant Feature Transform
SLAM Simultaneous Localization And Mapping
SP Scale Parameter
SVM Support Vector Machines
TN True Negatives
TP True Positives
TRI Terrain Ruggedness Index
TSDF Truncated Signed Distance Function
UAV Unmanned Aerial Vehicle
VHR Very High Resolution

Bibliography

- A. Adams, E.-V. Talvala, S. H. Park, D. E. Jacobs, B. Ajdin, N. Gelfand, J. Dolson, D. Vaquero, J. Baek, M. Tico, et al. The frankencamera: an experimental platform for computational photography. In *ACM SIGGRAPH 2010 papers*, pages 1–12. 2010.
- E. Agosto, P. Ardissonne, and L. Bornaz. The castle of graines: different survey methodologies for the documentation of historical buildings. In *Proceedings of CIPA XXth International Symposium, September*, pages 55–58, 2005.
- AIGoogleBlog. HDR+: Low light and High Dynamic Range photography in the Google Camera App, 2023. URL <https://ai.googleblog.com/2014/10/hdr-low-light-and-high-dynamic-range.html>. Accessed on 01.03.2023.
- S. Al-Kheder, Y. Al-Shawabkeh, and N. Haala. Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3d laser scanning and digital photogrammetry. *Journal of Archaeological Science*, 36(2):537–546, 2009.
- A. Almagro and A. Orihuela. Métodos para documentar y restaurar zonas de difícil acceso en el castillo de salobreña.(granada). 2015.
- M. Baltsavias, A. Gruen, L. van Gool, and M. Pateraki. *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage: Proceedings of the International Workshop, Centro Stefano Franscini, Monte Verita, Ascona, Switzerland, May 22-27, 2005*. CRC Press, 2005.
- J.-B. Barreau, Y. Bernard, Q. Petit, L. Beuchet, E. Petit, V. Platen, R. Gaugne, J. Le Rumeur, and V. Gouranton. Combination of 3d scanning, modeling and analyzing methods around the castle of coatfrec reconstitution. In *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection: 5th International Conference, EuroMed 2014, Limassol, Cyprus, November 3-8, 2014. Proceedings 5*, pages 418–426. Springer, 2014.
- K. Bartoš, K. Pukanská, J. Gajdošík, and M. Krajňák. The issue of documentation of hardly accessible historical monuments by using of photogrammetry and laser scanner techniques. *Geoinformatics FCE CTU*, 6:40–47, 2011.
- K. Bobek and K. Jedlička. 3d data model for purposes of cultural heritage custody-case study at the castle kozel. *XXVIII CIPA. Sympozium*, 2011.
- W. Böhler and G. Heinz. Documentation, surveying, photogrammetry. In *XVII CIPA Symposium. Recife, Olinda. Brazil*, volume 1, 1999.

- I. C and P. C. Detailed restitution and representation of the seaward castle of chios. In *XVII CIPA Symposium. Recife, Olinda. Brazil*, volume 1, 1999.
- B. Chazaly. Cylindrical orthophotography complete coverage of inside/outside cylindrical surfaces such as castle towers. In *XVIII CIPA Symposium*, volume 1, 2001.
- F. Chiabrando, M. de Bernardi, S. Curetti, et al. Integration of low cost geomatic techniques to support the architectural project. the perlo castle area survey. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 38:15-21, 2009.
- P. Drap, A. Durand, J. Seinturier, G. Vannini, and M. Nucciotti. Full XML documentation from photogrammetric survey to 3D visualization. The case study of Shawbak in Jordan. In *CIPA XXth international symposium*, pages 1-6, 2005.
- M. G. D'Urso and G. Russob. On the integrated use of laser-scanning and digital photogrammetry applied to an archaeological site. *International Archives of ISPRS*, 37(B5):1107, 2008.
- S. El-Hakim, L. Gonzo, F. Voltolini, S. Girardi, A. Rizzi, F. Remondino, and E. Whiting. Detailed 3d modelling of castles. *International journal of architectural computing*, 5(2):199-220, 2007.
- C. Engels, H. Stewénus, and D. Nistér. Bundle adjustment rules. *Photogrammetric computer vision*, 2(32), 2006.
- G. Fangi, E. Malinverni, and A. Tasseti. The metric documentation of cham towers in vietnam by spherical photogrammetry. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5:W1, 2013.
- M. Fiani and N. Siani. Comparison of terrestrial laser scanners in production of dems for cetara tower. In *Proceedings CIPA XX international symposium, Torino*, 2005.
- J. A. Fiss. *Methods and Applications for Portrait Selection from Video, Light Field Photography, and Light Field Video Editing*. PhD thesis, University of Washington, 2022.
- J. Garfella Rubio, M. J. Mañez Pitarch, J. A. Martínez Moya, and F. Ortega Tomas. Puesta en valor del palacio-castillo de betxí, a través de la modelización mediante arquitecturas inversas y documentación gráfica avanzada. *Defensive architecture of the mediterranean: XV to XVIII centuries. Vol. I*, pages 315-320, 2015.
- P. Gianniou, A. Georgopoulos, M. Tsakiri, and K. Della. The documentation of the medieval entrance of the rhodes fortification complex. In *Proceedings of the 21st International CIPA Symposium, Athens, Greece*, pages 01-06. Citeseer, 2007.
- R. Gini, D. Pagliari, D. Passoni, L. Pinto, G. Sona, P. Dosso, et al. Uav photogrammetry: Block triangulation comparisons. *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 1:W2, 2013.
- F. Giraud, K. Jacquot, C. Chevrier, and G. Halin. Acquire high quality meshes of scale models for an automatic modelling process. In *XXIV International CIPA Symposium*, volume 40, 2013.

- GIS-LOUNGE. Super-resolution imaging, 2022. URL <https://www.gislounge.com/super-resolution-imaging/>. Accessed on 03.10.2022.
- P. Grussenmeyer and J. Jasmine. The restoration of beaufort castle (south-lebanon): a 3d restitution according to historical documentation. In *XIXth CIPA International Symposium*, pages 322–327, 2003.
- R. Hartley and A. Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.
- H. Houshiar, D. Borrmann, J. Elseberg, A. Nuchter, F. Nath, and S. Winkler. Castle3d—a computer aided system for labelling archaeological excavations in 3d. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5:W3, 2015.
- M. Ioannides, D. Fellner, A. Georgopoulos, and H. D. 2d and 3d data capture methodologies and data processing. *Archaeolingua*, 2010.
- ISPRS. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2022. URL <https://www.isprs.org/society/default.aspx>. Accessed on 03.10.2022.
- E. Karantanellis, V. Marinos, E. Vassilakis, and D. Hölbling. Evaluation of machine learning algorithms for object-based mapping of landslide zones using uav data. *Geosciences*, 11(8):305, 2021.
- T. Kersten, M. Lindstaedt, L. Maziull, K. Schreyer, F. Tschirschwitz, and K. Holm. 3d recording, modelling and visualisation of the fortification kristiansten in trondheim (norway) by photogrammetric methods and terrestrial laser scanning in the framework of erasmus programmes. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5):255, 2015a.
- T. Kersten, K. Mechelke, and L. Maziull. 3d model of al zubarah fortress in qatar—terrestrial laser scanning vs. dense image matching. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5):1–8, 2015b.
- G. Kontogianni, E. Stathopoulou, A. Georgopoulos, and A. Doulamis. HDR imaging for feature detection on detailed architectural scenes. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2015.
- G. Kontogianni, R. Chliverou, A. Koutsoudis, G. Pavlidis, and A. Georgopoulos. Enhancing close-up image based 3D digitisation with focus stacking. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42, 2017a.
- G. Kontogianni, R. Chliverou, A. Koutsoudis, G. Pavlidis, and A. Georgopoulos. Investigating the effect of focus stacking on SfM-MVS algorithms. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42: 385, 2017b.
- A. Koutsoudis, B. Vidmar, G. Ioannakis, F. Arnaoutoglou, G. Pavlidis, and C. Chamzas. Multi-image 3d reconstruction data evaluation. *Journal of cultural heritage*, 15(1):73–79, 2014.

- K. Kraus. Photogrammetry, remote sensing and spatial information science for heritage documentation. In *XIX CIPA Symposium, Antalya, Turkey, 2003*.
- T. Křemen, B. Koska, and J. Pospíšil. Laserscanning for castle documentation. In *Proceedings of the 23rd CIPA Symposium. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie*, pages 1–8, 2011.
- K. Lambers, H. Eisenbeiss, M. Sauerbier, D. Kupferschmidt, T. Gaisecker, S. So-toodeh, and T. Hanusch. Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the late intermediate period site of pinchango alto, palpa, peru. *Journal of archaeological science*, 34(10):1702–1712, 2007.
- T. Landes, P. Grussenmeyer, T. Vögtle, and K. Ringle. Combination of terrestrial recording techniques for 3d object modelling regarding topographic constraints. example of the castle of Haut-Andlau, Alsace, France. In *XXIth CIPA International Symposium*, pages 435–440, 2007.
- R. Lukac. *Computational photography: methods and applications*. CRC press, 2017.
- Mapscaping. An introduction to artificial intelligence, 2022. URL <https://mapscaping.com/podcasts/an-introduction-to-artificial-intelligence/>. Accessed on 03.10.2022.
- H. Mayer, M. Mosch, and J. Peipe. Comparison of photogrammetric and computer vision techniques-3d reconstruction and visualization of wartburg castle. In *CIPA 2003 19th International Symposium*, pages 103–108, 2003.
- A. Merlo and P. R. Navarro. Los poblados fortificados en la Valleriana (Pescia, PT, Italia): Análisis de la forma urbana del Castello di Pietrabuona. In *Investigación gráfica, expresión arquitectónica*, pages 296–300. Universitat Politècnica de València, 2012.
- Merriam-Webster. Merriam-webster dictionary, 2023. URL <https://www.merriam-webster.com/>. Accessed on 01.02.2023.
- Microsoft-Research. Computational photography applications, 2023. URL <https://www.microsoft.com/en-us/research/product/computational-photography-applications/>. Accessed on 01.03.2023.
- M. U. Müller, N. Ekhtiari, R. M. Almeida, and C. Rieke. Super-resolution of multispectral satellite images using convolutional neural networks. *arXiv preprint arXiv:2002.00580*, 2020.
- A. Ntregka, A. Georgopoulos, and M. Santana Quintero. Photogrammetric exploitation of HDR images for cultural heritage documentation. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 2:209–214, 2013.
- A. Pinte, R. Héno, M. Pierrot-Deseilligny, X. Brunetaud, S. Janvier-Badosa, and R. Janvier. Orthoimages of the outer walls and towers of the château de chambord. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2, 2015.
- A. Pirinu. Design models and "attention" to the topography of the places in the

- sixteenth strongholds of sardinia: the use of the tenaille. *Defensive architecture of the mediterranean: XV to XVIII centuries. Vol. I*, pages 279–286, 2015.
- C. R. Popescu and A. Lungu. Real-time 3D reconstruction using a kinect sensor. *Computer Science and Information Technology*, 2(2):95–99, 2014.
- R. Raskar. Computational photography: Epsilon to coded photography. In *Emerging Trends in Visual Computing: LIX Fall Colloquium, ETVC 2008, Palaiseau, France, November 18-20, 2008. Revised Invited Papers*, pages 238–253. Springer, 2009.
- R. Raskar and J. Tumblin. *Computational photography: mastering new techniques for lenses, lighting, and sensors*. AK Peters, Ltd., 2009.
- F. Remondino. Heritage recording and 3d modeling with photogrammetry and 3d scanning. *Remote sensing*, 3(6):1104–1138, 2011.
- K. Ringle, M. Nutto, O. Teschauer, and C. Mohn. Integration of historical plans into a modern facility management system taking the castle of Heidelberg as an example. In *Proc. of the CIPA 2005 XX International Symposium*, pages 499–504, 2005.
- D. P. Robertson and R. Cipolla. Structure from motion. *Practical image processing and computer vision*, 13:1–49, 2009.
- P. Rodriguez-Navarro and G. Verdiani. Digital survey and interpretation of a fortification fragment: The cadix bridge at the feet of the alhambra hill, granada, spain. In *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, volume 2, pages 363–366. IEEE, 2013.
- P. Rodríguez Navarro, T. Gil Piqueras, and G. Verdiani. Comprehensive methodology for documenting the defense towers of the valencian coast (spain). *Defensive architecture of the mediterranean: XV to XVIII centuries. Vol. I*, pages 321–328, 2015.
- R. Suma, G. Stavropoulou, E. K. Stathopoulou, L. Van Gool, A. Georgopoulos, and A. Chalmers. Evaluation of the effectiveness of HDR tone-mapping operators for photogrammetric applications. *Virtual Archaeology Review*, 7(15):54–66, 2016.
- Κ. Αδάμ. *Γεωμετρία του στερεοζεύγους από βαθμονομημένες και από μη βαθμονομημένες μηχανές*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
- Κ. Βέργος. *Διερεύνηση και Αξιολόγηση Μεθοδολογιών Συνένωσης Νεφών Σημείων*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2015.
- Φ. Βρεπού. *Κάστρο Πεντεσκούφι: γεωμετρική τεκμηρίωση*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.
- Ο. Γεωργούλα. Αναλυτική Φωτογραμμετρία - Ενότητα 2: Φωτογραμμετρικός εξοπλισμός. Σημειώσεις διαλέξεων, 2021. URL <https://opencourses.auth.gr/>.
- Α. Γεωργόπουλος. Φωτογραμμετρία Ι - Εισαγωγή στη φωτογραμμετρία. *Σπουδαστικές Σημειώσεις 5ου εξαμήνου, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα*, 2008.
- Α. Γεωργόπουλος, Σ. Ταπεινάκη, Γ. Πανταζής, Ε. Λάμπρου, Ε. Άγα, and Γ. Μακρής.

- Φωτογραμμετρία I – Εισαγωγή στη φωτογραμμετρία. *Μάθημα Θέμα: Αποτυπώσεις Μνημείων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα, 2013.*
- Κ.Α. Δημητρουλάκη. *Καινοτόμες Προτάσεις Πρόληψης και Αντιμετώπισης Των Φυσικών Καταστροφών Εφαρμογή Στη Νήσο Κρήτη.* Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Καβάλας, 2010.
- Γ. Καρράς. *Γραμμικοί Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων στην Φωτογραμμετρία. Σπουδαστικές Σημειώσεις, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα, 1998.*
- Ε. Πέτσα. *Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας.* Διπλωματική Εργασία, ΑΤΕΙ Αθηνών, 2000.
- Μ. Παυλίδης. *Αποτύπωση τμήματος των τειχών της Θεσσαλονίκης με laser scanner και σύγκριση με φωτογραμμετρική μέθοδο αποτύπωσης.* Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2011.
- Ι. Πετρίδης. *Η τρισδιάστατη αποτύπωση του Δυτικού Τείχους Θεσσαλονίκης με τη χρήση σαρωτή Laser.* Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2015.
- Π. Ριβέλης. *Φωτογραφία Πλάτωνος Ριβέλη, 2023.* URL <https://www.rivellis.gr/>. Accessed on 01.02.2023.
- Β. Σουγλέ. *Φωτογραμμετρική αποτύπωση του οχυρωμένου βυζαντινού οικισμού της Ρεντίνας.* Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010.
- Λ.Δ.Α. Τζουβάρας and Ν.Γ. Κιάκας. *Αποτύπωση εσωτερικής όψης τμήματος του Βόρειου Τείχους της Θεσσαλονίκης.* Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2007.
- Α. Τζωρτζάκου. *Φωτογραμμετρικές τεχνικές SfM/SLAM με έμφαση στις εφαρμογές στη σπηλαιολογία.* Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 2022.
- J. Vidman, J. Zastoupil, and P. Hlavenka. *Digital photogrammetric methods for documentation of wall paintings on the karlštejn castle.* In *Proceedings of XXIII CIPA Symposium-12/16 September, 2011.*
- I. T. Weerasinghe, J. Y. Ruwanpura, J. E. Boyd, and A. F. Habib. *Application of microsoft kinect sensor for tracking construction workers.* In *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*, pages 858–867, 2012.
- XYHT. *State of: Close-Range Photogrammetry, 2022.* URL <https://www.xyht.com/lidarimaging/state-of-close-range-photogrammetry/>. Accessed on 03.10.2022.