

Τεχνική αναφορά

Ανακατασκευή ανάγλυφου μνημείων από στερεοσκοπικές εικόνες
με σκοπό την εικονική αναπαράσταση

Νίκος Κομοντάκης, Ηλίας Γκρίνιας και Γιώργος Τζιρίτας
Τυήμα Επιστήμης Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Κρήτης,
P.O. Box 2208, Heraklion, Greece
E-mail:{komod,grinias,tziritas}@csd.uoc.gr

11 Ιουνίου 2009

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μία μέθοδος για την εικονική αναπαράσταση γλυπτών αντικειμένων ή ανάγλυφων επιφανειών. Η μέθοδος χρησιμοποιεί οικονομικά προσιτό εξοπλισμό που αποτελείται από δύο ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, ένα βιντεοπροβολέα κι ένα φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο βιντεοπροβολέας χρησιμοποιείται για τον κωδικοποιημένο φωτισμό των αντικειμένων, ελεγχόμενο από το φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι δύο φωτογραφικές μηχανές καταγράφουν ένα στερεοσκοπικό ζεύγος εικόνων. Η κωδικοποίηση του φωτισμού διευκολύνει την αντιστοίχιση του στερεοσκοπικού ζεύγους. Ο υπολογισμός του πεδίου των μετατοπίσεων γίνεται με μια ιεραρχική μέθοδο αντιστοίχισης μπλοκ, που ολοκληρώνεται με τη λεπτομερή μέτρηση των μετατοπίσεων σημειακά σε όλη την περιοχή ενδιαφέροντος. Από το πεδίο των μετατοπίσεων κατασκευάζεται μια αναπαράσταση της τρισδιάστατης επιφάνειας του αντικειμένου. Σε συνδυασμό με τις εικόνες του αντικειμένου μπορεί να γίνει εικονική αναπαράσταση στη συνέχεια. Επιπλέον, για την περίπτωση που έχει ληφθεί σε περισσότερες όψεις, αυτές αντιστοιχίζονται μεταξύ τους για την ανακατασκευή ενός ενιαίου ανάγλυφου. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε εφαρμόσθηκε με επιτυχία σε ανάγλυφα του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης που προέρχονται από το Ναό του Αγίου Τίτου στη Γόρτυνα.¹

¹Η εργασία αυτή υλοποιήθηκε χάρη στη συγχρηματοδότηση κατά 75% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο), 25% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο (Υπουργείο Ανάπτυξης, Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας) και χάρη στην υποστήριξη του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα (Γ' Κοινωνικό Πλαίσιο Στήριξης, έργο 03ΕΔ417).

Virtual representation of monuments using stereoscopic images

N. Komodakis, I. Grinias and G. Tziritas

Technical Report

CSD-TR-2009-01

June 11, 2009

Abstract

We present a method for visual representation of sculpture objects or the relief of surfaces. The equipment used contains two digital cameras, a video projector and a laptop. The video projector illuminates objects with a coded structured pattern. A stereoscopic couple of images is registered by the two digital cameras. The registration of the stereoscopic images is aided by the coded illumination. A hierarchical block matching technique is used for the estimation of an initial disparity field, from which a dense disparity field is estimated. Based on the disparities field the 3D surface of the object is reconstructed. Using also views of the object the visual representation is obtained. If more than one stereoscopic couples are registered for an object, then using corresponding images the 3D models are registered for obtaining the whole 3D surface. The methods and techniques developed have been applied successfully on reliefs from the Church Saint Titus at Gortys exposed at the Historical Museum of Crete.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	ii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Τεχνολογίες τρισδιάστατης σάρωσης	2
1.2 Οργάνωση της Εργασίας	3
2 Φωτισμός της σκηνής και λήψη στερεοσκοπικών εικόνων	4
3 Δυαδικοποίηση των εικόνων	6
3.1 Λεπτές ζώνες	6
3.2 Πλατιές ζώνες	6
4 Αντιστοίχιση συνόλων εικόνων	8
5 Τρισδιάστατη ανακατασκευή ανάγλυφου	10
5.1 Βαθμονόμηση στερεοσκοπικής κάμερας	10
5.2 Εξαγωγή τρισδιάστατων συντεταγμένων	11
5.3 Εξαγωγή τρισδιάστατου πλέγματος	14
6 Αντιστοίχιση τμημάτων ανάγλυφου	15

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Της πάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη για τρισδιάστατη μοντέλοποίηση αρχιτεκτονικών στοιχείων ιστορικών μνημείων, που μπορεί να συμβάλει τόσο στην προβολή, όσο και στην καλύτερη κατανόησή τους. Οι αρχαιολόγοι και οι ιστορικοί με την ανάπτυξη της τεχνολογίας μπορούν να διαθέτουν τόσο νέες μεθόδους επιστημονικής έρευνας, όσο και μέσα προβολής των αποτελεσμάτων της έρευνας με ιδιαίτερα επωφελούμενο το ευρύτερο κοινό [1]. Οι αρχαιολόγοι ενδιαφέρονται να χρησιμοποιήσουν τεχνολογίες εικονικών τρισδιάστατων μοντέλων κατά τις αρχαιολογικές έρευνες για το σχεδιασμό αποκαταστάσεων ή αναστηλώσεων, για την παρουσίαση των ευρημάτων ή ακόμα για την τεκμηρίωσή τους. Από την άλλη πλευρά με τις τεχνολογίες εικονικών αναπαραστάσεων μπορεί να παρέχεται εξατομικευμένη πρόσβαση στο ευρύ κοινό σε ιστορικά μνημεία χωρίς να προκαλούνται φθορές σε αυτά. Η διαφύλαξη και προβολή του πολιτιστικού αποθέματος μπορεί να επωφεληθεί από τις τεχνολογίες της Πληροφορικής. Με τη χρήση τρισδιάστατων σαρωτών μπορούν να ληφθούν τηλεμετρήσεις για την αναπαράσταση του ανάγλυφου. Ωστόσο για μεγάλα μνημεία, όπως ένας ναός, οι τρισδιάστατοι σαρωτές είναι ανεπαρκείς, πολύ περισσότερο αν το μνημείο δε σώζεται εξολοκλήρου. Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνων, η υπολογιστική όραση, η γραφική και τα εικονικά περιβάλλοντα μπορούν ενολλακτικά, και ιδιαίτερα πειστικά, να αποτελέσουν νέες τεχνολογίες για την εικονική ανακατασκευή και αναπαράσταση των μνημείων. Οι τεχνολογίες της Πληροφορικής έχουν το πλεονέκτημα, χωρίς να προκαλούν φθορές στο πραγματικό περιβάλλον, να αξιοποιούν το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων, πληροφοριών και γνώσεων.

Το Δίκτυο για το Εικονικό Πολιτιστικό και Οικολογικό Απόθεμα

Virtual Heritage Network, <http://www.virtualheritage.net/>

είναι ένας διεθνής οργανισμός για την προώθηση της τεχνολογίας με σκοπό τη διάσωση και την προβολή του αποθέματος. Αναφερόμενα στη συνέχεια επιλεκτικά σε δραστηριότητες που υποδεικνύουν την εφικτότητα και τις δυνατότητας της τεχνολογίας των εικονικών αναπαραστάσεων. Τα ακόλουθα έργα είναι σχετικά με αναπαραστάσεις κτιρίων, ναών ή οικιστικών συγκροτημάτων:

- Ψηφιακή μοντέλοποίηση του έργου του Michelangelo *Pieta* της Φλωρεντίας [4],
- Αναπαράσταση της ελληνορωμαϊκής πόλης Sagalassos [12],

- Ανακατασκευή των ιστορικών ιαπωνικών χωριών Shirakawa-go [11],
- Ψηφιακή επανένωση των γλυπτών του Παρθενώνα [13],
- Ψηφιακή μοντελοποίηση του Καθεδρικού Ναού Αγίου Πέτρου στο Beauvais [2],
- Ψηφιακή μοντελοποίηση του Αβαείου της Pomposa [5].

1.1 Τεχνολογίες τρισδιάστατης σάρωσης

Πολλές τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί για την ψηφιακή μοντελοποίηση και την τρισδιάστατη ανακατασκευή αρχαιολογικών αντικειμένων ή ιστορικών μνημείων. Στις τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνονται τόσο υπολογιστικά συστήματα, όσο και μετρητικές διατάξεις. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν χατά περίπτωση την καταγραφή των γεωμετρικών και φωτομετρικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων. Το ανάγλυφο της επιφάνειας του αντικειμένου και η εμφάνισή του σε ορισμένες συνθήκες φωτισμού απαιτούνται για την εικονική του αναπαράσταση.

Βασικό ρόλο στην ανάπτυξη των τρισδιάστατων σαρωτών παίζει η βελτίωση των υπολογιστών στον τομέα των τρισδιάστατων γραφικών πραγματικού χρόνου. Η δυνατότητα διαχείρισης πολύπλοκης τρισδιάστατης γεωμετρίας σε πλατφόρμες χαμηλού κόστους βρίσκει άμεση εφαρμογή στην απεικόνιση λεπτομερών και υψηλής ακρίβειας τρισδιάστατων μοντέλων που δημιουργούνται από τη γεωμετρική και φωτομετρική πληροφορία.

Στην Ελλάδα ωστρέπει να υπογραμμίσουμε τις δραστηριότητες του Ινστιτούτου Πολιτιστικής και Εκπαίδευσης Τεχνολογίας (<http://www.ipet.gr/>) στον τομέα της τρισδιάστατης σάρωσης.

Στην ανάπτυξη των τρισδιάστατων σαρωτών συμβάλλει η πρόοδος σε διαφορετικά επιστημονικά αντικείμενα και τεχνολογικά πεδία, όπως είναι αυτά της υπολογιστικής όρασης, των τρισδιάστατων γραφικών, των μετρήσεων με ηλεκτρονικά αισθητήρια, της ψηφιακής φωτογράφησης και της φωτογραμμομετρίας. Η οπτική μετρολογία φαίνεται να πλεονεκτεί έναντι των μετρητικών συστημάτων επαφής από πολλές απόψεις.

Οι σαρωτές χωρίς επαφή με το αντικείμενο διαχρίνονται σε ενεργούς και παθητικούς. Οι ενεργοί σαρωτές εκπέμπουν κάποια κύματα, ακτινοβολία ή δέσμη φωτός και από την ανακλόμενη ακτινοβολία προσδιορίζουν τη γεωμετρία του ανάγλυφου όπου γίνεται η ανάκλαση και την εμφάνιση των αντικειμένων, αν χρησιμοποιείται και φωτισμός. Οι παθητικοί σαρωτές δεν εκπέμπουν ακτινοβολία, αλλά βασίζονται στη λήψη του διαχεόμενου από τις επιφάνειες των αντικειμένων φωτισμού. Η ανιχνευόμενη φωτεινή ισχύς ωστρέπει μπορούσε να είναι και υπέρυθρη. Οι παθητικοί σαρωτές έχουν μικρό κόστος, αλλά δύσκολα μπορούν να εξασφαλίσουν υψηλή ακρίβεια. Μια συγκριτική παρουσίαση των σαρωτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αρχαιολογικά αντικείμενα, έργα τέχνης και ιστορικά μνημεία δίδεται στο [1]. Κριτήρια σύγκρισης αποτελούν το κόστος, η ακρίβεια των μετρήσεων και το περιβάλλον χρήσης.

Οι σαρωτές laser βασίζονται στη μέτρηση του χρόνου διαδρομής ενός παλμού φωτός laser από την εκπομπή ως τη λήψη. Η ακρίβεια της μέτρησης προσδιορίζεται από την ακρίβεια μέτρησης του χρόνου. Η εκπομπή ακτίνων laser μπορεί να συνδυασθεί με μία κάμερα που εντοπίζει το σημείο πρόσπτωσης στην επιφάνεια και με την αρχή της τριγωνοποίησης προσδιορίζει την απόσταση. Για οικοδομήματα και μεγάλες αποστάσεις είναι προτιμότεροι οι σαρωτές μέτρησης του χρόνου, ενώ για κοντινές αποστάσεις και μικρά αντικείμενα

είναι προτιμότερη η τεχνική της τριγωνοποίησης. Οι σαρωτές laser, με υψηλό γενικά κόστος, μπορούν να παράσχουν ακριβείς μετρήσεις για την αναπαράσταση του ανάγλυφου [7]. Δεν έχουν ωστόσο στη δυνατότητα απόδοσης των φωτομετρικών χαρακτηριστικών, ενώ η διαδικασία σάρωσης μπορεί είναι χρονοβόρα.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας σαρωτής δομημένου φωτισμού. Το σύστημα σάρωσης χρησιμοποιεί συσκευές γενικής χρήσης. Ένας βιντεοπροβολέας προβάλλει στο αντικείμενο ένα μοτίβο και μία κάμερα καταγράφει τη γεωμετρική παραμόρφωση του μοτίβου. Με μία τεχνική τριγωνοποίησης που χρησιμοποιεί το γνωστό προβαλλόμενο μοτίβο και την εικόνα του προσδιορίζεται η απόσταση των σημείων της επιφάνειας. Απαιτείται ωστόσο η προβολή ενός αριθμού μοτίβων για να λυθεί το πρόβλημα της αντιστοίχισης του μοτίβου με την εικόνα του. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μία κάμερας για να είναι ορατά κατά το δυνατό όλα τα σημεία της επιφάνειας σε μια δοσμένη λήψη. Σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα ανάγεται σε αυτό της στερεοσκοπικής ανακατασκευής, αλλά με δομημένο και ενεργό φωτισμό. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε δύο φωτογραφικές μηχανές και ένα βιντεοπροβολέα.

Για την τρισδιάστατη ψηφιακή αναπαράσταση απαιτείται πέραν της τρισδιάστατη σάρωσης και λήψης εικόνων του αντικειμένου, και η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου, και τέλος η εικονική αναπαράσταση του ψηφιακού μοντέλου μέσω υπολογιστικής γραφικής πραγματικού χρόνου.

1.2 Οργάνωση της Εργασίας

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τεχνικές επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνων και υπολογιστικής άρασης με σκοπό την εικονική αναπαράσταση αρχιτεκτονικών μνημειακών στοιχείων. Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές παρουσιάζονται χωριστά στα κεφάλαιο αυτής της αναφοράς.

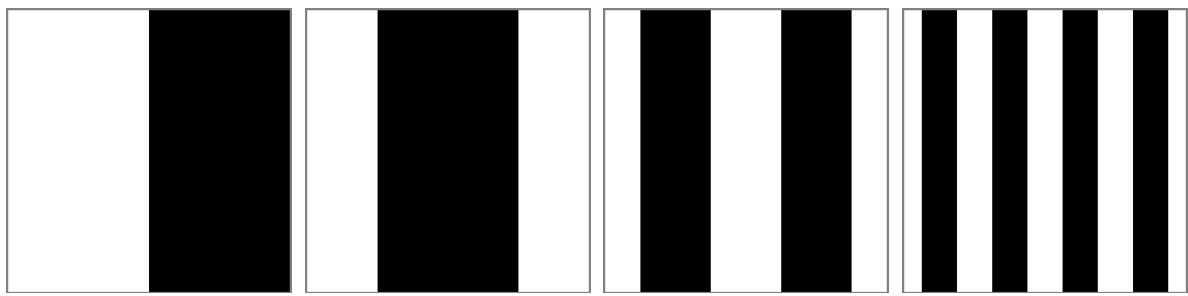
Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των στερεοσκοπικών εικόνων. Οι απαιτήσεις φωτισμού της σκηνής για την ακριβή στερεοσκοπική αντιστοίχιση δίδονται αναλυτικά. Στο Κεφάλαιο 3 δίδεται η χρησιμοποιούμενη τεχνική για το διαχωρισμό σε φωτεινές και σκοτεινές λωρίδες που οδηγεί σε δυαδικές εικόνες που τελικά θα αντιστοιχηθούν. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η τεχνική αντιστοίχισης των εικόνων που έχουν ληφθεί για την ίδια σκηνή. Στο Κεφάλαιο 5 δίδεται ο τρόπος ανακατασκευής της τρισδιάστατης επιφάνειας των αντικειμένων. Για την περίπτωση που ένα αντικείμενο έχει ληφθεί σε περισσότερες όψεις παρουσιάζεται στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 6 η τεχνική που επιτρέπει την ανακατασκευή ενός ενιαίου ανάγλυφου.

Κεφάλαιο 2

Φωτισμός της σκηνής και λήψη στερεοσκοπικών εικόνων

Για την τρισδιάστατη ανακατασκευή πρέπει να γίνει λήψη δύο τουλάχιστον εικόνων από γνωστές προκαθορισμένες θέσεις. Από τη σχετική θέση των οπτικών συστημάτων μπορεί να ευρεθεί η θέση στον τρισδιάστατο χώρο ενός σημείου της επιφάνειας, αρκεί να προσδιορισθούν οι θέσεις που απεικονίζεται στο σύνολο των διαθέσιμων όψεων. Απαιτείται επομένως αρχικά η αντιστοίχιση των σημείων μεταξύ των όψεων. Ωστόσο η αντιστοίχιση με βάση μόνο την εμφάνιση της επιφάνειας ενός αντικειμένου υπόκειται σε λάθη, γιατί πολλά διαφορετικά σημεία έχουν παρόμοια εμφάνιση. Μία οικονομική και απλή λύση για την εύρεση κατά το δυνατό των αντιστοίχισεων με μεγάλη ακρίβεια συνίσταται στο φωτισμό της σκηνής με δομημένο τρόπο. Σε αυτή την περίπτωση απαιτούνται περισσότερες λήψεις για την ίδια σκηνή με διαφορετικό κάθε φορά φωτισμό. Μία ανασκόπηση αυτών των τεχνικών δίδεται στο [3].

Στο Ιστορικό Μουσείο Κρήτης για το φωτισμό και τη λήψη των εικόνων χρησιμοποιήθηκαν δύο φημιακές φωτογραφικές μηχανές και ένας προβολέας. Σε κάθε ξεχωριστή λήψη φωτίζεται μέρος της σκηνής ακολουθώντας μοτίβα που περιλαμβάνουν οριζόντιες και κατακόρυφες λωρίδες, προσδιορισμένες μέσω κατάλληλων κωδίκων (Gray), ώστε να μπορεί να γίνει ταυτοποίηση των σημείων που προβάλλονται από το συνδυασμό όλων των προβολών. Οι κωδικές λέξεις που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μοτίβων έχουν όλες το ίδιο βάρος και η απόσταση μεταξύ τους είναι επίσης σταθερή. Τέσσερα από τα οριζόντια μοτίβα που δόθηκαν φαίνονται στο Σχήμα 2.1. Κατά τον ίδιο τρόπο ορίζονται τα επόμενα μοτίβα όπως και τα κατακόρυφα. Εάν δοθούν m τέτοια μοτίβα οριζόντια και n κατακόρυφα, μπορεί να προσδιορισθούν οι συντεταγμένες των σημείων εικόνας διάστασης $2^m \times 2^n$. Στις μετρήσεις που έγιναν στο Ιστορικό Μουσείο Κρήτης είχαμε $m = 11$ οριζόντια μοτίβα και $n = 10$ κατακόρυφα ανά λήψη. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν και τα συμπληρωματικά μοτίβα, εναλλάσσοντας σκοτεινές και φωτεινές λωρίδες, για καλύτερο εντοπισμό των σημείων και των αντιστοιχίσεων τους ανάμεσα στη δεξιά και την αριστερή εικόνα.



Σχήμα 2.1: Μοτίβα που χρησιμοποιούνται για την υποβοήθηση της αντιστοίχισης των στερεοσκοπικών ζευγών.

Κεφάλαιο 3

Δυαδικοποίηση των εικόνων

Με δοσμένο ότι τα μοτίβα φωτισμού είναι δυαδικά για να διευκολυνθεί η αντιστοίχιση των εικόνων απαιτείται ο διαχωρισμός των εικόνων στις σκοτεινές και στις φωτεινές ζώνες. Επειδή το πλάτος της ζώνης ποικίλει, για καλύτερη προσαρμογή και απόδοση, χρήσηται αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές μέθοδοι τμηματοποίησης.

3.1 Λεπτές ζώνες

Για το διαχωρισμό σκοτεινό/φωτεινό στην περίπτωση που οι ζώνες είναι λεπτές γίνεται σημειακή κατάταξη σε μία από τις δύο κλάσεις που μοντελοποιούνται με την ακόλουθη μίξη κατανομών,

$$p(x) = \frac{P_0}{\lambda_0} e^{-\frac{x}{\lambda_0}} + \frac{P_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{P_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}}. \quad (3.1.1)$$

Οι παράμετροι υπολογίζονται με μία επαναληπτική μέθοδο για την ανάλυση της μίξης των κατανομών [14]. Ο διαχωρισμός των δύο κλάσεων γίνεται ως προς την τιμή

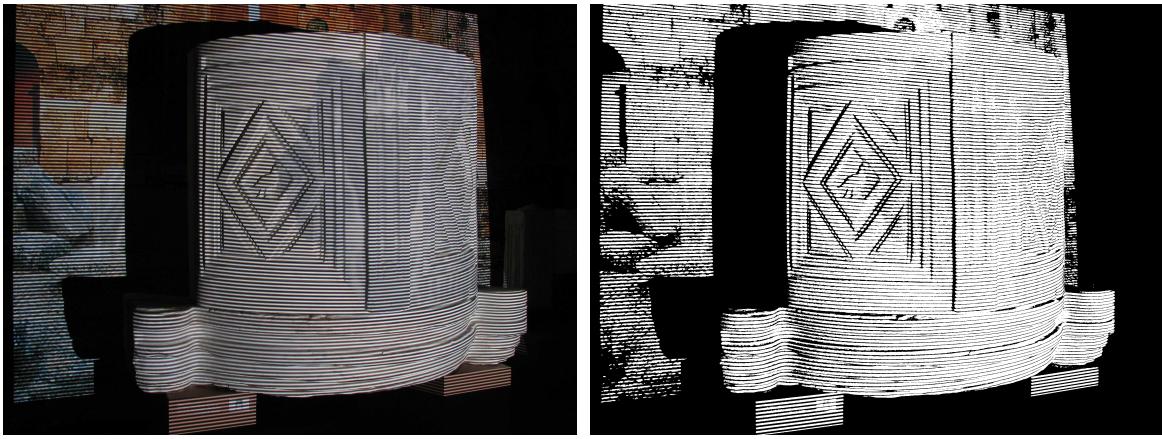
$$\kappa = \frac{\sigma_2 \mu_1 + \sigma_1 \mu_2}{\sigma_1 + \sigma_2}, \quad (3.1.2)$$

που δίδει προσεγγιστικά τη διαχωριστική τιμή με χριτήριο τη μέγιστη πιθανοφάνεια. Ένα αποτέλεσμα δίδεται στο Σχήμα 3.1.

3.2 Πλατιές ζώνες

Όταν οι ζώνες είναι σχετικά πλατιές μπορεί να αξιοποιηθεί η συνεκτικότητα των περιοχών και να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της πλημμυρίδας, όπως προτείνεται στη διδακτορική διατριβή του Η. Γκρίνια [8].

Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την αυτόματη εξαγωγή των χαρακτηριστικών των δύο κλάσεων κατά τρόπο παρόμοιο με τη σημειακή ταξινόμηση. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται σημεία που ανήκουν με πολύ μεγάλη πιθανότητα σε μια κλάση, βάσει πιθανοθεωρητικών κατά Bayes αποστάσεων των χαρακτηριστικών σημείου από το στατιστικό μοντέλο χαρακτηριστικών της κλάσης. Αυτό το πρώτο βήμα επιβολής ισχυρών



Σχήμα 3.1: Δυαδικοποίηση των τιμών μιας εικόνας με σημειακή κατάταξη των σημείων.

τοπολογικών περιορισμών χωρικής συνάφειας ολοκληρώνεται με έναν αλγόριθμο πλημμυρίδας περιοχών, δινοντας ως αποτέλεσμα την τελική δυαδικοποίηση της εικόνας.

Χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Priority MultiLabel Flooding Algorithm (PMLFA), που υπολογίζει τη διαδρομή ελαχίστου κόστους με βάση τις κατά Bayes αποστάσεις και αναθέτει επικέτα στα μη αρχικοποιημένα σημεία του πλέγματος επεκτείνοντας τις αρχικές περιοχές όλων των κλάσεων ταυτόχρονα. Με αυτό τον τρόπο επιβάλλονται ισχυροί τοπολογικοί περιορισμοί για τις κλάσεις. Ένα αποτέλεσμα δίδεται στο Σχήμα 3.2.



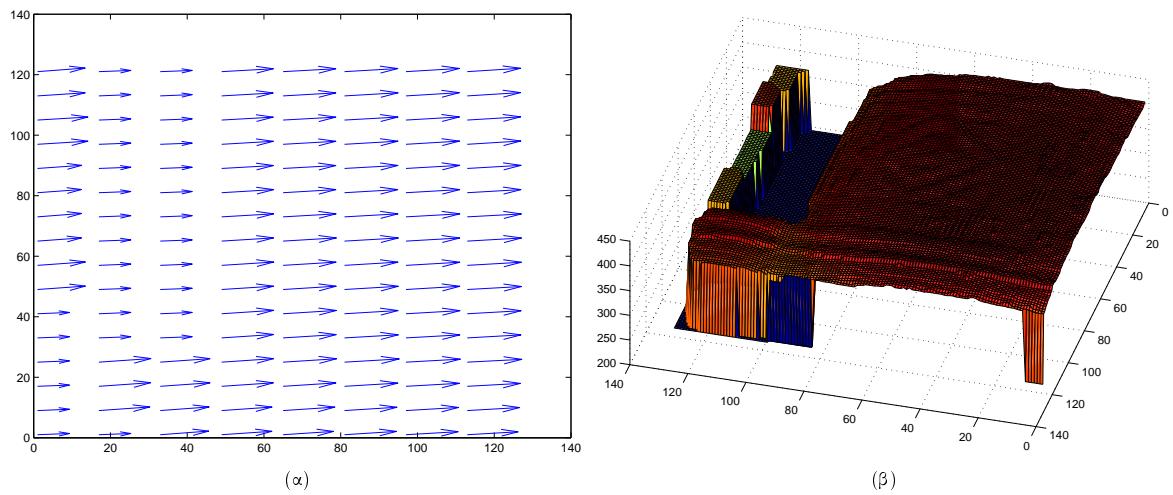
Σχήμα 3.2: Δυαδικοποίηση των τιμών μιας εικόνας με αλγόριθμο πλημμυρίδας.

Κεφάλαιο 4

Αντιστοίχιση συνόλων εικόνων

Η αντιστοίχιση χρησιμοποιεί το σύνολο των εικόνων δεξιάς και αριστερής λήψης με τρόπο ιεραρχικό. Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί ως ιεραρχική αντιστοίχιση ανάμεσα σε μπλοκ από σημεία των εικόνων. Υποθέτουμε επομένως πολλαπλές αναλύσεις που χρησιμοποιούνται ιεραρχικά. Οι πολλαπλές αναλύσεις προκύπτουν από το εύρος των λωρίδων, ή αλλιώς από την κωδικοποίηση του φωτισμού. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος μιας λωρίδας, τόσο πιο χονδρική θεωρούμε ότι είναι η ανάλυση. Κι αντίστροφα, όσο λεπτότερες είναι οι λωρίδες, τόσο λεπτομερέστερη θεωρείται η ανάλυση. Σε κάθε πάντως περίπτωση χρησιμοποιούνται όλα τα δεδομένα. Άλλαζει μόνο το μέγεθος του μπλοκ επί του οποίου υπολογίζεται η μετατόπιση και κατ' επέκταση και το πλήθος των μπλοκ. Στα αρχικά στάδια χρησιμοποιείται η πιο χονδρική ανάλυση για να ευρεθεί για μικρό αριθμό μεγάλων μπλοκ μια συνολική μετατόπιση μεταξύ δεξιάς και αριστερής εικόνας. Η εκτίμηση αυτή αποτελεί την αρετηρία για το επόμενο στάδιο που ευρίσκεται σε μεγαλύτερη ανάλυση και με μικρότερα μπλοκ, κι επομένως επιτυγχάνει μια καλύτερη προσέγγιση. Η εκκίνηση γίνεται από ολόκληρη την εικόνα. Άρα αρχικά έχουμε μια συνολική εκτίμηση της μετατόπισης μεταξύ δεξιάς και αριστερής εικόνας. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να φθάσουμε στη μεγαλύτερη ανάλυση που θεωρείται δυνατή η εκτίμηση της μετατόπισης. Συνήθως χρησιμοποιούνται 6 ή 7 επίπεδα ανάλυσης για εικόνες διάστασης της τάξης $2^{11} \times 2^{11}$. Στο Σχήμα 4.1 δίδεται ένα αραιό πεδίο μετατοπίσεων για να διακρίνονται τα ζεχωριστά διανύσματα και ως επιφάνεια η οριζόντια συνιστώσα της μετατόπισης. Πρόκειται για διαφορετικές παρουσιάσεις του ίδιου αποτελέσματος μετά το πέρας της ιεραρχικής εκτίμησης.

Μετά την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας εκτιμάται η μετακίνηση σημειακά για την εύρεση του τελικού πεδίου των αντιστοιχίσεων δεξιάς/αριστερής εικόνας. Η χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι πάλι η αντιστοίχιση μπλοκ μικρής διάστασης για να ευρεθεί τοπικά η διόρθωση ως προς την ιεραρχική εκτίμηση που τερματίζει σε μπλοκ. Το τελικό αποτέλεσμα δίδεται στο Σχήμα 4.2 σε αποχρώσεις του γκρί για την οριζόντια συνιστώσα της μετατόπισης. Δεδομένου ότι είναι η κύρια συνιστώσα της μετατόπισης δίδει ταυτόχρονα μια αποτύπωση του ανάγλυφου. Οι πιο φωτεινές τιμές αντιστοιχούν στις πιο χοντινές θέσεις.



Σχήμα 4.1: (α) Το πεδίο των μετατόπισεων, και (β) η οριζόντια συνιστώσα της μετατόπισης, μετά το πέρας της ιεραρχικής εκτίμησης.



Σχήμα 4.2: Η τελική εκτίμηση της οριζόντιας συνιστώσας της μετατόπισης σε αποχρώσεις του γκρί.

Κεφάλαιο 5

Τρισδιάστατη ανακατασκευή ανάγλυφου

Για την τρισδιάστατη ανακατασκευή ανάγλυφου ωστε χρειαστεί πρώτα να γίνει η βαθμονόμηση της στερεοσκοπικής κάμερας, η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην ενότητα 5.1, ενώ στη συνέχεια είναι δυνατή η εξαγωγή των τρισδιάστατων συντεταγμένων, η περιγραφή της οποίας ακολουθεί στην ενότητα 5.2. Με βάση αυτές τις τρισδιάστατες συντεταγμένες γινέται τέλος η εξαγωγή ενός τρισδιάστατου τριγωνικού πλέγματος το οποίο είναι κατάλληλο για απεικόνιση μέσω σύγχρονων καρτών τρισδιάστατων γραφικών (ενότητα 5.3).

5.1 Βαθμονόμηση στερεοσκοπικής κάμερας

Η βαθμονόμηση της στερεοσκοπικής κάμερας συνίσταται στον υπολογισμό δύο ειδών παραμέτρων: των εσωτερικών και των εξωτερικών. Οι πρώτες περιγράφουν την εσωτερική γεωμετρία της κάμερας, ενώ οι τελευταίες προσδιορίζουν τη σχετική τρισδιάστατη μετατόπιση και περιστροφή της δεξιάς κάμερας σε σχέση με την αριστερή.

Στην παρούσα εργασία θεωρούμε τόσο για την αριστερή, όσο και για τη δεξιά κάμερα, ένα μοντέλο το οποίο είναι γνωστό με το όνομα μάτι της βελόνας και διαθέτει τις παραχάτω εσωτερικές παραμέτρους:

- **Εστιακή απόσταση:** ορίζεται ως το διάνυσμα $f_c = [f_x \ f_y]$ του οποίου οι συνιστώσες μετρούν την εστιακή απόσταση (με μονάδα μέτρησης την απόσταση των εικονοστοιχείων).
- **Αρχικό σημείο:** είναι το σημείο στο οποίο ο οπτικός άξονας (ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο της εικόνας) τέμνει το επίπεδο αυτό. Αναπαριστάται με ένα διάνυσμα $c = [c_x \ c_y]$.
- **Συντελεστής κλίσης:** είναι ένας συντελεστής ο οποίος καθορίζει την γωνία μεταξύ των αξόνων x και y στο επίπεδο της εικόνας. Αναπαριστάται με ένα πραγματικό αριθμό α .
- **Παραμόρφωση:** υπάρχουν δύο είδη παραμορφώσεων των φακών της κάμερας, η ακτινική και η εφαπτόμενη παραμόρφωση. Η αναπαράσταση γίνεται μέσω ενός διανύσματος $d = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4 \ d_5]$,

όπου οι τρεις πρώτες συνιστώσες περιέχουν τους συντελεστές της ακτινικής παραμόρφωσης, ενώ οι δύο τελευταίες συνιστώσες τους συντελεστές της εφαπτόμενης παραμόρφωσης.

Έστω $P = (X_c, Y_c, Z_c)$ ένα τρισδιάστατο σημείο στο σύστημα αναφοράς της κάμερας. Η προβολή p του σημείου αυτού στο επίπεδο της εικόνας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p = K \cdot p_d ,$$

όπου K είναι ο εσωτερικός πίνακας βαθμονόμησης της κάμερας:

$$K = \begin{pmatrix} f_x & \alpha \cdot f_x & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

και p_d συμβολίζει το σημείο με κανονικοποιημένες δισδιάστατες συντεταγμένες (στην κανικοποιήση συνυπολογίζεται και η παραμόρφωση των φακών της κάμερας):

$$p_d = (1 + d_1 r^2 + d_2 r^4 + d_3 r^6) x' + dx .$$

Τα x' και dx που περιλαμβάνονται στην παραπάνω σχέση ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} x' &= \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{X_c}{Z_c} \\ \frac{Y_c}{Z_c} \end{pmatrix} , \\ dx &= \begin{pmatrix} 2d_3 xy + d_4(r^2 + 2x^2) \\ d_3(r^2 + 2y^2) + 2d_4xy \end{pmatrix} , \\ r^2 &= x^2 + y^2 . \end{aligned}$$

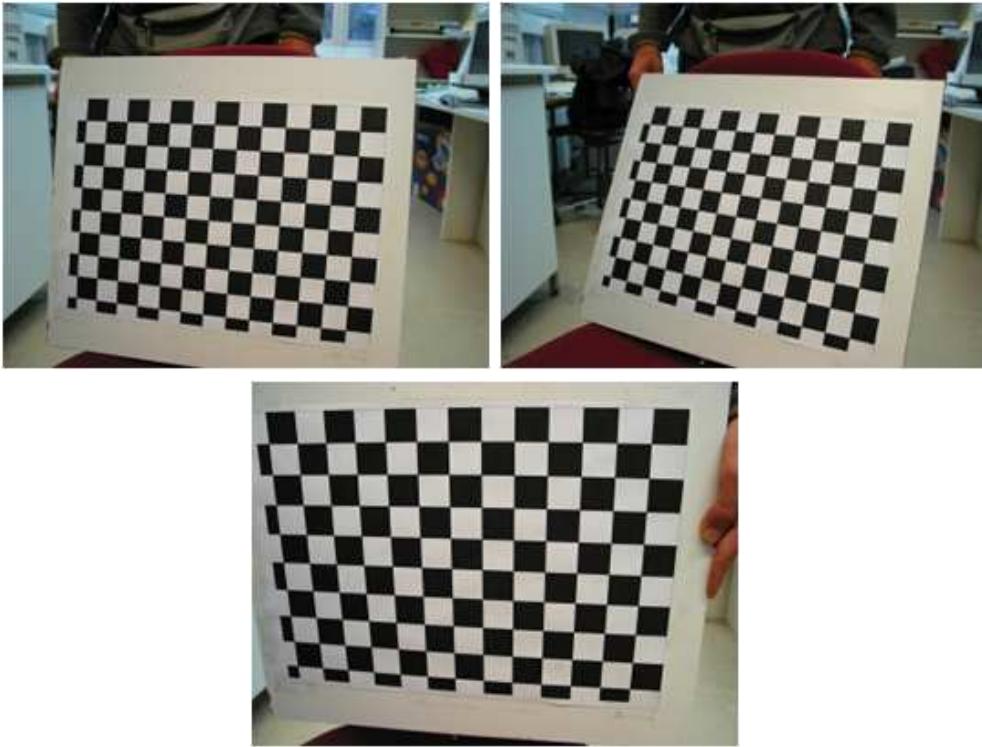
Οι εξωτερικές παράμετροι αποτελούνται από:

- τη σχετική τριασδιάστατη περιστροφή, η οποία αναπαριστάται με ένα ορθοκανονικό 3×3 πίνακα R ,
- και τη σχετική τριασδιάστατη μετατόπιση, η οποία αναπαριστάται με ένα 3×1 διάνυσμα T .

Για την βαθμονόμηση της κάμερας φωτογραφίζουμε μια βαθμονομημένη σκακιέρα τοποθετημένη σε διάφορες θέσεις και σε διάφορες πόζες (βλέπε εικόνα 5.1). Η προβολή των κορυφών των τετραγώνων της σκακιέρας στις εικόνες που προκύπτουν υπολογίζονται αυτόματα. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας μια τεχνική συνταιριάσματος υπολογίζονται ταυτόχρονα οι πόζες της σκακιέρας καθώς και οι παράμετροι βαθμονόμησης. Η διαδικασία αυτή στηρίζεται σε ήδη γνωστές τεχνικές για το σκοπό αυτό [16], [17]. Σημειώνουμε ότι η διαδικασία βαθμονόμησης χρειάζεται να εκτελεστεί μόνο μία φορά, πριν την εξαγωγή των τρισδιάστατων συντεταγμένων.

5.2 Εξαγωγή τρισδιάστατων συντεταγμένων

Στην ουσία κατά την εξαγωγή αυτή θα υπολογιστεί το βάθος για όλα τα σημεία που απεικονίζονται στην αριστερή εικόνα. Αυτό θα επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το πυκνό πεδίο των μετατοπίσεων που έχει υπολογιστεί



Εικόνα 5.1: Για τη βαθμονόμηση της κάμερας φωτογραφίζουμε μια βαθμονομημένη σκακιέρα σε διάφορες θέσεις και πόζες.

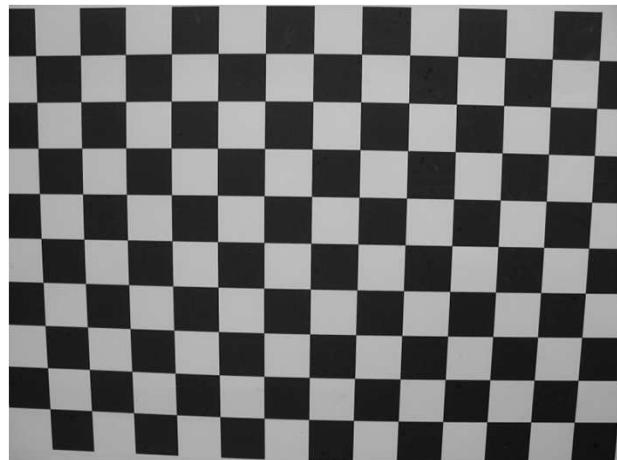
όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με βάση αυτές τις μετατοπίσεις μπορούμε να εξάγουμε αντιστοιχίσεις μεταξύ των σημείων της αριστερής και της δεξιάς εικόνας. Θεωρητικά, οι αντιστοιχίσεις αυτές μας οδηγούν απευθείας στον υπολογισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων ενός σημείου βρίσκοντας απλά την τομή των δύο ευθειών:

- της ευθείας που διέρχεται από ένα δεδομένο αριστερό σημείο και το οπτικό κέντρο της αριστερής κάμερας,
- και της ευθείας που διέρχεται από το αντίστοιχο (με βάση την ήδη υπολογισμένη μετατόπιση) δεξιό σημείο και το οπτικό κέντρο της δεξιάς κάμερας.

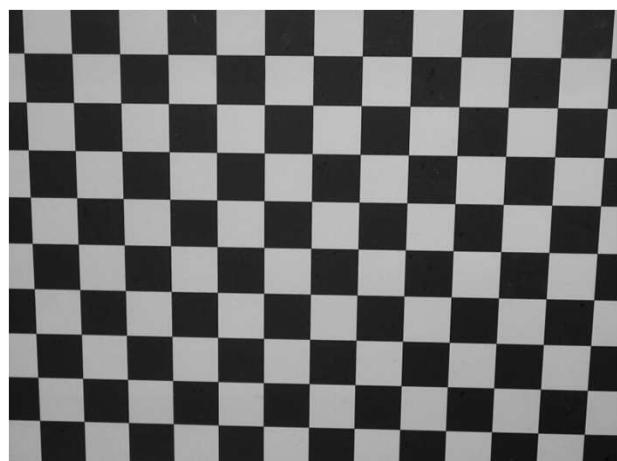
Οστόσο στην πράξη οι ευθείες αυτές μπορεί να μην τέμνονται ακριβώς (λόγω π.χ. μικρών λαθών κατά την εκτίμηση των μετατοπίσεων) και γι' αυτό απαιτείται μια εύρωστη μέθοδος τριγωνοποίησης [9]. Έστω

$$x = P \cdot X$$

η εξίσωση που περιγράφει την προβολή ενός σημείου στο επίπεδο της κάμερας, όπου P είναι ο πίνακας προβολής, $x = w \cdot (u, v, 1)^T$ είναι το δισδιάστατο σημείο σε ομογενείς συντεταγμένες, ενώ X είναι το αντίστοιχο τρισδιάστατο σημείο εκφρασμένο πάλι σε ομογενείς συντεταγμένες. Το (u, v) παριστάνει το σημείο στο επίπεδο της εικόνας και w είναι ένας άγνωστος συντελεστής. Συμβολίζοντας με p_i^T την i -οστή γραμμή



(α') Με παραμόρφωση



(β') Χωρίς παραμόρφωση

Εικόνα 5.2: Μια φωτογραφία πρίν και μετά την αραιέση της παραμόρφωσης των φακών.

του πίνακα P , η παραπάνω εξίσωση $x = P \cdot X$ μπορεί να ξαναγραφτεί ως εξής:

$$w \cdot u = p_1^T X \quad (5.2.1)$$

$$w \cdot v = p_2^T X \quad (5.2.2)$$

$$w = p_3^T X . \quad (5.2.3)$$

Εξαλείφοντας τον άγνωστο συντελεστή w χρησιμοποιώντας την τελευταία από τις παραπάνω εξισώσεις καταλήγουμε σε:

$$u \cdot p_3^T X = p_1^T X \quad (5.2.4)$$

$$v \cdot p_3^T X = p_2^T X . \quad (5.2.5)$$

Από τις δύο όψεις (αριστερή και δεξιά κάμερα) προκύπτουν έτσι 4 γραμμικές εξισώσεις της μορφής $A \cdot X = 0$, για ένα κατάλληλο 4×4 πίνακα A , από τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες X . Φυσικά, όπως προαναφέρθηκε, εξαιτίας σφαλμάτων οι εξισώσεις αυτές είναι πολύ πιθανό να μην ικανοποιούνται ακριβώς, όποτε υπολογίζουμε μια λύση επιλύοντας ένα πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάλυσης ιδιαζουσών τιμών (SVD, Singular Value Decomposition).

5.3 Εξαγωγή τρισδιάστατου πλέγματος

Μετά την εξαγωγή του βάθους, η τρισδιάστατη επιφάνεια που προκύπτει προσεγγίζεται με ένα τριγωνικό πλέγμα προκειμένου αφ' ενός μεν να μειωθεί η γεωμετρική πολυπλοκότητα του τρισδιάστατου μοντέλου και αφ' ετέρου το μοντέλο αυτό να προσαρμοστεί στη μορφή που επιβάλουν οι σύγχρονες τεχνικές απεικόνισης τρισδιάστατων γραφικών. Για την κατασκευή του τρισδιάστατου τριγωνικού πλέγματος χρησιμοποιείται ένα δισδιάστατο τριγωνικό πλέγμα στο επίπεδο της εικόνας το οποίο ανοβαθμίζεται σε τρισδιάστατη μορφή χρησιμοποιώντας τα βάθη που υπολογίστηκαν κατά το προηγούμενο στάδιο. Για τη μείωση του θορύβου εφαρμόζουμε προηγουμένως μια εξομάλυνση (π.χ. με ένα Γκαουσιανό φίλτρο) στην εικόνα που περιέχει τα βάθη. Τέλος, για την υφή χρησιμοποιούμε την εικόνα της αριστερής κάμερας (προφανώς, λόγω του γεγονότος αυτού, οι συντεταγμένες για την υφή συμπίπτουν με τις δισδιάστατες συντεταγμένες στο επίπεδο της αριστερής εικόνας).

Κεφάλαιο 6

Αντιστοίχιση τμημάτων ανάγλυφου

Για την αντιστοίχιση δύο διαφορετικών τμημάτων ανάγλυφου (τα οποία έχουν εξαχθεί ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, με τον τρόπο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο) χρειάζεται να υπολογισθεί η σχετική θέση (τρισδιάστατη περιστροφή και μετατόπιση) που τα τοποθετεί σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς.

Για την εκτίμηση της σχετικής τους θέσης, αρχεί να εξαχθεί ένα αραιό σύνολο αντιστοιχίσεων μεταξύ σημείων των εικόνων I_k, I_{k+1} , όπου με I_k, I_{k+1} συμβολίζουμε τις αριστερές εικόνες των στερεοσκοπικών όψεων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των δύο τμημάτων ανάγλυφου. Πράγματι στην περίπτωση αυτή, και αν (p_i, q_i) είναι ένα τέτοιο σύνολο σημείων με τα p_i (q_i) να ανήκουν αντίστοιχα στις εικόνες I_k (I_{k+1}), τότε η εκτίμηση πόζας μπορεί να επιτευχθεί με την ελαχιστοποίηση της παρακάτω συνάρτησης σφράλματος:

$$\sum_i \text{dist}(q_i, p'_i) , \quad (6.0.1)$$

όπου p'_i είναι οι επαναπροβολές των p_i στην εικόνα I_{k+1} :

$$p'_i = K_{\text{left}}(R \cdot P_i + T), \quad P_i = (X_k(p_i), Y_k(p_i), Z_k(p_i)) ,$$

ενώ με dist συμβολίζουμε την ευχλείδεια απόσταση μεταξύ σημείων στο επίπεδο της εικόνας, και με R, T συμβολίζουμε την άγνωστη περιστροφή και μεταφορά στο χώρο.

Το πρόβλημα με την εύρεση των (p_i, q_i) έγκειται στη μεγάλη¹ απόσταση που χωρίζει συνήθως τα σημεία λήψης των εικόνων I_k, I_{k+1} με αποτέλεσμα να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην εμφάνιση ενός αντικειμένου στις δύο αυτές εικόνες. Η κύρια συνέπεια αυτής της μεγάλης απόστασης είναι τα αντικείμενα που απεικονίζονται στην εικόνα I_{k+1} να φαίνονται μεγεθυμένα κατά ένα παράγοντα κλιμάκωσης $s > 1$ ανάλογα με το πόσο έχει πλησιάσει η κάμερα. Άρα αν $p \in I_k, q \in I_{k+1}$ είναι αντίστοιχα σημεία θα ισχύει:

$$I_{k+1}(s \cdot q) = I_k(p) ,$$

όπου ο παράγοντας κλιμάκωσης s μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή της εικόνας. Με βάση την παρατήρηση αυτή χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος αντιστοίχισης όπου για κάθε σημείο $p \in I_k$ γίνεται ταυτόχρονη εκτίμηση τόσο του αντίστοιχου σημείου $q \in I_{k+1}$, όσο και του παράγοντα κλιμάκωσης s . Για την μείωση

¹μεγάλη σε σχέση με την απόσταση που χωρίζει τις δύο όψεις ενός στερεοσκοπικού ζεύγους

του υπολογιστικού κόστους, μόνο ένα διακριτό σύνολο $S = \{1 = s_0 < s_1 < \dots < s_n\}$ από παράγοντες κλιμάκωσης δοκιμάζεται.

Επίσης λόγω του γεγονότος ότι η συνάρτηση (6.0.1) είναι μη χυρτή, είναι αναγκαίο να δοθεί μια καλή αρχικοποίηση για τις τιμές των R, T ώστε ο επαναληπτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης να μη παγιδευθεί σε τοπικά ελάχιστα που να βρίσκονται μακριά από το ζητούμενο ολικό ελάχιστο. Για τον σκοπό αυτό αρκεί να υπολογισθεί ο λεγόμενος θεμελιώδης πίνακας που συνδέει τις δύο εικόνες I_k, I_{k+1} , από τον οποίο είναι εύκολο στη συνέχεια να εξαχθεί μια αρχική τιμή για τη τρισδιάστατη μετατόπιση και μεταφορά [10].

Ο υπολογισμός του θεμελιώδη πίνακα θα βασιστεί και αυτός στις ήδη υπολογισμένες αντιστοιχίσεις σημείων (p_i, q_i) [15] χρησιμοποιώντας ένα αλγόριθμο τύπου συναίνεσης μέσω τυχαίας δειγματοληψίας (RANSAC) [6], έτσι ώστε να μειωθεί κατά το δυνατό η επίδραση από πιθανά σφάλματα στην εκτίμηση των (p_i, q_i) . Στη περίπτωση ενός RANSAC αλγορίθμου η τακτική που ακολουθείται είναι αντίθετη από τη τακτική που ακολουθείται συνήθως σε τεχνικές εξομάλυνσης: αντί να γίνεται προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του θεμελιώδη πίνακα όσο το δυνατό περισσότερες αντιστοιχίσεις σημείων, ένα μόνο μικρό τμήμα (το ελάχιστο δυνατό) των αντιστοιχίσεων αυτών χρησιμοποιείται κάθις φορά. Ωστόσο η διαδικασία υπολογισμού επαναλαμβάνεται αρκετές φορές ώστε να αυξηθεί σημαντικά η πιθανότητα ότι καμία από τις αντιστοιχίσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του θεμελιώδη πίνακα δεν είναι έκτοπη (δεν περιέχει δηλαδή σφάλματα πέραν των στατιστικώς επιτρεπτών). Στην περίπτωση που αντιμετωπίζουμε το ελάχιστο δυνατό πλήθος αντιστοιχίσεων που χρειάζεται είναι 7, οπότε και χρησιμοποιείται η παρακάτω διαδικασία υπολογισμού. Έστω F ο 3×3 θεμελιώδης πίνακας. Κάθε αντιστοιχίση $(x_i, y_i), (x'_i, y'_i)$ δημιουργεί ένα επιπλέον περιορισμό για τον πίνακα F :

$$\begin{pmatrix} x'_i & y'_i & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_1 & f_2 & f_3 \\ f_4 & f_5 & f_6 \\ f_7 & f_8 & f_9 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} = 0 . \quad (6.0.2)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να ξαναγραφτεί ως:

$$(x_i x'_i \ y_i x'_i \ x'_i \ x_i y'_i \ y_i y'_i \ y'_i \ x_i \ y_i \ 1) \cdot f = 0 , \quad (6.0.3)$$

όπου f είναι ο θεμελιώδης πίνακας εκφρασμένος ως ένα 9-διάστατο διάνυσμα. Χρησιμοποιώντας 7 τέτοιες εξισώσεις προκύπτει το παρακάτω σύστημα:

$$\begin{pmatrix} x_1 x'_1 & y_1 x'_1 & x'_1 & x_1 y'_1 & y_1 y'_1 & y'_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_7 x'_7 & y_7 x'_7 & x'_7 & x_7 y'_7 & y_7 y'_7 & y'_7 & x_7 & y_7 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \\ f_7 \\ f_8 \\ f_9 \end{pmatrix} = 0 . \quad (6.0.4)$$

Το σύστημα αυτό ικανοποιείται από μια παραμετρική οικογένεια πινάκων:

$$aF_1 + (1 - a)F_2 \quad .$$

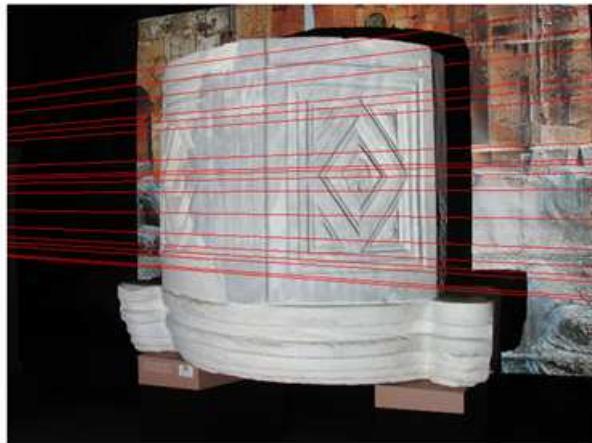
Από την οικογένεια αυτή των πινάκων επιλέγουμε τελικά τον πίνακα που επιπλέον ικανοποιεί την συνθήκη:

$$\det(F) = 0 \quad \vee \quad \det(aF_1 + (1 - a)F_2) = 0 \quad .$$

Ένα παράδειγμα από την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου φαίνεται στην εικόνα 6.1, όπου απεικονίζονται τα σημεία που κατά τον υπολογισμό επιλέχθηκαν ως στατιστικά αξιόπιστα, καθώς και οι επιπολικές γραμμές που προέκυψαν με βάση το θεμελιώδη πίνακα.



(α')



(β')

Εικόνα 6.1: Επιλεγμένα αξιόπιστα σημεία και αντίστοιχες επιπολικές γραμμές.

Παρακάτω (εικόνες 6.2, 6.3 και 6.4) παραθέτουμε επίσης μερικές όψεις από δύο επιμέρους τρισδιάστατα μοντέλα, καθώς και από το συνολικό μοντέλο που έχει προκύψει μετά την αντιστοίχιση. Η συνολική ψηφιακή αναπαράσταση επισδεκνύεται και σε ένα εικονικό βίντεο στο

Τέλος, στην εικόνα 6.5 παραθέτουμε δύο όψεις από ένα άλλο ανεξάρτητο ενιαίο τρισδιάστατο μοντέλο.



(α')



(β')

Εικόνα 6.2: Όψεις τρισδιάστατου μοντέλου 1.



(α')



(β')

Εικόνα 6.3: Όψεις τρισδιάστατου μοντέλου 2.



(α')



(β')



(γ')

Εικόνα 6.4: Όψεις τρισδιάστατου μοντέλου που προέκυψε από την αντιστοίχιση των μοντέλων 1 και 2.



(α')



(β')

Εικόνα 6.5: 'Οψεις από ένα άλλο ενταίσιο τρισδιάστατο μοντέλο.

Βιβλιογραφία

- [1] A. Addison and M. Gaiani. Virtualized architectural heritage: New tools and techniques. *IEEE Multimedia*, 7(2):26–31, 2000.
- [2] P. Allen, A. Troccoli, B. Smith, S. Murray, I. Stamos, and M. Leordeanu. New methods for digital modeling of historic sites. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 23(6):32–41, 2003.
- [3] J. Batlle, E. Mouaddib, and J. Salvi. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey. *Pattern Recognition*, 31(7):963–982, July 1998.
- [4] F. Bernardini and et al. Building a digital model of Michelangelo’s florentine pieta. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 22(1):59–67, 2002.
- [5] S. El-Hakim, J.-A. Beraldin, M. Picard, and G. Godin. New methods for digital modeling of historic sites. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(3):21–29, 2004.
- [6] M. Fischler and R. Bolles. Random sampling consensus: a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography. *Commun. Assoc. Comp. Mach.*, 1981.
- [7] G. Godin and et al. Active optical 3D imaging for heritage applications. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 22(5):24–35, 2002.
- [8] I. Grinias. *Bayesian Flooding for Image and Video segmentation*. University of Crete, PhD thesis, 2009.
- [9] R. Hartley and P. Sturm. Triangulation. *Computer Vision and Image Understanding*, 68(2):146–157, 1997.
- [10] R. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry*. Cambridge University Press, 2000.
- [11] H. Hirayu, T. Ojika, and R. Kijima. Constructing the historic villages of Shirikawa-go in virtual reality. *IEEE Multimedia*, 7(2):61–64, 2000.
- [12] M. Pollefeys and et al. 3D recording for archaeological fieldwork. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 23(3):20–27, 2003.
- [13] J. Stumpf and et al. Digital reunification of the Parthenon and its sculptures. In *In Proc. 4th Intern. Symp. Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, 2003.
- [14] S. Theodoridis and K. Koutroumbas. *Pattern Recognition*. Academic Press, 2006.
- [15] P.H.S. Torr and D.W. Murray. The development and comparison of robust methods for estimating the fundamental matrix. *Int. Journal of Computer Vision*, 1997.
- [16] R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE J. Robotics Automation*, RA-3(4):323–344, 1987.
- [17] Z. Zhang. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In *IEEE Intern. Conf. on Computer Vision*, 1999.