



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών Ηλεκτροοπτικής και Ηλεκτρονικών Υλικών

**Ανίχνευση χαρακτηριστικών προσώπου
και ψηφιακή επεξεργασία εικόνας
στην ανάπτυξη οπτικής μεθόδου μελέτης
της προπαλμικής αναστολής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλκιβιάδης Βουρεκάς

Επιβλέπουσα: Διδώ Γιόβα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών Ηλεκτροοπτικής και Ηλεκτρονικών Υλικών

**Ανίχνευση χαρακτηριστικών προσώπου
και ψηφιακή επεξεργασία εικόνας
στην ανάπτυξη οπτικής μεθόδου μελέτης
της προπαλμικής αναστολής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλκιβιάδης Βουρεκάς

Επιβλέπουσα: Διδώ Γιόβα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Δ. Γιόβα
Καθ. Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Δ. Κουτσούρης
Καθ. Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Πολιτόπουλος
Αναπλ. Καθ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....

Αλκιβιάδης Βουρεκάς

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

και Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αλκιβιάδης Θ. Βουρεκάς, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας και κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η μελέτη προπαλμικής αναστολής του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού αποτελεί έναν βασικό τομέα της ιατροφαρμακευτικής έρευνας στο πεδίο της σχιζοφρένειας, διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στο πλαίσιο ανάπτυξης και ελέγχου νέων τύπων αντιψυχωσικής αγωγής. Ως ενδοφαινοτυπικός δείκτης του κεντρικού αισθητικοκινητικού ηθμού, η προπαλμική αναστολή αποτελεί ταυτόχρονα εργαλείο έρευνας στο πλαίσιο μελέτης μιας ευρύτερης σειράς διαταραχών.

Η ισχύουσα μέθοδος εργαστηριακής καταγραφής και ανάλυσης της προπαλμικής αναστολής στον άνθρωπο αξιοποιεί τη λήψη μετρήσεων μέσω ηλεκτρομυογραφήματος (ΗΜΓ). Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στον περιοφθαλμικό μυ και καταγράφουν τους βλεφαρικούς σπασμούς. Οι προκύπτουσες χρονοσειρές βαθμονομούνται κατάλληλα και αναλύονται για την εκτίμηση των ευρημάτων. Δεδομένου ότι το ισχύον πρότυπο χαρακτηρίζεται από σχετική επεμβατικότητα και καθώς η εξέταση αφορά πληθυσμούς που ελέγχονται για εκδήλωση ψυχικών διαταραχών, προτείνεται η ανάπτυξη μιας νέας οπτικής μεθόδου εξ αποστάσεως καταγραφής των αντιδράσεων του εξεταζομένου ατόμου.

Η πειραματική μέθοδος χρησιμοποιεί κάμερα υψηλής χρονικής δειγματοληψίας για τη χρονικά λεπτομερή απεικόνιση των αντιδράσεων του προσώπου κατά τη διάρκεια της συνεδρίας, με σκοπό να ελαττώσει σημαντικά τον βαθμό δυσφορίας. Στην παρούσα εργασία, περιγράφεται η διαδικασία εκτέλεσης της νέας πειραματικής μεθόδου από το στάδιο εφαρμογής της σε εργαστηριακές συνθήκες μέχρι την εξαγωγή των συμπερασμάτων από την ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων. Ταυτόχρονα, αναπτύσσεται η αρχή λειτουργίας της ισχύουσας μεθόδου του ΗΜΓ, όπου οι παράλληλες μετρήσεις των δύο μεθόδων κατευθύνονται σε συγκρίσιμες μορφές.

Γίνεται ειδικότερη αναφορά στο στάδιο εφαρμογής του κατάλληλου αλγορίθμου κατάτμησης της ψηφιακής εικόνας. Οι προτεινόμενες μέθοδοι που ακολουθούνται είναι η κατωφλίωση και ο αλγόριθμος watershed. Περιγράφεται το στάδιο προεργασίας των εικόνων, συγκεκριμένες τροποποιήσεις και βελτιστοποιήσεις για την εκτέλεση των αλγορίθμων και παρουσιάζονται τα

αποτελέσματα σε πρότυπες εικόνες προσώπων, ενώ εξάγονται συμπεράσματα από τη σύγκριση των διαφορετικών μεθοδολογιών.

Επιπλέον, αναλύεται η διαδικασία ανίχνευσης χαρακτηριστικών προσώπου με βάση τη μέθοδο της σύμπτωσης προτύπων. Παρουσιάζεται η ανάγκη της σταδιακής (κλιμακωτής) ανίχνευσης χαρακτηριστικών, όπου γίνεται χρήση της τεχνικής κλιμακωτών συνελίξεων.

Για τον έλεγχο αξιοπιστίας της νέας οπτικής μεθόδου, πραγματοποιείται στάθμιση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα αντίστοιχα του ισχύοντος προτύπου του ΗΜΓ. Η εξαγωγή συμπερασμάτων από την αντιπαραβολή των μεθόδων επιτρέπει τη διατύπωση προτάσεων και εκτιμήσεων για τις μελλοντικές δυνατότητες ανάπτυξης και χρήσης της πειραματικής μεθόδου.

Λέξεις-κλειδιά

Προπαλμική αναστολή, αντανakλαστικός αιφνιδιασμός, κατάτμηση εικόνας, κατωφλίωση, αλγόριθμος watershed, ανίχνευση χαρακτηριστικών προσώπου, σύμπτωση προτύπων, MATLAB.

Abstract

The study of prepulse inhibition of startle response is an essential part of pharmaceutical research in the field of schizophrenia, contributing significantly to the development and testing of new types of antipsychotic drugs. As an endophenotype of sensorimotor gating, prepulse inhibition is also a useful tool for research on a broad spectrum of disorders.

The current method utilized for prepulse inhibition analysis uses measurements from electromyography (EMG). Needle electrodes are placed on the eye muscle, recording eyelid activity. The resulting time series are calibrated and analyzed for estimation of results. Taking into account the fact that the current standard can be considered somewhat intrusive and that the testing sessions involve patients examined for psychological disorders, we suggest a new visual method, in which reactions of subjects are recorded from a distance.

This experimental method uses a high frame rate camera for the detailed depiction of facial reactions during the session, in order to significantly reduce the degree of discomfort. In this work, an outline of all stages, from the laboratory tests on subjects to the processing of images and the subsequent results, is included. To facilitate the comparison, we also present the standard EMG method, adjusting the results of both methods to similar forms.

A detailed outline of the implementation of the appropriate image segmentation algorithm follows. Thresholding and watershed algorithm are the recommended methods to be utilized. We report on the appropriate preparation of images, modifications and optimizations to the algorithms, the results of the implementation in standardized pictures of faces and the conclusions of comparing both methods.

A report on the process of facial feature detection is also included. Template matching is implemented by the use of a gradual detection routine. Throughout the process, successive convolutions are executed with a scaling factor.

The efficiency of the experimental visual method is examined by comparing the results of the new method with those of the standard EMG model, in order to estimate the potential of its development and application.

Keywords

Prepulse inhibition, startle response, image segmentation, thresholding, watershed algorithm, face feature detection, template matching, MATLAB.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της εργασίας, κα. Διδώ Γιόβα, καθηγήτρια της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την εμπνευσμένη πρότασή της να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο ενδιαφέρον αντικείμενο, καθώς και για όλη τη συνεργασία μας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στον κ. Γιώργο Μπαλογιάννη, Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και επικεφαλής της έρευνας για την ανάπτυξη νέας μεθόδου μελέτης της προπαλμικής αναστολής, για τη γόνιμη συμβουλευτική καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια της συγγραφής, καθώς και για την ευκαιρία παρακολούθησης και συμμετοχής στις πειραματικές εργαστηριακές μετρήσεις.

Ευχαριστίες οφείλονται επίσης στους καθηγητές του Ερευνητικού Πανεπιστημιακού Ινστιτούτου Ψυχικής Υγιεινής (Ε.Π.Ι.Ψ.Υ) και ιδιαίτερα στην υπεύθυνη του εργαστηρίου, κα. Ξανθή Σταχτέα, για τον χρόνο που διέθεσε, καθώς και για τη διασαφήνιση αποριών σχετικά με τις εργαστηριακές διατάξεις.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και Υποψήφιο Διδάκτορα Πληροφορικής στο Πανεπιστήμιο του Άμστερνταμ, Άγγελο Οικονομόπουλο, για την αμέριστη ηθική συμπαράσταση.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Λέξεις-κλειδιά	6
Abstract	7
Keywords	8
Ευχαριστίες	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	
ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΠΑΛΜΙΚΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ	11
1.1 Προπαλμική αναστολή του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού	11
1.1.1 Αντανακλαστικός αιφνιδιασμός	11
1.1.2 Αισθητικοκινητικός ηθμός και αισθητηριακός ηθμός	12
1.1.3 Εργαστηριακή καταγραφή της προπαλμικής αναστολής	15
1.2 Διαταραχές της προπαλμικής αναστολής	17
1.2.1 Μελέτη προπαλμικής αναστολής και σχιζοφρένεια	17
1.2.2 Μελέτη προπαλμικής αναστολής σε άλλες διαταραχές	20
1.2.3 Μελέτη προπαλμικής αναστολής σε σχέση με διάφορες ουσίες	23
1.3 Το νευροβιολογικό υπόστρωμα της προπαλμικής αναστολής	24
1.3.1 Μέθοδοι έρευνας του νευροβιολογικού υποστρώματος	24
1.3.2 Συμπεράσματα έρευνας του νευροβιολογικού υποστρώματος	25
1.3.3 Η χρησιμότητα μελέτης της προπαλμικής αναστολής	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	
ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΡΟΠΑΛΜΙΚΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ	31
2.1 Οπτική μέθοδος μελέτης προπαλμικής αναστολής	31
2.1.1 Διάταξη εργαστηριακών μετρήσεων	31
2.1.2 Οπτική καταγραφή μετρήσεων	34
2.1.3 Λήψη εικόνας ουδέτερης έκφρασης	37
2.1.4 Κατάτμηση εικόνας	37
2.1.5 Ανίχνευση χαρακτηριστικών προσώπου	39
2.1.6 Υπολογισμός οπτικής ροής	40
2.2 Μελέτη προπαλμικής αναστολής με χρήση ΗΕΓ και ΗΜΓ	44
2.2.1 Καταγραφή μετρήσεων σε ΗΕΓ και ΗΜΓ	44
2.2.2 Εξομάλυνση χρονοσειράς με χρήση φίλτρου Savitzky-Golay	47
2.2.3 Εντοπισμός βλεφαρικών συσπάσεων	48
2.3 Στάθμιση οπτικής μεθόδου με βάση τα δεδομένα του ΗΜΓ	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΚΑΤΑΤΜΗΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ	57
3.1 Μέθοδοι κατάτμησης στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας	57
3.2 Κατωφλίωση	62
3.2.1 Προεργασία εικόνας	62
3.2.2 Μαθηματική μορφολογία	63
3.2.3 Εκτέλεση της κατωφλίωσης	69
3.2.4 Κώδικας MATLAB για την υλοποίηση της κατωφλίωσης	74
3.2.5 Εφαρμογή κατωφλίωσης σε φωτογραφίες-δείγματα	75
3.3 Αλγόριθμος υδροκρίτη (watershed)	80
3.3.1 Ο αλγόριθμος watershed στην κατάτμηση εικόνας	80
3.3.2 Εκτέλεση αλγορίθμου watershed	83
3.3.3 Κώδικας MATLAB για την υλοποίηση αλγορίθμου watershed	87
3.3.4 Εφαρμογή αλγορίθμου watershed σε φωτογραφίες-δείγματα	89
3.4 Σύγκριση μεθόδων κατωφλίωσης και αλγορίθμου watershed	93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΩΠΟΥ	95
4.1 Ταίριασμα προτύπων	95
4.2 Ταίριασμα προτύπων και ανίχνευση χαρακτηριστικών	99
4.2.1 Η μέθοδος της κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών	100
4.2.2 Εκτέλεση του προγράμματος ανίχνευσης χαρακτηριστικών	105
4.2.3 Η υπορουτίνα ανίχνευσης χαρακτηριστικών	108
4.2.4 Εκτέλεση της υπορουτίνας ανίχνευσης χαρακτηριστικών	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	115
5.1 Αποτελέσματα αντιπαραβολής μεθόδων	115
5.1.1 Έλεγχος χρονικής σύμπτωσης	115
5.1.2 Έλεγχος σύμπτωσης λόγου μεγεθών και χρόνου	119
5.2 Συμπεράσματα	123
5.2.1 Η σύγκριση των θεωρητικών μοντέλων (οπτική μέθοδος, ΗΜΓ)	123
5.2.2 Η απόδοση της οπτικής μεθόδου βάσει των μετρήσεων.....	125
5.3 Επίλογος	126

Παράρτημα	127
-----------------	-----

Βιβλιογραφία.....	131
-------------------	-----

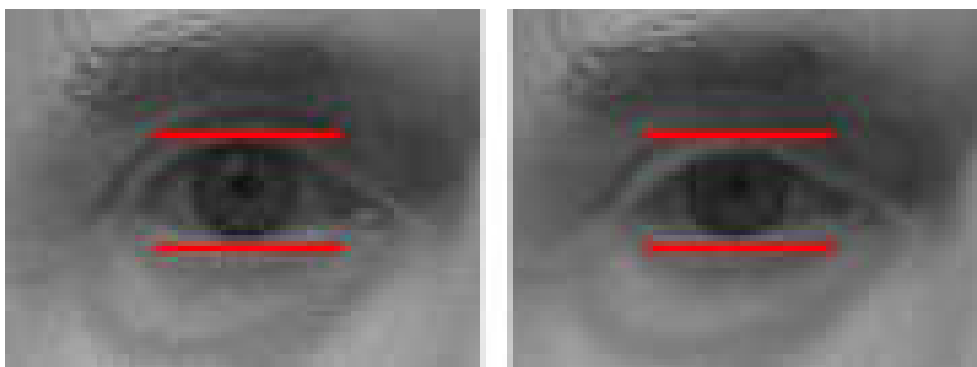
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΠΑΛΜΙΚΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ

1.1 Προπαλμική αναστολή του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού

1.1.1. Αντανακλαστικός αιφνιδιασμός

Ο αντανακλαστικός αιφνιδιασμός (*startle reflex*) αποτελεί την αντανακλαστική αντίδραση του εγκεφαλικού στελέχους σε αιφνίδια και σχετικά έντονα εξωτερικά ερεθίσματα, που προκαλεί την ταχύτατη (εντός 40-80 msec) σύσπαση των σκελετικών μυών και των μυών του προσώπου. Τα ερεθίσματα μπορεί να έχουν ακουστική, οπτική ή απτική μορφή, ενώ η αντίδραση παρατηρείται εμφανέστερα στους οφθαλμικούς μύες με τη μορφή ενός μερικού ή ολικού κλεισίματος του βλεφάρου. Πρόκειται για ένα πρωτόγονο αντανακλαστικό, που παρατηρείται σε μια σειρά από έμβια όντα. Αφορά ένα καλά προσδιορισμένο νευρωνικό κύκλωμα, κοινό τόσο στον άνθρωπο, όσο και στα άλλα θηλαστικά [1].



Σχήμα 1.1: Η καταγραφή του μερικού κλεισίματος του βλεφάρου κατά τον ακουστικό αντανακλαστικό αιφνιδιασμό από κάμερα υψηλής χρονικής δειγματοληψίας.

Ο ακουστικός αντανακλαστικός αιφνιδιασμός (*acoustic startle reflex*) συμβαίνει συνήθως όταν το ακουστικό ερέθισμα υπερβαίνει τα 80 dB. Ενδεικτικές δομές και διαδρομές του εγκεφαλικού στελέχους που εμπλέκονται στη λειτουργία του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού αποτελούν η αμυγδαλή, ο ιπλόκαμπος, ο βασικός πυρήνας της τελικής ταινίας (*bed nucleus of the stria terminalis*) καθώς και ο πρόσθιος φλοιός του προσαγωγίου (*anterior cingulate*

cortex) [2] [3]. Η ενεργοποίηση των ανωτέρω περιοχών θεωρείται πως σχετίζεται με τις επιμέρους ιδιότητές τους. Οι συγκεκριμένες περιοχές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο και σε άλλες καταστάσεις. Η αμυγδαλή δραστηριοποιείται κατά τον πρωταρχικό μηχανισμό «φυγής ή μάχης» (“fight or flight”), ο ιππόκαμπος ενεργεί για τη δημιουργία αναμνήσεων σχετικά με ερεθίσματα και ακόλουθες συναισθηματικές αντιδράσεις [4], ο βασικός πυρήνας της τελικής ταινίας σχετίζεται με καταστάσεις άγχους, ενώ ο πρόσθιος φλοιός του προσαγωγίου συνδέεται με τη συναισθηματική απόκριση και την επίγνωση [2].

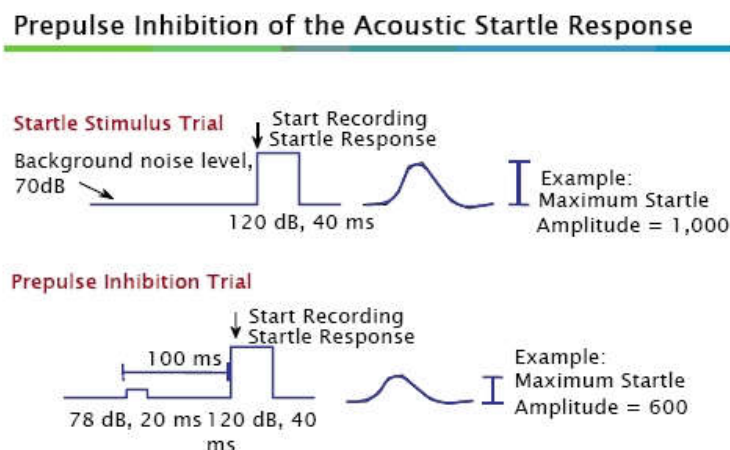
1.1.2 Αισθητικοκινητικός ηθμός και αισθητηριακός ηθμός

Ο *αισθητικοκινητικός ηθμός (sensorimotor gating)* είναι μια θεμελιώδης λειτουργία του εγκεφάλου με την οποία διασφαλίζεται η προστασία του οργανισμού από την αισθητηριακή υπερφόρτωση, γεγονός που επιτυγχάνεται με την ενεργοποίηση ανασταλτικών μηχανισμών που μειώνουν τη διασπαστική επίδραση επερχόμενων ερεθισμάτων μέχρι να ολοκληρωθεί η επεξεργασία της πληροφορίας που βρίσκεται τη στιγμή εκείνη στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος. Αναλυτικότερα, ο αισθητικοκινητικός ηθμός αποτελεί τη λειτουργία εκείνη όπου το κεντρικό νευρικό σύστημα ελέγχει και φιλτράρει τόσο εξωτερική αισθητηριακή, όσο και εσωτερική γνωστική και κινητική πληροφορία από υψηλής τάξης διαδικασίες και τις επακόλουθες αποκρίσεις τους, έτσι ώστε (κατά την επικρατέστερη επιστημονική θεωρία) να δίνεται η δυνατότητα της αδιάλειπτης επεξεργασίας των κυρίαρχων όψεων του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Με τον τρόπο αυτό, οι μηχανισμοί αισθητικοκινητικού ηθμού φέρονται να προλαμβάνουν την πληροφοριακή υπερφόρτωση, εξυπηρετώντας τη νοητική και συμπεριφορική αρτίωση [1].

Αξίζει να σημειωθεί ότι υφίσταται διάκριση μεταξύ *αισθητηριακού ηθμού (sensory gating)* και *αισθητικοκινητικού ηθμού (sensorimotor gating)*, όρων που στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν συχνά ως περίπου συνώνυμοι, καθώς διαπιστώθηκε ότι αφορούν διεργασίες που ενεργοποιούν σχετικώς διαφορετικά νευρωνικά κυκλώματα. Στη λειτουργία του αισθητικοκινητικού ηθμού, η ισχύς του ερεθίσματος είναι τέτοια ώστε να προκαλεί οπωσδήποτε σύσπαση των μυών, ενεργοποιώντας την αντίδραση του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού.

Αυτό γίνεται σαφέστερο λαμβάνοντας υπόψη τα μέσα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των δύο λειτουργιών σε διαφορετικές μεθόδους εργαστηριακών μετρήσεων.

Η βασική μέθοδος ανίχνευσης του αισθητηριακού ηθμού βάσει ακουστικών ερεθισμάτων είναι το *ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (HEΓ)*, μέσω του οποίου καταγράφονται τα *προκλητά δυναμικά P50*. Πρόκειται για την καταγραφή της αντίδρασης του εγκεφάλου σε χρονική απόσταση περίπου 50 msec από τη στιγμή που ξεκινά το ακουστικό ερέθισμα. Στη διαδικασία αυτή, χρησιμοποιείται ο έλεγχος του ζεύγους ήχων «κλικ» (*paired click test*), που αποτελείται από δύο ίδιους ήχους σε χρονική απόσταση 200 msec ο ένας από τον άλλο. Η καταγραφή της εγκεφαλικής δραστηριότητας, καθώς ο δεύτερος ήχος καθίσταται πλεονάζων, αναμένεται να αποτυπωθεί μέσω της καταστολής του δεύτερου ερεθίσματος, που κατά κανόνα προκαλεί μείωση στο πλάτος της κυματομορφής κατά 80% [5].



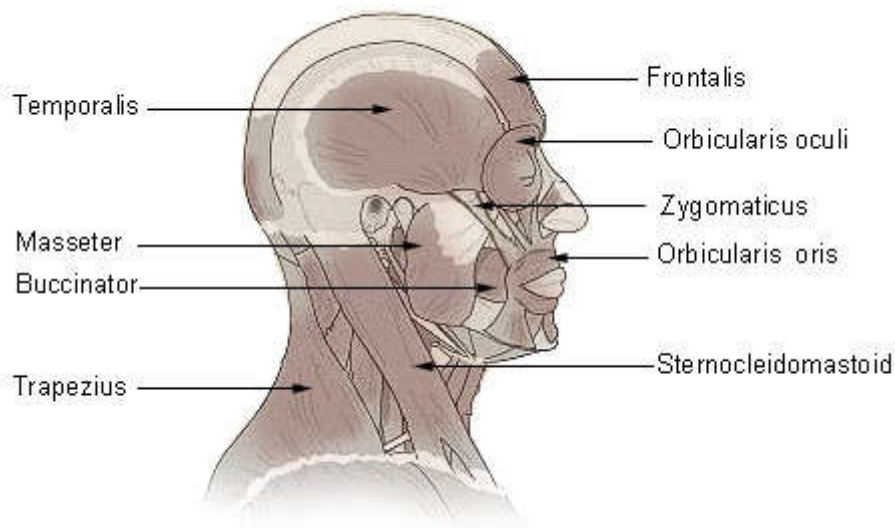
Σχήμα 1.2: Ενδεικτική καταγραφή ακουστικού αντανακλαστικού αιφνιδιασμού, απουσία προπαλμού και παρουσία προπαλμού, με προπαλμική αναστολή 40%.

Για την ανίχνευση του αισθητικοκινητικού ηθμού, η εργαστηριακή διαδικασία τροποποιείται βάσει του μοντέλου της *προπαλμικής αναστολής (prepulse inhibition)* του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού. Το βασικό ακουστικό ερέθισμα (παλμός) είναι σχετικά μεγάλης έντασης (ενδεικτικά: ένταση 120 dB και διάρκεια 40 msec), ικανής να προκαλεί τη σύσπαση των μυών του προσώπου κατά το φαινόμενο του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού. Όταν προηγείται ένα προπαλμικό ερέθισμα σε χρονική απόσταση από 50 έως 300

msec, δηλαδή ένας ήχος μικρότερης διάρκειας και έντασης, ο οποίος από μόνος του δε θα μπορούσε να επιφέρει μυοκινητικές επιπτώσεις, αλλά λειτουργεί ως «προειδοποιητικό» ερέθισμα για τον επερχόμενο παλμό, αναμένουμε ισχυρή μείωση στο εύρος της έντασης του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού. Η ποσοστιαία έκφραση της μείωσης του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού κατά τις συνθήκες προπαλμού-παλμού σε σχέση με το εύρος του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού που εκλύεται από τον παλμό ως μοναδικό ερέθισμα αποτελεί και τον πειραματικό ορισμό της προπαλμικής αναστολής. Η εργαστηριακή διάταξη με την οποία καταγράφεται το εύρος της σύσπασης του περιοφθαλμικού μυός είναι κατά κανόνα το ηλεκτρομυογράφημα (ΗΜΓ).

1.1.3 Εργαστηριακή καταγραφή της προπαλμικής αναστολής

Η εμφάνιση της προπαλμικής αναστολής παρατηρείται σε πλήθος έμβιων όντων. Πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί σε πειραματόζωα, κυρίως τρωκτικά (ποντίκια), με τη χρήση ανιχνευτών σύσπασης των σκελετικών μυών τους σε ειδικούς θαλάμους αντανακλαστικού αιφνιδιασμού (*startle chambers*) [6]. Στον άνθρωπο, η καταγραφή γίνεται μέσω τοποθέτησης ηλεκτροδίων στον μυ του προσώπου που συνδέεται περισσότερο με το κλείσιμο του βλεφάρου, τον *orbicularis oculi* (σφιγκτήρας των βλεφάρων).



Σχήμα 1.3: Σχηματική απεικόνιση των μυών της κεφαλής.



Σχήμα 1.4: Τοποθέτηση ηλεκτροδίων στον μυ *orbicularis oculi* για την καταγραφή του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού.

Η διαδικασία της εργαστηριακής καταγραφής της προπαλμικής αναστολής περιλαμβάνει τη δοκιμή διαφορετικών χρονικών διαστημάτων μεταξύ προπαλμού και παλμού. Συνήθως χρησιμοποιούνται τα διαστήματα των 30, 60, 120, 240 και 480 msec. Ένα τέτοιο διάστημα ορίζεται ως η χρονική απόσταση μεταξύ της έναρξης του προπαλμού και της έναρξης του παλμού. Η μέγιστη προπαλμική αναστολή παρατηρείται συνήθως στο διάστημα των 120 msec και μπορεί να ανέλθει έως και στο 65% [7]. Ωστόσο, όταν το διάστημα μεταξύ προπαλμού και παλμού υπερβεί τα 500 msec, αναμένεται αντιθέτως αύξηση της αντίδρασης του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού, οπότε η διαδικασία ονομάζεται *προπαλμική ενίσχυση (prepulse facilitation)* και συνδέεται πιθανότατα με την ικανότητα της *συντηρούμενης προσοχής (sustained attention)* [8]. Ο ήχος των παλμικών ερεθισμάτων έχει κατά κανόνα τη μορφή του λευκού θορύβου, με την ένταση του παλμού να κυμαίνεται γύρω στα 120 dB, με διάρκεια 40 msec, υπό συνεχές ηχητικό υπόβαθρο της τάξης των 65-70 dB, ενώ ο προπαλμός τίθεται περίπου 3-12 dB υψηλότερα από τον ήχο του υποβάθρου και με διάρκεια 20 msec. Ο σταθερός ήχος του υποβάθρου έχει διαπιστωθεί ότι επιτείνει τον αντανακλαστικό αιφνιδιασμό.

Η ένταση του *αντανακλαστικού αιφνιδιασμού αναφοράς (baseline startle amplitude)*, δηλαδή η αντίδραση που εκλύεται με απουσία προπαλμού, έχει παρατηρηθεί ότι δεν επηρεάζει το μέγεθος της προπαλμικής αναστολής. Επιπλέον, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις με βάση το φύλο, καθώς οι άντρες καταγράφουν μεσοσταθμικά υψηλότερη προπαλμική αναστολή, ενώ οι γυναίκες υψηλότερη προπαλμική διευκόλυνση [9]. Το φαινόμενο της

προπαλμικής αναστολής επίσης επιτείνεται όταν τα ακουστικά ερεθίσματα είναι μονοφωνικά, δηλαδή όταν ο ήχος που αναπαράγεται στα ακουστικά δίνει την αίσθηση ότι προέρχεται από μια συγκεκριμένη χωρικά πηγή [10], καθώς και όταν αυξάνει η διάρκεια του προπαλμού [7].

Η προπαλμική αναστολή του αντανάκλαστικού αιφνιδιασμού είναι πρωταρχικό φαινόμενο, δεν εξαρτάται δηλαδή από τη μάθηση, προηγείται της έναρξης των μηχανισμών προσοχής και χαρακτηρίζεται από σταθερότητα, επαναληψιμότητα και αξιοπιστία. Αρκετές ψυχοφυσιολογικές μελέτες έχουν εστιάσει στον διαχωρισμό μεταξύ *ακούσιας* και *ελεγχόμενης διαδικασίας*, όταν δηλαδή ο εξεταζόμενος δε γνωρίζει προκαταβολικά την ύπαρξη των προειδοποιητικών προπαλμών και όταν επιστάται η προσοχή του στην ύπαρξή τους. Τα συμπεράσματα των ερευνών έδειξαν ότι στην περίπτωση της ελεγχόμενης (εκούσιας) διαδικασίας, η προπαλμική αναστολή αυξάνεται στους υγιείς πληθυσμούς, αλλά μόνο όταν το διάστημα μεταξύ προπαλμού και παλμού υπερβαίνει τα 120 msec. Το γεγονός αυτό φαίνεται να οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι εγκεφαλικοί μηχανισμοί που ενεργοποιούνται κατά την ελεγχόμενη διαδικασία διαφέρουν αρκετά από εκείνους της ακούσιας, καθώς σε νευροαπεικονιστικές μελέτες υπό συνθήκες ελεγχόμενης προπαλμικής αναστολής διαπιστώθηκε αυξημένη ενεργοποίηση του μετωπιαίου φλοιού και του θαλάμου [1]. Για τη μείωση των επιπέδων εξοικείωσης κατά τη διάρκεια της εξέτασης, γενικά προτιμώνται τα ακανόνιστα διαστήματα μεταξύ δύο εκλυτικών ερεθισμάτων, είτε παλμού είτε προπαλμού-παλμού, ώστε να μην έχει ο εξεταζόμενος τη δυνατότητα της πρόβλεψης της χρονικής στιγμής έναρξης του επερχόμενου ακουστικού ερεθίσματος.

1.2 Διαταραχές της προπαλμικής αναστολής

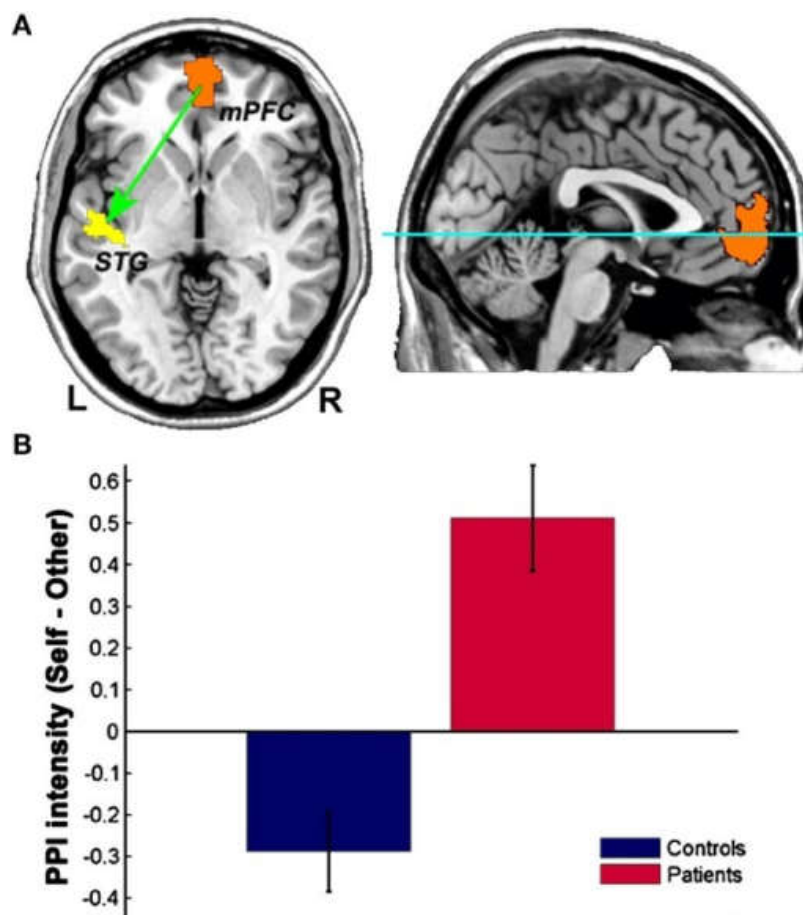
1.2.1 Μελέτη προπαλμικής αναστολής και σχιζοφρένεια

Η προπαλμική αναστολή μπορεί να θεωρηθεί έγκυρα ως ένας κατάλληλος *ενδοφαινοτυπικός δείκτης του κεντρικού αισθητικοκινητικού ηθμού*. Η καταγραφή ανωμαλιών στη λειτουργία της είναι πιθανό να υποδηλώνει διαταραχές στο νευρωνικό κύκλωμα, που με τη σειρά τους ενδέχεται να εκδηλώνονται με τη μορφή των ψυχικών διαταραχών. Ειδικότερα, η ελλειμματική προπαλμική αναστολή αποτελεί χαρακτηριστικό εύρημα στη

μελέτη της σχιζοφρένειας, ήδη από εκθέσεις του 1978 [11]. Αξίζει να σημειωθεί ότι ελλειμματικές διαταραχές της προπαλμικής αναστολής έχουν διαπιστωθεί σε μη ψυχωσικούς πρώτου βαθμού συγγενείς ασθενών με σχιζοφρένεια, γεγονός που στηρίζει την άποψη ότι η συγκεκριμένη διαταραχή της επεξεργασίας πληροφοριών αποτελεί μια κεντρική διαταραχή, η οποία σε συνδυασμό και με άλλους παράγοντες διαδραματίζει αιτιακό ρόλο στην εκδήλωση των γνωστικών ελλειμμάτων που παρατηρούνται στη σχιζοφρένεια και τις συναφείς προς αυτή διαταραχές. Το ίδιο εύρημα ουσιαστικά κατέστησε την προπαλμική αναστολή έναν έγκυρο ενδοφαινοτυπικό δείκτη σε γενετικές έρευνες. Με βάση τα σημερινά δεδομένα, ο έλεγχος προπαλμικής αναστολής δεν μπορεί να θεωρηθεί διαγνωστικό εργαλείο, ούτε αποδεικνύει αυτοτελώς την ύπαρξη δυσλειτουργιών σε νευρωνικά κυκλώματα του εγκεφάλου. Ωστόσο, σε συνδυασμό με άλλα εργαλεία, μπορεί να φανεί χρήσιμος στην περιγραφή αλλοιώσεων και απορρυθμίσεων σε συγκεκριμένες κλινικές καταστάσεις. Αυτό που εξετάζεται συνεπώς είναι μια συγκεκριμένη αυτόματη διεργασία σε ένα ουδέτερο, ανεξάρτητο από τη μάθηση μοντέλο, που δίνει επιπλέον τη δυνατότητα να συνδεθούν οι ιατρικές έρευνες στον άνθρωπο με την αντίστοιχη μελέτη της προπαλμικής αναστολής σε ζώα [1].

Η συνεισφορά των μετρήσεων προπαλμικής αναστολής είναι ιδιαίτερος σημαντικές στη μελέτη της *νευροβιολογίας της σχιζοφρένειας*, λόγω της συνάφειάς της «ανατομίας» του αισθητικοκινητικού ηθμού με την παθοφυσιολογία της διαταραχής, δεδομένης της ελλειμματικής δυνατότητας των ασθενών να «φιλτράρουν» τη γνωστική και αισθητηριακή πληροφορία που δέχονται ως χαρακτηριστικό κλινικό σύμπτωμα της διαταραχής. Οι πάσχοντες από σχιζοφρένεια παρουσιάζουν απώλειες σε μετρήσεις *συντηρούμενης ή ηθελημένης προσοχής (voluntary attention)*, ενώ γνωρίζουμε από κλινικές έρευνες και πειραματικές μετρήσεις ότι παρουσιάζουν επίσης αδυναμία να παρεμποδίσουν δευτερεύουσες σκέψεις και αισθητηριακά ερεθίσματα από το να εισέρχονται στη συνείδηση. Σε μια σειρά μελετών, έχει διερευνηθεί η σχέση μεταξύ προπαλμικής αναστολής και γνωστικών διαταραχών στη σχιζοφρένεια. Έχει βρεθεί ότι οι διαταραχές στην προπαλμική αναστολή συσχετίζονται σημαντικά με τις διαταραχές στη σκέψη και τη διασπαστικότητά της. Σήμερα, η σχιζοφρένεια και οι συναφείς προς αυτή διαταραχές θεωρούνται καταστάσεις στις οποίες ο διαταραγμένος αισθητικοκινητικός ηθμός οδηγεί σε

«υπερφόρτωση» του κεντρικού νευρικού συστήματος και σε «γνωστική διάσπαση». Η γνωστική διάσπαση συνεπάγεται ελλειμματική γνωστική λειτουργία, που οδηγεί σε μια σειρά από κλινικά συμπτώματα που αφορούν τόσο τη μορφή της σκέψης, όπως η χάλαση του ειρμού και η υπερπεριεκτική (overinclusive) σκέψη, όσο και το περιεχόμενό της, όπως παραληρήματα και ψευδαισθήσεις, αλλά και τη γενικότερη λεκτική και κινητική συμπεριφορά (ακατανόητη ομιλία, ανακόλουθη και απρόσφορη συμπεριφορά). Δημογραφικοί παράγοντες και συμπτώματα που έχουν συσχετιστεί με μειωμένα επίπεδα προπαλμικής αναστολής στη σχιζοφρένεια περιλαμβάνουν την έναρξη της νόσου σε μικρή ηλικία και την αυξημένη παρουσία θετικών και αρνητικών συμπτωμάτων [1].



Σχήμα 1.5: Μελέτη προπαλμικής αναστολής σε υγιείς πληθυσμούς και πάσχοντες από σχιζοφρένεια. Εδώ εξετάζεται και η λειτουργική συνδεσιμότητα των εγκεφαλικών περιοχών από τον έσω προμετωπιαίο φλοιό (medial prefrontal cortex) έως την αριστερή άνω κροταφική έλικα (left superior temporal gyrus).

1.2.2 Μελέτη προπαλμικής αναστολής σε άλλες διαταραχές

Διαταραχές της προπαλμικής αναστολής έχουν επίσης αναφερθεί στις περιπτώσεις της σχιζότυπης διαταραχής προσωπικότητας, στην ιδεοψυχαναγκαστική διαταραχή, στη διαταραχή πανικού, στη διπολική διαταραχή, στη νόσο Huntington, στο σύνδρομο Tourette, στη διαταραχή ελλειμματικής προσοχής, στην επιληψία κροταφικού λοβού συνοδευόμενη από ψύχωση, καθώς και στη νυκτερινή ενούρηση. Πρόσφατες συγκεντρωτικές μελέτες επαληθεύουν, εμπλουτίζουν, τροποποιούν ή απορρίπτουν ορισμένες από τις παραπάνω αναφορές [12].

Η συστηματική ύπαρξη ελλειμματικής προπαλμικής αναστολής στην *ιδεοψυχαναγκαστική διαταραχή* έχει διαπιστωθεί επανειλημμένα σε έρευνες. Έχει παρατηρηθεί ότι βρίσκεται σε υψηλότερα επίπεδα ιδιαίτερα σε εξεταζόμενους που παρουσιάζουν επιπλέον ακούσιες νευρικές συσπάσεις (τικ) [13].

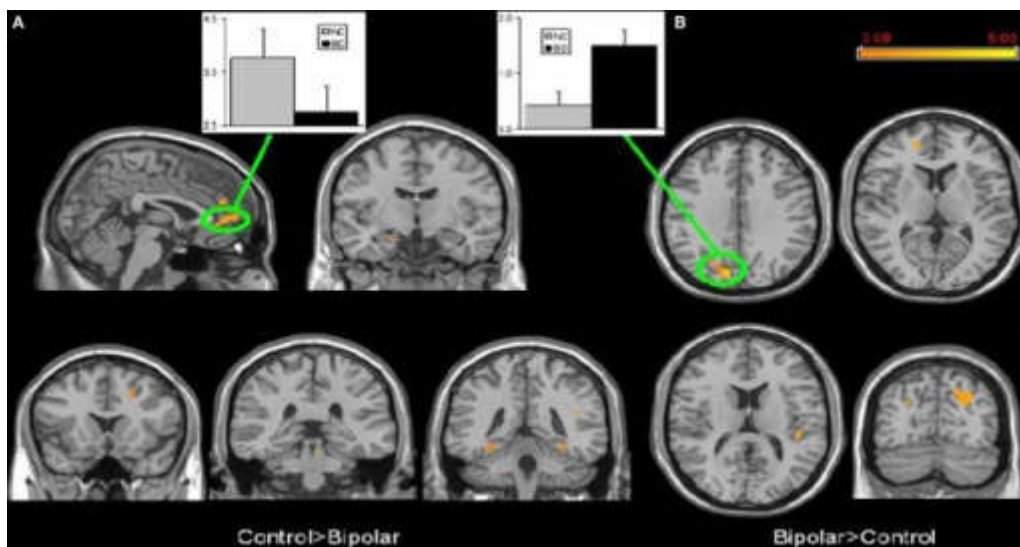
Αντίστοιχα, εξετάσεις παιδιών και εφήβων που έχουν διαγνωστεί με *σύνδρομο Tourette* δείχνουν τη συστηματική ύπαρξη ελλειμματικής προπαλμικής αναστολής. Ο πρόσφατος συσχετισμός του συνδρόμου Tourette με τη μετάλλαξη προσδιορισμένου στελέχους του ανθρώπινου γονιδιώματος (Hdc W317X) αποτελεί και την πρώτη συσχέτιση της ελλειμματικής προπαλμικής αναστολής με συγκεκριμένο γονότυπο [14].

Αναφορές περί ελλειμματικής προπαλμικής αναστολής παρατηρούνται και σε ελέγχους ασθενών της νόσου *Huntington*, όπου όμως άλλοι ασθενείς καταγράφουν ελλειμματικές μετρήσεις σε ακουστικά ερεθίσματα, άλλοι σε σωματοαισθητηριακά και άλλοι και στους δύο ελέγχους [15]. Καθώς παρόμοιες ανωμαλίες παρουσιάστηκαν και στην εξέταση του βλεφαρίσματος μέσω προκλητής νευροδιέγερσης (electrical stimulation of the supraorbital nerve), μπορούν να γίνουν βάσιμες υποθέσεις για τη νευροφυσιολογική αντανάκλαστική δυσλειτουργία στη νόσο Huntington, χωρίς ωστόσο να αποδεικνύεται σαφής συσχέτιση στα ευρήματα των δύο διακριτών μεθόδων εξέτασης.

Μελέτες της προπαλμικής αναστολής σε παιδιά με *πρωτογενή νυκτερινή ενούρηση* έδειξαν χαμηλά επίπεδα προπαλμικής αναστολής, ιδίως στα διαστήματα των 120 ms. Αρχικές έρευνες συνέδεαν τη συνύπαρξη διαταραχής

ελλειμματικής προσοχής με τις υψηλότερες καταγραφές ελλειμματικής προπαλμικής αναστολής, γεγονός που όμως δεν επιβεβαιώθηκε στις μεταγενέστερες έρευνες. Παρουσιάζει ενδιαφέρον το γεγονός ότι επαναληπτικές μετρήσεις στα ίδια παιδιά μετά την πάροδο δύο ετών κατέγραψαν φυσιολογικά αποτελέσματα, από όπου καταδείχτηκε ότι η ωρίμανση του εγκεφαλικού στελέχους διαδραματίζει αποφασιστικό ρόλο στην απάλειψη των συμπτωμάτων [16].

Οι πρώτες μελέτες προπαλμικής αναστολής στη διπολική διαταραχή έδιναν παρόμοια ευρήματα ελλειμματικού τύπου. Ωστόσο, όταν τα πειράματα επαναλήφθηκαν σε υποκείμενα σε φάση υπομανίας (ευθυμίας), τα αποτελέσματα βρισκόνταν στα όρια του φυσιολογικού. Νέες μελέτες σε άτομα με διπολική διαταραχή σε μικτές καταστάσεις επίσης δεν μπόρεσαν να δώσουν σαφή συμπεράσματα. Η βασικότερη υπόθεση πλέον υποστηρίζει ότι τα επίπεδα προπαλμικής αναστολής στη διπολική διαταραχή εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση του υποκειμένου [17].



Σχήμα 1.6: Μελέτη εγκεφαλικής λειτουργίας σε πάσχοντες από διπολική διαταραχή.

Μετρήσεις προπαλμικής αναστολής που πραγματοποιήθηκαν σε άτομα που έπασχαν από κρίσεις πανικού έδειξαν ελλειμματική λειτουργία. Ωστόσο, καθώς η ένταση του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού παρουσίαζε αύξηση όταν οι μετρήσεις επαναλαμβάνονταν, γεγονός που δεν μπορούσε να αποδοθεί σε συγκεκριμένο παράγοντα, τα συμπεράσματα της έρευνας παραμένουν μέχρι στιγμής ατελή [18] [19].

Σε πληθυσμούς που διαγνώστηκαν με *σύνδρομο Asperger*, καταγράφηκαν ασαφή αποτελέσματα, ενώ συσχέτιση μεταξύ ελλειμματικής προπαλμικής αναστολής και ατόμων στο φάσμα του αυτισμού εμφανίζεται στην κατηγορία πληθυσμών με *σύνδρομο εύθραυστου χρωμοσώματος X*, παρά στην κατηγορία του ιδιοπαθούς αυτισμού. Επίσης, η γνωστική και συμπεριφορική παθολογία της αυτιστικής συμπεριφοράς φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Από τα μέχρι στιγμής συμπεράσματα, προκύπτει η ανάγκη περαιτέρω έρευνας της σχέσης προπαλμικής αναστολής και αυτισμού, με έμφαση στο σύνδρομο εύθραυστου χρωμοσώματος X [20].

Ασθενείς πάσχοντες από *μετατραυματική αγχώδη διαταραχή* διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα αντανακλαστικού αιφνιδιασμού αναφοράς. Η ύπαρξη ορισμένων εκθέσεων που παρατηρούν ανωμαλίες στη λειτουργία της προπαλμικής αναστολής σε ασθενείς και άλλων που δίνουν σχετικώς φυσιολογικά αποτελέσματα δεν επαρκούν για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, δεδομένων των μικρών και ετερογενών ομάδων εξεταζομένων, καθώς και των μεθοδολογικών διαφοροποιήσεων [12].

Οι έρευνες της προπαλμικής αναστολής στη *διαταραχή μείζονος κατάθλιψης* δίνουν σταθερά μη ελλειμματικές μετρήσεις [21]. Μια ελαφρά τάση ελλειμματικής καταγραφής θεωρείται πως μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη διαταραχών σκέψης σε ένα τμήμα του πληθυσμού, ενώ η χορήγηση αντικαταθλιπτικής αγωγής δεν επηρεάζει τις μετρήσεις. Οι αναφορές για διαταραχές της προπαλμικής αναστολής σε άτομα με *διαταραχή ελλειμματικής προσοχής* δεν επιβεβαιώνονται από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν τόσο σε ανήλικους, όσο και ενήλικους πληθυσμούς, πέρα από την ανίχνευση υψηλών επιπέδων αντανακλαστικού αιφνιδιασμού αναφοράς [12].

Έλεγχοι προπαλμικής αναστολής έχουν επίσης πραγματοποιηθεί σε σχέση με γενετικές διαταραχές. Αξιοσημείωτα είναι τα αποτελέσματα μετρήσεων σε παιδιά με *σύνδρομο μικροελλείμματος 22q11.2 (σύνδρομο DiGeorge)*, όπου παρατηρήθηκε ελλειμματική προπαλμική αναστολή, σε αντίθεση με τις φυσιολογικές καταγραφές σε παράλληλους ελέγχους στα υγιή αδέρφια τους [22]. Επίσης, η μοναδική έρευνα που έχει γίνει μέχρι σήμερα σε ασθενείς με *σύνδρομο Klinefelter*, κατέδειξε παρόμοια ελλείμματα στον αισθητικοκινητικό ηθμό [23]. Ο τομέας της συγκεκριμένης έρευνας, ειδικότερα στο σύνδρομο μικροελλείμματος 22q11.2, παρουσιάζει ενδιαφέρον για

περαιτέρω ερευνητική εργασία, δεδομένης τόσο της σαφήνειας της αιτιολογικής βλάβης, όσο και του υψηλού ρίσκου της κατάστασης για εκδήλωση σχιζοφρένειας (25%).

1.2.3 Μελέτη προπαλμικής αναστολής σε σχέση με διάφορες ουσίες

Μετρήσεις προπαλμικής αναστολής έχουν γίνει και σε χρήστες ναρκωτικών και ψυχοτρόπων ουσιών, τα δεδομένα ωστόσο είναι περιορισμένα και σχετικώς ανεπαρκή. Χρήστες ινδικής κάνναβης παρουσίασαν ελλειμματική προπαλμική αναστολή, αποκλειστικά όμως στην ελεγχόμενη διαδικασία και όχι στην ακούσια [24]. Αναφορές συνδέουν το φαινόμενο αυτό με τη χρόνια χρήση κι όχι με το βαθμό της προσωρινής επήρειας [25]. Χρήστες κοκαΐνης παρουσίασαν χαμηλό επίπεδο αντανεκλαστικού αιφνιδιασμού αναφοράς (χωρίς προπαλμό), αλλά ιδιαίτερα ισχυρή προπαλμική αναστολή [26]. Χρήστες MDMA (ecstasy) επίσης παρουσίασαν ισχυρό επίπεδο προπαλμικής αναστολής, αλλά όχι σε όλες τις έρευνες [27].

Η μελέτη προπαλμικής αναστολής σε σχέση με την κατανάλωση καφεΐνης (σε δόσεις στοματικής λήψης των 0, 2 και 4 mg/kg) δείχνει ότι παρά τη συμβολή της ουσίας στην ανάπτυξη γενικευμένης διέγερσης των αντανεκλαστικών, η επιρροή της στους δείκτες μέτρησης ήταν αμελητέα. Ωστόσο, φαίνεται ότι η καφεΐνη δρα ανασταλτικά στη διάκριση μεταξύ ακούσιας και ελεγχόμενης διαδικασίας, απαλείφοντας τα ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα προπαλμικής αναστολής στην ελεγχόμενη διαδικασία για προπαλμικά διαστήματα μεγαλύτερα των 120 ms. Επιπλέον, η καφεΐνη επέδρασε ανασταλτικά στα υψηλότερα επίπεδα αντανεκλαστικού αιφνιδιασμού σε ελεγχόμενα πειράματα με απτικά ερεθίσματα για τα μικρότερα διαστήματα προπαλμών [28].

Οι μετρήσεις προπαλμικής αναστολής σε καπνιστές δείχνουν ότι η νικοτίνη αυξάνει τα επίπεδα προπαλμικής αναστολής. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώθηκαν και σε πειράματα υποδόριας χορήγησης νικοτίνης σε υγιείς πληθυσμούς. Στα πειραματόζωα, η χορήγηση νικοτίνης έδειξε παρόμοια αποτελέσματα, αλλά μόνο για χαμηλές δόσεις. Οι πάσχοντες από χρόνια σχιζοφρένεια είναι καπνιστές σε ποσοστό μεγαλύτερο τόσο του γενικού πληθυσμού, όσο και σε σύγκριση με πάσχοντες από άλλες διαταραχές ή

ασθένειες. Μετρήσεις σε πάσχοντες από σχιζοφρένεια που είχαν καπνίσει ένα τσιγάρο σε διάστημα μικρότερο των δέκα λεπτών πριν την έναρξη της διαδικασίας καταγραφής, έδειξαν σημαντικά υψηλότερα επίπεδα προπαλμικής αναστολής [29].

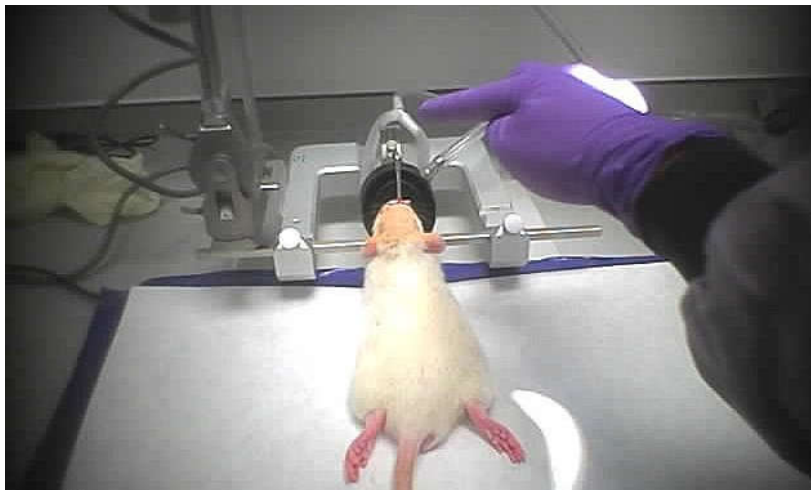
1.3 Το νευροβιολογικό υπόστρωμα της προπαλμικής αναστολής

1.3.1 Μέθοδοι έρευνας του νευροβιολογικού υποστρώματος

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος ως προς την κατανόηση του *νευρωνικού υποστρώματος που διαμεσολαβεί την προπαλμική αναστολή*, κυρίως μέσα από εκτεταμένες μελέτες σε πειραματόζωα. Οι πειραματικοί χειρισμοί περιλαμβάνουν μεμονωμένες ή συνδυασμένες παρεμβάσεις, όπως η πρόκληση καταστροφών σε συγκεκριμένες περιοχές του εγκεφάλου, η ενδο-εγκεφαλική έγχυση νευροδιαβιβαστών ή ουσιών με συγκεκριμένες φαρμακολογικές ιδιότητες, ο ηλεκτρικός ερεθισμός του εγκεφάλου και η συστηματική χορήγηση νευροτοξινών. Αυτές οι πειραματικές παρεμβάσεις συχνά συνδυάζονται με ανατομικές και νευροχημικές αναλύσεις, που εκτείνονται από ανακατασκευή του κατεστραμμένου ιστού, σε τεχνικές διαπίστωσης ανατομικών συνδέσεων, σε μικροδιαπίδυση και σε τεχνικές παρέμβασης στο γονιδίωμα. Οι γενετικές προσεγγίσεις, όπως η σύγκριση διαφορετικών ειδών (strain comparisons), η επιλεκτική φαρμακογενετική αναπαραγωγή (selective pharmacogenetic inbreeding) και η παραγωγή γενετικά τροποποιημένων ζώων, έχουν επίσης βοηθήσει στην κατανόηση του νευρωνικού υποστρώματος της προπαλμικής αναστολής [30].

Έτσι, ευρήματα από μελέτες με τις προαναφερθείσες τεχνικές έχουν συμβάλει στη διαμόρφωση ενός αρχικού νευρωνικού «χάρτη» του υποστρώματος της προπαλμικής αναστολής στα ζώα και τον άνθρωπο. Το υπόστρωμα αυτό περιλαμβάνει δομές, νευροδιαβιβαστές και νευροπεπτίδια που εντοπίζονται σε ένα μεγάλο εύρος του εγκεφάλου, το οποίο περιλαμβάνει δομές από το φλοιό μέχρι τη γέφυρα. Παρά το γεγονός ότι ο αντανακλαστικός αιφνιδιασμός και η προπαλμική αναστολή μπορούν να καταγραφούν και να ποσοτικοποιηθούν τόσο στον άνθρωπο όσο και στα ζώα, και παρά τις ομοιότητες που ενυπάρχουν στο νευρωνικό έλεγχο, όπως παρουσιάζονται σε μελέτες διαταραχής της προπαλμικής αναστολής σε κλινικούς πληθυσμούς,

είναι εσφαλμένο να θεωρηθεί ότι υπάρχει πλήρης ομολογία στο νευρωνικό υπόστρωμα της προπαλμικής αναστολής μεταξύ των ειδών. Οι πιο σημαντικές διαφορές στο εγκεφαλικό κύκλωμα μεταξύ των ειδών φαίνεται να εντοπίζονται στις οπίσθιες και στις φυλογενετικά νεότερες εγκεφαλικές περιοχές. Διαφορές ως προς τη διαμεσολάβηση του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού και της προπαλμικής αναστολής μεταξύ των ειδών είναι ωστόσο εμφανείς ακόμη και σε πιο πρωτόγονες περιοχές του εγκεφάλου [30].



Σχήμα 1.7: Επέμβαση στον εγκέφαλο εργαστηριακού πειραματόζωου.

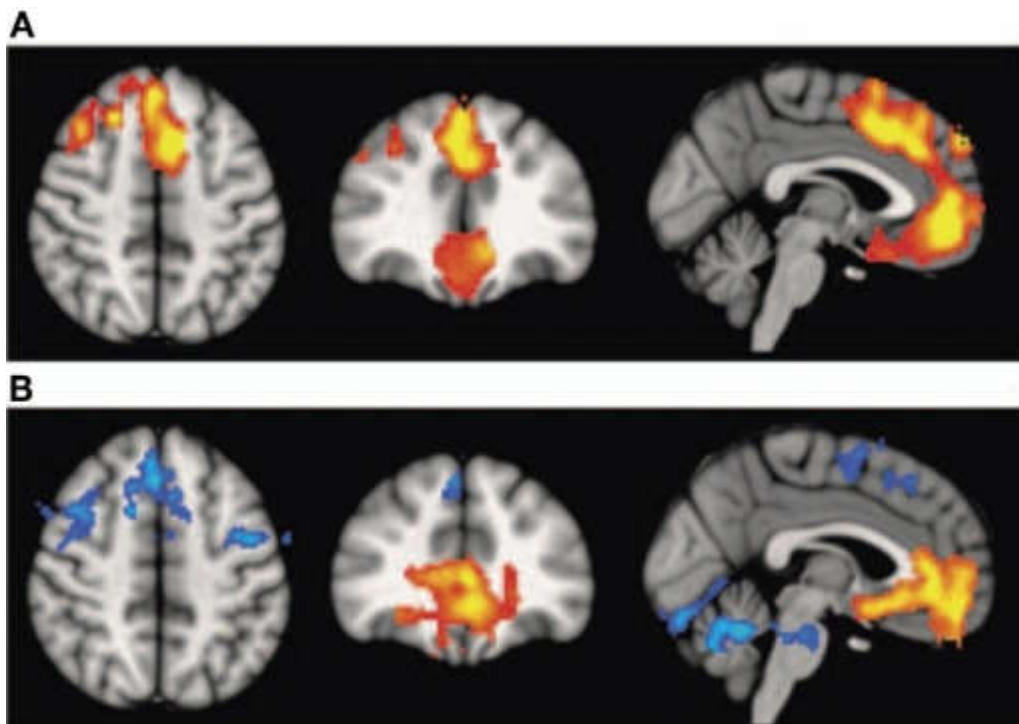
1.3.2 Συμπεράσματα έρευνας του νευροβιολογικού υποστρώματος

Όσον αφορά τα συμπεράσματα των σημερινών ερευνών σχετικά με το νευρωνικό υπόστρωμα που διαμεσολαβεί την προπαλμική αναστολή του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού, αξίζει να σταθεί κανείς στον ρόλο που διαδραματίζουν οι παρακάτω δομές της εγκεφαλικής λειτουργίας:

Ο *ιππόκαμπος (hippocampus)* διαμεσολαβεί στην επεξεργασία της αισθητηριακής πληροφορίας. Οι πιο άμεσες ενδείξεις προέκυψαν από μελέτες σε ζώα, από όπου εκτιμήθηκε ότι η χολινεργική νευροδιαβίβαση συμβάλλει καθοριστικά στη ρύθμιση της προπαλμικής αναστολής. Επιπλέον, η πρόκληση βλαβών στον κοιλιακό ιππόκαμπο παρατηρήθηκε πως έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη καθυστερημένης ευαισθητοποίησης στη μείωση της προπαλμικής αναστολής από ντοπαμινεργικούς αγωνιστές, γεγονός που μπορεί να έχει εξαιρετική σημασία για την κατανόηση της διαταραχής της προπαλμικής αναστολής στη σχιζοφρένεια, βάσει της θεωρητικής και εμπειρικής σύνδεσης

ανάμεσα στη δυσλειτουργία του ιπλόκαμπου και στην αυξημένη ντοπαμινεργική δραστηριότητα του μεσομεταιχμιακού συστήματος στην εν λόγω νόσο [31].

Από μελέτες σε ζώα, διαπιστώθηκε ότι ο έσω προμετωπιαίος φλοιός (*medial prefrontal cortex*) ρυθμίζει την προπαλμική αναστολή με τρόπο ανάλογο με τον προτεινόμενο ρόλο της μειωμένης ντοπαμινεργικής νευροδιαβίβασης της περιοχής αυτής στη σχιζοφρένεια, καθώς παρατηρήθηκε ότι η προπαλμική αναστολή μειώνεται σε πειραματικές παρεμβάσεις που μειώνουν τη ντοπαμινεργική νευροδιαβίβαση [32].



Σχήμα 1.8: Ευρήματα μελέτης εγκεφαλικής λειτουργίας σε πάσχοντες από σχιζοφρένεια με μεθόδους VBM (A) και fMRI (B). Με μπλε χρώμα οι περιοχές υπολειτουργίας και με πορτοκαλί οι περιοχές υπερδιέγερσης.

Πειράματα επιβεβαίωσαν ότι καταστροφές στην αμυγδαλή (*amygdala*) μείωσαν σημαντικά την προπαλμική αναστολή. Νεότερα πειράματα εξειδίκευσαν τον τομέα που συμβάλλει στη λειτουργία αυτή, ειδικά στον πλάγιο βασικό πυρήνα της αμυγδαλής (*basolateral amygdala*) [30].

Ο ιπλόκαμπος, η αμυγδαλή και ο προμετωπιαίος φλοιός επηρεάζουν τη συμπεριφορά μέσω των υποφλοιικών προβολών τους στον επικλινή πυρήνα (*nucleus accumbens*) και στην κοιλιακή καλυπτική περιοχή (*ventral tegmental*

area). Ο επικλινής πυρήνας φαίνεται να έχει καθοριστικό ρόλο στη σύνδεση περιοχών του πρόσθιου εγκεφάλου και του μεταχιακού συστήματος, που ρυθμίζουν τις ανώτερες γνωστικές λειτουργίες και τη συμπεριφορά. Επιπλέον, η ντοπαμινεργική δραστηριότητα στον επικλινή πυρήνα έχει βρεθεί ότι είναι ευαίσθητη και στη μεμονωμένη επίδραση των παλμών και των προπαλμών [30].

Η ντοπαμινεργική νευροδιαβίβαση και σε άλλες περιοχές του πρόσθιου εγκεφάλου, πέραν του επικλινούς πυρήνα, εμπλέκεται στη διαμεσολάβηση της προπαλμικής αναστολής, με μελέτες να έχουν επικεντρωθεί στο *ραβδωτό σώμα (striatum)* και στην *κοιλιακή ωχρά σφαίρα (ventral pallidum)*. Ειδικότερα, η μειωμένη προπαλμική αναστολή σε ασθενείς με νόσο του Huntington φαίνεται να συνδέεται με απώλεια GABAεργικών νευρώνων σε προβολές του ραβδωτού σώματος και της ωχράς σφαίρας, ενώ σε κάποιες μελέτες έχει διαπιστωθεί διαταραχή στο μεταβολισμό και τον όγκο της κοιλιακής ωχράς σφαίρας ή της έσω μοίρας της ωχράς σφαίρας (*internal pallidum*) στη σχιζοφρένεια. Η μείωση της προπαλμικής αναστολής μετά από αύξηση της ντοπαμινεργικής νευροδιαβίβασης στο ραβδωτό σώμα φαίνεται να αντανakλά τη μείωση της GABAεργικής νευροδιαβίβασης σε προβολές του ραβδωτού σώματος σε υποφλοιικές περιοχές, που περιλαμβάνουν και την κοιλιακή ωχρά σφαίρα [30]. Αυτή η προβολή από το ραβδωτό σώμα στην κοιλιακή ωχρά σφαίρα αποτελεί τμήμα ενός νευρωνικού κυκλώματος, το οποίο ρυθμίζει κεντρικούς ανασταλτικούς μηχανισμούς στα θηλαστικά.

Εκτεταμένες καταστροφές του *κάτω διδυμίου (inferior colliculus)* αυξάνουν το εύρος του αντανakλαστικού αιφνιδιασμού και απαλείφουν πλήρως την προπαλμική αναστολή όταν χρησιμοποιούνται ακουστικοί, αλλά όχι και οπτικοί προπαλμοί [33]. Για τον λόγο αυτό, προτάθηκε ισχυρά ότι το κάτω διδύμιο ενεργοποιείται από τον ακουστικό προπαλμό και προκαλεί φαινόμενο αναστολής. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι ηλεκτρικός ερεθισμός του κάτω διδυμίου πριν τη χορήγηση ενός ακουστικού παλμού, μιμείται τη δράση των ακουστικών προπαλμών και αναστέλλει τον αντανakλαστικό αιφνιδιασμό [34]. Επομένως, το κάτω διδύμιο φαίνεται να αποτελεί ένα σημαντικό τμήμα της ακουστικής οδού που διαμεσολαβεί την ακουστική προπαλμική αναστολή. Ο κεντρικός πυρήνας του δέχεται ακουστικές πληροφορίες, οι οποίες μεταφέρονται στον εξωτερικό πυρήνα πριν φθάσουν στις εσωτερικές στιβάδες του άνω διδυμίου. Με τον

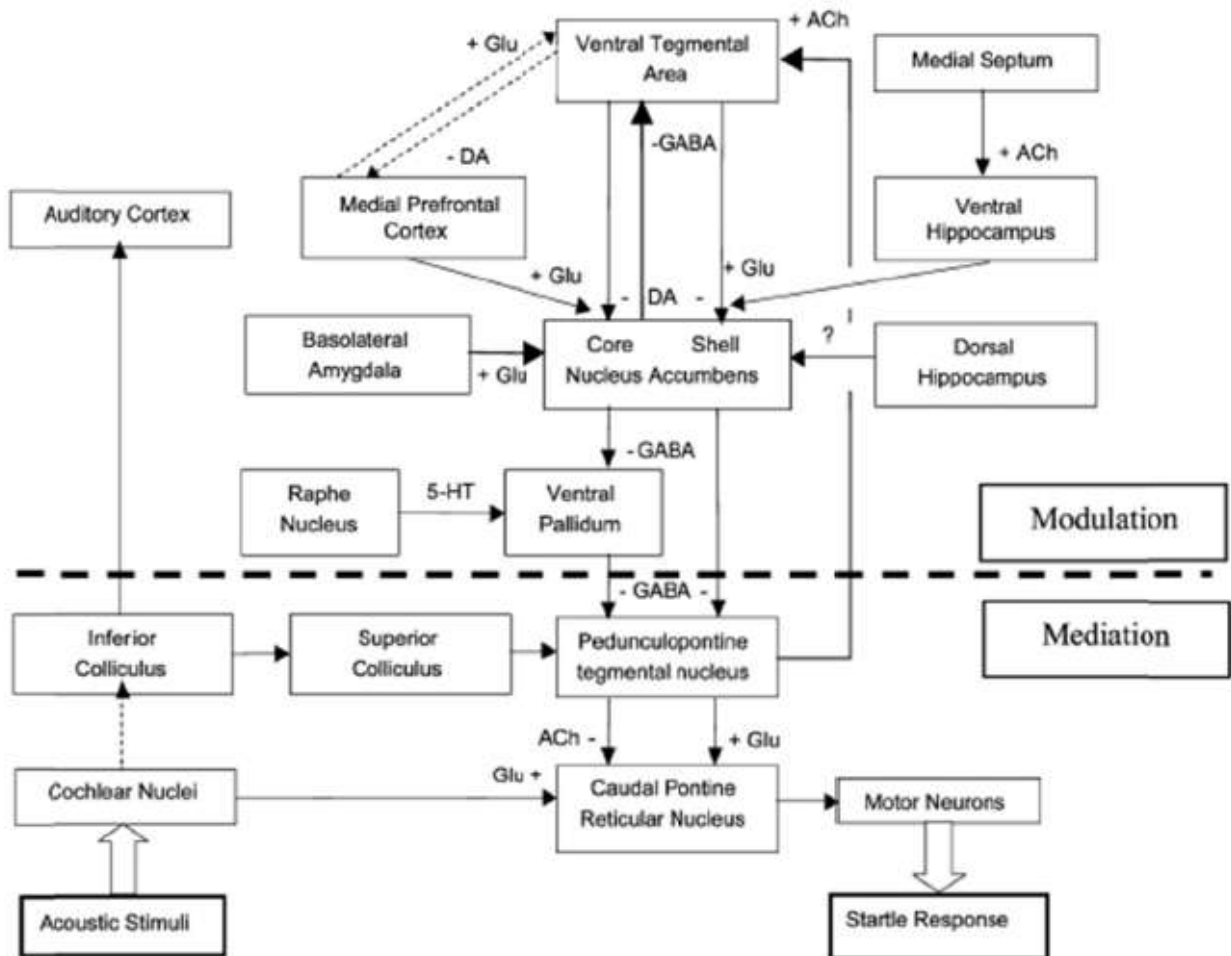
τρόπο αυτό, το κάτω διδύμιο μεταδίδει πληροφορίες από το ακουστικό σύστημα στο νευρωνικό κύκλωμα που διαμεσολαβεί την προπαλμική αναστολή.

Η πρόκληση καταστροφών στο άνω διδύμιο (*superior colliculus*) έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της προπαλμικής αναστολής περίπου κατά 45% [35], ενώ φαρμακολογικές παρεμβάσεις με αποκλεισμό των GABAεργικών υποδοχέων αντιθέτως αυξάνουν τα επίπεδα της προπαλμικής αναστολής [36]. Ο ηλεκτρικός ερεθισμός του άνω διδυμίου πριν τη χορήγηση παλμών βρέθηκε ότι έχει ανάλογα αποτελέσματα με τον ηλεκτρικό ερεθισμό του κάτω διδυμίου, δηλαδή μείωση του εύρους του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού κατά 80% περίπου [34]. Συμπερασματικά, το άνω διδύμιο φαίνεται να διαθέτει τις φυσιολογικές και ανατομικές ιδιότητες, για να λειτουργήσει ως ένας μεταβατικός σταθμός αναμετάδοσης των διαφόρων (ακουστικών, οπτικών, απτικών) προπαλμών προς τον σκελογεφυρικό πυρήνα της καλύπτρας [30].

Ο σκελογεφυρικός πυρήνας της καλύπτρας (*pedunculorontine tegmental nucleus*), καθώς και ο έξω ραχιαίος πυρήνας της καλύπτρας (*laterodorsal tegmental nucleus*) αποτελούν μέρος του δικτυωτού σχηματισμού (*reticular formation*) του μεσεγκεφάλου, ο οποίος έχει πολλαπλές λειτουργίες όσον αφορά τη ρύθμιση της συμπεριφοράς. Σε πειραματικές έρευνες, καταστροφές εστιασμένες στον σκελογεφυρικό πυρήνα μείωσαν τα επίπεδα της προπαλμικής αναστολής, αλλά αύξησαν το εύρος του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού αναφοράς [37]. Καταστροφές εστιασμένες στον έξω ραχιαίο πυρήνα μείωσαν την προπαλμική αναστολή κατά περίπου 40% χωρίς να επηρεάσουν το εύρος του βασικού αντανακλαστικού αιφνιδιασμού [38]. Καταστροφές εστιασμένες στους χολινεργικούς νευρώνες του σκελογεφυρικού πυρήνα ελάττωσαν την προπαλμική αναστολή κατά 65% περίπου, χωρίς μεταβολές στον αντανακλαστικό αιφνιδιασμό [39]. Ο έξω ραχιαίος πυρήνας αποτελείται από ακόμη μεγαλύτερες συγκεντρώσεις (70%) χολινεργικών νευρώνων και οι καταστροφές ελάττωσαν την προπαλμική αναστολή περίπου κατά 40%, χωρίς να επηρεάσουν τον αντανακλαστικό αιφνιδιασμό [38].

Η δικτυωτή μοίρα της μέλαινας ουσίας (*substantia nigra pars reticulata*) φαίνεται να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον ανασταλτικό έλεγχο της κινητικής συμπεριφοράς. Ζώα που υπέστησαν καταστροφές στη συγκεκριμένη εγκεφαλική δομή παρουσίασαν μείωση της τάξης του 60% στα επίπεδα της προπαλμικής αναστολής, ενώ δεν εκδήλωσαν περαιτέρω μείωση μετά τη

χορήγηση αμφεταμίνης ή διζοσιλίνης. Έτσι, θεωρήθηκε ισχυρά βάσιμο το γεγονός ότι η δικτυωτή μοίρα της μέλαινας ουσίας αποτελεί μέρος του νευρικού υποστρώματος της προπαλμικής αναστολής [40].



Σχήμα 1.9: Σχηματική αναπαράσταση του νευρικού υποστρώματος της προπαλμικής αναστολής. Τα μέρη που αναφέρονται στη μεσολάβηση (Mediation) είναι: ηχητικό ερέθισμα (Acoustic Stimuli), κοχλιακοί πυρήνες (Cochlear Nuclei), κάτω διδύμιο (Inferior Colliculus), άνω διδύμιο (Superior Colliculus), σκελογεφυρικός πυρήνας της καλύπτρας (Pedunculo-pontine tegmental nucleus), οπίσθιος δικτυωτός πυρήνας της γέφυρας (Caudal Pontine Reticular Nucleus), κινητικοί νευρώνες (Motor Neurons), αντανάκλαστικός αιφνιδιασμός (Startle Response). Τα μέρη που αναφέρονται στη διαμόρφωση (Modulation) είναι: κοιλιακή καλυπτική περιοχή (Ventral Tegmental Area), έσω πυρήνας του διαφράγματος (Medial Septum), ακουστικός φλοιός (Auditory Cortex), έσω προμετωπιαίος φλοιός (Medial Prefrontal Cortex), κοιλιακός ιππόκαμπος (Ventral Hippocampus), πλάγιος βασικός πυρήνας της αμυγδαλής (Basolateral Amygdala), βασικό κέλυφος του επικλινούς πυρήνα (Core Shell Nucleus Accumbens), ραχιαίος ιππόκαμπος (Dorsal Hippocampus), πυρήνας ραφής (Raphe Nucleus), κοιλιακή ωχρά σφαίρα (Ventral Pallidum).

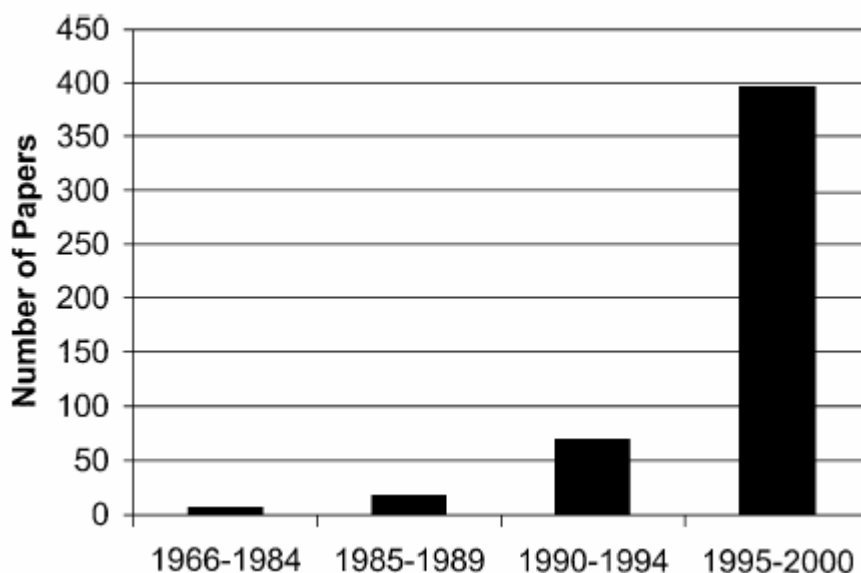
1.3.3 Η χρησιμότητα της μελέτης της προπαλμικής αναστολής

Η κατανόηση του νευροβιολογικού υποστρώματος της προπαλμικής αναστολής προσθέτει πολύτιμες πληροφορίες για την εξοικείωση με τους μηχανισμούς των βασικών λειτουργιών του εγκεφάλου, αλλά και για τη γνώση της γενετικής της ανάπτυξης του εγκεφάλου. Ειδικότερα, η προπαλμική αναστολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φαινοτυπικός δείκτης με γνωστό βιολογικό υπόστρωμα σε γενετικές μελέτες οικογενειών, διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό την κατανόηση της επίδρασης των γονιδίων σε συγκεκριμένες διεργασίες του εγκεφάλου. Μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση της παθοφυσιολογίας μιας σειράς διαταραχών, όπως η σχιζοφρένεια, ενώ συμβάλλει καθοριστικά στην έρευνα για τη δημιουργία νέων φαρμάκων για την αντιμετώπιση ή βελτίωση των συμπτωμάτων αυτών των διαταραχών.

Είναι χαρακτηριστικό ότι τα ευρήματα από μελέτες, τόσο σε ανθρώπους, όσο και σε ζώα, δείχνουν ότι η αντιψυχωσική αγωγή αναστρέφει τη διαταραχή της προπαλμικής αναστολής σε πάσχοντες από σχιζοφρένεια. Οι διαφορετικές κατηγορίες αντιψυχωσικών φαρμάκων, κλασικά και άτυπα, δρουν μέσω διαφορετικών νευροδιαβιβαστικών συστημάτων. Τα κλασικά αντιψυχωσικά μειώνουν την ντοπαμινεργική νευροδιαβίβαση, ενώ τα άτυπα, όπως η κλοζαπίνη, χαρακτηρίζονται από ένα ευρύτερο φαρμακολογικό προφίλ. Από μελέτες σε ζώα, διαπιστώθηκε ότι τα κλασικά αντιψυχωσικά αντέστρεψαν τη μείωση της προπαλμικής αναστολής που προκλήθηκε από χορήγηση ντοπαμινεργικών ψυχοσεογόνων, όπως η αμφεταμίνη, αλλά δεν ήταν αποτελεσματικά στην αντιμετώπιση διαταραχών της προπαλμικής αναστολής λόγω χορήγησης αναστολέων της γλουταμινεργικής νευροδιαβίβασης, όπως η φαινκυκλιδίνη. Αντιθέτως, η χορήγηση άτυπων αντιψυχωσικών φάνηκε να αναστρέφει τη μείωση της προπαλμικής αναστολής κι στις δύο περιπτώσεις, όπου τα συμπτώματα προκλήθηκαν είτε μέσω χορήγησης αμφεταμίνης, είτε φαινκυκλιδίνης. Βάσει αυτών των δεδομένων, εξετάστηκε το ενδεχόμενο τα άτυπα αντιψυχωσικά να είναι πιο αποτελεσματικά από τα κλασικά στην αντιμετώπιση των διαταραχών της προπαλμικής αναστολής σε ασθενείς με σχιζοφρένεια, γεγονός που όμως δεν επιβεβαιώθηκε, καθώς τόσο τα κλασικά όσο και τα άτυπα αποκατέστησαν την προπαλμική αναστολή σε επίπεδα συγκρίσιμα με αυτά των υγιών ανθρώπινων πληθυσμών [1].

Λόγω της μεγάλης ευαισθησίας της προπαλμικής αναστολής στη δράση τόσο ψυχοσεογόνων όσο και αντιψυχωσικών φαρμάκων, η μείωση των επιπέδων προπαλμικής αναστολής μέσω χορήγησης ψυχοσεογόνων αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά μοντέλα πρόκλησης ψύχωσης σε πειραματόζωα, με σκοπό τη δοκιμή των αντιψυχωσικών ιδιοτήτων νέων αντιψυχωσικών φαρμάκων. Έτσι, ο δείκτης της μείωσης της προπαλμικής αναστολής σε ζώα αποτελεί ένα από τα βασικότερα μέσα που χρησιμοποιεί η φαρμακοβιομηχανία για την ανακάλυψη νέων αντιψυχωσικών φαρμάκων.

Συμπερασματικά, το φαινόμενο της προπαλμικής αναστολής θεωρείται μείζον εργαλείο θεμελιώδους έρευνας λόγω τριών βασικών γνωρισμάτων: α) είναι ένα εξαιρετικά πρόσφορο πρότυπο στην κατεύθυνση της *μεταφραστικής έρευνας (translational research)*, καθώς πρόκειται για μια λειτουργία που παρατηρείται εξίσου σε όλα τα θηλαστικά. β) οι προϋποθέσεις για ένα ελάχιστο επίπεδο συνεργασιμότητας και οι χαμηλές απαιτήσεις παρακίνησης του εξεταζόμενου κατά τη διεξαγωγή της εργαστηριακής μέτρησης επαρκούν για την πραγματοποίησή της. γ) καθώς ο αντανακλαστικός αιφνιδιασμός είναι ευαίσθητος στην αισθητηριακή, γνωστική και φαρμακολογική χειραγώγηση, ανοίγεται ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών σε επιστημονικές έρευνες.



Σχήμα 1.10: Ενδεικτικό διάγραμμα δημοσιεύσεων σχετικά με έρευνες προπαλμικής αναστολής σε ανθρώπινους πληθυσμούς και πειραματόζωα μεταξύ 1966 και 2000.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΡΟΠΑΛΜΙΚΗΣ ΑΝΑΣΤΟΛΗΣ

2.1 Οπτική μέθοδος μελέτης προπαλμικής αναστολής

2.1.1. Διάταξη εργαστηριακών μετρήσεων

Στον χώρο του Ερευνητικού Πανεπιστημιακού Ινστιτούτου Ψυχικής Υγιεινής (Ε.Π.Ι.Ψ.Υ.) στην Αθήνα πραγματοποιούνται μετρήσεις προπαλμικής αναστολής για τους σκοπούς της έρευνας με στόχο την υλοποίηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση μιας νέας οπτικής μεθόδου καταγραφής του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού και της αντίστοιχης προπαλμικής αναστολής. Η πρώτη φάση των πειραματικών μετρήσεων ολοκληρώθηκε με την εξέταση ενός δείγματος 12 τυχαίων ατόμων ηλικίας από 20 έως 35 ετών. Καταγράφηκαν ορισμένα προσωπικά δεδομένα των εξεταζομένων ατόμων για στατιστικούς λόγους, όπως το φύλο, η ηλικία και ο βαθμός εκπαίδευσης. Επίσης λαμβάνεται υπόψη αν οι εξεταζόμενοι είναι, κατά δήλωσή τους, καπνιστές ή αν δήλωσαν ότι προηγήθηκε κατανάλωση καφέ πριν την εξέταση, για να ληφθεί υπόψη στη μελέτη της προπαλμικής αναστολής [28] [29].



Σχήμα 2.1: Εικόνες εξεταζομένων από τις συνεδρίες στο Ε.Π.Ι.Ψ.Υ.

Η οπτική μέθοδος καταγραφής του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού φιλοδοξεί να είναι πιο φιλική προς τον εξεταζόμενο, αντικαθιστώντας τις διατάξεις του ηλεκτρομυογραφήματος με τη χρήση ηλεκτρονικών μέσων εξ αποστάσεως καταγραφής και ελέγχου των αντιδράσεων του εξεταζομένου. Καταργώντας τα ηλεκτρόδια που τοποθετούνται στο κεφάλι και στους μύες του προσώπου, η νέα μέθοδος χρησιμοποιεί κάμερα υψηλής χρονικής δειγματοληψίας (έως 150 καρτέ ανά δευτερόλεπτο) για τη χρονικά λεπτομερή απεικόνιση των αντιδράσεων του προσώπου, ώστε να καταγραφούν με όσο το δυνατόν πληρέστερη ακρίβεια οι βλεφαρικές συσπάσεις, που αποτελούν μία από τις κυρίαρχες εκδηλώσεις του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού στον άνθρωπο.

Οι μετρήσεις σε κάθε εξεταζόμενο άτομο επαναλαμβάνονται δύο φορές. Την πρώτη φορά, παράλληλα με τη χρήση της ειδικής κάμερας, τοποθετούνται ηλεκτρόδια τόσο στο πρόσωπο όσο και στο κεφάλι, για την ταυτόχρονη καταγραφή μετρήσεων από ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (ΗΕΓ) και ηλεκτρομυογράφημα (ΗΜΓ), διαδικασία αναγκαία για τον έλεγχο αξιοπιστίας της πειραματικής οπτικής μεθόδου. Τη δεύτερη φορά, η διαδικασία επαναλαμβάνεται κάνοντας χρήση αποκλειστικά της οπτικής μεθόδου.

Ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την εργαστηριακή καταγραφή είναι απλός και ως εκ τούτου υπάρχει η δυνατότητα να είναι και φορητός, όπως στις πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν στο Ε.Π.Ι.Ψ.Υ. Αποτελείται από μια κάμερα υψηλής χρονικής δειγματοληψίας κι έναν φορητό Η/Υ (υπολογιστής καταγραφής). Χρησιμοποιείται επίσης ένας από τους μόνιμους εργαστηριακούς Η/Υ, που λειτουργεί ως γεννήτρια ακουστικών παλμών, ενώ αξιοποιείται και το ειδικά διαμορφωμένο δωμάτιο με προβολέα διάχυτου φωτός.

Η όλη διαδικασία όσον αφορά την εμπλοκή του εξεταζόμενου ατόμου σπάνια υπερβαίνει τα πέντε λεπτά, εφόσον χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά η οπτική μέθοδος, που σε αντίθεση με την ισχύουσα ρουτίνα, δεν απαιτεί την εφαρμογή ηλεκτροδίων στο κεφάλι του επισκέπτη. Η προετοιμασία του χώρου, η διασύνδεση των Η/Υ με την κάμερα –εφόσον προτιμηθεί ο φορητός εξοπλισμός– και οι πρώτες δοκιμαστικές λήψεις μπορούν να ολοκληρωθούν σε διάστημα μικρότερο των δεκαπέντε λεπτών.

Το εξεταζόμενο άτομο βρίσκεται καθισμένο στον ειδικό χώρο, ένα δωμάτιο ειδικά διαμορφωμένο, ώστε να λειτουργεί απομονωτικά για πιθανές ηλεκτροστατικές ή ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (κλωβός Faraday), ενώ περιορίζει αισθητά και τα περιφερειακά ακουστικά ερεθίσματα. Εκεί, ο εξεταζόμενος φορά τα ακουστικά και κοιτάζει προς τον φακό της κάμερας, η οποία τοποθετείται απέναντί του, ρυθμισμένη μετά από δοκιμές ώστε να εστιάζει κατάλληλα στο πρόσωπό του. Το δωμάτιο πρέπει να είναι καλά φωτισμένο για τις ανάγκες της λήψης εικόνων από την κάμερα, αλλά και με την κατάλληλη ισορροπία, ώστε ο φωτισμός να είναι διάχυτος, χωρίς όμως να δυσχεραίνει την όραση του εξεταζομένου, ούτε να ανεβάζει υπερβολικά τη θερμοκρασία του χώρου.



Σχήμα 2.2: Διάταξη οπτικής καταγραφής στο ειδικό δωμάτιο.

Διακρίνονται ο προβολέας, η κάμερα σε τρίποδο και το εξεταζόμενο άτομο που φορά ακουστικά και φέρει σύστημα ηλεκτροδίων σε κεφάλι και πρόσωπο.

2.1.2. Οπτική καταγραφή μετρήσεων

Στο προγραμματιστικό περιβάλλον της γεννήτριας ακουστικών παλμών, μιας ειδικά διαμορφωμένης εφαρμογής του εργαστηρίου, ένας ηλεκτρονικός βόμβος έντασης 140 dB και διάρκειας 40 ms αποτελεί τον κυρίως παλμό. Ένας

χαμηλότερος βόμβος έντασης 60 dB και διάρκειας 40 ms παίζει τον ρόλο του προπαλμού. Στις αρχικές εργαστηριακές μετρήσεις, η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ελεγχόμενη, καθώς οι εξεταζόμενοι, στην πλειοψηφία τους φοιτητές και καθηγητές, γνωρίζουν τη φύση του πειράματος εκ των προτέρων.

Κατά τη διάρκεια μιας πειραματικής καταγραφής στον χώρο του εργαστηρίου, λαμβάνονται συνολικά 51 μετρήσεις, ορισμένες εκ των οποίων με απουσία προπαλμού, αλλά στην πλειονότητά τους με προπαλμικό ηχητικό ερέθισμα σε χρονική απόσταση από 30 έως 1000 ms από τον παλμό. Η επιλογή της χρονικής απόστασης του προπαλμού γίνεται μέσω αλγορίθμου τυχαιότητας και δεν εξαρτάται από τον χειριστή του προγράμματος. Η διασφάλιση όμως του απρόβλεπτου μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων, το γεγονός δηλαδή ότι οι παλμοί δε θα εκλύονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να αποφευχθεί η εξοικείωση του εξεταζόμενου με προβλέψιμα χρονικά ερεθίσματα, γίνεται μέσω της τυχαίας χειροκίνητης επιλογής του χρόνου έναρξης κάθε μέτρησης από τον ίδιο τον χειριστή.

Η συγκεκριμένη χειροκίνητη ενεργοποίηση των ηχητικών ερεθισμάτων, χρησιμοποιείται ταυτόχρονα και για τον συντονισμό της γεννήτριας ηχητικών παλμών –του προγράμματος δηλαδή που εκτελείται στον Η/Υ του εργαστηρίου– με την καταχώριση των παλμών σε κατάλληλη βάση δεδομένων στον Η/Υ καταγραφής, όπου εκτελείται το πρόγραμμα βιντεοσκόπησης των αντιδράσεων κατά τη διάρκεια του επίμαχου διαστήματος ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα, ο χειριστής του προγράμματος, τη στιγμή που δίνει εντολή (συνήθως με το πάτημα ενός πλήκτρου) να ξεκινήσει το επόμενο ηχητικό ερέθισμα (είτε ζεύγος προπαλμού-παλμού, είτε αποκλειστικά παλμός), μέσω της ίδιας εντολής ταυτόχρονα ενεργοποιεί και τη βιντεοσκόπηση του πειράματος για το κατάλληλο χρονικό διάστημα. Στη διάταξη βιντεοσκόπησης έχει οριστεί ότι από τη στιγμή που θα ληφθεί η εντολή ενεργοποίησής της, η κάμερα υψηλής χρονικής δειγματοληψίας έχει προγραμματιστεί να καταγράφει συνολικά 250 διαδοχικά καρέ σε διάστημα 2,598 δευτερολέπτων, που κρίνεται επαρκές για την πλήρη απεικόνιση της αρχικής ήρεμης κατάστασης, του επερχόμενου αντανακλαστικού αιφνιδιασμού και της επιστροφής εκ νέου σε ήρεμη κατάσταση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ενεργοποίησης της λειτουργίας εξωτερικής διέγερσης (*external trigger mode*) στην κάμερα, χρησιμοποιώντας

κατάλληλα τη θύρα εισαγωγής-εξαγωγής δεδομένων γενικού σκοπού GPIO (General Purpose Input-Output).



(a)

Μοντέλο	PtGrey FL3-U3-13Y3M-C
Μέγιστη ανάλυση	1280 x 1024
Μέγιστος ρυθμός λήψης	150 fps
Πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων	USB 3.0
Θύρα εξωτερικού συγχρονισμού	8-pin GPIO
Φακός EdmundOptics	16mm/f1.4

(b)

Ρυθμός λήψης	96,23 fps
Πλήθος ηχητικών ερεθισμάτων	51
Εικόνες ανά ηχητικό ερέθισμα	250

(c)

Σχήμα 2.3: Η κάμερας της εργαστηριακής διάταξης.

(a) Άποψη της κάμερας Flea3.

(b) Χαρακτηριστικά κάμερας εργαστηριακής διάταξης.

(c) Ρυθμίσεις καταγραφής.

Αφού ολοκληρωθεί επιτυχώς η διαδικασία καταγραφής των αντιδράσεων του εξεταζομένου και το οπτικό υλικό βρίσκεται πλέον αποθηκευμένο στη μνήμη του Η/Υ καταγραφής, συνοδευόμενο από την αντιγραφή του αρχείου του εργαστηριακού Η/Υ με τα στοιχεία για τις αποστάσεις παλμού-προπαλμού στο σύνολο των ηχητικών ερεθισμάτων, απομένει πλέον η κατάλληλη επεξεργασία των στοιχείων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της προπαλμικής αναστολής μπορεί να αναλυθεί σε τέσσερα διαδοχικά στάδια:

- 1) Λήψη εικόνας ουδέτερης έκφρασης για τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου
- 2) Κατάτμηση εικόνας για τον διαχωρισμό του προσώπου από το υπόβαθρο
- 3) Ανίχνευση χαρακτηριστικών προσώπου βάσει προκαθορισμένων προτύπων για τον εντοπισμό των περιοχών αριστερού και δεξιού οφθαλμού
- 4) Εφαρμογή αλγορίθμου υπολογισμού οπτικής ροής για την ανίχνευση και τον υπολογισμό της βλεφαρικής κίνησης

2.1.3 Λήψη εικόνας ουδέτερης έκφρασης

Η εικόνα ουδέτερης έκφρασης, είναι μια εικόνα του εξεταζόμενου προσώπου, η οποία λειτουργεί σαν πρότυπο για τις υπόλοιπες εικόνες της συνεδρίας. Η ουδέτερη αυτή εικόνα πρέπει να απεικονίζει τον εξεταζόμενο σε φάση σχετικής χαλάρωσης, με ανοικτά μάτια, να κοιτάζει απευθείας στον φακό της κάμερας, χωρίς συσπάσεις ή μορφασμούς στο πρόσωπο. Όπως είναι λογικό, διαθέτοντας ήδη έναν μεγάλο αριθμό εικόνων, όπως προκύπτουν από τη συνολική καταγραφή όλου του πλήθους των μετρήσεων αναλυμένων σε πολλά διαδοχικά καρέ, οι κατάλληλες υποψήφιες εικόνες θα είναι σίγουρα αρκετές, με βάση τα παραπάνω κριτήρια. Η επιλογή της καταλληλότερης επαφίεται στην κρίση του αναλυτή.

2.1.4 Κατάτμηση εικόνας

Η κατάτμηση της εικόνας χρησιμοποιείται για την απομόνωση της μορφής του προσώπου από το υπόβαθρό του, μια διαδικασία που συμβάλλει στον περιορισμό της περιοχής ενδιαφέροντος από το σύνολο της εικόνας σε ένα συγκεκριμένο μέρος της. Εξετάζοντας τις πιθανές μεθόδους υλοποίησης, καταλήξαμε σε δύο κατάλληλες μεθόδους για τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής, την *κατωφλίωση* και τον *αλγόριθμο watershed*.

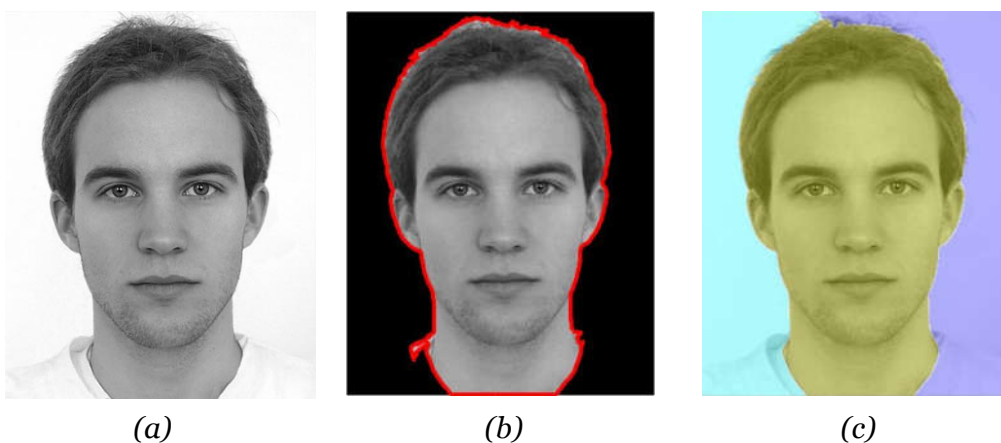
Η κατωφλίωση διαιρεί την εικόνα σε δύο περιοχές μέσα από μια διαδικασία πόλωσης και δυαδικής διάζευξης. Σκοπός είναι η διαίρεση αυτή να λειτουργήσει αποτελεσματικά ως προς την επίτευξη της διάκρισης μεταξύ

προσκήνιου και υποβάθρου, έτσι ώστε να απομονωθεί κατάλληλα η περιοχή του προσώπου, δίνοντας τη δυνατότητα η επικείμενη διαδικασία ανίχνευσης να περιοριστεί αποκλειστικά στη συγκεκριμένη περιοχή.

Ο αλγόριθμος watershed χρησιμοποιείται γενικά ως μέθοδος κατάτμησης για τον διαχωρισμό πολλαπλών αντικειμένων (τμημάτων) σε μία εικόνα. Η εκτέλεση του αλγορίθμου με την υλοποίηση της ρυθμιζόμενης με δείκτες μορφής του διασφαλίζει ότι θα αποτραπεί το φαινόμενο της υπερ-κατάτμησης, έτσι ώστε η περιοχή του προσώπου να διαχωριστεί ως ένα ενιαίο πεδίο στην εικόνα.

Για την επίτευξη της ορθής κατάτμησης, χρησιμοποιώντας οποιονδήποτε από τους δύο προτεινόμενους αλγορίθμους, προηγείται μια διαδικασία αναγκαίας προεργασίας της εικόνας. Για τον σκοπό αυτό, κάνουμε χρήση ενός σειριακού φίλτρου ανακατασκευής της εικόνας (άνοιγμα-κλείσιμο μέσω ανακατασκευής), που βασίζεται στη θεωρία της μαθηματικής μορφολογίας. Η διαδικασία της προεργασίας είναι σε μεγάλο βαθμό κοινή και στις δύο μεθόδους, με τον αλγόριθμο watershed, ως πιο εκλεπτυσμένη μέθοδο κατάτμησης, να απαιτεί ορισμένα περαιτέρω βήματα πριν την υλοποίησή του.

Η ανάπτυξη των μεθόδων κατάτμησης, με τη βήμα προς βήμα περιγραφή των φίλτρων προεργασίας και την ανάλυση των αλγορίθμων, μαζί με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους και των συμπερασμάτων από τη σύγκριση των δύο διαφορετικών μεθόδων, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3.



Σχήμα 2.4: Κατάτμηση εικόνας. (a) Αρχική εικόνα.

(b) Κατάτμηση με τη μέθοδο της κατωφλίωσης.

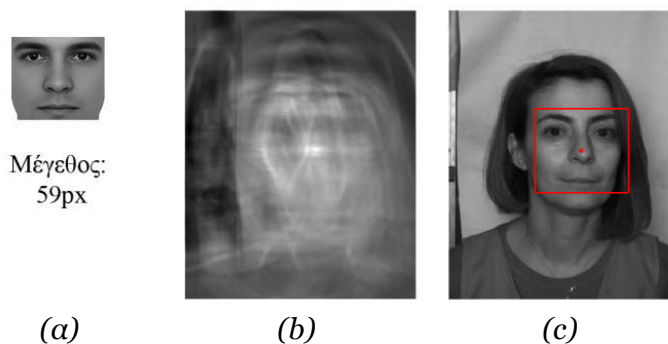
(c) Κατάτμηση με τη μέθοδο του αλγορίθμου watershed.

2.1.5 Ανίχνευση χαρακτηριστικών προσώπου

Στο στάδιο αυτό, σκοπός είναι να προσδιοριστεί και να απομονωθεί κατάλληλα η περιοχή του αριστερού και του δεξιού οφθαλμού. Το ταιρίασμα προτύπων, με βάση προκαθορισμένες εικόνες-πρότυπα και τη σύγκρισή τους με τις υπό εξέταση εικόνες, είναι η μέθοδος που ακολουθείται για την υλοποίηση της ανίχνευσης των συγκεκριμένων περιοχών του προσώπου.

Η χρήση μιας εικόνας-προτύπου ματιού ως κριτήριο ανίχνευσης στη συνολική εικόνα του προσώπου είναι πολύ πιθανό να επιστρέψει λανθασμένα αποτελέσματα (false positives). Για τον λόγο αυτό, γίνεται ανίχνευση σε βήματα, όπου κάθε επόμενο πρότυπο αποτελεί υποπεριοχή του προηγθέντος. Έτσι, κατά σειρά χρησιμοποιούνται τα πρότυπα: α) πρόσωπο β) μάτια-φρύδια γ) ζεύγος ματιών δ) αριστερό μάτι ε) δεξί μάτι.

Η διαδικασία αυτή έχει σκοπό να προσδιορίσει τόσο την ακριβή θέση, όσο και το μέγεθος της προσδιοριζόμενης περιοχής. Για τον σκοπό αυτό γίνεται χρήση τόσο της κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών, όσο και της τεχνικής κλιμακωτής συνέλιξης σε κάθε στάδιο. Δεδομένου ότι κάθε συνεδρία περιλαμβάνει 12750 εικόνες (250 εικόνες για κάθε ένα από τα 51 ηχητικά ερεθίσματα), θεωρούμε ότι αρκεί να εντοπίσουμε τη θέση των ματιών στην πρώτη εικόνα κάθε καταγραφής ηχητικού ερεθίσματος, καθώς το κεφάλι δε μετακινείται σημαντικά κατά τη διάρκεια ενός στιγμιότυπου των 2,6 περίπου δευτερολέπτων.



Σχήμα 2.5: Ενδεικτική υλοποίηση ταιριάσματος προτύπων. (α) Πρότυπο προσώπου. (β) Πίνακας συνέλιξης. (γ) Εντοπισμός χαρακτηριστικού (προσώπου) στην εικόνα.

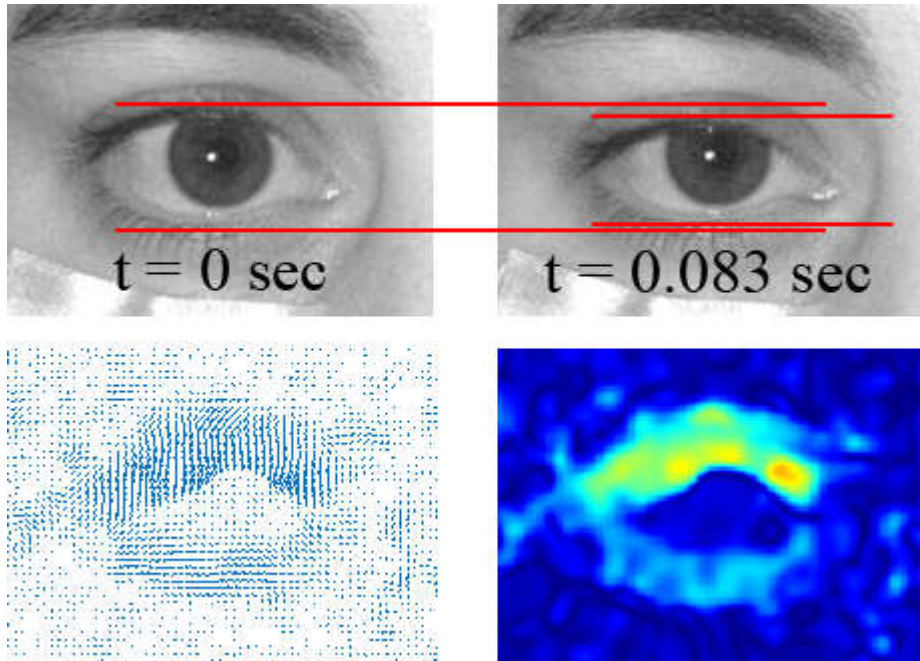
Η πληρέστερη επεξήγηση του τρόπου λειτουργίας της μεθόδου, καθώς και η αναλυτική περιγραφή των βημάτων της διαδικασίας ανίχνευσης αναπτύσσονται στο κεφάλαιο 4.

2.1.6 Υπολογισμός οπτικής ροής

Η τελική φάση της ανάλυσης των εικόνων αποσκοπεί στην ανίχνευση των κινήσεων των βλεφάρων. Για τη διαδικασία αυτή, γίνεται χρήση του αλγορίθμου *Lucas-Kanade*. Ο αλγόριθμος Lucas-Kanade συγκρίνει δύο εικόνες του ίδιου αντικειμένου, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα λήψης, με βάση τα οποία υπολογίζει τα τοπικά διανύσματα μεταβολής της θέσης ή της μορφής του αντικειμένου αυτού [41] [42]. Ο αλγόριθμος Lucas-Kanade είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος σε περιπτώσεις μικρών μεταβολών και αυτός είναι ένας από τους βασικότερους λόγους για τον οποίο προτιμήθηκε.

Στην προκειμένη περίπτωση, εισάγοντας διαδοχικές εικόνες κατά τη διάρκεια ενός βλεφαρισμού, η εφαρμογή του αλγορίθμου Lucas-Kanade αναμένουμε να επιστρέψει διανύσματα οπτικής ροής αποκλειστικά στα σημεία των κινούμενων βλεφάρων. Αυτό προϋποθέτει την παραδοχή ότι οι υπόλοιπες κινήσεις του προσώπου μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες από πλευράς ταχύτητας σε σχέση με την κίνηση των βλεφάρων. Από την εφαρμογή του αλγορίθμου προέκυψε ότι το γεγονός αυτό ισχύει με αρκετά καλή προσέγγιση, καθώς η ταχύτητα της βλεφαρικής σύσπασης είναι πολύ μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες φυσικές κινήσεις του προσώπου. Από το διανυσματικό πεδίο που προκύπτει, χρησιμοποιούμε μόνο την y -συνιστώσα, που αφορά την κίνηση των βλεφάρων του ματιού. Το άθροισμα των μέτρων των διανυσμάτων αυτών θεωρούμε ότι εκφράζει το απόλυτο μέγεθος της κίνησης του βλεφάρου.

Για να προκύψει η χρονική μεταβολή της θέσης του βλεφάρου πρέπει ο αλγόριθμος να λάβει υπόψη κάθε μία από τις 250 εικόνες που αντιστοιχούν σε κάθε καταγραφή αντιδράσεων ανά ηχητικό ζεύγος. Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος Lucas-Kanade απαιτεί δύο εικόνες για τον υπολογισμό της οπτικής ροής, κάθε εικόνα I_i συγκρίνεται με την επόμενη της I_{i+1} , όπου $i = 1$ έως 249. Τα απόλυτα μεγέθη κίνησης που προκύπτουν ορίζουν μια χρονοσειρά, από τη μελέτη της οποίας θα προκύψει η ακριβής στιγμή των βλεφαρικών συσπάσεων.



Σχήμα 2.6: Ενδεικτικό διάγραμμα ανίχνευσης οπτικής ροής.

Πάνω: Αριστερά απεικονίζεται το δεξί μάτι πριν τη σύσπαση, ενώ δεξιά το ίδιο μάτι βρίσκεται στη θέση μέγιστης σύσπασης. Μεσολαβεί χρονικό διάστημα 0.083 sec.

Κάτω: Το διανυσματικό διάγραμμα ροής της κίνησης του δεξιού βλεφάρου όπως προκύπτει από την επεξεργασία του άνω ζεύγους εικόνων (αριστερά) και ψευδοχρωματική απεικόνιση του μέτρου της διανυσματικής ροής (δεξιά).

Παρατηρούμε πως οι κινήσεις εκτός της περιοχής του βλεφάρου είναι αμελητέες.

Ως δείκτη του μεγέθους της κίνησης του βλεφάρου ορίζουμε το άθροισμα των τετραγωνικών ριζών των μέτρων των διανυσμάτων ροής, θεωρώντας με πολύ καλή προσέγγιση πως η πλειοψηφία της οπτικής ροής που εντοπίστηκε αφορά μόνο κινήσεις στην περιοχή του βλεφάρου. Έστω ότι κάποια χρονική στιγμή t , κάποιο σημείο (x,y) ενός αντικειμένου παρουσιάζει φωτεινότητα ίση με $I(x,y,t)$. Υποθέτουμε ότι μετά από χρόνο Δt το σημείο (x,y) έχει μετακινηθεί κατά $(\Delta x, \Delta y)$, χωρίς όμως να αλλάξει η φωτεινότητά του. Η υπόθεση αυτή εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση [43]:

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \approx I(x, y, t).$$

Για μικρές μετατοπίσεις $(\Delta x, \Delta y)$ σε μικρό χρονικό διάστημα Δt , μπορούμε να αναπτύξουμε τον όρο $I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ κατά Taylor, λαμβάνοντας:

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \approx I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t.$$

Εισάγοντας τις ταχύτητες $u \equiv \frac{dx}{dt}$ και $v \equiv \frac{dy}{dt}$ στην παραπάνω εξίσωση,

καταλήγουμε στην:

$$\frac{\partial I}{\partial x}u + \frac{\partial I}{\partial y}v + \frac{\partial I}{\partial t} = 0.$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί με τη χρήση του τελεστή κλίσης ως:

$$\nabla I(u, v) = -\frac{\partial I}{\partial t}.$$

Από την εξίσωση αυτή, μπορεί να υπολογιστεί η συνιστώσα της ταχύτητας κίνησης του αντικειμένου που είναι κάθετη στις ισοσταθμικές καμπύλες της εικόνας. Ωστόσο για την εύρεση και των δύο συνιστωσών u, v απαιτείται μία επιπλέον εξίσωση. Στον αλγόριθμο των Lucas-Kanade η λύση στο πρόβλημα δόθηκε θεωρώντας ότι η ταχύτητα είναι σταθερή γύρω από ένα κεντρικό εικονοστοιχείο x . Έτσι, η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης ισοδυναμεί με την ελαχιστοποίηση του συναρτησιακού:

$$\sum_{\bar{x} \in \Omega} W^2(\bar{x}) [\nabla I(\bar{x}, t) \bar{v} + I_t(\bar{x}, t)]^2,$$

όπου W είναι το σύνολο των σημείων της εικόνας στα οποία η ταχύτητα θεωρείται σταθερή, μία γειτονιά του x δηλαδή.

Ο πίνακας βαρών $W(\bar{x})$ χρησιμοποιείται για να δώσει περισσότερη έμφαση στα εικονοστοιχεία που βρίσκονται κοντά στο x σε σχέση με εκείνα στην περιφέρεια της γειτονιάς του. Έτσι η προηγούμενη σχέση μπορεί να θεωρηθεί ένα τυπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης και η λύση του δίνει:

$$A^T W^2 A \bar{v} = A^T W^2 b,$$

όπου ο πίνακας A^T ορίζεται ως:

$$A^T = \begin{bmatrix} I_x(\bar{x}_1) & \dots & I_x(\bar{x}_n) \\ I_y(\bar{x}_1) & \dots & I_y(\bar{x}_n) \end{bmatrix},$$

ο πίνακας W^2 ως:

$$W^2 = \begin{bmatrix} W^2(\bar{x}_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W^2(\bar{x}_2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & W^2(\bar{x}_n) \end{bmatrix},$$

το διάνυσμα \vec{v} ως:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix},$$

και ο b ορίζεται ως ένας $n \times 1$ πίνακας:

$$b = \begin{bmatrix} I_t(\vec{x}_1) \\ \vdots \\ I_t(\vec{x}_n) \end{bmatrix}.$$

Ο πίνακας $A^T W^2 A$ έχει διαστάσεις 2×2 και δίνεται από τη σχέση:

$$A^T W^2 A = \begin{bmatrix} \sum_{\vec{x} \in \Omega} W^2(\vec{x}) I_x^2(\vec{x}) & \sum_{\vec{x} \in \Omega} W^2(\vec{x}) I_x(\vec{x}) I_y(\vec{x}) \\ \sum_{\vec{x} \in \Omega} W^2(\vec{x}) I_x(\vec{x}) I_y(\vec{x}) & \sum_{\vec{x} \in \Omega} W^2(\vec{x}) I_y^2(\vec{x}) \end{bmatrix}.$$

Από τα παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για την εύρεση της ταχύτητας \vec{v} σε μία γειτονιά ενός κεντρικού εικονοστοιχείου x_i , αρκεί ο πίνακας $A^T W^2 A$ να είναι αντιστρέψιμος.

Όπως είδαμε, σε κάθε μία από τις 51 μετρήσεις λαμβάνονται 250 διαδοχικές εικόνες. Από αυτές, θα προκύψουν δύο ομάδες $[I_{le}]_i$, $[I_{re}]_i$ των 250 εικόνων, που αφορούν τις λήψεις, όπως επικεντρώνονται στο αριστερό και στο δεξιό μάτι αντίστοιχα. Οι εικόνες αυτές, μέσω της διαδοχικής εφαρμογής του αλγορίθμου Lucas-Kanade, θα δώσουν αντίστοιχα τις ομάδες διανυσματικών πεδίων οπτικής ροής $[V_{le}]_i$, $[V_{re}]_i$. Ως μέτρο M_v του μεγέθους της βλεφαρικής σύσπασης λαμβάνεται το άθροισμα των μέτρων των y -συνιστωσών των διανυσμάτων του πεδίου ροής $[V_{le}]_i$, $[V_{re}]_i$:

$$M_v = \sum_y v_y.$$

Τα αποτελέσματα έτσι μορφοποιούνται ως χρονοσειρές οπτικής ροής, σε παρόμοια μορφή με τις χρονοσειρές που προκύπτουν κατά τη μέθοδο του ΗΜΓ στην καταγραφή της προαλμικής αναστολής. Η διαδικασία εξομάλυνσης του σήματος και ακριβούς εντοπισμού των βλεφαρικών συσπάσεων στις χρονοσειρές μπορεί να αναλυθεί από κοινού και για τις δύο μεθόδους (ενότητες 1.2.2, 1.2.3). Επιπλέον, η προσέγγιση αυτή διευκολύνει και τη διαδικασία στάθμισης και ελέγχου στη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

2.2 Μελέτη προπαλμικής αναστολής με χρήση ΗΕΓ και ΗΜΓ

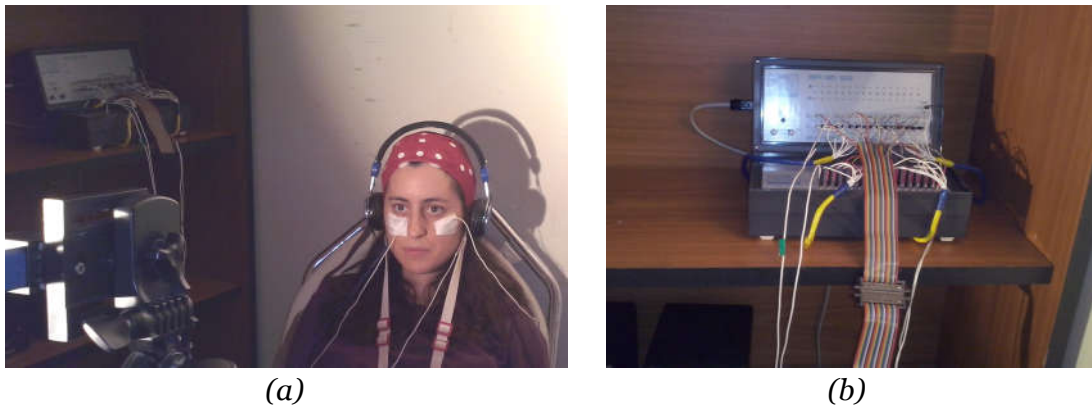
2.2.1 Καταγραφή μετρήσεων σε ΗΕΓ και ΗΜΓ

Καθώς η νέα οπτική μέθοδος μελέτης προπαλμικής αναστολής βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, είναι προφανές ότι ο έλεγχος αξιοπιστίας της περνάει μέσα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της με εκείνα της ισχύουσας μεθόδου, που κάνει χρήση ηλεκτροδίων για την καταγραφή των κινήσεων των βλεφάρων. Η χρήση και των δύο μεθόδων ταυτόχρονα στο ίδιο εξεταζόμενο άτομο επιτρέπει να εξάγουμε συμπεράσματα από κάθε μέθοδο ξεχωριστά και στη συνέχεια να συγκρίνουμε τις μετρήσεις, θεωρώντας τις τιμές της ισχύουσας μεθόδου των ηλεκτροδίων ως μετρήσεις αναφοράς.

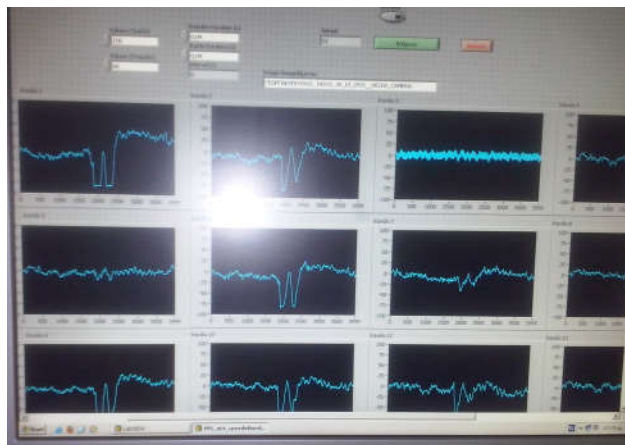
Στη διαδικασία που ακολουθείται στο Ε.Π.Ι.Ψ.Υ., με βάση τις προδιαγραφές από αντίστοιχες διεθνείς εργαστηριακές διατάξεις, ο εξεταζόμενος φορά το ειδικό κάλυμμα (σκούφος) με θέσεις για έναν αριθμό ηλεκτροδίων, σύμφωνα με το πρότυπο 10-20 (η απόσταση μεταξύ δύο ηλεκτροδίων είναι το 20% της απόστασης ανάμεσα στα δύο αυτιά, ενώ η απόσταση από το αυτί προς το κοντινότερό του ηλεκτρόδιο είναι το 10% της απόστασης ανάμεσα στα δύο αυτιά). Στα σημεία των επαφών των ηλεκτροδίων με το δέρμα χρησιμοποιείται ειδικό υγρό σε ρόλο ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, βάσει του μοντέλου 10-20, ειδικές απαγωγές τοποθετούνται στους λοβούς των αυτιών, αλλά και κοντά στα μάτια. Οι δύο απαγωγές που τοποθετούνται στους περιοφθαλμικούς μύες, όπως προβλέπεται και από το πρότυπο του ΗΕΓ, χρησιμεύουν στην παράλληλη καταγραφή του επιθυμητού ΗΜΓ, που αφορά τις βλεφαρικές συσπάσεις.

Τα σήματα που λαμβάνουμε από το ΗΕΓ συνιστούν τη διαφορά δυναμικών που ανά πάσα στιγμή παρουσιάζουν δύο ηλεκτρόδια μεταξύ τους. Το ΗΕΓ χρησιμοποιείται γενικά για την ανάλυση μιας σειράς από εγκεφαλικούς ρυθμούς (δέλτα, θήτα, άλφα και βήτα). Στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία μας ενδιαφέρει αποκλειστικά η μελέτη των εξωγενών ακουστικών προκλητών δυναμικών και ειδικότερα ο δείκτης P50, που αφορά τις προσυνειδητές πτυχές της προσοχής και εν προκειμένω καταγράφει την αντίδραση του εγκεφάλου σε χρονική απόσταση περίπου 50 msec από τη στιγμή που εκλύεται το ακουστικό ερέθισμα.

Τα δεδομένα από την πειραματική διαδικασία στέλνονται από τον εγκεφαλογράφο μέσω συστοιχίας ηλεκτρονικών ενισχυτών και φίλτρων στον εργαστηριακό Η/Υ, όπου και καταγράφονται με την μορφή χρονοσειρών. Συγκεκριμένα, τα ανιχνευόμενα σήματα οδηγούνται στο τμήμα ενισχυτικής διάταξης του ΗΕΓ, που περιέχει και διατάξεις φιλτραρίσματος. Κατόπιν, τα αναλογικά σήματα μέσω συσκευής πολυπλεξίας οδηγούνται στον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (Α/Δ converter), όπου τα ψηφιακά πλέον σήματα καταμετρώνται σε ηλεκτρονικό πολύμετρο. Στη συνέχεια, ο εργαστηριακός υπολογιστής λαμβάνει τα ψηφιακά δεδομένα των μετρήσεων, τα απεικονίζει στην οθόνη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και τα αποθηκεύει στον δίσκο, παρέχοντας τη δυνατότητα για ψηφιακή επεξεργασία του σήματος σε δεύτερο χρόνο.

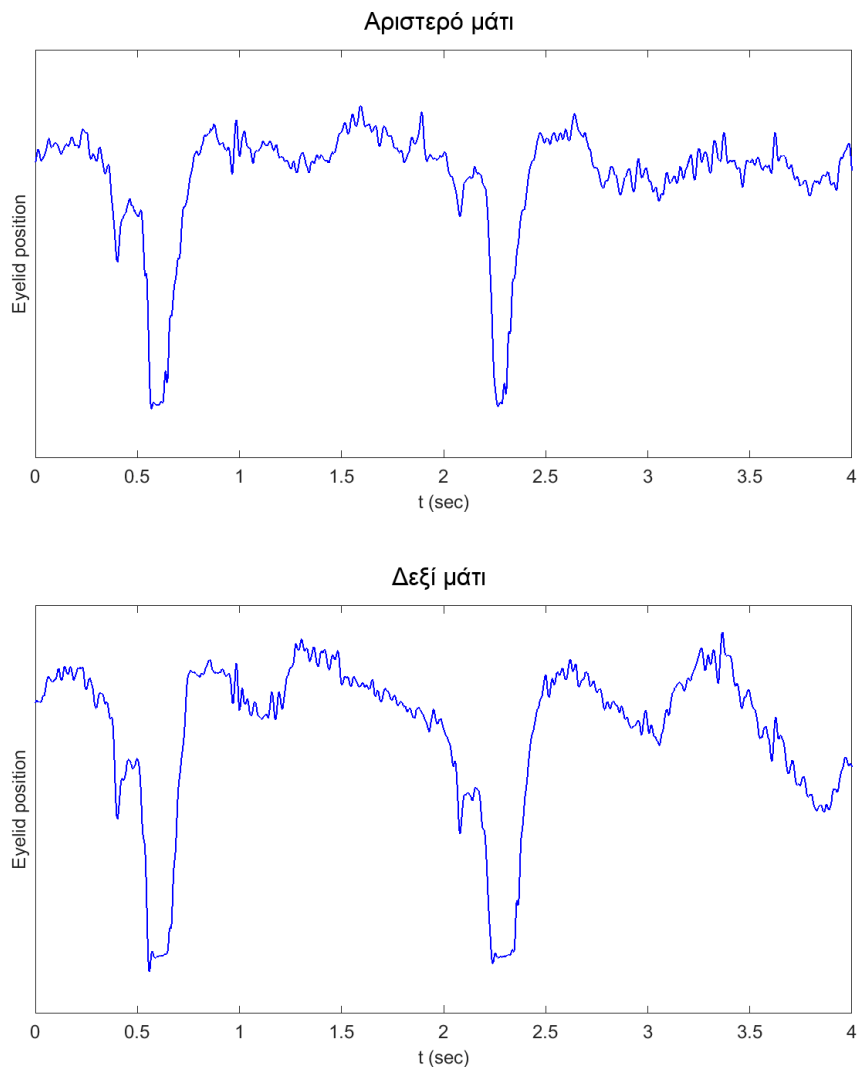


*Σχήμα 2.7: Μετρήσεις προπαλμικής αναστολής με χρήση ΗΕΓ στο Ε.Π.Ι.Ψ.Υ.
(a) Το εξεταζόμενο άτομο με τις απαγωγές των ηλεκτροδίων να καταλήγουν στον ηλεκτροεγκεφαλογράφο (πάνω αριστερά στο ράφι).
(b) Κοντινότερη άποψη του ηλεκτροεγκεφαλογράφου.*



Σχήμα 2.8: Ψηφιακή απεικόνιση του σήματος του ΗΕΓ στον εργαστηριακό Η/Υ.

Η χρησιμότητα του συνολικού ΗΕΓ έγκειται καταρχάς στη διαπίστωση της καλής λειτουργίας της διάταξης σε πραγματικό χρόνο, ενώ ταυτόχρονα μέσω της καταγραφής των προκλητών δυναμικών P50 αποτελεί ένα συμπληρωματικό εργαλείο για τον έλεγχο χρονικής σύμπτωσης με τα ευρήματα της οπτικής μεθόδου. Από τις καταγεγραμμένες χρονοσειρές ουσιαστικά επικεντρωνόμαστε στις μετρήσεις που αντιστοιχούν στα ηλεκτρόδια που τοποθετούνται στους κατάλληλους μύες του προσώπου (*orbicularis oculi*), από όπου μπορούμε να ελέγξουμε λεπτομερώς τη βλεφαρική δραστηριότητα (κανάλια 3 και 17 στη διάταξη του ΗΕΓ στο Ε.Π.Ι.Ψ.Υ.). Το ΗΜΓ αποτελεί εδώ και χρόνια το διεθνές πρότυπο για την καταγραφή του βλεφαρικού αντανακλαστικού αιφνιδισμού.



Σχήμα 2.9: Καμπύλη προκλητού δυναμικού όπως καταγράφεται από το ΗΜΓ κατά τη διάρκεια ενός ζεύγους ηχητικών παλμών.

Κάθε πτώση της καμπύλης ερμηνεύεται σαν κίνηση του βλεφαρικού μυός.

2.2.2 Εξομάλυνση χρονοσειράς με χρήση φίλτρου Savitzky-Golay

Οι καμπύλες δυναμικού, όπως καταγράφονται στο ΗΜΓ, αναπόφευκτα περιέχουν θόρυβο, ο οποίος προκαλείται είτε από εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά κύματα είτε από ενδογενή παράσιτα του κυκλώματος. Ο θόρυβος αυτός πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, ώστε ο εντοπισμός των βλεφαρικών κινήσεων να καταστεί πιο αξιόπιστος. Ωστόσο, και στην οπτική μέθοδο είναι αναγκαίο να εξομαλύνουμε τα δεδομένα, όπως προκύπτουν μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου Lucas-Kanade. Έτσι, για την κατάλληλη εξομάλυνση των δεδομένων χρησιμοποιείται το φίλτρο εξομάλυνσης Savitzky-Golay.

Το φίλτρο Savitzky-Golay είναι ένα ψηφιακό φίλτρο, που εφαρμοζόμενο σε ένα σύνολο ψηφιακών δεδομένων σημείων αυξάνει τον λόγο του σήματος ως προς τον θόρυβο, χωρίς να στρεβλώνει ιδιαίτερα το αρχικό σήμα, υλοποιώντας έτσι μια διαδικασία εξομάλυνσης [44]. Η αρχή λειτουργίας του φίλτρου βασίζεται στη διαδικασία της συνέλιξης, όπου εδώ παίρνει τη μορφή της προσαρμογής διαδοχικών υποσυνόλων γειτονικών δεδομένων με ένα πολώνυμο χαμηλού βαθμού, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των γραμμικών ελάχιστων τετραγώνων. Όταν τα σημεία δεδομένων είναι ισοκατανεμημένα, είναι δυνατή η εύρεση μιας αναλυτικής επίλυσης των εξισώσεων των ελάχιστων τετραγώνων με τη μορφή ενός ενιαίου συνόλου «συντελεστών συνέλιξης», που μπορούν να εφαρμοστούν σε όλα τα υποσύνολα δεδομένων για να δώσουν εκτιμήσεις του εξομαλυνθέντος σήματος (ή των παραγώγων αυτού) στο κεντρικό σημείο του κάθε υποσυνόλου.

Δεδομένου ότι στην περίπτωση που εξετάζουμε το ψηφιακό σήμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο σημείων δεδομένων, θεωρούμε ένα σύνολο n σημείων έστω:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{h}$$

όπου το \bar{x} αποτελεί την τιμή του κεντρικού σημείου.

Το z παίρνει διαδοχικά τις τιμές:

$$\frac{1-m}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{m-1}{2}.$$

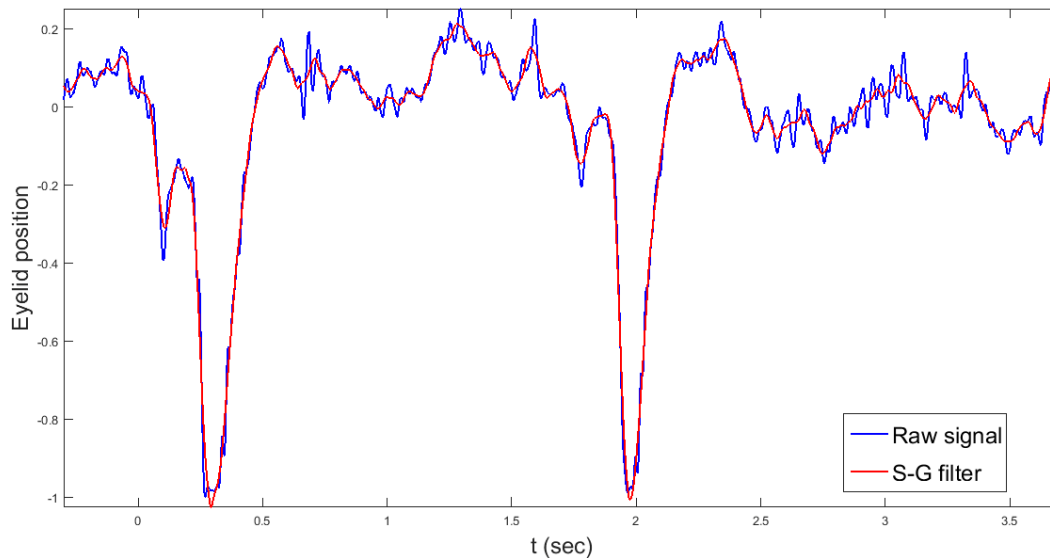
Το k -βαθμού πολώνυμο ορίζεται ως:

$$Y = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_k z^k$$

με τους συντελεστές a_0, a_1, \dots, a_k να υπολογίζονται από τις κανονικές εξισώσεις (όπως προκύπτουν από την επίλυση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων):

$$a = (J^T J)^{-1} J^T y$$

όπου η i -οστή γραμμή του πίνακα J παίρνει τιμές $1, z_i, z_i^2, \dots$



Σχήμα 2.10: Εξομάλυνση θορυβώδους σήματος ΗΜΓ (μπλε γραμμή) με φίλτρο Savitzky-Golay (κόκκινη γραμμή).

Τα φίλτρα Savitzky-Golay συνήθως χρησιμοποιούνται για να την εξομάλυνση ενός θορυβώδους σήματος, του οποίου το εύρος συχνοτήτων είναι σχετικά μεγάλο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα φίλτρα Savitzky-Golay αποδίδουν πολύ καλύτερα από ό,τι τα πρότυπα φίλτρα μέσου όρου FIR, τα οποία τείνουν να φιλτράρουν ένα σημαντικό εύρος συχνοτήτων του σήματος μαζί με το θόρυβο. Επιπλέον, στο περιβάλλον MATLAB, που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη περίπτωση για την εφαρμογή του φίλτρου, υπάρχει ήδη προεγκατεστημένη κατάλληλη υλοποίηση.

2.2.3 Εντοπισμός βλεφαρικών συσπάσεων

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία εξομάλυνσης του σήματος για την απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του θορύβου, είναι πλέον δυνατή η επεξεργασία της χρονοσειράς για τον εντοπισμό των χρονικών σημείων που αντιστοιχούν στις βλεφαρικές συσπάσεις. Όπως προκύπτει από τη μελέτη του σήματος του ΗΜΓ, οι ισχυρές συσπάσεις των περιοφθαλμικών μυών προκαλούν

βυθίσεις του σήματος, οι οποίες αποτελούν τοπικά ελάχιστα της χρονοσειράς. Έτσι, ζητούμενο αποτελεί ο εντοπισμός των τοπικών ελαχίστων, ο οποίος μπορεί να πραγματοποιηθεί με σχετικά απλό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια πρώτης και δεύτερης παραγώγου σε μία συνάρτηση.

Ως γνωστόν, μια συνάρτηση f με πεδίο ορισμού A παρουσιάζει στο $x_0 \in A$ τοπικό ελάχιστο, όταν υπάρχει $\delta > 0$, τέτοιο ώστε:

$$f(x) \geq f(x_0) \text{ για κάθε } x \in A \cap (x_0 - \delta, x_0 + \delta).$$

Το x_0 ονομάζεται θέση ή σημείο τοπικού ελαχίστου, ενώ το $f(x_0)$ τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης f .

Σύμφωνα με το κριτήριο πρώτης παραγώγου, εφόσον το σημείο x_0 αντιστοιχεί σε τοπικό ακρότατο, η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης f μηδενίζεται στο σημείο αυτό (δηλαδή $f'(x_0) = 0$), ενώ εκατέρωθεν του σημείου αυτού η παράγωγος αλλάζει πρόσημο. Σύμφωνα με το κριτήριο δεύτερης παραγώγου, για να αποφανθούμε ότι το τοπικό ακρότατο με βάση το πρώτο κριτήριο πρόκειται για τοπικό ελάχιστο, πρέπει η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης στο σημείο να είναι θετική, δηλαδή: $f''(x_0) > 0$.

Λόγω της μορφής του σήματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά οι εκφράσεις κεντρικής διακριτής παραγώγου πρώτης και δεύτερης τάξης μέσω του αναπτύγματος Taylor της συνάρτησης $f(x)$, που ορίζονται ως:

$$f'(x_0) \approx \frac{\delta_h[f](x_0)}{2h} = \frac{f(x_0+h) - f(x_0-h)}{2h}$$

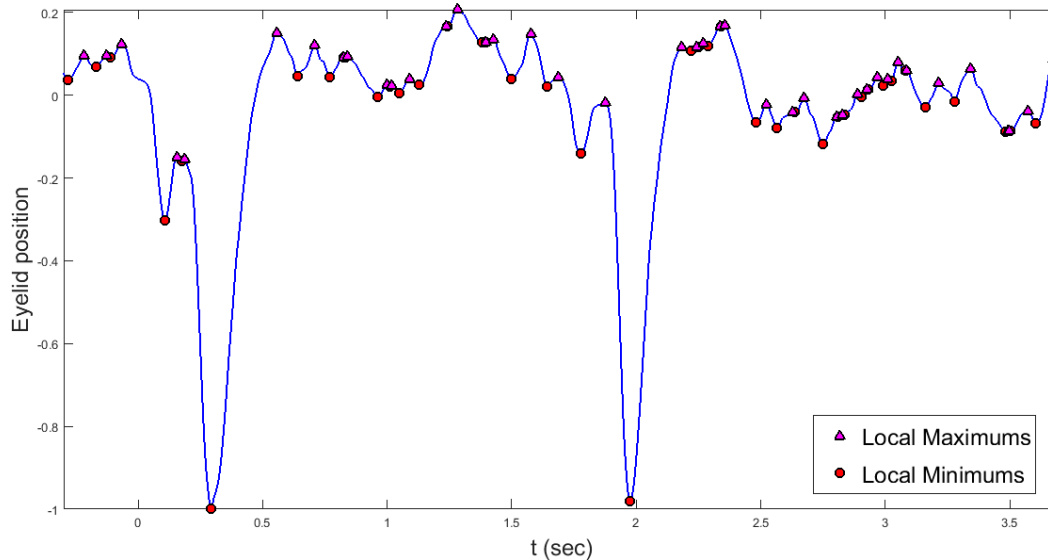
(κεντρική διακριτή παράγωγος πρώτης τάξης αναπτύγματος Taylor)

$$f''(x_0) \approx \frac{\delta_h^2[f](x_0)}{h^2} = \frac{f(x_0+h) - 2f(x_0) + f(x_0-h)}{h^2}$$

(κεντρική διακριτή παράγωγος δεύτερης τάξης αναπτύγματος Taylor).

Η εξαγωγή των τοπικών ελαχίστων αποτελεί μια σχετικά απλή διαδικασία. Αυτό που έχει σημασία, ωστόσο, είναι ο εύστοχος διαχωρισμός των χρονικών στιγμών όπου αντλαμβανόμαστε μια εκδήλωση βλεφαρίσματος ανάμεσα σε αυτές που προκύπτουν λόγω των ηχητικών ερεθισμάτων από τη γεννήτρια ακουστικών παλμών (αντανακλαστικές συσπάσεις) και σε εκείνες που παρουσιάζονται φυσιολογικά κατά τη διάρκεια της εξέτασης, ανεξάρτητα από τα εξωτερικά ερεθίσματα (αυθόρμητες συσπάσεις). Για την πραγματοποίηση της ορθής διάκρισης, λαμβάνουμε υπόψη τα δεδομένα από

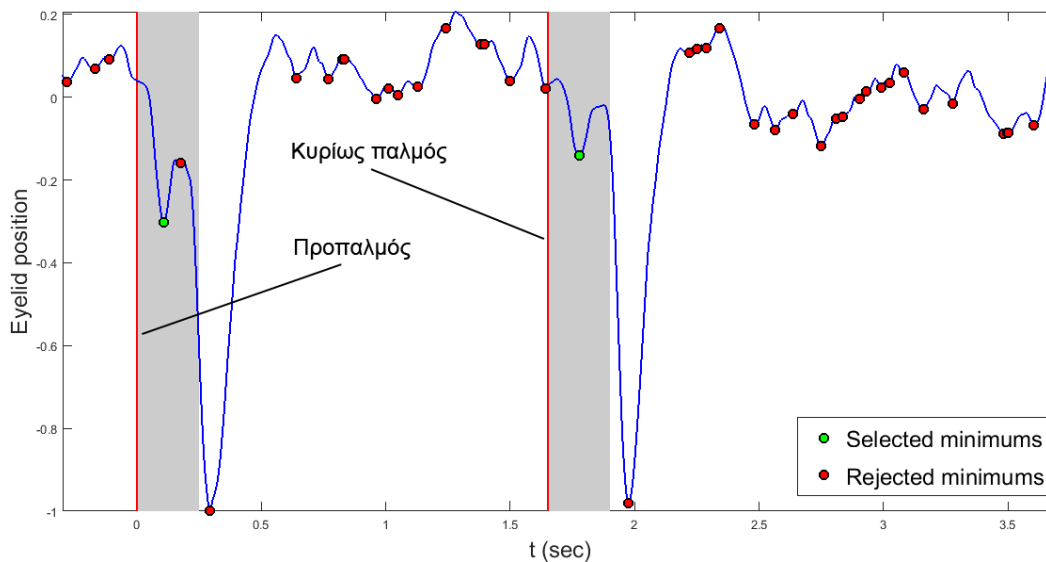
τον εργαστηριακό υπολογιστή, όπου καταγράφονται οι χρόνοι έναρξης των εκλύσεων ακουστικών παλμών, βάσει των οποίων απομονώνουμε τα συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα στη χρονοσειρά.



Σχήμα 2.11: Εντοπισμένα τοπικά ακρότατα (μέγιστα και ελάχιστα) σε μία καμπύλη δυναμικού ΗΜΓ

Για την μέτρηση του βάθους κάθε ελαχίστου χρειαζόμαστε μία στάθμη αναφοράς, η οποία ορίζεται ως ο μέσος όρος του ύψους δύο τοπικών μεγίστων. Δεδομένου ότι οι αντανακλαστικές συσπάσεις λαμβάνουν χώρα μέσα σε ένα χρονικό διάστημα από 0 έως 0.1 sec μετά την έκλυση του ηχητικού ερεθίσματος, θεωρούμε ότι όσα τοπικά ελάχιστα βρίσκονται αποκλειστικά εντός των διαστημάτων ενδιαφέροντος συγκαταλέγονται στις αντανακλαστικές συσπάσεις. Αντίστοιχα, τα τοπικά ελάχιστα που βρίσκονται εκτός διαστημάτων ενδιαφέροντος αποκλείονται από τη μελέτη. Έχει παρατηρηθεί επίσης ότι οι αντανακλαστικές συσπάσεις εμφανίζουν σημαντικά μικρότερο μέγεθος τοπικού ελαχίστου σε σχέση με τις αυθόρμητες, οπότε αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ένα επιπλέον κριτήριο διαχωρισμού. Τα «ανεπιθύμητα» ελάχιστα εντοπίζονται μέσω της αντιπαραβολή της αλληλουχίας των παλμών με την αντίστοιχη καμπύλη του προκλητού δυναμικού. Όπως είναι λογικό, οι συσπάσεις που είναι απόρροια των ακουστικών ερεθισμάτων εμφανίζονται κατά κανόνα σε ζεύγη, με την πρώτη να αντιστοιχεί στον προπαλμό και την δεύτερη στον κυρίως παλμό.

Η βαθμονόμηση της οριζόντιας κλίμακας σε μονάδες χρόνου πραγματοποιείται μέσω της γνώσης του ρυθμού δειγματοληψίας των αναλογικών σημάτων στο ΗΕΓ. Για τον υπολογισμό του σχετικού βάθους ενός ελαχίστου, χρησιμοποιείται σαν στάθμη αναφοράς ο μέσος όρος του ύψους των εκατέρωθεν τοπικών μεγίστων. Ένα ενδιαφέρον φαινόμενο που παρατηρείται κατά την διάρκεια των πειραμάτων είναι ότι ορισμένες φορές η αντανακλαστική σύσπαση λόγω ηχητικού παλμού ακολουθείται σύντομα και από μία πλήρη βλεφαρική συστολή (πλήρες κλείσιμο του ματιού), η οποία παρουσιάζεται σαν ένα βαθύτερο ελάχιστο αμέσως μετά αυτού της αντανακλαστικής συστολής.

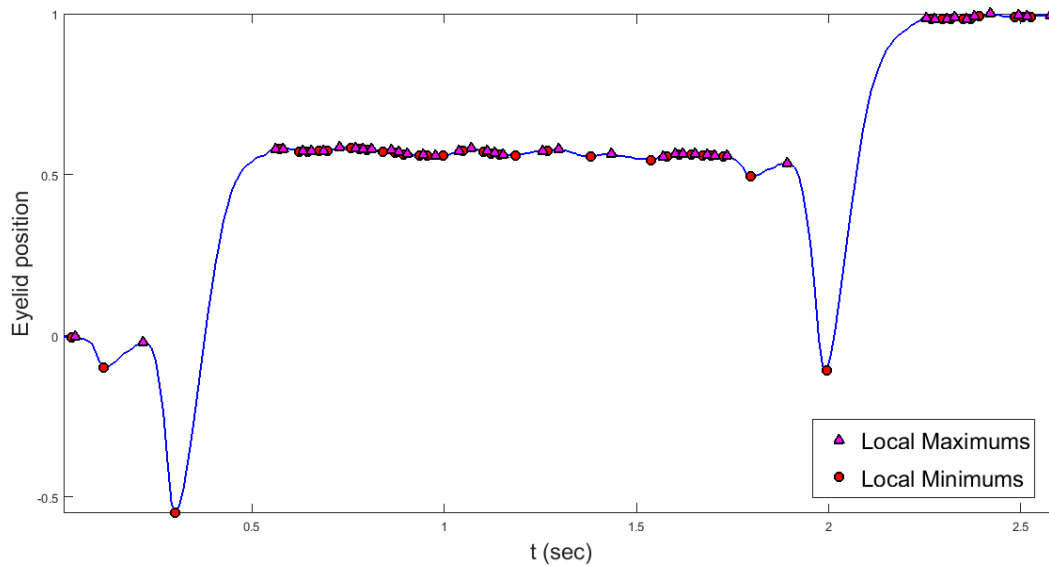


Σχήμα 2.12: Καμπύλη δυναμικού ΗΜΓ μαζί με τα εντοπισμένα τοπικά ελάχιστα.

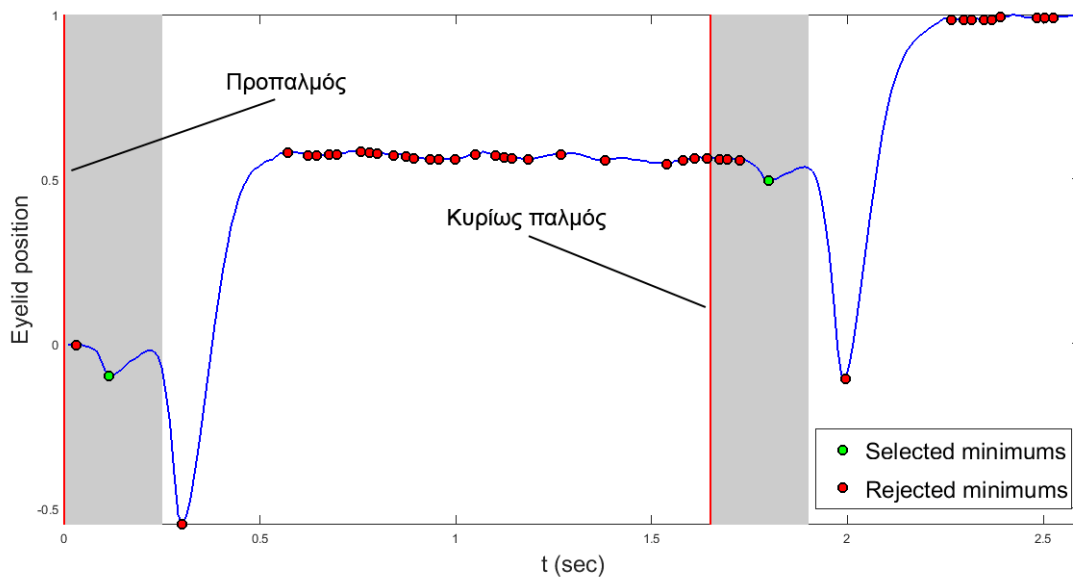
Οι δύο κόκκινες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις χρονικές στιγμές του ζεύγους προπαλμού-κυρίως παλμού, ενώ οι σκιασμένες περιοχές που ακολουθούν τον κάθε παλμό απεικονίζουν τα χρονικά παράθυρα των 0.2 sec, όπου δεχόμαστε ότι λαμβάνουν χώρα οι αντανακλαστικές συσπάσεις. Με πράσινους κύκλους σημειώνονται τα ελάχιστα που εμπίπτουν στα παράθυρα αυτά και αντιπροσωπεύουν τις αντανακλαστικές συσπάσεις λόγω των ηχητικών ερεθισμάτων. Εάν περιλαμβάνονται περισσότερα του ενός ελάχιστα, επιλέγουμε αυτό με το μεγαλύτερο βάθος.

Αντίστοιχα και στα δεδομένα της οπτικής μεθόδου, εφαρμόζουμε τα κριτήρια διαχωρισμού ανεπιθύμητων ελαχίστων. Οι αντανακλαστικές συσπάσεις λαμβάνουν χώρα μέσα σε ένα διάστημα της τάξης των 0.2 sec μετά το ηχητικό ερέθισμα. Έχοντας αυτό ως δεδομένο, μπορούμε να απαλείψουμε όλα τα εντοπισμένα ελάχιστα που βρίσκονται εκτός των διαστημάτων

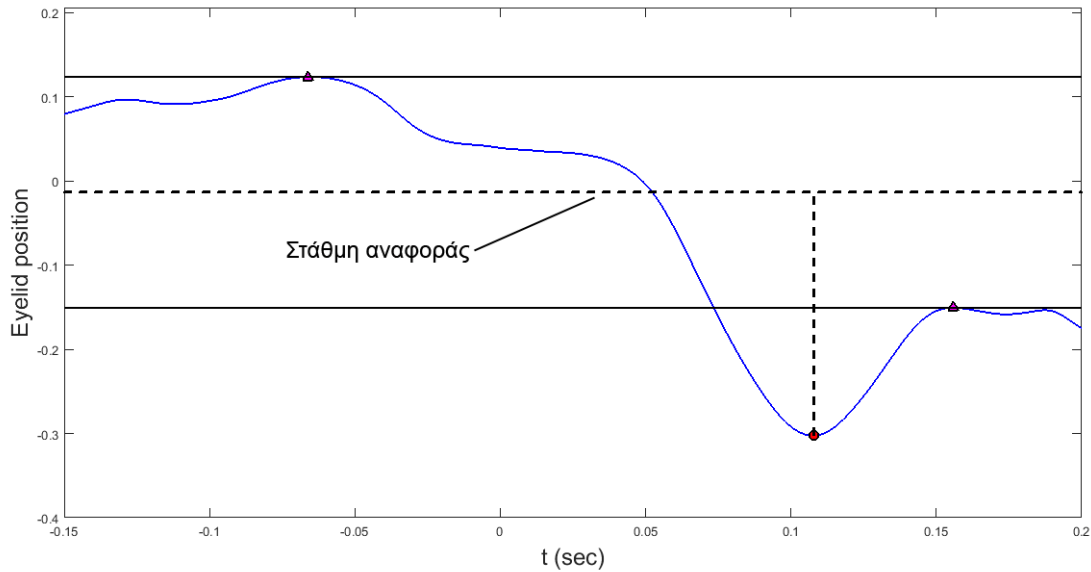
ενδιαφέροντος. Εάν στο χρονικό παράθυρο εμπίπτουν πάνω από ένα ελάχιστο, σαν αντανακλαστική σύσπαση επιλέγουμε αυτό με το μεγαλύτερο βάθος.



Σχήμα 2.13: Εντοπισμένα τοπικά ακρότατα (μέγιστα και ελάχιστα) σε μία χρονοσειρά οπτικής ροής.



Σχήμα 2.14: Εντοπισμένα τοπικά ελάχιστα σε χρονοσειρά οπτικής ροής. Οι δύο κόκκινες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις χρονικές στιγμές του ζεύγους προπαλμού-κυρίως παλμού, ενώ οι σκιασμένες περιοχές που ακολουθούν τον κάθε παλμό απεικονίζουν τα χρονικά παράθυρα των 0.2 sec, όπου δεχόμαστε πως συμβαίνουν οι αντανακλαστικές συσπάσεις. Με πράσινους κύκλους σημειώνονται τα ελάχιστα που εμπίπτουν στα παράθυρα αυτά και αντιπροσωπεύουν τις αντανακλαστικές συσπάσεις λόγω των ηχητικών ερεθισμάτων, όπου επιλέγουμε αυτό με το μεγαλύτερο βάθος.



Σχήμα 2.15: Υπολογισμός σχετικού βάθους ελαχίστου. Ως στάθμη αναφοράς για τον υπολογισμό του βάθους του ελαχίστου ορίζεται ο μέσος όρος του ύψους των εκατέρωθεν τοπικών μεγίστων.

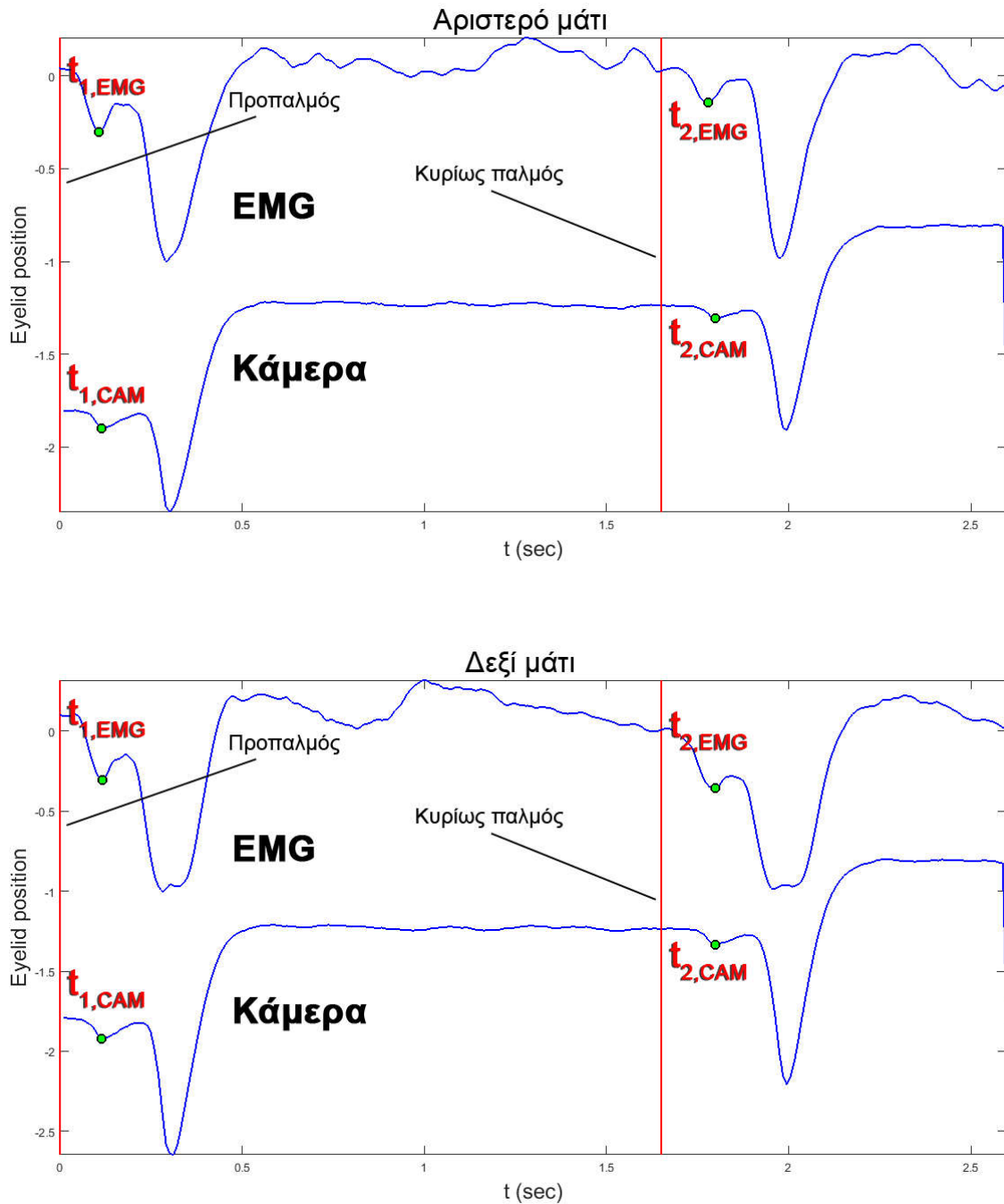
2.3 Στάθμιση οπτικής μεθόδου με βάση τα δεδομένα του ΗΜΓ

Εφαρμόζοντας τη χρήση και των δύο μεθόδων ταυτόχρονα στην ίδια συνεδρία και έπειτα από τον εντοπισμό των κατάλληλων τοπικών ελαχίστων, που αντιστοιχούν στις πτώσεις των βλεφάρων λόγω αντανακλαστικού αιφνιδιασμού, απομένει η επαλήθευση των αποτελεσμάτων μέσω του ελέγχου του βαθμού σύμπτωσής τους.

Η διαδικασία αναγνώρισης των αντανακλαστικών συσπάσεων πραγματοποιείται για κάθε ηχητικό ερέθισμα (ζεύγος προπαλμού-παλμού) από τα συνολικά 51 κατά τη διάρκεια της συνεδρίας. Σε καθένα από τα 51 διαστήματα ελέγχου αντιστοιχούν 4 χρονοσειρές. Δύο χρονοσειρές αναφέρονται στο αριστερό μάτι με διαφορετική μέθοδο λήψης των αποτελεσμάτων (ΗΜΓ και κάμερα) και αντίστοιχα άλλες δύο στο δεξί μάτι.

Στη διαδικασία ελέγχου, ουσιαστικά διερευνούμε κατά πόσον οι καταγραφείσες αντιδράσεις του εξεταζόμενου ατόμου συμπίπτουν ανάμεσα στις δύο μεθόδους, τόσο χρονικά, όσο και από άποψη μεγέθους. Έτσι, κριτήρια της αξιοπιστίας της πειραματικής οπτικής μεθόδου ορίζονται: α) η χρονική σύμπτωση των εντοπισμένων συσπάσεων μεταξύ των δύο μεθόδων και β) η

σύμπτωση μεγέθους της σχέσης των συσπάσεων προπαλμού-παλμού και στις δύο μεθόδους.



Σχήμα 2.16: Σύγκριση χρονοσειρών των δύο μεθόδων για ένα ζεύγος ηχητικών παλμών. Στις καμπύλες έχουν σημειωθεί και οι θέσεις των εντοπισμένων ελαχίστων t_1 , t_2 που αντιστοιχούν στις αντανακλαστικές συσπάσεις.

Ως πρώτο μέτρο σύγκρισης ορίζεται η χρονική απόσταση ανίχνευσης των αντιδράσεων στα ηχητικά ερεθίσματα προπαλμού και παλμού αντίστοιχα, σύμφωνα με την καταγραφή τους από τις δύο διαφορετικές μεθόδους:

$$d_{EC_1} = \sqrt{(t_{1,EMG} - t_{1,CAM})^2 + (t_{2,EMG} - t_{2,CAM})^2},$$

όπου $t_{1,EMG}$ είναι η χρονική στιγμή καταγραφής του προπαλμού στο ΗΜΓ, $t_{1,CAM}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του προπαλμού στην οπτική μέθοδο, $t_{2,EMG}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του κυρίως παλμού στο ΗΜΓ και $t_{2,CAM}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του κυρίως παλμού στην οπτική μέθοδο.

Για τον συνολικό έλεγχο αξιοπιστίας, λαμβάνουμε υπόψη τόσο τη χρονική σύμπτωση, όσο και το μέγεθος των αντιδράσεων. Καθώς η σύγκριση μεγεθών για τις συσπάσεις προπαλμού και παλμού δεν μπορεί να γίνει σε απόλυτα νούμερα, συγκρίνουμε τον λόγο των δύο μεγεθών (σύσπασης παλμού προς σύσπαση προπαλμού), όπως ελήφθησαν ξεχωριστά από τις δύο μεθόδους:

$$\lambda_{1,2} = \frac{dy_1}{dy_2},$$

όπου dy_1 και dy_2 οι αντίστοιχες αντιδράσεις στα ερεθίσματα παλμού και προπαλμού.

Έτσι, ως δεύτερο και πληρέστερο μέτρο σύγκρισης ορίζεται η σύγκριση χρονικής απόστασης αντιδράσεων, καθώς και λόγου μεγεθών προπαλμού-παλμού, σύμφωνα με την καταγραφή τους από τις δύο διαφορετικές μεθόδους:

$$d_{EC_2} = \sqrt{(t_{1,EMG} - t_{1,CAM})^2 + (t_{2,EMG} - t_{2,CAM})^2 + \left(\frac{\lambda_{1,2,EMG} - \lambda_{1,2,CAM}}{mean(\lambda_{1,2,EMG}, \lambda_{1,2,CAM})} \right)^2}$$

όπου $t_{1,EMG}$ είναι η χρονική στιγμή καταγραφής του προπαλμού στο ΗΜΓ, $t_{1,CAM}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του προπαλμού στην οπτική μέθοδο, $t_{2,EMG}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του κυρίως παλμού στο ΗΜΓ και $t_{2,CAM}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του κυρίως παλμού στην οπτική μέθοδο, $\lambda_{1,2,EMG}$ ο λόγος μεγεθών προπαλμού-παλμού στο ΗΜΓ, $\lambda_{1,2,CAM}$ ο αντίστοιχος λόγος μεγεθών προπαλμού-παλμού στην οπτική μέθοδο και $mean(\lambda_{1,2,EMG}, \lambda_{1,2,CAM})$ ο μέσος όρος των δύο λόγων.

Βάσει της τιμής χρονικής δειγματοληψίας της κάμερας της εργαστηριακής διάταξης (96,23 εικόνες ανά δευτερόλεπτο), ισχύει:

$$\frac{1}{96,23} \approx 0,01 \text{ sec,}$$

που αποτελεί μια καλή προσέγγιση του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο συνεχόμενα στιγμιότυπα (καρέ). Η χρονική δειγματοληψία της μεθόδου του ΗΜΓ είναι σαφέστατα υψηλότερη, καθώς αποδίδει πολύ μεγαλύτερο αριθμό μετρήσεων (περίπου 4000 διακριτών τιμών) για το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος παλμών σε σχέση με τις 250 λήψεις της κάμερας. Δεδομένων των σχετικών περιορισμών των τεχνικών μέσων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και του βαθμού δυσκολίας πλήρους ταύτισης της χρονικής βαθμονόμησης ανάμεσα στις δύο μεθόδους, ένα ανώτατο όριο σφάλματος $d_{EC_1} = 0,05$, που αντιστοιχεί δηλαδή σε απόκλιση κατά 5 καρέ της αλληλουχίας των διαδοχικών εικόνων, μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό στο πλαίσιο της πειραματικής έρευνας για το κριτήριο της χρονικής σύμπτωσης, εφόσον έχει διασφαλιστεί ότι ο αντανακλαστικός αιφνιδιασμός ανιχνεύθηκε σωστά από κοινού και στις δύο μεθόδους. Αντίστοιχα, ένα ανώτατο όριο σφάλματος $d_{EC_2} = 0,1$, όταν το κριτήριο λαμβάνει υπόψη και τον λόγο μεγεθών, μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό για την έρευνα αξιοπιστίας της οπτικής μεθόδου, δεδομένης της ισχυρά κυμαινόμενης αβεβαιότητας γύρω από το μέγεθος της προπαλμικής αναστολής από άνθρωπο σε άνθρωπο.

Τα κριτήρια ελέγχου εφαρμόζονται για τις αντίστοιχες τιμές τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού ματιού. Για υψηλότερο έλεγχο ακρίβειας μπορούμε, εν συνεχεία, να επαληθεύσουμε την ευστοχία των αποτελεσμάτων για κάθε μία από τις 51 μετρήσεις ταυτόχρονα και στα δύο μάτια για κάθε κοινό ηχητικό ερέθισμα.

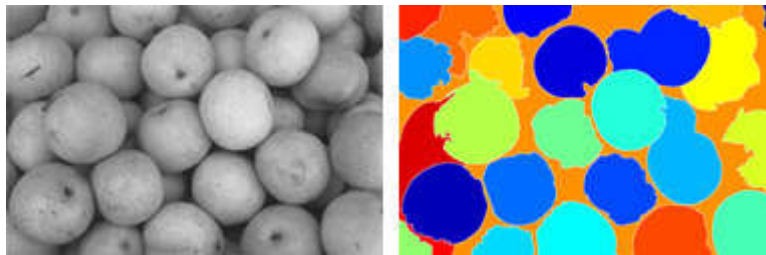
Πίνακες μετρήσεων και αποτελεσμάτων, καθώς και συνολικά συμπεράσματα από τη σύγκριση των δύο μεθόδων παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΑΤΑΤΜΗΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ

3.1 Μέθοδοι κατάτμησης στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας

Η κατάτμηση εικόνας (*image segmentation*) αποτελεί μια από τις βασικότερες διαδικασίες στο πεδίο της όρασης υπολογιστών. Ορίζεται ως η διαδικασία διαμέρισης μιας ψηφιακής εικόνας σε δύο ή περισσότερα τμήματα, αποτελούμενα από ομάδες εικονοστοιχείων (pixels), αποκαλούμενες και υπερ-εικονοστοιχεία (superpixels). Σκοπός της κατάτμησης είναι η απλοποίηση ή κάποια άλλου είδους τροποποίηση στην αναπαράσταση μιας εικόνας, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η ανάλυσή της ως προς τον εντοπισμό αντικειμένων ή ορίων εντός της. Ουσιαστικά, στη διαδικασία της κατάτμησης εικόνας αποδίδουμε μια *προσδιοριστική ετικέτα (label)* σε κάθε εικονοστοιχείο, ώστε όσα διαθέτουν την ίδια ετικέτα, να μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά.



(a)

(b)

Σχήμα 3.1: Παράδειγμα κατάτμησης εικόνας. (a) Αρχική εικόνα. (b) Εμφάνιση περιοχών κατάτμησης σε μορφή διακριτών χρωμάτων.

Το αποτέλεσμα της κατάτμησης είναι είτε ένα σύνολο από τμήματα που το άθροισμά τους καλύπτει τη συνολική επιφάνεια της εικόνας, είτε ένα σύνολο περιγραμμάτων (contours) που εξάγονται από την αρχική εικόνα. Κάθε εικονοστοιχείο που ανήκει σε μια συγκεκριμένη περιοχή μοιράζεται κάποιο κοινό χαρακτηριστικό ή υπολογιστική ιδιότητα με τα υπόλοιπα της ίδιας περιοχής, όπως χρώμα, ένταση (intensity) ή υφή (texture). Οι γειτονικές περιοχές διαφέρουν σημαντικά ως προς τουλάχιστον ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά. Πολύ συχνά, ειδικά στις εφαρμογές ψηφιακής εικόνας για ιατρικές απεικονίσεις, η υλοποίηση κατατμήσεων και εξαγωγής περιγραμμάτων

σε μια σειρά από εικόνες χρησιμοποιείται για τη δημιουργία τρισδιάστατων απεικονίσεων με τη συνδρομή της χρήσης κατάλληλων αλγορίθμων παρεμβολής.

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση της κατάτμησης μιας εικόνας. Η καταλληλότητα κάθε μεθόδου μπορεί να αποτιμηθεί με βάση την αποτελεσματικότητά της ως προς την επεξεργασία συγκεκριμένου τύπου εικόνας (π.χ. έγχρωμες ή σε κλίμακα του γκριζου), τη δυνατότητά της να ανταποκριθεί αποτελεσματικά στις εκάστοτε ιδιαιτερότητες της εικόνας και του σκοπού της κατάτμησης (απομόνωση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών ή αντικειμένων), την αλγοριθμική της πολυπλοκότητα (σημαντική όταν η επεξεργασία αφορά μεγάλο αριθμό εικόνων προς ανάλυση), αλλά και τη δυνατότητα χρήσης της σε διαφορετικές περιπτώσεις στην ίδια εφαρμογή (ώστε να δίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα, χωρίς να χρειάζεται να τροποποιείται εκ περιτροπής).

Επιγραμματικά, οι βασικότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την κατάτμηση των ψηφιακών εικόνων είναι:

➤ **Κατωφλίωση (thresholding)**

Μια από τις πιο απλές μεθόδους κατάτμησης είναι η κατωφλίωση, όπου μια εικόνα σε κλίμακα του γκριζου «πολώνεται» για να μετατραπεί σε δυαδική (binary) αναπαράσταση. Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές δυνατότητες υλοποίησης της μετατροπής, ανάλογα με τη μέθοδο επιλογής ενός ή περισσότερων κατωφλίων.

➤ **Μέθοδοι ομαδοποίησης (clustering)**

Ο διαχωρισμός της εικόνας σε k συστάδες (clusters) υλοποιείται μέσω του επαναληπτικού αλγορίθμου των k -ενδιαμέσων (k-means algorithm) [45]. Χρησιμοποιείται συνήθως όταν σκοπός είναι να διαχωριστεί η εικόνα σε αρκετά διακριτά τμήματα.

➤ **Μέθοδοι βασιζόμενες στη συμπίεση (compression-based)**

Η γενική αρχή μιας τέτοιας μεθόδου θεωρεί πως η βέλτιστη κατάτμηση επιτυγχάνεται όταν ελαχιστοποιείται το μήκος κώδικα των δεδομένων της εικόνας, μέσω της εύρεσης κοινών μοτίβων και της χρήσης συναρτήσεων κατανομής πιθανότητας [46].

➤ **Μέθοδοι βασιζόμενες στο ιστόγραμμα (histogram-based)**

Υπολογίζοντας το ιστόγραμμα από όλα τα εικονοστοιχεία της εισόδου, με κριτήριο είτε το χρώμα είτε την ένταση, η εύρεση των διακριτών τμημάτων της εικόνας γίνεται από την αποτύπωση των κορυφών (heaps) και των κοιλάδων (valleys). Πλεονέκτημα της μεθόδου θεωρείται η υπολογιστική ταχύτητά της (ένα μόνο πέρασμα από κάθε εικονοστοιχείο), με το ρίσκο ωστόσο της πιθανότητας αστοχίας σε απαιτητικές αναλύσεις.

➤ **Ανίχνευση ακμών (edge detection)**

Το πεδίο της ανίχνευσης ακμών αποτελεί έναν ιδιαίτερα ανεπτυγμένο τομέα της ανάλυσης ψηφιακών εικόνων. Καθώς στην ανίχνευση ακμών, τα εξαγόμενα δεδομένα δε σχηματίζουν κλειστές περιοχές (περιγράμματα), η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτο στάδιο στη διαδικασία της κατάτμησης.

➤ **Μέθοδοι επέκτασης περιοχών (region-growing)**

Δεδομένου ότι τα γειτονικά εικονοστοιχεία εντός μιας περιοχής διαθέτουν κοινές ιδιότητες, μια μέθοδος συγκρίσεων και ικανοποίησης κριτηρίων ομοιότητας μπορεί να ομαδοποιήσει αποτελεσματικά τα εικονοστοιχεία σε διακριτές περιοχές. Ανάλογα με το είδος των κριτηρίων ομοιότητας, υπάρχουν αρκετές διαφορετικές υλοποιήσεις της μεθόδου, με γνωστότερη τη στατιστική συγχώνευση περιοχών (SRM). Η εξάλειψη του θορύβου, χωρίς όμως να αλλοιώνονται σημαντικά χαρακτηριστικά της εικόνας, είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία της μεθόδου.

➤ **Μέθοδοι βασιζόμενες σε μερικές διαφορικές εξισώσεις (partial differential equation-based)**

Στηριζόμενη στη θεωρία των γεωδαισιακών ενεργών περιγραμμάτων (geodesic active contours), η επίλυση της μερικής διαφορικής εξίσωσης και το επαγόμενο υπολογιστικό πλέγμα μπορούν να αποδώσουν την κατάτμηση μιας εικόνας, χρησιμοποιώντας συνήθως τη μέθοδο της διάδοσης καμπυλών (curve propagation) [47]. Συνηθίζεται για απαιτητικές εργασίες, όπως η εξαγωγή αντικειμένων, η παρακολούθηση κινούμενων αντικειμένων, η στερεοσκοπική ανακατασκευή κ.ά.

➤ **Μέθοδοι διαμέρισης γράφου (graph partitioning)**

Η μέθοδος αυτή αναπαριστά την ψηφιακή εικόνα με έναν μη-κατευθυνόμενο γράφο με βάρη. Τα εικονοστοιχεία (ή ευρύτερες ομαδοποιήσεις τους) αναπαρίστανται ως κόμβοι, ενώ τα βάρη τους είναι ενδεικτικά του βαθμού ομοιότητάς τους. Οι συγκρίσεις γίνονται μεταξύ γειτονικών κόμβων και η τελική διαμέριση βασίζεται σε γνωστές μεθόδους από τη θεωρία γράφων.

➤ **Μετασχηματισμός υδροκρίτη (watershed transformation)**

Αποδίδοντας σε μια ψηφιακή εικόνα στην κλίμακα του γκριζου τα χαρακτηριστικά ενός γεωγραφικού ανάγλυφου, όπου η ένταση του λευκού αποδίδει το υψόμετρο της θέσης του αντίστοιχου εικονοστοιχείου, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η ρίψη σταγόνων νερού σε κάθε σημείο θα προκαλέσει τη διαγραφή μιας συγκεκριμένης διαδρομής με κατάληξη σε ένα τοπικό ελάχιστο. Επιπλέον, αν τοποθετούσαμε πηγές νερού σε κάθε τοπικό ελάχιστο και προκαλούσαμε πλημμυρισμό, θα μπορούσαμε να ορίσουμε ως σύνορα (υδροκρίτες) τις περιοχές όπου τα νερά από διαφορετικές πηγές συναντιούνται. Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί ορισμοί για έναν από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους κατάτμησης, ανάλογα με το εξειδικευμένο μοντέλο που ακολουθείται, με συνηθέστερη μέθοδο εκείνη που προηγείται ο ορισμός δεικτών (markers) είτε από τον χρήστη είτε μέσω μορφολογικών τελεστών πριν την υλοποίησή του σε τελικό στάδιο, ώστε να αποφευχθεί η υπερ-κατάτμηση.

➤ **Κατάτμηση βασιζόμενη σε μοντέλο (model based)**

Η συγκεκριμένη προσέγγιση βασίζεται στην ιδέα ότι οι δομές ενδιαφέροντος στην εικόνα παρουσιάζουν μια επαναλαμβανόμενη γεωμετρική μορφή. Οπότε, με τη χρήση ενός πιθανοτικού μοντέλου αναζητούμε παραλλαγές μιας καθορισμένης μορφής, ορίζοντας σχετικούς περιορισμούς απόκλισης για την αποτελεσματική κατάτμηση της εικόνας.

➤ **Κατάτμηση πολλαπλών κλιμάκων (multi-scale)**

Γνωστή κι ως κατάτμηση χώρων κλίμακας (scale-space), βασίζεται στην αντίστοιχη θεωρία ανάλυσης σημάτων. Υπολογίζονται οι περιγραφείς (descriptors) μιας εικόνας σε πολλαπλές κλίμακες εξομάλυνσης.

➤ **Ημι-αυτόματη κατάτμηση (semi-automatic)**

Αναφέρεται στη συμβολή του χρήστη κατά την πραγματοποίηση της κατάτμησης, ο οποίος επιλέγει (συνήθως με τη χρήση του ποντικιού) την περιοχή ενδιαφέροντος και ο αλγόριθμος επιστρέφει τη διαδρομή που καλύπτει με τον βέλτιστο τρόπο την ορισθείσα από τον χρήστη περιοχή.

Η κατάτμηση της εικόνας, που εδώ για τις ανάγκες της εφαρμογής εξειδικεύεται ως η απομόνωση της μορφής του προσώπου από το υπόβαθρό του, είναι μια ιδιαίτερα προσιτή διαδικασία. Ουσιαστικά, απαιτούμε τον διαχωρισμό της εικόνας σε δύο περιοχές: (α) στο προσκήνιο (foreground), όπου το φωτογραφημένο πρόσωπο απεικονίζεται σωστά εστιασμένο στο επίκεντρο και (β) στο υπόβαθρο (background), μια συνήθως μονόχρωμη και ενιαία περιοχή. Το γεγονός ότι οι εικόνες που μας ενδιαφέρουν έχουν συνήθως ληφθεί κατάλληλα σε συνθήκες εργαστηρίου διευκολύνει περαιτέρω στην αποτελεσματικότερη πραγματοποίηση του παραπάνω διαχωρισμού.

Οι μέθοδοι που θα εξετάσουμε είναι δύο: η *κατωφλίωση* και ο *αλγόριθμος watershed (υδροκρίτη)*. Η κατωφλίωση επιλέγεται ως μια απλή και αποτελεσματική για την περίπτωσή μας μέθοδος κατάτμησης. Η εικόνα πρέπει να διαιρεθεί σε δύο περιοχές (προσκήνιο, υπόβαθρο), επομένως μια διαδικασία πόλωσης και δυαδικής διάζευξης φαίνεται επαρκής για τις ανάγκες της συγκεκριμένης κατάτμησης. Επιπλέον, επιλέξαμε τον αλγόριθμο watershed ως μια πιο εκλεπτυσμένη μέθοδο κατάτμησης, όπου μια ελαφρώς εμπλουτισμένη μορφή κατωφλίωσης αποτελεί σημαντικό κομμάτι της προεργασίας της εικόνας για την υλοποίηση της *ρυθμιζόμενης με δείκτες (marker-controlled) μορφής* του αλγορίθμου. Θα εξετάσουμε και τις δύο μεθόδους κατάτμησης, συγκρίνοντας τα αποτελέσματά τους, για διάφορες περιπτώσεις ψηφιακών απεικονίσεων φωτογραφούμενων προσώπων.

3.2 Κατωφλίωση

3.2.1 Προεργασία εικόνας

Θεωρητικά, υπάρχει η δυνατότητα να εφαρμοστεί απευθείας η διαδικασία της κατωφλίωσης σε εικόνες που έχουν μετατραπεί σε κλίμακα του γκριζου. Τα πρακτικά αποτελέσματα δεν είναι αρνητικά, ωστόσο παρατηρούνται συχνά αρκετές ατέλειες, αλλά και αστοχίες σε περιπτώσεις ελαφρώς πιο απαιτητικών από το σύνηθες φωτογραφικών δειγμάτων. Αναζητώντας μια βελτιωμένη μορφή της διαδικασίας κατωφλίωσης, μπορούμε να επεξεργαστούμε κατάλληλα την αρχική εικόνα σε πρώτη φάση, ώστε στη συνέχεια τα αποτελέσματα της κατάτμησης να είναι σαφώς πιο εύστοχα. Διακρίνουμε επομένως δύο φάσεις για την κατάτμηση μέσω κατωφλίωσης: (α) την προεργασία της εικόνας, που θα βασιστεί σε βασικές εφαρμογές της μαθηματικής μορφολογίας και (β) την τελική εκτέλεση της κατωφλίωσης.

Καταρχάς προβαίνουμε σε ανάγνωση της εικόνας από αρχείο και προετοιμασία του πίνακα τιμών των εικονοστοιχείων για επεξεργασία, βεβαιώνοντας ότι χρησιμοποιούμε αριθμούς κινητής υποδιαστολής υψηλής ακρίβειας (double-precision floating point). Αν η αρχική εικόνα είναι έγχρωμη, περιγράφεται δηλαδή από τρεις πίνακες σύμφωνα με το RGB μοντέλο, θα προχωρήσουμε στη μετατροπή της σε έναν πίνακα έντασης της κλίμακας του γκριζου. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται εξαλείφοντας την πληροφορία απόχρωσης (hue) και κορεσμού (saturation) από την πρωτότυπη RGB εικόνα, διατηρώντας παράλληλα την πληροφορία φωτεινότητας (luminance). Η μέθοδος αυτή διασφαλίζει ότι η συγκεκριμένη μετατροπή πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο σε κάθε εφαρμογή λογισμικού.

Η σημαντικότερη μορφοποίηση της εικόνας στο στάδιο της προεργασίας για την επίτευξη της πιο εύστοχης κατωφλίωσής της είναι η εφαρμογή ενός σειριακού φίλτρου ανακατασκευής, που ορίζεται ως *άνοιγμα-κλείσιμο μέσω ανακατασκευής* (*open-close by reconstruction*) και βασίζεται στη θεωρία της μαθηματικής μορφολογίας (mathematical morphology), οι πρακτικές εφαρμογές της οποίας στον τομέα της ανάλυσης και επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας είναι πολυάριθμες και ιδιαίτερα διαδεδομένες.

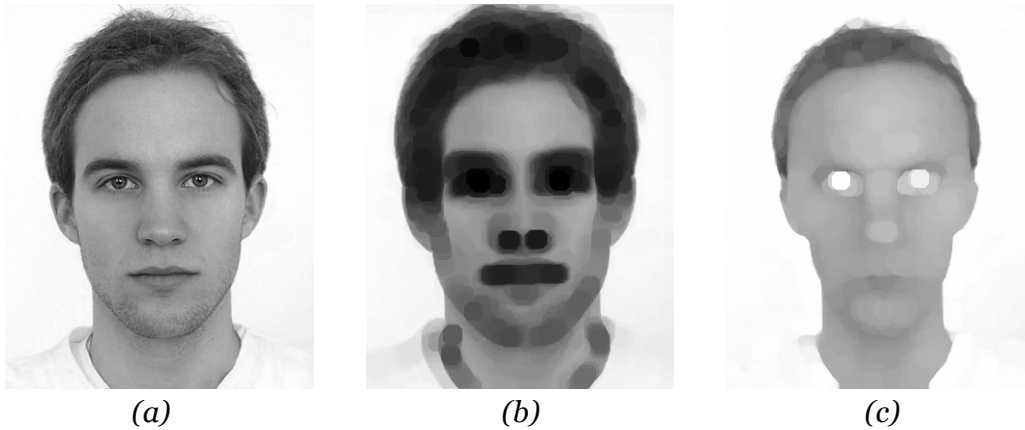
3.2.2 Μαθηματική μορφολογία

Οι βασικές έννοιες της μαθηματικής μορφολογίας, που θα τεθούν σε εφαρμογή και για τις ανάγκες της παρούσας επεξεργασίας, είναι η διάβρωση (erosion), η διαστολή (dilation) και η ανακατασκευή (reconstruction). Μια εικόνα σε κλίμακα του γκριζου μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχα και ως μια συνάρτηση $f(x)$ με πεδίο ορισμού E έναν ευκλείδειο χώρο $E \in \mathbb{R}^d$ και σύνολο τιμών το $\mathbb{R} \cup \{\infty, -\infty\}$. Αντίστοιχα, ορίζεται η έννοια του δομικού στοιχείου (structural element), που εκφράζει μια λιγότερο ή περισσότερο σύνθετη γεωμετρική επιφάνεια (τετράγωνο, δίσκος κ.ά.) επίσης σε μορφή συνάρτησης, έστω $b(x)$. Ένα δομικό στοιχείο θεωρητικά μπορεί να έχει είτε γραμμική είτε και τρισδιάστατη μορφή, ωστόσο στο κομμάτι της επεξεργασίας εικόνας, συνήθως αναφερόμαστε σε κάποια δεδομένη επιφάνεια.

Η διάβρωση μιας εικόνας που περιγράφεται από τη συνάρτηση $f(x)$ με χρήση του δομικού στοιχείου $b(x)$ ορίζεται ως η εύρεση του μέγιστου κάτω φράγματος (infimum): $(f \ominus b)(x) = \inf_{y \in E} [f(y) - b(y - x)]$

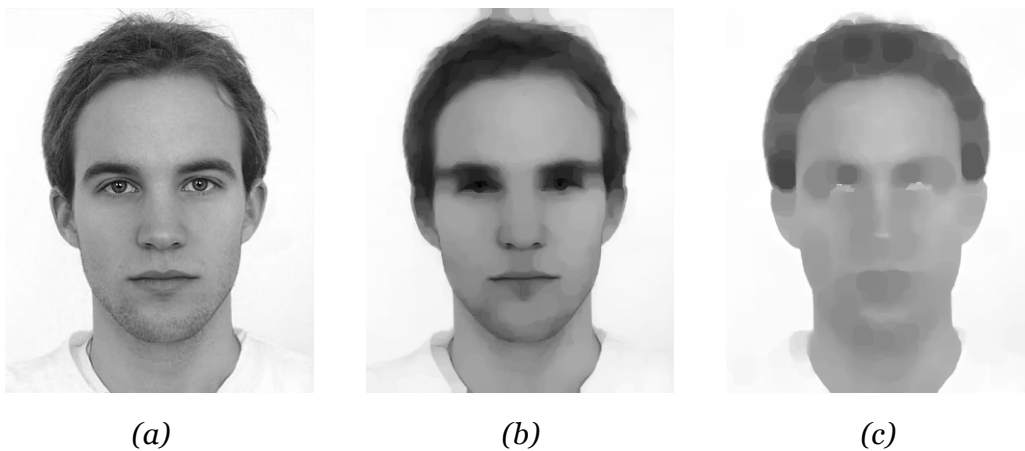
Η διαστολή μιας εικόνας $f(x)$ από το δομικό στοιχείο $b(x)$ είναι ο δυϊκός ορισμός της διάβρωσης για την εύρεση του αντίστοιχου ελάχιστου άνω φράγματος (supremum): $(f \oplus b)(x) = \sup_{y \in E} [f(y) + b(y - x)]$

Σκοπός της χρήσης της διάβρωσης μιας ψηφιακής εικόνας στην κλίμακα του γκριζου είναι η εύρεση και τοπική εξάπλωση των ελαχίστων, δηλαδή των λιγότερο φωτεινών σημείων της, με βάση το σχήμα και τις διαστάσεις που ορίζονται από το δομικό στοιχείο. Συγκρίνοντας τις τιμές γειτονικών εικονοστοιχείων μέσα σε μια καθορισμένη περιοχή, υπολογίζεται η ελάχιστη τιμή, με αποτέλεσμα όλα τα εικονοστοιχεία της περιοχής να εξισώνονται στην ίδια ελάχιστη τιμή. Αντίστοιχα, η διαστολή μιας grayscale εικόνας, εντείνει τις φωτεινές της περιοχές, σύμφωνα με τη μορφή του δομικού στοιχείου, καθώς γειτονικά εικονοστοιχεία παίρνουν την τιμή του τοπικού μέγιστου.



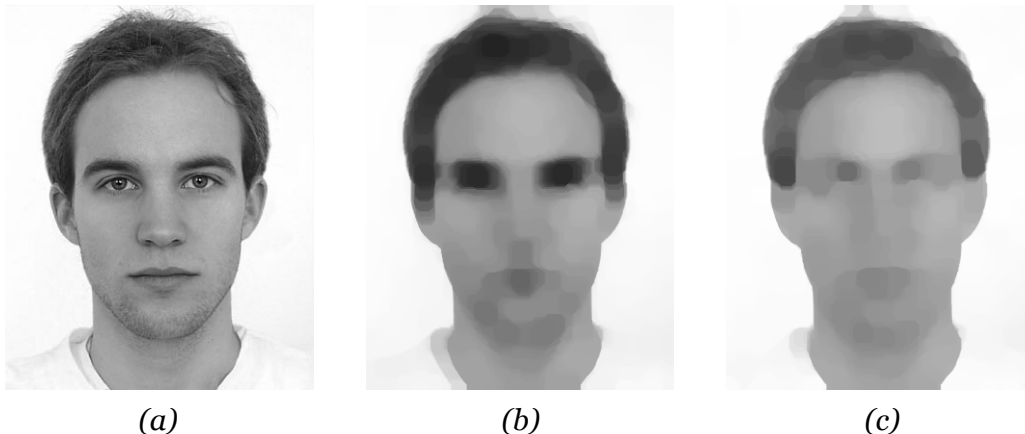
Σχήμα 3.2: (a) Αρχική εικόνα. (b) Διάβρωση (erosion) αρχικής εικόνας.
(c) Διαστολή (dilation) αρχικής εικόνας.

Είναι πολύ πιθανό να χρησιμοποιούνται και οι δύο τεχνικές ακολουθιακά στην ίδια διαδικασία επεξεργασίας, ώστε, για παράδειγμα, να αφαιρούνται τα πιο φωτεινά χαρακτηριστικά της εικόνας. Τότε, όταν η εφαρμογή της διάβρωσης με χρήση ενός συγκεκριμένου δομικού στοιχείου ακολουθείται από εφαρμογή διαστολής με χρήση του ίδιου δομικού στοιχείου, η διαδικασία αυτή ονομάζεται άνοιγμα (opening). Αν πάλι ακολουθηθεί η αντίστροφη σειρά εφαρμογής, όπου μια διαστολή ακολουθείται από διάβρωση βάσει του ίδιου δομικού στοιχείου, με αποτέλεσμα την αφαίρεση των πιο σκοτεινών χαρακτηριστικών της εικόνας, τότε η διαδικασία ονομάζεται κλείσιμο (closing). Ουσιαστικά, δηλαδή το άνοιγμα ορίζεται ως: $f \circ b = (f \odot b) \oplus b$. Ενώ αντίστοιχα το κλείσιμο: $f \bullet b = (f \oplus b) \odot b$



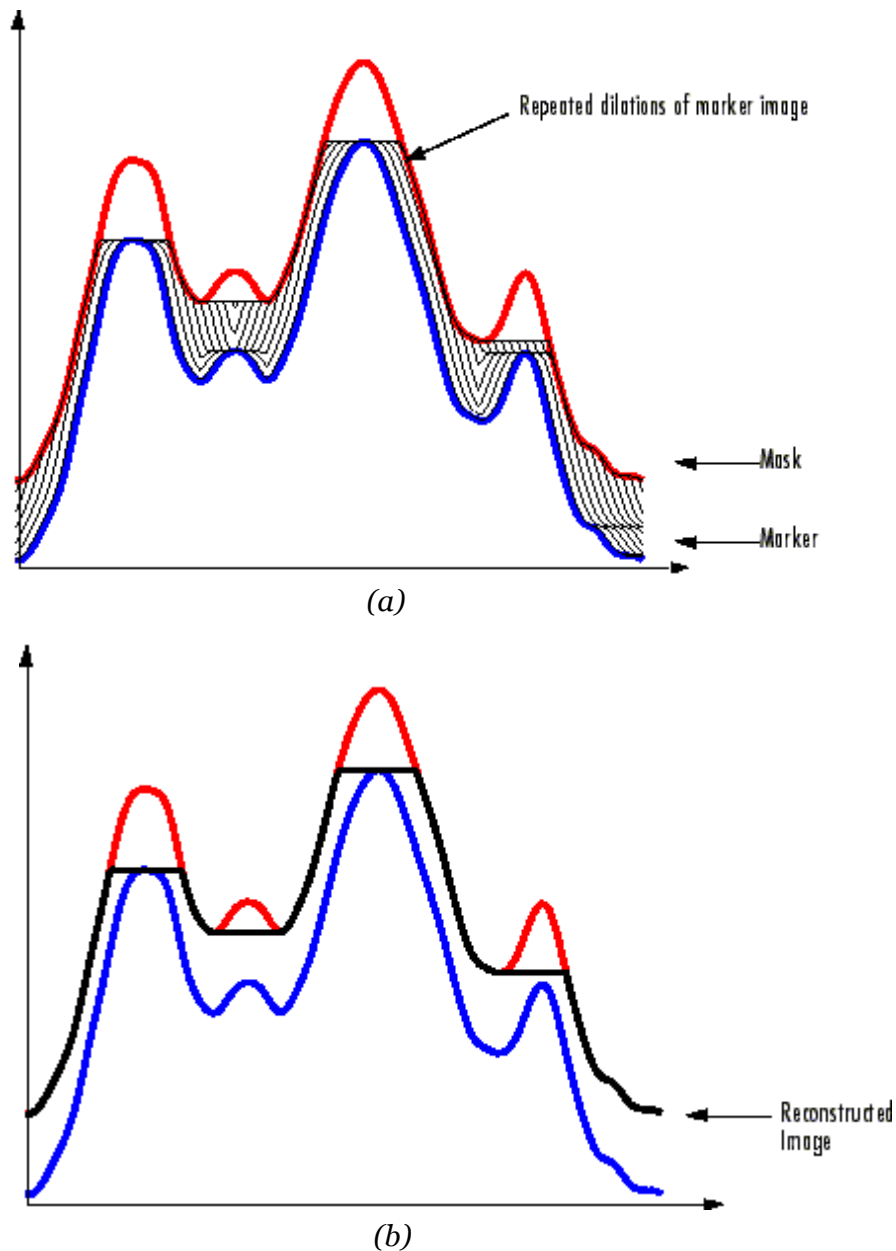
Σχήμα 3.3: (a) Αρχική εικόνα. (b) Άνοιγμα (erosion-dilation) αρχικής εικόνας.
(c) Κλείσιμο (dilation-erosion) αρχικής εικόνας.

Υπάρχει τέλος η δυνατότητα οι δύο επεξεργασίες ανοίγματος και κλεισίματος να εφαρμοστούν και αυτές με τη σειρά τους ακολουθιακά, η μία μετά την άλλη, δίνοντας έτσι τις διαδικασίες ανοίγματος-κλεισίματος (open-close) και κλεισίματος-ανοίγματος (close-open), αναλόγως με τη σειρά εφαρμογής. Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας διαδικασίας είναι να αφαιρεθούν από την εικόνα τόσο οι σκοτεινότερες, όσο και οι φωτεινότερες περιοχές της, καταλήγοντας σε μια μεσοσταθμισμένη, όσο και ιδιαίτερα αμβλυμένη απεικόνιση.



*Σχήμα 3.4: (a) Αρχική εικόνα. (b) Άνοιγμα-κλείσιμο αρχικής εικόνας.
(c) Κλείσιμο-άνοιγμα αρχικής εικόνας.*

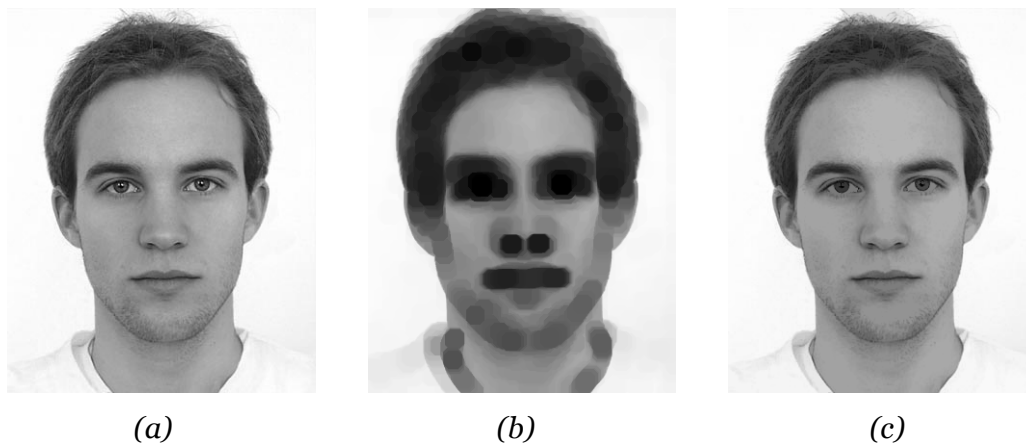
Μια βελτιωμένη εκδοχή των μεθόδων ανοίγματος και κλεισίματος είναι η υλοποίησή τους με την αρωγή της μεθόδου της μορφολογικής ανακατασκευής (morphological reconstruction). Η διαδικασία της ανακατασκευής μπορεί να περιγραφεί ως η επαναλαμβανόμενη διαστολή μιας εικόνας-δείκτη (marker image) έως ότου το σχήμα της να προσαρμοστεί πλήρως πάνω σε μια δεύτερη εικόνα, που ονομάζεται εικόνα-μάσκα (mask image). Ουσιαστικά, η ανακατασκευή βασίζεται στη μέθοδο της διαστολής μιας εικόνας, διαφέροντας ως προς το ότι α) στην ανακατασκευή χρησιμοποιούνται δύο εικόνες, ο δείκτης και η μάσκα, αντί για μια εικόνα και ένα δομικό στοιχείο, β) η ανακατασκευή βασίζεται στην αρχή της συνεκτικότητας (connectivity) μεταξύ των εικονοστοιχείων και γ) η διαδικασία της ανακατασκευής αποτελείται από μια σειρά επαναλαμβανόμενων εφαρμογών μέχρι την επίτευξη του σημείου σταθερότητας, εκεί δηλαδή που η εικόνα παύει πλέον να μεταβάλλεται.



Σχήμα 3.5: Ενδεικτική αποτύπωση της διαδικασίας ανακατασκευής σε μονοδιάστατη κλίμακα. (α) Η εικόνα-δείκτης διαστέλλεται επαναληπτικά μέχρι να προσαρμοστεί πάνω στην εικόνα-μάσκα. (β) Η ανακατασκευασμένη εικόνα προκύπτει από την εικόνα-μάσκα, περικόπτοντας τις κορυφές της.

Οι εικόνες που ορίζονται ως δείκτης και μάσκα έχουν πάντοτε τις ίδιες διαστάσεις, καθώς συνήθως η μία προκύπτει από την άλλη με κάποια μέθοδο επεξεργασίας. Έτσι, όταν εφαρμοστεί διάβρωση πάνω σε μια εικόνα, με βάση ένα δομικό στοιχείο, η προκύπτουσα εικόνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης, θέτοντας αντίστοιχα την αρχική εικόνα ως μάσκα. Μια τέτοια διαδοχή,

όπου μια διάβρωση ακολουθείται από ανακατασκευή της αρχικής εικόνας, ονομάζεται άνοιγμα μέσω ανακατασκευής (opening by reconstruction) και στις grayscale εικόνες χρησιμοποιείται για να απομακρύνει τα φωτεινά σημεία χαμηλής συνεκτικότητας, διατηρώντας όμως περισσότερα χαρακτηριστικά της αρχικής εικόνας σε σχέση με την απλή διαδικασία ανοίγματος (διάβρωση-διαστολή). Αντίστοιχα, μια διαδοχή διαστολής μιας εικόνας από ένα δομικό στοιχείο και επακόλουθης ανακατασκευής της, χρησιμοποιώντας την προκύπτουσα διασταλμένη εικόνα ως δείκτη, θα αφαιρέσει τα σκοτεινά σημεία χαμηλής συνεκτικότητας. Η διαδικασία αυτή λέγεται κλείσιμο μέσω ανακατασκευής (closing by reconstruction). Επειδή η ανακατασκευή μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο όταν οι τιμές των εικονοστοιχείων του δείκτη είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της μάσκας, πολλές φορές – όπως στο κλείσιμο μέσω ανακατασκευής – είναι απαραίτητο να υπολογίσουμε τα συμπληρώματα (complements) των δύο grayscale εικόνων για να γίνει εφικτή η διαδικασία. Στο τέλος, απλά υπολογίζουμε και πάλι το συμπλήρωμα της ανακατασκευασμένης εικόνας και έτσι ολοκληρώνουμε την επιθυμητή μορφοποίηση. Καθώς οι μέθοδοι ανοίγματος και κλεισίματος μέσω ανακατασκευής με χρήση του ίδιου δομικού στοιχείου μπορούν με τη σειρά τους να χρησιμοποιηθούν επίσης διαδοχικά, η συνολική μορφοποίηση που προκύπτει αποτελεί τη μέθοδο του ανοίγματος-κλεισίματος μέσω ανακατασκευής.



(a)

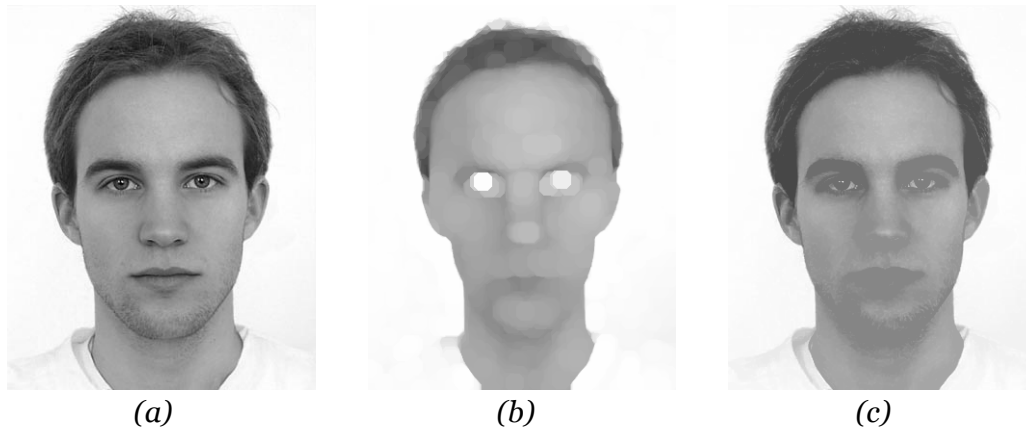
(b)

(c)

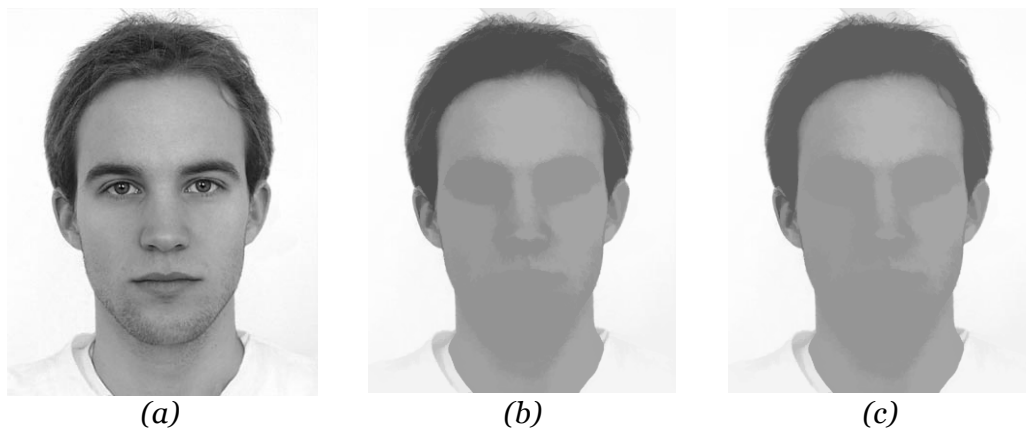
Σχήμα 3.6: (a) Αρχική εικόνα – μάσκα.

(b) Διάβρωση (erosion) αρχικής εικόνας – δείκτης.

(c) Άνοιγμα αρχικής εικόνας μέσω ανακατασκευής (open by reconstruction).



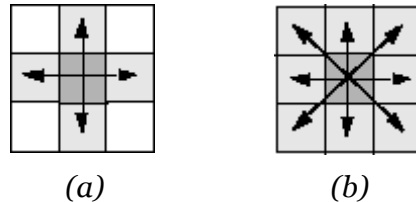
Σχήμα 3.7: (a) Αρχική εικόνα – μάσκα (συμπλήρωμα).
 (b) Διαστολή (erosion) αρχικής εικόνας – δείκτης (συμπλήρωμα).
 (c) Κλείσιμο αρχικής εικόνας μέσω ανακατασκευής (close by reconstruction).



Σχήμα 3.8: (a) Αρχική εικόνα. (b) Άνοιγμα-κλείσιμο μέσω ανακατασκευής.
 (c) Κλείσιμο-άνοιγμα μέσω ανακατασκευής

Το μορφολογικό φίλτρο ανοίγματος-κλεισίματος μέσω ανακατασκευής θα χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των φωτογραφημένων προσώπων, ώστε να εξομαλύνει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους, προετοιμάζοντας τις εικόνες για την υλοποίηση της κατωφλίωσης. Η εύρεση του κατάλληλου μορφολογικού δομικού στοιχείου εξαρτάται πάντοτε από τους σκοπούς της επεξεργασίας και ο ασφαλέστερος τρόπος προσδιορισμού του γίνεται μέσω δοκιμών. Τα καλύτερα αποτελέσματα στις εικόνες που χρησιμοποιήσαμε προέκυψαν με χρήση επιφάνειας δίσκου με ακτίνα μεγέθους 60. Η απεικόνιση ενός τέτοιου στοιχείου στην ψηφιακή εικόνα γίνεται βάσει της θεωρίας των περιοδικών γραμμών (periodic lines), όπου τα μη ευθύγραμμα τμήματα

προσεγγίζονται κατάλληλα από εικονοστοιχεία σε μικρότερες περιοδικότητες. Επιπλέον, η μορφολογική ανακατασκευή σε δύο διαστάσεις αποδίδει σαφώς καλύτερα αποτελέσματα στην υψηλή γειτονική συνεκτικότητα των οκτώ συνδέσεων (8-connected neighborhoods).



Σχήμα 3.9: (α) Γειτονικότητα 4 συνδέσεων (4-connected neighborhoods).
(β) Γειτονικότητα 8 συνδέσεων (8-connected neighbourhoods).

3.2.3 Εκτέλεση της κατωφλίωσης

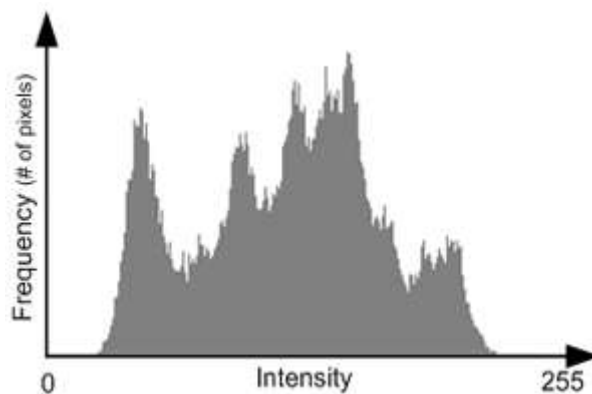
Η κατωφλίωση ως μέθοδος κατάτμησης μιας εικόνας μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορες μορφές υλοποίησης. Οι πιο συνηθισμένες βασίζονται στο ιστόγραμμα της εικόνας (histogram shape-based). Άλλες μέθοδοι βασίζονται στις ομαδοποιήσεις (clustering-based) ή στην εντροπία των περιοχών προσκήνιου και υποβάθρου (entropy-based). Επίσης, υπάρχουν μέθοδοι που βασίζονται στα χαρακτηριστικά αντικειμένου (object attribute-based), αναζητώντας βαθμούς ομοιότητας ανάμεσα στη μονόχρωμη και στη δυαδική μορφή της εικόνας, καθώς και χωρικές (spatial) ή τοπικές (local) μέθοδοι, που προσεγγίζουν κάθε εικονοστοιχείο ξεχωριστά [48].

Μια από τις πιο διαδεδομένες υλοποιήσεις είναι η μέθοδος Otsu, που βασίζεται στην εργασία του Nobuyuki Otsu από το 1979 [49]. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στο ιστόγραμμα της εικόνας, είναι αρκετά απλή στην εφαρμογή και γρήγορη, αποδίδοντας πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επιπλέον, η υλοποίηση της είναι προεγκατεστημένη στις περισσότερες εφαρμογές λογισμικού επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας. Αυτή είναι και η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την τελική φάση της κατωφλίωσης των εικόνων των φωτογραφημένων προσώπων.

Η μέθοδος Otsu δέχεται ως είσοδο μια μονόχρωμη εικόνα, δηλαδή μια εικόνα στην κλίμακα του γκριζου, με κάθε εικονοστοιχείο της να φέρει μια τιμή έντασης που αντιστοιχεί στην ανάλογη απόχρωση (επίπεδο) μεταξύ μαύρου και λευκού. Το πλήθος των δυνητικών τιμών είναι συνήθως 256, όταν πρόκειται για

τις τυπικές 8-bit απεικονίσεις, αλλά σπανιότερα μπορεί να απαιτηθεί η χρήση μεγαλύτερου αριθμού επιπέδων (έως και 65.536 στα 16-bit), ειδικά για απεικονίσεις ιατρικού ενδιαφέροντος, όπου το ζητούμενο είναι να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα λόγω στρογγυλοποίησης. Σκοπός είναι η εύρεση της κατάλληλης τιμής, του λεγόμενου κατωφλιού (threshold), που θα «πλώσει» κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας στις δύο αποκλειστικές δυαδικές αξίες 0 και 1. Για τιμές κατώτερες του κατωφλιού, το εικονοστοιχείο παίρνει την τιμή 0, που αντιστοιχεί στο μαύρο, ενώ για τιμές ίσες ή ανώτερες του κατωφλιού την τιμή 1, δηλαδή λευκό. Η εύρεση του αποδεκτού κατωφλιού βασίζεται στον υπολογισμό του επιπέδου ελάχιστης εντός κλάσεων διακύμανσης (within-class variance) ή εναλλακτικά του επιπέδου μέγιστης μεταξύ κλάσεων διακύμανσης (between-class variance).

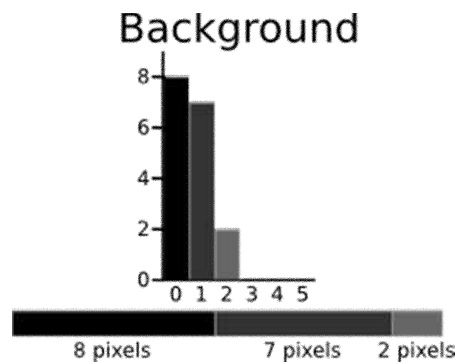
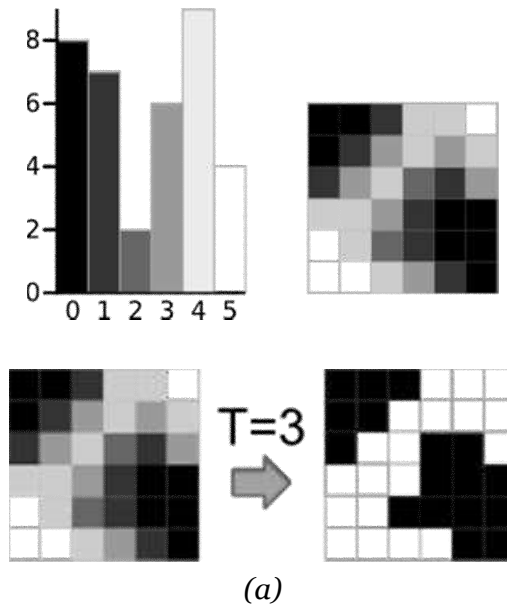
Το ιστόγραμμα μιας grayscale εικόνας δίνει το πλήθος των εμφανίσεων των εικονοστοιχείων σε κάθε επίπεδο, δηλαδή σε κάθε δυνατή απόχρωση του γκριζου.



Σχήμα 3.10: Ενδεικτικό ιστόγραμμα μονόχρωμης ψηφιακής εικόνας.

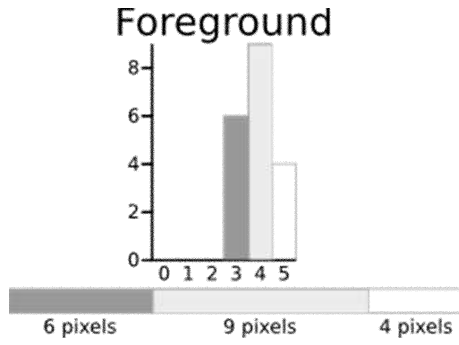
Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι κάθε ξεχωριστό επίπεδο, αποτελεί και υποψήφιο κατώφλι. Υπολογίζουμε επομένως για κάθε επίπεδο τις τιμές του βάρους, του μέσου όρου και της διακύμανσης τόσο για το υπόβαθρο (W_b, μ_b, σ_b^2) , όσο και για το προσκήνιο (W_f, μ_f, σ_f^2) . Η εντός κλάσεων διακύμανση ορίζεται ως: $\sigma_w^2 = W_b \cdot \sigma_b^2 + W_f \cdot \sigma_f^2$. Το επίπεδο εκείνο όπου η εντός κλάσεων διακύμανση ελαχιστοποιείται ορίζεται ως το ιδανικό κατώφλι. Στην πραγματικότητα, η συγκεκριμένη διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα,

καθώς απαιτεί τον υπολογισμό της διακύμανσης (σ_b^2, σ_f^2) για κάθε επίπεδο. Έτσι, προτιμάται ο υπολογισμός της μεταξύ κλάσεων διακύμανσης, που ορίζεται ως $\sigma_B^2 = W_b \cdot W_f \cdot (\mu_b - \mu_f)^2$. Το επίπεδο όπου η μεταξύ κλάσεων διακύμανση μεγιστοποιείται ταυτίζεται με το επίπεδο που η εντός των κλάσεων διακύμανση ελαχιστοποιείται και αποτελεί το ζητούμενο κατώφλι.



$$\begin{aligned} \text{Weight } W_b &= \frac{8 + 7 + 2}{36} = 0.4722 \\ \text{Mean } \mu_b &= \frac{(0 \times 8) + (1 \times 7) + (2 \times 2)}{17} = 0.6471 \\ \text{Variance } \sigma_b^2 &= \frac{((0 - 0.6471)^2 \times 8) + ((1 - 0.6471)^2 \times 7) + ((2 - 0.6471)^2 \times 2)}{17} \\ &= \frac{(0.4187 \times 8) + (0.1246 \times 7) + (1.8304 \times 2)}{17} \\ &= 0.4637 \end{aligned}$$

(b)



$$\text{Weight } W_f = \frac{6 + 9 + 4}{36} = 0.5278$$

$$\text{Mean } \mu_f = \frac{(3 \times 6) + (4 \times 9) + (5 \times 4)}{19} = 3.8947$$

$$\begin{aligned} \text{Variance } \sigma_f^2 &= \frac{((3 - 3.8947)^2 \times 6) + ((4 - 3.8947)^2 \times 9) + ((5 - 3.8947)^2 \times 4)}{19} \\ &= \frac{(4.8033 \times 6) + (0.0997 \times 9) + (4.8864 \times 4)}{19} \\ &= 0.5152 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Within Class Variance } \sigma_W^2 &= W_b \sigma_b^2 + W_f \sigma_f^2 = 0.4722 * 0.4637 + 0.5278 * 0.5152 \\ &= 0.4909 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Between Class Variance } \sigma_B^2 &= \sigma^2 - \sigma_W^2 \\ &= W_b(\mu_b - \mu)^2 + W_f(\mu_f - \mu)^2 \quad (\text{where } \mu = W_b \mu_b + W_f \mu_f) \\ &= W_b W_f (\mu_b - \mu_f)^2 \end{aligned}$$

(c)

Threshold	T=0	T=1	T=2	T=3	T=4	T=5
Weight, Background	$W_b = 0$	$W_b = 0.222$	$W_b = 0.4167$	$W_b = 0.4722$	$W_b = 0.6389$	$W_b = 0.8889$
Mean, Background	$\mu_b = 0$	$\mu_b = 0$	$\mu_b = 0.4667$	$\mu_b = 0.6471$	$\mu_b = 1.2609$	$\mu_b = 2.0313$

Threshold	T=0	T=1	T=2	T=3	T=4	T=5
Variance, Background	$\sigma_b^2 = 0$	$\sigma_b^2 = 0$	$\sigma_b^2 = 0.2489$	$\sigma_b^2 = 0.4637$	$\sigma_b^2 = 1.4102$	$\sigma_b^2 = 2.5303$
Weight, Foreground	$W_f = 1$	$W_f = 0.7778$	$W_f = 0.5833$	$W_f = 0.5278$	$W_f = 0.3611$	$W_f = 0.1111$
Mean, Foreground	$\mu_f = 2.3611$	$\mu_f = 3.0357$	$\mu_f = 3.7143$	$\mu_f = 3.8947$	$\mu_f = 4.3077$	$\mu_f = 5.000$
Variance, Foreground	$\sigma_f^2 = 3.1196$	$\sigma_f^2 = 1.9639$	$\sigma_f^2 = 0.7755$	$\sigma_f^2 = 0.5152$	$\sigma_f^2 = 0.2130$	$\sigma_f^2 = 0$
Within Class Variance	$\sigma_w^2 = 3.1196$	$\sigma_w^2 = 1.5268$	$\sigma_w^2 = 0.5561$	$\sigma_w^2 = 0.4909$	$\sigma_w^2 = 0.9779$	$\sigma_w^2 = 2.2491$
Between Class Variance	$\sigma_B^2 = 0$	$\sigma_B^2 = 1.5928$	$\sigma_B^2 = 2.5635$	$\sigma_B^2 = 2.6287$	$\sigma_B^2 = 2.1417$	$\sigma_B^2 = 0.8705$

(d)

Σχήμα 3.11: Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου Otsu σε εικόνα 6 επιπέδων.

(a) Η αρχική εικόνα (δεξιά) και το ιστόγραμμα της (αριστερά),

η μέθοδος Otsu δίνει αποτέλεσμα $T = 3$ (εύρεση κατωφλιού).

(b) Υπολογισμός βάρους, μέσου και διακύμανσης στο υπόβαθρο για $T = 3$.

(c) Υπολογισμός βάρους, μέσου και διακύμανσης στο προσκήνιο για $T = 3$,

καθώς και εντός κλάσεων διακύμανσης.

(d) Υπολογισμός εντός κλάσεων διακύμανσης και μεταξύ κλάσεων διακύμανσης σε κάθε επίπεδο, επαλήθευση εύρεσης βέλτιστων τιμών για $T=3$.

Μόλις πραγματοποιηθεί η κατωφλίωση, παίρνουμε μια δυαδική απεικόνιση, η οποία ιδανικά διαμερίζει επακριβώς την αρχική εικόνα σε προσκήνιο και υπόβαθρο. Ωστόσο, είναι αρκετά πιθανό να παρατηρηθεί στις προκύπτουσες εικόνες η ύπαρξη μαύρων «κηλίδων» εντός των λευκών περιοχών που κανονικά περιλαμβάνουν εξολοκλήρου το φωτογραφημένο πρόσωπο που επιθυμούμε να διαχωρίσουμε από το υπόβαθρο. Αυτό ξεπερνιέται εύκολα με την εφαρμογή μιας λειτουργίας πλήρωσης (fill) ή πλημμυρισμού (flood-fill) της επιθυμητής περιοχής. Καθώς η εικόνα πρέπει να διαχωριστεί σε δύο ενιαία μέρη, δε χρειάζεται να υποδεικνύουμε κάθε φορά με τον δείκτη του ποντικιού την κατάλληλη περιοχή για να ξεκινήσει η πλήρωση είτε να εφαρμόσουμε κάποια άλλη ημι-αυτόματη μέθοδο, αρκεί να προγραμματίσουμε τη διαδικασία στο σωστό χρονικό σημείο, αμέσως μετά την κατωφλίωση.

Πλέον, μπορούμε με μια απλή διαδικασία υπέρθεσης (superimposition) της αρχικής grayscale εικόνας πάνω στη δυαδική διαχωρισμένη, πολλαπλασιάζοντας δηλαδή τα λευκά εικονοστοιχεία (με τιμή 1) με τις

αντίστοιχες τιμές των αρχικών, να πάρουμε τα πλήρη χαρακτηριστικά της πρωτότυπης όψης (πρόσωπο, λαιμός, ώμοι), διατηρώντας το υπόβαθρο κενό (δηλαδή μαύρο). Εναλλακτικά, μπορούμε χρησιμοποιώντας μια απλή μέθοδο ανίχνευσης ορίων για ένα διακριτό αντικείμενο σε εικόνα, να εμφανίσουμε τα όρια (boundaries) της μορφής που επιθυμούμε να διαχωρίσουμε, ως μια κλειστή γραμμή γύρω από την ενιαία περιοχή του προσκηνίου.

3.2.4 Κώδικας MATLAB για την υλοποίηση της κατωφλίωσης

```
1 I0 = im2double(imread('face01.jpg'));
2 figure, imshow(I0), title('Original image (I0)');
3 I = rgb2gray(I0);
4 figure, imshow(I), title('Grayscale-original (I)');
5 se = strel('disk', 60);
6 Ie = imerode(I, se);
7 Iopn = imreconstruct(Ie, I);
8 Iopnd = imdilate(Iopn, se);
9 Iopncl0 = imreconstruct(imcomplement(Iopnd), imcomplement(Iopn));
10 Iopncl = imcomplement(Iopncl0);
11 figure, imshow(Iopncl), title('Opening-closing by reconstruction (Iopncl)');
12 bw = im2bw(Iopncl, graythresh(Iopncl));
13 wb = imcomplement(bw);
14 wb2 = imfill(wb, 'holes');
15 figure, imshow(wb2), title('Thresholding and filling (wb2)');
16 I2 = I.*wb2;
17 figure, imshow(I2), title('Superimpose on original image (I2)');
18 dim = size(wb2);
19 col = round(dim(2)/2)-90;
20 row = find(wb2(:,col), 1);
21 boundary = bwtraceboundary(wb2,[row, col], 'N');
22 imshow(I2), title('Show border (I2)'), hold on;
23 plot(boundary(:,2),boundary(:,1), 'r', 'LineWidth', 3);
```

Βήματα

Γραμμή 1: ανάγνωση εικόνας από αρχείο και μετατροπή τιμών σε double-precision

Γραμμή 2: εμφάνιση πρωτότυπης εικόνας

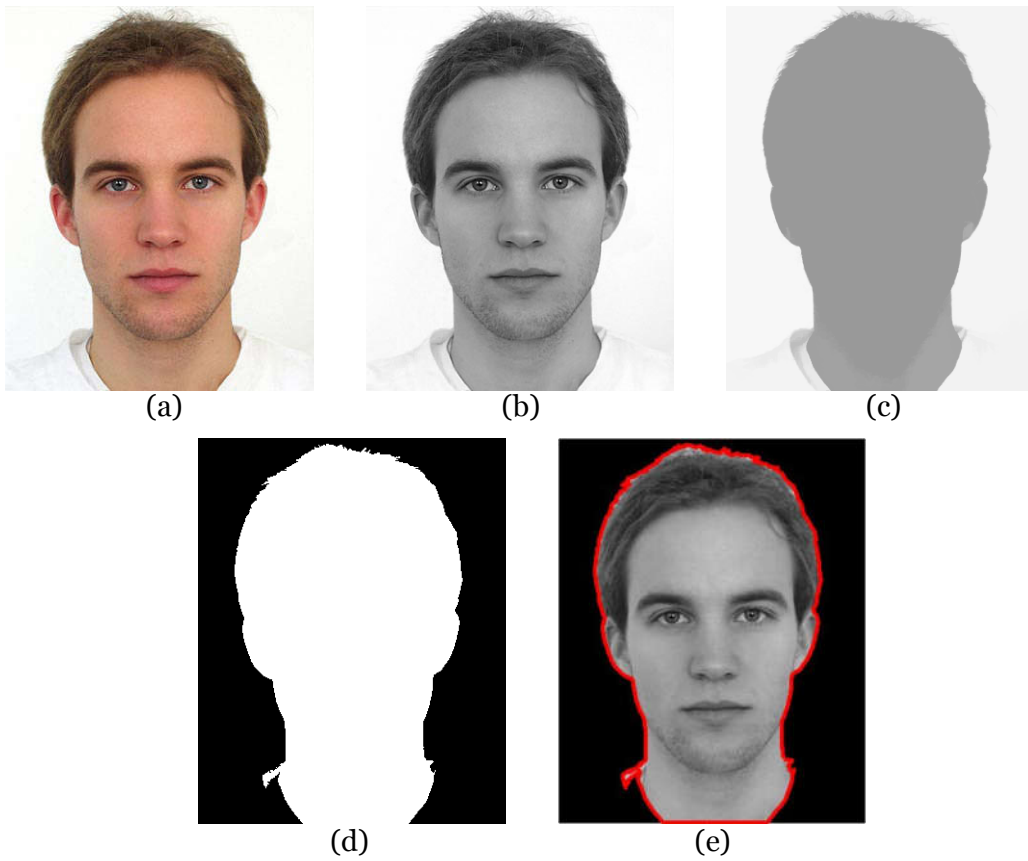
Γραμμή 3: μετατροπή εικόνας σε κλίμακα του γκριζου
Γραμμή 4: εμφάνιση grayscale εικόνας
Γραμμή 5: ορισμός δομικού στοιχείου (δίσκος ακτίνας 60)
Γραμμή 6: διάβρωση μονόχρωμης εικόνας από το δομικό στοιχείο
Γραμμή 7: ανακατασκευή εικόνας (άνοιγμα μέσω ανακατασκευής)
Γραμμή 8: διαστολή εικόνας από το δομικό στοιχείο
Γραμμές 9-10: ανακατασκευή εικόνας (κλείσιμο μέσω ανακατασκευής)
Γραμμή 11: εμφάνιση εικόνας μετά από άνοιγμα-κλείσιμο μέσω ανακατασκευής
Γραμμή 12: κατωφλίωση εικόνας με τη μέθοδο Otsu
Γραμμές 13-14: πλήρωση περιοχής προσκηνίου
Γραμμή 15: εμφάνιση δυαδικής εικόνας διαχωρισμού προσκηνίου-υποβάθρου
Γραμμή 16: υπέρθεση αρχικής εικόνας στη διαμερισμένη δυαδική
Γραμμή 17: εμφάνιση περιοχής ενδιαφέροντος σε κενό υπόβαθρο
Γραμμές 18-23: ανίχνευση ορίων και εμφάνιση οριοθετημένης περιοχής ενδιαφέροντος

3.2.5 Εφαρμογή κατωφλίωσης σε φωτογραφίες-δείγματα

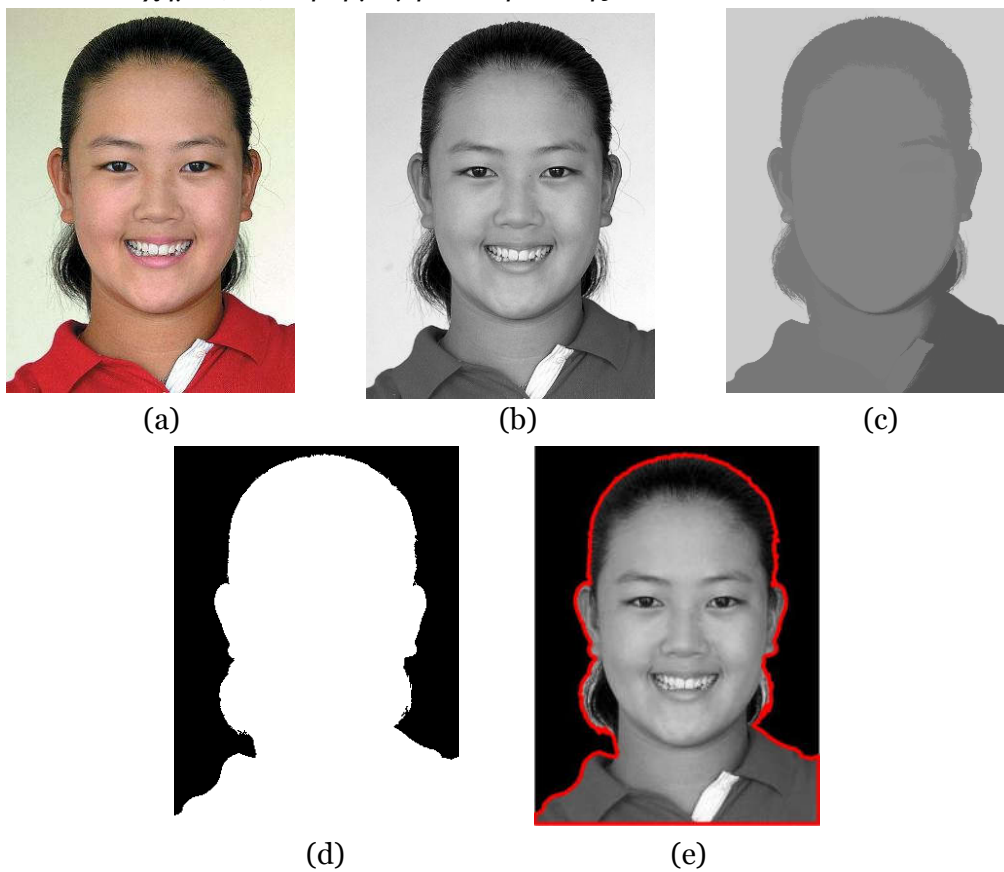
Δοκιμάζουμε την εφαρμογή της παραπάνω υλοποίησης σε έξι διαφορετικά δείγματα φωτογραφημένων προσώπων σε σειρά αύξουσας δυσκολίας, για να εκτιμήσουμε το βαθμό επιτυχίας της διαδικασίας, ενδεχόμενα προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν, καθώς και δυνατότητες αντιμετώπισής τους. Η εφαρμογή πραγματοποιείται σε πρότυπα προσώπων, πέρα από τις απεικονίσεις της μελέτης προπαλμικής αναστολής, για τη λεπτομερέστερη ανάλυση και αποσαφήνιση στην αντιμετώπιση ενδεχομένων δυσκολιών. Παρατίθενται πέντε απεικονίσεις ανά πρόσωπο, που αντιστοιχούν στα ανάλογα στάδια επεξεργασίας:

- (a) Πρωτότυπη εικόνα
- (b) Μονόχρωμη εικόνα
- (c) Εικόνα μετά από επεξεργασία ανοίγματος-κλεισίματος με ανακατασκευή
- (d) Δυαδική εικόνα διαχωρισμού προσκηνίου-υποβάθρου
- (e) Εμφάνιση οριοθετημένης περιοχής ενδιαφέροντος

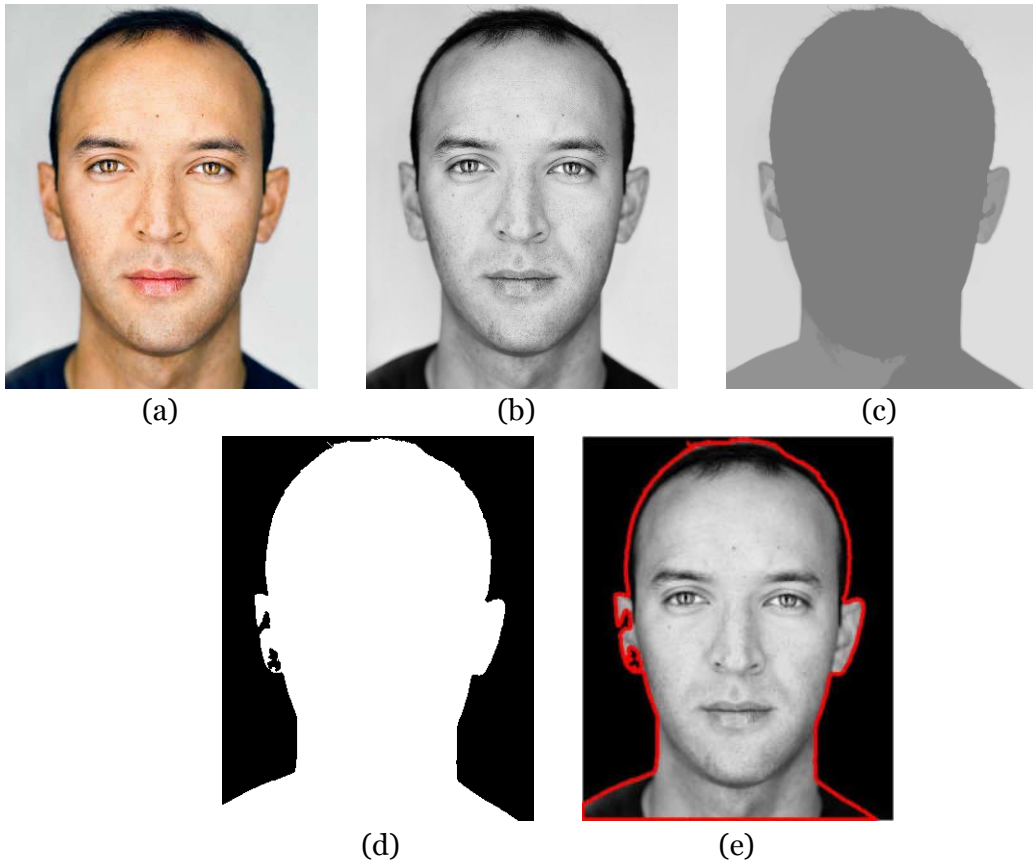
Σχήμα 3.12. Εφαρμογή κατωφλίωσης σε εικόνα N.01:



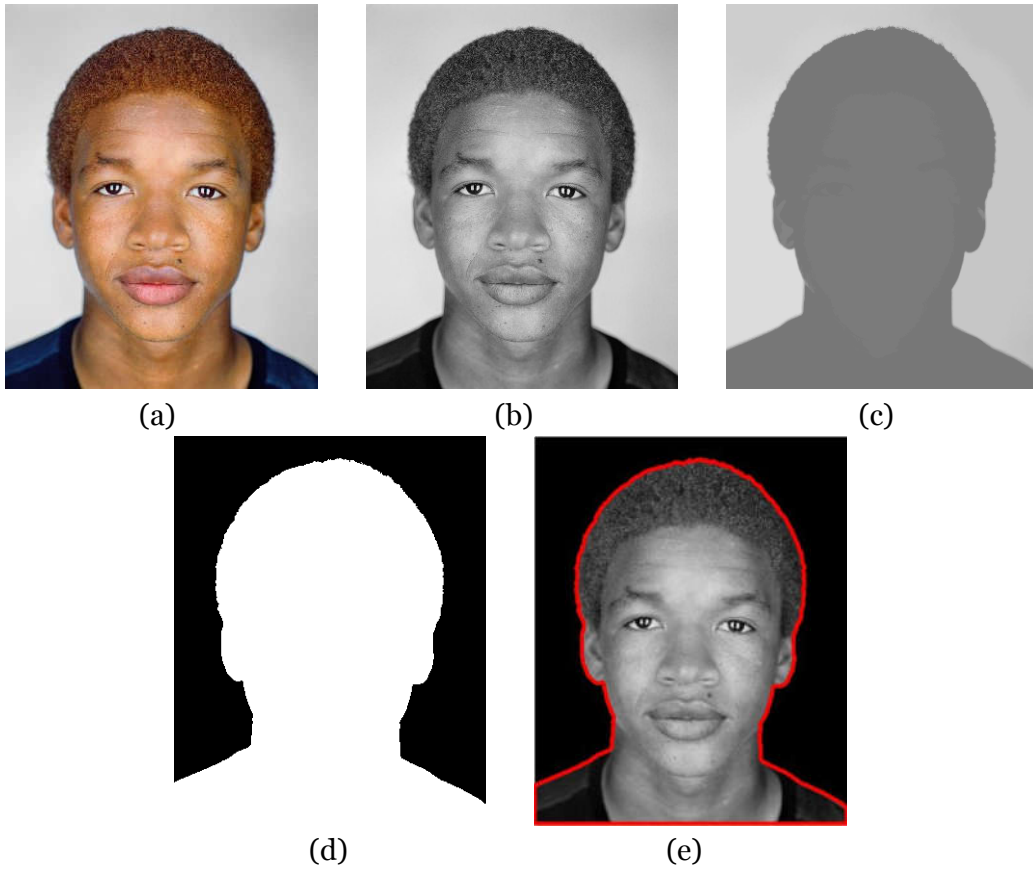
Σχήμα 3.13. Εφαρμογή κατωφλίωσης σε εικόνα N.02:



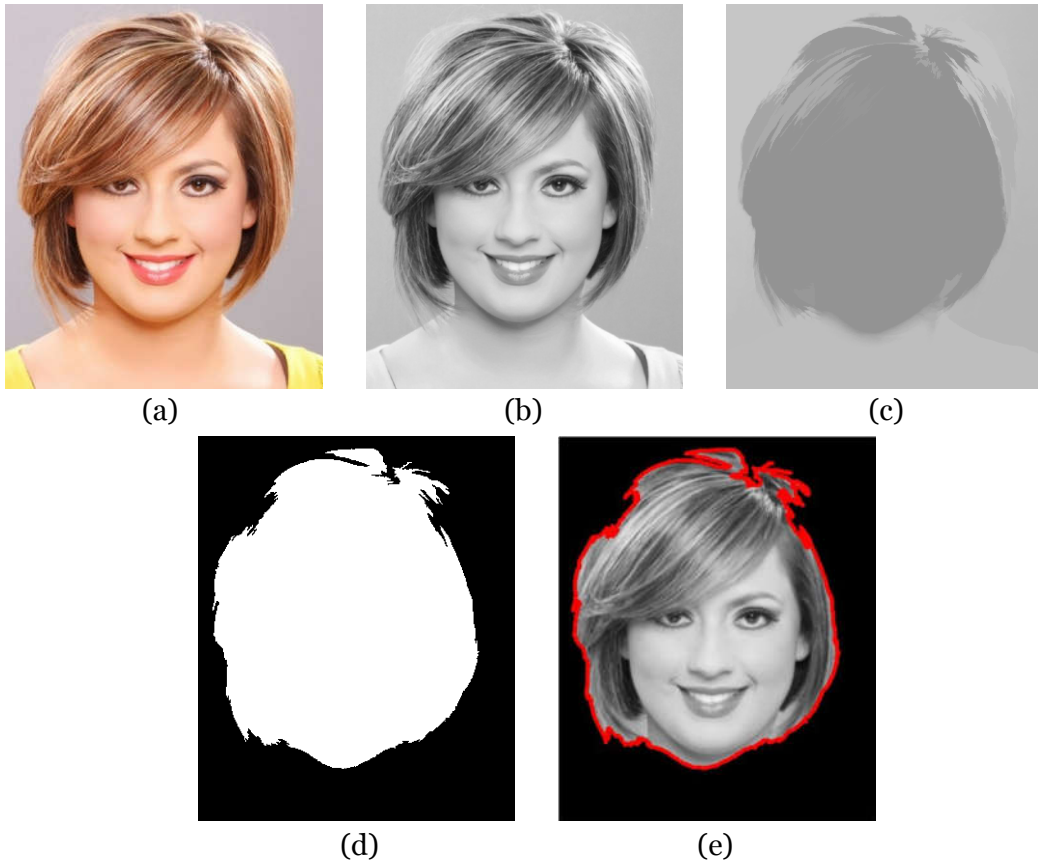
Σχήμα 3.14. Εφαρμογή κατοφλίωσης σε εικόνα N.03:



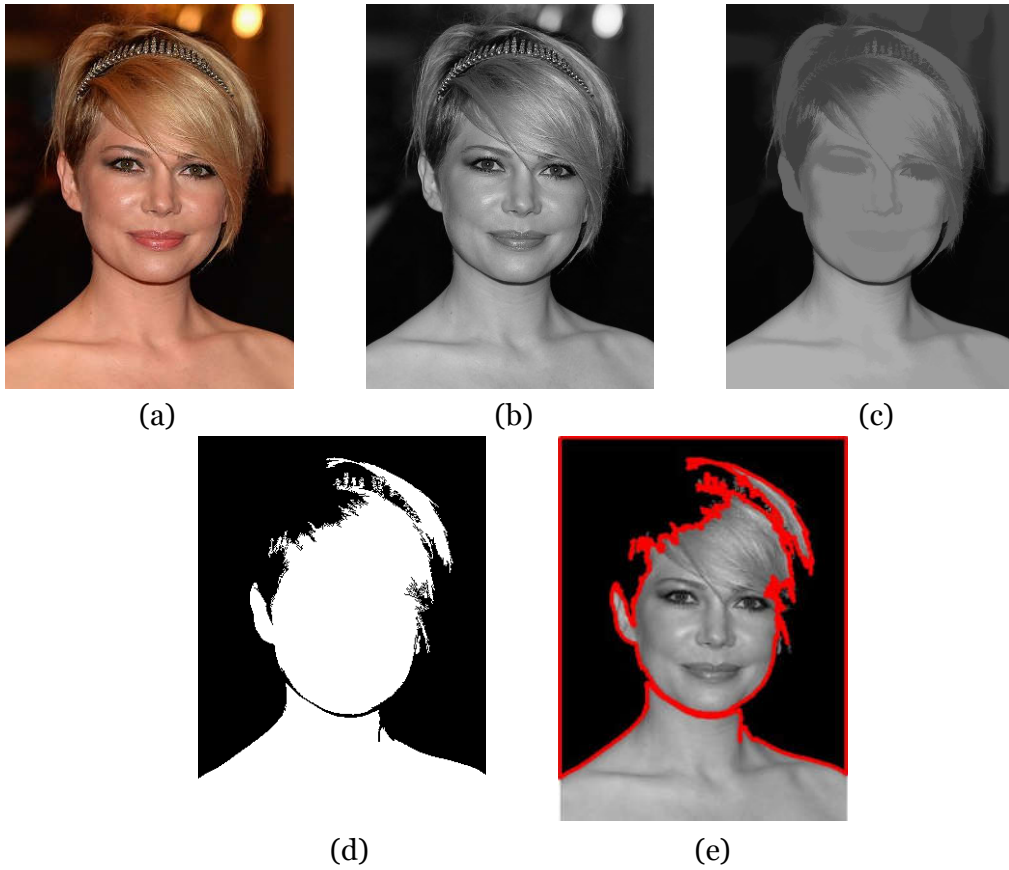
Σχήμα 3.15. Εφαρμογή κατοφλίωσης σε εικόνα N.04:



Σχήμα 3.16. Εφαρμογή κατωφλίωσης σε εικόνα N.05:



Σχήμα 3.17. Εφαρμογή κατωφλίωσης σε εικόνα N.06:



Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου κατωφλίωσης είναι πολύ ικανοποιητικά για τους σκοπούς της κατάτμησης των εικόνων σε δύο περιοχές (προσκήνιο-υπόβαθρο). Όπως φαίνεται και στις δυαδικές απεικονίσεις (εικόνες d), οι εικόνες διαμερίζονται με τον επιθυμητό τρόπο, ώστε η περιοχή ενδιαφέροντος να περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά του προσώπου με τα οποία θα ασχοληθούμε στα επόμενα βήματα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τις υποδειγματικές αρχικές λήψεις (εικόνες N.01-04), τα αποτελέσματα ήταν θετικά, χωρίς να χρειαστεί να τροποποιηθεί ο κώδικας εντολών σε κανένα σημείο. Συμπεριλάβαμε επιπλέον την ελαφρώς πιο απαιτητική δειγματική λήψη N.05, όπου η περιοχή ενδιαφέροντος περιορίστηκε σε μικρότερες διαστάσεις του αναμενόμενου, συμπεριλαμβάνοντας όμως όλα τα βασικά χαρακτηριστικά που αναζητούμε.

Τέλος, η σαφώς πιο προβληματική λήψη N.06, αποτύγχανε όταν εκτελούνταν το ίδιο σύνολο εντολών, λόγω του γεγονότος ότι εμφάνιζε περισσότερες από μια περιοχές κατάτμησης στο προσκήνιο της. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, ο κώδικας MATLAB τροποποιήθηκε ως εξής: (α) παραλήφθηκε η γραμμή 14, ώστε να πάψει η διαδικασία της πλήρωσης πιθανών οπών στη δυαδική εικόνα, γεγονός που εδώ οδηγούσε στη συγχώνευση των περιοχών προσκήνιου-υποβάθρου στην κρίσιμη περιοχή του προσώπου και (β), τροποποιήθηκε εξολοκλήρου το τμήμα του κώδικα που ανιχνεύει τα όρια των αντικειμένων στην περιοχή ενδιαφέροντος (γραμμές 18-23), ώστε αυτή να μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερα από ένα αντικείμενα:

```
18 boundaries = bwboundaries(wb);
19 imshow(I2), hold on;
20 for k=1:10
21 b = boundaries{k};
22 plot(b(:,2),b(:,1),'r','LineWidth',3);
23 end
```

Οι συγκεκριμένες τροποποιήσεις καλύπτουν ένα ευρύτερο φάσμα εικόνων, καθιστώντας περισσότερες απεικονίσεις ικανές να κατατμηθούν αποτελεσματικά με τη μέθοδο της κατωφλίωσης. Εξάλλου, οι ελεγχόμενες λήψεις σε εργαστηριακό περιβάλλον εμφανίζονται ιδιαίτερα πρόσφορες για τη χρήση μιας τέτοιας απλής και γρήγορης διαδικασίας.

3.3 Αλγόριθμος υδροκρίτη (watershed)

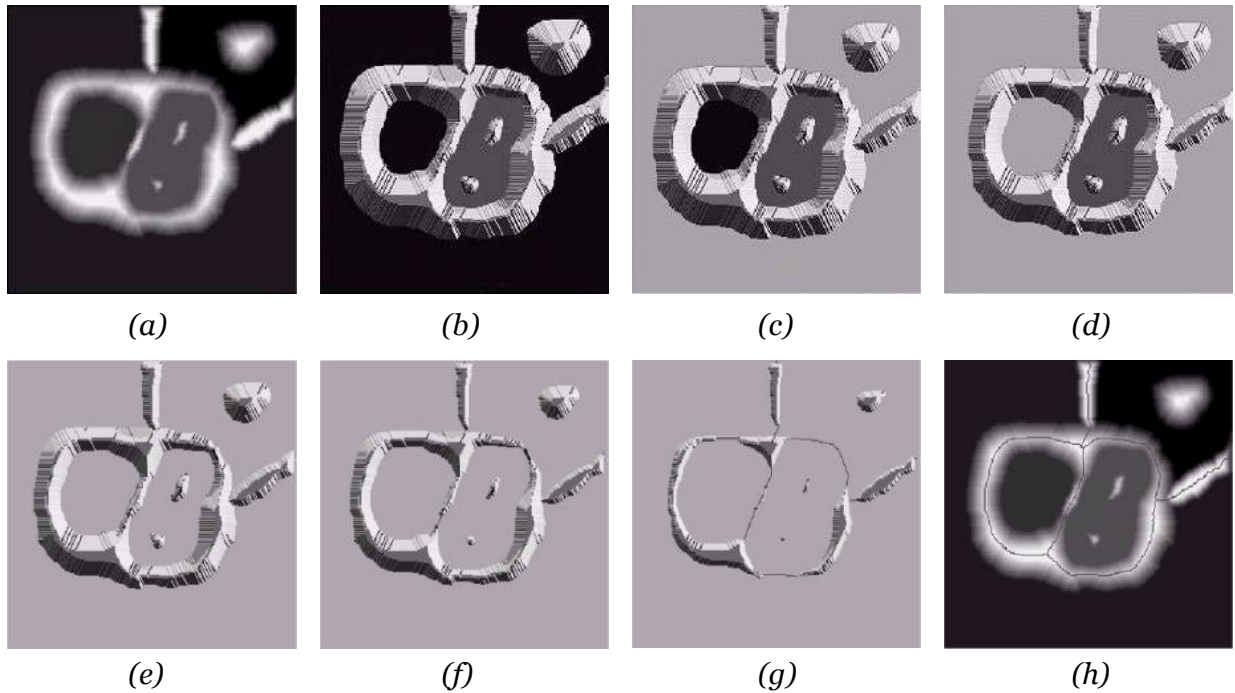
3.3.1 Ο αλγόριθμος watershed στην κατάτμηση εικόνας

Ο όρος watershed (υδροκρίτης ή υδροκριτική γραμμή) ανήκει στην επιστήμη της γεωλογίας και ειδικότερα στον τομέα της γεωμορφολογίας. Εκεί, εξετάζοντας τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής, παρατηρούμε ότι κλίνει προς ένα ιδιαίτερο σημείο εκφόρτισης με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματά της –δηλαδή το νερό που καταλήγει από την ατμόσφαιρα στο έδαφος με οποιαδήποτε αρχική μορφή– να οδηγούνται προς ένα κεντρικό σύστημα (ποτάμι, χείμαρρο, λίμνη, θάλασσα). Ο υδροκρίτης υποδεικνύει τα όρια μιας λεκάνης απορροής, δηλαδή την περιοχή αποστραγγισμού της, με τέτοιο τρόπο ώστε να διαχωρίζεται μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο από άλλες πιθανές γειτονικές λεκάνες απορροής.

Στην εφαρμογή του αλγορίθμου υδροκρίτη (watershed) ουσιαστικά αντιμετωπίζουμε μια εικόνα σε κλίμακα του γκριζου ως τοπογραφικό ανάγλυφο. Η ένταση του λευκού όπως δηλώνεται από κάθε εικονοστοιχείο μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε ανάλογο υψόμετρο. Έτσι, κάθε εικονοστοιχείο εκφράζεται μέσα από τρεις παραμέτρους, οι δύο αφορούν τις καρτεσιανές συντεταγμένες του στην εικόνα και η τρίτη δείχνει το «ύψος» του. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστεί η κλίση (gradient) κάθε εικονοστοιχείου και κατ' επέκταση να προκύψει ένας πίνακας κλίσεων στις ίδιες διαστάσεις με την αρχική εικόνα. Ο συγκεκριμένος πίνακας κλίσεων είναι πολύ χρήσιμος, καθώς τα «σημεία καμπής» μιας εικόνας εμφανίζονται κατά κανόνα στα όρια των εικονιζόμενων αντικειμένων, δίνοντας έτσι μια καλή προσέγγισή των περιγραμμάτων τους.

Ένας απλός τρόπος για να γίνει ευρύτερα κατανοητή η βασική σύλληψη του αλγορίθμου watershed είναι η περιγραφή της μεθόδου πλημμυρισμού (flooding). Αν αντιληφθούμε την εικόνα ως τοπογραφικό ανάγλυφο και θεωρήσουμε τα σημεία εκφόρτισης ανοιχτές οπές, μέσα από τις οποίες μπορεί να διοχετευτεί νερό με μια σταθερή και κοινή ροή (με κατεύθυνση από εσωτερικά προς τα πάνω), μπορούμε να απεικασουμε την επακόλουθη σταδιακή ανύψωση της στάθμης και τη διάχυση του νερού σε ενιαίες περιοχές. Καθώς ο πλημμυρισμός συνεχίζεται, κάποια στιγμή νερό που προέρχεται από διαφορετικές πηγές (σημεία εκφόρτισης) θα τείνει να έρθει σε επαφή, γεγονός

που θα οδηγούσε σε συγχώνευση γειτονικών περιοχών. Ακριβώς τη στιγμή εκείνη, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι χτίζουμε ένα «φράγμα» επάνω στα συνοριακά σημεία των περιοχών αυτών για να αποτραπεί η συγχώνευσή τους. Με αυτήν τη δημιουργία «φραγμάτων» και τον σχεδιασμό των συγκεκριμένων διαχωριστικών παίρνουμε πρακτικά τις υδροκριτικές γραμμές.



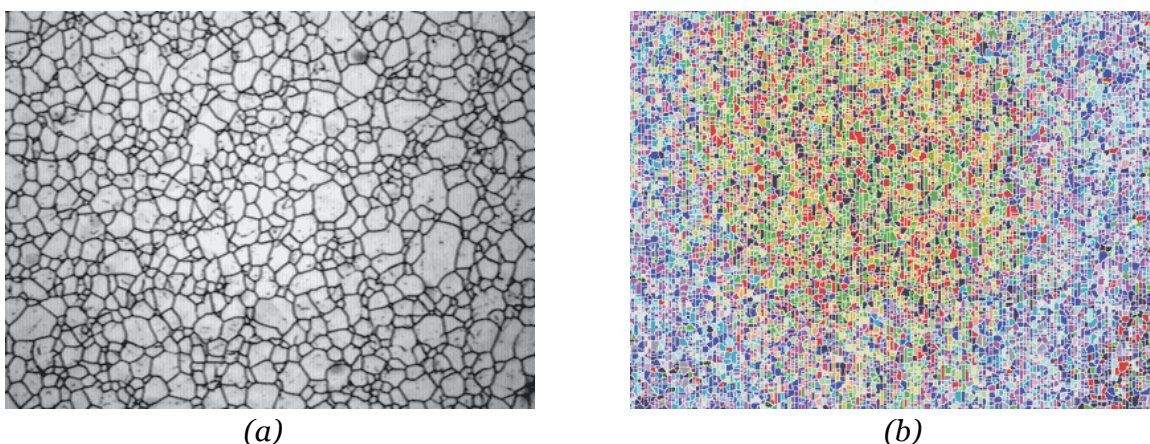
Σχήμα 3.18: Αναλυτικό παράδειγμα τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου watershed.

- (a) Αρχική εικόνα. (b) Μετατροπή σε τοπογραφικό ανάγλυφο.
- (c) Έναρξη πλημμυρισμού. (d) Δεύτερο στάδιο πλημμυρισμού.
- (e) Τρίτο στάδιο πλημμυρισμού.
- (f) Τέταρτο στάδιο πλημμυρισμού, έναρξη σχεδιασμού φραγμάτων.
- (g) Ολοκλήρωση πλημμυρισμού, τερματισμός σχεδιασμού φραγμάτων.
- (h) Υπέρθυση γραμμών κατάτμησης στην αρχική εικόνα.

Με βάση την παραπάνω περιγραφή, μπορούμε να διακρίνουμε τριών ειδών σημεία στην αρχική εικόνα: (α) τα σημεία που ανήκουν σε τοπικά ελάχιστα (σημεία εκφόρτισης), (β) τα σημεία στα οποία αν τοποθετηθούν σταγόνες νερού, θα κυλήσουν με απόλυτη βεβαιότητα σε ένα συγκεκριμένο τοπικό ελάχιστο και (γ) τα σημεία όπου αν τοποθετηθούν σταγόνες νερού, είναι εξίσου πιθανό να καταλήξουν σε περισσότερα από ένα τοπικά ελάχιστα. Κάθε σημείο της εικόνας συγκαταλέγεται υποχρεωτικά σε ένα από τα τρία είδη, με τα

κρίσιμα σημεία τύπου (γ), για τα οποία δεν μπορεί να αποφανθεί κανείς με ασφάλεια, να αποτελούν τα σημεία που σχηματίζουν τις υδροκριτικές γραμμές.

Για την αποτελεσματική χρήση του αλγορίθμου watershed είναι απαραίτητο να αποφύγουμε το φαινόμενο της υπερ-κατάτμησης (over-segmentation), όπου η εικόνα διαιρείται σε μεγαλύτερο αριθμό διακριτών περιοχών από το επιθυμητό, κατακερματίζοντας εσωτερικά τα αντικείμενα που επιθυμούμε να διαχωρίσουμε. Ιδιαίτερα για τις ανάγκες της υλοποίησης διαχωρισμού προσκηνίου-υποβάθρου των φωτογραφικών δειγμάτων, η κατάτμηση της εικόνας σε περισσότερες από δύο περιοχές, ειδικά αν αυτό αφορά την περιοχή του προσκηνίου, είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει σε λανθασμένα, μη αξιοποιήσιμα αποτελέσματα.



Σχήμα 3.19: Παράδειγμα υπερ-κατάτμησης εικόνας με χρήση αλγορίθμου watershed.

(a) Αρχική εικόνα (ατσάλινη επιφάνεια). (b) Φαινόμενο υπερ-κατάτμησης.

Για να αποτρέψουμε το φαινόμενο της υπερ-κατάτμησης, κάνουμε χρήση των δεικτών προσκηνίου (foreground markers) και δεικτών υποβάθρου (background markers) στην προεργασία της εικόνας για την εφαρμογή του αλγορίθμου watershed. Για τη διαδικασία αυτή θεωρούμε ότι τα αντικείμενα στο προσκήνιο είναι «υπερυψωμένα», οπότε και σημαδεύονται με λευκό χρώμα, ενώ το υπόβαθρο, που δε μας ενδιαφέρει η κατάτμησης του, είναι μαύρο. Η υλοποίηση της ρυθμιζόμενης με δείκτες (marker-controlled) μορφής του αλγορίθμου αποτελεί μία από τις βασικότερες τεχνικές για την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων, συμβάλλοντας στην ακριβέστερη οριοθέτηση των περιοχών ενδιαφέροντος από τον πίνακα κλίσεων της εικόνας.

3.3.2 Εκτέλεση αλγορίθμου watershed

Τα βήματα που θα ακολουθήσουμε για την κατάλληλη εκτέλεση του αλγορίθμου watershed αφορούν τους σκοπούς της συγκεκριμένης εφαρμογής (διάκριση προσώπου από φόντο) στα φωτογραφικά δείγματα και βασίζεται στην ευχέρεια που δίνουν ορισμένες –συντά προεγκατεστημένες– υλοποιήσεις στον κώδικα MATLAB. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή μπορεί να δρομολογηθεί, ανεξάρτητα από τον συγκεκριμένο κώδικα εντολών, με κατάλληλη σύνταξη του προγράμματος και σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού.

Αρχικά, διαβάζουμε την εικόνα από το αρχείο, βεβαιώνουμε ότι χρησιμοποιούμε αριθμούς υψηλής ακρίβειας (double-precision) και εφόσον η εικόνα βρίσκεται σε έγχρωμη μορφή προβαίνουμε στη μετατροπή της σε κλίμακα του γκριζου. Τώρα πλέον η εικόνα βρίσκεται στην κατάλληλη μορφή για τον αρχικό υπολογισμό του πίνακα κλίσεων.

Για να υπολογίσουμε τις τιμές της έντασης της κλίσης (gradient magnitude) σε κάθε εικονοστοιχείο, σχηματίζοντας τον ανάλογο πίνακα, χρησιμοποιούμε ένα φίλτρο Sobel, που συμβάλει στην ενίσχυση της απεικόνισης των ακμών και των απότομων μεταβολών που παρατηρούνται πάνω σε μία εικόνα. Πρόκειται για έναν διακριτό διαφορικό τελεστή σε διαστάσεις 3 x 3 που φιλτράρει μια εικόνα τόσο σε οριζόντια, όσο και κάθετη φορά, δίνοντας ως αποτέλεσμα δύο παράγωγες εικόνες, οι τιμές των οποίων μπορούν να συνδυαστούν για να δώσουν τον ζητούμενο πίνακα έντασης κλίσης. Ουσιαστικά, με μαθηματικούς όρους, το φίλτρο Sobel «φιλτράρει» μια εικόνα με χρήση συνέλιξης σε δύο διαστάσεις. Αν θεωρήσουμε ότι A είναι η αρχική εικόνα, τότε οι δύο προκύπτουσες εικόνες σε κάθετη και οριζόντια φορά αντίστοιχα ορίζονται ως:

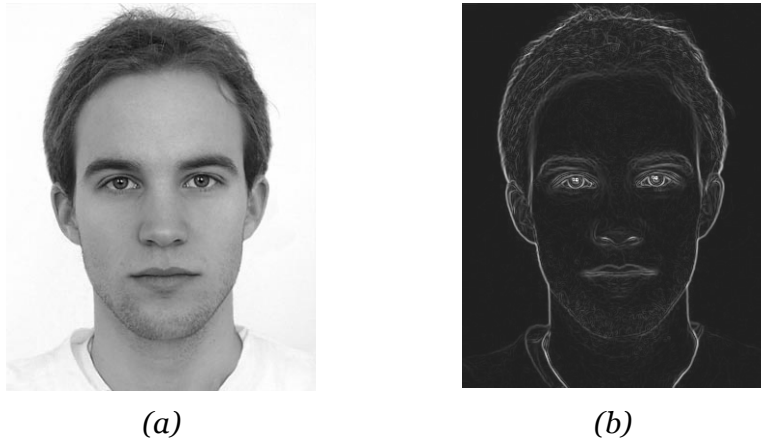
$$G_y = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} * A \quad \text{και} \quad G_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} * A .$$

Οι τιμές της τελικής εικόνας προκύπτουν από τις δύο προηγούμενες ως τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων τους ανά σημείο:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} .$$

Επιπλέον, κατά την εκτέλεση των πράξεων συνέλιξης, μπορούμε να αποσαφηνίσουμε ότι στις οριακές περιοχές στα άκρα της εικόνας, οι υποθετικές

τιμές των εικονοστοιχείων «εκτός κάδρου» ταυτίζονται με εκείνες του τελευταίου ακριβώς γειτονικού τους εικονοστοιχείου (λειτουργία replicate).



Σχήμα 3.20: (a) Αρχική εικόνα.
(b) Εικόνα-πίνακας κλίσεων (εφαρμογή φίλτρου Sobel).

Αν επιχειρούσαμε να προχωρήσουμε εδώ στην εκτέλεση του αλγορίθμου watershed, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία της εικόνας, θα παρατηρούσαμε ότι τα αποτελέσματα είναι απολύτως άστοχα για τους σκοπούς της διαδικασίας, λόγω του φαινομένου της υπερκατάτμησης. Συνεπώς, πρέπει να προβούμε στην κατάλληλη διαμόρφωση της εικόνας για τη διαδικασία του ορισμού των δεικτών προσκηνίου και των δεικτών υποβάθρου και στη συνέχεια να εκτελέσουμε τον αλγόριθμο της κατάτμησης.

Η διαδικασία που ακολουθούμε για την εύρεση του προσκηνίου της εικόνας είναι το άνοιγμα-κλείσιμο μέσω ανακατασκευής, όπως ακριβώς περιγράφηκε στη μέθοδο της κατωφλίωσης. Πρόκειται δηλαδή για τις διαδικασίες μαθηματικής μορφολογίας του ανοίγματος μέσω ανακατασκευής (διάβρωση ακολουθούμενη από ανακατασκευή) και του κλεισίματος μέσω ανακατασκευής (διαστολή ακολουθούμενη από ανακατασκευή). Ως δομικό στοιχείο παίρνουμε μια επιφάνεια δίσκου με ακτίνα μεγέθους 20, οι διαστάσεις του οποίου φάνηκε μετά από δοκιμές να δίνουν κατά μέσο όρο τα καλύτερα αποτελέσματα τόσο για την αποφυγή της υπερκατάτμησης σε περίπτωση χρήσης επιφάνειας μικρότερων διαστάσεων, όσο και για την αποτροπή ενδεχόμενης συγχώνευσης περιοχών προσκηνίου-υποβάθρου, αν είχε χρησιμοποιηθεί ένα στοιχείο μεγάλων διαστάσεων, όπως στην προεργασία της εικόνας για τη μέθοδο κατωφλίωσης (ακτίνα μεγέθους 60). Ωστόσο, όπως θα φανεί και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων, καθώς ο αλγόριθμος watershed

δίνει σε πολλές περιπτώσεις σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα, ακόμη και για μικρές διαφοροποιήσεις του δομικού στοιχείου, το μέγεθός του μπορεί να επιλεγεί κατάλληλα, συνήθως κοντά στην περιοχή του 20, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της κάθε εικόνας.

Μετά την παραπάνω μορφολογική επεξεργασία, υπολογίζουμε τα τοπικά μέγιστα της εικόνας, πολώνοντας τα εικονοστοιχεία στην τιμή 1, που αντιστοιχεί στο λευκό, σε κάθε σημείο εντοπισμού ενός τοπικού μέγιστου και στην τιμή 0 σε όλα τα υπόλοιπα σημεία. Παρατηρούμε ότι σχηματίζονται περιοχές με τοπικά μέγιστα κυρίως εντός του προσώπου της φωτογραφίας, αλλά ενδεχομένως και στο παρασκήνιο. Ο προκύπτων πίνακας έχει τις ίδιες διαστάσεις με την αρχική εικόνα, ενώ η όλη διαδικασία γίνεται στην υψηλή γειτονική συνεκτικότητα των οκτώ συνδέσεων (8-connected neighborhoods). Ο παραπάνω πίνακας που περιέχει τα τοπικά μέγιστα θα χρησιμοποιηθεί ως εικόνα-δείκτης προσκηνίου.

Για τον ορισμό των δεικτών υποβάθρου, εφαρμόζουμε κατωφλίωση στην εικόνα που προέκυψε αμέσως μετά την εφαρμογή του ανοίγματος-κλεισίματος μέσω ανακατασκευής, ακριβώς όπως και στην αποκλειστική μέθοδο κατωφλίωσης (μέθοδος Otsu). Εφαρμόζουμε επιπλέον και την πλήρωση οπών, για το ενδεχόμενο η δυαδική εικόνα να εμφανίζει σκοτεινές περιοχές εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, έτσι ώστε να καταλήξουμε σε μια πλήρως διαχωρισμένη εικόνα, όπου η περιοχή του προσκηνίου θα είναι ενιαία, έχοντας και πάλι σκοπό να αποτραπεί η υπερκατάτμηση.

Η διαδικασία του αλγορίθμου watershed που προβλέπει τον ορισμό των δεικτών υποβάθρου με βάση τις κορυφογραμμές (ridge lines) της εικόνας μπορεί να πραγματοποιηθεί ακολουθώντας τα εξής βήματα: (α) Υπολογίζουμε έναν πίνακα αποστάσεων ίδιων διαστάσεων με την κατωφλιωμένη εικόνα, όπου η τιμή κάθε εικονοστοιχείου ισούται με την ευκλείδεια απόστασή του από το πλησιέστερο μη μηδενικό εικονοστοιχείο στην κατωφλιωμένη δυαδική εικόνα. Προφανώς, για κάθε εικονοστοιχείο με μη μηδενική τιμή, η τιμή της απόστασής του στον νέο πίνακα γίνεται ίση με το μηδέν. (β) Εφαρμόζουμε μετασχηματισμό watershed στον πίνακα αποστάσεων και παίρνουμε έναν νέο πίνακα. (γ) Ορίζουμε ως πίνακα-δείκτη υποβάθρου τα σημεία όπου ο πίνακας του μετασχηματισμού watershed μηδενίζεται, δηλαδή στις εξαγόμενες κορυφογραμμές, όπως προκύπτουν από την επεξεργασία της αρχικής εικόνας [50]. Καθώς όμως στην περίπτωσή μας η εικόνα μετά την κατωφλίωση και την

πλήρωση των κενών διαθέτει δύο μόλις διακριτές περιοχές, κατά κανόνα ο συγκεκριμένος πίνακας με τους δείκτες υποβάθρου θα προκύπτει εξολοκλήρου ίσος με το μηδέν.



(a)

(b)

(c)

Σχήμα 3.21: Γενικό παράδειγμα εύρεσης δεικτών προσκηνίου και υποβάθρου.

(a) Αρχική εικόνα. (b) Υπέρθεση δεικτών προσκηνίου. (c) Δείκτες υποβάθρου.

Πριν την τελική εκτέλεση του αλγορίθμου watershed, απομένει η τροποποίηση του πίνακα κλίσεων, όπου επιβάλλουμε να εμφανίζονται τοπικά ελάχιστα στα σημεία που υποδεικνύουν οι δείκτες προσκηνίου και υποβάθρου. Τα σημεία που υποδεικνύονται από τους δύο αντίστοιχους πίνακες (εικόνες) είναι τα σημεία που αντιστοιχούν στα μη μηδενικά τους εικονοστοιχεία. Εν τέλει, στην εικόνα που προκύπτει εφαρμόζουμε τον μετασχηματισμό watershed και λαμβάνουμε την κατάτμηση που αποζητούσαμε.

Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων μπορούμε καταρχάς με μια διαδικασία υπέρθεσης να εμφανίσουμε τους δείκτες προσκηνίου και υποβάθρου, καθώς και τα όρια των αντικειμένων κατάτμησης πάνω στην αρχική εικόνα, έτσι ώστε να έχουμε μια πιο σφαιρική αντίληψη της όλης διαδικασίας και του βαθμού επιτυχίας της. Η πλέον διαδεδομένη εμφάνιση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του αλγορίθμου watershed γίνεται με την απόδοση διαφορετικών χρωμάτων σε κάθε διακριτή περιοχή, με βάση τις τιμές του πίνακα προσδιοριστικής ετικέτας (*label matrix*) που αντιστοιχούν σε κάθε τομέα κατάτμησης.

3.3.3 Κώδικας MATLAB για την υλοποίηση αλγορίθμου watershed

```
1 I0 = im2double(imread('face01.jpg'));
2 I = rgb2gray(I0);
3 figure, imshow(I), title('Grayscale-original');
4 hy = fspecial('sobel');
5 hx = hy';
6 Iy = imfilter(double(I), hy, 'replicate');
7 Ix = imfilter(double(I), hx, 'replicate');
8 gradmag = sqrt(Ix.^2 + Iy.^2);
9 se = strel('disk', 20);
10 Ie = imerode(I, se);
11 Iopn = imreconstruct(Ie, I);
12 Iopnd = imdilate(Iopn, se);
13 Iopncl = imreconstruct(imcomplement(Iopnd), imcomplement(Iopn));
14 Iopncl = imcomplement(Iopncl);
15 fgm = imregionalmax(Iopncl);
16 bw = im2bw(Iopncl, graythresh(Iopncl));
17 wb = imcomplement(bw);
18 wb2 = imfill(wb, 'holes');
19 bw2 = imcomplement(wb2);
20 D = bwdist(bw2);
21 DL = watershed(D);
22 bgm = DL == 0;
23 figure, imshow(gradmag2), title('Gradient magnitude enhanced (gradmag2)');
24 gradmag2 = imimposemin(gradmag, bgm | fgm);
25 L = watershed(gradmag2);
26 I2 = I;
27 I2(imdilate(L == 0, ones(3, 3)) | bgm | fgm) = 255;
28 figure, imshow(I2)
29 title('Markers and object boundaries superimposed on original image (I2)');
30 Lrgb = label2rgb(L, 'jet', 'w', 'shuffle');
31 figure, imshow(Lrgb), title('Colored watershed label matrix (Lrgb)');
32 figure, imshow(I), hold on
33 himage = imshow(Lrgb);
34 set(himage, 'AlphaData', 0.3);
35 title('Lrgb superimposed transparently on original image')
```

Βήματα

1. Γραμμή 1: ανάγνωση εικόνας από αρχείο και μετατροπή τιμών σε double-precision
2. Γραμμή 2: μετατροπή εικόνας σε κλίμακα του γκριζου
3. Γραμμή 3: εμφάνιση grayscale εικόνας
4. Γραμμές 4-7: φιλτράρισμα εικόνας με τελεστή Sobel σε δύο διαστάσεις
5. Γραμμή 8: υπολογισμός πίνακα κλίσεων (ανίχνευση ακμών)
6. Γραμμή 9: ορισμός δομικού στοιχείου (δίσκος ακτίνας 20)
7. Γραμμή 10: διάβρωση μονόχρωμης εικόνας από το δομικό στοιχείο
8. Γραμμή 11: ανακατασκευή εικόνας (άνοιγμα μέσω ανακατασκευής)
9. Γραμμή 12: διαστολή εικόνας από το δομικό στοιχείο
10. Γραμμές 13-14: ανακατασκευή εικόνας (κλείσιμο μέσω ανακατασκευής)
11. Γραμμή 15: υπολογισμός τοπικών μέγιστων (δείκτες προσκηνίου)
12. Γραμμή 16: κατωφλίωση εικόνας με τη μέθοδο Otsu
13. Γραμμές 17-19: πλήρωση περιοχής προσκηνίου
14. Γραμμή 20: υπολογισμός πίνακα αποστάσεων
15. Γραμμή 21: εφαρμογή μετασχηματισμού watershed στον πίνακα αποστάσεων
16. Γραμμή 22: υπολογισμός εικόνας-πίνακα κορυφογραμμών (δείκτες υποβάθρου)
17. Γραμμή 23: τροποποίηση πίνακα κλίσεων (υπέρθυση δεικτών προσκηνίου-υποβάθρου)
18. Γραμμή 24: εμφάνιση τροποποιημένης εικόνας-πίνακα κλίσεων
19. Γραμμή 25: κατάτμηση εικόνας με εφαρμογή μετασχηματισμού watershed
20. Γραμμές 26-29: εμφάνιση αρχικής εικόνας με υπέρθεση γραμμών κατάτμησης και δεικτών προσκηνίου-υποβάθρου
21. Γραμμές 30-31: εμφάνιση των περιοχών κατάτμησης της εικόνας από τον αλγόριθμο watershed σε μορφή διακριτών χρωμάτων
22. Γραμμές 32-35: υπέρθεση αρχικής εικόνας σε διάφανη χρωματική απεικόνιση των κατατμήσεων του αλγορίθμου watershed

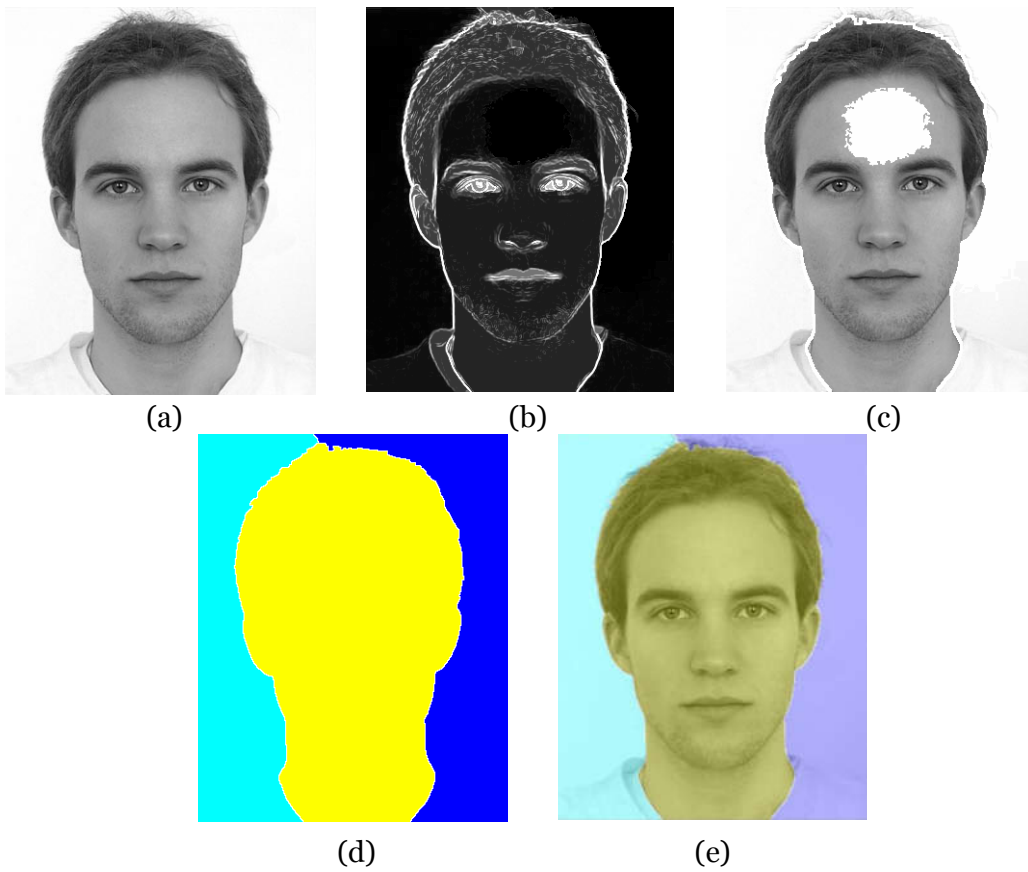
3.3.4 Εφαρμογή αλγορίθμου watershed σε φωτογραφίες-δείγματα

Αντίστοιχα με τη μέθοδο κατωφλίωσης, θα εξετάσουμε κι εδώ τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου watershed σε μια σειρά από ενδεικτικές εικόνες φωτογραφούμενων προσώπων. Χρησιμοποιούμε τα ίδια φωτογραφικά δείγματα, στην ίδια σειρά. Θα απομονώσουμε κι εδώ πέντε απεικονίσεις κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαδικασίας, αντιπροσωπευτικές των βασικών χαρακτηριστικών του αλγορίθμου στα διάφορα στάδια επεξεργασίας της εικόνας. Οι απεικονίσεις αυτές είναι οι παρακάτω:

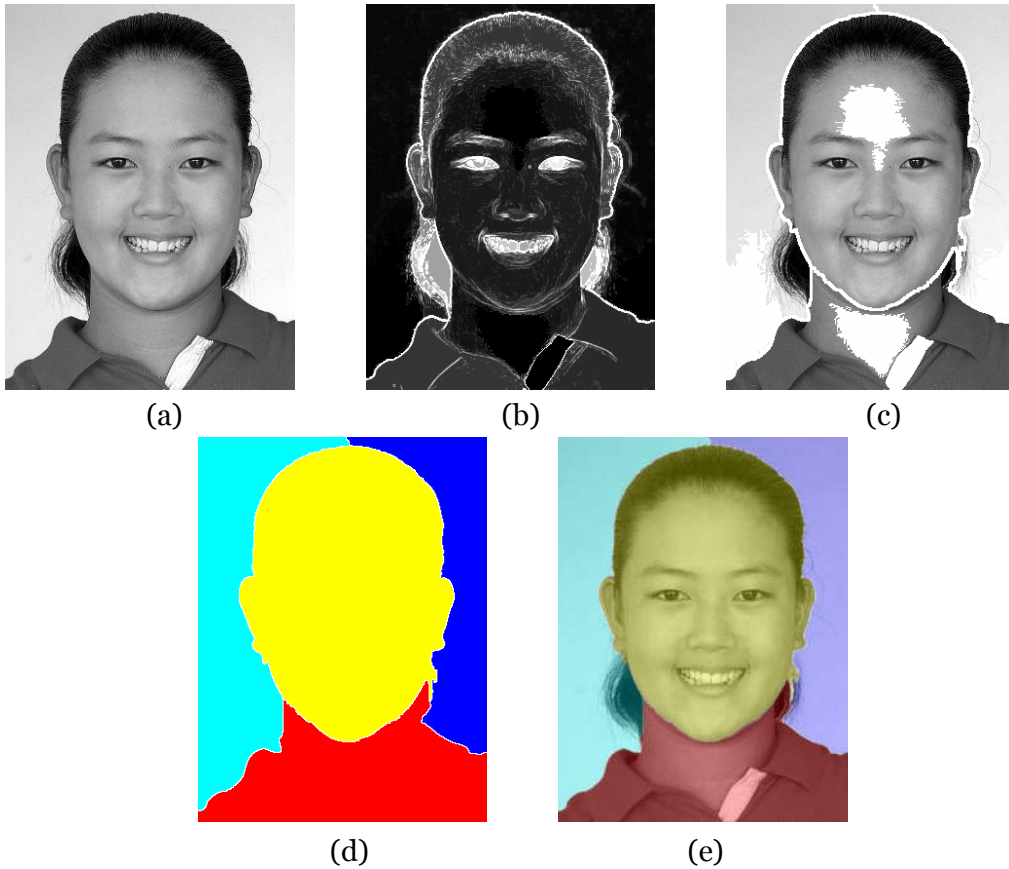
- (a) Μονόχρωμη εικόνα
- (b) Τροποποιημένη εικόνα κλίσεων (enhanced gradient magnitude)
- (c) Εικόνα με υπέρθεση γραμμών κατάτμησης και δεικτών προσκηνίου-υποβάθρου
- (d) Κατάτμηση εικόνας από αλγόριθμο watershed σε μορφή διακριτών χρωμάτων
- (e) Διάφανη χρωματική απεικόνιση των κατατμήσεων του αλγορίθμου watershed

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με τη διαδικασία της κατωφλίωσης, όπου με μία μόνο εξαίρεση, δε χρειάστηκε να επέμβουμε στην εκτέλεση του τελικού προγράμματος για να πάρουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα, εδώ κρίθηκε αναγκαίο να τροποποιήσουμε σημεία του κώδικα για τη βέλτιστη προσαρμογή του προγράμματος στις ανάγκες της κάθε εικόνας. Οι τροποποιήσεις αφορούν στην πράξη δύο σημεία: (α) τις διαστάσεις του δομικού στοιχείου (γραμμή κώδικα 9) της μορφολογικής επεξεργασίας, μικρές διαφοροποιήσεις στην τιμή του οποίου κατέληγαν σε σημαντικές αλλαγές στην κατάτμηση της εικόνας, ειδικά στην περιοχή ενδιαφέροντος (πρόσωπο) και (β) την επιλογή της εφαρμογής της τελικής φάσης του αλγορίθμου (εύρεση δεικτών προσκηνίου-υποβάθρου και εκτέλεση μετασχηματισμού watershed) στη μορφοποιημένη εικόνα (άνοιγμα-κλείσιμο με ανακατασκευή) ή στο συμπλήρωμά της. Η επιλογή αυτή πραγματοποιείται με τη συμπερίληψη ή την παράλειψη της γραμμής κώδικα 14. Οι συγκεκριμένες τροποποιήσεις όπως αρμόζουν σε κάθε εικόνα ξεχωριστά διευκρινίζονται αναλυτικά στον σχολιασμό των αποτελεσμάτων.

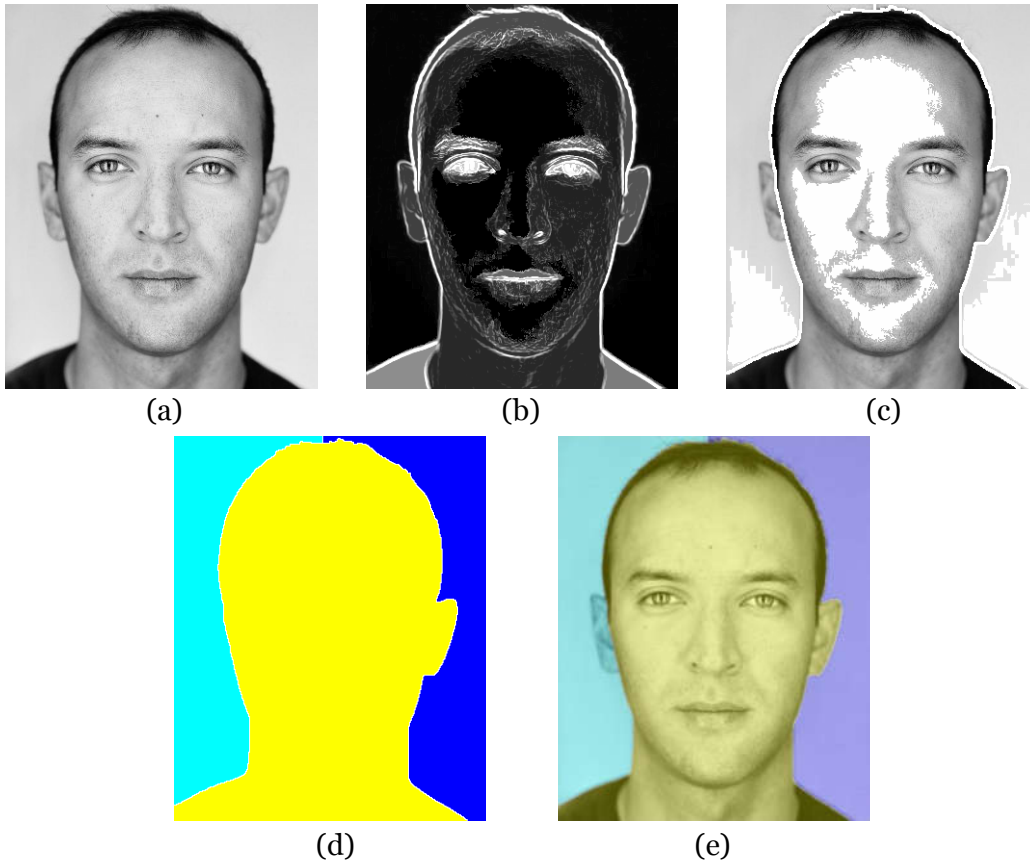
Σχήμα 3.22. Εφαρμογή αλγορίθμου watershed σε εικόνα N.01:



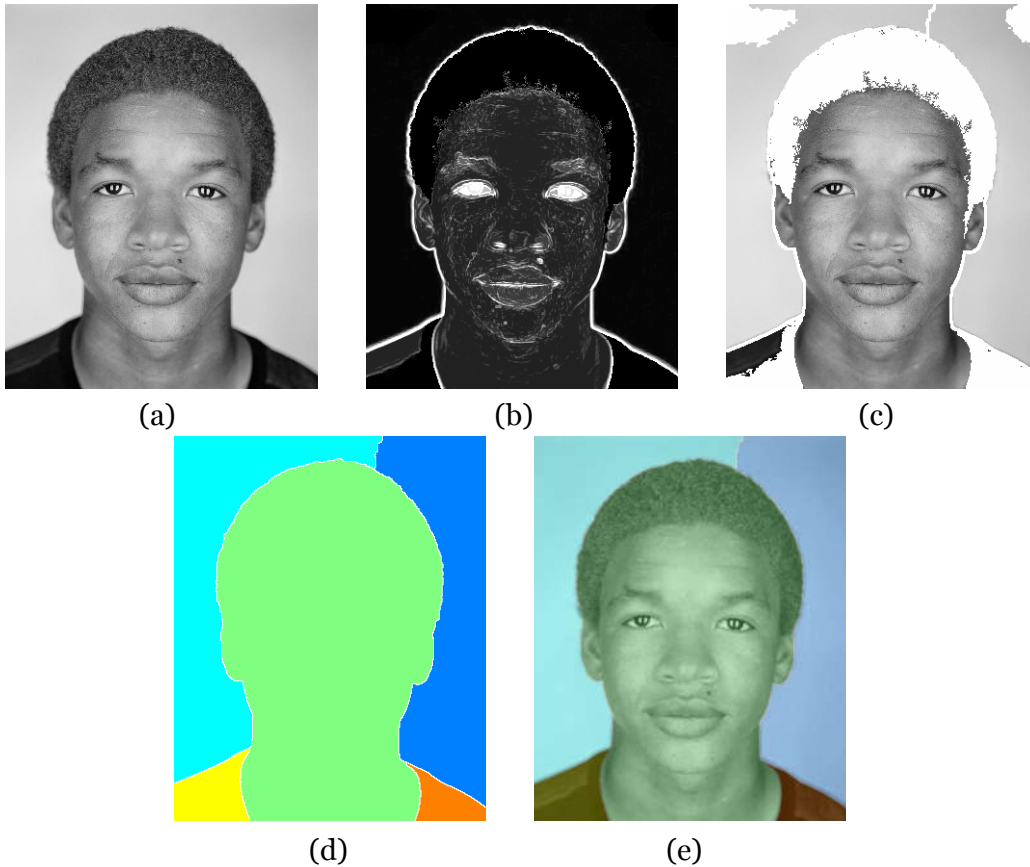
Σχήμα 3.23. Εφαρμογή αλγορίθμου watershed σε εικόνα N.02:



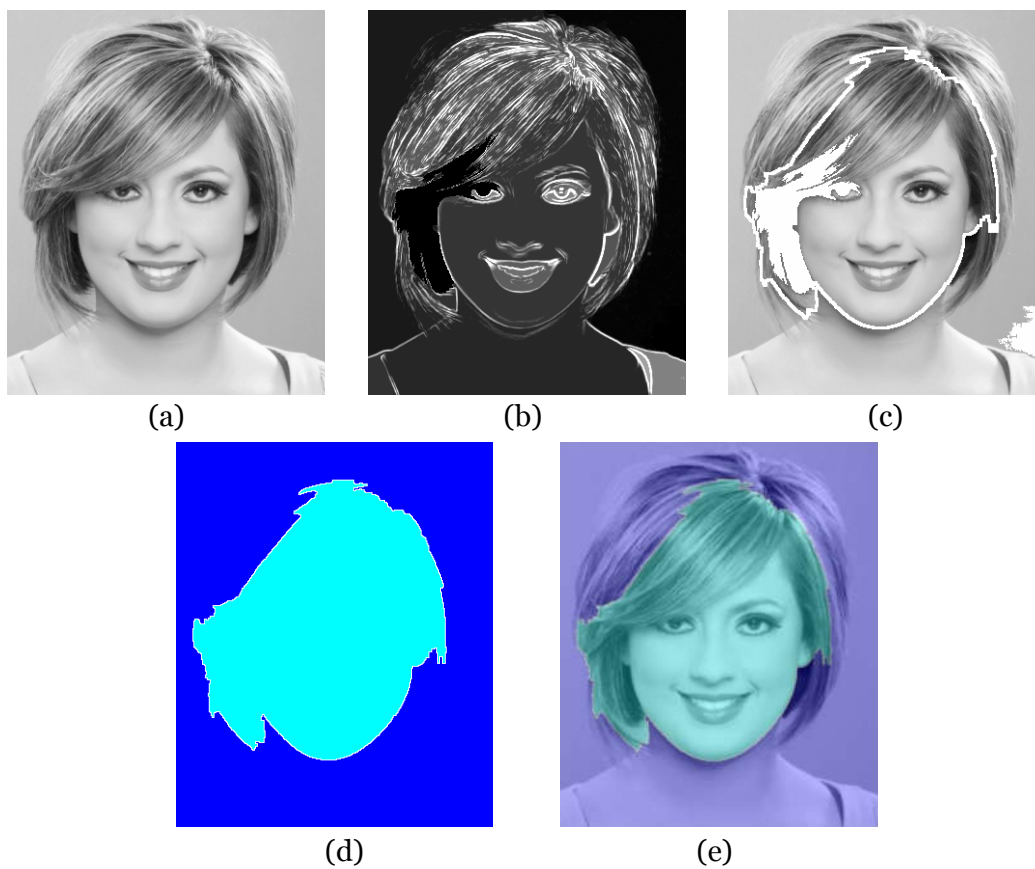
Σχήμα 3.24. Εφαρμογή αλγορίθμου watershed σε εικόνα N.03:



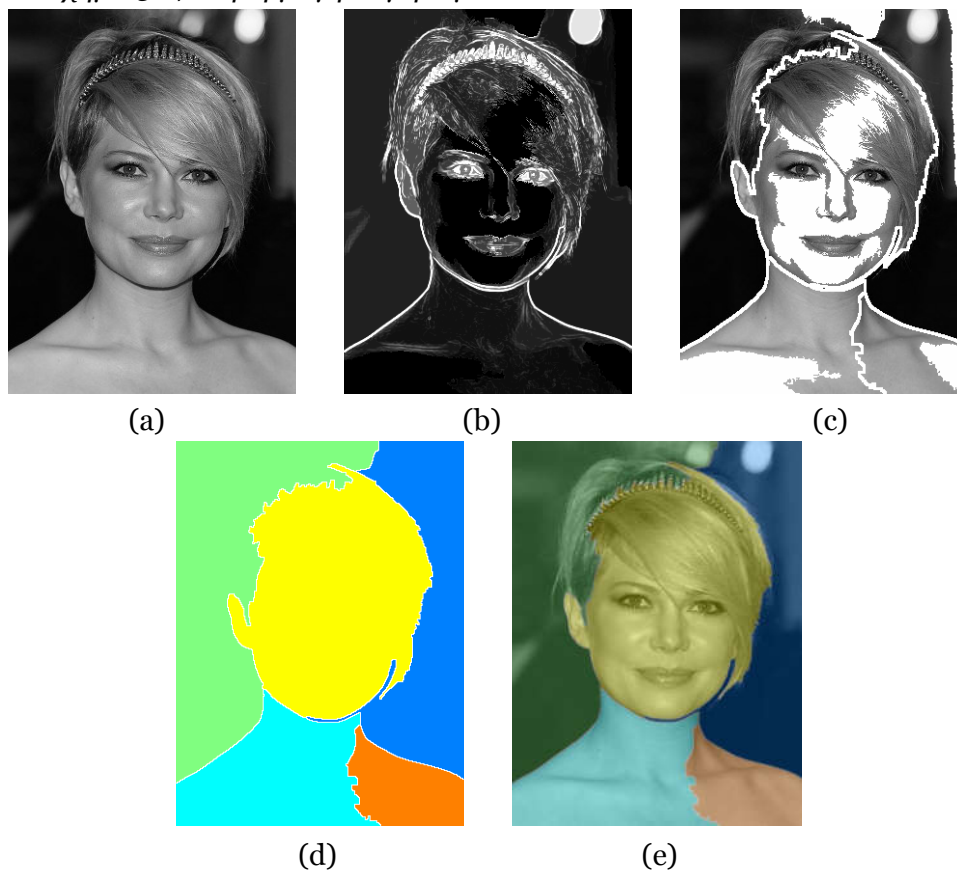
Σχήμα 3.25. Εφαρμογή αλγορίθμου watershed σε εικόνα N.04:



Σχήμα 3.26. Εφαρμογή αλγορίθμου watershed σε εικόνα N.05:



Σχήμα 3.27. Εφαρμογή αλγορίθμου watershed σε εικόνα N.06:



Για την εκτέλεση του αλγορίθμου στην εικόνα N.01 χρησιμοποιήθηκε δομικό στοιχείο ακτίνας ίσης με 30, ενώ για τις εικόνες N.03 και N.04 ίσης με 25. Στις υπόλοιπες εικόνες δε χρειάστηκε να τροποποιηθεί το δομικό στοιχείο από την τιμή 20 (γραμμή 9 στον κώδικα) για να καταλήξουμε σε εύστοχα αποτελέσματα. Επιπλέον, στις εικόνες N.04 και N.05 τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου watershed προκύπτουν σαφώς πιο επιτυχή όταν η τελική φάση της εκτέλεσης του προγράμματος γίνεται στο συμπλήρωμα της εικόνας, δηλαδή όταν παραλείπεται η γραμμή 14 στον κώδικα.

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα ήταν εν τέλει επιτυχή για όλα τα φωτογραφικά δείγματα, παρότι χρειάστηκε η εκ περιτροπής τροποποίηση του προγράμματος ανάλογα με τις απαιτήσεις της εικόνας. Η διαδικασία του αλγορίθμου watershed στην πλειονότητα των περιπτώσεων δεν κατάληξε στον διαχωρισμό της εικόνας σε δύο περιοχές, αλλά στην κατάτμησή της σε περισσότερες. Ο σκοπός όμως της απομόνωσης του προσώπου σε μια ενιαία περιοχή επιτελέσθηκε σε όλες τις περιπτώσεις.

3.4 Σύγκριση μεθόδων κατωφλίωσης και αλγορίθμου watershed

Με βάση την εμπειρία από τη χρήση των δύο μεθόδων κατάτμησης και την πρακτική τους εφαρμογή, καταλήξαμε σε ορισμένα συμπεράσματα για τα προτερήματα και τα ελαττώματα κάθε υλοποίησης στο πεδίο των απαιτήσεων της συγκεκριμένης εργασίας.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου κατωφλίωσης:

1. Ο διαχωρισμός περιοχών προσκηνίου και υποβάθρου είναι σαφής, επιτυγχάνοντας κατά κανόνα τη μορφή της απόλυτης δυαδικής διάζευξης.
2. Η ανάγκη μερικής τροποποίησης του κώδικα της μεθόδου σε διαδικασία δοκιμών για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων είναι πολύ σπάνια.
3. Ο χρόνος εκτέλεσης κρίνεται ικανοποιητικός, καθώς η υλοποίηση είναι σχετικά απλή και γρήγορη.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου αλγορίθμου watershed:

1. Ο αλγόριθμος watershed ως πιο εκλεπτυσμένος μπορεί να εφαρμοστεί σε ευρύτερη γκάμα εικόνων, καλύπτοντας και προβληματικές ή άλλες οριακές περιπτώσεις, εκεί που η μέθοδος κατωφλίωσης αποτυγχάνει.
2. Η εκάστοτε ανάγκη μερικής τροποποίησης του κώδικα της μεθόδου για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων αφορά πολύ συγκεκριμένες παραμέτρους, που συνεπάγεται ότι πιθανή αρχική αστοχία μπορεί να ξεπεραστεί χωρίς την απαίτηση σημαντικής μεταβολής του προγράμματος.
3. Ο χρόνος εκτέλεσης είναι σχετικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της κατωφλίωσης, ωστόσο η διαφορά αυτή είναι μικρής σημασίας για τις ανάγκες των περισσότερων εφαρμογών.

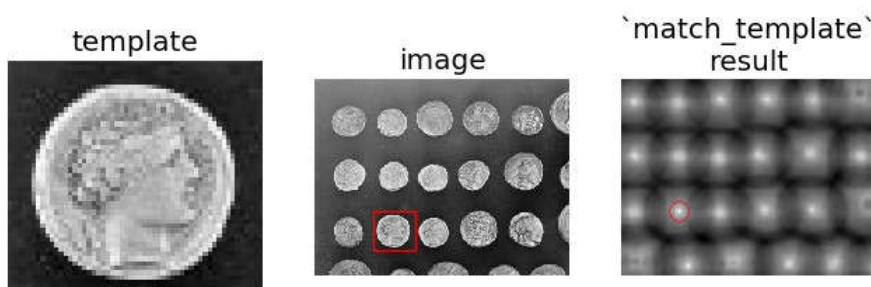
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΩΠΟΥ

4.1 Ταίριασμα προτύπων

Ο εντοπισμός συγκεκριμένων σχημάτων σε εικόνες θεωρείται ένα από τα πιο κλασικά προβλήματα αναζήτησης στην όραση υπολογιστών. Δεδομένης μιας εικόνας αναφοράς ενός αντικειμένου, εξετάζεται αν το αντικείμενο αυτό υπάρχει στην υπό ανάλυση εικόνα, και εφόσον υπάρχει ζητείται να εντοπιστεί η θέση του. Το ταίριασμα προτύπων αποτελεί την πιο διαδεδομένη προσέγγιση του ζητήματος ήδη από τα πιο πρώιμα στάδια ανάπτυξης της όρασης υπολογιστών.

Το ταίριασμα προτύπων ή σύμπτωση προτύπων (*template matching*) αποτελεί μια βασική τεχνική στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, ως μέθοδος για την εύρεση των τμημάτων μιας εικόνας που συμπίπτουν με μια άλλη εικόνα-πρότυπο αναφοράς. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε διαδικασίες ανίχνευσης αντικειμένου (*object detection*), αναγνώρισης αντικειμένου (*object recognition*), σύγκρισης αντικειμένων (*object comparison*) και υπολογισμού βάθους (*depth computation*). Η διαδικασία του ταίριασματος προτύπων βασίζεται στα χαρακτηριστικά της απεικόνισης, στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστικής, καθώς και στην επεξεργασία σήματος.



Σχήμα 4.1: Παράδειγμα εντοπισμού εικόνας-προτύπου σε υπό εξέταση εικόνα με χρήση ταίριασματος προτύπων.

Όταν η εικόνα-πρότυπο διαθέτει ισχυρά χαρακτηριστικά (*features*), τότε μπορεί να γίνει χρήση μιας προσέγγισης βασισμένης στα χαρακτηριστικά (*feature-based approach*). Τα χαρακτηριστικά αυτά συνήθως είναι σημεία, ακμές, γραμμές και επιφάνειες. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά,

οποιασδήποτε μορφής, πρέπει να είναι ευδιάκριτα ως προς το περιβάλλον τους, γεωμετρικά αμετάβλητα, σταθερά σε σχέση με τον θόρυβο, σχετικά σπάνια σε σύγκριση με άλλα χαρακτηριστικά στην ίδια εικόνα και, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις έγχρωμων απεικονίσεων, να διαθέτουν υψηλή φασματική διακριτική ικανότητα. Έτσι, όταν τόσο η εικόνα-πρότυπο, όσο και η υπό εξέταση εικόνα έχουν υψηλή αντιστοίχιση σε ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, όπως τα σημεία ελέγχου (control points), οι καμπύλες (curves) ή τα μοντέλα επιφάνειας (surface models), τότε η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι κατά πάσα πιθανότητα και η καταλληλότερη. Επιπλέον, καθώς η συγκεκριμένη προσέγγιση δε χρησιμοποιεί την εικόνα-πρότυπο στην ολότητά της, μπορεί να αποδειχθεί εξαιρετικά αποδοτικότερη από κάθε άλλη εναλλακτική, ειδικά όταν η εικόνα-πρότυπο είναι υψηλής ανάλυσης (high resolution).

Η διαδικασία ταιριάσματος των χαρακτηριστικών προϋποθέτει ως αρχικό βήμα την εξαγωγή των χαρακτηριστικών από την εικόνα-πρότυπο και στη συνέχεια τη χρήση τους μέσω κάποιας μεθόδου σύγκρισης. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαδικασία αυτή, ανάλογα με το είδος του χαρακτηριστικού που εξετάζεται. Οι μονάδες σύγκρισης στην προσέγγιση βασιζόμενη στα χαρακτηριστικά είναι σύνθετες οντότητες, που φέρουν ακριβή πληροφορία για τη μορφή του αντικειμένου στον πραγματικό χώρο, σε αντίθεση με τις τιμές έντασης των εικονοστοιχείων, στην πιο συνήθη εναλλακτική μέθοδο της προσέγγισης βασιζόμενης σε περιοχή. Γενικότερα, μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος ταιριάσματος που βασίζεται στα χαρακτηριστικά χρησιμοποιεί μια πολύ περισσότερο συμβολική περιγραφή των εικόνων και των ειδικών χαρακτηριστικών τους και για τον λόγο αυτό προσομοιάζει περισσότερο στη λειτουργία της ανθρώπινης όρασης και αντίληψης, με το αντίστοιχο πέρασμα από το γενικό στο ειδικό στα σημεία ενδιαφέροντος. Η χρήση χαρακτηριστικών έναντι των τιμών έντασης επιτρέπει την αναπαράσταση της εικόνας σε μια μορφή περισσότερο ανεξάρτητη από ενδεχόμενες παραλλαγές και παραμορφώσεις λόγω φωτισμού, αντανάκλασεων και γεωμετρίας, γεγονός που την καθιστά πιο ισχυρή μέθοδο από την προσέγγιση βάσει περιοχών, πάντοτε βέβαια σε εικόνες κατάλληλες για εξαγωγή συγκεκριμένων αναγνωριστικών χαρακτηριστικών [51]. Πέραν από τη δυνατότητα εφαρμογής της σε σαφώς μικρότερο αριθμό εικόνων, άλλα

μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η αρκετά χρονοβόρα και υπολογιστικά απαιτητική αναγκαία προεπεξεργασία, καθώς και η σχετικά μικρότερη υπολογιστική ακρίβεια.

Όταν η εικόνα-πρότυπο δε διαθέτει ισχυρά χαρακτηριστικά, μια προσέγγιση καθαρά βασιζόμενη στην εικόνα-πρότυπο (*template-based template matching approach*) φαντάζει ως η ιδανικότερη. Στην περίπτωση αυτή η σύγκριση και ο έλεγχος ομοιότητας πραγματοποιείται βάσει των τιμών έντασης (*intensity*) των εικονοστοιχείων, τόσο του προτύπου, όσο και της προς εξέταση εικόνας. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αναφέρεται επίσης και ως *προσέγγιση βασιζόμενη σε περιοχές (area-based approach)*, αλλά και ως *προσέγγιση που προσομοιάζει με συσχέτιση (correlation-like approach)* [52]. Γενικότερα, όταν γίνεται αναφορά σε χρήση της μεθόδου του ταιριάσματος προτύπων, συνήθως υπονοείται η συγκεκριμένη γενική προσέγγιση, εκτός αν διευκρινίζεται διαφορετικά.

Δεδομένου ότι στο ταίριασμα προτύπων είναι εξαιρετικά πιθανό να απαιτείται ο έλεγχος μεγάλου αριθμού σημείων, δηλαδή εικονοστοιχείων, πολύ συχνά ακολουθούνται δύο διαδικασίες, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό: α) η μείωση του μεγέθους (*downsizing*) και των δύο εικόνων (πρότυπου και εξεταζόμενης) με τον ίδιο συντελεστή, με τη μέθοδο της υπο-δειγματοληψίας, β) η χρήση ενός «παραθύρου αναζήτησης» (*search window*) εντός της προς εξέταση εικόνας, έτσι ώστε να μην είναι μονίμως απαραίτητη η συλλογή και χρήση δεδομένων από όλα τα σημεία της.

Σε ειδικές περιπτώσεις, όπου παρουσιάζονται δυσκολίες να βρεθεί εύκολο ταίριασμα μεταξύ προτύπου και εξεταζόμενης εικόνας, μπορεί να τεθεί σε εφαρμογή η χρήση ιδιοχώρων (*eigenspaces*), δηλαδή μια ομάδα προτύπων που απεικονίζουν το προς ανίχνευση αντικείμενο κάτω από ένα σύνολο διαφορετικών συνθηκών, που συνήθως έχουν να κάνουν με την προοπτική, τον φωτισμό, τις χρωματικές αντιθέσεις (*color contrast*), αλλά και οποιαδήποτε άλλη αποδεκτή για τις ανάγκες της ανίχνευσης παραλλαγή της μορφής. Έτσι, για παράδειγμα, στην αναζήτηση της μορφής ενός προσώπου, οι συγκεκριμένοι ιδιόχωροι θα μπορούσαν να αποτελούνται από ομάδες πρότυπων προσώπων σε διαφορετικές γωνίες λήψης από κάμερα, σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού ή και με διαφορετικές εκφράσεις στο πρόσωπο.

Ένα άλλο εμπόδιο που μπορεί να δυσχεράνει το έργο του ταιριάσματος προτύπων είναι η πιθανότητα το αναζητούμενο πρότυπο να καλύπτεται μέσω παρεμβολής ή επικάλυψης από κάποιο άλλο αντικείμενο στην εξεταζόμενη εικόνα. Τότε, η δημιουργία ποικιλίας κατάλληλων προτύπων που θα περιλαμβάνουν κάθε πιθανή επικάλυψη, όπως είναι προφανές, δεν αποτελεί υλοποιήσιμη λύση. Επιπλέον, υπάρχουν περιπτώσεις όπου το αντικείμενο που προσπαθούμε να ανιχνεύσουμε είναι εύπλαστο ή εύκαμπτο, οπότε ένας επιπρόσθετος παράγοντας αβεβαιότητας αφορά τη μορφή του αντικειμένου βάσει κάποιας πιθανής κίνησης ή παραμόρφωσής του. Στις περιπτώσεις αυτές, μια από τις πιο συνηθισμένες λύσεις δίνεται μέσω της εφαρμογής του ταιριάσματος προτύπων σε μικρότερα υπο-πρότυπα, που προκύπτουν διαιρώντας κατάλληλα το αρχικό.

Η ταμπλέτα-πρότυπο που απεικονίζει το σχήμα που αναζητούμε ονομάζεται και μάσκα συνέλιξης. Η μέθοδος ανίχνευσης του συγκεκριμένου σχήματος υλοποιείται με σχετικά απλό τρόπο για εικόνες στην κλίμακα του γκριζου. Η συνήθης διαδικασία ταιριάσματος προτύπων περιλαμβάνει τον υπολογισμό της συσχέτισης (cross-correlation) του πρωτοτύπου (template) με την εικόνα και τον καθορισμό της απόκλισης βάσει ενός μέτρου της μεταξύ τους ομοιότητας. Κατά κανόνα, εφαρμόζεται η σύγκριση της έντασης της φωτεινότητας μεταξύ εικονοστοιχείων (pixel intensity). Σε πιο γενικευμένους αλγόριθμους υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ κάθε θέσης της εικόνας και κάθε πιθανής περιστροφής, δηλαδή γενικότερα ενός αγχίγραμμου μετασχηματισμού (affine transformation) του προτύπου, ώστε να συμπεριληφθούν οι περιπτώσεις όπου το πρότυπο υπάρχει σε διαφορετικές κλίμακες στην υπό εξέταση εικόνα, ακόμη και περιστραμμένο.

Ο βασικός αλγόριθμος ταιριάσματος προτύπων συνίσταται στην ολίσθηση της ταμπλέτας-πρότυπο στην περιοχή αναζήτησης και στον επακόλουθο υπολογισμό σε κάθε θέση της τιμής μιας συνάρτησης παραμόρφωσης ή συσχέτισης, που υπολογίζει το βαθμό ανομοιότητας ή ομοιότητας μεταξύ του προτύπου και της υπό εξέτασης εικόνας. Κατόπιν, η θέση ελάχιστης παραμόρφωσης ή μέγιστης συσχέτισης, λαμβάνεται ως ένδειξη της εμφάνισης του προτύπου στην εξεταζόμενη εικόνα, θέτοντας ένα κατώτατο όριο στο μέτρο ομοιότητας/ανομοιότητας, που ρυθμίζεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, ώστε να απορρίπτονται τα μη βέλτιστα,

συνήθως εσφαλμένα, ταιριάσματα. Τα χαρακτηριστικά μέτρα παραμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στους αλγορίθμους σύμπτωσης προτύπων είναι το άθροισμα των απόλυτων διαφορών (*sum of absolute differences, SAD*) και το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών (*sum of square differences, SSD*), ενώ η ομαλοποιημένη συσχέτιση (*normalized cross-correlation, NCC*) είναι το συνηθέστερο μέτρο συσχέτισης. Το πλεονέκτημα της ευκολίας στην ερμηνεία, υλοποίηση και εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου μετριάζεται ωστόσο από το υψηλό υπολογιστικό κόστος του, ιδιαίτερα σε απαιτητικές συνθήκες.

$$\begin{aligned}
 \text{(SAD):} \quad & \sum_{(i,j) \in W} |I_1(i,j) - I_2(x+i, y+j)| \\
 \text{(SSD):} \quad & \sum_{(i,j) \in W} (I_1(i,j) - I_2(x+i, y+j))^2 \\
 \text{(NCC):} \quad & \frac{\sum_{(i,j) \in W} I_1(i,j) \cdot I_2(x+i, y+j)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in W} I_1^2(i,j) \cdot \sum_{(i,j) \in W} I_2^2(x+i, y+j)}}
 \end{aligned}$$

Σχήμα 4.2: Τύποι κριτηρίων ομοιότητας μεταξύ εικόνων (I_1, I_2).

Άθροισμα των απόλυτων διαφορών (*sum of absolute differences, SAD*).

Άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών (*sum of square differences, SSD*).

Ομαλοποιημένη συσχέτιση (*normalized cross-correlation, NCC*).

Η εφαρμογή της ίδιας διαδικασίας σε έγχρωμες εικόνες μπορεί να γίνει μέσω της ανάλυσης των χρωμάτων στις χρωματικές συνιστώσες τους και ακολούθως με τον υπολογισμό των διαφορών στα εικονοστοιχεία προτύπου και εξεταζόμενης εικόνας για κάθε απόχρωση ξεχωριστά, κάνοντας και πάλι χρήση των ίδιων μεθόδων.

4.2 Ταίριασμα προτύπων και ανίχνευση χαρακτηριστικών

4.2.1 Η μέθοδος της κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών

Η μέθοδος της σύμπτωσης προτύπων ακολουθείται στη διαδικασία της οπτικής μεθόδου μελέτης προπαλμικής αναστολής για την υλοποίηση του

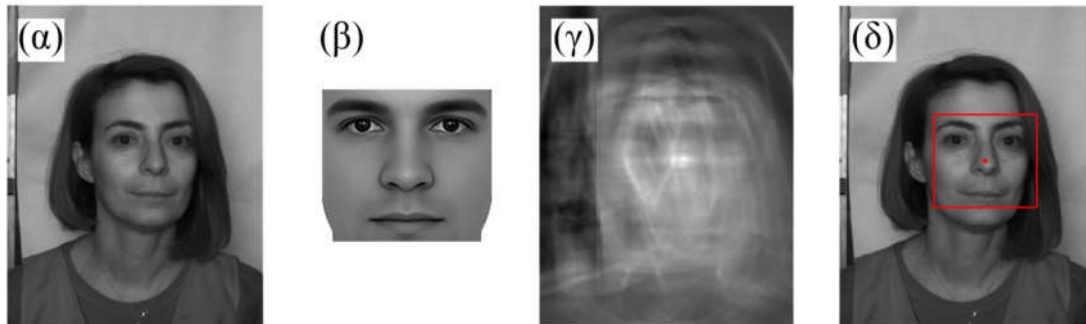
σταδίου ανίχνευσης και κατάλληλης απομόνωσης των περιοχών του αριστερού και του δεξιού οφθαλμού. Για την πραγματοποίηση του ταιριάσματος προτύπων, χρησιμοποιούνται προκαθορισμένες εικόνες-πρότυπα, που αποτελούν ψηφιακά πρότυπα χαρακτηριστικών προσώπου (*feature templates*). Πρόκειται για ψηφιακά κατασκευασμένα πρόσωπα με αναλογίες κοντά στον αναμενόμενο μέσο όρο, κατάλληλα για την συγκεκριμένη εργασία εντοπισμού. Δεδομένου ότι σκοπός είναι η ανίχνευση αριστερού και δεξιού ματιού εντός της εικόνας του προσώπου, αυτό απλοποιεί σχετικά τις απαιτήσεις των προτύπων, καθώς η ανίχνευση ειδικών χαρακτηριστικών σε άλλες περιπτώσεις (π.χ. εντοπισμός στόματος σε πρόσωπο με μουστάκι ή γένια) θα απαιτούσε ειδικές τεχνικές [53]. Εφόσον η περιοχή των ματιών είναι σχεδόν πάντοτε ομαλή, χωρίς ιδιάζουσες διαφοροποιήσεις από πρόσωπο σε πρόσωπο (η χρήση γυαλιών από τα εξεταζόμενα άτομα κατά τη διάρκεια της συνεδρίας, όπως είναι λογικό, δεν επιτρέπεται), μπορούμε βάσιμα να εκτιμήσουμε ότι τα αποτελέσματα θα είναι ιδιαίτερος επιτυχία.

Η μέθοδος ανίχνευσης χαρακτηριστικών μιας εικόνας με βάση μια άλλη εικόνα-πρότυπο βασίζεται, όπως και οι περισσότερες διαδικασίες φιλτραρίσματος στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, στη λειτουργία της συνέλιξης (*convolution*) με χρήση της διαδικασίας κυλιόμενων παραθύρων-γειτονιών (*sliding neighborhood operation*). Κάθε εικόνα είναι μια δισδιάστατη συλλογή εικονοστοιχείων σε ορθογώνιες συντεταγμένες, δηλαδή ένας πίνακας. Η εικόνα-πρότυπο διατρέχει κάθε εικονοστοιχείο της εξεταζόμενης εικόνας. Για καθένα από αυτά λαμβάνεται υπόψη για την πράξη της συνέλιξης μια περιοχή της υπό εξέταση εικόνας ίση με τις διαστάσεις του προτύπου, όπου το εξεταζόμενο εικονοστοιχείο βρίσκεται στο κέντρο της, γεγονός που αποκλείει ορισμένα εικονοστοιχεία στα άκρα της εικόνας. Για τις περιοχές αυτές μπορεί να πραγματοποιηθεί έλεγχος είτε προσθέτοντας μηδενικά εικονοστοιχεία στα άκρα της εικόνας (*zero padding*) είτε αντιγράφοντας τα εικονοστοιχεία των άκρων σε νέα οριακά εικονοστοιχεία για να πληρωθούν οι θέσεις του παραθύρου ελέγχου (*border replication*).

Η συνέλιξη μιας υπό εξέταση εικόνας I_o μεγέθους $M \times N$ με ένα πρότυπο T μεγέθους $m \times n$ ορίζεται ως:

$$I_c(i, j) = I_o(i, j) * T(i, j) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{i_t=1}^m \sum_{j_t=1}^n \sqrt{(I_o(i-i_t, j-j_t) - T(i_t, j_t))^2}$$

Αποτέλεσμα της συνέλιξης είναι μία νέα εικόνα I_c , της οποίας η φωτεινότητα $I_c(i,j)$ σε μία θέση (i,j) αποτελεί το μέτρο του βαθμού ταύτισης του προτύπου T με την εικόνα I_o στη συγκεκριμένη θέση. Έτσι, η θέση όπου παρατηρείται η υψηλότερη τιμή, άρα και ο μεγαλύτερος βαθμός ταύτισης, επιλέγεται ως η θέση βέλτιστου εντοπισμού του προτύπου στην υπό εξέταση εικόνα.



Σχήμα 4.3: Εντοπισμός προσώπου με τη μέθοδο της συνέλιξης.

- (α) Αρχική εικόνα ουδέτερης έκφρασης. (β) Ψηφιακό πρότυπο προσώπου.
(γ) Πίνακας-αποτέλεσμα της συνέλιξης, όπου διακρίνεται το σημείο μέγιστης φωτεινότητας, που αντιστοιχεί στο σημείο βέλτιστης ταύτισης.
(δ) Απεικόνιση της θέσης και των ορίων του εντοπισμένου προσώπου.

Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι πολύ συχνά οι διαστάσεις της εικόνας-προτύπου και οι διαστάσεις της εξεταζόμενης εικόνας, αλλά και του προς αναζήτηση χαρακτηριστικού εντός της διαφέρουν σημαντικά. Επιπλέον, στην ανίχνευση του προτύπου εντός της εξεταζόμενης εικόνας μας ενδιαφέρει τόσο η θέση του ανιχνευθέντος χαρακτηριστικού, όσο και το μέγεθός του. Για τους λόγους αυτούς, πραγματοποιούνται τόσο κατάλληλες σμικρύνσεις (συνηθέστερα) ή μεγεθύνσεις των εικόνων, αλλά και ένας αριθμός από ανιχνεύσεις, όπου κάθε φορά η διαδικασία ελέγχου πραγματοποιείται με διαφορετικές διαστάσεις της εικόνας-προτύπου, εφαρμόζοντας έτσι την *τεχνική της κλιμακωτής συνέλιξης*.

Είναι προφανές ότι με την ανάγκη εκτέλεσης των παραπάνω ρυθμίσεων, η διαδικασία καθίσταται περαιτέρω χρονοβόρα, γι' αυτό και λαμβάνονται ορισμένες προϋποθέσεις για τη διευκόλυνση της ορθής εκτέλεσης και τον περιορισμό του πλήθους των αναγκαίων ελέγχων για τον εντοπισμό της βέλτιστης ανίχνευσης. Οι βελτιστοποιήσεις αυτές προκύπτουν ως επί το πλείστον εξ εμπειρίας, μετά από αρκετές πειραματικές εκτελέσεις και

τροποποιήσεις του προγράμματος ανίχνευσης, και αφορούν τον ορισμό συγκεκριμένων μεγεθών, σχετικά με τις διαστάσεις των εικόνων, αλλά και ορισμένων βοηθητικών δεικτών σε καθορισμένες τιμές. Η χρήση τους συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του χρόνου εκτέλεσης για τη συγκεκριμένη εργαστηριακή εφαρμογή, όπως αναλύεται παρακάτω στη λεπτομερέστερη παρουσίαση της υπορουτίνας εντοπισμού χαρακτηριστικών.

Έχοντας υλοποιήσει την ορθή κατάτμηση της γενικότερης περιοχής του προσώπου (διαχωρισμός προσκηνίου-υποβάθρου) στο προηγούμενο βήμα, μια θεωρητικά απλή πρόταση για τον εύκολο εντοπισμό των ζητούμενων χαρακτηριστικών θα ήταν να χρησιμοποιηθεί απλώς μια εικόνα-πρότυπο για κάθε μάτι (αριστερό και δεξί) ως το μοναδικό πρότυπο ανίχνευσης, διατρέχοντας τη συνολική εικόνα του προσώπου. Παρατηρείται ωστόσο ότι μια τέτοια διαδικασία είναι πολύ επιρρεπής στην επιστροφή λανθασμένων αποτελεσμάτων (*false positives*). Σε πολλές περιπτώσεις το πρότυπο ενός οφθαλμού δίνει θετικά αποτελέσματα αναγνώρισης σε διάφορες άλλες περιοχές του προσώπου, όπως η περιοχή των φρυδιών ή το στόμα, ενώ καθίσταται πολύ δύσκολη η διάκριση μεταξύ αριστερού και δεξιού οφθαλμού.

Μια από τις βασικές αρχές της σύμπτωσης προτύπων είναι πως όταν ο βαθμός σχετικής πολυπλοκότητας της προς ανίχνευση εικόνας αυξάνει, αυξάνονται αντίστοιχα ισχυρά οι πιθανότητες εύστοχου εντοπισμού. Λαμβάνοντας αυτό ως δεδομένο, μπορούμε να τροποποιήσουμε τη διαδικασία εντοπισμού, χωρίζοντάς τη σε σταδιακά βήματα, όπου τα δείγματα της εικόνας-προτύπου ξεκινούν από μια γενική περιοχή (πρόσωπο) και κάθε επόμενο πρότυπο περιορίζεται σε υπο-περιοχή του προηγούμενου, μέχρι να καταλήξουμε στο τελικό πρότυπο του ματιού. Πρόκειται για την *τεχνική της κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών*. Οι διαδοχικές εικόνες-πρότυπα, όπως χρησιμοποιούνται κατά σειρά ανίχνευσης είναι:

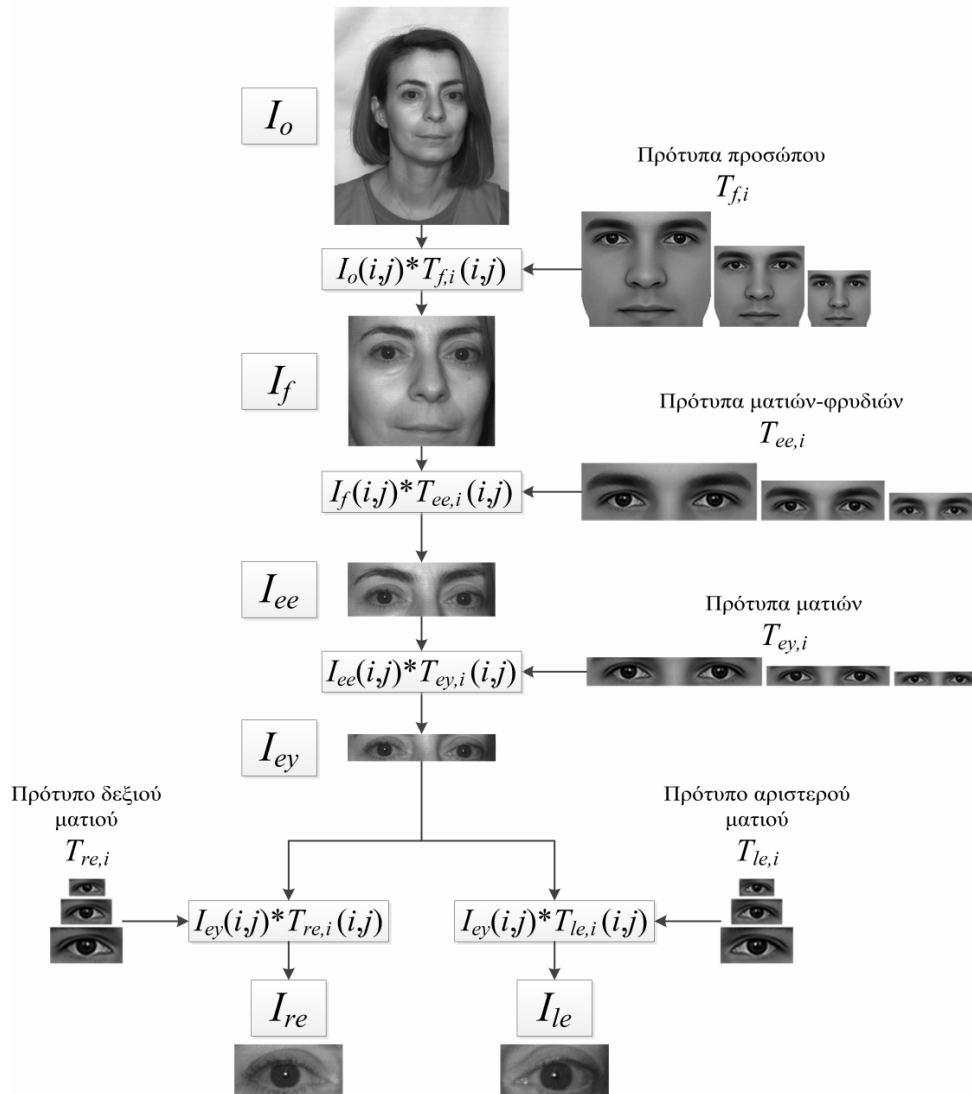
- α) περιοχή προσώπου (κάτω από το μέτωπο έως λίγο πριν το πηγούνι)
- β) περιοχή που περιλαμβάνει μάτια και φρύδια
- γ) περιοχή αποκλειστικά γύρω από τα μάτια (χωρίς τα φρύδια)
- δ) αριστερό μάτι
- ε) δεξί μάτι

Αρχικά σκοπεύουμε να εξειδικεύσουμε τον έλεγχο ανίχνευσης εντοπίζοντας μια κατάλληλη περικοπή της εικόνας ενός προσώπου, η οποία περιλαμβάνει όλα τα βασικά χαρακτηριστικά του (φρύδια, μάτια, μύτη, στόμα). Στη συγκεκριμένη διαδικασία το ταίριασμα προτύπων δίνει ασφαλή αποτελέσματα λόγω της πολυπλοκότητας του προτύπου. Ωστόσο, ζητούμενο δεν αποτελεί μόνο ο εντοπισμός της θέσης του προτύπου στην εικόνα, αλλά και ο προσδιορισμός του μεγέθους του. Για τον λόγο αυτό, θα εφαρμοστεί η τεχνική της κλιμακωτής συνέλιξης, εξετάζοντας διαφορετικά μεγέθη, με σκοπό να βρεθεί εκείνο που ταιριάζει καλύτερα βάσει του υλικού φωτογράφισης του συγκεκριμένου εξεταζομένου ατόμου κάθε φορά. Η τεχνική της κλιμακωτής συνέλιξης εφαρμόζεται εν συνεχεία σε όλες τις διαδοχικές ανιχνεύσεις, δεδομένου ότι δεν μπορούμε να ορίσουμε με απόλυτη σαφήνεια το μέγεθος κάθε επιμέρους προτύπου σε σχέση με το συνολικό πρόσωπο με τρόπο που να εφαρμόζεται επιτυχώς σε όλες τις περιπτώσεις, καθώς τα βιομετρικά χαρακτηριστικά ως γνωστόν ποικίλουν από άνθρωπο σε άνθρωπο.

Εν συνεχεία, σε δεύτερο βήμα, η εικόνα πρότυπο μάτια-φρύδια εφαρμόζεται ως κριτήριο ανίχνευσης στην περιορισμένη μορφή του προσώπου, όπως προέκυψε από τον προηγούμενο εντοπισμό. Το βήμα αυτό είναι απαραίτητο καθώς το ενδεχόμενο ταύτισης ενός σκέτου προτύπου ματιού με το σχήμα των φρυδιών είναι ιδιαίτερα υψηλή.

Σε τρίτο βήμα εφαρμόζεται η ταύτιση προτύπων με κριτήριο ανίχνευσης την εικόνα-πρότυπο αποκλειστικά των δύο ματιών, χωρίς τα φρύδια, πάνω στην ανιχνευθείσα περιοχή ματιών-φρυδιών από το προηγούμενο βήμα. Ως ένα επιπλέον μέτρο αποτροπής της λανθασμένης ανίχνευσης, μπορούμε να περιορίσουμε τον έλεγχο σε περιορισμένο τμήμα της εικόνας, αποκόπτοντας ένα συγκεκριμένο τμήμα από το πάνω μέρος της υπό εξέταση εικόνας.

Στο τελικό βήμα, η ανιχνευθείσα εικόνα που περιέχει τα δύο μάτια από το προηγούμενο βήμα διαιρείται καθέτως ακριβώς στη μέση και χωρίζεται σε δύο αυτοτελείς εικόνες, τμήματα της αρχικής. Στη συνέχεια, εκτελούνται οι διαδικασίες ανίχνευσης με βάση το πρότυπο του αριστερού ματιού στο αριστερό τμήμα και αντίστοιχα του δεξιού ματιού στο δεξί τμήμα.



Σχήμα 4.4: Εντοπισμός ματιών με την τεχνική της κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών προσώπου.

Η διαδικασία της κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών μας διασφαλίζει με μεγάλη αξιοπιστία την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Οι απόπειρες βελτιστοποίησης της διαδικασίας επικεντρώθηκαν στην εύρεση επιμέρους τεχνικών βελτιώσεων (*fine tuning*) ανά βήμα και συνολικά με μεθόδους κατάλληλης παραμετροποίησης ή και άλλες ιδέες περιορισμού του απαραίτητου όγκου δεδομένων. Οι ρυθμίσεις αυτές, αποσκοπούν στη βελτίωση της χρονικής πολυπλοκότητας, χωρίς όμως να θέτουν σε κίνδυνο την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Έτσι, για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη τη μικρή διάρκεια κάθε στιγμιότυπου καταγραφής αντιδράσεων στα ηχητικά ερεθίσματα (περίπου 2,6 sec), μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η θέση του κεφαλιού, και

επομένως και των δύο ματιών, παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια. Αυτό συνεπάγεται ότι αρκεί η ανίχνευση του αριστερού και του δεξιού ματιού μία φορά σε κάθε ένα από τα 51 σύνολα των 250 εικόνων το καθένα, γεγονός που προφανώς μειώνει θεματικά την υπολογιστική πολυπλοκότητα της επεξεργασίας. Εμπειρικά, παρατηρήσαμε ότι η παραδοχή αυτή δεν επηρεάζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

4.2.2 Εκτέλεση του προγράμματος ανίχνευσης χαρακτηριστικών

Στην είσοδο του προγράμματος ανίχνευσης χαρακτηριστικών εισάγονται τα εξής δεδομένα:

- α) μια εικόνα του προσώπου του εξεταζομένου ατόμου, απομονωμένου από το υπόβαθρό του (input 1)
- β) μια σειρά από εικόνες-πρότυπα, συνολικά 5, μία για κάθε ένα από τα προς ανίχνευση χαρακτηριστικά (input 2-6)

Input 2 (face). Μια περικοπή του προσώπου, που τα άνω όριά της βρίσκονται ακριβώς πάνω από τα φρύδια, τα κάτω όριά της σταματούν λίγο πριν το πηγούνι, ενώ αριστερά-δεξιά τα όρια σταματούν σε δύο ευθείες που εκκινούν εξωτερικά από τα μάτια, αποκόπτοντας τα αυτιά. Ο κεντρικός κάθετος άξονας της εικόνας, τη χωρίζει σε δύο συμμετρικά τμήματα εκατέρωθεν. Ενδεικτικές διαστάσεις: 158 x 141 εικονοστοιχεία.



Σχήμα 4.5: Πρότυπο ψηφιακού προσώπου, που χρησιμοποιείται στη διαδικασία κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών.

Input 3 (eyes and eyebrows). Μια περικοπή της προηγούμενης εικόνας, που εστιάζει αποκλειστικά στην περιοχή των ματιών, συμπεριλαμβανομένων και των φρυδιών. Διατηρείται η κεντρική συμμετρία. Ενδεικτικές διαστάσεις: 158 x 54 εικονοστοιχεία.



Σχήμα 4.6: Πρότυπο εικόνας για μάτια-φρύδια, που χρησιμοποιείται στη διαδικασία κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών.

Input 4 (eyepair). Αποκόπτοντας στην προηγούμενη εικόνα τις άνω οριζόντιες γραμμές εικονοστοιχείων, που περιλαμβάνουν τα φρύδια, αλλά και ένα μικρότερο τμήμα από τις κάτω οριζόντιες γραμμές, ώστε οι δύο οφθαλμοί να βρίσκονται ακριβώς στο κέντρο της εικόνας, τόσο στον κάθετο όσο και στον οριζόντιο άξονα, λαμβάνουμε το πρότυπο του αποκλειστικού ζεύγους οφθαλμών. Το ύψος της προκύπτουσας εικόνας είναι στα 4/9 του προηγούμενου προτύπου. Ενδεικτικές διαστάσεις 158 x 24 εικονοστοιχεία.



Σχήμα 4.7: Πρότυπο εικόνας για ζεύγος ματιών, που χρησιμοποιείται στη διαδικασία κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών.

Input 5 (left eye). Διχοτόμηση του προηγούμενου προτύπου στον κάθετο άξονα δίνει τις ξεχωριστές εικόνες δεξιού και αριστερού ματιού. Είναι πιθανή η ανάγκη ήπιας μεγέθυνσης του προτύπου για τη σωστή λειτουργία της ανίχνευσης. Ενδεικτικές διαστάσεις 54 x 27 εικονοστοιχεία.



Σχήμα 4.8: Πρότυπο εικόνας για αριστερό μάτι, που χρησιμοποιείται στη διαδικασία κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών.

Input 6 (right eye). Αντίστοιχα, το δεξί τμήμα της διχοτόμησης του προτύπου 3 (eyepair), ελαφρώς μεγεθυμένο. Ενδεικτικές διαστάσεις 54 x 27 εικονοστοιχεία.



Σχήμα 4.9: Πρότυπο εικόνας για δεξί μάτι, που χρησιμοποιείται στη διαδικασία κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών.

Η εκτέλεση του προγράμματος ξεκινά με την εισαγωγή και ανάγνωση της εξεταζόμενης εικόνας, αποθηκευμένης σε ειδικό φάκελο, που περιλαμβάνει όλες τις υπό ανάλυση εικόνες, ταξινομημένες σε χρονολογική σειρά. Στη συνέχεια, για τη διευκόλυνση των πράξεων, μετατρέπουμε τον πίνακα της εικόνας σε πίνακα του οποίου τα στοιχεία είναι αριθμοί κινητής υποδιαστολής διπλής ακρίβειας (im2double). Σε περίπτωση που η εικόνα είναι έγχρωμη, τη μετατρέπουμε σε αποχρώσεις του γκριζου (rb2gray). Στη συνέχεια, προβαίνουμε σε κανονικοποίηση φωτεινότητας, ώστε όλα τα στοιχεία του πίνακα της εικόνας να βρίσκονται στην κλίμακα 0-1, καθώς επιδιώκουμε ο παράγοντας φωτεινότητας να βρίσκεται σε όλες τις εικόνες στην ίδια κλίμακα. Αυτό πραγματοποιείται διαιρώντας κάθε στοιχείο με τη μέγιστη τιμή του πίνακα. Επιπλέον, προβλέπεται η δυνατότητα περιστροφής της εικόνας κατά 90 μοίρες, σε περίπτωση που το φωτογραφικό υλικό έχει ληφθεί με τους δύο άξονες, οριζόντιο και κάθετο, σε αντίστροφη θέση.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται με τα ίδια βήματα και για όλες τις εικόνες-πρότυπα. Αντίστοιχα, για να μπορέσουμε να τις χρησιμοποιήσουμε ως κριτήρια ομοιότητας πάνω στην εξεταζόμενη εικόνα, τα μετατρέπουμε σε αντίστοιχη κανονικοποιημένη μορφή (im2double, rb2gray, κανονικοποίηση φωτεινότητας).

Εφόσον όλες οι εικόνες πλέον βρίσκονται σε κατάλληλη κανονικοποιημένη μορφή, έχουμε τη δυνατότητα να ξεκινήσουμε τη διαδικασία εκτέλεσης της κλιμακωτής ανίχνευσης χαρακτηριστικών. Όπως περιγράψαμε προηγουμένως, ο σταδιακός περιορισμός της υπό ανίχνευσης περιοχής, μέχρι τον εντοπισμό του αναζητούμενου χαρακτηριστικού (αριστερό μάτι, δεξί μάτι) σημαίνει ότι η έξοδος ενός βήματος θα αποτελεί και την είσοδο του επομένου. Έτσι, με βάση το πρότυπο 1, εντοπίζουμε την περιοχή του προσώπου στην αρχική υπό εξέταση εικόνα. Η ανιχνευθείσα περιοχή στη συνέχεια εισάγεται στη διαδικασία ταιριάσματος προτύπων με το πρότυπο 2 (μάτια-φρύδια). Η περιοχή που λαμβάνουμε ως έξοδο θα χρησιμοποιηθεί για το ταιρίασμα προτύπου με το template 3 (μάτια) και μετά το διαχωρισμό της ανιχνευθείσας περιοχής σε δύο μέρη, εκτελούμε την ίδια διαδικασία ταιριάσματος με τα πρότυπα 4 (αριστερό μάτι) και πέντε (δεξί μάτι). Σε όλες τις παραπάνω διαδικασίες ανίχνευσης καλούμε την ίδια συνάρτηση, μια γενικής χρήσης υπορουτίνα (FeatureDetect), με τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου κάθε φορά.

Για τον καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας, μπορούμε να προγραμματίσουμε την έξοδο κατάλληλων εικόνων ή διαγραμμάτων ανά βήμα ανίχνευσης, ώστε να διαπιστώσουμε κατά πόσον η διαδικασία αποδίδει τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Στις εξόδους αυτές βασίζεται η πλειοψηφία των απεικονίσεων στο παρόν κεφάλαιο.

4.2.3 Η υπορουτίνα ανίχνευσης χαρακτηριστικών

Η υπορουτίνα ανίχνευσης χαρακτηριστικών λαμβάνει τις δύο εικόνες (εξεταζόμενη και πρότυπη) και σκοπός της είναι να επιστρέψει ως αποτελέσματα δύο τιμές (a) και (b), που αποτελούν τις συντεταγμένες του κεντρικού σημείου του χαρακτηριστικού (feature) που αναζητούσαμε στην υπό ανάλυση εικόνα, και έναν πίνακα 2 τιμών (c) που περιέχει τις τιμές πλάτους και ύψους της περιοχής του εντοπισμένου χαρακτηριστικού.

Στην είσοδο του υπορουτίνας ανίχνευσης χαρακτηριστικών εισάγονται τα εξής δεδομένα:

- α) Η εικόνα (I_o) εντός της οποίας αναζητούμε το πρότυπο
- β) Η εικόνα πρότυπο (I_t)
- γ) Ένα σύνολο εννέα βοηθητικών παραμέτρων (fd_props), οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω

1η παράμετρος (temp_bounds). Περιορίζει την αλγοριθμική αναζήτηση μέσα σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο, καθορίζοντας τις συντεταγμένες της εικόνας όπου θα πραγματοποιηθεί η διαδικασία συνέλιξης με το κυλιόμενο παράθυρο αναζήτησης. Λαμβάνει τέσσερις τιμές συντεταγμένων (i_min, i_max, j_min, j_max), οι οποίες εξαρτώνται και από την παράμετρο που ορίζει τον συντελεστή κλίμακας. Συνήθως ως περιοχή ενδιαφέροντος ορίζεται ολόκληρη η υπό εξέταση εικόνα, ωστόσο σε περιπτώσεις όπως ο εντοπισμός των ματιών στην εικόνα μάτια-φρύδια, περικόπτονται κατάλληλα οι διαστάσεις της περιοχής ενδιαφέροντος για να αποτραπεί ανίχνευση που δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις μας.

2η παράμετρος (im_scale). Μια συγκεκριμένη τιμή, που θα χρησιμοποιηθεί ως συντελεστής κλίμακας (σμίκρυνσης) της υπό εξέταση εικόνας, κοινός και για τις δύο διαστάσεις. Με τις τιμές αυτής της παραμέτρου

διαιρούμε τις διαστάσεις της υπό εξέταση εικόνας για τον επανακαθορισμό του μεγέθους της (resizing). Οι κατάλληλες τιμές που θα λάβει για τη βέλτιστη ανίχνευση του προτύπου με σημαντική βελτίωση του χρόνου ανταπόκρισης ορίζονται εμπειρικά ως 7 (αναγνώριση προσώπου), 8 (αναγνώριση ματιών-φρυδιών), 8 (αναγνώριση ματιών), 2 (αριστερό μάτι), 2 (δεξί μάτι), κατά σειρά κλιμακωτής ανίχνευσης. Οι τιμές αυτές προέκυψαν λόγω των διαστάσεων των εικόνων από τις ρυθμίσεις του συγκεκριμένου μοντέλου κάμερας που χρησιμοποιήθηκε κατά τη συνεδρία μελέτης προπαλμικής αναστολής και μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα σε περίπτωση διαφορετικής διάταξης.

3η παράμετρος (cont_size). Ένας βοηθητικός πίνακας δύο τιμών που αντιστοιχεί στις διαστάσεις της αρχικής υπό εξέταση εικόνας και χρησιμεύει στον υπολογισμό ενδιάμεσων τιμών.

4η παράμετρος (exp_ratio). Ο αναμενόμενος λόγος μεγέθους της εικόνας προς το πρότυπο στην οριζόντια διάσταση. Ορίζεται αφού προηγηθεί ο επανακαθορισμός των διαστάσεων της εξεταζόμενης εικόνας.

5η παράμετρος (h_size). Ο πίνακας που αντιστοιχεί σε ένα μονοδιάστατο βαθυπερατό Gaussian φίλτρο, το οποίο θα εφαρμοστεί πριν την έναρξη της συνέλιξης, τόσο στην εξεταζόμενη εικόνα, όσο και στην εικόνα-πρότυπο.

6η παράμετρος (sigma). Η *συνήθης απόκλιση (standard deviation)* του παραπάνω Gaussian φίλτρου.

7η παράμετρος (method). Δίνεται η δυνατότητα επιλογής εκτέλεσης της συνέλιξης με κριτήριο φωτεινότητας είτε μόνο στα εικονοστοιχεία όπου αυτό είναι δυνατόν (παράμετρος ίση με 1) είτε σε όλα τα εικονοστοιχεία με χρήση της μεθόδου αντιγραφής των συνοριακών τιμών (παράμετρος ίση με 2).

8η παράμετρος (perc). Πρόκειται για μια τιμή, που αποτελεί κριτήριο ορισμού των τιμών των συντελεστών κλίμακας, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν για τις αναγκαίες συνέλιξεις στην εξεταζόμενη εικόνα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μια σειρά από συνέλιξεις για διαφορετικές διαστάσεις της υπό εξέταση εικόνας για την εύρεση της βέλτιστης ανίχνευσης, κατά την τεχνική των κλιμακωτών συνέλιξεων. Η παράμετρος (perc) καθορίζει τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του συντελεστή κλίμακας, που θα χρησιμοποιήσουμε σε αυτή τη διαδικασία και αξιοποιείται στη μέθοδο εύρεσης ενός ανώτατου και ενός κατώτατου ορίου στους συντελεστές κλίμακας. Εμπειρικά, καταλήξαμε ότι τα πλέον ικανοποιητικά

αποτελέσματα προκύπτουν για τις παραμετρικές τιμές 15 (αναγνώριση προσώπου), 25 (αναγνώριση ματιών-φρυδιών), 15 (αναγνώριση ματιών), 35 (αριστερό μάτι), 35 (δεξί μάτι).

9η παράμετρος (conv_cycles). Ορίζει το πλήθος των συνελίξεων που θα πραγματοποιηθούν κατά τη διαδικασία της εφαρμογής κλιμακωτών συνελίξεων, το οποίο είναι ίσο με το πλήθος των συντελεστών κλίμακας που θα χρησιμοποιηθούν. Κατόπιν δοκιμών και λαμβάνοντας υπόψη την εξισορρόπηση της απαραίτητης αξιοπιστίας με την ανάγκη αποτροπής υπερβολικής αύξησης της χρονικής πολυπλοκότητας, καταλήξαμε στην παραμετρική τιμή 10 σε κάθε στάδιο της κλιμακωτής ανίχνευσης.

4.2.4 Εκτέλεση της υπορουτίνας ανίχνευσης χαρακτηριστικών

Αρχικά, η εξεταζόμενη εικόνα θα σμικρυνθεί κατάλληλα με βάση τον συντελεστή που έχουμε ορίσει στην είσοδο (im_scale). Έπειτα, υπολογίζεται η αναμενόμενη οριζόντια διάσταση του ζητούμενου πίνακα εξόδου, δηλαδή το πλήθος των εικονοστοιχείων μιας γραμμής του προς ανίχνευση χαρακτηριστικού (την οποία ονομάζουμε exp_size), ως ο λόγος των τιμών δύο δεδομένων παραμέτρων εισόδου. Πρόκειται για τον λόγο μίας από την τιμές του πίνακα διαστάσεων αρχικής εικόνας (cont_size), εκείνης που αντιστοιχεί στην οριζόντιο άξονα, προς την τιμή του αναμενόμενου λόγου μεγέθους (exp_ratio).

Έχοντας ως δεδομένη την τιμή της αναμενόμενης οριζόντιας διάστασης του προς ανίχνευση χαρακτηριστικού (exp_size), μπορούμε να υπολογίσουμε έναν μονοδιάστατο πίνακα (τον ονομάζουμε temp_sizes), αποτελούμενο από όλες τις τιμές των συντελεστών κλίμακας που θα χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία κλιμακωτής συνέλιξης. Ο πίνακας θα είναι ταξινομημένος σε αύξουσα κλίμακα, περιέχοντας τιμές σταθερού βήματος. Για να τον υπολογίσουμε, αρκεί να ορίσουμε την ανώτερη και την κατώτερη τιμή, καθώς και το πλήθος των ενδιάμεσων τιμών. Οι δύο οριακές τιμές υπολογίζονται βάσει της τιμής που μόλις υπολογίσαμε (exp_size) και της δεδομένης τιμής (perc) που ορίσαμε ως κριτήριο για τον υπολογισμό των συντελεστών στην είσοδο. Το πλήθος όλων των τιμών του πίνακα είναι ίσο με το πλήθος των συνελίξεων (conv_cycles), όπως επίσης καθορίστηκε στα δεδομένα εισόδου. Έτσι, ορίζουμε την τιμή $(1 - perc) * (expsize)$ ως κατώτατο συντελεστή στον πίνακα και την

τιμή $(1 + perc) * (expsize)$ αντίστοιχα ως ανώτατο συντελεστή. Το πλήθος των ενδιάμεσων τιμών θα είναι προφανώς ίσο με $(conv_cycles - 2)$.

Ακολούθως, εφαρμόζουμε στην υπό ανάλυση εικόνα, ένα μονοδιάστατο Gaussian φίλτρο με τα χαρακτηριστικά που ορίστηκαν στην είσοδο (πίνακας h_size με τυπική απόκλιση σ). Χρησιμοποιούμε κι εδώ τη μέθοδο `border replication` για τις συνοριακές τιμές της εικόνας.

Το μονοδιάστατο Gaussian φίλτρο είναι ένα βαθυπερατό φίλτρο του οποίου η κρουστική απόκριση είναι μια Gaussian συνάρτηση της γενικής μορφής:

$$g(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

όπου σ είναι η τυπική απόκλιση της Gaussian κατανομής. Ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά της Gaussian συνάρτησης είναι ότι: α) διαθέτει έναν μόνο «λόβο» (στην κρουστική απόκριση), δηλαδή οι συντελεστές του αντίστοιχου φίλτρου ελαττώνονται μονότονα με την απόσταση, β) ως συνάρτηση είναι ανεξάρτητη της διεύθυνσης, γ) δεδομένου ότι ο μετασχηματισμός Fourier μιας Gaussian συνάρτησης είναι επίσης Gaussian, αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ανεπιθύμητες υψηλές συχνότητες να μην ενισχύονται, δ) είναι διαχωρίσιμη σε οριζόντια και κάθετη διαδικασία, ενώ ε) μέσω της παραμέτρου σ δίνεται η δυνατότητα ελέγχου του βαθμού φιλτραρίσματος.

Για την υλοποίηση των κλιμακωτών συνελίξεων, ακολουθείται μια συγκεκριμένη τυποποιημένη διαδικασία για κάθε μία από τις τιμές του πίνακα συντελεστών κλίμακας (`temp_sizes`), όπως υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα. Η εικόνα-πρότυπο σμικρύνεται (ή μεγεθύνεται) βάσει της τιμής του εφαρμοζόμενου συντελεστή κλίμακας, πολλαπλασιάζοντας δηλαδή τις δύο διαστάσεις του προτύπου με τον συγκεκριμένο συντελεστή. Μετά τον μετασχηματισμό κλίμακας του προτύπου, δεδομένου ότι θα χρησιμοποιηθεί ως φίλτρο συνέλιξης που θα διατρέξει την εξεταζόμενη εικόνα, διασφαλίζουμε ότι ο αριθμός των γραμμών και των στηλών της θα είναι περιττός, εφαρμόζοντας, εφόσον είναι αναγκαίο, αποκοπή μίας οριακής γραμμής ή στήλης. Ακολούθως εφαρμόζεται και στην εικόνα-πρότυπο το ίδιο μονοδιάστατο Gaussian φίλτρο, όπως προηγουμένως και στην υπό εξέταση εικόνα.

Τώρα πλέον μπορούμε να εκτελέσουμε την πράξη συνέλιξης ανάμεσα στους δύο πίνακες, εφαρμόζοντας, αν κριθεί αναγκαίο, τη μέθοδο επανάληψης



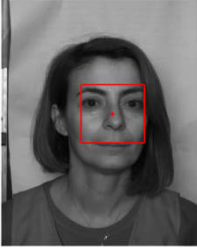


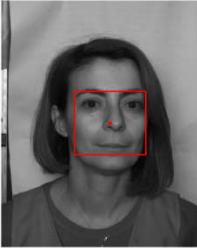


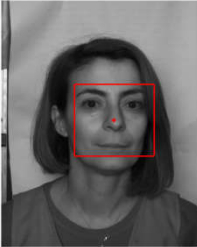


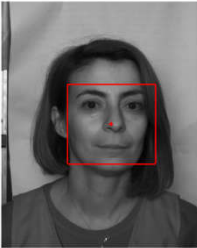


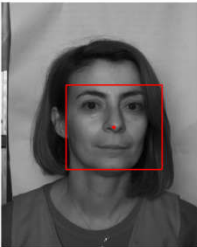
συνοριακών τιμών (border replication), την οποία ενεργοποιούμε στα δεδομένα εισόδου, θέτοντας στην αντίστοιχη παράμετρο (method) την κατάλληλη τιμή (2). Όπως γνωρίζουμε, στην εφαρμογή της τεχνικής συνέλιξης για το ταίριασμα προτύπων, λαμβάνουμε έναν νέο πίνακα (έστω C) στις διαστάσεις της εξεταζόμενης εικόνας, όπου τα εικονοστοιχεία με τις ακρότατες τιμές αποτελούν και τις βέλτιστες θέσεις ανίχνευσης του ζητούμενου χαρακτηριστικού στην εικόνα. Στη μέθοδο υλοποίησης που ακολουθήσαμε, τα εικονοστοιχεία αυτά εμφανίζουν ελάχιστες τιμές. Καθώς η διαδικασία της συνέλιξης δεν είναι μοναδική για κάθε στάδιο ανίχνευσης, αντίθετα υλοποιούνται τόσες συνελίξεις όσοι και οι συντελεστές κλίμακας, τα αποτελέσματα των οποίων πρέπει να τεθούν σε σύγκριση για τον εντοπισμό της βέλτιστης ανίχνευσης.

Ορίζουμε έναν πίνακα (C_min), ο οποίος διαθέτει τόσες γραμμές όσο και το πλήθος των συνελίξεων (conv_cycles), όσων επομένως και των στοιχείων του πίνακα συντελεστών κλίμακας. Ο C_min διαθέτει δύο στήλες, όπου σε κάθε γραμμή αποθηκεύονται οι συντεταγμένες του εικονοστοιχείου του προκύπτοντος πίνακα συνέλιξης (C) που εμφανίζει την ελάχιστη τιμή.

Κατασκευάζουμε επίσης έναν ακόμη βοηθητικό πίνακα (C_count), ο οποίος επίσης διαθέτει αριθμό γραμμών ίσο με το πλήθος των συνελίξεων, όπως το έχουμε ορίσει στα δεδομένα. Η πρώτη στήλη του αποτελείται από το πλήθος το στοιχείων του προκύπτοντος πίνακα συνέλιξης C που είναι μικρότερα από την τιμή 0.1, ενώ η δεύτερη και η τρίτη στήλη του παρουσιάζουν τις διαστάσεις της εικόνας-προτύπου που χρησιμοποιήσαμε μετά τους κατάλληλους μετασχηματισμούς, για κάθε τιμή του συντελεστή κλίμακας.

Το κριτήριο εντοπισμού της βέλτιστης σύμπτωσης προτύπων εξειδικεύεται στην εξέταση του βοηθητικού πίνακα C_count. Εντοπίζουμε ποια γραμμή του πίνακα C_count διαθέτει το ελάχιστο στοιχείο στην πρώτη στήλη της, όπου σε περίπτωση που η γραμμή αυτή δεν είναι μοναδική, επιλέγουμε μία από τις υποψήφιες γραμμές (π.χ. την πρώτη). Κατόπιν, αναζητούμε τις συντεταγμένες της θέσης του εικονοστοιχείου, εξετάζοντας την αντίστοιχη γραμμή του πίνακα C_min. Δεδομένου ότι οι συντελεστές κλίμακας βρίσκονται πάντοτε ταξινομημένοι σε αύξουσα σειρά και καθώς η αντιστοίχιση των θέσεων των γραμμών στους πίνακες βασίζεται στην ίδια ταξινόμηση, η αντιστοίχιση αυτή καθίσταται πολύ απλή. Έπειτα, αντιστρέφουμε τον

μετασχηματισμό κλίμακας που εκτελέσαμε με βάση τον συγκεκριμένο συντελεστή κλίμακας της βέλτιστης συνέλιξης, έτσι ώστε να εντοπιστούν οι αντίστοιχες συντεταγμένες στην αρχική υπό εξέταση εικόνα.

Πρότυπο (T_f)	Συνέλιξη (I_c)	Θέση εντοπισμού	Δείκτης ταύτισης
 Μέγεθος: 47px			21
 Μέγεθος: 53px			33
 Μέγεθος: 59px			18
 Μέγεθος: 65px			55
 Μέγεθος: 71px			241

Σχήμα 4.10: Εντοπισμός προσώπου με την τεχνική της κλιμακωτής συνέλιξης.

Στην τελευταία στήλη υπολογίζεται ο δείκτης ταύτισης,

για την εύρεση της βέλτιστης συνέλιξης.

Εκτός από τις συντεταγμένες του κεντρικού στοιχείου, η υπορουτίνα της ανίχνευσης χαρακτηριστικών πρέπει να επιστρέψει και τις διαστάσεις πλάτους και ύψους του ανιχνευθέντος χαρακτηριστικού. Αυτές προκύπτουν από τη δεύτερη και τρίτη στήλη της αντίστοιχης γραμμής του πίνακα C_count, πάλι μετά από τον αντίστροφο μετασχηματισμό κλιμάκωσης με βάση τον συντελεστή της βέλτιστης συνέλιξης.

Ο κώδικας MATLAB της βασικής υπορουτίνας ανίχνευσης βρίσκεται στο ειδικό Παράρτημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Αποτελέσματα αντιπαραβολής μεθόδων

5.1.1 Έλεγχος χρονικής σύμπτωσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (κεφάλαιο 2.3), για τη χρονική σύμπτωση των εντοπισμένων συσπάσεων χρησιμοποιείται ως πρώτο κριτήριο σύγκλισης η απόσταση των μετρήσεων προπαλμού και παλμού, όπως καταγράφηκαν ξεχωριστά στις δύο μεθόδους:

$$d_{EC_1} = \sqrt{(t_{1,EMG} - t_{1,CAM})^2 + (t_{2,EMG} - t_{2,CAM})^2},$$

όπου $t_{1,EMG}$ είναι η χρονική στιγμή καταγραφής του προπαλμού στο ΗΜΓ, $t_{1,CAM}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του προπαλμού στην οπτική μέθοδο, $t_{2,EMG}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του κυρίως παλμού στο ΗΜΓ και $t_{2,CAM}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του κυρίως παλμού στην οπτική μέθοδο.

Το ανώτατο επιτρεπόμενο σφάλμα ορίστηκε ίσο με $d_{EC_1} = 0,05$.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο μεθόδων για έναν από τους εξεταζόμενους στις εργαστηριακές μετρήσεις στο Ε.Π.Ι.Ψ.Υ., αναλυτικά για κάθε ένα από τα 51 ηχητικά ζεύγη προπαλμού-παλμού, στο αριστερό μάτι:

Μετρήσεις εξεταζόμενου ατόμου (#3) Αριστερό μάτι (χρονική σύμπτωση)					
A/A	$t_{1,CAM}$ (sec)	$t_{2,CAM}$ (sec)	$t_{1,EMG}$ (sec)	$t_{2,EMG}$ (sec)	$d_{EC1,left}$
1	0.094	1.091	0.050	1.137	0,064
2	0.104	0.322	0.084	0.404	0,084
3	0.094	1.528	0.081	1.511	0,021
4	0.104	1.787	0.098	1.768	0,020
5	0.104	NaN	0.083	0.470	NaN
6	0.094	1.226	0.083	1.120	0,107
7	0.083	1.642	0.059	1.627	0,028
8	0.083	1.050	0.057	0.904	0,148
9	0.094	0.145	0.072	NaN	NaN

10	0.104	1.060	0.083	1.038	0,030
11	0.094	0.094	0.086	0.086	0,011
12	0.083	NaN	0.065	0.514	NaN
13	0.104	0.613	0.078	0.592	0,033
14	0.094	1.133	0.082	1.107	0,029
15	0.094	0.530	0.063	0.503	0,041
16	0.094	NaN	0.092	NaN	NaN
17	0.094	0.727	0.069	0.797	0,074
18	0.094	0.094	0.078	NaN	NaN
19	0.073	0.384	0.055	0.447	0,066
20	0.094	0.883	0.061	0.971	0,094
21	0.094	1.039	0.070	0.978	0,066
22	0.114	1.392	0.040	1.353	0,084
23	0.094	1.528	0.059	1.499	0,045
24	0.094	1.060	0.084	1.062	0,010
25	0.094	0.572	0.055	0.557	0,042
26	0.094	0.094	0.064	NaN	NaN
27	0.094	0.582	0.065	0.552	0,042
28	0.073	0.634	0.060	0.606	0,031
29	0.094	2.141	0.091	2.003	0,138
30	0.094	0.894	0.069	0.867	0,037
31	0.083	2.130	NaN	2.123	NaN
32	0.083	0.281	0.071	0.247	0,036
33	0.094	1.777	0.079	1.748	0,033
34	0.104	0.260	0.088	0.237	0,028
35	0.094	2.026	0.073	2.020	0,022
36	0.094	0.353	0.050	0.439	0,097
37	0.083	NaN	0.062	0.531	NaN
38	0.094	0.811	0.077	0.800	0,020
39	0.114	0.644	0.061	0.633	0,054
40	0.094	0.270	0.086	0.255	0,017
41	0.094	0.239	0.083	0.258	0,022
42	0.094	0.249	0.074	0.254	0,021
43	0.094	0.094	0.065	0.065	0,041
44	0.094	0.291	0.078	0.293	0,016
45	0.062	0.062	0.046	0.046	0,023
46	0.083	0.540	0.057	0.526	0,030
47	0.166	0.946	0.152	0.909	0,040
48	0.083	0.686	0.072	0.646	0,041
49	0.083	0.634	0.070	NaN	NaN
50	0.010	0.353	0.045	0.253	0,106
51	0.062	1.309	0.039	1.344	0,042

Σχήμα 5.1: Πίνακας αποτελεσμάτων για τον έλεγχο χρονικής σύμπτωσης μεταξύ των δύο μεθόδων (ΗΜΓ και οπτικής) στο αριστερό μάτι. Με NaN σημειώνονται οι μετρήσεις, όπου δεν ανιχνεύτηκε αντίδραση αντανακλαστικού αιφνιδιασμού.

Έλεγχος μετρήσεων (χρονική σύμπτωση, αριστερό μάτι) [Πίνακας 5.1]:

Πλήθος μετρήσεων:	51
Εντός ορίων:	29
Εκτός ορίων:	13
Αστοχία ανίχνευσης:	9
Ποσοστό επιτυχίας:	56,86%

Ακολουθεί ο πίνακας αποτελεσμάτων για τον έλεγχο χρονικής σύμπτωσης του ίδιου εξεταζόμενου στο δεξί μάτι:

Μετρήσεις εξεταζόμενου ατόμου (#3)					
Δεξί μάτι (χρονική σύμπτωση)					
A/A	t_{1,CAM} (sec)	t_{2,CAM} (sec)	t_{1,EMG} (sec)	t_{2,EMG} (sec)	d_{EC1,right}
1	0.094	1.133	0.019	1.133	0,075
2	0.104	0.353	0.084	NaN	NaN
3	0.094	1.528	0.073	1.509	0,028
4	0.104	1.787	0.106	1.788	0,002
5	0.104	0.478	0.082	0.516	0,044
6	0.083	1.205	0.060	1.184	0,031
7	0.094	1.642	0.062	1.625	0,036
8	0.083	1.039	0.075	0.977	0,063
9	0.083	NaN	0.080	0.258	NaN
10	0.094	1.060	0.085	1.036	0,026
11	0.094	0.094	0.078	0.078	0,023
12	0.083	NaN	0.067	NaN	NaN
13	0.104	0.603	0.080	0.605	0,024
14	0.094	1.122	0.091	1.117	0,006
15	0.094	0.530	0.069	0.508	0,033
16	0.094	0.540	0.089	NaN	0,000
17	0.094	0.738	0.076	0.795	0,060
18	0.094	0.094	0.076	0.216	0,123
19	0.094	NaN	0.053	0.422	NaN
20	0.094	0.883	0.076	0.979	0,098
21	0.094	1.029	0.084	1.031	0,010
22	0.104	1.392	0.088	1.356	0,039
23	0.094	1.517	0.088	1.511	0,008
24	0.094	1.060	0.090	1.001	0,059
25	0.094	0.572	0.082	0.549	0,026
26	0.094	0.094	0.085	0.211	0,117
27	0.094	0.582	0.059	0.572	0,036
28	0.062	0.624	0.052	0.620	0,011
29	0.094	2.141	0.064	2.131	0,032

30	0.094	0.904	0.076	0.888	0,024
31	0.083	2.120	NaN	2.003	NaN
32	0.083	0.281	0.088	0.234	0,047
33	0.094	1.777	0.080	1.756	0,025
34	0.094	0.249	0.091	0.318	0,069
35	0.083	2.026	0.080	2.020	0,007
36	0.094	0.488	0.070	0.451	0,044
37	0.083	0.530	0.078	0.472	0,058
38	0.094	0.811	0.070	NaN	NaN
39	0.094	0.634	0.064	0.622	0,032
40	0.094	0.270	0.066	0.234	0,046
41	0.104	0.239	0.086	0.328	0,091
42	0.094	0.249	0.083	0.220	0,031
43	0.083	0.083	0.064	0.064	0,027
44	0.094	0.291	0.077	0.297	0,018
45	0.062	0.062	0.068	0.068	0,008
46	0.083	0.540	0.072	0.526	0,018
47	0.166	0.956	0.140	0.917	0,047
48	0.083	0.655	0.085	0.557	0,098
49	0.083	0.634	0.061	NaN	NaN
50	NaN	0.291	0.049	0.257	NaN
51	0.094	1.320	0.086	1.318	0,008

Σχήμα 5.2: Πίνακας αποτελεσμάτων για τον έλεγχο χρονικής σύμπτωσης μεταξύ των δύο μεθόδων (ΗΜΓ και οπτικής) στο δεξί μάτι. Με NaN σημειώνονται οι μετρήσεις, όπου δεν ανιχνεύτηκε αντίδραση αντανακλαστικού αιφνιδιασμού.

Έλεγχος μετρήσεων (χρονική σύμπτωση, δεξί μάτι) [Πίνακας 5.2]:

Πλήθος μετρήσεων:	51
Εντός ορίων:	36
Εκτός ορίων:	7
Αστοχία ανίχνευσης:	8
Ποσοστό επιτυχίας:	70,59%

Συγκρίνοντας ένα προς ένα τα ευρήματα των μετρήσεων και στα δύο μάτια, μπορούμε να καταλήξουμε σε συμπεράσματα για το βαθμό ευστοχίας της μεθόδου με περισσότερη αυστηρότητα, ορίζοντας ότι αποτελέσματα που καθίστανται ανεπιτυχή είτε στον έναν (αριστερό μάτι) είτε στον άλλο (δεξί μάτι) έλεγχο, θεωρούνται εξολοκλήρου άστοχα.

Έλεγχος μετρήσεων (χρονική σύμπτωση, αριστερό και δεξί μάτι):

Πλήθος μετρήσεων:	51
Εντός ορίων:	23
Εκτός ορίων:	15
Αστοχία ανίχνευσης:	13
Ποσοστό επιτυχίας:	45,1%

5.1.2 Έλεγχος σύμπτωσης λόγου μεγεθών και χρόνου

Επιπλέον, η σύγκριση χρονικής απόστασης αντιδράσεων, καθώς και λόγου μεγεθών προπαλμού-παλμού, σύμφωνα με την καταγραφή τους από τις δύο διαφορετικές μεθόδους ορίζεται ως:

$$d_{EC_2} = \sqrt{\left(t_{1,EMG} - t_{1,CAM}\right)^2 + \left(t_{2,EMG} - t_{2,CAM}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_{1,2,EMG} - \lambda_{1,2,CAM}}{mean(\lambda_{1,2,EMG}, \lambda_{1,2,CAM})}\right)^2}$$

όπου $t_{1,EMG}$ είναι η χρονική στιγμή καταγραφής του προπαλμού στο ΗΜΓ, $t_{1,CAM}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του προπαλμού στην οπτική μέθοδο, $t_{2,EMG}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του κυρίως παλμού στο ΗΜΓ και $t_{2,CAM}$ η χρονική στιγμή καταγραφής του κυρίως παλμού στην οπτική μέθοδο, $\lambda_{1,2,EMG}$ ο λόγος μεγεθών προπαλμού-παλμού στο ΗΜΓ, $\lambda_{1,2,CAM}$ ο αντίστοιχος λόγος μεγεθών προπαλμού-παλμού στην οπτική μέθοδο και $mean(\lambda_{1,2,EMG}, \lambda_{1,2,CAM})$ ο μέσος όρος των δύο λόγων.

Το ανώτατο επιτρεπόμενο σφάλμα ορίστηκε ίσο με $d_{EC_2} = 0,1$.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο μεθόδων με βάση το κριτήριο σύμπτωσης λόγου μεγεθών και χρόνου, στο αριστερό μάτι:

Εξεταζόμενος #3 – Αριστερό μάτι									
A/A	ΗΜΓ				Κάμερα				$d_{EC2,left}$
	$t_{1,CAM}$ (sec)	$t_{2,CAM}$ (sec)	$dy_{1,CAM}$	$dy_{2,CAM}$	$t_{1,EMG}$ (sec)	$t_{2,EMG}$ (sec)	$dy_{1,EMG}$	$dy_{2,EMG}$	
1	0.094	1.091	0.138	0.019	0.050	1.137	0.079	0.973	1.958
2	0.104	0.322	0.119	0.014	0.084	0.404	0.242	0.033	0.148
3	0.094	1.528	0.060	0.055	0.081	1.511	0.140	0.148	0.160

4	0.104	1.787	0.088	0.054	0.098	1.768	0.289	0.154	0.140
5	0.104	NaN	0.066	NaN	0.083	0.470	0.211	0.021	NaN
6	0.094	1.226	0.060	0.030	0.083	1.120	0.135	0.050	0.294
7	0.083	1.642	0.016	0.069	0.059	1.627	0.052	0.306	0.350
8	0.083	1.050	0.040	0.041	0.057	0.904	0.062	0.150	0.810
9	0.094	0.145	0.041	0.007	0.072	NaN	0.099	NaN	NaN
10	0.104	1.060	0.052	0.024	0.083	1.038	0.144	0.064	0.050
11	0.094	0.094	0.067	0.067	0.086	0.086	0.127	0.127	0.011
12	0.083	NaN	0.020	NaN	0.065	0.514	0.101	0.011	NaN
13	0.104	0.613	0.064	0.041	0.078	0.592	0.261	0.080	0.698
14	0.094	1.133	0.069	0.037	0.082	1.107	0.163	0.051	0.538
15	0.094	0.530	0.038	0.020	0.063	0.503	0.089	0.053	0.136
16	0.094	NaN	0.053	NaN	0.092	NaN	0.129	NaN	NaN
17	0.094	0.727	0.066	0.010	0.069	0.797	0.087	0.049	1.143
18	0.094	0.094	0.060	0.060	0.078	NaN	0.213	NaN	NaN
19	0.073	0.384	0.009	0.424	0.055	0.447	0.042	0.133	1.740
20	0.094	0.883	0.028	0.010	0.061	0.971	0.209	0.075	0.094
21	0.094	1.039	0.030	0.012	0.070	0.978	0.073	0.037	0.214
22	0.114	1.392	0.009	0.015	0.040	1.353	0.071	0.108	0.117
23	0.094	1.528	0.022	0.042	0.059	1.499	0.022	0.090	0.741
24	0.094	1.060	0.053	0.005	0.084	1.062	0.184	0.040	0.750
25	0.094	0.572	0.028	0.026	0.055	0.557	0.077	0.155	0.727
26	0.094	0.094	0.041	0.041	0.064	NaN	0.080	NaN	NaN
27	0.094	0.582	0.012	0.020	0.065	0.552	0.118	0.072	0.931
28	0.073	0.634	0.016	0.016	0.060	0.606	0.073	0.082	0.137
29	0.094	2.141	0.045	0.075	0.091	2.003	0.002	0.071	1.852
30	0.094	0.894	0.058	0.046	0.069	0.867	0.192	0.176	0.152
31	0.083	2.130	0.024	0.019	NaN	2.123	NaN	0.045	NaN
32	0.083	0.281	0.007	0.331	0.071	0.247	0.094	0.455	1.639
33	0.094	1.777	0.048	0.029	0.079	1.748	0.207	0.102	0.184
34	0.104	0.260	0.068	0.888	0.088	0.237	0.090	0.391	1.004
35	0.094	2.026	0.045	0.039	0.073	2.020	0.260	0.213	0.057
36	0.094	0.353	0.024	0.016	0.050	0.439	0.064	0.066	0.428
37	0.083	NaN	0.043	NaN	0.062	0.531	0.133	0.019	NaN
38	0.094	0.811	0.013	0.009	0.077	0.800	0.059	0.052	0.298
39	0.114	0.644	0.042	0.009	0.061	0.633	0.133	0.075	0.932
40	0.094	0.270	0.027	0.619	0.086	0.255	0.088	0.467	1.243
41	0.094	0.239	0.094	0.895	0.083	0.258	0.246	1.164	0.669
42	0.094	0.249	0.036	0.665	0.074	0.254	0.121	0.465	1.318
43	0.094	0.094	0.041	0.041	0.065	0.065	0.107	0.107	0.040
44	0.094	0.291	0.074	0.507	0.078	0.293	0.166	0.421	0.924
45	0.062	0.062	0.334	0.334	0.046	0.046	0.559	0.559	0.023
46	0.083	0.540	0.038	0.012	0.057	0.526	0.098	0.069	0.727
47	0.166	0.946	0.784	0.017	0.152	0.909	0.958	0.024	0.153
48	0.083	0.686	0.007	0.010	0.072	0.646	0.154	0.057	1.206
49	0.083	0.634	0.010	0.413	0.070	NaN	0.064	NaN	NaN

50	0.010	0.353	0.444	0.003	0.045	0.253	0.360	0.009	1.198
51	0.062	1.309	0.007	0.005	0.039	1.344	0.060	0.062	0.291

Σχήμα 5.3: Πίνακας αποτελεσμάτων για τον έλεγχο σύμπτωσης λόγου μεγεθών και χρόνου μεταξύ των δύο μεθόδων (ΗΜΓ και οπτικής) στο αριστερό μάτι.

Με NaN σημειώνονται οι μετρήσεις, όπου δεν ανιχνεύτηκε αντίδραση αντανακλαστικού αιφνιδιασμού.

Έλεγχος μετρήσεων (σύμπτωση λόγου μεγεθών και χρόνου, αριστερό μάτι)

[Πίνακας 5.3]:

Πλήθος μετρήσεων:	51
Εντός ορίων:	6
Εκτός ορίων:	36
Αστοχία ανίχνευσης:	9
Ποσοστό επιτυχίας:	11,76%

Ακολουθεί ο πίνακας αποτελεσμάτων για τον έλεγχο σύμπτωσης χρόνου και λόγου μεγεθών του ίδιου εξεταζόμενου στο δεξί μάτι:

Εξεταζόμενος #3 – Δεξί μάτι									
A/A	EMG				Κάμερα				$d_{EC2, right}$
	$t_{1, CAM}$ (sec)	$t_{2, CAM}$ (sec)	$dy_{1, CAM}$	$dy_{2, CAM}$	$t_{1, EMG}$ (sec)	$t_{2, EMG}$ (sec)	$dy_{1, EMG}$	$dy_{2, EMG}$	
1	0.094	1.133	0.133	0.038	0.019	1.133	0.113	0.429	1.724
2	0.104	0.353	0.153	0.009	0.084	NaN	0.392	NaN	NaN
3	0.094	1.528	0.047	0.055	0.073	1.509	0.302	0.230	0.406
4	0.104	1.787	0.097	0.075	0.106	1.788	0.282	0.222	0.019
5	0.104	0.478	0.082	0.074	0.082	0.516	0.279	0.061	1.226
6	0.083	1.205	0.078	0.022	0.060	1.184	0.128	0.043	0.160
7	0.094	1.642	0.022	0.088	0.062	1.625	0.128	0.325	0.458
8	0.083	1.039	0.036	0.034	0.075	0.977	0.106	0.143	0.350
9	0.083	NaN	0.050	NaN	0.080	0.258	0.162	0.643	NaN
10	0.094	1.060	0.082	0.046	0.085	1.036	0.270	0.158	0.055
11	0.094	0.094	0.071	0.071	0.078	0.078	0.163	0.163	0.022
12	0.083	NaN	0.029	NaN	0.067	NaN	0.132	NaN	NaN
13	0.104	0.603	0.093	0.055	0.080	0.605	0.309	0.078	0.802
14	0.094	1.122	0.081	0.044	0.091	1.117	0.342	0.074	0.851
15	0.094	0.530	0.067	0.027	0.069	0.508	0.196	0.129	0.502
16	0.094	0.540	0.063	0.045	0.089	NaN	0.206	NaN	NaN
17	0.094	0.738	0.074	0.013	0.076	0.795	0.196	0.106	1.049
18	0.094	0.094	0.057	0.057	0.076	0.216	0.201	0.398	0.667
19	0.094	NaN	0.006	NaN	0.053	0.422	0.061	0.002	NaN
20	0.094	0.883	0.050	0.011	0.076	0.979	0.121	0.026	0.098

21	0.094	1.029	0.034	0.013	0.084	1.031	0.122	0.123	0.907
22	0.104	1.392	0.013	0.021	0.088	1.356	0.051	0.102	0.263
23	0.094	1.517	0.043	0.051	0.088	1.511	0.180	0.046	1.278
24	0.094	1.060	0.061	0.009	0.090	1.001	0.251	0.084	0.748
25	0.094	0.572	0.033	0.037	0.082	0.549	0.181	0.169	0.201
26	0.094	0.094	0.046	0.046	0.085	0.211	0.112	0.505	1.279
27	0.094	0.582	0.010	0.025	0.059	0.572	0.134	0.086	1.164
28	0.062	0.624	0.020	0.020	0.052	0.620	0.095	0.153	0.499
29	0.094	2.141	0.052	0.091	0.064	2.131	0.029	0.026	0.644
30	0.094	0.904	0.069	0.054	0.076	0.888	0.293	0.190	0.190
31	0.083	2.120	0.030	0.022	NaN	2.003	NaN	0.027	NaN
32	0.083	0.281	0.015	0.472	0.088	0.234	0.065	0.660	1.006
33	0.094	1.777	0.059	0.042	0.080	1.756	0.254	0.171	0.057
34	0.094	0.249	0.069	1.020	0.091	0.318	0.155	0.110	1.818
35	0.083	2.026	0.058	0.058	0.080	2.020	0.241	0.177	0.295
36	0.094	0.488	0.025	0.022	0.070	0.451	0.117	0.080	0.289
37	0.083	0.530	0.043	0.031	0.078	0.472	0.136	0.025	1.184
38	0.094	0.811	0.028	0.007	0.070	NaN	0.111	NaN	NaN
39	0.094	0.634	0.038	0.033	0.064	0.622	0.170	0.051	0.983
40	0.094	0.270	0.027	0.638	0.066	0.234	0.115	0.503	1.366
41	0.104	0.239	0.100	1.260	0.086	0.328	0.253	0.521	1.441
42	0.094	0.249	0.032	0.939	0.083	0.220	0.205	0.622	1.625
43	0.083	0.083	0.046	0.046	0.064	0.064	0.153	0.153	0.027
44	0.094	0.291	0.090	0.668	0.077	0.297	0.186	0.779	0.555
45	0.062	0.062	0.358	0.358	0.068	0.068	0.657	0.657	0.008
46	0.083	0.540	0.029	0.015	0.072	0.526	0.131	0.069	0.042
47	0.166	0.956	1.067	0.026	0.140	0.917	0.637	0.060	1.189
48	0.083	0.655	0.010	0.005	0.085	0.557	0.091	0.049	0.168
49	0.083	0.634	0.012	0.510	0.061	NaN	0.125	NaN	NaN
50	NaN	0.291	NaN	0.006	0.049	0.257	0.549	0.008	NaN
51	0.094	1.320	0.011	0.004	0.086	1.318	0.037	0.030	0.731

Σχήμα 5.4: Πίνακας αποτελεσμάτων για τον έλεγχο σύμπτωσης λόγου μεγεθών και χρόνου μεταξύ των δύο μεθόδων (ΗΜΓ και οπτικής) στο δεξί μάτι. Με NaN σημειώνονται οι μετρήσεις, όπου δεν ανιχνεύτηκε αντίδραση αντανακλαστικού αιφνιδιασμού.

Έλεγχος μετρήσεων (σύμπτωση λόγου μεγεθών και χρόνου, δεξί μάτι)

[Πίνακας 5.4]:

Πλήθος μετρήσεων:	51
Εντός ορίων:	8
Εκτός ορίων:	34
Αστοχία ανίχνευσης:	9
Ποσοστό επιτυχίας:	15,69%

Σταθμίζοντας τα αποτελέσματα αριστερού και δεξιού ματιού συνολικά, λαμβάνουμε έναν αυστηρότερο έλεγχο μετρήσεων.

Έλεγχος μετρήσεων (σύμπτωση λόγου μεγεθών και χρόνου, αριστερό και δεξιό μάτι):

Πλήθος μετρήσεων:	51
Εντός ορίων:	5
Εκτός ορίων:	33
Αστοχία ανίχνευσης:	13
Ποσοστό επιτυχίας:	9,8%

5.2 Συμπεράσματα

5.2.1 Η σύγκριση των θεωρητικών μοντέλων (οπτική μέθοδος, ΗΜΓ)

Το βασικό πλεονέκτημα της πειραματικής μεθόδου μετρήσεων της προπαλμικής αναστολής μέσω κάμερας υψηλής ταχύτητας είναι το πλεόν προφανές: η μη επεμβατικότητά της. Δεδομένου ότι πρόκειται για μια εξέταση που αφορά πληθυσμούς που ελέγχονται για εκδήλωση ψυχικών διαταραχών, είναι εύλογο να επιθυμούμε να εξελίξουμε τον εργαστηριακό έλεγχο, ώστε να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο δυσάρεστος και οχληρός ως προς το εξεταζόμενο άτομο. Αποφεύγοντας τη χρήση ηλεκτροδίων ελαχιστοποιούμε σε μεγάλο βαθμό τον σημαντικότερο παράγοντα επιβάρυνσης. Επιπλέον, η αποτροπή της ενδεχόμενης έκφρασης δυσφορίας από το άτομο που βρίσκεται στη θέση του εξεταζομένου μπορεί βάσιμα να θεωρηθεί ότι αυξάνει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, καθώς διευκολύνεται η διαδικασία ομαλής καταγραφής των μετρήσεων.

Ταυτόχρονα, ο χρόνος για την προετοιμασία και την εκτέλεση της διαδικασίας καταγραφής της προπαλμικής αναστολής στο εργαστήριο μειώνεται, καθώς απλοποιείται η διάταξη. Η ταχύτητα εξαγωγής αποτελεσμάτων, καθώς και των επακόλουθων ιατρικών συμπερασμάτων-γνωματεύσεων αυτοματοποιείται περαιτέρω. Προς το παρόν, η αποδοτικότητα της ακολουθίας αλγορίθμων για την επεξεργασία, ανάλυση και εξαγωγή αριθμητικών μετρήσεων εστιάζει περισσότερο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η χρονική απόκριση μπορεί να βελτιωθεί με τροποποιήσεις σε

σημεία του προγράμματος, όπως, για παράδειγμα, με την παράλειψη της προεργασίας κατάτμησης της εικόνας σε περιοχές προσκηνίου-υποβάθρου, εφόσον η λήψη της κάμερας μπορεί να εστιάσει με ισχυρότερη μεγέθυνση (zoom) στο πρόσωπο του εξεταζόμενου ατόμου, χωρίς να τίθεται σε ρίσκο η ακρίβεια των υπολοίπων αυτοματισμών.

Ωστόσο, παρά τα πρόδηλα πλεονεκτήματα της νέας πειραματικής μεθόδου, εμφανίζονται και ορισμένοι περιορισμοί, ακόμη και σε πιθανή πρότυπη υλοποίησή του. Το εξεταζόμενο άτομο οφείλει να διατηρεί το βλέμμα του σταθερά προσηλωμένο στον φακό της κάμερας ή σε κατάλληλο παραπλήσιο σημείο, που θα του υποδειχθεί από τον υπεύθυνο για την καλή λειτουργία του εξοπλισμού. Ενδεχόμενες ξαφνικές μετατοπίσεις της ίριδας δυσχεραίνουν ιδιαίτερα την επεξεργασία των εικόνων που λαμβάνονται από την κάμερα, ειδικά όσον αφορά το τελικό στάδιο ανάλυσης για την ανίχνευση της κίνησης. Οδηγίες για την αποφυγή αχρείαστων κινήσεων του ματιού ωστόσο δίνονται γενικά και στους εξεταζόμενους κατά τη κλασική διαδικασία των μετρήσεων μέσω ΗΜΓ, το πλαίσιο όμως λειτουργίας της νέας μεθόδου καθιστά την παραπάνω οδηγία απαραίτητο όρο για την ακρίβεια των μετρήσεων. Είναι ενδεικτικό ότι στις μετρήσεις προπαλμικής αναστολής με χρήση ΗΜΓ, έχουν καταγραφεί –λίγες αλλά υπαρκτές– περιπτώσεις όπου οι εξεταζόμενοι καλούνται να κρατούν σταθερά κλειστά τα μάτια τους, εφόσον αυτό τους διευκολύνει, γεγονός που, όπως είναι προφανές, δεν μπορεί να επιτραπεί υπό τη νέα μέθοδο.

Επιπλέον, είναι φυσιολογικό στην οπτική μέθοδο να ασκούνται διαρκώς απόπειρες για τη βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας της. Οι διαδικασίες ελέγχου για την απόσταση που καλύπτει το βλέφαρο του ματιού κατά την μερική πτώση του μετά από ηχητικό ερέθισμα και η σύγκριση μετρήσεων μεταξύ εικόνων αντανακλαστικού αιφνιδιασμού παρουσία και απουσία προπαλμού δεν μπορούν να προσεγγίσουν τον υψηλό βαθμό ακρίβειας των μετρήσεων που καταγράφονται από τα ηλεκτρόδια που βρίσκονται τοποθετημένα στον περιοφθαλμικό μυ στη διάταξη του ΗΜΓ. Εφόσον επιτευχθεί ο επιθυμητός στόχος τα αποτελέσματα των μετρήσεων μέσω οπτικής μεθόδου να συγκλίνουν με εκείνα των μετρήσεων του ΗΜΓ σε τέτοιο βαθμό ώστε το σφάλμα να κινείται στα αποδεκτά όρια, μπορούμε να ισχυριστούμε βάσιμα ότι η νέα μέθοδος ικανοποιεί τις πιο αυστηρές απαιτήσεις αξιοπιστίας. Για τη νέα οπτική μέθοδο,

μπορεί να ειπωθεί ότι η πιθανότητα μικρότερης ακρίβειας στις μετρήσεις εξισορροπείται σχετικά λόγω της αποτροπής της έκφρασης δυσφορίας από το εξεταζόμενο άτομο, που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να επηρεάσει αρνητικά –από διαφορετική αφετηρία– την αξιοπιστία των μετρήσεων.

5.2.2 Η απόδοση της οπτικής μεθόδου βάσει των μετρήσεων

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί εύκολα από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, η απόδοση της μεθόδου κρίνεται σχετικά ικανοποιητική ως προς το πεδίο της χρονικής ανίχνευσης των αντιδράσεων του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού, με σημαντικά περιθώρια βελτίωσης. Το όχι αμελητέο πλήθος των ολικών αστοχιών (αδυναμία εντοπισμού του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού), ακόμη και στο μοντέλο του ΗΜΓ, δείχνει ότι υπάρχουν πιθανές τεχνικές ατέλειες στην ίδια την πειραματική διάταξη του εργαστηρίου, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε δυσλειτουργία της γεννήτριας ακουστικών παλμών, αλλά και γενικότερα στην ελλιπή αρτιότητα της εκτέλεσης της εργαστηριακής εξέτασης. Επανεκτέλεση των εξετάσεων σε υψηλότερο επίπεδο τεχνικής αρτιότητας, θα διασφάλιζε την αφαίρεση των απρόβλεπτων αστοχιών, φανερώνοντας ακριβώς τα σημεία όπου η πειραματική μέθοδος χρήζει βελτιώσεων.

Επιπλέον, η διαδικασία μετατροπής των δεδομένων των δύο μεθόδων σε συγκρίσιμες μορφές (χρονοσειρές), αποτελεί έναν επιπλέον παράγοντα αβεβαιότητας, καθώς η ανάγκη υψηλής ακρίβειας βαθμονόμησης των χρονικών ακολουθιών και η πιθανότητα έστω και ελάχιστης απόκλιση από τον απαραίτητο συγχρονισμό αποτελούν στοιχεία που είναι δυνατόν να προκαλέσουν σημαντικά σφάλματα, δεδομένου ότι αναζητούμε χρονικά διαστήματα της τάξης των msec. Ακόμη και η συγκεκριμένη κάμερα υψηλής χρονικής δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε στην εργαστηριακή καταγραφή, παρουσιάζει σχετικά οριακή συμπεριφορά για την τάξη των μεγεθών με τα οποία ασχολούμαστε.

Ο έλεγχος του μεγέθους της προπαλμικής αναστολής, παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα κατά τη σύγκριση των δύο μεθόδων. Εδώ υπεισέρχεται πάλι το στοιχείο των τεχνικών περιορισμών και πιθανών σφαλμάτων κατά την εργαστηριακή εφαρμογή, αλλά είναι παράλληλα σαφές ότι η μέτρηση του μεγέθους της σύσπασης του αντανακλαστικού αιφνιδιασμού αποτελεί μια

σημαντικά πιο απαιτητική υπόθεση σε σχέση με τον απλό χρονικό εντοπισμό των αντιδράσεων.

Καθώς το μέγεθος της προπαλμικής αναστολής διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο και λαμβάνοντας υπόψη επίσης την πιθανότητα πρόκλησης προπαλμικής διευκόλυνσης, βάσει των δεδομένων της διάταξης, είναι πολύ δύσκολο να οριστεί κάποιο μέγεθος αναμενόμενης αντίδρασης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι πρέπει να ληφθούν σημαντικά μέτρα βελτίωσης της απόδοσης της οπτικής μεθόδου ως προς το βαθμό ανίχνευσης του ύψους της βλεφαρικής σύσπασης, στην έρευνα που βρίσκεται σε εξέλιξη.

5.3 Επίλογος

Η μελέτη προπαλμικής αναστολής αποτελεί ένα διαρκές πεδίο ενδιαφέροντος για την επιστημονική κοινότητα. Η συσχέτισή της, υπό τη μορφή ενδοφαινοτυπικού δείκτη, με τη μελέτη της σχιζοφρένειας, καθώς και με άλλες ψυχολογικές κυρίως διαταραχές, την κατέστησε θεμελιώδη στην ιατροφαρμακευτική έρευνα για την πειραματική ανάπτυξη νέων τύπων αντιψυχωσικής αγωγής. Η απόπειρα ανάπτυξης μιας νέας μεθόδου καταγραφής και ανάλυσης της προπαλμικής αναστολής, εμφανώς βελτιωμένης ως προς τον ελάττωση του βαθμού δυσφορίας στα εξεταζόμενα άτομα, αφορά επομένως μια σημαντική εργαστηριακή διαδικασία σε διεθνή ερευνητικά κέντρα.

Η ερευνά, κομμάτι της οποίας αποτελεί και η παρούσα εργασία, βρίσκεται εν εξέλιξη. Τα ευρήματα είναι σχετικά ενθαρρυντικά, όσον αφορά την απόδοση του μοντέλου σε πρώτη φάση, φανερώνοντας και τα σημεία όπου η έρευνα καλείται να βελτιώσει σημαντικά. Δεδομένου ότι στο στάδιο αυτό εξετάστηκαν αμιγώς υγιείς πληθυσμοί, καθώς και λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα εργαστηριακά τεχνικά μέσα που χρησιμοποιήθηκαν διέπονται από σημαντικούς περιορισμούς, είναι προφανές ότι τα μέχρι στιγμής συμπεράσματα είναι ατελή. Ωστόσο, ως πεδίο έρευνας, η οπτική μέθοδος μελέτης προπαλμικής αναστολής παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον, δυνατότητες περαιτέρω αναβάθμισης και ισχυρές προοπτικές υλοποίησης.

Παράρτημα

Κώδικας MATLAB για τη βασική υπορουτίνα ανίχνευσης χαρακτηριστικών προσώπου:

FeatureDetect.m

```
function [imin,jmin,feat_size] = FeatureDetect(I_0,I_t,fd_props)
% Detect face features

%% INPUT DATA
hsize = fd_props.hsize;    % gaussian filter size used for
                           % low-pass filtering before convolution
sigma = fd_props.sigma;    % gaussian filter sigma used for
                           % low-pass filtering before convolution
im_scale = fd_props.im_scale; % images scale ratio
convcycl = fd_props.convcycl; % number of convolution cycles
perc = fd_props.perc;      % percentage in template magnification: [100-perc:100+perc]
exp_ratio = fd_props.exp_ratio; % feature expected size ratio(j-dimension):
                           % exp_ratio = size(I_0,2)/size(I_t,2)
cont_size = fd_props.cont_size/im_scale; % template container size
method = fd_props.method; % method = 1: brightness convolution (default)
                           % method = 2: edges convolution

% Boundaries in which the convolution is performed
temp_i_min = round(fd_props.temp_bounds(1)/im_scale);
temp_i_max = round(fd_props.temp_bounds(2)/im_scale);
temp_j_min = round(fd_props.temp_bounds(3)/im_scale);
temp_j_max = round(fd_props.temp_bounds(4)/im_scale);
% Show plots
plots = fd_props.plots; % plots = 1: show plots

%% RESIZE IMAGES
% Resize I_0 image
I_0_sc = imresize(I_0,[round(size(I_0,1)/im_scale),round(size(I_0,2)/im_scale)]);
% Scale sizes used for convolution loop
exp_size = cont_size(2)/exp_ratio; % feature expected size (j-dimension)
if convcycl == 1
    tempsizes = round(exp_size);
else
    tempsizes = round((1 - perc/100)*exp_size:...
        (2*perc/100)*exp_size/(convcycl-1):(1 + perc/100)*exp_size);
end
% Check if tempsizes are odd numbers
tempsizes = tempsizes + (1 - mod(tempsizes,2));
% Check template boundaries
if temp_i_min <= 1, temp_i_min = 1; end
if temp_i_max > size(I_0_sc,1), temp_i_max = size(I_0_sc,1); end
if temp_j_min <= 1, temp_j_min = 1; end
if temp_j_max > size(I_0_sc,2), temp_j_max = size(I_0_sc,2); end
```

```

%% PREPROCESS IMAGE I_0 BEFORE CONVOLUTION
% Low pass filtering
fg = fspecial('gaussian',hsize,sigma);
I_0_sc = imfilter(I_0_sc,fg,'replicate');
% Choose preprocessing method
if method == 2
    h_gx = [-1 0 1];
    h_gy = h_gx';
    I_0_sc_gx = imfilter(I_0_sc,h_gx,'replicate');
    I_0_sc_gy = imfilter(I_0_sc,h_gy,'replicate');
    I_0_sc = sqrt(I_0_sc_gx.^2 + I_0_sc_gy.^2);
end

%% START CONVOLUTION LOOP
C_count = zeros(numel(tempsizes),3);
C_min = zeros(numel(tempsizes),2);
for i = 1:numel(tempsizes)
% Resize template
I_t_sc = imresize(I_t,[round(tempsizes(i)*size(I_t,1)/size(I_t,2)),tempsizes(i)]);
% Test if the template has odd number of rows and columns
I_t_sc = imresize(I_t_sc,[size(I_t_sc,1) + 1 - mod(size(I_t_sc,1),2),...
    size(I_t_sc,2) + 1 - mod(size(I_t_sc,2),2)]);

%% PREPROCESS TEMPLATE I_t BEFORE CONVOLUTION
% Low pass filtering
I_t_sc = imfilter(I_t_sc,fg,'replicate');
% Choose preprocessing method
if method == 2
    I_t_sc_gx = imfilter(I_t_sc,h_gx,'replicate');
    I_t_sc_gy = imfilter(I_t_sc,h_gy,'replicate');
    I_t_sc = sqrt(I_t_sc_gx.^2 + I_t_sc_gy.^2);
end

%% INSERT BLACK PADDING AROUND TEMPLATE IMAGE
pad_i = (size(I_t_sc,1) - 1)/2;    % i-padding
pad_j = (size(I_t_sc,2) - 1)/2;    % j-padding
% Insert black padding around template image so that the template
% convolves at the image borders
I_0_sc_pad = zeros(temp_i_max - temp_i_min + 1 + 2*pad_i,temp_j_max - temp_j_min + 1 +
2*pad_j);
% Padded template image
I_0_sc_pad(pad_i + 1:pad_i + temp_i_max - temp_i_min + 1,...
    pad_j + 1:pad_j + temp_j_max - temp_j_min + 1) =
I_0_sc(temp_i_min:temp_i_max,temp_j_min:temp_j_max);
C = zeros(size(I_0_sc_pad));

%% APPLY FEATURE TEMPLATE
% Start convolution
for i_0 = pad_i + 1:pad_i + temp_i_max - temp_i_min + 1
    for j_0 = pad_j + 1:pad_j + temp_j_max - temp_j_min + 1

```



```

    % Convolution
    for i_t = 1:size(I_t_sc,1)
        for j_t = 1:size(I_t_sc,2)
            i_0_conv = i_0 - (size(I_t_sc,1) - 1)/2 + i_t - 1;
            j_0_conv = j_0 - (size(I_t_sc,2) - 1)/2 + j_t - 1;
            C_temp = (I_0_sc_pad(i_0_conv,j_0_conv) - I_t_sc(i_t,j_t))^2;
            C(i_0,j_0) = C(i_0,j_0) + C_temp;
        end
    end
end
end

end

% Remove padding
C = C(pad_i + 1:pad_i + temp_i_max - temp_i_min + 1,...
      pad_j + 1:pad_j + temp_j_max - temp_j_min + 1);
C = C - min(C(:));
C = C./max(C(:));

% Find position of minimum
[imin,jmin] = find(C == min(C(:)));
imin = imin(1);
jmin = jmin(1);
C_min(i,:) = [imin,jmin];

% Find and count values close to minimum
% figure
% imshow(C)
C_count(i,1) = numel(find(C < 0.1));
C_count(i,2:3) = size(I_t_sc);

%% SHOW RESULTS
if plots(1) == 1
% Show image and template
figure
subplot(1,2,1)
imshow(I_0_sc,[])
subplot(1,2,2)
imshow(I_t_sc)
end
if plots(2) == 1
% Show minimum position
figure
subplot(1,2,1)
imshow(C,[]), title(['template j-size = ',num2str(tempsizes(i))])
subplot(1,2,2)
imshow(I_0) % original image
hold on
% Show feature box final position
i_plot = imin + temp_i_min;
j_plot = jmin + temp_j_min;
plot(j_plot*im_scale,i_plot*im_scale,'r+')
plot(im_scale*[j_plot-size(I_t_sc,2)/2,j_plot+size(I_t_sc,2)/2],...
      im_scale*[i_plot+size(I_t_sc,1)/2,i_plot+size(I_t_sc,1)/2],'r-');
plot(im_scale*[j_plot-size(I_t_sc,2)/2,j_plot+size(I_t_sc,2)/2],...

```

```

        im_scale*[i_plot-size(I_t_sc,1)/2,i_plot-size(I_t_sc,1)/2],'r-');
plot(im_scale*[j_plot-size(I_t_sc,2)/2,j_plot-size(I_t_sc,2)/2],...
      im_scale*[i_plot-size(I_t_sc,1)/2,i_plot+size(I_t_sc,1)/2],'r-');
plot(im_scale*[j_plot+size(I_t_sc,2)/2,j_plot+size(I_t_sc,2)/2],...
      im_scale*[i_plot-size(I_t_sc,1)/2,i_plot+size(I_t_sc,1)/2],'r-');
hold off
end
end

%% FIND FINAL MINIMUM
% Minimum position
id_min = find(C_count(:,1) == min(C_count(:,1)));
id_min = id_min(1);
imin = im_scale*C_min(id_min,1);
jmin = im_scale*C_min(id_min,2);
% Template size
feat_size = round(im_scale*C_count(id_min,[2,3]));
feat_size = feat_size + 1 - mod(feat_size,1);

%% SHOW FINAL RESULT
if plots(2) == 1
figure
% Show count positions
subplot(1,2,1)
plot(C_count(:,3),C_count(:,1),'r*')
% Original image
subplot(1,2,2)
imshow(I_0)
hold on
% Show feature box final position
i_plot = imin + im_scale*temp_i_min;
j_plot = jmin + im_scale*temp_j_min;
plot(j_plot,i_plot,'r+')
plot([j_plot-feat_size(2)/2,j_plot+feat_size(2)/2],...
      [i_plot+feat_size(1)/2,i_plot+feat_size(1)/2],'r-');
plot([j_plot-feat_size(2)/2,j_plot+feat_size(2)/2],...
      [i_plot-feat_size(1)/2,i_plot-feat_size(1)/2],'r-');
plot([j_plot-feat_size(2)/2,j_plot-feat_size(2)/2],...
      [i_plot-feat_size(1)/2,i_plot+feat_size(1)/2],'r-');
plot([j_plot+feat_size(2)/2,j_plot+feat_size(2)/2],...
      [i_plot-feat_size(1)/2,i_plot+feat_size(1)/2],'r-');
hold off
end

```

Βιβλιογραφία

- [1] Στ. Γιακουμάκη, Π. Μπίτσιος. «Ο αισθητικοκινητικός ηθμός: η σημασία του στη λειτουργία του κεντρικού νευρικού συστήματος και η συμβολή του στην παθογένεια της ψύχωσης.» *Ψυχολογία*, 15(2):188-199, 2008.
- [2] Younglim Lee. “Role of the Hippocampus, the Bed Nucleus of the Stria Terminalis, and the Amygdala in the Excitatory Effect of Corticotropin-Releasing Hormone on the Acoustic Startle Reflex.” *The Journal of Neuroscience*, p.6434, 1997.
- [3] Nick Medford. “Conjoint Activity of Anterior Insular and Anterior Cingulate Cortex: Awareness and Response.” *Brain Structure and Function*, p.535, 2010.
- [4] Wouter Grouen. “Amygdala and Hippocampus Enlargement During Adolescence in Autism.” *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, p.552, 2010.
- [5] Steven Hillyard, Marta Kutas. “Event-Related Potentials and Magnetic Fields in the Human Brain.” *Neuropsychopharmacology – 5th Generation of Progress*, p.427-440, Lippincott, Williams, & Wilkins, 2002.
- [6] Geyer, McIlwain, Paylor. “Mouse genetic models for prepulse inhibition: An early review.” *Molecular Psychiatry*. 7(10):1039–53, 2002.
- [7] David Braff, Mark Geyer, Neal Swerdlow. “Human studies of prepulse inhibition of startle: Normal subjects, patient groups, and pharmacological studies.” *Psychopharmacology*, 156:234–258, 2001.
- [8] Wynn, Dawson, Schell, McGee, Salveson, Green. “Prepulse facilitation and prepulse inhibition in schizophrenia patients and their unaffected siblings.” *Biological Psychiatry*, 55(5):518-23, 2004.
- [9] Aasen, Kolli, Kumari. “Sex effects in prepulse inhibition and facilitation of the acoustic startle response: Implications for pharmacological and treatment studies.” *Journal of psychopharmacology*, 19(1):39–45, 2005.

- [10] Kumari, Fannon, Sumich, Sharma. "Startle gating in antipsychotic-naïve first episode schizophrenia patients: One ear is better than two." *Psychiatry Research*. 151(1-2):21-8, 2007.
- [11] Braff, Stone, Callaway, Geyer, Glick, Bali. "Prestimulus effects on human startle reflex in normals and schizophrenics." *Psychophysiology*, 15(4):339-43, 1978.
- [12] Kohl, Heekeren, Klosterkötter, Kuhn. "Prepulse inhibition in psychiatric disorders – Apart from schizophrenia." *Journal of Psychiatric Research*, 47:445-452, 2013.
- [13] Ahmari, Risbrough, Geyer, Simpson. "Impaired sensorimotor gating in unmedicated adults with obsessive-compulsive disorder." *Neuropsychopharmacology: Official Publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 37(5):1216-23, 2012.
- [14] Baldan Ramsey, Xu, Wood, Pittenger. "Lesions of the dorsomedial striatum disrupt prepulse inhibition." *Neuroscience*, 180:222-8, 2011.
- [15] Munoz, Cervera, Valls-Sole. "Neurophysiological study of facial chorea in patients with Huntington's disease." *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 114(7):1246-52, 2003.
- [16] Baeyens, Roeyers, Naert, Hoebeke, Vande Walle. "The impact of maturation of brainstem inhibition on enuresis: a startle eye blink modification study with 2-year followup." *The Journal of Urology*, 178(6):2621-5, 2007.
- [17] Barrett, Kelly, Watson, Bell, King. "Normal levels of prepulse inhibition in the euthymic phase of bipolar disorder." *Psychological Medicine*, 35(12):1737-46, 2005.
- [18] Ludewig, Ludewig, Geyer, Hell, Vollenweider. "Prepulse inhibition deficits in patients with panic disorder." *Depression and Anxiety*, 15(2):55-60, 2002.

- [19] Ludewig, Geyer, Ramseier, Vollenweider, Rechsteiner, Cattapan-Ludewig. "Information-processing deficits and cognitive dysfunction in panic disorder." *Journal of Psychiatry & Neuroscience*, 30(1):37-43, 2005.
- [20] Yuhas, Cordeiro, Tassone, Ballinger, Schneider, Long, et al. "Brief report: sensorimotor gating in idiopathic autism and autism associated with fragile X syndrome." *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 41(2):248-53, 2011.
- [21] Quednow, Westheide, Kuhn, Werner, Maier, Hawellek, et al. "Normal prepulse inhibition and habituation of acoustic startle response in suicidal depressive patients without psychotic symptoms." *Journal of Affective Disorders*, 92(2e3):299-303, 2006.
- [22] Sobin, Kiley-Brabeck, Karayiorgou. "Lower prepulse inhibition in children with the 22q11 deletion syndrome." *The American Journal of Psychiatry*, 162(6):1090-9, 2005.
- [23] van Rijn, Swaab, Magnee, van Engeland, Kemner. "Psychophysiological markers of vulnerability to psychopathology in men with an extra X chromosome (XXY)." *PloS One*, 6(5):e20292, 2011.
- [24] Mathias, Blumenthal, Dawes, Liguori, Richard, Bray B, et al. "Failure to sustain prepulse inhibition in adolescent marijuana users." *Drug and Alcohol Dependence*, 116(1-3):110-6, 2011.
- [25] Kedzior, Martin-Iverson. "Chronic cannabis use is associated with attention-modulated reduction in prepulse inhibition of the startle reflex in healthy humans." *Journal of Psychopharmacology*, 20(4):471e84, 2006.
- [26] Efferen, Duncan, Szilagyi, Chakravorty, Adams, Gonzenbach, et al. "Diminished acoustic startle in chronic cocaine users." *Neuropsychopharmacology: Official Publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 22(1):89-96, 2000.

- [27] Quednow, Kuhn, Hoenig, Maier, Wagner. “Prepulse inhibition and habituation of acoustic startle response in male MDMA (‘ecstasy’) users, cannabis users, and healthy controls.” *Neuropsychopharmacology: Official Publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 29(5):982-90, 2004.
- [28] Magne Arve Flaten, Åke Elden. “Caffeine and prepulse inhibition of the acoustic startle reflex.” *Psychopharmacology*, 147:322–330, 1999.
- [29] Kumari, Soni, Sharma. “Influence of cigarette smoking on prepulse inhibition of the acoustic startle response in schizophrenia.” *Human Psychopharmacology Clinical and Experimental*, 16:321–326, 2001.
- [30] Παναγιώτης Ρούσσοσ. «Η Προπαλμική Αναστολή ως Ενδοφαινότυπος για Ψύχωση: Η Επίδραση Γενετικών Πολυμορφισμών που Εμπλέκονται στη Σχιζοφρένεια, επί της Προπαλμικής Αναστολής.» *Διδακτορική Διατριβή Πανεπιστημίου Κρήτης*, 2010.
- [31] Csernansky, Bardgett. “Limbic-cortical neuronal damage and the pathophysiology of schizophrenia.” *Schizophrenia Bulletin*, 24:231-248, 1998.
- [32] Koch, Bubser. “Deficient sensorimotor gating after 6-hydroxydopamine lesion of the rat medial prefrontal cortex is reversed by haloperidol.” *European Journal of Neuroscience*, 6:1837-1845, 1994.
- [33] Leitner, Cohen. “Role of the inferior colliculus in the inhibition of acoustic startle in the rat.” *Physiology & Behavior*, 34:65-70, 1985.
- [34] Li, Yeomans. “Using intracranial electrical stimulation to study the timing of prepulse inhibition of the startle reflex.” *Brain Research Protocols*, 5:67-74, 2000.
- [35] Fendt, Koch, Schnitzler. “Sensorimotor gating deficits after lesions of the superior colliculus.” *NeuroReport* 5:1725-1728, 1994.
- [36] Markus Fendt. “Enhancement of prepulse inhibition after blockade of GABA activity within the superior colliculus.” *Brain Research*, 833:81-85, 1999.

- [37] Kodsi, Swerdlow. "Regulation of prepulse inhibition by ventral pallidal projections." *Brain Research Bulletin*, 43:219-22, 1997.
- [38] Jones, Shannon. "Bilateral lesions of the laterodorsal tegmental nucleus disrupt prepulse inhibition of acoustic startle in rats." *Schizophrenia Research*, 29:199, 1998.
- [39] Koch, Kungel, Herbert. "Cholinergic neurons in the pedunculo-pontine tegmental nucleus are involved in the mediation of prepulse inhibition of the acoustic startle response in the rat." *Experimental Brain Research*, 97:71-82, 1993.
- [40] Michael Koch, Markus Fendt, Beate Kretschmer. "Role of the substantia nigra pars reticulata in sensorimotor gating, measured by prepulse inhibition of startle in rats." *Behavioural Brain Research*, 117:153-162, 2000.
- [41] Bruce Lucas, Takeo Kanade. "An iterative image registration technique with an application to stereo vision." *IJCAI'81 Proceedings of the 7th international joint conference on Artificial intelligence Vol. 2*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., p.674-679, 1981.
- [42] Bruce Lucas. "Generalized Image Matching by the Method of Differences." *Doctoral Dissertation (PhD) in Carnegie-Mellon University*, 1985.
- [43] Jean-Yves Bouguet. "Pyramidal Implementation of the Affine Lucas Kanade Feature Tracker. Description of the algorithm." Intel Corporation. Microprocessor Research Labs, 2001.
- [44] Abraham Savitzky, Marcel J.E. Golay. "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures." *Analytical Chemistry*, 36(8):1627-3, 1964.
- [45] Lauren Barghout, Jacob Sheynin. "Real-world scene perception and perceptual organization: Lessons from Computer Vision." *Journal of Vision*, 13(9):709-709, 2013.

- [46] Hossein Mobahi, Shankar Rao, Allen Yang, Shankar Sastry, Yi Ma. “Segmentation of Natural Images by Texture and Boundary Compression.” *International Journal of Computer Vision*, 95:86–98, 2011.
- [47] Vicent Caselles, Ron Kimmel, Guillermo Sapiro. “Geodesic active contours.” *International Journal of Computer Vision*, 22(1):61–79, 1997.
- [48] Mehmet Sezgin, Bulent Sankur. “Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation.” *Journal of Electronic Imaging*, 13(1):146–165, 2004.
- [49] Nobuyuki Otsu. “A threshold selection method from gray-level histograms”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1):62–66, 1979.
- [50] Fernand Meyer, Serge Beucher. “Morphological segmentation.” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 1(1):21-46, 1990.
- [51] Roberto Brunelli, Tomaso Poggio. “Face Recognition: Features Versus Templates.” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(10):1042-52, 1993.
- [52] T. Mahalakshmi, R. Muthaiah, P. Swaminathan. “Review Article: An Overview of Template Matching Technique in Image Processing.” *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(24):5469-73, 2012.
- [53] Chai Tong Yuen, M. Rizon, Woo San San, Tan Ching Seong. “Facial Features for Template Matching Based Face Recognition.” *American Journal of Applied Sciences*, 6(11):1897-1901, 2009.

Κατά τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας έγινε επιπλέον συμβουλευτική μελέτη υλικού από διαδικτυακά εγχειρίδια της MATLAB (Mathworks documentation, MATLAB digest), λήμματα της Wikipedia, καθώς και βοηθητικού διδακτικού υλικού (σημειώσεις, παρουσιάσεις, διαλέξεις) από εκπαιδευτικά ιδρύματα της Ελλάδας και του εξωτερικού.