ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Επεξεργασία εικόνας για τον εντοπισμό των λωρίδων κυκλοφορίας και υλοποίηση συστήματος προειδοποίησης αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιάννος Σ. Μενοίκου

Επιβλέποντες : Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Δρ. Α. Αμδίτης
Ερευνητής Β' Ε.Μ.Π. / ΕΠΙΣΕΥ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2006

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Επεξεργασία εικόνας για τον εντοπισμό των λωρίδων κυκλοφορίας και υλοποίηση συστήματος προειδοποίησης αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιάννος Σ. Μενοίκου

Επιβλέποντες : Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Δρ. Α. Αμδίτης
Ερευνητής Β' Ε.Μ.Π. / ΕΠΙΣΕΥ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22η Δεκεμβρίου 2006..

.....	.....	.....
Ν. Ουζούνογλου	Π. Φράγκος	Κ. Νικήτα
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2006.

.....
Γιάννος Σ. Μενοίκου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γιάννος Σ. Μενοίκου

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η επεξεργασία εικόνας για τον εντοπισμό των λωρίδων κυκλοφορίας και η δημιουργία ενός συστήματος προειδοποίησης αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας. Ο στόχος αυτός εντάσσεται στο γενικότερο πλαίσιο χρήσης συστημάτων μηχανικής όρασης, ενσωματωμένων σε οχήματα, με σκοπό τη διευκόλυνση του έργου του οδηγού και την αποφυγή ατυχημάτων που οφείλονται σε ανθρώπινο λάθος.

Ο αλγόριθμος εντοπισμού λωρίδων κυκλοφορίας που προτείνουμε είναι βασισμένος σε τηλεοπτικές ακολουθίες που λαμβάνονται από ένα όχημα που οδηγεί στην εθνική οδό και χωρίζεται σε εφτά βασικά στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η σύλληψη της εικόνας από μία CCD κάμερα που είναι ενσωματωμένη στο όχημα. Ακολουθούν, η τμηματοποίηση της εικόνας, το φιλτράρισμα του θορύβου και η ανίχνευση των άκρων μέσω κατάλληλου φίλτρου ενώ οι λωρίδες κυκλοφορίας ανιχνεύονται χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Hough. Δεδομένου ότι οι λωρίδες κυκλοφορίας είναι συνήθως (πλην μικρών εξαιρέσεων) μακριές και ομαλές καμπύλες, τις εξετάζουμε ως ευθείες γραμμές μέσα σε ένα λογικό πλαίσιο για την ασφάλεια των οχημάτων. Μέσω του μετασχηματισμού Hough όχι μόνο καθορίζουμε τη θέση των λωρίδων, αλλά και χρησιμοποιείται για να παρέχει προειδοποίηση αναχώρησης από τα όρια που σχηματίζουν οι περικλείουσες το όχημα λωρίδες. Στο τελευταίο στάδιο οι ανιχνευμένες λωρίδες κυκλοφορίας μέσω ενός πίνακα βαθμονόμησης αντιστοιχίζονται με τη θέση τους στο χώρο. Αυτή η μέθοδος έχει δοκιμαστεί σε δεδομένα από video και τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν καταδείξει ένα γρήγορο, ισχυρό σύστημα για ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας.

Επιπλέον αναλύεται λεπτομερώς η διαδικασία βαθμονόμησης της κάμερας μέσω της οποίας η εικόνα της κάμερας αντιστοιχίζεται μέσω ενός ειδικού πίνακα (calibration matrix) και μιας διαδικασίας με τη θέση του στο χώρο, στην περίπτωσή μας στην ως προς τους άξονες x,y,z. Η διαδικασία αυτή έχοντας ως είσοδο τις συντεταγμένες ενός εικονοκυττάρου (i, j) δίνει ως αποτέλεσμα τις συντεταγμένες (x,y,z) του σημείου στο επίπεδο του δρόμου.

Μέσω του πίνακα βαθμονόμησης όχι μόνο μπορούμε να υπολογίζουμε για κάθε χρονική στιγμή την θέση των λωρίδων κυκλοφορίας ως προς το όχημα αλλά εξάγουμε και άλλα αποτέλεσματα χρήσιμα για την ασφάλεια του οχήματος και την αποφυγή συγκρούσεων.

Ο απαραίτητος κώδικας υλοποίησης των αλγορίθμων δημιουργήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab.

Λέξεις – Κλειδιά

Σύλληψη εικόνας, τμηματοποίηση εικόνας, βαθμονόμηση κάμερας, εντοπισμός λωρίδων κυκλοφορίας, ανιχνευτής άκρων Canny, μετασχηματισμός Hough, μετασχηματισμός Radon, εκκεντρότητα, ακτινωτή παραμόρφωση, μηχανική όραση, όραση υπολογιστών.

Abstract

The scope of this diploma thesis is to process image data for lane detection and to provide lane departure warning. It is part of the more general purpose of developing on board machine vision systems as assistance to the human driver, so as to avoid accidents that are due to human error.

In this paper we present a lane detection algorithm based on video sequences taken from a vehicle driving on highway which consists of seven steps. The first step is image capturing from a CCD camera mounted inside the vehicle. Next steps are image segmentation, noise effacing edge detection through a proper filter while lanes are detected using Hough transform. Since the lanes have normally long and smooth curves, we consider them as straight lines within a reasonable range for vehicle safety. The output of Hough transformation not only determines the location of the lane boundary, but also is used to provide lane departure warning. In the last step the detected lanes are assigned through a calibration matrix with their position in space. This method has been tested on video data and the experimental results have demonstrated a fast, robust system for lane detection.

Furthermore we analyse in detail the process of camera calibration through which an image taken from camera coincide with a matrix named as «calibration matrix» and a process with it's position to the space, in our case in relation to the x, y, z axes. This process having as input the coordinates of a pixel (i, j) gives as output the x, y, z coordinates of the certain spot on the road level.

Through calibration matrix we can estimate at any time the position of lanes in relation to the vehicle and we can extract other useful outcome for the safety of the vehicle and crash avoidance.

The necessary code for the implementation of the above algorithms was created in Matlab.

Key – words

Image capturing, Image Segmentation, Camera Calibration, Lane Detection, Canny Edge Detector, Hough Transform, Radon Transform, Eccentricity, Radial Distortion, Machine Vision, Computer Vision.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη *5*

Λέξεις – Κλειδιά *6*

Abstract *8*

Key – words *9*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ *11*

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ *13*

1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ *14*

2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΟΔΗΓΟΥ *19*

2.1 Συνοπτική παρουσίαση **19**

2.2 Η ανάπτυξη της μηχανικής όρασης για οχήματα δρόμου την τελευταία δεκαετία **19**

2.3 Δύο κλάδοι ανάπτυξης από τα μέσα της δεκαετίας του '90 ..... **25**

2.4 Εξελίξεις μικρής εμβέλειας για εφαρμογή σύντομα στην αγορά **28**

2.4.1 Βοήθεια στην πλευρική καθοδήγηση 28

2.4.2 Προσαρμοζόμενος αυτόματος πιλότος (adaptive cruise control) 29

2.4.3 Αυτόνομη οδήγηση σε κατάσταση «σταμάτα - ξεκίνα» 32

2.4.4 Ανάγνωση σημάτων κυκλοφορίας 34

2.4.5 Υποστήριξη στην αλλαγή λωρίδας 34

2.4.6 Αναγνώριση λωρίδων κυκλοφορίας 35

2.4.7 Προβλεπόμενη ανάπτυξη της όρασης για οχήματα δρόμου 37

2.5 Συμπέρασμα **38**

3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΛΩΡΙΔΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΑΧΩΡΗΣΗΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΛΩΡΙΔΕΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ *40*

3.1 Εισαγωγή **40**

3.2 Περίληψη **42**

3.3 Προτεινόμενος αλγόριθμος ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας και υλοποίησης συστήματος προειδοποίησης αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας **42**

3.4 Σύλληψη Εικόνας (Image Capturing) **44**

3.5 Τμηματοποίηση Εικόνας (Image Segmentation) **45**

3.6 Επιλογή περιοχής ανίχνευσης (οδικής περιοχής) και αφαίρεση ανεπιθύμητων μερών της εικόνας **47**

3.7 Ανίχνευση άκρων (Edge Detection) **49**

3.8 Ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση του μετασχηματισμού Hough (Hough Transform, HT) **52**

3.9 Εναλλακτικές μέθοδοι ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας **53**

3.9.1 Ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση του μετασχηματισμού Radon (Radon Transform) 53

3.9.2 Ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση της εκκεντρότητας (eccentricity) 55

3.10 Εντοπισμός λωρίδων κυκλοφορίας 56

3.11 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΛΩΡΙΔΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ..... 57

3.11.1 Προειδοποίηση αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας 57

3.11.2 Λήψη των μετρικών πληροφοριών..... 59

3.12 Παρουσίαση συναρτήσεων..... 62

3.12.1 Συνάρτηση συνεχόμενης εκτέλεσης του αλγορίθμου επεξεργασίας εικόνας της κάμερας (lanetracking.m) 62

3.12.2 Συνάρτηση μετατροπής σε δυαδική εικόνα (threshold.m) 64

3.12.3 Συνάρτηση Φιλτραρίσματος Θορύβου (noiseoff.m) 65

3.12.4 Συνάρτηση υλοποίησης μετασχηματισμού Hough (hough.m)..... 66

3.12.5 Συνάρτηση σχεδιασμού λωρίδων κυκλοφορίας (houghlines.m) 67

3.12.6 Συνάρτηση υπολογισμού πιθανής εξόδου από τις λωρίδες κυκλοφορίας (safetycheck.m)..... 68

3.12.7 Συνάρτηση εξάλειψης ακτινωτής παραμόρφωσης (Radial Distortion) και αντιστοίχισης με χωρικές συντεταγμένες. (calibrate.m) 69

3.13 Πειραματικά Αποτελέσματα 70

3.14 Συμπεράσματα..... 71

4 Βαθμονόμηση CCD κάμερας (Camera Calibration) 72

4.1 Επίλυση της μήτρας βαθμονόμησης (Calibration Matrix) 77

4.2 Γραμμικές μέθοδοι υπολογισμού της μήτρας C 78

4.2.1 $1^{η}$ Γραμμική Μέθοδος 78

4.2.2 $2^{η}$ Γραμμική Μέθοδος 81

4.3 Μη γραμμικές μεθόδοι υπολογισμού της C 85

4.4 Αποσύνθεση της C για την εξαγωγή των εσωτερικών (intrinsic) παραμέτρων . 86

5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ HOUGH.....90

5.1.1 Μετασχηματισμός Hough Γραμμής..... 91

5.1.2 Μετασχηματισμός Hough κύκλου 95

5.1.3 Γενικός μετασχηματισμός Hough 96

5.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης του μετασχηματισμού Hough 96

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ 98

6 Βιβλιογραφία:.....101

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1:Διάγραμμα των μελλοντικών εφαρμογών της όρασης στα οχήματα δρόμου 38
Σχήμα 2: Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγόριθμου εντοπισμού λωρίδων κυκλοφορίας..... 43
Σχήμα 3: Διάγραμμα ροής συστήματος προειδοποίησης αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας..... 44
Εικόνα 4: Τυπική σκηνή του δρόμου..... 45
Εικόνα 5: Εικόνα μετά την εφαρμογή του threshold..... 47
Εικόνα 6: Εικόνα μετά την αφαίρεση του μεγαλύτερου μέρους του θορύβου..... 48
Εικόνα 7: Εικόνα μετά την προσδιορισμό της οδικής περιοχής..... 49
Εικόνα 8: Εισαγωγή φίλτρου Canny..... 51
Σχήμα 9: Μετασχηματισμος Hough 52
Εικόνα 10: Αναγνώριση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση του μετασχηματισμού Hough..... 52
Σχήμα 11: Μετασχηματισμός Radon..... 54
Εικόνα 12: Αναγνώριση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση του μετασχηματισμού Radon 54
Σχήμα 13: Ενδεικτικές τιμές εκκεντρότητας για κωνικές τομές 55
Εικόνα 14: Αναγνώριση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση εκκεντρότητας..... 56
Σχήμα 15: Προειδοποίηση αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας 58
Σχήμα 16: Αντιστοίχηση τρισδιάστατου χώρου με δισδιάστατη εικόνα κάμερας..... 60
Εικόνα 17: Λωρίδες κυκλοφορίας μετασχηματισμένες στον χώρο..... 61
Σχήμα 18: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης συνεχούς εκτέλεσης του αλγορίθμου της κάμερας..... 64
Σχήμα 19: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης μετατροπής σε δυαδική εικόνα (binary image) 65
Σχήμα 20: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης φιλτραρίσματος του θορύβου 66
Σχήμα 21: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης υλοποίησης του μετασχηματισμού Hough..... 67
Σχήμα 22: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης σχεδιασμού των λωρίδων κυκλοφορίας 68
Σχήμα 23: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης υπολογισμού πιθανής εξόδου από τις λωρίδες κυκλοφορίας..... 69
Σχήμα 24: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης εξάλειψης ακτινωτής παραμόρφωσης (Radial Distortion) και αντιστοίχισης με χωρικές συντεταγμένες..... 70
Σχήμα 25: Τα συστήματα συντεταγμένων που εμπλέκονται στην βαθμονόμηση της κάμερας. 73
Σχήμα 26: Το σχέδιο των σημείων σε ένα πλαίσιο βαθμολόγησης. 78
Σχήμα 27: Παράδειγμα εικόνας προς επεξεργασία 91
Σχήμα 28: Αναπαράσταση γραμμής σε κανονική μορφή..... 92
Σχήμα 29: Μετασχηματισμός Hough του σχήματος 27 94
Σχήμα 30: Αποτέλεσμα αντίστροφης διαδικασίας μετασχηματισμού Hough. 95

1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Την τελευταία δεκαετία παρουσιάζεται έντονη η ανάγκη μείωσης των θανατηφόρων ατυχημάτων και των τραυματισμών στο αστικό και μη αστικό οδικό δίκτυο. Το βασικότερο αίτιο αυτών των ατυχημάτων είναι η μείωση της ικανότητας του οδηγού να αντιληφθεί το οδικό του περιβάλλον και να αντιδράσει έγκαιρα και σωστά. Κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται τόσο στις συνθήκες περιβάλλοντος και κίνησης (πυκνή κίνηση, βροχή, μειωμένη ορατότητα) όσο και στη μειωμένη προσοχή του οδηγού λόγω π.χ. κούρασης, υπνηλίας, δευτερεύουσας εργασίας (π.χ. κινητό τηλέφωνο) ή ο,τιδήποτε άλλο ενδεχομένως του αποσπά την προσοχή. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σε μία μεγάλη ανάπτυξη της έρευνας γύρω από τα θέματα οδικής ασφάλειας και πιο συγκεκριμένα γύρω από την εξέλιξη συστημάτων υποστήριξης του οδηγού σε πραγματικό χρόνο.

Τα μέχρι τώρα συστήματα επιχειρούν να ικανοποιήσουν σε ένα βαθμό την ανάγκη υποστήριξης του οδηγού με τη μορφή κυρίως παθητικής ασφάλειας (π.χ. ζώνη ασφαλείας, αερόσακοι) και συστημάτων ευστάθειας και πέδησης (π.χ. ABS). Με συστήματα ενεργητικής ασφάλειας, συστήματα δηλαδή που δεν προστατεύουν απλά από ένα ενδεχόμενο ατύχημα αλλά επιχειρούν να το προλάβουν αναγνωρίζοντας τον περιβάλλοντα χώρο και αντιδρώντας κατάλληλα, είναι εξοπλισμένα τα πιο πολυτελή σύγχρονα μοντέλα. Παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι π.χ. ο ACC (Adaptive Cruise Control), που στη σημερινή του μορφή ανιχνεύει και διατηρεί σταθερή απόσταση από το προπορευόμενο όχημα. Η ανάγκη για υποστήριξη όμως επιβάλλει τόσο την ανάπτυξη δραστικότερων και αποτελεσματικότερων ενεργητικών συστημάτων, όσο και τη χρήση τους από ένα μεγαλύτερο ποσοστό οχημάτων. Προς το σκοπό αυτό, τη δημιουργία δηλαδή προηγμένων συστημάτων ασφαλείας που να προλαμβάνουν ανεπιθύμητες καταστάσεις, να ειδοποιούν τον οδηγό και να επεμβαίνουν κατάλληλα, κινούνται κατά ένα μεγάλο ποσοστό οι ερευνητικές ενέργειες.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η χρήση μιας μονοχρωματικής CCD κάμερας για τον προσδιορισμό κάποιων από τα στοιχεία του οδικού περιβάλλοντος, και κυρίως των λωρίδων κυκλοφορίας. Προς επίτευξη του στόχου χρησιμοποιούμε διάφορες τεχνικές δίνοντας έμφαση σε αυτή που υλοποιείται μέσω του μετασχηματισμού Hough. Υλοποιούμε επίσης δυο άλλες τεχνικές για αναγνώριση των λωρίδων κυκλοφορίας εκ των οποίων η μεν πρώτη στηρίζεται στο μετασχηματισμό Radon ενώ η δεύτερη κάνει χρήση της τιμής της εκκεντρότητας για αναγνώριση των γραμμών στην εικόνα. Στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύσσονται οι αλγόριθμοι που δημιουργήθηκαν για την επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων.

Το κείμενο της διπλωματικής είναι διαρθρωμένο σε πέντε κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο είναι ο πρόλογος ενώ το δεύτερο αποτελεί μία επιγραμματική παρουσίαση της διαδικασίας εξέλιξης των συστημάτων τεχνητής όρασης για χρήση σε οχήματα. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου αναφέρονται τα στάδια έναρξης της έρευνας πάνω στον τομέα αυτό και παρατίθενται οι κύριες ερευνητικές ομάδες, τα σημαντικότερα ερευνητικά προγράμματα που εκπονήθηκαν καθώς και οι οπτικές ικανότητες που αποτέλεσαν το αντικείμενό τους. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται οι δύο ξεχωριστοί κλάδοι ανάπτυξης της προηγούμενης δεκαετίας. Ο πρώτος στόχευε στην εξέλιξη συστημάτων που μπορούσαν να τεθούν σε εφαρμογή με την υπάρχουσα τεχνολογία, με σκοπό την όσο το δυνατόν συντομότερη εφαρμογή τους στη βιομηχανία των αυτοκινήτων. Ο άλλος κλάδος ανάπτυξης αφορούσε περισσότερο τη δημιουργία ενός οπτικού συστήματος που να ενσωματώνει όλες τις πλευρές που μακροπρόθεσμα θα αποδειχθούν αναγκαίες. Έτσι η ολοκλήρωση της ανάπτυξης του συστήματος αυτού θα συνέπιπτε χρονικά με την ύπαρξη της κατάλληλης τεχνολογίας. Τέλος παρουσιάζονται τα συστήματα που προβλέπεται να εξελιχθούν σύνομα και να εισαχθούν στην αγορά και γίνεται μία υπόθεση για τη σειρά με την οποία θα αναπτυχθούν τα πιο προηγμένα συστήματα στο μέλλον, εάν και εφόσον αυτό καταστεί δυνατό και χρήσιμο.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί το βασικό κεφάλαιο της εργασίας, αφού σ' αυτό παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε για τον εντοπισμό των λωρίδων κυκλοφορίας και την υλοποίηση ενός συστήματος προειδοποίησης

αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας σε μαυρόασπρη εικόνα με χρήση CCD κάμερας. Αρχικά πραγματοποιείται η σύλληψη της εικόνας από μια CCD κάμερα τοποθετημένη μέσα στο όχημα. Ένας on board υπολογιστής με θύρα firewire είναι συνδεδεμένος με την κάμερα και λαμβάνει τις εικόνες σε πραγματικό χρόνο (με ταχύτητα 15 frames/sec) και τις αποθηκεύει στη μνήμη του υπολογιστή. Το σύστημα αναγνώρισης λωρίδων κυκλοφορίας που υλοποιούμε παίρνει τις εικόνες αυτές και τις επεξεργάζεται μία προς μία. Το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου είναι η τμηματοποίηση (segmentation) της δεδομένης εικόνας έχοντας ως μέτρο τμηματοποίησης την απόχρωση του χρώματος για κάθε εικονοκύτταρο (pixel) της εικόνας. Γενικά σε κάθε απόχρωση χρώματος αντιστοιχεί μια τιμή αρχίζοντας για μονοχρωματική εικόνα από το μηδέν (που είναι το μαύρο) και καταλήγοντας στο 255 (που είναι το λευκό). Ορίζοντας ένα αποδεκτό εύρος τιμών για το χρώμα παίρνουμε από την εικόνα όλες τις σχετικές πληροφορίες για τον εντοπισμό των λωρίδων κυκλοφορίας. Με την εφαρμογή της τεχνικής αυτής η αρχική μαυρόασπρη εικόνα μετατρέπεται σε δυαδική (Binary Image). Στο δεύτερο στάδιο του αλγορίθμου πραγματοποιείται η ανίχνευση της οδικής περιοχής και η αφαίρεση των ανεπιθύμητων μερών της εικόνας που αποτελούν το θόρυβο. Θέτοντας ένα κατώτερο όριο στο σύνολο των εικονοκύτταρων που αποτελούν το αντικείμενο, μπορούμε να αφαιρέσουμε όλα τα μικρά αντικείμενα από την εικόνα. Στο τρίτο στάδιο εφαρμόζουμε το φίλτρο Canny για να λάβουμε την εικόνα των άκρων ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η υλοποίηση του μετασχηματισμού Hough ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των ευθειών που αποτελούν τις λωρίδες κυκλοφορίας. Σαν εναλλακτικές λύσεις του μετασχηματισμού Hough δοκιμάζουμε την υλοποίηση με τον μετασχηματισμό Radon και την ανίχνευση γραμμών ανάλογα με την τιμή της εκκεντρότητας κάθε αντικειμένου που ανιχνεύτηκε στα προηγούμενα στάδια του αλγορίθμου. Στη συνέχεια, γίνεται ο σχεδιασμός των ευθειών αυτών πάνω στην αρχική εικόνα επεξεργασίας και ο υπολογισμός των γωνιών των ευθειών αυτών από τις οποίες εξάγεται ένα συμπέρασμα για την κατεύθυνση του οχήματος και το ενδεχόμενο αυτό να εξέλθει από τις λωρίδες κυκλοφορίας. Τέλος, μέσω ενός πίνακα βαθμονόμησης (calibration matrix) οι ανιχνευμένες λωρίδες αντιστοιχίζονται με τη θέση τους στο χώρο. Ακολουθούν οι συναρτήσεις που υλοποιούν τον αλγόριθμο και τα αποτελέσματά του.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται λεπτομερώς η διαδικασία βαθμονόμησης της CCD κάμερας με την εξαγωγή της μήτρας βαθμονόμησης (calibration matrix).

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον μετασχηματισμό Hough και αναλύεται το πως αυτός χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ομαλών καμπύλων όπως γραμμές, κύκλοι, ελλείψεις κτλ. Τελειώνοντας γίνεται λόγος στα πλεονεκτήματα χρήσης του και γιατί προτιμάται σαν μέσο υλοποίησης της συγκεκριμένης εφαρμογής, καταγράφονται όμως παράλληλα και τα μειονεκτήματα χρήσης του.

Η διπλωματική εργασία «Επεξεργασία εικόνας για τον εντοπισμό των λωρίδων κυκλοφορίας και υλοποίηση συστήματος προειδοποιήσης αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας» πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ερευνητικής δραστηριότητας της ερευνητικής ομάδας I-SENSE (Intelligent System Engineering and Novel Simulation Environments) του Εργαστηρίου Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Για τη δημιουργία του απαραίτητου κώδικα για την πειραματική δοκιμή των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν επιλέχτηκε η γλώσσα Matlab. Η δοκιμή του αλγορίθμου έγινε σε αρχεία βίντεο τύπου .sds (κάμερα) που είχαν παρασχεθεί από την εταιρεία VOLVO Cars. Τα βίντεο αυτά περιέχουν σενάρια κίνησης, με τα περισσότερα να λαμβάνουν χώρα σε αυτοκινητοδρόμους του εξωτερικού, και των οποίων η λήψη έγινε από την συγκεκριμένη εταιρεία με χρήση οχημάτων εξοπλισμένων με μία CCD κάμερα [Π. 1]. Αυτά τα αρχεία βίντεο αποτέλεσαν το πλέον απαραίτητο εργαλείο για τη δοκιμή των αλγορίθμων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Νικόλαο Ουζούνογλου (επιβλέποντα καθηγητή και διευθυντή του Εργαστηρίου Μικροκυμάτων) για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά την προπτυχιακή περίοδο και την άριστη συνεργασία μας κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον υπεύθυνο της ομάδας I–SENSE (Ερευνητή Β' του Ε.Μ.Π. / ΕΠΙΣΕΥ) Δρ. Άγγελο Αμδίτη για τη συμβολή του στο γενικότερο πλαίσιο σύλληψης και κατανόησης του θέματος αυτής της διπλωματικής εργασίας καθώς και για την επίβλεψή της. Η εκπόνηση της

διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε υπό την καθοδήγηση του Δρ. Άρη Πολυχρονόπουλου, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για τις ώρες που αφιέρωσε και την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε. Ευχαριστώ επίσης θερμά για τις πολλές ώρες που αφιέρωσε, τον υποψήφιο διδάκτορα Μανώλη Τσόγκα, με τη βοήθεια του οποίου ξεπεράστηκαν σημαντικά προβλήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΟΔΗΓΟΥ

2.1 Συνοπτική παρουσίαση

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία μέθοδος εντοπισμού των λωρίδων κυκλοφορίας και υλοποίηση ενός συστήματος προειδοποίησης αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας σε εικόνες CCD κάμερας. Ο στόχος αυτός εντάσεται στο γενικότερο πλαίσιο χρήσης συστημάτων μηχανικής όρασης ενσωματωμένων σε οχήματα με σκοπό τη διευκόλυνση του έργου του οδηγού και την αποφυγή ατυχημάτων που οφείλονται σε ανθρώπινο λάθος. Κρίθηκε λοιπόν σκόπιμο να παρουσιαστεί η μέχρι τώρα εξέλιξη στον τομέα αυτό καθώς και το τι προβλέπεται για το άμεσο και το απώτερο μέλλον. Άμεσους στόχους αποτελούν η επίτευξη βοήθειας στην πλευρική καθοδήγηση, η εισαγωγή προσαρμοζόμενου αυτόματου πιλότου στον εξοπλισμό των οχημάτων, η ειδοποίηση του οδηγού κατά την απομάκρυνση του οχήματος από τη λωρίδα κυκλοφορίας του καθώς και η ικανότητα αυτόματης πλοήγησης του οχήματος σε κατάσταση κυκλοφορίας «σταμάτα – ξεκίνα». Τα συστήματα ανάγνωσης των οδικών σημάτων, οδήγησης σε επαρχιακούς και αστικούς δρόμους, η αποφυγή συγκρούσεων και τέλος τα αυτόνομα αυτοκίνητα αποτελούν στόχους του απώτερου μέλλοντος.

2.2 Η ανάπτυξη της μηχανικής όρασης για οχήματα δρόμου την τελευταία δεκαετία

Πλήρως ενσωματωμένα αυτόνομα συστήματα όρασης για καθοδήγηση οχήματος με ψηφιακούς μικροεπεξεργαστές ξεκίνησαν στις αρχές της δεκαετίας του ’80 εντελώς ανεξάρτητα στη Γερμανία σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας, και στις ΗΠΑ στο πλαίσιο της DARPA πρωτοβουλίας «στρατηγικοί υπολογισμοί» (‘on strategic computing’). Στο τεράστιο εργασιακό πλαίσιο της τελευταίας, υπήρχε μία περιοχή εφαρμογών για «αυτόνομα οχήματα εδάφους» (“Autonomous Land Vehicles, ALV”). Ενώ στις ΗΠΑ η

έμφαση είχε δοθεί στην ανάπτυξη ειδικών αρχιτεκτονικών υπολογιστών και λογισμικού για όραση στις κοινότητες της «επιστήμης των υπολογιστών» και της «τεχνητής νοημοσύνης», που είχαν εμπνευστεί από τη γνώση για βιολογικά συστήματα όρασης, στη Γερμανία η προσέγγιση ήταν βασισμένη σε μηχανικές μεθόδους ελέγχου και στην ανάπτυξη τεχνολογίας μικροεπεξεργαστών γενικού σκοπού. Μόλις το 1985 τα μέλη των δύο κοινοτήτων έμαθαν για τις δραστηριότητες η μια της άλλης. Από το 1986 ξεκίνησε μια συστηματική ανταλλαγή συνεδρίων όπως το SPIE «Κινητά Ρομπότ» (“Mobile Robots”), το IEEE «Ρομποτική και Αυτοματισμός» (“Robotics and Automation) και η «Διεθνής Ομοσπονδία Αυτομάτου Ελέγχου» (International Federation of Automatic Control, IFAC).

Το 1987 μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρώτο ορόσημο στην ανάπτυξη της καθοδήγησης οχημάτων δρόμου με μηχανική όραση. Το δοκιμαστικό όχημα του Πανεπιστημίου του Μονάχου (Universität der Bundeswehr Munich, UBM) για αυτόνομη κίνηση και όραση υπολογιστών VaMoRs, επέδειξε την ικανότητα μιας πλήρως αυτόνομης διαμήκους και πλευρικής καθοδήγησης οχήματος με χρήση όρασης υπολογιστών σε μια ευθεία αυτοκινητόδρομου για περισσότερα από 20 km και για ταχύτητες μέχρι 96 km/h, περιορισμένες μόνο από τη δύναμη του κινητήρα. Το αποτέλεσμα αυτό οδήγησε στην απόφαση ότι η όραση υπολογιστών για καθοδήγηση οχημάτων έπρεπε να συμπεριληφθεί στο Ευρωπαϊκό Ερευνητικό Πρόγραμμα «Προμηθέας» (Prometheus). Αντίθετα, οι προηγούμενες προσπάθειες για πλευρική καθοδήγηση με θαμμένα καλώδια εγκαταλείφθηκαν. Αυτό το βήμα που ξεκίνησε από την εταιρία Daimler-Benz προετοίμασε το έδαφος για μια γρήγορη ανάπτυξη των δραστηριοτήτων στον τομέα, τόσο ανάμεσα στους Ευρωπαίους κατασκευαστές αυτοκινήτων όσο και στα πανεπιστήμια σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες.

Ταυτόχρονα οι παράλληλες επιτυχίες στο πρόγραμμα DARPA – ALV πυροδότησαν νέες δραστηριότητες στην Ιαπωνία, όπου η MITI μαζί με τις εταιρίες Nissan και Fujitsu ξεκίνησε το Ερευνητικό Πρόγραμμα «Προσωπικό σύστημα οχήματος» (“Personal Vehicle System”). Στις ΗΠΑ η κατασκευαστική εταιρία αυτοκινήτων General Motors ανέπτυξε το θέμα σε ένα ειδικό Ερευνητικό Πρόγραμμα. Η επταετής περίοδος του Προγράμματος Προμηθέας

(87 – 94) μπορεί να θεωρηθεί ως περίοδος όπου εξαπλώθηκαν γρήγορα και σε παγκόσμιο επίπεδο δραστηριότητες στον τομέα της όρασης υπολογιστών για καθοδήγηση οχημάτων δρόμου. Ο κύριος στόχος αυτών των δραστηριοτήτων ήταν να δείξουν ποιες από τις πολλές λειτουργίες που απαιτούνται για την καθοδήγηση οχημάτων δρόμου θα μπορούσαν να αυτοματοποιηθούν με την όραση υπολογιστών. Καμία από τις μεγάλες εταιρείες παραγωγής αυτοκινήτων δεν ήθελε να χάσει επαφή με τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των οχημάτων δρόμου με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια εξαιρετικά ευνοϊκή κατάσταση για την ανάπτυξη του τομέα της όρασης υπολογιστών. Είναι ενδιαφέρον ότι η βιομηχανία της επιστήμης των μηχανολόγων μηχανικών, πίεζε αυτήν την ανάπτυξη περισσότερο από τη βιομηχανία της επιστήμης των ηλεκτρολόγων μηχανικών και της επιστήμης των υπολογιστών. Ο πίνακας 1 δίνει μία έρευνα των θεμάτων που ερευνήθηκαν την περίοδο αυτή. Έγινε γρήγορα αντιληπτό ότι όλα τα προβλήματα που μπορούν να λυθούν με την ανθρώπινη όραση θα μπορούν μακροπρόθεσμα να λυθούν και με την όραση υπολογιστών.

Ωστόσο με το διαθέσιμο επίπεδο τιμής / απόδοσης στα μέσα της δεκαετίας του ’90, μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό θα μπορούσε να επιβιώσει οικονομικά, κάτι που οδήγησε στο διαχωρισμό των δραστηριοτήτων. Στη διάρκεια όλης της περιόδου που έχει αναφερθεί μέχρι τώρα, οι βασικές οπτικές ικανότητες διερευνήθηκαν τόσο για την ανάπτυξη βοηθητικών λειτουργιών για τον άνθρωπο – οδηγό που έχει τον έλεγχο (και την ευθύνη), όσο και για πιθανές αυτόνομες λειτουργίες οι οποίες δε χρειάζονται πλέον άμεσα τον άνθρωπο - οδηγό. Και στις δύο περιπτώσεις ο στόχος είναι η μείωση του ποσοστού ατυχημάτων και θανατηφόρων ατυχημάτων. Τα θανατηφόρα ατυχήματα στους δρόμους παγκοσμίως είναι της τάξης μεγέθους των εκατό χιλιάδων ανθρώπων το χρόνο, ενώ ένα μεγάλο ποσοστό από αυτά τα ατυχήματα οφείλονται σε ανθρώπινο λάθος.

Άσχετα με το ποια θα είναι η χρήση της μηχανικής όρασης μακροπρόθεσμα, θα εισχωρήσει σε όλα τα οχήματα παντός είδους, κατά τον ίδιο τρόπο που τα βιολογικά συστήματα οράσεως εξαπλώθηκαν σε όλα σχεδόν τα είδη των ζώων κατά τη διάρκεια της μεγάλης περιόδου της εξέλιξης. Η δυνατότητα που θα έχει ένα σύστημα να «κοιτάξει» σε περιοχές

και αντικείμενα τα οποία θα πρέπει να χειριστεί στο άμεσο μέλλον, θα αποφέρει τόσα πλεονεκτήματα, που τα συστήματα χωρίς ικανότητα όρασης απλά θα υστερούν και θα εξαφανιστούν με το πέρασμα του χρόνου. Παρ'όλα αυτά, για να γίνει πλήρης αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων που προσφέρονται, τα συστήματα αυτά θα πρέπει να χρησιμοποιούν μια βάση γνώσης που θα ενοποιεί τρισδιάστατες και χρονικές πλευρές. Στη βιολογία αυτό ήταν το υψηλότερο επίπεδο της επιστήμης για εκατομμύρια χρόνια. Σε τεχνικά συστήματα, η επονομαζόμενη «τετρασδιάστατη προσέγγιση» βασίζεται σε μεθόδους που αναπτύχθηκαν από το ανθρώπινο είδος στη μηχανική του ελέγχου (control engineering) μόλις μερικές δεκαετίες πριν. Επεκτάθηκε στην ερμηνεία ακολουθίας εικόνων από προοπτική προβολή στα μέσα της δεκαετίας του '80 από την ομάδα UBM. Μόνο με αυτό το πλούσιο χωρο-χρονικό υπόβαθρο μπορούμε να εκμεταλλευτούμε συστηματικά τη γνώση για τις διαδικασίες της κίνησης και για τις διαγραμματικές παραστάσεις δράσης των αντικειμένων. Η κατανόηση του τι συμβαίνει γύρω μας και των πιθανών μελλοντικών πράξεων των υπολοίπων υποκειμένων που εμπλέκονται σε μια δεδομένη κατάσταση, είναι προαπαιτούμενο για έναν επιθυμητό «αμυντικό» τρόπο οδήγησης.

Αριθμός	**Θέματα που ερευνήθηκαν**	**Σχόλια**
1	Αναγνώριση των διαχωριστικών γραμμών της λωρίδας κυκλοφορίας μπροστά και σε κοντινή απόσταση, της οριζόντιας καμπύλωσης και της σχετικής πλευρικής θέσης καθώς και του προσανατολισμού της λωρίδας.	Για δρόμους με σωστή διαγράμμιση λωριδών.
2	Αναγνώριση των ορίων του δρόμου, της οριζόντιας καμπύλωσης του δρόμου και της σχετικής πλευρικής θέσης,	Για δρόμους χωρίς διαγράμμιση, επιπρόσθετα χαρακτηριστικά της περιοχής.

	καθώς και του προσανατολισμού.	
3	Αναγνώριση γειτνιαζόντων λωρίδων κυκλοφορίας στο μπροστινό τμήμα.	Για αλλαγή λωρίδας.
4	Οπτική ανίχνευση, ιχνηλάτηση και εκτίμηση σχετικής κατάστασης σχετικά μεγάλων στατικών αντικειμένων στο δρόμο.	Απόδοση σε πραγματικό χρόνο με χαρακτηριστικά ακμών.
5	Ανίχνευση, ιχνηλάτιση και εκτίμηση σχετικής κατάστασης κινούμενου οχήματος στο μισό ημισφαίριο της ιδίας λωρίδας κυκλοφορίας.	Απόδοση σε πραγματικό χρόνο με χαρακτηριστικά ακμών.
6	Ταυτόχρονος οπτικός καθορισμός κατακόρυφου βαθμού κλίσης (έχει σημασία σε μη ομαλό έδαφος και κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης).	Βελτιώνει την εκτίμηση πλευρικής κατάστασης.
7	Ανίχνευση, ιχνηλάτιση και εκτίμηση σχετικής κατάστασης για κινούμενα οχήματα στο μπροστινό και το πίσω ημισφαίριο της ιδίας και των δύο γειτνιαζόντων λωρίδων κυκλοφορίας.	Απαιτείται για αυτόνομη οδήγηση σε αυτοκινητόδρομους.
8	Ανίχνευση σταυροδρομίου, του πλάτους του και της σχετικής θέσης του ως προς τον ίδιο δρόμο, εκτίμηση σχετικής θέσης	Για το χωρισμό του δρόμου ή για πλοήγηση με σημάδια.

	ως προς το κέντρο της διασταύρωσης.	
9	Αναγνώριση κάποιων ειδών σημάτων κυκλοφορίας με χρήση επεξεργασίας έγχρωμης εικόνας (όρια ταχυτήτων, απαγορεύεται η προσπέραση).	Δεν είναι δυνατό ακόμα σε πραγματικό χρόνο.
10	Αναγνώριση κινουμένων ανθρώπων που περπατούν, τρέχουν, κάνουν ποδήλατο. Σχετική κίνηση.[Νοήματα με το χέρι και χειρονομίες, (π.χ. με μια σημαία) θα χρειάζονται επίσης.]	Δεν είναι δυνατό ακόμα σε πραγματικό χρόνο.
11	Ανίχνευση οχημάτων σε διασταύρωση σχήματος «Τ» σε σταυροδρόμι ενώ στεκόμαστε και αναμένουμε να διασχίσουμε τη διασταύρωση.	Δεν απαιτείται ρυθμός βίντεο.
12	Αναγνώριση οριζόντιας και κάθετης καμπυλότητας του δρόμου σε μέτρια ευθεία - μπροστινή απόσταση.	Υπέρθεση σε όρους διαφορικής γεωμετρίας.
13	Έλεγχος γειτονικής λωρίδας (αριστερής ή δεξιάς) γύρω από το ίδιο όχημα εάν είναι ελεύθερη και μπορεί να γίνει αλλαγή λωρίδας: Με πλευρικά κατευθυνόμενες στερεοσκοπικές κάμερες. Με κράτημα στη μνήμη των οχημάτων που αφήνουν το πίσω και εισέρχονται στο μπροστινό	Περιορισμένο εύρος (<~ 80 m). VITA_2 VaMoRs

	οπτικό ημισφαίριο (μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε μία γειτονική λωρίδα κυκλοφορίας!).	
14	Εκτίμηση του οπτικού πεδίου σε συνθήκες ομίχλης.	Με παρατήρηση ελαττούμενης αντίθεσης (contrast).

Πίνακας 1: Βασικές οπτικές ικανότητες που ερευνήθηκαν στο διάστημα μεταξύ μέσων της δεκαετίας του '80 και αρχών της δεκαετίας του '90

2.3 Δύο κλάδοι ανάπτυξης από τα μέσα της δεκαετίας του '90.

Αφότου αποδείχθηκε το γεγονός ότι η μηχανική όραση είναι εφικτή για πολλές εφαρμογές της καθοδήγησης οχήματος (βλ. πίνακα 1), δημιουργήθηκε το ερώτημα πώς να προχωρήσουμε στο μέλλον. Ο υπολογισμός της ισχύος μέτριας έντασης, της κατανάλωσης ισχύος και του κόστους δεν ήταν ακόμη διαθέσιμα για την ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας συστημάτων που θα στόχευαν απευθείας σε ανθρώπινα επίπεδα απόδοσης. Είχε αποδειχθεί ότι ο «νόμος του Moore» για την ανάπτυξη ψηφιακών μικροεπεξεργαστών ίσχυε για τις τελευταίες δύο δεκαετίες και θα μπορούσε να υποτεθεί ότι θα ίσχυε και για τις επόμενες δύο έως ότου φτάσει σε υλικά όρια. Ο νόμος εκφράζει ότι αναμένεται ένας παράγοντας βελτίωσης της απόδοσης ίσος με 2 κάθε 18 μήνες, που αντιστοιχεί σε μία τάξη μεγέθους της επεξεργαζόμενης ισχύος κάθε 4 με 5 χρόνια.

Τα περισσότερα από τα αποτελέσματα πραγματικού χρόνου στην καθοδήγηση οχημάτων δρόμου μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '90 είχαν επιτευχθεί με χρήση μαυρόασπρης CCD (charged coupled devices) κάμερας και σχετικά απλής εξαγωγής άκρων. Για τον καλύτερο χειρισμό περισσότερο πολύπλοκων εικόνων με δύσκολο φωτισμό και καιρικές συνθήκες, κρίθηκαν απαραίτητα τόσο η ανάλυση χρωμάτων όσο και η ανάλυση υφής (color and texture analysis). Επίσης, για περίπλοκους ελιγμούς και για οδήγηση σε υψηλές ταχύτητες θα ήταν επιθυμητή μια εκτεταμένη εξάπλωση εστιακών αποστάσεων και οπτικών πεδίων (spread of focal lengths and fields of view), πιθανώς συνδυασμένη με ενεργό έλεγχο της διεύθυνσης όπου κοιτάμε. Έχει

υπολογιστεί ότι θα χρειαζόταν μία αύξηση κατά δύο ή τρεις τάξεις μεγέθους σε υπολογιζόμενη ισχύ για να επιτευχθεί επεξεργασία των απαιτούμενων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Σύμφωνα με το «νόμο του Moore» αυτό αντιστοιχεί σε περίπου μία με δύο δεκαετίες. Με απόλυτα μεγέθη δηλαδή, αυτό το επίπεδο απόδοσης δεν αναμένεται πριν από το 2010.

Η κατάσταση αυτή έχει οδηγήσει σε έναν διαχωρισμό στις αναπτυξιακές προσπάθειες. Αξιόπιστη αναγνώριση δρόμου και λωρίδων κυκλοφορίας μαζί με τη σχετική θέση του ιδίου οχήματος (ego vehicle – το όχημα που είναι εξοπλισμένο με τους αισθητήρες) θα μπορούσαν να έχουν επιτευχθεί με συμβατικούς επεξεργαστές γενικού σκοπού μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του ’90 (αυτή ήταν η τελευταία επίδειξη του Ερευνητικού Προγράμματος Προμηθέας στο Παρίσι τον Οκτώβριο του 1994). Μέσα σε μερικά χρόνια, αυτό θα μπορούσε να ήταν εφικτό με έναν απλό προσωπικό υπολογιστή (PC). Μία επιπλέον εξέλιξη θα μπορούσε να φέρει τη λύση που αναπτύχθηκε πάνω σε ειδικό hardware σα μια βάση για ένα προϊόν της αγοράς. Το 1997 ο πρώτος στόχος επιτεύχθηκε σε διάφορα μέρη. Η βιομηχανία με τον μάλλον βραχύ ορίζοντα ανάπτυξης υιοθέτησε πλήρως αυτήν την πορεία ενεργειών για διάφορες εφαρμογές.

Όταν κοιτάμε το λόγο τιμής προς απόδοση για απλές οπτικές εφαρμογές γίνεται φανερό ότι υπάρχουν υψηλά αρχικά κόστη εξαιτίας των υψηλών ρυθμών δεδομένων στις ροές βίντεο (video stream) (~ 10 MB/s για ασπρόμαυρη εικόνα με 400,000 εικονοκύτταρα στα 25 Hz). Για έγχρωμη όραση και μια εξάπλωση των εστιακών αποστάσεων, κάτι αναπόφευκτο όταν ο στόχος είναι ένα επίπεδο απόδοσης κοντά στο ανθρώπινο, ένας παράγοντας σχεδόν 5 θα εμφανιστεί στο ρυθμό δεδομένων. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα γενικού τύπου συστήματα οράσεως μοιάζουν να μην είναι οικονομικά συμφέροντα για μία μόνο λειτουργία. Αντίθετα θα καταστούν εφαρμόσιμα μόνο με εκμετάλλευση της μεγάλης τους ευκαμψίας και προσαρμοστικότητας, καθώς και με το να έχουν πολλές λειτουργίες που να μοιράζονται τους ίδιους πόρους λειτουργικού και hardware. Η όραση είναι μια διαδικασία αντίληψης που απαιτεί μία μεγάλη βάση γνώσης ως υπόβαθρο. Μόνο με συνδυασμό προαποθηκευμένης γνώσης για χωρο-χρονικές διαδικασίες με τη ροή δεδομένων της εικόνας υπό παρατήρηση μπορεί να

ερμηνευθεί κατάλληλα το δισδιάστατο σήμα. Αυτή η τεράστια βάση γνώσης γίνεται επίσης οικονομικά βιώσιμη μόνο αν χρησιμοποιείται για πολλούς και διαφορετικούς σκοπούς καθώς εμφανίζονται.

Με αυτά τα δεδομένα, ο άλλος κλάδος ανάπτυξης όρασης για οχήματα γίνεται εύκολα κατανοητός. Εφόσον θα χρειαστούν μία με δύο δεκαετίες για να αναπτυχθεί η υπολογιστική ισχύς που χρειάζεται, γιατί να μην πορευτούμε προς την ανάπτυξη ενός οπτικού συστήματος που να ενσωματώνει όλες τις πλευρές που μακροπρόθεσμα θα αναγνωριστούν ως αναγκαίες. Η πλήρης εκμετάλλευσή του μπορεί επίσης να χρειαστεί μία ή δύο δεκαετίες, σε συμφωνία με την ανάπτυξη του αναγκαίου hardware. Παρ'όλα αυτά η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος και η αποδοτική πολλαπλή χρήση των συστατικών του θα μπορούσαν να σχεδιαστούν έτσι, ώστε να είναι δυνατή μία αρμονική ανάπτυξη. Μακροπρόθεσμα δείχνει να είναι αναγκαία ακόμη και η αυτόνομη μάθηση, αφού δε θα είναι δυνατόν να πρέπει όλη η γνώση να εισέρχεται προγραμματιστικά στο σύστημα από ανθρώπους.

Η πρώτη γενιά οπτικών συστημάτων για καθοδήγηση οχημάτων είχε πολύ λίγες εντελώς ξεχωριστές λειτουργίες (στη δεκαετία του '80). Η δεύτερη γενιά συστημάτων transputer είχε περισσότερες λίγο πολύ ανεξάρτητες λειτουργίες, οι οποίες έπρεπε να τίθενται σε λειτουργία από ανθρώπους χειριστές ξεχωριστά, ανάλογα με το σκοπό που έπρεπε να εκτελεστεί. Δεν υπήρχε καμία εσωτερική αναπαράσταση των ικανοτήτων αντίληψης ή συμπεριφοράς του συστήματος ώστε να μπορούν να βασιστούν πάνω τους πραγματικά αυτόνομες αποφάσεις. Η συμπεριφορά ήταν ακλόνητα σταθεροποιημένη σε κώδικα λογισμικού. Παρ'όλα αυτά η αναπαράσταση των πιο σημαντικών αντικειμένων του περιβάλλοντος ήταν δυναμική και μπορούσε να γίνει διαθέσιμη σε όλους τους διαμοιρασμένους πράκτορες (agents) για αντίληψη και έλεγχο. Όλοι αυτοί οι πράκτορες είχαν τη δική τους βάση γνώσης, ξεχωριστή από όλους τους άλλους. Ο κώδικας ήταν σε προστακτικές γλώσσες προγραμματισμού και στις δύο γενιές (FORTRAN και C). Το νέο σύστημα τρίτης γενιάς έχει σχεδιαστεί σε αντικειμενοστρεφή γλώσσα προγραμματισμού (C++) με σαφείς αναπαραστάσεις όλης της διακρινόμενης κατάστασης και των ιδίων ικανοτήτων αντίληψης και συμπεριφοράς.

2.4 Εξελίξεις μικρής εμβέλειας για εφαρμογή σύντομα στην αγορά

Εφόσον η πιθανότητα αυτόνομων αυτοκινήτων στην αγορά ήταν αμφίβολη, όλοι οι κατασκευαστές αυτοκινήτων έστρεψαν την προσοχή τους για εφαρμογή της μηχανικής όρασης στην δημόσια κυκλοφορία, στα βοηθητικά συστήματα. Εφόσον δε το να αφαιρεθεί ο οδηγός ή να κοιμηθεί ενώ οδηγεί σε εθνικές οδούς είναι μια συχνή αιτία ατυχημάτων, η βοήθεια στην πλευρική καθοδήγηση οχήματος είναι μία από τις πρώτες εφαρμογές που ερευνήθηκαν.

2.4.1 Βοήθεια στην πλευρική καθοδήγηση

Ενώ στην Ευρώπη οι κατασκευαστές αυτοκινήτων δίσταζαν να προσφέρουν τέτοια συστήματα στην αγορά, στην Ιαπωνία η Mitsubishi (προαιρετικά στο μοντέλο «Galant» στα τέλη της δεκαετίας του ‘90) και η Nissan (στις αρχές αυτής της δεκαετίας που διανύουμε) τόλμησαν αυτό το βήμα για την εσωτερική ιαπωνική αγορά. Η DaimlerChrysler (DC) είχε ένα σύστημα για φορτηγά ανεπτυγμένο από την εταιρία «Odetics». Είχε προσφερθεί για «Freightliner» φορτηγά από το 2000 και για τα φορτηγά «Mercedes-Actros» από το 2001, παρέχοντας ηχητικές προειδοποιήσεις (στην αριστερή ή τη δεξιά πλευρά του αυτοκινήτου) όταν το αυτοκίνητο ξέφευγε περισσότερο από ένα κατώφλι από το κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας. Πολλοί άλλοι κατασκευαστές αυτοκινήτων έχουν προαναγγείλει παρόμοια συστήματα βοήθειας για τα τελευταίας τεχνολογίας αυτοκίνητά τους στο κοντινό μέλλον. Προμηθεύτριες εταιρείες ηλεκτρονικών όπως η Bosch και η Delco ανάμεσα σε άλλες αναπτύσσουν επίσης τις απαραίτητες κατασκευαστικές γνώσεις στην αντίληψη αυτών των ειδών των συστημάτων όρασης. Ενδέχεται να ενωθούν με τους κατασκευαστές για συνολικές λύσεις που να περιλαμβάνουν διαφορετικά interfaces ανθρώπου-μηχανής. Απτικές (haptic) είσοδοι για αυτόματες διορθώσεις στην κατάλληλη κατεύθυνση δείχνουν να είναι το καταλληλότερο μέσο. Ωστόσο αυτό έχει περισσότερο να

κάνει με την υλοποίηση. Οι ηχητικές προειδοποιήσεις είναι εύκολα υλοποιήσιμες και το πιο συνηθισμένο.

Από τις διάφορες προσεγγίσεις που ερευνήθηκαν για αναγνώριση δρόμου και λωρίδων κυκλοφορίας, η αναδρομική εκτίμηση που βασίζεται σε έξυπνα επιλεγμένες ακμές και σε μοντέλα (καμπυλότητας) διαφορικής γεωμετρίας φαίνεται να έχει επικρατήσει. Έχουν επίσης ερευνηθεί τα νευρωνικά δίκτυα αλλά μάλλον εξαφανίστηκαν στο μεταξύ. Το πρόβλημα που τίθεται από την αναγνώριση δρόμου και λωρίδων κυκλοφορίας συμπεριλαμβάνοντας την εκτίμηση της ιδίας πλευρικής κατάστασης μαζί με την ανίχνευση και την ιχνηλάτιση (tracking), έχουν απασχολήσει το μεγαλύτερο κομμάτι των ερευνών στον τομέα της όρασης για οχήματα. Οι περισσότερες προσεγγίσεις χρησιμοποιούν μία μονή κάμερα στερεωμένη στο σώμα του αυτοκινήτου και μία εστιακή απόσταση μέτριας εμβέλειας (το οποίο δεν επαρκεί ούτε για επικίνδυνες μανούβρες ούτε για οδήγηση σε υψηλές ταχύτητες).

2.4.2 Προσαρμοζόμενος αυτόματος πιλότος (adaptive cruise control)

Ο δεύτερος πλέον βαρετός στόχος στην οδήγηση σε εθνικές οδούς εκτός από την παραμονή στο κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας είναι η επίτευξη σταθερής απόστασης από το προπορευόμενο όχημα. Ο στόχος αυτός ερευνήθηκε για αυτοματισμό με αισθητήρες ραντάρ για πολλές δεκαετίες. Εξαιτίας των πολλών λανθασμένων προειδοποιήσεων εξαιτίας της κακής ποιότητας της ανάλυσης, των πολλαπλών αντανακλάσεων και της απουσίας ικανότητας αναγνώρισης δρόμου, δεν είχαν βρεθεί αποδεκτές λύσεις μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του ’80. Στις αρχές της δεκαετίας του ’90 στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Προμηθέας, το πρόβλημα αυτό διερευνήθηκε τόσο με Laser Range Finders (LRF) όσο και με όραση εκμεταλλευόμενη τη νέα γενιά μικροεπεξεργαστών που είχε γίνει διαθέσιμη. Οι LRF-σαρωτές βελτίωσαν κατά πολύ την πλευρική ανάλυση σε σχέση με το ραντάρ. Λύσεις με δισδιάσταση σάρωση με μία ακτίνα και με μονοδιάσταση σάρωση ερευνήθηκαν. Η ασφάλεια του ματιού είναι μια σημαντική πλευρά

που περιορίζει της λύσεις υψηλής ισχύος, που θα μπορούσαν να εξομαλύνουν το κομμάτι της επεξεργασίας δεδομένων.

Στην όραση, τόσο η διοπτρική στερεοσκοπική (stereo) όραση όσο και η διαδοχή εικόνων από μία κάμερα (monocular) ερευνήθηκαν. Για στερεοσκοπική όραση σε πραγματικό χρόνο, η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς δεν επαρκούσε. Χωροχρονική μοντελοποίηση του ιδίου και των άλλων οχημάτων σε συνδυασμό με οδόμετρα για την κίνηση του ιδίου οχήματος αποδείχθηκαν επαρκή για αξιόπιστο υπολογισμό της σχετικής κατάστασης στατικών εμποδίων αλλά και άλλων οχημάτων. Στα βιολογικά συστήματα αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως στερεοσκοπική κίνηση (motion stereo). Σε τεχνικά συστήματα είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της εφαρμογής αναδρομικών τεχνικών εκτίμησης με δυναμικά μοντέλα στη διαδικασία της όρασης από μία κινούμενη πλατφόρμα. Στις αρχές της δεκαετίας του ’90 θα μπορούσε να δειχθεί ότι επαρκώς αξιόπιστη εκτίμηση απόστασης για άλλα κινούμενα οχήματα ήταν πράγματι δυνατή για αποστάσεις μέχρι τουλάχιστον 80 m. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας επίδειξης του ερευνητικού προγράμματος Προμηθέας στο Autoroute 1 κοντά στο Παρίσι τον Οκτώβριο του 1994, χιλιάδες χιλιόμετρα οδηγήθηκαν με κανονική κίνηση τριών λωρίδων κυκλοφορίας συμπεριλαμβανομένης οδήγησης σε convoy και εναλλαγής σ’αυτό το είδος οδήγησης από οδήγηση ανοιχτής κυκλοφορίας με ταχύτητες μέχρι 130 km/h.

Αυτό επιτεύχθηκε με τα δοκιμαστικά οχήματα VITA2 της Daimler-Benz και VaMP (του UBM), δύο Mercedes SEL 500 sedan οχήματα εξοπλισμένα με δεκάδες transputers για επεξεργασία εικόνας, για ερμηνεία του περιβάλλοντος και για έλεγχο οχήματος (Common European Demonstrators CED 302 και 303). Το VITA2 πιθανότατα ήταν το καλύτερα εξοπλισμένο ερευνητικό όχημα για μηχανική όραση. Εκτός από τις τέσσερις κάμερες μινιατούρες που χρησιμοποιήθηκαν και στο VaMP, ανά δύο με διαφορετικές εστιακές αποστάσεις (8 και 24 mm) σε μία πλατφόρμα ενός άξονα κοιτώντας προς τα μπροστά και προς τα πίσω, είχε 7 επιπλέον ζευγάρια κάμερες στερεοσκοπικής όρασης. Το ένα ζευγάρι κοιτούσε προς τα μπροστά και από 3 ζευγάρια ήταν τοποθετημένα πλευρικά, όλα με μια μάλλον μεγάλη στερεοσκοπική βάση. Εφόσον πολλές πανεπιστημιακές ομάδες συνεισέφεραν

στο VITA2, η ιδέα των πολλών επεξεργαστών υπήρχε πολύ περισσότερο από ό,τι στο VaMP, το οποίο περιελάμβανε ένα σύνολο περίπου 60 transputers των 16 bits (για επεξεργασία εικόνας και επικοινωνία) και με λέξη των 32-bits.

Οι μικροεπεξεργαστές της επόμενης γενιάς (POWERPC 601) που χρησιμοποιήθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του ’90 σ’αυτά τα οχήματα, είχαν δεκαπλάσια υπολογιστική ισχύ. Αυτό χρησιμοποιήθηκε για διπλασιασμό του ρυθμού επεξεργασίας σε πλήρη ρυθμό βίντεο στα 25Hz (40 ms αντί για 80ms ο χρόνος κύκλου μηχανής) και για μείωση του αριθμού των επεξεργαστών κατά ένα παράγοντα ίσο με πέντε. Παρ’όλα αυτά δεν υπήρχε ακόμα αξιοπιστία και δύναμη στην αναγνώριση οχημάτων κάτω από ποικίλλες συνθήκες φωτισμού και καιρού ώστε να επιτρέπει την εισαγωγή τους στην αγορά.

Έτσι οι κατασκευαστές αυτοκινήτων αποφάσισαν να βασιστούν στα ραντάρ για την πρώτη γενιά συστημάτων προαρμοζόμενου αυτομάτου πιλότου (Adaptive Cruise Control, ACC) συμπεριλαμβάνοντας περισσότερη επεξεργασία σήματος με μικροεπεξεργαστές. Το μοντέλο Mercedes S-class ήταν το πρώτο αυτοκίνητο στην αγορά το οποίο μπορούσε προαιρετικά να εφοδιαστεί με ένα τέτοιο σύστημα, το οποίο καλούνταν «Distronic», το 2000. Άλλοι προμηθευτές ηλεκτρονικών αλλά και κατασκευαστές αυτοκινήτων ασχολήθηκαν με παρόμοια συστήματα και ακολούθησαν σύντομα. Εφόσον το ραντάρ δεν επιτρέπει την αναγνώριση της καμπυλότητας του δρόμου, αυτή υπολογίζεται με έναν προσεγγιστικό τρόπο από άλλα μετρούμενα σήματα όπως ο εσωτερικός ρυθμός εκτροπής (internal yaw rate) συνδυαζόμενος με την ταχύτητα την οποία έχει το αυτοκίνητο ή με διαφορές στις κλίσεις στροφής των αριστερών / δεξιών τροχών. (Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στην υπόθεση quasi-steady οδήγησης και συνεχούς στροφής).

Για μεγάλες μπροστινές αποστάσεις η υπόθεση αυτή δεν ισχύει και οι αλλαγές στην καμπυλότητα του δρόμου θα έχουν μία μη αμελητέα επίδραση. Ως εκ τούτου οι έρευνες είναι στραμμένες στην κατεύθυνση συμπλήρωσης του ACC ραντάρ με ένα εξάρτημα όρασης για ανίχνευση της κατάστασης του δρόμου στην κατεύθυνση του ραντάρ. Αυτό το πρόσθετο εξάρτημα βελτιώνει αισθητά τα αποτελέσματα εκτίμησης για την πλευρική θέση του αντικειμένου που ανιχνεύθηκε και επιτρέπει εντόπιση παρόμοια με αυτήν της διαγράμμισης

των λωρίδων κυκλοφορίας. Αυτό δεν είναι εφικτό με ένα καθαρό σύστημα ραντάρ. Η εισαγωγή στην αγορά αυτών των νέων υβριδικών βοηθητικών συστημάτων αναμένεται σύντομα.

2.4.3 Αυτόνομη οδήγηση σε κατάσταση «σταμάτα - ξεκίνα»

Όταν και εφόσον θα έχει επιτευχθεί μία αξιόπιστη απόδοση των δύο λειτουργιών που αναπτύχθηκαν παραπάνω, γεννάται το ερώτημα εάν θα μπορούσαμε να εμπιστευτούμε επαρκώς συνδυασμένα τέτοια συστήματα για την εντελώς αυτόνομη εκτέλεση σχετικά μη κρίσιμων ενεργειών. Μία τέτοια περίπτωση θα μπορούσε να είναι η βαρετή οδήγηση «σταμάτα – ξεκίνα» μέχρι ένα ανώτατο όριο ταχύτητας (π.χ. ταχύτητες μικρότερες από 30 km/h ή 10m/s). Για τα σύγχρονα αυτοκίνητα, η απόσταση που διανύουν μέχρι να σταματήσουν από ταχύτητα 10m/s μπορεί να είναι ακόμη και μόνο 5m (υπό ιδανικές συνθήκες).

Στην οδήγηση «σταμάτα-ξεκίνα», βέβαια, ακόμη και σε εθνικές οδούς ενδέχεται να παρουσιαστούν πολλών ειδών εμπόδια, όπως άνθρωποι που περπατούν ανάμεσα από τα οχήματα. Σε χαμηλές ταχύτητες, ενδέχεται να μπουν άνθρωποι στην τροχιά του οχήματος απευθείας από τα πλαϊνά. Γι' αυτό και η ανίχνευση εμποδίων δε μπορεί να περιοριστεί σε μία μικρή γωνιακή περιοχή στην κατεύθυνση όπου οδηγούμε, αλλά πρέπει να ελέγχεται ένα μεγάλο οπτικό πεδίο. Κατ'αρχήν μπορούν να χρησιμοποιηθούν laser range finders (LRF) ή ειδικοί αισθητήρες ραντάρ στις μπροστινές γωνίες του οχήματος καθώς και αισθητήρες όρασης ενός ευρέως οπτικού πεδίου πίσω από το παρμπρίζ του αυτοκινήτου.

Αυτές οι προσεγγίσεις και μερικές άλλες ερευνώνται. Το ερευνητικό όχημα VITA(1) της Daimler-Benz (Σχ.) ήταν κατά πάσα πιθανότητα το πρώτο όχημα που επέδειξε δημόσια αμιγείς βασισμένες στην όραση ικανότητες οδήγησης «σταμάτα – ξεκίνα».

Το πρώτο σύστημα που θα εισέλθει στην αγορά σε μερικά χρόνια μπορεί να είναι βασισμένο σε ραντάρ, γιατί αυτή η προσέγγιση έχει τις χαμηλότερες απαιτήσεις σε επεξεργασία δεδομένων. Αντίθετα η όραση έχει

τους υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων αλλά και την καλύτερη απόδοση σε ανάλυση χώρου. Σε ένα απλό σχέδιο, κάμερες με φακούς ευρέων οπτικών πεδίων μπορούν να τοποθετηθούν στην πάνω αριστερά και δεξιά γωνία πίσω από το μπροστινό παρμπρίζ, κοιτάζοντας σε διαφορετικές κατευθύνσεις του σώματος του αυτοκινήτου. Σε συνδυασμό και με μια τρίτη κάμερα που να κοιτάει ευθεία μπροστά στο κέντρο του παρμπρίζ, καλύπτεται ολόκληρο το μπροστινό ημισφαίριο. Παρ'όλα αυτά, οι εικόνες με αυτό το ευρύ οπτικό πεδίο (>60^{o}) χρειάζονται συνήθως διορθώσεις για οπτικές παραμορφώσεις στα πλευρικά τους τμήματα. Σε εναλλακτικές μελέτες προτιμούνται κάπως μεγαλύτερες εστιακές αποστάσεις, εφόσον μία πλήρης κάλυψη 180^{o} δεν είναι υποχρεωτική. Το μειονέκτημα αυτού είναι ότι η χωρική ανάλυση της κάμερας που κοιτάει μπροστά δεν είναι επαρκής για μεγάλες αποστάσεις στην ευθεία, και που απαιτείται σε υψηλές ταχύτητες. Η εστιακή απόσταση που χρειάζεται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι μεγαλύτερη κατά μία τάξη μεγέθους από αυτήν που χρειάζεται για ένα ευρύ οπτικό πεδίο σε κοντινή απόσταση. Φυσικά, για τις συνηθισμένες κάμερες με λιγότερα από 800 εικονοκύτταρα ανά γραμμή, αυτό συνεπάγεται ένα μικρό οπτικό πεδίο. Γι' αυτό και για να είναι δυνατή η εντόπιση καμπύλων του δρόμου σε μεγαλύτερες αποστάσεις απαιτείται υποχρεωτικά είτε ένα σετ (περίπου 10) καμερών τοποθετημένων σταθερά στο σώμα του οχήματος, είτε έλεγχος της κατεύθυνσης που βλέπουμε με μία πρόσθετη τηλεκάμερα είτε ένας zoom φακός με gaze control.

Μία άλλη ιδέα στην οδήγηση «σταμάτα – ξεκίνα» είναι το να ακολουθούμε πλευρικά το προπορευόμενο όχημα όταν δεν υπάρχει διαγράμμιση λωρίδων. Επιπρόσθετα πρέπει να αντιμετωπιστούν οι απρόσεκτοι οδηγοί που εισέρχονται σιγά σιγά στη λωρίδα μας ακριβώς μπροστά μας απαιτώντας να τους παραχωρηθεί η είσοδος. Από την άλλη μεριά θα πρέπει να είναι δυνατή η αλλαγή λωρίδας όταν υπάρχουν μεγάλα κενά σε γειτονική λωρίδα με γρηγορότερη κίνηση κατόπιν ρητής εντολής του ανθρώπου – χειριστή. Αυτός ο τύπος οδηγικής βοήθειας σε κίνηση «σταμάτα – ξεκίνα» είναι στη μεταβατική περιοχή προς τη δυνατότητα αυτόνομης οδήγησης. Παρ'όλα αυτά πρέπει να συγκεντρωθεί ένας μεγάλος όγκος εμπειρίας και στατιστικών δεδομένων με σαφείς υποδείξεις προς την

ανωτερότητα της αυτόματης οδήγησης και πρέπει να λυθεί το θέμα της αξιοπιστίας προτού επιτραπεί η πραγματικά αυτόνομη οδήγηση.

2.4.4 Ανάγνωση σημάτων κυκλοφορίας

Με το θέμα αυτό ασχολήθηκε από νωρίς η ερευνητική ομάδα της Daimler – Benz στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Προμηθέας. Η κατανόηση των ορίων ταχύτητας και των σημάτων «απαγορεύεται το πέρασμα» ήταν ο πρώτος στόχος που ερευνήθηκε. Πολλές ομάδες στο μεταξύ σε όλο τον κόσμο άρχισαν να ασχολούνται με το θέμα. Ωστόσο η αξιόπιστη αναγνώριση των οδικών σημάτων σε φυσικό περιβάλλον κατά μήκος δρόμων με πολλαπλές λωρίδες είναι ένας απαιτητικός στόχος, αφού πρέπει να λειτουργεί κάτω από όλες τις συνθήκες φωτισμού και καιρού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Μέχρι τώρα κανένα τέτοιο σύστημα δεν είναι έτοιμο να εισαχθεί στην αγορά με λογικό κόστος. Θα μπορούσε ίσως να εκτίθεται σε μία εσωτερική οθόνη η τρέχουσα έγκυρη κατάσταση στη ρύθμιση της κυκλοφορίας με απαίτηση του οδηγού. Αυτή θα μπορούσε να είναι μία ωραία επιπρόσθετη λειτουργία πάνω σε άλλες. Το κατά πόσον θα άξιζε το μάλλον υψηλό επενδυτικό κόστος για τα πλεονεκτήματα που θα προσέφερε είναι μάλλον αμφίβολο.

2.4.5 Υποστήριξη στην αλλαγή λωρίδας

Η απλή εφαρμογή αλλαγών λωρίδας όταν η γειτονική λωρίδα είναι άδεια είναι ένας μάλλον εύκολος στόχος που επιδείχτηκε από τα πρώτα στάδια της μηχανικής όρασης. Μπορεί να θεωρηθεί ως μία συνηθισμένη δυνατότητα των καθοδηγικών οπτικών συστημάτων (visual guidance systems) μέχρι τώρα. Το δύσκολο είναι να γίνει αξιόπιστα αντιληπτό ότι η γειτονική λωρίδα είναι άδεια. Αυτό περιλαμβάνει, φυσικά, γρηγορότερη κίνηση από πίσω. Εφόσον η λειτουργία αυτή είναι δύσκολη ακόμα και για τους ανθρώπους, θα ήταν πολύ χρήσιμη μία βοηθητική λειτουργία που να ενημερώνει τον οδηγό ότι είναι απολύτως ασφαλές να αλλάξει λωρίδα.

Για να καταλήξει σε αυτό το συμπέρασμα, πρέπει να εκτιμάται και να κρίνεται η κατάσταση της κίνησης τόσο στο μπροστινό όσο και στο πίσω ημισφαίριο καθώς και στα πλαϊνά στις διπλανές λωρίδες. Το ότι αυτό είναι εφικτό επιδείχθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα Προμηθέας από την ομάδα του UBM. Παρ'όλα αυτά ακόμα και σήμερα η κοινότητα της μηχανικής όρασης δε μπορεί να ισχυριστεί ότι ο στόχος αυτός μπορεί να επιλυθεί κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες και συνθήκες φωτισμού. Είναι πιθανό να λύσουν μακροπρόθεσμα το πρόβλημα λύσεις όπως οι μικτοί αισθητήρες, όπως και στην οδήγηση «σταμάτα – ξεκίνα». Υπάρχει όμως και πάλι η πιθανότητα ο εξοπλισμός που θα πρέπει να είναι ενσωματωμένος να είναι πολύ ακριβός προκειμένου να εξυπηρετήσει αυτή και μόνο τη λειτουργία.

2.4.6 Αναγνώριση λωρίδων κυκλοφορίας

Ως επί του παρόντος έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι αναγνώρισης λωρίδων κυκλοφορίας μέσω μηχανικής όρασης [8] - [12], [14] - [16]. Μεταξύ αυτών των αλγορίθμων, γίνεται εδώ σύντομη αναφορά σε διάφορα αντιπροσωπευτικά συστήματα ανίχνευσης λωρίδων.

- LOIS [8] (Likelihood of Image Shape).

Είναι αναπτυγμένο στο εργαστήριο τεχνητής νοημοσύνης του πανεπιστήμιου του Μίτσιγκαν και χρησιμοποιεί μια παραμορφώσιμη προσέγγιση προτύπων. Μια παραμετρική οικογένεια σχημάτων περιγράφει το σύνολο όλων των πιθανών τρόπων με τον οποίο τα όρια των λωρίδων κυκλοφορίας θα μπορούσαν να εμφανιστούν στην εικόνα. Μια λειτουργία (function) καθορίζεται της οποίας η τιμή είναι ανάλογη με το πόσο καλά ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων της μορφής της λωρίδας ταιριάζει με τα στοιχεία εικονοκυττάρου σε μια καθορισμένη εικόνα. Η ανίχνευση λωρίδων εκτελείται με την εύρεση των παραμέτρων της μορφής τς λωρίδας που μεγιστοποιούν τη λειτουργία (function) για την τρέχουσα εικόνα. Το σύστημα LOIS ανιχνεύει τις λωρίδες από πλαίσιο σε πλαίσιο. Χρησιμοποιεί ένα πιό αδύνατο προγενέστερο μοντέλο της θέσης των λωρίδων κατά την εκτέλεση της αρχικής ανίχνευσης των λωρίδων, και χρησιμοποιεί τις πληροφορίες από

το προηγούμενο πλαίσιο για να περιορίσει την πιθανή θέση των λωρίδων κατά την εκτέλεση της ανίχνευσης λωρίδων.

Εντούτοις, αυτός ο αλγόριθμος δεν μπορεί να εγγυηθεί ένα βέλτιστο αποτέλεσμα και μεγάλη ακρίβεια χωρίς κατανάλωση τεράστιων υπολογιστικών πόρων. Επομένως, δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογή πραγματικού χρόνου.

- RALPH [10] (Rapidly Adapting Lateral Position Handler)

Αναπτύχθηκε στο ινστιτούτο ρομποτικής του πανεπιστημίου Carnegie Mellon. Χρησιμοποιείται για να ελέγξει την πλευρική (πλευρική εννοώντας κάθετα στην διεύθυνση του οδοστρώματος) θέση ενός αυτόνομου οχήματος. Το σύστημα RALPH αποσυνθέτει το πρόβλημα του πλευρικού ελέγχου μέσω μηχανικής όρασης σε δύο βήματα. Κατ' αρχάς, πραγματοποιεί μια δειγματοληψία των εικόνων. Τα μέρη της εικόνας που είναι άσχετα για τον επιθμητό στόχο εξαλείφονται και μόνο το σχετικό μερος της εικόνας υποβάλλεται σε επεξεργασία και σμικρύνεται σε μια εικόνα διαστάσεων 30 επί 32 εικονοκυττάρων (pixels). Στη συνέχεια το σύστημα, υπολογίζει την κυρτότητα του δρόμου και τα πλευρικά όφσετ χρησιμοποιώντας μια τεχνική ταιριάσματος (matching technique) που ρυθμίζει προσαρμοστικά και ευθυγραμμίζει ένα πρότυπο στο υπολογισμένο κατά μέσο όρο σχεδιάγραμμα έντασης scanline. Το πλεονέκτημα του RALPH είναι το χαμηλό υπολογιστικό κόστος του. Λειτουργεί πολύ γρήγορα. Εντούτοις, μπορεί μόνο να καθορίσει την κυρτότητα του δρόμου. Τα σύνορα του δρόμου, που είναι χρήσιμα στην ανίχνευση αντικειμένου στο οδηγικό περιβάλλον, δεν υπολογίζονται από το σύστημα RALPH.

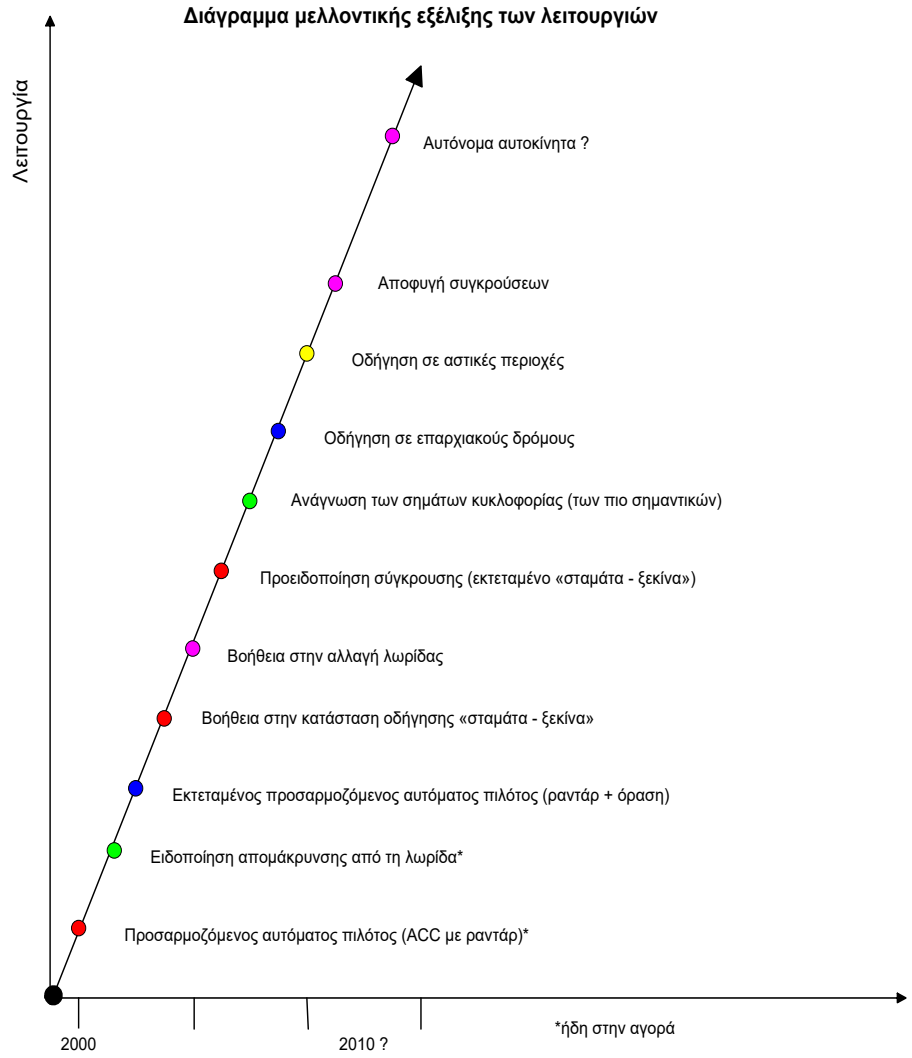
- ARCADE [9] (Automated Road Curvature and Direction Estimation)

Αναπτύχθηκε για να παράσχει μια στοιβαρή και αξιόπιστη μέθοδο για τον υπολογισμό της κυρτότητα και την κατεύθυνση του δρόμου χωρίς προγενέστερη ομαδοποίηση των σημείων των άκρων με τα όρια των λωρίδων κυκλοφορίας. Όταν υπολογιστεί η κυρτότητα και ο προσανατολισμός του δρόμου, το σύστημα ARCADE χρησιμοποιεί αυτά τα στοιχεία για να να μετατρέψει το πρόβλημα εντοπισμού των ορίων των λωρίδων κυκλοφορίας σε

σχέση με το όχημα σε πρόβλημα τμηματισμού ενός μονοδιάστατου σήματος. Αυτό το σήμα κατασκευάζεται με τον υπολογισμό του μέσου όρου των εικονοκυττάρων εικόνας με το ίδιο offset σε σχέση με το κέντρο της οδού προκειμένου να εκμηδενιστούν οι παραλλαγές λόγω των σκιών, της σύστασης, και διαφόρων άλλων παραγόντων. Το σύστημα ARCADE είναι ικανό να λειτουργήσει σε περιπτώσεις όπου μέχρι και το 50% των εισαχθέντων στο σύστημα σημείων των ακρών (edge points) είναι θόρυβος, αλλά ο αλγόριθμος αποτυγχάνει εάν το ποσοστό του θορύβου αυξηθεί πάνω από εκείνο το σημείο.

2.4.7 Προβλεπόμενη ανάπτυξη της όρασης για οχήματα δρόμου

Η ανά τον κόσμο βιομηχανία αυτοκινήτων δείχνει να συμφωνεί ως προς τα βήματα εξέλιξης της επόμενης δεκαετίας. Όλοι σχεδόν δείχνουν να συμφωνούν για τη διαδρομή της εικόνας. Η χρονική κλίμακα μπορεί να μην είναι απόλυτα σωστή κατά ένα μεγάλο ποσοστό, η αλληλουχία όμως των βημάτων είναι λογικά σίγουρη. Τα τελευταία τρία βήματα που βρίσκονται στην κορυφή είναι πολύ μακριά στο μέλλον. Η πραγματοποίησή τους θα εξαρτηθεί από την εμπειρία που θα έχει συγκεντρωθεί από τα προηγούμενα βήματα με το πέρασμα των χρόνων. Την αναγνώριση των πεζών την έχει ήδη αναλάβει κάποια κατασκευαστική εταιρεία αυτοκινήτων. Το ερώτημα του εάν θα υπάρξουν ποτέ εντελώς αυτόνομα οχήματα στο δρόμο, έχει τους υποστηρικτές του και τους αντιπάλους του. Πιθανόν ο πιο αποφασιστικός παράγοντας να είναι οι μελλοντικές στατιστικές των ποσοστών των ατυχημάτων που θα έχουν γίνει με αυτοκίνητα που οδηγούν άνθρωποι σε σύγκριση με εκείνα που έχουν γίνει με τα αυτόματα συστήματα αυτοκινήτων. Το ερώτημα αυτό θα απαντηθεί από τις επόμενες γενιές. Είναι δε σχεδόν σίγουρο ότι το μέσο επίπεδο απόδοσης στην οδήγηση οχημάτων από ανθρώπους θα είναι επιτεύξιμο μέσα σε μερικές δεκαετίες με τεχνικά συστήματα που θα βασίζονται στην όραση σε συνδυασμό με κάποια επιπλέον σήματα από πιο συμβατικούς αισθητήρες.



Σχήμα 1:Διάγραμμα των μελλοντικών εφαρμογών της όρασης στα οχήματα δρόμου

2.5 Συμπέρασμα

Η μηχανική όραση σημείωσε σημαντική πρόοδο στη διάρκεια της περασμένης δεκαετίας. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην ανάπτυξη της επίδοσης των μικροεπεξεργαστών. Ο αριθμός των ενεργών ομάδων που ασχολούνται με το θέμα έχει επίσης αυξηθεί κατά πολύ. Απλές λειτουργίες όπως η αλλαγή λωρίδων κυκλοφορίας εκτελούνται πλέον από ένα απλό προσωπικό υπολογιστή. Ωστόσο η αξιόπιστη και σίγουρη απόδοση κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες και υπό οποιεσδήποτε συνθήκες φωτισμού επιδέχεται βελτιώσεις. Η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος θα επιτρέψει

κάποιες μέθοδοι βασισμένες στο χρώμα ή στην αναγνώριση υφής να συμπληρώσουν το κενό. Αναπτύσσονται επίσης αντίστοιχες βάσεις γνώσης. Η εξέλιξη αυτή θα επιτρέψει να βασιστεί η αναγνώριση αντικειμένων και η εκτίμηση σχετικής θέσης σε μεγαλύτερο βαθμό στην όραση, μειώνοντας έτσι την ανάγκη χρήσης αισθητήρων όπως το ραντάρ και το λέιζερ. Από τη φύση των συνιστωσών που εμπλέκονται σε όραση υψηλής απόδοσης (που να μοιάζει στην ανθρώπινη) αξίζει να γίνουν προσπάθειες στην κατεύθυνση των ολοκληρωμένων ευέλικτων συστημάτων οράσεως που εκμεταλλεύονται το ίδιο software και το ίδιο hardware για ένα μεγάλο αριθμό λειτουργιών που χρειάζονται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του ζητούμενου. Αυτό θα γίνει δυνατό μέσα στην επόμενη ή τις δύο επόμενες δεκαετίες [2].

3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΛΩΡΙΔΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΑΧΩΡΗΣΗΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΛΩΡΙΔΕΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Ποικίλα συστήματα προειδοποίησης σύγκρουσης και αποφυγής σύγκρουσης έχουν προταθεί έως τώρα για να ενισχύσουν τα συστήματα αποφυγής και ικανότητας επιβίωσης συντριβής των ευφυών οχημάτων.

Ένα ακριβές σύστημα ανίχνευσης και αναγνώρισης αντικειμένου είναι μια βασική προϋπόθεση για τα συστήματα αποφυγής συντριβής, καθώς οι αλγόριθμοι επέκτασης τμημάτων συστημάτων στηρίζονται στην ακριβή ανίχνευση κινδύνου, την αναγνώριση, και την ανίχνευση. Η αναγνώριση και ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο είναι ένα βασικό κομμάτι του συστήματος ανίχνευσης και αναγνώρισης αντικειμένου για ένα σύστημα αποφυγής συντριβής. Σε αυτή την εργασία, παρουσιάζουμε έναν αλγόριθμο ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας βασισμένο σε τηλεοπτικές ακολουθίες που λαμβάνονται από ένα όχημα που οδηγεί στην εθνική οδό. Δεδομένου ότι οι λωρίδες κυκλοφορίας είναι συνήθως (πλην μικρών εξαιρέσεων) μακριές και ομαλές καμπύλες, τις εξετάζουμε ως ευθείες γραμμές μέσα σε ένα λογικό πλαίσιο για την ασφάλεια των οχημάτων. Οι λωρίδες κυκλοφορίας ανιχνεύονται χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Hough. Μέσω του μετασχηματισμού Hough όχι μόνο καθορίζουμε τη θέση των λωρίδων, αλλά και χρησιμοποιείται για να παρέχει προειδοποίηση αναχώρησης από τα όρια που σχηματίζουν οι περικλείουσες το όχημα λωρίδες. Στο τελευταίο στάδιο του αλγορίθμου οι ανιχνευμένες λωρίδες κυκλοφορίας μέσω ενός πίνακα βαθμονόμησης αντιστοιχίζονται με τη θέση τους στο χώρο. Αυτή η μέθοδος έχει δοκιμαστεί σε δεδομένα από video και τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν καταδείξει ένα γρήγορο, ισχυρό σύστημα για ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας.

Το σύστημα αναγνώρισης και ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο είναι ένα ουσιαστικό τμήμα του όλου συστήματος βοήθειας

και προειδοποίησης οδηγών, το οποίο παρέχει τις πληροφορίες για τη δομή των λωρίδων κυκλοφορίας και της σχετικής θέσης του οχήματος ως προς αυτές. Υπάρχουν πάνω από τρία εκατομμύρια τροχαία ατυχήματα κάθε έτος στις ΗΠΑ, στις οποίες ένα όχημα αφήνει το οδόστρωμα χωρίς σύγκρουση με ένα άλλο όχημα. Αυτά τα ατυχήματα οδηγούν σε 13.000 θανάτους ετησίως και είναι αρμόδια για 16,5% όλων των καθυστερήσεων στην κυκλοφορία. Υπολογίζεται ότι περίπου το 53% αυτών των ατυχημάτων θα μπορούσε να αποφευχθεί εάν τα οχήματα αυτά ήταν εφοδιασμένα με συστήματα προειδοποίησης του οδηγού [8]. Το σύστημα ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας που προτείνουμε μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα για να προειδοποιεί όταν το όχημα αναχωρεί από τις λωρίδες κυκλοφορίας.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, έχουν γίνει πολλές έρευνες στον τομέα της μηχανικής όρασης για ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας. Δεδομένου ότι οι εικόνες λαμβανόμενες αλλοιώνονται συνήθως από τους θορύβους, αναπτύχθηκαν πολλοί αλγόριθμοι ανίχνευσης παρόδων για να επιτύχουν την ευρωστία με το φιλτράρισμα αυτών των θορύβων. Ανεξάρτητα του τι είδος αλγορίθμου χρησιμοποιείται, ένας αλγόριθμος ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας για να προωθηθεί στην αγορά πρέπει να κατέχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Η ανίχνευση δεν πρέπει να επηρεάζεται από σκιές (π.χ σκιές δέντρων, κτηρίων, μεγάλων οχημάτων κ.λ.π.).
- Πρέπει να είναι ικανό να επεξεργάζεται εκτός από τους δρόμους με καλή διαγράμμιση και δρόμους χωρίς λωρίδες κυκλοφορίας.
- Πρέπει να είναι ικανό να χειρίζεται τον κυρτό δρόμο αντί να υποθέτει έναν ευθύ δρόμο.

Το υπόλοιπο της ενότητας οργανώνεται ως εξής. Η παράγραφος 3.3 περιγράφει τον προτεινόμενο αλγόριθμο για την ανίχνευση λωρίδων πραγματικού χρόνου και το σύστημα προειδοποίησης αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας. Οι παράγραφοι 3.4 έως 3.10 παρουσιάζουν την υλοποίηση του αλγορίθμου ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας. Στην παράγραφο 3.11 αναλύονται οι εφαρμογές του αλγορίθμου ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας ενώ στη 3.12 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις που

χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της συγκεκριμένης εφαρμογής. Η παράγραφος 3.13 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα της εφαρμογής αυτού του προτεινόμενου αλγορίθμου. Τα συμπεράσματα παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.14.

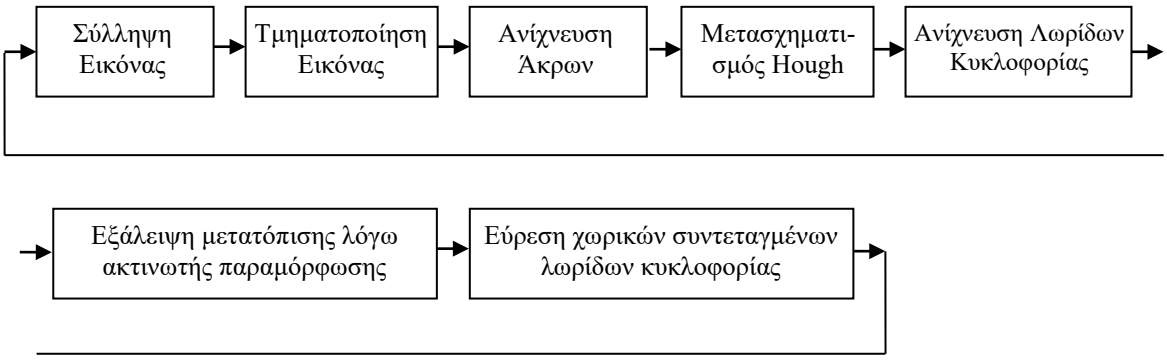
3.2 Περίληψη

Σε αυτήν την εργασία, παρουσιάζουμε έναν αλγόριθμο ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας βασισμένο σε ακολουθίες εικόνας που εξάγονται από video το οποίο λαμβάνεται από ένα όχημα που οδηγεί στην εθνική. Στον αλγόριθμο ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας, η τμηματοποίηση (segmentation) και η αφαίρεση των σκιών επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας την τιμή απόχρωσης του χρώματος για κάθε εικονοκύτταρο της εικόνας. Δεδομένου ότι οι λωρίδες κυκλοφορίας έχουν μακριές και ομαλές καμπύλες, ανιχνεύονται χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Hough. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας μπορεί να εφαρμοστεί στους δρόμους με σωστή διαγράμμιση ανεξάρτητα αν ο δρόμος είναι ευθύς ή έχει καμπυλότητα. Ο υπολογισμός του μετασχηματισμού Hough δεν καθορίζει μόνο τη θέση των λωρίδων κυκλοφορίας, αλλά χρησιμοποιείται για να παρέχει προειδοποίηση αναχώρησης από τις λωρίδες. Στο τελευταίο στάδιο του αλγορίθμου οι ανιχνευμένες λωρίδες κυκλοφορίας μέσω ενός πίνακα βαθμονόμησης αντιστοιχίζονται με τη θέση τους στο χώρο. Αυτή η μέθοδος έχει δοκιμαστεί σε δεδομένα από κάμερα CCD, και τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν καταδείξει ένα αρκετά ισχυρό σύστημα για την ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας πραγματικού χρόνου.

3.3 Προτεινόμενος αλγόριθμος ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας και υλοποίησης συστήματος προειδοποίησης αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας

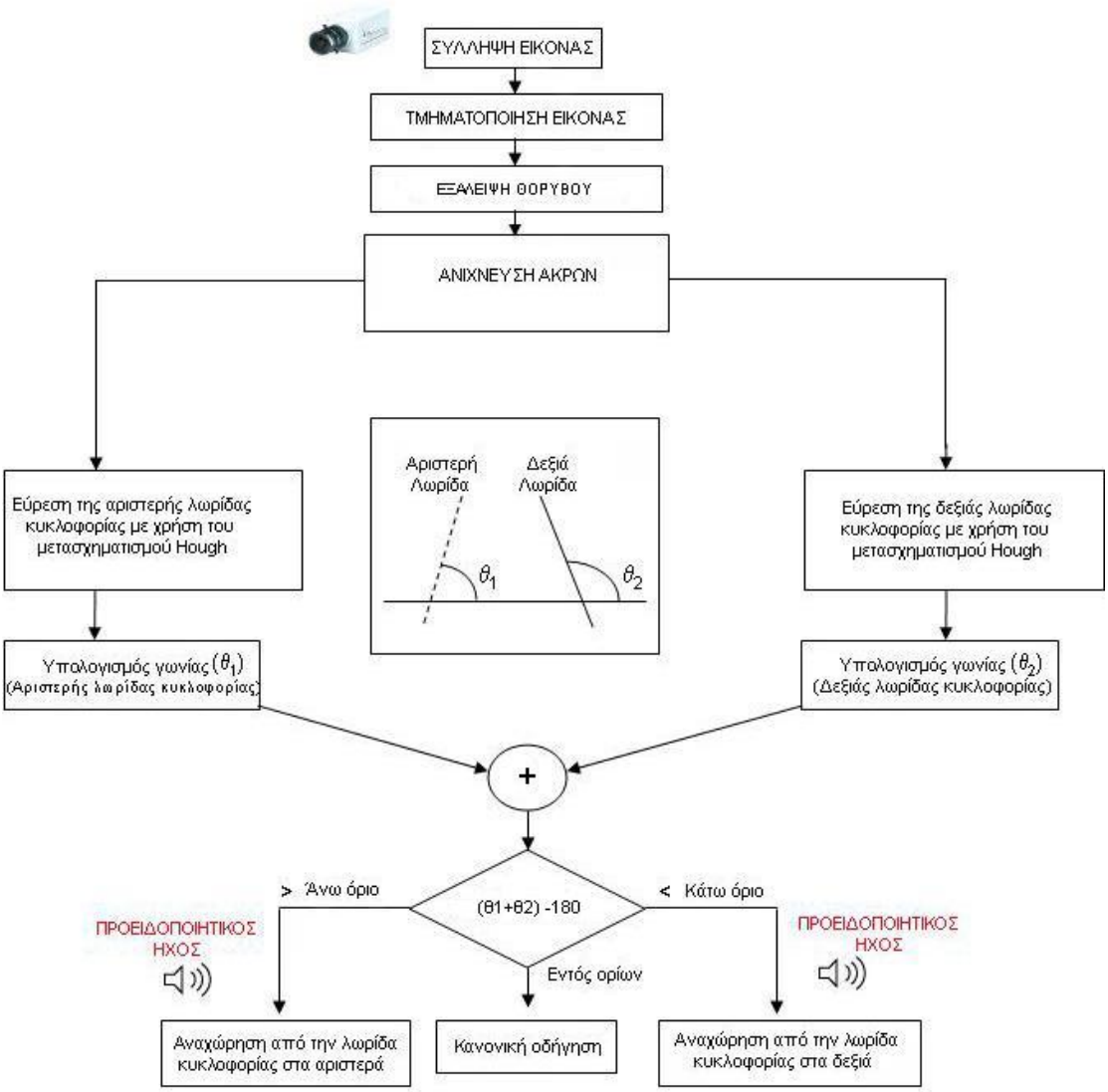
Στο σχήμα 2 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγόριθμου εντοπισμού λωρίδων κυκλοφορίας. Αποτελείται από εφτά βήματα: σύλληψη εικόνας (image capturing), τμηματοποίηση εικόνας (image

segmentation), ανίχνευση άκρων (edge detection), μετασχηματισμός Hough (Hough Transform, HT), ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας (lane tracking), αναίρεση μετατόπισης που προκαλείται από την ακτινωτή παραμόρφωση (radial distortion) και τέλος εύρεση χωρικών συντεταγμένων των λωρίδων κυκλοφορίας μέσω της μήτρας βαθμονόμησης (calibration matrix). Το κάθε ένα από τα βήματα αναλύεται λεπτομερώς πιο κάτω.



Σχήμα 2: Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγόριθμου εντοπισμού λωρίδων κυκλοφορίας

Στο σχήμα 3 απεικονίζεται ο τρόπος υλοποίησης του συστήματος προειδοποίησης αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας.



Σχήμα 3: Διάγραμμα ροής συστήματος προειδοποίησης αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας

3.4 Σύλληψη Εικόνας (Image Capturing)

Τα δεδομένα εισόδου του συστήματος είναι η ακολουθία ασπρόμαυρων εικόνων που λαμβάνονται από ένα κινούμενο όχημα. Μία μονόχρωμη CCD κάμερα είναι τοποθετημένη μέσα στο όχημα πίσω από τον υαλοθώρακα.

Αυτή λαμβάνει εικόνες από το περιβάλλον μπροστά από το όχημα, συμπεριλαμβανομένου του δρόμου, άλλων οχημάτων στον δρόμο, σήματα

τροχαίας στη άκρη του δρόμου και ενίοτε διάφορα άλλα αντικείμενα στον δρόμο. Ένας on-board υπολογιστής με θύρα firewire είναι συνδεδεμένος με την κάμερα και λαμβάνει τις εικόνες σε πραγματικό χρόνο (με ταχύτητα 15 frames/sec), και τις αποθηκεύει στην μνήμη του υπολογιστή. Το σύστημα αναγνώρισης λωρίδων κυκλοφορίας παίρνει τις εικόνες από την μνήμη και αρχίζει να τις επεξεργάζεται. Μια τυπική σκηνή του δρόμου φαίνεται στην Εικόνα 4.

Εικόνα 4: Τυπική σκηνή του δρόμου

3.5 Τμηματοποίηση Εικόνας (Image Segmentation)

Η τμηματοποίηση των λαμβανόμενων πλαισίων είναι ένα κρίσιμο σημείο στην όλη διαδικασία ανάλυσης των σκηνών οδήγησης.

Αν και για τον άνθρωπο ο προσδιορισμός των ορίων κάθε επιφάνειας και η ανίχνευση των σχετικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της κάθε σκηνής είναι αρκετά φυσικός και εύκολος, για ένα υπολογιστή η ακριβής

αυτόματη τμηματοποίηση μιας εικόνας έχει αποδειχθεί αρκετά δύσκολη και αναξιόπιστη. Πολλά παραδοσιακά συστήματα έχουν προταθεί για να αναγνωρίσουν κομμάτια των σκηνών κυκλοφορίας με την εξαγωγή χαρακτηριστικών γνωρισμάτων γεωμετρίας για να συμπεράνουν και να ελέγξουν την ύπαρξη ορισμένων κατηγοριών αντικειμένων. Μια άλλη σχετική κατηγορία μεθόδων τμηματοποίησης είναι βασισμένη στην τεχνική που λέγεται region growing and clustering όπως επίσης υπάρχουν και πολλές άλλες που δεν είναι επί του παρόντος να αναπτυχθούν και εξηγηθούν. Η αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας μεθόδου εξαρτάται αποφασιστικά από την ικανότητα ενός μέτρου ομοιότητας, όπως οι πληροφορίες σύστασης και χρώματος των εικονοκυττάρων. Στο δικό μας αλγόριθμο, χρησιμοποιούμε την απόχρωση χρώματος ως μέτρο της κατάτμησης. Γενικά σε κάθε απόχρωση χρώματος αντιστοιχεί μια τιμή αρχίζοντας, για μονοχρωματική εικόνα από το μηδέν (που είναι το μαύρο) και καταλήγοντας στο 255 (που είναι το λευκό). Ορίζοντας ένα αποδεκτό εύρος τιμών για το χρώμα παιρνουμε από την εικόνα όλες τις σχετικές πληροφορίες για τον εντοπισμό των λωρίδων κυκλοφορίας, ανεξάρτητα από την παρουσία διαφορετικών συνθηκών φωτισμού. Πολλά συστήματα ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας περιορίζονται από την ύπαρξη σκιών. Επομένως, μπορούν μόνο να εφαρμοστούν στις σκηνές εθνικών οδών. Οι σκιές (από δέντρα, κτήρια, μεγάλα οχήματα, κ.λπ) δημιουργούν ένα μεγάλο πρόβλημα στους περισσότερους αλγορίθμους ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας. Μπορούμε να λύσουμε μερικώς αυτό το πρόβλημα με τη χρησιμοποίηση της τιμής της απόχρωσης. Εύκολα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η μέση τιμή του χρώματος στην περιοχή υπό σκιά είναι υψηλότερη από αυτή της περιοχής που δεν σκιάζεται. Αυτή η διαπίστωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αφαιρέσει τις σκιές με την κατάλληλη τροποποίηση του αποδεκτού εύρους τιμών των αποχρώσεων των χρωμάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι λειτουργεί καλά.

Με την εφαρμογή της τεχνικής αυτής η αρχική εικόνα μετατρέπεται σε δυαδική οπότε και λαμβάνουμε την εικόνα που φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 5).

Εικόνα 5: Εικόνα μετά την εφαρμογή του threshold

3.6 Επιλογή περιοχής ανίχνευσης (οδικής περιοχής) και αφαίρεση ανεπιθύμητων μερών της εικόνας

Αν και η τμηματοποίηση (segmentation) της εικόνας με βάση το χρώμα είναι πολύ καλή, μερικά εικονοκύτταρα που δεν μας χρησιμεύουν και δεν αποτελούν μέρος λωρίδων κυκλοφορίας παραμένουν ακόμα στην εικόνα. Ο στόχος αυτού του βήματος είναι να αποβληθούν όσα περισσότερα γίνεται από τα άσχετα εικονοκύτταρα εικόνας.

Καταρχήν μπορούμε να αφαιρέσουμε όλα τα σχετικά μικρά αντικείμενα[1] από την εικόνα (θέτοντας ένα κατώτατο όριο στο σύνολο των εικονοκυττάρων που αποτελούν κάθε αντικείμενο).

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στην εικόνα του δρόμου το περισσότερο μέρος στο χαμηλότερο μέρος της εικόνας θεωρείται ως οδική

[1] με τον όρο αντικείμενο εννοούμε μια ομάδα γειτνιαζόντων εικονοκυττάρων με ίδια τιμή (0 ή 1).

περιοχή και οι λωρίδες κυκλοφορίας είναι σχετικά κεντρικά στο όλο πλάνο. Επομένως μπορούμε να αφαιρέσουμε από το δεδομένο πλάνο που επεξεργαζόμαστε όσα αντικείμενα ακουμπάνε στα άκρα του και είναι φωτεινότερα (εικονοκύτταρα με τιμή 1) από αυτά που τα περιτρυγιρίζουν. Με την εφαρμογή αυτών των μέτρων παίρνουμε μια εικόνα που μοιάζει στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 6).

Εικόνα 6: Εικόνα μετά την αφαίρεση του μεγαλύτερου μέρους του θορύβου

Όμως ακόμα και τώρα παραμένουν μερικά εικονοκύτταρα στο πάνω μέρος της εικόνας. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος στο χαμηλότερο μέρος της εικόνας μπορεί να θεωρηθεί ως οδική περιοχή, μπορούμε να αφαιρέσουμε από την όλη διαδικασία το πάνω κομμάτι της εικόνας ώστε αφενός μεν να απαλλαγούμε από ένα μέρος του θορύβου και αφετέρου να βελτιωθεί ο αλγόριθμος μας από άποψη ταχύτητας. Έτσι λοιπόν λαμβάνουμε την εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 7).

Εικόνα 7: Εικόνα μετά την προσδιορισμό της οδικής περιοχής

3.7 Ανίχνευση άκρων (Edge Detection)

Χρησιμοποιούμε ανιχνευτή άκρων για να εντοπίσουμε τη θέση των εικονοκυττάρων όπου υπάρχουν σημαντικά όρια αντικειμένων. Συγκεκριμένα για να λάβουμε την εικόνα των άκρων εφαρμόζουμε το φίλτρο Canny.

Ο ανιχνευτής άκρων Canny (Canny, 1986) είναι ίσως η δημοφιλέστερη τεχνική ανίχνευσης ακρών αυτή τη στιγμή και μπορεί να ικανοποιήσει ικανοποιητικά τις πιο κάτω τρεις κύριες απαιτήσεις:

1. βέλτιστη ανίχνευση χωρίς πλαστές αποκρίσεις
2. καλός εντοπισμός με ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ της ανιχνευμένης και της αληθινής θέση των ακρών.
3. ενιαία απόκριση για να εξαληφθούν οι πολλαπλές αποκρίσεις από μια ταυτόσημη άκρη.

Η πρώτη απαίτηση στοχεύει στο να μειώσει την απόκριση στο θόρυβο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη τεχνική της βέλτιστης λείανσης. Ο Canny ήταν ο πρώτος που έδειξε ότι το γκαουσσιανό φιλτράρισμα είναι βέλτιστο για την ανίχνευση άκρων. Η δεύτερη απαίτηση στοχεύει στην ακρίβεια: οι άκρες πρέπει να ανιχνευθούν στη σωστή θέση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη διαδικασία της μη-μέγιστης καταστολής, που είναι ισοδύναμη με την ανίχνευση των ακροτάτων (peaks). Η μη-μέγιστη καταστολή διατηρεί μόνο εκείνα τα σημεία στην κορυφή των στοιχείων των άκρων, ενώ ταυτόχρονα καταστέλλει όλα τα άλλα. Αυτό οδηγεί στην εκλέπτυνση (thinning): η παραγωγή της μη-μέγιστης καταστολής είναι λεπτές γραμμές αποτελούμενες από τα σημεία των άκρων, στη σωστή θέση. Η τρίτη απαίτηση αφορά τη θέση ενός ενιαίου σημείου άκρων σε αντίδραση σε μια αλλαγή στη φωτεινότητα. Αυτό είναι επειδή περισσότερες από μια άκρες μπορούν να δειχτούν για να είναι παρούσες, σύμφωνα με την απόκριση που λαμβάνεται από τους προηγούμενους τελεστές ακρών.

Η βασική ιδέα του ανιχνευτή ακρών Canny είναι η χρήση του γκαουσσιανού κατευθυντικού τελεστή. Αν είναι:

$$g(c,r) = e^{-\frac{c^2+r^2}{2\sigma^2}}$$

μια δισδιάστατη γκαουσσιανή συνάρτηση. Ο κατευθυντικός μαθηματικός τελεστής του είναι:

$$g_n(c,r) = \frac{\partial g(c,r)}{\partial n} = n \cdot \nabla g(c,r),$$

όπου n είναι το κατευθυντικό διάνυσμα προσανατολισμένο κανονικά στην κατεύθυνση μιας άκρης που ανιχνεύεται και μπορεί να υπολογιστεί με τη σχέση:

$$n = \frac{\nabla g(c,r) * f(c,r)}{\left|\nabla g(c,r) * f(c,r)\right|} \qquad (1)$$

όπου το σύμβολο "*" υποδηλώνει το μαθηματικό τελεστή συνελίξεων. Ένα σημείο άκρου καθορίζεται ως ένα τοπικό μέγιστο του μαθηματικού τελεστή g_n που εφαρμόζεται στην εικόνα f(c,r). Δηλαδή

$$\frac{\partial}{\partial n}[g_n(c,r) * f(c,r)] = 0 \qquad (2)$$

ή

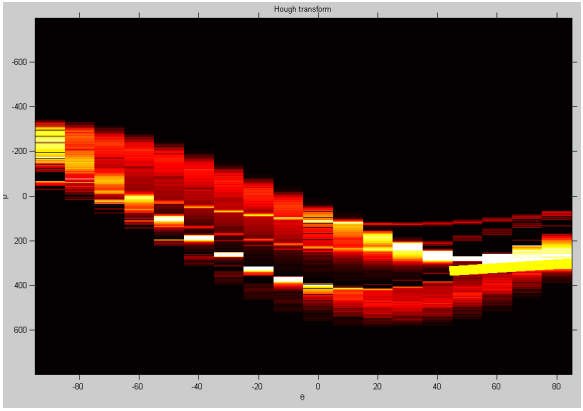
$$\frac{\partial^2}{\partial n^2}[g(c,r) * f(c,r)] = 0 \qquad (3)$$

Στην Εικόνα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξάγονται με τη εφαρμογή του φίλτρου ανίχνευσης άκρων στην εικόνα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 7. Δεδομένου ότι ο δρόμος είναι μακριά και ομαλή καμπύλη, η ακρίβεια της ανίχνευσης των άκρων στην εικόνα είναι αρκετά καλή ακόμα και όταν υπάρχουν μερικά εικονοκύτταρα που αποτελούν θόρυβο.

Εικόνα 8: Εισαγωγή φίλτρου Canny

3.8 Ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση του μετασχηματισμού Hough (Hough Transform, HT)

Μια αντιπροσωπευτική μέθοδος ανίχνευσης ευθειών είναι ο μετασχηματισμός Hough. Η βασική ιδέα είναι να μετατραπεί ένα πρόβλημα ανίχνευσης γραμμών σε ένα απλό πρόβλημα ανίχνευσης μεγίστων στο διάστημα των παραμέτρων της γραμμής. Αν και μπορούν να υπάρξουν καμπύλες στην γεωμετρία του δρόμου, η ευθεία είναι μια αρκετά καλή προσέγγιση των λωρίδων, μέσα στα λογικά όρια για την ασφάλεια των οχημάτων επειδή η καμπύλη είναι συνήθως μακριά και ομαλή. Ο μετασχηματισμός Hough αναλύεται πλήρως στο πέμπτο κεφάλαιο. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζονται οι λωρίδες κυκλοφορίας όπως ανιχνεύονται χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Hough.



Σχήμα 9: Μετασχηματισμος Hough

Εικόνα 10: Αναγνώριση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση του μετασχηματισμού Hough

3.9 Εναλλακτικές μέθοδοι ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας

Πιο κάτω παρουσιάζονται συνοπτικά δύο εναλλακτικές μέθοδοι για τον εντοπισμό των λωρίδων κυκλοφορίας.

3.9.1 Ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση του μετασχηματισμού Radon (Radon Transform)

Μια εναλλακτική προσέγγιση του προβλήματος αναγνώρισης λωρίδων κυκλοφορίας είναι διαμέσου του μετασχηματισμού Radon ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση του μετασχηματισμού Hough. Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά στον μετασχηματισμό αυτό.

Μετασχηματισμός Radon

Ο μετασχηματισμός Radon μιας συνάρτησης f(x,y) ορίζεται ως το ολοκλήρωμα κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής που καθορίζεται από την απόστασή της ρ από την προέλευση και τη γωνία κλίση της θ. Η ομοιότητα του ορισμού αυτού με αυτόν του μετασχηματισμού Hough είναι εμφανές.

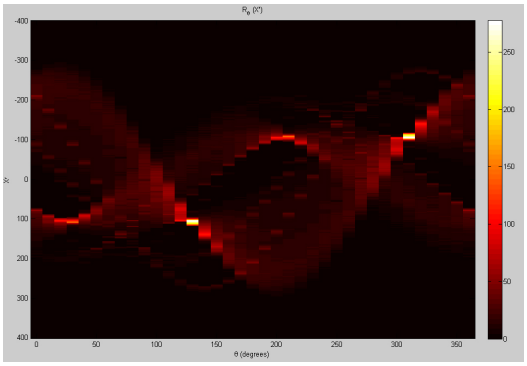
$$r(\rho,\theta) = \int_{z}\int_{y} f(x,y)\delta(xcos\theta + y\sin\theta - \rho)dxdy$$

Όπου δ(*) είναι η συνάρτηση δέλτα.

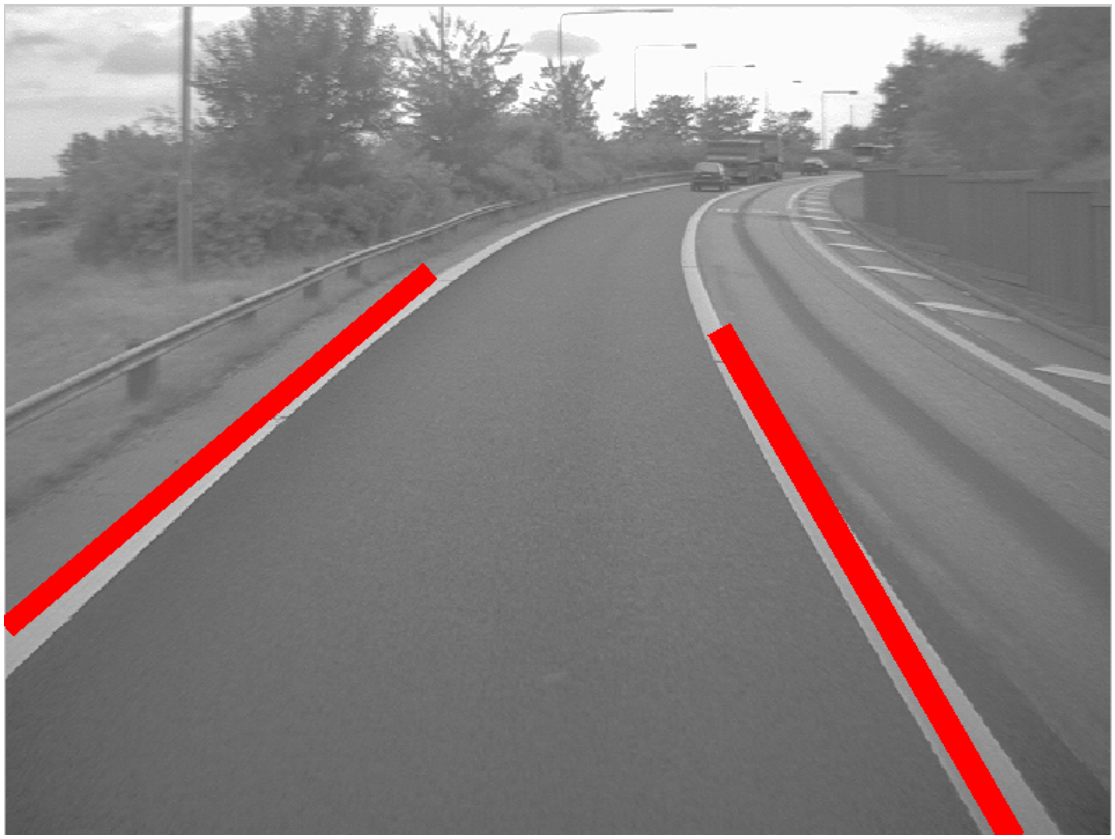
Η συνάρτηση δέλτα ορίζει την ολοκλήρωση μόνο κατά μήκος της ευθείας. Το εύρος του θ περιορίζεται μεταξύ 0 ≤ θ ≤ π. Όπως και στο μετασχηματισμό Hough, ο μαθηματικός τελεστής Radon αντιστοιχίζει τη χωρική περιοχή (*x*,*y*) στην περιοχή προβολής (ρ,θ), στην οποία κάθε σημείο αντιστοιχεί σε μια ευθεία γραμμή στη περιοχή του χώρου. Αντιθέτως, κάθε σημείο στη περιοχή του χώρου αντιστοιχεί σε μια ημιτονική καμπύλη στην περιοχή προβολής, ως εκ τούτου η χρήση του όρου «συνημιτονογράφημα» (sinogram). Ο μετασχηματισμός Hough μπορεί να θεωρηθεί ως η διακριτή μορφή του μετασχηματισμού Radon.

Ένα παραστατικό πλάνο που δείχνει πως αναγνωρίζονται οι λωρίδες κυκλοφορίας μέσω του μετασχηματισμού Radon είναι αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 12.

Όπως παρατηρούμε, η χρήση του μετασχηματισμού Radon αναγνωρίζει επίσης αρκετά καλά τις λωρίδες κυκλοφορίας ενώ η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται είναι παραπλήσια με αυτήν της χρήσης του μετασχηματισμού Hough.



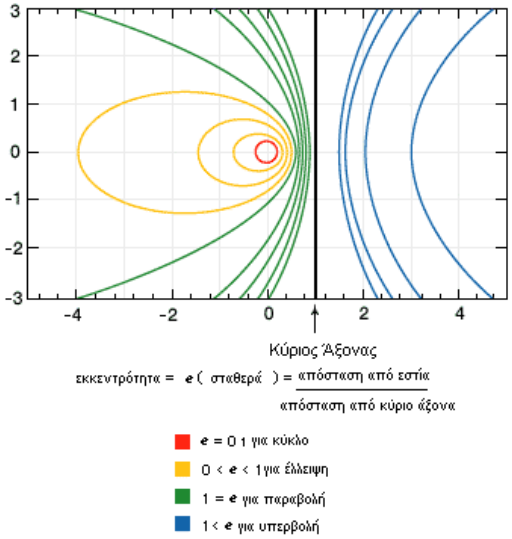
Σχήμα 11: Μετασχηματισμός Radon



Εικόνα 12: Αναγνώριση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση του μετασχηματισμού Radon

3.9.2 Ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση της εκκεντρότητας (eccentricity)

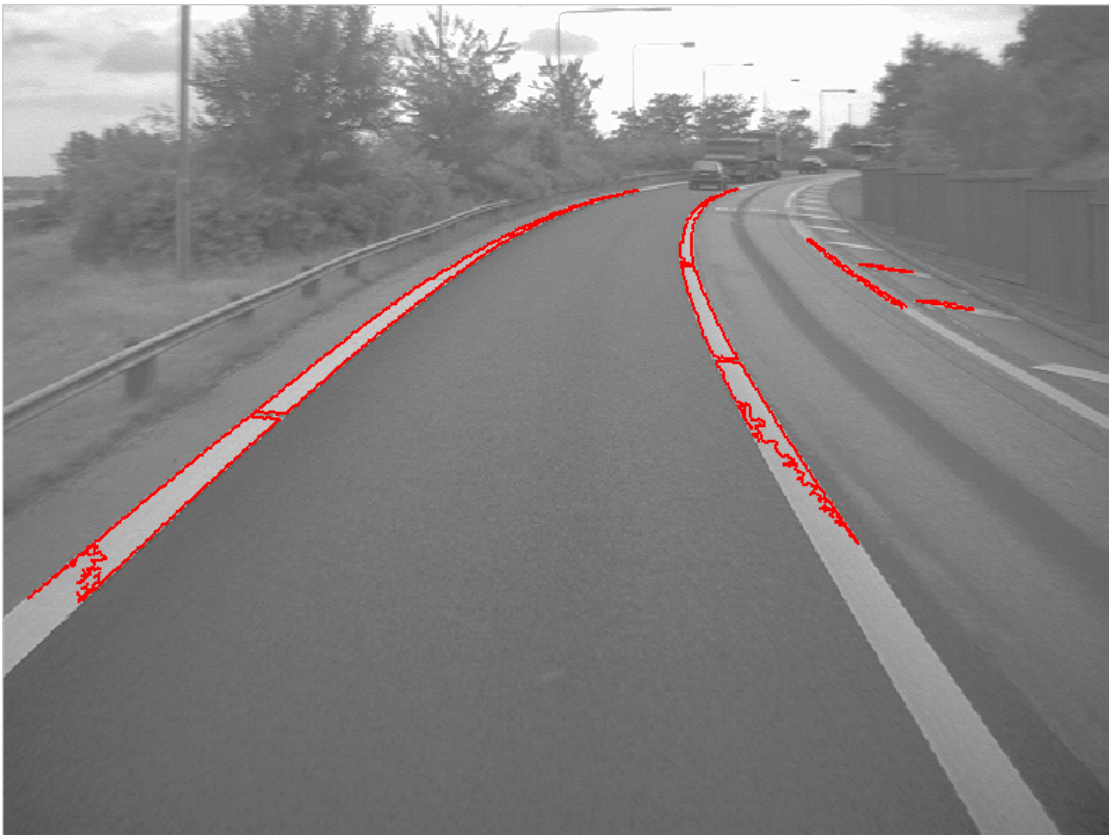
Μια εναλλακτική μέθοδος ανίχνευσης των λωρίδων κυκλοφορίας είναι μέσω της εκκεντρότητας. Αυτή μπορεί να αντικαταστήσει τα δύο τελευταία στάδια της μεθόδου που επεξηγήθηκε πριν με χρήση του μετασχηματισμού Hough (από το σημείο δηλαδή που γίνεται η ανίχνευση άκρων). Καταρχήν βρίσκουμε τα σύνορα όλων των αντικειμένων που υπάρχουν στην Εικόνα 7. Κατόπιν υπολογίζουμε την εκκεντρότητα κάθε αντικειμένου, το οποίο είναι η αναλογία της απόστασης μεταξύ της εστίας μιας έλλειψης και του κύριου άξονα της. Θεωρούμε ότι τα αντικείμενα με εκκεντρότητα 1 είναι τμήματα γραμμών.



Σχήμα 13: Ενδεικτικές τιμές εκκεντρότητας για κωνικές τομές

Επειδή μπορούν να υπάρξουν καμπύλες στην γεωμετρία του δρόμου θα θέσουμε για την εκκεντρότητα ένα απόδεκτό διάστημα εκτός του οποίου θα απορρίπτονται τα αντικειμένα στα οποία αντιστοιχεί η δεδομένη τιμή της εκκεντρότητας. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής της μεθόδου αυτής φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 14).

Παρά την λιγότερη υπολογιστική ισχύ που απαιτεί η χρήση της μεθόδου αυτής σε σχέση με την προηγούμενη, εντούτοις βρίσκει πολύ λιγότερες εφαρμογές στην μετέπειτα χρήση της για ενίσχυση των συστημάτων αποφυγής και ικανότητας επιβίωσης συντριβής των ευφυών οχημάτων σε σχέση με τις εφαρμογές που υποστηρίζει η χρήση του μετασχηματισμού Hough.



Εικόνα 14: Αναγνώριση λωρίδων κυκλοφορίας με χρήση εκκεντρότητας

3.10 Εντοπισμός λωρίδων κυκλοφορίας

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ της αναγνώρισης και της ανίχνευσης των λωρίδων κυκλοφορίας. Η ανίχνευση των λωρίδων κυκλοφορίας περιλαμβάνει τον καθορισμό της θέσης των λωρίδων σε μια εικόνα χωρίς προγενέστερη γνώση σχετικά με τη θέση τους. Η αναγνώριση λωρίδων κυκλοφορίας περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της θέσης των λωρίδων κυκλοφορίας σε μια ακολουθία διαδοχικών εικόνων, χρησιμοποιώντας πληροφορίες για τη θέση των λωρίδων στις προηγούμενες εικόνες της ακολουθίας για να περιορίσει την πιθανή ανίχνευση λωρίδων στην τρέχουσα εικόνα. Μερικά συστήματα χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγορίθμους για την αναγνώριση και την ανίχνευση των λωρίδων κυκλοφορίας.

Το σύστημα VaMoRs, παραδείγματος χάριν, χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο που περιγράφεται στο [8] για να εκτελέσει την αρχική ανίχνευση

του δρόμου, και έπειτα χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ο οποίος περιγράφεται στο [9] για να εκτελέσει την ανίχνευση της θέσεως των λωρίδων κυκλοφορίας από πλάνο σε πλάνο (frame to frame). Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται σε αυτό το πρόγραμμα είναι να χρησιμοποιηθεί η ίδια βασική επεξεργασία εικόνας για την ανίχνευση και την αναγνώριση λωρίδων.

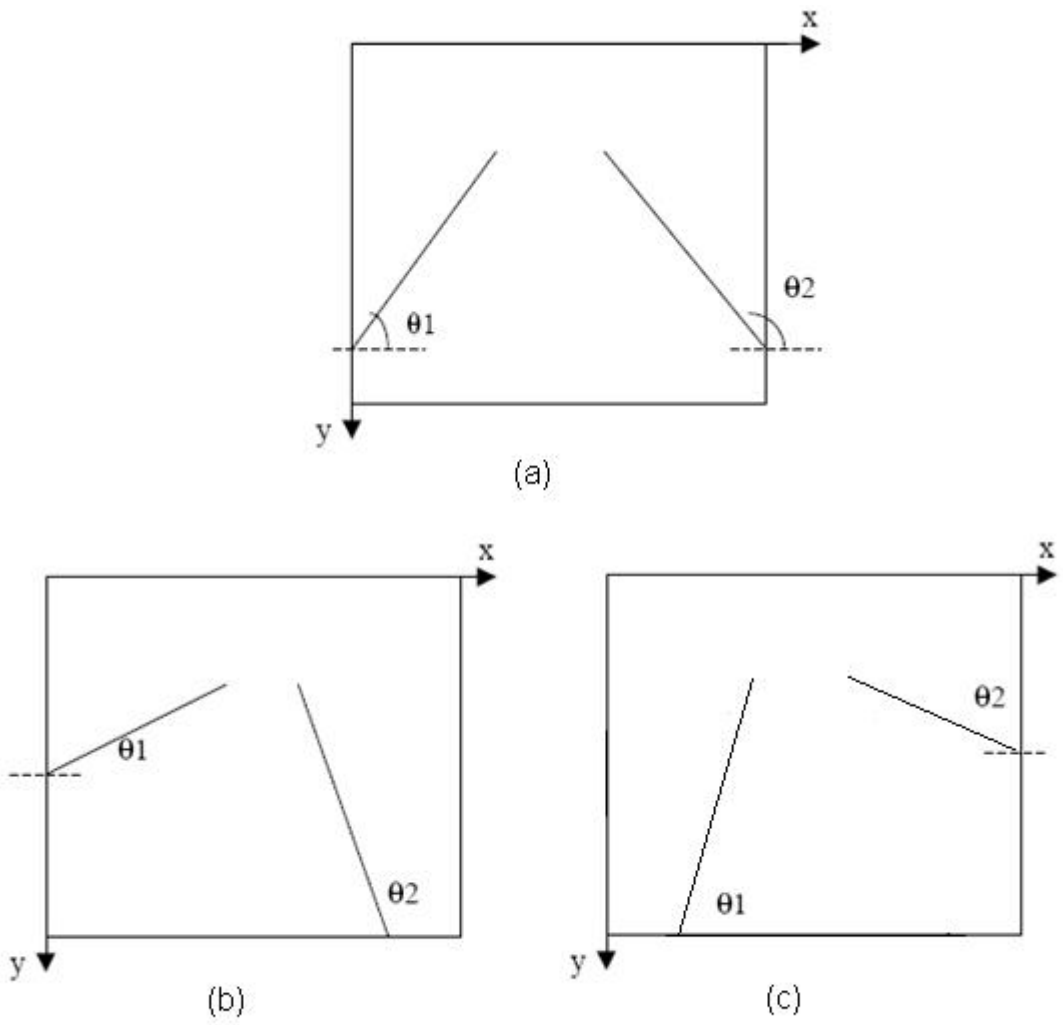
Δεδομένου ότι μπορούμε να λάβουμε μέχρι 15 πλάνα εικόνας ανά δευτερόλεπτο, η διαφορά μεταξύ των εικόνων στην ακολουθία θα είναι πολύ μικρή. Λόγω αυτού θα μπορούσαμε να μην επεξεργαζόμαστε κάθε εικόνα για την αναγνώριση των λωρίδων, διότι από την προηγούμενη θέση των λωρίδων, μπορούμε να έχουμε μια πολύ καλή εκτίμηση της θέσης των λωρίδων και στο τρέχον πλαίσιο. Επομένως, στο μετασχηματισμό Hough, η γωνία θ□ μπορεί να περιοριστεί σε ένα εύρος τιμών ανάλογα με την εκτίμηση του από τα προηγούμενα πλαίσια. Αυτό θα βελτιώσει την ταχύτητα υπολογισμού και την ακρίβεια της ανίχνευσης. Σε κάθε δευτερόλεπτο, τα πρώτα πλαίσια εικόνας θα υποβληθούν σε επεξεργασία από τον αλγόριθμο ανίχνευσης λωρίδων, και θα παράσχουν μια καλή εκτίμηση της θέσης των λωρίδων για τα επόμενα πλαίσια. Οι υπολοίπες εικόνες σε αυτό το δευτερόλεπτο θα υποβληθούν σε επεξεργασία από τον αλγόριθμο ανίχνευσης λωρίδων όπως περιγράφονται ανωτέρω.

3.11 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΛΩΡΙΔΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

3.11.1 Προειδοποίηση αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας

Η κάμερα είναι τοποθετημένη κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του οχήματος. Εάν το υπαγόμενο όχημα είναι μέσα στις λωρίδες, η εικόνα που λαμβάνεται από τη κάμερα θα μοιάζει με την Εικόνα 4. Από το μετασχηματισμό Hough, υπολογίζονται οι γωνίες (θ_1, θ_2) μεταξύ των ανιχνευμένων λωρίδων και του άξονα Χ. Η αναχώρηση από τις λωρίδες

κυκλοφορίας μπορεί να υπολογιστεί κάνοντας χρήση των γωνίων αυτών. Εάν το όχημα οδηγείται κανονικά, εντός δηλαδή των λωρίδων, η απόλυτη τιμή του $[(\theta_1 + \theta_2) - 180]$ θα είναι μέσα σε ένα ορισμένο κατώτατο όριο. Στην περίπτωση όμως που η απόλυτη τιμή $[(\theta_1 + \theta_2) - 180]$ είναι εκτός του κατώτατου ορίου, τότε θα συμβεί αναχώρηση από τις λωρίδες κυκλοφορίας ή έχει συμβεί αλλαγή στις λωρίδες κυκλοφορίας. Αυτό γίνεται περισσότερο κατανοητό στο Σχήμα 15: .



Σχήμα 15: Προειδοποίηση αναχώρησης από τις λωρίδες κυκλοφορίας
(a) Κανονικό Οδήγημα, abs($(\theta_1+\theta_2)$ -180) ≤ threshold
(b) Αλλαγή λωρίδων κυκλοφορίας ή αναχώρηση από τις λωρίδες κυκλοφορίας από τα αριστερά, $(\theta_1+\theta_2)$ -180 < -threshold
(c) Αλλαγή λωρίδων κυκλοφορίας ή αναχώρηση από τις λωρίδες κυκλοφορίας από τα δεξιά, $(\theta_1+\theta_2)$ -180 > threshold

3.11.2 Λήψη των μετρικών πληροφοριών

Υποθέτουμε ότι το όχημα κινείται στο επίγειο πλάνο. Προκειμένου να εξαχθούν μετρικές πληροφορίες, πρέπει να εκτελεσθεί κάποιο είδος βαθμονόμησης της κάμερας (Camera Calibration).

Βαθμονόμηση της κάμερας είναι αυτή ακριβώς η διαδικασία όπου η εικόνα του οχήματος στο δρόμο, η εικόνα της κάμερας δηλαδή, αντιστοιχίζεται μέσω ενός ειδικού πίνακα (calibration matrix) και μιας διαδικασίας με τη θέση του στο χώρο, στην περίπτωσή μας στην ως προς τους άξονες x,y,z. Η διαδικασία αυτή έχοντας ως είσοδο τις συντεταγμένες ενός εικονοκυττάρου (i, j) δίνει ως αποτέλεσμα τις συντεταγμένες (x,y,z) του σημείου στο επίπεδο του δρόμου.

Ένας παράγοντας που παρεμποδίζει την λήψη σωστών αποτελεσμάτων από την διαδικασία αυτή καλείται ακτινωτή παραμόρφωση (radial distortion). Ακολουθεί σύντομη περιγραφή του όρου αυτού.

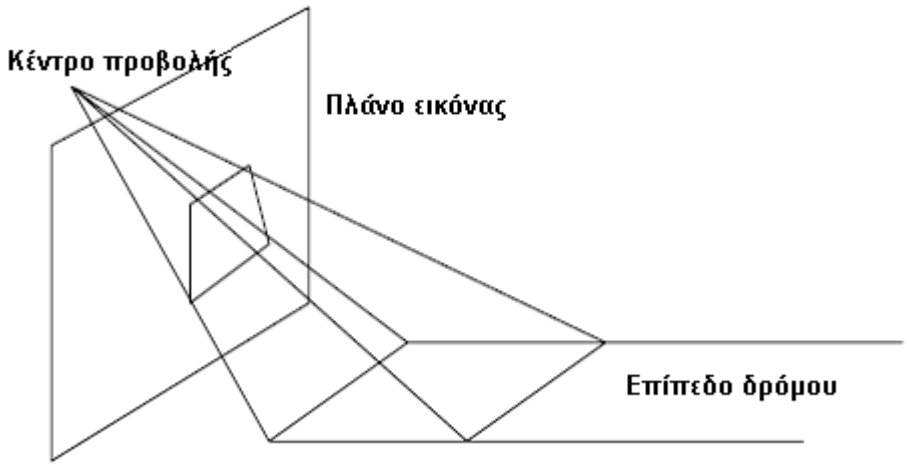
Ακτινωτή παραμόρφωση (Radial Distortion)

Τα οπτικά συστήματα πάσχουν από διάφορες αναπόφευκτες γεωμετρικές παραμορφώσεις. Στα οπτικά συστήματα φτιαγμένα από σφαιρικές επιφάνειες, και με τα κέντρα τους κατά μήκος του οπτικού άξονα, εμφανίζεται μια γεωμετρική παραμόρφωση στην ακτινωτή κατεύθυνση. Ένα σημείο απεικονίζεται σε απόσταση από το σημείο αρχής μεγαλύτερη (pin-cushion διαστρέβλωση) ή μικρότερη (διαστρέβλωση βαρελιών) από την προβλεφθέν από τις εξισώσεις προβολής προοπτικής. Η μετατόπιση αυτή αυξάνεται με την απόσταση από το κέντρο και είναι μικρή για τις κατευθύνσεις που είναι κοντά στον παράλληλο στον οπτικό άξονα και αυξάνεται με μορφή δυναμοσειράς της γωνίας. Η παραμόρφωση τείνει να είναι περισσότερο εμφανής στους ευρυγώνιους φακούς παρά στους τηλεφωτογραφικούς φακούς. Η μετατόπιση λόγω της ακτινωτής παραμόρφωσης μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις:

$$\delta x = x \cdot (\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \ldots)$$
$$\delta y = y \cdot (\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \ldots)$$

όπου το χ και το y μετριούνται από το κέντρο της διαστρέβλωσης, το οποίο υποθέτουμε ότι είναι στο σημείο της αρχής. Εμφανίζονται μόνο ζυγές δυνάμεις της απόστασης r από το σημείο αρχής και συνήθως θεωρούμε μόνο τον πρώτο όρο της δυναμοσειράς.

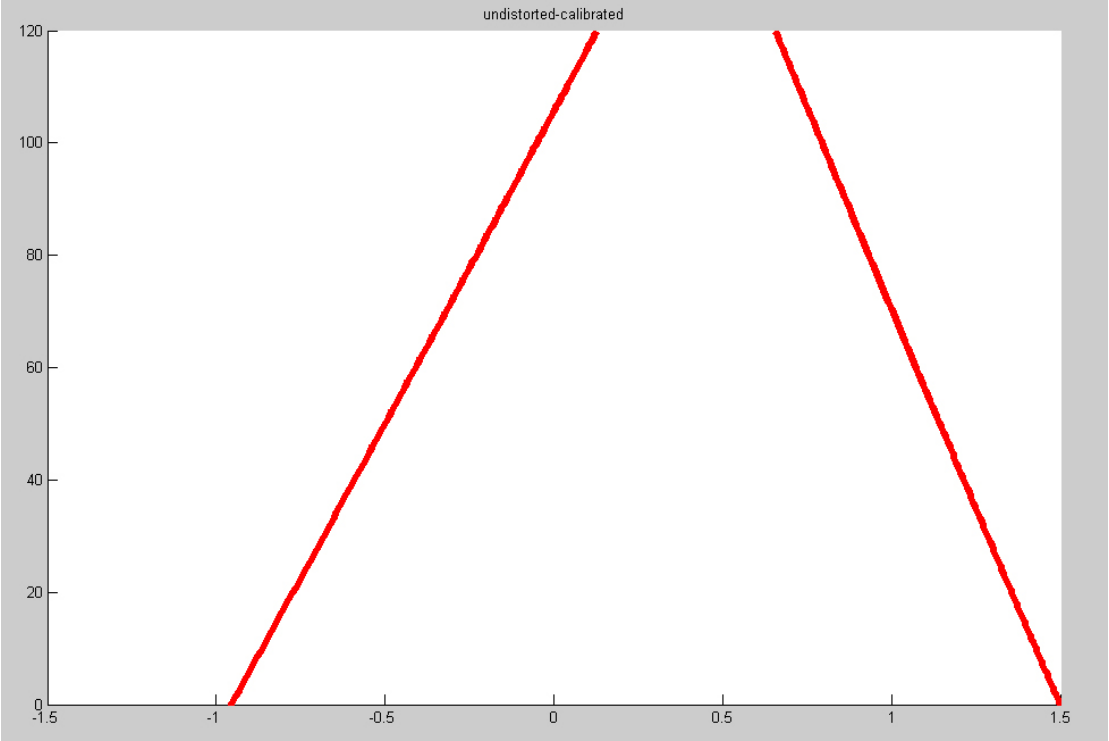
Η διαδικασία βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε αντίστροφα στα πλαίσια του αλγορίθμου, δηλαδή έγινε η μετατροπή από τις συντεταγμένες των εικονοκυττάρων της κάμερας σε συντεταγμένες χώρου (στο επίπεδο του δρόμου).



Σχήμα 16: Αντιστοίχηση τρισδιάστατου χώρου με δισδιάστατη εικόνα κάμερας

Μέσω του πίνακα βαθμονόμησης όχι μόνο μπορούμε να υπολογίζουμε για κάθε χρονική στιγμή την θέση των λωρίδων κυκλοφορίας ως προς το όχημα αλλά εξάγουμε και άλλα αποτέλεσματα χρήσιμα για την ασφάλεια του οχήματος και την αποφυγή συγκρούσεων. Γνωρίζοντας για παράδειγμα τις συντεταγμένες του προπορευομένου οχήματος μέσω ενός συστήματος ανίχνευσης οχημάτων και με χρήση του πίνακα βαθμονόμησης της κάμερας λαμβάνουμε εύκολα τη σχετική απόσταση των δύο οχημάτων (υπαγόμενου και προπορευόμενου). Θεωρώντας την αλλαγή της σχετικής απόστασης κατά τη διάρκεια ενός πολύ σύντομου χρόνου, μπορούμε με καλή προσέγγιση να υπολογίσουμε και τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του υπαγόμενου οχήματος και του προπορευόμενου οχήματος. Στο σχήμα 17 παρουσιάζονται οι

ανιχνευμένες λωρίδες κυκλοφορίας αντιστοιχισμένες μέσω του πίνακα βαθμονόμησης με τη θέση τους στο χώρο.



Εικόνα 17: Λωρίδες κυκλοφορίας μετασχηματισμένες στον χώρο

Δυστυχώς τα αποτελέσματα της διαδικασίας εξαγωγής της μήτρας βαθμονόμησης της κάμερας είναι πολύ ευαίσθητα στην κατακόρυφη κλίση (pitch) και την πλευρική κλίση (roll) του οχήματος (και της κάμερας), καθώς και στη μη επίπεδη κλίση του δρόμου. Έχουμε λάθη μέτρησης τα οποία έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην ακρίβεια του μετασχηματισμού.

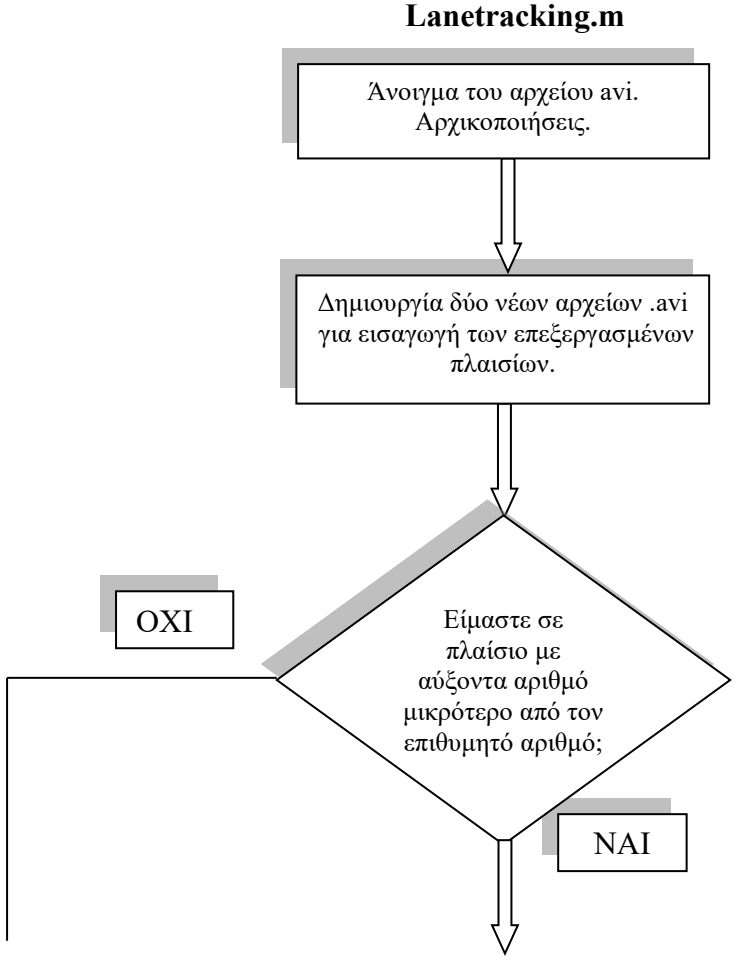
Μια λεπτομερής παρουσίαση της βαθμονόμησης της κάμερας παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4.

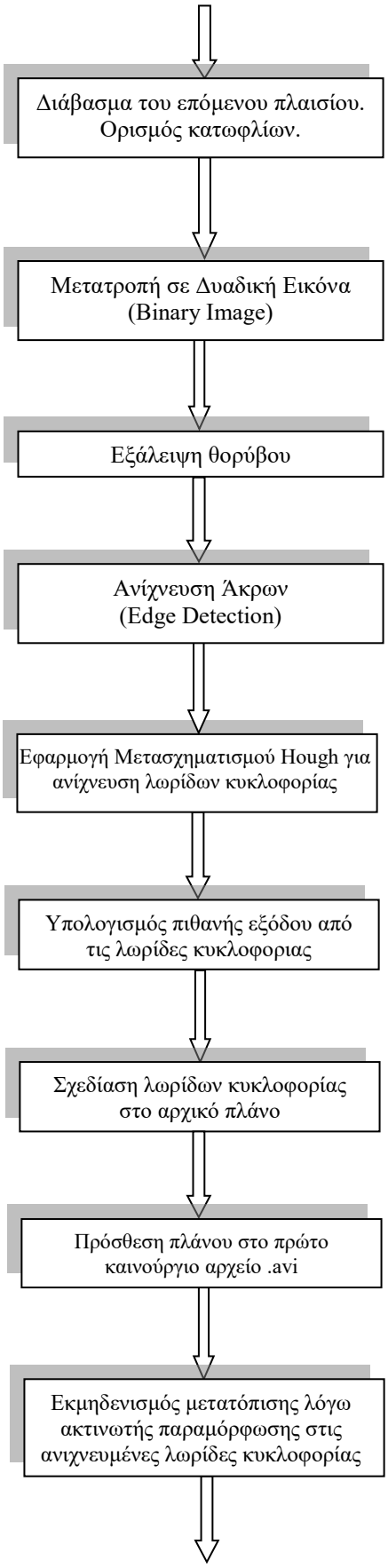
3.12 Παρουσίαση συναρτήσεων

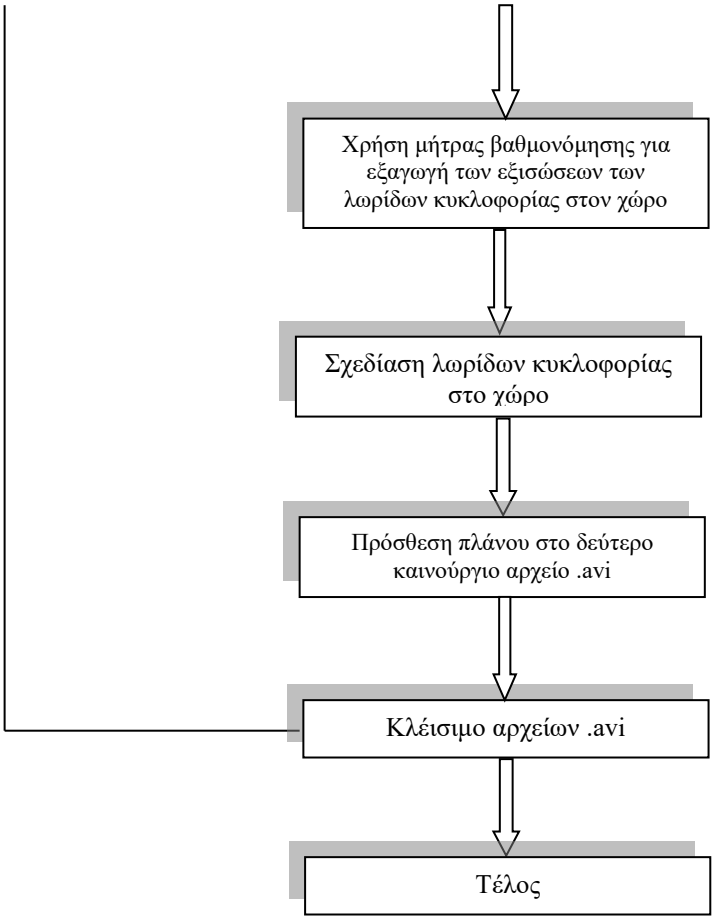
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συναρτήσεις που υλοποιήθηκαν για τη δοκιμή του παραπάνω αλγορίθμου. Για καθεμία δίνεται μία συνοπτική περιγραφή της λογικής πάνω στην οποία βασίστηκε και ένα μπλοκ διάγραμμα της ροής του αλγορίθμου, όπου αυτό χρειάζεται.

3.12.1 Συνάρτηση συνεχόμενης εκτέλεσης του αλγορίθμου επεξεργασίας εικόνας της κάμερας (lanetracking.m)

Πρόκειται για τη κύρια συνάρτηση η οποία μέσω των υποσυναρτήσεων που καλεί υλοποιεί τον αλγόριθμο εντοπισμού των λωρίδων κυκλοφορίας.




Διάβασμα του επόμενου πλαισίου. Ορισμός κατωφλίων.
Μετατροπή σε Δυαδική Εικόνα (Binary Image)
Εξάλειψη θορύβου
Ανίχνευση Άκρων (Edge Detection)
Εφαρμογή Μετασχηματισμού Hough για ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας
Υπολογισμός πιθανής εξόδου από τις λωρίδες κυκλοφοριας
Σχεδίαση λωρίδων κυκλοφορίας στο αρχικό πλάνο
Πρόσθεση πλάνου στο πρώτο καινούργιο αρχείο .avi
Εκμηδενισμός μετατόπισης λόγω ακτινωτής παραμόρφωσης στις ανιχνευμένες λωρίδες κυκλοφορίας

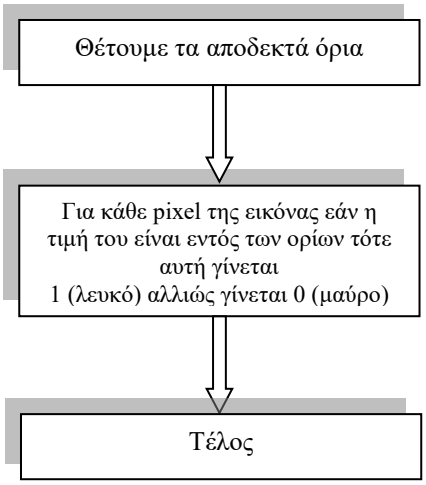


Σχήμα 18: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης συνεχούς εκτέλεσης του αλγορίθμου της κάμερας

3.12.2 Συνάρτηση μετατροπής σε δυαδική εικόνα (threshold.m)

Η συνάρτηση αυτή μετατρέπει το συγκεκριμένο πλάνο που επεξεργαζόμαστε σε δυαδικό (binary). Δίνει την τιμή 1 (λευκό) στα εικονοκύτταρα που έχουν τιμή εντός των ορίων που θέσαμε σαν αποδεκτά όρια και 0 (λευκό) σε όλα τα εικονοκύτταρα που έχουν τιμή εκτός των ίδιων ορίων. Το διάγραμμα ροής της είναι το παρακάτω:

Threshold.m



Σχήμα 19: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης μετατροπής σε δυαδική εικόνα (binary image)

3.12.3 Συνάρτηση Φιλτραρίσματος Θορύβου (noiseoff.m)

Η συνάρτηση αυτή απομακρύνει από το πλαίσιο προς επεξεργασία όλα τα ανεπιθύμητα εικονοκύτταρα τα οποία αποτελούν τον θόρυβο. Αποτελείται από τρία στάδια τα οποία είναι:

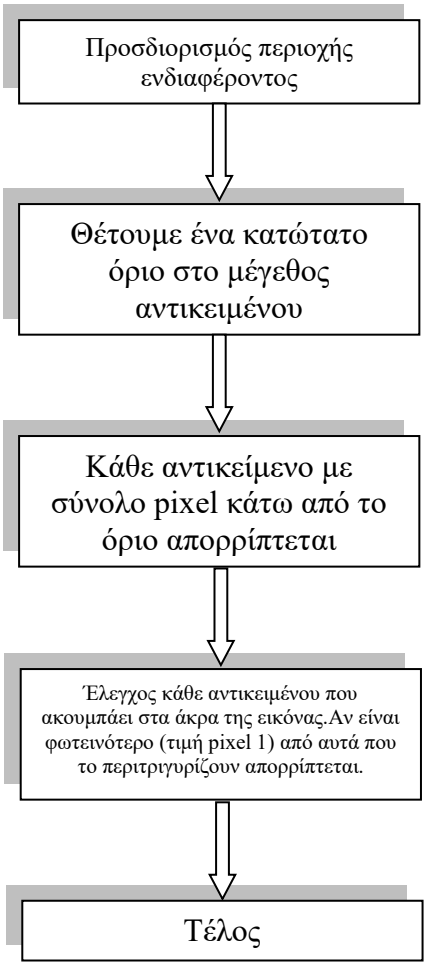
i. Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος.

ii. Φιλτράρισμα μικρών αντικειμένων.

iii. Φιλτράρισμα φωτεινών αντικειμένων στα άκρα της εικόνας.

Με τον όρο αντικείμενο εννοούμε μια ομάδα γειτνιαζόντων εικονοκυττάρων με ίδια τιμή (0 ή 1). Το διάγραμμα ροής της συνάρτησης φιλτραρίσματος του θορύβου φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 20).

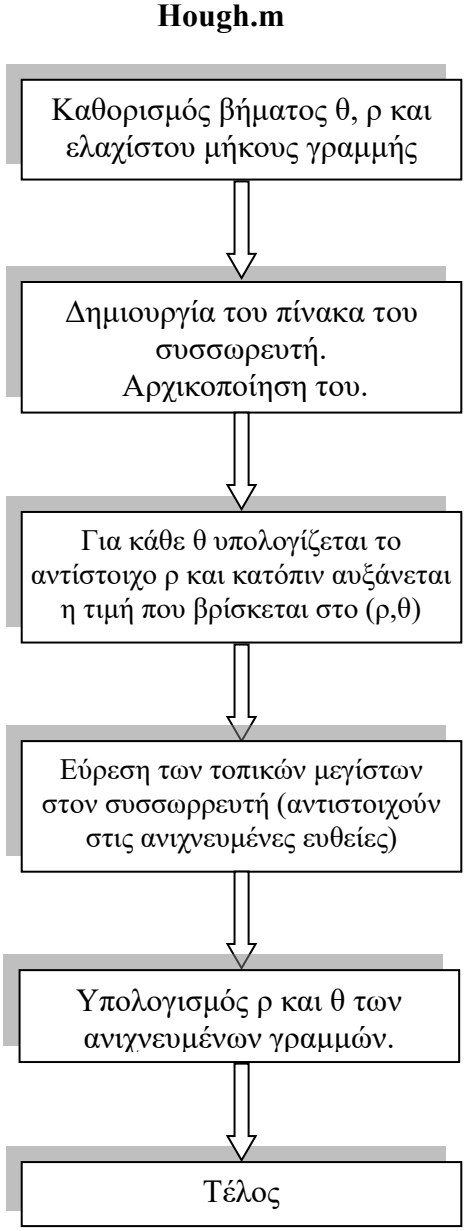
Noiseoff.m



Σχήμα 20: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης φιλτραρίσματος του θορύβου

3.12.4 Συνάρτηση υλοποίησης μετασχηματισμού Hough (hough.m)

Είναι η συνάρτηση η οποία υπολογίζει στο κάθε πλαίσιο που επεξεργαζόμαστε τα ρ και θ που αντιστοιχούν στις ευθείες οι οποίες αποτελούν τις λωρίδες κυκλοφορίας. Το διάγραμμα ροής της φαίνεται πιο κάτω.

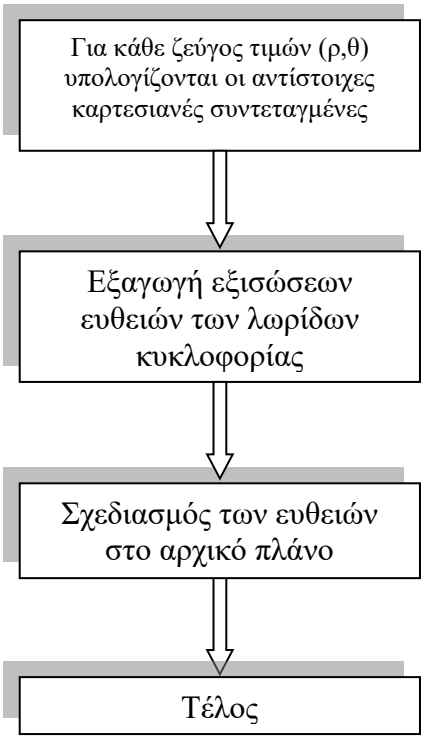


Σχήμα 21: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης υλοποίησης του μετασχηματισμού Hough

3.12.5 Συνάρτηση σχεδιασμού λωρίδων κυκλοφορίας (houghlines.m)

Πρόκειται για τη συνάρτηση η οποία για τις τιμές των θ, ρ που υπολογίστηκαν κατά την κλήση της συνάρτησης hough.m εξάγει τις εξισώσεις των ευθειών που αποτελούν τις λωρίδες κυκλοφορίας και κατόπιν τις σχεδιάζει στο αρχικό πλάνο.

Houghlines.m

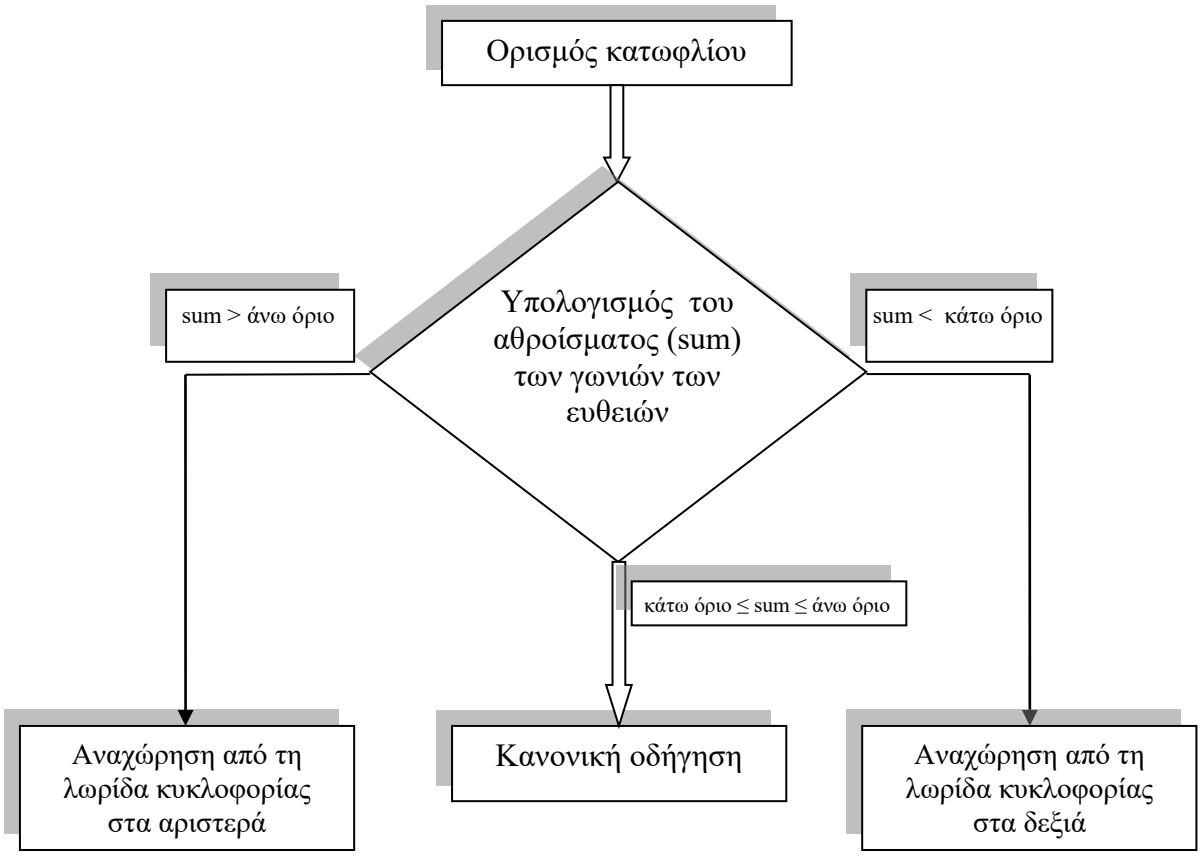


Σχήμα 22: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης σχεδιασμού των λωρίδων κυκλοφορίας

3.12.6 Συνάρτηση υπολογισμού πιθανής εξόδου από τις λωρίδες κυκλοφορίας (safetycheck.m)

Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει και προειδοποιεί με ηχητικό και οπτικό σήμα για πιθανή έξοδο (εκούσια ή ακούσια) από τις λωρίδες κυκλοφορίας. Το διάγραμμα ροής της φαίνεται στο σχήμα 23.

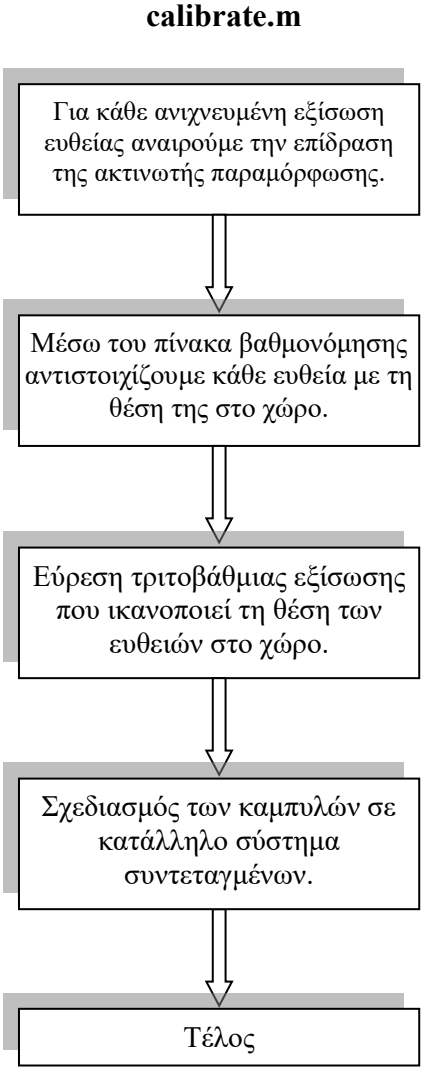
safetycheck.m



Σχήμα 23: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης υπολογισμού πιθανής εξόδου από τις λωρίδες κυκλοφορίας

3.12.7 Συνάρτηση εξάλειψης ακτινωτής παραμόρφωσης (Radial Distortion) και αντιστοίχισης με χωρικές συντεταγμένες. (calibrate.m)

Η συγκεκριμένη συνάρτηση εξαλείφει την επίδραση της ακτινωτής παραμόρφωσης (radial distortion) και κατόπιν κάνοντας χρήση της μήτρας βαθμονόμησης αντιστοιχίζει τις ανιχνευμένες λωρίδες με τη θέση τους στο χώρο. Τέλος τις σχεδιάζει σε κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 24: Μπλοκ διάγραμμα της συνάρτησης εξάλειψης ακτινωτής παραμόρφωσης (Radial Distortion) και αντιστοίχισης με χωρικές συντεταγμένες

3.13 Πειραματικά Αποτελέσματα

Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε ένα υπολογιστή Pentium IV 3.2GHz με χρήση Matlab έκδοσης R2006a. Ο αλγόριθμος λειτουργεί πολύ καλά στην δοκιμαστική ακολουθία εικόνων. Με την υπολογιστική ισχύ που διαθέτουμε η επεξεργασία ενός πλαισίου διαρκεί περίπου 1 δευτερόλεπτο.

3.14 Συμπεράσματα

Σε αυτό την μελέτη, παρουσιάσαμε έναν αλγόριθμο ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας βασισμένο σε ακολουθίες πλάνων που καταγράφηκαν από ένα όχημα που οδηγεί στην εθνική οδό. Η αναγνώριση και η ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο είναι ένα ουσιαστικό κομμάτι ενός ολοκληρωμένου συστήματος ανίχνευσης και αναγνώρισης αντικειμένων για την προειδοποίηση και την αποφυγή συντριβής. Στον αλγόριθμο ανίχνευσης λωρίδων, χρησιμοποιήθηκαν οι αποχρώσεις του χρώματος για να γίνει η κατάτμηση εικόνας και να αφαιρεθούν οι σκιές από τον δρόμο. Δεδομένου ότι οι λωρίδες είναι συνήθως μακριές και ομαλές καμπύλες, τις εξετάζουμε ως ευθείες γραμμές μέσα σε ένα λογικό πλαίσιο για την ασφάλεια των οχημάτων. Οι λωρίδες κυκλοφορίας ανιχνεύθηκαν χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Hough. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ανίχνευσης λωρίδων κυκλοφορίας μπορεί να εφαρμοστεί στους δρόμους με σωστή διαγράμμιση ανεξάρτητα αν ο δρόμος είναι ευθύς ή έχει καμπυλότητα.

Μέσω του μετασχηματισμού Hough όχι μόνο καθορίζουμε τη θέση των λωρίδων, αλλά και χρησιμοποιείται για να παρέχει προειδοποίηση αναχώρησης από τα όρια που σχηματίζουν οι περικλείουσες το όχημα λωρίδες. Αυτή η μέθοδος έχει δοκιμαστεί σε δεδομένα από video και τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν καταδείξει ένα γρήγορο, ισχυρό σύστημα για ανίχνευση λωρίδων κυκλοφορίας.

4 Βαθμονόμηση CCD κάμερας (Camera Calibration)

Στο σημείο αυτό θα εξετάσουμε τη διαμόρφωση της εικόνας και τη γεωμετρία των CCD φωτογραφικών καμερών για να καθορίσουμε λεπτομερώς πώς θα βαθμονομήσουμε τη CCD κάμερα που χρησιμοποιούμε ώστε να καθορίσουμε τη σχέση μεταξύ αυτού που εμφανίζεται στο πλάνο της εικόνας και της θέσης που βρίσκεται στον τρισδιάστατο κόσμο. Η μεθοδολογία που αναλύεται εδώ δεν είναι μοναδική καθώς υπάρχουν στην βιβλιογραφία πάρα πολλές μεθόδοι βαθμονόμησης.

Έστω ότι έχουμε ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων με κέντρο στο κέντρο της προβολής (οπτικό κέντρο) και της οποίας ο άξονας Z είναι κατά μήκος του οπτικού άξονα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 25. Αυτό το σύστημα συντεταγμένων είναι το τυπικό σύστημα συντεταγμένων της κάμερας. Ένα σημείο M σε ένα αντικείμενο με τις συντεταγμένες (X, Y, Z) θα απεικονίζεται σε κάποιο σημείο m = (x, y) στο πλάνο της εικόνας. Αυτές οι συντεταγμένες είναι σε σχέση με σύστημα συντεταγμένων του οποίου το κέντρο είναι στη διατομή του οπτικού άξονα και του πλάνου εικόνας, και των οποίων οι x και y άξονες είναι παράλληλοι με τους X και Y άξονες. Η σχέση μεταξύ των δύο συστημάτων συντεταγμένων (c, x, y) και (C, X, Y, Z) δίνεται από την :

$$x = \frac{Xf}{Z} \qquad \text{και} \qquad (1)$$

$$y = \frac{Yf}{Z}$$

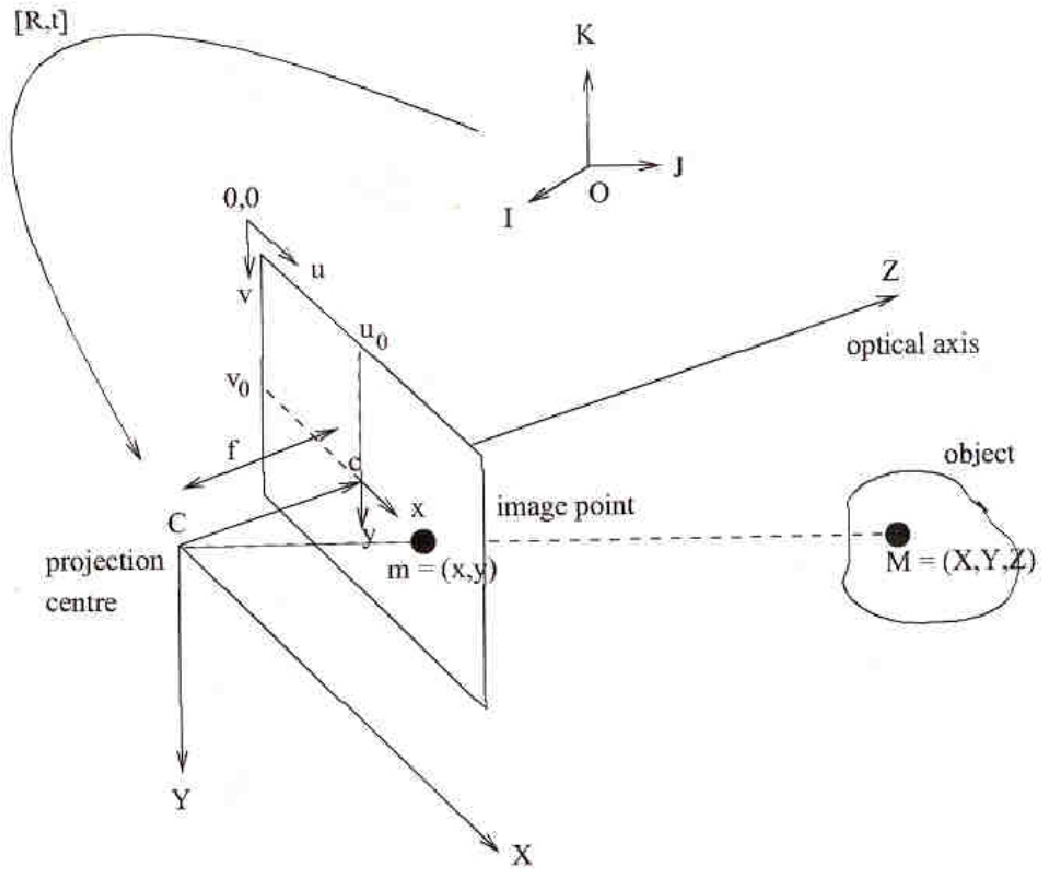
όπου f είναι το δραστικό εστιακό μήκος[2] της φωτογραφικής μηχανής και μετριέται συχνά σε μονάδες εικονοκυττάρου (μονάδες pixel).

[2] Δεν είναι το ίδιο με το εστιακό μήκος (π.χ., φακοί 9mm) που αναγράφεται στους φακούς της κάμερας.

Αυτό μπορεί να γραφτεί γραμμικά σε ομογενείς συντεταγμένες ως:

$$\begin{bmatrix} sx \\ sy \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

όπου $s \neq 0$ είναι ένας παράγοντας κλίμακας.



Σχήμα 25: Τα συστήματα συντεταγμένων που εμπλέκονται στην βαθμονόμηση της κάμερας.

Τώρα, οι πραγματικές συντεταγμένες του εικονοκυττάρου (u, υ) καθορίζονται με κέντρο στην αριστερή πάνω γωνία της εικόνας του πλάνου, και ικανοποιούν τις εξισώσεις:

$$u = u_0 + x \quad \text{και}$$
$$\upsilon = \upsilon_0 + y \qquad (2)$$

Μπορούμε να εκφράσουμε το μετασχηματισμό από τριδιαστατικές συντεταγμένες χώρου στις συντεταγμένες εικονοκυττάρου εικόνας χρησιμοποιώντας μια μήτρα 3X4. Αυτό γίνεται με την αντικατάσταση της εξίσωσης (1) στην εξίσωση (2) και τον πολλαπλασιασμό κατευθείαν με Z για να λάβουμε:

$$Zu = Zu_0 + Xf$$
$$Z\upsilon = Z\upsilon_0 + Yf \qquad (3)$$

Με άλλα λόγια:

$$\begin{bmatrix} su \\ s\upsilon \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f & \upsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

όπου ο παράγοντας κλίμακας s έχει την τιμή Z. Σε συντομία, το γράφουμε αυτό ως $\tilde{u} = K\tilde{X}$ όπου το $\tilde{u}$ αντιπροσωπεύει το ομογενές διάνυσμα των συντεταγμένων εικονοκυττάρου εικόνας, K είναι η μήτρα προοπτικής προβολής, και $\tilde{X}$ είναι το ομογενές διάνυσμα των παγκόσμιων συντεταγμένων. Κατά συνέπεια, μια φωτογραφική μηχανή μπορεί να θεωρηθεί ως σύστημα που εκτελεί έναν γραμμικό προβολικό μετασχηματισμό από το προβολικό διάστημα P^3 στο προβολικό πλάνο P^2.

Υπάρχουν τρεις παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις φωτογραφικές μηχανές, το εστιακό μήκος f, η παράμετρος u_O που είναι η u συντεταγμένη εικονοκυττάρου στο κύριο σημείο[3], και η παράμετρος u_O που είναι η u συντεταγμένη του εικονοκυττάρου στο κύριο σημείο. Μερικές παλαιού τύπου φωτογραφικές μηχανές CCD έχουν μη-τετραγωνικά εικονοκύτταρα. Αυτοί οι τύποι φωτογραφικών μηχανών μπορεί να έχουν λόγο διάστασης άνισο του 1

[3] Το κύριο σημείο είναι η εικόνα του οπτικού κέντρου της φωτογραφικής μηχανής

οπότε και θα προκαλούσαν διαφορετικούς παράγοντες κλίμακας s στους u και v άξονες (π.χ., μια σφαίρα θα εμφανιζόταν ως έλλειψη στην εικόνα). Για αυτούς τους τύπους φωτογραφικών μηχανών, θα χρειάζονταν δύο όροι, f_u και f_v, για να περιγράψουν το αποτελεσματικό εστιακό μήκος. Ο όρος f_u είναι το αποτελεσματικό εστιακό μήκος στις u μονάδες εικονοκυττάρου και f_v είναι το αποτελεσματικό εστιακό μήκος στις v μονάδες εικονοκυττάρου. Δεδομένου ότι όλες οι σύγχρονες φωτογραφικές μηχανές έχουν λόγο διάστασης μονάδα, μπορούμε ακίνδυνα να υποθέσουμε ότι $f_u = f_v = f$. Οι παράμετροι f , u_0 και v_0 δεν εξαρτώνται από τη θέση και τον προσανατολισμό της φωτογραφικής μηχανής στο διάστημα, και γι' αυτό καλούνται εγγενείς (intrinsic) παράμετροι.

Γενικά, οι 3D συντεταγμένες χώρου ενός σημείου δεν θα προσδιοριστούν σε ένα πλαίσιο (frame) του οποίου η αρχή είναι στο κέντρο της προβολής και του οποίου ο άξονας Z βρίσκεται κατά μήκος του οπτικού άξονα. Κάποιο άλλο, πιο κατάλληλο πλαίσιο, θα προσδιοριστεί, και έπειτα θα πρέπει να συμπεριλάβουμε μια αλλαγή των συντεταγμένων από αυτό το καινούριο πλαίσιο στο τυποποιημένο σύστημα συντεταγμενων. Κατά συνέπεια έχουμε:

$$\widetilde{u} = KT\widetilde{X},$$

όπου T είναι μια ομογενής μήτρα μετασχηματισμού διαστάσεων 4X4:

$$T = \begin{bmatrix} R & t \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix}$$

Η πάνω αριστερή γωνία 3X3 είναι μια μήτρα περιστροφής R και κωδικοποιεί τον προσανατολισμό της φωτογραφικής μηχανής σε σχέση με ένα δεδομένο παγκόσμιο πλαίσιο. Η στήλη nal είναι ένα ομογενές διάνυσμα t που απεικονίζει τη μετατόπιση της φωτογραφικής μηχανής από την αρχή του παγκόσμιου πλαισίου.

Η μήτρα T έχει έξι βαθμούς ελευθερίας, τρεις για τον προσανατολισμό, και τρεις για τη μετατόπιση (translation) της φωτογραφικής μηχανής. Αυτές οι

παράμετροι είναι γνωστές ως οι εξωγενείς (extrinsic) παράμετροι της φωτογραφικής μηχανής.

Η 3Χ4 μήτρα Κ της φωτογραφικής μηχανής και η 4Χ4 μήτρα μετασχηματισμού Τ συνδυάζονται για να διαμορφώσουν μια ενιαία μήτρα C διαστάσεων 3Χ4, αποκαλούμενη ως μήτρα βαθμονόμησης της κάμερας (camera calibration matrix). Μπορούμε να γράψουμε τη γενική μορφή της C ως συνάρτηση των εγγενών και εξωγενών παραμέτρων οπως φαίνεται στη σχέση 4:

$$C = \begin{bmatrix} fr_1^T + u_0 r_3^T & ft_x + u_0 t_z \\ fr_2^T + \upsilon_0 r_3^T & ft_y + \upsilon_0 t_z \\ r_3^T & t_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

όπου τα διανύσματαr r_1, r_2, και r_3 είναι τα διανύσματα σειρών της μήτρας R, και t = (t_X, t_Y, t_Z) . Η μήτρα C, όπως και η μήτρα Κ, είναι τρίτης τάξης.

- Ορθογραφική προβολή

Ας εξετάσουμε τη μετατόπιση (translation) του f κατά μήκος του άξονα Z του τυποποιημένου πλαισίου, έτσι ώστε η προέλευση και το κέντρο του πλάνου της εικόνας να συμπίπτουν, και το σημείο εστίασης να είναι τώρα Z = -f. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία περιστροφή που να εμπλέκεται σε αυτόν τον μετασχηματισμό, είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι η μήτρα βαθμολόγησης φωτογραφικών μηχανών είναι:

$$C = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & f \end{bmatrix}$$

όπου υποθέτουμε ότι το πλάτος και το ύψος του εικονοκυττάρου είναι και τα δύο μονάδα (1). Τώρα εφόσον η μήτρα C καθορίζεται μέχρι έναν παράγοντα κλίμακας, αυτό ισούται με:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

Εάν το f τείνει στο άπειρο, η μήτρα γίνεται:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Αυτή καθορίζει το μετασχηματισμό u = X και υ = Y και είναι γνωστό ως ορθογραφική προβολή παράλληλη στον άξονα Z. Εμφανίζεται ως το όριο της γενικής προοπτικής προβολής καθώς το εστιακό μήκος f γίνεται μεγάλο σε σχέση με την απόσταση Z της φωτογραφικής μηχανής από το αντικείμενο.

4.1 Επίλυση της μήτρας βαθμονόμησης (Calibration Matrix)

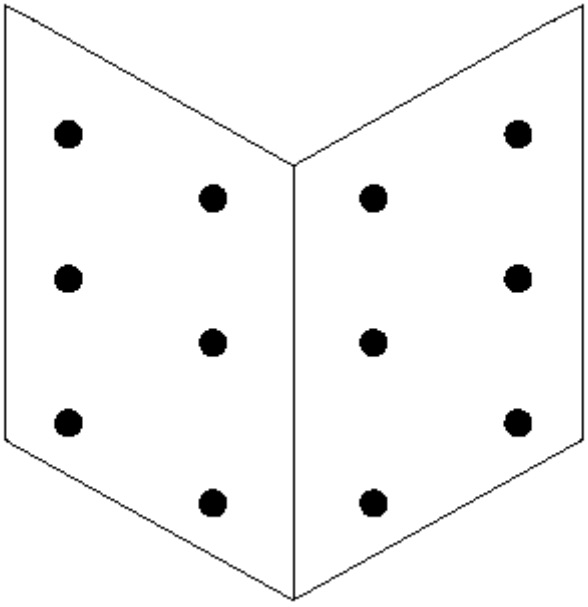
Βαθμονόμηση είναι η διαδικασία του υπολογισμού των εγγενών και εξωγενών παραμέτρων της φωτογραφικής μηχανής. Μπορεί να θεωρηθεί ως διαδικασία δύο σταδίων :

1. υπολογισμός της μήτρας C, και
2. υπολογισμός των εγγενών και εξωγενών παραμέτρων από τη C .

Σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα για τη στερεοσκοπική μηχανική όραση, το δεύτερο στάδιο δεν είναι απαραίτητο.

Τώρα, ας υποθέσουμε ότι μας δίνονται τα τρισδιάστατα ισότιμα διανύσματα $\mathbf{X_i = (X_i , Y_i , Z_i)}$ N σημείων αναφοράς καθώς επίσης και οι 2D συντεταγμένες (u_i , v_i) των εικόνων τους.

Γενικά, έχουμε τουλάχιστον 6 σημεία, κατά προτίμηση περισσότερα, τα οποία και επιλέγονται σε ένα ειδικό σχέδιο, όπως αυτό που παρουσιάζεται στην Σχήμα 26.



Σχήμα 26: Το σχέδιο των σημείων σε ένα πλαίσιο βαθμολόγησης.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να εξάγουμε τους συντελεστές της μήτρας C. Θα περιγράψουμε και τις γραμμικές και μη γραμμικές μεθόδους.

4.2 Γραμμικές μέθοδοι υπολογισμού της μήτρας C

4.2.1 1η Γραμμική Μέθοδος

Όπως εχει ήδη ειπωθεί, στις ομοιογενείς συντεταγμένες έχουμε μια γραμμική σχέση μεταξύ των σημείων στην εικόνα με συντεταγμένες (u_i , v_i) και του τρισδιάστατου σημείου αναφοράς (X_i , Y_i , Z_i) και δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} s_i u_i \\ s_i \upsilon_i \\ s_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11}\ q_{12}\ q_{13}\ q_{14} \\ q_{21}\ q_{22}\ q_{23}\ q_{24} \\ q_{31}\ q_{32}\ q_{33}\ q_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathrm{X}_i \\ \mathrm{Y}_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

ή, με συμπαγέστερη μορφή:

$$s_i \begin{bmatrix} u_i \\ \upsilon_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1^{\mathrm{T}}\ q_{14} \\ q_2^{\mathrm{T}}\ q_{24} \\ q_3^{\mathrm{T}}\ q_{34} \end{bmatrix} \cdot \widetilde{\mathrm{X}}$$

όπου q = (q_{j1}, q_{j2}, q_{j3}), για j = 1,....., 3.

Λόγω του αυθαίρετου παράγοντα κλίμακας s που επισέρχεται, μπορούμε να θέσουμε q_{34} = 1. Από αυτήν την εξίσωση μπορούμε να γράψουμε:

$$u_i = \frac{\mathrm{X}_i q_{11} + \mathrm{Y}_i q_{12} + Z_i q_{13} + q_{14}}{\mathrm{X}_i q_{31} + \mathrm{Y}_i q_{32} + Z_i q_{33} + 1}$$

και

$$\upsilon_i = \frac{\mathrm{X}_i q_{21} + \mathrm{Y}_i q_{22} + Z_i q_{23} + q_{24}}{\mathrm{X}_i q_{31} + \mathrm{Y}_i q_{32} + Z_i q_{33} + 1}$$

Οπότε :

$$\mathrm{X}_i q_{11} + \mathrm{Y}_i q_{12} + Z_i q_{13} + q_{14} - u\mathrm{X}_i q_{31}$$
$$- u\mathrm{Y}_i q_{32} - uZ_i q_{33} + 1 = u_i$$

Και

$$\mathrm{X}_i q_{21} + \mathrm{Y}_i q_{22} + Z_i q_{23} + q_{24} - \upsilon\mathrm{X}_i q_{31}$$
$$- \upsilon\mathrm{Y}_i q_{32} - \upsilon Z_i q_{33} = \upsilon_i$$

Έτσι δοθέντος ένός συνόλου N τρισδιάστατων σημείων χώρου και των συντεταγμένων τους στην εικόνα, μπορούμε να κατασκευάσουμε την ακόλουθη εξίσωση μητρών:

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1X_1 & -u_1Y_1 & -u_1Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -\upsilon_1X_1 & -\upsilon_1Y_1 & -\upsilon_1Z_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_N & Y_N & Z_N & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_NX_N & -u_NY_N & -u_NZ_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_N & Y_N & Z_N & 1 & -\upsilon_NX_N & -\upsilon_NY_N & -\upsilon_NZ_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{11} \\ q_{12} \\ q_{13} \\ q_{14} \\ q_{21} \\ q_{22} \\ q_{23} \\ q_{24} \\ q_{31} \\ q_{32} \\ q_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \upsilon_1 \\ u_2 \\ \upsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_N \\ \upsilon_N \end{bmatrix},$$

(7)

όπου η μεγάλη μήτρα στο αριστερό μέλος αποτελείται από τις γνωστές συντεταγμένες στην εικόνα και στον χώρο και είναι μεγέθους 2N X 11. Με 11 αγνώστους και κάθε σημείο να παρέχει 2 περιοριστικές εξισώσεις, χρειαζόμαστε τουλάχιστον έξι σημεία για να λύσουμε την εξίσωση.

Η καλύτερη εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων q_{ij} λαμβάνεται χρησιμοποιώντας τον ψευδο-αντίστροφο όπως παράγεται κατωτέρω.
Μπορούμε να γράψουμε την (7) με μορφή μητρών ως:

$$\mathbf{Aq = b}\,, \qquad (8)$$

όπου το A είναι η μήτρα **2N X 11, q = (q_{11} ,... , q_{33})** είναι ένα 11-διάνυσμα, και b είναι το 2N-διάνυσμα στην εξίσωση (7).
Για να υπολογίσουμε τα άγνωστα στοιχεία που ενσωματώνονται στο διάνυσμα q, διατυπώνουμε το πρόβλημα ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης του $||Aq-b||^2$, όπου το σύμβολο ||.|| υποδηλώνει το μέτρο[4] του διανύσματος.
Είναι:

$$L = || \; Aq - b \; ||^2 = (Aq - b)^T \cdot (Aq - b)$$

[4] Για παράδειγμα $|| (a,b,c) || = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$. Άρα $|| (a,b,c) ||^2 = a^2 + b^2 + c^2 = \begin{pmatrix} a & b & c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$

Οπότε στόχος μας είναι:

$$\min_{q} L = \min_{q} (Aq - b)^T \cdot (Aq - b)$$

Διαφορίζοντας το L ως προς το q και θέτοντας ίσο με 0 παίρνουμε:

$$\begin{aligned} & A^T \cdot (Aq - b) = 0 \\ \Rightarrow\ & A^T Aq = A^T b \\ \Rightarrow\ & q = (A^T A)^{-1} A^T b \end{aligned} \qquad (9)$$

Γενικά, ο όρος $(A^T A)^{-1} A^T$ είναι κοινός γνωστός ως ο ψευδοανάστροφος του πίνακα A και συχνά δηλώνεται με A^+. Π.χ. ,

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$$

Είναι σαφές από την (9) ότι το q μπορεί μόνο να υπολογιστεί εάν το γινόμενο A^TA είναι αντιστρέψιμο. Επειδή το A είναι μήτρα διαστάσεων 2N X 11, αυτό σημαίνει ότι το A^TA πρέπει να είναι πλήρους τάξης (δηλ. 11). Δηλαδή χρειαζόμαστε N ≥ 6 και οι σειρές του A δεν πρέπει να είναι γραμμικά εξαρτημένες έτσι ώστε η τάξη του A να μην καταρρεύσει σε μικρότερη του 11. Κατά συνέπεια, πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι τα σημεία αναφοράς $\{X_i \mid 1 \le i \le N, N \ge 6\}$ είναι σε τυχαίες θέσεις. Αυτό σημαίνει ότι τα επιλεγμένα σημεία αναφοράς δεν πρέπει να κείτονται σε μία ορισμένη διαμόρφωση, η οποία μπορεί να καθοριστεί μαθηματικά. Εάν έξι ή περισσότερα σημεία επιλεγούν τυχαία, και δεν βρίσκονται σε ένα μαθηματικό πλάνο, τότε μπορούμε να είμαστε βέβαιοι ότι αυτή η κατάσταση δεν θα εμφανιστεί.

4.2.2 2η Γραμμική Μέθοδος

Ένας ελαφρώς διαφορετικός τρόπος για τα άγνωστα q_{ij} είναι να χαλαρωθεί ο όρος $q_{34} = 1$ στην (5), δίνοντας

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1X_1 & -u_1Y_1 & -u_1Z_1 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -\upsilon_1X_1 & -\upsilon_1Y_1 & -\upsilon_1Z_1 & -\upsilon_1 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ X_N & Y_N & Z_N & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_NX_N & -u_NY_N & -u_NZ_N & -u_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_N & Y_N & Z_N & 1 & -\upsilon_NX_N & -\upsilon_NY_N & -\upsilon_NZ_N & -\upsilon_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{11} \\ q_{12} \\ q_{13} \\ q_{14} \\ q_{21} \\ q_{22} \\ q_{23} \\ q_{24} \\ q_{31} \\ q_{32} \\ q_{33} \\ q_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ . \\ . \\ . \\ . \\ . \\ . \\ . \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

(10)

Σε μορφή μητρών, αυτό είναι ίσο με

$$Aq = 0, \qquad (11)$$

όπου, σε αυτήν την περίπτωση, το A είναι μήτρα 2N X 12 στοιχείων, q είναι ένα 12-διάνυσμα που περιέχει τα αγνωστα q_{ij}, και 0 είναι ένα 2N-διάνυσμα μηδενικών. Μια τετριμμένη λύση για την (11) είναι η q=0, το οποίο αποτέλεσμα δεν είναι αποδεκτό αφού δεν έχει νόημα η λύση αυτή. Για να λάβουμε τη μη τετριμμένη λύση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια τεχνική γνωστή ως περιορισμένη βελτιστοποίηση. Δηλαδή, διατυπώνουμε το πρόβλημα ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης του

$$||Aq||^2 \qquad (12)$$

με τον περιορισμό ότι

$$||q||^2 - 1 = 0$$

(αυτός ο περιορισμός θα αποτρέψει το q από να γίνει μηδενικό διάνυσμα).

Ας είναι λ > 0 ο πολλαπλαστής Lagrange. Τότε ο όρος Lagrange που ελαχιστοποιείται είναι ο:

$$L(q,\lambda) = (Aq)^T(Aq) - \lambda(q^Tq - 1)$$

Διαφορίζοντας το L ως προς το q και θέτοντας ίσο με 0 δίνει

$$\frac{\partial L}{\partial q} = A^TAq - \lambda q = 0 \qquad (13)$$
$$\Rightarrow A^TAq = \lambda q$$

Διαφορίζοντας το L ως προς το λ και θέτοντας ίσο με 0 δίνει

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = q^T q - 1 = 0$$
$$\Rightarrow q^T q = 1 \qquad (14)$$

Ο πολλαπλασιασμός και των δύο πλευρών της (13) με q^T δίνει

$$q^T A^T A q = \lambda q^T q$$
$$\Rightarrow (Aq)^T (Aq) = \lambda \cdot 1 \qquad (15)$$
$$\Rightarrow \|Aq\|^2 = \lambda$$

Βλέπουμε ότι το αριστερό μέλος στην εξ. (15) είναι η ίδια έκφραση που προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε στην (12). Αυτό σημαίνει ότι για να ελαχιστοποιήσουμε το $||Aq||^2$, πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε το λ.

Τώρα η εξίσωση (13) μας λέει ότι η μήτρα q πρέπει να είναι ιδιοδιάνυσμα της μήτρας A^TA με το λ να είναι η αντίστοιχη ιδιοτιμή. Η εξίσωση (15), αφ' ετέρου, λέει ότι πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε το λ όσο το δυνατόν περισσότερο (ιδανικά το λ πρέπει να είναι 0). Αυτά τα δύο κομμάτια των πληροφοριών μαζί απλά λένε ότι το q πρέπει να είναι το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη μικρότερη ιδιοτιμή του A^TA.

Κατά συνέπεια, μπορούμε να βρούμε λύση για το q μέσω της αποσύνθεσης της ιδιοτιμής του A^TA, οδηγώντας σε μια λύση κλειστή μορφής. Αυτό που έχει περισσότερο ενδιαφέρον εν τούτοις, είναι το θέμα της τάξης της μήτρας A, δεδομένου ότι αυτό ενισχύει την κατανόηση μας για το πώς πρέπει να επιλεχτούν τα σημεία αναφοράς. Επανεξετάζοντας την εξίσωση (11) μπορούμε να σκεφτούμε ότι αυτό που ψάχνουμε στην εξίσωση αυτή είναι το μη-τετριμμένο μηδενικό διάνυσμα q της μήτρας A.

Ξέρουμε από την γραμμική άλγεβρα ότι εάν έχουμε μια n X m μήτρα A τότε :

rank(A) + null(A) = m,

όπου το null(A) αντιπροσωπεύει τη διάσταση του μηδενικού διαστήματος A. Στην περίπτωσή μας n ≥ m = 12 και υπάρχουν τρεις περιπτώσεις που πρέπει να εξετάσουμε:

- rank(A) = 12. Τότε το μηδενικό διάστημα έχει διάσταση 0, και υπάρχει μόνο μια λύση στο σύστημα, δηλαδή q = 0, το οποίο δεν έχει ιδιαίτερη σημασία.

- rank(A) = 11. Τότε το μηδενικό διάστημα έχει διάσταση 1 και υπάρχει μια μοναδική λύση (μέχρι έναν παράγοντα κλίμακας).

- rank(A) < 11. Τότε το μηδενικό διάστημα έχει διάσταση 2 ή μεγαλύτερη. Το μηδενικό διάνυσμα q που ψάχνουμε μπορεί να είναι οποιοδήποτε διάνυσμα σε αυτό το δισδιαστατικό διάστημα. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένας άπειρος αριθμός λύσεων για την εξίσωση (11). Ένας τρόπος με τον οποίο μπορεί να συμβεί αυτό είναι εάν όλα τα σημεία του χώρου που εξετάζονται είναι σε ένα πλάνο.

Έτσι, καταλήγουμε στο ίδιο συμπέρασμα με την προηγούμενη ανάλυσή μας του ψευδοανάστροφου και της μη-ιδιομορφίας του A^TA: πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι χρησιμοποιούμε τουλάχιστον 6 σημεία στο χώρο ως σημεία αναφοράς και ότι αυτά είναι σε τυχαία θέση. Ας σημειώσουμε ότι η τάξη του A είναι συχνά 12 αντί για 11 στη βαθμολόγηση με πραγματικά δεδομένα. Αυτό συμβαίνει διότι ο θόρυβος επηρεάζει την τάξη της μήτρας. Όταν ο θόρυβος είναι παρών στα σημεία αναφοράς μας στον χώρο, στο τελικό αποτέλεσμα η μικρότερη ιδιοτιμή του A^TA δεν είναι μηδέν αλλά ένας μικρός θετικός αριθμός. Μπορούμε συχνά να επισημάνουμε πόσος θόρυβος υπάρχει στα στοιχεία μας (δηλ., στις χωρικές συντεταγμένες και στις συντεταγμένες στο πλάνο των σημείων αναφοράς) εξετάζοντας την αναλογία μεταξύ των μικρότερων και μεγαλύτερων ιδιοτιμών της μήτρας A^TA.

4.3 Μη γραμμικές μεθόδοι υπολογισμού της C

Είναι δυνατό να ανασχηματίσουμε το πρόβλημα της επίλυσης της εξίσωση (5) ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης, όπου προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε την απόσταση στο πλάνο εικόνας μεταξύ των σημειακών συντεταγμένων (u_i, v_i) και των επαναπροβαλλόμενων σημείων (X_i, Y_i, Z_i, 1) χρησιμοποιώντας την υπολογισμένη εκτίμηση για το C. Μπορούμε να το κάνουμε αυτό με τον καθορισμό της ποσότητας:

$$e = \sum_{i=1}^{N} \left\| \frac{q_1^T \mathrm{X}_i + q_{14}}{q_3^T \mathrm{X}_i + q_{34}} - u_i \right\|^2 + \left\| \frac{q_2^T \mathrm{X}_i + q_{24}}{q_3^T \mathrm{X}_i + q_{34}} - v_i \right\|^2 \qquad (16)$$

Αυτή η ποσότητα e, είναι γνωστή ως σφάλμα επαναπροβολής (reprojection error). Αντίθετα από τις γραμμικές μεθόδους που παράγουν λύσεις κλειστής μορφής, μια μη γραμμική μέθοδος καθορίζει μόνο μια αρχική εκτίμηση της λύσης με ένα επαναληπτικό τρόπο, που οδηγεί σε μια καλύτερη εκτίμηση της λύσης. Έτσι μπορούμε να μεταχειριστούμε μια μη γραμμική μέθοδο ως διαδικασία που καθορίζει την αρχική εκτίμηση της λύσης που λαμβάνεται από μια γραμμική μέθοδο.

Χρησιμοποιώντας την αρχική εκτίμηση ότι $q = (q_{11}, \ldots\ldots, q_{34})^T$ την οποία λαμβάνουμε από οποιεσδήποτε από τις προαναφερθείσες γραμμικές μεθόδους, μπορούμε να υπολογίσουμε μια αρχική τιμή για το σφάλμα επαναπροβολής, e, με χρήση της εξ. (16). Εφαρμόζοντας οποιαδήποτε τυποποιημένη τεχνική ελαχιστοποίησης, όπως η κάθοδος κλίσης ή η μέθοδος Newton, μπορούμε να υπολογίσουμε μία καλύτερη τιμή για το q η οποία δίνει ένα μικρότερο σφάλμα επαναπροβολής e.

Είναι σημαντικό το ότι η αρχική εκτίμηση της λύσης q είναι πολύ κοντά στη σωστή λύση. Διαφορετικά, η μη γραμμική μέθοδος που υιοθετούμε μπορεί να οδηγήσει σε ένα τοπικό ελάχιστο παρά στο ολικό ελάχιστο. Θα χρειαστεί επίσης να θέσουμε ένα κατάλληλο κριτήριο διακοπής για τη λήξη της επανάληψης (π.χ., να τερματίζεται η επανάληψη όταν $e < 10^{-6}$).
Σε γενικές γραμμές, οι μη γραμμικές μέθοδοι οδηγούν στις πιό στοιβαρές λύσεις.

4.4 Αποσύνθεση της C για την εξαγωγή των εσωτερικών (intrinsic) παραμέτρων

Όπως είναι φανερό, δεν μπορούν όλες οι μήτρες να γραφούν στη μορφή της εξίσωσης (4). Στην πραγματικότητα η μήτρα αυτή εξαρτάται από τις 9 παραμέτρους f, u_0, υ_0, t_x, t_y, t_z, και τις 3 ανεξάρτητους βαθμούς ελευθερίας που σχετίζονται με τον περιστρεφόμενο πίνακα $R = [r_1, r_2, r_3]^T$. Γενικά, ένας πίνακας 3x4 έχει 11 βαθμούς ελευθερίας. Έχει 12 εισόδους μέσα στους οποίους συμπεριλαμβάνεται όμως και ένας τυχαίος παράγοντας. Έτσι μία από τις εισόδους μπορεί να πάρει την τιμή 1 χωρίς αυτό να επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα.

Με τα στοιχεία του C γραμμένα στη μορφή (6) υπάρχουν τέσσερις συνδυασμοι εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων έτσι ώστε το C να μπορέσει να γραφεί στη μορφή της εξίσωσης (4) αν και μονο αν τηρούνται οι δυο παρακάτω συνθήκες :

1. $\|q_3\| = 1$ και
2. $(q_1 \Lambda q_3) \cdot (q_2 \Lambda q_3) = 0$

Για να δείξουμε γιατί αυτό ισχύει θα θεωρήσουμε την παρακάτω απόδειξη και κατά τη διαδικασία θα υπολογιστούν αναλυτικά οι 9 άγνωστες παράμετροι
Αν το C είναι στη μορφή της εξίσωσης (4) τότε $q_3 = r_3$ και εφόσον το r_3 είναι μια γραμμή της περιστρεφόμενης μήτρας το μέτρο της είναι 1. Επιπλέον,

$$\begin{aligned}(q_1 \Lambda q_3)\cdot(q_2 \Lambda q_3) &= (fr_1 + u_0 r_3) \Lambda r_3 \cdot (fr_2 + \upsilon_0 r_3) \Lambda r_3 \\ &= (fr_1 \Lambda r_3)\cdot(fr_2 \Lambda r_3) \\ &= 0\end{aligned} \qquad (17)$$

Επομένως στην περίπτωση που το C είναι μια μήτρα της μορφής της εξίσωσης (4) οι δυο αυτές συνθήκες διατηρούνται. Για να αποδείξουμε ότι ισχύει και ανάποδα σημειώνουμε ότι αν $\|q_3\|^2 = 1$ τότε η τρίτη γραμμή του C πρέπει να είναι ενα μοναδιαίο διάνυσμα. Η δεύτερη συνθήκη

$$(q_1 \Lambda q_3)\cdot(q_2 \Lambda q_3) = 0,$$

από την αλλη πλευρά σημαίνει ότι τα q_1, q_2, και q_3 μπορούν να πάρουν την πιο αυστηρή μορφή εκείνη κατά την οποία είναι αντίστοιχα ορθογώνιες η μια στην άλλη.
Ωστώσο, μπορούν επίσης να πάρουν τη γενική μορφή όπως φαίνεται παρακάτω:

$$q_1 = \alpha_1 r_1 + \beta_1 r_3$$
$$q_2 = \alpha_2 r_2 + \beta_2 r_3$$
$$q_3 = r_3 ,$$

όπου α_1, α_2, β_1 και β_2 είναι αυθαίρετες σταθερές. Όπως είναι φανερό για μοντέρνες κάμερες θα περιμέναμε $\alpha_1 \approx \alpha_2$. Οι δύο συνθήκες στην εξ. (17) δεν επιβάλλουν κανέναν περιορισμό στη στήλη 4 της μήτρας C, αφήνοντας το t_x και το t_y να πάρουν τις σωστές τιμές όπως αυτές εξάγονται από τις άλλες παραμέτρους.

Στην πράξη, το C είναι ορισμένο μέχρι έναν άγνωστο παράγοντα κλίμακας έτσι ώστε $||q_3|| \neq 1$. Για να αποσυνθεθεί το C για να λάβουμε τις εγγενείς και εξωγενείς παράμετρους, πρέπει αρχικά να υπολογίσουμε τον άγνωστο παράγοντα κλίμακας, s, που αναιρεί την κλιμάκωση. Ενσωματώνουμε το s στη μήτρα C και ξαναγράφουμε την (4) ως εξής:

$$s\begin{bmatrix} q_1^{\mathrm{T}} q_{14} \\ q_2^{\mathrm{T}} q_{24} \\ q_3^{\mathrm{T}} q_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fr_1^T + u_0 r_3^T & ft_x + u_0 t_z \\ fr_2^{\mathrm{T}} + \upsilon_0 r_3^{\mathrm{T}} & ft_y + \upsilon_0 t_z \\ r_3^{\mathrm{T}} & t_z \end{bmatrix} \qquad (18)$$

Κατόπιν $||sq_3|| = ||r_3||$ οπότε $||sq_3|| = 1$. Κατά συνέπεια,

$$s = \pm \frac{1}{\|q_3\|} \qquad (2 \text{ λύσεις})$$

Έπειτα,

$$t_z = sq_{34} = \pm \frac{q_{34}}{\|q_3\|}$$ (2 λύσεις)

και

$$r_3 = sq_3$$ (2 λύσεις)

Επειδή το r_1 είναι ορθογώνιο στο r_3, το εσωτερικό γινόμενο των $fr_1+u_0 r_3$ και του r_3 θα εκμηδενίσει τον όρο f, αφήνοντας μόνο το u_0. Έτσι,

$$u_0 = s^2(q_1 \cdot q_3)$$ (1 λύση)

Παρομοίως,

$$\upsilon_0 = s^2(q_2 \cdot q_3)$$ (1 λύση)

Πάλι, η αμοιβαία ορθογωνιότητα του r_1, r_2 και του r_3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο εξωτερικό γινόμενο των $fr_1+u_0r_3$ και r_3 για τον υπολογισμό του f:

$$f = \pm s^2 \| q_1 \Lambda q_3 \|$$ (2 λύσεις για κάθε τιμή του s) (*)

Το μείον στον τύπο (*) ανωτέρω είναι για την περίπτωση όταν το f είναι αρνητικό (αυτό εξαρτάται από το ποια κατεύθυνση δείχνει ο οπτικός άξονας). Εναλλακτικά,

$$f = \pm s^2 \| q_2 \Lambda q_3 \|$$ (2 λύσεις για κάθε τιμή του s) (*')

Ιδανικά, οι τιμές του f που λαμβάνονται από τις (*) και (*΄) πρέπει να είναι ίδιες. Εάν αυτές οι δύο τιμές είναι παραπλήσιες είναι λογικό να πάρουμε το μέσο όρος από τους δύο τύπους ως την τελική αξία για το f διαφορετικά, η ακρίβεια των στοιχείων και της βαθμολόγησης και η διαδικασία του υπολογισμού μας πρέπει να επανεξεταστεί. Μπορούμε επίσης να επανεξετάσουμε την υπόθεσή μας για ότι τα εικονοκύτταρα είναι τετραγωνικά (παρά ορθογώνια).

Τέλος, υπολογίζοντας το f, t_z, u_0 και υ_0, μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε τα r_1, r_2, t_x και t_y:

$$r_1 = (sq_1 - u_0 q_3)/f \qquad \text{(2 λύσεις)}$$

$$r_2 = (sq_2 - \upsilon_0 q_3)/f \qquad \text{(2 λύσεις)}$$

$$t_x = (sq_{14} - u_0 t_z)/f \qquad \text{(2 λύσεις)}$$

$$t_y = (sq_{24} - \upsilon_0 t_z)/f \qquad \text{(2 λύσεις)}$$

Λόγω των επιλογών ±1 μπροστά από τη λύση για το s και το συνδυασμό των ± για το f, βλέπουμε ότι υπάρχουν τέσσερα πιθανά σύνολα λύσεων για εγγενείς και εξωγενείς παράμετρους. Αυτά τα τέσσερα σύνολα λύσεων αντιστοιχούν στο εάν η προέλευση των συντεταγμένων είναι μπροστά από τη φωτογραφική μηχανή ($t_z > 0$) ή πίσω από την φωτογραφική μηχανή ($t_z < 0$), και στην επιλογή της κατεύθυνσης του οπτικού άξονα.

Σημείώνουμε ότι μπορούμε να αποκλείσουμε δύο σύνολα των λύσεων εάν επιβάλουμε έναν δεξί ισότιμο σύστημα, το οποίο επιβάλλει ότι το det(R) πρέπει να είναι ίσο με 1 (αντί για -1).

5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ HOUGH

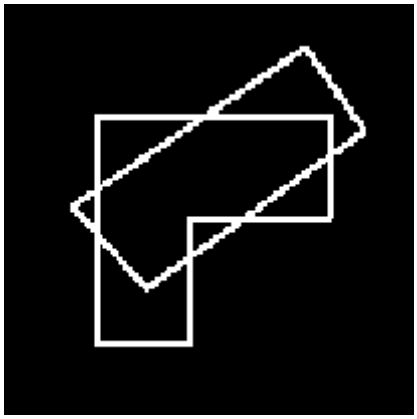
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία μέθοδος προσδιορισμού των λωρίδων κυκλοφορίας του δρόμου σε μαυρόασπρη εικόνα με χρήση του μετασχηματισμού Hough.

Ο μετασχηματισμός Hough (HT) (Hough, 1962) είναι μια τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να απομονώσει κάποια χαρακτηριστικά ενός συγκεκριμένου σχήματος σε μια εικόνα. Ειδικότερα, έχει χρησιμοποιηθεί για να εξάγει ευθείες, κύκλους και ελλείψεις (κωνικές τομές). Στην περίπτωση των ευθειών, ο μαθηματικός ορισμός του είναι ισοδύναμος με το μετασχηματιμό Radon (Deans, 1981). Ο μετασχηματισμός Hough εισήχθη από τον Hough (Hough, 1962) και χρησιμοποιήθηκε αρχικά για να βρίσκει τις διαδρομές φυσαλίδων αντί για σχήματα στις εικόνες. Εντούτοις, ο Rosenfeld επισήμανε τα πιθανά πλεονεκτήματά του ως αλγόριθμο επεξεργασίας εικόνας (Rosenfeld, 1969). Έκτοτε ο HT εφαρμόστηκε και για να βρίσκει σχήματα στις εικόνες (Duda, 1972) ενώ από τότε έχει επεκταθεί πολύ, δεδομένου ότι έχει πολλά πλεονεκτήματα και πολλές προοπτικές για βελτίωση. Το πρωταρχικό πλεονέκτημά του είναι ότι μπορεί να δώσει το ίδιο αποτέλεσμα με αυτό που εξάγεται με τη μέθοδο ταιριάσματος προτύπων (template matching), αλλά γρηγορότερα (Princen, 1992), (Sklansky, 1978) (Stockman, 1977). Ο μετασχηματισμός Hough συνίσταται στην παραμετροποίηση της περιγραφής ενός χαρακτηριστικού σε μία οποιαδήποτε θέση στην αρχική εικόνα. Κατόπιν γεννάται ένα πλέγμα καθορισμένο από αυτές τις παραμέτρους και για κάθε σημείο του πλέγματος συσσωρεύεται μια τιμή που υποδεικνύει πόσο καλά ένα αντικείμενο που έχει προκύψει από τις παραμέτρους που καθορίζονται για αυτό το σημείο αντιστοιχεί στην δοσμένη εικόνα. Τα σημεία του πλέγματος τα οποία συσσωρεύουν σχετικά μεγάλες τιμές περιγράφουν χαρακτηριστικά που μπορούν να προβληθούν πάνω στην εικόνα, ταιριάζοντας σε ένα βαθμό με χαρακτηριστικά που πραγματικά υπάρχουν στην εικόνα. Λόγω αυτής της παραμετροποίησης ο κλασσικός μετασχηματισμός Hough χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον για την ανίχνευση ομαλών καμπύλων όπως γραμμές, κύκλοι, ελλείψεις κτλ. Ένας γενικευμένος μετασχηματισμός χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου δεν είναι δυνατή μία απλή αναλυτική περιγραφή των

ζητούμενων χαρακτηριστικών. Παρ' όλα αυτά, ο γενικευμένος μετασχηματισμός Hough, ο οποίος μπορεί να ανιχνεύσει ένα δισδιάστατο συγκεκριμένο σχήμα οποιουδήποτε μεγέθους ή προσανατολισμού, απαιτεί ακόμα σημαντικό αποθηκευτικό χώρο και έχει υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις. Εντούτοις, το γεγονός ότι ο HT είναι ισοδύναμος με την μέθοδο ταιριάσματος προτύπων έχει δώσει ικανοποιητική ώθηση για την συγκεκριμένη τεχνική έτσι ώστε αυτή να είναι μεταξύ των δημοφιλέστερων από όλες τις υπάρχουσες τεχνικές εξαγωγής μορφής.

5.1.1 Μετασχηματισμός Hough Γραμμής

Η απλούστερη μορφή μετασχηματισμού Hough είναι ο μετασχηματισμός γραμμής. Ας υποτεθεί ότι θέλουμε να περιγράψουμε γραμμές που αντιστοιχούν σε ακμές σε μια δισδιάστατη εικόνα. Εφαρμόζοντας μια τεχνική ανίχνευσης ακμών στην εικόνα, ας υποθέσουμε ότι παίρνουμε μία εικόνα σαν την παρακάτω:



Σχήμα 27: Παράδειγμα εικόνας προς επεξεργασία

Για να χρησιμοποιήσουμε το μετασχηματισμό Hough, χρειαζόμαστε έναν τρόπο χαρακτηρισμού μίας γραμμής. Ένας τρόπος αναπαράστασης της γραμμής είναι με την κλίση της γραμμής, δηλαδή:

$$y = mx + b \qquad (1)$$

όπου m είναι η κλίση της γραμμής και b είναι η y συντεταγμένη του σημείου τομής της ευθείας με τον άξονα των y. Έχοντας αυτήν τη μορφή εξίσωσης της γραμμής, μπορούμε να εναλλαχθούμε μεταξύ οσωνδήποτε γραμμών που

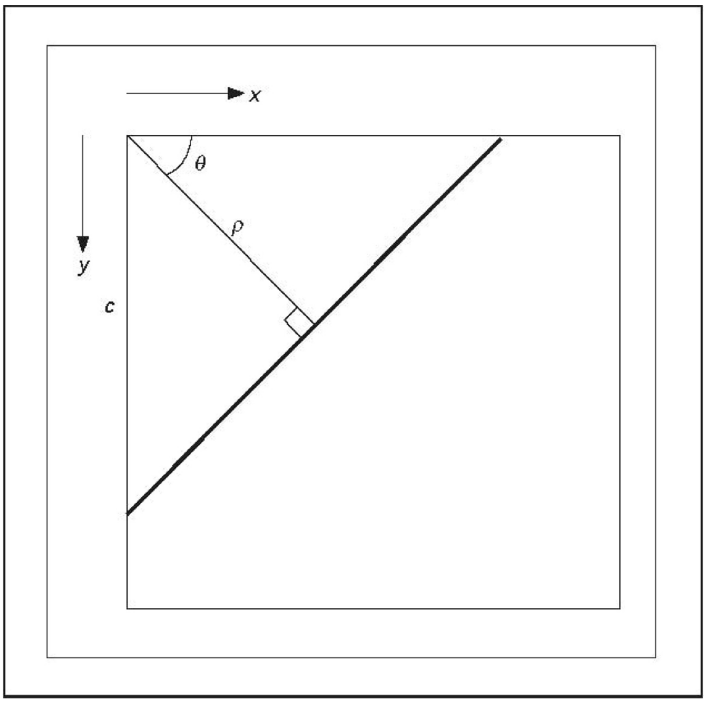
περνούν από ένα δοσμένο σημείο (x,y). Με εναλλαγή ανάμεσα σε συγκεκριμένες τιμές για το m, μπορούμε να λύσουμε ως προς b:

$$b = y - mx \tag{2}$$

Παρ'όλα αυτά αυτή η μέθοδος δεν είναι πολύ σταθερή. Καθώς οι γραμμές τείνουν να γίνουν κάθετες, τα μεγέθη m και b τείνουν προς το άπειρο. Μία πιο χρήσιμη αναπαράσταση μίας γραμμής είναι μέσω της κανονικής της μορφής:

$$x\cos\theta + y\sin\theta = \rho \tag{3}$$

Η εξίσωση αυτή δηλώνει μία γραμμή που περνάει από το σημείο (x,y) και είναι κάθετη στη γραμμή που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και καταλήγει στο σημείο (ρ, θ) των πολικών συντεταγμένων (δηλαδή (ρcosθ, ρsinθ) στις καρτεσιανές συντεταγμένες), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 28: Αναπαράσταση γραμμής σε κανονική μορφή

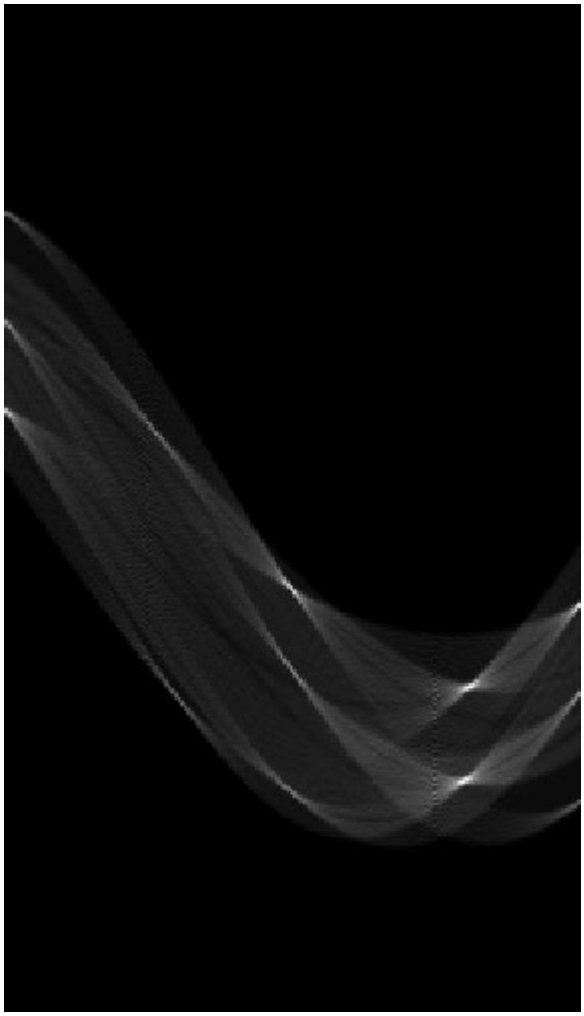
Για κάθε σημείο πάνω σε μία γραμμή , τα θ και ρ είναι σταθερά. Για κάθε δεδομένο σημείο (x,y), παίρνουμε τις γραμμές που περνούν από αυτό λύνοντας ως προς ρ και θ. Εναλλάσσοντας ανάμεσα σε πιθανές τιμές της γωνίας θ, μπορούμε να λύσουμε με χρήση της εξίσωσης (2) απ'ευθείας ως προς ρ. Η μέθοδος αυτή αποδεικνύεται περισσότερο αποτελεσματική απ'ό,τι

η (1), αφού είναι αριθμητικά σταθερή για αντιστοίχιση με γραμμές οποιασδήποτε γωνίας.

Στη συνέχεια εισάγεται η έννοια του συσσωρευτή. Για να επεξηγηθεί η έννοια αυτή, ας υποτεθεί ότι για την εύρεση του μετασχηματισμού Hough των γραμμών της εικόνας του Σχ. 1, επιλέγεται ένα συγκεκριμένο βήμα για τη γωνία (π.χ. 10^o) και γίνεται εναλλαγή ανάμεσα στις γωνίες που καθορίζονται από αυτό το βήμα. Για κάθε γωνία θ επιλύουμε ως προς ρ:

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta \qquad (4)$$

Κατόπιν αυξάνεται η τιμή που βρίσκεται στο (ρ,θ). Αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει κατανοητή ως «ψήφος» του σημείου (x,y) για τη γραμμή που καθορίζεται από τις συντεταγμένες (ρ,θ). Υπάρχουν παραλλαγές στο πώς γεννούνται οι ψήφοι ώστε να κάνουν το μετασχηματισμό περισσότερο στοιβαρό. Το αποτέλεσμα είναι μία νέα εικόνα ενός πολικού πλέγματος, όπως το παρακάτω (που έχει προκύψει από την αρχική εικόνα):



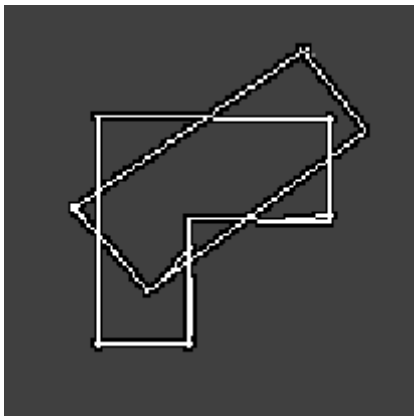
Σχήμα 29: Μετασχηματισμός Hough του σχήματος 27

Ας σημειωθεί ότι σε αυτήν την αναπαράσταση έχει προβληθεί ο χώρος των πολικών συντεταγμένων πάνω σε έναν τετραγωνικό χώρο. Η αρχή των αξόνων βρίσκεται στην πάνω αριστερή γωνία, ο άξονας των θ εκτείνεται προς τα δεξιά και ο άξονας των ρ εκτείνεται προς τα κάτω. Η εικόνα έχει κανονικοποιηθεί, ώστε η ένταση κάθε εικονοκυττάρου να αναπαριστά το λόγο της αρχικής τιμής έντασης στο σημείο αυτό προς την πιο φωτεινή τιμή.

Η ένταση ενός εικονοκυττάρου αντιστοιχεί στον αριθμό των ψήφων που έλαβε σε σχέση με το εικονοκύτταρο που έλαβε τις περισσότερες ψήφους. Η εναλλαγή ανάμεσα σε κάθε τιμή του θ για ένα συγκεκριμένο (x,y) στην αυθεντική εικόνα γεννά μία ημιτονοειδή καμπύλη στην τετραγωνική αναπαράσταση του μετασχηματισμού Hough. Γραμμές που τέμνονται στο ίδιο σημείο γεννώνται από συγγραμμικά σημεία. Έτσι, αν εντοπιστούν τα

περισσότερο φωτεινά σημεία της εικόνας, θα προκύψουν παράμετροι που θα περιγράφουν γραμμές που περνούν από πολλά σημεία της αρχικής εικόνας. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για να γίνει αυτό. Μπορεί να μπει απλά ένα κατώφλι στην εικόνα του μετασχηματισμού Hough, ή μπορεί να εντοπιστεί το τοπικό μέγιστο. Θα προκύψει τότε μία ομάδα άπειρων ευθειών. Η ιδέα αυτή αντιστοιχεί με την ιδέα της διαδικασίας ψήφων. Τα φωτεινότερα εικονοκύτταρα αναπαριστούν συντεταγμένες στο χώρο ρ,θ που έλαβαν τις περισσότερες ψήφους, και επομένως είναι περισσότερο πιθανόν να παράγουν γραμμές που να ταιριάζουν σε πολλά σημεία. Για κάθε (ρ,θ) που θεωρείται αρκετά φωτεινό στο μετασχηματισμό Hough, παράγεται μία γραμμή από την παραμετροποίηση που παρουσιάστηκε προηγουμένως.

Αυτές οι πληροφορίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να χωριστούν οι γραμμές αυτές σε ευθύγραμμα τμήματα που να ταιριάζουν καλά στην αρχική δυαδική εικόνα. Παρακάτω είναι ένα παράδειγμα των ευθυγράμμων τμημάτων που ενδέχεται να προκύψουν ως αποτέλεσμα, ζωγραφισμένο πάνω από την αρχική εικόνα.



Σχήμα 30: Αποτέλεσμα αντίστροφης διαδικασίας μετασχηματισμού Hough.

5.1.2 Μετασχηματισμός Hough κύκλου

Ο μετασχηματισμός Hough μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση αντικειμένων εκτός των γραμμών. Για παράδειγμα, ένας κύκλος μπορεί να παραμετροποιηθεί μέσω της σχέσης:

$$(x-a)^2+(y-b)^2=r^2 \qquad (5)$$

Εδώ (α,b) είναι οι συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου που περνά από το (x,y) και r είναι η ακτίνα του. Αφού υπάρχουν τρεις παράμετροι για αυτήν την εξίσωση, έπεται ότι ο μετασχηματισμός Hough θα είναι μια τρισδιάστατη εικόνα. Ως εκ τούτου οι κύκλοι απαιτούν περισσότερους υπολογισμούς για να προσδιοριστούν σε σχέση με τις γραμμές. Για το λόγο αυτό ο μετασχηματισμός χρησιμοποιείται τυπικά για απλές καμπύλες, όπως οι ευθείες γραμμές και οι παραβολές.

5.1.3 Γενικός μετασχηματισμός Hough

Ο γενικός μετασχηματισμός Hough χρησιμοποιείται όταν δεν είναι δυνατή μία αναλυτική περιγραφή του στοιχείου που μας ενδιαφέρει. Αντί για μια παραμετρική εξίσωση που να περιγράφει αυτό το στοιχείο, χρησιμοποιείται κάποιο είδος πίνακα αναζήτησης, που συσχετίζει θέσεις και προσανατολισμούς από πιθανά σημεία στην αρχική εικόνα με κάποια ομάδα παραμέτρων στο χώρο του μετασχηματισμού Hough.

5.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης του μετασχηματισμού Hough

Βασικό πλεονέκτημα του μετασχηματισμού Hough είναι ότι τα εικονοκύτταρα που αποτελούν μια ευθεία δεν χρειάζεται να είναι όλα παρακείμενα. Αυτό μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο όταν προσπαθούμε να ανιχνεύσουμε γραμμές που έχουν ενδιάμεσα μικρά διαστήματα (όπως είναι στις πλείστες περιπτώσεις οι λωρίδες κυκλοφορίας), είτε είναι παραμορφωμένες και ελλειπή λόγω θορύβου ή όταν τα αντικείμενα είναι μερικώς αποφραγμένα.

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα του μετασχηματισμού Hough αυτά είναι, κατά αρχήν ότι μπορεί να δώσει παραπλανητικά αποτελέσματα όταν τα αντικείμενα ευθυγραμμιστούν κατά τύχη. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι οι ανιχνευμένες γραμμές είναι άπειρες γραμμές που περιγράφονται από τις (m,c) τιμές τους, αντί για πεπερασμένες γραμμές με καθορισμένα σημεία αρχής και

τέλους. Επίσης σοβαρό μειονέκτημα είναι η υπολογιστική πολυπλοκότητα και άρα η αυξημένη υπολογιστική ισχύς που απαιτεί όπως επίσης και η ευαισθησία στις διαφορές μεταξύ της μορφής που παρουσιάζεται στην εικόνα και των παραμετρικών καμπυλών που χρησιμοποιούνται ως πρότυπο για την ανίχνευση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

PRODUCT SPECIFICATIONS

BASLER A600-HDR

Features/Benefits

- HDR feature allows capture of images with up to a 112 dB dynamic range
- The use of varying exposure times allows a high signal-to-noise ratio for all acquired gray values
- Different output formats are available to display the high dynamic range images
- 100% factory testing ensures consistent product quality
- Ultra compact size reduces the space needed in your application

Description

The A600 Series of high-performance, VGA resolution, digital cameras is ideal for price sensitive users seeking the advantages of digital video. The CMOS sensor used in A600 cameras is highly resistant to blooming and smearing. By capturing information at different gray values and various exposure times within one image, the A600F-HDR can generate a dynamic range of up to 112 dB. In addition to this high dynamic range, the signal-to-noise ratio for each gray value is exceptionally good compared to a purely logarithmic sensitivity curve. The output signal can be displayed in a linear 16 bit format (limited), by a Laplace conversion, by a tone mapping, or by using an exponential format (8 bit base, 8 bit exponent). Please see the user's manual for more detailed information.

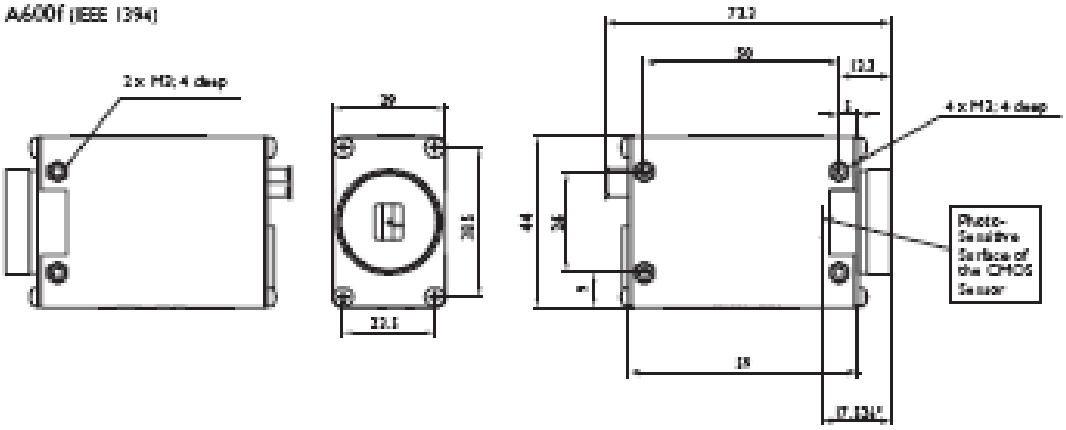
Applications

- Outdoor systems
- Intelligent traffic systems
- Surveillance
- Any application requiring high dynamic range

BASLER VISION TECHNOLOGIES

Dimensions (in mm)

A600f (IEEE 1394)



*All other Alignments
± 0.2 mm

Specifications	A601f-HDR
Sensor Size (H x V Pixels)	656 x 491
Sensor Type	Progressive Scan CMOS
Pixel Size	9.9 µm x 9.9 µm
Max. Frame Rate (depends on dynamic range)	33.3 fps @ 48 dB ... 8 fps @ 112 dB
Color / Mono	Mono
Video Output Type	IEEE 1394
Video Output Format	Inside FC: 8 bit/pixel, 16 bit/pixel (linear or exponential), Laplace, Tone map, or Gamma
Power Requirements	+ 8 to + 40 VDC (12 VDC nominal), max. ~ 2 W
Lens Mount	C-Mount
Housing Size (L x W x H)	67.5 mm x 44 mm x 29 mm
Weight	max. 100 g (typical)
Conformity	CE, FCC

Specifications are subject to change without prior notice.

Germany, Headquarters
Phone +49 4102 463 500
Fax +49 4102 463 599
vc.sales.europe@baslerweb.com

USA
Phone +1 610 280 0171
Fax +1 610 280 7608
vc.sales.usa@baslerweb.com

Singapore
Phone +65 6425 0472
Fax +65 6425 0473
vc.sales.asia@baslerweb.com

www.baslervc.com

6 Βιβλιογραφία:

[1]. L. Andreone, P.C. Antonello, M. Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli and D. Ranzatto, “Vehicle Detection and Localization in Infra-Red Images”, The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 3-6 September 2002, Singapore.

[2]. Ernst Dieter Dickmanns, “The development of machine vision for road vehicles in the last decade”.

[3]. Olivier Faugeras. \Three Dimensional Computer Vision". MIT Press, 1993 .S. Ganapathy. \Decomposition Of Transformation Matrices For Robot Vision". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 130- 139, 1984.

[4]. Ran B., and Liu X., "Development of A Vision-based Vehicle Detection and Recognition System for Intelligent Vehicles", Presented at the 1999 TRB Annual Meeting and To Appear in Transportation Research Record, 1999.

[5]. Ran B., and Liu X., "A Framework for the Development of a Proactive Exterior Airbag System", To Appear in the Proceedings of 6th ITS World Congress, 1999.

[6]. Kreucher C., Lakshmanan S. and Kluge K., "A Driver Warning System Based on the LOIS Lane Detection Algorithm", Proceeding of IEEE International Conference on Intelligent Vehicles, pp.17-22, 1998.

[7]. Chen M. , Jochem T., and Pomerlean D., "AURORA: A Vision-based Roadway Departure System," Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 1, pp. 243-248, 1995.

[8]. Pomerlean D., " RALPH: Rapidly Adapting Lateral Position Handler", Proceedings of the Intelligent Vehicles 1995 Symposium, pp. 506-511, 1995.

[9]. Behringer R., " Road Recognition From Multifocal Vision," Proceedings of the Intelligent Vehicles 1994 Symposium, pp.302-307, 1994.

[10]. Dickmanns E.D. and Graefe V., "Applications of Dynamic Monocular Machine Vision," Machine Vision and Applications, Vol1, pp. 241-261, 1988.

[11]. Kluge K. and Lakshmanan S., " A Deformable Template Approach to Detection," in Proceedings of the Intelligent Vehicles 1995 Symposium, pp.54-59, 1995.

[12]. Kluge K., "Extracting Road Curvature and Orientation From Image Edge Points without Perceptual Grouping into Features," Proceedings of the Intelligent Vehicles 1994 Symposium, pp. 109-114, 1994.

[13]. Wang Y., Shen D. and Teoh K., " Lane Detection Using Catmull-Rom Spline," Proceedings of Intelligent Vehicles 1998 Symposium, 1998.

[14]. Aoki M., "Image Processing in ITS," Proceedings of Intelligent vehicles 1998 Symposium, 1998.

[15]. Sakurai K. , Kyo S. , and Okazaki S. , "A Lane Recognition Method Based on White Line Detection and Road Area Detection," Proceedings of Intelligent Vehicles 1998 Symposium, 1998.

[16]. Maxwell E. A., "The methods of Plane Projective Geometry, Based on the Use of General Homogeneous Coordinates", Cambridge University Press, London.

[17]. Aguado, A. S., Nixon, M. S. and Montiel, M. E., Parameterising Arbitrary Shapes via Fourier Descriptors for Evidence-Gathering Extraction, *Computer Vision and Image Understanding*, **69**(2), pp. 202–221, 1998

[18]. Deans, S. R., Hough Transform from the Radon Transform, *IEEE Trans. on PAMI*, **13**, pp. 185–188, 1981

[19]. Mark S. Nixon, Alberto S. Aguado, Feature Extraction and Image Processing

[20]. Duda, R. O. and Hart, P. E., Use of the Hough Transform to Detect Lines and Curves in Pictures, *Comms. of the ACM*, **15**, pp. 11–15, 1972

[21]. Gerig, G. and Klein, F., Fast Contour Identification through Efficient Hough Transform and Simplified Interpretation Strategy, *Proc. 8th Int. Conf. Pattern Recog.*, pp. 498–500, 1986

[22]. Illingworth, J. and Kittler, J., The Adaptive Hough Transform, *IEEE Trans. on PAMI,* **9**(5), pp. 690–697, 1987

[23]. Illingworth, J. and Kittler, J., A Survey of the Hough Transform, *CVGIP*, **48**, pp. 87–116, 1988

[24]. Princen, J., Illingworth, J. and Kittler, J., A Formal Definition of the Hough Transform: Properties and Relationships, *J. Mathematical Imaging and*

Vision, **1**, pp. 153–168, 1992

[25]. Sonka, M., Hllavac, V. and Boyle, R., *Image Processing, Analysis and Computer Vision*, Chapman Hall, London UK, 1994