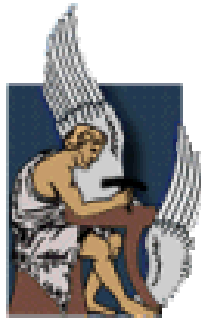


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



ΣΥΝΘΕΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΣΦΑΛΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΕΝΤΡΟΧΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ
ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για
την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

υπό

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΤΣΑΛΑΤΣΑΝΗ

ΧΑΝΙΑ, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2004

© Copyright υπό Αθανασίου Τσαλατσάνη
Έτος 2004

Η διατριβή του Αθανασίου Τσαλατσάνη, εγκρίνεται

ΤΣΟΥΡΒΕΛΟΥΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΒΑΛΑΒΑΝΗΣ ΚΙΜΩΝ

ΝΙΚΟΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της εργασίας, θεωρώ απαραίτητο να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλλαν σε αυτήν.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Νίκο Τσουρβελούδη, για την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας και την ουσιαστική συμβολή του με τα σχόλια, τις σκέψεις και τις διορθώσεις του.

Τον Καθηγητή κ. Κίμων Βαλαβάνη, συνεπιβλέποντα μου, για τις συμβουλές και την καθοδήγηση του στην διαμόρφωση του θέματος της εργασίας.

Τον Λέκτορα κ. Ιωάννη Νικολό, για την συνεχή βοήθεια σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή του ζητήθηκε και τις πολύτιμες παρατηρήσεις του.

Τον κ. Λευτέρη Δοϊτσίδη, υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την συνεργασία του.

Την Ανδρονίκη Βαρδιδάκη, φοιτήτρια του Τμήματος Ορυκτών Πόρων, για τις πολύτιμες συμβουλές της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συμπαράσταση τους κατά την διάρκεια της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα.....	v
Ευρετήριο Σχημάτων & Πινάκων.....	viii
Σύντομο Βιογραφικό.....	xiii
Περίληψη	xiv
1. Εισαγωγή	1
1.1 Κίνητρο	1
1.2 Διατύπωση του προβλήματος	2
1.3 Επιστημονική μεθοδολογία	2
1.4 Περίληψη αποτελεσμάτων.....	2
1.5 Δομή της εργασίας.....	2
2. Βιβλιογραφική επισκόπηση	4
3. Περιγραφή του ATRV-Mini	6
3.1 Εισαγωγή	6
3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	6
3.2 Το λογισμικό MOBILITY	7
3.3 Το σύστημα ελέγχου	8
3.4 Σύστημα κατεύθυνσης	9
3.5 Το σύστημα αξόνων.....	9
3.6 Αισθητήρες υπερήχων	10
3.7 Οπτικό σύστημα.....	11
4. Οπτικό σύστημα.....	12

4.1 Εισαγωγή	12
4.2 Λήψη ζεύγους εικόνων	13
4.2.1 Αλγόριθμος λήψης εικόνων με χρήση συναρτήσεων περιβάλλοντος MOBILITY	14
4.2.2 Αλγόριθμος λήψης εικόνων με την χρήση εντολών του λειτουργικού συστήματος Linux.....	15
4.3 Ψηφιοποίηση εικόνας	17
4.4 Χρωματικοί χώροι	18
4.4.1 Χρωματικός χώρος RGB	18
4.4.2 Χρωματικός χώρος HSI	19
4.4.3 Χρωματικός χώρος CMYK	23
4.4.4 Χρωματικός χώρος YCbCr	26
4.5 Επιλογή κατωφλίου.....	28
4.5.1 Εφαρμογή κατωφλίου στο χρωματικό χώρο HSI	29
4.5.2. Εφαρμογή κατωφλίου στο χρωματικό χώρο CMYK	31
4.5.3. Εφαρμογή κατωφλίου στο χρωματικό χώρο YCbCr	33
4.5.4. Εφαρμογή κατωφλίου στον συνδυασμένο χώρο CMYK - YCbCr	36
4.6 Εφαρμογή φίλτρων στην εικόνα	39
4.7 Βαθμονόμηση οπτικού συστήματος	40
4.7.1 Προοπτικός μετασχηματισμός.....	41
4.7.2 Περιγραφή τρισδιάστατου αντικειμένου με την χρήση μιας κάμερας	43
4.7.2 Περιγραφή τρισδιάστατου αντικειμένου με την χρήση στερεοσκοπικού οπτικού συστήματος	45
4.7.3 Στροφή του στερεοσκοπικού οπτικού συστήματος	47
4.7.4 Εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων	49
4.7.5 Υπολογισμός της απόστασης.....	51
4.8 Ολοκληρωμένη λειτουργία του οπτικού συστήματος	52
4.9 Αλγόριθμος κίνησης και αποφυγής εμποδίων	55
4.10 Περιορισμοί του αλγορίθμου κίνησης	58
5. Αποτελέσματα.....	59

5.1 Εφαρμογή κατωφλίου στον χρωματικό χώρο HIS	59
5.2 Εφαρμογή κατωφλίου στον χρωματικό χώρο CMYK.....	61
5.3 Εφαρμογή κατωφλίου στον χρωματικό χώρο YCbCr	65
5.4 Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων	68
5.5 Υπολογισμός απόστασης αντικειμένου	70
5.5.1 Παράλληλος προσανατολισμός	70
5.5.2 Οπτικό σύστημα υπό στροφή.....	74
5.6 Αποτελέσματα του αλγορίθμου κίνησης και αποφυγής εμποδίων	77
6. Συμπεράσματα	90
7. Βιβλιογραφία	91

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ & ΠΙΝΑΚΩΝ

Σχήμα 3.1. Το έντροχο ρομποτικό όχημα ATRV-Mini.....	6
Πίνακας 3.1 Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έντροχου ρομπότ ATRV-Mini	7
Σχήμα 3.2. Η αρχιτεκτονική του περιβάλλοντος MOBILITY	7
Σχήμα 3.3. Η κεντρική οθόνη λειτουργιών του rFlex.	9
Σχήμα 3.4. Ορθοκανονικό σύστημα αξόνων του ATRV-Mini.....	10
Σχήμα 3.5. Διάταξη των αισθητήρων υπερήχων για το ATRV-Mini.....	10
Σχήμα 3.6. Οπτικό σύστημα του έντροχου ρομπότ ATRV-Mini	11
Σχήμα 4.1.1. Διάγραμμα ροής της λειτουργίας του οπτικού συστήματος.....	13
Σχήμα 4.2.1. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου λήψης εικόνας μέσω συναρτήσεων MOBILITY	15
Σχήμα 4.2.2. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου λήψης εικόνας.....	16
Σχήμα 4.4.1. Χρωματικός χώρος RGB.....	19
Σχήμα 4.4.2. Χρωματικός χώρος HSI.....	20
Σχήμα 4.4.3. Υπολογισμός της απόχρωσης, H.....	21
Σχήμα 4.4.4. Υπολογισμός της καθαρότητας, S.....	22
Σχήμα 4.4.5. Δομικό διάγραμμα αλγορίθμου μετατροπής RGB σε HSI.....	23
Σχήμα 4.4.6. Χρωματικός χώρος CMY	24
Σχήμα 4.4.7. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου μετατροπής εικόνας RGB σε CMYK	25
Σχήμα 4.4.8. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου μετατροπής εικόνας RGB σε YCbCr.....	27
Σχήμα 4.5.1. Ιστόγραμμα μιας εικόνας που αποτελείται από σκούρο αντικείμενο σε φωτεινό φόντο.....	28
Σχήμα 4.5.2. Δομικό διάγραμμα εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο HSI.....	30

Σχήμα 4.5.3. Εφαρμογή τεχνικής κατωφλίου στο χρωματικό χώρο HSI	30
Σχήμα 4.5.4. Δομικό διάγραμμα εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο CMYK	32
Σχήμα 4.4.5. Εφαρμογή τεχνικής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο CMYK για T=81 ..	33
Σχήμα 4.5.6. Δομικό διάγραμμα εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο YCbCr.	35
Σχήμα 4.4.7. Εφαρμογή τεχνικής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο YCbCr για διάστημα κατωφλίου [90,110]	36
Σχήμα 4.5.8. Ταυτόχρονη εφαρμογή κατωφλίου στους χρωματικούς χώρους CMYK και YCbCr	38
Σχήμα 4.5.9.Εφαρμογή φίλτρου Gauss.....	40
Σχήμα 4.7.1. Σύστημα αναφοράς της κάμερας ταυτισμένο με το γενικό σύστημα αναφοράς.....	41
Σχήμα 4.7.2. Το οριζόντιο οπτικό πεδίο της κάμερας	43
Σχήμα 4.7.3. Διαδικασία λήψης δύο εικόνων ενός αντικειμένου από διαφορετική θέση	44
Σχήμα 4.7.4. Διαδικασία λήψης δύο εικόνων ενός αντικειμένου από στερεοσκοπικό οπτικό σύστημα.....	46
Σχήμα 4.7.5 Υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης εντοπισμού ενός αντικειμένου	47
Σχήμα 4.7.6 Στροφή του οπτικού συστήματος	48
Σχήμα 4.7.7. Εξαγωγή σημείων ενδιαφέροντος	50
Σχήμα 4.7.8. Εξαγωγή σημείων ενδιαφέροντος με την χρήση μιας κάμερας	51
Σχήμα 4.7.9 Αντιστοίχιση εικονοστοιχείων που αναπαριστούν το ίδιο σημείο του τρισδιάστατου χώρου.....	52
Σχήμα 4.8.1. Δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου του οπτικού συστήματος.....	54
Σχήμα 4.9.1. Δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου κίνησης.....	57
Σχήμα 5.1.1. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας	59
Σχήμα 5.1.2. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας	59
Σχήμα 5.1.3. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας	60
Πίνακας 5.1.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο HSI.....	60
Σχήμα 5.2.1. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας	61
Σχήμα 5.2.2. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας	62
Σχήμα 5.2.3. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας	62

Σχήμα 5.2.4. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας	63
Πίνακας 5.2.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο CMYK	64
Σχήμα 5.3.1. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας	65
Σχήμα 5.3.2. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας	66
Σχήμα 5.3.3. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας	66
Σχήμα 5.3.4. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας	67
Πίνακας 5.3.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο YCbCr.....	68
Σχήμα 5.4.1. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων.....	68
Σχήμα 5.4.2. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων.....	69
Σχήμα 5.4.3. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων.....	69
Σχήμα 5.4.4. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων.....	69
Σχήμα 5.4.5. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων.....	69
Σχήμα 5.4.6. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων.....	70
Σχήμα 5.5.1 Πραγματική απόσταση του αντικειμένου 259cm, υπολογιζόμενη 257cm...	70
Σχήμα 5.5.2 Πραγματική απόσταση του αντικειμένου 425cm, υπολογιζόμενη 432cm...	70
Σχήμα 5.5.3 Πραγματική απόσταση του αντικειμένου 166cm, υπολογιζόμενη 161cm...	71
Σχήμα 5.5.4 Πραγματική απόσταση του αντικειμένου 380cm, υπολογιζόμενη 382cm...	71
Σχήμα 5.5.5 Πραγματική απόσταση δεξιάς ακμής του αντικειμένου 150cm, υπολογιζόμενη 144cm	71
Πραγματική απόσταση της αριστερής ακμής του αντικειμένου 183cm, υπολογιζόμενη 178cm.....	71
Σχήμα 5.5.6 Πραγματική απόσταση δεξιάς ακμής του αντικειμένου 180cm, υπολογιζόμενη 178cm	71
Πραγματική απόσταση της αριστερής ακμής του αντικειμένου 215cm, υπολογιζόμενη 212cm.....	71
Σχήμα 5.5.7 Πραγματική απόσταση δεξιού αντικειμένου 153cm, υπολογιζόμενη 154cm	72
Πραγματική απόσταση αριστερού αντικειμένου 73cm, υπολογιζόμενη 71cm	72

Σχήμα 5.5.8 Πραγματική απόσταση δεξιού αντικειμένου 178cm, υπολογιζόμενη 174cm	72
Πραγματική απόσταση αριστερού αντικειμένου 95cm, υπολογιζόμενη 91cm	72
Σχήμα 5.5.9 Το μέγεθος των αντικειμένων είναι πολύ μικρό για να εντοπιστούν	72
Πίνακας 5.5.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αλγορίθμου υπολογισμού απόστασης	73
Σχήμα 5.5.10. Γραφική παράσταση των πραγματικών και υπολογιζόμενων αποστάσεων για 30 πειράματα	74
Σχήμα 5.5.11 Πραγματική απόσταση αντικειμένου 106cm, υπολογιζόμενη 103cm	74
Σχήμα 5.5.12 Πραγματική απόσταση αντικειμένου 205cm, υπολογιζόμενη 205cm	74
Σχήμα 5.5.13 Πραγματική απόσταση αντικειμένου 139cm, υπολογιζόμενη 139cm	75
Σχήμα 5.4.14 Πραγματική απόσταση δεξιού αντικειμένου 148cm, υπολογιζόμενη 147cm	75
Πραγματική απόσταση αριστερού αντικειμένου 78cm, υπολογιζόμενη 78cm	75
Πίνακας 5.5.2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αλγορίθμου υπολογισμού απόστασης	76
Σχήμα 5.5.15. Γραφική παράσταση των πραγματικών και υπολογιζόμενων αποστάσεων για 30 πειράματα	77
Σχήμα 5.6.1. Αποφυγή εμποδίου με την χρήση του οπτικού συστήματος	77
Σχήμα 5.6.2. Αποφυγή εμποδίου με την χρήση του οπτικού συστήματος	78
Σχήμα 5.6.3. Αποφυγή δύο εμποδίων με την χρήση του οπτικού συστήματος	79
Σχήμα 5.6.4 Αποφυγή δύο εμποδίων με την χρήση του οπτικού συστήματος	79
Σχήμα 5.6.5 Αποφυγή τριών εμποδίων με την χρήση του οπτικού συστήματος	80
Σχήμα 5.6.6 Αποφυγή τριών εμποδίων με την χρήση του οπτικού συστήματος	81
Σχήμα 5.6.7. Καρέ από το βίντεο της κίνησης με αποφυγή τριών εμποδίων	81
Σχήμα 5.6.8 Εντοπισμός των εμποδίων. Βρίσκονται μακριά και εξακολουθεί η ευθύγραμμη κίνηση	82
Σχήμα 5.6.9 Εξακολουθεί η ευθύγραμμη κίνηση. Τα εμπόδια δεν αποτελούν κίνδυνο σύγκρουσης	82
Σχήμα 5.6.10 Η απόσταση του πρώτου εμποδίου είναι μικρότερη των 180cm. Αποφασίζεται κίνηση προς αριστερά.	82
Σχήμα 5.6.11(a-d) Χρησιμοποιώντας την αριστερή κάμερα του οπτικού συστήματος πραγματοποιείται κίνηση στροφής έως ότου δεν υπάρχουν εμπόδια	83

Σχήμα 5.6.12. Αφού πραγματοποιηθεί η αποφυγή του πρώτου εμποδίου εξακολουθεί η κίνηση με στόχο την τελική θέση	83
Σχήμα 5.6.13. Εντοπίζεται το τρίτο εμπόδιο. Βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 180cm.....	84
Σχήμα 5.6.14. Το τρίτο εμπόδιο βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 180cm. Αποφασίζεται κίνηση προς τα δεξιά.....	84
Σχήμα 5.6.15. (a-b) Χρησιμοποιώντας την δεξιά κάμερα του οπτικού συστήματος πραγματοποιείται κίνηση στροφής έως ότου δεν υπάρχουν εμπόδια.....	84
Σχήμα 5.6.16. Μετά την αποφυγή του τρίτου εμποδίου, το ρομπότ κατευθύνεται προς την τελική θέση	85
Σχήμα 5.6.17. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων.....	85
Σχήμα 5.6.18. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων.....	86
Σχήμα 5.6.19. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων.....	87
Σχήμα 5.6.20. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων και οπτικού συστήματος.....	88
Σχήμα 5.6.21. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων και οπτικού συστήματος.....	88
Σχήμα 5.6.22. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων και οπτικού συστήματος.....	88
Σχήμα 5.6.23. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων και οπτικού συστήματος.....	89

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ

Ο Αθανάσιος Τσαλατσάνης, του Ιωάννη και της Ευφροσύνης, γεννήθηκε την 4^η Ιουνίου 1976 στην Αθήνα, όπου και μεγάλωσε. Φοίτησε στο Πολυκλαδικό Λύκειο Πειραιά απ' όπου αποφοίτησε το 1994. Το 1996 εισήχθη στη σχολή των Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης και αποφοίτησε από αυτήν το 2001, με βαθμό 7.23. Τον Σεπτέμβρη του 2002, έγινε δεκτός στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Με την εργασία αυτή ολοκληρώνει αυτόν τον κύκλο σπουδών του.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος σύνθεσης πληροφοριών που αντλούνται από το οπτικό σύστημα και τους αισθητήρες υπερήχων έντροχου ρομποτικού οχήματος. Οι κοινοί αισθητήρες υπερήχων αποτυγχάνουν να εντοπίσουν εμπόδια που βρίσκονται χαμηλότερα ή υψηλότερα από το επίπεδο τους, είτε αντικείμενα μικρά σε μέγεθος, αυξάνοντας τον κίνδυνο συγκρούσεων. Ταυτόχρονα, η τρισδιάστατη αναπαράσταση του χώρου με την χρήση του οπτικού συστήματος αυξάνει σημαντικά την απαίτηση για υπολογιστική ισχύ. Η προτεινόμενη μέθοδος συνθέτει τις πληροφορίες που λαμβάνονται από τους αισθητήρες υπερήχων με τις πληροφορίες του οπτικού συστήματος, με σκοπό την πλήρη αναπαράσταση του περιβάλλοντος κίνησης του ρομπότ και την πλοήγηση του. Πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την λειτουργία της μεθόδου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κίνητρο

Οι αισθητήρες υπερήχων χρησιμοποιούνται ευρέως στην πλοήγηση έντροχων ρομπότ. Σημαντικό τους πλεονέκτημα είναι ο ταχύτατος και σχετικά ακριβής υπολογισμός απόστασης. Ωστόσο, αν και κατάλληλοι για πολλές εφαρμογές πλοήγησης [1], [2], [3], [4], συχνά αποτυγχάνουν στον εντοπισμό ορισμένων εμποδίων για την αποφυγή σύγκρουσης. Αυτό συμβαίνει επειδή αντικείμενα, όπως τα πόδια μιας καρέκλας ή ενός τραπέζιου, καταλαμβάνουν μικρή επιφάνεια και είναι δύσκολο να εντοπιστούν.

Η πλοήγηση ενός έντροχου ρομποτικού οχήματος σε εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον με την χρήση του οπτικού συστήματος έχει εξεταστεί εκτεταμένα τόσο για μονοσκοπικό [5], [6], [7], όσο και για στερεοσκοπικό σύστημα [8], [9], [10]. Σημαντικό μειονέκτημα των μεθόδων είναι η απαίτηση μεγάλης υπολογιστικής ισχύος για την λεπτομερή αναπαράσταση του χώρου.

Σε αυτή την εργασία πραγματοποιείται σύνθεση των πληροφοριών που αντλούνται από τους αισθητήρες υπερήχων και το οπτικό σύστημα ενός έντροχου ρομποτικού οχήματος, με σκοπό την κίνηση του σε άγνωστο περιβάλλον με ταυτόχρονη αποφυγή εμποδίων. Με την σύνθεση των πληροφοριών, είναι δυνατό να περιγραφεί ικανοποιητικά το περιβάλλον κίνησης απομονώνοντας τα επί μέρους προβλήματα των αισθητήρων.

Αν και παρόμοιες εργασίες έχουν προταθεί κατά καιρούς, [12], [13], [14], [15], η συγκεκριμένη πρωτοτυπεί στο γεγονός ότι τόσο το οπτικό σύστημα όσο και οι αισθητήρες υπερήχων λειτουργούν ταυτόχρονα με κοινή ενεργή περιοχή. Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος εντοπισμού έγχρωμων αντικειμένων καθώς και μια νέα μέθοδος βαθμονόμησης του οπτικού συστήματος.

1.2 Διατύπωση του προβλήματος

Το πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία της σύνθεσης πληροφοριών από διάφορους αισθητήρες τοποθετημένους σε ένα έντροχο ρομποτικό όχημα, με σκοπό την πλοήγηση του. Συγκεκριμένα, ζητείται να διαγραφεί τροχιά με αποφυγή τυχών στατικών και δυναμικών εμποδίων, ενός έντροχου ρομποτικού οχήματος, με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων και του οπτικού συστήματος.

1.3 Επιστημονική μεθοδολογία

Με δεδομένη την δυσκολία των αισθητήρων υπερήχων να εντοπίσουν αντικείμενα που είναι μικρά σε μέγεθος ή που βρίσκονται σε διαφορετικό επίπεδο, η επίλυση του προβλήματος έγκειται στην ικανότητα του οπτικού συστήματος να εντοπίσει τα αντικείμενα αυτά.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές αλλαγής χρωματικών χώρων, προσαρμοστικών κατωφλίων, βαθμονόμησης τόσο μονοσκοπικού όσο και στερεοσκοπικού οπτικού συστήματος, εξαγωγής χαρακτηριστικών αντιστοιχισμένων σημείων και τέλος τεχνικές υπολογισμού απόστασης.

1.4 Περίληψη αποτελεσμάτων

Η αξιοπιστία του υπολογισμού της απόστασης με την χρήση του οπτικού συστήματος στηρίζεται στην ικανότητα του να συμπεριλαμβάνει ένα ολόκληρο αντικείμενο στο οπτικό του πεδίο. Το σφάλμα υπολογισμού κυμαίνεται από 0.1 έως 5% σε αντικείμενα τοποθετημένα σε απόσταση από 27cm έως 8m από το ρομποτικό, ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού του αντικειμένου και την ικανότητα του αλγορίθμου να διακρίνει το αντικείμενο από το φόντο.

Από τα πειράματα που διεξήχθησαν κατά την εκπόνηση της εργασίας αποδεικνύεται ότι η σύνθεση των πληροφοριών που προέρχονται από το οπτικό σύστημα και τους αισθητήρες υπερήχων του ρομποτικού οχήματος, παρέχουν μια ικανοποιητική αναπαράσταση του χώρου κίνησης. Συγκεκριμένα, με την χρήση του οπτικού συστήματος επιτυγχάνεται η αναγνώριση αντικειμένων που αδυνατούν να εντοπίσουν οι αισθητήρες υπερήχων.

Τέλος, ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε για τον έλεγχο της κίνησης του ρομπότ με την χρήση πληροφοριών τόσο από τους αισθητήρες υπερήχων όσο και από το οπτικό σύστημα, αποδεικνύεται ότι επιτυγχάνει την ασφαλή μετάβαση του από μια αρχική θέση σε μια τελική.

1.5 Δομή της εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η βιβλιογραφική επισκόπηση του θέματος. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται εργασίες που αφορούν την σύνθεση πληροφοριών

αισθητήρων υπερήχων και οπτικού συστήματος για την πλοήγηση έντροχων ρομπότ. Παράλληλα, παρουσιάζονται εργασίες σχετικές με τον εντοπισμό έγχρωμων αντικειμένων και με τις τεχνικές βαθμονόμησης του οπτικού συστήματος. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ρομποτικού οχήματος ATRVMini του Εργαστηρίου Ευφών Συστημάτων και Ρομποτικής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των τεχνικών λήψης και επεξεργασίας εικόνας, βαθμονόμησης μονοσκοπικού και στερεοσκοπικού συστήματος, της εξαγωγής αντιστοιχισμένων σημείων και του αλγορίθμου κίνησης. Στο πέμπτο και έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αλγορίθμων και τα συμπεράσματα της εργασίας αντίστοιχα, ενώ στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής βιβλιογραφική παρουσίαση.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Πολλές εργασίες έχουν πραγματοποιηθεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος της σύνθεσης πληροφοριών του οπτικού συστήματος και των αισθητήρων υπερήχων για την πλοήγηση των έντροχων ρομπότ. Στην συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες από αυτές.

Murphy [11]: Παρουσιάζει την θεωρία Dempster-Shafer και την εφαρμογή της σε προβλήματα σύνθεσης πληροφοριών από διάφορους αισθητήρες για την αυτόνομη πλοήγηση έντροχων ρομπότ.

Duffy, Garcia, Rooney, O'Hare [12]: Παρουσιάζουν την σύνθεση πληροφοριών οπτικού συστήματος και αισθητήρων υπέρηχων για την αυτόνομη πλοήγηση ομάδας έντροχων ρομπότ σε τυπικό περιβάλλον γραφείου. Τρεις εμπρόσθιοι αισθητήρες υπερήχων χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό αντικειμένων όπως τοίχοι, ανοιχτές πόρτες και γωνίες, ενώ το οπτικό σύστημα ενεργοποιείται για την λεπτομερή αναπαράσταση τους.

Cubber [13]: Στην εργασία του ο ρόλος του οπτικού συστήματος είναι η ανίχνευση της θέσης ενός κινούμενου στόχου, ενώ οι αισθητήρες υπερήχων αναλαμβάνουν τον εντοπισμό στατικών εμποδίων. Σκοπός της εργασίας είναι η αυτόνομη πλοήγηση έντροχου πνευματικού ρομπότ σε εσωτερικό χώρο.

Ohya, Kosaka, Kak [14]: Πραγματοποιούν εντοπισμό στατικών εμποδίων με την χρήση του οπτικού συστήματος και εντοπισμό κινούμενων εμποδίων με την χρήση αισθητήρων υπερήχων, για την πλοήγηση έντροχου ρομποτικού οχήματος σε εσωτερικό περιβάλλον. Χρησιμοποιείται μοντέλο του περιβάλλοντα χώρου για τον εντοπισμό των στατικών εμποδίων από το οπτικό σύστημα και για την παρακολούθηση της θέσης του ρομπότ.

Wilhelm, Bohme, Gross [15]: Στην εργασία τους παρουσιάζουν την σύνθεση πληροφοριών του οπτικού συστήματος και των αισθητήρων υπερήχων με σκοπό τον εντοπισμό ανθρώπινης φιγούρας.

Παρόμοιες εργασίες είναι εκείνες που στην θέση των αισθητήρων υπερήχων χρησιμοποιούν αισθητήρες δέσμης λέιζερ. Αναφέρονται οι εξής:

Baltzakis, Argyros, Trahanias [16]: Πραγματοποιείται εντοπισμός εμποδίου από τους αισθητήρες δέσμης λέιζερ και τρισδιάστατη αναπαράσταση του από το οπτικό σύστημα με σκοπό την αυτόνομη πλοήγηση έντροχου ρομποτικού οχήματος.

Rasmussen [17]: Σύνθεση πληροφοριών που αντλούνται από αισθητήρες δέσμης λέιζερ και το οπτικό σύστημα για εφαρμογές αυτόνομης παρακολούθησης ανάγλυφων δρόμων.

Σημαντικές εργασίες που αφορούν στην εξαγωγή έγχρωμων χαρακτηριστικών από μια εικόνα είναι οι εξής:

Llahi, Aranda, Sanfeliu [18]: Χρησιμοποιούν έγχρωμα ιστογράμματα για την παρακολούθηση έγχρωμων αντικειμένων.

Zhang, Wang [19]: Χρησιμοποιείται ο χρωματικός χώρος HSI με ιδιαίτερη έμφαση στα συστατικά απόχρωσης (hue) και έντασης (intensity) για τον εντοπισμό αντικειμένων σε έγχρωμη εικόνα.

Valavanis, Zheng, Paschos [20]: Στην εργασία τους χρησιμοποιούνται οι χρωματικοί χώροι CIE XYZ και CIE yxY για τον υπολογισμό της τιμής ολικής διαφοράς χρώματος, που συνδυάζει χρωματικές διαφορές και διαφορές φωτεινότητας, για την κατάτμηση έγχρωμης εικόνας (scene segmentation).

Τέλος, ως εργασίες που αφορούν στην βαθμονόμηση μονοσκοπικού και στερεοσκοπικού συστήματος αναφέρονται οι εξής:

Wilczkowiak, Boyer, Sturm [21]: Προτείνεται μια μέθοδος βαθμονόμησης μονοσκοπικού οπτικού συστήματος και ανακατασκευής τρισδιάστατου χώρου με την χρήση παραλληλεπίπεδων.

Sabharwal [22]: Παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για την ανακατασκευή τρισδιάστατου χώρου με την χρήση στερεοσκοπικού οπτικού συστήματος, χωρίς να υπάρχει γνώση για την Σχέση μεταξύ των δύο οπτικών συστημάτων παρά μόνο των σημείων αντιστοίχισης.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ATRV-MINI

3.1 Εισαγωγή

Το ρομποτικό όχημα που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας είναι το ATRV-Mini της iRobot. Πρόκειται για έντροχο ρομποτικό όχημα με δυνατότητα λειτουργίας τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους και ανήκει στην κατηγορία των οχημάτων που στρίβουν με ολίσθηση των τροχών.



Σχήμα 3.1. Το έντροχο ρομποτικό όχημα ATRV-Mini

3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ρομποτικού οχήματος.

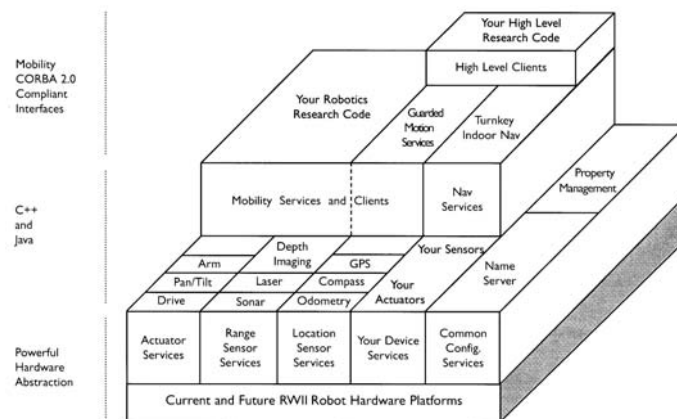
Μήκος	62.2 cm
Πλάτος	53.3 cm
Ύψος	45 cm
Βάρος	38.6 Kg
Μέγιστη ταχύτητα	1.5 m/sec
Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα	250°/sec
Ωφέλιμο φορτίο	9 kg

Χρόνος λειτουργίας	3 έως 6 hr
Κίνηση	4 τροχοί
Τρόπος κατεύθυνσης	Ολίσθηση των τροχών
Μπαταρίες	Δύο 12V, 12 amp/hr
Κινητήρες	Δύο 0.1 Hp, 24V DC servo motors
Υπολογιστής	Pentium III
Περιβάλλον λειτουργίας	Redhat Linux 6.2
I/O ports	Ethernet, Wireless Ethernet, RS-232, Joystick
Αισθητήρες	24 αισθητήρες υπερήχων Κάμερα (SONY EVI D30) Παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (GPS) Πυξίδα Γωνιόμετρο

Πίνακας 3.1 Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έντροχου ρομπότ ATRV-Mini

3.2 Το λογισμικό MOBILITY

Το MOBILITY είναι ένα αντικειμενοστραφές εργαλείο που παρέχεται από την iRobot για την δημιουργία προγραμμάτων ελέγχου για συστήματα ενός ή περισσότερων έντροχων ρομπότ. Αποτελείται από ένα σύνολο λογισμικών εργαλείων, το αντικείμενο του μοντέλου του ρομποτικού οχήματος, βασικές μονάδες (modules) ελέγχου του ρομπότ (κίνηση, sonar, κάμερα, GPS) και ένα αντικειμενοστραφές περιβάλλον εργασίας για την απλοποίηση της ανάπτυξης κώδικα.



Σχήμα 3.2. Η αρχιτεκτονική του περιβάλλοντος MOBILITY

Όπως φαίνεται στην Σχήμα 3.2, το Mobility προσδιορίζει το αντικείμενο του οχήματος χρησιμοποιώντας το CORBA standard, το οποίο του δίνει τη δυνατότητα να υποστηρίζει πολλές γλώσσες προγραμματισμού σε διάφορες πλατφόρμες. Το περιβάλλον του

MOBILITY επιτρέπει στο χρήστη να τροποποιήσει βασικά μέρη του συστήματος του ρομπότ και να προσθέσει νέα, ανάλογα με τις ανάγκες του.

Το αντικείμενο του ρομποτικού οχήματος αποτελείται από μια σειρά άλλων αντικειμένων. Καθένα από αυτά αντιπροσωπεύει μέρη του ρομπότ όπως τους αισθητήρες και το μηχανισμό κίνησης. Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να τροποποιηθούν ή να χρησιμοποιηθούν ως συναρτήσεις σε νέους αλγορίθμους.

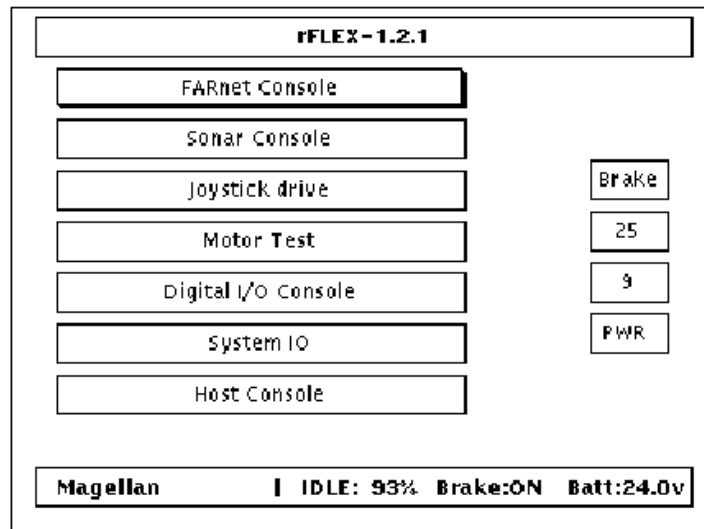
Το Mobility υποστηρίζει γλώσσες προγραμματισμού όπως η Java και η C++.

3.3 Το σύστημα ελέγχου

Το rFlex είναι το σύστημα ελέγχου του ρομποτικού οχήματος και των περιφερειακών του που λειτουργεί χωρίς την χρήση υπολογιστικής μονάδας και βρίσκεται πάνω στο ρομπότ. Αποτελείται από ένα απλό αλληλεπιδραστικό περιβάλλον εργασίας με το οποίο πραγματοποιείται διαχείριση, διαμόρφωση και διάγνωση των περιφερειακών. Οι κύριες λειτουργίες του rFlex είναι:

- Εκκίνηση – Τερματισμός λειτουργίας του ρομπότ
- Ορισμός του τύπου του δικτύου στο οποίο μετέχει το ρομπότ
- Ενεργοποίηση και έλεγχος των αισθητήρων ήχου
- Ενεργοποίηση της οδήγησης με χειριστήριο
- Έλεγχος των μοτέρ
- Ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των φρένων
- Ένδειξη στάθμης μπαταρίας
- Μεταφορά στην οθόνη του λειτουργικού συστήματος
- Έλεγχος των θυρών επικοινωνίας

Οι πληροφορίες παρέχονται στον χρήστη μέσω μιας οθόνης υγρών κρυστάλλων που βρίσκεται στο πίσω μέρος της κορυφής του ρομπότ. Η εναλλαγή μεταξύ των λειτουργιών πραγματοποιείται με διακριτό ποτενσιόμετρο.



Σχήμα 3.3. Η κεντρική οθόνη λειτουργιών του rFlex.

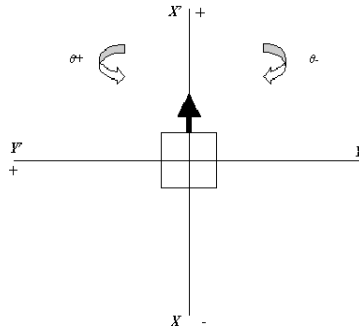
3.4 Σύστημα κατεύθυνσης

Το πλεονέκτημα των έντροχων ρομπότ που στρίβουν με ολίσθηση είναι ότι είναι συμπαγή, απαιτούν λιγότερα εξαρτήματα για να κατασκευαστούν και επιδεικνύουν εξαιρετική ευελιξία στο να κινούνται χρησιμοποιώντας εξαρτήματα τα οποία απαιτούνται για να κινηθεί το όχημα σε ευθεία γραμμή [23]. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ο τρόπος μετάδοσης κίνησης, όπου πραγματοποιείται μόνο σε έναν άξονα γύρω από τον οποίο περιστρέφονται οι τροχοί. Αντίθετα, στα ρομπότ που έχουν κατευθυντήριο τροχό, η κίνηση γίνεται σε δύο άξονες δυσκολεύοντας έτσι την μετάδοση της κίνησης.

3.5 Το σύστημα αξόνων

Το ATRV-Mini κινείται με βάση ένα ορθοκανονικό σύστημα αξόνων που έχει οριστεί από την iRobot και έχει τον προσανατολισμό που φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

Οι διαφορές του συστήματος αυτού σε σχέση με το καρτεσιανό σύστημα αξόνων είναι ο ορισμός των αξόνων X-Y. Ο άξονας Y του καρτεσιανού συστήματος αντιστοιχεί στον άξονα X του συστήματος του οχήματος και αντίστροφα. Διαφορετικά επίσης ορίζονται και τα θετικά και τα αρνητικά πρόσημα. Οι γωνίες στροφής και ο ορισμός τους ως αρνητικές ή θετικές φαίνονται στο Σχήμα 3.4. Κατά την δημιουργία των προγραμμάτων ο σχεδιασμός έγινε με βάση το παραπάνω σύστημα αξόνων



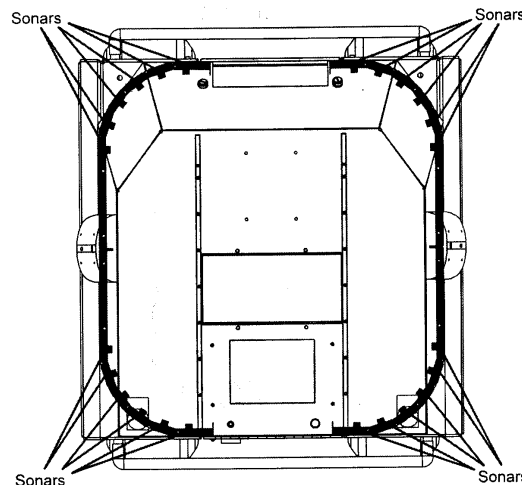
Σχήμα 3.4. Ορθοκανονικό σύστημα αξόνων του ATRV-Mini

3.6 Αισθητήρες υπερήχων

Οι αισθητήρες υπερήχων αναπτύχθηκαν στην διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου ως μέσο εντοπισμού εχθρικών υποβρυχίων. Αποτελούνται από ένα σύστημα πομπού, μετατροπέα και δέκτη. Ένας ηλεκτρικός παλμός παράγεται από τον πομπό, μετατρέπεται σε ηχητικό κύμα και μεταδίδεται στον αέρα. Όταν το κύμα συναντήσει ένα αντικείμενο αντηχείτε. Η αντήχηση επιστρέφει στον μετατροπέα, μετασχηματίζεται σε ηλεκτρικό παλμό και αναλύεται από τον δέκτη. Με δεδομένη την ταχύτητα του ήχου στον αέρα και με τον υπολογισμό του χρόνου αποστολής και λήψης του ηλεκτρικού παλμού, είναι δυνατή η μέτρηση της απόστασης του αντικειμένου.

Σημαντικά πλεονεκτήματα των αισθητήρων υπερήχων είναι το μικρό κόστος κατασκευής τους και ο υπολογισμός απόστασης με πολύ γρήγορο ρυθμό.

Περιμετρικά του ATRV-Mini βρίσκονται 24 αισθητήρες υπερήχων, Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5. Διάταξη των αισθητήρων υπερήχων για το ATRV-Mini

Η περιοχή εντοπισμού κάθε αισθητήρα περιγράφεται από έναν κώνο με κορυφή το κέντρο του και γωνία 30°.

Σημαντικά προβλήματα των αισθητήρων υπερήχων του ρομποτικού οχήματος ATRV-Mini είναι ότι αποτυγχάνουν να εντοπίσουν αντικείμενα μικρά σε μέγεθος, ή αντικείμενα που βρίσκονται τοποθετημένα με μεγάλη γωνία σε σχέση με την ακτίνα των αισθητήρων.

3.7 Οπτικό σύστημα

Σημαντική συσκευή για την πλοήγηση ρομποτικού οχήματος αποτελεί το οπτικό σύστημα. Με τη βοήθεια του είναι δυνατή η σύλληψη του χώρου σε εικόνες ή βίντεο. Οι εικόνες και το βίντεο επεξεργάζονται και παρέχουν σημαντικά στοιχεία για την πορεία του ρομπότ.

Το οπτικό σύστημα που χρησιμοποιείται από το ATRV-Mini αποτελείται από την κάμερα SONY EVI-D30 (Σχήμα 3.6). Λειτουργεί σε NTSC Color standard, έχει 12X βαθμό μεγέθυνσης και διαθέτει δύο κινητήρες που της επιτρέπουν κίνηση στον οριζόντιο άξονα με εύρος 200° με μέγιστη ταχύτητα 80°/sec και στον κατακόρυφο άξονα με εύρος 50° με μέγιστη ταχύτητα 50°/sec. Η SONY EVI-D30 έχει την ικανότητα αναγνώρισης και παρακολούθησης κίνησης.

Η επικοινωνία της κάμερας με τον υπολογιστή του ATRV-Mini γίνεται με το πρωτόκολλο VISCA/RS-232C το οποίο είναι σε θέση να διαχειριστεί 142 εντολές που σχετίζονται με την λειτουργία της.

Οι πληροφορίες του οπτικού σήματος μεταφέρονται στον υπολογιστή με την χρήση μιας συσκευής πρόσκτησης γραφικών. Για το ATRV-Mini, η iRobot έχει επιλέξει την HAUPPAUGE BTV848 η οποία έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει τρεις κάμερες σε διαδοχική λειτουργία. Η σύνδεση του οπτικού συστήματος με την συσκευή πρόσκτησης γραφικών πραγματοποιείται με ομοαξονικό καλώδιο.



Σχήμα 3.6. Οπτικό σύστημα του έντροχου ρομπότ ATRV-Mini

Για τις ανάγκες τις εργασίας, πραγματοποιήθηκαν, αρχικά, πειράματα με μία κάμερα. Στην συνέχεια προστέθηκε μια δεύτερη κάμερα με σκοπό την βελτίωση των αποτελεσμάτων του συστήματος.

4. ΟΠΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

4.1 Εισαγωγή

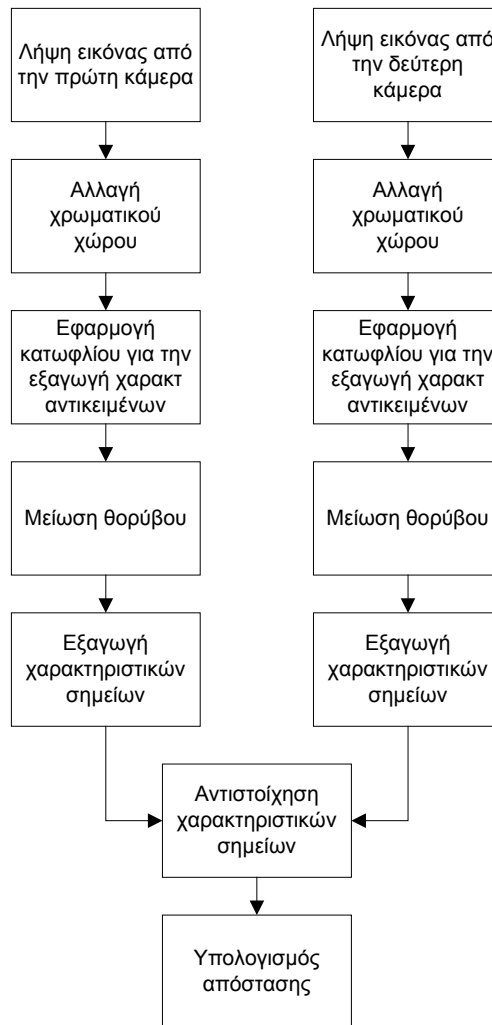
Η περιορισμένη δυνατότητα των αισθητήρων υπερήχων να εντοπίσουν αντικείμενα που βρίσκονται εντός της τροχιάς ενός έντροχου ρομποτικού οχήματος, πιστοποιεί την ανάγκη χρήσης του οπτικού συστήματος για την πλοήγηση του. Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με το ρομπότ ATRV-Mini καταδεικνύουν την αναγκαιότητα χρήσης του συστήματος όρασης προκειμένου να αντισταθμιστεί η αναποτελεσματική λειτουργία των αισθητήρων υπερήχων.

Σκοπός της εργασίας είναι η χρήση του οπτικού συστήματος για την αναγνώριση εμποδίων που αποτυγχάνουν να εντοπίσουν οι αισθητήρες υπερήχων.

Η λειτουργία του οπτικού συστήματος ξεκινά με την λήψη ζεύγους έγχρωμων εικόνων από μια κάμερα τοποθετημένη στην κορυφή του ρομποτικού οχήματος, που περιγράφουν τον εμπρόσθιο χώρο κίνησης. Οι εικόνες που λαμβάνονται από την κάμερα υποβάλλονται σε επεξεργασία με σκοπό την εξαγωγή χαρακτηριστικών αντικειμένων. Τα αντικείμενα αυτά επιλέγονται με βάση το χρώμα τους και αποτελούνται από τα εμπόδια που αποτυγχάνουν να εντοπίσουν οι αισθητήρες υπερήχων. Η επεξεργασία περιλαμβάνει μεθόδους αλλαγής χρωματικών χώρων, επιλογής κατωφλίου και εφαρμογής φίλτρων. Στην συνέχεια πραγματοποιείται εξαγωγή και αντιστοίχιση χαρακτηριστικών σημείων με την χρήση του συντελεστή Moravec για τις δύο επεξεργασμένες εικόνες. Τέλος βαθμονομείται το οπτικό σύστημα και υπολογίζεται η απόσταση του εμποδίου από το ρομπότ.

Όμοια διαδικασία ακολουθείται και στην περίπτωση όπου το οπτικό σύστημα αποτελείται από δύο κάμερες. Τότε όμως, το ζευγάρι των έγχρωμων εικόνων συγκροτείται με την λήψη μιας φωτογραφίας από κάθε κάμερα.

Στο Σχήμα 4.1.1 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα της λειτουργίας του οπτικού συστήματος που αποτελείται από δύο κάμερες.



Σχήμα 4.1.1. Διάγραμμα ροής της λειτουργίας του οπτικού συστήματος

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας τα αντικείμενα που αποτυγχάνουν να εντοπίσουν οι αισθητήρες υπερήχων χρωματίστηκαν κίτρινα προκειμένου να εντοπιστούν ευκολότερα από το οπτικό σύστημα. Το κίτρινο χρώμα επιλέχθηκε επειδή δεν συναντάται εύκολα στο περιβάλλον του εργαστηρίου. Αυτό όμως δεν βλάπτει την γενικότητα, διότι οι τεχνικές που ακολουθήθηκαν για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών αντικειμένων με βάση το χρώμα τους λειτουργούν εξίσου ικανοποιητικά για κάθε χρώμα.

4.2 Λήψη ζεύγους εικόνων

Η λήψη μιας εικόνας περιλαμβάνει την διαδικασία πρόσκτησής της από το οπτικό σύστημα και την ψηφιοποίησή της. Η λήψη της εικόνας πραγματοποιείται με την δημιουργία ειδικών αλγορίθμων, ενώ η ψηφιοποίηση του οπτικού σήματος γίνεται από την κάρτα πρόσκτησης γραφικών. Στην εργασία αυτή δημιουργήθηκαν δύο αλγόριθμοι

για την λήψη ζεύγους εικόνων. Ο πρώτος αλγόριθμος χρησιμοποιεί συναρτήσεις του περιβάλλοντος MOBILITY, ενώ ο δεύτερος αξιοποιεί το Video For Linux API. Και οι δύο αλγόριθμοι είναι γραμμένοι με γλώσσα προγραμματισμού C++.

4.2.1 Αλγόριθμος λήψης εικόνων με χρήση συναρτήσεων περιβάλλοντος MOBILITY

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας έχει την δυνατότητα να λαμβάνει ψηφιακές έγχρωμες εικόνες από την κάρτα πρόσκτησης γραφικών και να τις αποθηκεύει στην μνήμη του υπολογιστή. Αποτελείται από δύο υποπρογράμματα που λειτουργούν παράλληλα. Το πρώτο, v4lserver, λαμβάνει μια ακολουθία εικόνων από το οπτικό σύστημα και τροφοδοτεί, μετά από αίτηση, με μία εικόνα το δεύτερο. Το υποπρόγραμμα v4lserver παρέχεται από την iRobot και εκτελείται ως εξωτερική εφαρμογή πριν από το δεύτερο. Το χρωματικό πρότυπο που χρησιμοποιεί είναι το BGR (μπλε, πράσινο, κόκκινο) και έχει την δυνατότητα να λαμβάνει 15 εικόνες το δευτερόλεπτο. Η δομή του αλγορίθμου είναι η εξής

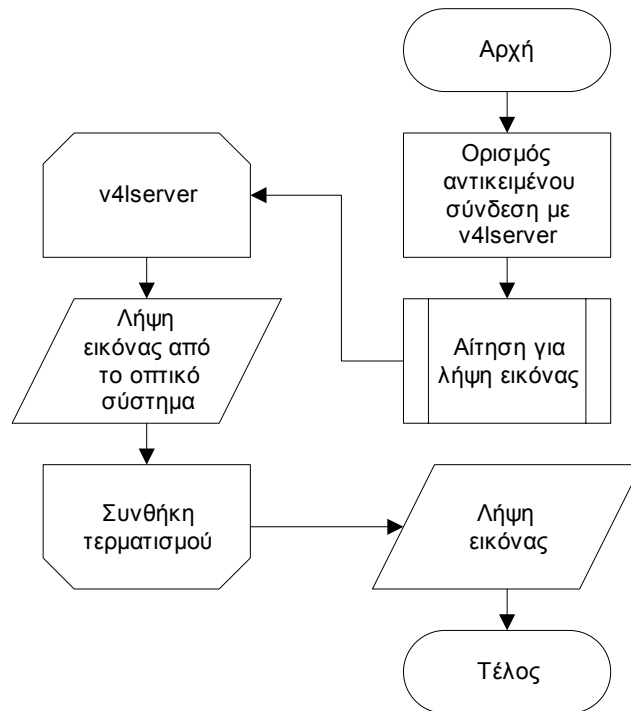
Βήμα 1. Εκκίνηση του υποπρογράμματος v4lserver

Βήμα 2. Ορισμός αντικειμένου για την σύνδεση με τον v4lserver

Βήμα 3. Αίτηση για λήψη νέας εικόνας

Βήμα 4. Λήψη νέας εικόνας

Σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι η ταχύτητα λήψης της εικόνας ενώ σημαντικό μειονέκτημα είναι η αδυναμία του να υποστηρίξει δεύτερη κάμερα. Στο Σχήμα 4.2.1 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.2.1. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου λήψης εικόνας μέσω συναρτήσεων MOBILITY

4.2.2 Αλγόριθμος λήψης εικόνων με την χρήση εντολών του λειτουργικού συστήματος Linux

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας έχει την δυνατότητα να λαμβάνει ψηφιακές έγχρωμες εικόνες από την συσκευή πρόσκτησης γραφικών και να τις αποθηκεύει προσωρινά στην μνήμη του υπολογιστή. Το χρωματικό πρότυπο που χρησιμοποιεί είναι το RGB (κόκκινο, πράσινο, μπλε) και έχει την δυνατότητα να λαμβάνει 30 εικόνες το δευτερόλεπτο. Η δομή του αλγορίθμου είναι η εξής:

- Βήμα 1. Ορισμός αρχείου περιγραφής (descriptor file) που αναλαμβάνει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ της συσκευής πρόσκτησης γραφικών και του υπολογιστή
- Βήμα 2. Έλεγχος διαθεσιμότητας συσκευής πρόσκτησης γραφικών
- Βήμα 3. Ενεργοποίηση της συσκευής πρόσκτησης γραφικών
- Βήμα 4. Ορισμός της ανάλυσης και του χρωματικού προτύπου της εικόνας
- Βήμα 5. Ορισμός της πηγής λήψης της εικόνας
- Βήμα 6. Λήψη εικόνας από την κάμερα
- Βήμα 7. Αποθήκευση της εικόνας στην μνήμη του υπολογιστή
- Βήμα 8. Απενεργοποίηση συσκευής πρόσκτησης γραφικών

Σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι η δυνατότητα του να λαμβάνει πληροφορίες από τις τρεις διαφορετικές πηγές της κάρτας πρόσκτησης γραφικών. Οι πηγές αυτές είναι οι: Composite, Svideo και Television. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατόν να ληφθούν ταυτόχρονα πληροφορίες από δύο κάμερες συνδεδεμένες σε διαφορετικές πηγές της κάρτας πρόσκτησης γραφικών. Στο Σχήμα 4.2.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.2.2. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου λήψης εικόνας

4.3 Ψηφιοποίηση εικόνας [24]

Ένα συνεχές αναλογικό οπτικό σήμα, προκειμένου να γίνει κατάλληλο για επεξεργασία από τον υπολογιστή, διακριτοποιείται όσον αφορά στις χωρικές συντεταγμένες και στην φωτεινότητα, σε μια δισδιάστατη συνάρτηση εικόνας $f(x,y)$, όπου x και y οι χωρικές συντεταγμένες και $f(x,y)$ η τιμή της φωτεινότητας που είναι ανάλογη με την φωτεινότητα της εικόνας σε εκείνο το σημείο. Η διακριτή συνάρτηση $f(x,y)$ μπορεί να αναπαρασταθεί με την μορφή $N \times M$ πίνακα

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \dots & f(1,M) \\ f(2,1) & f(2,2) & \dots & f(2,M) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(N,1) & f(N,2) & \dots & f(N,M) \end{bmatrix}.$$

Οι διαστάσεις M και N του πίνακα $f(x,y)$ είναι ανάλογες τις διακριτοποίησης των χωρικών συντεταγμένων που απαιτεί κάθε εφαρμογή.

Τα στοιχεία του πίνακα ονομάζονται εικονοστοιχεία και συνήθως λαμβάνουν τιμές στο διάστημα $[0, 255]$ για μονόχρωμες εικόνες, όπου στο μηδέν αντιστοιχούν τα μαύρα εικονοστοιχεία ενώ στο 255 τα λευκά. Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις όπου το εύρος των τιμών των εικονοστοιχείων είναι διαφορετικό. Για παράδειγμα στις εικόνες που χρησιμοποιούνται στην ιατρική, οι τιμές των εικονοστοιχείων ανήκουν στο διάστημα $[0, 4095]$.

Στην περίπτωση όπου το αναλογικό οπτικό σήμα περιλαμβάνει πληροφορίες χρώματος, η διακριτοποίηση πραγματοποιείται προς μια τρισδιάστατη συνάρτηση $f(x,y,z)$ όπου στην διάσταση z περιλαμβάνονται οι πληροφορίες χρώματος. Ο πιο διαδεδομένος χρωματικός χώρος για την απεικόνιση μια έγχρωμης εικόνας είναι ο RGB ο οποίος χρησιμοποιεί τα τρία βασικά χρώματα: κόκκινο, πράσινο και μπλε. Η διακριτή συνάρτηση $f(x,y,z)$ μπορεί να αναπαρασταθεί με την μορφή ενός πίνακα $N \times 3M$

$$f(x,y,z) = \begin{bmatrix} f(1,1,r) & f(1,1,g) & f(1,1,b) & \dots & f(1,M,r) & f(1,M,g) & f(1,M,b) \\ f(2,1,r) & f(2,1,g) & f(2,1,b) & \dots & f(2,M,r) & f(2,M,g) & f(2,M,b) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(N,1,r) & f(N,1,g) & f(N,1,b) & \dots & f(N,M,r) & f(N,M,g) & f(N,M,b) \end{bmatrix}.$$

Κάθε εικονοστοιχείο συμπληρώνεται από μια διαδοχική τριάδα των στοιχείων του πίνακα $f(x,y,z)$. Αυτό συμβαίνει επειδή τα τρία στοιχεία του πίνακα $f(x,y,z)$ περιέχουν τις τιμές του κόκκινου, πράσινου και μπλε χρώματος που συνθέτουν το εικονοστοιχείο.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν έγχρωμες εικόνες του χρωματικού χώρου RGB με διακριτοποίηση των χωρικών συντεταγμένων 240x320. Το μέγεθος αυτό επιλέχθηκε επειδή περιγράφει ικανοποιητικά τον χώρο και δεν απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ για την επεξεργασία του.

4.4 Χρωματικοί χώροι [24, 25]

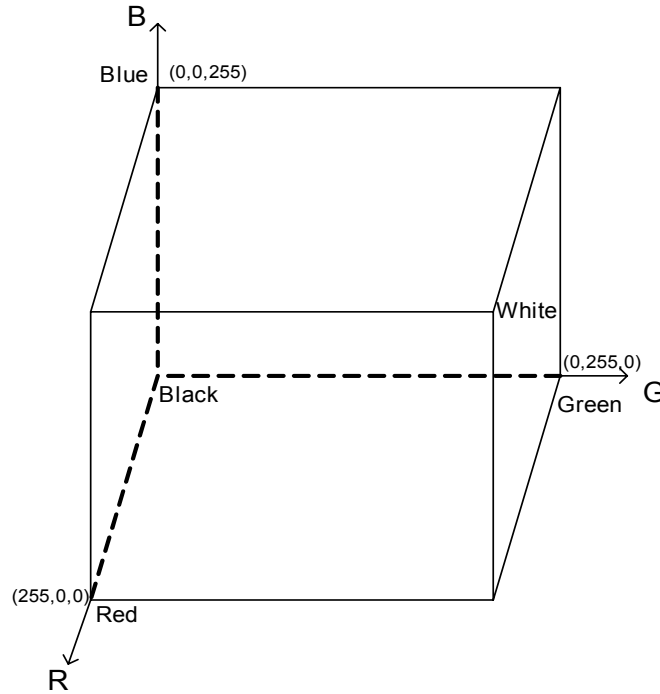
Οι χρωματικοί χώροι χρησιμοποιούνται για την προβολή των προδιαγραφών των χρωμάτων με έναν γενικά αποδεκτό τρόπο. Στην πραγματικότητα ένας χρωματικός χώρος είναι ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων μέσα στο οποίο κάθε χρώμα αντιπροσωπεύεται από ένα μοναδικό σημείο.

Οι χρωματικοί χώροι που χρησιμοποιούνται συνήθως στην επεξεργασία εικόνας είναι ο RGB (κόκκινο, πράσινο, μπλε) και ο HSI (απόχρωση, χρωματική καθαρότητα, ένταση).

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται το οπτικό σύστημα του έντροχου ρομποτικού οχήματος ATRV-Mini για τον εντοπισμό εμποδίων που αποτυγχάνουν να εντοπίσουν οι αισθητήρες υπερήχων. Τα εμπόδια αυτά έχουν χρωματιστεί κίτρινα. Έτσι, ο σκοπός της χρήσης του οπτικού συστήματος είναι ο εντοπισμός κίτρινων αντικειμένων μέσα σε μια έγχρωμη εικόνα. Για να γίνει αυτό απαιτείται η μεταφορά της εικόνας που λαμβάνεται από το οπτικό σύστημα σε διαφορετικούς χρωματικούς χώρους. Οι χρωματικοί χώροι που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό είναι οι HSI, CMYK και YCbCr, που περιγράφονται στη συνέχεια.

4.4.1 Χρωματικός χώρος RGB

Οι εικόνες που λαμβάνονται από το οπτικό σύστημα του ATRV-Mini ανήκουν στο χρωματικό χώρο RGB. Κάθε χρώμα εμφανίζεται ως συνάρτηση των τριών βασικών χρωμάτων κόκκινο, πράσινο και μπλε. Ο χώρος αυτός βασίζεται στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων του Σχήματος 4.4.1 του οποίου η περιοχή ενδιαφέροντος είναι ένας κύβος με αρχή το μαύρο χρώμα. Τα βασικά χρώματα κόκκινο, πράσινο και μπλε βρίσκονται στις τρεις γωνίες του κύβου. Οι τιμές των χρωμάτων ανήκουν στο διάστημα [0, 255].

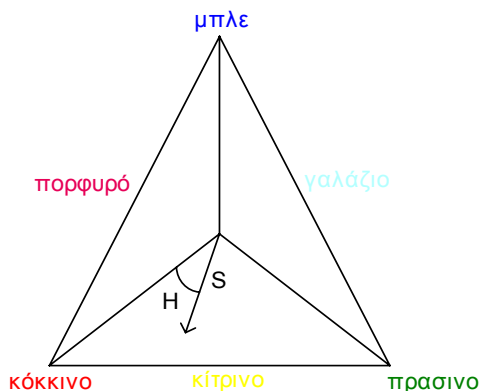


Σχήμα 4.4.1. Χρωματικός χώρος RGB

4.4.2 Χρωματικός χώρος HSI

Ο χρωματικός χώρος HSI προσομοιώνει πολύ καλά την ανθρώπινη αντίληψη του χρώματος. Αποτελείται από τα συστατικά απόχρωση (hue), καθαρότητα (saturation), και ένταση (intensity). Το συστατικό της απόχρωσης H, χρησιμοποιείται για την διάκριση των χρωμάτων και τον υπολογισμό της ποσότητας χρώματος του φωτός. Το συστατικό της καθαρότητας S, υπολογίζει την ποσότητα του λευκού φωτός που προστίθεται σε ένα καθαρό χρώμα. Τέλος το συστατικό της έντασης I, αναφέρεται στην διάκριση της έντασης του φωτός.

Ο χρωματικός χώρος HSI περιγράφεται από το τρίγωνο του Σχήματος 4.4.2, όπου οι συνδυασμοί της απόχρωσης H, και της καθαρότητας S, εμφανίζονται ως συνδυασμοί των βασικών χρωμάτων κόκκινο, πράσινο και μπλε. Οι κορυφές του τριγώνου αντιστοιχούν στις μέγιστες ποσότητες χρώματος. Τα εικονοστοιχεία που δεν έχουν χρώμα βρίσκονται στο κέντρο του τριγώνου.



Σχήμα 4.4.2. Χρωματικός χώρος HSI

Οι τιμές που λαμβάνει το συστατικό H κυμαίνονται στο διάστημα $[0^\circ, 360^\circ]$, ενώ οι τιμές των συστατικών S και I κυμαίνονται στο διάστημα $[0, 1]$. Καθώς η απόχρωση H, κινείται από τις 0° στις 360° το χρώμα αλλάζει από κόκκινο σε κίτρινο, πράσινο, γαλάζιο, μπλε, πορφυρό και πάλι κόκκινο. Καθώς η τιμή της καθαρότητας S, αυξάνεται από μηδέν στο ένα, τα χρώματα γίνονται καθαρότερα. Τέλος, καθώς η τιμή της έντασης I, αυξάνεται από μηδέν στο ένα, τα χρώματα γίνονται φωτεινότερα.

Το συστατικό της απόχρωσης H του χώρου HSI είναι σημαντικό για τον εντοπισμό συγκεκριμένου χρώματος σε μια εικόνα. Κάθε χρώμα έχει διαφορετική τιμή απόχρωσης. Τα κύρια χρώματα κόκκινο, κίτρινο και πράσινο αντιστοιχούν στις τιμές των 0° , 60° και 120° αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη εργασία αποσκοπεί στον εντοπισμό κίτρινων στοιχείων μιας εικόνας. Έτσι είναι δυνατό με κατάλληλες τεχνικές να εξαχθούν τα εικονοστοιχεία εκείνα η απόχρωση των οποίων κυμαίνεται σε μια μικρή περιοχή γύρω από τις 60° . Οι τεχνικές αυτές αναφέρονται στην παράγραφο 4.5.1.

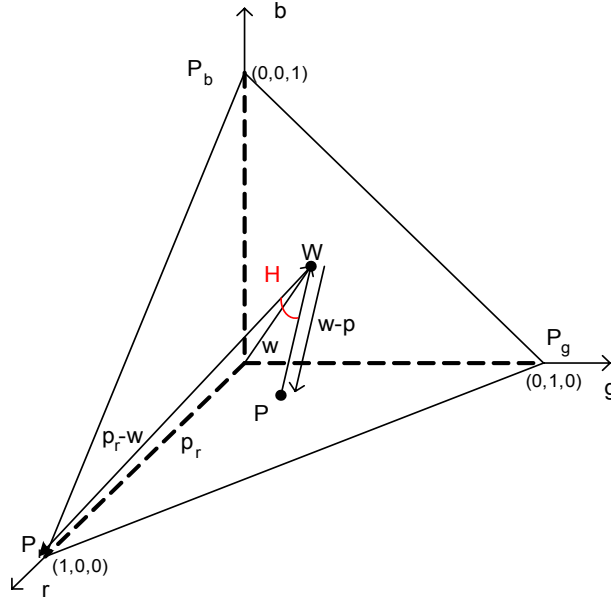
Μια RGB εικόνα μπορεί να μετατραπεί σε HSI με την προϋπόθεση ότι τα βασικά χρώματα κόκκινο, πράσινο και μπλε έχουν κανονικοποιηθεί στο διάστημα $[0, 1]$.

Το συστατικό I του χρωματικού χώρου HSI ισούται με το $1/3$ του αθροίσματος των κανονικοποιημένων τιμών RGB

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B). \quad (4.4.1)$$

Η εξαγωγή των εξισώσεων μετατροπής για την απόχρωση και την καθαρότητα ξεκινά με την απαλοιφή της έντασης από τις τιμές RGB:

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R + G + B} \\ g &= \frac{G}{R + G + B} \\ b &= \frac{B}{R + G + B} \end{aligned} \quad (4.4.2)$$



Σχήμα 4.4.3. Υπολογισμός της απόχρωσης, H

Η γεωμετρικός τόπος των πιθανών τιμών r , g , b είναι ένα τρίγωνο στο θετικό όγδοο του τρισδιάστατου χώρου με κορυφές $(1,0,0)$, $(0,1,0)$, $(0,0,1)$ (Σχήμα 4.4.3). Έστω ένα σημείο $P(r,g,b)$ στο τρίγωνο αυτό, p το διάνυσμα που ορίζεται από την αρχή του τριγώνου στο σημείο P , $W(1/3,1/3,1/3)$ το σημείο που αντιστοιχεί στο λευκό χρώμα, w το διάνυσμα από την αρχή του τριγώνου στο σημείο W και p_r το διάνυσμα από την αρχή του τριγώνου στην κορυφή που αντιστοιχεί σε χρώμα πλήρης καθαρότητας. Τότε, το H είναι η γωνία που σχηματίζεται από το διάνυσμα $p_r - w$ προς το διάνυσμα $p - w$ σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Το συνημίτονο της απόχρωσης είναι

$$\cos H = \frac{(p - w) \bullet (p_r - w)}{\|p - w\| \|p_r - w\|}. \quad (4.4.3)$$

Το μέτρο του διανύσματος $p - w$ είναι

$$\|p - w\| = \sqrt{(r - 1/3)^2 + (g - 1/3)^2 + (b - 1/3)^2}, \quad (4.4.4)$$

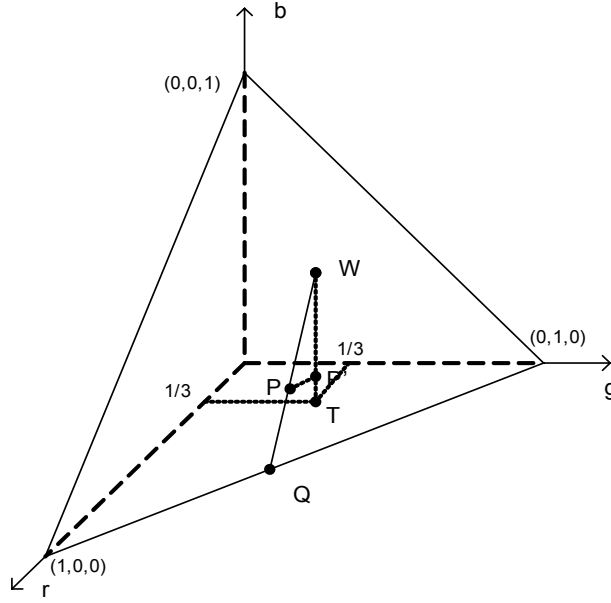
ενώ το μέτρο του διανύσματος $p_r - w$

$$\|p_r - w\| = \sqrt{2/3}. \quad (4.4.5)$$

Από τις εξισώσεις (4.4.2), (4.4.3), (4.4.4) και (4.4.5) προκύπτει

$$\cos H = \frac{2R - G - B}{2\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}}. \quad (4.4.6)$$

Για να ανήκει το H στο διάστημα $[0^\circ, 360^\circ]$ θα πρέπει να αφαιρεθεί από το 360 όταν $B/I > G/I$.



Σχήμα 4.4.4. Υπολογισμός της καθαρότητας, S

Το επόμενο βήμα που είναι ο υπολογισμός της καθαρότητας S , παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 4.4.4. Έστω WP η απόσταση από το σημείο W έως το σημείο P . Έστω WQ το μέτρο της ευθείας που ξεκινά από το σημείο W και καταλήγει σε ένα σημείο Q , πάνω στην ακμή του τριγώνου, και περνά από το σημείο P . Τότε η καθαρότητα, S , ισούται με τον λόγο WP/WQ . Αν T η προβολή του W πάνω στο επίπεδο rg και P' η προβολή του Q στο WT . Τότε

$$S = \frac{\|WP\|}{\|WQ\|} = \frac{\|WP'\|}{\|WT\|} = \frac{\|WT\| - \|P'T\|}{\|WT\|}. \quad (4.4.7)$$

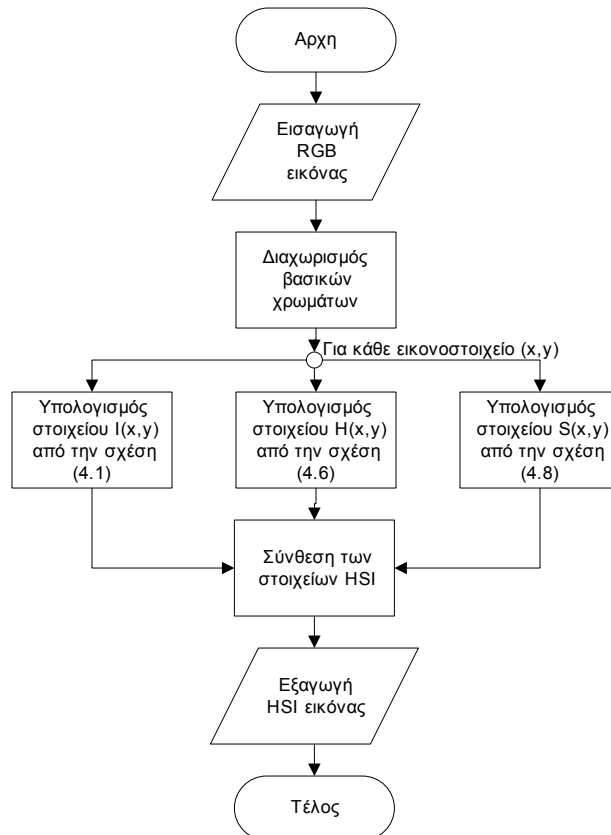
Αφού $\|WT\|=1/3$ και $\|P'T\|=b$

$$S = 3(1/3 - b) = 1 - 3b = 1 - b_0,$$

όπου $b_0 = \min(r_0, g_0, b_0)$. Οπότε

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} \min(R, G, B). \quad (4.4.8)$$

Οι εξισώσεις 4.4.1, 4.4.6 και 4.4.8 ορίζουν πλήρως την μετατροπή μιας RGB εικόνας στον HSI χρωματικό χώρο. Για την μετατροπή αυτή έχει αναπτυχθεί, στα πλαίσια της εργασίας, η συνάρτηση `rgb2hsi()` σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και MATLAB, με υπολογιστικό χρόνο 0.02sec και 0.30sec αντίστοιχα. Είσοδος στην συνάρτηση είναι η εικόνα του χώρου RGB και έξοδος είναι η εικόνα στον χώρο HSI. Το δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.5.



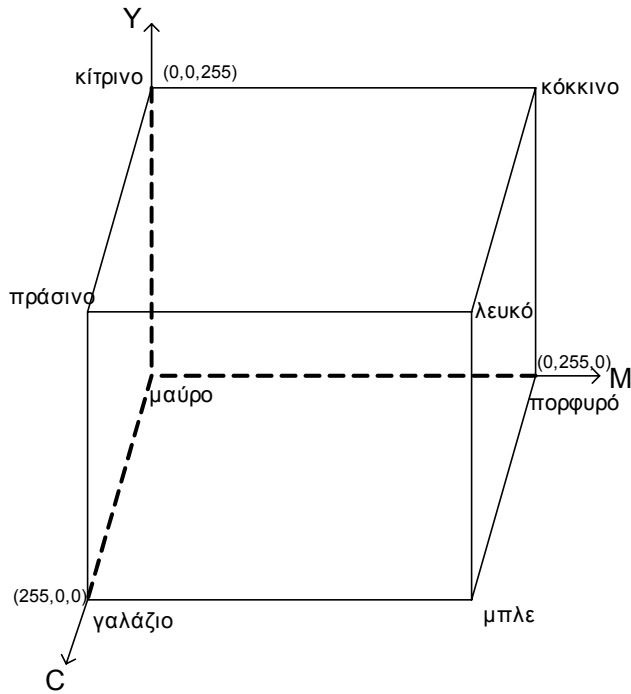
Σχήμα 4.4.5. Δομικό διάγραμμα αλγορίθμου μετατροπής RGB σε HSI

Αναλυτικότερα, η λειτουργία του έχει ως εξής

- Βήμα 1. Εισάγεται η RGB εικόνα, $f(x,y)$
- Βήμα 2. Διαχωρίζονται τα χρώματα κόκκινο, πράσινο και μπλε σε τρεις πίνακες, $R(x,y)$, $G(x,y)$, $B(x,y)$
- Βήμα 3. Για κάθε εικονοστοιχείο υπολογίζεται η τιμή $I(x,y)$
- Βήμα 4. Κανονικοποιούνται οι πίνακες R , G , B στους πίνακες $r(x,y)$, $g(x,y)$, $b(x,y)$
- Βήμα 5. Για κάθε εικονοστοιχείο υπολογίζονται οι τιμές $H(x,y)$, $S(x,y)$.
- Βήμα 6. Συνθέτονται τα στοιχεία H , S , I δημιουργώντας μια εικόνα, $g(x,y)$, που ανήκει στον χρωματικό χώρο HSI.

4.4.3 Χρωματικός χώρος CMYK

Τα βασικά χρώματα του χώρου CMY είναι το γαλάζιο (cyan), το πορφυρό (magenta) και το κίτρινο (yellow). Χρησιμοποιείται ευρέως για εκτυπώσεις έγχρωμων εγγράφων. Ο χρωματικός χώρος περιγράφεται από έναν κύβο, αντίστοιχο με εκείνον του RGB, που στις κορυφές του βρίσκονται βασικά χρώματα γαλάζιο, πορφυρό και κίτρινο (Σχήμα 4.4.6).



Σχήμα 4.4.6. Χρωματικός χώρος CMY

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4.6 τα χρώματα γαλάζιο, πορφυρό και κίτρινο είναι συμπληρωματικά των χρωμάτων κόκκινο, πράσινο και μπλε αντίστοιχα. Έτσι, ο μετασχηματισμός μιας εικόνας RGB στον χρωματικό χώρο CMY επιτυγχάνεται εύκολα με την εξίσωση

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix}_{(x,y)} = \begin{bmatrix} 255 \\ 255 \\ 255 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{(x,y)} . \quad (4.4.9)$$

Ωστόσο, η εξίσωση 4.9 δεν αποδίδει σωστά το μαύρο χρώμα. Για τον λόγο αυτό προστέθηκε η παράμετρος K, η οποία ισούται με την ελάχιστη τιμή των τριών χρωμάτων, δηλαδή

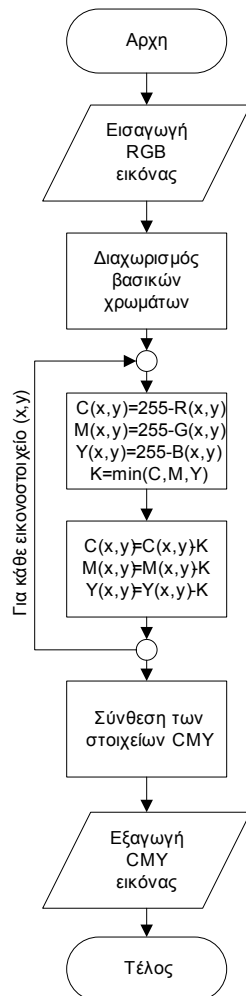
$$K = \min(C, M, Y) . \quad (4.4.10)$$

Έτσι δημιουργήθηκε ο χρωματικός χώρος CMYK όπου

$$\begin{aligned} C &= C - K \\ M &= M - K \\ Y &= Y - K \end{aligned} \quad (4.4.11)$$

Για την μετατροπή μιας εικόνας RGB στον χώρο CMYK έχει αναπτυχθεί, στα πλαίσια της εργασίας, η συνάρτηση rgb2cmyk() σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και MATLAB με υπολογιστικό χρόνο 0.01sec και 0.15sec αντίστοιχα. Είσοδος στην

συνάρτηση είναι η εικόνα στον χρωματικό χώρο RGB και έξοδος η εικόνα στον χρωματικό χώρο CMYK. Το δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.7.



Σχήμα 4.4.7. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου μετατροπής εικόνας RGB σε CMYK

Αναλυτικότερα η λειτουργία του έχει ως εξής

- Βήμα 1. Εισάγεται η RGB εικόνα, $f(x,y)$
- Βήμα 2. Διαχωρίζονται τα χρώματα κόκκινο, πράσινο και μπλε σε τρεις πίνακες $R(x,y)$, $G(x,y)$, $B(x,y)$
- Βήμα 3. Για κάθε εικονοστοιχείο υπολογίζονται οι τιμές C , M , Y , K
- Βήμα 4. Συνθέτονται τα στοιχεία C , M , Y δημιουργώντας μια εικόνα, $g(x,y)$, που ανήκει στον χρωματικό χώρο CMY.

Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ο χρωματικός χώρος CMYK σε αυτή την εργασία, είναι ότι ένα από τα βασικά του χρώματα είναι το κίτρινο. Το γεγονός αυτό βελτιώνει

σημαντικά τον εντοπισμό των κίτρινων εμποδίων. Η μέθοδος με την οποία εξάγονται τα κίτρινα στοιχεία από την εικόνα παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.5.

4.4.4 Χρωματικός χώρος YCbCr

Ο χρωματικός χώρος YCbCr χρησιμοποιείται στην έγχρωμη τηλεοπτική εκπομπή. Πρόκειται για επανακωδικοποίηση του σήματος RGB για την ικανοποιητική εκπομπή και την διατήρηση συμβατότητας με τις μονόχρωμες τηλεοράσεις. Τα βασικά συστατικά του είναι η φωτεινότητα (luminance), Y, και τα χρωματικά (chrominance) χαρακτηριστικά Cb και Cr.

Ο μετασχηματισμός μιας εικόνας RGB στον χρωματικό χώρο YCbCr επιτυγχάνεται με εξίσωση

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix}_{(x,y)} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 65.481 & 128.553 & 24.966 \\ -37.797 & -74.203 & 112 \\ 112 & -93.786 & -18.214 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R/255 \\ G/255 \\ B/255 \end{bmatrix}_{(x,y)} . \quad (4.4.11)$$

Για τον μετασχηματισμό εικόνας RGB στον χώρο YCbCr αναπτύχθηκε, στα πλαίσια της εργασίας, η συνάρτηση `rgb2ycbcr()` σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και MATLAB με υπολογιστικό χρόνο 0.01sec και 0.25sec αντίστοιχα. Είσοδος στην συνάρτηση είναι η εικόνα στον χρωματικό χώρο RGB και έξοδος η εικόνα στον χρωματικό χώρο YCbCr. Στο Σχήμα 4.4.8 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου, που περιγράφεται στη συνέχεια

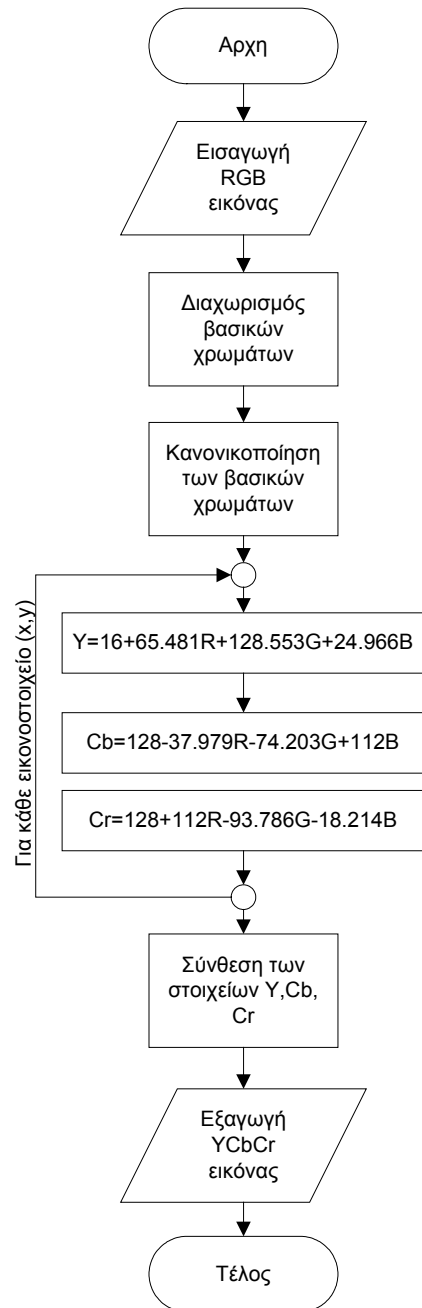
Βήμα 1. Εισάγεται η RGB εικόνα, $f(x,y)$

Βήμα 2. Διαχωρίζονται τα χρώματα κόκκινο, πράσινο και μπλε σε τρεις πίνακες $R(x,y)$, $G(x,y)$, $B(x,y)$

Βήμα 3. Κανονικοποίηση των R,G,B στο διάστημα $[0,1]$

Βήμα 4. Για κάθε εικονοστοιχείο υπολογίζονται οι τιμές Y, Cb, Cr

Βήμα 5. Συνθέτονται τα στοιχεία Y, Cb, Cr δημιουργώντας μια εικόνα, $g(x,y)$, που ανήκει στον χρωματικό χώρο YCbCr



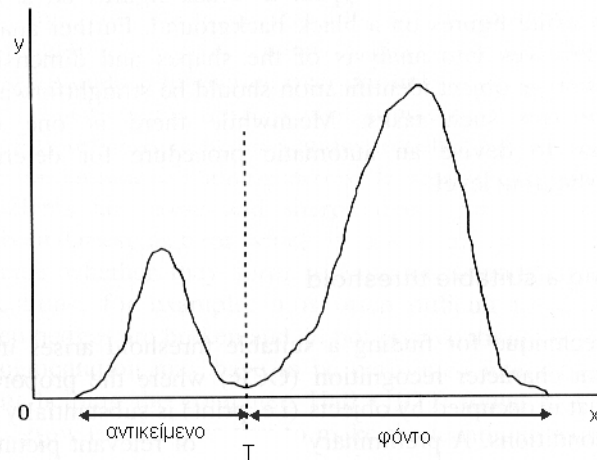
Σχήμα 4.4.8. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου μετατροπής εικόνας RGB σε YCbCr

Ο χρωματικός χώρος YCbCr χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία εξαιτίας του συστατικού Cb. Το συστατικό αυτό αφαιρεί το μπλε χρώμα από ένα εικονοστοιχείο εμφανίζοντας με αυτό τον τρόπο την ποσότητα κίτρινου χρώματος του εικονοστοιχείου. Η μέθοδος εξαγωγής των κίτρινων στοιχείων από μια εικόνα παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.5.

4.5 Επιλογή κατωφλίου

Η μέθοδος κατωφλίου είναι μια σημαντική προσέγγιση για τον διαχωρισμό της εικόνας σε τμήματα [24]. Χρησιμοποιείται συνήθως για τον εντοπισμό της υποεικόνας που αναπαριστά ένα αντικείμενο ενδιαφέροντος.

Στο Σχήμα 4.5.1 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα μιας εικόνας $f(x,y)$ στο επίπεδο του γκρι, αποτελούμενη από ένα σκούρο αντικείμενο σε φωτεινό φόντο. Ένας τρόπος για την εξαγωγή του αντικειμένου από το φόντο είναι η επιλογή ενός κατωφλίου T που διακρίνει τις δύο καταστάσεις. Τότε, κάθε εικονοστοιχείο (x,y) για το οποίο ισχύει $f(x,y) < T$ καλείται σημείο του αντικειμένου, αλλιώς καλείται σημείο του φόντου.



Σχήμα 4.5.1. Ιστόγραμμα μιας εικόνας που αποτελείται από σκούρο αντικείμενο σε φωτεινό φόντο

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής κατωφλίου σε μια εικόνα $f(x,y)$, είναι μια νέα εικόνα $g(x,y)$ η οποία λαμβάνει τιμές σύμφωνα με την Σχέση:

$$g(x,y) = \begin{cases} 255, & f(x,y) > T \\ 0, & f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (4.5.1)$$

Η εικόνα $g(x,y)$ είναι δυαδική και αποδίδει το φόντο με λευκό χρώμα (255) και το αντικείμενο με μαύρο χρώμα (0).

Η εφαρμογή κατωφλίου σε μια εικόνα προϋποθέτει σαφή διαχωρισμό μεταξύ του επιπέδων γκρι του αντικειμένου και του φόντου. Ο ορισμός της τιμής T απαιτεί πληροφορίες σχετικές με την κάθε εικόνα. Αυτό συμβαίνει γιατί ανάλογα με τον φωτισμό που επικρατεί σε μια σκηνή, η ίδια εικόνα μπορεί να εμφανιστεί φωτεινότερη ή σκοτεινότερη. Συνήθως, η τιμή του T είτε ορίζεται πειραματικά, είτε υπολογίζεται από τις Σχέσεις:

$$T = \begin{cases} \frac{\max + \min}{2} \\ \frac{\max - \min}{2} \\ \text{ενδιαμεσος}(\min, \max) \end{cases}, \quad (4.5.2)$$

όπου \max , η μέγιστη τιμή του επιπέδου γκρι της εικόνας $f(x,y)$ και \min , η ελάχιστη.

Η τεχνική της εφαρμογής κατωφλίου για τον διαχωρισμό του αντικειμένου από το φόντο, πραγματοποιείται μόνο σε εικόνες που ανήκουν στο επίπεδο του γκρι. Για τις έγχρωμες εικόνες το κατώφλι εφαρμόζεται είτε σε κάθε συστατικό ξεχωριστά (κόκκινο, πράσινο, μπλε), είτε στην αντίστοιχη γκρι εικόνα.

Σε αυτή την εργασία η τεχνική κατωφλίου εφαρμόζεται για τον διαχωρισμό κίτρινου αντικειμένου από το φόντο μιας έγχρωμης εικόνας. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι χρωματικοί χώροι HSI, CMYK, YCbCr.

4.5.1 Εφαρμογή κατωφλίου στο χρωματικό χώρο HSI

Στον χρωματικό χώρο HSI οι πληροφορίες χρώματος αποθηκεύονται στο συστατικό της απόχρωσης, H . Οπότε για τον διαχωρισμό του κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας εφαρμόζεται η τεχνική του κατωφλίου στον πίνακα $H(x,y)$ που περιέχει τις τιμές της απόχρωσης για κάθε εικονοστοιχείο (x,y) . Όπως είναι γνωστό, το κίτρινο χρώμα αντιστοιχεί στις 60° της απόχρωσης. Χρησιμοποιώντας αυτή την τιμή με μια μικρή ανοχή $\pm 5^\circ$ δημιουργούνται δύο κατώφλια $T_1=55^\circ$ και $T_2=65^\circ$ όπου εφαρμόζονται στον πίνακα $H(x,y)$ και υπολογίζεται η θέση (x,y) των κίτρινων εικονοστοιχείων.

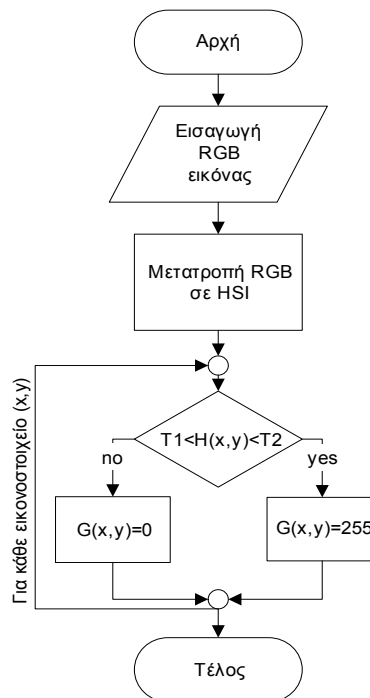
Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι τα κατώφλια T_1 και T_2 παραμένουν ίδια για κάθε εικόνα ανεξάρτητα με τις συνθήκες φωτός που επικρατούν.

Με την εφαρμογή των δύο κατωφλίων T_1 και T_2 στον πίνακα $H(x,y)$, δημιουργείται μια νέα εικόνα $g(x,y)$, σύμφωνα με την Σχέση 4.5.3, που εμφανίζει ως λευκά τα κίτρινα εικονοστοιχεία και ως μαύρα τα εικονοστοιχεία του φόντου.

$$g(x,y) = \begin{cases} 255, & T_1 < H(x,y) < T_2 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}. \quad (4.5.3)$$

Στο Σχήμα 4.5.2 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου εφαρμογής κατωφλίου στο χρωματικό χώρο HSI, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας και περιγράφεται στη συνέχεια.

- Βήμα 1. Εισαγωγή της RGB εικόνας, $f(x,y)$
- Βήμα 2. Μετατροπή της RGB εικόνας σε HSI
- Βήμα 3. Σάρωση κάθε εικονοστοιχείου του πίνακα $H(x,y)$
- Βήμα 4. Δημιουργία νέας εικόνας, $g(x,y)$, σύμφωνα με την Σχέση (4.5.3)



Σχήμα 4.5.2. Δομικό διάγραμμα εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο HSI

Στο Σχήμα 4.5.3 παρουσιάζεται μια εικόνα RGB (α) και ο εντοπισμός του κίτρινου αντικειμένου (β) με την εφαρμογή κατωφλίου στο χρωματικό χώρο HSI. Στο κεφάλαιο 5 υπάρχουν περισσότερα παραδείγματα για την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.5.3. Εφαρμογή τεχνικής κατωφλίου στο χρωματικό χώρο HSI

Για την υλοποίηση της εφαρμογής, αναπτύχθηκαν, στα πλαίσια της εργασίας, δύο αλγόριθμοι στις γλώσσες προγραμματισμού MATLAB και C++ με υπολογιστικό χρόνο 0.18sec και 0.001sec αντίστοιχα.

4.5.2. Εφαρμογή κατωφλίου στο χρωματικό χώρο CMYK

Ο χρωματικός χώρος CMYK περιλαμβάνει ως βασικό του χρώμα το κίτρινο. Η ποσότητα του κίτρινου χρώματος κάθε εικονοστοιχείου (x,y) αποθηκεύεται στον πίνακα Y(x,y). Τα εικονοστοιχεία ενός κίτρινου αντικειμένου να μετέχουν στον πίνακα Y(x,y) με μεγάλες τιμές. Στο γεγονός αυτό βασίζεται η εφαρμογή της τεχνικής του κατωφλίου που καλείται να διαχωρίσει ένα κίτρινο αντικείμενο από το έγχρωμο φόντο.

Στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε η τιμή του κατωφλίου προσαρμόζεται στις συνθήκες φωτεινότητας κάθε εικόνας. Στηρίζεται στο γεγονός ότι τις υψηλότερες τιμές του πίνακα Y(x,y) καταλαμβάνουν τα κίτρινα εικονοστοιχεία. Χρησιμοποιώντας λοιπόν το ιστόγραμμα του πίνακα Y(x,y), ορίζεται ως τιμή κατωφλίου εκείνη η απόδοση του κίτρινου που περιλαμβάνει τα περισσότερα εικονοστοιχεία μείον μια ανοχή της τάξης του 20%. Έτσι, δημιουργείται μια νέα εικόνα g(x,y), σύμφωνα με την Σχέση 4.5.4, στην οποία εμφανίζονται ως λευκά τα εικονοστοιχεία του αντικειμένου και ως μαύρα τα εικονοστοιχεία του φόντου.

$$g(x,y) = \begin{cases} 255, & Y(x,y) > T \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.5.4)$$

Το δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.4 και περιγράφεται στη συνέχεια.

Βήμα 1. Εισαγωγή της RGB εικόνας, f(x,y)

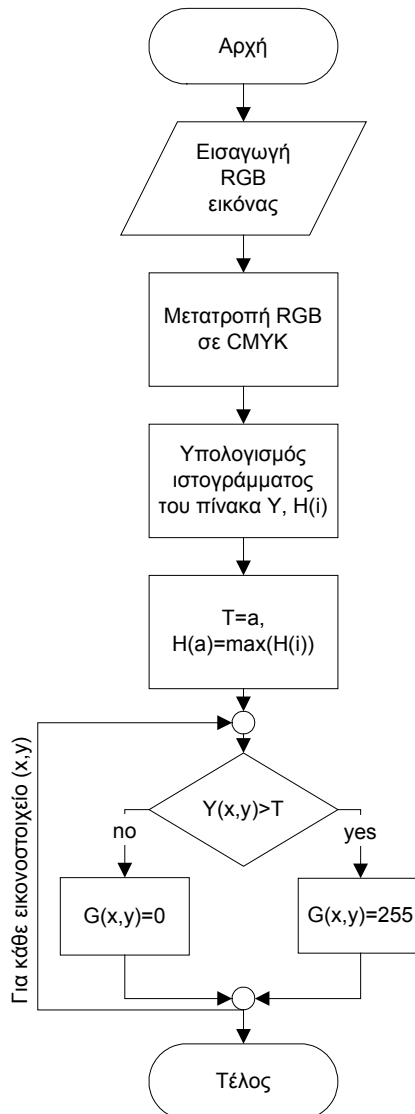
Βήμα 2. Μετατροπή της RGB εικόνας σε CMYK

Βήμα 3. Δημιουργία ιστογράμματος για τον πίνακα Y

Βήμα 4. Εύρεση της απόδοσης του κίτρινου με τα περισσότερα εικονοστοιχεία

Βήμα 5. Εφαρμογή κατωφλίου με T=απόδοση με τα περισσότερα εικονοστοιχεία

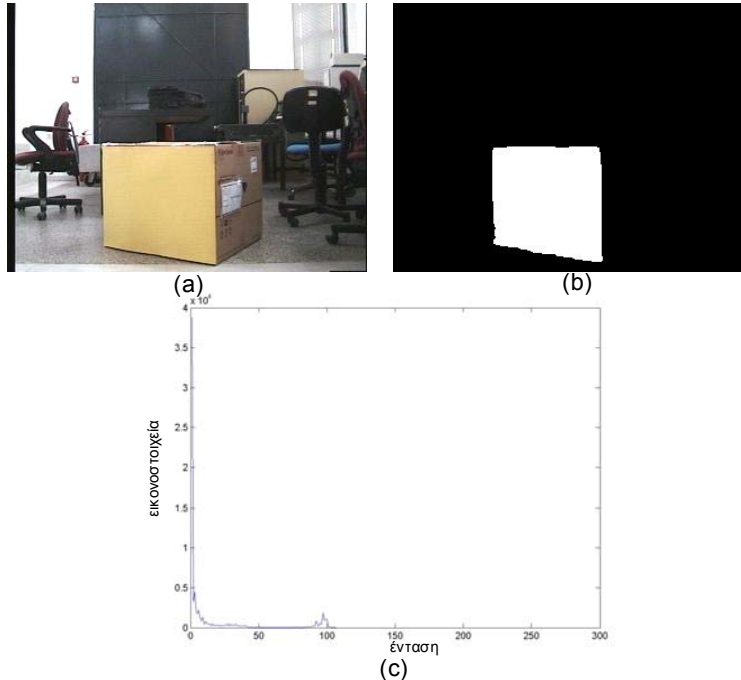
Βήμα 6. Δημιουργία νέας εικόνας, g(x,y), στην οποία εμφανίζονται ως λευκά τα εικονοστοιχεία του αντικειμένου και ως μαύρα τα εικονοστοιχεία του φόντου



Σχήμα 4.5.4. Δομικό διάγραμμα εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο CMYK

Για την επιτάχυνση του αλγορίθμου το ιστόγραμμα του πίνακα $Y(x,y)$ υπολογίζεται για τιμές που ανήκουν στο διάστημα $[80, 255]$. Αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι τα εικονοστοιχεία με μικρότερη ποσότητα κίτρινου δεν ανήκουν στα αντικείμενα ενδιαφέροντος.

Στο Σχήμα 4.5.5 παρουσιάζεται μια εικόνα RGB (α), η εξαγωγή του κίτρινου αντικειμένου με την εφαρμογή κατωφλίου στο χρωματικό χώρο CMYK (β) και το ιστόγραμμα του πίνακα $Y(x,y)$ (γ). Όπως φαίνεται από το ιστόγραμμα, η απόδοση του κίτρινου στην οποία μετέχουν τα περισσότερα εικονοστοιχεία είναι 90. Οπότε η τιμή του κατωφλίου που εφαρμόστηκε είναι 81. Στο κεφάλαιο 5 υπάρχουν περισσότερα παραδείγματα για την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.4.5. Εφαρμογή τεχνικής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο CMYK για $T=81$

Για την υλοποίηση της εφαρμογής, αναπτύχθηκαν, στα πλαίσια της εργασίας, δύο αλγόριθμοι στις γλώσσες προγραμματισμού MATLAB και C++ με υπολογιστικό χρόνο 0.23sec και 0.151sec αντίστοιχα.

4.5.3. Εφαρμογή κατωφλίου στο χρωματικό χώρο YCbCr

Η εφαρμογή κατωφλίου στο χρωματικό χώρο YCbCr έχει παρόμοια λειτουργία με την αντίστοιχη εφαρμογή στον χώρο CMYK. Η μέθοδος στηρίζεται στο γεγονός ότι το συστατικό Cb αφαιρεί μια μεγάλη ποσότητα μπλε χρώματος από κάθε εικονοστοιχείο όπως άλλωστε και το συστατικό Y του χώρου CMYK. Η διαφορά των δύο συστατικών είναι ότι το Cb αφαιρεί ταυτόχρονα μικρές ποσότητες κόκκινου και πράσινου χρώματος. Έτσι, το Cb εμφανίζεται ως ένα αυστηρότερο κριτήριο για την εξαγωγή κίτρινων εικονοστοιχείων.

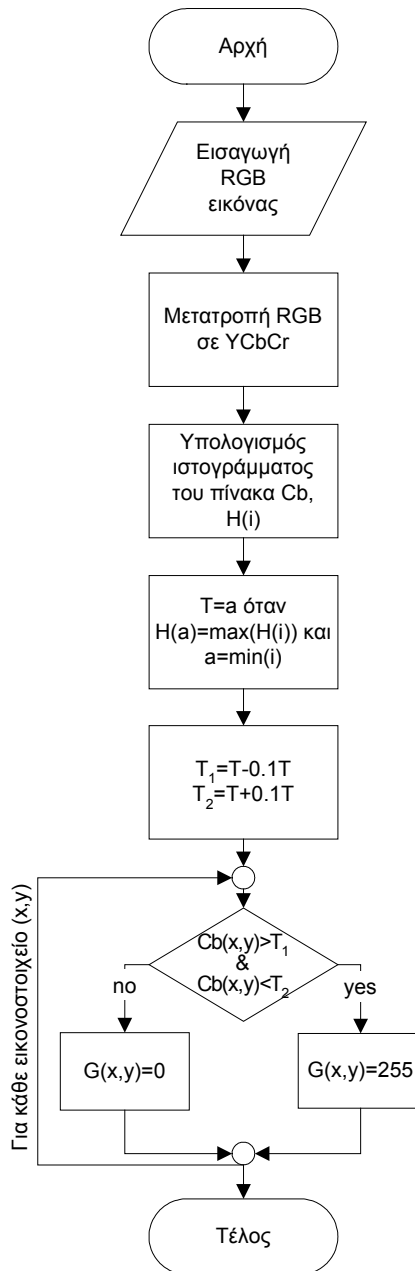
Η τιμή του κατωφλίου, T , υπολογίζεται από το ιστόγραμμα του πίνακα $Cb(x,y)$ και η επιλογή του στηρίζεται στο γεγονός ότι τα κίτρινα εικονοστοιχεία αντιστοιχούν σε πολύ μικρές αποδόσεις του συστατικού Cb. Έτσι πραγματοποιείται αντίστροφη σάρωση των τιμών του ιστογράμματος και ορίζεται ως περιοχή κατωφλίου το διάστημα $[T_1, T_2]$ γύρω από την μικρότερη απόδοση με τα περισσότερα εικονοστοιχεία.

Η εφαρμογή κατωφλίου σε μια εικόνα έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μιας νέας εικόνας $g(x,y)$, σύμφωνα με την Σχέση 4.5.5, που εμφανίζει ως λευκά τα εικονοστοιχεία του αντικειμένου και ως μαύρα τα εικονοστοιχεία του φόντου.

$$g(x, y) = \begin{cases} 255, & Cb(x, y) > T_1 \text{ και } Cb(x, y) < T_2 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}. \quad (4.5.5)$$

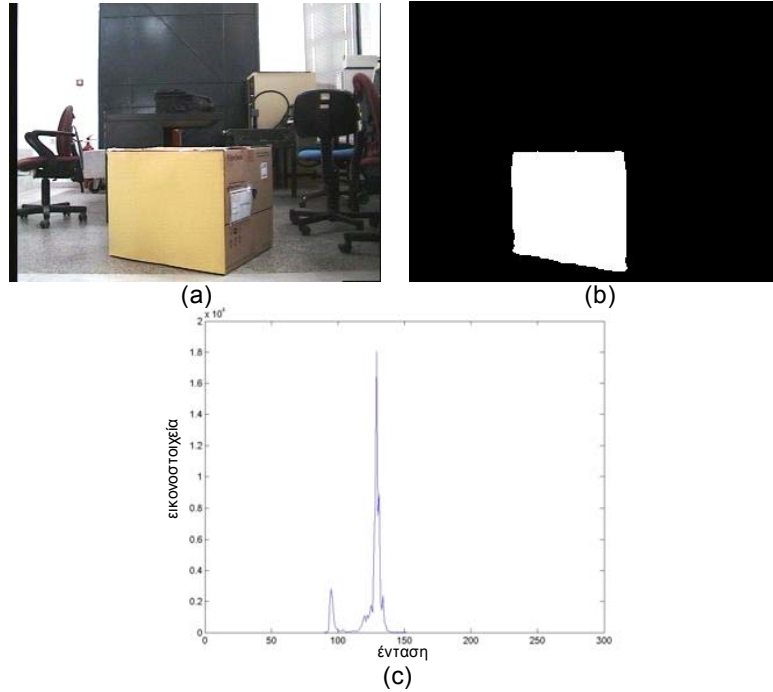
Η δομή του αλγορίθμου της εφαρμογής κατωφλίου στο χρωματικό χώρο YcbCr, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.6 και περιγράφεται στη συνέχεια.

- Βήμα 1. Εισαγωγή της RGB εικόνας
- Βήμα 2. Μετατροπή της RGB εικόνας σε YCbCr
- Βήμα 3. Δημιουργία ιστογράμματος για τον πίνακα Cb
- Βήμα 4. Εύρεση της μικρότερης απόδοσης του Cb με τα περισσότερα εικονοστοιχεία
- Βήμα 5. Εφαρμογή περιοχής κατωφλίου $[T_1, T_2]$ γύρω από την μικρότερη απόδοση
- Βήμα 6. Δημιουργία νέας εικόνας στην οποία εμφανίζονται ως λευκά τα εικονοστοιχεία του αντικειμένου και ως μαύρα τα εικονοστοιχεία του φόντου



Σχήμα 4.5.6. Δομικό διάγραμμα εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο YCbCr

Στο Σχήμα 4.5.7 παρουσιάζεται μια εικόνα RGB (α), το ιστόγραμμα του πίνακα Cb (β) και η εξαγωγή του κίτρινου αντικειμένου (γ) με την εφαρμογή κατωφλίου στο χρωματικό χώρο YCbCr. Όπως φαίνεται από το ιστόγραμμα, η μικρότερη απόδοση Cb με τα περισσότερα εικονοστοιχεία είναι η 100. Οπότε το διάστημα κατωφλίου που εφαρμόστηκε είναι το $[90, 110]$. Στο κεφάλαιο 5 υπάρχουν περισσότερα παραδείγματα για την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.4.7. Εφαρμογή τεχνικής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο YCbCr για διάστημα κατωφλίου [90,110]

Για την υλοποίηση της εφαρμογής, αναπτύχθηκαν, στα πλαίσια της εργασίας, δύο αλγόριθμοι στις γλώσσες προγραμματισμού MATLAB και C++ με υπολογιστικό χρόνο 0.21sec και 0.121sec αντίστοιχα.

4.5.4. Εφαρμογή κατωφλίου στον συνδυασμένο χώρο CMYK - YCbCr

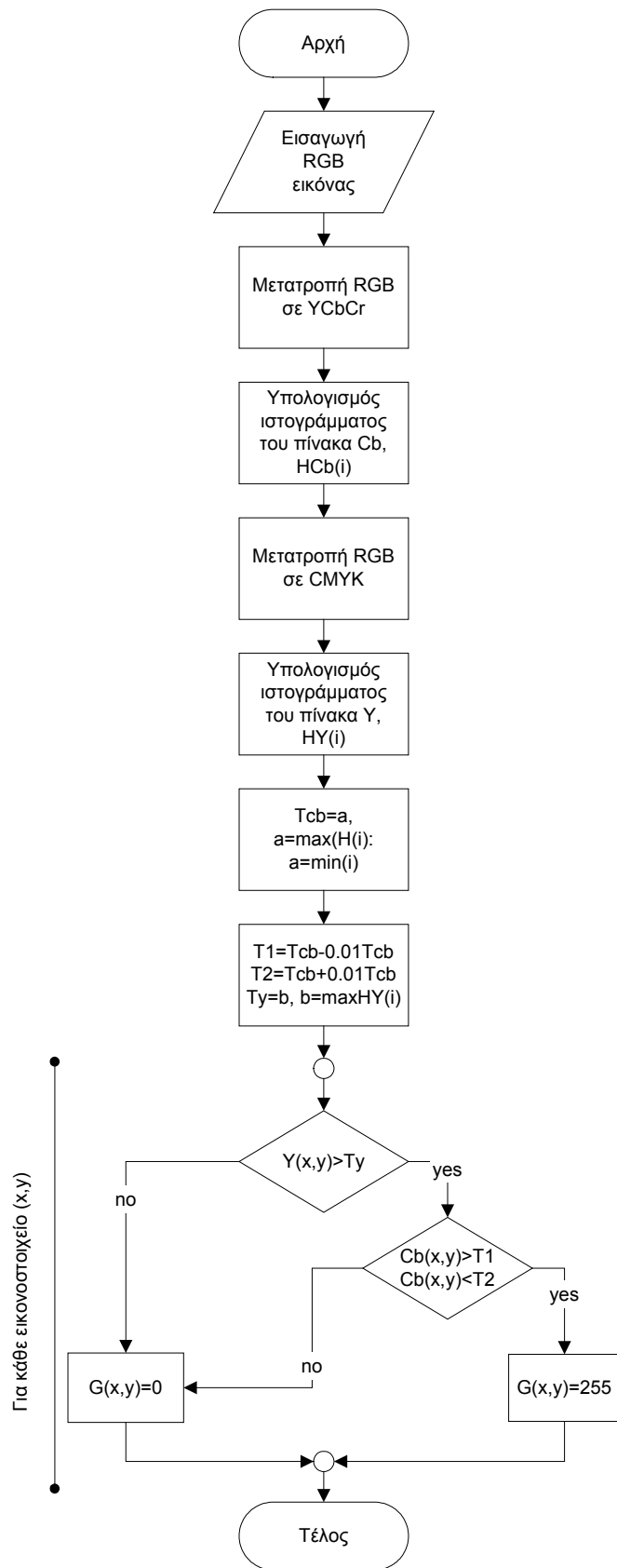
Για την υλοποίηση της εργασίας πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονη εφαρμογή της τεχνικής κατωφλίου στους χρωματικούς χώρους CMYK και YCbCr. Διαπιστώθηκε πειραματικά ότι αν και καθένας ξεχωριστά λειτουργεί ικανοποιητικά στη διάκριση των κίτρινων εικονοστοιχείων, ο συνδυασμός της εφαρμογής κατωφλίου και στους δύο χώρους έχει ως αποτέλεσμα την απαλοιφή εικονοστοιχείων που φέρουν σημαντική ποσότητα κίτρινου χρώματος αλλά δεν ανήκουν στο εμπόδιο.

Έτσι, υπολογίζεται μια τιμή κατωφλίου T_y από το ιστόγραμμα του πίνακα Y του χρωματικού χώρου CMYK και ένα διάστημα κατωφλίου $[T_{Cb1}, T_{Cb2}]$ από το ιστόγραμμα του πίνακα Cb του χρωματικού χώρου YCbCr. Η νέα εικόνα που δημιουργείται από την εφαρμογή των δύο κατωφλίων, $g(x,y)$, εμφανίζει τα κίτρινα εικονοστοιχεία ως λευκά και τα εικονοστοιχεία του φόντου ως μαύρα, σύμφωνα με την Σχέση 4.5.6.

$$g(x,y) = \begin{cases} 255, & Cb(x,y) \in [T_{Cb1}, T_{Cb2}] \text{ και } Y(x,y) > T_y \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.5.6)$$

Το δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια, της εργασίας, εμφανίζεται στο Σχήμα 4.5.8 και η λειτουργία του παρουσιάζεται στη συνέχεια.

- Βήμα 1. Εισαγωγή της RGB εικόνας
- Βήμα 2. Μετατροπή της RGB εικόνας σε YCbCr
- Βήμα 3. Μετατροπή της RGB εικόνας σε CMYK
- Βήμα 4. Δημιουργία ιστογράμματος για τον πίνακα Cb
- Βήμα 5. Δημιουργία ιστογράμματος για τον πίνακα Y
- Βήμα 6. Εύρεση της μικρότερης απόδοσης του Cb με τα περισσότερα εικονοστοιχεία
- Βήμα 7. Εύρεση της απόδοσης του Y με τα περισσότερα εικονοστοιχεία
- Βήμα 8. Εφαρμογή των κατωφλίων $[T_{Cb1}, T_{Cb2}]$ και T_y
- Βήμα 9. Δημιουργία νέας εικόνας στην οποία εμφανίζονται ως λευκά τα εικονοστοιχεία του αντικειμένου και ως μαύρα τα εικονοστοιχεία του φόντου



Σχήμα 4.5.8. Ταυτόχρονη εφαρμογή κατωφλίου στους χρωματικούς χώρους CMYK και YCbCr

Για την υλοποίηση της εφαρμογής, αναπτύχθηκαν, στα πλαίσια της εργασίας, δύο αλγόριθμοι στις γλώσσες προγραμματισμού MATLAB και C++ με υπολογιστικό χρόνο 0.44sec και 0.271sec αντίστοιχα.

Οι παραπάνω αλγόριθμοι παρουσιάζουν σημαντικό υπολογιστικό κόστος. Ένας τρόπος για να μειωθεί ο χρόνος επεξεργασίας, χωρίς να παρουσιάζονται σημαντικά σφάλματα στον διαχωρισμό του αντικειμένου από το φόντο, είναι κατά την εφαρμογή του κατωφλίου η σάρωση των εικονοστοιχείων να γίνεται ανά δύο. Αυτή η μέθοδος λειτουργεί ικανοποιητικά δεδομένου ότι εάν ένα εικονοστοιχείο ανήκει στο κίτρινο αντικείμενο τότε με μεγάλη πιθανότητα τα αμέσως γειτονικά του θα ανήκουν στο ίδιο αντικείμενο, ενώ μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο κατά 1/3. Τα σφάλματα της μεθόδου αφορούν κυρίως τα εικονοστοιχεία των ακμών του αντικειμένου. Ωστόσο δεδομένου ότι η σάρωση τα ελέγχει ανά δύο, το σφάλμα δεν μπορεί να ξεπεράσει το ένα εικονοστοιχείο.

4.6 Εφαρμογή φίλτρων στην εικόνα [25]

Πολλές φορές, η εφαρμογή της τεχνικής κατωφλίου σε μια εικόνα δεν είναι αποτελεσματική στον διαχωρισμό του αντικειμένου ενδιαφέροντος από το φόντο. Αυτό συμβαίνει επειδή κάποια από τα εικονοστοιχεία του φόντου διαθέτουν πληροφορίες όμοιες με τα εικονοστοιχεία του αντικειμένου. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου εφαρμόζονται κατάλληλα φίλτρα στην εικόνα που παράγεται από την εφαρμογή κατωφλίου, με σκοπό την αφαίρεση εικονοστοιχείων που δεν ανήκουν στο αντικείμενο ενδιαφέροντος. Τα φίλτρα είναι τετραγωνικοί πίνακες $h(x,y)$ των οποίων οι συνέλιξη με την ψηφιακή εικόνα $g(x,y)$ έχει ως αποτέλεσμα μια νέα εικόνα $F(x,y)$ απαλλαγμένη από σημαντικό μέρος του θορύβου. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από την εξίσωση 4.6.1:

$$F(x, y) = g(x, y) * h(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g(i, j)h(x - i, y - j), \quad (4.6.1)$$

όπου n η διάσταση του φίλτρου.

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο Gauss. Η επιλογή αυτή έγινε λόγω της ιδιότητας του να εξομαλύνει την εικόνα χωρίς να βλάπτει την ευκρίνεια της.

Η συνάρτηση του φίλτρου Gauss παρουσιάζεται στην Σχέση 4.6.2

$$h(x, y) = ce^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}, \quad (4.6.2)$$

όπου c μια σταθερά κανονικοποίησης και σ η διασπορά της γκαουσιανής συνάρτησης. Για την εκπόνηση της εργασίας επιλέχθηκε $\sigma=1$ και $n=5$, αφού μεγαλύτερες διαστάσεις αυξάνουν σημαντικά το υπολογιστικό κόστος, οπότε το φίλτρο Gauss έχει την μορφή:

$$h(x, y) = \frac{1}{115} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.6.3)$$

Η εφαρμογή του φίλτρου Gauss αυξάνει το υπολογιστικό κόστος κατά 0.11sec για αλγόριθμο σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB και κατά 0.04sec για αλγόριθμο σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Κρίνεται όμως απαραίτητη για την αντιμετώπιση λαθών που οφείλονται στην τεχνική κατωφλίου.

Στο Σχήμα 4.5.9. παρουσιάζεται μια εικόνα που έχει παραχθεί από την εφαρμογή κατωφλίου με την χρήση του χρωματικού χώρου HIS (α) και το αποτέλεσμα της εφαρμογής φίλτρου Gauss (β). Τα θολά εικονοστοιχεία δεν ανήκουν στο αντικείμενο ενδιαφέροντος και μπορούν να απαλειφούν με την επιβολή κατωφλίου.



Σχήμα 4.5.9. Εφαρμογή φίλτρου Gauss

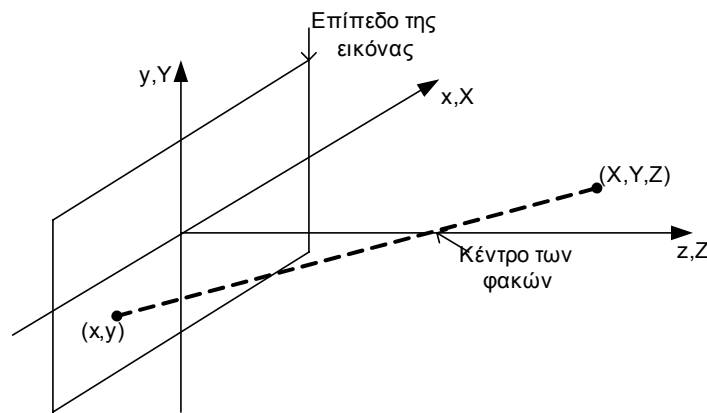
4.7 Βαθμονόμηση οπτικού συστήματος

Οι πληροφορίες που αντλούνται από μια εικόνα που αναπαριστά μια τρισδιάστατη σκηνή δεν επαρκούν για τον προσδιορισμό της θέσης του οπτικού συστήματος. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται συσχετισμός του οπτικού συστήματος με ένα σύστημα συντεταγμένων, που επιτυγχάνεται με την βαθμονόμηση του.

4.7.1 Προοπτικός μετασχηματισμός

Ο προοπτικός μετασχηματισμός δείχνει τον τρόπο με τον οποίο ένα τρισδιάστατο σημείο προβάλλεται σε μία εικόνα.

Στο Σχήμα 4.7.1 παρουσιάζεται το σύστημα αναφοράς (x, y, z) της κάμερας. Το επίπεδο (x,y) είναι το επίπεδο της εικόνας ενώ ο άξονας z , που περνά από το κέντρο του φακού της κάμερας, αποτελεί τον οπτικό άξονα του συστήματος. Το κέντρο του φακού της κάμερας έχει συντεταγμένες $(0, 0, \lambda)$ όπου λ είναι η εστιακή απόσταση όταν η κάμερα εστιάζει σε μακρινά αντικείμενα. Στο Σχήμα 4.7.1 το σύστημα αναφοράς της κάμερας ταυτίζεται με το γενικό σύστημα αναφοράς (X, Y, Z) .



Σχήμα 4.7.1. Σύστημα αναφοράς της κάμερας ταυτισμένο με το γενικό σύστημα αναφοράς

Έστω (X, Y, Z) οι συντεταγμένες οποιουδήποτε σημείου του χώρου στο γενικό σύστημα αναφοράς. Με την χρήση όμοιων τριγώνων υπολογίζεται η Σχέση μεταξύ του σημείου (X, Y, Z) και της προβολής του στο επίπεδο της εικόνας (x, y) . Τότε σύμφωνα με το Σχήμα 4.20:

$$\frac{x}{\lambda} = -\frac{X}{Z - \lambda} = \frac{X}{\lambda - Z} \quad (4.7.1)$$

και

$$\frac{y}{\lambda} = -\frac{Y}{Z - \lambda} = \frac{Y}{\lambda - Z}, \quad (4.7.2)$$

όπου το μείον δηλώνει ότι τα σημεία (X, Y) αντιστρέφονται κατά την προβολή τους στο επίπεδο (x, y) .

Οι συντεταγμένες του σημείου X, Y στο γενικό σύστημα αναφοράς υπολογίζονται από τις Σχέσεις

$$X = \frac{x}{\lambda}(\lambda - Z) \quad (4.7.3)$$

$$Y = \frac{y}{\lambda}(\lambda - Z), \quad (4.7.4)$$

όπου φαίνεται ότι εάν δεν υπάρχει συγκεκριμένη πληροφορία για το σημείο του χώρου που προβάλλεται στο επίπεδο της εικόνας, όπως η παράμετρος Z , δεν είναι δυνατό να υπολογιστούν πλήρως οι συντεταγμένες του σημείου (X, Y, Z) στο γενικό σύστημα αναφοράς.

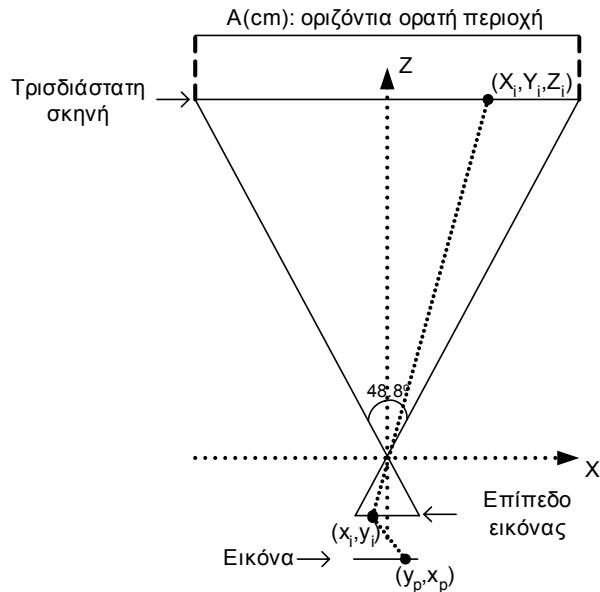
Επίσης, στις Σχέσεις 4.7.3 και 4.7.4 μετέχει η εσωτερική παράμετρος της κάμερας λ . Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του οπτικού συστήματος, όπως η εστιακή απόσταση και η γωνία κίνησης είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του οπτικού συστήματος [24]. Επειδή όμως η παραπάνω διαδικασία αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος, προτείνεται μια μέθοδος που στηρίζεται στο εύρος του οπτικού πεδίου της κάμερας και εξηγείται στη συνέχεια.

Στο Σχήμα 4.7.2 παρουσιάζεται το οριζόντιο οπτικό πεδίο της κάμερας. Είναι γνωστό ότι για την SONY EVI-D30 η γωνία του οριζόντιου οπτικού πεδίου ϕ , είναι $48,8^\circ$. Επίσης είναι γνωστό, λόγω της διακριτοποίησης της εικόνας, ότι κάθε τρισδιάστατη σκηνή A , που ανήκει στο οπτικό πεδίο της κάμερας σε απόσταση Z_i από αυτή, περιγράφεται από 320 εικονοστοιχεία στον οριζόντιο άξονα x , και από 240 εικονοστοιχεία στον άξονα y . Τέλος, κάθε σημείο (X_i, Y_i, Z_i) που ανήκει στην σκηνή A , προβάλλεται στην εικόνα στο (y_p, x_p) εικονοστοιχείο. Έτσι, σύμφωνα με το Σχήμα 4.21

$$\left. \begin{aligned} A &= 320(\text{pixels}) \\ A &= 2Z_i \tan(24.4)(\text{cm}) \\ X_i &= x_p(\text{pixels}) \end{aligned} \right\} X_i = \frac{2}{320} x_p Z_i \tan(24.4)(\text{cm}). \quad (4.7.5)$$

Αντίστοιχα, αν $\phi'=38^\circ$ η γωνία του κάθετου οπτικού πεδίου της κάμερας και A' η τρισδιάστατη περιοχή που ανήκει στο πεδίο αυτό και περιγράφεται από 240 εικονοστοιχεία η Σχέση 4.7.5 γίνεται

$$\left. \begin{aligned} A' &= 240(\text{pixels}) \\ A' &= 2Z_i \tan(19)(\text{cm}) \\ Y_i &= y_p(\text{pixels}) \end{aligned} \right\} Y_i = \frac{2}{240} y_p Z_i \tan(19)(\text{cm}). \quad (4.7.6)$$



Σχήμα 4.7.2. Το οριζόντιο οπτικό πεδίο της κάμερας

Στο Σχήμα 4.7.2 παρουσιάζονται οι όροι «επίπεδο εικόνας» και «εικόνα». Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι οι συντεταγμένες του επιπέδου της εικόνας είναι διαφορετικές από αυτές της εικόνας. Αυτό συμβαίνει επειδή στο επίπεδο της εικόνας προβάλλεται η τρισδιάστατη σκηνή αντεστραμμένη, ενώ η εικόνα προς επεξεργασία εμφανίζει την τρισδιάστατη σκηνή στην πραγματική της φορά. Στο εξής ο όρος «επίπεδο εικόνας» δεν θα αναφέρεται.

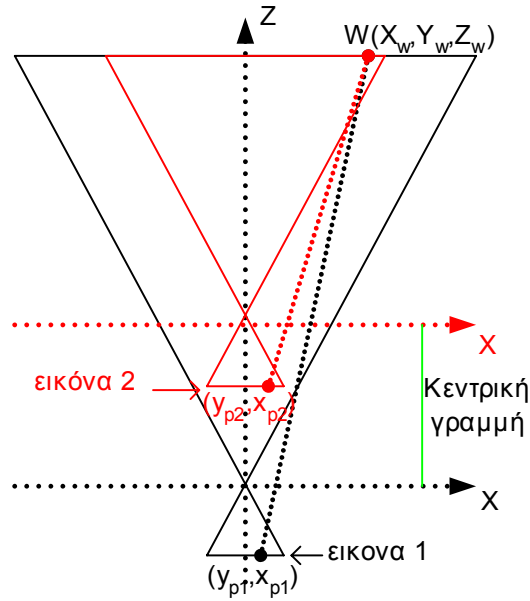
Από τις Σχέσεις 4.7.5 και 4.7.6 δεν είναι δυνατή η ολοκληρωμένη περιγραφή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου εάν δεν είναι γνωστή η παράμετρος της απόστασης Z . Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι απαραίτητη η απεικόνιση της τρισδιάστατης σκηνής από δύο διαφορετικές θέσεις του οπτικού συστήματος. Τα συστήματα αναφοράς των δύο θέσεων πρέπει να είναι ταυτισμένα και να διαφέρουν μόνο οι αρχές των αξόνων τους. Η διαδικασία αυτή είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί είτε με μία κάμερα είτε με στερεοσκοπικό οπτικό σύστημα.

4.7.2 Περιγραφή τρισδιάστατου αντικειμένου με την χρήση μιας κάμερας

Το σύστημα που περιγράφεται σε αυτή την εργασία αποτελείται από ένα έντροχο ρομποτικό όχημα στην κορυφή του οποίου βρίσκεται μια κάμερα. Καθώς το ρομπότ

κινείται, η κάμερα λαμβάνει μια ακολουθία από εικόνες που περιγράφουν τον τρισδιάστατο χώρο. Δύο διαδοχικές εικόνες ενός αντικειμένου μπορούν να επιλύσουν το πρόβλημα της ολοκληρωμένης περιγραφής της θέσης του, αρκεί να είναι γνωστή η απόσταση μεταξύ των δύο λήψεων.

Στο Σχήμα 4.7.3 παρουσιάζεται η λήψη δύο διαφορετικών εικόνων ενός σημείου W από δύο διαφορετικές θέσεις. Η απόσταση μεταξύ των δύο θέσεων B , καλείται κεντρική γραμμή και είναι γνωστή.



Σχήμα 4.7.3. Διαδικασία λήψης δύο εικόνων ενός αντικειμένου από διαφορετική θέση

Το σημείο W που στο γενικό σύστημα αναφοράς περιγράφεται από τις συντεταγμένες (X_w, Y_w, Z_w) , προβάλλεται στην πρώτη εικόνα στο εικονοστοιχείο (y_{p1}, x_{p1}) και στην δεύτερη εικόνα στο εικονοστοιχείο (y_{p2}, x_{p2}) . Σύμφωνα με την Σχέση 4.7.5, από την πρώτη εικόνα

$$X_w = \frac{2}{320} x_{p1} Z_1 \tan(24.4)(cm), \quad (4.7.7)$$

όπου Z_1 η απόσταση του σημείου W από την θέση της πρώτης λήψης. Ομοια για την δεύτερη εικόνα

$$X_w = \frac{2}{320} x_{p2} Z_2 \tan(24.4)(cm), \quad (4.7.8)$$

όπου Z_2 η απόσταση του σημείου W από την θέση της δεύτερης λήψης. Είναι όμως

$$Z_1 = Z_2 + B, \quad (4.7.9)$$

όπου B , το μέτρο της κεντρικής γραμμής. Έτσι από τις Σχέσεις (4.7.7), (4.7.8) και (4.7.9) συνεπάγεται

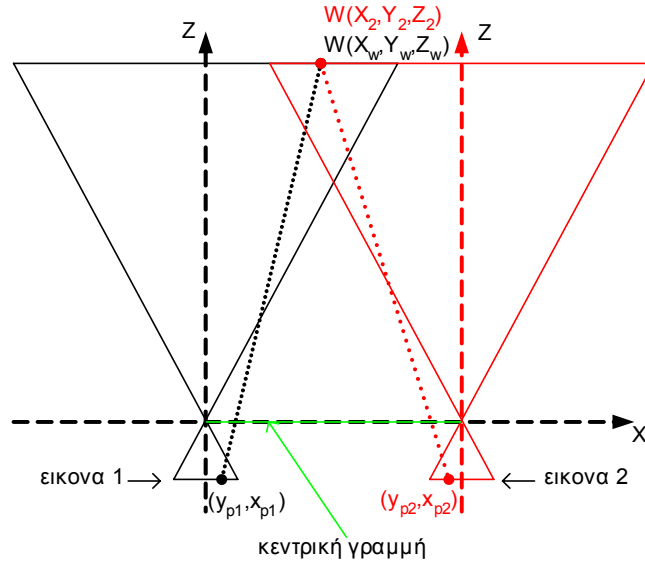
$$Z_w = Z_1 = \frac{x_{p2}B}{x_{p2} - x_{p1}} \quad (4.7.10)$$

Η παραπάνω διαδικασία υλοποιήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας. Παρουσιάζει όμως σημαντικά προβλήματα στον υπολογισμό της απόστασης ενός αντικειμένου που οφείλονται στις λανθασμένες ενδείξεις του οδομέτρου του ρομπότ. Συγκεκριμένα, δεν είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός του μεγέθους της κεντρικής γραμμής αυξάνοντας σημαντικά το σφάλμα της Σχέσης (4.7.10). Το πρόβλημα πολλαπλασιάζεται καθώς το ρομπότ κινείται σε τυχαία τροχιά που περιλαμβάνει περιστροφές. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε να συμπεριληφθεί μια ακόμη κάμερα στο οπτικό σύστημα του ρομπότ.

4.7.2 Περιγραφή τρισδιάστατου αντικειμένου με την χρήση στερεοσκοπικού οπτικού συστήματος

Ένα τρισδιάστατο σημείο, W , με συντεταγμένες (X_w, Y_w, Z_w) σε ένα γενικό σύστημα αναφοράς, μπορεί να περιγραφεί πλήρως χρησιμοποιώντας τις απεικονίσεις του από δύο κάμερες που βρίσκονται σε διαφορετική θέση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται στερεοσκοπική όραση.

Στο Σχήμα 4.7.4 παρουσιάζεται το στερεοσκοπικό οπτικό σύστημα του έντροχου ρομπότ ATRV-Mini. Δύο όμοιες κάμερες τοποθετημένες σε γνωστή απόσταση μεταξύ τους, B , απεικονίζουν σε δύο διαφορετικές εικόνες το τρισδιάστατο σημείο W . Το γενικό σύστημα αναφοράς ταυτίζεται με το σύστημα συντεταγμένων της αριστερής κάμερας. Το σημείο W προβάλλεται στο εικονοστοιχείο (y_{p1}, x_{p1}) της αριστερής εικόνας (εικόνα 1) και στο εικονοστοιχείο (y_{p2}, x_{p2}) της δεξιάς εικόνας (εικόνα 2).



Σχήμα 4.7.4. Διαδικασία λήψης δύο εικόνων ενός αντικειμένου από στερεοσκοπικό οπτικό σύστημα

Εφαρμόζοντας την Σχέση 4.7.5 στην πρώτη εικόνα προκύπτει

$$X_w = \frac{2}{320} x_{p1} Z_w \tan(24.4), \quad (4.7.11)$$

όπου Z_w η απόσταση του σημείου W από την αριστερή κάμερα. Εφαρμόζοντας την Σχέση 4.7.5 για την δεύτερη εικόνα προκύπτει

$$X_2 = \frac{2}{320} x_{p2} Z_2 \tan(24.4), \quad (4.7.12)$$

όπου Z_2 η απόσταση του αντικειμένου W από την δεξιά κάμερα. Είναι όμως

$$Z_w = Z_2 = Z, \quad (4.7.13)$$

και

$$X_w + (-X_2) = B, \quad (4.7.14)$$

Οπότε, από τις Σχέσεις 4.7.11 έως 4.7.14 προκύπτει

$$Z = \frac{320B}{2(x_{p1} - x_{p2}) \tan(24.4)}. \quad (4.7.15)$$

Στην πραγματικότητα όμως, επειδή σε κάθε εικόνα που λαμβάνεται από το οπτικό σύστημα του ρομπότ με μέγεθος 240x320, εμφανίζεται μια περιοχή μεγέθους 240x10 που δεν περιέχει πληροφορίες, ο τρισδιάστατος χώρος του οπτικού πεδίου της κάμερας περιγράφεται από 310 εικονοστοιχεία. Έτσι, η Σχέση 4.7.15 γίνεται:

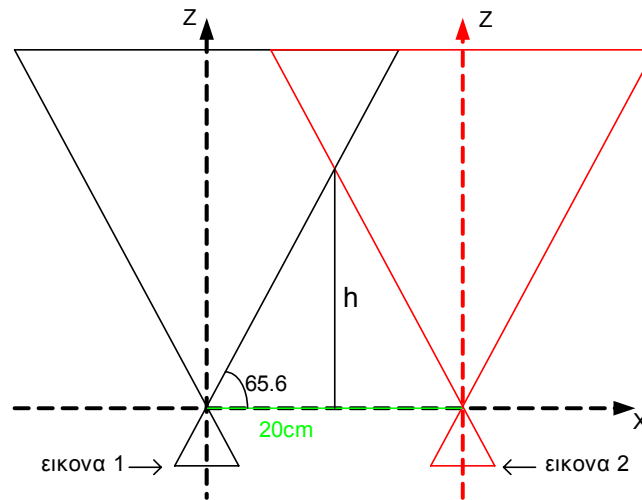
$$Z = \frac{310B}{2(x_{p1} - x_{p2}) \tan(24.4)} \quad (4.7.16)$$

Η Σχέση 4.7.16 δείχνει ότι εάν η διαφορά της θέσης των εικονοστοιχείων στα οποία προβάλεται το σημείο W στις δύο εικόνες είναι γνωστή τότε μπορεί πολύ εύκολα να υπολογιστεί η απόσταση, Z , του σημείου W .

Το σημαντικότερο πρόβλημα για τον υπολογισμό της απόστασης ενός τρισδιάστατου σημείου είναι εκείνο της αντιστοίχισης δύο εικονοστοιχείων που ανήκουν σε διαφορετικές εικόνες, πάνω στα οποία προβάλεται το τρισδιάστατο σημείο. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με την εφαρμογή αλγορίθμων για την εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων που περιγράφονται στην παράγραφο 4.7.4

4.7.3 Στροφή του στερεοσκοπικού οπτικού συστήματος

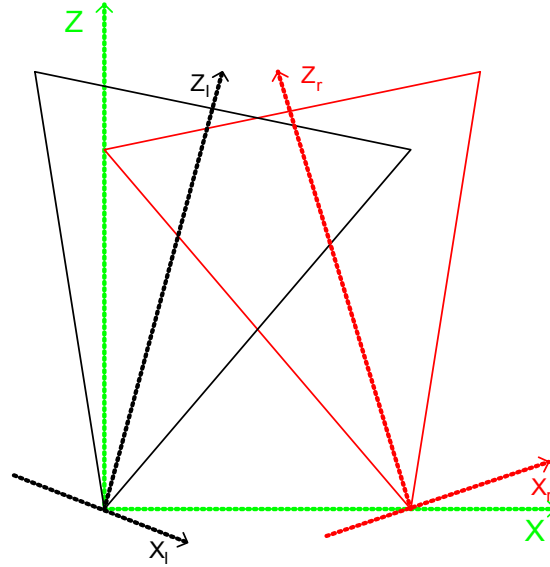
Στο Σχήμα 4.7.4 παρουσιάστηκε η τοποθέτηση των δύο καμερών του στερεοσκοπικού οπτικού συστήματος. Στην θέση αυτή, εντοπίζονται εμπόδια τα οποία απέχουν τουλάχιστον 45cm από το ρομπότ, σύμφωνα με το Σχήμα 4.7.5.



Σχήμα 4.7.5 Υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης εντοπισμού ενός αντικειμένου

Για να μειωθεί η ελάχιστη απόσταση εντοπισμού ενός αντικειμένου και παράλληλα να αυξηθεί η κοινή ορατή περιοχή των δύο καμερών, απαιτείται στροφή του οπτικού συστήματος. Για την συγκεκριμένη εργασία αποφασίστηκε να στραφούν οι κάμερες κατά 12° σύμφωνα με το Σχήμα 4.7.6. Έτσι, η νέα ελάχιστη απόσταση

εντοπισμού ενός αντικειμένου είναι 27cm. Η γωνία των 12° επιλέχθηκε δεδομένου ότι η απόσταση από το κέντρο του οπτικού συστήματος έως το εμπρόσθιο άκρο του ρομποτικού οχήματος είναι 25cm.



Σχήμα 4.7.6 Στροφή του οπτικού συστήματος

Για την περιγραφή του τρισδιάστατου αντικειμένου θα πρέπει να εξαχθούν εκ νέου οι εξισώσεις 4.7.11,12,15 λαμβάνοντας υπόψη τη στροφή του οπτικού συστήματος.

Έστω ένα γενικό σύστημα αναφοράς X, Y, Z όπου X, Z το επίπεδο κίνησης του ρομπότ, Σχήμα 4.7.6. Εάν X_r, Y_r, Z_r και X_l, Y_l, Z_l τα συστήματα αναφοράς της δεξιάς και αριστερής κάμερας αντίστοιχα, τότε για τον υπολογισμό της απόστασης Z ενός αντικειμένου από το ρομπότ είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός των δύο συστημάτων αναφοράς στο γενικό σύστημα αναφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται με την στροφή του επιπέδου $X_l Z_l$ της αριστερής κάμερας γύρω από τον άξονα Y_l κατά 12° και την στροφή του επιπέδου $X_r Z_r$ της δεξιάς κάμερας γύρω από τον άξονα Y_r κατά -12° . Ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται σύμφωνα με τις Σχέσεις

$$X^{new} = X^{old} \cos a - Z^{old} \sin a, \quad (4.7.16)$$

$$Z^{new} = X^{old} \sin a + Z^{old} \cos a, \quad (4.7.17)$$

όπου X^{new}, Z^{new} οι συντεταγμένες ενός σημείου στο γενικό σύστημα αναφοράς, X^{old}, Z^{old} οι συντεταγμένες του ίδιου σημείου στο σύστημα αναφοράς της εκάστοτε κάμερας και a η γωνία στροφής της κάθε κάμερας.

Τότε από την Σχέση 4.7.5 για την αριστερή κάμερα

$$X_l^{old} = \frac{2}{310} x_{p1} Z_l^{old} \tan(24.4) = AZ_l^{old} \quad (4.7.18)$$

και την δεξιά κάμερα

$$X_r^{old} = \frac{2}{310} x_{p2} Z_r^{old} \tan(24.4) = BZ_r^{old} . \quad (4.7.19)$$

Επιλύοντας το σύστημα των εξισώσεων 4.7.16 – 19 λαμβάνοντας υπόψη ότι

$$Z = Z_l^{new} = Z_r^{new} \quad (4.7.20)$$

και

$$X_r^{new} = X_l^{new} + baseline . \quad (4.7.21)$$

Εξάγεται η Σχέση 4.7.22 με την οποία υπολογίζεται η απόσταση ενός αντικειμένου με την χρήση στερεοσκοπικού συστήματος του οποίου οι κάμερες έχουν στραφεί κατά α° .

$$Z = \frac{-\cos^2(a) - (B - A)\cos(a)\sin(a) + AB\sin^2(a)}{(B - A)(\cos^2(a) - \sin^2(a)) - AB\sin(2a) - \sin(2a)} baseline . \quad (4.7.22)$$

4.7.4 Εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων [25]

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστεί κατά την εφαρμογή της στερεοσκοπικής όρασης για τον υπολογισμό των συντεταγμένων ενός τρισδιάστατου σημείου, είναι εκείνο της αντιστοίχισης εικονοστοιχείων μεταξύ των δύο εικόνων στις οποίες προβάλλεται το σημείο. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο συντελεστής ενδιαφέροντος Moravec. Ο συντελεστής αυτός δεν είναι παρά ένας τετραγωνικός πίνακας που υπολογίζει την τιμή της διακύμανσης της φωτεινότητας κάθε εικονοστοιχείου. Διαφορετικές τιμές διακύμανσης φωτεινότητας υπολογίζονται για κάθε διεύθυνση του εικονοστοιχείου σύμφωνα με τις Σχέσεις

$$I_1 = \sum_{(x,y) \in S} [f(x,y) - f(x,y+1)]^2 , \quad (4.7.23)$$

$$I_2 = \sum_{(x,y) \in S} [f(x,y) - f(x+1,y)]^2 , \quad (4.7.24)$$

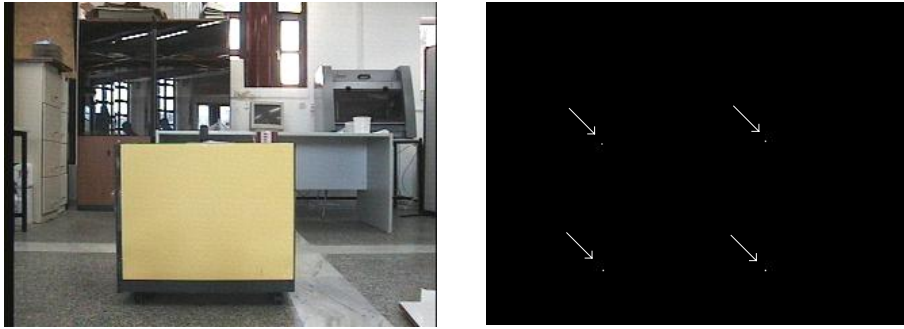
$$I_3 = \sum_{(x,y) \in S} [f(x,y) - f(x+1,y+1)]^2 , \quad (4.7.25)$$

$$I_4 = \sum_{(x,y) \in S} [f(x,y) - f(x+1,y-1)]^2 , \quad (4.7.26)$$

όπου S είναι το μέγεθος του τετραγωνικού πίνακα. Η τιμή ενδιαφέροντος για κάθε εικονοστοιχείο ορίζεται ως η ελάχιστη διακύμανση.

$$I(x,y) = \min(I_1, I_2, I_3, I_4) . \quad (4.7.27)$$

Το αποτέλεσμα την εφαρμογής του συντελεστή ενδιαφέροντος σε μια εικόνα $f(x,y)$ είναι η δημιουργία μια νέας εικόνας $g(x,y)$, Σχήμα 4.7.7. Η εικόνα $g(x,y)$, χωρίζεται σε περιοχές όπου για κάθε μια από αυτές εξάγεται το εικονοστοιχείο εκείνο που φέρει την μεγαλύτερη τιμή διακύμανσης. Το εικονοστοιχείο αυτό ονομάζεται σημείο ενδιαφέροντος.



Σχήμα 4.7.7. Εξάγωγή σημείων ενδιαφέροντος

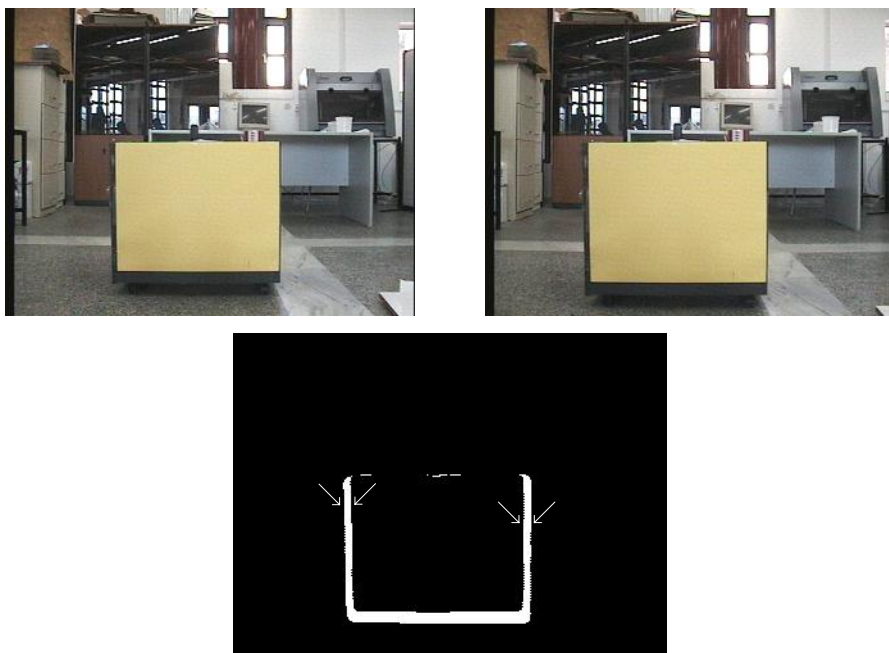
Ο συντελεστής ενδιαφέροντος εφαρμόζεται ταυτόχρονα στις δύο εικόνες και τα εικονοστοιχεία τα οποία φέρουν την ίδια τιμή ενδιαφέροντος αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο του τρισδιάστατου χώρου.

Ο συντελεστής ενδιαφέροντος Moravec δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση όπου το οπτικό σύστημα του ρομπότ αποτελείται από μία μόνο κάμερα. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά την κίνηση του ρομπότ προς το αντικείμενο ενδιαφέροντος, οι εικόνες που λαμβάνονται διαφέρουν σημαντικά εξαιτίας της μεγέθυνσης που προκαλείται από την κίνηση. Έτσι, δεν είναι δυνατόν να αντιστοιχιστούν τα σημεία ενδιαφέροντος των δύο εικόνων.

Για την αντιστοίχιση των εικονοστοιχείων δύο εικόνων, $f(x,y)$ και $g(x,y)$, ενός αντικειμένου, που προέρχονται από την ίδια κάμερα εφαρμόζεται η τεχνική της αφαίρεσης των εικόνων η οποία έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας νέας $h(x,y)$ σύμφωνα με την Σχέση

$$h(x, y) = |f(x, y) - g(x, y)|. \quad (4.7.28)$$

Τα εικονοστοιχεία της εικόνας $h(x,y)$ είναι λευκά όταν τα αντίστοιχα στοιχεία των εικόνων $f(x,y)$ και $g(x,y)$ ανήκουν στο αντικείμενο ενδιαφέροντος, αλλιώς είναι μαύρα, Σχήμα 4.7.8. Με σάρωση της νέας εικόνας κατά τον οριζόντιο άξονα εντοπίζεται αρχικά το πρώτο λευκό εικονοστοιχείο και στην συνέχεια το πρώτο μαύρο. Η διαφορά της θέσης των δύο αυτών εικονοστοιχείων είναι αυτή που χρησιμοποιείται στην Σχέση 4.7.10.



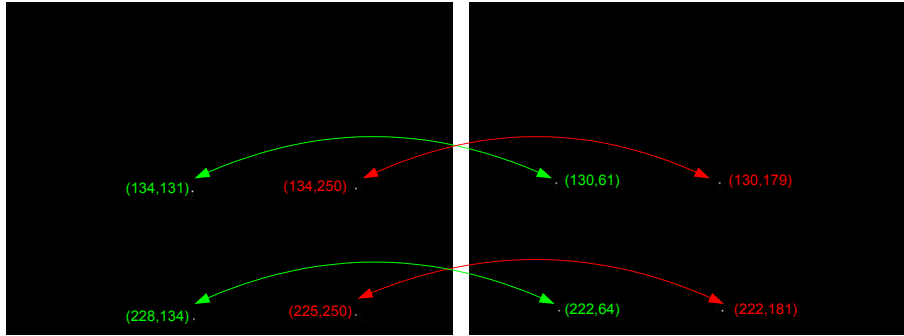
Σχήμα 4.7.8. Εξαγωγή σημείων ενδιαφέροντος με την χρήση μιας κάμερας

4.7.5 Υπολογισμός της απόστασης

Σύμφωνα με την Σχέση 4.7.16 είναι δυνατό να υπολογιστεί η απόσταση ενός αντικειμένου από το οπτικό σύστημα, αρκεί να είναι γνωστή η διαφορά της θέσης δύο εικονοστοιχείων που ανήκουν σε δύο διαφορετικές εικόνες και αναπαριστούν το ίδιο σημείο του αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο.

Στο Σχήμα 4.7.9. παρουσιάζονται δύο εικόνες που έχουν ληφθεί από ένα στερεοσκοπικό οπτικό σύστημα και η αντιστοίχιση των εικονοστοιχείων που αφορούν το ίδιο σημείο του τρισδιάστατου χώρου. Η πραγματική απόσταση του αντικειμένου είναι 187cm.





Σχήμα 4.7.9 Αντιστοίχιση εικονοστοιχείων που αναπαριστούν το ίδιο σημείο του τρισδιάστατου χώρου

Εφαρμόζοντας την Σχέση 4.7.16 για κάθε ζευγάρι εικονοστοιχείων υπολογίζονται τέσσερις τιμές απόστασης

$$Z_1 = 188.9cm$$

$$Z_2 = 186.3cm$$

$$Z_3 = 188.9cm$$

$$Z_4 = 191.7cm$$

Από τις τιμές αυτές, εξαιρούνται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή, ενώ ο μέσος όρος των άλλων δύο αντιστοιχεί στην απόσταση του αντικειμένου. Για το Σχήμα 4.7.9 η υπολογιζόμενη απόσταση είναι 188.9cm.

Με δεδομένη, πλέον, την απόσταση του αντικειμένου από το ρομποτικό όχημα είναι δυνατόν να υπολογιστεί το μέγεθος του. Έτσι, από το Σχήμα 4.7.9. (αριστερή εικόνα) φαίνεται ότι στον οριζόντιο άξονα το αντικείμενο αναπαρίσταται από 219 (250-139) εικονοστοιχεία, ενώ στον κατακόρυφο άξονα από 94 (228-134) εικονοστοιχεία, οπότε από τις Σχέσεις 4.7.5 και 4.7.6 υπολογίζεται ότι το μέγεθος του αντικειμένου είναι 65.2x47.8cm, ενώ το πραγματικό του μέγεθος είναι 64x50cm. Αντίστοιχα είναι δυνατόν να υπολογιστεί και το μέγεθος του χώρου που το περιβάλλει.

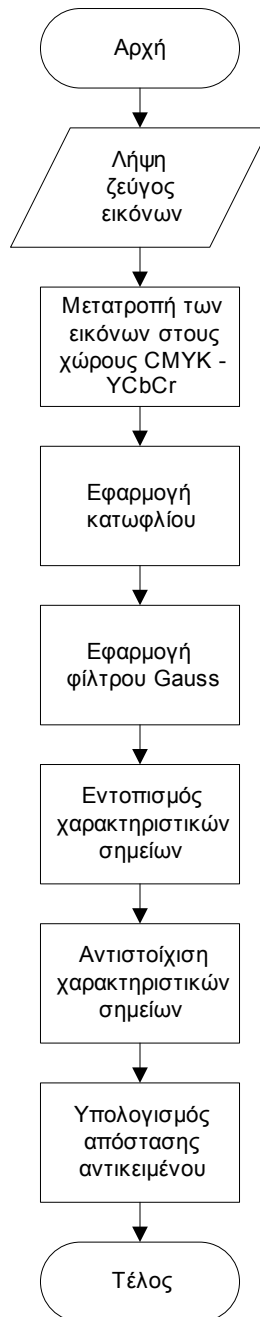
4.8 Ολοκληρωμένη λειτουργία του οπτικού συστήματος

Οι διαδικασίες που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους συνθέτουν τον αλγόριθμο του οπτικού συστήματος που σκοπό έχει τον εντοπισμό ενός αντικειμένου που παρεμβάλλεται στην τροχιά του ρομποτικού οχήματος.

Το οπτικό σύστημα αποτελείται από δύο κάμερες τοποθετημένες στην κορυφή του ρομπότ απομακρυσμένες κατά 40cm. Η λήψη των εικόνων πραγματοποιήθηκε με την αξιοποίηση του Video for Linux API. Τέλος, το αντικείμενο διαχωρίστηκε από το περιβάλλον με την χρήση του χρωματικού χώρου YCbCr.

Το Σχήμα 4.8.1 παρουσιάζει το δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου, που περιγράφεται στη συνέχεια.

- Βήμα 1. Λήψη ζεύγους εικόνων $f(x,y)$, $g(x,y)$ από το οπτικό σύστημα
- Βήμα 2. Μετατροπή των εικόνων $f(x,y)$ και $g(x,y)$ στις $f'(x,y)$ και $g'(x,y)$ που ανήκουν στο χρωματικό πρότυπο YCbCr-CMYK.
- Βήμα 3. Εφαρμογή κατωφλίου στις εικόνες $f'(x,y)$ και $g'(x,y)$ που σαν αποτέλεσμα έχει την δημιουργία δύο νέων εικόνων $F(x,y)$, $G(x,y)$
- Βήμα 4. Εφαρμογή φίλτρου Gauss στις εικόνες $F(x,y)$ και $G(x,y)$ με αποτέλεσμα την δημιουργία των εικόνων $F'(x,y)$ και $G'(x,y)$
- Βήμα 5. Εφαρμογή συντελεστή Moravec στις εικόνες $F'(x,y)$ και $G'(x,y)$ για την εξαγωγή αντιστοιχισμένων εικονοστοιχείων
- Βήμα 6. Υπολογισμός απόστασης σύμφωνα με την Σχέση 4.7.15



Σχήμα 4.8.1. Δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου του οπτικού συστήματος

Ο χρόνος λειτουργίας του αλγορίθμου δεν ξεπερνά τα 0.43sec στον υπολογιστή του ρομπότ, Pentium III 450MHz με λειτουργία σε περιβάλλον Linux.

4.9 Αλγόριθμος κίνησης και αποφυγής εμποδίων

Ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.8 μετατρέπει το οπτικό σύστημα σε ένα αποστασιόμετρο που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές εντοπισμού και αποφυγής εμποδίων, για την ασφαλή πλοήγηση ενός έντροχου ρομποτικού οχήματος.

Στα πλαίσια της εργασίας, αναπτύχθηκε αλγόριθμος κίνησης του ρομπότ που αξιοποιεί τις πληροφορίες που αντλούνται τόσο από το οπτικό σύστημα όσο και από τους αισθητήρες υπερήχων με σκοπό την μετάβαση του οχήματος από μια αρχική θέση σε μια τελική, με αποφυγή τυχόν εμποδίων. Ο αλγόριθμος αυτός δεν χρησιμοποιεί κάποιο κριτήριο βελτιστοποίησης και αναπτύχθηκε μόνο για να επιβεβαιώσει την ορθή λειτουργία της σύνθεσης πληροφοριών των αισθητήρων.

Ως πρωτεύων αισθητήρας έχει οριστεί το οπτικό σύστημα, αφού έχει την δυνατότητα να εντοπίζει αντικείμενα σε μεγαλύτερη απόσταση από ότι οι αισθητήρες υπερήχων. Ωστόσο και οι δύο αισθητήρες λειτουργούν συμπληρωματικά ώστε κάθε αντικείμενο που δεν εντοπίζεται από τον ένα να εντοπίζεται από τον άλλο.

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου, έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο οι οχτώ εμπρόσθιοι αισθητήρες υπερήχων του ρομποτικού οχήματος, ώστε να παρουσιάζεται κοινή ακτίνα εντοπισμού με το οπτικό σύστημα.

Για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι εμποδίων Α, Β, με μεγέθη (50x60x30)cm και (40x30x20)cm αντίστοιχα. Τα εμπόδια τύπου Α, δεν εντοπίζονται από το οπτικό σύστημα αφού δεν φέρουν κίτρινο χρώμα. Αντίθετα, τα εμπόδια τύπου Β, έχουν χρωματιστεί κίτρινα και δεν εντοπίζονται από τους αισθητήρες υπερήχων αφού το ύψος τους δεν ξεπερνά το επίπεδο των αισθητήρων.

Η κίνηση του ρομπότ πραγματοποιείται με συναρτήσεις του περιβάλλοντος Mobility, που δέχονται ως ορίσματα την επιθυμητή ευθεία και γωνιακή ταχύτητα. Η μετάβαση του ρομποτικού οχήματος από μια αρχική σε μια τελική θέση δεν υποστηρίζεται από το περιβάλλον Mobility. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ο ασαφής ελεγκτής που προτάθηκε στην εργασία [1], όπου γίνεται μια προσπάθεια ελαχιστοποίησης του γωνιακού σφάλματος σε κάθε χρονική στιγμή. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται μόνο το μέρος του ελεγκτή που ευθύνεται για την κίνηση χωρίς την αποφυγή εμποδίων. Έτσι, με δεδομένη την επιθυμητή ταχύτητα πλοήγησης και (x,y,θ) και (X,Y,Θ) τις συντεταγμένες της παρούσας και τελικής θέσης αντίστοιχα, τροφοδοτείται ο ελεγκτής με το τόξο της εφαπτομένης του λόγου $\frac{y-Y}{x-X}$, και επιστρέφει την απαιτούμενη γωνιακή ταχύτητα. Η κίνηση τερματίζεται όταν η απόσταση της παρούσας θέσης από την θέση του στόχου είναι μικρότερη από 40cm, όση δηλαδή και η διαγώνιος του οχήματος.

Για την επιλογή της κίνησης του ρομποτικού οχήματος κατά την αποφυγή ενός εμποδίου, ο αλγόριθμος υπολογίζει τον χώρο δεξιά και αριστερά του εμποδίου και πραγματοποιεί κίνηση προς την πλευρά με τον μεγαλύτερο ελεύθερο χώρο. Ο υπολογισμός του μεγέθους του χώρου γύρω από το εμπόδιο είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί τόσο με το οπτικό σύστημα όσο και με τους αισθητήρες υπερήχων.

Για το οπτικό σύστημα χρησιμοποιείται η Σχέση 4.7.5, όπου ως x_p τίθεται η διαφορά των θέσεων του πρώτου εικονοστοιχείου της εικόνας με το πρώτο εικονοστοιχείο του αντικειμένου (ελεύθερος χώρος αριστερά), και η διαφορά των θέσεων του τελευταίου εικονοστοιχείου της εικόνας με το τελευταίο εικονοστοιχείο του αντικειμένου (ελεύθερος χώρος δεξιά). Ωστόσο, επειδή οι κάμερες του οπτικού συστήματος βρίσκονται υπό στροφή, είναι προτιμότερο ο χώρος από αριστερά του αντικειμένου να υπολογίζεται με την χρήση της εικόνας της δεξιάς κάμερας και αντίστοιχα, ο χώρος από δεξιά του αντικειμένου να υπολογίζεται από την εικόνα της αριστερής κάμερας (Σχήμα 4.7.6).

Για τους αισθητήρες υπερήχων, συγκρίνεται το άθροισμα των πληροφοριών των τεσσάρων αριστερών και των τεσσάρων δεξιών αισθητήρων και το μεγαλύτερο άθροισμα υποδεικνύει μεγαλύτερο ελεύθερο χώρο.

Η ολοκλήρωση της αποφυγής του εμποδίου, πραγματοποιείται με την κίνηση του ρομποτικού οχήματος με μικρή ευθεία ταχύτητα (0.15m/sec) και στροφή προς την πλευρά του μεγαλύτερου ελεύθερου χώρου, έως ότου οι αισθητήρες υπερήχων ή το οπτικό σύστημα σταματήσουν να εντοπίζουν το εμπόδιο. Τέλος το όχημα μετακινείται, εκ συμβάσεως, ευθεία για ένα μέτρο ώστε να ξεπεράσει το εμπόδιο.

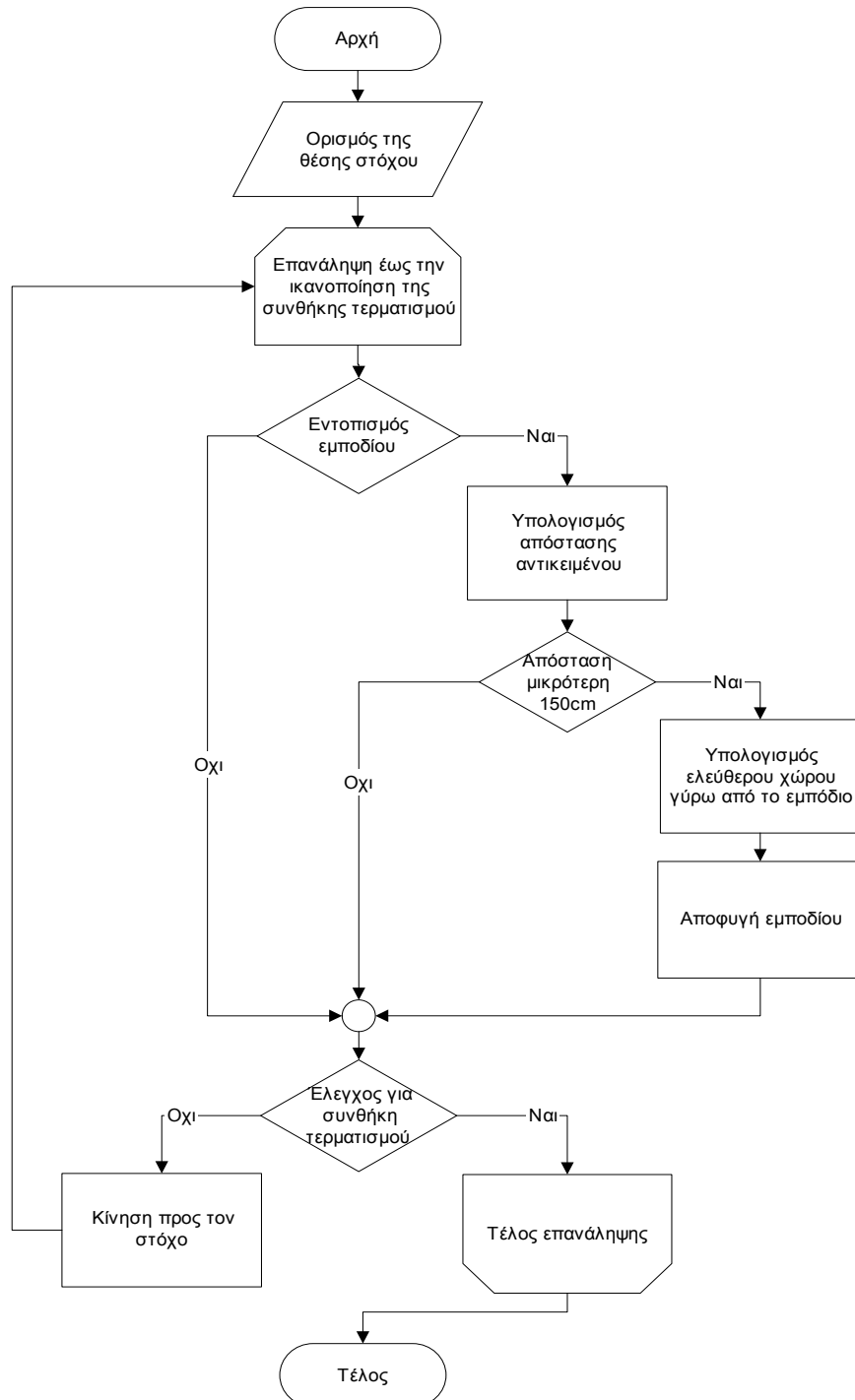
Η λειτουργία του αλγορίθμου έχει ως εξής:

- Βήμα 1. Ορισμός της θέσης στόχου
- Βήμα 2. Έλεγχος για τυχόν εμπόδια με την χρήση του οπτικού συστήματος και των αισθητήρων υπερήχων. Εάν υπάρχουν, υπολογίζεται η απόσταση τους και εάν είναι μικρότερη των 150cm πραγματοποιείται μετάβαση στο Βήμα 3, διαφορετικά μετάβαση στο Βήμα 5.
- Βήμα 3. Υπολογισμός του ελεύθερου χώρου δεξιά και αριστερά του εμποδίου.
- Βήμα 4. Αποφυγή του εμποδίου.
- Βήμα 5. Υπολογισμός της απόστασης μεταξύ της παρούσας θέσης και της θέσης του στόχου. Εάν είναι μικρότερη των 40cm η κίνηση τερματίζεται.
- Βήμα 6. Κίνηση προς τον στόχο και επιστροφή στο Βήμα 2.

Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης του οπτικού συστήματος για τον εντοπισμό εμποδίων είναι η ικανότητα του, ανάλογα με την θέση του, να εντοπίζει πέραν του ενός

εμποδίου. Έτσι είναι δυνατό να αποφευχθεί η τροχιά με τα περισσότερα εμπόδια κατά την κίνηση του ρομποτικού οχήματος.

Το δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου κίνησης του ρομπότ εμφανίζεται στο Σχήμα 4.9.1.



Σχήμα 4.9.1. Δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου κίνησης

4.10 Περιορισμοί του αλγορίθμου κίνησης

Ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.9 μετακινεί το ρομποτικό όχημα από μια αρχική σε μια τελική θέση με ταυτόχρονη αποφυγή εμποδίων. Τα εμπόδια εντοπίζονται είτε από τους αισθητήρες υπερήχων, είτε από το οπτικό σύστημα του οχήματος. Ωστόσο δεν είναι δυνατό να εντοπιστεί κάθε είδους εμπόδιο. Έτσι, όσον αφορά το οπτικό σύστημα, εντοπίζονται μόνο τα εμπόδια που έχουν χρωματιστεί κίτρινα, ενώ για τους αισθητήρες υπερήχων, εντοπίζονται μόνο τα αντικείμενα μεγάλης επιφάνειας που βρίσκονται στο επίπεδο των αισθητήρων.

Παράλληλα, δεν είναι δυνατό να εντοπιστούν, από το οπτικό σύστημα, κίτρινα αντικείμενα στα οποία δεν υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή χρώματος που προκαλείται από ανόμοιες συνθήκες φωτισμού.

Επίσης, για τα κίτρινα αντικείμενα που βρίσκονται κάτω από το επίπεδο των αισθητήρων υπερήχων (αντικείμενα με πολύ μικρό ύψος), θα πρέπει, προκειμένου να εντοπιστούν, οι κάμερες του οπτικού συστήματος να στραφούν κατά τον κατακόρυφο άξονα ώστε τα εμπόδια να βρίσκονται μέσα στο οπτικό τους πεδίο.

Τέλος, στην περίπτωση όπου το αντικείμενο ενδιαφέροντος απέχει απόσταση μεγαλύτερη των δέκα μέτρων από το ρομποτικό όχημα, ο αριθμός των εικονοστοιχείων που το αποτελεί είναι πολύ μικρός και παρουσιάζονται σημαντικά σφάλματα στον υπολογισμό της απόστασης με την χρήση του οπτικού συστήματος.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της εργασίας, για την υποστήριξη του οπτικού συστήματος. Οι αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί στις γλώσσες προγραμματισμού MATLAB και C++.

5.1 Εφαρμογή κατωφλίου στον χρωματικό χώρο HIS

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται, ενδεικτικά, εικόνες από τα πειράματα που διεξήχθησαν για τον εντοπισμό κίτρινου αντικειμένου με την χρήση του χρωματικού χώρου HSI.



Σχήμα 5.1.1. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας



Σχήμα 5.1.2. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας



Σχήμα 5.1.3. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας

Στο Πίνακα 5.1.1. παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για την επαλήθευση της λειτουργίας του αλγορίθμου. Στα πειράματα αυτά, μεταβάλλεται η θέση, η κατεύθυνση και ο αριθμός των κίτρινων αντικειμένων καθώς και οι συνθήκες φωτισμού του χώρου.

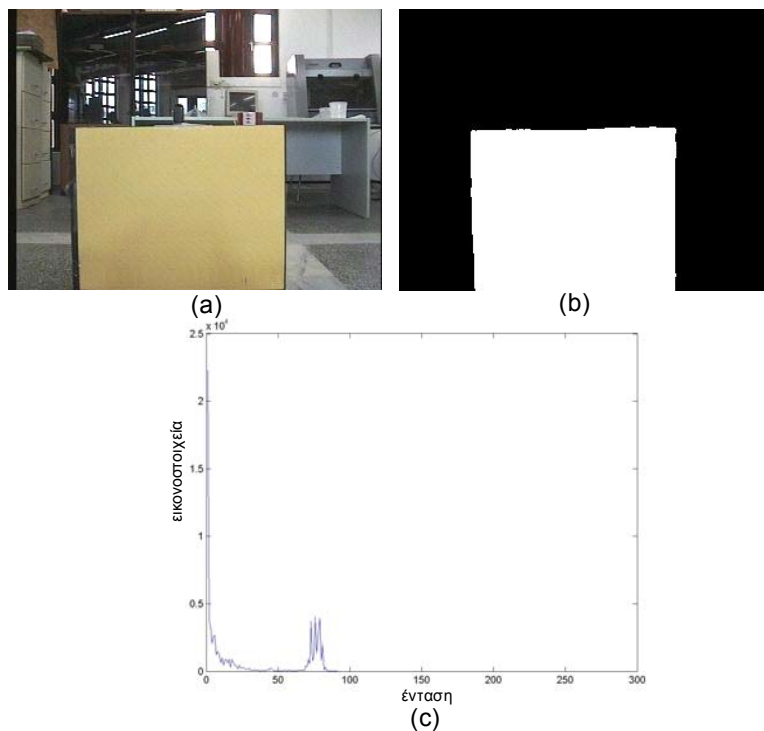
Αρ. Πειράματος	Ποσοστό % των εικονοστοιχείων του αντικειμένου που εντοπίστηκε	Ποσοστό % των εικονοστοιχείων που εντοπίστηκε και δεν ανήκει στο αντικείμενο
1	75%	0.5%
2	88%	0.11%
3	83%	0.14%
4	76%	0.17%
5	83%	0.15%
6	80%	0.3%
7	73%	0.4%
8	70%	0.1%
9	79%	0.02%
10	83%	0.6%
11	85%	0.5%
12	81%	0.2%
13	80%	0.3%
14	76%	0.02%
15	69%	0.01%

Πίνακας 5.1.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο HSI

Στον Πίνακα 5.1.1. φαίνεται ότι ένα ποσοστό της τάξης του 20% των εικονοστοιχείων του αντικειμένου δεν εντοπίζεται. Αντίθετα, εντοπίζονται εικονοστοιχεία που ανήκουν στο φόντο σε ποσοστό της τάξης του 0.27%.

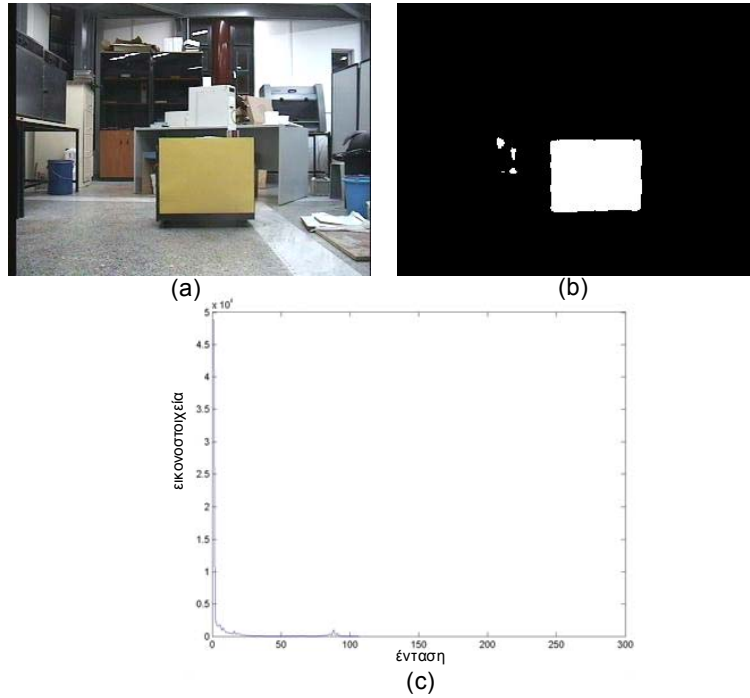
5.2 Εφαρμογή κατωφλίου στον χρωματικό χώρο CMYK

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου εφαρμογής τεχνικής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο CMYK. Σε κάθε σχήμα εμφανίζονται η πρωτότυπη εικόνα (a), η επεξεργασμένη εικόνα (b) και το ιστόγραμμα του κίτρινου συστατικού (c) μέσω του οποίου υπολογίζεται η τιμή κατωφλίου.



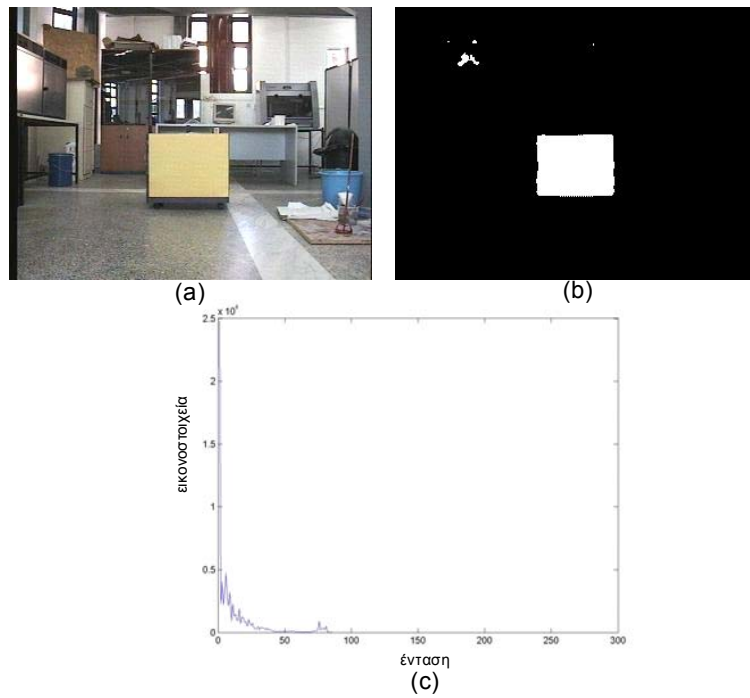
Σχήμα 5.2.1. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας

Στο Σχήμα 5.2.1.(c) φαίνεται ότι η μεγαλύτερη απόδοση του κίτρινου χρώματος με τα περισσότερα εικονοστοιχεία είναι η 75^η. Έτσι ως τιμή κατωφλίου ορίζεται η 60^η απόδοση.



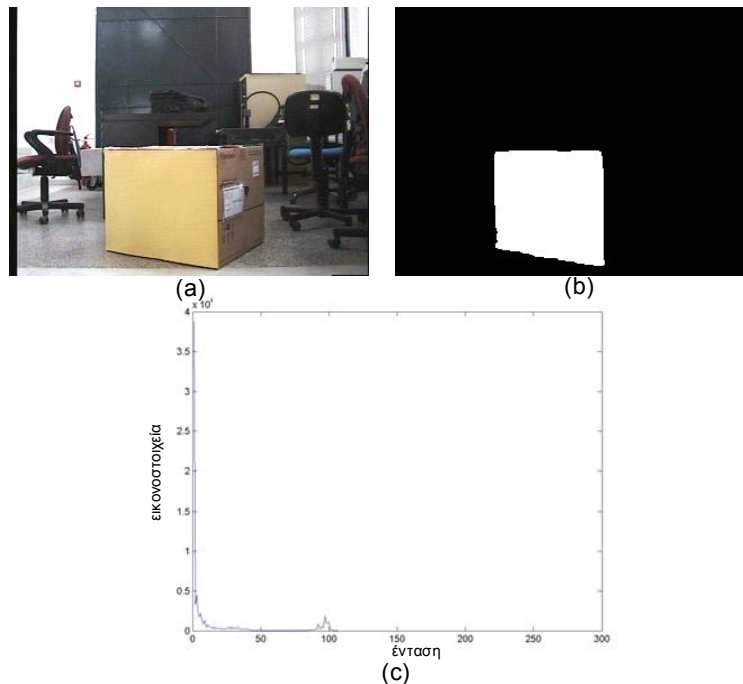
Σχήμα 5.2.2. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας

Στο Σχήμα 5.2.2.(c) φαίνεται ότι η μεγαλύτερη απόδοση του κίτρινου χρώματος με τα περισσότερα εικονοστοιχεία είναι η 85^η. Έτσι ως τιμή κατωφλίου ορίζεται η 68^η απόδοση.



Σχήμα 5.2.3. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας

Στο Σχήμα 5.2.3.(c) φαίνεται ότι η μεγαλύτερη απόδοση του κίτρινου χρώματος με τα περισσότερα εικονοστοιχεία είναι η 75^η. Έτσι ως τιμή κατωφλίου ορίζεται η 60^η απόδοση



Σχήμα 5.2.4. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας

Από το Σχήμα 5.2.4.(c) φαίνεται ότι η μεγαλύτερη απόδοση του κίτρινου χρώματος με τα περισσότερα εικονοστοιχεία είναι η 95^η. Έτσι ως τιμή κατωφλίου ορίζεται η 76^η απόδοση.

Στον Πίνακα 5.2.1. παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για την επαλήθευση της λειτουργίας του αλγορίθμου. Στα πειράματα αυτά, μεταβάλλεται η θέση, η κατεύθυνση και ο αριθμός των κίτρινων αντικειμένων καθώς και οι συνθήκες φωτισμού του χώρου.

Αρ.Πειράματος	Ποσοστό % των εικονοστοιχείων του αντικειμένου που εντοπίστηκε	Ποσοστό % των εικονοστοιχείων που εντοπίστηκε και δεν ανήκει στο αντικείμενο
1	95%	0%
2	91%	0%
3	91%	0.01%
4	90%	0.01%
5	89%	0.03%

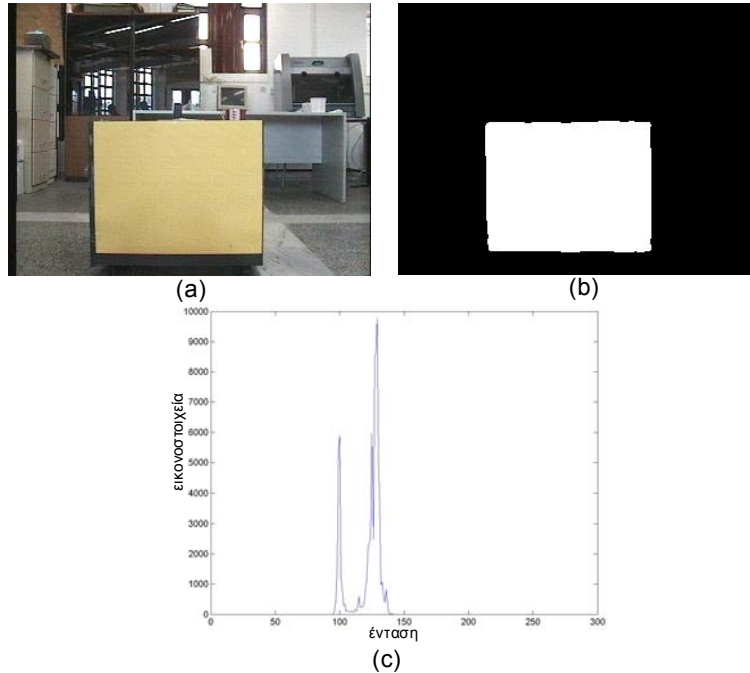
6	85%	0.05%
7	88%	0.05%
8	94%	0%
9	92%	0%
10	94%	0%
11	94%	0%
12	93%	0%
13	90%	0.12%
14	85%	0.03%
15	88%	0.01%

Πίνακας 5.2.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο CMYK

Στον Πίνακα 5.2.1. φαίνεται ότι ένα ποσοστό της τάξης του 10% των εικονοστοιχείων του αντικειμένου δεν εντοπίζεται. Αντίθετα, εντοπίζονται εικονοστοιχεία που ανήκουν στο φόντο σε ποσοστό της τάξης του 0.02%. Σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι ο υπολογισμός της τιμής του κατωφλίου προσαρμόζεται στις συνθήκες φωτεινότητας της σκηνής.

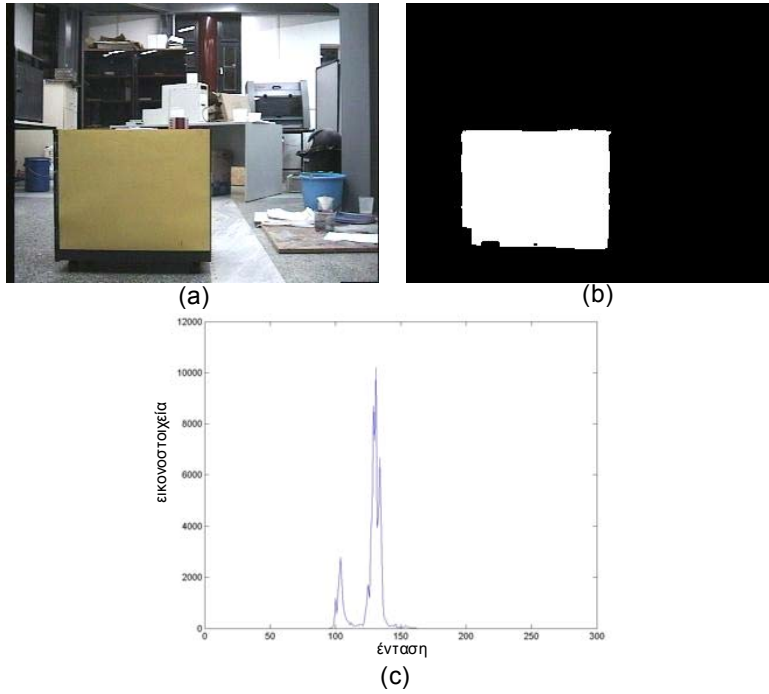
5.3 Εφαρμογή κατωφλίου στον χρωματικό χώρο YCbCr

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου εφαρμογής τεχνικής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο YCbCr. Σε κάθε σχήμα εμφανίζονται η πρωτότυπη εικόνα (a), η επεξεργασμένη εικόνα (b) και το ιστόγραμμα του συστατικού Cb (c) μέσω του οποίου υπολογίζεται η τιμή κατωφλίου.



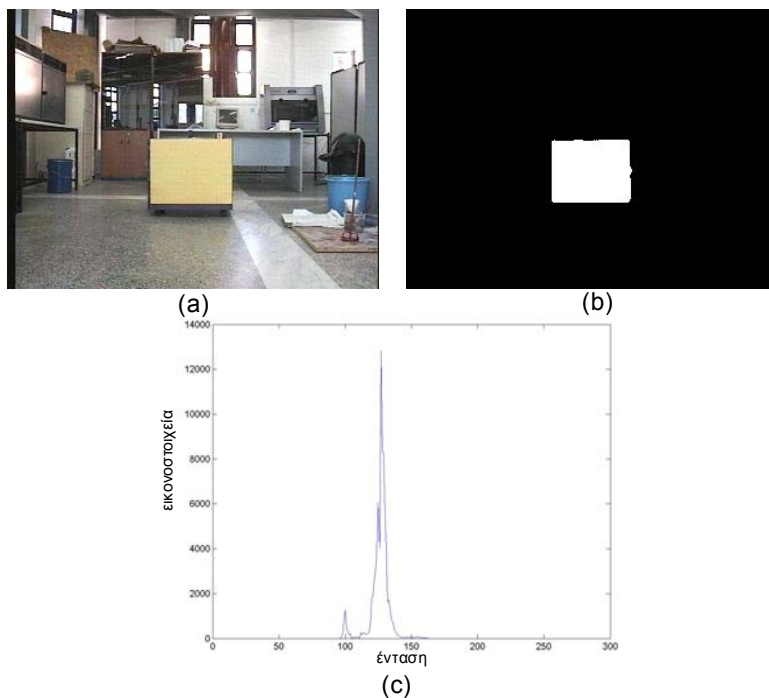
Σχήμα 5.3.1. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας

Στο Σχήμα 5.3.1.(c) φαίνεται ότι η μικρότερη απόδοση του συστατικού Cb με τα περισσότερα εικονοστοιχεία είναι η 95^η. Έτσι ως περιοχή κατωφλίου ορίζεται η [85, 105].



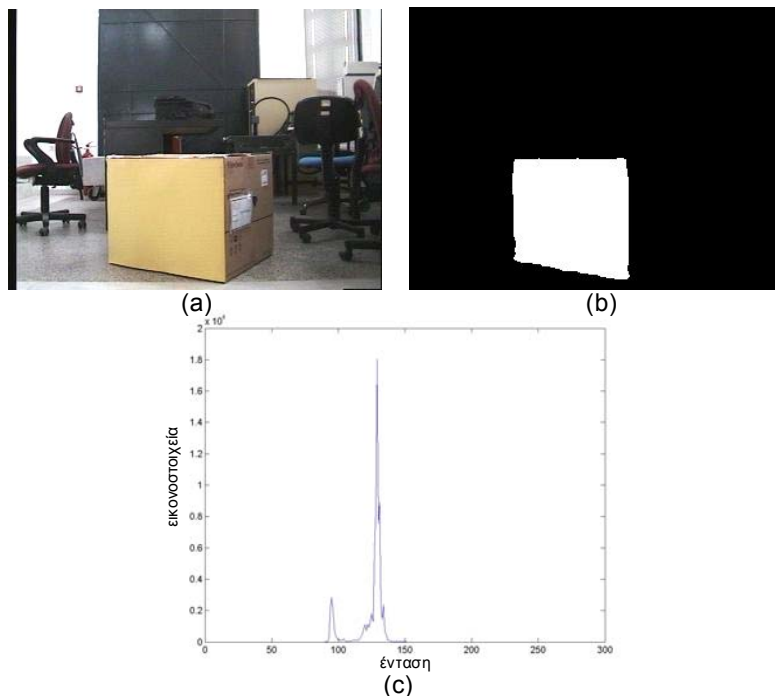
Σχήμα 5.3.2. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας

Στο Σχήμα 5.3.2.(c) φαίνεται ότι η μικρότερη απόδοση του συστατικού Cb με τα περισσότερα εικονοστοιχεία είναι η 110^η. Έτσι ως περιοχή κατωφλίου ορίζεται η [99, 122].



Σχήμα 5.3.3. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας

Στο Σχήμα 5.3.3.(c) φαίνεται ότι η μικρότερη απόδοση του συστατικού Cb με τα περισσότερα εικονοστοιχεία είναι η 100^η. Έτσι ως περιοχή κατωφλίου ορίζεται η [90, 110].



Σχήμα 5.3.4. Διαχωρισμός κίτρινου αντικειμένου από το φόντο της εικόνας

Στο Σχήμα 5.3.4.(c) φαίνεται ότι η μικρότερη απόδοση του συστατικού Cb με τα περισσότερα εικονοστοιχεία είναι η 93^η. Έτσι ως περιοχή κατωφλίου ορίζεται η [83, 102].

Στον Πίνακα 5.3.1. παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για την επαλήθευση της λειτουργίας του αλγορίθμου. Στα πειράματα αυτά, μεταβάλλεται η θέση, η κατεύθυνση και ο αριθμός των κίτρινων αντικειμένων καθώς και οι συνθήκες φωτισμού του χώρου.

Αρ.Πειράματος	Ποσοστό % των εικονοστοιχείων του αντικειμένου που εντοπίστηκε	Ποσοστό % των εικονοστοιχείων που εντοπίστηκαν και δεν ανήκουν στο αντικείμενο
1	97%	0%
2	95%	0%
3	88%	0%
4	97%	0%

5	97%	0%
6	94%	0%
7	90%	0%
8	96%	0%
9	96%	0%
10	92%	0%
11	93%	0%
12	96%	0%
13	92%	0%
14	95%	0%
15	97%	0%

Πίνακας 5.3.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου εφαρμογής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο YCbCr

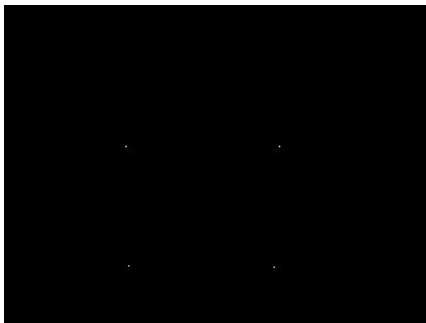
Ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε για τον εντοπισμό κίτρινου αντικειμένου σε έγχρωμη εικόνα με την χρήση του χρωματικού χώρου YcbCr παρουσιάζει πολύ καλά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, εντοπίζει, κατά μέσο όρο, το 95% των εικονοστοιχείων του αντικειμένου, ενώ απομονώνει όλα τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στο φόντο της εικόνας. Επιπρόσθετα, ο αλγόριθμος έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται στις συνθήκες φωτισμού κάθε σκηνής.

5.4 Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων

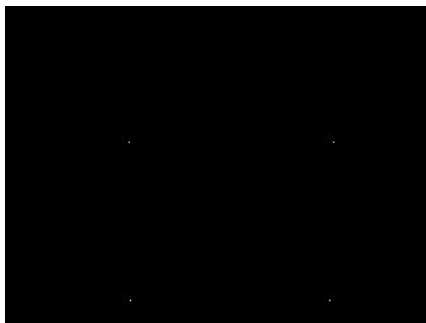
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται, ενδεικτικά τα αποτελέσματα του αλγορίθμου εντοπισμού χαρακτηριστικών σημείων με την χρήση του συντελεστή Moravec.



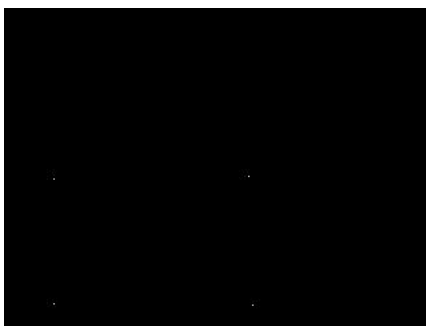
Σχήμα 5.4.1. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων



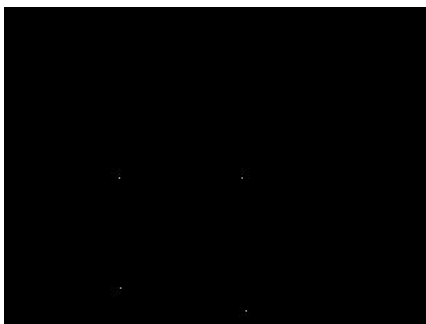
Σχήμα 5.4.2. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων



Σχήμα 5.4.3. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων



Σχήμα 5.4.4. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων



Σχήμα 5.4.5. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων



Σχήμα 5.4.6. Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων

5.5 Υπολογισμός απόστασης αντικειμένου

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη το οπτικό σύστημα αποτελείται από δύο κάμερες που βρίσκονται τοποθετημένες στην κορυφή του ρομποτικού οχήματος σε απόσταση 40cm και παράλληλο προσανατολισμό, ενώ στην δεύτερη οι κάμερες έχουν στραφεί κατά 12 μοίρες προς το κέντρο του ρομπότ.

5.5.1 Παράλληλος προσανατολισμός

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου υπολογισμού της απόστασης ενός αντικειμένου με την χρήση στερεοσκοπικού οπτικού συστήματος. Σε κάθε σχήμα εμφανίζονται οι εικόνες που προέρχονται από την αριστερή και δεξιά κάμερα του οπτικού συστήματος.



Σχήμα 5.5.1 Πραγματική απόσταση του αντικειμένου 259cm, υπολογιζόμενη 257cm



Σχήμα 5.5.2 Πραγματική απόσταση του αντικειμένου 425cm, υπολογιζόμενη 432cm



Σχήμα 5.5.3 Πραγματική απόσταση του αντικειμένου 166cm, υπολογιζόμενη 161cm



Σχήμα 5.5.4 Πραγματική απόσταση του αντικειμένου 380cm, υπολογιζόμενη 382cm

Αλλάζοντας τον προσανατολισμό του αντικειμένου:



*Σχήμα 5.5.5 Πραγματική απόσταση δεξιάς ακμής του αντικειμένου 150cm, υπολογιζόμενη 144cm
Πραγματική απόσταση της αριστερής ακμής του αντικειμένου 183cm, υπολογιζόμενη 178cm*



*Σχήμα 5.5.6 Πραγματική απόσταση δεξιάς ακμής του αντικειμένου 180cm, υπολογιζόμενη 178cm
Πραγματική απόσταση της αριστερής ακμής του αντικειμένου 215cm, υπολογιζόμενη 212cm*

Τέλος, αλλάζοντας το μέγεθος και τον αριθμό των αντικειμένων



Σχήμα 5.5.7 Πραγματική απόσταση δεξιού αντικειμένου 153cm, υπολογιζόμενη 154cm
Πραγματική απόσταση αριστερού αντικειμένου 73cm, υπολογιζόμενη 71cm



Σχήμα 5.5.8 Πραγματική απόσταση δεξιού αντικειμένου 178cm, υπολογιζόμενη 174cm
Πραγματική απόσταση αριστερού αντικειμένου 95cm, υπολογιζόμενη 91cm



Σχήμα 5.5.9 Το μέγεθος των αντικειμένων είναι πολύ μικρό για να εντοπιστούν

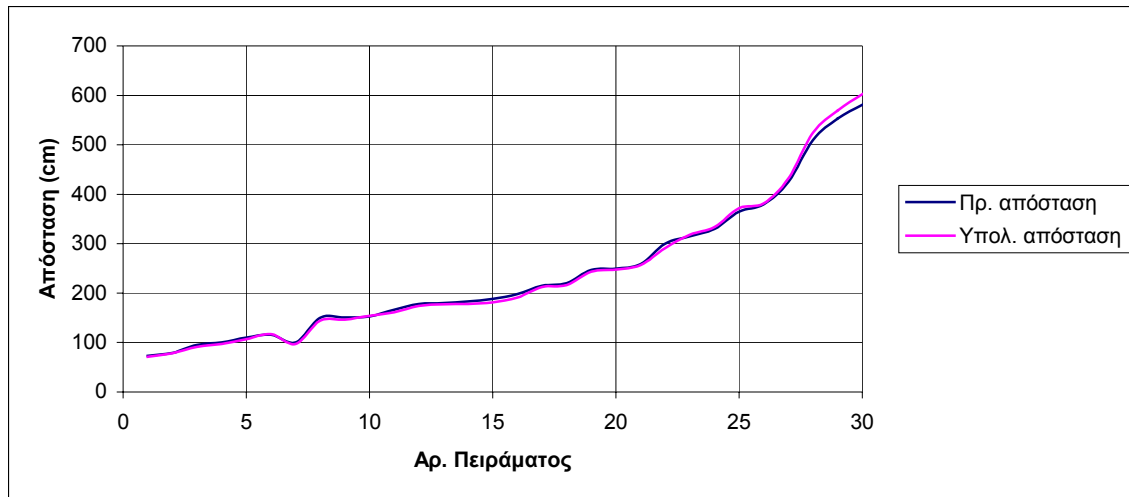
Στον Πίνακα 5.5.1. παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για την επαλήθευση της λειτουργίας του αλγορίθμου. Στα πειράματα αυτά, μεταβάλλεται η θέση, η κατεύθυνση και ο αριθμός των αντικειμένων καθώς και οι συνθήκες φωτισμού του χώρου. Το μέγιστο σφάλμα του υπολογισμού, όπως εμφανίζεται στον Πίνακα 5.5.1, είναι 4.21%, ενώ το ελάχιστο 0.52%.

Αρ. Πειράματος	Πραγματική απόσταση (cm)	Υπολογιζόμενη απόσταση (cm)	Σφάλμα %
1	73	71	2.73
2	79	78	1.26

3	95	91	4.21
4	100	97	3
5	110	107	2.72
6	116	117	0.86
7	100	97	3
8	150	144	4
9	151	146	3.31
10	153	154	0.65
11	166	161	3.01
12	178	174	2.24
13	180	177	1.66
14	183	178	2.73
15	188	181	3.72
16	198	191	3.53
17	215	212	1.39
18	220	216	1.81
19	247	243	1.61
20	250	248	0.8
21	259	257	0.77
22	300	291	3
23	315	318	0.95
24	330	334	1.21
25	365	372	1.91
26	380	382	0.52
27	425	432	1.64
28	510	525	2.94
29	553	569	2.89
30	581	602	3.66

Πίνακας 5.5.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αλγορίθμου υπολογισμού απόστασης

Στο Σχήμα 5.5.10. παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των πραγματικών και υπολογιζόμενων αποστάσεων για τα πειράματα του Πίνακα 5.5.1.



Σχήμα 5.5.10. Γραφική παράσταση των πραγματικών και υπολογιζόμενων αποστάσεων για 30 πειράματα

5.5.2 Οπτικό σύστημα υπό στροφή

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου υπολογισμού της απόστασης ενός αντικειμένου με την χρήση στερεοσκοπικού οπτικού συστήματος υπό στροφή. Σε κάθε σχήμα εμφανίζονται οι εικόνες που προέρχονται από την αριστερή και δεξιά κάμερα του οπτικού συστήματος.



Σχήμα 5.5.11 Πραγματική απόσταση αντικειμένου 106cm, υπολογιζόμενη 103cm



Σχήμα 5.5.12 Πραγματική απόσταση αντικειμένου 205cm, υπολογιζόμενη 205cm

Αλλάζοντας το μέγεθος και το πλήθος των αντικειμένων:



Σχήμα 5.5.13 Πραγματική απόσταση αντικειμένου 139cm, υπολογιζόμενη 139cm



Σχήμα 5.4.14 Πραγματική απόσταση δεξιού αντικειμένου 148cm, υπολογιζόμενη 147cm
Πραγματική απόσταση αριστερού αντικειμένου 78cm, υπολογιζόμενη 78cm

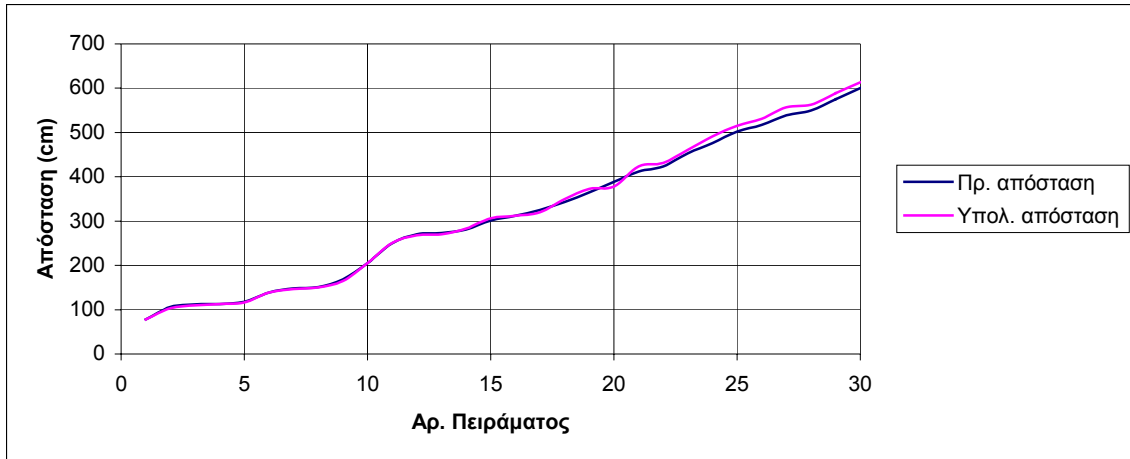
Στο Πίνακα 5.5.2. παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για την επαλήθευση της λειτουργίας του αλγορίθμου. Στα πειράματα αυτά, μεταβάλλεται η θέση, η κατεύθυνση και ο αριθμός των αντικειμένων καθώς και οι συνθήκες φωτισμού του χώρου. Το μέγιστο σφάλμα του υπολογισμού, όπως εμφανίζεται στον Πίνακα 5.5.2, είναι 3.33%, ενώ το ελάχιστο 0%.

Αρ. Πειράματος	Πραγματική απόσταση (cm)	Υπολογιζόμενη απόσταση (cm)	Σφάλμα %
1	78	78	0
2	106	103	2.83
3	112	110	1.78
4	113	113	0
5	118	116	1.69
6	139	139	0
7	148	147	0.67
8	151	150	0.66

9	168	165	1.78
10	205	205	0
11	250	251	0.4
12	270	268	0.74
13	273	270	1.09
14	281	283	0.71
15	301	306	1.66
16	312	312	0
17	325	320	1.53
18	343	350	2.04
19	365	373	2.19
20	389	378	2.82
21	412	423	2.67
22	423	431	1.89
23	453	461	1.76
24	476	491	3.15
25	502	515	2.58
26	517	531	2.70
27	539	557	3.33
28	550	563	2.36
29	575	589	2.43
30	600	613	2.16

Πίνακας 5.5.2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αλγορίθμου υπολογισμού απόστασης

Στο Σχήμα 5.5.15. παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των πραγματικών και υπολογιζόμενων αποστάσεων για τα πειράματα του Πίνακα 5.5.2.

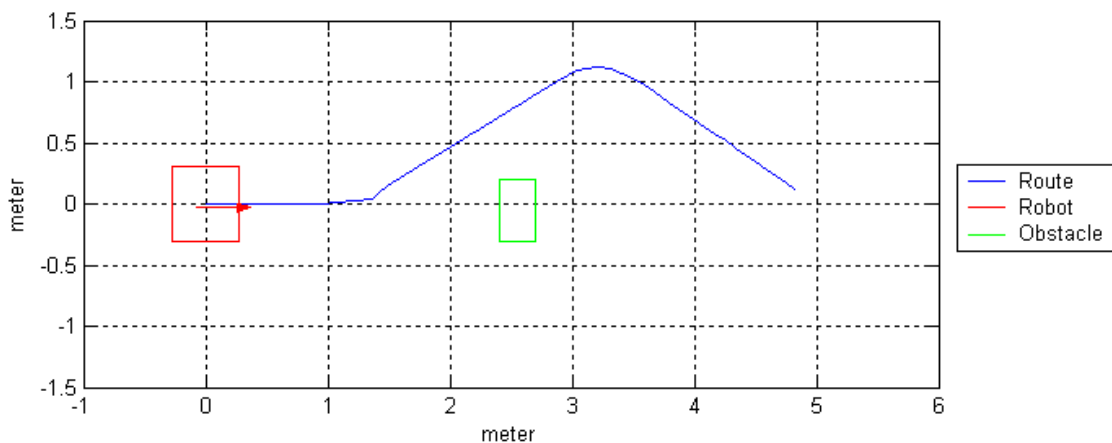


Σχήμα 5.5.15. Γραφική παράσταση των πραγματικών και υπολογιζόμενων αποστάσεων για 30 πειράματα

5.6 Αποτελέσματα του αλγορίθμου κίνησης και αποφυγής εμποδίων

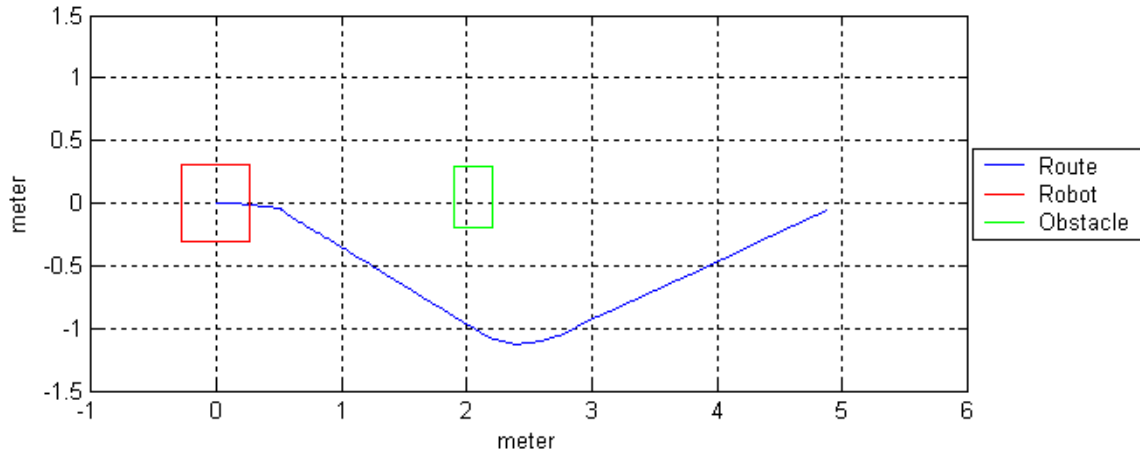
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κίνηση του ρομπότ από μια αρχική θέση σε μια τελική με ταυτόχρονη αποφυγή ενός, δύο ή τριών εμποδίων με την χρήση πληροφοριών του οπτικού συστήματος. Πρόκειται για πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο του εργαστηρίου Ρομποτικής και Ευφών Συστημάτων του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Οι θέσεις κίνησης του ρομπότ που παρουσιάζονται έχουν καταγραφεί από το οδόμετρο του.

Στο Σχήμα 5.6.1. παρουσιάζεται η κίνηση του ρομπότ από την θέση (0,0) στην θέση (5,0). Σε απόσταση 2.4m από την αρχική του θέση έχει τοποθετηθεί ένα εμπόδιο με συντεταγμένες κορυφών (2.4,-0.3), (2.4, 0.2), (2.7, 0.2) και (2.7, -0.3). Το εμπόδιο βρίσκεται δεξιά του ρομπότ αφήνοντας έτσι περισσότερο ελεύθερο χώρο για κίνηση προς τα αριστερά.



Σχήμα 5.6.1. Αποφυγή εμποδίου με την χρήση του οπτικού συστήματος

Στο Σχήμα 5.6.2. παρουσιάζεται η κίνηση του ρομπότ από την θέση (0,0) στην θέση (5,0). Σε απόσταση 1.9m από την αρχική του θέση έχει τοποθετηθεί ένα εμπόδιο με συντεταγμένες κορυφών (1.9,-0.2), (1.9, 0.3), (2.2, 0.3) και (2.2, -0.2). Το εμπόδιο βρίσκεται αριστερά του ρομπότ αφήνοντας έτσι περισσότερο ελεύθερο χώρο για κίνηση προς τα δεξιά.



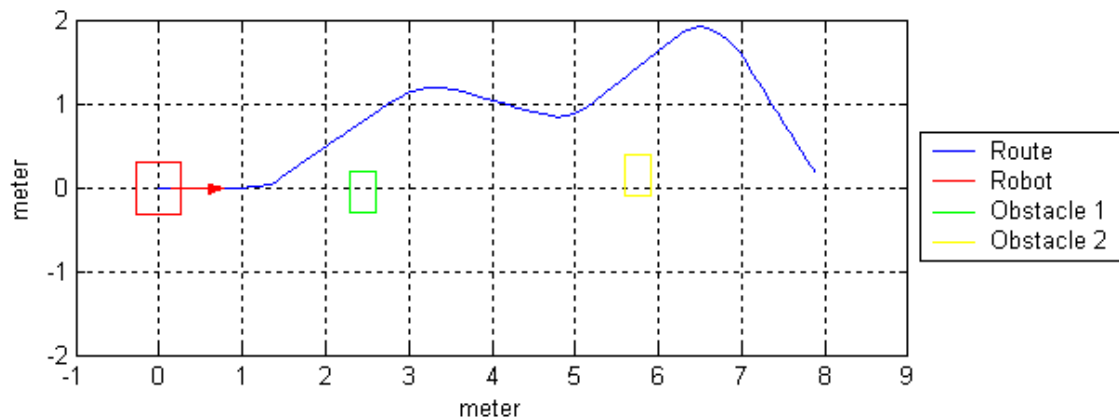
Σχήμα 5.6.2. Αποφυγή εμποδίου με την χρήση του οπτικού συστήματος

Στο Σχήμα 5.6.3 παρουσιάζεται η κίνηση του ρομπότ από την θέση (0,0) στην θέση (8,0). Σε απόσταση 2.3m και 5.6m από την αρχική του θέση έχουν τοποθετηθεί δύο εμπόδια. Οι συντεταγμένες των κορυφών τους είναι

Εμπόδιο 1: (2.3,-0.3), (2.3,0.2), (2.6, 0.2), (2.6,-0.3)

Εμπόδιο 2: (5.6, -0.1), (5.6, 0.4), (5.9, 0.4), (5.9,-0.1)

Το πρώτο εμπόδιο βρίσκεται δεξιά του ρομπότ, αφήνοντας έτσι περισσότερο ελεύθερο χώρο για κίνηση προς τα αριστερά. Επίσης λόγω της θέσης του, το δεύτερο εμπόδιο καλύπτεται από το πρώτο και δεν εντοπίζεται από το οπτικό σύστημα κατά την πρώτη αποφυγή. Μετά την αποφυγή του πρώτου εμποδίου, εντοπίζεται το δεύτερο που βρίσκεται δεξιά του ρομπότ.



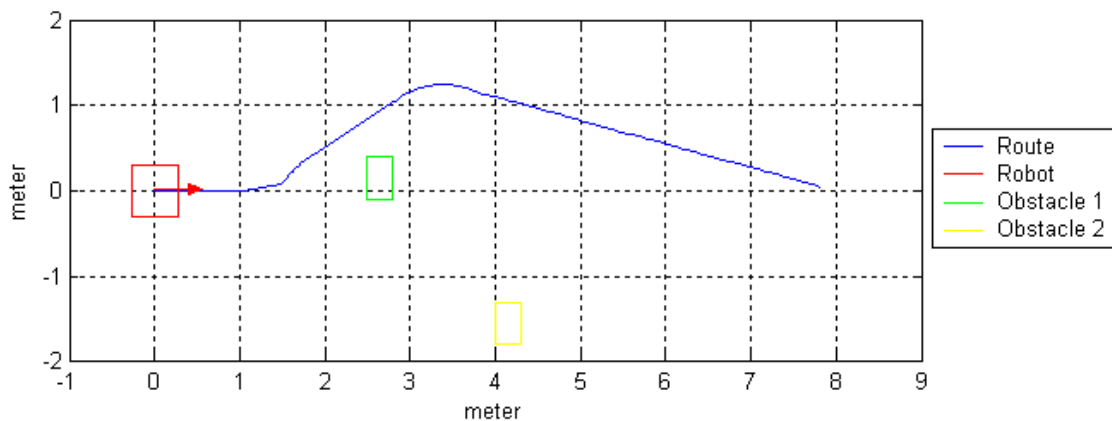
Σχήμα 5.6.3. Αποφυγή δύο εμποδίων με την χρήση του οπτικού συστήματος

Στο Σχήμα 5.6.4 παρουσιάζεται η κίνηση του ρομπότ από την θέση (0,0) στην θέση (8,0). Σε απόσταση 2.2m και 4.0m από την αρχική του θέση έχουν τοποθετηθεί δύο εμπόδια. Οι συντεταγμένες των κορυφών τους είναι:

Εμπόδιο 1: (2.6,-0.1), (2.6,0.4), (3, -0.1), (3,0.4)

Εμπόδιο 2: (3.8, -0.8), (3.8, -0.3), (4.2, 0.8), (4.2,0.3)

Το πρώτο εμπόδιο βρίσκεται αριστερά του ρομπότ, αφήνοντας έτσι περισσότερο ελεύθερο χώρο για κίνηση προς τα δεξιά. Όμως, λόγω της θέσης του, το δεύτερο εμπόδιο εντοπίζεται από το οπτικό σύστημα και αποφασίζεται κίνηση προς τα αριστερά.



Σχήμα 5.6.4 Αποφυγή δύο εμποδίων με την χρήση του οπτικού συστήματος

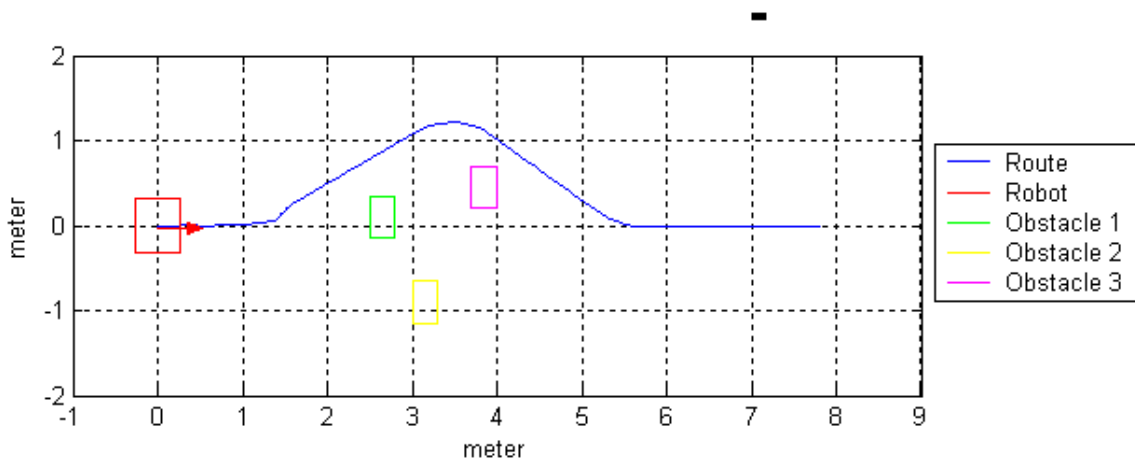
Στο Σχήμα 5.6.5 παρουσιάζεται η κίνηση του ρομπότ από την θέση (0,0) στην θέση (8,0). Σε απόσταση 1.5m, 3m και 3.7m από την αρχική του θέση έχουν τοποθετηθεί τρία εμπόδια. Οι συντεταγμένες των κορυφών τους είναι:

Εμπόδιο 1: (1.5,-0.15), (1.5,0.35), (1.8,-0.15), (1.8,0.35)

Εμπόδιο 2: (3,-1.15), (3,-0.65), (3.3, -0.65), (3.3,-1.15)

Εμπόδιο 3: (3.7,0.2), (3.7, 0.7), (4,0.2), (4,0.7)

Τα δύο κοντινότερα εμπόδια εντοπίζονται από το οπτικό σύστημα και αποφασίζεται κίνηση προς τα αριστερά. Στην συνέχεια εντοπίζεται και το τρίτο εμπόδιο που αποφεύγεται με μια εκ νέου αριστερή κίνηση.



Σχήμα 5.6.5 Αποφυγή τριών εμποδίων με την χρήση του οπτικού συστήματος

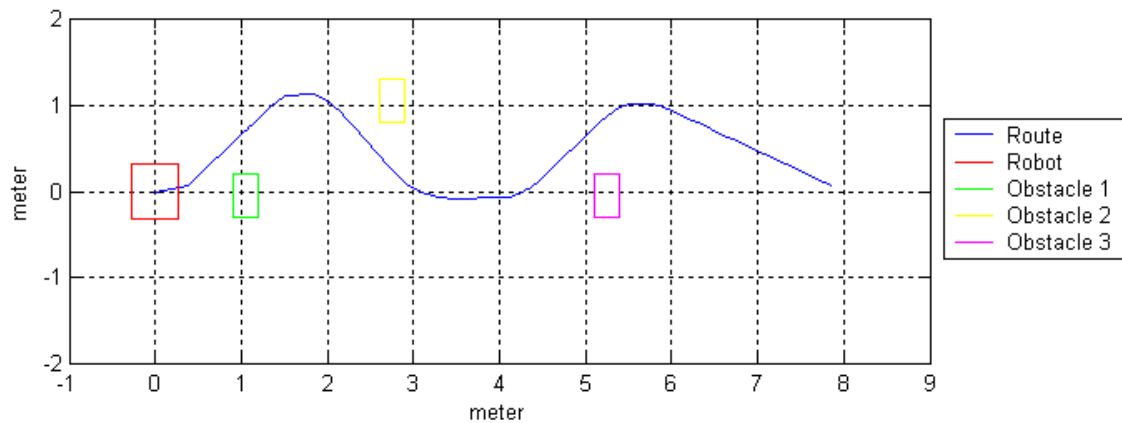
Στο Σχήμα 5.6.6 παρουσιάζεται η κίνηση του ρομπότ από την θέση (0,0) στην θέση (8,0). Σε απόσταση 0.9m, 2.6m και 5.1m από την αρχική του θέση έχουν τοποθετηθεί τρία εμπόδια. Οι συντεταγμένες των κορυφών τους είναι:

Εμπόδιο 1: (0.9,-0.3), (0.9,0.2), (1.2,0.2), (1.2,-0.3)

Εμπόδιο 2: (2.6,0.8), (2.6,1.3), (2.9,1.3), (2.9,0.8)

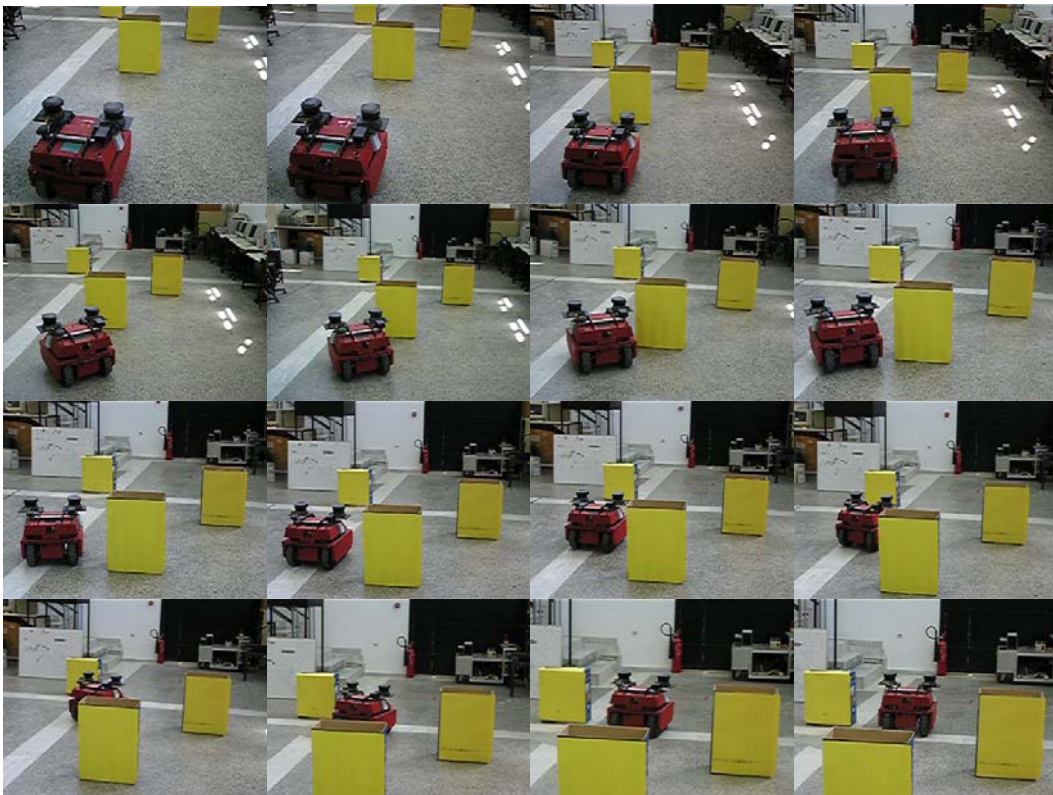
Εμπόδιο 3: (5.1,-0.3), (5.1, 0.2), (5.4,0.2), (5.4,-0.3)

Το πρώτο εμπόδιο βρίσκεται πολύ κοντά στο ρομπότ, εμποδίζοντας το οπτικό σύστημα να εντοπίσει τα άλλα δύο. Λόγω της θέσης του πρώτου εμποδίου, πραγματοποιείται κίνηση προς τα αριστερά. Στη συνέχεια εντοπίζεται το δεύτερο εμπόδιο, που βρίσκεται αριστερά από το ρομπότ οπότε πραγματοποιείται κίνηση προς τα δεξιά. Τέλος εντοπίζεται και το τρίτο εμπόδιο που βρίσκεται δεξιά του ρομπότ οπότε πραγματοποιείται κίνηση προς τα αριστερά.



Σχήμα 5.6.6 Αποφυγή τριών εμποδίων με την χρήση του οπτικού συστήματος

Για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων έχει καταγραφεί η κίνηση του ρομπότ σε βίντεο. Στο Σχήμα 5.6.7 παρουσιάζονται ενδεικτικά καρέ όπου πραγματοποιείται κίνηση με αποφυγή τριών εμποδίων.



Σχήμα 5.6.7. Καρέ από το βίντεο της κίνησης με αποφυγή τριών εμποδίων

Στις εικόνες που ακολουθούν εμφανίζονται οι πληροφορίες του οπτικού συστήματος κατά την κίνηση του ρομπότ για την αποφυγή τριών εμποδίων. Η αριστερή στήλη περιλαμβάνει τις εικόνες που λαμβάνονται από την αριστερή κάμερα του οπτικού συστήματος ενώ η δεξιά στήλη τις εικόνες της δεξιάς κάμερας. Οι μονές εικόνες περιλαμβάνουν τον έλεγχο αποφυγής εμποδίου.



Σχήμα 5.6.8 Εντοπισμός των εμποδίων. Βρίσκονται μακριά και εξακολουθεί η ευθύγραμμη κίνηση



Σχήμα 5.6.9 Εξακολουθεί η ευθύγραμμη κίνηση. Τα εμπόδια δεν αποτελούν κίνδυνο σύγκρουσης



Σχήμα 5.6.10 Η απόσταση του πρώτου εμποδίου είναι μικρότερη των 180cm. Αποφασίζεται κίνηση προς αριστερά.



(α)



(b)



(c)



(d)

Σχήμα 5.6.11(a-d) Χρησιμοποιώντας την αριστερή κάμερα του οπτικού συστήματος πραγματοποιείται κίνηση στροφής έως ότου δεν υπάρχουν εμπόδια



Σχήμα 5.6.12. Αφού πραγματοποιηθεί η αποφυγή του πρώτου εμποδίου εξακολουθεί η κίνηση με στόχο την τελική θέση



Σχήμα 5.6.13. Εντοπίζεται το τρίτο εμπόδιο. Βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 180cm



Σχήμα 5.6.14. Το τρίτο εμπόδιο βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 180cm. Αποφασίζεται κίνηση προς τα δεξιά



(a)



(b)

Σχήμα 5.6.15. (a-b) Χρησιμοποιώντας την δεξιά κάμερα του οπτικού συστήματος πραγματοποιείται κίνηση στροφής έως ότου δεν υπάρχουν εμπόδια



Σχήμα 5.6.16. Μετά την αποφυγή του τρίτου εμποδίου, το ρομπότ κατευθύνεται προς την τελική θέση

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κίνηση του ρομποτικού οχήματος από μια αρχική θέση σε μια τελική με ταυτόχρονη αποφυγή τριών εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων. Πρόκειται για πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο του εργαστηρίου και οι θέσεις κίνησης του ρομπότ που παρουσιάζονται έχουν καταγραφεί από το οδόμετρο του.

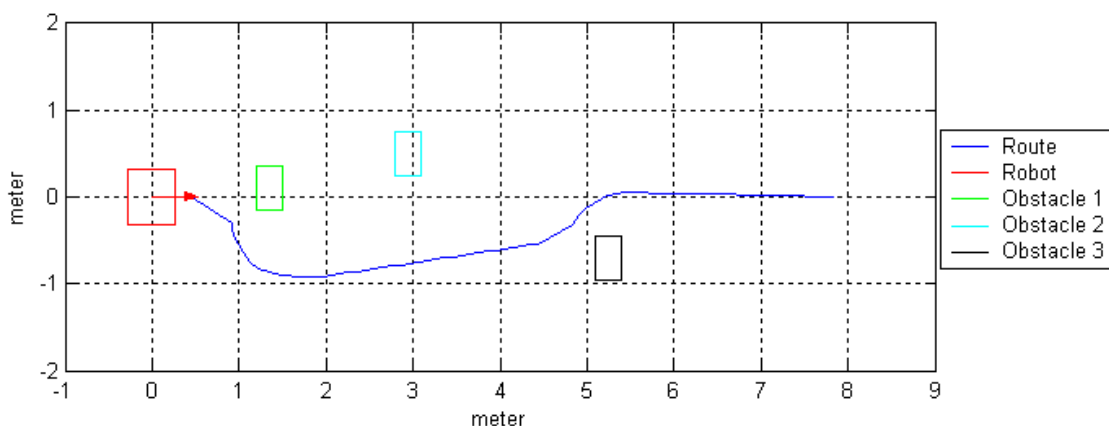
Στο Σχήμα 5.6.17 παρουσιάζεται η κίνηση του ρομπότ από την θέση (0,0) στην θέση (8,0). Σε απόσταση 1.2m, 2.8m και 5.1m από την αρχική θέση του ρομπότ έχουν τοποθετηθεί τρία εμποδία. Οι συντεταγμένες των κορυφών τους είναι:

Εμπόδιο 1: (1.2, -0.15), (1.2, 0.35), (1.5, 0.35), (1.2, -0.15)

Εμπόδιο 2: (2.8, 0.25), (2.8, 0.75), (3.1, 0.75), (3.1, 0.25)

Εμπόδιο 3: (5.1, -0.95), (5.1, -0.45), (5.4, -0.45), (5.4, 0.95)

Το πρώτο εμπόδιο βρίσκεται αριστερά του ρομπότ οπότε πραγματοποιείται κίνηση προς τα δεξιά. Το τρίτο εμπόδιο βρίσκεται δεξιά του ρομπότ οπότε πραγματοποιείται κίνηση προς τα αριστερά.



Σχήμα 5.6.17. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων

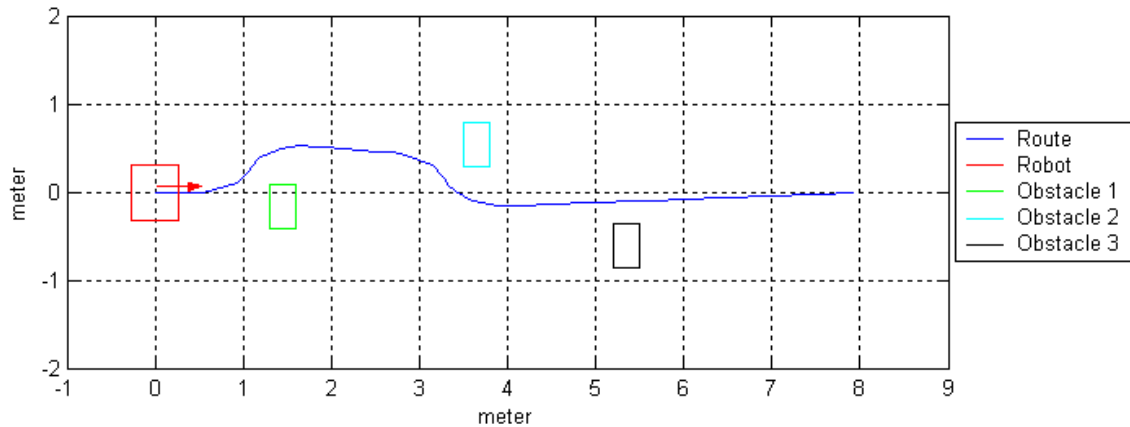
Στο Σχήμα 5.6.18 παρουσιάζεται η κίνηση του ρομπότ από την θέση (0,0) στην θέση (8,0). Σε απόσταση 1.3m, 3.5m και 5.2m από την αρχική θέση του ρομπότ έχουν τοποθετηθεί τρία εμπόδια. Οι συντεταγμένες των κορυφών τους είναι:

Εμπόδιο 1: (1.3, -0.4), (1.3, 0.1), (1.6, 0.1), (1.6, -0.4)

Εμπόδιο 2: (3.5, 0.3), (3.5, 0.8), (3.8, 0.8), (3.8, 0.3)

Εμπόδιο 3: (5.2, -0.85), (5.2, -0.35), (5.5, -0.35), (5.5, 0.85)

Το πρώτο εμπόδιο βρίσκεται δεξιά του ρομπότ οπότε πραγματοποιείται κίνηση προς τα αριστερά. Το δεύτερο εμπόδιο βρίσκεται αριστερά του ρομπότ οπότε πραγματοποιείται κίνηση προς τα δεξιά. Τέλος, το τρίτο εμπόδιο βρίσκεται δεξιά του ρομπότ οπότε πραγματοποιείται κίνηση προς τα αριστερά.



Σχήμα 5.6.18. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων

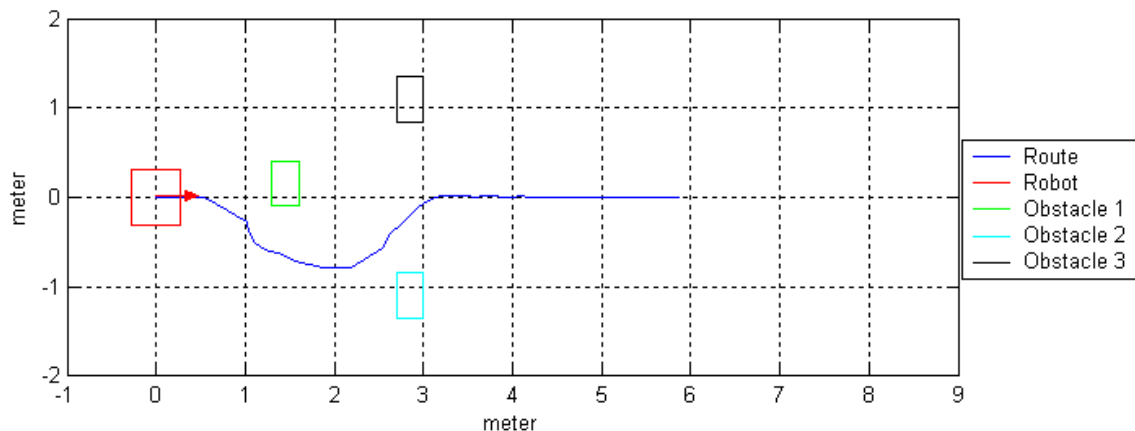
Στο Σχήμα 5.6.19 παρουσιάζεται η κίνηση του ρομπότ από την θέση (0,0) στην θέση (6,0). Σε απόσταση 1.3m, 2.7m και 2.7m από την αρχική θέση του ρομπότ έχουν τοποθετηθεί τρία εμπόδια. Οι συντεταγμένες των κορυφών τους είναι:

Εμπόδιο 1: (1.3, -0.1), (1.3, 0.4), (1.6, 0.4), (1.6, -0.1)

Εμπόδιο 2: (2.7, -0.85), (2.7, -1.35), (3, -1.35), (3, -0.85)

Εμπόδιο 3: (2.7, 0.85), (2.7, 1.35), (3, 1.35), (3, 0.85)

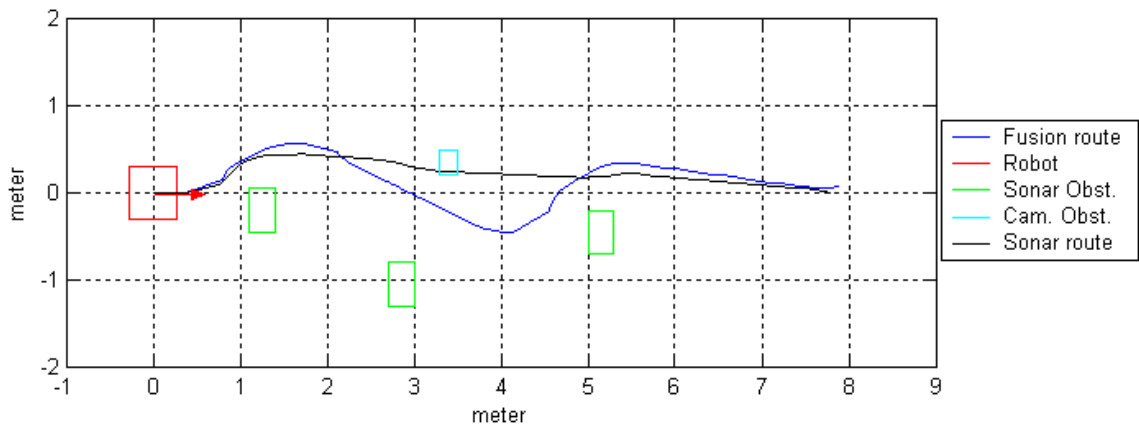
Το πρώτο εμπόδιο βρίσκεται αριστερά του ρομπότ οπότε πραγματοποιείται κίνηση προς τα δεξιά. Το δεύτερο εμπόδιο βρίσκεται δεξιά του ρομπότ οπότε πραγματοποιείται κίνηση προς τα αριστερά.



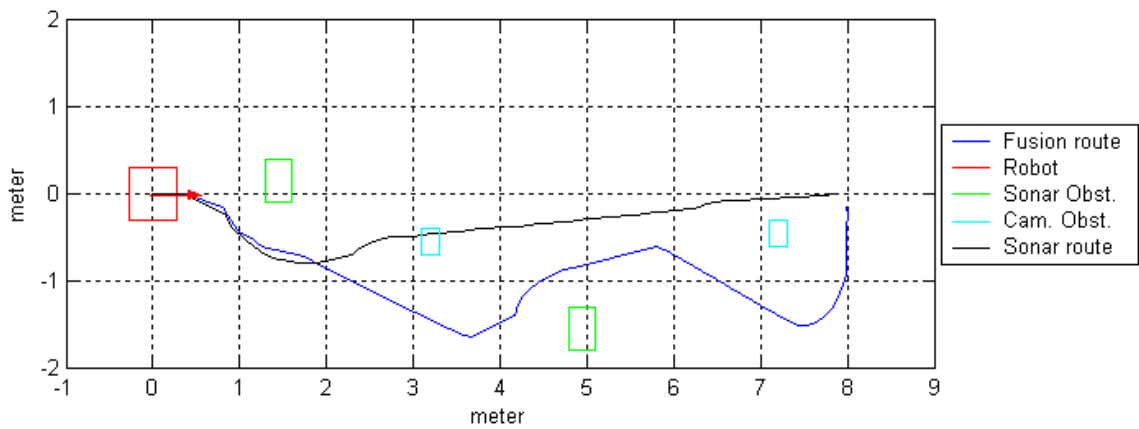
Σχήμα 5.6.19. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κίνηση του ρομποτικού οχήματος από μια αρχική θέση σε μια τελική, με ταυτόχρονη αποφυγή εμποδίων. Η αποφυγή πραγματοποιείται με πληροφορίες που αντλούνται τόσο από το οπτικό σύστημα όσο και από τους αισθητήρες υπερήχων του οχήματος. Οι πληροφορίες κίνησης του ρομποτικού οχήματος που παρουσιάζονται στα σχήματα προέρχονται από το οδόμετρον του. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη εμποδίων: Εμπόδια που εντοπίζονται από τους αισθητήρες υπερήχων με μέγεθος (50x60x30)cm και εμπόδια που εντοπίζονται από το οπτικό σύστημα με μέγεθος (40x30x20)cm. Τα εμπόδια που εντοπίζονται από το οπτικό σύστημα έχουν χρωματιστεί κίτρινα και το ύψος τους είναι 2cm μικρότερο από το ύψος του επιπέδου των αισθητήρων υπερήχων του οχήματος.

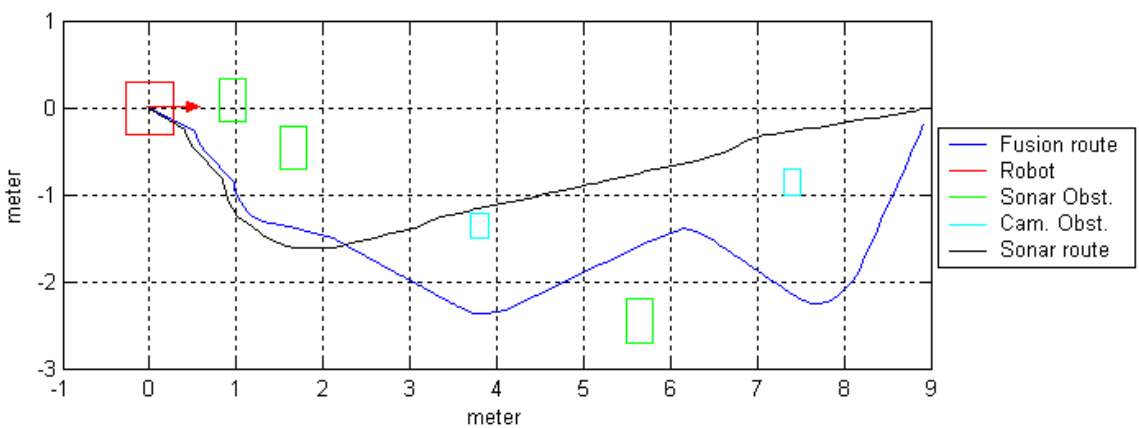
Στα Σχήμα 5.6.20-23. παρουσιάζεται η κίνηση του οχήματος από την θέση (0,0) στην θέση (8,0). Με μπλε χρώμα εμφανίζεται η κίνηση με αποφυγή εμποδίων που επιτυγχάνεται με την χρήση του οπτικού συστήματος και των αισθητήρων υπερήχων, ενώ με μαύρο χρώμα εμφανίζεται η κίνηση με αποφυγή εμποδίων που επιτυγχάνεται μόνο με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων.



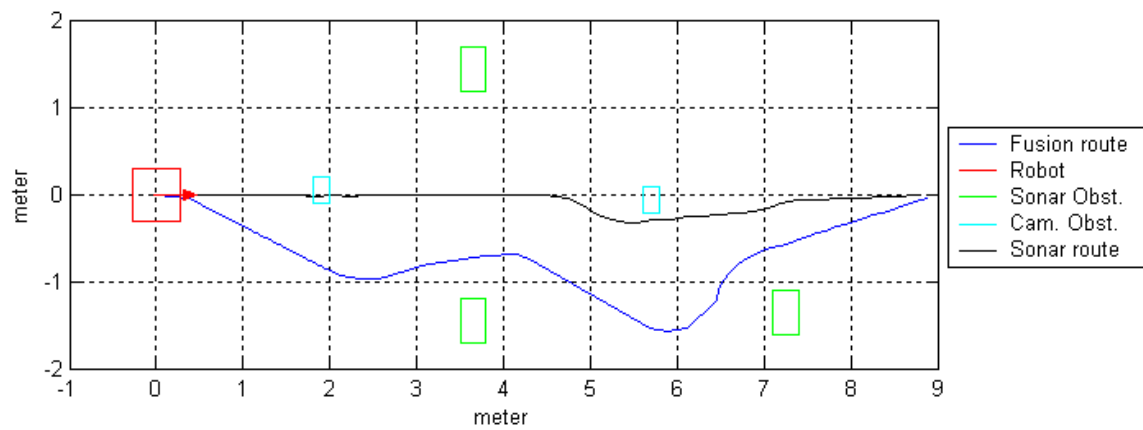
Σχήμα 5.6.20. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων και οπτικού συστήματος



Σχήμα 5.6.21. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων και οπτικού συστήματος



Σχήμα 5.6.22. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων και οπτικού συστήματος



Σχήμα 5.6.23. Αποφυγή εμποδίων με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων και οπτικού συστήματος

Από τα Σχήματα 5.6.20-23 είναι εμφανές ότι αισθητήρες υπερήχων αποτυγχάνουν να εντοπίσουν τα εμπόδια που βρίσκονται χαμηλότερα από το επίπεδο τους. Ωστόσο, με την χρήση του οπτικού συστήματος, τα εμπόδια αυτά εντοπίζονται και επιτυγχάνεται η ασφαλής πλοήγηση του ρομποτικού οχήματος.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της εργασίας ήταν η ταυτόχρονη χρήση των αισθητήρων υπερήχων και του οπτικού συστήματος ενός έντροχου ρομποτικού οχήματος για την ασφαλή πλοήγηση του σε άγνωστο περιβάλλον. Η εργασία ολοκληρώθηκε σε τρία στάδια. Στο πρώτο υλοποιήθηκε αλγόριθμος εντοπισμού έγχρωμων αντικειμένων με την χρήση του οπτικού συστήματος. Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του οπτικού συστήματος για τον υπολογισμό της απόστασης των αντικειμένων από το ρομποτικό όχημα. Τέλος, στο τρίτο στάδιο δημιουργήθηκε αλγόριθμος ελέγχου της κίνησης του ρομπότ με την χρήση πληροφοριών του οπτικού συστήματος και των αισθητήρων υπερήχων.

Για τον εντοπισμό των έγχρωμων αντικειμένων χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις χρωματικοί χώροι, HSI, CMYK και YCbCr. Με την χρήση τεχνικής κατωφλίου στον χρωματικό χώρο YCbCr, εντοπίστηκαν ικανοποιητικά τα έγχρωμα αντικείμενα που παρεμβάλλονταν στην πορεία του ρομποτικού οχήματος.

Παράλληλα η τεχνική που παρουσιάζεται για την βαθμονόμηση του οπτικού συστήματος με σκοπό την μέτρηση της απόστασης αντικειμένων από το ρομποτικό όχημα, παρουσιάζει σημαντική ακρίβεια, με σφάλμα που δεν ξεπερνά το 5% για αντικείμενα που βρίσκονται σε απόσταση 27cm έως 8m από το ρομπότ.

Τέλος, ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο της κίνησης του ρομποτικού οχήματος με την χρήση των αισθητήρων υπερήχων και του οπτικού συστήματος, αποδεικνύεται ικανός για την ασφαλή πλοήγηση του.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] L. Doitsidis, K.P. Valavanis, N. Tsourveloudis, "Fuzzy Logic Based Autonomous Skid Steering Vehicle Navigation," in *Proc. IEEE ICRA, 2002*, pp 2171-2177.
- [2] D. Pratihari, K. Deb, A. Ghosh, "A genetic-fuzzy approach for mobile robot navigation among moving obstacles," *Int. J. of Approximate Reasoning*, vol. 20, pp 145-172, 1999.
- [3] H.J.S. Feder, J.J. Leonard, C.M. Smith, "Adaptive Mobile Robot Navigation and Mapping," *Int. Journal of Robotics Research, Special Issue on Field and Service Robotics*, pp. 650-668, July 1999.
- [4] S. Thongchai, S. Sucksakulchai, D.M. Wilkes, N. Sarkar, "Sonar Behaviour – Based Fuzzy Control for a Mobile Robot," in *Proc. of IEEE Conf on Systems, Man and Cybernetics*, Nashville, Tennessee, Oct. 8-11, 2000.
- [5] Scott Lenser, Mauela Veloso, "Visual Sonar: Fast Obstacle Avoidance Using Monocular Vision," in *Proc. of IROS, Japan, Oct 2003*.
- [6] Gordon Wyeth, "Training a Vision Guided Mobile Robot," in *Autonomous Robots* vol. 5, pp. 381-394, 1998.
- [7] D.P. Huttenlocher, M.E. Leventon, W.J. Rucklidge "Visually-Guided Navigation by Comparing Edge Images," in *Computer and Vision Pattern Recognition*, pp. 85-96, 1994.
- [8] L.M. Lorigo, R.A. Brooks, W.E.L. Grimson, "Visually-Guided Obstacle Avoidance in Unstructured Environments," *MIT AI Laboratory Master Thesis*, Feb. 1996.
- [9] M.Gaetan, "Stereo Vision for Mobile Robotics," available in <http://vrai-group.epfl.ch/~marti/Download/lucerne97.doc>
- [10] S. Badal, S. Ravela, B. Draper, A. Hanson, "A Practical Obstacle Detection and Avoidance System," in *2nd IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, pp. 97-104, Dec. 5-7, 1994.

- [11] R.R. Murphy, "Dempster-Shafer Theory for Sensor Fusion in Autonomous Mobile Robots," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 14, no2, pp 197-206, April 1998
- [12] B.R. Duffy, C. Garcia, C.F.B Rooney, G.M.P. O'Hare, "Sensor Fusion for Social Robotics," in *31st Int. Symp. On Robotics, Montréal, Canada*, , pp. 258-264, May 2000.
- [13] G.D. Cubber, "Integration of Sensors on a Mobile Robot," *Master Thesis, Vrije Universiteit Brussel*, 2001.
- [14] A. Ohya, A. Kosaka, A. Kak, "Vision-Based Navigation by a Mobile Robot with Obstacle Avoidance Using Single-Camera Vision and Ultrasonic Sensing," in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no 6, pp.1-7, Dec. 1998.
- [15] T. Wilhelm, H. Bohme, H.M. Gross, "Sensor Fusion for Vision and Sonar Based People Tracking on a Mobile Service Robot," in *Proc. Int. Workshop on Dynamic Perception, Bochum*, pp. 315-320, 2002.
- [16] H. Baltzakis, A. Argyros, P. Trahanias, "Fusion of laser and visual data for robot motion planning and collision avoidance," in *Machine Vision and Applications*, vol. 13, pp 92-100, 2003.
- [17] C. Rasmussen, "Combining Laser Range, Color and Texture Cues for Autonomous Road Following," in *Proc. of IEEE ICRA, Washington DC*, pp. 4230-4325, May 2002.
- [18] J. Verges, J. Aranda, A. Sanfeliu, "Object tracking system using colour histograms," in *9th Spanish Symp. of Pattern Recognition and Image Analysis, Castellon*, May 2001.
- [19] C. Zhang, P. Wang, "A New Method of Color Image Segmentation Based on Intensity and Hue Clustering," in *Proc. of the 15th Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp. 3617-3620, Barcelona, Spain, September 2000.
- [20] K.P. Valavanis, J. Zheng, G. Paschos, "A Total Color Difference Measure for Segmentation in Color Images," in *Journal of Intelligent and Robotics Systems*, vol. 16, pp 269-313, 1996.
- [21] M. Wilczkowiak, E. Boyer, P. Sturn, "Camera Calibration and 3D Reconstruction from Single Images Using Parallelepipeds," in *ICCV*, pp. 142-148, 2001.
- [22] C. Sabharwal, "Recovering 3D Image Parameters from Corresponding two 2D Images," in *Symposium of Applied Computing*, pp.402-409, 1993.
- [23] B. Shamah, "Experimental comparison of skid steering vs. explicit steering for wheeled mobile robot," *M.Sc. Thesis, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh Pennsylvania*, 1999.

- [24] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, *Digital Image Processing*. Addison-Wesley, 1992
- [25] R. Jain, R. Kasturi, B.G. Schunck, *Machine Vision*. McGraw-Hill International Editions, 1995.