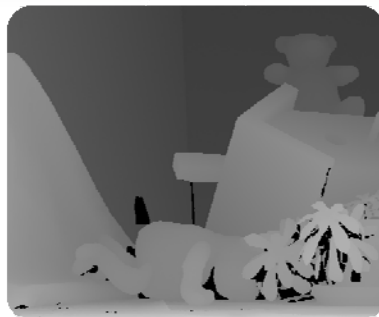




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ, ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΠΥΚΝΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΣΤΕΡΕΟΖΕΥΓΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΦΛΩΡΙΔΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2013

Περίληψη

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία προγραμματίστηκαν, διερευνήθηκαν και αξιολογήθηκαν ορισμένα βασικά μέτρα ομοιότητας για την αυτόματη πυκνή ψηφιακή συνταύτιση στερεοζεύγους εικόνων, από την εφαρμογή των οποίων προέκυψε η δημιουργία χαρτών ψηφιακής παράλλαξης αλλά, βάσει αυτών, και η ανακατασκευή 3D μοντέλου. Τα μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κριτήρια βασισμένα στις απόλυτες διαφορές και τα τετράγωνα των διαφορών έντασης καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης. Το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών εφαρμόστηκε και για τη συνταύτιση μετασχηματισμένων εικόνων. Οι μετασχηματισμοί που εξετάστηκαν ήταν βάσει του φίλτρου κατάταξης rank και του φίλτρου κλίσεων. Στους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από τη διαδικασία της συνταύτισης εφαρμόστηκαν ορισμένες τεχνικές βελτιστοποίησης, όπως η εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης και η παρεμβολή πολυωνυμικής καμπύλης 2^{ου} βαθμού για να επιτευχθεί υποψηφιακή ακρίβεια. Πραγματοποιήθηκε, ακόμη, έλεγχος “αμφίδρομης συμβατότητας” με σκοπό τον εντοπισμό περιοχών αποκρύψεων ή αστοχιών στην εικόνα, αλλά και την αξιολόγηση της ποιότητας των χαρτών βάθους που προκύπτουν από τη διαδικασία συνταύτισης. Για να ελεγχθεί η ορθότητα των χαρτών ψηφιακής παράλλαξης που υπολογίζονται, αλλά και για την συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών κριτηρίων που χρησιμοποιήθηκαν, ελέγχθηκαν τα αποτελέσματα της διπλωματικής αυτής εργασίας με τους αντίστοιχους αληθείς χάρτες ψηφιακής παράλλαξης (οι οποίοι στην προκειμένη περίπτωση διατίθενται στο Διαδίκτυο). Τέλος, προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες στον τρισδιάστατο χώρο των σημείων που πέρασαν τον έλεγχο “αμφίδρομης συμβατότητας”, με αποτέλεσμα την ανακατασκευή 3D μοντέλου. Η εργασία ολοκληρώνεται με τα τελικά συμπεράσματα και ορισμένες σκέψεις για πιθανά θέματα μελλοντικής μελέτης. Όλες οι διαδικασίες της διπλωματικής εργασίας προγραμματίστηκαν σε περιβάλλον Matlab.

Programming and Evaluation of Different Approaches for Dense Stereo-Matching

V. Floridi

Diploma Thesis, Department of Surveying, National Technical University of Athens

October 2013

Abstract

In this Diploma Thesis, basic similarity measures for automatic dense stereo-matching, the application of which led to the creation of disparity maps, have been programmed, investigated and evaluated. The measures used here were based on the criteria of absolute differences (AD), squared differences (SD), sum of absolute differences (SAD), sum of squared differences (SSD) and correlation coefficient. The criterion of the sum of absolute differences was further applied on transformed input images. The image transformations applied here were those of the rank filter and the gradient filter. Optimization techniques, such as smoothing filtering and sub-pixel interpolation, have also been applied on the disparity maps. Next, the left-right consistency check was performed, in order to exclude outliers and occlusion areas in the image, and for evaluating the quality of disparity maps. In order to check the accuracy of disparity maps, as well as to perform a comparative evaluation of similarity measures used, results were compared against the true disparity maps, which are available on the well-known evaluation platform of Middlebury College. Finally, object point coordinates were determined for 3D model reconstruction. The project concludes with some thoughts regarding possible further extensions of this work. All procedures have been implemented in Matlab.

Ευχαριστίες

Κλείνοντας αυτόν τον κύκλο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσοι στάθηκαν δίπλα μου με υπομονή και κατανόηση, και συντέλεσαν με κάθε τρόπο στην εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Γιώργο Καρρά για το αμέριστο ενδιαφέρον και την υπομονή που επέδειξε, το χρόνο και τις γνώσεις που απλόχερα μοιράστηκε μαζί μου, αλλά και για την υποστήριξή του σε όλη τη διάρκεια της διαδρομής αυτής. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας Χρήστο Στεντούμη, η συμβολή του οποίου σε προγραμματιστικά αλλά και θεωρητικά θέματα ήταν καθοριστική. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και την Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό Κατερίνα Αδάμ για τις συμβουλές και τη βοήθειά της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	ii
Ευχαριστίες.....	iii
1. Εισαγωγή	1
Γενικά	1
Η εξέλιξη των μεθόδων.....	2
Στόχος της Διπλωματικής.....	5
Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	5
2. Επιπολική γεωμετρία και ψηφιακή συνταύτιση	7
2.1. Επιπολική γεωμετρία στερεοζεύγους.....	7
2.2. Επιπολική επανασύσταση στερεοζεύγους	8
3. Χάρτης ψηφιακής παράλλαξης (Disparity Map)	15
3.1. Αποκατάσταση ομολογιών σημείων	15
3.2. Παράλλαξη και χάρτης ψηφιακής παράλλαξης	16
3.3. Εικόνα του χώρου των ψηφιακών παραλλάξεων (disparity space image – DSI)	18
3.4. Τομές του χώρου των ψηφιακών παραλλάξεων.....	19
4. Μέτρα ομοιότητας – Συναρτήσεις κόστους	22
4.1. Απόλυτες διαφορές (absolute differences)	22
4.2. Άθροισμα απόλυτων διαφορών (sum of absolute differences: SAD)	23
4.3. SAD με συνδυασμό παραθύρων.....	26
4.4. Τετράγωνα διαφορών (squared differences: AD).....	26
4.5. Άθροισμα τετραγώνων διαφορών (Sum of squared differences: SSD).....	27
4.6. Συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient).....	28
4.7. Συνταύτιση με μετασχηματισμό κλίσης (gradient)	29
4.8. Συνταύτιση με μετασχηματισμό κατάταξης rank.....	31
5. Βελτίωση και έλεγχος των αποτελεσμάτων	33
5.1. Υποψηφιακή παρεμβολή (sub – pixel refinement)	33
5.2. Φίλτρο μεσαίας τιμής.....	34
5.3. Φίλτρο μέσου όρου	34
5.4. Φίλτρο Gauss	35

5.5. Αμφίδρομη συμβατότητα (left – right consistency)	36
5.6. Έλεγχος αποτελεσμάτων συνταύτισης	38
5.7. Εμπροσθοτομία (3D ανακατασκευή).....	39
6. Εφαρμογές και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	42
6.1. Πρώτο ζεύγος εικόνων.....	42
6.1.1.Συνταύτιση με τις μεθόδους SAD, SSD και SAD colour	42
6.1.2.Συνταύτιση με τον συντελεστή συσχέτισης.....	50
6.1.3.Συνταύτιση εικόνων κλίσης (gradient).....	54
6.1.4.Συνταύτιση εικόνων μετά από μετασχηματισμό rank.....	60
6.1.5.Εξομάλυνση των αποτελεσμάτων της συνταύτισης.....	68
6.1.5.1. Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από την μέθοδο συνταύτισης SAD	68
6.1.5.2. Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες κλίσης	74
6.1.5.3. Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες rank	79
6.1.6.Υποψηφιακή παρεμβολή (sub – pixel refinement).....	85
6.1.7.Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας	88
6.1.7.1. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD	89
6.1.7.2. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD με εξομάλυνση.....	91
6.1.7.3. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης	92
6.1.7.4. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης με εξομάλυνση	93
6.1.7.5. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank.....	94
6.1.7.6. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank με εξομάλυνση	96
6.1.8.Συνταύτιση με περισσότερα παράθυρα	97
6.1.9.Συνταύτιση με την μέθοδο της απόλυτης διαφοράς.....	99
6.2. Δεύτερο ζεύγος εικόνων	101
6.2.1.Συνταύτιση με τις μεθόδους SAD, SSD και SAD colour	101
6.2.2.Συνταύτιση με τον συντελεστή συσχέτισης.....	107
6.2.3.Συνταύτιση εικόνων κλίσης (gradient).....	110
6.2.4.Συνταύτιση εικόνων μετά από μετασχηματισμό rank.....	114
6.2.5.Εξομάλυνση των αποτελεσμάτων της συνταύτισης.....	120
6.2.5.1. Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από την μέθοδο συνταύτισης SAD	121
6.2.5.2. Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες κλίσης	125
6.2.5.3. Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες rank.....	129

6.2.6.Υποψηφιακή παρεμβολή (sub – pixel refinement).....	134
6.2.7.Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας	136
6.2.7.1. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD	136
6.2.7.2. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD με εξομάλυνση.....	138
6.2.7.3. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης	139
6.2.7.4. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης με εξομάλυνση	141
6.2.7.5. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank.....	142
6.2.7.6. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank με εξομάλυνση .	143
6.2.8.Συνταύτιση με περισσότερα παράθυρα	144
6.2.9.Συνταύτιση με την μέθοδο της απόλυτης διαφοράς.....	145
6.3. Τρίτο ζεύγος εικόνων	147
6.3.1.Συνταύτιση με τις μεθόδους SAD, SSD και SAD colour	147
6.3.2.Συνταύτιση με τον συντελεστή συσχέτισης.....	153
6.3.3.Συνταύτιση εικόνων κλίσης (gradient).....	156
6.3.4.Συνταύτιση εικόνων μετά από μετασχηματισμό rank.....	161
6.3.5.Εξομάλυνση των αποτελεσμάτων της συνταύτισης.....	167
6.3.5.1. Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από την μέθοδο συνταύτισης SAD	167
6.3.5.2. Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες κλίσης	172
6.3.5.3. Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες rank...	175
6.3.6.Υποψηφιακή παρεμβολή (sub – pixel refinement).....	180
6.3.7.Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας	182
6.3.7.1. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD	182
6.3.7.2. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD με εξομάλυνση.....	184
6.3.7.3. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης	186
6.3.7.4. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης με εξομάλυνση	187
6.3.7.5. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank.....	188
6.3.7.6. Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank με εξομάλυνση .	189
6.3.8.Συνταύτιση με περισσότερα παράθυρα	190
6.3.9.Συνταύτιση με την μέθοδο της απόλυτης διαφοράς.....	192
6.4. Τέταρτο ζεύγος εικόνων	193
6.4.1.Συνταύτιση με τις μεθόδους SAD, SSD και SAD colour	194

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Ως άνθρωποι, αντιλαμβανόμαστε την τρισδιάστατη δομή του κόσμου γύρω μας με εμφανή ευκολία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για αυτό αποτελεί η άνεση με την οποία ο άνθρωπος μπορεί να αναγνωρίσει το σχήμα, το χρώμα, τις σκιές ενός αντικειμένου, ακόμα και να το διακρίνει αβίαστα από το υπόβαθρο στο οποίο εμφανίζεται. Στην ίδια λογική γίνεται, λοιπόν, προσπάθεια εδώ και δεκαετίες να προσομοιωθεί η διαδικασία αυτή από τον υπολογιστή. Όπως είναι προφανές, πρόκειται για μια ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία, καθώς ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής δεν αναγνωρίζει οντότητες, φυσικά χαρακτηριστικά ή χωρικές δομές στην εικόνα, ώστε να είναι σε θέση να προχωρήσει στην αναγνώριση προτύπων και, τελικά, στην ερμηνεία του περιεχομένου της εικόνας (Scharstein and Szeliski, 2002). Βασικό αντικείμενο της Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας, αλλά βέβαια και της Όρασης Υπολογιστών, συνιστά αυτή ακριβώς η προσπάθεια προσομοίωσης της ανθρώπινης όρασης από υπολογιστικές διαδικασίες. Καίριο συστατικό στοιχείο αυτού του επιστημονικού πεδίου αποτελούν οι μέθοδοι της *Συνταύτισης Εικόνας* (image matching), οι οποίες μεταξύ άλλων αποβλέπουν στην αυτόματη τρισδιάστατη ανακατασκευή των απεικονιζόμενων αντικειμένων (3D object reconstruction).

Οι μαθηματικές-υπολογιστικές τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί με ειδικότερο σκοπό την αυτόματη ανάκτηση του τρισδιάστατου σχήματος των αντικειμένων από εικόνες προϋποθέτουν, κατ' αρχήν, την ύπαρξη τουλάχιστον δυο επικαλυπτόμενων εικόνων που τα απεικονίζουν. Συνοπτικά μπορεί να πει κανείς ότι η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει δύο διακριτές δυνατότητες. Η μία αφορά εντοπισμό σημείων ή άλλων χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος στην εικόνα και προσδιορισμό των ομολόγων τους. Αυτό μπορεί να επιτρέψει τον προσανατολισμό των εικόνων και έπειτα την (αραιή) ανακατασκευή στον τρισδιάστατο χώρο, πχ. με την μορφή ενός συμβατικού ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (DEM) του αντικειμένου. Παράλληλα, όμως, υπάρχουν και τεχνικές που αφορούν την εύρεση ομολογιών για κάθε pixel των εικόνων, με στόχο την πυκνή (dense), δηλαδή κατά το δυνατόν "πλήρη" 3D ανακατασκευή, η οποία αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σε κάθε περίπτωση, η ανάγκη να προσδιοριστούν ομόλογα χαρακτηριστικά στις εικόνες θέτει το κεντρικό πρόβλημα της αντιστοίχισης (correspondence problem). Όλοι οι αλγόριθμοι αντιστοίχισης που έχουν δημιουργηθεί βασίζονται σε κάποιον τρόπο "ποσοτικοποίησης" της ομοιότητας των θέσεων της εικόνας, ο οποίος θα αναπτυχθεί για ορισμένες συγκεκριμένες περιπτώσεις εκτενέστερα στη συνέχεια. Στην περίπτωση όπου τα χαρακτηριστικά που εμπλέκονται είναι σημεία, κάποιοι αλγόριθμοι αντιστοίχισης βασίζονται σε κάθε εικονοψηφίδα ξεχωριστά για τον υπολογισμό του κόστους, και περιλαμ-

βάνουν πχ. τον υπολογισμό των απόλυτων διαφορών (*absolute differences – AD*) των τιμών έντασης ή του τετραγώνου των διαφορών (*squared differences – SD*), σε ασπρόμαυρες όσο και σε έγχρωμες εικόνες. Αλλά φυσικά υπάρχουν και οι αλγόριθμοι όπου ο υπολογισμός του κόστους αντιστοίχισης βασίζεται στη χρήση παραθύρων, και περιλαμβάνουν πχ. το άθροισμα των απόλυτων διαφορών (*sum of absolute differences – SAD*) είτε του τετραγώνου των διαφορών (*sum of squared differences – SSD*) ή το συντελεστή συσχέτισης (*normalized cross correlation – NCC*). Μπορούν ακόμα να χρησιμοποιούνται φίλτρα στις εικόνες πριν από τη διαδικασία της αντιστοίχισης, όπως πχ. φίλτρα παραγώνων ή φίλτρα εξομάλυνσης (μέσου όρου ή Gauss). Η εφαρμογή των τελευταίων δημιουργεί, παράλληλα, και κάποια “θόλωση” στα αποτελέσματα που παράγονται από τη διαδικασία της συνταύτισης. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί η χρήση πχ. αμφίπλευρου φίλτρου (*bilateral filter*), με σκοπό την εξομάλυνση με ταυτόχρονη διατήρηση των ακμών της εικόνας (Hirschmüller and Scharstein, 2009). Επιπλέον, έχουν διατυπωθεί μη παραμετρικές προσεγγίσεις για να υπολογίζεται το κόστος αντιστοίχισης, οι οποίες αξιολογούν μετασχηματισμούς που βασίζονται μόνο στη σχετική διάταξη (κατάταξη) των τιμών έντασης των εικονοψηφίδων εντός παραθύρου, παραμένουν δηλαδή ανεπηρέαστοι απέναντι σε γραμμικές ραδιομετρικές μεταβολές. Στους αλγόριθμους αυτούς υπάγονται οι μετασχηματισμοί *Rank* και *Census* (Hirschmüller and Scharstein, 2009).

Τέλος, βασική διάκριση των μεθόδων πυκνής σημειακής συνταύτισης είναι εκείνη μεταξύ *τοπικών* (*local*) και *σύνολων* (*global*) μεθόδων. Στην πρώτη περίπτωση, η οποία βασίζεται σε παράθυρα, η επιλογή της παράλλαξης – που ορίζει την ομολογία των σημείων – γίνεται με κριτήριο την μικρότερη τιμή κόστους. Το κόστος συνταύτισης συναθροίζεται (*cost aggregation*) εντός παραθύρου, συχνά αλλά όχι πάντοτε τετραγωνικού. Αντίθετα, οι “σύνολες” μέθοδοι πραγματοποιούν κάποιου είδους βελτιστοποίηση μετά από τον υπολογισμό των παραλλάξεων, συχνά χωρίς μεσολάβηση παραθύρου, αφού χρησιμοποιούνται δεσμεύσεις εξομάλυνσης (*global smoothness constraints*) που επιτελούν παρόμοια λειτουργία (Szeliski, 2010).

1.2 Η εξέλιξη των μεθόδων

Η έννοια της όρασης υπολογιστών (*computer vision*) χρονολογείται στις αρχές της δεκαετίας του 1970 ως στοιχείο ενός φιλόδοξου προγράμματος, με απώτερο σκοπό να μιμηθεί την ανθρώπινη ευφυΐα με την χρήση εικόνων και να δημιουργήσει ρομπότ με ευφυή συμπεριφορά. Η εύρεση ομολογιών με αυτοματοποιημένο τρόπο είχε απασχολήσει τη διεθνή επιστημονική κοινότητα από πολύ νωρίς, ήδη από τη δεκαετία του '50. Το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε αρχικά στον απλό συντελεστή συσχέτισης και παρεμφερείς συναρτήσεις (Στεντούμης, 2007). Εκείνο που διαχώριζε την όραση υπολογιστών από το ήδη υπάρχον πεδίο της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας ήταν η επιθυμία για ανάκτηση της τρισδιάστατης δομής του κόσμου από εικόνες, ώστε στη συνέχεια να χρη-

σιμοποιηθεί αυτό ως ένα σκαλοπάτι προς την πλήρη κατανόηση μιας σκηνής. Οι πρώτες προσπάθειες κατανόησης περιλάμβαναν την εξαγωγή ακμών και στη συνέχεια την ανάκτηση της τρισδιάστατης δομής ενός αντικειμένου με τη βοήθεια των τοπολογικών δομών δισδιάστατων γραμμών (Szeliski, 2010).

Στη δεκαετία του 1980 χρονολογείται η χρήση πυραμίδων εικόνων με σκοπό την εφαρμογή της διαδικασίας της συνταύτισης διαδοχικά από εικόνες μικρότερης σε εικόνες μεγαλύτερης ανάλυσης και παράλληλα τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου (Szeliski, 2010). Οι πυραμίδες ουσιαστικά αποτελούν μια αναπαράσταση χώρου κλίμακας (scale-space), και δημιουργούνται με κατάλληλη εξομάλυνση και υποδιπλασιασμό σε κάθε επίπεδο της χωρικής ανάλυσης της αρχικής εικόνας. Η αναζήτηση πραγματοποιείται από την κορυφή της, δηλαδή από το αδρό, προς τη βάση, δηλαδή το λεπτομερές, εξασφαλίζοντας κάθε φορά ικανοποιητικές αρχικές τιμές για την αναζήτηση στο επόμενο επίπεδο. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα χρήσιμη, υπολογιστικά αλλά και πρακτικά, μέθοδο καθώς η αρχική αναζήτηση πραγματοποιείται σε εικόνα αρκετά μικρότερη της κανονικής, όπου μαζί με το μειωμένο μέγεθος της εικόνας περιορίζονται και οι δυσμενείς επιπτώσεις του θορύβου και των παραμορφώσεων. Στην παρούσα εργασία, πάντως, δεν χρησιμοποιήθηκαν πυραμίδες εικόνας για την συνταύτιση.

Παράλληλα, το ενδιαφέρον επικεντρωνόταν όχι μόνο σε απλό εντοπισμό ομόλογων σημείων αλλά και σε τεχνικές βασιζόμενες στις παραγώγους των εικόνων. Η ανάγκη αυτή δημιουργήθηκε λόγω της συνθετότητας με την οποία το μοντέλο της κεντρικής προβολής απεικονίζει τις δύο διαστάσεις του 3D χώρου, αλλά και των ραδιομετρικών διαφοροποιήσεων που χαρακτηρίζουν τις πραγματικές εικόνες, τα οποία οδηγούν συχνά όχι μόνο σε μειωμένης ακρίβειας αποτελέσματα αλλά και σε αστοχία των λύσεων. Για το σκοπό αυτό, λοιπόν, έγιναν προσπάθειες σε ένα ευρύ φάσμα πειραματισμών που αφορά όχι μόνο την επιφανειακή (area-based) αλλά και την συνταύτιση χαρακτηριστικών (feature-based). Η διατύπωση των πρώτων αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν για τη συνταύτιση χαρακτηριστικών οφείλεται κυρίως στο ότι έγινε αντιληπτό πως ο ανθρώπινος εγκέφαλος συνταυτίζει οντότητες με βάση τα χαρακτηριστικά τους και όχι τους τόνους της απόχρωσής τους. Η προσέγγιση αυτή είναι συχνά πιο ανθεκτική σε παραμορφώσεις της προοπτικής (λόγω αναγλύφου, έντονων αλλαγών στις γεωμετρίες λήψης και την κλίμακα των εικόνων) αλλά και του φωτισμού, ενώ δεν απαιτεί ιδιαίτερα ακριβείς αρχικές τιμές. Ακόμα, μπορεί κατά περίπτωση να εξασφαλίζει ισχυρότερες λύσεις αν ληφθούν υπόψη και πληροφορίες για τη δομή του χώρου (Αδάμ, 2011). Οι αλγόριθμοι αυτοί αφορούσαν κυρίως την “αραιή” συνταύτιση (*sparse matching*) των εικόνων, όχι μόνο λόγω υπολογιστικών περιορισμών αλλά και για περιορισμό των λύσεων και αύξηση της ακρίβειας. Στην περίπτωση σημείων ενδιαφέροντος (*interest points*), έτσι, το όφελος είναι ότι η αναζήτηση αφορά συγκεκριμένα σημεία που, κατά το δυνατόν, συγκεντρώνουν ορισμένες ιδιότητες προκειμένου να θεωρηθούν ως σημεία ενδιαφέροντος και όχι οποιαδήποτε τυχαία οντότητα. Η τελική αντιστοίχιση μπορεί να πραγματοποιηθεί πχ. με ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους μεταξύ των διανυσμάτων

των περιγραφικών χαρακτηριστικών (descriptors) που αποδίδονται στα σημεία ενδιαφέροντος και περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά κυρίως με τις παραγώγους της εικόνας σε διαφορετικές αναλύσεις. Έχουν προταθεί διάφοροι τελεστές εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι από τους οποίους είναι εκείνοι των Moravec, Harris, Förstner ή ο SIFT (Αδάμ, 2011). Οι προσεγγίσεις αραιής συνταύτισης (σημείων ενδιαφέροντος) αποσκοπούν κυρίως στην αυτοματοποίηση των διαδικασιών προσανατολισμού και φωτοτριγωνισμού/αυτοβαθμονόμησης, και στην δημιουργία αδρών ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου ως υποβάθρων για πυκνότερη συνταύτιση. Ας σημειωθεί, παρενθετικά, πως ο σημειακός τελεστής Harris είχε χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενο μάθημα με σκοπό την αρχική εξαγωγή “καλών” σημείων για την διαδικασία του αυτόματου σχετικού προσανατολισμού (Φλωρίδη, 2013).

Η ανάγκη όμως να δημιουργούνται πλήρη 3D μοντέλα από εικόνες οδήγησε στην συμπλήρωση των αλγορίθμων αραιής συνταύτισης με την ανάπτυξη αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης (*dense matching*). Σε αντίθεση με την αραιή συνταύτιση όπου ζητούμενο είναι γενικά η εύρεση ομολογιών για συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος, εδώ ζητούμενο είναι η εύρεση των ομολογιών για κάθε, ει δυνατόν, εικονοψηφίδα της εικόνας αναφοράς. Η πυκνότητα της αντιστοίχισης είναι προφανώς εκείνη που καθορίζει και την πυκνότητα του 3D μοντέλου που πρόκειται να εξαχθεί, καθώς κάθε ομολογία μπορεί να μετατραπεί σε ένα σημείο του χώρου. Το πρόβλημα βέβαια αυτό παρουσιάζει περισσότερες δυσκολίες, δεδομένου ότι η εύρεση του ομόλογου σημείου κάθε εικονοψηφίδας της εικόνας αναφοράς απαιτεί το υπό εξέταση σημείο να είναι ορατό και στις δύο εικόνες, ενώ δυσκολίες εμφανίζονται ακόμη στην περίπτωση εξαγωγής του βάθους σημείων σε περιοχές με μειωμένη υφή, όπου απαιτείται ένας αριθμός εικασιών και περιορισμών.

Οι πρώτοι αλγόριθμοι που προτάθηκαν για το σκοπό της πυκνής συνταύτισης βασίζονται σε κάποια βασικά “δομικά στοιχεία”, από τα οποία μπορεί να διατυπωθεί ένα μεγάλο σύνολο αλγορίθμων. Τα τέσσερα βασικά στοιχεία των αλγορίθμων αυτών είναι τα εξής (Scharstein and Szeliski, 2002):

1. Μέθοδος υπολογισμού του κόστους αντιστοίχισης
2. Υπολογισμός του αθροίσματος του συνολικού κόστους που προκύπτει από τα επιμέρους κόστη κάθε εικονοψηφίδας εντός μια ορισμένης “περιοχής υποστήριξης” (παράθυρο)
3. Υπολογισμός παράλλαξης
4. Βελτιστοποίηση παράλλαξης.

Η κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων, όπως προαναφέρθηκε, γίνεται σε αυτούς που εφαρμόζονται τοπικά (*local*) και σε εκείνους που έχουν μια “σύνολη” (*global*) εφαρμογή. Οι πρώτοι αφορούν τον υπολογισμό της παράλλαξης σε ένα δεδομένο σημείο, ο οποίος εξαρτάται μόνο από τις τιμές της έντασης μέσα σε ένα συγκεκριμένο παράθυρο. Μερικοί από τους αλγορίθμους αυτούς κάνουν απλές παραδοχές ομαλότητας για το παρά-

θυρο όπου εφαρμόζονται. Οι δεύτεροι συνήθως δεν εκτελούν το 3^ο από τα βασικά βήματα που προαναφέρθηκαν, αλλά επιλύουν ένα πρόβλημα ολικής βελτιστοποίησης της παράλλαξης σε μια συνάρτηση οριζόμενη για όλες τις εικονοψηφίδες της εικόνας αναφοράς, κάνοντας ταυτόχρονα παραδοχές ομαλότητας. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ορισμένες τοπικές μέθοδοι συνταύτισης.

1.3 Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ήταν ο προγραμματισμός, η εφαρμογή και η αξιολόγηση ορισμένων από τα πιο γνωστά μέτρα ομοιότητας που χρησιμοποιούνται στην πυκνή συνταύτιση εικόνας. Έτσι, συντάχθηκαν κώδικες σε περιβάλλον Matlab για την εφαρμογή αυτών των μέτρων σε στερεοζεύγη επιπολικών εικόνων, αλλά και για τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου από τα ομόλογα εικονοσημεία που προέκυψαν από τη διαδικασία της συνταύτισης. Χρησιμοποιήθηκαν τρία ζεύγη επιπολικών εικόνων από μια γνωστή Διαδικτυακή πλατφόρμα αξιολόγησης αποτελεσμάτων, καθώς και οι αληθείς χάρτες παράλλαξης των εικόνων αυτών με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας. Χρησιμοποιήθηκε ακόμα πυραμίδα εικόνων στερεοζεύγους με σκοπό την εφαρμογή των μέτρων σε διαφορετικές αναλύσεις των εικόνων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει συνοπτικά την θεωρία σχετικά με τη γεωμετρία των επιπολικών εικόνων, αφού τέτοιες εικόνες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρονται ορισμένα βασικά στοιχεία για τη δημιουργία “χαρτών ψηφιακής παράλλαξης”, και αναλύεται το ζήτημα της ψηφιακής συνταύτισης καθώς και της δημιουργίας του “τρειςδιάστατου χώρου ψηφιακών παραλλάξεων”.

Όλα τα διαφορετικά μέτρα ομοιότητας που προγραμματίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την πυκνή συνταύτιση εικόνων παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4, ενώ στο 5^ο Κεφάλαιο αναφέρονται οι τεχνικές βελτίωσης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων αυτών, καθώς και τρόποι σύγκρισης και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Το 6^ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει τα αναλυτικά αποτελέσματα από την πρακτική εφαρμογή και αξιολόγηση όσων κριτηρίων και μεθόδων προγραμματίστηκαν και αναλύθηκαν στα Κεφάλαια 4 και 5.

Η Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνεται στο 7^ο Κεφάλαιο με συμπεράσματα και ορισμέ-

νες σκέψεις για πιθανή περαιτέρω διερεύνηση, καθώς και με την Βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

2. ΕΠΙΠΟΛΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΗ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗ

Η χρησιμότητα της επιπολικής επανασύστασης στερεοζευγών είναι μεγάλη στην ψηφιακή φωτογραμμετρία, κατ' αρχάς επειδή αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για στερεοσκοπική παρατήρηση στους ψηφιακούς φωτογραμμετρικούς σταθμούς. Η χρησιμότητα όμως της δημιουργίας επιπολικών εικόνων στην παρούσα διπλωματική εργασία, αλλά και γενικότερα σε διαδικασίες αυτοματισμού, έγκειται σε μια άλλη βασική ιδιότητά τους, δηλαδή στην διευκόλυνση που προσφέρουν κατά τη διαδικασία εύρεσης ομόλογων σημείων, ιδίως με σκοπό την υλοποίηση πυκνής συνταύτισης μεταξύ εικόνων. Όπως είναι γνωστό, για την εύρεση ομόλογων σημείων ακολουθείται συνήθως μια διαδικασία αναζήτησης της "ομόλογης εικονοψηφίδας" με χρήση ενός παραθύρου αναζήτησης στη δεξιά εικόνα.

Η θέση αναζήτησης του ομόλογου σημείου εξαρτάται, γενικά, από τη μέση παράλλαξη των δύο εικόνων. Το μέγεθος του παραθύρου αναζήτησης εξαρτάται από τα γεωμετρικά και ραδιομετρικά χαρακτηριστικά των εικόνων, και εκτείνεται συνήθως και στις δύο διαστάσεις (πaráθυρο $n \times m$, με n γραμμές και m στήλες). Στην περίπτωση όπου υπάρχουν επιπολικές εικόνες, το παράθυρο αναζήτησης αποτελείται από ορισμένες στήλες κατά τη διάσταση x και, θεωρητικά, από μια μόνο γραμμή (την ομόλογη επιπολική ευθεία) στην κατά y διάσταση, περιορίζοντας έτσι δραστικά την περιοχή αναζήτησης (μονοδιάστατη αναζήτηση). Αυτό συμβαίνει διότι, εξ ορισμού, σε επιπολικές εικόνες το ομόλογο σημείο εικονοσημείου κείται στην επιπολική ευθεία της άλλης εικόνας. Στην πράξη, βέβαια, μπορούν να χρησιμοποιούνται περισσότερες από μια γραμμές στην διεύθυνση y , και τούτο κυρίως γιατί η κατακόρυφη παράλλαξη p_y γενικά δεν εξαλείφεται πλήρως (λόγω των εναπομεινάντων σφαλμάτων του σχετικού προσανατολισμού). Επιπλέον, με τον τρόπο αυτό μπορεί να συμμετέχει στη συνταύτιση ραδιομετρική πληροφορία και από την γειτονιά της επιπολικής γραμμής.

2.1 Επιπολική γεωμετρία στερεοζεύγους

Η έννοια της επιπολικής γεωμετρίας περιγράφει την προβολική σχέση που ενυπάρχει μεταξύ δύο επικαλυπτόμενων εικόνων (Schenk, 1999, Hartley & Zisserman, 2003, Kraus, 2003, Καλησπεράκης, 2010, Αδάμ, 2011). Για την ερμηνεία της είναι απαραίτητοι οι ακόλουθοι ορισμοί (Σχ. 2.1):

- *Βάση του στερεοζεύγους*: η ευθεία του χώρου (ή, κατά περίπτωση, το ευθύγραμμο τμήμα) που ορίζεται από τα δύο προβολικά κέντρα O και O' των δύο εικόνων, οι οποίες έχουν αντίστοιχους πίνακες στροφής \mathbf{R} , \mathbf{R}' και έχουν ληφθεί με σταθερά μηχανής c .
- *Επιπολικό επίπεδο* σημείου Q του χώρου: ορίζεται ως το επίπεδο που περιλαμ-

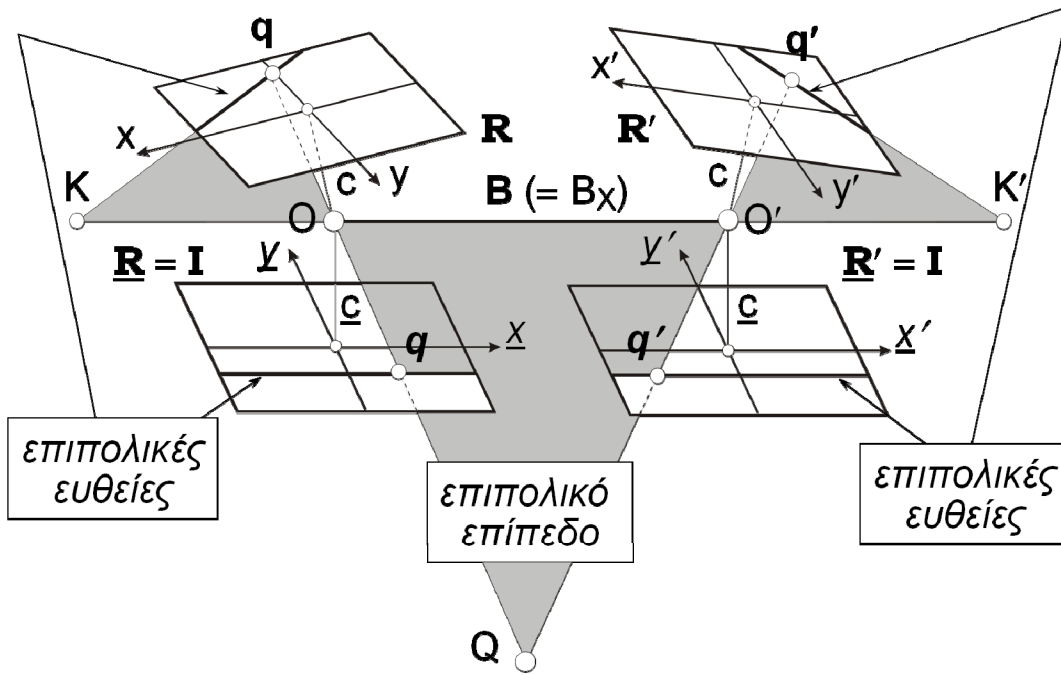
- βάνει το Q , τη βάση B και συγχρόνως τα ομόλογα εικονοσημεία q και q' .
- *Επιπολική γραμμή*: η τομή του επιπολικού επιπέδου με κάθε ένα από τα επίπεδα των δύο εικόνων.
 - *Πόλοι του στερεοζεύγους* (K και K'): τα σημεία τομής της βάσης με τα επίπεδα των εικόνων (οι πόλοι είναι, ταυτόχρονα, και σημεία σύγκλισης των επιπολικών γραμμών στην αντίστοιχη εικόνα του ζεύγους). Σε κάθε στερεοζεύγος υπάρχουν επομένως δυο πόλοι, ένας σε κάθε εικόνα, οι οποίοι στην περίπτωση των αεροφωτογραφιών βρίσκονται πολύ έξω από τα όρια των εικόνων. Αυτό συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις όπου οι εικόνες του στερεοζεύγους έχουν μικρή σύγκλιση μεταξύ τους, δηλαδή μικρή σχετική γωνία ϕ (ή πολύ μικρή συνιστώσα B_z).

Όπως είναι γνωστό, κατά τη στιγμή της λήψης οι εικόνες (και συγκεκριμένα τα συστήματα αναφοράς τους xy και $x'y'$) 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 επιπολικής επανασύστασης στερεοζεύγους είναι ακριβώς η δημιουργία ζεύγους εικόνων (από τα ίδια σημεία λήψης) οι οποίες θα είναι συνεπίπεδες, και 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 θα είναι $\mathbf{R} = \mathbf{R}' = \mathbf{I}$, ενώ η βάση του ζεύγους θα είναι παράλληλη στον άξονα X του συστήματος. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται “κανονικοποίηση στερεοζεύγους”. Στο Σχ. 2.1 φαίνεται η περίπτωση της θέσης δύο εικόνων κατά τη στιγμή της λήψης και η θέση τους μετά από τη διαδικασία της κανονικοποίησης (επιπολικής επανασύστασης). Στο σχήμα αυτό έχει θεωρηθεί η απλή περίπτωση όπου οι κατά Y και Z συνιστώσες της βάσης του ζεύγους είναι μηδενικές ($B_y = B_z = 0$), δηλαδή για την βάση της λήψης είναι εξαρχής $B = B_x$.

Για να γίνει εφικτή αυτή η διαδικασία, 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.

2.2 Επιπολική επανασύσταση στερεοζεύγους

Για τη διαδικασία μετασχηματισμού των εικόνων σε επιπολικές απαιτείται η γνώση του εσωτερικού προσανατολισμού των εικόνων, καθώς και του εξωτερικού προσανατολισμού τους ή, ισοδύναμα, του σχετικού προσανατολισμού του ζεύγους, ο οποίος ουσιαστικά εκφράζει τον “εξωτερικό προσανατολισμό” της δεξιάς εικόνας στο σύστημα της αριστερής με άγνωστη τιμή μετάθεσης (άγνωστη κλίμακα μοντέλου).



Σχήμα 2.1. Επιπολικές (κανονικοποιημένες) εικόνες με $B = B_x$.

Στην ουσία ακολουθούνται δύο βασικά βήματα για να μετασχηματιστούν επιπολικά οι εικόνες. Αρχικά μετασχηματίζονται οι εικονοσυντεταγμένες ώστε να έχουν μοναδιαίο πίνακα στροφής ως προς το σύστημα αναφοράς του εξωτερικού τους προσανατολισμού (ή, αντίστοιχα, του σχετικού τους προσανατολισμού). Οι γωνίες στροφής ω , ϕ , κ του εξωτερικού προσανατολισμού περιγράφουν, ως γνωστόν, τις στροφές του συστήματος των εικόνων ως προς το σύστημα αναφοράς του χώρου. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, κανείς τους αντίστροφους πίνακες \mathbf{R}_1^T , \mathbf{R}_2^T των πινάκων στροφής \mathbf{R}_1 , \mathbf{R}_2 , επιτυγχάνει τον μετασχηματισμό των εικόνων σε “αυστηρά κατακόρυφες” ($\omega = \phi = 0$) με μηδενική στροφή κ (στο γεωδαιτικό σύστημα ή στο σύστημα του σχετικού προσανατολισμού).

Στη συνέχεια όμως οι εικόνες πρέπει να αναχθούν στο σύστημα της βάσης, αφού η βάση γενικά δεν είναι παράλληλη στον άξονα X του γεωδαιτικού συστήματος (ή του συστήματος του σχετικού προσανατολισμού, που συνήθως ταυτίζεται με το σύστημα της αριστερής εικόνας). Για να υλοποιηθεί αυτό θα πρέπει οι δύο εικόνες να μετασχηματιστούν μέσω ενός πίνακα στροφής \mathbf{R}_b , ο οποίος εκφράζει τη στροφή της βάσης ως προς το χρησιμοποιούμενο σύστημα αναφοράς (Σχ. 2.2). Από τις τρεις συνιστώσες της βάσης

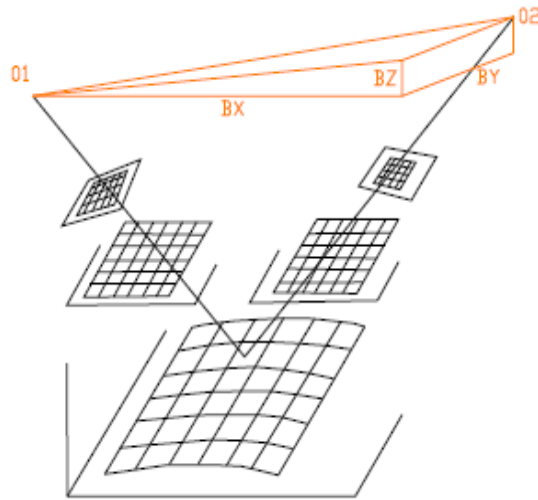
$$B_x = X_{02} - X_{01} \quad B_y = Y_{02} - Y_{01} \quad \text{και} \quad B_z = Z_{02} - Z_{01} \quad (2.1)$$

και τα τρίγωνα του Σχ. 2.2 υπολογίζονται οι γωνίες στροφής της βάσης του ζεύγους:

$$K = \tan^{-1}\left(\frac{B_X}{B_Y}\right) \quad (2.2\alpha)$$

$$F = \tan^{-1} \frac{-B_Z}{\sqrt{B_X^2 + B_Y^2}} \quad (2.2\beta)$$

$$\Omega = \frac{\omega_{\text{αριστερής εικόνας}} + \omega_{\text{δεξιάς εικόνας}}}{2} \quad (2.2\gamma)$$



Σχήμα 2.2. Γεωμετρία επιπολικού ζεύγους με συνιστώσες βάσης (B_Y, B_Z) $\neq 0$.

Να σημειωθεί ότι η επιλογή της τιμής της γωνίας Ω δεν παίζει κάποιο βασικό ρόλο στη δημιουργία επιπολικών εικόνων (η διεύθυνση ευθείας στον χώρο ορίζεται από δύο γωνίες στροφής). Είναι σύνηθες να επιλέγεται η τιμή της Εξ. (2.2γ) για να εξασφαλίζονται μικρές προοπτικές παραμορφώσεις, μικρός όγκος αρχείων και εικόνες περίπου ίσου όγκου με τις αρχικές.

Η συνολική στροφή της βάσης προκύπτει, λοιπόν, από τη σχέση:

$$\mathbf{R}_B = \mathbf{R}_\Omega \mathbf{R}_\Phi \mathbf{R}_K \quad (2.3)$$

Κάθε εικόνα, άρα, πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον αντίστοιχο πίνακα στροφής:

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{R}_B \mathbf{R}^T \quad (2.4)$$

όπου \mathbf{R}^T ο ανάστροφος του πίνακα στροφής κάθε εικόνας. Είναι σαφές ότι εφόσον είναι

γνωστός μόνο ο σχετικός προσανατολισμός του ζεύγους, για την αριστερή εικόνα είναι $\mathbf{R}_1 = \mathbf{I}$, και άρα $\mathbf{R}_n = \mathbf{R}_B$, ενώ για την δεξιά είναι $\mathbf{R}_n = \mathbf{R}_B \mathbf{R}^T$, όπου εδώ \mathbf{R} είναι ο πίνακας του σχετικού προσανατολισμού.

Άρα κάθε κανονικοποιημένη εικόνα προκύπτει από τη συνθήκη συγγραμμικότητας ως:

$$\begin{aligned} x_n &= -\underline{c} \frac{r_{11}(x-x_0) + r_{12}(y-y_0) - r_{13}c}{r_{31}(x-x_0) + r_{32}(y-y_0) - r_{33}c} \\ y_n &= -\underline{c} \frac{r_{21}(x-x_0) + r_{22}(y-y_0) - r_{23}c}{r_{31}(x-x_0) + r_{32}(y-y_0) - r_{33}c} \end{aligned} \quad (2.5)$$

όπου r_{ij} τα στοιχεία του αντίστοιχου πίνακα στροφής \mathbf{R}_n . Στις Εξ. (2.5) μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει σταθερά μηχανής \underline{c} μεγαλύτερη εκείνης της αρχικής εικόνας ώστε να αποφευχθεί απώλεια πληροφορίας (Kraus, 2003). Βέβαια όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του \underline{c} τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το μέγεθος των κανονικοποιημένων εικόνων που θα προκύψουν.

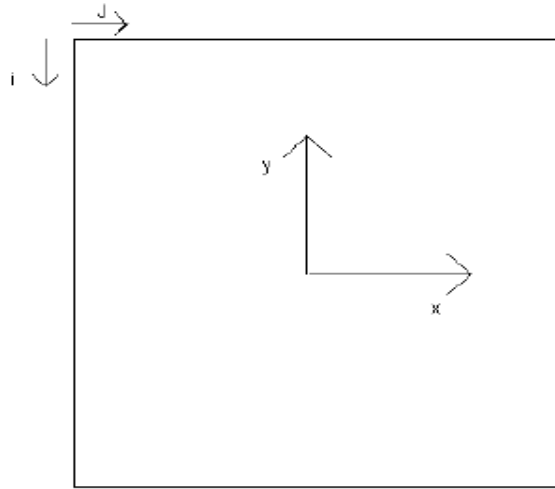
Για την παραγωγή, λοιπόν, επιπολικών εικόνων απαιτείται ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων της αρχικής εικόνας σε εκείνες της αντίστοιχης επιπολικής εικόνας, αφού πρώτα γίνουν οι απαιτούμενες αναγωγές και οριστούν οι διαστάσεις της επιπολικής εικόνας. Η συνθήκη συγγραμμικότητας αναφέρεται σε εικονοσυντεταγμένες με αφετηρία μέτρησης το κέντρο της εικόνας. Απαιτείται, άρα, αναγωγή μεταξύ των συστημάτων αναφοράς προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι εικονοσυντεταγμένες αυτές. Στην περίπτωση ψηφιακών εικόνων οι μετρήσεις των εικονοσυντεταγμένων συνήθως αναφέρονται σε αριστερόστροφο σύστημα, οριζόμενο από την πάνω αριστερή γωνία της ψηφιακής εικόνας (Σχ. 2.3). Απαιτείται λοιπόν ένας απλός μετασχηματισμός ώστε να γίνει το σύστημα δεξιόστροφο και να μετατεθεί η αρχή του. Ο μετασχηματισμός αυτός πραγματοποιείται μέσω των σχέσεων:

$$x = j - j_0 \quad y = -(i - i_0) \quad (2.6)$$

όπου i_0, j_0 είναι οι ψηφιακές συντεταγμένες της αρχής του φωτογραμμετρικού συστήματος των εικονοσυντεταγμένων (κέντρο της εικόνας). Για τον μετασχηματισμό στο σύστημα εικονοσυντεταγμένων της επιπολικής εικόνας εφαρμόζεται η συνθήκη συγγραμμικότητας με αναγωγή στο πρωτεύον σημείο της εικόνας (και διόρθωση των εικονοσυντεταγμένων από τα γνωστά σφάλματα του φακού). Η διαδικασία πραγματοποιείται αρχικά για τα 4 ακραία σημεία της αρχικής εικόνας, που ορίζουν τα όρια της επιπολικής εικόνας, ώστε να βρεθούν οι διαστάσεις της νέας εικόνας. Από τις συντεταγμένες των άκρων της κανονικοποιημένης εικόνας, υπολογίζονται οι διαστάσεις της νέας εικόνας:

$$\text{αριθμός σειρών} = y_{\max} - y_{\min} \quad \text{αριθμός στηλών} = x_{\max} - x_{\min}.$$

Σε περίπτωση όπου οι παραπάνω διαστάσεις αναφέρονται σε mm λόγω του συστήματος αναφοράς που έχει επιλεγεί, για να υπολογιστεί ο αριθμός των pixel σε κάθε διάσταση αρκεί προφανώς η απλή διαίρεση με την τιμή που έχει οριστεί ως μέγεθος pixel. Συνήθως η διάσταση εικονοψηφίδας διατηρείται ίση με εκείνη των αρχικών εικόνων.

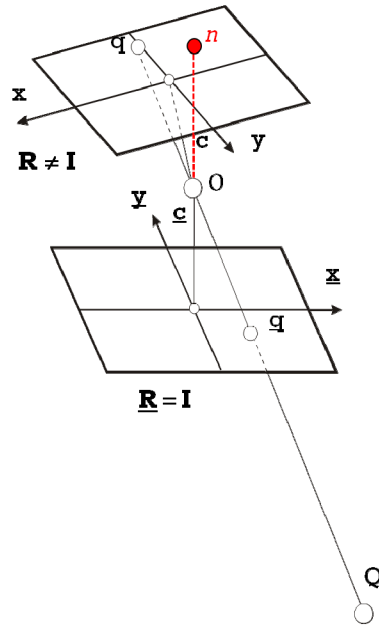


Σχήμα 2.3. Μετασχηματισμός συστημάτων εικόνας (i,j : σύστημα ψηφιακής εικόνας, x,y : φωτογραμμετρικό σύστημα εικονοσυντεταγμένων).

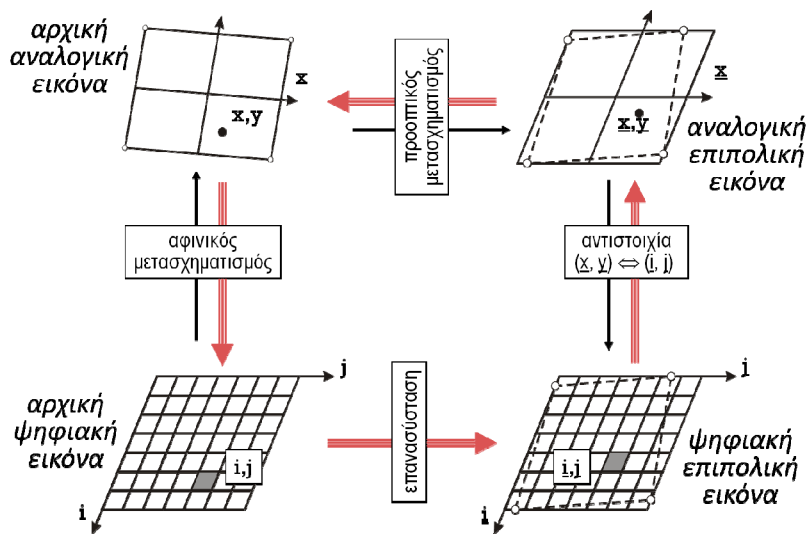
Ένα ακόμη σημαντικό ερώτημα είναι η εύρεση της εικονοψηφίδας που αντιστοιχεί στο πρωτεύον σημείο κάθε επιπολικής εικόνας, η οποία δηλαδή αποτελεί την αρχή του συστήματος εικονοσυντεταγμένων της. Από γεωμετρική άποψη, το σημείο αυτό είναι η προβολή n στην αρχική εικόνα του “ναδύρ” στο σύστημα της βάσης. Κάθε εικόνα με δεδομένο εξωτερικό προσανατολισμό σε ένα σύστημα αναφοράς έχει ένα σημείο “ναδύρ” στο σύστημα της βάσης. Η προβολή n του “ναδύρ” που αντιστοιχεί στο σύστημα της βάσης είναι, έτσι, το πρωτεύον σημείο της επιπολικής εικόνας (Σχ. 2. 4). Αυτό το σημείο έχει, άρα, εικονοσυντεταγμένες $(0,0)$ στο σύστημα της επιπολικής εικόνας. Απαιτείται η εύρεση των εικονοσυντεταγμένων εικόνας (pixel) του σημείου αυτού. Το πρωτεύον σημείο $(0,0)$ έχει συντεταγμένες pixel (x_{\min}, y_{\max}) [Καρφής, 2009]. Αν το σύστημα μέτρησης είναι σε mm, οι τιμές αυτές πρέπει φυσικά να διαιρεθούν με το μέγεθος του pixel. Ο ορισμός του πρωτεύοντος σημείου έχει σημασία όχι μόνο για την τελική 3D ανακατασκευή με εμπροσθοτομία (όσον αφορά την συντεταγμένη x_0), αλλά και για να συμπέσουν οι επιπολικές ευθείες των δύο εικόνων (όσον αφορά την συντεταγμένη y_0). Η κατακόρυφη μετάθεση που πρέπει να υποστεί η μία επιπολική εικόνα ως προς την άλλη ορίζεται ως η διαφορά των τιμών y_{\max} των δύο επιπολικών εικόνων.

Αυτό που απομένει πλέον είναι ο προσδιορισμός της ραδιομετρίας των εικόνων, δηλαδή η επιπολική επανασύστασή τους. Για κάθε λοιπόν εικονοψηφίδα της νέας εικόνας ακολουθούνται οι αντίστροφοι μετασχηματισμοί ώστε να γίνει αναγωγή στην αρχική

εικόνα και να παρεμβληθεί εκεί η τιμή του γκριζου (ή του χρώματος) που αντιστοιχεί σε κάθε εικονοψηφίδα (Σχ. 2.5). Για να προσδιοριστεί ο τόνος κάθε εικονοψηφίδα εφαρμόζεται μια από τις τρεις κύριες μεθόδους παρεμβολής (πλησιέστερου γείτονα, διγραμμική και δικυβική), ανάλογα με τις απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και ακρίβεια. Στις έγχρωμες εικόνες η διαδικασία της επανασύστασης πραγματοποιείται για κάθε ένα από τα τρία κανάλια (rgb) και ακολουθεί συγχώνευσή τους στην τελική έγχρωμη επιπολική εικόνα.



Σχήμα 2.4. Πρωτεύον σημείο επιπολικής εικόνας.

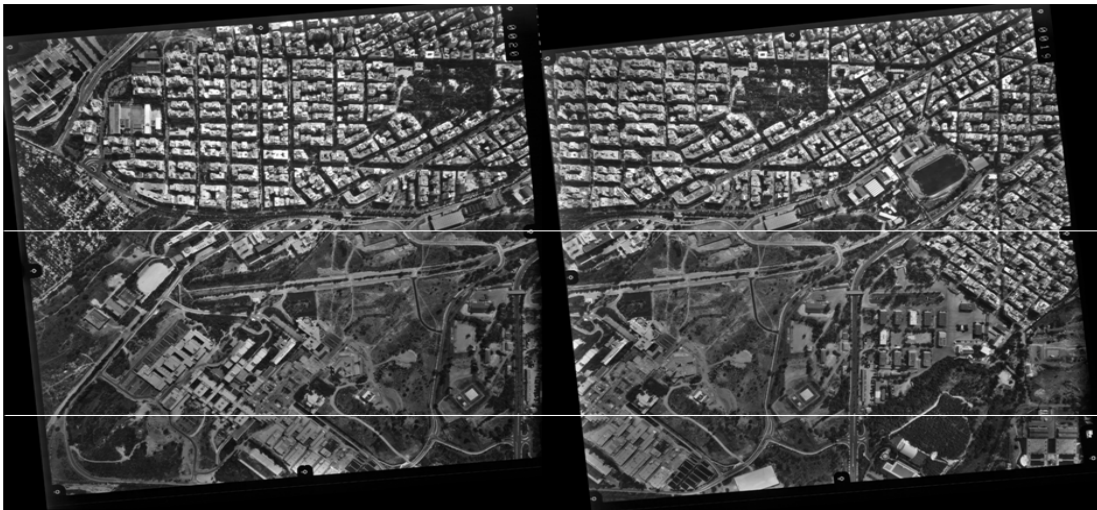


Σχήμα 2.5. Διαδικασία επιπολικής επανασύστασης.

Η πλήρης διαδικασία επιπολικής επανασύστασης είχε προγραμματιστεί στο Matlab κατά την εκπόνηση σχετικού θέματος σε μάθημα της Σχολής (Φλωρίδη, 2013). Στις Εικ. 2.6 και 2.7 φαίνονται ενδεικτικά ζεύγος αρχικών αεροφωτογραφιών και η επιπολική επανασύστασή τους βάσει σχετικού προσανατολισμού που προσδιορίστηκε αυτόματα με συσχέτιση χαρακτηριστικών σημείων των εικόνων (η οποία επίσης είχε προγραμματιστεί τότε). Σημειώνεται ότι η σημαντική κοινή στροφή K των επιπολικών εικόνων (Εικ. 2.7) οφείλεται στην σχετικά μεγάλη τιμή της συνιστώσας B_y του ζεύγους.



Εικόνα 2.6. Στερεοζεύγος αεροφωτογραφιών της περιοχής Ζωγράφου.



Εικόνα 2.7. Οι επιπολικές εικόνες του ζεύγους με ενδεικτικές επιπολικές γραμμές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πάντως, χρησιμοποιήθηκαν προϋπάρχουσες επιπολικές εικόνες (τρία ζεύγη προήλθαν από ιστοσελίδες αξιολόγησης αλγορίθμων συντάισης και ένα ζεύγος δόθηκε από τον υποψήφιο διδάκτορα Χ. Στεντούμη).

3. ΧΑΡΤΗΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΛΛΑΞΗΣ (DISPARITY MAP)

3.1 Αποκατάσταση ομολογιών σημείων

Το πρόβλημα της ψηφιακής συνταύτισης εικόνας ανάγεται, συνήθως, στην διαδικασία εύρεσης σε μια εικόνα (εικόνα αναζήτησης) του ομολογου σημείου p' ενός σημείου p μιας άλλης εικόνας (εικόνα αναφοράς). Κάποιο σημείο του αντικειμένου σε μια ψηφιακή εικόνα αντιστοιχεί σε μια τουλάχιστον εικονοψηφίδα γνωστών συντεταγμένων εικόνας (i, j) . Το ίδιο σημείο είναι πιθανό να έχει προβληθεί και σε μια δεύτερη ή περισσότερες εικόνες. Το ζήτημα, λοιπόν, είναι η εύρεση του σημείου αυτού στις άλλες εικόνες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το πρόβλημα περιορίζεται σε δύο εικόνες (stereo matching). Η ειδική αυτή περίπτωση εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αφορά ευρύ φάσμα εφαρμογών που βασίζονται σε στερεοσκοπικές λήψεις.

Το πρόβλημα της συνταύτισης υπάγεται στην κατηγορία των “αντίστροφων” προβλημάτων ($2D \rightarrow 3D$) που είναι ελλιπώς ορισμένα (ill-posed), δηλαδή είναι δυνατόν να μην έχει (Heipke, 1992):

- λύση
- μοναδική λύση
- σταθερή λύση για μικρές μεταβολές των δεδομένων.

Είναι δυνατόν το πρόβλημα της συνταύτισης να μην έχει λύση, πχ. λόγω αποκρύψεων. Η λύση είναι δυνατόν να μην είναι μοναδική, πχ. λόγω επαναλαμβανόμενων προτύπων. Η λύση μπορεί να μην είναι σταθερή λόγω μη επαρκούς διακύμανσης της υψής στις εικόνες ή λόγω ύπαρξης έντονου θορύβου.

Ως πρότυπο συνταύτισης επιλέγεται γενικά ένα σύνολο εικονοψηφίδων που αποτελούν ένα παράθυρο προς συνταύτιση και όχι μια μόνη εικονοψηφίδα. Αυτό συμβαίνει διότι μια εικονοψηφίδα περιέχει ως πληροφορία μόνο την ψηφιακή τιμή της, ή αλλιώς μία τιμή έντασης. Η πληροφορία, όμως, αυτή δεν επαρκεί δεδομένου ότι πολλές εικονοψηφίδες της ίδιας εικόνας ενδέχεται να έχουν την ίδια τιμή. Επιπλέον, λόγω της διαφορετικής σχετικής θέσης του αντικειμένου κατά τη στιγμή της λήψης των εικόνων είναι δυνατόν το ίδιο σημείο να δίνει διαφορετική ένταση σήματος στις εικόνες λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών όσο και γιατί τα υλικά διαφέρουν σημαντικά από τα ιδεώδη υλικά Lambert και δεν παρουσιάζουν ίδια σκέδαση φωτός προς όλες τις διευθύνσεις. Το πρόβλημα, λοιπόν, ανάγεται τελικά στην χρήση ενός συνόλου εικονοψηφίδων στις εικόνες (Καρφής, 2009).

Ως πρότυπα αναζήτησης μπορούν να επιλέγονται και χαρακτηριστικά (features), όπως σημεία, ευθείες, ακμές, γραμμές ή γενικότερα περιοχές, με την προϋπόθεση όμως ότι πληρούν κάποιες γενικές απαιτήσεις. Τέτοιες απαιτήσεις είναι η σταθερότητα σε σχέση με τον θόρυβο, η μοναδικότητα σε σύγκριση με άλλα πρότυπα, το να παραμένουν αμετάβλητα από γεωμετρική και ραδιομετρική άποψη και, τέλος, το να είναι ευδιάκριτα ως προς το περιβάλλον τους.

Εδώ εφαρμόστηκε η προσέγγιση της επιφανειακής συνταύτισης (area-based matching), όπου ως πρότυπο χρησιμοποιείται το σημείο, περί το οποίο σχηματίστηκε ένα παράθυρο προς αναζήτηση. Το παράθυρο που σχηματίζεται περί την υπό εξέταση εικονοψηφίδα στην πρώτη εικόνα καλείται *παράθυρο αναφοράς*, ενώ το παράθυρο στην δεύτερη εικόνα ονομάζεται *παράθυρο αναζήτησης*. Ζητούμενο είναι η εύρεση στην δεύτερη εικόνα του παραθύρου εκείνου που παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιότητα (similarity), ή μικρότερη διαφορά/ανομοιότητα (dissimilarity), προς το παράθυρο αναφοράς.

Η επίλυση του προβλήματος επιτυγχάνεται με τον ορισμό μιας *συνάρτησης κόστους*, η ελάχιστη ή η μέγιστη τιμή της οποίας υποδεικνύει την πιθανότερη θέση του ομόλογου προτύπου. Οι μέθοδοι και τα κριτήριά τους αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο. Αποτέλεσμα της συνταύτισης είναι ομολογίες σημείων στις δύο εικόνες.

3.2 Παράλλαξη και χάρτης ψηφιακής παράλλαξης

Όπως είναι γνωστό, ως οριζόντια παράλλαξη p_x , ή απλώς *παράλλαξη* p , ορίζεται γενικά η κατά x μετατόπιση ενός σημείου στην μια εικόνα (αριστερή) σε σχέση με μια άλλη επικαλυπτόμενη (δεξιά). Η ίδια η έννοια της παράλλαξης προϋποθέτει πως η γεωμετρία της λήψης αναφέρεται αυστηρά στην *κανονική περίπτωση του στερεοζεύγους*, είτε βέβαια σε επιπολικές εικόνες, στις οποίες δηλαδή έχει αποκατασταθεί εκ των υστέρων αυτή η γεωμετρία. Θεωρείται δηλαδή ότι δεν υφίσταται κατακόρυφη παράλλαξη (p_y), άρα οι εικονοσυντεταγμένες διαφέρουν μόνο κατά x . Στην φωτογραμμετρία η γεωμετρία της κεντρικής προβολής, αλλά και οι ανάγκες της 3D ανακατασκευής, επιβάλλουν η παράλλαξη να αναφέρεται σε εικονοσυντεταγμένες που αναφέρονται στο πρωτεύον σημείο (x_0, y_0) της εικόνας, δηλαδή:

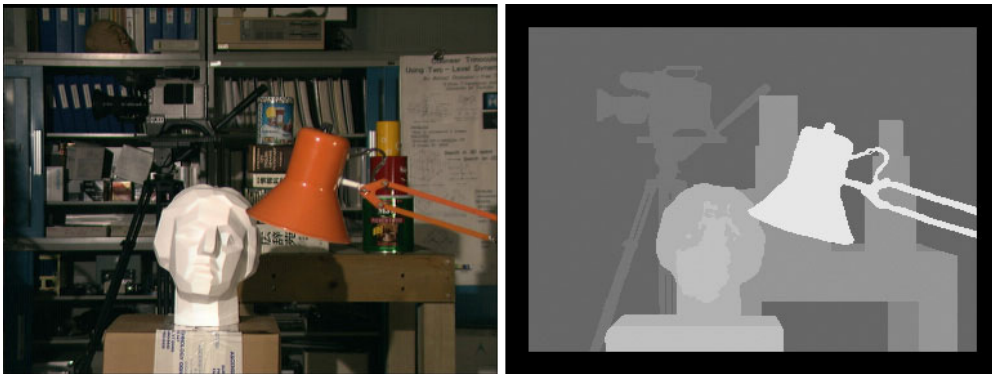
$$p = (x_1 - x_{01}) - (x_2 - x_{02}) \quad (3.1)$$

Συχνά, όμως, στην όραση υπολογιστών χρησιμοποιείται η έννοια της *ψηφιακής παράλλαξης* (disparity) d , δηλαδή η απλή διαφορά των ψηφιακών συντεταγμένων των ομόλογων σημείων του ζεύγους:

$$d = j_1 - j_2 \quad (3.2)$$

Είναι σαφές ότι δεν ισχύει κατ' ανάγκην η ισότητα $d = p$. Ο λόγος είναι ότι ενδέχεται το πρωτεύον σημείο των δύο ψηφιακών εικόνων να μην βρίσκεται στην ίδια θέση κατά x , δηλαδή $j_{o1} \neq j_{o2}$. Αυτό βέβαια δεν αναμένεται όταν αναφερόμαστε σε αρχικές εικόνες από την ίδια μηχανή. Στην περίπτωση, όμως, επιπολικών εικόνων είναι αναμενόμενο οι δύο εικόνες μετά από την επανασύσταση να έχουν όχι μόνο διαφορετικές διαστάσεις αλλά και διαφορετικές θέσεις πρωτεύοντος σημείου (τα “ναδίρ” των δύο εικόνων προβάλλονται σε διαφορετικά σημεία). Για τον λόγο λοιπόν αυτό είναι κρίσιμο να γίνεται η διάκριση μεταξύ ψηφιακής παράλλαξης d (απλής διαφοράς ψηφιακών συντεταγμένων κατά j) και παράλλαξης p (διαφοράς εικονοσυντεταγμένων κατά x ανηγμένων στα αντίστοιχα πρωτεύοντα σημεία). Προφανώς όταν $j_{o1} = j_{o2}$, τότε πράγματι είναι $d = p$.

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), ή και των δύο εικόνων, όπου στην θέση κάθε εικονοψηφίδας έχει αποδοθεί η τιμή d της ψηφιακής παράλλαξης. Αυτός ο χάρτης μπορεί και να οπτικοποιηθεί σαν εικόνα (Σχ. 3.1).



Σχήμα 3.1. Αριστερά: η αριστερή εικόνα στερεοζεύγους. Δεξιά: η αντίστοιχη εικόνα της ψηφιακής παράλλαξης του ζεύγους (<http://vision.middlebury.edu/stereo/>).

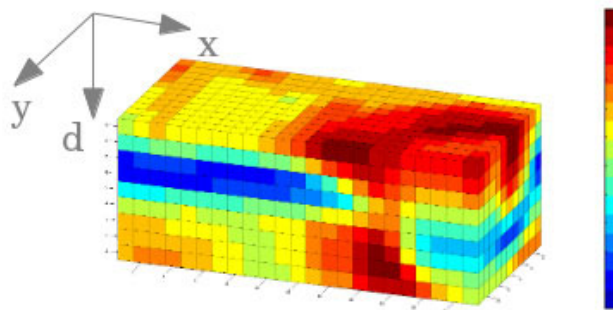
Οι απεικονίσεις αυτές (που μπορούν να παραχθούν με διαφορετικές μεθόδους προσδιορισμού των παραλλάξεων) είναι ένας απλός τρόπος προκειμένου να αποδοθούν οι ψηφιακές παραλλάξεις. Επομένως αντιστοιχούν, στην ουσία, και σε έναν *χάρτη βάθους (depth map)*, δεδομένου ότι η παράλλαξη είναι συνάρτηση του βάθους. Σημειώνεται ότι ο χάρτης βάθους είναι αντίστροφος του χάρτη ψηφιακών παραλλάξεων, αφού μεγάλες παραλλάξεις δημιουργούνται από σημεία σε μικρό βάθος/απόσταση από το φακό. Φυσικά αυτές οι απεικονίσεις είναι σε κεντρική προβολή καθώς διατηρούν την γεωμετρία της εικόνας. Στην παρούσα εργασία τα αποτελέσματα της ψηφιακής συνταύτισης αποδόθηκαν κυρίως σε μορφή τέτοιων χαρτών ψηφιακής παράλλαξης. Ο λόγος ήταν ότι διατίθενται στο Διαδίκτυο αρκετά δεδομένα (datasets) ζευγών με γνωστές ψηφιακές παραλλάξεις, ορισμένα από τα οποία αξιοποιήθηκαν εδώ, οπότε ήταν σχετικά απλό να

ελεγχθούν και να αξιολογηθούν με έγκυρο τρόπο τα αποτελέσματα των αλγορίθμων που προγραμματίστηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Φυσικά, παραλλάξεις είναι δυνατόν να υπολογιστούν μόνο για σημεία εμφανιζόμενα και στις δύο εικόνες. Σημεία που, αν και βρίσκονται εντός του οπτικού πεδίου και των δύο εικόνων, είναι ορατά μόνο σε μια εικόνα αποτελούν περιοχές αποκρύψεων (half-occlusion ή απλώς occlusion).

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές πυκνής ψηφιακής συνταύτισης εικόνας που εφαρμόζονται στη φωτογραμμετρία, και ιδίως στην όραση υπολογιστών, με στόχο την εξαγωγή χαρτών ψηφιακής παράλλαξης (ή χαρτών βάθους). Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται μερικοί ευρέως χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι επιφανειακής συνταύτισης (όπως αυτοί του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης, των απόλυτων διαφορών έντασης κ.α.), οι οποίοι προγραμματίστηκαν και αξιολογήθηκαν σε αυτή την διπλωματική εργασία.

3.3 Εικόνα του χώρου των ψηφιακών παραλλάξεων (disparity space image – DSI)

Για τη δημιουργία του χάρτη ψηφιακών παραλλάξεων (με κάποια μέθοδο προσδιορισμού διακριτών τιμών της παράλλαξης, όπως αυτές που αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο), είθισται να δημιουργείται αρχικά μία δομή δεδομένων, η οποία καλείται *εικόνα του χώρου των ψηφιακών παραλλάξεων (disparity space image: DSI)* και αναπαριστά τη συνάρτηση συνταύτισης. Ειδικότερα, πρόκειται για έναν τρισδιάστατο πίνακα (x,y,d) , ο οποίος σε κάθε θέση περιλαμβάνει την τιμή που δίνει η εκάστοτε χρησιμοποιούμενη συνάρτηση κόστους για κάθε εικονοψηφίδα x,y ανά κάθε πιθανή τιμή d ψηφιακής παράλλαξης (Σχ. 3.2).



Σχήμα 3.2. Οπτικοποίηση της κατανομής της τιμής του κόστους ανά τιμή d της παράλλαξης. Ο πίνακας (x,y,d) περιλαμβάνει τις τιμές που δίνει η συνάρτηση κόστους για κάθε εικονοψηφίδα x,y ανά κάθε πιθανή τιμή d ψηφιακής παράλλαξης (από την υπό εκπόνηση διδακτορική διατριβή του Χ. Στεντούμη).

Κάθε επίπεδο xy ($d = \text{σταθερό}$) περιλαμβάνει τις τιμές κόστους όλων των εικονοψηφίδων για την τιμή ψηφιακής παράλλαξης d στην οποία αυτό αντιστοιχεί, ενώ κάθε επίπεδο xd ($y = \text{σταθερό}$) περιλαμβάνει τις τιμές κόστους της αντίστοιχης επιπολικής γραμμής (που ορίζεται από την τιμή y) για όλες τις δυνατές τιμές ψηφιακής παράλλαξης d .

Για την τελική εξαγωγή του χάρτη βάθους επιλέγεται για κάθε θέση (x,y) του πίνακα η θέση d στον 3D χώρο εκείνης της εικονοψηφίδας που εμφανίζει τη μέγιστη, ή αναλόγως την ελάχιστη, τιμή κόστους (στο παράδειγμα του Σχ. 3.2 πρόκειται για τα σημεία με σκούρο μπλε χρώμα). Οι απεικονίσεις DSI είναι, επιπλέον, χρήσιμες όταν χρειάζεται να γίνει παρεμβολή δεκαδικής τιμής στην παράλλαξη (όπως θα αναπτυχθεί στην ενότητα 5.1), πράγμα που ενισχύει την ακρίβεια της 3D ανακατασκευής.

3.4 Τομές του χώρου των ψηφιακών παραλλάξεων

Εναλλακτικοί τρόποι για τον έλεγχο και ερμηνεία της “ογκομετρικής αναπαράστασης του κόστους”, όπως έχει επικρατήσει να λέγεται, έχουν χρησιμοποιηθεί από διάφορους ερευνητές στο πλαίσιο των διεικονικών αποδόσεων, (Bobick and Intille, 1999). Τέτοιους τρόπους αποτελούν τομές (slices) παράλληλες στα επίπεδα xy και xd , η αναπαράσταση των οποίων γίνεται μέσω γραφικών παραστάσεων.

Αυτός ο τρισδιάστατος χώρος *κόστους-ψηφιακών παραλλάξεων* οπτικοποιείται, σε κάθε επίπεδο, με τιμές έντασης ανάλογες του κόστους. Για δεδομένη λοιπόν τιμή ψηφιακής παράλλαξης d , από την τομή στο επίπεδο xy προκύπτει μια 2.5D γραφική παράσταση/απεικόνιση, κάθε σημείο της οποίας αναπαριστά το κόστος της συγκεκριμένης εικονοψηφίδας για τη δεδομένη τιμή παράλλαξης d . Άξονας των τετμημένων είναι ο άξονας x , ενώ των τεταγμένων ο άξονας y . Οι τιμές έντασης των εικονοψηφίδων της γραφικής παράστασης υποδηλώνουν το κόστος για την επιλεγμένη τιμή παράλλαξης. Ειδικότερα, με σκούρο χρώμα εμφανίζονται οι εικονοψηφίδες με μικρό κόστος (συνεπώς με πραγματική τιμή ψηφιακής παράλλαξης ίση με την επιλεγμένη τιμή d), ενώ όσο αυξάνει η απόσταση της εξεταζόμενης παράλλαξης από την ορθή τιμή d τόσο αυξάνει και η τιμή του γκρίζου με την οποία αυτές εμφανίζονται (δηλαδή κινείται προς το λευκό). Το Σχ. 3.4 παρουσιάζει οπτικοποίηση της τομής xy του 3D πίνακα κόστους του Σχ. 3.3 για τιμή ψηφιακής παράλλαξης $d = 10$.

Από την άλλη μεριά, οι τομές παράλληλα στο επίπεδο xd ($y = \text{σταθερό}$) αναπαριστούν τις αντίστοιχες τιμές κόστους επί ομόλογων επιπολικών γραμμών. Σε κάθε τέτοιο διάγραμμα εντοπίζεται μια “διαδρομή” (path) με τα ελάχιστα κόστη για κάθε εικονοψηφίδα, το σύνολο των οποίων ορίζουν τελικά και το χάρτη ψηφιακών παραλλάξεων στην προκειμένη περίπτωση. Αυτή η διαδρομή σημειώνεται με κίτρινο χρώμα στο παράδειγμα του Σχ. 3.5.



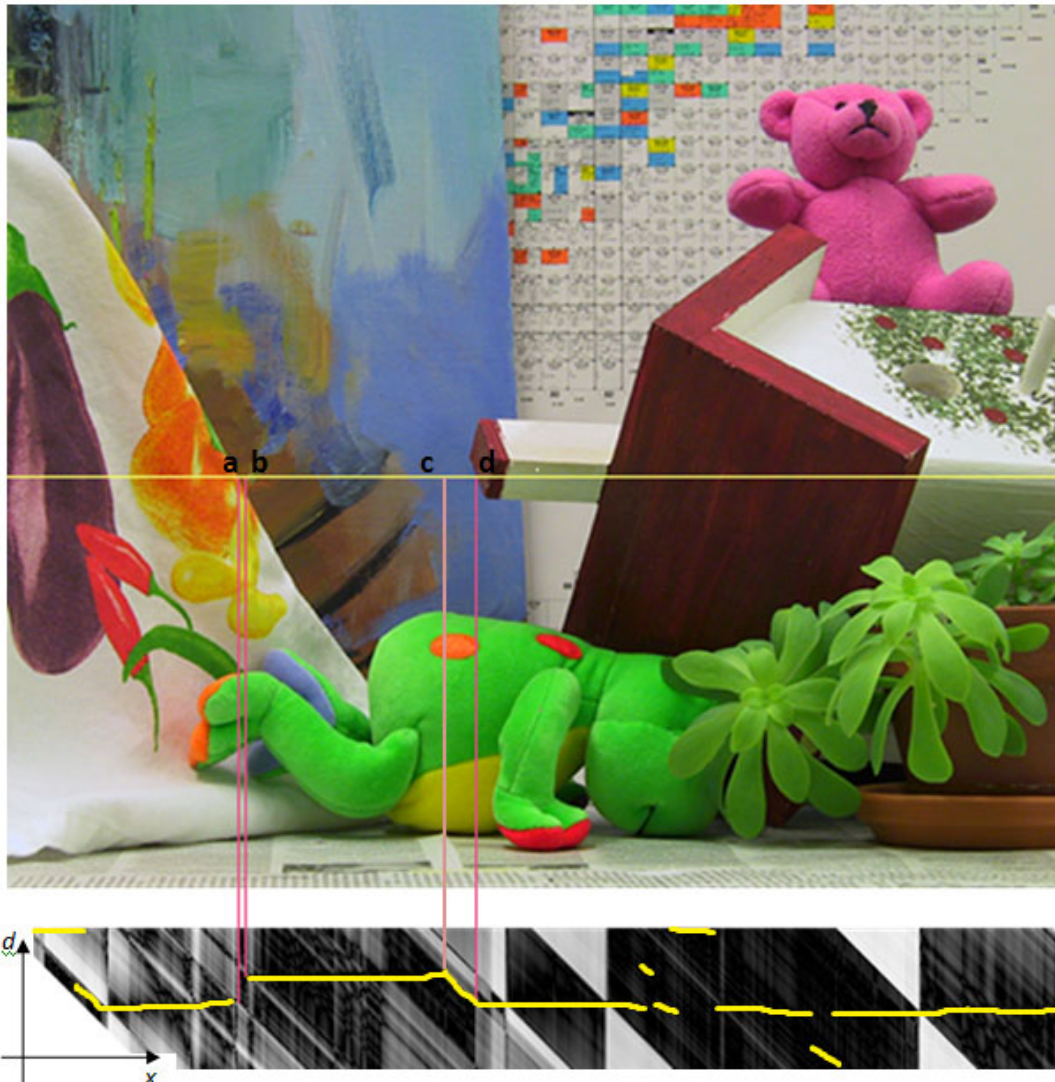
Σχήμα 3.3. Αριστερή εικόνα στερεοζεύγους.



Σχήμα 3.4. Τομή xy για τιμή παράλλαξης $d = 10$.

Σημεία τα οποία βρίσκονται σε ακμές, και συνήθως συνοδεύονται από ακμές στον χώρο της εικόνας, στο χάρτη παράλλαξης προκαλούν αντίστοιχες “ασυνέχειες” στην διαδρομή ελάχιστου κόστους. Αντίστροφα, η παρουσία ασυνεχειών στη διαδρομή ελάχιστου κόστους στο διάγραμμα xd δηλώνει ύπαρξη ασυνέχειας στην επιφάνεια του φυσικού αντικειμένου και απότομη μεταβολή της παράλλαξης. Επιπλέον, η μορφή της ασυνέχειας στην τομή xd υποδηλώνει το είδος της απόκρυψης. Μείωση της ψηφιακής παράλλαξης σηματοδοτεί περιοχή απόκρυψης της αριστερής εικόνας στη δεξιά (συνοδεύ-

εται από διαγώνια μετατόπιση/αδύνατη λύση στο διάγραμμα – βλ. περιοχή c-d στο Σχ. 3.5), ενώ αντιθέτως αύξησή της σημαίνει δημιουργία περιοχής απόκρυψης της δεξιάς στην αριστερή. Έτσι, απότομη αύξηση των τιμών της ψηφιακής παράλλαξης, η οποία γίνεται εύκολα αντιληπτή ως “άλμα” που εμφανίζεται στη διαδρομή ελάχιστου κόστους (σημεία a-b στο Σχ. 3.5), μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη περιοχών αποκρύψεων στην αριστερή εικόνα (εικόνα αναφοράς) [Stentoumis et al., 2013].



Σχήμα 3.5. Οπτικοποίηση κόστους σε τομή xd για επιπολική γραμμή $y = 200$.

Η δημιουργία, λοιπόν, τομών στην ογκομετρική αναπαράσταση του κόστους είναι ιδιαίτερως χρήσιμη, μέσω των πρόσθετων πληροφοριών που αυτές παρέχουν, για να αξιολογηθούν, αλλά και να ερμηνευτούν ποιοτικά, τα αποτελέσματα της συνταύτισης και η απόδοση της χρησιμοποιούμενης συνάρτησης κόστους.

4. ΜΕΤΡΑ ΟΜΟΙΟΤΗΤΑΣ – ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΚΟΣΤΟΥΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται όλα τα διαφορετικά μέτρα ομοιότητας (διαφορετικές συναρτήσεις κόστους) που προγραμματίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας για τον σκοπό της πυκνής συνταύτισης εικόνων.

4.1 Απόλυτες διαφορές (*absolute differences: AD*)

Οι απόλυτες διαφορές (*absolute differences – AD*) είναι ίσως το πιο απλό από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στη συνταύτιση εικόνων ορίζοντας ένα μέτρο ομοιότητας ως προς την ένταση, ή τις τιμές χρώματος, για ομόλογα *pixel*. Το μέτρο αυτό βασίζεται στον απλό υπολογισμό των απόλυτων διαφορών έντασης των *pixel* των δύο εικόνων. Για εικόνες γνωστού προσανατολισμού, όπως συμβαίνει στην προκειμένη περίπτωση, οι διαφορές υπολογίζονται γενικά μόνο για τα *pixel* που βρίσκονται επί ομόλογων επιπολικών γραμμών. Η αναζήτηση μπορεί βέβαια να περιοριστεί ακόμα περισσότερο στη διεύθυνση των επιπολικών γραμμών, ειδικά σε εικόνες σχετικά υψηλής ανάλυσης, στη βάση κάποιας εκτίμησης της μέσης παράλλαξης και της διαφοράς παράλλαξης που αναμένεται να έχουν οι δύο επιπολικές εικόνες. Το κόστος για κάθε εικονοψηφίδα υπολογίζεται ως:

$$c(i, j) = |g'(i, j) - g''(i, j)| \quad (4.1)$$

όπου

$c(i, j)$: το κόστος για κάθε *pixel* της εικόνας αναφοράς με κάθε ένα από τα εξεταζόμενα *pixel* της εικόνας σύγκρισης

$g'(i, j)$: τιμή έντασης του προτύπου (*pixel* αναφοράς) της αριστερής εικόνας

$g''(i, j)$: τιμή έντασης στο εκάστοτε εξεταζόμενο *pixel* της δεξιάς εικόνας.

Ως ομόλογο σημείο επιλέγεται εκείνο με την μικρότερη απόλυτη διαφορά έντασης από την εικονοψηφίδα αναφοράς, δηλαδή εκείνο με το μικρότερο κόστος. Γενικά, βέβαια, μπορεί να τίθενται και κατώφλια ώστε να απορρίπτονται ομολογίες σημείων με πολύ μεγάλες διαφορές παράλλαξης. Θα μπορούσε δηλαδή η αναζήτηση να γίνεται πχ. σε ολόκληρη την επιπολική γραμμή και στο τέλος να απορρίπτονται όσα σημεία παρουσιάζουν διαφορά εκτός του εκτιμώμενου αποδεκτού εύρους τιμών παράλλαξης, ενώ ως ομόλογο σημείο να επιλέγεται εκείνο με το μικρότερο κόστος, εφόσον η τιμή του μέτρου δεν υπερβαίνει κάποιο κατώφλι. Ως κατώφλι θα μπορούσε να οριστεί μια τιμή που να

εκφράζει την ανεκτή διαφορά έντασης. Είναι προφανές πως στην προκειμένη περίπτωση, όταν δεν χρησιμοποιείται κάποιος τρόπος συνολικής περιγραφής της συνάρτησης συνταύτισης (global, semi-global, dynamic programming), η επιλογή ομολογου σημείου βασίζεται αποκλειστικά στην σύγκριση της έντασης μεμονωμένων pixel. Συνεπώς, αναπόφευκτα παρουσιάζει προφανή μειονεκτήματα όσον αφορά την ευαισθησία σε τοπικές ραδιομετρικές διαφορές και τον θόρυβο των εικόνων. Για το λόγο αυτό, συνδυάζεται με παράθυρα/περιοχές συνάθροισης του κόστους (*sum of absolute differences: SAD* – βλ. επόμενη ενότητα) στις τοπικές μεθόδους. Επιπλέον, ως αναφερθεί ότι το μέτρο *AD* εφαρμόζεται με διάφορες μεθόδους και στα τρία χρωματικά επίπεδα (rgb), στην προσπάθεια να ενσωματωθεί η πληροφορία του χρώματος στη συνάρτηση συνταύτισης.

4.2 Άθροισμα απόλυτων διαφορών (*sum of absolute differences: SAD*)

Η χρήση παραθύρων καθιστά το κριτήριο αυτό αποτελεσματικότερο εφόσον οι διαφορές υπολογίζονται πλέον και αθροίζονται για μια περιοχή περί το εξεταζόμενο pixel και όχι αποκλειστικά για το ίδιο το pixel. Η επιλογή αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι γειτονικά pixel έχουν κατ' αρχήν κοινή παράλλαξη, οπότε η χρήση ορθογώνιων παραθύρων, σταθερού ή μεταβλητού μεγέθους, μπορούν να κάνουν την μέθοδο αυτή αποτελεσματικότερη. Εδώ ως γειτονικά pixel εννοούνται αυτά που ανήκουν στην οριζόμενη ανά περίπτωση γειτονιά, δηλαδή ένα παράθυρο περί την υπό εξέταση εικονοψηφίδα. Βέβαια η υπόθεση αυτή ευσταθεί, αυστηρά μιλώντας, μόνο σε παράθυρα “μετωπικά” (*fronto-parallel*) ως προς το αντικείμενο, ενώ δεν ισχύει σε περιοχές όπου υπάρχει άλμα στο βάθος, όπως αυτή παρατηρείται κυρίως στα όρια αντικειμένων και, γενικότερα, σε ασυνέχειες των επιφανειών.

Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιούνται παράθυρα με κέντρο την εξεταζόμενη εικονοψηφίδα, τα οποία είναι συνήθως ορθογώνια (Fusiello et al., 1997, Bobick and Intille, 1999). Ειδικότερα, ορίζεται ένα παράθυρο αναφοράς στη μια εικόνα και ένα αντιστοιχο παράθυρο, ίδιου μεγέθους, στην άλλη. Το παράθυρο της δεξιάς εικόνας διατρέχει την επιπολική γραμμή, επί της οποίας αναμένεται να βρίσκεται το ομόλογο του αναζητούμενου σημείου, έως τη θέση της αναμενόμενης μέγιστης παράλλαξης. Σε κάθε θέση αυτού του παραθύρου υπολογίζεται το άθροισμα των απόλυτων διαφορών, ενώ ως ομόλογο σημείο επιλέγεται εκείνο με το μικρότερο κόστος.

Ιδιαίτερα σημαντική για τη μέθοδο είναι η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους παραθύρων που θα χρησιμοποιηθούν. Η αύξηση του μεγέθους του παραθύρου αυξάνει την αξιοπιστία των λύσεων, αφού αντλείται πληροφορία από μεγαλύτερο τμήμα της εικόνας, μειώνεται ωστόσο η ακρίβεια της λύσης. Αντίστροφα, το μικρό παράθυρο μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι ακριβέστερο, ωστόσο απαιτεί καλές αρχικές τιμές γιατί αλλιώς μπορεί να οδηγήσει σε “τοπικά μέγιστα”. Η επιλογή του παραθύρου εξαρ-

τάται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εικόνων. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι η γεωμετρική παραμόρφωση που δημιουργείται πχ. λόγω διαφοράς κλίμακας μεταξύ των προτύπων, η οποία εμφανίζεται σε περίπτωση αισθητής διαφοράς στις αποστάσεις λήψης, καθώς και οι διαφορετικές σχετικές γωνίες στροφής μεταξύ δύο εικόνων. Ακόμα, οι διαφορές στις προοπτικές των εικόνων που οφείλονται στις διακυμάνσεις του αναγλύφου παίζουν εδώ σημαντικό ρόλο. Επιλέγοντας λοιπόν ένα μικρό παράθυρο περιορίζονται οι πιθανότητες εύρεσης του σωστού ομόλογου σημείου λόγω του ότι αυτό ενδεχομένως δεν θα μπορεί να συμπεριλάβει επαρκή διακύμανση της έντασης ώστε να διακριθεί ένα σημείο από άλλα γειτονικά του. Από την άλλη μεριά, μέσα σε ένα πολύ μεγάλο παράθυρο μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά η προοπτική αλλά και η παράλλαξη, οπότε παύει αυτομάτως να ευσταθεί η αρχική υπόθεση παρόμοιας παράλλαξης μεταξύ γειτονικών εικονοψηφίδων. Για το λόγο αυτό προτιμάται συχνά η εφαρμογή διαφορετικών παραθύρων στην εικόνα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής που εξετάζεται.

Σημασία έχουν όμως και τα ραδιομετρικά χαρακτηριστικά των εικόνων. Έτσι, για περιοχές με μειωμένη υφή γενικά επιλέγονται μεγαλύτερα παράθυρα, ενώ μικρότερα επιλέγονται σε περιοχές με εντονότερη διακύμανση. Οι διαστάσεις των παραθύρων πρέπει συνεπώς να προκύπτουν συναρτήσει των γεωμετρικών όσο και των ραδιομετρικών χαρακτηριστικών των εικόνων.

Η αναζήτηση της ομόλογης εικονοψηφίδας γίνεται με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, μόνο που τώρα αναμένονται καλύτερα αποτελέσματα συνταύτισης σημείων. Όπως προαναφέρθηκε, με τις απόλυτες διαφορές μεμονωμένων εικονοψηφίδων υπάρχει βάσιμος κίνδυνος λανθασμένου αποτελέσματος διότι η αναζήτηση περιορίζεται σε ένα και μόνο pixel. Η πληροφορία συνεπώς δεν επαρκεί διότι μπορεί να υπάρχουν και άλλες εικονοψηφίδες στην εικόνα με τον ίδιο τόνο, αλλά και γιατί μπορεί το ίδιο σημείο ενός αντικειμένου να δίνει κάπως διαφορετική ένταση σήματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορετική θέση λήψης των δύο εικόνων, λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών αλλά και επειδή τα υλικά διαφέρουν σημαντικά από τα ιδεώδη υλικά *Lambert* και δεν παρουσιάζουν την ίδια σκέδαση φωτός προς όλες τις διευθύνσεις. Αυτοί είναι λοιπόν κατά βάση και οι λόγοι που επιλέγεται ένα σύνολο εικονοψηφίδων (παράθυρο).

Έτσι, το κόστος για κάθε εικονοψηφίδα υπολογίζεται ως εξής:

$$c(g', g'') = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |g'(i, j) - g''(i, j)| \quad (4.2)$$

όπου

c : το κόστος που προκύπτει για κάθε pixel από το χρησιμοποιούμενο παράθυρο

$g'(i, j)$: τιμή έντασης του pixel της αριστερής εικόνας

$g''(i, j)$: τιμή έντασης του αντίστοιχου pixel της δεξιάς εικόνας

$m \times n$: διαστάσεις του παραθύρου.

Για να είναι η τιμή του κόστους κατά βάση ανεξάρτητη από τη διάσταση του παραθύρου, διαιρείται αυτή με τον συνολικό αριθμό $m \times n$ των εικονοψηφίδων του παραθύρου. Έτσι, η κανονικοποιημένη μορφή της παραπάνω σχέσης ορίζεται ως:

$$c(g', g'') = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |g'(i, j) - g''(i, j)| \quad (4.3)$$

Τέλος, για να τον υπολογισμό του κόστους κάθε εικονοψηφίδας, ανηγμένου όμως στον μέσο όρο των παραθύρων (η αναγωγή στους μέσους όρους έχει στόχο να εξαλείψει διαφορές λόγω ενιαίας διαφοράς στην φωτεινότητα των δύο εικόνων), χρησιμοποιείται η σχέση:

$$c(g', g'') = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |(g'(i, j) - \bar{g}') - (g''(i, j) - \bar{g}'')| \quad (4.4)$$

όπου

$\bar{g}' = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g'(i, j)$ μέσος όρος τιμών έντασης παραθύρου αριστερής εικόνας

$\bar{g}'' = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g''(i, j)$ μέσος όρος τιμών έντασης παραθύρου δεξιάς εικόνας.

Και εδώ, όπως προαναφέρθηκε, για κάθε θέση του παραθύρου αναζήτησης υπολογίζεται το άθροισμα των απόλυτων διαφορών, ως ομόλογο δε σημείο επιλέγεται εκείνο με το μικρότερο κόστος, υπό τον όρο ότι δεν υπερβαίνει ένα δεδομένο κατώφλι. Μπορεί κανείς όμως να χρησιμοποιήσει εδώ και το “περικεκομμένο” άθροισμα των απόλυτων διαφορών (*truncated sum of absolute differences*), όπου κάθε κόστος, δηλαδή διαφορά τιμών έντασης, που υπερβαίνει ένα κατώφλι παίρνει την τιμή του κατωφλίου, ώστε να μην υπάρχουν πολύ μεγάλα κόστη που διαταράσσουν τη συνολική λύση.

Για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα των μεθόδων συνταύτισης έχει προταθεί η εφαρμογή των κριτηρίων με συνδυασμό παραθύρων και στα τρία χρωματικά επίπεδα της εικόνας (Hirschmüller and Scharstein, 2009). Στην περίπτωση του μέτρου των απόλυτων διαφορών, η αναζήτηση ομόλογων εικονοψηφίδων εφαρμόζεται πλέον και στα τρία κανάλια της εικόνας, δηλαδή για κάθε εικονοψηφίδα συναθροίζονται εντός του

παραθύρου οι απόλυτες διαφορές έντασης σε κάθε χρωματικό επίπεδο. Η πληροφορία στην περίπτωση αυτή είναι περισσότερη από ό,τι προηγουμένως, οπότε για κάθε σημείο υπολογίζεται ο μέσος όρος από τα κόστη των τριών χρωματικών επιπέδων. Αντίστοιχα, λοιπόν, ως ομόλογο σημείο επιλέγεται εκείνο με το μικρότερο κόστος. Εναλλακτικά, εκτός από τον υπολογισμό του μέσου κόστους των τριών χρωματικών επιπέδων, ως τελικό κόστος για κάθε σημείο θα μπορούσε να ληφθεί το μικρότερο από τα τρία κόστη που προκύπτουν από κάθε χρωματικό επίπεδο.

4.3 SAD με συνδυασμό παραθύρων

Γενικά, η χρήση παραθύρων μπορεί να γίνει ακόμα πιο σύνθετη με σκοπό την αύξηση της αποτελεσματικότητάς της. Μπορεί λοιπόν κανείς για την εύρεση των ομόλογων σημείων να χρησιμοποιεί περισσότερα από ένα παράθυρα και να επιλέγεται το αποτέλεσμα από εκείνο που δίνει το μικρότερο κόστος (Fusiello et al., 1999). Τα παράθυρα αυτά θα ορίζονται περί το κέντρο πάντα της εξεταζόμενης εικονοψηφίδας, θα έχουν όμως διαφορετικό μέγεθος. Στην ειδικότερη περίπτωση λοιπόν των απόλυτων διαφορών, για κάθε παράθυρο επιλέγεται το σημείο που δίνει το μικρότερο κόστος, ενώ ως ομόλογο σημείο επιλέγεται τελικά το κεντρικό σημείο εκείνου του παραθύρου που δίνει το μικρότερο κόστος από όλα τα χρησιμοποιούμενα παράθυρα. Έτσι αντιμετωπίζεται, κατά κάποιον τρόπο, η ανάγκη τα παράθυρα να προσαρμόζονται στα τοπικά χαρακτηριστικά της εικόνας.

Η δυνατότητα για συνδυασμό παραθύρων αναφέρεται σε αυτή την ενότητα, αλλά προφανώς μπορεί να εφαρμοστεί και με άλλα κριτήρια συνταύτισης, όπως πχ. με ορισμένα που αναφέρονται στην συνέχεια (πχ. άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών ή κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης).

4.4 Τετράγωνα διαφορών (squared differences: SD)

Στην λογική των απόλυτων διαφορών κινείται και το κριτήριο των τετραγώνων των διαφορών (squared differences: SD). Εκείνο που πλέον ενδιαφέρει είναι ο υπολογισμός των τετραγώνων των διαφορών έντασης των εικονοψηφίδων και όχι οι απόλυτες διαφορές τους. Όπως συμβαίνει σε αυτές τις περιπτώσεις που βασίζονται στα τετράγωνα διαφορών, σε σχέση με τις απλές διαφορές εδώ δίνεται περισσότερο βάρος στις μεγαλύτερες τιμές διαφορών εις βάρος των μικρότερων. Το κόστος στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται ως:

$$c(i, j) = (g'(i, j) - g''(i, j))^2 \quad (4.5)$$

όπου

$c(i, j)$: το κόστος του κάθε pixel με κάθε ένα από τα εξεταζόμενα της άλλης εικόνας

$g'(i, j)$: η τιμή έντασης του pixel της αριστερής εικόνας

$g''(i, j)$: η τιμή έντασης του pixel της δεξιάς εικόνας.

Και εδώ ως ομόλογο σημείο επιλέγεται εκείνο με την μικρότερη διαφορά έντασης ως προς την εικονοψηφίδα αναφοράς, αλλά τώρα υψωμένη στο τετράγωνο. Ωστόσο, είναι προφανές ότι το αποτέλεσμα αυτής της προσέγγισης είναι ταυτόσημο με εκείνο από την απόλυτη διαφορά (AD) που αναφέρθηκε στην ενότητα 4.1, αφού η εικονοψηφίδα που δίνει την μικρότερη διαφορά είναι η ίδια και με το μικρότερο τετράγωνο διαφοράς. Αναφέρεται όμως εδώ για λόγους πληρότητας, αφού η εφαρμογή των τετραγώνων των διαφορών σε παράθυρα, που αναφέρεται στην συνέχεια, οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα από εκείνα της απόλυτης διαφοράς.

4.5 Άθροισμα τετραγώνων διαφορών (*sum of squared differences: SSD*)

Η ενίσχυση της αποτελεσματικότητας αυτής της μεθόδου βασίζεται επίσης στη χρήση παραθύρων (*sum of squared differences: SSD*), όπου το κόστος πλέον υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c(g', g'') = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (g'(i, j) - g''(i, j))^2 \quad (4.6)$$

όπου

c : το κόστος για κάθε pixel

$g'(i, j)$: η τιμή έντασης του pixel της αριστερής εικόνας

$g''(i, j)$: η τιμή έντασης του pixel της δεξιάς εικόνας

$m \times n$: οι διαστάσεις του παραθύρου.

Αντίστοιχα, για τον υπολογισμό του κόστους κάθε εικονοψηφίδας, ανηγμένου όμως στο μέσο όρο των παραθύρων, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$c(g', g'') = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(g'(i, j) - \bar{g}_1) - (g''(i, j) - \bar{g}_2)]^2 \quad (4.7)$$

4.6 Συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient)

Πρόκειται για το πιο γνωστό μέτρο επιφανειακής συνταύτισης, το οποίο αποτελεί την κανονικοποιημένη έκφραση της συμμεταβλητότητας δύο παραθύρων, βασιζόμενο στα στατιστικά στοιχεία τους (μέσους όρους και τυπικές αποκλίσεις). Η σχέση με βάση την οποία υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης ρ είναι η εξής:

$$\rho = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1\sigma_2} = \frac{\sum_{j=1}^N (g_1(i) - \bar{g}_1)(g_2(i) - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (g_1(i) - \bar{g}_1)^2 \sum_{j=1}^N (g_2(i) - \bar{g}_2)^2}} \quad (4.8)$$

όπου N : το σύνολο των εικονοψηφίδων του παραθύρου και

σ_{12} : η συμμεταβλητότητα των δύο παραθύρων

σ_1, σ_2 : οι τυπικές αποκλίσεις των παραθύρων αυτών

g_1, \bar{g}_1 : οι τιμές έντασης και ο μέσος όρος τους στην αριστερή εικόνα

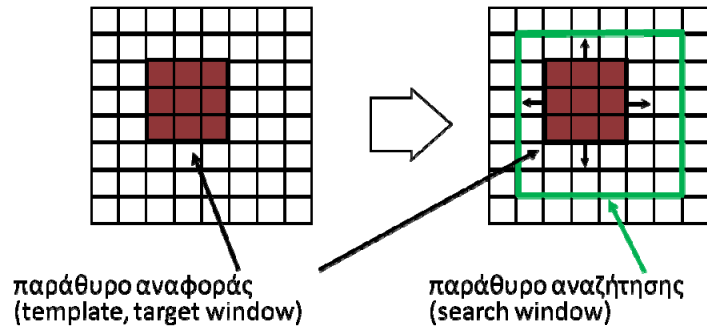
g_2, \bar{g}_2 : οι τιμές έντασης και ο μέσος όρος τους στην δεξιά εικόνα.

Σημειώνεται ότι ο συντελεστής συσχέτισης παραμένει αμετάβλητος σε ενιαίες μεταβολές της φωτεινότητας ενός παραθύρου. Αυτό οφείλεται στο ότι όλες οι μεταβλητές που συμμετέχουν σε αυτόν έχουν αναχθεί στον μέσο όρο της έντασης των αντίστοιχων παραθύρων. Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα πρότυπα δεν έχουν κατ' ανάγκη την ίδια ένταση σε κάθε εικόνα. Αντίστοιχα, η συμμετοχή των τυπικών αποκλίσεων των εικόνων στην Εξ. (4.8) καθιστά τον συντελεστή συσχέτισης αμετάβλητο σε γραμμικές μεταβολές της ραδιομετρίας, δηλαδή σε ενιαία αλλαγή της αντίθεσης ενός παραθύρου.

Η εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει να οριστούν οι διαστάσεις ενός παραθύρου αναφοράς στην πρώτη εικόνα και ενός μεγαλύτερου παραθύρου στην δεύτερη εικόνα, το οποίο αποτελεί την περιοχή αναζήτησης του ομόλογου προτύπου (Σχ. 4.1). Το παράθυρο αναφοράς διατρέχει το παράθυρο αναζήτησης υπολογίζοντας σε κάθε θέση του τον συντελεστή συσχέτισης ρ των τόνων του γκρίζου των εικονοψηφίδων. Ως ομόλογο σημείο επιλέγεται το κεντρικό ρικελ του παραθύρου που θα εμφανίσει τον υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης, άρα κριτήριο εδώ αποτελεί η μεγιστοποίηση και όχι η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης. Για να παραμείνει κανείς συνεπής με τον ορισμό της συνάρτησης κόστους στη διαδικασία της συνταύτισης, θα μπορούσε να ορίσει ως συνάρτηση κόστους την ποσότητα $1/\rho$.

Η συνάρτηση του συντελεστή συσχέτισης ρ παίρνει, ως γνωστόν, τιμές εντός του διαστήματος $[-1, 1]$. Όταν τα δύο παράθυρα (παράθυρο αναφοράς και το αντίστοιχο στο

παράθυρο αναζήτησης) είναι όμοια, ο συντελεστής συσχέτισης παίρνει την τιμή 1, ενώ όταν δεν σχετίζονται παίρνει τιμή 0. Σε περίπτωση όπου τα δύο παράθυρα είναι αντίθετα μεταξύ τους (αντεστραμμένα), ο συντελεστής παίρνει την τιμή -1 . Τέτοια περίπτωση αντίθετων παραθύρων είναι η σχέση μιας εικόνας με το αρνητικό της.



Σχήμα 4.1. Παράθυρα αναφοράς και αναζήτησης.

Ας αναφερθεί εδώ ότι, γενικά, για την αποδοχή ενός σημείου ως ομόλογου ορίζεται ένα κατώφλι, το οποίο συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.60 – 0.75. Βέβαια το κατώφλι αυτό εξαρτάται κάθε φορά από τις ιδιαιτερότητες των εικόνων στις οποίες πραγματοποιείται η συνταύτιση. Έτσι, η επιλογή κατωφλίου έπεται συνήθως δοκιμών ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη τιμή και να αποφευχθεί εσφαλμένη εξαγωγή σημείων. Για παράδειγμα, σε περιοχές με επαναλαμβανόμενα πρότυπα (πχ. χωράφια με καλλιέργειες ή αστικές περιοχές) προτιμάται μεγάλη τιμή κατωφλίου, έως και 0.90 ή και μεγαλύτερη, διότι οι πιθανότητες επιλογής λανθασμένου σημείου είναι μεγάλες. Αντίστοιχα, σε εικόνες με περιορισμένη υφή η ανοχή για μια αποδεκτή συσχέτιση μπορεί να πέσει αρκετά χαμηλότερα (πχ. στην τιμή 0.50).

4.7 Συνταύτιση με μετασχηματισμό κλίσης (gradient)

Τα μέτρα ομοιότητας για την συνταύτιση ομόλογων σημείων που προαναφέρθηκαν δεν είναι αναγκαίο να εφαρμόζονται αποκλειστικά στις αρχικές εικόνες (ή και σε πυραμίδες αυτών των εικόνων). Μπορούν κάλλιστα να εφαρμόζονται και σε μετασχηματισμούς των αρχικών εικόνων, δηλαδή αφού αυτές έχουν προηγουμένως φιλτραριστεί κατάλληλα. Ένας τέτοιος μετασχηματισμός που μπορεί να προηγηθεί της τελικής συνταύτισης είναι η δημιουργία απεικονίσεων που οπτικοποιούν τις κλίσεις των εικόνων (Brown et al., 2003), και εν συνεχεία χρησιμοποιούνται αυτές πλέον οι απεικονίσεις για την συνταύτιση.

Τα φυσικά όρια των αντικειμένων απεικονίζονται ως απότομες μεταβολές ή ασυνέχειες της έντασης. Στις περιοχές αυτές εμφανίζεται μέγιστο η πρώτη προσανατολισμένη παρά-

γωγος της συνάρτησης έντασης της εικόνας $f(x,y)$, δηλαδή γίνεται μέγιστο το διάνυσμα κλίσης. Για την ενίσχυση, λοιπόν, των ακμών της εικόνας, αλλά και την εξαγωγή ακμών, χρησιμοποιούνται φίλτρα παραγώγων. Εν προκειμένω χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα κλίσης, δηλαδή υπολογίστηκαν οι πρώτες παράγωγοι κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση, και υπολογίστηκε το μέτρο της παραγώγου:

α' παράγωγος στη διεύθυνση x:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{\delta f}{\delta x} \quad (4.9\alpha)$$

α' παράγωγος στη διεύθυνση y:

$$\frac{\partial f}{\partial y} \approx \frac{\delta f}{\delta y} \quad (4.9\beta)$$

μέτρο διανύσματος :

$$\nabla f \approx \sqrt{\left(\frac{\delta f}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta y}\right)^2} \quad (4.9\gamma)$$

Για να υπολογιστεί η κλίση χρησιμοποιήθηκε εδώ η απλή διαφορά των τιμών έντασης αριστερά-δεξιά και πάνω-κάτω κάθε εικονοψηφίδας. Σε ακμές η α' παράγωγος, που υποδηλώνει την τοπική κλίση της εικόνας, εμφανίζει μέγιστο ή ελάχιστο, με τιμή που αποδίδει την διαφορά έντασης εκατέρωθεν της ακμής, ενώ η β' παράγωγος, που εκφράζει τη μεταβολή της κλίσης, μηδενίζεται επί της ακμής (σημείο καμπής), έχοντας τοπικό μέγιστο και ελάχιστο εκατέρωθεν της ακμής (διέλευση από το μηδέν – zero crossing).

Εφαρμόζοντας λοιπόν σε κάθε μια από τις δύο εικόνες φίλτρο κλίσης κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση, δημιουργεί κανείς μια νέα εικόνα, κάθε σημείο της οποίας έχει πλέον ως πληροφορία όχι την τιμή της έντασης αλλά το μέτρο του διανύσματος της κλίσης. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να γίνει και χρήση της κάθε διεύθυνσης ξεχωριστά. Στη συνέχεια, για τη συνταύτιση αυτών των εικόνων κλίσης μπορούν, γενικά, να χρησιμοποιηθούν διάφορα κριτήρια ομοιότητας. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD). Η διαδικασία που ακολουθείται είναι εκείνη που αναλύθηκε στην ενότητα 4.2.

Επειδή η εφαρμογή φίλτρων παραγώγων γενικά εισάγει θόρυβο στην εικόνα, μεγεθύνοντας και τυχαίες τοπικές μεταβολές έντασης, πριν από την συνταύτιση σκόπιμο είναι να προηγηθεί εξομάλυνση (φίλτρα μεσαίας τιμής, Gauss) των εικόνων κλίσης.

4.8 Συνταύτιση με μετασχηματισμό κατάταξης rank

Ένας άλλος μετασχηματισμός που είναι δυνατόν να προηγηθεί της τελικής συνταύτισης είναι ο μετασχηματισμός κατάταξης *rank* (Zabih & Woodfill, 1994, Szeliski, 2010). Πρόκειται για έναν μη παραμετρικό μετασχηματισμό, ο οποίος εφαρμόζεται και στις δύο εικόνες με σκοπό τη μείωση του θορύβου αλλά και την ενίσχυση των ακμών των εικόνων. Η μέθοδος αυτή κατατάσσει τοπικά τα *pixel*, σε μια περιοχή οριζόμενη από ένα παράθυρο $a \times b$ περί κάθε εξεταζόμενο *pixel*, κατά αύξουσα τιμή έντασης. Έτσι, οι τιμές των *pixel* στο παράθυρο κυμαίνονται από 1 έως ab . Για παράδειγμα, για παράθυρο διαστάσεων 3×3 οι τιμές που θα έχουν οι εικονοψηφίδες θα είναι από 1 έως 9. Ένα τέτοιο ενδεικτικό αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχ. 4.2.

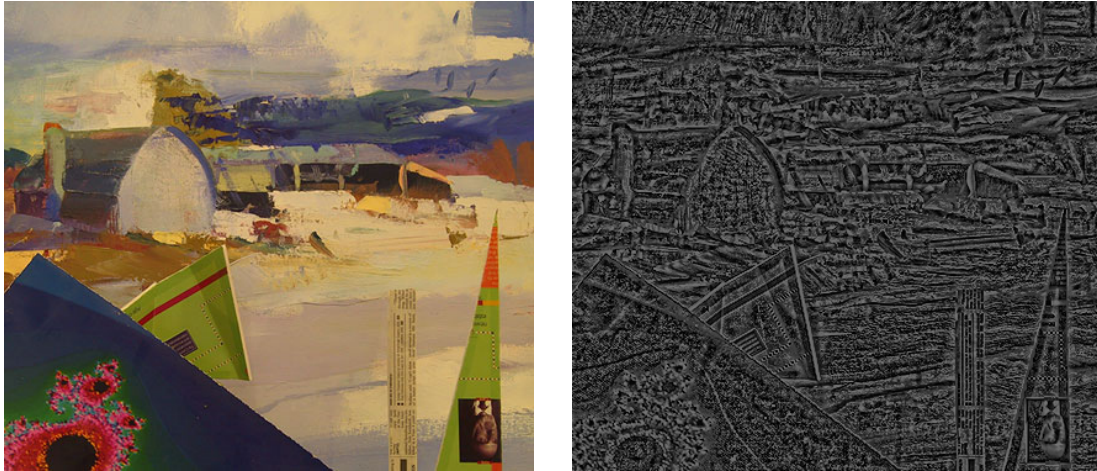
35	20	100	3	1	7
65	25	130	4	2	8
70	95	160	5	6	9

Σχ. 4.2. Μετασχηματισμός *rank*. Αριστερά: τιμές έντασης σε παράθυρο εικόνας 3×3 . Δεξιά: αποτέλεσμα του μετασχηματισμού.

Τελικά, στο κεντρικό *pixel* αποδίδεται η τιμή που αντιστοιχεί σε αυτό μετά από τον μετασχηματισμό. Στο παραπάνω παράδειγμα, επομένως, το κεντρικό *pixel* που στην αρχική εικόνα είχε τιμή έντασης 25 στην νέα εικόνα θα έχει τιμή 2. Στην Εικ. 4.3 φαίνεται ένα παράδειγμα τέτοιου μετασχηματισμού με παράθυρο $a \times b = 11 \times 11$. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι εκείνο που ενδιαφέρει στην μέθοδο αυτή είναι η σχετική τοπική κατάταξη των εντάσεων των εικονοψηφίδων και όχι οι ίδιες οι τιμές τους.

Μετά από την εφαρμογή του μετασχηματισμού, πραγματοποιείται πλέον κανονικά η συνταύτιση των νέων εικόνων, η οποία και εδώ έγινε με το κριτήριο των απόλυτων διαφορών σε συνδυασμό με χρήση κάποιας μορφής παραθύρων (SAD). Η διαδικασία που ακολουθείται είναι εκείνη που αναλύθηκε στην ενότητα 4.2.

Στο σημείο αυτό πρέπει πάντως να επισημανθεί πως η μέθοδος μπορεί να μειώνει την ευαισθησία σε ραδιομετρικές αλλαγές, ενδέχεται πάντως σε ορισμένες περιπτώσεις να μειώνει και την ισχύ της συνταύτισης, δεδομένου ότι μετά από την εφαρμογή του μετασχηματισμού η πληροφορία για την ένταση κάθε σημείου χάνεται. Επιπλέον χάνεται και η πληροφορία της σχετικής διάταξης των εικονοψηφίδων που περιβάλλουν την κεντρική εικονοψηφίδα, καθώς το μόνο που διατηρείται είναι ο αριθμός κατάταξης του κεντρικού αυτού *pixel*.



Εικόνα 4.3. Εφαρμογή μετασχηματισμού *rank* με παράθυρο 11×11 .

Σημαντικό στοιχείο για την αξιολόγηση της συνταύτισης που βασίζεται στο μετασχηματισμό *rank* είναι φυσικά οι διαστάσεις των παραθύρων, τόσο αυτού της άθροισης των διαφορών ή των τετραγώνων των διαφορών της έντασης ($m \times n$), όσο όμως και εκείνου που χρησιμοποιήθηκε για τον ίδιο τον μετασχηματισμό ($a \times b$).

5. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ

Οι τεχνικές που αναφέρθηκαν προηγουμένως καταλήγουν σε μια τελική αντιστοίχιση εικονοψηφίδων των δύο εικόνων. Υπάρχουν όμως δυνατότητες να βελτιωθεί αυτό το αποτέλεσμα, πχ. προκειμένου να απομακρυνθούν χονδροειδώς εσφαλμένες ομολογίες, να επιτευχθεί υψηλότερη ακρίβεια συνταύτισης ή και να εξομαλυνθεί η διαδοχή των τιμών έντασης. Τέλος, τα αποτελέσματα της συνταύτισης πρέπει με κάποιον τρόπο να ελεγχθούν και να αξιολογηθούν.

5.1 Υποψηφιδική παρεμβολή (*sub-pixel refinement*)

Τα κριτήρια λοιπόν που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο καταλήγουν, τελικά, σε ακέραιες τιμές ψηφιακής παράλλαξης (*disparity*) για κάθε εικονοψηφίδα. Όπως είναι γνωστό, υπάρχει μια αναντιστοιχία μεταξύ των συνεχών χωρικών φαινομένων και της απεικόνισής τους στο μη συνεχές μέσο της ψηφιακής εικόνας. Αυτό έχει την συνέπεια πως ένα “σημειακό” στοιχείο δεν ταυτίζεται απαραίτητως με το κέντρο του ρixel, αλλά εάν πχ. είναι μικρότερο βρίσκεται “κάπου στο εσωτερικό του”, ενώ αν είναι μεγαλύτερο καταλαμβάνει περισσότερα ρixel. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει η ανάγκη να επιτευχθεί ακρίβεια στον προσδιορισμό ομολογιών ανώτερη του ρixel. Για το λόγο αυτό εφαρμόζονται αλγόριθμοι που εισάγουν ένα βήμα *υποψηφιδικής* παρεμβολής, μετά από το αρχικό στάδιο της συνταύτισης όπου προσδιορίζονται οι διακριτές τιμές παράλλαξης (Szeliski and Scharstein, 2004).

Μια δυνατότητα για υποψηφιδική εκτίμηση της παράλλαξης είναι με εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης, πχ. μέσου όρου και Gauss, στους χάρτες ψηφιακής παράλλαξης (βλ. ενότητες 5.2 και 5.3). Μια διαφορετική προσέγγιση είναι με παρεμβολή πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού (παραβολή) στις διακριτές τιμές του *τριδιάστατου πίνακα κόστους* (DSI) που αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2 (Stentoumis et al., 2012). Με τα ελάχιστα στοιχεία, η καμπύλη αυτή ορίζεται για κάθε ρixel από την επιλεγμένη (ελάχιστη ή μέγιστη, ανάλογα με το κριτήριο) τιμή κόστους c_d , η οποία έστω πως 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:

$$c = Ad^2 + Bd + C \quad (5.1)$$

όπου d η τιμή της ψηφιακής παράλλαξης και c η τιμή του αντίστοιχου κόστους. Η μέ-

γιστη (ή, κατά περίπτωση, η ελάχιστη) τιμή της καμπύλης αντιπροσωπεύει τη ζητούμενη υποψηφιδική τιμή της ψηφιακής παράλλαξης, και βρίσκεται στη θέση όπου μηδενίζεται η a' παράγωγος της συνάρτησης, δηλαδή:

$$d_{subpixel} = -\frac{B}{2A} \quad (5.2)$$

Εάν βέβαια χρησιμοποιηθούν >3 ζεύγη τιμών (c, d), παρεμβάλλεται σε αυτά η Εξ. (5.1) με τη μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων των ελαχίστων τετραγώνων.

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

Αλλά εκτός από την περιγραφείσα διαδικασία για τον προσδιορισμό παράλλαξης με ακρίβεια ανώτερη του ενός pixel (υποψηφιδική ακρίβεια), υπάρχουν και άλλες επεξεργασίες του χάρτη ψηφιακών παραλλάξεων που είναι δυνατόν να έπονται της διαδικασίας συνταύτισης (ή, κατά περίπτωση, και να προηγηθούν αυτής – βλ. ενότητα 4.7 που αναφέρεται στις εικόνες κλίσης) με σκοπό την βελτίωση του υπολογισμού των παραλλάξεων αυτών.

5.2 Φίλτρο μεσαίας τιμής

Ένας τέτοιος τρόπος είναι η εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής (median) στον χάρτη ψηφιακών παραλλάξεων. Η διαδικασία πυκνής συνταύτισης μπορεί να οδηγήσει σε χονδροειδώς λανθασμένες ομολογίες (χονδροειδή σφάλματα στις τιμές ψηφιακής παράλλαξης) ή να δημιουργήσει κενά σε περιοχές με αποκρύψεις. Η εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής εξαλείφει τις χονδροειδείς αναντιστοιχίες που προκύπτουν και μπορεί να γεμίζει τα κενά αυτά αντλώντας πληροφορία από τα γειτονικά pixel.

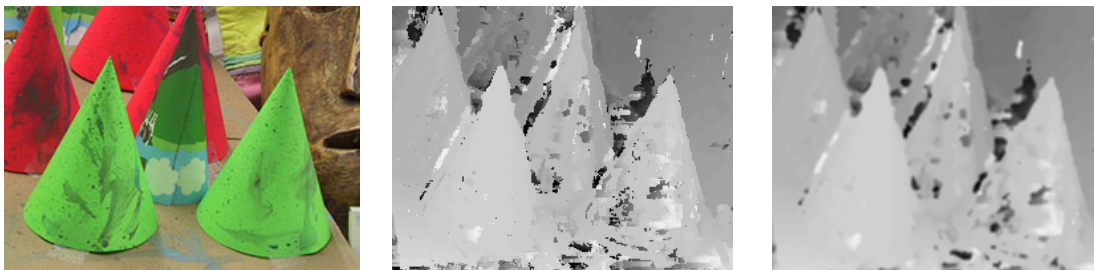
Πρόκειται για ένα μη γραμμικό φίλτρο εξομάλυνσης, το οποίο ωστόσο διατηρεί τις ακμές. Είναι κατάλληλο για μεμονωμένο (διακριτό) θόρυβο, τύπου “αλατοπίπερο”, ο οποίος εδώ προκαλείται από τις τοπικά λανθασμένες ομολογίες σημείων κατά τη διαδικασία της συνταύτισης (outliers). Το φίλτρο κατατάσσει τις τιμές ψηφιακής παράλλαξης σε μια περιοχή περί κάθε εικονοψηφίδα κατά αύξουσα τιμή και επιστρέφει ως νέα τιμή της εικονοψηφίδας τη μεσαία τιμή (διάμεσος) του παραθύρου.

5.3 Φίλτρο μέσου όρου

Πρόκειται επίσης για ένα χαμηλοπερατό φίλτρο ή φίλτρο εξομάλυνσης. Εδώ η βασική

ιδέα είναι πως η κεντρική εικονοψηφίδα κάθε παραθύρου, στο οποίο εφαρμόζεται το φίλτρο, παίρνει την τιμή του μέσου όρου των ψηφιακών παραλλάξεων των εικονοψηφίδων του παραθύρου. Έτσι επιτυγχάνεται μείωση του θορύβου με αποκοπή των υψηλών συχνοτήτων, πχ. σε περιοχές θορύβου αλλά και στις περιοχές των ακμών, και της διατήρησης των χαμηλών συχνοτήτων.

Η εφαρμογή του φίλτρου παρουσιάζει λοιπόν και ορισμένα προβλήματα. Εικονοψηφίδες με ακραίες τιμές έντασης θα επηρεάσουν την τιμή του μέσου όρου των υπόλοιπων εικονοψηφίδων στην εγγύτερη περιοχή (για τον λόγο αυτό το φίλτρο μέσου όρου έπεται του φίλτρου μεσαίας τιμής). Επιπλέον, σε περιπτώσεις όπου το φίλτρο διασχίζει περιοχές ακμών θα παρεμβάλλει νέες τιμές για τις εικονοψηφίδες των ακμών, προκαλώντας έτσι μια “θόλωση” (ανάλογα με την διάσταση του φίλτρου). Τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζονται συνήθως στα όρια των αντικειμένων, όπου οι τιμές των εικονοψηφίδων εμφανίζουν γενικά σημαντικές διαφορές έντασης συγκριτικά με εκείνες των εικονοψηφίδων του υποβάθρου (βλ. Εικ. 5.1). Το φίλτρο μέσου όρου χρησιμοποιήθηκε στους χάρτες βάθους που προέκυψαν από τη συνταύτιση εικόνων αφού προηγήθηκε η εφαρμογή του φίλτρου μεσαίας τιμής.



Εικόνα 5.1. Εικόνα στερεοζεύγους (αριστερά), ο αντίστοιχος χάρτης ψηφιακών παραλλάξεων (μέσον) και το αποτέλεσμα εφαρμογής σε αυτόν φίλτρου μέσου όρου.

5.4 Φίλτρο Gauss

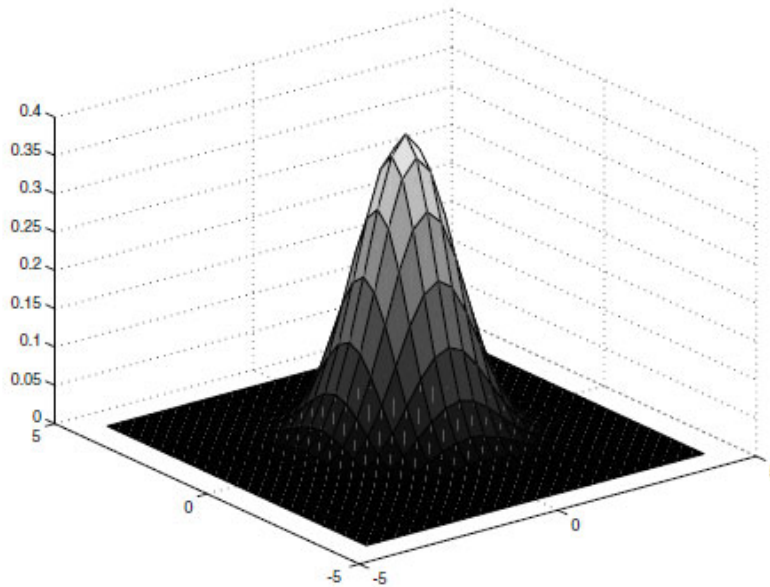
Το φίλτρο Gauss είναι και αυτό ένα χαμηλοπερατό φίλτρο εξομάλυνσης. Η κατανομή Gauss, η οποία αποτελεί τη συνάρτηση πυκνότητας-πιθανότητας για μια μονοδιάστατη μεταβλητή, περιγράφεται από την αναλυτική σχέση:

$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5.3)$$

όπου σ είναι η τυπική απόκλιση του δείγματος. Για τις δύο διαστάσεις είναι:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5.4)$$

Η μορφή αυτής της καμπύλης Gauss φαίνεται στο Σχ. 5.2. Η τιμή της τυπικής απόκλισης είναι εκείνη που ορίζει τη διάσταση του φίλτρου.



Σχήμα 5.2. Καμπύλη Gauss δύο μεταβλητών.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.7, στην παρούσα εργασία στην περίπτωση των εικόπων κλίσης η εφαρμογή του φίλτρου εξομάλυνσης Gauss προηγήθηκε της διαδικασίας συνταύτισης. Η εφαρμογή φίλτρων κλίσης δημιουργεί εικόνες στις οποίες τα φυσικά όρια των αντικειμένων είναι άμεσα διακριτά, όπως προαναφέρθηκε. Οι εικόνες αυτές όμως, λόγω της ενίσχυσης και απλών τοπικών διαφοροποιήσεων έντασης, αποκτούν έντονο θόρυβο, ο οποίος δυσχεραίνει τη διαδικασία της συνταύτισης. Για το λόγο αυτό στις εικόνες κλίσεων χρησιμοποιήθηκε, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, φίλτρο Gauss με σκοπό την εξομάλυνσή τους και τη μείωση του θορύβου. Πριν από το φίλτρο Gauss, στις εικόνες κλίσεων έγινε χρήση φίλτρου μεσαίας τιμής για να απομακρυνθούν μεμονωμένες ακραίες τιμές κλίσης.

5.5 Αμφίδρομη συμβατότητα (left-right consistency)

Προκειμένου να ανιχνευθούν οι περιοχές της εικόνας όπου υπάρχουν αποκρύψεις, αλλά και για να αξιολογηθεί η ποιότητα των χαρτών βάθους που προκύπτουν από τη συνταύτιση, εφαρμόζεται μια τεχνική γνωστή ως *αμφίδρομη συμβατότητα* (left-right consistency).

stency) [Banks, 2001, Brown et al., 2003].

Με κάποιο, λοιπόν, από τα κριτήρια που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο εξάγονται δύο εικόνες ψηφιακής παράλλαξης, μια από την αντιστοίχιση της δεξιάς εικόνας (εικόνα αντιστοίχισης) προς την αριστερή εικόνα (εικόνα αναφοράς) και μια με την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή από την αντιστοίχιση της αριστερής εικόνας προς την δεξιά. Για κάθε θέση εικονοψηφίδας $x_{αρ}$ της εικόνας αναφοράς χρησιμοποιείται η παράλλαξη που έχει βρεθεί ότι αντιστοιχεί στο σημείο αυτό, και έτσι βρίσκεται η ομόλογη θέση $x_{δεξ}$ στην εικόνα αντιστοίχισης. Εν συνεχεία, αντίστροφα, ελέγχεται εάν το σημείο αυτό της εικόνας αντιστοίχισης που έχει εκτιμηθεί ως ομόλογο αντιστοιχεί πράγματι στο υπό εξέταση σημείο της εικόνας αναφοράς. Αυτό γίνεται βάσει της εικόνας ψηφιακών παραλλάξεων που έχει προκύψει για τη δεξιά εικόνα, η οποία δίνει, ως ομόλογη του $x_{δεξ}$, την θέση $\underline{x}_{αρ}$ στην αριστερή εικόνα. Για να ελεγχθεί η συμβατότητα των δύο χαρτών ψηφιακής παράλλαξης επιλέγεται κατώφλι για την διαφορά θέσης $\Delta x = x_{αρ} - \underline{x}_{αρ}$ (η οποία ισούται με την διαφορά Δd της παράλλαξης αριστερά-δεξιά), και με βάση αυτό κρίνεται εάν η ομολογία κάθε σημείου είναι αποδεκτή ή όχι.

Περιοχές με ασύμβατες παραλλάξεις θεωρείται ότι, κατ' αρχάς, αντιπροσωπεύουν περιοχές αποκρύψεων. Υπάρχουν βέβαια και άλλοι λόγοι που μπορούν να οδηγήσουν 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 στον εντοπισμό εσφαλμένων εκτιμήσεων βάθους, χωρίς πάντως να κάνει διάκριση αιτίων τους (Stentoumis et al., 2012). Είναι προφανές πως η διαδικασία αυτή, τυπικά μιλώντας, δεν βελτιώνει το αποτέλεσμα της συνταύτισης, αυξάνει όμως την αξιοπιστία της. Εντοπίζει δηλαδή αυτόματα περιοχές όπου η συνταύτιση δεν είναι αποδεκτή, οι οποίες πρέπει συνεπώς να αντιμετωπιστούν με διαφορετικές προσεγγίσεις. Το αποτέλεσμα είναι χάρτες ψηφιακών παραλλάξεων, επί των οποίων έχουν επισημανθεί οι περιοχές αστοχίας.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι χάρτες ψηφιακής παράλλαξης (χάρτες βάθους) που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του εργαλείου αυτού είχαν προέλθει από συνταύτιση με το κριτήριο των απόλυτων διαφορών με χρήση παραθύρων (SAD) και εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής για τη μείωση του θορύβου των εικόνων, ενώ ως κατώφλι διαφοράς ψηφιακής παράλλαξης (Δd) για την αποδοχή των ομολογιών επελέγη το 1 pixel.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αξιολογούνται εφαρμογές των αλγορίθμων. Όπως συμβαίνει και στον έλεγχο όλων των μεθόδων (βλ. επόμενη ενότητα), για όλα τα σημεία της εικόνας αναφοράς που ανταποκρίνονται στον έλεγχο συμβατότητας συγκρίνονται οι υπολογιζόμενες ψηφιακές παραλλάξεις με τις αληθείς τιμές τους, δηλαδή εκείνες που προκύπτουν από τον γνωστό χάρτη ψηφιακών παραλλάξεων της αριστερής

εικόνας. Υπολογίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των διαφορών τους. Ακόμα, υπολογίζεται ενδεικτικά και το ποσοστό των εικονοσυντεταγμένων για τις οποίες η τιμή της διαφοράς είναι ≤ 1 pixel, ενώ γενικά παρουσιάζεται και το ιστόγραμμα των διαφορών αυτών.

Επιτυχής εφαρμογή του ελέγχου συμβατότητας σημαίνει, προφανώς, ότι η συνταύτιση επιτυγχάνεται τελικά σε λιγότερα σημεία, αλλά αναμένεται ότι θα βελτιώνονται κατά μέσο όρο οι διαφορές των υπολογιζόμενων παραλλάξεων από τις αληθείς.

5.6 Έλεγχος αποτελεσμάτων συνταύτισης

Μετά από τη διαδικασία της συνταύτισης πρέπει βέβαια να ελεγχθεί η ορθότητα των χαρτών ψηφιακής παράλλαξης (χαρτών βάθους) που προκύπτουν, αλλά και να αξιολογηθούν συγκριτικά τα διάφορα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή τους. Στο επόμενο κεφάλαιο, όπου παρουσιάζονται οι εφαρμογές, έγιναν λοιπόν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας με τους αληθείς χάρτες ψηφιακής παράλλαξης (true disparity map). Τέτοια αληθή δεδομένα αναφοράς υπάρχουν σε ιστοσελίδες που διαθέτουν υλικό κατάλληλο για συγκρίσεις και αξιολόγηση (datasets). Εδώ αξιοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν κυρίως δεδομένα από την πιο γνωστή σχετική ιστοσελίδα, εκείνη του Middlebury College (<http://vision.middlebury.edu/stereo/>). Τα εν λόγω δεδομένα είναι επιπολικές εικόνες στερεοζευγών μαζί με τους αντίστοιχους χάρτες ψηφιακής παράλλαξης (αναφερόμενους στην αριστερή εικόνα).

Έτσι, από την αφαίρεση των δύο εικόνων – της υπολογισμένης από την αληθή εικόνα ψηφιακής παράλλαξης – προκύπτει μια νέα εικόνα, η *εικόνα διαφορών*, από την οποία μπορούν να εξαχθούν στοιχεία χρήσιμα ώστε να αξιολογηθούν τα κριτήρια συνταύτισης. Τέτοια στοιχεία είναι το ιστόγραμμα των διαφορών των παραλλάξεων από τις αληθείς, καθώς επίσης ο μέσος όρος και η τυπική τους απόκλιση. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπολογίστηκε ενδεικτικά και το ποσοστό των εικονοψηφίδων με διαφορά παράλλαξης που δεν υπερβαίνει το 1 pixel. Έτσι, η σύγκριση των τεχνικών συνταύτισης που χρησιμοποιήθηκαν ανάγεται στη σύγκριση των στοιχείων αυτών μεταξύ τους. Προφανώς, το κριτήριο συνταύτισης που οδηγεί στην μικρότερη μέση τιμή και τυπική απόκλιση είναι εκείνο που θεωρείται ότι αποδίδει καλύτερα για κάθε εξεταζόμενο στερεοζεύγος εικόνων.

Ένας άλλος τρόπος αξιολόγησης των αποτελεσμάτων θα ήταν βέβαια η 3D ανακατασκευή (βλ. επόμενη ενότητα 5.7) και η σύγκριση με αληθή 3D δεδομένα. Δεν είναι όμως πάντοτε εύκολο να βρεθούν αξιόπιστα δεδομένα αυτού του τύπου, ενώ και η σύγκριση σε μια τέτοια περίπτωση δεν είναι απλή, αφού θα έπρεπε να συγκριθούν σημειοσύνολα διαφορετικής πυκνότητας και προσανατολισμού, με αλγόριθμους όπως πχ. ο ICP (Besl & McKay, 1992). Έτσι, προτιμήθηκε να επιλεγούν δεδομένα που θα επιτρέψουν

οι βασικές συγκρίσεις να γίνουν άμεσα με διαθέσιμους αληθείς χάρτες ψηφιακών παραλλάξεων. Ωστόσο έγινε και μια εφαρμογή με 3D ανακατασκευή, όπου τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν οπτικά.

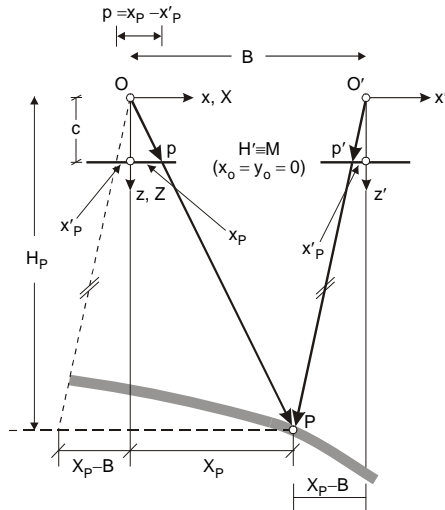
5.7 Εμπροσθοτομία (3D ανακατασκευή)

Η εύρεση ψηφιακών παραλλάξεων ισοδυναμεί, τελικά, με την εύρεση ομόλογων εικονοσυντεταγμένων (πρέπει εδώ να ληφθούν υπόψη και όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.1 σχετικά με το μέγεθος των επιπολικών εικόνων και τα πρωτεύοντα σημεία τους). Έτσι, εφόσον είναι γνωστοί οι προσανατολισμοί των εικόνων, είναι δυνατή η 3D ανακατασκευή του αντικειμένου και η δημιουργία ενός μοντέλου από τους χάρτες βάθους (εικόνες ψηφιακής παράλλαξης). Η διαδικασία ανακατασκευής ανάγεται στον υπολογισμό των συντεταγμένων σημείων του αντικειμένου στον πραγματικό χώρο (ή τον χώρο μοντέλου). Αυτό ισοδυναμεί με εύρεση της τομής δύο τουλάχιστον ομόλογων ακτίνων στο χώρο (απλή φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία).

Η συνθήκη που περιγράφει τη σχέση μεταξύ των εικονοσυντεταγμένων και των συντεταγμένων μοντέλου ή 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). Για κάθε επιπλέον εικόνα που εισάγεται στην εμπροσθοτομία ενισχύεται η περίσσεια παρατηρήσεων, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη συνόρθωσης των παρατηρήσεων με σκοπό την εκτίμηση της βέλτιστης λύσης. Η συνόρθωση βασίζεται στη μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων, ενώ οι εξισώσεις παρατήρησης γραμμικοποιούνται ως προς τις τρεις ανεξάρτητες παραμέτρους, δηλαδή τις 3D συντεταγμένες. Στην περίπτωση του στερεοζεύγους οι εξισώσεις είναι τέσσερις, συνεπώς υπάρχει ένας βαθμός ελευθερίας.

Όμως στην κανονική περίπτωση λήψης (Σχ. 5.1) ο άξονας λήψης είναι παράλληλος στον άξονα Z του χώρου, οι δε άξονες x των εικονοσυντεταγμένων των δύο εικόνων 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 έχουν και μηδενικές συνιστώσες βάσης B_y και B_z , 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.

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 , άρα συμπίπτει με εκείνο της αριστερής εικόνας.



Σχήμα 5.1. Κανονική περίπτωση στερεοζεύγους (Πέτσα, 2003).

Συνοπτικά, από τα όμοια τρίγωνα του Σχ. 5.1 για κάθε σημείο P του χώρου ισχύει:

$$\frac{x}{X} = \frac{y}{Y} = \frac{c}{H} = \frac{1}{k} \quad (5.5)$$

όπου k: συντελεστής κλίμακας του υπό εξέταση σημείου, H: απόσταση λήψης από το σημείο, c: σταθερά μηχανής. Υπό μορφή πινάκων, η Εξ. (5.5) γράφεται ως:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ c \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ H \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \mathbf{X} \quad \text{όπου } \mathbf{x} = \overrightarrow{O'p}, \mathbf{X} = \overrightarrow{O'P} \quad (5.6)$$

Δηλαδή τα διανύσματα \mathbf{x} της εικόνας και \mathbf{X} του χώρου είναι συγγραμμικά και διαφέρουν μόνο κατά μέγεθος (κατά τον συντελεστή κλίμακας k). Αντίστοιχα, για το ίδιο σημείο στην άλλη εικόνα (δεξιά εικόνα) ισχύει:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ c \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} X - B \\ Y \\ H \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \mathbf{X} \quad \text{όπου } \mathbf{x} = \overrightarrow{O'p'}, \mathbf{X} = \overrightarrow{O'P} \quad (5.7)$$

ενώ από την αφαίρεση των Εξ. (5.6) και (5.7) προκύπτει:

$$\mathbf{x} - \mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x - x' \\ y - y' \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow x - x' = p = \frac{1}{k} B \Rightarrow \frac{1}{k} = \frac{p}{B} \quad (5.8)$$

όπου $p = x - x'$ είναι η παράλλαξη του υπό εξέταση σημείου. Έτσι προκύπτουν τελικά οι βασικές φωτογραμμετρικές σχέσεις της παράλλαξης:

$$X = \frac{B}{p}x = B + \frac{B}{p}x' \quad Y = \frac{B}{p}y = \frac{B}{p}y' \quad H = \frac{B}{p}c \quad (5.9)$$

Και για τις επιπολικές εικόνες, λοιπόν, υπολογίζεται με τις Εξ. (5.9) η απόσταση λήψης H για κάθε σημείο (τρίτη διάσταση) και οι συντεταγμένες X, Y του σημείου στο χώρο.

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 (βλ. ενότητα 2.2). Αυτό πρέπει απαραίτητως να ληφθεί υπόψη, κατά x όσο και κατά y . Ειδικότερα όσον αφορά την παράλλαξη p , η ψηφιακή παράλλαξη d πρέπει προφανώς να διορθωθεί κατά την διαφορά Δj_0 των πρωτευόντων σημείων στην διεύθυνση x (δηλαδή, σε μονάδες pixel: $p = d - \Delta j_0$).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για την αξιολόγηση των χαρτών ψηφιακής παράλλαξης που προκύπτουν από εφαρμογή των διαφορετικών κριτηρίων ομοιότητας χρησιμοποιήθηκαν εδώ “αληθείς χάρτες παράλλαξης” (true disparity map) προερχόμενοι, όπως και τα ζεύγη των εικόνων, από έγκυρες ιστοσελίδες αξιολόγησης αλγορίθμων συνταύτισης. Πρόκειται για 3 μοντέλα από την ιστοσελίδα του Middlebury College (<http://vision.middlebury.edu/stereo/>), και ειδικότερα τα μοντέλα *Cones* (1^ο μοντέλο), *Teddy* (2^ο μοντέλο), *Venus* (3^ο μοντέλο). Κατά τη διαδικασία της αξιολόγησης υπολογίζονται στις αντίστοιχες εικονοψηφίδες οι διαφορές των υπολογισμένων χαρτών παράλλαξης από τον αληθή χάρτη παράλλαξης. Αυτές εμφανίζονται αρχικά με τη μορφή ιστογράμματος, ενώ στη συνέχεια υπολογίζονται οι μέσοι όροι και οι τυπικές αποκλίσεις των διαφορών. Υπολογίζεται ακόμα το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης που είναι μικρότερες από 2 pixel (άρα είναι 0 ή 1 pixel).

6.1 Πρώτο ζεύγος εικόνων

Αυτό το ζεύγος εικόνων (Σχ. 6. 1), διαστάσεων 450×375, έχει τιμή παράλλαξης από 0 έως 59 pixel. Η μέγιστη τιμή ορίζει και την διάσταση του παραθύρου αναζήτησης.



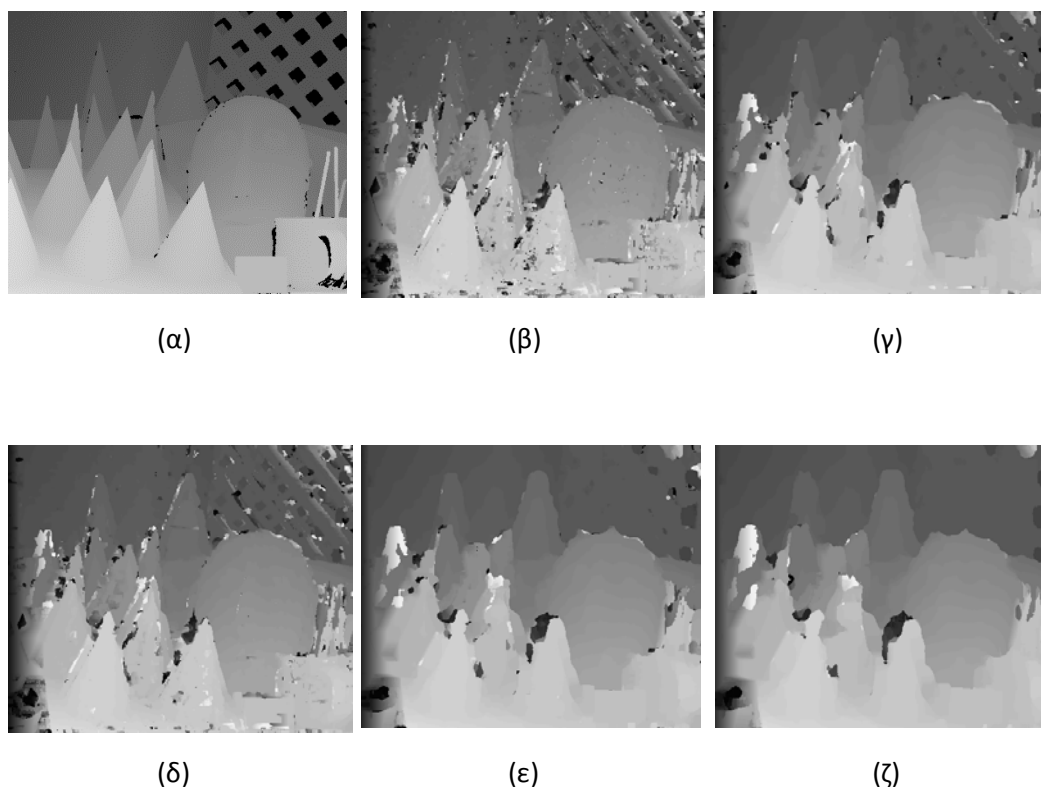
Σχήμα 6.1. Πρώτο στερεοζεύγος εικόνων (“Cones”).

6.1.1 Συνταύτιση με τις μεθόδους SAD, SSD και SAD colour

Κατά την εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών (SAD) αλλά και των τετραγώνων των διαφορών (SSD) χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές διαστάσεις παραθύρων αναφοράς. Τα χρησιμοποιηθέντα παράθυρα είναι: 5×5, 7×7, 11×11, 15×15,

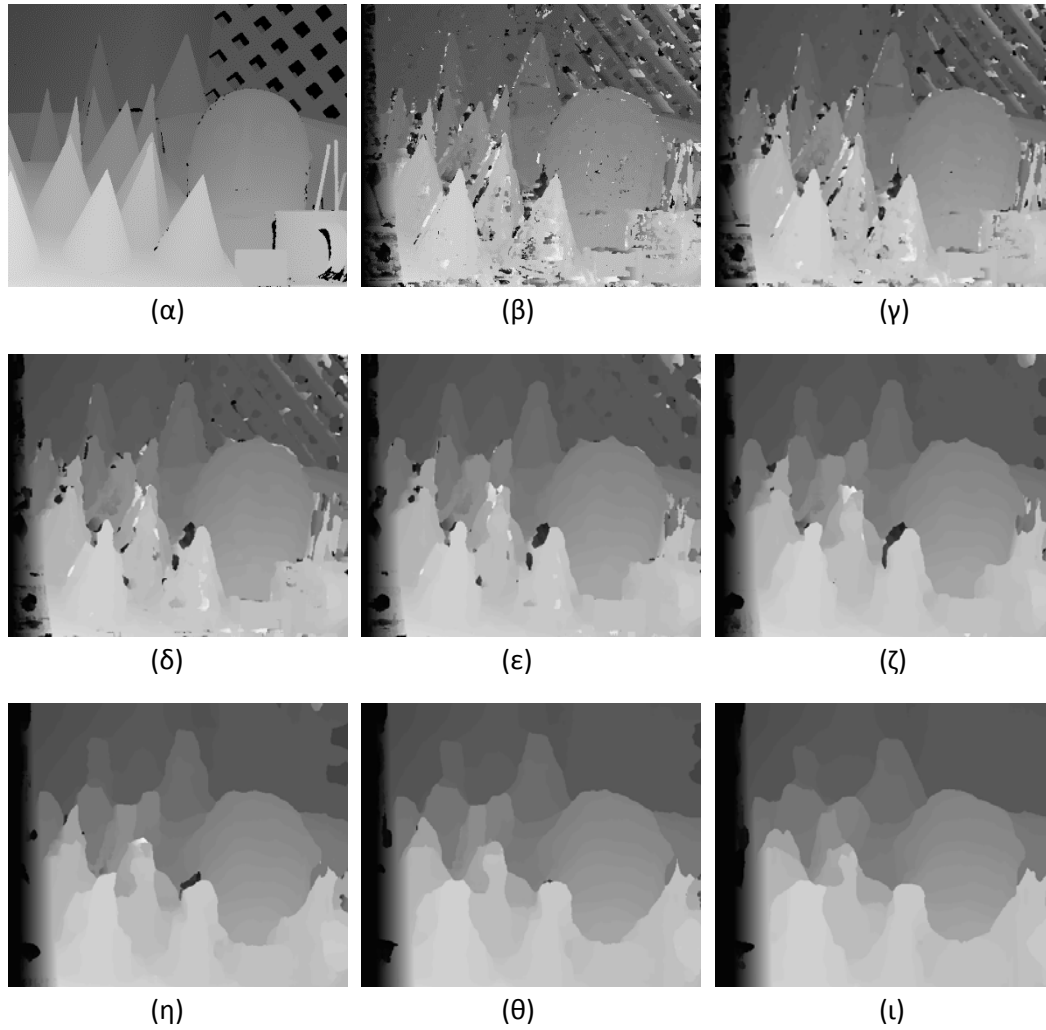
21×21. Για λόγους πληρότητας, για την εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών χρησιμοποιήθηκαν, επιπλέον, παράθυρα 31×31, 41×41 και 51×51. Για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου πραγματοποιήθηκε επίσης εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών και στα τρία χρωματικά επίπεδα της εικόνας για παράθυρα 7×7 και 15×15. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται για κάθε εικονοψηφίδα ο μέσος όρος από τα κόστη των τριών χρωματικών επιπέδων.

Στο Σχ. 6.2 παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προκύπτουν από την εφαρμογή του κριτηρίου των τετραγώνων των διαφορών (SSD) για όλα τα παράθυρα που χρησιμοποιήθηκαν.

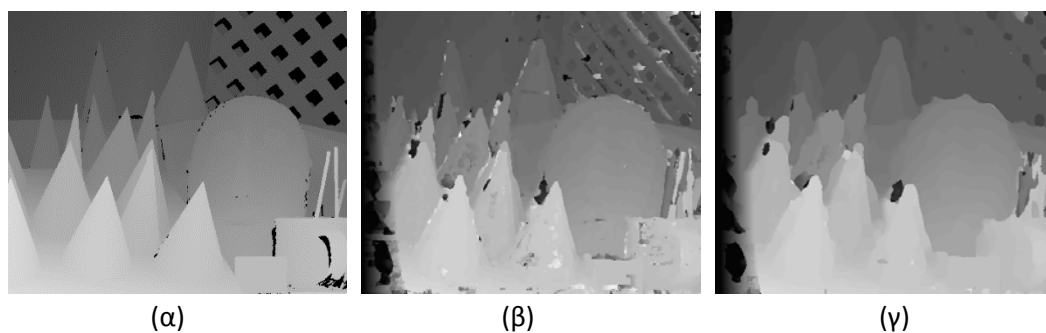


Σχήμα 6.2. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν με βάση το κριτήριο των τετραγώνων των διαφορών (SSD) με τη χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) αληθής χάρτης παράλλαξης, (β) παράθυρο 5×5, (γ) παράθυρο 7×7, (δ) παράθυρο 11×11, (ε) παράθυρο 15×15 και (ζ) παράθυρο 21×21.

Αντίστοιχα, στο Σχ. 6.3 παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προκύπτουν από εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών (SAD). Τέλος, στο Σχ. 6.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με το κριτήριο των απόλυτων διαφορών και στα τρία χρωματικά επίπεδα της εικόνας για παράθυρα 7×7 και 15×15.



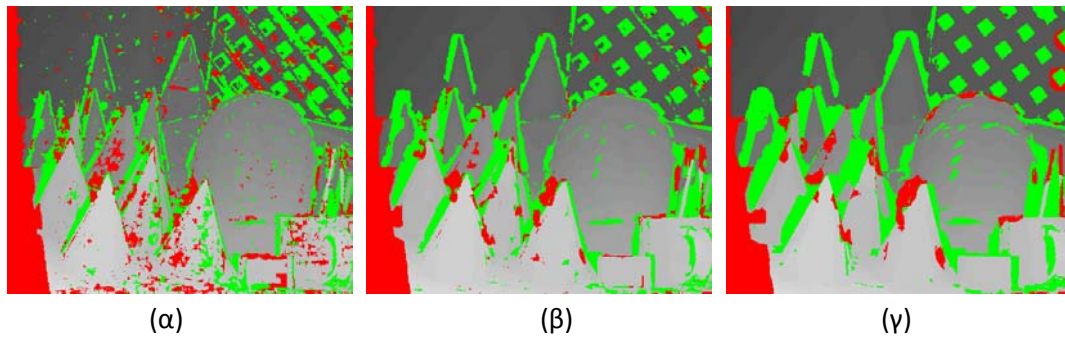
Σχήμα 6.3. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο των απόλυτων διαφορών (SAD) με χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) αληθής χάρτης παράλλαξης, (β) παράθυρο 5×5 , (γ) παράθυρο 7×7 , (δ) παράθυρο 11×11 , (ε) παράθυρο 15×15 , (ζ) παράθυρο 21×21 , (η) παράθυρο 31×31 , (θ) παράθυρο 41×41 και (ι) παράθυρο 51×51 .



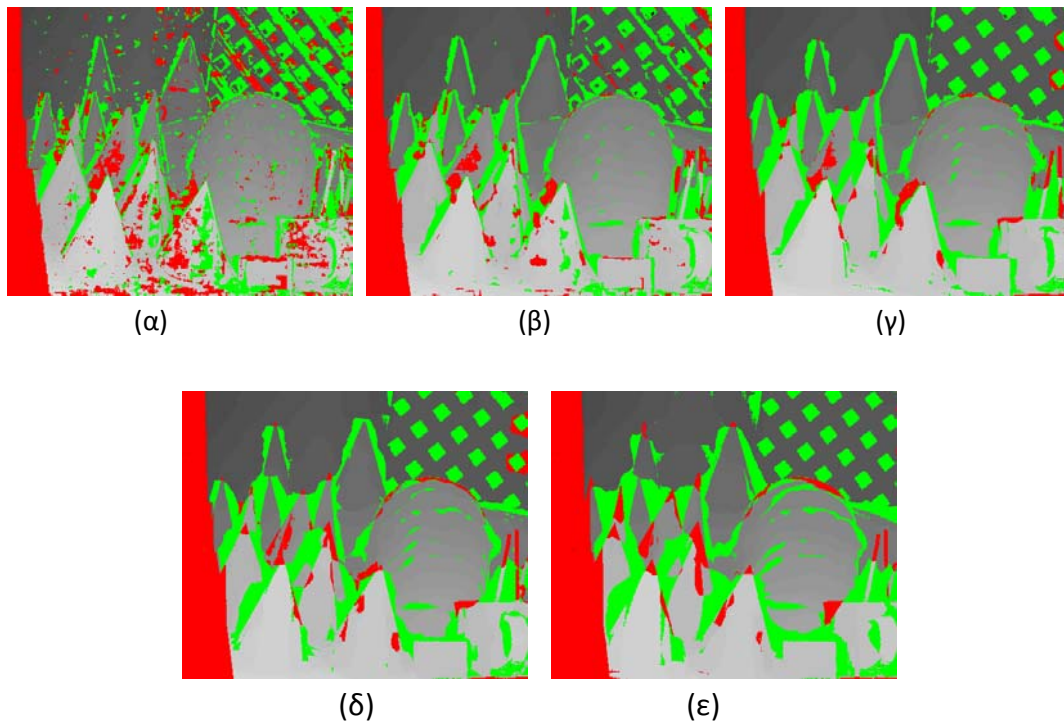
Σχήμα 6.4. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο των απόλυτων διαφορών (SAD) και στα τρία χρωματικά κανάλια με χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) αληθής χάρτης βάθους, (β) παράθυρο 7×7 , (γ) παράθυρο 15×15 .

Από τη σύγκριση των χαρτών παράλλαξης με τον αληθή χάρτη προκύπτει κάθε φο-

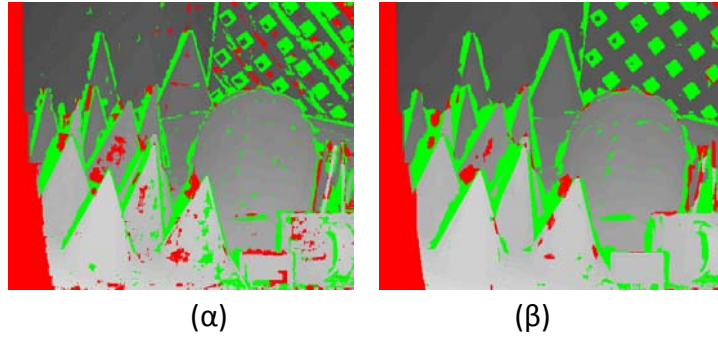
ρά μια νέα εικόνα (εικόνα διαφορών), οι οποίες φαίνονται στα Σχ. 6.5–6.7. Σε αυτές τις απεικονίσεις κάθε εικονοψηφίδα έχει την τιμή της παράλλαξης εφόσον η διαφορά δεν υπερβαίνει το 1 ρικελ, ενώ με κόκκινο φαίνονται οι εικονοψηφίδες όπου η διαφορά παράλλαξης είναι $(d_{\alpha\lambda\eta\theta} - d) < -1$ και με πράσινο όπου $(d_{\alpha\lambda\eta\theta} - d) > 1$.



Σχήμα 6.5. Εικόνες διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 και (γ) 21×21 .



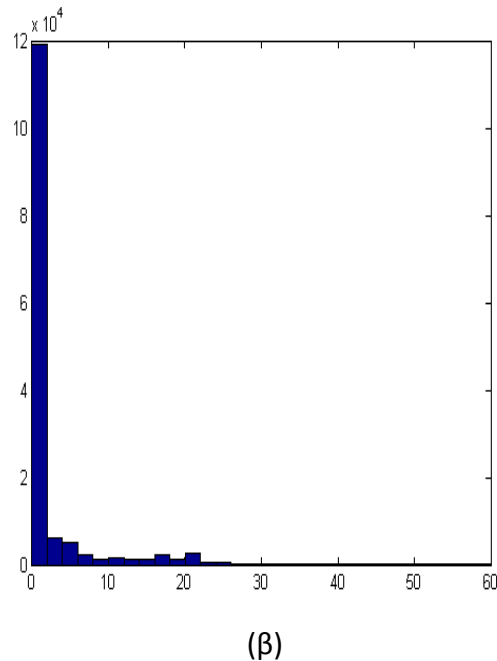
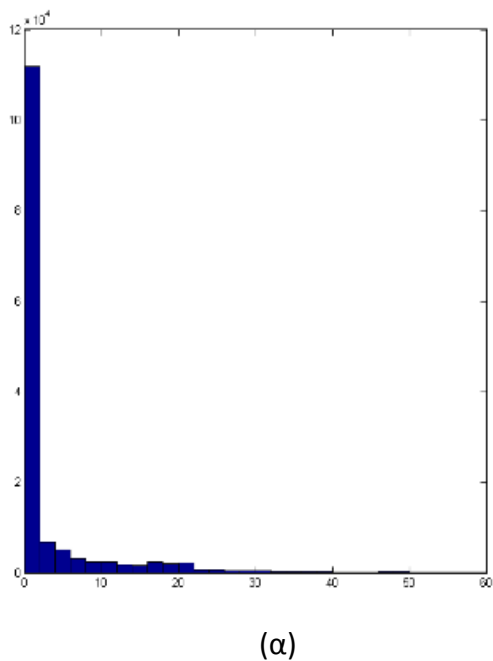
Σχήμα 6.6. Εικόνες διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 , (γ) 21×21 , (δ) 31×31 και (ε) 51×51 .

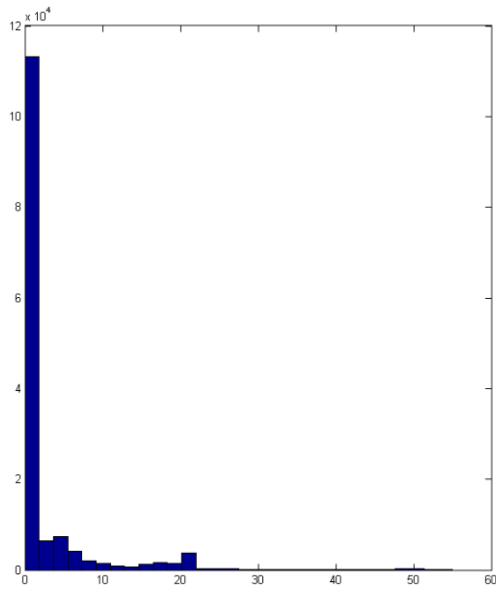


Σχήμα 6. 7. Εικόνες διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών και στα τρία χρωματικά κανάλια για παράθυρα: (α) 7×7 και (β) 15×15 .

Στη συνέχεια παρουσιάζονται, ενδεικτικά, ορισμένα από τα ιστογράμματα των διαφορών παράλλαξης που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε έναν από τους υπολογισμένους χάρτες (Σχ. 6.8 – 6.10).

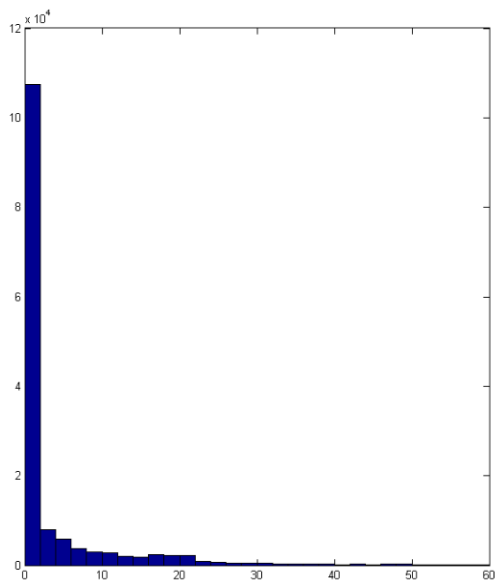
Ακόμα, στον Πίνακα 6.1 συγκεντρώνονται τα βασικά στατιστικά στοιχεία των διαφορών για κάθε μέθοδο (μέσος όρος μ , τυπική απόκλιση σ και ποσοστό $\pi[-1, 1]$ διαφορών παράλλαξης Δd που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$). Το ποσοστό $\pi[-1, 1]$ υπολογίζεται, όπως και σε όλες τις εφαρμογές, όχι στο σύνολο των εικονοψηφίδων αλλά αφού προηγουμένως αφαιρεθούν οι στήλες της εικόνας που βρίσκονται εκτός επικάλυψης.



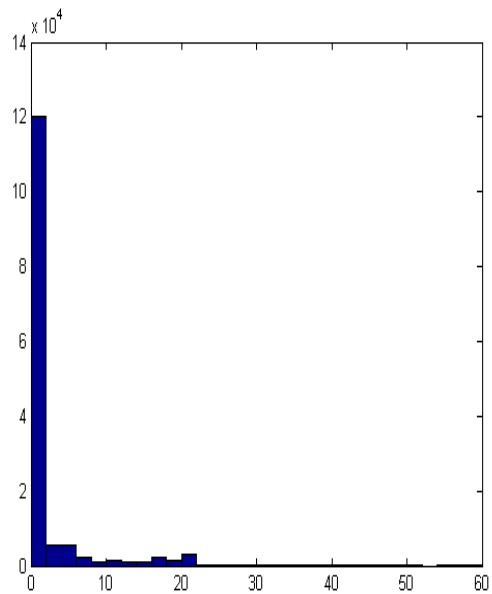


(γ)

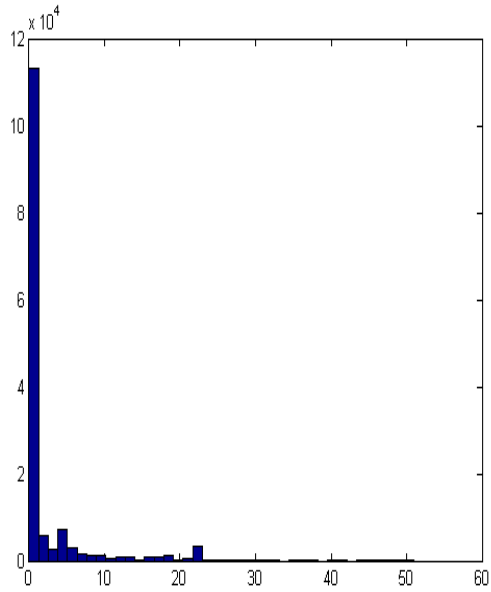
Σχήμα 6.8: Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο των τετραγώνων των διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 11×11, (γ) 21×21.



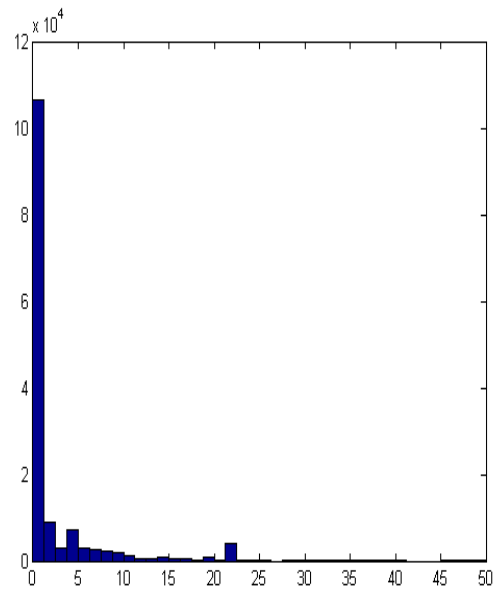
(α)



(β)

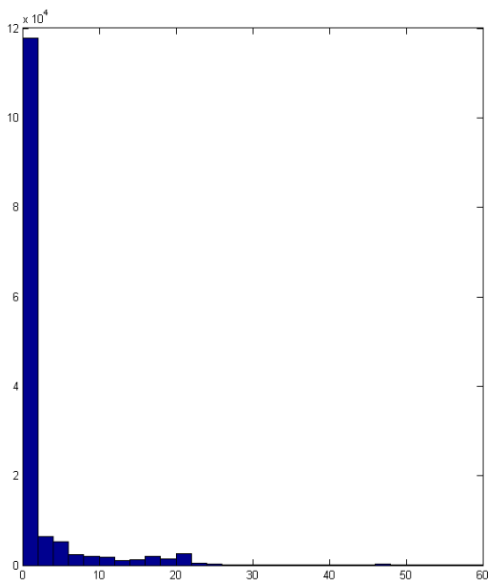


(γ)

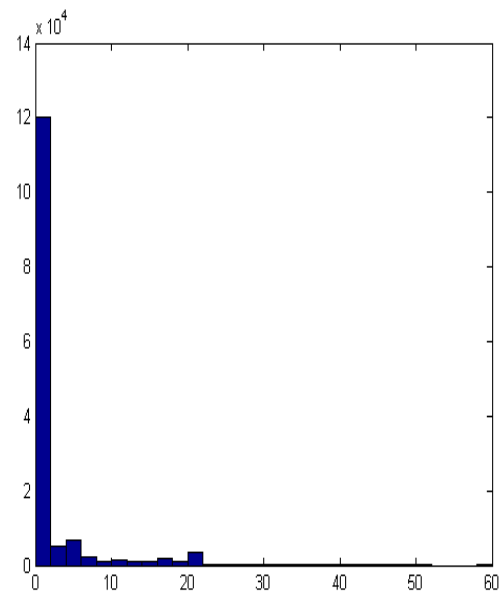


(δ)

Σχήμα 6.9. Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο των απόλυτων διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 15×15, (γ) 31×31, (δ) 51×51.



(α)

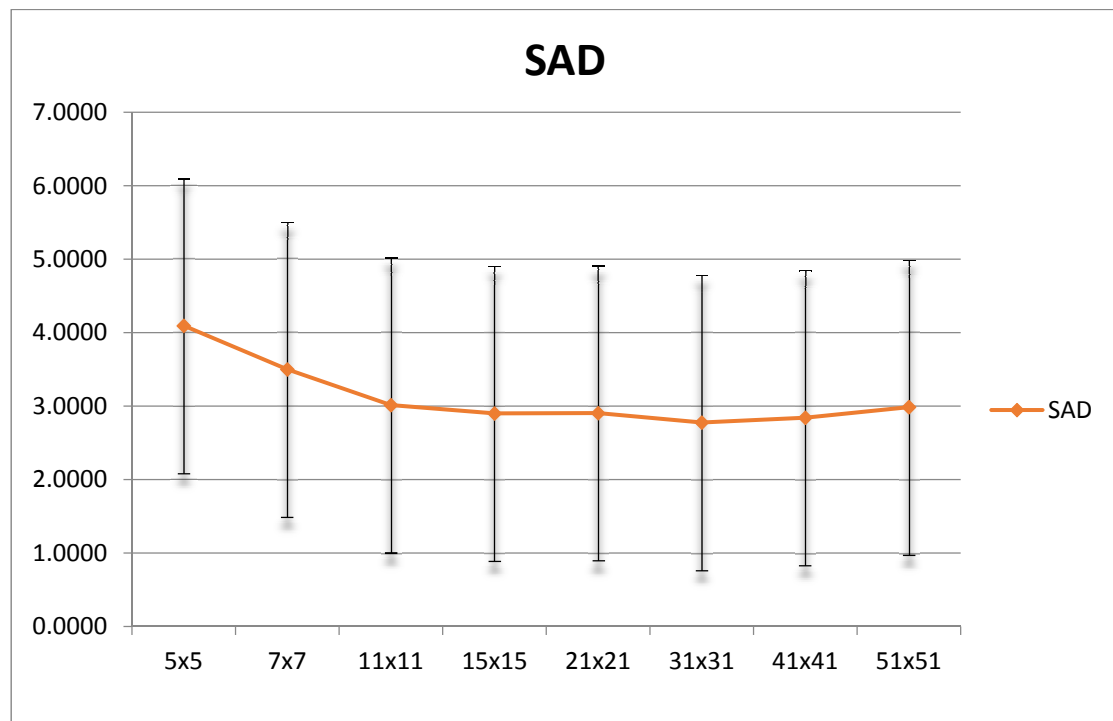


(β)

Σχήμα 6.10. Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο των απόλυτων διαφορών και στα τρία χρωματικά επίπεδα για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 15×15, (γ) 31×31, (δ) 51×51

Πίνακας 6.1. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)									
$m \times n$	SSD			SAD			SAD color		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	3.82	7.37	75.36	4.09	7.56	71.93			
7×7	3.38	6.90	79.05	3.50	6.88	76.40	3.00	5.978	79.40
11×11	3.11	6.49	80.53	3.01	6.22	80.12			
15×15	3.14	6.40	79.29	2.90	6.04	81.27	2.90	5.66	81.51
21×21	3.20	6.31	77.34	2.90	5.92	80.59			
31×31				2.78	5.75	77.38			
41×41				2.84	5.73	75.24			
51×51				2.99	5.80	72.75			

Τέλος, για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο Σχ. 6.11 ένα διάγραμμα μεταβολής της ποσότητας ($\mu \pm \sigma$) που προέκυψε από τη σύγκριση με τον αληθή χάρτη παραλλάξεων στην περίπτωση της μεθόδου απόλυτων διαφορών.



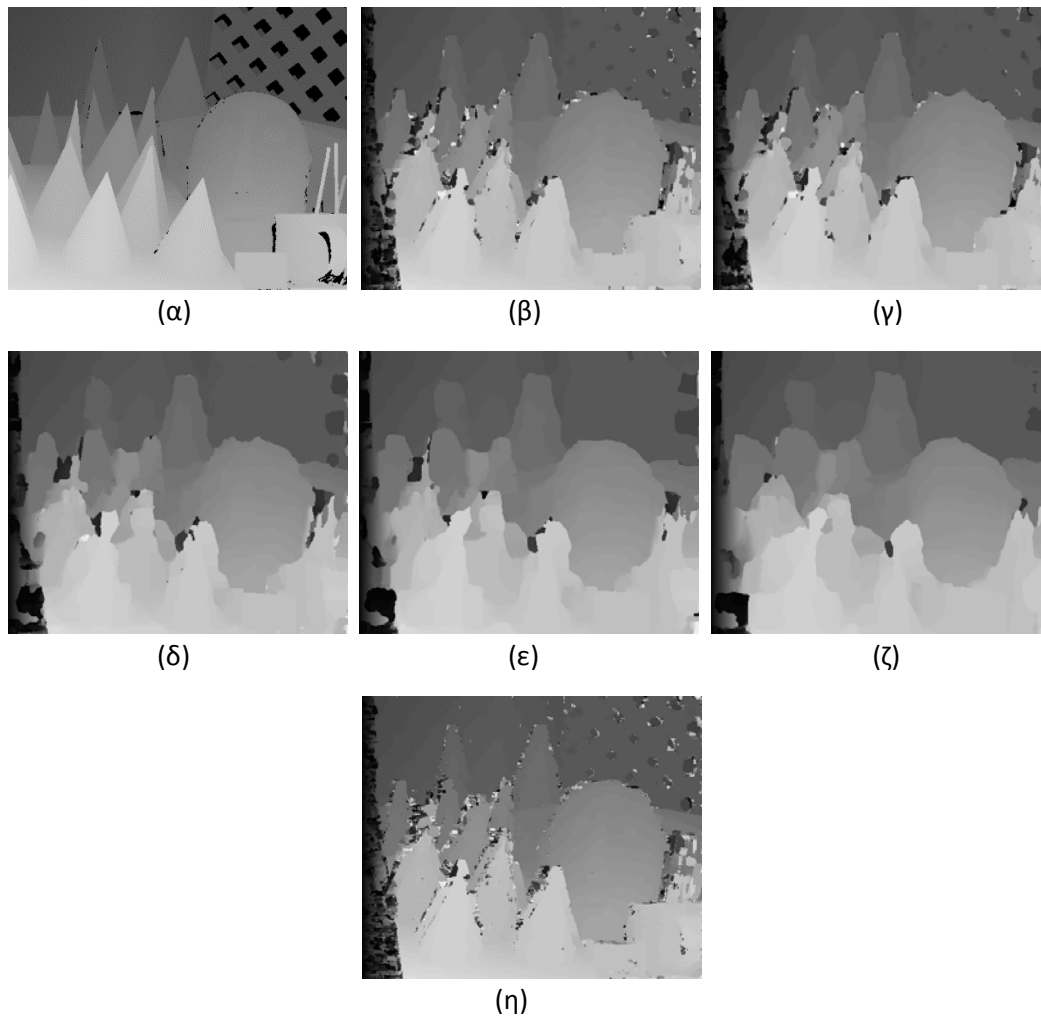
Σχήμα 6.11. Διάγραμμα της ποσότητας ($\mu \pm \sigma$) των διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με τους χάρτες που προκύπτουν από εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών.

Από τα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων, και ιδίως εκείνα που έχουν συγκεντρωθεί στον Πίνακα 6.1, προκύπτει πως δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές από την εφαρμογή των δύο βασικών κριτηρίων SAD και SSD. Ωστόσο, στα μεσαία παράθυρα (11×11 έως 21×21) παρατηρείται μια ελαφρά υπεροχή της μεθόδου SAD σε όλα τα κριτήρια. Επιπλέον, εντοπίζεται η κατ' αρχήν βελτίωση των αποτελεσμάτων με την αύξηση του μεγέθους του παραθύρου, η οποία όμως σταματάει στο μέγεθος 11×11 για το κριτήριο των τετραγώνων των διαφορών και στο μέγεθος 31×31 για το κριτήριο των απόλυτων διαφορών. Αυτό στην δεύτερη περίπτωση αφορά τις ποσότητες μ και σ , εάν όμως κοιτάξει κανείς τα ποσοστά των διαφορών που δεν υπερβαίνουν το 1 pixel διαπιστώνει ότι καλύτερα αποτελέσματα με το SAD (81.27%) προκύπτουν με παράθυρο 15×15. Η συμμετοχή και των τριών χρωματικών επιπέδων κατά την εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών οδηγεί σε βελτίωση των αποτελεσμάτων τόσο για παράθυρο 7×7 όσο και για παράθυρο 15×15, για το οποίο προκύπτουν οι καλύτερες τιμές. Τέλος, επισημαίνεται ότι το ποσοστό για διαφορές παράλλαξης 0 ή 1 κυμαίνεται γενικά περί το 80%, τιμή που θεωρείται ικανοποιητική.

Η οπτική παρατήρηση των χαρτών παράλλαξης οδηγεί στο σχόλιο πως, όπως είναι αναμενόμενο, οι κύριες αστοχίες αυτών των αυτόματων αλγορίθμων είναι σε περιοχές αποκρύψεων, δηλαδή περιοχών που δεν είναι ορατές και στις δύο εικόνες. Παρατηρείται, ακόμα, πως η χρήση σχετικά μικρών παραθύρων παράγει χάρτες όπου διατηρούνται κατά βάση αναλλοίωτα τα φυσικά όρια των αντικειμένων της εικόνας (βλ. Σχ. 6.3). Βέβαια στις εικόνες αυτές παρατηρείται, εκτός των περιοχών των αποκρύψεων, και η ύπαρξη μικρών διάσπαρτων περιοχών με λανθασμένη πληροφορία (βλ. Σχ. 6.6), διότι όπως είναι λογικό η πληροφορία που αξιοποιείται κατά τη διαδικασία της αναζήτησης είναι περιορισμένη λόγω του μεγέθους του παραθύρου. Από την άλλη μεριά, υπερβολική αύξηση της διάστασης του παραθύρου οδηγεί βέβαια σε χάρτες παράλλαξης στους οποίους τα όρια και τα σχήματα των αντικειμένων δεν είναι πλέον σαφώς ευδιάκριτα, δηλαδή έχουν αμβλυνθεί σημαντικά (βλ. Σχ. 6.6). Έτσι στα επόμενα δεν δοκιμάστηκαν τα πολύ μεγάλα παράθυρα που χρησιμοποιήθηκαν εδώ.

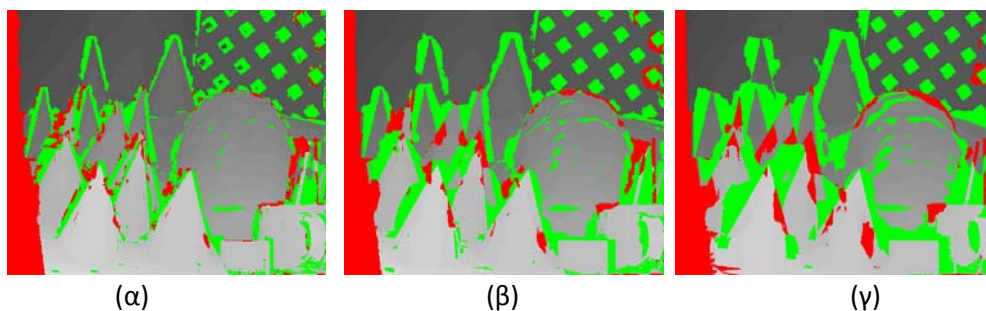
6.1.2 Συνταύτιση με τον συντελεστή συσχέτισης

Κατά την εφαρμογή του συντελεστή συσχέτισης, ο οποίος αποτελεί το πιο γνωστό μέτρο επιφανειακής συνταύτισης όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε μέγεθος παραθύρου αναζήτησης όπως προηγουμένως (οριζόμενο δηλαδή από την μέγιστη παράλλαξη του ζεύγους) και παραθύρων αναφοράς 5×5, 7×7, 11×11, 15×15, 21×21, καθώς επίσης και ορθογώνιο παράθυρο 5×11 (Σχ. 6.12).



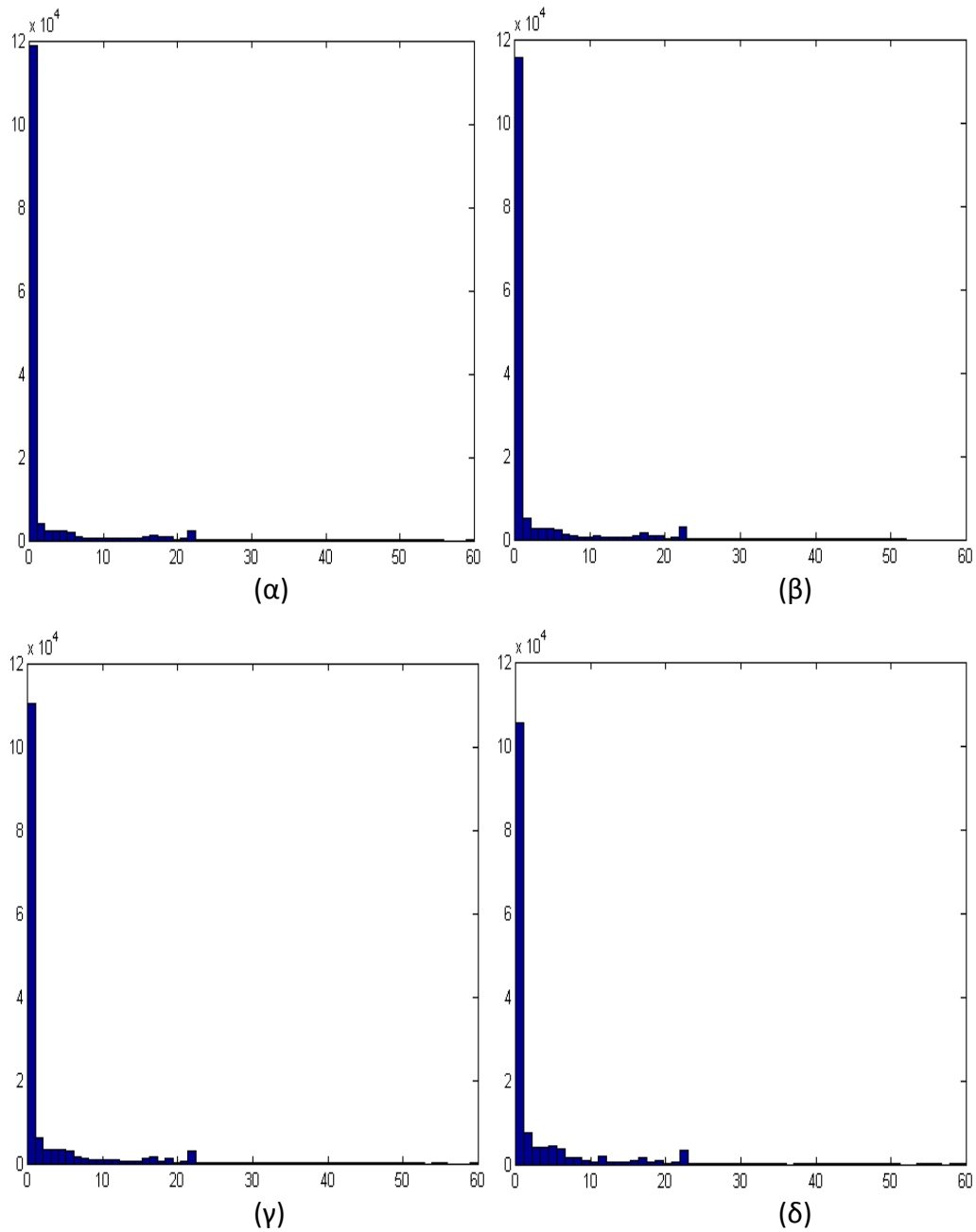
Σχήμα 6.12. Χάρτες παράλληλης που προέκυψαν από το κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης με τη χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) αληθινής χάρτης παράλληλης, (β) παράθυρο 5×5 , (γ) παράθυρο 7×7 , (δ) παράθυρο 11×11 , (ε) παράθυρο 15×15 , (ζ) παράθυρο 21×21 , (η) παράθυρο 5×11 .

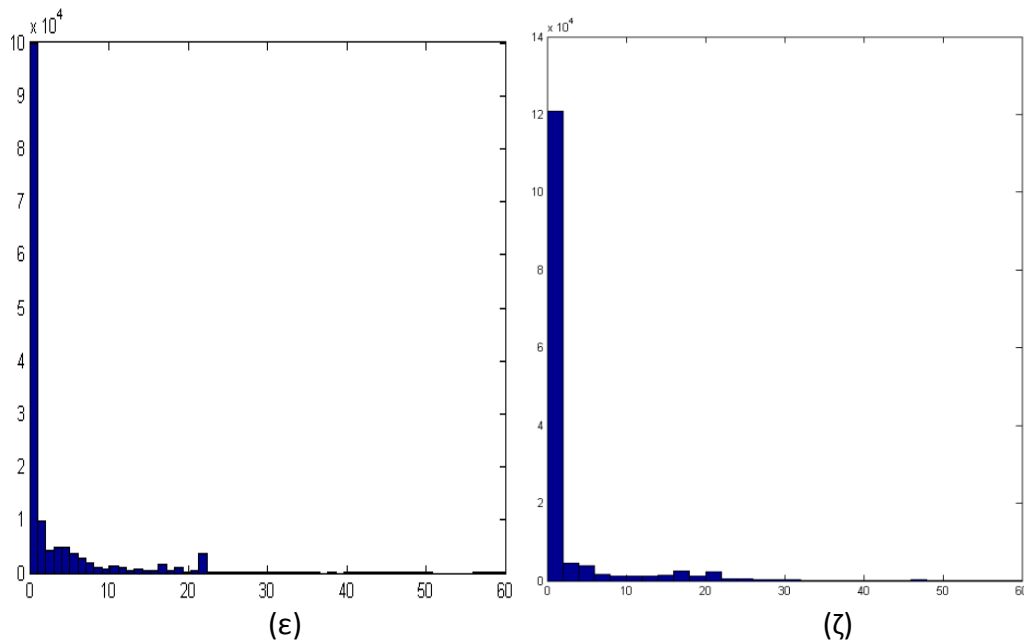
Το Σχ. 6.13 δείχνει, όπως και στην προηγούμενη ενότητα, τις εικόνες διαφορών από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με εκείνους του Σχ. 6.12.



Σχήμα 6.13. Εικόνες διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλληλης με τους χάρτες παράλληλης από το κριτήριο του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 και (γ) 21×21 .

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ιστογράμματα που προκύπτουν από τις διαφορές του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε έναν από τους χάρτες που έχουν υπολογιστεί εδώ (Σχ. 6.14), καθώς επίσης και ο Πίνακας 6.2 με τα στατιστικά στοιχεία (μέσος όρος και τυπική απόκλιση – στήλες 1 και 2) και το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης με τιμή μικρότερη των 2 εικονοψηφίδων (στήλη 3).



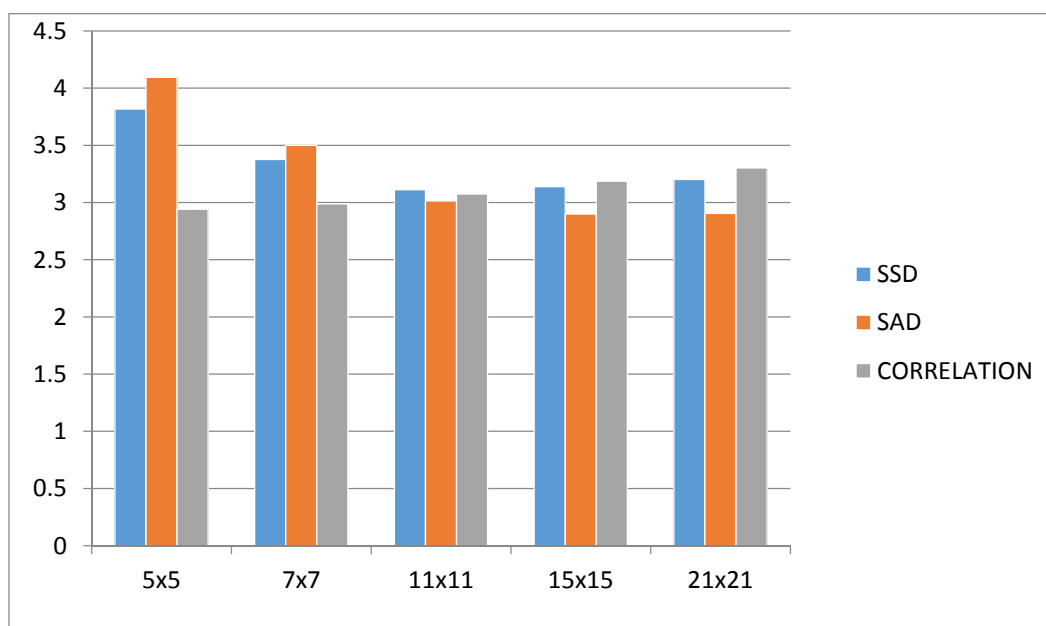


Σχήμα 6.14: Ιστογράμματα: (α) παράθυρο 5×5, (β) παράθυρο 7×7, (γ) παράθυρο 11×11, (δ) παράθυρο 15×15, (ε) παράθυρο 21×21, (ζ) παράθυρο 5×11.

Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει ότι η καλύτερη τιμή μέσου όρου εμφανίζεται για μικρό παράθυρο (5×5), ενώ η καλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης εμφανίζεται για παράθυρο 11×11. Η καλύτερη τιμή για το ποσοστό πολύ μικρών διαφορών αντιστοιχεί στο παράθυρο 5×11. Η αύξηση του μεγέθους του παραθύρου επιφέρει αύξηση των τιμών αυτών, δηλαδή επιδείνωση των αποτελεσμάτων. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η επιλογή μικρών παραθύρων μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερες λύσεις, καθώς η συμμετοχή γειτονικών εικονοψηφίδων είναι σχετικά περιορισμένη. Έτσι, οι πιθανότητες εύρεσης του σωστού ομόλογου σημείου είναι περισσότερες συγκριτικά με την επιλογή μεγάλου παραθύρου, όπου ναι μεν αντλείται πληροφορία από ευρύτερο τμήμα της εικόνας, αυξάνονται όμως οι πιθανότητες το παράθυρο αυτό να περιέχει περισσότερες παραμορφώσεις.

Πίνακας 6.2. Διαφορές παραλλάξεων από αληθείς τιμές για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο εύρος $-1 \leq \Delta d \leq 1$)			
$m \times n$	Συντελεστής συσχέτισης		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	2.94	6.39	80.99
7×7	2.99	6.25	78.77
11×11	3.08	6.10	75.15
15×15	3.19	6.13	71.27
21×21	3.30	6.16	66.57
5×11	3.252	6.84	81.98

Για πιο άμεση σύγκριση των κριτηρίων SAD, SSD και συντελεστή συσχέτισης, παρουσιάζεται στο Σχ. 6.15 ένα συγκριτικό διάγραμμα με τις τιμές των μέσων όρων από κάθε κριτήριο για τα κοινά παράθυρα που εφαρμόστηκαν.



Σχήμα 6.15. Ιστόγραμμα μέσων όρων για το κριτήριο του τετραγώνου των διαφορών, των απόλυτων διαφορών και του συντελεστή συσχέτισης.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το κριτήριο του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης δίνει καλύτερα αποτελέσματα για μικρά παράθυρα (5×5, 7×7), για παράθυρο 11×11 τα τρία κριτήρια δίνουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα, ενώ για παράθυρα 15×15 και 21×21 το κριτήριο των απόλυτων διαφορών δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Βέβαια η επιλογή ενός κριτηρίου δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το αν παρέχει τα βέλτιστα αποτελέσματα συγκριτικά με άλλες μεθόδους, αλλά και από τον υπολογιστικό φόρτο που απαιτείται κατά την εφαρμογή του, όπου το κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης υστερεί εμφανώς σε σύγκριση με τα κριτήρια SAD και SSD. Δεδομένου, άρα, ότι από την σύγκριση των Πινάκων 6.1 και 6.2, καθώς και από το Σχ. 6.15, δεν φαίνεται να υπάρχει ουσιαστική διαφορά μεταξύ των μεθόδων, ιδίως για τα μεσαία παράθυρα, στην συνέχεια δεν χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής συσχέτισης ούτε και το κριτήριο των τετραγώνων των διαφορών, δηλαδή οι επόμενες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν βάσει του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών (SAD).

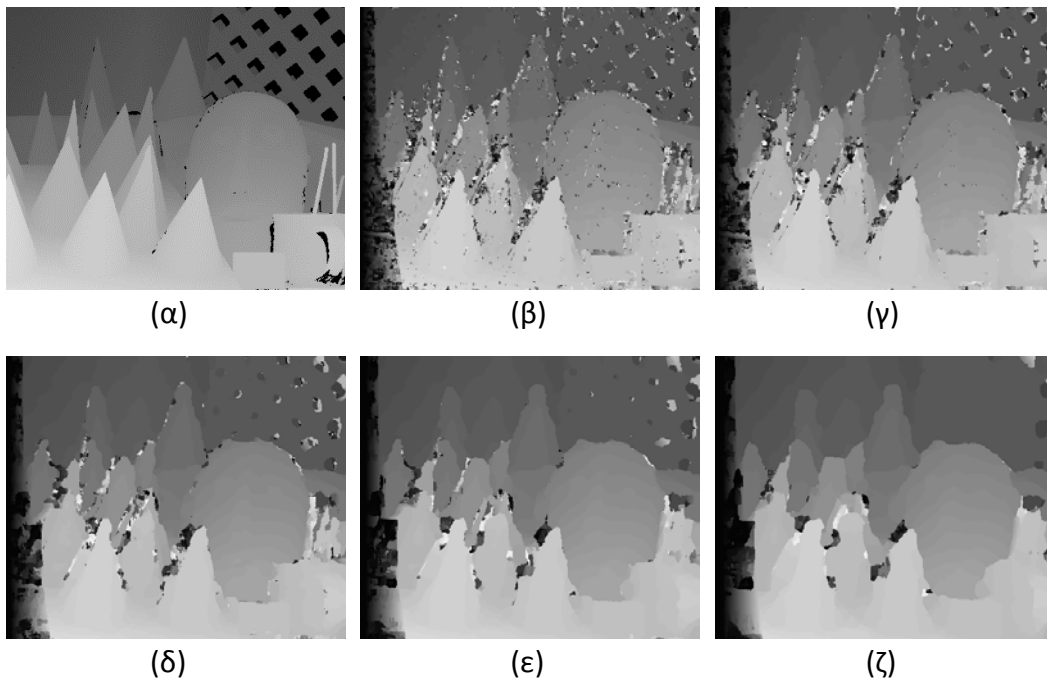
6.1.3 Συνταύτιση εικόνων κλίσης (gradient)

Με στόχο να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας συνταύτισης, τα μέτρα ομοιότητας μπορούν να εφαρμόζονται και σε μετασχηματισμούς των αρχι-

κών εικόνων. Ένας τέτοιος μετασχηματισμός είναι η δημιουργία εικόνων πρώτης παραγώγου, οι οποίες επιτρέπουν την οπτικοποίηση των κλίσεων των εικόνων. Στο στερεοζεύγος εφαρμόστηκε φίλτρο κλίσης κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ οι νέες εικόνες περιείχαν ως πληροφορία το μέτρο του διανύσματος της κλίσης (Σχ. 6.16).



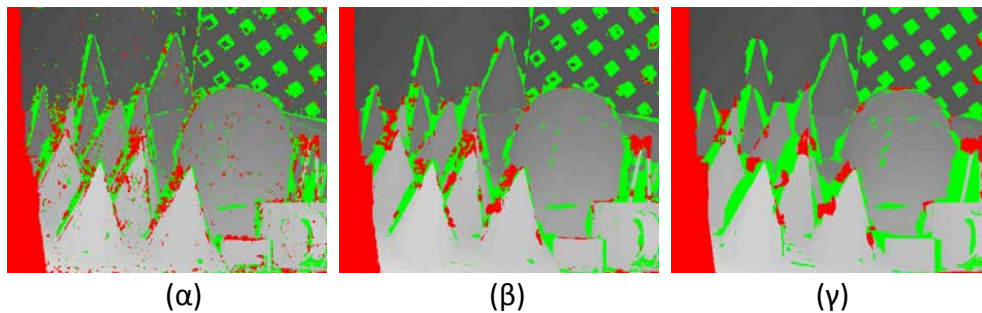
Σχήμα 6.16. Εικόνες κλίσεων του στερεοζεύγους.



Σχήμα 6.17. Χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης: (α) αληθής χάρτης παράλλαξης, (β) παράθυρο 5×5, (γ) παράθυρο 7×7, (δ) παράθυρο 11×11, (ε) παράθυρο 15×15, (ζ) παράθυρο 21×21.

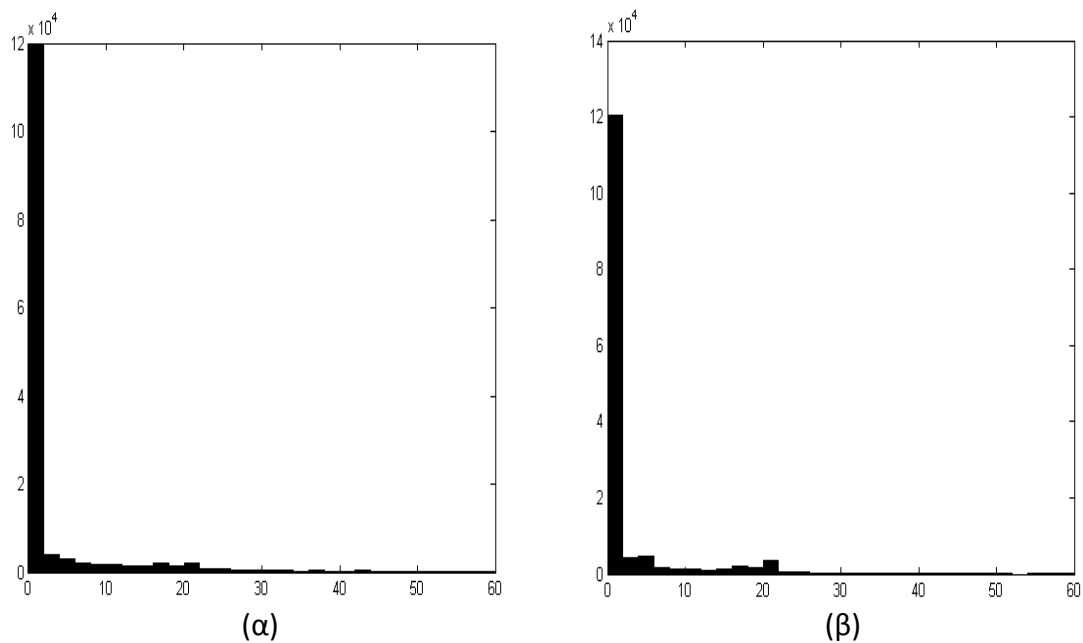
Στις νέες εικόνες που προέκυψαν από την εφαρμογή του φίλτρου κλίσης οι ακμές των αντικειμένων έχουν αναδειχθεί, ενώ τα φυσικά όριά τους γίνονται εύκολα διακριτά. Στην συνέχεια, για τη διαδικασία της συνταύτισης στις νέες αυτές εικόνες

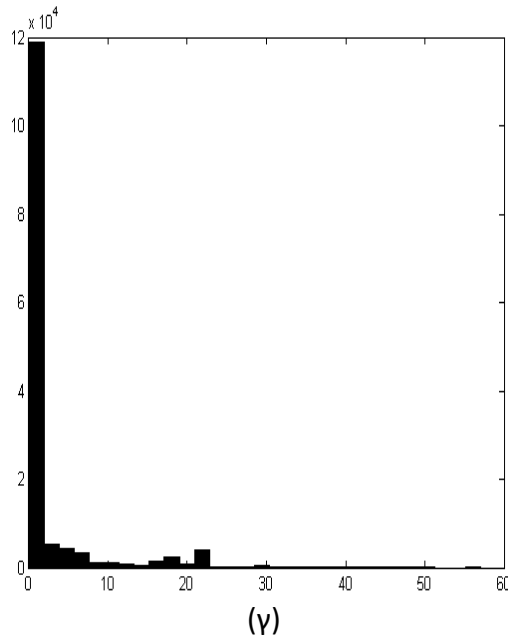
επελέγη το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για τα παράθυρα 5×5 , 7×7 , 11×11 , 15×15 και 21×21 (Σχ. 6.17). Στο Σχ. 6.18 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι εικόνες των διαφορών που προέκυψαν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με ορισμένους από τους χάρτες του Σχ. 6.17.



Σχήμα 6.18. Εικόνες διαφορών που προέκυψαν βάσει του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης για παράθυρα: (α) 5×5 (β) 11×11 , (γ) 21×21 .

Στη συνέχεια παρατίθενται τα ιστογράμματα διαφορών παράλλαξης που προέκυψαν από τη σύγκριση των χαρτών με τον αληθή χάρτη παράλλαξης (Σχ. 6.19), καθώς επίσης ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και το ποσοστό των διαφορών με τιμή μικρότερη από 2 ρixel (Πίνακας 6.3). Για αμεσότερη αξιολόγηση της μεθόδου, στον πίνακα αυτό περιλαμβάνονται και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών στις αρχικές εικόνες (δηλαδή οι αντίστοιχες στήλες του Πίνακα 6.1 της ενότητας 6.1.1).

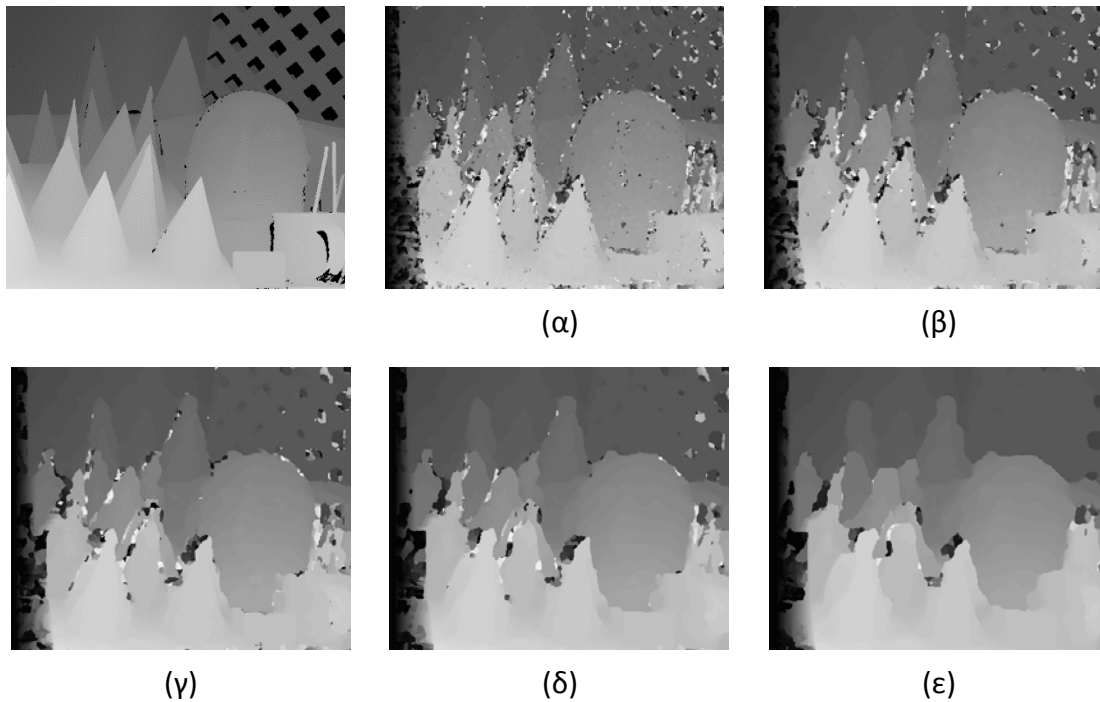




Σχήμα 6.19. Τα ιστογράμματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των παραπάνω χαρτών με τον αληθή χάρτη παράλλαξης για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 11×11 και (γ) 21×21.

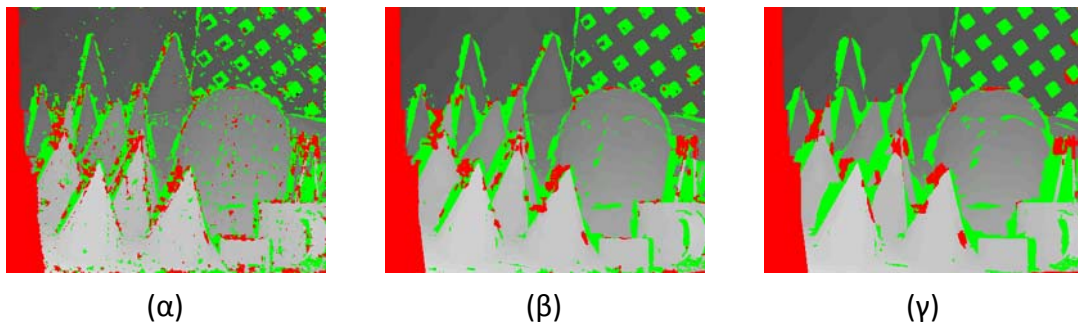
Πίνακας 6.3. Διαφορές υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)						
$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών (SAD)			Άθροισμα απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	4.09	7.56	71.92	3.67	7.64	81.17
7×7	3.50	6.88	76.40	3.38	7.23	82.71
11×11	3.01	6.22	80.12	3.29	6.97	82.51
15×15	2.90	6.04	81.27	3.26	6.83	81.87
21×21	2.90	5.92	80.58	3.17	6.52	81.18

Από την παρατήρηση των δεδομένων του πίνακα συνάγεται ότι στην περίπτωση των εικόνων κλίσης οι τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης παραμένουν για κάθε παράθυρο που χρησιμοποιήθηκε σχεδόν σταθερές, αλλά για τις μεγαλύτερες διαστάσεις παραθύρων είναι υποδεέστερες των αποτελεσμάτων από την συνταύτιση των αρχικών εικόνων. Αυτό ενδεχομένως συμβαίνει γιατί οι εικόνες που προέρχονται από εφαρμογή του φίλτρου κλίσης έχουν ενισχυμένο θόρυβο (και άρα σε ορισμένες περιοχές παρουσιάζονται χονδροειδή σφάλματα συνταύτισης). Αντίθετα, οι τιμές του ποσοστού των διαφορών των εικονοψηφίδων με τιμή < 2 ρixel σημείωσαν αισθητή αύξηση. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση εικόνων κλίσης δίνει περισσότερα σωστά αποτελέσματα, αλλά εισάγει θόρυβο. Έτσι, για τη μείωση του θορύβου και την εξομάλυνση των εικόνων κλίσης εφαρμόστηκε σε αυτές φίλτρο Gauss και η συνταύτιση πραγματοποιήθηκε στις εξομαλυσμένες εικόνες κλίσης (Σχ. 6.20).



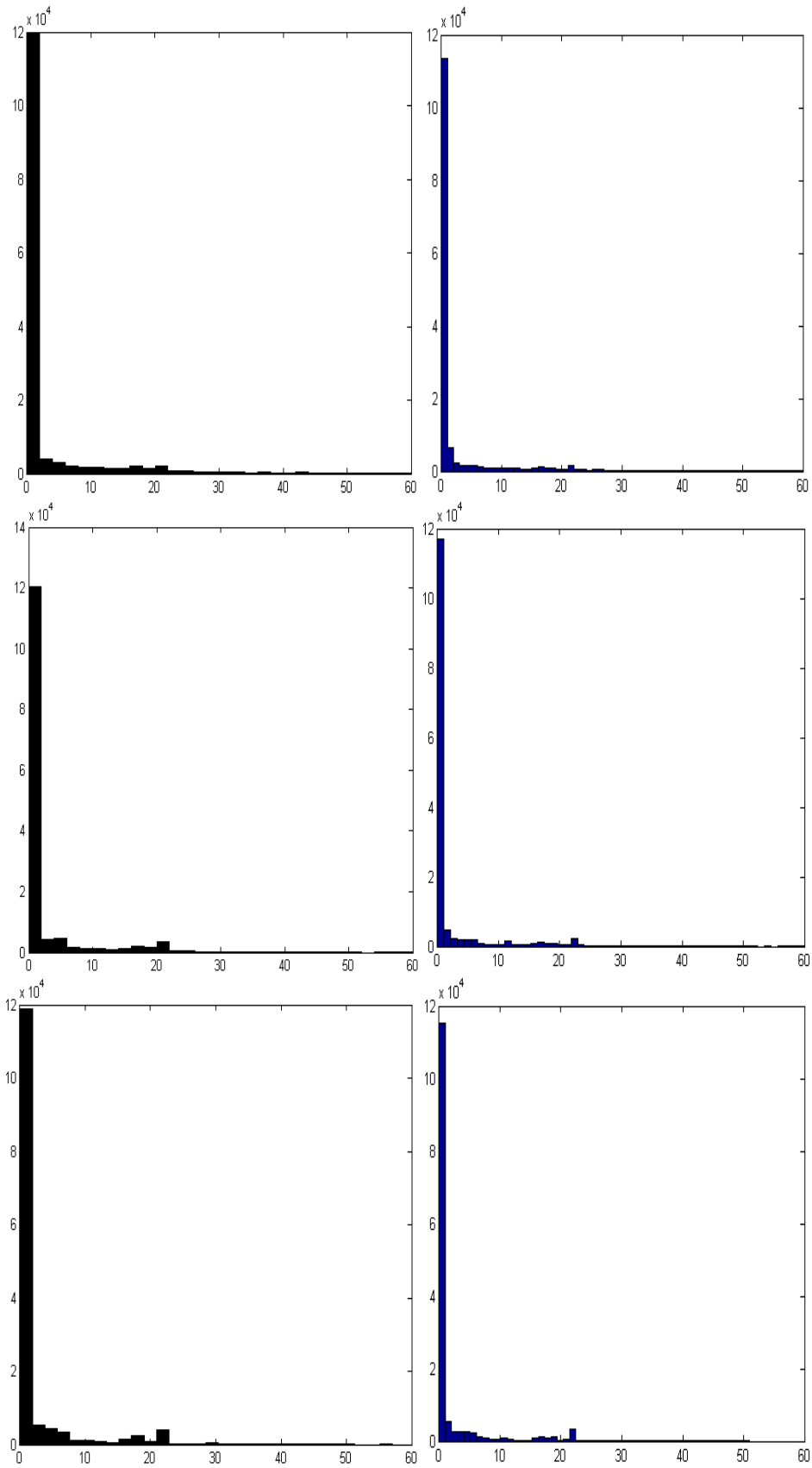
Σχήμα 6.20. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης, μετά από την εφαρμογή φίλτρου Gauss, για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 7×7 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 , (ε) 21×21 .

Οι εικόνες των διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με τους παραπάνω χάρτες παρουσιάζονται στο Σχ. 6.21.



Σχήμα 6.21. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με αυτούς που προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης μετά από την εφαρμογή φίλτρου Gauss για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 , (γ) 21×21 .

Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένα από τα ιστογράμματα που προκύπτουν από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης μετά από χρήση φίλτρου Gauss (Σχ. 6.22).



Σχήμα 6.22. Ιστογράμματα από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν για παράθυρα: 5x5 (πάνω), 11x11 (μέσον), 21x2 (κάτω) Αριστερά: συνταύτιση σε εικόνες κλίσης. Δεξιά: συνταύτιση σε εικόνες κλίσης μετά από φίλτρο Gauss .

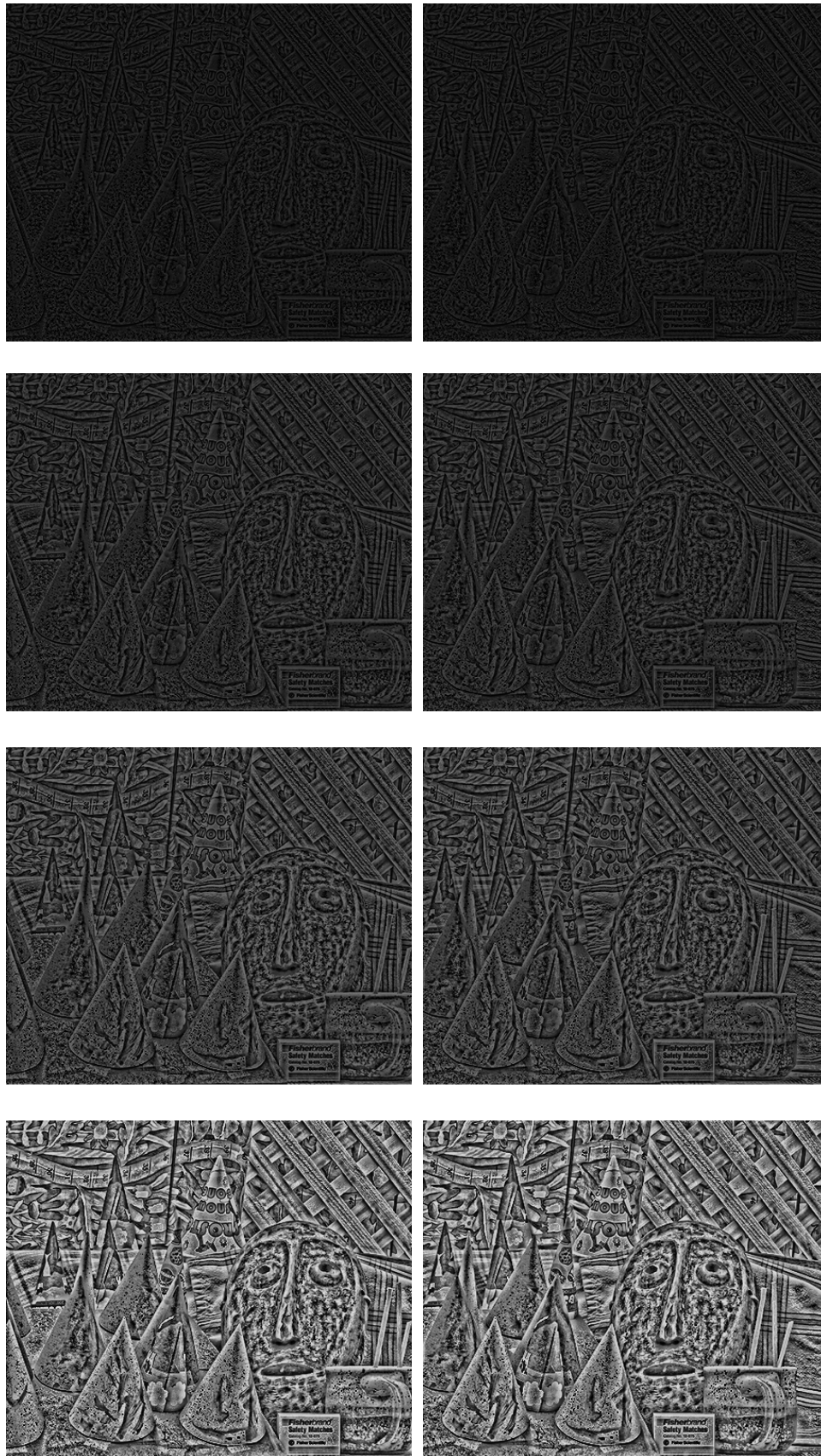
Επιπλέον, στον Πίνακα 6.4 παρατίθενται και τα στατιστικά στοιχεία (μέσος όρος, τυπική απόκλιση και ποσοστό διαφορών των παραλλάξης με τιμή κάτω των 2 pixel) που προκύπτουν από τα ιστογράμματα αυτά. Ο πίνακας συμπεριλαμβάνει, για να διευκολύνεται η σύγκριση, και τα αποτελέσματα που του Πίνακα 6.3 για τη συνταύτιση σε εικόνες κλίσης χωρίς χρήση φίλτρου Gauss.

Πίνακας 6.4. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)						
$m \times n$	SAD σε εικόνες κλίσης			SAD σε εικόνες κλίσης μετά από εφαρμογή φίλτρου Gauss		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	3.67	7.64	81.17	3.52	7.54	76.65
7×7	3.38	7.23	82.71	3.28	7.17	79.70
11×11	3.29	6.97	82.51	3.13	6.80	80.33
15×15	3.26	6.83	81.87	3.02	6.54	79.92
21×21	3.17	6.52	81.18	2.90	6.15	79.08

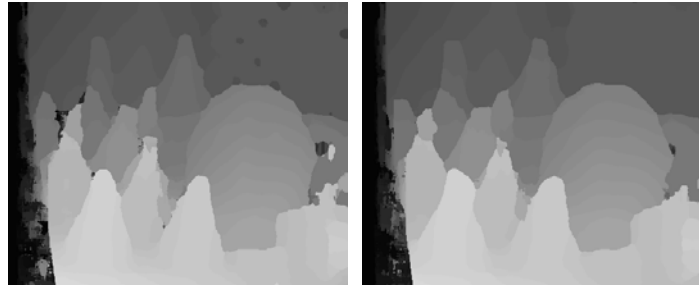
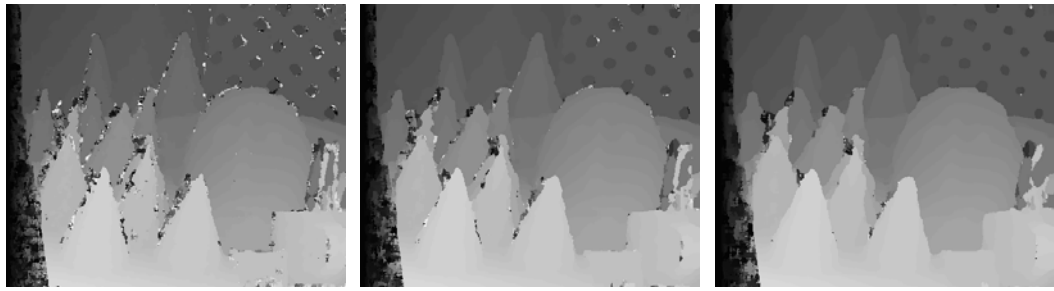
Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.4 προκύπτει ότι η εφαρμογή του φίλτρου Gauss βελτιώνει σε όλες τις περιπτώσεις τις τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης. Από την άλλη μεριά, όμως, μειώνει τα ποσοστά των πολύ καλών συνταυτίσεων. Εκτιμάται, λοιπόν, πως το φίλτρο μειώνει τον γενικό θόρυβο που έχουν οι εικόνες κλίσης (αυτό φαίνεται πχ. από την σύγκριση του Σχ. 6.221 με το Σχ. 6.18) με κόστος μια κάποια εξομάλυνση (“θόλωση”) των ακμών. Επομένως, η χρησιμότητα της εφαρμογής φίλτρου εξομάλυνσης στις εικόνες κλίσης φαίνεται ότι εξαρτάται από το επιδιωκόμενο κάθε φορά αποτέλεσμα.

6.1.4 Συνταύτιση εικόνων μετά από μετασχηματισμό rank

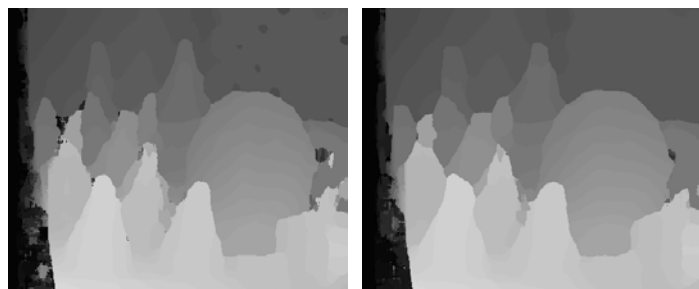
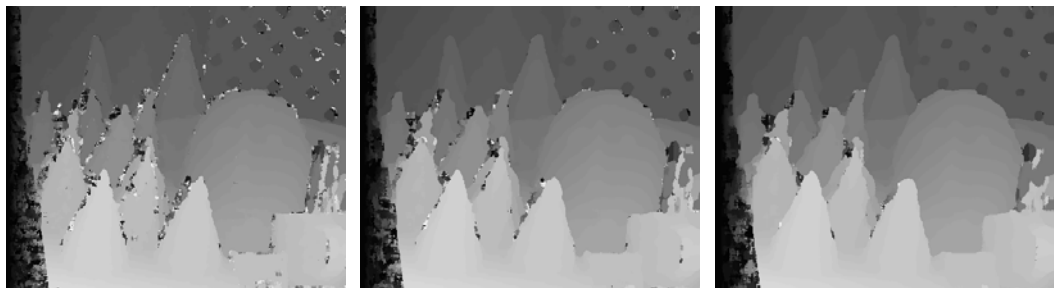
Ένας άλλος μετασχηματισμός που εφαρμόστηκε στις αρχικές εικόνες, πριν από τη διαδικασία της συνταύτισης, είναι ο μετασχηματισμός κατάταξης rank. Ο μετασχηματισμός χρησιμοποιήθηκε στις αρχικές εικόνες για παράθυρα 7×7, 9×9, 11×11 και 15×15 (Σχ. 6.23). Το κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της συνταύτισης είναι αυτό του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για μέγεθος παραθύρων 7×7, 11×11, 15×15, 21×21 και 31×31 (Σχ. 6.24).



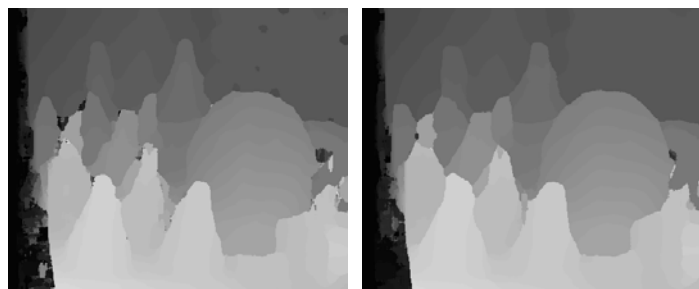
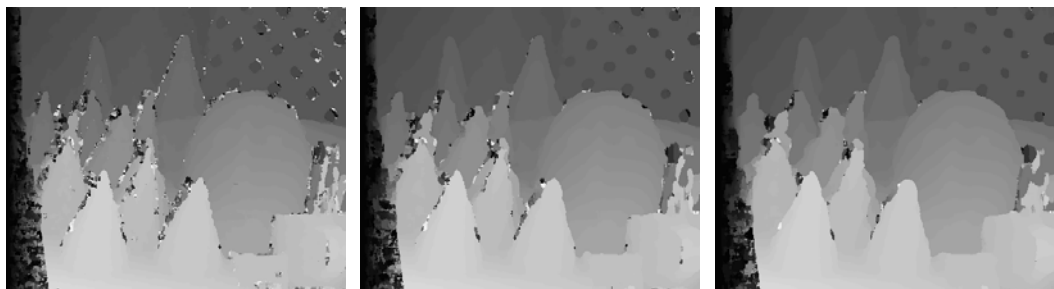
Σχήμα 6.23 Στερεοζεύγη εικόνων που προκύπτουν από το μετασχηματισμό rank για μέγεθος παραθύρου (από επάνω προς τα κάτω): 7×7, 9×9, 11×11, 15×15.



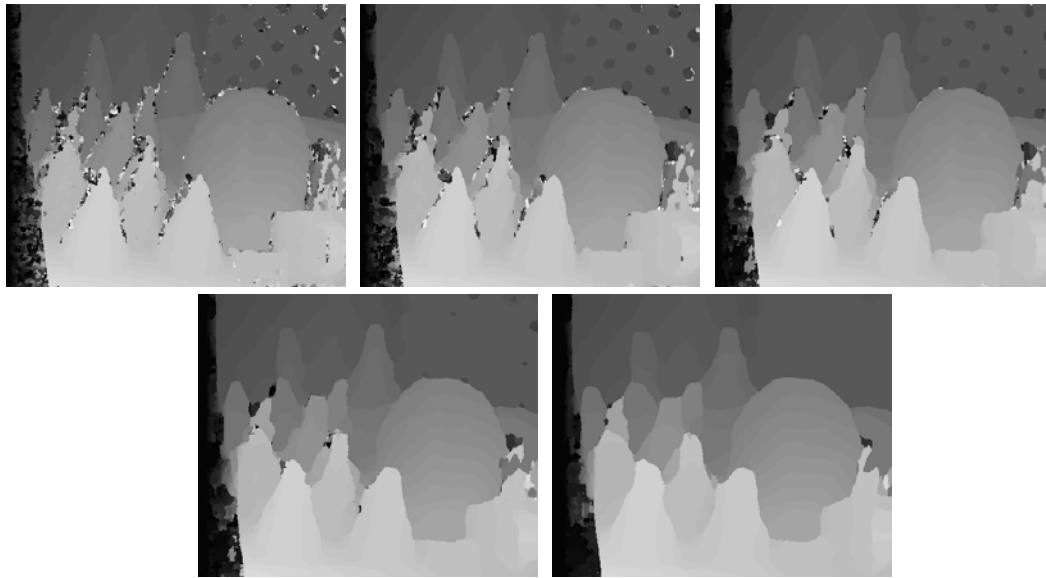
(α)



(β)



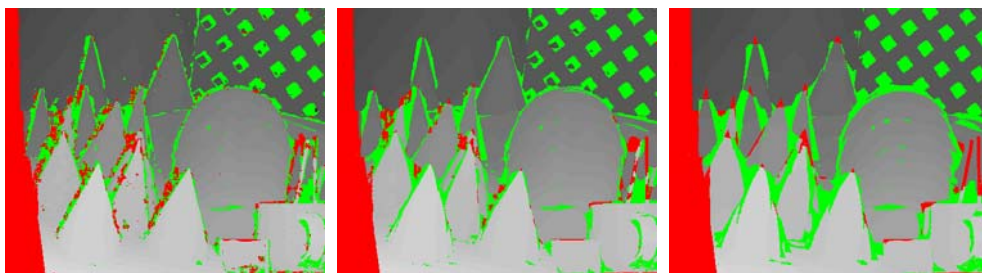
(γ)



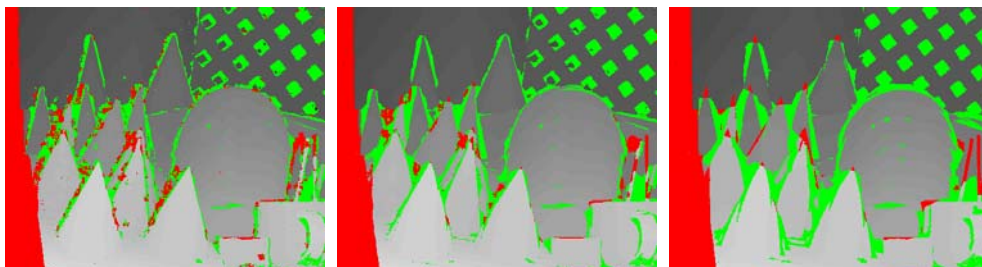
(δ)

Σχήμα 6.24. Χάρτες ψηφιακής παράλλαξης που προέκυψαν από τη διαδικασία της συνταύτισης με βάση το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα: 7×7 , 11×11 , 15×15 , 21×21 και 31×31 , σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank με παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 και (δ) 15×15 .

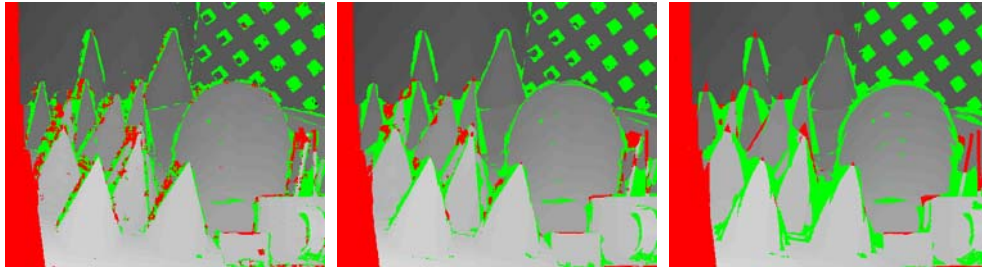
Ορισμένες από τις εικόνες των διαφορών ψηφιακής παράλλαξης που προέκυψαν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες του Σχ. 6.24 παρουσιάζονται στο Σχ. 6.25.



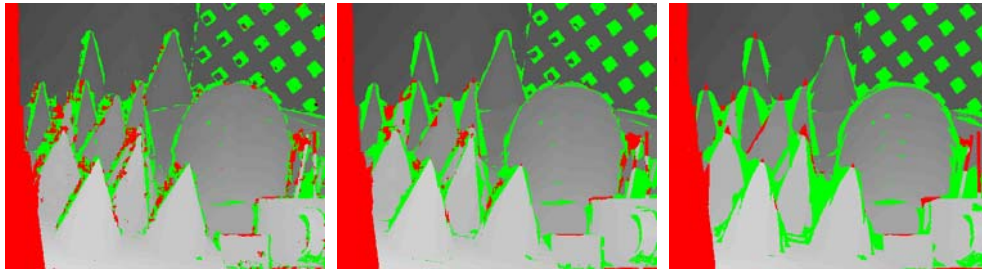
(α)



(β)



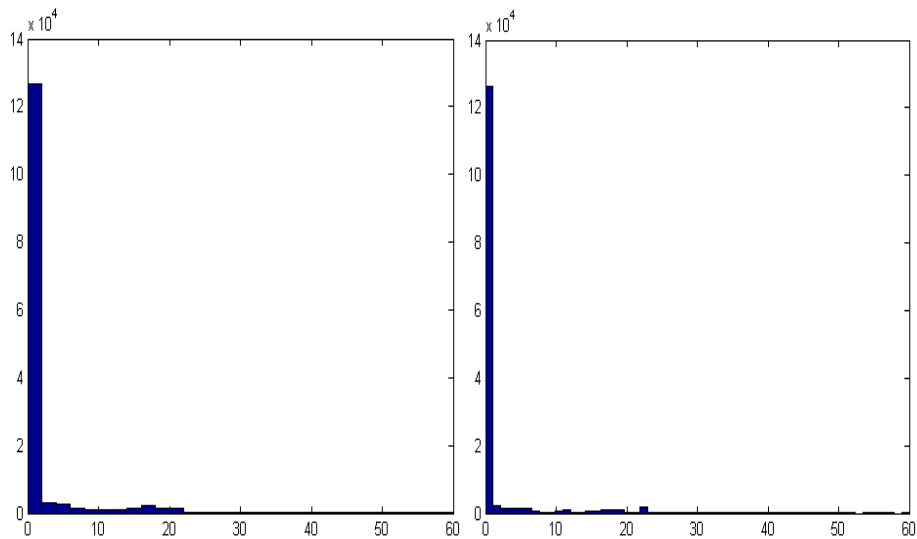
(γ)

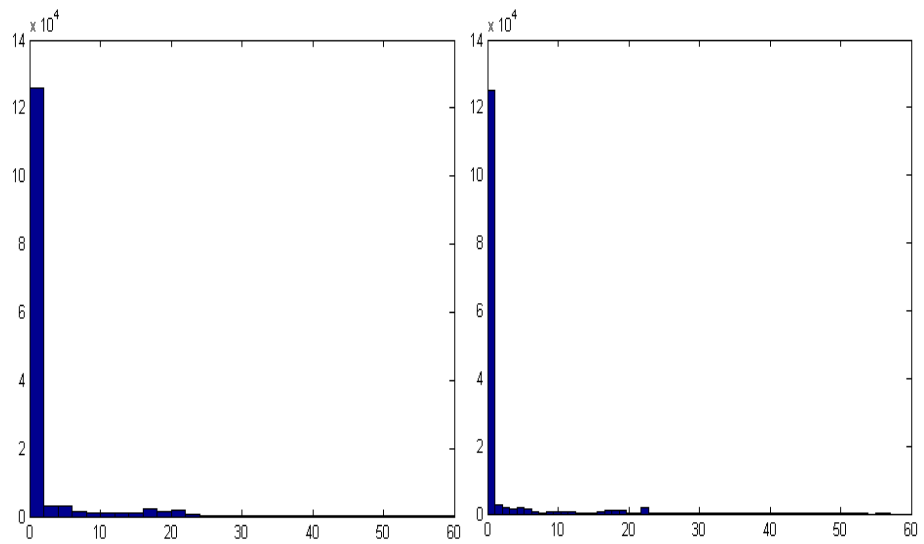
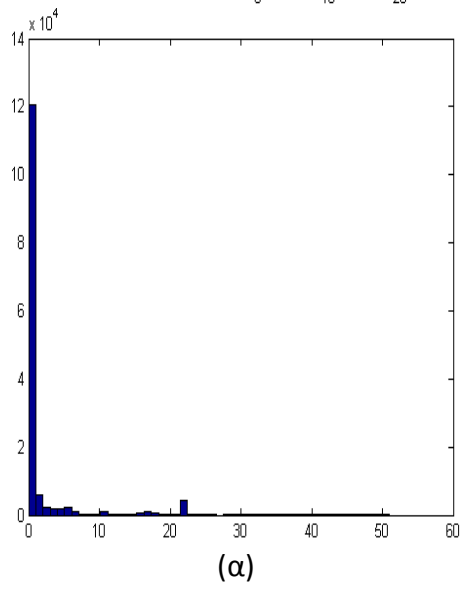
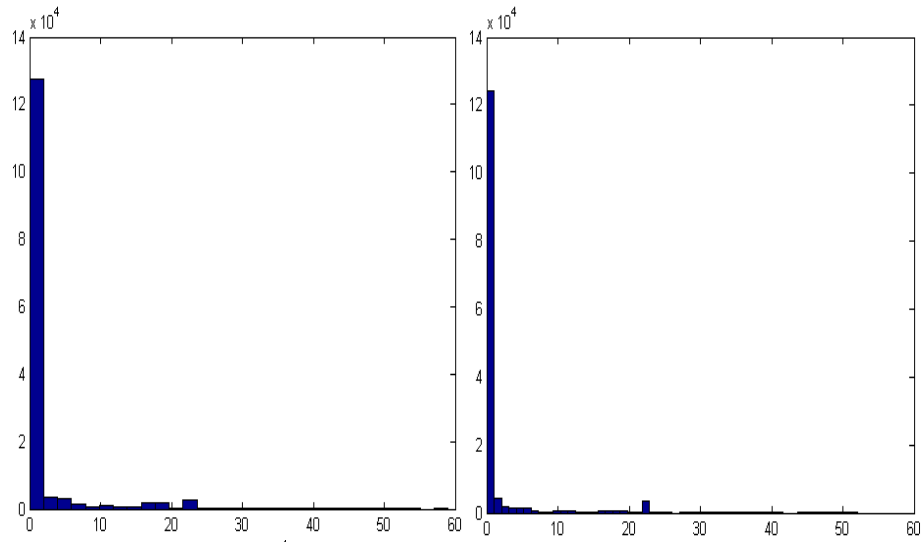


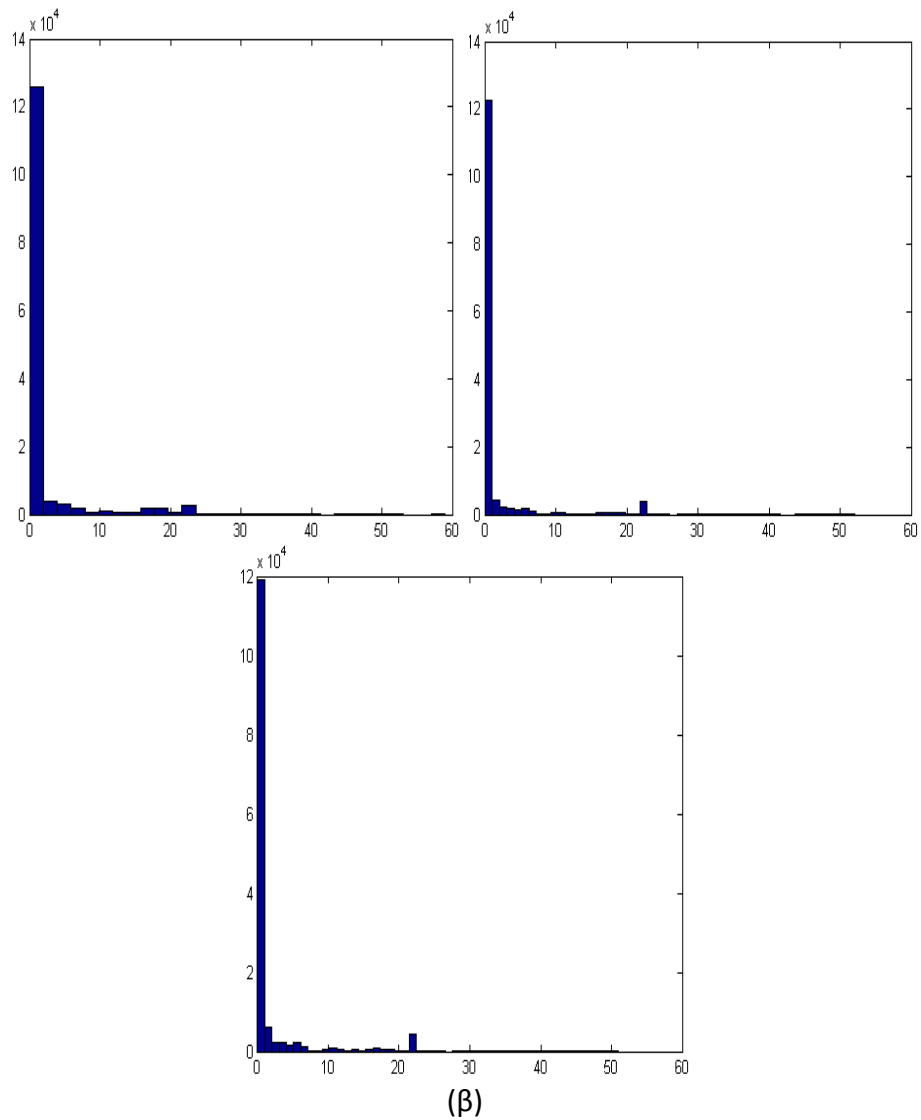
(δ)

Σχήμα 6.25. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με χάρτες που προέκυψαν από τη διαδικασία της συνταύτισης με το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα 7×7 , 15×15 , και 31×31 σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank με παράθυρο: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 .

Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά στο Σχ. 6.26 ορισμένα από τα ιστογράμματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των χαρτών του Σχ. 6.24 με τον αληθή χάρτη παράλλαξης, καθώς επίσης ο Πίνακας 6.5 με τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση και ο Πίνακας 6.6 με το ποσοστό των διαφορών των εικονοψηφίδων με τιμή κάτω των 2 ρικελ. Για την αμεσότερη αξιολόγηση της μεθόδου, στους πίνακες περιλαμβάνονται και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών στις αρχικές εικόνες.







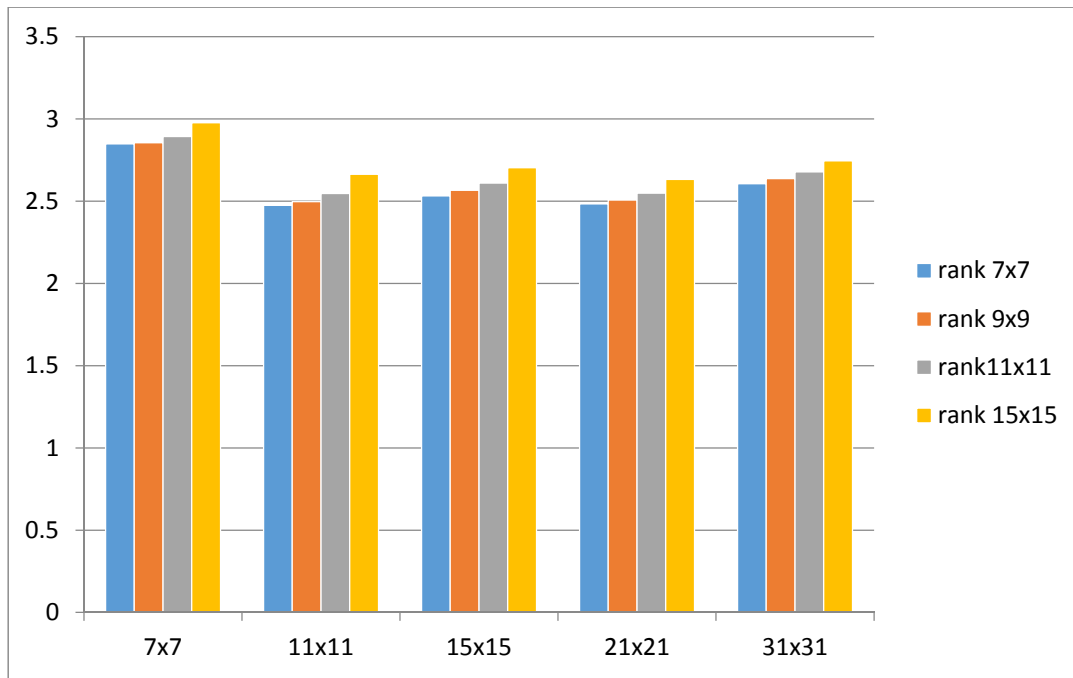
Σχήμα 6.26. Ιστογράμματα από σύγκριση αληθούς χάρτη παράλλαξης με χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου SAD για παράθυρα 7×7, 11×11, 15×15, 21×21, 31×31 σε εικόνες μετασχηματισμένες με rank με παράθυρα: (α) 7×7, (β) 11×11.

Πίνακας 6.5. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση)										
$m \times n$	Αρχικές εικόνες		rank 7×7		rank 9×9		rank 11×11		rank 15×15	
7×7	3.50	6.88	2.85	6.36	2.85	6.34	2.89	6.37	2.98	6.54
11×11	3.01	6.22	2.47	5.71	2.50	5.70	2.55	5.77	2.66	6.02
15×15	2.90	6.04	2.53	5.53	2.57	5.56	2.61	5.62	2.70	5.78
21×21	2.90	5.92	2.48	5.65	2.51	5.67	2.55	5.72	2.63	5.81
31×31	2.78	5.75	2.61	5.89	2.64	5.91	2.68	5.94	2.74	5.99

Πίνακας 6.6 Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (π[-1, 1]: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)					
$m \times n$	Αρχικές εικόνες	rank 7×7	rank 9×9	rank 11×11	rank 15×15
7×7	76.40	86.18	85.82	85.62	85.62
11×11	80.12	86.46	86.00	85.50	84.63
15×15	81.27	87.15	86.64	86.12	85.25
21×21	80.58	84.89	84.44	83.96	83.12
31×31	77.38	82.29	81.85	81.75	80.95

Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.5 προκύπτει εμφανώς ότι με την εφαρμογή του μετασχηματισμού rank στις αρχικές εικόνες οι τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης βελτιώνονται πολύ σημαντικά. Τα παράθυρα του μετασχηματισμού rank δεν φαίνεται να παίζουν ιδιαίτερο ρόλο. Σημειώνεται πάντως ότι βέλτιστα αποτελέσματα παρατηρούνται για τα μικρότερα παράθυρα μετασχηματισμού (7×7, 9×9) και τα μεσαία παράθυρα συνταύτισης (11×11 έως 21×21). Παράλληλα, παρατηρώντας κανείς στον Πίνακα 6.6 τα ποσοστά των ορθών συνταυτίσεων, διαπιστώνει ότι όταν έχει προηγηθεί της συνταύτισης μετασχηματισμός rank τα αποτελέσματα και εδώ βελτιώνονται πολύ σημαντικά. Τα παράθυρα μετασχηματισμού rank δεν φαίνεται να έχουν κάποια ιδιαίτερη σημασία, επισημαίνεται ωστόσο ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά εμφανίζονται για μικρά παράθυρα (7×7, 9×9).

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της συνταύτισης σε εικόνες που έχουν προηγουμένως υποστεί μετασχηματισμό rank δίνουν εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα από κάθε άλλη μέθοδο που δοκιμάστηκε στα προηγούμενα. Το μέγεθος του παραθύρου rank δεν φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο, πάντως ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν για τα μικρότερα παράθυρα. Αυτό αποτυπώνεται και στο διάγραμμα του Σχ. 6.27, το οποίο εμφανίζει τους μέσους όρους των διαφορών παραλλάξης για κάθε ένα από τα παράθυρα μετασχηματισμού που χρησιμοποιήθηκαν και για όλα τα παράθυρα συνταύτισης.



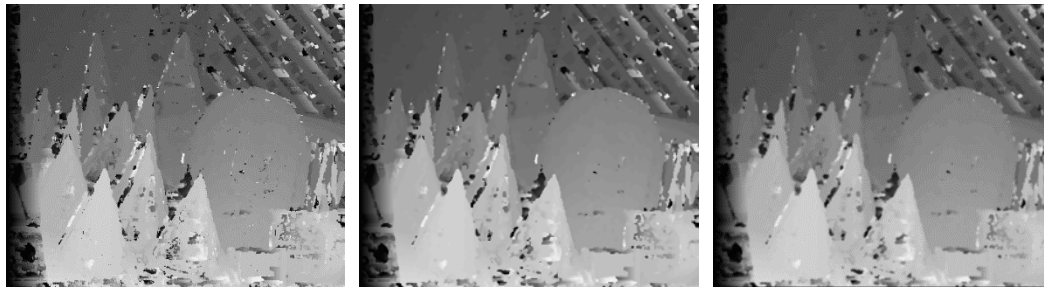
Σχήμα 6.27. Διάγραμμα μέσων όρων διαφορών παράλλαξης απ συνταύτιση σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank (μέθοδος συνταύτισης: SAD).

6.1.5 Εξομάλυνση των αποτελεσμάτων της συνταύτισης

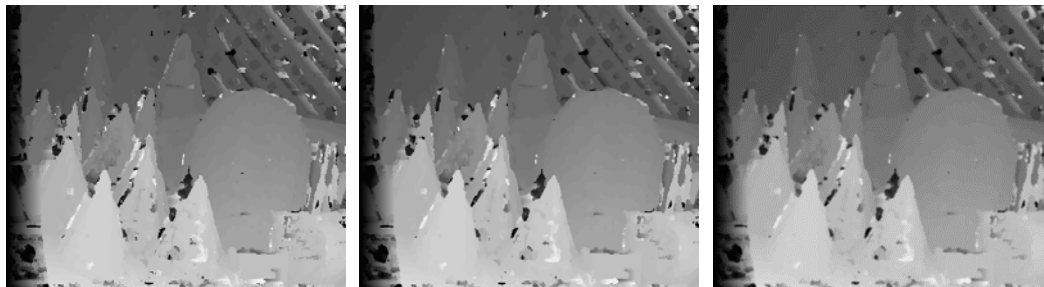
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα αποτελέσματα της συνταύτισης σκόπιμο είναι να τα επεξεργαστεί κανείς προκειμένου να απομακρύνει χονδροειδή σφάλματα και να εξομαλύνει τις τιμές της παράλλαξης. Η εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης είναι ένα τέτοιο μέσον. Εδώ χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα μεσαίας τιμής και μέσου όρου (ενότητες 5.3 και 5.2, αντίστοιχα). Στην θέση του δεύτερου θα μπορούσε να είχε δοκιμαστεί και φίλτρο Gauss.

6.1.5.1 Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από την μέθοδο συνταύτισης SAD

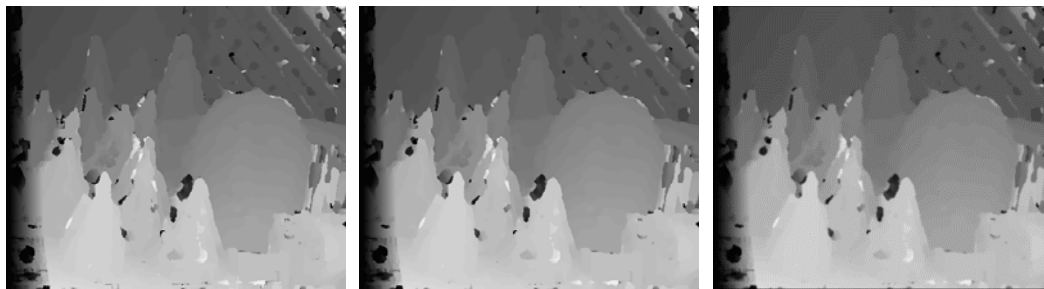
Στους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν με βάση το κριτήριο των απόλυτων διαφορών εφαρμόστηκε φίλτρο μεσαίας τιμής 3×3 , με σκοπό την απομάκρυνση του μεμονωμένου θορύβου (τύπου “αλατοπίπερο”) που προκαλείται από τις λανθασμένες ομολογίες σημείων κατά τη διαδικασία της συνταύτισης. Κατόπιν, μετά από εφαρμογή του φίλτρου μεσαίας τιμής, εφαρμόστηκε φίλτρο μέσου όρου 3×3 με σκοπό την γενικότερη εξομάλυνση του χάρτη των ψηφιακών παραλλάξεων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 6.28.



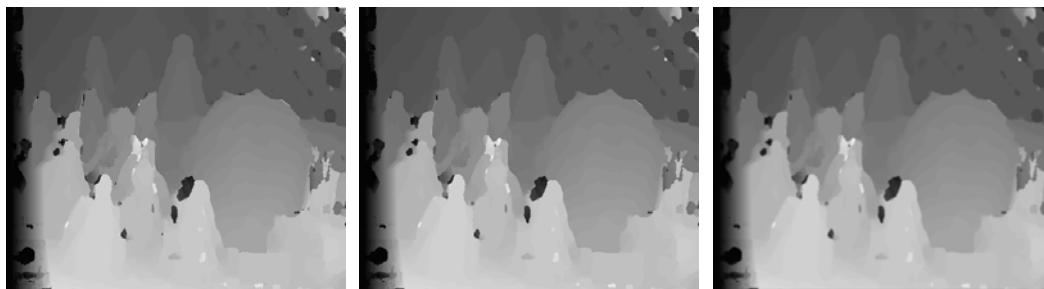
(α)



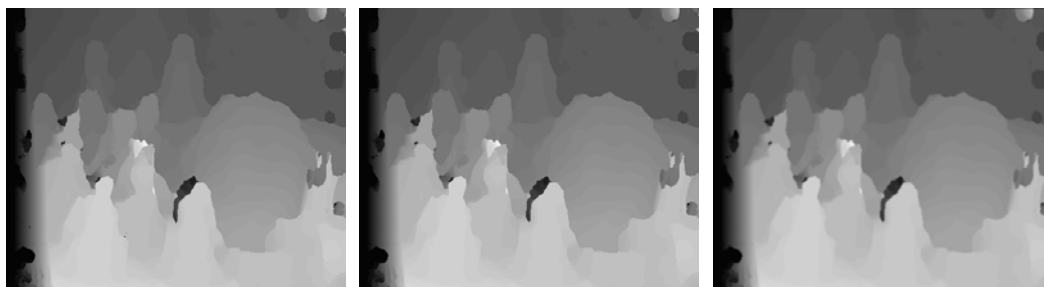
(β)



(γ)



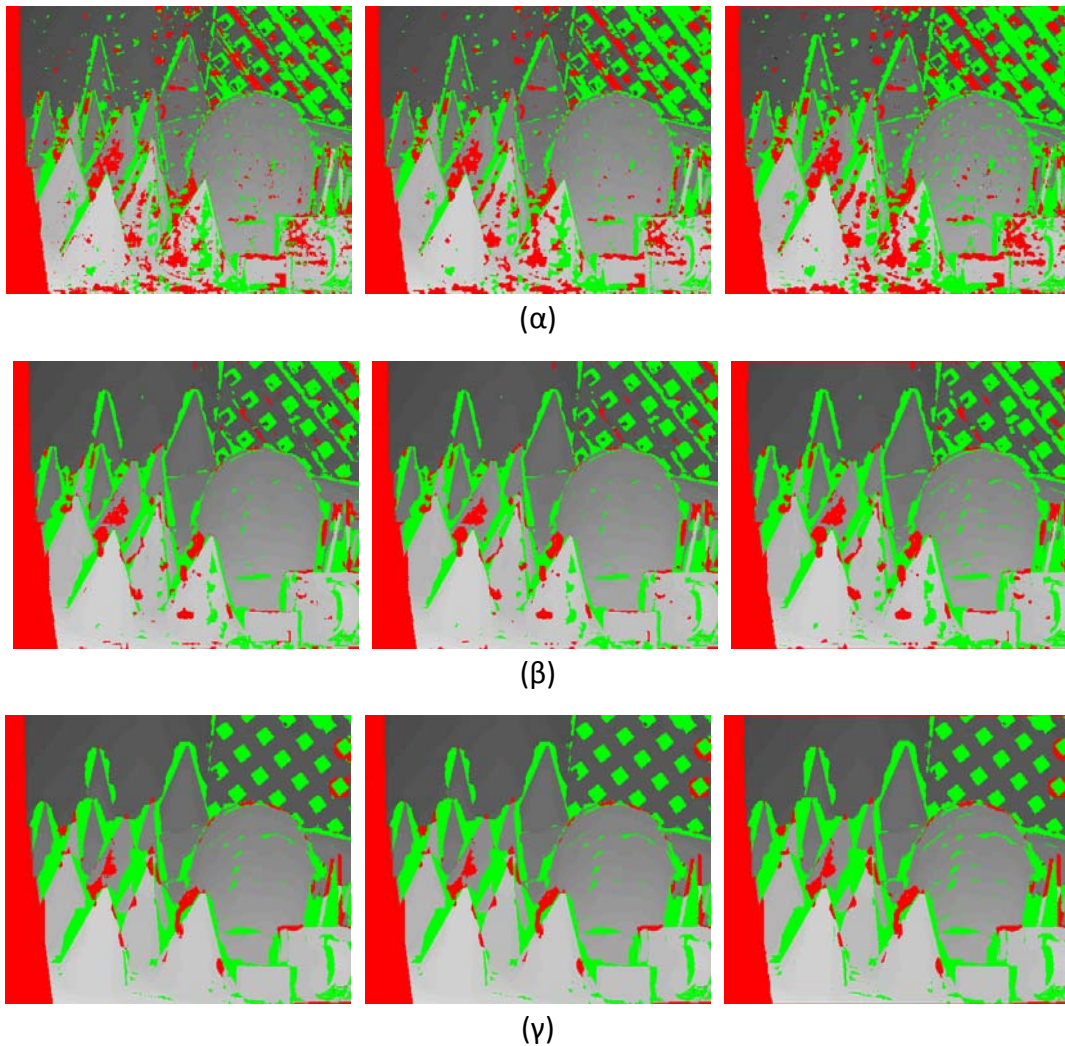
(δ)



(ε)

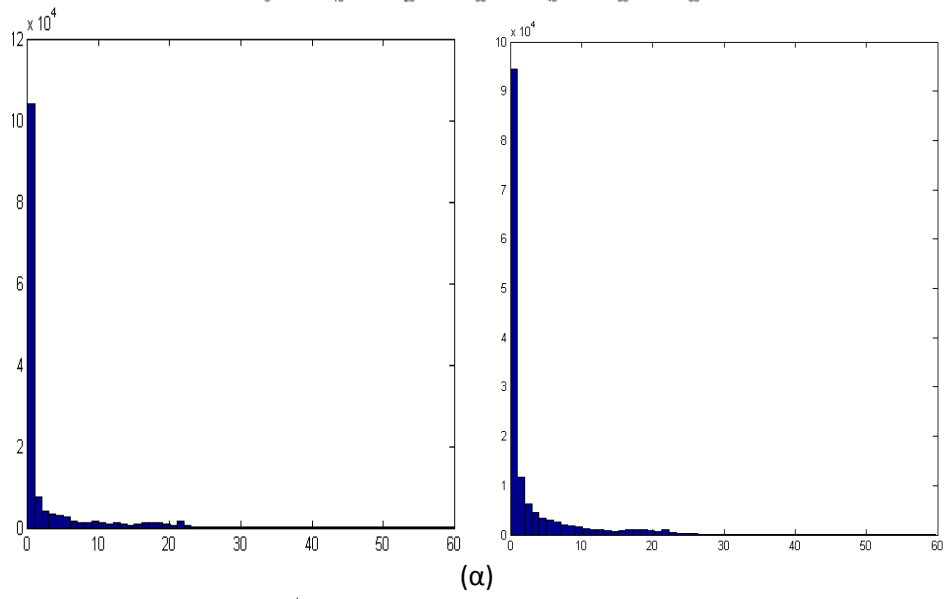
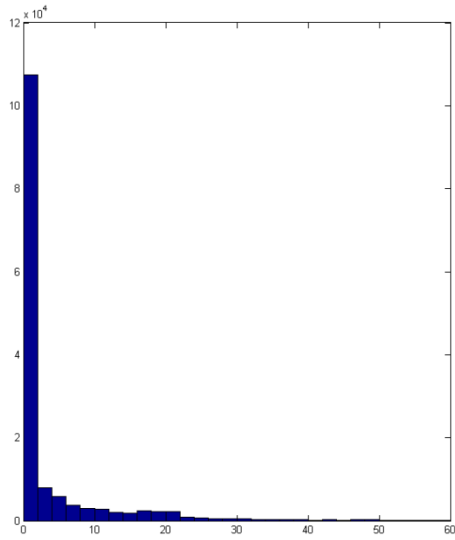
Σχήμα 6.28. Χάρτες παράλλαξης από την εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών (SAD) και εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής (μέσον) και φίλτρου μέσου όρου (δεξιά) για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 7×7 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 , (ε) 21×21 .

Οι εικόνες των διαφορών παράλλαξης οι οποίες προέκυψαν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με ορισμένους από τους χάρτες του Σχ. 6.28 παρουσιάζονται στο Σχ. 6.29.

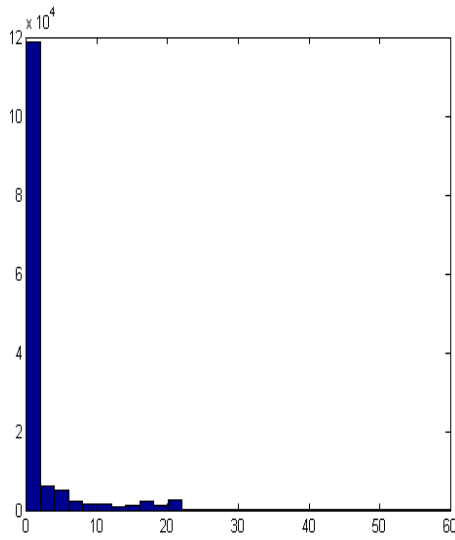


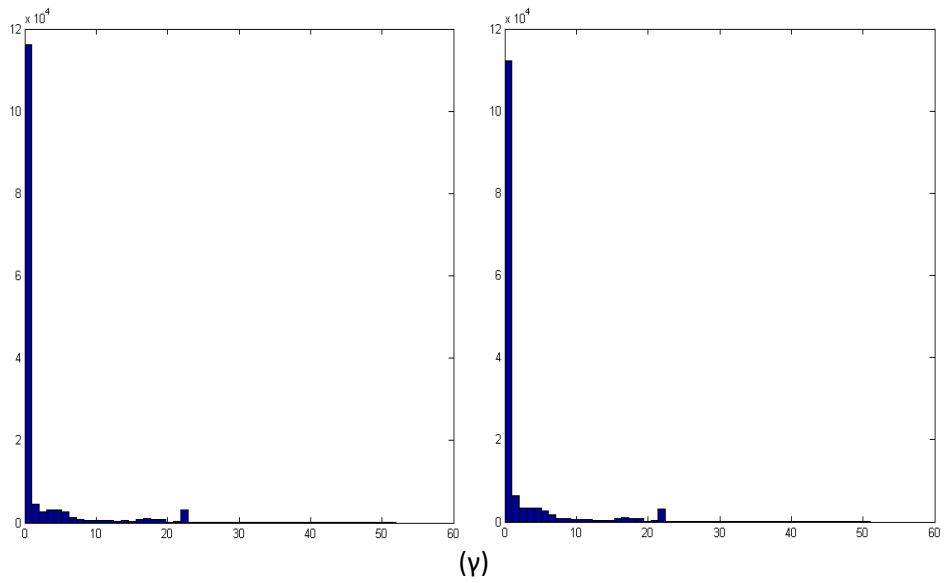
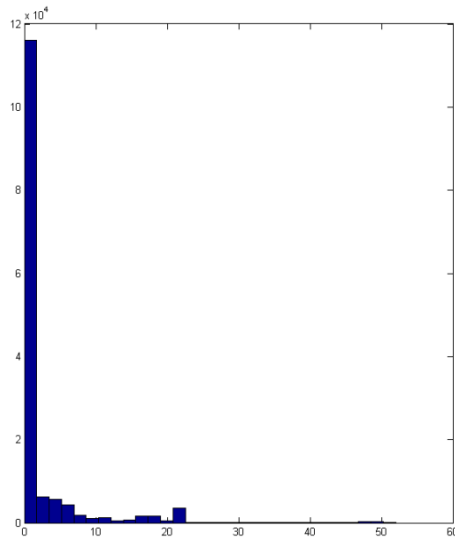
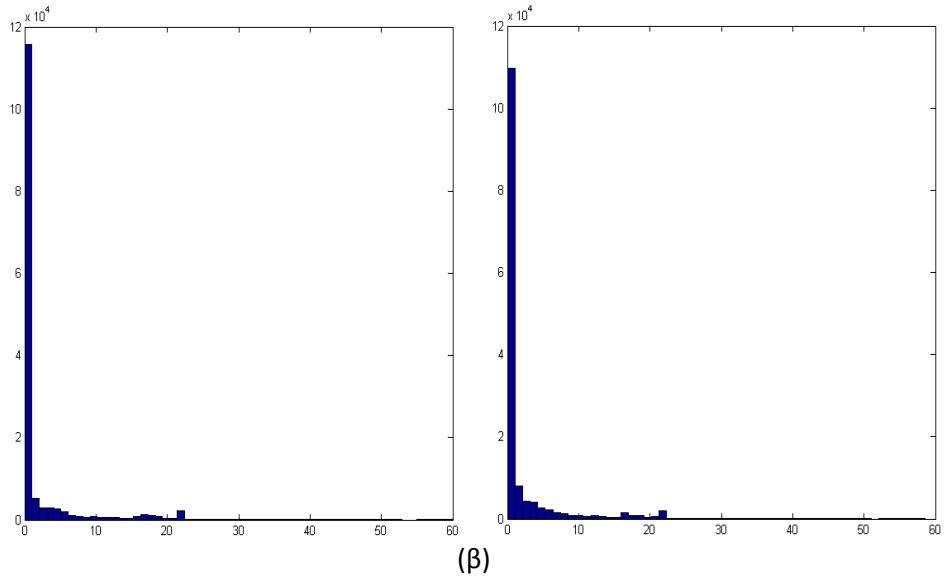
Σχήμα 6.29. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου SAD και την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής (μέσον) και φίλτρου μέσου όρου (δεξιά) για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 , (γ) 21×21 .

Στη συνέχεια φαίνονται ενδεικτικά (Σχ. 6.30) ορισμένα ιστογράμματα από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες του Σχ. 6.28. Στον Πίνακα 6.7 φαίνονται, όπως στα προηγούμενα, τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών.



(α)





Σχήμα 6.30. Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο των απόλυτων διαφορών με εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και φίλτρο μέσου όρου για παράθυρο: (α) 5×5, (β) 11×11, (γ) 21×21.

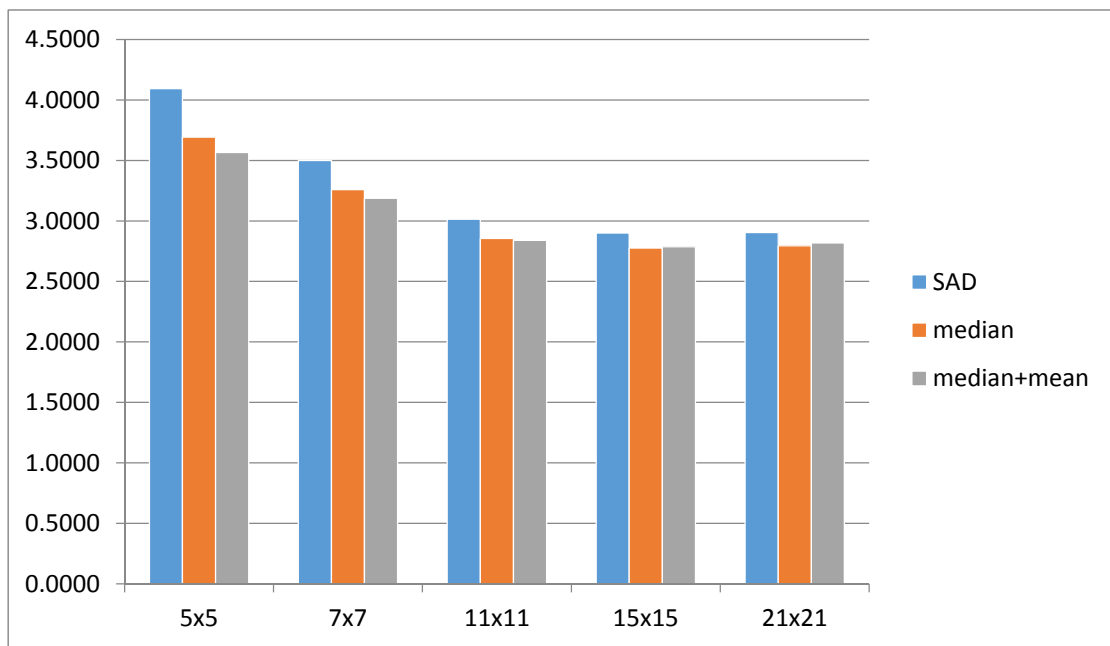
Πίνακας 6.7. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)									
$m \times n$	SAD			Φίλτρο μεσαίας τιμής			Φίλτρο μέσου όρου		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	4.09	7.56	71.92	3.69	7.15	71.16	3.57	6.56	70.88
7×7	3.50	6.88	76.40	3.26	6.68	75.23	3.19	6.26	74.99
11×11	3.01	6.22	80.12	2.86	6.16	78.96	2.84	5.93	78.93
15×15	2.90	6.04	81.27	2.78	6.02	80.07	2.79	5.89	80.16
21×21	2.90	5.92	80.58	2.79	5.93	79.22	2.82	5.87	79.32

Από τα δεδομένα του Πίνακα 6.7 παρατηρείται πως με την εφαρμογή του φίλτρου μεσαίας τιμής βελτιώνονται οι τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης, αλλά παράλληλα μειώνονται ελαφρώς τα ποσοστά των εικονοψηφίδων με διαφορά παράλλαξης μικρότερη των 2 pixel. Η εφαρμογή του φίλτρου μεσαίας τιμής έπεται της διαδικασίας της συνταύτισης με σκοπό την εξάλειψη αναντιστοιχιών που προκύπτουν κατά τη διαδικασία αυτή, αλλά και το “γέμισμα” κενών που μπορεί να δημιουργηθούν λόγω ύπαρξης περιοχών αποκρύψεων. Για την εξάλειψη των αναντιστοιχιών που προκύπτουν, το φίλτρο μεσαίας τιμής αντλεί άμεσα πληροφορία από τα γειτονικά pixel, γεγονός που οδηγεί στη βελτίωση του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης των διαφορών. Όπως είναι λογικό όμως, υπάρχει και ένα μικρό ποσοστό σωστών αντιστοιχιών που ελαφρώς “χαλάει”, μειώνοντας έτσι το ποσοστό των διαφορών των εικονοψηφίδων με τιμή μικρότερη των 2 pixel.

Από τον Πίνακα 6.7 προκύπτει επίσης ότι η εφαρμογή του φίλτρου μέσου όρου γενικά δεν επηρεάζει τις τιμές του μέσου όρου. Το γεγονός αυτό εξηγείται, ίσως, αν σκεφτεί κανείς ότι σε περιοχές ακμών το φίλτρο παρεμβάλλει νέες τιμές για τις εικονοψηφίδες των ακμών, δημιουργώντας έτσι και “θόλωμα” στην εικόνα. Η οπτική παρατήρηση των χαρτών παράλλαξης που προέκυψαν πριν και μετά από την εφαρμογή του φίλτρου μέσου όρου (Σχ. 6.28) ενισχύει την άποψη αυτή. Από την άλλη μεριά όμως, το φίλτρο εξομαλύνει περαιτέρω περιοχές με ακραίες διαφορές, για αυτό και παρατηρείται μια μικρή βελτίωση των τιμών της τυπικής απόκλισης των διαφορών των εικονοψηφίδων των χαρτών παράλλαξης από τον αληθή χάρτη. Το φιλτράρισμα υψηλών συχνοτήτων μπορεί να λειτουργεί επιβαρυντικά σε περιοχές ακμών, συντελεί όμως στη γενικότερη μείωση του θορύβου της εικόνας. Έτσι, φαίνεται ότι περιορίζονται οι εικονοψηφίδες που εμφανίζουν μεγάλες διαφορές από τον αληθή χάρτη παράλλαξης, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι αποκτούν διαφορά μικρότερη της τιμής του μέσου όρου, ώστε να συντελέσουν και στη μείωση της δικής του τιμής. Γενικά, οι μέσοι όροι και τα ποσοστά διαφορών <2 pixel δεν φαίνεται να διαφέρουν για

τα δύο φίλτρα, η συνεισφορά του φίλτρου μέσου όρου εντοπίζεται, έτσι, στην ελαφρά πτώση της διασποράς των τιμών των διαφορών.

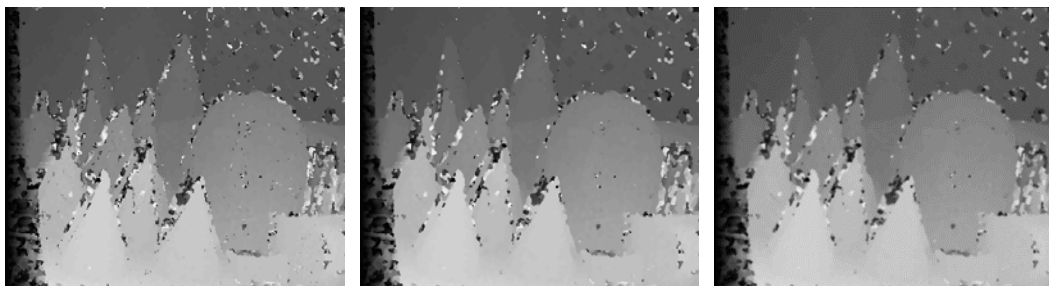
Τέλος, για αμεσότερη αξιολόγηση των τιμών του μέσου όρου που προκύπτουν από τη σύγκριση των χαρτών παραλλάξεων με και χωρίς εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και φίλτρου μέσου όρου, παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχ. 6.31 οι τιμές αυτές για κάθε ένα από τα παράθυρα που χρησιμοποιήθηκε.

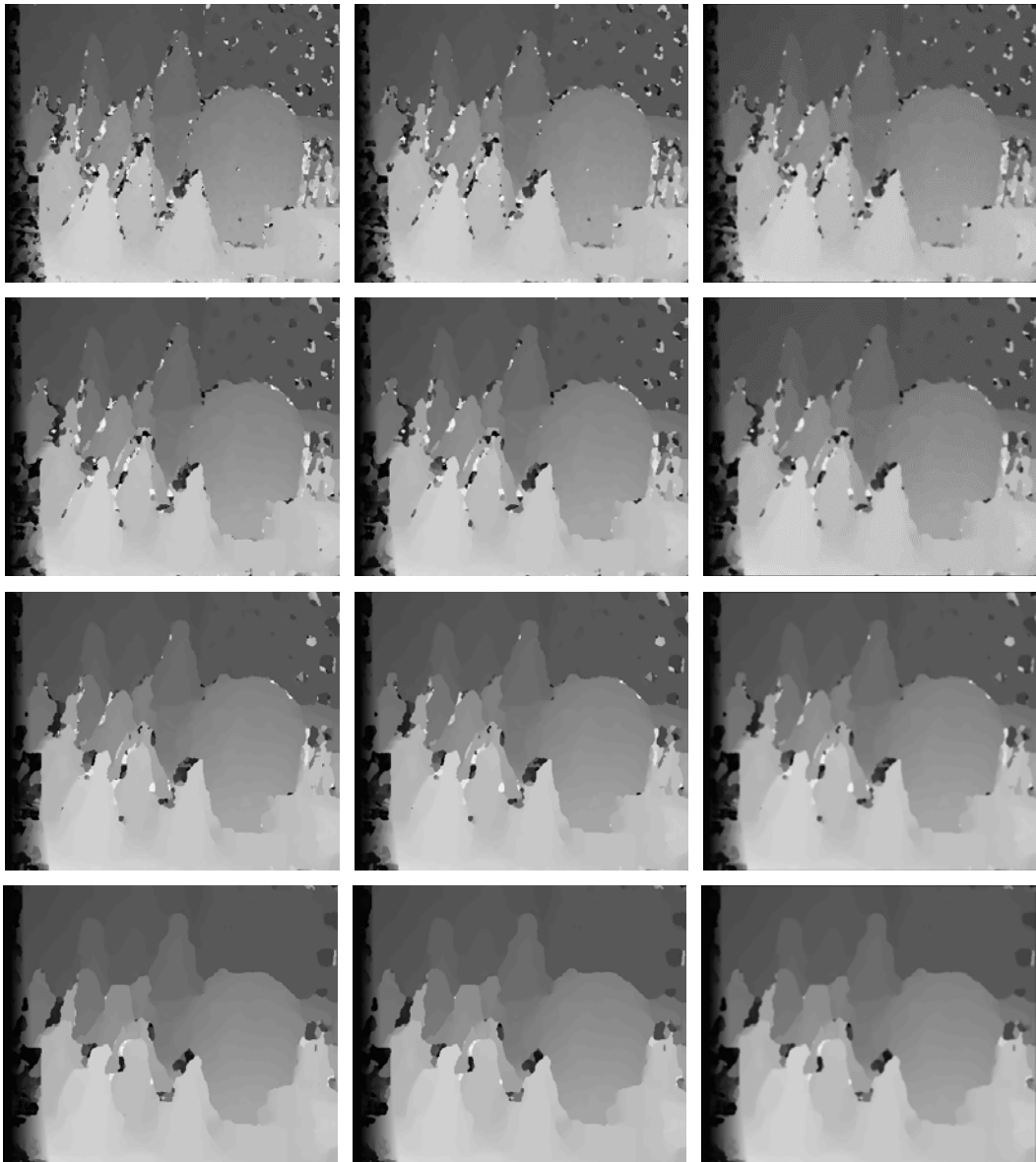


Σχήμα 6.31. Διάγραμμα μέσων όρων διαφορών παράλλαξης από τις αληθείς τιμές.

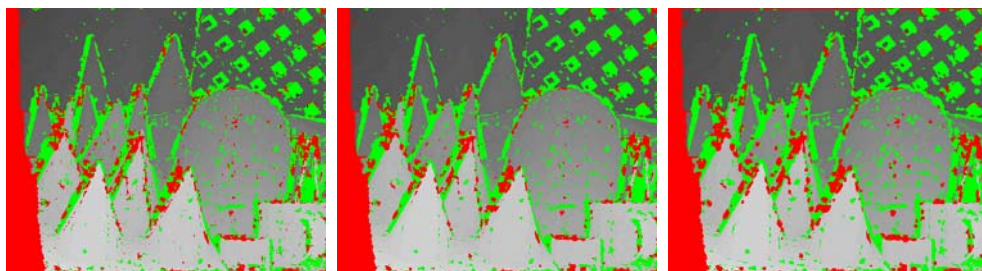
6.1.5.2 Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες κλίσης

Για τα αποτελέσματα συνταύτισης σε εικόνες κλίσης, οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν αφού είχε πρώτα εφαρμοστεί φίλτρο Gauss (ενότητα 6.1.3) υπέστησαν επεξεργασία διαδοχικά με φίλτρα μεσαίας τιμής και μέσου όρου (Σχ. 6.32).

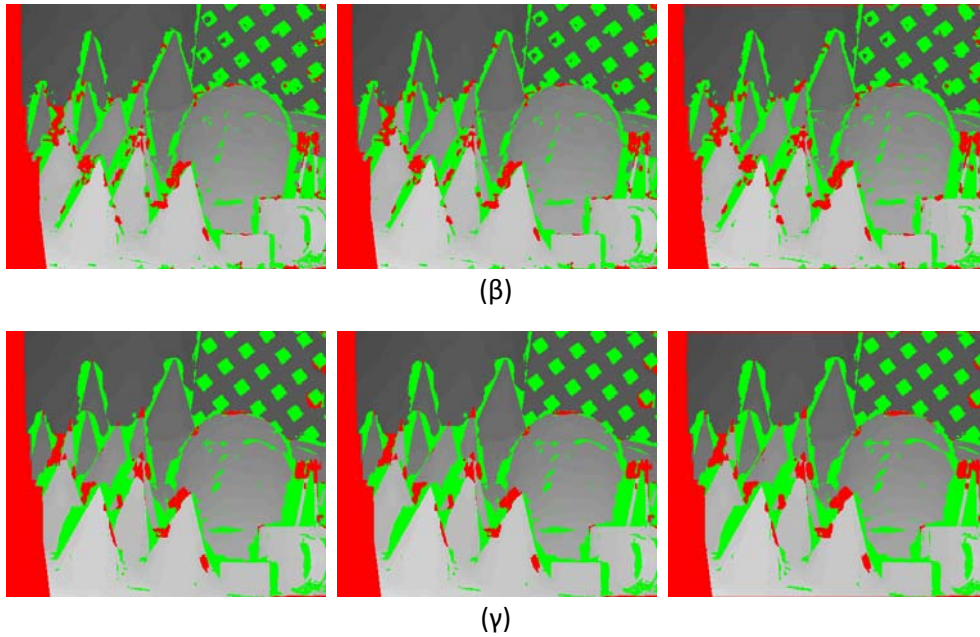




Σχήμα 6.32. Χάρτες παράλλαξης βάσει του κριτηρίου SAD για παράθυρα (από πάνω προς τα κάτω) 5×5 , 7×7 , 11×11 , 15×15 , 21×21 σε εικόνες κλίσης μετά από φιλτράρισμα Gauss (αριστερά) και εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και μέσου όρου στους χάρτες παράλλαξης. Οι εικόνες των διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με τους χάρτες αυτούς παρουσιάζονται στο Σχ. 6.33.



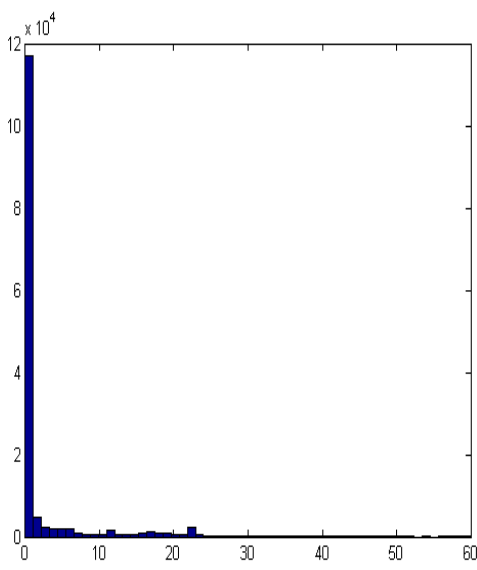
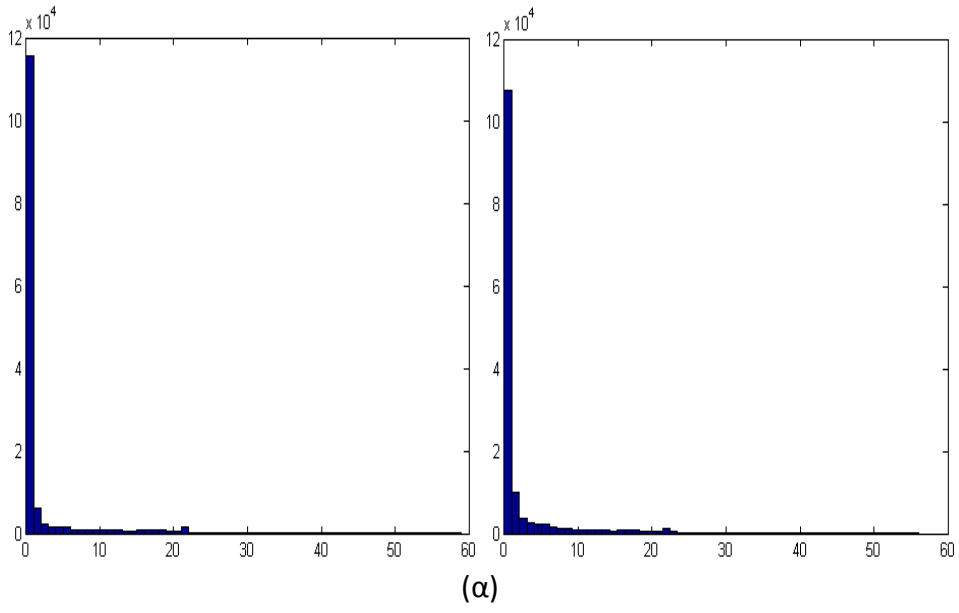
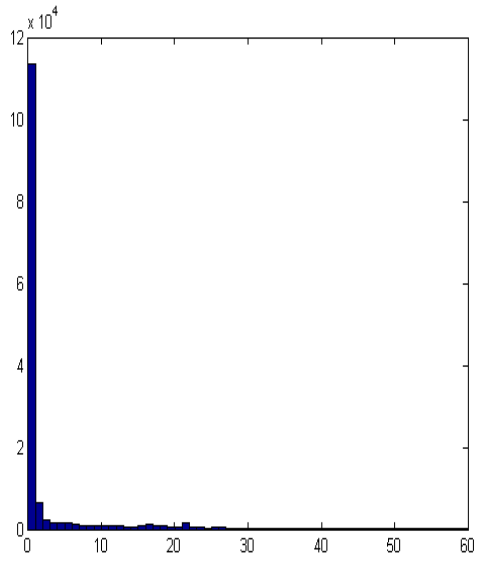
(α)

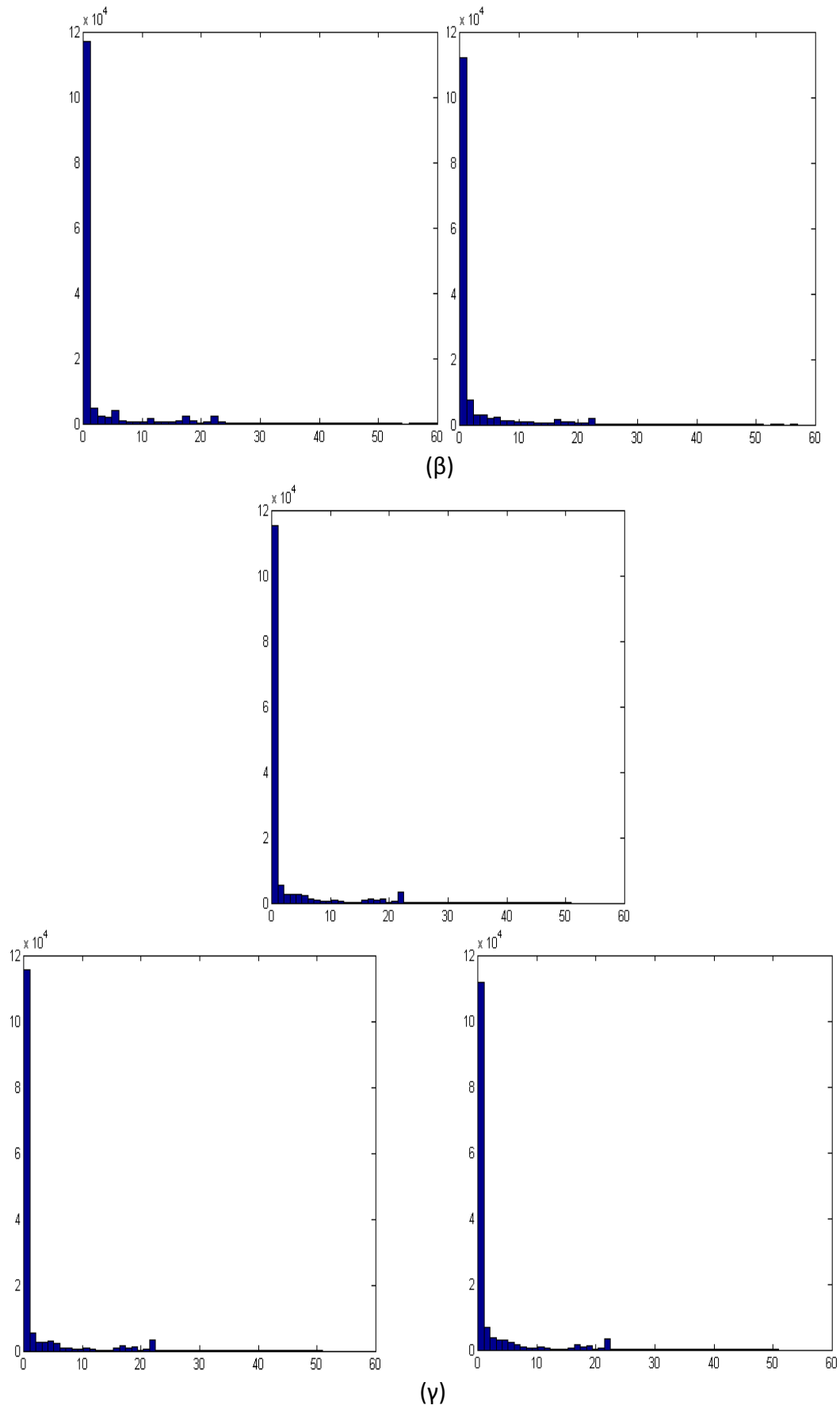


Σχήμα 6.33. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με αυτούς που προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης μετά την εφαρμογή φίλτρου Gauss και την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και φίλτρου μέσου όρου στους χάρτες παράλλαξης για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 , (γ) 21×21 .

Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένα από τα ιστογράμματα που προκύπτουν από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες που προέρχονται από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης μετά από εφαρμογή φίλτρου Gauss και εν συνεχεία εφαρμογή σε αυτούς φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου (Σχ. 6.34).

Επιπλέον, παρατίθενται τα στατιστικά στοιχεία (μέσος όρος, τυπική απόκλιση) καθώς και το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης των εικονοψηφίδων με τιμή μικρότερη από 2 pixel που προκύπτουν από τα ιστογράμματα αυτά (Πίνακας 6.8).





Σχήμα 6.34. Ιστογράμματα διαφορών από εικόνες κλίσης φιλτραρισμένες με Gauss, και με εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου. Παράθυρα: (α) 5×5, (β) 11×11, (γ) 21×21.

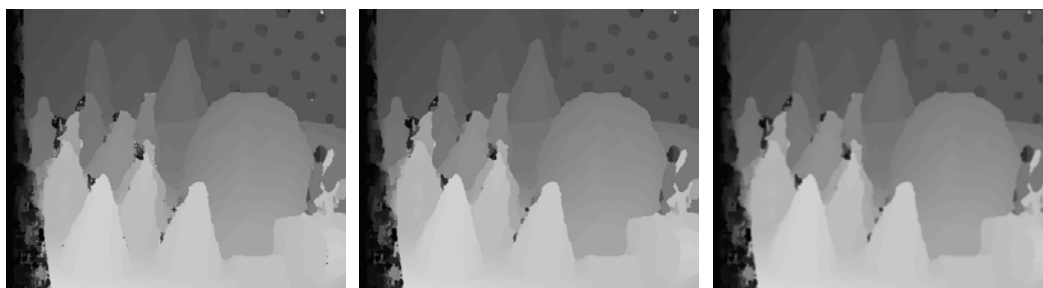
Πίνακας 6.8. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	SAD σε εικόνες κλίσης φιλτραρισμένες με φίλτρο Gauss			Φίλτρο μεσαίας τιμής			Φίλτρο μέσου όρου		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	3.52	7.54	76.65	3.22	7.00	77.54	3.11	6.41	76.82
7×7	3.28	7.17	79.70	3.14	6.90	80.03	3.08	6.46	79.27
11×11	3.13	6.80	80.33	3.08	6.69	80.46	3.04	6.37	79.92
15×15	3.02	6.54	79.92	2.99	6.47	79.97	2.99	6.27	79.51
21×21	2.90	6.15	79.08	2.89	6.12	79.11	2.91	6.02	78.77

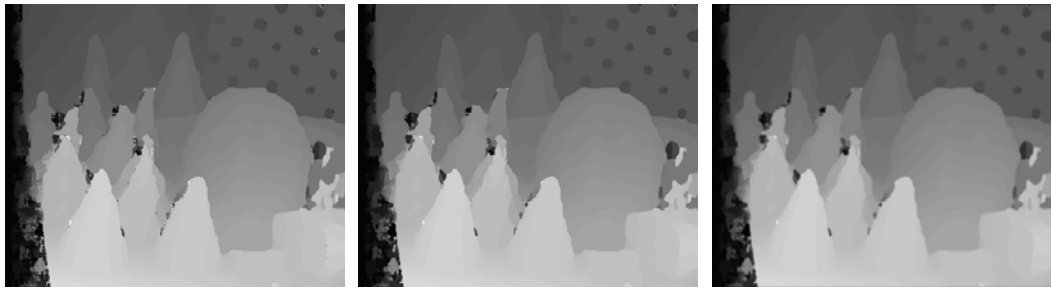
Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.8 προκύπτει ότι, όπως και προηγουμένως, η εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής στους χάρτες παράλλαξης βελτιώνει τις τιμές μέσου όρου και τυπικής απόκλισης των διαφορών, ενώ δεν μεταβάλλει ουσιαστικά το ποσοστό των σωστών συνταυτίσεων. Η εν συνεχεία εφαρμογή φίλτρου μέσου όρου επιφέρει, κυρίως, μια αισθητή πτώση των τιμών των τυπικών αποκλίσεων, αφού εξομαλύνει περαιτέρω τις ακραίες τιμές διαφορών.

6.1.5.3 Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες rank

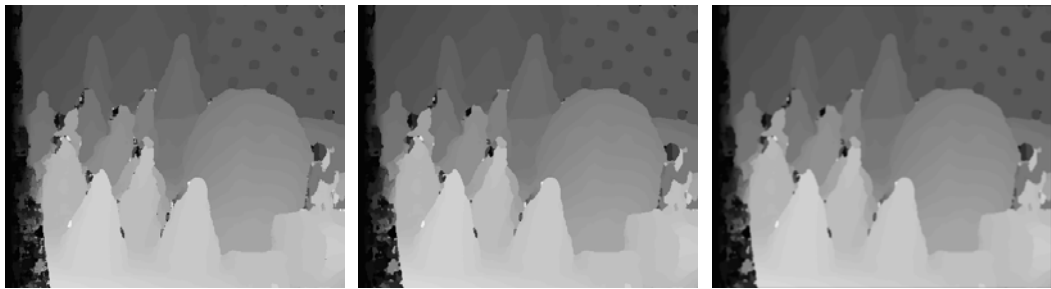
Στις εικόνες παράλλαξης που προέκυψαν βάσει του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD), αποκλειστικά για παράθυρο 15×15 , από εικόνες στις οποίες είχε προηγουμένως εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός κατάταξης rank (με παράθυρα: 7×7 , 9×9 , 11×11 , 15×15) εφαρμόστηκε φίλτρο μεσαίας τιμής 3×3 και στην συνέχεια στις νέες εικόνες παράλλαξης εφαρμόστηκε φίλτρο μέσου όρου 3×3 . Οι εικόνες παράλλαξης που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία φαίνονται στο Σχ. 6.35. Η απεικόνιση των διαφορών που προέκυψαν από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τα αποτελέσματα του Σχ. 6.35 παρουσιάζονται στο Σχ. 6.36.



(α)



(β)

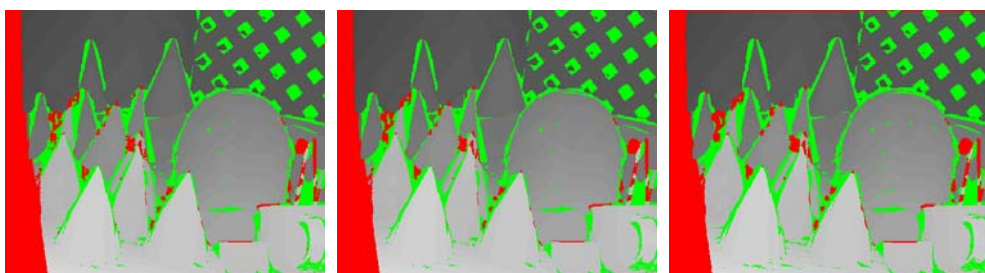


(γ)

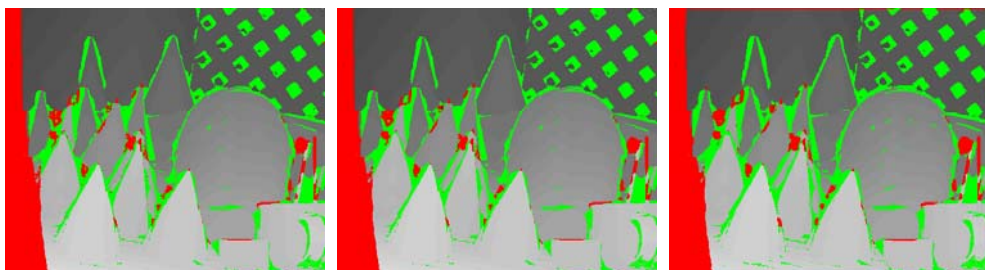


(δ)

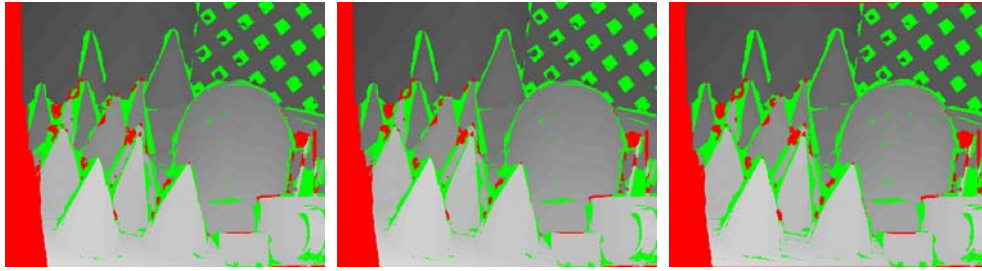
Σχήμα 6.35. Χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή κριτηρίου SAD (παράθυρο 15×15) σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank για παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 , και εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής (μέσον) και μέσου όρου (δεξιά).



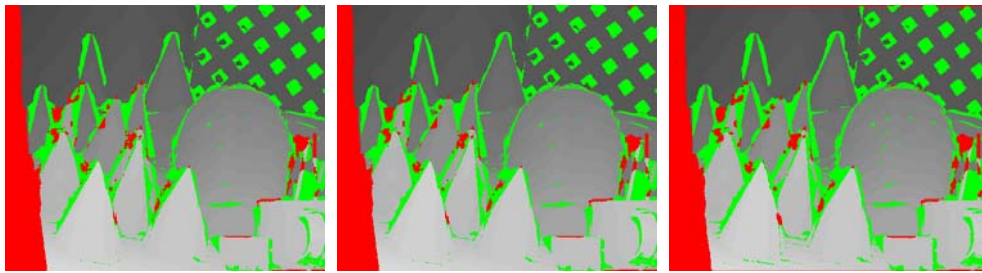
(α)



(β)



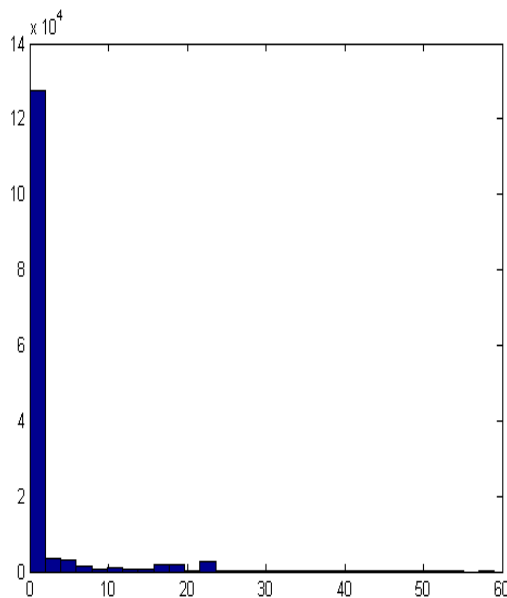
(γ)

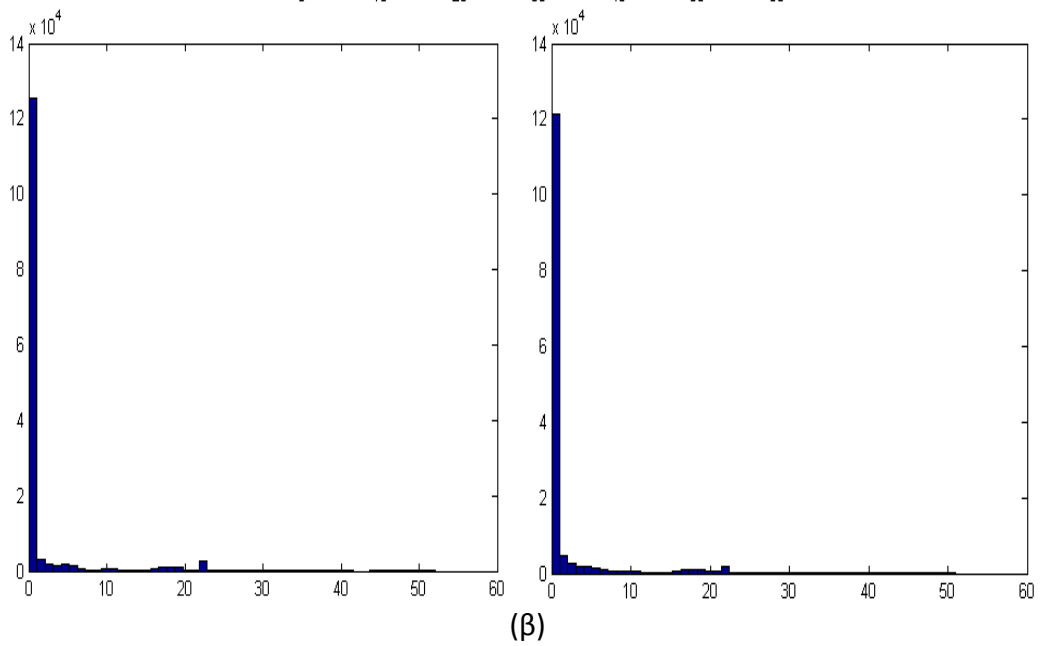
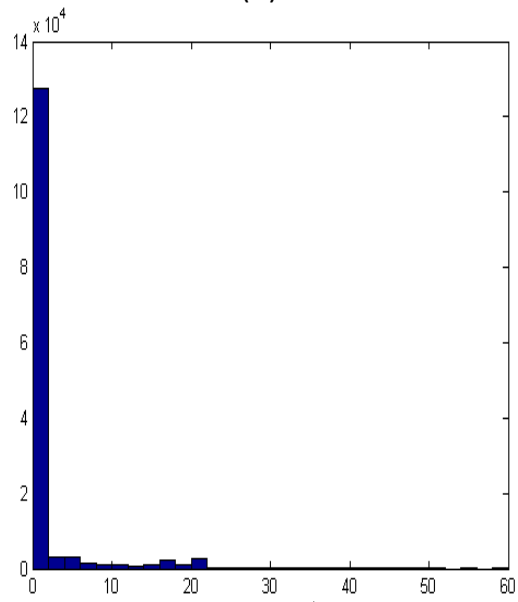
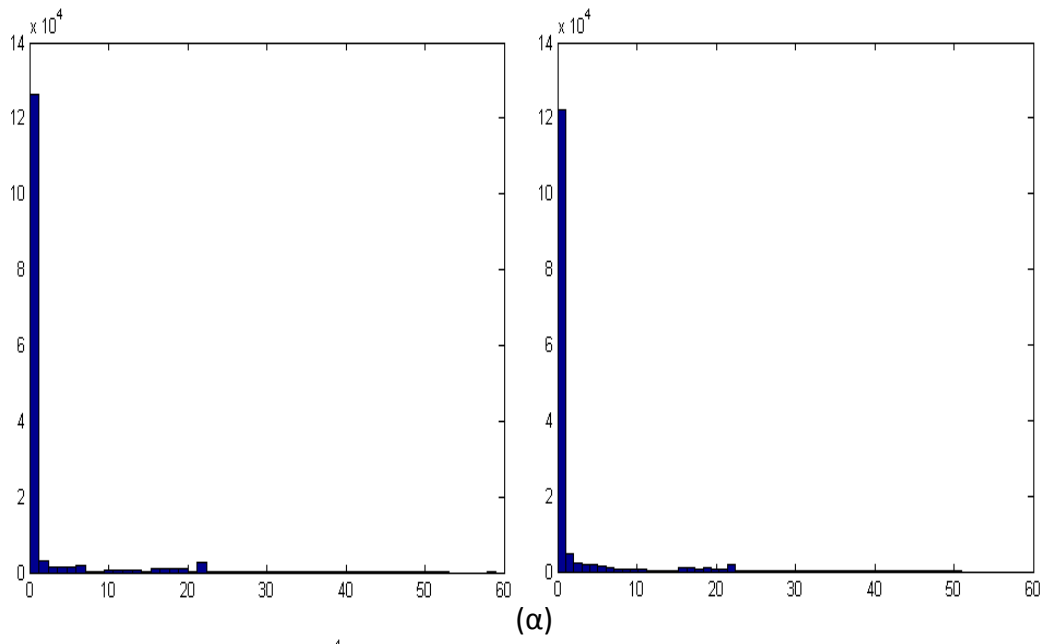


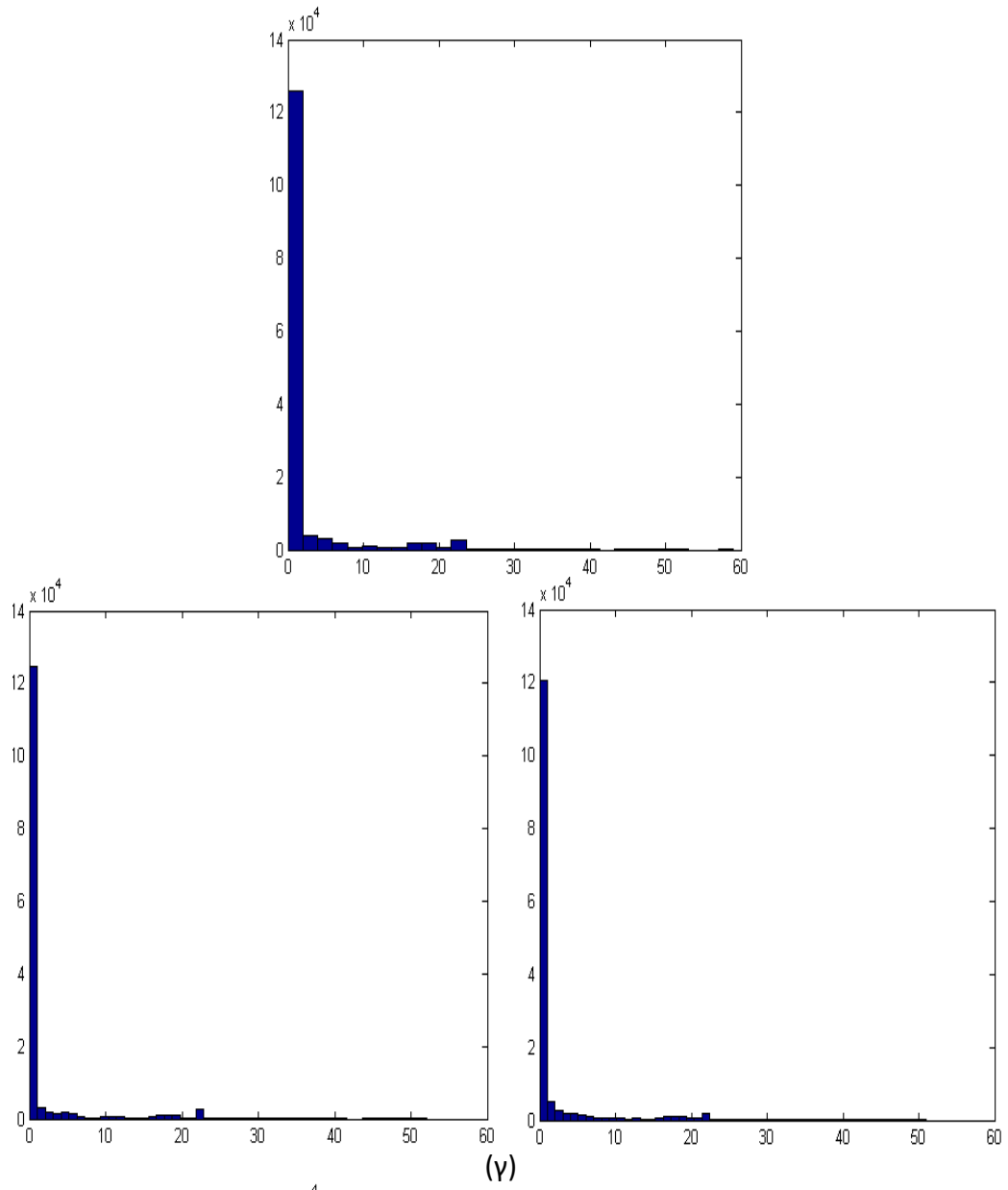
(δ)

Σχήμα 6.36. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από εφαρμογή κριτηρίου SAD (παράθυρο 15×15) σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank για παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 , και εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής (μέσον) και μέσου όρου (δεξιά).

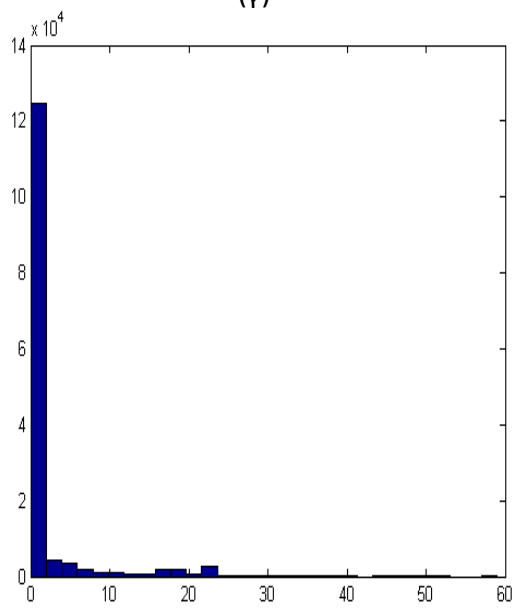
Στο Σχ. 6.37 παρατίθενται ιστογράμματα της σύγκρισης του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε μια από τις εικόνες παράλλαξης του Σχ. 6.35, ενώ ο Πίνακας 6.9 περιλαμβάνει τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών και τα ποσοστά τους με τιμή μικρότερη από 2 pixel.

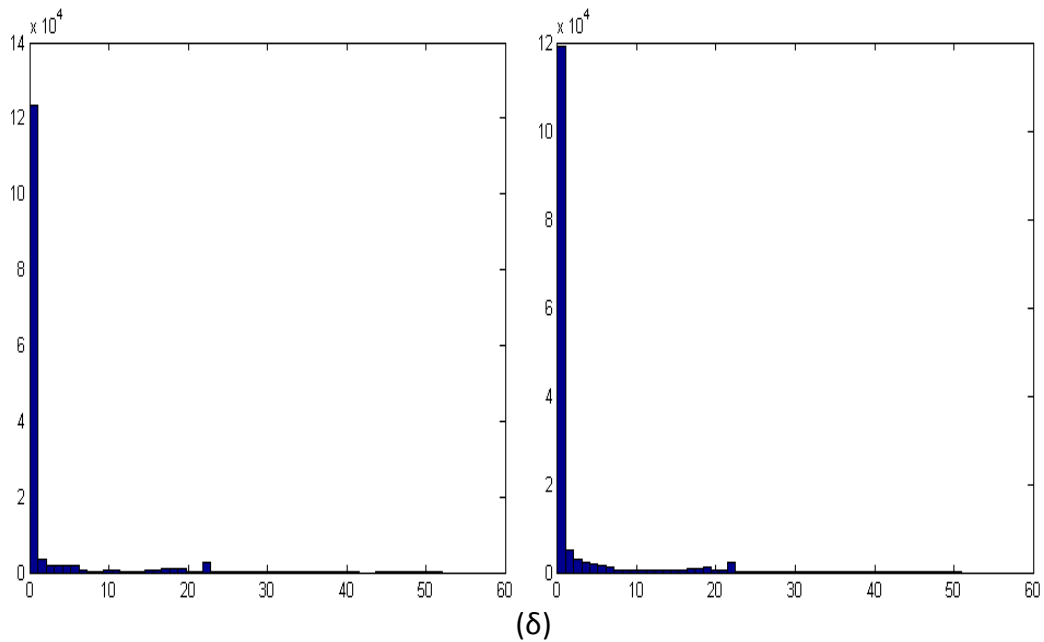






(v)





Σχήμα 6.37 Ιστογράμματα που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε έναν από τους χάρτες παράλλαξης του Σχ. 6.35 για παράθυρα rank: (α) 7×7, (β) 9×9, (γ) 11×11, (δ) 15×15).

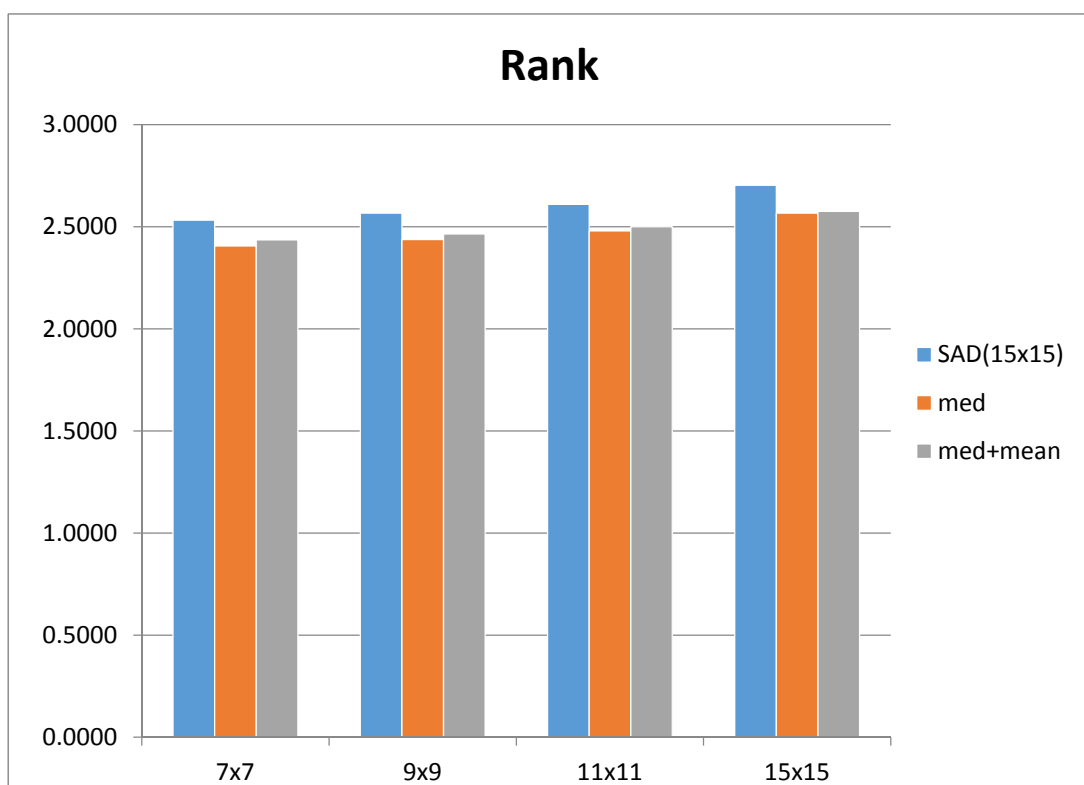
Πίνακας 6.9. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από τις αληθείς για παράθυρο 15×15 (μ: μέσος όρος, σ: τυπική απόκλιση, π[-1, 1]: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

Παράθυρο rank	SAD			Φίλτρο μεσαίας τιμής			Φίλτρο μέσου όρου		
	μ	σ	π[-1, 1]	μ	σ	π[-1, 1]	μ	σ	π[-1, 1]
7×7	2.53	5.53	87.15	2.41	5.51	85.80	2.44	5.44	85.23
9×9	2.57	5.56	86.64	2.44	5.54	85.80	2.46	5.47	84.78
11×11	2.61	5.62	86.16	2.48	5.59	85.27	2.50	5.50	84.33
15×15	2.70	5.78	85.25	2.57	5.73	84.32	2.58	5.60	83.38

Στον Πίνακα 6.9 παρατηρείται μικρή βελτίωση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης λόγω εφαρμογής του φίλτρου μεσαίας τιμής. Όπως έχει αναφερθεί, το φίλτρο αυτό αντλεί άμεση πληροφορία από τις γειτονικές εικονοψηφίδες με σκοπό την εξάλειψη των αναντιστοιχιών που προκύπτουν από τη διαδικασία της συνταύτισης. Αυτός είναι ίσως ο λόγος που κατά την εφαρμογή του παρουσιάζεται μικρή μείωση των ποσοστών των διαφορών με τιμή μικρότερη από 2 ρικελ, επειδή δηλαδή μεταβάλλονται κάπως και οι σωστές τιμές παράλλαξης, πχ. σε ακμές. Με ε-

φαρμογή φίλτρου μέσου όρου παρατηρείται μικρή βελτίωση των τιμών της τυπικής απόκλισης. Σκοπός της χρήσης των φίλτρων εδώ δεν είναι τόσο η αύξηση των σωστών αντιστοιχιών όσο η μείωση των αποκλίσεων των εσφαλμένων. Συνεπώς, η ελαφρά μείωση των ποσοστών των διαφορών με τιμή μικρότερη από 2 rixel, αλλά και η μερική αύξηση της τιμής των μέσων όρων, εκτιμάται ότι εν μέρει οφείλεται σε περιοχές σωστών συνταυτίσεων όπου με τη χρήση φίλτρων προέκυψε κάπως διαφορετική τιμή.

Τέλος, για την άμεση σύγκριση των τιμών του μέσου όρου που προέκυψαν από τη σύγκριση των χαρτών παράλλαξης με και χωρίς τη χρήση φίλτρων, παρατίθεται διάγραμμα με τις τιμές αυτές (Σχ. 6.38), όπου φαίνεται η επίδραση των φίλτρων.

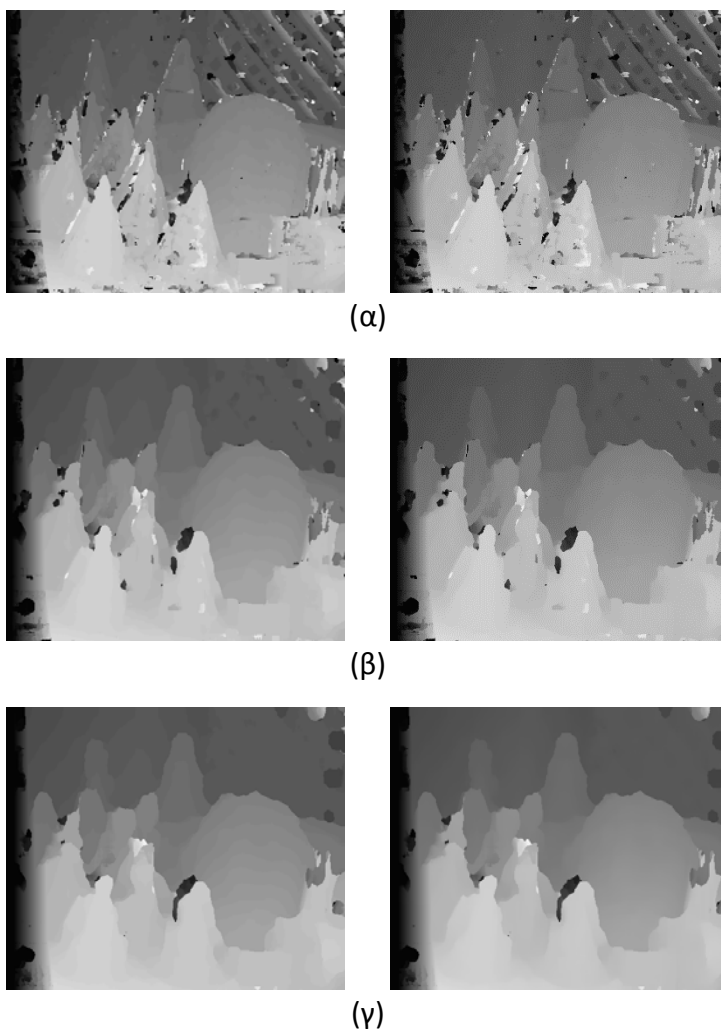


Σχήμα 6.38. Διάγραμμα των τιμών του μέσου όρου των διαφορών παράλλαξης στην περίπτωση συνταύτισης εικόνων rank και εφαρμογής φίλτρων εξομάλυνσης στον χάρτη παραλλάξεων.

6.1.6 Υποψηφιδική παρεμβολή (sub-pixel refinement)

Όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 5.1, δυνατότητα για την βελτίωση των χαρτών παράλλαξης προσφέρει η παρεμβολή πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού (παραβολής) στις διακριτές τιμές του τρισδιάστατου πίνακα κόστους (DSI), ο οποίος εξηγήθηκε στην ενότητα 3.2. Με τα ελάχιστα στοιχεία, η καμπύλη ορίζεται για κάθε rixel από την επιλεγμένη τιμή κόστους και τις τιμές κόστους που αντιστοιχούν στην αμέσως μικρότερη

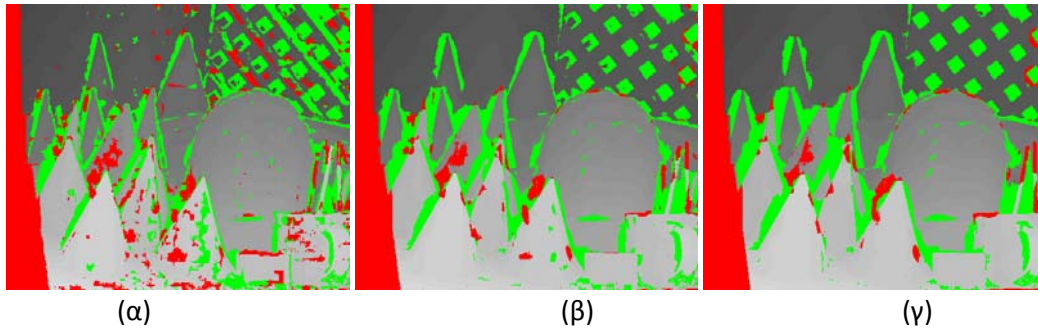
και την αμέσως μεγαλύτερη τιμή παράλλαξης. Εδώ, η καμπύλη παρεμβλήθηκε στον πίνακα κόστους που είχε προκύψει με βάση το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 6.39. Η παρεμβολή πραγματοποιήθηκε με σκοπό την επίτευξη ακρίβειας στον προσδιορισμό της παράλλαξης καλύτερη του ρικελ. Η υποψηφιακή εκτίμηση της παράλλαξης πραγματοποιήθηκε για τις τιμές παράλλαξης που προέκυψαν για διαστάσεις παραθύρου 7×7 , 15×15 και 21×21 .



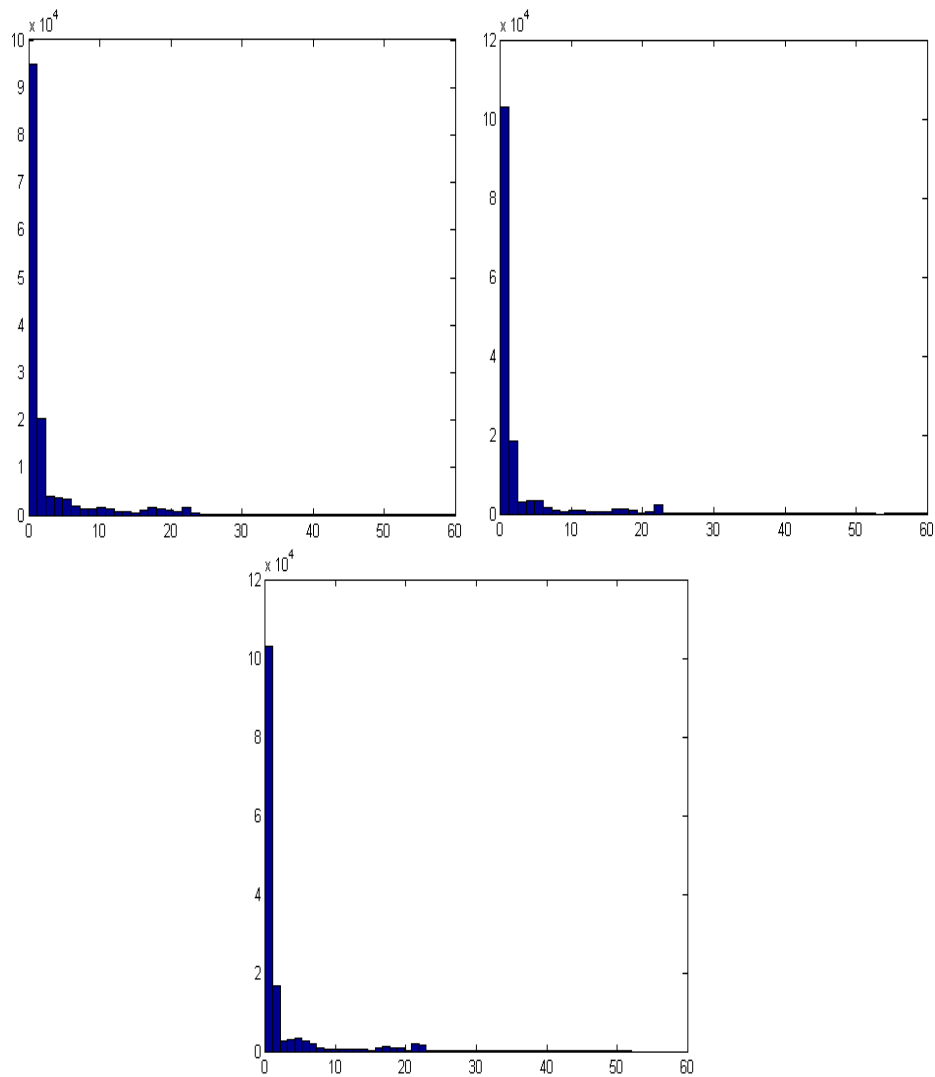
Σχ. 6.39. Χάρτες παράλλαξης με βάση το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (αριστερά) και αποτέλεσμα παρεμβολής πολυωνύμου με σκοπό την υποψηφιακή εκτίμηση της παράλλαξης (δεξιά) για παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 15×15 , και (γ) 21×21 .

Για τις εικόνες αυτές έγινε σύγκριση με τον αληθή χάρτη, από την οποία προέκυψαν οι εικόνες διαφορών που φαίνονται στο Σχ. 6.40. Καθώς τα έως τώρα αποτελέσματα προέρχονταν από μεθόδους συνταύτισης που δίνουν παραλλάξεις στο επίπεδο του ακέραιου ρικελ, οι απόλυτες διαφορές παράλλαξης 0 ή 1 από τις αληθείς τιμές θεωρήθηκαν σωστές, ενώ με πράσινο και κόκκινο χρώμα επισημάνθηκαν (ανάλογα με το πρόσημο) οι διαφορές παράλλαξης που είχαν τιμή 2 και μεγαλύτερη. Εδώ, αντιθέτως, οι τελικές τιμές παράλλαξης έχουν δεκαδικές τιμές. Έτσι, ως σωστές θεωρή-

θηκαν οι απόλυτες τιμές διαφορών παράλλαξης $\Delta d < 1.5$, ενώ με χρώμα επισημάνθηκαν οι απόλυτες διαφορές $\Delta d \geq 1.5$.



Σχ. 6.40. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε έναν από τους χάρτες του Σχ. 6.39 (δεξιά στήλη) για παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 15×15 και (γ) 21×21 .



Σχ. 41. Ιστογράμματα διαφορών παράλλαξης των χαρτών που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών με παρεμβολή πολυωνύμου $2^{ου}$ βαθμού, για παράθυρα: 7×7 (πάνω αριστερά), 15×15 (πάνω δεξιά), 21×21 (κάτω).

Τα ιστογράμματα των διαφορών παράλλαξης που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε έναν από τους χάρτες του Σχ. 6.39 (δεξιά στήλη) παρουσιάζονται στο Σχ. 6.41. Τέλος, στον Πίνακα 6.10 συγκεντρώνονται τα βασικά στατιστικά στοιχεία των διαφορών (μέσος όρος, τυπική απόκλιση) και το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης Δd που βρίσκονται στο διάστημα $-1.5 \leq \Delta d \leq 1.5$.

Πίνακας 6.10. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1.5 < \Delta d < 1.5$)						
$m \times n$	SAD			Υποψηφιακή παρεμβολή		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
7×7	3.50	6.88	76.40	3.40	6.91	73.32
15×15	2.90	6.04	81.27	2.79	6.06	78.87
21×21	2.90	5.92	80.58	2.79	5.94	78.23

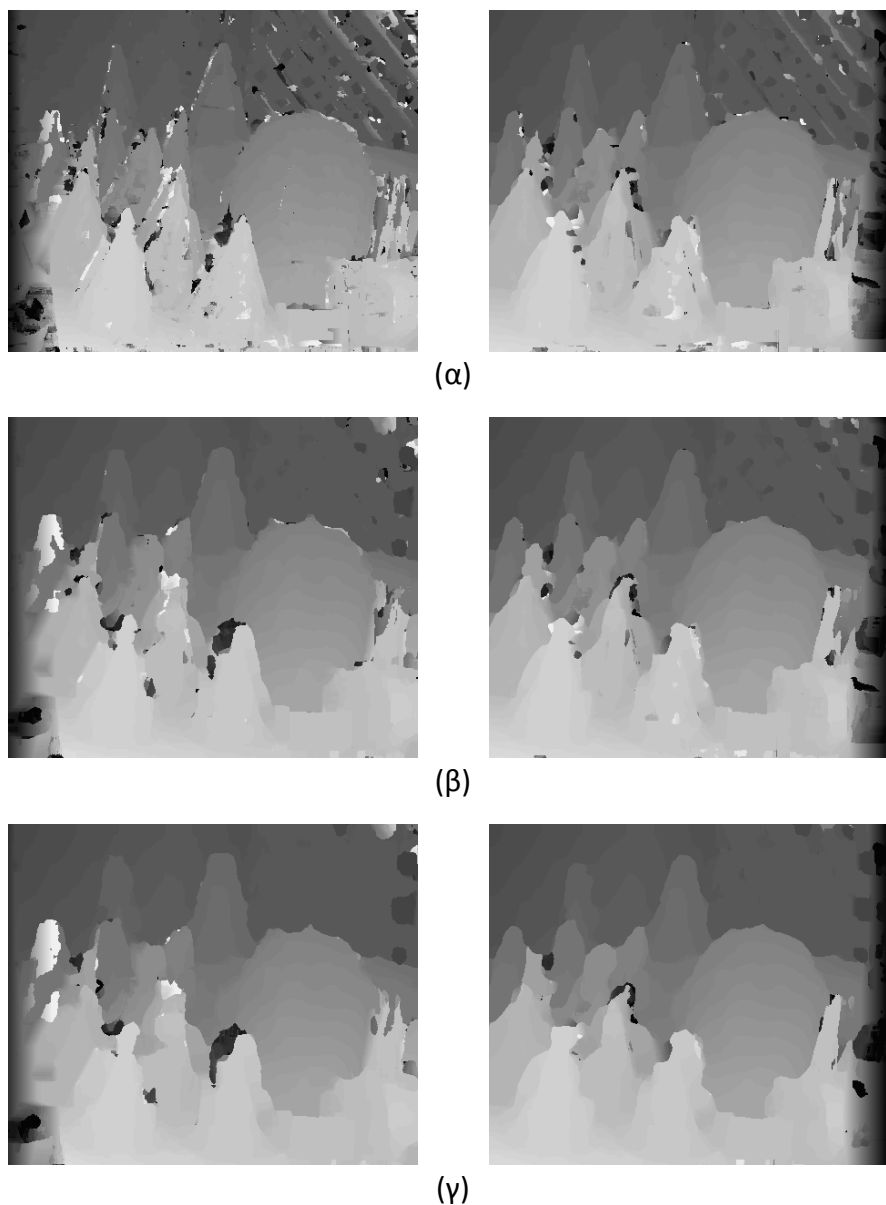
Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.10 προκύπτει ότι υπάρχει μια κάποια βελτίωση στον μέσο όρο των διαφορών. Οι μεταβολές αυτές, ωστόσο, είναι πολύ μικρές, πράγμα αναμενόμενο όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 5.1, αφού πρόκειται απλώς για υποψηφιακές μεταβολές στους χάρτες παράλλαξης, οι οποίοι πάντως αναμένεται ότι, γενικά, θα έχουν ευεργετική επίδραση στην 3D ανακατασκευή. Τα ποσοστά των σωστών pixel φαίνονται μειωμένα, αλλά τα στοιχεία αυτά δεν είναι απολύτως συγκρίσιμα αφού την μία φορά αφορούν ακέραιες τιμές και την άλλη δεκαδικές.

6.1.7 Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας

Για κάθε ένα από τα κριτήρια συνταύτισης που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα υπολογίστηκαν δύο χάρτες παράλλαξης, ένας από την αντιστοίχιση της αριστερής εικόνας (εικόνα αναφοράς) με τη δεξιά (εικόνα αντιστοίχισης) και ένας από την αντιστοίχιση της δεξιάς εικόνας με την αριστερή, με στόχο τον έλεγχο της αμφίδρομης συμβατότητας (ενότητα 5.5). Έτσι, επιλέγονται οι τιμές διαφορών παράλλαξης μόνο για όσα σημεία της εικόνας αναφοράς περνούν τον έλεγχο συμβατότητας. Τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας ελέγχου είναι, για τα αποδεκτά σημεία, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της διαφοράς της θέσης τους στην εικόνα αναφοράς σε σχέση με τον αληθή χάρτη βάθους. Επιπλέον, υπολογίζεται το ποσοστό των αποδεκτών εικονοψηφίδων στις οποίες η τιμή διαφοράς παράλλαξης είναι < 2 pixel, ενώ σχεδιάζεται και το ιστογράμματα των διαφορών αυτών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας που προέκυψαν για κάθε μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν.

6.1.7.1 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD

Για το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας έγινε για διάσταση παραθύρου 11×11 , 15×15 , 21×21 . Οι χάρτες παράλλαξης για κάθε εικόνα του στερεοζεύγους παρουσιάζονται στο Σχ. 6.42.



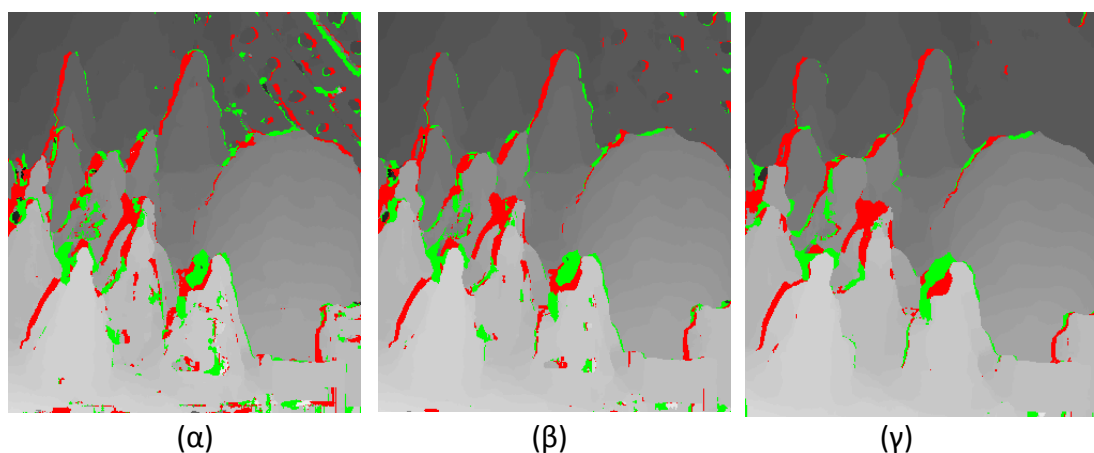
Σχήμα 6.42. Χάρτες παράλλαξης της αριστερής (αριστερά) και της δεξιάς εικόνας (δεξιά) που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 15×15 και (γ) 21×21 .

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον έλεγχο των χαρτών παράλλαξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.11, μαζί με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των αρχικά υπολογισμένων χαρτών με τον αληθή χάρτη παράλλαξης.

Πίνακας 6.11. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)							
$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
11×11	3.01	6.22	80.12	90.26	1.68	3.73	87.87
15×15	2.90	6.04	81.27	92.85	1.73	3.87	87.42
21×21	2.90	5.92	80.59	94.00	1.84	4.02	85.80

Η τέταρτη στήλη (με σκούρα στοιχεία) δείχνει το ποσοστό q των εικονοψηφίδων τα οποία περνάνε τον έλεγχο συμβατότητας, δηλαδή οι τιμές της παράλλαξής τους είναι αποδεκτές με βάση το κατώφλι που χρησιμοποιείται. Εδώ ως κατώφλι διαφοράς παράλλαξης για την αποδοχή των ομολογιών ετέθη το 1 pixel. Υπενθυμίζεται ότι οι στήλες οι αναφερόμενες στα αποτελέσματα μετά από τον έλεγχο συμβατότητας εμφανίζουν τιμές για τις διαφορές θέσης των σημείων της εικόνας αναφοράς σε σχέση τον αληθή χάρτη βάθους μόνο για όσες εικονοψηφίδες έχουν περάσει τον έλεγχο.

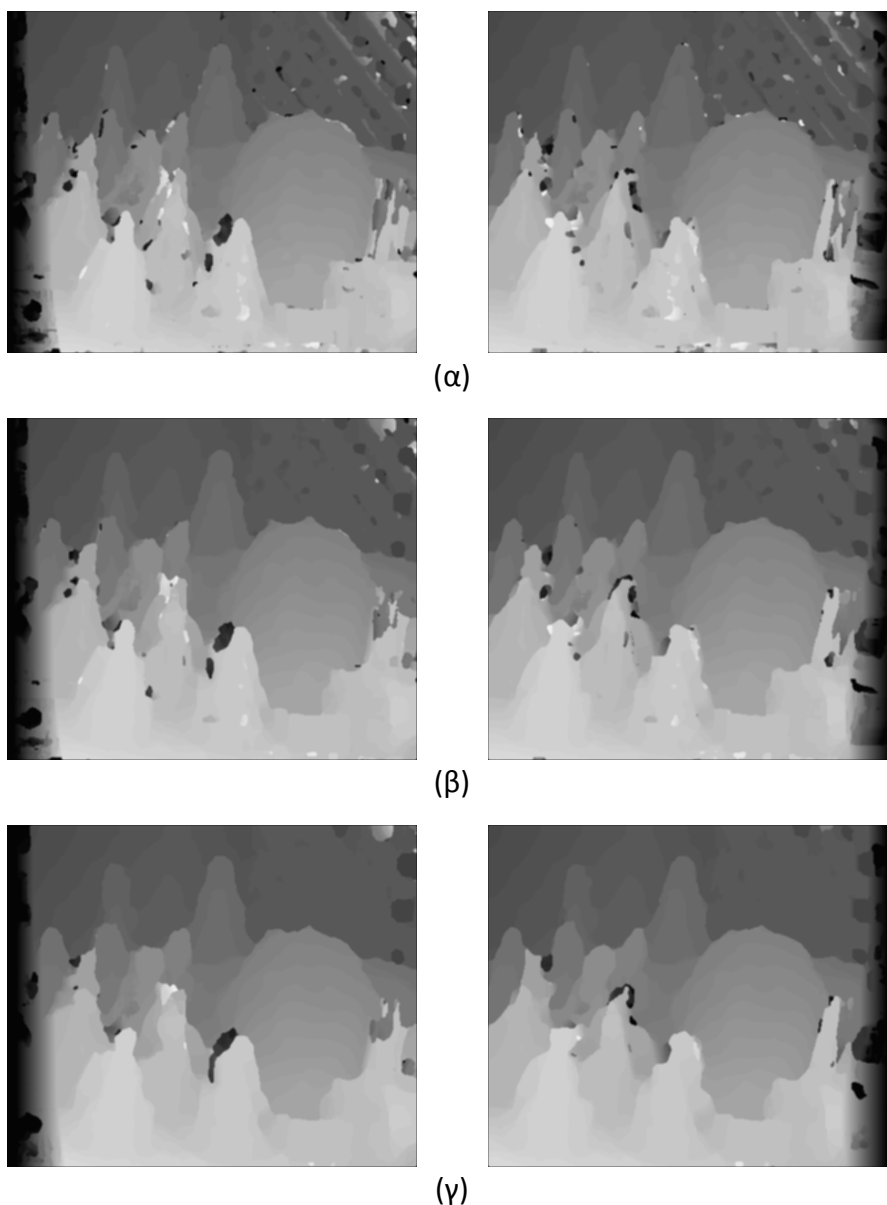
Από τον Πίνακα 6.11 είναι σαφές ότι ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας απομακρύνει περίπου 10% των παραλλάξεων οι οποίες, γενικά, είναι πράγματι εσφαλμένες, όπως φαίνεται από την θεαματική βελτίωση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης των τιμών που απομένουν, όσο και του ποσοστού των διαφορών με τιμή μικρότερη από 2 pixel. Το Σχ. 43 εμφανίζει τους χάρτες παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προήλθαν από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης, όπου διακρίνονται όσα σημεία απορρίφθηκαν κατά τον έλεγχο (τα δύο χρώματα υποδηλώνουν διαφορές πέραν του κατωφλίου με αντίθετο πρόσημο).



Σχήμα 6.43: Χάρτες παράλλαξης που εμφανίζουν τα σημεία που αποκλείστηκαν κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.

6.1.7.2 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD και εξομάλυνση

Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας πραγματοποιήθηκε και για τους φιλτραρισμένους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (ενότητα 6.1.5.1). Οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν για κάθε εικόνα του στερεοζεύγους μετά από την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και φίλτρο μέσου όρου παρουσιάζονται στο Σχ. 6.44.



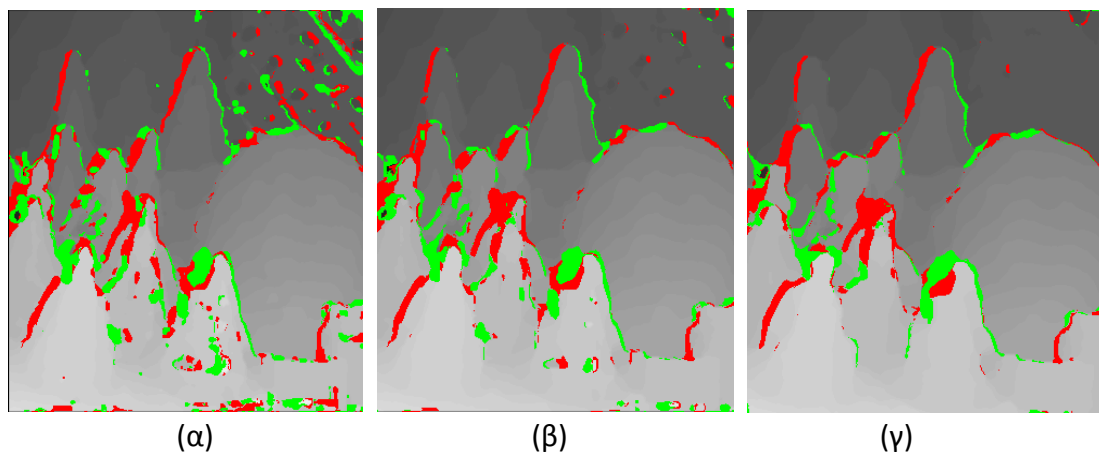
Σχήμα 6.44 Φιλτραρισμένοι χάρτες παράλλαξης της αριστερής και της δεξιάς εικόνας που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 15×15 και (γ) 21×21 .

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας των χαρτών παράλλαξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.12.

Πίνακας 6.12. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών και εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
11×11	2.84	5.93	78.93	87.16	1.57	3.49	89.48
15×15	2.79	5.89	80.16	90.76	1.69	3.77	88.50
21×21	2.82	5.87	79.32	92.25	1.83	4.02	86.62

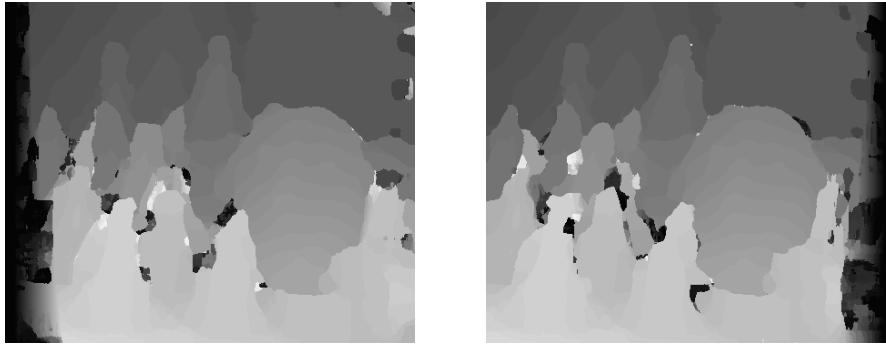
Και εδώ η βελτίωση των αποτελεσμάτων είναι εμφανής (οι τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης μειώθηκαν σχεδόν στο ήμισυ). Οι χάρτες παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προήλθαν από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης φαίνονται στο Σχ. 6.45.



Σχήμα 6.45. Χάρτες παράλλαξης που εμφανίζουν τα σημεία που αποκλείστηκαν κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.

6.1.7.3 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης

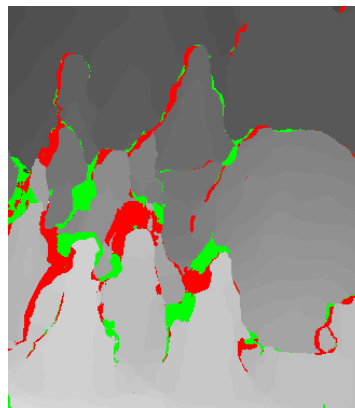
Ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας πραγματοποιήθηκε, ακόμα, για τον χάρτη παράλλαξης που προέκυψε από την εφαρμογή του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης για παράθυρο 21×21. Οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν για τις δύο εικόνες του στερεοζεύγους παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.46. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας των χαρτών παράλλαξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.13. Ο χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προέκυψε από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης παρουσιάζεται στο Σχ. 6.47.



Σχήμα 6.46. Χάρτες παράλληξης των εικόνων του στερεοζεύγους από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης (παράθυρο 21x21).

Πίνακας 6.13. Διαφορές των υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
21x21	3.17	6.52	81.18	91.92	1.75	3.96	87.83

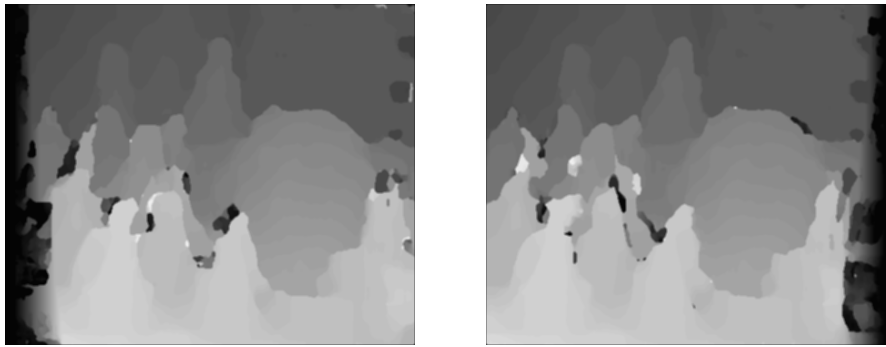


Σχήμα 6.47. Χάρτης παράλληξης αριστερής εικόνας από έλεγχο συμβατότητας.

Και στην περίπτωση αυτή παρατηρείται μείωση των τιμών σχεδόν στο ήμισυ, καθώς και αύξηση του ποσοστού των διαφορών με τιμή μικρότερη από 2 pixel.

6.1.7.4 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης με εξομάλυνση

Πριν από τη συνταύτιση των εικόνων κλίσης είχε εφαρμοστεί σε αυτές φίλτρο Gauss και μετά πραγματοποιήθηκε η συνταύτιση για παράθυρο 21x21. Στους χάρτες παράλληξης που προέκυψαν για τις δύο εικόνες του ζεύγους εφαρμόστηκε φίλτρο μεσαίας τιμής και φίλτρο μέσου όρου (Σχ. 6.48). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας φαίνονται στον Πίνακα 6.14.

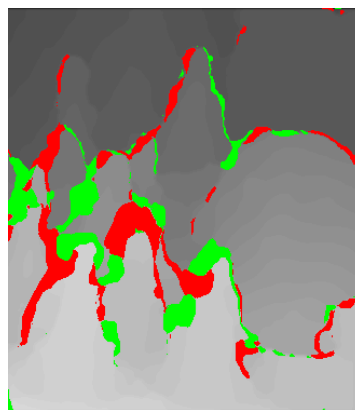


Σχήμα 6.48. Φιλτραρισμένοι χάρτες παράλλαξης των δύο εικόνων από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε φιλτραρισμένες (Gauss) εικόνες κλίσης.

Πίνακας 6.14. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης με εξομάλυνση			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
21×21	2.91	6.02	78.50	88.48	1.74	4.00	89.14

Οι αλλαγές στα αποτελέσματα είναι όπως προηγουμένως. Ο χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας μετά από τον έλεγχο συμβατότητας φαίνεται στο Σχ. 6.49.

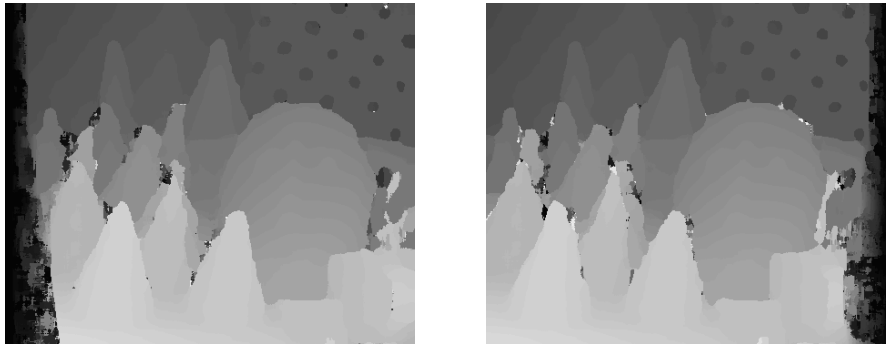


Σχήμα 6.49. Χάρτης παράλλαξης αριστερής εικόνας από έλεγχο συμβατότητας.

6.1.7.5 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank

Ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας πραγματοποιήθηκε επίσης για το χάρτη παράλλαξης που είχε προκύψει βάσει του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες μετασχηματισμένες με το φίλτρο κατάταξης rank για παράθυ-

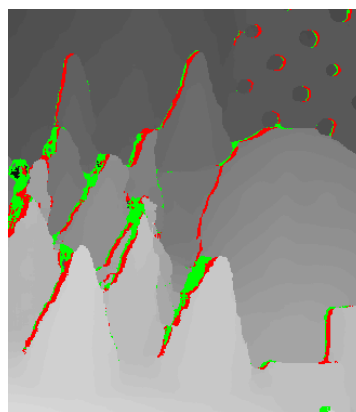
ρο 7×7. Οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν για τις εικόνες του ζεύγους για παράθυρο 15×15 φαίνονται στο Σχ. 6.50. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο των χαρτών παράλλαξης βρίσκονται στον Πίνακα 6.15. Ο χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας μετά από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης φαίνεται στο Σχ. 6.51.



Σχήμα 6.50. Χάρτες παράλλαξης από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες μετασχηματισμένες με το φίλτρο rank.

Πίνακας 6.15. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	Αθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες rank (7×7)			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
15×15	2.53	5.53	87.15	94.79	1.56	3.47	91.80



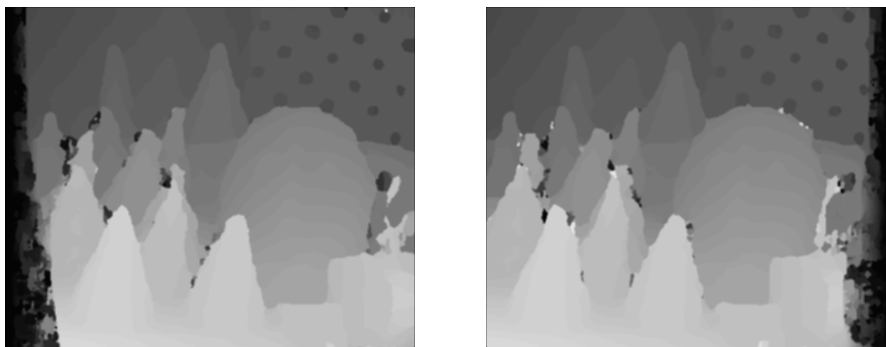
Σχήμα 6.51. Χάρτης παράλλαξης αριστερής εικόνας μετά από τον έλεγχο συμβατότητας.

Από τον Πίνακα 6.15 προκύπτει ότι και εδώ οι τιμές των αποτελεσμάτων βελτιώθηκαν σημαντικά με τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, ενώ οι τιμές που αποκλείονται εντοπίζονται στις περιοχές αποκρύψεων. Τα αποτελέσματα αυτά, όπως και ε-

κείνα της αμέσως επόμενης ενότητας, είναι τα καλύτερα από όλες τις άλλες μεθόδους.

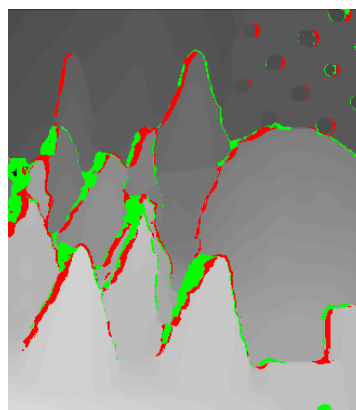
6.1.7.6 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank και εξομάλυνση

Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε, τέλος, και για τους εξομαλυμένους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες μετασχηματισμένες με το φίλτρο rank. Οι χάρτες παράλλαξης μετά από εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου φαίνονται στο Σχ. 6.52. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο των χαρτών παράλλαξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.16. Ο χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προέκυψε από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης φαίνεται στο Σχ. 6.53.



Σχήμα 6.52. Φιλτραρισμένοι χάρτες παράλλαξης των δύο εικόνων βάσει του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες μετασχηματισμένες με φίλτρο rank.

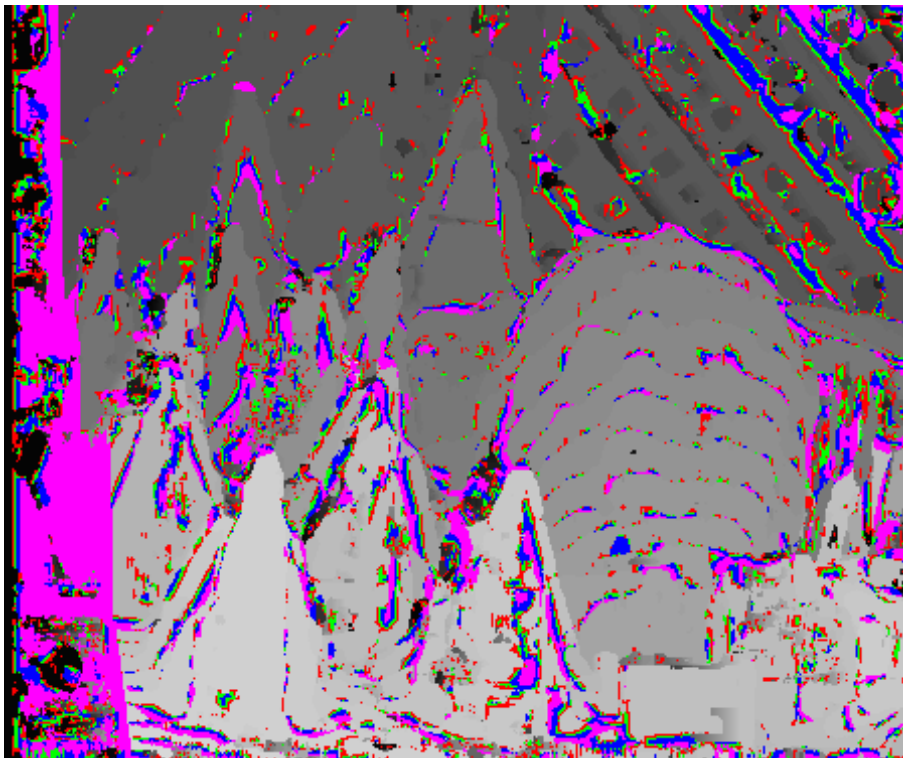
Πίνακας 6.16. Διαφορές των υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)							
$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες rank (7x7) με εξομάλυνση			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
15x15	2.44	5.44	85.23	93.75	1.56	3.47	92.47



Σχήμα 6.53. Χάρτης παράλλαξης αριστερής εικόνας μετά από έλεγχο συμβατότητας.

6.1.8 Συνταύτιση με περισσότερα παράθυρα

Όλα τα προηγούμενα αποτελέσματα προέρχονται από διαδικασίες συνταύτισης κατά τις οποίες το μέγεθος του παραθύρου είναι σταθερό. Εδώ ελέγχθηκε, αντιθέτως, το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών με ταυτόχρονη χρήση 5 παραθύρων. Για κάθε παράθυρο δημιουργήθηκε ένας τρισδιάστατος πίνακας κόστους, και για κάθε εικονοψηφίδα επελέγη ως ομόλογο σημείο εκείνο με την μικρότερη τιμή κόστους. Τα παράθυρα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μέγεθος 7×7, 9×9, 11×11, 15×15 και 21×21. Τέλος, για να είναι συγκρίσιμα τα κόστη από τα διαφορετικά παράθυρα, οι τιμές τους ανάγονται στον συνολικό αριθμό pixel κάθε παραθύρου.



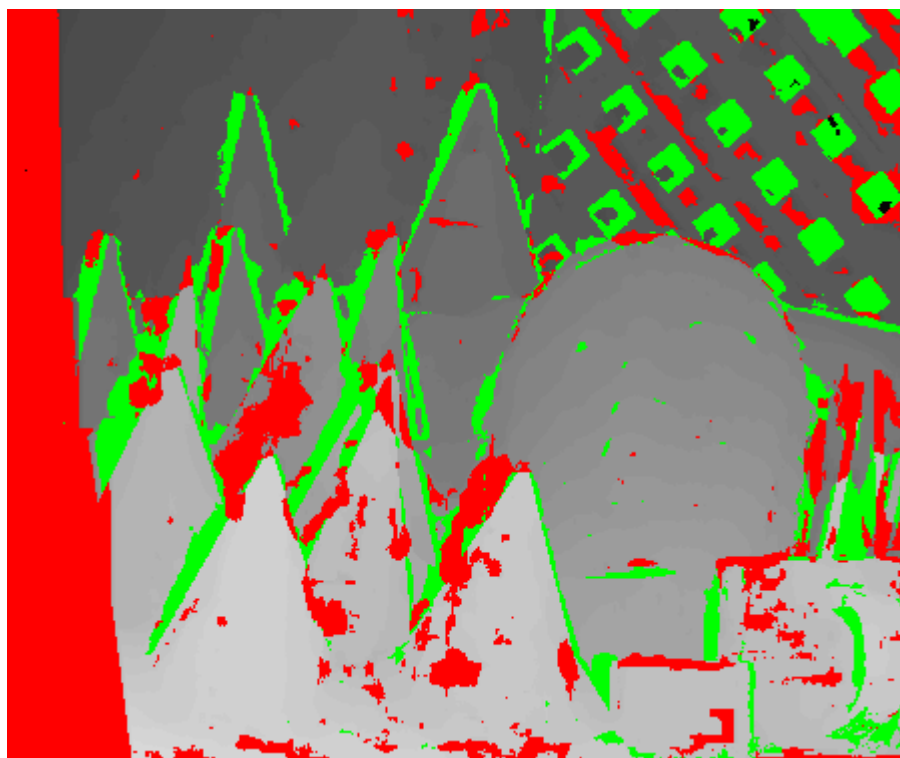
Σχ. 6.54 Χάρτης παράλλαξης που δείχνει από ποιο παράθυρο επελέγη η τιμή παράλλαξης.

Στο Σχ. 6.54 με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα σημεία για τα οποία, για την εύρεση του ομόλογου σημείου, προκρίθηκε η τιμή παράλλαξης από το παράθυρο 9×9, ενώ το πράσινο αναφέρεται στο παράθυρο 11×11, το μπλε στο παράθυρο 15×15 και το μωβ στο παράθυρο 21×21. Στα υπόλοιπα σημεία, που απεικονίζονται με τόνους του γκριζου (τιμές παράλλαξης), η μικρότερη τιμή κόστους εμφανιζόταν στο παράθυρο 7×7, η οποία και επελέγη.

Παρατηρείται ότι το παράθυρο με την μικρότερη τιμή κόστους, που χρησιμοποιήθηκε κατά βάση για τη δημιουργία του παραπάνω χάρτη παράλλαξης, ήταν το 7×7 (ειδικά σε περιπτώσεις ενιαία παράλλαξης). Η χρήση διαφορετικών παραθύρων παρατηρείται κυρίως στα όρια των αντικειμένων της εικόνας.

Από την σύγκριση των υπολογισμένων παραλλάξεων με την αληθή εικόνα βάθους

προέκυψε η εικόνα διαφορών του Σχ. 6.55. Τέλος, στον Πίνακα 6.17 συγκεντρώνονται τα βασικά στατιστικά στοιχεία των διαφορών (μέσος όρος, τυπική απόκλιση και ποσοστό διαφορών παράλλαξης Δd που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$).



Σχ. 6.55. Εικόνα διαφορών που προέκυψε από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τον χάρτη παράλλαξης που προήλθε από την χρήση διαφορετικών παραθύρων.

Πίνακας 6.17. Διαφορές των υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

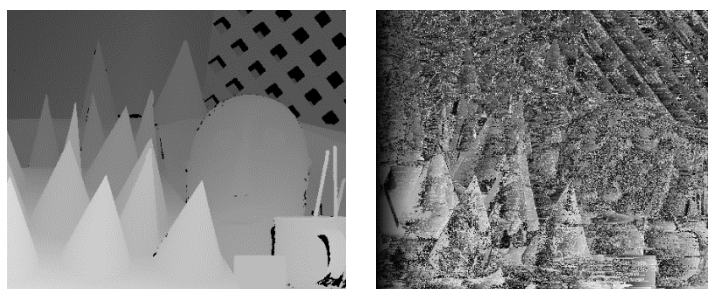
SAD				Με επιλογή από 5 παράθυρα		
$m \times n$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	4.09	7.56	71.91	2.97	6.47	79.22
7×7	3.50	6.88	76.40			
11×11	3.01	6.22	80.12			
15×15	2.90	6.04	81.11			
21×21	2.90	5.92	80.58			

Στον Πίνακα 6.17 παρατίθενται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για διαφορετικά παράθυρα, ενώ αριστερά έχουν συμπεριληφθεί για λόγους σύγκρισης οι τιμές για σταθερά παράθυρα. Αντίθετα από αυτό που θα ανέμενε κανείς, τα αποτελέσματα από τη χρήση πολλα-

πλών παραθύρων (όπως τουλάχιστον αυτό υλοποιήθηκε εδώ) δεν βελτιώνουν τα αποτελέσματα, στην ουσία δίνουν τιμές παρόμοιες με εκείνες που προκύπτουν για παράθυρο 11×11. Μπορεί άρα να υποθέσει κανείς ότι το παράθυρο με το μικρότερο κόστος δεν δίνει, κατ' ανάγκη, πάντοτε την βέλτιστη τιμή παράλλαξης.

6.1.9 Συνταύτιση με την μέθοδο της απόλυτης διαφοράς

Όλες οι μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί μέχρι τώρα σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιούν παράθυρα συνάθροισης του κόστους (cost aggregation) και όχι συγκρίσεις της έντασης μεμονωμένων ρικελ. Ο λόγος είναι, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.1, ότι η σύγκριση μεμονωμένων εικονοψηφίδων εμφανίζει προφανή μειονεκτήματα όσον αφορά την ευαισθησία της σε τοπικές ραδιομετρικές διαφορές και τον θόρυβο των εικόνων. Απλώς, λοιπόν, για λόγους πληρότητας και μόνον παρουσιάζεται εδώ εφαρμογή του απλού κριτηρίου των απόλυτων διαφορών (AD) που, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.4, ισοδυναμεί με εκείνη των τετραγώνων των διαφορών (SD). Στο Σχ. 6.56 παρουσιάζεται ο χάρτης παράλλαξης που προκύπτει από την εφαρμογή του κριτηρίου αυτού. Από τη σύγκρισή του με τον αληθή χάρτη προκύπτει κάθε φορά μια νέα εικόνα (εικόνες διαφορών), οι οποίες φαίνονται στο Σχ. 6.57.



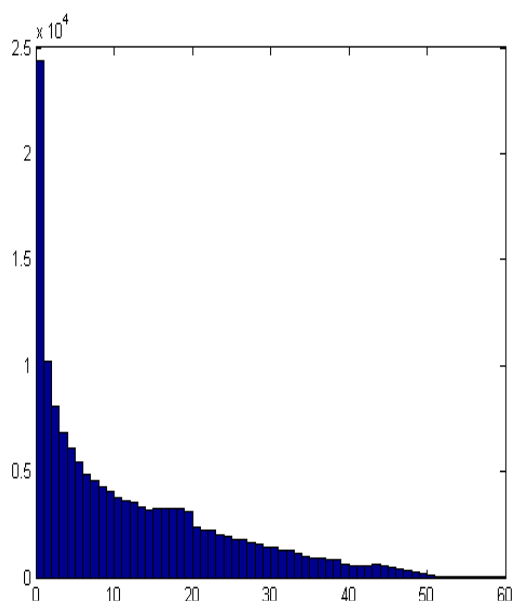
Σχήμα 6.56. Αληθής χάρτης παράλλαξης (αριστερά) και χάρτης με βάση το κριτήριο των απόλυτων διαφορών (δεξιά).



Σχήμα 6.57. Εικόνα διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνον από το κριτήριο των απόλυτων διαφορών.

Ακόμα, στο Σχ. 6.58 φαίνεται το ιστόγραμμα των διαφορών παράλλαξης που προκύπτει από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τον υπολογισμένο χάρτη.

Τέλος, στον Πίνακα 6.18 συγκεντρώνονται τα βασικά στατιστικά στοιχεία των διαφορών (μέσος όρος, τυπική απόκλιση και ποσοστό διαφορών παράλλαξης Δd εντός του διαστήματος $-1 \leq \Delta d \leq 1$).



Σχήμα 6.58. Ιστόγραμμα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνον που προέκυψε από το κριτήριο των απόλυτων διαφορών.

Πίνακας 6.18. Διαφορές των υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς (μ : μέσος όρος σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)		
AD		
μ	σ	$\pi[-1, 1]$
12.85	12.07	16.68

Από τον Πίνακα 6.18 προκύπτει ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του κριτηρίου είναι, όπως βέβαια αναμενόταν, πολύ κατώτερα εκείνων από τις άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούν παράθυρα. Από την οπτική παρατήρηση του χάρτη παράλλαξης φαίνεται ότι η εικόνα που προκύπτει εμφανίζει πολύ έντονο θόρυβο, λόγω κυρίως της ευαισθησίας του κριτηρίου σε κάθε τοπική ραδιομετρική διαφορά. Αυτή είναι, λοιπόν, και η προφανής αιτία που προτιμάται η χρήση παραθύρων κατά την εφαρμογή των κριτηρίων συνταύτισης.

6.2 Δεύτερο ζεύγος εικόνων

Αυτό το ζεύγος εικόνων (Σχ. 6.60), διαστάσεων 450×375, έχει επίσης τιμή παράλλαξης από 0 έως 59 pixel. Η μέγιστη τιμή ορίζει την διάσταση του παραθύρου αναζήτησης.

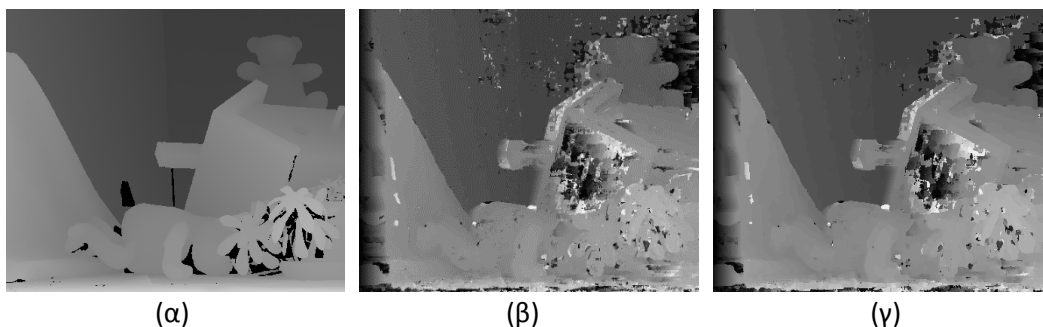


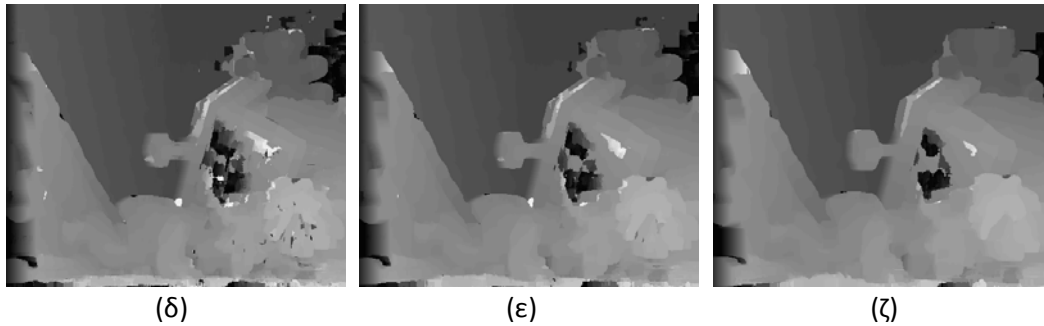
Σχήμα 6.60. Δεύτερο στερεοζεύγος εικόνων ("Teddy").

6.2.1 Συνταύτιση με τις μεθόδους SAD, SSD και SAD colour

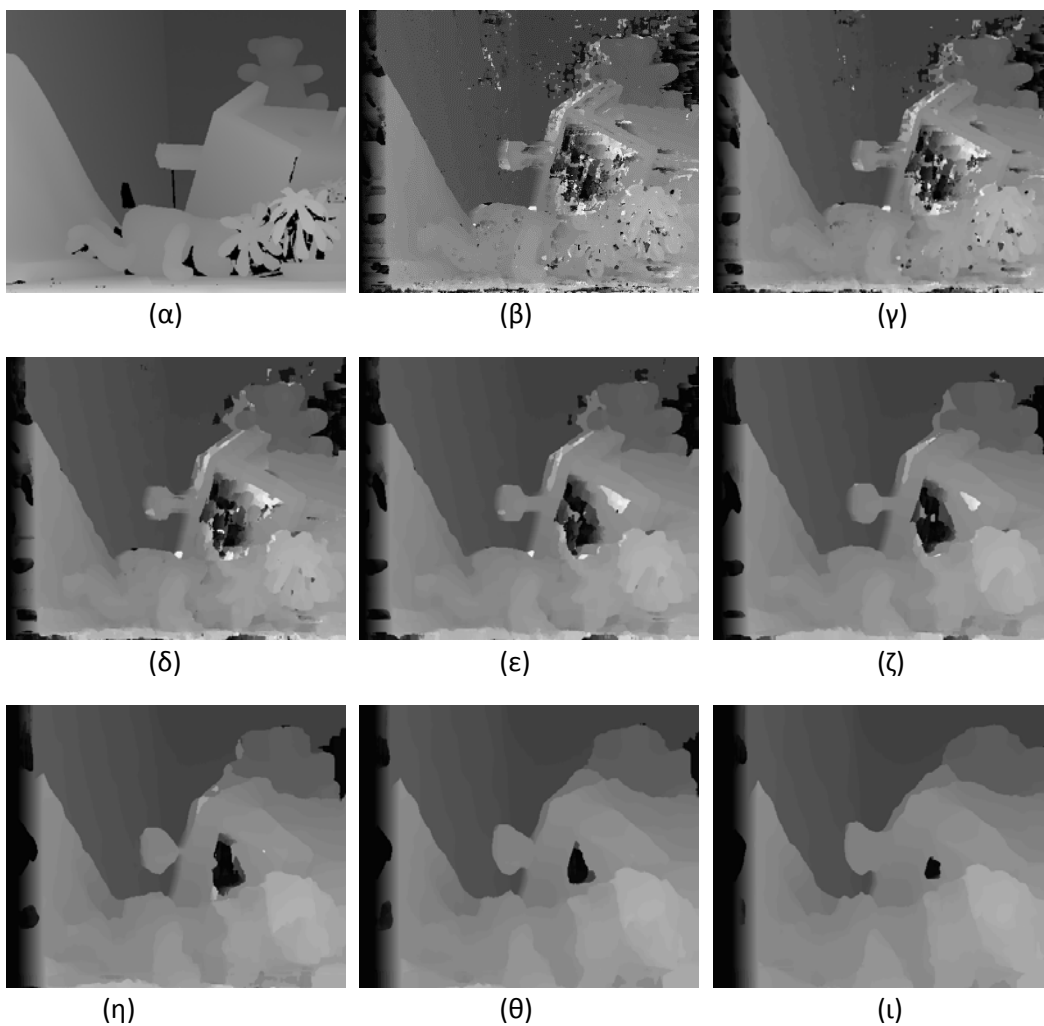
Αντίστοιχα με το 1^ο στερεοζεύγος εικόνων, εφαρμόστηκε και εδώ το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) και του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών (SSD) για παράθυρα 5×5, 7×7, 11×11, 15×15, 21×21. Για την εφαρμογή του κριτηρίου SAD χρησιμοποιήθηκαν, επιπλέον, και τα παράθυρα 31×31, 41×41 και 51×51. Κατά την εφαρμογή του κριτηρίου SAD και στα τρία χρωματικά επίπεδα της εικόνας χρησιμοποιήθηκαν παράθυρα 7×7 και 15×15.

Στο Σχ. 6.61 παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προκύπτουν από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών (SSD) για όλα τα παράθυρα που χρησιμοποιήθηκαν.





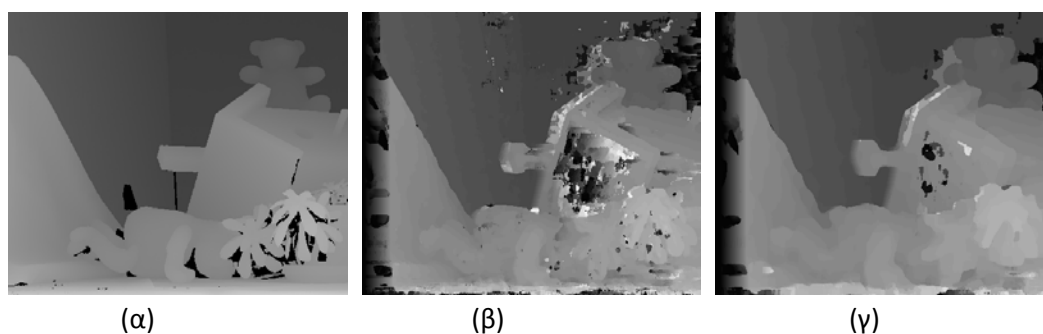
Σχήμα 6.61. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν με βάση το κριτήριο του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών (SSD) με τη χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) αληθής χάρτης παράλλαξης, (β) παράθυρο 5×5, (γ) παράθυρο 7×7, (δ) παράθυρο 11×11, (ε) παράθυρο 15×15 και (ζ) παράθυρο 21×21.



Σχήμα 6.62. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για διαφορετικά παράθυρα: (α) αληθής χάρτης παράλλαξης, (β) παράθυρο 5×5, (γ) παράθυρο 7×7, (δ) παράθυρο 11×11, (ε) παράθυρο 15×15, (ζ) παράθυρο 21×21, (η) παράθυρο 31×31, (θ) παράθυρο 41×41 και (ι) παράθυρο 51×51.

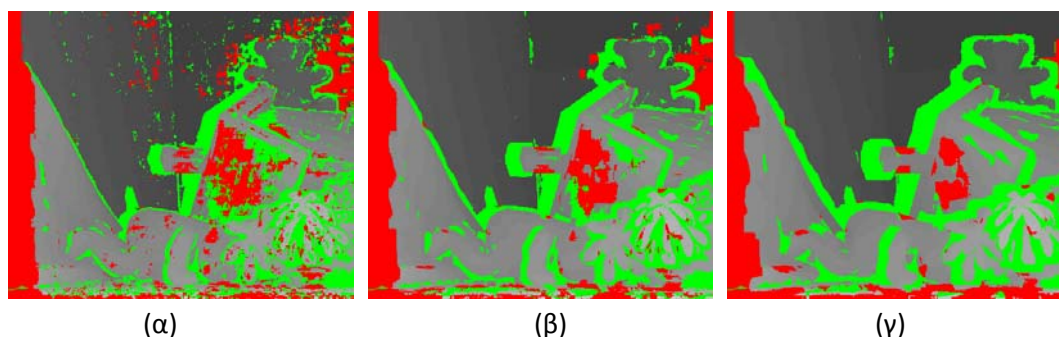
Αντίστοιχα, στο Σχ. 6.62 παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προκύπτουν από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD). Τέ-

λος, στο Σχ. 6.63 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών και στα τρία χρωματικά επίπεδα της εικόνας για παράθυρα 7×7 και 15×15.

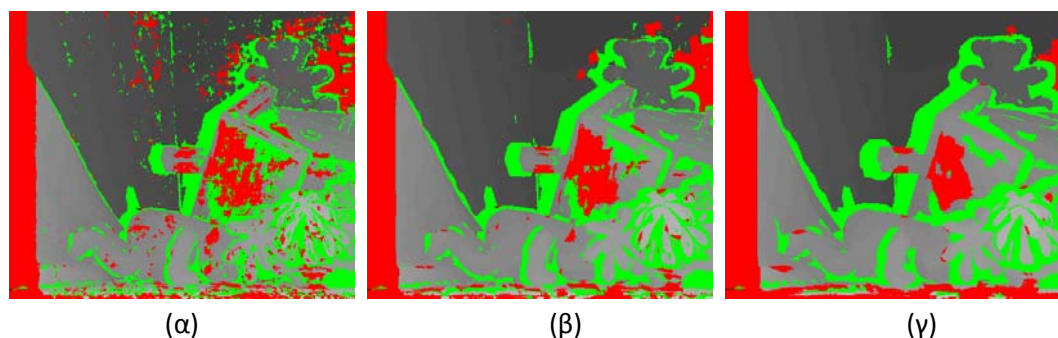


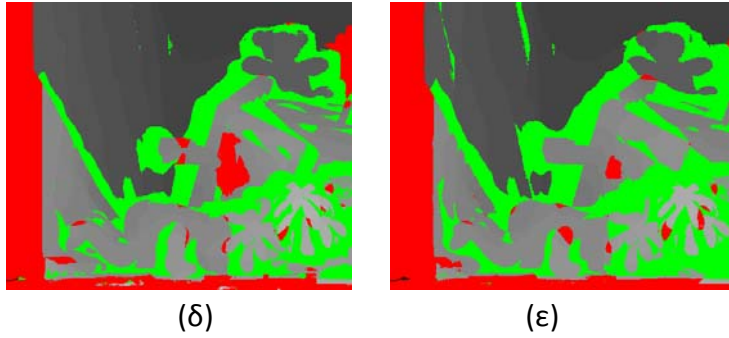
Σχήμα 6.63. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) και στα τρία χρωματικά κανάλια με χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) αληθής χάρτης βάθους, (β) παράθυρο 7×7, (γ) παράθυρο 15×15.

Από τη σύγκριση των χαρτών παράλλαξης με τον αληθή χάρτη προκύπτει κάθε φορά μια νέα εικόνα (εικόνα διαφορών), οι οποίες φαίνονται στα Σχ. 6.64–6.66. Στις απεικονίσεις αυτές κάθε εικονοψηφίδα έχει την τιμή της παράλλαξης εφόσον η διαφορά δεν υπερβαίνει το 1 pixel, ενώ με κόκκινο φαίνονται οι εικονοψηφίδες όπου η διαφορά παράλλαξης είναι $(d_{\alpha\lambda\eta\theta} - d) < -1$ και με πράσινο όπου $(d_{\alpha\lambda\eta\theta} - d) > 1$.

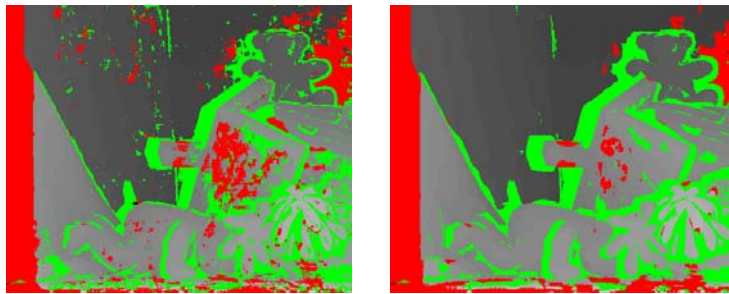


Σχήμα 6.64. Εικόνες διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 11×11 και (γ) 21×21.

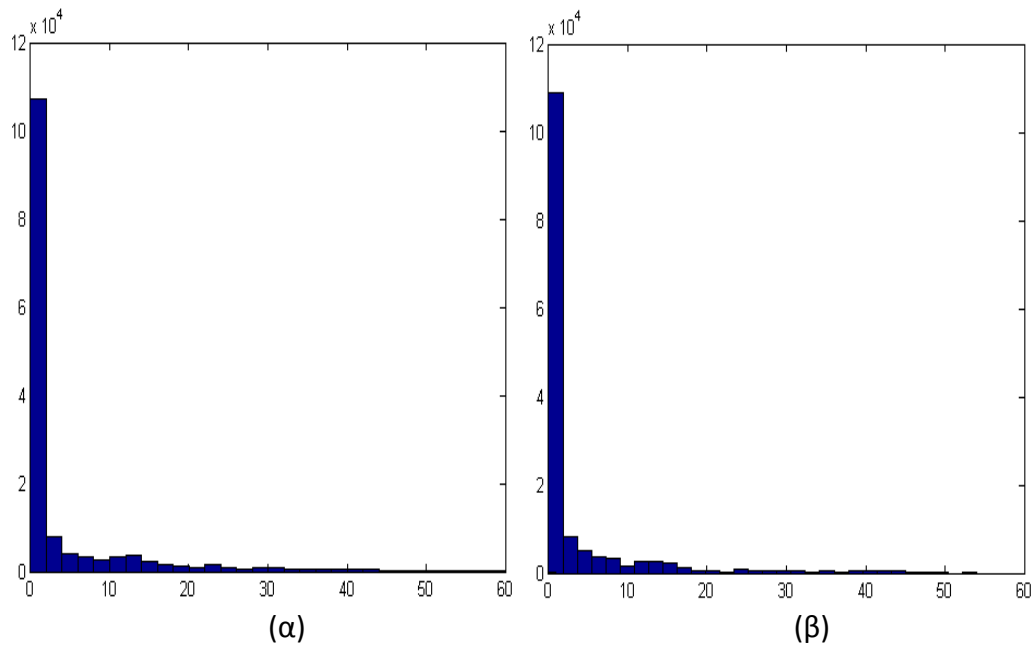




Σχήμα 6.65. Εικόνες διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 11×11, (γ) 21×21, (δ) 31×31 και (ε) 51×51.



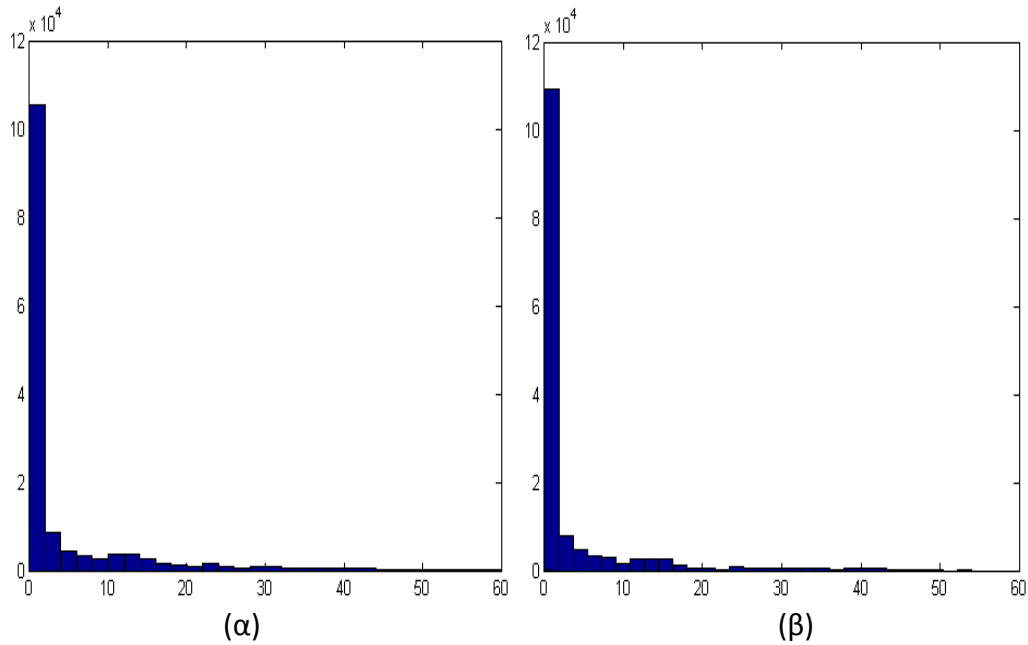
Σχήμα 6.66. Εικόνες διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών και στα τρία χρωματικά κανάλια για παράθυρα: 7×7 και 15×15.



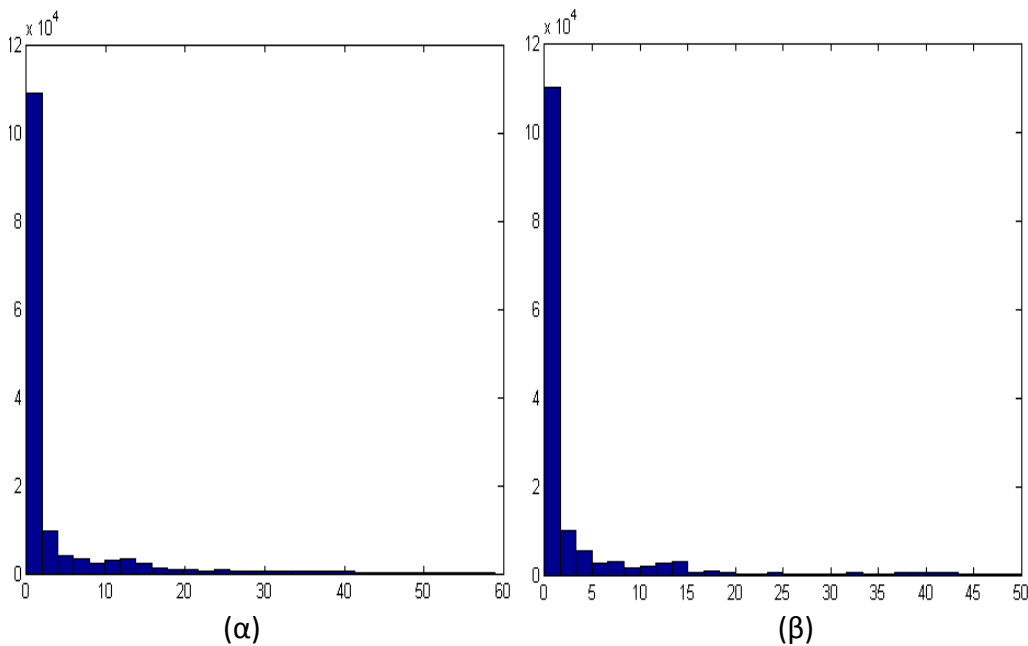
Σχήμα 6.67. Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο SSD ων διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 15×15.

Παρουσιάζονται, ενδεικτικά, ορισμένα από τα ιστογράμματα των διαφορών παράλλαξης που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε έναν από τους υπολογισμένους χάρτες (Σχ. 6.67–6.69). Στον Πίνακα 6.19 συγκεντρώ-

νονται τα βασικά στατιστικά στοιχεία των διαφορών για κάθε μέθοδο (μέσος όρος, τυπική απόκλιση και το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης Δd που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$).



Σχήμα 6.68. Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 15×15 .

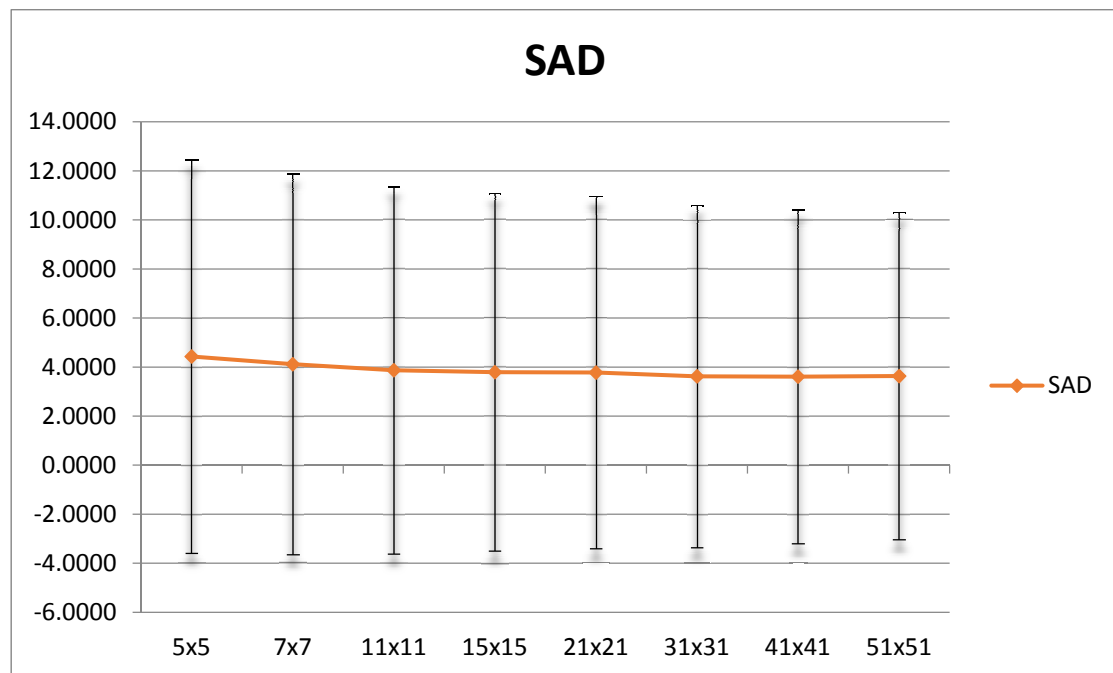


Σχήμα 6.69. Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών και στα τρία χρωματικά επίπεδα για παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 15×15 .

Πίνακας 6.19. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$
(μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	SSD			SAD			SAD color		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5x5	4.37	8.01	72.12	4.43	7.99	70.98			
7x7	4.08	7.76	74.02	4.12	7.74	73.34	3.87	7.44	74.3918
11x11	3.83	7.46	74.93	3.87	7.47	74.76			
15x15	3.74	7.24	74.47	3.79	7.28	74.67	3.28	6.64	77.3915
21x21	3.68	7.03	73.00	3.78	7.17	73.65			
31x31				3.62	6.96	69.36			
41x41				3.61	6.79	67.32			
51x51				3.93	6.66	65.20			

Τέλος, το Σχ. 6.70 δείχνει διάγραμμα μεταβολής της ποσότητας ($\mu \pm \sigma$) που προέκυψε από σύγκριση με τον αληθή χάρτη στην περίπτωση της μεθόδου SAD.



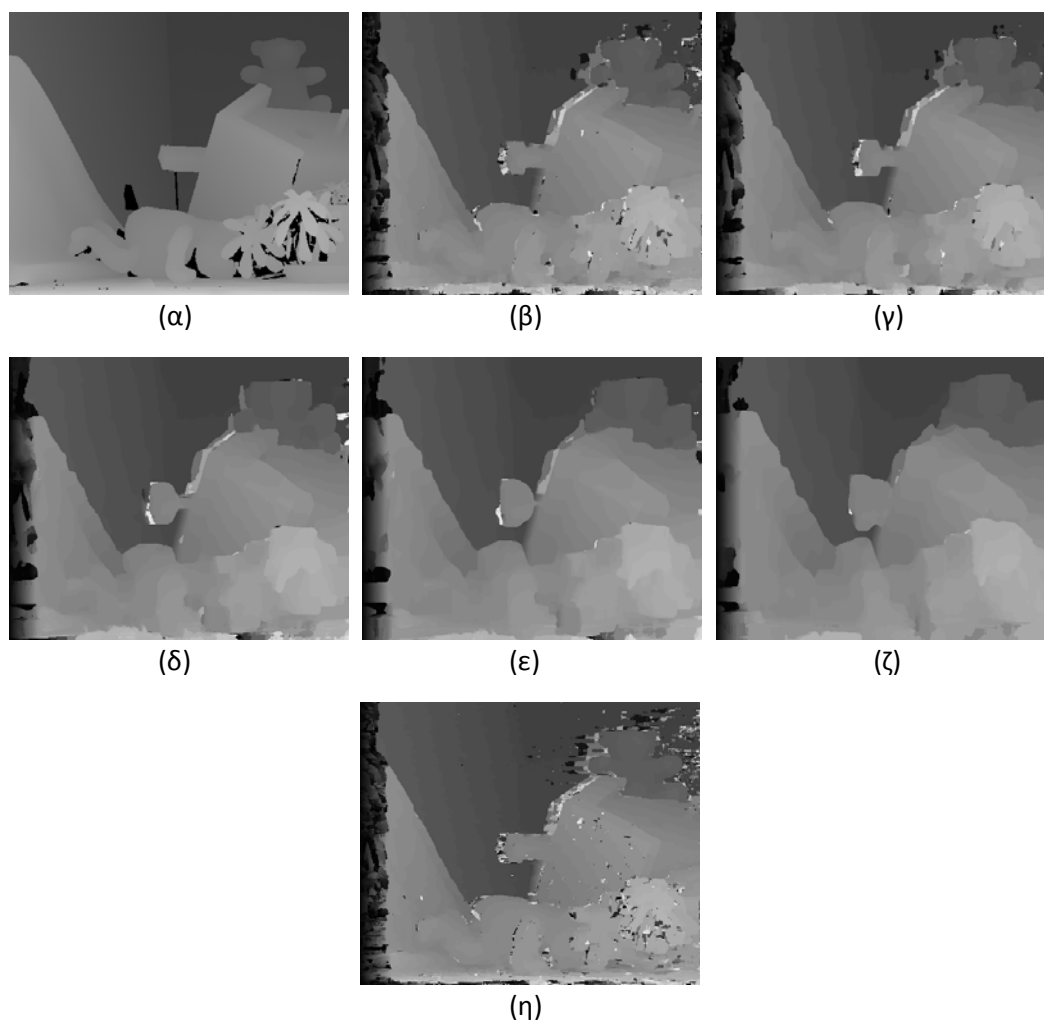
Σχήμα 6.70. Διάγραμμα της ποσότητας ($\mu \pm \sigma$) των διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με εκείνους από εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών.

Από τα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων, και ιδίως εκείνα που έχουν συγκεντρωθεί στον Πίνακα 6.19, προκύπτει ότι δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές από την εφαρμογή των κριτηρίων SAD και SSD. Εντοπίζεται βελτίωση των αποτελεσμάτων της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης με την αύξηση του

μεγέθους του παραθύρου, η οποία σταματάει στο μέγεθος 21×21 για το κριτήριο των τετραγώνων των διαφορών και στο μέγεθος 31×31 για το κριτήριο των απόλυτων διαφορών. Τα καλύτερα αποτελέσματα των ποσοστών των διαφορών που δεν υπερβαίνουν το 1 ρικελ εμφανίζονται και στα δύο κριτήρια για παράθυρα 11×11 και 15×15 . Η συμμετοχή των τριών χρωματικών επιπέδων κατά την εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών οδηγεί σε βελτίωση των αποτελεσμάτων και για τα δύο χρησιμοποιηθέντα παράθυρα. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με εκείνα για το πρώτο μοντέλο εικόνων.

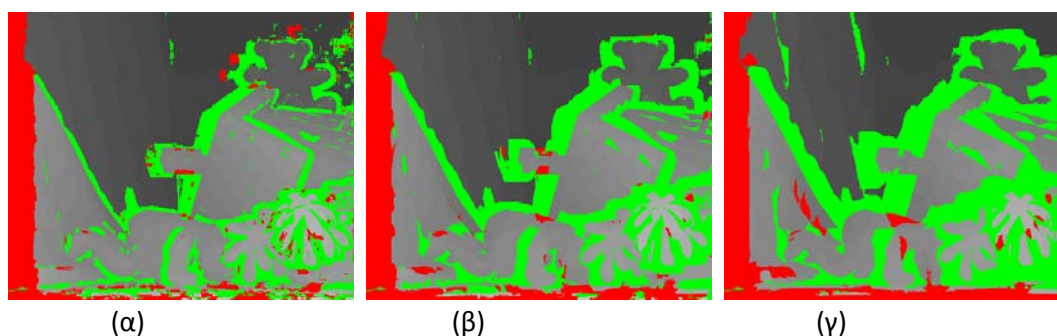
6.2.2 Συνταύτιση με τον συντελεστή συσχέτισης

Κατά την εφαρμογή του συντελεστή συσχέτισης χρησιμοποιήθηκαν παράθυρα 5×5 , 7×7 , 11×11 , 15×15 , 21×21 , καθώς επίσης και ορθογώνιο παράθυρο 5×11 (Σχ. 6.71).



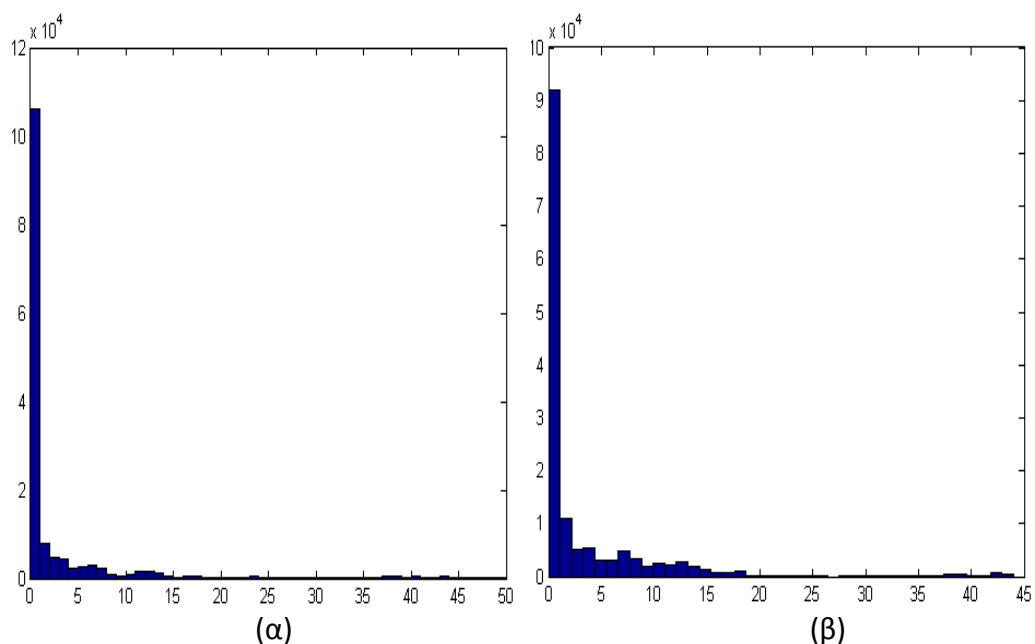
Σχήμα 6.71. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης με τη χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) αληθής χάρτης παράλλαξης, (β) παράθυρο 5×5 , (γ) παράθυρο 7×7 , (δ) παράθυρο 11×11 , (ε) παράθυρο 15×15 , (ζ) παράθυρο 21×21 , (η) παράθυρο 5×11 .

Το Σχ. 6.72 παρουσιάζει τις εικόνες διαφορών που προέκυψαν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με εκείνους του Σχ. 6.71.



Σχήμα 6.72. Εικόνες διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 και (γ) 21×21 .

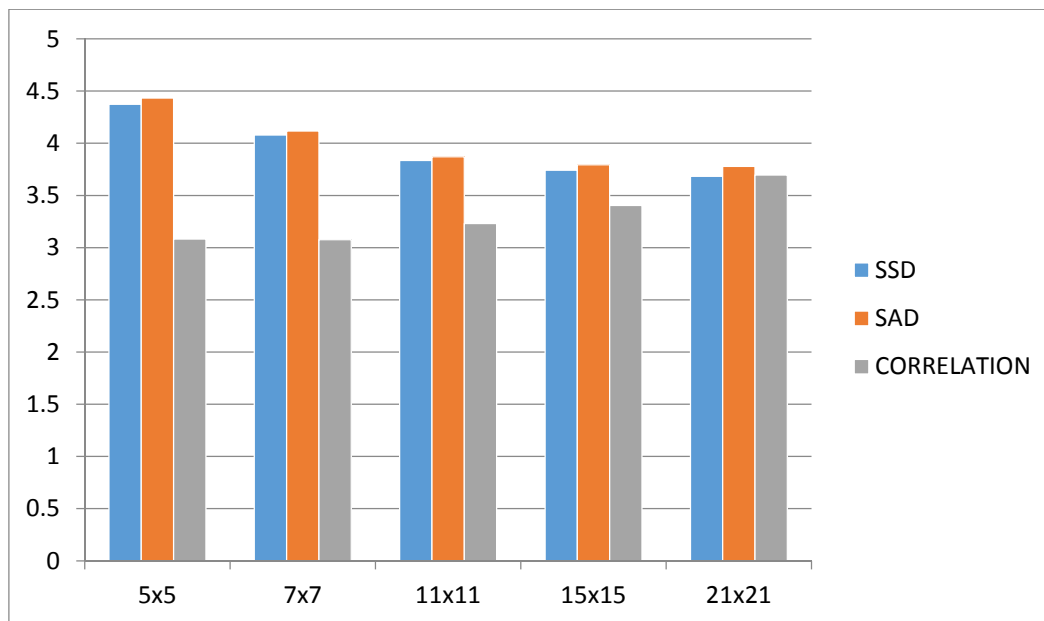
Ακόμα, παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένα από τα ιστογράμματα με τις διαφορές του αληθούς χάρτη παράλλαξης από τους χάρτες που υπολογίστηκαν εδώ (Σχ. 6.73), καθώς επίσης και ο Πίνακας 6.20 με τα στατιστικά και το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης με τιμή μικρότερη των 2 εικονοψηφίδων.



Σχήμα 6.73. Ιστογράμματα: (α) παράθυρο 11×11 , (β) παράθυρο 21×21 .

Πίνακας 6.20. Διαφορές παραλλάξεων από αληθείς τιμές για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο εύρος $-1 \leq \Delta d \leq 1$)			
$m \times n$	Συντελεστής συσχέτισης		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5x5	3.08	7.08	78.57
7x7	3.08	6.90	76.73
11x11	3.23	6.76	72.49
15x15	3.40	6.63	68.43
21x21	3.69	6.57	62.91
5x11	3.35	7.39	81.57

Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει ότι η καλύτερη τιμή μέσου όρου εμφανίζεται για μικρά παράθυρα (5x5 και 7x7), ενώ η καλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης εμφανίζεται για μεγαλύτερα παράθυρα (21x21). Η καλύτερη τιμή για το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης με τιμή μικρότερη των 2 εικονοψηφίδων προκύπτει για παράθυρο 5x11. Για πιο άμεση σύγκριση των κριτηρίων SAD, SSD και συντελεστή συσχέτισης, παρουσιάζεται στο Σχ. 6.74 ένα συγκριτικό διάγραμμα με τις τιμές των μέσων όρων από κάθε κριτήριο για τα κοινά παράθυρα που εφαρμόστηκαν.



Σχήμα 6.74. Ιστόγραμμα μέσων όρων για το κριτήριο του τετραγώνου των διαφορών, των απόλυτων διαφορών και του συντελεστή συσχέτισης.

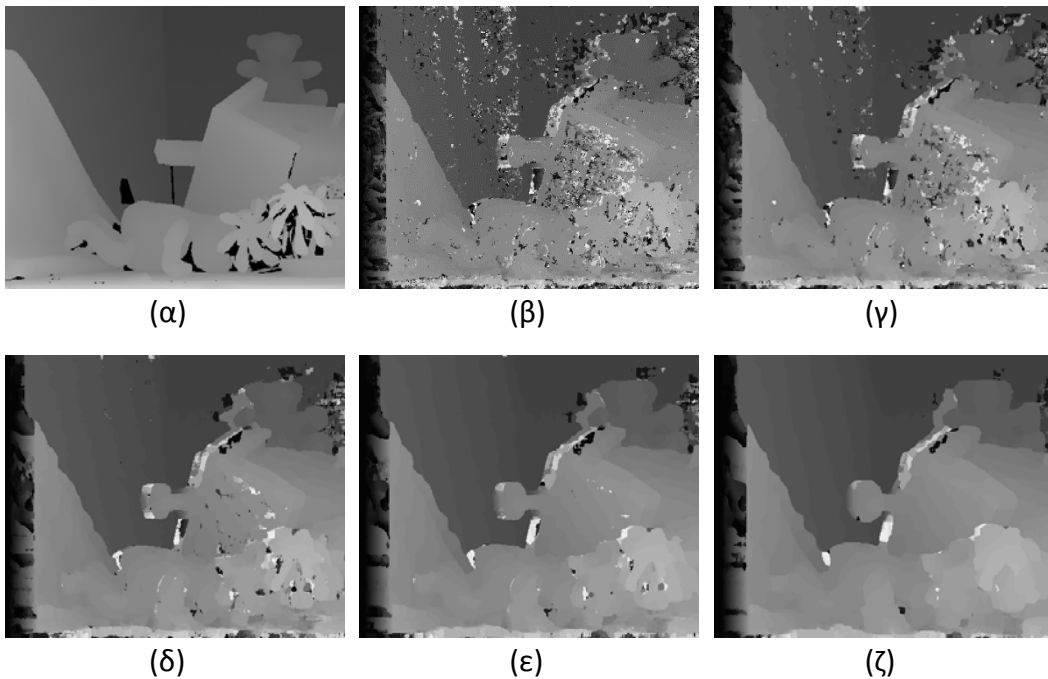
Το διάγραμμα του Σχ. 6.74 δείχνει ότι το κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης δίνει ανώτερα αποτελέσματα για παράθυρα 5x5 έως 15x15, ενώ για παράθυρο 21x21 δίνει ίδια αποτελέσματα με τα κριτήρια SAD και SSD. Σε αντίθεση με το πρώτο μοντέλο, εδώ ο συντελεστής συσχέτισης δίνει γενικά τον μικρότερο μέσο όρο. Μολατούτα, δεν χρησιμοποιήθηκε στα επόμενα, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 6.1.2.

6.2.3 Συνταύτιση εικόνων κλίσης (gradient)

Στο στερεοζεύγος εφαρμόστηκε φίλτρο κλίσης κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ οι νέες εικόνες που περιείχαν ως πληροφορία το μέτρο του διανύσματος της κλίσης παρουσιάζονται στο Σχ. 6.75. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από τη διαδικασία συνταύτισης στις νέες αυτές εικόνες με το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα 5×5 , 7×7 , 11×11 , 15×15 , 21×21 (Σχ. 6.76).

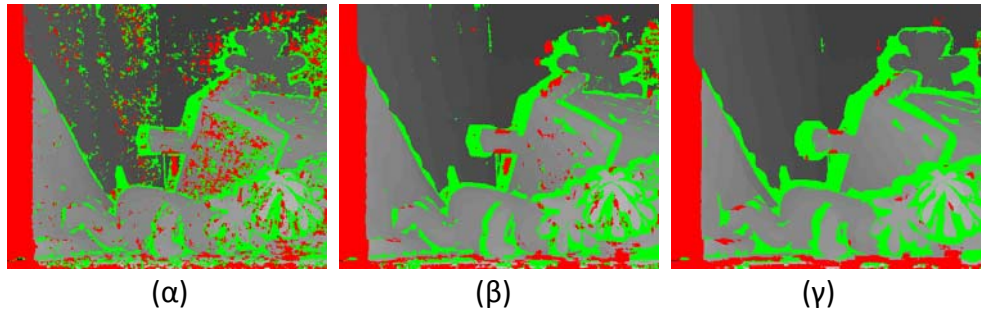


Σχήμα 6.75. Εικόνες κλίσεων του στερεοζεύγους.



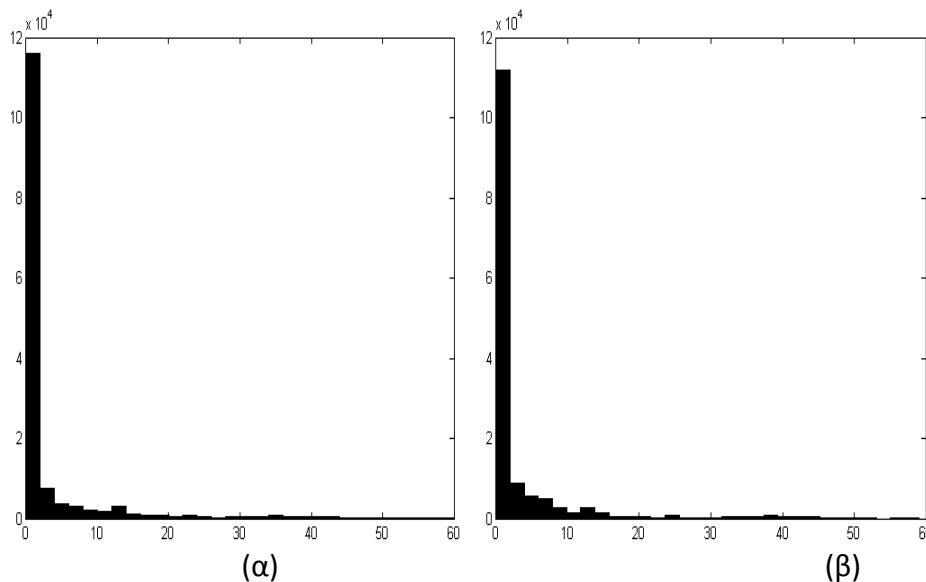
Σχήμα 6.76. Χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης: (α) αληθής χάρτης παράλλαξης, (β) παράθυρο 5×5 , (γ) παράθυρο 7×7 , (δ) παράθυρο 11×11 , (ε) παράθυρο 15×15 , (ζ) παράθυρο 21×21 .

Στο Σχ. 6.77 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι εικόνες των διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με ορισμένους από τους χάρτες του Σχ. 6.76.



Σχήμα 6.77. Εικόνες διαφορών που προέκυψαν βάσει του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 11×11, (γ) 21×21.

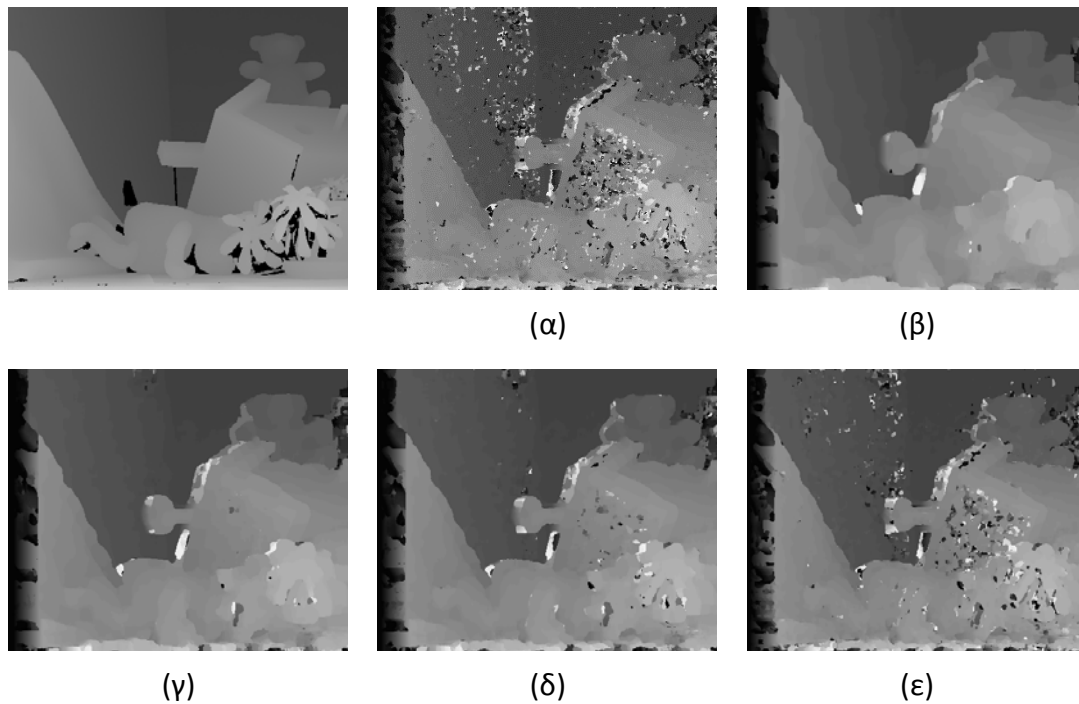
Ακόμα, παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένα από τα ιστογράμματα των διαφορών που προέκυψαν από τη σύγκριση των υπολογισμένων χαρτών με τον αληθή χάρτη παράλλαξης (Σχ. 6.78), καθώς επίσης και ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και το ποσοστό των διαφορών με τιμή μικρότερη από 2 pixel (Πίνακας 6.21).



Σχήμα 6.78. Τα ιστογράμματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των χαρτών με τον αληθή χάρτη παράλλαξης για παράθυρα: (α) 11×11 και (β) 21×21.

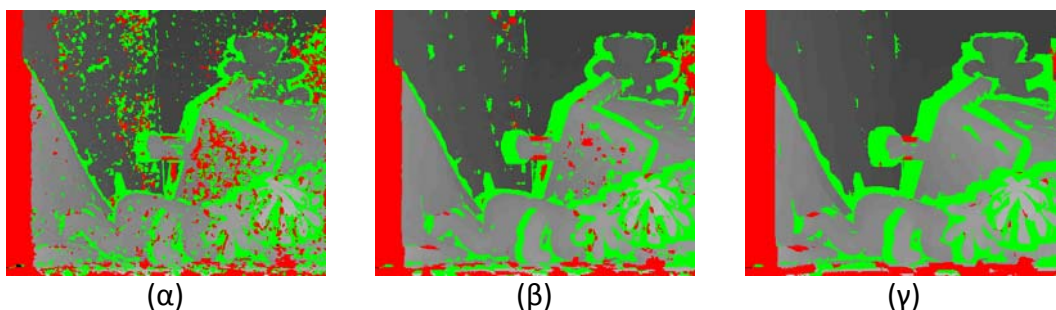
Πίνακας 6.20. Διαφορές υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)						
$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών (SAD)			Άθροισμα απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	4.43	7.99	70.98	4.77	8.61	71.33
7×7	4.12	7.74	73.34	3.97	7.92	76.34
11×11	3.87	7.47	74.76	3.48	7.29	78.44
15×15	3.79	7.28	74.67	3.36	7.11	78.01
21×21	3.78	7.17	73.65	3.36	7.00	76.56

Από την παρατήρηση των δεδομένων του πίνακα προκύπτει πως στην περίπτωση των εικόνων κλίσης (με την εξαίρεση του πρώτου παραθύρου) οι τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης εμφανίζουν βελτίωση σε σχέση με την συνταύτιση στις αρχικές εικόνες, αλλά και με την αύξηση του μεγέθους του παραθύρου. Μικρή αύξηση σημειώνουν και οι τιμές του ποσοστού των διαφορών των εικονοψηφίδων με τιμή <2 pixel. Και εδώ, για την αύξηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου, εφαρμόστηκε στις εικόνες κλίσεων φίλτρο Gauss για μείωση του θορύβου (Σχ. 6.79).



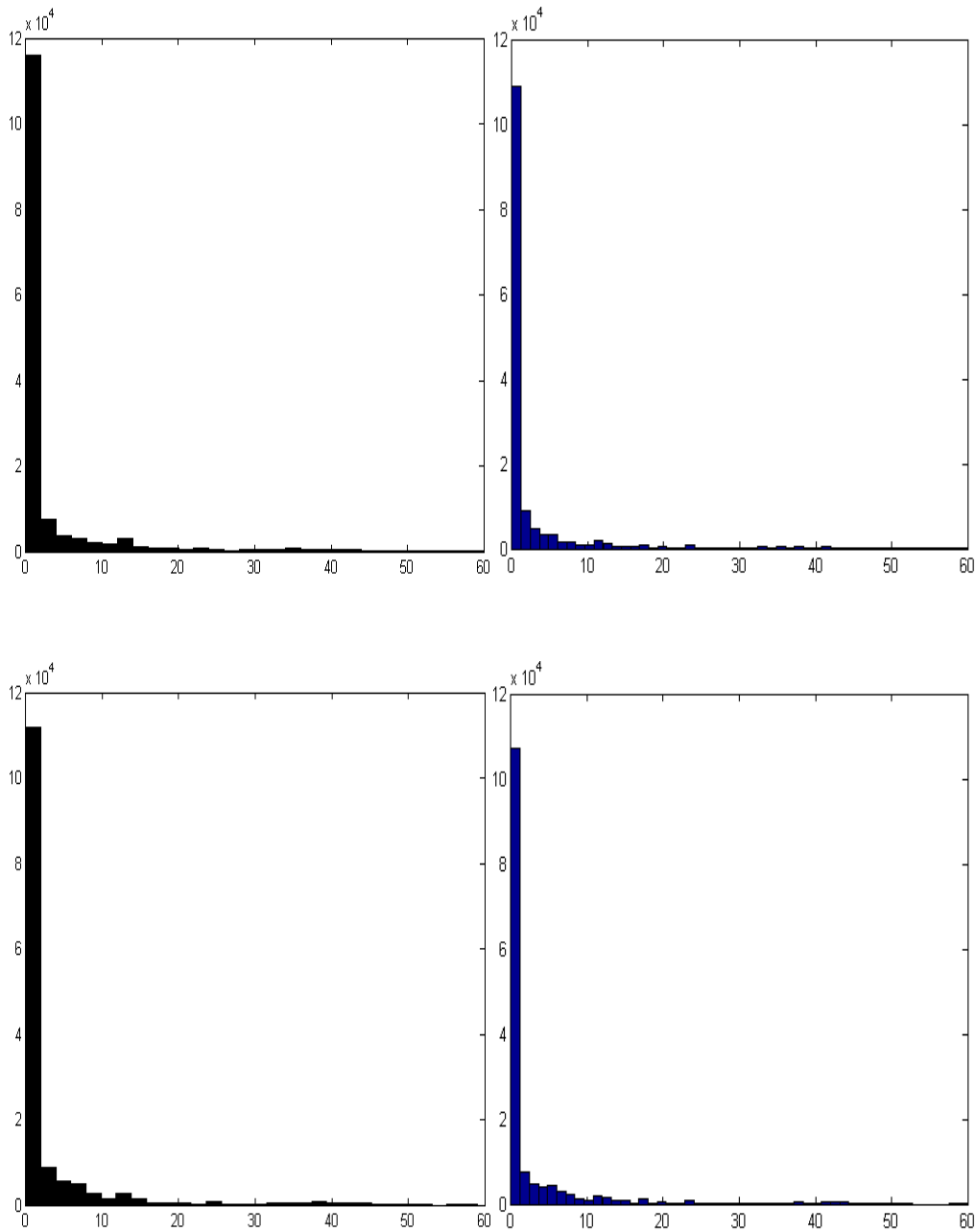
Σχήμα 6.79. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης, μετά από την εφαρμογή φίλτρου Gauss, για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 7×7 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 , (ε) 21×21 .

Οι εικόνες των διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με τους χάρτες αυτούς παρουσιάζονται στο Σχ. 6.80.



Σχήμα 6.80. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης εκείνους από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης μετά από εφαρμογή φίλτρου Gauss για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 , (γ) 21×21 .

Επιπλέον, παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένα από τα ιστογράμματα που προέκυψαν από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης μετά από χρήση φίλτρου Gauss (Σχ. 6.81).



Σχήμα 6.81. Ιστογράμματα από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν για παράθυρα: 11×11 (πάνω), 21×2 (κάτω). Αριστερά: συνταύτιση σε εικόνες κλίσης. Δεξιά: συνταύτιση σε εικόνες κλίσης μετά από φίλτρο Gauss .

Επιπλέον, στον Πίνακα 6.21 παρατίθενται και τα στατιστικά στοιχεία (μέσος όρος, τυπική απόκλιση και ποσοστό διαφορών των παράλλαξης με τιμή κάτω των 2 pixel) που προκύπτουν από τα ιστογράμματα αυτά.

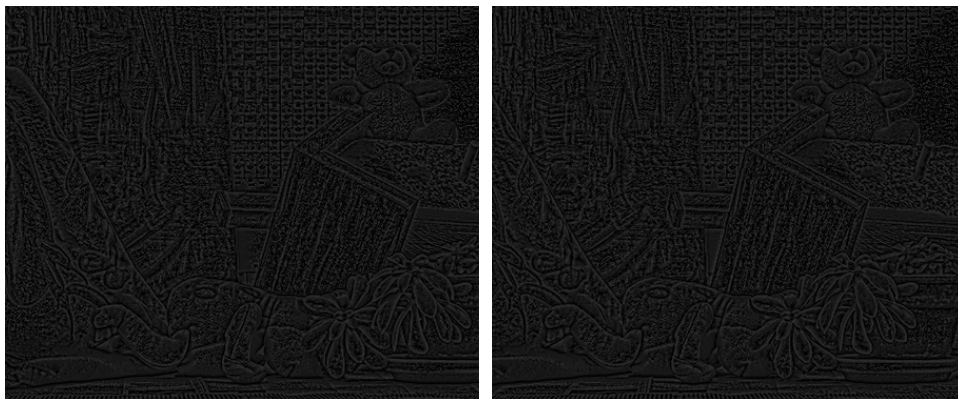
Πίνακας 6.21. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$
(μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	SAD σε εικόνες κλίσης			SAD σε εικόνες κλίσης μετά από εφαρμογή φίλτρου Gauss		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	4.77	8.61	71.33	4.44	8.48	64.59
7×7	3.97	7.92	76.34	3.77	7.82	72.05
11×11	3.48	7.29	78.44	3.27	7.23	76.13
15×15	3.36	7.11	78.01	3.18	7.02	75.83
21×21	3.36	7.00	76.56	3.21	6.83	74.36

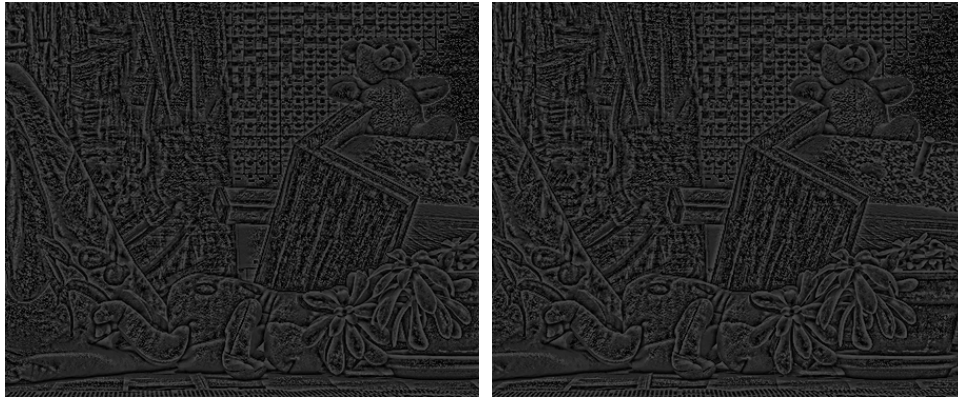
Από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα προκύπτει, όπως και στο πρώτο μοντέλο, ότι η εφαρμογή του φίλτρου Gauss στις εικόνες κλίσης βελτιώνει αισθητά τα αποτελέσματα του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης, μειώνει όμως τις τιμές των ποσοστών των πολύ μικρών διαφορών. Όπως έχει αναφερθεί και για το πρώτο ζεύγος, εκτιμάται ότι το φίλτρο μειώνει μεν τον γενικό θόρυβο που έχουν οι εικόνες, δημιουργώντας όμως κάποια “θόλωση” στις ακμές.

6.2.4 Συνταύτιση εικόνων μετά από μετασχηματισμό rank

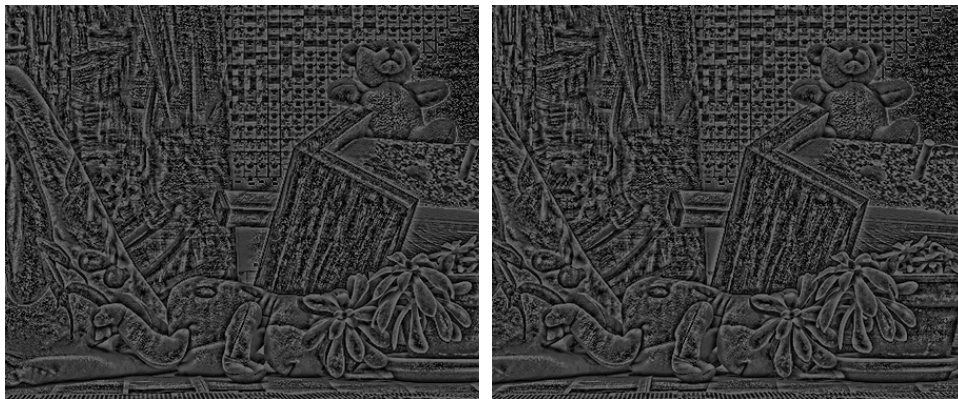
Ο μετασχηματισμός χρησιμοποιήθηκε στις αρχικές εικόνες για παράθυρα 7×7 , 9×9 , 11×11 και 15×15 (Σχ. 6.82). Το κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της συνταύτισης είναι αυτό του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για μέγεθος παραθύρων 7×7 , 11×11 , 15×15 , 21×21 και 31×31 (Σχ. 6.83).



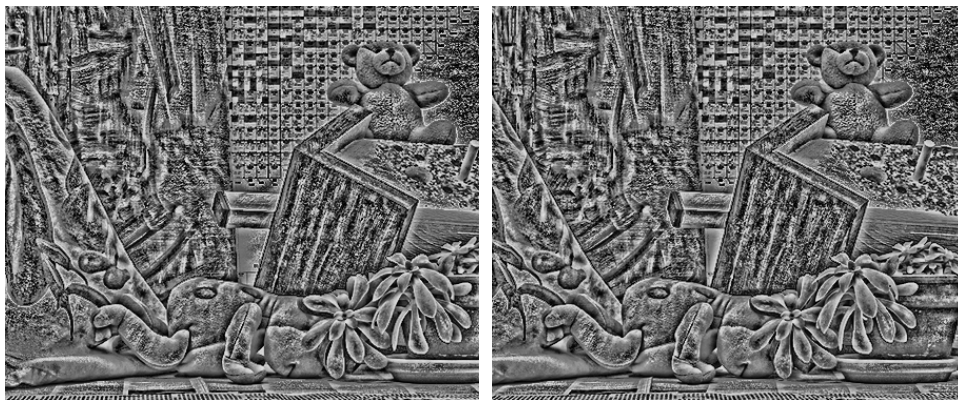
(α)



(β)



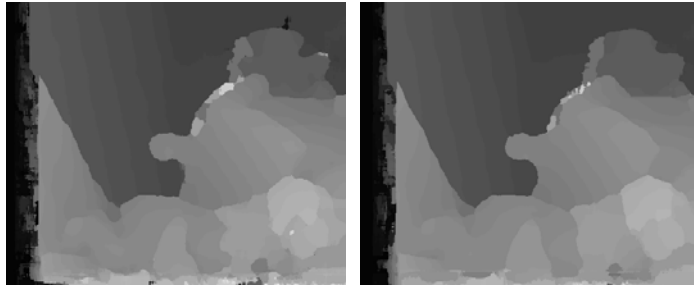
(γ)



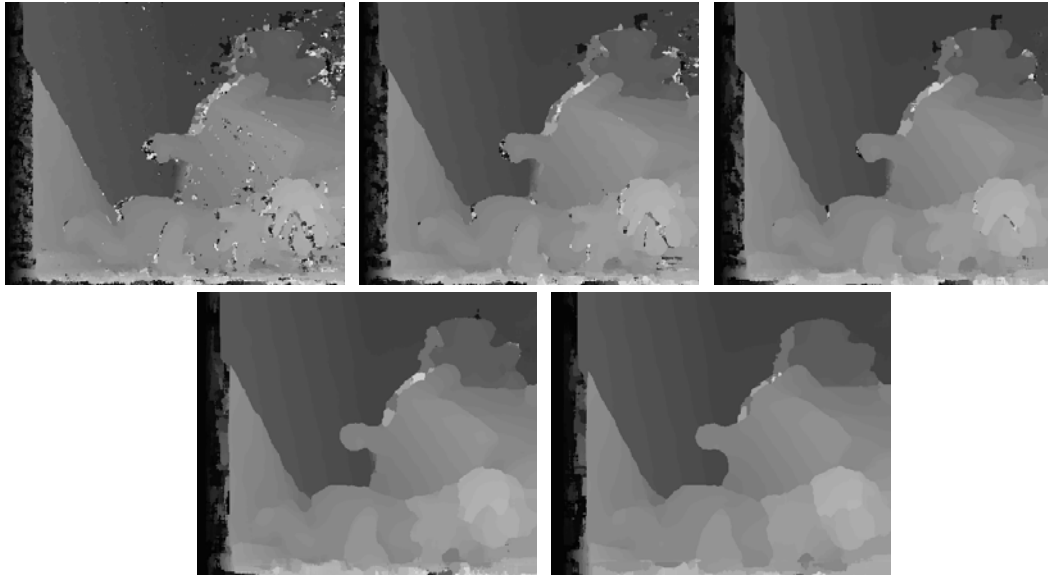
(δ)

Σχήμα 6.82. Στερεοζεύγη εικόνων που προκύπτουν από το μετασχηματισμό rank για μέγεθος παραθύρου: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 .

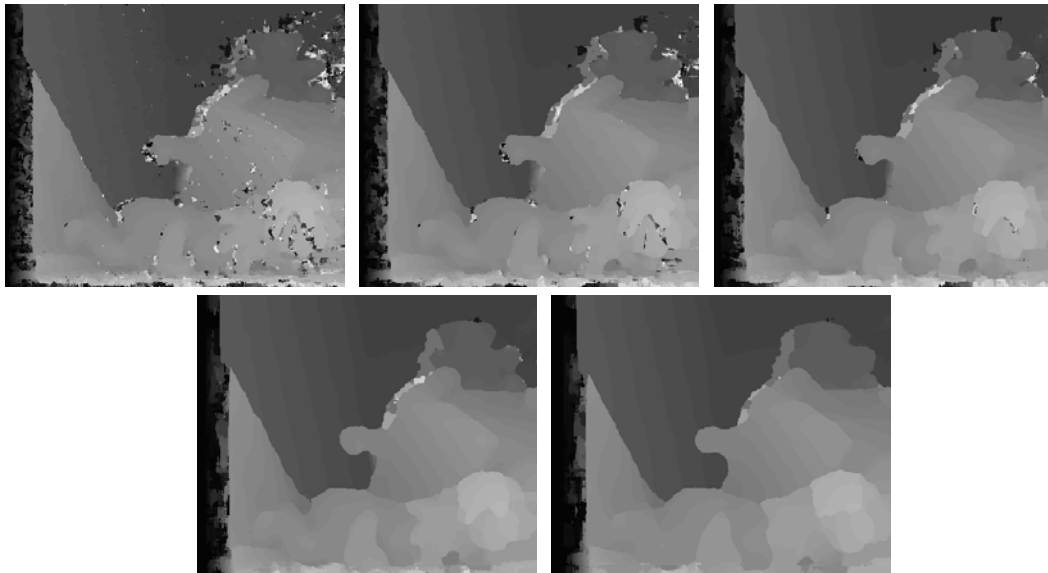




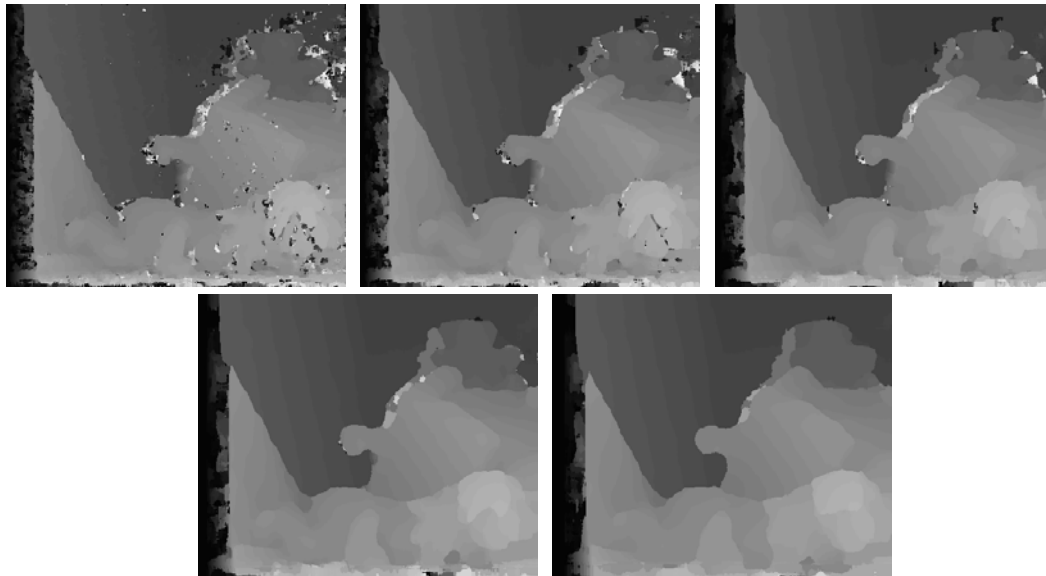
(α)



(β)



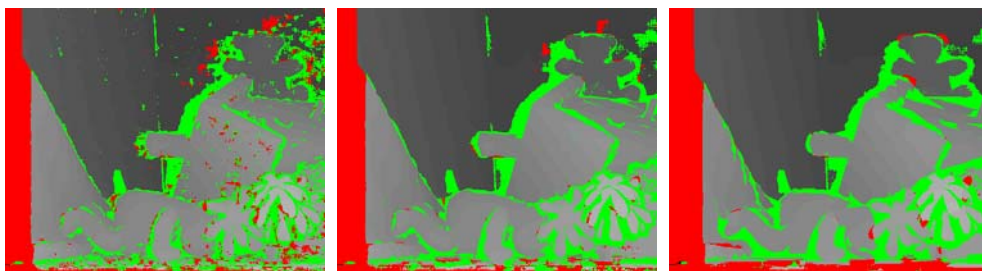
(γ)



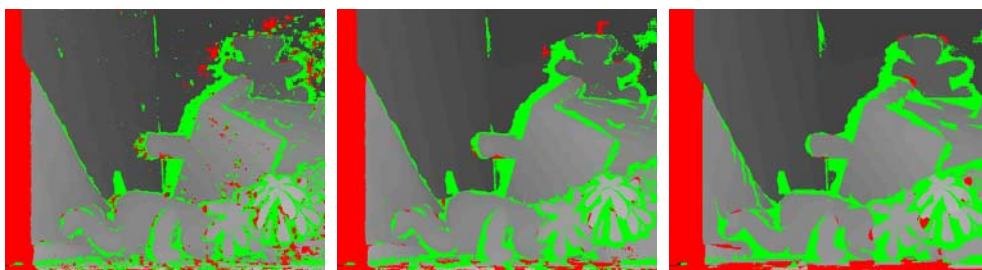
(δ)

Σχήμα 6.83. Χάρτες ψηφιακής παράλλαξης από τη διαδικασία συνταύτισης με βάση το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρα: 7×7 , 11×11 , 15×15 , 21×21 , 31×31 , σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank με παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 και (δ) 15×15 .

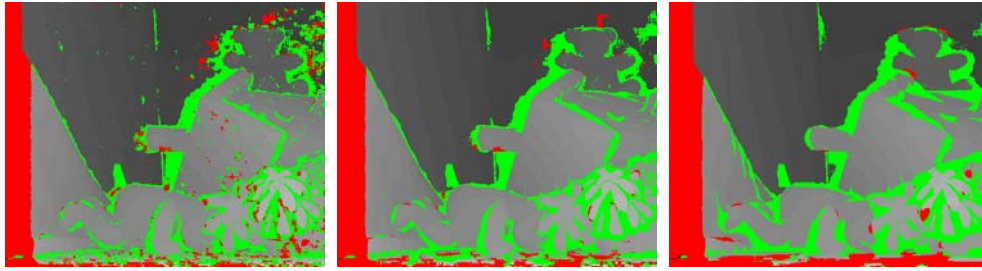
Ορισμένες από τις εικόνες των διαφορών ψηφιακής παράλλαξης που προέκυψαν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες του Σχ. 6.83 παρουσιάζονται στο Σχ. 6.84.



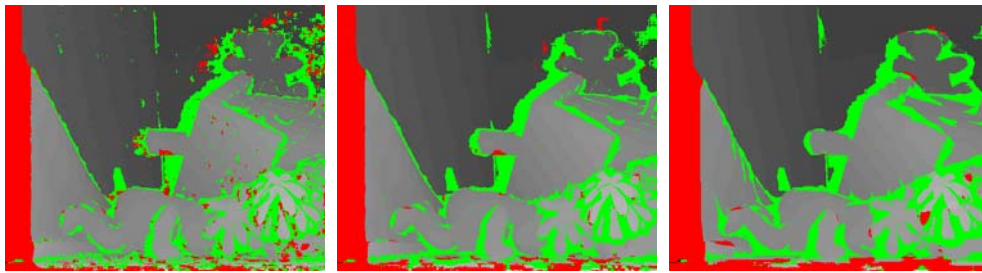
(α)



(β)



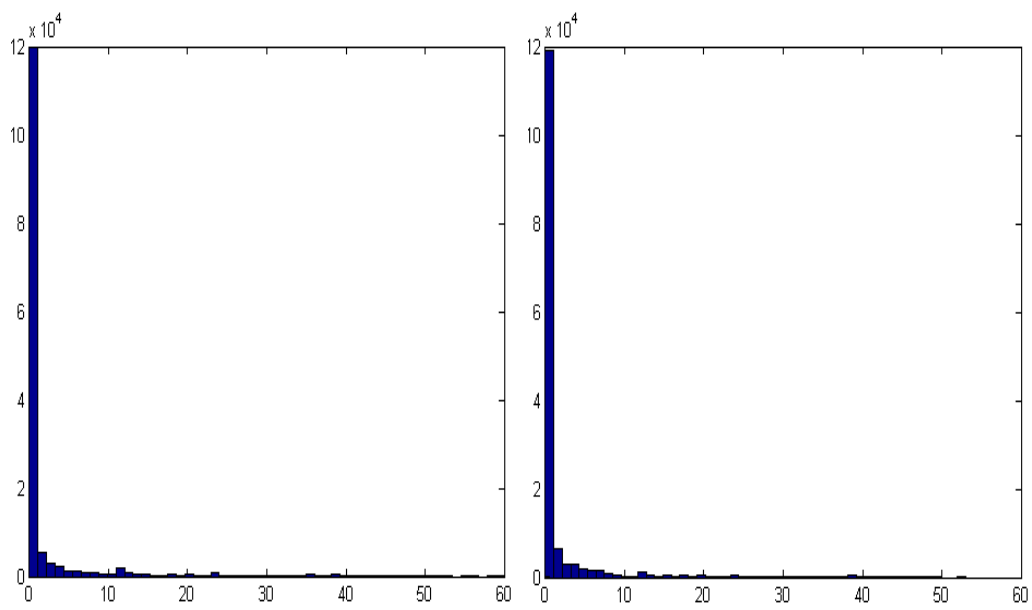
(γ)



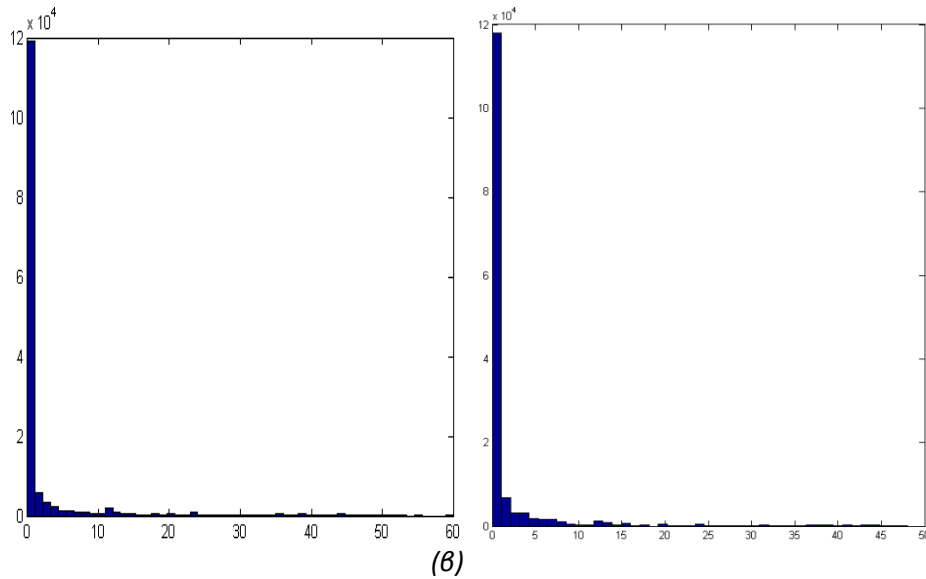
(δ)

Σχήμα 6.84. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με χάρτες που προέκυψαν από τη διαδικασία της συνταύτισης με το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρα: 7×7 , 15×15 , 31×31 σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank με παράθυρο: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 .

Ακόμα, παρατίθενται ενδεικτικά στο Σχ. 6.85 ορισμένα από τα ιστογράμματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των χαρτών του Σχ. 6.83 με τον αληθή χάρτη παράλλαξης, καθώς επίσης ο Πίνακας 6.22 με τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση και, τέλος, ο Πίνακας 6.23 με το ποσοστό των διαφορών των εικονοψηφίδων με τιμή κάτω των 2 pixel.



(α)



Σχήμα 6.85. Ιστογράμματα από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρα 11×11, 21×21 σε εικόνες μετασχηματισμένες με rank με παράθυρα: (α) 7×7, (β) 11×11.

Πίνακας 6.22. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση)

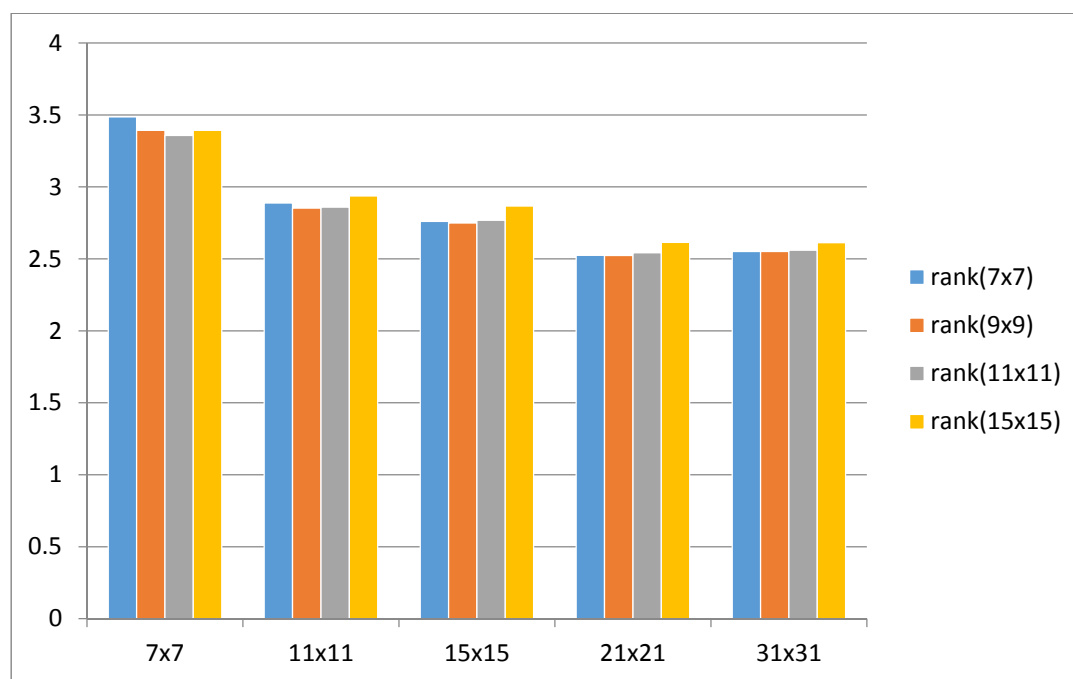
$m \times n$	Αρχικές εικόνες		<i>rank</i> 7×7		<i>rank</i> 9×9		<i>rank</i> 11×11		<i>rank</i> 15×15	
7×7	4.43	7.99	3.49	7.67	3.39	7.53	3.36	7.47	3.39	7.55
11×11	4.12	7.74	2.89	6.96	2.85	6.88	2.86	6.88	2.94	7.05
15×15	3.87	7.47	2.76	6.41	2.75	6.37	2.77	6.38	2.87	6.59
21×21	3.79	7.28	2.53	6.10	2.52	6.07	2.54	6.07	2.61	6.16
31×31	3.78	7.17	2.55	5.98	2.55	5.96	2.56	5.95	2.61	6.00

Πίνακας 6.23 Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από αληθείς για παράθυρα $m \times n$ ($\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	Αρχικές εικόνες	<i>rank</i> 7×7	<i>rank</i> 9×9	<i>rank</i> 11×11	<i>rank</i> 15×15
7×7	70.98	81.88	82.22	82.24	81.98
11×11	73.34	81.90	81.77	81.57	81.01
15×15	74.76	84.36	83.78	83.78	83.15
21×21	74.67	81.41	81.12	80.72	79.91
31×31	73.65	78.99	78.91	78.59	77.98

Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.22 προκύπτει πως, και για αυτό το δεύτερο μοντέλο, με την εφαρμογή του μετασχηματισμού rank στις αρχικές εικόνες οι τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση. Τα βέλτιστα αποτελέσματα παρατηρούνται για τα μεσαία παράθυρα μετασχηματισμού (9×9 και 11×11) και για τα μεγαλύτερα παράθυρα συνταύτισης. Αντίστοιχα, από τα στοιχεία του Πίνακα 6.23 προκύπτει επίσης αισθητή βελτίωση των ποσοστών των μικρών διαφορών παράλλαξης στην περίπτωση όπου έχει γίνει μετασχηματισμός των εικόνων πριν από τη διαδικασία συνταύτισης. Οι σχετικά καλύτερες τιμές των ποσοστών παρατηρούνται για μικρά παράθυρα μετασχηματισμού (7×7, 9×9). Πάντως, όπως έχει διαπιστωθεί και για το πρώτο στερεομοντέλο, το μέγεθος του παραθύρου μετασχηματισμού δεν φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο, γεγονός που γίνεται εύκολα αντιληπτό και στο διάγραμμα του Σχ. 6.86.

Συμπερασματικά: όπως και για το πρώτο μοντέλο, το προϊόν της συνταύτισης σε εικόνες που έχουν προηγουμένως υποστεί μετασχηματισμό rank δίνουν σαφώς καλύτερα αποτελέσματα από κάθε άλλη μέθοδο που δοκιμάστηκε στα προηγούμενα.



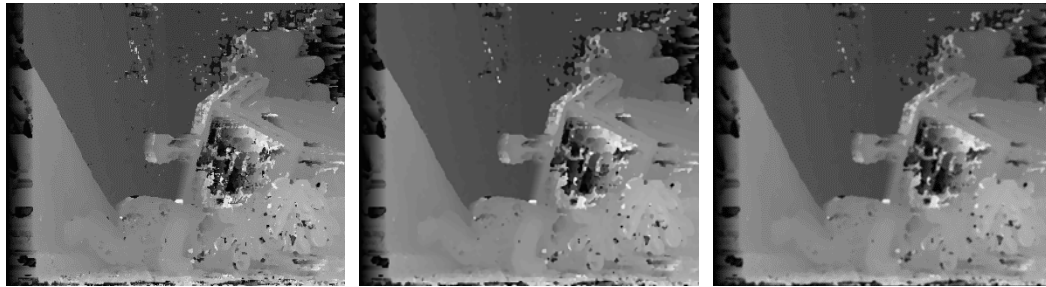
Σχήμα 6.86. Διάγραμμα μέσων όρων διαφορών παράλλαξης από συνταύτιση σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank (μέθοδος συνταύτισης: SAD).

6.2.5 Εξομάλυνση των αποτελεσμάτων της συνταύτισης

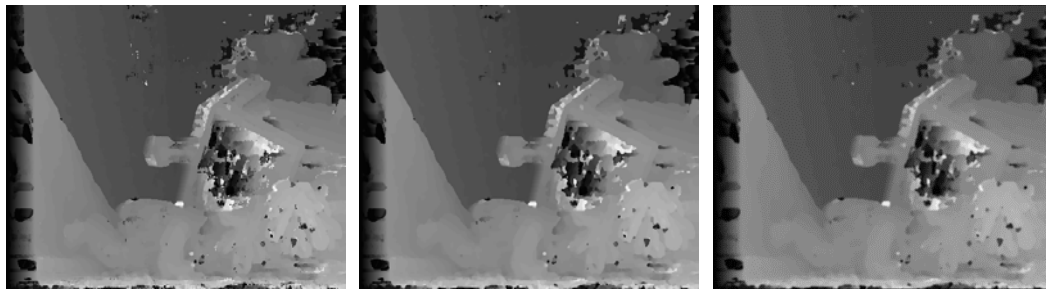
Η εξομάλυνση των αποτελεσμάτων της συνταύτισης πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 6.1.5, με σκοπό την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων και θορύβου.

6.2.5.1 Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από την μέθοδο συνταύτισης SAD

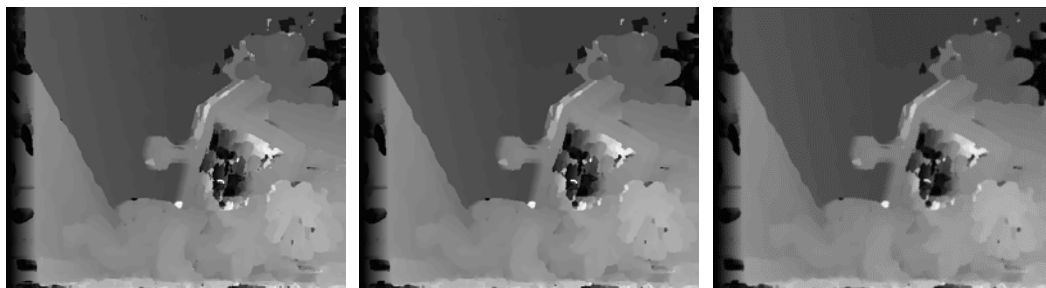
Στους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν με βάση το κριτήριο των απόλυτων διαφορών εφαρμόστηκε φίλτρο μεσαίας τιμής 3×3 , και στη συνέχεια φίλτρο μέσου όρου 3×3 . Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 6.87.



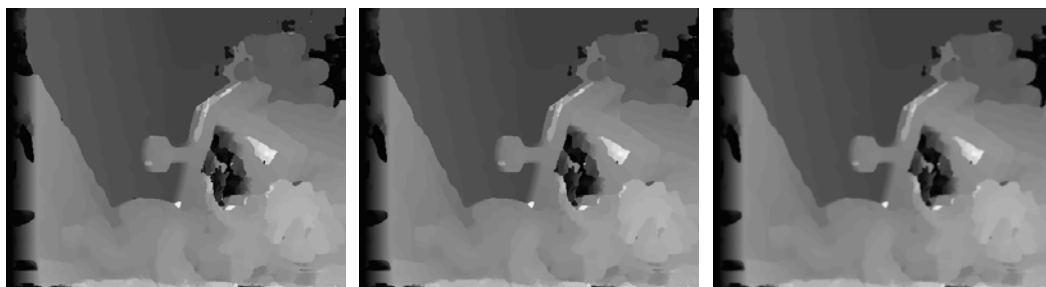
(α)



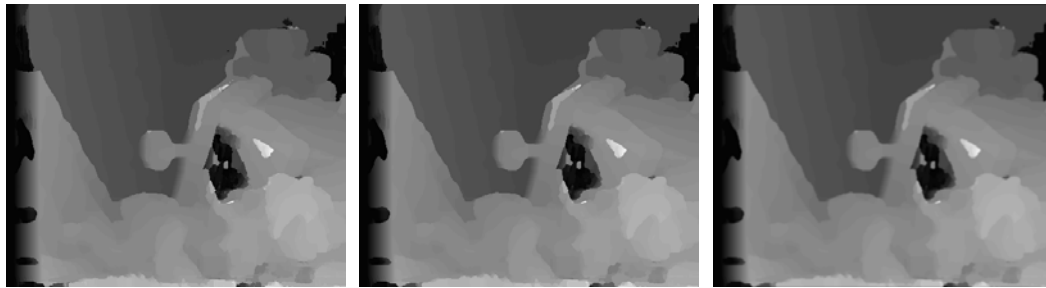
(β)



(γ)



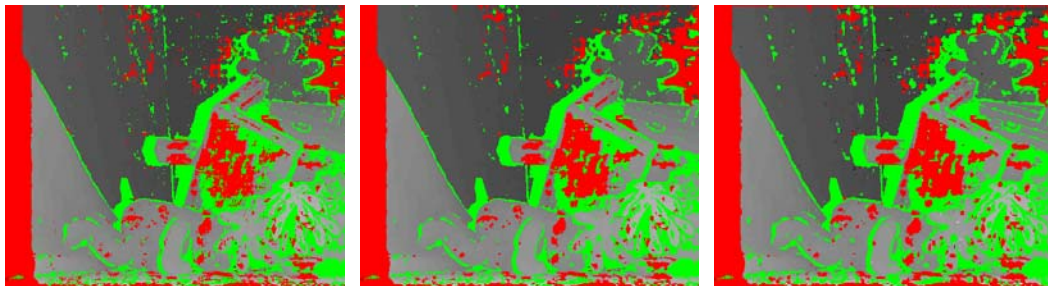
(δ)



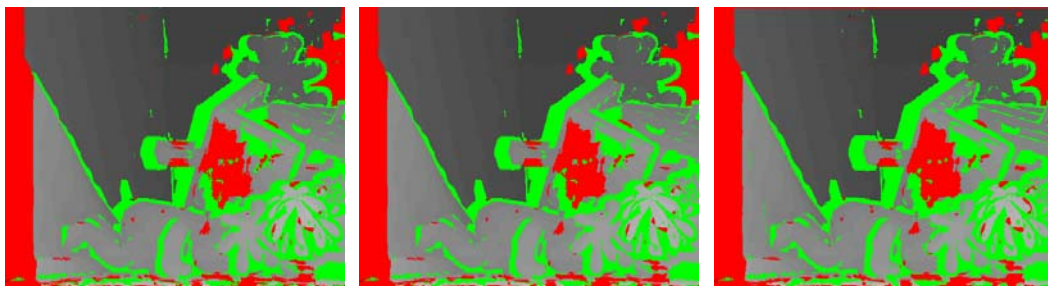
(ε)

Σχήμα 6.87. Χάρτες παράλλαξης από την εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών (SAD) και εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής (μέσον) και φίλτρου μέσου όρου (δεξιά) για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 7×7, (γ) 11×11, (δ) 15×15, (ε) 21×21.

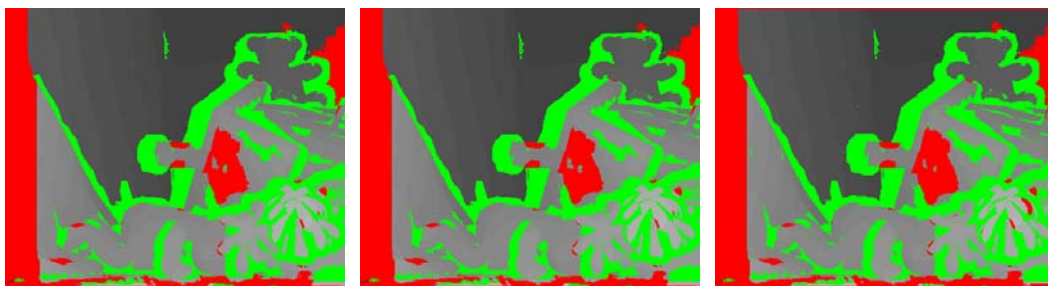
Οι εικόνες των διαφορών παράλλαξης από σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με ορισμένους από τους χάρτες του Σχ. 6.87 φαίνονται στο Σχ. 6.88.



(α)



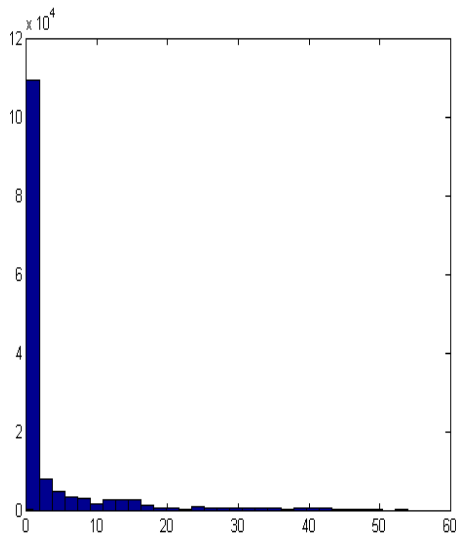
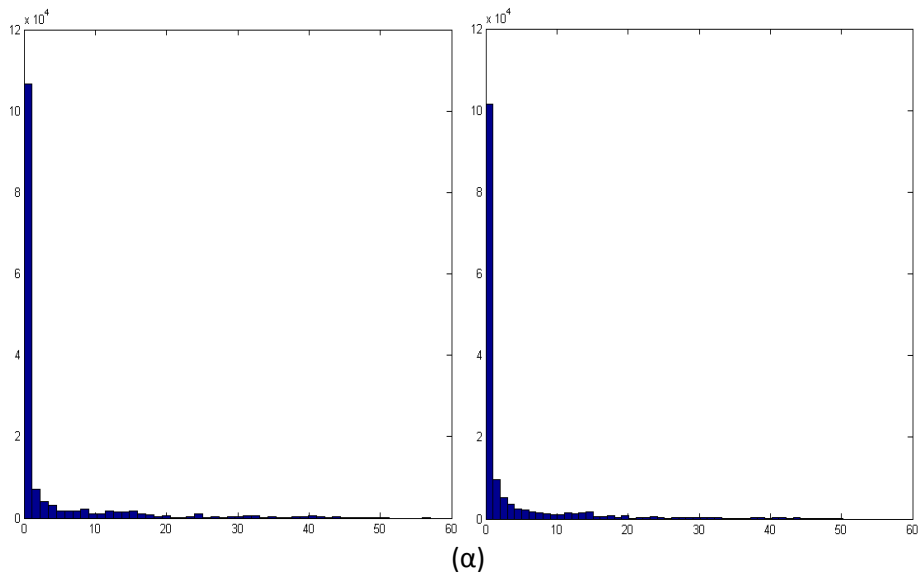
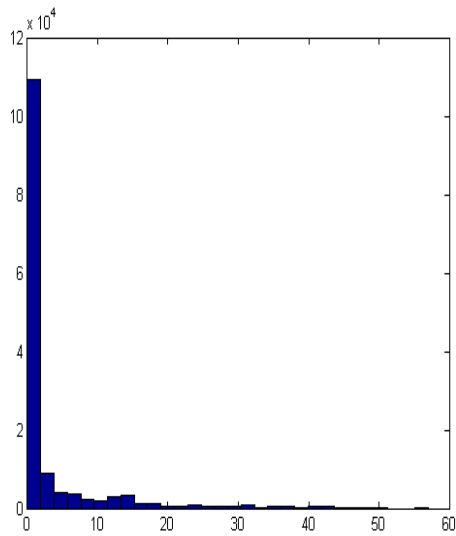
(β)

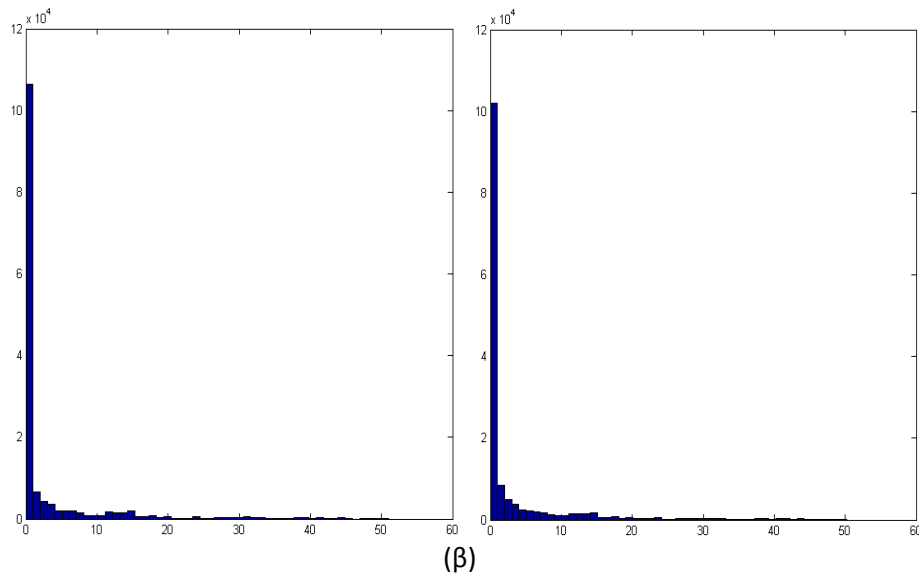


(γ)

Σχήμα 6.88. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου SAD και την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής (μέσον) και φίλτρου μέσου όρου (δεξιά) για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 11×11, (γ) 21×21.

Στη συνέχεια φαίνονται ενδεικτικά (Σχ. 6.89) ορισμένα ιστογράμματα από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες του Σχ. 6.87. Στον Πίνακα 6.24 φαίνονται, όπως στα προηγούμενα, τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών.





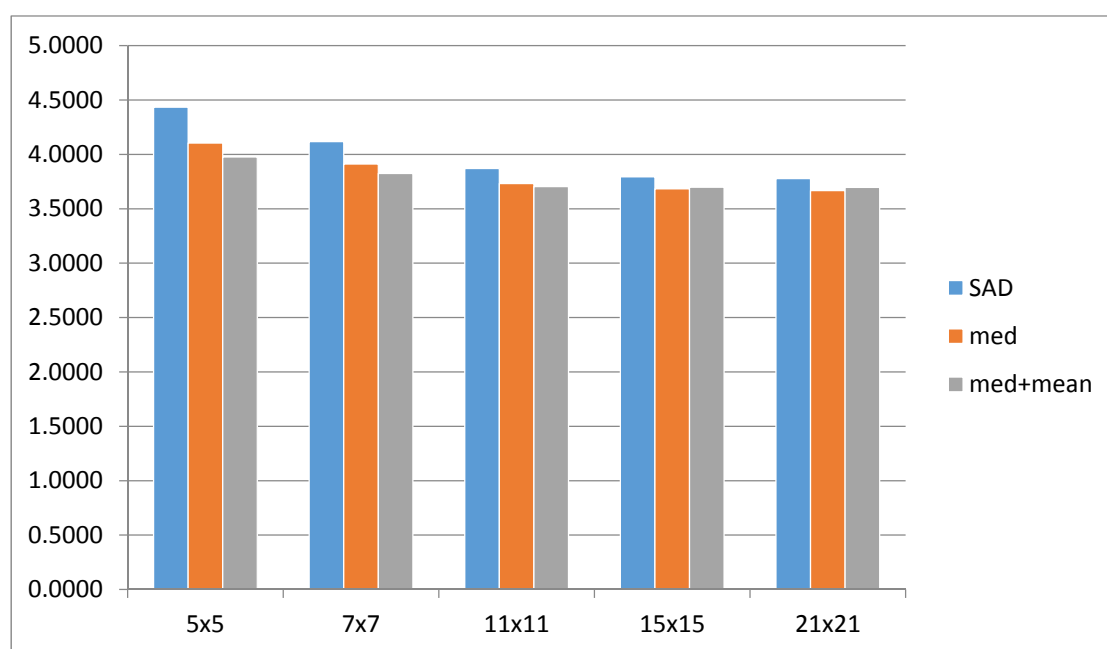
Σχήμα 6.89. Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο των απόλυτων διαφορών με εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και φίλτρο μέσου όρου για παράθυρο: (α) 11×11 και (β) 15×15 .

Πίνακας 6.24. Διαφορές των υπολογισμένων παραλάξεων (SAD) από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)									
$m \times n$	SAD			Φίλτρο μεσαίας τιμής			Φίλτρο μέσου όρου		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5x5	4.43	7.99	70.98	4.10	7.77	70.03	3.98	7.38	69.75
7x7	4.12	7.74	73.34	3.91	7.65	71.71	3.83	7.36	71.76
11x11	3.87	7.47	74.76	3.73	7.46	72.86	3.71	7.29	72.89
15x15	3.79	7.28	74.67	3.68	7.30	72.74	3.70	7.22	72.54
21x21	3.78	7.18	73.65	3.67	7.19	71.74	3.70	7.16	71.43

Στον Πίνακα 6.24 παρατηρείται πως η εφαρμογή του φίλτρου μεσαίας τιμής βελτιώνει τις τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης, αλλά παράλληλα μειώνει ελαφρώς τα ποσοστά των εικονοψηφίδων με διαφορά παράλλαξης μικρότερη των 2 pixel. Η μείωση αυτή του ποσοστού ενδεχομένως οφείλεται, όπως έχει αναφερθεί και για το πρώτο στερεοζεύγος, στο ότι στην προσπάθεια να εξαλειφθούν οι αναντιστοιχίες που προκύπτουν κατά τη συνταύτιση το φίλτρο μεσαίας τιμής αντλεί πληροφορία από τα γειτονικά pixel, γεγονός που βελτιώνει τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση των διαφορών. Όπως είναι λογικό όμως, υπάρχει και ένα μικρό ποσοστό σωστών αντιστοιχιών που ελαφρώς επιδεινώνεται και, συνεπώς, υποβιβάζεται το ποσοστό των διαφορών των εικονοψηφίδων με τιμή μικρότερη των 2 pixel.

Από τον πίνακα 6.24 προκύπτει, επιπλέον, μείωση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης με την εφαρμογή του φίλτρου μέσου όρου, με παράλληλη μείωση όμως και των ποσοστών των εικονοψηφίδων με διαφορά παράλλαξης <2 pixels. Η μείωση αυτή ενδεχομένως οφείλεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην “θόλωση” των ακμών από την εφαρμογή του φίλτρου του μέσου όρου στις εικόνες.

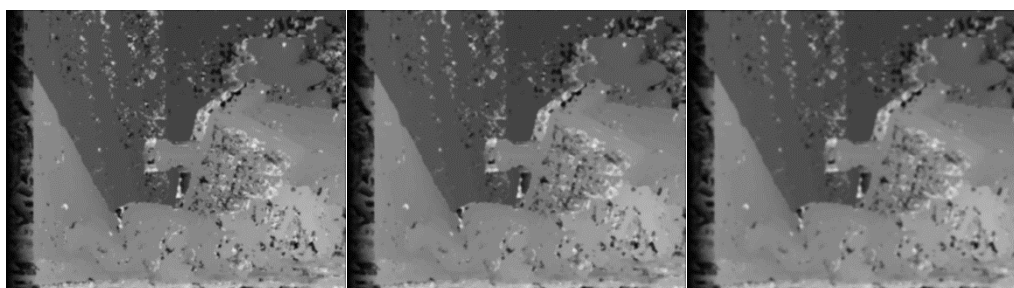
Για πιο άμεση αξιολόγηση των τιμών του μέσου όρου που δίνει η σύγκριση των χαρτών παραλλάξεων με και χωρίς εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και φίλτρου μέσου όρου, παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχ. 6.90 οι τιμές αυτές για κάθε ένα από τα παράθυρα που χρησιμοποιήθηκε.

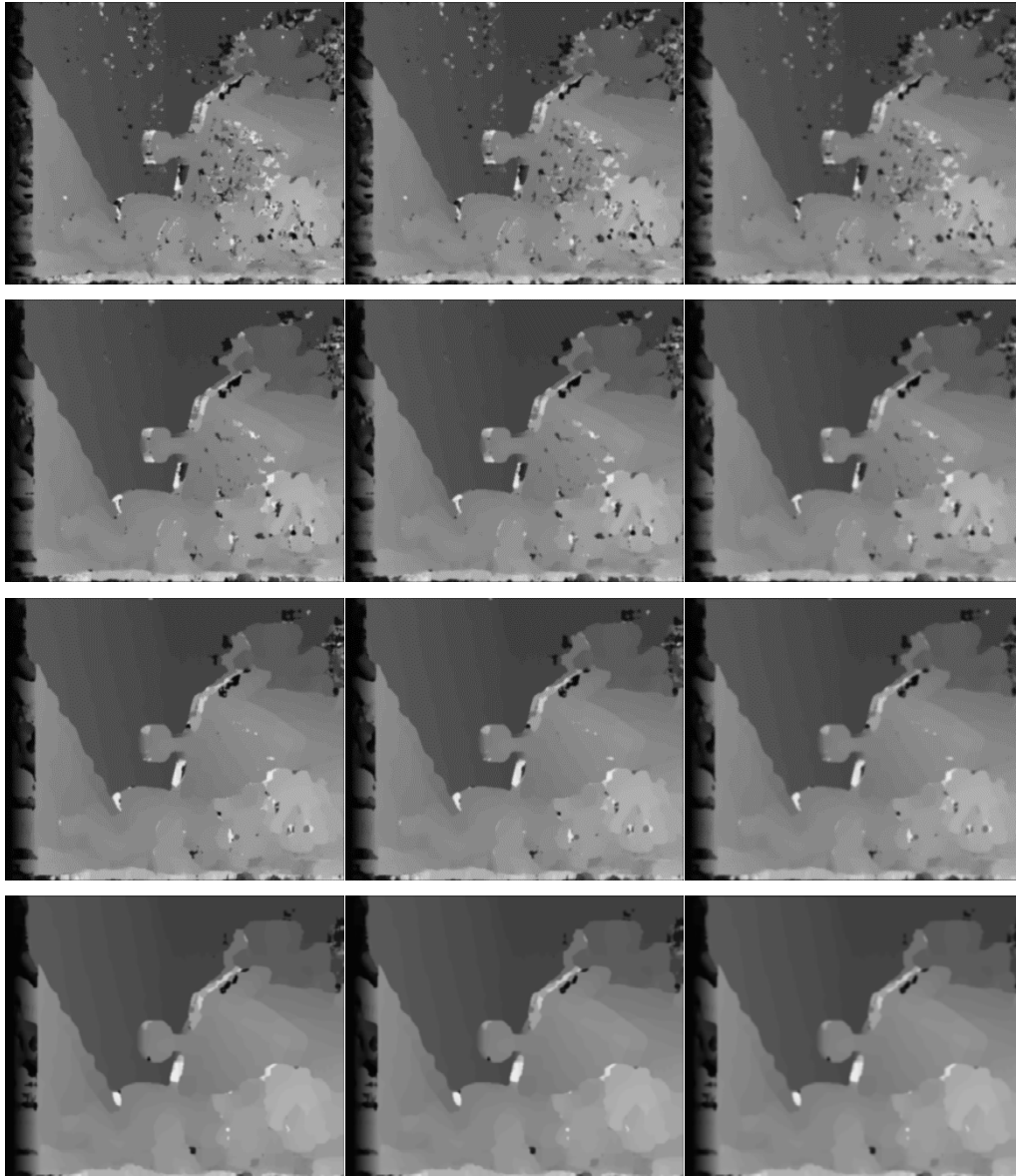


Σχήμα 6.90. Διάγραμμα μέσων όρων διαφορών παράλλαξης από τις αληθείς τιμές.

6.2.5.2 Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες κλίσης

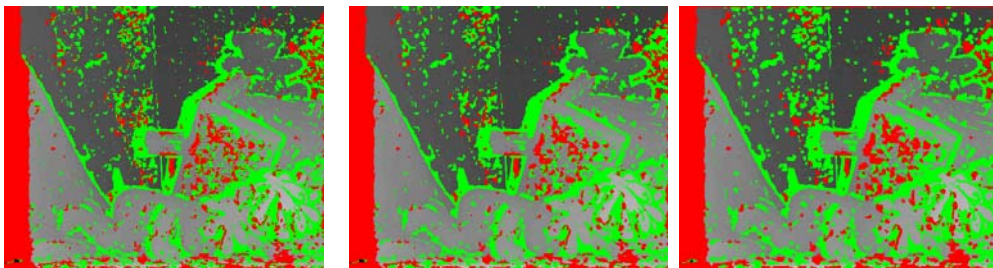
Όσον αφορά το αποτέλεσμα συνταύτισης σε εικόνες κλίσης, οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν μετά από εφαρμογή φίλτρου Gauss (ενότητα 6.2.3) υπέστησαν επεξεργασία διαδοχικά με φίλτρο μεσαίας τιμής και φίλτρο μέσου όρου (Σχ.6.91).



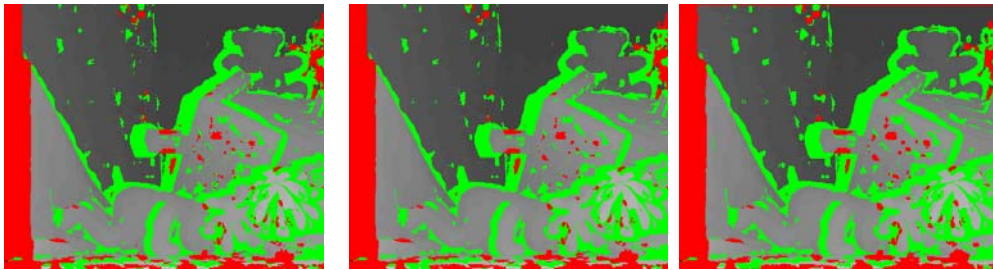


Σχήμα 6.91. Χάρτες παράλλαξης βάσει του κριτηρίου SAD για παράθυρα (από πάνω προς τα κάτω) 5×5 , 7×7 , 11×11 , 15×15 , 21×21 σε εικόνες κλίσης μετά από φιλτράρισμα Gauss (αριστερά) και εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και μέσου όρου στους χάρτες παράλλαξης.

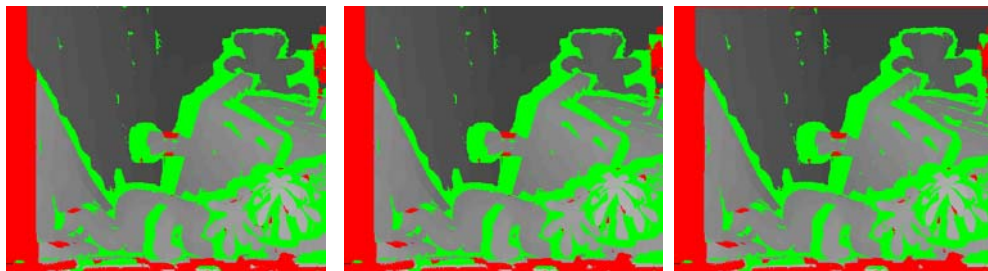
Οι εικόνες των διαφορών από σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με τους χάρτες αυτούς παρουσιάζονται στο Σχ. 6.92.



(α)



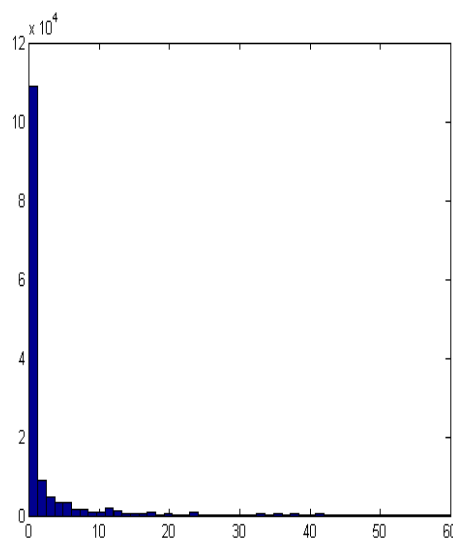
(β)

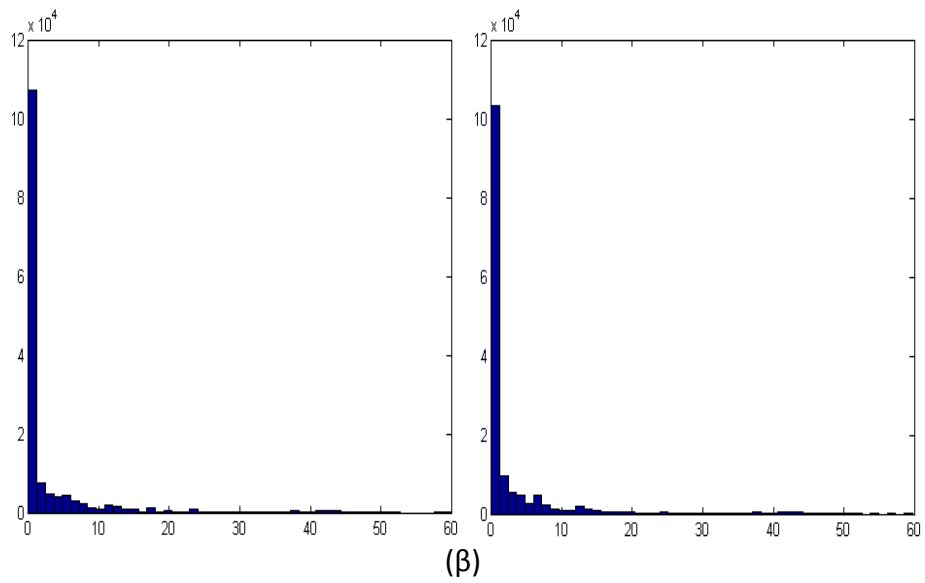
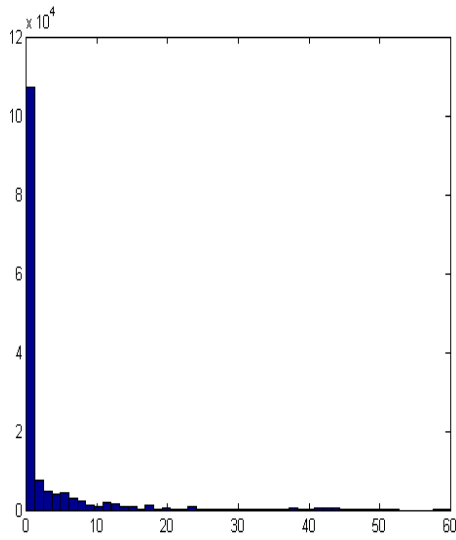
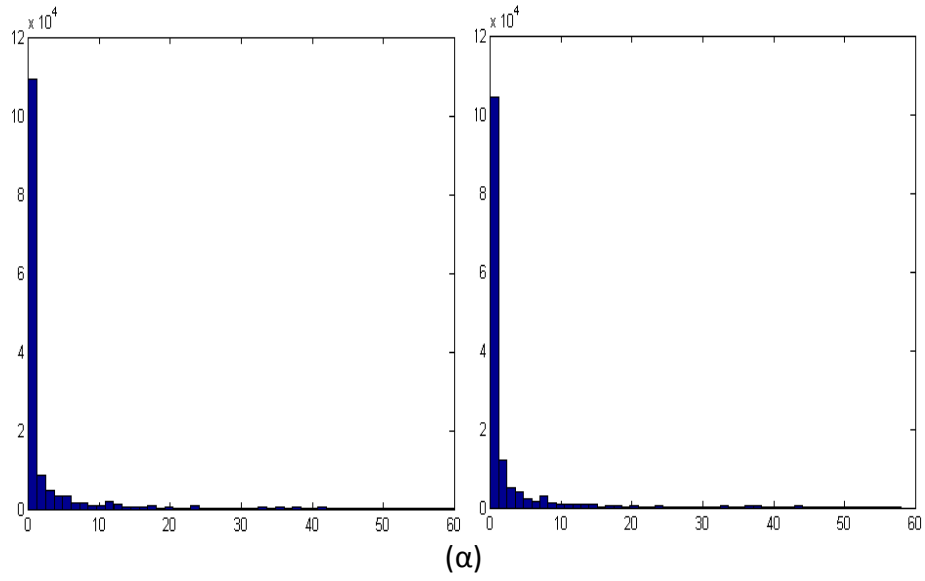


(γ)

Σχήμα 6.92. Εικόνες διαφορών από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης (μετά από την εφαρμογή φίλτρου Gauss) και την εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου στους χάρτες παράλλαξης για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 , (γ) 21×21 .

Στην συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένα από τα ιστογράμματα που προέκυψαν από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες που προέρχονται από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης μετά από εφαρμογή φίλτρου Gauss και εν συνεχεία εφαρμογή σε αυτούς φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου (Σχ. 6.93). Επιπλέον, παρατίθενται τα στατιστικά στοιχεία (μέσος όρος, τυπική απόκλιση) καθώς και το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης των εικονοψηφίδων με τιμή μικρότερη από 2 pixel που προκύπτουν από τα ιστογράμματα αυτά (Πίνακας 6.25).





Σχήμα 6.93. Ιστογράμματα διαφορών από εικόνες κλίσης φιλτραρισμένες με Gauss, και με εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου. Παράθυρα: (α) 11×11, (β) 21×21.

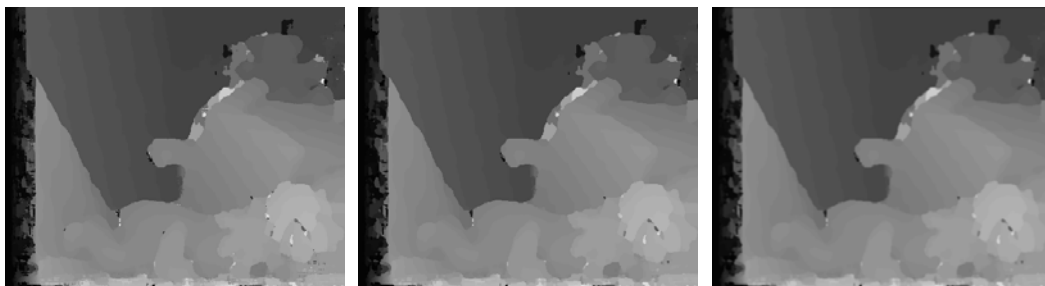
Πίνακας 6.25. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	SAD σε εικόνες κλίσης φιλτραρισμένες με φίλτρο Gauss			Φίλτρο μεσαίας τιμής			Φίλτρο μέσου όρου		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	4.44	8.48	66.72	4.00	7.96	68.90	3.81	7.30	68.61
7×7	3.77	7.82	71.32	3.57	7.56	72.33	3.46	7.11	72.73
11×11	3.27	7.23	74.51	3.22	7.15	74.84	3.21	6.96	75.34
15×15	3.18	7.02	74.78	3.16	6.99	74.90	3.18	6.90	75.15
21×21	3.21	6.83	73.20	3.20	6.81	73.22	3.24	6.78	73.19

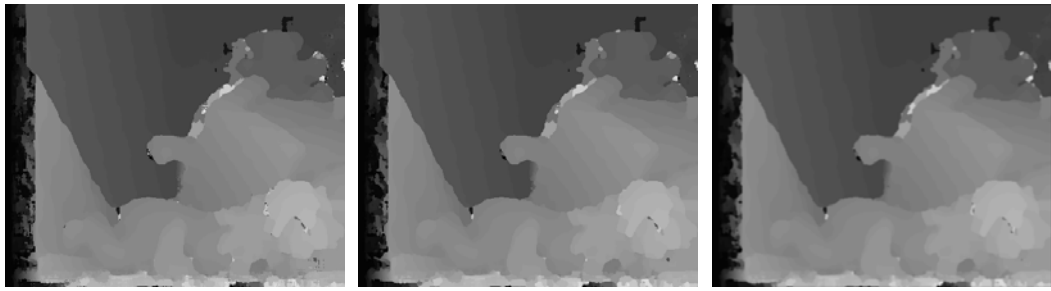
Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.25 προκύπτει ότι η εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής στους χάρτες παράλλαξης βελτιώνει τις τιμές μέσου όρου και τυπικής απόκλισης των διαφορών (για τα μικρότερα παράθυρα), όχι όμως ουσιαστικά και το ποσοστό των σωστών συνταυτίσεων. Ακόμα, η εφαρμογή φίλτρου μέσου όρου επιφέρει μια επιπλέον μείωση των τιμών των τυπικών αποκλίσεων, αφού εξομαλύνει περαιτέρω τις ακραίες τιμές διαφορών, χωρίς να μεταβάλλει ιδιαίτερα τις τιμές του μέσου όρου και του ποσοστού των διαφορών.

6.1.5.3 Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες rank

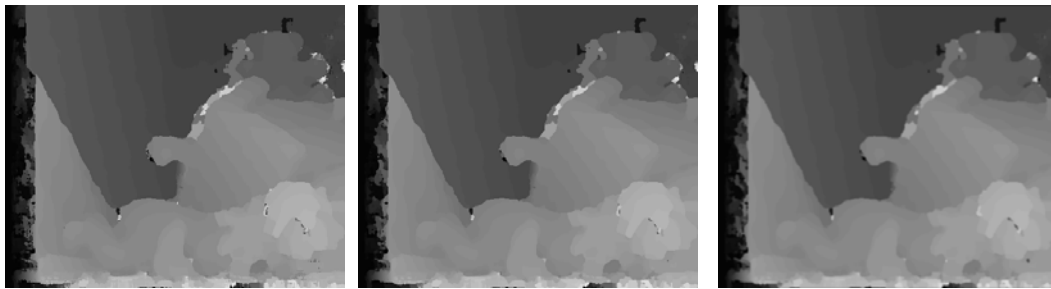
Στις εικόνες παράλλαξης που προέκυψαν βάσει του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD), για παράθυρο 15×15 , από εικόνες στις οποίες είχε προηγουμένως εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός κατάταξης rank (με παράθυρα: 7×7 , 9×9 , 11×11 , 15×15) εφαρμόστηκε φίλτρο μεσαίας τιμής 3×3 και στην συνέχεια, στις νέες εικόνες παράλλαξης, εφαρμόστηκε φίλτρο μέσου όρου 3×3 . Οι εικόνες παράλλαξης που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία φαίνονται στο Σχ. 6.94. Η απεικόνιση των διαφορών που προέκυψαν από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τα αποτελέσματα του Σχ. 6.94 παρουσιάζονται στο Σχ. 6.95.



(α)



(β)

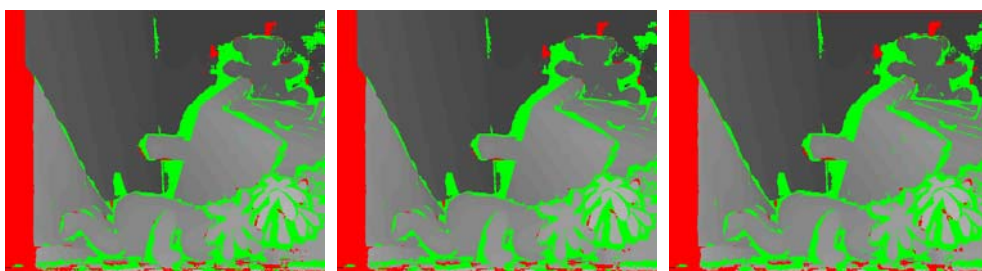


(γ)

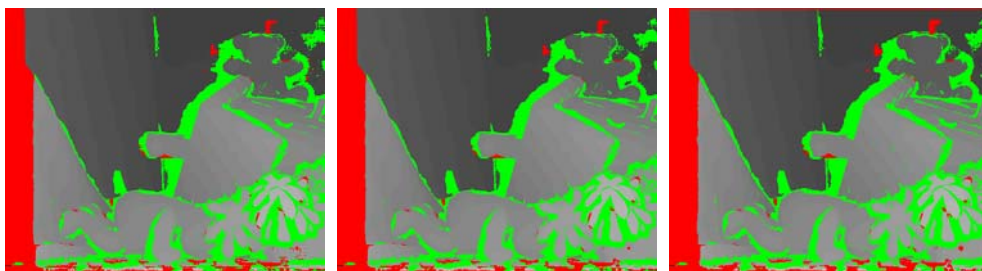


(δ)

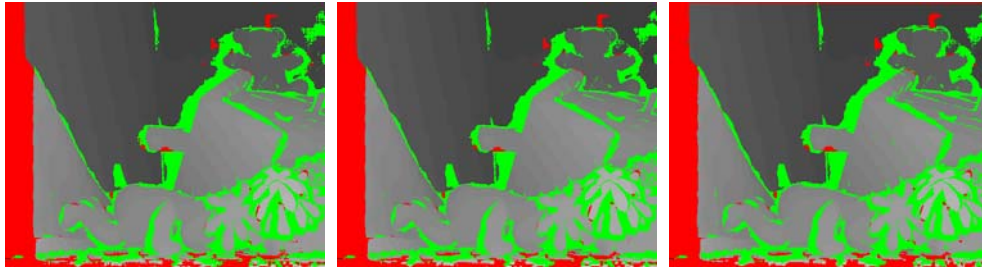
Σχήμα 6.94. Χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου SAD (παράθυρο 15×15) σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό g_{aff} για παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 , και εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής (μέσον) και μέσου όρου (δεξιά).



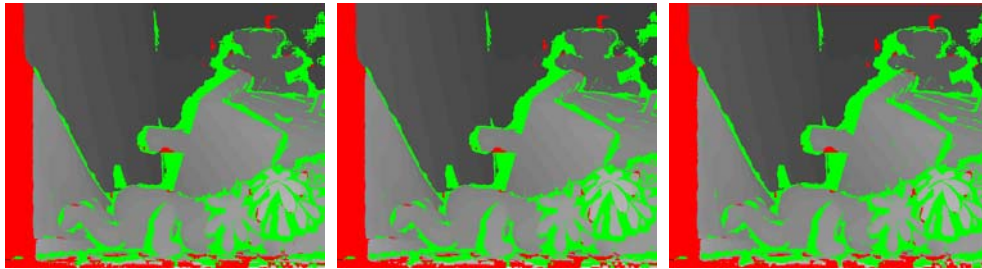
(α)



(β)



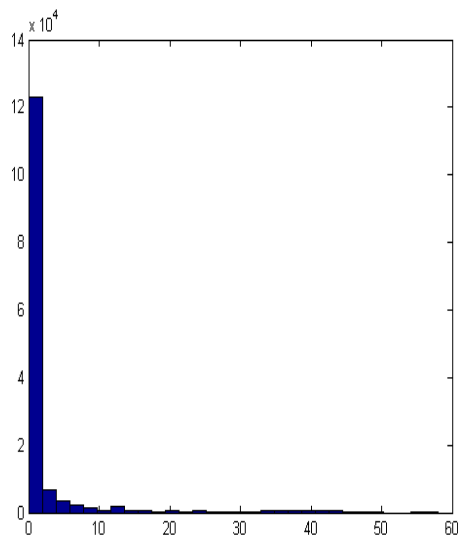
(γ)

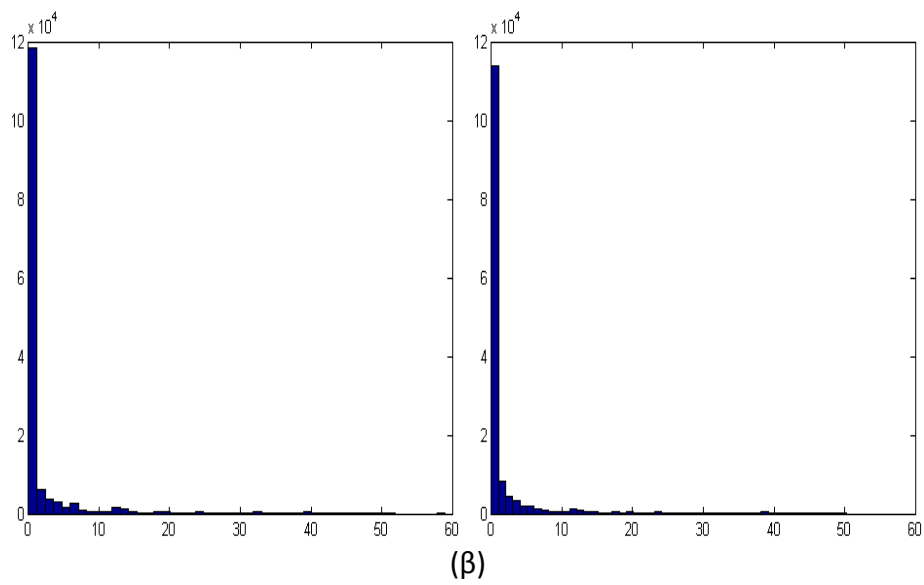
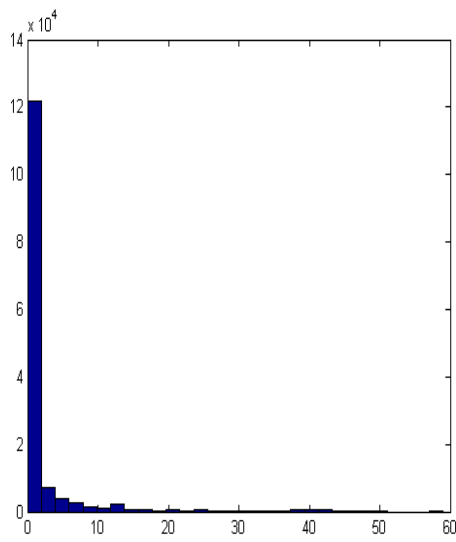
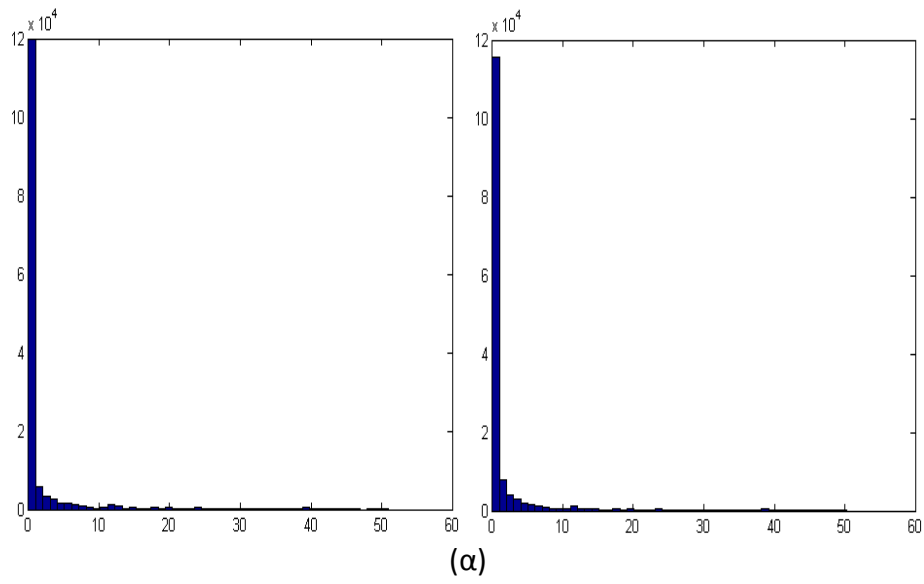


(δ)

Σχήμα 6.95. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από εφαρμογή κριτηρίου SAD (παράθυρο 15×15) σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank για παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 , και εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής (μέσον) και μέσου όρου (δεξιά).

Στο Σχ. 6.96 παρατίθενται, ενδεικτικά, κάποια από τα ιστογράμματα της σύγκρισης του αληθούς χάρτη με κάθε μια από τις εικόνες παράλλαξης του Σχ. 6.35, ενώ ο Πίνακας 6.26 περιλαμβάνει τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών και τα ποσοστά τους με τιμή μικρότερη από 2 pixel.



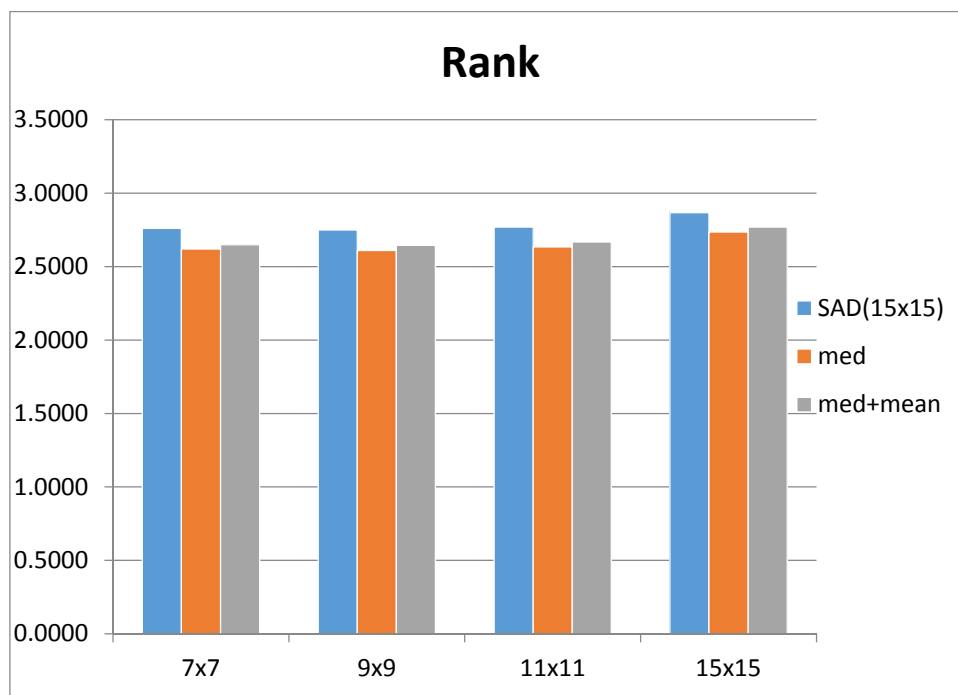


Σχήμα 6.96. Ιστογράμματα από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε έναν από τους χάρτες παράλλαξης του Σχ. 6.94 για παράθυρα rank: (α) 9×9 , (β) 15×15 .

Πίνακας 6.26. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από τις αληθείς για παράθυρο 15×15 (μ: μέσος όρος, σ: τυπική απόκλιση, π[-1, 1]: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

Παράθυρο rank	SAD			Φίλτρο μεσαίας τιμής			Φίλτρο μέσου όρου		
	μ	σ	π[-1, 1]	μ	σ	π[-1, 1]	μ	σ	π[-1, 1]
7×7	2.76	6.41	84.36	2.62	6.38	82.30	2.65	6.32	81.90
9×9	2.75	6.37	84.14	2.61	6.34	82.04	2.64	6.28	81.67
11×11	2.77	6.38	83.78	2.63	6.36	81.61	2.67	6.30	81.28
15×15	2.87	6.59	83.15	2.73	6.56	80.90	2.77	6.47	80.61

Στον Πίνακα 6.26 παρατηρείται μείωση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης με εφαρμογή του φίλτρου μεσαίας τιμής. Η εφαρμογή του φίλτρου μέσου όρου επιφέρει μικρή βελτίωση των τιμών της τυπικής απόκλισης. Η εξομάλυνση όμως, όπως και στο πρώτο μοντέλο, έχει παράλληλα ως συνέπεια ότι τα ποσοστά διαφορών που είναι μικρότερες των 2 pixel περιορίζονται.

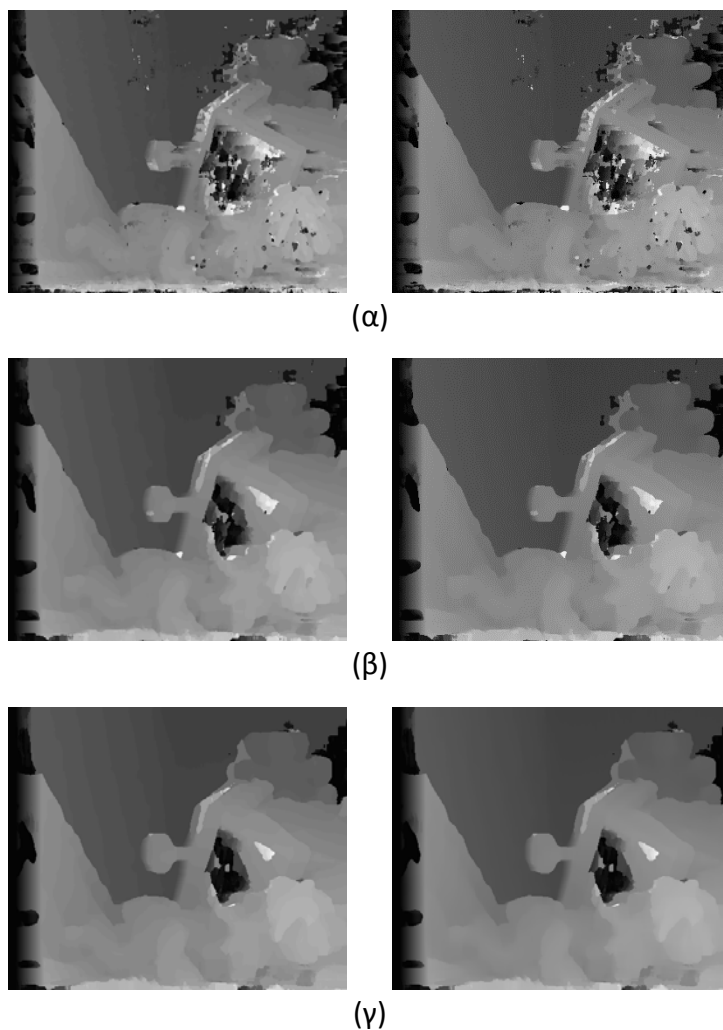


Σχήμα 6.97. Διάγραμμα τιμών μέσου όρου των διαφορών παράλλαξης σε συνταύτιση εικόνων rank και εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης στον χάρτη παραλλάξεων.

Τέλος, για την άμεση σύγκριση των τιμών του μέσου όρου που προέκυψαν από τη σύγκριση των χαρτών παράλλαξης με και χωρίς τη χρήση φίλτρων, παρατίθεται διάγραμμα με τις τιμές αυτές (Σχ. 6.97), όπου φαίνεται η επίδραση των φίλτρων.

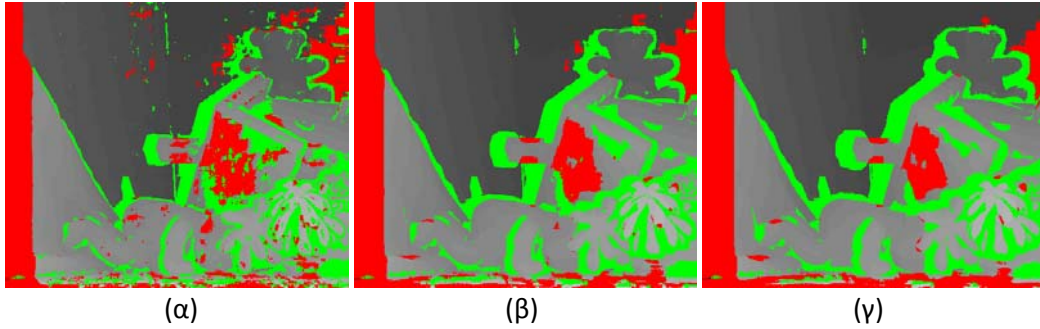
6.2.6 Υποψηφιακή παρεμβολή (sub-pixel refinement)

Τα αποτελέσματα από παρεμβολή πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού στις διακριτές τιμές του τρισδιάστατου πίνακα κόστους (DSI), με σκοπό την επίτευξη ακρίβειας στον προσδιορισμό της παράλλαξης καλύτερης του ρικελ, παρουσιάζονται στο Σχ. 6.68. Η υποψηφιακή εκτίμηση της παράλλαξης έγινε για τις τιμές παράλλαξης που προέκυψαν για μεγέθη παραθύρου 7×7, 15×15 και 21×21.



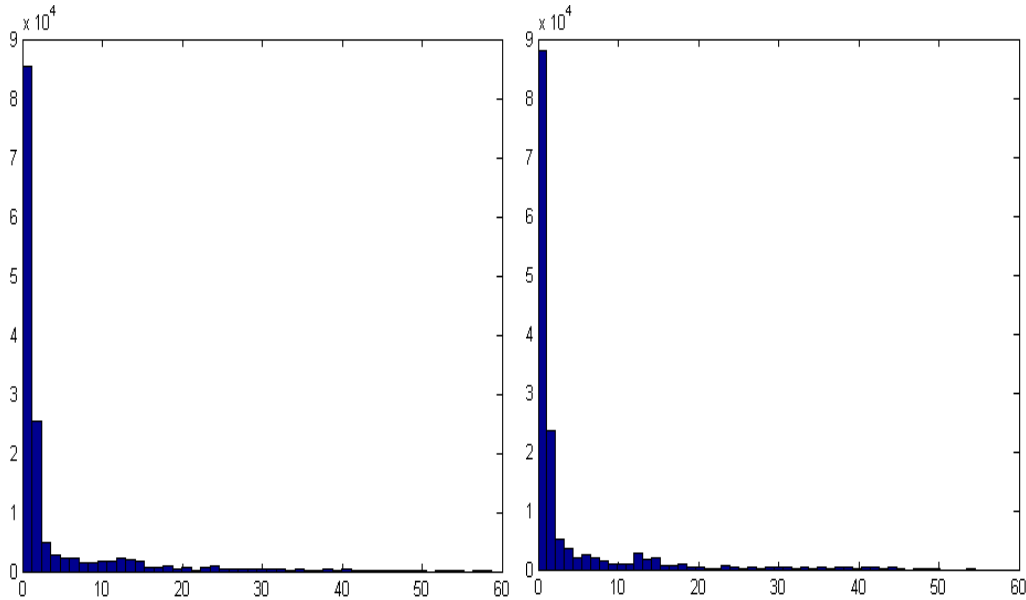
Σχ. 6.98. Χάρτες παράλλαξης με βάση το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (αριστερά) και αποτέλεσμα παρεμβολής πολυωνύμου με σκοπό την υποψηφιακή εκτίμηση της παράλλαξης (δεξιά) για παράθυρα: (α) 7×7, (β) 15×15, και (γ) 21×21.

Για τις εικόνες αυτές έγινε σύγκριση με τον αληθή χάρτη, από την οποία προέκυψαν οι εικόνες διαφορών που φαίνονται στο Σχ. 6.99.



Σχ. 6.99. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε έναν από τους χάρτες του Σχ. 6.98 (δεξιά στήλη) για παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 15×15 , και (γ) 21×21 .

Τα ιστογράμματα των διαφορών από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους του Σχ. 6.98 (δεξιά στήλη), για παράθυρα 7×7 και 15×15 , φαίνονται στο Σχ. 6.100. Ο Πίνακα 6.27 δείχνει τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ποσοστό διαφορών παράλλαξης Δd στο διάστημα $-1.5 \leq \Delta d \leq 1.5$).



Σχ. 6.100. Ιστογράμματα διαφορών παράλλαξης των χαρτών που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών με παρεμβολή πολυωνύμου 2^{ou} βαθμού, για παράθυρα: 7×7 (αριστερά) και 15×15 (δεξιά).

Πίνακας 6.27. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1.5 \leq \Delta d \leq 1.5$)						
$m \times n$	SAD			Υποψηφιακή παρεμβολή		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
7×7	4.12	7.74	73.34	4.03	7.77	69.59
15×15	3.79	7.28	74.67	3.69	7.30	71.34
21×21	3.78	7.17	73.65	3.67	7.18	70.37

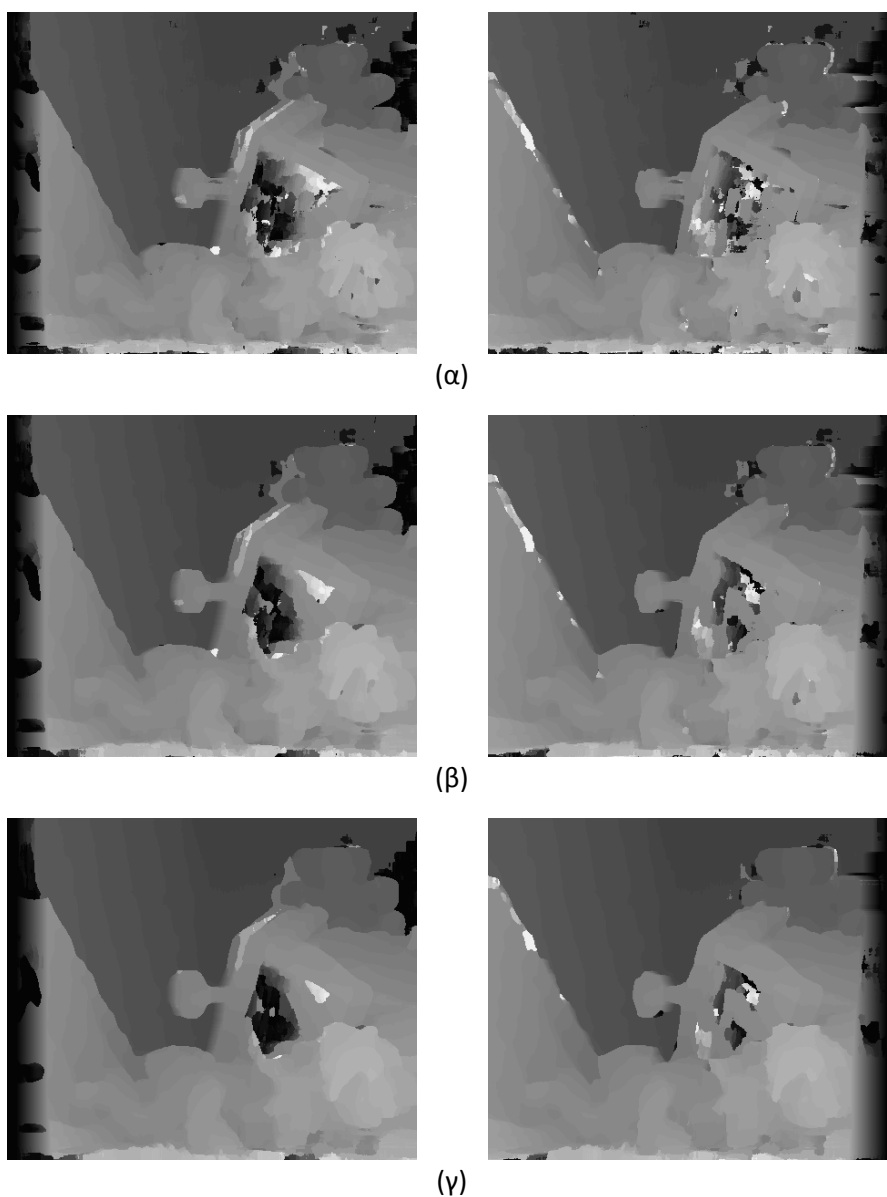
Από τον πίνακα αυτό προκύπτει ότι υπάρχει απλώς μια πολύ μικρή βελτίωση στις τιμές του μέσου όρου, πράγμα αναμενόμενο (όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 6.1.6).

6.2.7 Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας

Έγινε και εδώ έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας για όλα τα κριτήρια συνταύτισης.

6.2.7.1 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD

Για το κριτήριο του SAD ο έλεγχος έγινε για παράθυρα 11×11 , 15×15 , 21×21 . Οι χάρτες παράλλαξης για κάθε εικόνα του στερεοζεύγους παρουσιάζονται στο Σχ. 6.101.



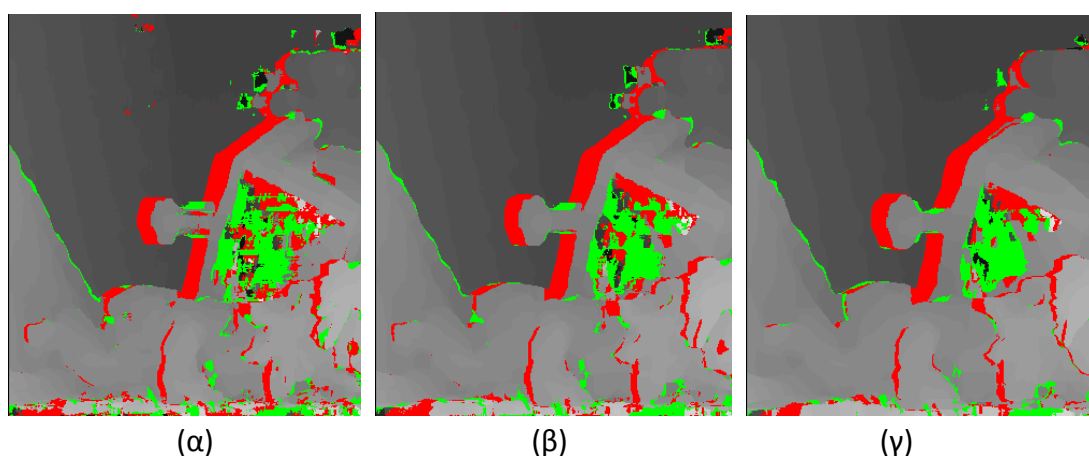
Σχήμα 6.101. Χάρτες παράλλαξης της αριστερής (αριστερά) και της δεξιάς εικόνας (δεξιά) που προέκυψαν από το κριτήριο SAD για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 15×15 και (γ) 21×21 .

Τα αποτελέσματα του ελέγχου των χαρτών παράλλαξης φαίνονται στον Πίνακα 6.28 μαζί με εκείνα που προήλθαν από τη σύγκριση των αρχικά υπολογισμένων χαρτών με τον αληθή χάρτη παράλλαξης.

Πίνακας 6.28. Διαφορές των υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
11×11	3.87	7.47	74.76	86.21	2.29	5.74	84.81
15×15	3.79	7.28	74.67	87.99	2.39	5.83	83.47
21×21	3.78	7.17	73.65	89.45	2.48	5.90	81.15

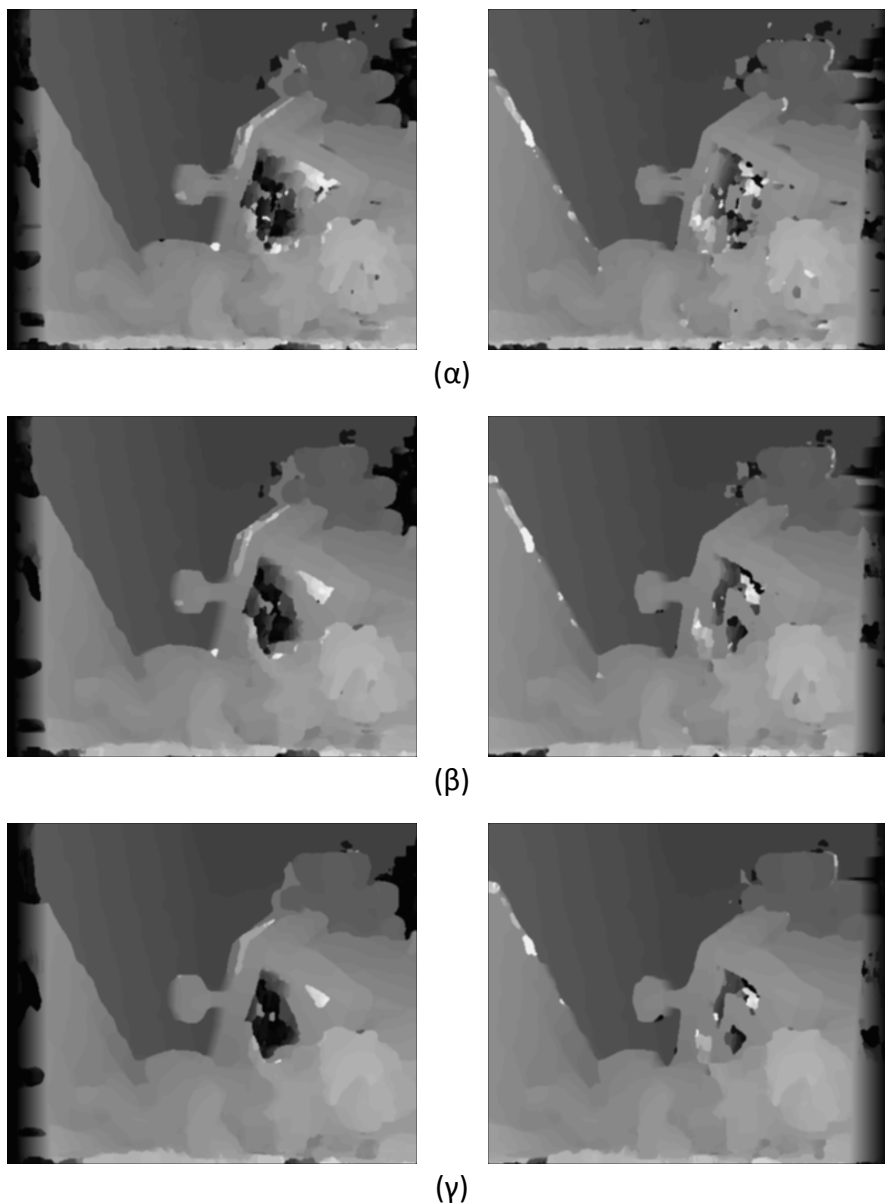
Όπως και στην ενότητα 6.1.7.1, εδώ ως κατώφλι διαφοράς παράλλαξης για την αποδοχή των ομολογιών τέθηκε το 1 pixel. Τα αποτελέσματα μετά από τον έλεγχο συμβατότητας εμφανίζουν τιμές για τις διαφορές θέσης των σημείων της εικόνας αναφοράς σε σχέση τον αληθή χάρτη βάθους μόνο για όσες εικονοψηφίδες έχουν περάσει τον έλεγχο. Από τον πίνακα 6.28 προκύπτει ότι ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τις τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης των τιμών που απομένουν, όσο και του ποσοστού των διαφορών με τιμή μικρότερη από 2 pixel, δηλαδή οι εικονοψηφίδες που εντοπίζονται (περί το 12% του συνόλου) όντως εμφανίζουν, γενικά, μεγάλα σφάλματα παράλλαξης. Το Σχ. 6.102 εμφανίζει τους χάρτες παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προήλθαν από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης, όπου διακρίνονται όσα σημεία απορρίφθηκαν κατά τον έλεγχο.



Σχήμα 6.102: Χάρτες παράλλαξης που εμφανίζουν τα σημεία που αποκλείστηκαν κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.

6.2.7.2 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD και εξομάλυνση

Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας πραγματοποιήθηκε και για τους φιλτραρισμένους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (ενότητα 6.2.5.1). Οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν για κάθε εικόνα του στερεοζεύγους μετά από την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και φίλτρο μέσου όρου παρουσιάζονται στο Σχ. 6.103.



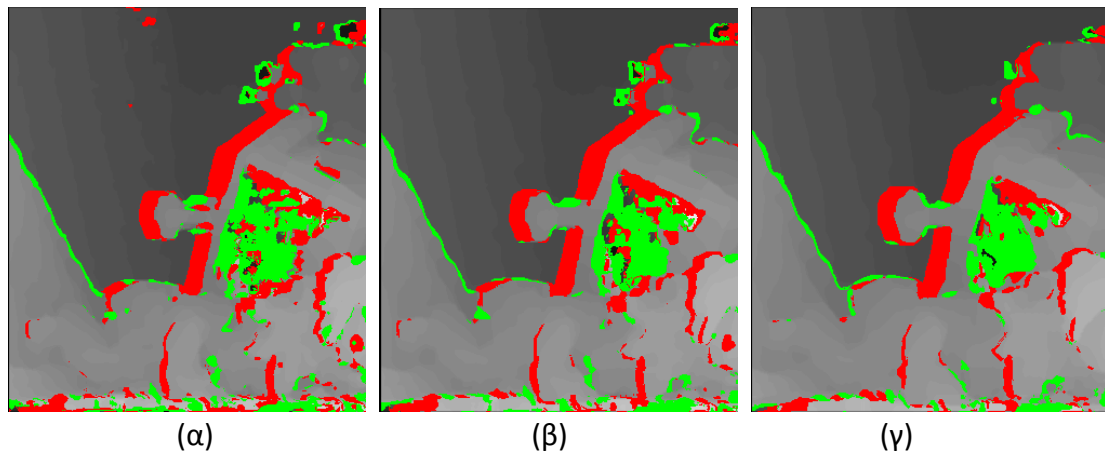
Σχήμα 6.103. Φιλτραρισμένοι χάρτες παράλλαξης της αριστερής και της δεξιάς εικόνας που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.

Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας των χαρτών παράλλαξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.29.

Πίνακας 6.29. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών και εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
11×11	3.72	7.29	73.24	82.88	2.06	5.41	87.29
15×15	3.70	7.22	72.80	84.81	2.21	5.59	85.63
21×21	3.70	7.16	71.75	86.67	2.36	5.80	83.15

Και στην περίπτωση αυτή η βελτίωση των τιμών των αποτελεσμάτων είναι σαφής. Οι χάρτες παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προήλθαν από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης φαίνονται στο Σχ. 6.104.

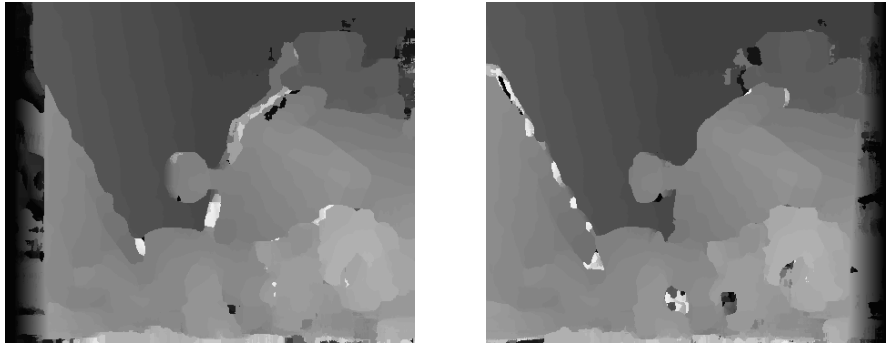


Σχήμα 6.104. Χάρτες παράλλαξης οι οποίοι εμφανίζουν τα σημεία που αποκλείστηκαν κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.

6.2.7.3 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης

Ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας πραγματοποιήθηκε, ακόμα, για τον χάρτη παράλλαξης που προέκυψε από την εφαρμογή του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης για παράθυρο 21×21.

Οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν για τις δύο εικόνες του στερεοζεύγους παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.105.

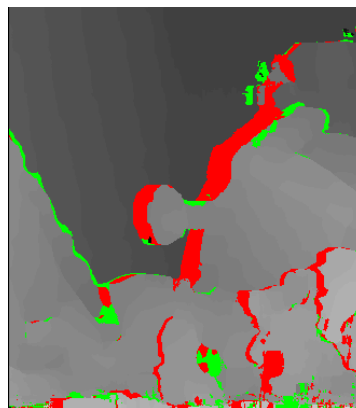


Σχήμα 6.105. Χάρτες παράλλαξης των εικόνων του στερεοζεύγους από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης (παράθυρο 21×21).

Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας των χαρτών παράλλαξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.30. Ο χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προέκυψε από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης παρουσιάζεται στο Σχ. 6.106.

Πίνακας 6.30. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
21×21	3.36	7.00	76.56	87.51	1.91	5.22	87.83

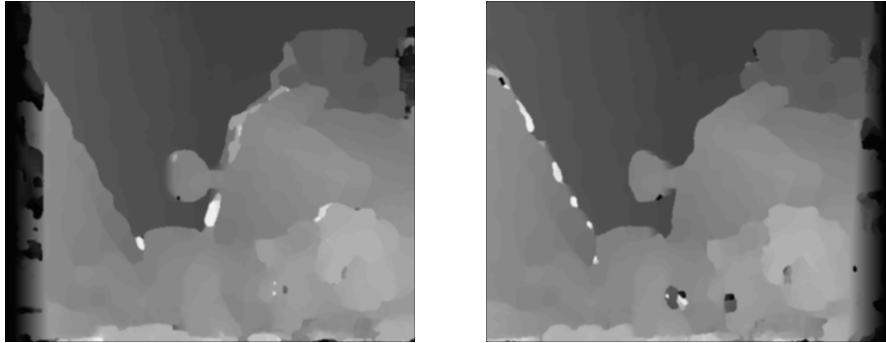


Σχήμα 6.106. Χάρτης παράλλαξης αριστερής εικόνας από έλεγχο συμβατότητας.

Παρατηρείται και εδώ μεγάλη μείωση των τιμών μέσου όρου και τυπικής απόκλισης διαφορών, καθώς και αύξηση του ποσοστού των διαφορών με τιμή < 2 pixel.

6.2.7.4 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης με εξομάλυνση

Εδώ πριν από τη συνταύτιση των εικόνων κλίσης είχε εφαρμοστεί φίλτρο Gauss και μετά πραγματοποιήθηκε η συνταύτιση για παράθυρο 21×21. Στους χάρτες παράλληλα που προέκυψαν για τις εικόνες του ζεύγους εφαρμόστηκε φίλτρο μεσαίας τιμής και φίλτρο μέσου όρου (Σχ. 6.107).

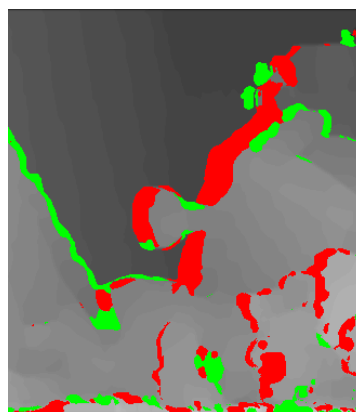


Σχήμα 6.107. Φιλτραρισμένοι χάρτες παράλληλα των δύο εικόνων από την εφαρμογή του κριτηρίου SAD σε φιλτραρισμένες (Gauss) εικόνες κλίσης.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας φαίνονται στον Πίνακα 6.31. Ο χάρτης παράλληλα της αριστερής εικόνας μετά από τον έλεγχο συμβατότητας φαίνεται στο Σχ. 6.108.

Πίνακας 6.31. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

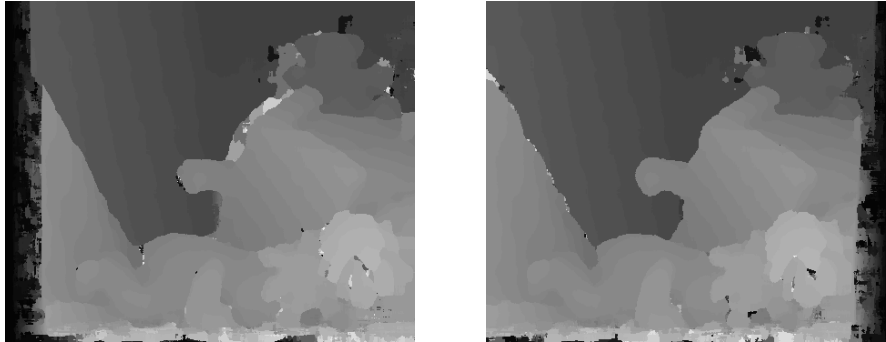
$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης με εξομάλυνση			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
21×21	3.24	6.78	73.19	91.01	5.06	2.23	83.14



Σχήμα 6.108. Χάρτης παράλληλα αριστερής εικόνας από έλεγχο συμβατότητας.

6.2.7.5 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank

Ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας πραγματοποιήθηκε επίσης για το χάρτη παράλλαξης που είχε προκύψει με κριτήριο το άθροισμα των απόλυτων διαφορών σε εικόνες μετασχηματισμένες με το φίλτρο κατάταξης rank για παράθυρο 7×7.

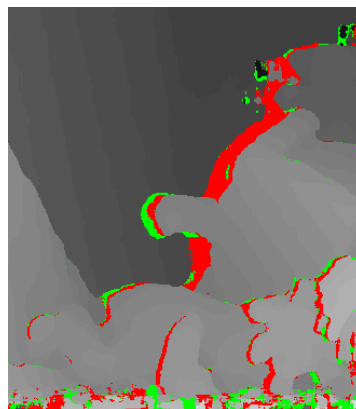


Σχήμα 6.109. Χάρτες παράλλαξης από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες μετασχηματισμένες με το φίλτρο rank.

Οι χάρτες παράλλαξης του ζεύγους για παράθυρο 15×15 φαίνονται στο Σχ. 6.109. Ο Πίνακας 6.32 δείχνει τα αποτελέσματα από τον έλεγχο των χαρτών παράλλαξης. Ο χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας μετά από τον έλεγχο συμβατότητας φαίνεται στο Σχ. 6.110. Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.32 προκύπτει ότι και εδώ οι τιμές των αποτελεσμάτων παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση. Επιπλέον παρατηρείται ότι οι τιμές που αποκλείονται επίσης εντοπίζονται σε περιοχές αποκρύψεων.

Πίνακας 6.32. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

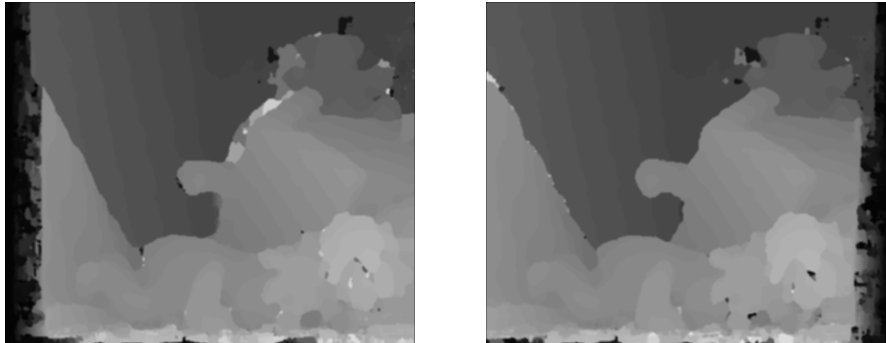
$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες rank (7×7)			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
15×15	2.76	6.41	84.36	92.71	1.91	5.22	89.20



Σχήμα 6.110. Χάρτης παράλλαξης αριστερής εικόνας μετά από τον έλεγχο συμβατότητας.

6.2.7.6 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank και εξομάλυνση

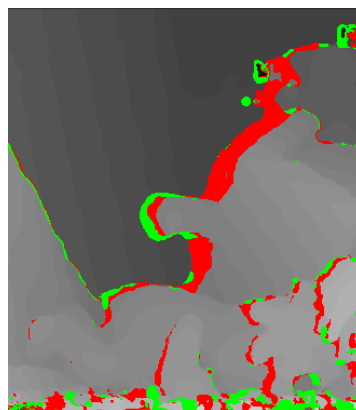
Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε, τέλος, και για τους εξομαλυμένους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες μετασχηματισμένες με το φίλτρο rank. Οι χάρτες παράλλαξης μετά από εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου παρουσιάζονται στο Σχ. 6.111. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο των χαρτών παράλλαξης φαίνονται στον Πίνακα 6.33. Ο χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προέκυψε από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης υπάρχει στο Σχ. 6.112.



Σχήμα 6.111. Φιλτραρισμένοι χάρτες παράλλαξης των δύο εικόνων βάσει του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες μετασχηματισμένες με φίλτρο rank.

Πίνακας 6.33. Διαφορές των υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

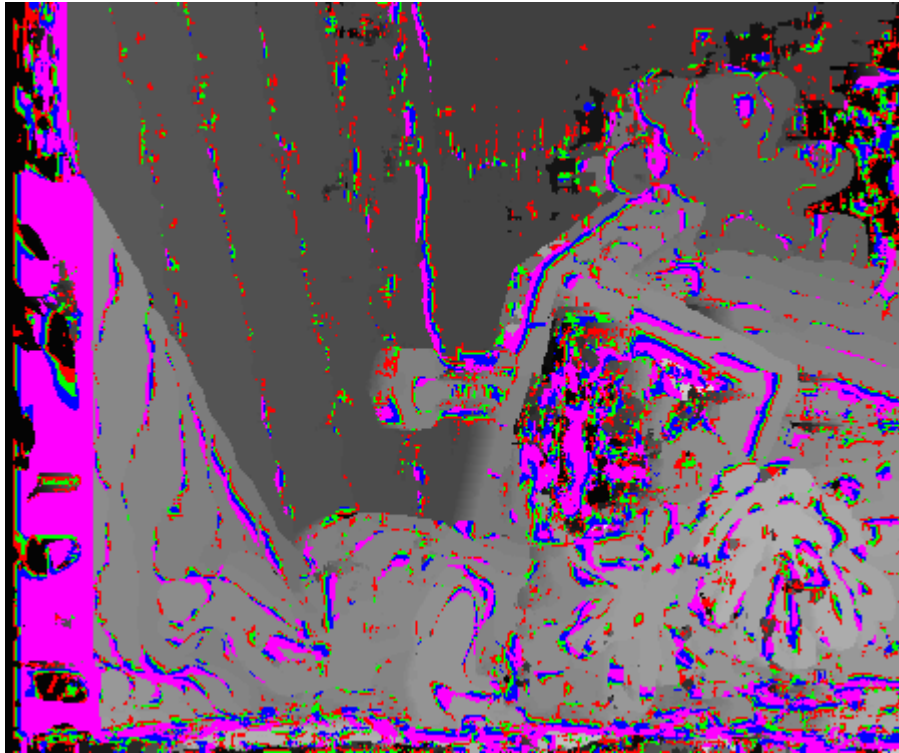
$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες rank (7×7) με εξομάλυνση			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
15×15	2.65	6.32	81.90	90.16	1.78	4.99	90.66



Σχήμα 6.112. Χάρτης παράλλαξης αριστερής εικόνας μετά από τον έλεγχο συμβατότητας.

6.2.8 Συνταύτιση με περισσότερα παράθυρα

Από τον έλεγχο του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών με ταυτόχρονη χρήση 5 παραθύρων (μεγεθούς 7×7, 9×9, 11×11, 15×15 και 21×21) προέκυψε ο χάρτης παράλλαξης του Σχ. 6.113.

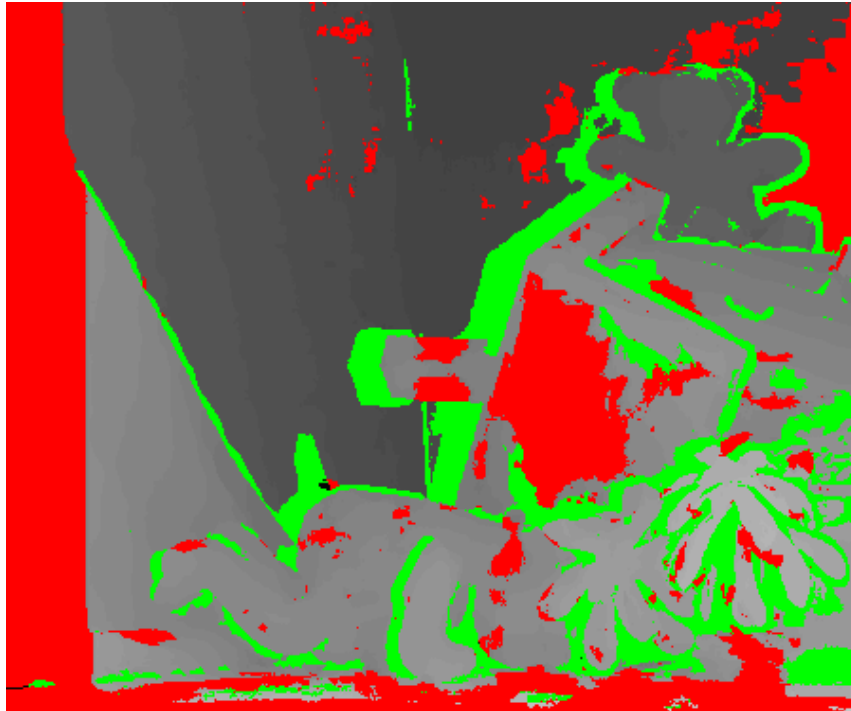


Σχ. 6.113. Χάρτης παράλλαξης που δείχνει από ποιο παράθυρο επελέγη η τιμή παράλλαξης.

Στο Σχ. 6.113 με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα σημεία για τα οποία για την εύρεση του ομόλογου σημείου προκρίθηκε η τιμή παράλλαξης από το παράθυρο 9×9, ενώ το πράσινο αναφέρεται στο παράθυρο 11×11, το μπλε στο παράθυρο 15×15 και το μωβ στο παράθυρο 21×21. Στα υπόλοιπα σημεία, που απεικονίζονται με τόνους του γκριζου (τιμές παράλλαξης), η μικρότερη τιμή κόστους εμφανιζόταν στο παράθυρο 7×7, η οποία και επελέγη.

Παρατηρείται, όπως και για το προηγούμενο στερεοζεύγος, ότι κατά βάση το παράθυρο με την μικρότερη τιμή κόστους που προκρίθηκε για τη δημιουργία του παραπάνω χάρτη παράλλαξης ήταν το 7×7. Από την άλλη μεριά, η χρήση διαφορετικών παραθύρων παρατηρείται κυρίως στα όρια των αντικειμένων της εικόνας. Η εικόνα διαφορών του Σχ. 6.114 προέκυψε από την σύγκριση του χάρτη του Σχ. 6.113 με την αληθή εικόνα βάθους.

Τέλος, ο Πίνακα 6.34 συγκεντρώνει τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ποσοστό διαφορών παράλλαξης Δd που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$).



Σχ. 6.114. Εικόνα διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τον χάρτη παράλλαξης που προήλθε από την χρήση διαφορετικών παραθύρων.

Πίνακας 6.34. Διαφορές των υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

SAD				Με επιλογή από 5 παράθυρα		
$m \times n$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	4.43	7.99	70.98	3.96	7.89	73.04
7×7	4.12	7.74	73.34			
11×11	3.87	7.47	74.76			
15×15	3.79	7.28	74.67			
21×21	3.78	7.17	73.65			

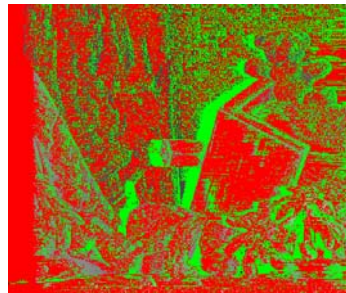
Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και για το πρώτο στερεοζεύγος, τα αποτελέσματα από τη χρήση πολλαπλών παραθύρων δεν βελτιώνουν τα αποτελέσματα, δίνοντας τιμές χονδρικά παρόμοιες με εκείνες που προκύπτουν για παράθυρο 11×11.

6.2.9 Συνταύτιση με την μέθοδο της απόλυτης διαφοράς

Όπως και στην ενότητα 6.1.9, για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται εδώ η εφαρμογή του απλού κριτηρίου των απόλυτων διαφορών (AD). Το Σχ. 6.114 δείχνει τον χάρτη παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου αυτού, ενώ στο Σχ. 6.116 φαίνεται η εικόνα διαφορών που προέκυψε από τη σύγκρισή του με τον αληθή.

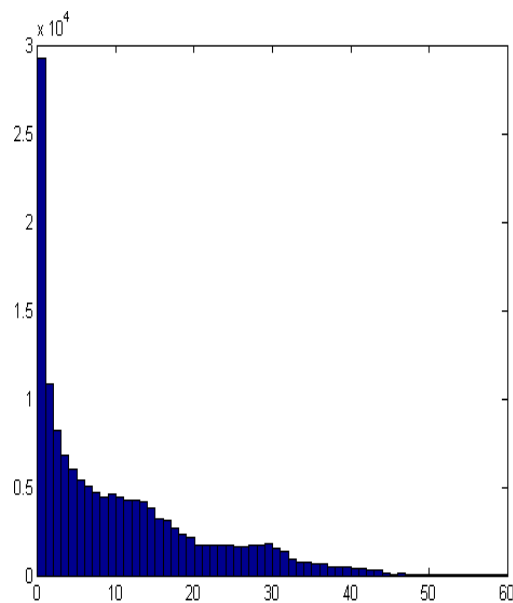


Σχήμα 6.115. Αληθούς χάρτης παράλλαξης (αριστερά) και χάρτης με βάση το κριτήριο των απόλυτων διαφορών (δεξιά).



Σχήμα 6.116. Εικόνα διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνον από το κριτήριο των απόλυτων διαφορών.

Ακόμα, στο Σχ. 6.117 φαίνεται το ιστόγραμμα των διαφορών παράλλαξης που προκύπτει από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τον υπολογισμένο χάρτη. Τέλος, στον Πίνακα 6.35 συγκεντρώνονται τα βασικά στατιστικά στοιχεία των διαφορών (μέσος όρος, τυπική απόκλιση και ποσοστό διαφορών παράλλαξης Δd εντός του διαστήματος $-1 \leq \Delta d \leq 1$).



Σχήμα 6.117. Ιστόγραμμα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνον που προέκυψε από το κριτήριο των απόλυτων διαφορών.

Πίνακας 6.35. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς (μ : μέσος όρος σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)		
κριτήριο AD		
μ	σ	$\pi[-1, 1]$
11.06	10.63	17.36

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι τα αποτελέσματα από εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών είναι φυσικά πολύ κατώτερα εκείνων από τις άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούν παράθυρα. Επιπλέον, από το χάρτη παράλλαξης του Σχ.115 φαίνεται πως η εικόνα έχει πολύ έντονο θόρυβο, λόγω της ευαισθησίας του κριτηρίου σε τοπικές ραδιομετρικές διαφορές.

6.3 Τρίτο ζεύγος εικόνων

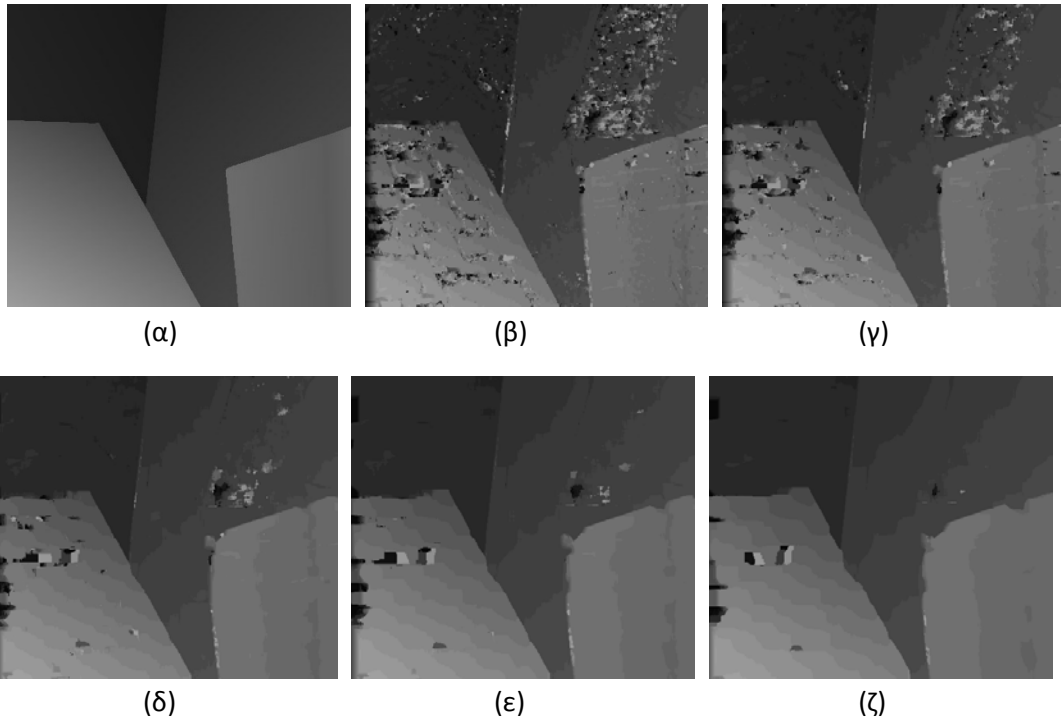
Αυτό το ζεύγος εικόνων (Σχ. 6.118), διαστάσεων 434×383, έχει τιμή παράλλαξης από 0 έως 19 pixel. Η μέγιστη τιμή ορίζει και την διάσταση του παραθύρου αναζήτησης.



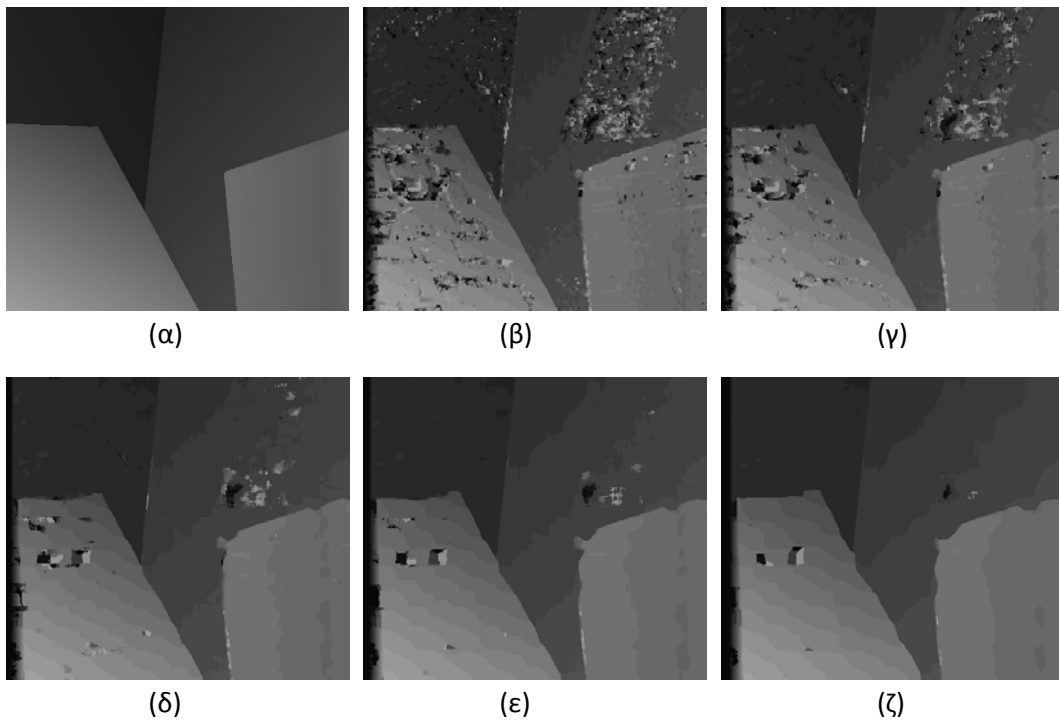
Σχήμα 6.118. Δεύτερο στερεοζεύγος εικόνων (“Venus”).

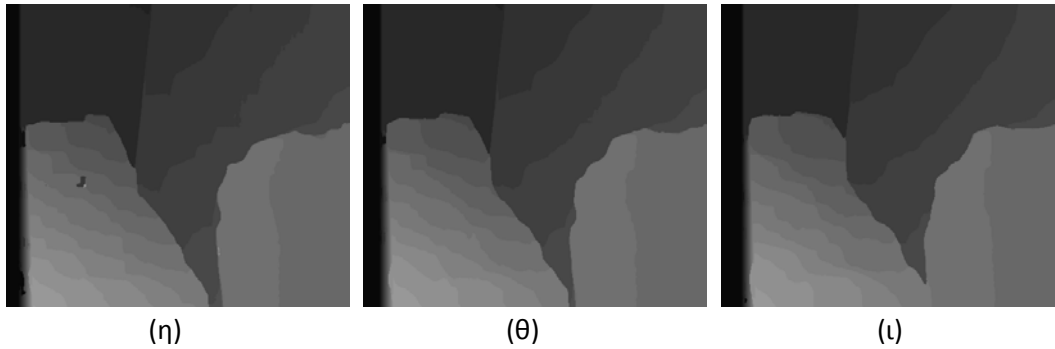
6.3.1 Συνταύτιση με τις μεθόδους SAD, SSD και SAD colour

Το Σχ. 6.119 παρουσιάζει τους χάρτες παράλλαξης που προκύπτουν από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών (SSD) για παράθυρα 5×5, 7×7, 11×11, 15×15, 21×21. Αντίστοιχα, στο Σχ. 6.120 παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προκύπτουν από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα 5×5, 7×7, 11×11, 15×15, 21×21, 31×31, 41×41 και 51×51. Τέλος, στο Σχ. 6.121 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών και στα τρία χρωματικά επίπεδα της εικόνας για παράθυρα 7×7 και 15×15.

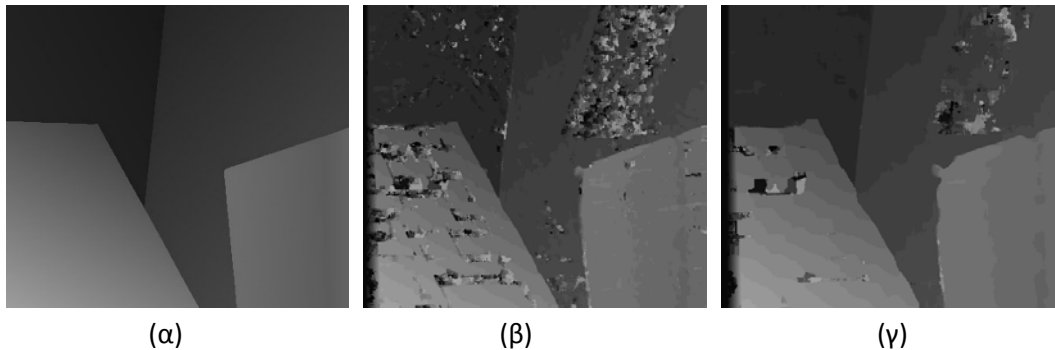


Σχήμα 6.119. Χάρτες παράλλαξης με βάση το κριτήριο του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών με τη χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) αληθής χάρτης παράλλαξης, (β) παράθυρο 5×5, (γ) παράθυρο 7×7, (δ) παράθυρο 11×11, (ε) παράθυρο 15×15, (ζ) παράθυρο 21×21.



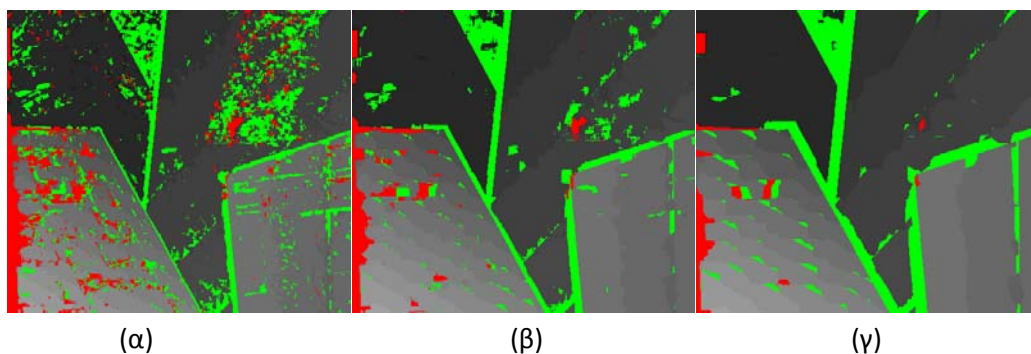


Σχήμα 6.120. Χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών με χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) αληθής χάρτης παράλλαξης, (β) παράθυρο 5×5, (γ) παράθυρο 7×7, (δ) παράθυρο 11×11, (ε) παράθυρο 15×15, (ζ) παράθυρο 21×21, (η) παράθυρο 31×31, (θ) παράθυρο 41×41 και (ι) παράθυρο 51×51.

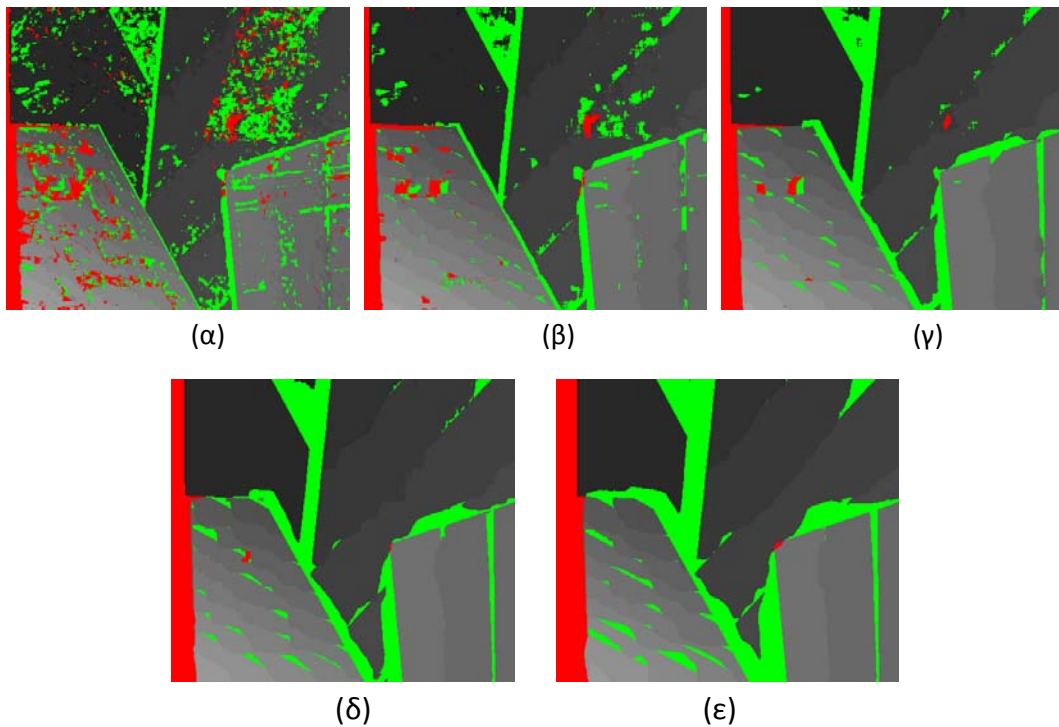


Σχήμα 6.121. Χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών και στα τρία χρωματικά κανάλια με χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) αληθής χάρτης βάθους, (β) παράθυρο 7×7, (γ) παράθυρο 15×15.

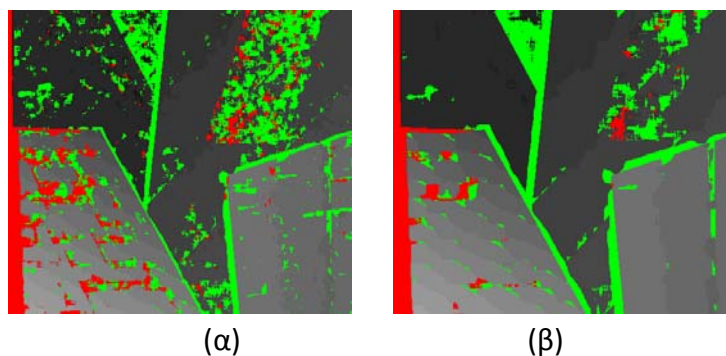
Η σύγκριση των χαρτών παράλλαξης με τον αληθή χάρτη δίνει κάθε φορά μια νέα εικόνα (εικόνες διαφορών), οι οποίες παρουσιάζονται στα Σχ. 6.122–6.124. Σε αυτές τις απεικονίσεις σε κάθε ρικελ έχει αποδοθεί η τιμή της παράλλαξης εφόσον η διαφορά δεν υπερβαίνει το 1 ρικελ, ενώ με κόκκινο φαίνονται οι εικονοψηφίδες όπου η διαφορά παράλλαξης είναι $(d_{\alpha\lambda\eta\theta} - d) < -1$ και με πράσινο όπου $(d_{\alpha\lambda\eta\theta} - d) > 1$.



Σχήμα 6.122. Εικόνες διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 11×11 και (γ) 21×21.

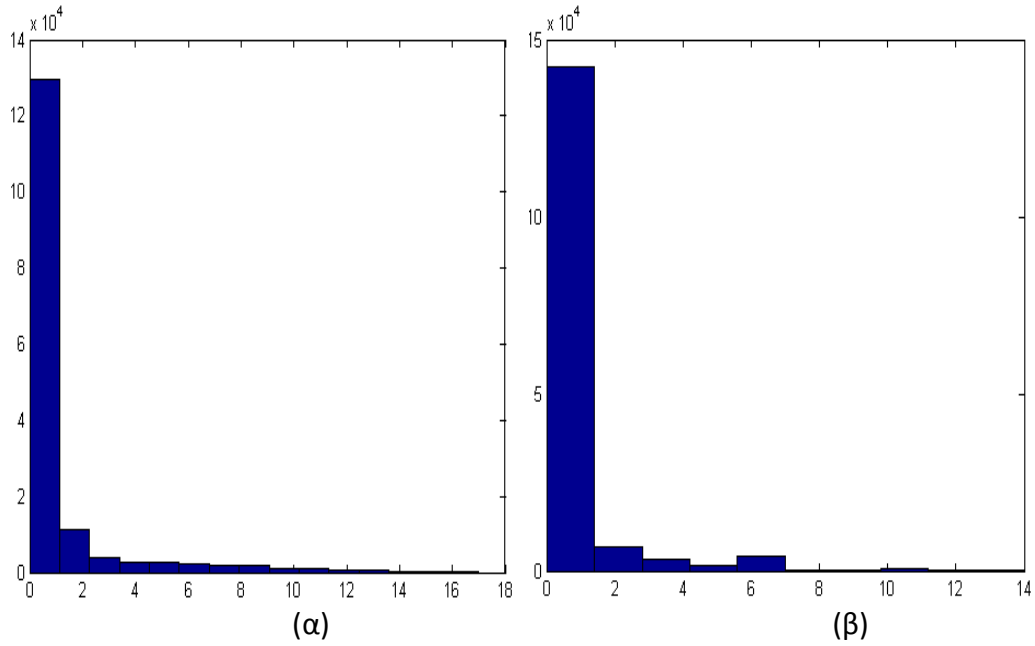


Σχήμα 6.123. Εικόνες διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 , (γ) 21×21 , (δ) 31×31 και (ε) 51×51 .

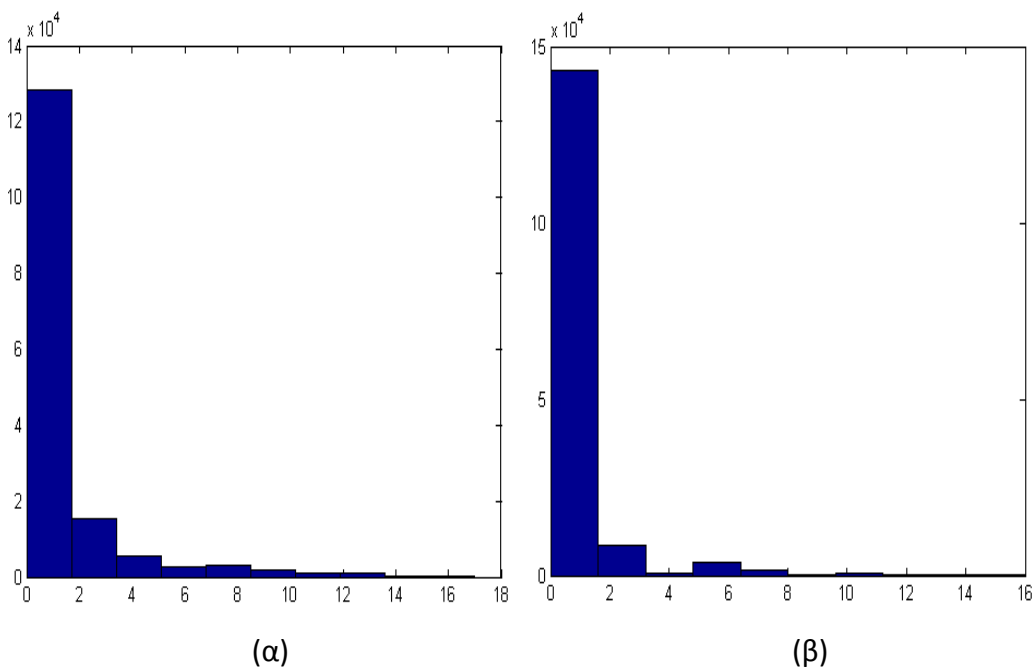


Σχήμα 6.124. Εικόνες διαφορών που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών και στα τρία χρωματικά κανάλια για παράθυρα: (α) 7×7 και (β) 15×15 .

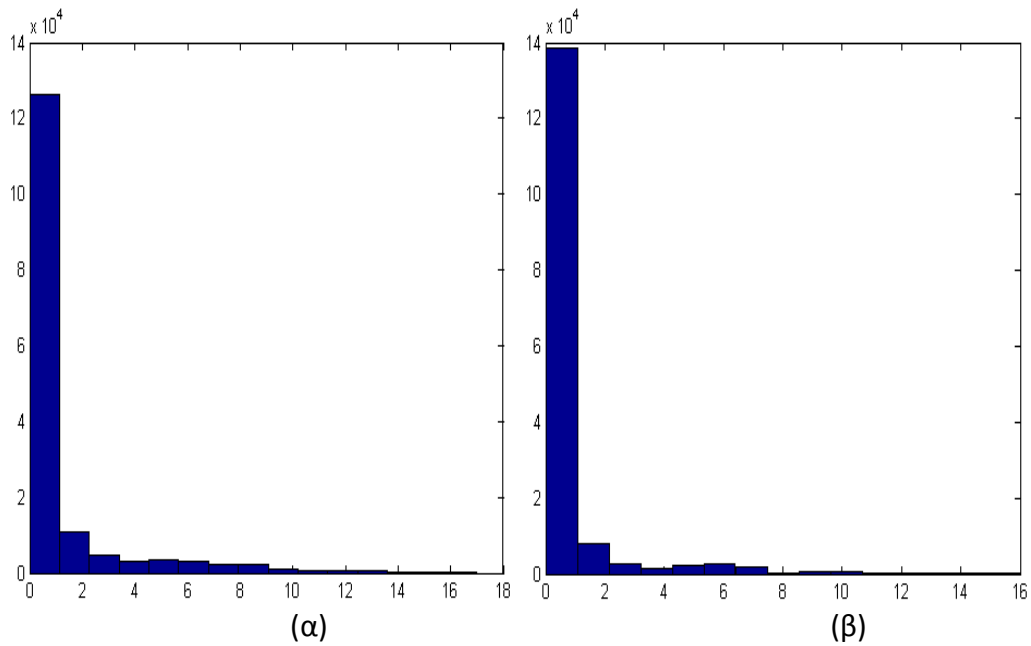
Ακόμα, παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένα ιστογράμματα διαφορών παράλλαξης που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε έναν από τους υπολογισμένους χάρτες (Σχ. 6.125 – 6.127). Τέλος, ο Πίνακας 6.36 συγκεντρώνει τα βασικά στατιστικά στοιχεία των διαφορών για κάθε μέθοδο (μέσος όρος, τυπική απόκλιση και ποσοστό διαφορών παράλλαξης Δd που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$).



Σχήμα 6.125. Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 15×15 .



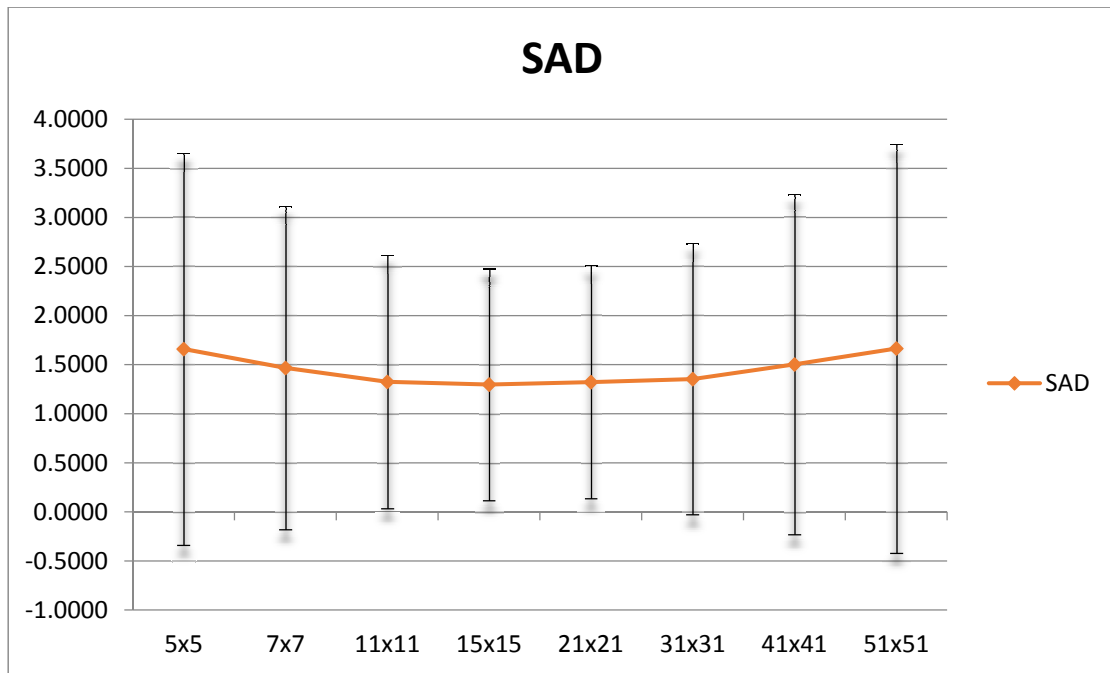
Σχήμα 6.126. Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 15×15 .



Σχήμα 6.127. Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών και στα τρία χρωματικά επίπεδα για παράθυρα: (α) 7×7, (β) 15×15

Πίνακας 6.36. Διαφορές των υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)									
$m \times n$	SSD			SAD			SAD color		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	1.59	1.99	81.76	1.61	2.01	80.98			
7×7	1.39	1.63	86.59	1.41	1.66	85.92	1.70	2.14	79.56
11×11	1.26	1.29	89.64	1.27	1.31	89.67			
15×15	1.25	1.23	89.84	1.24	1.20	90.38	1.36	1.48	87.33
21×21	1.28	1.24	88.85	1.27	1.22	89.52			
31×31				1.37	1.43	87.35			
41×41				1.52	1.79	84.46			
51×51				1.68	2.13	81.49			

Τέλος, το Σχ. 6.128 παρουσιάζει ένα διάγραμμα μεταβολής της ποσότητας ($\mu \pm \sigma$) που προέκυψε από τη σύγκριση με τον αληθή χάρτη παραλάξεων στην περίπτωση της μεθόδου απόλυτων διαφορών.



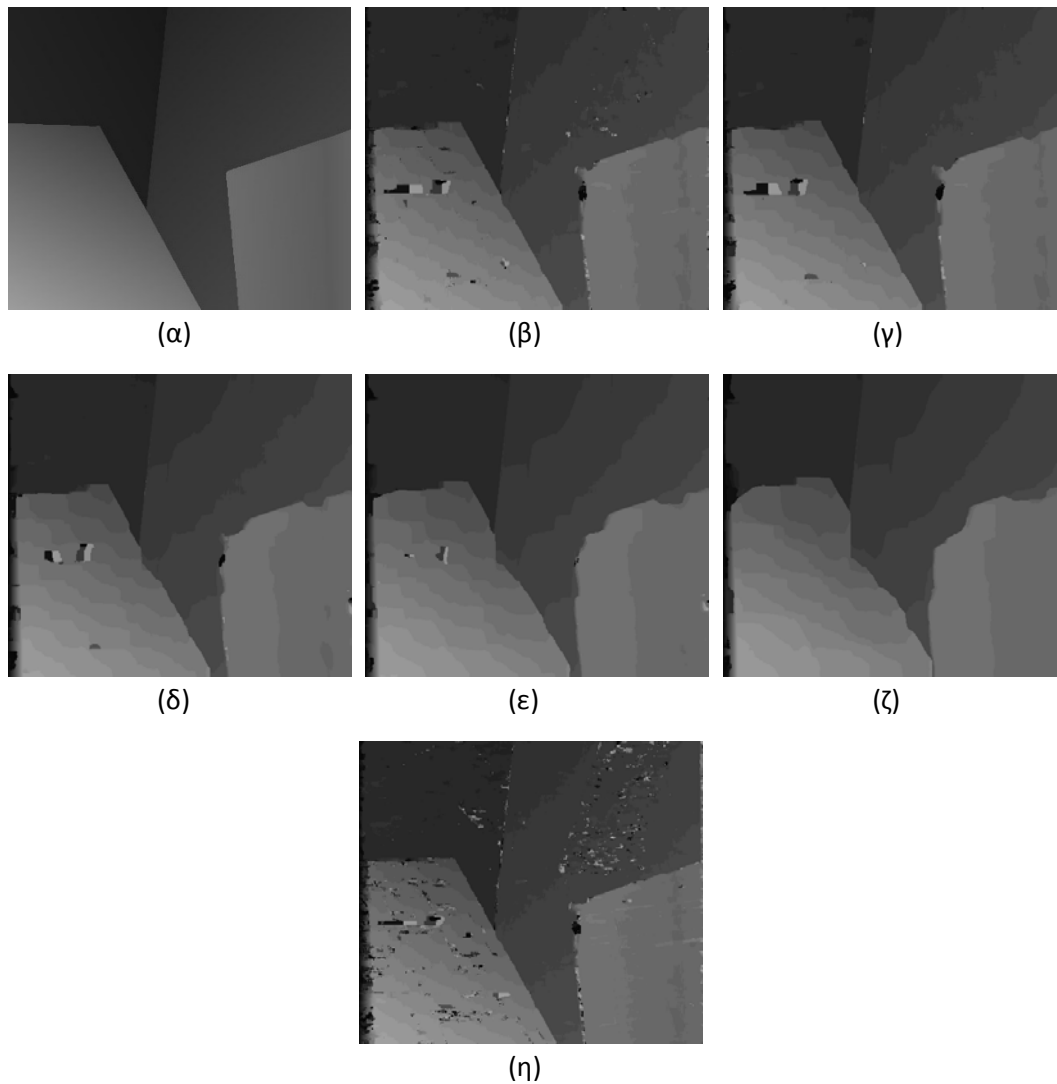
Σχήμα 6.128. Διάγραμμα της ποσότητας ($\mu \pm \sigma$) των διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με τους χάρτες που προκύπτουν από εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.36 προκύπτει ότι και για αυτό το στερεοζεύγος εικόνων δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στα αποτελέσματα από την εφαρμογή των κριτηρίων του αθροίσματος των διαφορών και του αθροίσματος των τετραγώνων τους. Και για τις δύο μεθόδους, με την αύξηση του μεγέθους του παραθύρου παρατηρείται βελτίωση των τιμών του μέσου όρου, της τυπικής απόκλισης και των ποσοστών των διαφορών που δεν υπερβαίνουν το 1 pixel, οι οποίες παραμένουν χονδρικά σταθερές για τα μεσαία παράθυρα (11x11 – 31x31).

Αντίθετα με τα προηγούμενα μοντέλα, η συμμετοχή των τριών χρωματικών επιπέδων κατά την εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών δεν προκύπτει εδώ να οδηγεί σε βελτίωση των αποτελεσμάτων για κανένα από τα δύο παράθυρα που χρησιμοποιήθηκαν.

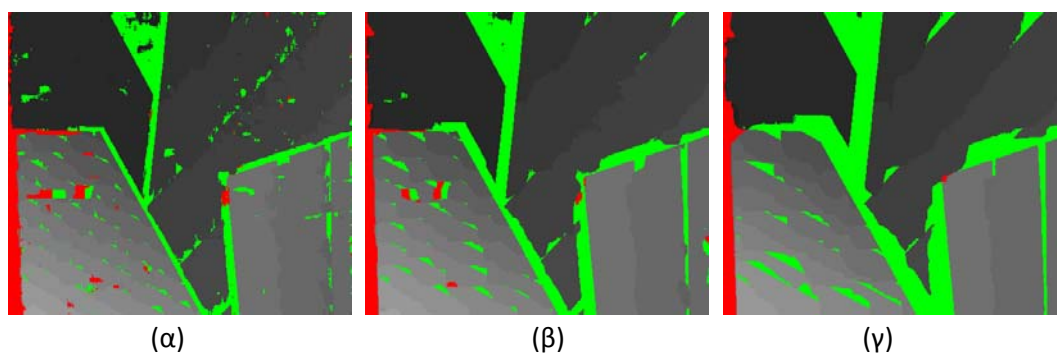
6.3.2 Συνταύτιση με τον συντελεστή συσχέτισης

Για την εφαρμογή του συντελεστή συσχέτισης χρησιμοποιήθηκαν παράθυρα 5x5, 7x7, 11x11, 15x15, 21x21, καθώς επίσης και ορθογώνιο παράθυρο 5x11 (Σχ. 6.129).



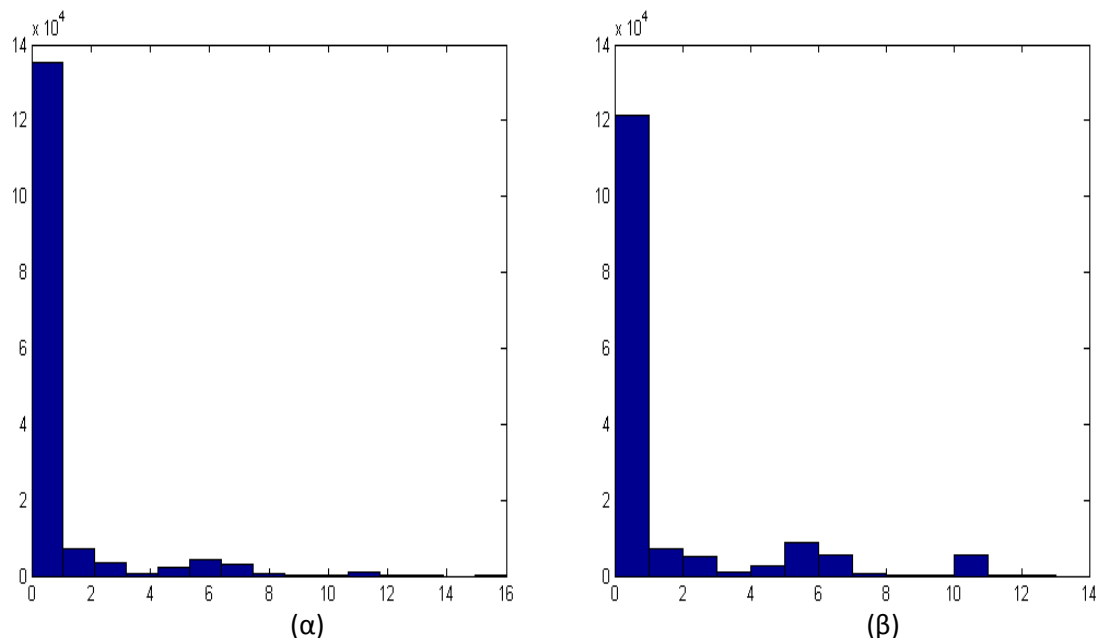
Σχήμα 6.129. Χάρτες παράλλαξης με κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης σε διαφορετικά παράθυρα: (α) αληθής χάρτης παράλλαξης, (β) παράθυρο 5×5, (γ) παράθυρο 7×7, (δ) παράθυρο 11×11, (ε) παράθυρο 15×15, (ζ) παράθυρο 21×21, (η) παράθυρο 5×11.

Το Σχ. 6.130 παρουσιάζει τις εικόνες διαφορών που προέκυψαν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με εκείνους του Σχ. 6.129.



Σχήμα 6.130. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση των αληθών παραλλάξεων με εκείνες από το κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 11×11 και (γ) 21×21.

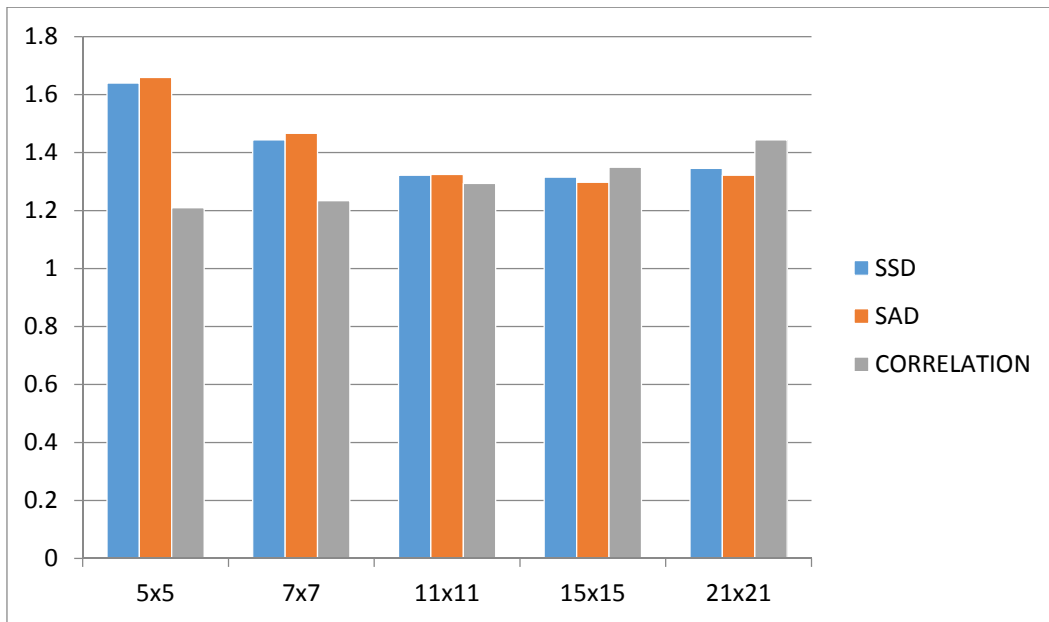
Επιπλέον, παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένα από τα ιστογράμματα που προκύπτουν από τις διαφορές του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες που έχουν υπολογιστεί εδώ (Σχ. 6.131), καθώς επίσης και ο Πίνακας 6.37 με τα στατιστικά και το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης με τιμή μικρότερη των 2 εικονοψηφίδων.



Σχήμα 6.131. Ιστογράμματα: (α) παράθυρο 11×11, (β) παράθυρο 21×21.

Πίνακας 6.37. Διαφορές παραλλάξεων από αληθείς τιμές για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο εύρος $-1 \leq \Delta d \leq 1$)			
$m \times n$	Συντελεστής συσχέτισης		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	1.21	1.17	90.65
7×7	1.23	1.19	90.34
11×11	1.29	1.24	88.48
15×15	1.35	1.32	86.75
21×21	1.44	1.46	83.92
5×11	1.32	1.52	88.25

Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.37 προκύπτει ότι οι καλύτερες τιμές του μέσου όρου, της τυπικής απόκλισης αλλά και του ποσοστού των διαφορών παράλλαξης με τιμή μικρότερη των 2 εικονοψηφίδων εμφανίζεται για μικρά παράθυρα (5×5, 7×7). Για πιο άμεση σύγκριση των κριτηρίων SAD, SSD με εκείνο του συντελεστή συσχέτισης, παρουσιάζεται στο Σχ. 6.132 συγκριτικό διάγραμμα με τις τιμές των μέσων όρων από κάθε κριτήριο για τα κοινά παράθυρα που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 6.132. Ιστόγραμμα μέσων όρων για το κριτήριο των τετραγώνων των διαφορών, των απόλυτων διαφορών και του συντελεστή συσχέτισης.

Από τα διάγραμμα αυτό συνάγεται ότι το κριτήριο του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα για παράθυρα 5x5 και 7x7, για παράθυρα 11x11 και 15x15 τα τρία κριτήρια δίνουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα, ενώ για παράθυρο 21x21 το κριτήριο των απόλυτων διαφορών υπερτερεί έναντι των άλλων. Έτσι, και από εδώ προκύπτει ότι, γενικά, το υπολογιστικά πολύ απαιτητικότερο κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης δεν φαίνεται να προσφέρει κάποια αισθητή βελτίωση.

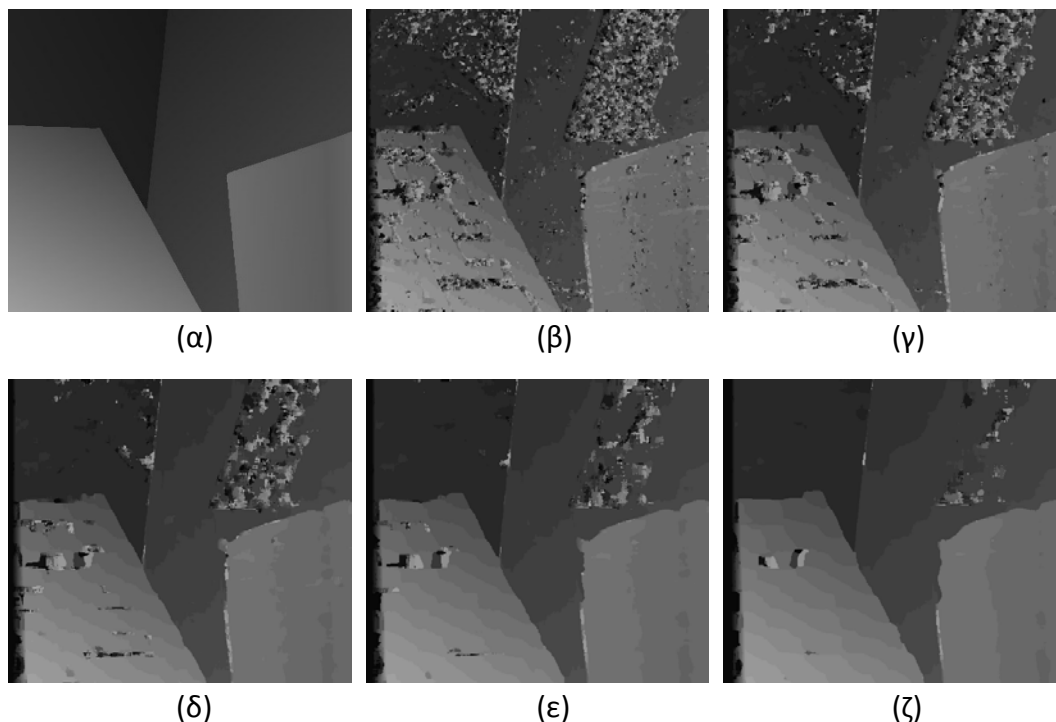
6.3.3 Συνταύτιση εικόνων κλίσης (gradient)

Οι εικόνες κλίσεων του ζεύγους που προέκυψαν από εφαρμογή του φίλτρου κλίσης κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση εμφανίζονται στο Σχ. 6.133.



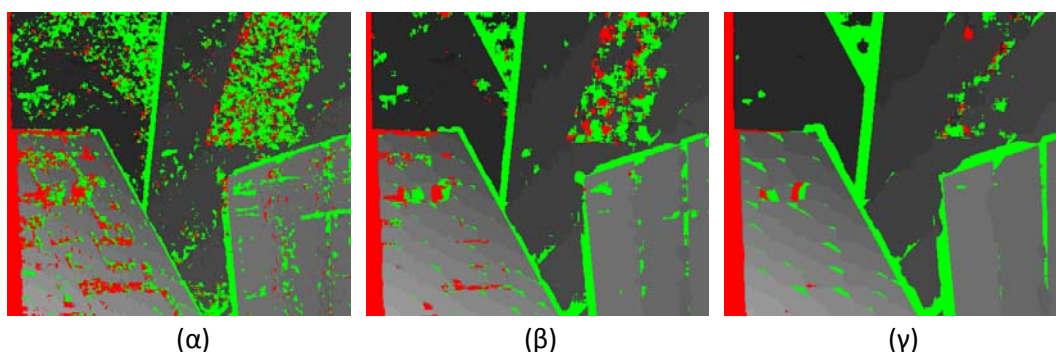
Σχήμα 6.133. Εικόνες κλίσεων του στερεοζεύγους.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από τη διαδικασία της συνταύτισης στις νέες αυτές εικόνες με το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα 5×5 , 7×7 , 11×11 , 15×15 και 21×21 (Σχ. 6.134).



Σχήμα 6.134. Χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης: (α) αληθής χάρτης παράλλαξης, (β) παράθυρο 5×5 , (γ) παράθυρο 7×7 , (δ) παράθυρο 11×11 , (ε) παράθυρο 15×15 , (ζ) παράθυρο 21×21 .

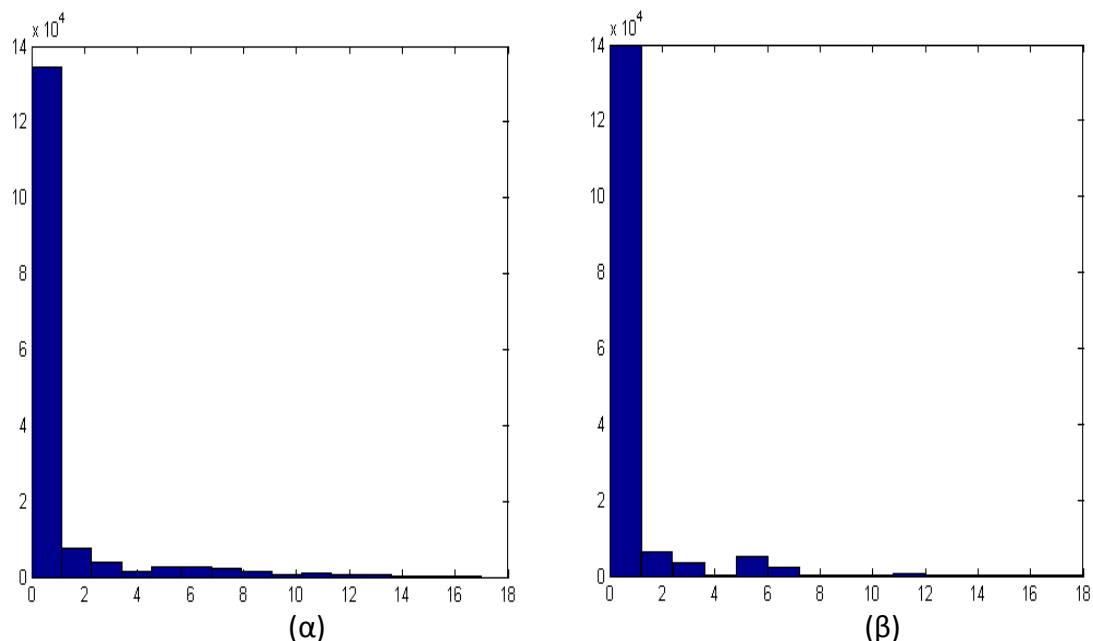
Στο Σχ. 6.135 παρουσιάζονται, ενδεικτικά, οι εικόνες των διαφορών που προέκυψαν από σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με ορισμένους από τους χάρτες του Σχ. 6.134.



Σχήμα 6.135. Εικόνες διαφορών που προέκυψαν βάσει του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 , (γ) 21×21 .

Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά κάποια από τα ιστογράμματα των διαφορών

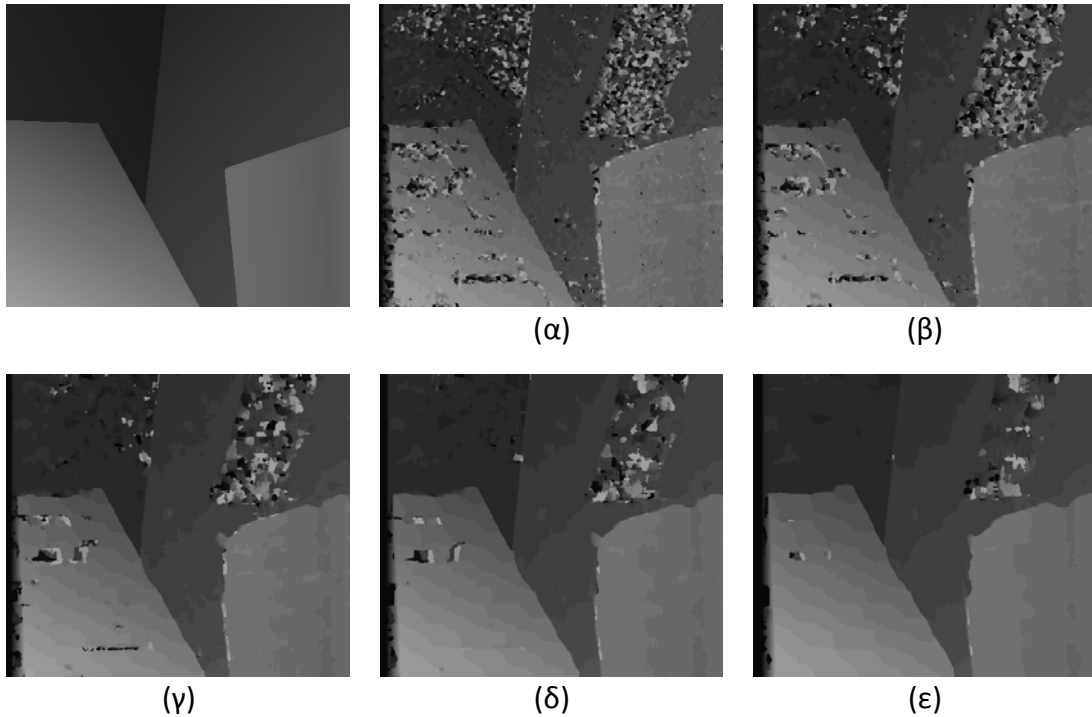
παράλλαξης που προέκυψαν από τη σύγκριση των υπολογισμένων χαρτών με τον αληθή χάρτη παράλλαξης (Σχ. 6.136), καθώς επίσης ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης με τιμή μικρότερη από 2 pixel (Πίνακας 6.38).



Σχήμα 6.136. Τα ιστογράμματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των υπολογισμένων χαρτών παράλλαξης με τον αληθή χάρτη για παράθυρα: (α) 11×11 και (β) 21×21.

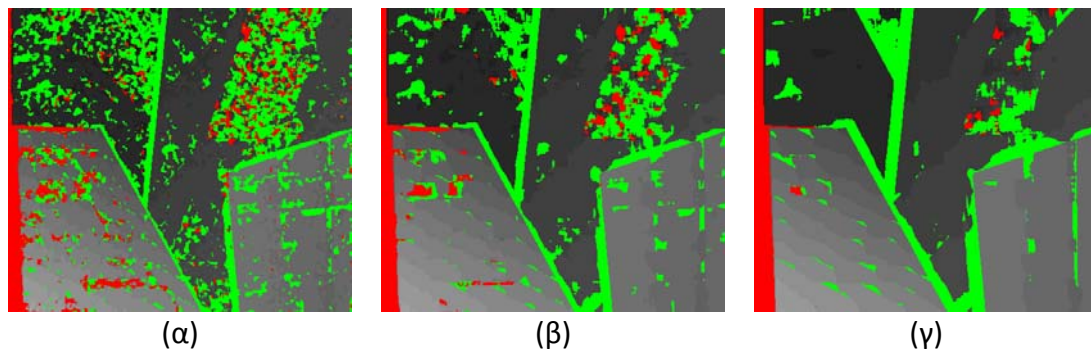
Πίνακας 6.38. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)						
$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών (SAD)			Άθροισμα απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	1.66	1.99	86.23	2.17	2.78	78.90
7×7	1.47	1.64	90.55	1.89	2.44	84.05
11×11	1.32	1.29	93.58	1.62	1.97	88.70
15×15	1.30	1.18	93.98	1.48	1.65	90.85
21×21	1.32	1.18	93.31	1.41	1.44	91.85

Από τον Πίνακα 6.38 προκύπτει ότι, σε αντίθεση με το προηγούμενο μοντέλο, στην περίπτωση των εικόνων κλίσεων εμφανίζεται αύξηση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης. Επιπλέον, προκύπτει και μείωση των ποσοστών των διαφορών των εικονοψηφίδων με τιμή < 2 pixel. Και εδώ, για τη μείωση του θορύβου εφαρμόστηκε εν συνεχεία φίλτρο Gauss στις εικόνες κλίσης (Σχ. 6.137).



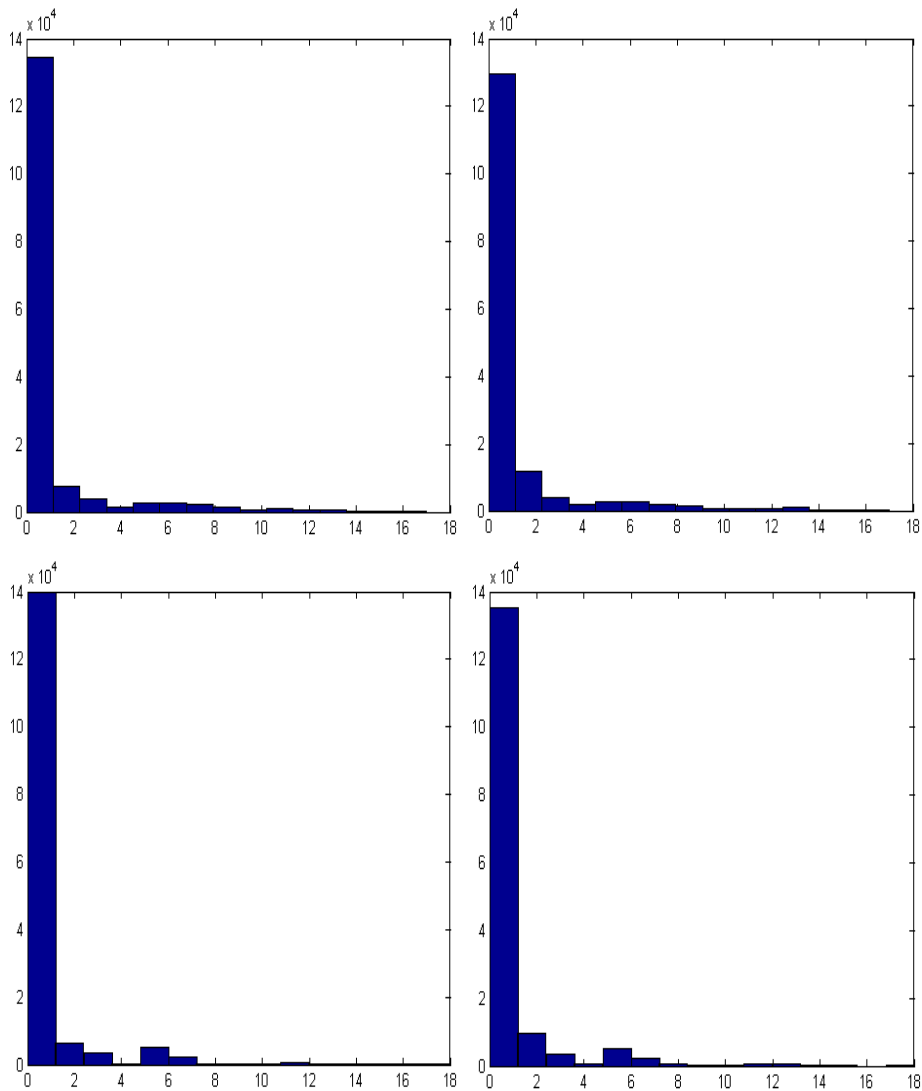
Σχήμα 6.137. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης, μετά από την εφαρμογή φίλτρου Gauss, για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 7×7 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 , (ε) 21×21 .

Οι εικόνες των διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με τους υπολογισμένους χάρτες παρουσιάζονται στο Σχ. 6.138.



Σχήμα 6.138. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξης με εκείνους από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης μετά από την εφαρμογή φίλτρου Gauss, για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 , (γ) 21×21 .

Ακόμα, παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένα από τα ιστογράμματα που προκύπτουν από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξης με τους χάρτες από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης μετά από χρήση φίλτρου Gauss (Σχ. 6.139).



Σχήμα 6.139. Ιστογράμματα από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν για παράθυρα: 11×11 (πάνω), 21×21 (κάτω). Αριστερά: συνταύτιση σε εικόνες κλίσης. Δεξιά: συνταύτιση σε εικόνες κλίσης μετά από φίλτρο Gauss.

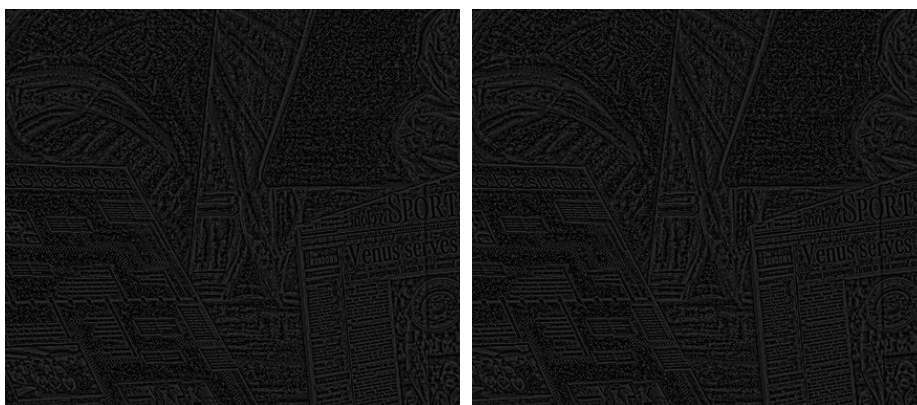
Ο Πίνακας 6.39 παραθέτει τα στατιστικά στοιχεία (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ποσοστό διαφορών παράλλαξης <2 pixel) που προκύπτουν από τα ιστογράμματα.

Πίνακας 6.39. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)						
$m \times n$	SAD σε εικόνες κλίσης			SAD σε εικόνες κλίσης μετά από εφαρμογή φίλτρου Gauss		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	2.12	2.80	74.00	2.02	2.73	72.43
7×7	1.83	2.45	79.62	1.82	2.46	76.84
11×11	1.56	1.99	84.84	1.57	2.04	81.75
15×15	1.42	1.66	87.27	1.45	1.76	84.25
21×21	1.35	1.48	88.14	1.40	1.60	85.31

Από τον Πίνακα 6.39 προκύπτει ότι, γενικά, η εφαρμογή του φίλτρου Gauss στις εικόνες κλίσης δεν φαίνεται εδώ να βελτιώνει κάποιο από τα αποτελέσματα. Θα περίμενε κανείς πως η εφαρμογή του φίλτρου Gauss στις εικόνες κλίσεων θα βελτιώνει όχι το ποσοστό των διαφορών με τιμή μικρότερη από 2 ρικελ (για λόγους που έχουν εξηγηθεί) αλλά τις τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης, όπως συνέβη και στα δύο προηγούμενα ζεύγη εικόνων. Αυτό μπορεί ίσως να αποδοθεί στο γεγονός πως εδώ διότι πρόκειται για στερεοζεύγος τεχνητών και όχι πραγματικών εικόνων.

6.3.4 Συνταύτιση εικόνων μετά από μετασχηματισμό rank

Ο μετασχηματισμός εφαρμόστηκε στις αρχικές εικόνες για παράθυρα διαστάσεων 7×7 , 9×9 , 11×11 , 15×15 (Σχ. 6.140). Κριτήριο για τη διαδικασία της συνταύτισης ήταν και εδώ το άθροισμα των απόλυτων διαφορών (SAD) για μεγέθη παραθύρων 7×7 , 11×11 , 15×15 , 21×21 και 31×31 (Σχ. 6.141).



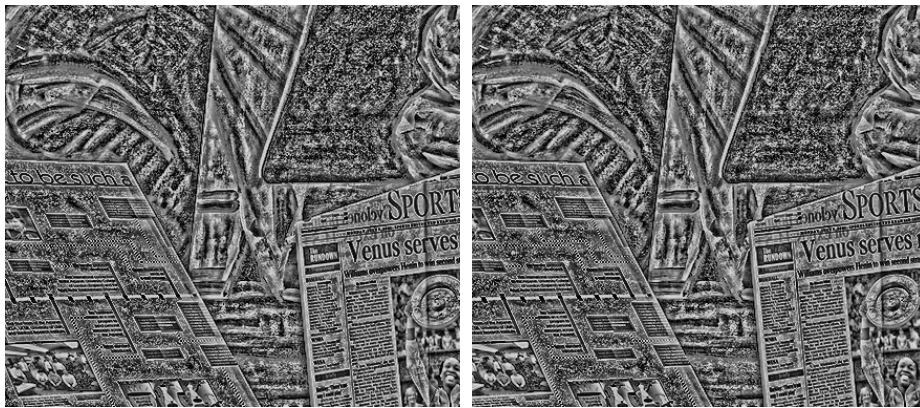
(α)



(β)

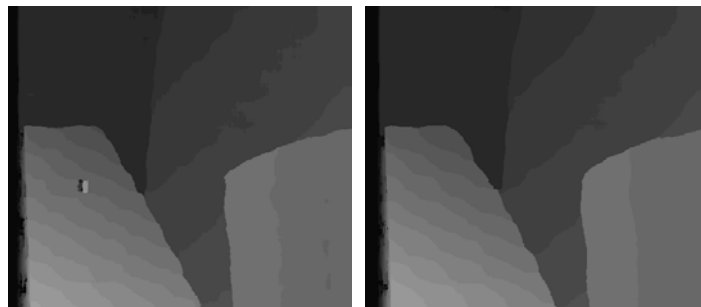


(γ)

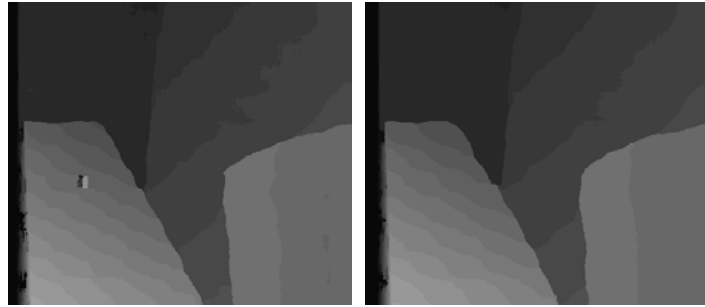
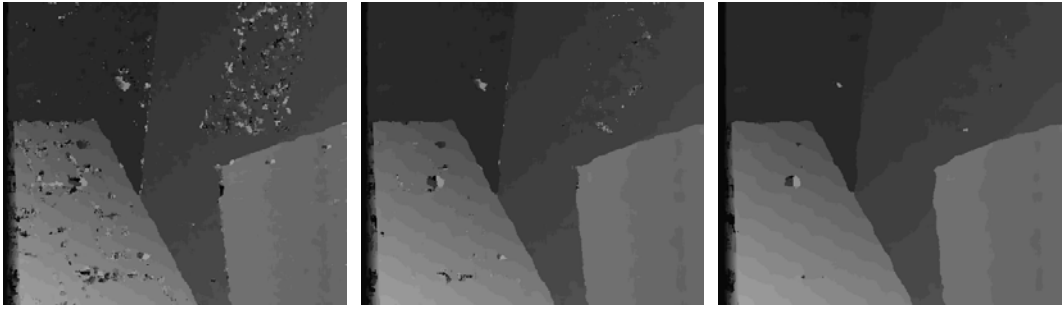


(δ)

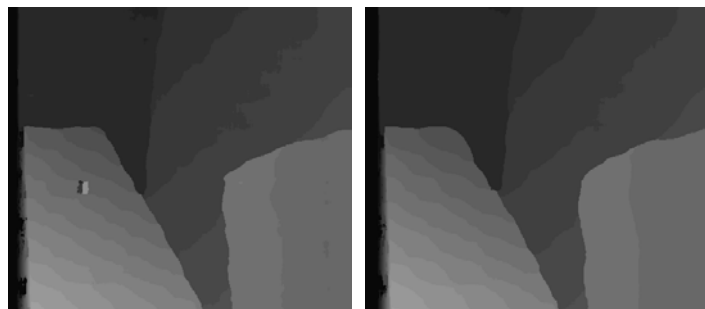
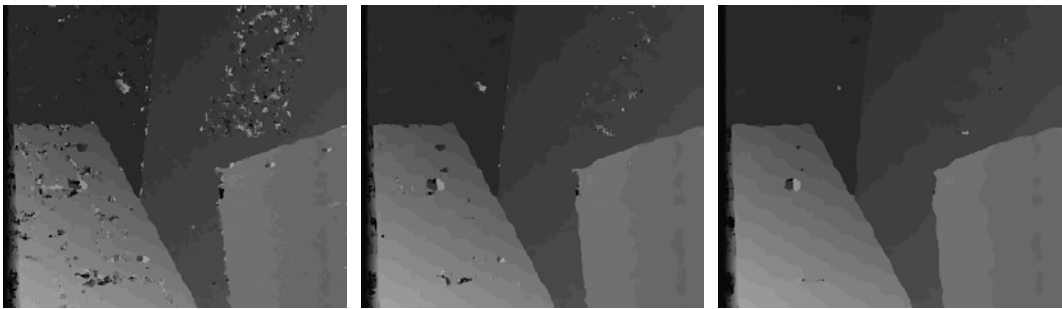
Σχήμα 6.140. Στερεοζεύγη εικόνων που προκύπτουν από το μετασχηματισμό rank για μέγεθος παραθύρου: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 .



(α)

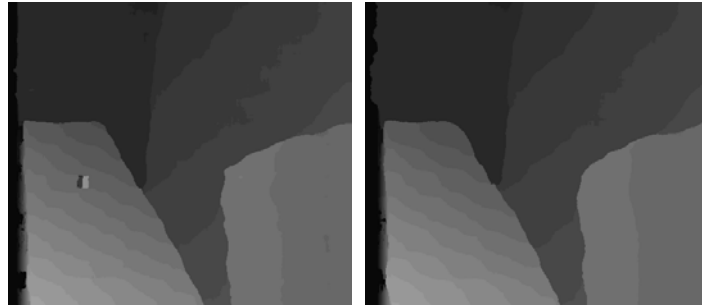


(β)



(γ)

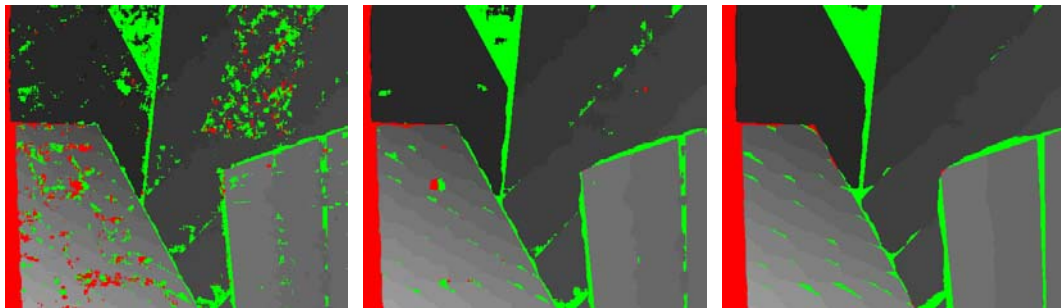




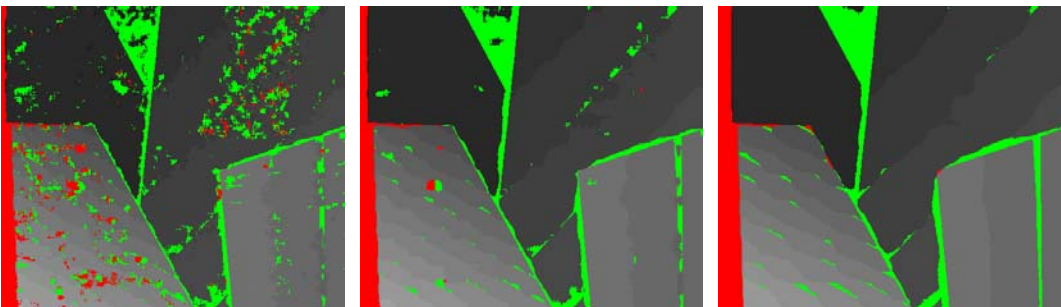
(δ)

Σχήμα 6.141. Χάρτες ψηφιακής παράλλαξης από συνταύτιση με το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρα: 7×7 , 11×11 , 15×15 , 21×21 , 31×31 , σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank με παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 και (δ) 15×15 .

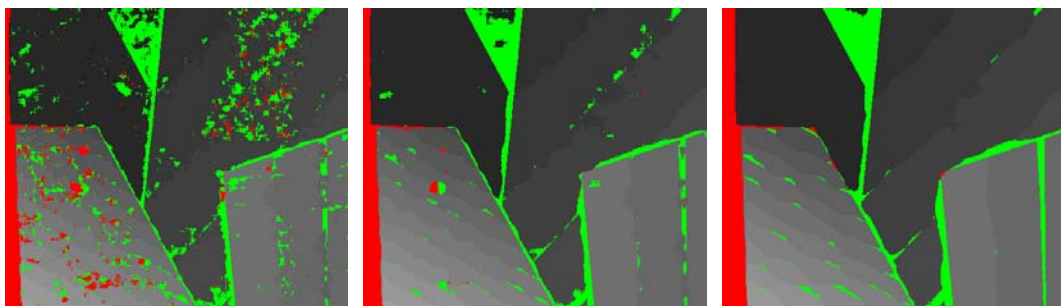
Ορισμένες από τις εικόνες των διαφορών ψηφιακής παράλλαξης που προέκυψαν από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες του Σχ. 6.141 παρουσιάζονται στο Σχ. 6.142.



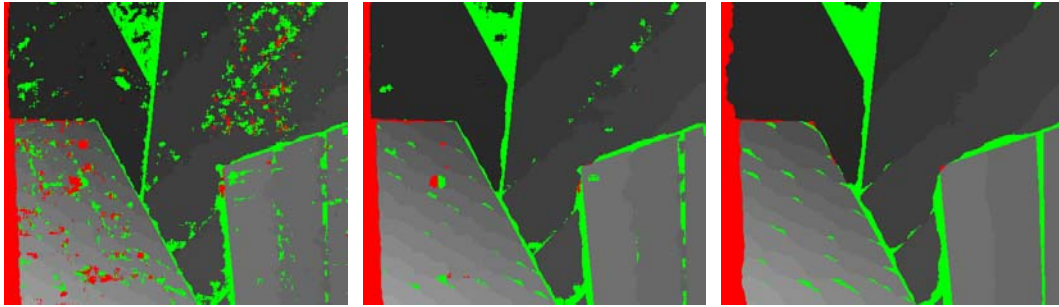
(α)



(β)



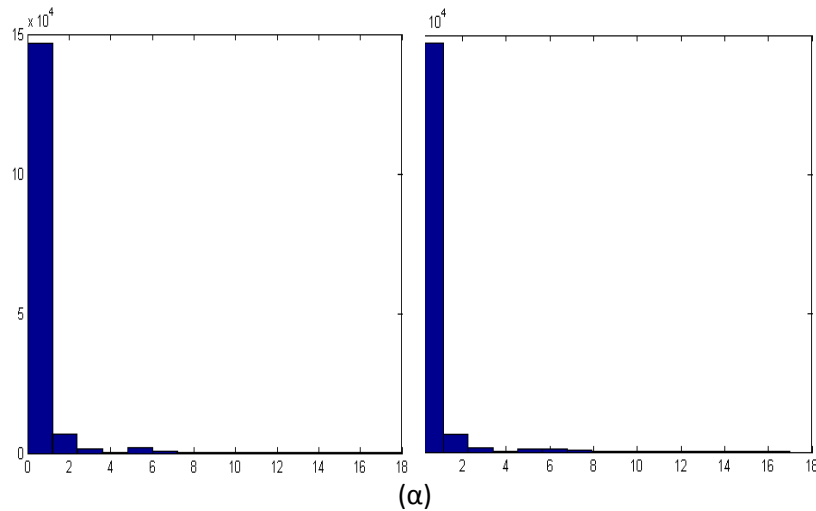
(γ)



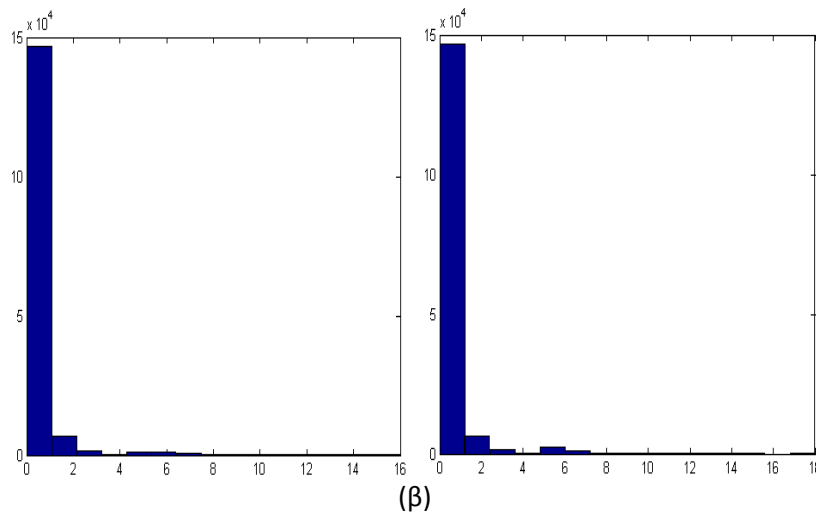
(δ)

Σχήμα 6.142. Διαφορές από σύγκριση του αληθούς χάρτη με χάρτες που προέκυψαν από συνταύτιση με το κριτήριο SAD, για παράθυρα: 7×7 , 15×15 , 31×31 , σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank με παράθυρο: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 .

Ακόμα, παρατίθενται στο Σχ. 6.143 ορισμένα από τα ιστογράμματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των χαρτών του Σχ. 6.141 με τον αληθή χάρτη παράλλαξης, ο Πίνακας 6.40 με τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση και, τέλος, ο Πίνακας 6.41 με το ποσοστό των διαφορών των εικονοψηφίδων με τιμή κάτω των 2 pixel.



(α)



(β)

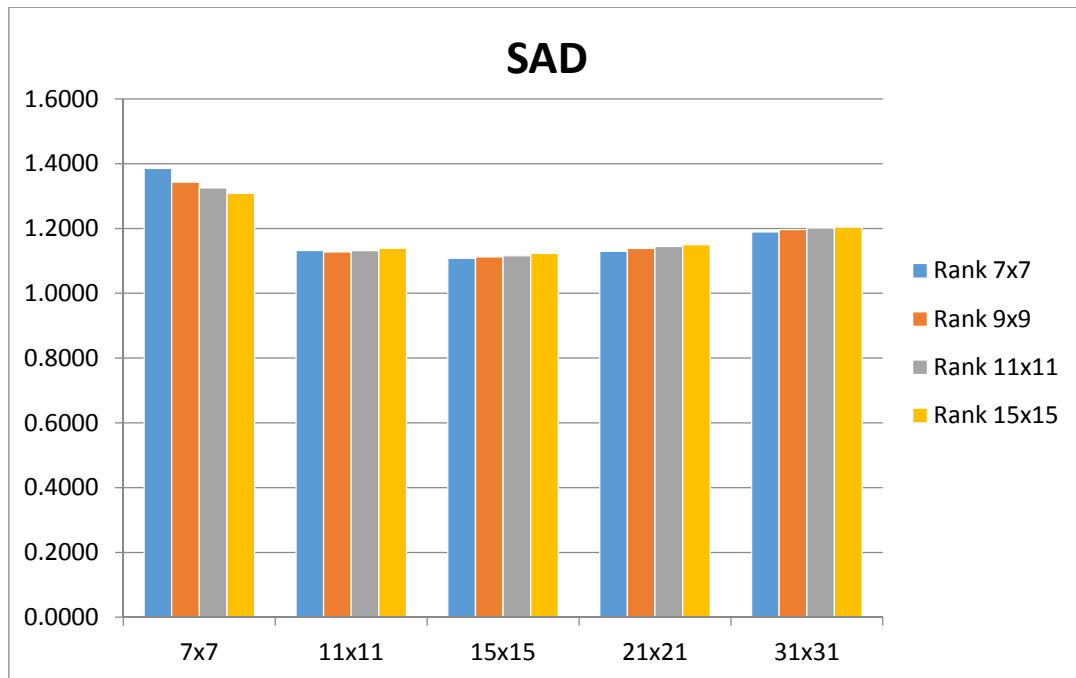
Σχήμα 6.143. Ιστογράμματα από σύγκριση των αληθών παραλλάξεων με εκείνες από εφαρμογή του κριτηρίου SAD για παράθυρα 11×11 , 21×21 σε εικόνες μετασχηματισμένες με rank με παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 11×11 .

Πίνακας 6.40. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση)										
$m \times n$	Αρχικές εικόνες		<i>rank 7×7</i>		<i>rank 9×9</i>		<i>rank 11×11</i>		<i>rank 15×15</i>	
7×7	1.41	1.66	1.386	1.723	1.343	1.632	1.325	1.574	1.309	1.519
11×11	1.27	1.31	1.132	1.008	1.128	0.985	1.131	0.985	1.139	0.999
15×15	1.24	1.20	1.108	0.876	1.112	0.881	1.116	0.881	1.123	0.894
21×21	1.27	1.22	1.130	0.914	1.139	0.957	1.144	0.966	1.150	0.969
31×31	1.37	1.43	1.189	1.159	1.197	1.185	1.202	1.188	1.204	1.189

Πίνακας 6.41 Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από αληθείς για παράθυρα $m \times n$ ($\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)					
$m \times n$	Αρχικές εικόνες	<i>rank 7×7</i>	<i>rank 9×9</i>	<i>rank 11×11</i>	<i>rank 15×15</i>
7×7	85.92	87.38	87.98	87.95	87.99
11×11	89.67	92.50	92.62	92.44	92.22
15×15	90.38	93.27	93.20	93.10	92.88
21×21	89.52	92.87	92.75	92.61	92.45
31×31	87.35	91.87	91.79	91.67	91.61

Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.40 προκύπτει πως, και για αυτό το μοντέλο, με την εφαρμογή του μετασχηματισμού rank στις αρχικές εικόνες οι τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση. Ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα παρατηρούνται για τα μικρά παράθυρα μετασχηματισμού (7×7 και 9×9) και για τα μεσαία παράθυρα συνταύτισης (11×11, 15×15, 21×21).

Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.41 προκύπτει ότι και τα αποτελέσματα των ποσοστών των μικρών διαφορών παράλλαξης εμφανίζουν βελτίωση χάρη στην εφαρμογή του μετασχηματισμού rank στις εικόνες. Οι καλύτερες τιμές των ποσοστών παρατηρούνται για μεσαία παράθυρα συνταύτισης (15×15, 21×21). Και στην περίπτωση αυτή, όπως και για τα προηγούμενα δύο μοντέλα, διαπιστώνεται ότι το μέγεθος του παραθύρου μετασχηματισμού δεν φαίνεται τελικά να παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο, όπως δείχνει και το διάγραμμα του Σχ. 6.144.



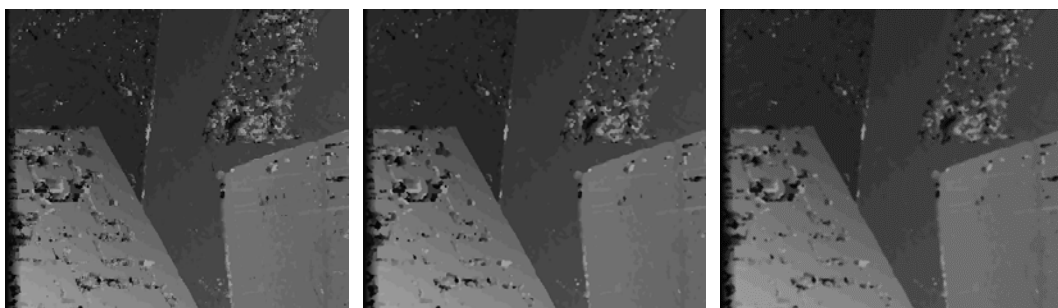
Σχήμα 6.144. Διάγραμμα μέσων όρων των διαφορών παράλλαξης από συνταύτιση σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank (μέθοδος συνταύτισης: SAD).

6.3.5 Εξομάλυνση των αποτελεσμάτων της συνταύτισης

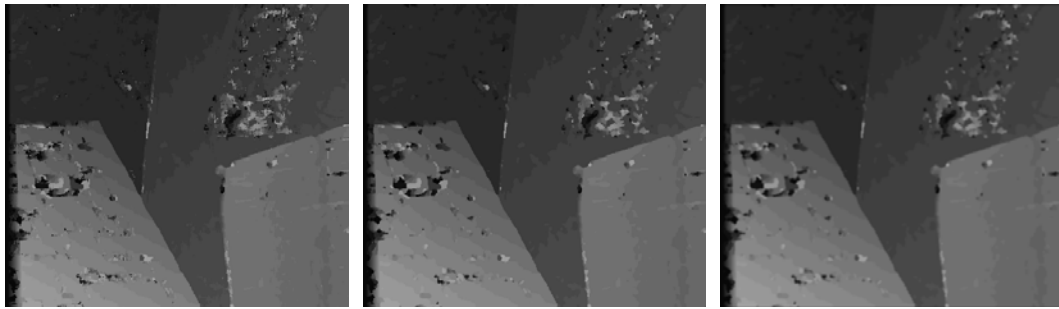
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εξομάλυνση των αποτελεσμάτων της συνταύτισης με εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης (όπως αναφέρθηκε και στις ενότητες 6.1.5 και 6.2.5).

6.3.5.1 Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από την μέθοδο συνταύτισης SAD

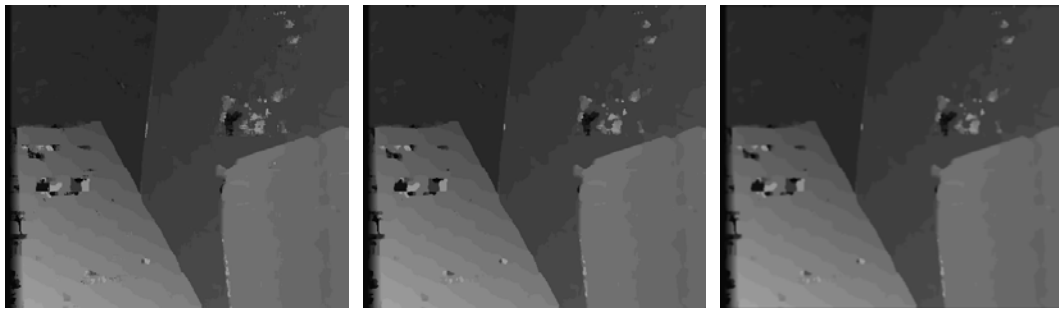
Στους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν με βάση το κριτήριο των απόλυτων διαφορών εφαρμόστηκε φίλτρο μεσαίας τιμής 3×3 και στη συνέχεια φίλτρο μέσου όρου 3×3. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 6.145.



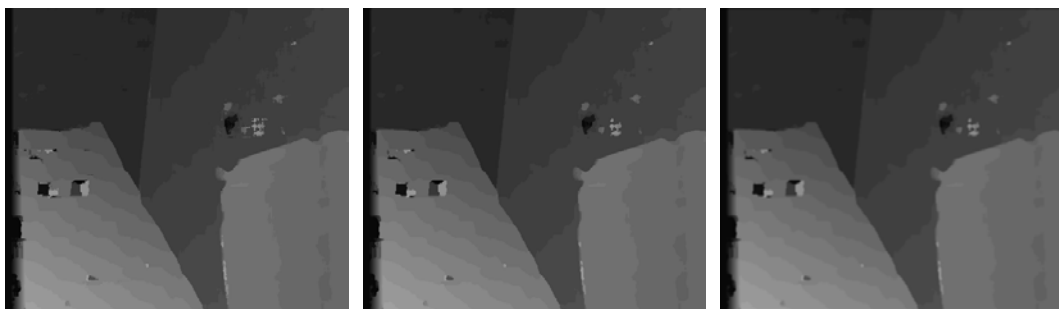
(α)



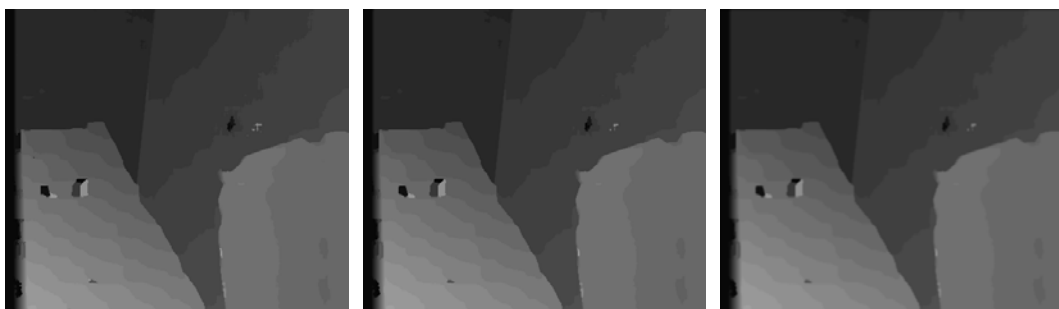
(β)



(γ)



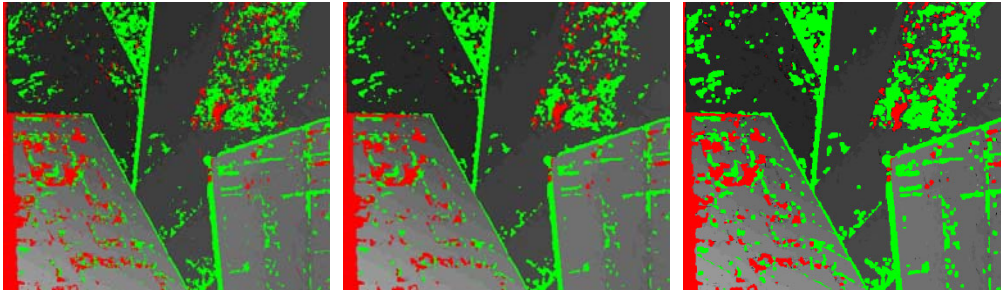
(δ)



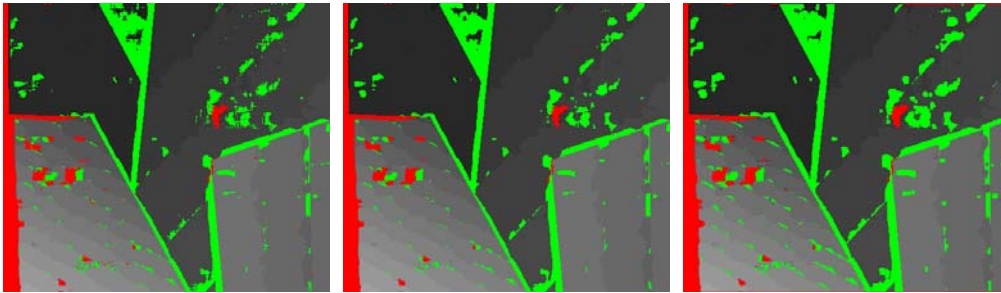
(ε)

Σχήμα 6.145. Χάρτες παράλλαξης από την εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών (SAD) και εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής (μέσον) και φίλτρου μέσου όρου (δεξιά) για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 7×7 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 , (ε) 21×21 .

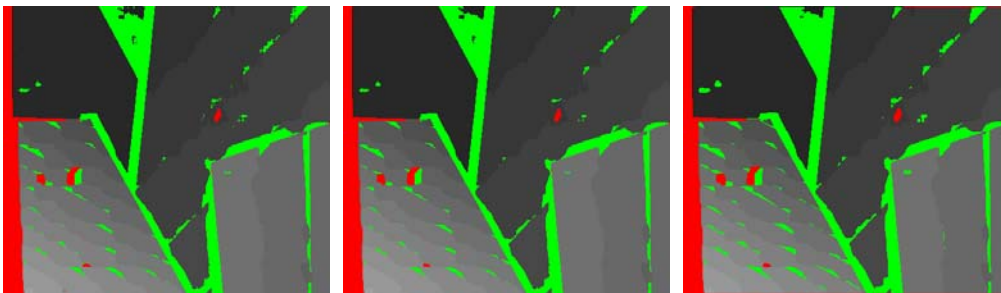
Οι εικόνες των διαφορών παράλλαξης από σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με ορισμένους από τους χάρτες του Σχ. 6.145 φαίνονται στο Σχ. 6.146.



(α)



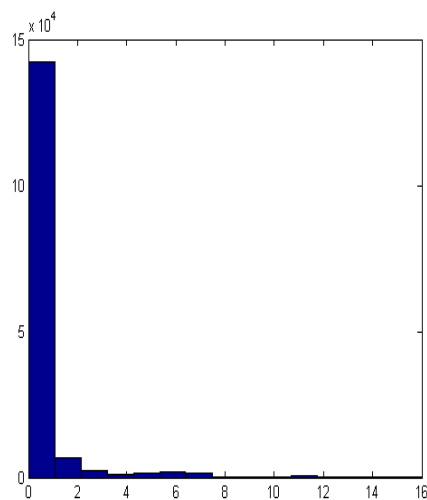
(β)

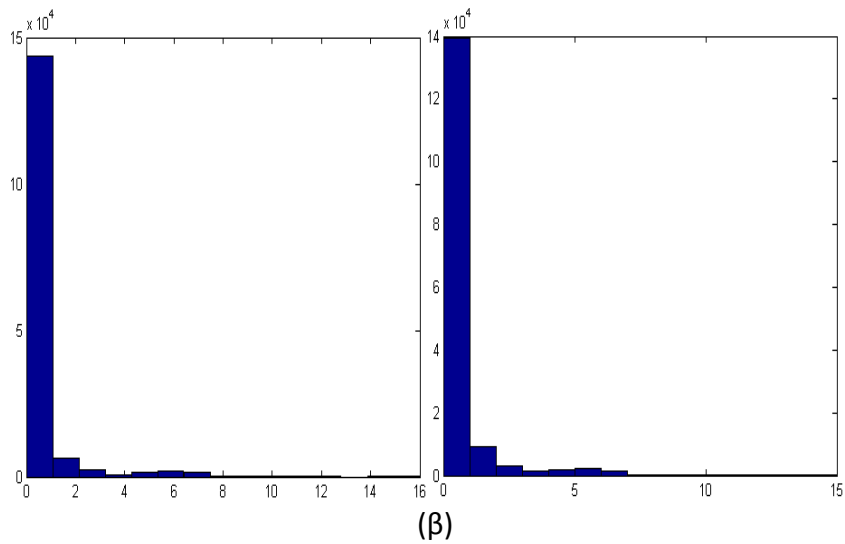
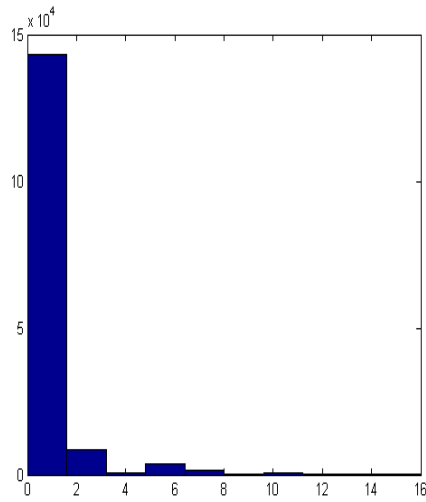
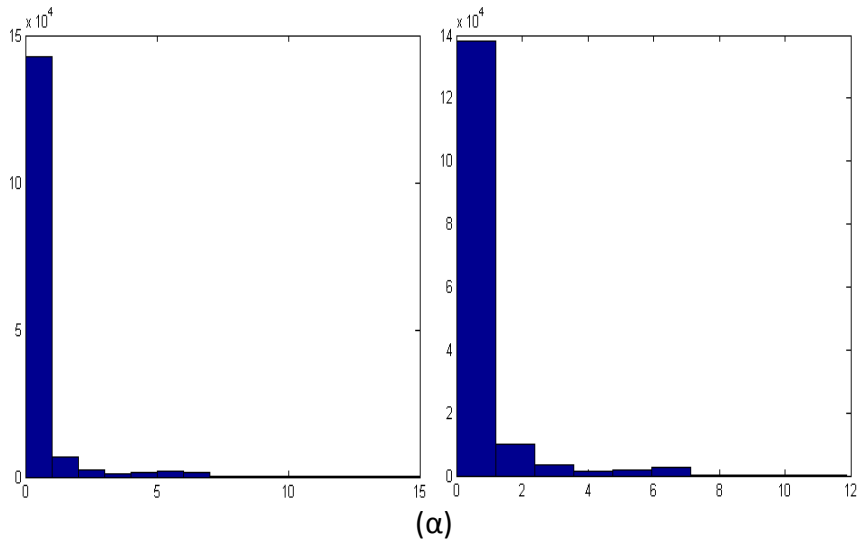


(γ)

Σχήμα 6.146. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου SAD και την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής (μέσον) και φίλτρου μέσου όρου (δεξιά) για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 11×11, (γ) 21×21.

Στη συνέχεια φαίνονται ενδεικτικά (Σχ. 6.147) ορισμένα ιστογράμματα από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους χάρτες του Σχ. 6.145. Ο Πίνακας 6.42 δείχνει, όπως στα προηγούμενα, τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών.

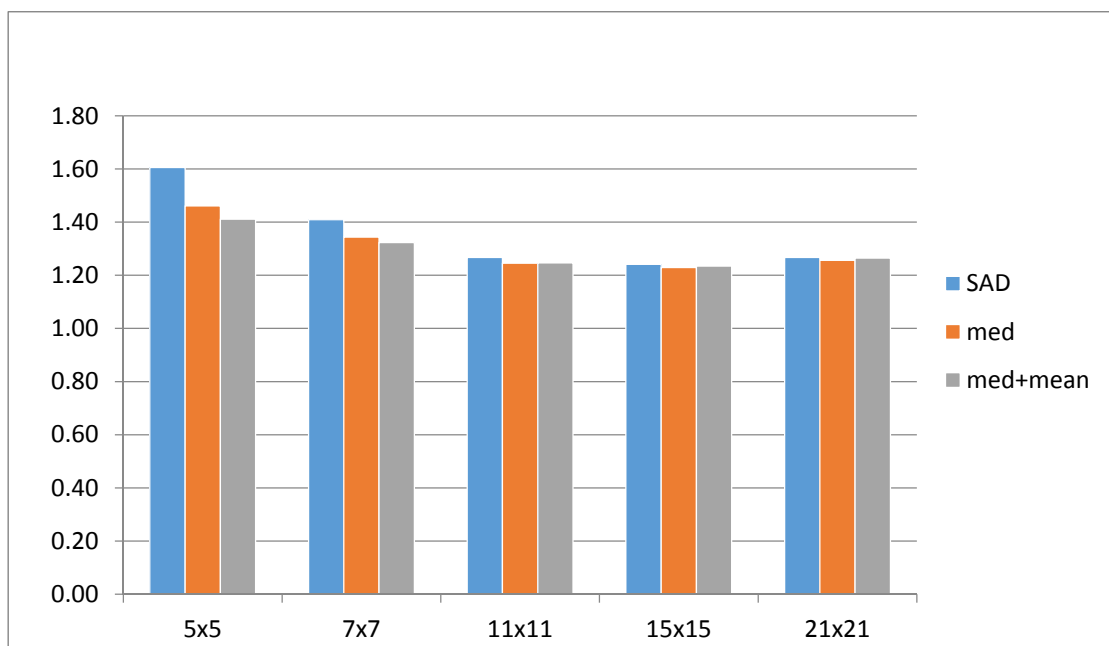




Σχήμα 6.147. Ιστογράμματα από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους που προέκυψαν από το κριτήριο των απόλυτων διαφορών με εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και φίλτρο μέσου όρου για παράθυρο: (α) 11×11 και (β) 15×15 .

Πίνακας 6.42. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)									
$m \times n$	SAD			Φίλτρο μεσαίας τιμής			Φίλτρο μέσου όρου		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5x5	1.66	1.99	80.98	1.46	1.72	83.31	1.41	1.46	86.04
7x7	1.47	1.64	85.92	1.34	1.50	87.03	1.32	1.32	88.61
11x11	1.32	1.29	89.67	1.25	1.23	89.90	1.25	1.14	90.47
15x15	1.30	1.18	90.38	1.23	1.16	90.35	1.23	1.10	90.72
21x21	1.32	1.18	89.52	1.26	1.18	89.48	1.26	1.15	89.74

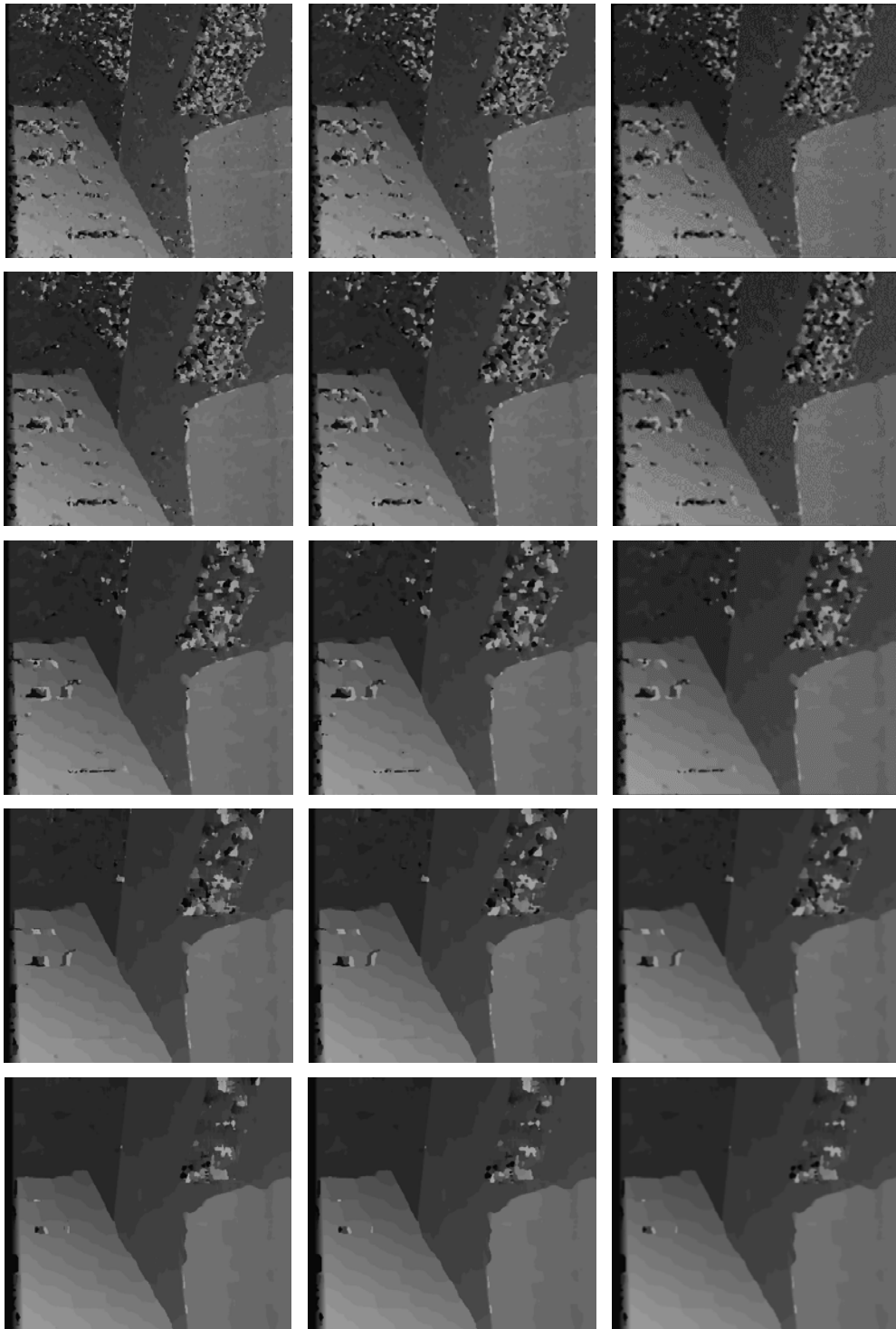
Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.42 παρατηρείται ότι η εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής βελτιώνει τις τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης των διαφορών, καθώς όμως (σε αντίθεση με τα άλλα μοντέλα) και τις τιμές των ποσοστών των εικονοψηφίδων με διαφορά παράλλαξης μικρότερη των 2 ρixel, ειδικά στα μικρά παράθυρα (5x5, 7x7). Στον Πίνακα 6.42 παρατηρείται επιπλέον μείωση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης των διαφορών χάρη στην εφαρμογή του φίλτρου μέσου όρου, με παράλληλη βελτίωση και των ποσοστών των εικονοψηφίδων με διαφορά παράλλαξης <2 ρixel. Για πιο άμεση αξιολόγηση των τιμών του μέσου όρου από τη σύγκριση των χαρτών παραλλάξεων με και χωρίς εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου, το διάγραμμα του Σχ. 6.148 δείχνει τις τιμές αυτές για κάθε ένα από τα παράθυρα.



Σχήμα 6.148. Διάγραμμα μέσων όρων διαφορών παράλλαξης από τις αληθείς τιμές.

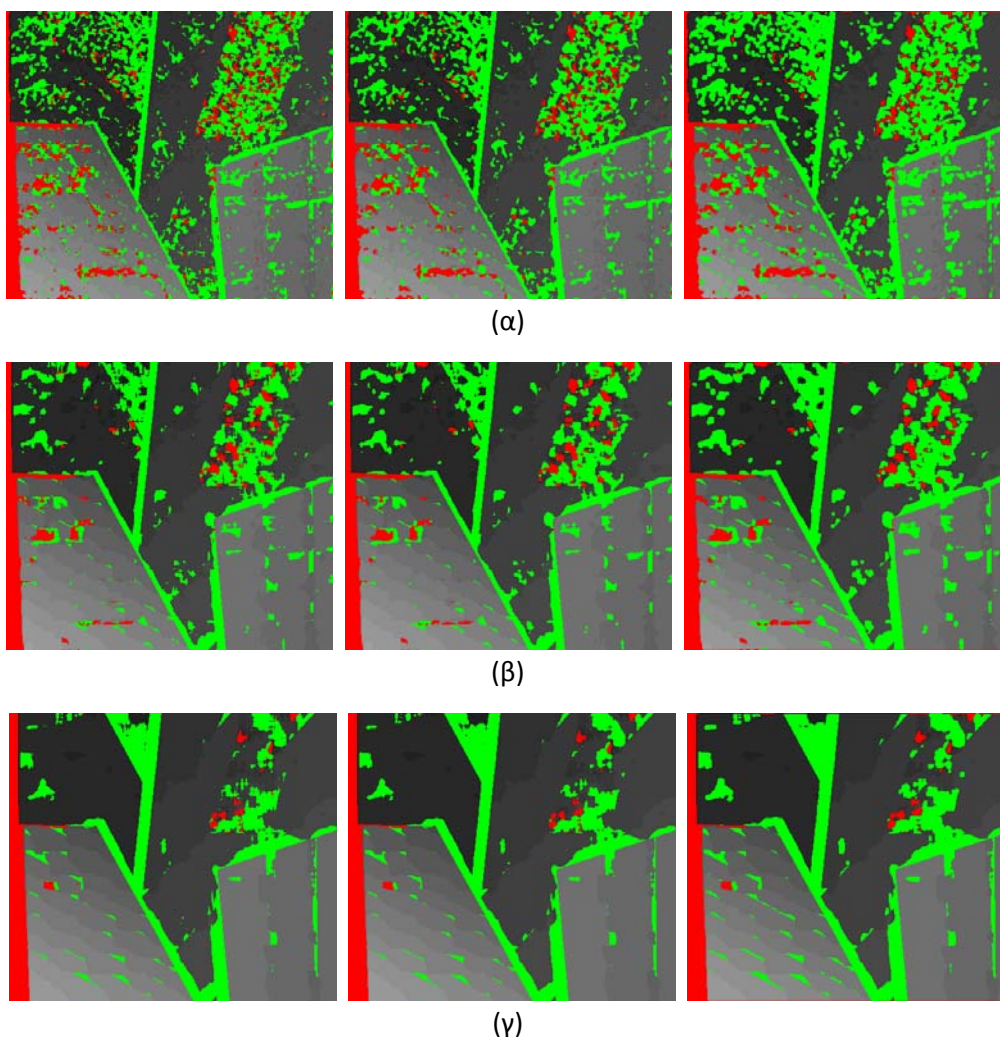
6.3.5.2 Εξομάλνιση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες κλίσης

Όσον αφορά το αποτέλεσμα συνταύτισης σε εικόνες κλίσης, οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν μετά από εφαρμογή φίλτρου Gauss (ενότητα 6.3.3) υπέστησαν επεξεργασία διαδοχικά με φίλτρο μεσαίας τιμής και φίλτρο μέσου όρου (Σχ.6.149).



Σχήμα 6.149. Χάρτες παράλλαξης βάσει του κριτηρίου SAD για παράθυρα (από πάνω προς τα κάτω) 5×5 , 7×7 , 11×11 , 15×15 , 21×21 σε εικόνες κλίσης μετά από φιλτράρισμα Gauss (αριστερά) και εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και μέσου όρου στους χάρτες παράλλαξης.

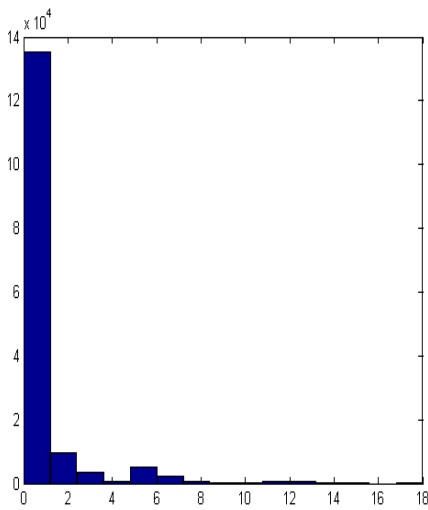
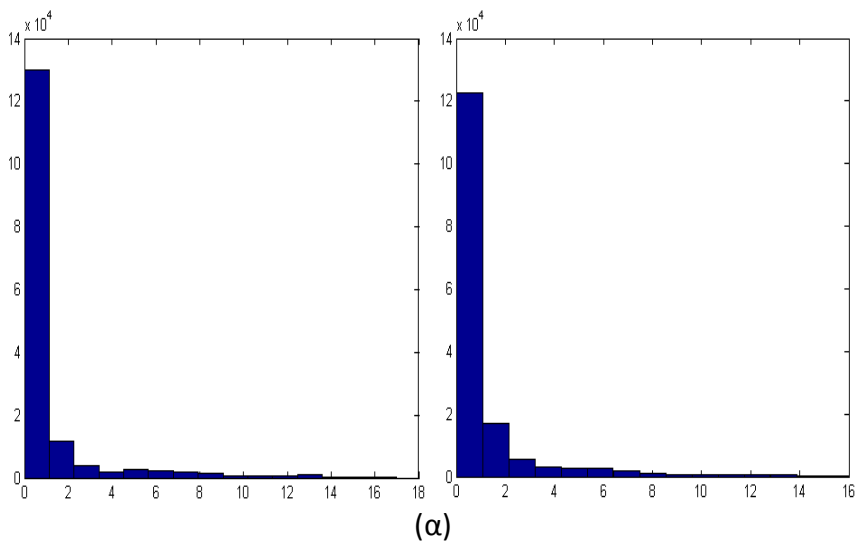
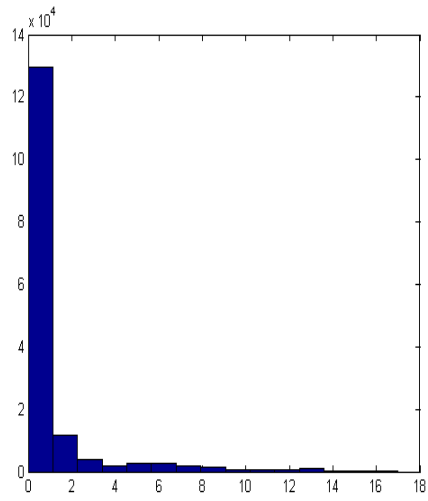
Οι εικόνες των διαφορών από σύγκριση του αληθούς χάρτη παραλλάξεων με τους χάρτες αυτούς παρουσιάζονται στο Σχ. 6.150.

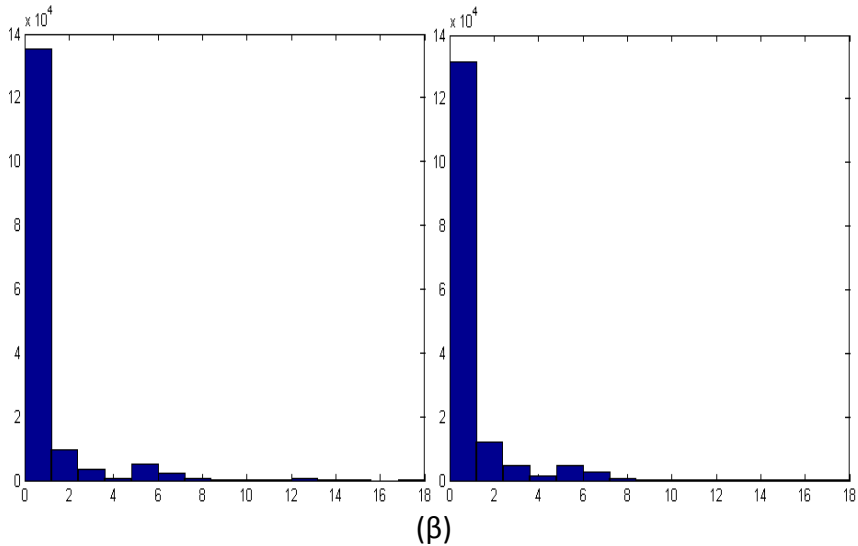


Σχήμα 6.150. Εικόνες διαφορών από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με εκείνους από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης (μετά από την εφαρμογή φίλτρου Gauss) και την εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου στους χάρτες παράλλαξης για παράθυρα: (α) 5×5 , (β) 11×11 , (γ) 21×21 .

Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένα από τα ιστογράμματα από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους προερχόμενους από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης μετά από εφαρμογή φίλτρου Gauss και εν συνεχεία εφαρμογή σε αυτούς φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου (Σχ. 6.151).

Επιπλέον, παρατίθενται τα στατιστικά στοιχεία (μέσος όρος, τυπική απόκλιση) καθώς και το ποσοστό των διαφορών παράλλαξης των εικονοψηφίδων με τιμή μικρότερη από 2 ρixel που προκύπτουν από τα ιστογράμματα αυτά (Πίνακας 6.43).





Σχήμα 6.151. Ιστογράμματα διαφορών από εικόνες κλίσης φιλτραρισμένες με Gauss, και με εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου. Παράθυρα: (α) 11×11, (β) 21×21.

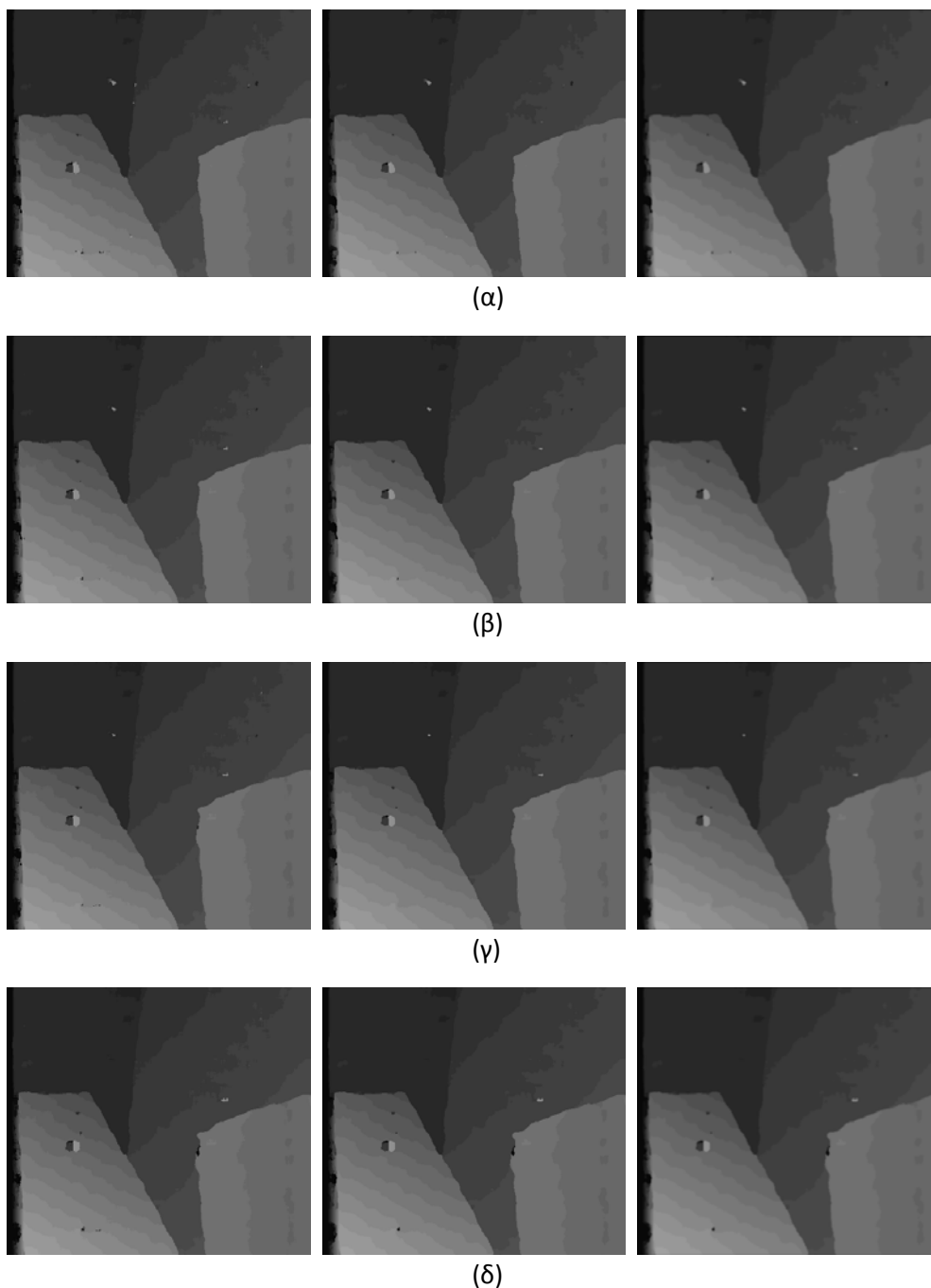
Πίνακας 6.43. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)									
$m \times n$	SAD σε εικόνες κλίσης φιλτραρισμένες με φίλτρο Gauss			Φίλτρο μεσαίας τιμής			Φίλτρο μέσου όρου		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	2.02	2.73	72.43	1.89	2.53	74.05	1.80	2.17	78.20
7×7	1.82	2.46	76.84	1.75	2.33	77.73	1.69	2.05	80.83
11×11	1.57	2.04	81.75	1.54	1.97	82.09	1.52	1.78	84.05
15×15	1.45	1.76	84.25	1.43	1.72	84.44	1.43	1.61	85.89
21×21	1.40	1.60	85.31	1.39	1.58	85.41	1.39	1.50	86.22

Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.43 προκύπτει ότι εν προκειμένω η εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής στους χάρτες παράλλαξης βελτιώνει, ιδίως για τα μικρότερα παράθυρα, τις τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης των διαφορών, αλλά και το ποσοστό των σωστών συνταυτίσεων. Ακόμα, η εφαρμογή φίλτρου μέσου όρου επιφέρει μια επιπλέον μείωση των τιμών των τυπικών αποκλίσεων, αφού εξομαλύνει περαιτέρω τις ακραίες τιμές διαφορών, βελτιώνοντας παράλληλα εδώ και τις τιμές του μέσου όρου και του ποσοστού των διαφορών.

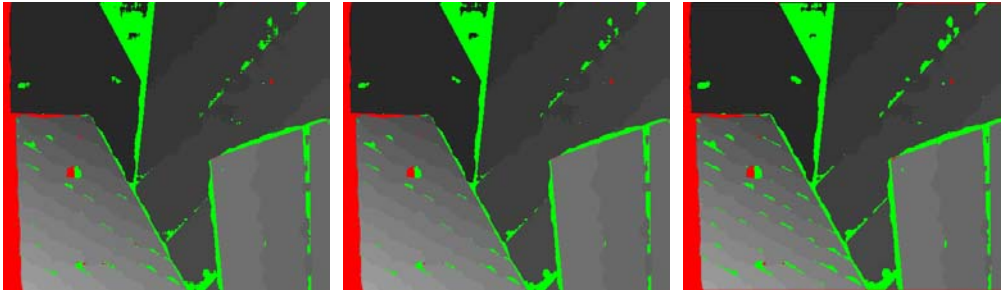
6.2.5.3 Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες rank

Στις εικόνες παράλλαξης που προέκυψαν βάσει του κριτηρίου του αθροίσματος των

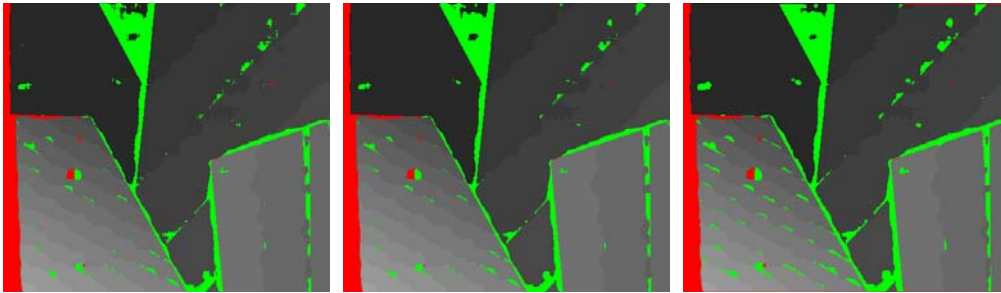
απόλυτων διαφορών (SAD), για παράθυρο 15×15 , από εικόνες στις οποίες είχε προηγουμένως εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός κατάταξης rank (με παράθυρα: 7×7 , 9×9 , 11×11 , 15×15) εφαρμόστηκε φίλτρο μεσαίας τιμής 3×3 και στην συνέχεια, στις νέες εικόνες παράλλαξης, εφαρμόστηκε φίλτρο μέσου όρου 3×3 . Οι εικόνες παράλλαξης που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία φαίνονται στο Σχ. 6.152. Η απεικόνιση των διαφορών που προέκυψαν από την σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τα εκείνους του Σχ. 6.152 παρουσιάζονται στο Σχ. 6.153.



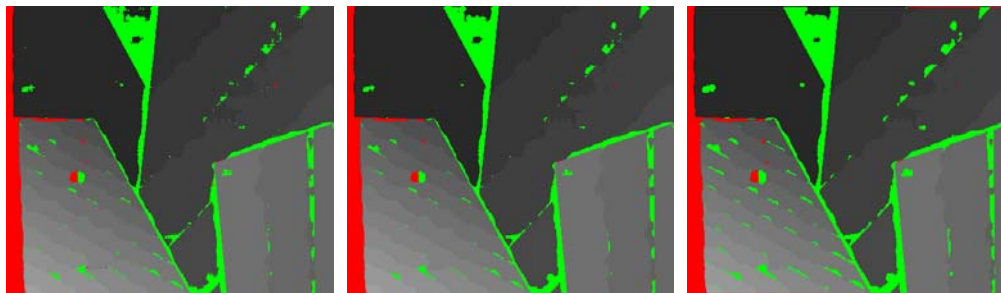
Σχήμα 6.152 Χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου SAD (παράθυρο 15×15) σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank για παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 , και εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής (μέσον) και μέσου όρου (δεξιά).



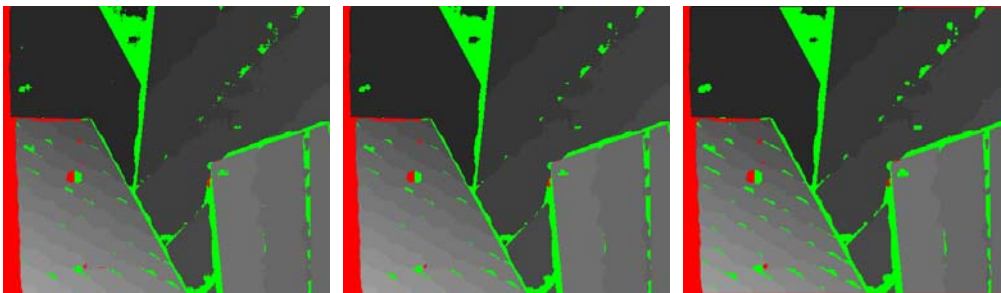
(α)



(β)



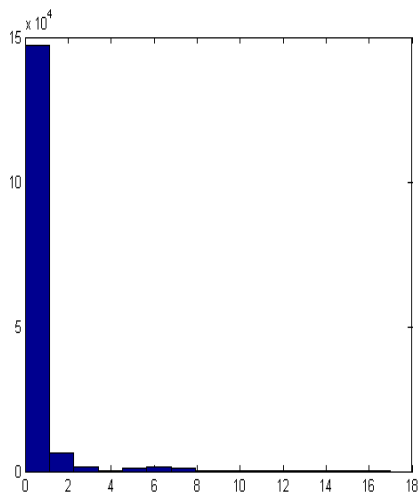
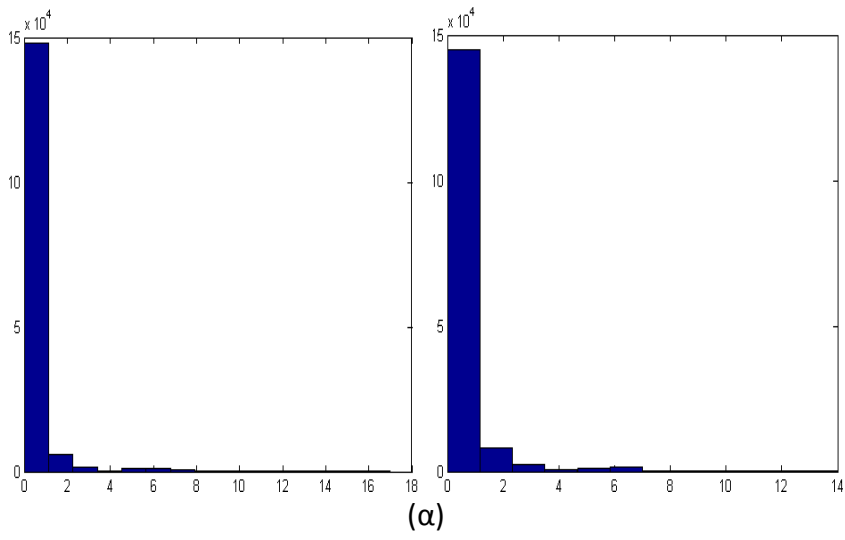
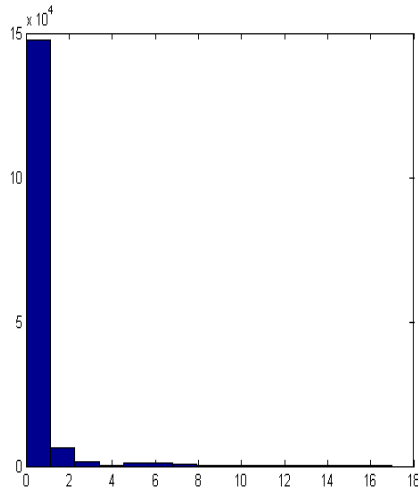
(γ)

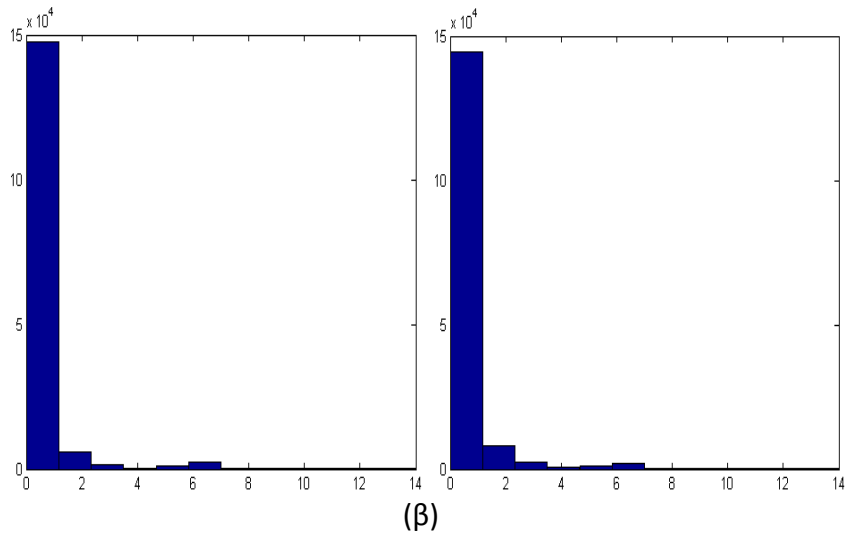


(δ)

Σχήμα 6.153. Εικόνες διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλληλης με εκείνους που προέκυψαν από εφαρμογή κριτηρίου SAD (παράθυρο 15×15) σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank για παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 , και εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής (μέσον) και μέσου όρου (δεξιά).

Το Σχ. 6.154 παραθέτει, ενδεικτικά, κάποια από τα ιστογράμματα της σύγκρισης του αληθούς χάρτη με κάθε μια από τις εικόνες παράλληλης του Σχ. 6.152, ενώ ο Πίνακας 6.44 περιλαμβάνει τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών και τα ποσοστά τους με τιμή μικρότερη από 2 pixel.



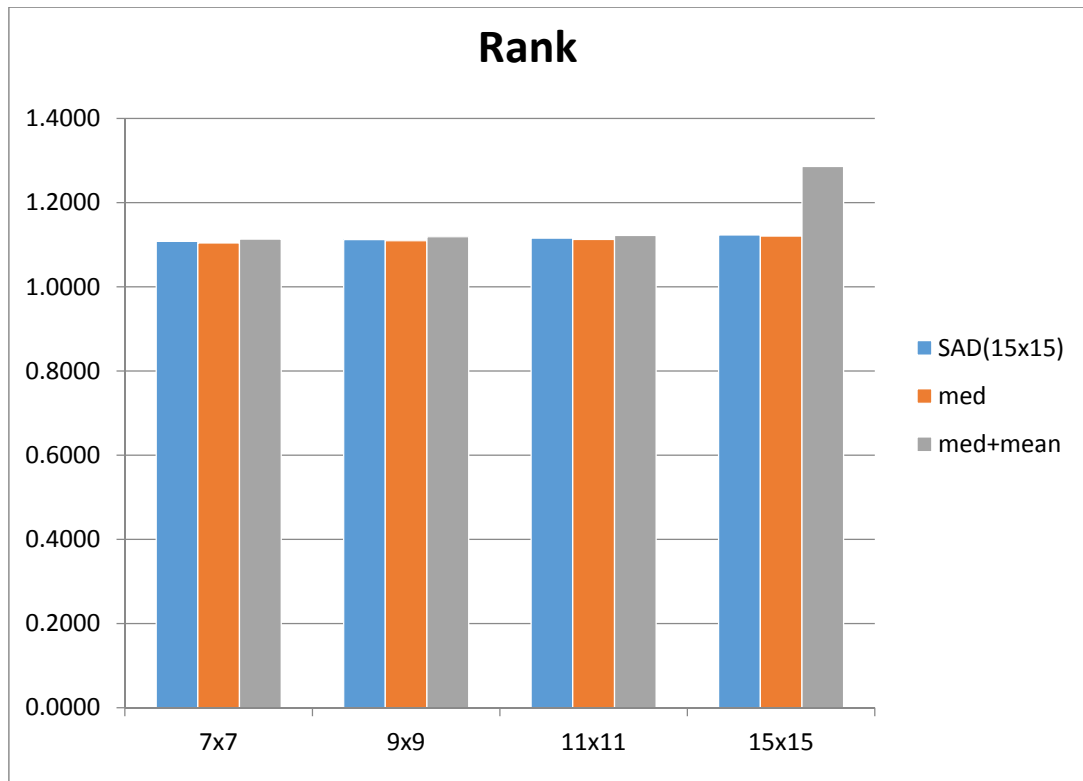


Σχήμα 6.154. Ιστογράμματα από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε έναν από τους χάρτες παράλλαξης του Σχ. 6.152 για παράθυρα rank: (α) 9×9, (β) 15×15.

Πίνακας 6.44. Διαφορές υπολογισμένων παραλλάξεων (SAD) από τις αληθείς για παράθυρο 15×15 (μ: μέσος όρος, σ: τυπική απόκλιση, π[-1, 1]: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)									
Παράθυρο rank	SAD			Φίλτρο μεσαίας τιμής			Φίλτρο μέσου όρου		
	μ	σ	π[-1, 1]	μ	σ	π[-1, 1]	μ	σ	π[-1, 1]
7×7	1.108	0.876	93.27	1.104	0.852	93.36	1.114	0.805	93.42
9×9	1.112	0.881	93.20	1.110	0.865	93.29	1.119	0.819	93.34
11×11	1.116	0.881	93.10	1.113	0.863	93.20	1.122	0.824	93.28
15×15	1.123	0.894	92.88	1.121	0.881	92.96	1.286	0.8422	93.11

Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.44 προκύπτει μικρή μείωση της τιμής της τυπικής απόκλισης με την εφαρμογή του φίλτρου μεσαίας τιμής. Η εφαρμογή του φίλτρου μέσου όρου συντελεί στην περαιτέρω μείωση των τιμών της τυπικής απόκλισης. Από την άλλη μεριά (και με μία εξαίρεση), στις τιμές του μέσου όρου και των ποσοστών διαφορών παράλλαξης <2 pixel δεν παρατηρείται ουσιαστική διαφορά (οι τιμές παραμένουν σχεδόν σταθερές).

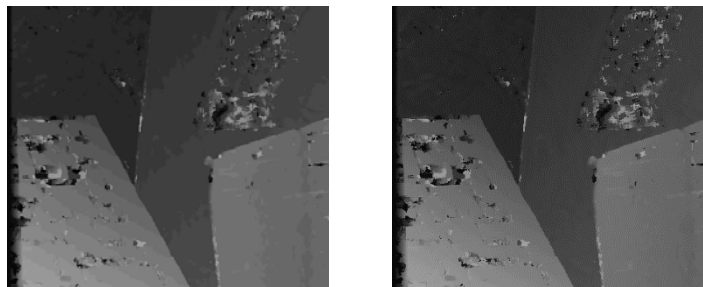
Τέλος, για την άμεση σύγκριση των τιμών του μέσου όρου που προέκυψαν από τη σύγκριση των χαρτών παράλλαξης με και χωρίς τη χρήση φίλτρων, παρατίθεται διάγραμμα με τις τιμές αυτές (Σχ. 6.155), όπου φαίνεται η επίδραση των φίλτρων.



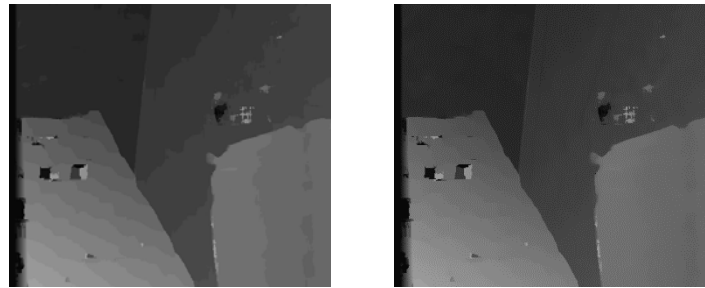
Σχήμα 6.155. Διάγραμμα των τιμών του μέσου όρου των διαφορών παράλλαξης στην περίπτωση συνταύτισης εικόνων rank και εφαρμογής φίλτρων εξομάλυνσης στον χάρτη παραλλάξεων.

6.3.6 Υποψηφιακή παρεμβολή (sub-pixel refinement)

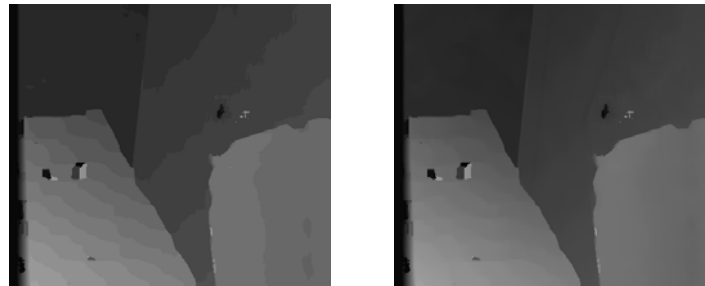
Τα αποτελέσματα που προήλθαν από παρεμβολή πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού στις διακριτές τιμές του τρισδιάστατου πίνακα κόστους (DSI), με σκοπό να επιτευχθεί στον προσδιορισμό της παράλλαξης ακρίβεια καλύτερη του ρικελ, παρουσιάζονται στο Σχ. 6.156. Η υποψηφιακή εκτίμηση της παράλλαξης πραγματοποιήθηκε για τις τιμές παράλλαξης που προέκυψαν με μεγέθη παραθύρου 7×7, 15×15 και 21×21.



(α)



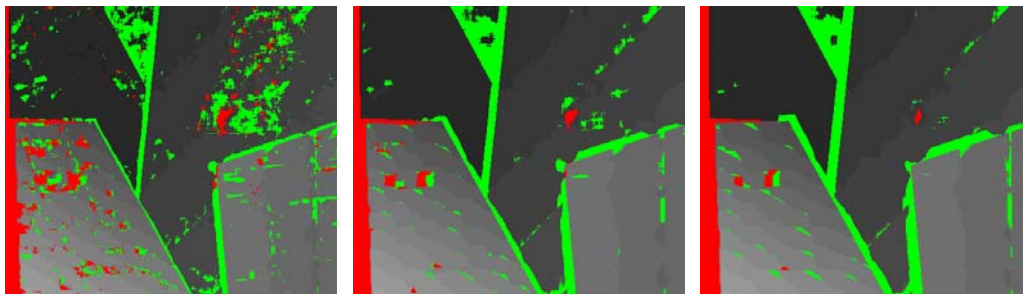
(β)



(γ)

Σχ. 6.156. Χάρτες παράλλαξης με βάση το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (αριστερά) και αποτέλεσμα παρεμβολής πολυωνύμου με σκοπό την υποψηφιδική εκτίμηση της παράλλαξης (δεξιά) για παράθυρα: (α) 7x7, (β) 15x15, και (γ) 21x21.

Για τις εικόνες αυτές έγινε σύγκριση με τον αληθνή χάρτη, από την οποία προέκυψαν οι εικόνες διαφορών που φαίνονται στο Σχ. 6.157.



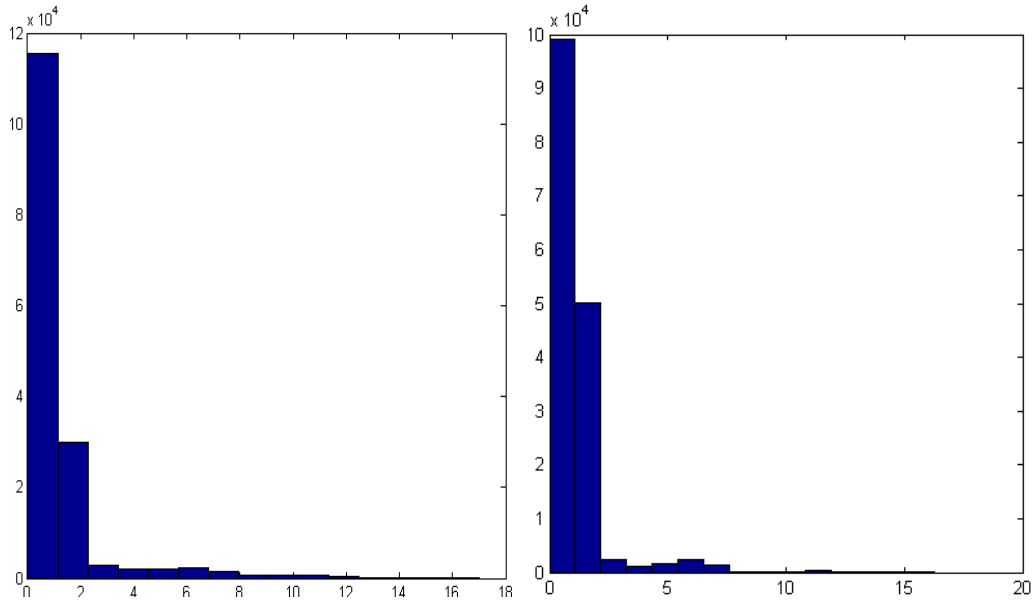
(α)

(β)

(γ)

Σχ. 6.157. Εικόνες των διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με κάθε έναν από τους χάρτες παράλλαξης του Σχ. 6.156 (δεξιά στήλη) για παράθυρα: (α) 7x7, (β) 15x15, και (γ) 21x21.

Τα ιστογράμματα των διαφορών παράλλαξης που προκύπτουν από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τους υπολογισμένους χάρτες, για παράθυρα 7x7 και 15x15, του Σχ. 6.156 (δεξιά στήλη) παρουσιάζονται στο Σχ. 6.158. Τέλος, ο Πίνακας 6.45 συγκεντρώνει τα βασικά στατιστικά στοιχεία των διαφορών (μέσος όρος, τυπική απόκλιση και ποσοστό διαφορών παράλλαξης Δd που βρίσκονται στο διάστημα $-1.5 \leq \Delta d \leq 1.5$).



Σχ. 6.158. Ιστογράμματα διαφορών παράλλαξης των χαρτών που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών με παρεμβολή πολυωνύμου 2^{ou} βαθμού, για παράθυρα: 7×7 και 15×15 .

Πίνακας 6.45. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1.5 \leq \Delta d \leq 1.5$)

$m \times n$	SAD			Υποψηφιδική παρεμβολή		
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
7x7	1.41	1.66	85.92	1.41	1.65	84.62
15x15	1.24	1.20	90.38	1.23	1.18	89.24
21x21	1.27	1.22	89.52	1.25	1.19	88.60

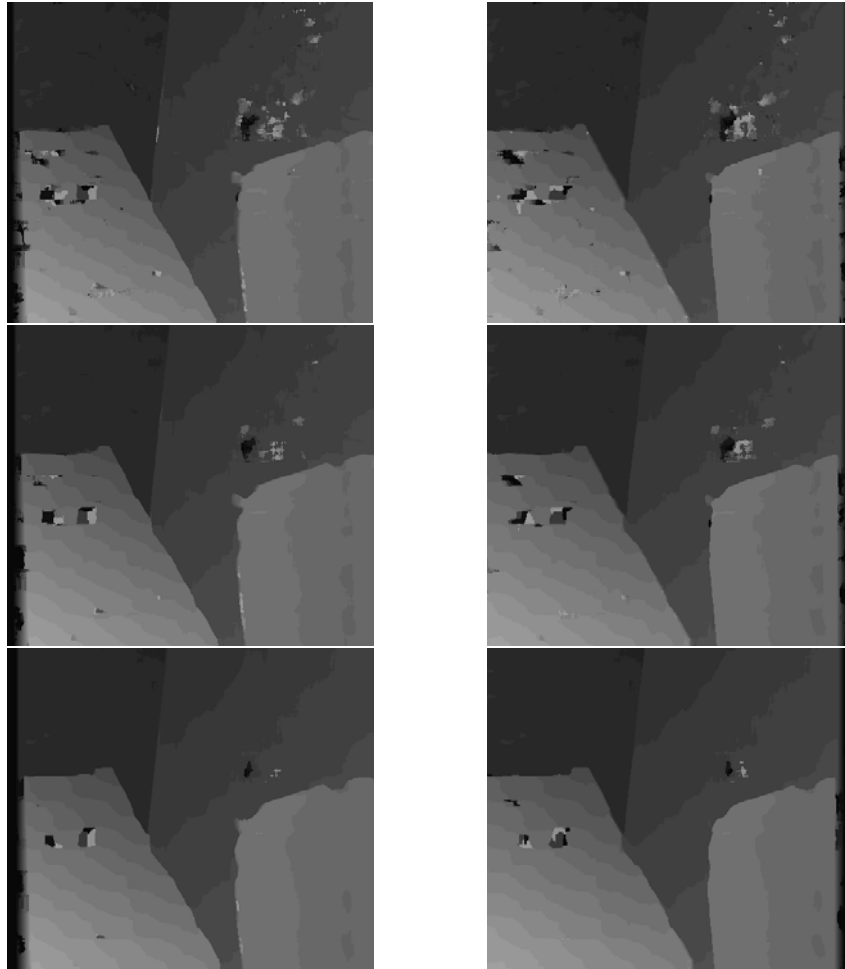
Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.45 δεν συνάγεται κάποια ουσιαστική μεταβολή.

6.3.7 Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας

Ακόμα, έγινε έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας για κάθε ένα από τα κριτήρια συνταύτισης που χρησιμοποιήθηκαν.

6.3.7.1 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD

Για το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας έγινε για διάσταση παραθύρων 11×11 , 15×15 , 21×21 . Οι χάρτες παράλλαξης για κάθε εικόνα του στερεοζεύγους παρουσιάζονται στο Σχ. 6.159.

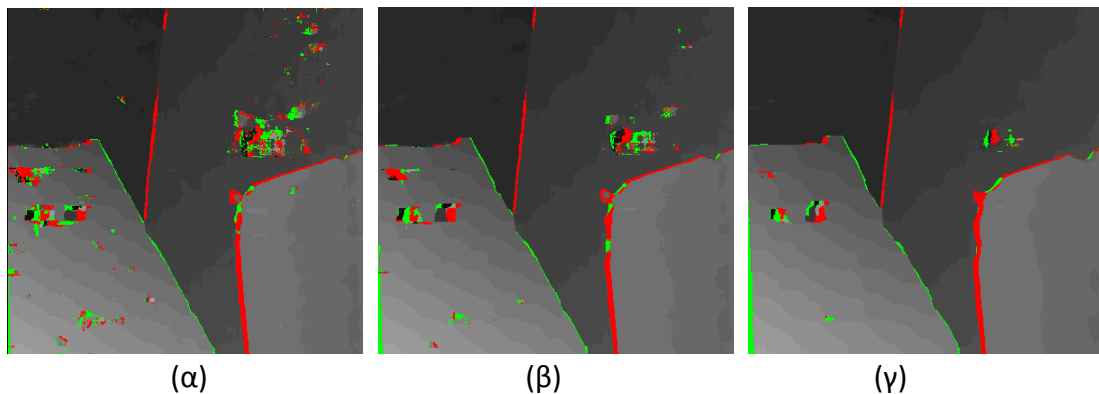


Σχήμα 6.159. Χάρτες παράλλαξης της αριστερής (αριστερά) και της δεξιάς εικόνας (δεξιά) που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα: 11×11 (πάνω), 15×15 (μέσον) και 21×21 (κάτω).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον έλεγχο των χαρτών παράλλαξης φαίνονται στον Πίνακα 6.46, μαζί με εκείνα που προήλθαν από τη σύγκριση των αρχικά υπολογισμένων χαρτών με τον αληθή χάρτη παράλλαξης.

Πίνακας 6.46. Διαφορές των υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)							
$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
11×11	1.27	1.31	89.67	95.98	1.16	1.02	91.43
15×15	1.24	1.20	90.38	97.10	1.17	1.01	91.48
21×21	1.27	1.22	89.52	97.46	1.19	1.04	90.61

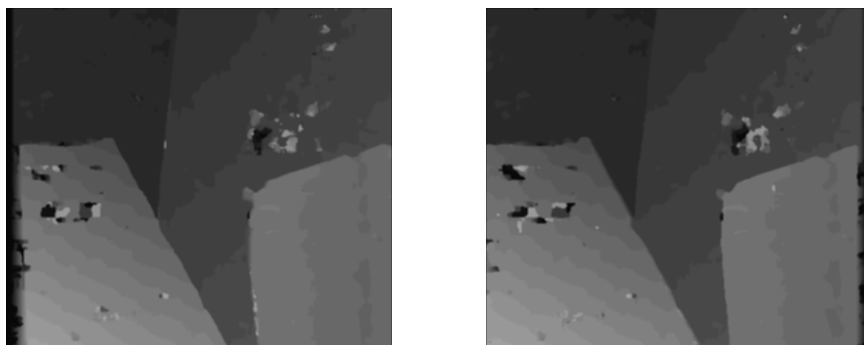
Τα αποτελέσματα μετά από τον έλεγχο συμβατότητας, για τιμή κατωφλίου 1 ρικελ, εμφανίζουν τιμές για τις διαφορές θέσης των σημείων της εικόνας αναφοράς σε σχέση τον αληθή χάρτη βάθους μόνο για όσες εικονοψηφίδες έχουν περάσει τον έλεγχο. Από τον Πίνακα 6.46 συνάγεται πως ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας βελτιώνει τις τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης των τιμών που απομένουν, όσο και του ποσοστού των διαφορών με τιμή μικρότερη από 2 ρικελ. Προκύπτει, λοιπόν, ότι εδώ μόλις το 3-4% του συνόλου εμφανίζουν μεγάλα σφάλματα παράλλαξης. Η βελτίωση στην προκειμένη περίπτωση είναι μικρότερη σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα (ενότητες 6.1.71, 6.2.7.1) γιατί τα αποτελέσματα της αρχικής συνταύτισης ήταν πολύ καλύτερα σε όλους τους δείκτες, και άρα τα περιθώρια βελτίωσης ήταν περιορισμένα. Το Σχ. 6.160 εμφανίζει τους χάρτες παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προήλθαν από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης, όπου διακρίνονται όσα σημεία απορρίφθηκαν κατά τον έλεγχο.

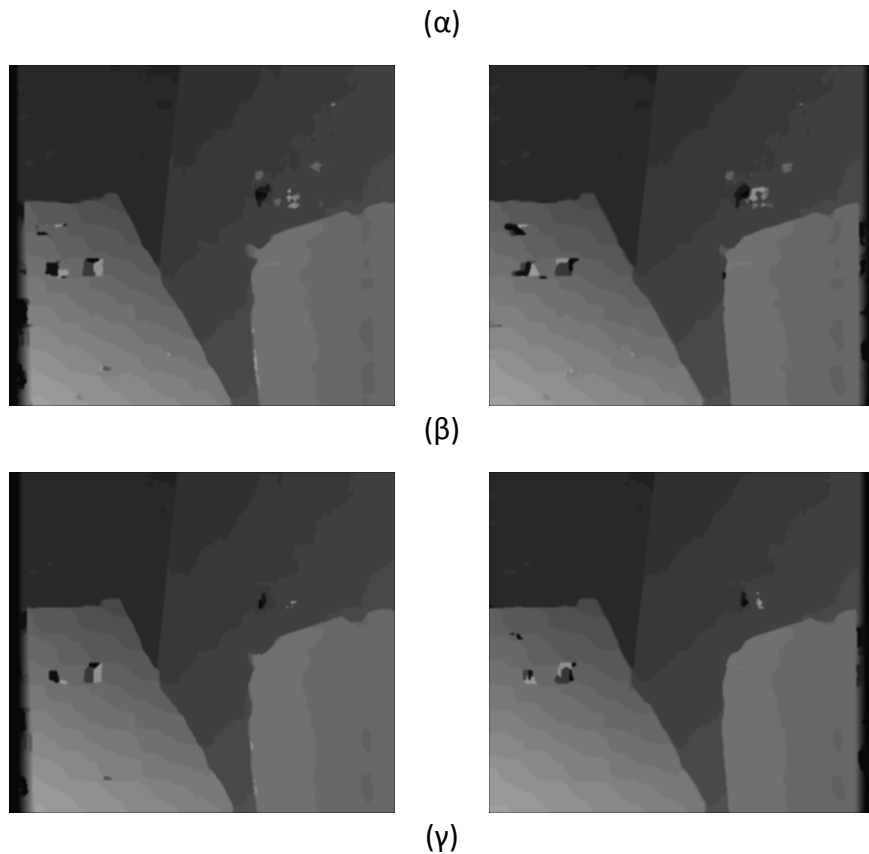


Σχήμα 6.160. Χάρτες παράλλαξης που εμφανίζουν τα σημεία που αποκλείστηκαν κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 15×15 και (γ) 21×21 .

6.3.7.2 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD και εξομάλυνση

Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας πραγματοποιήθηκε και για τους φιλτραρισμένους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν με βάση το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (ενότητα 6.3.5.1). Οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν για κάθε εικόνα του στερεοζεύγους μετά από την εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής και φίλτρο μέσου όρου παρουσιάζονται στο Σχ. 6.161.



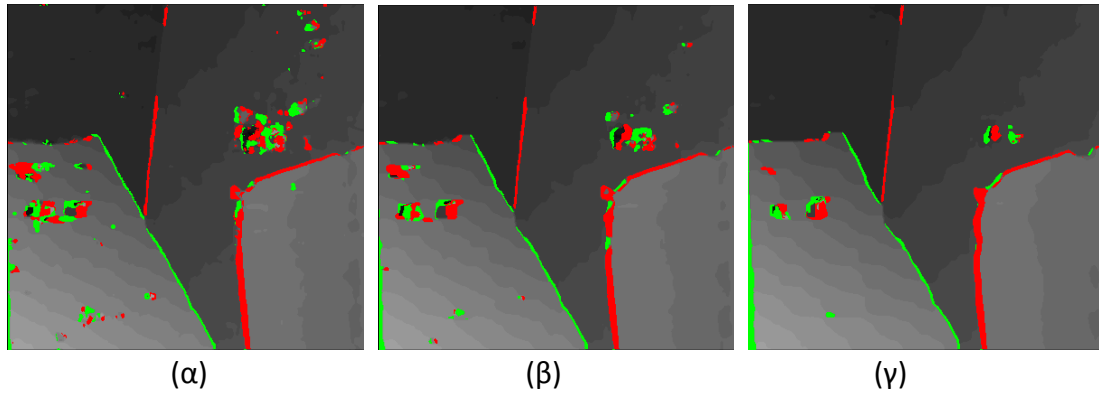


Σχήμα 6.161. Φιλτραρισμένοι χάρτες παράλλαξης της αριστερής και της δεξιάς εικόνας που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.

Πίνακας 6.47. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών και εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
11×11	1.25	1.14	90.47	94.88	1.13	0.87	93.26
15×15	1.23	1.10	90.72	96.02	1.14	0.91	92.81
21×21	1.26	1.15	89.74	96.52	1.18	0.98	91.64

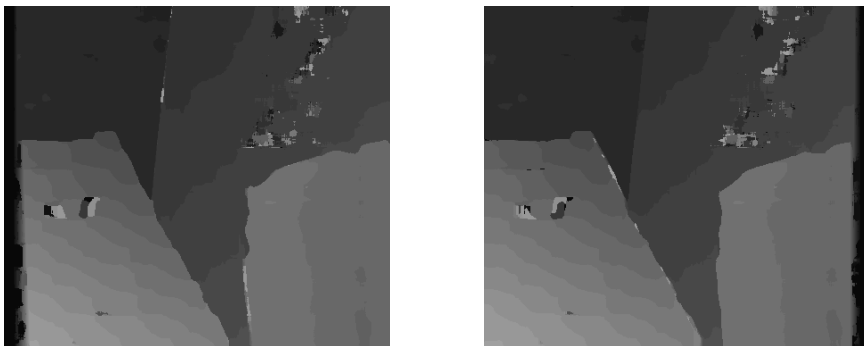
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας των χαρτών παράλλαξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.47. Και στην περίπτωση αυτή η βελτίωση των τιμών των αποτελεσμάτων είναι εμφανής. Οι χάρτες παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προήλθαν από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης φαίνονται στο Σχ. 6.162.



Σχήμα 6.162. Χάρτες παράλλαξης που εμφανίζουν τα σημεία που αποκλείστηκαν κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.

6.3.7.3 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης

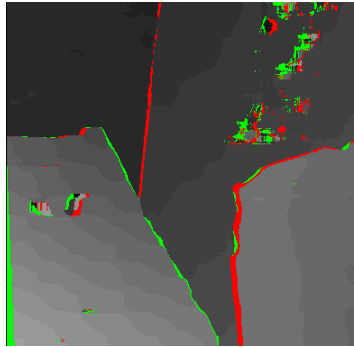
Ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας πραγματοποιήθηκε και για τον χάρτη παράλλαξης που προήλθε από εφαρμογή του κριτηρίου SAD σε εικόνες κλίσης για παράθυρο 21×21. Οι χάρτες παράλλαξης για τις δύο εικόνες του στερεοζεύγους παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.163. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας των χαρτών παράλλαξης βρίσκονται στον Πίνακα 6.48. Ο χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προέκυψε από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης φαίνεται στο Σχ. 6.164.



Σχήμα 6.163. Χάρτες παράλλαξης των εικόνων του στερεοζεύγους από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης (παράθυρο 21×21).

Πίνακας 6.48. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
21×21	1.35	1.48	88.14	96.27	1.24	1.17	89.65

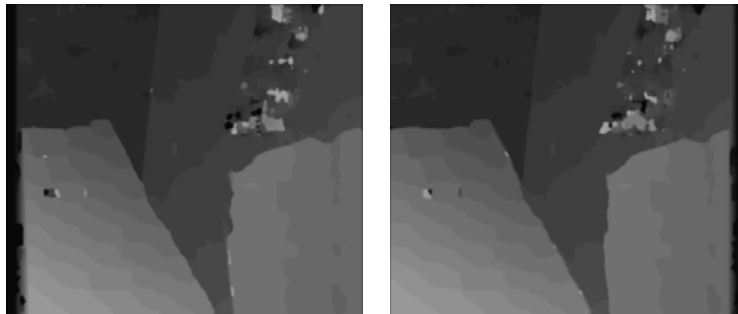


Σχήμα 6.164. Χάρτης παράλλαξης αριστερής εικόνας από έλεγχο συμβατότητας.

Παρατηρείται και εδώ μείωση των τιμών μέσου όρου και τυπικής απόκλισης διαφορών, καθώς και αύξηση του ποσοστού των διαφορών με τιμή <2 pixel.

6.3.7.4 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων κλίσης με εξομάλυνση

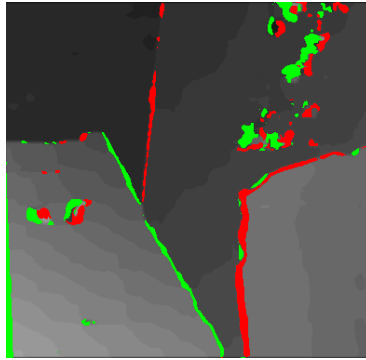
Εδώ πριν από τη συνταύτιση των εικόνων κλίσης είχε εφαρμοστεί φίλτρο Gauss και μετά πραγματοποιήθηκε η συνταύτιση για παράθυρο 21×21. Στους προκύψαντες χάρτες παράλλαξης για τις εικόνες του ζεύγους εφαρμόστηκαν φίλτρα μεσαίας τιμής και μέσου όρου (Σχ. 6.165). Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας εμφανίζονται στον Πίνακα 6.49. Ο χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας μετά από τον έλεγχο συμβατότητας φαίνεται στο Σχ. 6.166.



Σχήμα 6.165. Φιλτραρισμένοι χάρτες παράλλαξης των δύο εικόνων από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε φιλτραρισμένες (Gauss) εικόνες κλίσης.

Πίνακας 6.49. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

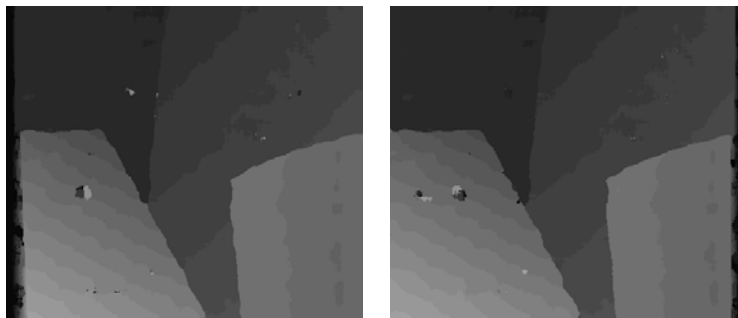
$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσης με εξομάλυνση			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
21×21	1.39	1.50	86.22	94.33	1.22	1.06	91.28



Σχήμα 6.166. Χάρτης παράλλαξης αριστερής εικόνας από έλεγχο συμβατότητας.

6.3.7.5 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank

Ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας πραγματοποιήθηκε επίσης για το χάρτη παράλλαξης που είχε προκύψει με κριτήριο το άθροισμα των απόλυτων διαφορών σε εικόνες μετασχηματισμένες με το φίλτρο κατάταξης rank για παράθυρο 7×7. Οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν για τις εικόνες του ζεύγους για παράθυρο 15×15 φαίνονται στο Σχ. 6.167. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο των χαρτών παράλλαξης βρίσκονται στον Πίνακα 6.50.

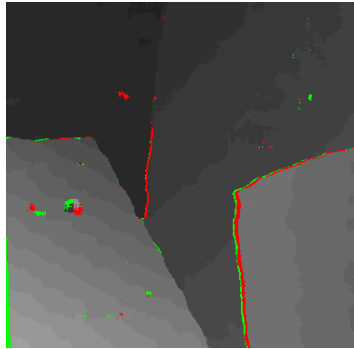


Σχήμα 6.167. Χάρτες παράλλαξης από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες μετασχηματισμένες με το φίλτρο rank.

Πίνακας 6.50. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες rank (7×7)			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
15×15	1.11	0.88	93.27	98.49	1.06	0.67	93.78

Ο χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας μετά από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης φαίνεται στο Σχ. 6.168.

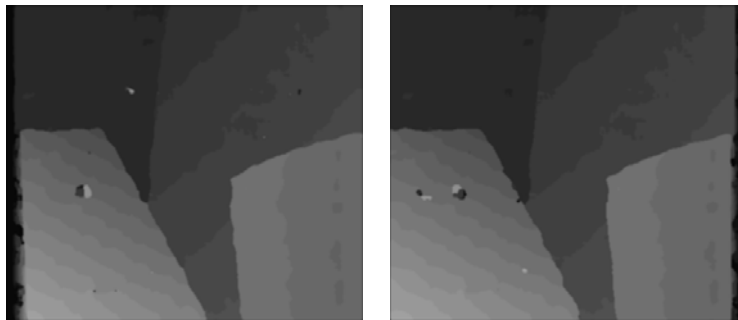


Σχήμα 6.168. Χάρτης παράλλαξης αριστερής εικόνας μετά από τον έλεγχο συμβατότητας.

Από τα στοιχεία του Πίνακα 6.50 προκύπτει ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μικρή βελτίωση, αφού τα αποτελέσματα ήταν ήδη εξ αρχής πολύ καλά. Οι τιμές που αποκλείονται εντοπίζονται σχεδόν αποκλειστικά σε περιοχές αποκρύψεων.

6.3.7.6 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση εικόνων rank και εξομάλυνση

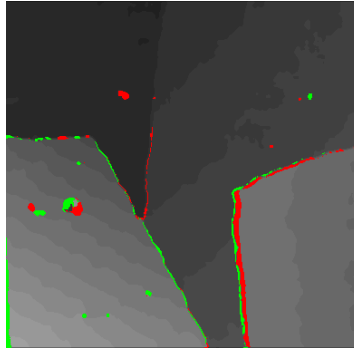
Ελέγχθηκε, τέλος, και η εξομάλυνση χαρτών παράλλαξης που είχαν προέλθει από εφαρμογή του κριτηρίου SAD σε εικόνες μετασχηματισμένες με φίλτρο rank. Οι χάρτες παράλλαξης μετά από εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου φαίνονται στο Σχ. 6.169. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο των χαρτών εμφανίζονται στον Πίνακα 6.51. Ο χάρτης παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προέκυψε από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης εμφανίζεται στο Σχ. 6.170.



Σχήμα 6.169. Φιλτραρισμένοι χάρτες παράλλαξης των δύο εικόνων βάσει του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών σε εικόνες μετασχηματισμένες με φίλτρο rank.

Πίνακας 6.51. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς για παράθυρο $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, q : % ανεκτών διαφορών βάσει του κριτηρίου της αμφίδρομης συμβατότητας, $\pi[-1, 1]$: % των ανεκτών διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

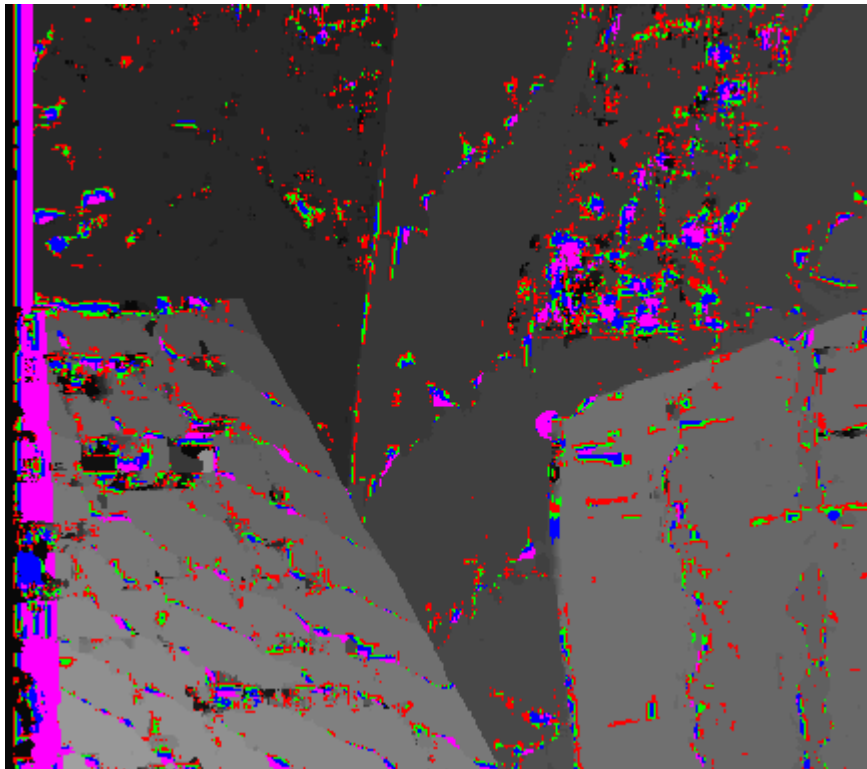
$m \times n$	Άθροισμα απόλυτων διαφορών σε εικόνες rank (7×7) με εξομάλυνση			Με έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας			
	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	q	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
15×15	1.29	0.84	93.11	97.91	1.06	0.61	94.53



Σχήμα 6.170. Χάρτης παράλλαξης μετά από έλεγχο συμβατότητας.

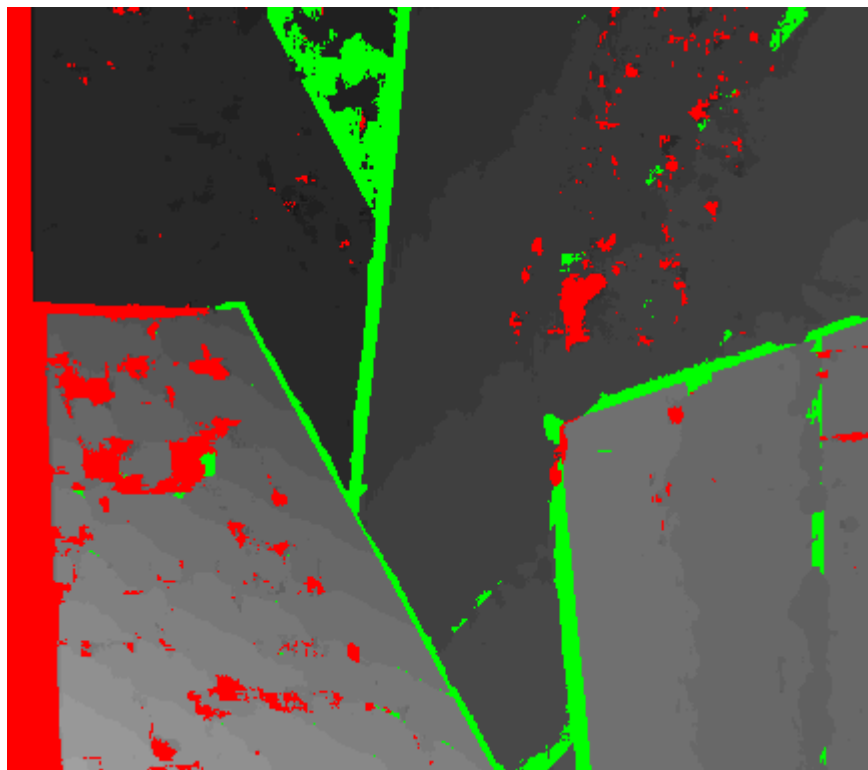
6.3.8 Συνταύτιση με περισσότερα παράθυρα

Από τον έλεγχο του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών με ταυτόχρονη χρήση 5 παραθύρων (μεγέθους 7×7 , 9×9 , 11×11 , 15×15 και 21×21) προέκυψε ο χάρτης παράλλαξης του Σχ. 6.171. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα σημεία στα οποία για την εύρεση του ομόλογου σημείου επελέγη η τιμή παράλλαξης από το παράθυρο 9×9 , ενώ το πράσινο αναφέρεται στο παράθυρο 11×11 , το μπλε στο παράθυρο 15×15 και το μωβ στο παράθυρο 21×21 . Στα υπόλοιπα σημεία, που απεικονίζονται με τόνους του γκριζου (τιμές παράλλαξης), η μικρότερη τιμή κόστους εμφανιζόταν στο παράθυρο 7×7 , η οποία και επελέγη. Όπως έχει παρατηρηθεί και για τα δυο προηγούμενα στερεοζεύγη, το παράθυρο με την μικρότερη τιμή κόστους που κατά βάση προκρίθηκε για τη δημιουργία του παραπάνω χάρτη παράλλαξης ήταν το μικρότερο (7×7).



Σχ. 6.171. Χάρτης παράλλαξης που δείχνει από ποιο παράθυρο επελέγη η τιμή παράλλαξης.

Η εικόνα διαφορών του Σχ. 6.172 προέκυψε από την σύγκριση του χάρτη του Σχ. 6.171 με την αληθή εικόνα βάθους. Τέλος, στον Πίνακα 6.52 συγκεντρώνονται τα βασικά στατιστικά στοιχεία των διαφορών (μέσος όρος, τυπική απόκλιση και ποσοστό διαφορών παράλλαξης Δd που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$).



Σχ. 6.172. Εικόνα διαφορών από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τον χάρτη παράλλαξης που προήλθε από την χρήση διαφορετικών παραθύρων.

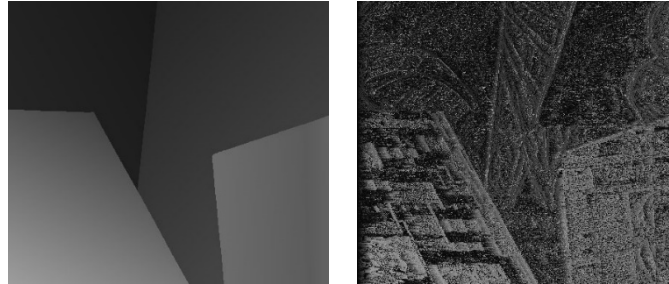
Πίνακας 6.52. Διαφορές των υπολογισμένων παραλάξεων από τις αληθείς για παράθυρα $m \times n$ (μ : μέσος όρος, σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών που βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)

SAD				Με επιλογή από 5 παράθυρα		
$m \times n$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$	μ	σ	$\pi[-1, 1]$
5×5	1.61	2.01	80.98	1.20	1.34	91.26
7×7	1.41	1.66	85.92			
11×11	1.27	1.31	89.67			
15×15	1.24	1.20	90.38			
21×21	1.27	1.22	89.52			

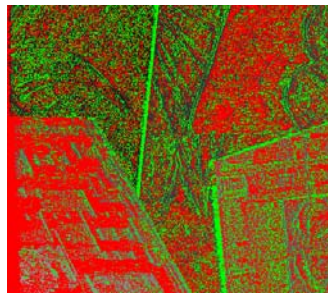
Από τον Πίνακα 6.52 προκύπτει ότι, σε αντίθεση με τα προηγούμενα στερεοζεύγη, η χρήση διαφορετικών παραθύρων συνετέλεσε στην βελτίωση των τιμών του μέσου όρου και του ποσοστού των διαφορών με τιμή μικρότερη των 2 pixel. Η τιμή της τυπικής απόκλισης είναι παρόμοια με εκείνη που προκύπτει για παράθυρο 11×11.

6.3.9 Συνταύτιση με την μέθοδο της απόλυτης διαφοράς

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται και για αυτό το μοντέλο η εφαρμογή του απλού κριτηρίου των απόλυτων διαφορών (AD). Το Σχ. 6.173 παρουσιάζει τον χάρτη παράλλαξης που προκύπτει από εφαρμογή του κριτηρίου αυτού, ενώ στο Σχ. 6.174 φαίνεται η εικόνα διαφορών που προέκυψε από τη σύγκρισή του με τον αληθή.

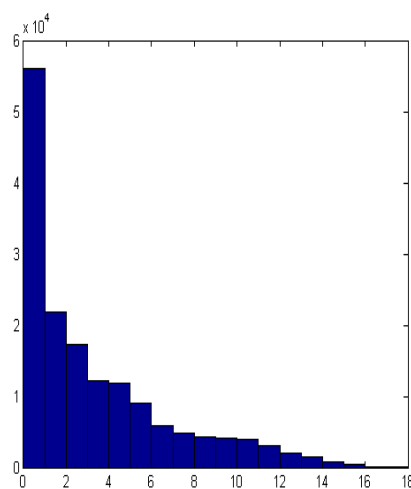


Σχήμα 6.173. Αληθής χάρτης παράλλαξης και χάρτης με βάση το κριτήριο AD (δεξιά).



Σχήμα 6.174. Διαφορές από τη σύγκριση του αληθούς χάρτη με εκείνον από το κριτήριο AD.

Ακόμα, στο Σχ. 6.175 φαίνεται το ιστόγραμμα των διαφορών παράλλαξης που προκύπτει από σύγκριση του αληθούς χάρτη παράλλαξης με τον υπολογισμένο χάρτη.



Σχήμα 6.175. Ιστόγραμμα από σύγκριση του αληθούς χάρτη με εκείνον από το κριτήριο AD.

Τέλος, ο Πίνακα 6.53 δείχνει τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών (μέσος όρος, τυπική απόκλιση και ποσοστό διαφορών παράλλαξης Δd στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$).

Πίνακας 6.53. Διαφορές των υπολογισμένων παραλλάξεων από τις αληθείς (μ : μέσος όρος σ : τυπική απόκλιση, $\pi[-1, 1]$: % διαφορών στο διάστημα $-1 \leq \Delta d \leq 1$)		
AD		
μ	σ	$\pi[-1, 1]$
3.80	3.57	35.37

Όπως έχει αναφερθεί και για τα προηγούμενα ζεύγη εικόνων, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από εφαρμογή του κριτηρίου αυτού είναι φυσικά πολύ υποδεέστερα εκείνων από τις άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούν παράθυρα. Επιπλέον, είναι εμφανές από το χάρτη παράλλαξης του Σχ. 6.173 ότι όντως πρόκειται για εικόνα παράλλαξης με πολύ έντονο θόρυβο.

6.4 Τέταρτο ζεύγος εικόνων

Αυτό όπως και τα επόμενα μοντέλα προέρχεται από την πυραμίδα ζεύγους πραγματικών εικόνων ("*Herz_Jesu-K7*") από δεδομένα ελέγχου τα οποία διαθέτει το Πολυτεχνείο της Λωζάννης EPFL (Strecha et al., 2008). Το παρόν μοντέλο (Σχ. 6.174) αντιστοιχεί στο 4^ο επίπεδο της πυραμίδας. Πρόκειται για εικόνες διαστάσεων 437×278 με τιμή ψηφιακής παράλλαξης από -3 έως 20 pixels. Η αρνητική τιμή της ψηφιακής παράλλαξης οφείλεται στο γεγονός ότι η ψηφιακή παράλλαξη γενικά δεν συμπίπτει με την πραγματική παράλλαξη (η οποία είναι πάντοτε θετική) για λόγους που έχουν εκτεθεί στην ενότητα 2.2, δηλαδή επειδή οι θέσεις των πρωτευόντων σημείων δεν ταυτίζονται (ενώ, επιπλέον, μια εικόνα έχει κοπεί και στο αριστερό άκρο της).



Σχήμα 6.174. Τέταρτο στερεοζεύγος εικόνων ("*Herz_Jesu-K7*").

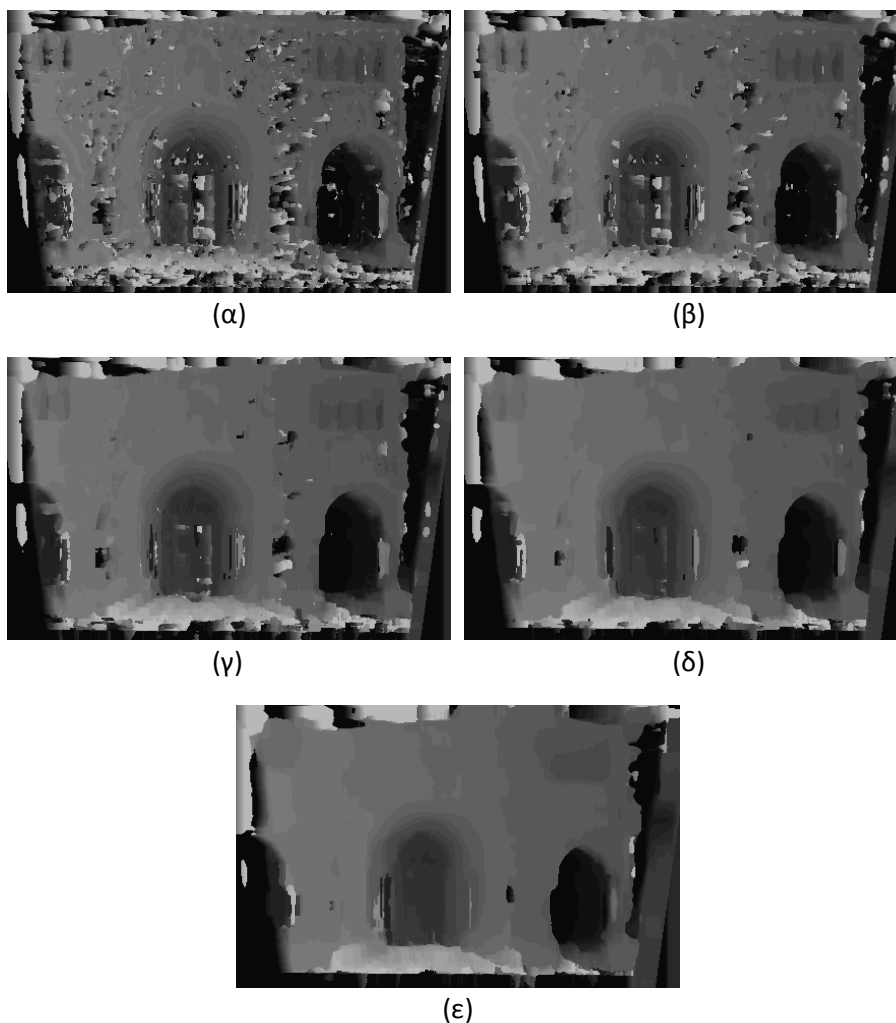
Για αυτό το ζεύγος εικόνων δεν διατίθεται αληθής χάρτης ψηφιακών παραλλάξεων, συνεπώς η εφαρμογή των μέτρων συνταύτισης δεν ήταν δυνατόν να αξιολογηθεί με τα ίδια στατιστικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στα τρία προηγούμενα στερεοζεύγη. Η σύγκριση της 3D ανακατασκευής με το διαθέσιμο 3D μοντέλο (από σαρωτή laser) προϋπέθετε την έμμεση σύγκριση σημειοσυνόλων διαφορετικής πυκνότητας

και προσανατολισμού, το οποίο εδώ δεν έγινε (όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.6). Η αξιολόγηση στην προκειμένη περίπτωση ήταν, έτσι, κυρίως ποιοτική.

6.4.1 Συνταύτιση με τις μεθόδους SAD, SSD και SAD colour

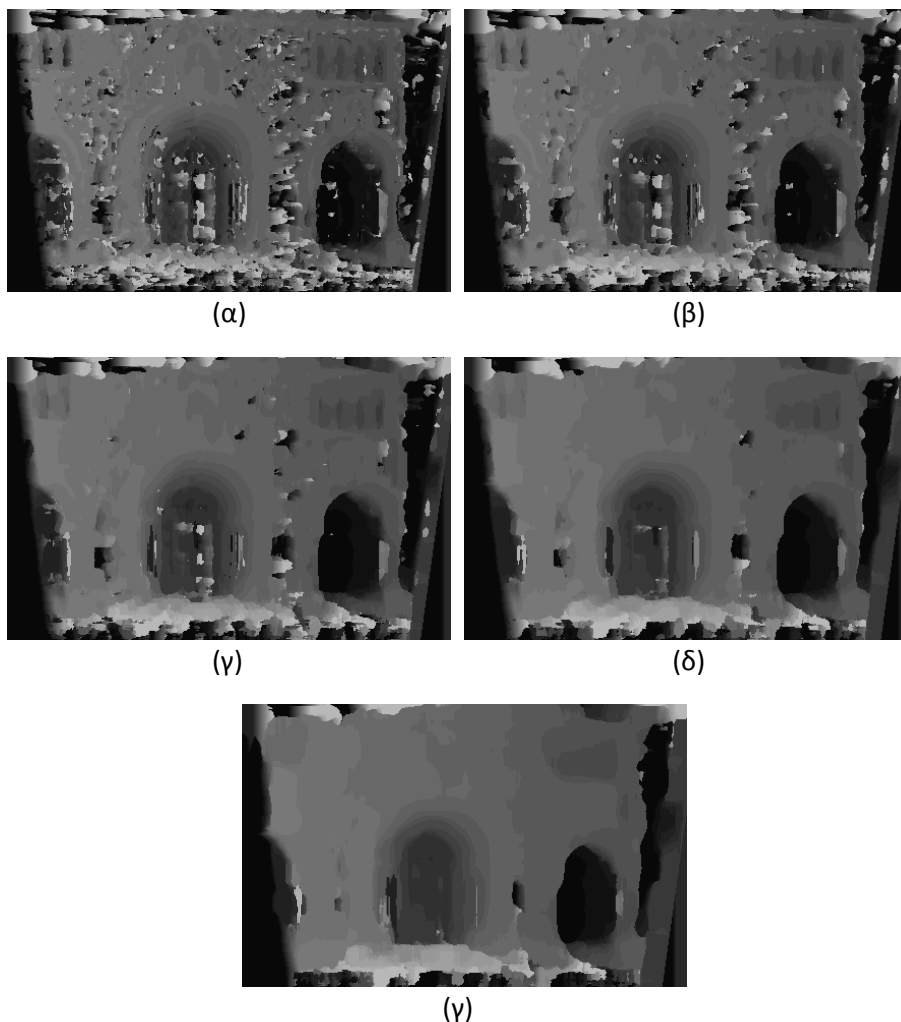
Το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών και του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών χρησιμοποιήθηκαν για παράθυρα 5×5 , 7×7 , 11×11 , 15×15 , 21×21 . Κατά την εφαρμογή του κριτηρίου SAD και στα τρία χρωματικά επίπεδα της εικόνας χρησιμοποιήθηκαν παράθυρα 7×7 και 15×15 .

Στο Σχ. 6.175 παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προκύπτουν από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών (SSD) για όλα τα παράθυρα που χρησιμοποιήθηκαν.

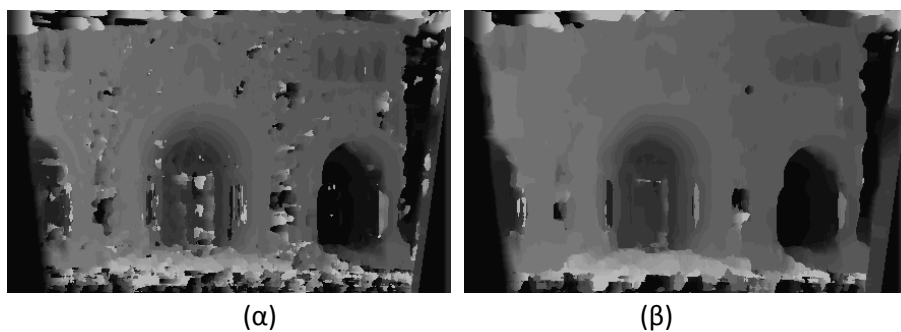


Σχήμα 6.175. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών (SSD) για διαφορετικά παράθυρα: (α) παράθυρο 5×5 , (β) παράθυρο 7×7 , (γ) παράθυρο 11×11 , (δ) παράθυρο 15×15 , (ε) παράθυρο 21×21 .

Αντίστοιχα, στο Σχ. 6.176 παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προκύπτουν από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD). Τέλος, στο Σχ. 6.177 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με το κριτήριο SAD και στα τρία χρωματικά επίπεδα της εικόνας για παράθυρα 7×7 και 15×15.



Σχήμα 6.176. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για διαφορετικά παράθυρα: (α) παράθυρο 5×5, (β) παράθυρο 7×7, (γ) παράθυρο 11×11, (δ) παράθυρο 15×15, (ε) παράθυρο 21×21.

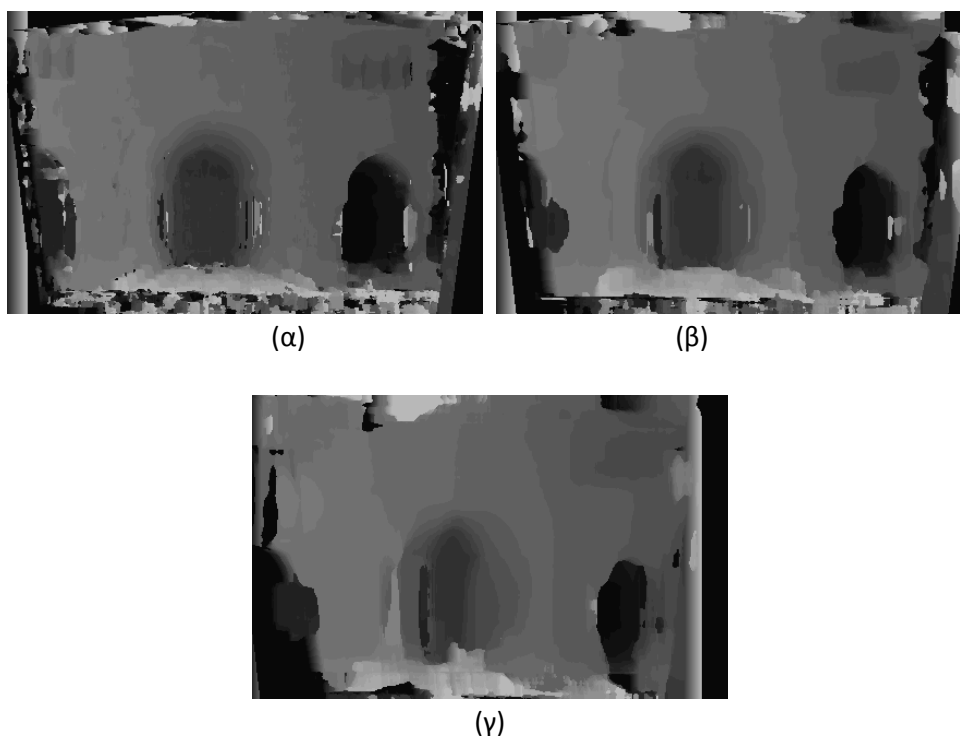


Σχήμα 6.177. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) και στα τρία χρωματικά κανάλια με χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) παράθυρο 7×7, (β) παράθυρο 15×15.

Η οπτική παρατήρηση των εικόνων που προήλθαν από την εφαρμογή των κριτηρίων SAD και SSD οδηγεί στο συμπέρασμα πως, και σε αυτή την περίπτωση, δεν εμφανίζονται αισθητές διαφορές. Η επίδραση της διάστασης του παραθύρου είναι βέβαια προφανής, καθώς τα μικρότερα παράθυρα παρουσιάζουν μεν σημαντικό θόρυβο αλλά και προσεγγίζουν καλύτερα τις λεπτομέρειες (πχ. στο πάνω αριστερό και δεξιό άκρο). Τα μεγάλα παράθυρα, αντιθέτως, εξομαλύνουν υπερβολικά τους χάρτες παράλλαξης. Η συμμετοχή, τέλος, των τριών χρωματικών επιπέδων κατά την εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών φαίνεται να οδηγεί σε κάποια μικρή βελτίωση (εξομάλυνση) των αποτελεσμάτων και για τα δύο παράθυρα που χρησιμοποιήθηκαν.

6.4.2 Συνταύτιση με τον συντελεστή συσχέτισης

Κατά την εφαρμογή του συντελεστή συσχέτισης χρησιμοποιήθηκαν παράθυρα 5×5 , 11×11 , 21×21 , καθώς επίσης και ορθογώνιο παράθυρο 5×11 (Σχ. 6.178).



Σχήμα 6.178. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης με τη χρήση διαφορετικών παραθύρων: (α) παράθυρο 5×5 , (β) παράθυρο 11×11 , (γ) παράθυρο 21×21 .

Από την οπτική παρατήρηση των χαρτών παράλλαξης φαίνεται ότι η αύξηση του μεγέθους του παραθύρου αναφοράς επιφέρει ένα “θόλωμα” των ορίων των αντικειμένων, ενώ παράλληλα προκαλεί και κάποια παραμόρφωση (πχ. στην περιοχή των δύο εισόδων για παράθυρο 21×21) σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τα

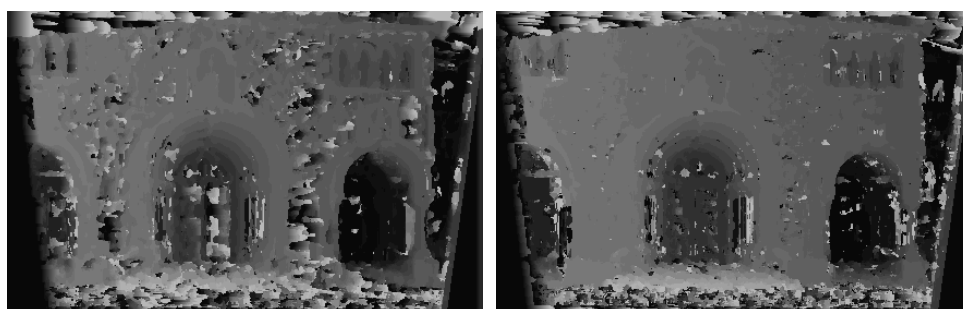
κριτήρια SSD και SAD (βλ. Σχ. 6.175 και 6.176). Αντιθέτως, η εικόνα παραλλάξεων που προέκυψε εδώ για μέγεθος παραθύρου 5×5 υπερτερεί αισθητά έναντι των αποτελεσμάτων από τις άλλες δύο μεθόδους, οι οποίες οδήγησαν στην παρουσία έντονου θορύβου.

6.4.3 Συνταύτιση εικόνων κλίσης (gradient)

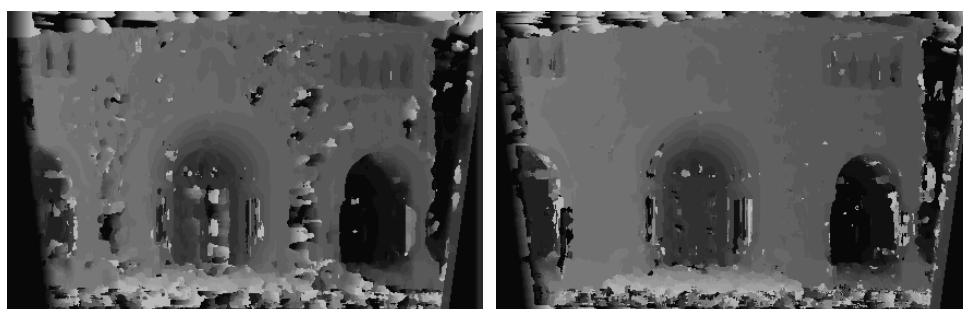
Οι εικόνες κλίσεων του στερεοζεύγους που προέκυψαν από εφαρμογή του φίλτρου κλίσης κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζονται στο Σχ. 6.179, ενώ στο Σχ. 6.180 εμφανίζονται οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από τη διαδικασία της συνταύτισης στις εικόνες κλίσης με το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα 5×5, 7×7, 11×11, 15×15 και 21×21.



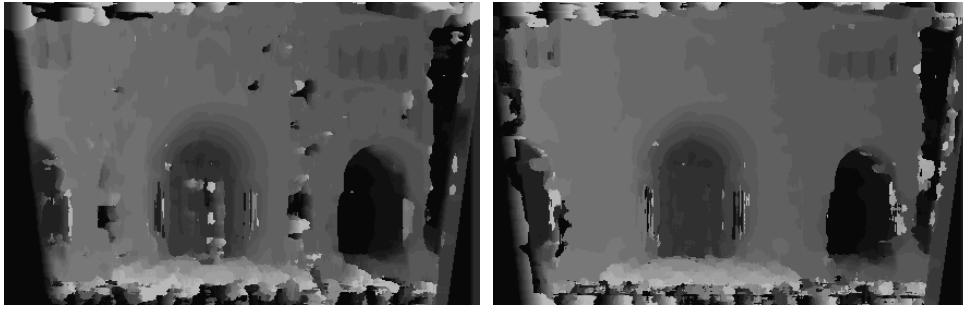
Σχήμα 6.179. Εικόνες κλίσεων του στερεοζεύγους.



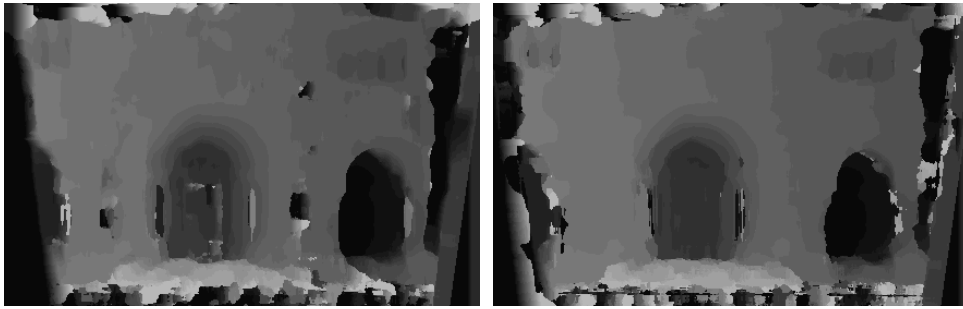
(α)



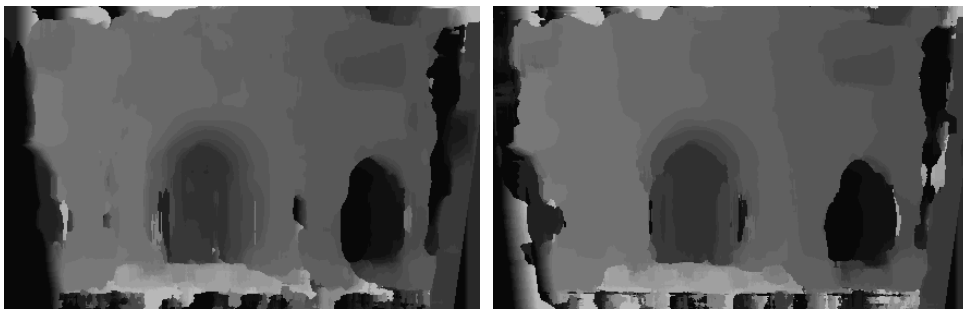
(β)



(γ)



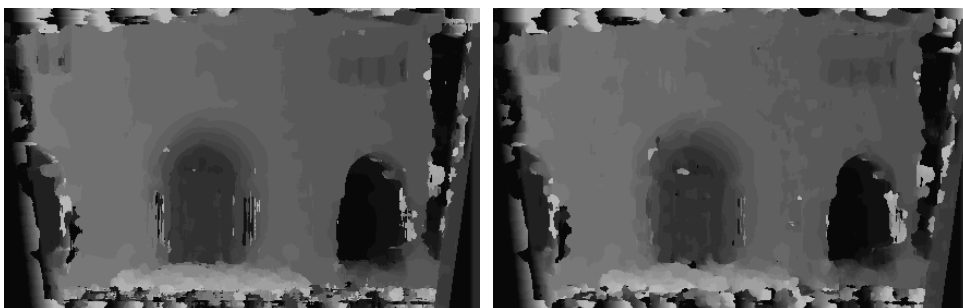
(δ)



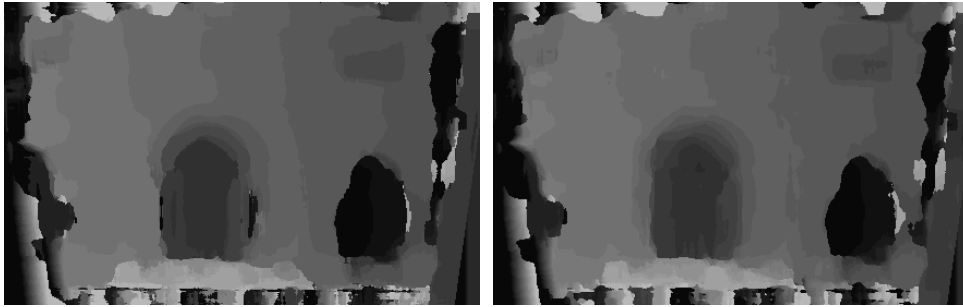
(ε)

Σχήμα 6.180. Χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου SAD στις αρχικές εικόνες (αριστερά) και σε εικόνες κλίσης (δεξιά): (α) παράθυρο 5×5, (β) παράθυρο 7×7, (γ) παράθυρο 11×11, (δ) παράθυρο 15×15, (ε) παράθυρο 21×21.

Η σύγκριση των χαρτών παράλλαξης του Σχ. 6.180 δείχνει ότι οι χάρτες από εφαρμογή του κριτηρίου SAD σε εικόνες κλίσεων έχουν βελτίωση, συγκριτικά με εκείνους από την εφαρμογή του στις αρχικές εικόνες, όσον αφορά τον θόρυβο (ιδίως στα μικρά παράθυρα). Εφαρμόστηκε και εδώ στις εικόνες κλίσεων φίλτρο Gauss για παράθυρα αναφοράς 11x11 και 21x21, με συνέπεια την μείωση του θορύβου (Σχ. 6.181).



(α)

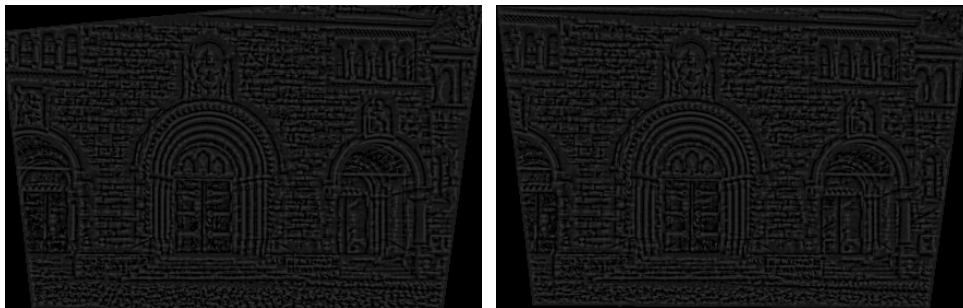


(β)

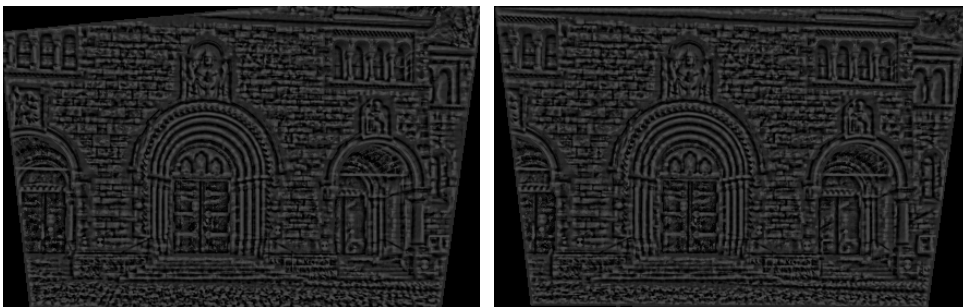
Σχήμα 6.181. Χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) σε εικόνες κλίσης (αριστερά) και σε εικόνες κλίσης μετά από την εφαρμογή φίλτρου Gauss (δεξιά), για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 21×21 .

6.4.4 Συνταύτιση εικόνων μετά από μετασχηματισμό rank

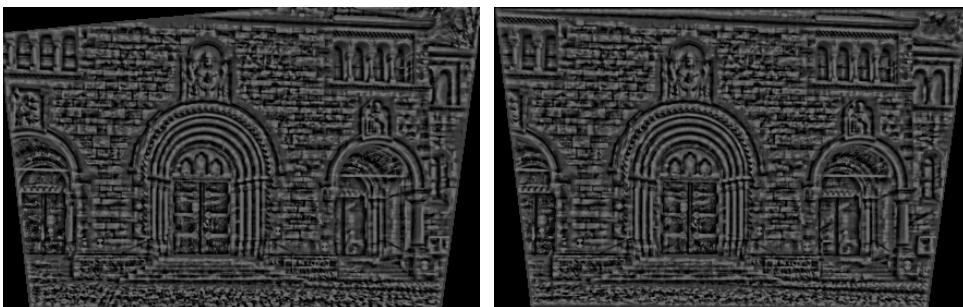
Ο μετασχηματισμός χρησιμοποιήθηκε στις αρχικές εικόνες για παράθυρα 7×7 , 9×9 , 11×11 και 15×15 (Σχ. 6.182). Χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για μέγεθος παραθύρων 7×7 και 15×15 (Σχ. 6.183).



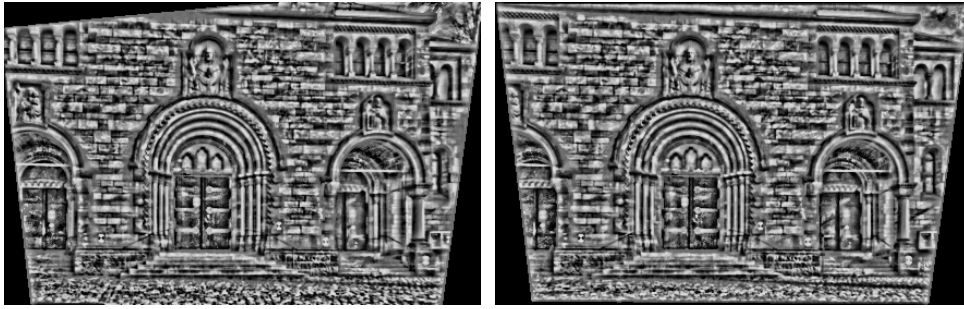
(α)



(β)

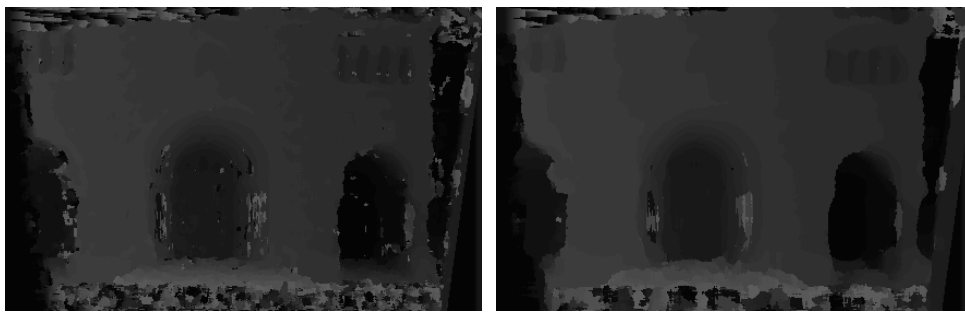


(γ)

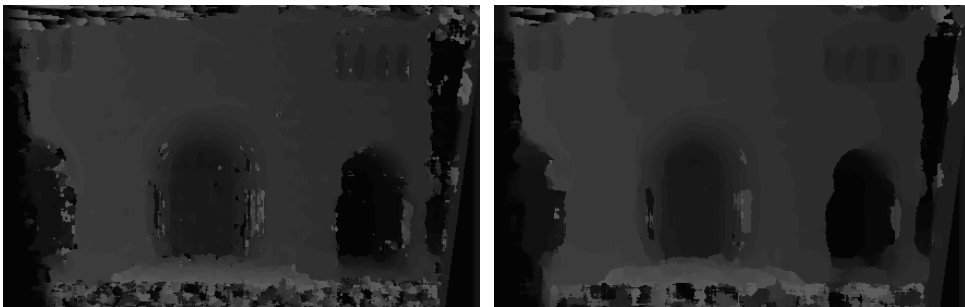


(δ)

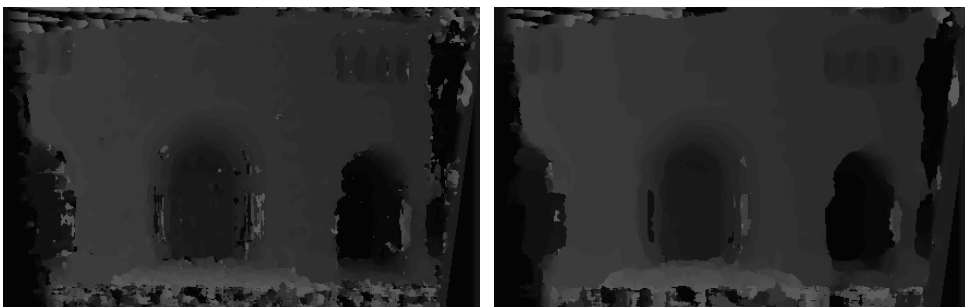
Σχήμα 6.182. Στερεοζεύγη εικόνων που προκύπτουν από το μετασχηματισμό rank για μέγεθος παραθύρου: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 .



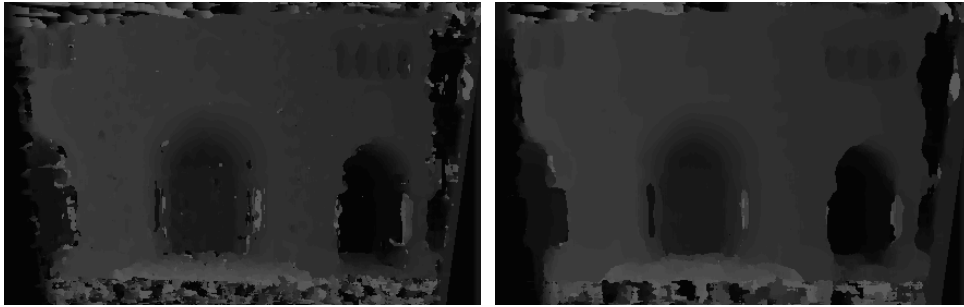
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 6.183. Χάρτες ψηφιακής παράλλαξης από τη διαδικασία συνταύτισης με βάση το κριτήριο SAD για παράθυρα 7×7 (αριστερά) και 15×15 (δεξιά) σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank με παράθυρα: (α) 7×7, (β) 9×9, (γ) 11×11 και (δ) 15×15.

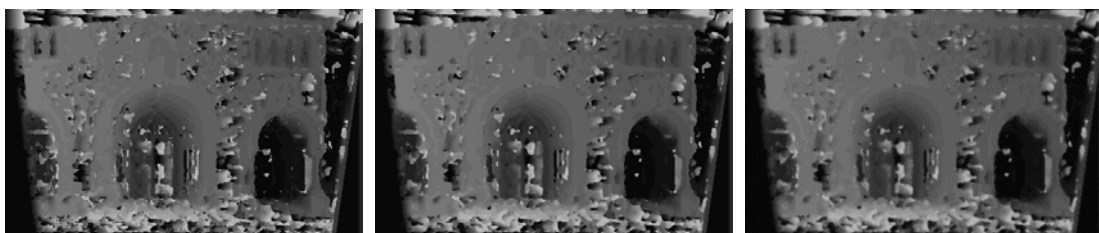
Από την εξέταση των χαρτών αυτών και την σύγκρισή τους με εκείνους από συνταύτιση στις αρχικές εικόνες προκύπτει, κατ' αρχάς, ότι η συνταύτιση σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την απεικόνιση λεπτομερειών όσο και τον θόρυβο. Ταυτόχρονα, η χρήση μικρότερων παραθύρων συνταύτισης (αριστερά) δημιουργεί εικόνες με αυξημένο θόρυβο, ενώ τα μεγαλύτερα παράθυρα μετασχηματισμού rank (κάτω) φαίνεται να οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα.

6.4.5 Εξομάλυνση των αποτελεσμάτων της συνταύτισης

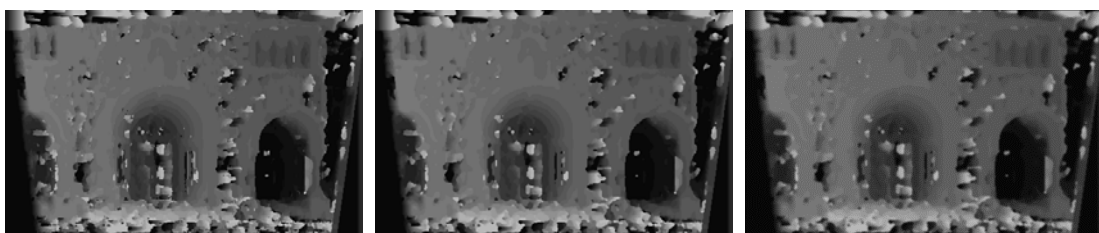
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης στα προϊόντα της συνταύτισης (όπως στις ενότητες 6.1.5, 6.2.5, 6.3.5).

6.4.5.1 Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από την μέθοδο συνταύτισης SAD

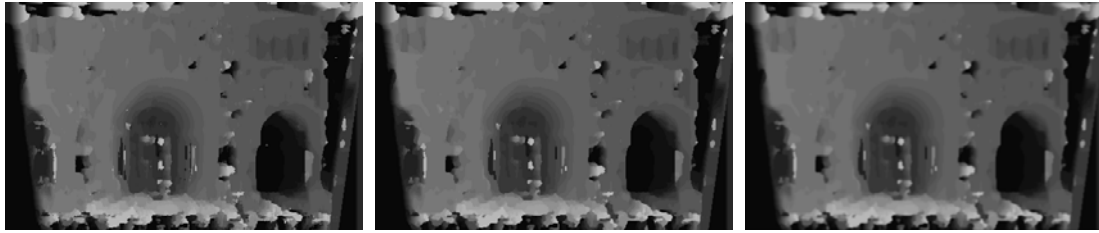
Στους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν με βάση το κριτήριο των απόλυτων διαφορών εφαρμόστηκε φίλτρο μεσαίας τιμής 3×3 και στη συνέχεια φίλτρο μέσου όρου 3×3. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 6.184.



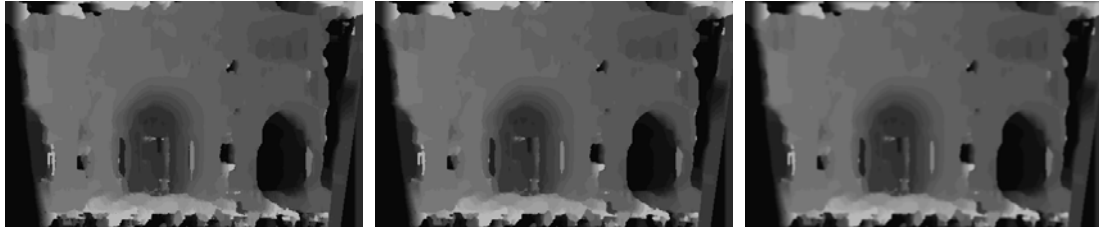
(α)



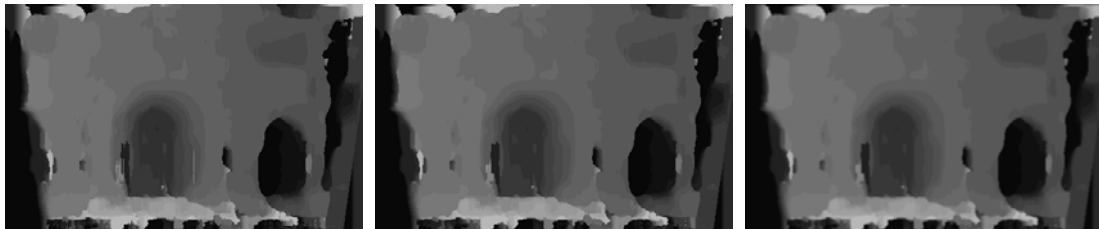
(β)



(γ)



(δ)



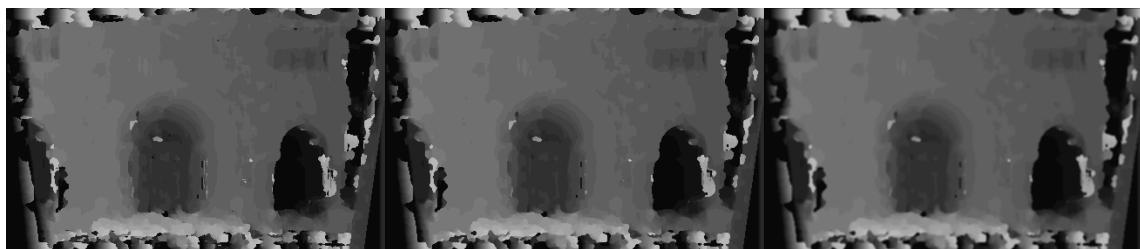
(ε)

Σχήμα 6.185. Χάρτες παράλλαξης από την εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών (SAD) και εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής (μέσον) και φίλτρου μέσου όρου (δεξιά) για παράθυρα: (α) 5×5, (β) 7×7, (γ) 11×11, (δ) 15×15, (ε) 21×21.

Στους χάρτες του Σχ. 6.185 παρατηρείται μια μικρή (τοπική) βελτίωση των εικόνων με την εφαρμογή του φίλτρου μεσαίας τιμής. Η εφαρμογή του φίλτρου μέσου όρου δεν φαίνεται να επιφέρει βελτιώσεις στις εικόνες, ενώ αμβλύνει κάπως τις ακμές.

6.2.5.2 Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες κλίσης

Όσον αφορά το αποτέλεσμα συνταύτισης σε εικόνες κλίσης, οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν μετά από εφαρμογή φίλτρου Gauss (ενότητα 6.4.3) υπέστησαν επεξεργασία διαδοχικά με φίλτρο μεσαίας τιμής και φίλτρο μέσου όρου (Σχ. 6.186).



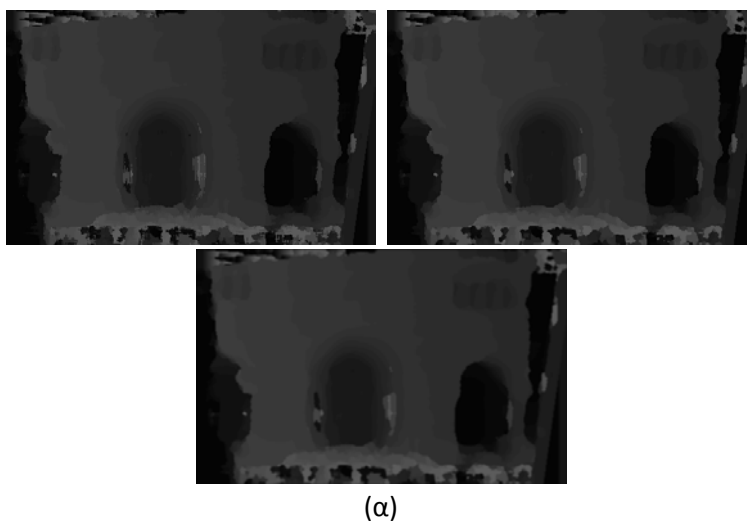


Σχήμα 6.186. Χάρτες παράλλαξης βάσει του κριτηρίου SAD για παράθυρα 11×11 (πάνω) και 21×21 (κάτω) σε εικόνες κλίσης μετά από φιλτράρισμα Gauss (αριστερά) και εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής (μέσον) και μέσου όρου (δεξιά) στους χάρτες παράλλαξης.

Φαίνεται, όπως και στις εικόνες του Σχ. 6.185, μικρή τοπική βελτίωση των εικόνων παράλλαξης με την εφαρμογή του φίλτρου μεσαίας τιμής. Το φίλτρο μέσου όρου κυρίως αμβλύνει τις τιμές, πράγμα που επιφέρει κάποιο “θόλωμα” των εικόνων.

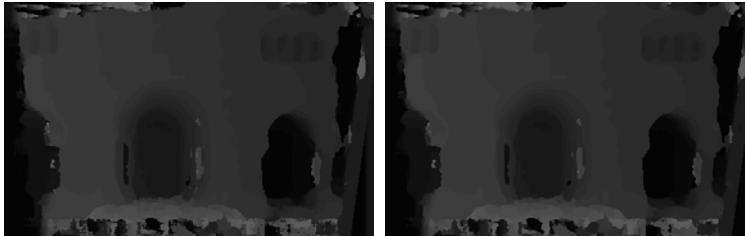
6.4.5.3 Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες rank

Στους χάρτες παράλλαξης βάσει του κριτηρίου SAD, για παράθυρο 15×15 , από εικόνες στις οποίες είχε προηγουμένως εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός κατάταξης rank (με παράθυρο: 7×7 , 9×9 , 11×11 , 15×15) εφαρμόστηκε φίλτρο μεσαίας τιμής 3×3 και κατόπιν, στις νέες εικόνες παράλλαξης, εφαρμόστηκε φίλτρο μέσου όρου 3×3 . Οι εικόνες παράλλαξης που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία είναι στο Σχ. 6.187.





(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 6.187 Χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου SAD (παράθυρο 15×15) σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό rank για παράθυρα: (α) 7×7, (β) 9×9, (γ) 11×11, (δ) 15×15, και εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής (μέσον) και μέσου όρου (δεξιά).

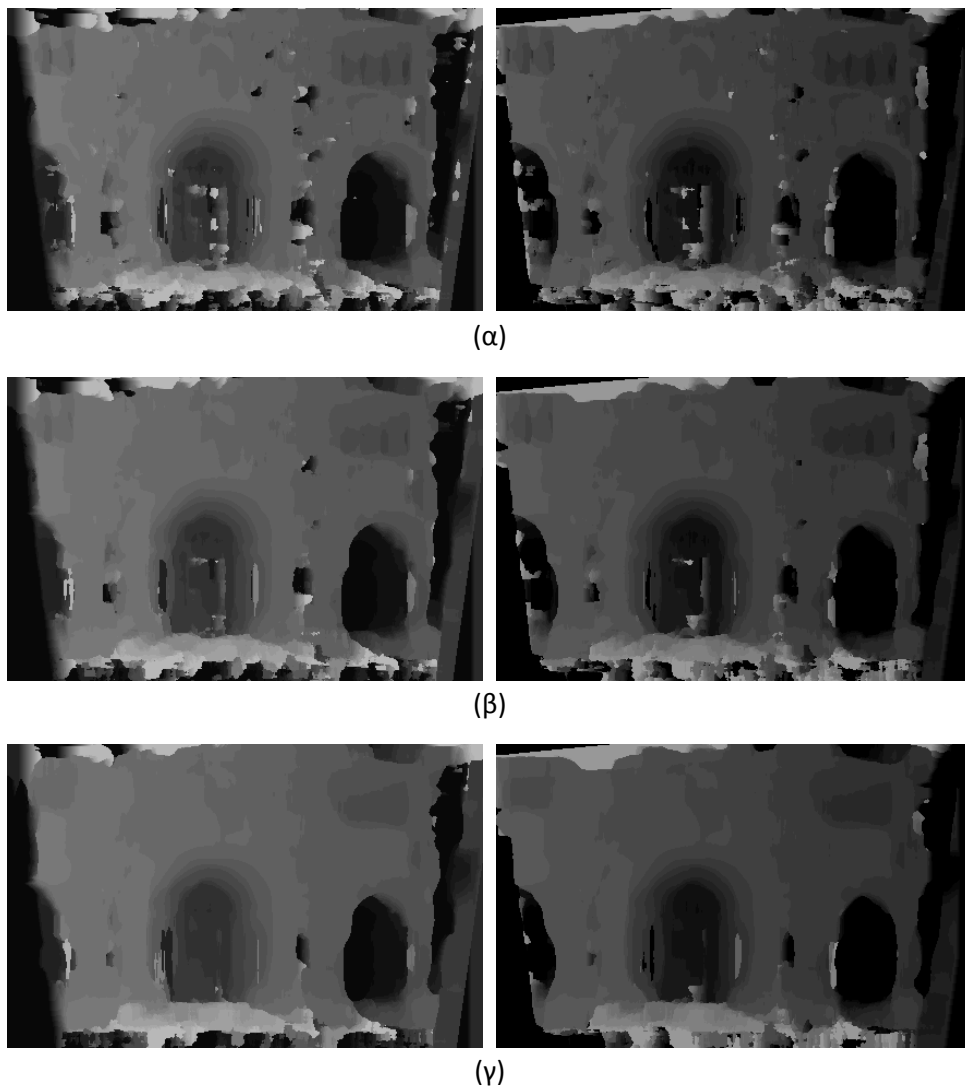
Η οπτική παρατήρηση των χαρτών παράλλαξης του Σχ. 6.187 οδηγεί στην εκτίμηση ότι τα φίλτρα μεσαίας τιμής και μέσου όρου δεν βελτιώνουν αισθητά τις εικόνες.

6.4.6 Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας

Ακόμα, έγινε και εδώ έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας για κάθε ένα από τα κριτήρια συνταύτισης που χρησιμοποιήθηκαν.

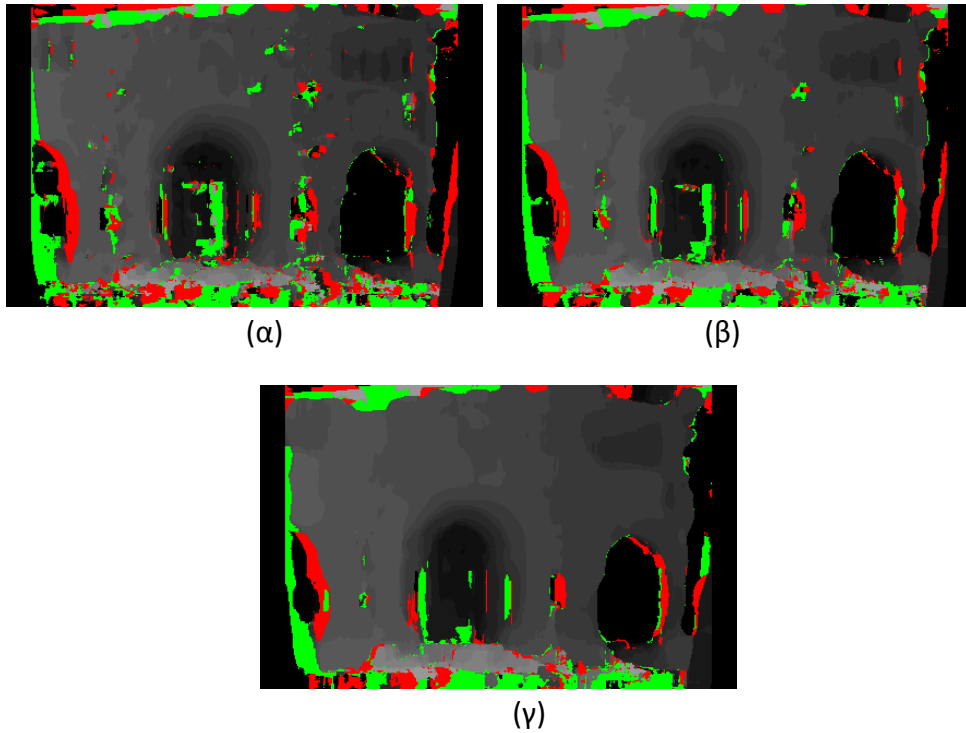
6.4.6.1 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD

Για το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας έγινε για διάσταση παραθύρων 11×11 , 15×15 , 21×21 . Οι χάρτες παράλλαξης για κάθε εικόνα του στερεοζεύγους παρουσιάζονται στο Σχ. 6.188.



Σχήμα 6.188. Χάρτες παράλλαξης της αριστερής (αριστερά) και της δεξιάς εικόνας (δεξιά) που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 15×15 και (γ) 21×21 .

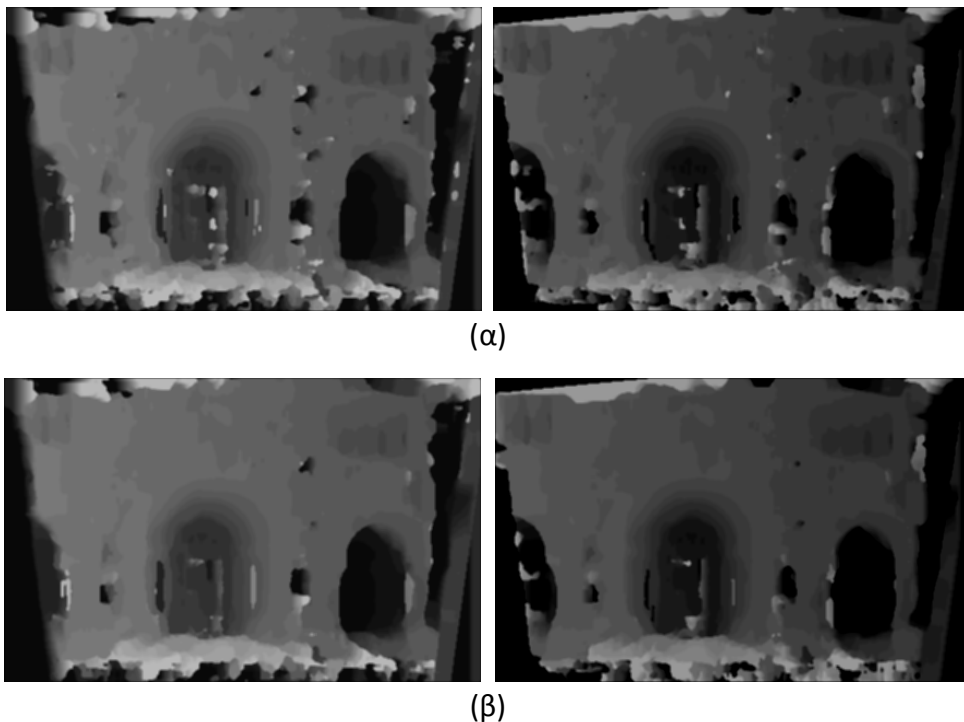
Από τον έλεγχο συμβατότητας που πραγματοποιήθηκε για τιμή κατωφλίου 1 pixel προέκυψε ότι για μέγεθος παραθύρου συνταύτισης 11×11 το ποσοστό των έγκυρων pixel είναι 83.6%, για μέγεθος 15×15 το ποσοστό είναι 86.1%, ενώ για το παράθυρο 21×21 το ποσοστό των έγκυρων pixel είναι 88.1%. Το Σχ. 6.189 εμφανίζει τους χάρτες παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προήλθαν από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης, όπου διακρίνονται όσα σημεία απορρίφθηκαν κατά τον έλεγχο.

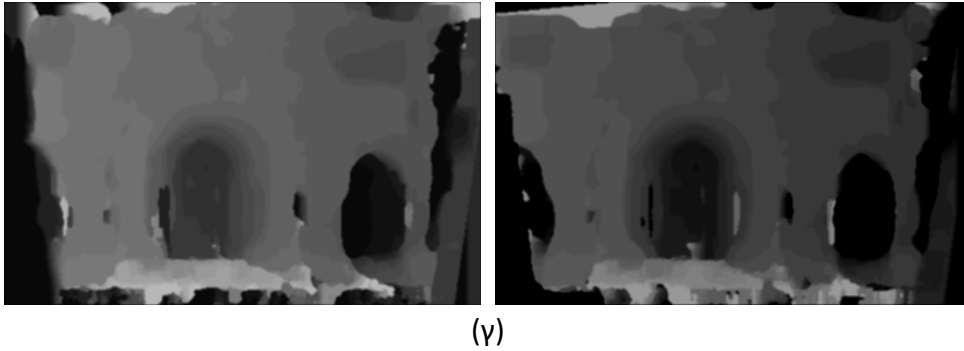


Σχήμα 6.189. Χάρτες παράλληλης με τα σημεία που αποκλείστηκαν κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 15×15 και (γ) 21×21 .

6.4.7.2 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD και εξομάλυνση

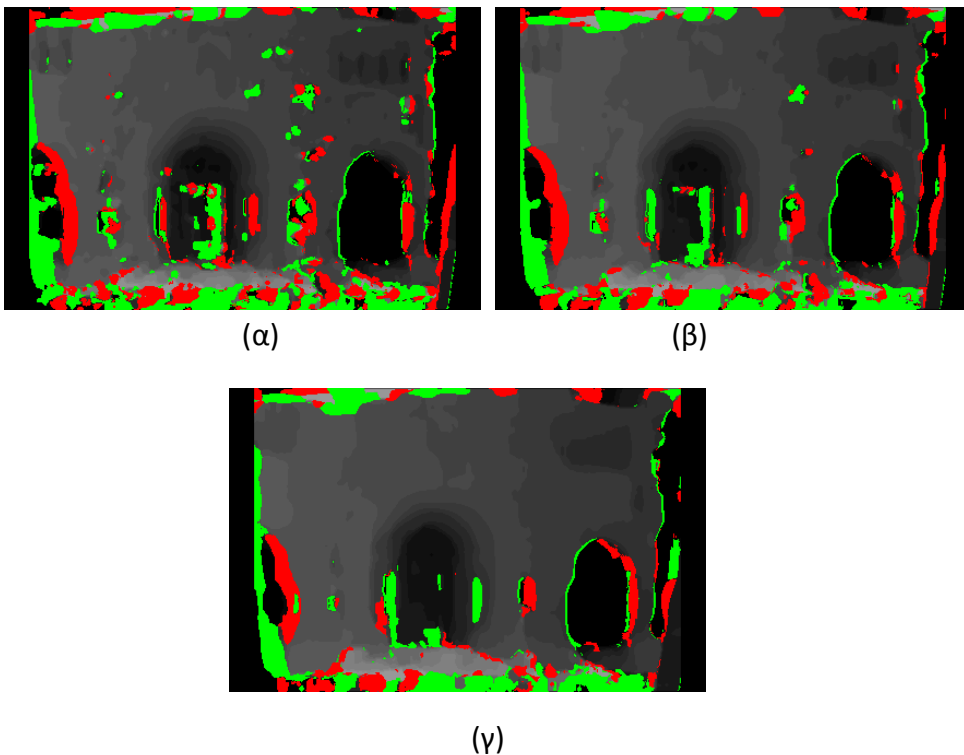
Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας έγινε και για τους φιλτραρισμένους χάρτες παράλληλης που προέκυψαν με βάση το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών. Οι χάρτες παράλληλης για κάθε εικόνα του στερεοζεύγους μετά από εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου παρουσιάζονται στο Σχ. 6.190).





Σχήμα 6.190. Φιλτραρισμένοι χάρτες παράλλαξης της αριστερής και της δεξιάς εικόνας που προέκυψαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.

Από τον έλεγχο συμβατότητας που έγινε για τιμή κατωφλίου 1 ρixel προέκυψε ότι για μέγεθος παραθύρου 11×11 το ποσοστό των έγκυρων ρixel είναι 79.6%, για μέγεθος 15×15 το ποσοστό είναι 82.6%, για δε παράθυρο 21×21 το ποσοστό των έγκυρων ρixel είναι 85.2%. Οι χάρτες παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προήλθαν από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών φαίνονται στο Σχ. 6.191.



Σχήμα 6.191. Χάρτες παράλλαξης που εμφανίζουν τα σημεία που αποκλείστηκαν κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.

Παρατηρείται ότι τα ποσοστά των ίδιων παραλλάξεων που υπολογίστηκαν για την μία και την άλλη εικόνα είναι μεγαλύτερα όταν πρόκειται για την συνταύτιση των αρχικών εικόνων από εκείνα που προκύπτουν μετά από εξομάλυνση. Εάν θεωρηθεί

ότι μεγάλο ποσοστό σημείων που περνούν τον αμφίδρομο έλεγχο σημαίνει κατ' αρχήν και ορθότερα αποτελέσματα, θα μπορούσε να πει κανείς ότι η εξομάλυνση (και ιδίως το φίλτρο μέσου όρου) μειώνουν κάπως τον αριθμό των ορθών παραλλάξεων. Ακόμα, σημειώνεται πως μεγαλύτερα ποσοστά ίδιων παραλλάξεων δεξιά-αριστερά δίνουν τα μεγαλύτερα παράθυρα συνταύτισης.

6.5 Πέμπτο ζεύγος εικόνων

Επειδή οι εικόνες του προηγούμενου ζεύγους είχαν πολύ μικρή ανάλυση και το αντικείμενο έχει πολλές λεπτομέρειες με έντονες διακυμάνσεις στην υφή, χρησιμοποιήθηκε και ζεύγος εικόνων διπλάσιας ανάλυσης (το οποίο βέβαια σημαίνει και μεγαλύτερο υπολογιστικό φόρτο). Πρόκειται, λοιπόν, για το 3^ο επίπεδο της πυραμίδας των εικόνων "Herz-Jesu-K7". Οι εικόνες έχουν διαστάσεις 873×555, με τιμή ψηφιακής παράλλαξης από -7 έως 40 ρixel (Σχ. 192). Υπενθυμίζεται πως δεν διατίθεται αληθής χάρτης παραλλάξεων, οπότε η αξιολόγηση των χαρτών παράλλαξης γίνεται με οπτική παρατήρηση.

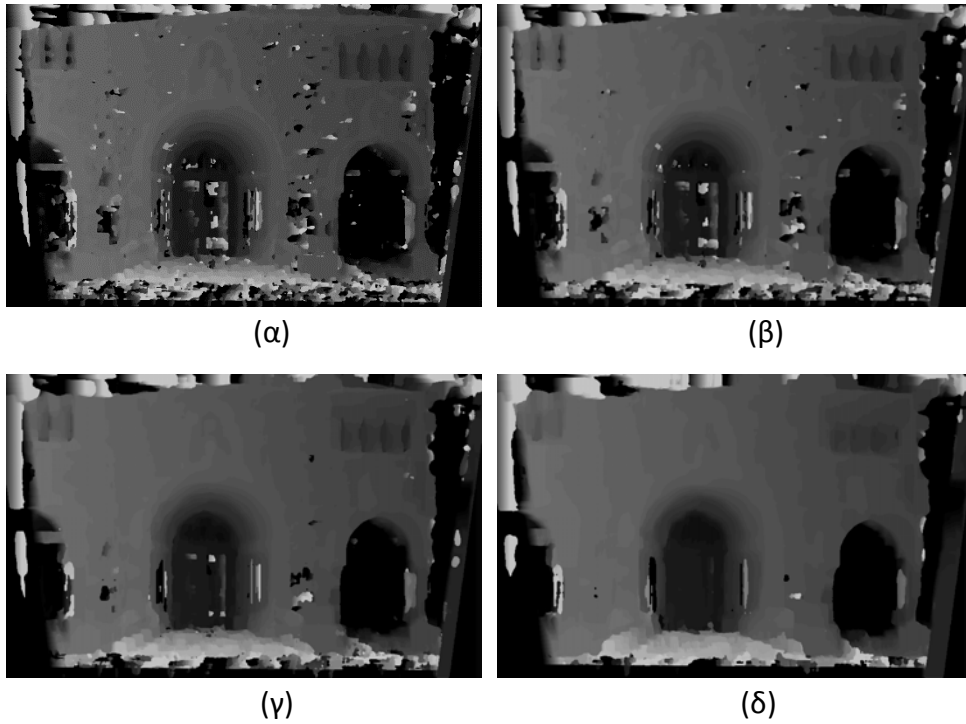


Σχήμα 6.192. Πέμπτο στερεοζεύγος εικόνων ("herjesus").

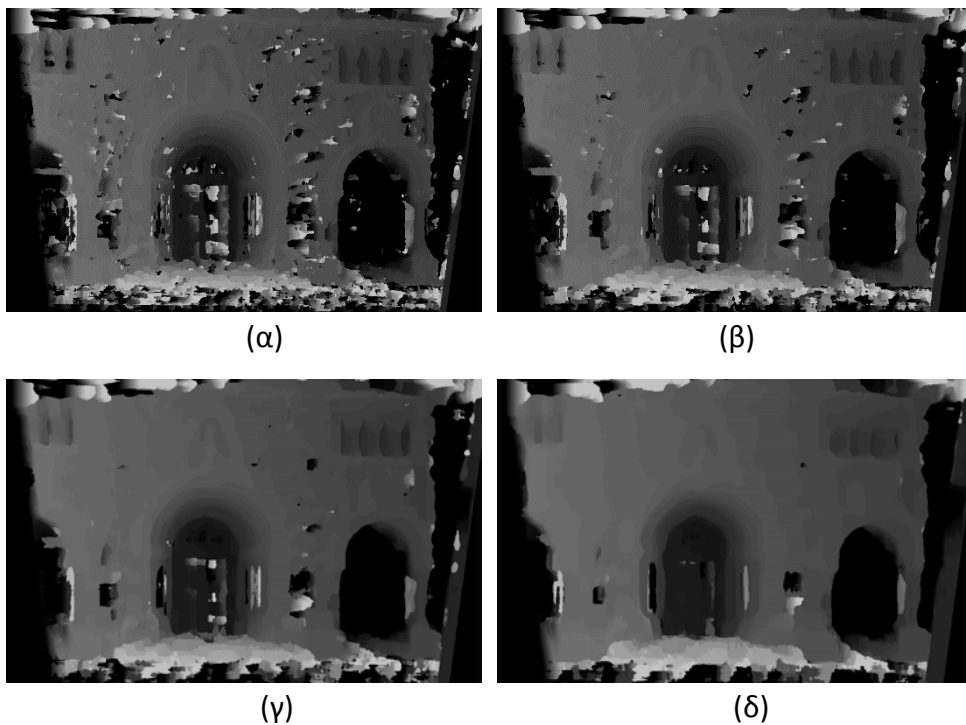
6.5.1 Συνταύτιση με τις μεθόδους SAD και SSD

Για να περιοριστεί ο υπολογιστικός φόρτος εξαιτίας του μεγέθους των εικόνων, τα κριτήρια του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών και των τετραγώνων των διαφορών εφαρμόστηκαν σε μεγαλύτερα παράθυρα αναφοράς από εκείνα που είχαν χρησιμοποιηθεί στα προηγούμενα στερεοζεύγη. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν παράθυρα 11×11, 15×15, 21×21 και 31×31.

Στο Σχ. 6.193 φαίνονται οι χάρτες παράλλαξης από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών για τα χρησιμοποιηθέντα παράθυρα, ενώ στο Σχ. 6.194 υπάρχουν οι χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών.



Σχήμα 6.193. Χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών (SSD) για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 15×15 , (γ) 21×21 , (δ) 31×31 .



Σχήμα 6.194. Χάρτες παράλλαξης από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 15×15 , (γ) 21×21 , (δ) 31×31 .

Η οπτική παρατήρηση των χαρτών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, σε αυτή την περίπτωση των εικόνων υψηλότερης ανάλυσης, το κριτήριο SSD δίνει σχετικά καλύτερα

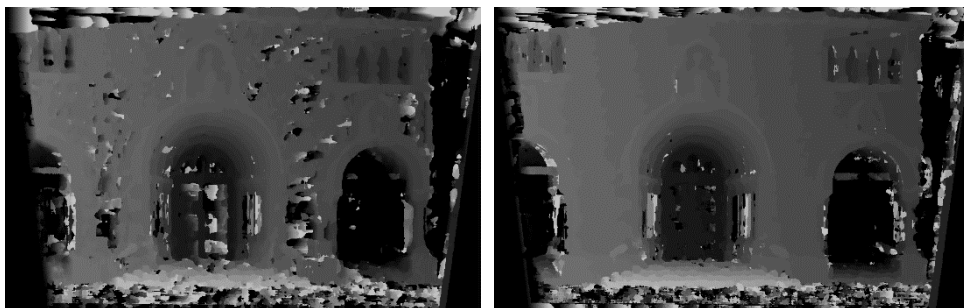
αποτελέσματα από εκείνα που προκύπτουν με την εφαρμογή του SAD. Ακόμα, η υψηλότερη ανάλυση επιτρέπει να εντοπίζονται και μικρότερες διαφορές παράλλαξης από προηγουμένως, όπως δείχνει η σύγκριση με τα Σχ. 6.175 και 6.176.

6.5.2 Συνταύτιση εικόνων κλίσης (gradient)

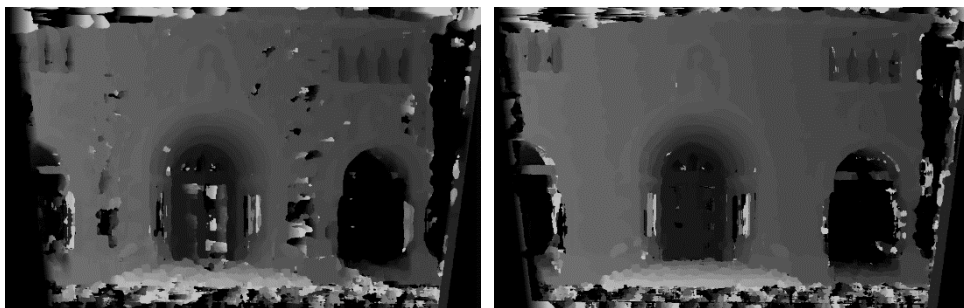
Οι εικόνες κλίσεων του ζεύγους φαίνονται στο Σχ. 6.195. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από τη συνταύτιση στις νέες αυτές εικόνες με το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) για παράθυρα 11×11 , 15×15 , 21×21 και 31×31 (Σχ. 6.196).



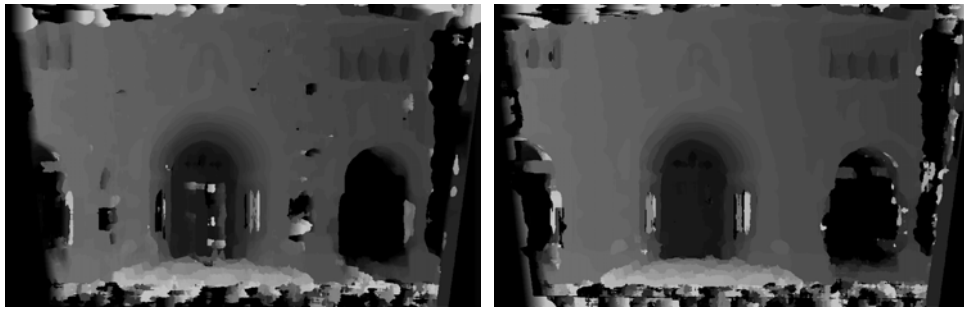
Σχήμα 6.195. Εικόνες κλίσεων του στερεοζεύγους.



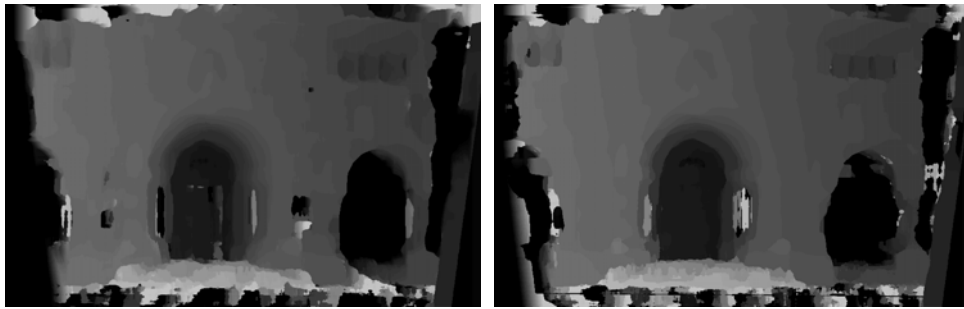
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 6.196. Χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) στις αρχικές εικόνες (αριστερά) και σε εικόνες κλίσης (δεξιά): (α) παράθυρο 11×11, (β) παράθυρο 15×15, (γ) παράθυρο 21×21, (δ) παράθυρο 31×31.

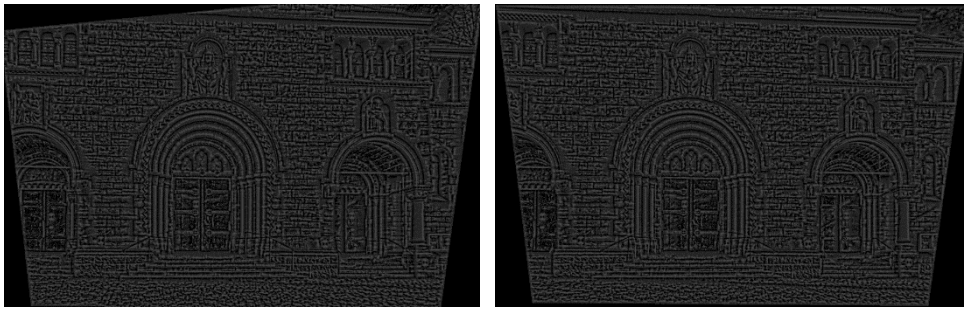
Από τη σύγκριση αυτών των χαρτών παράλλαξης συνάγεται ότι, σε αυτή την περίπτωση εικόνων υψηλότερης ανάλυσης, οι χάρτες που προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου των απόλυτων διαφορών σε εικόνες κλίσεων εμφανίζουν γενικά σημαντική βελτίωση συγκριτικά με εκείνους που προήλθαν από εφαρμογή του κριτηρίου στις αρχικές εικόνες.

6.5.3 Συνταύτιση εικόνων μετά από μετασχηματισμό rank

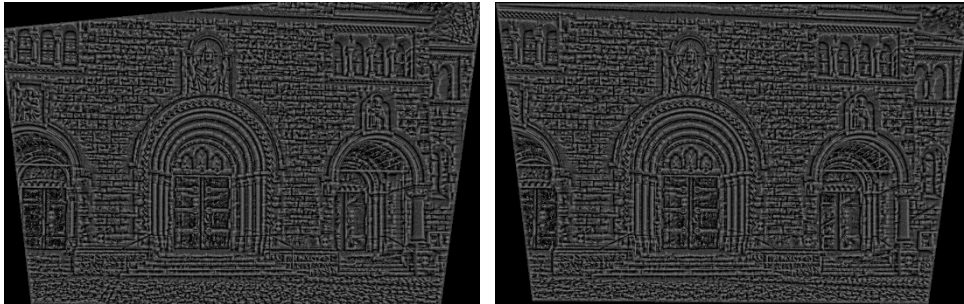
Ο μετασχηματισμός εφαρμόστηκε στις αρχικές εικόνες για μεγέθη παραθύρων 7×7, 9×9, 11×11 και 15×15 (Σχ. 6.197). Το κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της συνταύτισης είναι αυτό του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD), για μέγεθος παραθύρων συνταύτισης 15×15 (Σχ. 6.198).



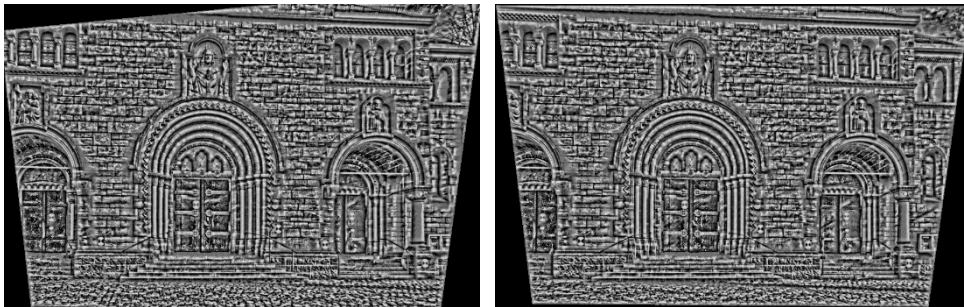
(α)



(β)

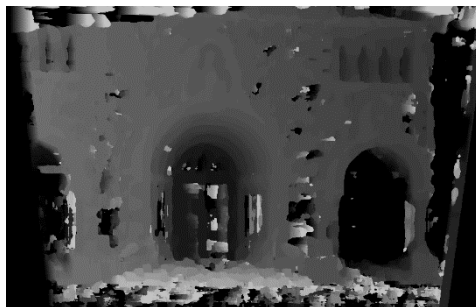


(γ)

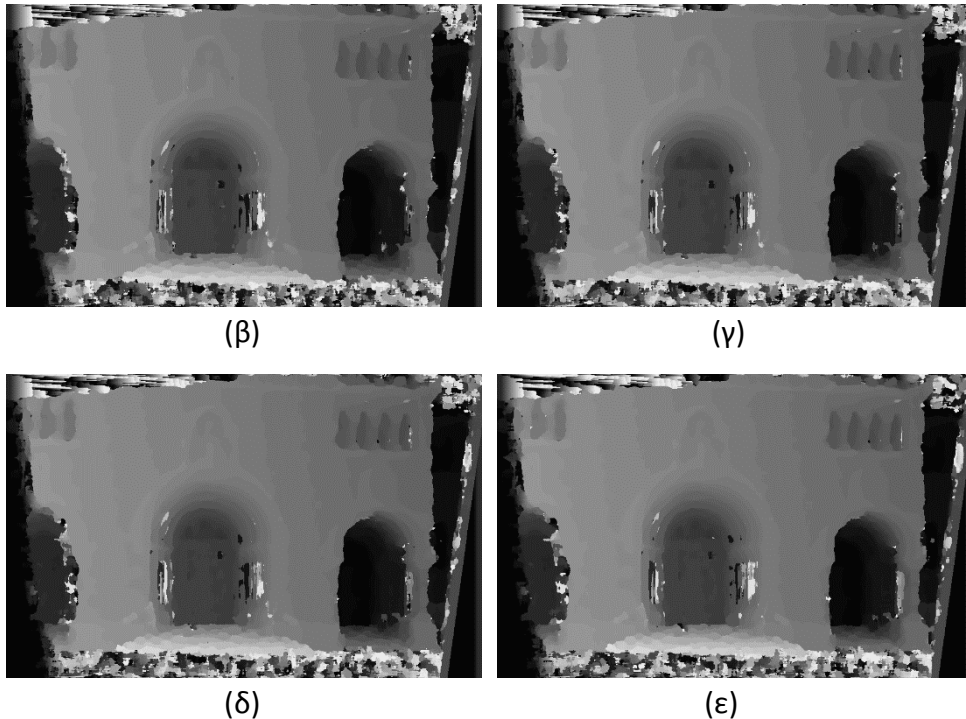


(δ)

Σχήμα 6.197. Στερεοζεύγη εικόνων που προκύπτουν από το μετασχηματισμό rank για μέγεθος παραθύρου: (α) 7×7 , (β) 9×9 , (γ) 11×11 , (δ) 15×15 .



(α)



Σχήμα 6.198. Χάρτες ψηφιακής παράλλαξης από τη διαδικασία συνταύτισης με βάση το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρο 15×15 (α) στις αρχικές εικόνες και σε εικόνες που έχουν υποστεί μετασχηματισμό *rank* με παράθυρα: (β) 7×7 , (γ) 9×9 , (δ) 11×11 και (ε) 15×15 .

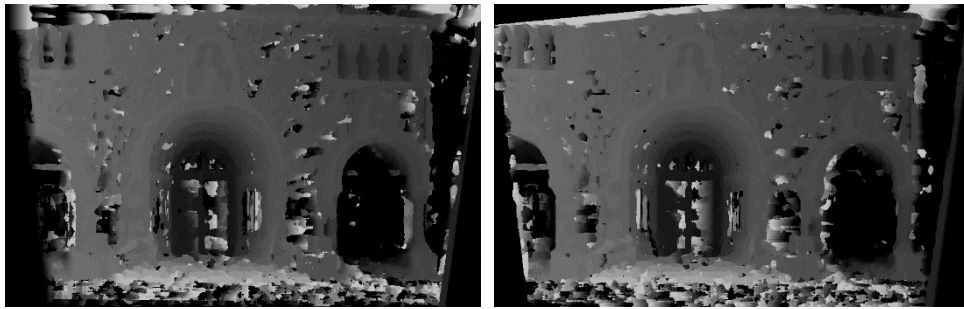
Από τη σύγκριση των παραπάνω χαρτών παράλλαξης προκύπτει πως η συνταύτιση εικόνων που έχουν υποστεί μετασχηματισμό *rank* οδηγεί σε εικόνες αισθητά βελτιωμένες, συγκριτικά τουλάχιστον με εκείνες που προκύπτουν από συνταύτιση στις αρχικές εικόνες, αλλά ίσως (ιδίως για τα κάπως μεγαλύτερα παράθυρα) και από εκείνες από συνταύτιση σε εικόνες κλίσεων.

6.5.4 Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας

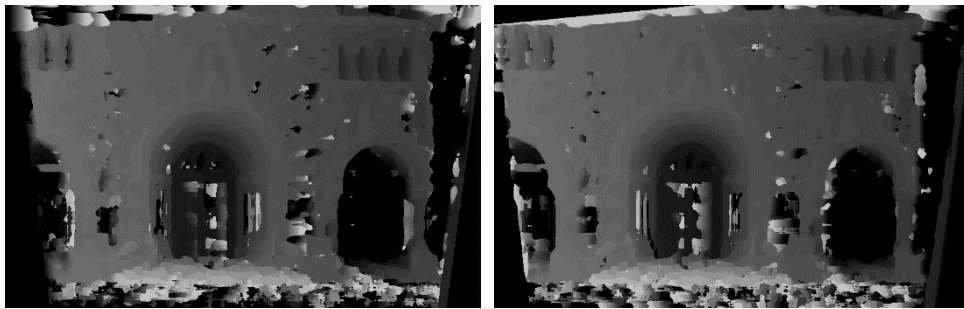
Ακόμα, έγινε έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας για το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρα 11×11 , 15×15 και 21×21 .

6.5.4.1 Έλεγχος συμβατότητας σε συνταύτιση SAD

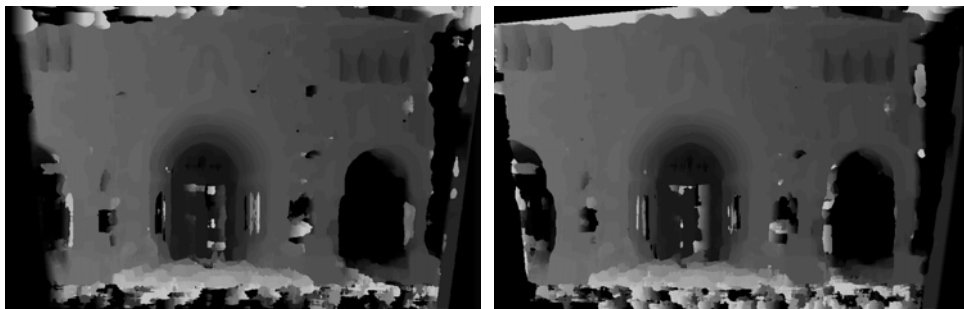
Για το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών ο έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας έγινε για διάσταση παραθύρων 11×11 , 15×15 , 21×21 . Οι χάρτες παράλλαξης για κάθε εικόνα του στερεοζεύγους παρουσιάζονται στο Σχ. 6.199.



(α)



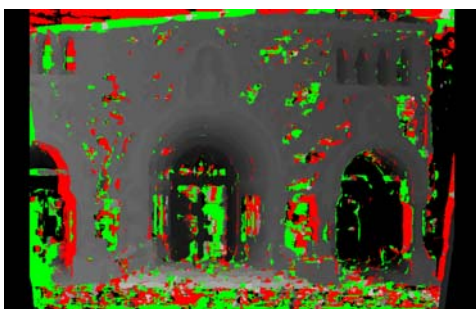
(β)



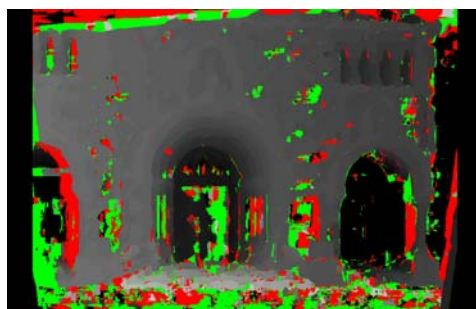
(γ)

Σχήμα 6.199. Χάρτες παράλλαξης της αριστερής (αριστερά) και της δεξιάς εικόνας (δεξιά) από το κριτήριο SAD για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 15×15 και (γ) 21×21 .

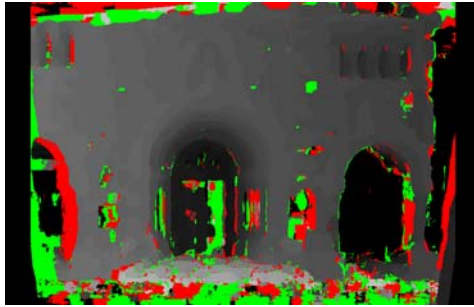
Από τον έλεγχο συμβατότητας, που έγινε για τιμή κατωφλιού 1 pixel προέκυψε πως για μέγεθος παραθύρου 11×11 το ποσοστό των έγκυρων pixel είναι 76.8%, για μέγεθος 15×15 το ποσοστό είναι 80.2%, ενώ για παράθυρο 21×21 το ποσοστό των έγκυρων pixel είναι 82.8%. Το Σχ. 6.200 δείχνει τους χάρτες παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προήλθαν από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης, όπου διακρίνονται όσα σημεία απορρίφθηκαν κατά τον έλεγχο.



(α)



(β)



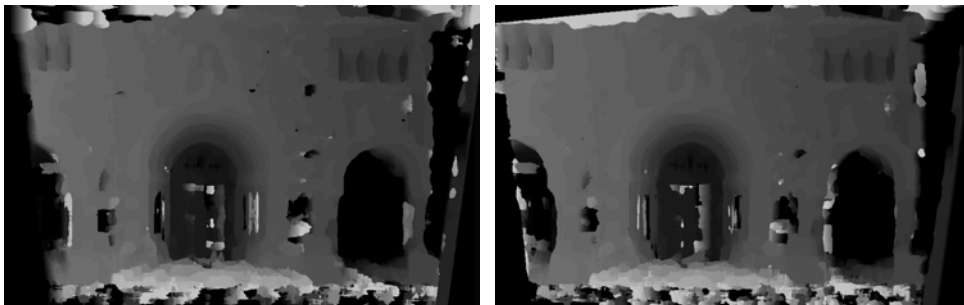
(γ)

Σχήμα 6.200. Χάρτες παράλλαξης που εμφανίζουν τα σημεία που αποκλείστηκαν κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας, για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.

6.5.5 Εμπροσθοτομία (3D ανακατασκευή)

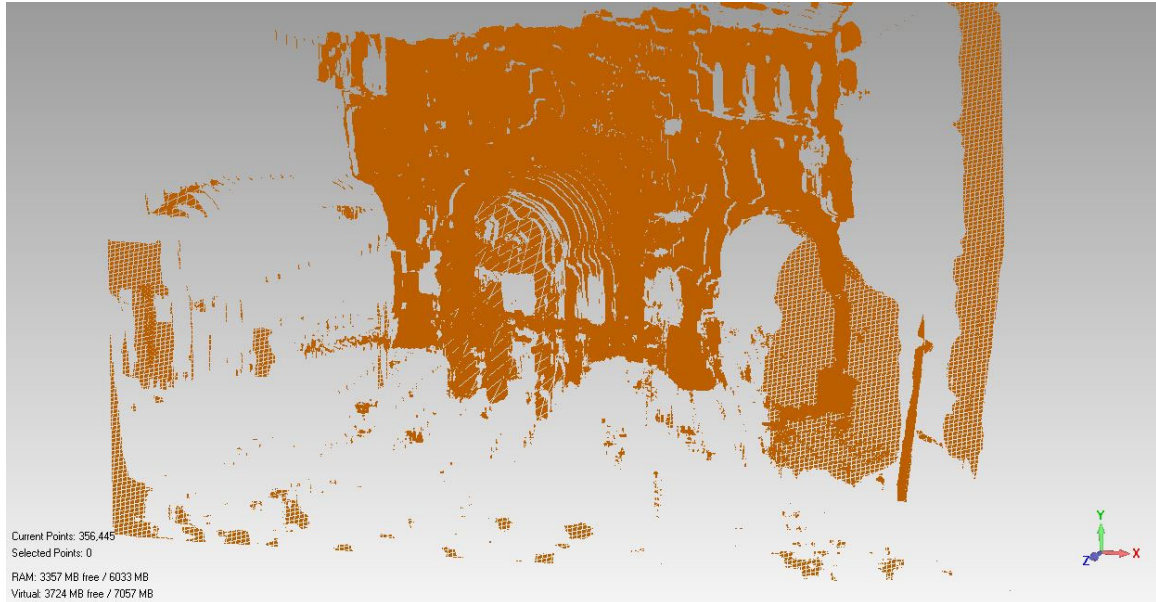
Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 5.7, η εύρεση ψηφιακών παραλλάξεων ισοδυναμεί με την εύρεση ομόλογων εικονοσυντεταγμένων. Συνεπώς, γνωρίζοντας κανείς και τους προσανατολισμούς των εικόνων είναι σε θέση να παραγάγει ένα 3D μοντέλο από τους χάρτες παράλλαξης. Στην προκειμένη περίπτωση οι επιπολικές εικόνες αναφέρονται στην απλή κανονική περίπτωση του στερεοζεύγους. Η γνωστή σταθερά της μηχανής έπρεπε, προφανώς, να αναχθεί στην ανάλυση του 3^{ου} επιπέδου της πυραμίδας, ενώ βέβαια ελήφθησαν υπόψη και οι θέσεις των πρωτευόντων σημείων στις δύο εικόνες προκειμένου οι ψηφιακές παραλλάξεις να αναχθούν σε πραγματικές παραλλάξεις (ενότητα 2.2)

Οι χάρτες παράλλαξης που χρησιμοποιήθηκαν εδώ για τη δημιουργία του 3D μοντέλου προήλθαν από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για μέγεθος παραθύρου 21×21 (Σχ. 201). Η εύρεση των 3D συντεταγμένων μοντέλου πραγματοποιήθηκε για όσα σημεία είχαν περάσει τον έλεγχο αμφίπλευρης συμβατότητας που έγινε στην ενότητα 6.5.4.

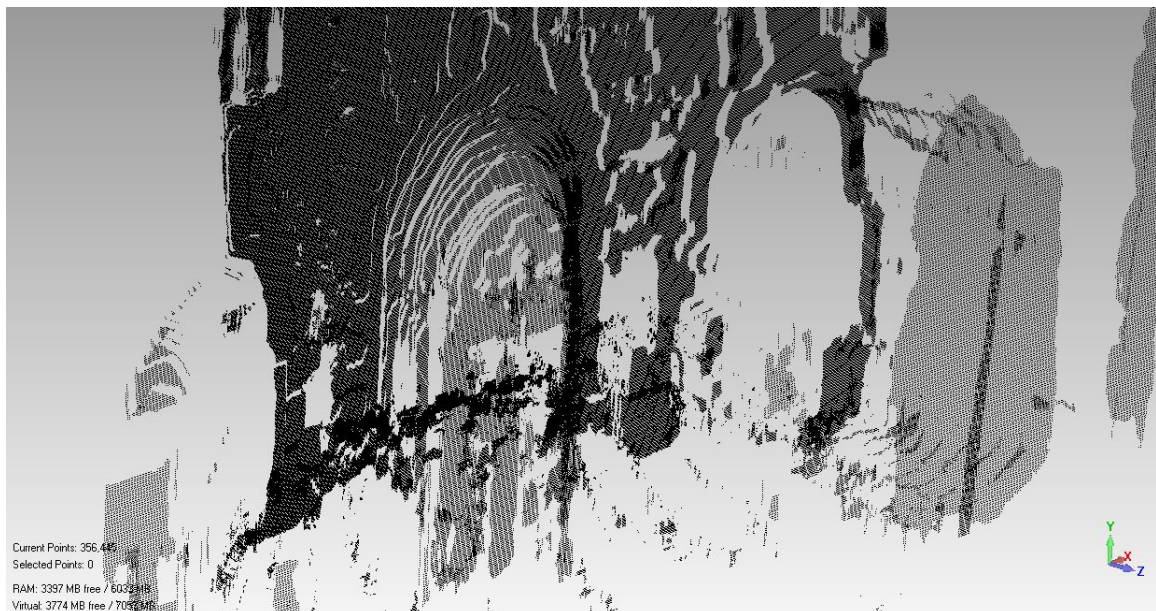


Σχήμα 6.201. Χάρτες παράλλαξης που προκύπτουν από την εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρο 21×21 στην αριστερή και τη δεξιά εικόνα.

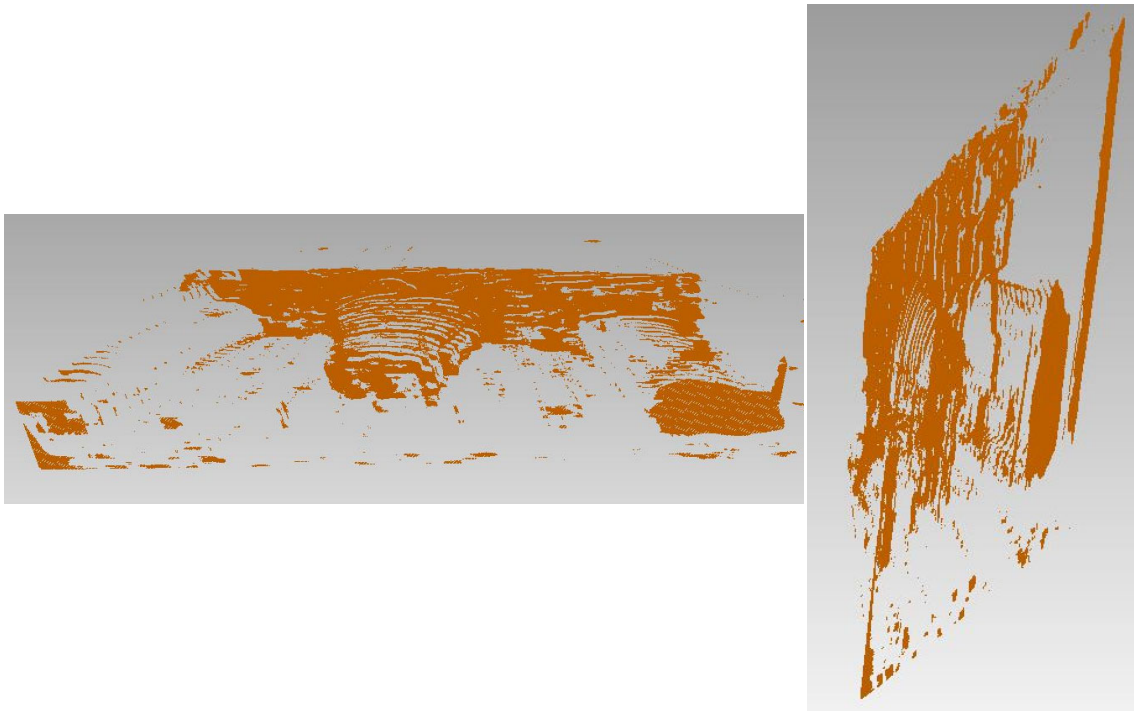
Όψη του 3D μοντέλου που προέκυψε από τους παραπάνω χάρτες παράλλαξης (για το 80% των σημείων που πέρασαν τον έλεγχο της αμφίπλευρης συμβατότητας) παρουσιάζεται στο Σχ. 202, λεπτομέρειά του φαίνεται στο Σχ. 20, ενώ απεικονίσεις υπό μεγάλες γωνίες στο Σχ. 204. Η προβολή του 3D μοντέλου έγινε στο περιβάλλον του *Geomatic*.



Σχήμα 6.202. Οπτικοποίηση του ανακατασκευασμένου 3D μοντέλου που προέκυψε από χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου SAD για παράθυρο 21x21.

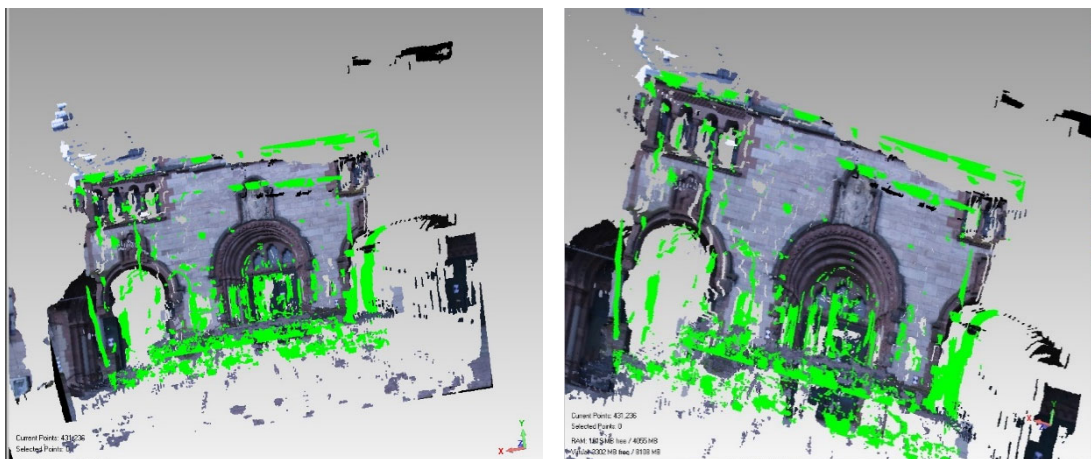


Σχήμα 6.203. Λεπτομέρεια του ανακατασκευασμένου 3D μοντέλου.



Σχήμα 6.204. Πλάγιες απεικονίσεις του ανακατασκευασμένου 3D μοντέλου.

Από τις εικόνες αυτές φαίνεται ότι το μοντέλο είναι, βέβαια, ελλειπές και κατά περιοχές εσφαλμένο, έχουν όμως αποδοθεί αρκετά στοιχεία το αναγλύφου του. Είναι ακόμα σαφές πως, εφόσον κάθε 3D σημείο αντιστοιχεί σε γνωστά εικονοσημεία, είναι δυνατόν να αποδοθεί σε όλα τα σημεία και τιμή χρώματος (rgb), είτε από μία εικόνα είτε ως ο μέσος όρος της τιμής χρώματος από τις δύο εικόνες, όπως έγινε εδώ. Έτσι, στο Σχ. 6.205 εμφανίζονται όψεις του 3D μοντέλου με φωτοϋφή, όπου με πράσινο χρώμα έχει αποδοθεί το 20% των σημείων που δεν πέρασαν τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας.



Σχήμα 6.205. Εικόνες με φωτοϋφή από το 3D μοντέλο που προέκυψε από εφαρμογή του κριτηρίου SAD για παράθυρο συνταύτισης 21×21.

6.6 Έκτο και έβδομο ζεύγος εικόνων

Τα προηγούμενα αποτελέσματα προέρχονται από εικόνες χαμηλής ανάλυσης, και άρα δεν μπορεί να αξιολογήσει κανείς πλήρως την απόδοση των μεθόδων, ιδίως όταν πρόκειται για αντικείμενο τόσο σύνθετο. Ακόμα, η περιοχή πχ. των σκαλοπατιών δεν μπορούσε να αποδοθεί, πολύ περισσότερο μάλιστα που οι ακμές εκεί είναι πρακτικά παράλληλες στις επιπολικές γραμμές. Κρίθηκε σκόπιμο, συνεπώς, να αξιοποιηθεί η πλήρης ανάλυση των εικόνων. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν εδώ δύο ζεύγη εικόνων, τα οποία αποτελούν τμήματα των αρχικών εικόνων υψηλής ανάλυσης. Η εφαρμογή των κριτηρίων περιορίστηκε σε τμήματα των εικόνων λόγω έλλειψης υπολογιστή με επαρκείς δυνατότητες. Πρόκειται για ζεύγη με διαστάσεις 709×328 και 658×536, αντίστοιχα, με τιμή παράλλαξης από -50 έως 70 pixel και από -25 έως 35 pixel (Σχ. 6.206 και 6.204).



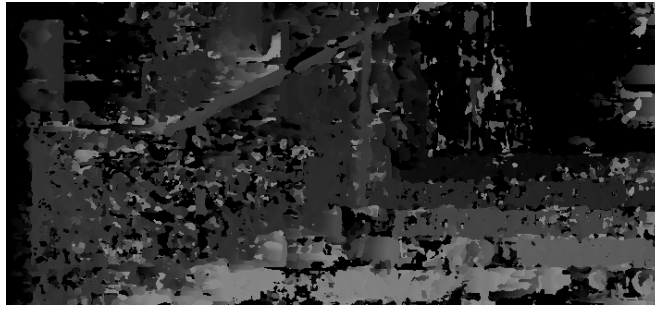
Σχήμα 6.206. Έκτο στερεοζεύγος εικόνων ("Herz_Jesus-K7").



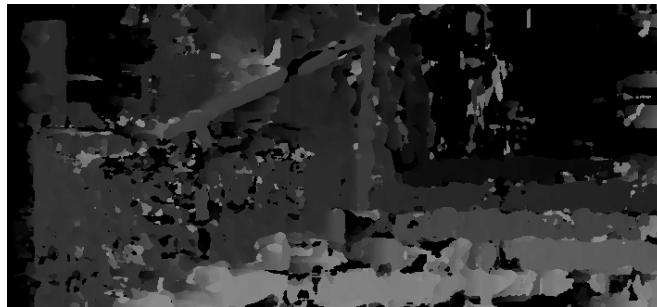
Σχήμα 6.207. Έβδομο στερεοζεύγος εικόνων ("Herz_Jesus-K7").

6.6.1 Συνταύτιση με την μέθοδο SAD

Το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) εφαρμόστηκε εδώ για παράθυρα αναφοράς 7×7, 11×11, 15×15 και 21×21. Στα Σχ. 6.208 και 6.209 παρουσιάζονται οι χάρτες παράλλαξης που προκύπτουν από εφαρμογή του κριτηρίου SAD για όλα τα παράθυρα που χρησιμοποιήθηκαν και για τα δύο ζεύγη εικόνων.



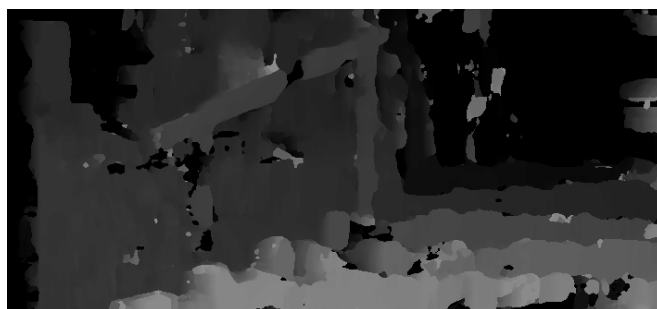
(α)



(β)

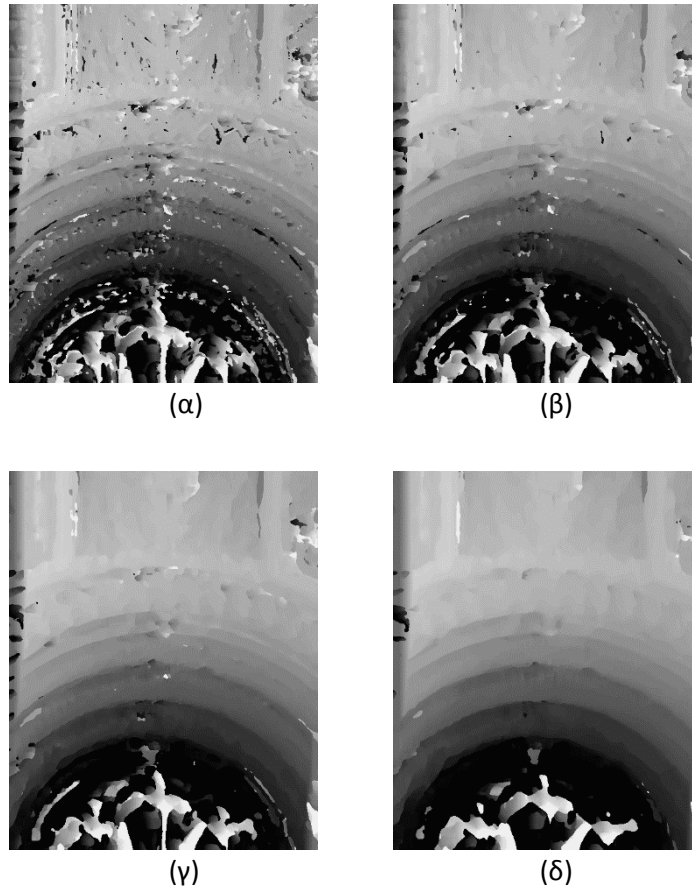


(γ)



(δ)

Σχήμα 6.208. Χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου SAD για παράθυρα: (α) 7×7 , (β) 11×11 (γ) 15×15 , (δ) 21×21 .

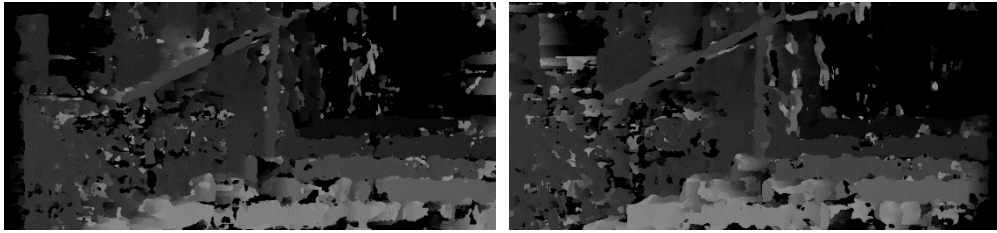


Σχήμα 6.209. Χάρτες παράλλαξης από εφαρμογή του κριτηρίου SAD για παράθυρο: (α) 7×7, (β) 11×11 (γ) 15×15, (δ) 21×21.

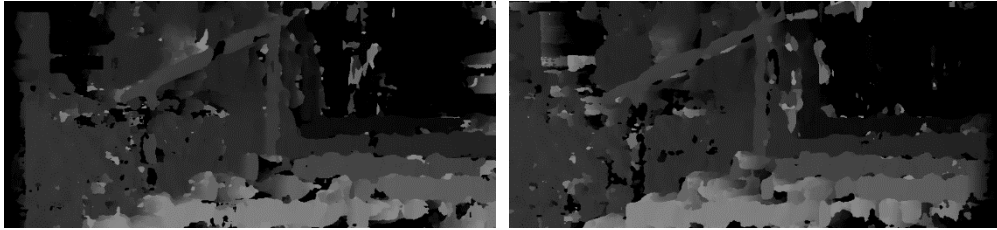
Όπως φαίνεται και σε αυτές τις εικόνες, η υψηλή ανάλυση επιτρέπει να δημιουργείται πολύ καλύτερη αίσθηση του αναγλύφου. Στην πρώτη περίπτωση, έτσι, διακρίνονται γενικά τα σκαλοπάτια αλλά χονδρικά ακόμα και το κάγκελο, ενώ στο δεύτερο παράδειγμα έχει καταγραφεί σωστά η μεταβολή του αναγλύφου στο άνω μέρος της εισόδου.

6.6.2 Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας

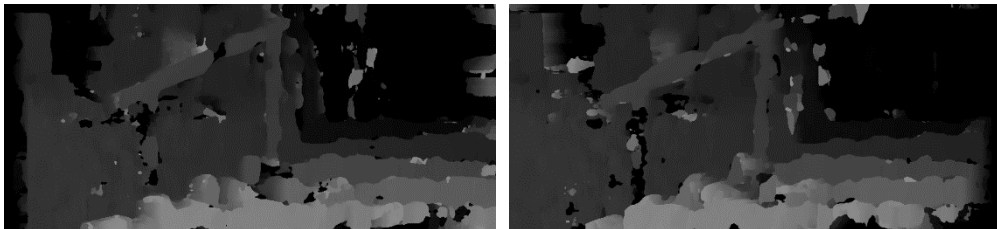
Ακόμα, έγινε έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας για το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για παράθυρα 11×11, 15×15 και 21×21. Οι χάρτες παράλλαξης για κάθε εικόνα του στερεοζεύγους παρουσιάζονται στα Σχ. 6.210 και 6.211.



(α)

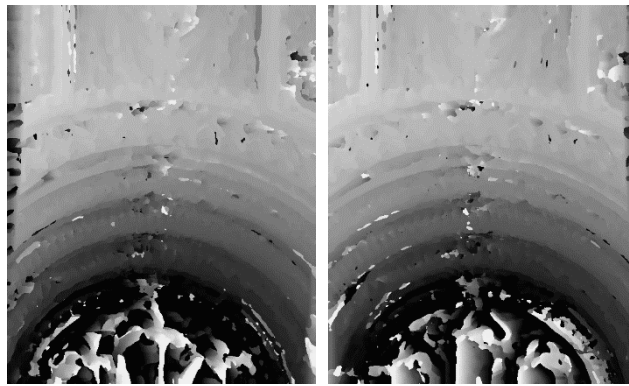


(β)

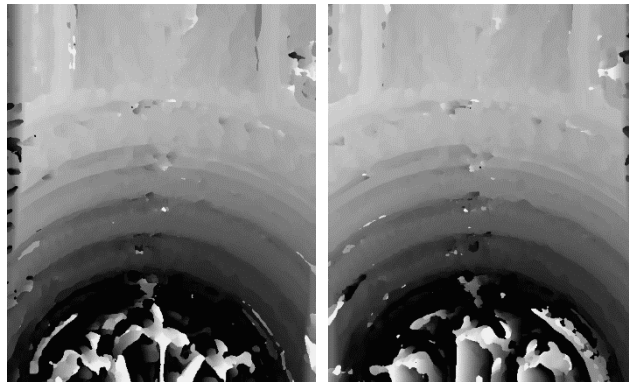


(γ)

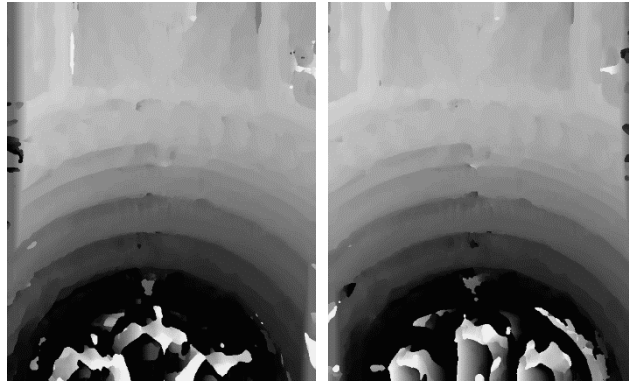
Σχήμα 6.210. Χάρτες παράλλαξης της αριστερής (αριστερά) και της δεξιάς εικόνας (δεξιά) που προέκυψαν από το κριτήριο SAD για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 15×15 και (γ) 21×21 .



(α)



(β)

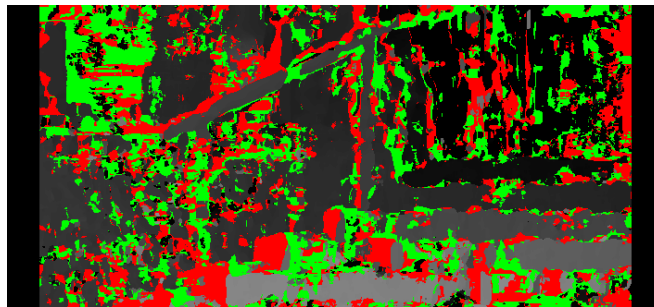


(γ)

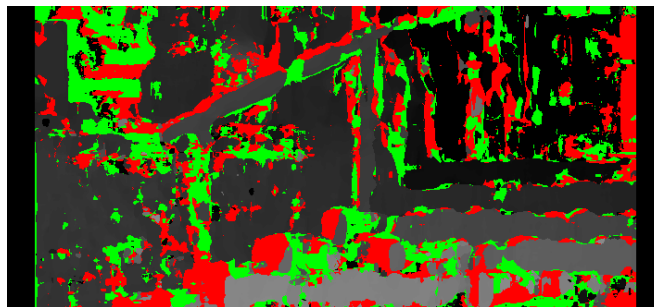
Σχήμα 6.211. Χάρτες παράλλαξης της αριστερής (αριστερά) και της δεξιάς εικόνας (δεξιά) που προέκυψαν από το κριτήριο SAD για παράθυρα: (α) 11×11 , (β) 15×15 και (γ) 21×21 .

Από τον έλεγχο συμβατότητας με τιμή κατωφλίου 1 pixel προέκυψε ότι για παράθυρα συνταύτισης 11×11 , 15×15 και 21×21 τα ποσοστά των έγκυρων pixel για το πρώτο στερεοζεύγος ήταν 61.3%, 66.7% και 72.6, αντίστοιχα. Ομοίως, για το δεύτερο στερεοζεύγος τα αντίστοιχα ποσοστά 72.3%, 81.5% και 89.4%.

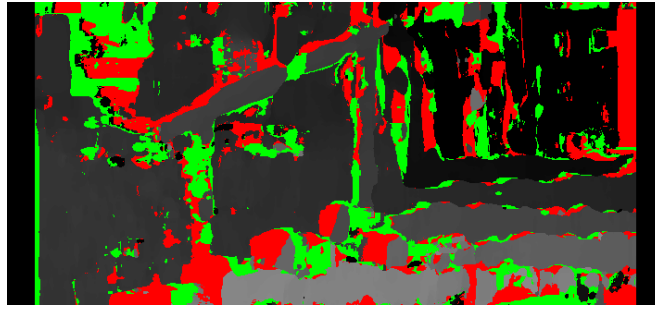
Τα Σχ. 6.212 και 6.213 εμφανίζουν τους χάρτες παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προήλθαν από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης, όπου διακρίνονται όσα σημεία απορρίφθηκαν κατά τον έλεγχο για κάθε ένα από τα δύο στερεοζεύγη εικόνων.



(α)

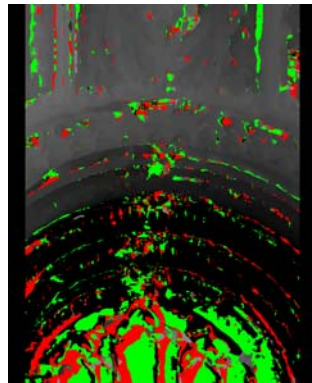


(β)

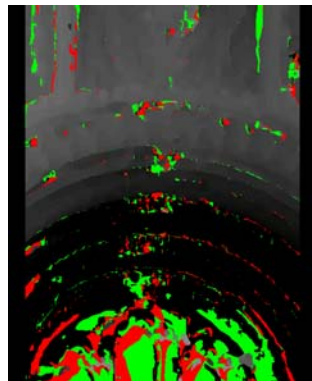


(γ)

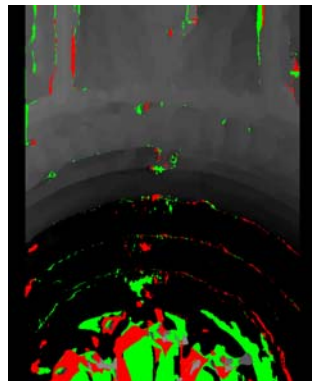
Σχήμα 6.212. Χάρτες παράλλαξης που εμφανίζουν τα σημεία που αποκλείστηκαν κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 6.213. Χάρτες παράλλαξης που εμφανίζουν τα σημεία που αποκλείστηκαν κατά τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας για παράθυρα: (α) 11×11, (β) 15×15 και (γ) 21×21.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας προγραμματίστηκαν, εφαρμόστηκαν και αξιολογήθηκαν βασικές μέθοδοι για την πυκνή συνταύτιση σε ζεύγη εικόνων. Όλες οι διαδικασίες που αναφέρθηκαν (άθροισμα απόλυτων διαφορών και τετραγώνων των διαφορών έντασης, δημιουργία εικόνων κλίσεων, μετασχηματισμός rank, παραγωγή χάρτη ψηφιακών παραλλάξεων, δημιουργία εικόνας του χώρου των ψηφιακών παραλλάξεων και τομών του, υποψηφιδική παρεμβολή, αμφίδρομη συμβατότητα, εμπροσθοτομία, απόδοση χρώματος στα 3D σημεία κ.λπ.) προγραμματίστηκαν σε περιβάλλον Matlab. Εξαίρεση είναι τα φίλτρα εξομάλυνσης, όπου για ευκολία χρησιμοποιήθηκαν έτοιμοι κώδικες. Η παραγωγή επιπολικών εικόνων είχε προγραμματιστεί παλαιότερα, αλλά ο κώδικας δεν χρησιμοποιήθηκε εδώ (χρησιμοποιήθηκαν επιπολικές εικόνες του υποψήφιου διδάκτορα Χ. Στεντούμη).

Με βάση, λοιπόν, τα επιμέρους συμπεράσματα που διατυπώθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο από την εφαρμογή των κριτηρίων σε κάθε ένα από τα στερεοζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν, μπορεί κανείς να εξαγάγει κάποια γενικότερα συμπεράσματα για τα κριτήρια αυτά. Προφανώς, οι κρίσεις αναφέρονται στις συγκεκριμένες εικόνες των εφαρμογών, οι οποίες καθορίζουν και τα όρια τέτοιων “γενικεύσεων”.

• SSD – SAD – SAD colour

Η εφαρμογή του κριτηρίου του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) και των τετραγώνων των διαφορών (SSD) γενικά οδηγεί στη δημιουργία παρόμοιων χαρτών παράλλαξης, δηλαδή τα στοιχεία από τη σύγκρισή τους με τον αληθή χάρτη παράλλαξης δεν εμφανίζουν ουσιαστικές διαφορές. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι βέλτιστες τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης, και για τις δύο μεθόδους, εμφανίζονται για μεσαία παράθυρα αναφοράς (11×11 έως 31×31). Αντίστοιχα, οι καλύτερες τιμές για τα ποσοστά των διαφορών παράλλαξης από τις αληθείς με τιμή <2 pixel εμφανίζονται για παράθυρα αναφοράς 11×11 και 15×15. Επισημαίνεται πάντως ότι σε εικόνες υψηλότερης ανάλυσης (ενότητα 6.5.1) η μέθοδος SSD φαίνεται να υπερτερεί της SAD.

Τέλος, η συμμετοχή των τριών χρωματικών επιπέδων στη συνταύτιση με το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών οδηγεί κατ’ αρχήν σε βελτίωση, ενώ τα βέλτιστα αποτελέσματα εμφανίζονται για παράθυρο αναφοράς 15×15.

• Συντελεστής συσχέτισης

Η εφαρμογή του κριτηρίου του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης (correlation) δίνει, γε-

νικά, καλύτερα αποτελέσματα έναντι των άλλων δύο κριτηρίων που αναφέρθηκαν για μικρά παράθυρα αναφοράς. Για μεσαία παράθυρα αναφοράς και τα τρία κριτήρια φαίνεται να δίνουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα, ενώ για μεγάλα παράθυρα αναφοράς υπερτερεί το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών. Δεδομένου ότι το κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης είναι υπολογιστικά απαιτητικότερο, μπορεί κανείς να πει ότι θα μπορούσε ίσως να αντικατασταθεί από τα άλλα δύο μέτρα ομοιότητας.

Γενικότερα μπορεί κανείς να πει ότι τα μικρά παράθυρα αναφοράς παράγουν χάρτες όπου διατηρούνται αναλλοίωτα τα φυσικά όρια των αντικειμένων της εικόνας. Από την άλλη μεριά όμως, οι χάρτες αυτοί εμφανίζουν περισσότερες περιοχές με λανθασμένη εκτίμηση λόγω της περιορισμένης πληροφορίας που περιλαμβάνει το παράθυρο.

• Μετασχηματισμός κλίσης (gradient)

Η εφαρμογή μετασχηματισμού κλίσης στις εικόνες πριν από τη διαδικασία της συνταύτισης δεν επιφέρει πάντα βελτίωση στις τιμές των αποτελεσμάτων, ίσως λόγω του θορύβου που υπεισέρχεται σε αυτές από τη διαδικασία του μετασχηματισμού. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η εφαρμογή του μετασχηματισμού βελτίωσε, γενικά, τα αποτελέσματα, ιδίως στην περίπτωση του τελευταίου ζεύγους εικόνων. Στα μοντέλα του Middlebury, με εξαίρεση εκείνο των κώνων, η μέθοδος συνετέλεσε στη βελτίωση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης των διαφορών, όχι όμως και των ποσοστών των διαφορών με τιμή >2 pixel. Λόγω του ενισχυμένου θορύβου των εικόνων κλίσεων εμφανίζονται περιοχές με χονδροειδή σφάλματα συνταύτισης, με συνέπεια τη μείωση των ποσοστών αυτών. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση εικόνων κλίσης βελτιώνει γενικά τα αποτελέσματα, αλλά εισάγει τοπικό θόρυβο. Αυτός είναι και ο λόγος που εφαρμόζεται φίλτρο εξομάλυνσης Gauss στις εικόνες κλίσης.

Μέσω, λοιπόν, της εφαρμογής του φίλτρου Gauss στις εικόνες κλίσης επιτυγχάνεται η βελτίωση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης χάρη στη μείωση του γενικού θορύβου των εικόνων. Από την άλλη μεριά, όμως, παρατηρείται μείωση των ποσοστών των καλών συνταυτίσεων, γεγονός που αποδίδεται στη "θόλωση" που δημιουργεί η εφαρμογή του φίλτρου Gauss, ιδίως στις ακμές των αντικειμένων. Εξαίρεση αποτελεί το μοντέλο *Venus*, όπου η εφαρμογή φίλτρου Gauss δεν επέφερε κάποια βελτίωση στα αποτελέσματα (αυτό ίσως οφείλεται, όπως έχει αναφερθεί, στο ότι πρόκειται για τεχνητές και όχι πραγματικές εικόνες).

• Μετασχηματισμός κατάταξης rank

Η εφαρμογή μετασχηματισμού rank στις εικόνες πριν από τη διαδικασία συνταύτισης εμφανίζεται να βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα. Οι καλύτερες τιμές παρατηρούνται κυρίως για μικρά παράθυρα μετασχηματισμού (7×7, 9×9, 11×11) και, όπως προηγουμένως, μεσαία παράθυρα συνταύτισης (11×11, 15×15, 21×21). Από όλα

τα αποτελέσματα για κάθε ένα από τα κριτήρια που εφαρμόστηκαν προκύπτει πως η συνταύτιση σε εικόνες που έχουν προηγουμένως υποστεί μετασχηματισμό rank δίνουν, στην περίπτωση των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν, εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα από κάθε άλλη μέθοδο. Ακόμα, εκτιμάται ότι το μέγεθος του παραθύρου rank δεν φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο.

• Φίλτρα εξομάλυνσης

– *Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από την μέθοδο συνταύτισης SAD*

Η εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής στους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από το κριτήριο SAD για τα διαφορετικά μοντέλα φαίνεται να επιφέρει βελτίωση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης, όχι όμως και των ποσοστών των εικονοψηφίδων με διαφορές παράλλαξης μικρότερες των 2 ρixel (εξαίρεση σε αυτή τη μείωση των ποσοστών αποτελούν και εδώ οι τεχνητές εικόνες του μοντέλου “Venus”, όπου εμφανίζεται αύξηση των ποσοστών).

Η εφαρμογή του φίλτρου μέσου όρου σε χάρτες παράλλαξης όπου προηγουμένως έχει εφαρμοστεί φίλτρο μεσαίας τιμής επιφέρει σχετικά μικρή (μερικές φορές και μηδενική) βελτίωση των τιμών του μέσου όρου, όχι όμως και των τιμών της τυπικής απόκλισης, οι οποίες εμφανίζουν ιδιαίτερα σημαντική βελτίωση. Τα ποσοστά των διαφορών <2 ρixel δεν φαίνεται να βελτιώνονται από την εφαρμογή του φίλτρου (με εξαίρεση και πάλι το μοντέλο “Venus”). Σε περιοχές ακμών το φίλτρο μέσου όρου παρεμβάλλει νέες τιμές, δημιουργώντας έτσι ένα “θόλωμα” στην εικόνα. Το φιλτράρισμα υψηλών συχνοτήτων μπορεί να λειτουργεί επιβαρυντικά σε περιοχές ακμών, συντελεί όμως στη γενικότερη μείωση του θορύβου της εικόνας. Έτσι, περιορίζονται οι εικονοψηφίδες που εμφανίζουν μεγάλες διαφορές από τον αληθή χάρτη παράλλαξης, συμβάλλοντας στη μείωση της τιμής της τυπικής απόκλισης (χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως αποκτούν διαφορά μικρότερη της τιμής του μέσου όρου, ώστε να συντελέσουν και στη μείωση της δικής του τιμής). Στο “θόλωμα” στην εικόνα από την εφαρμογή του φίλτρου οφείλεται, πιθανόν, και η μείωση των ποσοστών με τις πολύ καλές συνταυτίσεις.

– *Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες κλίσης*

Η εφαρμογή του φίλτρου μεσαίας τιμής στους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από εφαρμογή του κριτηρίου SAD σε εικόνες κλίσης επέφερε μείωση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης, ιδίως για τα μικρά παράθυρα. Τα ποσοστά των διαφορών <2 ρixel δεν παρουσιάζουν βελτίωση (με εξαίρεση το μοντέλο “Venus”).

Η εφαρμογή του φίλτρου μέσου όρου επιφέρει, κυρίως, μια αισθητή πτώση των τιμών των τυπικών αποκλίσεων, αφού εξομαλύνει περαιτέρω τις ακραίες τιμές διαφορών, χωρίς να μεταβάλλει ιδιαίτερα τις τιμές του μέσου όρου και των ποσοστών των διαφορών. Και στην περίπτωση αυτή, εξαίρεση αποτελεί το μοντέλο “Venus”, για το οποίο

βελτίωση παρουσιάζουν και οι τιμές του μέσου όρου και των ποσοστών. Τελικά, τα αποτελέσματα από εφαρμογή φίλτρων μεσαίας τιμής και μέσου όρου παρουσιάζουν, όπως είναι φυσικό, τις ίδιες τάσεις τόσο στις αρχικές εικόνες όσο στις εικόνες κλίσης.

– *Εξομάλυνση αποτελεσμάτων από συνταύτιση SAD σε εικόνες rank*

Αντίστοιχη συμπεριφορά φαίνεται να έχουν και τα αποτελέσματα από εφαρμογή των φίλτρων στους χάρτες παράλλαξης που προέκυψαν από τη διαδικασία της συνταύτισης σε εικόνες οι οποίες είχαν προηγουμένως υποστεί μετασχηματισμό rank. Ειδικότερα, η εφαρμογή φίλτρου μεσαίας τιμής συντελεί στη βελτίωση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης, όχι όμως και των ποσοστών των εικονοψηφίδων με απόκλιση μικρότερη από 2 pixels. Από την άλλη μεριά, η εφαρμογή φίλτρου μέσου όρου οδηγεί σε μικρή βελτίωση των τιμών της τυπικής απόκλισης, γεγονός αναμενόμενο καθώς σκοπός της χρήσης του φίλτρου εδώ δεν είναι τόσο η αύξηση των σωστών αντιστοιχιών όσο η μείωση των αποκλίσεων των εσφαλμένων. Συνεπώς, η μικρή μείωση των ποσοστών των διαφορών με τιμή μικρότερη από 2 pixels, αλλά και η μερική αύξηση της τιμής των μέσων όρων, ενδεχομένως οφείλεται σε περιοχές σωστών συνταυτίσεων όπου με τη χρήση φίλτρων διαφοροποιήθηκε ελαφρώς η τιμή της διαφοράς παράλλαξης.

• Υποψηφιδική παρεμβολή παράλλαξης

Η παρεμβολή πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού (παραβολής) στις διακριτές τιμές του 3D πίνακα κόστους (DSI) δίνει, όπως είναι λογικό, σχεδόν ίδιες διαφορές. Όπως έχει αναφερθεί (ενότητα 5.1), πρόκειται απλώς για υποψηφιδικές μεταβολές στους χάρτες παράλλαξης, οι οποίες αναμένεται ότι θα λειτουργήσουν επιβοηθητικά στην 3D ανακατασκευή. Παρατηρείται, ακόμα, μια μείωση των ποσοστών των διαφορών <2 pixels, η οποία όμως δεν μπορεί να αξιολογηθεί καθώς τα ποσοστά αυτά δεν είναι απολύτως συγκρίσιμα, αφού την μία φορά αφορούν ακέραιες τιμές <2 και την άλλη δεκαδικές τιμές <1.5.

• Έλεγχος αμφίδρομης συμβατότητας

Από τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας που έγινε για ορισμένα από τα χρησιμοποιηθέντα κριτήρια συνταύτισης προέκυψε πως με τη διαδικασία αυτή απομακρύνονται ~10% των υπολογισμένων παραλλάξεων για τα ζεύγη “Cones” και “Teddy”, και ~5% για το ζεύγος “Venus”. Οι παραλλάξεις αυτές είναι πράγματι εσφαλμένες, όπως φαίνεται από τη θεαματική βελτίωση των τιμών του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης των διαφορών παράλλαξης που απομένουν, όσο και του ποσοστού των διαφορών <2 pixels. Στους χάρτες παράλλαξης της αριστερής εικόνας που προέκυψαν από τον έλεγχο συμβατότητας των δύο χαρτών παράλλαξης εύκολα διακρίνει κανείς ότι τα σημεία που απορρίφθηκαν κατά τον έλεγχο συγκεντρώνονται κυρίως στις ακμές. Αυτό εξηγείται αν σκεφτεί κανείς πως στις περιοχές των ακμών υπάρχει δυσκολία διάκρισης των αντικειμένων από το υπόβαθρο, κυρίως εξαιτίας των αποκρύψεων λόγω προοπτικής.

• 3D ανακατασκευή

Στην ενότητα 6.5.5 πραγματοποιήθηκε ανακατασκευή του 3D μοντέλου, για το 3^ο επίπεδο της πυραμίδας των εικόνων “*Herz-Jesu-K7*”, από τους χάρτες παράλλαξης που είχαν προκύψει από το κριτήριο του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών για μέγεθος παραθύρου 21×21. Η εύρεση των 3D συντεταγμένων μοντέλου πραγματοποιήθηκε για τα σημεία τα οποία είχαν περάσει τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας (περίπου 80% των σημείων). Από την οπτικοποίηση του 3D μοντέλου προκύπτει ότι το μοντέλο είναι, βέβαια, ελλιπές και κατά περιοχές εσφαλμένο, έχουν όμως αποδοθεί αρκετά στοιχεία του αναγλύφου του. Επιπλέον, από την απόδοση χρώματος (rgb) σε όλα τα σημεία, καθώς αυτά αντιστοιχούν σε γνωστά εικονοσημεία, προέκυψαν όψεις του 3D μοντέλου με φωτοϋφή. Οι εικόνες απεικονίζουν όψεις του 3D μοντέλου, στις οποίες γίνεται σχετικά πιο εύκολα διακριτό το σχήμα και οι λεπτομέρειες του κτιρίου. Στις όψεις αυτές απεικονίστηκαν με πράσινο χρώμα και τα σημεία που δεν είχαν περάσει τον έλεγχο αμφίδρομης συμβατότητας.

7.2 Προτάσεις

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν ορισμένα από τα πιο γνωστά μέτρα συνταύτισης, όπως εκείνα του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών, του αθροίσματος του τετραγώνου των διαφορών ή του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης. Για την ενίσχυση της διαδικασίας της συνταύτισης, αυτά τα κριτήρια εφαρμόστηκαν και σε εικόνες στις οποίες είχε προηγουμένως εφαρμοστεί φίλτρο κλίσεων και κατόπιν φίλτρο Gauss, αλλά και το μη παραμετρικό φίλτρο rank (το οποίο στις εφαρμογές που έγιναν εδώ επέφερε σημαντική βελτίωση). Η μελέτη της βιβλιογραφίας έδειξε ότι υπάρχουν και άλλες δυνατότητες επεξεργασίας και συνδυασμού των εικόνων με στόχο την βελτίωση των αποτελεσμάτων, οι οποίες θα ήταν σκόπιμο να εξεταστούν στο μέλλον.

Ένας τέτοιος μη παραμετρικός μετασχηματισμός που εφαρμόζεται στις αρχικές εικόνες είναι ο μετασχηματισμός *census*. Ο μετασχηματισμός αυτός παράγει αποτελέσματα βασισμένα στη σχέση μεταξύ των εικονοψηφίδων μιας περιοχής της εικόνας (Zabih and Woodfill, 1994). Ειδικότερα, επιλέγεται μια περιοχή $m \times n$ περί το εξεταζόμενο pixel και ελέγχεται εάν η ένταση των γειτονικών pixel είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την ένταση της κεντρικής εικονοψηφίδας. Αποτέλεσμα είναι ένα δυαδικό διάνυσμα μήκους mn , το οποίο αποδίδεται σε κάθε εικονοψηφίδα. Ο μετασχηματισμός *census* εξαρτάται από τη σχέση της έντασης μιας εικονοψηφίδας με τις γειτονικές της στην περιοχή (παραθύρο) που έχει επιλεγεί. Πρόκειται δηλαδή για έναν μετασχηματισμό ανεξάρτητο απέναντι σε γραμμικές αλλαγές της φωτεινότητας και της αντίθεσης. Επιπλέον, η μεταβολή στην ένταση ενός pixel δεν επηρεάζει αθροιστικά το σύνολο του μέτρου, αλλά μόνο το συγκεκριμένο bit της δυαδικής περιγραφής της υπό εξέταση εικονοψηφίδας.

Αυτός είναι και ο λόγος που ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός αναφέρεται ότι βελτιώνει τα αποτελέσματα της συνταύτισης σε περιοχές με μειωμένη υφή, σε περιοχές ασυνεχειών και στην περίπτωση εικονοψηφίδων με αυξημένο θόρυβο (Stentoumis et al., 2012). Ο μετασχηματισμός *census* χρησιμοποιείται σε ασπρόμαυρες εικόνες αλλά και σε έγχρωμες, όπου πληροφορία υπάρχει και στα τρία χρωματικά επίπεδα της εικόνας.

Από την άλλη μεριά, έχει διαπιστωθεί ότι η εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης (μέσου όρου ή Gauss) στις αρχικές εικόνες έχει ευεργετική επίδραση σε περιοχές με ομαλή μεταβολή της έντασης, αλλά βέβαια “θολώνει” τις ακμές. Ένα από τα φίλτρα, λοιπόν, που έχουν προταθεί είναι το “αμφίπλευρο φίλτρο” (bilateral filter), η εφαρμογή του οποίου αποσκοπεί στην εξομάλυνση των εικόνων με παράλληλη διατήρηση των ακμών (edge-preserving filter). Πρόκειται για ένα φίλτρο στο οποίο η συμμετοχή κάθε σημείου μειώνεται όχι μόνο με την απόσταση αλλά και με την διαφορά έντασης από την κεντρική εικονοψηφίδα του παραθύρου. Αυτή η βασική ιδέα δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά στην βιβλιογραφία της όρασης υπολογιστών το 1998 (Szeliski, 2010). Επειδή η εφαρμογή του συγκεκριμένου φίλτρου είναι αρκετά αργή, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές επιτάχυνσης της μεθόδου, οι οποίες όμως έχουν την τάση να χρησιμοποιούν περισσότερη μνήμη από εκείνη που απαιτείται σε περιπτώσεις εφαρμογής φίλτρων εξομάλυνσης, και ως εκ τούτου γενικά δεν εφαρμόζονται άμεσα σε έγχρωμες εικόνες.

Το σύνολο των μετασχηματισμών εικόνας που έχουν αναφερθεί στην παρούσα εργασία οδηγούν στην δημιουργία εικόνων με διαστάσεις ίσες με εκείνες των αρχικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή τους. Συχνά όμως, όπως αναφέρει ο Szeliski (2010), προκύπτει η ανάγκη να μεταβληθεί η ανάλυση της εικόνας (για παράδειγμα, σε περιπτώσεις παρεμβολής μιας μικρότερης εικόνας ώστε να ταιριάζει η ανάλυσή της με εκείνη ενός εκτυπωτή ή μιας οθόνης υπολογιστή κ.λπ.). Ακόμα, η μείωση του μεγέθους της εικόνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιταχυνθεί η εκτέλεση ενός αλγορίθμου ή να εξοικονομηθεί αποθηκευτικός χώρος. Μερικές φορές, πάλι, δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων ποια είναι κάθε φορά η καταλληλότερη ανάλυση της εικόνας (όπως, για παράδειγμα, συμβαίνει κατά τη διαδικασία εντοπισμού ενός προσώπου σε εικόνα όπου η κλίμακά του δεν είναι γνωστή), και έτσι απαιτείται η χρήση περισσότερων κλιμάκων της εικόνας. Εκείνο όμως που κυρίως ενδιαφέρει εδώ είναι ότι η *πυραμίδα εικόνων* μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιβοηθητική στην αναζήτηση ομολογιών/αντιστοιχιών, η οποία μπορεί αρχικά να πραγματοποιηθεί σε ένα πιο αδρό επίπεδο (κορυφή πυραμίδας) και στη συνέχεια να προχωρήσει διαδοχικά σε πιο λεπτομερή επίπεδα (βάση). Αυτή η διαδικασία συντελεί, γενικά, στην εξασφάλιση κάθε φορά ικανοποιητικών αρχικών τιμών για την αναζήτηση στο επόμενο επίπεδο, άρα και στην επιτάχυνση της διαδικασίας. Οι πυραμίδες εικόνων είναι, γενικά, χρήσιμο εργαλείο στον “ιεραρχικό” προσδιορισμό ομολογιών. Είναι δυνατόν, όμως, να χρησιμοποιηθούν και με διαφορετικό τρόπο, δηλαδή με ταυτόχρονη συμμετοχή δεδομένων από όλα τα επίπεδα της πυραμίδας.

Τέλος, υπενθυμίζεται ότι όλες οι τεχνικές ψηφιακής συνταύτισης εικόνας που εφαρμόστηκαν εδώ αναφέρονται σε δύο μόνο εικόνες του αντικειμένου (stereo matching). Είναι προφανές ότι αναγκαία προϋπόθεση για την συνταύτιση ομόλογων σημείων είναι η εμφάνιση του υπό εξέταση σημείου και στις δύο εικόνες (αναφοράς και αναζήτησης). Αυτό βέβαια δεν είναι πάντοτε εφικτό, καθώς σε κάθε σκηνή είναι πιθανό να υπάρχουν πολλές αποκρύψεις. Ως περιοχές αποκρύψεων της εικόνας χαρακτηρίζονται ομάδες εικονοψηφίδων, χωρικά συνεκτικές, οι οποίες εμφανίζονται σε μια μόνο από τις δυο εικόνες του ζεύγους και υποδηλώνουν ασυνέχειες βάθους. Φυσικά, για τα σημεία που βρίσκονται σε περιοχές αποκρύψεων είναι αδύνατος ο προσδιορισμός συντεταγμένων στο χώρο. Αυτό έχει ως συνέπεια είτε εσφαλμένες αντιστοιχίσεις σημείων και χονδροειδή σφάλματα είτε την παρουσία “κενών” στο 3D μοντέλο του αντικειμένου (τα οποία προκύπτουν πχ. με βάση το κριτήριο της αμφίδρομης συμβατότητας). Έτσι, σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν διαφορετικές λήψεις μιας σκηνής/αντικειμένου υπάρχει η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί η διαδικασία συνταύτισης σε περισσότερες από δύο εικόνες. Και τούτο μπορεί να γίνει είτε με συνδυασμό περισσότερων διεικονικών συνταυτίσεων είτε όμως και με απευθείας πολυεικονική συνταύτιση. Αυτή η περίσσεια δεδομένων μπορεί, θεωρητικά τουλάχιστον, τόσο να διορθώσει χονδροειδή σφάλματα όσο και να συμπληρώσει κενά, επιτρέποντας τελικά την παραγωγή ενός πλήρους 3D μοντέλου. Είναι σαφές, όμως, ότι τέτοιοι αλγόριθμοι είναι πολύ συνθετότεροι από εκείνους που συντάχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Βιβλιογραφία

- Αδάμ Κ., 2011. *Γεωμετρία του Στερεοζεύγους από Βαθμονομημένες και από Μη Βαθμονομημένες Μηχανές*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Banks J., 2001. Quantitative evaluation of matching methods and validity measures for stereo vision. *International Journal of Robotics Research*, 20(7), pp. 512-532.
- 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.
- Bobick A.F., Intille S.S., 1999. Large occlusion stereo. *International Journal of Computer Vision*, 33(3), pp. 181-200.
- Brown M., Burschka D., Hager G., 2003. Advances in computational stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(8), pp. 993-1008.
- Fusiello A., Roberto V., Trucco E., 1997. Efficient stereo with multiple windowing. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 858-863.
- Heipke C., 1992. Overview of image matching techniques. *OEEPE Workshop on Application of Digital Photogrammetric Workstations*, Lausanne, pp. 173-191.
- Hirschmüller H., Scharstein D., 2009. Evaluation of stereo matching costs on images with radiometric differences. *IEEE Trans. on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 31(9), pp. 1582-1599.
- Θεοφάνους Α., 2004. *Ανάπτυξη Προγράμματος για την Επιπολική Επανασύσταση Στερεοζεύγους*. Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Τοπογραφίας, Τ.Ε.Ι. Αθήνας
- Καλησπεράκης Η., 2010. *Η Επιπολική Γεωμετρία στον Προβολικό και τον Ευκλείδειο Χώρο*. Διδακτορική διατριβή, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Καρφής, 2009. *Διερεύνηση Φωτογραμμετρικών Αυτοματισμών με Χρήση της Επιπολικής Γεωμετρίας*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ
- Kraus, 2003. *Φωτογραμμετρία*. Τόμος 1, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε.
- Middlebury College Stereo Datasets. URL: <http://vision.middlebury.edu/stereo/>
- Πέτσα, 2003. *Θεμελιώδεις Έννοιες της Φωτογραμμετρίας*. Σπουδαστικές Σημειώσεις, Τμήμα Τοπογραφίας, Τ.Ε.Ι. Αθήνας.
- Schenk T., 1999. *Digital Photogrammetry*. TerraScience, vol. 1.
- Stentoumis C., Grammatikopoulos L., Kalisperakis I., Karras G., 2012. Implementing an adaptive approach for dense stereo-matching. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 38(5), pp. 309-314

Strecha C., von Hansen W., van Gool L., Fua P., Thoennessen U., 2008. On benchmarking camera calibration and multi-view stereo for high resolution imagery. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1–8.

Szeliski R., Scharstein D., 2004. Sampling the disparity space image. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(3):419–425.

Szeliski R., 2010. *Computer Vision: Algorithms and Applications* (draft). Springer.
<http://szeliski.org/Book/>.

Φλωρίδη Β., 2013. *Αυτόματος Σχετικός Προσανατολισμός Στερεοζεύγους Αεροφωτογραφιών και Δημιουργία Επιπολικών Εικόνων*. Θέμα Μαθήματος “Μεγάλες Θερινές Ασκήσεις Φωτογραμμετρίας”, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Zabih R., Woodfill J., 1994. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence. *European Conference on Computer Vision*, pp. 151-158.