ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Πλοήγηση ρομποτικού συστήματος σε προκαθορισμένο μονοπάτι

Ανδρέας Γ. Αρταβάνης

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ηράκλειο, Οκτώβριος 1998

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Πλοήγηση ρομποτικού συστήματος σε προκαθορισμένο μονοπάτι

Εργασία που υποβλήθηκε από τον
Ανδρέα Γ. Αρταβάνη
ως μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων
για την απόκτηση
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Συγγραφέας:

Ανδρέας Γ. Αρταβάνης
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

Εισηγητική Επιτροπή:

Πάνος Τραχανιάς
Αναπληρωτής Καθηγητής, Επόπτης

Απόστολος Τραγανίτης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Μέλος

Γιώργος Τζιρίτας
Αναπληρωτής Καθηγητής, Μέλος

Δεκτή:

Πάνος Κωνσταντόπουλος
Καθηγητής
Πρόεδρος Επιτροπής Μεταπτυχιακών Σπουδών

Ηράκλειο, Οκτώβριος 1998

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους, με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, με στήριξαν κατά τη διάρκεια της προσπάθειάς μου για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Καταρχήν οφείλω να ευχαριστήσω τον επόπτη μου, τον Πάνο Τραχανιά, υπό την καθοδήγηση του οποίου πραγματοποιήθηκε αυτή η εργασία. Θέλω να τον ευχαριστήσω για την επιστημονική του καθοδήγηση, τις συμβουλές του και το χρόνο που μου αφιέρωσε, συζητώντας μαζί μου τα θέματα που με απασχόλησαν στην εργασία μου. Θέλω επίσης να τον ευχαριστήσω για την στήριξη και τη συμβολή του ώστε να πραγματοποιήσω την πολύμηνη επίσκεψή μου στο εργαστήριο ρομποτικής της Γένοβας, που αποτέλεσε για μένα μια εμπειρία ζωής που πάντα θα με συνοδεύει. Μακάρι να έχω την τύχη να συνεργαστώ και στο μέλλον με ανθρώπους σαν τον Πάνο Τραχανιά.

Επίσης πρέπει να ευχαριστήσω το Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Κρήτης, καθώς και το Ινστιτούτο Πληροφορικής του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας για την οικονομική ενίσχυση και υλικοτεχνική υποστήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Σημαντική συμπαράσταση είχα και από πολλούς φίλους και συναδέλφους φοιτητές, που παρά το δικό τους φόρτο εργασίας με υπομονή και όρεξη ήταν πάντα διαθέσιμοι για σχόλια και παρατηρήσεις σε πολλά στάδια της εργασίας. Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τον Σταύρο Τζουρμπάκη για τις εύστοχες παρατηρήσεις του στη διόρθωση του κειμένου και την ειλικρινή του διάθεση να μοιραστεί τα αποτελέσματα της εργασίας του όταν αυτά μου ήταν χρήσιμα, τη Βασιλεία Λιοντάκη και το Χρήστο Κολιό για την εξίσου θετικότατη διάθεση και συμβολή τους και τέλος τον Αντώνη Αργυρό για τις λίγες αλλά ουσιαστικότατες συζητήσεις μας.

Περισσότερο από όλους όμως θέλω να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με στήριξαν και με βοήθησαν ώστε να φτάσω μέχρι εδώ. Τον αδελφό μου Μιχάλη, του οποίου οι συμβουλές του είναι πολύτιμες για μένα και τους δύο ανθρώπους που βρίσκονται πάντα κοντά μου, με στηρίζουν, με ενθαρρύνουν και μου δίνουν τη δύναμη να αγωνίζομαι ακολουθώντας τις αξίες και τα ιδανικά που και οι ίδιοι σαν άνθρωποι έχουν στη ζωή τους. Σε αυτούς αφιερώνω αυτήν την εργασία.

Στους γονείς μου

Πλοήγηση ρομποτικού συστήματος σε προκαθορισμένο μονοπάτι

Ανδρέας Γ. Αρταβάνης
Μεταπτυχιακή Εργασία

Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Περίληψη

Η πλοήγηση ενός ρομποτικού συστήματος είναι ένα από τα ποιο ενδιαφέροντα θέματα έρευνας για την ανάπτυξη ρομποτικών συστημάτων με υψηλό βαθμό αυτονομίας. Οι περισσότερες προσεγγίσεις υιοθετούν τη χρήση οροσήμων, τεχνητών ή φυσικών, και την κατασκευή και τη χρήση γεωμετρικών αναπαραστάσεων του περιβάλλοντος. Ωστόσο, οι ιδιαιτερότητες και τα μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν αυτές τις προσεγγίσεις τις καθιστούν συχνά μη εφαρμόσιμες για την προσαρμογή τους σε πραγματικά συστήματα.

Σε αυτήν την εργασία μελετήθηκε μια μέθοδος για την πλοήγηση ενός αυτόνομου συστήματος σε κάποιο προκαθορισμένο μονοπάτι, περιορίζοντας την ανάγκη ύπαρξης προηγούμενης γνώσης και επέμβασης στο περιβάλλον λειτουργίας του συστήματος. Η μέθοδος προορίζεται για την εφαρμογή της σε εσωτερικούς χώρους με την χρήση αποκλειστικά οπτικών αισθητήρων. Η τεχνική που χρησιμοποιείται διακρίνεται σε δύο ανεξάρτητα μεταξύ τους στάδια, το στάδιο της εκμάθησης του μονοπατιού και το στάδιο της αυτόνομης πλοήγησης.

Το στάδιο της εκμάθησης είναι ένα προκαταρκτικό στάδιο προετοιμασίας του συστήματος. Κατά τη διάρκειά του κάποιος δάσκαλος κατευθύνει διαλεκτικά το σύστημα στο επιθυμητό μονοπάτι και το σύστημα καταγράφει τη διαδρομή με τη μορφή μιας ακολουθίας διαδοχικών εικόνων που αποθηκεύεται στη μνήμη του συστήματος.

Κατά το στάδιο της αυτόνομης πλοήγησης το σύστημα έχει ως στόχο να επαναλάβει την διαδρομή που έχει διδαχτεί από το στάδιο της εκμάθησης. Για να το επιτύχει αυτό, το σύστημα συγκρίνει τις εικόνες που καταγράφει από την θέση που βρίσκεται σε κάθε χρονική στιγμή με τις εικόνες αναφοράς που κατέγραψε κατά τη διάρκεια της εκμάθησης. Υπολογίζονται οι διαφορές στη θέση και τον προσανατολισμό του συστήματος ως προς τη θέση και τον προσανατολισμό του στις εικόνες αναφοράς και το αποτέλεσμα των υπολογισμών χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της θέσης του συστήματος. Η επανάληψη αυτής της διαδικασίας καθόλη τη διάρκεια της κίνησης

έχει ως αποτέλεσμα το σύστημα να μην παρεκλίνει από το μονοπάτι που έχει διδαχτεί και να κινείται με επιτυχία προς το στόχο του.

Για τον υπολογισμό της σχετικής θέσης του συστήματος ως προς τις εικόνες αναφοράς χρησιμοποιούνται δισδιάστατα χαρακτηριστικά του χώρου που εξάγονται από τις εικόνες. Στην παρούσα εργασία έγινε η μελέτη, η υλοποίηση και η αξιολόγηση τριών μεθόδων για την εκτίμηση της σχετικής θέσης του συστήματος ως προς τις εικόνες αναφοράς με τη βοήθεια αντιστοιχίσεων δισδιάστατων χαρακτηριστικών. Η πρώτη μέθοδος που μελετήθηκε χρησιμοποιεί αντιστοιχίσεις κάθετων ευθειών του χώρου, η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί αντιστοιχίσεις ευθυγράμμων τμημάτων και η τρίτη αντιστοιχίσεις σημείων. Για την αξιολόγηση των τριών μεθόδων παρατίθενται τα αποτελέσματα της εκτίμησης της σχετικής θέσης του συστήματος με τη χρήση συνθετικών και πραγματικών εικόνων.

Επόπτης: Πάνος Τραχανιάς
Αναπληρωτής καθηγητής

Navigation of a robotic system on a predefined path

Andreas G. Artavanis
Master's Thesis

Department of Computer Science
University of Crete, Greece

Abstract

Navigation of a robotic system is among the most interesting research topics in the field of robotics, aiming at the development of systems with a high degree of autonomy. Most approaches adopt the use of landmarks, either natural or artificial, or the construction and use of geometric representations of the environment. However, such approaches are based on assumptions that are occasionally not met in practice and their application on real systems may not always be feasible.

In this work a methodology is studied for the navigation of an autonomous system on a predefined path, in which we minimize the need for previous knowledge regarding the environment. This methodology best fits to indoor workspaces, making use only of the systems' visual sensors. A two-phase strategy is employed: (a) in the learning phase the system is shown a path, and (b) in the navigation phase the system attempts to track the learned path.

The learning phase is a prerequisite to the navigation procedure. During this phase, a teacher interactively directs the system on a specific path, while the system is recording the route as an image sequence which is stored in its memory.

During the navigation phase, the system aims at moving on the learned path. In order to accomplish this, the system compares the images acquired at each step of the navigation procedure with the reference images recorded in the learning phase. The differences in position and orientation between the two images are estimated and the result is used towards the correction of the position and the orientation of the system. By repeating the above steps throughout the navigation procedure, the system is not expected to deviate from the predefined path and to move successfully towards its goal.

To estimate the position of the system with respect to the reference images, two-dimensional characteristics are extracted from the environment and used. In the current work we studied, implemented and evaluated three methods for the position estimation with respect to the reference images, using two-dimensional characteristics. The first method uses

correspondences of vertical lines, the second method uses correspondences of line segments and the third method uses point correspondences between the two images. The results of the position estimation of the system obtained from the above methods are presented and evaluated, using both synthetic and real images.

Advisor: Panos Trahanias
Associate Professor

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες **i**

Περίληψη **iv**

Abstract **vii**

Περιεχόμενα **1**

Κατάλογος σχημάτων **3**

1 Εισαγωγή **5**
1.1 Γενική εισαγωγή 5
1.2 Γενικά χαρακτηριστικά του προβλήματος 6
1.3 Οργάνωση του κειμένου 7
1.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση 8
1.4.1 Πλοήγηση με τη χρήση οροσήμων 8
1.4.1.1 Πλοήγηση με φυσικά ορόσημα 9
1.4.1.2 Πλοήγηση με τεχνητά ορόσημα 10
1.4.2 Πλοήγηση με τη χρήση χαρτών 10
1.5 Συμπεράσματα 11

2 Μεθοδολογία πλοήγησης σε προκαθορισμένο μονοπάτι **13**
2.1 Εισαγωγή 13
2.2 Περιγραφή της μεθόδου πλοήγησης 14
2.2.1 Το στάδιο της εκμάθησης 15
2.2.2 Το στάδιο της πλοήγησης 15
2.2.2.1 Εξαγωγή των χαρακτηριστικών 18
2.2.2.2 Αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών 20
2.2.2.3 Εκτίμηση της σχετικής θέσης του συστήματος 20
2.3 Παραδοχές 21

3 Εκτίμηση θέσης με αντιστοίχιση ευθειών **23**
3.1 Εισαγωγή 23
3.2 Μέθοδος των κάθετων ευθειών 23

3.2.1 Περιγραφή της μεθόδου . . . 24
3.2.2 Υλοποίηση . . . 26
3.2.3 Παρατηρήσεις από τη μελέτη της μεθόδου . . . 27
3.3 Μέθοδος της επικάλυψης ευθυγράμμων τμημάτων . . . 30
3.3.1 Περιγραφή της μεθόδου . . . 31
3.3.2 Υλοποίηση . . . 32
3.3.3 Παρατηρήσεις από τη μελέτη της μεθόδου . . . 35

4 Εκτίμηση θέσης με αντιστοίχιση σημείων **37**
4.1 Εισαγωγή . . . 37
4.2 Περιγραφή της μεθόδου . . . 37
4.2.1 Μοντέλο κίνησης . . . 38
4.2.2 Μεθοδολογία . . . 39
4.3 Υλοποίηση . . . 40
4.4 Παρατηρήσεις από την μελέτη της μεθόδου . . . 43

5 Αποτελέσματα **45**
5.1 Εισαγωγή . . . 45
5.2 Αποτελέσματα μεθόδου κάθετων ευθειών . . . 45
5.2.1 Πρώτο πείραμα . . . 46
5.3 Αποτελέσματα μεθόδου επικάλυψης ευθυγράμμων τμημάτων . . . 47
5.3.1 Πρώτο πείραμα . . . 48
5.3.2 Δεύτερο πείραμα . . . 48
5.3.3 Τρίτο πείραμα . . . 51
5.4 Αποτελέσματα μεθόδου σημείων . . . 52
5.4.1 Πρώτο πείραμα . . . 52
5.4.2 Δεύτερο πείραμα . . . 53
5.4.3 Τρίτο πείραμα . . . 55
5.5 Συμπεράσματα . . . 56

6 Μελλοντικές κατευθύνσεις **59**

A Αλγόριθμοι για robust regression **61**
A.1 Εισαγωγή . . . 61
A.2 Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων . . . 61
A.3 Μέθοδος ελαχίστου τετραγωνικού ενδιάμεσου . . . 62

B Αλγόριθμος ελαχιστοποίησης Downhill Simplex **65**
B.1 Εισαγωγή . . . 65
B.2 Αρχικοποίηση . . . 65
B.3 Κύκλος επανάληψης του αλγορίθμου . . . 65

Βιβλιογραφία **68**

Κατάλογος Σχημάτων

2.1 Η μέθοδος για την αυτόνομη πλοήγηση 14
2.2 Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας 16
2.3 Παράδειγμα εφαρμογής της μεθοδολογίας 17
2.4 Η μεθοδολογία για τη διόρθωση της θέσης του συστήματος 18
2.5 Μάσκα για την παραγώγιση μιας εικόνας 18
2.6 Εξαγωγή ευθειών από εικόνα εσωτερικού χώρου 19
2.7 Εξαγωγή σημείων από εικόνα εσωτερικού χώρου 20

3.1 Γεωμετρία του προβλήματος με μία κάθετη ευθεία 24
3.2 Η καμπύλη $\Delta\phi$ vs. ϕ, για την περίπτωση διαφορετικού προσανατολισμού μεταξύ των θέσεων του συστήματος 25
3.3 Η καμπύλη $\Delta\phi$ vs. ϕ, για την περίπτωση διαφορετικής θέσης του συστήματος ως προς την διεύθυνση $x(x > 0)$ 25
3.4 Η καμπύλη $\Delta\phi$ vs. ϕ, για την περίπτωση διαφορετικής θέσης του συστήματος ως προς την διεύθυνση $y(y > 0)$ 26
3.5 Η γενική περίπτωση της καμπύλης $\Delta\phi$ vs. ϕ 27
3.6 Επίδραση κάθετων ευθειών που δεν εξάγονται από τους τοίχους 28
3.7 Επίδραση κοντινών κάθετων ευθειών 29
3.8 Η περίπτωση όπου το σύστημα δεν είναι ευθυγραμμισμένο ως προς την κατεύθυνση του διαδρόμου 29
3.9 Υπολογισμός της αρχικής γωνίας $\omega = 10^o$, με την χρήση των γραφικών παραστάσεων 30
3.10 Εκτίμηση της κίνησης από την τομή των επιπέδων προβολής 31
3.11 Η γεωμετρία του προβλήματος με ένα ευθύγραμμο τμήμα 32
3.12 Η υπολογιζόμενη επικάλυψη μεταξύ δύο ευθυγράμμων τμημάτων 33
3.13 Οι τέσσερις δυνατές διατάξεις των ακραίων σημείων των προσανατολισμένων ευθυγράμμων τμημάτων για να υπάρχει επικάλυψη 34

4.1 Γεωμετρία της προβολής των σημείων στις δύο εικόνες του συστήματος . 39

5.1 Το σκηνικό του πρώτου πειράματος για την πρώτη μέθοδο 46

5.2 Απεικόνιση της διαφοράς στη θέση και τον προσανατολισμό του συστήματος κατά την πλοήγηση με την χρήση της μεθόδου των κάθετων ευθειών 47
5.3 Το σκηνικό του δεύτερου πειράματος με συνθετικές εικόνες 49
5.4 Το σκηνικό του δεύτερου πειράματος με την ακολουθία συνθετικών εικόνων 50
5.5 Το αποτέλεσμα της πλοήγησης του συστήματος με την μέθοδο των επικαλύψεων ευθυγράμμων τμημάτων σε μια ακολουθία συνθετικών εικόνων 50
5.6 Το σκηνικό του τρίτου πειράματος με πραγματικές εικόνες 51
5.7 Το σκηνικό του τρίτου πειράματος με πραγματικές εικόνες 51
5.8 Το σκηνικό του δεύτερου πειράματος με συνθετικές εικόνες 53
5.9 Το σκηνικό του δεύτερου πειράματος με συνθετικές εικόνες και περισσότερα σημεία 54
5.10 Το σκηνικό του τρίτου πειράματος με την ακολουθία συνθετικών εικόνων 54
5.11 Το αποτέλεσμα της προσπάθειας πλοήγησης του συστήματος στην στροφή του διαδρόμου 55
5.12 Το σκηνικό του τρίτου πειράματος με πραγματικές εικόνες 56
5.13 Σκηνικό του τρίτου πειράματος με πραγματικές εικόνες 56

A.1 Συγκριτικά αποτελέσματα της συμπεριφοράς του LS και του LMedS . . . 63

B.1 Το διάγραμμα ροής του Downhill Simplex 66
B.2 Παράδειγμα εφαρμογής του Downhill Simplex 67

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενική εισαγωγή

Ο άνθρωπος και οι περισσότεροι ζωντανοί οργανισμοί έχουν την ικανότητα να βλέπουν, να διακρίνουν αντικείμενα, να αντιλαμβάνονται κινήσεις στο χώρο του οπτικού τους πεδίου, να κινούνται με ασφάλεια στο χώρο που βρίσκονται και να εκτελούν παρόμοιες και εξίσου βασικές λειτουργίες με ευκολία. Όμως, όσο απλές και αυτονόητες και αν μοιάζουν αυτές οι δυνατότητες, τόσο σύνθετες και δυσνόητες αποδεικνύονται για τους ερευνητές που προσπαθούν να τις μελετήσουν. Η προσπάθειά τους έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την κατανόηση του κόσμου γύρω μας, είναι πολύτιμη όμως και για τον τομέα της ρομποτικής αφού η κατανόησή τους αποτελεί το κλειδί για την κατασκευή ρομποτικών συστημάτων με υψηλό βαθμό αυτονομίας. Η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων είναι εξαιρετικού ενδιαφέροντος, καθώς στοχεύει στην παραγωγή ‘‘έξυπνων’’ και ‘‘ευέλικτων’’ μηχανών που μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά τον άνθρωπο στην διεκπεραίωση βαρετών, επίπονων και επικίνδυνων εργασιών. Για παράδειγμα, ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να είναι το μελλοντικό αυτοκίνητο που θα μπορεί να κινείται με ασφάλεια στο οδόστρωμα, αποφεύγοντας τα άλλα αυτοκίνητα και τηρώντας τον κώδικα οδικής κυκλοφορίας, μια πολύτιμη αναπηρική πολυθρόνα που θα μπορεί με ευκολία να κινείται στο σπίτι ή ένας αξιόπιστος εργάτης πρόθυμος να δουλέψει σε ανθιυγεινό περιβάλλον.

Η παρούσα εργασία εξετάζει ζητήματα που αφορούν κυρίως την απαίτηση αυτών των συστημάτων να κινούνται με ασφάλεια και με απώτερο σκοπό να βρεθούν σε κάποια επιθυμητή θέση στον χώρο ακολουθώντας μια αποδεκτή, από πλευράς σχεδιασμού της, διαδρομή. Ο όρος που χρησιμοποιεί ο κλάδος της ρομποτικής για την παραπάνω διαδικασία είναι ο όρος της **πλοήγησης (navigation) του ρομποτικού συστήματος** και μελετώνται ορισμένες μέθοδοι για την επίτευξή της.

Είναι προφανές ότι η δυνατότητα πλοήγησης έχει ζωτική σημασία για όλες τις μορφές ζωής, καθώς παίζει καθοριστικό ρόλο για την ικανοποίηση βασικών αναγκών τους όπως είναι η εύρεση τροφής, η προστασία τους και η ικανότητα της επιστροφής στην φωλιά. Είναι όμως εκπληκτική η ποικιλία μεθόδων που χρησιμοποιούν τα ζώα

για τον σκοπό αυτό, πράγμα που φανερώνει ότι η πλοήγηση δεν είναι τετριμμένη υπόθεση. Πράγματι, πολλά θηλαστικά χρησιμοποιούν τις μυρωδιές για να βρουν τον δρόμο τους, τα πουλιά χρησιμοποιούν την εξαιρετική τους όραση σε συνδυασμό ίσως με την θέση χαρακτηριστικών στον ουρανό, άλλα νυχτόβια ζώα χρησιμοποιούν εκπομπές ηχητικών σημάτων για τον προσανατολισμό τους και σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιούν την πληροφορία που συλλέγουν με διαφορετικό μεταξύ τους τρόπο. Όλα αυτά υποδεικνύουν ότι δεν υπάρχει αυστηρός τρόπος για να εφαρμόσει κανείς ώστε να πετύχει την πλοήγηση ενός ρομποτικού συστήματος, γεγονός που προσθέτει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην μελέτη του θέματος.

1.2 Γενικά χαρακτηριστικά του προβλήματος

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση του θέματος της πλοήγησης ενός ρομποτικού συστήματος. Είναι επιθυμητό όμως η πλοήγηση να πραγματοποιείται με την ελάχιστη δυνατή ανθρώπινη παρέμβαση και επιδιώκεται να μην εμποδίζεται από τις αλλαγές που συμβαίνουν σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον, όπως αναμένεται να είναι το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να λειτουργήσει το σύστημα. Τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζουν την **αυτόνομη πλοήγηση (autonomous navigation)** του συστήματος, τομέας ο οποίος παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον και στον οποίο επικεντρώνονται οι σχετικές έρευνες για την κατασκευή **αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων**. Η εκπλήρωση των απαιτήσεων αυτών στον μέγιστο δυνατό βαθμό συμβάλει στην ανάπτυξη της ευελιξίας του συστήματος, αλλά προϋποθέτει την ικανότητά του να ανταποκρίνεται σε κάποιες άλλες, στοιχειωδέστερες απαιτήσεις. Για παράδειγμα, τέτοιες είναι η ικανότητα του να αναγνωρίζει αντικείμενα (object recognition), να αποφεύγει αντικείμενα που παρεμβάλλονται στην τροχιά της κίνησης του (obstacle avoidance), να μαθαίνει από την ‘‘εμπειρία’’ του (learning), να εκτιμά την κίνησή του [4] και την ανεξάρτητη κίνηση άλλων αντικειμένων (motion estimation) και πολλές άλλες, τα οποία αποτελούν ανοιχτά θέματα της σύγχρονης έρευνας για τον σχεδιασμό συστημάτων αυτόνομης πλοήγησης.

Οι περισσότερες εφαρμογές τέτοιων συστημάτων προορίζονται για την λειτουργία τους σε εσωτερικούς χώρους. Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά που συναντάμε σε εσωτερικούς χώρους σε σχέση με τους εξωτερικούς έχουν ως αποτέλεσμα την χρήση διαφορετικών τεχνικών πλοήγησης για την κάθε περίπτωση. Για παράδειγμα, σε εσωτερικούς χώρους μπορεί να θεωρηθεί ότι οι τοίχοι, το πάτωμα, κάποιες πόρτες ή παράθυρα θα είναι ορατά και συνεπώς τέτοια χαρακτηριστικά του χώρου χρησιμοποιούνται ευρέως στην πλοήγηση σε εσωτερικούς χώρους. Αντίθετα, διαφορετικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται όταν επιδιώκεται η πλοήγηση σε εξωτερικούς χώρους. Έτσι διακρίνεται το θέμα της πλοήγησης σε δύο υποπεριπτώσεις, στην **πλοήγηση σε εσωτερικούς χώρους (indoor navigation)** και στην **πλοήγηση σε εξωτερικούς χώρους (outdoor navigation)**.

Για την επικοινωνία με το περιβάλλον και την αντίληψη του χώρου γύρω του ένα σύ-

στημα μπορεί να χρησιμοποιεί ένα πλήθος από διαφορετικούς αισθητήρες (sensors). Για τον άνθρωπο η πολυτιμότερη αίσθηση είναι η όραση, καθώς αυτή του προσφέρει την πλουσιότερη πληροφορία για το περιβάλλον του. Έτσι, η χρήση αισθητήρων όρασης (visual sensors) είναι ευρέως διαδεδομένη. Επίσης διαφορές υπάρχουν και μεταξύ των αισθητήρων όρασης που χρησιμοποιούνται, προσπαθώντας για παράδειγμα να προσομοιωθεί η όραση του ανθρώπου που έχει μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα στο κέντρο και μικρότερη στην περιφεριακή όραση (με την χρήση log-polar αισθητήρων[17]). Συχνά όμως προτιμούνται άλλοι αισθητήρες, όπως οι αισθητήρες εκπομπής υπερηχητικών κυμάτων (sonars) ή υπέρυθρων ακτινών (infra-red), σταθμίζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε περίπτωσης ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Ενδιαφέρον για την έρευνα έχει επίσης η χρήση αισθητήρων όσφρησης (smell sensors), που μπορεί για τον άνθρωπο να μην είναι η πλέον αξιόπιστη αίσθηση, είναι όμως πολύ σημαντική για πολλά άλλα ζώα.

Η παρούσα εργασία λοιπόν ασχολείται με το πρόβλημα της αυτόνομης πλοήγησης, σε εσωτερικούς χώρους, ενός ρομποτικού συστήματος με την χρήση αποκλειστικά οπτικής πληροφορίας. Εξετάζονται, αναλύονται και αξιολογούνται εφορμόσιμες μέθοδοι για την πλοήγηση ενός συστήματος σε ένα μονοπάτι που έχει προηγουμένως ‘‘διδαχτεί’’ στο σύστημα από κάποιο δάσκαλο. Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον της προσέγγισης αυτής είναι ότι αποφεύγει τα μειονεκτήματα άλλων μεθόδων, όπως για παράδειγμα η κατασκευή χαρτών (maps) του χώρου στον οποίο πρόκειται να βρεθεί το σύστημα και ο περιορισμός για στατικό περιβάλλον, ή η κατασκευή μοντέλων αντικειμένων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως ορόσημα (landmarks) και η προϋπόθεση ότι θα είναι πάντα ορατά από το σύστημα. Η μόνη προϋπόθεση που τίθεται στην προσέγγιση που μελετήθηκε, της εκμάθησης δηλαδή του μονοπατιού στο σύστημα από δάσκαλο, ουσιαστικά είναι ένα προκαταρκτικό στάδιο κατά το οποίο το ρομποτικό σύστημα καταγράφει την διαδρομή και την κρατά στην μνήμη του με την μορφή μιας ακολουθίας εικόνων. Ένα τέτοιο στάδιο ‘‘προετοιμασίας’’ αναμένεται ότι είναι απαραίτητο, αλλά και επαρκές, για την επιτυχή πλοήγηση κάθε μορφής ζωής σε ένα κατά τα άλλα άγνωστο περιβάλλον.

1.3 Οργάνωση του κειμένου

Στη συνέχεια του **κεφαλαίου 1** γίνεται μια ανασκόπηση στις μεθόδους που έχουν προταθεί για την επίλυση του προβλήματος της αυτόνομης πλοήγησης. Περιγράφονται οι σημαντικότερες από αυτές και αναφέρονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Δίνονται επίσης ορισμένες αντιπροσωπευτικές αναφορές τους στην βιβλιογραφία για την περαιτέρω μελέτη τους.

Στο **κεφάλαιο 2** αναλύεται η προτεινόμενη μεθοδολογία στα επιμέρους βήματά της και παρουσιάζονται επιγραμματικά κάποιες κλασικές τεχνικές για την μελέτη των θεμάτων που αντιμετωπίζονται στα βήματα αυτά.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται οι μέθοδοι που μελετήθηκαν για την εκτίμηση του σφάλματος στην θέση και τον προσανατολισμό του ρομποτικού συστήματος ως προς

την διαδρομή που έχει ‘‘διδαχτεί’’, με την χρήση *αντιστοιχίσεων ευθειών* που εξάγονται από το περιβάλλον του.

Στο **κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η μελέτη μιας μεθόδου για τον ίδιο σκοπό, η οποία κάνει χρήση *αντιστοιχίσεων σημείων* που εξάγονται από το περιβάλλον.

Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται, αξιολογούνται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των μεθόδων αυτών σύμφωνα με την υλοποίηση που πραγματοποιήθηκε, τόσο με συνθετικά όσο και με πραγματικά δεδομένα και παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Στο **κεφάλαιο 6** προτείνονται συγκεκριμένες κατευθύνσεις για μια ενδεχόμενη μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας.

Στο **παράρτημα Α** παρουσιάζονται με λεπτομέρεια αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για robust regression.

Στο **παράρτημα Β** περιγράφεται ο αλγόριθμος Downhill Simplex, που εφαρμόστηκε για την ελαχιστοποίηση μιας μη γραμμικής συνάρτησης.

Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την διεκπεραίωση της εργασίας, όπου μπορεί να ανατρέξει ο αναγνώστης για να βρει περισσότερες λεπτομέρειες γύρω από το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης που έγινε.

1.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το ζήτημα της πλοήγησης σε εσωτερικούς χώρους με την χρήση οπτικής πληροφορίας απασχολεί εδώ και πολλά χρόνια τους ερευνητές. Η πιο απλή μέθοδος για την υλοποίησή της, είναι η χρήση **οδομετρίας** σύμφωνα με την οποία το σύστημα πλοηγείται ‘‘μετρώντας’’ κάθε φορά τα βήματα που κάνει και υπολογίζοντας την απόστασή του από τον στόχο. Όμως, τα μικρά λάθη που γίνονται σε αυτούς τους υπολογισμούς και στην ακριβή μέτρηση των κινήσεων του συστήματος, προστίθενται στην συνολική κίνηση του συστήματος και συνήθως αποτυγχάνει η προσπάθεια πλοήγησής του. Έτσι, στην πράξη χρησιμοποιούνται άλλες τεχνικές, είτε αυτόνομες είτε σε συνδυασμό με τις τεχνικές της οδομετρίας. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η **πλοήγηση με τη χρήση οροσήμων**[28] και η **πλοήγηση με τη χρήση χαρτών**[14]. Στην βιβλιογραφία όμως φαίνεται να έχει γίνει περιορισμένη εργασία στην κατεύθυνση της πλοήγησης σε ένα προκαθορισμένο μονοπάτι, κάτι με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία.

1.4.1 Πλοήγηση με τη χρήση οροσήμων

Συνήθως, ο στόχος της κίνησης του αυτόνομου συστήματος δεν είναι άμεσα ορατός από το οπτικό του σύστημα και κατά συνέπεια πρέπει να χρησιμοποιηθούν μια σειρά από διαδοχικά ορόσημα (landmarks) για να χαραχθεί η πορεία του. Με τον όρο ορόσημο εννοούμε ένα χαρακτηριστικό τμήμα του κόσμου, το οποίο ξεχωρίζει στο περιβάλλον του και μπορεί να αναγνωριστεί από το αυτόνομο σύστημα. Έχουν εφαρμοστεί δύο προσεγγίσεις για την πλοήγηση, που χρησιμοποιούν ορόσημα. Η παλαιότερη από αυτές

χρησιμοποιούσε τα ορόσημα για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων ή χαρτών του περιβάλλοντος που βρίσκεται το αυτόνομο σύστημα[13, 6, 16]. Σε αυτή την περίπτωση όμως είναι βασικό να διατηρείται έγκυρη και ακριβής η περιγραφή του κόσμου από το σύστημα[12, 23], κάτι που είναι εξαιρετικά επίπονο σε δυναμικά περιβάλλοντα. Η νεότερη προσέγγιση, η οποία υποστηρίχθηκε αρχικά από τον Brooks, αποφεύγει την απαίτηση για ακριβή γεωμετρική περιγραφή του κόσμου και η πλοήγηση επιτυγχάνεται μόνο με βάση τα δεδομένα που λαμβάνει το σύστημα από τους αισθητήρες του[9, 5].

Ένα ενδιαφέρον θέμα που τίθεται είναι το ποια αντικείμενα του χώρου είναι τα πλέον κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν ως ορόσημα. Με την απάντηση στο ερώτημα αυτό ασχολήθηκε ο Greiner[19], δείχνοντας πως το θέμα αυτό επιδέχεται ακόμη αρκετά χρόνια έρευνας προτού εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Τα αντικείμενα όμως που χρησιμοποιούνται μπορούν να είναι είτε φυσικά αντικείμενα του χώρου (natural landmarks), είτε ευδιάκριτα αντικείμενα που τοποθετούνται εσκεμμένα στον χώρο για να διευκολύνουν την πλοήγηση (artificial landmarks).

1.4.1.1 Πλοήγηση με φυσικά ορόσημα

Φυσικά ορόσημα θεωρούνται τα αντικείμενα ή τα χαρακτηριστικά του χώρου τα οποία προϋπάρχουν στο περιβάλλον και το σύστημα μπορεί να τα εντοπίζει και να τα αναγνωρίζει. Για έναν εσωτερικό χώρο, τέτοια ορόσημα μπορούν να είναι οι πόρτες στους τοίχους, οι γωνίες στους διαδρόμους, οι ευθείες γραμμές του χώρου, τα φώτα στην οροφή, αντικείμενα στο πάτωμα ή τους τοίχους, κ.ά. Για την επιλογή του οροσήμου παίζει ρόλο το κατά πόσο αυτό μπορεί να εξαχθεί εύκολα από το περιβάλλον του, κατά πόσο αναμένεται να είναι ορατό από το σύστημα για να μπορεί να το εντοπίζει και κατά πόσο μπορεί να αναγνωριστεί με αξιοπιστία από αυτό.

Ο Yeh μελέτησε το θέμα της πλοήγησης ενός συστήματος με φυσικά ορόσημα, επιλέγοντας τη χρήση σημείων για την περιγραφή των οροσήμων[44]. Από το σύνολο των σημείων που εξάγει από τις εικόνες, εφαρμόζει το κριτήριο του Bayes για να επιλέξει το υποσύνολο που έχει τις περισσότερες πιθανότητες να αναγνωριστεί αργότερα από το σύστημα και έχει τις λιγότερες πιθανότητες σύγχυσης με κάποιο άλλο σύνολο σημείων.

Φιλόδοξη είναι η προσπάθεια για τον εντοπισμό των ‘‘εξέχοντων’’ περιοχών στην εικόνα με την κατασκευή *χαρτών ανομοιογένειας*[41]. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, εντοπίζονται οι περιοχές ανομοιογένειας στην εικόνα και χρησιμοποιούνται ως ορόσημα. Τα ορόσημα που επιλέγονται με αυτόν τον τρόπο δεν είναι προκαθορισμένα και έτσι αυξάνεται η ευελιξία του συστήματος.

Η προσέγγιση των Fukuda et al.[18] προσανατολίζεται στη χρήση αντικειμένων εξαγόμενων από την οροφή, όπως για παράδειγμα τα μηχανήματα εξαερισμού στο εσωτερικό κτιρίων. Λόγω της θέσης τους, τα αντικείμενα αυτά έχουν το πλεονέκτημα ότι εντοπίζονται εύκολα και είναι απίθανο να επικαλυφθούν από άλλα εμπόδια.

1.4.1.2 Πλοήγηση με τεχνητά ορόσημα

Τεχνητά ορόσημα θεωρούνται τα αντικείμενα που τοποθετούνται εσκεμμένα στην διαδρομή του συστήματος από τον άνθρωπο, με σκοπό να διευκολύνουν την πλοήγηση. Αυτή η προσέγγιση έχει το μειονέκτημα ότι κάποιος πρέπει προηγουμένως να επισκεφθεί και να αλλοιώσει το περιβάλλον όπου πρόκειται να λειτουργήσει το σύστημα. Κατά κανόνα, τα τεχνητά ορόσημα είναι εξαιρετικά ευδιάκριτα και χαρακτηριστικά αντικείμενα, ώστε να αυξάνονται οι πιθανότητες αξιόπιστου εντοπισμού τους και αναγνώρισής τους από το σύστημα.

Οι Taylor et al.[38], στο πανεπιστήμιο του Yale, χρησιμοποίησαν bar-codes ως ορόσημα για την πλοήγηση. Ο χώρος αρχικά εξερευνείται από το σύστημα, εντοπίζονται και αναγνωρίζονται τα τεχνητά ορόσημα και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός τοπολογικού χάρτη του περιβάλλοντος που θα χρησιμοποιηθεί για την πλοήγηση.

Οι Magee et al.[29] χρησιμοποιούν ως ορόσημα σφαίρες, που έχουν σχεδιασμένους πάνω τους δύο κάθετους κύκλους. Η πληροφορία για την απόσταση και τον προσανατολισμό του συστήματος ως προς την σφαίρα παρέχεται από το μέγεθος της προβολής της σφαίρας και την μετατόπιση των κύκλων πάνω σε αυτήν.

Οι Nasr et al.[30] χρησιμοποιούν δεδομένα προβλέψεων για την εμφάνιση ή την απουσία οροσήμων, μειώνοντας την αβεβαιότητα για την θέση τους και την πολυπλοκότητα των υπολογισμών για τον εντοπισμό και την αναγνώρισή τους.

Επιπλέον, η χρήση τεχνητών οροσήμων προϋποθέτει την μελέτη ενός υποπροβλήματος που αυτή συνεπάγεται. Αυτό είναι ο καθορισμός *της θέσης και του πλήθους* των οροσήμων που πρέπει να τοποθετηθούν στον χώρο, ζήτημα το οποίο απασχόλησε και μελέτησαν οι Tashiro et al.[37].

1.4.2 Πλοήγηση με τη χρήση χαρτών

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να διακριθεί σε δύο βήματα. Το πρώτο αφορά την κατασκευή ακριβών γεωμετρικών αναπαραστάσεων (χαρτών) του χώρου στο οποίο θα βρεθεί το σύστημα. Αυτήν την επίπονη εργασία αναλαμβάνει συνήθως να την διεκπεραιώσει ο άνθρωπος, είτε με το χέρι είτε με την βοήθεια σχεδιαστικών προγραμμάτων (CAD), κάθε φορά που πρόκειται το σύστημα να λειτουργήσει σε ένα νέο περιβάλλον. Σπανιότερα προτιμάται η αυτόματη κατασκευή των χαρτών από το ίδιο το σύστημα, με την χρήση γνωστών μεθόδων εκτίμησης της τρισδιάστατης δομής του κόσμου. Οι μέθοδοι αυτές είναι στενά συσχετισμένες με το πρόβλημα της εκτίμησης της ιδιο-κίνησης (egomotion) του αυτόνομου συστήματος που επιτυγχάνεται με την βοήθεια αντιστοιχίσεων χαρακτηριστικών του χώρου[38, 45, 24, 22], της οπτική ροής[40, 3, 10] ή της στερεοσκοπικής όρασης[33]. Για διαφόρους λόγους, τα αποτελέσματα όλων αυτών των μεθόδων δεν θεωρούνται αρκετά αξιόπιστα και έτσι συνήθως οι χάρτες κατασκευάζονται από τον άνθρωπο. Όταν γίνει αυτό, οι χάρτες είναι δύσκολο και επίπονο να αλλάξουν και ενδεχόμενες μεταβολές στον χώρο καθιστούν τους χάρτες άχρηστους.

Το επόμενο βήμα μετά την κατασκευή των χαρτών είναι η ανάπτυξη μεθόδων για τον

προσδιορισμό της θέσης του συστήματος στον χώρο (self-localization) και ο σχεδιασμός της κίνησής του (motion planning). Οι Roh et al.[27] μελέτησαν τη χρήση προβολικών αμετάβλητων (projective invariants) για τον προσδιορισμό της θέσης του συστήματος. Εξάγουν πεντάδες ομοεπίπεδων σημείων από τον κόσμο, υπολογίζουν μία ποσότητα αμετάβλητη από την προβολή των σημείων στο επίπεδο της εικόνας (cross ratio) και ανατρέχουν σε μία βάση από προϋπολογισμένες ποσότητες cross ratio για να βρουν την αντιστοιχία τους. Τα σημεία στα οποία γίνεται η αντιστοίχιση είναι γνωστά σημεία του χάρτη που διατηρεί το σύστημα και έτσι προσδιορίζεται η θέση του συστήματος.

Οι Ishiguro et al.[20] πρότειναν την χρήση T-Net δικτύων για την περιγραφή του χώρου. Τα T-nets κατασκευάζονται με την βοήθεια χαρακτηριστικών σημείων (feature points) του χώρου και επιδιώκουν να προσεγγίσουν τοπικές περιοχές με ευθύγραμμα τμήματα. Το αποτέλεσμα είναι η κατασκευή του σκελετού του μονοπατιού στο οποίο μπορεί να κινηθεί το σύστημα.

Για τον ίδιο σκοπό, θεωρητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η χρήση του σημείου διαφυγής σε συνδυασμό με την θέση ορισμένων ευθειών του χώρου[41]. Στην πράξη όμως, μικρά σφάλματα στον εντοπισμό του σημείου διαφυγής έχουν σοβαρό αντίκτυπο στην εκτιμούμενη θέση του συστήματος.

Ο σχεδιασμός της κίνησης του συστήματος, όταν έχει προσδιοριστεί η θέση του στον κόσμο και είναι γνωστή η θέση του στόχου του, είναι ένα ζήτημα που μπορεί να λυθεί απλά με τεχνικές οδομετρίας. Όμως, η παρουσία εμποδίων στην διαδρομή αυτή επιβάλλει την εφαρμογή πιο ‘‘έξυπνων’’ μεθόδων. Οι Fujimori et al.[1], προτείνουν την επίλυση μιας διαφορικής εξίσωσης πρώτου βαθμού όταν είναι γνωστή η απόσταση του συστήματος από τα εμπόδια σε τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις, λαμβάνοντας υπόψην τη δυναμική του συστήματος.

Τέλος, ευρέως διαδεδομένη είναι και η αναγωγή του προβλήματος σε θέματα μαθηματικού υπολογισμού[39] και αναζήτησης σε γράφους[32, 11]. Έτσι, κατασκευάζοντας συναρτήσεις κόστους με αυξανόμενες τιμές πλησιάζοντας τα εμπόδια και επιτυγχάνοντας την ελαχιστοποίησή τους, το σύστημα μπορεί να κινηθεί με ασφάλεια μεταξύ των εμποδίων. Επίσης, η συντομότερη διαδρομή του συστήματος προς τον στόχο μπορεί να αναχθεί στο πρόβλημα της εύρεσης του ελαχίστου μήκους διαδρομής σε γράφους.

1.5 Συμπεράσματα

Η πλοήγηση με ορόσημα θέτει πολλούς περιορισμούς όσο αφορά τον χώρο εργασίας του αυτόνομου συστήματος, όπως περιγράφεται και από τον Bloom[8]. Η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να γενικευθεί αν το σύστημα δεν μπορεί να εντοπίζει και να χρησιμοποιεί καινούργια ορόσημα από μόνο του. Περιορίζεται μάλιστα ακόμη περισσότερο όταν πρέπει να χρησιμοποιηθούν τεχνητά ορόσημα. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει προηγουμένως κάποιος να επισκεφθεί το περιβάλλον και να επέμβει σε αυτό. Υπάρχει επίσης και η συχνή περίπτωση τα ορόσημα να μην είναι πάντα ορατά ή αναγνωρίσιμα από το σύστημα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, πρέπει να χρησιμοποιούνται άλλου είδους αισθητήρες

που να βοηθούν την αντίληψη του αυτόνομου συστήματος. Τέλος, η αναγνώριση των οροσήμων απαιτεί την εφαρμογή αλγορίθμων από την θεωρία της αναγνώρισης προτύπων, που συνήθως παρουσιάζουν μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Σε πραγματικά περιβάλλοντα, όπου η δομή του κόσμου δεν είναι απλή, τα ορόσημα πρέπει να αναγνωρίζονται κάτω από συνθήκες διαφορετικού φωτισμού και επικάλυψης από άλλα αντικείμενα.

Η κατασκευή χαρτών για την γεωμετρική περιγραφή του κόσμου είναι επίσης μια μέθοδος με πολλά μειονεκτήματα για την κατασκευή ‘‘έξυπνων’’ ρομποτικών συστημάτων. Η κατασκευή των χαρτών αυτών απαιτεί λεπτομερή περιγραφή του περιβάλλοντος και είναι μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία. Επίσης περιορίζει τις δυνατότητες του συστήματος αφού αυτό μπορεί να κινηθεί μόνο σε περιβάλλοντα για τα οποία υπάρχουν ήδη έτοιμοι χάρτες, ενώ επιπρόσθετα υπονοεί ότι ο κόσμος πρέπει να είναι στατικός, κάτι που φυσικά δεν ισχύει στην πραγματικότητα. Η απομνημόνευση ολόκληρων αναπαραστάσεων του κόσμου αποδεικνύεται πολύ δαπανηρή από την άποψη απαιτήσεων σε διαθέσιμη μνήμη. Εξάλλου, συνήθως δεν είναι απαραίτητη η πλήρης αντίληψη του χώρου και της δομής του για τις περισσότερες περιπτώσεις πλοήγησης ενός αυτόνομου ρομποτικού συστήματος.

Φαίνεται λοιπόν, πως οι παρούσες μέθοδοι παρουσιάζουν μειονεκτήματα και πως το θέμα της αυτόνομης πλοήγησης είναι ανοικτό σε νέες προτάσεις. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσπάθεια της πλοήγησης του συστήματος *σε μονοπάτι που έχει προηγουμένως ‘‘διδαχτεί’’ στο σύστημα* από κάποιο δάσκαλο. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, υπολογίζεται το σφάλμα στην πορεία του συστήματος ως προς την πορεία του κατά την διάρκεια της εκμάθησης και κινείται έτσι ώστε να μειώσει αυτό το σφάλμα. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα καταφέρνει να μην παρεκλίνει από την διαδρομή που έχει διδαχτεί. Οι Matsumoto et al.[43] εφάρμοσαν μεθόδους *συσχέτισης σε όλη την εικόνα* για τον υπολογισμό του παραπάνω σφάλματος, κάτι που είναι πολύ δαπανηρό όσο αφορά τις απαιτήσεις σε μνήμη και υπολογιστική ισχύ. Οι Ohno et al.[36] προτείνουν την χρήση αντιστοιχίσεων *κάθετων ευθειών* του κόσμου για τον ίδιο σκοπό. Η παρούσα εργασία υιοθετεί την μέθοδο αυτή και διερευνά τα αποτελέσματα της χρήσης διαφορετικών δισδιάστατων χαρακτηριστικών, (σημείων και ευθειών) για την εφαρμογή τους σε αυτήν την μέθοδο.

Κεφάλαιο 2

Μεθοδολογία πλοήγησης σε προκαθορισμένο μονοπάτι

2.1 Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη και η εφαρμογή μεθόδων για την αυτόνομη πλοήγηση ενός ρομποτικού συστήματος σε εσωτερικούς χώρους κτιρίων με την χρήση οπτικής πληροφορίας. Η μέθοδος αυτή έχει στόχο την επιτυχή πλοήγηση του συστήματος πάνω σε ένα προκαθορισμένο μονοπάτι. Αυτό καθορίζεται σε ένα προκαταρκτικό στάδιο εκμάθησης του συστήματος. που πραγματοποιείται υπό την επίβλεψη ενός δασκάλου. Κατά τη διάρκεια της εκμάθησης το σύστημα καταγράφει την διαδρομή που ακολουθεί και την αποθηκεύει στη μνήμη του με τη μορφή μιας ακολουθίας εικόνων. Το ενδιαφέρον λοιπόν της εργασίας επικεντρώνεται στο σχεδιασμό της γενικής μεθοδολογίας για την πλοήγηση του συστήματος και τη μελέτη, υλοποίηση, εφαρμογή και αξιολόγηση μεθόδων εκτίμησης της σχετικής κίνησης/θέσης του συστήματος, που αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία αναπτύσσεται η μεθοδολογία που σχεδιάζεται.

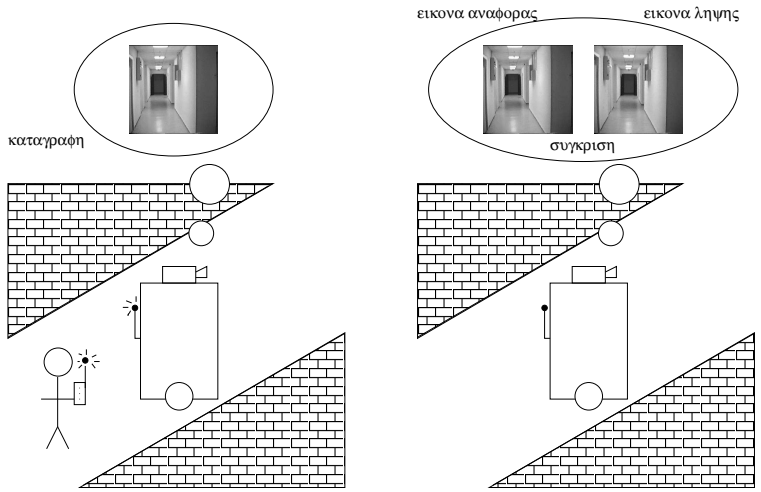
Η φιλοσοφία της προσέγγισης αυτής είναι απλή. Καταρχήν υπολογίζονται οι διαφορές μεταξύ της εικόνας που λαμβάνει το σύστημα και της εικόνας την οποία είχε καταγράψει, στην αντίστοιχη χρονική στιγμή, κατά τη διάρκεια της εκμάθησης του μονοπατιού. Η επόμενη κίνηση του συστήματος προγραμματίζεται έτσι ώστε να αναιρούνται αυτές οι διαφορές. Η επανάληψη αυτής της διαδικασίας καθ' όλη την διάρκεια της κίνησης του συστήματος έχει ως αποτέλεσμα αυτό να παραμένει πάνω στην τροχιά της πορείας που ακολούθησε κατά την διάρκεια της εκμάθησης. Για τον υπολογισμό των διαφορών μεταξύ της εικόνας αναφοράς και της εικόνας που λαμβάνει κάθε χρονική στιγμή το σύστημα, χρησιμοποιούνται δισδιάστατα χαρακτηριστικά τα οποία εξάγονται από τις δύο εικόνες[36]. Οι Matsumoto et al.[43] πρότειναν την αντιστοίχιση των εικόνων με μεθόδους *συσχέτισης* (correlation) σε όλη την εικόνα. Η προσέγγιση τους έχει το μειονέκτημα ότι έχει μεγάλες απαιτήσεις σε μνήμη και υπολογιστική ισχύ, γεγονός που την καθιστά μη πρακτική.

Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος παρακάμπτει την ανάγκη γεωμετρικής αναπαράστα-

σης του περιβάλλοντος και τη διαδικασία του εντοπισμού και της αναγνώρισης ορόσημων. Αυτές οι προσεγγίσεις, όπως προαναφέρθηκε, είναι αναξιόπιστες ως προς την αποτελεσματικότητά τους και υπολογιστικά χρονοβόρες για μια πρακτική εφαρμογή τους σε ένα πραγματικό σύστημα με ρεαλιστικές απαιτήσεις. Αντίθετα, η εξεταζόμενη προσέγγιση αναμένεται να είναι πιο *γενική* όσο αφορά την εφαρμοσιμότητά της σε πραγματικά περιβάλλοντα, καθώς δεν θέτει σημαντικούς περιορισμούς για την προσαρμογή της σε ένα πραγματικό σύστημα. Επίσης, αναμένεται να είναι περισσότερο *αποδοτική* και *ευέλικτη* από τις μεθόδους αυτές, καθώς διάφορα χαρακτηριστικά του χώρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της παρέκλισης του συστήματος από την πορεία του. Τα χαρακτηριστικά εξάγονται από τις εικόνες με την χρήση ευρέως διαδεδομένων αλγορίθμων, που υπάγονται στην κατηγορία **αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας σε χαμηλό επίπεδο** (low-level image processing). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η υλοποίηση της μεθόδου αυτής μπορεί να είναι αρκετά *γρήγορη* στην εκτέλεσή της για την on-line εφαρμογή της σε πραγματικές ρομποτικές πλατφόρμες. Τέλος, είναι σημαντικό ότι στην μέθοδο αυτή μπορούν να προσαρμοστούν **αλγόριθμοι ανθεκτικοί σε σφάλματα** στα δεδομένα τους (robust regression), γεγονός που προσαυξάνει την *αξιοπιστία* της μεθόδου. Στην εργασία αυτή δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην ανάπτυξη και χρήση τέτοιων αλγορίθμων.

2.2 Περιγραφή της μεθόδου πλοήγησης

Η μέθοδος πλοήγησης που περιγράφεται διακρίνεται σε δύο ανεξάρτητα στάδια, το στάδιο της **εκμάθησης** της διαδρομής και το στάδιο της **αυτόνομης πλοήγησης** του συστήματος στην διαδρομή αυτή (σχήμα 2.1).



(α) Το στάδιο της εκμάθησης (β) Το στάδιο της πλοήγησης

Σχήμα 2.1: Η μέθοδος για την αυτόνομη πλοήγηση

2.2.1 Το στάδιο της εκμάθησης

Η εκμάθηση συνίσταται στο σύνολο των ενεργειών που πραγματοποιούνται ώστε το αυτόνομο σύστημα να καταγράψει τη διαδρομή που θα ακολουθεί για την πλοήγηση. Κατά τη διάρκεια της εκμάθησης ένας *δάσκαλος* κατευθύνει διαλεκτικά το σύστημα πάνω στην επιθυμητή διαδρομή. Η διαδρομή καταγράφεται από το σύστημα και αποθηκεύεται στη μνήμη του με τη μορφή μιας ακολουθίας εικόνων. Είναι σημαντικό να επιδιώκει ο δάσκαλος η καταγραφή των εικόνων να γίνεται με τέτοιο ρυθμό, ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των διαδοχικών εικόνων της ακολουθίας. Αυτή η επιδίωξη διευκολύνει αργότερα την πλοήγηση του συστήματος. Οι εικόνες που καταγράφει το σύστημα σε αυτό το στάδιο αποτελούν τις **εικόνες αναφοράς** του. Το στάδιο αυτό είναι ανάγκη να εκτελείται κάθε φορά που το σύστημα θέλουμε να ‘‘μάθει’’ μια νέα διαδρομή. Κάθε φορά που θέλουμε το σύστημα να κινείται πάνω στην ίδια διαδρομή μπορεί να χρησιμοποιεί την ίδια ακολουθία εικόνων αναφοράς.

2.2.2 Το στάδιο της πλοήγησης

Το στάδιο αυτό συνίσταται στην προσπάθεια του συστήματος να επαναλάβει το προκαθορισμένο, από το στάδιο της εκμάθησης, μονοπάτι. Για να το καταφέρει αυτό, το σύστημα συγκρίνει μεταξύ τους δύο εικόνες. Η πρώτη από αυτές είναι η εικόνα που απεικονίζει τον κόσμο όπως τον λαμβάνει το σύστημα από την θέση που βρίσκεται σε κάθε χρονική στιγμή. Η δεύτερη εικόνα προέρχεται από την ακολουθία εικόνων αναφοράς και είναι η χρονικά *επόμενη* από την πλησιέστερη εικόνα αναφοράς στην πρώτη εικόνα. Θεωρώντας ότι το σύστημα θα ξεκινήσει από μια θέση κοντά στην αρχική του θέση κατά την εκμάθηση, η διαδικασία ξεκινά συγκρίνοντας την πρώτη εικόνα που λαμβάνει το σύστημα με την πρώτη εικόνα που κατέγραψε κατά την εκμάθηση.

Η σύγκριση μπορεί να γίνει με βάση κατάλληλα χαρακτηριστικά που εξάγονται από τις δύο εικόνες. Στην προσέγγιση που περιγράφεται, μελετήθηκε η ανεξάρτητη χρησιμοποίηση δύο χαρακτηριστικών, **σημείων** και **ευθυγράμμων τμημάτων**. Ο λόγος για τον οποίο προτιμήθηκαν αυτά είναι γιατί μπορούν σχετικά εύκολα και με απλές τεχνικές να εξαχθούν από τις εικόνες.

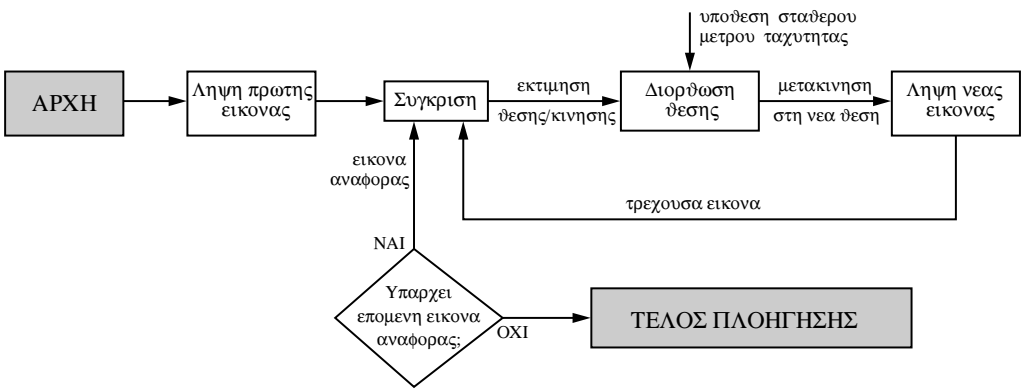
Έχοντας πλέον δύο σύνολα χαρακτηριστικών, ένα από κάθε εικόνα, πρέπει να βρεθεί η μεταξύ τους αντιστοίχιση, ώστε να εντοπιστεί ποιες μετακινήσεις υπάρχουν μεταξύ των δύο εικόνων. Στην πράξη, η διαδικασία αυτή αποδεικνύεται αρκετά δύσκολη καθώς ορισμένα χαρακτηριστικά μπορεί να υπάρχουν μόνο στη μία από τις δύο εικόνες, λόγω π.χ. ενδεχόμενης παρεμβολής ή απόσυρσης ενός αντικειμένου ή μπορεί να είναι αρκετά *όμοια*[1] με περισσότερα από ένα χαρακτηριστικά της άλλης εικόνας. Έτσι, συχνά γίνονται λάθη αντιστοίχισης μεταξύ των χαρακτηριστικών. Αυτά τα λάθη επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα των υπολογισμών που ακολουθούν και

[1] Η ομοιότητα δεν αναφέρεται απαραίτητα στην εμφάνιση των χαρακτηριστικών, αλλά αφορά τα κριτήρια ομοιότητας που εφαρμόζει ο αλγόριθμος αντιστοίχισης που χρησιμοποιείται.

για αυτό είναι επιθυμητό να περιορίζονται. Η επιδίωξη, κατά την διάρκεια της εκμάθησης, οι διαδοχικές εικόνες να μην έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους στοχεύει στον περιορισμό αυτών των λαθών που συμβαίνουν κατά την αντιστοίχιση.

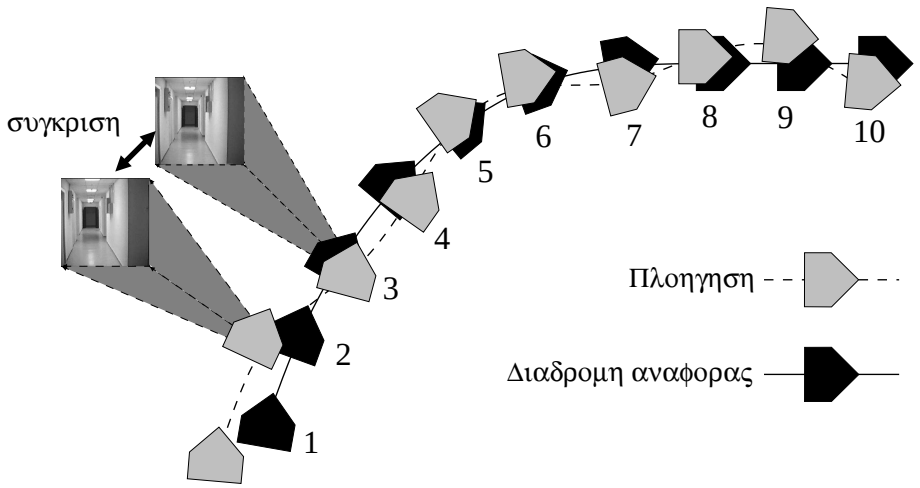
Οι διαφορές μεταξύ της εικόνας αναφοράς και της εικόνας που λαμβάνει το αυτόνομο σύστημα μπορούν να εκφραστούν μέσω της μεταβολής στη θέση και τον προσανατολισμό του συστήματος μεταξύ των δύο εικόνων. Το ζητούμενο πλέον είναι να εκτιμηθεί η σχετική θέση του συστήματος ως προς την θέση που είχε όταν κατέγραψε την εικόνα αναφοράς, έχοντας τα δύο σύνολα με τα αντιστοιχισμένα χαρακτηριστικά. Ο αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό ανήκουν στην κατηγορία των αλγορίθμων για την *εκτίμησης τρισδιάστατης κίνησης*. Δεδομένου ότι οι αντιστοιχίσεις που χρησιμοποιούνται περιέχουν τα λάθη που προαναφέρθηκαν, οι αλγόριθμοι ενισχύονται με την προσθήκη μεθόδων για robust regression ώστε να επιτυγχάνονται περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η εκτιμούμενη κίνηση σε συνδυασμό με μια υπόθεση σταθερού μέτρου της ταχύτητας του συστήματος κατά την εκμάθηση, χρησιμοποιείται κατά αντίστροφο τρόπο για τη διόρθωση της θέσης του συστήματος. Έτσι, το αυτόνομο σύστημα θα προχωρήσει στην επόμενή του θέση και θα βρεθεί πάνω στο μονοπάτι που έχει διδαχτεί. Η διαρκής επανάληψη αυτής της διαδικασίας έχει ως αποτέλεσμα την επιτυχή πλοήγηση του συστήματος προς το στόχο του. Το συνολικό διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας απεικονίζεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής της μεθοδολογίας που μόλις περιγράφηκε στην πλοήγηση του συστήματος απεικονίζεται στο παρακάτω παράδειγμα. Στο σχήμα 2.3 που ακολουθεί έχει αποτυπωθεί η καμπύλη τροχιά που πραγματοποίησε το σύστημα κατά τη διάρκεια της εκμάθησης. Για την πλοήγηση το σύστημα αφήνεται σε μια αρχική θέση κοντά στη αρχική του θέση κατά την εκμάθηση και επιδιώκει να διορθώσει τη θέση του ως προς την τροχιά αναφοράς του. Στην πράξη, η εκτίμηση της σχετικής θέσης/κίνησης του συστήματος που χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της θέσης του δεν αναμένεται να είναι απόλυτα ακριβής και κατά συνέπεια το σύστημα ουσιαστικά επιτυγχάνει απλώς να προσεγγίζει το προκαθορισμένο μονοπάτι. Ένα στιγμιότυπο της



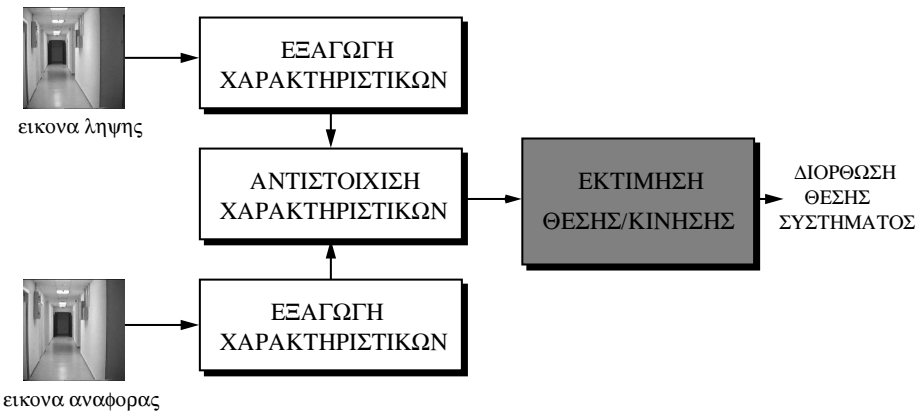
Σχήμα 2.3: Παράδειγμα εφαρμογής της μεθοδολογίας

πλοήγησης, με βάση το σχήμα 2.3, αποτελεί το βήμα του συστήματος από τη θέση 2 στη θέση 3. Για τη πραγματοποίηση αυτού του βήματος, το σύστημα συγκρίνει την εικόνα που λαμβάνει όταν βρίσκεται στη θέση 2 με την εικόνα της θέσης 3 από την ακολουθία των εικόνων αναφοράς. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης θα υποδείξει στο σύστημα την κατεύθυνση της κίνησης που πρέπει να κάνει ώστε να βρεθεί κοντά στη θέση 3. Αν η εκτίμηση της σχετικής θέσης/κίνησης του συστήματος, ως αποτέλεσμα της σύγκρισης, είναι ακριβής τότε το σύστημα θα βρεθεί ακριβώς πάνω στη θέση 3. Πάντως, η ακρίβεια δεν είναι απαραίτητη για την επιτυχή πλοήγηση του συστήματος καθώς μικρά ενδεχόμενα σφάλματα σε κάθε βήμα της πλοήγησης δεν αθροίζονται στην συνολική κίνηση του συστήματος και έτσι δεν επηρεάζουν τα επόμενα βήματά του.

Η βάση λοιπόν για την πλοήγηση, σύμφωνα με τη μέθοδο που προτείνεται και περιγράφεται, είναι η διαδικασία διόρθωσης της θέσης του συστήματος. Αυτή η διαδικασία μπορεί να αναλυθεί στα εξής επιμέρους βήματα (σχήμα 2.4):

- στην εξαγωγή των δισδιάστατων χαρακτηριστικών από τις δύο εικόνες (feature extraction),
- στη μεταξύ τους αντιστοίχιση των εξαγόμενων χαρακτηριστικών (feature correspondence) και
- στην εκτίμηση της σχετικής θέσης (κίνησης) του συστήματος μεταξύ των δύο εικόνων (3D motion estimation).

Στην εργασία που περιγράφεται, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε κυρίως στο τελευταίο στάδιο, δηλαδή στη μελέτη διαφόρων μεθόδων για την εκτίμηση της σχετικής θέσης/κίνησης του συστήματος ως προς τις εικόνες αναφοράς του. Αν και δεν μας απασχόλησαν ιδιαίτερα τα θέματα της εξαγωγής και της αντιστοίχισης των χαρακτηριστικών, για λόγους πληρότητας στην παρουσίαση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους ορισμένες κλασικές τεχνικές



Σχήμα 2.4: Η μεθοδολογία για τη διόρθωση της θέσης του συστήματος

για τη συνολική αντιμετώπιση των θεμάτων που προκύπτουν για την πλοήγηση του συστήματος.

2.2.2.1 Εξαγωγή των χαρακτηριστικών

Όπως ειπώθηκε, για την πλοήγηση του συστήματος χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικά που εξάγονται από το περιβάλλον κίνησής του. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η εφαρμογή αλγορίθμων που χρησιμοποιούν ευθείες γραμμές και σημεία του χώρου. Προφανώς, εφαρμόζονται διαφορετικές τεχνικές ανάλογα με το είδος των χαρακτηριστικών που επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν. Στη συνέχεια περιγράφονται ενδεικτικά ορισμένες κλασικές μέθοδοι για την εξαγωγή αυτών των χαρακτηριστικών.

Η **εξαγωγή των ευθειών** από μια εικόνα είναι ένα πολύ βασικό εργαλείο για την επεξεργασία εικόνας, καθώς η ανάκτηση των ευθειών από αυτήν μπορεί να έχει πολλές εφαρμογές. Κατά αυτόν τον τρόπο, μπορούν να γίνουν υπολογισμοί εκτίμησης κίνησης από δύο εικόνες, εκτίμησης της δομής του χώρου, να περιγραφούν αντικείμενα, να γίνει αναγνώριση άλλων κ.ά.

Το πρώτο στάδιο αφορά πάντα την εξαγωγή των ακμών από την εικόνα. Για την υλοποίησή του, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλές μάσκες, όπως αυτή του σχήματος 2.5 ή περισσότερο πολύπλοκες τεχνικές παραγώγισης της εικόνας[35]. Ο

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

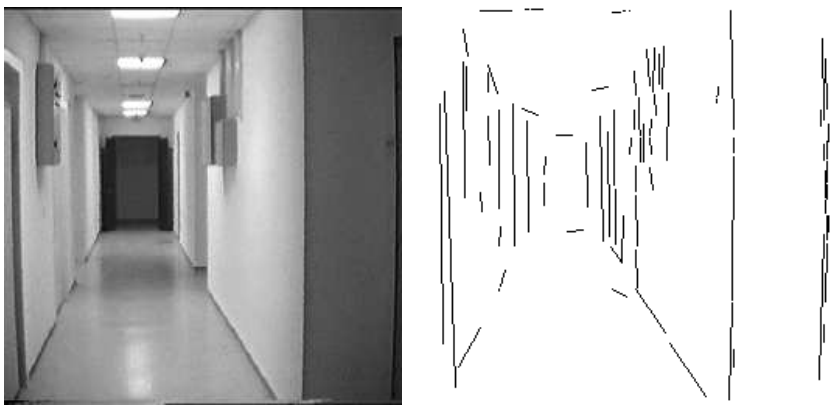
Σχήμα 2.5: Μάσκα για την παραγώγιση μιας εικόνας

εντοπισμός των ευθειών γίνεται στις περιοχές των ισχυρότερων ακμών.

Ο αλγόριθμος Hough[7] για την εξαγωγή των ευθειών είναι ίσως η πιο κλασική

μέθοδος. Ο χώρος αναζήτησης περιορίζεται μεταξύ των ευθειών με κλίση σε ένα συγκεκριμένο εύρος και με περιορισμένη απόσταση από ένα σημείο αναφοράς στη εικόνα. Κατόπιν υπολογίζεται το πλήθος των σημείων που ανήκουν σε ισχυρές ακμές και που ‘‘υποστηρίζει’’ κάθε επιτρεπτή ευθεία στα όρια που έχουν καθοριστεί. Οι ευθείες που ‘‘ψηφίζονται’’ από τα περισσότερα σημεία είναι αυτές που εξάγει τελικά ο αλγόριθμος και τα σημεία που έχουν συμβάλει στην επιλογή της είναι σημεία της ευθείας αυτής.

Στο εργαστήριό μας έχει επίσης υλοποιηθεί η μέθοδος των Burns el al.[25]. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή ομαδοποιούνται οι περιοχές της εικόνας όπου τα σημεία τους έχουν παρόμοια διεύθυνση στο διάνυσμα της κλίσης. Τα σημεία που χρησιμοποιούνται είναι αυτά που βρίσκονται πάνω σε ισχυρές ακμές. Κάθε μία τέτοια περιοχή είναι υποψήφια για την εξαγωγή κάποιας ευθείας γραμμής. Το επίπεδο της έντασης που αντιστοιχεί σε μία περιοχή προσεγγίζεται από σταθμισμένο επίπεδο ελαχίστων τετραγώνων στις τιμές της έντασης. Για την εξαγωγή της ευθείας υπολογίζεται η τομή του επιπέδου αυτού με το οριζόντιο επίπεδο, που εκφράζει την μέση ένταση στην περιοχή αυτή. Στο σχήμα 2.6 απεικονίζεται μια τυπική περίπτωση εσωτερικού χώρου και οι ευθείες που εξήχθησαν από αυτό με την παραπάνω μέθοδο.



Σχήμα 2.6: Εξαγωγή ευθειών από εικόνα εσωτερικού χώρου

Η **εξαγωγή των σημείων** είναι ένα εξίσου βασικό εργαλείο στην επεξεργασία εικόνας. Μια προτεινόμενη μέθοδος για την εξαγωγή των σημείων από μία εικόνα είναι ο αλγόριθμος των Kanade-Lucas-Tomasi (KLT). Τα σημεία εντοπίζονται από τον έλεγχο της ελάχιστης ιδιοτιμής του κάθε πίνακα 2×2 της κλίσης της φωτεινής έντασης. Στο σχήμα 2.7 που ακολουθεί, απεικονίζεται ενδεικτικά η απόδοση του αλγορίθμου σύμφωνα με την υλοποίηση που έγινε στο εργαστήριο της ρομποτικής του πανεπιστημίου του Stanford.

Μια άλλη μέθοδος[26] για τον εντοπισμό των σημείων εφαρμόζει τη σχέση:

$$\mathcal{D} = \frac{\mathrm{I}_{xx} I_y^2 - 2 I_{xy} I_x I_y + I_{yy} I_x^2}{I_x^2 + I_y^2}$$

για κάθε σημείο της εικόνας που βρίσκεται πάνω σε ισχυρή ακμή. Η τιμή $\mathcal{D}$ αυξάνει

Σχήμα 2.7: Εξαγωγή σημείων από εικόνα εσωτερικού χώρου

στις άκρες των ακμών, εκεί όπου υπάρχει μεγάλη καμπυλότητα στην ακμή. Τα σημεία με τις μεγαλύτερες τιμές στο $\mathcal{D}$ είναι τα σημεία που εξάγονται από την εικόνα.

2.2.2.2 Αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών

Τα χαρακτηριστικά που εξάγονται στο παραπάνω στάδιο αντιστοιχίζονται μεταξύ τους για να εφαρμοστούν οι μέθοδοι εκτίμησης κίνησης. Γενικά, για την αντιστοίχιση χρησιμοποιούνται είτε τεχνικές *ταιριάσματος* (matching), είτε τεχνικές *παρακολούθησης* (tracking) των χαρακτηριστικών[15].

Στην πρώτη κατηγορία ανήκει η μέθοδος υπολογισμού του βαθμού συσχέτισης (correlation) μιας περιοχής γύρω από ένα χαρακτηριστικό στην πρώτη εικόνα με την δεύτερη εικόνα. Σε περιοχές που αντιστοιχούν στο ίδιο χαρακτηριστικό μεταξύ των δύο εικόνων, η ποσότητα που υπολογίζεται από τη συσχέτιση έχει μεγάλη τιμή και έτσι εντοπίζονται οι αντιστοιχίσεις.

Συχνά επίσης χρησιμοποιούνται συναρτήσεις κόστους με τις οποίες επιδιώκεται να βρεθεί μια αντιστοίχιση μεταξύ των χαρακτηριστικών όπου πληρούνται, όσο το δυνατόν σε μεγαλύτερο βαθμό, ορισμένοι περιορισμοί. Τέτοιοι είναι για παράδειγμα η επιδίωξη τα χαρακτηριστικά που αντιστοιχίζονται μεταξύ τους να μην απέχουν πολύ μεταξύ τους, να έχουν παρόμοιες τιμές στην παραγώγιση της εικόνας, κ.ά. Ο συνδυασμός πολλών τέτοιων κανόνων περιορίζει τις αποδεκτές αντιστοιχίσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών και επιλέγεται αυτή που τις ικανοποιεί στο μεγαλύτερο βαθμό.

2.2.2.3 Εκτίμηση της σχετικής θέσης του συστήματος

Οι μέθοδοι για την εκτίμηση των παραμέτρων της κίνησης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη είναι η εκτίμηση της κίνησης με την υπολογισμό της *οπτικής ροής*[21]. Η προσέγγιση υπολογίζει το διάνυσμα της ταχύτητας μετακίνησης ενός σημείου μεταξύ των δύο εικόνων. Έτσι, αν η ένταση ενός σημείου (x, y) στην εικόνα της χρονικής στιγμής t είναι $g(x, y, t)$ και το ίδιο σημείο μετατοπίζεται κατά $(\Delta x, \Delta y)$ σε χρόνο Δt ισχύει:

$$g(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = g(x, y, t) \tag{2.1}$$

υποθέτοντας ότι διατηρείται η ένταση της φωτεινότητας στις δύο εικόνες. Η ανάπτυξη του αριστερού μέλους σε σειρά Taylor στην εξίσωση (2.1) δίνει:

$$g(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) = g(x,y) + g_x\Delta x + g_y\Delta y + g_t\Delta t + Q(x,y,t)$$

Αγνοώντας το $Q(\cdot)$ ως αμελητέα ποσότητα και υπολογίζοντας το όριο για $\Delta t \to 0$ έχουμε:

$$g_x u + g_y v + g_t = 0$$

Στην εξίσωση αυτή οι παράγοντες g_x,g_y και g_t υπολογίζονται από την εικόνα και τα $u = \frac{dx}{dt}$ και $v = \frac{dy}{dt}$ είναι οι συντεταγμένες του διανύσματος της ταχύτητας του σημείου (x, y). Η συλλογή των διανυσμάτων (u, v) για όλα τα σημεία της εικόνας αποτελεί την οπτική ροή στην εικόνα. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μονάχα όταν οι δύο εικόνες είναι αρκετά κοντινές, διαφορετικά το σφάλμα από την αγνόηση του $Q(\cdot)$ παύει να είναι αμελητέο.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις τεχνικές που κάνουν χρήση των *αντιστοιχίσεων* των χαρακτηριστικών για την λύση των εξισώσεων κίνησης και την εκτίμησή της. Γενικά, οι τεχνικές στην κατηγορία αυτή μπορούν να εφαρμόζονται ακόμα και όταν υπάρχουν σχετικά μεγάλες μετακινήσεις μεταξύ των δύο εικόνων. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν και οι μέθοδοι που μελετήθηκαν σε αυτήν την εργασία και οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

2.3 Παραδοχές

Για την εφαρμογή της μεθόδου που μελετήθηκε δεν απαιτείται να γίνουν σημαντικές παραδοχές που θα συμβάλλουν στην καλή λειτουργία της. Ο σπουδαιότερος περιορισμός είναι η εφαρμογή της μεθόδου σε εσωτερικούς χώρους. Η ανάγκη για τον εντοπισμό επαρκούς αριθμού από σημεία ή ευθείες στον περιβάλλον κίνησης του αυτόνομου συστήματος καλύπτεται σε σημαντικό βαθμό από το γεγονός ότι το σύστημα θα κινηθεί σε εσωτερικούς χώρους. Σε τυπικούς εσωτερικούς χώρους κτιρίων, όπως είναι οι διάδρομοι και τα δωμάτια, υπάρχουν με φυσικό τρόπο τα αναζητούμενα χαρακτηριστικά και κατά συνέπεια δεν είναι απαραίτητη η παρέμβαση του ανθρώπου για την προσθήκη τέτοιων χαρακτηριστικών ώστε να εντοπιστούν αργότερα από το σύστημα.

Η δεύτερη σημαντική παραδοχή είναι ότι οι διαδοχικές εικόνες που λαμβάνει και καταγράφει το σύστημα δεν έχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Αυτό διευκολύνει την σωστή αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών στο στάδιο πριν την εκτίμηση της σχετικής θέσης του συστήματος. Οι μικρές διαφορές στις διαδοχικές εικόνες μπορούν να επιτευχθούν όταν το σύστημα καταγράφει τις εικόνες με υψηλό ρυθμό ως προς την ταχύτητα της κίνησής του.

Επίσης, πρέπει να γίνει η υπόθεση ότι η αρχική θέση στην οποία τοποθετείται το σύστημα προκειμένου να ξεκινήσει την πλοήγηση βρίσκεται κοντά στη θέση από την οποία ξεκίνησε την εκμάθηση. Δεν είναι ανάγκη η αρχική θέση να ταυτίζεται με την

αρχική του θέση κατά την εκμάθηση, απαιτείται όμως είναι κοντά σε αυτήν ώστε να μπορεί το σύστημα να εντοπίσει τις σωστές αντιστοιχίσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιεί στην πλοήγηση.

Τέλος, καθώς η χρήση δισδιάστατων χαρακτηριστικών δεν παρέχει τη δυνατότητα να εκτιμηθεί το μέτρο της μεταφορικής κίνησης, χρειάζεται να υποθέσουμε ότι κατά την διάρκεια της εκμάθησης το σύστημα κινείται με σταθερή ταχύτητα. Η υπόθεση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα περιοριστική και μπορούμε να θεωρήσουμε ότι γενικά ισχύει σε πραγματικές συνθήκες. Χρησιμοποιώντας την πληροφορία του μέτρου της μεταφορικής κίνησης μπορεί το σύστημα να εκτιμήσει με ακρίβεια την κίνηση που πρέπει να κάνει ώστε να διορθώσει την θέση του.

Κεφάλαιο 3

Εκτίμηση θέσης με αντιστοίχιση ευθειών

3.1 Εισαγωγή

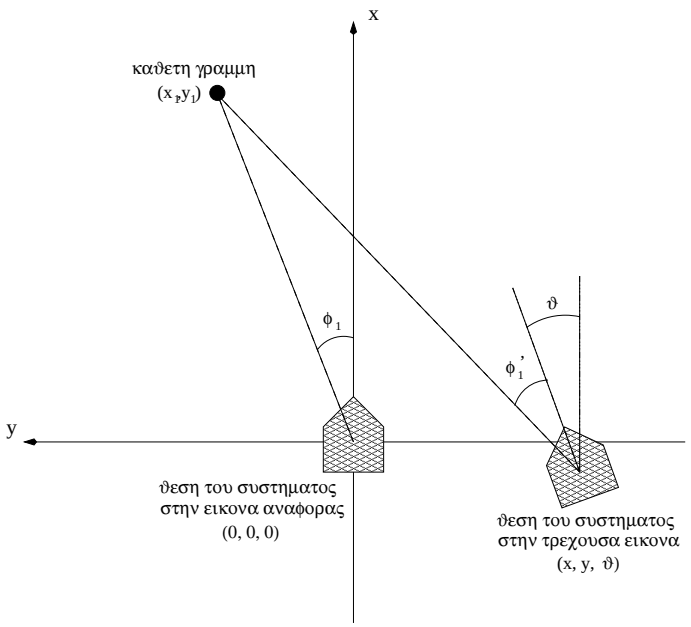
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο και η υλοποίηση δύο μεθόδων για την εκτίμηση της θέσης του αυτόνομου συστήματος ως προς την εικόνα αναφοράς του. Η πρώτη μέθοδος που παρουσιάζεται κάνει χρήση αντιστοιχίσεων *κάθετων ευθειών* μεταξύ των δύο εικόνων, ενώ η δεύτερη κάνει χρήση αντιστοιχίσεων *ευθυγράμμων τμημάτων*. Καθώς λοιπόν και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν παρόμοια χαρακτηριστικά του χώρου, παρουσιάζονται στο ίδιο κεφάλαιο. Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται μια ακόμη μέθοδος που μελετήθηκε σε αυτήν την εργασία, η οποία κάνει χρήση αντιστοιχίσεων *σημείων* μεταξύ των δύο εικόνων. Όλες οι μέθοδοι υπολογίζουν τη διαφορά στη θέση και τον προσανατολισμό του συστήματος ως προς την θέση και τον προσανατολισμό του κατά την λήψη της εικόνας αναφοράς. Κατόπιν, η εκτιμούμενη μετατόπιση χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της θέσης του αυτόνομου συστήματος και έτσι το σύστημα παραμένει πάνω στο προκαθορισμένο μονοπάτι.

3.2 Μέθοδος των κάθετων ευθειών

Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου[36] θεωρείται δεδομένο ότι έχει προηγηθεί η εξαγωγή των καθετών ευθειών από τις δύο εικόνες που επεξεργάζεται το σύστημα και έχει γίνει η μεταξύ τους αντιστοίχιση. Στο κεφάλαιο 2 προτείνονται τρόποι που συνήθως χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση αυτού του σταδίου επεξεργασίας στις δύο εικόνες. Σε τυπικές μορφές εσωτερικών χώρων, όπως είναι οι διάδρομοι και τα δωμάτια, αναμένεται να υπάρχουν αρκετές κάθετες ευθείες για να εξαχθούν και να εφαρμοστεί η μέθοδος. Οι κάθετες ευθείες συνήθως προέρχονται από τα περιγράμματα των πορτών και των παραθύρων στους διαδρόμους, από τις τομές μεταξύ των τοίχων με διαφορετικό προσανατολισμό, από τα περιγράμματα αντικειμένων που συναντά το σύστημα στην πορεία του, κλπ.

3.2.1 Περιγραφή της μεθόδου

Στόχος της μεθόδου είναι η εκτίμηση της μετατόπισης $(x\,,\,y)$ του συστήματος στο επίπεδο του εδάφους και της γωνίας περιστροφής θ του συστήματος γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, που περιγράφουν την κίνηση του συστήματος μεταξύ δύο θέσεών του. Η εκτίμηση βασίζεται στο σχεδιασμό καμπυλών που εκφράζουν τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η διαφορά στην γωνία υπό την οποία το σύστημα ‘‘βλέπει’’ τις κάθετες ευθείες του χώρου. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό, στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο του σεναρίου για την πλοήγηση του συστήματος. Σε αυτό το σχήμα



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία του προβλήματος με μία κάθετη ευθεία

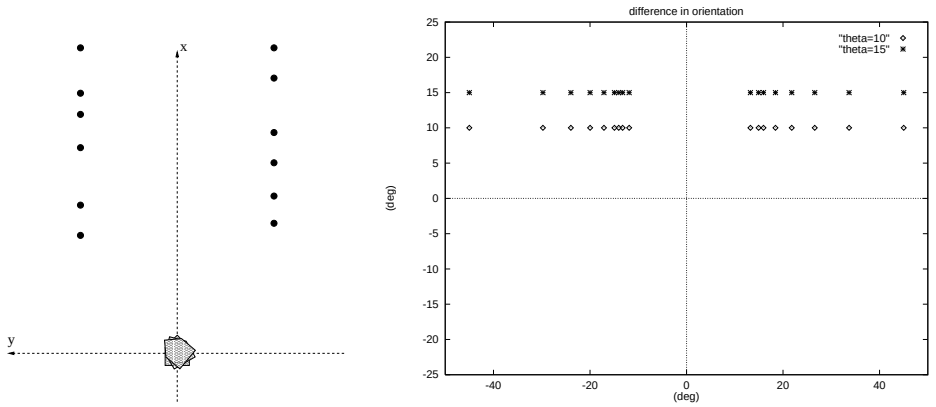
ο κόσμος προβάλλεται στο επίπεδο του εδάφους. Έτσι, όλες οι κάθετες ευθείες του κόσμου αποτυπώνονται ως σημεία. Θέλοντας να βρούμε την θέση του συστήματος ως προς την εικόνα αναφοράς είναι λογικό να θεωρήσουμε ένα σύστημα συντεταγμένων προσαρμοσμένο στην θέση του συστήματος στην εικόνα αναφοράς. Στο σχήμα 3.1 το σύστημα στην εικόνα αναφοράς ‘‘βλέπει’’ την ευθεία υπό γωνία ϕ_1, ενώ στην τρέχουσα εικόνα υπό γωνία ϕ_1'. Όπως φαίνεται, το σύστημα έχει παρεκλίνει από την θέση στην οποία θέλουμε να βρίσκεται κατά $(x\,,\,y)$ στο επίπεδο του εδάφους και κατά γωνία θ όσο αφορά τον προσανατολισμό του. Το ζητούμενο είναι να υπολογιστούν αυτές οι τρεις παράμετροι, το x, το y και το θ, γνωρίζοντας τις γωνίες ϕ_i και ϕ_i', $(i = 1, \ldots, k)$ για κάθε μία από τις k κάθετες ευθείες που έχουν αντιστοιχηθεί.

Μεταξύ των δύο θέσεων του συστήματος υπολογίζεται η διαφορά στην γωνία υπό την οποία ‘‘βλέπει’’ το σύστημα κάθε κάθετη ακμή:

$$\Delta\phi_i = \phi_i - \phi_i'. \tag{3.1}$$

Η διαφορά στην θέση και τον προσανατολισμό μπορούν να υπολογιστούν χρησιμο-

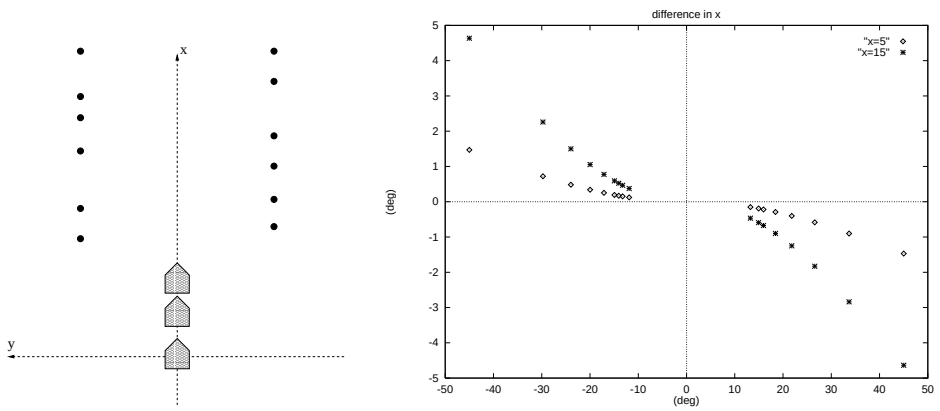
ποιώντας την σχέση (3.1) για πολλές κάθετες ευθείες και μελετώντας την καμπύλη που παρεμβάλλεται στα σημεία $(\Delta\phi_i, \phi_i)$. Η μορφή της καμπύλης μας δίνει πληροφορία για το είδος και το μέγεθος της κίνησης του συστήματος. Στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται η μορφή της εν λόγω καμπύλης, για την περίπτωση που το σύστημα έχει διαφορετικό προσανατολισμό σε σχέση με την θέση του στην εικόνα αναφοράς. Από αυτό το σχήμα



Σχήμα 3.2: Η καμπύλη $\Delta\phi$ vs. ϕ, για την περίπτωση διαφορετικού προσανατολισμού μεταξύ των θέσεων του συστήματος

παρατηρούμε ότι διαφορά στον προσανατολισμό προκαλεί μετατόπιση της καμπύλης κατά μήκος του άξονα $\Delta\phi$. Η μετατόπιση αυτή είναι ανάλογη του μεγέθους του θ και συνεπώς αυτό μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας την απόσταση της καμπύλης από τον άξονα του ϕ.

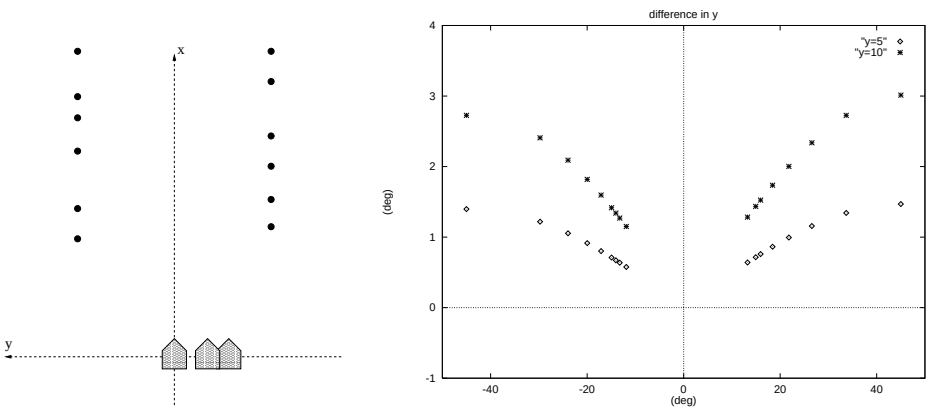
Στο σχήμα 3.3 απεικονίζεται η περίπτωση όπου το σύστημα είναι μετατοπισμένο μόνο κατά την διεύθυνση του x. Η καμπύλη που παρεμβάλλεται στα σημεία $(\Delta\phi_i, \phi_i)$,



Σχήμα 3.3: Η καμπύλη $\Delta\phi$ vs. ϕ, για την περίπτωση διαφορετικής θέσης του συστήματος ως προς την διεύθυνση $x(x > 0)$

μπορεί να προσεγγιστεί από μία κεκλιμένη ευθεία. Αύξηση της μετατόπισης κατά τον άξονα του x προκαλεί μεγαλύτερη περιστροφή της ευθείας αυτής. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η πληροφορία για την εκτίμηση του x μπορεί να εξαχθεί από την κλίση της ευθείας.

Η περίπτωση κατά την οποία υπάρχει μετατόπιση του συστήματος μόνο στην διεύθυνση του άξονα y αποτυπώνεται στο σχήμα 3.4. Η καμπύλη που παρεμβάλλεται στα σημεία της γραφικής παράστασης έχει τη μορφή γράμματος ‘‘V’’. Μεγαλύτερη μετατόπιση στον άξονα y έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες διαφορές στις μετρούμενες γωνίες και συνεπώς στις τιμές των $\Delta\phi_i$. Στην γραφική παράσταση αυτό προκαλεί



Σχήμα 3.4: Η καμπύλη $\Delta\phi$ vs. ϕ, για την περίπτωση διαφορετικής θέσης του συστήματος ως προς την διεύθυνση $y(y > 0)$

επιμήκυνση της καμπύλης στην κατακόρυφη κατεύθυνση, δηλαδή περιορισμό του ανοίγματος του ‘‘V’’. Επομένως, η πληροφορία για την εκτίμηση του y μπορεί να εξαχθεί από το άνοιγμα της καμπύλης.

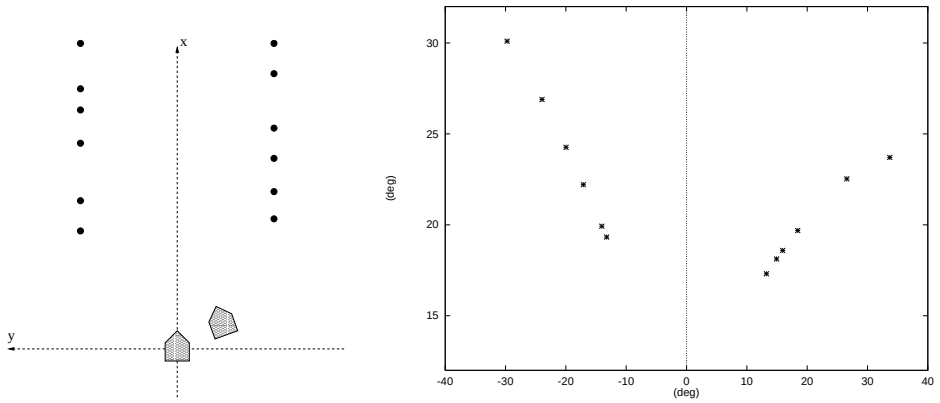
Πρακτικό ενδιαφέρον έχει η γενική περίπτωση κατά την οποία το σύστημα είναι μετατοπισμένο ως προς τις δύο διευθύνσεις x και y και ταυτόχρονα είναι περιστραμμένο κατά γωνία θ όσο αφορά τον προσανατολισμό του ως προς την εικόνα αναφοράς. Αυτή η σύνθετη κίνηση είναι το αποτέλεσμα της συνύπαρξης κάθε μίας από τις στοιχειώδεις κινήσεις των οποίων η επίδραση στην καμπύλη παρεμβολής στα σημεία $(\Delta\phi_i, \phi_i)$ παρουσιάστηκε παραπάνω. Ουσιαστικά λοιπόν, στη γενική περίπτωση η εξεταζόμενη γραφική παράσταση προκύπτει από το συνδυασμό των προηγούμενων γραφικών παραστάσεων (σχήμα 3.5). Έτσι, οι τιμές των x, y και θ υπολογίζονται με τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που περιγράφηκε παραπάνω. Το θ υπολογίζεται από την μετατόπιση της καμπύλης πάνω στον άξονα του $\Delta\phi$, το x από την κλίση της καμπύλης και το y από το άνοιγμά της.

3.2.2 Υλοποίηση

Για την υλοποίηση της μεθόδου που μόλις περιγράφηκε ακολουθείται ο παρακάτω αλγόριθμος:

1. Για κάθε ζεύγος κάθετων ευθειών που έχουν αντιστοιχηθεί μεταξύ τους υπολόγισε το ϕ και το $\Delta\phi$.

2. Με την μέθοδο των *ελαχίστων τετραγώνων* (LS, παράρτημα Α), βρες τις ευθείες που παρεμβάλλονται στις περιοχές της γραφικής παράστασης για $\phi > 0, \phi < 0$ και για



Σχήμα 3.5: Η γενική περίπτωση της καμπύλης $\Delta\phi$ vs. ϕ

όλο το ϕ. Έστω α_+, α_- και α_{all} οι κλίσεις τους και b_+, b_- και b_{all} τα σημεία τομής τους με τον άξονα του $\Delta\phi$ αντίστοιχα.

3. Έλεγξε τα πρόσημα των α_+ και α_-:

   - Αν είναι ίδια, τότε δεν υπάρχει μετατόπιση του συστήματος κατά την διεύθυνση y (σχήμα 3.3). Η διαφορά θέσης και προσανατολισμού στο σύστημα υπολογίζεται:

$$\begin{aligned} x &= \alpha_{all} \cdot CONV_X \\ y &= 0 \\ \theta &= b_{all} \end{aligned} \tag{3.2}$$

   - Αν είναι διαφορετικά τότε η γραφική παράσταση είναι της μορφής του σχήματος 3.5. Η διαφορά θέσης και προσανατολισμού στο σύστημα υπολογίζεται:

$$\begin{aligned} x &= \frac{\alpha_+ + \alpha_-}{2} \cdot conv_x(|y|) \\ y &= \frac{|\alpha_+| + |\alpha_-|}{2} \cdot CONV_Y \cdot (sign\ of\ \alpha_+) \\ \theta &= \frac{b_+ + b_-}{2} \end{aligned} \tag{3.3}$$

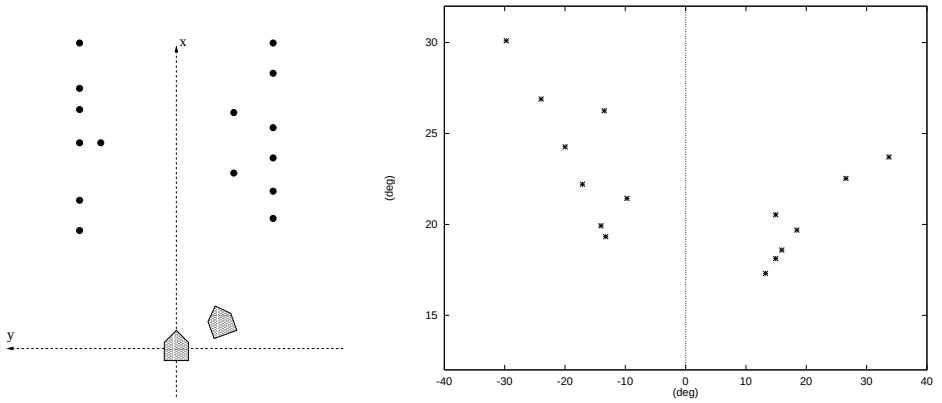
Τα $CONV_X$ και $CONV_Y$ είναι σταθερές ποσότητες, ενώ το $conv_x(\cdot)$ είναι μία συνάρτηση του y.

3.2.3 Παρατηρήσεις από τη μελέτη της μεθόδου

Στην πράξη, η εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζει αρκετές ιδιαιτερότητες. Οι γωνίες ϕ_i και ϕ_i' μπορούν να υπολογιστούν όταν είναι γνωστή η γωνία εύρους λήψης της κάμερας που καταγράφει τις εικόνες που επεξεργάζεται το σύστημα, η οποία είναι μια σταθερή ποσότητα για κάθε κάμερα. Αν όμως δεν είναι γνωστή αυτή η ποσότητα, οι

γωνίες δεν μπορούν να υπολογιστούν από την προβολή των ευθειών στο επίπεδο των δύο εικόνων[1]. Αυτή η παρατήρηση έχει ως συνέπεια την ανάγκη κατασκευής τεχνητών δεδομένων για τη μελέτη της εφαρμογής της μεθόδου. Τα δεδομένα αυτά είναι η εκ των προτέρων γνώση της θέσης των ευθειών στον χώρο. Όσο αφορά λοιπόν τη θέση αυτή, παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Οι κάθετες ευθείες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της γραφικής παράστασης $\Delta\phi$ vs. ϕ πρέπει να βρίσκονται στην ίδια ευθεία στον χώρο. Τέτοιες



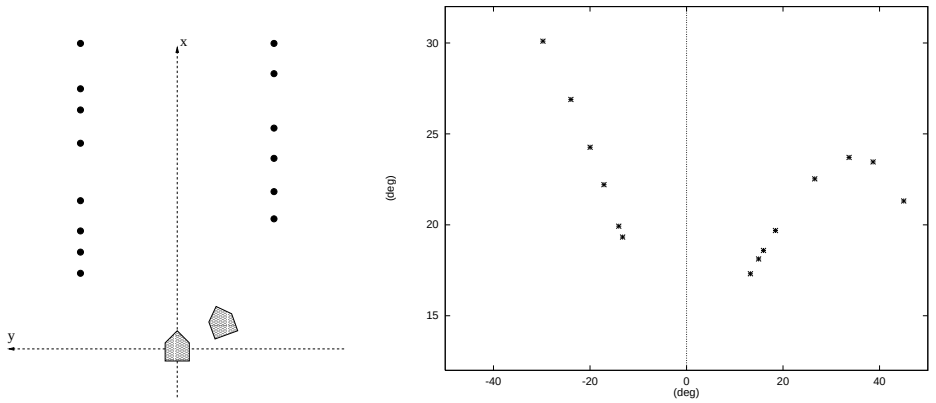
Σχήμα 3.6: Επίδραση κάθετων ευθειών που δεν εξάγονται από τους τοίχους

κάθετες ευθείες είναι αυτές που εξάγονται από τους τοίχους του διαδρόμου. Αντίθετα, ευθείες που εξάγονται από τυχόν αντικείμενα που βρίσκονται αλλού στο χώρο αλλάζουν την κατεύθυνση των ευθειών που υπολογίζονται με τον LS αλγόριθμο (σχήμα 3.6). Έτσι η εφαρμογή των σχέσεων (3.2) και (3.3) γίνεται σε αλλοιωμένες καμπύλες και συνεπώς δίνουν αναξιόπιστα αποτελέσματα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος στην υλοποίηση που έγινε, αντί του LS χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος *ελαχίστου τετραγωνικού ενδιάμεσου* (LMedS, παράρτημα Α) ο οποίος έχει την δυνατότητα να αγνοεί τα ‘‘εκτός θέσης’’ σημεία της γραφικής παράστασης. Σε κάθε περίπτωση όμως, η πλειοψηφία των σημείων από *κάθε* πλευρά της γραφικής παράστασης πρέπει να προέρχεται από κάθετες ευθείες που βρίσκονται στην ίδια ευθεία στον χώρο, ώστε να μπορεί να τα διακρίνει ο LMedS. Εντούτοις, στην πράξη οι περισσότερες κάθετες ευθείες εξάγονται από τους τοίχους των διαδρόμων και κατά συνέπεια βρίσκονται πάνω στην ίδια ευθεία στο χώρο.

- Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται για τις κάθετες ευθείες που βρίσκονται σχετικά κοντά στο σύστημα (βλ. σχήμα 3.7). Η χρήση του LMedS και για αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητη για να ελπίζουμε σε αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η αιτία για την παρουσία των δύο προβλημάτων που μόλις περιγράφηκαν είναι η φύση της δομής του περιβάλλοντος. Μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι η διαφορά στην γωνία

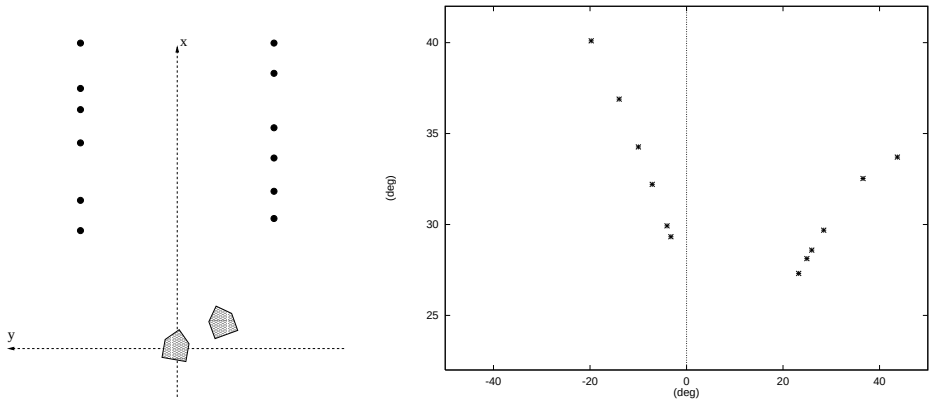
[1]Για τον υπολογισμό τους, απαιτούνται η γνώση του βάθους στο οποίο βρίσκεται η κάθετη ευθεία και της εστιακής απόστασης της κάμερας του συστήματος



Σχήμα 3.7: Επίδραση κοντινών κάθετων ευθειών

υπό την οποία ‘‘φαίνεται’’ μια κάθετη ευθεία του χώρου εξαρτάται από την σχετική θέση της ευθείας ως προς το σύστημα. Για μια συγκεκριμένη κίνηση του συστήματος η διαφορά στην γωνία είναι πιο μικρή για πολύ κοντινές κάθετες ευθείες σε σχέση με την διαφορά στην γωνία για λιγότερο κοντινές ευθείες.

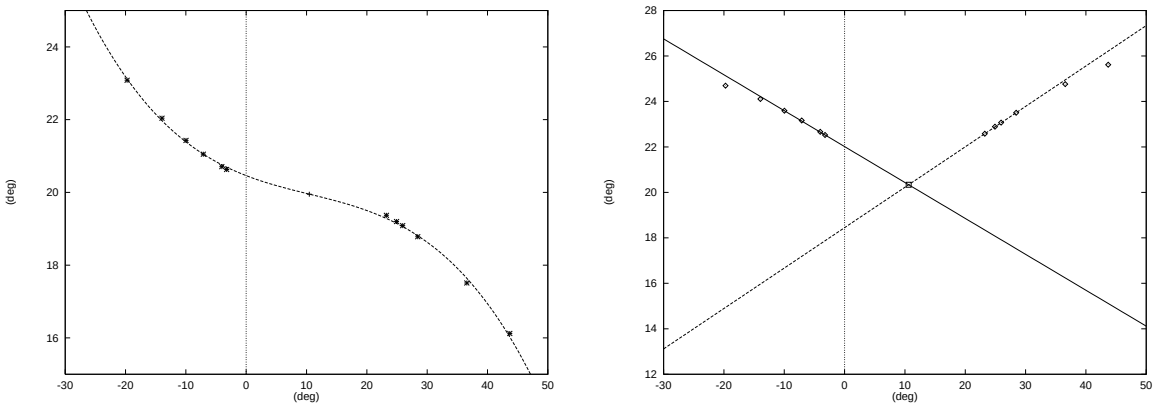
Στην γενική περίπτωση, το σύστημα αναφοράς δεν είναι πάντα προσανατολισμένο σύμφωνα με την κατεύθυνση του διαδρόμου. Πολύ συχνά αντικρύζει τους τοίχους υπό κάποια αρχική γωνία ω. Η επίδραση αυτού του γεγονότος στην εξεταζόμενη γραφική παράσταση, είναι μια μετατόπιση όλων των σημείων $(\Delta\phi_i, \phi_i)$ ως προς τον άξονα του ϕ. Παρατηρήθηκε ότι η μετατόπιση αυτή είναι ακριβώς όσο το μέγεθος της γωνίας υπό την οποία το σύστημα βλέπει τους τοίχους στην εικόνα αναφοράς (σχήμα 3.8). Η παρατήρηση αυτή μας δίνει την δυνατότητα να υπολογίσουμε τη γωνία



Σχήμα 3.8: Η περίπτωση όπου το σύστημα δεν είναι ευθυγραμμισμένο ως προς την κατεύθυνση του διαδρόμου

ω. Όταν υπάρχει κίνηση στη διεύθυνση του άξονα y, δηλαδή η γραφική παράσταση έχει την μορφή γράμματος ‘‘V’’, η γωνία ω υπολογίζεται από το σημείο τομής των δύο ευθειών που παρεμβάλλονται στα σημεία $(\Delta\phi_i, \phi_i)$ της γραφικής παράστασης για $\phi_i > 0$ και για $\phi_i < 0$ (σχήμα 3.9). Αντίθετα, όταν δεν υπάρχει κίνηση στη διεύθυνση του άξονα y η γωνία ω υπολογίζεται από το σημείο καμπής της καμπύλης

που παρεμβάλλεται σε όλα τα σημεία $(\Delta\phi_i, \phi_i)$. Η παρεμβολή μπορεί να γίνει με μία



(α) Σημείο καμπής: $\omega = 10.47^o$ (β) Σημείο τομής: $\omega = 10.62^o$

Σχήμα 3.9: Υπολογισμός της αρχικής γωνίας $\omega = 10^o$, με την χρήση των γραφικών παραστάσεων

πολυωνυμική συνάρτηση 3ου βαθμού[42]. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και συναρτήσεις μεγαλύτερου βαθμού που προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα δεδομένα σημεία, αλλά παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην εκτίμηση της γωνίας ω. Αυτή η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί όταν η γωνία ω είναι σχετικά μικρή, ώστε να είναι γνωστό ποιές κάθετες ευθείες του χώρου προέρχονται από την δεξιά πλευρά του διαδρόμου και ποιές από την αριστερή πλευρά. Διαφορετικά, αυτή η τεχνική πρέπει να συνδυαστεί με μεθόδους *ομαδοποίησης* (clustering) των σημείων $(\Delta\phi_i, \phi_i)$ της γραφικής παράστασης σε δύο ομάδες, που αντιστοιχούν στις δύο πλευρές του διαδρόμου.

Τέλος, οι τιμές των σταθερών ποσοτήτων $CONV_X$ και $CONV_Y$ και η μορφή της συνάρτησης $conv_x(\cdot)$ εκτιμούνται πειραματικά. Παρατηρήθηκε ότι οι τιμές των σταθερών ποσοτήτων εκφράζουν την κλίμακα μεγέθους που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της θέσης των κάθετων ευθειών στον χώρο.

3.3 Μέθοδος της επικάλυψης ευθυγράμμων τμημάτων

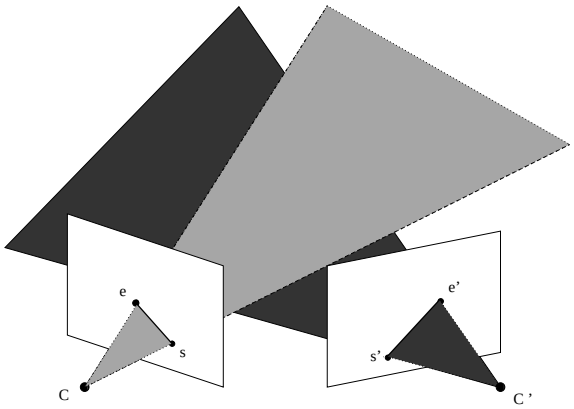
Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο[45], για την εκτίμηση της θέσης του συστήματος ως προς την θέση του στην εικόνα αναφοράς χρησιμοποιούνται *ευθύγραμμα τμήματα*, δηλαδή οι ευθείες γραμμές που εξάγονται από τις εικόνες *μαζί* με τα ακραία τους σημεία. Κατά συνέπεια, αυτή η μέθοδος προϋποθέτει ότι από τις δύο εικόνες έχουν ήδη εξαχθεί τα ευθύγραμμα τμήματα και έχει λυθεί το θέμα της μεταξύ τους αντιστοίχισης. Πολύ περισσότερο από τις κάθετες ευθείες, στους διαδρόμους και τα δωμάτια των εσωτερικών χώρων υπάρχει μεγάλο πλήθος ευθυγράμμων τμημάτων που μπορούν να εξαχθούν για να χρησιμοποιηθούν από την μέθοδο. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ότι τα ευθύγραμμα τμήματα που αντιστοιχίζονται μεταξύ τους πρέπει να είναι προβολές ευθύγραμμων τμημάτων που έχουν κάποιο κοινό κομμάτι

στο χώρο. Η απαίτηση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα περιοριστική για την περίπτωση μικρών παρεκλίσεων του συστήματος από την διαδρομή αναφοράς του, όπου οι δύο συγκρινόμενες εικόνες δεν αναμένεται να έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους.

3.3.1 Περιγραφή της μεθόδου

Το ζητούμενο της μεθόδου είναι η εκτίμηση ενός διανύσματος μετατόπισης $\vec{t}$ και ενός διανύσματος περιστροφής $\vec{r}$ που περιγράφουν την κίνηση του συστήματος μεταξύ των δύο εικόνων. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτή η εκτίμηση είναι μέσω της μεγιστοποίησης της συνολικής επικάλυψης στο χώρο των ευθυγράμμων τμημάτων που αντιστοιχίζονται μεταξύ τους.

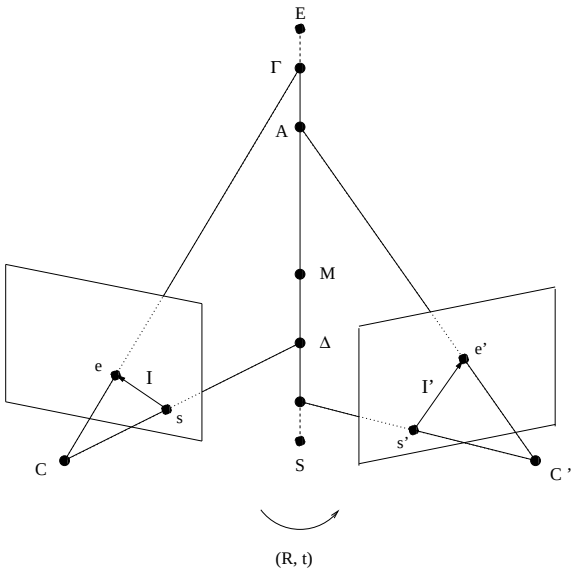
Το σχήμα 3.10 δείχνει τον τρόπο με τον οποίο η ύπαρξη πολλών ευθυγράμμων τμημάτων μπορεί να περιορίσει την κίνηση και να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμησή της. Με τη βοήθεια του σχήματος μπορεί να γίνει κατανοητό ότι η χρήση ευθειών απείρου



Σχήμα 3.10: Εκτίμηση της κίνησης από την τομή των επιπέδων προβολής

μήκους αποτελεί την προβολή ενός ολοκλήρου επιπέδου σημείων του χώρου. Δύο τυχαία τέτοια επίπεδα τέμνονται κατά ανάγκη και το σημείο τομής τους αποτελεί τον άξονα στον οποίο βρίσκεται η ευθεία του χώρου, οι προβολές της οποίας εντοπίζονται στις δύο εικόνες. Συνεπώς, η χρησιμοποίηση ευθειών δεν μπορεί να περιορίσει την κίνηση και να συμβάλλει στην διερεύνηση για την εκτίμησή της. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιούνται ευθύγραμμα τμήματα τα επίπεδα αυτά περιορίζονται σε δύο απείρου μήκους τρίγωνα, όπως αυτά που φαίνονται στο σχήμα 3.10. Δύο τυχαία τέτοια τρίγωνα δεν είναι απαραίτητο ότι θα τέμνονται. Τέμνονται όμως όταν πρόκειται για τα επίπεδα που σχετίζονται με δύο ευθύγραμμα τμήματα του χώρου τα οποία έχουν κάποιο κοινό κομμάτι. Θεωρώντας λοιπόν ότι υπάρχουν επικαλύψεις στα ευθύγραμμα τμήματα που έχουν αντιστοιχηθεί και επιδιώκοντας την μεγιστοποίηση της συνολικής επικάλυψής τους, εκτιμάται η μετατόπιση του συστήματος.

Στο σχήμα 3.11 φαίνεται η γεωμετρία της μετατόπισης των ευθυγράμμων τμημάτων στις δύο εικόνες. Απεικονίζονται δύο ευθύγραμμα τμήματα I και I' που έχουν εξαχθεί από τις εικόνες και έχουν αντιστοιχηθεί μεταξύ τους. Τα ευθύγραμμα τμήματα είναι



Σχήμα 3.11: Η γεωμετρία του προβλήματος με ένα ευθύγραμμο τμήμα

προσανατολισμένα, δηλαδή το ένα άκρο τους θεωρείται *πάντα* η αρχή και το άλλο το τέλος τους. Στο σχήμα αυτό φαίνεται πώς μπορεί δύο ευθύγραμμα τμήματα να είναι προβολές ενός μέρους μόνο του πραγματικού ευθύγραμμου τμήματος στο χώρο και πώς μπορεί αυτά τα μέρη να έχουν κάποιο κοινό κομμάτι, δηλαδή να επικαλύπτονται.

Η μέθοδος για την εκτίμηση του διανύσματος μετατόπισης $\vec{t}$ και του διανύσματος περιστροφής $\vec{r}$ του συστήματος σε σχέση με την εικόνα αναφοράς του έχει ώς εξής:

- Για κάθε ευθύγραμμο τμήμα (s, e) της πρώτης εικόνας και του αντίστοιχού του (s', e') της δεύτερης εικόνας κάνε τα παρακάτω:

  1. Υπολόγισε την επιπολική γραμμή του s στην δεύτερη εικόνα.
  2. Υπολόγισε την ευθεία πάνω στην οποία βρίσκεται το τμήμα (s', e').
  3. Βρες το σημείο τομής s'' των δύο παραπάνω ευθειών.
  4. Επανέλαβε την ίδια διαδικασία με το e, για την εύρεση του e''.
  5. Υπολόγισε τη σχετική επικάλυψη του τμήματος (s'', e'') με το τμήμα (s', e') ως προς το μήκος του (s', e').

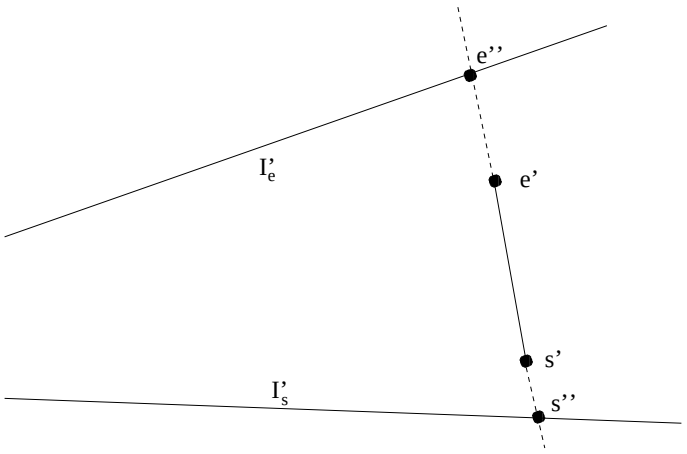
- Επανέλαβε τα παραπάνω για κάθε ευθύγραμμο τμήμα (s', e') της δεύτερης εικόνας με το αντίστοιχό του (s, e) στην πρώτη εικόνα.

- Μεγιστοποίησε τη συνολική επικάλυψη που προκύπτει με βάση τα παραπάνω ως προς τις παραμέτρους $\vec{t}$ και $\vec{r}$.

3.3.2 Υλοποίηση

Έστω ένα ευθύγραμμο τμήμα (s, e) στην πρώτη εικόνα και (s', e') το αντίστοιχό του στην δεύτερη εικόνα. Έστω επίσης ότι η δεύτερη εικόνα έχει προκύψει από μια

μετατόπιση $\vec{t} = [t_1, t_2, t_3]$ και μια περιστροφή $\vec{r} = [r_1, r_2, r_3]$ της πρώτης εικόνας. Η



Σχήμα 3.12: Η υπολογιζόμενη επικάλυψη μεταξύ δύο ευθυγράμμων τμημάτων

επιπολική γραμμή, π.χ. του s στην δεύτερη εικόνα (σχήμα 3.12) υπολογίζεται:

$$I'_s = E \cdot \bar{s}$$

όπου $\bar{s}$ είναι οι ορθοκανονικές συντεταγμένες του s στην πρώτη εικόνα και Ε είναι ο *βασικός πίνακας* (essential matrix) των $\vec{t}$ και $\vec{r}$:

$$E = [t]_x \cdot R$$

Τα $[t]_x$ και R ορίζονται άμεσα από τα $\vec{t}$ και $\vec{r}$ ως εξής:

$$[t]_x = \begin{bmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{bmatrix}$$

και

$$R = I_3 + \frac{\sin\theta}{\theta} \cdot [r]_x + \frac{1 - \cos\theta}{\theta^2} \cdot [r]_x^2$$

όπου I_3 είναι ο 3×3 μοναδιαίος πίνακας, το $[r]_x$ ορίζεται αντίστοιχα με το $[t]_x$ και θ είναι το μέτρο του $\vec{r}$. Η εξίσωση της ευθείας πάνω στην οποία βρίσκεται το ευθύγραμμο τμήμα (s', e') δίνεται από την σχέση:

$$I' = s' \times e' = 0$$

Το σημείο s'' δίνεται από την σχέση:

$$s'' = I' \times I'_s$$

Εντελώς αντίστοιχα υπολογίζεται το e'':

$$e'' = I' \times I'_e = I' \times (E \cdot \bar{e})$$

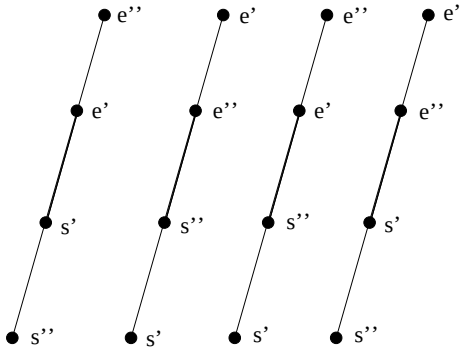
Έτσι υπολογίζεται το (s'', e'') στην δεύτερη εικόνα. Η επικάλυψη που μετράται σε αυτήν μεταξύ του (s'', e'') και του (s', e') είναι:

$$\mathcal{L}' = \min(\| e' - s' \|, \| e'' - s' \|, \| e' - s'' \|, \| e'' - s'' \|)$$

αν υπάρχει επικάλυψη και:

$$\mathcal{L}' = -\min(\| e' - s'' \|, \| e'' - s' \|)$$

αν δεν υπάρχει επικάλυψη μεταξύ του (s'', e'') και του (s', e'). Η συνθήκη για να υπάρχει



Σχήμα 3.13: Οι τέσσερις δυνατές διατάξεις των ακραίων σημείων των προσανατολισμένων ευθυγράμμων τμημάτων για να υπάρχει επικάλυψη

επικάλυψη μεταξύ των δύο ευθυγράμμων τμημάτων προκύπτει με την βοήθεια του σχήματος 3.13 και είναι:

$$(s'' - s') \cdot (e' - s'') > 0 \ \| \ (e'' - s') \cdot (e' - e'') > 0 \ \|$$
$$\| \ (s' - s'') \cdot (e'' - s') > 0 \ \| \ (e' - s'') \cdot (e'' - e') > 0$$

Τα διανύσματα $\vec{t}$ και $\vec{r}$ υπολογίζονται από την μεγιστοποίηση της συνολικής επικάλυψης των n αντιστοιχίσεων $(I_i, I'_i), i = 1, .., n$, δηλαδή την ελαχιστοποίηση της ποσότητας:

$$\mathcal{F} = \sum_{i=1}^{n}((1 - \frac{\mathcal{L}_i}{l_i})^2 + (1 - \frac{\mathcal{L}'_i}{l'_i})^2) \tag{3.4}$$

όπου:

$\mathcal{L}_i$ είναι η επικάλυψη που υπολογίζεται στην πρώτη εικόνα,

$\mathcal{L}'_i$ είναι η επικάλυψη που υπολογίζεται στη δεύτερη εικόνα,

l_i είναι το μήκος του τμήματος I_i και

l'_i είναι το μήκος του τμήματος I'_i.

Όπως προκύπτει από την σχέση (3.4), η εκτίμηση των διανυσμάτων $\vec{t}$ και $\vec{r}$ είναι το αποτέλεσμα της ελαχιστοποίησης μιας μη γραμμικής ποσότητας. Έτσι χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος *DownHill Simplex*[31]. Αυτή η μέθοδος χρειάζεται μια καλή αρχική εκτίμηση της λύσης προκειμένου να την εντοπίσει. Για να βρεθεί αυτή η αρχική εκτίμηση ακολουθείται η παρακάτω στρατηγική:

- Εφαρμόζεται δειγματοληψία στο χώρο των διανυσμάτων περιστροφής. Καθώς αναμένεται να υπάρχει περιστροφή της κάμερας του συστήματος μόνο κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση, ο χώρος αναζήτησης μπορεί να περιοριστεί στο χώρο των κατακόρυφων διανυσμάτων ως προς το επίπεδο του εδάφους. Η δειγματοληψία που μπορεί να γίνει είναι ομοιόμορφη στο εύρος $[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}]$ με βήμα $\frac{\pi}{12}$. Με αυτόν τον τρόπο παίρνουμε 7 δείγματα.

- Εφαρμόζεται δειγματοληψία στο χώρο των διανυσμάτων μετατόπισης. Καθώς αναμένεται να υπάρχει μετατόπιση της κάμερας του συστήματος μόνο στο επίπεδο του εδάφους, ο χώρος αναζήτησης μπορεί να περιοριστεί στο χώρο των διανυσμάτων που βρίσκονται στο επίπεδο του εδάφους. Η δειγματοληψία μπορεί να γίνει με την εφαρμογή ομοιόμορφου διαμερισμού μιας ημισφαίρας[2] Gaussian[7]. Παίρνουμε έτσι 9 δείγματα μεταφορικών διανυσμάτων και μαζί με τα δυϊκά τους συνολικά 16 δείγματα.

- Για κάθε ένα συνδυασμό δειγμάτων περιστροφής και μεταφοράς (συνολικά $16 \cdot 7 = 112$) υπολογίζεται η προς ελαχιστοποίηση ποσότητα σύμφωνα με την σχέση (3.4).

- Διαλέγονται σαν ''καλές'' αρχικές τιμές οι συνδυασμοί των δειγμάτων $\vec{t}$ και $\vec{r}$ που στον προηγούμενο υπολογισμό έδωσαν τις 10 μικρότερες τιμές στην παράσταση προς ελαχιστοποίηση.

Για κάθε μία από τις παραπάνω αρχικές λύσεις εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Downhill Simplex. Η τελική λύση που έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη από τις τιμές για την ποσότητα $\mathcal{F}$ αποτελεί τη ζητούμενη εκτίμηση για τα διανύσματα $\vec{t}$ και $\vec{r}$.

3.3.3 Παρατηρήσεις από τη μελέτη της μεθόδου

Από την περιγραφή της μεθόδου γίνεται φανερό ότι αυτή η προσέγγιση είναι αρκετά πολύπλοκη σε υπολογισμούς. Χρειάζονται πολλοί υπολογισμοί σε πολλά ευθύγραμμα τμήματα και το πρόβλημα καταλήγει στην ελαχιστοποίηση μιας μη γραμμικής ποσότητας ως προς τρεις μεταβλητές. Η λύση εντοπίζεται με διερεύνηση στο χώρο των πιθανών λύσεων και αφού εντοπιστεί μια καλή αρχική τιμή, επιδιώκεται ο ακριβέστερος εντοπισμός της με επαναληπτικό τρόπο.

Ένα χαρακτηριστικό των μεθόδων όπως αυτή, που χρησιμοποιούν δηλαδή δισδιάστατα χαρακτηριστικά του κόσμου για την εκτίμηση της θέσης του συστήματος, είναι ότι γεωμετρικά δεν είναι δυνατόν να υπολογισθεί το μέτρο του διανύσματος μετατόπισης. Η αδυναμία αυτή παρουσιάζεται φυσικά και στην παρούσα μέθοδο.

Όμως το διάνυσμα της μετατόπισης δε μπορεί να εκτιμηθεί με άμεσο τρόπο ούτε όσο αφορά το πρόσημό του. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η δειγματοληψία του

[2] Η προσέγγιση αυτή δεν έχει την δυνατότητα να εκτιμήσει άμεσα το πρόσημο του $\vec{t}$ και κατά συνέπεια μπορεί να περιοριστεί ο χώρος των διανυσμάτων μετατόπισης για την δειγματοληψία σε μία ημισφαίρα.

χώρου των διανυσμάτων μετατόπισης μπορεί να περιοριστεί σε μία ημισφαίρα Gaussian. Το πρόσημο του διανύσματος της μετατόπισης μπορεί να εκτιμηθεί εκ των υστέρων, υπολογίζοντας π.χ. τη θέση των ευθυγράμμων τμημάτων στον χώρο και απαιτώντας να βρίσκονται μπροστά από την κάμερα του συστήματος, εφόσον αυτό τα είχε στο οπτικό του πεδίο. Για την εκτίμηση του προσήμου αρκεί η χρησιμοποίηση λίγων σημείων, συνήθως πέντε ή έξι σημεία μπορούν να εξασφαλίσουν την σωστή εκτίμησή του. Στα πειράματα που έγιναν με τη χρήση δέκα σημείων, το πρόσημο εκτιμήθηκε όλες τις φορές σωστά.

Ένα θέμα που προκύπτει κατά την υλοποίηση είναι όταν μία επιπολική γραμμή σχηματίζει μικρή γωνία με το ευθύγραμμο τμήμα της άλλης εικόνας. Τότε η εκτίμηση του σημείου τομής τους δε μπορεί να είναι ακριβής και το συγκεκριμένο ζευγάρι των ευθυγράμμων τμημάτων πρέπει να αγνοείται από τους υπολογισμούς της συνολικής επικάλυψης στις δύο εικόνες.

Τέλος, για την αξιολόγηση της μεθόδου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ο τρόπος με τον οποίο το πλήθος των ευθυγράμμων τμημάτων και τα ενδεχόμενα λάθη στην αντιστοίχισή τους επηρεάζουν την απόδοσή του. Θεωρητικά, η μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και αν υπάρχει μόνο ένα ζευγάρι ευθυγράμμων τμημάτων. Όμως, όσο περισσότερα ευθύγραμμα τμήματα υπάρχουν τόσο περιορίζεται ο διανυσματικός χώρος μέσα στον οποίο ψάχνει η μέθοδος για να εντοπίσει την πιθανή λύση. Σε πραγματικά δεδομένα, όπου υπάρχουν λάθη αντιστοιχίσεων μεταξύ των ευθυγράμμων τμημάτων και μικρότερα λάθη στον ακριβή εντοπισμό τους, είναι ανάγκη να υπάρχουν διαθέσιμα περισσότερα ευθύγραμμα τμήματα.

Κεφάλαιο 4

Εκτίμηση θέσης με αντιστοίχιση σημείων

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο και η υλοποίηση μιας μεθόδου για την εκτίμηση της θέσης του αυτόνομου συστήματος ως προς την εικόνα αναφοράς του, με τη βοήθεια αντιστοιχίσεων *σημείων* του χώρου που εξάγονται από το περιβάλλον[22]. Θεωρείται δεδομένο ότι έχει προηγηθεί το στάδιο της εξαγωγής των σημείων από τις δύο εικόνες και το στάδιο της αντιστοίχισης των σημείων αυτών μεταξύ τους, με τρόπους αντίστοιχους με αυτούς που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2. Αναμένεται ότι σε εσωτερικούς χώρους κτιρίων, για τους οποίους προορίζεται η εφαρμογή, υπάρχουν αρκετά σημεία για να εντοπιστούν και να χρησιμοποιηθούν από την παρούσα μέθοδο.

4.2 Περιγραφή της μεθόδου

Το ζητούμενο της μεθόδου είναι η εκτίμηση της σχετικής θέσης του συστήματος ως προς την θέση του στην εικόνα αναφοράς, με βάση N αντιστοιχίσεις σημείων. Αυτό ισοδυναμεί με την προσπάθεια εκτίμησης της τρισδιάστατης κίνησης του συστήματος μεταξύ των δύο θέσεων. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η κίνηση μπορεί να αναλυθεί σε ένα διάνυσμα μεταφορικής κίνησης $\vec{t}$ και ένα διάνυσμα περιστροφικής κίνησης $\vec{r}$ του συστήματος. Όταν για την εκτίμηση αυτών χρησιμοποιούνται δισδιάστατα χαρακτηριστικά, δηλαδή οι προβολές χαρακτηριστικών του χώρου στις εικόνες, το διάνυσμα της μεταφορικής κίνησης δε μπορεί να εκτιμηθεί ως προς το μέτρο του. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι και τα σημεία, που χρησιμοποιούνται από αυτήν τη μέθοδο.

Η μεθοδολογία για τον υπολογισμό των $\vec{t}$ και $\vec{r}$ προσανατολίζεται στη λύση των εξισώσεων κίνησης των σημείων μεταξύ των δύο εικόνων. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές επίλυσης των εξισώσεων που καταλήγουν στην επίλυση είτε σε γραμμικών

είτε μη γραμμικών συστημάτων. Γενικά, η επίλυση γραμμικών συστημάτων έχει το πλεονέκτημα των εύκολων και γρήγορων υπολογισμών αλλά τα αποτελέσματα είναι ευαίσθητα στην παρουσία θορύβου, π.χ. λόγω λαθών στην αντιστοίχιση των σημείων. Αντίθετα, η επίλυση μη γραμμικών συστημάτων είναι πιο πολύπλοκη σε υπολογισμούς και απαιτεί μια καλή αρχική εκτίμηση της λύσης αλλά εφόσον αυτή είναι διαθέσιμη, μπορεί να δώσει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Η μέθοδος που μελετήθηκε καταλήγει στην επίλυση ενός γραμμικού συστήματος και για να αντιμετωπισθεί η επίδραση των ενδεχόμενων λαθών στις αντιστοιχίσεις των σημείων, έχει προσαρμοστεί ο αλγόριθμος LMedS (παράρτημα Α) στην επίλυση του συστήματος.

4.2.1 Μοντέλο κίνησης

Έστω ότι ένα σημείο του τρισδιάστατου χώρου εντοπίζεται στη θέση $\vec{p}$ ως προς τη θέση του συστήματος στην εικόνα αναφοράς. Αν το σύστημα μετατοπιστεί κατά την κίνηση $(\vec{t}, \vec{r})$, με $\vec{t} = (t_1, t_2, t_3)$ και $\vec{r} = (r_1, r_2, r_3)$, το ίδιο σημείο θα εντοπισθεί σε μία άλλη θέση $\vec{p'}$ ως προς το σύστημα στη νέα του θέση. Η σχέση που συνδέει τις δύο θέσεις του σημείου είναι:

$$\vec{p'} = R \cdot \vec{p} + \vec{t} \tag{4.1}$$

όπου R είναι ο πίνακας περιστροφής που προκύπτει από το διάνυσμα $\vec{r}$. Η εξίσωση (4.1) είναι η βασική εξίσωση κίνησης που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των $\vec{t}$ και $\vec{r}$.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να παρασταθεί ο πίνακας R. Αν είναι γνωστό ένα διάνυσμα περιστροφής $\vec{r}$, η διεύθυνση και το μέτρο του οποίου είναι ο άξονας περιστροφής και το μέγεθος της γωνίας περιστροφής αντίστοιχα, ο πίνακας R μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$R = I_3 + \frac{\sin\theta}{\theta} \cdot [r]_x + \frac{1 - \cos\theta}{\theta^2} \cdot [r]_x^2$$

όπου I_3 είναι ο 3×3 μοναδιαίος πίνακας, θ είναι το μέτρο του $\vec{r}$ και το $[r]_x$ ορίζεται:

$$[r]_x = \begin{bmatrix} 0 & -r_3 & r_2 \\ r_3 & 0 & -r_1 \\ -r_2 & r_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Εναλλακτικά, ο R μπορεί να περιγραφεί από τρεις διαδοχικές περιστροφές γύρω από τους άξονες x, y και z, με γωνίες ω, ψ και ϕ αντίστοιχα και μπορεί να υπολογισθεί ως το γινόμενο αυτών των τριών περιστροφών:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \sin\omega \\ 0 & -\sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix}$$

Στην πρώτη περίπτωση η εκτίμηση της κίνησης γίνεται με βάση τις παραμέτρους t_1, t_2, t_3, r_1, r_2 και r_3, ενώ στην δεύτερη περίπτωση γίνεται με βάση τις παραμέτρους t_1,

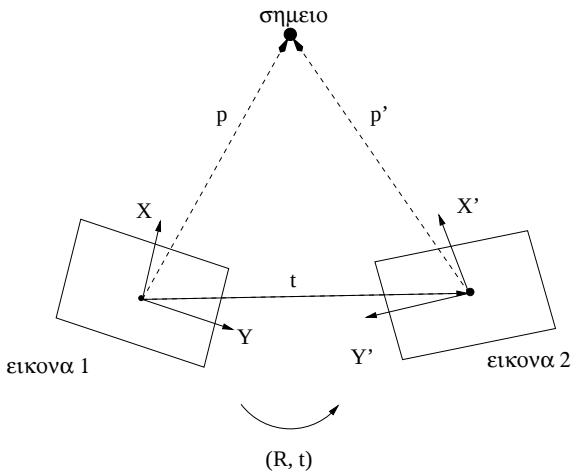
t_2, t_3, ω, ψ και ϕ. Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν έξι παράμετροι που περιγράφουν την κίνηση.

Συχνά χρησιμοποιούνται και οι εννέα συντελεστές $\{r_{ij}\}_{i,j=1,2,3}$ του πίνακα περιστροφής R για την περιγραφή του. Αυτοί όμως δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και τελικά η κίνηση περιγράφεται πάλι από έξι ανεξάρτητες παραμέτρους.

4.2.2 Μεθοδολογία

Η σχέση (4.1) συνδέει τη θέση ενός σημείου του χώρου ως προς δύο συστήματα συντεταγμένων προσαρμοσμένα στη θέση του συστήματος κατά τη λήψη της εικόνας αναφοράς και της τρέχουσας εικόνας που λαμβάνει το σύστημα. Το ζητούμενο είναι να εκτιμηθούν οι παράμετροι R και $\vec{t}$, έχοντας N αντιστοιχίσεις σημείων του χώρου $(\vec{p}_i, \vec{p}_i')_{i=1,\cdots,N}$ και γνωρίζοντας μόνο τις προβολές τους $(\vec{P}_i, \vec{P}_i')_{i=1,\cdots,N}$ που μετρώνται στις δύο εικόνες. Έχει όμως ήδη αναφερθεί ότι από δύο προοπτικές προβολές μιας σκηνής δεν είναι δυνατόν να καθορισθεί το μέτρο του $\vec{t}$. Αυτό υποδηλώνει και το γεγονός ότι η προοπτική προβολή ενός αντικειμένου σε μια εικόνα είναι ίδια με την προβολή ενός άλλου που βρίσκεται σε διπλάσια απόσταση από το επίπεδο προβολής αλλά έχει διπλάσιο μέγεθος από το πρώτο αντικείμενο και κινείται με τη διπλάσια ταχύτητα από αυτό. Έτσι, το διάνυσμα μεταφοράς $\vec{t}$ μπορεί να εκτιμηθεί μόνο κατά αναλογία ως προς το μέτρο του. Κατά συνέπεια, το πρόβλημα περιορίζεται στην εκτίμηση του R και του $\frac{\vec{t}}{||\vec{t}||}$, που εκφράζει την κατεύθυνση του διανύσματος μεταφοράς.

Όταν είναι διαθέσιμα οκτώ ή περισσότερα σημεία σε αντιστοίχιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια γραμμική μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος. Στο σχήμα 4.1 απεικονίζεται η γεωμετρία της προβολής ενός σημείου στις δύο εικόνες. Από το σχήμα



Σχήμα 4.1: Γεωμετρία της προβολής των σημείων στις δύο εικόνες του συστήματος

φαίνεται ότι τα τρία διανύσματα $R\vec{p}$, $\vec{p'}$ και $\vec{t}$ είναι ομοεπίπεδα, άρα ισχύει:

$$\vec{p'} \cdot (\vec{t} \times (R \cdot \vec{p})) = 0$$

και ισοδύναμα:

$$(\vec{p'})^T \cdot E \cdot \vec{p} = 0 \tag{4.2}$$

όπου E είναι ένας 3×3 πίνακας που ονομάζεται *βασικός πίνακας* (essential matrix) και ορίζεται:

$$E \equiv [t]_x \cdot R = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 \\ e_4 & e_5 & e_6 \\ e_7 & e_8 & e_9 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

και το $[t]_x$ ορίζεται κατά αντιστοιχία με το $[r]_x$. Αν θεωρήσουμε ότι οι προβολές γίνονται στο επίπεδο $z = 1$, ότι τα ορατά από το σύστημα σημεία έχουν $z > 0$ και συμβολίσουμε $\vec{p} = (x, y, z)$ και $\vec{p'} = (x', y', z')$ και αντίστοιχα τις προβολές τους στο επίπεδο της εικόνας $\vec{P} = (X, Y)$ και $\vec{P'} = (X', Y')$, τότε διαιρώντας και τα δύο μέλη στην σχέση (4.2) με την θετική ποσότητα $z \cdot z'$ έχουμε:

$$(\vec{P'})^T \cdot E \cdot \vec{P} = 0$$

ή ισοδύναμα:

$$\begin{bmatrix} X' & Y' & 1 \end{bmatrix} \cdot E \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \tag{4.4}$$

Η εξίσωση (4.4) είναι γραμμική και ομογενής με αγνώστους τις παραμέτρους $\{e_i\}_{i=1,\cdots,9}$. Όταν υπάρχουν οκτώ ή περισσότερα ζευγάρια σημείων $(\vec{P}, \vec{P'})$ δημιουργείται ένα γραμμικό σύστημα, το οποίο μπορεί να λυθεί ως προς παραμέτρους $\{e_i\}_{i=1,\cdots,9}$. Καθώς το σύστημα είναι ομογενές, αυτές μπορούν να εκτιμηθούν μόνο κατά αναλογία μιας σταθεράς. Κατόπιν, τα ζητούμενα R και $\vec{t}$ υπολογίζονται από τον πίνακα E. Στην πράξη, υπάρχουν συχνά λάθη αντιστοίχισης των σημείων και ο υπολογισμός του E γίνεται με τεχνικές που εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στους υπολογισμούς.

4.3 Υλοποίηση

Η διαδικασία της υλοποίησης μπορεί να διακριθεί σε τέσσερα επιμέρους βήματα. Αυτά είναι κατά σειρά η εκτίμηση του πίνακα E, ο υπολογισμός ενός μοναδιαίου διανύσματος $\vec{t}_u = \pm\frac{\vec{t}}{||\vec{t}||}$ στην κατεύθυνση του διανύσματος μεταφοράς $\vec{t}$, ο υπολογισμός του R από τον E και τέλος ο καθορισμός του προσήμου του $\vec{t}_u$.

Εκτίμηση του E: Το σύστημα της σχέσης (4.4) μπορεί να γραφεί:

$$A \cdot \vec{h} = 0$$

όπου ο A είναι ένας $N \times 9$ πίνακας που υπολογίζεται άμεσα από τις συντεταγμένες των προβολών των σημείων στις εικόνες και $\vec{h} = (h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, h_8, h_9)^T$ είναι το διάνυσμα των αγνώστων του συστήματος. Παρουσία θορύβου στα περιεχόμενα του A, το πρόβλημα μετατρέπεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης:

$$||A \cdot \vec{h}|| = min \tag{4.5}$$

Η λύση της εξίσωσης (4.5) για το $\vec{h}$ δίδεται από το μοναδιαίο ιδιοδιάνυσμα του A^TA που σχετίζεται με την μικρότερη ιδιοτιμή του. Βάσει του $\vec{h}$, ο πίνακας E υπολογίζεται ως εξής:

$$E = \begin{bmatrix} \vec{E}_1 & \vec{E}_2 & \vec{E}_3 \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot \begin{bmatrix} h_1 & h_4 & h_7 \\ h_2 & h_5 & h_8 \\ h_3 & h_6 & h_9 \end{bmatrix}$$

Υπολογισμός του $\vec{t}_u$: Το $\vec{t}_u$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση του $\vec{t}$. Υπολογίζεται από την σχέση:

$$||E \cdot \vec{t}_u|| = min$$

Αντίστοιχα με την εκτίμηση του $\vec{h}$, το $\vec{t}_u$ δίδεται από το μοναδιαίο ιδιοδιάνυσμα του EE^T που σχετίζεται με την μικρότερη ιδιοτιμή του. Αν:

$$\sum_i (\vec{t}_u \times \vec{X}_i') \cdot (E \cdot \vec{X}_i) < 0$$

τότε $\vec{t}_u \leftarrow -\vec{t}_u$. Το παραπάνω άθροισμα υπολογίζεται για λίγα ζευγάρια σημείων ώστε να μην επηρεάζεται το αποτέλεσμα από τον ενδεχόμενο θόρυβο. Στην πράξη φάνηκε ότι τρία ή τέσσερα ζευγάρια σημείων αρκούν για να υπολογιστεί το πρόσημο του $\vec{t}$ με ασφάλεια.

Υπολογισμός του R: Για τον υπολογισμό του πίνακα R χρησιμοποιείται η σχέση (4.3) και έχουμε:

$$R^T \cdot [-\vec{t}_u]_x - E^T = 0$$

Παρουσία θορύβου, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$||R^T \cdot [-\vec{t}_u]_x - E^T|| = min \tag{4.6}$$

Εναλλακτικά, ο R μπορεί να υπολογισθεί πιο άμεσα. Έστω $W = \begin{bmatrix} \vec{W}_1 & \vec{W}_2 & \vec{W}_3 \end{bmatrix}$ με:

$$\vec{W}_1 = \vec{E}_1 \times \vec{t}_u + \vec{E}_2 \times \vec{E}_3$$
$$\vec{W}_2 = \vec{E}_2 \times \vec{t}_u + \vec{E}_3 \times \vec{E}_1$$
$$\vec{W}_1 = \vec{E}_3 \times \vec{t}_u + \vec{E}_1 \times \vec{E}_2$$

Παρουσία θορύβου, ο R υπολογίζεται από την σχέση:

$$||R - W|| = min \tag{4.7}$$

Ο πίνακας R μπορεί να υπολογισθεί είτε με τη βοήθεια της σχέσης (4.6), είτε με τη βοήθεια της σχέσης (4.7). Η γενική τους μορφή είναι:

$$||R \cdot C - D|| = min$$

όπου $C = \left[\begin{array}{ccc} \vec{C}_1 & \vec{C}_2 & \vec{C}_3 \end{array} \right]$ και $D = \left[\begin{array}{ccc} \vec{D}_1 & \vec{D}_2 & \vec{D}_3 \end{array} \right]$. Ορίζεται ο 4×4 πίνακας:

$$B = \sum_{i=1}^{3} B_i^T \cdot B_i$$

όπου:

$$B_i = \left[\begin{array}{cc} 0 & (C_i - D_i)^T \\ D_i - C_i & [D_i - C_i]_x \end{array} \right]$$

Αν $\vec{q} = (q_0, q_1, q_2, q_3)^T$ είναι το μοναδιαίο ιδιοδιάνυσμα του B που σχετίζεται με την μικρότερη ιδιοτιμή του, η λύση για τον υπολογισμό του R δίνεται από την σχέση:

$$R = \left[\begin{array}{ccc} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2 \cdot (q_1 \cdot q_2 - q_0 \cdot q_3) & 2 \cdot (q_1 \cdot q_3 + q_0 \cdot q_2) \\ 2 \cdot (q_2 \cdot q_1 + q_0 \cdot q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2 \cdot (q_2 \cdot q_3 - q_0 \cdot q_1) \\ 2 \cdot (q_3 \cdot q_1 - q_0 \cdot q_2) & 2 \cdot (q_3 \cdot q_2 + q_0 \cdot q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{array} \right]$$

Υπολογισμός του $\frac{\vec{t}}{||\vec{t}||}$: Για τον υπολογισμό της μεταφορικής κίνησης πρέπει αρχικά να γίνει έλεγχος για $\vec{t} = 0$. Έστω ϵ ένα μικρό κατώφλι ($\epsilon = 0$, αν δεν υπάρχει θόρυβος). Αν:

$$\frac{||\vec{X}_i' \times R \cdot \vec{X}_i||}{||\vec{X}_i|| \cdot ||\vec{X}_i'||} \leq \epsilon$$

για κάθε τιμή του i τότε $\vec{t} \approx 0$, διαφορετικά μπορεί να υπολογισθεί το πρόσημό του. Αν:

$$\sum_i (\vec{t}_u \times \vec{X}_i') \cdot (\vec{X}_i' \times R \cdot \vec{X}_i) > 0$$

τότε $\frac{\vec{t}}{||\vec{t}||} = \vec{t}_u$, αλλιώς $\frac{\vec{t}}{||\vec{t}||} = -\vec{t}_u$. Όμοια όπως παραπάνω, το άθροισμα μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τρία ή τέσσερα ζευγάρια σημείων ώστε να μην επηρεάζεται το αποτέλεσμα από τον θόρυβο στον εντοπισμό των σημείων.

Πολλές φορές υπάρχουν λάθη στις αντιστοιχίσεις μεταξύ των σημείων, γεγονός το οποίο επηρεάζει τα αποτελέσματα του αλγορίθμου. Για να αντιμετωπισθεί αυτό το ζήτημα η μέθοδος ενισχύθηκε με την ιδέα της προσέγγισης του LMedS (παράρτημα Α). Έτσι, όταν υπάρχουν οι αντιστοιχίσεις περισσότερων από οκτώ σημεία επιλέγονται με τυχαίο τρόπο οκτώ ζευγάρια σημείων από το σύνολο των αντιστοιχίσεων και λύνεται το θέμα της εκτίμησης της κίνησης όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται για ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων με διαφορετικά σύνολα αντιστοιχίσεων σημείων που επιλέγονται με τυχαίο τρόπο. Ο αριθμός των επαναλήψεων καθορίζεται τέτοιος ώστε να εξασφαλίζεται, με μια επιθυμητή πιθανότητα, ότι θα επιλεχθεί ένα τουλάχιστον σύνολο που δεν θα περιέχει ζευγάρια σημείων που έχουν από λάθος αντιστοιχηθεί μεταξύ τους, αν είναι γνωστή η εκ των προτέρων πιθανότητα να γίνει λάθος στην αντιστοίχιση δύο σημείων. Κατόπιν υπολογίζεται ο ελάχιστος ενδιάμεσος στο διάνυσμα της απόκλισης $A \cdot \vec{h}$ για καθένα σύνολο σημείων και με βάση την εκτίμηση της κίνησης που δίνει η οκτάδα των σημείων στην οποία αντιστοιχεί ο

ελάχιστος ενδιάμεσος εντοπίζονται οι αντιστοιχίσεις με αυξημένη πιθανότητα λάθους, καθώς αυτές δεν συμβαδίζουν με το μοντέλο της κίνησης από τη συγκεκριμένη οκτάδα. Τα σημεία που συμμετέχουν στις λάθος αντιστοιχίσεις απομονώνονται και επιλύεται το πρόβλημα της εκτίμησης της κίνησης χρησιμοποιώντας τα υπόλοιπα ζευγάρια σημείων.

4.4 Παρατηρήσεις από την μελέτη της μεθόδου

Η εκτίμηση της σχετικής θέσης του συστήματος ως προς την θέση του στην εικόνα αναφοράς με την παραπάνω μέθοδο είναι σχετικά απλή στην υλοποίηση και έχει μικρή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Η λύση υπολογίζεται γρήγορα καθώς το σύστημα που επιλύεται είναι γραμμικό. Όταν είναι διαθέσιμα αρκετά σημεία για την λύση του προβλήματος τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα, ακόμα και παρουσία θορύβου στον εντοπισμό των σημείων στον χώρο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όλα τα σημεία συμμετέχουν στους υπολογισμούς με την χρησιμοποίηση της τεχνικής ελαχίστων τετραγώνων για την επίλυση του συστήματος που προκύπτει. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων ενισχύεται ακόμη περισσότερο με την προσθήκη του LMedS στην μέθοδο, αντιμετωπίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο το ενδεχόμενο λαθών στις αντιστοιχίσεις μεταξύ των σημείων. Επιπλέον, η προσθήκη του LMedS δεν καθυστερεί ιδιαίτερα τους υπολογισμούς καθώς πραγματοποιεί λίγες σχετικά επαναλήψεις. Για παράδειγμα, θεωρώντας ότι η αντιστοίχιση των σημείων είναι επιτυχής στο 80% των περιπτώσεων, σε 31 επαναλήψεις αναμένεται με πιθανότητα 99% ότι θα επιλεγεί ένα τουλάχιστον σύνολο σημείων που δεν θα περιέχει λάθη αντιστοίχισης και κατά συνέπεια θα μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή εκτίμηση της κίνησης.

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Για την αντικειμενική αξιολόγηση της απόδοσης των μεθόδων που μελετήθηκαν θα έπρεπε αυτές να προσαρμοστούν σε ένα αυτόνομο σύστημα για την επίτευξη της πλοήγησης σε πραγματικό χρόνο. Μια τέτοια προσπάθεια όμως είναι εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρα, η οποία σε συνδυασμό με τη μελέτη που έχει προηγηθεί ξεφεύγει από τα πλαίσια μιας μεταπτυχιακής εργασίας. Εξάλλου, για την εφαρμογή των μεθόδων που παρουσιάσθηκαν χρειάζεται και η υλοποίηση των πρώτων σταδίων της πλοήγησης, δηλαδή της εξαγωγής και της αντιστοίχισης των χαρακτηριστικών από το περιβάλλον του συστήματος. Αν και στο εργαστήριό μας έχουν γίνει εργασίες προς αυτήν την κατεύθυνση υπάρχουν ακόμα ορισμένες ελλείψεις. Για παράδειγμα, δεν υπάρχει διαθέσιμο εργαλείο για την αντιστοίχιση των ευθειών που εξάγονται και συνεπώς είναι απαραίτητη η ανθρώπινη παρέμβαση. Έτσι, στην παρούσα φάση δε μπορεί να αυτοματοποιηθεί η όλη διαδικασία.

Ως φυσικό επακόλουθο των παραπάνω η εφαρμογή των μεθόδων περιορίζεται σε συνθήκες ελεγχόμενου πειράματος. Η χρήση πραγματικών εικόνων μπορεί να μας προσφέρει μόνο μια ποιοτική εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων, γιατί δεν είναι γνωστή η κίνηση που πραγματοποίησε το σύστημα για την λήψη των εικόνων. Αντίθετα, συνθετικές εικόνες που προκύπτουν από γνωστές μετακινήσεις του συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ποσοτικό έλεγχο της αποτελεσματικότητας των μεθόδων.

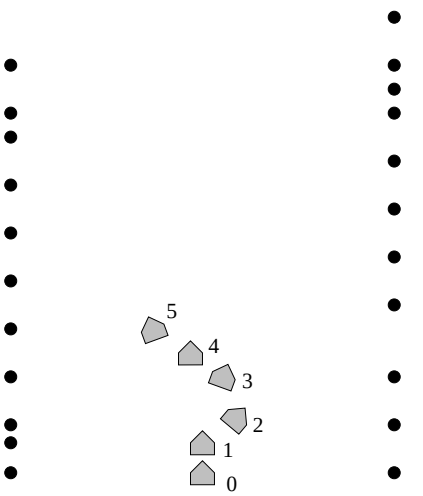
5.2 Αποτελέσματα μεθόδου κάθετων ευθειών

Για την αξιολόγηση της πρώτης μεθόδου που μελετήθηκε δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν εικόνες εσωτερικών χώρων. Όπως έχει αναφερθεί, αυτή η τεχνική στηρίζεται στο σχεδιασμό γραφικών παραστάσεων της μεταβολής της γωνίας υπό την οποία το σύστημα βλέπει τις κάθετες ευθείες του χώρου. Όμως, ο υπολογισμός των γωνιών προϋποθέτει είτε γνώση του εύρους γωνίας της κάμερας που καταγράφει τις εικόνες

είτε γνώση δεδομένων που χάνονται από την προβολή των κάθετων ευθειών στο επίπεδο των εικόνων, όπως είναι το βάθος τους. Έτσι, καθώς το εύρος γωνίας της κάμερας δεν είναι γνωστό για τις πραγματικές εικόνες που ήδη διαθέτουμε, χρησιμοποιούνται τεχνητά κατασκευασμένα περιβάλλοντα, βάσει των οποίων θεωρείται γνωστή η θέση των ευθειών στον χώρο, παρακάμπτοντας ταυτόχρονα το ζήτημα της εξαγωγής και της αντιστοίχισης των ευθειών.

5.2.1 Πρώτο πείραμα

Σε αυτό το πείραμα θεωρήσαμε την θέση των κάθετων ευθειών που απεικονίζεται στο σχήμα 5.1. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η διαδρομή του συστήματος κατά την διάρκεια της εκμάθησης.[1] Όπως φαίνεται, κατά την διάρκεια της εκμάθησης το σύστημα



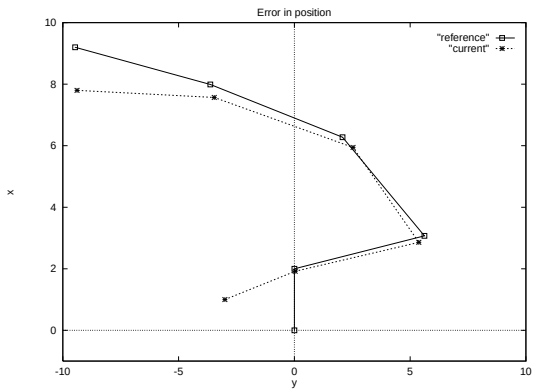
Σχήμα 5.1: Το σκηνικό του πρώτου πειράματος για την πρώτη μέθοδο

διέγραψε μια καμπύλη τροχιά μεταβάλλοντας ταυτόχρονα τον προσανατολισμό του ως προς τους τοίχους του διαδρόμου.

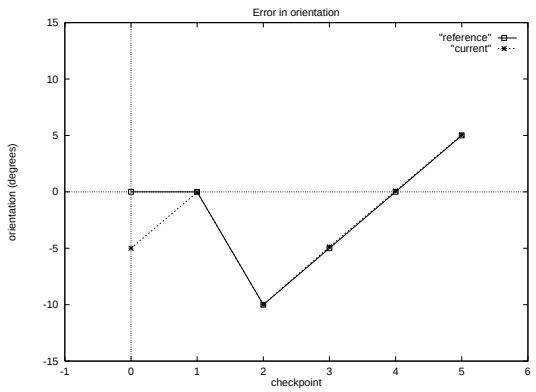
Για την πλοήγηση το σύστημα αφέθηκε σε μια αρχική θέση κοντά στην θέση 0 αλλά όχι ακριβώς στην ίδια θέση. Οι τιμές των ποσοτήτων $CONV_X, CONV_Y$ και $conv_x(\cdot)$ προσεγγίστηκαν πειραματικά πριν την εκτέλεση του πειράματος που παρουσιάζεται εδώ. Τα αποτελέσματα από την εκτίμηση της θέσης του συστήματος ως προς τη διαδρομή αναφοράς του απεικονίζονται στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 5.2.

Γενικά, το συμπέρασμα που προκύπτει από τις γραφικές παραστάσεις είναι ότι η διαφορά στον προσανατολισμό του συστήματος υπολογίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια, ενώ η εκτίμηση της θέσης του συστήματος είναι αρκετά αναξιόπιστη. Το πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι οι σταθερές ποσότητες στην πράξη μεταβάλλονται ανάλογα με το μέγεθος της κίνησης. Έτσι, μικρά λάθη σε κάθε βήμα στην εκτίμηση της κίνησης συσσωρεύονται και μετά από ορισμένα βήματα το σύστημα μπορεί να βρεθεί

[1] Στην πραγματικότητα, το μέγεθος της κίνησης του σύστηματος σε σχέση με την θέση των ευθειών είναι μεγενθυμένο, για προφανείς λόγους απεικόνισης.



(α) Διαφορά στη θέση του συστήματος



(β) Διαφορά στον προσανατολισμό του συστήματος

Σχήμα 5.2: Απεικόνιση της διαφοράς στη θέση και τον προσανατολισμό του συστήματος κατά την πλοήγηση με την χρήση της μεθόδου των κάθετων ευθειών

σημαντικά εκτός της επιθυμητής πορείας. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα το σύστημα μπορεί να επαναλαμβάνει το τελευταίο βήμα στην εκτίμηση της θέσης του μετά από κάποιο συγκεκριμένο αριθμό βημάτων. Όσο αφορά το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση των υπολογισμών, είναι ελάχιστος καθώς οι υπολογισμοί είναι άμεσοι.

Οι περιοριστικές συνθήκες για την εφαρμογή της μεθόδου και η απαίτηση της γνώσης δεδομένων πέρα από αυτά που μπορούν να εξαχθούν μόνο μέσω των εικόνων, καθιστούν τη μέθοδο μη ικανοποιητική για τη λειτουργία ενός αυτόνομου συστήματος σε πραγματικό χρόνο και υπό ρεαλιστικές απαιτήσεις. Η μέθοδος λοιπόν παρουσιάζει κυρίως θεωρητικό ενδιαφέρον και για αυτό το λόγο κρίνεται ανώφελη η παρουσίαση επιπλέον αποτελεσμάτων.

5.3 Αποτελέσματα μεθόδου επικάλυψης ευθυγράμμων τμημάτων

Στα πειράματα που έγιναν για την αξιολόγηση της δεύτερης μεθόδου η εξαγωγή και η αντιστοίχιση των ευθυγράμμων τμημάτων έγινε με το χέρι, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα εργαλεία για την αυτόματη πραγματοποίηση αυτών των σταδίων της πλοήγησης. Με αυτόν τον τρόπο, αν και δε μπορεί να αξιολογηθεί συνολικά η επιτυχία στην πλοήγηση του συστήματος, απομονώνεται το στάδιο της εκτίμησης της κίνησης με το οποίο ασχολήθηκε κυρίως η παρούσα εργασία και μπορούν να γίνουν ασφαλέστερες εκτιμήσεις για την απόδοσή τους.

Η εκτέλεση των παρακάτω πειραμάτων έγινε σε ένα Sun Ultra 1. Ο χρόνος για τους υπολογισμούς εξαρτάται από το πλήθος των ευθυγράμμων τμημάτων και την επιτυχία στον εντοπισμό του ελαχίστου από το Simplex. Ενδεικτικά πάντως, η χρήση 50 ευθυγράμμων τμημάτων απαιτεί υπολογισμούς περίπου ενός λεπτού.

5.3.1 Πρώτο πείραμα

Το πρώτο πείραμα παρουσιάζει ενδιαφέρον για την αξιολόγηση της μεθόδου όσο αφορά την ορθότητα της μεθοδολογίας και της υλοποίησης. Δίνεται μια τυχαία τοποθέτηση ευθυγράμμων τμημάτων στο χώρο και μια κίνηση του συστήματος. Κατόπιν, υπολογίζονται οι προβολές των ευθυγράμμων τμημάτων στις κάμερες του συστήματος πριν και μετά από την κίνηση του. Για τον έλεγχο της μεθόδου αντιστρέφουμε την παραπάνω διαδικασία. Χρησιμοποιούνται τα δεδομένα των δύο προβολών των ευθυγράμμων τμημάτων και εκτιμάται η κίνηση που πρέπει να πραγματοποίησε το σύστημα ώστε να παρατηρηθεί η δεδομένη διαφορά στις προβολές. Αν η μέθοδος είναι σωστή θα πρέπει να υπολογιστεί η κίνηση που χρησιμοποιήθηκε αρχικά.

Στο πείραμα θεωρήθηκε ότι το σύστημα κινήθηκε σύμφωνα με το διάνυσμα μεταφοράς $\vec{t} = [0.15, 0, -0.3]$ και το διάνυσμα περιστροφής $\vec{r} = [0, 0.2, 0]$. Η προσπάθεια εκτίμησης της κίνησης έδωσε το αποτέλεσμα $\vec{t} = [0.38669, 0, -0.77317]$ και $\vec{r} = [0, 0.19999, 0]$. Όπως φαίνεται, το $\vec{t}$ εκτιμάται σωστά μόνο κατά την διεύθυνσή του αλλά όχι κατά το μέτρο του. Όμως, τόσο η διεύθυνσή του όσο και το διάνυσμα περιστροφής υπολογίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια.

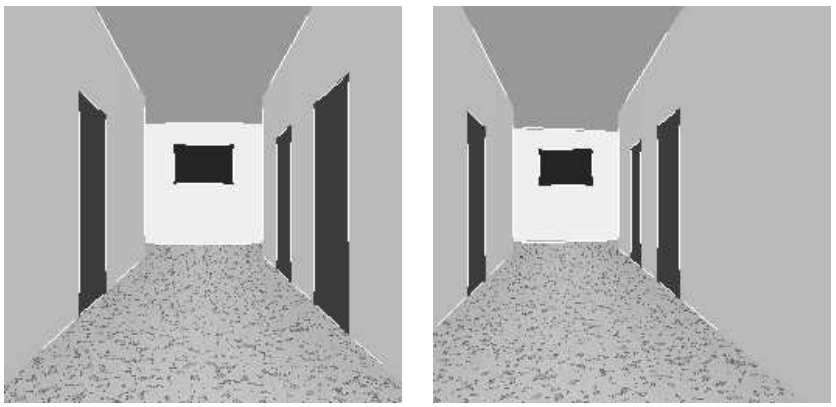
Η πραγματοποίηση του ίδιου πειράματος με τα μισά ευθύγραμμα τμήματα έδωσε $\vec{t} = [0.37809, 0, -0.79547$ και $\vec{r} = [0, 0.20002, 0]$. Τα αποτελέσματα είναι και στις δύο περιπτώσεις ικανοποιητικά καθώς δεν υπάρχουν σφάλματα από τον εντοπισμό και την αντιστοίχιση των ευθυγράμμων τμημάτων.

Δύο λάθος αντιστοιχίσεις έχουν καταστροφικά αποτελέσματα στην απόδοση της μεθόδου. Στο επόμενο αποτέλεσμα οι αντιστοιχίσεις δύο από τα 25 ευθύγραμμα τμήματα άλλαξαν και η μέθοδος έδωσε $\vec{t} = [0.93918, 0, -0.49815]$ και $\vec{r} = [0, 0.20250, 0]$. Γενικά, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει σχετική επιτυχία στην εκτίμηση της περιστροφικής κίνησης ακόμα και υπό την παρουσία λαθών, κάτι που δεν ισχύει για την μεταφορική κίνηση.

Τέλος, το ίδιο σφάλμα στην αντιστοίχιση των ευθυγράμμων τμημάτων αλλά σε σύνολο 50 τμημάτων έδωσε $\vec{t} = [0.47646, 0, 0.97991]$ και $\vec{r} = [0, 0.20781, 0]$. Όπως ήταν αναμενόμενο, το αποτέλεσμα της εκτίμησης της κίνησης είναι πιο αξιόπιστο όταν χρησιμοποιούνται περισσότερα ευθύγραμμα τμήματα.

5.3.2 Δεύτερο πείραμα

Για την πραγματοποίηση του δεύτερου πειράματος κατασκευάστηκαν συνθετικές εικόνες με την βοήθεια του εργαλείου POVRAY 2.2 που υπάρχει στο εργαστήριό μας. Αρχικά κατασκευάστηκε μιαν εικόνα και χρησιμοποιήθηκε μια γνωστή κίνηση για να τραβηχτεί ένα δεύτερο πλάνο του ίδιου χώρου από άλλη οπτική γωνία. Κατόπιν, εξήχθησαν ένα σύνολο ευθειών από τις δύο εικόνες και εντοπίστηκαν οι αντιστοιχίσεις μεταξύ των ευθειών των δύο συνόλων. Στο σχήμα 5.3 απεικονίζεται ο χώρος που σχεδιάστηκε και οι ευθείες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κίνησης. Η δεύτερη εικόνα προήλθε από την πρώτη με μετακίνηση του συστήματος κατά $\vec{t} = [-0.1, 0, 1]$ και $\vec{r} = [0, 0.1745, 0]$.



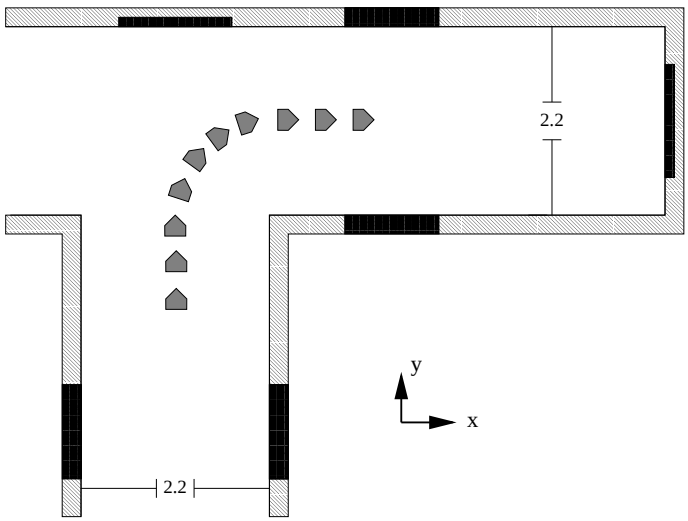
Σχήμα 5.3: Το σκηνικό του δεύτερου πειράματος με συνθετικές εικόνες

Η εφαρμογή της μεθόδου έδωσε τα αποτελέσματα $\vec{t} = [0.0169, 0, 0.9998]$ και $\vec{r} = [0, 0.1407, 0]$. Όπως είναι φανερό, η μέθοδος δεν καταφέρνει να εκτιμήσει ικανοποιητικά την μεταφορική κίνηση, ενώ αντίθετα η περιστροφική κίνηση προσεγγίζεται από τα αποτελέσματα που πήραμε.

Η αδυναμία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι εμφανίζεται μεγάλος αριθμός επιπολικών γραμμών που σχηματίζει μικρές γωνίες με τα αντίστοιχα ευθύγραμμα τμήματα στην άλλη εικόνα. Έτσι, ο υπολογισμός του σημείου τομής τους δεν είναι σταθερός και δημιουργείται πρόβλημα στην εκτίμηση της κίνησης. Το ζήτημα αυτό είναι γνωστό ότι προκαλεί προβλήματα στη στερεοσκοπική όραση. Στην υλοποίηση που έγινε εντοπίζονται οι αστάθειες και αγνοούνται τα αντίστοιχα ζευγάρια ευθυγράμμων τμημάτων αλλά και πάλι δεν υπάρχει επιτυχία, καθώς το πρόβλημα εντοπίζεται σε πάρα πολλά ζευγάρια. Η αιτία για την εμφάνιση τόσων πολλών ασταθειών είναι ότι αρκετά από τα ευθύγραμμα τμήματα που εξάγονται από τους εσωτερικούς χώρους έχουν οριζόντια ή κατακόρυφη διεύθυνση. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι στις περιπτώσεις που μας ενδιαφέρουν κυριαρχεί συνήθως η μεταφορική κίνηση του συστήματος κατά μήκος του διαδρόμου, έχει ως αποτέλεσμα τα ευθύγραμμα τμήματα που βρίσκονται κοντά στο κέντρο του οπτικού πεδίου του συστήματος να παρουσιάζουν παρόμοιο προσανατολισμό με τις επιπολικές γραμμές που τους αντιστοιχούν. Όπως ειπώθηκε, αυτά τα ευθύγραμμα τμήματα πρέπει να αγνοούνται από τους υπολογισμούς που ακολουθούν, όμως το πλήθος των ευθυγράμμων τμημάτων που απομένουν είναι αρκετά μικρό ώστε να μην είναι εύκολο να εκτιμηθεί σωστά η κίνηση. Επιπλέον, οι διαφορετικές διευθύνσεις των ευθυγράμμων τμημάτων που απομένουν είναι λίγες και κατά συνέπεια δεν μπορεί να περιοριστεί ικανοποιητικά η κίνηση από τα διαθέσιμα ευθύγραμμα τμήματα που απομένουν για τους υπολογισμούς. Η φύση λοιπόν των εσωτερικών χώρων, στους οποίους μας ενδιαφέρει η εφαρμογή της μεθόδου, είναι τέτοια που καθιστά τη συγκεκριμένη μέθοδο όχι την πλέον κατάλληλη.

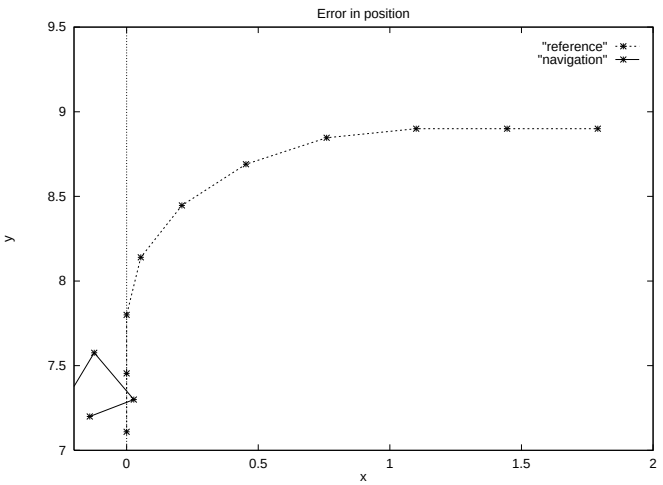
Στην πλοήγηση σε εσωτερικούς χώρους επαναλαμβάνεται διαρκώς η διαδικασία εκτίμησης της σχετικής θέσης του συστήματος, και γίνονται ιδιαίτερα φανερές οι δυσκολίες εφαρμογής της μεθόδου. Για το πείραμα που ακολουθεί και παρουσιάζει

αυτό το γεγονός, κατασκευάστηκε μια ακολουθία συνθετικών εικόνων που προσομοιώνει την πορεία του συστήματος που απεικονίζεται στο σχήμα 5.4. Η προσπάθεια



Σχήμα 5.4: Το σκηνικό του δεύτερου πειράματος με την ακολουθία συνθετικών εικόνων

πλοήγησης του συστήματος πάνω σε αυτό το μονοπάτι, σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι ιδιαίτερα δύσκολη καθώς δεν μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί η μεταφορική κίνηση του συστήματος. Το αποτέλεσμα της πλοήγησης του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.5. Από αυτή τη γραφική παράσταση φαίνεται ότι πολύ σύντομα το σύστημα παρεκλίνει αρκετά από την επιθυμητή διαδρομή και συνήθως αποτυγχάνει η πλοήγηση.



Σχήμα 5.5: Το αποτέλεσμα της πλοήγησης του συστήματος με την μέθοδο των επικαλύψεων ευθυγράμμων τμημάτων σε μια ακολουθία συνθετικών εικόνων

5.3.3 Τρίτο πείραμα

Στο τρίτο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές εικόνες από διαδρόμους στο χώρο του ITE. Αν και δεν είναι γνωστή η πραγματική κίνηση του συστήματος μεταξύ των εικόνων, εντούτοις τα αποτελέσματα μπορούν να κριθούν ποιοτικά.

Σχήμα 5.6: Το σκηνικό του τρίτου πειράματος με πραγματικές εικόνες

Το πρώτο αποτέλεσμα αφορά τις εικόνες και τα ευθύγραμμα τμήματα που εξήχθησαν από αυτές και απεικονίζονται στο σχήμα 5.6. Το αποτέλεσμα της εκτίμησης της κίνησης για τις δύο εικόνες ήταν $\vec{t} = [0.6077, 0, 0.7941]$ και $\vec{r} = [0, 0.1959, 0]$. Από τις συγκεκριμένες εικόνες μπορεί να διαπιστώσει κανείς ότι το μέγεθος και η κατεύθυνση της περιστροφικής κίνησης που υπολογίζεται θα μπορούσε να ανταποκρίνεται στην πραγματική κίνηση του συστήματος μεταξύ των δύο εικόνων.

Το δεύτερο αποτέλεσμα αφορά τις εικόνες του σχήματος 5.7, όπου τονίζονται και τα ευθύγραμμα τμήματα που εξήχθησαν για τους υπολογισμούς. Το αποτέλεσμα που

Σχήμα 5.7: Το σκηνικό του τρίτου πειράματος με πραγματικές εικόνες

υπολογίστηκε ήταν $\vec{t} = [-0.3113, 0, 0.9502]$ και $\vec{r} = [0, -0.0588, 0]$. Αν και η κίνηση της κάμερας είναι αρκετά μικρή ώστε να είναι ευδιάκριτη, είναι φανερό ότι το μέγεθος της περιστροφικής κίνησης που εκτιμήθηκε είναι αρκετά μικρό και θα μπορούσε να ανταποκρίνεται στην πραγματική κίνηση του συστήματος μεταξύ των δύο εικόνων.

Οι λόγοι για τους οποίους δεν έχει επιτευχθεί ικανοποιητική εκτίμηση της μεταφορικής κίνησης στα δύο τελευταία πειράματα εξηγούνται στην προηγούμενη παράγραφο.

5.4 Αποτελέσματα μεθόδου σημείων

Για την αξιολόγηση της μεθόδου που κάνει χρήση αντιστοιχίσεων σημείων παρουσιάζονται αποτελέσματα σε τρία διαφορετικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Το πρώτο δείχνει την απόδοση της μεθόδου σε ένα τεχνητό περιβάλλον όπου οι συνθήκες λειτουργίας της μεθόδου είναι ιδανικές και είναι χρήσιμο για την εξαγωγή συμπερασμάτων όσο αφορά την ορθότητα της μεθόδου σε θεωρητικό επίπεδο και την αξιολόγηση της υλοποίησης. Στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιούνται συνθετικές εικόνες για τον υπολογισμό αποτελεσμάτων που μπορούν να συγκριθούν με την πραγματική κίνηση στις εικόνες. Τέλος, το τρίτο πείραμα εφαρμόζεται σε πραγματικές εικόνες εσωτερικών χώρων για μια ποιοτική αξιολόγηση της εφαρμογής της μεθόδου με πραγματικά δεδομένα.

Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε ένα μηχάνημα Sun Ultra 1. Ο μέσος χρόνος εκτέλεσης των πειραμάτων δεν ξεπέρασε τα 4 δευτερόλεπτα. Φυσικά, στο χρόνο αυτό δε συμπεριλαμβάνεται η διαδικασία της εξαγωγής και της αντιστοίχισης των σημείων, οι οποίες έχουν γίνει με το χέρι.

5.4.1 Πρώτο πείραμα

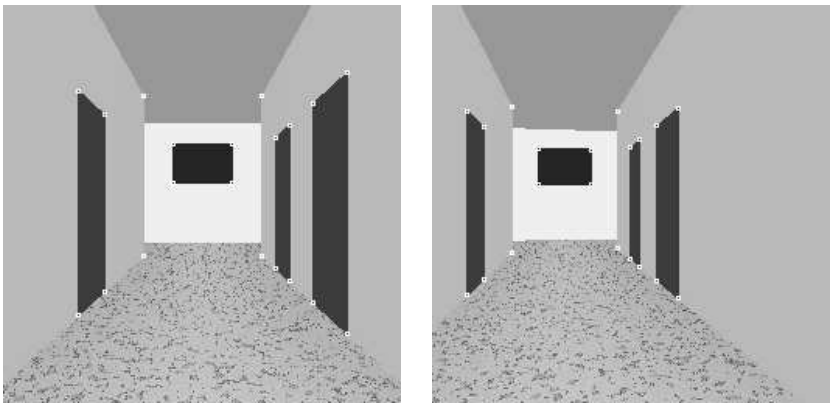
Για την πραγματοποίηση του πρώτου πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένα τυχαίο σύνολο τρισδιάστατων σημείων και μετασχηματίστηκε σύμφωνα με μια γνωστή κίνηση. Τα δύο σύνολα σημείων προβλήθηκαν σε ένα φανταστικό επίπεδο, το επίπεδο των εικόνων του συστήματος. Για τον έλεγχο της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν οι προβολές των σημείων για τον υπολογισμό της μεταξύ τους κίνησης. Αν η μέθοδος και η υλοποίησή της είναι σωστή, η κίνηση που θα υπολογιστεί θα πρέπει να είναι η ίδια που χρησιμοποιήθηκε για τον μετασχηματισμό των τρισδιάστατων σημείων.

Χρησιμοποιήθηκαν λοιπόν 19 σημεία και θεωρήθηκε η κίνηση $\vec{t} = [0.2, 0.1, -0.15]$ και $\vec{r} = [0, -0.123, 0]$. Το αποτέλεσμα που πήραμε ήταν $\vec{t} = [0.7425, 0.3712, -0.5574]$ και $\vec{r} = [0.0049, -0.1229, 0.0034]$. Παρόμοια, η εκτίμηση της κίνησης $\vec{t} = [-0.19, 0, -0.27]$ και $\vec{r} = [0, 0.023, 0]$ έδωσε το αποτέλεσμα $\vec{t} = [-0.5752, -0.0002, -0.8179]$ και $\vec{r} = [-3.316e - 06, 0.0229, 4.08407e - 07]$. Παρατηρείται από τα δύο αποτελέσματα ότι η μέθοδος υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια το $\vec{r}$ και τη διεύθυνση του $\vec{t}$. Η παρουσία λαθών στην αντιστοίχιση των σημείων δεν έχει καμία επίπτωση στα αποτελέσματα εξαιτίας της λειτουργίας του LMedS, εφόσον βέβαια ο αριθμός τους παραμένει μειοψηφία μεταξύ των αντιστοιχίσεων.

Το παραπάνω πείραμα δείχνει την ορθότητα της μεθόδου σε θεωρητικό επίπεδο. Στην πράξη υπάρχει πάντα θόρυβος στον ακριβή εντοπισμό των σημείων, λόγω της προβολής τους στο επίπεδο της εικόνας και της στρογγυλοποίησης των υπολογιζόμενων προβολών για την απεικόνισή τους στο ψηφιακό πλέγμα των εικόνων και λόγω σφαλμάτων του ανιχνευτή σημείων. Έτσι, χρειάζονται περισσότερα ζευγάρια σημείων για την αντιμετώπιση του θορύβου, κάτι που προκύπτει και από τα πειράματα που ακολουθούν.

5.4.2 Δεύτερο πείραμα

Στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν οι συνθετικές εικόνες που κατασκευάστηκαν με το POVRAY. Από τις δύο εικόνες εξήχθησαν ένα πλήθος από σημεία, τα οποία χρησιμοποιήσαμε για την εκτίμηση της κίνησης μεταξύ των δύο εικόνων. Στο σχήμα 5.8 απεικονίζεται ο χώρος που σχεδιάστηκε και τα σημεία που εξήχθησαν. Η δεύτερη εικόνα προήλθε από την πρώτη με μετακίνηση του συστήματος κατά $\vec{t} = [-0.1, 0, 1]$ και $\vec{r} = [0^0, 10^0, 0^0]$.[2]



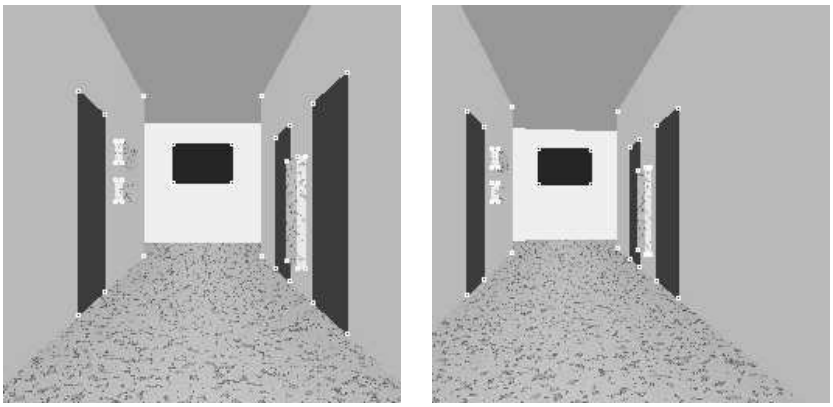
Σχήμα 5.8: Το σκηνικό του δεύτερου πειράματος με συνθετικές εικόνες

Αρχικά χρησιμοποιήσαμε 20 σημεία για την εκτίμηση της κίνησης, τα οποία τονίζονται στις εικόνες του σχήματος 5.8. Η εκτιμούμενη κίνηση βάσει αυτών υπολογίστηκε $\vec{t} = [-0.0906, 0.0036, 0.9958]$ και $\vec{r} = [0.1692^0, 9.2146^0, -0.1489^0]$, η οποία είναι πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικής κίνησης που υπάρχει μεταξύ των δύο εικόνων. Όμως, η επανάληψη της εκτέλεσης του αλγορίθμου μπορεί να δώσει μικρές διαφορές στα αποτελέσματα. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο σημαντικό θόρυβο που υπάρχει στον εντοπισμό των σημείων σε συνδυασμό με τη χρήση του LMedS. Λόγω του LMedS είναι πιθανό σε διαφορετικές εκτελέσεις του αλγορίθμου να επιλέγονται διαφορετικές οκτάδες για την εκτίμηση της κίνησης, καθώς γενικά εξετάζονται διαφορετικά σύνολα οκτάδων σημείων σε κάθε εκτέλεση αφού η σύνθεσή τους γίνεται με τυχαίες επιλογές από το σύνολο των διαθέσιμων σημείων. Ο σημαντικός θόρυβος που υπάρχει έχει ως αποτέλεσμα να θεωρούνται λανθασμένες ορισμένες από τις σωστές αντιστοιχίσεις μεταξύ των σημείων και να παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο. Η χρησιμοποίηση περισσοτέρων σημείων για την πραγματοποίηση των υπολογισμών συμβάλλει στην ανθεκτικότητα των αποτελεσμάτων στο θόρυβο, γεγονός που παρατηρείται στο επόμενο πείραμα.

Στο σχήμα 5.9 έχουν προστεθεί στο χώρο ορισμένα επιπλέον αντικείμενα προκειμένου να εξαχθούν περισσότερα σημεία. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούμε 34 σημεία. Η εκτίμηση της κίνησης της κάμερας ήταν $\vec{t} = [-0.0889, 0.0429, 0.9951]$

[2] Για λόγους ευκολίας με την χρήση του POVRAY, περιγράφουμε το διάνυσμα περιστροφής με βάση τις γωνίες περιστροφής της κάμερας γύρω από τους άξονες x,y και z.

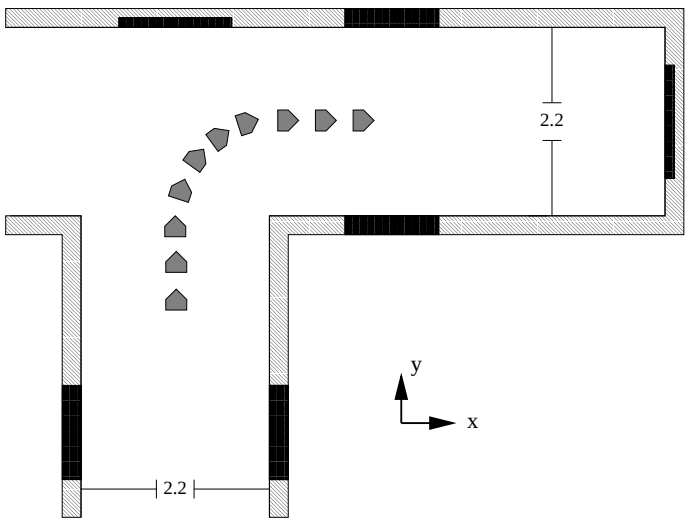
και $\vec{r} = [-0.6796^0, 10.0691^0, -0.1928^0]$. Γενικά παρατηρήθηκε ότι η χρήση περισσό-



Σχήμα 5.9: Το σκηνικό του δεύτερου πειράματος με συνθετικές εικόνες και περισσότερα σημεία

τερων σημείων για την πραγματοποίηση των υπολογισμών είχε σαν αποτέλεσμα οι υπολογισμοί να γίνονται πιο αξιόπιστοι, καθώς τα επιπλέον σημεία συμβάλλουν στην αντιμετώπιση των προβλημάτων από το θόρυβο.

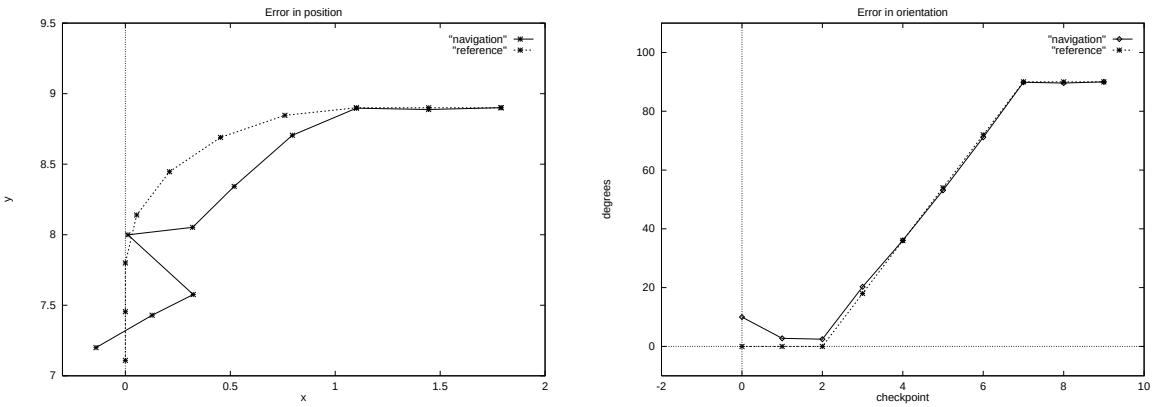
Κατασκευάζοντας μια ακολουθία συνθετικών εικόνων που θα προσομοιώνει τις εικόνες που καταγράφει το σύστημα σε μια εικονική πορεία του, μπορεί κανείς να εξετάσει την επιτυχία στην πλοήγηση του συστήματος. Το επόμενο αποτέλεσμα παρατίθεται για αυτόν τον λόγο. Κατασκευάστηκαν οι συνθετικές εικόνες που προσομοιώνουν τις εικόνες που θα κατέγραφε το σύστημα σε μια πορεία σύμφωνα με αυτή του σχήματος 5.10. Όπως φαίνεται από το σχήμα, η κίνηση του συστήματος είναι μια στροφή στο διάδρομο. Στο χώρο έχουν τοποθετηθεί πόρτες και παράθυρα στους



Σχήμα 5.10: Το σκηνικό του τρίτου πειράματος με την ακολουθία συνθετικών εικόνων

τοίχους, από τα οποία το σύστημα εξάγει τα απαιτούμενα σημεία που χρειάζονται για την εκτέλεση της μεθόδου. Η επιτυχία στην εφαρμογή της μεθόδου για την πλοήγηση

παρουσιάζεται με τη βοήθεια των γραφικών παραστάσεων του σχήματος 5.11, που απεικονίζουν το σφάλμα στη θέση και τον προσανατολισμό του συστήματος κατά την πλοήγηση, σε σχέση με το προκαθορισμένο μονοπάτι. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει την



(α) Σφάλμα θέσης (β) Σφάλμα προσανατολισμού

Σχήμα 5.11: Το αποτέλεσμα της προσπάθειας πλοήγησης του συστήματος στην στροφή του διαδρόμου

επιτυχία της μεθόδου για την πλοήγηση του συστήματος, παρόλο που η κίνηση μεταξύ των διαδοχικών θέσεων του συστήματος ήταν σχετικά μεγάλη και που σχετικά λίγα σημεία ($10 \sim 12$ από κάθε εικόνα) εξάχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς. Πάντως μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι η εκτίμηση της σχετικής θέσης του συστήματος δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής όταν το σύστημα πλησιάζει την στροφή, καθώς εκεί περιορίζεται το οπτικό του πεδίο και τα ελάχιστα σημεία που εξάγονται προέρχονται όλα από τον τοίχο στο βάθος, γεγονός που δεν βοηθά στην εκτίμηση της σχετικής θέσης του συστήματος.

Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη λαθών στην αντιστοίχιση των σημείων δεν έχει σημαντική επιρροή στους υπολογισμούς, καθώς εντοπίζονται και απομονώνονται με τη βοήθεια του LMedS.

5.4.3 Τρίτο πείραμα

Το τρίτο πείραμα αφορά την εφαρμογή της μεθόδου σε πραγματικές εικόνες. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τραβηχτεί στους διαδρόμους του ITE με τη χρήση μιας κλασικής κάμερας CCD. Δυστυχώς δεν είναι γνωστή η πραγματική κίνηση του συστήματος μεταξύ των εικόνων και κατά συνέπεια τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτήν την παράγραφο μπορούν να εκτιμηθούν μόνο ποιοτικά.

Το πρώτο ζευγάρι εικόνων φαίνεται στο σχήμα 5.12. Στο ίδιο σχήμα τονίζονται και τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς. Εξήχθησαν λοιπόν 20 σημεία και η εκτίμηση της κίνησης είχε ως αποτέλεσμα μεταφορικής κίνησης $\vec{t} = [0.1983, -0.2161, -0.9559]$ και περιστροφικής $\vec{r} = [2.5657^0, 8.3006^0, -2.6894^0]$. Παρατηρώντας προσεκτικά τις δύο εικόνες συμπεραίνει κανείς ότι πράγματι δείχνει να

Σχήμα 5.12: Το σκηνικό του τρίτου πειράματος με πραγματικές εικόνες

κυριαρχεί μια μικρή σχετικά περιστροφική κίνηση ως προς τον κατακόρυφο άξονα και μια μεταφορική κίνηση στην διεύθυνση του διαδρόμου.

Το δεύτερο ζευγάρι εικόνων φαίνεται στο σχήμα 5.13 μαζί με τα 20 σημεία που εξήχθησαν για τους υπολογισμούς. Το αποτέλεσμα για την εκτίμηση

Σχήμα 5.13: Σκηνικό του τρίτου πειράματος με πραγματικές εικόνες

της κίνησης μεταξύ αυτών των δύο εικόνων ήταν $\vec{t} = [0.1560, 0.3784, 0.9123]$ και $\vec{r} = [-1.8253^0, -1.821^0, 5.233^0]$. Πάντως, η διαφορά των δύο εικόνων σε αυτήν την περίπτωση είναι αρκετά μικρή, ώστε να μπορεί κανείς να διακρίνει με ασφάλεια την πραγματική κίνηση. Η περιστροφική κίνηση που εκτιμήθηκε είναι επίσης μικρή, κάτι που αποτελεί ένδειξη ότι τα αποτελέσματα μπορεί να ανταποκρίνονται στην πραγματική κίνηση.

5.5 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι πολύτιμα για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων όσο αφορά την απόδοση των μεθόδων που μελετήθηκαν στις αντικειμενικές απαιτήσεις της πλοήγησης ενός αυτόνομου ρομποτικού συστήματος σε πραγματικό περιβάλλον. Στην πράξη φαίνεται ποιές από αυτές μπορούν και αξίζει να εφαρμοστούν για την πλοήγηση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Η πρώτη μέθοδος λοιπόν είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί για πολλούς λόγους. Όταν δεν είναι γνωστή η γωνία εύρους λήψης της κάμερας απαιτείται η γνώση της θέσης των κάθετων ευθειών στον τρισδιάστατο χώρο, πράγμα που σε πρακτικές εφαρμογές δεν είναι διαθέσιμο. Επίσης, είναι αρκετά περιοριστική όσο αφορά τη δομή του περιβάλλοντος στο οποίο είναι εφαρμόσιμη. Εκτός των άλλων, οι περιορισμοί αυτοί δεν επιτρέπουν στο σύστημα να κινείται στις στροφές των διαδρόμων, καθώς εκεί δεν ισχύει η δομή του κόσμου που υποτέθηκε.

Η μέθοδος της μεγιστοποίησης της επικάλυψης των ευθυγράμμων τμημάτων είναι θεωρητικά εφαρμόσιμη, Όμως, στην πράξη φάνηκε πως δεν είναι η πλέον κατάλληλη για την πλοήγηση του συστήματος στα συγκεκριμένα περιβάλλοντα για τα οποία προορίζεται η εφαρμογή. Η μέθοδος αποτυγχάνει στην εκτίμηση της μεταφορικής κίνησης καθώς παρουσιάζονται πολλές περιπτώσεις όπου οι επιπολικές γραμμές έχουν παρόμοιο προσανατολισμό με τα ευθύγραμμα τμήματα στην άλλη εικόνα. Επίσης, η μέθοδος είναι αρκετά αργή για να προσαρμοστεί σε ένα πραγματικό σύστημα.

Η τρίτη και τελευταία μέθοδος είναι η πιο ελπιδοφόρα. Από τα πειράματα φάνηκε ότι μπορεί να λυθεί το πρόβλημα της εκτίμησης κίνησης με ικανοποιητική επιτυχία υπό πραγματικές συνθήκες και ταυτόχρονα με σύντομο χρόνο εκτέλεσης. Επίσης, οι επαναληπτικές εκτελέσεις του LMedS για την εκτίμηση της κίνησης είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες και μπορούν να εκτελεστούν σε παράλληλους επεξεργαστές για την επιπλέον επιτάχυνση των υπολογισμών. Παράλληλα μπορεί να αντιμετωπισθεί και το ζήτημα της εξαγωγής των σημείων από τις εικόνες, μειώνοντας έτσι ακόμα περισσότερο το χρόνο που απαιτείται για κάθε βήμα στην πλοήγηση του συστήματος. Όλα αυτά τα στοιχεία, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή δεν είναι ιδιαίτερα περιοριστική για την εφαρμογή της, υποδεικνύουν ότι η προσπάθεια για την πλοήγηση του συστήματος υιοθετώντας την μεθοδολογία που περιγράφηκε αξίζει να λάβει υπόψην της αυτή τη μέθοδο.

Κεφάλαιο 6

Μελλοντικές κατευθύνσεις

Η μελέτη που έγινε σε αυτήν την εργασία ανέδειξε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ορισμένων μεθόδων για την εκτίμηση της κίνησης στο πρόβλημα της πλοήγησης ενός ρομποτικού συστήματος σε εσωτερικούς χώρους. Δύο από αυτές αποδείχτηκαν ανεπαρκείς για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, ενώ η τρίτη μέθοδος έδωσε ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

Προφανώς, η παρούσα εργασία δεν εξαντλεί τη μελέτη των μεθόδων που μπορούν να εφαρμοστούν για την εκτίμηση της κίνησης του συστήματος στο πρόβλημα της πλοήγησης. Ενδιαφέρον έχει η εξαγωγή σημείων και ευθειών από το περιβάλλον για την ταυτόχρονη χρησιμοποίησή τους σε υπολογισμούς εκτίμησης κίνησης. Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν θα μπορούσαν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Κυρίως για συγκριτικούς λόγους είναι ενδιαφέρουσα και η εφαρμογή τεχνικών υπολογισμού και χρήσης της οπτικής ροής για την εκτίμηση της κίνησης του συστήματος. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής μπορούν να σταθμιστούν ώστε να κριθεί ποια τεχνική είναι καταλληλότερη για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Η σημαντικότερη επέκταση της εργασίας θα ήταν ασφαλώς η προσαρμογή της σε ένα πραγματικό ρομποτικό σύστημα, το οποίο είναι ο αντικειμενικός στόχος της εργασίας. Για τη συνολική αντιμετώπιση του ζητήματος της πλοήγησης του συστήματος πρέπει να συνδυαστεί με την εφαρμογή μιας τεχνικής για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών από το περιβάλλον και τη μεταξύ τους αντιστοίχιση. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά δύσκολη και επίπονη, έχει όμως ξεχωριστό ενδιαφέρον στην προσπάθεια ανάπτυξης ενός αυτόνομου συστήματος.

Τέλος, θα μπορούσε κανείς να μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να συνδυαστεί η οπτική πληροφορία που διαθέτει το ρομποτικό σύστημα για το περιβάλλον του με την πληροφορία που προσφέρει η χρήση άλλων αισθητήρων. Σημαντική επιπλέον πληροφορία μπορούν να προσφέρουν στο σύστημα οι αισθητήρες εκπομπής υπερηχητικών κυμάτων (sonars), με τη βοήθεια των οποίων μπορεί να αυξηθεί η ευελιξία και η αυτονομία του συστήματος.

Παράρτημα Α

Αλγόριθμοι για robust regression

Α.1 Εισαγωγή

Οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας είναι χρήσιμοι για την εκτίμηση των παραμέτρων ενός μοντέλου, όταν είναι διαθέσιμο ένα σύνολο από μετρήσεις υπό την παρουσία δεδομένων με θόρυβο. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση ενός γραμμικού μοντέλου που περιγράφεται από τη σχέση:

$$y_i = x_{i1}\theta_1 + x_{i2}\theta_2 + \cdots + x_{ip}\theta_p + e_i, \quad i = 1, \cdots, n$$

το πρόβλημα αφορά την εκτίμηση των παραμέτρων $\theta_k, k = 1, \cdots, p$ βάσει των προβλεπόμενων μετρήσεων $y_i, i = 1, \cdots, n$ και των βοηθητικών μεταβλητών x_{ik}. Το e_i είναι το σφάλμα σε κάθε μέτρηση. Γενικά, μπορεί να υποτεθεί ότι η κατανομή των e_i έχει μηδενική μέση τιμή αλλά άγνωστη διασπορά.

Αν έχουμε μια εκτίμηση των παραμέτρων $\hat{\theta}_1 \cdots \hat{\theta}_p$ μπορούμε να προβλέψουμε την συμπεριφορά του μοντέλου με βάση τη σχέση:

$$\hat{y}_i = x_{i1}\hat{\theta}_1 + x_{i2}\hat{\theta}_2 + \cdots + x_{ip}\hat{\theta}_p, \quad i = 1, \cdots, n$$

Η απόκλιση των παρατηρούμενων από τις προβλεπόμενες μετρήσεις είναι:

$$r_i = y_i - \hat{y}_i, \quad i = 1, \cdots, n$$

Η εκτίμηση των παραμέτρων θ_k προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος:

$$\min_{\theta_1 \cdots \theta_p} \{\phi(\vec{r})\}$$

όπου $\phi(\cdot)$ είναι μια έκφραση των αποκλίσεων r_i.

Α.2 Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων

Η πιο γνωστή μέθοδος στην κατηγορία των αλγορίθμων για robust regression είναι η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (least squares). Προκύπτει για:

$$\phi(\vec{r}) = \sum_{i=1}^{n} r_i^2$$

είναι δηλαδή η λύση του προβλήματος ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγωνικών αποκλίσεων:

$$\min_{\theta_1 \cdots \theta_p} \left\{ \sum_{i=1}^{n} r_i^2 \right\}$$

Η επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης είναι αρκετά εύκολη, κατανοητή και υπολογιστικά γρήγορη. Για αυτόν το λόγο ο least squares εφαρμόζεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Επιπλέον, η απόδοση του αλγορίθμου είναι πολύ καλή όταν η κατανομή του θορύβου στις μετρήσεις ακολουθεί την κατανομή Gauss με μηδενική μέση τιμή. Στην αντίθετη περίπτωση, η χρήση του μπορεί να δώσει αναξιόπιστα αποτελέσματα.

Επίσης, σημαντικό μειονέκτημά του είναι ότι η παρουσία outliers, μετρήσεων δηλαδή που δεν ακολουθούν το μοντέλο, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοσή του και προκαλεί μεγάλη διαταραχή στα αποτελέσματά του. Η παρουσία outliers επιβάλλει την εφαρμογή άλλων αλγορίθμων.

Α.3 Μέθοδος ελαχίστου τετραγωνικού ενδιάμεσου

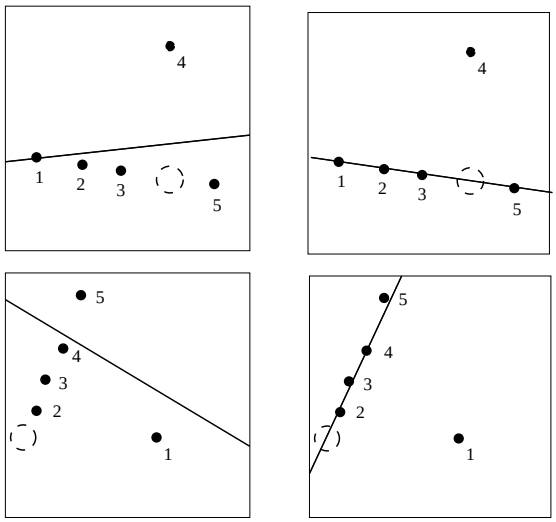
Η μέθοδος του ελαχίστου τετραγωνικού ενδιάμεσου (LMedS) αρχικά προτάθηκε από τον Rousseuw[34] και αφορά την ελαχιστοποίηση του μη γραμμικού προβλήματος:

$$\min_{\theta_1 \cdots \theta_p} \left\{ \; median_{i=1,\cdots,n} r_i^2 \; \right\}$$

όπου ο median είναι το ενδιάμεσο στοιχείο στην ταξινόμηση των αποκλίσεων r_i. Διαισθητικά, η προσέγγιση αυτή προσπαθεί να εντοπίσει τις παραμέτρους του προβλήματος που ταιριάζουν καλύτερα στην *πλειοψηφία* των μετρήσεων και όχι σε *όλες* τις μετρήσεις. Έτσι δεν επηρεάζεται από την παρουσία outliers. Η ανθεκτικότητά του στους outliers φτάνει το 50%, δηλαδή μπορεί να μην επηρεάζεται όσο η πλειοψηφία των μετρήσεων είναι συνεπής στο μοντέλο. Δύο χαρακτηριστικά αποτελέσματα της απόδοσής του σε σύγκριση με τον LS αλγόριθμο δίνονται στο σχήμα Α.1.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η υπολογιστική της πολυπλοκότητα η οποία αναφέρεται ως υψηλή[2]. Αυτό οφείλεται στην επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος, που γίνεται με διερεύνηση στο χώρο των πιθανών λύσεων που παράγεται από τις δεδομένες μετρήσεις. Καθώς ο χώρος αυτός μπορεί να είναι πολύ μεγάλος, στην πράξη επιλέγεται τυχαία ένα υποσύνολο από τα δεδομένα και υπολογίζεται η απόκλιση των μετρήσεων από τις προβλέψεις που δίνουν τα επιλεγμένα δεδομένα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για έναν ορισμένο αριθμό επαναλήψεων και η εκτίμηση των ζητούμενων παραμέτρων είναι αυτή που έχει ως αποτέλεσμα τον ελάχιστο ενδιάμεσο στις αποκλίσεις.

Ένα ζήτημα που προκύπτει είναι ο καθορισμός του πλήθους των επαναλήψεων του αλγορίθμου, ώστε να αναμένεται ότι κάποιο *καλό* υποσύνολο από τα δεδομένα θα έχει επιλεγεί. Ένα σύνολο από τα δεδομένα είναι *καλό* αν δεν περιέχει outliers. Υποθέτοντας



(α) Αλγόριθμος LS (β) Αλγόριθμος LMedS

Σχήμα Α.1: Συγκριτικά αποτελέσματα της συμπεριφοράς του LS και του LMedS

ότι ένα ποσοστό ϵ των δεδομένων είναι outliers, η πιθανότητα ότι *τουλάχιστον* ένα από τα m τυχαία επιλεγμένα υποσύνολα δε θα περιέχει outliers είναι:

$$P = 1 - [1 - (1 - \epsilon)^p]^m \tag{A.1}$$

όπου p είναι το μέγεθος του υποσυνόλου που χρειάζεται για την πρόβλεψη των μετρήσεων σύμφωνα με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο. Από την σχέση (A.1), λύνοντας ως προς m, βρίσκουμε ότι:

$$m = \frac{\log(1 - P)}{\log[1 - (1 - \epsilon)^p]}.$$

Οι απαιτήσεις της εφαρμογής καθορίζουν του μέγεθος του P.

Η απόδοση του LMedS δεν είναι καλή όταν υπάρχει θόρυβος Gauss. Βασιζόμενοι όμως στα αποτελέσματα του LMedS μπορούν να εντοπιστούν οι outliers στα δεδομένα. Ορίζεται η διασπορά:

$$\hat{\sigma} = 1.4826 \cdot (1 - \frac{5}{n - p}) \cdot \sqrt{M_J}$$

όπου η σταθερά 1.4826 χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί παρόμοια απόδοση του αλγορίθμου με τον LS όταν υπάρχει θόρυβος Gauss. Ο όρος $\frac{5}{n-p}$ χρησιμοποιείται για να αντιπαρέρχεται η περίπτωση όπου το πλήθος n των δεδομένων είναι μικρό και M_J είναι ο ελάχιστος ενδιάμεσος του αλγορίθμου. Τότε σε κάθε μέτρηση χρεώνεται βάρος:

$$w_i = \begin{cases} 1, & r_i^2 < (2.5 \cdot \hat{\sigma})^2 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου r_i είναι η απόκλιση της μέτρησης i από την προβλεπόμενη τιμή της. Μία μέτρηση με βάρος $w_i = 0$ είναι outlier, ενώ μία μέτρηση με $w_i = 1$ είναι inlier.

Παράρτημα Β

Αλγόριθμος ελαχιστοποίησης Downhill Simplex

Β.1 Εισαγωγή

Μία συλλογή από $n+1$ διανύσματα ενός $n-$διάστατου χώρου ονομάζεται simplex. Για την ελαχιστοποίηση μιας $n-$διάστατης συνάρτησης ο αλγόριθμος Downhill Simplex αντικαθιστά το διάνυσμα του simplex με την μεγαλύτερη τιμή στην συνάρτηση με κάποιο άλλο διάνυσμα επαναληπτικά[31]. Ο αλγόριθμος προσαρμόζεται στην καμπυλότητα της συνάρτησης και κινείται προς τις περιοχές ελαχίστων.

Β.2 Αρχικοποίηση

Πριν εφαρμοστεί ο αλγόριθμος πρέπει να αρχικοποιηθεί ο simplex των $n+1$ διανυσμάτων. Από ένα αρχικό διάνυσμα P_0 (αρχική τιμή), ο απλούστερος τρόπος για να πάρει κανείς τα υπόλοιπα n διανύσματα του simplex είναι με τη βοήθεια της σχέσης:

$$P_i = P_0 + \lambda_i \cdot e_i, i = 1, \cdots, n$$

όπου e_i είναι τα διανύσματα βάσης του $n-$διάστατου χώρου και λ_i είναι μια σταθερή ποσότητα. Επίσης, y_i είναι οι τιμές της συνάρτησης στα σημεία P_i.

Β.3 Κύκλος επανάληψης του αλγορίθμου

Με δεδομένα τα y_i και P_i, υπολογίζονται:

$$l = arg\ \min_i(y_i)$$

$$h = arg\ \max_i(y_i)$$

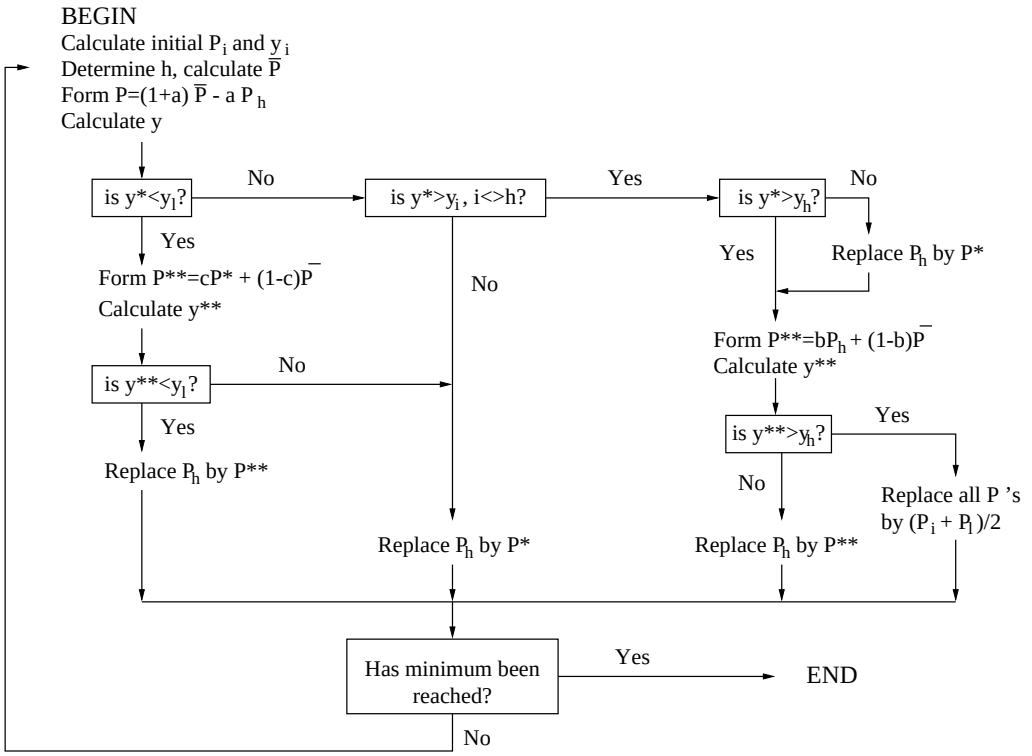
δηλαδή τα l και h είναι οι δείκτες του ελάχιστου και του μέγιστου y_i και συνεπώς:

$$y_l = \min_i(y_i)$$

$$y_h = \max_i(y_i)$$

Υπολογίζεται επίσης το $\bar{P}$ ως το κέντρο βάρους των διανυσμάτων του simplex εξαιρουμένου του P_h. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου αντικαθίσταται το διάνυσμα P_h με κάποιο άλλο διάνυσμα.

Στο σχήμα Β.1 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Αρχικά υπολογίζεται η αντανάκλαση P^* του P_h σύμφωνα με την σχέση:



Σχήμα Β.1: Το διάγραμμα ροής του Downhill Simplex

$$P^* = (1 + a) \cdot \bar{P} - a \cdot P_h.$$

Ο συντελεστής αντανάκλασης a είναι μία θετική σταθερά. Αν η αντανάκλαση παράγει ένα νέο ελάχιστο, δηλαδή $y^* < y_l$, το P^* διαστέλλεται στο P^{**} σύμφωνα με τη σχέση:

$$P^{**} = c \cdot P^* + (1 - c) \cdot \bar{P}.$$

Ο συντελεστής διαστολής c είναι μία σταθερά μεγαλύτερη της μονάδας. Αν και πάλι υπολογιστεί ένα ελάχιστο, δηλαδή $y^{**} < y_l$, το P_h αντικαθίσταται από το P^{**} και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Αν όμως $y^{**} \geq y_l$ η διαστολή έχει αποτύχει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται αντικαθιστώντας το P_h με το P^*. Αν στην αντανάκλαση του P_h στο P^* ισχύει ότι $y^* > y_i$, για κάθε $i \neq h$, δηλαδή η αντικατάσταση του P_h από το P^* πρόκειται να κάνει το y^* να είναι το νέο μέγιστο, τότε ορίζεται ένα νέο P_h που είναι το διάνυσμα που έχει την μικρότερη τιμή στην συνάρτηση μεταξύ των διανυσμάτων

P_h και P^* και υπολογίζεται η συστολή:

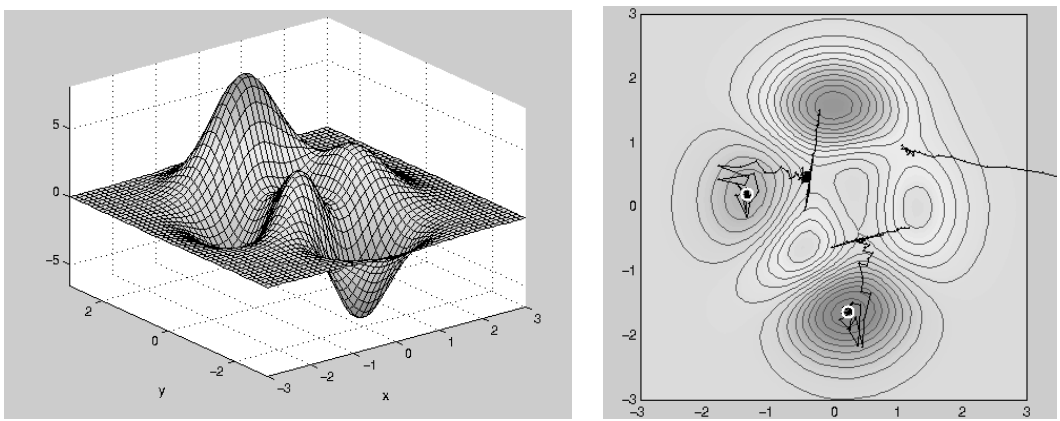
$$P^{**} = b \cdot P_h + (1 - b) \cdot \bar{P}.$$

Το b είναι ο συντελεστής συστολής και έχει σταθερή τιμή μεταξύ των τιμών 0 και 1. Αν αποτύχει η συστολή, δηλαδή ισχύει ότι $y^{**} > \min(y_h, y^*)$ τότε κάθε σημείο P_i αντικαθίσταται σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_i = \frac{P_i + P_l}{2}$$

και επαναλαμβάνεται η διαδικασία από την αρχή. Διαφορετικά, το P_h αντικαθίσταται από το διάνυσμα P^{**} και επαναλαμβάνεται η διαδικασία.

Το κριτήριο για τον τερματισμό του αλγορίθμου αφορά τον έλεγχο της διασποράς των τιμών y_i της συνάρτησης γύρω από το κέντρο βάρους $\bar{y}$. Έτσι, όταν η τιμή της ποσότητας $\sqrt{\sum_i \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n}}$ γίνει μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, θεωρείται πλέον ότι η εκτίμηση του ελαχίστου δεν πρόκειται να αλλάξει σημαντικά και τερματίζεται ο αλγόριθμος.



(α) Γραφική παράσταση της συνάρτησης για ελαχιστοποίηση

(β) Εντοπισμός των ελαχίστων για τρεις αρχικές τιμές

Σχήμα Β.2: Παράδειγμα εφαρμογής του Downhill Simplex

Στο σχήμα Β.2 απεικονίζεται ένα παράδειγμα της εφαρμογής του Downhill Simplex όπως υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Στην αριστερή εικόνα φαίνεται η συνάρτηση της οποίας ζητούνται να εντοπιστούν τα ελάχιστα, ενώ στην δεξιά εικόνα φαίνεται η απόδοση του αλγορίθμου για τρεις διαφορετικές αρχικές τιμές. Για πρακτικούς λόγους απεικόνισης, το παράδειγμα περιορίζεται στην εύρεση ελαχίστων μιας συνάρτησης δύο μεταβλητών. Σε όλες τις περιπτώσεις ο αλγόριθμος καταλήγει στον εντοπισμό του τοπικού ελάχιστου στο οποίο τον οδηγεί η μορφή της συνάρτησης. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τους συντελεστές λ, a, b, c και το κατώφλι τερματισμού του αλγορίθμου είναι 0.1, 1, 0.5, 2 και 10^{-17} αντίστοιχα.

Βιβλιογραφία

[1] P.N. Nikiforuk A. Fujimori and M.M. Gupta. Adaptive navigation of mobile robots with obstacle avoidance. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(4):596--602, Aug. 1997.

[2] P. Meer A. Mintz and A. Rosenffeld. Robust regression methods for computer vision: A review. *International Journal of Computer Vision*, 6(1):59--70, 1991.

[3] G. Adiv. Determining three-dimensional motion and structure from optical flow generated by several moving objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7:348--401, 1985.

[4] A. Argyros. Visual detection of independent 3d motion by a moving observer. *Ph.D.thesis. University of Crete, Computer Science Department*, 1996.

[5] R. Arkin and R. Murphy. Autonomous navigation in a manufacturing environment. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(5):445--454, Ayg. 1990.

[6] N. Ayache and O. Faugeras. Maintaining representations of the enviroment of a mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(6):804--819, Dec. 1989.

[7] D.H. Ballard and C.M. Brown. *Computer Vision*. Englewood Cliff, N.J: Prentice Hall, 1982.

[8] B.C. Bloom. Use of landmarks for mobile robot navigation. *Proceedings SPIE Conference on Intelligent Robots and Computer Vision*, pages 351--355, 1985.

[9] R.A. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(1):14--23, Mar. 1986.

[10] A.R. Bruss and B.K. Horn. Passive navigation. *Computer Vision, Graphics, Image Processing*, 21:3--20, 1983.

[11] J.F. Canny. The complexity of robot motion planning. *MIT Press, Cambridge, MA*, 1988.

[12] R. Chatila and J. Laumond. Position referencing and consistent world modeling for mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1985.

[13] J. Crowley. Navigation for an intelligent mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, pages 31--41, Mar. 1985.

[14] K. Dangsung. Indoor robot navigation with a generic map. Technical Report CA 90089--0273, University of Southern California, Los Angeles.

[15] R. Deriche and O. Faugeras. Tracking line segments. *Proceedings of the 1st European Conference on Computer Vision*, pages 259--268, Apr. 1990.

[16] E. Triendl D.J. Kriegman and T.O. Binford. Stereo vision and navigation in buildings for mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(6):792--803, Dec. 1989.

[17] P. Questa F. Ferrari, J. Nielsen and G. Sandini. Space variant imaging. *Sensor Review*, 15(2):17--26, 1995.

[18] T. Fukuda, S. Ito, F. Arai, Y. Yokoyama, Y. Abe, K. Tanaka, and Y. Tanaka. Navigation system based on ceiling landmark recognition for autonomous mobile robot. *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IPOS)*, 2:150--161, 1995.

[19] R. Greiner and R. Isukapalli. Learning to select useful landmarks. *IEEE Transactions Systems, Man, Cybern. Part B: Cybernetics*, 26(3):437--449, 1996.

[20] T. Miyashita H. Ishiguro and S. Tsuji. T-net for navigating a vision guided robot in real world. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1068--1073, 1995.

[21] B. Horn and B. Schunck. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 17:185--203, 1981.

[22] T.S. Huang and N. Netravali. Motion and structure from feature correspondences: A review. *Proceedings of the IEEE*, 82(2):252--268, Feb. 1994.

[23] H. Durrant-Whyte J. Leonard and I. Cox. Dynamic map building for an autonomous mobile robot. *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pages 89--96, 1990.

[24] T.S. Huang J. Weng and N. Ahuja. Motion and structure from two perspective views: Algorithms, error analysis and error estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(5):451--476, May 1989.

[25] A.R. Hanson J.B. Burns and E.M. Riseman. Extracting straight lines. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(4):425--455, July 1986.

[26] L. Kitchen and A. Rosenfeld. Gray-level corner detection. *Pattern Recognition Letters*, pages 95--102, Dec. 1982.

[27] W.H. Lee K.S. Roh and I.S. Kweon. Obstacle detection and self-localization without camera calibration using projective invariants. *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IPOS)*, pages 1030--1035, 1997.

[28] A. Lazanas and J.C. Latombe. Landmark-based robot navigation. *In 10th National Conference on Artificial Intelligence*, pages 697--702, July 1992.

[29] M. Magee and J.K. Aggarwalls. Robot self-location using visual reasoning relative to a single target object. *Pattern Recognition*, 28(2), 1995.

[30] H. Nasr and B. Bhanu. Landmark recognition for autonomous mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1218--1223, 1988.

[31] J.A. Nelder and R. Mead. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, (7):308--313, 1965.

[32] N.J. Nilsson. A mobile automation, an application of artificial intelligence techniques. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 509--520, 1969.

[33] I. Patras, N. Alvertos, and G. Tziritas. Joint disparity and motion field estimation in stereoscopic image sequences. In *13th International Conference on Pattern Recognition*, volume 1, pages 359--362, Aug. 1996. Vienna, Austria.

[34] P.J. Rousseuw. Least median of squares regression. *Journal of American Statistics Association*, 79:871--880, 1984.

[35] S. Sarkar and K.L. Boyer. On optimal infinite impulse response edge detection filters. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(11):1154--1171, Nov. 1991.

[36] A. Ohya T. Ohno and S. Yuta. Autonomous navigation for mobile robots reffering pre-recorded image secuence. *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IPOS)*, pages 672--679, 1996.

[37] K. Tashiro, J. Ota, Y. Lin, and T. Arai. Design of the optimal arrangment of artificial landmarks. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 407--413, 1995.

[38] C.J. Taylor and D.J. Kriegman. Vision-based motion planning and exploration algorithms for mobile robors. Technical report, Yale University, 1994.

[39] R.B. Tilove. Local obstacle avoidance for mobile robots based on the method of artificial potentials. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cincinati, OH*, pages 566--571, 1990.

[40] G. Tziritas and C. Labit. *Motion Analysis for Image Sequence Coding*. Elsevier, 1994.

[41] S. Velissaris. Indoor navigation of a robot using visual information. Master's thesis, Computer Science Department, University of Crete, Greece, Dec. 1996.

[42] S. Teukolsky W. Press and W. Vetterling. *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, 2nd edition, Jan. 1993.

[43] M. Inaba Y. Matsumoto and H. Inoue. Navigation based on memorization of scene image secuences--position identification and obstacle detection in corridor enviroment. *Proceedings of the Annual Conference of Robotics Society*, pages 313--314, 1995.

[44] E. Yeh and D.J. Kriegman. Toward selecting and recognizing natural landmarks. *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IPOS)*, 1:47--53, 1995.

[45] Z. Zhang. Estimating motion and structure from correspondences of line segments between two perspective images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(12):1129--1139, Dec. 1995.