

ΤΕΛΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
ΕΠΕΑΕΚ “Αρχιμήδης ΙΙ”, Μέτρο 2.2

**Ανάπτυξη Αλγορίθμων για την Αυτόματη Παραγωγή
Φωτορεαλιστικών Μοντέλων Ακριβείας με Συνδυασμό Τεχνικών
Φωτογραμμετρίας, Επεξεργασίας Εικόνας και Laser Scanning
– Εφαρμογή σε Θέματα Πολιτιστικής Κληρονομιάς –**

επιστημονική υπεύθυνος
Ε. Πέτσα





ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΑΘΗΝΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ – Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας

ΤΕΛΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

**Ανάπτυξη αλγορίθμων για την αυτόματη παραγωγή
φωτορραλιστικών μοντέλων ακριβείας με συνδυασμό τεχνικών
φωτογραμμετρίας, επεξεργασίας εικόνας και laser scanning
– Εφαρμογή σε θέματα Πολιτιστικής Κληρονομιάς**

Επιστημονική Υπεύθυνος

Ε. Πέτσα

Ερευνητική Ομάδα

Α. Γραμματικόπουλος

Η. Καλησπεράκης

Β. Παγούνης

Δ. Πανταζής

Γ. Καρράς

Χ. Λιαπάκης

Β. Μπαλλής

Γ. Μπίνας

ΑΘΗΝΑ 2007

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΕΑΕΚ, Αρχιμήδης II

Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων του ΤΕΙ Αθήνας *Μέτρο 2.2 – Υποέργο 6*

 <p>ΕΛΛΑΔΑ ΚΥΒΕΡΝΗΣΗ 2008 <i>Ανάπτυξη παντού. Ανάπτυξη για όλους.</i></p>	<p>ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΤΑΜΕΙΟ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</p>		 <p>Η ΠΑΙΔΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης</p>
--	--	---	---

Το πρόγραμμα συγχρηματοδοτείται 75% από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και 25% από Εθνικούς Πόρους
The project is co-funded by the European Social Fund and National Resources

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
Περίληψη φυσικού αντικειμένου	1
Προηγούμενη σχετική δραστηριότητα της ερευνητικής ομάδας	2
Επιστημονικές δημοσιεύσεις από το έργο	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.1 Γενικά	3
1.2 Η περίπτωση των από αέρα λήψεων	4
1.2.1 Ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας	4
1.2.2 Εντοπισμός αποκρύψεων εικόνας	4
1.2.3 Η γενική έννοια “απόδοση φωτούφής”	6
2. Η ΟΡΘΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΣΕ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	6
2.1 Λήψεις και φωτοτριγωνισμός	6
2.1.1 Η λήψη των εικόνων	6
2.1.2 Φωτοτριγωνισμός	7
2.2 Η παραγωγή του 3D μοντέλου επιφάνειας	8
2.2.1 Φωτογραμμετρική παραγωγή 3D μοντέλου	9
2.2.2 Παραγωγή 3D μοντέλου με σάρωση laser	12
2.3 Το πρόβλημα των αποκρύψεων	12
2.4 Φωτούφή από πολλές εικόνες	13
2.5 Περίγραμμα αλγορίθμου της παρούσας έρευνας	14
3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΠΟΛΥΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΟΡΘΟΑΝΑΓΩΓΗΣ	15
3.1 Έλεγχος ορατοτήτων και αποκρύψεων	15
3.1.1 Αυτοαπόκρυψη της επιφάνειας	16
3.1.2 Απόκρυψη εικόνας	18
3.2 Μίξη χρώματος	19
3.2.1 Παρεμβολή χρώματος στην εικόνα	19
3.2.2 Απόρριψη χονδροειδών σφαλμάτων υφής	21
3.2.3 Διεύρυνση των ορίων απόκρυψης	23
3.2.4 Ορθοαναγωγή εικόνας	25
3.2.5 Επιλογή βαρών και μίξη χρώματος	25
3.2.6 Η επίδραση της ακτινικής διαστροφής του φακού	27
3.3 Άλλες προβολές	28
3.3.1 Τομές	28
3.3.2 Προοπτικά	28
3.4 Το λογισμικό της ερευνητικής ομάδας	28
4. ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	30
4.1 Εφαρμογή 1	30
4.2 Εφαρμογή 2	33
4.3 Εφαρμογή 3	35
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	42
Βιβλιογραφία	44

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν κείμενο είναι η **Τελική Έκθεση** του Υποέργου 6 με τίτλο

**“Ανάπτυξη Αλγορίθμων για την Αυτόματη Παραγωγή
Φωτορραλιστικών Μοντέλων Ακριβείας με Συνδυασμό Τεχνικών
Φωτογραμμετρίας, Επεξεργασίας Εικόνας και Laser Scanning
– Εφαρμογή σε Θέματα Πολιτιστικής Κληρονομιάς”**

το οποίο πραγματοποιήθηκε, κατά την περίοδο **1.1.2005 – 30.6.2007**, στο πλαίσιο του Προγράμματος ΕΠΕΑΕΚ ‘**Αρχιμήδης ΙΙ’**, Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων του **ΤΕΙ Αθήνας (ΤΕΙ-Α)**, στο Μέτρο 2.2. Το Πρόγραμμα συγχρηματοδοτείται κατά 75% από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και κατά 25% από Εθνικούς Πόρους. Το υποέργο εκπόνησε η εξής ερευνητική ομάδα στο πλαίσιο του **Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας του Τμήματος Τοπογραφίας (ΤΤ) του ΤΕΙ Αθήνας**:

Επιστημονική Υπεύθυνος

Ε. Πέτσα
Δρ. ΑΤΜ, Καθηγήτρια ΤΤ

Ερευνητική Ομάδα

Α. Γραμματικόπουλος ΑΤΜ, Επιστημονικός Συνεργάτης ΤΤ, ΥΔ ΕΜΠ	Γ. Καρράς Δρ. ΑΤΜ, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
Η. Καλησπεράκης ΑΤΜ, Επιστημονικός Συνεργάτης ΤΤ, ΥΔ ΕΜΠ	Χ. Λιαπάκης Δρ. ΑΤΜ
Β. Παγούνης Δρ. ΑΤΜ, Αναπληρωτής Καθηγητής ΤΤ	Β. Μπαλλής Δρ. ΑΤΜ
Δ. Πανταζής Δρ. ΑΤΜ, Αναπληρωτής Καθηγητής ΤΤ	Γ. Μπίνας Προγραμματιστής Η/Υ

• **Περίληψη Φυσικού Αντικειμένου**

Φυσικό αντικείμενο του υποέργου είναι τα σύγχρονα φωτορραλιστικά 3D μοντέλα επιφανειών και η τεχνολογική έρευνα για αύξηση της ταχύτητας, της γεωμετρικής ακρίβειας, της οπτικής ποιότητας και του αυτοματισμού κατά την παραγωγή τους. Σήμερα είναι δυνατή πλέον η πλήρης 3D περιγραφή περίπλοκων επιφανειών με τα σύγχρονα συστήματα *σάρωσης laser* (laser scanning). Το υποέργο συνδυάζει αυτήν την νέα τεχνολογία με τεχνικές φωτογραμμετρίας και επεξεργασίας εικόνας για να παραχθούν εικονιστικά προϊόντα υψηλής ακριβείας και οπτικής ποιότητας, ένα πεδίο που βρίσκεται στην αιχμή της έρευνας. Επεκτάθηκαν προϋπάρχοντες αλγόριθμοι της ερευνητικής ομάδας που χειρίζονται τα θέματα της απόκρυψης σε προβολές 3D επιφανειών και της επιλογής κατάλληλης “φωτοϋφής” για κάθε στοιχειώδες τμήμα της επιφάνειας, αλλά και το πρόβλημα της αποτελεσματικής διαχείρισης του τεράστιου όγκου δεδομένων. Πεδίο εφαρμογής είναι τα αρχαιολογικά μνημεία και η ανάγκη για την γεωμετρική τεκμηρίωσή τους όσο και την ανάδειξή τους σε εικονικά περιβάλλοντα.

- **Προηγούμενη σχετική δραστηριότητα της ερευνητικής ομάδας**

Το παρόν έργο αποτελεί επανεπεξεργασία, περαιτέρω διερεύνηση και αναδιατύπωση, τόσο σε γενικό επίπεδο μεθόδων όσο και στο επίπεδο της ανάπτυξης λογισμικού, ορισμένων πρώτων βασικών ιδεών που είχαν διατυπωθεί στις ακόλουθες δύο προγενέστερες επιστημονικές εργασίες της ερευνητικής ομάδας.

GRAMMATIKOPOULOS L., KALISPERAKIS I., KARRAS G., KOKKINOS T., PETSA E., 2004.

On automatic orthoprojection and texture-mapping of 3D surface models. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 35(5), pp. 360-365.

GRAMMATIKOPOULOS L., KALISPERAKIS I., KARRAS G., KOKKINOS T., PETSA E., 2004.

Automatic multi-image photo-texturing of 3D surface models obtained with laser scanning. *Proc. CIPA International Workshop on "Vision Techniques Applied to the Rehabilitation of City Centres"*, Lisbon, 25-27 October (πρακτικά σε CD).

- **Επιστημονικές Δημοσιεύσεις από το Έργο**

Στο πλαίσιο και κατά την εξέλιξη του έργου έγιναν οι εξής τρεις δημοσιεύσεις:

GRAMMATIKOPOULOS L., KALISPERAKIS I., KARRAS G., PETSA E., 2005. Data fusion from

multiple sources for the production of orthographic and perspective views with automatic visibility checking. *Proc. XX CIPA International Symposium*, Torino, 27 September - 1 October, pp. 819-824.

Λ. ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ, Η. ΚΑΛΗΣΠΕΡΑΚΗΣ, Γ. ΚΑΡΡΑΣ, Δ. ΜΑΥΡΟΜΑΤΗ, Ε. ΠΕΤΣΑ,

2006. Σύγχρονες ψηφιακές τεχνικές τεκμηρίωσης στην επίγεια φωτογραμμετρία. *Πρακτικά 2^{ου} Συνεδρίου Πανελληνίου Συλλόγου Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών*, Αθήνα, 9-10 Δεκεμβρίου (σε CD).

KARRAS G., GRAMMATIKOPOULOS L., KALISPERAKIS I., PETSA E., 2007. Generation of

orthoimages and perspective views with automatic visibility checking and texture blending. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(4), pp. 403-411.

Ακόμα, έχουν γίνει αποδεκτές για παρουσίαση και δημοσίευση δύο επιστημονικές εργασίες, οι οποίες προέρχονται από το παρόν πρόγραμμα αλλά τα συνέδρια θα πραγματοποιηθούν αμέσως μετά από την λήξη του:

GRAMMATIKOPOULOS L., KALISPERAKIS I., KARRAS G., PETSA E., 2007. Automatic multi-

view texture mapping of 3D surface projections. *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D Arch '07)*, July 12-13, ETH Zürich, Switzerland.

PETSA E., KALISPERAKIS I., GRAMMATIKOPOULOS L., KARRAS G., PAGOUNIS V., 2007.

Laser scanning and automatic multi-image texturing of surface projections. *XXI CIPA International Symposium*, Athens, 1-6 October.

- Στις σχετικές εργασίες της ερευνητικής ομάδας έχουν γίνει 9 αναφορές στην διεθνή βιβλιογραφία.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Μία από τις πιο σημαντικές αλλαγές που επέφερε η εισαγωγή ψηφιακών τεχνικών στην Φωτογραμμετρία είναι ότι σήμερα τα εικονιστικά προϊόντα (συνδυασμός γεωμετρικής ακρίβειας με οπτική πληροφορία) συνιστούν γενικά το τυπικό φωτογραμμετρικό παραδοτέο. Αυτό αναφέρεται κυρίως σε ορθοφωτομωσαϊκά, όμως αφορά και άλλες ψηφιακές προβολές ή 3D μοντέλα με *φωτούφή* (photo-texture). Γενικά βέβαια, τα προϊόντα αυτά προϋποθέτουν αξιόπιστη 3D πληροφορία για το ανάγλυφο της αποδιδόμενης επιφάνειας.

Όπως έχει λοιπόν ήδη αναφερθεί, αντικείμενο της παρούσας έρευνας είναι τα σύγχρονα φωτορρεαλιστικά 3D μοντέλα επιφανειών. Στόχος της είναι να αυξηθεί η ταχύτητα, η γεωμετρική ακρίβεια, η οπτική ποιότητα και ο αυτοματισμός κατά την παραγωγή τους. Μια τέτοια έρευνα είναι ιδιαίτερα επίκαιρη σήμερα για δύο λόγους. Κατά πρώτον, εξαιτίας της μεγάλης ζήτησης για 3D δεδομένα οπτικοποιημένα με αυθεντική φωτούφή από πραγματικές εικόνες. Δεύτερος λόγος είναι ότι έχει καταστεί πλέον δυνατή η πλήρης 3D περιγραφή περίπλοκων επιφανειών με τα σύγχρονα συστήματα όπως είναι οι σαρωτές laser (laser scanners), δηλαδή τέτοια ακριβή 3D μοντέλα είναι πλέον διαθέσιμα σε πολύ ευρύτερη από προηγούμενως κλίμακα με τεχνικές πλιό γρήγορες και άνετες.

Αλλά ο πρώτος καθοριστικός παράγων σε μια οπτικοποίηση – και γενικότερα στην παραγωγή εικονιστικών προϊόντων υψηλής ακριβείας και οπτικής ποιότητας – είναι η *μεμωνωμένη προβολή*. Άλλωστε, ακόμα και μια φωτορρεαλιστική κίνηση (animation) δεν είναι τελικά παρά μια ταχεία διαδοχή 2D προβολών. Υπ' αυτή την έννοια, βασικό αντικείμενο της παρούσας έρευνας είναι η γεωμετρική και οπτική ποιότητα ψηφιακών προβολών με φωτούφή, βάσει των ακόλουθων δύο κεντρικών ερωτημάτων:

- *Γεωμετρικό ερώτημα*

Πώς να λαμβάνονται υπόψη σε μια προβολή οι αποκρύψεις που μοιραία αναμένονται στην περίπτωση του οποιουδήποτε αντικειμένου έχει ανάγλυφο, πολύ δε περισσότερο στην περίπτωση ενός πλήρως 3D μοντέλου;

- *Ραδιομετρικό ερώτημα*

Πώς να αποδοθεί στην προβολή της 3D επιφάνειας η βέλτιστη και χωρίς ασυνέχειες φωτούφή, και μάλιστα από διαφορετικές εικόνες;

Υπάρχουν βέβαια αρκετές ειδικότερες προβολές – όπως πχ. τα αναπτύγματα ή οι χαρτογραφικές προβολές (Karras et al., 1997) – που επίσης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή εικονιστικών προϊόντων σε εφαρμογές επίγεια φωτογραμμετρίας. Ωστόσο οι δύο βασικότερες προβολές του 3D χώρου στο επίπεδο είναι η κεντρική και η ορθή. Δεδομένου ότι η κατ' αρχήν προσέγγιση όλων των προβολών είναι κατά βάση κοινή και απλώς διαφέρει η γεωμετρική σχέση αντικειμένου-επιπέδου προβολής (ενώ η σχέση εικόνας-αντικειμένου παραμένει φυσικά η ίδια), το βάρος θα δοθεί εδώ κατά κύριο λόγο στην *ορθοπροβολή*. Άλλωστε η ορθοφωτογραφία και τα ορθοφωτομωσαϊκά αποτελούν ίσως το πλέον διαδεδομένο σήμερα φωτογραμμετρικό παραδοτέο, με τα θέματα της γεωμετρικής ακρίβειας και της ραδιομετρικής ποιότητάς τους να συνιστούν κεντρικό αντικείμενο έρευνας από την σκοπιά της χαρτογραφίας, των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών και του κτηματολογίου, όσο και στην επίγεια φωτογραμμετρία. Καίτοι πεδίο εφαρμογής είναι εδώ τα αρχαιολογικά μνημεία, θα γίνει για λόγους πληρότητας μια αρχική αναφορά και στα σχετικά ζητήματα της αεροφωτογραμμετρίας, όπου το κρίσιμο θέμα της *“αληθούς ορθοφωτογραφίας”* (‘true ortho’) προκαλεί σήμερα μεγάλο ενδιαφέρον.

1.2 Η περίπτωση των από αέρα λήψεων

Πράγματι, στην σχετική βιβλιογραφία έχουν επισκοπηθεί εκτεταμένα τα προβλήματα και οι πηγές σφάλματος που εμφανίζονται στην παραγωγή ορθοφωτογραφιών, κυρίως σε σχέση με τις αεροφωτογραφίες (Amhar et al., 1998; Schickler & Thorpe, 1998; Palà & Arbiol, 2002; Rau et al., 2002; Sheng et al., 2003) αλλά και τις δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης (Chen et al., 2001). Ο ρόλος της ραδιομετρίας είναι βέβαια αυτονόητος: η ποιότητα των ορθοφωτογραφιών εξαρτάται από τις αρχικές εικόνες και μπορεί να υποβαθμιστεί περαιτέρω – πχ. εξαιτίας ραδιομετρικών διαφορών μεταξύ διαδοχικών εικόνων, την ανεπαρκή κάλυψη κενών (hole-filling) ή τις παραμένουσες σκιές.

Ωστόσο, ο πυρήνας εκείνου που αποκαλείται “*παραγωγή αληθούς ορθοφωτογραφίας*”, δηλαδή της επανασύστασης (resampling) απεικονίσεων όπου κάθε ορατό σημείο του αντικειμένου καταλαμβάνει την ορθή οριζοντιογραφική θέση του, είναι η γεωμετρία. Η κύρια πηγή γεωμετρικών παραμορφώσεων μιας συμβατικής ορθοφωτογραφίας είναι διπλή: η μοντελοποίηση της επιφάνειας (surface modeling) και ο αλγόριθμος ορθοαναγωγής. Όπως θα αναφερθεί αναλυτικότερα στην συνέχεια, το γεωμετρικό ζήτημα είναι ακόμα σημαντικότερο στην επίγεια φωτογραμμετρία εξαιτίας της συνθετότητας των επιφανειών που συνήθως αντιμετωπίζει κανείς σε τέτοιες εφαρμογές.

1.2.1 Ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας

Η ορθοφωτογραφία δεν εξαρτάται μόνον από την ακρίβεια καθαυτή του 3D ψηφιακού μοντέλου αλλά, πρωτίστως, από το περιεχόμενό του. Όταν μοντελοποιεί κανείς μόνο την μορφολογία του εδάφους σε μορφή *ψηφιακών μοντέλων εδάφους* (digital terrain model: DTM), τα αντικείμενα επί του εδάφους – πχ. ανθρώπινες κατασκευές, δέντρα κ.λπ. – αγνοούνται. Αυτό φυσικά επιφέρει προοπτικές παραμορφώσεις στην ορθοφωτογραφία (εσφαλμένη κλίμακα, μετάθεση), οι οποίες δημιουργούν φαινόμενα όπως η “κατάκλιση κτιρίων” (building leaning) και οι συνεπαγόμενες αποκρύψεις (occlusions) περιοχών του αντικειμένου.

Τα κτίρια και τεχνικά έργα μπορούν να μοντελοποιηθούν με ποικιλία μεθόδων βασισμένων σε αισθητήρες απόστασης (range sensors) ή και αυτόματες ή μη φωτογραμμετρικές τεχνικές (πχ. Hoffman, 2004; Rau and Chen, 2004; Zhou et al., 2004.). Αυτά μπορούν να εισαχθούν ως *ψηφιακά μοντέλα κτιρίων* (digital building models: DBM) και να χρησιμοποιηθούν αυτόνομα προκειμένου να παραχθούν ορθοφωτογραφίες συμπληρωματικές εκείνων από DTM, με τις οποίες εν συνεχεία θα συγχωνευθούν (Amhar et al., 1998).

Εναλλακτικά, το DBM μπορεί να συγχωνευθεί εκ των προτέρων με ένα DTM, συγκροτώντας έτσι ένα *ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας* (digital surface model: DSM) που περιγράφει πλήρως ολόκληρη την επιφάνεια του 3D αντικειμένου (Rau et al., 2002; Oda et al., 2004). Τα DSM μπορούν επίσης να συλλέγονται άμεσα, συνήθως με εναέρια σάρωση laser (Katzenbeisser, 2004).

1.2.2 Εντοπισμός αποκρύψεων εικόνας

Είναι όμως γνωστό ότι οι τυπικοί αλγόριθμοι ορθοαναγωγής δεν αποδίδουν το επιθυμητό αποτέλεσμα ακόμα και όταν διατίθεται λεπτομερές DSM. Μπορεί σε αυτή την περίπτωση οι ανθρώπινες κατασκευές να προβάλλονται σωστά, θα υπάρχουν όμως και κρυμμένες περιοχές – που απαιτούν συμπλήρωση υψής από γειτονικές εικόνες – κατειλημμένες από *διπλοπροβολές* (double projections) των σκεπών και ταρατσών των κτιρίων (Rau et al., 2002). Έχει επισημανθεί (Zhou et al., 2004) ότι μόνο ένα πλήρες 3D μοντέλο μπορεί πλέ-

ον να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των σύγχρονων ορθοαναγωγών σε αστικές περιοχές. Αντίθετα, τα παραδοσιακά DEM και DSM περιγράφουν την επιφάνεια σε 2.5 διαστάσεις (2.5D), δηλαδή δέχονται μόνο μία τιμή υψομέτρου σε κάθε οριζοντιογραφική θέση. Ωστόσο, με λίγες εξαιρέσεις (κυρίως γέφυρες και ανισόπεδοι κόμβοι), οι απαιτήσεις της ορθοπροβολής σε αστικές περιοχές είναι ουσιαστικά δυνατόν να ικανοποιηθούν με μοντέλα 2.5D. Έτσι, οι Rognant et al. (2000) χρησιμοποίησαν μοντέλα TIN προερχόμενα από τριγωνισμό Delaunay στο επίπεδο (2D Delaunay triangulation) για να παραγάγουν αληθείς ορθοφωτογραφίες (βλ. ακόμα Oda et al., 2004, Palà and Arbiol, 2002). Στην πραγματικότητα, το κρίσιμο πρόβλημα εδώ είναι ότι οι συμβατικοί αλγόριθμοι ορθοαναγωγής αδυνατούν να χειριστούν σωστά ακόμα και μοντέλα 2.5D, δεδομένου ότι προϋποθέτουν πως όλα τα εμπλεκόμενα σημεία του μοντέλου είναι όντως ορατά στην εικόνα, δηλαδή δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα των αποκρύψεων της εικόνας.

Και πράγματι, όλες οι προαναφερθείσες δημοσιεύσεις παρουσιάζουν διαφορετικές λύσεις για την παραγωγή σωστής ορθοφωτογραφίας με εντοπισμό των αποκρύψεων εικόνας. Ορισμένες από αυτές (Amhar et al., 1998; Rau et al., 2002; Sheng et al., 2003) υιοθετούν παραλλαγές της τεχνικής του “Z-buffer”, μιας βασικής μεθόδου που χρησιμοποιείται στα Γραφικά Υπολογιστών (computer graphics) για να εντοπιστούν κρυμμένες περιοχές επιφανειών. Εν προκειμένω, όλα τα πολύγωνα της επιφάνειας επαναπροβάλλονται στην αρχική εικόνα προκειμένου να δημιουργηθεί ένα “Z-buffer”, το οποίο καταγράφει για κάθε εικονοψηφίδα (pixel) την μικρότερη απόσταση της επιφάνειας από το κέντρο προβολής της εικόνας. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ο αντίστοιχος “χάρτης” που αποδίδει σε κάθε εικονοψηφίδα τον κωδικό του ορατού πολυγώνου. Έτσι, κρατούνται μόνο οι εικονοψηφίδες της αρχικής εικόνας που δικαιούνται να συμμετέχουν στην διαδικασία ορθοαναγωγής. Οι Sheng et al. (2003) έχουν αναφερθεί σε ορισμένους περιορισμούς παρόμοιων αλγορίθμων, οι οποίοι είναι δυνατόν να προκαλέσουν την εμφάνιση ανεπιθύμητων σχηματισμών (artefacts) στην ορθοφωτογραφία. Από την μεριά τους, οι Kuzmin et al. (2004) πρότειναν έναν βάσει πολυγώνων ταχύτερο αλγόριθμο, ανεξάρτητο της ανάλυσης, για τον εντοπισμό κρυμμένων επιφανειών. Οι τομές των πολυγώνων της επιφάνειας, προβαλλόμενες στην αρχική εικόνα, επιτρέπουν την υποδιαίρεση του επιπέδου της εικόνας σε τμήματα, για τα οποία δημιουργείται κατάλογος με τα αντίστοιχα επικαλυπτόμενα πολύγωνα ταξινομημένα κατά απόσταση από το κέντρο προβολής. Έτσι ορίζεται το ορατό πολύγωνο για κάθε τμήμα. Η προβολή των εν λόγω τμημάτων στην αρχική εικόνα ορίζει τις περιοχές της επιφάνειας που είναι ορατές σε αυτήν.

Παρόμοιες μέθοδοι παράγουν επιμέρους ορθοφωτογραφίες με κενές περιοχές που πρέπει να πληρωθούν με υφή από επικαλυπτόμενες εικόνες. Οι Rau et al. (2002) επιλέγουν μια εικόνα αναφοράς, ενώ οι γειτονικές λειτουργούν ως “υποκείμενες” εικόνες που ρόλο έχουν να συνεισφέρουν την ελλείπουσα πληροφορία. Η εφαρμογή κατάλληλου αλγορίθμου κατά την δημιουργία του ορθοφωτομωσαϊκού επιτρέπει να αποφεύγονται ενδεχόμενες ραδιομετρικές ασυνέχειες οφειλόμενες στην άμεση επικόλληση υφής από “υποκείμενες” εικόνες. Η υφή μπορεί ακόμα να επιλέγεται βάσει της καλύτερης γωνίας τομής που σχηματίζει η ακτίνα προβολής με την επιφάνεια (Amhar et al., 1998; Sheng et al., 2003). Στην αυτόματη τεχνική των Schickler and Thorpe (1998) για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής του μωσαϊκού επιλέγεται μια “βέλτιστη” εικόνα βάσει ενός δείκτη ποιότητας για κάθε εικονοψηφίδα, μέσω του οποίου δημιουργείται μια “εικόνα βαρών” για κάθε επιμέρους ορθοφωτογραφία. Εκτός από την κλίση της επιφάνειας ως προς την ακτίνα προβολής, στην εκτίμηση των βαρών λαμβάνονται επίσης υπόψη οι αποστάσεις από το

ναδέρ της λήψης και από την περιοχή της απόκρυψης (το τελευταίο κριτήριο ουσιαστικά εισάγει και μια σημαντική τοπολογική διάσταση). Με την μέθοδο των Oda et al. (2004), τέλος, παράγονται σύνθετες ορθοφωτογραφίες με συμμετοχή των επιμέρους ορθοφωτογραφιών με κατάλληλα βάρη.

1.2.3 Η γενική έννοια “απόδοση φωτοϋφής”

Παρά την αδιαμφισβήτητη πρακτική βαρύτητα της ορθοφωτογραφίας, έχει επισημανθεί ότι, καθώς η πλήρως 3D μοντελοποίηση επιφανειών ολοένα κερδίζει έδαφος, η ορθοφωτογραφία θα καταστεί – αργά ή γρήγορα – απλώς μια ειδική περίπτωση στο πεδίο ορισμού της γενικότερης έννοιας “μετασχηματισμός εικόνας” (Amhar et al., 1998). Σε αυτό λοιπόν το ευρύτερο πλαίσιο της “απόδοσης φωτοϋφής” (texture-mapping), για παράδειγμα, η ορθοπροβολή ουσιαστικά θα αντιπροσωπεύει μια ειδική περίπτωση της προσέγγισης των Früh et al. (2004) για την απόδοση φωτοϋφής σε 3D μοντέλα πόλεων – προερχόμενων από σαρώσεις laser από αέρα και από το έδαφος – από πολλαπλές πλάγιες αεροφωτογραφίες που απεικονίζουν τις στέγες όσο και τις όψεις των κτιρίων. Για κάθε τρίγωνο του μοντέλου της επιφάνειας επιλέγεται μια βέλτιστη εικόνα βάσει ορισμένων κριτηρίων. Αυτά τα “τμήματα φωτοϋφής” από όλες τις εικόνες συγχωνεύονται εν συνεχεία σε έναν “άτλαντα υφής” για ενιαία περιγραφή και αναπαράσταση του μοντέλου.

Ωστόσο, είναι τελικά σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές μικρών αποστάσεων (και ειδικότερα στην τεκμηρίωση μνημείων που κυρίως ενδιαφέρει εδώ) που η ορθοαναγωγή μπορεί να γίνει σαφέστερα αντιληπτή ως το κατ’ εξοχήν παράδειγμα για την γενικότερη περίπτωση της φωτογραμμετρικής απόδοσης υφής.

2. Η ΟΡΘΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΣΕ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Συγκρινόμενη με την αεροφωτογραμμετρία, η ορθοαναγωγή για σκοπούς αρχαιολογικής τεκμηρίωσης εμφανίζει σημαντικές ιδιαιτερότητες. Πριν εξεταστούν όσα ζητήματα αφορούν αμεσότερα το παρόν ερευνητικό έργο, αξίζει να σημειωθούν ορισμένες τέτοιες ιδιαιτερότητες, όπως αυτές έχουν συζητηθεί αναλυτικά σε εργασίες μελών της ερευνητικής ομάδας (Mavromati et al., 2002, Mavromati et al., 2003, Γραμματικόπουλος κ.ά., 2006).

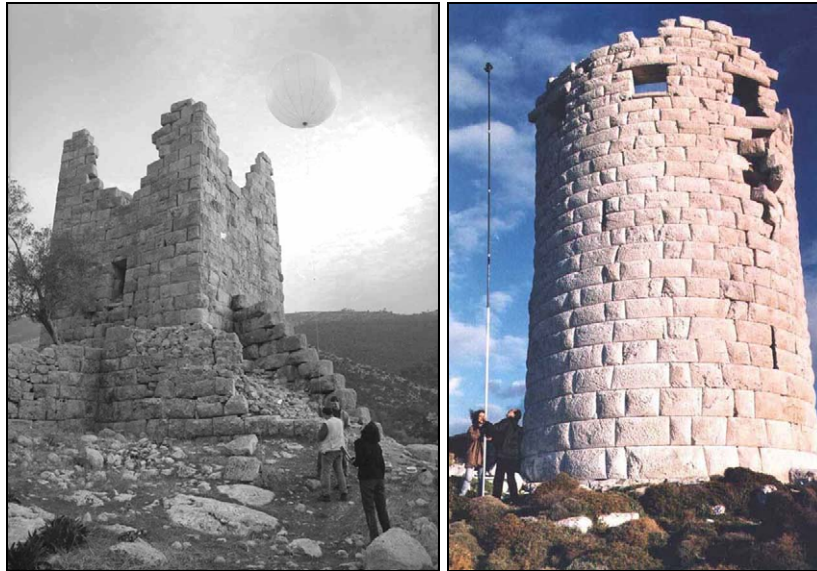
2.1 Λήψεις και φωτοτριγωνισμός

2.1.1 Η λήψη των εικόνων

Κατ’ αρχάς, οι μεγάλης κλίμακας εικόνες αρχαιολογικών χώρων πρέπει γενικά να λαμβάνονται κατακόρυφα από ψηλά (ανασκαφές, αρχαία θέατρα) ή οριζόντια από κάποιο ύψος (κάστρα, πύργοι), πράγμα που θέτει πρόβλημα σχεδιασμού και εκτέλεσης των λήψεων. Ανάλογα με την τοποθεσία (περιοχές πυκνοδομημένες είτε προσβάσιμες μόνο πεζή) και συχνά υπό ασφυκτικούς οικονομικούς περιορισμούς, καλείται λοιπόν κανείς να επινοεί ευέλικτες και φθηνές πλατφόρμες μηχανής. Δύο τέτοιες λύσεις για την ανύψωση της μηχανής υπάρχουν στην Εικ. 1, προερχόμενες από παλαιότερο ερευνητικό πρόγραμμα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας του ΤΕΙ-Α (αριστερά: Κάστρο Αιγοσθένων) και από άλλη εργασία μελών της ερευνητικής ομάδας (δεξιά: Πύργος Δρακάνου, Άνδρος).

Αλλά, ακόμα και εάν η μηχανή έχει συνδεθεί με οθόνη, τέτοιες εγγενώς “ασταθείς” πλατφόρμες δεν επιτρέπουν τον πλήρη έλεγχο των στροφών, με σύνηθες αποτέλεσμα τα

μπλοκ εικόνων να έχουν πολύ ακανόνιστη γεωμετρία. Ανάλογα ισχύουν για την διακύμανση στην απόσταση λήψης και τις προκύπτουσες διακυμάνσεις κλίμακας. Αυτές φυσικά επιτείνονται από το συχνότατο έντονο ανάγλυφο της επιφάνειας (το οποίο, έτσι κι αλλιώς, προξενεί έντονες διαφορές προοπτικής μεταξύ γειτονικών εικόνων). Πρέπει ακόμα να συνηπολογιστεί η ιδιομορφία ότι – ακριβώς λόγω συνεχών απότομων μεταβολών του αναγλύφου στις αρχαιολογικές εφαρμογές και της ανάγκης να αποφεύγονται “νεκρές” περιοχές – συχνά πρέπει οι λήψεις να γίνουν πολύ πυκνά, λόγος για τον οποίο περιπλέκεται ακόμα περισσότερο η γεωμετρία του μπλοκ των εικόνων.



Εικόνα 1. Λήψεις με μπαλόκι και με καλάμι (Mavromati et al., 2003, Petsa, 2001).

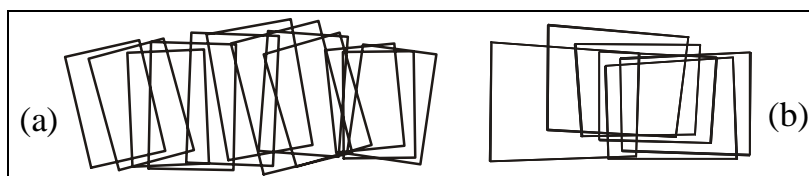
Μια άλλη ιδιαιτερότητα αφορά την χρήση απλών, χαμηλού κόστους ερασιτεχνικών (μη μετρικών) μηχανών μικρού ή μεσαίου φορμάτ, δεδομένου ότι οι απλές πλατφόρμες σηκώνουν μόνο μικρά βάρη. Έτσι, η άγνωστη γεωμετρία μηχανής και η έντονη ακτινική διαστροφή (κυρίως των ευρυγώνιων φακών) έρχονται να προστεθούν στις τυπικές δυσκολίες που αντιμετωπίζει ο φωτοτριγωνισμός στις αρχαιολογικές εφαρμογές. Υπ’ αυτή την έννοια πρόκειται τελικά για ένα πρόβλημα που εδώ τίθεται στην γενικότερη, ίσως, μορφή του.

2.1.2 Φωτοτριγωνισμός

Με βάση τα προηγηθέντα, είναι απαραίτητο να εισάγονται όλες οι εικόνες σε έναν ενιαίο φωτοτριγωνισμό με την μέθοδο της δέσμης προκειμένου να εξασφαλιστεί κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο η μεταξύ τους σύνδεση όσο και η ένταξή τους στο σύστημα του χώρου. Αυτό είναι αναγκαίο για την συλλογή της 3D πληροφορίας (η οποία όμως σε πολλές περιπτώσεις πραγματοποιείται και με σάρωση laser) και βέβαια για την ορθοαναγωγή. Παράλληλα δίνεται έτσι η δυνατότητα να εκτιμάται ο εσωτερικός προσανατολισμός της μηχανής με *αυτοβαθμονόμηση*. Αυτό δυστυχώς δεν είναι πάντοτε δυνατό, πχ. λόγω περιορισμένου αναγλύφου ή μη ευνοϊκής γεωμετρίας του μπλοκ. Ωστόσο, έχει δείχτει ότι για ανάγλυφο όχι ιδιαίτερα έντονο και εστίαση στο άπειρο μπορεί γενικά να χρησιμοποιείται η ονομαστική τιμή της εστιακής απόστασης και να αγνοείται το πρωτεύον σημείο της μηχανής (Karras and Mavromati, 2001). Η ακτινική διαστροφή, ιδίως των ευρυγώνιων φακών, έχει σοβαρή επίδραση και μπορεί να εκτιμάται ανεξάρτητα με απλές τεχνικές, πχ. από εικόνες ευθειών.

Αυτές οι λύσεις έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε προηγούμενα ερευνητικά προγράμματα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας του ΤΕΙ-Α για την παραγωγή ορθοφωτομωσαϊκών με συμβατικές τεχνικές. Όπως θα φανεί όμως στην συνέχεια, η αυτοβαθμονόμηση έχει ιδιαίτερη σημασία για την πολυεικονική παραγωγή ορθοπροβολών, πράγμα που αποτελεί και το πλαίσιο της παρούσας έρευνας.

Από όσα έχουν εκτεθεί είναι σαφές ότι σε εφαρμογές αυτού του τύπου εξίσου σημαντικές είναι και οι δυσκολίες που αντιμετωπίζει ο αξιόπιστος προσδιορισμός του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων ή ακόμα και η ίδια η επίλυση του φωτοτριγωνισμού. Οι μη πλήρως ελέγξιμες πλατφόρμες (ιδίως μάλιστα όταν υπάρχει άνεμος) γενικά δεν επιτρέπουν να τηρείται ο προγραμματισμός της λήψης, γεγονός που συχνότατα συνεπάγεται “δύσκολες” γεωμετρίες. Τόσο σε κατακόρυφες λήψεις (συνήθως με μπαλόνη) όσο και σε οριζόντιες (με μπαλόνη ή καλάμι) κυριότερο πρόβλημα είναι στροφές των εικόνων περί την κατακόρυφο, που μπορεί να ξεπερνούν ακόμα και τις 15° . Η Εικ. 2 παρουσιάζει λωρίδες κατακόρυφων (a) και οριζόντιων (b) λήψεων από παλαιότερα ερευνητικά προγράμματα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας, όπου είναι εμφανείς οι μεγάλες στροφές των εικόνων, η επίδρασή τους στην επικάλυψη και οι διαφορές κλίμακας των εικόνων.



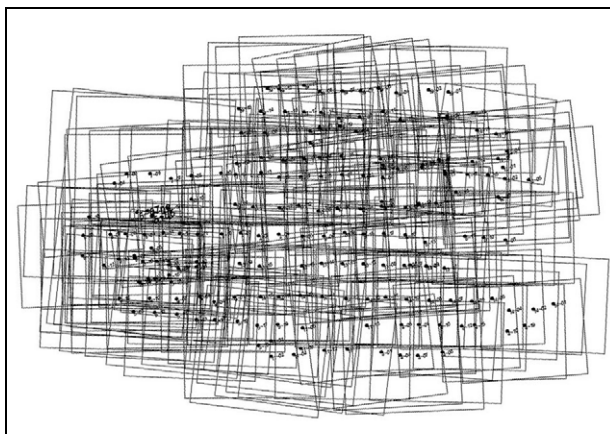
Εικόνα 2. Γεωμετρίες λωρίδων.

Αυτό έχει άμεση επίπτωση τόσο στην επικάλυψη όσο και στην δυνατότητα να επιλυθεί ο φωτοτριγωνισμός με το λογισμικό των φωτογραμμετρικών σταθμών. Γενικά, απαιτούνται πυκνές λήψεις προκειμένου να εξασφαλίζεται ικανοποιητική επικάλυψη και επαρκής αριθμός αλληλοτομιών. Άλλωστε κάτι τέτοιο είναι συνήθως ούτως ή άλλως αναγκαίο ως εγγύηση ότι δεν θα υπάρχουν περιοχές που θα “κρύβονται” εξαιτίας της προοπτικής. Ακόμα, κρίσιμη είναι η ύπαρξη επαρκούς αριθμού φωτοσταθερών – αλλά και σημείων ελέγχου για την εκ των υστέρων αξιολόγηση – και η επιλογή πολλών κατάλληλων σημείων σύνδεσης, μετρούμενων κατά το δυνατόν σε όλες τις εικόνες όπου αυτά εμφανίζονται. Όλα τα σημεία, που συχνά δεν είναι προσημασμένα, πρέπει να αναγνωρίζονται προσεκτικά λόγω της φύσης του αντικειμένου αλλά και των συχνά έντονων (λόγω αναγλύφου και κλίσης των εικόνων) διαφορών προοπτικής. Τελικά, υπ’ αυτές τις προϋποθέσεις είναι δυνατόν να εξασφαλίζεται η αναγκαία ακρίβεια, δεδομένου ότι η ποιότητα του φωτοτριγωνισμού είναι φυσικά το αρχικό κρίσιμο στάδιο της φωτογραμμετρικής διαδικασίας. Αυτό αφορά ακόμα και πολύ μεγάλα μπλοκ εικόνων. Για παράδειγμα, σε άλλο υπό εξέλιξη ερευνητικό πρόγραμμα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας σε ρωμαϊκό αρχαιολογικό χώρο, η συνεχής διακύμανση του αναγλύφου και η έκταση του μνημείου υπαγόρευσαν μεγάλο αριθμό πολύ πυκνών λήψεων από μπαλόνη (Εικ. 3). Ο φωτοτριγωνισμός με 194 εικόνες μεσαίου φορμάτ και μέσης κλίμακας 1:600 επιλύθηκε με μέση τετραγωνική απόκλιση 1.5 cm στα φωτοσταθερά.

2.2 Η παραγωγή του 3D μοντέλου επιφάνειας

Ωστόσο, και παρά τα πρόσθετα προβλήματα που προσιδιάζουν στις περιπτώσεις ορθοαναγωγής σε μνημεία όπως αυτά αναφέρθηκαν εδώ, παραμένει αδιαμφισβήτητος ο καθορι-

στικός ρόλος που παίζει η περιγραφή ή μοντελοποίηση της επιφάνειας (surface modeling) για αποτέλεσμα γεωμετρικά αξιόπιστο και οπτικά άψογο. Οι El-Hakim et al. (2003a) παρουσίασαν και αξιολόγησαν διάφορες μεθόδους, διαδραστικές όσο και αυτόματες, για την παραγωγή 3D μοντέλων και την οπτικοποίησή τους, οι οποίες εφαρμόζονται στο πεδίο της πολιτιστικής κληρονομιάς.



Εικόνα 3. Μπλοκ εικόνων από μπαλόκι.

Πράγματι, το σχήμα των αρχαιολογικών αντικειμένων είναι γενικά ιδιαίτερα σύνθετο, διακρινόμενο από απότομες και ακανόνιστες μεταβολές στο ανάγλυφο, εσοχές, προεξοχές ή διαδοχικές ασυνέχειες, εν μέρει οφειλόμενες σε καταστροφές και φθορές. Ο τριγωνισμός της επιφάνειας συνιστά υπ' αυτές τις συνθήκες ζήτημα ιδιαίτερα κρίσιμο, δεδομένου ότι η πληρότητα και πιστότητα του 3D μοντέλου έχει καθοριστική σημασία για το παράγωγο εικονιστικό προϊόν αφού μια ελλιπής περιγραφή επιφανειών μπορεί να προξενήσει απαράδεκτες παραμορφώσεις (Εικ. 4).



Εικόνα 4. Ορθοφωτογραφίες από ελλiptές και πλήρες 3D μοντέλο (Mavromati et al., 2003).

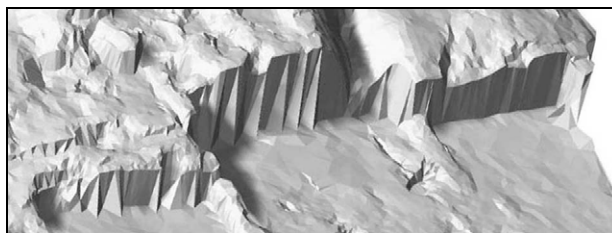
2.2.1 Φωτογραμμετρική παραγωγή 3D μοντέλου

Ένας βασικός τρόπος για την συλλογή της 3D πληροφορίας – και μέχρι πρόσφατα ουσιαστικά ο μοναδικός – είναι η Φωτογραμμετρία. Καίτοι οι ψηφιακοί φωτογραμμετρικοί σταθμοί διαθέτουν βασικούς αλγορίθμους για αυτόματη συνταύτιση ψηφιακών εικόνων (digital image matching), αυτά τα λογισμικά είναι γενικά ακατάλληλα για εφαρμογές στα μνημεία, καθώς π.χ. τα τελευταία συνήθως εμφανίζουν επιφάνειες φτωχής υφής ή και μεγάλης ανακλαστικότητας, αλλά και πολλές αποκρύψεις. Από την άλλη μεριά, η βιβλιογραφία στην επιστημονική περιοχή της Όρασης Υπολογιστών (computer vision) έχει να παρουσιάσει ισχυρούς αλγορίθμους που επιτρέπουν την αυτόματη δημιουργία φωτορρεαλιστικών 3D

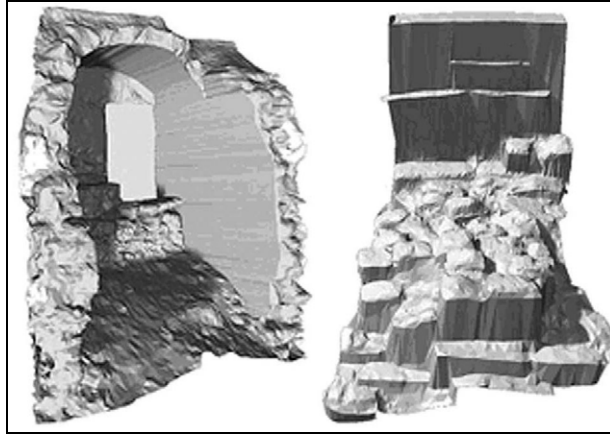
μοντέλων με φωτοϋφή από πυκνές διαδοχικές λήψεις (image sequences) χωρίς καμία a priori πληροφορία για την μηχανή ή το αντικείμενο. Παράγονται έτσι μοντέλα υψηλής οπτικής ποιότητας, παραμένει όμως αδιευκρίνιστο το κατά πόσον οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται πληρούν τις απαιτήσεις των περισσότερων εφαρμογών αποτύπωσης (Pollefeys et al., 2000). Ακόμα, έχουν παρουσιαστεί ιδιαίτερα προχωρημένες τεχνικές για την αυτόματη πυκνή ανακατασκευή (dense reconstruction) επιφανειών από περιορισμένο αριθμό επικαλυπτόμενων εικόνων με μεγάλη βάση (wide-baseline), πχ. από τους Strecha et al. (2003), όμως η καθαυτό μετρητική απόδοσή τους μένει να αξιολογηθεί.

Έτσι, η συλλογή των αρχικών 3D δεδομένων για την περιγραφή μιας επιφάνειας πραγματοποιείται κατά κανόνα χειρωνακτικά με στερεοσκοπική παρατήρηση στο περιβάλλον ενός ψηφιακού φωτογραμμετρικού σταθμού. Γενικά όμως τα εμπορικά λογισμικά ‘μοντελοποιούν’ τα πρωτογενή 3D δεδομένα με 2D τριγωνισμό Delaunay, δηλαδή περιγράφουν τις επιφάνειες με μοντέλα 2.5D (ένα μόνο υπόμετρο σε κάθε οριζοντιογραφική θέση). Συνεπώς χρειάζεται προσοχή (αλλά και εμπειρία) κατά την φάση της χειρωνακτικής συλλογής ώστε να συμπεριληφθούν όλες οι ασυνέχειες της επιφάνειας, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να έχει κανείς εκ των προτέρων σαφή εικόνα για τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί το μοντέλο επιφάνειας για την ορθοαναγωγή.

Συνηθέστατο πρόβλημα στις ορθοπροβολές αρχαιολογικών αντικειμένων είναι η περιγραφή επιφανειών που είναι παράλληλες στην διεύθυνση προβολής (δηλαδή ο σχηματισμός “κατακόρυφων τριγώνων”). Γενικά, η 3D πληροφορία σε τέτοιες κατακόρυφες επιφάνειες συλλέγεται ως συνδυασμός γραμμών ασυνέχειας (break-lines) στο επάνω χείλος και γραμμών ασυνέχειας ή σημείων στο κάτω μέρος. Αυτό όμως κάθε άλλο παρά αποκλείει έναν “αυθαίρετο” 2D τριγωνισμό, με άμεση βέβαια επίπτωση στην ορθοαναγωγή. Σε αυτές λοιπόν τις περιπτώσεις, ο αλγόριθμος τριγωνισμού θα πρέπει να “υποβοηθηθεί” με κατάλληλη τεχνική συλλογής. Στην υπό εκπόνηση διδακτορική διατριβή της, η Δ. Μαυρομάτη έχει αναπτύξει ειδική στρατηγική συλλογής που στηρίζεται στον συνδυασμό γραμμών ασυνέχειας και κατάλληλης επιλογής σημείων (βλ. Mavromati et al., 2002 και 2003). Καίτοι επίπονη, αυτή η τεχνική 3D συλλογής επιτρέπει να ελέγχεται στα μοντέλα 2.5D ο σχηματισμός τριγώνων, αφού τα “εξαναγκάζει” να ακολουθούν την μορφή της επιφάνειας, και άρα εξασφαλίζει κατά το δυνατόν πιστή περιγραφή. Προφανώς, η τεχνική υιοθετείται μόνο σε ορισμένες δύσκολες περιοχές και όχι για ολόκληρη την επιφάνεια. Η Εικ. 5 δείχνει την σαφή διαφορά που προκύπτει στην μοντελοποίηση κατακόρυφων επιφανειών όταν τα πρωτογενή 3D δεδομένα έχουν προέλθει από τυχαία συλλογή (αριστερά) και από ελεγχόμενη συλλογή (δεξιά). Στην Εικ. 6 παρουσιάζονται παραδείγματα σκιασμένων 3D μοντέλων από παλαιότερα ερευνητικά προγράμματα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας – τα οποία αναφέρονται στο Αρχαίο Κάστρο Αιγιοσθένων και το Αρχαίο Θέατρο Σπάρτης – όπου διακρίνεται η επιτυχής απόδοση επιφανειών κάθετων μεταξύ τους (βλ. και Mavromati et al., 2003, Γραμματικόπουλος κ.ά. 2006).

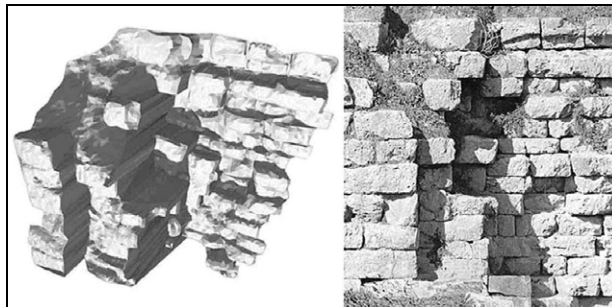


Εικόνα 5. Ανεπιτυχής και επιτυχής περιγραφή κατακόρυφων επιφανειών.



Εικόνα 6. Φωτοσκιασμένα μοντέλα επιφάνειας.

Η κατάλληλη συλλογή και “μοντελοποίηση” επιφανειών εξασφαλίζει ορθοφωτομωσαϊκά υψηλής γεωμετρικής ακρίβειας αλλά και οπτικής ποιότητας. Η Εικ. 7 δείχνει μέρος ενός 3D μοντέλου επιφάνειας με έντονο ανάγλυφο και το αντίστοιχο ορθοφωτομωσαϊκό. Στην ορθοπροβολή της Εικ. 8 φαίνεται πώς έχουν εξαλειφθεί οι εκτροπές λόγω αναγλύφου της αρχικής εικόνας.



Εικόνα 7. 3D μοντέλο και ορθοφωτομωσαϊκό.



Εικόνα 8. Αρχική και ορθοαναηγμένη εικόνα.

Η φωτογραμμετρική διαδικασία συλλογής πυκνής 3D πληροφορίας μπορεί λοιπόν να αποδώσει προϊόντα υψηλής ποιότητας, ιδίως εφόσον υιοθετηθούν ειδικά διαμορφωμένες στρατηγικές επιλογής σημείων και γραμμών ασυνέχειας όπως η προαναφερθείσα. Μια τέτοια προσέγγιση έχει όμως δύο βασικούς περιορισμούς:

- η φωτογραμμετρική συλλογή αξιόπιστων 3D μοντέλων από χειριστή είναι διαδι-

κασία που απαιτεί ιδιαίτερη εμπειρία, ενώ ταυτόχρονα είναι πολύ κοπιαστική και χρονοβόρα,

- η κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργία ενός πλήρως 3D μοντέλου, ειδικά δε όταν αναφέρεται κανείς στις πολυσχιδείς επιφάνειες αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, είναι γενικά διαδικασία ιδιαίτερος σύνθετη και απαιτητική.

2.2.2 Παραγωγή 3D μοντέλου με σάρωση laser

Σήμερα όμως η τεχνολογία της επίγειας σάρωσης laser επιτρέπει ταχύτατη δειγματοληψία τεράστιου αριθμού σημείων μιας επιφάνειας. Είναι αυτονόητο ότι οι σαρωτές laser δεν είναι πανάκεια αφού θέση, διάταξη και μορφολογία του αντικειμένου δεν επιτρέπουν πάντα πρόσβαση στον σαρωτή. Ανεξάρτητα όμως από αυτό, από το υψηλό κόστος ή και τις δυσκολίες που ενδεχομένως θα αντιμετωπίσει κανείς όταν επεξεργάζεται “νέφη σημείων”, γεγονός παραμένει ότι η σάρωση laser έχει επαναστατικοποιήσει την διαδικασία συλλογής 3D σημειοσυνόλων και τα προϊόντα της αντιπροσωπεύουν σε πλείστες περιπτώσεις πρώτης τάξεως υπόβαθρα για την ορθοαναγωγή – αλλά και για να παράγονται υψηλής ποιότητας εικονικά φωτορρεαλιστικά μοντέλα αντικειμένων του πραγματικού κόσμου (Bernardini et al., 2001). Στην πραγματικότητα, η προβολή της πολιτιστικής κληρονομιάς εμφανίζεται ως μία από τις κύριες κινητήριες δυνάμεις της έρευνας σχετικά με τον συνδυασμό σάρωσης laser και έγχρωμων εικόνων (Beraldin et al., 2002). Όντως, η χαμηλή ποιότητα των έγχρωμων εικόνων (γνωστού προσανατολισμού στο σύστημα του 3D μοντέλου) που παρέχονται από ορισμένα εμπορικά συστήματα 3D μέτρησης υπαγορεύει την λήψη ανεξάρτητων εικόνων υψηλής ανάλυσης, ειδικά μάλιστα για τους σκοπούς της ορθοαναγωγής σε πολύ μεγάλες κλίμακες.

Η φωτογραμμετρία καλείται λοιπόν να αξιοποιήσει αυτά τα 3D μοντέλα, μεταξύ άλλων και ως υπόβαθρο για την παραγωγή ψηφιακών προβολών.

2.3 Το πρόβλημα των αποκρύψεων

Ακόμα όμως και ύστερα από την επεξεργασία των αρχικών 3D δεδομένων και τον τριγωνισμό της επιφάνειας, ο διπλός περιορισμός των συνήθων λογισμικών ορθοαναγωγής παραμένει: α) δεν είναι σε θέση ελέγξουν τι πραγματικά “βλέπει” μια εικόνα, δηλαδή την ορατότητα της εικόνας, και β) χειρίζονται μόνο μοντέλα επιφάνειας 2.5D. Αλλά, σε αντίθεση με τις περισσότερες περιπτώσεις αεροφωτογραφίας όπου, όπως έχει αναφερθεί, ένα μοντέλο επιφάνειας 2.5D είναι πιθανότατα επαρκές, στις εφαρμογές μικρών αποστάσεων είναι πολύ συχνά αδύνατον να αποφύγει κανείς την ανάγκη για πλήρως 3D μοντέλα λόγω της σύνθετης μορφής των αντικειμένων. Συνεπώς, ένας αυστηρός αλγόριθμος ορθοπροβολής θα ήταν πρωτίστως υποχρεωμένος να αντιμετωπίσει *το διττό ερώτημα της ορατότητας (ή απόκρυψης)*:

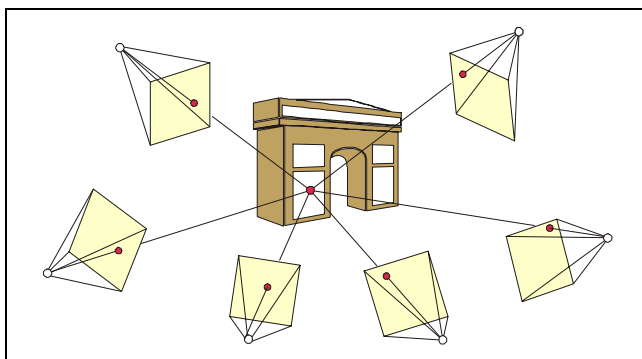
- Οφείλει να αναγνωρίζει όλες τις περιοχές της επιφάνειας που πρέπει όντως να είναι ορατές στην διεύθυνση της ορθοπροβολής, με αποτέλεσμα σε κάθε εικονομηφίδα της ορθοφωτογραφίας να αποδίδεται μία και μόνη τιμή υψομέτρου (ή, γενικότερα, μία και μόνη τιμή βάθους).
- Εν συνεχεία πρέπει να ελέγξει ποιά σημεία της επιφάνειας από εκείνα που καθορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα είναι επίσης ορατά στην αρχική εικόνα. Για τα υπόλοιπα, οι τιμές χρώματος θα πρέπει να αντληθούν από γειτονικές εικόνες.

Έτσι, οι Wanshou and Yixuan (1999) παρήγαγαν *χάρτες βάθους* (depth maps) της ορθο-

φωτογραφίας όσο και των αρχικών εικόνων. Υιοθετώντας την τυπική φωτογραμμετρική προσέγγιση, έδωσαν υφή σε κάθε ορατή περιοχή της επιφάνειας από μία μόνο εικόνα, επιλέγοντάς την βάσει της εγγύτητας στο κέντρο προβολής. Είναι σαφές ότι αυτός ο γενικός τρόπος να τίθεται το ζήτημα δεν έχει τίποτα το αποκλειστικά σχετικό με την ορθοφωτογραφία, και άρα είναι κατάλληλος πχ. και για την παραγωγή προοπτικών απεικονίσεων.

2.4 Φωτοϋφή από πολλές εικόνες

Εξαιτίας της συνθετότητας των επιφανειών που αντιμετωπίζονται και των ακανόνιστων γεωμετριών λήψης, είναι αμφίβολο το κατά πόσον θα μπορούσε να υιοθετηθεί και στις επίγειες εφαρμογές το σχήμα “εικόνα αναφοράς – υποκείμενες εικόνες” της αεροφωτογραμμετρίας. Επιπλέον, σε πρακτικές συνθήκες οι τιμές χρώματος και έντασης για ένα στοιχείο της επιφάνειας δεν θα είναι ακριβώς οι ίδιες στις διαφορετικές εικόνες – πχ. λόγω συνθηκών φωτισμού αλλά και εξαιτίας μικρών σφαλμάτων στην βαθμονόμηση της μηχανής, την συνόρθωση δέσμης ή την γεωδαιτική ένταξη και την περιγραφή της επιφάνειας (Baumberg, 2002). Έτσι, όταν γειτονικές εικονοψηφίδες της ορθοφωτογραφίας παίρνουν χρώμα από διαφορετικές εικόνες με διαφορετική ραδιομετρία, είναι πιθανόν να εμφανιστούν ραδιομετρικές ασυνέχειες ή παραμορφώσεις. Απάντηση σε αυτό είναι ο “χρωματισμός” κάθε εικονοψηφίδας της νέας εικόνας με την συμμετοχή πολλών εικόνων (Εικ. 9).



Εικόνα 9. Πολυεικονική απόδοση φωτοϋφής.

Με τον όρο λοιπόν *μίξη χρώματος* ή και *μίξη υφής* (colour ή texture blending) εννοείται ότι για κάθε σημείο χρησιμοποιείται συνδυασμός με κατάλληλα βάρη αντίστοιχων υφών από όλες τις εικόνες ή υποσυνόλου τους (Pulli et al., 1998; Neugebauer & Klein, 1999; Buehler et al., 2001; Wang et al., 2001; Rocchini et al., 2002). Παρόμοιες τεχνικές για την εξάλειψη ραδιομετρικών διαφορών προέρχονται από τον χώρο των γραφικών υπολογιστών (computer graphics), όπου ο ρεαλισμός όσο και ο φωτισμός έχουν βέβαια σημασία. Είναι κατανοητό λοιπόν γιατί οι στρατηγικές επιλογής βαρών διαμορφώνονται εκεί κυρίως στο πλαίσιο της *απόδοσης υφής βάσει της διεύθυνσης* (view-dependent texture mapping), ήτοι κάθε φορά η παρεμβολή ευνοεί εικόνες που “βλέπουν” το αντικείμενο υπό γωνία πλησιέστερη προς εκείνη της εκάστοτε γωνίας παρατήρησης (Debevec et al., 1996). Οι Pulli et al. (1998), για παράδειγμα, χρησιμοποιούν συμβατές ακτίνες από τις τρεις εικόνες που έχουν ληφθεί με διευθύνσεις πλησιέστερες προς την τρέχουσα διεύθυνση παρατήρησης.

Όμως οι Wang et al. (2001) έχουν επισημάνει ότι για ένα 3D μοντέλο συνήθως επαρκεί ένας μοναδικός “χάρτης υφής” (texture map). Πράγματι, στις περισσότερες περιπτώσεις φωτογραμμετρικής αποτύπωσης φαίνεται λογικό να προτιμάται μια στατική, και όχι δυναμική, διαδικασία απόδοσης υφής. Έτσι, ένας αλγόριθμος *απόδοσης υφής ανεξαρ-*

τήτως διεύθυνσης (view-independent) θα εισήγαγε βάρη στην συνεισφορά κάθε αρχικής εικόνας βάσει της χωρικής σχέσης της με την επιφάνεια του μοντέλου (απόσταση, γωνία) και των χαρακτηριστικών της (σταθερά μηχανής, ανάλυση) προκειμένου να αποδώσει μια μοναδική τιμή χρώματος σε κάθε στοιχειώδη μονάδα της επιφάνειας (Poulin et al., 1998).

Μολονότι η μίξη χρώματος είναι, σε κάποιο βαθμό, και διαδικασία απορρόφησης σφαλμάτων, θα εξακολουθήσουν να υπάρχουν γεωμετρικές και ραδιομετρικές παραμορφώσεις προερχόμενες από υπαρκτές πηγές σφάλματος. Για παράδειγμα, η αδιόρθωτη ακτινική διαστροφή του φακού μπορεί να υποβαθμίσει δραστικά το αποτέλεσμα της μίξης υψής. Με την έννοια αυτή, όπως θα αναπτυχθεί στην συνέχεια, είναι προφανής η σημασία που έχει η πλήρης βαθμονόμηση της μηχανής και η ακριβής ένταξη της εικόνας στον χώρο μέσω συνόρθωσης δέσμης. Παρ' όλα αυτά εξακολουθούν να είναι απαραίτητα ορισμένα εργαλεία για τον εντοπισμό χονδροειδών σφαλμάτων χρώματος. Η εμφάνιση φαινομένων θόλωσης (blurring) κατά την μίξη χρώματος λόγω σημαντικών διαφορών στην ανάλυση των εικόνων είναι επίσης ένα ζήτημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη (Neugebauer & Klein, 1999; Buehler et al., 2001).

2.5 Περίγραμμα αλγορίθμου της παρούσας έρευνας

Βάσει μελέτης της σχετικής διεθνούς βιβλιογραφίας και της προϋπάρχουσας δραστηριότητας της ερευνητικής ομάδας, ο σκοπός εδώ ήταν να αντιμετωπιστεί το βασικό φωτογραμμετρικό πρόβλημα της ορθοαναγωγής στο ευρύτερο πλαίσιο της *απόδοσης υψής* (texture-mapping) προκειμένου να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος με την προσαρμογή και σύνθεση εργαλείων από την Φωτογραμμετρία και τα Γραφικά Υπολογιστών. Έτσι, η μέθοδος που ανέπτυξε η ερευνητική ομάδα παράγει σωστές ορθοφωτογραφίες (ή προοπτικές εικόνες) από ένα τριγωνισμένο 3D μοντέλο μιας επιφάνειας, προερχόμενο από σάρωση laser, και πολλαπλές εικόνες.

Η διαδικασία απαιτεί τα ακόλουθα δεδομένα εισόδου:

- ένα τριγωνισμένο 3D μοντέλο (3D mesh) στην μορφή τριάδων XYZ που περιγράφουν την επιφάνεια του αντικειμένου
- ασπρόμαυρες ή έγχρωμες ψηφιακές εικόνες με τις παραμέτρους του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού τους
- την εξίσωση του επιπέδου προβολής στον χώρο (εκτός από ορθές είναι δυνατόν να παραχθούν και πλάγιες προβολές) ή τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού της νέας προοπτικής εικόνας.

Συνοπτικά, τα διαδοχικά βήματα του υλοποιημένου αλγορίθμου είναι τα εξής:

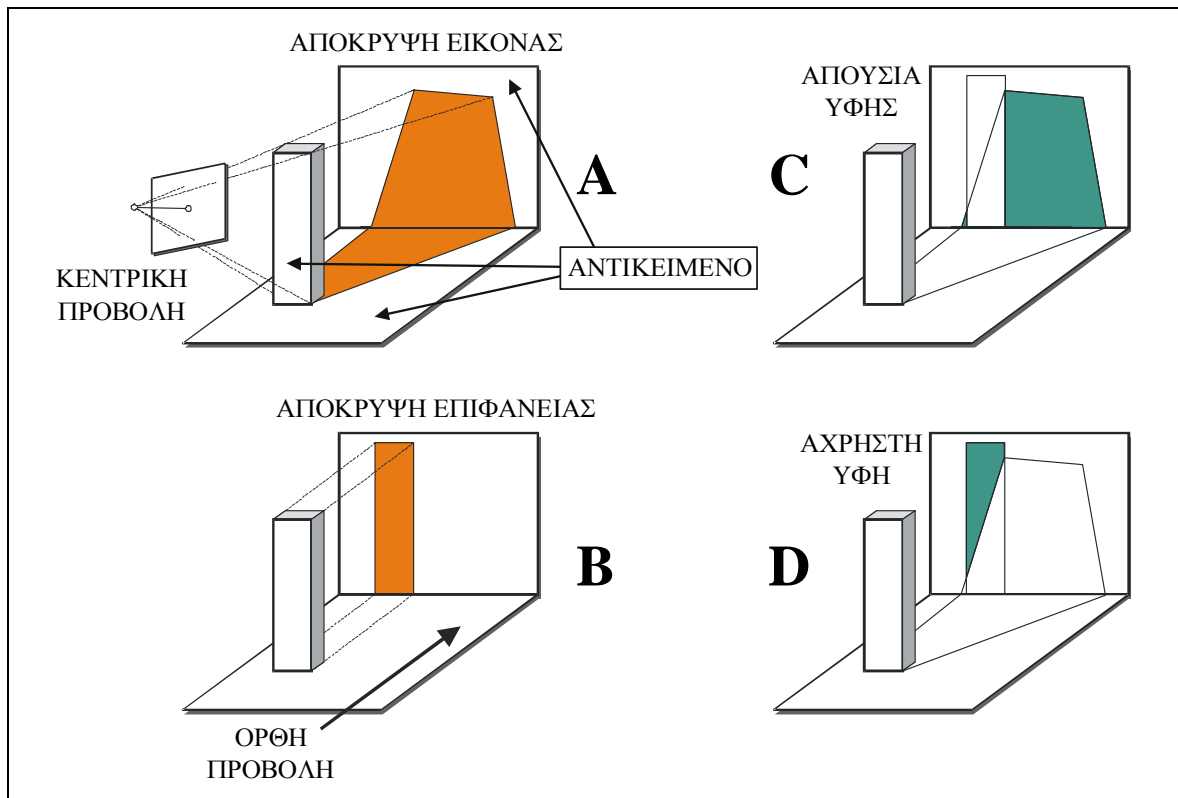
- διακρίνει όλα τα τρίγωνα της επιφάνειας που πρέπει να φαίνονται στην επιλεγμένη διεύθυνση προβολής και δημιουργεί τον "χάρτη βάθους" της νέας απεικόνισης
- ορίζει ποιά από τα σημεία της επιφάνειας που χαρακτηρίστηκαν προηγουμένως ως ορατά στην νέα εικόνα απεικονίζονται επίσης και σε κάθε διαθέσιμη αρχική εικόνα
- αποδίδει χρώμα σε κάθε εικονοψηφίδα της νέας απεικόνισης με μίξη υψής, βάσει βαρών, προερχόμενης από όλες τις εικόνες που βλέπουν το σημείο
- παρέχει μέσα για τον αυτόματο αποκλεισμό χονδροειδώς αποκλινουσών τιμών χρώματος.

3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΠΟΛΥΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΟΡΘΟΑΝΑΓΩΓΗΣ

3.1. Έλεγχος ορατότητων και αποκρύψεων

Πρώτο ερώτημα είναι ο χειρισμός του ζητήματος της απόκρυψης. Αυτό το διπλό πρόβλημα αποκρύψεων, το οποίο τελικά καλείται να αντιμετωπίσει ένα λογισμικό παραγωγής εικονιστικών προϊόντων από πλήρως 3D μοντέλα, παρουσιάζεται στην Εικ. 10. Πρέπει λοιπόν, κατ' αρχάς, να εντοπιστούν οι περιοχές που δεν είναι ορατές στην διεύθυνση προβολής, δηλαδή η “αυτοαπόκρυψη” της επιφάνειας (**B**). Κατόπιν πρέπει να διακριθούν οι περιοχές του αντικειμένου που δεν φαίνονται στην εικόνα, δηλαδή οι αποκρύψεις της εικόνας (**A**). Αυτό είναι συνώνυμο με το να μπορεί τελικά το λογισμικό να “αντιλαμβάνεται”:

- ποιές περιοχές φαίνονται μεν στην εικόνα αλλά πρέπει να μην φαίνονται στην προβολή και επομένως η συγκεκριμένη εικόνα δεν δικαιούται εν προκειμένω να συμμετάσχει στην απόδοση χρώματος (**D**),
- και ποιές περιοχές πρέπει μεν να φαίνονται στην προβολή αλλά δεν φαίνονται στην εικόνα (**C**), και επομένως και σε αυτές δεν δικαιούται η συγκεκριμένη εικόνα να συμμετάσχει στην απόδοση χρώματος.



Εικόνα 10. Το πρόβλημα της ορατότητας – απόκρυψης.

- A:** Περιοχές του αντικειμένου που δεν έχουν απεικονιστεί στην εικόνα.
- B:** Περιοχές του αντικειμένου που δεν πρέπει να απεικονίζονται στην προβολή.
- C:** Περιοχές για τις οποίες δεν υπάρχει η αναγκαία υφή.
- D:** Περιοχές για τις οποίες υπάρχει μη χρησιμοποιητέα υφή.

Τελικά λοιπόν, διακρίνοντας για κάθε αρχική εικόνα τις περιοχές όπου υπάρχει μεν υφή αλλά αυτή πρέπει να αποκλειστεί και τις περιοχές όπου απαιτείται η ύπαρξη υφής αλλά

αυτή δεν υπάρχει, είναι δυνατόν να οριστούν τελεσίδικα οι περιοχές κάθε αρχικής εικόνας που νομιμοποιούνται να συμμετάσχουν στην απόδοση χρώματος σε μια συγκεκριμένη προβολή. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, η προσέγγιση αυτή υπερβαίνει βέβαια την απλή περίπτωση της ορθής προβολής και ουσιαστικά αφορά κάθε προβολή, αλλά και το γενικότερο θέμα “απόδοση φωτουΐφής” σε 3D μοντέλα.

3.1.1 Αυτοαπόκρυψη της επιφάνειας

Το ζήτημα των αποκρύψεων της επιφάνειας στην επιθυμητή διεύθυνση προβολής προηγείται. Χωρίς απώλεια σε γενικότητα, οι εξηγήσεις αναφέρονται εδώ σε περιπτώσεις ορθοπροβολής. Στο λογισμικό που αναπτύχθηκε, το τριγωνισμένο 3D μοντέλο της επιφάνειας προβάλλεται ορθά στο καθορισμένο επίπεδο προβολής (θεωρούμενο εδώ για λόγους απλότητας παράλληλο στο επίπεδο XY του συστήματος του χώρου).

Στην αρχική εκδοχή του προγράμματος της ερευνητικής ομάδας, η κενή ψηφιακή ορθοφωτογραφία διαιρείτο σε τετραγωνικό κάναβο με κελί μεγαλύτερο – πχ. κατά συντελεστή 5 – από την εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας (ο συντελεστής εξαρτάται από την διαθέσιμη μνήμη H/Y και τα μεγέθη του μοντέλου και της ορθοεικόνας). Ο στόχος ήταν να επιταχυνθεί η διαδικασία αναζήτησης. Για κάθε προβεβλημένο τρίγωνο σχηματίζεται το περιγεγραμμένο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, το οποίο καταλαμβάνει έναν αριθμό γειτονικών κελιών. Σε αυτά αποδίδεται ο κωδικός αριθμός (KA) του συγκεκριμένου τριγώνου. Κατάληξη της διαδικασίας είναι ένα πίνακας με όλους τους KA τριγώνων που έχουν αποδοθεί σε κάθε μεμονωμένο κελί του κανάβου. Κατ’ αυτόν τον τρόπο, όλα τα προβεβλημένα τρίγωνα που περιείχαν μια δεδομένη εικονοψηφίδα της ορθοεικόνας μπορούσαν να αναγνωριστούν με έλεγχο μόνο των τριγώνων που είχαν σχετιστεί με το αντίστοιχο κελί.

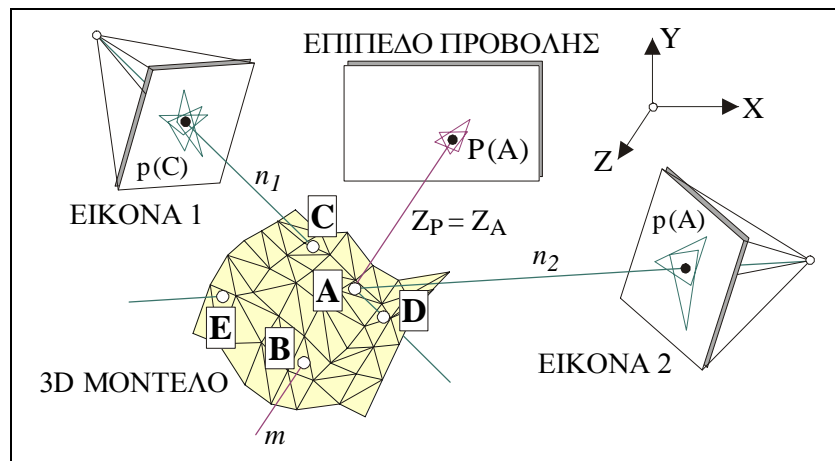
Στην πορεία του παρόντος ερευνητικού έργου τροποποιήθηκε ο αλγόριθμος αυτός που βρίσκει σε ποιά τρίγωνα του 3D μοντέλου, προβεβλημένα στο επίπεδο προβολής, περιλαμβάνεται κάθε εικονοψηφίδα της ορθοαναγωγής. Αντί δηλαδή να ελέγχεται εάν μία εικονοψηφίδα ανήκει ή όχι στο περιγεγραμμένο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο κάθε 2D τριγώνου, εφαρμόζεται τώρα η μέθοδος “scanline conversion” από την βιβλιογραφία των γραφικών υπολογιστή. Ο νέος αλγόριθμος απαιτεί λιγότερη μνήμη και είναι ταχύτερος.

Αντί λοιπόν να υπολογίζονται για κάθε εικονοψηφίδα τα τρίγωνα του μοντέλου που την περιέχουν, προσδιορίζονται για κάθε τρίγωνο οι περιεχόμενες σε αυτό εικονοψηφίδες και τους αποδίδεται το αντίστοιχο βάθος. Έτσι εξαλείφεται η ανάγκη να υπολογίζονται τα περιγεγραμμένα ορθογώνια παραλληλόγραμμο για όλα τα τρίγωνα του μοντέλου, η οποία αποσκοπούσε στον γρήγορο προσδιορισμό του τριγώνου που περιέχει μια συγκεκριμένη εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας. Η μέθοδος προσδιορισμού των εικονοψηφίδων που περιέχονται σε ένα τρίγωνο (triangle filler) είναι γνωστή από την διεθνή βιβλιογραφία Γραφικών Υπολογιστών ως *scanline conversion*, καθώς ο προσδιορισμός των εικονοψηφίδων πραγματοποιείται ανά γραμμή. Με αφετηρία την κορυφή (έστω A) του τριγώνου με την μεγαλύτερη τεταγμένη y και βάσει των κλίσεων των δύο πλευρών που τέμνονται στο A, υπολογίζονται για κάθε γραμμή εικονοψηφίδων οι τετμημένες x της πρώτης και της τελευταίας εικονοψηφίδας που ανήκουν στο τρίγωνο (scanline) και αποδίδονται σε αυτά, καθώς και στα ενδιάμεσα τους, τα κατάλληλα βάθη (υψόμετρα). Με αυτόν τον τρόπο επιταχύνεται σημαντικά η όλη διαδικασία, ενώ το χρησιμοποιούμενο ποσοστό μνήμης είναι αρκετά μικρότερο αφού δεν υπάρχει πλέον ανάγκη να αποθηκεύονται περιγεγραμμένα ορθογώνια.

Τελικά, με τον τρόπο αυτό είναι γνωστό στο εσωτερικό ποιών προβεβλημένων τριγώνων του μοντέλου βρίσκεται η κάθε εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας, άρα και ποιιά

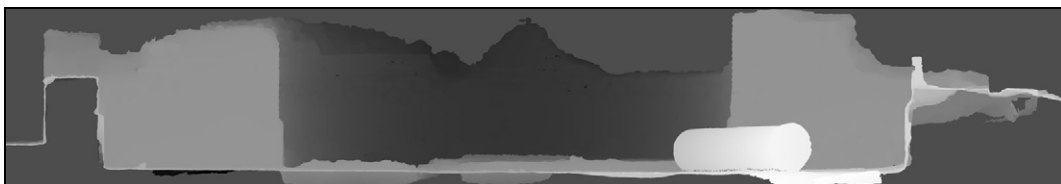
τρίγωνα τέμνει στον χώρο η ακτίνα προβολής της συγκεκριμένης εικονοψηφίδας. Ο αλγόριθμος αποθηκεύει την τιμή Z εκείνου του σημείου τομής της ακτίνας με τα τρίγωνα το οποίο βρίσκεται εγγύτερα στο επίπεδο προβολής. Αυτή η τιμή Z αποδίδεται στην υπό εξέταση εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας και αποθηκεύεται μαζί με τον KA του τριγώνου. Η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας για όλες τις εικονοψηφίδες δημιουργεί τελικά τον χάρτη βάθους της ορθοφωτογραφίας. Κατ' αυτόν τον τρόπο αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της ορατότητας (αυτοαπόκρυψης) της επιφάνειας.

Τα προηγηθέντα εικονογραφούνται στην Εικ. 11. Μετά από την ορθή προβολή όλων των τριγώνων της επιφάνειας στο επίπεδο ορθοπροβολής, ο αλγόριθμος αναγνωρίζει ότι κάποια εικονοψηφίδα P περιέχεται σε δύο 2D τρίγωνα. Αυτό σημαίνει ότι η ακτίνα προβολής m τέμνει δύο τρίγωνα του μοντέλου, το ένα στο σημείο A και το άλλο στο σημείο B . Το πρώτο σημείο (A) βρίσκεται πιο κοντά στο επίπεδο προβολής. Συνεπώς αυτό ακριβώς το σημείο πρέπει να απεικονίσει η εικονοψηφίδα P , με την οποία πλέον συνδέεται το βάθος Z_A και ο KA του τριγώνου του μοντέλου στο οποίο ανήκει το σημείο A .



Εικόνα 11. Το πρόβλημα της ορατότητας-απόκρυψης. Το σημείο A , το οποίο πρέπει να εμφανίζεται στην ορθοπροβολή, έχει απεικονιστεί στην εικόνα 2, αλλά όχι και στην 1.

Ακόμα, στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου αναπτύχθηκε αλγόριθμος για την οπτικοποίηση του χάρτη βάθους της ορθοφωτογραφίας σε μορφή ψηφιακής εικόνας (αυτή η απεικόνιση θα χρειαστεί στην συνέχεια για τον αποτελεσματικότερο χειρισμό των ορίων απόκρυψης). Έχοντας πρώτα υπολογίσει τα "υψόμετρα" (βάθη) για όλες τις εικονοψηφίδες της ορθοφωτογραφίας από τα ορατά τρίγωνα, το πρόγραμμα αντιστοιχίζει τις τιμές στο εύρος 0–255 και το αποτέλεσμα αποθηκεύεται ως ψηφιακή εικόνα. Οι Εικ. 12 και 13 δείχνουν τους χάρτες βάθους δύο ορθοπροβολών.



Εικόνα 12. Χάρτης βάθους ορθοφωτογραφίας (τμήμα μνημείου με ημικυλινδρική επιφάνεια και πεσμένο στύλο).



Εικόνα 13. Χάρτης βάθους ορθοφωτογραφίας (τμήμα πρόσοψης της Καπνικαρέας).

3.1.2 Απόκρυψη εικόνας

Ερχόμενος τώρα κανείς στην δεύτερη πλευρά του θέματος ορατότητα που πλέον αφορά τις αποκρύψεις στις εικόνες, θα πρέπει πρώτα να ξαναπροβάλει όλα τα τρίγωνα του 3D μοντέλου – αυτή την φορά σε όλες τις εικόνες με τις κεντρικές προβολές που ορίζονται από τον εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό καθεμιάς. Οι 3D συντεταγμένες μοντέλου που έχουν σχετιστεί μονοσήμαντα στο προηγηθέν βήμα με κάθε εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας επιτρέπουν να σχηματιστούν οι ακτίνες προβολής. Στο παράδειγμα της Εικ. 11, για το σημείο A (που αντιστοιχεί στην εικονοψηφίδα P) σχηματίζονται οι ακτίνες προβολής n_1 και n_2 για τις εικόνες 1 και 2, αντίστοιχα. Μέσω των ακτίνων προβολής υπολογίζονται οι αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες σε όλες τις εικόνες.

Εφαρμόζεται και εδώ αλγόριθμος όμοιος με προηγουμένως προκειμένου να διαπιστωθεί ποιά τρίγωνα κάθε εικόνας περιέχουν το εικονοσημείο της που ορίζεται από την ακτίνα προβολής δια του σημείου του μοντέλου (A) που έχει αντιστοιχιστεί με την υπό εξέταση εικονοψηφίδα της ορθοπροβολής. Από όλα τα τρίγωνα που τέμνονται από μια συγκεκριμένη ακτίνα, το σημείο τομής που είναι εγγύτερα στο κέντρο προβολής της εικόνας είναι εκείνο που απεικονίστηκε κατά την στιγμή της λήψης. Εάν ο KA του τριγώνου δεν συμφωνεί με εκείνον που έχει ήδη δοθεί από το προηγούμενο βήμα στην εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας, διαπιστώνεται ότι το σημείο του 3D μοντέλου που σχετίζεται με την εν λόγω εικονοψηφίδα δεν είναι ορατό στην εικόνα. Αντίθετα, ίδιοι KA συνεπάγεται ότι το σημείο όντως φαίνεται και στην εικόνα, οπότε στην συγκεκριμένη περιοχή της εικόνας μπορούν πλέον να παρεμβληθούν τιμές χρώματος (RGB) και να αποθηκευτούν.

Όπως προαναφέρθηκε, στο παράδειγμα της Εικ. 11 το σημείο A (αντίστοιχο της εικονοψηφίδας P) ορίζει τις ακτίνες προβολής n_1 και n_2 . Η πρώτη συναντάει το μοντέλο σε τρία σημεία (C, A και D). Από αυτά έχει απεικονιστεί το C που είναι πιο κοντά στο σημείο λήψης. Δεδομένου ότι ο KA του τριγώνου του C διαφέρει από εκείνον του A, το σημείο A αποκρύπτεται στην εικόνα 1. Επομένως, αυτή δεν δικαιούται να συμμετάσχει στον χρωματισμό της εικονοψηφίδας P της ορθοφωτογραφίας. Αντίθετα, η ακτίνα n_2 συναντάει το μοντέλο πρώτα στο σημείο A και κατόπιν στο σημείο E. Συνεπώς, η εικόνα 2 μπορεί να συμμετάσχει στην μίξη υψής για την συγκεκριμένη εικονοψηφίδα P της ορθοαναγωγής.

Όπως και προηγουμένως, τέλος, ο αλγόριθμος επιτρέπει την παραγωγή και οπτικοποίηση του χάρτη βάθους των αρχικών εικόνων, όπου σε κάθε εικονοψηφίδα τους αντιστοιχίζεται η απόστασή της από την επιφάνεια. Η Εικ. 14 παρουσιάζει δύο εικόνες μαζί με τους αντίστοιχους χάρτες βάθους.



Εικόνα 14. Εικόνες και αντίστοιχοι χάρτες βάθους.

3.2 Μίξη χρώματος

Τα προηγούμενα βήματα ορίζουν, για κάθε μία εικονοψηφίδα της ορθοαναγωγής, συγκεκριμένες θέσεις στις αρχικές εικόνες οι οποίες επιτρέπεται να συνεισφέρουν υφή. Πρέπει τώρα να απαντηθούν δύο επόμενα ερωτήματα για κάθε εικονοψηφίδα της ορθοαναγωγής:

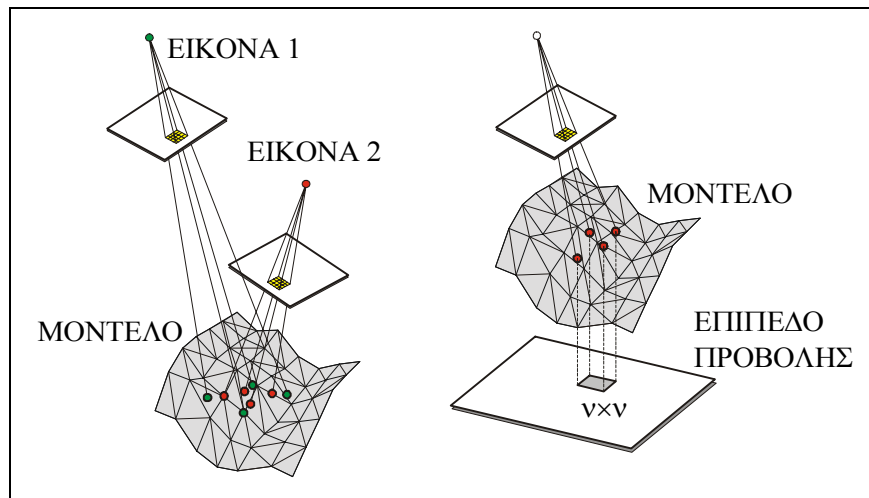
- πώς θα παρεμβληθεί η τιμή χρώματος σε κάθε εικόνα, και
- πώς θα εξαχθεί από αυτές τις επιμέρους τιμές από κάθε εικόνα μια τελική υφή για την εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας.

3.2.1 Παρεμβολή χρώματος στην εικόνα

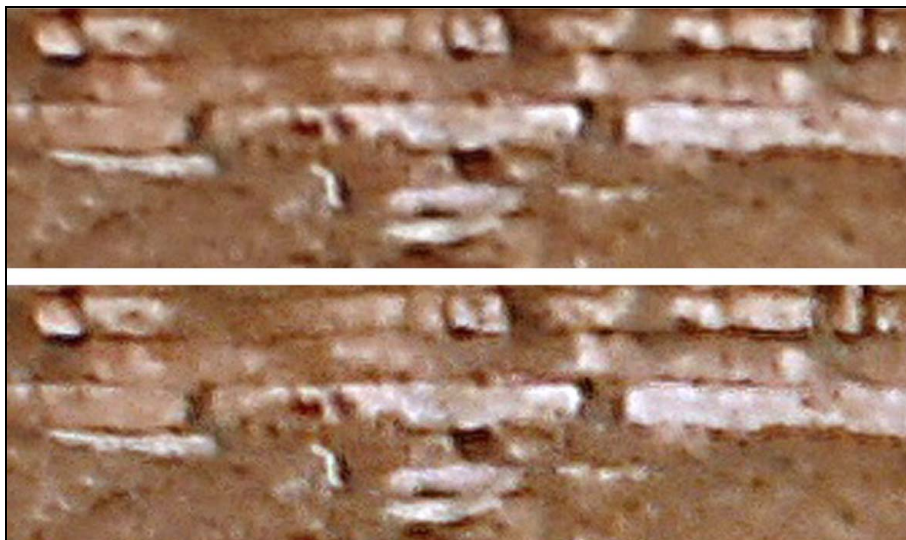
Όσον αφορά κατ' αρχάς την παρεμβολή χρώματος στα σημεία κάθε εικόνας που υποδεικνύονται από την προβολή σε αυτήν του αντίστοιχου ορατού σημείου της επιφάνειας, εδώ χρησιμοποιείται η δικυβική παρεμβολή (που επιφέρει εξομάλυνση της υφής). Όμως ο προβληματισμός που αναπτύχθηκε ήταν ότι εάν υπάρχουν σοβαρές διαφορές κλίμακας μεταξύ των εικόνων, το τυπικό παράθυρο εικόνας 4×4 όπου γίνεται αυτή η παρεμβολή χρώματος αντιπροσωπεύει διαφορετικές διαστάσεις στο επίπεδο ορθοπροβολής όσο και στο αντικείμενο. Σε μια τέτοια περίπτωση οι αντίστοιχες παρεμβολές σε διαφορετικές εικόνες θα πραγματοποιούνται με υφή προερχόμενη από κάπως διαφορετικές περιοχές του αντικειμένου (Εικ. 15, αριστερά), με αποτέλεσμα θολότερες απεικονίσεις.

Θεωρήθηκε έτσι λογικό να δοκιμαστεί η χρησιμοποίηση σταθερού παραθύρου $n \times n$ όχι πλέον στην εικόνα αλλά στο επίπεδο προβολής, ώστε να ορίζεται εκεί η αποδεκτή περιοχή παρεμβολής. Η προβολή κάθε φορά αυτού του παραθύρου, δια του 3D μοντέλου, στην εικόνα θα όριζε για κάθε σημείο των εικόνων τα συγκεκριμένα όρια για την παρεμβολή (Εικ. 15, δεξιά). Η διαδικασία αυτή, εκτός από περίπλοκη και χρονοβόρα, αποδείχθηκε ότι τελικά δεν είχε αισθητή ευεργετική επίδραση στην ενάργεια της παραγόμενης απεικόνισης. Κρίθηκε έτσι ότι σε περίπτωση που οι διατιθέμενες εικόνες εμφανίζουν μεταξύ τους μεγάλες διαφορές κλίμακας είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται οι N "καλύτερες" εικόνες βάσει του τοπικού βάρους τους (ο υπολογισμός του εξηγείται σε επόμενη ενότητα). Έστω και κάπως πρωθύστερα (αφού δεν έχει εξηγηθεί ακόμα πώς τελικά πραγματοποιείται

η μίξη χρώματος), η Εικ. 16. παρουσιάζει την ραδιομετρική βελτίωση που προκύπτει κατ' αυτόν τον τρόπο όταν συμμετέχουν εικόνες με πολύ διαφορετικές κλίμακες.

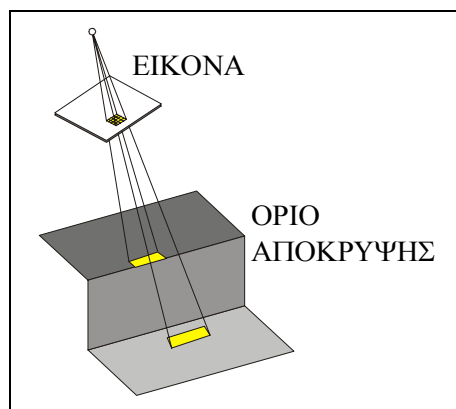


Εικόνα 15. Αριστερά: παρεμβολή χρώματος σε ενιαίο παράθυρο εικόνων με διαφορετική κλίμακα. Δεξιά: παρεμβολή χρώματος σε παράθυρο ορισμένο στο επίπεδο προβολής.



Εικόνα 16. Επάνω: τμήμα ορθοφωτογραφίας παραχθέν με μίξη χρώματος από πολλές εικόνες διαφορετικής κλίμακας. Κάτω: το αποτέλεσμα προκύπτει από την συμμετοχή μόνον των 3 “καλύτερων” εικόνων ανά εικονοψηφίδα ορθοφωτογραφίας.

Πέραν αυτού, αληθεύει εξίσου ότι γειτονικές εικονοψηφίδες δεν αντιστοιχούν κατ' ανάγκην σε γειτονικά σημεία του μοντέλου. Το προφανές παράδειγμα είναι εδώ τα όρια απόκρυψης (Εικ. 17). Δεδομένου πως οι τιμές βάθους για όλες τις εικονοψηφίδες είναι γνωστές (βλ. Εικ. 14), μπορεί κανείς να θέσει ένα κατώφλι διαφοράς βάθους. Εάν διαπιστωθεί ότι μεταξύ των γειτονικών εικονοψηφίδων, στις οποίες θα γίνει παρεμβολή χρώματος, υπάρχουν διαφορές πέραν του κατωφλίου, η συγκεκριμένη εικονοψηφίδα θα μπορούσε να αποκλειστεί. Ας σημειωθεί ότι και οι Früh et al. (2004) επίσης χρησιμοποιούν χάρτες βάθους για να αναγνωρίσουν εικονοψηφίδες ως οριακές εάν οι διαφορές βάθους τους από τις γειτονικές υπερβαίνουν μια τιμή κατωφλίου. Στο πλαίσιο του παρόντος ερευνητικού έργου προτιμήθηκε μια δραστικότερη λύση με χρήση μορφολογικών φίλτρων στα όρια απόκρυψων, όπως θα αναπτυχθεί στα επόμενα.



Εικόνα 17. Σε περιοχές ορίων απόκρυψης, ένα παράθυρο στην εικόνα μπορεί να συμπεριλαμβάνει εντελώς διαφορετικές περιοχές του αντικειμένου.

Τελικά, μετά από την παρεμβολή υψής, διατίθενται “νόμιμες” τιμές χρώματος από διαφορετικές εικόνες για κάθε εικονοψηφίδα της ορθοαναγωγής – εκτός φυσικά εάν το συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας δεν είναι ορατό σε καμία εικόνα. Τέτοιες εικονοψηφίδες της ορθοεικόνας χαρακτηρίζονται με μια συγκεκριμένη τιμή χρώματος. Σε αυτές τις περιοχές της θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές “πλήρωσης κενών” (hole-filling) προκειμένου να εξαχθεί υφή από γειτονική περιοχή του μοντέλου (Debevec et al., 1998, Poulin et al., 1998). Το θέμα αυτό δεν έχει απασχολήσει προς το παρόν την ερευνητική ομάδα.

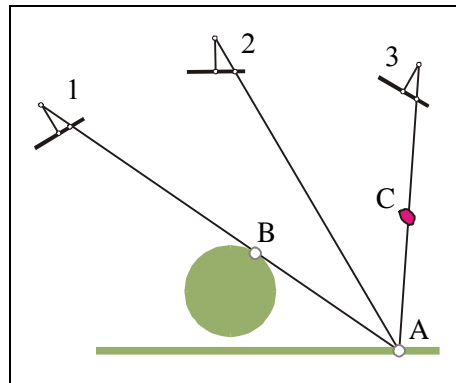
3.2.2 Απόρριψη χονδροειδών σφαλμάτων υψής

Προκειμένου να αποδοθεί τελική υφή στις εικονοψηφίδες της ορθοπροβολής από όλες τις εικόνες που “βλέπουν” το αντίστοιχο σημείο της επιφάνειας του αντικειμένου, πρέπει πρώτα να αναγνωριστούν και να εξαιρεθούν χονδροειδώς αποκλίνουσες τιμές χρώματος. Αυτές μπορεί να οφείλονται σε σφάλματα του προσανατολισμού και ατέλειες της 3D μοντελοποίησης της επιφάνειας, όσο όμως και σε στοιχεία εξαρτώμενα από την γωνία παρατήρησης (view-dependent), όπως είναι τα παρεμβαλλόμενα εμπόδια ή φαινόμενα οφειλόμενα στον φωτισμό, πχ. ανακλάσεις (Poulin et al., 1998; Rocchini et al., 2001). Στην Εικ. 18 φαίνεται ενδεικτικά η περίπτωση εμπόδιου (C), το οποίο θα αποδώσει εσφαλμένη τιμή στον χρωματισμό του σημείου A του αντικειμένου.

Ωστόσο, σημαντικότερο πρόβλημα είναι η εγγύτητα σε περιοχές μη ορατές στον φακό, δηλαδή σε όρια αποκρύψεων της εικόνας (Neugebauer & Klein, 1999; Buehler et al., 2001). Σε παρόμοιες περιπτώσεις μπορούν να εμφανίζονται – ανύπαρκτοι στην πραγματικότητα – “σχηματισμοί” (artefacts), αφού ακόμα και μικρά σφάλματα προσανατολισμού και μοντελοποίησης είναι δυνατόν να προξενούν την εσφαλμένη συμμετοχή υψής από μια αποκρύπτουσα (ή, ανάλογα, αποκρυπτόμενη) περιοχή της επιφάνειας (Εικ. 18).

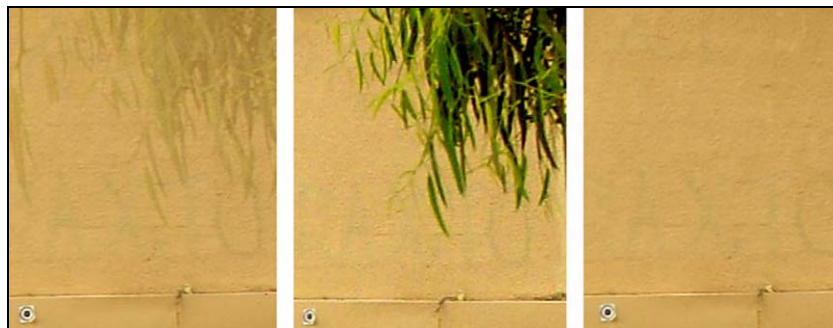
Για να αντιμετωπίσουν τέτοια προβλήματα, οι Bornik et al. (2001) χρησιμοποιούν ένα φίλτρο μεσαίας τιμής (median) για να απομονώσουν ανεπιθύμητες τιμές εκτός ενός εύρους διαφορών που ορίζει ο χρήστης. Αντί για σταθερό κατώφλι, στον αλγόριθμο της ερευνητικής ομάδας αυτός ο “κίνδυνος απόκρυψης” αντιμετωπίζεται κατ’ αρχήν με μια μεταβλητή τιμή. Από όλες τις διαθέσιμες τιμές για κάποια συγκεκριμένη εικονοψηφίδα υπολογίζεται η μέση τιμή μ και η τυπική απόκλιση σ , ώστε πλέον να μπορούν να αποκλείονται τιμές εκτός του εύρους $\mu \pm \sigma$. Στον αλγόριθμο προβλέπεται επιπλέον και η δυνατότητα η τιμή σ να αναφέρεται και στην μεσαία τιμή, η οποία είναι πιο ευαίσθητη στον εντοπισμό ακραίων τιμών. Αυτός ο βασικός στατιστικός έλεγχος έχει αποδειχτεί ιδιαίτερα αποτελεσμα-

τικός στην αναγνώριση και απόρριψη των τιμών χρώματος που αποκλίνουν χονδροειδώς από τις αντίστοιχες τιμές από άλλες εικόνες.



Εικόνα 18. Απόδοση εσφαλμένης τιμής χρώματος στο σημείο A εξαιτίας εγγύτητας σε περιοχή ορίου απόκρυψης B (εικόνα 1) και λόγω εμπόδιου C (εικόνα 3).

Στις Εικ. 19, 20 και 21 φαίνονται παραδείγματα για την απομάκρυνση σφαλμάτων υψής σε πολυεικονικές ορθοαναγωγές. Στην πρώτη περίπτωση ο στατιστικός έλεγχος διόρθωσε τον εσφαλμένο χρωματισμό λόγω των φύλλων του δέντρου (εμπόδιο) σε μία από τις αρχικές εικόνες. Στις άλλες δύο περιπτώσεις μία συγκεκριμένη αρχική εικόνα προξένησε την εμφάνιση λευκού σχηματισμού οφειλόμενου στην χρήση εσφαλμένων τιμών χρώματος από αποκρύπτουσες περιοχές της εικόνας. Ο αλγόριθμος απέκλεισε την συμμετοχή των εικόνων αυτών από την απόδοση υψής στις συγκεκριμένες εικονοψηφίδες της ορθοφωτογραφίας και διόρθωσε το αποτέλεσμα.



Εικόνα 19. Αριστερά: ορθοπροβολή από 7 εικόνες. Μέσον: αρχική εικόνα, στην οποία οφείλεται το λόγω εμπόδιου πρόβλημα χρωματισμού της ορθοφωτογραφίας. Δεξιά: αυτόματη ραδιομετρική διόρθωση της ορθοφωτογραφίας με αποκλεισμό των περιοχών της εικόνας που απεικονίζουν τα φύλλα του δέντρου.

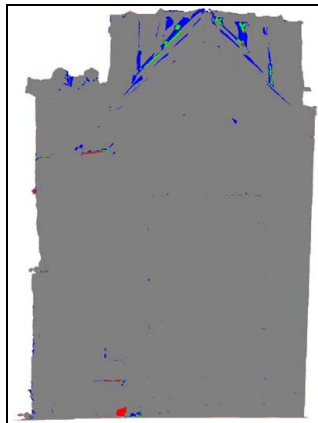
Αλλά τέτοιοι έλεγχοι απαιτούν να υπάρχουν τουλάχιστον τρεις τιμές. Ο αλγόριθμος δημιουργεί έναν “χάρτη κάλυψης” με την κατανομή όσων εικονοψηφίδων της ορθοεικόνας (δηλαδή των αντίστοιχων σημείων του μοντέλου) εμφανίζονται σε 0, 1, 2 και > 2 εικόνες (Εικ. 22). Έτσι μπορεί κανείς να εισαγάγει πρόσθετες εικόνες, εφόσον υπάρχουν. Πάντως, σε περίπτωση εικονοψηφίδων της ορθοαναγωγής για τις οποίες υπάρχουν τιμές χρώματος μόνο από δύο εικόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι χάρτες βάθους τους. Εάν αυτές οι δύο τιμές διαφέρουν περισσότερο από ένα όριο (που καθορίζεται από προηγούμενες τιμές του σ), τότε μπορεί να αποκλειστεί η συμμετοχή της εικόνας εκείνης στην οποία το βάθος της εικονοψηφίδας διαφέρει από εκείνα των γειτονικών της πέραν του ορίου.



Εικόνα 20. Αριστερά: ορθοπροβολή από 7 εικόνες. Μέσον: αρχική εικόνα, στην οποία οφείλεται η λόγω εγγύτητας σε όριο απόκρυψης εμφάνιση λευκού σχηματισμού στην ορθοφωτογραφία. Δεξιά: αυτόματη ραδιομετρική διόρθωση της ορθοφωτογραφίας με αποκλεισμό των εσφαλμένων τιμών χρώματος από την αποκρύπτουσα επιφάνεια.



Εικόνα 21. Παράδειγμα αντίστοιχο με εκείνο της Εικ. 20. Η αρχική εικόνα στο μέσον είναι υπεύθυνη για έναν από τους δύο λευκούς σχηματισμούς (αριστερά), οι οποίοι εξαλείφονται αυτόματα μέσω του ελέγχου της διασποράς των τιμών χρώματος (δεξιά).

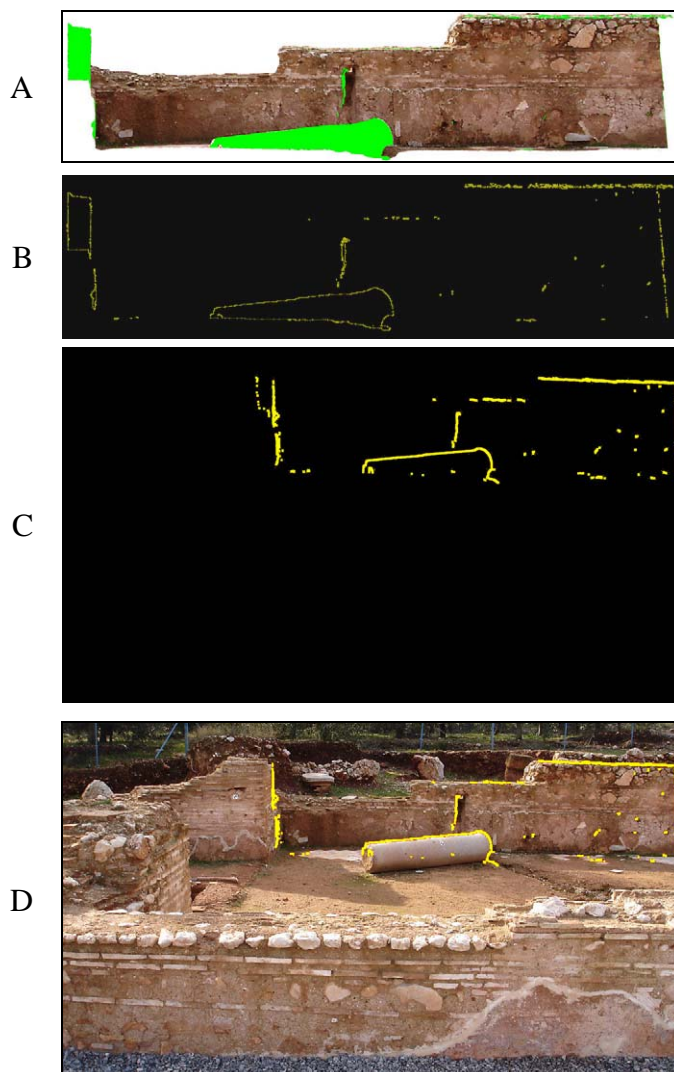


Εικόνα 22. Χάρτης κάλυψης ορθοφωτογραφίας (Καπνικαρέα): περιοχές που δεν φαίνονται σε καμία εικόνα (κόκκινο), που φαίνονται σε 1 εικόνα (πράσινο), σε 2 εικόνες (μπλε) και σε ≥ 3 εικόνες (γκρίζο).

3.2.3 Διεύρυνση των ορίων απόκρυψης

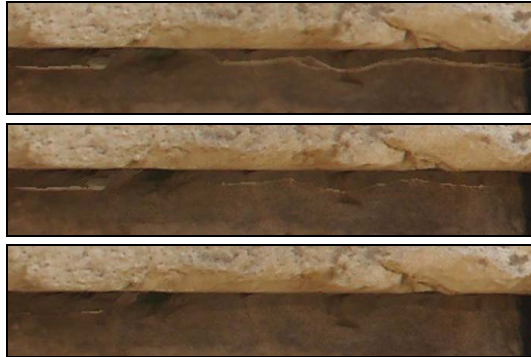
Γενικά, ο βασικός στατιστικός έλεγχος συλλαμβάνει την πλειονότητα των χονδροειδών σφαλμάτων. Αλλά ο έλεγχος αυτός δεν είναι πάντοτε αποτελεσματικός όταν οι τιμές χρώματος από διαφορετικές εικόνες έχουν σημαντική διασπορά. Σε περιπτώσεις τέτοιες είναι σκόπιμο να “προλάβει” κανείς πιθανά σφάλματα υψής με το να αποκλείσει εκ των προτέρων εικονοψηφίδες με τιμές βάθους που διαφέρουν πέραν ενός κατωφλίου από τις γειτονικές τους. Στο πνεύμα αυτό, ο Baumberg (2002) χρησιμοποιεί έναν χάρτη βαρών για κάθε εικόνα, ο οποίος “σβήνει” στα όρια απόκρυψης, ώστε να εξασφαλιστεί η συνέχεια της συνάρτησης βαρών. Ωστόσο, μια αλλαγή στον χάρτη βάθους μιας εικόνας δεν συνεπάγεται κατ’ ανάγκην και παρουσία ορίου απόκρυψης, αφού στα σημεία αυτά μπορεί να υπάρχει μεταβολή και στον ίδιο τον χάρτη βάθους της ορθοφωτογραφίας. Για να αποσαφηνιστεί λοιπόν αυτό θα ήταν απαραίτητη μια σύγκριση με τον χάρτη βάθους της ορθοπροβολής ή τους χάρτες βάθους άλλων εικόνων.

Αντ' αυτού, η ερευνητική ομάδα διατύπωσε και υλοποίησε μια άμεση μονοεικονική αντιμετώπιση των ορίων απόκρυψης, βασισμένη σε μορφολογικούς μετασχηματισμούς εικόνας και αυτόματη εξαγωγή ακμών. Έτσι, για κάθε αρχική εικόνα πραγματοποιείται η αντίστοιχη ορθοαναγωγή, στην οποία οι αποκρύψεις της υπό εξέταση εικόνας διακρίνονται με ένα συγκεκριμένο χρώμα. Η ορθοεικόνα γίνεται κατόπιν δυαδική (binary) ώστε να ξεχωρίσουν αυτές οι αποκρυπτόμενες περιοχές. Εν συνεχεία, στην δυαδική εικόνα εφαρμόζεται τελεστής “ανοίγματος” (opening) ώστε να εξαλειφθούν οι μικρές ομάδες λίγων εικονοψηφίδων. Επόμενο βήμα είναι η αυτόματη εξαγωγή των ακμών απόκρυψης με φίλτρο Laplace. Αυτές οι ακμές (που είναι 3D οντότητες αφού σε κάθε εικονοψηφίδα της ορθοπροβολής αντιστοιχεί ένα σημείο του μοντέλου) προβάλλονται κατόπιν στην αρχική εικόνα και επεκτείνονται με τελεστή “διαστολής” (dilation). Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι αποκρυπτόμενες περιοχές της αρχικής εικόνας έχουν ελαφρώς αυξηθεί. Το εύρος του παραθύρου διαστολής εξαρτάται από την εκτιμώμενη ακρίβεια της 3D μοντελοποίησης και του προσανατολισμού των εικόνων. Έτσι, η συμμετοχή της εικόνας στην τελική ορθοφωτογραφία δεν θα εμπλέξει υφή από τις περιοχές που προστέθηκαν με αυτή την πράξη κατά μήκος των ακμών απόκρυψης. Η Εικ. 23 εικονογραφεί τα βήματα της όλης διαδικασίας.



Εικόνα 23. Διαστολή ορίων απόκρυψης. A: ορθοαναγωγή μιας εικόνας (οι αποκρύψεις με πράσινο). B: οι ακμές απόκρυψης μετά την πράξη “ανοίγματος”. C: προβολή των ακμών απόκρυψης στο επίπεδο της εικόνας D: προβολή των ακμών απόκρυψης στην εικόνα.

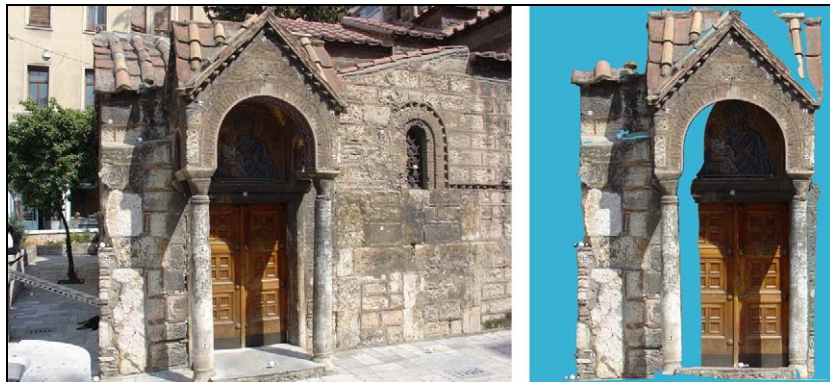
Μετά από αυτά τα βήματα, στην μίξη χρώματος θα συμμετάσχουν όσες “νόμιμες” τιμές περάσουν επιπλέον και τον έλεγχο του $\mu \pm \sigma$. Η περιγραφείσα διαδικασία διαστολής των ακμών απόκρυψης βελτιώνει το τελικό αποτέλεσμα συγκρινόμενη με την απλή εφαρμογή του ελέγχου, όπως δείχνει και το παράδειγμα της Εικ. 24.



Εικόνα 24. Λεπτομέρεια πολυεικονικής ορθοαναγωγής. Πάνω: χωρίς έλεγχο χονδροειδών σφαλμάτων. Μέσον: αποκλεισμός σφαλμάτων με έλεγχο $\mu \pm \sigma$. Κάτω: διαστολή ακμών απόκρυψης και εν συνεχεία αποκλεισμός σφαλμάτων με έλεγχο $\mu \pm \sigma$.

3.2.4 Ορθοαναγωγή εικόνας

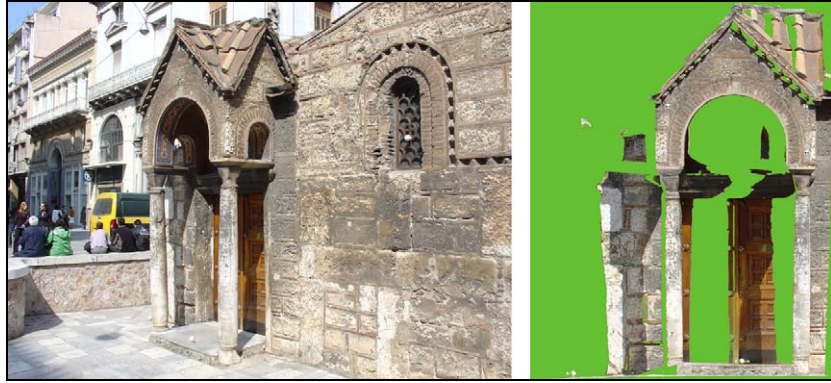
Μετά από την δημιουργία του χάρτη βάθους της ορθοφωτογραφίας και την αναγνώριση των σημείων της που είναι ορατά σε κάθε εικόνα, αλλά και την διαστολή των ακμών απόκρυψης που μόλις αναφέρθηκε, είναι πλέον δυνατή η τελική ορθοαναγωγή κάθε εικόνας ατομικά. Παραδείγματα φαίνονται στις Εικ. 24, 25 και 26. Απόρροια όλων των προηγηθεισών διαδικασιών είναι ότι για κάθε εικονοψηφίδα της ορθοαναγωγής υπάρχει πλέον τελική υφή από όλες τις εικόνες που δικαιούνται να συμμετάσχουν.



Εικόνα 24. Αρχική εικόνα και “αληθής” ορθοαναγωγή.

3.2.5 Επιλογή βαρών και μίξη χρώματος

Όλες οι κατ’ αρχήν αποδεκτές τιμές χρώματος από όλες τις συμμετέχουσες εικόνες αξιοποιούνται προκειμένου να παραχθεί η τελική υφή για κάθε εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας. Δεδομένου ότι κάθε εικόνα “βλέπει” διαφορετικά το σημείο της επιφάνειας, είναι λογικό η συμβολή καθεμιάς να ρυθμίζεται από έναν αντίστοιχο συντελεστή βάρους, δηλαδή η τελική τιμή να προκύπτει ως ο μέσος όρος με βάρη των παρεμβεβλημένων τοπικά τιμών χρώματος.



Εικόνα 25. Αρχική εικόνα και “αληθής” ορθοαναγωγή.



Εικόνα 26. Αρχική εικόνα και “αληθής” ορθοαναγωγή.

Στην απόδοση τιμής ανεξαρτήτως διεύθυνσης (view-independent), οι γεωμετρικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ραδιομετρική ποιότητα της υψής κάθε εικόνας είναι:

- η κλίμακα της εικόνας (απόσταση λήψης και σταθερά της μηχανής)
- η χωρική ανάλυση της εικόνας
- η γωνία παρατήρησης (γωνία σχηματιζόμενη από την τομή της ακτίνας προβολής και το τρίγωνο της επιφάνειας) .

Ο συνδυασμός των δύο πρώτων παραγόντων είναι ισοδύναμος με την *ανάλυση της εικόνας στον χώρο*, εκφραζόμενη από την *εδαφομηφίδα* (groundel) της συγκεκριμένης απεικόνισης.

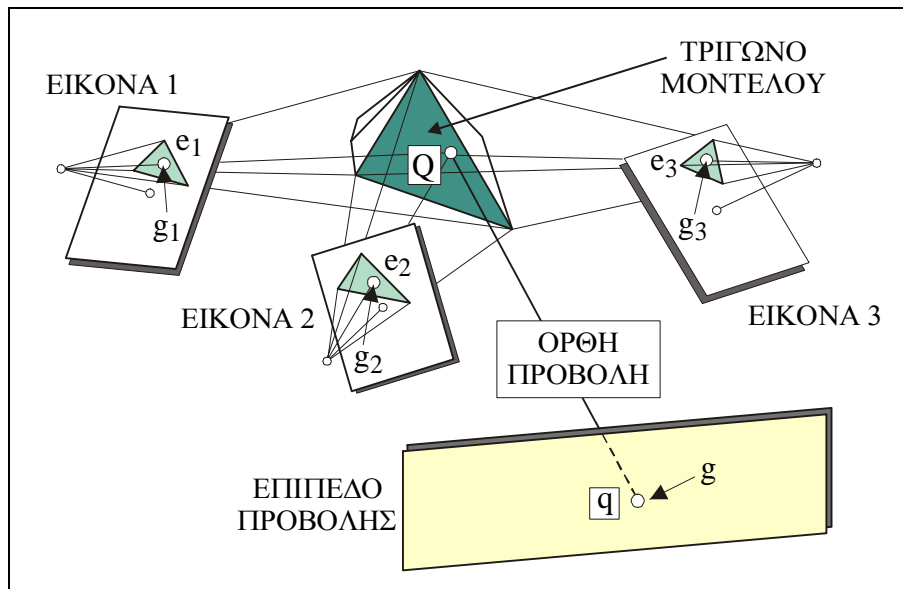
Τοπική συνισταμένη αυτών των παραγόντων είναι το μέγεθος – σε μονάδες pixel – της προβολής του τριγώνου του μοντέλου σε κάθε εικόνα, το οποίο θεωρείται ως η βασική ρεαλιστική ένδειξη για την “ισχύ” της αντίστοιχης τιμής χρώματος (Poulin et al., 1998). Έτσι, με αναφορά και στην Εικ. 27, η συμβολή κάθε συμμετέχουσας τιμής χρώματος g_i έχει βάρος ανάλογο του εμβαδού e_i του αντίστοιχου 2D τριγώνου της εικόνας (αυτό εφαρμόζουν και οι Visponcova et al., 2001). Δηλαδή, η τελική τιμή χρώματος g για κάθε εικονομηφίδα q της ορθοφωτογραφίας, η οποία αντιστοιχεί σε σημείο Q του μοντέλου, είναι:

$$g = \frac{\sum e_i g_i}{\sum e_i}$$

Αυτή είναι η βασική σχέση που χρησιμοποιείται εδώ για την μίξη χρώματος. Στην περίπτωση πάντως που υπάρχουν σημαντικές διαφορετικές κλίμακας, είναι δυνατόν να τροποποιήσει κανείς τα βάρη με δυνάμεις του εμβαδού, προκειμένου να ευνοηθούν περαιτέρω οι “ισχυρότερες” εικόνες. Έτσι, ο αλγόριθμος έχει την δυνατότητα και για επιλογές ό-

πως η ακόλουθη:

$$g = \frac{\sum e_i^2 g_i}{\sum e_i^2}$$



Εικόνα 27. Επιλογή βαρών για την μίξη χρώματος.

3.2.6 Η επίδραση της ακτινικής διαστρώσης του φακού

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι, προφανώς, η επίδραση της ακτινικής διαστρώσης των φακών δεν μπορεί να θεωρηθεί απλώς ως χονδροειδές σφάλμα χρώματος, το οποίο θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με κάποιον στατιστικό έλεγχο. Η επίδρασή της πρέπει απαραίτητα να διορθωθεί, γιατί σε αντίθετη περίπτωση – ιδίως σε ευρυγώνιους φακούς που χρησιμοποιούνται συχνότερα, αλλά και γενικότερα – θα έχει καταστροφικά αποτελέσματα στην ποιότητα της απεικόνισης. Η διαστρώση πρέπει δηλαδή να είναι γνωστή εκ των προτέρων (κατά προτίμηση από ενιαία συνόρθωση δέσμης) και η διόρθωσή της να συμμετέχει στην προβολή των σημείων του 3D μοντέλου στην εικόνα. Η μεγάλη σημασία που έχει η διόρθωση της ακτινικής διαστρώσης σε μια πολυεικονική απόδοση υψής εικονογραφείται στις Εικ. 28 και 29.



Εικόνα 28. Λεπτομέρειες ορθοφωτογραφιών από 7 εικόνες χωρίς και με διόρθωση της ακτινικής διαστρώσης του φακού.



Εικόνα 29. Λεπτομέρειες από άλλη ορθοφωτογραφία από 7 εικόνες χωρίς και με διάθροιση της ακτινικής διαστροφής του φακού.

3.3 Άλλες προβολές

Η όλη διαδικασία αναλύθηκε σε σχέση με την ορθοπροβολή, δηλαδή τον βασικότερο γεωμετρικό μετασχηματισμό στην Φωτογραμμετρία για τις περιπτώσεις μη επίπεδου αντικειμένου. Ωστόσο όλα τα βήματα – έλεγχος ορατοτήτων στην προβολή και τις εικόνες, αναγνώριση χονδροειδών σφαλμάτων, μίξη χρώματος κ.λπ. – δεν αφορούν μόνο την ορθοαναγωγή αλλά και κάθε άλλη προβολή επιφανειών. Στον αλγόριθμο της ερευνητικής ομάδας έχει προβλεφθεί η δυνατότητα για δύο τέτοιες προβολές.

3.3.1 Τομές

Μια ενδιαφέρουσα δυνατότητα του αλγορίθμου είναι ότι, υπό μία έννοια, μπορεί να φέρνει αποκρυπτόμενες περιοχές στο προσκήνιο. Υπό την προϋπόθεση ότι το μοντέλο είναι όντως μια πλήρως 3D αναπαράσταση και υπάρχει η αναγκαία υφή, μπορούν να δημιουργούνται τομές με απλή κατωφλίωση του βάθους και έτσι να αποκαλύπτονται περιοχές του αντικειμένου που δεν είναι ορατές σε μια κανονική ορθοφωτογραφία. Σχετικά παραδείγματα δίδονται στην συνέχεια.

3.3.2 Προοπτικά

Μια ακόμα επιλογή του προγράμματος είναι ότι μπορεί επίσης να συνθέτει προοπτικές απεικονίσεις. Οι νέες αυτές εικόνες είναι κεντρικές προβολές του μοντέλου της επιφάνειας με ελεύθερα επιλεγμένες παραμέτρους για την γεωμετρία της φανταστικής μηχανής και τον εξωτερικό προσανατολισμό της. Η διαδικασία παραγωγής προοπτικών είναι παρόμοια με την δημιουργία του χάρτη βάθους μιας εικόνας.

Δίχως να υπεισέλθει κανείς σε λεπτομέρειες (σχετικά βλ. Bräuer-Burchardt and Voss, 2000), πρέπει να σημειώσει ότι εάν ο φακός της φανταστικής μηχανής θεωρηθεί απαλλαγμένος ακτινικής διαστροφής η διαδικασία είναι απλούστερη, ενώ για την δημιουργία μιας “πραγματικής” εικόνας είναι απαραίτητο να επανυπολογιστεί η κατανομή της ακτινικής διαστροφής. Παράδειγμα για την σύνθεση κεντρικής προβολής θα παρουσιαστεί στην συνέχεια.

3.4 Το λογισμικό της ερευνητικής ομάδας

Όλες οι διαδικασίες που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα έχουν προγραμματιστεί από την ερευνητική ομάδα. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε στην διάρκεια του παρόντος ερευνητικού έργου στο πλαίσιο του “Αρχιμήδη II” στηρίχθηκε σε προϋπάρχοντα κώδικα της ερευνητικής ομάδας. Τον κώδικα αυτόν αποτελούσαν ανεξάρτητες ρουτίνες σε γλώσσα προγραμματισμού ANSI C, των οποίων η εκτέλεση επραγματοποιείτο από το

command line (DOS) και η μεταξύ τους επικοινωνία γινόταν μέσω αρχείων ASCII. Το σύνολο του κώδικα γράφτηκε εκ νέου σε γλώσσα προγραμματισμού C++ (βασικές ρουτίνες) και C# (GUI) στο περιβάλλον του Visual Studio (.net). Οι επιμέρους εντολές του προγράμματος οργανώθηκαν σε *classes* και υιοθετήθηκε η λογική κώδικα *managed*. Ταυτόχρονα, έγιναν ορισμένες αλλαγές στον βασικό κώδικα με σκοπό την βελτίωση της ταχύτητας και την καλύτερη διαχείριση της μνήμης (όπως ανάγνωση και αποθήκευση αρχείων *binary*), προστέθηκαν νέες ρουτίνες που επεκτείνουν τις δυνατότητες του προγράμματος και δημιουργήθηκε περιβάλλον γραφικών (Graphical User Interface).

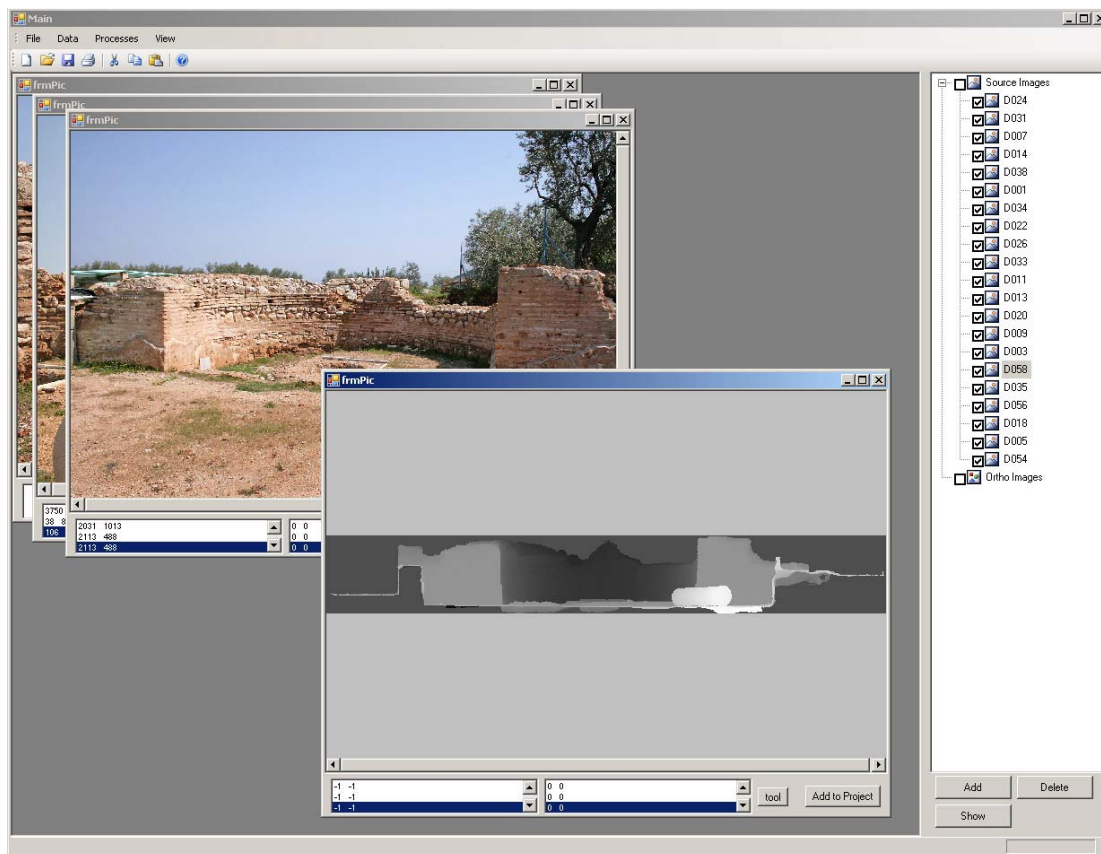
Μια σημαντική αλλαγή είναι εκείνη του αλγορίθμου ταχείας εύρεσης των τριγώνων του 3D μοντέλου που, προβαλλόμενα στο επίπεδο προβολής, περιέχουν κάθε εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας. Ο αλγόριθμος βασίζεται, όπως έχει αναφερθεί, στην μέθοδο “scanline conversion” από τη βιβλιογραφία των Γραφικών Υπολογιστή, απαιτεί λιγότερη μνήμη και είναι ταχύτερος. Ακόμα, αναπτύχθηκε αλγόριθμος υπολογισμού χάρτη βάθους της ορθοφωτογραφίας και αποθήκευσής του σε μορφή εικόνας. Ανάλογη διαδικασία εφαρμόζεται και για τις αρχικές εικόνες.

Επίσης, έγιναν αλλαγές στον αλγόριθμο υπολογισμού των τιμών χρώματος της τελικής ορθοφωτογραφίας από τις επιμέρους ορθοφωτογραφίες κάθε εικόνας (μίξη εικόνων). Η συμμετοχή τους καθορίζεται με βάρος το εμβαδόν ή και το τετράγωνο του εμβαδού των ορατών τριγώνων. Ο στατιστικός έλεγχος για την εύρεση αποκλινοσών τιμών χρώματος γίνεται πλέον με υπολογισμό της τυπικής απόκλισης είτε ως προς τον μέσο όρο είτε ως προς την μεσαία τιμή. Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα να επιλέγεται ο μέγιστος αριθμός εικόνων που θα συνεισφέρουν χρώμα σε κάθε εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας.

Συμπληρωματικά προς τον βασικό στατιστικό έλεγχο, όπως έχει ήδη σημειωθεί, αναπτύχθηκε αλγόριθμος με χρήση μορφολογικών φίλτρων ώστε να εντοπίζονται αυτόματα επί των αρχικών εικόνων περιοχές κοντά σε αποκρύψεις. Αρχικά, για κάθε εικόνα δημιουργείται η αντίστοιχη δυαδική εικόνα των αποκρύψεων στο επίπεδο της ορθοφωτογραφίας. Οι πολύ μικρές περιοχές αποκρύψεων εξαλείφονται με φίλτρο “ανοίγματος” (erode – dilate) με μέγεθος παραθύρου οριζόμενο από τον χρήστη. Στην συνέχεια εντοπίζονται τα όρια των περιοχών απόκρυψης μέσω φίλτρου δεύτερης παραγώγου (Laplace). Οι προκύπτουσες τρισδιάστατες ακμές προβάλλονται στην αντίστοιχη εικόνα και διευρύνονται με φίλτρο “διαστολής”, ορίζοντας περιοχές που δεν θα συνεισφέρουν χρώμα στην τελική ορθοαναγωγή.

Όλες οι επιμέρους διαδικασίες του προγράμματος εντάχθηκαν σε ενιαίο και φιλικό προς τον χρήστη γραφικό περιβάλλον εργασίας (GUI). Μέσω αυτού ορίζει κανείς και διαχειρίζεται τις εικόνες (εργαλεία *zoom*, *pan*, ενεργοποίηση και απενεργοποίηση εικόνας), το 3D μοντέλο τριγώνων (μορφή ASCII ή STL), εισάγονται οι τιμές των στοιχείων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού, και επιλέγονται οι βασικές παράμετροι του προγράμματος: μέγεθος εδαφοψηφίδας, διεύθυνση και θέση επιπέδου προβολής, μέγεθος παραθύρου για τους μορφολογικούς τελεστές, μέγιστος αριθμός εικόνων, επιλογή μέσου όρου ή μεσαίας τιμής και συντελεστής k της τυπικής απόκλισης (προκειμένου να μπορεί να οριστεί και εύρος $\pm k\sigma$), επιλογή βάθους βάσει του εμβαδού ή του τετραγώνου του εμβαδού κ.λπ. Από αντίστοιχα menu επιλέγεται η δημιουργία ορθοφωτογραφίας, προοπτικής εικόνας ή τομής από τις ενεργές εικόνες.

Τα δεδομένα, οι παράμετροι και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε ενιαίο *project* μέσω αρχείων INI. Το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού φαίνεται στην Εικ.30.



Εικόνα 30. Περιβάλλον εργασίας του λογισμικού που ανέπτυξε η ερευνητική ομάδα.

4. ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Στα προηγηθέντα έχουν ήδη παρουσιαστεί επιμέρους παραδείγματα από εφαρμογές με πραγματικά δεδομένα, που σκοπό είχαν να εικονογραφήσουν διάφορες τεχνικές και χαρακτηριστικά του αλγορίθμου. Εδώ θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα στοιχεία των πειραματικών εφαρμογών που έγιναν με στόχο τον έλεγχο και την αξιολόγηση του αλγορίθμου που ανέπτυξε και υλοποίησε η ερευνητική ομάδα. Παράλληλα, θα σχολιαστούν και ορισμένα άλλα ζητήματα με άμεση πρακτική αλλά και γενικότερη θεωρητική σημασία, όπως τα αναφερόμενα στον φωτοτριγωνισμό και την αυτοβαθμονόμηση της μηχανής.

4.1 Εφαρμογή 1

Αντικείμενο της πρώτης εφαρμογής ήταν η είσοδος της βυζαντινής εκκλησίας της Καπνικαρέας στην Αθήνα. Το μνημείο, χάρη κυρίως στις κολώνες, προσφερόταν για δοκιμές με τον αλγόριθμο που ελέγχει τις ορατότητες. Η σάρωση και φωτογράφησή του, καθώς και οι πρώτοι πειραματισμοί, έγιναν πριν από την έναρξη του ερευνητικού έργου. Όλες οι τροποποιήσεις που έγιναν στον αλγόριθμο ελέγχθηκαν πρώτα με αυτά τα δεδομένα.

- Σάρωση και μοντελοποίηση

Η σάρωση της επιφάνειας πραγματοποιήθηκε με επίγειο σαρωτή Mensi GS200, ο οποίος σαρώνει με συχνότητα 5000 σημεία/sec και κατακόρυφο οπτικό πεδίο 60°. Έγιναν 3 διαφορετικές σαρώσεις από ~5 m (τυπική απόκλιση ± 1.4 mm). Η ένταξη στο γεωδαιτικό σύ-

στημα, βάσει 6 σφαιρών, είχε ακρίβεια εκτιμώμενη σε ± 2.5 mm. Συνολικά συνελέγησαν ~ 7 εκ. σημεία της επιφάνειας. Το τελικό “αποδεκατισμένο” 3D μοντέλο περιελάμβανε ~ 1 εκ. σημεία και ~ 3 εκ. τρίγωνα. Η Εικ. 31 δείχνει μια άποψη του σκιασμένου μοντέλου.



Εικόνα 31. Φωτοσκιασμένο 3D μοντέλο της πρώτης εφαρμογής.

• *Λήψη εικόνων και φωτοτριγωνισμός*

Οι λήψεις έγιναν με ψηφιακή μηχανή 5 MegaPixel (2592×1944). Επελέγησαν 7 εικόνες (Εικ. 32) που είχαν ίδιο εσωτερικό προσανατολισμό. Χρησιμοποιήθηκαν 18 προσημασμένα φωτοσταθερά, που σχεδόν όλα φαίνονταν σε όλες τις εικόνες.

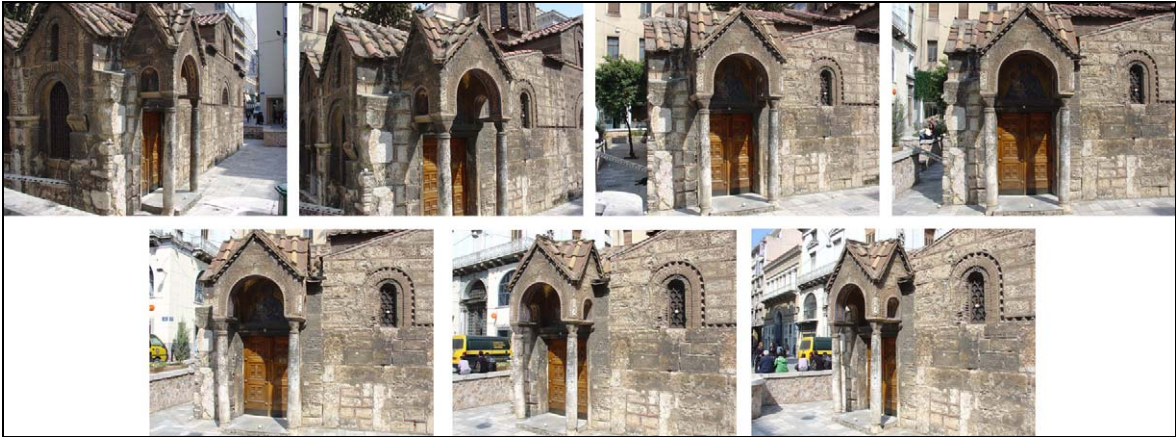
Με ίδιον λογισμικό πραγματοποιήθηκε συνόρθωση δέσμης με αυτοβαθμονόμηση, συμπεριλαμβανομένων των συντελεστών k_1 , k_2 του πολυωνύμου της ακτινικής διαστρόφης. Η ακρίβεια της συνόρθωσης ήταν υψηλή, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα του εσωτερικού προσανατολισμού (βλ. Πίνακα 1). Χάρη στα προσημασμένα και μετρημένα με ακρίβεια φωτοσταθερά η απόκλιση σε αυτά ήταν $rms = 0.3$ mm (το τυπικό σφάλμα των σημείων σύνδεσης ήταν $\sigma = \pm 1.3$ mm). Ο φακός έχει πολύ σημαντική ακτινική διαστρόφη, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικ. 33.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα συνόρθωσης δέσμης με 7 εικόνες $\sigma_o = \pm 0.28$ pixel				
c (pixel)	x_o (pixel)	y_o (pixel)	$k_1 \times 10^{-8}$ (pix ⁻²)	$k_2 \times 10^{-15}$ (pix ⁻⁴)
2573.94 ± 1.36	10.27 ± 1.03	7.35 ± 0.87	-2.98 ± 0.04	4.90 ± 0.19

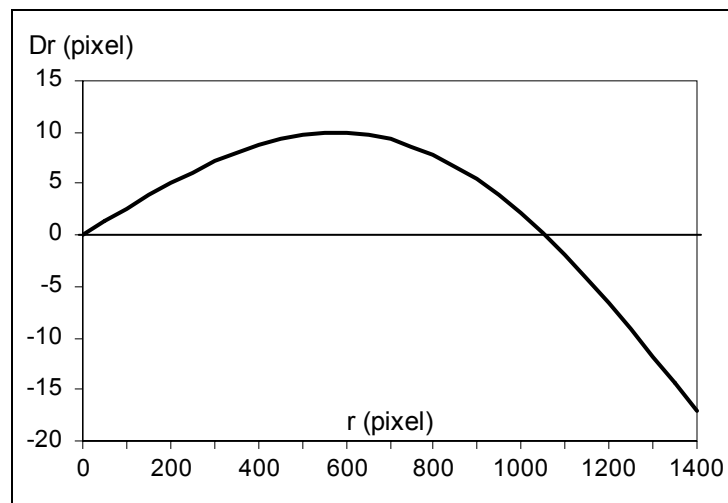
• *Δημιουργία νέων εικόνων*

Με αυτά τα δεδομένα εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού οι εικόνες χρησιμοποιήθηκαν για να παραχθούν νέες προβολές του μοντέλου. Οι εικόνες είχαν ληφθεί υπό ίδιες συνθήκες φωτισμού, συνεπώς δεν υπήρχαν ουσιαστικές ραδιομετρικές διαφορές. Ως επίπεδο προβολής επελέγη το επίπεδο της πρόσοψης και, δεδομένου ότι η ανάλυση των εικόνων επαρκούσε, επελέγη διάσταση εδαφοψηφίδας 2 mm (δηλαδή κατάλληλη για προβολή σε κλίμακα 1:20).

Η τελική, αυτόματα παραχθείσα, ορθοφωτογραφία παρουσιάζεται στην Εικ. 34 (αριστερά). Το αποτέλεσμα είναι απολύτως ικανοποιητικό. Η βασική ατέλεια είναι μικρά κενά λόγω έλλειψης υψής (οι λήψεις έγιναν από το έδαφος) ή 3D πληροφορίας. Επίσης, στην Εικ. 34 (δεξιά) φαίνεται μια κατακόρυφη τομή που προέκυψε με αξιοποίηση ολόκληρης της διατιθέμενης πληροφορίας, συμπεριλαμβανομένων και τμημάτων του αντικειμένου τα οποία δεν είναι ορατά στην κυρίως ορθοπροβολή (πχ. τμήμα των ασφίδων).



Εικόνα 32. Οι επτά εικόνες της πρώτης εφαρμογής.



Εικόνα 33. Βαθμονομημένη καμπύλη ακτινικής διαστρώσης φακού.

Τέλος, στην Εικ. 35 φαίνεται αριστερά μια από τις αρχικές εικόνες, και δεξιά η αντίστοιχη συνθετική εικόνα, η οποία δημιουργήθηκε με τα στοιχεία εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού της αρχικής εικόνας και συμμετοχή μόνο των υπόλοιπων 6 εικόνων. Η ουσιαστική διαφορά τους είναι ότι η συνθετική εικόνα είναι απαλλαγμένη ακτινικής διαστρώσης.

Έχει υποστηριχτεί, βάσιμα, ότι η μίξη χρώματος ενδέχεται να επιφέρει μια κάποια θόλωση στην νέα εικόνα (El-Hakim et al., 2003b). Εδώ, όπου οι εικόνες είχαν καλή ραδιομετρία και οι προσανατολισμοί ήταν γνωστοί με ακρίβεια, βλέπει κανείς ότι η συνθετική εικόνα εμφανίζεται εξίσου ευκρινής με την αρχική.



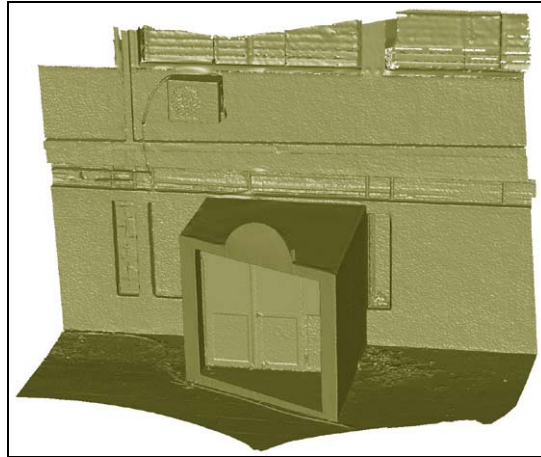
Εικόνα 34. Ορθοφωτογραφία και κατακόρυφη τομή.



Εικόνα 35. Αρχική εικόνα (αριστερά) και αντίστοιχη συνθετική εικόνα (δεξιά).

4.2 Εφαρμογή 2

Αντικείμενο της δεύτερης εφαρμογής ήταν μία από τις εισόδους του Κτιρίου Τοπογράφων στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Στο αντικείμενο, που επίσης έχει έντονες διαφορές στο βάθος, έγιναν δύο σαρώσεις με τον σαρωτή laser CyraX 2500 και ανάλυση ~6 mm. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, εδώ δεν χρησιμοποιήθηκαν γεωδαιτικά μετρημένα φωτοσταθερά για να διαπιστωθεί εάν είναι δυνατόν να αντληθεί η πληροφορία γεωδαιτικού ελέγχου απευθείας από τα νέφη σημείων. Έτσι, αναγνωρίστηκαν 10 σημασμένα σημεία στις εικόνες έντασης (intensity images) και η μέση απόκλιση μεταξύ των δύο σαρώσεων ήταν 4 mm. Το τελικό 3D μοντέλο, που φαίνεται στην Εικ. 36, περιορίστηκε στα 1.2 εκ. τρίγωνα.



Εικόνα 36. Φωτοσκιασμένο 3D μοντέλο της δεύτερης εφαρμογής.

Η λήψη των 7 εικόνων (που φαίνονται στην Εικ. 37) έγινε με την ίδια μηχανή και η συνόρθωση δέσμης έδωσε τα αποτελέσματα του Πίνακα 2, ενώ η μέση τετραγωνική απόκλιση στα φωτοσταθερά και το τυπικό σφάλμα των σημείων σύνδεσης ήταν περί το 1.5 mm.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα συνόρθωσης δέσμης με 7 εικόνες $\sigma_o = \pm 0.25$ pixel				
c (pixel)	x_o (pixel)	y_o (pixel)	$k_1 \times 10^{-8}$ (pix ⁻²)	$k_2 \times 10^{-15}$ (pix ⁻⁴)
2575.78 ± 2.30	20.93 ± 2.11	16.17 ± 3.74	-3.37 ± 0.07	5.77 ± 0.26



Εικόνα 37. Οι επτά εικόνες της δεύτερης εφαρμογής.

Τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά με εκείνα της προηγούμενης εφαρμογής. Η σταθερά της μηχανής διαφέρει κατά 0.7%, ενώ η καμπύλη ακτινικής διαστροφής διαφέρει λίγο πάνω από μία εικονοψηφίδα στα άκρα της εικόνας. Ουσιαστικές διαφορές εμφανίζονται στην θέση του πρωτεύοντος σημείου, αλλά αυτό είναι γενικά αναμενόμενο (οι Ruiz et al., 2002, επισημαίνουν ότι τυπικοί αλγόριθμοι βαθμονόμησης εφαρμοζόμενοι σε διαφορετικά σύνολα εικόνων γενικά επιδεικνύουν αποδεκτή σταθερότητα στην σταθερά της μηχανής, ενώ η θέση του πρωτεύοντος σημείου εκτιμάται με μεγάλη διακύμανση). Το σημαντικό ωστόσο, όπως θα αναφερθεί αναλυτικότερα στην επόμενη εφαρμογή, είναι η γενική συμφωνία των δεδομένων της συνόρθωσης μεταξύ τους. Η συμφωνία αυτή είναι καλή, όπως φαίνεται και από το τελικό αποτέλεσμα της ορθοαναγωγής που παρουσιάζεται στην Εικ. 38.



Εικόνα 38. Ορθοφωτογραφία της δεύτερης εφαρμογής.

4.3 Εφαρμογή 3

- Αντικείμενο, 3D μοντέλο και λήψεις

Στόχος αυτής της εφαρμογής ήταν να ελεγχθεί το πρόγραμμα σε πρακτικές συνθήκες απαιτητικότερες από τις προηγούμενες. Αντικείμενο ήταν εδώ ένας αρχαιολογικός χώρος, ρωμαϊκής περιόδου, στην Αρκαδία. Τα επιλεγμένα τμήματά του είχαν ιδιαίτερα μεγάλες διαφορές βάθους, συνδυαζόμενες με σημαντικά προβλήματα αποκρύψεων. Επιπλέον – λόγω ακριβώς των έντονων διαφορών βάθους – έπρεπε να ληφθούν εικόνες με έντονες διαφορές κλίμακας και μεγάλες στροφές προκειμένου να εξασφαλιστούν κατά το δυνατόν ομοιόμορφα δεδομένα υψής, γεγονός που με την σειρά του θέτει προβλήματα στην ενιαία συνόρθωση των εικόνων.

Το αντικείμενο σαρώθηκε με σαρωτή Mensi GS200 σε 9 σαρώσεις που είχαν ανάλυση 1 cm. Προκειμένου να ξεπεραστούν ορισμένες δυσκολίες που προέκυψαν στον αμοιβαίο προσανατολισμό των ανεξάρτητων νεφών σημείων με το διαθέσιμο λογισμικό, εφαρμόστηκε μετασχηματισμός ομοιότητας

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{R}_k \mathbf{x}_{ik} + \mathbf{t}_k$$

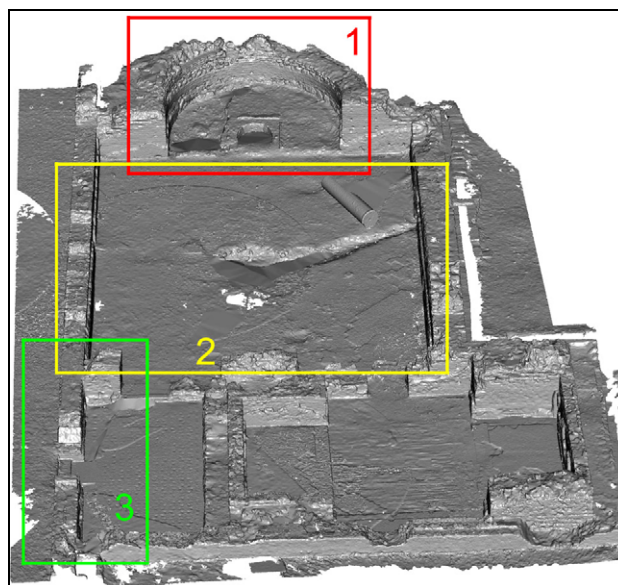
για να μετασχηματιστούν, σε ενιαία επίλυση, όλα τα φωτοσταθερά και σημεία “σύνδεσης” \mathbf{x}_i των σαρώσεων k στο γεωδαιτικό σύστημα (\mathbf{X}_i) μέσω στροφών \mathbf{R}_k και μεταθέσεων \mathbf{t}_k κάθε επιμέρους συστήματος σάρωσης (η ακρίβεια της λύσης ήταν ± 7 mm).

Επελέγησαν τα τρία τμήματα (1, 2, 3) του 3D μοντέλου που φαίνονται στην Εικ. 39. Τα τμήματα αυτά περιελάμβαναν 3.5, 3.6 and 0.8 εκ. τρίγωνα, αντίστοιχα.

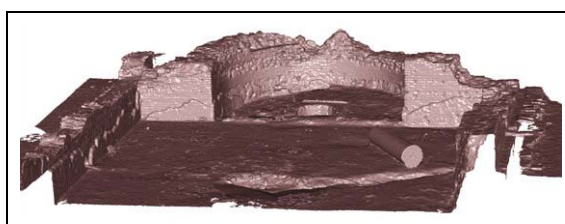
Στο τμήμα 1 περιλαμβάνεται επιφάνεια ημικυλινδρικού σχήματος (Εικ. 40), η οποία βέβαια, λόγω των κλίσεων στα άκρα, είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη επιφάνεια για κάθε αλγόριθμο ορθοαναγωγής. Για να εξασφαλιστεί ότι οι διαφορετικές περιοχές δεν θα πάρουν υφή με πολύ ανόμοια ανάλυση, οι λήψεις πραγματοποιήθηκαν με σημαντικές διαφορές κλίμακας και στροφές.

Ακόμα, προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης, χρησιμοποιήθηκαν δύο ομάδες εικόνων από διαφορετικές μηχανές: η πρώτη ομάδα είχε ληφθεί με μηχανή 7.2 Megapixel και περιελάμβανε 16 εικόνες (Εικ. 41), στην δεύτερη περίπτωση οι 23 εικόνες

προήλθαν από μηχανή 10 Megapixel (Εικ. 42). Η γεωμετρία των λήψεων φαίνεται στην Εικ. 43.



Εικόνα 39. Τα τρία τμήματα του 3D μοντέλου της τρίτης εφαρμογής.



Εικόνα 40. Τμήμα 1 του 3D μοντέλου.

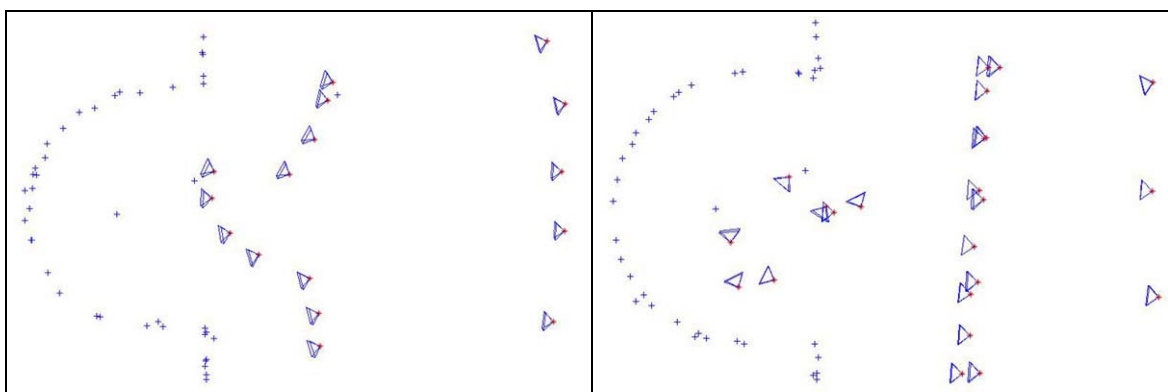


Εικόνα 41. Πρώτη ομάδα εικόνων του τμήματος 1 του μοντέλου.

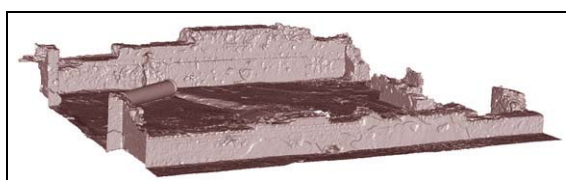
Το τμήμα 2 περιλάμβανε κυρίως δύο παράλληλα επίπεδα, τα οποία απείχαν αρκετά μεταξύ τους (Εικ. 44). Χρησιμοποιήθηκαν 17 εικόνες από την μηχανή 7.2 Megapixel, επίσης με πολύ διαφορετικές αποστάσεις λήψεων. Οι εικόνες και η γεωμετρία των λήψεων φαίνονται στην Εικ. 45.



Εικόνα 42. Δεύτερη ομάδα εικόνων του τμήματος 1 του μοντέλου.



Εικόνα 43. Γεωμετρία λήψης πρώτης και δεύτερης ομάδας εικόνων (τμήμα 1 μοντέλου).



Εικόνα 44. Τμήμα 2 του 3D μοντέλου.

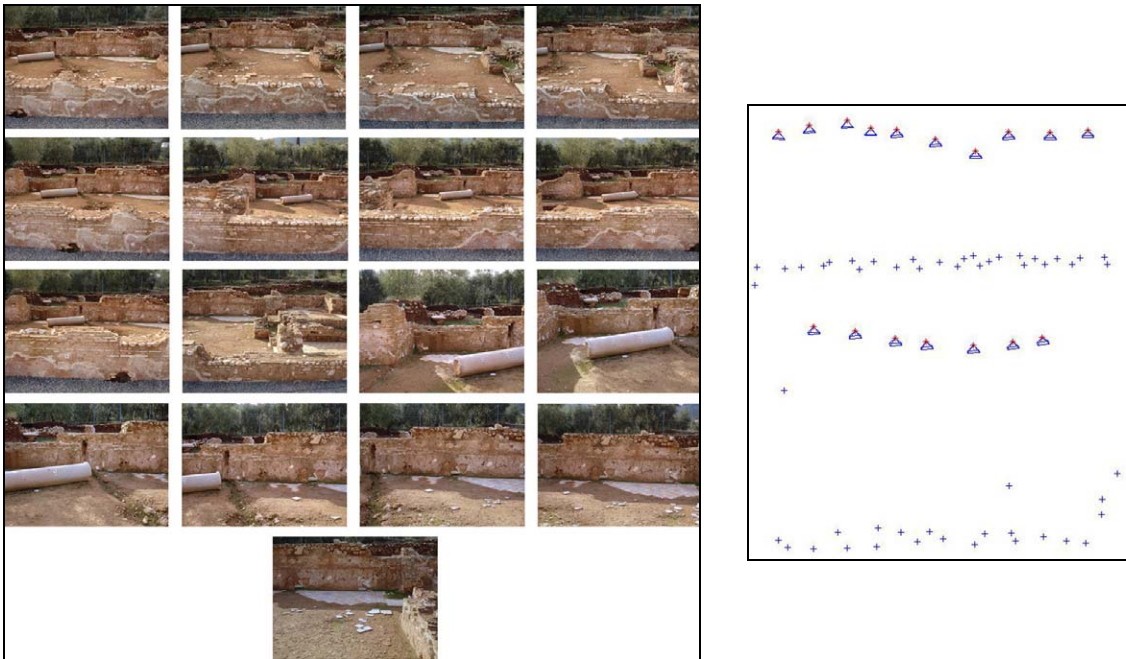
Τέλος, το τμήμα 3 ήταν πίο απλό, αλλά περιελάμβανε έναν τοίχο κάθετο στην όψη (Εικ. 46). Οι 10 εικόνες ελήφθησαν με την ίδια μηχανή και φαίνονται στην Εικ. 47.

- Φωτοτριγωνισμοί

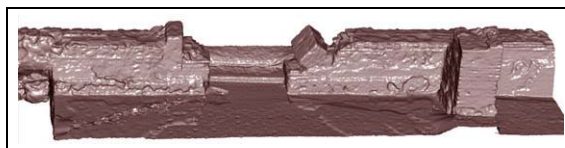
Στην απόδοση υφής η συμφωνία των τιμών χρώματος που προέρχονται από τις διαφορετικές εικόνες είναι προφανώς κρίσιμη απαίτηση. Αυτό ισχύει ακόμα περισσότερο όταν ζητείται να παραχθούν προβολές μεγάλης κλίμακας με πολυεικονική μίξη υφής. Έτσι, πρέπει απαραίτητως να εξασφαλιστεί ότι όλες οι εικόνες έχουν συνδεθεί αξιόπιστα τόσο μεταξύ τους όσο και με το 3D μοντέλο της επιφάνειας – γεγονός που υπονοεί ότι όλες οι εικόνες που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να συμμετάσχουν σε ενιαία συνόρθωση δέσμης με αυτοβαθμονόμηση.

Σαφώς, οι διατάξεις εικόνων που είναι κατάλληλες για να εξασφαλίσουν καλή υφή

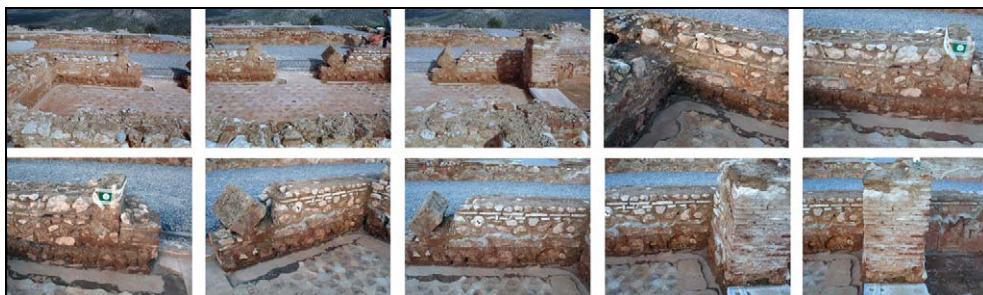
για ολόκληρο το αντικείμενο δεν αντιπροσωπεύουν κατ' ανάγκην και ιδανικές γεωμετρίες για την συνόρθωση. Τέτοιες διατάξεις μπορεί πράγματι να είναι, από την άποψη αυτή, αδύνατες – πχ. επειδή δεν υπάρχει σύγκλιση μεταξύ των αξόνων λήψης, επειδή έχουν ληφθεί παρόμοιες λωρίδες εικόνων από διαφορετικές αποστάσεις απλώς για να εξασφαλιστεί παρόμοια ανάλυση στα διαφορετικά βάθη (πράγμα που συνεπάγεται οξείες γωνίες αλληλοτομίας των ακτίνων προβολής) ή επειδή η διακύμανση του αναγλύφου είναι περιορισμένη. Σε παρόμοιες περιπτώσεις είναι αναπόφευκτο ότι οι εκτιμήσεις των τιμών των παραμέτρων θα έχουν μικρή ακρίβεια (μεγάλες συσχετίσεις). Τέτοιες εκτιμήσεις μπορεί, καθαυτές, να μην είναι διόλου αξιόπιστες (πχ. ως στοιχεία βαθμονόμησης της μηχανής), ωστόσο αντιπροσωπεύουν την βέλτιστη συμφωνία μεταξύ των διαθέσιμων δεδομένων.



Εικόνα 45. Εικόνες και γεωμετρία λήψης για το τμήμα 2 του μοντέλου.



Εικόνα 46. Τμήμα 3 του 3D μοντέλου.



Εικόνα 47. Εικόνες τμήματος 3 του μοντέλου.

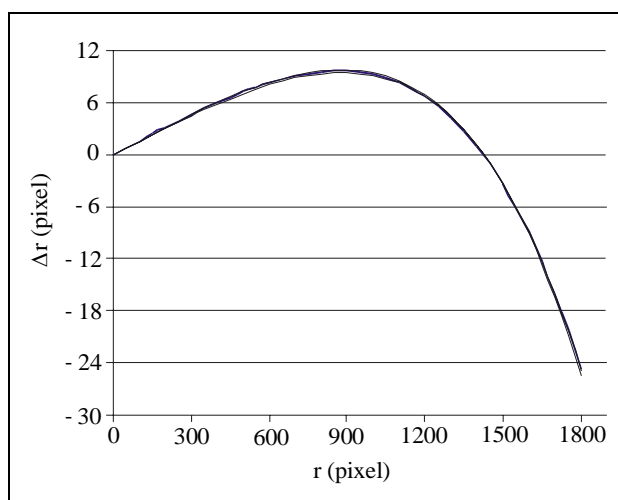
Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό στο παράδειγμα των τριών ομάδων εικόνων – μιας για κάθε τμήμα του μοντέλου – που προέρχονται από την ίδια μηχανή. Αποτελέσματα για τις συνορθώσεις τους φαίνονται στον Πίνακα 3. Οι εκτιμήσεις για την θέση του πρωτεύοντος σημείου διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των φωτοτριγωνισμών και έχουν μεγάλη αβεβαιότητα. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για το τμήμα 3, όπου επιπλέον το ανάγλυφο της επιφάνειας είναι περιορισμένο. Στην τελευταία αυτή περίπτωση, η σταθερά της μηχανής εκτιμάται με τυπικό σφάλμα 5%.

Ωστόσο, καίτοι τα αποτελέσματα αυτά δεν υποδηλώνουν αξιόπιστη βαθμονόμηση μηχανής, τούτο δεν επηρέασε αισθητά τις αλληλοτομίες των ακτίνων, όπως διαπιστώθηκε στην διαδικασία μίξης υφής.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα συνόρθωσης δέσμης			
	τμήμα 1	τμήμα 2	τμήμα 3
# εικόνων	17	16	10
σ_0 (pixel)	0.54	0.61	0.58
c (pixel)	3418.4 ± 4.9	3415.2 ± 6.3	3409.7 ± 17.4
x_0 (pixel)	6.6 ± 3.1	2.6 ± 3.2	57.9 ± 10.3
y_0 (pixel)	13.5 ± 7.3	3.7 ± 4.3	26.4 ± 13.3
$k_1 \times 10^{-9}$ (pix ⁻²)	5.2 ± 0.2	5.4 ± 0.3	5.8 ± 0.6
$k_2 \times 10^{-15}$ (pix ⁻⁴)	1.2 ± 0.1	1.2 ± 0.1	1.1 ± 0.2

Από την άλλη μεριά, σημειώνεται ότι η εκτίμηση του πολυώνυμου της ακτινικής διαστρόφης του φακού είναι άκρως επαναλήψιμη, όπως προκύπτει και από τις βαθμονομημένες καμπύλες της Εικ. 48. Τέλος, όλα τα τυπικά σφάλματα σ_0 της συνόρθωσης υπερέβαιναν ελαφρώς την $\frac{1}{2}$ εικονοψηφίδα, γεγονός που αποδίδεται στο ότι εδώ τα φωτοσταθερά δεν είχαν μετρηθεί γεωδαιτικά αλλά είχαν απλώς εξαχθεί από το νέφος σημείων.

Πάντως, τα τελικά προϊόντα της διαδικασίας χρωματισμού έδειξαν ότι για τις ανάγκες της ακριβούς απόδοσης υφής μπορεί κατ' αρχήν να εμπιστεύεται κανείς φωτοσταθερά που έχουν αντληθεί απευθείας από τα 3D δεδομένα της επιφάνειας.



Εικόνα 48. Βαθμονομημένες καμπύλες ακτινικής διαστρόφης του φακού από τρεις ανεξάρτητους φωτοτριγωνισμούς.

• *Δημιουργία νέων εικόνων*

Μετά από την εξομοίωση των ιστογραμμάτων τους, όλες οι εικόνες κάθε μπλοκ συμμετέσχαν στην παραγωγή των ορθοφωτογραφιών με μέγεθος εδαφοψηφίδας 2 mm. Όπως έχει αναφερθεί, η μίξη χρώματος από εικόνες με διαφορετικές κλίμακες (δηλαδή με διαφορετικές αναλύσεις στον χώρο του αντικειμένου) αναμένεται να παράγει κάπως πιάθολο προϊόν. Εάν χρησιμοποιηθούν μόνο οι N “καλύτερες” εικόνες – εκείνες με τα μεγαλύτερα βάρη – η προκύπτουσα απεικόνιση έχει περισσότερη λεπτομέρεια ενώ παράλληλα διατηρεί την ραδιομετρική συνέχεια, μπορεί όμως να έχει περισσότερο θόρυβο (πρβλ. Εικ. 16). Φαίνεται ότι σε κάθε περίπτωση πρέπει, τελικά, να επιλέγει κανείς εκείνη την διαδικασία που ταιριάζει περισσότερο στο συγκεκριμένο μπλοκ εικόνων.

Στα επόμενα παρουσιάζονται οι τελικές ορθοφωτογραφίες που προέκυψαν μετά από δοκιμές με τις διάφορες επιλογές που έχουν εξηγηθεί στα προηγούμενα. Τα αποτελέσματα είναι απολύτως ικανοποιητικά και η ραδιομετρική τους ποιότητα πιστοποιεί την ακρίβεια στην σύνδεση μεταξύ εικόνων και χώρου που επετεύχθη με τους φωτοτριγωνισμούς. Τα κενά σημεία οφείλονται σε απουσία υψής, αλλά εν μέρει και στην μορφολογική πράξη της “διαστολής” (βλ. και σχετική παρατήρηση στην επόμενη ενότητα “Συμπεράσματα και Προοπτικές”).

Στην Εικ. 49 φαίνονται οι ορθοφωτογραφίες του τμήματος 1 από τις δύο ομάδες εικόνων (16 και 23 εικόνες). Οι παραμορφώσεις στην πάνω αριστερή γωνία της δεύτερης εικόνας εξηγούνται από το ότι μέρος του μνημείου είχε καλυφθεί, για λόγους προστασίας, μεταξύ των δύο λήψεων. Επισημαίνεται ακόμα ότι ο πεσμένος στύλος που κείται μπροστά από το κυρίως αντικείμενο έχει “υπερπηδηθεί” στην δεύτερη περίπτωση, ακριβώς με την προαναφερθείσα τεχνική της “τομής” με κατωφλίωση του βάθους. Αντίστοιχα, στην Εικ. 50 φαίνονται η ορθοφωτογραφία του τμήματος 2 και, κάτω, η τομή που αποκαλύπτει τον πίσω τοίχο. Λεπτομέρεια αυτής της ορθοφωτογραφίας και της τομής δείχνει η Εικ. 51.



Εικόνα 49. Τελική ορθοφωτογραφία από τα δύο μπλοκ εικόνων του τμήματος 1 του μοντέλου.

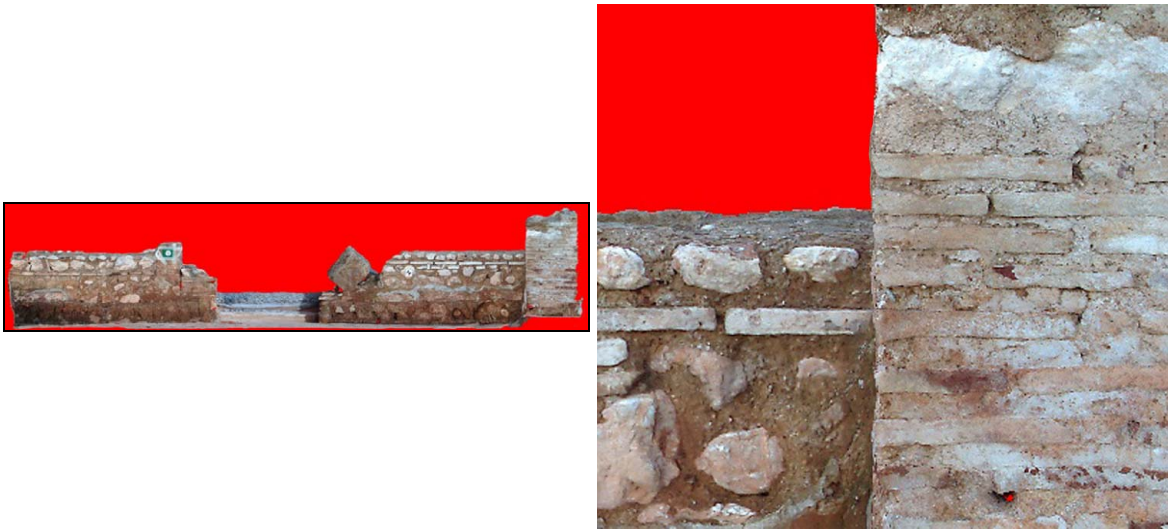
Η μέθοδος που αναπτύχθηκε από την ερευνητική ομάδα για την αυτόματη εξαγωγή και την εν συνεχεία διαστολή των ορίων απόκρυψης επέτρεψε να παραχθούν υψηλής ποιότητας απεικονίσεις, ιδίως δε στις “ευαίσθητες” περιοχές όπου εμφανίζονται απότομες μεταβολές του βάθους (ασυνέχειες) με στοιχεία κάθετα στο επίπεδο της προβολής. Όπως φαίνεται στην Εικ. 52 όπου παρουσιάζεται η ορθοφωτογραφία του τμήματος 3 και λεπτομέρειά της, η ακμή απεικονίζεται ευκρινώς.



Εικόνα 50. Τελική ορθοφωτογραφία και τομή (κάτω) του τμήματος 2 του μοντέλου.



Εικόνα 51. Λεπτομέρεια ορθοφωτογραφίας και τομής (δεξιά) του τμήματος 2 του μοντέλου.



Εικόνα 52. Τελική ορθοφωτογραφία και λεπτομέρεια του τμήματος 3 του μοντέλου.

Σαφής είναι και η ακμή της Εικ. 53, όπου φαίνεται λεπτομέρεια της ορθοαναγωγής από την δεύτερη ομάδα εικόνων του τμήματος 1. Η ακμή απεικονίστηκε με μίξη χρώματος από 9 εικόνες (όσες από τις 23 εικόνες του μπλοκ έβλεπαν την περιοχή αυτή). Άλλο παράδειγμα βρίσκεται στην Εικ. 54, όπου φαίνεται άλλη ακμή από το ίδιο τμήμα όπως αυτή συντέθηκε από τις εικόνες των δύο μπλοκ. Και στις δύο περιπτώσεις στην απεικόνιση της ακμής συμμετείχαν 8 εικόνες. Η ορθή προβολή των άκρων της ημικυλινδρικής επιφάνειας, που εκεί έχει μεγάλη κλίση ως προς το επίπεδο προβολής, είναι επίσης ικανοποιητική.



Εικόνα 53. Λεπτομέρεια ακμής του τμήματος 1 του μοντέλου (συμμετοχή 9 εικόνων).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Σήμερα, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον διεθνώς για τεχνικές που παράγουν, κατά τρόπο αυτόματο και με μίξη χρώματος από πολλές εικόνες, υψηλής γεωμετρικής και ραδιομετρικής ποιότητας προβολές με φωτούφή στην βάση προϋπαρχόντων 3D μοντέλων του αντικειμένου, προερχόμενων κυρίως από επίγειες σαρώσεις laser (Alshawabkeh & Haala, 2005, Aguilera et al., 2006, Zhang et al., 2006). Υπό την προϋπόθεση ότι είναι δεδομένα το 3D μοντέλο της επιφάνειας και τα στοιχεία του εσωτερικού/εξωτερικού προσανατολισμού για πολλαπλά επικαλυπτόμενες εικόνες του, ο αλγόριθμος της ερευνητικής ομάδας αναγνωρίζει αυτοαποκρύψεις του αντικειμένου και αποκρύπτει εικόνας προκειμένου να συνθέσει

πολυεικονικά, και κατά τρόπο απολύτως αυτόματο, προβολές του 3D μοντέλου με φωτού-φή. Εκτός από ορθές, αυτές μπορούν να είναι προοπτικές ή και τομές. Στις εικονοψηφίδες αποδίδεται υφή με μίξη χρώματος, δηλαδή με την μέσω βαρών συμμετοχή όλων των ει-κόνων, ή επιλεγμένων ανά εικονοψηφίδα υποσυνόλου τους. Βασικοί στατιστικοί έλεγχοι επιτρέπουν τον αποκλεισμό χονδροειδώς εσφαλμένων τιμών χρώματος.



Εικόνα 54. Λεπτομέρειες ακμής του τμήματος 1 του μοντέλου από διαφορετικές σειρές εικόνων (συμμετοχή 8 εικόνων).

Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου, αφενός ο αρχικός βασικός αλγόριθμος προγραμματί-στηκε εξαρχής σε πιά πρόσφορο περιβάλλον, με αυξημένη ταχύτητα και λειτουργικότητα, αφετέρου δε περιλαμβάνει πλέον πολλές νέες δυνατότητες που αναλύθηκαν στα προη-γούμενα, όπως είναι πχ. η δημιουργία και χρήση χαρτών βάθους, εναλλακτικές εκφράσεις των βαρών και, τέλος, η εφαρμογή εργαλείων επεξεργασίας εικόνας (εξαγωγή ακμών και μορφολογικοί τελεστές) που επιτρέπουν την βελτίωση της ποιότητας του αποτελέσματος, κυρίως στις ευαίσθητες περιοχές περί τα όρια αποκρύψεων. Παράλληλα, συνελέγησαν ε-παρκή νέα δεδομένα, με διαφορετικές μορφολογίες αντικειμένων και γεωμετρίες λήψεων, προκειμένου να ελεγχθεί και να αξιολογηθεί το λογισμικό σε διαφορετικές πρακτικές συν-θήκες. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν κρίνονται ως υψηλής ποιότητας από κάθε άποψη, ειδικά δε στις περιοχές των ορίων απόκρυψης η λειτουργία του νέου αλγορίθμου είναι ιδιαίτερος ικανοποιητική. Επισημαίνεται ο καθοριστικός ρόλος τον οποίο παίζει η α-κρίβεια και πληρότητα των αρχικών δεδομένων, δηλαδή τόσο αυτή του μοντέλου όσο και εκείνη των προσανατολισμών εικόνων, όπου η σημασία της ενιαίας συνόρθωσης όλων των συμμετεχουσών εικόνων είναι μεγάλη.

Όσον αφορά τον υλοποιημένο αλγόριθμο, οι βασικές “ατέλειες” των αποτελεσμά-των εντοπίζονται σε μικρά κενά, οφειλόμενα στην έλλειψη υφής. Το πρόβλημα αυτό το ε-πιτείνει τεχνητά ο τελεστής διαστολής που χρησιμοποιείται μεν για να επεκταθούν οι α-κμές απόκρυψης, όμως παράλληλα μεγεθύνει και τις υπάρχουσες μικρές συσσωματώσεις αποκρυπτόμενων εικονοψηφίδων. Εδώ απαιτείται μια πιο εκλεπτυσμένη προσέγγιση (πχ.

μέσω “connected components labeling”) για την απομάκρυνση τέτοιων “συστάδων” απόκρυψης.

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, η έρευνα αυτή θα μπορούσε να επεκταθεί προς ορισμένες ενδιαφέρουσες κατευθύνσεις, εκμεταλλευόμενη παράλληλα την υπάρχουσα σημαντική θεωρητική και πρακτική εμπειρία σε πεδία όπως τα γραφικά υπολογιστών και η όραση υπολογιστών. Θέματα τέτοια είναι, επί παραδείγματι, η υιοθέτηση και ανάπτυξη εργαλείων για την αυτόματη πλήρωση κενών (hole-filling) και την απομάκρυνση της σκιάς. Τέλος, η πολυεικονική κάλυψη και οι ακριβείς αρχικές τιμές που μπορεί να δώσει το 3D μοντέλο είναι ικανές προϋποθέσεις προκειμένου να εισαχθούν τεχνικές ψηφιακής συνταύτισης εικόνας (image matching) ώστε να βελτιωθεί και να συμπληρωθεί τοπικά το 3D μοντέλο της επιφάνειας ή και η σύνδεση των εικόνων μεταξύ τους και με το μοντέλο (Debevec et al., 1996; Bernardini et al., 2001).

Βιβλιογραφία

- AGUILERA D.G., LAHOZ J.G., FINAT J., MARTÍNEZ J., FERNÁNDEZ J., SAN JOSÉ J., 2006. Terrestrial laser scanning and low-cost aerial photogrammetry in the archaeological modeling of a Jewish tanneries. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 36(5), pp. 8-13.
- ALSHAWABKEH Y., HAALA N., 2005. Automatic multi-image photo-texturing of complex 3D scenes. *XVIII CIPA Interbational Symposium*, Torino, 27 September - 1 October, pp. 68-73.
- AMHAR, F., JANSÁ J., RIES C., 1998. The generation of true orthophotos using a 3D building model in conjunction with a conventional DTM. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 (Part 4), pp. 16-22.
- BAUMBERG A., 2002. Blending images for texturing 3D models. *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC 2002)*, pp. 404-413.
- BERALDIN J.-A., PICARD M., EL-HAKIM S.F., GODIN G., LATOUCHE C., VALZANO V., BANDIERA A., 2002. Exploring a Byzantine crypt through a high-resolution texture mapped 3D model: combining range data and photogrammetry. *Proceedings of CIPA International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recoding*, Corfu, pp. 65-70.
- BERNARDINI F., MARTIN I.M., RUSHMEIER H., 2001. High-quality texture reconstruction from multiple scans. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 7(4):318-332.
- BORNIK A., KARNER K., BAUER J., LEBERL F., MAYER H., 2001. High quality texture reconstruction from multiple views. *Journal of Visualisation & Computer Animation*, 12(5):263-276.
- BÄRNER-BURCHARDT C., VOSS K., 2000. Automatic lens distortion calibration using single views. *Proceedings of the 22th DAGM Symposium (Mustererkennung 2000)*, Springer, Berlin, pp. 187-194.
- BUEHLER C., BOSSE M., MCMILLAN L., GORTLER S., COHEN M., 2001. Unstructured lumigraph rendering. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Annual Conference Series*, pp. 425-432.

- CHEN, L. C., LO C. Y., RAU J. Y., 2001. Generation of true orthophotos from IKONOS GEO images. *Proceedings of the 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, Singapore, pp. 1159-1164.
- DEBEVEC P., TAYLOR C.J., MALIK G., 1996. Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry- and image-based approach. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, pp. 11–20.
- DEBEVEC P., BORSHUKOV G., YU Y., 1998. Efficient view-dependent image-based rendering with projective texture-mapping. *Proc. 9th Eurographics Rendering Workshop, Rendering Techniques '98*, Springer, pp. 14-26.
- EL-HAKIM S.F., BERARDIN J.-A., PICARD M., VETTORE A., 2003a. Effective 3D modeling of heritage sites. *Proceedings of the 4th International Conference of 3D Imaging & Modeling (3DIM '03)*, Banff, Alberta, Canada, pp. 302-309.
- EL-HAKIM, S.F., GONZO L., PICARD M., GIRARDI S., SIMONI A., PAQUET E., VIKTOR H., BRENNER C., 2003b. Visualization of highly textured surfaces. *Proceedings of the International Symposium on Virtual Reality, Archaeology & Intelligent Cultural Heritage (VAST2003)*, Brighton, November 5-7, pp. 231-240.
- FRÜH C., SAMMON R., ZAKHOR A., 2004. Automated texture mapping of 3D city models with oblique aerial imagery. *Proceedings of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization & Transmission (3DPVT)*, Thessaloniki, pp. 396-403.
- HOFFMAN G. R., 2004. Product generation using ADS-40 digital imagery. *Proceedings of the ASPRS Annual Conference*, May 2004, Denver, Colorado (πρακτικά σε CD).
- KARRAS G., PATIAS P., PETSAS E., KETIPIS K., 1997. Raster projection and development of curved surfaces. *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, 32(5C1B), pp. 179-185.
- KARRAS G., MAVROMATI D., 2001. Simple calibration techniques for non-metric cameras. *XVIII CIPA International Symposium*, Potsdam, Germany, September 18-22, pp. 39-46.
- KATZENBEISSER, R., 2004. Calibration and data validation of a LIDAR fiber scanner. *Proceedings of the ASPRS Annual Conference*, Denver, Colorado (πρακτικά σε CD).
- KUZMIN, Y. P., KORYTNIK S. A., LONG O., 2004. Polygon-based true orthophoto generation. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 35(Part 3):529-531.
- MAVROMATI D., PETSAS E., KARRAS G., 2002. Theoretical and practical aspects of archaeological orthoimaging. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 34(Part 5):413-418.
- MAVROMATI D., PETSAS E., KARRAS G., 2003. Experiences in photogrammetric archaeological recording. *Proc. XIX CIPA International Symposium*, Antalya, pp. 666-669.
- NEUGEBAUER P., KLEIN K., 1999. Texturing 3D models of real world objects from multiple unregistered photographic views. *Proceedings of Eurographics, Computer Graphics Forum*, 18(3):245-256.
- ODA, K., LU W., UCHIDA O., DOIHARA T., 2004. Triangle-based visibility analysis and true orthoimage generation, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 35(Part 3):623-628.
- PALÀ V., ARBIOL R., 2002. True orthoimage generation in urban areas. *Proceedings of*

- the 3rd International Symposium on Remote Sensing of Urban Areas, Istanbul, 11-13 June, Vol. 1, pp. 309-314.
- PETSA E., 2001. Zur digitalen Projektion und Visualisierung von Türmen. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, Nr. 4, pp. 283-288.
- POLLEFEYS M., KOCH R., VERGAUWEN M., VAN GOOL L., 2000. Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 55, pp. 251-267.
- POULIN P., OUIMET M., FRASSON M.-C., 1998. Interactively modeling with photogrammetry. *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 93-104.
- PULLI K., ABI-RACHED H., DUCHAMP T., SHAPIRO L.G., STUETZLE W., 1998. Acquisition and visualization of colored 3-D objects. *Proceedings of the IEEE International Conference on Pattern Recognition*, Brisbane, Australia, August 16-20, pp. 99-108.
- RAU, J., CHEN N., CHEN L., 2002. True orthophoto generation of built-up areas using multi-view images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(6):581-588.
- RAU, J. Y., CHEN L. C., 2004. Geometrical building modeling and its application to the ortho-rectification for aerial images. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 9(1):53-76.
- ROCCHINI C., CIGNONI P., MONTANI C., SCOPIGNO R., 2002. Acquiring, stitching and blending diffuse appearance attributes on 3D models. *The Visual Computer*, 18, pp. 186-204.
- ROGNANT L., PLANÈS J.G, MEMIER M., CHASSERY J.M., 2000. Low cost precise urban orthophotos. *Proceedings of the ASPRS Annual Conference*, Washington D.C., May 22-26 (πρακτικά σε CD).
- RUIZ A., LÓPEZ-DE-TERUEL P.E., GARCÍA-MATEOS G., 2002. A note on principal point estimability. *Proc. 16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR '02)*, 11-15 August, Quebec, Canada, vol. 2, pp. 304- 307.
- SCHICKLER, W., THORPE A., 1998. Operational procedure for automated true orthophoto generation. *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, 32 (Part 4), pp. 527-532.
- SHENG, Y., GONG P., BIGING G.S., 2003. True orthoimage production for forested areas from large-scale aerial photographs. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(3):259-266.
- STRECHA C., TUYTELAARS T., VAN GOOL L., 2003. Dense matching of multiple wide-baseline views. *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision*, Cannes, France, Vol. 2, pp. 1994-1201.
- VISNOVCOVA J., LI Z., GRÜN A., 2001. Generating a 3D model of a Bayon tower using non-metric imagery. *Proceedings of the International Workshop on Recreating the Past - Visualization & Animation of Cultural Heritage*, Ayutthaya, Thailand, 26 February - 1 March (πρακτικά σε CD).
- WANG L., KANG S.B., SZELISKI R., SHUM H.-Y., 2001. Optimal texture map reconstruction from multiple views. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '01)*, vol. 1.
- WANSHOU J., YIXUAN Z., 1999. The making of high precision orthoimage of ancient

- buildings. *Proceedings of the Asian Conference of Remote Sensing (ACRS 1999)*.
URL: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1999/ps4/ps4245.shtml>.
- ZHANG Y., YANA L., LU X., 2006. Precise texture modeling with 3D laser scanning.
Geoinformatics 2006: Remotely Sensed Data and Information, Proc. SPIE, vol. 6419,
paper no. 64191Z.
- ZHOU, G., SCHICKLER W., THORPE A., SONG P., CHEN W., SONG C., 2004. True ortho-
image generation in urban areas with very tall buildings. *International Journal of Re-
mote Sensing*, 25:5163–5180.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΕΑΕΚ, Αρχιμήδης II

Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων του ΤΕΙ Αθήνας Μέτρο 2.2 – Υποέργο 6

	<p>ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΤΑΜΕΙΟ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</p>	 	 <p>Η ΠΑΙΔΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης</p>
--	--	--	---

Το πρόγραμμα συγχρηματοδοτείται 75% από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και 25% από Εθνικούς Πόρους
The project is co-funded by the European Social Fund and National Resources