

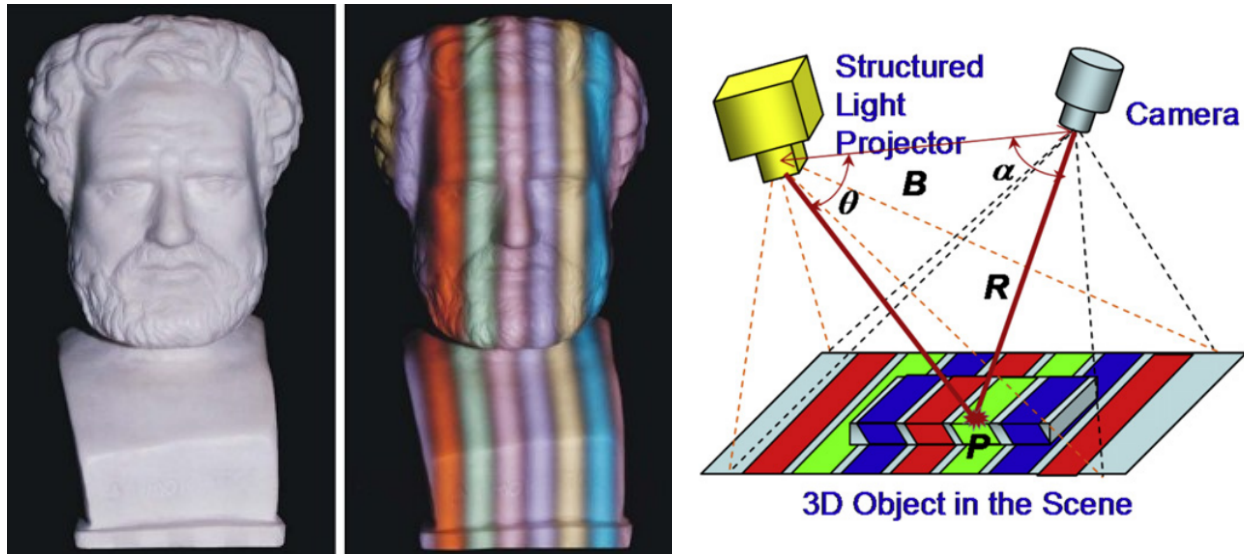
1.1.1 Σχήμα από Δομημένο Φως

Η ανάκτηση της πληροφορίας βάθους πραγματοποιείται με την προβολή ενός μοτίβου φωτός πάνω σε ένα αντικείμενο, από γνωστή οπτική γωνία. Η Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως βασίζεται στον τριγωνισμό, όπως και η σάρωση με ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων. Οι δύο μεθοδολογίες έχουν παρεμφερή χαρακτηριστικά. Η διαφοροποίηση είναι στην χρήση προβολικού συστήματος αντί για κάποια πηγή λέιζερ.

Για την 3Δ αποτύπωση πραγματοποιούνται προβολές από φωτεινά μοτίβα που περιέχουν πολλαπλές ρίγες, πλέγματα ή ακόμα και ελλείψεις. Σε κάποιες περιπτώσεις συναντούμε και χρωματικά κωδικοποιημένα μοτίβα. Η χρωματική κωδικοποίηση βοηθά το σαρωτή να ξεχωρίσει ευκολότερα τις μεταβολές που δέχεται το μοτίβο, καθώς προβάλλεται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Η κωδικοποίηση μπορεί να γίνει με ποικίλες μεθόδους. Δημοφιλέστερες είναι η μεταβλητή φωτεινότητα χρωμάτων και η μεταβλητή πυκνότητα των σχημάτων που φέρει ένα μοτίβο. Ο κύριος στόχος της προβολής των κωδικοποιημένων μοτίβων είναι ο εύκολος διαχωρισμός του εικονοστοιχείων. Από τη στιγμή λοιπόν που το μοτίβο είναι κωδικοποιημένο, οι αντιστοιχίες ανάμεσα στις θέσεις των εικονοστοιχείων που αποτυπώνει ο σαρωτής και των αρχικών σημείων του μοτίβου μπορούν να συγκριθούν. Με τη σύγκριση υπολογίζονται όλες οι αποκλίσεις στα αντίστοιχα σημεία και μπορεί, με τον έμμεσο αυτό τρόπο, να ανακτηθεί η τρίτη διάσταση.

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1 η ένταση του κάθε εικονοστοιχείου πάνω στο μοτίβο του δομημένου φωτισμού αναπαριστάται από ένα ψηφιακό σήμα της μορφής $\{i,j\} = (i,j)$, $i=1,2,\dots,I$, $j=1,2,\dots,J$, όπου (i,j) είναι οι συντεταγμένες (x,y) του προβαλλόμενου μοτίβου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα μοτίβα είναι δύο διαστάσεων. Ο αισθητήρας (βίντεο κάμερα, φωτογραφική μηχανή) χρησιμοποιείται για τη συλλογή εικόνων που παρουσιάζουν την σκηνή προς ψηφιοποίηση υπό την προβολή του δομημένου φωτισμού (2Δ μοτίβο). Αν η σκηνή είναι επίπεδη χωρίς κάποια μεταβολή στην καμπυλότητα της επιφάνειας τότε το προβαλλόμενο μοτίβο δεν επιδέχεται καμία παραμόρφωση. Σε άλλες περιπτώσεις, για μη-επίπεδες επιφάνειες, το γεωμετρικό σχήμα της επιφάνειας παραμορφώνει το μοτίβο. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου είναι η αναγνώριση και η εξαγωγή της 3Δ γεωμετρίας της επιφάνειας η οποία συμβαδίζει με τις μεταβολές που παρουσιάζει το μοτίβο. Η γεωμετρική σχέση ανάμεσα στον αισθητήρα της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής, του προβολικού συστήματος και ενός σημείου στην επιφάνεια του αντικειμένου προς ψηφιοποίηση μπορεί να εκφραστεί και στη συγκεκριμένη περίπτωση με την αρχή τριγωνισμού ως εξής:

$$R = B (\sin(\theta)/\sin(\alpha+\theta))$$



Εικόνα 1 Προβολή χρωματικού μοτίβου για εφαρμογή της μεθόδου σχήμα από δομημένο φως

Όπως ήδη αναφέρθηκε ένα σύστημα προβολής κωδικοποιημένων μοτίβων χρησιμοποιεί ειδικά σχεδιασμένα μοτίβα. Η κωδικοποίηση γίνεται με την απόδοση λέξεων κλειδιών (codewords) σε σύνολα εικονοστοιχείων. Ως εκ τούτου, τα εικονοστοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα μοτίβο οργανώνονται σαν ένας δισδιάστατος πίνακας, όπου το κάθε κελί περιέχει μία λέξη κλειδί. Οι λέξεις κλειδιά είναι απλοί αριθμοί, οι οποίοι χαρτογραφούνται στο μοτίβο με τη χρήση γκριζών χρωματικών τόνων ή γεωμετρικών αναπαραστάσεων. Το πλήθος των σημείων που πρέπει να κωδικοποιηθούν είναι ανάλογο με το πλήθος των λέξεων κλειδιών που απαιτούνται. Όσο το πλήθος των σημείων αυξάνεται τόσο αυξάνεται και η δυσκολία χαρτογράφησης τους πάνω στο μοτίβο. Η κωδικοποίηση μπορεί να πραγματοποιείται άλλοτε σε έναν από τους δύο καρτεσιανούς άξονες του μοτίβου x ή y και άλλοτε και στους δύο. Η χρήση μεθοδολογιών κωδικοποίησης επιτρέπει κάποιες φορές την 3Δ σάρωση ακόμη και αντικειμένων που κινούνται με μικρές ταχύτητες. Η δυνατότητα αυτή, όμως, δεν εμπίπτει στην άμεση θεματολογία του συγκεκριμένου κειμένου αφού όλα τα πολιτιστικά αντικείμενα θεωρούνται ακίνητα.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές προβολής μοτίβου δομημένου φωτός, ταξινομημένες ανάλογα με τους τρόπους κωδικοποίησης που ακολουθούνται. Οι τεχνικές αυτές είναι, ονομαστικά, οι εξής:

- Πολύπλεξη χρόνου
- Κωδικοποίηση γειτονικών στοιχείων

- Άμεση κωδικοποίηση

Πολύπλεξη χρόνου

Αποτελεί μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές και βασίζεται στην προσωρινή κωδικοποίηση. Με τον όρο προσωρινή κωδικοποίηση εννοούμε τη χρήση ενός συνόλου διαφορετικών μοτίβων. Η μεθοδολογία αυτή αποφέρει μετρήσιμες υψηλής ακρίβειας λόγω δύο σημαντικών χαρακτηριστικών της:

- Τα πολλαπλά μοτίβα που προβάλλονται επιτρέπουν τη χρήση απλών λέξεων κλειδιών και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εύκολη αποκωδικοποίησή τους.
- Εφαρμόζεται μέθοδος κλιμάκωσης ποιότητας, ώστε η θέση του κάθε εικονοστοιχείου να κωδικοποιείται με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια όσο προβάλλονται διαδοχικά τα μοτίβα.

Οι Salvi, Pages και Battle [25] έχουν οργανώσει τις μεθόδους πολύπλεξης χρόνου σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το είδος των λέξεων-κλειδιών που χρησιμοποιούνται, ενώ συγκεντρωτικά μπορούμε να διακρίνουμε συνολικά τέσσερις κατηγορίες:

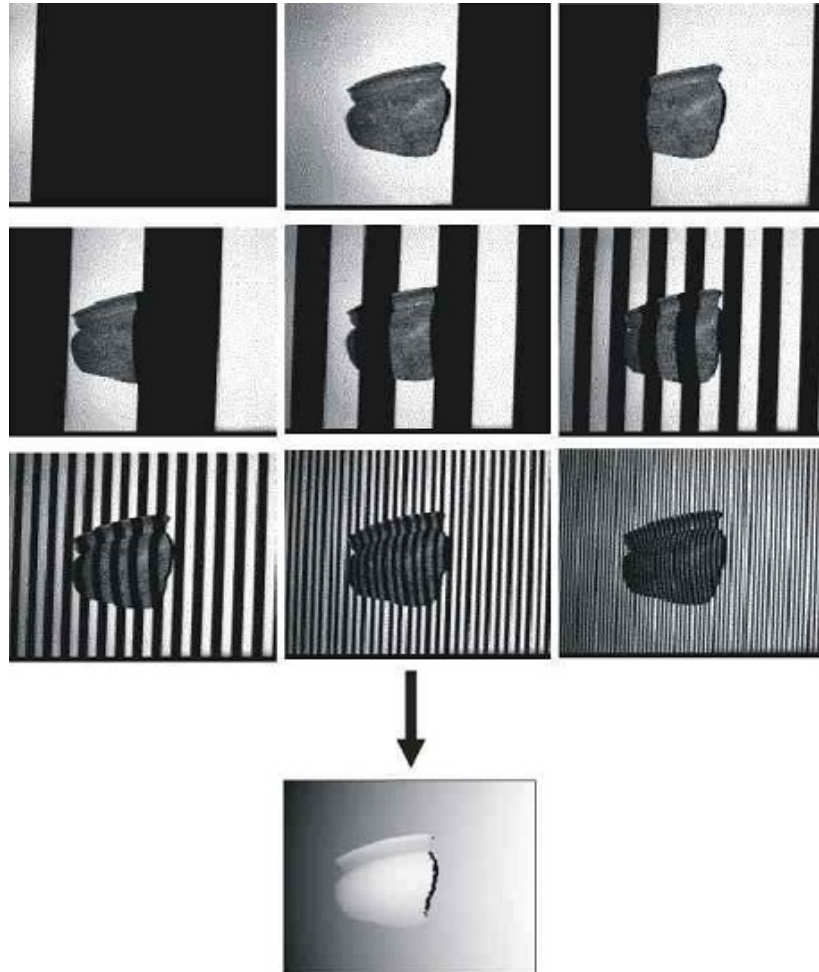
- Δυαδικοί κώδικες
- Κώδικες n -ψηφίων
- Διαβαθμίσεις του γκρι σε συνδυασμό με διαφορά φάσης
- Υβριδικές μέθοδοι

Δυαδικοί κώδικες

Σε αυτή την τεχνική χρησιμοποιούνται δύο μόνο επίπεδα φωτισμού, τα οποία κωδικοποιούνται συνήθως ως 0 και 1. Κάθε εικονοστοιχείο του μοτίβου έχει τη δική του λέξη κλειδί, που διαμορφώνεται από μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων (0 και 1). Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της τεχνικής αυτής είναι ότι το μοτίβο κωδικοποιείται μόνο σε έναν άξονα κάθε φορά.

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη συγκεκριμένη κωδικοποίηση. Το 1982 οι Posdamer και Altschuler [32] ήταν οι πρώτοι που πρότειναν την προβολή μιας ακολουθίας m μοτίβων για να κωδικοποιηθούν $2m$ κάθετες ρίγες, χρησιμοποιώντας δυαδικές λέξεις κλειδιά. Ως εκ τούτου, η λέξη κλειδί που σχετίζεται με κάθε εικονοστοιχείο είναι μια δυαδική ακολουθία που παράχθηκε από m μοτίβα. Ο μέγιστος αριθμός των μοτίβων προβολής καθορίζεται από την ανάλυση των εικονοστοιχείων της συσκευής προβολής. Φυσικά σε κανένα σύστημα δεν προτείνεται πολύ μεγάλος αριθμός μοτίβων, καθώς τα οπτικά συστήματα των σαρωτών πολλές φορές αδυνατούν να ανιχνεύσουν πολύ στενές

ρίγες. Θα πρέπει ακόμα να σημειωθεί πως τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στην ίδια ρίγα της υψηλότερης συχνότητας μοιράζονται την ίδια λέξη κλειδί. Για το λόγο αυτό ο τριγωνισμός στα περισσότερα συστήματα λαμβάνει υπόψη είτε από το κέντρο της κάθε ρίγας είτε τη μία άκρη της. Η δεύτερη μέθοδος έχει δειχθεί ότι αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα [31]. Στην Εικόνα 2 δίνεται ένα παράδειγμα ανακατασκευής τμήματος αντικειμένου με τη μέθοδο αυτή [<http://www.prip.tuwien.ac.at,2000>].



Εικόνα 2 Παράδειγμα προβολής των διαφορετικών μοτίβων για την 3Δ αποτύπωση θραύσματος

Οι Inokuchi et al. [33] βελτίωσαν την κωδικοποίηση των Posdamer και Altschuler εισάγοντας κωδικοποίηση σε αποχρώσεις του γκρι. Το πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στον έλεγχο των λέξεων κλειδιών με τη μέθοδο της απόστασης Hamming. Η κωδικοποίηση γίνεται πιο ανθεκτική στο θόρυβο.

Ο Trobina [34] έδειξε πως το κρίσιμο σημείο σε τέτοια συστήματα ψηφιοποίησης είναι ο ακριβής εντοπισμός της κάθε ρίγας πάνω στην εικόνα. Πρότεινε μια τεχνική όπου με συγκεκριμένη μέθοδος

μετατροπής σε ασπρόμαυρες φωτογραφίες (binarization) καταφέρνει να αναγνωρίζει τις ρίγες σε επίπεδο εικονοστοιχείου.

Τα τελευταία χρόνια το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί σε τρόπους βελτίωσης της αναγνώρισης των ορίων των ριγών. Το 2001 ο Rocchini [35] πρότεινε την χρωματική αλλαγή των ριγών από άσπρο και μαύρο σε μπλε και κόκκινο για να καταφέρει την ευκολότερη αναγνώριση των ορίων των ριγών. Επιπρόσθετα εισήγαγε μια σχισμή πράσινου χρώματος μήκους ενός εικονοστοιχείου ανάμεσα σε κάθε ρίγα. Με τη μέθοδο αυτή οι μεταβάσεις ανάμεσα σε δύο διαδοχικές ρίγες γίνονται με την αναγνώριση της πράσινη σχισμής με ακρίβεια ενός εικονοστοιχείου.

Κώδικες n-ψηφίων

Η τεχνική αυτή έρχεται να καλύψει το πρόβλημα χρήσης πολλών μοτίβων που εμφανίζει η δυαδική κωδικοποίηση. Ο Caspi [36] παρουσίασε έναν κώδικα πολλών χρωματικών επιπέδων, ο οποίος βασίζεται σε αλφάβητο που αποτελείται από n σύμβολα, όπου το κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε μία χρωματική τιμή. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται δραματική μείωση του πλήθους των απαιτούμενων μοτίβων. Έχει, επίσης, δειχθεί ότι η κωδικοποίηση n-ψηφίων επιτυγχάνει ακρίβεια μέτρησης και αντοχή στο θόρυβο παρόμοια με αυτή της δυαδικής κωδικοποίησης χρησιμοποιώντας πολύ λιγότερα μοτίβα [36].

Διαβαθμίσεις του γκρι σε συνδυασμό με διαφορά φάσης

Η ενσωμάτωση των τεχνικών διαβαθμίσεων του γκρι και διαφοράς φάσης καταλήγουν σε μια τεχνική με τα πλεονεκτήματα και των δύο, οδηγώντας σε σαφή και ορθή κωδικοποίηση του μοτίβου διασφαλίζοντας ταυτόχρονα και υψηλή ανάλυση. Ο Gühring [37] ανέπτυξε ένα σύστημα βασισμένο σε LCD και DMD προβολείς εικόνας. Τα αποτελέσματα του συστήματος άγγιξαν ένα μέσω όρο σφάλματος κοντά στα 30μm με μέγιστη απόκλιση 0.281mm.

Υβριδικές τεχνικές

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές μέθοδοι που βασίζονται στην πολλαπλή προβολή μοτίβων, στην πολύπλεξη χρόνου αλλά ταυτόχρονα και στην πληροφορία που μπορούν να παρέχουν γειτονικά εικονοστοιχεία. Οι Hall-Holt και Rusinkiewicz [38] εφάρμοσαν το διαχωρισμό τεσσάρων μοτίβων σε συνολικά 111 κάθετες ασπρόμαυρες ρίγες. Το πιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής είναι

ότι μπορεί να υποστηρίξει την 3Δ αποτύπωση τόσο αντικείμενων όσο και ολόκληρων χώρων που κινούνται ομαλά. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στην έξυπνη κωδικοποίηση που εφαρμόζεται, καθώς και τη δυνατότητα αναγνώρισης των ριγών ανάμεσα στα διαφορετικά μοτίβα.

Κωδικοποίηση γειτονικών στοιχείων

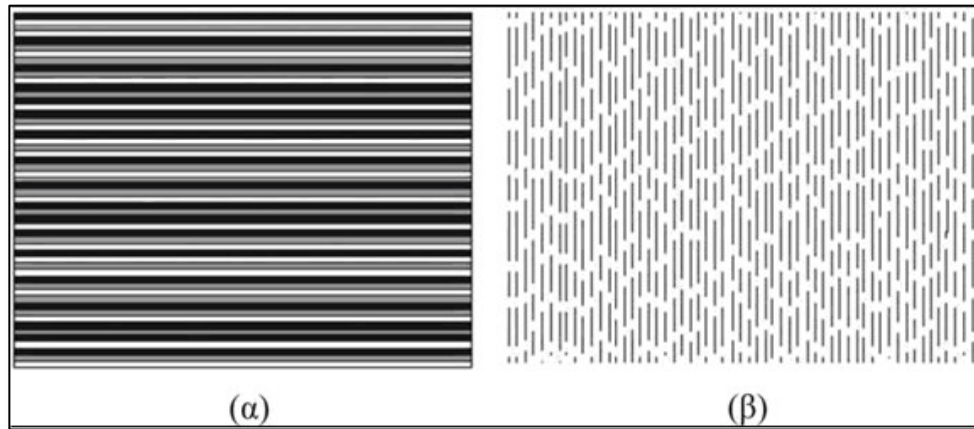
Όλες σχεδόν οι τεχνικές που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιούν ένα μοτίβο. Η λέξη κλειδί ενός συγκεκριμένου σημείου στο μοτίβο δημιουργείται από τα γειτονικά του σημεία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δυσκολότερη αποκωδικοποίηση, αφού πολλές φορές δεν είναι εφικτό να αναγνωριστούν όλα τα σημεία, και εισάγονται, έτσι, γεωμετρικά σφάλματα. Όπως και η προηγούμενη ενότητα τεχνικών κωδικοποίησης, αναγνωρίζουμε διάφορες τεχνικές:

- Μη-τυπική κωδικοποίηση
- Ακολουθίες De Bruijn
- Μαθηματικοί πίνακες

Μη τυπική κωδικοποίηση

Πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει τη χρήση μοτίβων που είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να διαιρούνται σε ένα συγκεκριμένο πλήθος περιοχών.

Οι Maguyama και Abe [39] σχεδίασαν ένα μοτίβο με τυχαία κατανεμημένα κενά (Εικόνα 3). Τα τυχαία αυτά κενά δημιουργούν ένα σύνολο από γραμμικά τμήματα, όπου η θέση του κάθε τμήματος υπολογίζεται από το μήκος του και από το μήκος των γειτονικών τμημάτων. Η τεχνική αυτή έχει εφαρμογή σε αντικείμενα των οποίων η επιφάνεια παρουσιάζει ομαλές μεταβολές βάθους. Εξαιτίας αυτού του χαρακτηριστικού αποκλείεται σχεδόν αμέσως από εφαρμογές ψηφιοποίησης πολιτιστικών αντικειμένων. Μια παραλλαγή του μοτίβου παρουσιάστηκε από την ερευνητική ομάδα του Durdle [40], κατά την οποία η κωδικοποίηση πραγματοποιείται σε ρίγες χρωματισμένες με τρία επίπεδα του γκρι (λευκό-Λ, γκριζο-Γ και μαύρο-Μ). Το μοτίβο παρουσιάζει την εξής μορφολογία χρωμάτων για τη διαδοχή των ριγών: ΜΛ ΓΛ ΒΓΛ ΓΜΓΛ ΜΓΜΛ ΜΓΛ.



Εικόνα 3 Τυχαία διακεκομμένα γραμμικά τμήματα κατά Maruyama και Abe

Ακολουθίες De Bruijn

Για την κωδικοποίηση των μοτίβων χρησιμοποιούνται επίσης και οι ακολουθίες De Bruijn. Πολλές είναι ερευνητικές εργασίες που πραγματεύονται το συγκεκριμένο τρόπο κωδικοποίησης. Οι πιο σημαντικές είναι των Salvi [41], Petriu [42], Lavoie et al [43] και Zhang et al. [44].

Μαθηματικοί πίνακες

Εφαρμογή στη σάρωση με προβολή μοτίβων έχουν βρει και οι μαθηματικοί πίνακες αφού τα χαρακτηριστικά τους βοηθούν στη διαδικασία κωδικοποίησης. Η χρήση πινάκων για κωδικοποίηση των σημείων του μοτίβου προϋποθέτει την αμφίδρομη κωδικοποίηση και στους δύο άξονες (x,y), αφού κάθε σημείο του μοτίβου φέρει διαφορετική λέξη κλειδί για τις κάθετες και οριζόντιες συντεταγμένες. Σημαντικές εργασίες στη συγκεκριμένη τεχνική είναι αυτές των Petriu et al. [45], Spoelder et al. [46] και Griffin et al. [47]. Η κωδικοποίηση με βάση τους μαθηματικούς πίνακες μπορεί να εφαρμοστεί σε αντικείμενα όπου άλλες τεχνικές όπως τα χρωματιστά μοτίβα δεν λειτουργούν ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρωματική ποικιλομορφία που παρουσιάζει η επιφάνεια ενός αντικειμένου εμποδίζει την αναγνώριση των παραμορφώσεων που δέχεται το μοτίβο [48].

Άμεση κωδικοποίηση

Η αρχή αυτής της μεθοδολογίας σχετίζεται με τη δημιουργία ενός μοτίβου, όπου κάθε εικονοστοιχείο μπορεί να περιγραφεί από τη χρωματική πληροφορία που αυτό φέρει. Η άμεση κωδικοποίηση εφαρμόζεται κυρίως σε μονόχρωμα αντικείμενα χωρίς έντονες επιφανειακές ανακλάσεις και προαπαιτεί μια διαδικασία βαθμονόμησης για την αναγνώριση όλου του χρωματικού φάσματος που

παρουσιάζει το αντικείμενο. Γενικά, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν την άμεση κωδικοποίηση χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Κωδικοποίηση βασισμένη σε διαβαθμίσεις του γκρι.
- Κωδικοποίηση βασισμένη σε χρώμα.

Κωδικοποίηση βασισμένη σε διαβαθμίσεις του γκρι

Οι Carrihill και Hummel [48] ανέπτυξαν ένα σύστημα, το οποίο ονόμασαν αισθητήρας βάθους βασιζόμενος στο λόγο έντασης (intensity ratio depth sensor). Το μοτίβο αποτελείται από ένα σύνολο στηλών που περιέχουν χρωματικές διαβαθμίσεις του γκρι. Ο λόγος έντασης της απόχρωσης του γκρι υπολογίζεται σε όλα τα εικονοστοιχεία του μοτίβου. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι πολύ χαμηλής ποιότητας αφού η κλίμακα του σφάλματος αγγίζει το 1 εκατοστό. Η μέθοδος βελτιώθηκε από άλλους ερευνητές όπως οι Miyasaka et al [50], Chazan και Kiryati [51].

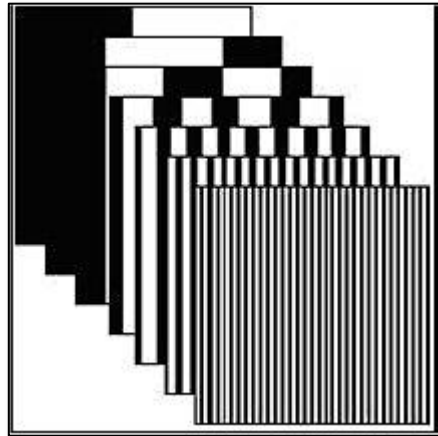
Κωδικοποίηση βασισμένη σε χρώμα

Η μέθοδος βασίζεται στην ίδια αρχή με την προηγούμενη, με μοναδική διαφορά στο ότι το πλήρες χρωματικό φάσμα έρχεται να αντικαταστήσει τις διαβαθμίσεις του γκρι. Οι Tajima και Iwakawa [52] χρησιμοποίησαν τα χρώματα του ουράνιου τόξου. Ο Sato, όμως, το 1999 [53] υποστήριξε ότι χρειάζεται ένα σύνθετο οπτικό σύστημα (κάμερα με οπτικά φίλτρα) για να συλλάβει ένα τέτοιο χρωματικό φάσμα.

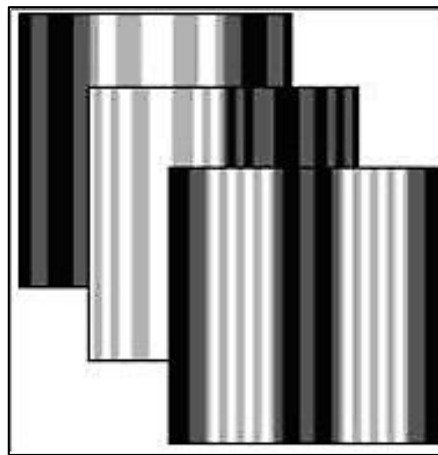
Προβληματισμοί Ακρίβειας Αποτελεσμάτων

Οι Salvi, Pages και Battle [54] σε μια εκτενή μελέτη πάνω στις μεθόδους κωδικοποίησης μοτίβων επιχείρησαν να συγκρίνουν τις επτά πιο αντιπροσωπευτικές τεχνικές και να τις δοκιμάσουν κάτω από τις ίδιες συνθήκες με σκοπό να αποτιμήσουν τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους. Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τις τεχνικές που δοκιμάστηκαν.

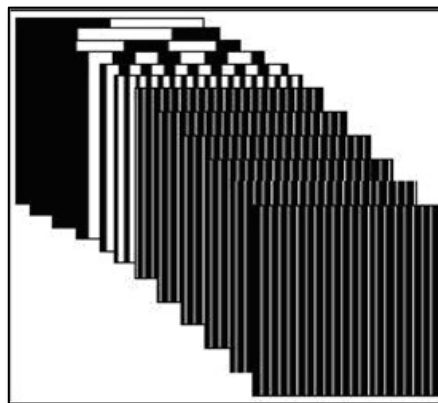
Posdamer: Μοτίβο από ρίγες κωδικοποιημένες με διαβάθμιση του γκρι 7 bits (128 ρίγες κωδικοποιούνται)



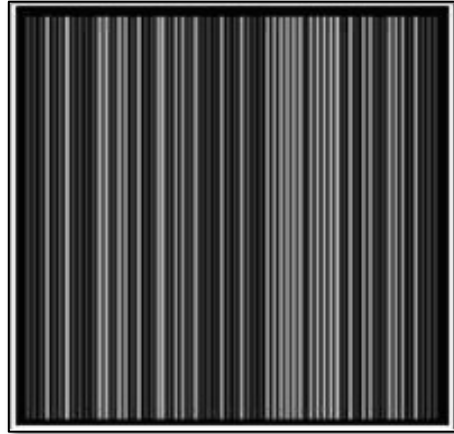
Guhring: Τεχνική μετατόπισης γραμμών με 6 κωδικοποιημένα μοτίβα σε διαβαθμίσεις του γκρι καθώς και μοτίβο 21σχισμών με μετατόπιση



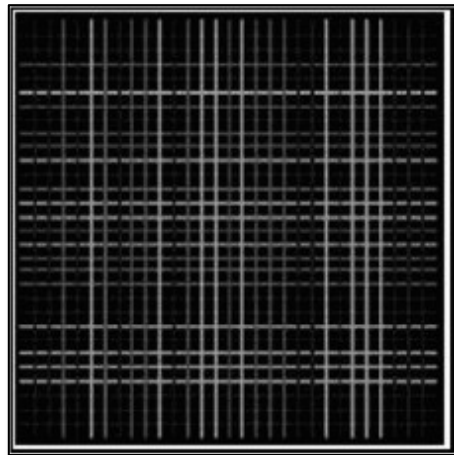
Horn: Τρία μοτίβα κωδικοποιούν 64 ρίγες με χρήση 4 διαβαθμίσεων του γκρι



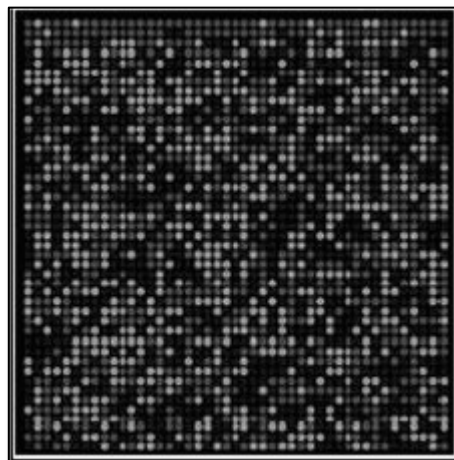
Κωδικοποίηση Γειτονικών Στοιχείων De
Buijn: Μοτίβο με 64 κάθετες σχισμές
κωδικοποιημένο με ακολουθία De Buijn
τρίτης τάξης και τεσσάρων χρωμάτων



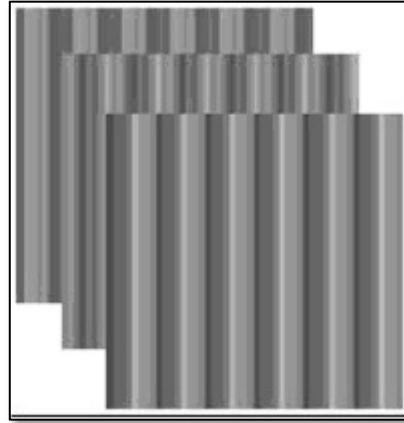
Salvi: Μοτίβο με μορφή πλέγματος 29 x 29
κωδικοποιημένο με ακολουθία De Buijn
τρίτης τάξης και τριών χρωμάτων



Morano: Μοτίβο που αποτελείται από
χρωματιστές κουκίδες κωδικοποιημένο με
M-πίνακες 45 x 45 στοιχείων και τριών
χρωμάτων



Άμεση Κωδικοποίηση Sato: Τρία περιοδικά μοτίβα που πρότεινε ο ίδιος ο ερευνητής



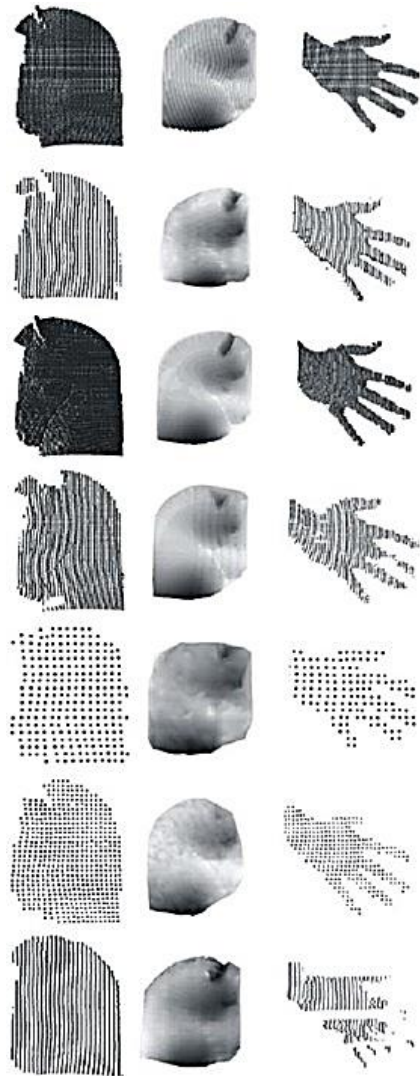
Πίνακας Ι. Ενδεικτικές τεχνικές κωδικοποίησης μοτίβων φωτός Τεχνικές Πολύπλεξης Χρόνου

Στο πείραμα περιγράφουν οι Salvi et al. [54] τοποθετήθηκε μια λευκή επίπεδη επιφάνεια σε απόσταση 120 cm από τον εργαστηριακό σαρωτή και αποτυπώθηκαν αντικείμενα με τις παραπάνω τεχνικές (Πίνακας ΙΙ). Το ίδιο πείραμα εφαρμόστηκε με τη μεταφορά της επίπεδης επιφάνειας περί τα 40 mm εγγύτερα στο σαρωτή. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η σταθερή απόκλιση απόστασης ανάμεσα στα δύο επίπεδα για κάθε μία από τις τεχνικές. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα αποτελέσματα των συγκρίσεων. Περιλαμβάνεται η σταθερή απόκλιση σε μm, η μέση απόκλιση ανάμεσα στα δύο παράλληλα επίπεδα, ο μέσος όρος 3Δ σημείων που ανακατασκευάστηκαν (νέφος σημείων), το ποσοστό των εικονοστοιχείων που αποκωδικοποιήθηκαν (και αντιστοιχούσαν σε μια περιοχή 515x226 εικονοστοιχείων) και τέλος, το συνολικό πλήθος μοτίβων που προβλήθηκαν για κάθε τεχνική.

Τεχνική	Σταθερή Απόκλιση	Νέφος Σημείων	Ανάλυση(%)	Αριθμός Μοτίβων
Posdamer [24]	37.6	25213	21.67	9
Hom [48]	9.6	12988	11.17	5
Guhring [29]	4.9	27214	23.38	14
De Bruijn [49]	13.1	13899	11.94	1
Salvi [33]	72.3	372	0.32	1
Morano [41]	23.6	926	0.8	1
Sato [46]	11.9	10204	8.77	3

Για την ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των τεχνικών χρησιμοποιήθηκαν δύο αντικείμενα που ανακατασκευάστηκαν με τις επτά μεθόδους. Το πρώτο αντικείμενο είναι η προτομή ενός λευκού αλόγου διαστάσεων 21x15x10cm, ενώ το δεύτερο είναι ένα ανθρώπινο χέρι (αντικείμενο με γεωμετρική πολυπλοκότητα και ασυνέχειες στις περιοχές των δακτύλων). Οι 3Δ ανακατασκευές των

δύο αντικειμένων παρουσιάζονται στην Εικόνα 4, όπου από πάνω προς τα κάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των μεθόδων Posdamer, Guhring, Horn, De Bruijn, Salvi, Morano και Sato. Αριστερά βρίσκονται τα νέφη σημείων του αλόγου, στο κέντρο η φωτορεαλιστική απόδοση ενός τμήματος του αλόγου και δεξιά τα νέφη σημείων του χεριού.



Εικόνα 4 3Δ ανατασκευές με χρήση διαφορετικών μοτίβων

Οι πειραματικές συγκρίσεις που επιχείρησαν οι Salvi et al. [54] καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι σαρωτές που βασίζονται στην πολύπλεξη χρόνου αποφέρουν τα καλύτερα αποτελέσματα, ενώ ταυτόχρονα είναι εύκολη η υλοποίησή τους τόσο από πλευράς λογισμικού όσο και τεχνικού εξοπλισμού. Τα συστήματα που βασίζονται σε μοτίβα διαβαθμίσεων του γκρι αποφέρουν

ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά η μέγιστη ανάλυση που μπορεί να προσφέρει το σύστημα προβολής του μοτίβου δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί στην πράξη.

Η ποιότητα των αποτελεσμάτων των σαρωτών βασίζονται στη μέγιστη δυνατή ανάλυση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής και του προβολικού συστήματος που χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα, στο σύστημα που ανέπτυξαν οι Rocchini et al. [55] γίνεται χρήση φωτογραφικής μηχανής με CCD ανάλυσης 1440 εικονοστοιχείων στον οριζόντιο και 960 στον κάθετο άξονα. Το μοτίβο βασίζεται σε ρίγες και μπορεί να προβάλλει έως και 512 ρίγες. Έτσι, στην καλύτερη περίπτωση το πλήθος των 3Δ δειγμάτων μπορεί να είναι έως και 960 x 512.

Ο ρυθμός ψηφιοποίησης εξαρτάται από την ταχύτητα της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής και την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων προς το υπολογιστικό σύστημα που θα πραγματοποιήσει την επεξεργασία των δεδομένων. Ο μέγιστος όγκος που μπορεί να ψηφιοποιηθεί χωρίς να μετακινηθεί το σύστημα ή το αντικείμενο εξαρτάται από την ικανότητα εστίασης του προβολικού συστήματος. Ένας από τους βασικότερους περιορισμούς αυτών των συστημάτων είναι το μικρό βάθος πεδίου του προβολικού που περιορίζει το εύρος δυνατοτήτων αποτύπωσης, αφού επιτρέπει ουσιαστικά μία μόνο σάρωση.

Στις μεθόδους Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως η πλήρης ψηφιοποίηση αντικειμένων γίνεται συνήθως με την εφαρμογή των τεχνικών ενοποίησης τμηματικών σαρώσεων [55]-[57] και χρωματικής ανάμιξης πληροφορίας υψής. Η πληροφορία υψής δημιουργείται από ένα σύνολο φωτογραφιών που αποκτώνται από την ίδια οπτική γωνία από όπου γίνονται και οι προβολές των μοτίβων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη χρήσης του ίδιου συστήματος για την καταγραφή γεωμετρίας και πληροφορίας υψής.

Συνοψίζοντας, η ακρίβεια των συστημάτων Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Οπτική ποιότητα του προβολικού συστήματος, που βασίζεται κυρίως στο φακό που χρησιμοποιείται.
- Ποιότητα της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής (ανάλυση εικόνας και πιστότητας απόδοσης χρωμάτων).
- Γωνία τοποθέτησης του προβολικού συστήματος έναντι του αντικειμένου και οι σκιές που δημιουργούνται βάση αυτής της γωνίας πάνω στα αντικείμενα.

- Χαρακτηριστικά της επιφάνειας των αντικειμένων.
- Τα προβολικά συστήματα δεν μπορούν να εστιάσουν σε μικρές αποστάσεις (π.χ. μικρότερες από 50 cm) και αυτό μειώνει την πυκνότητα δειγματοληψίας της επιφάνειας των αντικειμένων. Η χρήση διαφορετικών φακών μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να διορθώσει αυτό το πρόβλημα [55].

2 Αναφορές

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

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

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

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

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

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

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