



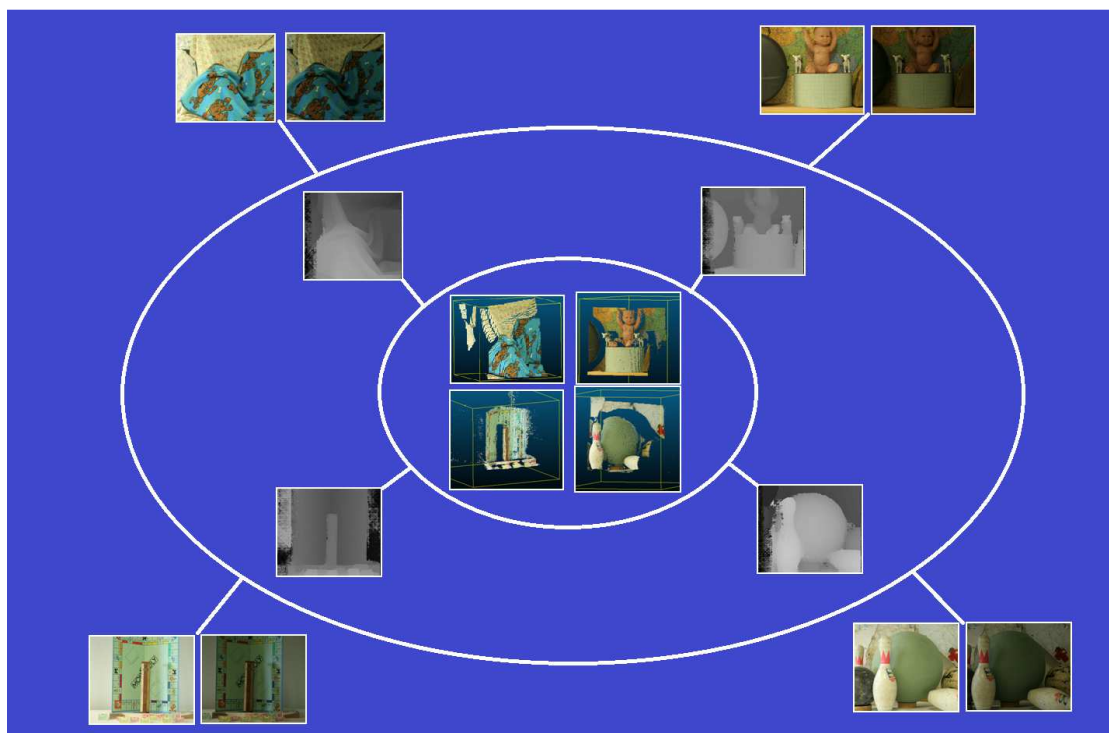
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΥΠΟ-ΣΥΝΟΛΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ
(SEMI-GLOBAL MATCHING)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΚΑΡΚΑΛΟΥ ΕΛΛΗ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή την διπλωματική εργασία προγραμματίστηκαν και αξιολογήθηκαν ορισμένες μέθοδοι υπο-σύνολης συνταύτισης στερεοζεύγους εικόνων, η οποία συνιστά υποκατηγορία της αυτόματης πυκνής ψηφιακής συνταύτισης. Από την εφαρμογή των μεθόδων αυτών προέκυψαν χάρτες ψηφιακής παράλλαξης και, βάσει αυτών, η ανακατασκευή 3D μοντέλων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν διαφορετικές συναρτήσεις υπολογισμού του κόστους συνταύτισης, όπως οι Απόλυτες Διαφορές και ο Μετασχηματισμός Census αλλά και διαφορετικές συναρτήσεις υπολογισμού για την ποινή P_2 , μιας από τις κύριες παραμέτρους της υπο-σύνολης συνταύτισης που χρησιμοποιείται στο στάδιο βελτιστοποίησης της παράλλαξης. Αρχικά έγινε βελτιστοποίηση των παραμέτρων κάθε μεθόδου, με την δοκιμή διαφόρων τιμών σε 21 ζεύγη εικόνων από διαδικτυακή πλατφόρμα αξιολόγησης (Middlebury College). Στην συνέχεια, και με τη χρήση των βέλτιστων τιμών, οι μέθοδοι εφαρμόστηκαν στα ίδια ζεύγη αλλά όταν αυτά έχουν ληφθεί με διαφορετική έκθεση ή συνθήκες φωτισμού. Για την συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων χρησιμοποιήθηκαν οι διαθέσιμοι αληθείς χάρτες παράλλαξης. Εξετάστηκε, επίσης, μια ακόμη μέθοδος υπο-σύνολης συνταύτισης εικόνων από την βιβλιοθήκη ανοικτού κώδικα OpenCV. Έγινε και σε αυτήν βελτιστοποίηση παραμέτρων της με βάση τα ίδια ζεύγη εικόνων και έπειτα εφαρμογή της στα στερεοζεύγη με ραδιομετρικές διαφορές. Διενεργήθηκε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της και των αληθών χαρτών παράλλαξης άρα, έμμεσα, και με τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει από τις υπόλοιπες μεθόδους. Εν συνεχεία, για τρεις από τις μεθόδους που εξετάστηκαν δημιουργήθηκαν 3D μοντέλα από 4 ζεύγη εικόνων με βάση τους παραχθέντες χάρτες παράλλαξης. Έγινε σύγκριση των μοντέλων με τα αντίστοιχα από τους αληθείς χάρτες παράλλαξης. Ακόμη, επιχειρήθηκε βελτίωση των ανακατασκευών της καλύτερης μεθόδου με την εφαρμογή τεχνικών βελτίωσης στους χάρτες παράλλαξης που είχαν παραχθεί. Οι τεχνικές που δοκιμάστηκαν ήταν: έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας, υποψηφιακή παρεμβολή, φίλτρο μεσαίας τιμής και εφαρμογή της διαθέσιμης μάσκας αποκρύψεων. Τέλος, έγινε ανακατασκευή 3D μοντέλου για τα σημεία που πέρασαν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις και πραγματοποιήθηκε για κάθε ζεύγος εικόνων η τελική σύγκριση με το αληθές 3D μοντέλο. Η εργασία ολοκληρώνεται με τα τελικά συμπεράσματα και ορισμένες προτάσεις για πιθανά θέματα μελλοντικής έρευνας. Για την υλοποίηση των παραπάνω διαδικασιών συντάχθηκαν κώδικες στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab και, δευτερευόντως, στην γλώσσα προγραμματισμού C++ με χρήση της βιβλιοθήκης OpenCV.

Implementation and Evaluation of Variations of Semi-Global Matching

Diploma Thesis

Elli Karkalou

September 2015

ABSTRACT

In this Diploma Thesis, several variations of semi-global matching, a sub-category of automatic dense stereo-matching, have been implemented and evaluated. The use of these methods led to the creation of disparity maps and the reconstruction of 3D models. The examined matching algorithms involve the use of different matching cost functions, such as the Absolute Differences (AD) and the Census transform, but also the employment of different functions for the computation of the P_2 penalty, one of the main parameters of semi-global matching used in the optimization step. Initially, parameter tuning was carried out for each case by applying several values to the default 21 stereo-pairs of the Middlebury 2006 dataset. Next, using its optimal parameters each method was applied to stereo-pairs taken under illumination and exposure changes. Comparisons among different methods were conducted with the aid of true disparity maps, available on the aforementioned well-known evaluation platform. Afterwards, a semi-global matching method included in the OpenCV library (StereoSGBM) was investigated. Optimal values for certain parameters were again found in a tuning step applied to the same stereo-pairs and then used on the stereo-pairs with radiometric changes. StereoSGBM results were compared against the true disparity maps, and thus implicitly with the results of the other methods. Moreover, for 3 of the methods studied and for 4 stereo-pairs 3D models were reconstructed from the produced disparity maps. The models were compared against those from the true disparity maps. An effort for improving the reconstructions of the best method was made via following optimization techniques applied to the produced disparity maps: left-right consistency check, sub-pixel interpolation, median filter and application of the available occlusion mask. Finally, for all stereo-pairs a 3D model was generated from points having passed the left-right consistency check in the non-occluded areas, and a final comparison with true 3D models was made. The project concludes with an overall assessment of results and suggestions regarding possible further extensions of this work. The procedures mentioned above have been implemented primarily in Matlab and, secondarily, in C++ using the OpenCV library.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα κατ'αρχάς να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Γιώργο Καρρά για την βοήθεια και τον χρόνο που διέθεσε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, κυρίως όμως για την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας Χρήστο Στεντούμη για τις συμβουλές και τις γνώσεις που μοιράστηκε μαζί μου. Επιπλέον, ευχαριστώ την Στυλιανή Βερυκόκου, επίσης υποψήφια διδάκτορα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας, για την βοήθειά της όσον αφορά την βιβλιοθήκη OpenCV.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, για την συμπαράσταση που μου έδειξαν σε όλα τα χρόνια σπουδών μου στη Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στο πλαίσιο του καλοκαιρινού μαθήματος “Μεγάλες Θερινές Ασκήσεις Φωτογραμμετρίας” είχα την πρώτη επαφή με το αντικείμενο της πυκνής συνταύτισης εικόνων, με τη μελέτη μιας τοπικής μεθόδου, του Αθροίσματος των Απόλυτων Διαφορών (Sum of absolute differences). Ορισμένοι αλγόριθμοι (για παράδειγμα, για την δημιουργία χάρτη παράλλαξης από τον τρισδιάστατο πίνακα κόστους DSI) είχαν ήδη αναπτυχθεί για αυτό το μάθημα, και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα εργασία. Το μάθημα εκείνο αποτέλεσε το έναυσμα για να ασχοληθώ, σε επίπεδο διπλωματικής εργασίας αυτή την φορά, με μια πιο σύνθετη μέθοδο, την υποσύνολη συνταύτιση (semi-global matching), η οποία αναπτύχθηκε την τελευταία δεκαετία και γενικά παράγει πιο ακριβείς χάρτες παράλλαξης σε συγκρίσιμο χρόνο εκτέλεσης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε εδώ με διάφορους τρόπους και σε ποικίλων ειδών εικόνες, με κώδικες που συνέταξα κυρίως στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab. Ακόμη, μού δόθηκε η ευκαιρία να εμβαθύνω περισσότερο και πιο σφαιρικά σε πολλά θεωρητικά θέματα που άπτονται του αντικειμένου.

Από την διπλωματική εργασία, σε συνδυασμό με την υπό εκπόνηση διδακτορική διατριβή του υποψήφιου διδάκτορα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας Χρήστου Στεντούμη, προέκυψε και η ακόλουθη δημοσίευση:

Stentoumis C., Karkalou E., Karras G., 2015. “A review and evaluation of penalty functions for Semi-global matching”. *IEEE 11th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*, Cluj-Napoca, Romania, September 3-5.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ABSTRACT.....	ii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	iii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iv
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	v
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Το Πλαίσιο της Εργασίας.....	1
1.2 Συνοπτική Ιστορική Αναδρομή	2
1.3 Στόχος και Δομή της Εργασίας.....	4
2. Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	6
2.1 Βήματα για την Κατασκευή 3D Μοντέλου από Ζεύγος Εικόνων	6
2.1.1 Εύρεση παραμέτρων εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού...6	
2.1.2 Επιτολική επανασύσταση	7
2.1.3 Πυκνή ανακατασκευή.....	9
2.2 Αλγόριθμοι Πυκνής Συνταύτισης Εικόνων.....	9
2.2.1 Τοπικές Μέθοδοι (Local methods)	9
2.2.2 Σύνολες Μέθοδοι (Global methods)	10
2.2.3 Σύγκριση.....	11
2.3 Διαδικασία Πυκνής Συνταύτισης	11
2.3.1 Προεπεξεργασία εικόνων	11
2.3.2 Υπολογισμός κόστους συνταύτισης	12
2.3.3 Συσσωμάτωση κόστους.....	16
2.3.4 Δημιουργία χάρτη παράλλαξης.....	17
2.3.5 Βελτίωση χάρτη παράλλαξης	17
2.4 Αξιολόγηση Μεθόδων Συνταύτισης	21
2.4.1 Μέτρα αξιολόγησης του χάρτη παράλλαξης	21
2.4.2 Μέτρα αξιολόγησης του 3D μοντέλου στον χώρο	24
2.5 Αποφάσεις πριν από την Συνταύτιση	26
2.5.1 Μέγεθος παραθύρου συνταύτισης.....	26
2.5.2 Μέγιστη παράλλαξη	27
3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΣΥΝΟΛΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ (semi-global matching).....	28

3.1	Αρχικός Αλγόριθμος SGM	28
3.2	Παραλλαγές του Αλγορίθμου SGM	31
3.3	Συναρτήσεις Μεταβλητής Ποινής P_2	41
3.4	Ο Αλγόριθμος SGM ως Αλγόριθμος Πραγματικού Χρόνου	44
3.4.1	Αλγόριθμοι πραγματικού χρόνου (real-time)	44
3.4.2	Ιστορική αναδρομή αλγορίθμων πραγματικού χρόνου.....	44
3.4.3	Προσαρμογή SGM ως αλγορίθμου πραγματικού χρόνου	45
3.4.4	Σύγκριση SGM με αλγορίθμους πραγματικού χρόνου	47
3.5	Ποιοτική Σύγκριση Αλγορίθμου SGM με LiDAR.....	48
4.	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ SGM - ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	49
4.1	Χαρακτηριστικά Αλγορίθμου	49
4.2	Ενδεικτικά Αποτελέσματα.....	50
4.2.1	Παραχθέντες χάρτες παράλλαξης από τον αλγόριθμο SGM	50
4.2.2	Αποτελέσματα για διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού κόστους	53
4.2.3	Αποτελέσματα για διαφορετικές συναρτήσεις ποινών	53
4.2.4	Χάρτες παράλλαξης μετά από εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων	54
4.2.5	Σύγκριση χάρτη παράλλαξης από SGM με αντίστοιχο από SAD.....	55
4.3	Βελτιστοποίηση Παραμέτρων SGM για Εικόνες “2003 datasets”	55
4.3.1	Μεθοδολογία.....	55
4.3.2	Αριθμητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	56
4.3.3	Ποιοτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	59
4.4	Βελτιστοποίηση Παραμέτρων SGM για Εικόνες “2006 datasets”	60
4.4.1	Μεθοδολογία.....	60
4.4.2	Συνολικά αποτελέσματα και συμπεράσματα	61
4.4.3	Ειδικότερα αποτελέσματα και συμπεράσματα	96
5.	SGM ΣΕ ΕΙΚΟΝΕΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΚΑΙ ΦΩΤΙΣΜΟ	99
5.1	Θεωρητικό Πλαίσιο	99
5.2	Μεθοδολογία	100
5.3	Αριθμητικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα	100
5.4	Ποιοτικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα	109
5.4.1	Αποτελέσματα για εικόνες με διαφορετική έκθεση	109
5.4.2	Αποτελέσματα για εικόνες με διαφορετικό φωτισμό.....	112

5.5	Σχετικές Αξιολογήσεις στην Βιβλιογραφία	115
6.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ SGM ΑΠΟ ΤΗΝ OPENCV	118
6.1	Σχετικά με την OpenCV	118
6.2	Κλάση Stereo Semi-Global Block Matching (StereoSGBM)	119
6.3	Βελτιστοποίηση Παραμέτρων P_1 , P_2 για την Συλλογή ‘2006 datasets’	121
6.3.1	Μεθοδολογία.....	121
6.3.2	Αριθμητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	122
6.3.3	Ποιοτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	126
6.4	Εφαρμογή SGBM σε Εικόνες με Διαφορετική Έκθεση/Φωτισμό.....	126
6.4.1	Θεωρητικό πλαίσιο	127
6.4.2	Μεθοδολογία.....	127
6.4.3	Αριθμητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	128
6.4.4	Ποιοτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	130
6.5	Σύγκριση με τον Αλγόριθμο SGM που Υλοποιήθηκε στο Matlab	132
6.5.1	Σύγκριση βελτιστοποίησης παραμέτρων	133
6.5.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων από εικόνες με διαφορετική έκθεση/φωτισμό.....	135
7.	3D ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	139
7.1	Μεθοδολογία	139
7.2	3D Ανακατασκευή με βάση τον Αληθή Χάρτη Παράλλαξης.....	140
7.3	3D Ανακατασκευές με τις Καλύτερες Μεθόδους και Ποινές	142
7.3.1	Παραχθέντες χάρτες παράλλαξης και σφάλματα.....	142
7.3.2	Αποτελέσματα ανακατασκευής για κάθε ζεύγος.....	144
7.3.3	Στατιστική σύγκριση ανακατασκευών με τις αληθείς.....	147
7.3.4	Συμπεράσματα.....	151
7.4	3D Ανακατασκευή με Βελτιώσεις των Χαρτών Παράλλαξης.....	152
7.4.1	Εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων	152
7.4.2	Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας.....	155
7.4.3	Φίλτρο μεσαίας τιμής.....	158
7.4.4	Υποψηφιακή παρεμβολή.....	161
7.4.5	Σύγκριση των βελτιωμένων 3D μοντέλων.....	163
7.4.6	Σύγκριση βέλτιστης ανακατασκευής με την αληθή	166

8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	171
8.1	Συμπεράσματα.....	171
8.2	Προτάσεις.....	177
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	179

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αρχικά αναλύεται το πλαίσιο εντός του οποίου τοποθετείται η παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία αφορά την δημιουργία 3D μοντέλων μετά από πυκνή συνταύτιση ζεύγους εικόνων με χρήση μιας υπο-σύνολης (semi-global) μεθόδου. Ακολουθεί σύντομη αναδρομή στην ιστορία της συνταύτισης εικόνων, από την σκοπιά της Φωτογραμμετρίας όσο και από εκείνη της Όρασης Υπολογιστών. Τέλος, ορίζεται ο στόχος της διπλωματικής εργασίας και περιγράφεται η δομή της με αναφορά στα περιεχόμενα κάθε κεφαλαίου.

1.1 Το Πλαίσιο της Εργασίας

Η δημιουργία πυκνής 3D πληροφορίας είναι απαραίτητη για τις περισσότερες εφαρμογές στο πεδίο της Φωτογραμμετρίας και της Όρασης Υπολογιστών, όπως η 3D ανακατασκευή και η παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, η ανίχνευση και αναγνώριση αντικειμένων, η αυτόματη πλοήγηση, η επαυξημένη πραγματικότητα. Οι μέθοδοι για την απόκτηση 3D πληροφορίας διακρίνονται σε ενεργητικές (σαρωτές laser και οπτικοί σαρωτές) και παθητικές. Οι τελευταίες, που ορίζουν και το ευρύτερο πλαίσιο αυτής της εργασίας, βασίζονται αποκλειστικά σε εικόνες (image-based) και έχουν αρχίσει να γίνονται πλέον ανταγωνιστικές ως προς την ακρίβεια που παρέχουν έναντι των πρώτων, ενώ παρουσιάζουν σαφές πλεονέκτημα όσον αφορά το κόστος και την ευελιξία.

Στην γενική περίπτωση, υπάρχουν διαφορετικά στάδια σε μια διαδικασία εκμετάλλευσης εικόνων προκειμένου να παραχθεί 3D πληροφορία κατά τρόπο αυτόματο (Μπούρου, 2015). Η συνταύτιση εικόνων, δηλαδή εν προκειμένω ο καθορισμός ομολογιών μεταξύ εικονοψηφίδων, συνιστά τον πυρήνα κάθε τέτοιας διαδικασίας. Η πρώτη φάση αφορά συνήθως την εύρεση σχετικά μικρού αριθμού ομολογιών σημείων στις εικόνες – συνταύτιση χαρακτηριστικών (feature-based matching) ή αραιή συνταύτιση (sparse matching) – και χρησιμοποιείται για τον προσανατολισμό της μηχανής, χωρίς ή και με βαθμονόμησή της (εύρεση των παραμέτρων του εξωτερικού ή και του εσωτερικού προσανατολισμού των εικόνων, αντίστοιχα). Η δεύτερη φάση, στην οποία και επικεντρώνεται η παρούσα διπλωματική εργασία, αποβλέπει στην πυκνή συνταύτιση των εικόνων (dense matching), δηλαδή την εύρεση κατά το δυνατόν όλων των ομολογιών σημείων σε στερεοζεύγη ή και σε περισσότερες επικαλυπτόμενες εικόνες, και αποσκοπεί στην πυκνή 3D ανακατασκευή της απεικονιζόμενης σκηνής. Οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται για την πυκνή συνταύτιση δύο εικόνων, όπως αυτός που εξετάζεται εδώ, γενικά αξιοποιούν την επιπολική δέσμευση, δηλαδή συνήθως χρησιμοποιούνται απευθείας σε επιπολικές εικόνες ώστε να παραχθεί ένας χάρτης ψηφιακής παράλλαξης (disparity map), δηλαδή μια απεικόνιση της μιας εικόνας, συνήθως της αριστερής, όπου σε κάθε εικονοψηφίδα αντί της τιμής έντασης έχει αποδοθεί η τιμή d της ψηφιακής παράλλαξης (Φλωρίδη, 2013).

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση συνταύτισης ζεύγους εικόνων. Παρ' ότι, βέβαια, έχουν πλέον αναπτυχθεί μέθοδοι συνταύτισης που αφορούν περισσότερες από δύο εικόνες, είναι συχνά αναγκαίο να χρησιμοποιούνται μόνο στερεοζεύγη, πχ. είτε λόγω περιορισμού του χρόνου εκτέλεσης (για εφαρμογές πραγματικού χρόνου) είτε λόγω του εγγενούς περιορισμού των διαθέσιμων μέσων (για παράδειγμα, σε εφαρμογές με στερεομηχανές φερόμενες από οχήματα).

Οι αλγόριθμοι πυκνής συνταύτισης εικόνων διακρίνονται στους τοπικούς (local) και τους "σύνολους" (global), ανάλογα με την έκταση της εικόνας που χρησιμοποιούν κατά την βελτιστοποίηση για τον υπολογισμό της παράλλαξης κάθε σημείου. Οι μέθοδοι αυτές εμφανίζουν διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και την ταχύτητα απόκτησής τους. Αυτό επεδίωξε να γεφυρώσει η μέθοδος της "υπο-σύνολης" συνταύτισης εικόνων (semi-global matching), η οποία μελετήθηκε, παρουσιάζεται αναλυτικά, προγραμματίστηκε και αξιολογήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής εργασίας.

1.2 Συνοπτική Ιστορική Αναδρομή

Όπως αναφέρεται και σε σχετική ιστορική αναδρομή των Remondino et al. (2014), οι διαδικασίες συνταύτισης εικόνας αναπτύχθηκαν παράλληλα σε δύο διαφορετικά επιστημονικά πεδία, αυτό της Φωτογραμμετρίας και εκείνο της Όρασης Υπολογιστών. Αρχικά οι φωτογραμμετρικές εξελίξεις ήταν βέβαια στενά συνδεδεμένες με τις αεροφωτογραφίες και με χαρτογραφικά προβλήματα. Αναφέρεται ότι οι πρώτοι αλγόριθμοι συνταύτισης αναπτύχθηκαν ήδη από την δεκαετία του 1950 (και ειδικότερα από τον G. L. Hobrough το 1959). Την δεκαετία του 1970 εισήχθησαν για πρώτη φορά με πιο άμεσα πρακτικό τρόπο οι (γνωστές ήδη από πολύ παλαιότερα) έννοιες της επιπολικής γεωμετρίας στο πλαίσιο της συσχέτισης εικόνων (Helava, 1978). Μετά από την εμφάνιση των ψηφιακών εικόνων η έρευνα εστίαζε πλέον ολόένα και περισσότερο σε αυτόματες μεθόδους ώστε να αντικαταστήσει την άμεση επέμβαση του χειριστή, και να επιτευχθεί πιο αποτελεσματική απόδοση στη συνταύτιση μεμονωμένων σημείων (Förstner, 1982, Ackermann, 1984, Grün, 1985). Σύντομα μάλιστα διατυπώθηκαν και οι γεωμετρικές παραδοχές για την αυτόματη συνταύτιση περισσότερων εικόνων (Grün, 1985, Grün & Baltsavias, 1988). Παράλληλα, η διαδικασία της συνταύτισης μεταφερόταν και στον 3D χώρο με την εισαγωγή του μοναδιαίου τρισδιάστατου στοιχείου "groundel" ή "surfel" κατ' αντιστοιχίαν με το pixel (Wrobel, 1987, Ebner & Heipke, 1988, Helava, 1988).

Κατά την δεκαετία του 1990 η συνταύτιση εικόνων εδραιώθηκε σε ορισμένες εργασίες ρουτίνας, και εμφανίστηκε σημαντικός αριθμός εμπορικών φωτογραμμετρικών συστημάτων για την παραγωγή Ψηφιακών Μοντέλων Επιφανείας (Digital Surface Model - DSM) και Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (Digital Terrain Model - DTM) από μεγάλα μπλοκ σχεδόν κατακόρυφων αεροφωτογραφιών. Από την αραιή συνταύτιση (για μεμονωμένα σημεία) οι αλγόριθμοι προχώρησαν, λοιπόν, στην αναζήτηση πυ-

κνότερων ομολογιών σημείων. Έτσι, οι Zhang et al. (1992) παρουσίασαν μια μέθοδο συνταύτισης για ολόκληρη την εικόνα μονομιάς (σύνολη μέθοδος), ενώ ο Maas (1996) πρότεινε μέθοδο συνταύτισης για πολλές εικόνες με γεωμετρικές παραδοχές, όπου τα χαρακτηριστικά σημεία αναζητούνταν και συνταυτίζονταν κατά μήκος των επιπολικών γραμμών. Παρά την σχετική επιτυχία τους, με τις μεθόδους αυτές από τον φωτογραμμετρικό χώρο εξακολουθούσαν να παραμένουν σοβαρά προβλήματα στην συνταύτιση επίγειων εικόνων (πχ. συγκλινουσών λήψεων). Αυτά αντιμετωπίστηκαν στο πεδίο της Όρασης Υπολογιστών (όπου πάντως η ακρίβεια, στην αρχική φάση, δεν είχε υψηλή προτεραιότητα).

Στο πεδίο της Όρασης Υπολογιστών, λοιπόν, η συνταύτιση δύο εικόνων είχε αρχίσει να ερευνάται ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του '70 (Marr & Poggio, 1976), και η ανάπτυξή της συνεχίστηκε κατά τη δεκαετία του '80, κυρίως μάλιστα για επίγειες εφαρμογές (Baker & Binford, 1981, Ohta & Kanade, 1985, Dhond & Aggarwal, 1989). Κατά την δεκαετία του '90 το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην συνταύτιση πολλών εικόνων (Okutomi & Kanade, 1993, Fua & Leclerc, 1995, Kanade et al., 1997), και πιο πρόσφατα στις εξελίξεις στην αρχιτεκτονική των υπολογιστών (hardware), όπως οι “προγραμματιζόμενες διατάξεις θυρών πεδίου” (Field Programmable Gate Arrays-FPGA) και οι μονάδες επεξεργασίας γραφικών (Graphics Processing Unit-GPU), στην μέτρηση του κόστους όλων των εικονοψηφίδων (Birchfield & Tomasi, 1998), στους αλγορίθμους ελαχιστοποίησης της σύνολης ενέργειας (Roy & Cox, 1998, Hirschmüller, 2008) και στις προσεγγίσεις δυναμικού προγραμματισμού (Kolmogorov et al., 2006).

Την σημερινή εποχή, η συνταύτιση εικόνων, όπως αυτή διαμορφώθηκε και από τις πρόσφατες εξελίξεις στην Όραση Υπολογιστών (Hartley & Zissermann, 2003, αλλά και Goesele et al., 2007, Pollefeys et al., 2008, Snavely et al., 2008, Furukawa et al., 2010, Shan et al., 2013) εξασφαλίζει αυτόματες διαδικασίες για τον προσανατολισμό των εικόνων (βλέπε επ' αυτού και Remondino et al., 2012) και την 3D ανακατασκευή σε διαφορετικές κλίμακες (Lafarge & Mallet, 2012, Haala, 2013). Σύνθετες σκηνές και αντικείμενα μπορούν πλέον να ανακατασκευάζονται πολύ αποτελεσματικά με τη χρήση πολλών εικόνων. Μέθοδοι για την παραγωγή πυκνών νεφών σημείων (από την πυκνή συνταύτιση εικόνων) είναι πλέον διαθέσιμες για επαγγελματικές και ερασιτεχνικές εφαρμογές, όπως παραγωγή 3D μοντέλων, χαρτογραφία, ρομποτικά και ιατρικά συστήματα, πλοήγηση κ.λπ.

Σήμερα παραμένουν βέβαια αρκετά ακόμα ανοιχτά ζητήματα σχετικά με την πυκνή συνταύτιση εικόνων που χρήζουν περισσότερης μελέτης και έρευνας (Stentoumis et al., 2014). Ζητούμενο, για παράδειγμα, αποτελεί ο επιτυχής υπολογισμός των παραλλάξεων σε περιοχές ασυνεχειών βάθους, οι οποίες υποδεικνύουν όρια (ακμές) αντικειμένων στον 3D χώρο, ή σε περιοχές με χαμηλή υφή, αφού η συνταύτιση βασίζεται στην αξιοποίηση των τιμών έντασης των εικόνων. Μια γνωστή αστοχία των

υπαρχόντων αλγορίθμων είναι το “μετωπικό” φαινόμενο (“fronto-parallel effect”) που εμφανίζεται στον χάρτη παράλλαξης για επιφάνειες με μεγάλη κλίση. Ένα ακόμη πρόβλημα συνιστά ο χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων, καθώς αυξάνεται η ζήτηση για αλγορίθμους που θα επεξεργάζονται υψηλής ανάλυσης εικόνες, ακόμα και σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, ένα επιπλέον ζήτημα, που απασχόλησε σε σημαντικό βαθμό και την παρούσα εργασία, είναι η εξασφάλιση αλγορίθμων με παραμέτρους που θα εμφανίζουν σταθερή απόδοση και δεν θα εξαρτώνται από το εκάστοτε εξεταζόμενο ζεύγος εικόνων ή την εκάστοτε σκηνή.

1.3 Στόχος και Δομή της Εργασίας

Σε αυτό το γενικότερο πλαίσιο, ειδικότερος στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ήταν ο προγραμματισμός και η αξιολόγηση μεθόδων υπο-σύνολης συνταύτισης εικόνων. Έτσι, συντάχθηκαν κώδικες σε περιβάλλον Matlab για την εφαρμογή αυτών των μεθόδων σε στερεοζεύγη επιπολικών εικόνων. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 21 ζεύγη επιπολικών εικόνων από μια γνωστή έγκυρη διαδικτυακή πλατφόρμα αξιολόγησης αποτελεσμάτων, όπως και οι διατιθέμενοι αληθείς χάρτες παράλλαξης των εικόνων αυτών με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Έγινε βελτιστοποίηση των παραμέτρων κάθε μεθόδου υπο-σύνολης συνταύτισης, οι οποίες εν συνεχεία αξιοποιήθηκαν για την εφαρμογή των μεθόδων σε ζεύγη με διαφορετική έκθεση και φωτισμό. Ακόμη χρησιμοποιήθηκε παράλληλα, για μια επιπλέον σύγκριση, και ο αλγόριθμος υπο-σύνολης συνταύτισης όπως έχει υλοποιηθεί στην βιβλιοθήκη OpenCV, με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων του, βελτιστοποίηση κάποιων εξ αυτών και εφαρμογή του στις εικόνες με διαφορετική έκθεση και φωτισμό. Τέλος, δημιουργήθηκαν 3D μοντέλα με βάση τους χάρτες παράλλαξης από κάθε μέθοδο, και έγινε προσπάθεια για την βελτίωση του καλύτερου μοντέλου με διάφορους τρόπους.

Η εργασία αναπτύσσεται σε συνολικά 8 κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται συνοπτικά, αλλά κατά το δυνατόν πληρέστερα, το θεωρητικό πλαίσιο στο οποίο βασίζεται η δημιουργία τρισδιάστατης απεικόνισης από ένα ζεύγος εικόνων. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η μέθοδος υπο-σύνολης συνταύτισης και οι κυριότερες παραλλαγές της. Η υλοποίηση της μεθόδου με διάφορες παραλλαγές, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων καθεμιάς για διάφορα ζεύγη εικόνων και η εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 4. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 5 εφαρμόζονται οι μέθοδοι σε εικόνες με διαφορετική έκθεση και φωτισμό. Στο Κεφάλαιο 6 χρησιμοποιείται η παραλλαγή SGBM της υπο-σύνολης συνταύτισης από την βιβλιοθήκη της OpenCV. Αφού εξεταστούν οι διάφορες παράμετροί της, γίνεται βελτιστοποίηση για τις κυριότερες από αυτές με τις ίδιες εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν και προηγουμένως, και κατόπιν εφαρμόζεται στις εικόνες με διαφορετική έκθεση και φωτισμό. Ακολούθως συγκρίνονται τα προκύπτοντα αποτελέσματα με εκείνα των προηγούμενων κεφαλαίων. Στο Κεφάλαιο 7 δημιουργούνται 3D μοντέλα με βά-

ση τον αληθή χάρτη παράλλαξης και τους χάρτες παράλλαξης από τις μεθόδους συνταύτισης των προηγούμενων κεφαλαίων, και πραγματοποιείται σύγκρισή τους. Ακόμη, εφαρμόζονται μέθοδοι βελτίωσης στο καλύτερο 3D μοντέλο που προέκυψε και διενεργούνται περαιτέρω συγκρίσεις με εκείνο από τα αληθή δεδομένα. Στο Κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, και διατυπώνονται προτάσεις για την πιθανή περαιτέρω διερεύνηση των μεθόδων υπο-σύνολης συνταύτισης. Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία επί της οποίας βασίστηκε η εργασία.

2. Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τα στοιχεία εκείνα που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της θεωρίας σχετικά με την δημιουργία τρισδιάστατων ανακατασκευών και, κατ'επέκταση, αποτελούν προαπαιτούμενη γνώση για την κατανόηση και της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά περιγράφονται τα βήματα που απαιτούνται για την δημιουργία ενός 3D μοντέλου από ζεύγος εικόνων. Στη συνέχεια αναλύονται οι δυο κατηγορίες αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης που υπάρχουν. Ακολούθως, αναπτύσσονται τα δομικά στοιχεία που συγκροτούν την διαδικασία πυκνής συνταύτισης, όπως αυτά προκύπτουν από μελέτη της βιβλιογραφίας. Κατόπιν αναφέρονται τα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των μεθόδων συνταύτισης, με βάση τόσο τους παραγόμενους χάρτες παράλλαξης όσο και τα αντίστοιχα 3D μοντέλα. Τέλος, γίνεται αναφορά σε δυο κρίσιμες παραμέτρους της συνταύτισης εικόνων, το μέγεθος του παραθύρου συνταύτισης και τη μέγιστη παράλλαξη που επιλέγονται.

2.1 Βήματα για την Κατασκευή 3D Μοντέλου από Ζεύγος Εικόνων

Στην παρούσα ενότητα αναλύονται με τη σειρά τα βήματα ώστε να παραχθεί το 3D μοντέλο από ένα δεδομένο ζεύγος εικόνων.

2.1.1 Εύρεση παραμέτρων εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού

Ως πρώτο βήμα για την παραγωγή 3D μοντέλου από ζεύγος εικόνων απαιτείται προφανώς ο υπολογισμός των παραμέτρων του εσωτερικού και του εξωτερικού, ή κατά περίπτωση του σχετικού, προσανατολισμού των δυο εικόνων. Συνήθετα, για ένα μπλοκ εικόνων χρησιμοποιείται συνόρθωση δέσμης με αυτοβαθμονόμηση με ή και χωρίς φωτοσταθερά, και μάλιστα με κατά το δυνατόν αυτόματο τρόπο (Μπούρου, 2015).

Ο επιπολικός πίνακας του ζεύγους (fundamental matrix) έχει 7 βαθμούς ελευθερίας, 5 εκ των οποίων αντιστοιχούν στις παραμέτρους του σχετικού προσανατολισμού και 2 σε εκείνες του εσωτερικού προσανατολισμού (Καλησπεράκης, 2010, Αδάμ, 2011). Στην περίπτωση στερεοζεύγους δεν μπορεί, επομένως, να πραγματοποιηθεί πλήρης αυτοβαθμονόμηση αλλά μόνο μερική. Συνήθως υπολογίζεται η σταθερά της μηχανής c (ή οι δύο σταθερές των μηχανών του ζεύγους c_1, c_2), με την παραδοχή ότι η θέση του πρωτεύοντος σημείου ταυτίζεται με το κέντρο της εικόνας. Με βάση αυτή την εκτίμηση μπορεί, πλέον, να χρησιμοποιηθεί ο δεσμευμένος επιπολικός πίνακας (essential matrix) ώστε να γίνει μια πρώτη εκτίμηση για τις παραμέτρους του σχετικού προσανατολισμού. Δεδομένου ότι σε μια τέτοια επίλυση δεν χρησιμοποιούνται φωτοσταθερά, οι 5 παράμετροί του βασίζονται στον ορισμό ενός αυθαίρετου συστήματος αναφοράς, συνήθως εκείνου της αριστερής εικόνας.

Η τελική συνόρθωση πραγματοποιείται είτε με την συνθήκη συνεπιπεδότητας είτε

με την μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων με μαθηματικό μοντέλο την συνθήκη συγγραμμικότητας (συνόρθωση δέσμης σε ζεύγος εικόνων). Εάν θεωρηθούν άγνωστοι και δύο παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού, ο ελάχιστος αριθμός ομόλογων σημείων είναι 7, ενώ παρατηρήσεις είναι οι μετρημένες εικονοσυντεταγμένες τους. Στην μέθοδο της δέσμης προκύπτουν για κάθε σημείο που εμφανίζεται στις δύο εικόνες δυο εξισώσεις παρατήρησης, οπότε ο συνολικός αριθμός των εξισώσεων παρατήρησης είναι $n = 7 \times 4(x,y) = 28$. Οι m άγνωστοι της συνόρθωσης είναι οι 7 παράμετροι του σχετικού και του εσωτερικού προσανατολισμού καθώς και οι 3 συντεταγμένες χώρου (X,Y,Z) κάθε ομόλογου σημείου ($m = 7 + 7 \times 3(X,Y,Z) = 28$). Με περισσότερα ομόλογα σημεία υπάρχει περίσσεια παρατηρήσεων και πραγματοποιείται συνόρθωση με MET. Συνηθέστερα βέβαια χρησιμοποιούνται απλώς οι αρχικές εκτιμήσεις για τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, οπότε οι παράμετροι για κάθε ζεύγος είναι απλώς οι 5 του σχετικού του προσανατολισμού. Στην συνέχεια αναγνωρίζονται αυτόματα τα κοινά σημεία σε περισσότερα διαδοχικά ζεύγη, και πραγματοποιείται η τελική πολυεικονική συνόρθωση δέσμης με αυτοβαθμονόμηση (Μπούρου, 2015).

Τα ομόλογα σημεία που απαιτούνται σε τέτοιες αυτόματες προσεγγίσεις μπορούν να βρεθούν αυτόματα, με μια διαδικασία αραιής συνταύτισης ή συνταύτισης χαρακτηριστικών των εικόνων (Φλωρίδη, 2013). Σε αυτήν αναζητούνται σημεία σαφώς διακριτά από το περιβάλλον τους (“σημεία ενδιαφέροντος”). Στη συνέχεια, τα ομόλογά τους προσδιορίζονται πχ. με ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους μεταξύ των διανυσμάτων των περιγραφικών χαρακτηριστικών (descriptors) που έχουν αποδοθεί στα σημεία ενδιαφέροντος και περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τις παραγώγους (κλίσεις) της εικόνας σε διαφορετικές αναλύσεις (χώρος κλιμάκων – scale space). Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τελεστές εξαγωγής σημείων είναι αυτοί των Moravec, Harris, Förstner και σήμερα κυρίως οι SIFT και SURF (Αδάμ, 2011).

Η τυπική συνόρθωση δέσμης με αυτοβαθμονόμηση δίνει, στην ουσία, έναν ενιαίο συνδυασμό παραμέτρων μηχανής και εξωτερικών προσανατολισμών που είναι βέλτιστα προσαρμοσμένες στη συγκεκριμένη γεωμετρία των εικόνων και του απεικονιζόμενου χώρου. Η λύση αυτή μπορεί λοιπόν να δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για την περαιτέρω αξιοποίηση των συγκεκριμένων εικόνων, πχ. για παραγωγή επιπολικών εικόνων ή 3D ανακατασκευή (Luhmann et al., 2014). Σε καμία περίπτωση πάντως δεν σημαίνει αυτομάτως και αυστηρή βαθμονόμηση της μηχανής, αλλά απλώς βαθμονόμηση των συγκεκριμένων εικόνων.

2. 1.2 Επιπολική επανασύσταση

Με δεδομένο τον εσωτερικό και τον εξωτερικό, ή απλώς τον σχετικό, προσανατολισμό ενός ζεύγους, μπορούν να παραχθούν πλέον οι επιπολικές εικόνες του. Η χρησιμότητα των επιπολικών εικόνων σε διαδικασίες αυτοματισμού όπως η πυκνή συνταύτιση εικόνων έγκειται ακριβώς στη διευκόλυνση που προσφέρουν κατά τη διαδι-

κασία εύρεσης ομόλογων σημείων. Ειδικότερα, περιορίζουν δραστικά την περιοχή αναζήτησης (πρακτικά μονοδιάστατη αναζήτηση), αφού το παράθυρο αναζήτησης του ομόλογου σημείου στην δεξιά εικόνα αρκεί να αποτελείται από ορισμένες στήλες κατά τη διάσταση x (που ορίζονται από το εκτιμώμενο εύρος της παράλλαξης) και, θεωρητικά, από μόνο μια γραμμή (την ομόλογη επιπολική ευθεία) στην κατά y διάσταση (Φλωρίδη, 2013).

Η γενική έννοια της επιπολικής γεωμετρίας αναφέρεται στην προβολική σχέση που ενυπάρχει μεταξύ δύο επικαλυπτόμενων εικόνων (Schenk, 1999, Hartley & Zisserman, 2003, Kraus, 2003, Καλησπεράκης, 2010, Αδάμ, 2011). Και μόνη η γνώση του επιπολικού πίνακα αρκεί, έτσι, για την δημιουργία επιπολικών εικόνων με αυθαίρετο εσωτερικό προσανατολισμό. Αυτές όμως θα είναι προβολικά παραμορφωμένες, δηλαδή θα επιτρέπουν απλώς προβολική και όχι μετρική 3D ανακατασκευή (Hartley & Zisserman, 2003, Καλησπεράκης, 2010, Αδάμ, 2011). Εν προκειμένω όμως ενδιαφέρει η μετρική (Ευκλείδεια) 3D ανακατασκευή, επομένως ενδιαφέρει η συμβατική έννοια του σχετικού προσανατολισμού (Schenk, 1999, Kraus, 2003), δηλαδή ο σχετικός προσανατολισμός δεσμών ακτίνων και όχι απλώς εικόνων, γεγονός που προϋποθέτει γνώση του εσωτερικού προσανατολισμού. Στην περίπτωση αυτή οι επιπολικές εικόνες επιτρέπουν Ευκλείδεια 3D ανακατασκευή.

Κατά τη στιγμή της λήψης, λοιπόν, οι δέσμες των εικόνων βρίσκονται γενικά σε τυχαία θέση ως προς τη βάση του ζεύγους, πράγμα που ισχύει συνεπώς και για τη θέση και τον προσανατολισμό των επιπολικών ευθειών. Ζητούμενο κατά τη διαδικασία της επιπολικής επανασύστασης στερεοζεύγους είναι η δημιουργία συνεπίπεδου ζεύγους εικόνων (προφανώς από τα ίδια σημεία λήψης αφού οι δέσμες ακτίνων είναι δεδομένες), όπου επιπλέον οι ομόλογες επιπολικές γραμμές θα συμπίπτουν με τις ομόλογες γραμμές της εικόνας, δηλαδή οι επιπολικές γραμμές θα είναι συνευθειακές κατά μήκος του άξονα x των εικόνων (Θεοφάνους, 2004). Αυτό σημαίνει ότι οι πίνακες στροφής των νέων εικόνων στο σύστημα της βάσης του ζεύγους θα είναι $\mathbf{R} = \mathbf{R}' = \mathbf{I}$ (η βάση του ζεύγους θα είναι παράλληλη στον άξονα X του συστήματος). Για να γίνει εφικτή αυτή η “κανονικοποίηση του στερεοζεύγους”, τα εικονοσημεία πρέπει να μετασχηματιστούν έτσι ώστε οι άξονες x των συστημάτων αναφοράς τους να ταυτίζονται και να είναι παράλληλοι στη βάση του ζεύγους. Αντίστοιχα, οι άξονες y των δύο συστημάτων πρέπει να είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι οι μετασχηματισμένες εικόνες είναι πλέον συνεπίπεδες, παράλληλες στην βάση και οι κατά x άξονές τους συμπίπτουν.

Συνοπτικά, κατ' αρχάς μετασχηματίζονται οι εικόνες ώστε να έχουν μοναδιαίο πίνακα στροφής στο σύστημα του εξωτερικού (ή του σχετικού) τους προσανατολισμού, πράγμα που υλοποιείται με χρήση των αντίστροφων πινάκων $\mathbf{R}_1^T, \mathbf{R}_2^T$ στροφής τους. Στη συνέχεια οι εικόνες ανάγονται στο σύστημα της βάσης, μετασχηματιζόμενες μέσω του πίνακα στροφής \mathbf{R}_B της βάσης ως προς το χρησιμοποιούμενο σύστημα ανα-

φοράς. Κάθε εικόνα πρέπει συνεπώς να πολλαπλασιαστεί με τον αντίστοιχο πίνακα στροφής:

$$\mathbf{R}_{\varepsilon\pi} = \mathbf{R}_B \mathbf{R}^T \quad (2.1)$$

Κώδικας για την επιπολική επανασύσταση είχε συνταχθεί σε άσκηση του μαθήματος “Φωτογραμμετρία III”, αλλά στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν χρειάστηκε αφού χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από την πλατφόρμα αξιολόγησης αλγορίθμων συνταύτισης Middlebury (<http://vision.middlebury.edu/stereo/>), οι οποίες είναι ήδη επιπολικές.

2. 1.3 Πυκνή ανακατασκευή

Για να υπολογιστεί η παράλλαξη (και εν συνεχεία το βάθος) κάθε σημείου πρέπει φυσικά να επιλυθεί πρώτα το πρόβλημα της αντιστοίχισης (correspondence), δηλαδή η αναζήτηση προβολών του ίδιου σημείου στις δυο εικόνες (Humenberger et al., 2010). Σε επιπολικές εικόνες η οριζόντια μετακίνηση των δυο ομόλογων σημείων, εκφρασμένη στο σύστημα της ψηφιακής εικόνας, ορίζει την ψηφιακή παράλλαξη (disparity). Οι αλγόριθμοι πυκνής (επιφανειακής) συνταύτισης εικόνων επιζητούν να υπολογίσουν έναν πλήρη χάρτη ψηφιακής παράλλαξης (disparity map), ο οποίος αποτελεί μια νέα απεικόνιση της αριστερής (συνήθως) εικόνας όπου σε κάθε εικονοψηφίδα της αντί τιμής έντασης έχει αποδοθεί η τιμή d της ψηφιακής παράλλαξης.

Η διαδικασία συνταύτισης βασίζεται ακριβώς στη σύγκριση της ομοιότητας των περιοχών των δυο εικόνων. Κατά συνέπεια, προβλήματα προκύπτουν για περιοχές με χαμηλή υφή ή για σημεία ορατά μόνο στην μια εικόνα (αποκρύψεις), των οποίων η θέση στον χώρο δεν μπορεί άρα να υπολογιστεί. Για σημείο (i, j) της αριστερής εικόνας αναζητείται το ομόλογό του στη δεξιά εικόνα με αφετηρία το σημείο της (i, j) και με μειούμενη εικονοσυντεταγμένη j (δηλαδή προς τα αριστερά) για κάθε διαδοχικό σημείο στην ίδια (επιπολική) γραμμή έως την εκτιμώμενη μέγιστη παράλλαξη.

Αποτέλεσμα της πυκνής συνταύτισης είναι ότι από δυο εικόνες, με βάση τον χάρτη παράλλαξης και τις βασικές φωτογραμμετρικές σχέσεις της παράλλαξης, προκύπτει μεγάλος αριθμός σημείων στον χώρο, δηλαδή παράγεται πυκνό 3D μοντέλο (πυκνή 3D ανακατασκευή). Η πυκνότητα λοιπόν της αντιστοίχισης καθορίζει και την πυκνότητα του 3D μοντέλου που θα εξαχθεί, καθώς κάθε ομολογία μπορεί να μετατραπεί άμεσα σε σημείο του χώρου (Φλωρίδη, 2013).

2.2 Αλγόριθμοι Πυκνής Συνταύτισης Εικόνων

Εδώ περιγράφονται οι δύο κατηγορίες αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης εικόνων που απαντώνται στη βιβλιογραφία, και γίνεται μια σχετική σύγκρισή τους.

2. 2.1 Τοπικές Μέθοδοι (Local methods)

Οι μέθοδοι αυτές αφορούν τον υπολογισμό της παράλλαξης σε ένα δεδομένο κάθε

φορά σημείο, ο οποίος εξαρτάται μόνο από τις τιμές της έντασης μέσα σε ένα συγκεκριμένο παράθυρο. Ορισμένοι από τους αλγορίθμους κάνουν απλές παραδοχές ομαλότητας για το παράθυρο όπου εφαρμόζονται (Φλωρίδη, 2013). Κατά συνέπεια, το κύριο βάρος δίνεται στον υπολογισμό του κόστους συνταύτισης και στη συσσωμάτωση (aggregation) του κόστους. Αντίθετα, ο υπολογισμός παράλλαξης γίνεται με απλό τρόπο, δηλαδή με την επιλογή για κάθε εικονοψηφίδα της παράλλαξης στην οποία αντιστοιχεί το μικρότερο κόστος (τοπική βελτιστοποίηση με τη μέθοδο WTA: “Winner-Takes-All”). Ένα μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι οι ομολογίες είναι μοναδικές μόνο στην εικόνα αναφοράς, ενώ τα σημεία της άλλης εικόνας ενδέχεται να αντιστοιχίζονται σε πολλά σημεία (Scharstein & Szeliski, 2002).

2. 2.2 Σύνολες Μέθοδοι (Global methods)

Εδώ αποδίδεται έμφαση στη διαδικασία υπολογισμού της παράλλαξης και συχνά δεν γίνεται συσσωμάτωση του κόστους. Ειδικότερα, μετά από τον υπολογισμό των παραλλάξεων, πραγματοποιείται κάποιου είδους βελτιστοποίηση της παράλλαξης σε μια συνάρτηση οριζόμενη για όλες τις εικονοψηφίδες της εικόνας αναφοράς, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται δεσμεύσεις εξομάλυνσης (global smoothness constraints) [Szeliski, 2010].

Πολλές σύνολες μέθοδοι βασίζονται στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας. Στόχος είναι να βρεθεί μια συνάρτηση $E(d)$ της παράλλαξης d που θα ελαχιστοποιεί τη συνολική ενέργεια, και η οποία αποτελείται από δύο όρους:

$$E(d) = E_{data}(d) + \lambda E_{smooth}(d) \quad (2.2)$$

Ο πρώτος όρος (E_{data}) αφορά τα δεδομένα και μετράει το πόσο καλά ταιριάζει η συνάρτηση παράλλαξης d με το ζεύγος εικόνων. Ισούται με το άθροισμα για κάθε εικονοψηφίδα των κοστών συνταύτισης C , αρχικών ή συσσωματωμένων, του πίνακα DSI (disparity space image – βλ. επ’ αυτού ενότητα 2.3.2):

$$E_{data}(d) = \sum_{(x,y)} C(x, y, d(x, y)) \quad (2.3)$$

Ο όρος ομαλότητας (E_{smooth}) ενσωματώνει τις παραδοχές ομαλότητας που κάνει ο αλγόριθμος. Συχνά περιορίζεται στη μέτρηση των διαφορών παράλλαξης μόνο μεταξύ των γειτονικών εικονοψηφίδων ώστε να περιοριστεί ο χρόνος εκτέλεσης. Μπορεί ακόμα να προσαρμοστεί στις διαφορές έντασης, με τον όρο ομοιότητας να μειώνεται όταν η κλίση της έντασης είναι μεγάλη. Με αυτό τον τρόπο οι ασυνέχειες της παράλλαξης ωθούνται στο να ταυτίζονται με τις ακμές της έντασης. Ο παράγοντας λ αντιπροσωπεύει το σχετικό βάρος του όρου ομαλότητας.

Μετά από τον ορισμό της συνολικής ενέργειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ποικιλία αλγορίθμων για να υπολογιστεί το (τοπικό) ελάχιστο (Scharstein & Szeliski, 2002). Οι γνωστότερες μέθοδοι που πραγματοποιούν 2D βελτιστοποίηση είναι οι *Graph Cuts* και *Belief Propagation*. Αντίθετα, μονοδιάστατη βελτιστοποίηση κάνουν οι μέθοδοι

δυναμικού προγραμματισμού και *Scanline Optimization* (βλ. και υποενότητα 2.3.4).

2. 2.3 Σύγκριση

Οι τοπικές μέθοδοι συνταύτισης είναι προφανώς πιο εύκολες στην υλοποίηση και πιο απλές, κατά συνέπεια είναι επαρκώς γρήγορες ώστε να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, υστερούν όμως σε ακρίβεια. Από την άλλη μεριά, οι σύνολες μέθοδοι υιοθετούν αναλυτικά μοντέλα για να περιγράψουν την διαδικασία της συνταύτισης, και αυτό οδηγεί σε χάρτες παράλλαξης υψηλότερης ποιότητας (για παράδειγμα, επιτυγχάνουν καλύτερα αποτελέσματα σε περιοχές με χαμηλή υφή). Ωστόσο ο χρόνος εκτέλεσης αυτών των αλγορίθμων είναι μεγάλος και τελικά μάλλον απαγορευτικός για εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο ή για επεξεργασία εικόνων υψηλής ανάλυσης. Τα τελευταία, πάντως, χρόνια οι περιορισμοί κάθε κατηγορίας μεθόδων υποχωρούν σε σημασία, καθώς οι θεωρητικές πρόοδοι και η εξέλιξη του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού (hardware) καθιστούν εφικτή την γρήγορη εφαρμογή των σύνολων μεθόδων, ενώ από την μεριά τους οι τοπικές μέθοδοι επιτυγχάνουν υψηλής ακρίβειας χάρτες παράλλαξης (συγκρίσιμους ή ακόμα και ανώτερους από αντίστοιχους ορισμένων σύνολων μεθόδων) χάρη στην πιο λεπτομερή συσσωμάτωση του κόστους. Προφανώς η αύξηση των υπολογιστικών πόρων στους προσωπικούς υπολογιστές κάνει δυνατή την εφαρμογή λεπτομερών και απαιτητικών αλγορίθμων, αλλά ταυτόχρονα η εξέλιξη των μέσων συλλογής εικόνων προσφέρει εικόνες με υψηλή χωρική και ραδιομετρική ανάλυση, με αποτέλεσμα και οι δύο κατηγορίες μεθόδων να παραμένουν χρήσιμες (Stentoumis et al., 2014).

2.3 Διαδικασία Πυκνής Συνταύτισης

Μετά από αυτή την πρώτη εισαγωγική διάκριση, στην παρούσα ενότητα αναλύεται ξεχωριστά κάθε ένα από τα δομικά στάδια που συνήθως περιλαμβάνουν όλοι οι αλγόριθμοι πυκνής συνταύτισης (Scharstein & Szeliski, 2002), με ελαφρές διαφοροποιήσεις στο πρώτο βήμα, το οποίο ορισμένες φορές συγχωνεύεται με το επόμενο.

2. 3.1 Προεπεξεργασία εικόνων

Κατά την συνταύτιση γίνεται η παραδοχή ότι τα αντικείμενα στην αριστερή και την δεξιά εικόνα έχουν κατ' αρχήν την ίδια οπτική εμφάνιση (χρώμα και φωτεινότητα). Στην πραγματικότητα όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει εξαιτίας του θορύβου, των χαρακτηριστικών της μηχανής και, κυρίως, διαφορών του φωτισμού λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών ή και των απεικονιζόμενων αντικειμένων, των οποίων τα υλικά διαφέρουν από τα ιδεώδη υλικά Lambert και δεν παρουσιάζουν ίδια σκέδαση φωτός προς όλες τις διευθύνσεις (Φλωρίδη, 2013).

Αν υπάρχει απλός Γκαουσιανός θόρυβος οι εικόνες μπορούν να διορθωθούν με φίλτρο μεσαίας τιμής. Για την διόρθωση πιο σύνθετων μορφών θορύβου χρησιμοποιούνται φίλτρα, όπως Sobel και LoG, ή “εναπομένουσες” (residual) εικόνες (Mroz & Breckon, 2012). Το φίλτρο Sobel είναι φίλτρο κλίσης και μπορεί να εφαρμοστεί ως

προσάδιο για την ανίχνευση ακμών. Το φίλτρο LoG περιγράφει την εφαρμογή φίλτρου Laplace (β' παραγώγου) για την ανίχνευση ακμών μετά από εξομάλυνση των εικόνων με φίλτρο Gauss ώστε πρώτα να μειωθεί ο θόρυβος. Οι “εναπομένουσες” εικόνες είναι εικόνες διαφορών που αντιπροσωπεύουν την συνιστώσα της υφής της εικόνας. Προκύπτουν με αφαίρεση της εξομαλυμένης με φίλτρο μέσου όρου εικόνας από την αρχική, ώστε να αναδειχθούν οι υψηλές συχνότητες (Hermann et al., 2010). Σε γενικές γραμμές όλες αυτές οι μέθοδοι υπολογίζουν την παράγωγο του σήματος της εικόνας (ανίχνευση ακμών) και κατά συνέπεια αντισταθμίζουν την διακύμανση του φωτισμού, επειδή η επιρροή του στην πρώτη και τη δεύτερη παράγωγο της εικόνας είναι μικρότερη. Μειονέκτημα των μεθόδων αυτών (εκτός του LoG) είναι ότι μεγεθύνουν τον θόρυβο της εικόνας.

Ένα άλλο φίλτρο που έχει προταθεί (Hirschmüller & Scharstein, 2009) είναι το αμφίπλευρο φίλτρο (bilateral filter) που έχει στόχο την εξομάλυνση με ταυτόχρονη διατήρηση των ακμών. Η συμμετοχή των εντάσεων των γειτονικών εικονοψηφίδων μειώνεται με την απόσταση αλλά και με την διαφορά της έντασης ή του χρώματος. Για την εφαρμογή του απαιτείται να οριστεί η περιοχή του φίλτρου, μια χωρική απόσταση (που καθορίζει το μέγεθος της εξομάλυνσης) και μια ραδιομετρική απόσταση (ορίζεται ως η απόλυτη διαφορά των εντάσεων και αποτρέπει την εξομάλυνση όπου υπάρχει υψηλή διακύμανση υφής). Στη συνέχεια, για την ακόμα καλύτερη διατήρηση των ακμών, μπορεί να αφαιρεθεί η φιλτραρισμένη εικόνα από την αρχική (μέθοδος “BilSub”: background subtraction by bilateral filtering, βλ. Ansar et al., 2004).

2. 3.2 Υπολογισμός κόστους συνταύτισης

Στο στάδιο αυτό αποδίδεται η τιμή ενός μέτρου ομοιότητας σε κάθε εικονοψηφίδα για κάθε τιμή παράλλαξης μέσα στο εύρος που έχει τεθεί. Είθισται να δημιουργείται μια δομή δεδομένων, η οποία καλείται “εικόνα του χώρου των ψηφιακών παραλλάξεων” (Disparity Space Image – DSI) και αναπαριστά την συνάρτηση συνταύτισης (Szeliski & Scharstein, 2004). Ειδικότερα, πρόκειται για έναν τρισδιάστατο πίνακα (x,y,d) , ο οποίος περιλαμβάνει τις τιμές που δίνει η εκάστοτε χρησιμοποιούμενη συνάρτηση κόστους για κάθε εικονοψηφίδα x, y ανά κάθε πιθανή τιμή d ψηφιακής παράλλαξης (Φλωρίδη, 2013). Οι υπάρχουσες μέθοδοι υπολογισμού κόστους συνταύτισης διακρίνονται στις παραμετρικές, τις μη παραμετρικές και τις πιο σύνθετες.

Οι παραμετρικές συναρτήσεις υπολογισμού κόστους κατηγοριοποιούνται σε αυτές που υπολογίζονται για κάθε εικονοψηφίδα (pixel-based) και συνήθως χρησιμοποιούνται στις σύνολες μεθόδους, και εκείνες που χρησιμοποιούν παράθυρο (window-based) και εφαρμόζονται στις τοπικές μεθόδους (Hirschmüller & Scharstein, 2009). Στις πρώτες περιλαμβάνονται οι εξής, όπου με C συμβολίζεται το κόστος, με I η τιμή έντασης, με p η εξεταζόμενη εικονοψηφίδα και με d η ψηφιακή παράλλαξη, ενώ οι δείκτες L, R αναφέρονται στην αριστερή και την δεξιά εικόνα:

- Απόλυτη Διαφορά (Absolute Difference – AD): Υπολογίζει τις απόλυτες διαφορές έντασης μεταξύ των εικονοψηφίδων των δυο εικόνων. Θεωρεί ότι η φωτεινότητα μεταξύ των ομόλογων εικονοψηφίδων είναι σταθερή.

$$C_{AD}(\mathbf{p}, d) = |I_L(\mathbf{p}) - I_R(\mathbf{p} - d)| \quad (2.4)$$

- Τετράγωνα Διαφορών (Squared Differences – SD): Υπολογίζει τα τετράγωνα των διαφορών έντασης των εικονοψηφίδων, οπότε δίνεται μεγαλύτερο βάρος στις μεγαλύτερες τιμές διαφορών εις βάρος των μικρότερων.

$$C_{SD}(\mathbf{p}, d) = (I_L(\mathbf{p}) - I_R(\mathbf{p} - d))^2 \quad (2.5)$$

- Birchfield & Tomasi (BT): Υπολογίζει το κόστος συσχέτισης δύο εικονοψηφίδων με χρήση γραμμικών παρεμβολών στις γειτονικές τους εικονοψηφίδες, συνήθως με τη μέθοδο των Απόλυτων Διαφορών. Θεωρείται λιγότερο ευαίσθητη στην επίδραση της δειγματοληψίας του σήματος της εικόνας όταν η ένταση των εικονοψηφίδων μεταβάλλεται απότομα (Μαλτζός, 2013).

$$C_{BT}(\mathbf{p}, d) = \min(A, B) \quad (2.6a)$$

$$A = \max(0, I_L(\mathbf{p}) - I_R^{max}(\mathbf{p} - d), I_R^{min}(\mathbf{p} - d) - I_L(\mathbf{p})) \quad (2.6b)$$

$$B = \max(0, I_R(\mathbf{p} - d) - I_L^{max}(\mathbf{p}), I_L^{min}(\mathbf{p}) - I_R(\mathbf{p} - d)) \quad (2.6c)$$

$$I^{min}(\mathbf{p}) = \min(I^-(\mathbf{p}), I(\mathbf{p}), I^+(\mathbf{p})) \quad (2.6d)$$

$$I^{max}(\mathbf{p}) = \max(I^-(\mathbf{p}), I(\mathbf{p}), I^+(\mathbf{p})) \quad (2.6e)$$

$$I^-(\mathbf{p}) = (I(\mathbf{p} - [1 \ 0]^T) + I(\mathbf{p}))/2 \quad (2.6f)$$

$$I^+(\mathbf{p}) = (I(\mathbf{p} + [1 \ 0]^T) + I(\mathbf{p}))/2 \quad (2.6g)$$

Οι πιο γνωστές παραμετρικές συναρτήσεις που εφαρμόζονται με παράθυρα είναι:

- Άθροισμα Απόλυτων Διαφορών (Sum of absolute differences – SAD)

$$C_{SAD}(\mathbf{p}, d) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |I_L(\mathbf{p}) - I_R(\mathbf{p} - d)| \quad (2.7)$$

- Άθροισμα Τετραγώνων Διαφορών (Sum of squared differences – SSD)

$$C_{SSD}(\mathbf{p}, d) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_L(\mathbf{p}) - I_R(\mathbf{p} - d))^2 \quad (2.8)$$

- Κανονικοποιημένος Συντελεστής Συσχέτισης (Normalized cross-correlation – NCC): Είναι η κανονικοποιημένη έκφραση της συμμεταβλητότητας δυο παραθύρων, βασιζόμενη στα στατιστικά στοιχεία τους (μέσους όρους και τυπικές αποκλίσεις). Παραμένει αμετάβλητος σε ενιαίες και γραμμικές μεταβολές της φωτεινότητας και της αντίθεσης του παραθύρου.

$$C_{NCC}(\mathbf{p}, d) = \frac{\sum_{j=1}^N (I_L(\mathbf{p}) - \bar{I}_L)(I_R(\mathbf{p} - d) - \bar{I}_R)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (I_L(\mathbf{p}) - \bar{I}_L)^2 \sum_{j=1}^N (I_R(\mathbf{p} - d) - \bar{I}_R)^2}} \quad (2.9)$$

Τα ανωτέρω μέτρα ομοιότητας μπορούν να αναχθούν στον μέσο όρο των παραθύρων ώστε να εξαλειφθούν διαφορές λόγω ενιαίας διαφοράς στην φωτεινότητα των

δύο εικόνων (μέθοδοι ZSAD και ZSSD). Πολλές φορές χρησιμοποιείται κατώφλι στις τιμές των μέτρων ομοιότητας για να μειωθούν κάποιες από τις εσφαλμένες ομολογίες. Η ενδεδειγμένη τιμή του κατωφλίου ποικίλλει από εικόνα σε εικόνα. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να ορίζεται ακριβώς πάνω από το επίπεδο του θορύβου της εικόνας (Scharstein & Szeliski, 2002).

Οι μη παραμετρικές συναρτήσεις κόστους βασίζονται στην τοπική σειρά ή τη σχέση των εντάσεων. Επειδή λοιπόν εξαρτώνται μόνο από την διάταξη ή τη σχέση των εντάσεων και όχι από τις απόλυτες τιμές τους, μπορούν να αντεπεξέρχονται σε όλες τις ραδιομετρικές αλλαγές που διατηρούν αυτή την σειρά ή σχέση. Κάποιες από αυτές εφαρμόζονται ως φίλτρα σε κάθε εικόνα ξεχωριστά. Εδώ παρουσιάζονται δύο φίλτρα που προτάθηκαν για πρώτη φορά από τους Zabih & Woodfill (1994) με στόχο να αυξηθεί η ανθεκτικότητα των τοπικών μεθόδων απέναντι σε εσφαλμένες ομολογίες μέσα στην περιοχή συνταύτισης, οι οποίες τυπικά συμβαίνουν κοντά σε ασυνέχειες βάθους και προκαλούν θολά όρια αντικειμένων.

- Το φίλτρο κατάταξης (Rank) αντικαθιστά τις εντάσεις των εικονοψηφίδων με την κατ' αύξουσα σειρά κατάταξη των εντάσεων των εικονοψηφίδων σε μια συγκεκριμένη περιοχή, δηλαδή η τιμή κάθε εικονοψηφίδας στη νέα εικόνα προκύπτει ως:

$$I_{Rank}(\mathbf{p}) = \sum_{q \in N_p} T[I(\mathbf{q}) < I(\mathbf{p})] \quad (2.10)$$

Κατόπιν οι φιλτραρισμένες εικόνες συνταυτίζονται με το μέτρο του Αθροίσματος των Απόλυτων Διαφορών (SAD). Το φίλτρο Rank είναι ευάλωτο στον θόρυβο σε περιοχές με χαμηλή υφή.

- Το φίλτρο Census ορίζει μια σειρά από bit, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μια εικονοψηφίδα της περιοχής περί την εξεταζόμενη. Συνήθως χρησιμοποιούνται παράθυρα 3×3 (8-bit), 5×5 (32-bit) ή 9×7 (64-bit). Το bit παίρνει τον αριθμό 1 εάν η εικονοψηφίδα που του αντιστοιχεί έχει χαμηλότερη τιμή έντασης από την εξεταζόμενη:

$$I_{Census}(\mathbf{p}) = BITSTRING_{q \in N_p}(I(\mathbf{q}) < I(\mathbf{p})) \quad (2.11)$$

Μετάπειτα οι φιλτραρισμένες εικόνες συνταυτίζονται με υπολογισμό της απόστασης Hamming μεταξύ των αντίστοιχων σειρών από bit, η οποία ισούται με τον αριθμό των bit κατά τον οποίο διαφέρουν οι δυο σειρές. Το φίλτρο Census δεν αποθηκεύει μόνο την σειρά των εντάσεων όπως το φίλτρο Rank, αλλά και την χωρική διάρθρωση των εντάσεων της περιοχής, οπότε έχει καλύτερη απόδοση. Το μειονέκτημά του έγκειται στο ότι αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο ανάλογα με το μέγεθος του επιλεγόμενου παραθύρου. Για το λόγο αυτόν έχουν εμφανιστεί διάφορες παραλλαγές (πχ. το “Center-Symmetric Census Transform”, βλ. Zinner et al., 2008) και έχει επιχειρηθεί η εφαρμογή του σε ειδικό εξοπλισμό, όπως “προγραμματιζόμενες διατάξεις θυρών πεδίου” (Field Programmable Gate Arrays – FPGA) [βλ. ενότητα 3.4].

Οι Hirschmüller & Scharstein (2009) έχουν δείξει ότι το φίλτρο Census είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό σε συνταυτίσεις εικόνων με τεχνητές ή πραγματικές ραδιομετρικές μεταβολές.

Τέλος, υπάρχουν μέθοδοι που επιζητούν να μοντελοποιήσουν με άμεσο τρόπο τις σύνθετες ραδιομετρικές σχέσεις μεταξύ των εικόνων, όπως η Αμοιβαία Πληροφορία (Mutual Information – MI) των δυο εικόνων (Viola & Wells, 1997). Αυτή ισούται με το άθροισμα των εντροπιών των κατανομών πιθανότητας (H_{I_1} και H_{I_2}) που υπολογίζονται για το επικαλυπτόμενο τμήμα κάθε εικόνας και αφαίρεση της εντροπίας της κοινής κατανομής πιθανότητας (H_{I_1, I_2}) των ομολογιών των δυο εικόνων για κάθε εικονοψηφίδα:

$$MI_{I_1, I_2} = H_{I_1} + H_{I_2} - H_{I_1, I_2} \quad (2.12)$$

Οι κατανομές πιθανότητας προκύπτουν από τα ιστογράμματα των αντίστοιχων περιοχών της εικόνας.

Η τιμή της Αμοιβαίας Πληροφορίας εκφράζει πόσο καλά έχουν επανασυσταθεί επιπολικά (“ευθυγραμμιστεί”) οι δυο εικόνες. Αν αυτό έχει γίνει επιτυχώς, η εντροπία της κοινής κατανομής πιθανότητας H_{I_1, I_2} θα είναι χαμηλή, ενώ η εντροπία των κατανομών πιθανότητας για κάθε εικόνα (H_{I_1} και H_{I_2}) θα είναι περίπου σταθερή αφού το επικαλυπτόμενο τμήμα κάθε εικόνας θα είναι σχεδόν ίδιο. Η Αμοιβαία Πληροφορία υπολογίζεται συνήθως για ολόκληρη την εικόνα, και έτσι μπορεί στη συνέχεια να γίνει συνταύτιση για κάθε εικονοψηφίδα (Kim et al., 2003, Hirschmüller, 2008). Αυτό πραγματοποιείται με χρήση ενός αρχικού χάρτη παράλλαξης, ο οποίος καθορίζει τις ομόλογες εικονοψηφίδες και κατά συνέπεια βοηθάει στον υπολογισμό των απαιτούμενων κατανομών πιθανότητας. Επειδή αυτός ο υπολογισμός αφορά ολόκληρη την εικόνα, οι κατανομές πιθανότητας που προκύπτουν είναι πολύ αξιόπιστες. Η χρήση πολυωνύμου Taylor για την Αμοιβαία Πληροφορία επιτρέπει την παραγωγή ενός πίνακα με κόστη, ο οποίος καθορίζει το κόστος συνταύτισης για κάθε δυνατό ζεύγος εικονοψηφίδων των δυο εικόνων. Αυτός ο πίνακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιαδήποτε παραμετρική μέθοδο συνταύτισης (με υπολογισμό κόστους για κάθε εικονοψηφίδα ή με παράθυρο). Ο απαιτούμενος αρχικός χάρτης παράλλαξης μπορεί στην αρχή να έχει τυχαίες τιμές, οι οποίες να βελτιωθούν επαναληπτικά. Κάθε επανάληψη χρησιμοποιεί τον προηγούμενο χάρτη παράλλαξης για τον υπολογισμό ενός νέου πίνακα με κόστη. Έχει βρεθεί (Kim et al., 2003) ότι αρκούν τρεις επαναλήψεις για να σταθεροποιηθεί πρακτικά το αποτέλεσμα και να παραχθεί ο τελικός χάρτης παράλλαξης.

Μια πιο αποτελεσματική παραλλαγή της Αμοιβαίας Πληροφορίας αποτελεί η Ιεραρχική Αμοιβαία Πληροφορία (Hierarchical Mutual Information – HMI), η οποία εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε συνδυασμό με τη μέθοδο υποσύνολης συνταύτισης (Semi-global matching) για τη βελτιστοποίηση της παράλλαξης (Hirschmüller, 2008).

Ξεκινά με εικόνες ανάλυσης μικρότερης κατά συντελεστή 16 και τυχαίες παραλλάξεις. Υπολογίζεται ο πίνακας με τα κόστη με οποιαδήποτε μέθοδο συνταύτισης και προκύπτει ο πρώτος χάρτης παράλλαξης. Ο χάρτης παράλλαξης χρησιμοποιείται για τον εκ νέου υπολογισμό του πίνακα με τα κόστη. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μερικές φορές πριν η παράλλαξη πολλαπλασιαστεί ώστε να χρησιμοποιηθεί ως αρχική εκτίμηση για συνταύτιση των εικόνων στο 1/8 της πλήρους ανάλυσης. Ο πολλαπλασιασμός και η συνταύτιση επαναλαμβάνονται μέχρι την πλήρη ανάλυση. Σημειώνεται ότι ο χάρτης παράλλαξης του χαμηλότερου επιπέδου χρησιμοποιείται μόνο για τον υπολογισμό των κοστών συνταύτισης του υψηλότερου επιπέδου και όχι για τον περιορισμό του εύρους της παράλλαξης, καθώς κάτι τέτοιο θα μπορούσε να οδηγήσει στο να μην εντοπιστούν μικρά αντικείμενα. Έχει αποδειχθεί (Hirschmüller, 2008) ότι η Ιεραρχική Αμοιβαία Πληροφορία αποδίδει το ίδιο καλά με την αρχική μέθοδο. Ακόμη, ο χρόνος εκτέλεσής της είναι μεγαλύτερος μόνο κατά 15-20% συγκρινόμενος με μη επαναληπτικούς αλγορίθμους (όπως η μέθοδος των Απόλυτων Διαφορών ή των Birchfield & Tomasi) αν ο χρόνος αυτών εξαρτάται γραμμικά από τον αριθμό των εικονοψηφίδων και των παραλλάξεων.

Η Ιεραρχική Αμοιβαία Πληροφορία αντεπεξέρχεται σε σύνθετες ραδιομετρικές αλλαγές που υπάρχουν στο σύνολο της εικόνας. Έχει ελαφρώς καλύτερη απόδοση από το Census αν οι ραδιομετρικές διαφορές είναι μικρές. Αντίθετα, εμφανίζει προβλήματα στη διαχείριση μεγάλων τοπικών ραδιομετρικών αλλαγών που προκαλούνται από το “βινιετάρισμα”, τις μη-Λαμπερτιανές επιφάνειες και τη χρήση διαφορετικών σε τύπο και θέση φωτισμών.

Στην παρούσα εργασία ως μέτρα ομοιότητας χρησιμοποιήθηκαν οι Απόλυτες Διαφορές (Absolute Differences-AD) και ο Μετασχηματισμός Census με συνταύτιση μέσω της απόστασης Hamming (συνοπτικά θα αναφέρεται στο εξής ως Μετασχηματισμός Census).

2. 3.3 Συσσωμάτωση κόστους

Σε αυτό το βήμα, το κόστος που έχει υπολογιστεί για κάθε εικονοψηφίδα υποστηρίζεται από μια περιοχή περί την εικονοψηφίδα, δηλαδή συσσωματώνεται με τα κόστη των γειτονικών εικονοψηφίδων. Στις τοπικές μεθόδους γίνεται χρήση παραθύρου, και υπάρχουν τρία είδη μεθόδων που μπορούν να εφαρμοστούν. Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση ορθογωνικών παραθύρων (ή των παραλλαγών τους, ώστε να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα) και είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη, λόγω της απλότητας που διακρίνει την εφαρμογή της. Κυλιόμενα παράθυρα ή παράθυρα με εικονοψηφίδα αναφοράς άλλη πλην της κεντρικής (Kang et al., 1995, Fusiello et al., 1997, Bobick & Intille, 1999) όσο και πολλαπλά παράθυρα που βασίζονται στην τοπική μεταβολή της έντασης και της παράλλαξης (Kanade & Okutomi, 1994, Veksler, 2003) έχουν επίσης προταθεί στην βιβλιογραφία. Άλλες μέθοδοι χρησιμοποιούν παράθυρα σταθερού μεγέθους και σχήματος προσαρμόζοντας τα βάρη

κάθε γειτονικής εικονοψηφίδας. Τα βάρη μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με την ομοιότητα στο χρώμα, την γεωμετρική γειτνίαση (Yoon and Kweon, 2006) ή και άλλα πρόσθετα κριτήρια. Τέλος, μέθοδοι όπου η περιοχή είναι τυχαίου σχήματος επιδιώκουν να βρεθεί το βέλτιστο σχήμα και μέγεθος παραθύρου (Stentoumis et al., 2014).

Στην υποσύνολη μέθοδο συνταύτισης (Semi-global matching) η συσσωμάτωση κόστους γίνεται διαφορετικά, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 3.1.

2.3.4 Δημιουργία χάρτη παράλλαξης

Όπως έχει προαναφερθεί, το σύνολο των ψηφιακών παραλλάξεων d μεταξύ των δύο εικόνων στερεοζεύγους ονομάζεται χάρτης ψηφιακών παραλλάξεων (disparity map). Πρόκειται για την απεικόνιση μέσω μιας εικόνας (συνήθως της αριστερής), όπου στην θέση κάθε εικονοψηφίδας έχει αποδοθεί η τιμή d της ψηφιακής παράλλαξης (Φλωρίδη, 2013).

Όπως αναφέρουν και οι Stentoumis et al. (2014), ο υπολογισμός της βέλτιστης παράλλαξης για κάθε εικονοψηφίδα γίνεται στις τοπικές μεθόδους συνήθως με τη μέθοδο Winner-Takes-All (WTA), δηλαδή επιλέγεται, μέσω του τρισδιάστατου πίνακα κόστους DSI, η παράλλαξη που αντιστοιχεί στο μικρότερο συσσωματωμένο κόστος. Από την άλλη μεριά, οι σύνολες μέθοδοι βελτιστοποιούν την παράλλαξη σε μια συνάρτηση ενέργειας, που έχει οριστεί για όλες τις εικονοψηφίδες της εικόνας, χάρη στην ταυτόχρονη επιβολή μιας παραδοχής ομαλότητας. Έχουν εφαρμοστεί διάφορες μέθοδοι, βασιζόμενες στις μερικές διαφορικές εξισώσεις (Faugeras & Keriven, 1998, Strecha et al., 2004, Ranftl et al., 2012), τον δυναμικό προγραμματισμό (Veksler, 2005) και μεθόδους όπως το *Scanline Optimization* (Ohta & Kanade, 1985, Mattoccia et al., 2007), το *Simulated Annealing* (Barnard, 1986), το *Belief Propagation* (Sun et al., 2003, Felzenszwalb & Huttenlocher, 2004) και τα *Graph Cuts* (Kolmogorov & Zabih, 2001, Boykov et al., 2001).

2.3.5 Βελτίωση χάρτη παράλλαξης

Ο χάρτης παράλλαξης που προκύπτει από τα προηγούμενα βήματα επιδέχεται βελτιώσεις προκειμένου να απομακρυνθούν χονδροειδώς εσφαλμένες ομολογίες, να επιτευχθεί υψηλότερη ακρίβεια συνταύτισης ή και να εξομαλυνθεί η διαδοχή των τιμών έντασης (Φλωρίδη, 2013). Οι κυριότερες από αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Υποψηφιδική παρεμβολή (Subpixel interpolation)
Ένας παραχθείς χάρτης παράλλαξης περιλαμβάνει ακέραιες τιμές ψηφιακής παράλλαξης για κάθε εικονοψηφίδα. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι υπάρχει μια αναντιστοιχία μεταξύ των συνεχών χωρικών φαινομένων και απεικονίσεών τους στο μη συνεχές μέσο της ψηφιακής εικόνας. Αυτό έχει ως συνέπεια ένα “σημειακό” στοιχείο να μην ταυτίζεται απαραίτητως με το κέντρο της εικονοψηφίδας, αλλά εάν πχ. είναι μικρότερο να βρίσκεται “κάπου στο εσω-

τερικό της”, ενώ αν είναι μεγαλύτερο να καταλαμβάνει περισσότερες εικονοψηφίδες. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει ανάγκη να επιτευχθεί ακρίβεια στον προσδιορισμό ομοιοτήτων ανώτερη της μιας εικονοψηφίδας. Για το λόγο αυτό εφαρμόζονται αλγόριθμοι που εισάγουν ένα βήμα υποψηφιακής παρεμβολής μετά από το αρχικό στάδιο της συνταύτισης στο οποίο προσδιορίζονται οι διακριτές τιμές παράλλαξης (Szeliski & Scharstein, 2004). Αυτό μπορεί να γίνει με παρεμβολή πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού (παραβολή) στις διακριτές τιμές του τρισδιάστατου πίνακα κόστους DSI (Stentoumis et al., 2012). Με τα ελάχιστα στοιχεία, η καμπύλη αυτή ορίζεται για κάθε εικονοψηφίδα από την επιλεγμένη (ελάχιστη ή μέγιστη, ανάλογα με το κριτήριο) τιμή κόστους c_d , η οποία έστω ότι αντιστοιχεί σε ψηφιακή παράλλαξη d , και τις τιμές κόστους c_{d+1} και c_{d-1} που αντιστοιχούν στις ψηφιακές παραλλάξεις $d+1$ και $d-1$. Έχοντας λοιπόν στη διάθεσή του κανείς τρία γνωστά ζεύγη (c, d) τιμών κόστους και ψηφιακής παράλλαξης, μπορεί να υπολογίζει μονοσήμαντα τους τρεις συντελεστές της καμπύλης 2^{ου} βαθμού:

$$c = Ad^2 + Bd + C \quad (2.13)$$

όπου d η τιμή της ψηφιακής παράλλαξης και c η τιμή του αντίστοιχου κόστους. Η μέγιστη (ή, κατά περίπτωση, η ελάχιστη) τιμή της καμπύλης αντιπροσωπεύει τη ζητούμενη υποψηφιακή τιμή της ψηφιακής παράλλαξης και βρίσκεται στη θέση μηδενισμού της a' παραγώγου της συνάρτησης:

$$d_{subpixel} = -\frac{B}{2A} \quad (2.14)$$

Εάν χρησιμοποιηθούν >3 ζεύγη τιμών (c, d) γίνεται συνόρθωση για την παρεμβολή της καμπύλης.

Η υποψηφιακή παρεμβολή δεν προβλέπεται ότι, οπτικά, θα διαφοροποιήσει αισθητά τον χάρτη ψηφιακών παραλλάξεων, αλλά αναμένεται ότι θα έχει ευεργετική επίδραση στην 3D ανακατασκευή (Φλωρίδη, 2013).

- Φίλτρο μεσαίας τιμής (Median filter)
Η εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής εξαλείφει προκύπτουσες χονδροειδείς αναντιστοιχίες και μπορεί να γεμίζει τα κενά σε περιοχές με αποκρύψεις αντλώντας πληροφορία από τις γειτονικές εικονοψηφίδες. Πρόκειται, ως γνωστόν, για ένα μη γραμμικό φίλτρο εξομάλυνσης, το οποίο ωστόσο διατηρεί τις ακμές. Είναι κατάλληλο για μεμονωμένο (διακριτό) θόρυβο, τύπου “αλατοπίπερο”, ο οποίος εδώ προκαλείται από τις τοπικά λανθασμένες ομοιογένειες σημείων κατά τη διαδικασία της συνταύτισης (outliers).
- Φίλτρο μέσου όρου (Mean filter)
Πρόκειται για ένα χαμηλοπερατό φίλτρο ή φίλτρο εξομάλυνσης, όπου η κεντρική εικονοψηφίδα του παραθύρου παίρνει την τιμή του μέσου όρου των ψηφιακών παραλλάξεων. Έτσι επιτυγχάνεται μείωση του θορύβου με αποκοπή των υψηλότερων συχνοτήτων, πχ. σε περιοχές θορύβου αλλά και στις

περιοχές των ακμών.

Είναι σαφές ότι εικονοψηφίδες με ακραίες τιμές έντασης επηρεάζουν την τιμή του μέσου όρου στην εγγύτερη περιοχή, γι' αυτό και το φίλτρο μέσου όρου έπεται του φίλτρου μεσαίας τιμής. Σε περιπτώσεις όπου το φίλτρο διασχίζει περιοχές ακμών θα παρεμβάλλει νέες τιμές για τις εικονοψηφίδες των ακμών, προκαλώντας έτσι μια "θόλωση" ανάλογη με την διάστασή του.

- Φίλτρο Gauss (Gauss filter)

Το φίλτρο Gauss είναι και αυτό ένα χαμηλοπερατό φίλτρο εξομάλυνσης. Χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις, όπως πχ. πριν μετασχηματιστούν οι εικόνες σε εικόνες κλίσεων προκειμένου να γίνει εξομάλυνσή τους και μείωση του θορύβου, ώστε να γίνει ενίσχυση μόνο των ακμών.

- Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας (Left-Right Consistency check)

Η μέθοδος εφαρμόζεται για να ανιχνευτούν οι περιοχές της εικόνας όπου υπάρχουν αποκρύψεις, αλλά και για να αξιολογηθεί η ποιότητα των χαρτών βάθους που παράγει η συνταύτιση (Banks, 2001, Brown et al., 2003). Εξάγονται λοιπόν, με κάποιο από τα κριτήρια που αναφέρθηκαν στην υποενότητα 2.3.2, δύο χάρτες ψηφιακής παράλλαξης, ένας από την αντιστοίχιση της δεξιάς εικόνας με την αριστερή και ένας με την αντίστροφη διαδικασία (αντιστοίχιση αριστερής εικόνας με την δεξιά). Για κάθε εικονοψηφίδα $x_{αρ}$ της αριστερής εικόνας η ευρεθείσα παράλλαξη επιτρέπει να βρίσκεται η ομόλογη θέση $x_{δεξ}$ στην άλλη εικόνα. Εν συνεχεία ελέγχεται, αντίστροφα, εάν το σημείο αυτό $x_{δεξ}$ που έχει εκτιμηθεί ως ομόλογο αντιστοιχεί πράγματι στο υπό εξέταση σημείο της αριστερής εικόνας. Αυτό γίνεται βάσει του χάρτη παράλλαξης που έχει προκύψει για τη δεξιά εικόνα, η οποία έστω ότι έχει δώσει ως ομόλογη του $x_{δεξ}$ την θέση $x_{αρ}$ στην αριστερή εικόνα. Για να ελεγχθεί η συμβατότητα των δύο χαρτών ψηφιακής παράλλαξης επιλέγεται κατώφλι (συνήθως ίσο με 1 εικονοψηφίδα) για την διαφορά θέσης $\Delta x = x_{αρ} - x_{αρ}$ (η οποία ισούται με την διαφορά Δd της παράλλαξης αριστερά-δεξιά), και βάσει αυτού κρίνεται αν η ομολογία κάθε σημείου είναι αποδεκτή ή όχι. Περιοχές με ασύμβατες παραλλάξεις θεωρείται ότι, κατ' αρχήν, αντιπροσωπεύουν περιοχές αποκρύψεων. Υπάρχουν βέβαια και άλλοι λόγοι που ενδέχεται να οδηγούν σε λανθασμένες αντιστοιχίες εικονοψηφίδων. Τέτοιοι είναι η παρουσία προοπτικών παραμορφώσεων, η έλλειψη ομοιόμορφου φωτισμού όσο και η ύπαρξη θορύβου στις εικόνες (sensor noise). Ο έλεγχος συμβατότητας αντιμετωπίζει εξίσου αποτελεσματικά όλα αυτά τα φαινόμενα, αποδίδοντας ικανοποιητικά για τον εντοπισμό εσφαλμένων εκτιμήσεων βάθους, χωρίς πάντως να κάνει διάκριση των αιτίων τους (Stentoumis et al., 2012). Είναι προφανές πως η διαδικασία αυτή δεν βελτιώνει το καθαυτό αποτέλεσμα της συνταύτισης, αυξάνει όμως την αξιοπιστία της. Εντοπίζει δη-

λαδή αυτόματα περιοχές μη αποδεκτής συνταύτισης, οι οποίες πρέπει συνεχώς να αντιμετωπιστούν με διαφορετικές προσεγγίσεις. Το αποτέλεσμα είναι χάρτες ψηφιακών παραλλάξεων, επί των οποίων έχουν επισημανθεί οι περιοχές αστοχίας (Φλωρίδη, 2013).

- Μάσκα αποκρύψεων (Occlusion mask)

Σημεία που, αν και βρίσκονται εντός του γωνιακού ανοίγματος και των δύο εικόνων, είναι ορατά μόνο σε μια εικόνα αποτελούν περιοχές αποκρύψεων. Εξ ορισμού, λοιπόν, σε αυτές τις περιοχές δεν μπορεί να υπολογιστεί σωστή τιμή παράλλαξης από την συνταύτιση δύο εικόνων (Hirschmüller & Scharstein, 2009). Γι' αυτό το λόγο, αν αφαιρεθούν από τον χάρτη παράλλαξης, αναμένονται λιγότερα σφάλματα και άρα βελτίωση του χάρτη παράλλαξης.

Η ιστοσελίδα Middlebury διαθέτει χάρτες ("μάσκες") αποκρύψεων για ορισμένες από τις εικόνες της, οι οποίες μπορούν να προσαρμοστούν στους αληθείς ή παραχθέντες χάρτες παράλλαξης. Συγκεκριμένα, αποτελούν μια δυαδική εικόνα όπου οι περιοχές αποκρύψεων απεικονίζονται με μαύρο χρώμα (τιμή 0), ενώ η υπόλοιπη εικόνα με άσπρο (τιμή 1). Κατά συνέπεια, εάν γίνει πολλαπλασιασμός της μάσκας αποκρύψεων με εικόνα παραλλάξεων (χάρτη παράλλαξης), η προκύπτουσα εικόνα θα έχει μαύρο χρώμα στις περιοχές αποκρύψεων (πολλαπλασιασμός με την τιμή 0), ενώ θα διατηρεί τις τιμές παράλλαξης στις υπόλοιπες περιοχές (πολλαπλασιασμός με την τιμή 1). Στο τέλος, κατά τον υπολογισμό των σφαλμάτων των εξαχθέντων χαρτών παράλλαξης, θα εξαιρεθούν από την σύγκριση οι περιοχές με τιμή 0, δηλαδή οι αποκρύψεις.

Είναι βέβαια αυτονόητο πως μόνο σε περιπτώσεις ελεγχόμενου πειραματισμού (όπως στην προκειμένη περίπτωση) είναι δυνατή η ύπαρξη μάσκας αποκρύψεων.

- Έλεγχος εμπιστοσύνης (Confidence check)

Ένας τρόπος ανίχνευσης εσφαλμένων ομολογιών, και επομένως βελτίωσης του χάρτη παράλλαξης με την αφαίρεσή τους, είναι ο έλεγχος εμπιστοσύνης (van der Mark & Gavrilu, 2006, Mroz & Breckon, 2012). Εδώ υπολογίζεται για κάθε εικονοψηφίδα πόσο διαφέρει το ελάχιστο κόστος (που αντιστοιχεί στην παράλλαξη που επιλέχθηκε) και το αμέσως μεγαλύτερο. Σε περιοχές με χαμηλή υφή, τα κόστη θα είναι παρόμοια, ενώ αν υπάρχει επαναλαμβανόμενη υφή, θα υπάρχουν πολλά μικρά κόστη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το μέτρο εμπιστοσύνης θα είναι μικρό και τα σφάλματα θα μπορέσουν να βρεθούν. Γενικώς τα δυο κόστη πρέπει να διαφέρουν αρκετά ώστε να μην θεωρηθεί ότι η επιλογή της τελικής παράλλαξης μπορεί να έχει επηρεαστεί από τον θόρυβο που τυχόν υπάρχει στην εικόνα. Κάποιες φορές όμως η σωστή

ομολογία σημείων βρίσκεται μεταξύ δυο εικονοψηφίδων, με συνέπεια να υπάρχουν δυο πολύ κοντινές τιμές στα κόστη. Για να μην εξαιρούνται τέτοιες περιπτώσεις από τον τελικό βελτιωμένο χάρτη, έχει προταθεί να χρησιμοποιείται το δεύτερο αμέσως μεγαλύτερο (C_3) από το ελάχιστο κόστος (C_1) κατά τον έλεγχο. Συνεπώς η τιμή C_t που υπολογίζεται από τον έλεγχο προκύπτει ως:

$$C_t = \frac{C_3 - C_1}{C_1} \quad (2.15)$$

Μετά από τον υπολογισμό του μέτρου εμπιστοσύνης για κάθε εικονοψηφίδα, τίθεται ένα κατώφλι όσον αφορά τις μικρότερες τιμές που μπορούν να γίνουν αποδεκτές, με συνέπεια ο τελικός χάρτης παράλλαξης να έχει αυξημένη αξιοπιστία.

- Αφαίρεση απομονωμένων εστιών παράλλαξης (Invalidation of small disparity segments)
Πολλές φορές μετά από τις διαδικασίες επεξεργασίας αφαιρούνται από τον χάρτη παράλλαξης απομονωμένες ομαδοποιήσεις τιμών παράλλαξης με μέγεθος μικρότερο πχ. από 20 εικονοψηφίδες, γιατί θεωρούνται χονδροειδή σφάλματα (Hirschmüller & Scharstein, 2009).
- Πλήρωση κενών (Hole Filling)
Μετά από το τέλος της εφαρμογής των διάφορων βελτιώσεων του χάρτη παράλλαξης γίνεται συνήθως παρεμβολή των παραλλάξεων στις εικονοψηφίδες που έμειναν κενές, ώστε ο τελικός χάρτης να είναι “πλήρης”, δηλαδή κάθε εικονοψηφίδα να διαθέτει τιμή παράλλαξης (Mroz & Breckon, 2012).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ως μέθοδοι βελτίωσης εφαρμόστηκαν η επιβολή της διαθέσιμης μάσκας αποκρύψεων, η υποψηφιδική παρεμβολή, ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας και το φίλτρο μεσαίας τιμής.

2.4 Αξιολόγηση Μεθόδων Συνταύτισης

Σε αυτή την ενότητα αναλύονται τα μέτρα που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία αλλά και στην παρούσα εργασία για να αξιολογείται η απόδοση των μεθόδων συνταύτισης όσον αφορά τόσο τους παραγόμενους χάρτες παράλλαξης όσο και τα παραγόμενα 3D μοντέλα.

2.4.1 Μέτρα αξιολόγησης του χάρτη παράλλαξης

Σύμφωνα με τους Scharstein & Szeliski (2002), τα πρώτα χρόνια η αξιολόγηση της απόδοσης των διάφορων μεθόδων συνταύτισης ή της ίδιας μεθόδου με αλλαγή των παραμέτρων της ήταν ποιοτική, δηλαδή με οπτική σύγκριση των παραγόμενων χαρτών παράλλαξης. Ακόμη, εξεταζόταν αν ο χάρτης παράλλαξης έχει θόρυβο, περιέχει

πληροφορία βάθους ακόμα και για λεπτά αντικείμενα και έχει συνοχή όσον αφορά τις τιμές του βάθους.

Για να γίνεται πιο λεπτομερής αξιολόγηση αναπτύχθηκαν ποσοτικές μέθοδοι που υπολογίζουν στατιστικά σφάλματα των παραγόμενων χαρτών όταν αυτοί συγκρίνονται με αντίστοιχους αληθείς χάρτες ψηφιακής παράλλαξης (true disparity map). Τέτοια αληθή δεδομένα αναφοράς υπάρχουν σε ιστοσελίδες που διαθέτουν δεδομένα (datasets) κατάλληλα για συγκρίσεις και αξιολόγηση. Εδώ αξιοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν κυρίως δεδομένα από την πιο γνωστή σχετική ιστοσελίδα, εκείνη του Middlebury College (<http://vision.middlebury.edu/stereo/>). Δύο από αυτές τις μεθόδους αξιολόγησης είναι:

- Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root-Mean-Squared Error) μεταξύ του υπολογισθέντος χάρτη παράλλαξης $d_C(x,y)$ και του αληθούς $d_T(x,y)$, το οποίο υπολογίζεται στην μονάδα μέτρησης της παράλλαξης, δηλαδή σε εικονοψηφίδες:

$$R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{(x,y)} |d_C(x,y) - d_T(x,y)|^2} \quad (2.16)$$

όπου N ο συνολικός αριθμός των εικονοψηφίδων της εικόνας.

- Ποσοστό των εσφαλμένα συνταυτισθεισών εικονοψηφίδων (Percentage of Bad Matching Pixels)

$$B = \frac{1}{N} \sum_{(x,y)} (|d_C(x,y) - d_T(x,y)| > \delta_d) \quad (2.17)$$

όπου δ_d είναι η ανοχή στη διαφορά της παράλλαξης μεταξύ του αξιολογούμενου χάρτη παράλλαξης και του αληθούς (γενικά ορίζεται $\delta_d = 1$).

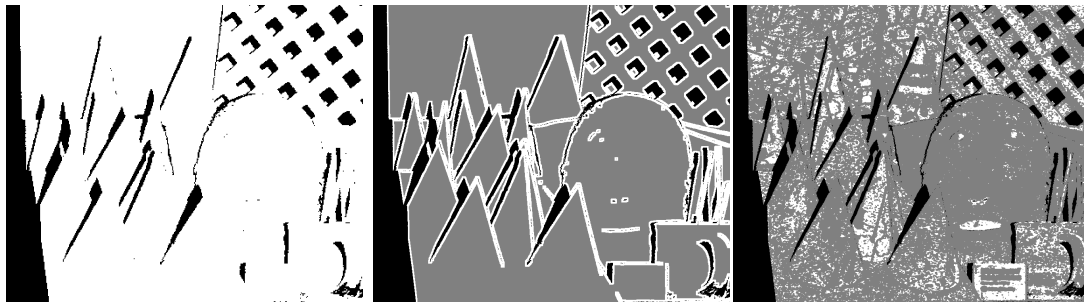
Συνήθως προτιμάται να χρησιμοποιείται το ποσοστό των εσφαλμένα συνταυτισθεισών εικονοψηφίδων αντί του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, καθώς το δεύτερο ενδέχεται να επηρεάζεται από λίγες εικονοψηφίδες που εμφανίζουν μεγάλη διαφορά παράλλαξης από τον αληθή χάρτη. Αντίθετα, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα χρησιμοποιείται όταν το ποσοστό των εσφαλμένα συνταυτισθεισών εικονοψηφίδων είναι πολύ μικρό, και διερευνάται πόσο διαφέρουν οι παραλλάξεις των εικονοψηφίδων ώστε να γίνει υποψηφιακή παρεμβολή.

Για την διευκόλυνση των υπολογισμών, ένα ενδιάμεσο βήμα πριν από τον υπολογισμό των μέτρων αξιολόγησης είναι η κατασκευή εικόνας διαφορών παράλλαξης με αφαίρεση του υπολογισμένου από τον αληθή χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.

Εκτός από τον υπολογισμό των σφαλμάτων για ολόκληρη την εικόνα, τα σφάλματα μπορούν να υπολογιστούν και για άλλες κρίσιμες περιοχές της εικόνας (Scharstein & Szeliski, 2002): τις περιοχές αποκρύψεων, τις περιοχές με χαμηλή υφή και τις περιοχές των ασυνεχειών βάθους. Ως περιοχές αποκρύψεων ορίζονται οι περιοχές που δεν είναι ορατές σε μια από τις δυο εικόνες. Οι περιοχές με χαμηλή υφή είναι

εκείνες όπου το τετράγωνο της κλίσης, κανονικοποιημένο στον μέσο όρο των εντάσεων ενός τετράγωνου παραθύρου, είναι χαμηλότερο από ένα κατώφλι. Τέλος, οι περιοχές με ασυνέχειες βάθους αφορούν τις εικονοψηφίδες των οποίων η παράλλαξη διαφέρει από εκείνες των γειτονικών τους περισσότερο από ένα κατώφλι.

Το ποσοστό των εσφαλμένα συνταυτισθεισών εικονοψηφίδων για αυτές τις περιοχές υπολογίζεται κατά τα γνωστά, αλλά μόνο για τις εικονοψηφίδες που ανήκουν σε αυτές τις περιοχές. Για αυτό τον λόγο χρειάζονται χάρτες όπου αυτές επισημαίνονται (Εικ. 2.1). Με τον υπολογισμό αυτών των σφαλμάτων μπορεί να αναλυθεί λεπτομερέστερα η αποτελεσματικότητα της εξεταζόμενης μεθόδου συνταύτισης. Συνήθως ως μέτρο για την συνολική απόδοση οποιασδήποτε μεθόδου χρησιμοποιείται το ποσοστό για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις, όπως και στην παρούσα διπλωματική εργασία, ενώ τα ποσοστά των περιοχών με χαμηλή υφή και των ασυνεχειών βάθους έχουν μάλλον επικουρικό ρόλο.



Εικόνα 2.1. Από αριστερά προς τα δεξιά: Χάρτης περιοχών αποκρύψεων (με μαύρο), χάρτης περιοχών αποκρύψεων (με μαύρο) και ασυνεχειών βάθους (με άσπρο), χάρτης περιοχών αποκρύψεων (με μαύρο) και περιοχών με χαμηλή υφή (με άσπρο)
[Ζεύγος εικόνων *cones*, <http://vision.middlebury.edu/stereo/data/scenes2003/>].

Τα τελευταία χρόνια, με τις εξελίξεις στα συστήματα υπολογιστών, κατέστη δυνατή η χρήση της συνταύτισης εικόνων σε κυκλοφοριακές εφαρμογές (συστήματα υποβοήθησης οδηγού ή ρομποτικά αυτοκίνητα). Σε αυτές τις περιπτώσεις, εκτός από τα ποσοτικά αποτελέσματα είναι απαραίτητο να γίνει μια σημασιολογική ερμηνεία του παραγόμενου χάρτη παράλλαξης (Mroz & Breckon, 2012). Για αυτό τον λόγο, εξετάζεται αν τα αντικείμενα που απεικονίζονται στον χάρτη παράλλαξης είναι συνεκτικά και κατά πόσον συνδέονται ή διαχωρίζονται εύκολα από το περιβάλλον. Αυτό χρησιμεύει στην κατάτμηση (*segmentation*) ή ακόμα και την αναγνώριση αντικειμένων, κυρίως όσων βρίσκονται κοντά στο αυτοκίνητο (την κάμερα), όπως πεζοί, άλλα οχήματα ή οδικός εξοπλισμός (πχ. πινακίδες). Σε άλλη δημοσίευση (Steingrube et al., 2009) οι μέθοδοι συνταύτισης αξιολογούνται με βάση το κατά πόσον από τον παραγόμενο χάρτη παράλλαξης μπορεί να υπολογιστεί ο ελεύθερος χώρος μπροστά από το αντικείμενο (*object-free space*) ή να γίνει αντιληπτό το προπορευόμενο όχημα (*leader vehicle measurement*).

2. 4.2 Μέτρα αξιολόγησης του 3D μοντέλου στον χώρο

Από τους χάρτες παράλλαξης, και με δεδομένη την επιπολική γεωμετρία των εικόπων και τον εσωτερικό προσανατολισμό τους, μπορεί να παραχθεί τρισδιάστατο νέφος σημείων (3D ανακατασκευή), το οποίο και θα συγκριθεί με το αντίστοιχο που έχει προκύψει πχ. από έναν σαρωτή laser, όπου το τελευταίο μπορεί να θεωρείται ως “αληθές” (Hamilton et al., 2013).

Ειδικότερα, η εύρεση ψηφιακών παραλλάξεων ισοδυναμεί με την εύρεση ομόλογων εικονοσυντεταγμένων (Φλωρίδη, 2013). Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι είναι γνωστοί οι προσανατολισμοί των εικόπων, είναι τότε δυνατή η 3D ανακατασκευή του αντικειμένου, δηλαδή η δημιουργία ενός 3D μοντέλου από τους χάρτες βάθους. Η διαδικασία ανακατασκευής ανάγεται στον υπολογισμό των συντεταγμένων σημείων του αντικειμένου στον πραγματικό χώρο (ή τον χώρο του μοντέλου). Αυτό ισοδυναμεί με εύρεση της τομής δύο τουλάχιστον ομόλογων ακτίνων στον χώρο (απλή φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία).

Η συνθήκη που περιγράφει τη σχέση μεταξύ των εικονοσυντεταγμένων και των συντεταγμένων μοντέλου ή εκείνων του γεωδαιτικού συστήματος είναι, ως γνωστόν, η συνθήκη συγγραμμικότητας. Για την εύρεση των 3D συντεταγμένων χώρου, ή μοντέλου, κάθε σημείου απαιτούνται τουλάχιστον δυο εικόνες, που δίνουν τέσσερις παρατηρήσεις (εικονοσυντεταγμένες x, y της μιας εικόνας και x', y' της άλλης). Δηλαδή στην περίπτωση στερεοζεύγους υπάρχει ένας βαθμός ελευθερίας. Για κάθε επιπλέον εικόνα που εισάγεται στην εμπροσθοτομία ενισχύεται η περίσσεια παρατηρήσεων. Η συνόρθωση βασίζεται στη μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων, ενώ οι εξισώσεις παρατήρησης γραμμικοποιούνται ως προς τις τρεις ανεξάρτητες παραμέτρους, δηλαδή τις 3D συντεταγμένες.

Στην κανονική περίπτωση λήψης οι άξονες λήψης είναι παράλληλοι στον άξονα Z του χώρου, οι δε άξονες x των εικονοσυντεταγμένων των δύο εικόπων συμπίπτουν και είναι παράλληλοι προς τον άξονα X του χώρου, ενώ οι άξονες y των εικονοσυντεταγμένων είναι παράλληλοι μεταξύ τους αλλά και προς τον άξονα Y του χώρου. Δηλαδή οι εικόνες του ζεύγους δεν έχουν στροφές ως προς το σύστημα του χώρου αλλά ταυτόχρονα έχουν και μηδενικές συνιστώσες B_y και B_z της βάσης B, δηλαδή θεωρείται ότι η βάση είναι παράλληλη στον άξονα X και οι εικόνες έχουν ληφθεί από την ίδια απόσταση λήψης. Ακόμα, θεωρείται ότι οι σταθερές των δύο λήψεων είναι ίσες ($c_1 = c_2 = c$). Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, οι 3D συντεταγμένες κάθε σημείου στον χώρο υπολογίζονται από τις απλές φωτογραμμετρικές σχέσεις της παράλλαξης, όπου p η παράλλαξη και H η απόσταση λήψης:

$$X = \frac{B}{p} x \qquad Y = \frac{B}{p} y \qquad H = \frac{B}{p} c \qquad (2.18)$$

Οι επιπολικές εικόνες εμπίπτουν ακριβώς στην κανονική περίπτωση λήψης, όπου

είναι $y = y'$, ενώ η διαφορά $p = x - x'$ ορίζει την παράλλαξη. Το σύστημα χώρου θεωρείται εδώ ότι έχει αρχή το σημείο λήψης O της αριστερής εικόνας. Κατά συνέπεια, οι συντεταγμένες X, Y του σημείου στο χώρο και η απόσταση λήψης H για κάθε σημείο (τρίτη διάσταση) υπολογίζονται από τις Εξ. (2.18).

Υπογραμμίζεται πως, για λόγους απλότητας, οι εικονοσυντεταγμένες αναφέρονται εδώ στο πρωτεύον σημείο της εικόνας. Στην προκειμένη περίπτωση των επιπολικών εικόνων ενδέχεται, βέβαια, να διαφέρουν τα πρωτεύοντα σημεία των δύο επιπολικών εικόνων, και αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη τόσο κατά x όσο και κατά y . Όσον αφορά την παράλλαξη p , η ψηφιακή παράλλαξη $d = j - j'$ που λαμβάνεται από τον χάρτη παράλλαξης πρέπει προφανώς να διορθωθεί κατά την διαφορά Δj_0 των πρωτευόντων σημείων στην διεύθυνση x (σε μονάδες pixel):

$$p = d + \Delta j_0 \quad (2.19)$$

αφού ισχύει:

$$p = (x_1 - x_{o1}) - (x_2 - x_{o2}), \quad d = x_1 - x_2, \quad \Delta j_0 = x_{o2} - x_{o1} \quad (2.20)$$

Δεν είναι όμως πάντα εύκολο να βρεθούν αξιόπιστα “αληθή” δεδομένα για μια 3D ανακατασκευή, ενώ και η σύγκριση σε μια τέτοια περίπτωση δεν είναι απλή, αφού θα έπρεπε να συγκριθούν σημειοσύνολα διαφορετικής πυκνότητας και προσανατολισμού, με αλγορίθμους όπως ο ICP (Besl & McKay, 1992).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε 3D ανακατασκευή για τέσσερα ζεύγη εικόνων, με διάφορες μεθόδους συνταύτισης, και σύγκριση των νεφών που προέκυψαν από τους παραχθέντες χάρτες παράλλαξης με το αντίστοιχο νέφος από τον αληθή χάρτη. Σε αυτή την περίπτωση οι συντεταγμένες των σημείων προκύπτουν στο ίδιο σύστημα αναφοράς (εκείνο της αριστερής επιπολικής εικόνας) και έχουν την ίδια πυκνότητα σημείων, γι' αυτό η σύγκριση των νεφών (κατά X, Y, Z) μπορεί να γίνει απευθείας με τα εξής μέτρα αξιολόγησης:

- Μέσος όρος των διαφορών των συντεταγμένων (σε mm)

$$\mu_{\Delta X, \Delta Y, \Delta Z}^{mm} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_i}{n} \quad (2.21)$$

- Τυπική απόκλιση των διαφορών των συντεταγμένων (σε mm)

$$\sigma_{\Delta X, \Delta Y, \Delta Z}^{mm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_i - \mu_{\Delta X, \Delta Y, \Delta Z}^2}{n-1}} \quad (2.22)$$

- Μέση τετραγωνική διαφορά των συντεταγμένων (σε mm)

$$RMS_{\Delta X, \Delta Y, \Delta Z}^{mm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_i^2}{n}} \quad (2.23)$$

- Μέση τετραγωνική διαφορά των συντεταγμένων (σε pix)

$$RMS_{\Delta X, \Delta Y}^{pix} = \frac{RMS_{\Delta X, \Delta Y}^{mm}}{k}, \quad RMS_{\Delta Z}^{pix} = \frac{RMS_{\Delta Z}^{mm}}{k} \frac{B}{H} \quad (2.24)$$

όπου n ο αριθμός των σημείων του νέφους, B η βάση λήψης του στερεοζεύ-

γους, H η απόσταση λήψης και k η διάσταση της εδαφοψηφίδας (λόγος απόστασης λήψης σε m προς σταθερά της μηχανής σε μονάδες pixel).

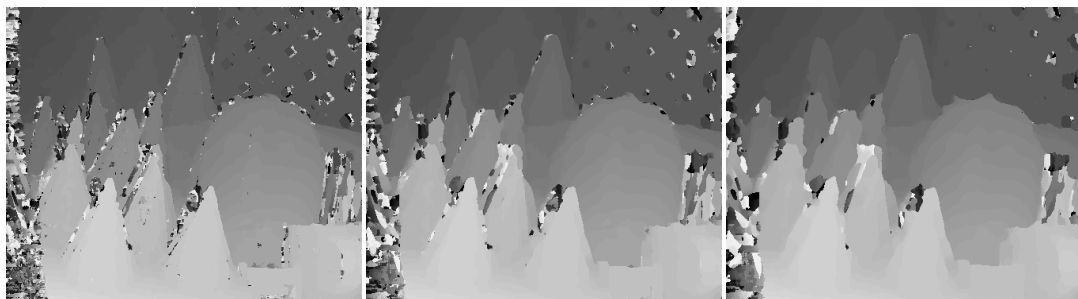
Είναι συχνά χρήσιμο να υπολογιστούν εκ νέου τα στατιστικά αυτά μεγέθη μετά από αφαίρεση των σημείων με διαφορές ΔZ εκτός διαστήματος $[-3\sigma, 3\sigma]$, που συνήθως αποτελούν χονδροειδή σφάλματα. Μπορεί να δοθεί, με τη μορφή ποσοστού επί του συνόλου των σημείων, ο αριθμός των σημείων που ανήκουν στο διάστημα $[-3\sigma, 3\sigma]$ και για των οποίων τις διαφορές θα υπολογιστούν ξανά τα στατιστικά. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι – αφού όταν συγκρίνονται παραχθέντες χάρτες βάθους με τους αληθείς οι εικονοσυντεταγμένες είναι δεδομένες – τα σφάλματα στα X και Y οφείλονται αποκλειστικά και μόνον στην κλίμακα, δηλαδή στην απόσταση λήψης που προκύπτει από την υπολογιζόμενη παράλλαξη. Συνεπώς, η αξιολόγηση αφορά αποκλειστικά τις αποστάσεις λήψης (δηλαδή τις υπολογισθείσες παραλλάξεις).

2.5 Αποφάσεις πριν από την Συνταύτιση

Πριν γίνει η συνταύτιση εικόνων πρέπει, γενικά, να ληφθούν ορισμένες αποφάσεις κρίσιμες για την ποιότητα των χαρτών παράλλαξης που θα παραχθούν. Επισημαίνονται δύο από τις κυριότερες επιλογές που πρέπει να γίνουν.

2.5.1 Μέγεθος παραθύρου συνταύτισης

Γίνεται η παραδοχή ότι οι εικονοψηφίδες του παραθύρου έχουν ίδιες τιμές βάθους. Αυτό δεν ισχύει όπου υπάρχουν ασυνέχειες βάθους ή έντονες αλλαγές στην προοπτική μεταξύ των εικόνων. Με την επιλογή μικρού παραθύρου βελτιώνεται η λεπτομέρεια του απεικονιζόμενου αντικειμένου. Από την άλλη μεριά, μπορεί να προκύψει αναξιόπιστη εκτίμηση της παράλλαξης, επειδή δεν περιλαμβάνονται αρκετές εναλλαγές έντασης, και να οδηγηθεί κανείς σε αποτέλεσμα χαμηλής ακρίβειας και έντονου θορύβου. Τα μεγάλα παράθυρα αντιστρέφουν αυτή την κατάσταση, αλλά παρουσιάζουν άλλα μειονεκτήματα. Συνήθως δεν μπορούν να υπολογίσουν απότομες αλλαγές βάθους, με συνέπεια να προκαλούν ομαλοποίηση των επιφανειών και να χάνουν πληροφορία όπου υπάρχουν μικρά αντικείμενα (Εικ. 2.2).



Εικόνα 2.2. Από αριστερά προς τα δεξιά: Χάρτες παράλλαξης με χρήση παραθύρων διαφορετικού μεγέθους: 7×7 , 11×11 , 15×15 (Κάρκαλου, 2014).

2. 5.2 Μέγιστη παράλλαξη

Τις περισσότερες φορές πρέπει πριν από την συνταύτιση να επιλεγεί η μέγιστη παράλλαξη, δηλαδή το για πόσες εικονοψηφίδες θα εξεταστεί η ομοιότητα με την εξεταζόμενη εικονοψηφίδα της εικόνας αναφοράς. Αν επιλεγεί μικρή τιμή μέγιστης παράλλαξης είναι σαν να τοποθετείται ένα τεχνητό όριο βάθους στην εικόνα, οπότε τα αντικείμενα με μεγαλύτερη παράλλαξη (δηλαδή όσα βρίσκονται πιο κοντά στην κάμερα) δεν μπορούν να βρεθούν στον χώρο συνταύτισης. Αντίθετα, αν επιλεγεί πολύ μεγάλη τιμή όχι μόνο αυξάνεται ο υπολογιστικός χρόνος (και επηρεάζεται η καταλληλότητα του αλγορίθμου για εφαρμογές πραγματικού χρόνου) αλλά μπορεί να επηρεαστεί και η ποιότητα του χάρτη παράλλαξης (Mroz & Breckon, 2012).

Στις εικόνες από την ιστοσελίδα αξιολόγησης αλγορίθμων συνταύτισης Middlebury, που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία, η μέγιστη παράλλαξη ταυτίζεται με τη μεγαλύτερη τιμή του αληθούς χάρτη παράλλαξης που διατίθεται, λαμβανομένης φυσικά υπόψη της αναγωγής που έχουν υποστεί οι τιμές (πολλαπλασιασμός $\times 3$ ή $\times 4$ για τα ζεύγη εικόνων της συλλογής “2003 datasets” ή “2006 datasets”, αντίστοιχα), ώστε οι τιμές να καλύπτουν σχεδόν ολόκληρο το εύρος 0-255 των τιμών μιας εικόνας με ραδιομετρική ανάλυση 8-bit.

3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΣΥΝΟΛΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ (semi-global matching)

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται αρχικά ο πρωτότυπος αλγόριθμος της υποσύνολης συνταύτισης (SGM) όσο και οι διάφορες παραλλαγές του και εκείνες του υπολογισμού των παραμέτρων του. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι παραλλαγές του αλγόριθμου ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (real-time) και η σύγκρισή του με άλλους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για τον ίδιο σκοπό, αφού προηγηθεί μια αναδρομή στους αλγόριθμους πραγματικού χρόνου και την ιστορία τους. Ακόμη, δίνεται η σύγκριση της διαδικασίας της συνταύτισης με τον αλγόριθμο (που συνιστά μια παθητική διαδικασία) με εκείνη που ακολουθείται για το LiDAR (ενεργητική διαδικασία), όπως αυτή περιγράφεται στη βιβλιογραφία.

3.1 Αρχικός Αλγόριθμος SGM

Ο Hirschmüller (2005, 2006, 2008) εισήγαγε πρώτος την μέθοδο Semi-Global Matching (SGM). Η μέθοδος προσφέρει καλή αναλογία μεταξύ απαιτούμενου χρόνου εκτέλεσης και παρεχόμενης ακρίβειας, ειδικά σε ακμές αντικειμένων. Οι εφαρμογές της ποικίλλουν από την εξαγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους από αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες έως την ρομποτική και τα συστήματα υποβοήθησης οδηγού (Hirschmüller, 2011).

Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε ζεύγη εικόνων με γνωστό εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό (κυρίως σε επιπολικές εικόνες) και συγκροτείται από διακριτά διαδοχικά βήματα. Ορισμένα από αυτά είναι προαιρετικά, ανάλογα με την εφαρμογή.

Πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός ενός αρχικού κόστους ομοιότητας C για κάθε εικονοψηφίδα \mathbf{p} σε κάθε παράλλαξη d μέσα στο ορισμένο εύρος παραλλάξεων. Το κόστος $C(\mathbf{p}, d)$ υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε εικονοψηφίδα (pixel-wise matching cost calculation). Κατά συνέπεια δεν απαιτείται παραδοχή για την ύπαρξη σταθερών παραλλάξεων στην γειτονιά κάθε εικονοψηφίδας, και άρα με τον τρόπο αυτό μπορούν να διατηρούνται οι ακμές των αντικειμένων. Συνήθως χρησιμοποιείται μια από τις εξής προαναφερθείσες μεθόδους υπολογισμού κόστους: BT (Birchfield & Tomasi, 1998), AD [Absolute Differences – Απόλυτες Διαφορές], Hierarchical Mutual Information [Ιεραρχική Αμοιβαία Πληροφορία] (Hirschmüller, 2008) και οι μη παραμετρικοί μετασχηματισμοί Rank ή Census (Zabih & Woodfill, 1994).

Για την εύρεση της βέλτιστης παράλλαξης σε κάθε εικονοψηφίδα διαμορφώνεται η συνάρτηση ενέργειας $E(d)$, με ανεξάρτητη μεταβλητή την ψηφιακή παράλλαξη d , όπως στους σύνολους αλγόριθμους:

$$E(d) = \sum_{\mathbf{p}} (C(\mathbf{p}, d_{\mathbf{p}}) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|d_{\mathbf{p}} - d_{\mathbf{q}}| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|d_{\mathbf{p}} - d_{\mathbf{q}}| > 1]) \quad (3.1)$$

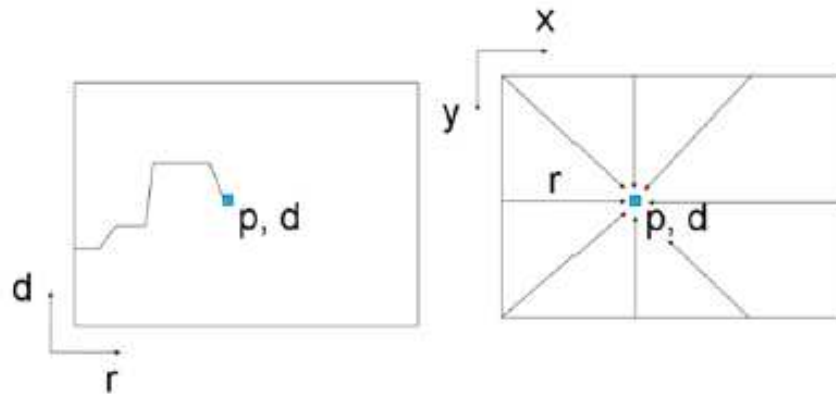
Ο πρώτος όρος για κάθε εικονοψηφίδα \mathbf{p} είναι το κόστος για δεδομένη παράλλαξη d . Όμως ο υπολογισμός του κόστους με βάση την τιμή έντασης μόνο της ίδιας της

εικονοψηφίδας μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό προστίθεται μια δέσμευση, η οποία υποστηρίζει την ομαλότητα αποδίδοντας ποινές όταν οι γειτονικές εικονοψηφίδες έχουν διαφορετική παράλλαξη. Ο δεύτερος όρος, έτσι, προσθέτει μια σταθερή ποινή P_1 για όλες τις εικονοψηφίδες \mathbf{q} , στη γειτονιά της εικονοψηφίδας \mathbf{p} , στις οποίες η παράλλαξη αλλάζει λίγο (πχ. 1 pixel). Ο τρίτος όρος προσθέτει μια μεγαλύτερη σταθερή ποινή P_2 αν η παράλλαξη αλλάζει περισσότερο. Οι δύο τελευταίοι όροι συνδέουν έμμεσα, επομένως, όλες τις εικονοψηφίδες της εικόνας μεταξύ τους και είναι αυτοί που δίνουν ένα χαρακτηριστικό σύνολης (global) συνάρτησης (Hirschmüller, 2011).

Μικρότερη ποινή P_1 για τις μικρές αλλαγές της παράλλαξης επιτρέπει προσαρμογή σε κυρτές ή καμπύλες (δηλαδή σχετικά ομαλές) επιφάνειες. Η σταθερή ποινή P_2 για τις μεγαλύτερες διαφορές παράλλαξης διατηρεί τις ασυνέχειες βάθους έως ένα βαθμό. Επειδή οι ασυνέχειες βάθους είναι συχνά ορατές ως αλλαγές στην ένταση, η ποινή P_2 μπορεί να προσαρμοστεί στην κλίση της έντασης (μειούμενη καθώς η κλίση αυξάνεται). Γενικώς οι ασυνέχειες διατηρούνται αν η συνταύτιση είναι ισχυρότερη από την ποινή. Αυτό στην περίπτωση της μεταβλητής ποινής εξαρτάται από το αν η υφή της εικόνας υποδηλώνει την ύπαρξη ασυνέχειας βάθους. Έστω εξεταζόμενη εικονοψηφίδα \mathbf{p} με παράλλαξη d_p , για την οποία προέκυψε από την συνταύτιση το μικρότερο κόστος ($C(\mathbf{p}, d_p)$). Αν η διαφορά παράλλαξης μεταξύ της τρέχουσας εικονοψηφίδας \mathbf{p} και της προηγούμενης στο μονοπάτι \mathbf{q} είναι μεγαλύτερη από 1 και ταυτόχρονα η διαφορά έντασης μεταξύ των δύο εικονοψηφίδων είναι μεγάλη, υπάρχει πιθανότητα το μικρό κόστος να μην οφείλεται σε λανθασμένη συνταύτιση αλλά να υπάρχει ακμή στην εικόνα και για αυτό υπάρχει μεγάλη διαφορά παράλλαξης μεταξύ γειτονικών εικονοψηφίδων. Αν η ποινή P_2 προσαρμοστεί στην κλίση της εικόνας θα είναι μικρή, και όταν θα προστεθεί στο κόστος αυτό θα εξακολουθήσει να είναι το μικρότερο κόστος της εικονοψηφίδας, οπότε θα επιλεγεί για τον χάρτη παράλλαξης η (ορθή) παράλλαξη d_p που αντιστοιχεί σε αυτό. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να διασφαλίζεται ότι $P_2 \geq P_1$.

Ζητούμενο είναι η εύρεση του χάρτη ψηφιακής παράλλαξης ο οποίος ελαχιστοποιεί την συνάρτηση ενέργειας, δηλαδή ζητείται να βρεθεί για κάθε εικονοψηφίδα η παράλλαξη στην οποία παρουσιάζεται το ελάχιστο κόστος, και επομένως επιτυγχάνεται βέλτιστη συνταύτιση. Επειδή όμως αυτό είναι υπολογιστικά δυσεπίλυτο, έχει προταθεί να υπολογίζεται το τελικό (συσσωματωμένο – aggregated) κόστος ως το άθροισμα του κόστους από κάθε κατεύθυνση, χωρίς βάρη. Συνήθως επιλέγονται 8 κατευθύνσεις (Hirschmüller, 2008). Αυτό συνιστά το δεύτερο βήμα του αλγορίθμου.

Το συσσωματωμένο κόστος $S(\mathbf{p}, d)$ για κάθε εικονοψηφίδα \mathbf{p} στην παράλλαξη d το υπολογίζει κανείς αθροίζοντας τα κόστη από τα “μονοπάτια ελάχιστου κόστους” που καταλήγουν στην εικονοψηφίδα (Εικ. 3.1).



Εικόνα 3.1. Τα 8 “μονοπάτια ελάχιστου κόστους” από τις διαφορετικές κατευθύνσεις συναντώνται σε κάθε εικονοψηφίδα. Πηγή: Hirschmüller (2011).

Το κόστος $L_r(\mathbf{p}, d)$ της εικονοψηφίδας \mathbf{p} στην παράλλαξη d κατά μήκος ενός μονοπατιού ελάχιστου κόστους στη διεύθυνση r ορίζεται ως το άθροισμα των κάτωθι όρων:

- Του κόστους συνταύτισης $C(\mathbf{p}, d)$ της εικονοψηφίδας, όπως αυτό υπολογίστηκε στο πρώτο βήμα.
- Του ελάχιστου κόστους της προηγούμενης εικονοψηφίδας του μονοπατιού, συμπεριλαμβανομένων των αντίστοιχων ποινών. Κατά συνέπεια, για τον υπολογισμό του συσσωματωμένου κόστους μιας εικονοψηφίδας απαιτείται να είναι γνωστά τα κόστη των προηγούμενων εικονοψηφίδων σε κάθε παράλλαξη. Ειδικότερα, επιλέγεται το ελάχιστο από τις εξής τιμές: το κόστος της προηγούμενης εικονοψηφίδας του μονοπατιού $\mathbf{p}-r$ στην ίδια παράλλαξη d ($L_r(\mathbf{p}-r, d)$), το κόστος της προηγούμενης εικονοψηφίδας του μονοπατιού $\mathbf{p}-r$ στην αμέσως προηγούμενη παράλλαξη $d-1$ συμπεριλαμβανομένης της ποινής P_1 ($L_r(\mathbf{p}-r, d-1) + P_1$), το κόστος της προηγούμενης εικονοψηφίδας του μονοπατιού $\mathbf{p}-r$ στην αμέσως επόμενη παράλλαξη $d+1$ συμπεριλαμβανομένης της ποινής P_1 ($L_r(\mathbf{p}-r, d+1) + P_1$), το ελάχιστο κόστος της προηγούμενης εικονοψηφίδας του μονοπατιού $\mathbf{p}-r$ σε όποια παράλλαξη αυτό έχει επιτευχθεί συμπεριλαμβανομένης της ποινής P_2 ($\min(L_r(\mathbf{p}-r, i)) + P_2$).
- Τέλος, αφαιρείται το ήδη γνωστό ελάχιστο κόστος της προηγούμενης εικονοψηφίδας του μονοπατιού ($\min(L_r(\mathbf{p}-r, k))$) ώστε να μην αυξηθούν υπερβολικά οι τιμές του κόστους. Το μονοπάτι ελάχιστου κόστους δεν επηρεάζεται, αφού αφαιρείται η ίδια τιμή από όλα τα κόστη κάθε εικονοψηφίδας \mathbf{p} για οποιαδήποτε παράλλαξη d , και επιπλέον η αφαίρεση αυτή σε καμία περίπτωση δεν θα καταστήσει αρνητικό το κόστος στο μονοπάτι (Hirschmüller, 2011).

Δηλαδή, ο υπολογισμός του κόστους $L_r(\mathbf{p}, d)$ της εικονοψηφίδας \mathbf{p} στην παράλλαξη d κατά μήκος ενός μονοπατιού ελάχιστου κόστους στη διεύθυνση r δίδεται ως:

$$L_r(\mathbf{p}, d) = C(\mathbf{p}, d) + \min \begin{pmatrix} L_r(\mathbf{p} - r, d), \\ L_r(\mathbf{p} - r, d - 1) + P_1, \\ L_r(\mathbf{p} - r, d + 1) + P_1, \\ \min_i (L_r(\mathbf{p} - r, i)) + P_2 \end{pmatrix} - \min_k (L_r(\mathbf{p} - r, k)) \quad (3.2)$$

Το συσσωματωμένο κόστος $S(\mathbf{p}, d)$ για κάθε εικονοψηφίδα \mathbf{p} στην παράλλαξη d ισούται με:

$$S(\mathbf{p}, d) = \sum_r L_r(\mathbf{p}, d) \quad (3.3)$$

Το τρίτο βήμα είναι ο υπολογισμός της παράλλαξης. Ο χάρτης ψηφιακής παράλλαξης D_L ο οποίος αντιστοιχεί στην εικόνα αναφοράς καθορίζεται, όπως και στους τοπικούς αλγορίθμους, με την επιλογή για κάθε εικονοψηφίδα \mathbf{p} εκείνης της παράλλαξης d που αντιστοιχεί στο ελάχιστο συσσωματωμένο κόστος $S(\mathbf{p}, d)$ (μέθοδος Winner-Takes-All):

$$D_L(\mathbf{p}) = \operatorname{argmin}_d S(\mathbf{p}, d) \quad (3.4)$$

Μπορεί να ακολουθήσει βελτίωση του παραχθέντος χάρτη παράλλαξης με τους διάφορους προαναφερθέντες τρόπους (έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας, εφαρμογή μικρού φίλτρου μεσαίας τιμής, υποψηφιακή παρεμβολή κ.λπ.).

3.2 Παραλλαγές του Αλγορίθμου SGM

Σε αυτή την ενότητα αναλύονται οι κυριότερες παραλλαγές του αλγορίθμου SGM, με την χρονολογική σειρά που αυτές εμφανίστηκαν στη βιβλιογραφία. Οι περισσότερες από αυτές έχουν αρκετά υψηλή κατάταξη σε γνωστές ιστοσελίδες αξιολόγησης αλγορίθμων συνταύτισης, όπως η KITTI (<http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/>) και η Middlebury (<http://vision.middlebury.edu/stereo/>).

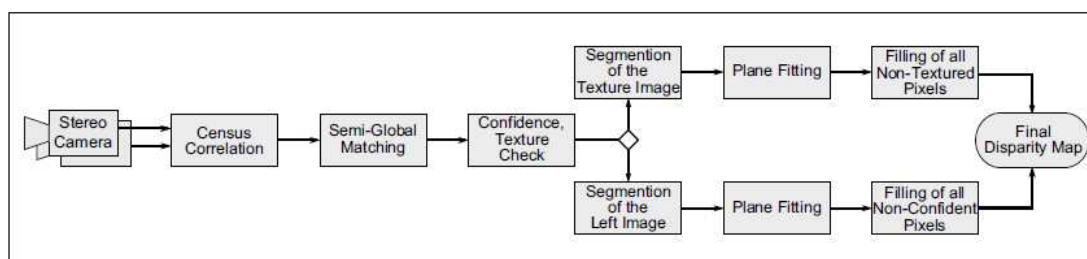
Οι Humenberger et al. (2010) δημιούργησαν μια παραλλαγή του αλγορίθμου SGM (*PlaneFitSGM*) σε συνδυασμό με τη χρήση του μετασχηματισμού Census για τον υπολογισμό του κόστους, και βελτίωσαν τον χάρτη παράλλαξης με την προσαρμογή επιπέδων σε προβληματικές περιοχές που μπορούν να θεωρηθούν ως επίπεδες. Κατά την εφαρμογή αυτής της παραλλαγής του αλγορίθμου SGM, ο πίνακας DSI με τα αρχικά κόστη χωρίζεται σε στρώματα πάχους ορισμένων εικονοψηφίδων. Γίνεται παραδοχή ότι κάθε εικονοψηφίδα μπορεί να επωφεληθεί από την εφαρμογή της μεθόδου SGM ακόμα και αν αυτή εφαρμόζεται σε τμήμα της εικόνας. Ως αποτέλεσμα, τα συσσωματωμένα κόστη υπολογίζονται ξεχωριστά σε κάθε στρώμα, κατά τα γνωστά. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η κατανάλωση μνήμης.

Ο χάρτης ψηφιακής παράλλαξης υπολογίζεται μόνο για τα σημεία που περνούν δύο ελέγχους, τους ελέγχους εμπιστοσύνης και υφής, όπου για κάθε εικονοψηφίδα υπολογίζεται μια τιμή εμπιστοσύνης και μια υφής. Η εμπιστοσύνη εκφράζει την διαφορά που έχει το ελάχιστο κόστος κάθε εικονοψηφίδας με την αμέσως επόμενη μεγα-

λύτερη τιμή του κόστους (ανηγγμένη στο μέγιστο δυνατό κόστος). Η υφή εκφράζεται ως η μεταβλητότητα σε ένα παράθυρο. Ο έλεγχος διενεργείται με τη σύγκριση των τιμών εμπιστοσύνης και υφής κάθε εικονοψηφίδας με αντίστοιχα κατώφλια.

Στη συνέχεια, για τα σημεία που δεν πέρασαν τους ελέγχους εμπιστοσύνης και υφής γίνεται αρχικά κατάτμηση της εικόνας. Αυτή μπορεί να γίνει με βάση το χρώμα της αριστερής εικόνας (εικόνα αναφοράς), προκειμένου να υπολογιστούν παραλλάξεις για τα σημεία που δεν πέρασαν τον έλεγχο εμπιστοσύνης, ή στην δυαδική εικόνα υφής, για τα σημεία που δεν πέρασαν τον έλεγχο υφής. Για κάθε τμήμα προσαρμόζεται εξίσωση επιπέδου με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ή εκείνη των Bleyer & Gelautz (2005), από την οποία προκύπτουν λιγότερα χονδροειδή σφάλματα. Τα σημεία που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του επιπέδου είναι εκείνα που είχαν περάσει τον έλεγχο εμπιστοσύνης και έχουν, έτσι, γνωστές παραλλάξεις. Ακολούθως, γίνεται έλεγχος για την ποιότητα των επιπέδων που υπολογίστηκαν, επειδή σε κάποιες προβληματικές περιοχές τα αρχικά δεδομένα ενδέχεται να μην επαρκούσαν για τον σωστό προσδιορισμό του επιπέδου.

Για τα σημεία που πέρασαν τον έλεγχο εμπιστοσύνης ο τελικός βελτιωμένος χάρτης παράλλαξης δημιουργείται από τον αρχικό χάρτη παράλλαξης. Για τα σημεία που δεν πέρασαν τον έλεγχο εμπιστοσύνης ή τον έλεγχο υφής, ανάλογα με τον τύπο της κατάτμησης που επιλέχθηκε, ο χάρτης συμπληρώνεται από τα επίπεδα που υπολογίστηκαν και πέρασαν τον διενεργηθέντα έλεγχο αξιοπιστίας. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου φαίνεται στην Εικ. 3.2.



Εικόνα 3.2. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου. Πηγή: Humenberger et al. (2010).

Η εφαρμογή στην συγκεκριμένη περίπτωση του αλγορίθμου SGM είναι ιδιαίτερα σημαντική, γιατί αυξάνει σε κάθε εικονοψηφίδα την διαφορά μεταξύ ελάχιστου κόστους και επόμενης μεγαλύτερης τιμής. Κατά συνέπεια, περισσότερα σημεία περνούν τον έλεγχο εμπιστοσύνης και άρα χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή επιπέδου, με αποτέλεσμα την βελτίωση του τελικού χάρτη ψηφιακής παράλλαξης.

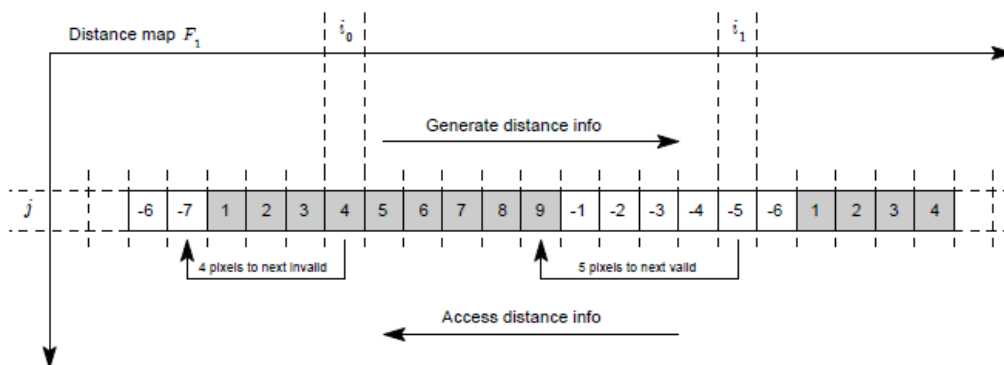
Μια παραλλαγή της μεθόδου SGM, η οποία ονομάζεται *eSGM* (Hirschmüller et al., 2012), υπόσχεται μικρότερη δέσμευση μνήμης επειδή εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των εικονοψηφίδων και όχι από το εύρος της παράλλαξης. Σε αυτή την μέθοδο, μετά από τον υπολογισμό του κόστους σε κάθε μονοπάτι υπολογίζεται η παράλλαξη που αντιστοιχεί στο ελάχιστο κόστος του μονοπατιού και αποθηκεύεται μόνο αυτή,

και όχι τα κόστη που αντιστοιχούν σε κάθε εικονοψηφίδα για κάθε παράλλαξη. Αυτό βασίζεται στην παραδοχή ότι, θεωρητικά, η παράλλαξη που αντιστοιχεί στο ελάχιστο κόστος θα είναι η ίδια για κάθε μονοπάτι και θα είναι η αληθής.

Οι Hermann & Klette (2012) εισηγήθηκαν μια επαναληπτική εκδοχή του αλγορίθμου SGM (*iSGM*). Στην πρώτη φάση εφαρμόζεται εδώ ο αρχικός αλγόριθμος SGM στην αριστερή και την δεξιά εικόνα μόνο για τις κατευθύνσεις αριστερά και δεξιά της κεντρικής εικονοψηφίδας και, επιπλέον, στις ίδιες εικόνες με τη μισή ανάλυση για όλες τις κατευθύνσεις. Τα κόστη από την εφαρμογή του αλγορίθμου στις εικόνες με μισή ανάλυση συγχωνεύονται στον πίνακα με τα κόστη των εικόνων με πλήρη ανάλυση, μειωμένα με έναν συντελεστή η . Στη συνέχεια παράγεται χάρτης ψηφιακής παράλλαξης, ο οποίος υποβάλλεται σε έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας.

Ακολούθως δημιουργείται ο ομογενοποιημένος χάρτης παράλλαξης H , ο οποίος περιλαμβάνει θετικές τιμές παράλλαξης μέσα στο εύρος $[0, d_{max}]$ ή τον χαρακτηρισμό *inv*, ο οποίος υποδεικνύει άκυρη (invalid) τιμή παράλλαξης. Θεωρείται ότι μια εικονοψηφίδα έχει άκυρη παράλλαξη αν η διαφορά της παράλλαξής της σε σχέση με την παράλλαξη οποιασδήποτε από τις 8 γειτονικές της εικονοψηφίδες είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλι γ . Σε αυτή την περίπτωση, σε όλες αυτές οι εικονοψηφίδες αποδίδεται άκυρη παράλλαξη. Με αυτό τον τρόπο ομογενοποιείται ο χάρτης παράλλαξης με βάση το κατώφλι γ .

Ο “υποσύνολος χάρτης αποστάσεων” (semi-global distance map), ο οποίος εισήχθη τότε για πρώτη φορά στην βιβλιογραφία, παράγεται από τον ομογενοποιημένο χάρτη παράλλαξης. Αρχικά δημιουργείται, για καθεμία από τις 8 κατευθύνσεις, ένας χάρτης αποστάσεων F_k (Εικ. 3.3), με βάση τις τιμές που έχουν η τρέχουσα εικονοψηφίδα και η προηγούμενή της στο μονοπάτι ελάχιστου κόστους στον ομογενοποιημένο χάρτη παράλλαξης H .



Εικόνα 3.3. Δημιουργία χάρτη αποστάσεων F_k (για $k = 1$). Πηγή: Hermann & Klette (2012).

Ειδικότερα, σε περίπτωση έγκυρων παραλλάξεων ορίζεται η τιμή ενός μετρητή ίση με 1, αυξανόμενη κατά 1 για κάθε διαδοχική εικονοψηφίδα με έγκυρη παράλλαξη. Η τιμή κάθε εικονοψηφίδας στον χάρτη αποστάσεων ισούται με την τιμή που έχει ο

μετρητής στην συγκεκριμένη εικονοψηφίδα. Σε περίπτωση που η επόμενη εικονοψηφίδα στο μονοπάτι έχει άκυρη παράλλαξη, η τιμή του μετρητή τίθεται στο -1 και μειώνεται κατά 1 για κάθε διαδοχική εικονοψηφίδα με άκυρη παράλλαξη. Επειδή η πληροφορία για την απόσταση αθροίζεται με την αντίθετη φορά από εκείνη που χρησιμοποιείται για την συσσωμάτωση του κόστους από τον αλγόριθμο SGM, απαιτείται να μετονομαστούν οι δείκτες των χαρτών αποστάσεων που δημιουργούνται.

Ο υποσύνολος χάρτης αποστάσεων F_p συγκροτείται από την συγχώνευση των 8 χαρτών αποστάσεων, κατά συνέπεια η τιμή μιας εικονοψηφίδας του αποτελείται από ένα διάνυσμα με 8 τιμές. Αυτό που εκφράζεται είναι σε ποια απόσταση (σε εικονοψηφίδες) βρίσκεται η κοντινότερη εικονοψηφίδα της αντίθετης κατηγορίας (δηλαδή εάν η τρέχουσα εικονοψηφίδα έχει έγκυρη παράλλαξη και τιμή 5 στον υποσύνολο χάρτη αποστάσεων, αυτό σημαίνει ότι στην θέση που απέχει 5 εικονοψηφίδες στην εξεταζόμενη κατεύθυνση συναντάται άκυρη παράλλαξη. Αντίστοιχα, αν η τρέχουσα εικονοψηφίδα έχει άκυρη παράλλαξη και τιμή -5 στον υποσύνολο χάρτη αποστάσεων, αυτό σημαίνει ότι σε 5 εικονοψηφίδες προς την εξεταζόμενη κατεύθυνση συναντάται έγκυρη παράλλαξη.)

Με γνωστό τον υποσύνολο χάρτη αποστάσεων, είναι γνωστή για κάθε εικονοψηφίδα η απόσταση που αυτή απέχει από κάθε γειτονική εικονοψηφίδα της αντίθετης κατηγορίας. Επίσης, επειδή ο χάρτης έχει προκύψει από τον ομογενοποιημένο χάρτη παράλλαξης, είναι γνωστό ότι δύο διαδοχικές εικονοψηφίδες με έγκυρη τιμή παράλλαξης θα έχουν διαφορά παράλλαξης μικρότερη από το κατώφλι γ . Αυτά τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται για τη μείωση του χώρου αναζήτησης της βέλτιστης παράλλαξης. Συγκεκριμένα, προκειμένου για έγκυρες παραλλάξεις, αν θεωρηθεί για μια εικονοψηφίδα ότι η ελάχιστη τιμή απόστασης f_{\min} που έχει στο διάνυσμα απόστασης F_p είναι μεγαλύτερη από ένα δεδομένο ακέραιο κατώφλι απόστασης ϑ , συνεπάγεται ότι οι παραλλάξεις μέσα σε μια περιοχή μεγέθους $(2 \times f_{\min} + 1) \times (2 \times f_{\min} + 1)$ – δηλαδή σε απόσταση f_{\min} περί την εικονοψηφίδα – δεν μπορούν να διαφέρουν περισσότερο από το κατώφλι γ . Αν η ελάχιστη τιμή f_{\min} είναι μεγαλύτερη από ένα αρκετά μεγάλο κατώφλι ϑ , υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το κόστος της εικονοψηφίδας να είναι κοντά σε εκείνο που αντιστοιχεί στην αληθή παράλλαξη. Κατ' αυτό τον τρόπο, στην διάρκεια της διαδικασίας υπολογισμού του συσσωματωμένου κόστους σύμφωνα με τον αλγόριθμο SGM περιορίζεται το εύρος παραλλάξεων εντός του οποίου υπολογίζεται το ελάχιστο κόστος της προηγούμενης εικονοψηφίδας στην υποσύνολη γειτονιά. Προκειμένου για άκυρες παραλλάξεις, το διάνυσμα απόστασης F_p της εικονοψηφίδας περιλαμβάνει μόνο αρνητικές τιμές, οι οποίες εκφράζουν την απόσταση από την κοντινότερη γειτονική εικονοψηφίδα με έγκυρη παράλλαξη. Το εύρος παραλλάξεων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κόστους ορίζεται από την μεγαλύτερη και την μικρότερη έγκυρη παράλλαξη, με την λογική ότι η βέλτιστη παράλλαξη θα πρέπει να βρίσκεται μέσα σε αυτό το διάστημα, αφού αυτά είναι τα 8 μονοπάτια ελάχιστου κόστους τα οποία περνάνε από την συγκεκριμένη ει-

κονοψηφίδα. Από την άλλη μεριά, για τις εικονοψηφίδες με άκυρες παραλλάξεις μπορεί να γίνει “υποσύνολη παρεμβολή”. Η βέλτιστη τιμή παράλλαξης για κάθε εικονοψηφίδα μπορεί τότε να υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των παραλλάξεων των 8 κοντινότερων εικονοψηφίδων που έχουν έγκυρη παράλλαξη με βάρος τις αποστάσεις τους από την εξεταζόμενη εικονοψηφίδα.

Στην συνέχεια εφαρμόζεται ο αρχικός αλγόριθμος του SGM στην αριστερή και την δεξιά εικόνα μόνο για τις κατευθύνσεις πάνω και κάτω της κεντρικής εικονοψηφίδας, στον περιορισμένο χώρο αναζήτησης που ορίστηκε. Για να περιοριστεί περαιτέρω ο χώρος αναζήτησης, μπορεί να γίνει μια ακόμη επανάληψη. Έπειτα εφαρμόζεται ο αρχικός αλγόριθμος του SGM στην αριστερή και την δεξιά εικόνα για τις διαγώνιες κατευθύνσεις.

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται με εικόνα αναφοράς την δεξιά. Ο τελικός χάρτης παράλλαξης προκύπτει μετά από έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας στους δύο χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από την συνταύτιση της αριστερής εικόνας με την δεξιά και την συνταύτιση της δεξιάς με την αριστερή. Στην Εικ. 3.4 φαίνεται το διάγραμμα ροής της συγκεκριμένης παραλλαγής του αλγορίθμου SGM.

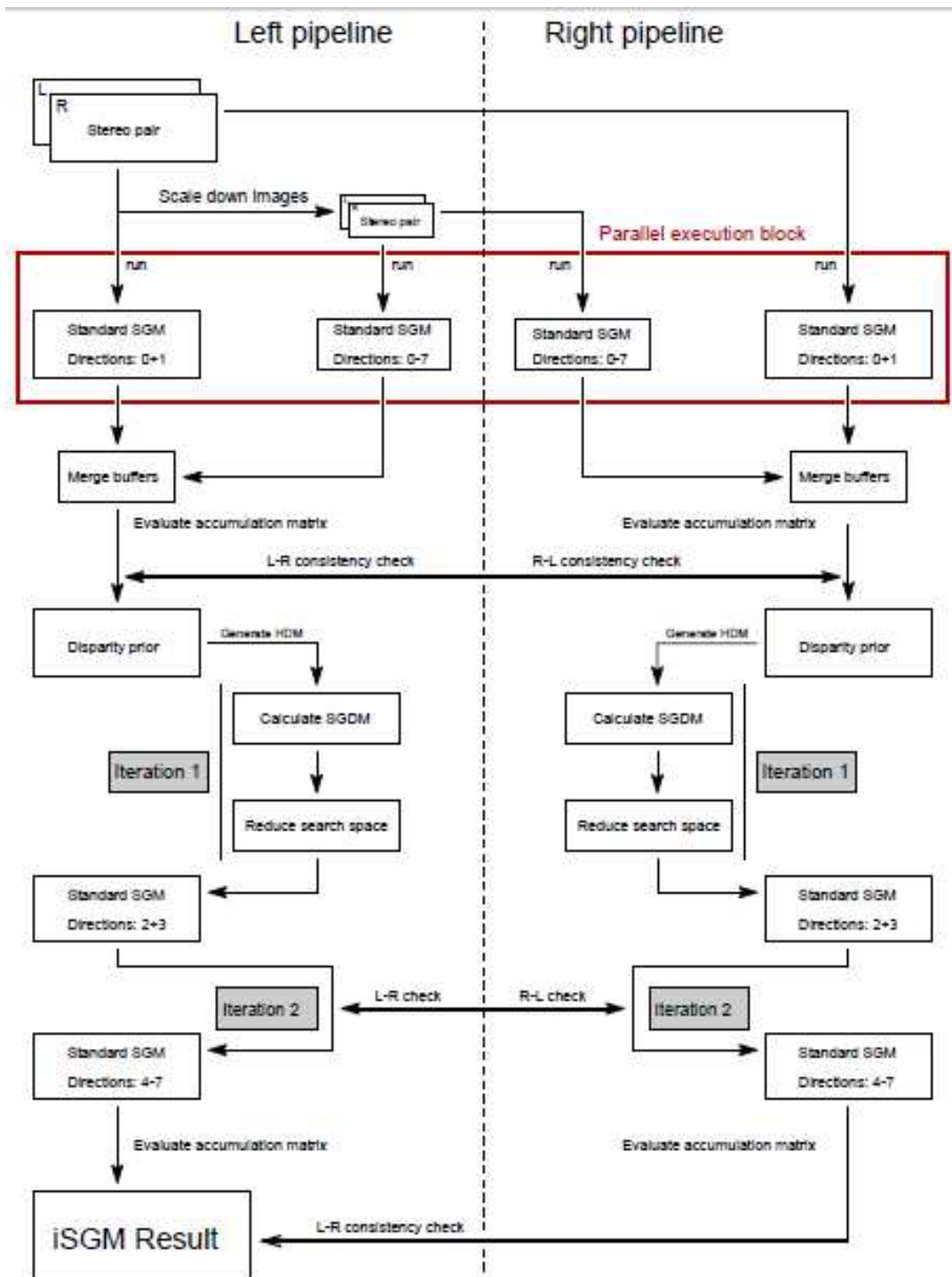
Οι νέες παράμετροι που εισάγονται στην μέθοδο *iSGM* είναι το κατώφλι γ , το οποίο χρησιμεύει για την παραγωγή του ομογενοποιημένου χάρτη παράλλαξης, το κατώφλι ϑ , το οποίο καθορίζει το απαιτούμενο ελάχιστο του διανύσματος απόστασης F ώστε να μειωθεί ο χώρος αναζήτησης, και ο συντελεστής η , με τον οποίο πολλαπλασιάζονται τα συσσωματωμένα κόστη που υπολογίστηκαν στις εικόνες μισής ανάλυσης πριν από την συγχώνευσή τους στον πίνακα με τα κόστη των εικόνων πλήρους ανάλυσης. Επειδή για όλες τις παραλλάξεις που ανήκουν στο δεδομένο εύρος υπολογίζονται πρώτα τα συσσωματωμένα κόστη στην οριζόντια διεύθυνση, τα αποτελέσματα παράλλαξης είναι καλύτερα για όσα σημεία έχουν σταθερές παραλλάξεις στην διεύθυνση αυτή.

Για την βελτίωση του αποτελέσματος που δίνει ο αλγόριθμος SGM οι Michael et al. (2013) έχουν προτείνει την εισαγωγή επιπλέον παραμέτρων (μέθοδος *SGMDDW*). Ειδικότερα, προτείνεται:

- να δοθούν διαφορετικές ποινές P_1, P_2 σε κάθε διεύθυνση,
- να δοθεί διαφορετικό βάρος \vec{w} στο κόστος που προκύπτει από κάθε διεύθυνση πριν γίνει η συσσωμάτωση και υπολογιστεί ο τελικός χάρτης παράλλαξης, και
- να χρησιμοποιούνται νέες ποινές $\widehat{P}_1, \widehat{P}_2$ σε κάθε διεύθυνση αντί των P_1, P_2 εφόσον το διάνυσμα της κλίσης της έντασης σε αυτή την διεύθυνση ξεπεράσει ένα ορισμένο κατώφλι.

Τελικά χρησιμοποιούνται 5 παράμετροι σε κάθε διεύθυνση. Σημειώνεται πως δεν

λαμβάνεται υπόψη η φορά προς την οποία γίνεται το άθροισμα του κόστους (δηλαδή από πάνω προς τα κάτω ή από αριστερά προς τα δεξιά). Κατά συνέπεια, σε μια τυπική εφαρμογή του αλγορίθμου SGM με 8 κατευθύνσεις, οι διευθύνσεις είναι 4. Οπότε συνολικά οι παράμετροι της μεθόδου είναι 20.

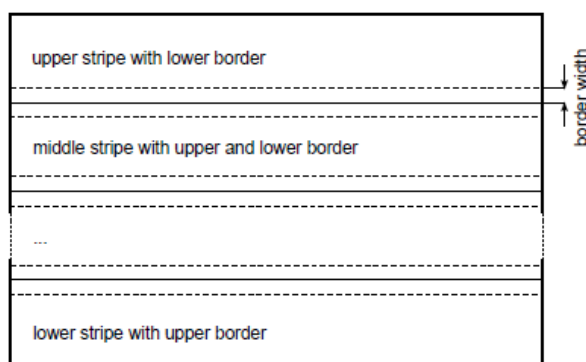


Εικόνα 3.4. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου iSGM. Πηγή: Hermann & Klette (2012).

Οι Sprangenberg et al. (2013) εισήγαγαν δύο καινοτόμα στοιχεία. Πρώτον, ο υπολογισμός του κόστους πραγματοποιείται με παραλλαγή του μετασχηματισμού Census,

η οποία ονομάζεται Center-Symmetric Census Transform (Zinner et al., 2008). Σε αυτόν τον μετασχηματισμό συγκρίνονται μόνο τα ζεύγη των εικονοψηφίδων που είναι συμμετρικά ως προς το κέντρο του παραθύρου (δηλαδή η 1^η εικονοψηφίδα παραθύρου 5×5 συγκρίνεται με την 24^η εικονοψηφίδα – η κεντρική εικονοψηφίδα δεν συμμετέχει στην σύγκριση). Στην συνέχεια, τα διανύσματα που παράγονται από την αριστερή και την δεξιά εικόνα συγκρίνονται μέσω της απόστασης Hamming, στην οποία συμπεριλαμβάνονται βάρη ανάλογα με την θέση της εικονοψηφίδας στο παράθυρο (για παράδειγμα, δίνεται αυξημένο βάρος στις εικονοψηφίδες που σχηματίζουν σταυρό περί την κεντρική). Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να εφαρμόζεται μετασχηματισμός Census σε μεγαλύτερες επιφάνειες με υπολογιστικό χρόνο που αντιστοιχεί στην εφαρμογή του σε μικρότερη επιφάνεια. Δεύτερον, προτείνεται να δίνεται διαφορετικό βάρος σε κάθε κόστος, ανάλογα με το σε ποιο μονοπάτι αντιστοιχεί και με την απεικονιζόμενη επιφάνεια (μέθοδος *wSGM*). Προκειμένου, ειδικά, για επίπεδα αντικείμενα μεγαλύτερο βάρος δίνεται στα μονοπάτια που σχηματίζουν μικρότερη γωνία με την αντίστοιχη ευθεία φυγής.

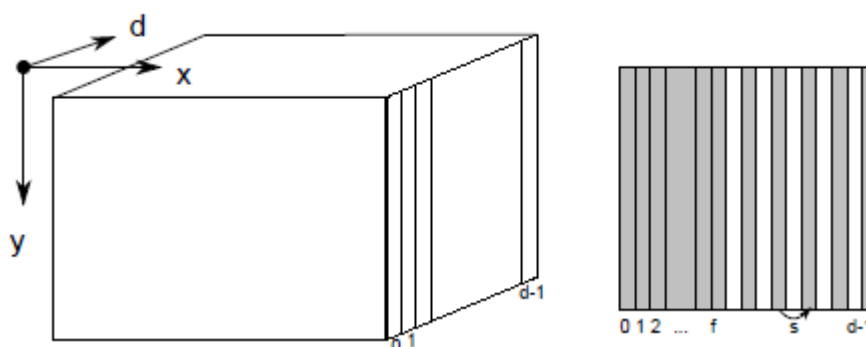
Σε επόμενη δημοσίευση, οι Spangenberg et al. (2014) ανέπτυξαν μια νέα παραλλαγή της μεθόδου SGM, την οποία ονόμασαν *rSGM* (rapid SGM). Σε αυτή, χώρισαν την εικόνα σε επικαλυπτόμενες οριζόντιες λωρίδες (Εικ. 3.5), ώστε να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος SGM παράλληλα σε κάθε λωρίδα και να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος.



Εικόνα 3.5. Επικάλυψη μεταξύ των λωρίδων της εικόνας. Πηγή: Spangenberg et al. (2014).

Ακόμη, συμπίεσαν τον χώρο των παραλλάξεων (δηλαδή τον πίνακα DSI), μειώνοντας τον αριθμό των παραλλάξεων για τις οποίες υπολογίζονται κόστη από ένα βάθος και πίσω (Εικ. 3.6). Για παράδειγμα, υπολογίζεται το κόστος για κάθε παράλλαξη στο εύρος από 0 έως 63, και για κάθε δεύτερη ή τέταρτη τιμή στο εύρος από 64 έως 127. Τα επόμενα βήματα του αλγορίθμου SGM (πχ. συσσωμάτωση κόστους) εφαρμόζονται στον συμπιεσμένο πίνακα DSI και παράγεται ο χάρτης ψηφιακών παραλλάξεων κατά τα γνωστά. Με αυτόν τον τρόπο, εάν ένα σημείο έχει παράλλαξη d_1 και αυτή η τιμή παράλλαξης δεν χρησιμοποιήθηκε στην υποδειγματοληψία που έγινε (ανά 2 τιμές), το ελάχιστο κόστος του σημείου θα αντιστοιχεί στην αμέσως επόμενη ή προηγούμενη παράλλαξη. Γίνεται αντιληπτό ότι, με τη χρήση του συμπιεσμένου πίνακα DSI, τροποποιείται έμμεσα η συνθήκη ομαλότητας του αλγορίθμου SGM

και επιτρέπεται οι εικονοψηφίδες να έχουν μεγαλύτερη διαφορά παραλλάξεων μεταξύ τους. Επισημαίνεται ακόμη ότι με αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται οι εικόνες πλήρους ανάλυσης, δηλαδή αξιοποιείται ολόκληρη η πληροφορία από αυτές.



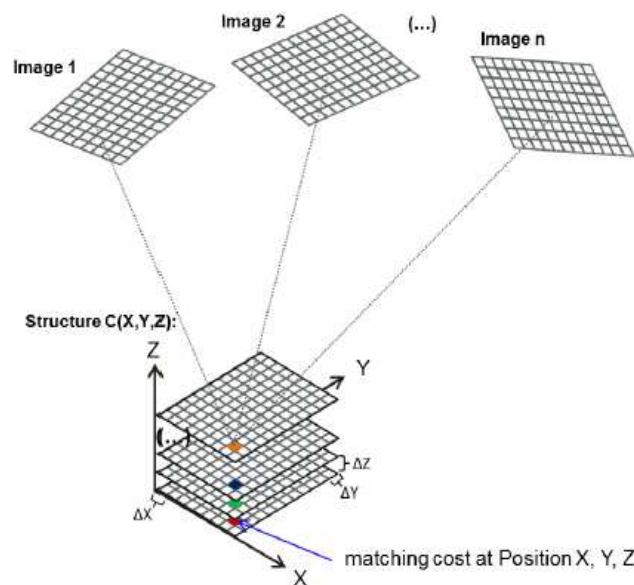
Εικόνα 3.6. Εφαρμογή υποδειγματοληψίας στον πίνακα DSI, από το βάθος f και πίσω, με βήμα s , μέχρι την τελευταία παράλλαξη $d-1$. Πηγή: Spangenberg et al. (2014).

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος *rSGM* πρέπει να οριστούν ορισμένα μεγέθη. Κατ' αρχάς, πρέπει να αποφασιστεί ο αριθμός των οριζόντιων λωρίδων στις οποίες θα χωριστεί η εικόνα και το μέγεθος (σε εικονοψηφίδες) του επικαλυπτόμενου τμήματος μεταξύ λωρίδων (border width). Όταν οι λωρίδες είναι πολύ μικρές και χωρίζουν περιοχές με υφή από περιοχές χωρίς μεγάλη διακύμανση υφής, εμφανίζονται διακριτά άλματα στην παράλλαξη στον παραγόμενο χάρτη παράλλαξης. Τα άλματα αυτά γίνονται λιγότερο ευδιάκριτα όσο αυξάνεται το μέγεθος του επικαλυπτόμενου τμήματος μεταξύ των λωρίδων. Επίσης, πρέπει να επιλεγεί από ποιο βάθος (δηλαδή από ποια τιμή παράλλαξης) θα αρχίσει η υποδειγματοληψία και με ποιο βήμα θα γίνει αυτή (πχ. ανά 2 ή ανά 4 τιμές παραλλάξεων). Όπως είναι βέβαια φυσικό όσο μεγαλώνει το βήμα της υποδειγματοληψίας μειώνεται το ποσοστό των συνταυτιζόμενων εικονοψηφίδων. Ακόμη, μειώνεται η αποτελεσματικότητα του ελέγχου αμφίδρομης συμβατότητας (δεν είναι ρεαλιστικό να μπει κατώφλι 1 pixel), ενώ ως οπτικό αποτέλεσμα παρατηρείται πως οι παραλλάξεις των καμπύλων αντικειμένων εμφανίζονται λιγότερο ομαλές στον χάρτη παράλλαξης. Συμπερασματικά, η μέθοδος *rSGM* είναι ταχύτερη του αρχικού αλγορίθμου, παράγοντας γενικά σχεδόν ισάξιους χάρτες παράλλαξης.

Μία προσέγγιση για την εφαρμογή της μεθόδου *SGM* απευθείας στον χώρο (*OSGM*) έχει γίνει από τους Bethmann & Luhmann (2014). Οι εικόνες που χρησιμοποιούνται μπορούν να είναι τυχαίου αριθμού, δηλαδή να μην είναι απλά ζεύγη. Επιπλέον, δεν είναι αναγκαίο να έχουν αναχθεί σε επιπολικές, αλλά πρέπει βέβαια να είναι γνωστός ο εσωτερικός και ο εξωτερικός προσανατολισμός τους.

Ο υπολογισμός του κόστους πραγματοποιείται στον χώρο του αντικειμένου, ο οποίος χωρίζεται σε στοιχεία όγκου (voxel), συνήθως κύβους ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$). Το μέγεθος των στοιχείων όγκου καθορίζει την ανάλυση στον χώρο, κατά συνέπεια για να επι-

λεγεί πρέπει να ληφθεί υπόψη η μέση εδαφοψηφίδα των εικόνων. Στη συνέχεια, το κέντρο κάθε στοιχείου όγκου, το οποίο έχει γνωστές συντεταγμένες χώρου, προβάλλεται σε όλες τις εικόνες με βάση την εξίσωση συγγραμμικότητας. Η τιμή γκρίζου ή RGB της εικονοψηφίδας στην οποία αντιστοιχεί το σημείο σε κάθε εικόνα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κόστους. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως το κόστος που υπολογίζεται αντιστοιχεί συνήθως απευθείας σε συντεταγμένες εικόνες με υποψηφιακή ακρίβεια, σε αντίθεση με την παρεμβολή στον πίνακα DSI που απαιτείται να γίνει στον αρχικό αλγόριθμο SGM. Στην Εικ. 3.7 παρουσιάζεται ενδεικτικά ο υπολογισμός του κόστους στον χώρο του αντικειμένου για 3 εικόνες.



Εικόνα 3.7. Υπολογισμός του κόστους στον χώρο του αντικειμένου για πολλές εικόνες. Πηγή: Bethmann & Luhmann (2014).

Διακρίνονται τρεις δυνατές διαδικασίες μέσω των οποίων μπορεί να υπολογιστεί το κόστος. Η πρώτη αφορά τον υπολογισμό του κόστους για όλα τα πιθανά ζεύγη εικόνων και τη δημιουργία μιας δομής $C(X, Y, Z)$ με τα ελάχιστα κόστη. Αποτελεί την απλούστερη διαδικασία, με μεγαλύτερο πλεονέκτημα το γεγονός πως η δομή C δημιουργείται μια φορά. Θεωρείται ότι γίνεται έμμεσος έλεγχος, αφού επιλέγεται η ελάχιστη τιμή από τα κόστη που υπολογίζονται για τα ζεύγη εικόνων. Το μειονέκτημα εδώ είναι ότι είναι αδύνατο να διερευνηθεί ποια στοιχεία όγκου δεν είναι ορατά ή είναι ορατά μόνο σε μια εικόνα, με αποτέλεσμα να υπάρχει η πιθανότητα ύπαρξης χονδροειδών λαθών στον τελικό πίνακα C .

Η δεύτερη διαδικασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό του κόστους για όλα τα πιθανά ζεύγη εικόνων και τη δημιουργία μιας δομής $C_i(X, Y, Z)$ για κάθε ζεύγος. Χρησιμοποιείται ώστε να μειωθούν τα χονδροειδή λάθη, καθώς είναι δυνατό να γίνουν έλεγχοι αμφίδρομης συμβατότητας σε κάθε ζεύγος (βλ. και Wenzel et al., 2013).

Η τρίτη διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί ως συνέχεια της δεύτερης, αξιοποιώντας

από αυτήν την πληροφορία για το ποιο στοιχείο όγκου είναι ορατό σε ποια εικόνα. Ακολουθώντας, υπολογίζονται εκ νέου τα κόστη για όλα τα στοιχεία όγκου που είναι ορατά σε δύο, τρεις ή και περισσότερες εικόνες κ.ο.κ, και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε μια δομή $C_j(X, Y, Z)$ για κάθε πιθανό αριθμό ακτίνων j που αντιστοιχούν σε ένα στοιχείο όγκου. Ο ελάχιστος αριθμός ακτίνων είναι 2, δηλαδή το στοιχείο όγκου να είναι ορατό σε 2 εικόνες και για αυτό υπολογίζεται ένα κόστος.

Η συσσωμάτωση του κόστους γίνεται και αυτή στον χώρο του αντικειμένου. Σε ευθεία αναλογία με τον αρχικό αλγόριθμο του SGM, διαμορφώνεται η συνάρτηση ενέργειας $E(Z)$, με ανεξάρτητη μεταβλητή το βάθος Z :

$$E(Z) = \sum_v (C(X, Y, Z_v) + \sum_{q \in N_v} P_1 T[|Z_v - Z_q| = 1] + \sum_{q \in N_v} P_2 T[|Z_v - Z_q| > 1]) \quad (3.5)$$

Δηλαδή η συνάρτηση ενέργειας ισούται με το άθροισμα των εξής όρων. Ο πρώτος όρος της είναι το κόστος $C(X, Y, Z_v)$ για ένα στοιχείο όγκου $\mathbf{v}(X, Y, Z)$ σε δεδομένο βάθος Z . Ο δεύτερος όρος προσθέτει μια σταθερή ποινή P_1 για όλα τα στοιχεία όγκου \mathbf{q} στη γειτονιά του στοιχείου όγκου \mathbf{v} στα οποία η διαφορά βάρους είναι μικρή (συνήθως ίση με την ανάλυση ΔZ). Ο τρίτος όρος προσθέτει μια μεγαλύτερη σταθερή ποινή P_2 αν η διαφορά κατά Z είναι μεγαλύτερη.

Αντίστοιχα υπολογίζεται το τελικό (συσσωματωμένο) κόστος ως το άθροισμα του κόστους από κάθε κατεύθυνση. Το συσσωματωμένο κόστος $S(\mathbf{v}, Z)$ για κάθε στοιχείο όγκου \mathbf{v} στο βάθος Z υπολογίζεται με άθροιση τιμών κόστους από τα μονοπάτια ελάχιστου κόστους που καταλήγουν στο στοιχείο όγκου με διαστάσεις συντεταγμένες (X, Y) . Το κόστος $L_r'(\mathbf{v}, Z)$ του στοιχείου όγκου \mathbf{v} για το βάθος Z κατά μήκος ενός μονοπατιού ελάχιστου κόστους στη διεύθυνση r ορίζεται ως το άθροισμα των κάτωθι όρων:

- Του κόστους συντάυτισης $C(\mathbf{v}, Z)$ του στοιχείου όγκου, όπως αυτό υπολογίστηκε στο πρώτο βήμα.
- Του ελάχιστου κόστους του προηγούμενου στοιχείου όγκου του μονοπατιού, συμπεριλαμβανομένων και των αντίστοιχων ποινών. Κατά συνέπεια, για τον υπολογισμό του συσσωματωμένου κόστους ενός στοιχείου όγκου απαιτείται και εδώ να είναι γνωστά τα κόστη των προηγούμενων στοιχείων όγκου σε κάθε βάθος. Ειδικότερα, επιλέγεται το ελάχιστο από τις ακόλουθες τιμές: το κόστος του προηγούμενου στοιχείου όγκου του μονοπατιού $\mathbf{v}-r$ στο ίδιο βάθος $Z(L_r'(\mathbf{v}-r, Z))$, το κόστος του προηγούμενου στοιχείου όγκου του μονοπατιού $\mathbf{v}-r$ στο αμέσως προηγούμενο, σύμφωνα με την ανάλυση, βάθος $Z - \Delta Z$ συμπεριλαμβανομένης και της ποινής $P_1(L_r'(\mathbf{v}-r, Z - \Delta Z) + P_1)$, το κόστος του προηγούμενου στοιχείου όγκου του μονοπατιού $\mathbf{v}-r$ στο αμέσως επόμενο, σύμφωνα με την ανάλυση, βάθος $Z + \Delta Z$ συμπεριλαμβανομένης της ποινής $P_1(L_r'(\mathbf{v}-r, Z + \Delta Z) + P_1)$, το ελάχιστο κόστος του προηγούμενου στοιχείου όγκου του μονοπατιού $\mathbf{v}-r$ σε όποιο βάθος αυτό επιτυγχάνεται συμπεριλαμβανόμε-

νομένης της ποινής P_2 ($\min_k(L_r(\mathbf{v} - r, i * \Delta Z)) + P_2$).

- Τέλος, αφαιρείται το ελάχιστο κόστος του προηγούμενου στοιχείου όγκου του μονοπατιού ώστε να μην αυξηθούν πολύ οι τιμές του συσσωματωμένου κόστους.

Δηλαδή, ο υπολογισμός του κόστους $L_r(\mathbf{v}, Z)$ του στοιχείου όγκου \mathbf{v} για το βάθος Z κατά μήκος ενός μονοπατιού ελάχιστου κόστους στη διεύθυνση r δίδεται ως:

$$L_r(\mathbf{v}, Z) = C(\mathbf{v}, Z) + \min \left(\begin{array}{l} L_r(\mathbf{v} - r, Z), \\ L_r(\mathbf{v} - r, Z - \Delta Z) + P_1, \\ L_r(\mathbf{v} - r, Z + \Delta Z) + P_1, \\ \min_i(L_r(\mathbf{v} - r, i * \Delta Z)) + P_2 \end{array} \right) - \min_k(L_r(\mathbf{v} - r, k * \Delta Z)) \quad (3.6)$$

Το συσσωματωμένο κόστος $S(\mathbf{v}, Z)$ για κάθε στοιχείο όγκου \mathbf{v} στο βάθος Z ισούται με:

$$S(\mathbf{v}, Z) = \sum_r L_r(\mathbf{v}, Z) \quad (3.7)$$

Το τρίτο βήμα είναι ο υπολογισμός του βάθους Z . Ο χάρτης $Z(\mathbf{v})$ που δημιουργείται καθορίζεται με την επιλογή για κάθε στοιχείο όγκου \mathbf{v} εκείνου του βάθους Z που αντιστοιχεί στο ελάχιστο συσσωματωμένο κόστος $S(\mathbf{v}, Z)$:

$$Z(\mathbf{v}) = \operatorname{argmin}_Z S(\mathbf{v}, Z) \quad (3.8)$$

3.3 Συναρτήσεις Μεταβλητής Ποινής P_2

Στην ενότητα 3.1 έγινε αναφορά στη σημασία της μεταβλητής ποινής P_2 . Εδώ παρουσιάζονται οι κυριότερες συναρτήσεις ποινής που απαντώνται στη βιβλιογραφία.

Ο Hirschmüller (2005, 2006, 2008) εισηγήθηκε πρώτος τη χρήση μεταβλητής ποινής P_2 , προσαρμοζόμενης στην κλίση της έντασης. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να διασφαλίζεται ότι $P_2 \geq P_1$, δηλαδή πραγματοποιείται μια μορφή κατωφλίωσης. Είναι:

$$P_2 = \max \left(\frac{P_2'}{|I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{p} - r)|}, P_1 \right) \quad (3.9)$$

(όπου P_2' μια αρχική, σταθερή τιμή ποινής και \mathbf{p} , $\mathbf{p} - r$ γειτονικές εικονοψηφίδες του μονοπατιού r στην εικόνα αναφοράς I).

Οι Hermann et al. (2009, 2012) πρότειναν μια παραλλαγή της συνάρτησης αυτής, με τη χρήση παραμέτρου δ , η οποία πρέπει να είναι θετική ώστε να ισχύει $P_2 \geq P_1$ και συνήθως ισούται με $\delta = 1$:

$$P_2 = \max \left(\frac{P_2'}{|I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{p} - r)|}, P_1 + \delta \right) \quad (3.10)$$

Οι Zhu et al. (2011) όρισαν μια νέα συνάρτηση για τον υπολογισμό της ποινής P_2 , ώστε αυτή να προσαρμόζεται στην τοπική κλίση της έντασης. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε μια νέα παράμετρος W_{P_2} , η οποία ελέγχει τη μείωση της ποινής:

$$P_2 = \frac{P_2'}{1+|I(\mathbf{p})-I(\mathbf{p}-r)|/W_{P_2}} \quad (3.11)$$

Οι Banz et al. (2012) ερεύνησαν και αξιολόγησαν την απόδοση τριών ακόμη συναρτήσεων για την ποινή P_2 , έναντι της σταθερής ποινής P_2 , σε εικόνες της πλατφόρμας Middlebury όπου η αρχική συνταύτιση είχε γίνει με μετασχηματισμό Rank ή Census. Αυτές είναι οι εξής:

- Αρνητικά ανάλογη προς την απόλυτη κλίση της έντασης μεταξύ της τρέχουσας \mathbf{p} και της προηγούμενης εικονοψηφίδας $\mathbf{p}-r$ στο μονοπάτι:

$$P_{2,l} = -\alpha|I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{p} - r)| + \gamma \quad (3.12)$$

- Αντιστρόφως ανάλογη προς την απόλυτη κλίση της έντασης μεταξύ της τρέχουσας \mathbf{p} και της προηγούμενης εικονοψηφίδας $\mathbf{p}-r$ στο μονοπάτι (η πρόταση προσομοιάζει περισσότερο την αρχική πρόταση του αλγορίθμου SGM):

$$P_{2,i} = \frac{\alpha}{|I(\mathbf{p})-I(\mathbf{p}-r)|+\beta} + \gamma \quad (3.13)$$

- Αρνητικά ανάλογη προς τη μεταβλητότητα της έντασης σε ένα τοπικό παράθυρο A περί την εικονοψηφίδα \mathbf{p} :

$$P_{2,v} = -\alpha Var(A(\mathbf{p})) + \gamma \quad (3.14)$$

Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να ισχύει ότι $P_2 \geq P_1$. Για το λόγο αυτό εισάγεται μια νέα παράμετρος $P_{2,\min}$ ως χαμηλότερο όριο στο οποίο αποκόπτονται οι μεταβλητές.

Οι δύο πρώτες περιπτώσεις βασίζονται στην υπόθεση πως οι αλλαγές βάθους είναι συνήθως ορατές ως αλλαγές έντασης. Η τρίτη περίπτωση βασίζεται στην υπόθεση ότι τα κόστη συνταύτισης σε περιοχές με υψηλή υφή είναι πολύ διαφορετικά και οι αλλαγές στη φωτεινότητα δεν οφείλονται μόνο στις μεταβολές των αντικειμένων.

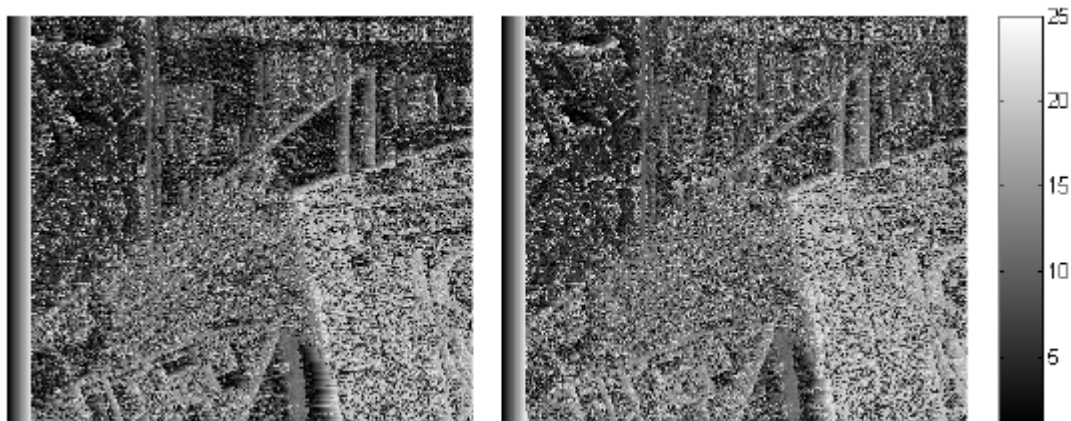
Από την αξιολόγηση προκύπτουν συμπεράσματα για την απόδοση κάθε εκδοχής. Η περίπτωση με σταθερή ποινή P_2 παρουσιάζει καλά αποτελέσματα εάν είναι προσεκτικά προσαρμοσμένη, μέσω της βελτιστοποίησης των παραμέτρων της, στη συγκεκριμένη εικόνα. Οι περιπτώσεις των μεταβλητών συναρτήσεων που είναι αρνητικά ή αντιστρόφως ανάλογες προς την απόλυτη κλίση της έντασης αποδίδουν λίγο καλύτερα (κατά 1%) και η διαφορά μεταξύ τους είναι πολύ μικρή (κάτω του 0.3%), εξαρτώμενη από την εικόνα στην οποία εφαρμόζονται, όταν η αρχική συνταύτιση έχει γίνει με μετασχηματισμό Census. Όταν όμως έχει χρησιμοποιηθεί μετασχηματισμός Rank, η πρώτη υπερτερεί της δεύτερης (σφάλμα μικρότερο έως 1%). Η περίπτωση όπου χρησιμοποιείται η μεταβλητότητα είναι κατώτερη των δύο προηγούμενων περιπτώσεων (με σφάλμα έως 2% μεγαλύτερο) και ορισμένες φορές αποδίδει λιγότερο και από την περίπτωση της σταθερής ποινής P_2 . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συνάρτηση δεν υπολογίζει ποινές μεταξύ των εικονοψηφίδων στο μονοπάτι αλλά δίνει την ίδια ποινή σε όλες τις εικονοψηφίδες του παραθύρου. Τέλος, σε

κάθε περίπτωση η εφαρμογή μετασχηματισμού Census αντί του μετασχηματισμού Rank παράγει καλύτερους χάρτες ψηφιακής παράλλαξης, με μικρότερη θολότητα σε περιοχές ακμών επειδή ο μετασχηματισμός αυτός διατηρεί τη χωρική πληροφορία.

Ακόμη, αξιολογήθηκε η απόδοση κάθε συνάρτησης ποινής όταν αυτή εφαρμόζεται σε εικόνες με διαφορετική ραδιομετρία ή θόρυβο. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν περιπτώσεις ραδιομετρίας όπου στην αριστερή εικόνα αλλάζει γραμμικά ή μη γραμμικά (μεταβολή γάμμα) η φωτεινότητα και περιπτώσεις θορύβου όπου έχει προστεθεί Γκαουσιανός θόρυβος ή θόρυβος τύπου “αλατοπίπερο”. Σε κάθε περίπτωση η δεξιά εικόνα παραμένει ως έχει. Καλύτερη απόδοση έχουν και πάλι οι μεταβλητές συναρτήσεις οι οποίες είναι αρνητικά ή αντιστρόφως ανάλογες προς την απόλυτη κλίση της έντασης, με την πρώτη να είναι αρκετά καλύτερη όταν η αρχική συνταύτιση έχει γίνει με μετασχηματισμό Rank (εκτός από όταν υπάρχει θόρυβος τύπου “αλατοπίπερο” οπότε η διαφορά είναι 0.63%), ενώ όταν χρησιμοποιείται μετασχηματισμός Census η απόδοσή τους είναι παρόμοια, εκτός από όταν υπάρχει θόρυβος τύπου “αλατοπίπερο”, όπου η αντιστρόφως ανάλογη συνάρτηση είναι καλύτερη (με λιγότερο από 1% διαφορά σφάλματος). Η συνάρτηση με τη μεταβλητότητα είναι κατώτερη από τις άλλες δύο μεταβλητές συναρτήσεις. Τέλος, η σταθερή συνάρτηση παρουσιάζει υποδεέστερα αποτελέσματα όσο αυξάνεται στις εικόνες η ποσότητα του θορύβου, επειδή οι σταθερές ποινές που χρησιμοποιεί είχαν προκύψει για συγκεκριμένο επίπεδο θορύβου.

Οι Chen & Jaw (2013) χρησιμοποίησαν τον τύπο της συνάρτησης P_2 των Banz et al. (2012) στον οποίο η ποινή P_2 είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την απόλυτη κλίση της έντασης και διερεύνησαν τη συμπεριφορά των παραμέτρων α , β και γ . Αρχικά τέθηκε $\gamma = P_1$, ώστε να ισχύει $P_2 > P_1$. Τα αποτελέσματα βελτιώνονται με τη χρήση μεγαλύτερης τιμής για την παράμετρο α , χωρίς τη χρήση της παραμέτρου β . Τα αποτελέσματα βελτιώνονται ακόμα περισσότερο με χρήση της τελευταίας. Σημειώνεται πως τα μεγέθη που δίνουν για τις παραμέτρους είναι συνάρτηση του κόστους συνταύτισης που προκύπτει από τη συνταύτιση με τη μέθοδο της Ιεραρχικής Αμοιβαίας Πληροφορίας (Hierarchical Mutual Information - HMI).

Ένα ακόμη ενδιαφέρον αποτέλεσμα που περιλαμβάνουν οι συγγραφείς είναι η εφαρμογή του αλγορίθμου SGM χωρίς τη χρήση ποινών P_1 και P_2 . Ο χάρτης ψηφιακής παράλλαξης που προκύπτει είναι πολύ κοντά στον αντίστοιχο χάρτη που είχε προκύψει από τον υπολογισμό του κόστους πριν από τη συσσωμάτωσή του (δηλαδή, στην προκειμένη περίπτωση, τον χάρτη παράλλαξης από τη συνταύτιση με βάση την Ιεραρχική Αμοιβαία Πληροφορία) (Εικ. 3.8). Έτσι, προκύπτει το εύλογο συμπέρασμα ότι η σημασία του αλγορίθμου SGM έγκειται στην εφαρμογή των ποινών σε μικρές και μεγάλες αλλαγές παράλλαξης των γειτονικών εικονοψηφίδων.



Εικόνα 3.8. Αριστερά: Χάρτης παράλλαξης μετά από συνταύτιση με HMI. Δεξιά: Χάρτης παράλλαξης μετά από συνταύτιση με HMI και συσσωμάτωση κόστους με τη μέθοδο SGM, χωρίς τη χρήση ποινών.
Πηγή: Chen & Jaw (2013).

3.4 Ο Αλγόριθμος SGM ως Αλγόριθμος Πραγματικού Χρόνου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι σημαντικότερες παραλλαγές του αλγορίθμου SGM προκειμένου αυτός να γίνει αλγόριθμος πραγματικού χρόνου, αφού δοθεί πρώτα ο ορισμός και γίνει μια σύντομη ιστορική αναδρομή για αυτή την κατηγορία αλγορίθμων. Τέλος, παρατίθενται βιβλιογραφικές αναφορές όπου συγκρίνεται ο SGM με άλλους αλγορίθμους πραγματικού χρόνου.

3.4.1 Αλγόριθμοι πραγματικού χρόνου (real-time)

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες κατέστη δυνατή η παραγωγή πυκνού χάρτη παράλλαξης σε πραγματικό χρόνο (30 καρέ ανά δευτερόλεπτο), με συνέπεια την χρήση του σε πλειάδα εφαρμογών, όπως είναι τα ρομποτικά συστήματα ή συστήματα υποβοήθησης οδηγών (Driver Assistance Systems – DAS). Ο μικρός χρόνος εκτέλεσης οφείλεται είτε στη χρήση ειδικού εξοπλισμού (hardware), όπως επεξεργαστές ψηφιακού σήματος (Digital Signal Processors – DSP), προγραμματιζόμενες διατάξεις θυρών πεδίου (Field Programmable Gate Arrays – FPGA), ολοκληρωμένα κυκλώματα για συγκεκριμένες εφαρμογές (Application Specific Integrated Circuits – ASIC), στην εφαρμογή των αλγορίθμων σε μονάδα επεξεργασίας γραφικών (Graphics Processing Unit – GPU) είτε και στην μεγάλη ταχύτητα των επεξεργασιών των υπολογιστών (Central Processing Unit – CPU) ή και την ενσωμάτωση σε αυτούς συνεπεξεργασιών (Single Instruction Multiple Data – SIMD).

3.4.2 Ιστορική αναδρομή αλγορίθμων πραγματικού χρόνου

Σύμφωνα με την ανασκόπηση των Brown et al. (2003), οι πρώτες προσπάθειες άρχισαν την διετία 1993-1995 από τους Faugeras et al. (1993), Matthies et al. (1995). Για πρώτη φορά η συχνότητα επεξεργασίας 30 καρέ/δευτερόλεπτο (frames per second – fps) επιτεύχθηκε από τους Kanade et al. (1995), με την χρήση οκτώ DSP και εφαρμογή του SSAD (άθροισμα του SAD) ως μέτρου ομοιότητας. Ο Konolige (1997) πέτυχε συχνότητα μεγαλύτερη από 30 fps, με τη χρήση DSP και 12 fps σε επεξεργα-

στή 233MHz Pentium II (στη συνέχεια αυξήθηκε σε 30 fps σε επεξεργαστή 700MHz Pentium III). Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν φιλτραριστεί με φίλτρο LoG (Laplacian of a Gaussian) και η συνταύτιση έγινε με SAD. Ακόμη, οι Woodfill & Von Herzen (1997) και οι Corke & Dunn (1997) χρησιμοποίησαν FPGA και συνταύτιση με Μετασχηματισμό Census, επιτυγχάνοντας συχνότητες 42 fps και 30 fps, αντίστοιχα, ενώ η εξέλιξη συνεχίζεται με γοργούς ρυθμούς. Οι Banz et al. (2010) αναφέρουν ότι επιτεύχθηκαν 150 fps σε εικόνες 320×240 (QVGA) και εύρος παράλλαξης 20 pixel από τους Murphy et al. (2007) και 230 fps σε εικόνες 640×480 (VGA) και εύρος παράλλαξης 64 pixel από τους Jin et al. (2010), με χρήση Μετασχηματισμού Census.

3. 4.3 Προσαρμογή SGM ως αλγόριθμου πραγματικού χρόνου

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές παραλλαγές του αλγορίθμου SGM (με λιγότερες κατευθύνσεις, μεθόδους μετεπεξεργασίας κ.λπ.) σε ποικίλων μεγεθών εικόνες, σε διάφορα μέσα (FPGA, GPU, CPU) και με ποικίλες επιδόσεις. Έγινε εδώ μια προσπάθεια να συγκεντρωθούν όλες οι μέθοδοι, και κυρίως εκείνες που παρουσιάζουν τις καλύτερες επιδόσεις.

Ο αρχικός αλγόριθμος, υλοποιημένος σε CPU, με μέτρο ομοιότητας την Ιεραρχική Αμοιβαία Πληροφορία (HMI) και με μετεπεξεργασία με φίλτρο μεσαίας τιμής, επιτυγχάνει 0.55 fps για εικόνες 450×375 και εύρος παράλλαξης 64, ενώ με την απλή Αμοιβαία Πληροφορία (MI) η απόδοση είναι 0.25 fps (Hirschmüller, 2005). Οι Rosenberg et al. (2006) εφάρμοσαν πρώτοι τον αλγόριθμο σε κάρτα γραφικών (GPU), με μέτρο ομοιότητας τις Απόλυτες Διαφορές (AD), σε συνδυασμό με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας και παρεμβολή κενών, σε εικόνες 320×240 με εύρος παράλλαξης 64 και επέτυχαν απόδοση 8 fps. Οι Ernst & Hirschmüller (2008) επίσης εφάρμοσαν τον αλγόριθμο σε GPU, με μέτρο ομοιότητας την Ιεραρχική Αμοιβαία Πληροφορία, σε εικόνες 320×240 με εύρος παράλλαξης 64 και η απόδοση ήταν 13 fps. Την ίδια χρονιά εφαρμόστηκε επίσης σε GPU από τους Gibson & Marques (2008), σε εικόνες 450×375 και εύρους παράλλαξης 64 με μέτρο ομοιότητας αυτό των Birchfield & Tomasi (BT) και απόδοση 6 fps. Η υλοποίηση του αλγορίθμου σε CPU με το ίδιο μέτρο ομοιότητας και τις ίδιες εικόνες επιτυγχάνει 0.66 fps (Hirschmüller, 2008). Ακολούθως, οι Gehrig et al. (2009) υλοποίησαν τον αλγόριθμο με 27 fps σε FPGA, με τη χρήση εικόνων ανάλυσης 680×400pix, εύρος παράλλαξης 128 και μέτρο ομοιότητας ZSAD. Στη συνέχεια οι Banz et al. (2010) επέτυχαν 30 fps με υλοποίηση σε FPGA, χρήση λίγο μεγαλύτερων εικόνων (VGA - 640×480), ίδιο εύρος παράλλαξης και χρήση μετασχηματισμού Rank και φίλτρου μεσαίας τιμής. Ίδια απόδοση πέτυχαν και οι Payá Vayá et al. (2010) με την εφαρμογή του αλγορίθμου σε DSP, χρησιμοποιώντας και αυτοί μετασχηματισμό Rank και εικόνες VGA, με μικρότερο εύρος παράλλαξης (64) και χωρίς την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής. Οι Gehrig & Rabe (2010) εφάρμοσαν τον αλγόριθμο SGM (με μετασχηματισμό Census, υποψηφιακή παρεμβολή, φίλτρο μεσαίας τιμής και έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας) σε εικόνες 640×480 εύρους παράλλαξης 128 με επεξεργαστή Intel Core i7 (3.3 GHz) και με αποτέλεσμα

14 fps. Παράλληλα οι Haller et al. (2010) έτρεξαν τον αλγόριθμο (με τη χρήση του μετασχηματισμού Census) σε GPU, για εικόνες ανάλυσης 512×383 και εύρους παράλλαξης 56, με χρόνο εκτέλεσης 19 ms, ο οποίος αντιστοιχεί σε 53 fps. Μετέπειτα οι Banz et al. (2011) χρησιμοποίησαν τον μετασχηματισμό Rank για την συνταύτιση εικόνων ανάλυσης 1024×768 και εύρους παράλλαξης 128 και με χρήση φίλτρου μεσαίας τιμής σε GPU, επιτυγχάνοντας 27 fps. Η προσπάθεια του Hirschmüller (2011) για συνταύτιση μεγάλου μεγέθους εικόνων (2048×2048 με εύρος παράλλαξης 1024) με μέτρο ομοιότητας τον μετασχηματισμό Census και εφαρμογή σε FPGA οδήγησε σε 0.5 fps. Ο Buder (2012) εφήρμοσε την παραλλαγή eSGM με αρχική μέθοδο συνταύτισης τον μετασχηματισμό Census σε FPGA σε εικόνες μεγέθους VGA και εύρους παράλλαξης 64 με αποτέλεσμα 33 fps. Η εφαρμογή από τους Hirschmüller et al. (2012) του ίδιου αλγορίθμου στις ίδιες εικόνες σε GPU οδήγησε σε 4 fps, ενώ σε CPU σε 0.5 fps. Οι Michael et al. (2013) πέτυχαν 11.7 fps με την εφαρμογή της παραλλαγής wSGM σε GPU για εικόνες 640×480 και εύρος παράλλαξης 64, ενώ οι Spangenberg et al. (2013) διαπίστωσαν επίδοση 19.6 fps με την εφαρμογή ίδιων εικόνων σε CPU 4 πυρήνων. Ο Πίνακας 3.1 αποτελεί μια προσπάθεια της παρούσας εργασίας για σύνοψη όσων αναφέρθηκαν σε αυτήν την παράγραφο.

Συγγραφείς	Έτος	Μέσο	Μέτρο ομοιότητας	Εικόνες και εύρος παράλλαξης	Επίδοση (fps)
Hirschmüller	2005	CPU	HMI+SGM+MF	450×375×64	0.55
Hirschmüller	2005	CPU	MI+SGM+MF	450×375×64	0.25
Rosenberg et al.	2006	GPU	AD+LRC+HF	320×240×64	8
Ernst&Hirschmüller	2008	GPU	HMI+SGM	320×240×64	13
Gibson&Marques	2008	GPU	BT +SGM	450×375×64	6
Hirschmüller	2008	CPU	BT+SGM	450×375×64	0.66
Gehrig et al.	2009	FPGA	ZSAD +SGM	680×400×128	27
Banz et al.	2010	FPGA	Rank+SGM+MF	640×480×128	30
Payá Vayá et al.	2010	DSP	Rank+SGM	640×480×64	30
Gehrig&Rabe	2010	CPU	Census+SGM+SI +MF+LRC	640×480×128	14
Haller et al.	2010	GPU	Census+SGM	512×383×56	53
Banz et al.	2011	GPU	Rank+SGM+MF	1024×768×128	27
Hirschmüller	2011	FPGA	Census+SGM	2048×2048×1024	0.5
Buder	2012	FPGA	Census+eSGM	640×480×64	33
Hirschmüller et al.	2012	GPU	eSGM	640×480×64	4
Hirschmüller et al.	2012	CPU	eSGM	640×480×64	0.5
Michael et al.	2013	GPU	wSGM	640×480×64	11.7
Spangenberg et al.	2013	CPU	rSGM	640×480×64	19.6

Πίνακας 3.1. Εφαρμογές αλγορίθμου SGM ως αλγορίθμου πραγματικού χρόνου.

Στον πίνακα αυτόν παρουσιάζονται οι διάφορες παραλλαγές, τα μέτρα ομοιότητας και τυχόν μετεπεξεργασία με φίλτρο μεσαίας τιμής (median filter – MF), έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας (Left-Right Consistency – LRC), υποψηφιακή παρεμβολή (Subpixel interpolation – SI) ή παρεμβολή κενών (Hole Filling – HF), οι εικόνες και το εύρος παράλλαξης που χρησιμοποιήθηκαν, το μέσο στο οποίο εφαρμόστηκαν, το έ-

τος και οι συγγραφείς της παραλλαγής και, τέλος, η επίδοση σε fps. Θεωρείται ότι περισσότερες λεπτομέρειες για το είδος των επεξεργασιών και άλλων στοιχείων ξεφεύγουν από τα όρια της παρούσας εργασίας και προτείνεται η προσφυγή στη σχετική βιβλιογραφία.

Οι καλύτερες επιδόσεις για εφαρμογή του αλγορίθμου σε FPGA προκύπτουν από τους Hirschmüller (2011) και Buder (2012). Για εφαρμογή σε GPU βέλτιστες μέθοδοι θεωρούνται εκείνες των Haller et al. (2010) και Banz et al. (2011). Χαμηλότερες επιδόσεις επιτυγχάνονται με CPU (Spangenberg et al., 2013), με περιθώριο πάντως να βελτιωθούν στο μέλλον.

3. 4.4 Σύγκριση SGM με αλγορίθμους πραγματικού χρόνου

Οι Steingrube et al. (2009) αξιολόγησαν την απόδοση του αλγορίθμου SGM, όπως αυτός προσαρμόστηκε για να τρέχει σε FPGA από τους Gehrig et al. (2009), έναντι μιας μεθόδου συνταύτισης χαρακτηριστικών (“Signature-based stereo”) και μιας τοπικής μεθόδου συνταύτισης (“Correlation stereo”) που χρησιμοποιεί ως μέτρο ομοιότητας το ZSSD (Zero-mean Sum of Squared Differences – Κανονικοποιημένο άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των εντάσεων). Ειδικότερα, εξετάστηκε η απόδοσή του ως αλγορίθμου για ρομποτικές εφαρμογές ή συστήματα υποβοήθησης οδηγού. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν απεικόνιζαν τυπικές σκηνές δρόμων, υπό κανονικές ή δύσκολες καιρικές συνθήκες. Έγινε εφαρμογή τριών μεθόδων αξιολόγησης: το ποσοστό των εσφαλμένα συνταυτισθεισών εικονοψηφίδων, ο υπολογισμός του ελεύθερου χώρου μπροστά από το αυτοκίνητο και η εύρεση του προπορευόμενου οχήματος. Σε όλων των ειδών τις εικόνες, η μέθοδος SGM σημείωσε τα μικρότερα σφάλματα και για τα τρία μέτρα αξιολόγησης (1% σφάλμα ομολογιών, 0.8% σφάλμα υπολογισμού ελεύθερου χώρου και 99% εύρεση προπορευόμενου αυτοκινήτου), με επόμενη καλύτερη μέθοδο την τοπική και τελευταία την μέθοδο συνταύτισης χαρακτηριστικών.

Οι Mroz & Breckon (2012) εφάρμοσαν την SGM σε εικόνες της πλατφόρμας Middlebury και σε πραγματικές εικόνες με περιβάλλον δρόμου. Χρησιμοποιήθηκαν μόνο 5 κατευθύνσεις (αντί 8), μέτρο ομοιότητας Birchfield & Tomasi και έγινε προεπεξεργασία με φίλτρο Sobel κατά x. Οι υπόλοιπες μέθοδοι που εξετάστηκαν ήταν μια τοπική μέθοδος με μέτρο ομοιότητας SAD (“Kornolige block matching”), μια επαναληπτική μέθοδος (για την εύρεση της μέγιστης παράλλαξης) με SAD εφαρμοσμένη σε πυραμίδες εικόνων (“No-maximal disparity approach”), ένας αλγόριθμος με παράθυρο που αλλάζει σχήμα με βάση την ομοιότητα σε χρώμα των εικονοψηφίδων (“Cross-based local approach”) και μια μέθοδος που χρησιμοποιεί διαφορετικά βάρη κατά το στάδιο συσσωμάτωσης του κόστους και Δυναμικό Προγραμματισμό (Dynamic Programming – DP) για την εύρεση της βέλτιστης παράλλαξης (“Adaptive aggregation with DP”). Στις εικόνες Middlebury η SGM έχει την καλύτερη απόδοση, αλλά και στις πραγματικές εικόνες ο χάρτης παράλλαξης που παράγει είναι ευκρινής, και εί-

ναι δυνατόν να διαχωριστούν τόσο τα κοντινά όσο και τα μακρινά αντικείμενα, ακόμα και εκείνα που έχουν πολύ μικρό πάχος (πχ. στύλοι πινακίδων). Παρ' όλα αυτά διαπιστώνεται ότι, λόγω του θορύβου στις εικόνες, δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά με την τοπική μέθοδο, η οποία έχει και μικρότερο χρόνο εκτέλεσης.

3.5 Ποιοτική Σύγκριση Αλγορίθμου SGM με LiDAR

Την τελευταία δεκαετία το αερομεταφερόμενο LiDAR (Light Detection and Ranging) έχει κατά κάποιον τρόπο καθιερωθεί ως η αιχμή της τεχνολογίας για την παραγωγή Ψηφιακών Μοντέλων Επιφανείας (Digital Surface Models – DSM) ή Αναγλύφου (Digital Elevation Models – DEM). Με την ανάπτυξη του αλγορίθμου SGM κατέστη δυνατή η γρήγορη παραγωγή DSM με υψηλή ανάλυση από την συνταύτιση εικόνων. Οι Gerke et al. (2010) συνέκριναν τις δύο μεθόδους παραγωγής DSM. Αναφέρονται στην συνέχεια τα βασικά τους συμπεράσματα.

Έτσι, όσον αφορά το LiDAR σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι η συλλογή των δεδομένων είναι δυνατή ανεξαρτήτως συνθηκών φωτισμού, δηλαδή μπορεί να γίνει ακόμα και τη νύχτα. Επίσης, οι παλμοί laser διεισδύουν στα φυλλώματα των δέντρων και μπορούν να φτάσουν έως το έδαφος, καθιστώντας έτσι δυνατή την απευθείας μέτρηση του υψομέτρου του εδάφους. Συχνά τα σημεία που επιστρέφουν από τους παλμούς laser περιλαμβάνουν, εκτός από το υψόμετρο, πληροφορία έντασης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας.

Ως μειονέκτημα για τη χρήση του LiDAR μπορεί να θεωρηθεί το μεγαλύτερο οριζοντιογραφικό σφάλμα (κατά X,Y: 10-15 cm) από το υψομετρικό (κατά Z: 5 cm). Ακόμη, η ακρίβεια των σημείων από το LiDAR μπορεί να επηρεαστεί από ατμοσφαιρικές συνθήκες που δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν (όπως η ομίχλη ή η ηφαιστειακή στάχτη) ή από ανακλαστικές ιδιότητες του αντικειμένου-στόχου.

Η παραγωγή DSM μέσω του αλγορίθμου SGM γίνεται για κάθε εικονοψηφίδα των αρχικών εικόνων, με αποτέλεσμα να πληρούται η απαιτούμενη ανάλυσή του για την δημιουργία ορθοφωτογραφίας. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι μόνο οι εικόνες, που μπορούν να συλλεγούν με μια απλή πτήση αεροφωτογράφισης. Κατά συνέπεια, ο χρόνος και το κόστος είναι πολύ μικρότερο από ό,τι για το LiDAR. Πλεονέκτημα, ήσσονος έστω σημασίας, συνιστά το γεγονός ότι, εφόσον το DSM προέρχεται κατά κανόνα από τις ίδιες εικόνες που θα χρησιμοποιηθούν για την ορθοφωτογραφία, θα περιλαμβάνουν τα ίδια αντικείμενα και δεν θα υπάρχουν σφάλματα λόγω αλλαγών στο ανάγλυφο της περιοχής.

Τέλος, αρνητικό στοιχείο θεωρείται το γεγονός ότι το DSM προέρχεται από συνταύτιση εικόνων, η οποία απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον, η ακρίβεια του DSM που επιτυγχάνεται εξαρτάται από την ακρίβεια του αεροτριγωνισμού των εικόνων που προηγήθηκε της συνταύτισης.

4. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ SGM - ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά τα χαρακτηριστικά του αλγορίθμου SGM που προγραμματίστηκε και ενδεικτικοί χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν για διάφορες περιπτώσεις. Εν συνεχεία περιγράφεται η διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων του αλγορίθμου, η οποία πραγματοποιήθηκε για δυο συλλογές εικόνων, με 2 και 21 ζεύγη εικόνων, αντίστοιχα. Ειδικότερα, αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και παρουσιάζονται τα συνολικά όσο και επιμέρους αποτελέσματα.

4.1 Χαρακτηριστικά Αλγορίθμου

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος SGM στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.

Επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού του αρχικού κόστους συνταύτισης: Απόλυτες Διαφορές (Absolute Differences – AD) και Μετασχηματισμός Census (με παράθυρο 7×7) με συνταύτιση μέσω της απόστασης Hamming. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος SGM για το βήμα της συσσωμάτωσης του κόστους, όπως περιγράφεται στις αρχικές δημοσιεύσεις του Hirschmüller (2005, 2006, 2008).

Χρησιμοποιήθηκαν 5 διαφορετικές συναρτήσεις υπολογισμού της ποινής P_2 :

A) Σταθερή τιμή (Hirschmüller, 2005, 2006, 2008):

$$P_{2A} = const. \quad (4.1)$$

B) Τιμή αντιστρόφως ανάλογη προς την απόλυτη κλίση της έντασης μεταξύ της τρέχουσας \mathbf{p} και της προηγούμενης εικονοψηφίδας $\mathbf{p-r}$ στο μονοπάτι, με έλεγχο για το αν ισχύει η συνθήκη $P_2 \geq P_1$ – ο οποίος αποτελεί ένα είδος κατωφλίωσης (Hirschmüller, 2005, 2006, 2008):

$$P_{2B} = \max \left(\frac{P_2'}{|I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{p-r})|}, P_1 \right) \quad (4.2)$$

Γ) Τιμή αντιστρόφως εξαρτημένη από την απόλυτη κλίση της έντασης μεταξύ της τρέχουσας \mathbf{p} και της προηγούμενης εικονοψηφίδας $\mathbf{p-r}$ στο μονοπάτι, με προσθήκη μιας παραμέτρου (w), η οποία ελέγχει την μείωση της ποινής, και με παράλληλο έλεγχο για το αν ισχύει η συνθήκη $P_2 \geq P_1$ (Zhu et al., 2011):

$$P_{2\Gamma} = \max \left(\frac{P_2'}{1 + |I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{p-r})|/w}, P_1 \right) \quad (4.3)$$

Δ) Τιμή αρνητικά εξαρτώμενη από την απόλυτη κλίση της έντασης μεταξύ της τρέχουσας \mathbf{p} και της προηγούμενης εικονοψηφίδας $\mathbf{p-r}$ στο μονοπάτι, με έλεγχο για το αν ισχύει η συνθήκη $P_2 \geq P_1$ (Banz et al., 2012):

$$P_{2\Delta} = \max (-\alpha |I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{p-r})| + c, P_1) \quad (4.4)$$

Ε) Τιμή αντιστρόφως εξαρτημένη από την απόλυτη κλίση της έντασης μεταξύ της τρέχουσας \mathbf{p} και της προηγούμενης εικονοψηφίδας $\mathbf{p-r}$ στο μονοπάτι, με προσθήκη τριών παραμέτρων και έλεγχο για την ισχύ της συνθήκης $P_2 \geq P_1$ (Banz et al., 2012):

$$P_{2E} = \max \left(\frac{a}{|I(\mathbf{p}) - I(\mathbf{p-r})| + b} + c, P_1 \right) \quad (4.5)$$

Σημειώνεται πως εδώ δεν έγινε καμία διαδικασία προεπεξεργασίας των προς συνταύτιση εικόνων ή μετεπεξεργασίας του χάρτη παράλλαξης προκειμένου να αξιολογηθεί η καθαυτό απόδοση του αλγορίθμου SGM.

4.2 Ενδεικτικά Αποτελέσματα

Παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προκύπτουν σε κάθε βήμα της εφαρμογής του αλγορίθμου SGM, όπως και τα αποτελέσματα για διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού κόστους (Απόλυτες Διαφορές και Μετασχηματισμός Census) και για διαφορετικές συναρτήσεις ποινής (P_{2A} , P_{2B} , $P_{2Γ}$, $P_{2Δ}$, P_{2E}). Ακολούθως παρατίθεται ο χάρτης παράλλαξης που δημιουργείται μετά από εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων στον αρχικό χάρτη. Τέλος, γίνεται σύγκριση ενός χάρτη παράλλαξης που προκύπτει από την υποσύνολη μέθοδο SGM με τον χάρτη παράλλαξης που δημιουργείται από μια τοπική μέθοδο συνταύτισης (SAD).

4.2.1 Παραχθέντες χάρτες παράλλαξης από τον αλγόριθμο SGM

Σε αυτή την υποενότητα παρατίθενται οι χάρτες ψηφιακής παράλλαξης που παράγονται από την εφαρμογή του αλγορίθμου SGM στο ζεύγος επιτολικών εικόνων *cones* (Εικ. 4.1) από την ιστοσελίδα-διακομιστή αξιολόγησης αλγορίθμων συνταύτισης Middlebury (<http://vision.middlebury.edu/stereo/> – Scharstein & Szeliski, 2003).

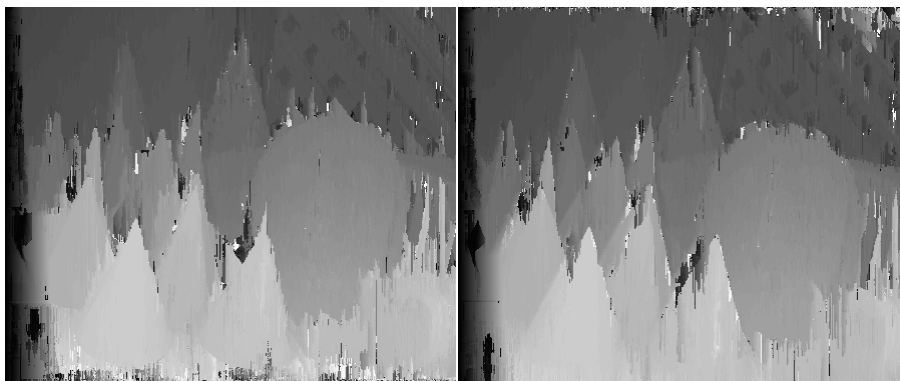


Εικόνα 4.1. Αριστερή, δεξιά εικόνα στερεοζεύγους *cones* και αληθής χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας (από αριστερά προς τα δεξιά).

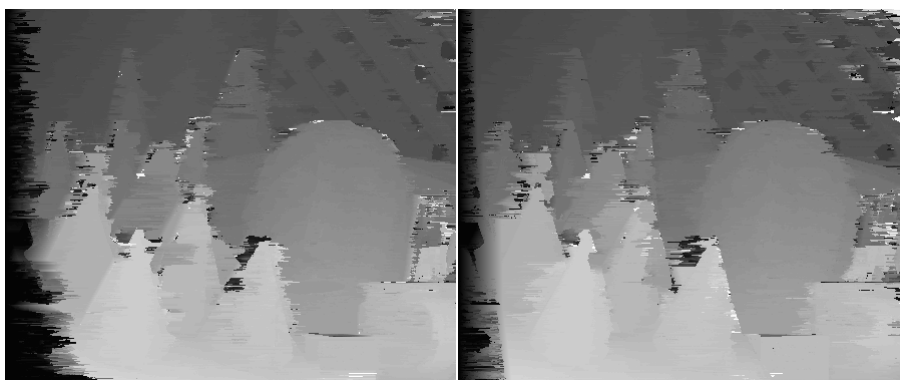
Ειδικότερα, παρουσιάζεται ο αρχικός χάρτης παράλλαξης που προκύπτει από την συνταύτιση των εικόνων με χρήση μιας εκ των μεθόδων υπολογισμού κόστους (πχ. AD) (Εικ. 4.2), οι χάρτες παράλλαξης που παράγονται από τον υπολογισμό του κόστους με τη μέθοδο SGM κατά μήκος καθενός από τα 8 μονοπάτια, με χρήση μιας εκ των συναρτήσεων ποινών (P_{2A}) (Εικ. 4.3-4.6) και ο τελικός χάρτης παράλλαξης ο οποίος δημιουργείται με την επιλογή της παράλλαξης που αντιστοιχεί στο ελάχιστο κόστος, μετά από την άθροιση των κοστών στα 8 μονοπάτια (Εικ. 4.7).



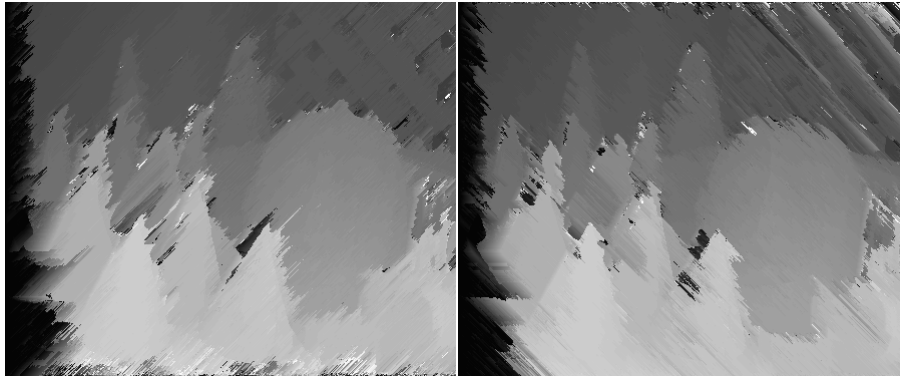
Εικόνα 4.2. Χάρτης παράλλαξης μετά από συνταύτιση με AD, χωρίς το βήμα της συσσωμάτωσης του κόστους.



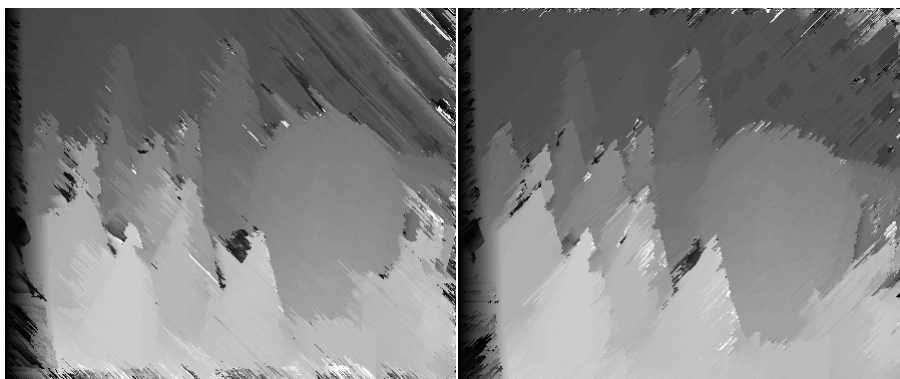
Εικόνα 4.3. Χάρτες παράλλαξης από τον υπολογισμό με κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω (αριστερά) και από πάνω προς τα κάτω (δεξιά).



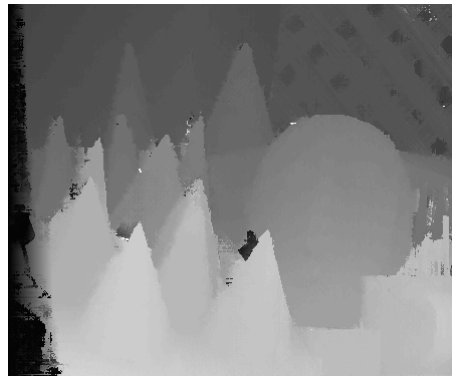
Εικόνα 4.4. Χάρτες παράλλαξης από τον υπολογισμό με κατεύθυνση από αριστερά προς τα δεξιά (αριστερά) και από τα δεξιά προς τα αριστερά (δεξιά).



Εικόνα 4.5. Χάρτες παράλλαξης από τον υπολογισμό με κατεύθυνση από κάτω αριστερά προς πάνω δεξιά (αριστερά) και από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά (δεξιά).



Εικόνα 4.6. Χάρτες παράλλαξης από τον υπολογισμό με κατεύθυνση από κάτω δεξιά προς πάνω αριστερά (αριστερά) και από πάνω δεξιά προς κάτω αριστερά (δεξιά).



Εικόνα 4.7. Τελικός χάρτης παράλλαξης μετά από συνταύτιση με AD και συσσωμάτωση κόστους με SGM (χρησιμοποιούμενες ποινές συνάρτησης P_{2A} : $P_1 = 15$, $P_2 = 100$).

Παρατηρείται ότι ο χάρτης παράλλαξης που προέκυψε μετά από συνταύτιση με τη μέθοδο των Απόλυτων Διαφορών χωρίς το βήμα της συσσωμάτωσης του κόστους εμφανίζει πολύ θόρυβο, όπως είναι φυσικό εξαιτίας της συνταύτισης καθεμιάς εικονοψηφίδας ξεχωριστά. Στους χάρτες παράλλαξης όπου γίνεται ο υπολογισμός του κόστους προς μια κατεύθυνση, αυτός γίνεται αντιληπτός από τα σφάλματα που προκύπτουν στην παράλλαξη και αλλοιώνουν το σχήμα των αντικειμένων, με βάση

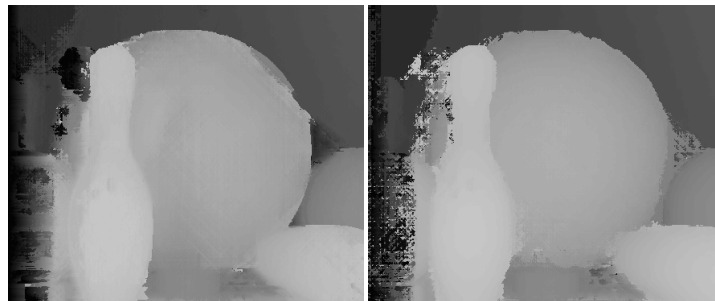
την ίδια αυτή κατεύθυνση. Στον τελικό χάρτη παράλλαξης, μετά από την ένωση όλων των κατευθύνσεων, δεν εμφανίζονται τέτοιου είδους σφάλματα και οι ακμές των απεικονιζόμενων αντικειμένων είναι ιδιαίτερα ευκρινείς.

4. 2.2 Αποτελέσματα για διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού κόστους

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι χάρτες ψηφιακής παράλλαξης του ζεύγους επιπολικών εικόνων *Bowling2* (Εικ. 4.8) από την ιστοσελίδα αξιολόγησης αλγορίθμων συνταύτισης Middlebury (<http://vision.middlebury.edu/stereo/> – Hirschmüller & Scharstein, 2007) που παράγονται από την εφαρμογή διαφορετικής μεθόδου συνταύτισης (Απόλυτες Διαφορές και Μετασχηματισμός Census) κατά το στάδιο του υπολογισμού του κόστους και από την χρήση της μεθόδου SGM κατά το στάδιο της συσσωμάτωσης του κόστους (Εικ. 4.9).



Εικόνα 4.8. Αριστερή, δεξιά εικόνα στερεοζεύγους *Bowling2* και αληθής χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας (από αριστερά προς τα δεξιά).



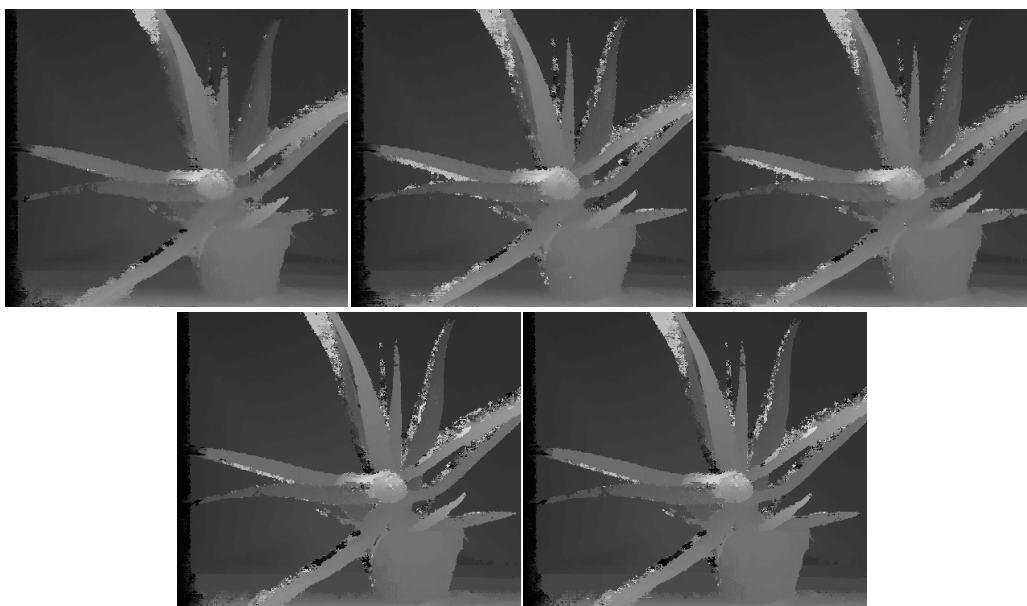
Εικόνα 4.9. Χάρτης παράλλαξης μετά από συνταύτιση με AD και συσσωμάτωση κόστους με SGM και συνάρτηση ποινής P_{2A} , με χρησιμοποιούμενες ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$ (αριστερά) και χάρτης παράλλαξης μετά από συνταύτιση με Census και συσσωμάτωση κόστους με SGM και συνάρτηση ποινής P_{2A} , με χρησιμοποιούμενες ποινές: $P_1 = 25$, $P_2 = 100$ (δεξιά).

4. 2.3 Αποτελέσματα για διαφορετικές συναρτήσεις ποινών

Σε αυτή την υποενότητα παρατίθενται οι δύο εικόνες και ο αληθής χάρτης παράλλαξης (Εικ. 4.10) του ζεύγους εικόνων *Aloe* (<http://vision.middlebury.edu/stereo/> – Hirschmüller & Scharstein, 2007) και στη συνέχεια οι χάρτες ψηφιακής παράλλαξης που παράγονται από συνταύτιση με το ίδιο μέτρο ομοιότητας (Απόλυτες Διαφορές) αλλά με χρήση διαφορετικής συνάρτησης υπολογισμού της ποινής (P_{2A} , P_{2B} , $P_{2Γ}$, $P_{2Δ}$, $P_{2Ε}$) κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου SGM (Εικ. 4.11).



Εικόνα 4.10. Αριστερή, δεξιά εικόνα στερεοζεύγους *Aloe* και αληθής χάρτης παράλληλης της αριστερής εικόνας (από αριστερά προς τα δεξιά).



Εικόνα 4.11. Χάρτες παράλληλης από συνταύτιση με AD και διαφορετικές συναρτήσεις ποινής P_2 . Επάνω: Συνάρτηση P_{2A} : ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$ (αριστερά). Συνάρτηση P_{2B} : ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 600$ (κέντρο). Συνάρτηση P_{2F} : ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 200$, $w = 8$ (δεξιά). Κάτω: Συνάρτηση $P_{2Δ}$: ποινές: $P_1 = 35$, $a = 0.1$, $c = 60$ (αριστερά). Συνάρτηση P_{2E} : ποινές: $P_1 = 35$, $a = 700$, $b = 90$, $c = 65$ (δεξιά).

4. 2.4 Χάρτες παράλληλης μετά από εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων

Με αφαίρεση των περιοχών αποκρύψεων από τον χάρτη παράλληλης χάρη στους διαθέσιμους χάρτες (“μάσκες”) αποκρύψεων που αναφέρθηκαν στην υποενότητα 2.3.5, αναμένονται λιγότερα σφάλματα και άρα βελτίωση του χάρτη παράλληλης.



Εικόνα 4.12. Από αριστερά: Χάρτης παράλληλης από συνταύτιση με AD και συνάρτηση P_{2A} (ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$), μάσκα αποκρύψεων, τελικός χάρτης παράλληλης μετά από εφαρμογή της μάσκας.

Στην Εικ. 4.12 παρουσιάζεται χάρτης παράλληλης που προέκυψε μετά από συνταύ-

τιση με Απόλυτες Διαφορές και συσσωμάτωση με SGM στο ζεύγος εικόνων *Aloe*, η μάσκα αποκρύψεων και ο χάρτης παράλλαξης άνευ περιοχών αποκρύψεων.

4. 2.5 Σύγκριση χάρτη παράλλαξης από SGM με αντίστοιχο από SAD

Εδώ συγκρίνεται ένας ενδεικτικός χάρτης παράλλαξης του ζεύγους *cones* που προέκυψε μετά από υπολογισμό κόστους με τη μέθοδο των Απόλυτων Διαφορών και την συσσωμάτωση του κόστους με τον αλγόριθμο SGM με τον αντίστοιχο που προέκυψε μετά από υπολογισμό κόστους με την ίδια μέθοδο και συσσωμάτωση του κόστους (SAD – Sum of Absolute Differences) με παράθυρο 11×11 . Η μέθοδος SAD είχε υλοποιηθεί από την γράφουσα στο πλαίσιο του μαθήματος ‘Μεγάλες Θερινές Ασκήσεις Φωτογραμμετρίας’ (Εικ. 4.13). Από τους χάρτες παράλλαξης έχουν αφαιρεθεί οι περιοχές αποκρύψεων. Γίνεται αντιληπτό ότι ο χάρτης παράλλαξης με SGM διαφέρει ελάχιστα από τον αληθή, ενώ ο χάρτης παράλλαξης με SAD παρουσιάζει περισσότερα σφάλματα, κυρίως στις ακμές. Τα σφάλματα των χαρτών των δύο μεθόδων σε σχέση με τον αληθή χάρτη παράλλαξης διαφέρουν κατά 5.2% για το σύνολο των σημείων (13.7% για το SGM έναντι 18.9% του SAD) και κατά 3.4% για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις (7.6% για το SGM έναντι 11% του SAD).



Εικόνα 4.13. Από αριστερά: Αληθής χάρτης παράλλαξης, χάρτης παράλλαξης με μέθοδο συνταύτισης Απόλυτες Διαφορές, συσσωμάτωση κόστους με SGM και συνάρτηση ποινής P_{2A} (ποινές: $P_1 = 20, P_2 = 80$) και, δεξιά, χάρτης παράλλαξης με μέθοδο συνταύτισης Απόλυτες Διαφορές και συσσωμάτωση κόστους με παράθυρο 11×11 . Σε όλους τους χάρτες έχει εφαρμοστεί μάσκα αποκρύψεων.

4.3 Βελτιστοποίηση Παραμέτρων SGM για Εικόνες “2003 datasets”

Πρόκειται για την πρώτη προσπάθεια βελτιστοποίησης των παραμέτρων (tuning) των συναρτήσεων ποινής, και για αυτό τον λόγο έγινε ενδεικτικά για δυο μόνο περιπτώσεις. Αναλύεται η μεθοδολογία και παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα, οι γραφικές παραστάσεις και οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν.

4. 3.1 Μεθοδολογία

Χρησιμοποιήθηκαν δύο ζεύγη επιτολικών εικόνων της συλλογής “2003 datasets” της ιστοσελίδας Middlebury (<http://vision.middlebury.edu/stereo/data/scenes2003/> – Scharstein & Szeliski, 2003), οι οποίες έχουν διαστάσεις 450×375 (“quarter-size”).

Έγινε βελτιστοποίηση των παραμέτρων των συναρτήσεων ποινής P_{2A} και P_{2T} , με αρχική μέθοδο υπολογισμού κόστους τις Απόλυτες Διαφορές, οπότε διακρίνονται δύο

περιπτώσεις (Πίνακας 4.1).

Περίπτωση 1	AD+P _{2A}
Περίπτωση 2	AD+ P _{2Γ}

Πίνακας 4.1. Περιπτώσεις βελτιστοποίησης για την συλλογή “2003 datasets”.

Σε κάθε μια των περιπτώσεων εξετάζονται διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Το βήμα μεταξύ των τιμών για κάθε παράμετρο είναι κάθε φορά τέτοιο ώστε, από την μια πλευρά, κάθε σεντ παραμέτρων να καταλήγει σε ένα διακριτά διαφορετικό τελικό αποτέλεσμα και, από την άλλη, να διασφαλίζεται ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα μπορεί να εξαχθεί από τις εξεταζόμενες τιμές (Banz et al., 2012). Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Περίπτωση (Παράμετροι)	P ₁	P ₂	w
AD+P _{2A}	15,20,25,30	50,80,110,140	
AD+ P _{2Γ}	10,20,30,40	120,150,180,210	8,10,12,14,16

Πίνακας 4.2. Τιμές παραμέτρων P₁, P₂ και w για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση.

Από την διαδικασία βελτιστοποίησης προκύπτει για κάθε περίπτωση, για κάθε σεντ παραμέτρων και για κάθε ζεύγος εικόνων ένας χάρτης ψηφιακής παράλλαξης μαζί με το σφάλμα από τη σύγκρισή του με τον αληθή χάρτη παράλλαξης. Αυτό γίνεται τόσο για ολόκληρη την εικόνα όσο και μόνο για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις. Ο χάρτης αποκρύψεων παράγεται με εφαρμογή ελέγχου αμφίδρομης συμβατότητας στον αριστερό και τον δεξιό αληθή χάρτη παράλλαξης με χρήση κατωφλίου 1 εικονοψηφίδας για τις επιτρεπόμενες διαφορές παραλλάξεων.

Ως σφάλμα ορίζεται το ποσοστό των εικονοψηφίδων με υπολογισθείσα παράλλαξη που διαφέρει περισσότερο του 1 από την παράλλαξη στον αληθή χάρτη (“ποσοστό των εσφαλμένα συνταυτισθεισών εικονοψηφίδων”). Το τελικό σφάλμα που λαμβάνεται υπόψη για την αξιολόγηση των συναρτήσεων και της απόδοσής τους σε κάθε περίπτωση είναι το ελάχιστο του μέσου σφάλματος των δύο ζευγών εικόνων για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις.

4. 3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

Το μικρότερο σφάλμα για κάθε περίπτωση, καθώς και οι παράμετροι για τις οποίες αυτό επιτυγχάνεται, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Περίπτωση	Μικρότερο σφάλμα (p _{low} %)	Παράμετροι για p _{low}
AD+P _{2A}	7.6	P ₁ = 20, P ₂ = 80
AD+ P _{2Γ}	7.7	P ₁ = 20, P ₂ = 150, w = 16

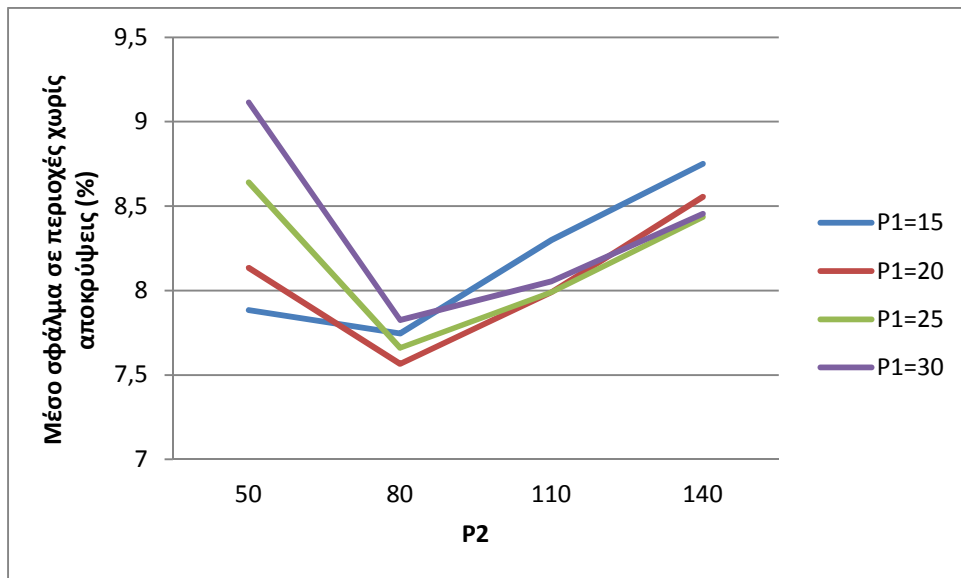
Πίνακας 4.3. Μικρότερο σφάλμα κάθε περίπτωσης και βέλτιστες παράμετροι.

Παρατηρείται ότι τα σφάλματα αλλάζουν πολύ λίγο με χρήση διαφορετικής συνάρτησης υπολογισμού της ποινής P₂.

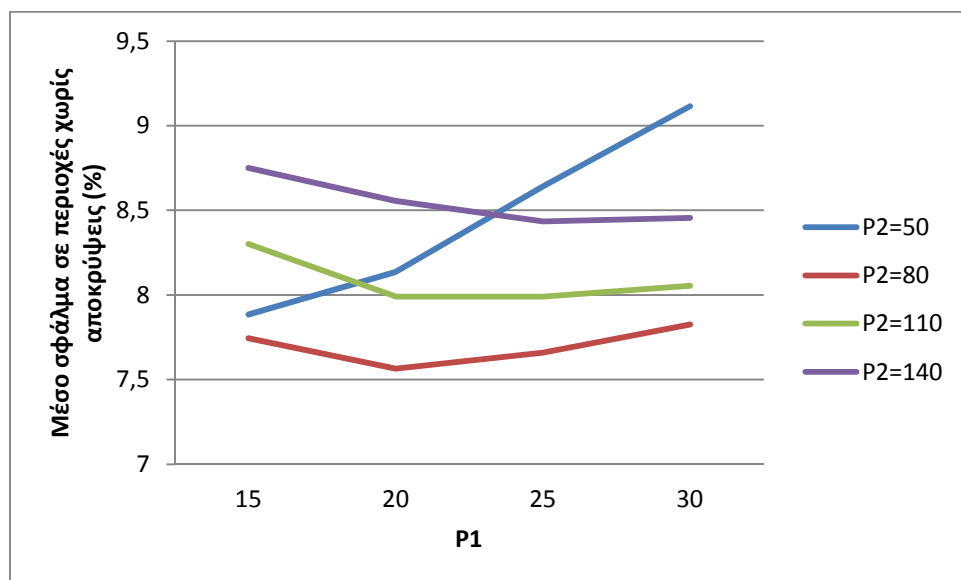
Με τη βοήθεια γραφικών παραστάσεων μπορούν να εξαχθούν πρόσθετα συμπερά-

ματα. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν γραφικές παραστάσεις όπου απεικονίζεται η συμπεριφορά κάθε τιμής της μιας ποινής για όλες τις τιμές της άλλης. Για την Περίπτωση 2, όπου συμμετέχουν τρεις παράμετροι, η μία παράμετρος σε κάθε γραφική παράσταση διατηρείται σταθερή και ίση με την τιμή της βέλτιστης παραμέτρου.

- Περίπτωση 1. Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2A}



Εικόνα 4.14. Περίπτωση 1: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_2 , για τις διάφορες τιμές της P_1 .

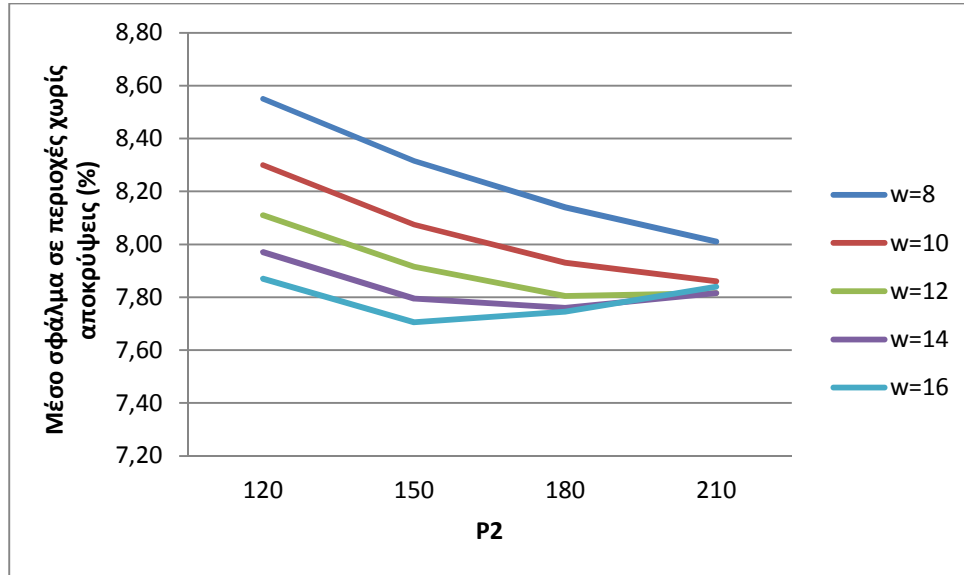


Εικόνα 4.15. Περίπτωση 1: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_2 , για τις διάφορες τιμές της P_1 .

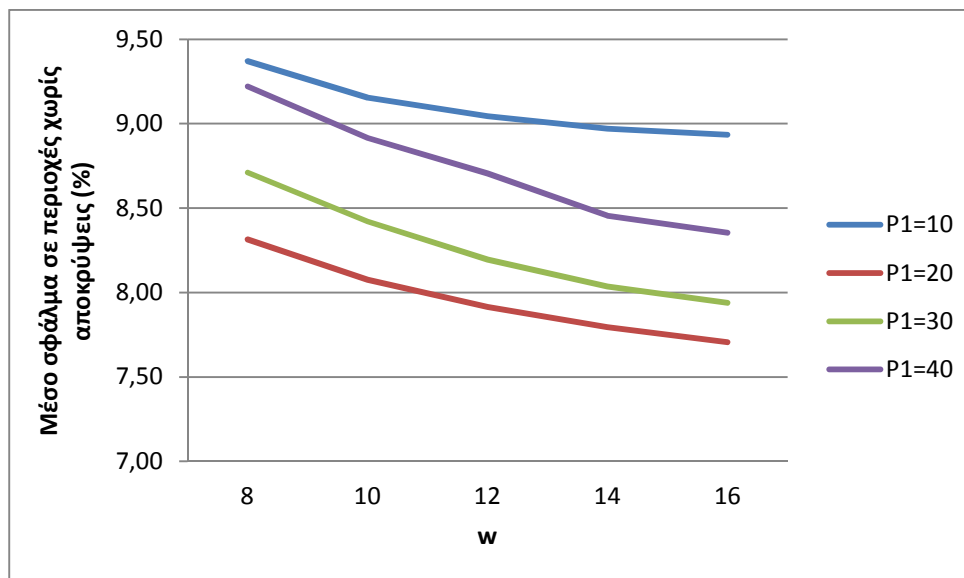
Όλες οι τιμές της παραμέτρου P_1 εμφανίζουν ελάχιστο σφάλμα για $P_2 = 80$. Το μικρότερο σφάλμα μεταξύ των τιμών της ποινής P_1 προκύπτει για την τιμή $P_1 = 20$, η οποία όμως εμφανίζει μεγαλύτερα σφάλματα από τις άλλες τιμές της P_1 για τις υπό-

λοιπες τιμές της P_2 (Εικ. 4.14). Από την άλλη μεριά, η ποινή $P_2 = 80$ παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα για όλες τις τιμές της ποινής P_1 (Εικόνα 4.15).

- Περίπτωση 2. Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: $P_{2Γ}$

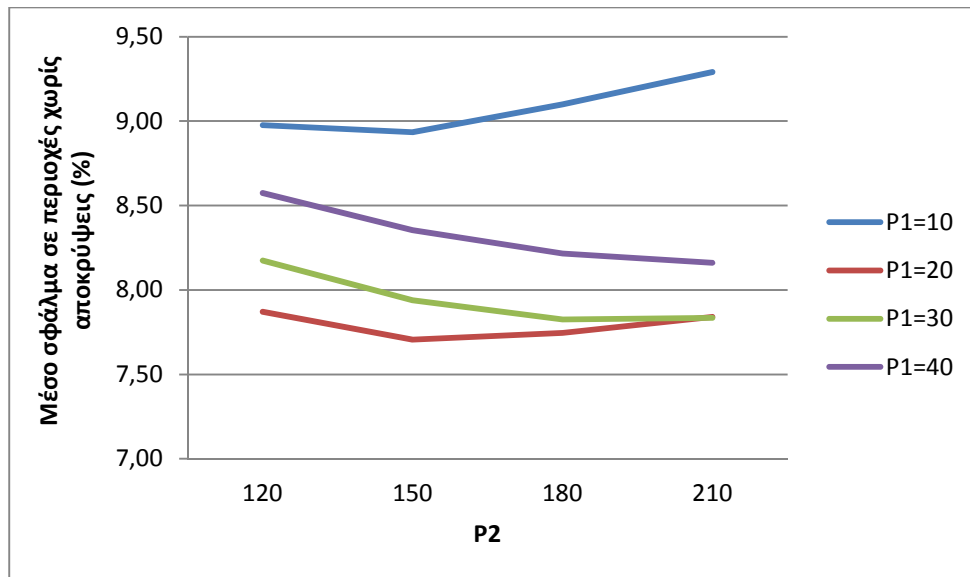


Εικόνα 4.16. Περίπτωση 2: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_2 , για τις διάφορες τιμές της w , με σταθερή ποινή $P_1 = 20$.



Εικόνα 4.17. Περίπτωση 2: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής w , για τις διάφορες τιμές της P_1 , με σταθερή ποινή $P_2 = 150$.

Παρατηρείται ότι η τιμή $w = 16$ παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα για όλες τις τιμές της ποινής P_2 , πλην μιας, με μικρή διαφορά σφάλματος από την προηγούμενη τιμή ($w = 14$) (Εικ. 4.16). Ακόμη, το μικρότερο σφάλμα για όλες τις τιμές της ποινής w προκύπτει για $P_1 = 20$ (Εικ. 4.17), όπως και για όλες τις τιμές της ποινής P_2 πλην μιας (Εικ. 4.18).

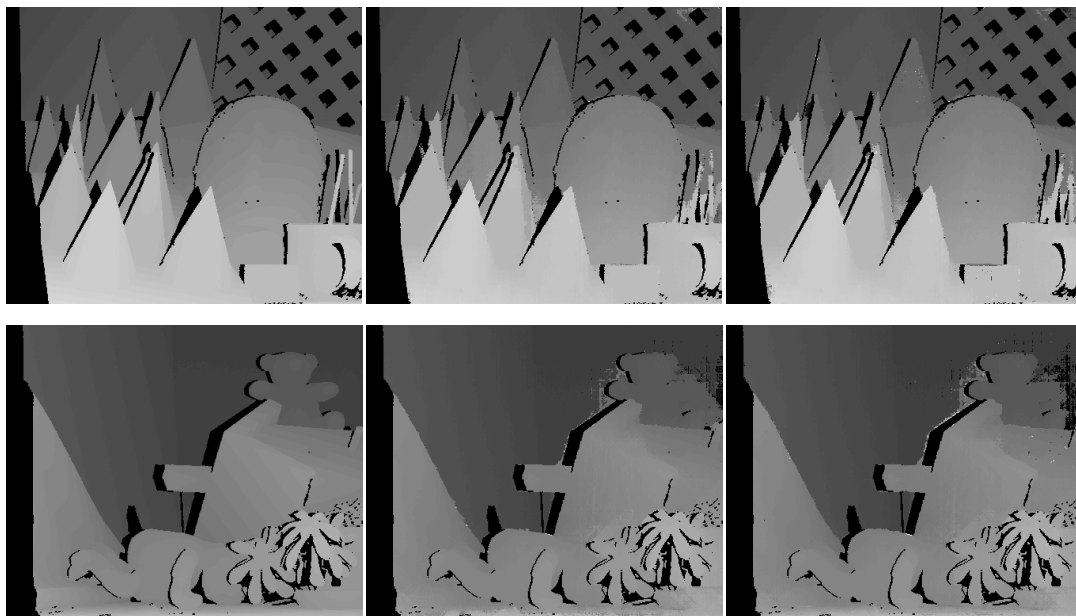


Εικόνα 4.18. Περίπτωση 2: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσεως των τιμών της ποινής P_2 , για τις διάφορες τιμές της P_1 , με σταθερή ποινή $w = 16$.

Συμπερασματικά, με την συνάρτηση ποινής P_{2f} επιτυγχάνεται καλύτερος διαχωρισμός των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων.

4. 3.3 Ποιοτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης των δύο ζευγών εικόνων που προέκυψαν από τις καλύτερες τιμές των ποινών, δηλαδή εκείνες που προκαλούν το μικρότερο μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις, για τις δύο περιπτώσεις βελτιστοποίησης που εξετάστηκαν (Εικ. 4.19).



Εικόνα 4.19. Από αριστερά προς τα δεξιά, για κάθε σειρά: Αληθής χάρτης παράλλαξης, χάρτης παράλλαξης για τις βέλτιστες τιμές της Περίπτωσης 1 (Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 20$, $P_2 = 80$) και χάρτης παράλλαξης για τις βέλτιστες τιμές της Περίπτωσης 2 (Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2f} , ποινές: $P_1 = 20$, $P_2 = 150$, $w = 16$). Από πάνω προς τα κάτω: ζεύγη εικόνων *cones* και *teddy*.

4.4 Βελτιστοποίηση Παραμέτρων SGM για Εικόνες “2006 datasets”

Αυτή η διαδικασία για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων (tuning) των συναρτήσεων ποινής εφαρμόστηκε σε διαφορετικού είδους εικόνες και για αυτό κρίθηκε σκόπιμο να γίνει ξεχωριστά. Αφορά όλες τις περιπτώσεις υπολογισμού κόστους και συναρτήσεων ποινής. Αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το σύνολο των εικόνων, οι γραφικές παραστάσεις και αποτελέσματα για μεμονωμένες εικόνες.

4.4.1 Μεθοδολογία

Χρησιμοποιήθηκαν τα 21 ζεύγη επιπολικών εικόνων της συλλογής “2006 datasets” (<http://vision.middlebury.edu/stereo/data/scenes2006/>, Hirschmüller & Scharstein, 2007) από την ιστοσελίδα Middlebury, με διαστάσεις 413×370 έως 465×370 (“third-size”). Οι εικόνες της συλλογής θεωρούνται πολύ πιο σύνθετες από εκείνες προηγούμενων συλλογών (2001, 2003 και 2005), όσον αφορά την απεικονιζόμενη σκηνή, την γεωμετρία της και την χαμηλή υφή, άρα τα σφάλματα από την συνταύτιση αναμένονται μεγαλύτερα.

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων κάθε συνάρτησης (tuning) πραγματοποιείται για κάθε συνδυασμό των δύο μεθόδων υπολογισμού κόστους με τις πέντε συναρτήσεις ποινής P_2 , οπότε διακρίνονται 10 περιπτώσεις (Πίνακας 4.4).

Περίπτωση 1	AD+ P_{2A}
Περίπτωση 2	AD+ P_{2B}
Περίπτωση 3	AD+ $P_{2\Gamma}$
Περίπτωση 4	AD+ $P_{2\Delta}$
Περίπτωση 5	AD+ P_{2E}
Περίπτωση 6	Census+ P_{2A}
Περίπτωση 7	Census+ P_{2B}
Περίπτωση 8	Census+ $P_{2\Gamma}$
Περίπτωση 9	Census+ $P_{2\Delta}$
Περίπτωση 10	Census+ P_{2E}

Πίνακας 4.4. Περιπτώσεις βελτιστοποίησης.

Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις εξετάζονται διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Και εδώ, σε κάθε περίπτωση το βήμα μεταξύ των τιμών για κάθε παράμετρο είναι τέτοιο ώστε, από την μια πλευρά, κάθε σεντ παραμέτρων να καταλήγει σε ένα διακριτά διαφορετικό τελικό αποτέλεσμα και, από την άλλη, να διασφαλίζεται ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα μπορεί να εξαχθεί από τις εξεταζόμενες τιμές (Banz et al., 2012). Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε περίπτωση εμφανίζονται στους Πίνακες 4.5-4.6.

Από την διαδικασία της βελτιστοποίησης προκύπτει για κάθε μια από τις δέκα περιπτώσεις, για κάθε σεντ παραμέτρων και για κάθε ζεύγος εικόνων ένας χάρτης ψηφιακής παράλλαξης μαζί με το σφάλμα από τη σύγκρισή του με τον αληθή χάρτη

παράλλαξης. Αυτό γίνεται τόσο για ολόκληρη την εικόνα όσο και μόνο για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις. Όπως και προηγουμένως, ο χάρτης αποκρύψεων παράγεται με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας στον αριστερό και τον δεξιό αληθή χάρτη παράλλαξης με χρήση κατωφλίου 1 εικονοψηφίδας για τις επιτρεπόμενες διαφορές παραλλάξεων.

Περίπτωση (Παράμετροι)	P_1	P_2	w
AD+ P_{2A}	5,10,15,20,25,30,35,40	70,100,130,160,190,220,250	
AD+ P_{2B}	10,20,30,60,100,140	100,200,300,400,500,600	
AD+ $P_{2Γ}$	5,10,20,30,40	50,100,200,300,400	8,10,12,14,16
Census+ P_{2A}	5,10,25,40,55,70	50,100,150,200,250	
Census+ P_{2B}	5,10,15,20,25,30,60,100,140	50,75,100,125,150,200,300,400	
Census+ $P_{2Γ}$	10,20,40,60,80	50,100,200,300,400	4,6,10,14,16

Πίνακας 4.5. Τιμές παραμέτρων P_1 , P_2 και w για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση.

Περίπτωση (Παράμετροι)	P_1	a	b	c
AD+ $P_{2Δ}$	5,35,65,95	0.1,0.4,0.7,1.0		20,60,100,140
AD+ P_{2E}	5,35,65,95	100,300,500,700	10,50,90,130	5,35,65,95
Census+ $P_{2Δ}$	5,35,65,95	0.1,0.4,0.7,1.0		20,60,100,140
Census+ P_{2E}	5,35,65,95	100,300,500,700	10,50,90,130	5,35,65,95

Πίνακας 4.6. Τιμές παραμέτρων P_1 , a, b και c για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση.

Ως σφάλμα ορίζεται και εδώ το ποσοστό των εικονοψηφίδων με υπολογισθείσα παράλλαξη που διαφέρει περισσότερο του 1 από την παράλλαξη στον αληθή χάρτη. Το τελικό σφάλμα για την αξιολόγηση των συναρτήσεων και της απόδοσής τους σε κάθε περίπτωση είναι το ελάχιστο του μέσου σφάλματος των 21 ζευγών εικόνων για τις περιοχές δίχως αποκρύψεις.

4.4.2 Συνολικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

Το μικρότερο σφάλμα για κάθε περίπτωση, καθώς και οι παράμετροι για τις οποίες αυτό επιτυγχάνεται, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7.

Περίπτωση	Μικρότερο σφάλμα (ρ_{low} %)	Παράμετροι για ρ_{low}
AD+ P_{2A}	21.4	$P_1 = 10, P_2 = 100$
AD+ P_{2B}	21.8	$P_1 = 10, P_2 = 600$
AD+ $P_{2Γ}$	21.5	$P_1 = 10, P_2 = 200, w = 8$
AD+ $P_{2Δ}$	23.0	$P_1 = 35, a = 0.1, c = 60$
AD+ P_{2E}	22.9	$P_1 = 35, a = 700, b = 90, c = 65$
Census+ P_{2A}	9.7	$P_1 = 25, P_2 = 100$
Census+ P_{2B}	9.8	$P_1 = 25, P_2 = 100$
Census+ $P_{2Γ}$	9.6	$P_1 = 20, P_2 = 100, w = 14$
Census+ $P_{2Δ}$	9.9	$P_1 = 35, a = 1, c = 140$
Census+ P_{2E}	9.9	$P_1 = 35, a = 300, b = 10, c = 95$

Πίνακας 4.7. Μικρότερο σφάλμα κάθε περίπτωσης και βέλτιστες παράμετροι.

Παρατηρείται ότι τα σφάλματα μειώνονται κατά το ήμισυ και πλέον με την χρήση α-

ποτελεσματικότερης μεθόδου συνταύτισης (Μετασχηματισμός Census αντί Απόλυτων Διαφορών – AD). Αντιθέτως τα ποσοστά βελτιώνονται απλώς οριακά (0.3–1.6%) με διαφορετικές συναρτήσεις υπολογισμού της ποινής P_2 (ανεξαρτήτως μεθόδου υπολογισμού του κόστους).

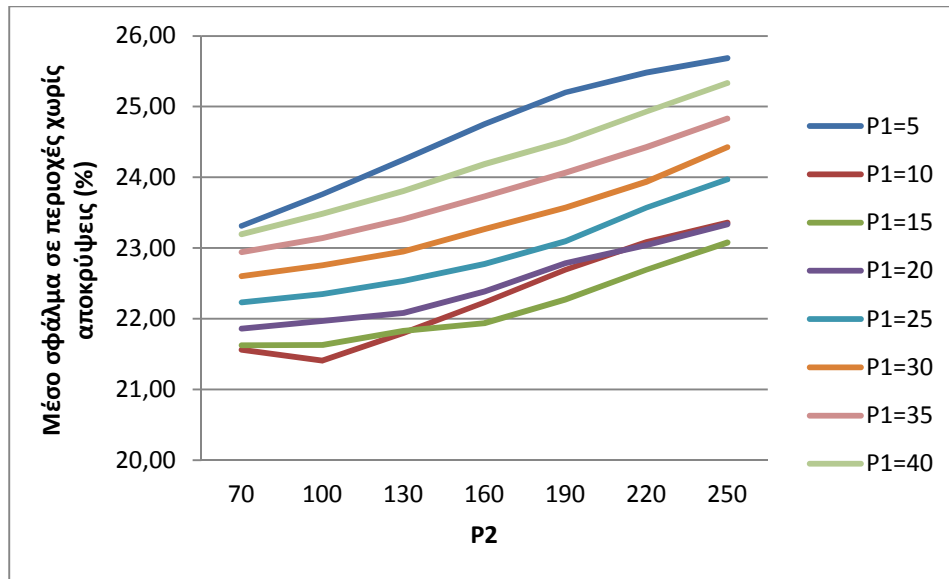
Χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν μέσω γραφικών παραστάσεων. Συγκεκριμένα, για τις περιπτώσεις με δύο παραμέτρους ($AD+P_{2A}$, $AD+P_{2B}$, $Census+P_{2A}$, $Census+P_{2B}$) δημιουργήθηκαν πέντε γραφικές παραστάσεις. Στο πρώτο διάγραμμα απεικονίζεται η συμπεριφορά κάθε τιμής της ποινής P_1 για όλες τις τιμές της ποινής P_2 , ενώ στο δεύτερο διάγραμμα το αντίστροφο. Στην τρίτη εικόνα απεικονίζεται χρωματικά ο αριθμός των ζευγών εικόνων που εμφανίζουν ελάχιστο σφάλμα για κάθε συνδυασμό ποινών [P_1 , P_2]. Στην τέταρτη γραφική παράσταση παρουσιάζεται για κάθε ζεύγος εικόνων η απόκλιση του σφάλματός του συγκριτικά με το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις παραμέτρους που αυτό επιτυγχάνεται. Στην τελευταία γραφική παράσταση συγκρίνεται για κάθε ζεύγος εικόνων το μικρότερο σφάλμα του με εκείνο που προκύπτει από τις παραμέτρους που δίνουν το ελάχιστο μέσο σφάλμα.

Για τις περιπτώσεις με τρεις παραμέτρους ($AD+P_{2Γ}$, $AD+P_{2Δ}$, $Census+P_{2Γ}$, $Census+P_{2Δ}$) δημιουργήθηκαν πέντε γραφικές παραστάσεις. Στα πρώτα τρία διαγράμματα, με σταθερή κάθε φορά μια ποινή, διερευνάται η συμπεριφορά κάθε τιμής της δεύτερης ποινής ως προς όλες τις τιμές της τρίτης. Επειδή η απεικόνιση του αριθμού των ζευγών εικόνων που εμφανίζουν ελάχιστο για κάθε συνδυασμό ποινών δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί στις δύο διαστάσεις, λόγω και του πλήθους των δεδομένων, τα αποτελέσματα απλώς αναφέρονται. Τα υπόλοιπα δύο διαγράμματα κατασκευάζονται όπως για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

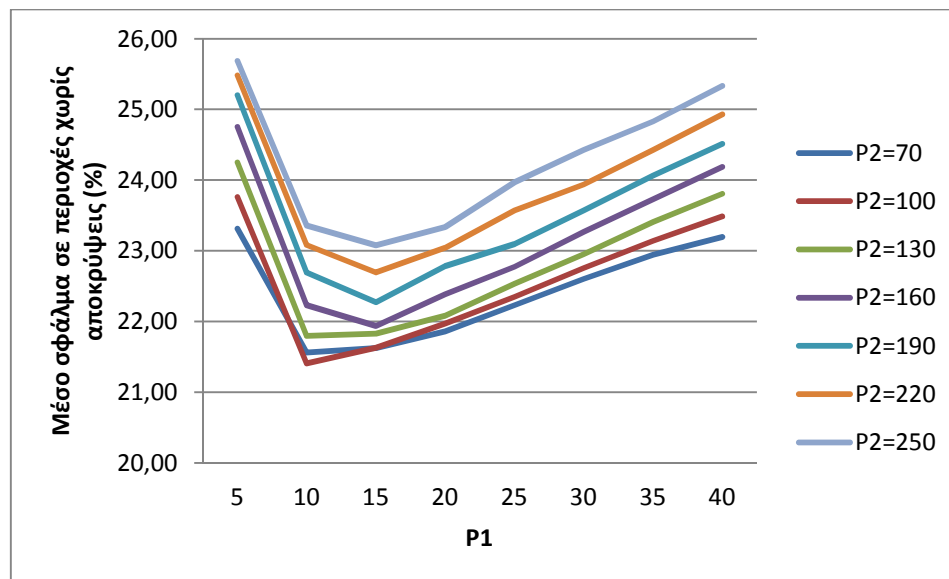
Για τις περιπτώσεις με τέσσερις παραμέτρους ($AD+P_{2Ε}$, $Census+P_{2Ε}$) δημιουργήθηκαν οχτώ γραφικές παραστάσεις, που παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες. Στα πρώτα έξι διαγράμματα, με σταθερές κάθε φορά δύο ποινές, διερευνάται η συμπεριφορά κάθε τιμής της τρίτης ποινής ως προς όλες τις τιμές της τέταρτης. Επειδή η απεικόνιση του αριθμού των ζευγών εικόνων που εμφανίζουν ελάχιστο για κάθε συνδυασμό ποινών δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί στις δύο διαστάσεις, λόγω και του πλήθους των δεδομένων, τα αποτελέσματα απλώς αναφέρονται. Τα άλλα δύο διαγράμματα κατασκευάζονται όπως για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

- Περίπτωση 1.

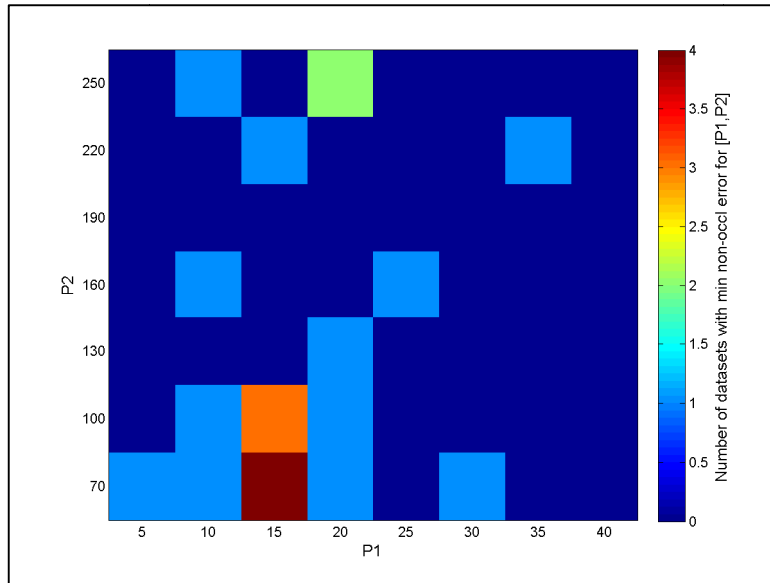
Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2A}



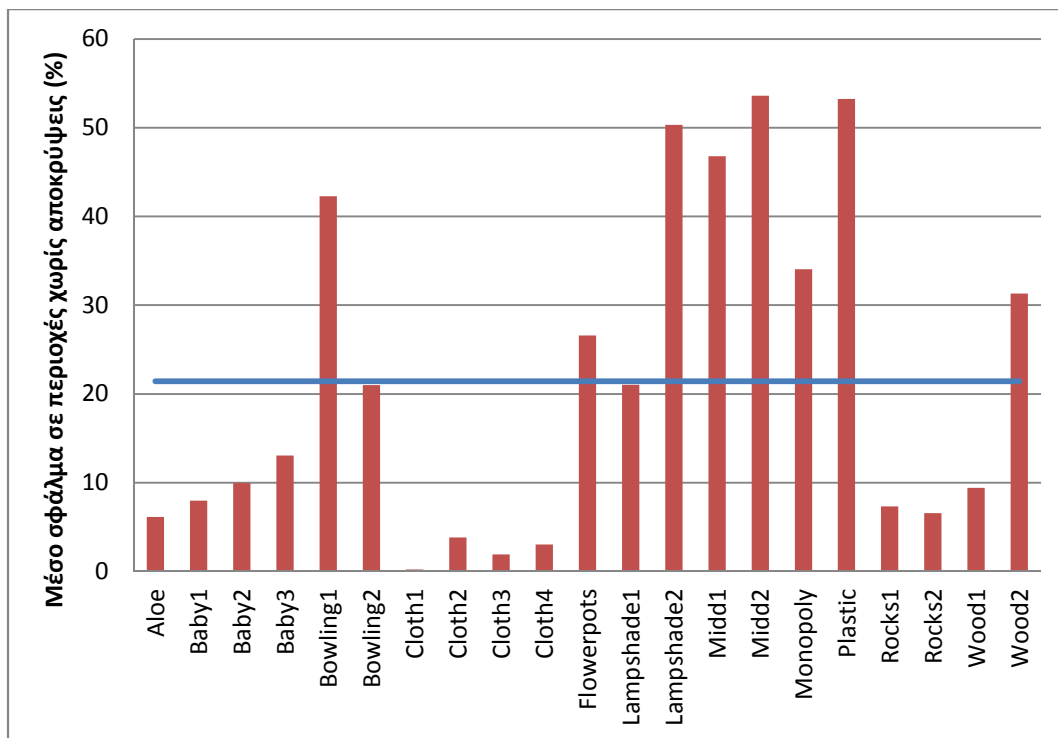
Εικόνα 4.20. Περίπτωση 1: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_2 , για τις διάφορες τιμές της P_1 .



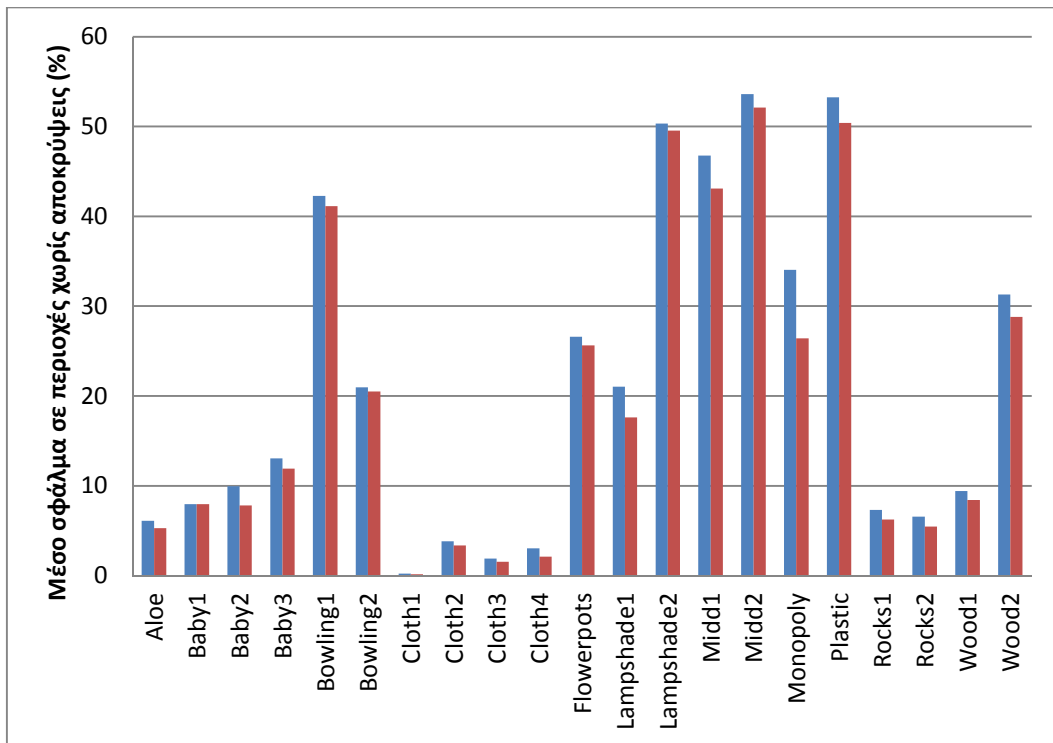
Εικόνα 4.21. Περίπτωση 1: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της P_2 .



Εικόνα 4.22. Περίπτωση 1: Αριθμός των ζευγών εικόνων που εμφανίζουν ελάχιστο για κάθε συνδυασμό παραμέτρων $[P_1, P_2]$.



Εικόνα 4.23. Περίπτωση 1: Με μπλε χρώμα: Μικρότερο μέσο σφάλμα (για $P_1 = 10, P_2 = 100$). Με κόκκινο χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 10, P_2 = 100$).

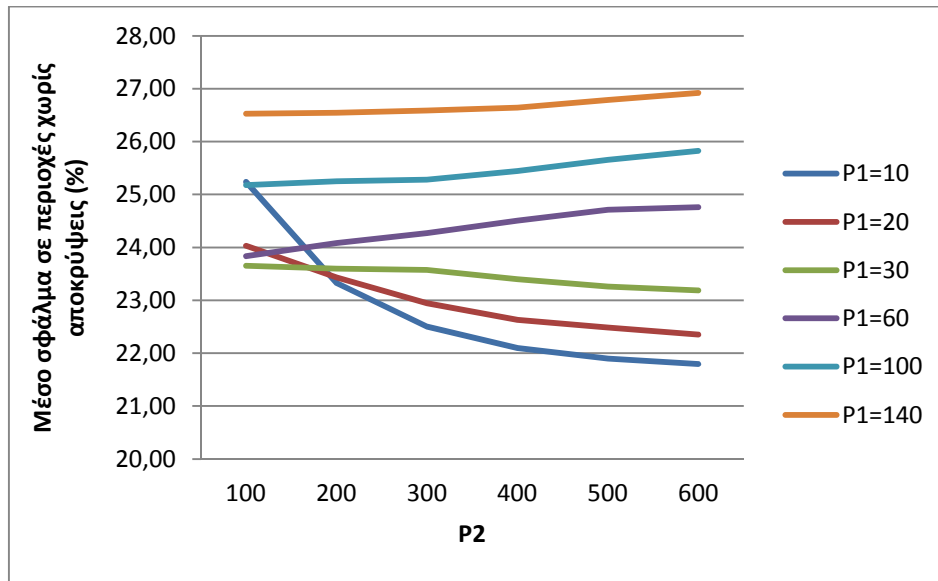


Εικόνα 4.24. Περίπτωση 1: Με μπλε χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 10$, $P_2 = 100$). Με κόκκινο χρώμα: Μικρότερο σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων.

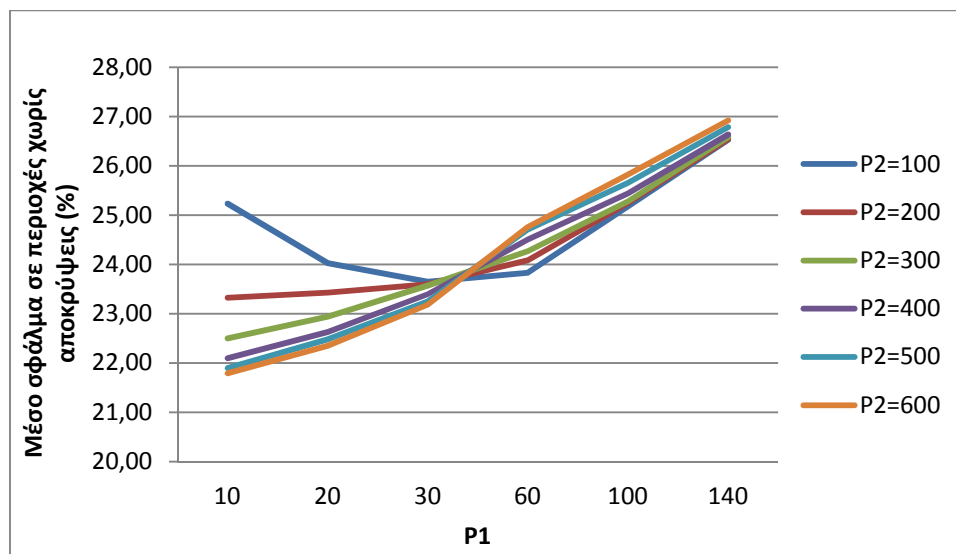
Για την παράμετρο P_1 οι καλύτερες τιμές είναι οι $P_1 = 10$ και $P_1 = 15$, καθώς επιδεικνύουν το μικρότερο σφάλμα και την πιο σταθερά καλή συμπεριφορά, αντίστοιχα (Εικ. 4.20). Για την παράμετρο P_2 οι καλύτερες τιμές είναι οι $P_2 = 70$ και $P_2 = 100$ για παρόμοιους λόγους (Εικ. 4.21). Τα ίδια διαπιστώνονται και από το γεγονός ότι το μικρότερο σφάλμα προκύπτει με βάση τον συνδυασμό [$P_1 = 10$, $P_2 = 100$], αλλά και από το ότι τα περισσότερα ζεύγη εικόνων (4 στα 21) παρουσιάζουν ελάχιστο σφάλμα για τον συνδυασμό [$P_1 = 15$, $P_2 = 70$] (Εικ. 4.22). Από τα 21 ζεύγη εικόνων τα 5 (*Bowling1*, *Lampshade2*, *Midd1*, *Midd2*, *Plastic*) έχουν διαφορά σφάλματος >20% από το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις ίδιες παραμέτρους (Εικ. 4.23). Τέλος, μόνο ένα ζεύγος εικόνων (*Monopoly*) παρουσιάζει σχετικά μεγάλη ποσοστιαία διαφορά (>5%) μεταξύ του ελάχιστου σφάλματός του και του σφάλματός του για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος (Εικ. 4.24).

- Περίπτωση 2.

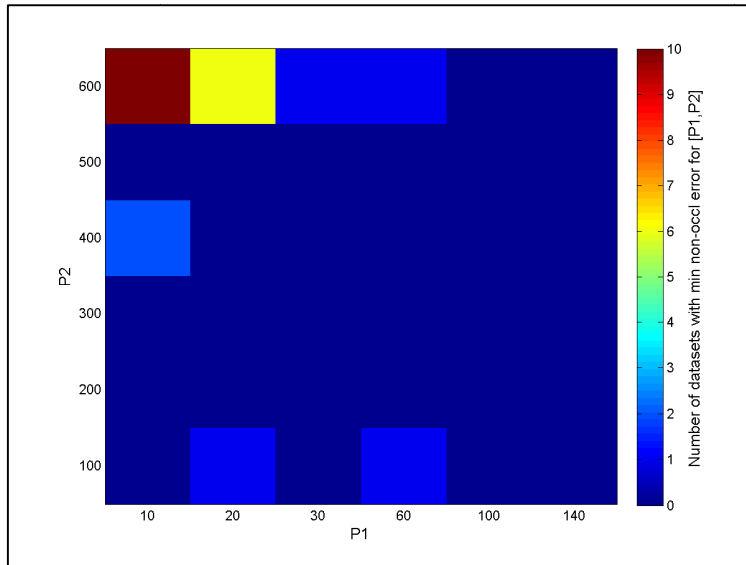
Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2B}



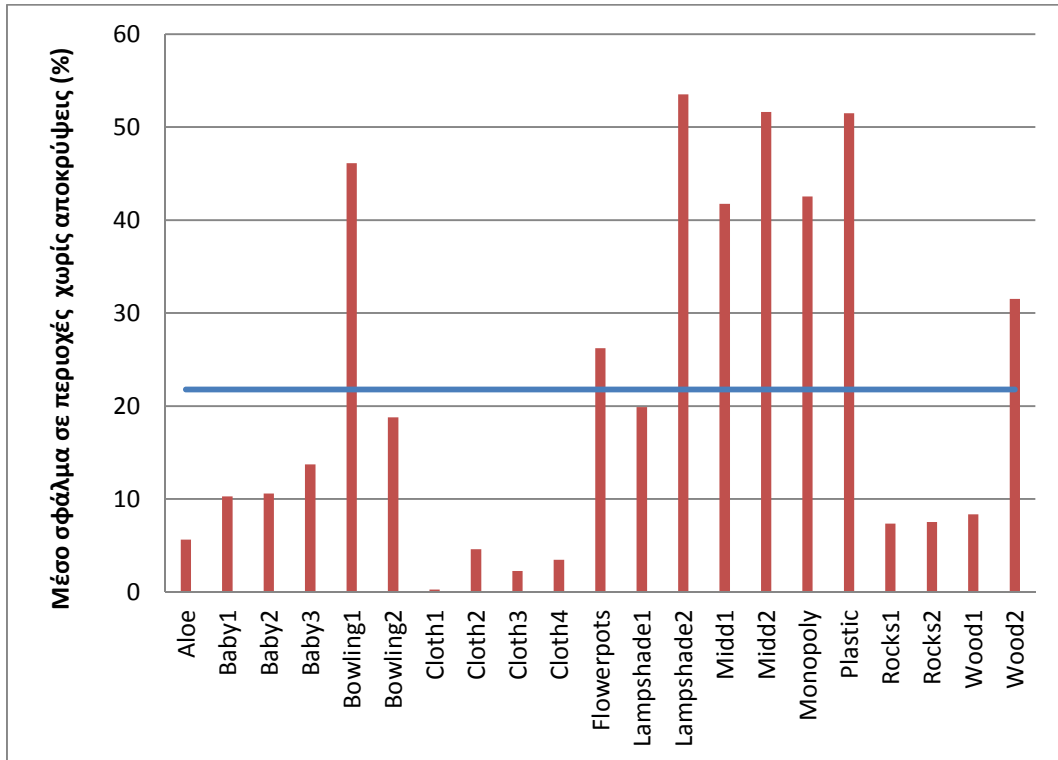
Εικόνα 4.25. Περίπτωση 2: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_2 , για τις διάφορες τιμές της P_1 .



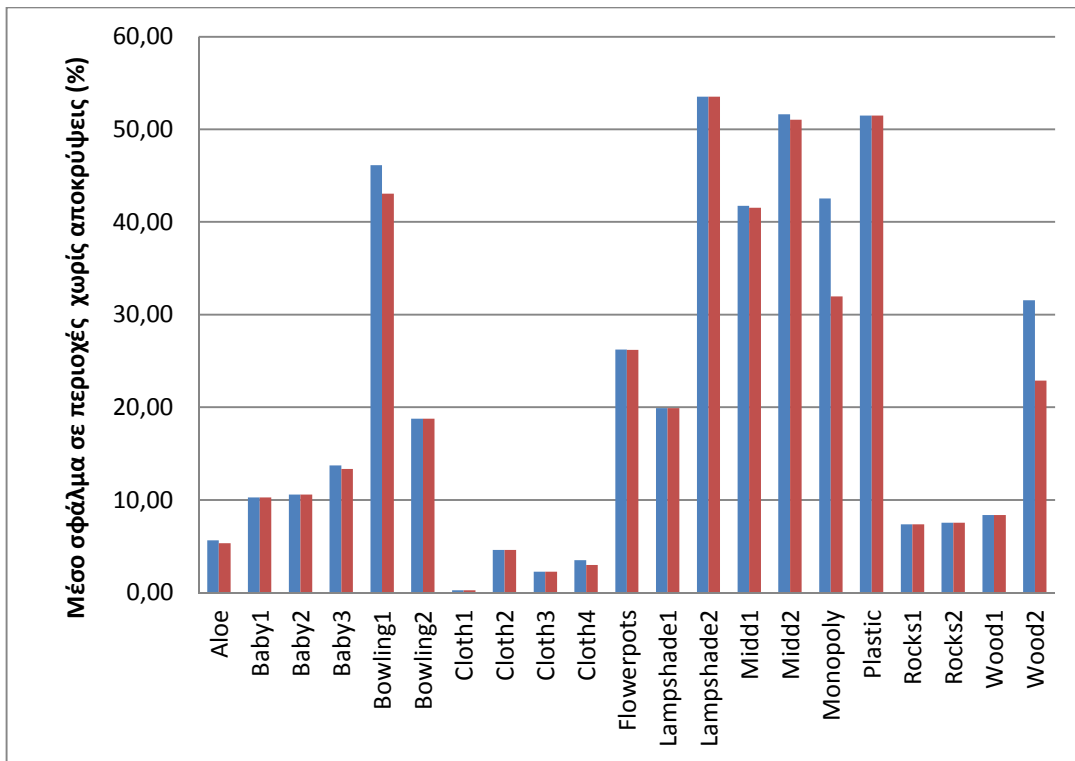
Εικόνα 4.26. Περίπτωση 2: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της P_2 .



Εικόνα 4.27. Περίπτωση 2: Αριθμός των ζευγών εικόνων που εμφανίζουν ελάχιστο για κάθε συνδυασμό παραμέτρων $[P_1, P_2]$.



Εικόνα 4.28. Περίπτωση 2: Με μπλε χρώμα: Μικρότερο μέσο σφάλμα (για $P_1 = 10, P_2 = 600$). Με κόκκινο χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 10, P_2 = 600$).

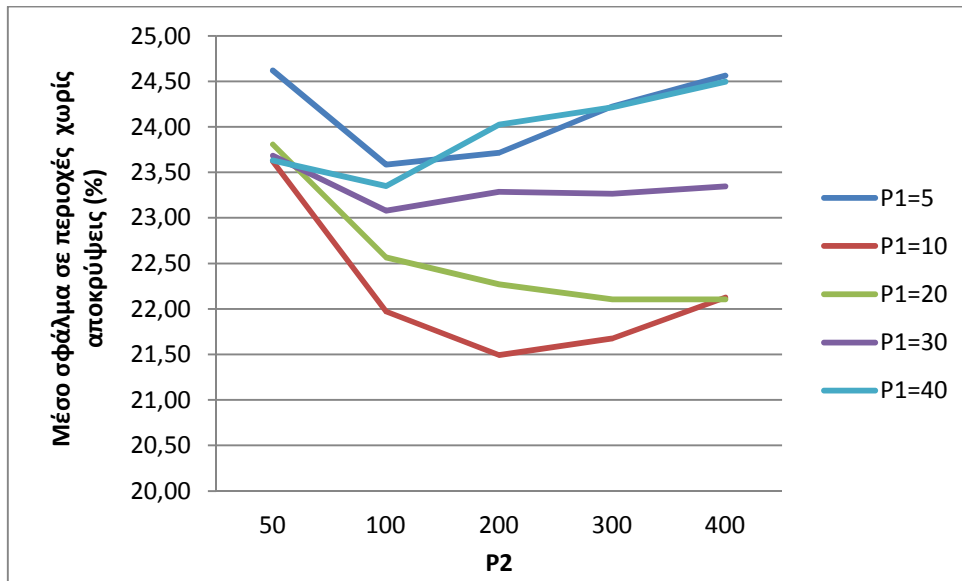


Εικόνα 4.29. Περίπτωση 2: Με μπλε χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 10$, $P_2 = 600$). Με κόκκινο χρώμα: Μικρότερο σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων.

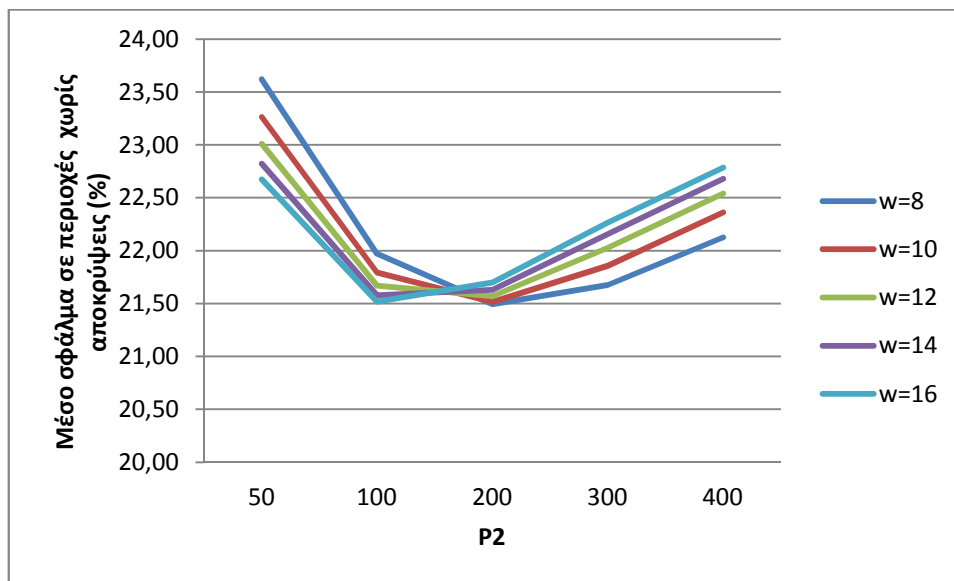
Οι τρεις μεγαλύτερες τιμές P_1 παρουσιάζουν σταθερό και μεγάλο σφάλμα για όλες τις τιμές του P_2 . Οι δύο επόμενες μικρότερες τιμές P_1 εμφανίζουν κάποια πτωτική τάση όσο αυξάνει η τιμή του P_2 . Η μικρότερη τιμή $P_1 = 10$ έχει την μεγαλύτερη πτωτική πορεία, καταλήγοντας στο ελάχιστο για την μεγαλύτερη εξεταζόμενη τιμή P_2 , με μικρή διαφορά από το σφάλμα που παρουσιάζεται για την αμέσως μεγαλύτερη τιμή P_1 αλλά και την αμέσως μικρότερη τιμή P_2 (Εικ. 4.25). Όλες οι τιμές της παραμέτρου P_2 , πλην της $P_2 = 100$, έχουν ανοδική τάση για τις τιμές της παραμέτρου P_1 , με την μεγαλύτερη τιμή $P_2 = 600$ να έχει το μικρότερο σφάλμα και τις υπόλοιπες τιμές διαδοχικά να έχουν μεγαλύτερο. Η κατάσταση αυτή αντιστρέφεται πλήρως μετά από την τιμή $P_1 = 30$. Τελικά, το ελάχιστο μέσο σφάλμα επιτυγχάνεται για τις παραμέτρους $P_1 = 10$ και $P_2 = 600$ (Εικ. 4.26). Μάλιστα πολλά (10 από τα 21) ζεύγη εικόνων εμφανίζουν ελάχιστο για αυτές ακριβώς τις τιμές (Εικ. 4.27). Ακόμα, 6 από τα 21 ζεύγη εικόνων (*Bowling1*, *Lampshade2*, *Midd1*, *Midd2*, *Monopoly*, *Plastic*) έχουν ατομικό σφάλμα μεγαλύτερο από 20% από το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις ίδιες παραμέτρους (Εικ. 4.28). Δύο ζεύγη εικόνων (*Monopoly* και *Wood2*) εμφανίζουν σχετικά μεγάλη διαφορά (περί το 10%) μεταξύ του μικρότερου σφάλματός τους και εκείνου που παρουσιάζουν για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος (Εικ. 4.29).

- Περίπτωση 3.

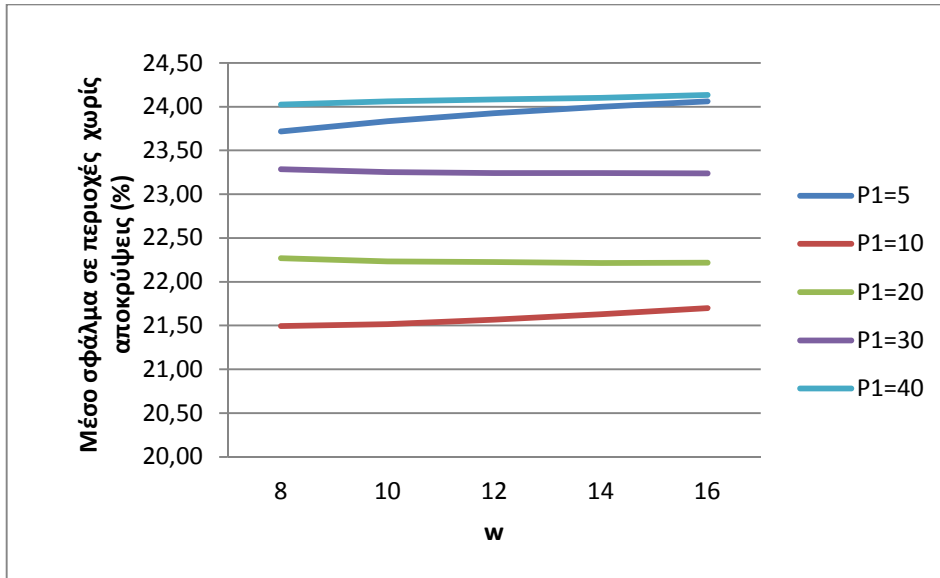
Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2T}



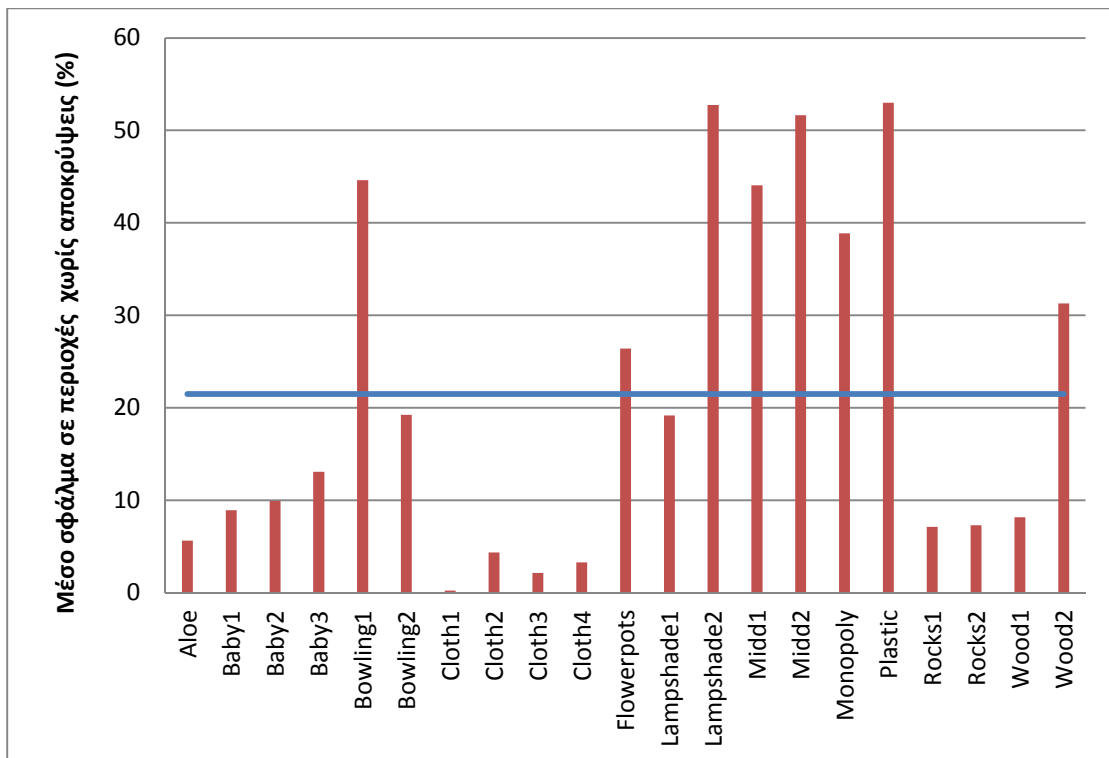
Εικόνα 4.30. Περίπτωση 3: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_2 , για τις διάφορες τιμές της P_1 , με σταθερή ποινή $w = 8$.



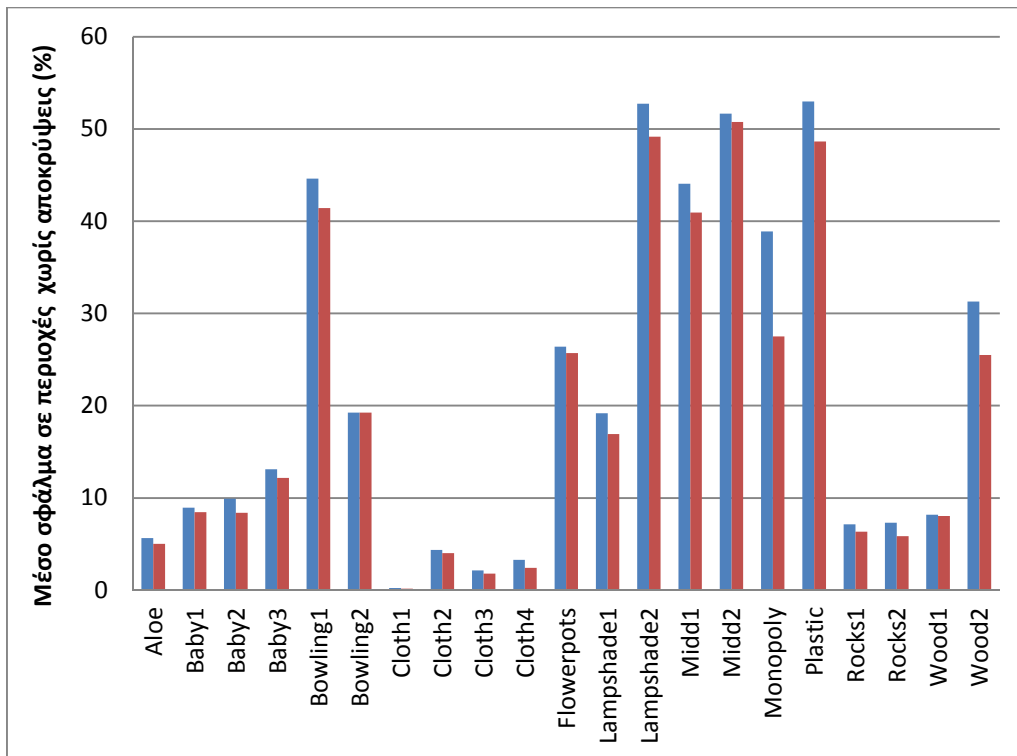
Εικόνα 4.31. Περίπτωση 3: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_2 , για τις διάφορες τιμές της w , με σταθερή ποινή $P_1 = 10$.



Εικόνα 4.32. Περίπτωση 3: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσεϊ των τιμών της ποινής w , για τις διάφορες τιμές της P_1 , με σταθερή ποινή $P_2 = 200$.



Εικόνα 4.33. Περίπτωση 3: Με μπλε χρώμα: Μικρότερο μέσο σφάλμα (για $P_1 = 10$, $P_2 = 200$, $w = 8$). Με κόκκινο χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 10$, $P_2 = 200$, $w = 8$).

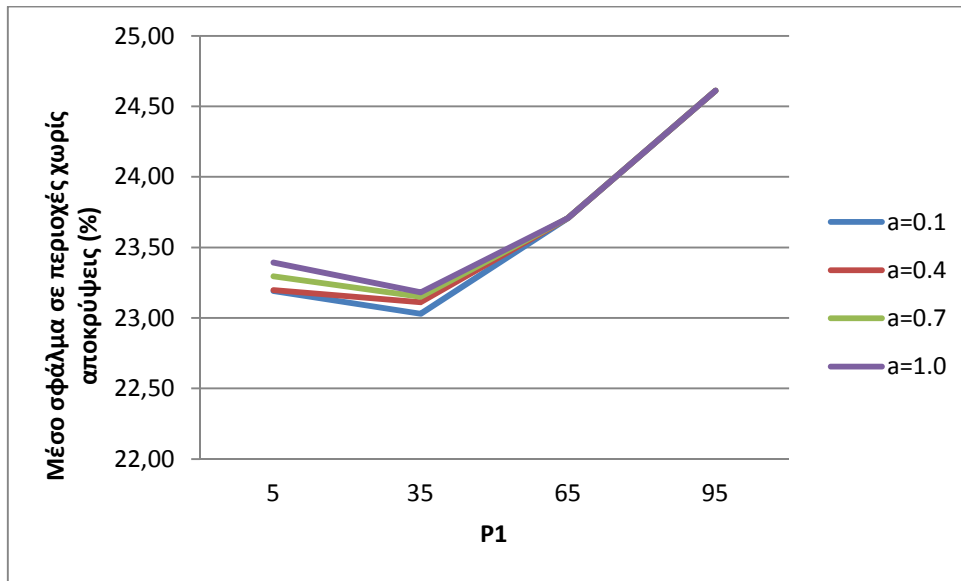


Εικόνα 4.34. Περίπτωση 3: Με μπλε χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 10$, $P_2 = 200$, $w = 8$). Με κόκκινο χρώμα: Μικρότερο σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων.

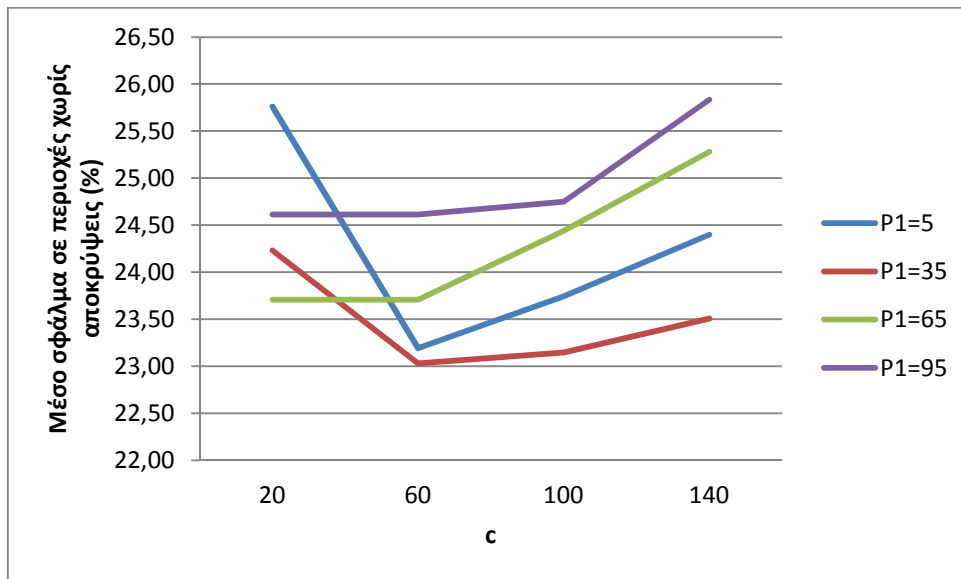
Για την τιμή της παραμέτρου w στην οποία παρουσιάζεται το ελάχιστο μέσο σφάλμα ($w = 8$), η τιμή $P_1 = 10$ έχει το μικρότερο σφάλμα για όλες τις τιμές της παραμέτρου P_2 και εμφανίζει ελάχιστο για $P_2 = 200$ (Εικ. 4.30). Με σταθερή την τιμή της παραμέτρου P_1 στην οποία παρουσιάζεται το ελάχιστο μέσο σφάλμα ($P_1 = 10$), για τις δύο μικρότερες τιμές της παραμέτρου P_2 οι τιμές της παραμέτρου w δίνουν μικρότερο σφάλμα όσο αυξάνονται. Στην συνέχεια η κατάσταση αντιστρέφεται, με τις μικρότερες τιμές του w να δίνουν το μικρότερο σφάλμα. Στο σημείο της αντιστροφής ($P_2 = 200$) εμφανίζεται το ελάχιστο για $w = 8$ (Εικ. 4.31). Με την παράμετρο P_2 σταθερή ($P_2 = 200$), η τιμή $P_1 = 10$ παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα για όλες τις τιμές του w , με διακύμανση μικρότερη του 0.5% και με το ελάχιστο να παρουσιάζεται για $w = 8$ (Εικόνα 4.32). Δεν υπάρχει συνδυασμός παραμέτρων για τον οποίο περισσότερα από δύο ζεύγη να εμφανίζουν το ελάχιστο σφάλμα τους. Από τα 21 ζεύγη εικόνων τα 5 (*Bowling1*, *Lampshade2*, *Midd1*, *Midd2*, *Plastic*) παρουσιάζουν σφάλμα μεγαλύτερο από 20% από το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις ίδιες παραμέτρους (Εικ. 4.33). Δύο ζεύγη εικόνων (*Monopoly*, *Wood2*) έχουν σχετικά μεγάλη διαφορά (>5%) μεταξύ του μικρότερου σφάλματός τους και εκείνου που εμφανίζουν για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος (Εικ. 4.34).

- Περίπτωση 4.

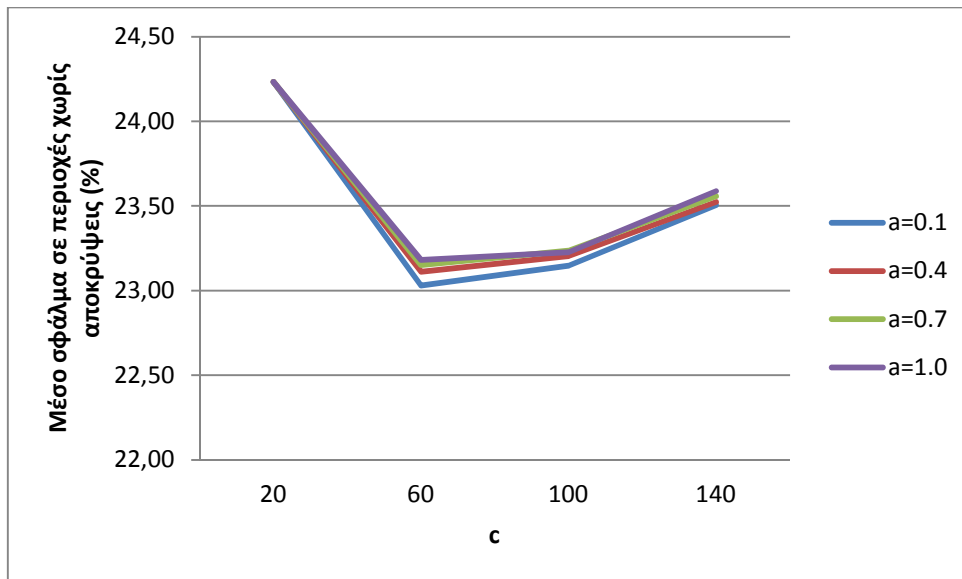
Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: $P_{2\Delta}$



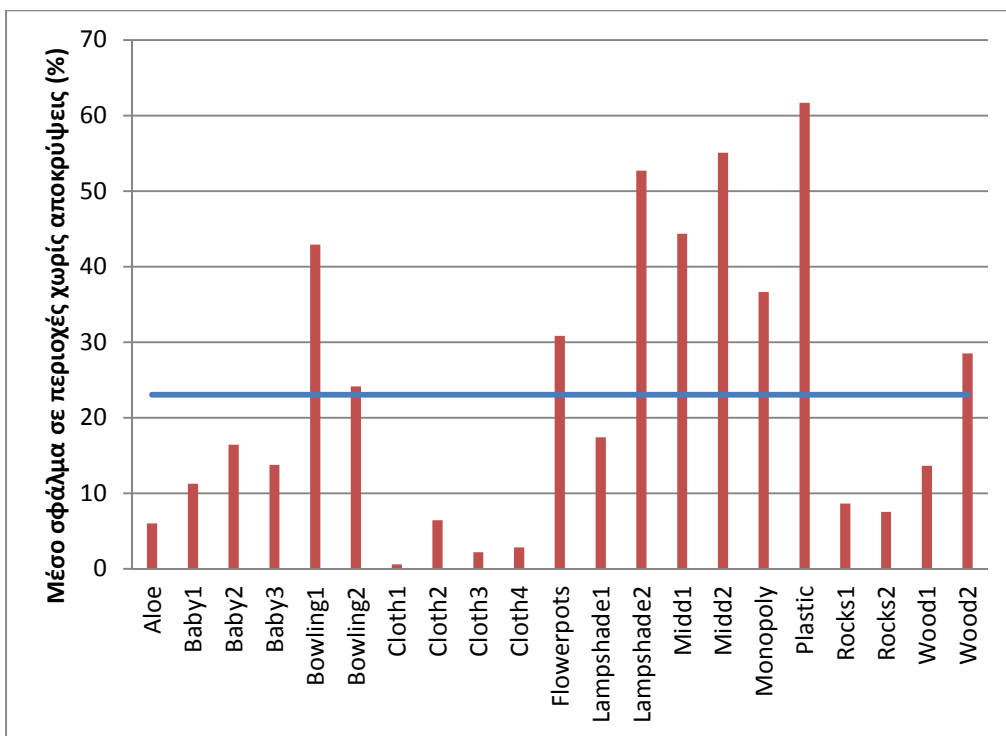
Εικόνα 4.35. Περίπτωση 4: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της a , με σταθερή ποινή $c = 60$.



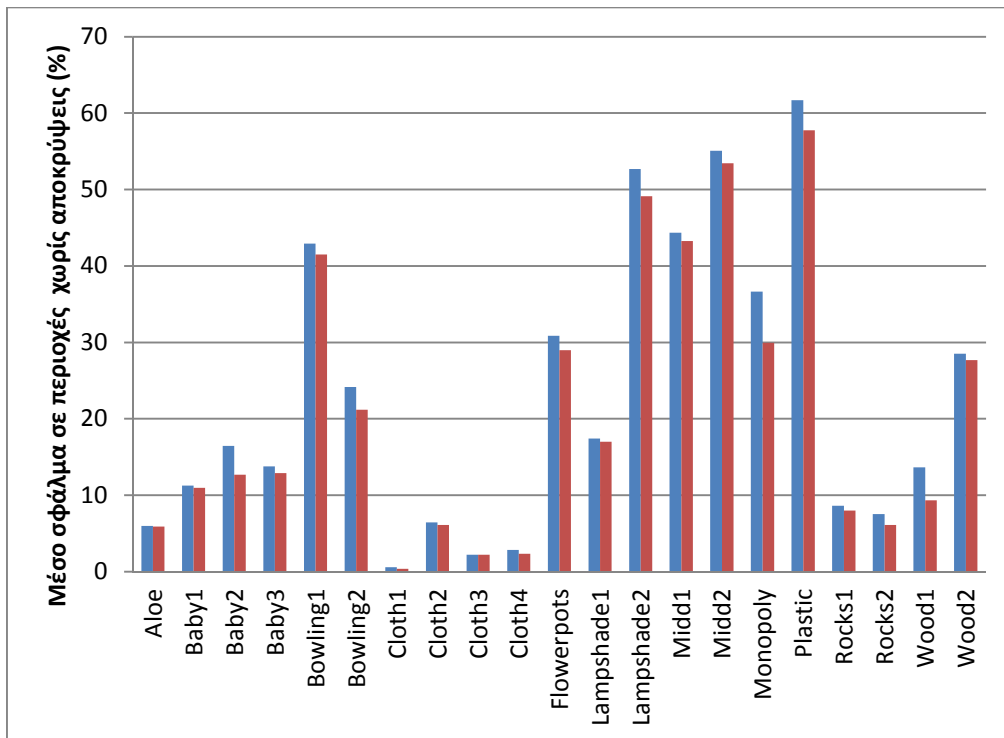
Εικόνα 4.36. Περίπτωση 4: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής c , για τις διάφορες τιμές της P_1 , με σταθερή ποινή $a = 0.1$.



Εικόνα 4.37. Περίπτωση 4: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσεως των τιμών της ποινής c , για τις διάφορες τιμές της a , με σταθερή ποινή $P_1 = 35$.



Εικόνα 4.38. Περίπτωση 4: Με μπλε χρώμα: Μικρότερο μέσο σφάλμα (για $P_1 = 35$, $a = 0.1$, $c = 60$). Με κόκκινο χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 35$, $a = 0.1$, $c = 60$).

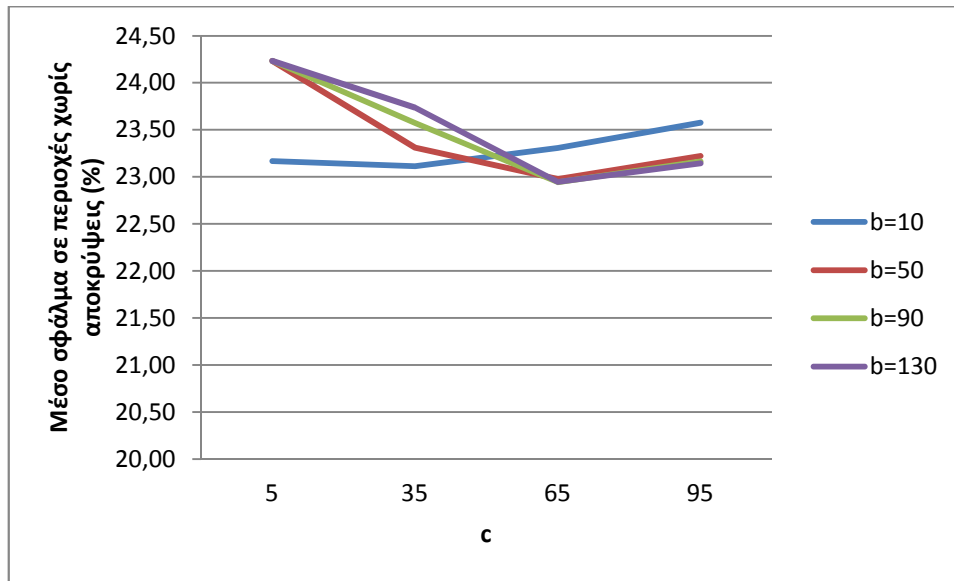


Εικόνα 4.39. Περίπτωση 4: Με μπλε χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 35$, $a = 0.1$, $c = 60$). Με κόκκινο χρώμα: Μικρότερο σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων.

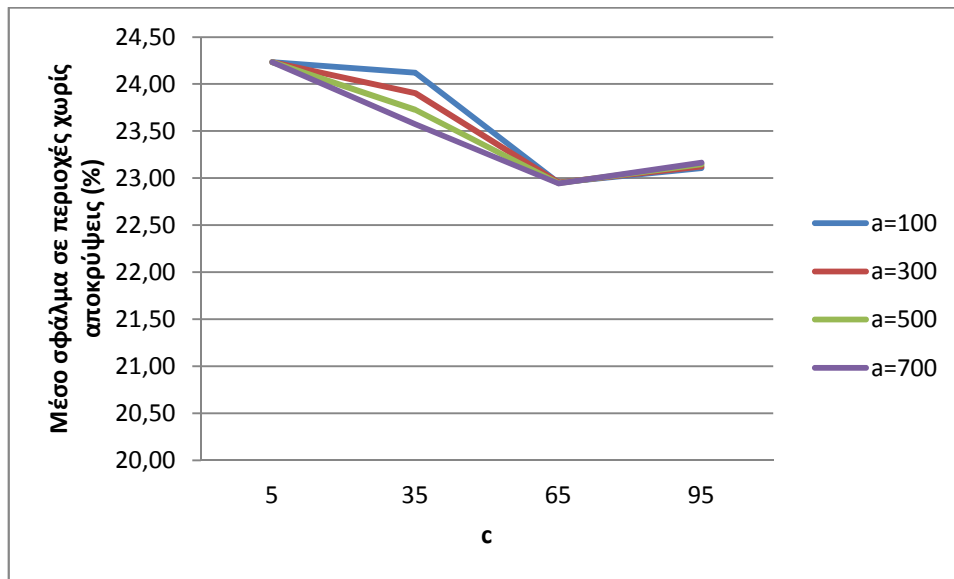
Το μικρότερο σφάλμα, με σταθερή την ποινή $c = 60$, επιτυγχάνεται για $P_1 = 35$, για όλες τις τιμές της ποινής a (Εικ. 4.35). Με σταθερό $a = 0.1$, προκύπτει μικρότερο σφάλμα για όλες τις τιμές του c (πλην μιας) για $P_1 = 35$, με ελάχιστο για $c = 60$ (Εικ. 4.36). Επίσης, με σταθερή ποινή $P_1 = 35$ προκύπτει μικρότερο σφάλμα για $c = 60$ για όλες τις τιμές της ποινής a , με την τιμή $a = 0.1$ να παρουσιάζει το ελάχιστο (Εικ. 4.37). Πέντε ζεύγη εμφανίζουν το ελάχιστο σφάλμα για τον συνδυασμό $[P_1, a, c] = [35, 0.1, 140]$ (δηλαδή κοντά στις βέλτιστες παραμέτρους) και τρία ζεύγη για τους συνδυασμούς $[P_1, a, c] = [5, 0.1, 60]$ και $[P_1, a, c] = [5, 0.1, 140]$. Από τα 21 ζεύγη εικόνων τα 5 (και εδώ *Bowling1*, *Lampshade2*, *Midd1*, *Midd2*, *Plastic*) παρουσιάζουν σφάλμα μεγαλύτερο από 20% από το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις ίδιες παραμέτρους (Εικ. 4.38). Το ζεύγος εικόνων *Monopoly* έχει διαφορά περίπου 5% μεταξύ του μικρότερου σφάλματός του και εκείνου που εμφανίζει για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος (Εικ. 4.39).

- Περίπτωση 5.

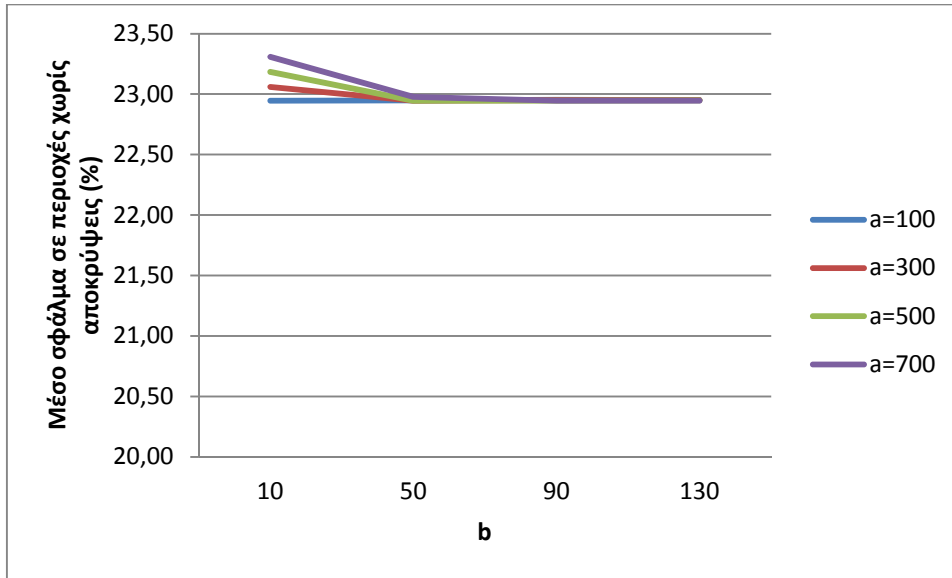
Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2E}



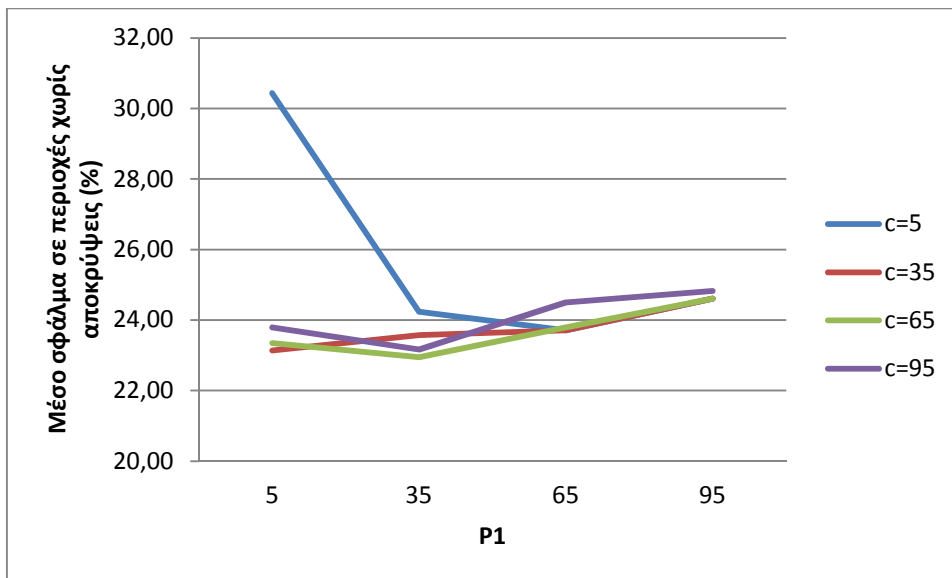
Εικόνα 4.40. Περίπτωση 5: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής c , για τις διάφορες τιμές της b , με σταθερές ποινές $P_1 = 35$, $a = 700$.



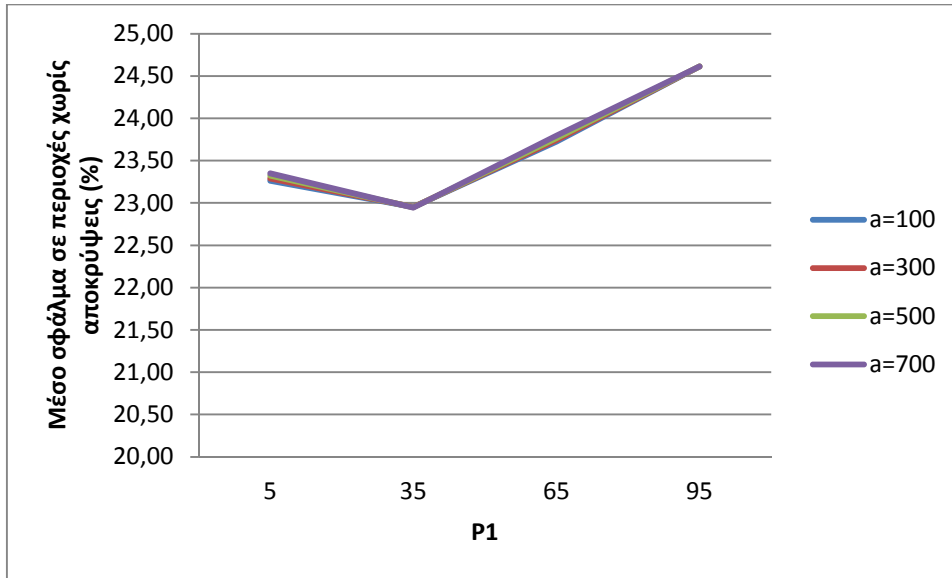
Εικόνα 4.41. Περίπτωση 5: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής c , για τις διάφορες τιμές της a , με σταθερές ποινές $P_1 = 35$, $b = 90$.



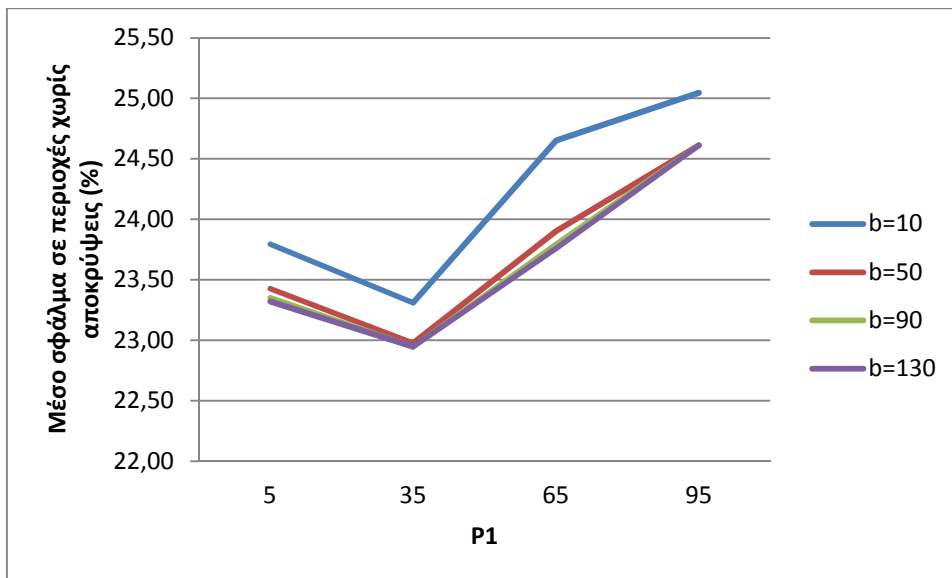
Εικόνα 4.42. Περίπτωση 5: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής b , για τις διάφορες τιμές της a , με σταθερές ποινές $P_1 = 35$, $c = 65$.



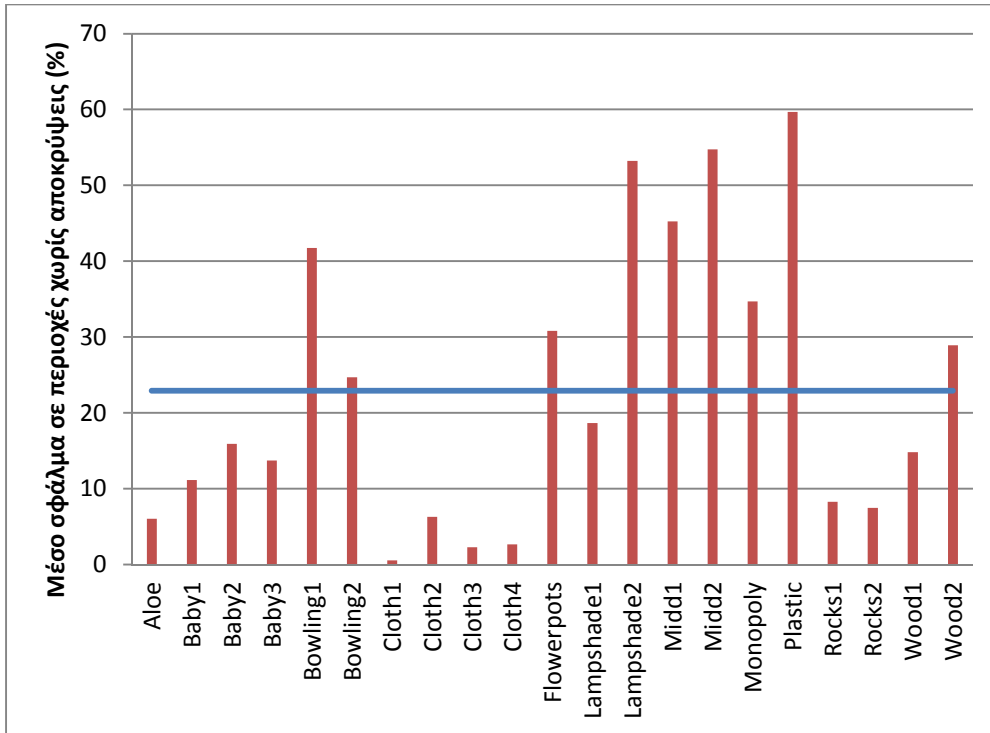
Εικόνα 4.43. Περίπτωση 5: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της c , με σταθερές ποινές $a = 700$, $b = 90$.



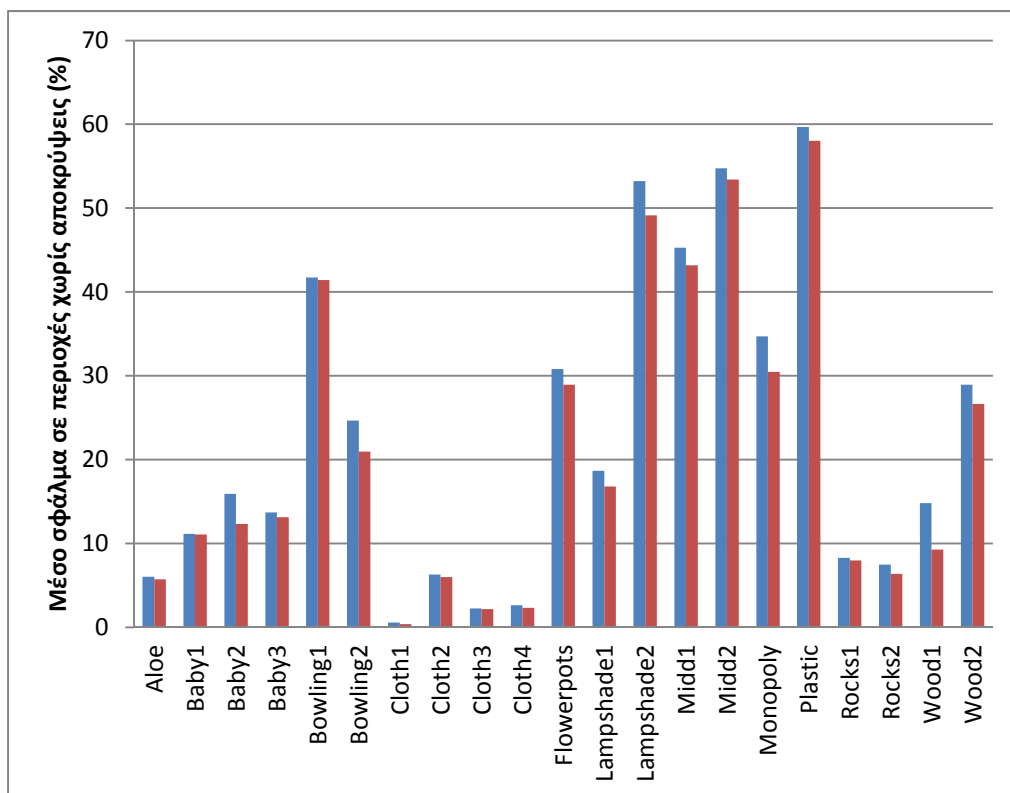
Εικόνα 4.44. Περίπτωση 5: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της a , με σταθερές ποινές $b = 90$, $c = 65$.



Εικόνα 4.45. Περίπτωση 5: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της b , με σταθερές ποινές $a = 700$, $c = 65$.



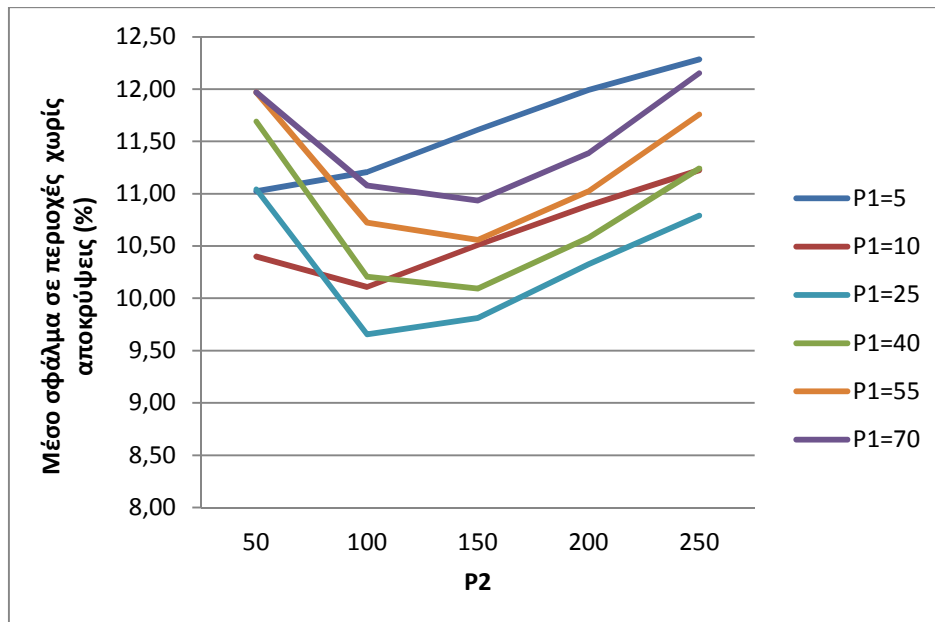
Εικόνα 4.46. Περίπτωση 5: Με μπλε χρώμα: Μικρότερο μέσο σφάλμα (για $P_1 = 35$, $a = 700$, $b = 90$, $c = 65$). Με κόκκινο χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 35$, $a = 700$, $b = 90$, $c = 65$).



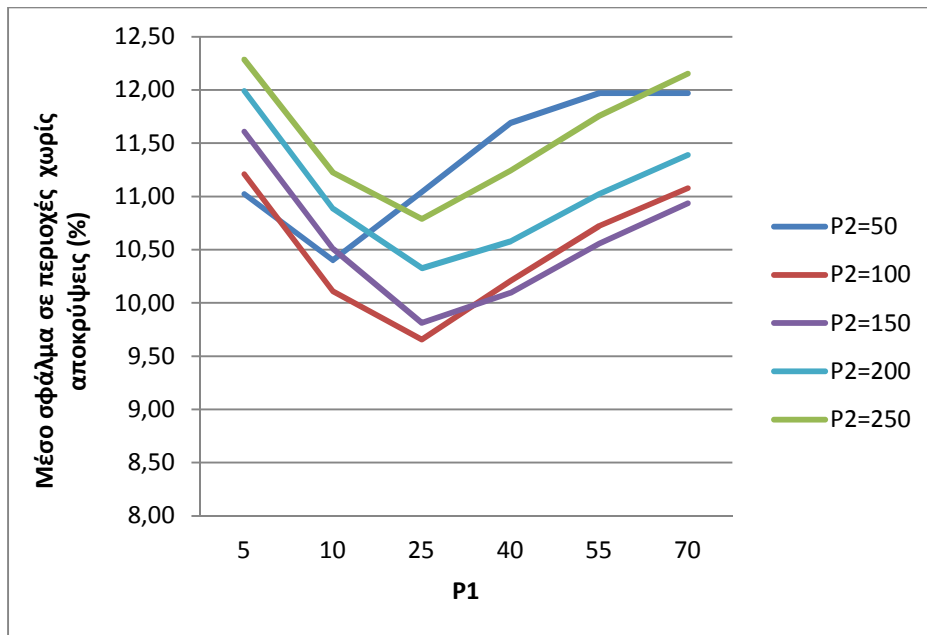
Εικόνα 4.47. Περίπτωση 5: Με μπλε χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 35$, $a = 700$, $b = 90$, $c = 65$). Με κόκκινο χρώμα: Μικρότερο σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων.

Οι περισσότερες τιμές της ποινής b ($b = 50, 90, 130$) εμφανίζουν ελάχιστο για $c = 65$, με σταθερές τις ποινές $P_1 = 35$, $a = 700$ (Εικ. 4.40). Για όλες τις τιμές της παραμέτρου a , μικρότερο σφάλμα εμφανίζεται επίσης για $c = 65$, με σταθερές τις ποινές $P_1 = 35$, $b = 90$ (Εικ. 4.41). Ακόμη, για όλες τις τιμές της παραμέτρου a το σφάλμα παραμένει σταθερό για σχεδόν όλες τις τιμές της παραμέτρου b , με σταθερές τις ποινές $P_1 = 35$, $c = 65$ (Εικ. 4.42). Με σταθερές τις ποινές $a = 700$ και $b = 90$, το μικρότερο σφάλμα προκύπτει για $P_1 = 35$, για την τιμή $c = 65$ (οι μικρότερες τιμές της παραμέτρου c έχουν άλλη συμπεριφορά) (Εικ. 4.43). Με $b = 90$ και $c = 65$, παρουσιάζεται ελάχιστο για $P_1 = 35$ για όλες τις τιμές της ποινής a , με ελάχιστη διαφορά μεταξύ τους (Εικ. 4.44). Αντίστοιχα, με $a = 700$ και $c = 65$ μικρότερο σφάλμα εμφανίζεται για $P_1 = 35$ για όλες τις τιμές της ποινής b , με την τιμή $b = 10$ να παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερο σφάλμα (Εικ. 4.45). Έξι ζεύγη εικόνων εμφανίζουν ελάχιστο σφάλμα για τον συνδυασμό παραμέτρων $[P_1, a, b, c] = [35, 700, 10, 95]$. Από τα 21 ζεύγη εικόνων τα 4 (*Lampshade2, Midd1, Midd2, Plastic*) παρουσιάζουν σφάλμα μεγαλύτερο από 20% από το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις ίδιες παραμέτρους (Εικ. 4.46). Το ζεύγος εικόνων *Wood1* έχει διαφορά περίπου 5% μεταξύ του μικρότερου σφάλματός του και εκείνου που παρουσιάζει για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος (Εικ. 4.47).

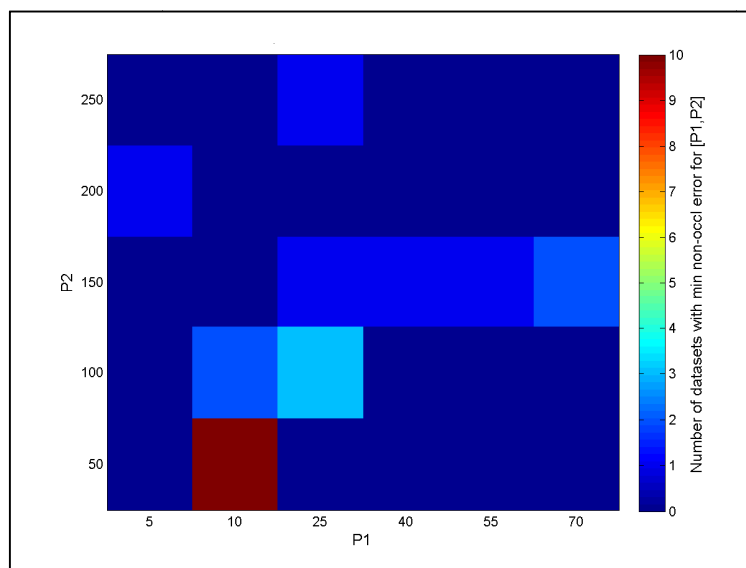
- Περίπτωση 6.
Μέθοδος συνταύτισης: Μετασχηματισμός Census, Συνάρτηση ποινής: P_{2A}



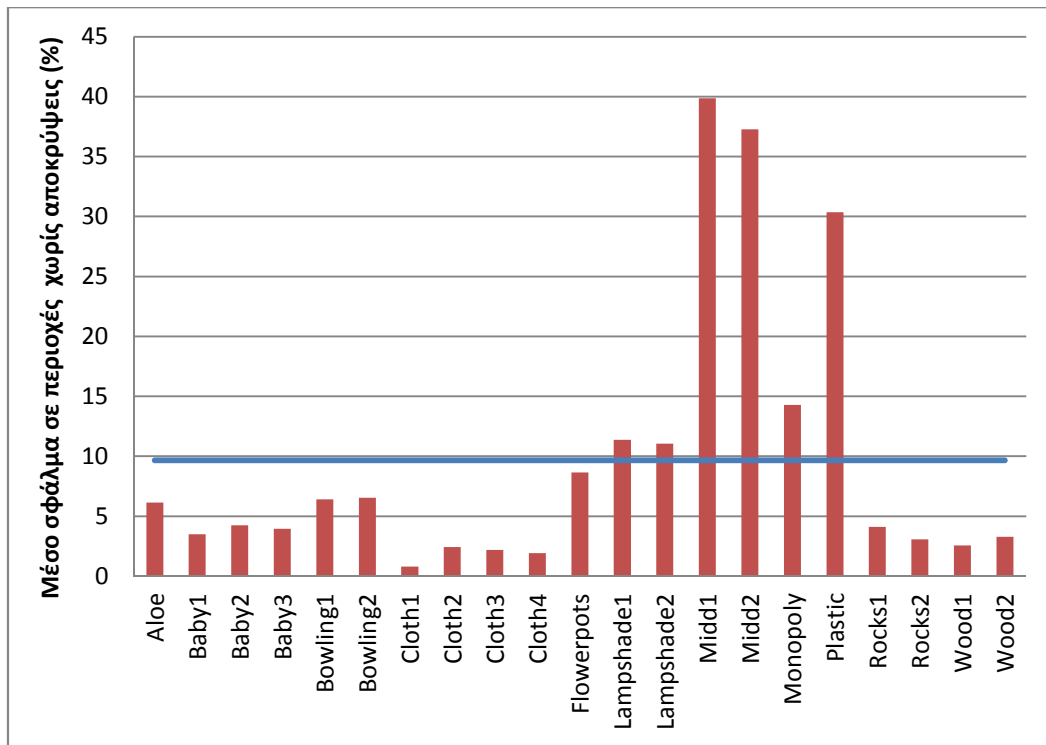
Εικόνα 4.48. Περίπτωση 6: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_2 , για τις διάφορες τιμές της P_1 .



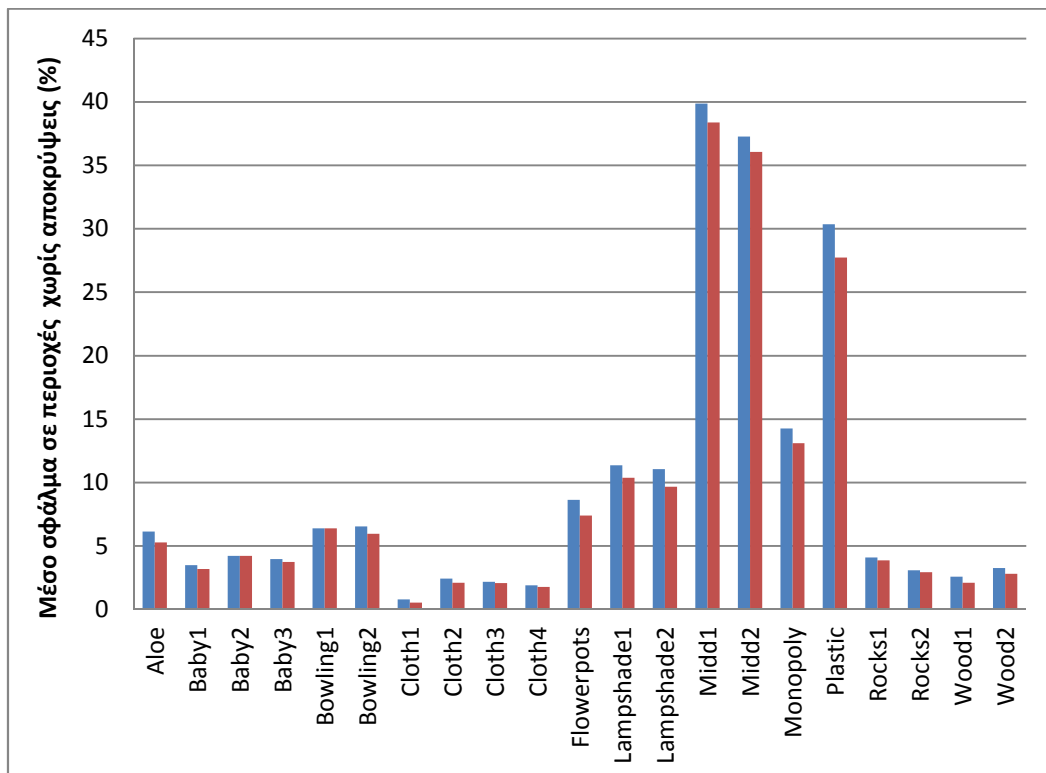
Εικόνα 4.49. Περίπτωση 6: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της P_2 .



Εικόνα 4.50. Περίπτωση 6: Αριθμός των ζευγών εικόνων που εμφανίζουν ελάχιστο για κάθε συνδυασμό παραμέτρων $[P_1, P_2]$.



Εικόνα 4.51. Περίπτωση 6: Με μπλε χρώμα: Μικρότερο μέσο σφάλμα (για $P_1 = 25$, $P_2 = 100$). Με κόκκινο χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 25$, $P_2 = 100$).

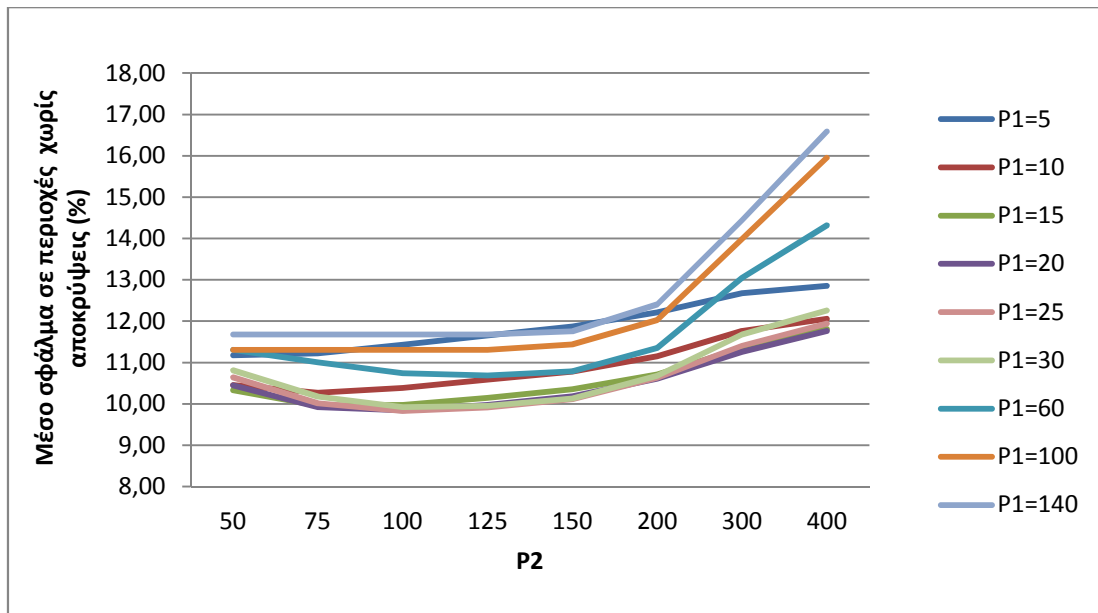


Εικόνα 4.52. Περίπτωση 6: Με μπλε χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 25$, $P_2 = 100$). Με κόκκινο χρώμα: Μικρότερο σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων.

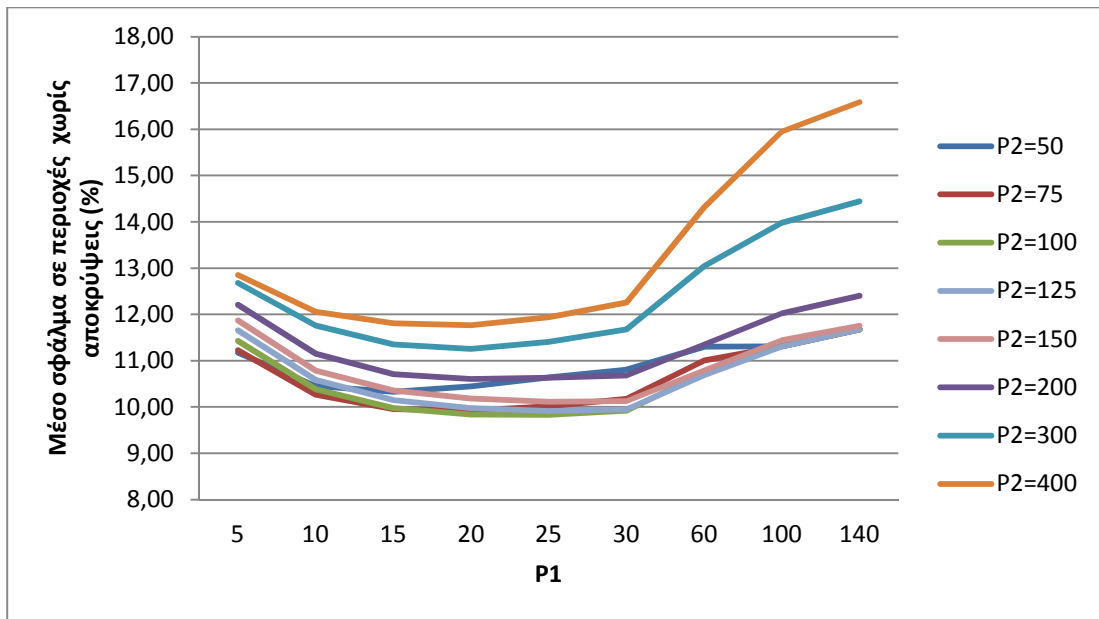
Η παράμετρος P_1 εμφανίζει μικρότερο σφάλμα για όλες, πλην μιας, τις τιμές της παραμέτρου P_2 για την τιμή $P_1 = 25$, με ελάχιστο στο $P_2 = 100$ (Εικ. 4.48). Αντίστοιχα, η

παράμετρος P_2 εμφανίζει μικρότερο σφάλμα για τις περισσότερες τιμές της παραμέτρου P_1 (πλην των δύο μικρότερων) για τις τιμές $P_2 = 100$ (σε αυτήν μάλιστα επιτυγχάνεται το ελάχιστο μέσο σφάλμα, για $P_1 = 25$) και $P_2 = 150$ (Εικ. 4.49). Τα 10 από τα 21 ζεύγη εικόνων παρουσιάζουν το μικρότερο σφάλμα για τον συνδυασμό τιμών $[P_1, P_2] = [10, 50]$, δηλαδή για τιμές κοντινές στις βέλτιστες παραμέτρους (Εικ. 4.50). Τρία ζεύγη εικόνων (*Midd1*, *Midd2*, *Plastic*) επιδεικνύουν σφάλμα μεγαλύτερο από 20% από το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις παραμέτρους με τις οποίες αυτό επιτυγχάνεται (Εικ. 4.51). Δεν υπάρχει κάποιο ζεύγος εικόνων που να παρουσιάζει σημαντική ποσοστιαία διαφορά μεταξύ του μικρότερου σφάλματός του και εκείνου για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος (Εικ. 4.52).

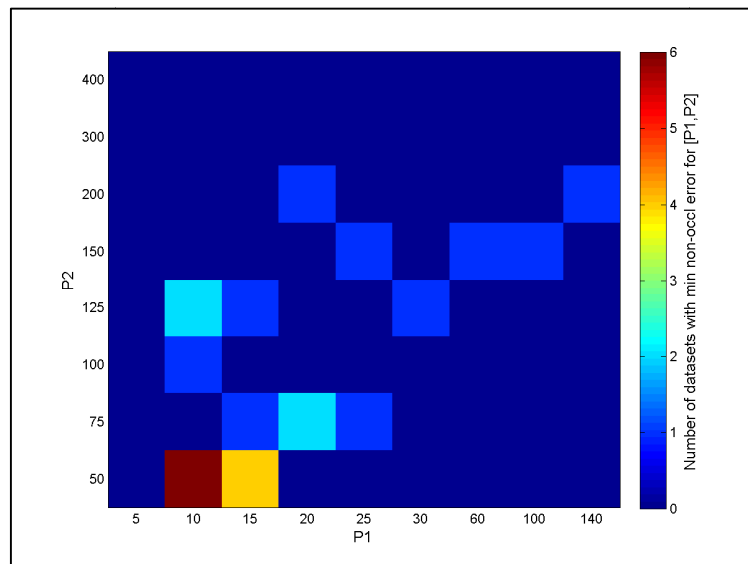
- Περίπτωση 7.
Μέθοδος συνταύτισης: Μετασχηματισμός Census, Συνάρτηση ποινής: P_{2B}



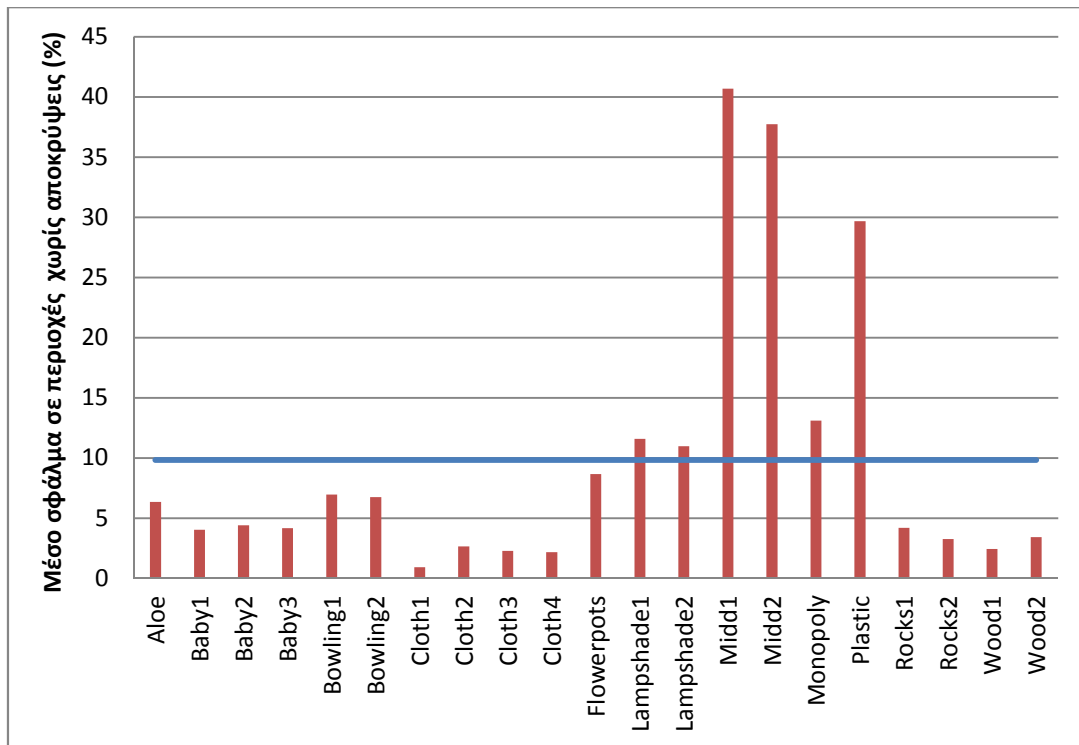
Εικόνα 4.53. Περίπτωση 7: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_2 , για τις διάφορες τιμές της P_1 .



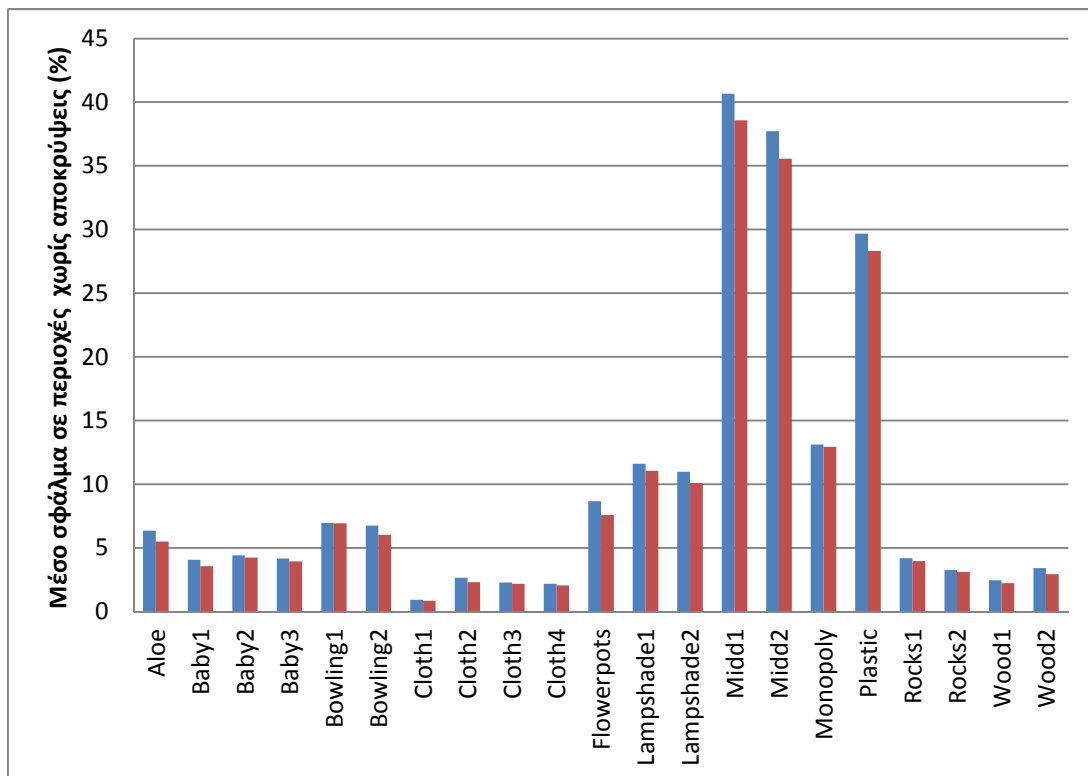
Εικόνα 4.54. Περίπτωση 7: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της P_2 .



Εικόνα 4.55. Περίπτωση 7: Αριθμός των ζευγών εικόνων που εμφανίζουν ελάχιστο για κάθε συνδυασμό παραμέτρων $[P_1, P_2]$.



Εικόνα 4.56. Περίπτωση 7: Με μπλε χρώμα: Μικρότερο μέσο σφάλμα (για $P_1 = 25$, $P_2 = 100$). Με κόκκινο χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 25$, $P_2 = 100$).



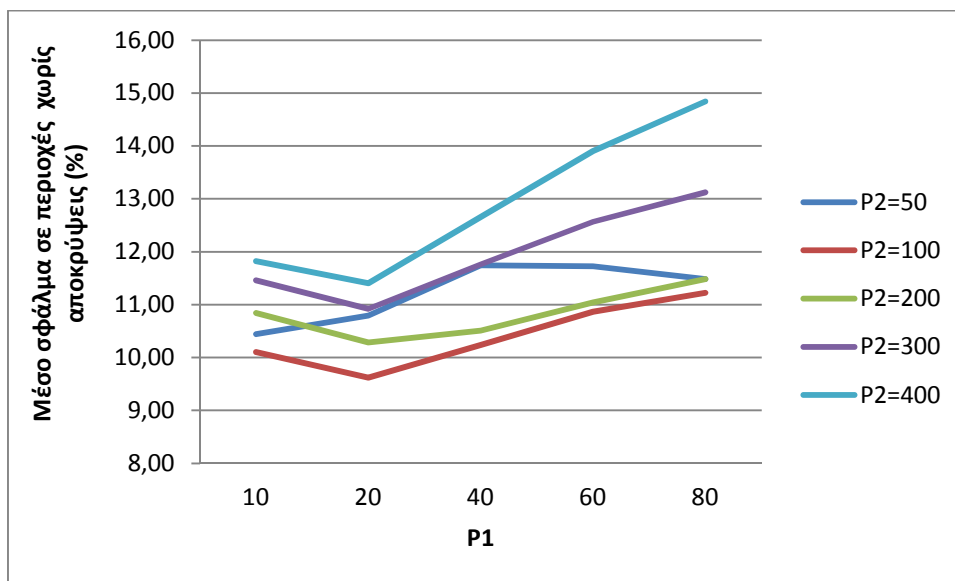
Εικόνα 4.57. Περίπτωση 7: Με μπλε χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 25$, $P_2 = 100$). Με κόκκινο χρώμα: Μικρότερο σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων.

Η παράμετρος P_1 εμφανίζει μικρό σφάλμα για όλες τις τιμές της παραμέτρου P_2 για τις τιμές $P_1 = 15$, $P_1 = 20$, $P_1 = 25$ και $P_1 = 30$, με το μικρότερο σφάλμα να επιτυγχάνεται για $P_2 = 100$ (Εικ. 4.53). Η παράμετρος P_2 εμφανίζει μικρό σφάλμα για όλες τις

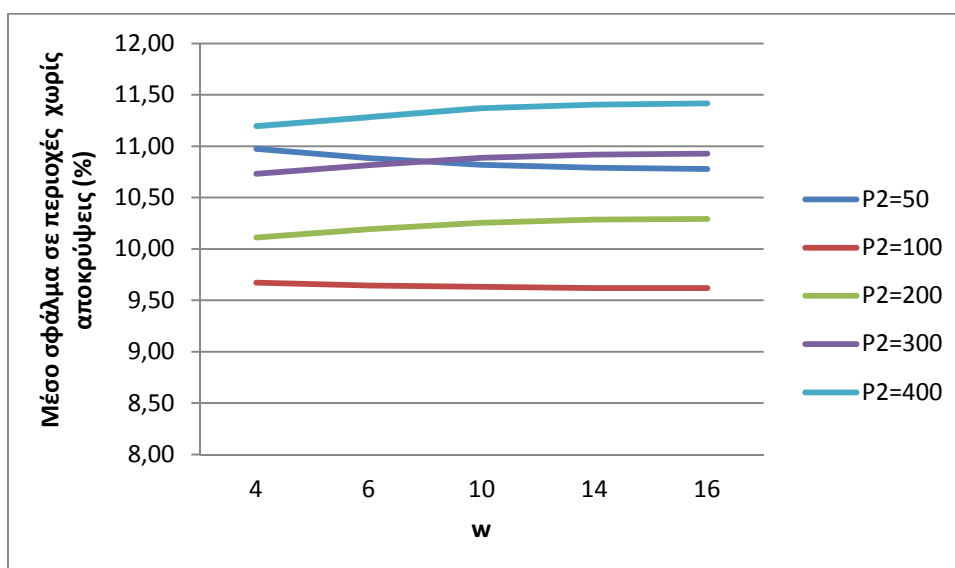
τιμές της παραμέτρου P_1 για τις τιμές $P_2 = 75$, $P_2 = 100$, $P_2 = 125$ και $P_2 = 150$, με ελάχιστο για $P_2 = 25$ (Εικ. 4.54). Έξι από τα 21 ζεύγη εικόνων παρουσιάζουν το μικρότερο σφάλμα για τον συνδυασμό τιμών $[P_1, P_2] = [10, 50]$ (Εικ. 4.55). Τρία ζεύγη εικόνων (και εδώ τα *Midd1*, *Midd2*, *Plastic*) επιδεικνύουν διαφορά σφάλματος μεγαλύτερη από 20% από το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις παραμέτρους με τις οποίες αυτό επιτυγχάνεται (Εικ. 4.56). Δεν υπάρχει κάποιο ζεύγος εικόνων που να παρουσιάζει μεγάλη διαφορά μεταξύ του μικρότερου σφάλματός του και εκείνου για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος (Εικ. 4.57).

- Περίπτωση 8.

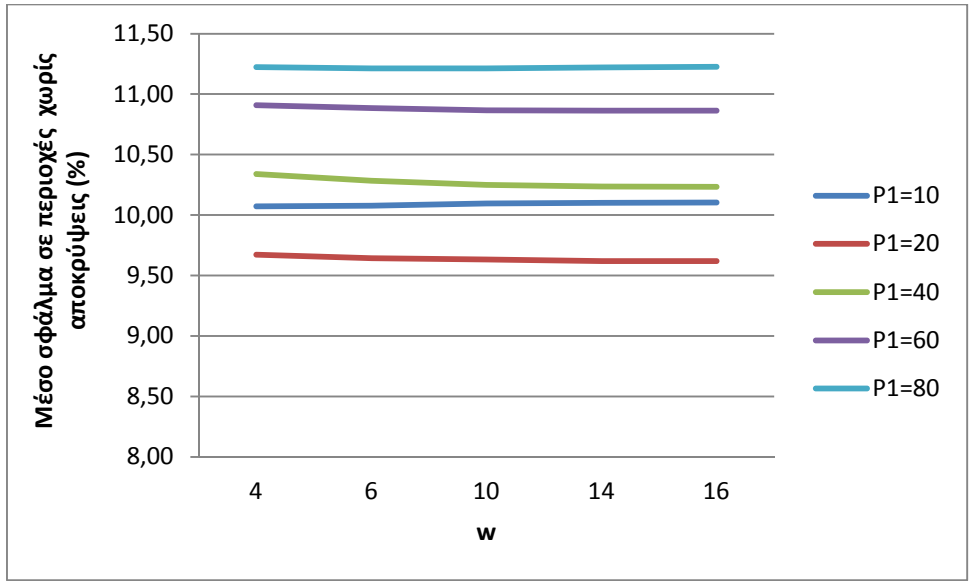
Μέθοδος συνταύτισης: Μετασχηματισμός Census, Συνάρτηση ποινής: P_2r



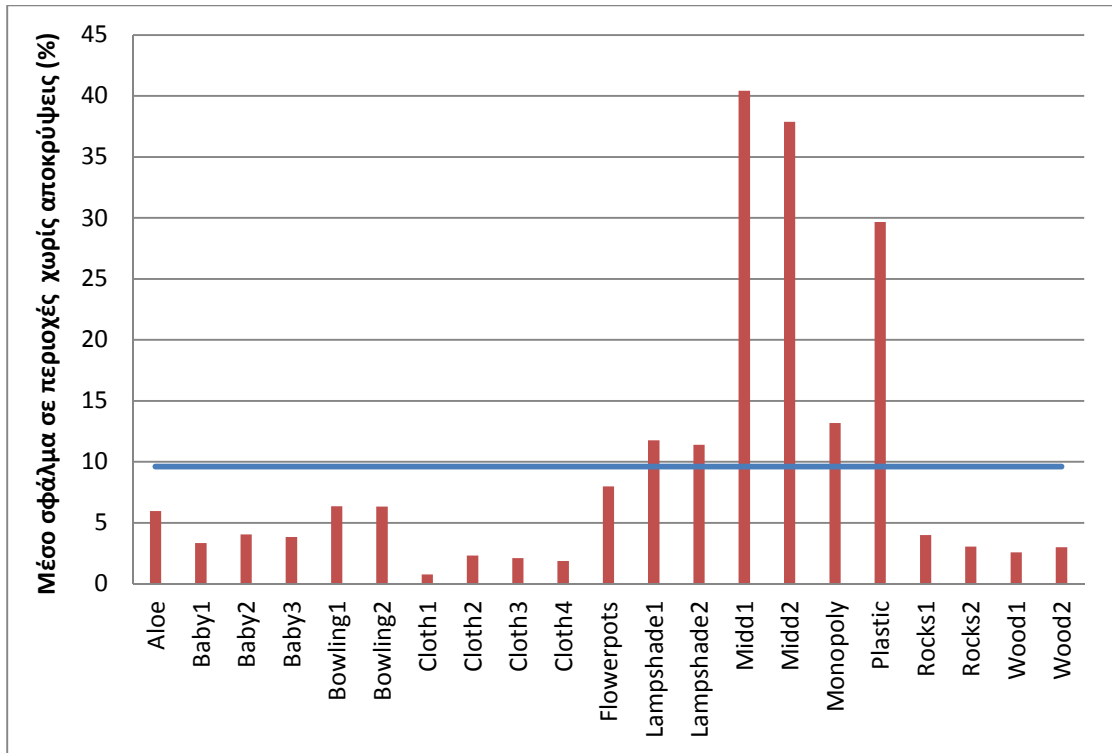
Εικόνα 4.58. Περίπτωση 8: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της P_2 , με σταθερή ποινή $w = 14$.



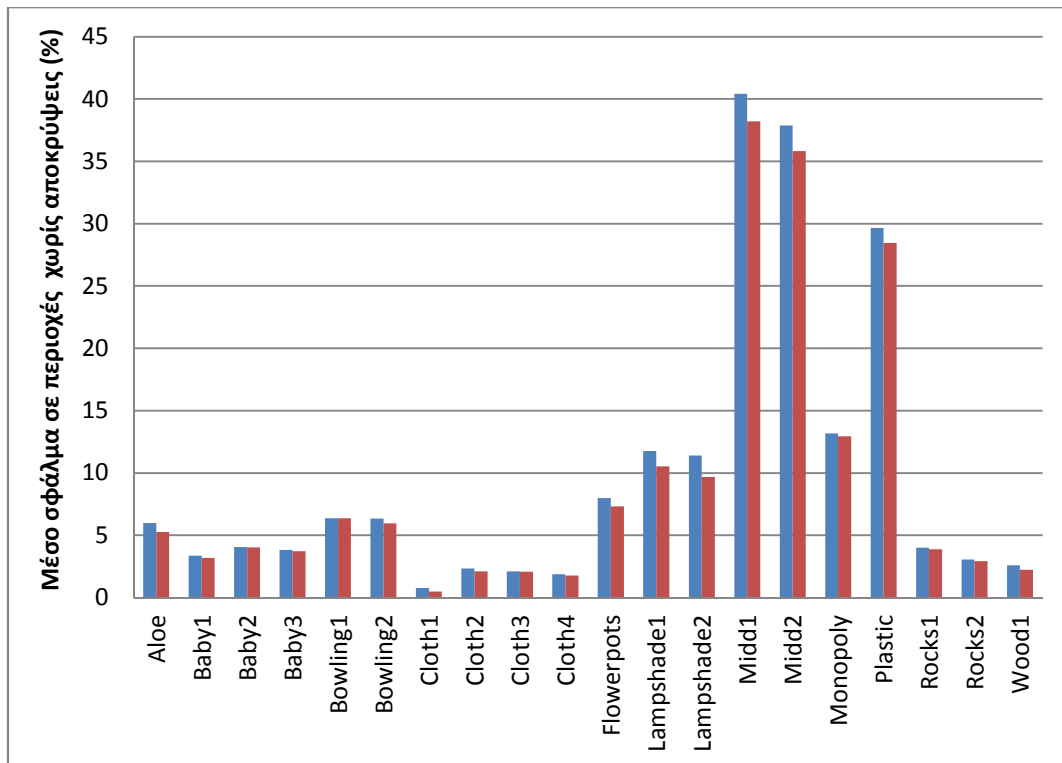
Εικόνα 4.59. Περίπτωση 8: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής w , για τις διάφορες τιμές της P_2 , με σταθερή ποινή $P_1 = 20$.



Εικόνα 4.60. Περίπτωση 8: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσεϊ των τιμών της ποινής w , για τις διάφορες τιμές της P_1 , με σταθερή ποινή $P_2 = 100$.



Εικόνα 4.61. Περίπτωση 8: Με μπλε χρώμα: Μικρότερο μέσο σφάλμα (για $P_1 = 20$, $P_2 = 100$, $w = 14$). Με κόκκινο χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 20$, $P_2 = 100$, $w=14$).

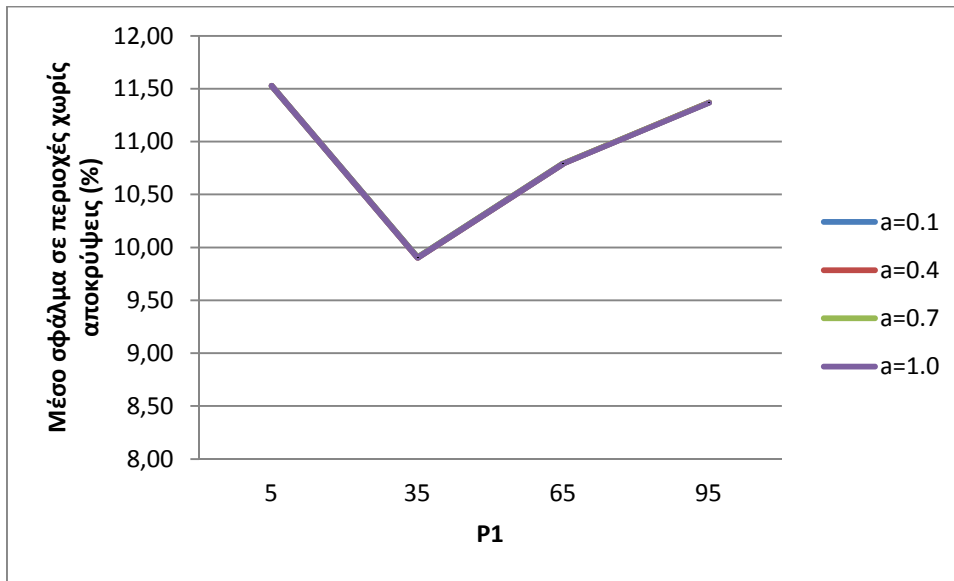


Εικόνα 4.62. Περίπτωση 8: Με μπλε χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 20$, $P_2 = 100$, $w = 14$). Με κόκκινο χρώμα: Μικρότερο σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων.

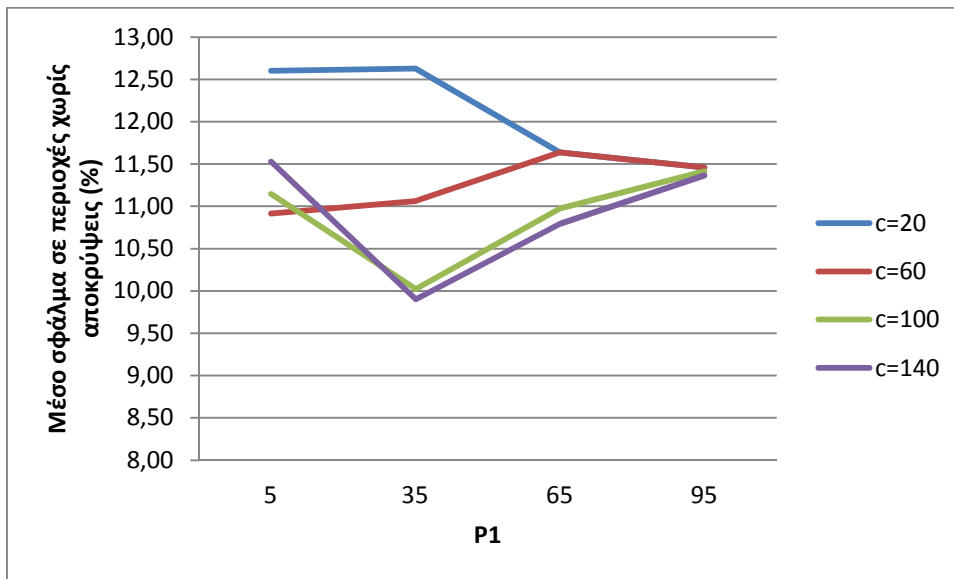
Για την τιμή της παραμέτρου w για την οποία παρουσιάζεται το ελάχιστο μέσο σφάλμα ($w = 14$), η τιμή $P_2 = 100$ της παραμέτρου P_2 παρουσιάζει σταθερά το μικρότερο σφάλμα για όλες τις τιμές της παραμέτρου P_1 (Εικ. 4.58). Το ίδιο διαπιστώνεται για σταθερή παράμετρο P_1 ($P_1 = 20$), όπου η τιμή $P_2 = 100$ έχει το μικρότερο σφάλμα για όλες τις τιμές του w , με το ελάχιστο να σταθεροποιείται για τις τιμές $w = 14$ και $w = 16$ (Εικ. 4.59). Με την παράμετρο P_2 σταθερή ($P_2 = 100$), η τιμή $P_1 = 20$ εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα για όλες τις τιμές του w . Παρατηρείται ότι το σφάλμα διαφοροποιείται ελάχιστα για τις διαφορετικές τιμές του w (Εικ. 4.60). Σημαντικό κρίνεται το γεγονός πως 18 από τα 21 ζεύγη εικόνων παρουσιάζουν ελάχιστο για τις παραμέτρους $P_1 = 10$ και $P_2 = 50$, για διάφορες τιμές του w . Τρία ζεύγη εικόνων (και εδώ τα *Midd1*, *Midd2*, *Plastic*) έχουν διαφορά σφάλματος μεγαλύτερη από 20% από το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις παραμέτρους με τις οποίες αυτό επιτυγχάνεται (Εικ. 4.61). Δεν υπάρχει κάποιο ζεύγος εικόνων που να εμφανίζει σημαντική διαφορά μεταξύ του μικρότερου σφάλματός του και του σφάλματός του για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος (Εικ. 4.62).

- Περίπτωση 9.

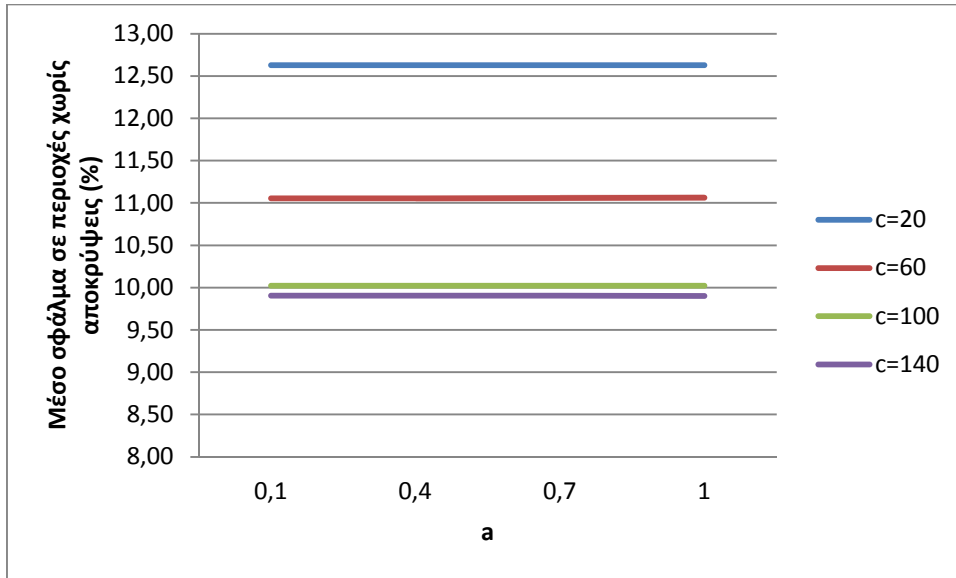
Μέθοδος συνταύτισης: Μετασχηματισμός Census, Συνάρτηση ποινής: $P_{2\Delta}$



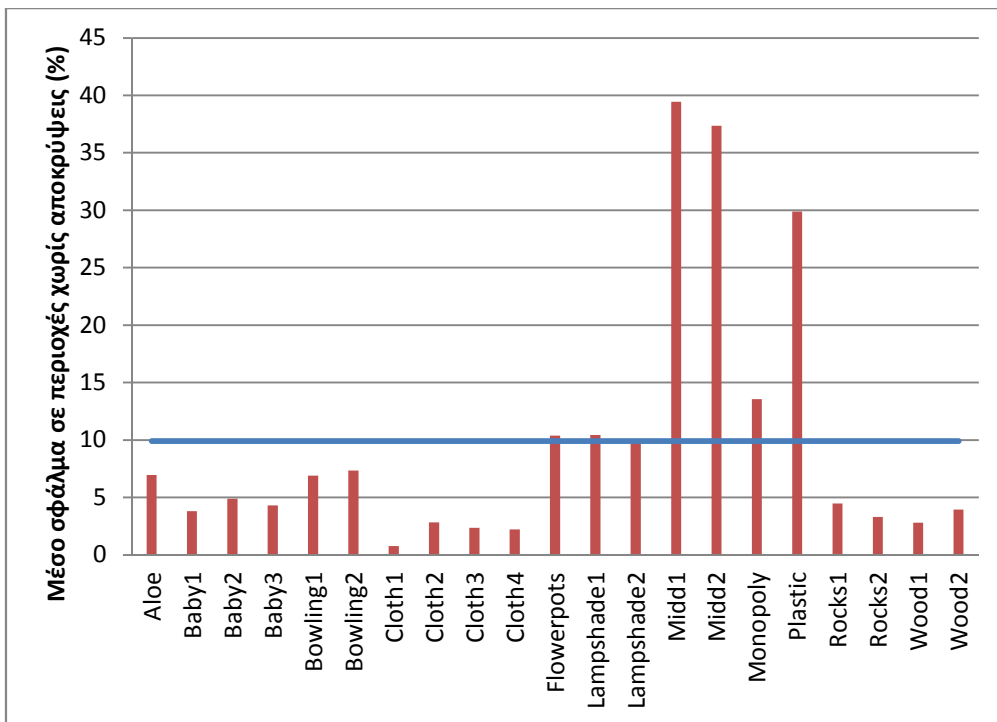
Εικόνα 4.63. Περίπτωση 9: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της a , με σταθερή ποινή $c = 140$.



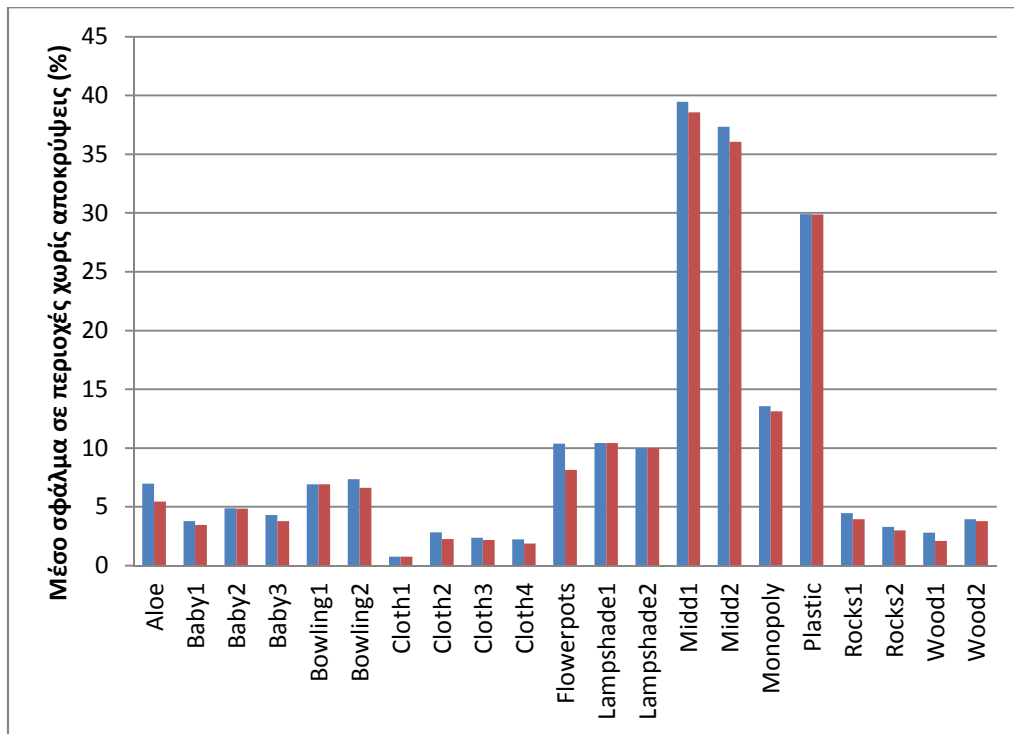
Εικόνα 4.64. Περίπτωση 9: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της c , με σταθερή ποινή $a = 1$.



Εικόνα 4.65. Περίπτωση 9: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσε των τιμών της ποινής a , για τις διάφορες τιμές της c , με σταθερή ποινή $P_1 = 35$.



Εικόνα 4.66. Περίπτωση 9: Με μπλε χρώμα: Μικρότερο μέσο σφάλμα (για $P_1 = 35$, $a = 1$, $c = 140$). Με κόκκινο χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 35$, $a = 1$, $c = 140$).

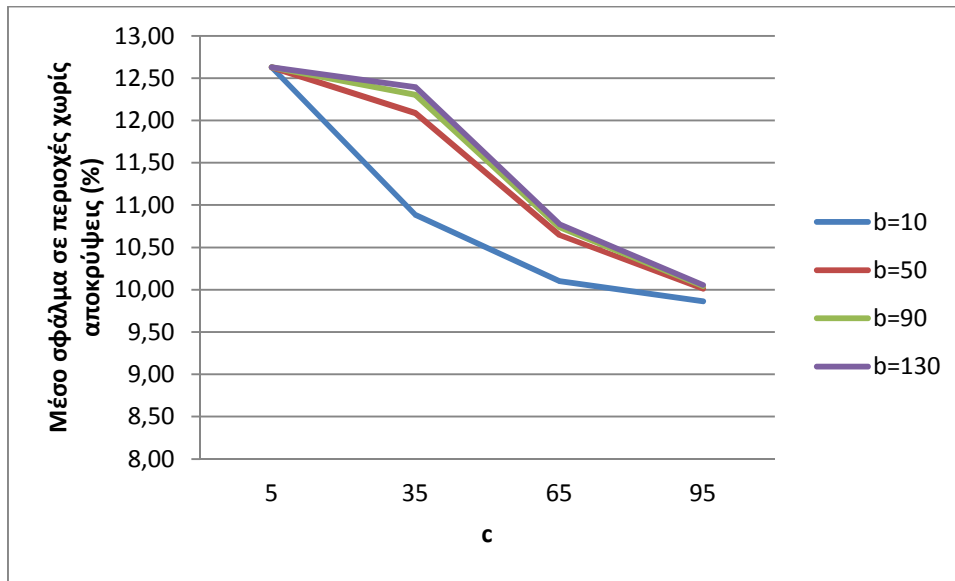


Εικόνα 4.67. Περίπτωση 9: Με μπλε χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 35$, $a = 1$, $c = 140$). Με κόκκινο χρώμα: Μικρότερο σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων.

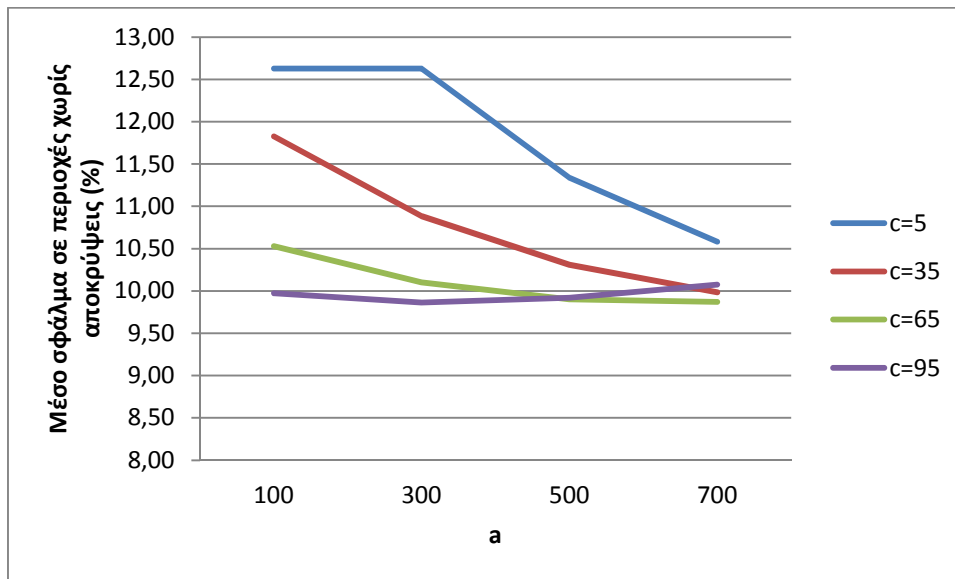
Το μικρότερο σφάλμα, με σταθερή την ποινή c στην τιμή $c = 140$, επιτυγχάνεται για $P_1 = 35$, για όλες τις τιμές της ποινής a , με ελάχιστη διαφορά μεταξύ τους (Εικ. 4.63). Με σταθερό $a = 1$ προκύπτει μικρότερο σφάλμα για τις τιμές $c = 100$ και $c = 140$, για $P_1 = 35$. Οι μικρότερες τιμές του c εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά (Εικ. 4.64). Επίσης, προκύπτει μικρότερο σφάλμα για $c = 140$ για όλες τις τιμές της ποινής a , με σταθερή ποινή $P_1 = 35$. Κάθε τιμή της ποινής c εμφανίζει σταθερό σφάλμα για όλες τις τιμές της ποινής a (Εικ. 4.65). Σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται το φαινόμενο πολλά ζεύγη εικόνων να επιδεικνύουν το (ίδιο) μικρότερο σφάλμα για πολλούς συνδυασμούς παραμέτρων. Γι' αυτό τον λόγο, υπάρχουν 9 ζεύγη που εμφανίζουν το ελάχιστο σφάλμα τους για τον συνδυασμό $[P_1, a, c] = [5, 0.7, 60]$, 8 ζεύγη για τον συνδυασμό $[P_1, a, c] = [5, 1, 60]$ και 7 ζεύγη για τους συνδυασμούς $[P_1, a, c] = [5, 0.4, 60]$ και $[P_1, a, c] = [5, 0.1, 60]$ (σημειώνεται ότι τα ζεύγη αυτά μπορεί να ταυτίζονται). Από τα 21 ζεύγη εικόνων τα 3 (και εδώ τα *Midd1*, *Midd2*, *Plastic*) παρουσιάζουν σφάλμα $>20\%$ από το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις ίδιες παραμέτρους (Εικ. 4.66). Δεν υπάρχει ζεύγος εικόνων με μεγάλη διαφορά μεταξύ του μικρότερου σφάλματός του και εκείνου που εμφανίζει για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος (Εικ. 4.67).

- Περίπτωση 10.

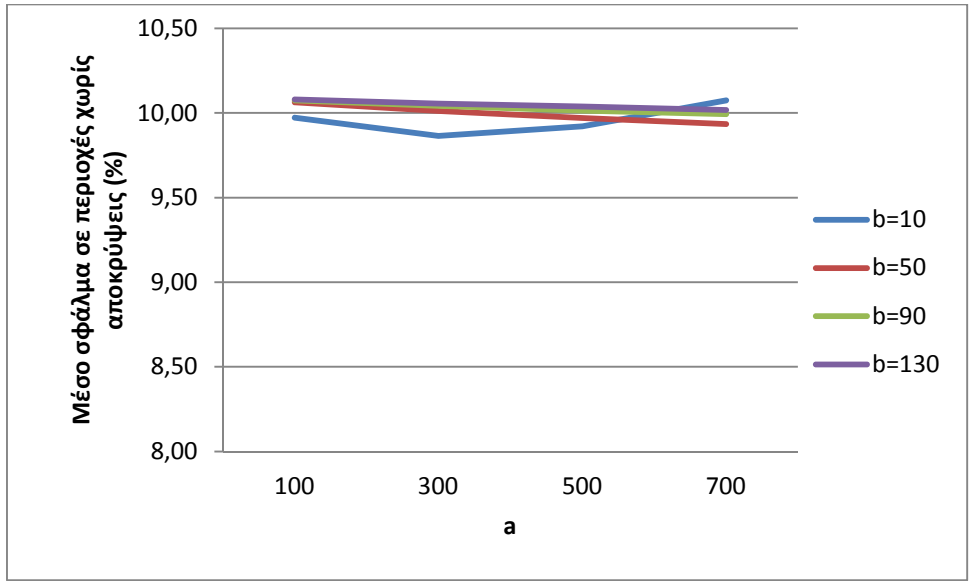
Μέθοδος συνταύτισης: Μετασχηματισμός Census, Συνάρτηση ποινής: P_{2E}



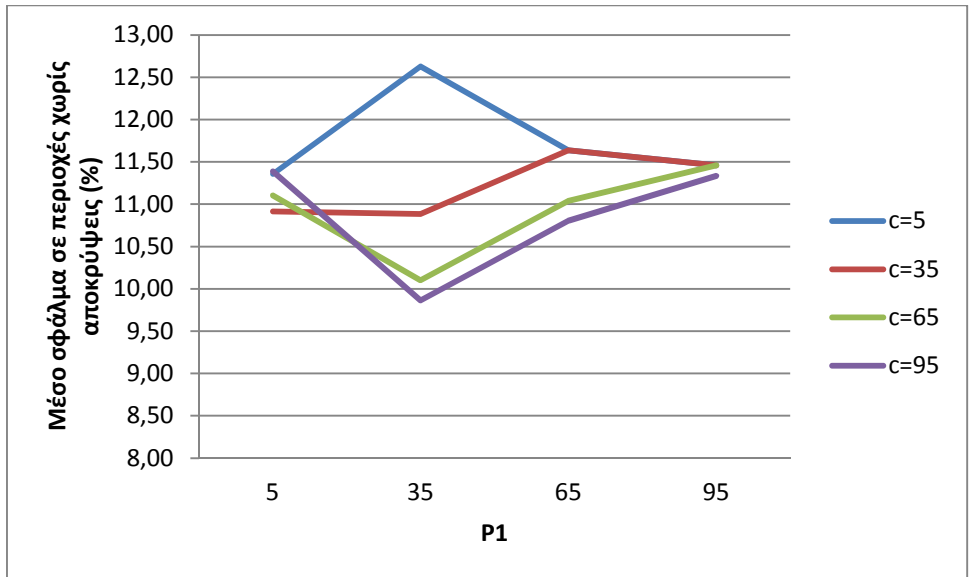
Εικόνα 4.68. Περίπτωση 10: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής c , για τις διάφορες τιμές της b , με σταθερές ποινές $P_1 = 35$, $a = 300$.



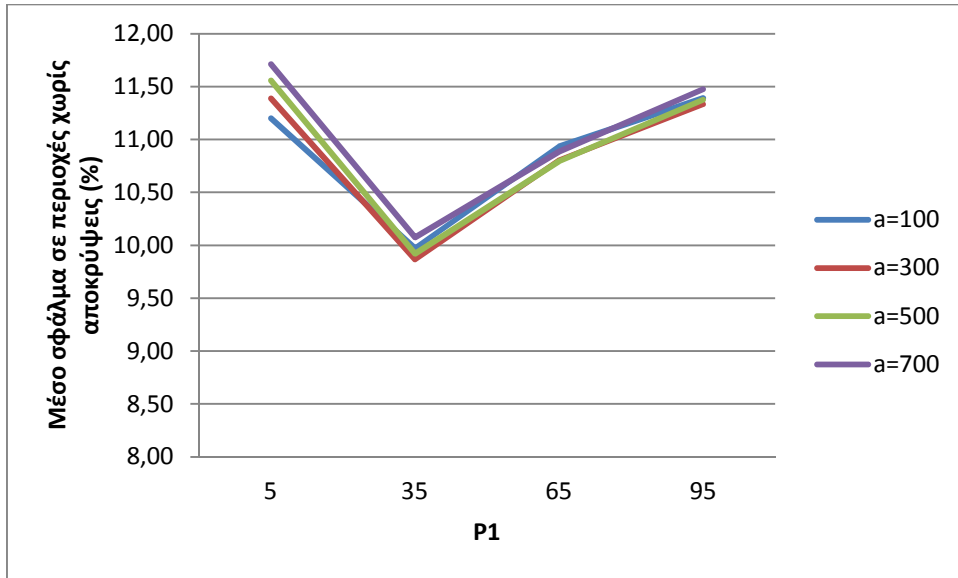
Εικόνα 4.69. Περίπτωση 10: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής a , για τις διάφορες τιμές της c , με σταθερές ποινές $P_1 = 35$, $b = 10$.



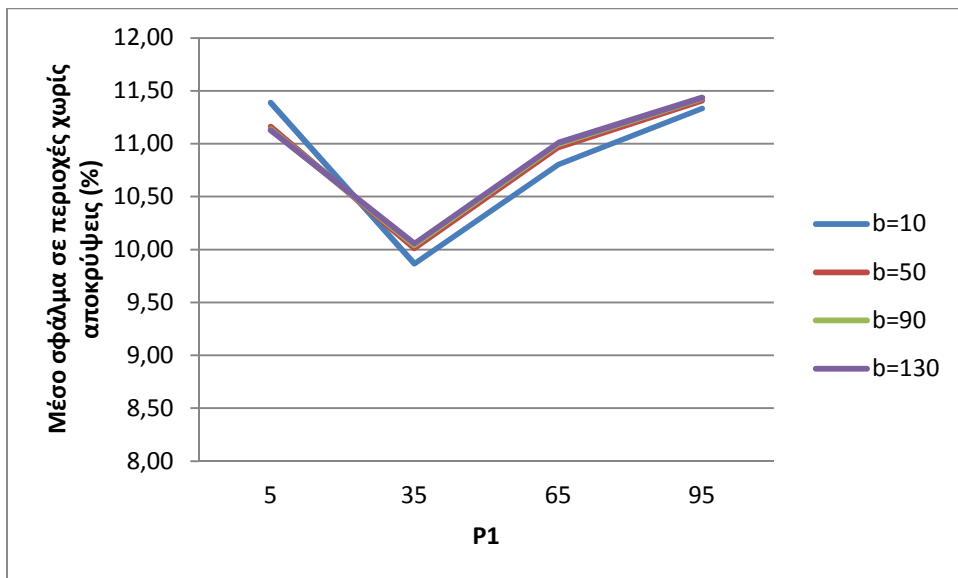
Εικόνα 4.70. Περίπτωση 10: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής a , για τις διάφορες τιμές της b , με σταθερές ποινές $P_1 = 35$, $c = 95$.



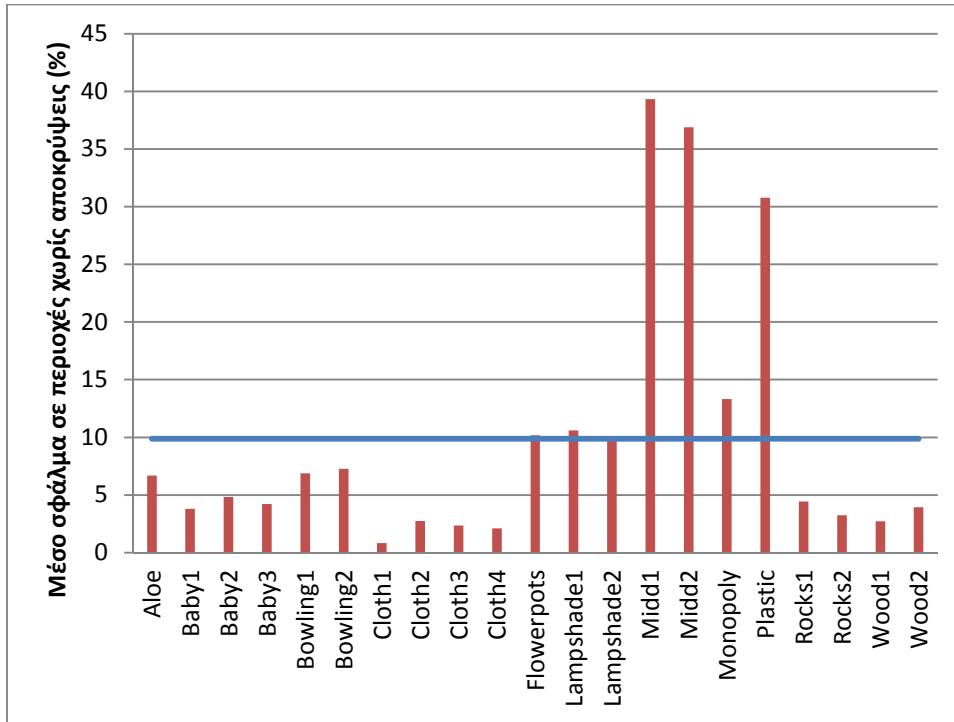
Εικόνα 4.71. Περίπτωση 10: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της c , με σταθερές ποινές $a = 300$, $b = 10$.



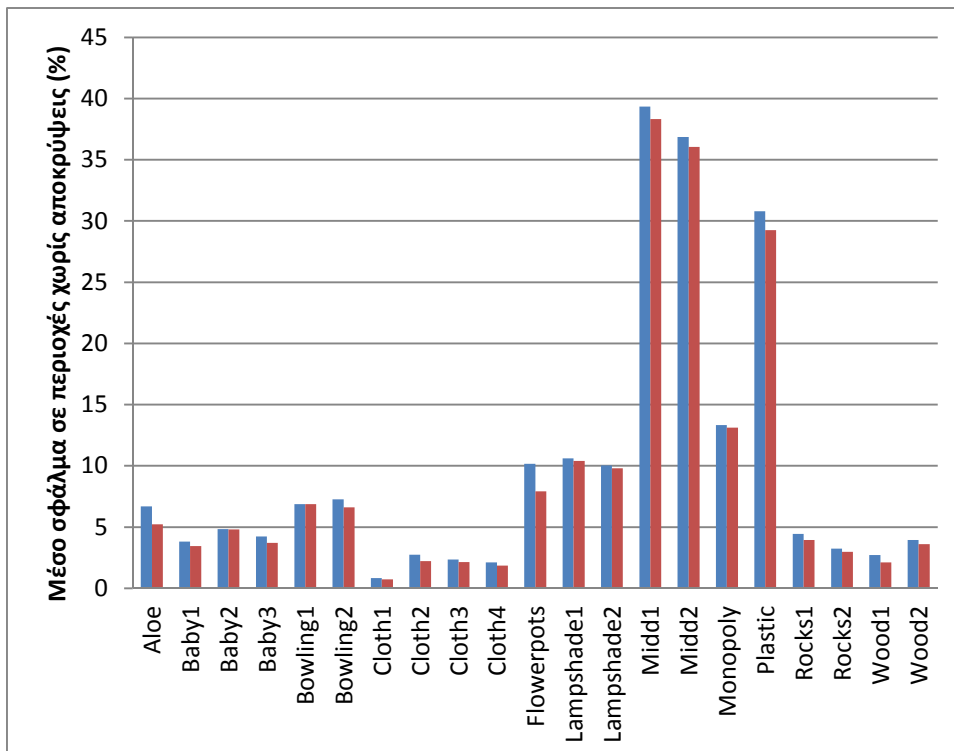
Εικόνα 4.72. Περίπτωση 10: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της a , με σταθερές ποινές $b = 10$, $c = 95$.



Εικόνα 4.73. Περίπτωση 10: Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της b , με σταθερές ποινές $a = 300$, $c = 95$.



Εικόνα 4.74. Περίπτωση 10: Με μπλε χρώμα: Μικρότερο μέσο σφάλμα (για $P_1 = 35$, $a = 300$, $b = 10$, $c = 95$). Με κόκκινο χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους (για $P_1 = 35$, $a = 300$, $b = 10$, $c = 95$).



Εικόνα 4.75. Περίπτωση 10: Με μπλε χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 35$, $a = 300$, $b = 10$, $c = 95$). Με κόκκινο χρώμα: Μικρότερο σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων.

Με σταθερές τις ποινές $P_1 = 35$ και $a = 300$, το μικρότερο σφάλμα επιτυγχάνεται για

την τιμή $b = 10$, για όλες τις τιμές της παραμέτρου c (με ελάχιστο για $c = 95$) (Εικ. 4.68). Η τιμή $c = 95$ έχει το μικρότερο σφάλμα για τις μικρότερες τιμές της παραμέτρου a , εμφανίζει ελάχιστο για $a = 300$ και μετά παρουσιάζει αυξητική τάση. Αντίθετη συμπεριφορά έχουν οι υπόλοιπες τιμές της ποινής c , οι οποίες ενώ αρχικά έχουν μεγάλο σφάλμα έπειτα παρουσιάζουν πτωτική τάση, με την τιμή $c = 65$ να παρουσιάζει πολύ μικρό σφάλμα (οριακά μεγαλύτερο από το ελάχιστο) για την τιμή $a = 700$ (με σταθερές ποινές $P_1 = 35$, $b = 10$) (Εικ. 4.69). Για όλες τις τιμές της παραμέτρου a (εκτός από την μεγαλύτερη), το μικρότερο σφάλμα παρουσιάζεται για $b = 10$, με ελάχιστο για $a = 300$ (με σταθερές τις ποινές $P_1 = 35$, $c = 95$) (Εικ. 4.70). Με σταθερές τις ποινές $a = 300$ και $b = 10$, μικρότερο σφάλμα προκύπτει για $c = 95$, για όλες τις τιμές της ποινής P_1 (εκτός της μικρότερης), με ελάχιστο για $P_1 = 35$. Η μικρότερη τιμή της ποινής c παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά (Εικ. 4.71). Όλες οι τιμές της ποινής a έχουν παρόμοια συμπεριφορά και μικρή διακύμανση και παρουσιάζουν μικρότερο σφάλμα για $P_1 = 35$, με την τιμή $a = 300$ να προκαλεί το ελάχιστο (με σταθερές τις ποινές $b = 10$, $c = 95$) (Εικ. 4.72). Αντίστοιχα, όλες οι τιμές της ποινής b έχουν παρόμοια συμπεριφορά και μικρή διακύμανση και παρουσιάζουν μικρότερο σφάλμα για $P_1 = 35$. Η συμπεριφορά της τιμής $b = 10$ διαφέρει λίγο και για αυτήν επιτυγχάνεται το ελάχιστο σφάλμα (με σταθερές τις ποινές $a = 300$, $c = 95$) (Εικ. 4.73). Πέντε ζεύγη εικόνων εμφανίζουν ελάχιστο σφάλμα για τον συνδυασμό παραμέτρων $[P_1, a, b, c] = [5, 700, 130, 35]$. Στη συνέχεια, από 3 ζεύγη εικόνων εμφανίζουν ελάχιστο σε 10 διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων – σημειώνεται ότι τα ζεύγη αυτά μπορεί να ταυτίζονται. Τρία από τα 21 ζεύγη εικόνων (και εδώ τα *Midd1*, *Midd2*, *Plastic*) παρουσιάζουν σφάλμα πλέον του 20% από το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις ίδιες παραμέτρους (Εικ. 4.74). Δεν υπάρχει ζεύγος εικόνων που να έχει μεγάλη διαφορά μεταξύ του μικρότερου σφάλματός του και εκείνου που εμφανίζει για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος (Εικ. 4.75).

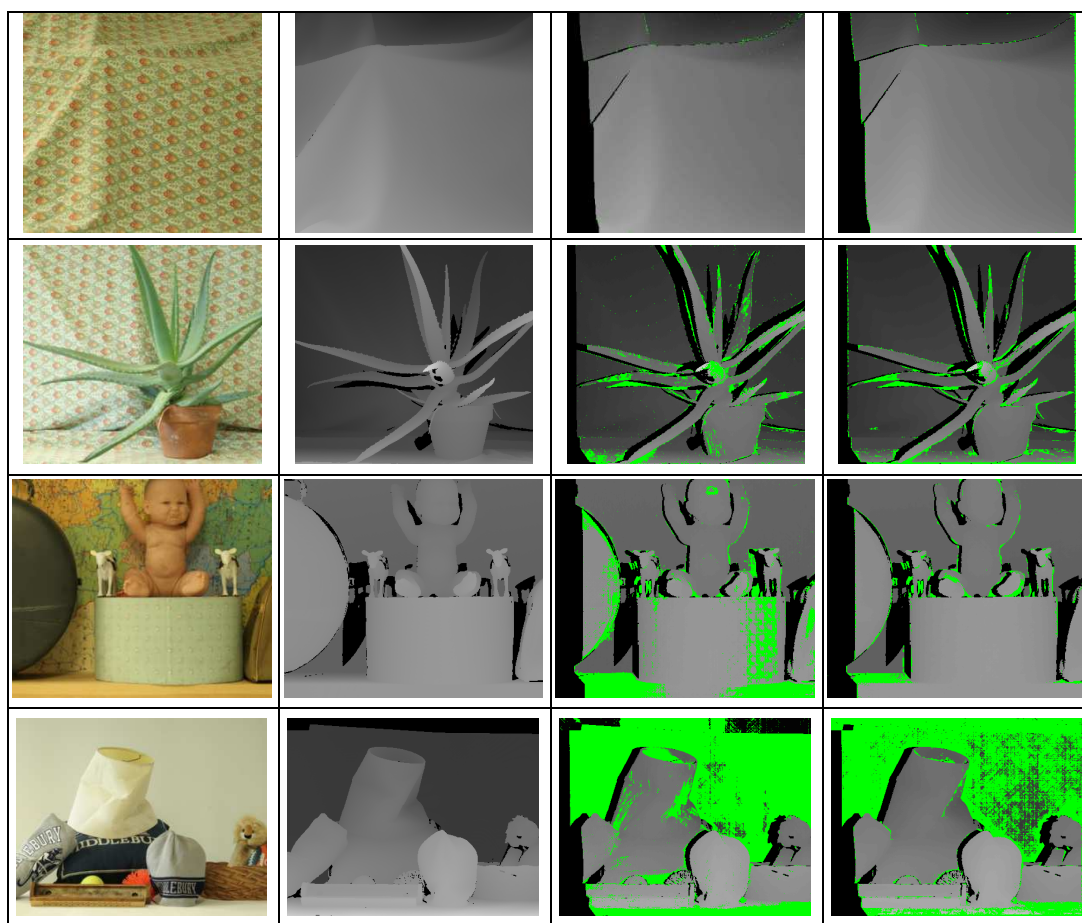
Κάνοντας μία συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων, από τις γραφικές παραστάσεις διαπιστώνει κανείς ότι το μικρότερο σφάλμα επιτυγχάνεται για τιμές μέσα στο διάστημα των εξεταζόμενων τιμών για όλες τις μεταβλητές, και όχι στα όριά τους, στις περιπτώσεις 1, 6, 7 και 8. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις το μικρότερο σφάλμα παρουσιάζεται στο όριο του διαστήματος των τιμών για κάποια μεταβλητή, αλλά παρατηρείται ότι έχει μικρή διαφορά σε σχέση με την αμέσως επόμενη (προκειμένου για το κατώτερο όριο) ή την αμέσως προηγούμενη (για το ανώτερο όριο). Οι περιπτώσεις όπου αρκετά (≥ 4) ζεύγη εικόνων εμφανίζουν μικρότερο σφάλμα για παραμέτρους ίδιες ή κοντινές με εκείνες για τις οποίες παρουσιάζεται το ελάχιστο μέσο σφάλμα είναι οι 1, 2, 6, 7, 8. Οι περιπτώσεις όπου αρκετά (≥ 4) ζεύγη εικόνων παρουσιάζουν απόκλιση ανώτερη του 20% μεταξύ του ελάχιστου μέσου σφάλματος και του σφάλματός τους για τις παραμέτρους με τις οποίες παρουσιάζεται το πρώτο είναι οι 1, 2, 3, 4, 5 (πρόκειται για τις περιπτώσεις όπου η αρχική συνταύτιση έγινε με τη μέθοδο των Απόλυτων Διαφορών). Η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ του μικρό-

τερου σφάλματος για κάθε ζεύγος εικόνων και του σφάλματός του για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος είναι >5% στις περιπτώσεις 1, 2, 3, 4, 5 (όπου χρησιμοποιήθηκαν οι Απόλυτες Διαφορές) για ένα έως δύο ζεύγη εικόνων.

4. 4.3 Ειδικότερα αποτελέσματα και συμπεράσματα

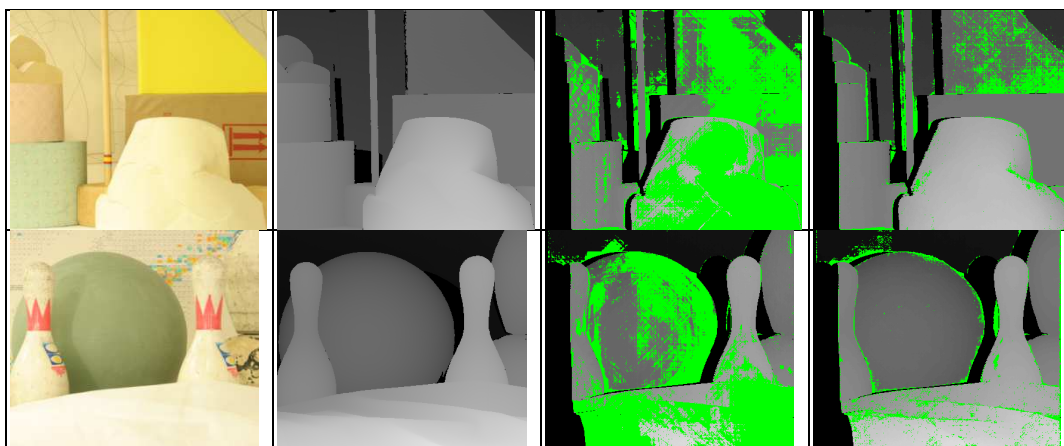
Ένας άλλος τρόπος αξιολόγησης των παραχθέντων χαρτών παράλλαξης είναι η σύγκρισή τους με τους αντίστοιχους αληθείς και η κατασκευή εικόνων διαφορών, όπου απεικονίζονται με χρώμα (εδώ πράσινο) οι εικονοψηφίδες των οποίων η παράλλαξη στον παραχθέντα χάρτη διαφέρει περισσότερο από 1 από εκείνη του αληθούς. Αυτός ο τρόπος χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση χαρτών παράλλαξης από συγκεκριμένα ζεύγη εικόνων. Οι χρησιμοποιηθέντες χάρτες παράλλαξης (αληθείς και παραχθέντες) αφορούν τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις.

Τέσσερα ζεύγη εικόνων (*Cloth1*, *Aloe*, *Baby3*, *Midd1*), αντιπροσωπευτικά για το μέγεθος των σφαλμάτων που απαντώνται στην διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων, φαίνονται στην Εικ. 4.76. Γίνεται αντιληπτό ότι τα σφάλματα της συνταύτισης εμφανίζονται σε όρια αντικειμένων ή περιοχές με χαμηλή υφή.

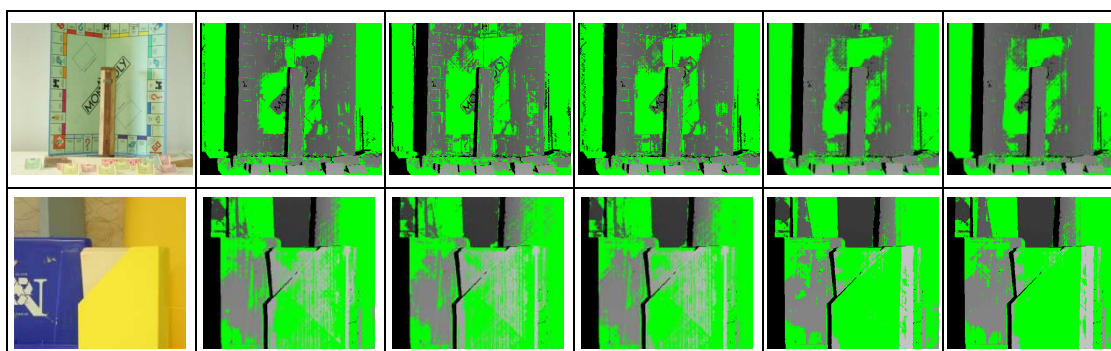


Εικόνα 4.76. Σε κάθε σειρά: Αριστερή εικόνα ζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και εικόνες διαφορών για τις βέλτιστες παραμέτρους της Περίπτωσης 1 (Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$) και της Περίπτωσης 6 (Μέθοδος συνταύτισης: Μετασχηματισμός Census, Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 25$, $P_2 = 100$), αντίστοιχα. Από πάνω προς τα κάτω: ζεύγη εικόνων *Cloth1*, *Aloe*, *Baby3*, *Midd1*.

Στη συνέχεια συγκρίθηκαν τα σφάλματα που παρουσιάζουν οι χάρτες παράλλαξης οι οποίοι προέκυψαν μετά από την χρήση διαφορετικής μεθόδου συνταύτισης (Απόλυτες Διαφορές και Μετασχηματισμός Census). Οι μεγαλύτερες διαφορές (>30%) προκύπτουν για τα ζεύγη εικόνων *Lampshade2* και *Bowling1* (Εικ. 4.77). Και στις δύο περιπτώσεις, περιοχές με χαμηλή υφή (το κουτί για τα περιοδικά στο *Lampshade2*, μέρος της μπάλας στο *Bowling1*, αντικείμενα στο μπροστινό μέρος των εικόνων) δεν συνταυτίζονται επαρκώς με τη μέθοδο των Απόλυτων Διαφορών, σε αντίθεση με τη χρήση του μετασχηματισμού Census.



Εικόνα 4.77. Σε κάθε σειρά: Αριστερή εικόνα ζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και εικόνες διαφορών για τις βέλτιστες παραμέτρους της Περίπτωσης 1 (Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$) και της Περίπτωσης 6 (Μέθοδος συνταύτισης: Μετασχηματισμός Census, Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 25$, $P_2 = 100$), αντίστοιχα. Από πάνω προς τα κάτω: ζεύγη εικόνων *Lampshade2* και *Bowling1*.

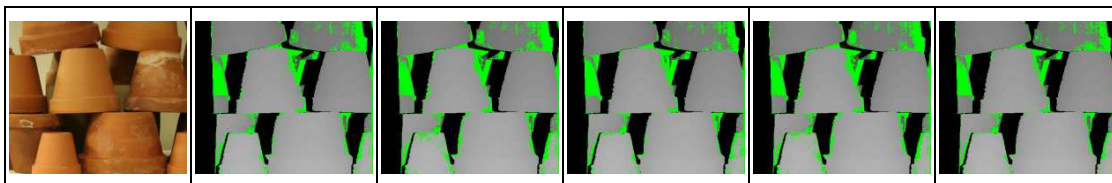


Εικόνα 4.78. Σε κάθε σειρά: Αριστερή εικόνα ζεύγους και εικόνες διαφορών για τις βέλτιστες παραμέτρους της Περίπτωσης 1 (Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$), της Περίπτωσης 2 (Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2B} , ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 600$), της Περίπτωσης 3 (Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: $P_{2Γ}$, ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 200$, $w = 8$), της Περίπτωσης 4 (Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: $P_{2Δ}$, ποινές: $P_1 = 35$, $a = 0.1$, $c = 60$) και της Περίπτωσης 5 (Μέθοδος συνταύτισης: Απόλυτες διαφορές, Συνάρτηση ποινής: P_{2E} , ποινές: $P_1 = 35$, $a = 700$, $b = 90$, $c = 65$). Επάνω σειρά: Ζεύγος εικόνων *Monopoly*. Κάτω σειρά: Ζεύγος εικόνων *Plastic*.

Τέλος, αξιολογήθηκε η απόδοση κάθε συνάρτησης ποινής P_2 , όταν το κόστος υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο. Τα ζεύγη εικόνων *Monopoly* και *Plastic* (Εικ. 4.78) εμφανίζουν τα μεγαλύτερα σφάλματα (δηλαδή >7%) μεταξύ των διαφόρων συναρτήσεων ποινής, όταν η αρχική συνταύτιση έχει γίνει με τη μέθοδο των Απόλυτων Διαφορών,

με αντίστοιχες διαφορές σφάλματος έως 8.5% και 10.2%.

Αντίθετα, όταν χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Census τα ζεύγη εικόνων έχουν μικρή διαφορά σφάλματος. Μόνο το ζεύγος εικόνων *Flowerpots* παρουσιάζει διαφορά σφάλματος μεταξύ των διαφόρων συναρτήσεων ποινής που ξεπερνάει οριακά το 2% (Εικ. 4.79).



Εικόνα 4.79. Αριστερή εικόνα ζεύγους εικόνων Flowerpots και εικόνες διαφορών για τις βέλτιστες παραμέτρους της Περίπτωσης 6 (Μέθοδος συνταύτισης: Census, Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 25$, $P_2 = 100$), της Περίπτωσης 7 (Μέθοδος συνταύτισης: Census, Συνάρτηση ποινής: P_{2B} , ποινές: $P_1 = 25$, $P_2 = 100$), της Περίπτωσης 8 (Μέθοδος συνταύτισης: Census, Συνάρτηση ποινής: P_{2F} , ποινές: $P_1 = 20$, $P_2 = 100$, $w = 14$), της Περίπτωσης 9 (Μέθοδος συνταύτισης: Census, Συνάρτηση ποινής: P_{2D} , ποινές: $P_1 = 35$, $a = 1$, $c = 140$) και της Περίπτωσης 10 (Μέθοδος συνταύτισης: Census, Συνάρτηση ποινής: P_{2E} , ποινές: $P_1 = 35$, $a = 300$, $b = 10$, $c = 95$).

5. SGM ΣΕ ΕΙΚΟΝΕΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΚΑΙ ΦΩΤΙΣΜΟ

Σε αυτό το κεφάλαιο ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε στο Matlab εφαρμόζεται σε 21 σκηνές (τις ίδιες που χρησιμοποιήθηκαν και στο προηγούμενο κεφάλαιο, εκεί όμως σε εικόνες χωρίς ραδιομετρικές διαφορές). Η καθεμία από αυτές έχει απεικονιστεί εδώ σε 18 στερεοζεύγη με διαφορετικούς συνδυασμούς έκθεσης και συνθηκών φωτισμού. Περιγράφεται το θεωρητικό πλαίσιο για αυτή την εφαρμογή, η μεθοδολογία που υιοθετήθηκε, τα αριθμητικά και τα ποιοτικά αποτελέσματα που προκύπτουν, καθώς και σχετικές αναφορές στη βιβλιογραφία.

5.1 Θεωρητικό Πλαίσιο

Στις βασικές μεθόδους συνταύτισης που βασίζονται στον υπολογισμό του κόστους σε κάθε εικονοψηφίδα θεωρείται ότι η ένταση είναι σταθερή (πχ. μέθοδος Απόλυτων Διαφορών) ή γραμμικά μεταβαλλόμενη στις ομόλογες εικονοψηφίδες (πχ. Κανονικοποιημένος Συντελεστής Συσχέτισης). Αντίθετα, οι μέθοδοι συνταύτισης που πραγματοποιούν μη παραμετρικούς μετασχηματισμούς (πχ. Rank και Census) στις εικόνες και βασίζονται αποκλειστικά στην τοπική σειρά (δηλαδή την διαδοχή) ή την σχέση των εντάσεων, και όχι στις ίδιες τις τιμές των εντάσεων, μπορούν να αντεπεξέρχονται κατά την συνταύτιση εικόνων και με μη γραμμικές, αλλά μονοτονικές, ραδιομετρικές διαφορές οι οποίες διατηρούν αυτή την σειρά ή σχέση εντός του παραθύρου ορισμού τους (Hirschmüller & Scharstein, 2009). Η επεξεργασία των εικόνων πριν από την συνταύτιση με φίλτρο παραγώγου (πχ. Sobel κατά x) οδηγεί, γενικά, σε άμβλυνση των ραδιομετρικών διακυμάνσεων, καίτοι με αυτό τον τρόπο ενδέχεται να μεγεθύνεται ο θόρυβος που τυχόν έχει η εικόνα. Στη συνέχεια, η συνταύτιση πραγματοποιείται στις φιλτραρισμένες εικόνες με ένα απλό μέτρο ομοιότητας, όπως οι Απόλυτες Διαφορές (Mroz & Breckon, 2012).

Οι εικόνες με διαφορετικό φωτισμό έχουν προκύψει από την αλλαγή της θέσης και του τύπου των πηγών φωτισμού, πράγμα που προκαλεί πολλές τοπικές ραδιομετρικές αλλαγές. Αντίθετα, η αλλαγή της έκθεσης θεωρείται ότι μπορεί να προσεγγιστεί από έναν μετασχηματισμό σε ολόκληρη την εικόνα. Αυτές οι ραδιομετρικές αλλαγές θεωρούνται πραγματικές, και όχι τεχνητές – όπως θα ήταν η προσθήκη θορύβου στις εικόνες (Hirschmüller & Scharstein, 2009). Το θέμα των ραδιομετρικών μεταβολών έχει προφανώς εξαιρετική σημασία για την συνταύτιση εικόνας, δεδομένου ότι στόχος είναι να αναπτυχθούν μέθοδοι που δεν θα ανταποκρίνονται απλώς σε ελεγχόμενες (“εργαστηριακές”) συνθήκες αλλά και σε πραγματικές καταστάσεις λήψεων, ιδιαίτερα μάλιστα εξωτερικών χώρων (outdoor scenes) όπου οι ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ εικόνων ενδέχεται να είναι πολύ έντονες.

5.2 Μεθοδολογία

Η εφαρμογή έγινε στις εικόνες 21 σκηνών (συνθέσεων αντικειμένων) με όνομα “2006 datasets” από την διαδικτυακή πλατφόρμα του Middlebury College, οι οποίες σημειωτέον έχουν χρησιμοποιηθεί πολύ λιγότερο στη βιβλιογραφία από τις προηγούμενες συλλογές. Για κάθε σκηνή διατίθενται εικόνες από 7 διαφορετικές θέσεις λήψης, με όλους τους 9 συνδυασμούς τριών περιπτώσεων φωτισμού (Illum1-3) και τριών περιπτώσεων έκθεσης (Exp0-2).

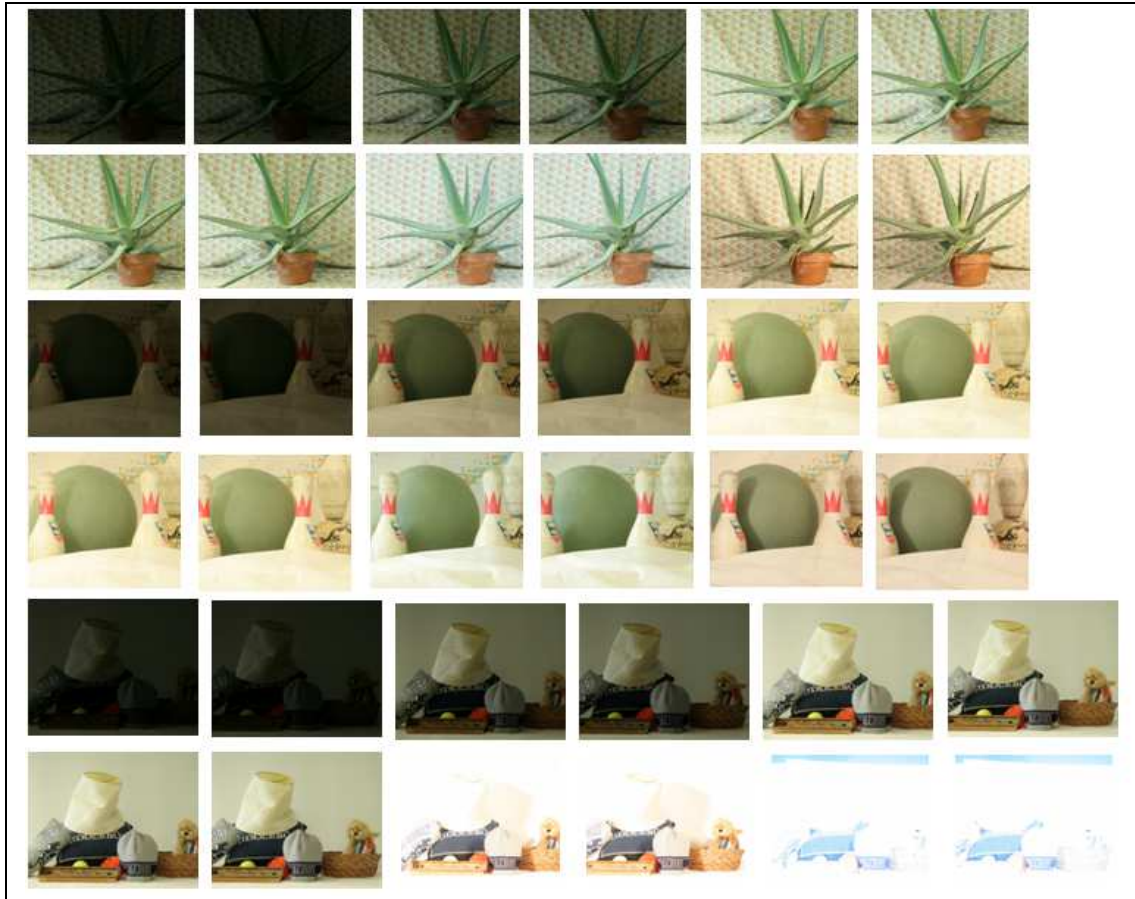
Η υλοποίηση του αλγορίθμου SGM πραγματοποιήθηκε με 3 διαφορετικές μεθόδους συνταύτισης (Απόλυτες Διαφορές των Εντάσεων, εφαρμογή φίλτρου Sobel κατά x και ακολούθως συνταύτιση με Απόλυτες Διαφορές, και Μετασχηματισμός Census με συνταύτιση μέσω απόστασης Hamming) και για 5 διαφορετικές εκδοχές υπολογισμού της ποινής P_2 (P_{2A} , P_{2B} , P_{2F} , P_{2D} και P_{2E}), δηλαδή συνολικά διακρίνονται 15 περιπτώσεις. Για τις ποινές P_1 , P_2 , w , a , b και c χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που προέκυψαν ως καλύτερες για την κάθε περίπτωση από την βελτιστοποίηση που προηγήθηκε, δηλαδή αυτές που προκαλούν το μικρότερο σφάλμα (βλέπε Κεφάλαιο 4, Πίνακας 4.7). Προκειμένου για τις εικόνες στις οποίες εφαρμόζεται φίλτρο Sobel, χρησιμοποιούνται οι βέλτιστες παράμετροι που προέκυψαν για τη μέθοδο των Απόλυτων Διαφορών. Κατά συνέπεια, τα ζεύγη των εικόνων χωρίς ραδιομετρικές διαφορές που χρησιμοποιήθηκαν στη βελτιστοποίηση θεωρούνται ως ομάδα εκπαίδευσης (training set), ενώ τα ζεύγη των εικόνων με ραδιομετρικές διαφορές που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη φάση αποτελούν τα σετ επίβλεψης ή ελέγχου (test set) (Hirschmüller & Scharstein, 2009).

Στην εργασία αυτή, διερευνήθηκε η απόδοση κάθε περίπτωσης σε εικόνες με διαφορετικό φωτισμό και έκθεση. Ειδικότερα, με σταθερή φωτεινότητα στην κανονική (default) τιμή της Illum = 1, δημιουργήθηκαν 9 ζεύγη εικόνων από τους συνδυασμούς των τριών διαφορετικών εκθέσεων που μπορεί να έχει η κάθε εικόνα. Αντίστοιχα, με σταθερή έκθεση στην τιμή Exp = +2, δημιουργήθηκαν 9 ζεύγη εικόνων από τους συνδυασμούς των τριών διαφορετικών φωτισμών που μπορεί να έχει κάθε εικόνα. Δημιουργήθηκαν, έτσι, συνολικά 18 στερεοζεύγη για κάθε σκηνή. Τυπικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην Εικ. 5.1.

Σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν οι εικόνες “view1” και “view5”, στις οποίες αντιστοιχούν οι αληθείς χάρτες παράλλαξης που δίνονται. Ισχύουν και εδώ οι ίδιοι ορισμοί για τον τρόπο υπολογισμού του σφάλματος όπως στο Κεφάλαιο 4.

5.3 Αριθμητικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Το μικρότερο μέσο σφάλμα για κάθε περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1 για τις εικόνες με μεταβαλλόμενη έκθεση και στον Πίνακα 5.2 για τις εικόνες με μεταβαλλόμενο φωτισμό. Ακόμη, παρατίθενται οι τιμές έκθεσης ή φωτισμού για τις οποίες επιτυγχάνεται το μικρότερο σφάλμα.



Εικόνα 5.1. Αντιπροσωπευτικές εικόνες με ραδιομετρικές διαφορές που χρησιμοποιήθηκαν ως στερεοζεύγη (σκηνές *Aloe*, *Bowling1*, *Midd1*). Για κάθε σκηνή, στην επάνω σειρά: Εικόνες με σταθερό φωτισμό ($Illum = 1$) και μεταβαλλόμενη έκθεση, και στην κάτω σειρά: Εικόνες με σταθερή έκθεση ($Exp = +2$) και μεταβαλλόμενο φωτισμό.

Σταθερή φωτεινότητα ($Illum = 1$)		
Περίπτωση	Μικρότερο σφάλμα ($p_{low}\%$)	Έκθεση αριστερής-δεξιάς εικόνας ($expL, expR$) για p_{low}
AD+P _{2A}	23.5	$expL = 2, expR = 2$
AD+P _{2B}	23.9	$expL = 2, expR = 2$
AD+P _{2Γ}	23.6	$expL = 2, expR = 2$
AD+P _{2Δ}	25.1	$expL = 2, expR = 2$
AD+P _{2Ε}	25.0	$expL = 2, expR = 2$
xSobel+AD+P _{2A}	17.2	$expL = 2, expR = 2$
xSobel+AD+P _{2B}	17.6	$expL = 2, expR = 2$
xSobel+AD+P _{2Γ}	17.2	$expL = 2, expR = 2$
xSobel+AD+P _{2Δ}	18.2	$expL = 2, expR = 2$
xSobel+AD+P _{2Ε}	18.6	$expL = 2, expR = 2$
Census+P _{2A}	11.0	$expL = 2, expR = 2$
Census+P _{2B}	11.2	$expL = 2, expR = 2$
Census+P _{2Γ}	11.0	$expL = 2, expR = 2$
Census+P _{2Δ}	11.3	$expL = 2, expR = 2$
Census+P _{2Ε}	11.2	$expL = 2, expR = 2$

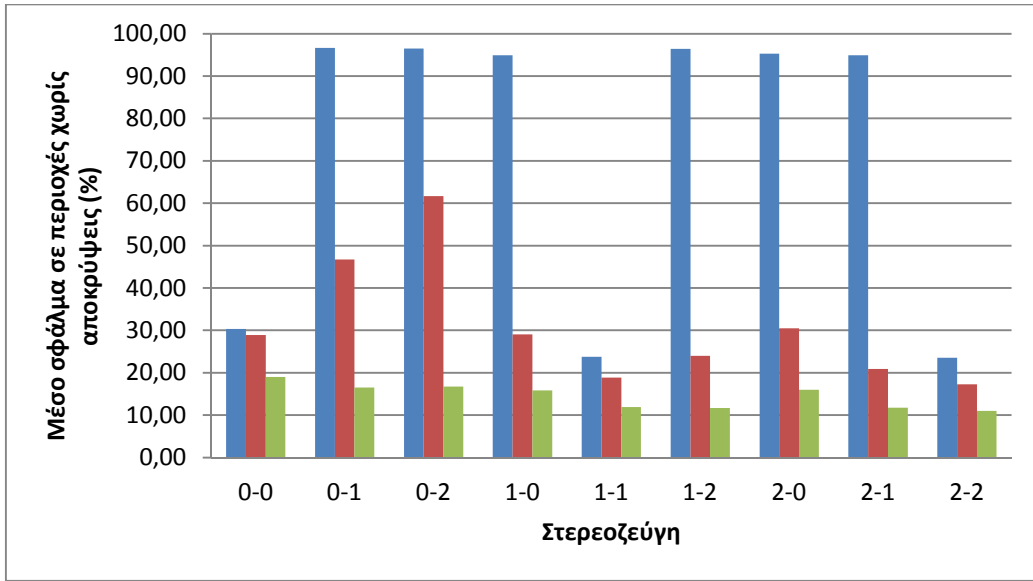
Πίνακας 5.1. Μικρότερο σφάλμα κάθε περίπτωσης και τιμές έκθεσης για τις οποίες αυτό επιτυγχάνεται (σταθερή φωτεινότητα).

Σταθερή έκθεση (Exp = 2)		
Περίπτωση	Μικρότερο σφάλμα (ρ_{low} %)	Φωτισμός αριστερής-δεξιάς εικόνας (illumL, illumR) για ρ_{low}
AD+P _{2A}	23.0	illumL = 2 , illumR = 2
AD+P _{2B}	23.3	illumL = 2 , illumR = 2
AD+P _{2Γ}	23.0	illumL = 2 , illumR = 2
AD+P _{2Δ}	23.9	illumL = 2 , illumR = 2
AD+P _{2Ε}	24.0	illumL = 2 , illumR = 2
xSobel+AD+P _{2A}	17.2	illumL = 1 , illumR = 1
xSobel+AD+P _{2B}	17.6	illumL = 1 , illumR = 1
xSobel+AD+P _{2Γ}	17.2	illumL = 1 , illumR = 1
xSobel+AD+P _{2Δ}	18.2	illumL = 1 , illumR = 1
xSobel+AD+P _{2Ε}	18.6	illumL = 1 , illumR = 1
Census+P _{2A}	11.0	illumL = 1 , illumR = 1
Census+P _{2B}	11.2	illumL = 1 , illumR = 1
Census+P _{2Γ}	11.0	illumL = 1 , illumR = 1
Census+P _{2Δ}	11.3	illumL = 1 , illumR = 1
Census+P _{2Ε}	11.2	illumL = 1 , illumR = 1

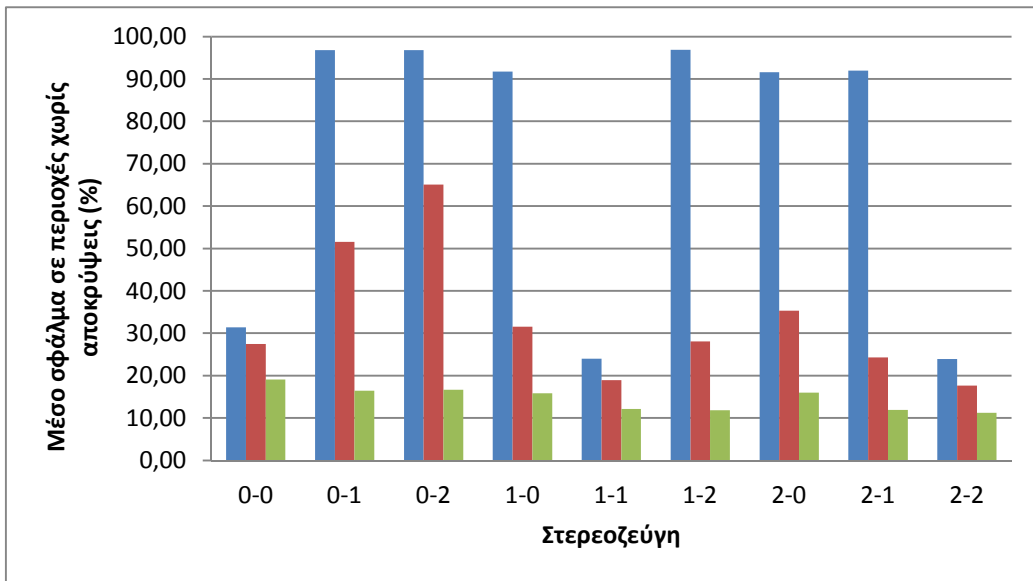
Πίνακας 5.2. Μικρότερο σφάλμα κάθε περίπτωσης και τιμές φωτισμού για τις οποίες αυτό επιτυγχάνεται (σταθερή έκθεση).

Παρατηρείται ότι, και εδώ, με την εφαρμογή του μετασχηματισμού Census στις εικόνες το ελάχιστο μέσο σφάλμα μειώνεται στο μισό σε σχέση με το αντίστοιχο των Απόλυτων Διαφορών. Οι διαφορετικές εκδοχές υπολογισμού της ποινής P_2 δεν έχουν μεγάλη διαφορά μεταξύ τους, όπως διαπιστώθηκε και στη φάση της βελτιστοποίησης (απόκλιση 0.3-1.6% μεταξύ των συναρτήσεων ποινής για την ίδια μέθοδο συνταύτισης). Η χρήση φίλτρου Sobel στις εικόνες και εν συνεχεία η συνταύτιση με τη μέθοδο των Απόλυτων Διαφορών έχει καλύτερη απόδοση (μικρότερο σφάλμα κατά 6%) από την απλή συνταύτιση με τις Απόλυτες Διαφορές, αλλά αντίστοιχα μεγαλύτερο σφάλμα (κατά 6% περίπου) από ό,τι ο μετασχηματισμός Census. Το σφάλμα των εικόνων με διαφορετική έκθεση είναι μεγαλύτερο κατά περίπου 1% από το σφάλμα των εικόνων με διαφορετικό φωτισμό για την αντίστοιχη περίπτωση, όταν το αρχικό κόστος συνταύτισης υπολογίζεται με τη μέθοδο των Απόλυτων Διαφορών, ενώ ταυτίζονται όταν αρχικά χρησιμοποιείται φίλτρο Sobel ή μετασχηματισμός Census. Αυτό οφείλεται στο ότι στις δύο τελευταίες περιπτώσεις τα μικρότερα σφάλματα, τόσο στις εικόνες με διαφορετικό φωτισμό όσο και σε εκείνες με διαφορετική έκθεση, προκύπτουν για τον συνδυασμό των “κανονικών” τιμών (ενώ για τις Απόλυτες Διαφορές το μικρότερο σφάλμα προκύπτει για $[illumL, illumR] = [2, 2]$).

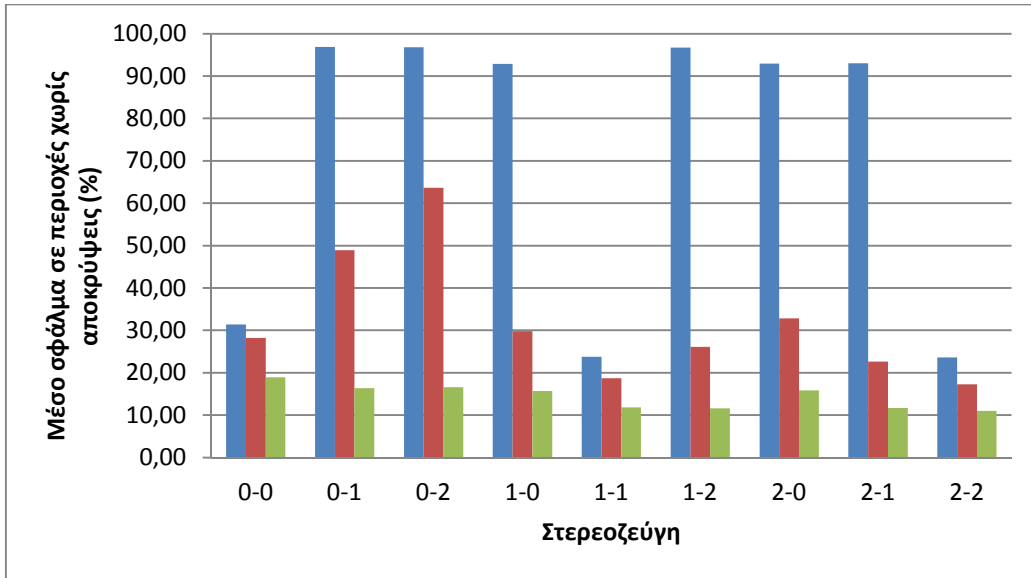
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα του μέσου σφάλματος (από τα 21 ζεύγη εικόνων) για κάθε συνδυασμό έκθεσης στην αριστερή και την δεξιά εικόνα του ζεύγους, για τις μεθόδους συνταύτισης Απόλυτες Διαφορές, φίλτρο Sobel + Απόλυτες Διαφορές και τον Μετασχηματισμό Census, για καθεμιά από τις συναρτήσεις ποινής (Εικ. 5.2-5.6):



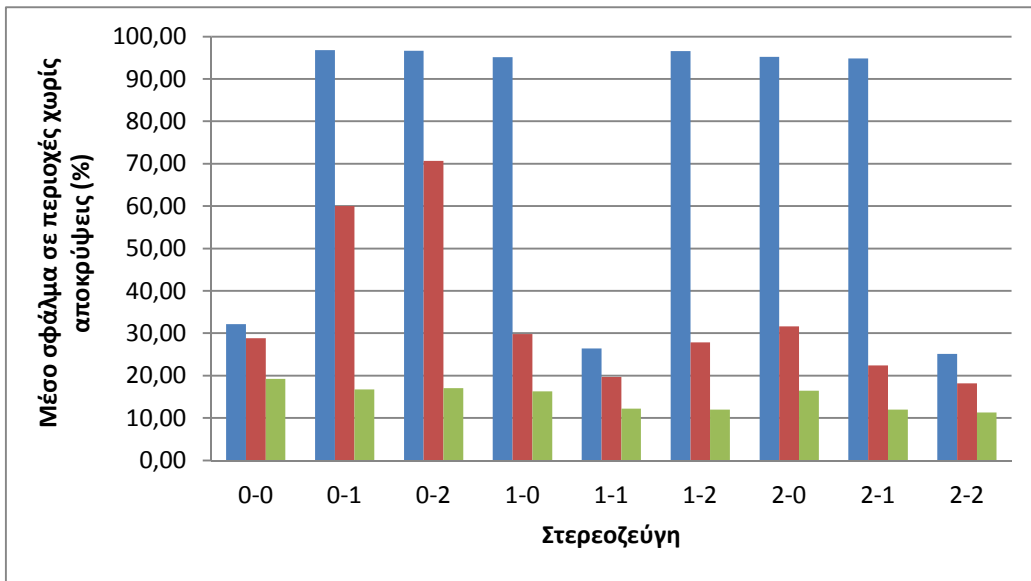
Εικόνα 5.2. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενη έκθεση και σταθερό φωτισμό (= 1). Μέθοδοι συνταύτισης: Απόλυτες Διαφορές (μπλε χρώμα), Sobel + Απόλυτες Διαφορές (κόκκινο χρώμα) και Μετασχηματισμός Census (πράσινο χρώμα).
Συνάρτηση ποινής P_{2A} .



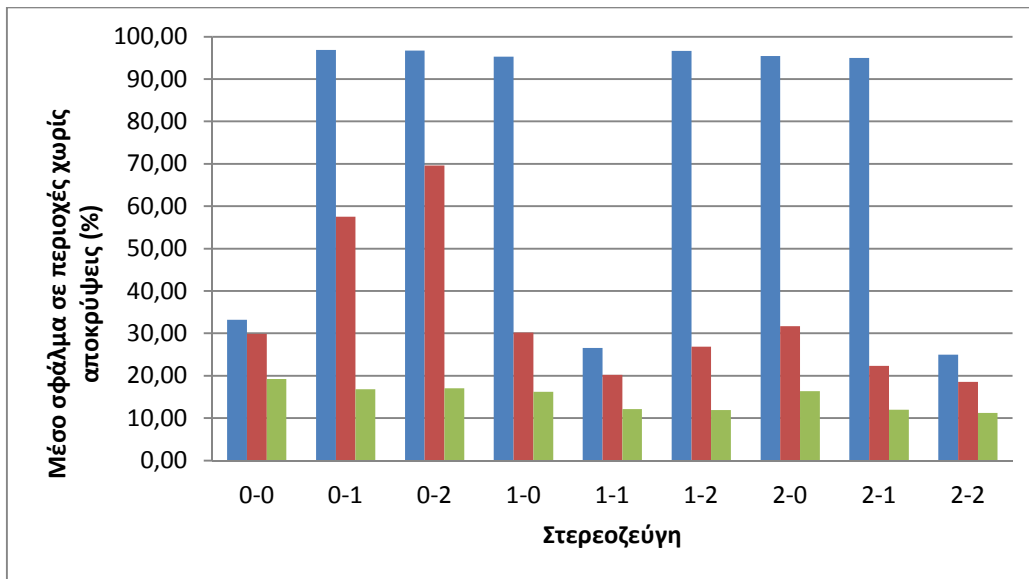
Εικόνα 5.3. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενη έκθεση και σταθερό φωτισμό (= 1). Μέθοδοι συνταύτισης: Απόλυτες Διαφορές (μπλε χρώμα), Sobel + Απόλυτες Διαφορές (κόκκινο χρώμα) και Μετασχηματισμός Census (πράσινο χρώμα).
Συνάρτηση ποινής P_{2B} .



Εικόνα 5.4. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενη έκθεση και σταθερό φωτισμό ($= 1$). Μέθοδοι συνταύτισης: Απόλυτες Διαφορές (μπλε χρώμα), Sobel + Απόλυτες Διαφορές (κόκκινο χρώμα) και Μετασχηματισμός Census (πράσινο χρώμα).
Συνάρτηση ποιότητος $P_{2\Gamma}$.



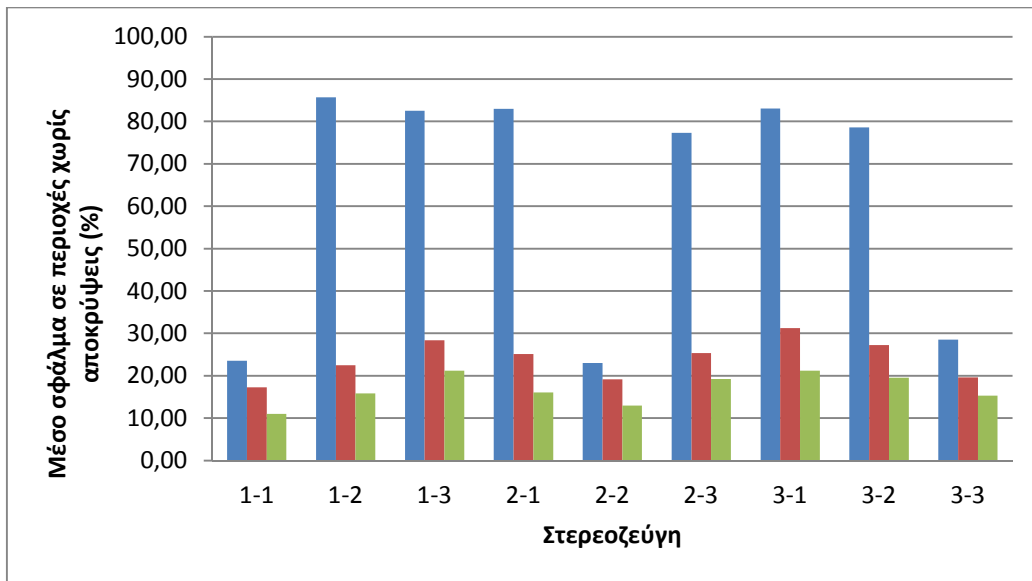
Εικόνα 5.5. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενη έκθεση και σταθερό φωτισμό ($= 1$). Μέθοδοι συνταύτισης: Απόλυτες Διαφορές (μπλε χρώμα), Sobel + Απόλυτες Διαφορές (κόκκινο χρώμα) και Μετασχηματισμός Census (πράσινο χρώμα).
Συνάρτηση ποιότητος $P_{2\Delta}$.



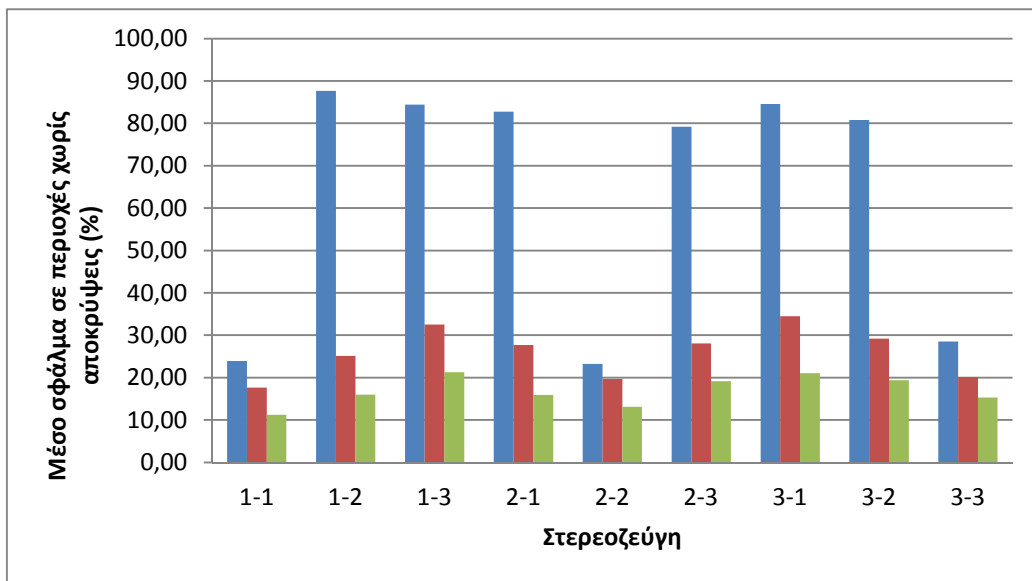
Εικόνα 5.6. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενη έκθεση και σταθερό φωτισμό (= 1). Μέθοδοι συνταύτισης: Απόλυτες Διαφορές (μπλε χρώμα), Sobel + Απόλυτες Διαφορές (κόκκινο χρώμα) και Μετασχηματισμός Census (πράσινο χρώμα).
Συνάρτηση ποινής P_{2E} .

Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν από όλα τα διαγράμματα: με σταθερό φωτισμό και μεταβλητή έκθεση στις δύο εικόνες, το μικρότερο μέσο σφάλμα επιτυγχάνεται σε όλες τις περιπτώσεις για έκθεση στην αριστερή και την δεξιά εικόνα ίση με 2, δηλαδή για την “κανονική” της τιμή. Όταν αρχική μέθοδος συνταύτισης είναι οι Απόλυτες Διαφορές, τα μικρότερα σφάλματα προκύπτουν για τις περιπτώσεις 0-0, 1-1 και 2-2, δηλαδή όταν η έκθεση της αριστερής και της δεξιάς εικόνας είναι ίδιες. Αν στις εικόνες εφαρμοστεί φίλτρο Sobel και ακολουθήσει η συνταύτιση με Απόλυτες Διαφορές, οι περιπτώσεις 2-2, 1-1 και 2-1 εμφανίζουν τα μικρότερα σφάλματα. Όταν η αρχική μέθοδος συνταύτισης είναι ο Μετασχηματισμός Census, τα μικρότερα σφάλματα προκύπτουν για τις περιπτώσεις 1-1, 1-2, 2-1 και 2-2. Δηλαδή με τις δύο τελευταίες μεθόδους συνταύτισης μπορεί να επιτευχθεί μικρό σφάλμα ακόμα και όταν οι δύο συνταυτιζόμενες εικόνες έχουν διαφορετική έκθεση. Ακόμη, η διαφορά μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου σφάλματος είναι 73% όταν χρησιμοποιούνται οι Απόλυτες Διαφορές, 50% όταν έχει προηγηθεί φιλτράρισμα των εικόνων με Sobel, ενώ είναι μόλις 8% στις περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται ο Μετασχηματισμός Census.

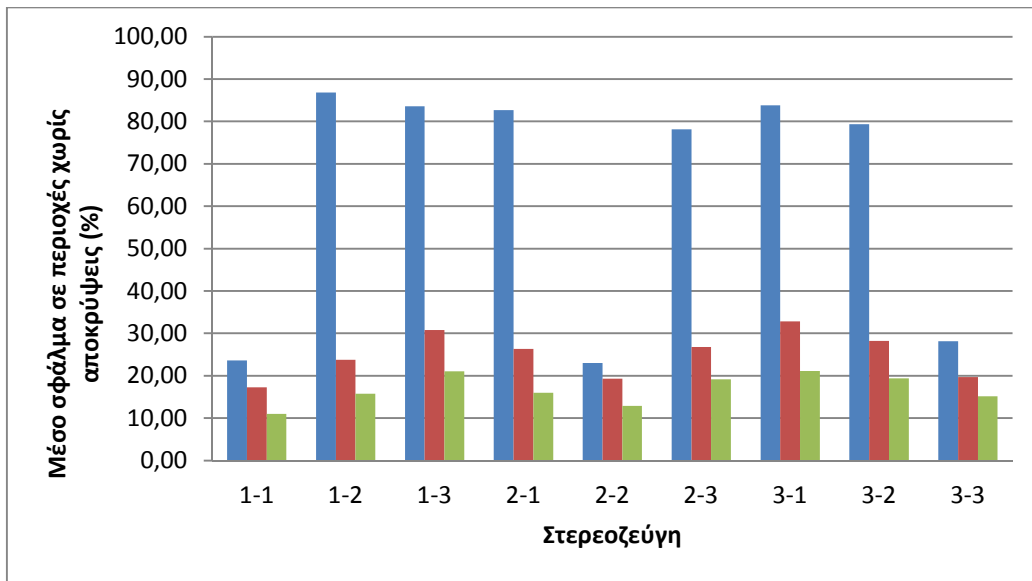
Ακολουθώς παρουσιάζονται τα διαγράμματα του μέσου σφάλματος (από τα 21 ζεύγη εικόνων) για κάθε *συνδυασμό φωτεινότητας* στην αριστερή και την δεξιά εικόνα του ζεύγους, για την μέθοδο συνταύτισης Απόλυτες Διαφορές, φίλτρο Sobel + Απόλυτες Διαφορές και τον Μετασχηματισμό Census, για καθεμιά από τις συναρτήσεις ποινής (Εικ. 5.7-5.11):



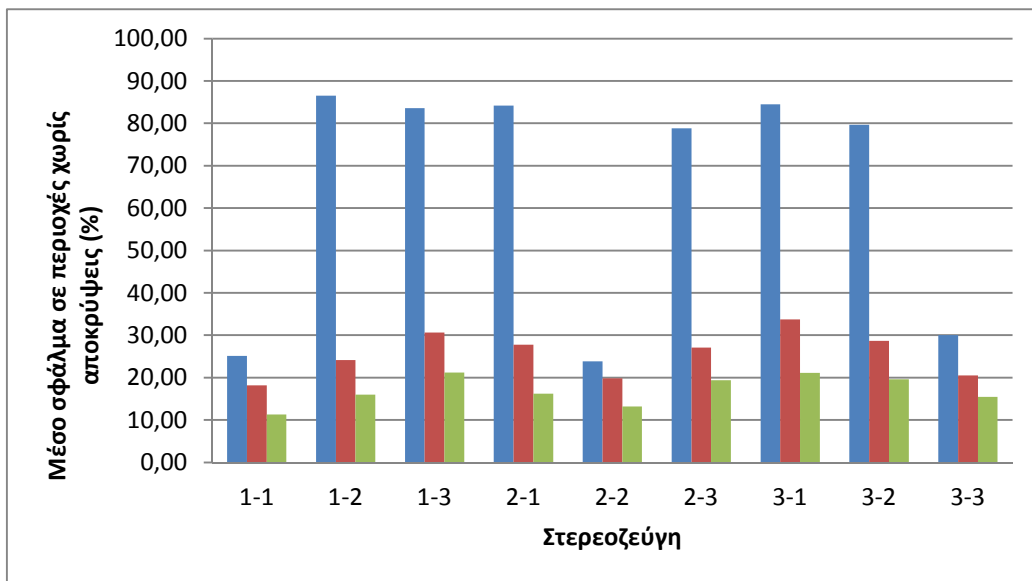
Εικόνα 5.7. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενο φωτισμό και σταθερή έκθεση (= +2). Μέθοδοι συνταύτισης: Απόλυτες Διαφορές (μπλε χρώμα), Sobel + Απόλυτες Διαφορές (κόκκινο χρώμα) και Μετασχηματισμός Census (πράσινο χρώμα).
Συνάρτηση ποινής P_{2A} .



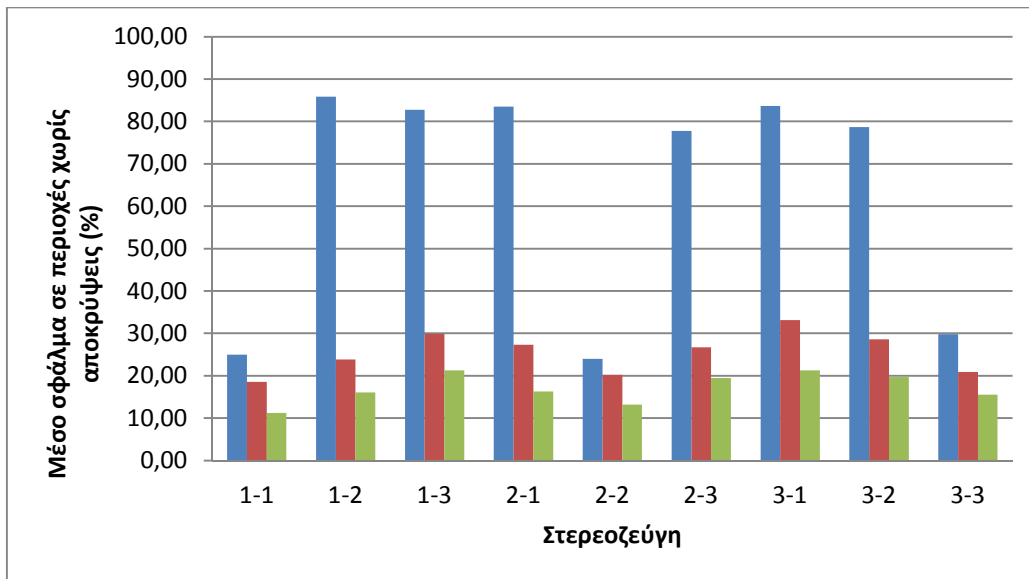
Εικόνα 5.8. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενο φωτισμό και σταθερή έκθεση (= +2). Μέθοδοι συνταύτισης: Απόλυτες Διαφορές (μπλε χρώμα), Sobel + Απόλυτες Διαφορές (κόκκινο χρώμα) και Μετασχηματισμός Census (πράσινο χρώμα).
Συνάρτηση ποινής P_{2B} .



Εικόνα 5.9. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενο φωτισμό και σταθερή έκθεση (= +2). Μέθοδοι συνταύτισης: Απόλυτες Διαφορές (μπλε χρώμα), Sobel + Απόλυτες Διαφορές (κόκκινο χρώμα) και Μετασχηματισμός Census (πράσινο χρώμα).
Συνάρτηση ποιότητος $P_{2\Gamma}$.



Εικόνα 5.10. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενο φωτισμό και σταθερή έκθεση (= +2). Μέθοδοι συνταύτισης: Απόλυτες Διαφορές (μπλε χρώμα), Sobel + Απόλυτες Διαφορές (κόκκινο χρώμα) και Μετασχηματισμός Census (πράσινο χρώμα).
Συνάρτηση ποιότητος $P_{2\Delta}$.



Εικόνα 5.11. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενο φωτισμό και σταθερή έκθεση (= +2). Μέθοδοι συνταύτισης: Απόλυτες Διαφορές (μπλε χρώμα), Sobel + Απόλυτες Διαφορές (κόκκινο χρώμα) και Μετασχηματισμός Census (πράσινο χρώμα).
Συνάρτηση ποινής P_{2E} .

Και εδώ προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα από όλα τα διαγράμματα: όταν διατηρείται η ίδια έκθεση στις δύο εικόνες αλλά αλλάζει ο φωτισμός και η αρχική μέθοδος συνταύτισης είναι οι Απόλυτες Διαφορές, το ελάχιστο μέσο σφάλμα προκύπτει για το ζεύγος 2-2 αλλά με πολύ κοντινές τιμές σφαλμάτων και για τα ζεύγη 1-1 και 3-3. Εάν έχει προηγηθεί επεξεργασία των εικόνων με εφαρμογή φίλτρου Sobel, οι φωτισμοί 1-1, 2-2 και 3-3 δίνουν επίσης τα μικρότερα σφάλματα. Το ίδιο συμβαίνει και όταν η αρχική μέθοδος συνταύτισης είναι ο Μετασχηματισμός Census, όπου το ελάχιστο μέσο σφάλμα προκύπτει για τον συνδυασμό φωτισμών 1-1 (“κανονική” τιμή φωτισμού) και τα αμέσως μεγαλύτερα σφάλματα για τους συνδυασμούς 2-2 και 3-3. Διαπιστώνεται δηλαδή ότι για όλες τις περιπτώσεις τα μικρότερα σφάλματα επιτυγχάνονται όταν ο φωτισμός της αριστερής και της δεξιάς εικόνας είναι ίδιος. Όσον αφορά όμως τον Μετασχηματισμό Census, παρατηρείται ότι το τρίτο μικρότερο σφάλμα (που επιτυγχάνεται για τον συνδυασμό 3-3) έχει απόκλιση λιγότερο από 1% από τα δύο αμέσως μεγαλύτερα σφάλματα, τα οποία αντιστοιχούν στα στερεοζεύγη με φωτισμό 1-2 και 2-1. Τέλος, το ελάχιστο και μέγιστο σφάλμα διαφέρουν κατά 63% με την εφαρμογή της μεθόδου των Απόλυτων Διαφορών, σε αντίθεση με τη διαφορά 15% όταν η συνταύτιση εφαρμόζεται σε εικόνες φιλτραρισμένες με Sobel και τη διαφορά 10% όταν χρησιμοποιείται ο Μετασχηματισμός Census.

Παρατηρείται λοιπόν ότι για εικόνες με διαφορετικό φωτισμό, η εφαρμογή φίλτρου Sobel πριν από την συνταύτιση αποδίδει πολύ καλύτερα απ’ ό,τι για εικόνες με διαφορετική έκθεση (εκτός από το μικρότερο μέσο σφάλμα που παραμένει ίδιο), καθώς μειώνονται σημαντικά τα μεγαλύτερα μέσα σφάλματα. Επίσης, διαπιστώνεται πως τα μεγέθη των σφαλμάτων, όπως και η διαφορά μέγιστου και ελάχιστου σφάλ-

ματος, ομοιάζουν με τα αντίστοιχα στοιχεία του Μετασχηματισμού Census. Ο τελευταίος αντιπροσωπεύει βέβαια την καλύτερη από τις εξεταζόμενες μεθόδους για την συνταύτιση εικόνων με έντονες ραδιομετρικές διαφορές.

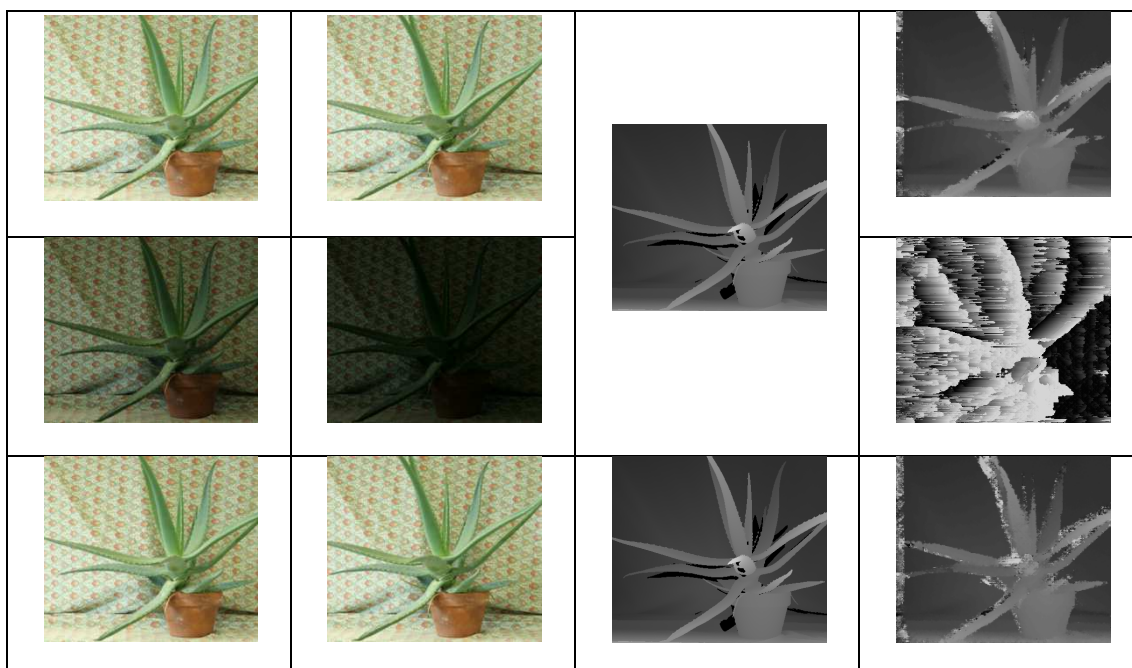
5.4 Ποιοτικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

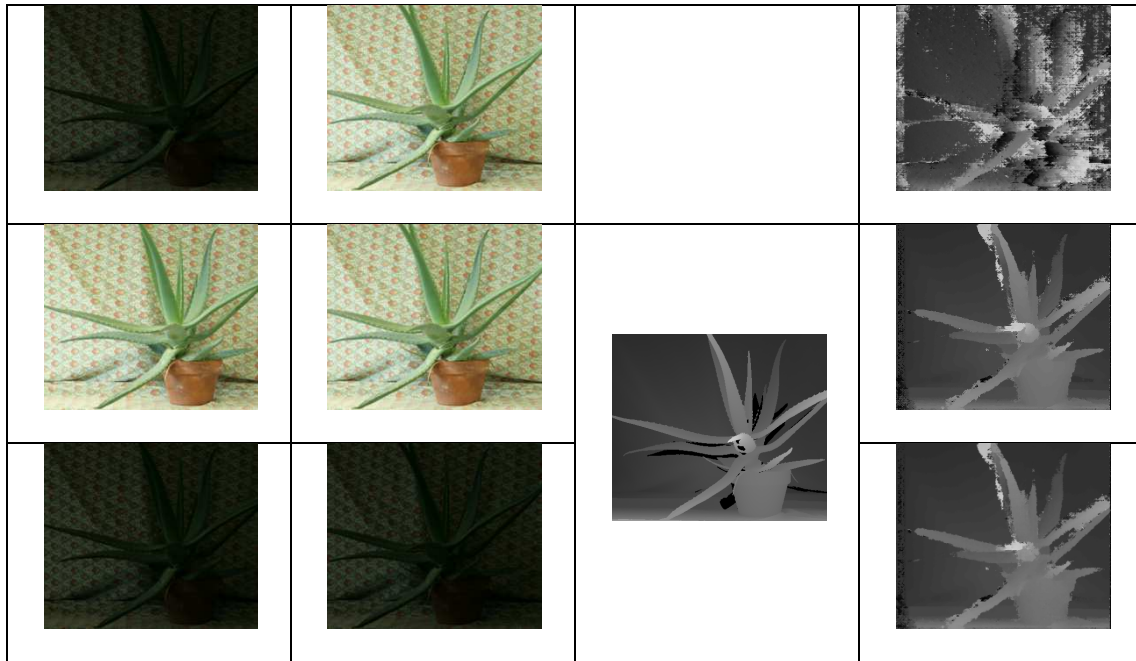
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται χάρτες παράλλαξης ενδεικτικά για 3 ζεύγη εικόνων με διαφορετική έκθεση και φωτισμό, που προέκυψαν από κάθε μέθοδο συνταύτισης, για τις περιπτώσεις εκείνες που εμφανίζουν το μικρότερο και το μεγαλύτερο σφάλμα.

Τα ζεύγη που επιλέχθηκαν εμφανίζουν σφάλματα μεγέθους αντιπροσωπευτικού εκείνων που προέκυψαν συνολικά σε αυτή την διαδικασία. Επειδή η χρήση διαφορετικών συναρτήσεων ποινής δεν διαφοροποιεί αισθητά τα αποτελέσματα, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν εκείνα από τη χρήση μιας συνάρτησης ποινής (συγκεκριμένα της P_{2A}). Σημειώνεται πως για τα διαφορετικά ζεύγη εικόνων ενδέχεται σε μερικές περιπτώσεις να διαφέρουν η καλύτερη ή η χειρότερη περίπτωση. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στη χρησιμοποιούμενη μέθοδο συνταύτισης είτε, για την ίδια μέθοδο, στις εικόνες — η αλλαγή της έκθεσης και του φωτισμού είναι διαφορετική στα ποικίλα ζεύγη εικόνων και προκαλεί διαφορετικά αποτελέσματα.

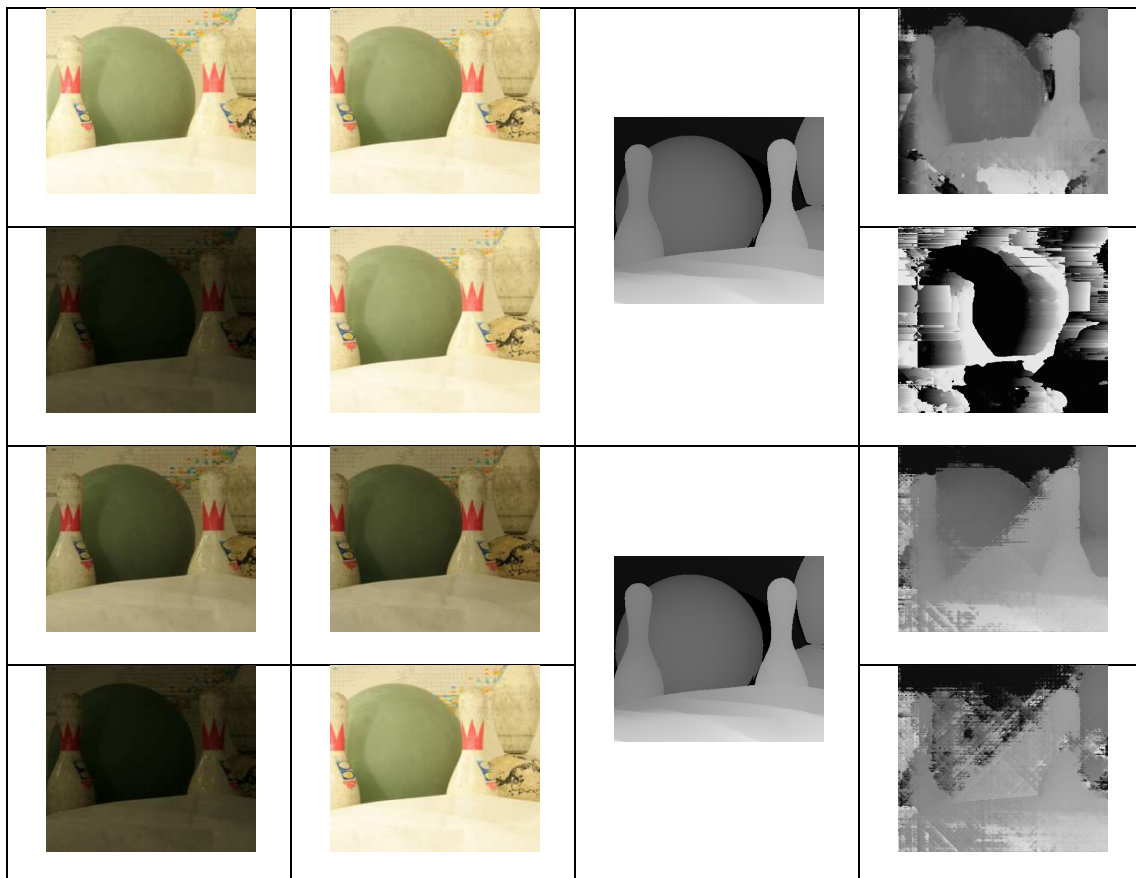
5.4.1 Αποτελέσματα για εικόνες με διαφορετική έκθεση

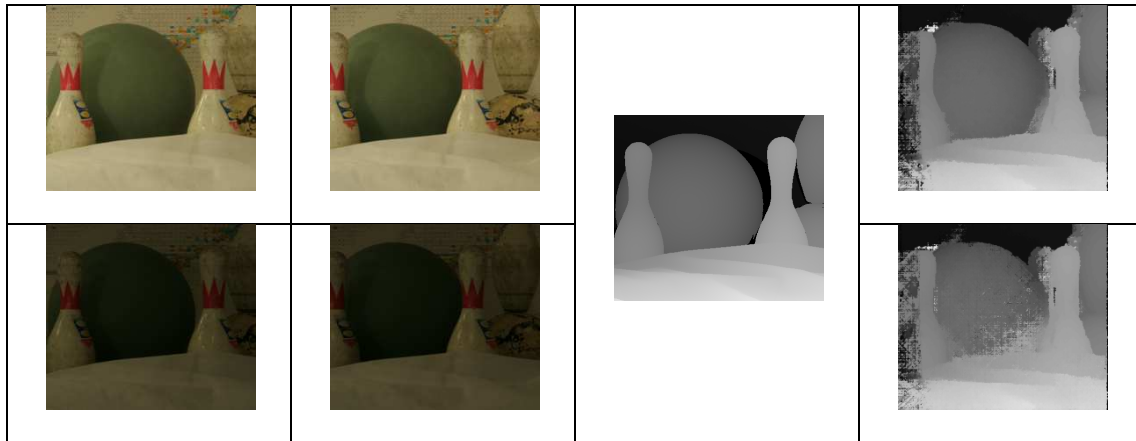
Ενδεικτικά παρατίθενται οι χάρτες παράλλαξης που αντιστοιχούν στις περιπτώσεις με το μικρότερο και το μεγαλύτερο σφάλμα, για τη μέθοδο συνταύτισης Απόλυτες Διαφορές, φίλτρο Sobel + Απόλυτες Διαφορές και Μετασχηματισμός Census, για τα ζεύγη εικόνων *Aloe* (Εικ. 5.12), *Bowling1* (Εικ. 5.13) και *Midd1* (Εικ. 5.14).



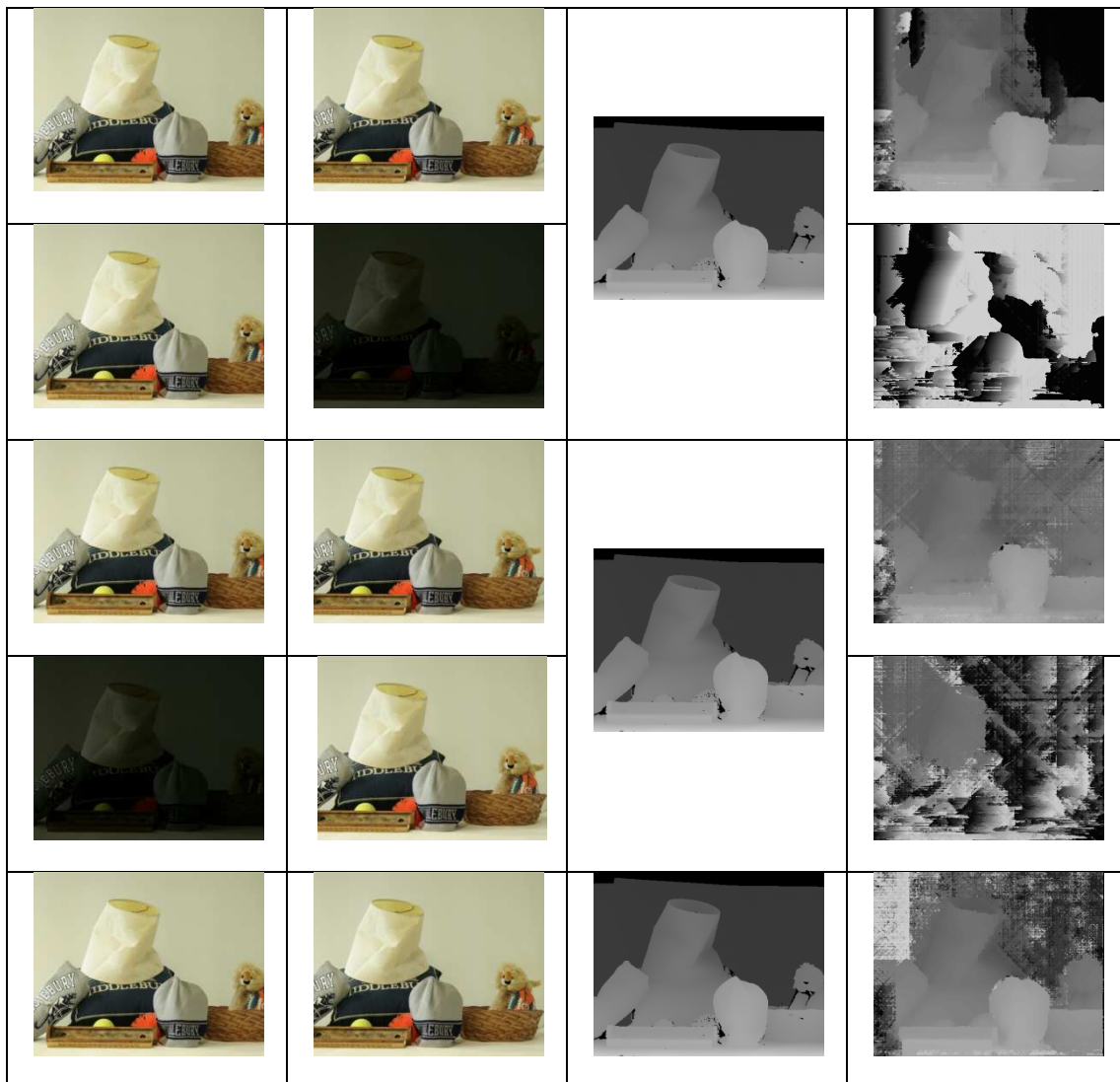


Εικόνα 5.12. Πρώτες δύο γραμμές, από αριστερά προς τα δεξιά: Εικόνες στερεοζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και χάρτες παράλλαξης για την καλύτερη (2-2) και χειρότερη (1-0) περίπτωση έκθεσης με την μέθοδο συνταύτισης AD. Επόμενες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (2-2) και χειρότερη (0-2) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης xSobel+AD. Τελευταίες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (2-2) και χειρότερη (0-0) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης Census.
Σκηνή Aloe.





Εικόνα 5.13. Πρώτες δύο γραμμές, από αριστερά προς τα δεξιά: Εικόνες στερεοζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και χάρτες παράλλαξης για την καλύτερη (2-2) και χειρότερη (0-2) περίπτωση έκθεσης με την μέθοδο συνταύτισης AD. Επόμενες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (1-1) και χειρότερη (0-2) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης xSobel+AD. Τελευταίες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (1-1) και χειρότερη (0-0) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης Census. Σκηνή Bowling1.



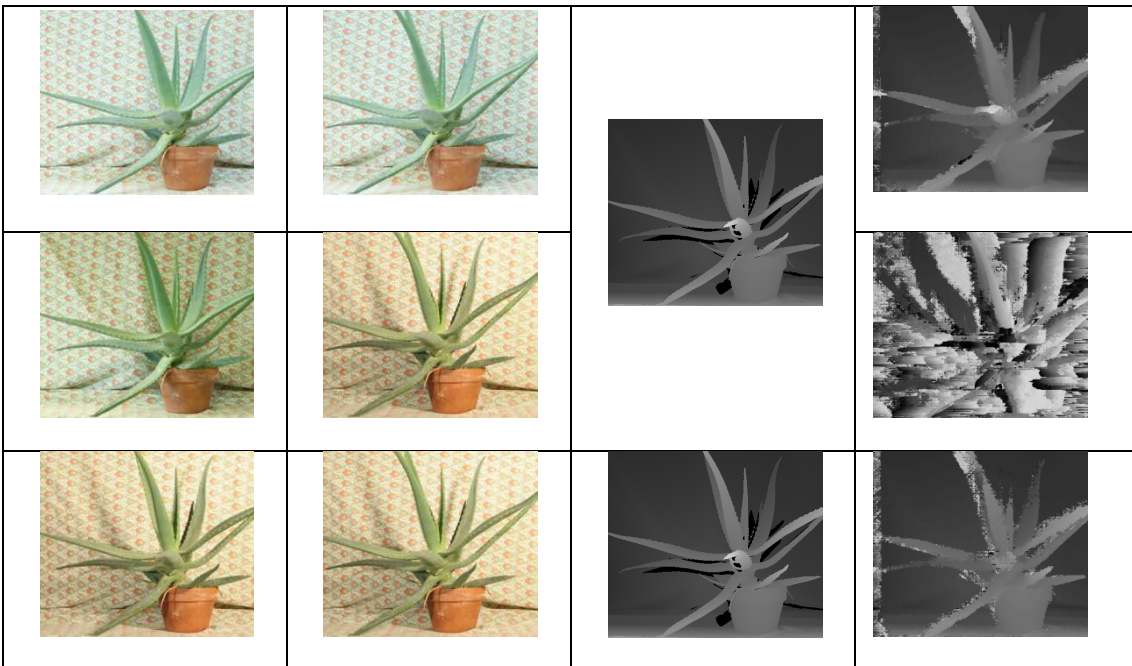


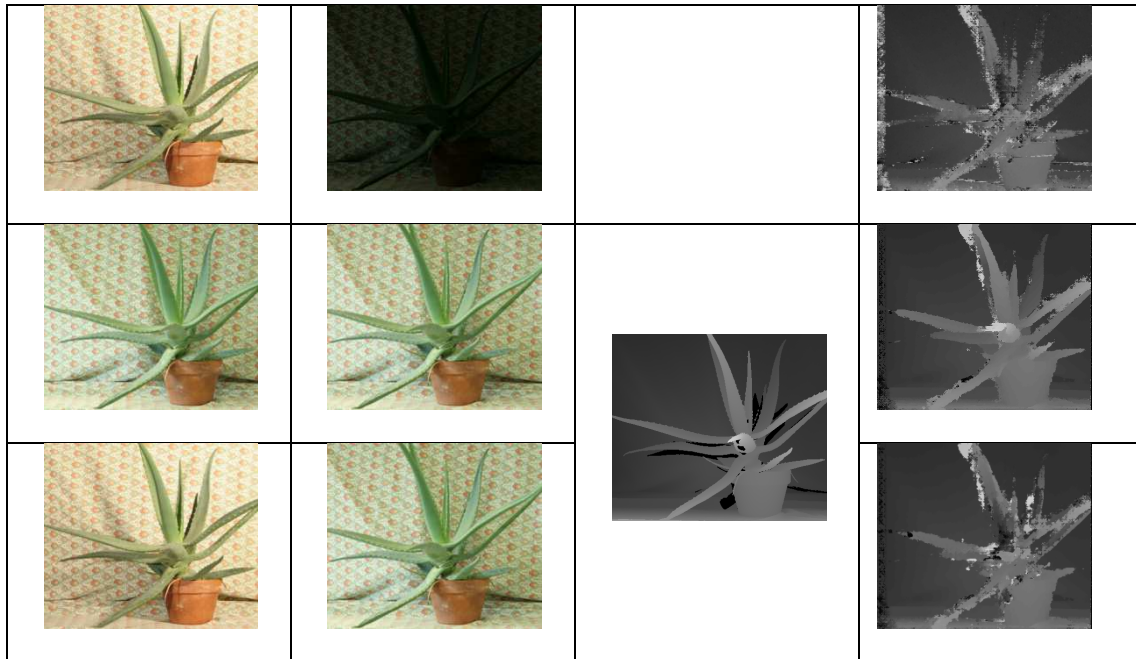
Εικόνα 5.14. Πρώτες δύο γραμμές, από αριστερά προς τα δεξιά: Εικόνες στερεοζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και χάρτες παράλλαξης για την καλύτερη (2-2) και χειρότερη (2-0) περίπτωση έκθεσης με την μέθοδο συνταύτισης AD. Επόμενες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (2-2) και χειρότερη (0-2) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης xSobel+AD. Τελευταίες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (2-2) και χειρότερη (0-0) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης Census. Σκηνή *Midd1*.

Όπως άλλωστε διαπιστώθηκε και από τα αριθμητικά αποτελέσματα, η συνταύτιση με Απόλυτες Διαφορές παράγει σε περιπτώσεις με εικόνες διαφορετικής έκθεσης χάρτες παράλλαξης με πολλά σφάλματα. Εφόσον έχει προηγηθεί φιλτράρισμα των εικόνων με φίλτρο Sobel κατά x, αυτά τα σφάλματα μετριάζονται αλλά αυξάνεται το σφάλμα στους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από ζεύγη εικόνων με ίδια έκθεση (λόγω του θορύβου που υπεισέρχεται). Τέλος, η μέθοδος συνταύτισης βάσει Μετασχηματισμού Census παράγει σχεδόν ισάξιους χάρτες παράλλαξης για όλες τις περιπτώσεις έκθεσης.

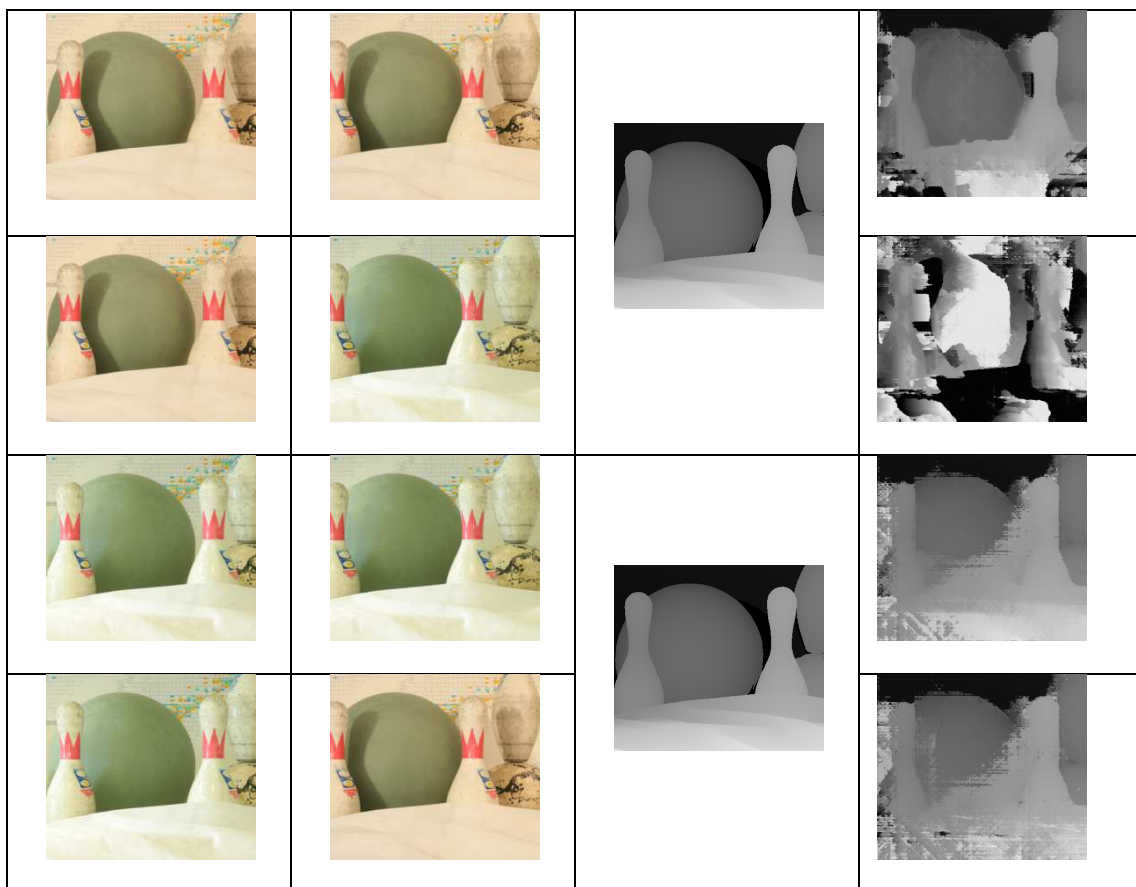
5. 4.2 Αποτελέσματα για εικόνες με διαφορετικό φωτισμό

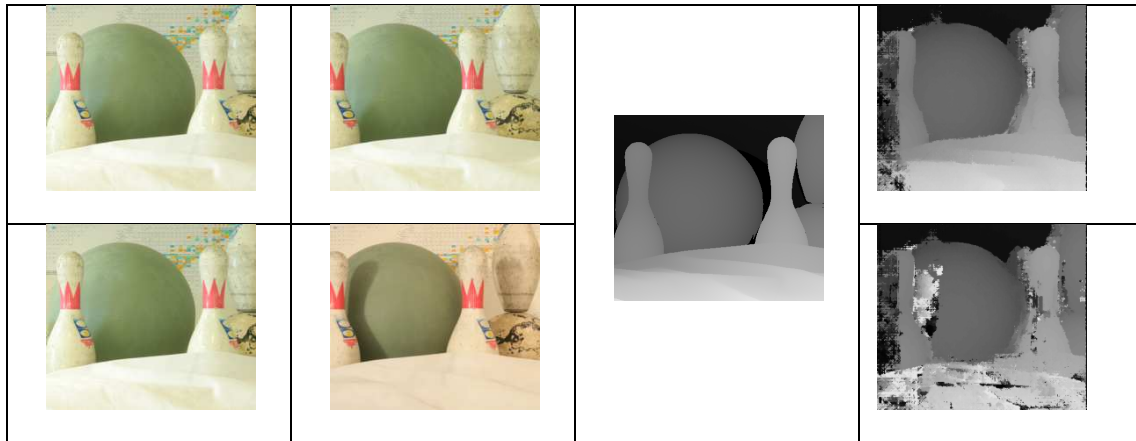
Ενδεικτικά παρατίθενται οι χάρτες παράλλαξης που αντιστοιχούν στις περιπτώσεις με το μικρότερο και το μεγαλύτερο σφάλμα, για τη μέθοδο συνταύτισης Απόλυτες Διαφορές, φίλτρο Sobel + Απόλυτες Διαφορές και Μετασχηματισμός Census, για τις σκηνές *Aloe* (Εικ. 5.15), *Bowling1* (Εικ. 5.16), *Midd1* (Εικ. 5.17).



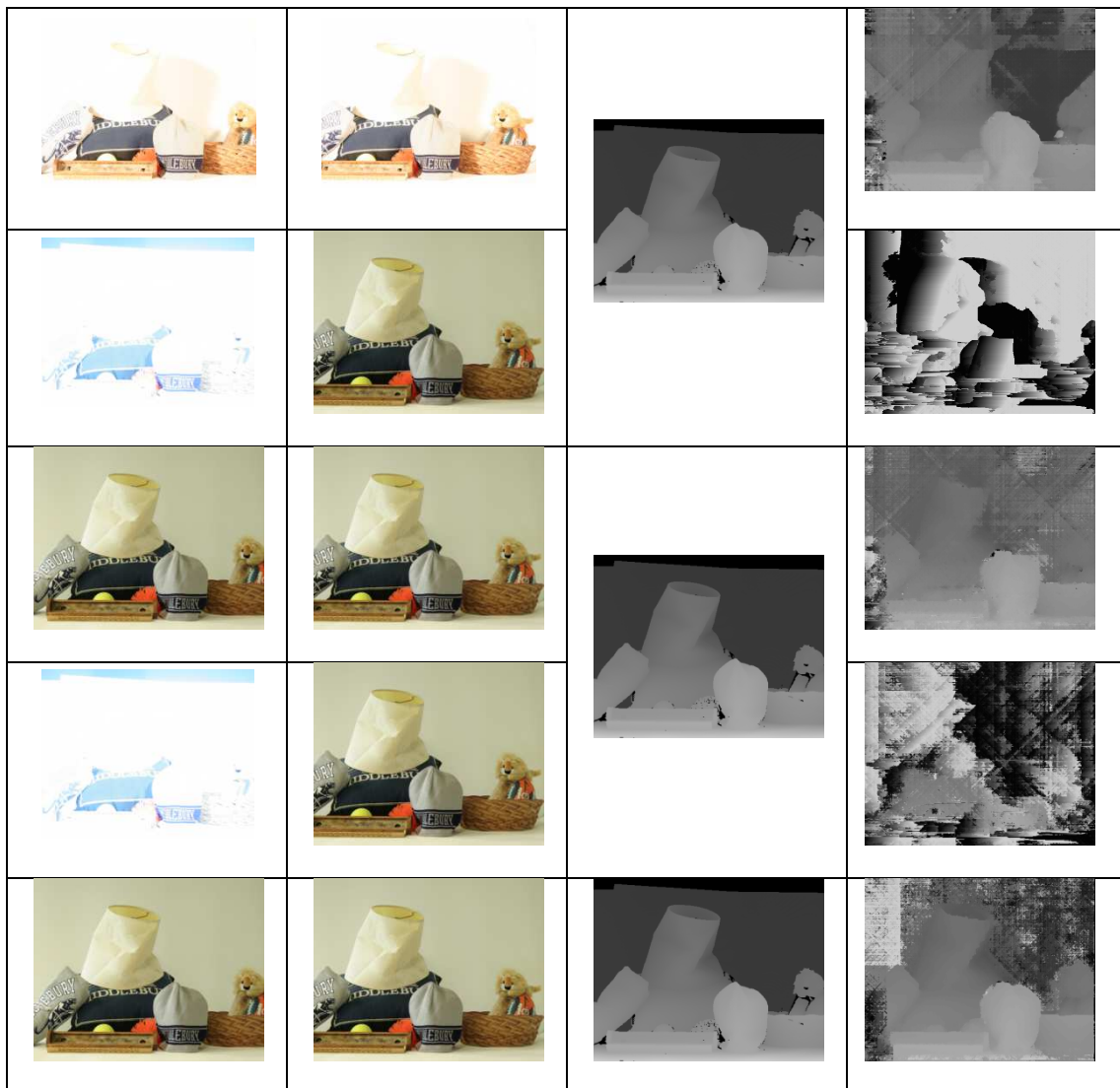


Εικόνα 5.15. Πρώτες δύο γραμμές, από αριστερά προς τα δεξιά: Εικόνες στερεοζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και χάρτες παράλλαξης για την καλύτερη (2-2) και χειρότερη (1-3) περίπτωση φωτισμού με την μέθοδο συνταύτισης AD. Επόμενες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (3-3) και χειρότερη (3-1) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης xSobel+AD. Τελευταίες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (1-1) και χειρότερη (3-1) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης Census. Σκηνή Aloe.





Εικόνα 5.16. Πρώτες δύο γραμμές, από αριστερά προς τα δεξιά: Εικόνες στερεοζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και χάρτες παράλλαξης για την καλύτερη (3-3) και χειρότερη (3-2) περίπτωση φωτισμού με την μέθοδο συνταύτισης AD. Επόμενες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (2-2) και χειρότερη (2-3) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης xSobel+AD. Τελευταίες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (2-2) και χειρότερη (2-3) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης Census. Σκηνή Bowling1.





Εικόνα 5.17. Πρώτες δύο γραμμές, από αριστερά προς τα δεξιά: Εικόνες στερεοζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και χάρτες παράλλαξης για την καλύτερη (2-2) και χειρότερη (3-1) περίπτωση φωτισμού με την μέθοδο συνταύτισης AD. Επόμενες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (1-1) και χειρότερη (3-1) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης xSobel+AD. Τελευταίες 2 γραμμές: αντίστοιχα για την καλύτερη (1-1) και χειρότερη (3-1) περίπτωση με την μέθοδο συνταύτισης Census. Σκηνή *Mid1*.

Όπως διαπιστώθηκε και από τα αριθμητικά αποτελέσματα, η συνταύτιση με Απόλυτες Διαφορές παράγει σε περιπτώσεις με εικόνες διαφορετικού φωτισμού χάρτες παράλλαξης με πολλά σφάλματα. Αν έχει προηγηθεί φιλτράρισμα των εικόνων με φίλτρο Sobel κατά x , τα σφάλματα μετριάζονται (και μάλιστα σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό απ' ό,τι στις εικόνες με διαφορετική έκθεση), αλλά αυξάνεται ελαφρώς το σφάλμα στους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από ζεύγη εικόνων με ίδιο φωτισμό (λόγω του θορύβου που υπεισέρχεται). Τέλος, η μέθοδος συνταύτισης Μετασχηματισμός Census παράγει χάρτες παράλλαξης με τα μικρότερα σφάλματα για όλες τις περιπτώσεις φωτισμού.

5.5 Σχετικές Αξιολογήσεις στην Βιβλιογραφία

Οι Hirschmüller & Scharstein (2009) αξιολόγησαν την απόδοση διάφορων μεθόδων υπολογισμού του κόστους συνταύτισης, σε συνδυασμό με διάφορους αλγόριθμους συνταύτισης, σε τρεις κατηγορίες εικόνων από την ιστοσελίδα του Middlebury: χωρίς, με προσομοιωμένες και με πραγματικές ραδιομετρικές διαφορές. Οι ομάδες εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν είναι η “2003 datasets” και η “2005 datasets”.

Για τις εικόνες χωρίς ραδιομετρικές αλλαγές, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι μέθοδοι BilSub (Ansar et al., 2004) και Census είναι οι καλύτερες, σε συνδυασμό με την εφαρμογή τους με οποιονδήποτε αλγόριθμο συνταύτισης, δηλαδή τοπικό (Window: με παράθυρο), υποσύνολο (Semi-Global Matching) ή σύνολο (global – Graph Cuts). Επίσης, η Ιεραρχική Αμοιβαία Πληροφορία (HMI) αποδίδει εξίσου καλά για τον υποσύνολο αλγόριθμο και είναι η καλύτερη για τον σύνολο αλγόριθμο σε μερικά σετ εικόνων.

Διακρίνονται 4 είδη τεχνητών ραδιομετρικών αλλαγών που προστίθενται στις αρχικές εικόνες. Οι δύο πρώτες αλλαγές αφορούν την συνολική φωτεινότητα της δεξιάς εικόνας, η οποία αλλάζει γραμμικά ή μη γραμμικά, ενώ η αριστερή εικόνα παραμένει αμετάβλητη. Η επόμενη αφορά την εφαρμογή στις δύο εικόνες τοπικής αλλαγής φωτεινότητας, η οποία προσομοιάζει το “βινιετάρισμα” (η φωτεινότητα μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο της εικόνας). Τέλος, προστίθενται στις

δύο εικόνες Γκαουσιανός θόρυβος. Αποδεικνύεται ότι η μέθοδος Census είναι η πιο στιβαρή (δηλαδή έχει σταθερή απόδοση) και σε πολλές περιπτώσεις η καλύτερη. Η μέθοδος BilSub αποδίδει αρκετά καλά, εκτός από τις περιπτώσεις όπου η αλλαγή στη φωτεινότητα είναι μεγάλη, είναι μη γραμμική ή ο θόρυβος που προστίθεται είναι έντονος. Η HMI αποδίδει ισάξια ή ελαφρώς καλύτερα για τον υποσύνολο και τον σύνολο αλγόριθμο, ενώ αρκετά χειρότερα για τον τοπικό αλγόριθμο. Είναι πιο σταθερή σε περίπτωση ύπαρξης θορύβου αλλά κατώτερη όταν υπάρχουν τοπικές ραδιομετρικές διαφορές όπως βινιετάρισμα, επειδή υπολογίζει το κόστος με παραδοχές για το σύνολο της εικόνας.

Οι πραγματικές ραδιομετρικές αλλαγές στις εικόνες αφορούν 3 είδη φωτισμού και 3 είδη έκθεσης, και υπολογίστηκαν τα σφάλματα των χαρτών παράλλαξης που προκύπτουν από εικόνες με διαφορετικό φωτισμό ή έκθεση. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι παρόμοια με εκείνα από τις τεχνητές ραδιομετρικές αλλαγές. Ο μετασχηματισμός Census έχει την καλύτερη απόδοση για όλους τους αλγόριθμους συνταύτισης. Η μέθοδος BilSub είναι η αμέσως καλύτερη, ενώ παρουσιάζει προβλήματα μόνο όταν οι αλλαγές είναι μεγάλες. Η μέθοδος HMI αποδίδει χειρότερα για τις εικόνες με διαφορετικό φωτισμό, ο οποίος προκαλεί τοπικές ραδιομετρικές μεταβολές τις οποίες αυτή δεν μπορεί να αντιμετωπίσει.

Τέλος, οι Hermann et al. (2010) διερεύνησαν την απόδοση 4 συναρτήσεων κόστους σε εικόνες με ραδιομετρικές διαφορές. Πρόκειται για τις συναρτήσεις Census, κλίσης (gradient), SAD (Άθροισμα των Απόλυτων Διαφορών σε παράθυρο 3×3), RSAD (η μέθοδος SAD εφαρμοσμένη σε “εναπομένουσες” εικόνες, δηλαδή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εικόνες διαφορών που αποτελούν την συνιστώσα της υψής της εικόνας και προκύπτουν με αφαίρεση της εξομαλυμένης με φίλτρο μέσου όρου εικόνας από την αρχική). Για τη συσσωμάτωση του κόστους χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος SGM και δεν έπεται καμία μέθοδος βελτίωσης του αποτελέσματος.

Η εφαρμογή γίνεται σε ζεύγη εικόνων της ιστοσελίδας Middlebury (“2005 datasets”) με διαφορετικό φωτισμό ή έκθεση και σε τριάδες εικόνων της διαδικτυακής πλατφόρμας “.enpeda..” (www.mi.auckland.ac.nz/EISATS), με μικρές (“driving straight sequence”) ή πιο μεγάλες (“bird sequence”) αλλαγές στη φωτεινότητα. Οι συναρτήσεις Census, κλίσης και RSAD αποδίδουν πολύ καλά στις ραδιομετρικές αλλαγές (οι δύο τελευταίες είναι σχεδόν ισοδύναμες με το Census αν οι διαφορές φωτεινότητας είναι μικρές ή δεν υπάρχουν διαφορές στην έκθεση), ενώ η συνάρτηση SAD έχει υποδεέστερη απόδοση, όπως είναι φυσικό, αφού προϋποθέτει σταθερές τιμές έντασης για τις ομόλογες εικονοψηφίδες.

Στην ίδια δημοσίευση μελετήθηκε και η σχέση μεταξύ αρχικής εικόνας εντάσεων και των εικόνων που προκύπτουν από τους μετασχηματισμούς Census, κλίσης και “εναπομενουσών” εικόνων. Οι τρεις μετασχηματισμοί αντιπροσωπεύουν τις σχετικές αλλαγές έντασης στην εικόνα, με τους δύο τελευταίους να κρατούν πληροφορία και

για το μέγεθος των εντάσεων. Αυτό το στοιχείο διαφοροποιεί τις μεθόδους συνταύτισης κλίσης και RSAD, κάνοντάς τες να επηρεάζονται περισσότερο από τον θόρυβο από όσο ο μετασχηματισμός Census.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ SGM ΑΠΟ ΤΗΝ OPENCV

Στο παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιείται μια παραλλαγή του αλγορίθμου SGM, η οποία προσφέρεται από την βιβλιοθήκη OpenCV. Αρχικά δίνονται πληροφορίες για την OpenCV όσο και για την ίδια την παραλλαγή και τις παραμέτρους της. Στη συνέχεια γίνεται βελτιστοποίηση των δύο κύριων παραμέτρων της και εφαρμογή του αλγορίθμου σε εικόνες με διαφορετική έκθεση και φωτισμό, όπως δηλαδή πραγματοποιήθηκε και με τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στο Matlab και τα αποτελέσματα του οποίου αναλύθηκαν στα Κεφάλαια 4 και 5. Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο αλγορίθμων.

6.1 Σχετικά με την OpenCV

Η OpenCV (Open Source Computer Vision Library) είναι μια βιβλιοθήκη ανοικτού κώδικα που διαθέτει πάνω από 2.500 αλγορίθμους, οι οποίοι αφορούν την όραση υπολογιστών και την υπολογιστική μάθηση (machine learning) [βλ. σχετικά και <https://www.ceemple.com/opencv-c-ide/>], μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνεται και ο αλγόριθμος SGM. Η διεπαφή της (interface) μπορεί να είναι σε μια από τις εξής γλώσσες προγραμματισμού: C, C++, Python ή Java, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με λειτουργικό σύστημα Windows, Linux, Mac OS, iOS ή Android. Διανέμεται υπό την άδεια BSD (Berkeley Software Distribution), οπότε είναι ελεύθερη τόσο για ακαδημαϊκή όσο και για εμπορική χρήση. Η OpenCV σχεδιάστηκε για να προσφέρει μεγαλύτερη υπολογιστική αποτελεσματικότητα και να διευκολύνει την ανάπτυξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου (<http://opencv.org/>).

Εδώ έγινε χρήση της βιβλιοθήκης της OpenCV μέσω της γλώσσας προγραμματισμού C++. Το περιβάλλον ανάπτυξης των προγραμμάτων σε C++ επιλέχθηκε να είναι το Microsoft Visual Studio 2013 (<https://www.visualstudio.com/downloads/download-visual-studio-vs>), το οποίο αποτελεί μια ομάδα από “ολοκληρωμένα περιβάλλοντα ανάπτυξης”, όπως έχει αποδοθεί ο όρος Interactive Development Environment – IDE (Βερυκόκου, 2013). Ακόμη, έγινε χρήση του Ceemple OpenCV IDE στο Visual Studio, με την προσθήκη του οποίου δεν χρειάζεται εγκατάσταση της OpenCV αλλά μπορεί αυτή να χρησιμοποιηθεί άμεσα. Σημειώνεται ότι περιλαμβάνει την πιο πρόσφατη έκδοση της OpenCV, την v3.0 (<https://www.ceemple.com/ceemple-opencv-visual-studio/>).

Η βιβλιοθήκη της OpenCV χρησιμοποιήθηκε στην εργασία επειδή περιλαμβάνει μια παραλλαγή του αλγορίθμου SGM, με όνομα Stereo Semi-Global Block Matching (StereoSGBM). Θεωρήθηκε χρήσιμο, στο πλαίσιο της εμβάθυνσης στον αλγόριθμο SGM, να μελετηθεί μια παραλλαγή του που έχει αναπτυχθεί από άλλους προγραμματιστές και χρησιμοποιείται ευρέως χάρη στην παρεχόμενη ευκολία πρόσβασης. Ακόμη, με αυτό τον τρόπο δίνεται η ευκαιρία να συγκριθούν τα αποτελέσματα του

αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας με τα αντίστοιχα ενός αναγνωρισμένου αλγορίθμου.

Ως πλεονεκτήματα της OpenCV μπορούν να αναγνωριστούν η μεγάλη ταχύτητα που επιδεικνύει κατά την εκτέλεση των προγραμμάτων και οι μικρές απαιτήσεις που θέτει στον χρήστη όσον αφορά τις προγραμματιστικές του γνώσεις ή την γνώση του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί. Ακόμη, εκτός από τον κύριο αλγόριθμο που οδηγεί στη δημιουργία ενός πυκνού χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, διαθέτει πλήθος μεθόδων προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας. Ως μειονεκτήματα μπορούν να θεωρηθούν η “ανασφάλεια” που προκύπτει από το γεγονός ότι δεν είναι γνωστά τα ακριβή βήματα υλοποίησης του αλγορίθμου και η μελέτη που πρέπει να προηγηθεί της εκτέλεσής του για την ορθή επιλογή των παραμέτρων του, οι οποίες φυσικά επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

6.2 Κλάση Stereo Semi-Global Block Matching (StereoSGBM)

Η OpenCV (http://docs.opencv.org/3.0.0/d2/d85/classcv_1_1StereoSGBM.html) περιλαμβάνει την κλάση StereoSGBM (συνοπτικά εδώ SGBM), η οποία εφαρμόζει τον αρχικό αλγόριθμο του Hirschmüller (2005, 2006, 2008) με ορισμένες διαφορές. Κατ’ αρχάς ο αλγόριθμος συσσωματώνει τα κόστη από 5 κατευθύνσεις αντί 8. Επιπλέον, μπορεί να κάνει συνταύτιση υπολογίζοντας τα κόστη με τη χρήση παραθύρων και όχι για κάθε εικονοψηφίδα ξεχωριστά. Αυτές οι επιλογές μπορούν να αλλάξουν από τον χρήστη ώστε ο αλγόριθμος να εφαρμόζεται κατά τον αρχικό τρόπο. Μια ακόμα διαφορά εντοπίζεται στη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αρχικού κόστους, και η οποία δεν μπορεί να αλλάξει. Ενώ ο Hirschmüller είχε προτείνει την χρήση της Ιεραρχικής Αμοιβαίας Πληροφορίας, εδώ χρησιμοποιείται ένα απλούστερο μέτρο ομοιότητας, εκείνο των Birchfield & Tomasi (BT), το οποίο καταλήγει σε υποψηφιακή εύρεση της βέλτιστης παράλλαξης. Ακόμη, στην κλάση συμπεριλαμβάνονται βήματα προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας.

Η εφαρμογή της κλάσης στην πλήρη της μορφή εμπλέκει 11 παραμέτρους. Οι πρώτες δύο, *minDisparity* και *numDisparities*, αφορούν το εύρος της παράλλαξης μέσα στο οποίο θα αναζητηθεί το σημείο της εικόνας αντιστοίχισης που παρουσιάζει μέγιστη ομοιότητα με το σημείο της εικόνας αναφοράς. Η παράμετρος *minDisparity* αφορά την μικρότερη δυνατή τιμή παράλλαξης και συνήθως ορίζεται ως 0. Εξαιρέση μπορεί να γίνει στην περίπτωση επιτολικών ή κομμένων εικόνων, όπου θα πρέπει να προσαρμοστεί κατάλληλα. Αντίστοιχα, η παράμετρος *numDisparities* εκφράζει το εύρος της παράλλαξης που θα χρησιμοποιηθεί, δηλαδή ορίζεται ως η διαφορά της μικρότερης παράλλαξης από την μέγιστη, άρα η τιμή της είναι πάντοτε θετική. Η τιμή που παίρνει πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του 16.

Το αν ο αρχικός υπολογισμός του κόστους θα γίνει για κάθε εικονοψηφίδα ξεχωριστά ή για μπλοκ εικονοψηφίδων (παράθυρα) ορίζεται από το *blocksize*. Πρέπει να

είναι περιττός αριθμός, αφού χρησιμοποιούνται τετραγωνικά παράθυρα, και να είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 1 (στην περίπτωση των μεμονωμένων εικονοψηφίδων). Συνήθως, κυμαίνεται μεταξύ 3 και 11, δηλαδή δημιουργούνται παράθυρα 3×3 έως 11×11.

Για να καθοριστεί αν η συσσωμάτωση κόστους θα γίνει από 5 ή 8 κατευθύνσεις, χρησιμοποιείται η παράμετρος *mode*. Χωρίς τον ορισμό της, τρέχει ο αλγόριθμος με τις 5 κατευθύνσεις (MODE_SGBM), ενώ αν της δοθεί τιμή MODE_HH θα τρέξει ο αλγόριθμος με τις 8 κατευθύνσεις, ο οποίος καταναλώνει περισσότερη μνήμη (κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη αν οι εικόνες έχουν ιδιαίτερα μεγάλο μέγεθος).

Οι παράμετροι P_1 και P_2 καθορίζουν την ομαλότητα των παραλλάξεων στον παραγόμενο χάρτη. Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές τόσο πιο ομαλή είναι και η διαδοχή των παραλλάξεων. Η ποινή P_1 δίνεται όταν η απόλυτη διαφορά παραλλάξης μεταξύ γειτονικών εικονοψηφίδων είναι 1, η δε ποινή P_2 όταν οι παραλλάξεις δυο γειτονικών εικονοψηφίδων διαφέρουν πέραν του 1. Ο αλγόριθμος απαιτεί να ισχύει $P_2 > P_1$. Γενικώς προτείνονται ως ενδεικτικές – δηλαδή έχει παρατηρηθεί ότι έχουν καλή απόδοση σε διάφορα ζεύγη εικόνων – οι τιμές $P_1 = (8 \times \text{αριθμός καναλιών εικόνας} \times \text{μέγεθος παραθύρου κατά } x \times \text{μέγεθος παραθύρου κατά } y)$ και $P_2 = (32 \times \text{αριθμός καναλιών εικόνας} \times \text{μέγεθος παραθύρου κατά } x \times \text{μέγεθος παραθύρου κατά } y)$.

Η προεπεξεργασία των προς συνταύτιση εικόνων μπορεί να ελεγχθεί μέσω της παραμέτρου *preFilterCap*. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος υπολογίζει την κλίση κατά x για κάθε εικονοψηφίδα (οι εικόνες φιλτράρονται με φίλτρο Sobel κατά x) και η τιμή που προκύπτει αποκόπτεται ώστε να ανήκει στο διάστημα $[-preFilterCap, preFilterCap]$. Οι εικόνες που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του κόστους με την μέθοδο συνταύτισης Birchfield & Tomasi.

Ο χάρτης παραλλάξης που παράγεται μπορεί να υποστεί μετεπεξεργασία με τρεις μεθόδους. Μια πρώτη μέθοδο συνιστά ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας, όπου με την παράμετρο *disp12MaxDiff* ορίζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά παραλλάξης σε ομόλογα σημεία (τα οποία βρίσκονται στον χάρτη παραλλάξης που προκύπτει από την συνταύτιση της δεξιάς εικόνας με την αριστερή και στον αντίστοιχο χάρτη από τη συνταύτιση της αριστερής εικόνας με τη δεξιά), με μονάδα μέτρησης την ακέραια εικονοψηφίδα. Η τιμή της παραμέτρου τίθεται αρνητική αν δεν επιλέγεται να γίνει ο έλεγχος. Στη συνέχεια, μπορεί να διενεργηθεί έλεγχος εμπιστοσύνης, όπου με την παράμετρο *uniquenessRatio* ορίζεται η ποσοστιαία διαφορά που πρέπει να έχει το μικρότερο (δηλαδή το καλύτερο) υπολογισμένο κόστος από το αμέσως μεγαλύτερο ώστε να θεωρείται σωστή η ομολογία. Συνήθως χρησιμοποιείται τιμή εντός του εύρους 5-15%. Ακόμη, μπορεί να φιλτραρισθεί ο χάρτης παραλλάξης προκειμένου να αφαιρεθεί ο “κοκκώδης” θόρυβος (speckle). Με την παράμετρο *speckleWindowSize* ορίζεται το μέγιστο μέγεθος που μπορούν να έχουν περιοχές με ομαλή παραλλάξη ώστε να αφαιρεθεί ο θόρυβος που τυχόν έχουν. Οι τιμές που

χρησιμοποιούνται συνήθως ανήκουν στο εύρος 50-200. Αν το φιλτράρισμα δεν είναι επιθυμητό, χρησιμοποιείται η τιμή 0. Η παράμετρος *spreckleRange* καθορίζει τη μέγιστη διαφορά παράλλαξης που μπορεί να εμφανίζεται σε μια περιοχή με ομαλή παράλλαξη. Οι τιμές που παίρνει πρέπει να είναι θετικές και συνηθέστερα είναι 1-2, οι οποίες στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται με το 16. Αν δεν πραγματοποιείται φιλτράρισμα, η τιμή της παραμέτρου πρέπει να είναι αρνητική.

6.3 Βελτιστοποίηση Παραμέτρων P_1 , P_2 για την Συλλογή ‘2006 datasets’

Οι τιμές των παραμέτρων P_1 και P_2 παίζουν καίριο ρόλο για την ποιότητα των παραγόμενων χαρτών παράλλαξης και γι’ αυτό αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίησή τους. Αναλύεται η σχετική μεθοδολογία και παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα, οι γραφικές παραστάσεις και ποιοτικά αποτελέσματα.

6.3.1 Μεθοδολογία

Χρησιμοποιήθηκαν και εδώ, όπως και στο Κεφάλαιο 4, τα ίδια (“third-size”) 21 ζεύγη επιπολικών εικόνων της συλλογής “2006 datasets”.

Επιλέχθηκε να εξεταστούν οι τιμές 5 έως 100 με βήμα 5 για την παράμετρο P_1 και οι τιμές 50 έως 500 με βήμα 50 για την παράμετρο P_2 . Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων διατηρήθηκαν σταθερές, εκτός από όσες αλλάζουν για κάθε ζεύγος εικόνων, και τέτοιες ώστε να προκύπτει συγκρίσιμο αποτέλεσμα με εκείνο της βελτιστοποίησης με τον κώδικα που αναπτύχθηκε στο Matlab (Κεφάλαιο 4). Συγκεκριμένα, επιλέγεται να τρέξει ο πλήρης αλγόριθμος (δηλαδή η παράμετρος *mode* παίρνει την τιμή *MODE_HH*). Η μικρότερη παράλλαξη (*minDisparity*) ορίζεται να είναι 1. Το εύρος της παράλλαξης (*numDisparities*) υπολογίστηκε με αφαίρεση της μικρότερης από την μέγιστη παράλλαξη. Η τελευταία υπολογίζεται με αναζήτηση στον αληθή χάρτη παράλλαξης της μεγαλύτερης τιμής. Επειδή εδώ χρησιμοποιούνται οι εικόνες μικρότερου μεγέθους κατά 3 (“third-size”), πρέπει φυσικά και οι παραλλάξεις που λαμβάνονται από τον αληθή χάρτη να υποτριπλασιαστούν. Ο αλγόριθμος SGBM θέτει ως περιορισμό για την τιμή του εύρους παράλλαξης την διαιρετότητά του με το 16. Στις περιπτώσεις όπου η μέγιστη παράλλαξη που είχε υπολογιστεί δεν είναι πολλαπλάσιο του 16, στρογγυλοποιείται στο αμέσως μεγαλύτερο πολλαπλάσιο του 16 ώστε να μην χαθεί καμιά υπαρκτή τιμή παράλλαξης. Ως μέγεθος παραθύρου (*blocksize*) επιλέγεται το 1×1 , δηλαδή η μια εικονοψηφίδα.

Δεν έγιναν διαδικασίες προεπεξεργασίας των εικόνων ή μετεπεξεργασίας των παραγόμενων χαρτών παράλλαξης, όπως άλλωστε και στο Κεφάλαιο 4, προκειμένου να αξιολογηθεί το καθαρό αποτέλεσμα που προκύπτει από τον αλγόριθμο SGM (με την αντίστοιχη κάθε φορά μέθοδο αρχικού υπολογισμού του κόστους). Εξαίρεση αποτελεί το φιλτράρισμα Sobel, το οποίο πραγματοποιήθηκε αφού κρίθηκε απαραίτητο λόγω της κατοπινής εφαρμογής του αλγορίθμου SGM σε εικόνες με διαφορετική έκθεση και φωτισμό (οπότε εδώ η βελτιστοποίηση έγινε στις φιλτραρισμένες ει-

κόνες). Η παράμετρος *preFilterCap* παίρνει την τιμή 255, δηλαδή οι τιμές μετά από το φιλτράρισμα ανάγονται στο διάστημα $[-255, 255]$. Για να μην γίνει έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας, η μέγιστη δυνατή διαφορά έντασης (ή παράλλαξης, επειδή πρόκειται για χάρτη παράλλαξης) δυο ομόλογων σημείων (*disp12MaxDiff*) ορίζεται ίση με την μέγιστη παράλλαξη. Ο έλεγχος εμπιστοσύνης μπορεί να απενεργοποιηθεί αν ως ποσοστό κατά το οποίο μπορεί να διαφέρει το μικρότερο κόστος από το αμέσως μεγαλύτερο (*uniquenessRatio*) τεθεί το 0. Τέλος, για να μην γίνει φιλτράρισμα των χαρτών παράλλαξης, οι παράμετροι *speckleWindowSize* και *speckleRange* παίρνουν τις τιμές 0 και -1, αντίστοιχα.

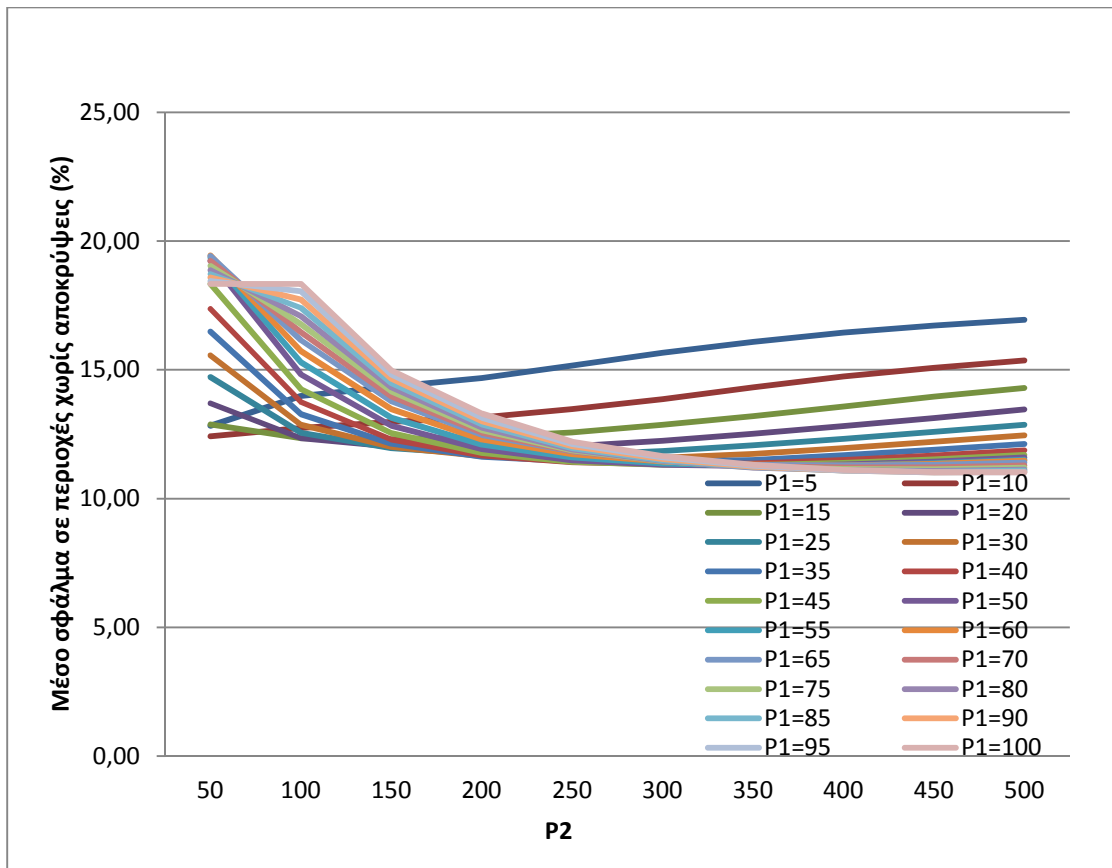
Από την διαδικασία της βελτιστοποίησης προκύπτει για κάθε ομάδα παραμέτρων και κάθε ζεύγος εικόνων ένας χάρτης ψηφιακής παράλλαξης. Στη συνέχεια κάθε χάρτης παράλλαξης συγκρίνεται με τον αληθή χάρτη παράλλαξης και προκύπτει το σφάλμα, τόσο για ολόκληρη την εικόνα όσο και μόνο για τις περιοχές δίχως αποκρύψεις.

Ως σφάλμα ορίζεται το ποσοστό των εικονοψηφίδων με υπολογισθείσα παράλλαξη που διαφέρει περισσότερο του 1 από την παράλλαξη στον αληθή χάρτη. Το τελικό σφάλμα που λαμβάνεται υπόψη για την αξιολόγηση των συναρτήσεων και της απόδοσής τους σε κάθε περίπτωση είναι το ελάχιστο του μέσου σφάλματος των 21 ζευγών εικόνων για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις.

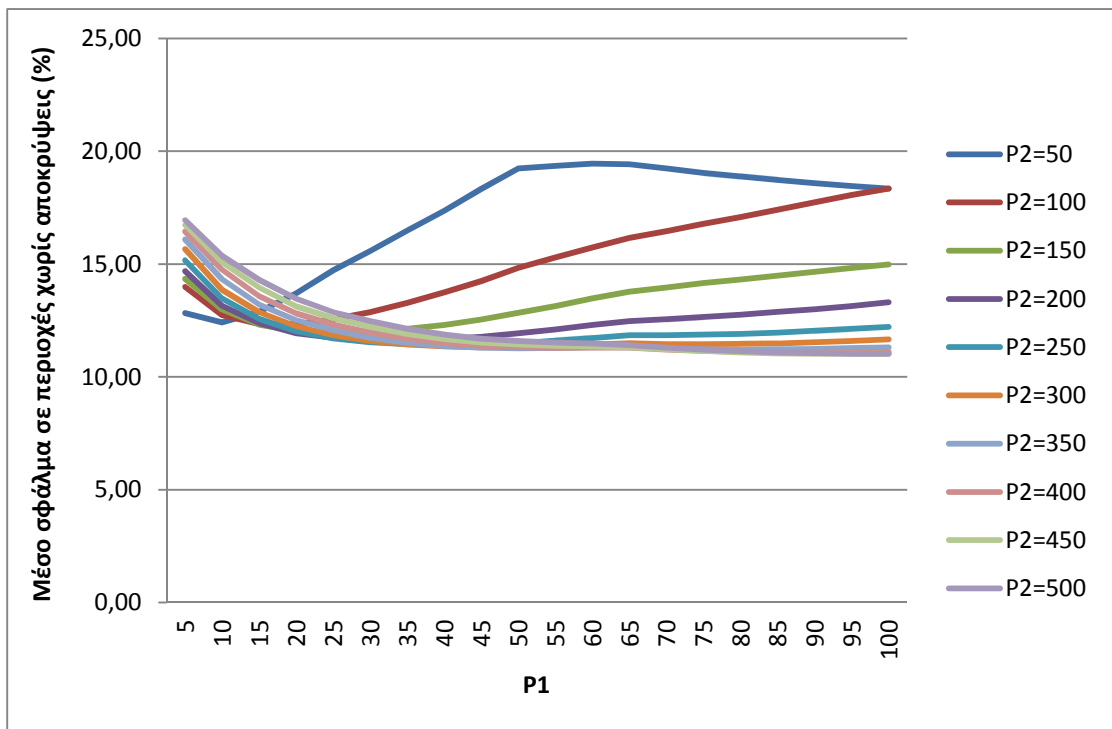
6. 3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

Το μικρότερο σφάλμα προκύπτει για τις παραμέτρους $P_1 = 90$ και $P_2 = 450$, και είναι ίσο με 11.0%.

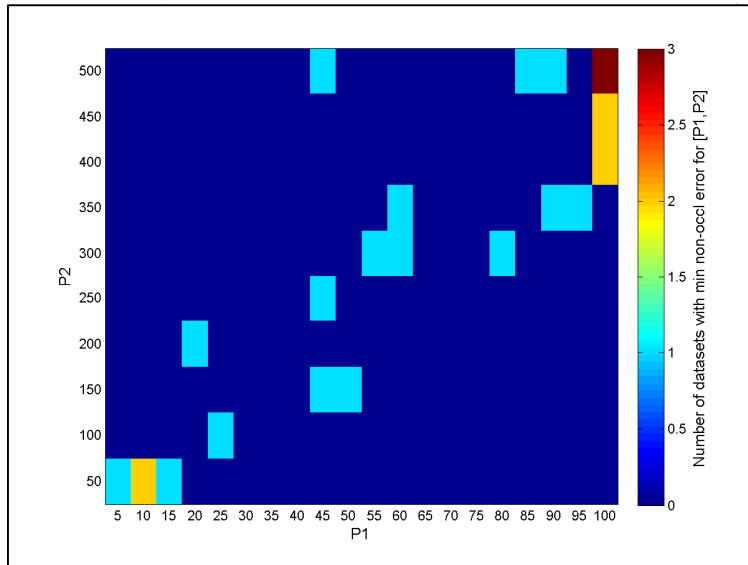
Εκτενέστερα συμπεράσματα για την απόδοση αυτής της μεθόδου μπορούν να εξαχθούν μέσω γραφικών παραστάσεων. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν πέντε γραφικές παραστάσεις (Εικ. 6.1 – 6.5), όπως και στο Κεφάλαιο 4. Στο πρώτο διάγραμμα απεικονίζεται η συμπεριφορά κάθε τιμής της ποινής P_1 για όλες τις τιμές της ποινής P_2 , ενώ στο δεύτερο διάγραμμα το αντίστροφο. Στην τρίτη εικόνα απεικονίζεται χρωματικά ο αριθμός των ζευγών εικόνων που εμφανίζουν ελάχιστο για κάθε συνδυασμό ποινών $[P_1, P_2]$. Στην τέταρτη γραφική παράσταση παρουσιάζεται για κάθε ζεύγος εικόνων η απόκλιση του σφάλματός του συγκριτικά με το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις παραμέτρους με τις οποίες αυτό επιτυγχάνεται. Στην τελευταία γραφική παράσταση συγκρίνεται για κάθε ζεύγος εικόνων το μικρότερο σφάλμα του με εκείνο που προκύπτει από τις παραμέτρους που δίνουν το ελάχιστο μέσο σφάλμα.



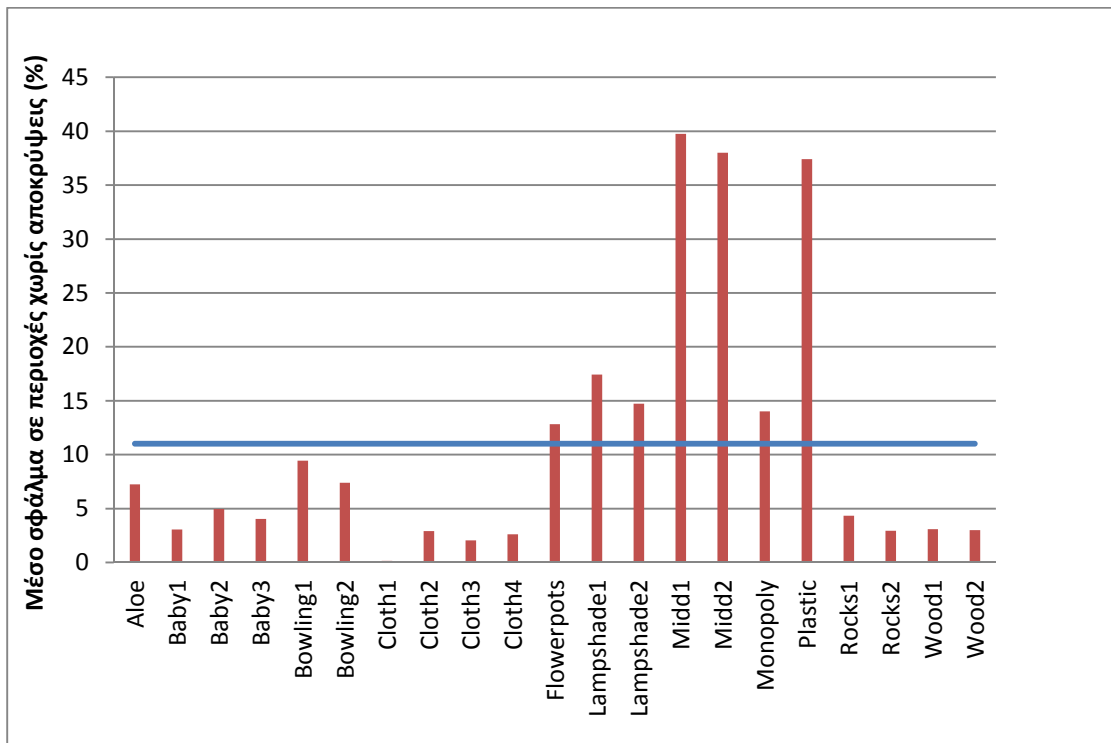
Εικόνα 6.1. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_2 , για τις διάφορες τιμές της P_1 .



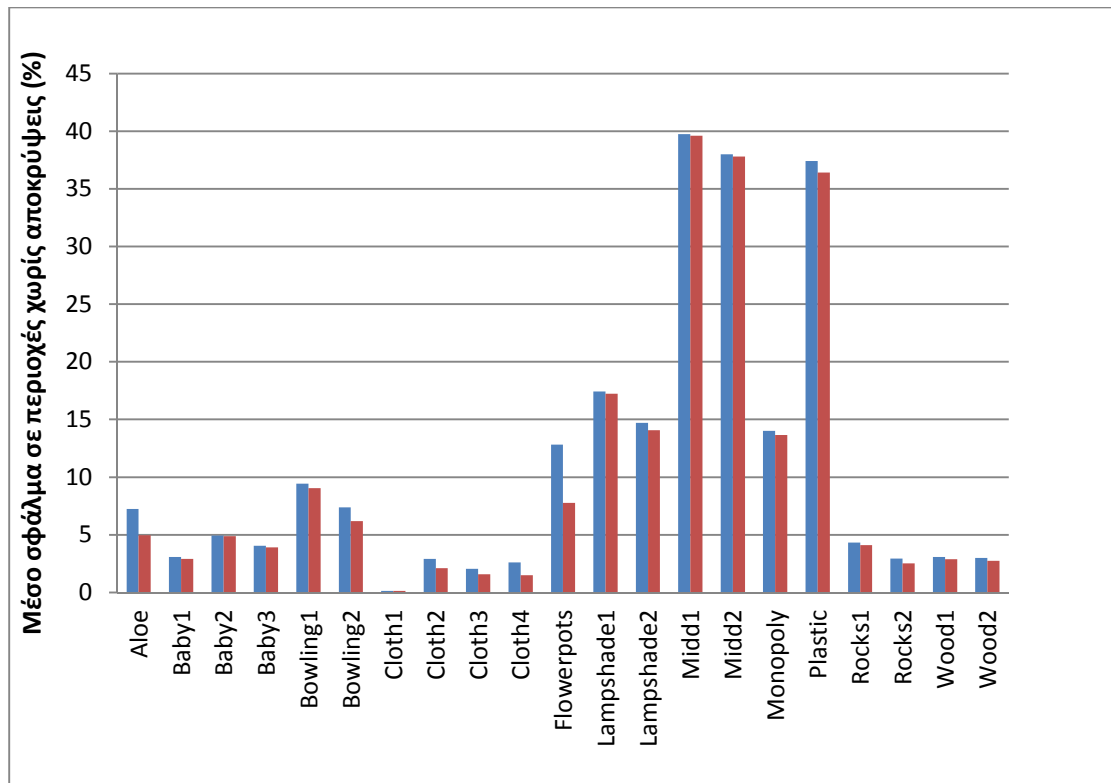
Εικόνα 6.2. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις συναρτήσει των τιμών της ποινής P_1 , για τις διάφορες τιμές της P_2 .



Εικόνα 6.3. Αριθμός των ζευγών εικόνων που εμφανίζουν ελάχιστο για κάθε συνδυασμό παραμέτρων $[P_1, P_2]$.



Εικόνα 6.4. Με μπλε χρώμα: Μικρότερο μέσο σφάλμα (για $P_1 = 90, P_2 = 450$). Με κόκκινο χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 90, P_2 = 450$).



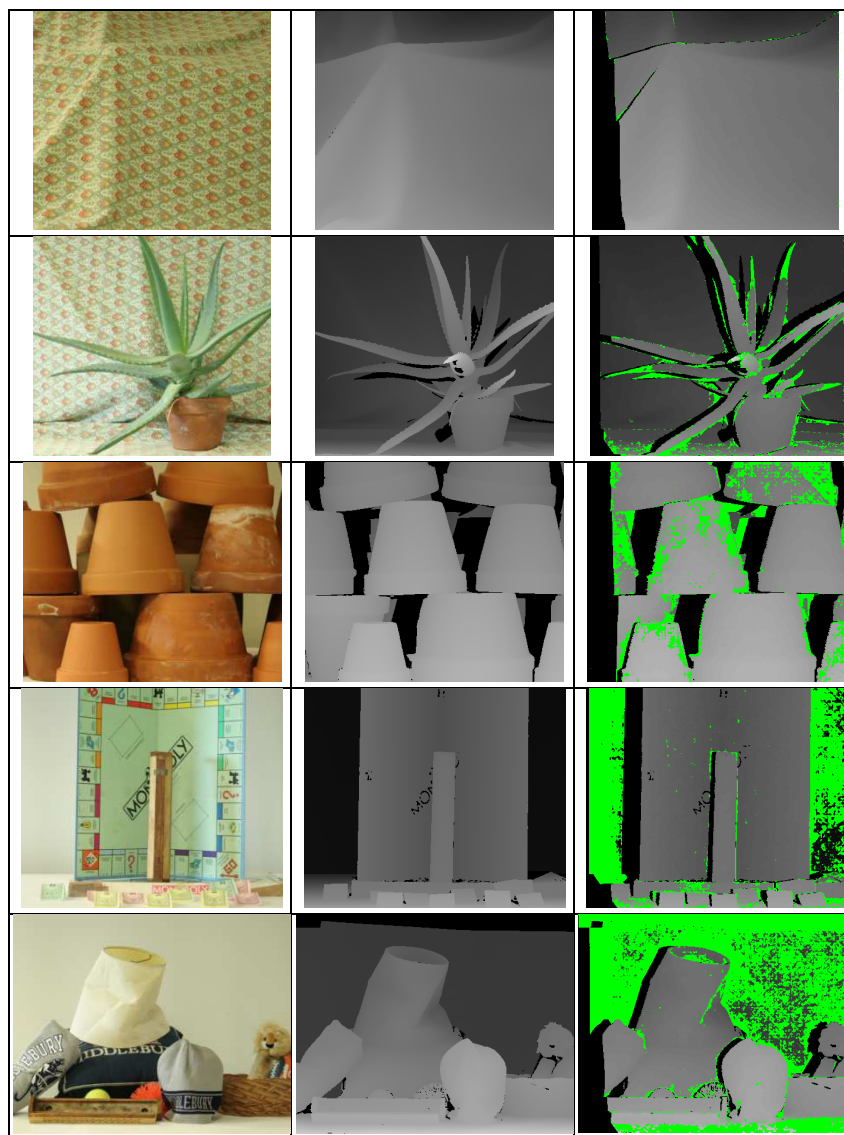
Εικόνα 6.5. Με μπλε χρώμα: Σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων για τις βέλτιστες παραμέτρους ($P_1 = 90$, $P_2 = 450$). Με κόκκινο χρώμα: Ελάχιστο σφάλμα κάθε ζεύγους εικόνων.

Για τις μικρότερες τιμές της ποινής P_2 τα μεγαλύτερα σφάλματα προκύπτουν για τις μεγαλύτερες τιμές της ποινής P_1 . Αυτή η κατάσταση αντιστρέφεται πλήρως μετά από την τιμή $P_2 = 350$. Τα σφάλματα από αυτή την τιμή και μετά διαφέρουν ελάχιστα για τις τιμές του P_1 από 45 έως 100 και παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά, με το μικρότερο σφάλμα να παρουσιάζεται για $P_1 = 90$. Οι μικρότερες τιμές της ποινής P_1 (5 και 10) παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά από τις υπόλοιπες (Εικ. 6.1). Αντίστοιχη είναι η συμπεριφορά των τιμών της παραμέτρου P_2 για όλες τις τιμές της P_1 , δηλαδή για τις μικρότερες τιμές της ποινής P_1 τα μεγαλύτερα σφάλματα προκύπτουν για τις μεγαλύτερες τιμές της ποινής P_2 , γεγονός που αντιστρέφεται μετά από την τιμή $P_1 = 65$. Τα σφάλματα από αυτή την τιμή και μετά διαφέρουν ελάχιστα για τις τιμές του P_2 από 300 έως 500 και παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά, με το μικρότερο σφάλμα να επιτυγχάνεται για $P_2 = 450$. Η μικρότερη τιμή της ποινής P_2 ($P_2 = 50$) παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από τις υπόλοιπες (Εικ. 6.2). Δεν υπάρχει κάποιος συνδυασμός παραμέτρων $[P_1, P_2]$ στον οποίο να παρουσιάζουν ελάχιστο πολλά ζεύγη εικόνων. Τρία ζεύγη εικόνων παρουσιάζουν ελάχιστο για $[P_1, P_2] = [100, 500]$ (δηλαδή σε τιμές κοντινές στις βέλτιστες) και δυο ζεύγη εμφανίζουν ελάχιστο για τους συνδυασμούς $[P_1, P_2] = [100, 400]$, $[100, 450]$ και $[10, 50]$ (Εικ. 6.3). Ακόμη, 3 από τα 21 ζεύγη εικόνων (*Midd1*, *Midd2* και *Plastic*) έχουν ατομικό σφάλμα μεγαλύτερο από 20% από το ελάχιστο μέσο σφάλμα για τις ίδιες παραμέτρους (Εικ. 6.4). Ένα ζεύγος εικόνων (*Flowerpots*) εμφανίζει σχετικά μεγάλη διαφορά (περί το 10%) μεταξύ του μικρότερου σφάλματός του και εκείνου που πα-

ρουσιάζει για τις παραμέτρους του ελάχιστου μέσου σφάλματος (Εικ. 6.5).

6. 3.3 Ποιοτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι εικόνες διαφορών χωρίς τις περιοχές αποκρύψεων (Εικ. 6.6) που αντιστοιχούν σε 5 ζεύγη εικόνων, αντιπροσωπευτικά ως προς το μέγεθος των σφαλμάτων που απαντώνται κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων. Παρατηρείται ότι τα σφάλματα της συνταύτισης εμφανίζονται σε όρια αντικειμένων ή περιοχές με χαμηλή υφή, όπως τοίχοι.



Εικόνα 6.6. Σε κάθε σειρά: Αριστερή εικόνα ζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και εικόνα διαφορών για τις βέλτιστες παραμέτρους (ποινές: $P_1 = 90$, $P_2 = 450$). Από πάνω προς τα κάτω: ζεύγη εικόνων *Cloth1*, *Aloe*, *Flowerpots*, *Monopoly*, *Midd1*.

6.4 Εφαρμογή SGBM σε Εικόνες με Διαφορετική Έκθεση/Φωτισμό

Σε αυτή την ενότητα, αφού αναλυθεί το θεωρητικό πλαίσιο και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, εφαρμόζεται η μέθοδος SGBM σε εικόνες με διαφορετική έκθεση

και φωτισμό, και παρουσιάζονται τα αριθμητικά και τα ποιοτικά αποτελέσματα που προκύπτουν, με τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

6. 4.1 Θεωρητικό πλαίσιο

Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος SGBM χρησιμοποιεί το μέτρο ομοιότητας Birchfield & Tomasi (BT), η χρήση του οποίου έχει αποδειχθεί ότι προκαλεί μεγάλα σφάλματα όταν αυτό εφαρμόζεται σε εικόνες με ραδιομετρικές διαφορές (Hirschmüller & Scharstein, 2009). Όμως, στη μέθοδο περιλαμβάνεται ως τεχνική προεπεξεργασίας το φιλτράρισμα των προς συνταύτιση εικόνων με φίλτρο Sobel κατά x . Η χρήση ενός τέτοιου φίλτρου έχει αποδειχθεί (Mroz & Breckon, 2012) ότι οδηγεί στην άμβλυση των ραδιομετρικών διακυμάνσεων της αλλά, ως παρενέργεια, ενισχύεται ο θόρυβος που τυχόν έχει η εικόνα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι εικόνες με διαφορετικό φωτισμό έχουν προκύψει από την αλλαγή της θέσης και του τύπου των πηγών φωτισμού, πράγμα που προκαλεί πολλές τοπικές ραδιομετρικές αλλαγές. Αντίθετα, η αλλαγή της έκθεσης θεωρείται ότι αποτελεί έναν μετασχηματισμό σε ολόκληρη την εικόνα. Αυτές οι αλλαγές θεωρούνται πραγματικές, και όχι τεχνητές (Hirschmüller & Scharstein, 2009).

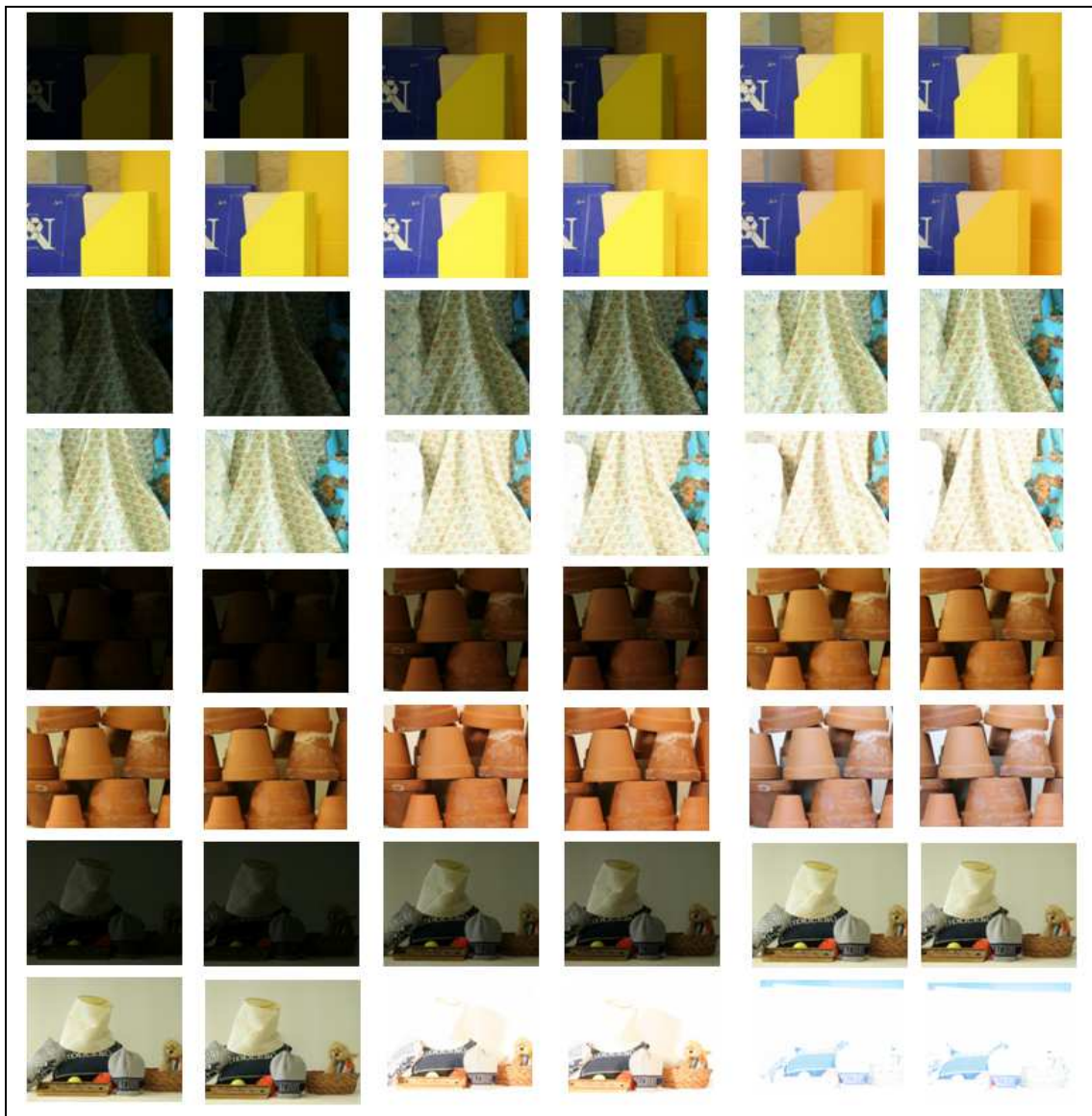
6. 4.2 Μεθοδολογία

Η εφαρμογή έγινε στις ίδιες, όπως και στο Κεφάλαιο 5, 21 ομάδες εικόνων με όνομα "2006 datasets" από την ιστοσελίδα Middlebury. Υπενθυμίζεται ότι για κάθε ομάδα εικόνων διατίθενται 7 εικόνες (από διαφορετική θέση λήψης), για καθεμία από τις 3 περιπτώσεις φωτισμού (Illum1-3) και τις 3 περιπτώσεις έκθεσης (Exp0-2). Χρησιμοποιήθηκαν και εδώ οι εικόνες *view1* και *view5*, στις οποίες αντιστοιχούν οι αληθείς χάρτες παράλλαξης που είναι διαθέσιμες στην ιστοσελίδα.

Για τις ποινές P_1 και P_2 χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που προέκυψαν ως καλύτερες από την προηγηθείσα βελτιστοποίηση, δηλαδή αυτές που προκαλούν το μικρότερο σφάλμα ($P_1 = 90$, $P_2 = 450$). Συνεπώς, τα σετ εικόνων χωρίς ραδιομετρικές διαφορές που χρησιμοποιήθηκαν στη βελτιστοποίηση θεωρούνται και εδώ, τρόπον τινά, ως "σετ εκπαίδευσης" (training set), ενώ τα σετ εικόνων με ραδιομετρικές διαφορές που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη φάση συγκροτούν τα σετ επίβλεψης (test set) (Hirschmüller & Scharstein, 2009). Οι υπόλοιπες παράμετροι της μεθόδου SGBM διατήρησαν τις τιμές που τους δόθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Διερευνήθηκε, έτσι, η απόδοση της μεθόδου SGBM σε εικόνες με διαφορετικό φωτισμό και έκθεση. Ειδικότερα, με σταθερή φωτεινότητα στην κανονική της (default) τιμή Illum = 1, δημιουργήθηκαν 9 ζεύγη εικόνων από τους συνδυασμούς των τριών διαφορετικών εκθέσεων που μπορεί να έχει η κάθε εικόνα. Αντίστοιχα, με σταθερή έκθεση στην τιμή Exp = +2, δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα 9 ζεύγη εικόνων από τους 3 διαφορετικούς φωτισμούς που μπορεί να έχει η κάθε εικόνα. Παρήχθησαν λοιπόν 18 στερεοζεύγη για κάθε σκηνή. Οι εικόνες των οποίων οι χάρτες παράλλα-

ξης θα παρουσιαστούν στη συνέχεια φαίνονται στην Εικ. 6.7.

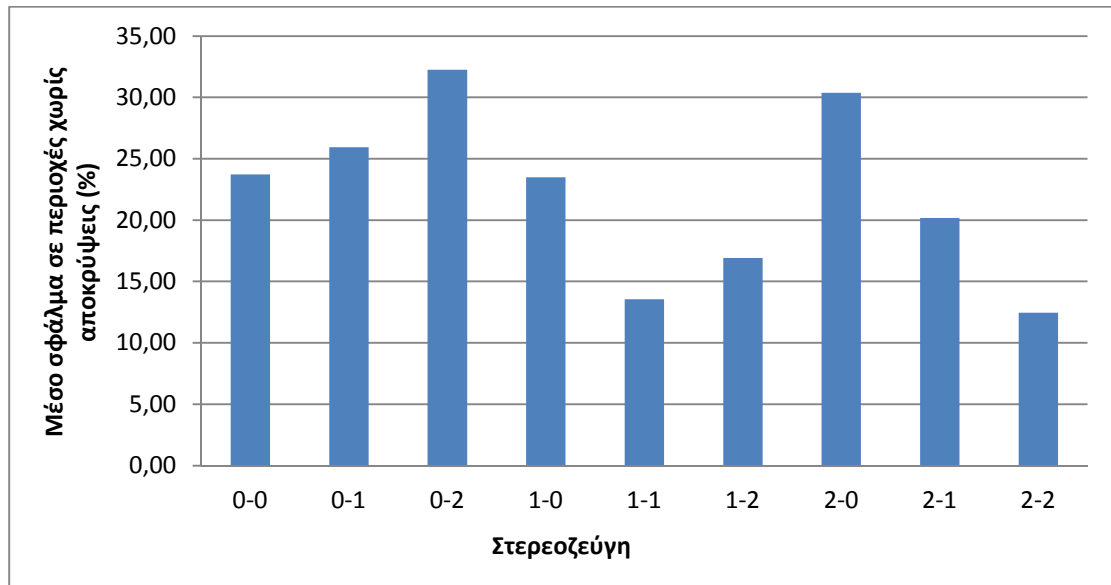


Εικόνα 6.7. Αντιπροσωπευτικές εικόνες με ραδιομετρικές διαφορές που χρησιμοποιήθηκαν ως στερεοζεύγη (ζεύγη εικόνων *Plastic, Cloth4, Flowerpots, Midd1*). Για κάθε ζεύγος, στην επάνω σειρά: Εικόνες με σταθερό φωτισμό ($Illum = 1$) και μεταβαλλόμενη έκθεση και στην κάτω σειρά: Εικόνες με σταθερή έκθεση ($Exp = +2$) και μεταβαλλόμενο φωτισμό.

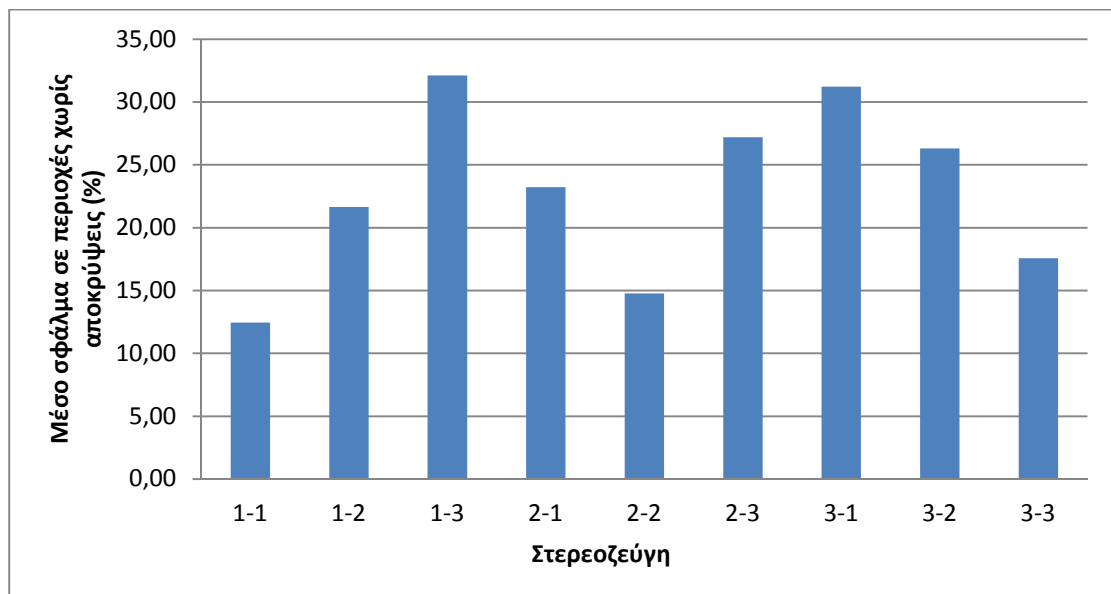
6. 4.3 Αριθμητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

Το μικρότερο μέσο σφάλμα για τις εικόνες με μεταβαλλόμενη έκθεση είναι 12.5% και προκύπτει για την περίπτωση όπου η αριστερή και η δεξιά εικόνα έχουν την ίδια τιμή έκθεσης (2-2), η οποία αποτελεί την “κανονική” (default) τιμή. Αντίστοιχα, για τις εικόνες με μεταβαλλόμενο φωτισμό το μικρότερο μέσο σφάλμα είναι επίσης 12.5% και προκύπτει για την περίπτωση όπου η αριστερή και η δεξιά εικόνα έχουν την ίδια τιμή φωτισμού (1-1), η οποία αποτελεί την “κανονική” (default) τιμή. Δηλαδή τα μικρότερα σφάλματα προκύπτουν για τις “κανονικές” ρυθμίσεις φωτισμού και έκθεσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα του μέσου σφάλματος (από τα 21 ζεύγη εικόνων) για κάθε συνδυασμό έκθεσης και για κάθε συνδυασμό φωτεινότητας στην αριστερή και την δεξιά εικόνα του ζεύγους (Εικ. 6.8 - 6.9).



Εικόνα 6.8. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενη έκθεση και σταθερό φωτισμό (= 1).



Εικόνα 6.9. Μέσο σφάλμα στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις για εικόνες με μεταβαλλόμενο φωτισμό και σταθερή έκθεση (= +2).

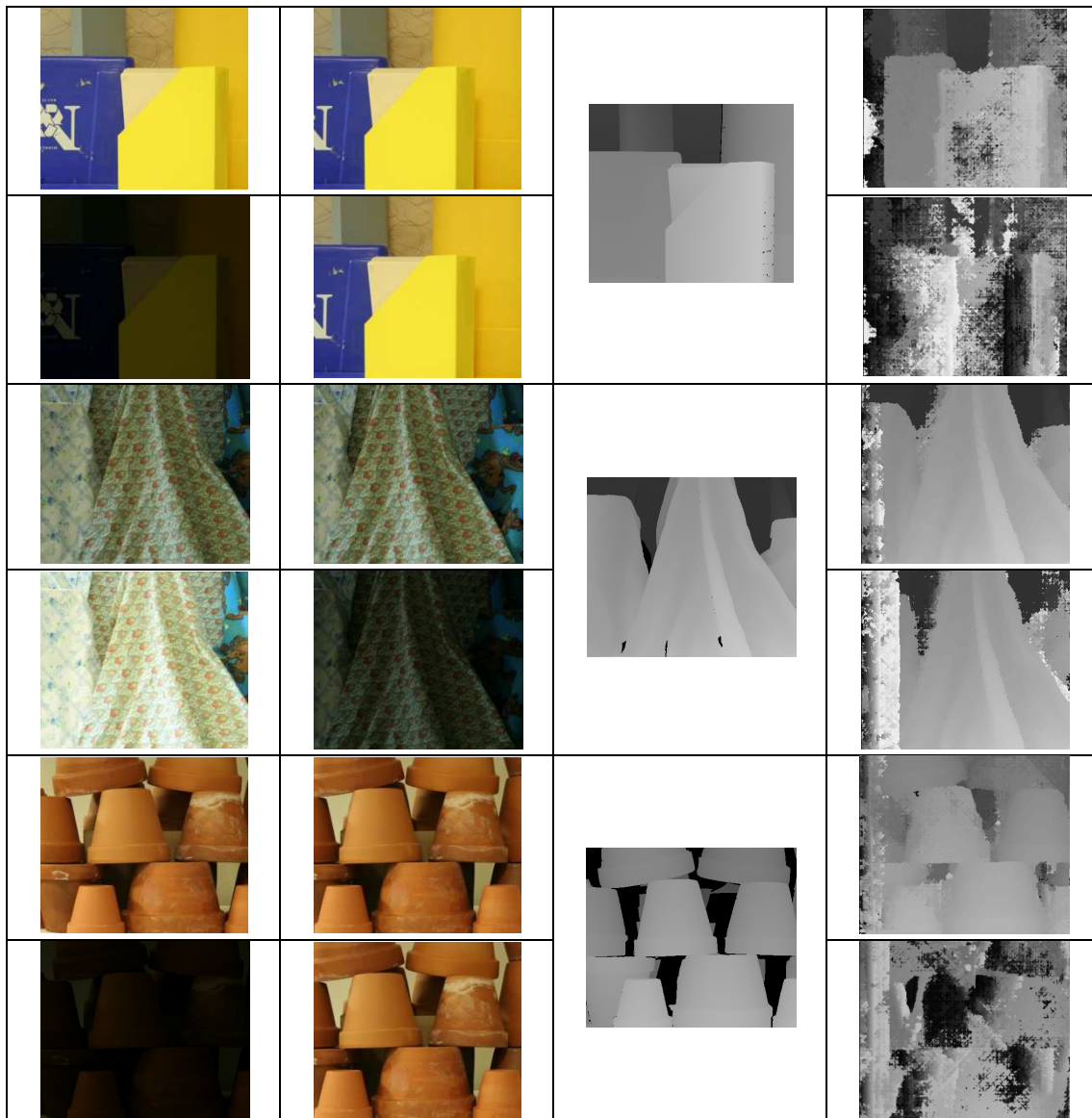
Με σταθερή φωτεινότητα στις δύο εικόνες, το μικρότερο μέσο σφάλμα επιτυγχάνεται σε όλες τις περιπτώσεις για την ίδια έκθεση στην αριστερή και την δεξιά εικόνα, και μάλιστα ίση με 2, δηλαδή για την “κανονική” της τιμή. Μικρά σφάλματα παρουσιάζουν όμως και οι περιπτώσεις 1-2 και 1-1, δηλαδή μπορεί να επιτευχθεί μικρό σφάλμα ακόμα και αν οι δύο συνταυτιζόμενες εικόνες έχουν διαφορετική έκθεση. Η διαφορά μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου σφάλματος είναι 20%.

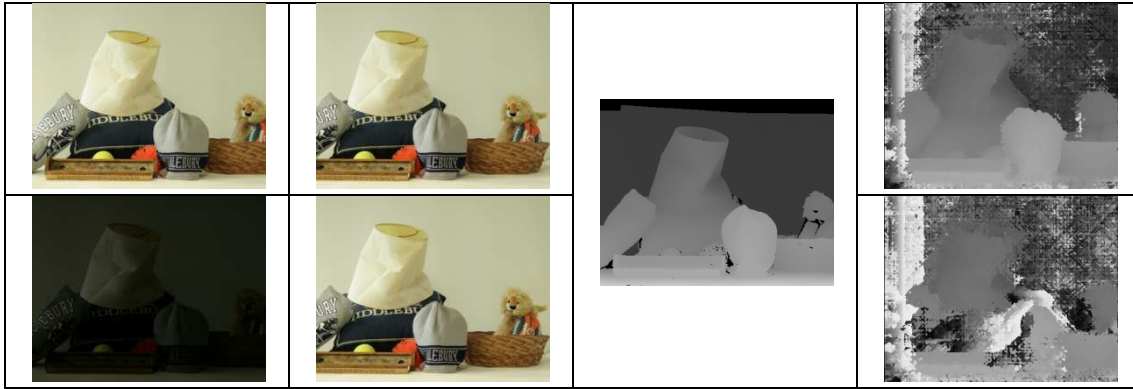
Όταν διατηρείται η ίδια έκθεση στις δύο εικόνες αλλά αλλάζει ο φωτισμός, το ελάχιστο μέσο σφάλμα προκύπτει για το στερεοζεύγος 1-1 (“κανονικές” τιμές φωτεινότητας), ωστόσο πολύ μικρά σφάλματα προκύπτουν και για τα στερεοζεύγη 2-2 και 3-3. Η διαφορά μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου σφάλματος είναι και εδώ 20%.

6. 4.4 Ποιοτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται χάρτες παράλλαξης που δημιουργήθηκαν για 4 ζεύγη εικόνων (*Plastic, Cloth4, Flowerpots, Midd1*), με διαφορετική έκθεση και φωτισμό, για τις περιπτώσεις όπου εμφανίζουν το μικρότερο και το μεγαλύτερο σφάλμα (Εικ. 6.10-6.11). Τα ζεύγη αυτά επιλέχθηκαν επειδή εμφανίζουν αντιπροσωπευτικού μεγέθους σφάλματα εκείνων που εμφανίζονται συνολικά σε αυτή την διαδικασία. Σημειώνεται ότι για τα διαφορετικά ζεύγη εικόνων ενδέχεται, σε ορισμένες περιπτώσεις, να διαφέρουν η καλύτερη ή η χειρότερη περίπτωση.

- Αποτελέσματα για εικόνες με διαφορετική έκθεση

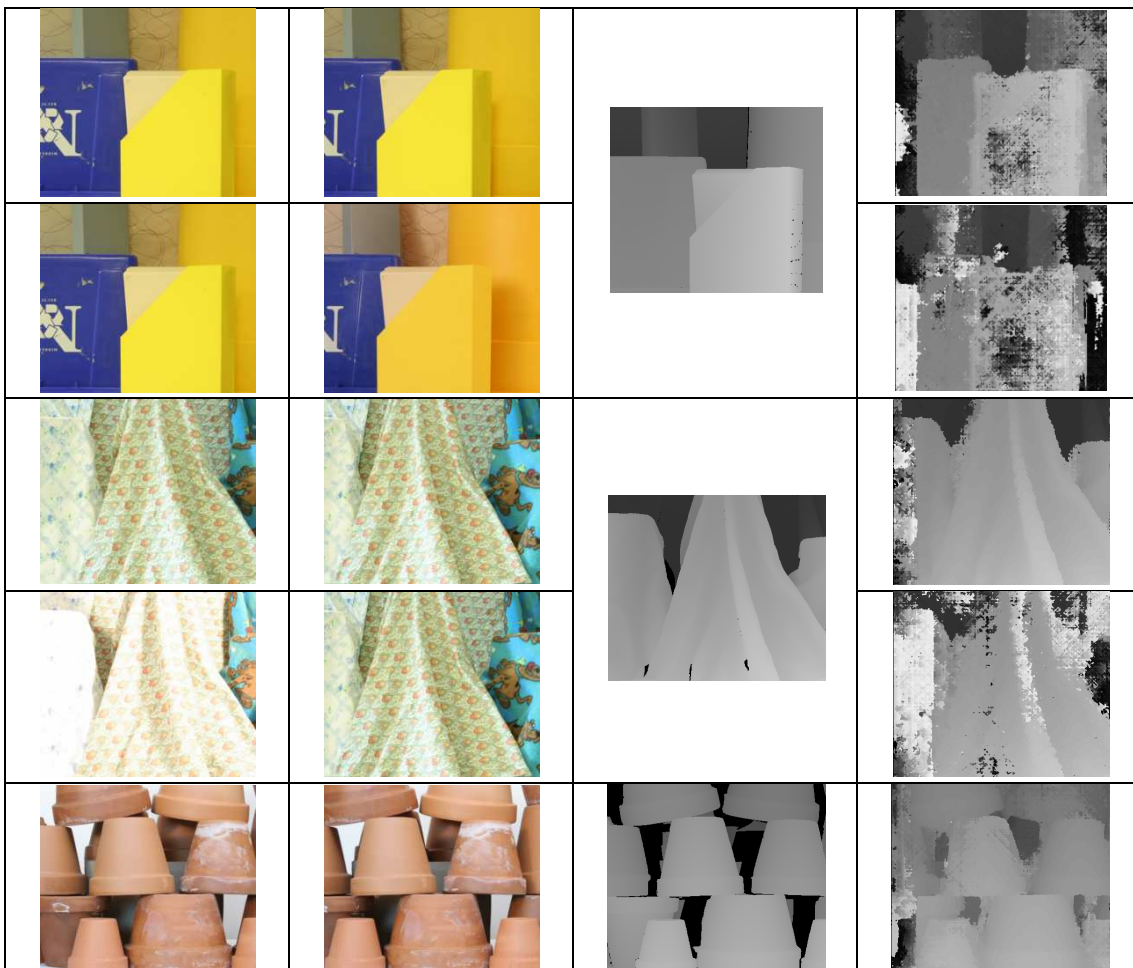


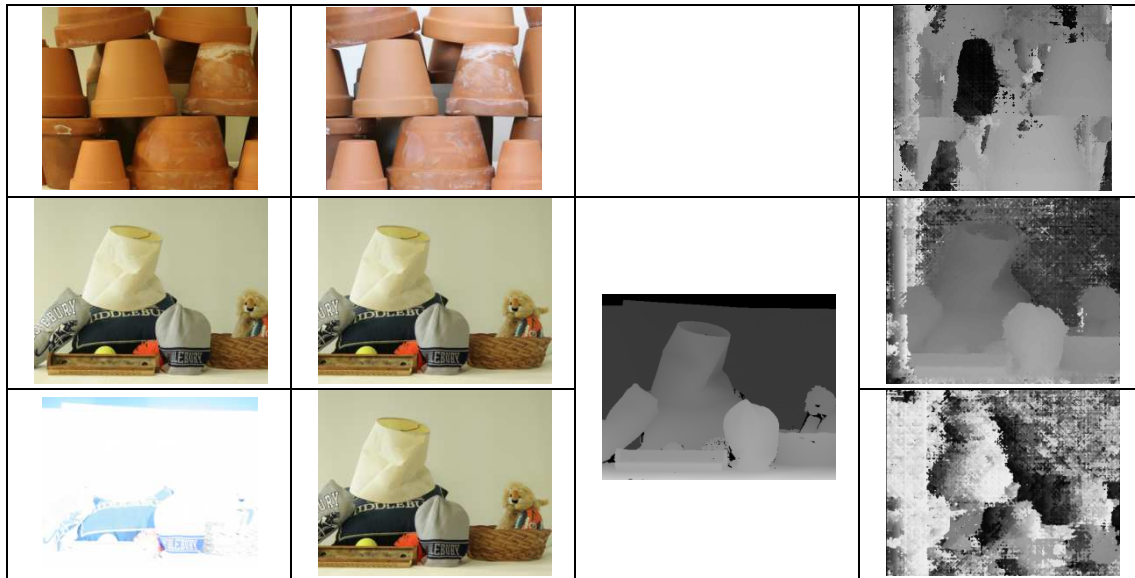


Εικόνα 6.10. Για κάθε ζεύγος εικόνων, ανά δύο γραμμές, από αριστερά προς τα δεξιά: Εικόνες στερεοζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και χάρτες παράλλαξης για την καλύτερη και χειρότερη περίπτωση έκθεσης. Ζεύγη εικόνων (από πάνω προς τα κάτω) και καλύτερη και χειρότερη περίπτωση: *Plastic* (2-2, 0-2), *Cloth4* (1-1, 2-0), *Flowerpots* (2-2, 0-2), *Midd1* (2-2, 0-2).

Όπως είναι φυσικό, οι χάρτες παράλλαξης με τα μικρότερα σφάλματα προκύπτουν για εικόνες με την ίδια τιμή έκθεσης. Αντίθετα, οι χάρτες παράλλαξης με τα μεγαλύτερα σφάλματα προκύπτουν όταν η αριστερή και η δεξιά εικόνα του στερεοζεύγους έχουν μεγάλη διαφορά στην έκθεση (0-2 ή 2-0).

- Αποτελέσματα για εικόνες με διαφορετικό φωτισμό





Εικόνα 6.11. Για κάθε ζεύγος εικόνων, ανά δύο γραμμές, από αριστερά προς τα δεξιά: Εικόνες στερεοζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και χάρτες παράλλαξης για την καλύτερη και χειρότερη περίπτωση φωτισμού. Ζεύγη εικόνων (από πάνω προς τα κάτω) και καλύτερη και χειρότερη περίπτωση: *Plastic* (1-1, 1-3), *Cloth4* (1-1, 3-1), *Flowerpots* (3-3, 1-3), *Midd1* (1-1, 3-1).

Και εδώ οι χάρτες παράλλαξης με τα μικρότερα σφάλματα προκύπτουν για εικόνες με την ίδια τιμή φωτισμού, ενώ οι χάρτες παράλλαξης με τα μεγαλύτερα σφάλματα προκύπτουν όταν η αριστερή και η δεξιά εικόνα του στερεοζεύγους έχουν μεγάλη διαφορά στον φωτισμό (1-3 ή 3-1).

Από την επισκόπηση των συγκεκριμένων εικόνων που οδηγούν στους χάρτες παράλλαξης με το μικρότερο και το μεγαλύτερο σφάλμα, προκύπτει εύλογα το συμπέρασμα πως το μέγεθος των σφαλμάτων εξαρτάται από την διαφορά των δυο εικόνων. Στην περίπτωση των *Cloth4* και *Midd1*, οι εικόνες που ως στερεοζεύγος προκαλούν το μεγαλύτερο σφάλμα στην περίπτωση διαφορετικού φωτισμού διαφέρουν περισσότερο μεταξύ τους απ' όσο οι αντίστοιχες εικόνες για την περίπτωση διαφορετικής έκθεσης. Γι' αυτό τα μέγιστα σφάλματα για αυτά τα ζεύγη είναι πολύ μεγαλύτερα στην περίπτωση διαφορετικού φωτισμού απ' ό,τι έκθεσης. Το αντίθετο ισχύει για τα άλλα δύο ζεύγη που παρουσιάστηκαν (*Plastic* και *Flowerpots*). Τελικά, τα ζεύγη με τη μια ή την άλλη συμπεριφορά είναι μάλλον ισομοιρασμένα, αφού το ελάχιστο μέσο σφάλμα είναι το ίδιο για την περίπτωση εικόνων διαφορετικής έκθεσης ή φωτισμού.

6.5 Σύγκριση με τον Αλγόριθμο SGM που Υλοποιήθηκε στο Matlab

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων, αριθμητικών (σφαλμάτων) και ποιοτικών (χαρτών παράλλαξης), που προκύπτουν από τον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε στο Matlab στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας και από τον αλγόριθμο που διαθέτει η OpenCV τόσο κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων τους όσο και κατά την εφαρμογή τους σε εικόνες με δια-

φορετική έκθεση και φωτισμό.

6. 5.1 Σύγκριση βελτιστοποίησης παραμέτρων

Εδώ συγκρίνονται τα σφάλματα (στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις) των χαρτών παράλλαξης από τον κώδικα που αναπτύχθηκε στο Matlab (Κεφάλαιο 4) – με αρχική μέθοδο συνταύτισης τις Απόλυτες Διαφορές και τον Μετασχηματισμό Census, και εν συνεχεία συσσωμάτωση του κόστους με τον αλγόριθμο SGM (μέθοδοι AD+SGM και Census+SGM) – με τους αντίστοιχους χάρτες παράλλαξης από τη μέθοδο SGBM της OpenCV.

Το ελάχιστο μέσο σφάλμα για κάθε μέθοδο παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1. Για τις μεθόδους AD+SGM και Census+SGM, οι οποίες είχαν εφαρμοστεί με 5 διαφορετικές συναρτήσεις ποινής, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των σφαλμάτων τους, αφού αυτά δεν αλλάζουν σημαντικά.

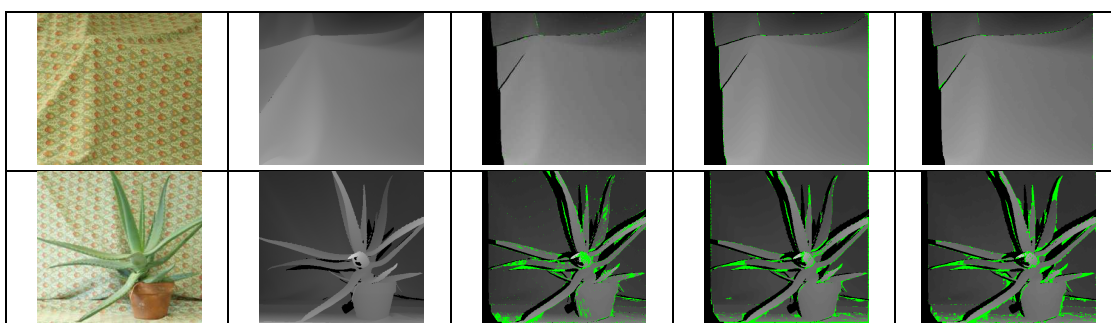
Μέθοδος	Μικρότερο σφάλμα ($\rho_{low}\%$)
AD+SGM	22.1
Census+SGM	9.8
SGBM	11.0

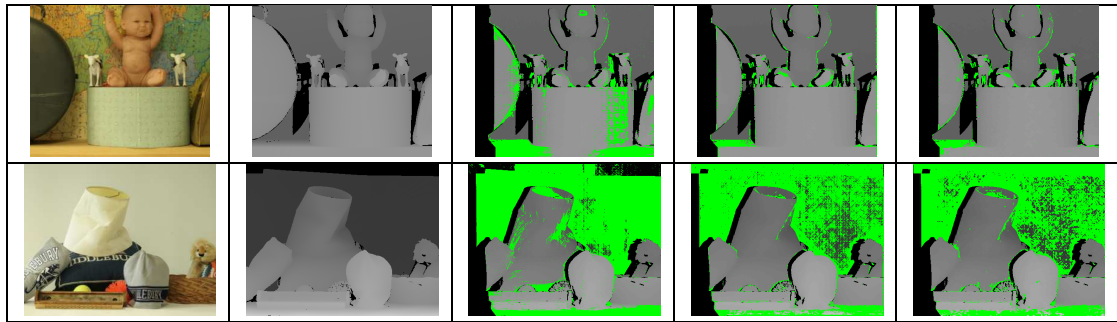
Πίνακας 6.1. Ελάχιστο μέσο σφάλμα για κάθε μέθοδο κατά την βελτιστοποίηση των παραμέτρων.

Συμπεραίνεται ότι υπερτερεί η μέθοδος Census+SGM, έπεται με μικρή διαφορά η SGBM, ενώ η AD+SGM εμφανίζει διπλάσιου μεγέθους σφάλματα.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης γίνονται πιο απτά αν τα σφάλματα αυτά οπτικοποιηθούν σε εικόνες διαφορών. Ειδικότερα, ο χάρτης παράλλαξης από κάθε μέθοδο συνταύτισης συγκρίνεται με τον αληθή (δίχως αποκρύψεις) και οι περιοχές όπου οι διαφορές παράλλαξης τους με τον αληθή ξεπερνούν την μια εικονοψηφίδα επισημαίνονται με χρώμα.

Παρουσιάζονται έτσι τα αποτελέσματα για 4 αντιπροσωπευτικά ζεύγη εικόνων, που δηλαδή εμφανίζουν μικρά, μεσαία και μεγάλα σφάλματα (Εικ. 6.12). Για τις μεθόδους AD+SGM και Census+SGM, οι οποίες είχαν εφαρμοστεί με 5 διαφορετικές συναρτήσεις ποινής, επιλέχθηκε μια από αυτές (P_{2A}), αφού τα αποτελέσματα από διαφορετικές συναρτήσεις ποινής δεν μεταβάλλονται σημαντικά.

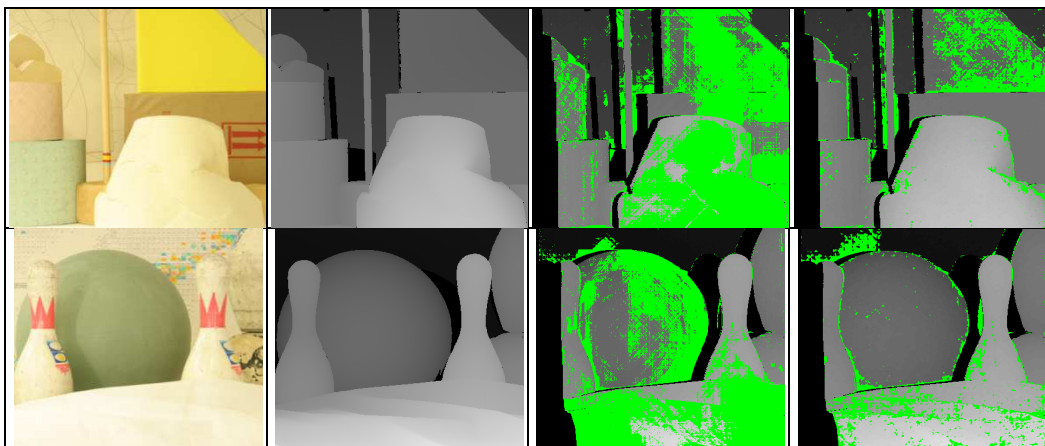




Εικόνα 6.12. Για κάθε ζεύγος εικόνων, από αριστερά προς τα δεξιά: Αριστερή εικόνα στερεοζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και εικόνες διαφορών για τις βέλτιστες παραμέτρους κάθε μεθόδου: AD+SGM (Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$), Census+SGM (Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 25$, $P_2 = 100$) και SGBM (ποινές: $P_1 = 90$, $P_2 = 450$). Ζεύγη εικόνων (από πάνω προς τα κάτω): *Cloth1*, *Aloe*, *Baby3*, *Midd1*.

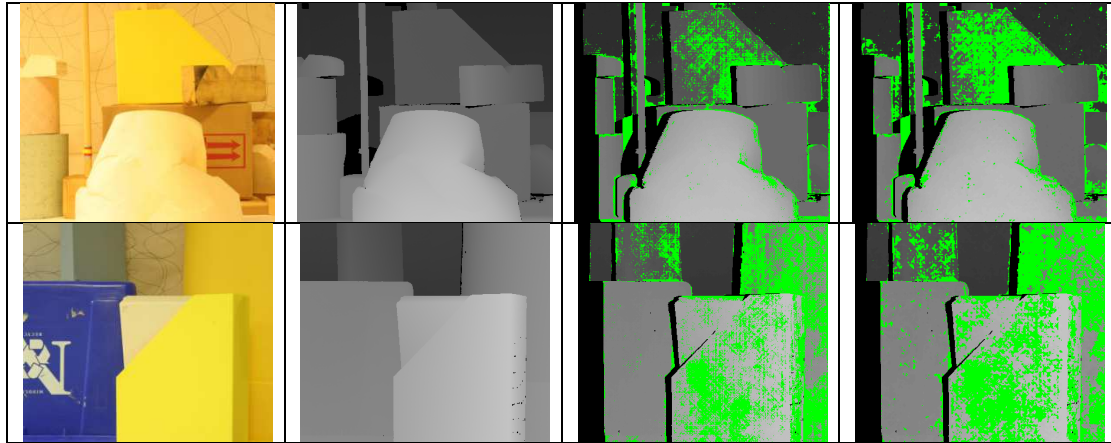
Παρατηρείται ότι, για τα δύο πρώτα ζεύγη, τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων είναι πρακτικά ισάξια. Για τα δύο επόμενα ζεύγη, που απεικονίζουν πιο σύνθετα αντικείμενα, η μέθοδος SGBM παράγει πολύ καλύτερους χάρτες παράλλαξης από την μέθοδο AD+SGM, ενώ υστερεί ελάχιστα από την Census+SGM.

Τα ζεύγη εικόνων με τη μεγαλύτερη διαφορά σφάλματος μεταξύ του χάρτη παράλλαξης από την μέθοδο AD+SGM και του αντίστοιχου από την SGBM, που είναι της τάξης του 30-40%, παρουσιάζονται στην Εικ. 6.13. Τα ίδια ζεύγη εμφάνιζαν την μεγαλύτερη διαφορά σφάλματος μεταξύ χαρτών παράλλαξης και από τη σύγκριση των μεθόδων AD+SGM και Census+SGM (βλέπε υποενότητα 4.4.3).



Εικόνα 6.13. Σε κάθε σειρά: Αριστερή εικόνα ζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και εικόνες διαφορών για τις βέλτιστες παραμέτρους κάθε μεθόδου: AD+SGM (Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$) και SGBM (ποινές: $P_1 = 90$, $P_2 = 450$), αντίστοιχα. Από πάνω προς τα κάτω: ζεύγη εικόνων *Lampshade2* και *Bowling1*.

Η μεγαλύτερη διαφορά σφάλματος μεταξύ των χαρτών παράλλαξης από την μέθοδο Census+SGM και των αντίστοιχων της μεθόδου SGBM είναι πολύ μικρότερη, της τάξης του 5-6%, για τα ζεύγη της Εικ. 6.14. Ενδεχομένως οφείλεται εν μέρει στο θόρυβο που προστίθεται στις εικόνες από το φιλτράρισμα με Sobel κατά την εφαρμογή της μεθόδου SGBM.



Εικόνα 6.14. Σε κάθε σειρά: Αριστερή εικόνα ζεύγους, αληθής χάρτης παράλλαξης και εικόνες διαφορών για τις βέλτιστες παραμέτρους της μεθόδου Census+SGM (Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 25$, $P_2 = 100$) και της SGBM (ποινές: $P_1 = 90$, $P_2 = 450$), αντίστοιχα. Από πάνω προς τα κάτω: ζεύγη εικόνων *Lampshade1* και *Plastic*.

6. 5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων από εικόνες με διαφορετική έκθεση/φωτισμό

Εδώ πραγματοποιείται σύγκριση των σφαλμάτων (στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις) των χαρτών παράλλαξης από την συνταύτιση εικόνων με διαφορετική έκθεση και φωτισμό με βάση τον κώδικα που αναπτύχθηκε στο Matlab (Κεφάλαιο 5) – με αρχική μέθοδο συνταύτισης τις Απόλυτες Διαφορές, το φιλτράρισμα με Sobel κατά x και μετά συνταύτιση με Απόλυτες Διαφορές, και τον Μετασχηματισμό Census και εν συνεχεία συσσωμάτωση του κόστους με τον αλγόριθμο SGM (μέθοδοι AD+SGM, x Sobel+AD+SGM και Census+SGM) – με τους αντίστοιχους χάρτες παράλλαξης από τη μέθοδο SGBM της OpenCV.

Το ελάχιστο μέσο σφάλμα για κάθε μέθοδο, όταν αυτές εφαρμόζονται σε εικόνες με διαφορετική έκθεση και φωτισμό, παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2. Για τις μεθόδους AD+SGM, x Sobel+AD+SGM και Census+SGM, οι οποίες είχαν εφαρμοστεί με 5 διαφορετικές συναρτήσεις ποινής, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των σφαλμάτων τους, αφού αυτά δεν αλλάζουν σημαντικά.

Μέθοδος	Σταθερή φωτεινότητα (Illum = 1) Μικρότερο σφάλμα (p_{low} %)	Σταθερή έκθεση (Exp = +2) Μικρότερο σφάλμα (p_{low} %)
AD+SGM	24.2	23.4
x Sobel+AD+SGM	17.8	17.8
Census+SGM	11.2	11.2
SGBM	12.5	12.5

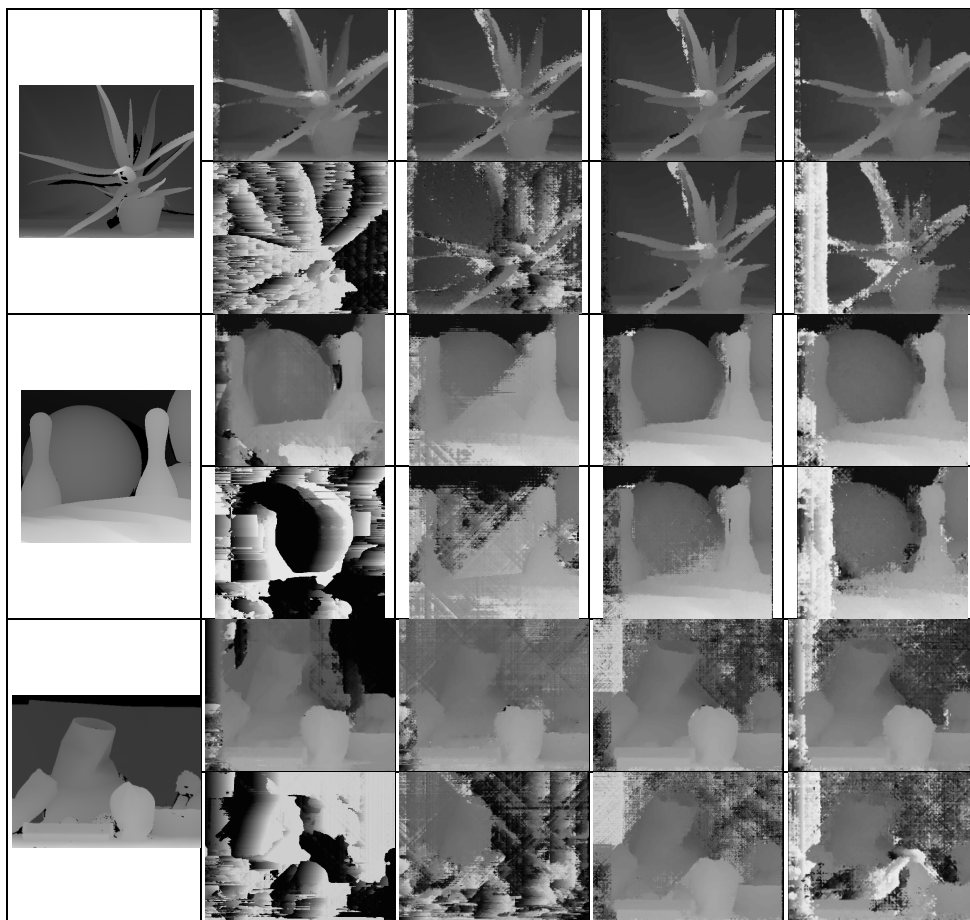
Πίνακας 6.2. Ελάχιστο μέσο σφάλμα για κάθε μέθοδο, για εικόνες με διαφορετική έκθεση και φωτισμό.

Συμπεραίνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση υπερτερεί η Census+SGBM και έπεται, με μικρή διαφορά, η SGBM. Τα μεγαλύτερα σφάλματα (περίπου διπλάσια από εκείνα των προαναφερθεισών μεθόδων) προέρχονται από τη μέθοδο AD+SGM, ενώ βελτίωση της τάξης του 6% παρατηρείται αν πριν από τη συνταύτιση εφαρμοστεί

φίλτρο Sobel στις εικόνες. Σημειώνεται ότι και εδώ οι “κανονικές” (default) τιμές φωτισμού και έκθεσης δίνουν στις τρεις περιπτώσεις τα καλύτερα αποτελέσματα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης κάθε μεθόδου για την καλύτερη και χειρότερη περίπτωση σφάλματος από την εφαρμογή τους σε εικόνες με διαφορετική έκθεση και φωτισμό. Επιλέχθηκαν 3 αντιπροσωπευτικά ζεύγη εικόνων, δηλαδή με μικρό, μεσαίο και μεγάλο σφάλμα (Εικ. 6.15-6.16). Για τις τρεις μεθόδους AD+SGM, xSobel+AD+SGM και Census+SGM, οι οποίες είχαν εφαρμοστεί με 5 διαφορετικές συναρτήσεις ποινής, επιλέχθηκε η P_{2A} , αφού τα αποτελέσματα με τη χρήση διαφορετικής συνάρτησης δεν μεταβάλλονται σημαντικά.

- Εικόνες με διαφορετική έκθεση

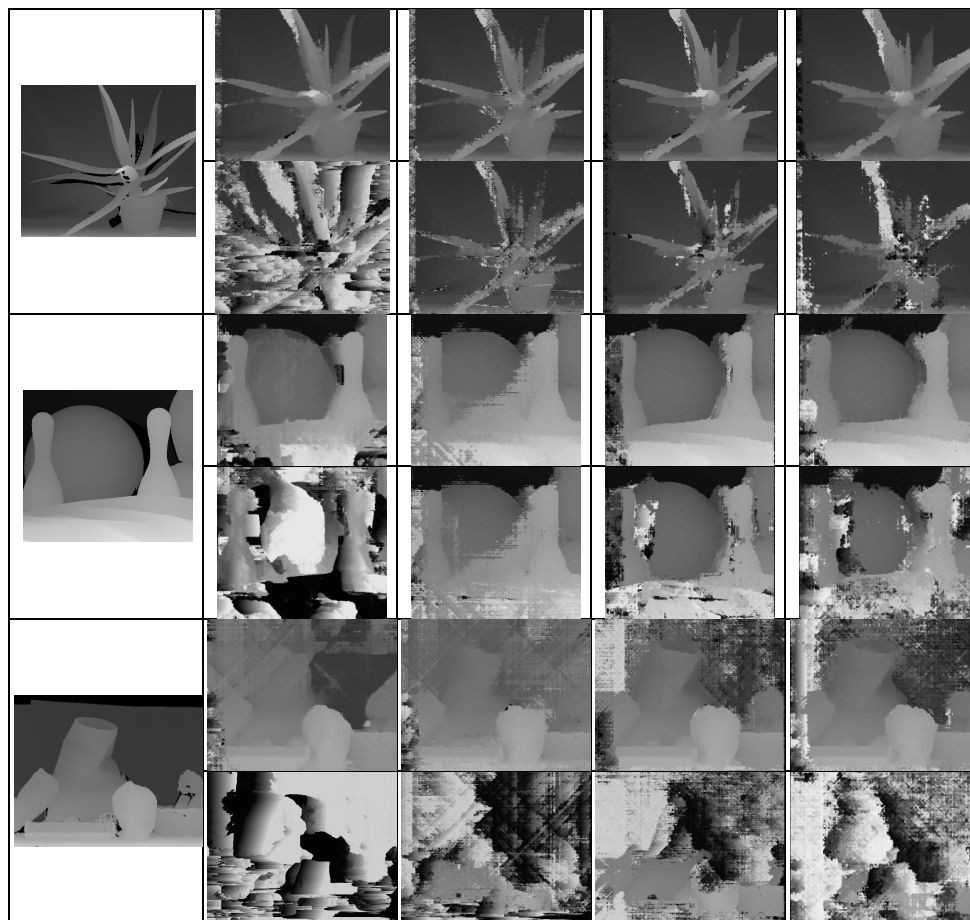


Εικόνα 6.15. Για κάθε ζεύγος εικόνων, ανά δύο γραμμές (επάνω το ελάχιστο σφάλμα, κάτω το μέγιστο): Αληθής χάρτης παράλλαξης, χάρτες παράλλαξης για τις βέλτιστες παραμέτρους της μεθόδου AD+SGM (Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$), της xSobel+AD+SGM (Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$), της Census+SGM (Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 25$, $P_2 = 100$) και της SGBM (ποινές: $P_1 = 90$, $P_2 = 450$) αντίστοιχα. Εφαρμογή σε εικόνες με διαφορετική έκθεση. Από πάνω προς τα κάτω: ζεύγη εικόνων *Aloe*, *Bowling1* και *Midd1*.

Στις εικόνες παρατηρείται εκείνο που διαπιστώθηκε και από τα αριθμητικά αποτελέσματα, δηλαδή ότι η μέθοδος SGBM παράγει χάρτες με μεγαλύτερα σφάλματα για τον δυσμενέστερο συνδυασμό έκθεσης απ’ ό,τι η Census+SGM, και σχεδόν ισά-

ξιους χάρτες παράλλαξης για τον καλύτερο συνδυασμό έκθεσης. Ακόμη, τα αποτελέσματα της SGBM είναι σαφώς ανώτερα (ιδίως για την χειρότερη περίπτωση έκθεσης) από εκείνα των μεθόδων AD+SGM και xSobel+AD+SGM.

- Εικόνες με διαφορετικό φωτισμό



Εικόνα 6.16. Για κάθε ζεύγος εικόνων, ανά δύο γραμμές (επάνω το ελάχιστο σφάλμα, κάτω το μέγιστο): Αληθής χάρτης παράλλαξης, χάρτες παράλλαξης για τις βέλτιστες παραμέτρους της μεθόδου AD+SGM (Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$), της xSobel+AD+SGM (Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 10$, $P_2 = 100$), της Census+SGM (Συνάρτηση ποινής: P_{2A} , ποινές: $P_1 = 25$, $P_2 = 100$) και της SGBM (ποινές: $P_1 = 90$, $P_2 = 450$) αντίστοιχα. Εφαρμογή σε εικόνες με διαφορετικό φωτισμό. Από πάνω προς τα κάτω: ζεύγη εικόνων *Aloe*, *Bowling1* και *Midd1*.

Όταν η μέθοδος SGBM εφαρμόζεται σε εικόνες με διαφορετικό φωτισμό παράγει, για τον καλύτερο συνδυασμό έκθεσης, χάρτες παράλλαξης με μεγαλύτερα σφάλματα απ' ό,τι η μέθοδος Census+SGM και μικρότερα απ' ό,τι οι μέθοδοι AD+SGM και xSobel+AD+SGM. Όμως για τον χειρότερο συνδυασμό έκθεσης, ως μέθοδος με τα μικρότερα σφάλματα μετά από την Census+SGM εμφανίζεται η xSobel+AD+SGM και ακολουθούν οι SGBM και AD+SGM.

Το τελικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα αποτελέσματα της SGBM είναι ελαφρώς υποδεέστερα από εκείνα της μιας από τις μεθόδους που αναπτύχθηκε στο Matlab (Census+SGM). Πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι στο πλαίσιο αυτής της σύγ-

κρίσης δεν έγινε χρήση όλων των εργαλείων (μέθοδοι προπεξεργασίας των εικόνων ή μετεπεξεργασίας του χάρτη παράλλαξης) που διαθέτει η SGBM και τα οποία θα μπορούσαν να βελτιώσουν το αποτέλεσμα.

7. 3D ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στην δημιουργία 3D μοντέλων. Αφού αρχικά αναπτύσσεται η σχετική μεθοδολογία, παρουσιάζονται τα νέφη σημείων που προέκυψαν από τον αληθή χάρτη παράλλαξης και από εκείνους με τις μεθόδους συνταύτισης ($AD+P_{2A}+SGM$, $Census+P_{2r}+SGM$ και $SGBM$) των προηγούμενων κεφαλαίων. Στη συνέχεια επιχειρήθηκε βελτίωση των ανακατασκευών με μεθόδους παρέμβασης στους χάρτες παράλλαξης, όπως ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας, το φίλτρο μεσαίας τιμής και η υποψηφιδική παρεμβολή, ενώ παράλληλα αξιοποιήθηκε και η διαθέσιμη μάσκα αποκρύψεων. Τα 3D μοντέλα συγκρίθηκαν μεταξύ τους οπτικά αλλά και με το αληθές 3D μοντέλο μέσω στατιστικών μεγεθών.

7.1 Μεθοδολογία

Χρησιμοποιήθηκαν 4 ζεύγη (*Cloth3*, *Baby3*, *Bowling2*, *Monopoly*), τα οποία εμφανίζουν διαφορετικού μεγέθους σφάλματα, από την συλλογή “2006 datasets” της ιστοσελίδας του Middlebury (<http://vision.middlebury.edu/stereo/data/scenes2006/>). Η ίδια ιστοσελίδα δίνει τη βάση κάθε στερεοζεύγους ίση με $B = 160$ mm. Επίσης, γνωστή είναι η σταθερά της μηχανής ($c = 3740$ pix) των επιτολικών εικόνων και η κατά x διαφορά Δ_j των πρωτευόντων σημείων (d_{min} στην ορολογία του Middlebury) σε όλα τα ζεύγη εικόνων. Η τελευταία, όπως έχει εξηγηθεί στην υποενότητα 2.4.2, πρέπει να προστεθεί στην ψηφιακή παράλλαξη d που αντλείται από τον χάρτη παράλλαξης ώστε να προκύψει η αντίστοιχη παράλλαξη p , δηλαδή η διαφορά των εικονοσυντεταγμένων ανηγμένων στα πρωτεύοντα σημεία των εικόνων. Επειδή οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν εδώ είναι μικρών διαστάσεων (“third-size”), η παράλλαξη από τον αληθή χάρτη παράλλαξης πρέπει προφανώς να υποτριπλασιαστεί (ή αλλιώς οι παραλλάξεις που υπολογίζονται από την συνταύτιση να τριπλασιαστούν, για να είναι δυνατή η μεταξύ τους σύγκριση). Παράλληλα, πρέπει βέβαια να υποτριπλασιαστούν και η σταθερά της μηχανής όσο και η διαφορά των πρωτευόντων σημείων.

Το ανακατασκευασμένο 3D νέφος σημείων προκύπτει από τον υπολογισμό, για κάθε εικονοψηφίδα με εικονοσυντεταγμένες (x,y) και παράλλαξη p , των συντεταγμένων της XYZ στον χώρο (του υπό σωστή κλίμακα μοντέλου) μέσω των βασικών φωτογραμμετρικών σχέσεων της παράλλαξης, δεδομένου ότι οι εικόνες είναι επιτολικές. Ακόμη, για κάθε σημείο προστίθεται και η πληροφορία για το χρώμα του (RGB), βάσει της εικόνας αναφοράς. Η οπτική απεικόνιση των νεφών σημείων πραγματοποιήθηκε στο ελεύθερο λογισμικό CloudCompare (<http://www.danielgm.net/cc/>).

Τα 3D νέφη από τις διάφορες μεθόδους συνταύτισης συγκρίνονται με το νέφος από τον αληθή χάρτη παράλλαξης βάσει ορισμένων στατιστικών στοιχείων για τις διαφορές των συντεταγμένων κατά X , Y και Z . Ειδικότερα, υπολογίζεται ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφορών για το σύνολο αφ’

ενός των σημείων και αφ' ετέρου μόνο για τα σημεία των οποίων οι διαφορές κατά Z ανήκουν στο διάστημα $[-3\sigma, 3\sigma]$, ώστε να έχουν αφαιρεθεί τα χονδροειδή σφάλματα (βλέπε υποενότητα 2.4.2).

Για να γίνει αμεσότερα κατανοητό το μέγεθος των τιμών των στατιστικών στοιχείων, μπορούν αυτά να συγκριθούν με την μέση εδαφοψηφίδα της εικόνας ή, αντίστροφα, ιδιαίτερα στην περίπτωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, να αναχθούν στο επίπεδο της εικόνας, δηλαδή να εκφραστούν σε εικονοψηφίδες. Για να γίνει αυτό, πρέπει να είναι γνωστή η μέση απόσταση λήψης. Έτσι, υπολογίζεται η ελάχιστη και η μέγιστη απόσταση λήψης, βάσει της βασικής φωτογραμμετρικής σχέσης της παράλλαξης:

$$H_{min} = \frac{Bc}{maxdisp+\Delta j_0}, \quad H_{max} = \frac{Bc}{mindisp+\Delta j_0} \quad (7.1)$$

όπου $mindisp$ και $maxdisp$ η ελάχιστη και η μέγιστη ψηφιακή παράλλαξη, αντίστοιχα, που αντλούνται από τον αληθή χάρτη ψηφιακής παράλλαξης (εννοείται ότι, αφού οι εικόνες είναι διαστάσεων "third-size", οι τιμές διαιρούνται με 3). Η μέση απόσταση λήψης H υπολογίζεται ως ο μέσος όρος της μικρότερης και της μεγαλύτερης απόστασης λήψης, ενώ το βάθος της σκηνής προκύπτει ως η διαφορά τους. Τελικά, η εδαφοψηφίδα k προκύπτει ως ο λόγος της απόστασης λήψης με την σταθερά της μηχανής (δηλαδή σε μονάδες m/pix) ως:

$$k = \frac{H}{c} \quad (7.2)$$

Με αυτό τον τρόπο υπολογίστηκε η μέση απόσταση λήψης, το βάθος της σκηνής και η εδαφοψηφίδα κάθε ζεύγους εικόνων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1.

	<i>Cloth3</i>	<i>Baby3</i>	<i>Bowling2</i>	<i>Monopoly</i>
Βάση στερεοζεύγους B (mm)	160	160	160	160
Σταθερά της μηχανής c (pix)	1247	1247	1247	1247
Διαφορά πρωτευόντων σημείων Δj_0 (pix)	97	83	80	79
Ελάχιστη παράλλαξη $mindisp$ (pix)	15	16	13	1
Μέγιστη παράλλαξη $maxdisp$ (pix)	56	51	66	54
Μικρότερη απόσταση λήψης H_{min} (m)	1.30	1.49	1.37	1.50
Μεγαλύτερη απόσταση λήψης H_{max} (m)	1.78	2.02	2.15	2.49
Βάθος σκηνής (m)	0.48	0.53	0.78	0.99
Μέση απόσταση λήψης H (m)	1.54	1.75	1.76	2.00
Εδαφοψηφίδα k (mm)	1.20	1.40	1.40	1.60

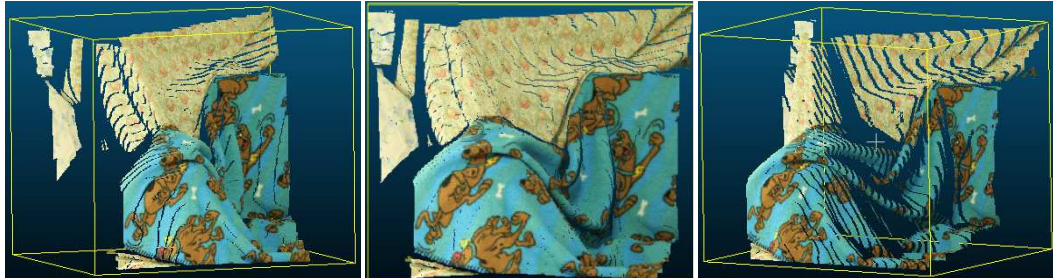
Πίνακας 7.1. Μέση απόσταση λήψης, βάθος σκηνής, εδαφοψηφίδα και άλλα χρήσιμα στοιχεία για κάθε ζεύγος εικόνων.

7.2 3D Ανακατασκευή με βάση τον Αληθή Χάρτη Παράλλαξης

Η 3D ανακατασκευή με βάση τον αληθή χάρτη παράλλαξης έγινε σύμφωνα με την προαναφερθείσα διαδικασία. Σημειώνεται ότι, για να μπορέσει να χρησιμεύσει η α-

νακατασκευή ως απόλυτα “αληθής”, εφαρμόστηκε στον αληθή χάρτη η μάσκα αποκρύψεων, ώστε τελικά να ανακατασκευαστούν μόνο τα σημεία που θα μπορούσαν να είχαν προκύψει από την συνταύτιση των δύο εικόνων του στερεοζεύγους.

Τα αποτελέσματα της ανακατασκευής για κάθε ζεύγος εικόνων, απεικονιζόμενα υπό τρεις γωνίες, παρουσιάζονται στις Εικ. 7.1-7.4.



Εικόνα 7.1. Ανακατασκευή με βάση τον αληθή χάρτη παράλλαξης, μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Cloth3*.



Εικόνα 7.2. Ανακατασκευή με βάση τον αληθή χάρτη παράλλαξης, μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Baby3*.



Εικόνα 7.3. Ανακατασκευή με βάση τον αληθή χάρτη παράλλαξης, μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Bowling2*.



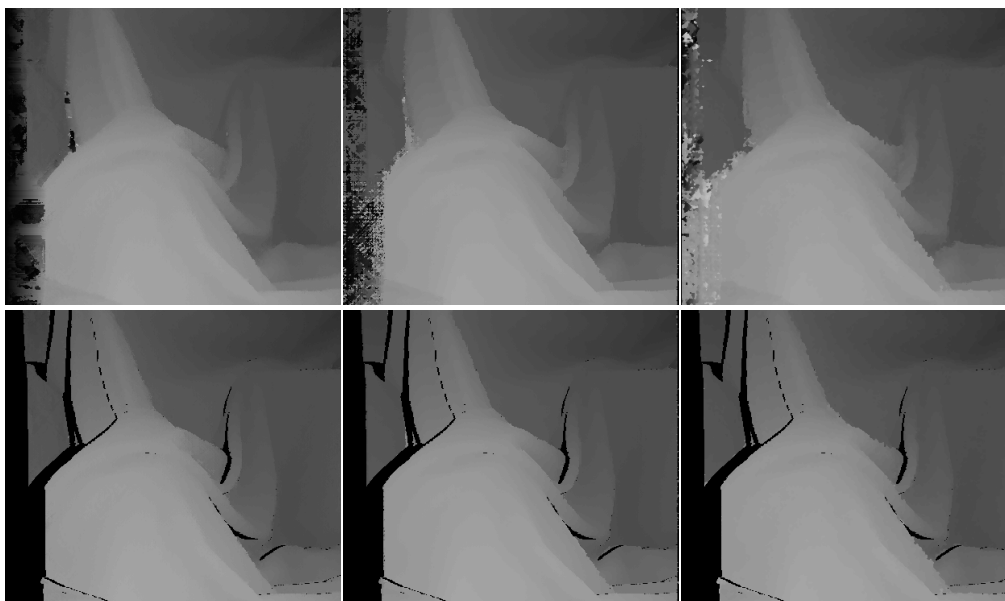
Εικόνα 7.4. Ανακατασκευή με βάση τον αληθή χάρτη παράλλαξης, μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Monopoly*.

7.3 3D Ανακατασκευές με τις Καλύτερες Μεθόδους και Ποινές

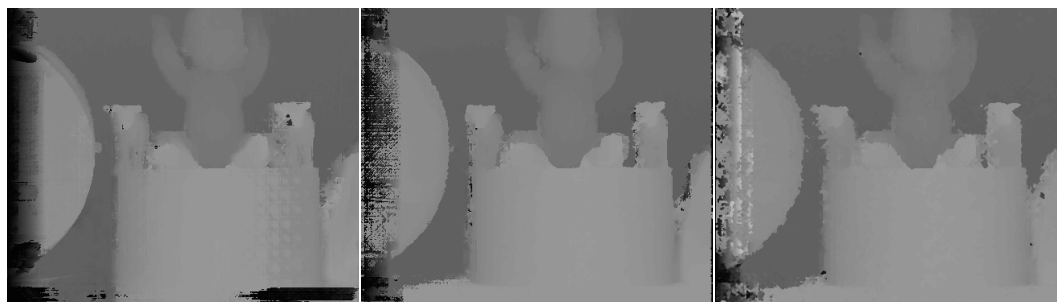
Σε αυτή την ενότητα γίνεται 3D ανακατασκευή βάσει των καλύτερων χαρτών παράλληλης από κάθε μέθοδο συνταύτισης που εξετάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Ειδικότερα, με μέθοδο αρχικού υπολογισμού κόστους τις Απόλυτες Διαφορές ο χάρτης παράλληλης με τα μικρότερα σφάλματα προέκυψε για τις βέλτιστες παραμέτρους του συνδυασμού της με την συνάρτηση ποινής P_{2A} (μέθοδος $AD+P_{2A}+SGM$). Με τη χρήση του Μετασηματισμού Census, ο καλύτερος χάρτης παράλληλης προέκυψε για τις βέλτιστες παραμέτρους του συνδυασμού του με τη συνάρτηση ποινής P_{2r} ($Census+P_{2r}+SGM$). Αντίστοιχα, είναι γνωστός ο χάρτης παράλληλης με τα μικρότερα σφάλματα για την μέθοδο SGBM.

7.3.1 Παραχθέντες χάρτες παράλληλης και σφάλματα

Οι χάρτες παράλληλης στους οποίους βασίστηκε η 3D ανακατασκευή εμφανίζονται, για κάθε μέθοδο και ζεύγος εικόνων, στις Εικ. 7.5-7.8.

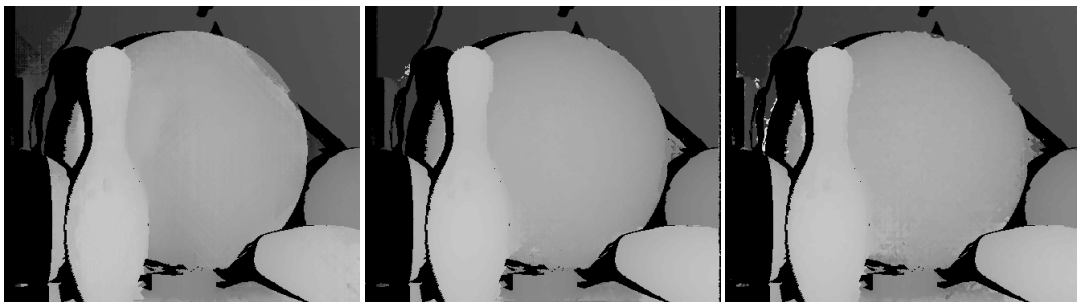


Εικόνα 7.5. Επάνω σειρά: Παραχθέντες χάρτες παράλληλης από τις μεθόδους $AD+P_{2A}+SGM$, $Census+P_{2r}+SGM$, SGBM (από τα αριστερά προς τα δεξιά). Κάτω σειρά: Οι ίδιοι χάρτες παράλληλης, μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Cloth3*.





Εικόνα 7.6. Επάνω σειρά: Παραχθέντες χάρτες παράλλαξης από τις μεθόδους $AD+P_{2A}+SGM$, $Census+P_{2I}+SGM$, $SGBM$ (από τα αριστερά προς τα δεξιά). Κάτω σειρά: Οι ίδιοι χάρτες παράλλαξης, μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Baby3*.



Εικόνα 7.7. Επάνω σειρά: Παραχθέντες χάρτες παράλλαξης από τις μεθόδους $AD+P_{2A}+SGM$, $Census+P_{2I}+SGM$, $SGBM$ (από τα αριστερά προς τα δεξιά). Κάτω σειρά: Οι ίδιοι χάρτες παράλλαξης, μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Bowling2*.





Εικόνα 7.8. Επάνω σειρά: Παραχθέντες χάρτες παράλλαξης από τις μεθόδους AD+P_{2A}+SGM, Census+P_{2r}+SGM, SGBM (από τα αριστερά προς τα δεξιά). Κάτω σειρά: Οι ίδιοι χάρτες παράλλαξης, μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Monopoly*.

Τα σφάλματα (%) των χαρτών παράλλαξης μετά από σύγκρισή τους με τον αληθή, για κάθε μέθοδο και ζεύγος εικόνων, για το σύνολο της εικόνας (all) και τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις (nocl) παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

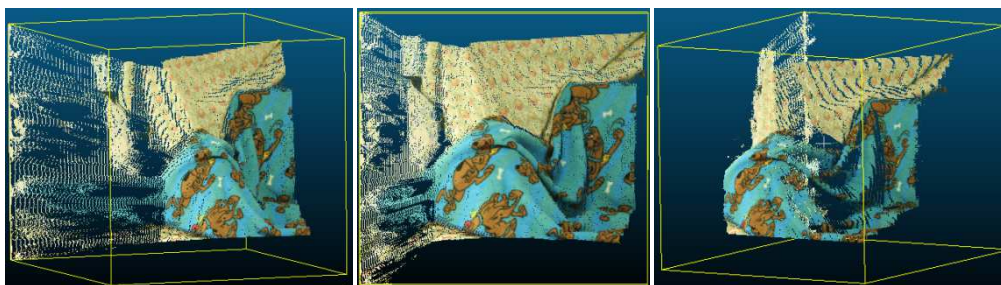
	<i>Cloth3</i>		<i>Baby3</i>		<i>Bowling2</i>		<i>Monopoly</i>	
	all	nocl	all	nocl	all	nocl	all	nocl
AD+P _{2A} +SGM	3.8	1.9	22.6	13.1	29.9	21.0	43.0	34.1
Census+P _{2r} +SGM	4.1	2.1	13.3	3.8	14.7	6.4	22.2	13.2
SGBM	4.0	2.1	13.7	4.0	16.0	7.4	23.1	14.0

Πίνακας 7.2. Σφάλματα (%) των χαρτών παράλλαξης κάθε μεθόδου στο σύνολο της εικόνας και στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις, για κάθε ζεύγος εικόνων.

Για το ζεύγος εικόνων *Cloth3* τα σφάλματα στους χάρτες παράλλαξης προκύπτουν κατά σειρά από το μικρότερο στο μεγαλύτερο για τις μεθόδους AD+P_{2A}+SGM, SGBM και Census+P_{2r}+SGM. Για τα υπόλοιπα ζεύγη εικόνων (*Baby3*, *Bowling2* και *Monopoly*) καλύτερη απόδοση έχει η μέθοδος Census+P_{2r}+SGM και ακολουθούν οι SGBM και AD+P_{2A}+SGM (η τελευταία με μεγάλη διαφορά).

7.3.2 Αποτελέσματα ανακατασκευής για κάθε ζεύγος

Τα αποτελέσματα της ανακατασκευής για κάθε μέθοδο και κάθε ζεύγος εικόνων παρουσιάζονται, υπό τρεις γωνίες, στις Εικ. 7.9-7.20.



Εικόνα 7.9. Ανακατασκευή από τη μέθοδο AD+P_{2A}+SGM. Σκηνή *Cloth3*.



Εικόνα 7.10. Ανακατασκευή από τη μέθοδο Census+ P_{2r} +SGM. Σκηνή *Cloth3*.



Εικόνα 7.11. Ανακατασκευή από τη μέθοδο SGBM. Σκηνή *Cloth3*.



Εικόνα 7.12. Ανακατασκευή από τη μέθοδο AD+ P_{2A} +SGM. Σκηνή *Baby3*.



Εικόνα 7.13. Ανακατασκευή από τη μέθοδο Census+ P_{2r} +SGM. Σκηνή *Baby3*.



Εικόνα 7.14. Ανακατασκευή από τη μέθοδο SGBM. Σκηνή *Baby3*.



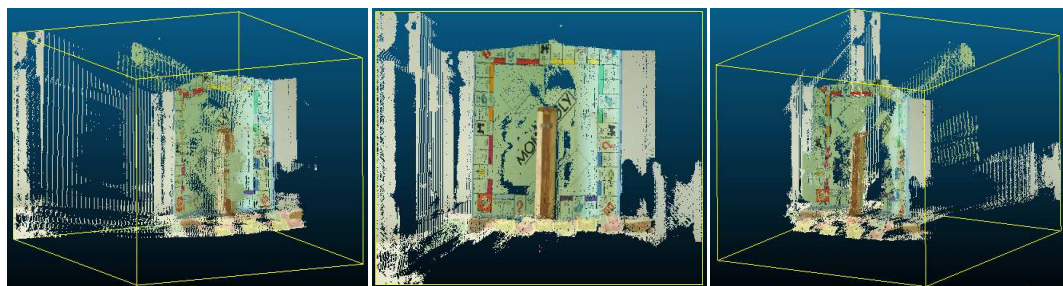
Εικόνα 7.15. Ανακατασκευή από τη μέθοδο AD+P_{2A}+SGM. Σκηνή *Bowling2*.



Εικόνα 7.16. Ανακατασκευή από τη μέθοδο Census+P_{2r}+SGM. Σκηνή *Bowling2*.



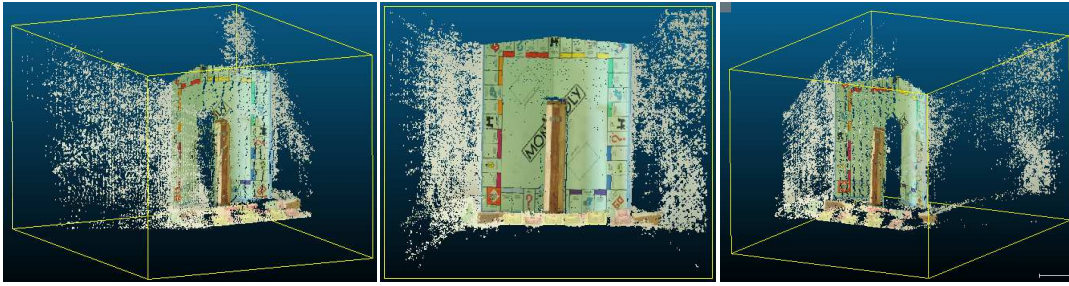
Εικόνα 7.17. Ανακατασκευή από τη μέθοδο SGBM. Σκηνή *Bowling2*.



Εικόνα 7.18. Ανακατασκευή από τη μέθοδο AD+P_{2A}+SGM. Σκηνή *Monopoly*.



Εικόνα 7.19. Ανακατασκευή από τη μέθοδο Census+P_{2r}+SGM. Σκηνή *Monopoly*.



Εικόνα 7.20. Ανακατασκευή από τη μέθοδο SGBM. Σκηνή *Monopoly*.

Παρατηρείται ότι έντονος θόρυβος υπάρχει κυρίως στο αριστερό άκρο κάθε νέφους, που αντιστοιχεί στο τμήμα της εικόνας εκτός επικαλυπτομένου και το οποίο μπορεί να αφαιρεθεί με τη βοήθεια του ελέγχου αμφίδρομης συμβατότητας.

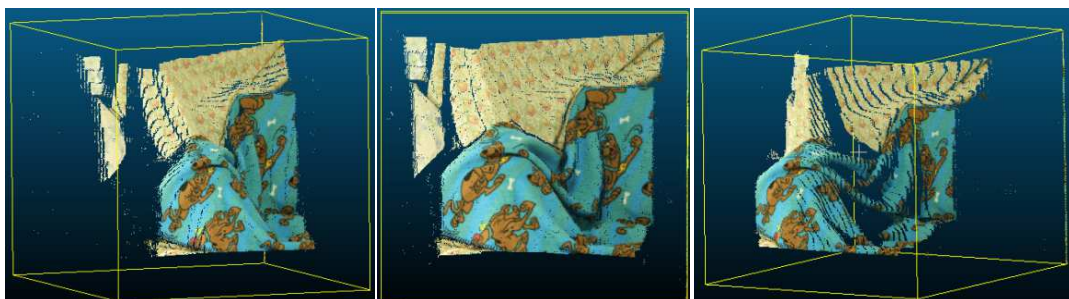
7.3.3 Στατιστική σύγκριση ανακατασκευών με τις αληθείς

Η σύγκριση των συντεταγμένων των σημείων κάθε νέφους με τις συντεταγμένες των σημείων του “αληθούς” νέφους γίνεται μόνο για τα σημεία που βρίσκονται σε περιοχές χωρίς αποκρύψεις, αφού στις περιοχές αποκρύψεων εξ ορισμού δεν μπορεί να υπολογιστεί σωστά η παράλλαξη και δεν θα ήταν αντιπροσωπευτικό να συμπεριληφθούν και αυτά τα σφάλματα στην σύγκριση.

Κατά συνέπεια, τα προϊόντα της ανακατασκευής για κάθε μέθοδο και κάθε ζεύγος εικόνων μόνο για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις παρουσιάζονται, υπό τρεις γωνίες, στις Εικ. 7.21-7.32.



Εικόνα 7.21. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο $AD+P_{2A}+SGM$. Σκηνή *Cloth3*.



Εικόνα 7.22. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο $Census+P_{2r}+SGM$. Σκηνή *Cloth3*.



Εικόνα 7.23. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο SGBM. Σκηνή *Cloth3*.



Εικόνα 7.24. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο $AD+P_{2A}+SGM$. Σκηνή *Baby3*.



Εικόνα 7.25. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο $Census+P_{2I}+SGM$. Σκηνή *Baby3*.



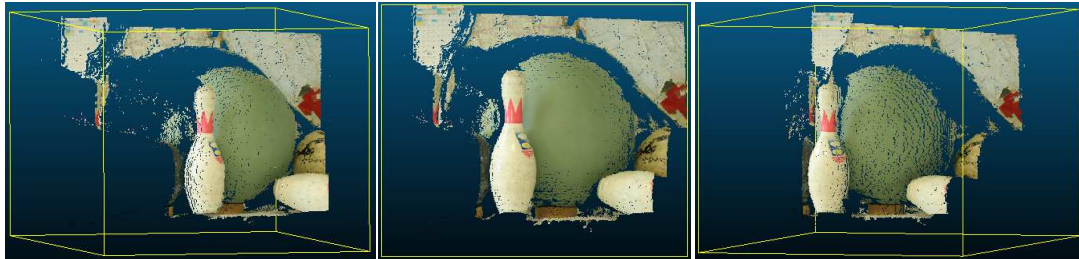
Εικόνα 7.26. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο SGBM. Σκηνή *Baby3*.



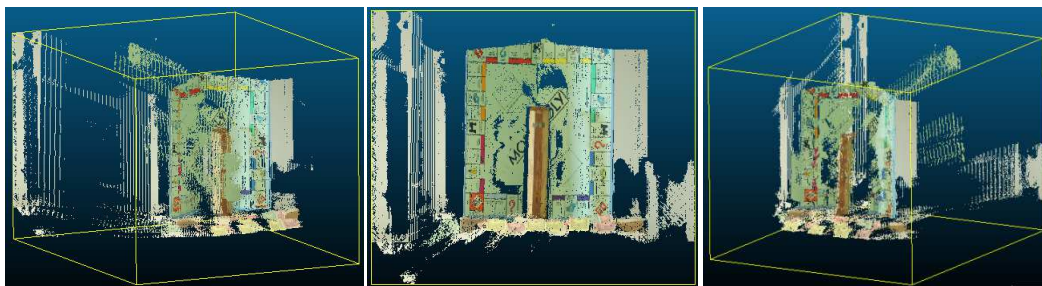
Εικόνα 7.27. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο $AD+P_{2A}+SGM$. Σκηνή *Bowling2*.



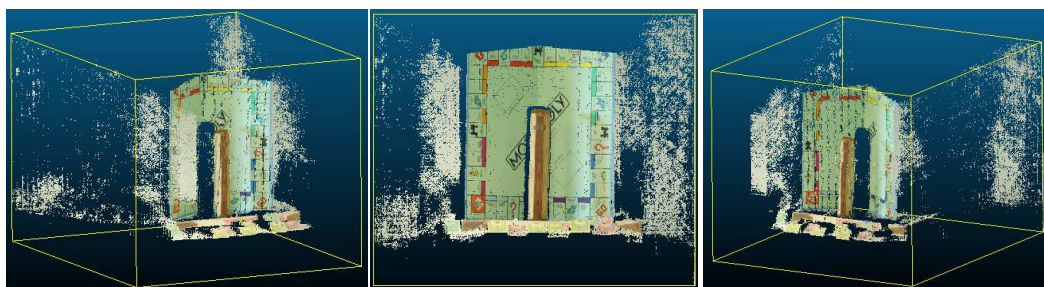
Εικόνα 7.28. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο $Census+P_{2r}+SGM$. Σκηνή *Bowling2*.



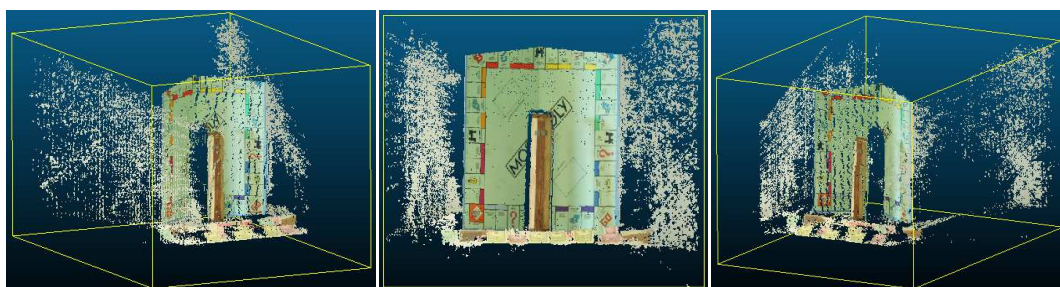
Εικόνα 7.29. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο SGBM. Σκηνή *Bowling2*.



Εικόνα 7.30. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο $AD+P_{2A}+SGM$. Σκηνή *Monopoly*.



Εικόνα 7.31. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο $Census+P_{2r}+SGM$. Σκηνή *Monopoly*.



Εικόνα 7.32. Ανακατασκευή μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων από τη μέθοδο SGBM. Σκηνή *Monopoly*.

Ακολουθως υπολογίζονται για κάθε ζεύγος εικόνων οι διαφορές κατά XYZ των συντεταγμένων κάθε νέφους σημείων με τις συντεταγμένες από το αντίστοιχο “αληθές” νέφος και εξάγονται ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφορών για το σύνολο των σημείων (σε mm και pix) και τα ίδια στατιστικά στοιχεία μόνο για όσα σημεία έχουν διαφορές κατά Z που ανήκουν στο διάστημα $[-3\sigma, 3\sigma]$, ώστε να έχουν αφαιρεθεί χονδροειδή σφάλματα (Πίνακες 7.3-7.6).

Υπογραμμίζεται ότι στην προκειμένη περίπτωση οι αποκλίσεις ΔX και ΔY οφείλονται αποκλειστικά και μόνο στα σφάλματα της παράλλαξης (της απόστασης λήψης, και άρα της κλίμακας) δεδομένου ότι οι εικονοσυντεταγμένες x, y στον αληθή και τους υπολογισμένους χάρτες παράλλαξης είναι ακριβώς οι ίδιες. Επομένως, οι τιμές ΔX και ΔY δίνονται εδώ απλώς ενδεικτικά. Το ενδιαφέρον, δηλαδή, επικεντρώνεται αποκλειστικά στις αποκλίσεις ΔZ που οφείλονται στις διαφορές παράλλαξης, οι οποίες και είναι το κριτήριο για την αξιολόγηση των μεθόδων. Συνεπώς, η αναγωγή στο επίπεδο της εικόνας, μέσω της Εξ. (2.24), παρουσιάζεται μόνο για τα $RMS_{\Delta Z}$.

Σκηνή <i>Cloth3</i>									
	Σύγκριση AD+P _{2A} +SGM με αληθή			Σύγκριση Census+P _{2r} +SGM με αληθή			Σύγκριση SGBM με αληθή		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
μ^{mm}	0.0	0.0	-1.4	-0.3	0.0	0.8	0.0	0.0	-1.7
σ^{mm}	0.8	0.7	8.3	5.3	3.0	33.2	1.1	0.9	10.6
RMS^{mm}	0.8	0.7	8.4	5.3	3.0	33.2	1.1	0.9	10.7
RMS^{pix}			0.7			2.8			0.9
$\Delta Z [-3\sigma, 3\sigma]: 98.5\%$ των σημείων			98.7% των σημείων			99.4% των σημείων			
μ^{mm}	0.0	0.0	-0.9	0.1	0.0	-1.2	0.0	0.0	-1.1
σ^{mm}	0.5	0.4	5.1	0.7	0.6	7.2	0.5	0.4	5.0
RMS^{mm}	0.5	0.4	5.2	0.7	0.6	7.3	0.5	0.4	5.1
RMS^{pix}			0.4			0.6			0.4

Πίνακας 7.3. Σύγκριση της ανακατασκευής από κάθε μέθοδο με εκείνη από τον αληθή χάρτη για το σύνολο των σημείων (πάνω) και μόνο για τα σημεία με διαφορές ΔZ στο διάστημα $[-3\sigma, 3\sigma]$. Σκηνή *Cloth3*.

Σκηνή <i>Baby3</i>									
	Σύγκριση AD+P _{2A} +SGM με αληθή			Σύγκριση Census+P _{2r} +SGM με αληθή			Σύγκριση SGBM με αληθή		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
μ^{mm}	-1.4	3.4	23.4	-0.6	0.1	2.7	0.1	0.1	-0.7
σ^{mm}	15.4	17.7	133.7	10.6	5.6	73.5	4.7	3.1	50.6
RMS^{mm}	15.5	18.0	135.8	10.6	5.6	73.6	4.7	3.1	50.6
RMS^{pix}			8.8			4.8			3.29
$\Delta Z [-3\sigma, 3\sigma]: 97.3\%$ των σημείων			99% των σημείων			98.8% των σημείων			
μ^{mm}	0.4	0.8	7.2	0.1	0.0	1.1	0.1	0.0	1.5
σ^{mm}	3.9	4.5	37.6	1.9	1.5	19.2	1.5	1.3	15.6
RMS^{mm}	3.9	4.6	38.3	1.9	1.5	19.2	1.5	1.3	15.7
RMS^{pix}			2.5			1.2			1.0

Πίνακας 7.4. Σύγκριση της ανακατασκευής από κάθε μέθοδο με εκείνη από τον αληθή χάρτη για το σύνολο των σημείων (πάνω) και μόνο για τα σημεία με διαφορές ΔZ στο διάστημα $[-3\sigma, 3\sigma]$. Σκηνή *Baby3*.

Σκηνή Bowling2									
	Σύγκριση AD+P _{2A} +SGM με αληθή			Σύγκριση Censu+P _{2Γ} +SGM με αληθή			Σύγκριση SGBM με αληθή		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
μ ^{mm}	0.1	0.0	-6.4	-0.6	-0.1	-3.2	-0.1	-0.3	-8.9
σ ^{mm}	5.4	6.6	62.3	12.5	8.5	91.2	7.3	6.6	72.2
RMS ^{mm}	5.4	6.6	62.6	12.6	8.5	91.3	7.3	6.6	72.8
RMS ^{pix}			4.0			5.9			4.7
ΔZ [-3σ, 3σ] : 99% των σημείων			98.6% των σημείων			98.8% των σημείων			
μ ^{mm}	0.0	0.4	-3.2	0.0	0.0	-1.9	0.0	0.0	-3.6
σ ^{mm}	3.0	2.5	27.1	2.2	2.1	20.0	2.1	1.9	19.7
RMS ^{mm}	3.0	2.5	27.2	2.2	2.1	20.1	2.1	1.9	20.1
RMS ^{pix}			1.8			1.3			1.3

Πίνακας 7.5. Σύγκριση ανακατασκευής από κάθε μέθοδο με εκείνη από τον αληθή χάρτη για το σύνολο των σημείων (πάνω) και μόνο για τα σημεία με ΔZ στο διάστημα [-3σ,3σ]. Σκηνή *Bowling2*.

Σκηνή Monopoly									
	Σύγκριση AD+P _{2A} +SGM με αληθή			Σύγκριση Censu+P _{2Γ} +SGM με αληθή			Σύγκριση SGBM με αληθή		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
μ ^{mm}	4.8	3.5	-82.9	-7.7	4.5	-110.5	-5.6	2.6	-115.0
σ ^{mm}	38.0	21.1	261.6	42.0	21.0	265.4	40.9	21.1	250.0
RMS ^{mm}	38.3	21.4	274.4	42.7	21.5	287.5	41.3	21.3	275.1
RMS ^{pix}			13.7			14.4			13.8
ΔZ [-3σ, 3σ] : 99.8% των σημείων			94% των σημείων			95.7% των σημείων			
μ ^{mm}	4.6	3.3	-83.9	-0.1	2.6	-63.1	-1.6	2.9	-81.5
σ ^{mm}	37.7	20.6	259.1	29.4	15.7	189.9	31.9	16.0	196.1
RMS ^{mm}	38.0	20.9	272.3	29.4	15.9	200.1	31.9	16.3	212.3
RMS ^{pix}			13.6			10.0			10.6

Πίνακας 7.6. Σύγκριση της ανακατασκευής από κάθε μέθοδο με εκείνη από τον αληθή χάρτη για το σύνολο των σημείων (πάνω) και μόνο για τα σημεία με ΔZ στο διάστημα [-3σ,3σ]. Σκηνή *Monopoly*.

7.3.4 Συμπεράσματα

Η αξιολόγηση βασίζεται κυρίως στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφορών κατά Z (RMS_{ΔZ}). Αποδεκτό μπορεί να θεωρηθεί το σφάλμα από 1 έως 2 εικονοψηφίδες.

Για το ζεύγος εικόνων *Cloth3*, το μικρότερο σφάλμα για όλα τα σημεία προκύπτει για τη μέθοδο AD+P_{2A}+SGM. Μετά από την αφαίρεση των σημείων έξω από το διάστημα [-3σ,3σ], μειώνεται το μεγάλο σφάλμα της μεθόδου Censu+P_{2Γ}+SGM (που οφειλόταν σε σημεία λιγότερα από το 1% των συνολικών), αλλά τα σφάλματα της AD+P_{2A}+SGM και της SGBM παραμένουν τα μικρότερα και ίσα (της τάξης του 0.4 pix).

Όσον αφορά το ζεύγος εικόνων *Baby3*, τα μεγαλύτερα σφάλματα επιτυγχάνονται για τις μεθόδους (κατά σειρά): AD+P_{2A}+SGM, Censu+P_{2Γ}+SGM και SGBM. Μετά από την αφαίρεση των χονδροειδών σφαλμάτων, μειώνεται κατά πολύ το σφάλμα της AD+P_{2A}+SGM, αλλά καλύτερες μέθοδοι παραμένουν οι SGBM και Censu+P_{2Γ}+SGM (με μικρή διαφορά, με σφάλματα 1.0-1.2 pix).

Σχετικά με το ζεύγος εικόνων *Bowling2*, για το σύνολο των σημείων των νεφών η μέθοδος AD+P_{2A}+SGM υπερτερεί των άλλων δύο. Μετά από την αφαίρεση των σημείων έξω από το [-3σ,3σ] (1.5% επί του συνόλου) τα σφάλματα των άλλων δύο μεθόδων μειώνονται σημαντικά, με την SGBM να είναι ισάξια της Census+P_{2r}+SGM, και εμφανίζουν σφάλμα της τάξης του 1.3 pix.

Για το ζεύγος εικόνων *Monopoly*, τα σφάλματα όλων των μεθόδων είναι πολύ υψηλά (14 pix). Όταν αφαιρούνται τα σημεία με >3σ μειώνονται τα σφάλματα των μεθόδων Census+P_{2r}+SGM και SGBM, αλλά παραμένουν υψηλά (10 pix).

Συμπερασματικά, γίνεται αντιληπτό πως πριν από την αφαίρεση των σημείων εκτός του διαστήματος [-3σ, 3σ] η μέθοδος AD+P_{2A}+SGM παρουσιάζει τα μικρότερα σφάλματα για τα τρία από τα τέσσερα ζεύγη εικόνων (εκτός του *Baby3*). Κατόπιν, επειδή απαλείφονται τα χονδροειδή σφάλματα, υπερτερούν (εκτός από την περίπτωση του *Cloth3*) οι μέθοδοι SGBM και Census+P_{2r}+SGM, με μικρή διαφορά μεταξύ τους.

7.4 3D Ανακατασκευή με Βελτιώσεις των Χαρτών Παράλλαξης

Σε αυτή την ενότητα χρησιμοποιείται για κάθε ζεύγος ο χάρτης παράλλαξης με τα μικρότερα σφάλματα από όλες τις μεθόδους που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, δηλαδή εκείνος της μεθόδου Census+P_{2r}+SGM (τα σφάλματα από την ανακατασκευή χωρίς βελτιώσεις είναι για αυτήν οριακά μεγαλύτερα από εκείνα της ανακατασκευής από την μέθοδο SGBM της OpenCV). Διερευνάται κατά πόσον θα βελτιωθεί το νέφος σημείων που παράγεται από την 3D ανακατασκευή όταν ο χάρτης παράλλαξης υποστεί κάποιες από τις πιο γνωστές βελτιώσεις, όπως η εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων (αυτή φυσικά υφίσταται μόνο σε περιπτώσεις ελεγχόμενου πειραματισμού), ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας, το φίλτρο μεσαίας τιμής και η υποψηφιδική παρεμβολή.

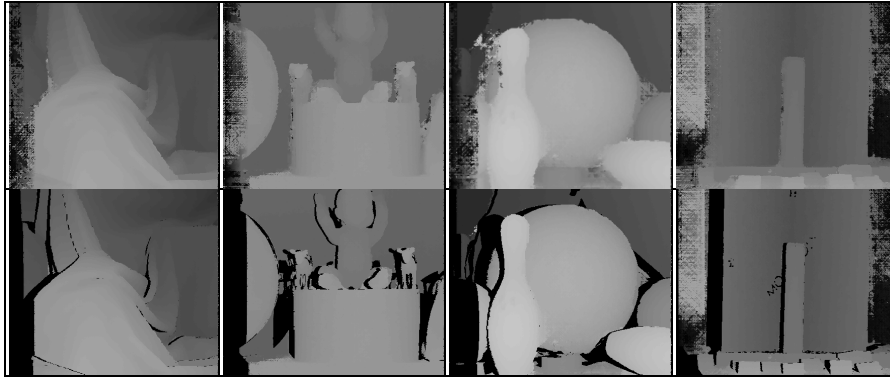
7.4.1 Εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων

Όταν αφαιρεθούν οι περιοχές αποκρύψεων από τον χάρτη παράλλαξης (χάρη στους χάρτες αποκρύψεων που διατίθενται στην προκειμένη περίπτωση) αναμένονται λιγότερα σφάλματα και άρα βελτίωσή του. Στον Πίνακα 7.7 παρατίθενται τα σφάλματα για τον χάρτη παράλλαξης κάθε ζεύγους εικόνων, πριν και μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων (βλ. και Πίνακα 7.2).

	Σφάλμα (%)	
	Χωρίς εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων	Μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων
Σκηνή <i>Cloth3</i>	4.1	2.1
Σκηνή <i>Baby3</i>	13.3	3.8
Σκηνή <i>Bowling2</i>	14.7	6.4
Σκηνή <i>Monopoly</i>	22.2	13.2

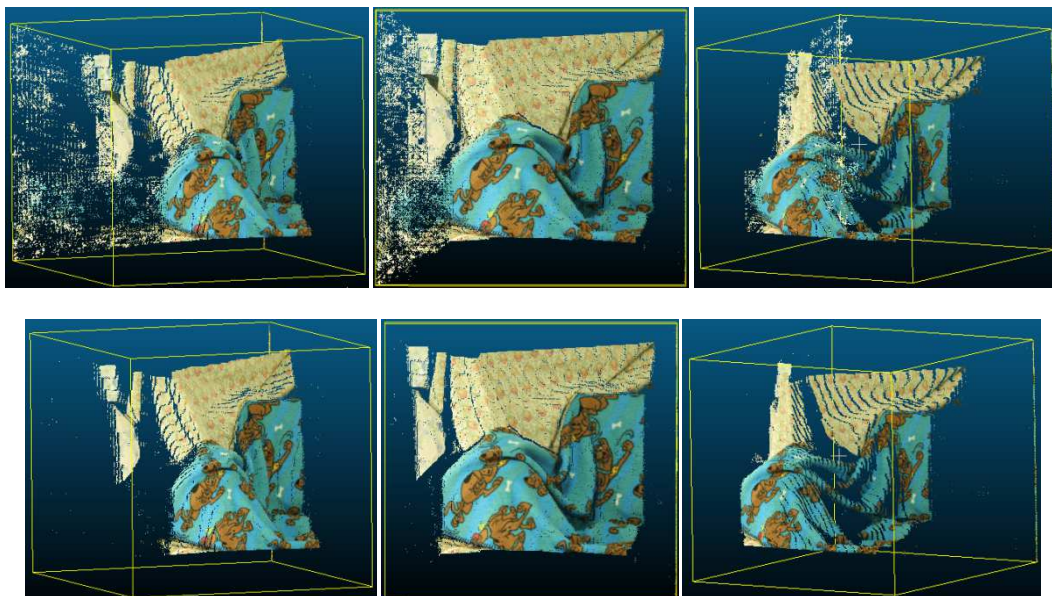
Πίνακας 7.7. Σφάλματα συνταύτισης των χαρτών παράλλαξης πριν και μετά από την αφαίρεση των περιοχών αποκρύψεων.

Αντίστοιχα, οι χάρτες παράλλαξης που παράγονται παρουσιάζονται στην Εικ. 7.33.



Εικόνα 7.33. Επάνω σειρά: Χάρτες παράλλαξης πριν από την επιβολή μάσκας αποκρύψεων. Κάτω σειρά: Χάρτες παράλλαξης μετά από την επιβολή μάσκας αποκρύψεων. Από αριστερά προς τα δεξιά: Ζεύγη εικόνων *Cloth3*, *Baby3*, *Bowling2* και *Monopoly*.

Τέλος, για κάθε ζεύγος δείχνονται υπό τρεις γωνίες τα προϊόντα (με υφή) των ανακατασκευών πριν και μετά από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων (Εικ. 7.34-7.37):



Εικόνα 7.34. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Cloth3*.

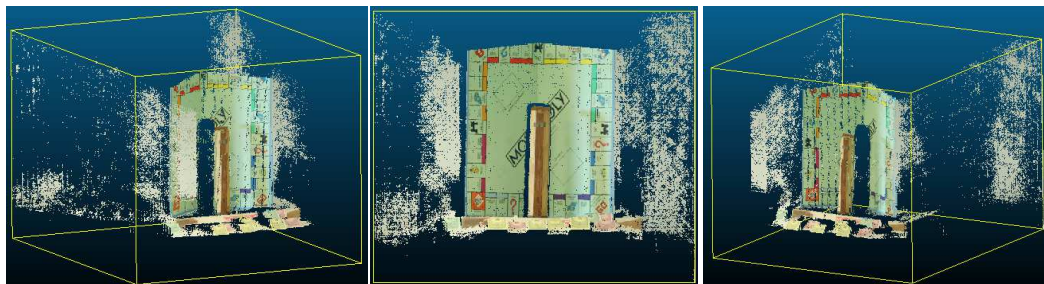




Εικόνα 7.35. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Baby3*.



Εικόνα 7.36. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Bowling2*.



Εικόνα 7.37. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων. Σκηνή *Monopoly*.

Με την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων απομακρύνονται, όπως αναμενόταν, πολλά

χονδροειδή σφάλματα που οφείλονταν σε (αναπόφευκτες) εσφαλμένες ομολογίες. Στην περίπτωση των τριών πρώτων ζευγών η βελτίωση είναι πιο μεγάλη, στην περίπτωση του *Monopoly* τα σφάλματα που παραμένουν οφείλονται σε άλλους λόγους (πχ. αδυναμία σωστής συνταύτισης λόγω φτωχής υφής).

7. 4.2 Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας

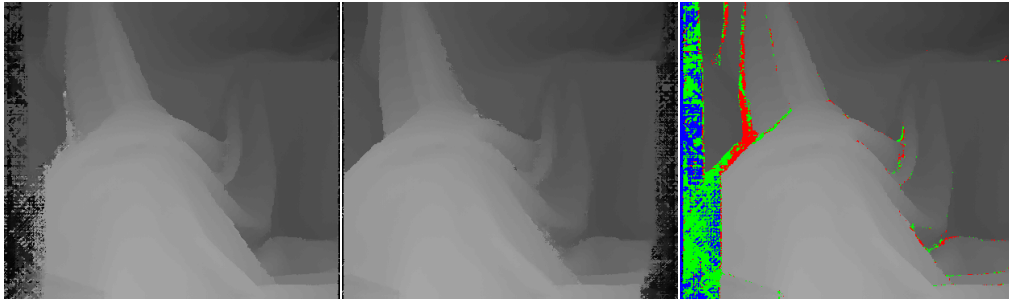
Για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας, χρειάζονται ο χάρτης παράλλαξης από την συνταύτιση της δεξιάς εικόνας με την αριστερή και εκείνος από την συνταύτιση της αριστερής με την δεξιά. Κατώφλι για τις αποδεκτές διαφορές παράλλαξης που μπορεί να εμφανίζει το ίδιο σημείο στους δυο χάρτες παράλλαξης είναι η 1 εικονοψηφίδα. Το αποτέλεσμα του ελέγχου είναι ένας χάρτης ψηφιακών παραλλάξεων (της αριστερής εικόνας), επί του οποίου έχουν επισημανθεί οι περιοχές αστοχίας με χρώμα. Με την αφαίρεση των περιοχών με ασύμβατες παραλλάξεις από τον χάρτη παράλλαξης αναμένονται λιγότερα σφάλματα και άρα βελτίωση του χάρτη παράλλαξης.

Στον Πίνακα 7.8 παρατίθενται το σφάλμα για τον χάρτη παράλλαξης κάθε ζεύγους εικόνων πριν από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, το ποσοστό των σημείων που περνά τον έλεγχο και το σφάλμα μετά από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας. Διαπιστώνεται ότι οι παραλλάξεις των σημείων που αφαιρούνται ήταν πράγματι εσφαλμένες, αφού μειώνεται σαφώς το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης που είναι μεγαλύτερες από 1 εικονοψηφίδα.

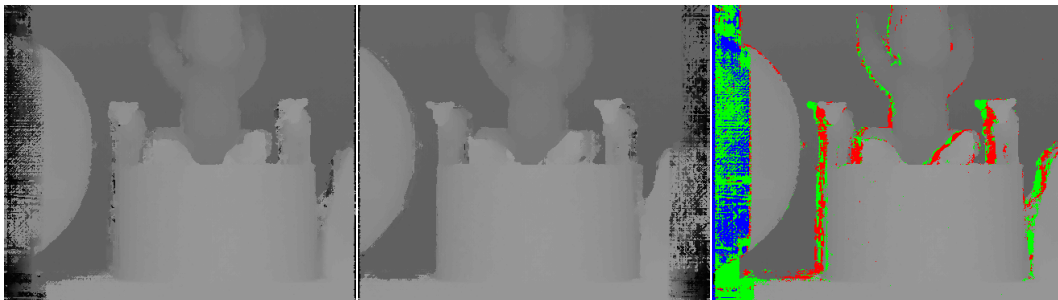
Ζεύγος εικόνων	Σφάλμα (%) πριν από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας	Ποσοστό (%) των σημείων που περνά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας	Σφάλμα (%) μετά από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας
Cloth3	4.1	91.8	2.3
Baby3	13.3	87.9	9.1
Bowling2	14.7	84.5	9.3
Monopoly	22.2	79.9	11.4

Πίνακας 7.8. Σφάλματα συνταύτισης των χαρτών παράλλαξης πριν από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, ποσοστό των σημείων που περνούν τον έλεγχο και σφάλματα συνταύτισης μετά από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας.

Αντίστοιχα, οι δύο παραγόμενοι χάρτες παράλλαξης (της αριστερής και της δεξιάς εικόνας) και ο χάρτης παράλλαξης με επισημασμένες τις περιοχές αστοχίας παρουσιάζονται στις Εικ. 7.38-7.41. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα σημεία των οποίων η θέση, με βάση την υπολογισμένη παράλλαξη του αριστερού χάρτη, βρίσκονται εκτός της δεξιάς εικόνας, με κόκκινο χρώμα όσα σημεία έχουν παράλλαξη στον αριστερό χάρτη μεγαλύτερη κατά 2 και πλέον εικονοψηφίδες από εκείνη του δεξιού, ενώ με πράσινο χρώμα τα σημεία που έχουν παράλλαξη στον δεξιό χάρτη μεγαλύτερη κατά 2 και πλέον εικονοψηφίδες από εκείνη του αριστερού.



Εικόνα 7.38. Χάρτες παράλλαξης αριστερής και δεξιάς εικόνας και χάρτης παράλλαξης όπου με χρώμα επισημαίνονται τα σημεία που δεν πέρασαν τον έλεγχο συμβατότητας. Σκηνή *Cloth3*.



Εικόνα 7.39. Χάρτες παράλλαξης αριστερής και δεξιάς εικόνας και χάρτης παράλλαξης όπου με χρώμα επισημαίνονται τα σημεία που δεν πέρασαν τον έλεγχο συμβατότητας. Σκηνή *Baby3*.

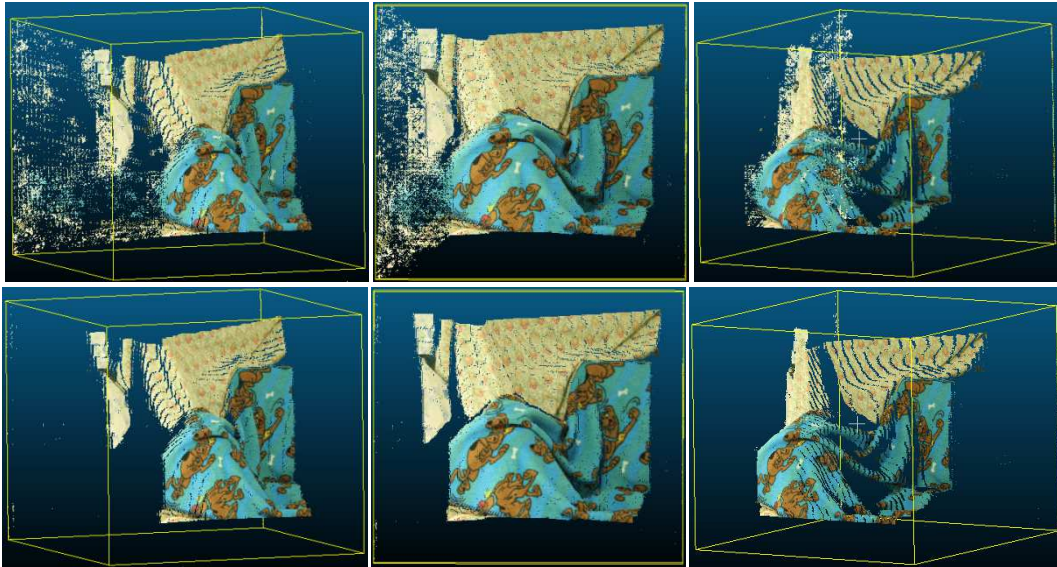


Εικόνα 7.40. Χάρτες παράλλαξης αριστερής και δεξιάς εικόνας και χάρτης παράλλαξης όπου με χρώμα επισημαίνονται τα σημεία που δεν πέρασαν τον έλεγχο συμβατότητας. Σκηνή *Bowling2*.

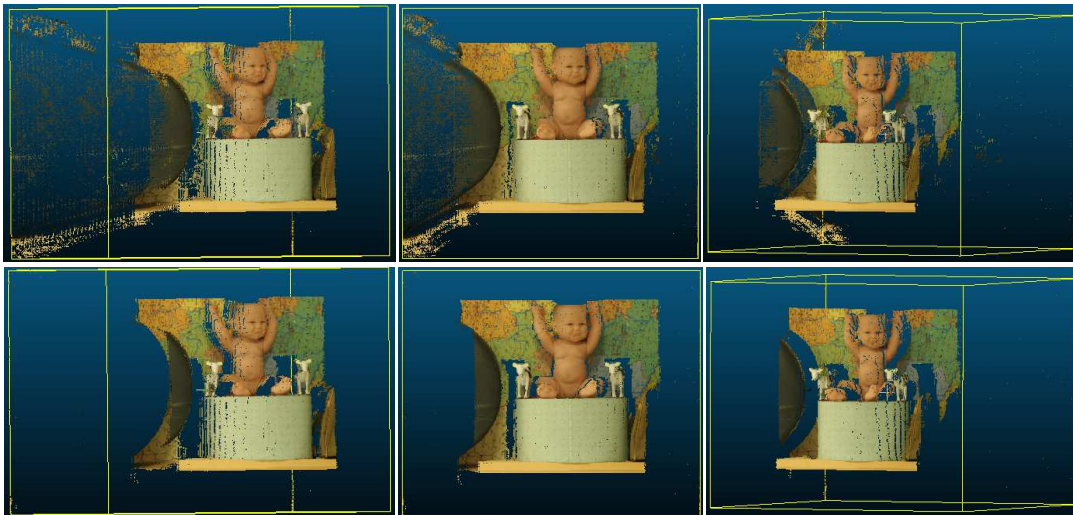


Εικόνα 7.41. Χάρτες παράλλαξης αριστερής και δεξιάς εικόνας και χάρτης παράλλαξης όπου με χρώμα επισημαίνονται τα σημεία που δεν πέρασαν τον έλεγχο συμβατότητας. Σκηνή *Monopoly*.

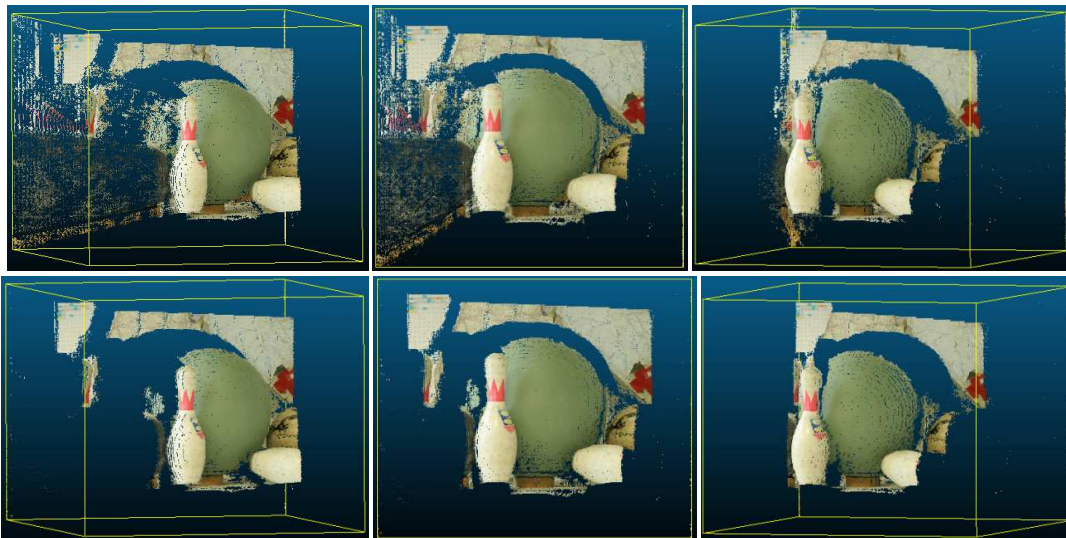
Τέλος, για κάθε ζεύγος παρουσιάζονται υπό τρεις γωνίες τα αποτελέσματα των ανακατασκευών πριν και μετά από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας (Εικ. 7.42-7.45).



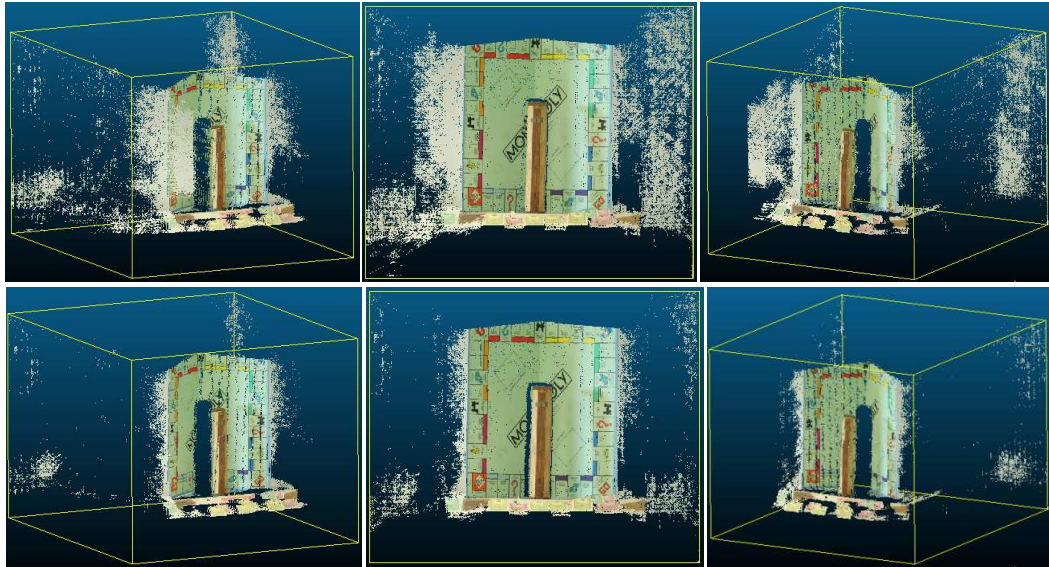
Εικόνα 7.42. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας. Σκηνή *Cloth3*.



Εικόνα 7.43. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας. Σκηνή *Baby3*.



Εικόνα 7.44. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας. Σκηνή *Bowling2*.



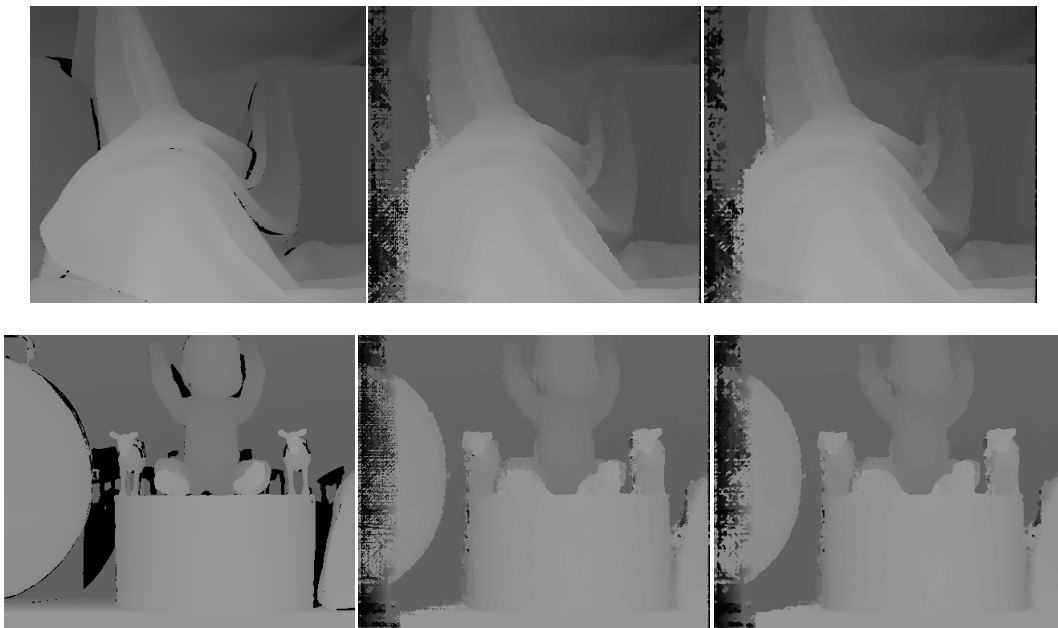
Εικόνα 7.45. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας. Σκηνή *Monopoly*.

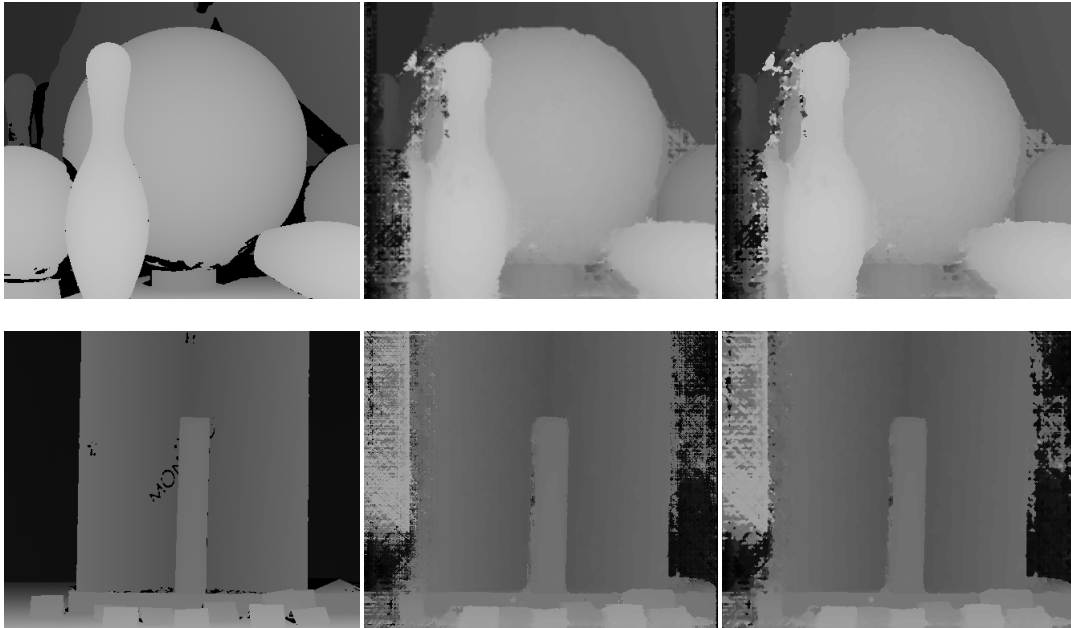
Με τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας απομακρύνθηκαν εσφαλμένες ομολογίες σημείων εκτός του επικαλυπτόμενου τμήματος ή σε περιοχές αποκρύψεων. Στην περίπτωση του *Monopoly* φεύγουν πολλά σημεία που δεν συνταυτίστηκαν σωστά.

7.4.3 Φίλτρο μεσαίας τιμής

Ο αρχικός χάρτης παράλλαξης κάθε ζεύγους υπόκειται σε φίλτρο μεσαίας τιμής μέσω της συνάρτησης *medfilt2* του Matlab με παράθυρο 3×3 . Με αυτό τον τρόπο απομακρύνεται ο διακριτός θόρυβος που τυχόν υπάρχει και προκαλείται από τις τοπικά λανθασμένες ομολογίες σημείων κατά τη συνταύτιση.

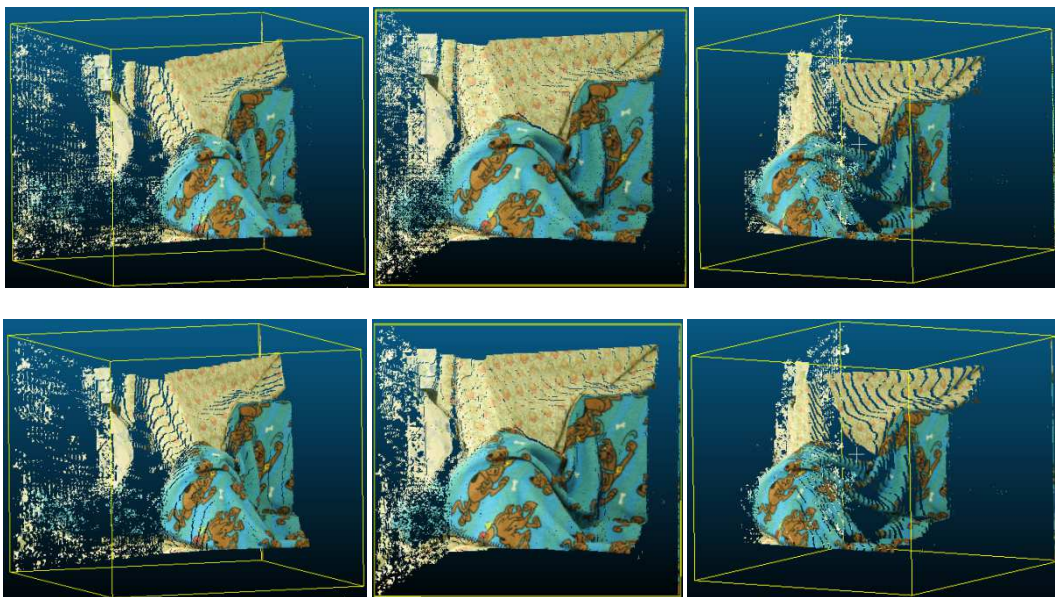
Οι χάρτες παράλλαξης που παράγονται παρουσιάζονται στην Εικ. 7.46.





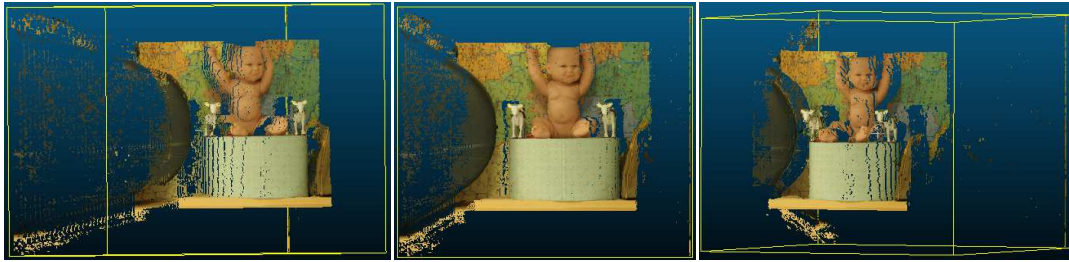
Εικόνα 7.46. Σε κάθε σειρά: Αληθής χάρτης παράλλαξης και χάρτες παράλλαξης πριν και μετά από την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής. Από επάνω προς τα κάτω: Ζεύγος εικόνων *Cloth3*, *Baby3*, *Bowling2* και *Monopoly*.

Τέλος, για κάθε ζεύγος παρουσιάζονται υπό τρεις γωνίες τα προϊόντα των ανακατασκευών πριν και μετά από την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής (Εικ. 7.47-7.50):



Εικόνα 7.47. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής. Σκηνή *Cloth3*.





Εικόνα 7.48. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής. Σκηνή *Baby3*.



Εικόνα 7.49. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής. Σκηνή *Bowling2*.



Εικόνα 7.50. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής. Σκηνή *Monopoly*.

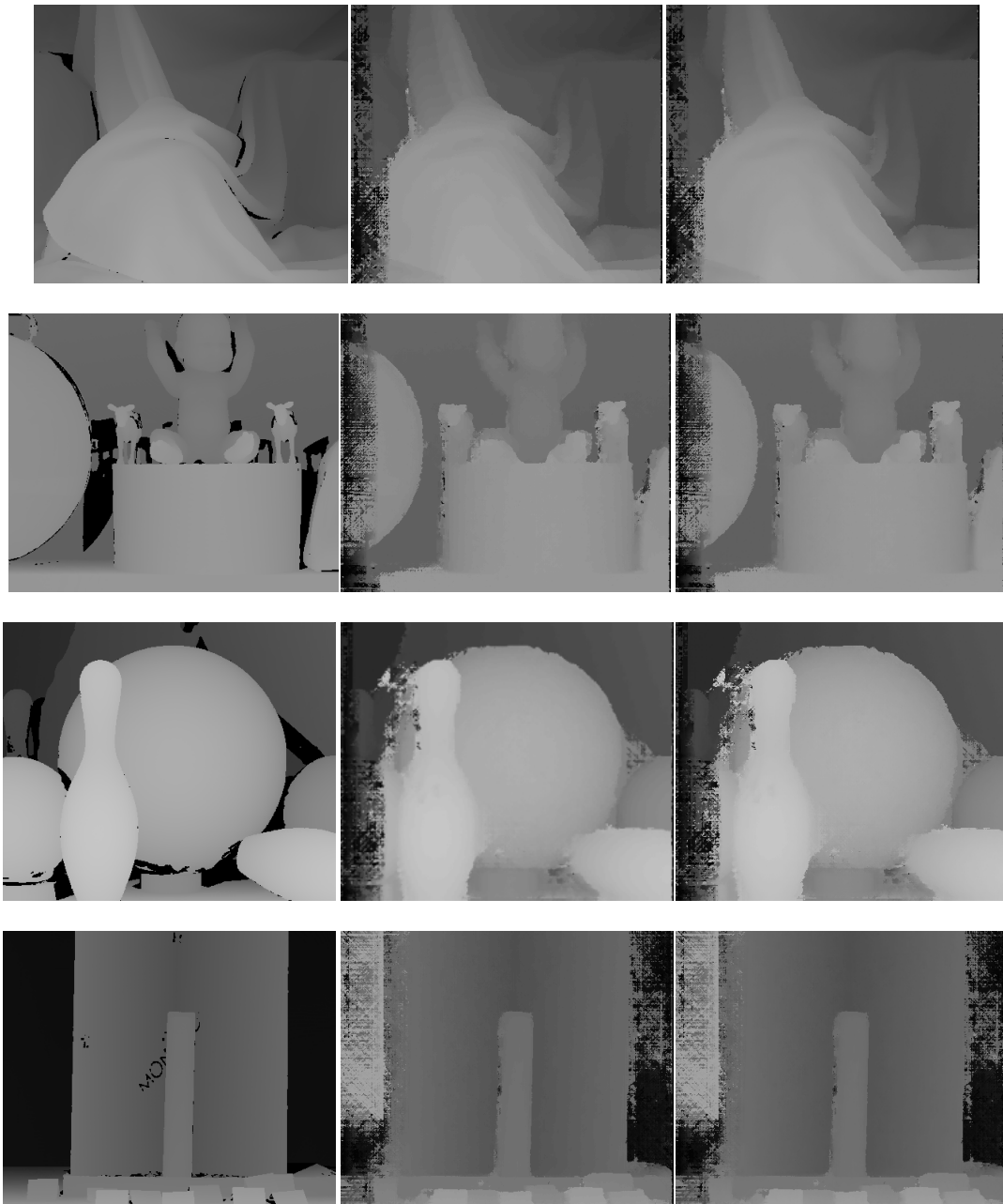
Δεν φαίνεται κάποια αισθητή βελτίωση, ούτε στους χάρτες παράλλαξης αλλά ούτε και στις ανακατασκευές, με την εφαρμογή του φίλτρου μεσαίας τιμής, ίσως επειδή

οι αρχικοί χάρτες παράλλαξης δεν παρουσίαζαν διακριτό θόρυβο.

7. 4.4 Υποψηφιακή παρεμβολή

Για να υπολογιστεί η παράλλαξη με ακρίβεια ανώτερη της μιας εικονοψηφίδας μπορεί, όπως έχει αναφερθεί ήδη, να παρεμβληθεί πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού στις διακριτές τιμές του τρισδιάστατου πίνακα κόστους DSI.

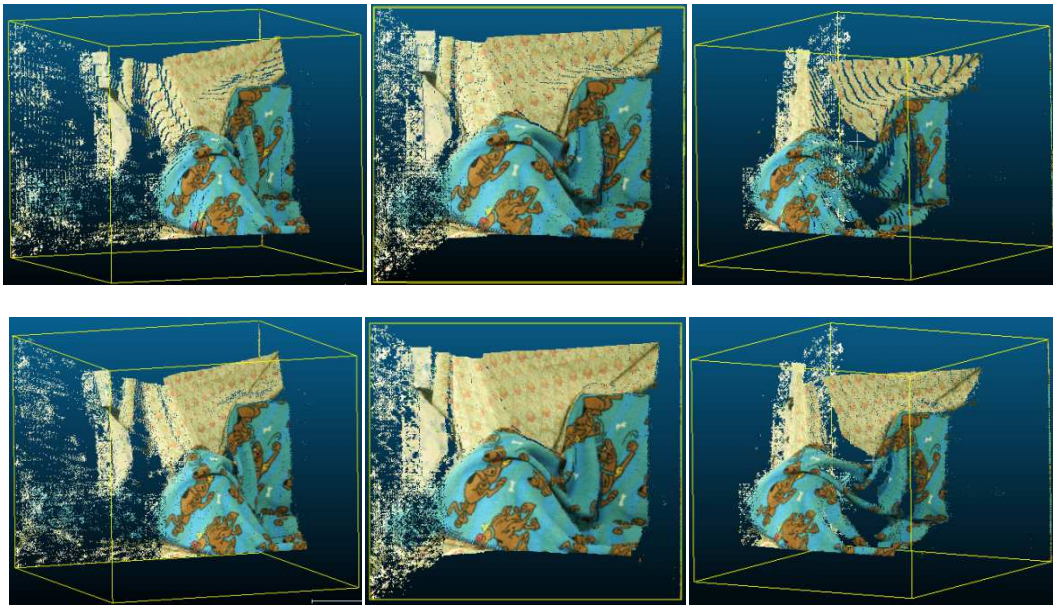
Οι χάρτες παράλλαξης που παράγονται παρουσιάζονται στην Εικ. 7.51.



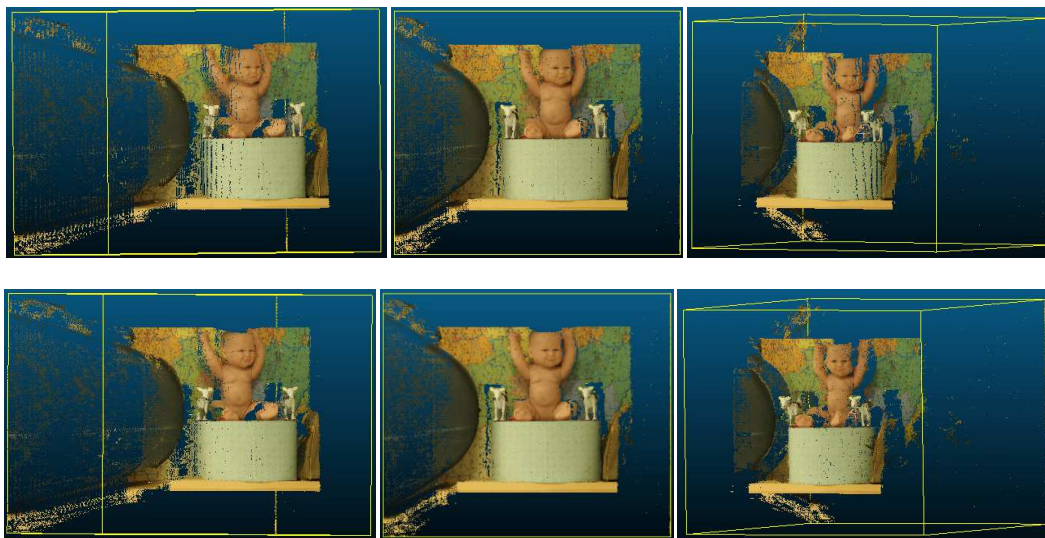
Εικόνα 7.51. Σε κάθε σειρά: Αληθής χάρτης παράλλαξης και χάρτες παράλλαξης πριν και μετά από την υποψηφιακή παρεμβολή. Από επάνω προς τα κάτω: Σκηνή *Cloth3*, *Baby3*, *Bowling2* και *Monopoly*.

Τέλος, για κάθε ζεύγος εμφανίζονται υπό τρεις γωνίες τα αποτελέσματα των ανακα-

τασκευών πριν και μετά από την υποψηφιδική παρεμβολή (Εικ. 7.52-7.55).



Εικόνα 7.52. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την υποψηφιδική παρεμβολή. Σκηνή *Cloth3*.



Εικόνα 7.53. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την υποψηφιδική παρεμβολή. Σκηνή *Baby3*.





Εικόνα 7.54. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την υποψηφιακή παρεμβολή. Σκηνή *Bowling2*.



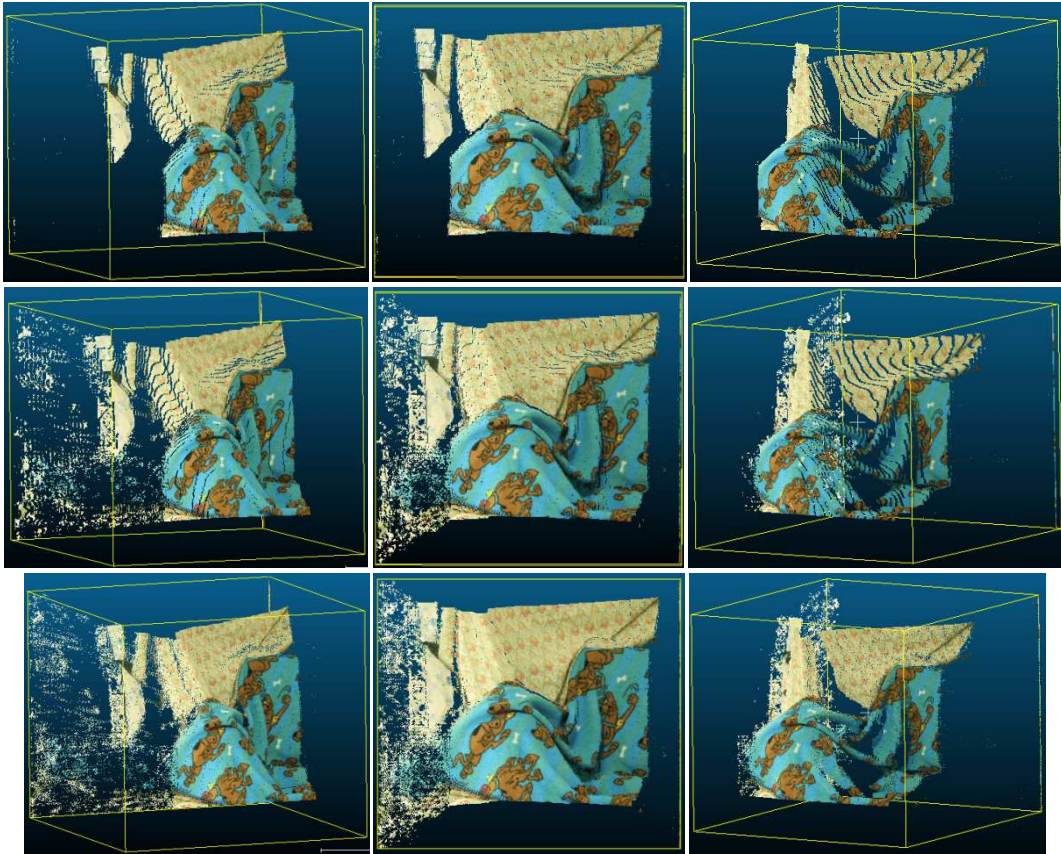
Εικόνα 7.55. Ανακατασκευή με βάση τον χάρτη παράλλαξης πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από την υποψηφιακή παρεμβολή. Σκηνή *Monopoly*.

Με την υποψηφιακή παρεμβολή συμπληρώνονται κάποια κενά στα απεικονιζόμενα αντικείμενα οφειλόμενα σε άλματα της παράλλαξης (πχ. στο σεντόνι του *Cloth3* που βρίσκεται επάνω και δεξιά στην εικόνα, και στο αριστερό τμήμα του πάνελ της *Monopoly*) ή και εξομαλύνονται ορισμένες ακμές.

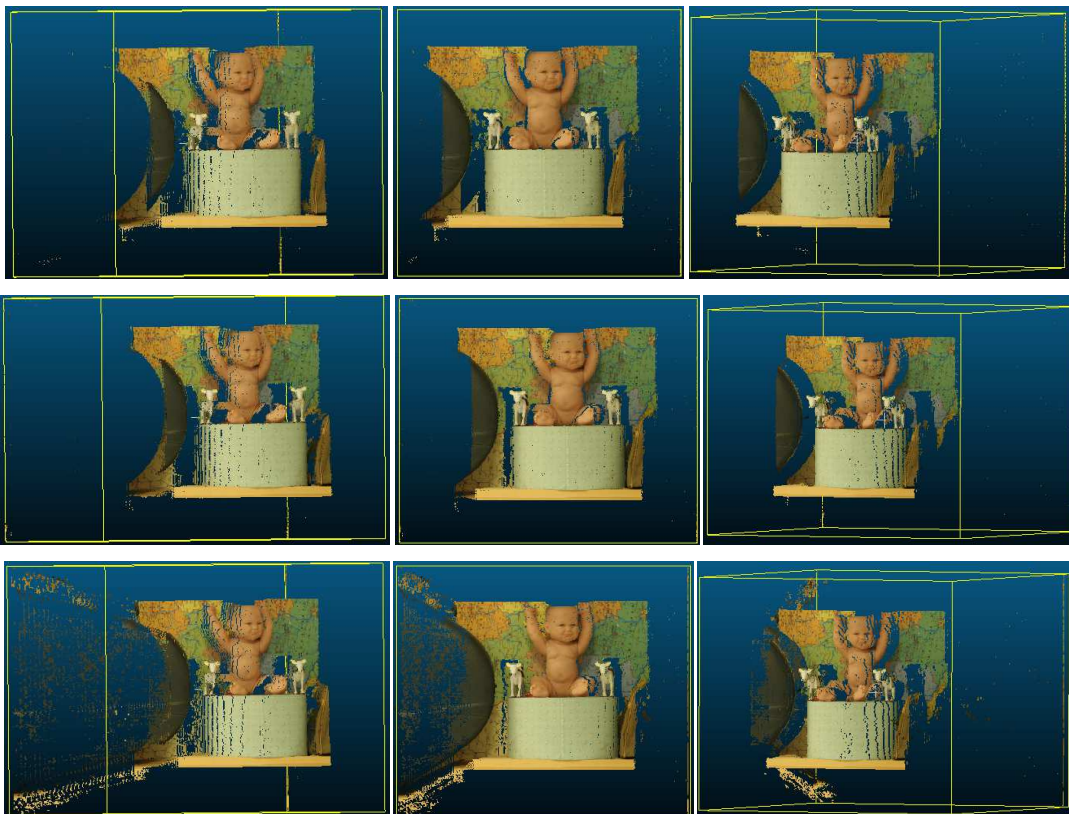
7. 4.5 Σύγκριση των βελτιωμένων 3D μοντέλων

Στην υποενότητα αυτή συγκρίνονται τα αποτελέσματα των 4 ανακατασκευών με τις διάφορες μεθόδους βελτίωσης του χάρτη παράλλαξης για κάθε ζεύγος εικόνων (Εικ. 7.56-7.59).





Εικόνα 7.56. Ανακατασκευή υπό τρεις γωνίες με βάση τον χάρτη παράλλαξης με (από επάνω προς τα κάτω): εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων, έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας, εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής, υποψηφιακή παρεμβολή. Σκηνή *Cloth3*.

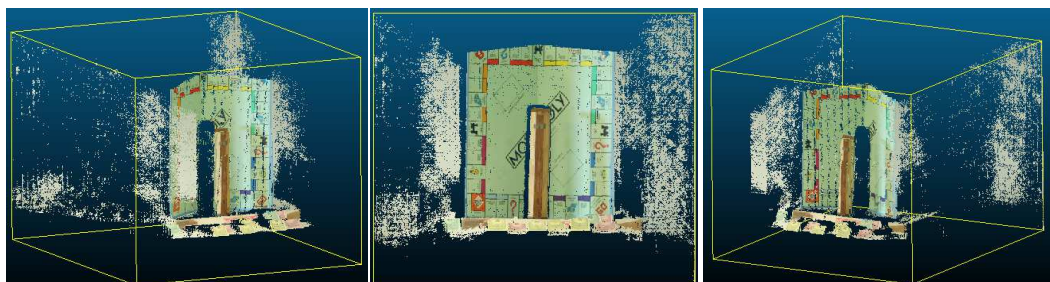


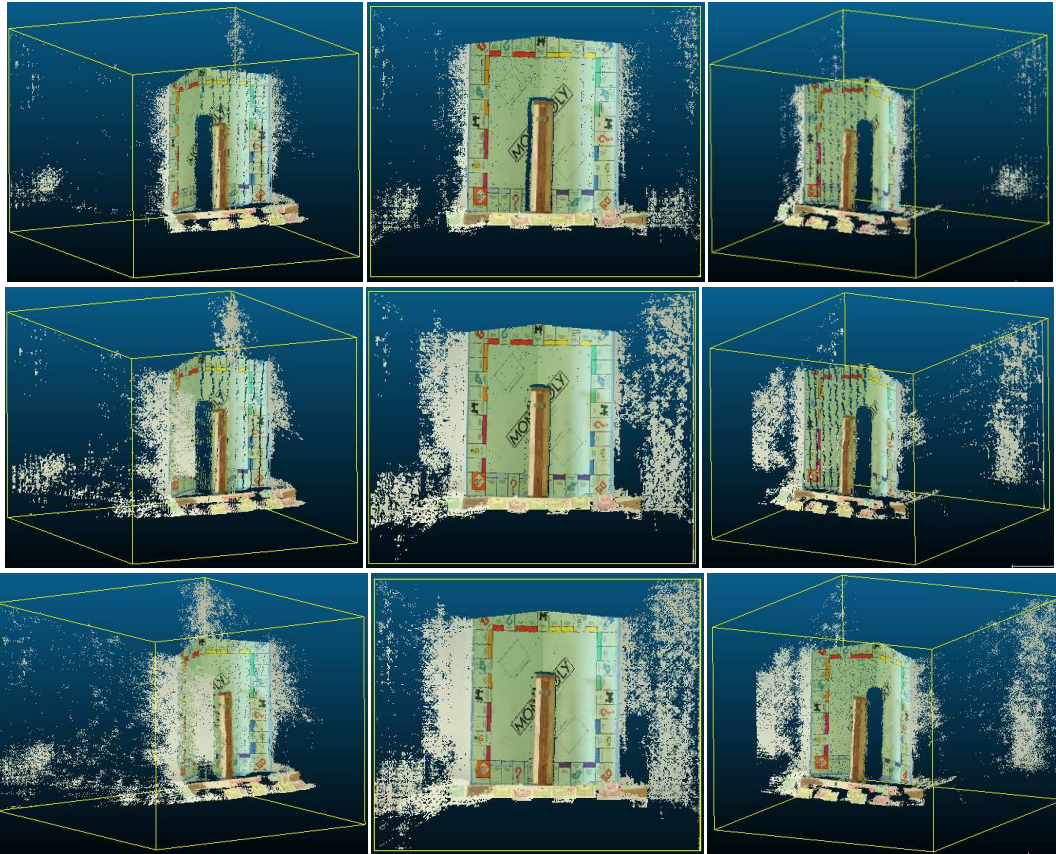


Εικόνα 7.57. Ανακατασκευή υπό τρεις γωνίες με βάση τον χάρτη παράλλαξης με (από επάνω προς τα κάτω): εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων, έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας, εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής, υποψηφιακή παρεμβολή. Σκηνή *Baby3*.



Εικόνα 7.58. Ανακατασκευή υπό τρεις γωνίες με βάση τον χάρτη παράλλαξης με (από επάνω προς τα κάτω): εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων, έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας, εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής, υποψηφιακή παρεμβολή. Σκηνή *Bowling2*.





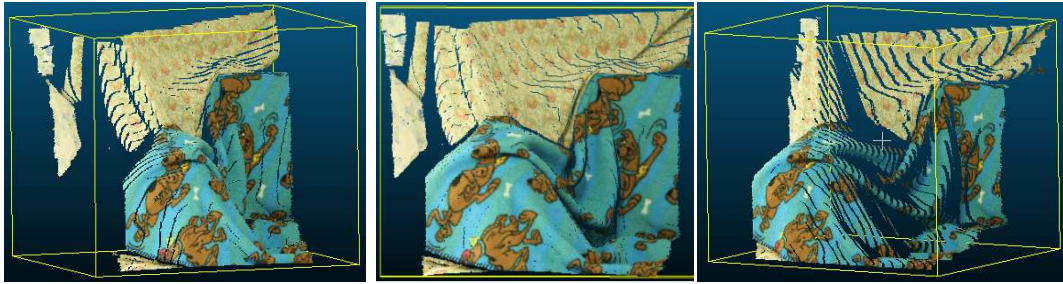
Εικόνα 7.59. Ανακατασκευή υπό τρεις γωνίες με βάση τον χάρτη παράλλαξης με (από επάνω προς τα κάτω): εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων, έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας, εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής, υποψηφιακή παρεμβολή. Σκηνή *Monopoly*.

Τελικά διαπιστώνεται και εδώ ότι η βελτίωση που αποδίδει καλύτερα σε όλα τα ζεύγη εικόνων – πέραν της εφαρμογής μάσκας αποκρύψεων, η οποία σε πραγματικές συνθήκες δεν είναι βέβαια δυνατή – είναι ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας.

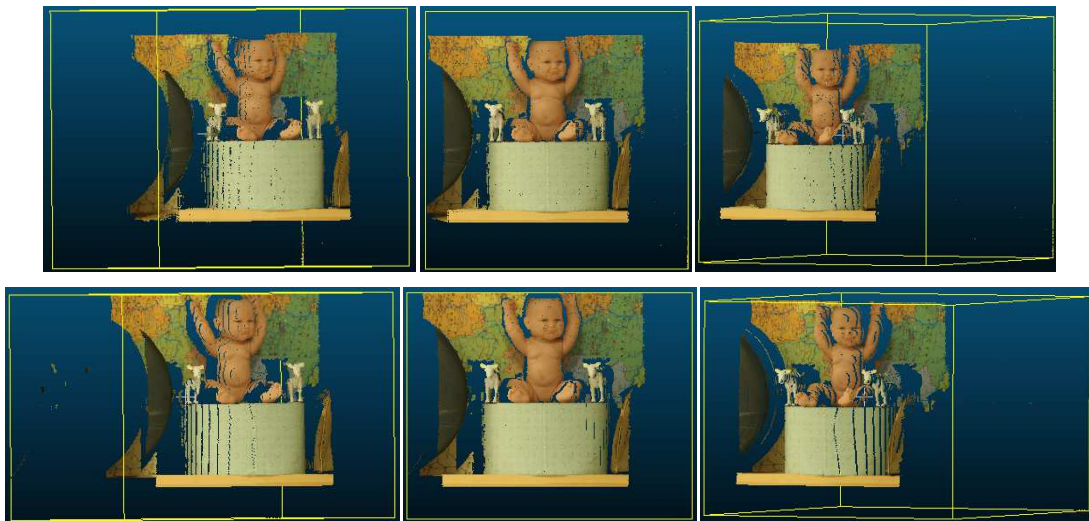
7. 4.6 Σύγκριση βέλτιστης ανακατασκευής με την αληθή

Εδώ η ανακατασκευή που θεωρείται βέλτιστη, δηλαδή η προερχόμενη από την μέθοδο $Census+P_{2T}+SGM$ μετά από εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων και έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, συγκρίνεται με την αντίστοιχη αληθή ανακατασκευή, για τα ίδια σημεία. Οι ανακατασκευές παρουσιάζονται στις Εικ. 7.60-7.63.

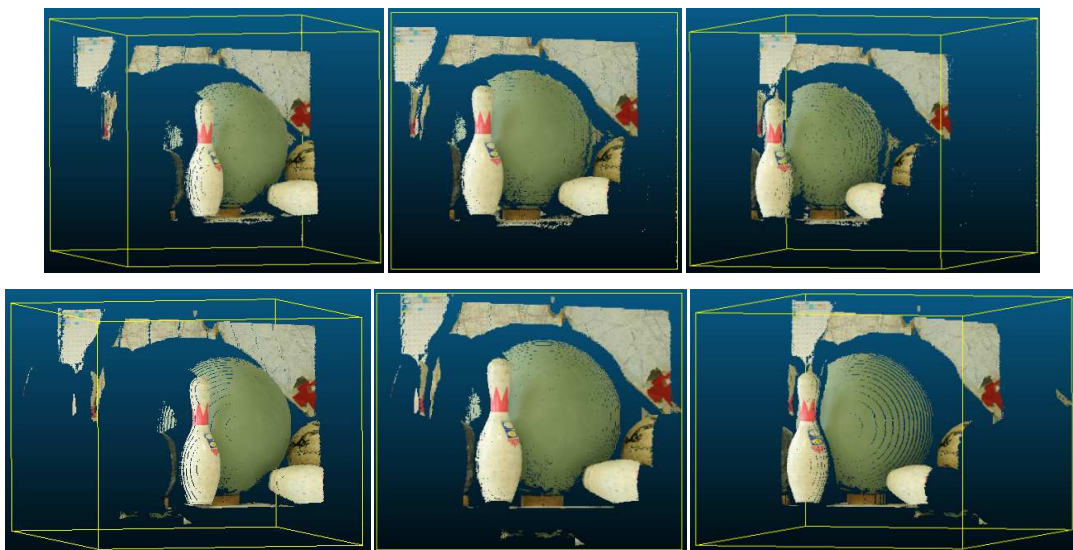




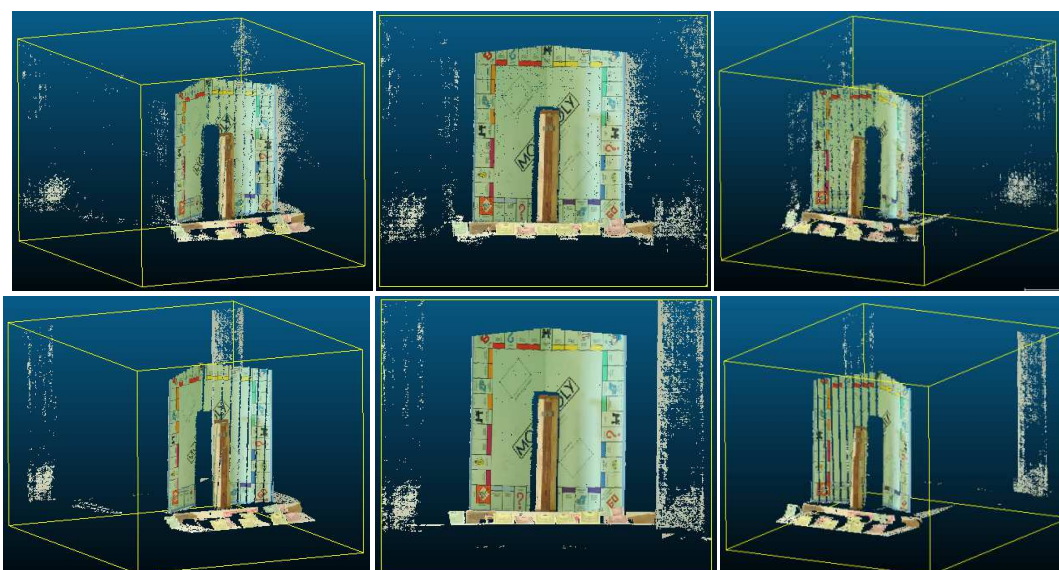
Εικόνα 7.60. Ανακατασκευή υπό τρεις γωνίες από τον χάρτη παράλλαξης της μεθόδου Census+P_{2r}+SGM για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις και μόνο για τα σημεία που περνούν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας (επάνω) και αντίστοιχη ανακατασκευή από τον αληθή χάρτη παράλλαξης (κάτω). Σκηνή *Cloth3*.



Εικόνα 7.61. Ανακατασκευή υπό τρεις γωνίες από τον χάρτη παράλλαξης της μεθόδου Census+P_{2r}+SGM για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις και μόνο για τα σημεία που περνούν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας (επάνω) και αντίστοιχη ανακατασκευή από τον αληθή χάρτη παράλλαξης (κάτω). Σκηνή *Baby3*.



Εικόνα 7.62. Ανακατασκευή υπό τρεις γωνίες από τον χάρτη παράλλαξης της μεθόδου Census+P_{2r}+SGM για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις και μόνο για τα σημεία που περνούν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας (επάνω) και αντίστοιχη ανακατασκευή από τον αληθή χάρτη παράλλαξης (κάτω). Σκηνή *Bowling2*.



Εικόνα 7.63. Ανακατασκευή υπό τρεις γωνίες από τον χάρτη παράλλαξης της μεθόδου Census+P_{2r}+SGM για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις και μόνο για τα σημεία που περνούν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας (επάνω) και αντίστοιχη ανακατασκευή από τον αληθή χάρτη παράλλαξης (κάτω). Σκηνή *Monopoly*.

Αντίστοιχα, ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διαφορών κατά X, Y, Z των δύο νεφών σημείων για το σύνολο των σημείων (σε mm και σε pix) και για μόνο τα σημεία των οποίων οι διαφορές κατά Z ανήκουν στο διάστημα [-3σ, 3σ] παρουσιάζονται για κάθε ζεύγος εικόνων στους Πίνακες 7.9-7.12.

Σκηνή <i>Cloth3</i>			
Σύγκριση Census+P _{2r} +SGM με αληθή (στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις, για τα σημεία που πέρασαν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας)			
	ΔX	ΔY	ΔZ
μ^{mm}	0.0	0.0	-0.9
σ^{mm}	2.1	1.2	14.3
RMS ^{mm}	2.1	1.2	14.3
RMS ^{pix}			1.2
ΔZ [-3σ, 3σ] : 99.4% των σημείων			
μ^{mm}	0.0	0.0	-0.9
σ^{mm}	0.4	0.4	4.7
RMS ^{mm}	0.4	0.4	4.7
RMS ^{pix}			0.4

Πίνακας 7.9. Στατιστικά στοιχεία από την σύγκριση της ανακατασκευής από τον χάρτη παράλλαξης της μεθόδου Census+P_{2r}+SGM με την αληθή (στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις και για τα σημεία που πέρασαν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας) για το σύνολο αυτών των σημείων (επάνω) και μόνο για τα σημεία των οποίων οι διαφορές κατά ΔZ ανήκουν στο διάστημα [-3σ, 3σ]. Σκηνή *Cloth3*.

Σκηνή <i>Baby3</i>			
Σύγκριση Census+P _{2r} +SGM με αληθή (στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις, για τα σημεία που πέρασαν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας)			
	ΔX	ΔY	ΔZ
μ^{mm}	-0.1	0.0	0.8
σ^{mm}	5.1	3.5	39.1

RMS ^{mm}	5.1	3.5	39.1
RMS ^{pix}			2.5
ΔZ [-3σ, 3σ] : 99.1% των σημείων			
μ ^{mm}	0.0	0.0	1.6
σ ^{mm}	1.0	0.9	9.9
RMS ^{mm}	1.0	0.9	10.0
RMS ^{pix}			0.6

Πίνακας 7.10. Στατιστικά στοιχεία από την σύγκριση της ανακατασκευής από τον χάρτη παράλλαξης της μεθόδου Census+P_{2r}+SGM με την αληθή (στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις και για τα σημεία που πέρασαν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας) για το σύνολο αυτών των σημείων (επάνω) και μόνο για τα σημεία των οποίων οι διαφορές κατά ΔZ ανήκουν στο διάστημα [-3σ, 3σ]. Σκηνή *Baby3*.

Σκηνή Bowling2			
	Σύγκριση Census+P _{2r} +SGM με αληθή (στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις, για τα σημεία που πέρασαν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας)		
	ΔX	ΔY	ΔZ
μ ^{mm}	0.0	-0.1	-5.0
σ ^{mm}	7.2	6.0	65.4
RMS ^{mm}	7.2	6.0	65.6
RMS ^{pix}			4.2
ΔZ [-3σ, 3σ] : 99.2% των σημείων			
μ ^{mm}	0.0	0.0	-1.6
σ ^{mm}	1.5	1.5	15.0
RMS ^{mm}	1.5	1.5	15.1
RMS ^{pix}			1.0

Πίνακας 7.11. Στατιστικά στοιχεία από την σύγκριση της ανακατασκευής από τον χάρτη παράλλαξης της μεθόδου Census+P_{2r}+SGM με την αληθή (στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις και για τα σημεία που πέρασαν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας) για το σύνολο αυτών των σημείων (επάνω) και μόνο για τα σημεία των οποίων οι διαφορές κατά ΔZ ανήκουν στο διάστημα [-3σ, 3σ]. Σκηνή *Bowling2*.

Σκηνή Monopoly			
	Σύγκριση Census+P _{2r} +SGM με αληθή (στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις, για τα σημεία που πέρασαν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας)		
	ΔX	ΔY	ΔZ
μ ^{mm}	2.4	0.9	-23.8
σ ^{mm}	16.5	10.0	120.0
RMS ^{mm}	16.7	10.0	122.3
RMS ^{pix}			6.1
ΔZ [-3σ, 3σ] : 96.5% των σημείων			
μ ^{mm}	0.1	0.0	-1.5
σ ^{mm}	2.5	2.0	18.2
RMS ^{mm}	2.5	2.0	18.3
RMS ^{pix}			0.9

Πίνακας 7.12. Στατιστικά στοιχεία από την σύγκριση της ανακατασκευής από τον χάρτη παράλλαξης της μεθόδου Census+P_{2r}+SGM με την αληθή (στις περιοχές χωρίς αποκρύψεις και για τα σημεία που πέρασαν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας) για το σύνολο αυτών των σημείων (επάνω) και μόνο για τα σημεία των οποίων οι διαφορές κατά ΔZ ανήκουν στο διάστημα [-3σ, 3σ]. Σκηνή *Monopoly*.

Για το ζεύγος εικόνων *Cloth3* προκύπτουν μικρά σφάλματα (της τάξης του 1.2 pix), τα οποία μειώνονται ακόμα περισσότερο με την αφαίρεση των σημείων έξω από το διάστημα $[-3\sigma, 3\sigma]$ (0.4 pix). Για τα ζεύγη εικόνων *Baby3*, *Bowling2* και *Monopoly* επιτυγχάνεται ικανοποιητικό σφάλμα (μικρότερο από 1 pix) μόνο μετά από την αφαίρεση των σημείων έξω από το διάστημα $[-3\sigma, 3\sigma]$. Όσον αφορά ειδικά το ζεύγος *Monopoly*, η μόνη περίπτωση στην οποία επιτυγχάνεται σφάλμα μικρότερο από 1 pix είναι η ανακατασκευή με βελτιώσεις για τα σημεία εντός των $\pm 3\sigma$. Κατά συνέπεια, επιτυγχάνεται ακρίβεια ικανοποιητική, σε σχέση με τις αληθείς ανακατασκευές, των ανακατασκευών από τη μέθοδο Census+P_{2T}+SGM σε συνδυασμό με τη χρήση βελτιώσεων (εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων και έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας), για όλα τα ζεύγη εικόνων.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Εδώ συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα προηγούμενα κεφάλαια, και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης στο μέλλον.

8.1 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας προγραμματίστηκαν και αξιολογήθηκαν διάφορες μέθοδοι υποσύνολης (semi-global) συνταύτισης εικόνων. Οι διαδικασίες που αναφέρθηκαν στα Κεφάλαια 4, 5 και 7 προγραμματίστηκαν σε περιβάλλον Matlab. Οι κυριότερες από αυτές είναι οι εξής: συσσωμάτωση του κόστους με βάση τον αλγόριθμο SGM, υπολογισμός μεταβλητής ποινής P_2 με πέντε διαφορετικές συναρτήσεις, βελτιστοποίηση των παραμέτρων του αλγορίθμου SGM, εφαρμογή του σε εικόνες με διαφορετική έκθεση και φωτισμό, υπολογισμός κόστους συνταύτισης με χρήση των μέτρων ομοιότητας Απόλυτες Διαφορές και Μετασχηματισμός Census με συνταύτιση μέσω απόστασης Hamming. Ακόμη, προγραμματίστηκε κώδικας στην C++, όπου έγινε χρήση της κλάσης SGBM που διαθέτει η OpenCV (Κεφάλαιο 6). Οι κώδικες για την υποψηφιδική παρεμβολή, τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, την παραγωγή χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, τη σύγκρισή του με τον αληθή και τον υπολογισμό του ποσοστού σφάλματος και της εικόνας διαφορών, την εμπροσθοτομία, την απόδοση χρώματος στα 3D σημεία και την σύγκριση μεταξύ των νεφών σημείων με εξαγωγή στατιστικών στοιχείων είχαν ήδη προγραμματιστεί στο Matlab για την εργασία που εκπονήθηκε στο πλαίσιο του καλοκαιρινού μαθήματος “Μεγάλες Θερινές Ασκήσεις Φωτογραμμετρίας”. Εξαιρεση αποτελούν τα φίλτρα μεσαίας τιμής και Sobel (που πάντως είχαν ήδη προγραμματιστεί σε άσκηση του μαθήματος “Φωτογραμμετρία III”), όπου για ευκολία αξιοποιήθηκαν έτοιμες συναρτήσεις του Matlab.

Εδώ επιχειρείται, λοιπόν, μια προσπάθεια για τη σύνοψη των συμπερασμάτων που διατυπώθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και την, κατά το δυνατόν, εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων που αφορούν θέματα με τα οποία ασχολήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία. Προφανώς, οι κρίσεις αυτές προέρχονται από εφαρμογές σε συγκεκριμένες εικόνες, οπότε οι όποιες “γενικεύσεις” υπόκεινται στην πραγματικότητα σε προφανείς περιορισμούς.

Χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν πρωτίστως από την εφαρμογή διάφορων μεθόδων υποσύνολης συνταύτισης εικόνων. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι συνταύτισης (Απόλυτες Διαφορές και Μετασχηματισμός Census) και πέντε συναρτήσεις υπολογισμού της ποινής P_2 , μιας σημαντικής παραμέτρου κάθε μεθόδου υποσύνολης συνταύτισης.

Έτσι, όσον αφορά τη μέθοδο υπολογισμού του αρχικού κόστους συνταύτισης, παρατηρήθηκε ότι η χρήση του Μετασχηματισμού Census και εν συνεχεία συνταύτιση

με την απόσταση Hamming σε εικόνες με κανονική έκθεση και φωτισμό (όπως αυτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την βελτιστοποίηση των παραμέτρων) παράγει χάρτες ψηφιακής παράλλαξης με σφάλματα μειωμένα κατά το ήμισυ, συγκριτικά με εκείνους που παράγονται με εφαρμογή της μεθόδου των Απόλυτων Διαφορών. Στις εικόνες με διαφορετική έκθεση και φωτισμό, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες μέθοδοι συνταύτισης με την προσθήκη μιας ακόμη: της μεθόδου όπου γίνεται χρήση φίλτρου Sobel στις εικόνες και εν συνεχεία συνταύτιση μέσω των Απόλυτων Διαφορών. Το μικρότερο μέσο σφάλμα για τις δυο πρώτες μεθόδους παραμένει το ίδιο, ενώ η μέθοδος με το φίλτρο Sobel έχει καλύτερη απόδοση (μικρότερο σφάλμα κατά 6%) από την απλή συνταύτιση με τις Απόλυτες Διαφορές, αλλά αντίστοιχα μεγαλύτερο σφάλμα (κατά 6% περίπου) από τον μετασχηματισμό Census. Ακόμη, η διαφορά μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου σφάλματος στις εικόνες με διαφορετική έκθεση είναι 73% όταν χρησιμοποιούνται οι Απόλυτες Διαφορές, 50% όταν έχει προηγηθεί φιλτράρισμα των εικόνων με Sobel, ενώ είναι μόλις 8% στις περιπτώσεις εφαρμογής του Μετασχηματισμού Census. Αντίστοιχα, στις εικόνες με διαφορετικό φωτισμό, το ελάχιστο και μέγιστο σφάλμα διαφέρουν κατά 63% με την εφαρμογή της μεθόδου των Απόλυτων Διαφορών, σε αντίθεση με τη διαφορά 15% όταν η συνταύτιση εφαρμόζεται σε εικόνες φιλτραρισμένες με Sobel και τη διαφορά 10% όταν χρησιμοποιείται ο Μετασχηματισμός Census. Παρατηρείται λοιπόν ότι για εικόνες με διαφορετικό φωτισμό, η εφαρμογή φίλτρου Sobel πριν από την συνταύτιση αποδίδει πολύ καλύτερα απ' ό,τι για εικόνες με διαφορετική έκθεση (εκτός από το μικρότερο μέσο σφάλμα που παραμένει ίδιο), καθώς μειώνονται σημαντικά τα μεγαλύτερα μέσα σφάλματα. Επίσης, διαπιστώνεται ότι τα μεγέθη των σφαλμάτων, όπως και η διαφορά μέγιστου και ελάχιστου σφάλματος, ομοιάζουν με τα αντίστοιχα στοιχεία του Μετασχηματισμού Census. Ο τελευταίος αντιπροσωπεύει βέβαια την καλύτερη από τις εξεταζόμενες μεθόδους για την συνταύτιση εικόνων με έντονες ραδιομετρικές διαφορές.

Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία. Εκεί αναφέρεται ότι σε μεθόδους όπως εκείνη των Απόλυτων Διαφορών θεωρείται πως η ένταση μεταξύ των συνταυτιζόμενων εικονοψηφίδων είναι σταθερή, κατά συνέπεια δεν μπορούν να αντεπεξέλθουν στη συνταύτιση εικόνων με ραδιομετρικές διαφορές. Αντίθετα, ο (μη παραμετρικός) μετασχηματισμός Census βασίζεται αποκλειστικά στην δυαδική σχέση της έντασης μιας εικονοψηφίδας με τις γειτονικές της και όχι στις ίδιες τις τιμές των εντάσεων, και έτσι μπορεί να αποδίδει αποτελεσματικά κατά την συνταύτιση εικόνων με μη γραμμικές αλλά μονοτονικές ραδιομετρικές διαφορές, οι οποίες διατηρούν αυτή την σχέση εντός του παραθύρου ορισμού τους (Hirschmüller & Scharstein, 2009). Τέλος, η επεξεργασία των εικόνων πριν από την συνταύτιση με φίλτρο παραγώγου (πχ. Sobel κατά x) οδηγεί γενικά σε απαλοιφή των ραδιομετρικών διακυμάνσεων, αν και με αυτό τον τρόπο ενδέχεται να μεγεθύνεται ο θόρυβος που τυχόν έχει η εικόνα (Mroz & Breckon, 2012).

Ένα ακόμη θέμα που εξετάστηκε εκτεταμένα στο πλαίσιο της εργασίας είναι η χρήση συναρτήσεων που μεταβάλλουν την τιμή της ποινής P_2 , προσαρμόζοντάς την συνήθως στην κλίση της έντασης (με μειούμενη τιμή καθώς η κλίση αυξάνεται). Η προσέγγιση αυτή προτείνεται προκειμένου να διατηρούνται οι ακμές των αντικειμένων (οι οποίες είναι συχνά ορατές στις εικόνες ως αλλαγές στην ένταση) στον παραγόμενο χάρτη παράλλαξης, με τη μορφή ασυνεχειών βάθους, άρα να υπάρχουν και στην κατοπινή ανακατασκευή τους.

Γενικώς (ακόμα και στην περίπτωση της σταθερής ποινής) οι ασυνέχειες διατηρούνται αν η συνταύτιση είναι ισχυρότερη από την ποινή. Στην περίπτωση της μεταβλητής ποινής, η διατήρηση των ακμών εξαρτάται από το κατά πόσον η υφή της εικόνας υποδηλώνει την ύπαρξη ασυνέχειας βάθους. Έστω εξεταζόμενη εικονοψηφίδα \mathbf{p} με παράλλαξη d_p , για την οποία προέκυψε από την συνταύτιση το μικρότερο κόστος ($C(\mathbf{p}, d_p)$). Εάν η διαφορά παράλλαξης μεταξύ της τρέχουσας εικονοψηφίδας \mathbf{p} και της προηγούμενης στο μονοπάτι \mathbf{q} είναι μεγαλύτερη από 1, και ταυτόχρονα η διαφορά έντασης μεταξύ των δύο εικονοψηφίδων είναι μεγάλη, υπάρχει πιθανότητα το μικρό κόστος να μην οφείλεται σε λανθασμένη συνταύτιση αλλά να υπάρχει ακμή στην εικόνα, και για αυτό υπάρχει μεγάλη διαφορά παράλλαξης μεταξύ γειτονικών εικονοψηφίδων. Αν η ποινή P_2 προσαρμοστεί στην κλίση της εικόνας θα είναι μικρή, και όταν προστεθεί στο κόστος αυτό θα εξακολουθήσει να είναι το μικρότερο κόστος της εικονοψηφίδας, οπότε θα επιλεγεί για τον χάρτη παράλλαξης η παράλλαξη d_p που αντιστοιχεί σε αυτό.

Συνολικά εξετάστηκαν τέσσερις συναρτήσεις μεταβλητής ποινής P_2 έναντι της σταθερής ποινής. Κατά την εφαρμογή τους σε στερεοζεύγη με εικόνες ίδιου αλλά και διαφορετικού φωτισμού ή έκθεσης δεν διαπιστώθηκε μεγάλη διαφορά μεταξύ των σφαλμάτων που προκαλούν, ανεξαρτήτως μεθόδου υπολογισμού του αρχικού κόστους. Αυτό μπορεί να οφείλεται στις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν, και οι οποίες πιθανόν να μην περιείχαν εκτεταμένο αριθμό ακμών, ώστε να φανεί η υπεροχή κάποιας μεθόδου. Οι συναρτήσεις αυτές δεν έχουν εφαρμοστεί άλλη φορά σε αυτά τα ζεύγη εικόνων. Οι Banz et al. (2012), οι πρώτοι που πρότειναν και εφάρμοσαν δύο από τις συναρτήσεις και την περίπτωση της σταθερής ποινής (σε άλλα ζεύγη εικόνων), επίσης δεν διαπίστωσαν κάποια σημαντική διαφορά (μεγαλύτερη του 2%) στα σφάλματα που προέκυψαν από τις μεθόδους στο στάδιο της βελτιστοποίησης των παραμέτρων (με τη χρήση ως μεθόδου συνταύτισης του Μετασχηματισμού Census). Τις ίδιες συναρτήσεις χρησιμοποίησαν και σε εικόνες με (τεχνητές όμως) ραδιομετρικές διαφορές. Συνολικά δοκίμασαν τέσσερα είδη θορύβου, με τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των συναρτήσεων μεταβλητής ποινής να εμφανίζεται στην περίπτωση του θορύβου τύπου “αλατοπίπερο”, η οποία όμως ήταν μικρότερη του 1%. Μεταξύ των συναρτήσεων ποινής και της σταθερής ποινής παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά (άνω του 2%, και συγκεκριμένα 8%) μόνο στη συνταύτιση εικόνων στις οποίες είχε προστεθεί Γκαουσιανός θόρυβος.

Όσον αφορά τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων, πρέπει να σημειωθεί ότι πρόκειται για μια διαδικασία ιδιαίτερα χρονοβόρα αλλά και απαραίτητη για την εξασφάλιση καλού αποτελέσματος. Στην παρούσα εργασία διενεργήθηκε, στην ολοκληρωμένη της μορφή, για 21 ζεύγη εικόνων και για τις παραμέτρους 10 συνολικά περιπτώσεων σε κάθε ζεύγος. Η κάθε περίπτωση περιλάμβανε από δύο έως τέσσερις παραμέτρους, για καθεμία από τις οποίες εξετάστηκαν από τέσσερις έως οκτώ τιμές. Για κάθε διαφορετικό συνδυασμό τιμών, αποθηκεύταν ο αντίστοιχος χάρτης παράλλαξης και το σφάλμα του, που προέκυπτε μετά από σύγκριση με τον αληθή (τόσο για τον πλήρη χάρτη όσο και μόνο για τις περιοχές χωρίς αποκρύψεις). Αντιλαμβάνεται κανείς ότι πρόκειται για μια σύνθετη διαδικασία, η οποία απαιτεί υψηλή μεθοδικότητα όσον αφορά τον προγραμματισμό της (ποιες τιμές των παραμέτρων θα δοκιμαστούν, ταχύτητα εκτέλεσης αλγορίθμου), την αποθήκευση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων (χάρτες ψηφιακής παράλλαξης, σφάλματα σε σχέση με τον αληθή). Είναι χρήσιμο να βρεθούν αρχικές τιμές για τις παραμέτρους, το οποίο γίνεται μετά από αναζήτηση στη βιβλιογραφία. Εδώ βρέθηκαν αρχικές τιμές για τις παραμέτρους των έξι από τις δέκα περιπτώσεις που εξετάστηκαν, για παρόμοιες εικόνες, από τους Banz et al. (2012) και Chen & Jaw (2013). Γι' αυτό το λόγο, η βελτιστοποίηση συνιστά και μια επαναληπτική διαδικασία, αφού μετά από την ανάλυση των αποτελεσμάτων τις περισσότερες φορές απαιτείται να διερευνηθούν και άλλες τιμές παραμέτρων, είτε γιατί το μικρότερο σφάλμα προκύπτει στη μεγαλύτερη ή τη μικρότερη τιμή τους, και άρα πρέπει να εξεταστεί αν μειώνεται περαιτέρω, είτε εάν είναι επιθυμητό να βρεθεί μια βέλτιστη τιμή με μεγαλύτερη ακρίβεια, δηλαδή να χρησιμοποιηθεί μικρότερο διάστημα (βήμα) μεταξύ των τιμών. Η βελτιστοποίηση, παρ' όλες αυτές τις δυσκολίες της, παραμένει μια σημαντική διαδικασία, από την οποία μπορούν να φανούν οι δυνατότητες κάθε μεθόδου. Έχει συμβεί μια μέθοδος να θεωρείται καλύτερη από την άλλη με την χρήση κάποιων τιμών για παραμέτρους της, μετά όμως από βελτιστοποίηση των παραμέτρων και των δύο μεθόδων, να διαπιστωθεί τελικά το αντίθετο. Ιδιαίτερης σημασίας είναι το γεγονός ότι κάθε μέθοδος εφαρμόζεται σε αρκετά ζεύγη εικόνων (στην προκειμένη περίπτωση σε 21) και η τελική της απόδοση προκύπτει από τον μέσο όρο της συμπεριφοράς της σε αυτά. Στην παρούσα εργασία, η βελτιστοποίηση αποτέλεσε το εργαλείο για να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων κάθε μεθόδου, ώστε στη συνέχεια να αξιολογηθεί η απόδοση των μεθόδων σε εικόνες με διαφορετική έκθεση και φωτισμό.

Η συνταύτιση εικόνων με διαφορετική έκθεση ή φωτισμό είναι σημαντική εφαρμογή, αφού στην πραγματικότητα οι εικόνες ενός στερεοζεύγους μπορεί να έχουν ληφθεί υπό διαφορετικές συνθήκες. Αυτό γίνεται αντιληπτό πχ. στις εφαρμογές που έχουν γίνει για την υποβοήθηση οδηγών (Driver Assistance Systems), όπου απαιτείται η συνταύτιση εικόνων που λήφθηκαν από κάμερες τοποθετημένες στα αυτοκίνητα για να γίνει στη συνέχεια η αναγνώριση του χώρου μπροστά από αυτά. Εκεί διαπιστώνεται ότι η μια εικόνα του στερεοζεύγους μπορεί πχ. να είναι υπερβολικά

φωτεινή λόγω του ήλιου ή η άλλη σκοτεινή λόγω των σκιών που σχηματίζουν τα δέντρα στην άκρη του δρόμου.

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία αφορούσαν σκηνές εσωτερικού χώρου αλλά έχουν πραγματικές ραδιομετρικές διαφορές, δηλαδή κατά τη λήψη τους χρησιμοποιήθηκε διαφορετική τιμή χρόνου έκθεσης ή διαφορετικός φωτισμός, και δεν προστέθηκε τεχνητός θόρυβος. Από καθένα από τα 21 ζεύγη εικόνων δημιουργήθηκαν 9 στερεοζεύγη από τους συνδυασμούς των 3 περιπτώσεων έκθεσης και αντίστοιχα 9 στερεοζεύγη από τις 3 περιπτώσεις φωτισμού. Το μικρότερο σφάλμα προκύπτει πάντα για στερεοζεύγος με τις ίδιες συνθήκες έκθεσης ή φωτισμού. Αντίθετα, το μεγαλύτερο σφάλμα προκύπτει, φυσικά, όταν οι εικόνες του στερεοζεύγους έχουν ληφθεί υπό διαφορετικές συνθήκες. Το ποιος είναι αυτές οι συνθήκες ποικίλλει για κάθε μέθοδο συνταύτισης, αλλά και για την ίδια μέθοδο αλλάζει για τις διάφορες εικόνες, επειδή η αλλαγή της έκθεσης και του φωτισμού επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα σε διαφορετικές εικόνες (και επειδή η αλλαγή δεν είναι η ίδια για όλες τις εικόνες).

Σύμφωνα με τους Hirschmüller & Scharstein (2009), οι εικόνες με διαφορετικό φωτισμό που έχουν προκύψει από την αλλαγή της θέσης και του τύπου των πηγών φωτισμού έχουν πολλές τοπικές ραδιομετρικές αλλαγές. Αντίθετα, η αλλαγή της έκθεσης θεωρείται πως μπορεί να προσεγγιστεί από έναν μετασχηματισμό σε ολόκληρη την εικόνα. Το μικρότερο μέσο σφάλμα διαφέρει πολύ λίγο (1%) όταν εφαρμόζεται η μέθοδος συνταύτισης Απόλυτες Διαφορές σε εικόνες με διαφορετική έκθεση ή φωτισμό και καθόλου όταν χρησιμοποιούνται οι άλλες δύο μέθοδοι συνταύτισης. Ακόμη, παρατηρείται αξιοσημείωτη βελτίωση στη συμπεριφορά της μεθόδου “Φίλτρο Sobel + Απόλυτες Διαφορές” όταν εφαρμόζεται σε εικόνες με διαφορετικό φωτισμό όσον αφορά το μεγαλύτερο σφάλμα που προκύπτει, σε σχέση με το αντίστοιχο στις εικόνες με διαφορετική έκθεση.

Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε και παραλλαγή του αλγορίθμου SGM που περιλαμβάνεται στη βιβλιοθήκη OpenCV, ο αλγόριθμος “Stereo Semi-Global Block Matching” (συνοπτικά αναφέρεται στην εργασία ως SGBM). Το πρώτο χαρακτηριστικό του που πρέπει να επισημανθεί είναι ο πολύ μικρός χρόνος εκτέλεσης. Συγκεκριμένα, κατέστη δυνατό να δοκιμαστούν 20 και 10 τιμές για δύο παραμέτρους του, αντίστοιχα, κατά τη βελτιστοποίησή τους, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Ακόμη, περιλαμβάνει φιλτράρισμα των προς συνταύτιση εικόνων, με αποτέλεσμα να είναι έως ένα σημείο ανθεκτική στις ραδιομετρικές αλλαγές. Οι χάρτες παράλλαξης που παράγει εμφανίζουν σαφώς μικρότερα σφάλματα από εκείνους των Απόλυτων Διαφορών και λίγο μεγαλύτερα από εκείνους του Μετασχηματισμού Census, κατά την συνταύτιση εικόνων τόσο με ίδιες όσο και με διαφορετικές συνθήκες έκθεσης ή φωτισμού. Συγκριτικά με την άλλη μέθοδο που χρησιμοποιεί φίλτρο Sobel (αλλά με απλούστερο μέτρο ομοιότητας, τις Απόλυτες Διαφορές), η SGBM παρουσιάζει μικρό-

τερο μέσο σφάλμα. Τέλος, κατά την ανακατασκευή με βάση τον καλύτερο χάρτη παράλλαξης που παράγει, η μέση τετραγωνική της διαφορά κατά Z ($RMS_{\Delta Z}$) σε σχέση με τον αληθή προέκυψε σε ορισμένες περιπτώσεις μικρότερη από εκείνη της μεθόδου του Μετασχηματισμού Census (αν και εμφάνιζε μεγαλύτερο ποσοστό σφάλματος στον χάρτη παράλλαξης). Αυτό υποδηλώνει ότι τα σημεία που η SGBM υπολογίζει εσφαλμένα βρίσκονται πιο κοντά στα αληθή από όσο τα εσφαλμένα σημεία που προκύπτουν από τον Μετασχηματισμό Census.

Η 3D ανακατασκευή με βάση τους καλύτερους χάρτες παράλλαξης καθεμιάς από τις τρεις μεθόδους συνταύτισης για τέσσερα επιλεγμένα ζεύγη εικόνων προσέφερε την ευκαιρία να δημιουργηθούν νέφη σημείων με φωτοϋφή (της μορφής X, Y, Z, R, G, B), τα οποία γενικά αποτελούν και το τελικό ζητούμενο σε κάθε διαδικασία συνταύτισης. Έτσι, οπτικοποιήθηκαν τα αποτελέσματα κάθε μεθόδου συνταύτισης με τον πλέον απτό τρόπο και συγκρίθηκαν στον 3D χώρο. Επιπλέον, στα 3D μοντέλα γίνεται πιο εύκολα διακριτό το σχήμα και οι λεπτομέρειες των απεικονιζόμενων αντικειμένων.

Η ανακατασκευή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια στοιχείων που ήταν γνωστά για τα στερεοζεύγη και αφορούν τον εσωτερικό προσανατολισμό των εικόνων (σταθερά της μηχανής και διαφορά πρωτευόντων σημείων) και την κλίμακα μοντέλου (βάση του στερεοζεύγους). Τα ίδια στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για τις ανακατασκευές με βάση τόσο τους παραχθέντες χάρτες παράλλαξης όσο και τους αληθείς. Δεδομένου ότι τα νέφη σημείων δημιουργήθηκαν με τον ίδιο τρόπο και είχαν ίδια κλίμακα και πυκνότητα σημείων, ήταν δυνατή η άμεση σύγκρισή τους με απλή αφαίρεση των συντεταγμένων των σημείων και εξαγωγή στατιστικών στοιχείων όπως η μέση τετραγωνική διαφορά (κατά Z). Η τελευταία, με βάση την υπολογισμένη μέση εδαφοψηφίδα κάθε ζεύγους εικόνων, μπορούσε να αναχθεί και σε μονάδες εικονοψηφίδας, για να γίνει ευκολότερα αντιληπτό το μέγεθος των διαφορών.

Για την υλοποίηση των ανακατασκευών θεωρήθηκε σκόπιμο να εφαρμοστούν ορισμένες μέθοδοι βελτίωσης των χαρτών παράλλαξης ώστε να εξεταστεί πόσο θα μειωθούν τα σφάλματα των ανακατασκευών. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν την εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων (η οποία, επαναλαμβάνεται, δεν είναι βέβαια διαθέσιμη σε πραγματικές συνθήκες), τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, το φίλτρο μεσαίας τιμής και την υποψηφιδική παρεμβολή. Ειδικότερα, η εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων απομακρύνει σφάλματα οφειλόμενα στις εσφαλμένες ομολογίες λόγω αποκρύψεων. Με τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, απομακρύνθηκαν εσφαλμένες ομολογίες σημείων εκτός του επικαλυπτόμενου τμήματος ή σε περιοχές αποκρύψεων. Η χρήση φίλτρου μεσαίας τιμής απομακρύνει τον διακριτό θόρυβο που τυχόν υπάρχει στους χάρτες ψηφιακής παράλλαξης και ο οποίος προκαλείται από τοπικά λανθασμένες ομολογίες σημείων κατά τη συνταύτιση. Τέλος, η υποψηφιδική παρεμβολή πραγματοποιείται, με παρεμβολή πολυωνύμου 2^{0u} βαθμού στις διακρι-

τές τιμές του τρισδιάστατου πίνακα κόστους DSI, για να υπολογιστεί η παράλλαξη με ακρίβεια ανώτερη της μιας εικονοψηφίδας. Ως αποτελέσματά της καταγράφονται η συμπλήρωση κάποιων κενών στα απεικονιζόμενα αντικείμενα που οφείλονταν σε άλματα της παράλλαξης αλλά και η εξομάλυνση ορισμένων ακμών. Τελικά, οι μέθοδοι που προκάλεσαν τη μεγαλύτερη βελτίωση στην ανακατασκευή ήταν η εφαρμογή μάσκας αποκρύψεων και ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας. Γι' αυτό εφαρμόστηκαν στην τελευταία ("βέλτιστη") ανακατασκευή κάθε ζεύγους, που πραγματοποιήθηκε για την καλύτερη μέθοδο συνταύτισης (με βάση τα σφάλματα από τους χάρτες παράλλαξης), για τον Μετασχηματισμό Census και την συνάρτηση ποινής P_{2T} .

Η σύγκριση των ανακατασκευών δίνει σε γενικές γραμμές τα ίδια αποτελέσματα με εκείνα από τη σύγκριση των χαρτών παράλλαξης, με την διαφορά ότι επειδή χρησιμοποιείται άλλο μέτρο αξιολόγησης (μέση τετραγωνική διαφορά αντί ποσοστού εσφαλμένα συνταυτισθεισών εικονοψηφίδων), δίνεται βάρος όχι μόνο στον αριθμό των εσφαλμένων σημείων ως προς τα αληθή αλλά και στο πόσο διαφέρουν μεταξύ τους. Σε αυτό οφείλονται οι όποιες διαφορές διαπιστώθηκαν στην απόδοση των εξεταζόμενων μεθόδων. Ακόμη, η ανακατασκευή σε περιπτώσεις όπως η υποψηφιδική παρεμβολή δίνει τη δυνατότητα να φανεί η βελτίωση που προκαλείται, η οποία γίνεται ελάχιστα αντιληπτή στους χάρτες παράλλαξης. Τέλος, για τις "βέλτιστες" ανακατασκευές των ζευγών εικόνων διαπιστώθηκε σε όλα μέσο σφάλμα που αντιστοιχεί σε λιγότερο από 1 εικονοψηφίδα στο επίπεδο των εικόνων.

8.2 Προτάσεις

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εφαρμόστηκε ο πρωτότυπος αλγόριθμος SGM, όπως αυτός περιγράφεται από τον Hirschmüller (2005, 2006, 2008), όσον αφορά την διαδικασία της συσσωμάτωσης του κόστους. Η μελέτη της βιβλιογραφίας έδειξε ότι στη συνέχεια είχαν προταθεί διάφορες παραλλαγές του αλγορίθμου, οι οποίες επιτυγχάνουν καλύτερο χάρτη παράλλαξης (δηλαδή με μικρότερα σφάλματα) ή μικρότερο χρόνο εκτέλεσης (runtime) και σχεδόν ισάξια αποτελέσματα, είτε με διαφοροποίηση κάποιων βημάτων της διαδικασίας είτε χάρη στην εφαρμογή τους σε ειδικό εξοπλισμό (hardware). Υπάρχει, ακόμη, παραλλαγή του αλγορίθμου που μεταφέρει τη διαδικασία της συνταύτισης από την εικόνα στον χώρο. Όλες αυτές οι μέθοδοι περιγράφηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 και θα ήταν σκόπιμο να εξεταστούν αναλυτικότερα στο μέλλον.

Ακόμη, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να υλοποιηθεί ο αλγόριθμος SGM και με χρήση κάποιου άλλου μέτρου ομοιότητας για τον αρχικό υπολογισμό του κόστους, όπως η Ιεραρχική Αμοιβαία Πληροφορία (Hierarchical Mutual Information). Η χρήση της μάλιστα προτείνεται στην αρχική δημοσίευση του αλγορίθμου υποσύνολης συνταύτισης (Hirschmüller, 2008), όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.3.2 της παρούσας εργασίας. Αντίστοιχα, μπορεί να δοκιμαστεί η απόδοση κάποιας άλλης συνάρτησης μεταβλητής ποινής P_2 , όπως αυτές αναλύθηκαν στην ενότητα 3.3. Γενικώς, μια συ-

νάρτηση μεταβλητής ποινής προτιμάται έναντι μιας άλλης εφόσον παράγει χάρτη παράλλαξης με μικρότερα σφάλματα, διαθέτει λιγότερες παραμέτρους, έχει παραμέτρους σταθερές σε απόδοση (οπότε δεν απαιτείται να βελτιστοποιηθούν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθορισμένες τιμές για όλες τις εικόνες) και έχει μικρότερο χρόνο εκτέλεσης. Το τελευταίο σχετίζεται με την πολυπλοκότητα του τρόπου του υπολογισμού της, δηλαδή αν για παράδειγμα υπολογίζεται για το σύνολο της εικόνας ή για κάθε εικονοψηφίδα ξεχωριστά.

Επιπροσθέτως, θα ήταν πολύ σημαντική η εφαρμογή του αλγορίθμου SGM σε εικόνες που απεικονίζουν εξωτερικές σκηνές (outdoor scenes), πιο πολλά και σύνθετα αντικείμενα (και κατά συνέπεια με περισσότερες ακμές, όπου θα μπορούν να δοκιμαστούν οι διάφορες συναρτήσεις ποινής P_2) ή σε ζεύγη με μεγαλύτερες ραδιομετρικές διαφορές. Υπάρχουν ιστοσελίδες που παρέχουν τέτοιου είδους εικόνες για συνταύτιση, όπως οι πλατφόρμες KITTI (<http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/>) και “.enpeda..” (www.mi.auckland.ac.nz/EISATS), αλλά και οι πιο νέες εικόνες της πλατφόρμας Middlebury (<http://vision.middlebury.edu/stereo/data/scenes2014/>).

Πρόκληση, ακόμη, συνιστά η εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου της παρούσας εργασίας, με τις κατάλληλες βελτιώσεις, και σε εικόνες μεγαλύτερου μεγέθους (σημειώνεται πως στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν εικόνες μεγέθους έως 465×370), όπως οι εναέριες λήψεις, λόγω του αυξημένου υπολογιστικού κόστους. Εξαρχής, βέβαια, ο Hirschmüller (2005, 2011) δοκίμασε πολύ μεγάλου όγκου εικόνες (αεροφωτογραφίες και δορυφορικές), άλλωστε αυτό ήταν και το αρχικό κίνητρο για την ανάπτυξη της μεθόδου. Μάλιστα, εφαρμογή του αλγορίθμου υποσύνολης συνταύτισης σε εναέριες εικόνες, όπως αυτός έχει υλοποιηθεί στη βιβλιοθήκη OpenCV, έχει ήδη πραγματοποιηθεί με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα (Μαλτέζος, 2013, Κύρκου, 2015) – στην περίπτωση αυτή βέβαια δεν υπήρχε πρόβλημα με το μέγεθος των εικόνων χάρη στη μεγάλη ταχύτητα εκτέλεσης που προσφέρει η OpenCV. Στις ίδιες εργασίες έγινε και μια διερεύνηση των υπόλοιπων παραμέτρων της μεθόδου SGBM και των δυνατοτήτων τους όσον αφορά την βελτίωση των χαρτών παράλλαξης.

Τέλος, θα ήταν χρήσιμη η εφαρμογή μιας τοπικής, μιας σύνολης και της υποσύνολης μεθόδου στις ίδιες εικόνες και η αναλυτική σύγκριση της απόδοσής τους, όσον αφορά το παραγόμενο αποτέλεσμα, την ταχύτητα εκτέλεσης και την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Διεθνής βιβλιογραφία

Ackermann F., 1984. Digital image correlation: performance and potential application in photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 11(64), pp. 429-439.

Ansar A., Castano A., Matthies L., 2004. Enhanced real-time stereo using bilateral filtering. *IEEE Proc. 2nd International Symposium 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT 2004)*, pp. 455-462.

Baker H.H., Binford T.O., 1981. Depth from edge and intensity based stereo. *Proc. 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2, pp. 631-636.

Banks J., 2001. Quantitative evaluation of matching methods and validity measures for stereo vision. *International Journal of Robotics Research*, 20(7), pp. 512-532.

Banz C., Hesselbarth S., Flatt H., Blume H., 2010. Real-time stereo vision system using semi-global matching disparity estimation: Architecture and FPGA-implementation. *Proc. International Conference on Embedded Computer Systems*, pp. 93-101.

Banz C., Blume H., Pirsch P., 2011. Real-time semi-global matching disparity estimation on the GPU. *IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, pp. 514-521.

Banz C., Pirsch P., Blume H., 2012. Evaluation of penalty functions for semi-global matching cost aggregation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B3, pp. 1-6.

Barnard S.T., 1986. A stochastic approach to stereo vision. *Proc. 5th National Conference on Artificial Intelligence*, Philadelphia, Penn., pp. 676-680.

Besl P.J., McKay N.D., 1992. A method for registration of 3D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), pp. 239-256.

Bethmann F., Luhmann T., 2014. Object-based multi-image semi-global matching - concept and first results. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5, pp. 93-100.

Birchfield S., Tomasi C., 1998. Depth discontinuities by pixel-to-pixel stereo. *Proc. 6th IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1073-1080.

Bleyer M., Gelautz M., 2005. A layered stereo matching algorithm using image segmentation and global visibility constraints. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59, pp. 128-150.

Bobick A.F., Intille S.S., 1999. Large occlusion stereo. *International Journal of Compu-*

ter Vision, 33 (3), pp. 181-200.

Boykov Y., Veksler O., Zabih R., 2001. Fast approximate energy minimization via graph cuts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23 (11), pp. 1222-1239.

Brown M., Burschka D., Hager G., 2003. Advances in computational stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(8), pp. 993-1008.

Buder M., 2012. Dense realtime stereo matching using a memory efficient semi-global matching variant based on FPGAs. *Real-Time Image and Video Processing*. SPIE Proceedings, Vol. 8437.

Chen Y., Jaw J., 2013. Optimization of penalty functions for semi-global matching cost aggregation. *Proc. 34th Asian Conference on Remote Sensing*.

Corke P., Dunn P., 1997. Real-time stereopsis using FPGAs. *Proc. IEEE TENCON—Speech and Image Technologies for Computing & Telecommunications*, pp. 235-238.

Dhond U.R., Aggarwal J.K., 1989. Structure from stereo - a review. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 19(6), pp. 1489-1510.

Ebner H., Heipke C., 1988. Integration of digital image matching and object surface reconstruction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 27(B11), pp. 534-545.

Ernst I., Hirschmüller H., 2008. Mutual information based semi-global matching on the GPU. *Advances in Visual Computing*, LNCS, Vol. 5358, Part 1, Springer, pp. 228-239.

Faugeras O., Hotz B., Matthieu H., Vieville T., Zhang Z., Fua P., Theron E., Moll L., Berry G., Vuillemin J., Bertin P., Proy C., 1993. *Real Time Correlation-Based Stereo: Algorithm, Implementations and Applications*. INRIA Technical Report no. 2013.

Faugeras O., Keriven R., 1998. Variational principles, surface evolution, PDE's, level set methods, and the stereo problem. *IEEE Transactions on Image Processing*, 7 (3), pp. 336-344.

Felzenszwalb P.F., Huttenlocher D.P., 2004. Efficient belief propagation for early vision. *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 261-268.

Förstner W., 1982. On the geometric precision of digital correlation. *International Archives of Photogrammetry*, 24(3), pp. 176-189.

Fua P., Leclerc Y.G., 1995. Object-centered surface reconstruction: combining multi-

image stereo and shading. *International Journal of Computer Vision*, 16(1), pp. 35-56.

Furukawa Y., Curless B., Seitz S.M., Szeliski R., 2010. Towards internet-scale multi-view stereo. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1434-1441.

Fusiello A., Roberto V., Trucco E., 1997. Efficient stereo with multiple windowing. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 858-863.

Gehrig S.K., Eberli F., Meyer T., 2009. A real-time low-power stereo vision engine using semi-global matching. *Proc. Computer Vision Systems*, pp. 134-143.

Gehrig S.K., Rabe C., 2010. Real-time semi-global matching on the CPU. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 85-92.

Gerke S., Morin K., Downey M., Boehrer N., Fuchs T., 2010. Semi-global matching: an alternative to Lidar for DSM generation? *Proc. Canadian Geomatics Conference & ISPRS Com. I Symposium*, Calgary, 15-18 June.

Gibson J., Marques O., 2008. Stereo depth with a unified architecture GPU. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 1-6.

Goesele M., Snavely N., Curless B., Hoppe H., Seitz S.M., 2007. Multi-view stereo for community photo collections. *11th International Conference on Computer Vision*, 2, pp. 265-270.

Grün A., 1985. Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, 14(3), pp. 175-187.

Grün A., Baltsavias E.P., 1988. Geometrically constrained multiphoto matching. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54(5), pp. 633-641.

Haala M., 2013. The landscape of dense image matching algorithms. *Photogrammetric Week '13* (Ed. D. Fritsch), Wichmann, pp. 271-284.

Haller I., Pantillie C., Oniga F., Nedevschi S., 2010. Real-time semiglobal dense stereo solution with improved sub-pixel accuracy. *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 369-376.

Hamilton O.K., Breckon T.P., Bai X., Kamata S., 2013. A foreground object based quantitative assessment of dense stereo approaches for use in automotive environments. *Proc. IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 418-422.

Hartley R., Zisserman A., 2003. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second

edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Helava U.V., 1978. Digital correlation in photogrammetric instruments. *Photogrammetry*, 34(1), pp. 19-34.

Helava U.V., 1988. Object-space least squares correlation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54(6), pp. 711-714.

Hermann S., Klette R., Destefanis E., 2009. Inclusion of a second-order prior into semi-global matching. *Proc. Pacific-Rim Symposium on Image Video Technology*, pp. 633-644.

Hermann S., Morales S., Vaudrey T., Klette R., 2010. Illumination invariant cost functions in semi-global matching. *Proc. Computer Vision Vehicle Technology: From Earth to Mars (CVVT:E2M)*, LNCS 6469, Springer, pp. 245-254.

Hermann S., Klette R., 2012. Iterative semi-global matching for robust driver assistance systems. *Proc. 11th Asian Conference on Computer Vision*, LNCS, Vol. 7726, pp. 465-478.

Hirschmüller H., 2005. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. 807-814.

Hirschmüller H., 2006. Stereo vision in structured environments by consistent semi-global matching. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2386-2393.

Hirschmüller H., Scharstein D., 2007. Evaluation of cost functions for stereo matching. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1-8.

Hirschmüller H., 2008. Stereo processing by semi-global matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2), pp. 328-341.

Hirschmüller H., Scharstein D., 2009. Evaluation of stereo matching costs on images with radiometric differences. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 31(9), pp. 1582-1599.

Hirschmüller H., 2011. Semi-global matching - motivation, developments and applications. *Photogrammetric Week*, Wichmann, pp. 173-184.

Hirschmüller H., Buder M., Ernst I., 2012. Memory efficient semi-global matching. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume I-3, pp. 371-376.

Humenberger M., Engelke T., Kubinger W., 2010. A census-based stereo vision algorithm using modified semi-global matching and plane fitting to improve matching quality. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 77-84.

Jin S., Cho J., Pham X.D., Lee K.M., Park S.K., Kim M., Jeon J.W., 2010. FPGA design and implementation of a real-time stereo vision system. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 20(1), pp. 15 -26.

Kanade T., Okutomi M., 1994. A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiment. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 16 (9), pp. 920-932.

Kanade T., Kato H., Kimura S., Yoshida A., Oda K., 1995. Development of a video-rate stereo machine. *Proc. International Robotics and Systems Conference (IROS '95), Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, pp. 95 - 100.

Kanade T., Rander P., Narayanan P J., 1997. Virtualized reality: constructing virtual worlds from real scenes. *IEEE Multimedia, Immersive Telepresence*, 4(1), pp. 34-47.

Kang S.B., Webb J., Zitnick C., Kanade T., 1995. A multi baseline stereo system with active illumination and real-time image acquisition. *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 88-93.

Kim J., Kolmogorov V., Zabih R., 2003. Visual correspondence using energy minimization and mutual information. *IEEE International Conference on Computer Vision*, vol. 2, pp. 1033-1040.

Kolmogorov V., Zabih R., 2001. Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts. *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 508-515.

Kolmogorov V., Criminisi A., Blake A., Cross G., Rother C., 2006. Probabilistic fusion of stereo with color and contrast for bilayer segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(9), pp. 1480-1492.

Konolige K., 1997. Small vision systems: hardware and implementation. *Proc. 8th International Symposium on Robotics Research*, Springer, pp 203-212.

Kraus K., 2003. *Φωτογραμμετρία*. Τόμος 1, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε.

Lafarge F., Mallet C., 2012. Creating large-scale city models from 3D-point clouds: a robust approach with hybrid representation. *International Journal of Computer Vision*, 99(1), pp. 69-85.

Luhmann T., Robson S., Kyle S., Boehm J., 2014. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Walter de Gruyter, Berlin.

Maas H.G., 1996. Automatic DEM generation by multi-image feature based matching. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31(3), pp. 484-489.

Marr D., Poggio T., 1976. Cooperative computation of stereo disparity. *Science*, 194, pp. 283-287.

Matthies L., Kelly A., Litwin T., Tharp G., 1995. Obstacle detection for unmanned ground vehicles: a progress report. *Proc. Intelligent Vehicles '95 Symposium*, pp. 66-71.

Mattocchia S., Tombari F., Di Stefano L., 2007. Stereo vision enabling precise border localization within a scanline optimization framework. *IEEE Asian Conference on Computer Vision*, pp. 517-527.

Michael M., Salmen J., Stallkamp J., Schlipsing M., 2013. Real-time stereo vision: optimizing semi-global matching. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 1197-1202

Mroz F., Breckon T.P., 2012. A foreground object based quantitative assessment of dense stereo approaches for use in automotive environments. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2012(13), pp. 1-19.

Murphy C., Lindquist D., Rynning A.M., Cecil T., Leavitt S., Chang M.L., 2007. Low-cost stereo vision on an FPGA. *Proc. 15th IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*, pp. 333-334.

Ohta Y., Kanade T., 1985. Stereo by intra- and inter-scanline search using dynamic programming. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7(2), pp. 139-154.

Okutomi M., Kanade T., 1993. A multiple-baseline stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(4), pp. 353-363.

Payá-Vayá G., Martín-Langerwerf J., Banz C., Giesemann F., Pirsch P., Blume H., 2010. VLIW architecture optimization for an efficient computation of stereoscopic video applications. *IEEE International Conference on Green Circuits and Systems*, pp. 457-462.

Pollefeys M., Nister D., Frahm J.M., Akbarzadeh A., Mordohai P., Clipp B., Engels C., Gallup D., Kim S.J., Merrell P., Salmi C., Sinha S., Talton B., Wang L., Yang Q., Stewenius H., Yang R., Welch G., Towles H., 2008. Detailed real-time urban 3D reconstruction from video. *International Journal of Computer Vision*, 78(2-3), pp. 143-167.

Ranftl R., Gehrig S., Pock T., Bischof H., 2012. Pushing the limits of stereo using variational stereo estimation. *Proc. IEEE Symposium on Intelligent Vehicles*, pp. 401-407.

Remondino F., Grazia Spera M., Nocerino E., Menna F., Nex F., 2014. State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, 29(146), pp. 144-166.

Remondino F., Del Pizzo S., Kersten T.P., Troisi S., 2012. Low-cost and open-source solutions for automated image orientation - a critical overview. *Progress in Cultural Heritage Preservation*, LNCS, vol. 7616, Springer, pp. 40-54.

Rosenberg I.D., Davidson P.L., Muller C.M.R., Han J.Y., 2006. Real-time stereo vision using semi-global matching on programmable graphics hardware. *Proc. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH*.

Roy S., Cox I.N., 1998. A maximum-flow formulation of the N-camera stereo correspondence problem. *6th International Conference on Computer Vision*, pp. 492-499.

Scharstein D., Szeliski R., 2002. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 47, pp. 7-42.

Scharstein D., Szeliski R., 2003. High-accuracy stereo depth maps using structured light. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1, pp. 195-202.

Schenk T., 1999. *Digital Photogrammetry*. Vol. 1, TerraScience.

Shan Q., Adams R., Curless B., Furukawa Y., Seitz S.M., 2013. The visual Turing test for scene reconstruction. *Vision Conference 3D*, pp. 25-32.

Snavely N., Seitz S.M., Szeliski R., 2008. Modeling the world from Internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), pp. 189-210.

Spangenberg R., Langner T., Rojas R., 2013. Weighted semi-global matching and center-symmetric census transform for robust driver assistance. *Computer Analysis of Images and Patterns*, LNCS, vol. 8048, Springer, pp. 34-41.

Spangenberg R., Langner T., Adfeldt S., Rojas R., 2014. Large scale Semi-Global Matching on the CPU. *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 195-201.

Steingrube P., Gehrig S., Franke U., 2009. Performance evaluation of stereo algorithms for automotive applications. *Computer Vision Systems*, LNCS, Springer, vol. 5815, pp. 285-294.

Stentoumis C., Grammatikopoulos L., Kalisperakis I., Karras G., 2012. Implementing an adaptive approach for dense stereo-matching. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, B5, pp. 309-314.

Stentoumis C., Grammatikopoulos L., Kalisperakis I., Karras G., 2014. On accurate

dense stereo-matching using a local adaptive multi-cost approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 91, pp. 29-49.

Strecha C., Fransens R., Van Gool L., 2004. A probabilistic approach to large displacement optical flow and occlusion detection. *Statistical Methods in Video Processing*, Springer, pp. 25-45.

Sun J., Zheng N.N., Shum H.Y., 2003. Stereo matching using belief propagation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25 (7), pp. 787-800.

Szeliski R., Scharstein D., 2004. Sampling the disparity space image. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(3), pp. 419-425.

Szeliski R., 2010. *Computer Vision: Algorithms and Applications* (draft). Springer, <http://szeliski.org/Book/>.

van der Mark W., Gavrila D.M., 2006. Real-time dense stereo for intelligent vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(1), pp. 38-50.

Veksler O., 2003. Fast variable window for stereo correspondence using integral images. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition*, pp. 556-561.

Veksler O., 2005. Stereo correspondence by dynamic programming on a tree. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 384-390.

Viola P., Wells W.M., 1997. Alignment by maximization of mutual information. *International Journal of Computer Vision*, 24(2), pp. 137-154.

Wenzel K., Rothermel M., Fritsch D., Haala N., 2013. Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5/W1, pp. 251-258.

Woodfill J., Von Herzen B., 1997. Real-time stereo vision on the PARTS reconfigurable computer. *Proc. IEEE Workshop FPGAs for Custom Computing Machines*, pp. 242-250.

Wrobel B., 1987. Facets stereo vision (FAST Vision) - a new approach to computer stereo vision and to digital photogrammetry. *ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data*, Interlaken, Switzerland, pp. 231-258.

Yoon K.J., Kweon I.S., 2006. Adaptive support-weight approach for correspondence search. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28 (4), pp. 650-656.

Zabih R., Woodfill J., 1994. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence. *European Conference on Computer Vision*, pp. 151-158.

Zhang Z., Zhang J., Wu X., Zhang H., 1992. Global image matching with relaxation method. *International Colloquium on Photogrammetry, Remote Sensing and GIS*, Wuhan, China, pp. 175-188.

Zhu K., D'Angelo P., Butenuth M., 2011. A performance study on different stereo matching costs using airborne image sequences and satellite images. *Photogrammetric Image Analysis*, vol. 6952, Springer, pp. 159-170.

Zinner C., Humenberger M., Ambrosch K., Kubinger W., 2008. An optimized software based implementation of a census-based stereo matching algorithm. *Proc. 4th International Symposium on Advances in Visual Computing*, Springer, pp. 216-227.

- Ελληνική βιβλιογραφία

Αδάμ Κ., 2011. *Γεωμετρία του Στερεοζεύγους από Βαθμονομημένες και μη Βαθμονομημένες Μηχανές*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.

Βερυκόκου Σ., 2013. *Ανάπτυξη Εφαρμογών Επαυξημένης Πραγματικότητας Βάσει Επίπεδου Προτύπου*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.

Θεοφάνους Α., 2004. *Ανάπτυξη Προγράμματος για την Επιπολική Επανασύσταση Στερεοζεύγους*. Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Τοπογραφίας, ΤΕΙ Αθήνας.

Καλησπεράκης Η., 2010. *Η Επιπολική Γεωμετρία στον Προβολικό και τον Ευκλείδειο Χώρο*. Διδακτορική διατριβή, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.

Κύρκου Α., 2015. *Διερεύνηση Ημι-Καθολικής Μεθόδου Πυκνής Συνταύτισης Σημείων για την Εξαγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου και Ορθοεικόνας*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.

Μαλτέζος Ε., 2013. *Εξαγωγή Πινάκων Ανομοιοτήτων Βάθους από Εναέριες Εικόνες Μέσω Πυκνής Συνταύτισης Σημείων*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.

Μπούρου Σ., 2015. *Προγραμματισμός και Αξιολόγηση Αυτόματου Φωτοτριγωνισμού με Αυτοβαθμονόμηση σε Λωρίδες Επίγειων Λήψεων*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.

Φλωρίδη Β., 2013. *Προγραμματισμός, Εφαρμογή και Αξιολόγηση Μεθόδων Αυτόματης Πυκνής Συνταύτισης Εικόνας σε Στερεοζεύγη*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.

- Ιστοσελίδες

<http://vision.middlebury.edu/stereo/> [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]

<http://vision.middlebury.edu/stereo/data/scenes2003/> [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]

<http://vision.middlebury.edu/stereo/data/scenes2006/> [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]

<http://vision.middlebury.edu/stereo/data/scenes2014/> [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]

<https://www.ceemple.com/opencv-c-ide/> [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]

<http://opencv.org/> [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]

<https://www.visualstudio.com/downloads/download-visual-studio-vs> [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]

<https://www.ceemple.com/ceemple-opencv-visual-studio/> [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]

http://docs.opencv.org/3.0.0/d2/d85/classcv_1_1StereoSGBM.html [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]

<http://www.danielgm.net/cc/> [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]

www.mi.auckland.ac.nz/EISATS [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]

<http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/> [Τελευταία πρόσβαση: 10/9/2015]