

*Τμηματοποίηση εικόνων από χαρακτηριστικά
χρώματος και υφής με χρήση στατιστικών
μοντέλων και μεθόδων ΜΔΕ*

Ευτύχης Δ. Σηφάκης

Τεχνική αναφορά
CSD-TR-2000-01

13 Ιουλίου 2000

*Image segmentation by color and texture
features using statistical models and
PDE methods*

Eftychis D. Sifakis

Technical Report
CSD-TR-2000-01

13th July 2000

Περίληψη

Στην αναφορά αυτή παρουσιάζεται η μελέτη και υλοποίηση ενός συστήματος τμηματοποίησης εικόνων το οποίο βασίζεται στην από κοινού αξιοποίηση χαρακτηριστικών φωτεινότητας, χρώματος και υφής. Ως χαρακτηριστικά φωτεινότητας και χρώματος χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα κανονικοποιημένα ιστογράμματα, ενώ ως χαρακτηριστικά υφής χρησιμοποιούνται οι διασπορές των συνιστωσών της ανάλυσης Discrete Wavelet Frames της εικόνας εισόδου.

Για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών των πρότυπων κλάσεων εφαρμόζεται μία τεχνική ιεραρχικής ομαδοποίησης σε τετράγωνα μπλοκ της εικόνας. Μετά από τη στατιστική μοντελοποίηση των δεδομένων, η μετρική Bhattacharya χρησιμοποιείται για την κατάταξη με μεγάλη εμπιστοσύνη ενός υποσυνόλου της εικόνας στις κλάσεις που έχουν εξαχθεί. Ο βασισμένος σε τεχνικές επιπέδων στάθμης (level sets) αλγόριθμος *Multi-Label Fast Marching* χρησιμοποιείται για την διάδοση των αρχικών αποφάσεων κατάταξης στο σύνολο της εικόνας.

Abstract

This report presents the design and implementation of an image segmentation system based on the joint usage of *intensity*, *color* and *texture* features. Intensity and color features consist of the respective normalized local histograms, while the local variances of the Discrete Wavelet Frames analysis components are used as the texture descriptors.

A hierarchical clustering technique is applied on square image blocks to estimate the features of the prototype classes. Following the statistical modeling of the corresponding features, the Bhattacharya metric is used to yield high confidence classifications of image pixels into the extracted classes. The level set based *Multi-Label Fast Marching* algorithm is used for the propagation of initial classification decisions towards the rest of the image.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καυθηγητή μου κ. Γιώργο Τζιρίτα για την πολύτιμη του βοήθεια και υποστήριξη, τόσο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας όσο και καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Η τμηματοποίηση αποτελεί βασικό τμήμα πολλών μεθόδων ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνων. Συστήματα αναγνώρισης προτύπων, παρακολούθησης αντικειμένων και κωδικοποίησης ακολουθιών εικόνων βασίζονται στην τμηματοποίηση είτε ως προαπαιτούμενο ή ως συμπλήρωμα της υλοποιούμενης μεθόδολογίας. Μέθοδοι τμηματοποίησης που απαντούν στη βιβλιογραφία παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία στα επιμέρους χαρακτηριστικά που αξιοποιούν, στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, στην ανοχή στο θόρυβο αλλά και στην αλγορίθμική τους πολυπλοκότητα.

Η χρήση χαρακτηριστικών υφής ή χρωματικών δομών για τμηματοποίηση εικόνων παρουσιάζει μία εγγενή δυσκολία καθώς οι ασάφειες, ακόμα και σε επίπεδο αντίληψης, είναι κατά κανόνα πολλαπλάσιες αυτών που παρατηρούνται σε απλές εικόνες φωτεινότητας, όπου τα διαφορετικά αντικείμενα χαρακτηρίζονται από μία χρωματική ομοιομορφία. Η ποικιλία των φορμαλισμών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή τέτοιων χαρακτηριστικών είναι ενδεικτική των περιορισμών που φέρουν τα αντίστοιχα μοντέλα και της μη καθολικής τους ισχύος.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην τμηματοποίηση εικόνων όπου οι διαφορετικές κλάσεις διακρίνονται ικανοποιητικά με μέτρο την κατανομή φωτεινότητας και χρώματος και την περιεχόμενη υφή. Εξετάζεται τόσο η περίπτωση της τμηματοποίησης υπό επίβλεψη, όπου ο χρήστης παρέχει στο σύστημα υποδείγματα των διαφορετικών κλάσεων που αναζητούνται σε μία εικόνα, όσο και της τμηματοποίησης χωρίς επίβλεψη, όπου η μόνη παρεχόμενη πληροφορία είναι ο αριθμός των διαφορετικών κλάσεων που απαρτίζουν μία δεδομένη εικόνα εισόδου. Βασικές επιδιώξεις της υλοποίησης είναι η καλή ανοχή στο θόρυβο χωρίς να ψυσιάζεται η ακρίβεια του εντοπισμού των ορίων των κλάσεων και η κατά το δυνατό αποφυγή εμφάνισης παρασιτικών ανιχνεύσεων.

1.2 Δομή της παρουσίασης

Το υπόλοιπο της παρούσας αναφοράς θα ακολουθήσει την παρακάτω θεματική διάρθρωση:

Κεφάλαιο 2 Δίδεται ο ακριβής ορισμός των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την πληροφορία υφής, χρώματος και φωτεινότητας σε μία εικόνα. Εξετάζονται τα στατιστικά μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών αυτών και ορίζονται μέτρα ομοιότητας μεταξύ χαρακτηριστικών διαχριτών αντικειμένων.

Κεφάλαιο 3 Επιχειρείται μία ανασκόπηση των βασισμένων σε φορμαλισμούς μερικών διαφορικών εξισώσεων θεωριών επιπέδων στάθμης και περιγράφεται η λειτουργικότητα των σχετικών αλγορίθμων. Παρουσιάζεται εκτενώς μία επέκταση των κλασσικών μεθόδων που οδηγεί στον αλγόριθμο *Multi-Label Fast Marching* και εξετάζονται τα ιδιαίτερα του χαρακτηριστικά για εφαρμογές τμηματοποίησης.

Κεφάλαιο 4 Παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η αλγορίθμική διάρθρωση της ολοκληρωμένης εφαρμογής τμηματοποίησης που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και επεξηγούνται οι επιλογές που έγιναν κατά το σχεδιασμό και την υλοποίηση του συστήματος.

Κεφάλαιο 5 Δίδονται ολοκληρωμένα αποτελέσματα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την τμηματοποίηση χωρίς επίβλεψη ικανού αριθμού πραγματικών σκηνών, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντική ποικιλία στην διακριτότητα των διαφόρων τμημάτων και στην ισχύ των επιμέρους χαρακτηριστικών που τα διακρίνουν.

Κεφάλαιο 6 Σχολιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου, παρουσιάζονται οι περιορισμοί και τα περιθώρια εξέλιξης των σχετικών αλγορίθμων και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα της υλοποίησης.

Κεφάλαιο 2

Χαρακτηριστικά υφής, χρώματος και φωτεινότητας

2.1 Γενικά

Η μοντελοποίηση χαρακτηριστικών εικόνων όπως η υφή και το χρωματικό περιεχόμενο παρουσιάζει μία εγγενή δυσκολία, η οποία πηγάζει τόσο από την έλλειψη αυστηρού ορισμού για τις έννοιες αυτές όσο και από την ανεπαρκή γνώση μας για τη συσχέτισή τους με την αντίληψη. Επιπλέον, υπάρχουν και πρακτικές δυσκολίες που σχετίζονται με την πολυπλοκότητα του χώρου που ορίζουν τα χαρακτηριστικά αυτά, ο οποίος συχνά είναι μη ευκλείδειος και, σε κάποιες περιπτώσεις, ενδεχομένως ούτε καν γραμμικός.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκεκριμένα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή των χαρακτηριστικών υφής, χρώματος και φωτεινότητας. Ως χαρακτηριστικά υφής χρησιμοποιήθηκαν οι διασπορές διακριτών συχνοτικών συνιστώσων της εικόνας, ενώ ως χαρακτηριστικά υφής και χρώματος τα αντίστοιχα κανονικοποιημένα ιστογράμματα. Επίσης περιγράφεται η μετρική Bhattacharya ως ένα μέτρο ανομοιότητας μεταξύ τμημάτων της εικόνας.

Η ενοποίηση των χαρακτηριστικών υφής και χρώματος έχει επιχειρηθεί στο [2] από το οποίο η παρούσα μεθοδολογία δανείζεται μέρος της προδιαγραφής των χαρακτηριστικών. Ως εξειδίκευση της παραπάνω μεθοδολογίας η παρούσα υλοποίηση επιλέγει την αντιμετώπιση των χαρακτηριστικών υφής και χρώματος χωρίς την υιοθέτηση κάποιου μοντέλου, καθώς εκτιμάται ότι οι κατανομές των χρωματικών και φωτεινών μοτίβων συχνά απέχουν κατά πολύ από πρότυπες κατανομές που προσφέρουν μία εύχρηστη διατύπωση των μέτρων ανομοιογένειας.

2.2 Περιγραφή χαρακτηριστικών

2.2.1 Χαρακτηριστικά υφής

Για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών υφής χρησιμοποιείται η ανάλυση σε *Discrete Wavelet Frames (DWF)* [6]. Η αρχική μονοχρωματική εικόνα αναλύεται σε συνιστώσες του ίδιου μεγέθους που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων.

Για το διαχωρισμό των συνιστωσών της ανάλυσης DWF χρησιμοποιείται ένα βαθυπερατό φίλτρο $H(z)$ και το συζυγές του υψηπερατό φίλτρο $G(z)$. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιούνται τα διωνυμικά φίλτρα τετάρτης τάξεως:

$$H(z) = \frac{3}{8} + \frac{1}{4}(z + z^{-1}) + \frac{1}{16}(z + z^{-1}) \quad (2.1)$$

$$G(z) = zH(-z^{-1}) \quad (2.2)$$

Τα παραπάνω φίλτρα χρησιμοποιούνται ως προτότυπα για τη δημιουργία του πλήρους συνόλου των φίλτρων της ανάλυσης DWF σύμφωνα με το αναδρομικό σχήμα:

$$H_{i+1}(z) = H(z^{2^i})H_i(z) \quad (2.3)$$

$$G_{i+1}(z) = G(z^{2^i})H_i(z) \quad (2.4)$$

Η εφαρμογή αυτών των φίλτρων στο σήμα εισόδου έχει ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό του σε συνιστώσες που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η αποτύπωση σημαντικών χαρακτηριστικών υφής, όπως τα περιοδικά μοτίβα, σε διαφορετικές κλίμακες. Στην περίπτωση ιδανικών προτοτύπων φίλτρων, οι συνιστώσες της ανάλυσης DWF είναι ασυσχέτιστες. Τα φίλτρα που δίδονται στις σχέσεις (2.1,2.2) έχουν αρκετά μικρή συχνοτική επικάλυψη, προσεγγίζοντας ικανοποιητικά την προδιαγραφή των ασυσχέτιστων συνιστωσών της ανάλυσης DWF. Επίσης, η ανάλυση δεν απαιτεί υποδειγματοληψία του σήματος, παρέχοντας συνιστώσες του ίδιου μεγέθους με την είσοδο, και ιστώντας σταθερότερη την εξαγωγή στατιστικών μέτρων.

Το παραπάνω σχήμα ανάλυσης επεκτείνεται στις δύο διαστάσεις, όπου τα αντίστοιχα φίλτρα δίδονται ως το γινόμενο Kronecker ανά δύο των μονοδιάστατων φίλτρων, για κάθε επίπεδο ανάλυσης. Το αποτέλεσμα είναι τρεις συνιστώσες για κάθε επίπεδο ανάλυσης (λεπτομέρειες) και η συνιστώσα που αντιστοιχεί στις χαμηλές συχνότητες του τελευταίου επιπέδου ανάλυσης (προσέγγιση).

Ως χαρακτηριστικά υφής λαμβάνονται οι διασπορές των $3N$ συνιστωσών που αντιστοιχούν στις λεπτομέρειες των N επιπέδων ανάλυσης. Λόγω της φύσης των φίλτρων οι συνιστώσες αυτές έχουν μηδενική μέση τιμή. Η προσέγγιση της ανάλυσης DWF χαρακτηρίζεται από την μέση τιμή της και τη διασπορά. Ωστόσο, στην παρούσα υλοποίηση αυτή η συνιστώσα δε συνυπολογίζεται στα χαρακτηριστικά υφής, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγαλύτερη αξιοπιστία στο πλαίσιο των χαρακτηριστικών φωτεινότητας, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.2.3.

2.2.2 Χαρακτηριστικά χρώματος

Για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών χρώματος χρησιμοποιείται ο χώρος χρωμάτων *Lab*. Είναι γνωστό ότι ο χώρος αυτός είναι κατά προσέγγιση γραμμικός ως προς την αντίληψη των χρωμάτων, συνεπώς η ευκλείδεια απόσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση χρωματικών αποστάσεων. Στη συγχεκτικότητα της ανεξαρτησίας από τη συσκευή απεικόνισης. Μετά το χρωματικό μετασχηματισμό της εικόνας εισόδου, τα χαρακτηριστικά χρώματος εξάγονται από τα ζεύγη τιμών (a, b) της εικόνας, δεδομένου ότι η συνιστώσα L περιέχει πληροφορία φωτεινότητας, η οποία στην παρούσα υλοποίηση εξετάζεται ανεξάρτητα.

Αρχικά οι N διαφορετικές χρωματικές τιμές $\{\mathcal{C}_i = (a_i, b_i)\}_{i=1}^N$ κβαντίζονται ώστε να προκύψουν K τιμές (όπου $K < N$). Αρχικά επιλέγονται K το πλήθος χρώματα, τέτοια ώστε να βρίσκονται κατά το δυνατόν σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, με βάση την αναδρομική σχέση:

$$\mathcal{Q}_{i+1} = \arg \max_{\mathcal{C}_j} \min_{\mathcal{C}_k \in \{\mathcal{Q}_1, \dots, \mathcal{Q}_i\}} d(\mathcal{C}_j, \mathcal{C}_k) \quad (2.5)$$

όπου $d(\cdot, \cdot)$ η ευκλείδεια απόσταση. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος *K-means* στα χρώματα $\{\mathcal{C}_i\}_{i=1}^N$ για την ομαδοποίησή τους σε K χρώματα, βάσει της ευκλείδειας απόστασης και χρησιμοποιώντας ως αρχικοποίηση τις τιμές $\{\mathcal{Q}_i\}_{i=1}^K$. Ο κβαντισμός αποσκοπεί κατά κύριο λόγο στη συμπύκνωση του χρωματικού περιεχομένου, ιδιότητα αναγκαία για λόγους στατιστικής ευρωστίας, αλλά και στη μείωση του υπολογιστικού κόστους της μετέπειτα επεξεργασίας.

Η τελική μορφή των χαρακτηριστικών χρώματος ενός τμήματος της εικόνας είναι το κανονικοποιημένο ιστόγραμμα των κβαντισμένων χρωματικών ζευγών (a, b) που παρατηρούνται στα σημεία του.

2.2.3 Χαρακτηριστικά φωτεινότητας

Για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών φωτεινότητας η αντίστοιχη μονοχρωματική εικόνα υφίσταται κβαντισμό με εφαρμογή βέλτιστου βαθμωτού κβαντισμού για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.2.2. Δεδομένου του μονοδιάστατου χαρακτήρα της πληροφορίας φωτεινότητας, σε μερικές περιπτώσεις είναι επιθυμητό να προηγηθεί μία εξομάλυνση του ιστογράμματος κάθε περιοχής για την οποία αναζητούμε τα χαρακτηριστικά φωτεινότητας με ένα φίλτρο Gauss και το νέο ιστόγραμμα να αναχθεί εκ των υστέρων στις κβαντισμένες τιμές που προέκυψαν από το σύνολο της εικόνας. Επισημαίνεται ότι παρόμοια διεργασία δεν χρησιμοποιείται στην περίπτωση των χρωματικών χαρακτηριστικών λόγω του αυξημένου κόστους που έχει η επεξεργασία του διδιάστατου ιστογράμματος.

Οι τελικά χαρακτηριστικά φωτεινότητας χρησιμοποιούνται τα κανονικοποιημένα ιστογράμματα των κβαντισμένων φωτεινότητων. Επισημαίνεται ότι, πέρα από τη διαφορετική επεξεργασία που ακολουθείται στην εξαγωγή τους,

τα χαρακτηριστικά χρώματος και φωτεινότητας χρησιμοποιούνται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο για τη μετέπειτα επεξεργασία.

2.2.4 Συνδυασμένη χρήση χαρακτηριστικών

Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται έχει εν γένει σχεδιαστεί για έγχρωμες εικόνες. Ως συνέπεια αυτού, μόνο τα χαρακτηριστικά χρώματος είναι απόλυτα ορισμένα, ως τα κανονικοποιημένα ιστογράμματα των κβαντισμένων τιμών (a, b) του μετασχηματισμού στον χώρο Lab της αρχικής εικόνας. Τα χαρακτηριστικά υφής και φωτεινότητας έχουν οριστεί αναφορικά με μία μονοχρωματική εικόνα εισόδου, της οποίας η προέλευση είναι δυνατό να ποικίλει, ανάλογα με τις επιλογές της υλοποίησης.

Τα χαρακτηριστικά υφής είναι δυνατό να εξαχθούν από την εικόνα φωτεινής έντασης (*intensity*) της αρχικής τριχρωματικής εικόνας. Η φωτεινή ένταση δίδεται ως ένα σταθμισμένο άθροισμα των χρωματικών συνιστωσών R, G, B σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{intensity}(x, y) = 0.299I_R(x, y) + 0.587I_G(x, y) + 0.114I_B(x, y) \quad (2.6)$$

Η χρήση της φωτεινής έντασης για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών υφής είναι μία λογική προσέγγιση, καθώς η εικόνα φωτεινής έντασης περιέχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, σχεδόν το σύνολο των περιοδικών χαρακτηριστικών που η ανάλυση DWF έχει σχεδιαστεί να αποτυπώνει.

Περιπτώσεις όπου περιοδικά χαρακτηριστικά απαντούν μόνο στις επιμέρους χρωματικές συνιστώσες, αλλά όχι τόσο εμφανώς στην εικόνα φωτεινής έντασης θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με την εξαγωγή τριών συνόλων χαρακτηριστικών υφής, χρησιμοποιώντας αντίστοιχα ως είσοδο της ανάλυσης τις τρεις χρωματικές συνιστώσες ενός κατάλληλου χώρου χρωμάτων. Αυτή η προσέγγιση δεν εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας υλοποίησης καθώς κρίθηκε ότι η αναμενόμενη ωφέλεια θα ήταν κατά πολύ μικρότερη της αύξησης της πολυπλοκότητας των χαρακτηριστικών και λόγω της ουσιώδους εξάρτησης που θα είχαν από την επιλογή του χώρου χρωμάτων τα χαρακτηριστικά υφής.

Πρέπει να επισημανθεί ότι και οι δύο προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν έχουν, σε διαφορετικό βαθμό, το πρόβλημα της επικάλυψης των δεδομένων εισόδου με αυτά που χρησιμοποιούνται για τα χαρακτηριστικά χρώματος. Η φυσιολογική λύση θα ήταν να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών υφής η συνιστώσα L (*luminance*) του μετασχηματισμού Lab. Αυτή η προσέγγιση λύνει το πρόβλημα της επικάλυψης των δεδομένων εισόδου, χωρίς ωστόσο να εγγυάται την ανεξαρτησία τους. Ωστόσο, ο χώρος χρωμάτων Lab συχνά προκαλεί υπερβολική συμπύκνωση των ορατών χρωμάτων γύρω από μικρά διαστήματα ως προς τη συνιστώσα L και επίσης, κατά κανόνα, διαισθητικά δεν υπερτερεί από την εικόνα φωτεινής έντασης ως μέτρο φωτεινότητας. Στην παρούσα υλοποίηση η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιήθηκε ως δεύτερη επιλογή έναντι της χρήσης της φωτεινής έντασης για λόγους απλότητας αλλά και βάσει

της εμπειρικής παρατήρησης ότι το χρωματικό και το συχνοτικό περιεχόμενο των εικόνων φαίνονται να είναι ασυσχέτιστα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων.

Τα χαρακτηριστικά φωτεινότητας είναι δυνατόν να εξαχθούν τόσο από την εικόνα φωτεινής έντασης, όσο και από τη συνιστώσα L του χώρου Lab, σύμφωνα με τα επιχειρήματα που προτάθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, στην περίπτωση ταυτόχρονης χρήσης χαρακτηριστικών υφής και φωτεινότητας, υπάρχει το ζήτημα της επικάλυψης των αντίστοιχων δεδομένων εισόδου. Αυτό μπορεί να λυθεί αν τα χαρακτηριστικά φωτεινότητας εξαχθούν από την συνιστώσα προσέγγισης της ανάλυσης DWF. Σε αυτή την περίπτωση εγγυάται η διάκριση των δεδομένων εισόδου των διαφόρων χαρακτηριστικών άλλα και η στατιστική ανεξαρτησία από τα χαρακτηριστικά υφής. Η προσέγγιση αυτή προβλέφθηκε στην παρούσα υλοποίηση, αλλά κατά κανόνα δεν χρησιμοποιήθηκε, λόγω της υπερβολικής εξομάλυνσης που παρουσιάζει η συνιστώσα προσέγγισης, η οποία συχνά εκμηδενίζει τη διακριτική ικανότητα των χαρακτηριστικών φωτεινότητας.

2.3 Μέτρα ομοιότητας

Οι αλγόριθμοι τμηματοποίησης που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της παρούσας μεθόδολογίας βασίζονται στην ύπαρξη ενός μέτρου ομοιότητας ή απόλυτα συμμετρικά μίας συνάρτησης απόστασης η οποία αξιοποιείται ως μέτρο ανομοιότητας. Απαιτείται τόσο μία απόσταση μεταξύ χαρακτηριστικών τμημάτων της εικόνας, όσο και μεταξύ ενός σημείου και των χαρακτηριστικών ενός πρότυπου τμήματος. Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη υλοποίηση, η απόσταση Bhattacharya μεταξύ τμημάτων της εικόνας και ο αρνητικός λογάριθμος της πιθανοφάνειας μεταξύ σημείου και τμήματος της εικόνας, παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Απόσταση τμημάτων της εικόνας Η απόσταση Bhattacharya χρησιμοποιείται ως μέτρο ανομοιότητας μεταξύ των χαρακτηριστικών που εξάγονται από δύο τμήματα της εικόνας. Η μετρική αυτή εκφράζει την ανομοιότητα μεταξύ δύο κατανομών πιθανοτήτων. Στην περίπτωση συνεχών κατανομών η αναλυτική της έκφραση είναι:

$$d_B(p_1, p_2) = -\ln \left(\int_x \sqrt{p_1(x)p_2(x)} dx \right) \quad (2.7)$$

όπου οι p_1 και p_2 είναι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της διανυσματικής μεταβλητής $x \in R^N$. Στην περίπτωση διακριτών κατανομών η απόσταση παίρνει τη μορφή:

$$d_B(p_1, p_2) = -\ln \left(\sum_i \sqrt{p_1(i)p_2(i)} \right) \quad (2.8)$$

όπου ο δείκτης i απαριθμεί τις διαφορετικές τιμές της διακριτής μεταβλητής.

Στην περίπτωση των χαρακτηριστικών υφής η αποδοχή ενός κατάλληλου μοντέλου για την περιγραφή των χαρακτηριστικών οδηγεί σε μία απλούστερη, αλλά και στατιστικά σταθερότερη, έκφραση για την απόσταση της εξίσωσης (2.7). Στη μεθοδολογία που παρουσιάζεται επελέγη το μοντέλο της κατανομής Gauss για την περιγραφή των χαρακτηριστικών υφής:

$$p^{(i)}(x) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}} \quad (2.9)$$

όπου $p^{(i)}$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την i -στή συνιστώσα της ανάλυσης DWF και σ_i η αντίστοιχη διασπορά. Με δεδομένη την ανεξαρτησία των χαρακτηριστικών υφής, η εξίσωση (2.7) παίρνει τη μορφή:

$$d_B(\mathcal{C}_i, \mathcal{C}_j) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{3N} \ln \frac{\sigma_{k,i}^2 + \sigma_{k,j}^2}{2\sigma_{k,i}\sigma_{k,j}} \quad (2.10)$$

όπου $\sigma_{k,i}$ είναι η τυπική απόκλιση του k -στού χαρακτηριστικού του τμήματος \mathcal{C}_i και N ο αριθμός των επιπέδων της ανάλυσης DWF.

Για τα χαρακτηριστικά χρώματος και φωτεινότητας δεν έχει υιοθετηθεί κάποιο μοντέλο, αλλά η απόσταση δύο τμημάτων υπολογίζεται άμεσα από τη σχέση (2.8). Σημειώνεται ότι λόγω του κβαντισμού των τιμών χρώματος και φωτεινότητας ο αναλυτικός υπολογισμός των αποστάσεων καθίσταται υπολογιστικά εφικτός.

Η απόσταση δύο τμημάτων της εικόνας βάσει του συνδυασμού χαρακτηριστικών υφής, χρώματος και φωτεινότητας δίδεται, με βάση την υπόθεση της ανεξαρτησίας των χαρακτηριστικών και την έκφραση της απόστασης Bhattacharya, ως το άθροισμα των αποστάσεων που οφείλονται στα επιμέρους χαρακτηριστικά:

$$d_B(\mathcal{C}_i, \mathcal{C}_j) = d_{B,texture}(\mathcal{C}_i, \mathcal{C}_j) + d_{B,color}(\mathcal{C}_i, \mathcal{C}_j) + d_{B,intensity}(\mathcal{C}_i, \mathcal{C}_j) \quad (2.11)$$

Απόσταση σημείου από τμήμα της εικόνας Για τη μέτρηση της απόστασης ενός σημείου της εικόνας από μία πρότυπη κλάση χαρακτηριστικών χρησιμοποιείται ως απόσταση ο αρνητικός λογάριθμος της πιθανοφάνειας των χαρακτηριστικών του σημείου ως προς την κατανομή της κλάσης. Αυτός ο φορμαλισμός οδηγεί στις παρακάτω σχέσεις για την απόσταση του σημείου s από την κλάση \mathcal{C}_l :

$$d_{l,texture}(x(s)) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{3N} \left(\frac{x_{i,texture}^2(s)}{\sigma_{i,l}^2} + \ln \sigma_{i,l}^2 \right) + \frac{3N}{2} \ln(2\pi) \quad (2.12)$$

$$d_{l,color}(x(s)) = -\ln p_{l,color}(x_{color}(s)) \quad (2.13)$$

$$d_{l,intensity}(x(s)) = -\ln p_{l,intensity}(x_{intensity}(s)) \quad (2.14)$$

όπου $x(s)$ το διάνυσμα χαρακτηριστικών του σημείου s . Επισημαίνεται ότι στις σχέσεις (2.13,2.14) έχουν χρησιμοποιηθεί οι εμπειρικές κατανομές χρώματος και φωτεινότητας που προκύπτουν από τα αντίστοιχα ιστογράμματα.

Όπως και στην περίπτωση της απόστασης Bhattacharya η τελική απόσταση δίδεται ως το άθροισμα των αποστάσεων που οφείλονται στα επιμέρους χαρακτηριστικά:

$$d_l(x(s)) = d_{l,texture}(x(s)) + d_{l,color}(x(s)) + d_{l,intensity}(x(s)) \quad (2.15)$$

Κεφάλαιο 3

Αλγόριθμοι επιπέδων στάθμης (level sets)

3.1 Βασική θεωρία

Ο φορμαλισμός των επιπέδων στάθμης (*level sets*) που εισήγαγαν οι Osher και Sethian [3] επιτρέπει την προσομοίωση και παρακολούθηση της εξέλιξης μίας μεταλλασσόμενης καμπύλης του επιπέδου. Η καμπύλη κινείται υπό την επίδραση δυνάμεων που επάγουν κατά μήκος της ένα πεδίο ταχύτητας για την κίνηση στην κάθετη προς αυτή κατεύθυνση. Πηγές του πεδίου ταχύτητας είναι δυνατόν να αποτελέσουν τοπικά χαρακτηριστικά της καμπύλης, όπως η καμπυλότητα και το κάθετο διάνυσμα, καθολικά χαρακτηριστικά της, όπως το μήκος και η περικλειόμενη επιφάνεια, ή και εξωτερικά χαρακτηριστικά, όπως οι ιδιότητες του χωρίου του επιπέδου ή της εικόνας που η καμπύλη περικλείει.

Η συνήθης αναπαράσταση μίας καμπύλης ως μία συνεχής διανυσματική συνάρτηση μίας βαθμωτής παραμέτρου $C(t)$ παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς, με βασικότερο την αδυναμία χειρισμού μεταλλάξεων της καμπύλης που έχουν ως συνέπεια μορφολογικές αλλαγές της, όπως διάσπαση και ένωση ανεξαρτήτων τμημάτων της. Ο φορμαλισμός που ακολουθείται στην θεωρία των επιπέδων στάθμης μοντελοποιεί μία υπερ-επιφάνεια με $N - 1$ βαθμούς ελευθερίας στον χώρο R^N ως ένα σύνολο στάθμης μίας συνάρτησης N μεταβλητών.

Έστω μία μεταβαλλόμενη στο χρόνο υπερ-επιφάνεια $\Gamma(t)$ διάστασης $N - 1$. Έστω η συνάρτηση $N + 1$ μεταβλητών $\phi(x, t)$, όπου $x \in R^N$ και $t \geq 0$, η οποία ικανοποιεί την αρχική συνθήκη:

$$\phi(x, t = 0) = \pm d \tag{3.1}$$

όπου d είναι η απόσταση του σημείου x από την επιφάνεια $\Gamma(t = 0)$, προσημασμένη θετικά ή αρνητικά αν το x είναι αντίστοιχα στο εξωτερικό ή εσωτερικό της επιφάνειας. Συνεπώς, η αρχική θέση της κινούμενης επιφάνειας δίδεται ως:

$$\Gamma(t = 0) = \{x | \phi(x, t = 0) = 0\} \tag{3.2}$$

Αποδεικνύεται ότι αν η συνάρτηση ϕ ικανοποιεί την εξαρτημένη από το χρόνο εξίσωση επιπέδων στάθμης:

$$\phi_t + F|\nabla\phi| = 0 \quad (3.3)$$

και την αρχική συνθήκη (3.1), όπου η κλίση στην παραπάνω μερική διαφορική εξίσωση λαμβάνεται μόνο προς τις χωρικές μεταβλητές, τότε οι διαδοχικές θέσεις της επιφάνειας $\Gamma(t)$ στο χρόνο, καθώς αυτή κινείται υπό την επίδραση της κάθετης ταχύτητας F , δίδονται από το σύνολο μηδενικής στάθμης της συνάρτησης ϕ , δηλαδή:

$$\Gamma(t_0) = \{x | \phi(x, t_0) = 0\} \quad (3.4)$$

Η εξίσωση (3.3) μπορεί να λυθεί αριθμητικά, με τη χρήση κεντρικών διαφορών για τις χωρικές παραγώγους και μονόπλευρης διαφοράς για τη χρονική παράγωγο. Συχνά η αρχική συνθήκη (3.1) καθιστά δυνατή την ύπαρξη μόνο ασθενών λύσεων, περίπτωση στην οποία είναι απαραίτητη η χρήση εναλλακτικών διακριτών προσεγγίσεων των παραγώγων κατά τρόπο ώστε να αντιμετωπίζονται τα ιδιόμορφα σημεία της λύσης της μερικής διαφορικής εξίσωσης. Επισημαίνεται, τέλος, ότι στην έκφραση της συνάρτησης ταχύτητας F είναι δυνατόν να συμμετέχουν τοπικές παράμετροι της κινούμενης καμπύλης, όπως η καμπυλότητα και το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα, οι οποίες δίδονται ως αλγεβρικές εκφράσεις των τιμών της συνάρτησης ϕ και των παραγώγων της.

Στην περίπτωση που η συνάρτηση ταχύτητας F διατηρεί σταθερό πρόσημο, η κίνηση της καμπύλης (ή γενικότερα της επιφάνειας) γίνεται μόνο προς μία κατεύθυνση. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να ορίσουμε μία συνάρτηση χρόνου άφιξης $T(x)$ ως τη μοναδική χρονική στιγμή κατά την οποία το σημείο x βρίσκεται στο μηδενικό σύνολο στάθμης της συνάρτησης ϕ . Δηλαδή:

$$T(x) = t_0 \Leftrightarrow \phi(x, t_0) = 0 \quad (3.5)$$

οπότε η θέση της κινούμενης καμπύλης δίδεται από τη σχέση:

$$\Gamma(t = t_0) = \{x | T(x) = t_0\} \quad (3.6)$$

Με τη χρήση αυτού του φορμαλισμού η εξίσωση (3.3) ανάγεται στην στατική εξίσωση επιπέδων στάθμης:

$$F|\nabla T| = 1 \quad (3.7)$$

η οποία υποδεικνύει ότι το μέτρο της κλίσης της συνάρτησης χρόνου άφιξης T , δηλαδή η παράγωγος στην κάθετη προς την επιφάνεια κατεύθυνση, είναι αντιστρόφως ανάλογο της ταχύτητας της κάθετης κίνησης. Η εξίσωση (3.7) επιδέχεται κατασκευαστική επίλυση, χωρίς να απαιτείται η χρονοβόρα διαδικασία της επαναληπτικής αριθμητικής προσέγγισης. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα της επίλυσης της εξίσωσης αυτής είναι της τάξης $n \log n$, όπου n το πλήθος των σημείων της εικόνας, με τη χρήση του αλγορίθμου *Fast Marching* [4]. Το αντίτυπο για την ιδιαίτερα μικρή αλγορίθμική πολυπλοκότητα είναι η εγγενής δυσκολία χρήσης τοπικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας στην έκφραση της ταχύτητας κίνησης.

3.2 Ο αλγόριθμος Multi-Label Fast Marching

Ο αλγόριθμος Fast Marching έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών τμηματοποίησης, στις οποίες η εξαιρετικά γρήγορη αλγόριθμική υλοποίηση που επιδέχεται έχει αποδόσει σημαντική μείωση στους απαιτούμενους χρόνους επεξεργασίας. Ωστόσο, στη συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών αυτών υπήρχε μία σαρής διάκριση των περιοχών προς τμηματοποίηση σε εσωτερικές και εξωτερικές του κινούμενου περιγράμματος. Έχει προταθεί η επέκταση του αλγορίθμου σε πολλαπλές περιοχές προς τμηματοποίηση μέσω της αντιστοίχισης διαφορετικών επιπέδων στάθμης στα σύνορα μεταξύ διαφορετικών ζευγών από περιοχές, ωστόσο αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει προβλήματα στις περιπτώσεις τριπλών σημείων που οδηγούν σε αστάθειες και δεν έχουν λυθεί με στέρεο και γενικό τρόπο για το σύνολο των εφαρμογών του αλγορίθμου.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελεί μία επέκταση του αλγορίθμου *Fast Marching* στην περίπτωση πολλαπλών περιοχών προς τμηματοποίηση. Ο νέος αλγόριθμος *Multi-Label Fast Marching*, ο οποίος περιγράφεται εκτενώς στο [5], είναι σε θέση να χειρίστει την τμηματοποίηση αυθαίρετου πλήθους περιοχών, μέσω της ανεξάρτητης παράλληλης κίνησης πολλαπλών κλάσεων από καμπύλες (ή γενικότερα επιφάνειες), ενδεχομένως με διαφορετικές παραμέτρους κίνησης για την κάθε κλάση. Επιπρόσθετα, το υπολογιστικό κόστος του νέου αλγορίθμου παραμένει στην ίδια τάξη πολυπλοκότητας με τον κλασικό αλγόριθμο *Fast Marching*, ανεξαρτήτως του πλήθους των περιοχών που συμμετέχουν στην τμηματοποίηση. Στη συνέχεια θα θεωρήσουμε την εφαρμογή του αλγορίθμου στο επίπεδο, δεδομένου ότι η προσέγγιση γενικεύεται κατά τετριμένο τρόπο και σε χώρους μεγαλύτερης διάστασης.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος απαιτεί τον προσδιορισμό ξένων ανά δύο υποσυνόλων της εικόνας, τα σύνορα των οποίων συνιστούν τις αρχικές θέσεις των καμπυλών που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση προς τμηματοποίηση. Επίσης απαιτείται ένα πεδίο ταχυτήτων για την κίνηση στην κάθετη κατεύθυνση των καμπυλών αυτών, το οποίο εν γένει είναι διαφορετικό για κάθε κλάση. Οι περιοχές που περικλείονται από τις καμπύλες κάθε κλάσης επεκτείνονται κατά ανταγωνιστικό τρόπο, ενώ όταν δύο καμπύλες που ανήκουν σε διαφορετικές κλάσεις βρευθούν σε επαφή κατά την κίνησή τους οι ταχύτητές του μηδενίζονται κατά μήκος των κοινών τους τμημάτων. Ο αλγόριθμος *Multi-Label Fast Marching* υπολογίζει κατασκευαστικά μία λύση της στατικής εξίσωσης επιπέδων στάθμης (3.7) σε κάθε υποσύνολο της εικόνας που μετά τη διάδοση των διαφορετικών κλάσεων κατατάσσεται σε μία από αυτές. Επιπλέον παράγεται ένας χάρτης με τις τελικές κατατάξεις των σημείων της εικόνας στις διαφορετικές κλάσεις διάδοσης που προβλέφθηκαν, ο οποίος αποτελεί το αποτέλεσμα της τμηματοποίησης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ενώ ο κλασικός αλγόριθμος *Fast Marching* απαιτεί για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος τμηματοποίησης την επιλογή ενός κατάλληλου σημείου στο χρόνο στο οποίο η θέση της επιφάνειας διαχωρίζει τα δύο τμήματα, στην περίπτωση του προτεινόμενου

αλγορίθμου δεν υπάρχει ανάγκη για μία τέτοια επιλογή καθώς η τελική κατάταξη των σημείων της εικόνας στις διάφορες κλάσεις προσδιορίζεται με τρόπο απόλυτα αιτιοχρατικό και αυτόματο.

Η αρχή λειτουργίας του νέου αλγορίθμου βασίζεται στη διαπίστωση ότι το επιθυμητό αποτέλεσμα θα ήταν δυνατό να παραχθεί από την ανεξάρτητη εκτέλεση του αλγορίθμου Fast Marching για κάθε κλάση ξεχωριστά, με την αντίστοιχη αρχικοποίηση και συνάρτηση ταχύτητας. Μετά την ολοκλήρωση των επιμέρους διαδόσεων, κάθε σημείο της εικόνας θα αποδιδόταν στην κλάση της οποίας το κινούμενο περίγραμμα πέρασε από την εν λόγω θέση στον ελάχιστο χρόνο. Ωστόσο, η μεθοδολογία αυτή έχει δύο σημαντικά μειονεκτήματα. Ο χρόνος υπολογισμού είναι ανάλογος του αριθμού των διαφορετικών κλάσεων, καθώς όλες οι εκτελέσεις του αλγορίθμου θα χρειαστεί να σαρώσουν το συμπλήρωμα της ένωσης των αρχικών περιοχών. Επίσης, η ανεξάρτητη διάδοση σε συνδυασμό με τις διαφορετικές εκφράσεις ταχύτητας είναι δυνατόν να οδηγήσει σε μορφολογική ασυνέπεια του αποτελέσματος με την αρχικοποίηση, σε περίπτωση που μία κλάση με υψηλή ταχύτητα διάδοσης καταφέρει να αφιχθεί πρώτη σε μία περιοχή της εικόνας από μία κλάση με χαμηλότερη ταχύτητα, αν και λόγω της αρχικοποίησης η περιοχή αυτή περικλείεται από τη δεύτερη κλάση.

Ο αλγόριθμος Multi-Label Fast Marching αντιμετωπίζει αυτά τα προβλήματα, παρέχοντας μία υλοποίηση με πολυπλοκότητα $n \log n$ επί του αριθμού των σημείων της εικόνας που δεν έχουν αποδοθεί σε μία από τις κλάσεις στην αρχική τους μορφή, ανεξαρτήτως του αριθμού των διαφορετικών κλάσεων που ψεωρούνται, και εγγυόμενος ότι η μορφολογική πολυπλοκότητα του αποτελέσματος δεν θα υπερβεί αυτή της αρχικοποίησης και ειδικότερα ότι δύο κλάσεις που είναι στην αρχικοποίηση διαχωρίσιμες μέσω μίας συνεχούς καμπύλης συγκλίνουν, με το πέρας της διάδοσης, επίσης σε ένα σύνορο αποτελούμενο από μία μοναδική καμπύλη. Η συμβολική περιγραφή του αλγορίθμου δίδεται παρακάτω:

*Αρχικοποίησε τη συνάρτηση χρόνων άφιξης
Αρχικοποίησε τις λιστες υποψηφιοτήτων
εφόσον (Υπάρχουν εκκρεμείς δοκιμαστικές υποψηφιότητες) {
 Βρές την δοκιμαστική υποψηφιότητα με τον ελάχιστο χρόνο άφιξης
 Σημειώσε την υποψηφιότητα ως ενεργή
 Ενημέρωσε τον πίνακα αποφάσεων
 Προσένεσε τα γειτονικά σημεία ως δοκιμαστικές υποψηφιότητες
 Ενημέρωσε τους χρόνους άφιξης των γειτονικών σημείων
}*

Η είσοδος του αλγορίθμου αποτελείται από έναν χάρτη αποφάσεων για τις κατατάξεις κάθε σημείου σε μία από τις κλάσεις, ο οποίος είναι μερικά συμπληρωμένος. Τα σύνορα των περιοχών που έχουν αρχικά αποδοθεί σε κάθε κλάση συνιστούν τα αντίστοιχα κινούμενα περιγράμματα, τα οποία κινούνται στην κατεύθυνση της ανταγωνιστικής επέκτασης των περιοχών που περικλείουν, υπό την επίδραση πεδίων ταχυτήτων ανεξάρτητα ορισμένων για κάθε κλάση. Ο αλ-

γόριθμος προσομοιώνει την παράλληλη διάδοση των διαφόρων κλάσεων, αξιοποιώντας το δυναμικό περιορισμό που επιβάλλει η επέκταση κάθε κλάσης στη διάδοση των υπολοίπων, σαρώνοντας κάθε σημείο εσωτερικό των τελικών περιοχών μόνο από την κλάση στην οποία τελικά αποδόθηκε. Με το πέρας της εκτέλεσης, ο αλγόριθμος παρέχει έναν πλήρως συμπληρωμένο χάρτη αποφάσεων καθώς και τους χρόνους άφιξης για κάθε σημείο της εικόνας.

Ο πίνακας των χρόνων άφιξης αρχικοποιείται κατά τρόπο ώστε οι αρχικές περιοχές των κλάσεων να έχουν μηδενικό χρόνο άφιξης, ενώ αυτός των σημείων που δεν έχουν αποδοθεί σε κάποια κλάση τίθεται στο άπειρο. Ο αλγόριθμος βασίζεται στην έννοια των υποψηφιοτήτων σημείων για κάθε κλάση. Μία υποψηφιότητα ενός σημείου της εικόνας μπορεί να είναι είτε δοκιμαστική αν είναι δυνατό να υποστεί αναπροσαρμογές του χρόνου άφιξης ή ενεργή αν ο χρόνος άφιξης της είναι πλέον σταθερός. Η τελική κατάταξη κάθε σημείου της εικόνας καθορίζεται από την κλάση για την οποία υπάρχει μία ενεργή υποψηφιότητα για το συγκεκριμένο σημείο με τον ελάχιστο χρόνο άφιξης. Οι υποψηφιότητες κάθε σημείου διατηρούνται σε μία συνδεδεμένη λίστα, ενώ παράλληλα όλες οι δοκιμαστικές δραστηριότητες συμμετέχουν σε μία ουρά προτεραιότητας με κριτήριο την ελάχιστη τιμή του χρόνου άφιξης. Κατά την αρχικοποίηση όλα τα σημεία που συνορεύουν με αρχικές κατατάξεις σημείων αποκτούν μία υποψηφιότητα για κάθε κλάση με σημεία της οποίας βρίσκονται σε επαφή, ενώ οι χρόνοι άφιξης αυτών των υποψηφιοτήτων τίθενται σε μία αρχική τιμή, βάσει της ταχύτητας διάδοσης της αντίστοιχης κλάσης.

Ο αλγόριθμος επεξεργάζεται διαδοχικά όλες τις δοκιμαστικές υποψηφιότητες, μέχρι εξάντλησής τους. Σε κάθε βήμα επιλέγεται η δοκιμαστική υποψηφιότητα με τον ελάχιστο χρόνο άφιξης και ανάγεται σε ενεργή. Σε περίπτωση που αυτή είναι η πρώτη ενεργή υποψηφιότητα που δημιουργείται για το συγκεκριμένο σημείο της εικόνας η κλάση στην οποία ανήκει χρησιμοποιείται ως η τελική κατάταξη του σημείου αυτού. Στη συνέχεια κάθε σημείο που δεν έχει μία δοκιμαστική ή ενεργή υποψηφιότητα για την κλάση αυτή αποκτά μία δοκιμαστική υποψηφιότητα της ίδιας κλάσης. Τέλος, οι χρόνοι άφιξης όλων των δοκιμαστικών υποψηφιοτήτων των γειτονικών σημείων ενημερώνονται με τρόπο ώστε να επιβάλλεται η ισχύς της στατικής εξίσωσης επιπέδων στάθμης (3.7) στα σημεία αυτά. Κατά τη διάρκεια της διάδοσης είναι πιθανό να υπάρξουν σημεία στα οποία η εξίσωση επιδέχεται μόνο ασθενείς λύσεις. Ως συνέπεια αυτού είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί μία εναλλακτική αριθμητική προσέγγιση του διανύσματος της κλίσης της συνάρτησης χρόνου άφιξης, η οποία θα επιτρέπει το σχηματισμό ασθενών λύσεων της στατικής εξίσωσης. Η συνήθης προσέγγιση που χρησιμοποιείται οδηγεί στην εξίσωση:

$$1/F_{ij}^2 = \max \left\{ \max\{D_{ij}^{-x}T, 0\}, -\min\{D_{ij}^{+x}T, 0\} \right\} + \\ \max \left\{ \max\{D_{ij}^{-y}T, 0\}, -\min\{D_{ij}^{+y}T, 0\} \right\} \quad (3.8)$$

όπου F_{ij} η ταχύτητα διάδοσης της κλάσης στην οποία ανήκει η υποψηφιότητα στο σημείο (i, j) και $D_{ij}^{\pm\{x|y\}}T$ η κατάλληλη μονόπλευρη διαφορά της συνάρτη-

σης χρόνου άφιξης. Η εξίσωση (3.8) οδηγεί σε μία δευτεροβάθμια αλγεβρική σχέση από την οποία επιλέγεται η μεγαλύτερη τιμή για τον χρόνο άφιξης του σημείου (i, j) .

Είναι προφανές ότι ο αλγόριθμος θα χρειαστεί να σαρώσει μόνο μία φορά τα σημεία που θα βρεθούν στο εσωτερικό των τελικών περιοχών, με ενδεχόμενη την πολλαπλή σάρωση μόνο των σημείων που θα αποτελέσουν τα σύνορα των κλάσεων. Ωστόσο, το γεγονός ότι μία υποψηφιότητα εισάγεται μόνο ως συνέπεια της κατάταξης ενός γειτονικού σημείου σε κάποια κλάση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πολύ τέσσερεις υποψηφιότητες είναι δυνατό να συνυπάρξουν ανά σημείο της εικόνας. Στην πράξη η πλειοψηφία των πολλαπλών υποψηφιοτήτων απαντά σε απλά σύνορα μεταξύ δύο κλάσεων, οπότε και εισάγονται ακριβώς δύο διακριτές υποψηφιότητες. Είναι φανερό ότι ακόμα και στην χειρότερη περίπτωση η αλγορίθμική πολυπλοκότητα είναι ανεξάρτητη του αριθμού των διαφορετικών κλάσεων που συμμετέχουν στην τμηματοποίηση. Δοκιμές του αλγορίθμου έχουν δείξει απαιτήσεις χρόνου εκτέλεσης όχι μεγαλύτερες από το διπλάσιο αυτών του απλού αλγορίθμου Fast Marching.

Κεφάλαιο 4

Τλοποίηση

4.1 Γενικά

Η εφαρμογή τμηματοποίησης που υλοποιήθηκε δομείται αλγορίθμικά από τέσσερα στάδια: την εξαγωγή των πρότυπων χαρακτηριστικών, τον υπολογισμό των τοπικών χαρακτηριστικών και αποστάσεων, την επιλογή των κατατάξεων μεγάλης εμπιστοσύνης για την αρχικοποίηση του αλγορίθμου διάδοσης και, τέλος, τη διάδοση των αποφάσεων κατάταξης με χρήση του αλγορίθμου Multi-Label Fast Marching. Το πρώτο στάδιο απαιτείται μόνο στην περίπτωση της τμηματοποίησης χωρίς επίβλεψη. Αν παρέχονται υποδείγματα των κλάσεων που αναζητούνται στην εικόνα τότε η εξαγωγή των πρότυπων χαρακτηριστικών γίνεται από αυτά, χωρίς ανάγκη επεξεργασίας της εικόνας εισόδου. Στη συνέχεια δίδεται μία αναλυτική περιγραφή των διαφόρων σταδίων του υλοποιηθέντος συστήματος.

4.2 Εξαγωγή των χαρακτηριστικών

Το πρώτο στάδιο του συστήματος τμηματοποίησης εφαρμόζεται στην περίπτωση τμηματοποίησης χωρίς επίβλεψη, όπου καλείται να συγκροτήσει ένα δεδομένο αριθμό από πρότυπα χαρακτηριστικά εξάγοντας περιοχές υποδείγματα για την κάθιση κλάση από την εικόνα εισόδου.

Η προσέγγιση που υιοθετήθηκε συνίσταται στον καταμερισμό της εικόνας εισόδου σε τετράγωνα τμήματα ή μπλοκ και η περιγραφή των υποδειγμάτων των διαφόρων κλάσεων ως διακεριμένα σύνολα αυτών. Το μέγεθος των μπλοκ πρέπει να σχετικά μικρό ώστε να εξασφαλίζεται μία καλή προσέγγιση των πραγματικών περιοχών των διαφόρων κλάσεων αλλά και επαρκώς μεγάλο ώστε να βρίσκεται υπό έλεγχο το στατιστικό σφάλμα που διέπει την εξαγωγή των χαρακτηριστικών από αυτά. Εμπειρικές παρατηρήσεις έδειξαν ότι ικανοποιητικά αποτελέσματα λαμβάνονται με ένα αριθμό από μπλοκ της τάξης των 100 για τις περισσότερες των περιπτώσεων, γεγονός που υποδεικνύει τα μεγέθη των 32×32 και 64×64 σημείων της εικόνας ως φυσιολογικές τιμές για τα συνήθη

μεγέθη εικόνων.

Αρχικά, τα θεωρούμενα χαρακτηριστικά υπολογίζονται για καθένα από τα μπλοκ της εικόνας. Δεδομένου ότι τα μπλοκ που βρίσκονται στα σύνορα μεταξύ διαφορετικών κλάσεων φέρουν χαρακτηριστικά που δεν αντιστοιχούν με ακρίβεια σε κάποια κλάση, η χρήση τους στη διαδικασία εξαγωγής των χαρακτηριστικών είναι δυνατό να προκαλέσει στατιστικά σφάλματα και αστάθειες. Για να προληφθούν αυτές οι καταστάσεις εφαρμόζεται μία μεθοδολογία απόρριψης από την διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών των μπλοκ εκείνων που χαρακτηρίζονται από ανομοιογενές περιεχόμενο. Η ανομοιογένεια ενός μπλοκ εκτιμάται βάσει της εμπειρικής παραδοχής ότι ένα ομοιογενές μπλοκ θα παρουσιάζει με μεγάλη πιθανότητα σημαντική ομοιότητα με την πλειοψηφία των γειτονικών του. Η ομοιότητα αυτή μετράται μέσω της απόστασης Bhattacharya που ορίστηκε στην παράγραφο 2.3. Δεδομένου ότι η τιμή της απόστασης αυτής εξαρτάται εγγενώς και από τα χαρακτηριστικά των μπλοκ, ένα καταλληλότερο κριτήριο ανομοιογένειας είναι η διαφορά της ελάχιστης ανομοιογένειας από τα γειτονικά μπλοκ από την ελάχιστη:

$$M(B) = \text{med}_n d_B(B, B_n) - \min_n d_B(B, B_n) \quad (4.1)$$

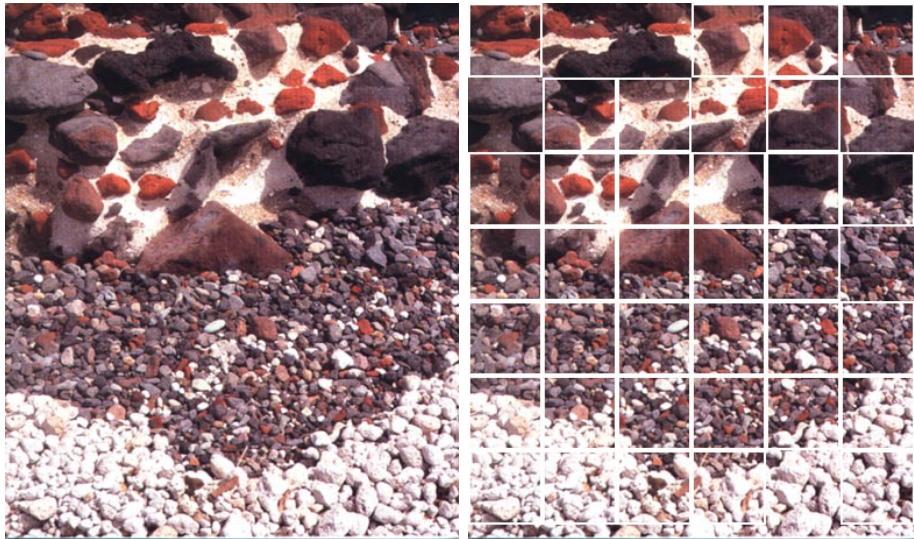
όπου τα μπλοκ B_n είναι τα γειτονικά του θεωρούμενου μπλοκ B . Η διάκριση των ομοιογενών και ανομοιογενών μπλοκ γίνεται υποθέτοντας ότι αυτές είναι οι μόνες καταστάσεις που παρουσιάζονται στην εικόνα. Συνεπώς το ιστόγραμμα των τιμών ανομοιογένειας διαχωρίζεται μέσω ενός κατωφλιού σε δύο τμήματα. Ο διαχωρισμός αυτός πραγματοποιείται με την διάταξη των τιμών της ανομοιογένειας σε φθίνουσα σειρά και την επιλογή του κατωφλιού ως το σημείο μεγιστοποίησης της δεύτερης παραγώγου του ταξινομημένου ιστογράμματος. Το αποτέλεσμα της απόρριψης των ανομοιογενών μπλοκ παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1 για το παράδειγμα της εικόνας *SeaStones*.

Μετά την απόρριψη των ανομοιογενών μπλοκ πραγματοποιείται μία ομαδοποίηση των ομοιογενών μπλοκ κατά ζεύγη για τη βελτίωση της στατιστικής ευρωποτίας της εκτίμησης των χαρακτηριστικών. Η απόσταση Bhattacharya υπολογίζεται για όλα τα ζεύγη γειτονικών ομοιογενών μπλοκ και πραγματοποιούνται οι ενώσεις με σειρά προτεραιότητας που καθορίζεται από την ομοιότητα των μπλοκ. Επιπέδων, αποτρέπονται οι ενώσεις μπλοκ με ανομοιότητα μεγαλύτερη ενός κατωφλιού που εμπειρικά ορίζεται ως:

$$T_p = \frac{\max_{B \in B_H} \text{med}_n d_B(B, B_n) + \min_{B \in B_H} \text{med}_n d_B(B, B_n)}{2} \quad (4.2)$$

όπου B_H το σύνολο των ομοιογενών μπλοκ που επελέγησαν από την προηγούμενη διεργασία.

Στη συνέχεια εκτιμούνται τα χαρακτηριστικά για τα ζεύγη μπλοκ που έχουν δημιουργηθεί. Ακολούθως, όλα αυτά τα ζεύγη συμμετέχουν σε έναν ιεραρχικό αλγόριθμο ομαδοποίησης. Σε κάθε βήμα ενώνονται τα δύο σύνολα μπλοκ



Σχήμα 4.1: Η αρχική εικόνα *SeaStones* και τα ομοιογενή της μπλοκ

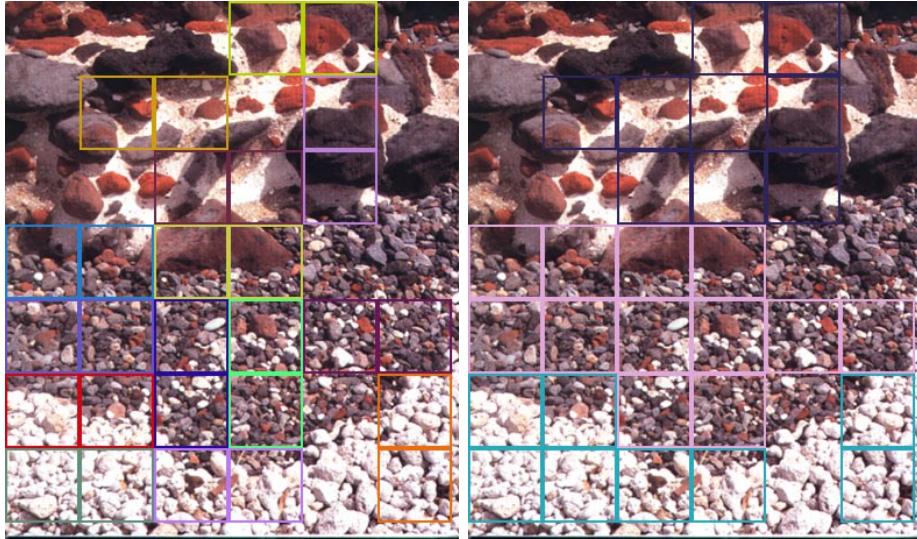
που παρουσιάζουν την μικρότερη ανομοιότητα, όπως αυτή μετράται μέσω της απόστασης Bhattacharya και ταυτόχρονα τα χαρακτηριστικά του νέου συνόλου ορίζονται ως ο κυρτός συνδυασμός των χαρακτηριστικών των επιμέρους συνόλων με βάρη στάθμισης τα ποσοστά συμμετοχής του κάθε συνόλου στον συνολικό αριθμό των μπλοκ. Η ομαδοποίηση περατώνεται όταν ο αριθμός των συνόλων μπλοκ στα οποία έχουμε οδηγηθεί συμπίπτει με τον αριθμό των κλάσεων που έχει ζητηθεί. Τα τελικά χαρακτηριστικά των συνόλων μπλοκ που προκύπτουν από τον αλγόριθμο ομαδοποίησης χρησιμοποιούνται ως τα πρότυπα χαρακτηριστικά των προς τμηματοποίηση κλάσεων στα υπόλοιπα στάδια της εφαρμογής τμηματοποίησης.

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας επιλογής ζευγών και της τελικής εξαγωγής των προτύπων περιοχών απεικονίζονται στο σχήμα 4.2 για την περίπτωση της εικόνας *SeaStones*.

4.3 Εξαγωγή των τοπικών χαρακτηριστικών και αποστάσεων

Το στάδιο της εξαγωγής τοπικών χαρακτηριστικών αποσκοπεί στην αντιστοίχιση σε κάθε σημείο της εικόνας ενός συνόλου χαρακτηριστικών που προέρχονται είτε από το συγκεκριμένο σημείο ή από μία προκαθορισμένη γειτονιά του. Επίσης υπολογίζεται η απόστασή του με χρήση των μέτρων της παραγράφου 2.3 από τις κλάσεις που προήλθαν από το στάδιο της εξαγωγής των προτύπων χαρακτηριστικών ή από συγκεκριμένα υποδείγματα που δόθηκαν στην περίπτωση τμηματοποίησης με επίβλεψη.

Αρχικά, χρησιμοποιείται η απόσταση Bhattacharya για την μέτρηση της



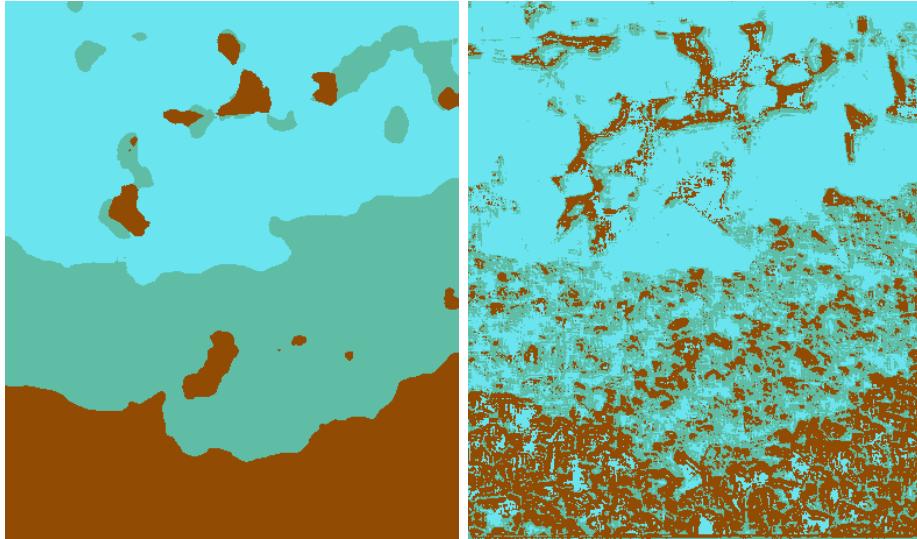
Σχήμα 4.2: Εύρεση ζευγών ομοιογενών μπλοκ και ιεραρχική ομαδοποίηση για την εξαγωγή των προτύπων τριών κλάσεων στην εικόνα SeaStones

ομοιότητας ενός σημείου της εικόνας με καθεμία από τις πρότυπες κλάσεις. Καθώς η συγκεκριμένη μετρική εφαρμόζεται σε ζεύγη κατανομών, τα χαρακτηριστικά δεν λαμβάνονται από το σημείο καθαυτό, αλλά από μία τετράγωνη γειτονιά με κέντρο το εν λόγω σημείο. Εμπειρικά δεδομένα υποδεικνύουν ένα μέγεθος γειτονιάς της τάξης των 10^3 σημείων ως επαρκές για την αξιοπιστη εξαγωγή των τοπικών χαρακτηριστικών. Ταυτόχρονα υπολογίζεται και η απόσταση του σημείου από κάθε κλάση με τη χρήση του σημειακού μέτρου του αρνητικού λογαρίθμου της πιθανοφάνειας.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται μία προκαταρκτική κατάταξη των σημείων της εικόνας SeaStones σε καθεμία από τις τρείς εξαχθείσες κλάσεις βάσει του χριτηρίου της ελάχιστης απόστασης σύμφωνα με τα δύο μέτρα που προαναφέρθηκαν. Παρατηρούμε ότι, εν γένει, η απόσταση Bhattacharya δίδει μία πιο αξιόπιστη κατάταξη, η οποία ωστόσο δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη ακρίβεια κοντά στα σύνορα των περιοχών. Αντίθετα ο αρνητικός λογάριθμος της πιθανοφάνειας επιτυγχάνει σημαντικά καλύτερη ακρίβεια κοντά στα όρια περιοχών, παρουσιάζοντας ωστόσο μία εξαιρετικά θορυβώδη συμπεριφορά στο σύνολο της έκτασης της εικόνας. Τα δύο αυτά μέτρα απόστασης αξιοποιούνται κατά περίπτωση στα δύο ακόλουθα στάδια του συστήματος τμηματοποίησης.

4.4 Εύρεση των κατατάξεων μεγάλης εμπιστοσύνης

Σκοπός του επομένου σταδίου της μεθόδου τμηματοποίησης είναι η επιλογή ενός ικανού υποσυνόλου των σημείων της εικόνας για τα οποία μπορούν να ληφθούν αποφάσεις κατάταξης με εξαιρετικά μεγάλη εμπιστοσύνη, ιδανικά



Σχήμα 4.3: Κατάταξη των σημείων της εικόνας στις πρότυπες κλάσεις σύμφωνα με τη μετρική Bhattacharya και την μέγιστη πιθανοφάνεια

αποκλείοντας την περίπτωση λάθος κατατάξεων. Οι κατατάξεις αυτές πραγματοποιούνται με χριτήριο την απόσταση Bhattacharya μεταξύ των διαφόρων κλάσεων και των τοπικών χαρακτηριστικών κάθε σημείου της εικόνας, δεδομένης της αυξημένης αξιοπιστίας που παρουσιάζει αυτή η μετρική.

Η επιλογή γίνεται σε $N + 1$ διαδοχικές βαθμίδες. Για κάθε τιμή του $w = 0, \dots, N$ θεωρούμε ένα παράθυρο B_w διαστάσεων $(2w+1) \times (2w+1)$. Ορίζουμε επίσης την συνάρτηση κατάταξης για κάθε σημείο s της εικόνας ως εξής:

$$k(s) = \arg \min_l \sum_{p \in B_w} d_l(s+p) \quad (4.3)$$

όπου $d_l(s)$ η απόσταση Bhattacharya του σημείου s από την κλάση \mathcal{C}_l .

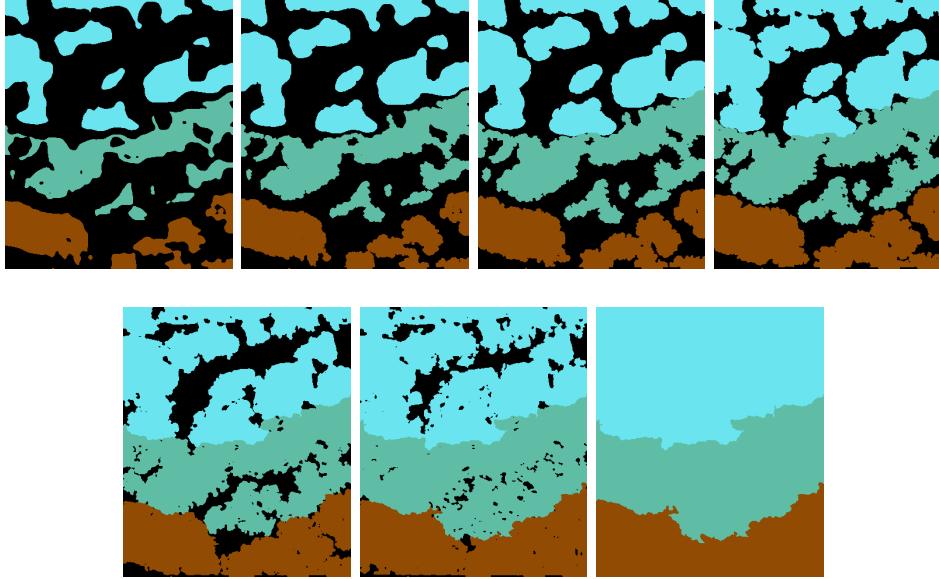
Ορίζουμε επιπλέον ένα χριτήριο αξιοπιστίας σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathcal{R}(s) = \sum_{p \in B_w} \left(\min_{l \neq k(s)} d_l(s+p) - d_{k(s)}(s+p) \right) \quad (4.4)$$

Η επιλογή των κατατάξεων μεγάλης αξιοπιστίας γίνεται για τις διαδοχικές τιμές της ακτίνας k του παραθύρου B_w κατά τρόπο ώστε να επιλέγεται σε κάθε βαθμίδα ένα προκαθορισμένο ποσοστό σημείων της εικόνας τα οποία χαρακτηρίζονται από τη μέγιστη τιμή του χριτηρίου $\mathcal{R}(s)$.

Τα σημεία που επιλέγονται με αυτό τον τρόπο αποτελούν την αρχικοποίηση του αλγορίθμου Multi-Label Fast Marching που χρησιμοποιείται στο επόμενο στάδιο. Ένα ποσοστό της τάξης του 5-10% είναι γενικά επαρκές για τις περισσότερες εφαρμογές, αν και η ακριβής επιλογή μπορεί να διαφοροποιηθεί

ανάλογα με τη διαχριτική ικανότητα που παρουσιάζουν τα χρησιμοποιούμενα χαρακτηριστικά. Ένα παράδειγμα αρχικοποίησης για την εικόνα *SeaStones* σε ποσοστό 40% απεικονίζεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Ο αρχικός χάρτης αποφάσεων (ποσοστό 40%) και στιγμιότυπα της εκτέλεσης του αλγορίθμου *Multi-Label Fast Marching* στην εικόνα *SeaStones*

4.5 Διάδοση των αποφάσεων κατάταξης

Με δεδομένο ένα αρχικό υποσύνολο των σημείων της εικόνας όπου έχουν αποδοθεί αποφάσεις με μεγάλη εμπιστοσύνη, το ζητούμενο είναι να επεκταθούν αυτές στο υπόλοιπο της εικόνας, με τρόπο καθοδηγούμενο από τα μέτρα ομοιότητας μεταξύ σημείων και κλάσεων που έχουν οριστεί.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος *Multi-Label Fast Marching*, ο οποίος παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.2. Ως αρχικοποίηση του αλγορίθμου χρησιμοποιείται ο ημιτελής χάρτης αποφάσεων που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο στάδιο. Τα σύνορα των περιοχών που έχουν αρχικά αποδοθεί σε κάθε κλάση συνιστούν κινούμενα περιγράμματα, τα οποία κινούνται εκτατικά μέχρι σύγκλισης και θεωρούνται επί των υπολοίπων. Ο πυρήνας της μεθοδολογίας τημματοποίησης που παρουσιάζεται σε αυτή την αναφορά είναι η χρήση της δεσμευμένης (*a posteriori*) πιθανότητας μίας δεδομένης κλάσης υπό τη δέσμευση των χαρακτηριστικών του σημείου που διεκδικείται από αυτή ως την ταχύτητα διάδοσης για την κλάση αυτή στο συγκεκριμένο σημείο. Ανακαλώντας τον ορισμό της βασισμένης στην πιθανοφάνεια απόστασης που δόθηκε στην παράγραφο 2.3 και αξιοποιώντας τον κανόνα του Bayes η ταχύτητα αυτή

μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$F_l(s) = p(l|x(s)) = \frac{1}{1 + \sum_{k \neq l} \frac{Pr(k)}{Pr(l)} e^{d_l(x(s)) - d_k(x(s))}} \quad (4.5)$$

όπου $Pr(k)$ η *a priori* πιθανότητα της κλάσης k και $d_k(\cdot)$ η απόσταση που ορίστηκε ως ο αρνητικός λογάριθμος της πιθανοφάνειας. Οι πιθανότητες $Pr(k)$ μπορούν να ληφθούν αξιωματικά ίσες με τη μονάδα, απουσία στέρεης γνώσης για την τιμή τους, ή να εξαχθούν από μία (κατά προτίμηση τοπικής εμβέλειας) εκτίμηση με χρήση των κατατάξεων που δίδει η απόσταση Bhattacharya.

Ακολούθως εκτελείται ο αλγόριθμος Multi-Label Fast Marching ο οποίος επεκτείνει τις αρχικές αποφάσεις κατάταξης στο σύνολο των σημείων της εικόνας, εκτελώντας μία διάδοση των περιγραμμάτων των κλάσεων σύμφωνα με τον ορισμό των ταχυτήτων διάδοσης που δόθηκε στη σχέση (4.5). Διαδοχικά στιγμιότυπα της εκτέλεσης του εν λόγω αλγορίθμου στην εικόνα *SeaStones* δίδονται στο σχήμα 4.4.

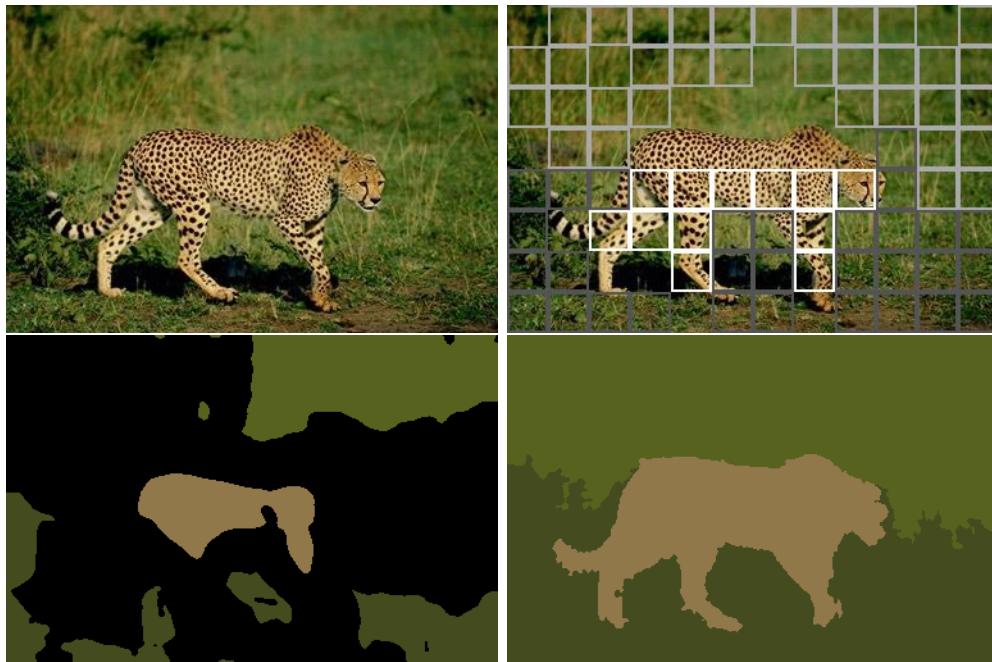
Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα

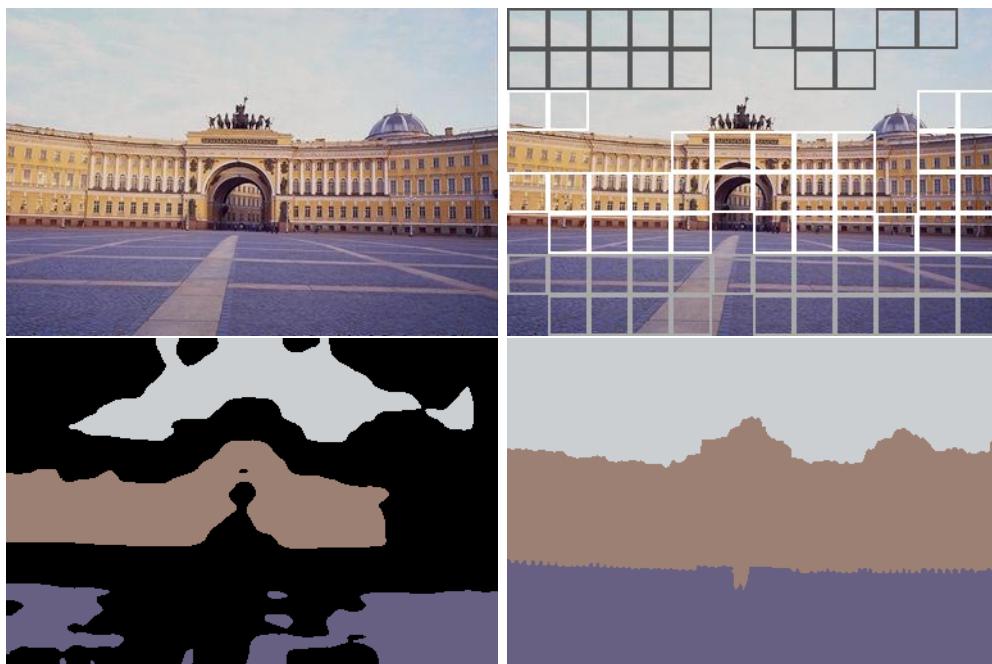
Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα εκτέλεσης του αλγορίθμου σε ένα σύνολο εικόνων με σημαντική ποικιλία χαρακτηριστικών και απαιτήσεων τμηματοποίησης. Το σύνολο των δοκιμαστικών εικόνων λήφθηκε από τη συλλογή *Corel Gallery*. Οι δοκιμές έγιναν στις περισσότερες των περιπτώσεων με ένα σταθερό σύνολο παραμέτρων, ώστε να είναι εφικτή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στα σχήματα 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται τμηματοποιήσεις εικόνων με συνδυασμένη χρήση χαρακτηριστικών υφής χρώματος και φωτεινότητας. Τα αποτελέσματα των σχημάτων 5.3 και 5.4 έχουν ληφθεί με χρήση μόνο χαρακτηριστικών υφής ή χρώματος αντίστοιχα. Παρουσιάζονται επιπλέον στο σχήμα 5.5 περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία η διάσπαση περιοχών σε τμήματα, λόγω της ανομοιομορφίας των χαρακτηριστικών που περιέχονται σε αυτές. Τέλος, στο σχήμα 5.6 δίδονται παραδείγματα ανεπιτυχών τμηματοποιήσεων, οφειλόμενων κυρίως στη μη αντιπροσωπευτικότητα των εξαγόμενων χαρακτηριστικών, συχνά μετά από απόρριψη, ως ανομοιογενών, αρκετών χρήσιμων μπλοκ.

Σε κάθε περίπτωση δίδεται η αρχική εικόνα, η επιλογή των μπλοκ για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών των κλάσεων, η αρχικοποίηση του αλγορίθμου διάδοσης και το τελικό αποτέλεσμα. Κατά κανόνα χρησιμοποιήθηκαν 3 επίπεδα ανάλυσης DWF, 64 κβαντισμένες τιμές χρώματος και 32 φωτεινότητας. Κατά το στάδιο της εξαγωγής των χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκαν μεγέθη μπλοκ 32×32 ή 50×50 κατά περίπτωση. Η αρχικοποίηση του αλγορίθμου διάδοσης έγινε σε ποσοστό 30 – 40% ενώ κατά τη φάση της διάδοσης στις περισσότερες περιπτώσεις οι a priori πιθανότητες των κλάσεων λήφθηκαν ίσες.



Corel Gallery #134025



Corel Gallery #805079

Σχήμα 5.1: Τμηματοποίηση εικόνων σε 3 κλάσεις με συνδυασμένη χρήση χαρακτηριστικών υφής, χρώματος και φωτεινότητας

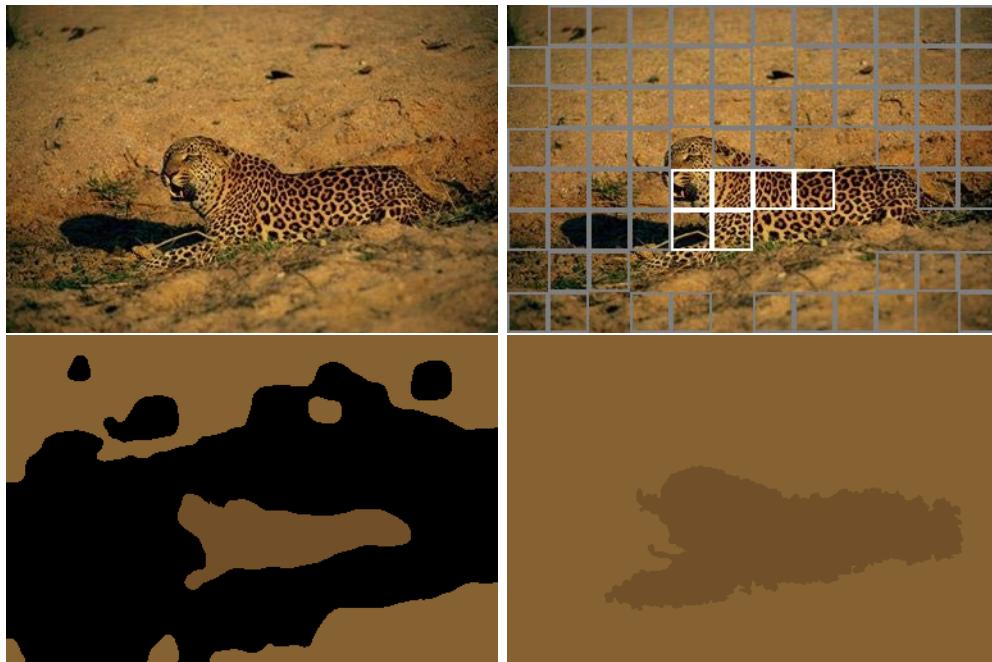


Corel Gallery #134057

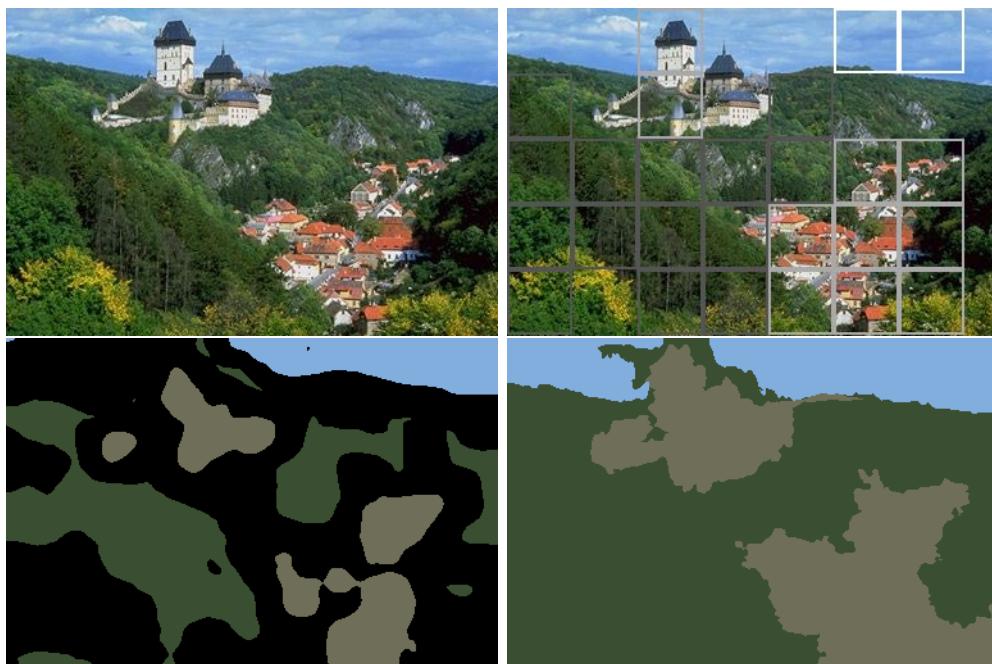


Corel Gallery #214078

Σχήμα 5.2: Τυμηματοποίηση εικόνων σε 2 ή 4 κλάσεις με συνδυασμένη χρήση χαρακτηριστικών υφής, χρώματος και φωτεινότητας

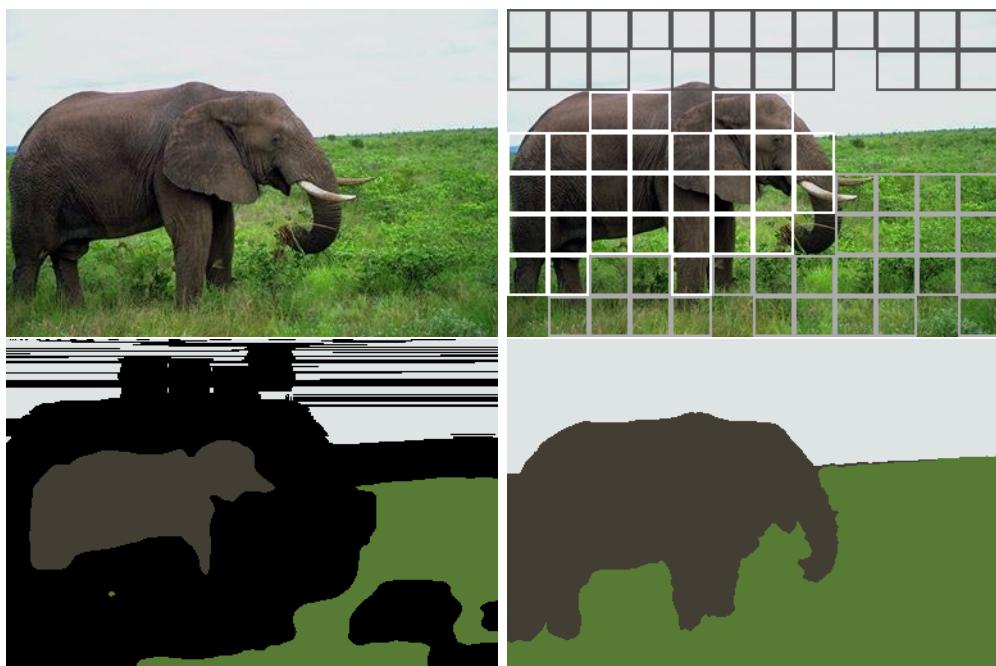


Corel Gallery #134047

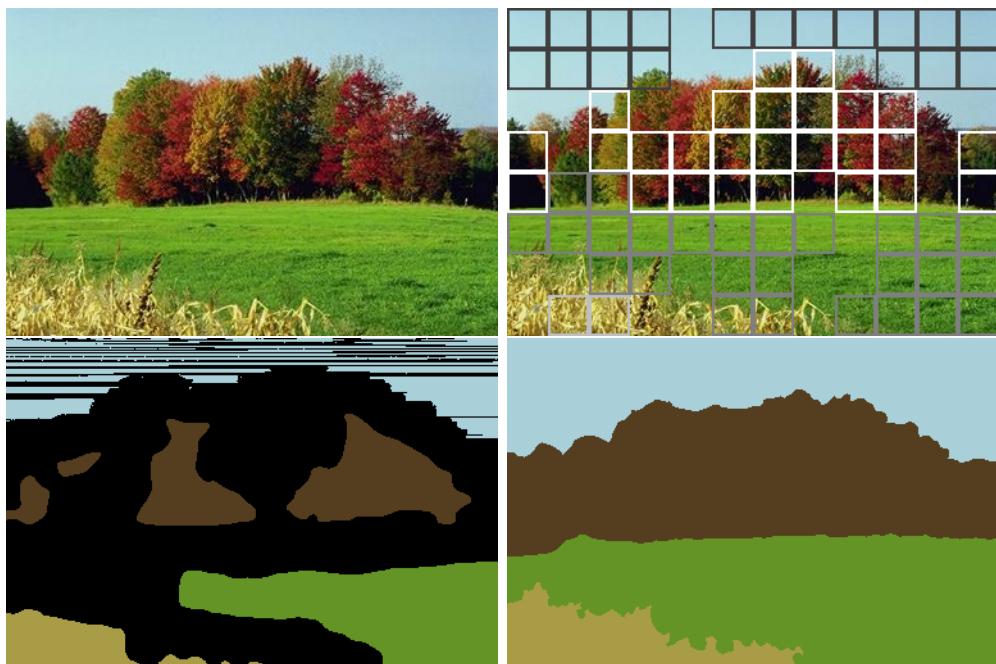


Corel Gallery #534017

Σχήμα 5.3: Τμηματοποίηση εικόνων σε 2 ή 3 κλάσεις με αποκλειστική χρήση χαρακτηριστικών υφής

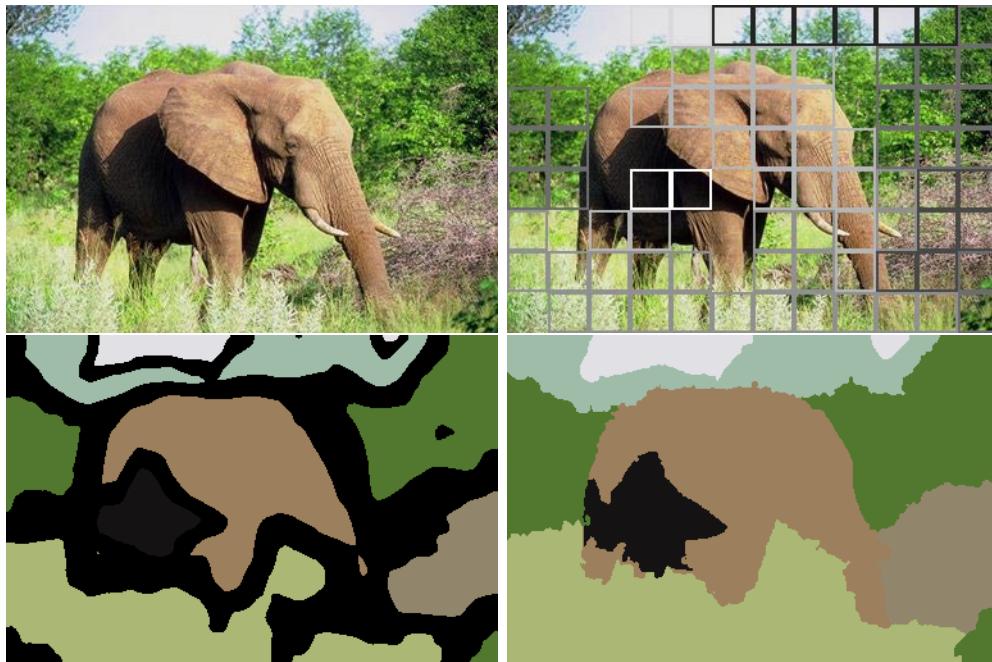


Corel Gallery #107005



Corel Gallery #150012

Σχήμα 5.4: Τμηματοποίηση εικόνων σε 3 ή 4 κλάσεις με αποκλειστική χρήση χαρακτηριστικών χρώματος

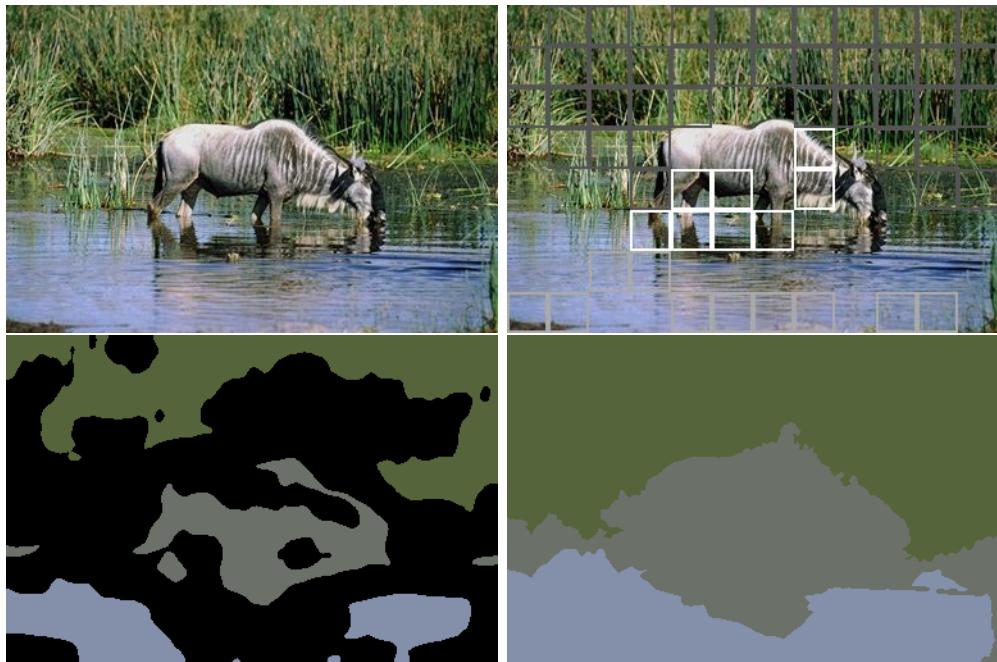


Corel Gallery #107001

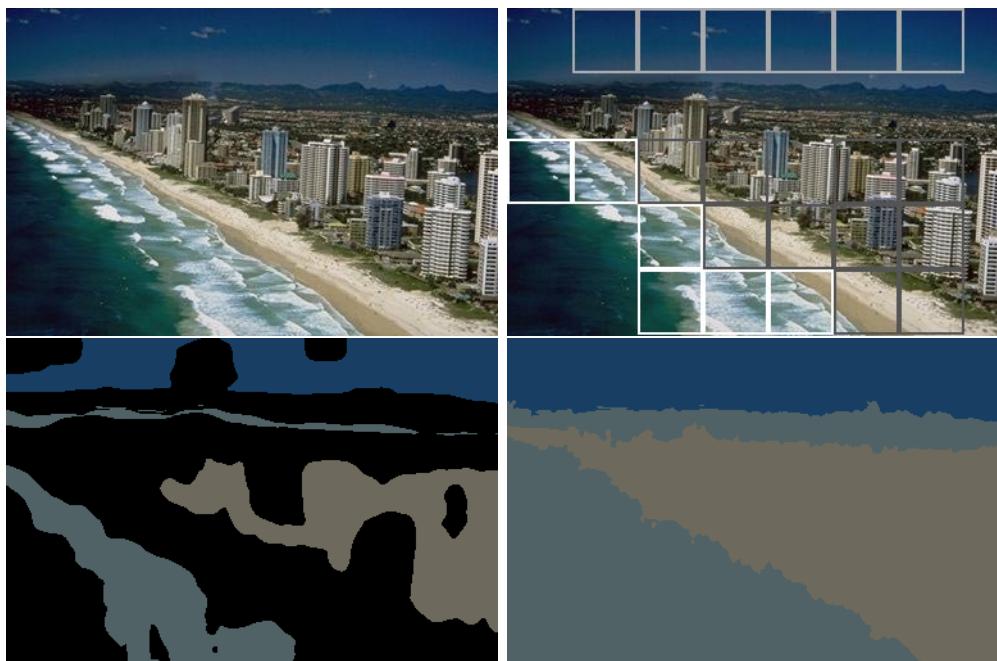


Corel Gallery #251093

Σχήμα 5.5: Περιπτώσεις κατάτμησης περιοχών λόγω ανομοιομορφίας των περιεχομένων χαρακτηριστικών



Corel Gallery #77030



Corel Gallery #384078

Σχήμα 5.6: Προβλήματα τμηματοποίησης οφειλόμενα στην αναζιοπιστία των εξαγόμενων χαρακτηριστικών

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

6.1 Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα τμηματοποίησης εικόνων από συνδυασμό χαρακτηριστικών υφής, χρώματος και φωτεινότητας. Η μεθοδολογία προϋποθέτει τη γνώση μόνο του αριθμού των διαφορετικών κλάσεων που περιέχονται στην εικόνα εισόδου. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ικανοποιητική συμπεριφορά της μεθοδολογίας, ακόμα και σε αρκετά δύσκολες περιπτώσεις.

Οι δοκιμές που έγιναν υποδεικνύουν την ισχυρή εξάρτηση της μεθόδου από την ποιότητα των εξαγομένων χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα, όλες οι περιπτώσεις που δοκιμάστηκαν και στις οποίες έγινε εξαγωγή χαρακτηριστικών με επάρκεια και αντιπροσωπευτικότητα δεν αντιμετώπισαν κανένα πρόβλημα στα υπόλοιπα στάδια της τμηματοποίησης. Οι όποιες αποτυχημένες τμηματοποιήσεις οφείλονται στη συντριπτική τους πλειοψηφία σε αναξιοπιστία των εξαγομένων χαρακτηριστικών, οφειλόμενη συχνά είτε στην επιλογή μπλοκ μόνο από ένα τμήμα μίας δεδομένης κλάσης, είτε στην απόρριψη ως ανομοιογενών μπλοκ που περιέχουν σημαντικό μέρος των χαρακτηριστικών της. Σε ελάχιστες περιπτώσεις είχαν κάποιο ρόλο στην αδυναμία εξαγωγής αξιόπιστων χαρακτηριστικών και οι γεωμετρικοί περιορισμοί της ομαδοποίησης και συγκεκριμένα της προκαταρκτικής ομαδοποίησης σε ζεύγη.

Ο αλγόριθμος Multi-Label Fast Marching παρουσίασε ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά στο σύνολο των περιπτώσεων, ακόμη και όταν η παρεχόμενη αρχικοποίηση ήταν ιδιαίτερα πτωχή. Εμφάνισε ιδιαίτερη αποτελεσματικότητα στην απαλοιφή του θορύβου των σημειακών μέτρων ανομοιογένειας που χρησιμοποιήθηκαν, σεβόμενος παράλληλα τις μεταβάσεις μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων της εικόνας.

6.2 Προοπτικές

Η παρουσιαζόμενη μεθοδολογία επιδέχεται αρκετές συμπληρώσεις και επεκτάσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται ο αυτόματος προσδιορισμός του αριθμού των χλάσεων τμηματοποίησης, αλλά και άλλων παραμέτρων του αλγορίθμου. Ένας τέτοιος προσδιορισμός θα μπορούσε να προκύψει είτε κατά τη διάρκεια της εξαγωγής χαρακτηριστικών, ως επέκταση της ιεραρχικής ομαδοποίησης, είτε με τη χρήση ενός συνολικού κριτηρίου ποιότητας στο τελικό αποτέλεσμα της τμηματοποίησης.

Η καλύτερη αξιοποίηση των χαρακτηριστικών υφής θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω επιλογής των κατάλληλων συνιστωσών της ανάλυσης DWF και των αντιπροσωπευτικότερων τιμών φωτεινότητας και χρώματος για τον υπολογισμό των μέτρων ομοιότητας, με κριτήριο την αυξημένη διακριτότητα των τμημάτων της εικόνας. Ο υπολογισμός των επιπέδων της ανάλυσης για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών υφής εντάσσεται στο ίδιο πλαίσιο. Τέλος, παρά την καλή συμπεριφορά των συνήθων παραμέτρων για το ποσοστό της αρχικοποίησης και τον προσδιορισμό των a priori πιθανοτήτων των χλάσεων, θα ήταν επιθυμητός και ο απόλυτα αυτόματος καθορισμός τους.

6.3 Πρωτότυπη συνεισφορά

Στην παρούσα εργασία περιλαμβάνονται πρωτότυπες μέθοδοι και φορμαλισμοί, με επίκεντρο τον αλγόριθμο Multi-Label Fast Marching και τη συνδυασμένη χρήση του με τις μετρικές που ορίστηκαν. Οι φορμαλισμοί που παρουσιάστηκαν έχουν συνεισφέρει επίσης σε δύο ερευνητικές εργασίες [1, 5] που έχουν γίνει ήδη δεκτές για δημοσίευση.

Βιβλιογραφία

- [1] S. Liapis, E. Sifakis and G. Tziritas. Color and/or texture segmentation using deterministic relaxation and fast marching algorithms. In *Proc. of Int. Conf. on Pattern Recognition*, 2000 (προς δημοσίευση)
- [2] Σπ. Λιάπης. Εξαγωγή χαρακτηριστικών υφής και χρώματος για τυμηματοποίηση και ανάκληση εικόνων. *Μεταπτυχιακή εργασία*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, 1999
- [3] S. Osher and J. Sethian. Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. *Journal of Computational Physics*, 79:12-49, 1988
- [4] J. Sethian. A marching level set method for monotonically advancing fronts. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 93:1591-1595, 1996
- [5] E. Sifakis, C. Garcia and G. Tziritas. Bayesian level sets for image segmentation. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2000 (προς δημοσίευση)
- [6] M. Unser. Texture classification and segmentation using wavelet frames. *IEEE Trans. on Image Processing*, 4:1549-1560, November 1995.