



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΙΤΛΟΣ

Διδακτορική Διατριβή

του

Αλεξάνδρου Φιλοθέου του Χρήστου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΚΑΙ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΟΥΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΒΑΣΙΛΙΚΟΥ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΟΚΧΟΛΜΗΣ

που εκπονήθηκε ως μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για την απονομή του τίτλου του

Διδάκτορα Μηχανικού

Επιβλέπων

Γεώργιος Δ. Σεργιάδης

Καθηγητής

Συμβουλευτική Επιτροπή

Τραϊανός Β. Γιούλτσας

Καθηγητής

Ανδρέας Λ. Συμεωνίδης

Αναπληρωτής Καθηγητής

Η κύρια αιτία των προβλημάτων είναι οι λύσεις.

—Έρικ Σέβαράιντ

Περίληψη

Abstract

Περιεχόμενα

I	Εισαγωγή	1
1	Περιγραφή του πεδίου εφαρμογής	3
1.1	Ρομποτική κινητής βάσης	5
1.1.1	Θεμελιώδεις λειτουργίες	5
1.1.2	Πηγές και κύριοι τρόποι αντίληψης του περιβάλλοντος	7
1.1.3	Τρέχουσα κατάσταση και Προκλήσεις	11
1.2	Απαραίτητες έννοιες	11
1.2.1	Εκτιμητέο διάνυσμα κατάστασης	11
1.2.2	Τα δύο κύρια προβλήματα εκτίμησης στάσης	12
1.2.3	Το φίλτρο σωματιδίων	13
1.2.4	Ο αισθητήρας lidar δισδιάστατων μετρήσεων	16
1.2.5	Ευθυγράμμιση σαρώσεων lidar	17
1.2.6	Ευθυγράμμιση σαρώσεων lidar με σαρώσεις χάρτη	19
1.2.7	Το λειτουργικό σύστημα ρομπότ ROS	22
2	Οδικός χάρτης	25
2.1	Οδικός χάρτης	25
3	Συμβολές και Διάρθρωση της διατριβής	31
3.1	Συμβολές της διατριβής	31
3.2	Διάρθρωση	31

II Προβλήματα—Λύσεις—Συμβολές	33
4 Αξιολόγηση αλγορίθμων αυτόνομης πλοήγησης	35
4.1 Στόχοι του κεφαλαίου και δομή	36
4.2 Σχετική βιβλιογραφία	36
4.2.1 Αλγόριθμοι χάραξης μονοπατιών	37
4.2.2 Ελεγκτές κίνησης	40
4.2.3 Αυτόνομη πλοήγηση με το ROS	42
4.3 Μεθοδολογία αξιολόγησης	49
4.3.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης, περιβάλλοντα, και συμβολισμοί	49
4.3.2 Ορισμός μετρικών αξιολόγησης	52
4.3.3 Μεθοδολογία συνολικής και ιεραρχημένης αξιολόγησης	56
4.3.4 Ορισμός μετρικών ποιότητας πακέτων λογισμικών πλοήγησης	60
4.4 Πειραματική αξιολόγηση	62
4.4.1 Προκαταρκτική αξιολόγηση	62
4.4.2 Αξιολόγηση στο περιβάλλον CORRIDOR	64
4.4.3 Αξιολόγηση στο περιβάλλον WILLOWGARAGE	69
4.4.4 Αξιολόγηση στο περιβάλλον CSAL	72
4.4.5 Συνολική αξιολόγηση	75
4.5 Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα	77
4.5.1 Συμπεράσματα κεφαλαίου	77
4.5.2 Αιτίες περαιτέρω έρευνας	78
5 Μέθοδοι ελάττωσης σφάλματος εκτίμησης στάσης φίλτρου σωματιδίων	81
5.1 Στόχοι του κεφαλαίου και δομή	81
5.2 Σχετική βιβλιογραφία	84
5.2.1 Ευθυγράμμιση μετρήσεων δισδιάστατου αισθητήρα lidar	84

5.2.2	Ευθυγράμμιση μετρήσεων δισδιάστατου αισθητήρα lidar με σαρώσεις χάρτη	93
5.3	Μεθοδολογία ελάττωσης σφάλματος εκτίμησης στάσης	98
5.3.1	Μέσω επιλογής σωματιδίων	98
5.3.2	Μέσω ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη	103
5.3.3	Μέσω ανάδρασης	105
5.3.4	Το ολικό σύστημα ελάττωσης του σφάλματος εκτίμησης	109
5.4	Πειραματική αξιολόγηση	110
5.4.1	Πειραματική διαδικασία	110
5.4.2	Αποτελέσματα	114
5.4.3	Αξιολόγηση μεθόδων επιλογής σωματιδίων	117
5.4.4	Αξιολόγηση ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη	118
5.4.5	Αξιολόγηση μεθόδων ανάδρασης	119
5.5	Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα	120
5.5.1	Συμπεράσματα κεφαλαίου	120
5.5.2	Αιτίες περαιτέρω έρευνας	123
III	Συμπεράσματα	129
IV	Αναφορές	131
V	Παραρτήματα	155
	Αξιολόγηση αλγορίθμων αυτόνομης πλοήγησης	157
.1	Τύποι αναλογικότητας μετρικών αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομης πλοήγησης	157
.2	Λεπτομέρειες αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομους πλοήγησης	160
.2.1	Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον CORRIDOR	160
.2.2	Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον WILLOWGARAGE	167

.2.3	Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον CSAL	173
Μέθοδοι ελάττωσης σφάλματος στάσης φίλτρου σωματιδίων		181
.1	Σφάλματα εκτίμησης στάσης μεθόδου επιλογής σωματιδίων	181
.2	Σφάλματα εκτίμησης στάσης μεθόδου ανάδρασης σωματιδίων	181

Μέρος Ι

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1

Περιγραφή του πεδίου εφαρμογής

Η ρομποτική είναι η επιστήμη της αντίληψης και του χειρισμού του φυσικού κόσμου μέσω συσκευών που ελέγχονται από υπολογιστές [TBF05]. Ως επιστήμη συμβάλλεται από τους κλάδους του αυτομάτου ελέγχου, της επιστήμης των υπολογιστών, των μαθηματικών, και ως πράξη από την επιστήμη της φυσικής, της τεχνολογίας υλικών, της τεχνολογίας λογισμικού, και της ηλεκτρονικής. Το φυσικό αντικείμενο της ρομποτικής είναι το ρομποτό: μία τεχνητή σύνθεση αντλούσα πληροφορίες από το φυσικό περιβάλλον μέσω αισθητήριων συσκευών, επενεργούσα σε αυτό μέσω φυσικών δυνάμεων, αποτελούμενη κατ' ελάχιστον από κινητήρες, τερματικά, υπολογιστικά συστήματα, λογισμικό, και πηγή ενέργειας. Η μορφή της χρήσης των ρομπότ είναι πρόσθετική:¹ πολλαπλασιάζουν τις επιχειρησιακές ενέργειες του ανθρώπου διαιρώντας την απαιτούμενη προσπάθεια για την επίτευξη των σκοπών του και κατανέμοντάς την σε μη ανθρώπινους δράστες της βούλησής του. Στη σημερινή εποχή επικουρούν, συνεργούν, ή επιχειρούν εξ ολοκλήρου στους τομείς της κατασκευής [Wan+19], πλανητικής εξερεύνησης [Wil+18], γεωργίας [VKA19; NB11], απομαχρυσμένης ιατρικής πράξης [SCD20], μεταφοράς αγαθών και ανθρώπων [DB16; Lim+18; Sim+19], συνεχούς απογραφής αγαθών σε αποθήκες [Dim+21], καθαρισμού και απολύμανσης χώρων [KSL20], και αλλού [smp21; rev22; Che+21; NH08]. Σκοπός του ανθρώπου όσο αφορά στα ρομπότ είναι (α) η αντικατάστασή του ατόμου του από αυτά με στόχο την απελευθέρωσή του από τα τετριμμένα, χρονοβόρα, ή επικίνδυνα έργα τα οποία έχει αυτοεπωμιστεί και (β) η ανάπτυξη τους ώστε να αποκτήσει

¹πρόσθετικός: ο διατεθειμένος να προσθέσει, ο παρέχων πρόσθετον δύναμιν [LSK07]

τη δυνατότητα να πατήσει στους ώμους γιγάντων με στόχο τις δικές του επιδιώξεις. Η επιταχυνόμενη, εξαπλούμενη, και θεμελιωμένη χρήση της αυτοματικής λογικής που γέννησε τη ρομποτική έχει εκτρέψει αυτές τις αντικειμενικές επιδιώξεις με αποτέλεσμα την αυτονόμηση τους: ο οριακός σκοπός της αυτοματοποίησης είναι σήμερα η παράδοση των διαδικασιών που εμπλέκουν οργανικά τον άνθρωπο, ει και όπου δυνατόν, στον κόσμο των αυτοματοποιημάτων.

Προς το παρόν, και σε συνάφεια με το πεδίο εφαρμογής της παρούσας διατριβής, το περιεχόμενο αντικείμενο της ρομποτικής ταξινομείται σε τέσσερις τάξεις:

- ρομπότ των οποίων το σώμα μπορεί να κινηθεί ως μία μονάδα στο σύνολό του στο χώρο (ρομποτική κινητής βάσης) ή ρομπότ των οποίων μόνο μέρη έχουν τη δυνατότητα κίνησης στο χώρο (π.χ. βραχίονες)
- ρομπότ τα οποία δρουν αυτόνομα, χωρίς την ανάγκη για είσοδο από άνθρωπο (π.χ. αυτόνομη οδήγηση) ή ρομπότ των οποίων η δράση ορίζεται από ανθρώπινες εντολές (π.χ. ως μέσα εξουδετέρωσης εκρηκτικών μηχανισμών). Αυτή η τάξη διακρίνεται σε βαθμίδες αυτονομίας [BFR14]
- ρομπότ τα οποία έχουν τη δυνατότητα κίνησης στη γη, τον αέρα, ή τη θάλασσα
- ρομπότ εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου

Πεδίο Εφαρμογής ΠΕ. Το πεδίο εφαρμογής της παρούσας διατριβής είναι η ρομποτική αυτόνομης επίγειας κινητής βάσης εσωτερικού χώρου.

Πιο συγκεκριμένα: το μεγαλύτερο μέρος της διατριβής αφορά στην επίλυση προβλημάτων τα οποία είναι ανεξάρτητα από το βαθμό αυτονομίας, ενώ σε όλες τις συνθήκες προϋποτίθεται ότι το ρομπότ επιχειρεί εντός κλειστού (από όλες τις έξι πλευρές) χώρου. Η τελευταία προϋπόθεση-παραδοχή είναι κύριας σημασίας:

Παραδοχή Ι. Ο περιβάλλον χώρος είναι επιδεκτικός αίσθησης ως πλήρως οριοθετημένος, και κάθε πληροφορία που αποτελεί είσοδο (ή προϊόν επεξεργασίας της) των υπολογιστικών συστημάτων του ρομπότ προέρχεται αποκλειστικά από ίδια μέσα του ρομπότ και από την επίδραση του με τα όρια του χώρου—: το σύστημα ρομποτικού περιβάλλον χώρος είναι κλειστό.

Παρατήρηση I. Αυτό σημαίνει ότι η μοντελοποίηση του κόσμου και η αυτο-αντίληψη του ρομπότ πηγάζουν από τους δικούς του (πεπερασμένους) πόρους.

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στο πεδίο εφαρμογής ΠΕ λόγω του διαρκώς αυξανόμενου ενδιαφέροντος στην έρευνα αυτόνομων επίγειων οχημάτων, η οποία εφορμάται από την τρέχουσα και προβλεπόμενη διάχυση τους σε (κρίσιμους και μη) τομείς της παγκόσμιας ανθρώπινης δραστηριότητας. Σκοπός της είναι η επίλυση τρέχοντων προβλημάτων του πεδίου εφαρμογής, τα οποία απαντώνται τόσο στην ερευνητική βιβλιογραφία όσο και στην ερευνητική πράξη. Σημείο εκκίνησής της είναι η έρευνα πάνω στην αυτόνομη πλοήγηση επί του πρακτέου. Από εκεί, βάσει μίας κρίσιμης παρατήρησης, ξεκινάει να εστιάζει στο πρόβλημα της εύρεσης της στάσης ενός ρομπότ στο χώρο, με βάσει παραδοχές και περιορισμούς που προσδιορίζονται από πραγματικές συνθήκες και επιδιώξεις και οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με αυτές. Σε αυτό το κεφάλαιο ορίζεται η ρομποτική κινητής βάσης (ενότητα 1.1) ... ??

1.1 Ρομποτική κινητής βάσης

Ο όρος “ρομποτική κινητής βάσης” αναφέρεται σε ρομπότ τα οποία έχουν τη δυνατότητα κίνησης στο περιβάλλον τους, σε αντίθεση με εκείνα των οποίων η βάση είναι πακτωμένη σε μία συγκεκριμένη θέση του χώρου. Ως εκ τούτου η έρευνα αυτού του τομέα ασχολείται με όλα εκείνα τα προβλήματα που απορρέουν από την πλοήγηση ενός ρομπότ από μία θέση σε μία άλλη.

1.1.1 Θεμελιώδεις λειτουργίες

Το πρόβλημα της πλοήγησης διακρίνεται σε βαθμούς αυτονομίας. Κάθε επόμενη βαθμίδα αυτονομίας αφομοιώνει μία ανεξάρτητη μεταβλητή προηγούμενης βαθμίδας ως μία προς υπολογισμό, την οποία εξαρτά από τον αρχικό στόχο. Η αυτονομία πλοήγησης ξεκινάει από την τυχαία κίνηση στο χώρο με εντολές κίνησης υπολογιζόμενες από το ρομπότ, στην παρακολούθηση προκαθορισμένων τροχιών, ύστερα στην αυτόνομη χάραξη τροχιών προς προκαθορισμένους στόχους και την αυτόνομη παρακολούθηση των τροχιών, και καταλήγει στην αυτόνομη πλοήγηση με αυτόνομη επιλογή σημείων-στόχων.

Κοιτώντας την μη-τετριμμένη αυτόνομη πλοήγηση από το επίπεδο της επιφάνειας απαιτείται κατ' ελάχιστον η γνώση δύο μεταβλητών: του στόχου προς τον οποίο το ρομπότ θα κινηθεί και η τρέχουσα θέση του. Αυτές οι αθώες μεταβλητές ανοίγουν την πόρτα σε ένα σύμπαν προβλημάτων μερικών από των οποίων τη λύση αποπειράται η παρούσα διατριβή.

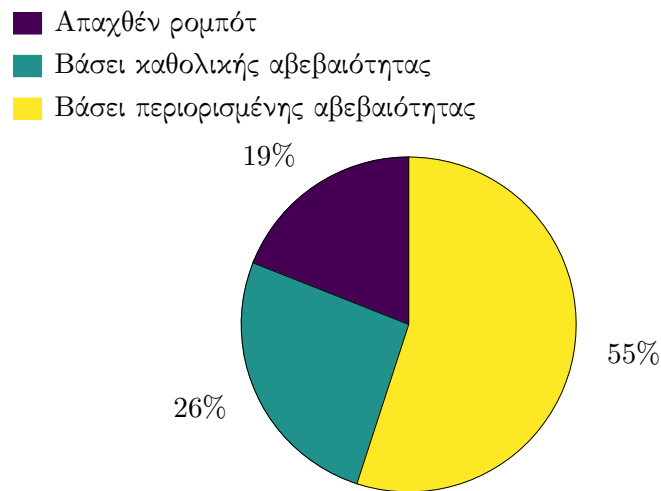
Για τον ακριβή προσδιορισμό ενός σημείου στο φυσικό χώρο απαιτείται αυτός ο χώρος να φέρει σύστημα συντεταγμένων, και κατά συνέπεια να είναι μετρικός. Έπειτα, με γνώμονα την ασφάλεια του ρομπότ και του περιβάλλοντός του, το ρομπότ πρέπει να έχει γνώση των κατειλημμένων και μη σημείων από εμπόδια σε αυτό το σύστημα. Από αυτές τις αιτίες προκύπτει η ανάγκη για την αναπαράσταση του περιβάλλοντος με τη μορφή μετρικού χάρτη. Εν γένει το σύστημα συντεταγμένων και ο χάρτης θα πρέπει να εφευρεθούν επί τούτου για κάθε περιβάλλον καθώς στη γενική περίπτωση τα αρχιτεκτονικά σχέδια χώρων δεν είναι γνωστά. Από αυτή την απαίτηση προκύπτει το πρόβλημα του SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping), δηλαδή της ταυτόχρονης κατασκευής χάρτη και εύρεσης της στάσης ενός ρομπότ σε αυτόν.

Κατά συνέπεια η γνώση μιας οποιασδήποτε θέσης στο φυσικό χώρο μεσολαβείται από τη γνώση της στο χάρτη του, στο οικείο του σύστημα αναφοράς. Δεδομένου του χάρτη ενός χώρου ένα ρομπότ μπορεί να προσδιορίσει τη θέση του σε αυτόν χρησιμοποιώντας τους αισθητήρες του, αντιπαραβάλλοντας μετρήσεις από αυτούς με εικονικές μετρήσεις από κάποια υπόθεση-εκτίμηση για τη θέση του στο χάρτη. Το πρόβλημα της εύρεσης της θέσης ενός ρομπότ στο χάρτη είναι θεμελιώδους σημασίας στη ρομποτική κινητής βάσης, και διακρίνεται σε τριών ειδών προβλήματα (σχήμα 1.1 [PB21]):

- Εύρεση της θέσης βάσει καθολικής αβεβαιότητας (Global Localisation)
- Εύρεση και παρακολούθηση της θέσης βάσει περιορισμένης αβεβαιότητας (Pose Tracking)
- Ανίχνευση απαγωγής ρομπότ και εύρεση της νέας θέσης του (Kidnapped Robot Problem)

Παρατήρηση II. Λόγω της παραδοχής I η θέση του ρομπότ δεν είναι μετρήσιμη αλλά παρατηρήσιμη.

Στο μεγαλύτερο της μέρος η παρούσα διατριβή εστιάζει στα δύο πρώτα προβλήματα, των οποίων η λύση απαιτείται στην πράξη σε κάθε σύστημα με πεδίο εφαρμογής ΠΕ που ικανοποιεί την παραδοχή I.



Σχήμα 1.1: Κατάτμηση του προβλήματος της εύρεσης θέσης σε κατηγορίες και τα ποσοστά έρευνας σε αυτές

Δεδομένης της γνώσης του χάρτη του περιβάλλοντος στο οποίο κινείται ένα ρομπότ κινητής βάσης, της αρχικής και της επιθυμητής του θέσης, ενός αλγορίθμου παρακολούθησης της θέσης του (pose tracking), και αισθητήρων για την αντίληψη του περιβάλλοντος, στη γενικότερή του μορφή το πρόβλημα της αυτόνομης πλοήγησης είναι επιλύσιμο. Για την επίλυσή του απαιτούνται δύο μέθοδοι:

- Ένας αλγόριθμος χάραξης μονοπατιού που συνδέει την αρχική με την τελική του θέση (Path Planning)
- Ένας ελεγκτής κίνησης του ρομπότ για την παρακολούθηση του παραπάνω μονοπατιού (Motion Controller)

1.1.2 Πηγές και κύριοι τρόποι αντίληψης του περιβάλλοντος

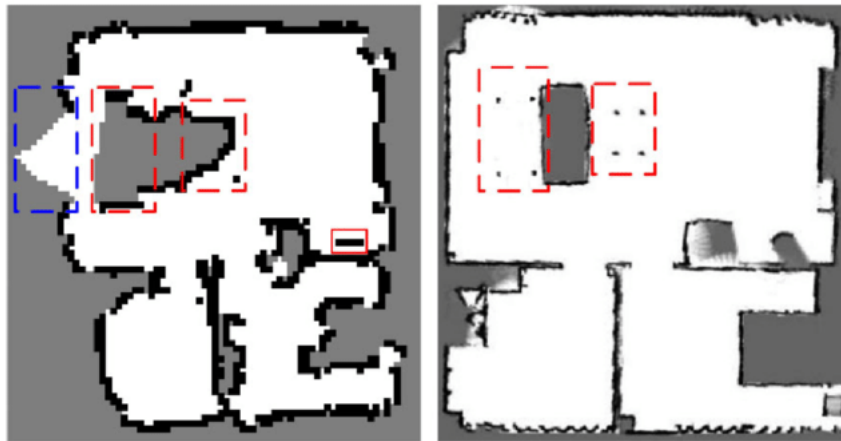
Η επιτυχής λύση του προβλήματος της αυτόνομης πλοήγησης προϋποθέτει την ύπαρξη και χρήση εξωδεκτικών αισθητήρων. Χωρίς αυτούς τα προβλήματα των οποίων η λύση είναι αναγκαία για την αυτόνομη πλοήγηση (κατασκευή χάρτη, εύρεση και παρακολούθηση της θέσης του ρομπότ) δεν είναι επιλύσιμα. Για την αντίληψη των ορίων (επιφάνειες-εμπόδια) του περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται αισθητήρες με ποικίλα χαρακτηριστικά, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και την αντικειμενική επιδίωξη της χρήσης ρομπότ κινητής βάσης. Όσο τα χρόνια περνούσαν και η τεχνολογία υλικών εκλεπτυνόταν, μαζί της εξελίσ-

σονταν και οι παραπάνω αλγόριθμοι, οξύνοντας την ακρίβεια εκτίμησης της αναπαράστασης του περιβάλλοντος χώρου και της θέσης ενός ρομπότ σε αυτό, ή παρέχοντας περισσότερη και πλουσιότερη πληροφορία για το περιβάλλον.

Τα πρώτα χρόνια της ρομποτικής χρησιμοποιούνταν αισθητήρες υπερήχων (sonar), εκκινώντας από την ανίχνευση εμποδίων στη γειτονιά ενός ρομπότ. Η τεχνολογία ήταν εκεί λόγω εκτεταμένης χρήσης τους σε στρατιωτικές επιχειρήσεις, και το κόστος τους ήταν χαμηλό. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εκτίμηση αποστάσεων προς τα γύρω εμπόδια μέσω της μέτρησης του χρόνου εκπομπής υπερήχων προς και ανάκλασης από αυτά. Αν και χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα, η χρήση τους περιορίζεται στην ανίχνευση αντικειμένων σε χαμηλές αποστάσεις λόγω της αδρής λεπτομέρειας των μετρήσεών τους, το περιορισμένο τους γωνιακό πεδίο όρασης, και το εγγενές πρόβλημα της αμφισημίας των μετρήσεών τους λόγω των πολλαπλών διαδοχικών ενδεχόμενων ανακλάσεων του ήχου σε τρίτες επιφάνειες.

Την ίδια αρχή λειτουργίας εκμεταλλεύονται οι αισθητήρες lidar (σύντμηση του Light και Radar ή αλλιώς Light Detection and Ranging) χρησιμοποιώντας, αντί για ήχο, φως υπέρυθρης, ορατής, ή υπεριώδους ακτινοβολίας. Διακρίνονται σε αισθητήρες που αποτυπώνουν αποστάσεις σε εμπόδια του περιβάλλοντός τους σε ένα επίπεδο (δισδιάστατες μετρήσεις) ή σε πολλαπλά επίπεδα γύρω από αυτό (τρισδιάστατες μετρήσεις). Οι αισθητήρες LIDAR υστερούν σε κόστος, μέγεθος, και συχνότητα μετρήσεων σε σχέση με τους αισθητήρες υπερήχων, αλλά εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερο εύρος όρασης (έως 360°), τόσο γωνιακά όσο και ακτινικά, και ακρίβεια μετρήσεων που μπορεί να φτάσει την τάξη των μερικών εκατοστών. Η διαφορά της ακρίβειάς των μετρήσεών τους ως προς την κατασκευή χάρτη με τη χρήση τους αποτυπώνεται στο σχήμα 1.2.

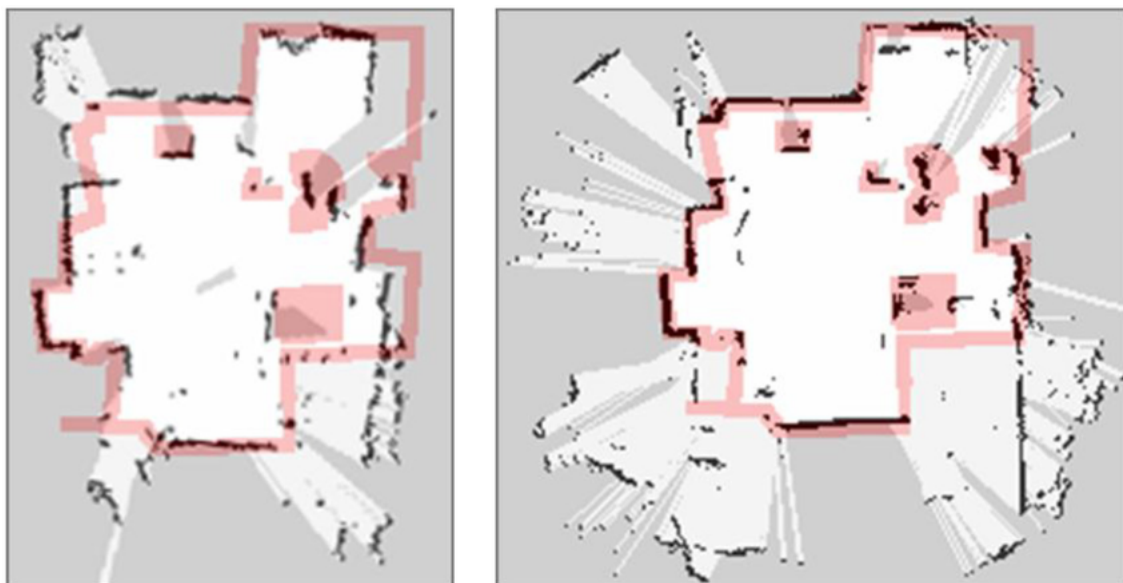
Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αισθητήρων εικόνας και η βελτίωση της ποιότητάς τους τους κατέστησε και πηγές εξωδεκτικών μετρήσεων στη ρομποτική. Το σημαντικό τους πρότερημα είναι η χρωματική πληροφορία του περιβάλλοντος, το μεγάλο οριζόντιο και κάθετο εύρος όρασής τους, και ο υψηλός ρυθμός ανανέωσης των μετρήσεών τους. Η εφεύρεση των αισθητήρων εικόνας και βάθους (RGBD, ή η χρήση στερεοειδών συστημάτων) εισάγει την επιπρόσθετη πληροφορία κατάληψης σημείων στον τρισδιάστατο χώρο από εμπόδια, αλλά ταυτόχρονα επιφέρει χαμηλότερες συχνότητες ανανέωσης αξιοποιήσιμης πληροφορίας λόγω του αυξημένου όγκου της χωρικής πλέον πληροφορίας. Λόγω του μεγάλου όγκου πληροφορίας που φέρουν απαιτούν αντίστοιχους υπολογιστικούς πόρους, οι οποίοι στα πλαίσια του πε-



Σχήμα 1.2: Αριστερά: διδιάστατος χάρτης από μετρήσεις αισθητήρα τύπου sonar. Δεξιά: χάρτης του ίδιου χώρου από μετρήσεις αισθητήρα τύπου lidar σε δύο διαστάσεις [Qi+20]. Τα χρωματισμένα περιγράμματα περικλείουν περιοχές τις οποίες ο αισθητήρας sonar απέτυχε να χαρτογραφήσει με πιστότητα προς το πραγματικό περιβάλλον

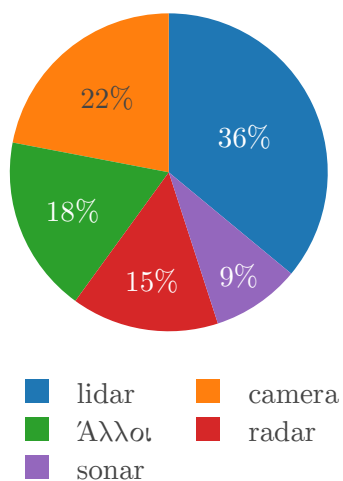
δίου εφαρμογής ΠΕ ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμοι. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους αισθητήρες εξαρτώνται από τις συνθήκες φωτισμού του χώρου στον οποίο λειτουργούν και συνεπώς η ποιότητα των μετρήσεων είναι ευμετάβλητη. Σε σχέση με τους αισθητήρες lidar εμφανίζουν σημαντικά περιορισμένο γωνιακό εύρος όρασης, ακρίβεια μετρήσεων που φθίνει τετραγωνικά σε σχέση με την απόσταση μέτρησης (αντί για γραμμικά όπως στους αισθητήρες lidar), και περιοχές μη αξιοποιήσιμων μετρήσεων λόγω σκιών που παράγονται ως συνέπεια της αρχής λειτουργίας τους [MDM14]. Η διαφορά της ακρίβειάς των μετρήσεών τους ως προς την κατασκευή χάρτη με τη χρήση τους αποτυπώνεται στο σχήμα 1.3.

Λόγω της μεγάλης τους μετρητικής ακρίβειας, της πυκνής τους γωνιακής δειγματοληψίας, του ικανού ρυθμού ανανέωσης μετρήσεων, του ευρύτατου πεδίου οράσεώς τους, του μέτριου κόστους τους, και του γεγονότος ότι ο όγκος των μετρήσεών τους είναι κατά κύριο λόγο επεξεργάσιμος σε πραγματικό χρόνο (απαιτητέο από την επίλυση της πλειονότητας των προβλημάτων της υποενότητας 1.1.1), οι αισθητήρες τύπου lidar έχουν προκριθεί στη θέση των αισθητήρων εκ των ων ουκ άνευ όσο αφορά σε εφαρμογές αυτόνομους πλοήγησης, κατασκευής χάρτη, και εύρεσης της θέσης ενός ρομπότ, στο πεδίο εφαρμογής ΠΕ που ικανοποιούν την παραδοχή I. Οι ίδιες αρετές τους έχουν καταστήσει ηγέτες στην ευρύτερη αγορά αισθητήρων για ρομποτικές εφαρμογές όπου επιζητείται επιπρόσθετη αντίληψη που να υπηρετεί σκοπούς αυτονομίας (σχήμα 1.4).

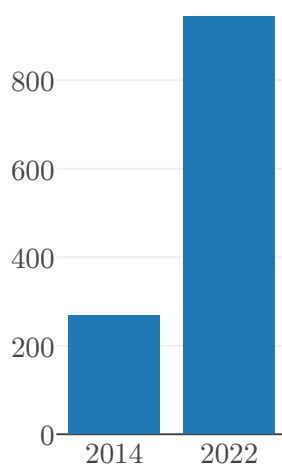


Σχήμα 1.3: Αριστερά: διδιάστατος χάρτης από μετρήσεις αισθητήρα τύπου RGBD προβεβλημένες στο οριζόντιο επίπεδο. Δεξιά: χάρτης του ίδιου χώρου από μετρήσεις αισθητήρα τύπου lidar σε δύο διαστάσεις [Oli+12]. Οι κόκκινες γραμμές αναπαράσταν το πραγματικό περιβάλλον

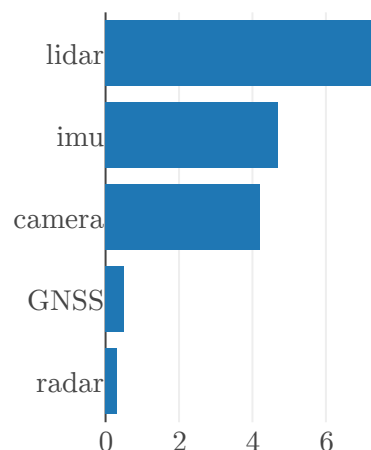
Παγκόσμια αγορά αισθητήρων
στην αυτοκινητοβιομηχανία



Παγκόσμιες πωλήσεις
αισθητήρων lidar



Παγκόσμια αγορά
αισθητήρων 2027



Σχήμα 1.4: Αριστερά: κατάτμηση της αγοράς αισθητήρων στην αυτοκινητοβιομηχανία [SSC21]. Μέση: πωλήσεις αισθητήρων lidar σε εκατομμύρια δολάρια κατά έτος [staa]. Δεξιά: προβολή της κατάτμησης της αγοράς αισθητήρων και πωλήσεις σε δισεκατομμύρια δολάρια το έτος 2027 [stab]

1.1.3 Τρέχουσα κατάσταση και Προκλήσεις

Τα θεμελιακά προβλήματα που απορρέουν από απαιτήσεις αυτόνομης πλοήγησης, δηλαδή η κατασκευή χάρτη, η εύρεση και παρακολούθηση της θέσης ενός ρομπότ στο χώρο, καθώς και η ίδια η αυτόνομη πλοήγηση, θεωρούνται σήμερα λυμένα στο πεδίο εφαρμογής ΠΕ με τη χρήση αισθητήρων lidar. Για την ακρίβεια αυτό που θεωρείται λυμένο είναι το πρόβλημα *επί της αρχής*: δηλαδή ότι υπάρχουν αναγκαίες συνθήκες στις οποίες η λύση κάθε προβλήματος είναι εφικτή. Η αφαίρεση αυτών των συνθηκών και η έρευνα με γνώμονα την ευρωστία στη μετέπειτα κατάσταση αποτελεί πρόκληση για κάθε μελλοντική λύση.

Επιπρόσθετα η λύση κάθε προβλήματος δεν είναι απαραίτητα “βέλτιστη”. Παράδειγμα αποτελεί το πεδίο του εντοπισμού της θέσης ενός ρομπότ όπου, λόγω της παρατήρησης Π, η εκτίμηση για τη θέση του φέρει ένα αναπόφευκτο σφάλμα (λόγω μετρητικού θορύβου και σφαλμάτων μοντελοποίησης και λύσης). Η ανάγκη για πρόσθετη ή υψηλή ακρίβεια, αν και πάντα ευπρόσδεκτη, δεν ανήκει στις αυστηρές απαιτήσεις των ρομποτικών εφαρμογών, εκτός από αυτές της βιομηχανίας. Στις τελευταίες, ωστόσο, λόγω της ανάγκης για αυστηρές προδιαγραφές και υψηλή ακρίβεια, η αυτονομία ενός οχήματος είτε αποφεύγεται (η χειροκίνητη πλοήγηση καθιστά περιττό τον εντοπισμό της θέσης του) είτε, όπου υιοθετείται, αντικαθίσταται από εξωτερικές και δαπανηρές υποδομές λόγω των διακυβεύματων που υπάρχουν στα βιομηχανικό πλαίσια [Vas+16]. Σε αυτά τα πλαίσια αποτελεί πρόκληση η μείωση των σφαλμάτων εκτίμησης της θέσης ενός ρομπότ, καθώς μικρότερα σφάλματα σημαίνουν περισσότερο γόνιμο έδαφος για την περαιτέρω αυτοματοποίηση διαδικασιών, και την διεύρυνση υιοθέτησης ρομποτικών οχημάτων από τη βιοτεχνία/βιομηχανία.

1.2 Απαραίτητες έννοιες

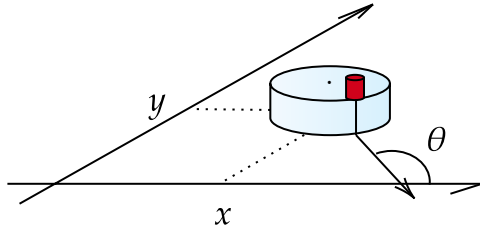
1.2.1 Εκτιμητέο διάνυσμα κατάστασης

Κεντρικής σημασίας στη διατριβή είναι το εκτιμητέο διάνυσμα κατάστασης ενός επίγειου οχήματος. Μέχρι σε αυτό το σημείο χρησιμοποιείτο αντί αυτής η λέξη “θέση” για εισαγωγικούς λόγους.

Ορισμός I. Διάνυσμα κατάστασης ή στάση

Ως διάνυσμα κατάστασης θεωρούμε τη στάση ενός οχήματος στο δισδιάστατο επίπεδο: τον ειρμό της θέσης του με τον προσανατολισμό του, ως προς το σύστημα αναφοράς του χάρτη του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται το όχημα (σχήμα 1.5):

$$\mathbf{p} = [x \ y \ \theta]^\top \quad (1.1)$$



Σχήμα 1.5: Το διάνυσμα κατάστασης (στάση) $\mathbf{p} = [x, y, \theta]^\top$ ενός επίγειου οχήματος στο οριζόντιο επίπεδο

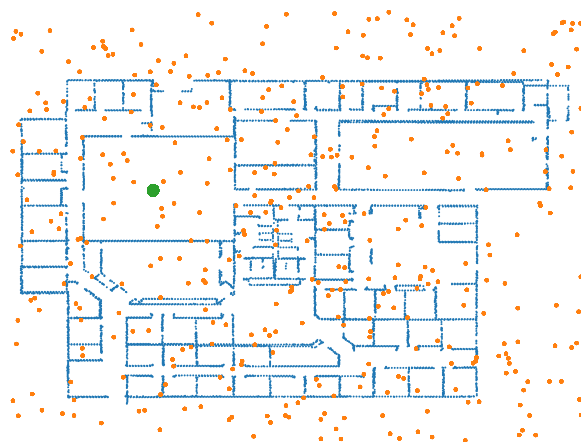
Η ακριβής γνώση της στάσης του οχήματος είναι απαγορευμένη (παρατήρηση II): η *εκτίμηση* $\hat{\mathbf{p}}$ της στάσης του είναι το αντικείμενο των αλγορίμων εύρεσης στάσης.

1.2.2 Τα δύο κύρια προβλήματα εκτίμησης στάσης

Τα δύο κύρια προβλήματα εκτίμησης της στάσης ενός οχήματος (σχήμα 1.1) διακρίνονται βάσει του εύρους της αβεβαιότητας που διαθέτει το όχημα για αυτή. Και τα δύο προϋποθέτουν κατ' ελάχιστον τη γνώση του χάρτη του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται το όχημα (το μόνο σύστημα αναφοράς είναι αυτό του χάρτη και χωρίς αυτό είναι αδύναμη η εκτίμηση της στάσης του) και μετρήσεις από τουλάχιστον έναν αισθητήρα αντίληψης του περιβάλλοντός του.

Το πρόβλημα της εύρεσης-εκτίμησης της στάσης του βάσει καθολικής αβεβαιότητας (global localisation) αναφέρεται στη συνθήκη όπου η μόνη επιπρόσθετη γνώση που διαθέτει το ρομπότ είναι ότι βρίσκεται εντός των ορίων του χάρτη: δεν υπάρχει εκ των προτέρων γνώση για τη στάση του. Για τη λύση του προβλήματος το ρομπότ πρέπει να συλλέξει μετρήσεις από τους αισθητήρες του και να τις αντιπαραβάλλει με το χάρτη του περιβάλλοντός. Εάν η εκτίμηση της στάσης ισούται με την πραγματική του στάση τότε εικονικές μετρήσεις ή χαρακτηριστικά του χάρτη που αντιλαμβάνεται το ρομπότ από την εκτίμήσή της στάσης του

προσεγγίζουν τις αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις ή χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος με μεγαλύτερη πιστότητα από άλλες υποθέσεις για τη στάση του (σχήμα 1.6).



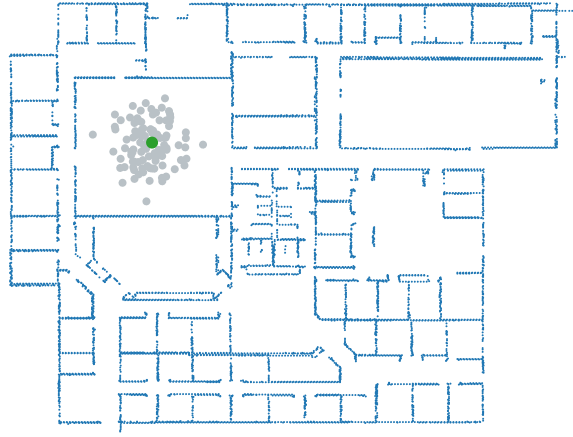
Σχήμα 1.6: Το πρόβλημα της εκτίμησης της στάσης ενός ρομπότ βάσει καθολικής αβεβαιότητας της στάσης του. Το ρομπότ βρίσκεται στη θέση που σημειώνεται με πράσινο. Οι κουκίδες που σημειώνονται με πορτοκαλί δείχνουν υποθέσεις προς εξέταση για την εκτίμηση της στάσης του

Αντιθέτως το πρόβλημα της εκτίμησης της στάσης του βάσει περιορισμένης αβεβαιότητας (pose tracking) δέχεται ως δεδομένη τη γνώση της αρχικής του στάσης. Στόχος της λύσης του προβλήματος είναι η διαρκής εκτίμηση της στάσης του καθώς το ρομπότ κινείται μέσα στο χώρο στο πέρασμα του χρόνου. Για την επίλυσή του είναι εξαιρετικά επιτυχημένη η χρήση πιθανοτικών προσεγγίσεων, όπως το φίλτρο Kalman [May79] και το φίλτρο σωματιδίων [Thr02; Gus+02].

1.2.3 Το φίλτρο σωματιδίων

Οι πιθανοτικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα της εκτίμησης της στάσης έχουν αυξημένη ακρίβεια και ευρωστία σε σύγκριση με τις μη πιθανοτικές, αλλά, ανάλογα με τη φύση τους, πάσχουν ή επιλύουν διάφορα προβλήματα που αφορούν στους σκοπούς εκτίμησης. Για παράδειγμα τα φίλτρα Kalman είναι γνωστό ότι είναι εύρωστα και ακριβή (βέλτιστα ακόμα όταν όλοι οι συστημικοί θόρυβοι είναι κατανεμημένοι κανονικά), αλλά δεν έχουν την ικανότητα να αναπαραστούν αμφισημίες (ambiguities) ως προς τη στάση ή να εντοπίζουν το ρομπότ στην περίπτωση άγνωστης αρχικής στάσης. Από την άλλη πλευρά η φύση των τεχνικών MCL [Del+] τούς επιτρέπει να αναπαραστούν την αβεβαιότητα ως προς τη στάση του ρομπότ διατηρώντας ένα σύνολο υποθέσεων (που ονομάζονται σωματίδια) για αυτή, του οποίου η

μορφή δεν δεσμεύεται από συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας μίας κορυφής (unimodal) όπως στα φίλτρα Kalman. Μεταξύ άλλων αυτή η αναπαράσταση επιτρέπει στις προσεγγίσεις MCL να εντοπίζουν καθολικά ένα ρομπότ και να παρακολουθούν τις αμφισημίες της στάσης του μέχρι να είναι σε θέση να τις επιλύσει, λόγω της δυνατότητας αναπαράστασης αυθαίρετα πολύπλοκων πυκνοτήτων πιθανότητας. Το σχήμα 1.7 απεικονίζει την κατανομή υποθέσεων στάσης μετά την αρχικοποίηση του φίλτρου σωματιδίων.



Σχήμα 1.7: Αρχικοποίηση κατανομής σωματιδίων δεδομένης εκτίμησης για την αρχική στάση. Η πληροφορία προσανατολισμού παραλείπεται για λόγους ευανάγνωστης. Στην αρχική φάση το φίλτρο δεν έχει συγκλίνει και συνεπώς η διαχύμανσή του συνόλου υποθέσεων στάσης είναι μέγιστη

Τα φίλτρα σωματιδίων εκτιμούν αναδρομικά την εκ των υστέρων πυκνότητα πιθανότητας της στάσης ενός οχήματος βάσει λογικής Bayes [TBF05]:

$$p(\mathbf{p}_t | \mathbf{z}_{1:t}, \mathbf{u}_{0:t-1}, \mathbf{M}) \propto p(\mathbf{z}_t | \mathbf{p}_t) \int_{\mathbf{p}'} p(\mathbf{p}_t | \mathbf{p}', \mathbf{u}_{t-1}) \cdot p(\mathbf{p}' | \mathbf{z}_{1:t-1}, \mathbf{u}_{0:t-2}, \mathbf{M}) d\mathbf{x}' \quad (1.2)$$

όπου η στάση του ρομπότ τη χρονική στιγμή t συμβολίζεται με \mathbf{p}_t , η ακολουθία των εντολών κίνησης που εκτελούνται από το ρομπότ με $\mathbf{u}_{0:t-1}$, και με $\mathbf{z}_{0:t}$ η ακολουθία των μετρήσεων που γίνονται από τους αισθητήρες του. \mathbf{M} είναι ο χάρτης που αναπαράστα το περιβάλλον στο οποίο κινείται το ρομπότ. Το μοντέλο κίνησης $p(\mathbf{p}_t | \mathbf{p}_{t-1}, \mathbf{u}_{t-1})$ υποδηλώνει την πιθανότητα ότι τη χρονική στιγμή t το ρομπότ καταλήγει στην κατάσταση \mathbf{p}_t δεδομένου ότι εκτελεί την εντολή κίνησης \mathbf{u}_{t-1} ενώ βρίσκεται στην κατάσταση \mathbf{p}_{t-1} τη χρονική στιγμή $t - 1$. Σε ρομπότ με τροχούς οι εντολές κίνησης συνήθως αντικαθίστανται από

μετρήσεις της περιστροφής τους μέσω κωδικοποιητών (encoders), οι οποίες αναφέρονται ως *οδομετρία*. Το μοντέλο παρατήρησης $p(z_t|\mathbf{p}_t, \mathbf{M})$ δηλώνει την πιθανότητα μέτρησης z_t ενώ το ρομπότ βρίσκεται στη στάση \mathbf{p}_t . Δεδομένου ότι τα φίλτρα σωματιδίων διατηρούν ένα σύνολο διαφορετικών υποθέσεων ως προς την κατάσταση του ρομπότ, η κάθε μία σταθμίζεται σύμφωνα με την πιθανότητα το ρομπότ να διενεργήσει τη μέτρηση z_t υπό τη συγκεκριμένη υπόθεση στάσης ενός σωματιδίου \mathbf{p}_t^i με βάση το μοντέλο παρατήρησης $p(z_t|\mathbf{p}_t, \mathbf{M})$, όπου i δηλώνει τον δείκτη-αναγνωριστικό του σωματιδίου-υπόθεσης i . Αυτή η πιθανότητα ονομάζεται το *βάρος* του κάθε σωματιδίου, του οποίου το μέγεθος, θεωρητικά, είναι ευθέως ανάλογο της ακρίβειας της υπόθεσής του για τη στάση του ρομπότ. Η τελική εκτίμηση του φίλτρου είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος των υποθέσεων στάσης όλων των σωματιδίων κατά το βάρος του καθενός.

Στην απλούστερη έκδοση των φίλτρων σωματιδίων ο αριθμός των τελευταίων είναι σταθερός. Για την αποφυγή απόκλισης της εκτίμησης λόγω εξάντλησης των σωματιδίων [TBF05] ένας μεγάλος αριθμός δειγμάτων είναι απαραίτητος ώστε το ρομπότ να μπορεί να αντιμετωπίσει τόσο τον αρχικό εντοπισμό της στάσης του όσο και την παρακολούθηση της μετά από αυτόν. Η πρακτική του σταθερού αριθμού υποθέσεων μπορεί να είναι μια σοβαρή σπατάλη υπολογιστικών πόρων μετά τα αρχικά στάδια εντοπισμού. Η δειγματοληψία KLD [Fox01] χρησιμοποιείται προκειμένου το φίλτρο να προσαρμόζει τον αριθμό των σωματιδίων που απαιτούνται με την πάροδο του χρόνου, περιορίζοντας το σφάλμα που εισάγεται από την αναπαράσταση της εκ των υστέρων πυκνότητας πιθανότητας της στάσης του ρομπότ με βάση τα δείγματα, και μειώνοντας έτσι τον αριθμό των απαιτούμενων υπολογισμών. Το σφάλμα υπολογίζεται με βάση την απόκλιση Kullback-Leibler μεταξύ της δειγματοληπτούμενης κατανομής και μιας διακριτής κατανομής που υπολογίζεται σε ολόκληρο το χάρτη. Στα αρχικά στάδια του εντοπισμού (όταν το φίλτρο πρέπει να εντοπίσει το ρομπότ βάσει καθολικής αβεβαιότητας), τα σωματίδια μπορούν να έχουν μεγαλύτερη διασπορά, έτσι ώστε να καλύπτουν μεγαλύτερο χώρο υποθέσεων. Αντίθετα, αφού το ρομπότ έχει εντοπιστεί με επιτυχία και το σφάλμα μεταξύ των δύο παραπάνω κατανομών έχει μειωθεί, το φίλτρο σωματιδίων μπορεί να διατηρήσει ένα μικρότερο σύνολο σωματιδίων για την παρακολούθηση της στάσης του ρομπότ.

Το φίλτρο σωματιδίων έχει τη δυνατότητα να αφομοιώσει μετρήσεις από αισθητήρες των οποίων το μοντέλο παρατήρησης μπορεί να ανακατασκευαστεί σε κλειστή μορφή, και συ-

νήθως χρησιμοποιούνται αισθητήρες sonar, lidar, και εικόνες. Η παρούσα διατριβή εστιάζει αποκλειστικά στη χρήση αισθητήρων lidar δισδιάστατων μετρήσεων.

1.2.4 Ο αισθητήρας lidar δισδιάστατων μετρήσεων

Ορισμός II. Ορισμός μέτρησης αισθητήρα 2D lidar

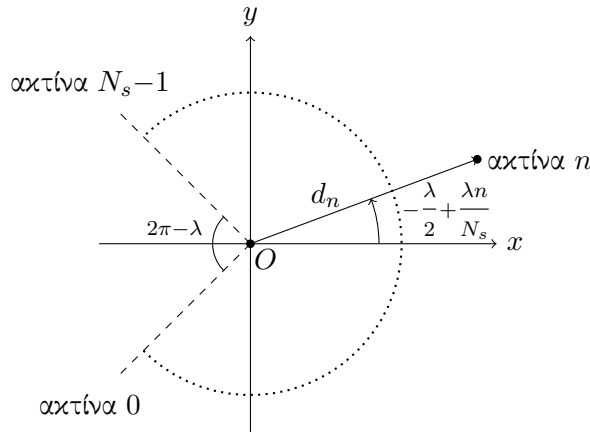
Μία μέτρηση συμβατικού αισθητήρα 2D lidar αποτελείται από έναν πεπερασμένο αριθμό αποστάσεων σε αντικείμενα σε οπτική επαφή εντός της μέγιστης εμβέλειάς του. Οι μετρήσεις λαμβάνονται εγκαρσώς προς το σώμα του, σε κανονικά γωνιακά και χρονικά διαστήματα, σε ένα καθορισμένο γωνιακό εύρος [CRP18].

Μία μέτρηση (αλλιώς ονομαζόμενη σάρωση) \mathcal{S} που απαρτίζεται από N_s ακτίνες σε γωνιακό εύρος λ είναι μία διατεταγμένη ακολουθία $\mathcal{S} : \Theta \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$, όπου

$$\Theta = \{\theta_n \in [-\frac{\lambda}{2}, +\frac{\lambda}{2}) : \theta_n = -\frac{\lambda}{2} + \lambda \frac{n}{N_s}, n = 0, 1, \dots, N_s - 1\} \quad (1.3)$$

Οι γωνίες θ_n εκφράζονται σε σχέση με τον προσανατολισμό του αισθητήρα στο τοπικό του σύστημα συντεταγμένων.

Το σχήμα 1.8 απεικονίζει τη γεωμετρία του ενός τυπικού αισθητήρα 2D lidar, όπου $d_n = \mathcal{S}[-\frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda n}{N_s}]$ είναι η απόσταση που αφορά στην ακτίνα με αναγνωριστικό n .



Σχήμα 1.8: Κάτοψη του τοπικού συστήματος αναφοράς ενός τυπικού αισθητήρα αποστάσεων τύπου 2D lidar. Ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος στο $O(0, 0)$ και ο προσανατολισμός του είναι αυτός του θετικού x άξονα. Το γωνιακό πεδίο οράσεώς του είναι λ

Ορισμός III. *Πανοραμικός αισθητήρας 2D lidar*

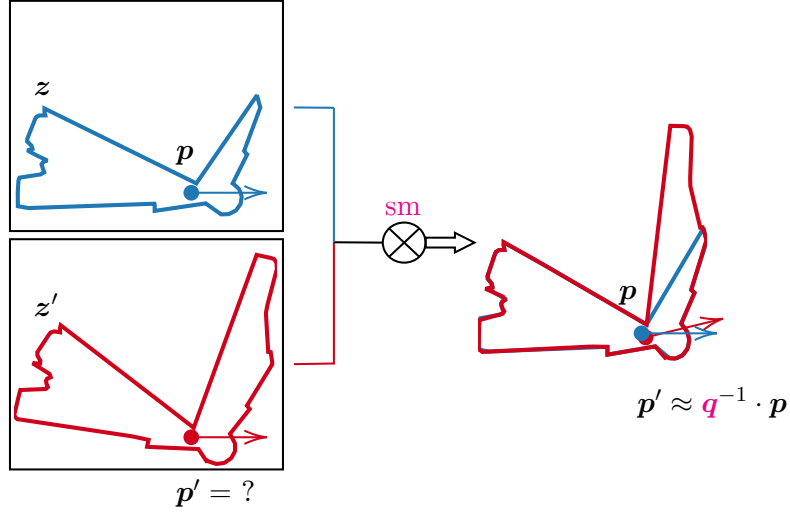
Το γωνιακό εύρος ενός 2D lidar είναι συμμετρικά κατανομημένο ως προς τον τοπικό του x άξονα. Κάθε ακτίνα έχει την ίδια γωνιακή απόσταση από τις γειτονικές της, εξαιρέσει των δύο ακραίων ακτίνων όταν $\lambda < 2\pi$. Όταν $\lambda = 2\pi$ ο αισθητήρας ονομάζεται πανοραμικός.

1.2.5 Ευθυγράμμιση σαρώσεων lidar

Η ευθυγράμμιση σαρώσεων μέσω αισθητήρων lidar βρίσκεται στο επίκεντρο των περισσότερων εφαρμογών χαρτογράφησης και εκτίμησης της στάσης ενός οχήματος λόγω της ικανότητάς της να εξάγει τη σχέση μεταξύ στάσεων από όπου ελήφθησαν μετρήσεις του αισθητήρα. Έστω ένα ρομπότ εξοπλισμένο με έναν αισθητήρα 2D lidar που καταγράφει δύο σαρώσεις, z και z' , την πρώτη ενώ ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος στη στάση $p(x, y, \theta)$, και την δεύτερη ενώ βρίσκεται στη στάση $p'(x', y', \theta')$, σε κάποιο σύστημα αναφοράς. Αυτές οι σαρώσεις καταγράφουν μια οριζόντια τομή του περιβάλλοντος στο οποίο κινείται το ρομπότ. Υπό την προϋπόθεση ότι ορισμένα τμήματα του περιβάλλοντος είναι ορατά τόσο από τη στάση p όσο και από τη p' είναι γενικά δυνατή η εύρεση του τρισδιάστατου μετασχηματισμού q που προβάλλει τα τελικά σημεία του z' σε εκείνα του z με τρόπο τέτοιο ώστε να ευθυγραμμιστούν μεταξύ τους. Η διαδικασία εξαγωγής του μετασχηματισμού q ονομάζεται ευθυγράμμιση σαρώσεων (scan-matching—εδώ σε μετρήσεις δύο διαστάσεων). Η λύση q αποτελείται από δύο μεταφορικές συνιστώσες, Δx και Δy , και μία περιστροφική συνιστώσα, $\Delta \theta$. Αυτή η λύση αντιστοιχεί στην ακριβώς αντίστροφη κίνηση του αισθητήρα από τη στάση p στην p' : $p = R(\Delta \theta) \cdot p' + [\Delta x, \Delta y]^T$, όπου $R(\cdot)$ είναι ο πίνακας περιστροφής σε δύο διαστάσεις.

Στο σχήμα 1.9 απεικονίζεται η ευθυγράμμιση δύο μετρήσεων που λήφθηκαν από στάσεις σε κοντινή απόσταση και στο ίδιο περιβάλλον μέσω του τελεστή sm . Στην πράξη, η εφαρμογή του μετασχηματισμού q^{-1} στο διάνυσμα p δεν ισούται ακριβώς με p' λόγω (α) της παρουσίας θορύβου στις μετρήσεις του αισθητήρα, (β) ενδεχόμενης ατελούς αλληλοεπικάλυψης των δύο μετρήσεων σε μη κυρτά περιβάλλοντα, (γ) του γεγονότος ότι ένας αλγόριθμος ευθυγράμμισης σαρώσεων δεν είναι απαραίτητα τέλειος τελεστής, και (δ) του γεγονότος ότι ο τελευταίος

συνήθως απαιτεί τον καθορισμό πολλών παραμέτρων, κυριότερες από τις οποίες είναι εκείνες που διέπουν το χειρισμό των συσχετίσεων ανάμεσα στις ακτίνες των δύο μετρήσεων.



Σχήμα 1.9: Η ευθυγράμμιση των μετρήσεων 2D lidar $z(p)$ και $z'(p')$ (scan-matching) παράγει την εκτίμηση p' από την p

Ορισμός IV. Ευθυγράμμιση σαρώσεων 2D lidar

Έστω δύο μετρήσεις ενός 2D lidar αισθητήρα που ικανοποιούν τον ορισμό II, S_R και S_V . Έστω ότι οι μετρήσεις λήφθηκαν στο ίδιο περιβάλλον και τις δύο χρονικές στιγμές καταγραφής τους. Έστω $p_V(x_V, y_V, \theta_V)$ η στάση από την οποία ο αισθητήρας κατέγραψε την S_V , εκπεφρασμένη σε κάποιο σύστημα συντεταγμένων. Στόχος της ευθυγράμμισης σαρώσεων σε δύο διαστάσεις είναι να βρεθεί ο τρισδιάστατος μετασχηματισμός $q = (t, \theta)$, $t = (\Delta x, \Delta y)$, που ελαχιστοποιεί την απόσταση των τελικών σημείων της μετασχηματιζόμενης κατά q μέτρησης S_V από την προβολή της στην S_R . Συμβολίζοντας τα τελικά σημεία του S_V με $\{p_V^i\}$:

$$\min_q \sum_i \left\| p_V^i \oplus q - \prod \{S_R, p_V^i \oplus q^{-1}\} \right\|^2 \quad (1.4)$$

Το σύμβολο “ \oplus ” δηλώνει τον τελεστή μετασχηματισμού $p_V^i \oplus (t, \theta) \triangleq R(\theta)p_V^i + t$, όπου $R(\theta)$ είναι ο διδιάστατος πίνακας περιστροφής με όρισμα θ , και $\prod \{S_R, p_V^i \oplus q\}$ είναι η ευκλείδεια προβολή στην S_R .

Παρατήρηση III. Η ευθυγράμμιση σαρώσεων χρησιμοποιείται στη ρομποτική ως μέσο οδομετρίας, πρωτίστως σε μη τροχοφόρα οχήματα (τα οποία συνεπώς δεν έχουν τη δυνατότητα να φέρουν κωδικοποιητές), ή ως ένας χρήσιμος βελτιωτικός παράγοντας της διαρκώς παρεκκλίνουσας οδομετρίας με κωδικοποιητές: σαρώσεις που λαμβάνονται σε διαδοχικές χρονικές στιγμές, εισαγόμενες σε αλγόριθμο ευθυγράμμισης σαρώσεων, εξάγουν την εκτίμηση της στάσης του αισθητήρα σάρωσης κατά τη δεύτερη χρονική στιγμή καταγραφής σε σχέση με την πρώτη. Αλγόριθμοι ευθυγράμμισης σαρώσεων χρησιμοποιούνται με επιτυχία για την επίλυση του προβλήματος της ταυτόχρονης χαρτογράφησης και εκτίμησης της στάσης οχήματος [GK; Hah+; CTT], κατασκευή τοπικών χαρτών [Lac+02; MMM; MMM08], και σε συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς ανθρώπων [Sch+].

1.2.6 Ευθυγράμμιση σαρώσεων lidar με σαρώσεις χάρτη

Η τεχνική της ευθυγράμμισης μετρήσεων 2D lidar έχει αποκτήσει τα τελευταία χρόνια και μία ακόμη εφαρμογή: τη χρήση της για την εκτίμηση της στάσης ενός οχήματος εντός του χάρτη του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται. Η λογική εδώ είναι ότι εάν αντικατασταθεί η μία από τις δύο μετρήσεις που αναφέρονται στο περιβάλλον με μία σάρωση που αναφέρεται στο χάρτη του τότε η ευθυγράμμισή της σάρωσης του χάρτη με τη σάρωση του περιβάλλοντος παρέχει το μετασχηματισμό που ελαχιστοποιεί το σφάλμα εκτίμησης της στάσης του αισθητήρα στο σύστημα συντεταγμένων του χάρτη. Συνεπώς η ευθυγράμμιση σαρώσεων lidar με σαρώσεις χάρτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της λύσης προβλημάτων εκτίμησης της στάσης του αισθητήρα. Κατά συνέπεια, σε αντίθεση με το πρόβλημα της ευθυγράμμισης σαρώσεων μετρήσεων lidar, το οποίο δεν προϋποθέτει τη γνώση του χάρτη του περιβάλλοντος, στο πρόβλημα της ευθυγράμμισης σαρώσεων lidar με σαρώσεις χάρτη η γνώση του τελευταίου είναι αναγκαία συνθήκη.

Ορισμός V. Ορισμός σάρωσης χάρτη

Μια σάρωση χάρτη είναι μια εικονική σάρωση που ενσωματώνει τις ίδιες πληροφορίες με μια σάρωση που προέρχεται από έναν φυσικό αισθητήρα. Μόνο η υποκείμενη αρχή λειτουργίας τους είναι διαφορετική λόγω του γεγονότος ότι η σάρωση χάρτη αναφέρεται

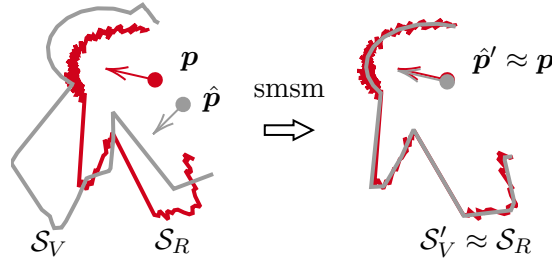
σε αποστάσεις σε εμπόδια εντός του χάρτη του περιβάλλοντος του ρομπότ και όχι εντός του το ίδιου του περιβάλλοντος—εξ ου και η εικονικότητά του. Μία σάρωση χάρτη λαμβάνεται από έναν εικονικό αισθητήρα και προκύπτει μέσω του εντοπισμού των τομών των ακτίνων που προέρχονται από την εκτίμηση της στάσης του αισθητήρα και των ορίων των εμποδίων του χάρτη.

Ορισμός VI. *Ευθυγράμμιση σαρώσεων 2D lidar με σαρώσεις χάρτη*

Η ευθυγράμμιση σαρώσεων 2D lidar με σαρώσεις χάρτη ορίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως η ευθυγράμμιση σαρώσεων 2D lidar (ορισμός IV) αλλά με το \mathcal{S}_V να προέρχεται όχι από το φυσικό περιβάλλον του ρομπότ αλλά από το χάρτη του.

Παρατήρηση IV. Το όφελος της ευθυγράμμισης α) μιας σάρωσης χάρτη που προέρχεται από έναν εικονικό αισθητήρα, από την εκτιμώμενη στάση του σε αυτόν με (β) μια σάρωση που προέρχεται από έναν φυσικό αισθητήρα, από την πραγματική του στάση είναι ότι η διόρθωση της εκτίμησης της στάσης του αισθητήρα παρέχει τη διόρθωση της εκτίμησης της στάσης του ρομπότ: Έστω ότι η εκτίμηση της στάσης ενός ρομπότ βρίσκεται στη γειτονιά της πραγματικής στάσης του. Αν υποθεθεί ότι ο αισθητήρας απόστασης είναι σταθερά στην ίδια στάση σε σχέση με το ρομπότ τόσο στο πραγματικό όσο και στο εικονικό περιβάλλον τότε ο μετασχηματισμός των τελικών σημείων της εικονικής σάρωσης που ελαχιστοποιεί την απόσταση από την προβολή τους στη φυσική σάρωση ισούται με το μετασχηματισμό που, όταν εφαρμοστεί στην εκτιμώμενη στάση του ρομπότ ελαχιστοποιεί το σφάλμα της σε σχέση με την πραγματική του στάση. Επομένως η εξαγωγή του σχετικού μετασχηματισμού της εικονικής σάρωσης σε σχέση με την πραγματική σάρωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διόρθωση της εκτίμησης της θέσης του ρομπότ εντός του χάρτη. Η βαρύτητα της σημασίας αυτής της διόρθωσης έγκειται στο γεγονός ότι η τελευταία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει το σφάλμα εκτίμησης της θέσης του ρομπότ κατά την παρακολούθηση της στάσης του, ή για να διευκολύνει την εύρεση της στάσης του υπό καθολική αβεβαιότητα.

Στο σχήμα 1.10 απεικονίζεται η ευθυγράμμιση μίας μέτρησης \mathcal{S}_R με μία εικονική μέτρηση \mathcal{S}_V μέσω του τελεστή smsm .



Σχήμα 1.10: Η ευθυγράμμιση της 2D εικονικής μέτρησης $\mathcal{S}_V(\hat{p})$ με τη φυσική μέτρηση 2D lidar $\mathcal{S}_R(p)$ (scan-to-map-scan matching) μειώνει το σφάλμα εκτίμησης σε $\hat{p}' \approx p$: $\|\hat{p}' - p\| < \|\hat{p} - p\|$. Τα κόκκινα σημεία υποδηλώνουν τη φυσική μέτρηση $\mathcal{S}_R(p)$, ενώ τα γκρι την εικονική μέτρηση $\mathcal{S}_V(\hat{p})$. Η μεταβολή της μορφής της εικονικής μέτρησης οφείλεται στο γεγονός ότι από διαφορετικές στάσεις εντός του χάρτη είναι ορατά διαφορετικά σημεία του: η εικονική μέτρηση προσομοιάζει όλο και περισσότερο τη φυσική μέτρηση όσο το σφάλμα εκτίμησης της στάσης μειώνεται.

Παρατήρηση V. Σε αντίθεση με το πρόβλημα της ευθυγράμμισης πραγματικών σαρώσεων, η ευθυγράμμιση πραγματικών και εικονικών σαρώσεων είναι ένα εγγενώς συζευγμένο πρόβλημα: δεδομένου του γεγονότος ότι η γεωμετρία των τελικών σημείων των ακτίνων της εικονικής σάρωσης μπορεί να ευθυγραμμιστεί, χωρίς βλάβη της γενικότητας, μόνο από την πραγματική στάση του ρομπότ, ο προσανατολισμός του ρομπότ μπορεί να εξαχθεί εάν και μόνον εάν η εκτίμηση της θέσης του συμπίπτει με την πραγματική του θέση, και η θέση του μπορεί να εξαχθεί μόνο εάν και μόνον εάν η εκτίμηση προσανατολισμού του είναι ίση με τον πραγματικό του προσανατολισμό. Ωστόσο, και τα δύο είναι, κατ' αρχήν, άνισα. Αυτή η σύζευξη είναι ο λόγος για τον οποίο απαιτείται μια επαναληπτική μέθοδος όσο αφορά στην λύση της ευθυγράμμισης πραγματικών και εικονικών σαρώσεων.

Παρατήρηση VI. Σε αντίθεση με την ευθυγράμμιση μετρήσεων, όπου η \mathcal{S}_V είναι μια αμετάβλητη μέτρηση επιφορτωμένη με αναπόφευκτα σφάλματα λόγω τυφλών σημείων, στην ευθυγράμμιση πραγματικών μετρήσεων και εικονικών σαρώσεων η \mathcal{S}_V παράγεται από το χάρτη, ο οποίος αποτυπώνει το περιβάλλον του ρομπότ στο σύνολό του, μεταφέροντας έτσι αυτή την ιδιότητα στην εικονική σάρωση. Αυτή η λεπτή διαφορά καθιστά κατ' αρχήν δυνατή την ευθυγράμμιση της εικονικής σάρωσης \mathcal{S}_V με την αμετάβλητη

μέτρηση \mathcal{S}_R

- με μέγιστη ακρίβεια: η ανάκτηση της πραγματικής στάσης του ρομπότ μπορεί να γίνει με αυθαίρετη ακρίβεια (στην ιδανική περίπτωση τέλειων μετρήσεων και πλήρους σύμπτωσης χάρτη και περιβάλλοντος)
- χωρίς την ανάγκη να δημιουργηθούν αντιστιχίες μεταξύ των ακτίνων των δύο σαρώσεων (καθώς η λειτουργία αυτή επινοήθηκε για και κυρίως διευκολύνει την αντιστοίχιση συνόλων που κατ' αρχήν επικαλύπτονται σε ορισμένες περιοχές αλλά όχι σε άλλες, δηλαδή για το έργο της ευθυγράμμισης μετρήσεων)

Παρατήρηση VII. Η σημασία της αποφυγής χρήσης αντιστοιχιών—εκτός από το γεγονός ότι δεν είναι αυστηρά απαραίτητες για την ευθυγράμμιση πραγματικών μετρήσεων και εικονικών σαρώσεων—έγκειται στο γεγονός ότι η αποφυγή τους συμπαράσχει και την αποφυγή χρήσης των εξωτερικά καθορίσιμων παραμέτρων που διέπουν τη λειτουργία των αλγορίθμων ευθυγράμμισης. Μέθοδοι ευθυγράμμισης που βασίζονται στην εφεύρεση και χρήση αντιστοιχιών απαιτούν τη ρύθμιση των εν λόγω παραμέτρων, ο προσδιορισμός ορισμένων από τις οποίες έχει αποδειχθεί ότι είναι μη διαισθητικός, απαιτητικός, και όχι καθολικά αρμόζων σε οποιοδήποτε περιβάλλον ή ακόμη και για διαφορετικές στάσεις στο ίδιο περιβάλλον.

1.2.7 Το λειτουργικό σύστημα ρομπότ ROS

Το ROS είναι ένα μετα-λειτουργικό σύστημα ανοικτού κώδικα για την εκτέλεση εφαρμογών που αφορούν στη ρομποτική από το υπολογιστικό σύστημα που φέρει ένα ρομπότ [Ng09]. Παρέχει αφαίρεση υλικού (hardware abstraction), έλεγχο συσκευών χαμηλού επιπέδου, υλοποίηση συχνά χρησιμοποιούμενων λειτουργιών, διακίνηση μηνυμάτων μεταξύ διεργασιών, και διαχείριση πακέτων. Παρέχει επίσης εργαλεία και βιβλιοθήκες για την απόκτηση, την κατασκευή, τη συγγραφή, και την εκτέλεση κώδικα. Ο "γράφος" του ROS σε χρόνο εκτέλεσης είναι ένα δίκτυο peer-to-peer διεργασιών που συνδέονται χρησιμοποιώντας την υποδομή επικοινωνίας του ROS.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του ROS είναι η τυποποίηση των τύπων μηνυμάτων επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας μια απλή γλωσσικά ουδέτερη IDL (Interface Definition Language) για την περιγραφή τους, με αποτέλεσμα την ικανότητα υλοποίησης λογισμικού χωρίς γλωσσικές ιδιαιτερότητες. Αυτή η τυποποίηση επιτρέπει την ανάπτυξη αποσυνδεδεμένων πακέτων ROS, δηλαδή εύκολα επαναχρησιμοποιήσιμων συλλογών *κόμβων*. Ένας κόμβος είναι μια υπολογιστική διεργασία που εκτελεί υπολογισμούς που προσφέρουν συγκεκριμένη λειτουργικότητα. Οι κόμβοι συνδυάζονται μαζί σε έναν γράφο και επικοινωνούν μεταξύ τους ασύγχρονα, χρησιμοποιώντας θέματα (topics), ή/και σύγχρονα, μέσω υπηρεσιών κλήσης απομακρυσμένων διαδικασιών.² Στο ROS ένα ρομποτικό σύστημα αποτελείται συνήθως από πολλούς κόμβους. Οι απαιτήσεις του υλικού του ROS είναι ελάχιστες σε επεξεργαστική ισχύ και μνήμη, καθιστώντας το ικανό να εκτελεστεί σε ένα Raspberry Pi ή ένα BeagleBone, ωστόσο οι πραγματικές απαιτήσεις του ποικίλουν ανάλογα με το ανάλογα με τον αριθμό και τον τύπο των κόμβων που έχει αναλάβει να εκτελέσει ένα ρομπότ.

Για τους σκοπούς της διατριβής το ROS χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με πραγματικά ή προσομοιωμένα περιβάλλοντα, αισθητήρες, και ρομπότ, για την εμβάθυνση της έρευνας στο πεδίο εφαρμογής ΠΕ, και για την διεξαγωγή πειραμάτων και προσομοιώσεων με βάση προτεινόμενες μεθόδους και μεθόδους της βιβλιογραφίας.

²<http://wiki.ros.org/Nodes>

Κεφάλαιο 2

Οδικός χάρτης

2.1 Οδικός χάρτης

Αυτό το κεφάλαιο έχει ως σκοπό την παροχή μίας συνοπτικής κάτοψης των προβλημάτων των οποίων τη λύση συμβάλλει η διατριβή. Το σχήμα 2.1 λειτουργεί τροχιοδεικτικά ως προς τα προβλήματα-σταθμούς, των συνδετικών βημάτων ανάμεσά τους, και τις ιδιότητές των λύσεών τους.

Όλα ξεκινούν από την ανάγκη διαλεύκανσης ενός προβλήματος του οποίου η λύση είναι κρίσιμη σε πρακτικές εφαρμογές ρομποτικής κινητής βάσης: της επίδοσης και ποιότητας των διαφορετικών πακέτων λογισμικού που αφορούν στην αυτόνομη πλοήγηση με το λειτουργικό σύστημα ROS (υποενότητα 1.2.7). Καθώς η δημοφιλία τού τελευταίου έχει εξαπλωθεί στην έρευνα, έχει ενσωματωθεί σε αυτό ένας ικανός αριθμός αλγορίθμων αυτόνομους πλοήγησης (χάραξης μονοπατιών σε δισδιάστατο χάρτη και ελεγκτών κίνησης: υποενότητα 1.1.1), των οποίων η συνδυαστική χρήση αποτελεί αντικείμενο χρονοβόρας έρευνας και πειραματισμού για ερευνητές και επαγγελματίες του πεδίου εφαρμογής ΠΕ. Σκοπός αυτής της μελέτης είναι η παροχή μίας μεθόδου αξιολόγησης της επίδοσης αλγορίθμων αυτόνομους πλοήγησης, καθώς και η πειραματική αξιοποίησή της σε ό,τι αφορά τρέχοντες διαθέσιμους αλγορίθμους.

Κατά τη διενέργεια της πειραματικής αξιολόγησης των μεθόδων πλοήγησης παρατηρήσαμε το φαινόμενο της αστάθειας της εκτίμησης της στάσης από το φίλτρο σωματιδίων, και το γενικευμένο φαινόμενο του σφάλματός της ως προς την πραγματική στάση ενός ρομπότ, ανεξαρτήτως μεθόδου πλοήγησης (σχήμα 2.1-A). Η μικρή αυτή παρατήρηση αποδεικνύεται

ότι είναι καίριας σημασίας καθώς μάς εισάγει στον δρόμο της έρευνας επί της βελτίωσης της εκτίμησης της στάσης ενός ρομπότ.

Προς αυτόν το στόχο επικεντρωθήκαμε στην πηγή του προβλήματος: την εκτίμηση της στάσης ενός ρομπότ βάσει περιορισμένης αβεβαιότητας (pose tracking) με φίλτρο σωματιδίων (υποενότητα 1.2.3). Με σκοπό τη μείωση του σφάλματος εκτίμησης θέσαμε έναν αριθμό από υποθέσεις και εξακριβώσαμε πειραματικά την ευστάθειά τους. Τα συμπεράσματα που εξήγαμε αφορούν στη βελτίωση της ακρίβειας εκτίμησης του φίλτρου σωματιδίων (α) επιλέγοντας ως πηγές της τελικής εκτίμησης του υποσύνολα των πιό βαρέων σωματιδίων, (β) με τον προσθετικό τρόπο χρήσης της μεθόδου ευθυγράμμισης μετρήσεων lidar με σαρώσεις χάρτη (υποενότητα 1.2.6), και (γ) με την ανατροφοδότηση της εκτίμησης της τελευταίας στον πληθυσμό σωματιδίων του φίλτρου (σχήμα 2.1-B).

Για την υλοποίηση της ευθυγράμμισης μετρήσεων lidar με σαρώσεις χάρτη χρησιμοποιήσαμε τον αλγόριθμο ευθυγράμμισης μετρήσεων lidar με την καλύτερη επίδοση στη βιβλιογραφία. Κατά την υλοποίηση της μεθόδου β' παρατηρήσαμε ότι η λύσεις του εν λόγω αλγορίθμου παρουσίαζαν σημαντικές διακυμάνσεις στην ακρίβειά τους (α) με μικρές αλλαγές στις παραμέτρους που αφορούν στη διαδικασία υπολογισμού αντιστοιχιών ανάμεσα στις ακτίνες των δύο σαρώσεων, και (β) με την ακρίβεια να μειώνεται όσο ο θόρυβος στις δύο σαρώσεις αυξάνεται.

Για αυτούς τους λόγους ξεκινήσαμε να ερευνούμε τη βιβλιογραφία για μεθόδους ευθυγράμμισης μετρήσεων lidar με σαρώσεις χάρτη που να μην χρησιμοποιούν αντιστοιχίες και που να είναι εύρωστες ως προς τον θόρυβο εισόδου. Το ενδιαφέρον εδώ είναι ότι τόσο οι μέθοδοι ευθυγράμμισης μετρήσεων lidar με σαρώσεις χάρτη όσο και οι μέθοδοι ευθυγράμμισης μετρήσεων lidar (οι οποίες είναι δυνατόν και αυτές να χρησιμοποιηθούν για την ευθυγράμμιση μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη) χρησιμοποιούν στο σύνολό τους αντιστοιχίσεις ανάμεσα σε δύο εισόδους για να φέρουν εις πέρας την ευθυγράμμιση. Για να πετύχουμε τους στόχους στραφήκαμε εν τέλει στο πεδίο της μηχανικής όρασης, από όπου χρησιμοποιήσαμε μία μέθοδο που εκπληρώνει και τα δύο κριτήρια. Για την πειραματική εξακρίβωση του οφέλους χρήσης της τήν στρέψαμε στο πρόβλημα της εύρεσης της στάσης ενός ρομπότ βάσει καθολικής αβεβαιότητας (σχήμα 2.1-Γ). Η πειραματική διαδικασία της μεθόδου εστιάζει στην εξακρίβωση των ποσοστών των αληθώς θετικών εκτιμήσεων στάσεων και των σφαλμάτων τους σε σχέση με την καλύτερη μέθοδο ευθυγράμμισης μετρήσεων lidar με σαρώσεις χάρτη της βιβλιογραφίας.

Ο λόγος που η μέθοδος δεν χρησιμοποιήθηκε απευθείας για την εκτίμηση της στάσης ενός

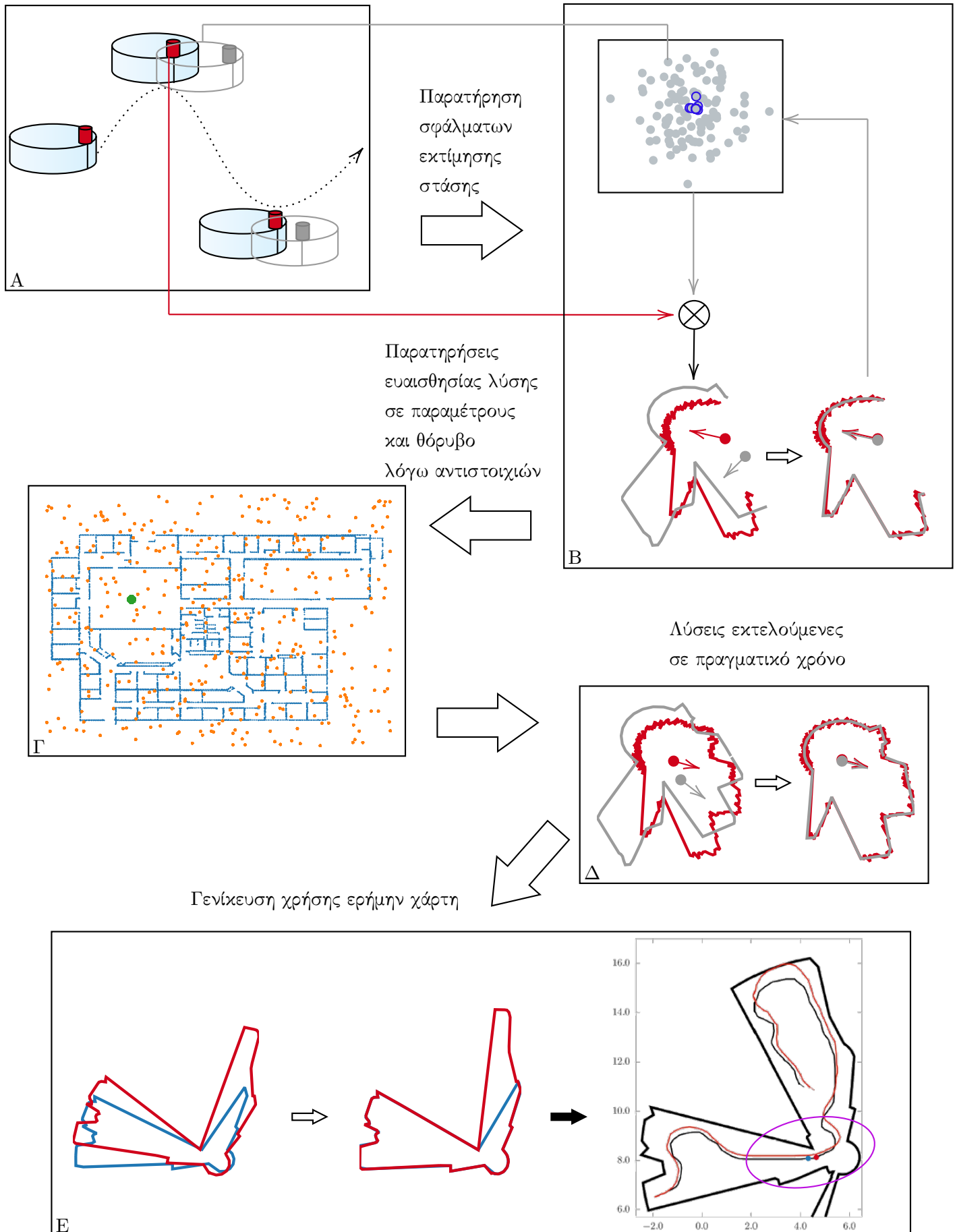
οχήματος βάσει περιορισμένης αβεβαιότητας είναι ότι ο χρόνος εκτέλεσής της είναι τέτοιος που δεν μπορεί να συμβαδίσει με το ρυθμό ανανέωσης των μετρήσεων που προέρχονται από έναν συμβατικό αισθητήρα lidar. Αντιθέτως, στο πρόβλημα της εκτίμησης βάσει καθολικής αβεβαιότητας, ο χαμηλός χρόνος εκτέλεσης είναι επιθυμητός αλλά όχι αυστηρά απαιτητέος ή αναγκαίος.

Σε αυτό το σημείο είχαν γίνει κατανοητά τέσσερα σημεία: (α) η ευθυγράμμιση μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη είναι ικανή να επιλύσει με επιτυχία τα προβλήματα εύρεσης και παρακολούθησης της στάσης ενός ρομπότ (δηλαδή βάσει καθολικής και πεπερασμένης αβεβαιότητας), (β) η ευθυγράμμιση μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη με βάση τον υπολογισμό αντιστοιχιών ανάμεσα στις εισόδους—ο *de facto* και καθ' ολοκληρίαν τρόπος επίλυσης του προβλήματος—είναι υπό συνθήκες επιβλαβής ως προς την ποιότητα της ευθυγράμμισης, (γ) η ανάπτυξη μεθόδων ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη χωρίς τη χρήση αντιστοιχιών που εκτελείται σε πραγματικό χρόνο αποτελεί ως εκ τούτου σημαντική συμβολή στη λύση του προβλήματος, και (δ) οποιαδήποτε προσπάθεια για τη δημιουργία μεθόδου ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη χωρίς τη χρήση αντιστοιχιών θα έπρεπε να προέλθει από έρευνα έξω από τη σχετική βιβλιογραφία.

Ως εκ τούτων η έρευνα μας επικεντρώθηκε στην επίλυση του προβλήματος της ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη χωρίς τη χρήση αντιστοιχιών και σε πραγματικό χρόνο. Προς αυτόν το σκοπό εστιάσαμε σε μία κλάση αισθητήρων lidar των οποίων η χρήση έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια για σκοπούς εύρεσης της στάσης, οι οποίοι έχουν να επωφεληθούν τα μέγιστα από τέτοιες μεθόδους λόγω του αυξημένου θορύβου μέτρησης που φέρουν. Επιπρόσθετα, αυτή η κλάση αισθητήρων εμφανίζει πανοραμικό γωνιακό πεδίο όρασης: κατά συνέπεια η περιοδικότητα του σήματος μετρήσεων αποτελεί γόνιμο έδαφος για την απαλλαγή από τον υπολογισμό αντιστοιχιών (σχήμα 2.1-Δ). Το αποτέλεσμα αυτής της έρευνας ήταν η ανάπτυξη μίας τριλογίας μεθόδων, αντλούσα την αποτελεσματικότητά της από πρώτες αρχές, το πεδίο της κρυσταλλογραφίας, και το πεδίο της μηχανικής όρασης. Κάθε μία από τις τρεις μεθόδους εκτελείται σε πραγματικό χρόνο και εμφανίζει μεγαλύτερη ευρωστία και μικρότερα σφάλματα στάσης από τις μεθόδους της βιβλιογραφίας.

Το επόμενο και τελευταίο βήμα ήταν το πιο σημαντικό, το λιγότερο τεχνικό, και με τη γενικότερη συμβολή: εάν ο χάρτης αντικατασταθεί με μία δεύτερη φυσική μέτρηση τότε η ευθυγράμμιση μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη μετατρέπεται στη γενικότερη μέθοδο ευθυγράμ-

μησης μετρήσεων lidar, η οποία χρησιμοποιείται ως μέσο οδομετρίας (απαραίτητη στα φίλτρα σωματιδίων και Kalman), και βρίσκεται στην καρδιά της επίλυσης του προβλήματος της ταυτόχρονης χαρτογράφησης και παρακολούθησης της στάσης ενός ρομπότ (παρατήρηση III). Το τελευταίο λοιπόν βήμα είναι η ανάπτυξη μίας μεθόδου για την ευθυγράμμιση μετρήσεων 2D lidar που δεν χρησιμοποιεί αντιστοιχίες, που εκτελείται σε πραγματικό χρόνο, και που εμφανίζει μεγαλύτερη ευρωστία στο θόρυβο μέτρησης και μικρότερα σφάλματα ευθυγράμμισης σε σχέση με αντίστοιχες μεθόδους της βιβλιογραφίας.



Κεφάλαιο 3

Συμβολές και Διάρθρωση της διατριβής

3.1 Συμβολές της διατριβής

3.2 Διάρθρωση

Μέρος II

Προβλήματα—Λύσεις— Συμβολές

Κεφάλαιο 4

Αξιολόγηση αλγορίθμων αυτόνομης πλοήγησης

Μια από τις θεμελιώδεις λειτουργίες ενός αυτόνομου ρομπότ κινητής βάσης είναι η ικανότητα να διασχίζει το περιβάλλον στο οποίο δραστηριοποιείται με ελάχιστο ή καθόλου χειροκίνητο έλεγχο από άνθρωπο, και με ασφάλεια. Η ικανότητα αυτή ονομάζεται *πλοήγηση*. Η αυτόνομη πλοήγηση χωρίζεται σε δύο διακριτές λειτουργίες: (α) τον *σχεδιασμό* της πλοήγησης, που αποτελείται από έναν αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών, ο οποίος αναλαμβάνει τη δημιουργία ενός μονοπατιού από μια αρχική σε μια τελική θέση-στόχο εντός του χάρτη του περιβάλλοντος στο οποίο κινείται το ρομπότ, και (β) την *εκτέλεση* της πλοήγησης, που αποτελείται από έναν ελεγκτή κίνησης, ο οποίος είναι επιφορτισμένος με τη διάσχιση του προαναφερθέντος μονοπατιού. Ο τελευταίος πρέπει κατά τη λειτουργία του να αντιμετωπίζει με επιτυχία προβλήματα, κινήσεις, και αβεβαιότητες που προκύπτουν μέσα στο- και από το περιβάλλον του, μέσω των αισθητήρων του.

Το έργο της επιλογής του πρακτικά βέλτιστου συνδυασμού αλγορίθμων αυτόνομους πλοήγησης είναι αρκετά δύσκολο, δεδομένου της ανεπαρκούς έρευνας σχετικά με το ποιος συνδυασμός είναι ο αποτελεσματικότερος δεδομένων των περιορισμών και των ικανοτήτων των υποκείμενων αλγορίθμων πλοήγησης και των σκοπών των εφαρμογών αυτόνομους πλοήγησης. Το ερώτημα της επιλογής του βέλτιστου συνδυασμού είναι σημαντικό καθώς η έρευνα επί των αυτόνομων επίγειων οχημάτων αυξάνει σε αναλογία και με την υιοθέτησή τους σε πραγματικά περιβάλλοντα, και η απάντησή του αναλόγως των διαφόρων εφαρμογών επιφέρει

δαπανηρούς χρόνους έρευνας και δοκιμών.

4.1 Στόχοι του κεφαλαίου και δομή

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι (α) ο σχεδιασμός μίας ολοκληρωμένης, περιεκτικής, και επεκτάσιμης μεθοδολογίας αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομους πλοήγησης κινητών βάσεων ρομπότ του πεδίου εφαρμογής ΠΕ, και (β) η εφαρμογή της για την αξιολόγηση της επίδοσης τρεχόντων υλοποιήσεων τους στο και μέσω του μεσολογισμικού ROS.

Στην ενότητα 4.2 γίνεται η επισκόπηση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που απαντώνται στη ερευνητική βιβλιογραφία ως θεωρητικές μέθοδοι και ως υλοποιήσεις πακέτων λογισμικού. Στην ενότητα 4.3 εκτίθεται η μεθοδολογία αξιολόγησης. Αρχικά παρουσιάζεται η διάταξη της πειραματικής διαδικασίας, και στη συνέχεια η μεθοδολογία αξιολόγησης με βάση ποσοτικές μετρικές, οι οποίες αποτελούν αντικειμενικά κριτήρια της επίδοσης ενός ρομπότ στο έργο της αυτόνομους πλοήγησης. Όσο αφορά στις υλοποιήσεις των μεθόδων αυτόνομους πλοήγησης, δεδομένου ότι η αξιολόγηση είναι στραμμένη στην πράξη, συστήνεται μία μεθοδολογία προκαταρκτικής αξιολόγησής τους με βάσει ποιοτικά κριτήρια που τίθενται από την εμπειρία ανάπτυξης και συντήρησης λογισμικού, προκειμένου να διακριθούν τα εύρωστα και εύχρηστα πακέτα λογισμικού από τα μη. Η πειραματική αξιολόγηση διενεργείται επί μεθόδων αυτόνομους πλοήγησης των οποίων οι υλοποιήσεις δεν απορρίπτονται με βάση αυτά τα ποιοτικά κριτήρια. Η πειραματική διαδικασία και η εφαρμογή της μεθοδολογίας ποσοτικής αξιολόγησης διενεργείται σε εννιά συνδυασμούς πακέτων λογισμικού στην ενότητα 4.4. Το αποτέλεσμα είναι μία ιεράρχηση των συνδυασμών τους. Τέλος, η ενότητα 4.5 παρέχει τα συμπεράσματα του κεφαλαίου και οδούς για περαιτέρω έρευνα, οι οποίες οδηγούν στο κεφάλαιο 5.

4.2 Σχετική βιβλιογραφία

Για να διασχίσει ένα αυτόνομο επίγειο ρομπότ το περιβάλλον του πρέπει να είναι διαθέσιμες μία σειρά από προϋποθέσεις και λειτουργίες. Πρώτον είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός στόχου για να φτάσει το ρομπότ. Αυτός ο στόχος είναι συνήθως η επιθυμητή τελική στάση του στον $2D$ χώρο $([x, y, \theta]$ —σχήμα 1.5). Στη συνέχεια πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος ικανός να λάβει ως είσοδο τη ρομποτική αντίληψη για τον περιβάλλοντα κόσμο (συνήθως ένας $2D$ ή

3D χάρτης), καθώς και την εκτίμηση για την αρχική στάση του ρομπότ, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της στάσης του ρομπότ ενόσω αυτό κινείται αυτόνομα προς τον ανωτέρω στόχο (pose tracking—ενότητα 1.2.2). Έπειτα απαιτείται η ύπαρξη ενός γεωμετρικού μονοπατιού το οποίο, εάν ακολουθηθεί από το ρομπότ, θα το οδηγήσει από την αρχική στην επιθυμητή του στάση. Αυτό το μονοπάτι παράγεται από έναν αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών, του οποίου το αντικείμενο είναι το σύνολο του (στατικού) χάρτη. Τέλος, ένας ελεγκτής κίνησης είναι απαραίτητος, ο οποίος θεωρεί ως εισόδους του το μονοπάτι, την τρέχουσα στάση του ρομπότ, και την τοπική του αντίληψη,¹ και παράγει ταχύτητες κινητήρων έτσι ώστε να οδηγηθεί το ρομπότ στο να ακολουθήσει το μονοπάτι. Ταυτόχρονα, είναι αρμοδιότητα τού τελευταίου να πλοηγείται το ρομπότ με την μεγαλύτερη δυνατή ασφάλεια (υποθέτοντας ότι το ρομπότ θα πρέπει να αποφεύγει συγκρούσεις με στατικά ή κινούμενα αντικείμενα, αν και αυτό δεν αποτελεί πάντοτε προϋπόθεση [GPG17]).

Σε αυτή την ενότητα παρέχεται μία επισκόπηση των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών της βιβλιογραφίας, των ελεγκτών κίνησης για επίγειες κινητές βάσεις, καθώς και των υλοποιήσεών τους σε υπολογιστή με το λειτουργικό σύστημα ROS.

4.2.1 Αλγόριθμοι χάραξης μονοπατιών

Όσον αφορά στους αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών αυτοί συνήθως ανήκουν σε μία από τις παρακάτω έξι κύριες αλγοριθμικές οικογένειες: *Γράφοι Ορατότητας* (Visibility Graphs), *Τεχνικές Βασισμένες στη Σκελετοποίηση, Πιθανοτικοί Οδικοί Χάρτες* (Probabilistic Roadmaps—PRM), *Τυχαία Δένδρα Ταχείας Εξερεύνησης* (Rapidly exploring Random Trees—RRT), *Πλέγματα Κατάστασης* (State Lattices), και *Συναρτήσεις Πλοήγησης* (Navigation Functions—NF).

Οι Γράφοι Ορατότητας ήταν μία από τις πρώτες μεθόδους σχεδιασμού μονοπατιών. Προτάθηκαν από τους Losano-Perez και Wesley το 1979 [LW79], και περιγράφουν μια μέθοδο δημιουργίας μονοπατιών σε κυρτά περιβάλλοντα, όπου τα εμπόδια μετασχηματίζονται με τρόπο τέτοιο ώστε να απεικονίζουν περιοχές που δεν μπορούν να διασχιστούν λόγω των γεωμετρικών περιορισμών του αποτυπώματος του ρομπότ. Μετά την κατασκευή του γράφου ορατότητας, ο οποίος περιέχει ως κόμβους τα μετασχηματισμένα εμπόδια, εφαρμόζεται ένας

¹Με τον όρο τοπική αντίληψη εννοούνται τα ακατέργαστα αισθητηριακά δεδομένα που αντιπροσωπεύουν τις δυναμικές μεταβολές του περιβάλλοντος, σε αντιδιαστολή με τον στατικό συνολικό χάρτη.

αλγόριθμος αναζήτησης για τη δημιουργία της τελικής διαδρομής. Όπως περιγράφεται στα [Gho07] και [GG13] οι γράφοι ορατότητας υποφέρουν από υψηλές απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους και από την πολυπλοκότητα των γεωμετρικών περιορισμών των εμποδίων. Ως εκ τούτων, έχουν προταθεί άλλες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων [KKK11].

Μεταξύ των τεχνικών σκελετοποίησης το Γενικευμένο Διάγραμμα Voronoi (Generalised Voronoi Diagram—GVD) είναι ο κυρίαρχος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται προκειμένου να παραχθεί ένας σκελετός του ελεύθερου χώρου στον οποίο κινείται το ρομπότ, και συνεπώς μονοπατιών πλοήγησης των οποίων τα σημεία ισαπέχουν από τα εμπόδια του περιβάλλοντος. Παραδείγματα χρήσης του GVD σε αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών αναφέρονται (α) στο [Gar+06], όπου το GVD ακολουθείται από την εφαρμογή της μεθόδου Fast Marching για την ελαχιστοποίηση του μήκους της διαδρομής, (β) στο [BG07], όπου το GVD χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μιας ομαλής διαδρομής που εάν ακολουθηθεί κατά γράμμα δεν επιφέρει συγχρούσεις του ρομπότ με το περιβάλλον του, και (γ) στο [Ok+13], το οποίο εισάγει τα Πεδία Αβεβαιότητας Voronoi (VUF), και που συνδυάζει το GVD για την κατασκευή μονοπατιών και έναν ελεγκτή κίνησης για την πλοήγηση του οχήματος.

Μια από τις πιο διάσημες οικογένειες αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομής είναι αυτή των Πιθανοτικών Οδικών Χαρτών. Η ιδέα τους είναι απλή: πραγματοποιείται δειγματοληψία στον ελεύθερο χώρο του χάρτη του περιβάλλοντος και δημιουργείται ένας γράφος του οποίου οι ακμές είναι ασφαλείς για προσπέλαση. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος αναζήτησης στον γράφο για την εύρεση της διαδρομής που εμφανίζει ελάχιστο κόστος με βάση τη μετρική του μήκους του συνολικού μονοπατιού από την αρχική προς την τελική στάση. Τα PRM εισήχθησαν αρχικά από τους Kavraki κ.α. [Kav+96], ωστόσο έχουν προταθεί διάφορες τροποποιήσεις, όπως (α) στο [NSL], όπου οι έννοιες των Γράφων Ορατότητας χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του PRM, (β) στο [BK00] που εισάγει τον αλγόριθμο Lazy PRM, ο οποίος ελαχιστοποιεί δυναμικά τις συνδέσεις του γράφου, και (γ) στο [HSZ] όπου προτείνεται ο υβριδικός PRM, δηλαδή ένας συνδυασμός διαφορετικών PRM ανάλογα με τις ιδιότητες του περιβάλλοντος.

Μια άλλη μεθοδολογία σχεδιασμού μονοπατιών είναι αυτή των Τυχαίων Δένδρων Ταχείας Εξερεύνησης, που προτάθηκε αρχικά από τον La Valle το 1998 [Lav98]. Τα RRT δημιουργούν επαναληπτικά δενδροειδείς δομές, ξεκινώντας από έναν κόμβο-ρίζα και τερματίζουν όταν ένα

φύλλο φτάσει στον επιθυμητό στόχο. Υπάρχουν διάφορες τροποποιήσεις του, όπως, μεταξύ άλλων, το Execution Extended RRT (ERRT) [BV], τα αμφίδρομα RRT [MWS07], Cell-RRT [GFC09], RRT* [KF10], και T-RRT [JCS10].

Ο σχεδιασμός μονοπατιών σε Πλέγματα Καταστάσεων εμφανίστηκε το 2005 από τους Pivtoraiko και Kelly [Mik05]. Ένα πλέγμα καταστάσεων είναι ένας χώρος αναζήτησης που περιλαμβάνει ένα διακριτοποιημένο σύνολο από τις προσβάσιμες-εφικτές καταστάσεις ενός συστήματος (του κινηματικού μοντέλου του ρομπότ εν προκειμένω), το οποίο μπορεί να κωδικοποιήσει ακολουθήσιμα-εφικτά μονοπάτια. Τα μονοπάτια σχηματίζονται από τοπικές συνδέσεις μεταξύ καταστάσεων που συμμορφώνονται στους εκάστοτε κινηματικούς περιορισμούς της κινητής βάσης, και στους περιορισμούς που θέτει ο περιβάλλον χώρος. Μετά την ανάπτυξη του χώρου αναζήτησης δημιουργείται ένα σύνολο χωρικά διακριτών μονοπατιών. Αυτός ο χώρος κωδικοποιεί τις τοπικές συνδέσεις και εξαλείφει τους πλεονασμούς έτσι ώστε ένα ερώτημα σχεδιασμού στο συνδεδεμένο γράφημα αναζήτησης να μπορεί να εκτελεστεί με αποδοτικό τρόπο.

Οι Συναρτήσεις Πλοήγησης είναι μια ειδική κατηγορία Συναρτήσεων Δυναμικού για την πλοήγηση ρομπότ κινητής βάσης [Lat91]. Η συνάρτηση δυναμικού προϋποθέτουν έναν γνωστό χάρτη, και αποδίδουν μια τιμή δυναμικού σε κάθε σημείο του (σε χάρτες που βασίζονται σε ορόσημα) ή σε κάθε κελί πλέγματος (σε χάρτες που βασίζονται σε πλέγμα): κάθε ένα από αυτά λαμβάνει τιμή δυναμικού αντιστρόφως ανάλογη με την απόστασή του από ένα εμπόδιο. Αντίθετα, στη στάση του στόχου αποδίδεται χαμηλή τιμή δυναμικού. Η αρχή του δυναμικού πεδίου είναι ελκυστική λόγω της απλότητας και της κομψότητάς της, ωστόσο, στη βιβλιογραφία αναφέρεται ένας αριθμός ουσιαστικών ελλείψεων [KB][GC00], όπως η ευαισθησία της μεθόδου στο να παγιδεύει το ρομπότ σε τοπικά ελάχιστα, και η αύξηση των ταλαντώσεων όταν ένα ρομπότ πλησιάζει εμπόδια ή στενά περάσματα. Οι Συναρτήσεις Πλοήγησης προσπαθούν να ξεπεράσουν αυτά τα προβλήματα: είναι συναρτήσεις (α) για τις οποίες το δυναμικό του στόχου λαμβάνει μηδενική τιμή ή, εάν ο στόχος είναι απρόσιτος, άπειρη τιμή, και (β) που έχουν μονοτονική κλίση, δηλαδή δεν περιλαμβάνουν τοπικά ελάχιστα, εκτός από αυτό του στόχου. Ωστόσο, η μέθοδος της συνάρτησης πλοήγησης μπορεί παρουσιάσει αργή σύγκλιση, ιδίως όταν το περιβάλλον του ρομπότ περιλαμβάνει στενά περάσματα, και επομένως απαιτεί προσαρμοσμένη ρύθμιση [Kow19]. Επιπλέον, στην χώρους υψηλών διαστάσεων, όπου τα σχήματα του ρομπότ ή των εμποδίων είναι πολύπλοκα, το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται

απότομα [Par16].

4.2.2 Ελεγκτές κίνησης

Αφού δημιουργηθεί το μονοπάτι που συνδέει την αρχική με την επιθυμητή στάση του ρομπότ, ένας ελεγκτής κίνησης πρέπει να χρησιμοποιηθεί προκειμένου το ρομπότ να ακολουθήσει το μονοπάτι στον πραγματικό χώρο, με βάση μετρήσεις από τους εξωδεκτικούς του αισθητήρες. Ο ελεγκτής πρέπει ταυτόχρονα να βεβαιωθεί ότι αποφεύγει τόσο τα στατικά όσο και τα δυναμικά εμπόδια του περιβάλλοντος του ρομπότ. Οι ελεγκτές κίνησης ανήκουν κατά κύριο λόγο σε μία από πέντε οικογένειες προσεγγίσεων: *Ιστογράμματα Διανυσματικών Πεδίων* (Vector-Field Histograms—VFH), *Προσέγγιση Δυναμικού Παραθύρου* (Dynamic Window Approach—DWA), *Δένδρα Πλοήγησης Κενών* (Gap Navigation Trees—GNT), *Προσέγγιση Πλοήγησης με Διαγράμματα Εγγύτητας* (Nearness Diagram navigation approach—ND), και *Ελαστικής Ζώνης* (Elastic Band).

Ένας από τους παλαιότερους ελεγκτές κίνησης είναι τα *Ιστογράμματα Διανυσματικού Πεδίου*, που προτάθηκαν το 1991 από τους Borenstein και Koren [BK91]. Τα VFH δημιουργούν ένα πολικό ιστόγραμμα σε σχέση με τον προσανατολισμό του ρομπότ μέσω των μετρήσεων των αισθητήρων του, αποδίδοντας σε κάθε προσανατολισμό την πιθανότητα η κατεύθυνση αυτή να είναι κατειλημμένη από εμπόδιο. Στη συνέχεια εντοπίζονται επαρκώς μεγάλα ανοίγματα για να μπορεί το ρομπότ να πλοηγηθεί με ασφάλεια μέσα από αυτά, και υπολογίζεται μια συνάρτηση κόστους για κάθε άνοιγμα, όπου και τελικά επιλέγεται αυτό με το μικρότερο κόστος. Βελτιώσεις των VFH είναι τα VFH+, τα οποία ενσωματώνουν τοξοειδείς τοπικές τροχιές, σε αντίθεση με τις ευθείες γραμμές των VFH [UBb], και τα VFH* τα οποία επαληθεύουν ότι μια υποψήφια κατεύθυνση οδηγεί το ρομπότ γύρω από ένα εμπόδιο, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο A* και τις κατάλληλες συναρτήσεις κόστους και ευρηστικών συναρτήσεων [UBa].

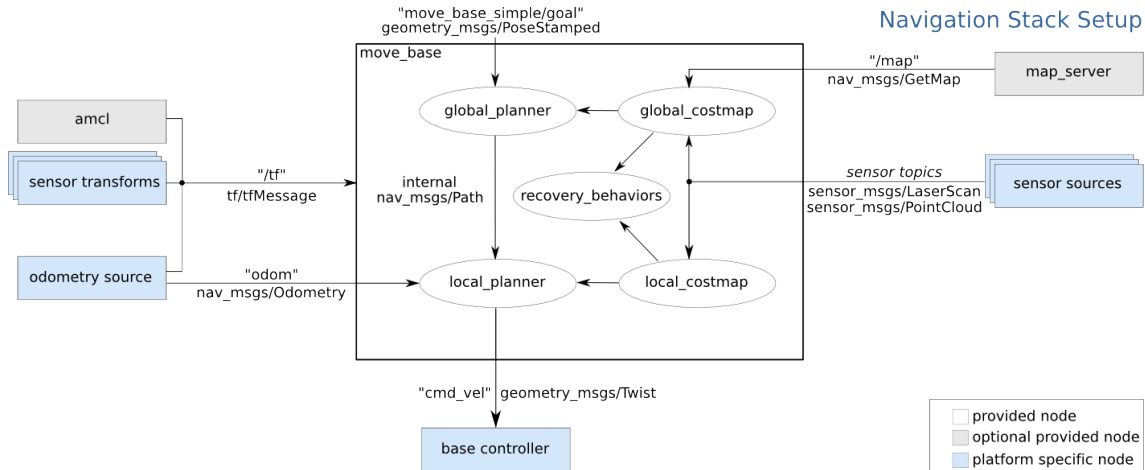
Μια άλλη διάσημη προσέγγιση είναι η *Προσέγγιση Δυναμικού Παραθύρου*, που προτάθηκε από τους Fox, Burgard, και Thrun [FBT97]. Η DWA δειγματοληπτεί το τοπικό περιβάλλον του ρομπότ με πιθανές τροχιές που προκύπτουν άμεσα από το κινηματικό μοντέλο του, υπολογίζοντας ένα κόστος για κάθε δείγμα. Η συνάρτηση αυτή περιλαμβάνει την κατεύθυνση του ρομπότ σε σχέση με τον επιθυμητό στόχο, την απόσταση της τροχιάς του από το πλησιέστερο εμπόδιο, και την προηγούμενη γραμμική ταχύτητα προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αδράνεια

του σώματος του. Στη συνέχεια το σύνολο ταχυτήτων που μεγιστοποιεί μια αντικειμενική συνάρτηση επιλέγεται για εφαρμογή στους κινητήρες του.

Τα Δένδρα Πλοήγησης Κενών είναι δένδροειδείς δομές που δημιουργούνται από τρέχουσες μετρήσεις των αισθητήρων του ρομπότ που κωδικοποιούν διαδρομές από την τρέχουσα θέση του ρομπότ σε οποιοδήποτε σημείο του περιβάλλοντος [TGL05]. Ένα GNT ενημερώνεται καθώς το ρομπότ κινείται, και παράγει βέλτιστες διαδρομές εάν το περιβάλλον είναι απλά συνδεδεμένο, υπό την προϋπόθεση ότι τα όρια του περιβάλλοντος είναι ομαλά, αφού προσπαθεί να εντοπίσει “κενά” στις μετρήσεις των αισθητήρων.

Μία άλλη προσέγγιση ελεγκτών κίνησης ξεκίνησε το 2004 με την Προσέγγιση Πλοήγησης με Διάγραμμα Εγγύτητας από τους Minguez και Montano [MM]. Η μεθοδολογία ND παράγει αρχικά δύο διαγράμματα εγγύτητας: το PND (από το κεντρικό σημείο του ρομπότ) και το RND (από τα άκρα του ρομπότ) για την αναπαράσταση των πληροφοριών σχετικά με την εγγύτητα των εμποδίων σε αυτό. Τόσο το PND όσο και το RND αναλύονται περαιτέρω, και ειδικά τμήματα και κενά ασφαλείας υπολογίζονται, με βάση τα οποία το ρομπότ λαμβάνει μια κατάσταση ασφαλείας μεταξύ πέντε διαθέσιμων. Τελικά αξιολογούνται πέντε νόμοι κίνησης, σύμφωνα με την κατηγορία ασφαλείας του ρομπότ, με αποτέλεσμα τις κατάλληλες εντολές ταχύτητας τη δεδομένη χρονική στιγμή. Η μεθοδολογία ND+ προτείνει την προσθήκη ενός έκτου σεναρίου για την εξισορρόπηση της διαίρεσης των νόμων κίνησης, αυξάνοντας την ομαλότητα των μεταβάσεων μεταξύ ορισμένων από τα σενάρια [MOM04]. Τέλος, η πλοήγηση SND (Smooth Nearness-Diagram) είναι μια εξέλιξη της ND+, όπου ένας μόνο νόμος κίνησης εφαρμόζεται σε όλες τις πιθανές καταστάσεις του ρομπότ γύρω από τα εμπόδια, αφαιρώντας την εμφάνιση απότομων μεταβατικών φαινομένων όταν το ρομπότ πλοηγείται κοντά σε εμπόδια [DB08].

Η προσέγγιση Ελαστικής Ζώνης των Quinlan και Khatib [QK] γεφυρώνει το μονοπάτι προς ακολούθηση με τη θεωρία ελέγχου: με βάση ένα συνολικό μονοπάτι ο ελεγκτής κίνησης παράγει μια παραμορφώσιμη διαδρομή σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε οι αλλαγές στο περιβάλλον (που ανιχνεύονται από τους αισθητήρες του ρομπότ), οι αβεβαιότητες στις μετρήσεις, το μοντέλο αβεβαιότητας του κινηματικού μοντέλου, και τα κινούμενα αντικείμενα να ενσωματώνονται στον σχεδιασμό και την ακολούθηση της προγραμματισμένης διαδρομής. Για την επίτευξη των στόχων του (ένας από τους οποίους είναι η διατήρηση της ακεραιότητας της προγραμματισμένης διαδρομής), η προσέγγιση βασίζεται σε τεχνητές δυνάμεις: προκαθορισμένες



Σχήμα 4.1: Εποπτική άποψη του λογισμικού αυτόνομης πλοήγησης move_base. Πηγή: http://wiki.ros.org/move_base

εσωτερικές δυνάμεις συστέλλουν τη διαδρομή και την καθιστούν πιο ομαλή, ενώ εξωτερικές δυνάμεις διατηρούν τον διαχωρισμό από τα εμπόδια. Ωστόσο, η αρχική προσέγγιση δεν ενσωματώνει ρητά χρονικούς περιορισμούς ή περιορισμούς που επιτάσσονται από το ίδιο το κινηματικό μοντέλο του ρομπότ. Μια επέκταση της αρχικής προσέγγισης, που παραμορφώνει τις τροχιές αλλά όχι τα προγραμματισμένα μονοπάτια, παρουσιάζεται στο [KF07].

Η προσέγγιση Χρονισμένης Ελαστικής Ζώνης (Timed-Elastic Band) [Rös+12], από την άλλη πλευρά, εμπνευσμένη από την ιδέα της μεθόδου της Ελαστικής Ζώνης, λαμβάνει υπόψη τόσο τους χρονικούς περιορισμούς όσο και τους περιορισμούς του κινηματικού μοντέλου της κινητής βάσης. Η αρχική προσέγγιση παρέχει σε πραγματικό χρόνο τον προγραμματισμό της τροχιάς για ρομπότ με διαφορετική κίνηση. Μιμούμενη έναν ελεγκτή πρόβλεψης μέσω μοντέλου (Model Predictive Controller), αναδιαμορφώνει το σχεδιασμό της τροχιάς και τον υπολογισμό ταχυτήτων σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που υπόκειται σε κινηματοδυναμικούς περιορισμούς και περιορισμούς αποφυγής εμποδίων, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη και το συνολικό χρόνο πλοήγησης. Μια επέκταση της προσέγγισης Χρονισμένης Ελαστικής Ζώνης παρουσιάζεται στο [RHB17], όπου παρουσιάζεται μια πιο γενική διατύπωση, επεκτείνοντάς την στην υποστήριξη κινηματικών μοντέλων τύπου Ackermann.

4.2.3 Αυτόνομη πλοήγηση με το ROS

Το ROS έχει γίνει ευρέως δημοφιλές στην κοινότητα της ρομποτικής καθώς προσφέρει μια πληθώρα δωρεάν πακέτων, από ερευνητικές ομάδες όλου του κόσμου. Προσφέρει δυνατό-

τητες πλοήγησης με τη μορφή *στοιβών* (stacks), δηλαδή συλλογών πακέτων λογισμικού. Το πιο γνωστό και συχνά χρησιμοποιούμενο από αυτά είναι το **move_base**, το οποίο εσωτερικά χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών και έναν ελεγκτή κίνησης για να φέρει εις πέρας το έργο της αυτόνομους πλοήγησης ρομπότ κινητής βάσης. Στην εσωτερική ονοματολογία του ROS αυτά τα δύο συστατικά ονομάζονται αντίστοιχα *global planner* και *local planner*. Το **move_base** παίρνει πληροφορίες από την οδομετρία, μετρήσεις από αισθητήρες, και μια στάση-στόχο, και εξάγει ασφαλείς εντολές ταχύτητας προς είσοδο στους κινητήρες κινητής βάσης.²

Ένα υψηλού επιπέδου διάγραμμα αρχιτεκτονικής της στοίβας πλοήγησης απεικονίζεται στο σχήμα 4.1. Κοιτώντας το **move_base** ως ένα μαύρο κουτί, αυτό εξάγει ταχύτητες κινητήρων, και προϋποθέτει την ύπαρξη των ακόλουθων εισόδων, είτε σε μορφή μηνυμάτων ROS (δομημένα δεδομένα) ή μετασχηματισμών (σχέσεις μεταξύ συστημάτων αναφοράς):

- Την εκτιμώμενη στάση του ρομπότ με τη μορφή ενός μετασχηματισμού μεταξύ του οδομετρικού συστήματος αναφοράς του ρομπότ και του συστήματος αναφοράς του χάρτη, που παρέχεται εδώ από το πακέτο **amcl**³. AMCL σημαίνει Adaptive Monte Carlo Localisation [Fox01; GSB07] και είναι επί του παρόντος ο de facto αλγόριθμος παρακολούθησης της στάσης ενός ρομπότ μέσα στον διδιάστατο χώρο στο ROS
- Πληροφορίες οδομετρίας και (προαιρετικά) τον χάρτη του περιβάλλοντος
- Δεδομένα απόστασης είτε από έναν αισθητήρα αποστάσεων τύπου lidar, είτε από έναν αισθητήρα που μπορεί να εξάγει νέφη σημείων σε τρεις διαστάσεις, όπως μια κάμερα βάθους
- Τους μετασχηματισμούς μεταξύ των συστημάτων αναφοράς των αισθητήρων και των τελικών στοιχείων (effectors) του ρομπότ χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό μετασχηματισμού του ROS (**tf**)

Επιπλέον, το ROS προσφέρει την αναπαράσταση του περιβάλλοντος με τη μορφή χαρτών κόστους (costmaps), που περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τη δυνατότητα διέλευσης του ρομπότ μέσα στο περιβάλλον του και μέσα στον χάρτη αυτού, με βάση το αποτύπωμα

²<http://wiki.ros.org/navigation>

³<http://wiki.ros.org/amcl>

του ρομπότ και τα στατικά και δυναμικά εμπόδια (υποθέτοντας ότι είναι πιο δαπανηρό να να κινηθεί κοντά σε εμπόδια). Όταν θεωρείται ως λευκό κουτί, το `move_base` περιλαμβάνει:

- Έναν ολικό χάρτη κόστους (`global costmap`), που αναπαριστά το κόστος διέλευσης πλησίον των στατικών εμποδίων του χάρτη
- Έναν τοπικό χάρτη κόστους (`local costmap`), ο οποίος δημιουργείται και ανανεώνεται σε πραγματικό χρόνο στην άμεση γειτονιά του ρομπότ, και που βασίζεται στις μετρήσεις των εξωδεκτικών αισθητήρων, προκειμένου να αντιμετωπίσει τα στατικά και δυναμικά εμπόδια του πραγματικού περιβάλλοντός του
- Έναν αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών (`global planner`), ο οποίος λαμβάνει ως είσοδο μία στάση-στόχο, και τον ολικό χάρτη κόστους, και παράγει το γεωμετρικό μονοπάτι που ενώνει την αρχική στάση του ρομπότ με την επιθυμητή
- Έναν ελεγκτή κίνησης (`local planner`), ο οποίος δέχεται ως είσοδο το ως άνω μονοπάτι και τον τοπικό χάρτη κόστους, και υπολογίζει εντολές ταχύτητας
- Μια ενότητα που ονομάζεται συμπεριφορές ανάκτησης (`recovery_behaviours`) που δέχεται και τους δύο χάρτες κόστους ως είσοδο, εντοπίζει πότε το ρομπότ δεν μπορεί να προχωρήσει με την επιθυμητή ταχύτητα, και εφαρμόζει προκαθορισμένα σύνολα κινήσεων, με στόχο την “απεγκλωβισμό” του. Αυτές οι ενέργειες ενεργοποιούνται κάθε φορά που (α) το ρομπότ γίνεται αντιληπτό ότι ταλαντώνεται, (β) ένα σχέδιο κίνησης δεν έχει ληφθεί για πάνω από κάποιο χρονικό διάστημα, ή (γ) ο ελεγκτής κίνησης έχει αποτύχει να εξάγει έγκυρες εντολές ταχύτητας για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα, το `move_base` εφαρμόζει δύο είδη ανάκτησης του ελέγχου του ρομπότ: (α) μια περιστροφή 360 μοιρών που στοχεύει στην εκκαθάριση του τοπικού χάρτη κόστους από τυχόν ψευδείς μετρήσεις (ψευδώς θετικά αντιληπτά εμπόδια) και (β) μια επαναφορά του χάρτη κόστους που καθαρίζει την στοίβα πλοήγησης, επαναφέροντάς τον στον στατικό χάρτη έξω από τα όρια μιας δεδομένης ακτίνας μακριά από το ρομπότ⁴. Η τελευταία χρησιμοποιείται συνήθως πολλαπλές φορές και σε έναν ιεραρχικό τρόπο, ξεκινώντας από κάποια ακτίνα εντός του ημιπλάτους του τοπικού χάρτη κόστους και προχωρώντας πιο κοντά στο ίχνος του ρομπότ. Εάν το ρομπότ εξακολουθεί

⁴http://wiki.ros.org/clear_costmap_recovery

να θεωρείται παγιδευμένο μετά την εκτέλεση όλων των προκαθορισμένων συμπεριφορών ανάκτησης του ελέγχου του, η πλοήγηση διακόπτεται και το ρομπότ σταματά την κίνησή του, τουλάχιστον μέχρι να δοθεί ένας νέος στόχος.

4.2.3.1 Αλγόριθμοι χάραξης μονοπατιών

Αυτή η ενότητα παρέχει μια επισκόπηση των αλγορίθμων-πακέτων χάραξης μονοπατιών των οποίων οι υλοποιήσεις είναι διαθέσιμες στο ROS.

Ο `navfn`⁵ βασίζεται στην προσέγγιση των Συναρτήσεων Πλοήγησης NF1 [Lat91]. Παρέχει μια παρεμβλλόμενη συνάρτηση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μονοπατιών για κινητή βάση που προϋποτίθεται ότι έχει κυκλικό αποτύπωμα. Η συνάρτηση πλοήγησης δέχεται ως είσοδο τον ολικό χάρτη κόστους, μία στάση εκκίνησης και μία στάση τερματισμού, και παράγει το σχέδιο ελάχιστου κόστους από την αρχή έως το τέλος χρησιμοποιώντας τους αλγορίθμους Dijkstra ή A*. Τα κύρια μειονεκτήματα του NF1 (και συνεπώς του `navfn`) είναι η έλλειψη ομαλότητας των παραγόμενων διαδρομών, καθώς αυτές αποτελούνται από ευθύγραμμα τμήματα που ενώνονται με γωνίες που είναι ακέραια πολλαπλάσια του $\pi/4$, και, το σημαντικότερο, ότι παράγει διαδρομές που περνούν ξυστά από εμπόδια, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη το μέγεθος του αποτυπώματος των ρομπότ [Phi04].

Το πακέτο `global_planner` σχεδιάστηκε ως ένας ευέλικτος διάδοχος του `navfn` και είναι σε θέση να παράγει μονοπάτια χρησιμοποιώντας είτε τον αλγόριθμο A* είτε τον αλγόριθμο του Dijkstra, έτσι ώστε ο υπολογιστικός φόρτος να μπορεί να μειωθεί (αυτός του τελευταίου είναι μεγαλύτερος από αυτόν του πρώτου), αν και τα παραγόμενα μονοπάτια δεν θεωρούνται βέλτιστα με την έννοια της 8-συνδεδεμένης διαδρομής.

Το πακέτο `asr_navfn`⁶ ουσιαστικά λειτουργεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως το `navfn`, με την προσθήκη του πλεονεκτήματος ότι, σε περίπτωση που ο επιθυμητός στόχος είναι ανέφικτος (δηλαδή εντός εμποδίου ή πάρα πολύ κοντά σε αυτό), υπολογίζει έναν εφικτό στόχο που να είναι ο εγγύτερος του αρχικού.

Σε αντίθεση με τον `navfn` και την πλειονότητα των άλλων πακέτων χάραξης μονοπατιών που παρουσιάζονται εδώ, το MoveIt! δεν αποτελεί ένα plugin του `move_base` [CSC12]. Οι κύριοι περιορισμοί του σε σχέση με το σχεδιασμό διαδρομών για ρομπότ κινητής βάσης

⁵<http://wiki.ros.org/navfn>

⁶http://wiki.ros.org/asr_navfn

είναι ότι (α) απευθύνεται και αναπτύχθηκε κυρίως για ρομποτικούς βραχίονες πολλαπλών αρθρώσεων, (β) δεν μπορεί να σχεδιάσει διαδοχικές διαμορφώσεις για αρθρώσεις πολλαπλών βαθμών ελευθερίας (δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για το σχεδιασμό της κίνησης ολονομικών (holonomic) βάσεων), και γ) απαιτεί την μετατροπή των χαρτών κόστους στο δικό του χώρο καταστάσεων OMPL. Όσον αφορά στους αλγόριθμους σχεδίασης διαδοχικών διαμορφώσεων, το MoveIt! μπορεί να χρησιμοποιήσει εσωτερικά το OMPL (Open Motion Planning Library⁷), STOMP (Στοχαστική βελτιστοποίηση τροχιάς για κίνηση). Planning⁸), SBPL (Βιβλιοθήκη σχεδιασμού με βάση την αναζήτηση⁹) ή CHOMP (Covariant Hamiltonian Optimisation for Motion Planning¹⁰).

Το πακέτο `sbpl_lattice_planner`¹¹ αποτελεί μια προσέγγιση Πλέγματος Καταστάσεων [Mik05] που χρησιμοποιεί τη βιβλιοθήκη SBPL. Σε πλήρη αντίθεση με όλους τους άλλους αλγόριθμους που αναφέρονται σε αυτήν την ενότητα, τα μονοπάτια παράγονται συνδυάζοντας μια σειρά από πρωτότυπα κίνησης, δηλαδή έγκυρες και εφικτές κινήσεις που βασίζονται στο κινηματικό μοντέλο της βάσης του ρομπότ. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων του είναι ότι (α) λαμβάνοντας υπόψη του το κινηματικό μοντέλο του ρομπότ, η παραγόμενη διαδρομή καθίσταται αυτομάτως εφικτή από έναν ελεγκτή κίνησης και (β) παρέχει τη δυνατότητα στάθμισης των κινήσεων ανάλογα με το ποιές από αυτές είναι προτιμητέες (για παράδειγμα, ένας μηχανικός ρομποτικής μπορεί να επιλέξει αν είναι πιο επιθυμητό το ρομπότ να στρίβει επιτόπια ή να διασχίζει ένα τόξο όταν αυτό καλείται να εκτελέσει στροφή). Οι ανεπιθύμητες κινήσεις τιμωρούνται έτσι ώστε η τροχιά του ρομπότ να συντονίζεται και να ταιριάζει με δεδομένες προδιαγραφές, εάν αυτές υπάρχουν. Ο σχεδιασμός εκτελείται με βάση το σύνολο της κατάστασης του ρομπότ και άρα λαμβάνεται υπόψη και ο προσανατολισμός του. Τέλος, οι αλγόριθμοι χαμηλού επιπέδου ARA* [LGT03] ή AD* [Lik+05] χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του συνολικού μονοπατιού.

Το πακέτο `sbpl_dynamic_env_global_planner`¹² είναι παρόμοιο με το `sbpl_lattice_planner`, ωστόσο είναι ικανό να ενσωματώνει πληροφορίες τόσο από τον ολικό (στατικό) χάρτη κόστους όσο και από προβλεπόμενες μελλοντικές τροχιές των κινούμενων εμποδίων, οι οποίες

⁷<http://ompl.kavrakilab.org/>

⁸http://wiki.ros.org/stomp_motion_planner

⁹<http://wiki.ros.org/sbpl>

¹⁰<http://www.nathanratliff.com/thesis-research/chomp>

¹¹http://wiki.ros.org/sbpl_lattice_planner

¹²http://wiki.ros.org/sbpl_dynamic_env_global_planner[PL11]

εξάγονται από τον τοπικό (δυναμικό) χάρτη κόστους. Αυτό γίνεται με την ομαδοποίηση χωροχρονικών πληροφοριών για το πού και πότε η κίνηση θα είναι ασφαλής, και ο σχεδιασμός πραγματοποιείται στις τυπικές τρεις χωρικές διαστάσεις, συμπεριλαμβανομένης μιας τέταρτης που είναι σχετική με την ασφάλεια.

Το πακέτο `lattice_planner`¹³ παρέχει ένα χρονικά περιορισμένο αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών τύπου πλέγματος καταστάσεων A^* . Αυτός ο τύπος χρησιμοποιεί τον ολικό χάρτη κόστους ROS και μπορεί να παράγει χρονοεξαρτώμενες, δυναμικά εφικτές διαδρομές πλοήγησης για ρομπότ με διαφορικούς περιορισμούς κίνησης.

Ένας ακόμη αλγόριθμος χάραξης μονοπατιών είναι ο `waypoint_global_planner`.¹⁴ Δέχεται ως είσοδο ενδιάμεσα σημεία διαδρομής τα οποία οι ίδιοι οι μηχανικοί πρέπει να παρέχουν ως εφικτές στάσεις, καθώς ο αλγόριθμος δεν έχει γνώση των εμποδίων του χάρτη, και παράγει μια διαδρομή που τα διασχίζει διαδοχικά. Το μονοπάτι αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα που συνδέουν ένα εισαγόμενο σημείο με το επόμενο, και η τελική θέση του ρομπότ υιοθετεί τον προσανατολισμό του ευθύγραμμου τμήματος που συνδέει το προτελευταίο σημείο της διαδρομής με το τελευταίο.

Το πακέτο `voronoi_planner`¹⁵ δημιουργεί ένα συνολικό μονοπάτι από ένα σημείο σε ένα άλλο χρησιμοποιώντας το GVD του περιβάλλοντος [BG07]. Το GVD κατασκευάζεται από τα εμπόδια των χαρτών κόστους και περιέχει όλα τα σημεία που ισαπέχουν από τα πλησιέστερα εμπόδια, παρέχοντας έναν σκελετό του ελεύθερου χώρου. Το τελικό μονοπάτι περιορίζεται στο να υπάρχει στο GVD (σε αντίθεση με τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούν αλγόριθμους αναζήτησης όπως ο A^*). Αυτή η δυνατότητα αναγκάζει τον αλγόριθμο να παράγει ασφαλέστερα αλλά μη βέλτιστα σε μήκος μονοπάτια.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μεταξύ όλων των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών που εξετάζονται σε αυτή την ενότητα μόνο ο `sbpl_dynamic_env_global_planner` είναι σε θέση να λάβει υπόψη του τα κινούμενα αντικείμενα στο περιβάλλον λειτουργίας του ρομπότ, δηλαδή να εκτιμά την κίνηση τους και να την προβάλλει στο μέλλον δεδομένης της θέσης και της ταχύτητάς τους. Τα υπόλοιπα μπορούν να λειτουργήσουν μόνο θεωρώντας τα εμπόδια ως ακίνητα για το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών εκδόσεων του σχεδιασθέντος μονοπατιού.

¹³https://github.com/marinaKollmitz/lattice_planner

¹⁴<https://github.com/gkouros/waypoint-global-planner>

¹⁵http://wiki.ros.org/voronoi_planner

Ένα ενδιαφέρον σχόλιο σχετικά με τους διαθέσιμους στο ROS αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών είναι ότι σχεδόν όλοι είναι αφελείς όσον αφορά στον χρόνο και τους πόρους. Για παράδειγμα σχεδόν όλοι χρησιμοποιούν εκδόσεις του γνωστού αλγορίθμου αναζήτησης A^* , ο οποίος, αν και είναι βέλτιστος ως προς το μήκος, μπορεί να είναι πολύ αργός σε χρόνο εκτέλεσης όταν ο χάρτης είναι μεγάλος σε εμβαδό.

4.2.3.2 Ελεγκτές Κίνησης

Αυτή η ενότητα παρέχει μια σύντομη επισκόπηση των ελεγκτών κίνησης που είναι διαθέσιμοι στο ROS. Σε αντίθεση με τους αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών, λίγοι ελεγκτές είναι διαθέσιμοι και ευρέως διαδεδομένοι.

Ο ελεγκτής κίνησης `dwa_local_planner`¹⁶ βασίζεται στην εργασία των Fox κ.α. [FBT97]. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως ο DWA δειγματοληπτεί διακριτά το χώρο καταστάσεων του ρομπότ, εκτελεί προσομοίωση προς τα εμπρός (χρονικά) για κάθε δείγμα, αξιολογεί κάθε τροχιά σε σχέση με τον τοπικό χάρτη κόστους, απορρίπτει τις μη εφικτές τροχιές, και τέλος επιλέγει την τροχιά με την υψηλότερη βαθμολογία που ικανοποιεί τόσο τους κινηματικούς περιορισμούς του ρομπότ όσο και την ασφάλεια διέλευσης. Ο `dwa_local_planner` δεν υποστηρίζει την αποφυγή εμποδίων για δυναμικά εμπόδια.

Ο `eband_local_planner`¹⁷ βασίζεται στη θεωρία των ελαστικών ζωνών [QK]. Μια ελαστική ζώνη είναι ένα παραμορφώσιμο μονοπάτι χωρίς συγκρούσεις με εμπόδια που δημιουργείται από ένα συνολικό μονοπάτι και από πληροφορίες για την εγγύτητα των εμποδίων. Αυτή η παραμόρφωση από το προγραμματισμένο μονοπάτι πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης καθώς αλλάζει η τοπική αντίληψη. Ο `eband_local_planner` δεν υποστηρίζει την αποφυγή δυναμικών εμποδίων.

Ο `teb_local_planner`¹⁸ δέχεται ως είσοδο το προγραμματισμένο μονοπάτι που δημιουργείται από τον αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών και ελαχιστοποιεί κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης τον χρόνο ακολουθήσής του, ικανοποιώντας τους περιορισμούς αποφυγής εμποδίων, τους περιορισμούς του κινηματικού μοντέλου του ρομπότ, καθώς και περιορισμούς που αφορούν σε μέγιστες και ελάχιστες ταχύτητες και επιταχύνσεις κίνησης. Βασίζεται στη θεωρητική ερ-

¹⁶http://wiki.ros.org/dwa_local_planner

¹⁷http://wiki.ros.org/eband_local_planner

¹⁸http://wiki.ros.org/teb_local_planner

γασία που παρουσιάστηκε στο [RHB17], η οποία βελτιώνει τη θεωρία των ελαστικών ζωνών. Ο `teb_local_planner` υποστηρίζει την αποφυγή κινουμένων εμποδίων.

4.3 Μεθοδολογία αξιολόγησης

4.3.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης, περιβάλλοντα, και συμβολισμοί

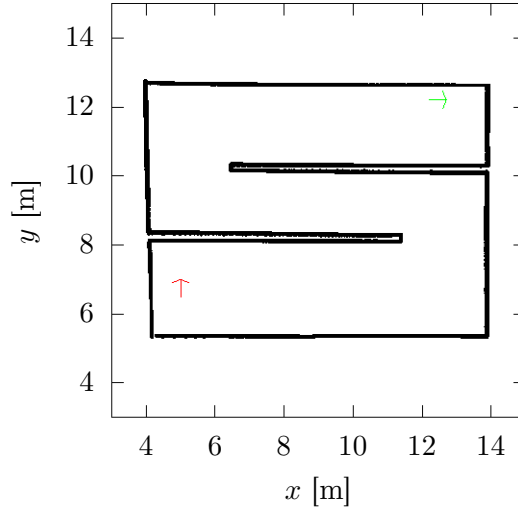
Η αξιολόγηση όλων των συνδυασμών των μεθόδων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή πραγματοποιείται σε προσομοιωμένα και πραγματικά περιβάλλοντα. Το ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις συνθήκες είναι η δεύτερη έκδοση του Turtlebot,¹⁹ ένα ρομπότ με διαφορική κίνηση και κυκλικό αποτύπωμα ακτίνας $r = 0.175$ m. Τα δύο προσομοιωμένα περιβάλλοντα στα οποία έγινε συγκριτική αξιολόγηση όλων των αλγορίθμων είναι διαθέσιμοι κόσμοι του περιβάλλοντος προσομοίωσης Gazebo.²⁰ Αυτοί οι κόσμοι προσομοιώνουν με ακρίβεια τις περισσότερες από τις συνθήκες που θα αντιμετώπιζε μια επίγεια κινητή βάση σε ένα στατικό περιβάλλον εσωτερικού χώρου: διαδρόμους διαφορετικού πλάτους, στενά περάσματα όπου η ικανοποίηση των περιορισμών είναι κρίσιμη και ευκολότερα παραβιάσιμη ενώ δοκιμάζουν την ικανότητα των ελεγκτών κίνησης να εκτελούν λεπτές κινήσεις, αναστροφές, πολλαπλές διαδοχικές στροφές, και εμπόδια που ο ελεγκτής κίνησης πρέπει να αποφύγει στην πορεία του ρομπότ προς τον στόχο. Το πραγματικό περιβάλλον όπου δοκιμάστηκαν οι μέθοδοι είναι το εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Υπολογιστικών Συστημάτων (CSAL) του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΑΠΘ.

Στο σχήμα 4.2 απεικονίζεται ο χάρτης του προσομοιωμένου κόσμου CORRIDOR, που στο εξής συμβολίζεται με M_C . Το σχήμα 4.3 απεικονίζει ένα τμήμα από τον σημαντικά μεγαλύτερο σε μέγεθος χάρτη WILLOWGARAGE, ο οποίος συμβολίζεται με M_W . Το σχήμα 4.4 απεικονίζει το χάρτη του CSAL, που συμβολίζεται με M_L . Τα πράσινα βέλη υποδηλώνουν την αρχική στάση του ρομπότ, ενώ τα κόκκινα τον στόχο. Οι χάρτες των δύο προσομοιωμένων περιβαλλόντων κατασκευάστηκαν με τη χρήση του ROS πακέτου SLAM `gmapping`²¹, ενώ αυτός του πραγματικού περιβάλλοντος κατασκευάστηκε με τη χρήση του

¹⁹<https://www.turtlebot.com/turtlebot2/>

²⁰<http://gazebo.org/>

²¹<https://openslam-org.github.io/gmapping.html>



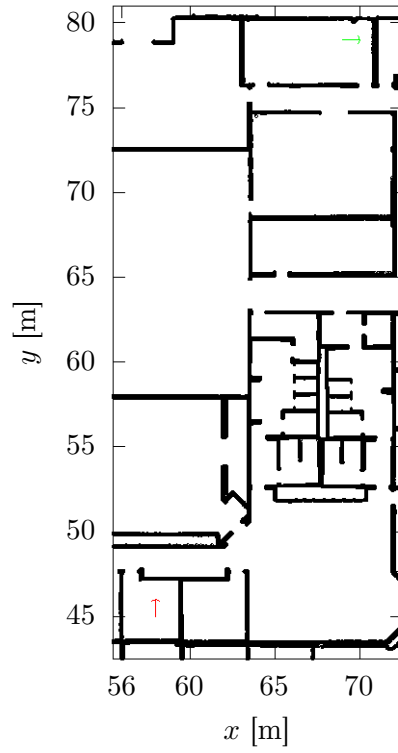
Σχήμα 4.2: Ο χάρτης M_C του προσομοιωμένου περιβάλλοντος CORRIDOR. Το πράσινο βέλος (άνω δεξιά) δείχνει την αρχική στάση του ρομπότ p_0^C . Το κόκκινο βέλος (κάτω αριστερά) δείχνει τη στάση-στόχο p_G^C .

open-karto²². Ενώ ο M_C είναι ένας χάρτης που μοιάζει με τη δομή μιας τυπικής αποθήκης, ο χάρτης M_W είναι μια κάτοψη που μοιάζει με αυτή ενός τυπικού ορόφου γραφείων. Η δυσκολία του πρώτου είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σύγκριση με εκείνη του δεύτερου: οι διάδρομοι είναι φαρδείς, δεν υπάρχουν στενά περάσματα και υπάρχουν μόνο δύο στροφές των οποίων η απόσταση είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αναμένεται ότι οι αλγόριθμοι πλοήγησης θα κατευθύνουν το ρομπότ μακριά και από τα δύο άκρα των τοίχων με ευκολία—αν και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ακόμη και αυτή η προσδοκία είναι αισιόδοξη για ορισμένους συνδυασμούς μεθόδων πλοήγησης.

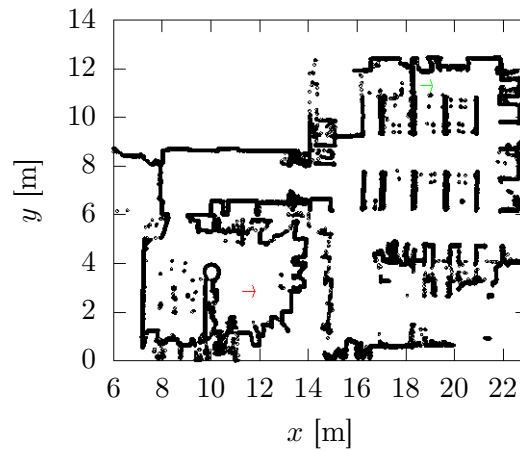
Οι αρχικές και τελικές στάσεις ορίστηκαν έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η δυσκολία των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών στην εύρεση ενός εφικτού μονοπατιού και η δυσκολία των ελεγκτών κίνησης στη διάσχισή του. Ως εκ τούτου διευκολύνουν την έκθεση των αδυναμιών των τύπων αλγορίθμων. Οι στάσεις που τέθηκαν ως αρχικές και τελικές συνθήκες στα τρία περιβάλλοντα καταγράφονται στον πίνακα 4.1.

Κάθε συνδυασμός από global και local planner δοκιμάστηκε σε κάθε περιβάλλον με τις ίδιες αρχικές και τελικές στάσεις για $N = 10$ φορές, και επομένως η αξιολόγηση των απόδοσης όλων των συνδυασμών έγινε με τη χρήση στατιστικών μέσων. Κάθε συνδυασμός έλαβε μια χρονική περίοδο για να εκτελέσει την πλοήγησή του από την αρχή ως τον στόχο,

²²http://wiki.ros.org/open_karto



Σχήμα 4.3: Ο χάρτης M_W τμήματος του προσομοιωμένου περιβάλλοντος WILLOWGARAGE. Το πράσινο βέλος (άνω δεξιά) δείχνει την αρχική στάση του ρομπότ p_0^W . Το κόκκινο βέλος (κάτω αριστερά) δείχνει τη στάση-στόχο p_G^W .



Σχήμα 4.4: Ο χάρτης M_L του πραγματικού περιβάλλοντος του εργαστηρίου Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών του THMMY APΘ (CSAL). Το πράσινο βέλος (άνω δεξιά) δείχνει την αρχική στάση του ρομπότ p_0^L . Το κόκκινο βέλος (κάτω αριστερά) δείχνει τη στάση-στόχο p_G^L .

Στάση	(m,m,rad)
p_0^C	(12.2, 12.2, 0.0)
p_G^C	(5, 6.5, $\pi/2$)
p_0^W	(69.0, 79.0, 0.0)
p_0^L	(58.0, 45.0, $\pi/2$)
p_0^L	(18.6, 11.3, 0.0)
p_G^L	(11.3, 2.86, 0.0)

Πίνακας 4.1: Αρχικές p_0 και τελικές p_G στάσεις αυτόνομους πλοήγησης στα τρία περιβάλλοντα CORRIDOR, WILLOWGARAGE, και CSAL

η οποία ορίστηκε σε $t_C^{max} = 120$ sec για τον κόσμο CORRIDOR, $t_W^{max} = 180$ sec για τον κόσμο WILLOWGARAGE, και $t_L^{max} = 600$ sec στο περιβάλλον CSAL.

Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο λειτουργικό σύστημα Linux Ubuntu 16.04, σε υπολογιστή με επεξεργαστή 12 νημάτων, 32GB μνήμης, και συχνότητα ρολογιού 4.00 GHz. Όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον CSAL πραγματοποιήθηκαν σε Linux Ubuntu 16.04, σε υπολογιστή με επεξεργαστή με 4 νήματα, 8 GB μνήμης, και συχνότητα ρολογιού 3.20 GHz.

4.3.2 Ορισμός μετρικών αξιολόγησης

Σε αυτήν την ενότητα κάνουμε τις ακόλουθες παραδοχές και ορισμούς.

Ορισμός VII. Ένα μονοπάτι $P : [1, n] \rightarrow \mathbb{R}^2 \times [-\pi, \pi)$ είναι μια ακολουθία στάσεων $p_i, i = 1, 2, \dots, n$, δηλαδή $P \equiv \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, όπου $p_i = (x_i, y_i, \theta_i)$, είναι οι συντεταγμένες μίας στάσης στον \mathbb{R}^2 και θ_i είναι ο προσανατολισμός του διανύσματος που ξεκινά από το σημείο (x_i, y_i) ως προς τον άξονα x του συστήματος αναφοράς του χάρτη.

Το μέγεθος (cardinality) του P αναφέρεται ως $|P|$ και είναι ίσο με τον αριθμό των στάσεων του P . Συμβολίζουμε μία συλλογή N μονοπατιών $P_j, j = 1, 2, \dots, N$ με $\mathcal{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$.

Ορισμός VIII. Η απόσταση μεταξύ δύο στάσεων p_i και p_j είναι η Ευκλείδεια απόσταση $d(p_i, p_j) = ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{1/2}$.

Ορισμός IX. Ένας χάρτης πλέγματος πληρότητας (Occupancy Grid Map—OGM)

$M : [1, q] \rightarrow \mathbb{R}^2$ είναι ένα μη ταξινομημένο σύνολο σημείων στο καρτεσιανό επίπεδο:

$$M \equiv ((x_1^M, y_1^M), (x_2^M, y_2^M), \dots, (x_q^M, y_q^M)).$$

Ορισμός X. Το μήκος ενός μονοπατιού P συμβολίζεται με $l(P)$ και υπολογίζεται ως:

$$l(P) = \sum_{i=1}^{|P|-1} d(p_i, p_{i+1}) \quad (4.1)$$

δηλαδή είναι το άθροισμα των αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών θέσεων p_i και p_{i+1} .

Ορισμός XI. Η ομαλότητα ενός μονοπατιού P , $s(P)$, ορίζεται ως:

$$s(P) = \left(\frac{1}{|P|-2} \sum_{i=1}^{|P|-1} (\theta_{i+1} - \theta_i)^2 \right)^{1/2} \quad (4.2)$$

Ορισμός XII. Η μέση ελάχιστη απόσταση ενός μονοπατιού P από τα εμπόδια του χάρτη M είναι η μέση απόσταση των στάσεων που αποτελούν το μονοπάτι από το πλησιέστερο εμπόδιο της κάθε μίας. Συμβολίζεται με $d(P, M)$ και ορίζεται ως:

$$d(P, M) = \frac{1}{|P|} \sum_{k=1}^{|P|} \min_{i=1,2,\dots,q} d(p_k, m_i) \quad (4.3)$$

όπου $p_k \in P$, $k = 1, 2, \dots, |P|$, και $m_i \in M$, $i = 1, 2, \dots, q$.

Ορισμός XIII. Η ολική ελάχιστη απόσταση μιας συλλογής μονοπατιών $\mathcal{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ από τα εμπόδια του M συμβολίζεται με $\inf(d(\mathcal{P}, M))$ (για να επισημανθεί η απόλυτη φύση αυτής της ελάχιστης τιμής), και ορίζεται ως:

$$\inf(d(\mathcal{P}, M)) = \min_{j=1,2,\dots,N} \left\{ \min_{\substack{k=1,2,\dots,|P_j| \\ i=1,2,\dots,q}} d(p_k^j, m_i) \right\} \quad (4.4)$$

όπου $P_j \in \mathcal{P}$, $p_k^j \in P_j$, $k = 1, 2, \dots, |P_j|$, και $m_i \in M$, $i = 1, 2, \dots, q$.

Ορισμός XIV. Η μέση απόκλιση ενός μονοπατιού P_1 από ένα μονοπάτι P_2 υπολογίζεται ως η μέση απόσταση κάθε στάσης του P_1 από την πλησιέστερη στάση της που ανήκει στο P_2 :

$$d_\delta(P_1, P_2) = \frac{1}{|P_1|} \sum_{k=1}^{|P_1|} \min_{l=1,2,\dots,|P_2|} d(p_k, p_l) \quad (4.5)$$

όπου $p_k \in P_1$, $k = 1, 2, \dots, |P_1|$, και $p_l \in P_2$, $l = 1, 2, \dots, |P_2|$.

Ορισμός XV. Η ολική απόκλιση ενός μονοπατιού P_1 από ένα μονοπάτι P_2 υπολογίζεται ως το άθροισμα της απόστασης κάθε στάσης που αποτελεί το P_1 από την πλησιέστερη στάση της στο P_2 :

$$d_\Delta(P_1, P_2) = |P_1| \cdot d_\delta(P_1, P_2) \quad (4.6)$$

Η μετρική απόστασης Frechet, η οποία εισήχθη από τον Maurice Frechet για συνεχείς καμπύλες σε ένα μετρικό χώρο το 1906 [Fré06], είναι ένα μέτρο της ομοιότητας μεταξύ δύο καμπυλών. Στα πλαίσια της διατριβής προτιμάται από την μετρική απόστασης Pompeiu-Hausdorff [RW98] λόγω του ότι η τελευταία δεν λαμβάνει υπόψη της τη θέση και τη διάταξη των σημείων κατά μήκος μιας καμπύλης (εν προκειμένω ενός μονοπατιού).

Ορισμός XVI. Για διακριτές καμπύλες $P_1 : [1, m] \rightarrow V$ και $P_2 : [1, n] \rightarrow V$ (όπως τα δείγματα στάσης ενός μονοπατιού και τα ολικά μονοπάτια) που αποτελούνται από ακολουθίες διακριτών σημείων $\lambda(P_1) \equiv \{P_1(1), P_1(2), \dots, P_1(m)\} \equiv \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ και $\lambda(P_2) \equiv \{P_2(1), P_2(2), \dots, P_2(n)\} \equiv \{u_1, u_2, \dots, u_g\}$ αντίστοιχα, η διακριτή απόσταση Frechet ορίζεται ως:

$$\delta_d^F(P_1, P_2) = \min\{\|L\| \mid L \text{ είναι μια σύζευξη μεταξύ } P_1 \text{ και } P_2\} \quad (4.7)$$

όπου $\|L\| = \max_{i=1,\dots,q} d(u_{a_i}, v_{b_i})$. Μια σύζευξη L είναι μια ακολουθία διαφορετικών ζευγών από το $\lambda(P_1) \times \lambda(P_2)$: $L \equiv \{(u_{a_1}, v_{b_1}), (u_{a_2}, v_{b_2}), \dots, (u_{a_q}, v_{b_q})\}$, και $d(a, b)$ είναι ένα μετρική της απόστασης (εδώ ίση με την ευκλείδεια απόσταση όπως ορίζεται παραπάνω) μεταξύ των σημείων a και b .

Επιπλέον, έστω ότι συμβολισμοί $\mu(x)$, $\sigma(x)$ να υποδηλώνουν τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της μεταβλητής x . Συμβολίζοντας με \mathcal{G} μια συλλογή από N συνολικά μονοπάτια προς ακολούθηση που παράγονται σε N πειράματα και προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, $\mathcal{G} = \{\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_N\}$, και με \mathcal{P} μια συλλογή από N διανυόμενες διαδρομές $\mathcal{P} = \{\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_N\}$, οι μετρικές αξιολόγησης για τους κατασκευαστές μονοπατιών global planners, τους ελεγκτές κίνησης local planners, και τους συνδυασμούς τους παρουσιάζονται στους πίνακες 4.2, 4.3, και 4.4.

Μετρική αξιολόγησης global planner	Τύπος	Τύπος αναλογικότητας
$\mu_l(\mathcal{G})$	Το μέσο μήκος των συνολικών σχεδιασθέντων μονοπατιών $\mu_l(\mathcal{G}) = \mu(l(\mathbf{G}_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\sigma_l(\mathcal{G})$	Η τυπική απόκλιση γύρω από το μέσο μήκος μονοπατιών $\sigma_l(\mathcal{G}) = \sigma(l(\mathbf{G}_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$ —ένα μέτρο της συνέπειας σχεδιασμού μονοπατιών	↘
$\mu_r(\mathcal{G})$	Ο μέσος αριθμός των στάσεων του συνολικού μονοπατιού επί του μέσου μήκους του συνολικού μονοπατιού $\mu_r(\mathcal{G}) = \mu(\mathbf{G}_j /l(\mathbf{G}_j))$ [θέσεις / m], $j = 1, 2, \dots, N$ —ένα μέτρο της αναλυτικότητας μονοπατιών: όσο υψηλότερη η ανάλυση, τόσο λεπτομερέστερα τα μονοπάτια και τόσο λεπτότεροι οι ελιγμοί του ρομπότ (εάν, για παράδειγμα, το απαιτούν οι προδιαγραφές)	↗
$\mu_s(\mathcal{G})$	Η μέση ομαλότητα των παραγόμενων μονοπατιών $\mu_s(\mathcal{G}) = \mu(s(\mathbf{G}_j))$ [rad], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\sigma_s(\mathcal{G})$	Η τυπική απόκλιση γύρω από τη μέση ομαλότητα σχεδιασθέντων μονοπατιών $\sigma_s(\mathcal{G}) = \sigma(s(\mathbf{G}_j))$ [rad], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\inf(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}))$	Η συνολική ελάχιστη απόσταση σχεδιασθέντων μονοπατιών από τα εμπόδια του χάρτη \mathbf{M} $\inf(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}))$ [m]—ένα μέτρο του πόσο καλή είναι η σχεδίαση ενός μονοπατιού με βάση την απόσταση από εμπόδια του χάρτη	↗
$\mu(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}))$	Η μέση ελάχιστη απόσταση των σχεδιασθέντων μονοπατιών από τα εμπόδια του χάρτη \mathbf{M} , $\mu(d(\mathbf{G}_j, \mathbf{M}))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↗
$\sigma(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}))$	Η τυπική απόκλιση γύρω από τη μέση ελάχιστη απόσταση των μονοπατιών από τα εμπόδια του χάρτη \mathbf{M} , $\sigma(d(\mathbf{G}_j, \mathbf{M}))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘

Πίνακας 4.2: Μετρικές αξιολόγησης για τους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών (global planners) (αριστερά), η περιγραφή τους (μέση) και η φύση της συμβολής τους στην τιμή-αξία ενός συνδυασμού αλγορίθμων για αυτόνομη πλοήγηση (δεξιά): τα βέλη που δείχνουν προς τα πάνω υποδηλώνουν ότι όσο υψηλότερη είναι η τιμή μιας μετρικής τόσο υψηλότερη είναι η αξία του συνδυασμού. Τα βέλη που δείχνουν προς τα κάτω υποδεικνύουν ότι η αξία ενός συνδυασμού είναι τόσο υψηλότερη όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της εν λόγω μετρικής

Μετρική αξιολόγησης
local planner

Τύπος

Τύπος
αναλογικότητας

μ_A/N	Ο μέσος αριθμός των ματαιωμένων αποστολών επί του συνολικού αριθμού των προσομοιώσεων ή πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν	↘
μ_{RR}	Ο μέσος αριθμός των ανακτήσεων με περιστροφή	↘
σ_{RR}	Η τυπική απόκλιση γύρω από τον μέσο αριθμό των ανακτήσεων με περιστροφή	↘
μ_{CC}	Ο μέσος αριθμός των εκκαθαρίσεων του χάρτη κόστους	↘
σ_{CC}	Η τυπική απόκλιση γύρω από τον μέσο αριθμό των εκκαθαρίσεων του χάρτη κόστους	↘
μ_{PF}	Ο μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής—ένα μέτρο του πόσες φορές ο ελεγκτής κίνησης απέτυχε να υπολογίσει έγκυρες ταχύτητες κίνησης	↘
σ_{PF}	Η τυπική απόκλιση γύρω από το μέσο αριθμό αποτυχιών διαδρομής	↘
μ_{PF}/μ_{LPC}	Ο μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής επί του μέσου αριθμού κλήσεων του ελεγκτή κίνησης— ένα μέτρο του πόσο συχνά ο τοπικός σχεδιαστής απέτυχε να ελέγξει την τροχιά του ρομπότ	↘

Πίνακας 4.3: Μετρικές αξιολόγησης για τους ελεγκτές κίνησης (local planners) (αριστερά), η περιγραφή τους (μέση) και η φύση της συμβολής τους στην τιμή-αξία ενός συνδυασμού αλγορίθμων για αυτόνομη πλοήγηση (δεξιά): τα βέλη που δείχνουν προς τα πάνω υποδηλώνουν ότι όσο υψηλότερη είναι η τιμή μιας μετρικής τόσο υψηλότερη είναι η αξία του συνδυασμού. Τα βέλη που δείχνουν προς τα κάτω υποδεικνύουν ότι η αξία ενός συνδυασμού είναι τόσο υψηλότερη όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της εν λόγω μετρικής

4.3.3 Μεθοδολογία συνολικής και ιεραρχημένης αξιολόγησης

Η συνολική αξιολόγηση κάθε συνδυασμού global και local planner πραγματοποιείται με βάση την κοινή τους επίδοση και τις επιδόσεις των δύο συνιστωσών του. Κάθε μετρική m που περιγράφεται ανωτέρω λαμβάνεται υπόψη και της αποδίδεται ένα βάρος $w_m \in \mathbb{R}_{\geq 0}$, έτσι ώστε η γενική αξιολόγηση να είναι εφικτή για μεταβλητές προδιαγραφές (ανάλογα με την εφαρμογή, ένας μηχανικός μπορεί να προτιμήσει να αποδώσει περαιτέρω σημασία, για παράδειγμα, στο μήκος των διαδρομών του σε σχέση με το συνολικό χρόνο πλοήγησης). Απώτερος στόχος είναι η απόδοση μίας τιμής-αξίας σε κάθε συνδυασμό αλγορίθμων πλοήγησης, η οποία θα τους διακρίνει και θα τους κατατάσσει με βάση της συνολική τους επίδοση.

Αρχικά κάνουμε την παραδοχή ότι η τιμή ενός συνδυασμού πρέπει να είναι αυστηρά αύ-

Μετρική αξιολόγησης
συνδυασμών global
και local planner

Τύπος

Τύπος
αναλογικότητας

$\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$	Η μέση απόκλιση μεταξύ των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που ακολούθησε το ρομπότ σε σύγκριση με τα σχεδιασθέντα μονοπάτια \mathcal{G} που επρόκειτο να ακολουθήσει $\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G}) = \mu(d_\delta(\mathbf{P}_j, \mathbf{G}_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\mu_\Delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$	Η μέση συνολική απόκλιση μεταξύ των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που ακολούθησε το ρομπότ σε σύγκριση με τα σχεδιασθέντα μονοπάτια \mathcal{G} που επρόκειτο να ακολουθήσει $\mu_\Delta(\mathcal{P}, \mathcal{G}) = \mu(d_\Delta(\mathbf{P}_j, \mathbf{G}_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\mu_\delta^F(\mathcal{P}, \mathcal{G})$	Η μέση απόσταση Frechet μεταξύ των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που ακολούθησε το ρομπότ και των αντίστοιχων σχεδιασθέντων μονοπατιών \mathcal{G} , $\mu_\delta^F(\mathcal{P}, \mathcal{G}) = \mu(\delta_{dF}(\mathbf{P}_j, \mathbf{G}_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
μ_t	Ο μέσος χρόνος διαδρομής από την αρχική στάση \mathbf{p}_0 στη στάση-στόχο \mathbf{p}_G [sec]	↘
σ_t	Η τυπική απόκλιση γύρω από το μέσο χρόνο διαδρομής [sec]	↘
$\mu_l(\mathcal{P})$	Το μέσο μήκος των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που ακολούθησε το ρομπότ ως αποτέλεσμα του ελεγκτή κίνησης $\mu_l(\mathcal{P}) = \mu(l(\mathbf{P}_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\sigma_l(\mathcal{P})$	Η τυπική απόκλιση γύρω από το μέσο πραγματικό μήκος διαδρομής $\sigma_l(\mathcal{P}) = \sigma(l(\mathbf{P}_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$ —ένα μέτρο της συνέπειας των διαδρομών που υπαγόρευσε ο ελεγκτής κίνησης στο ρομπότ	↘
$\mu_s(\mathcal{P})$	Η μέση ομαλότητα των διανυόμενων διαδρομών $\mu_s(\mathcal{P}) = \mu(s(\mathbf{P}_j))$ [rad], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\sigma_s(\mathcal{P})$	Η τυπική απόκλιση γύρω από τη μέση ομαλότητα των διανυόμενων διαδρομών $\sigma_s(\mathcal{P}) = \sigma(s(\mathbf{P}_j))$ [rad], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\inf(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_C))$	Η συνολική ελάχιστη απόσταση των πραγματικών διαδρομών που ακολούθησε το ρομπότ από τα εμπόδια του χάρτη \mathbf{M} σε όλα τα πειράματα ή τις προσομοιώσεις $\inf(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}))$ [m]—ένα μέτρο του πόσο καλά ο ελεγκτής κίνησης σχεδιάζει και εκτελεί τη διαδρομή του ρομπότ γύρω από τα εμπόδια ώστε να μην παραβιάζει περιορισμούς αποφυγής σύγκρουσης	↗
$\mu(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_C))$	Η μέση ελάχιστη απόσταση των πραγματικών διαδρομών που διέσχισε το ρομπότ από τα εμπόδια του χάρτη \mathbf{M} , $\mu(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↗
$\sigma(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_C))$	Η τυπική απόκλιση γύρω από τη μέση ελάχιστη απόσταση των πραγματικών διαδρομών του ρομπότ από τα εμπόδια του χάρτη \mathbf{M} , $\sigma(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘

Πίνακας 4.4: Μετρικές αξιολόγησης για τον συνδυασμό ενός αλγορίθμου χάραξης μονοπατιών (global planner) με έναν ελεγκτή κίνησης (local planner), η περιγραφή τους (μέση) και η φύση της συμβολής τους στην τιμή-αξία του συνδυασμού τους (δεξιά): τα βέλη που δείχνουν προς τα πάνω υποδηλώνουν ότι όσο υψηλότερη είναι η τιμή μιας μετρικής τόσο υψηλότερη είναι η αξία του συνδυασμού. Τα βέλη που δείχνουν προς τα κάτω υποδεικνύουν ότι η αξία ενός συνδυασμού τόσο υψηλότερη όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της εν λόγω μετρικής

ξουσα, έτσι ώστε οι μεγαλύτερες τιμές να αντικατοπτρίζουν καλύτερες επιδόσεις. Η τιμή αυτή εξαρτάται όχι μόνο από την τιμή κάθε μετρικής που συζητήθηκε μέχρι τώρα, αλλά, πιο συγκεκριμένα, από τη φύση της συμβολής μιας μετρικής. Για παράδειγμα, οι χρόνοι πλοήγησης μεταξύ $p_0^{M_C}$ και $p_G^{M_C}$ συμβάλλουν περισσότερο όσο μικρότερη είναι η τιμή τους, αλλά, σε σχέση με τη συνολική απόσταση μεταξύ των εμποδίων, η τιμή ενός συνδυασμού θα πρέπει να αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η απόσταση. Επομένως, η τιμή ενός συνδυασμού αλγορίθμων εξαρτάται από τον τύπο της αναλογικότητας της συνεισφοράς κάθε συγκεκριμένης μετρικής. Οι πίνακες 4.2-4.4 συνοψίζουν τη συμβολή κάθε μετρικής που αφορά τους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών, τους ελεγκτές κίνησης, και του συνδυασμού τους. Τα βέλη που δείχνουν προς τα πάνω υποδηλώνουν ευθεία αναλογικότητα. Τα βέλη που δείχνουν προς τα κάτω υποδηλώνουν αντίστροφη αναλογικότητα. Περισσότερες λεπτομέρειες υπάρχουν στο παράρτημα Δ'1.

Δεδομένου ότι αυτό που επιδιώκουμε είναι η απόδοση μιας κλιμακωτής τιμής $V(C)$ σε κάθε συνδυασμό C από αλγορίθμους σχεδιασμού μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης, πρέπει να περάσουμε από την κατασκευή μιας έγκυρης συνάρτησης αξίας V . Η συνάρτηση V πρέπει (α) να είναι γνησίως αύξουσα (ώστε να εκφράζει με ακρίβεια την αξία ενός συνδυασμού με βάση τις μετρικές επίδοσης του, και ταυτόχρονα να παρέχει ένα νόημα στις διαφορές τους, η οποία να μπορεί να αναχθεί στη διαφορά μεταξύ της επίδοσης ξεχωριστών μετρικών τους) και (β) να λαμβάνει υπόψη μετρικές διαφορετικών μονάδων μέτρησης. Για τον σκοπό αυτό ξεκινάμε με την κανονικοποίηση των τιμών των μετρικών εντός του αντίστοιχου διαστήματος ελάχιστων και μέγιστων τιμών για όλους τους συνδυασμούς—έτσι ώστε η τιμή όλων των μετρικών να εκφράζεται στο διάστημα $[0, 1]$ άνευ μονάδας μέτρησης—και ανάλογα με τα συμφραζόμενα. Το τελευταίο σημαίνει ότι η τιμή, για παράδειγμα, του μέσου μήκους N σχεδίων μονοπατιών θα εκφράζεται μεταξύ του ελάχιστου μέσου μήκους και του μέγιστου μέσου μήκους όλων των μονοπατιών και όλων των συνδυασμών—αφού αυτή η μετρική είναι ανεξάρτητη από την επιτυχία ή την αποτυχία της αποστολής ενός συνδυασμού—, αλλά ο μέσος χρόνος πλοήγησης μεταξύ p_0^M και p_G^M στον χάρτη M , ο οποίος εξαρτάται από την επιτυχία της αποστολής, θα εκφράζεται μόνο μεταξύ του ελάχιστου μέσου και του μέγιστου μέσου χρόνου διαδρομής των συνδυασμών που κατάφεραν να μεταφέρουν το ρομπότ από τη στάση p_0^M στην p_G^M . Η

κανονικοποιητική συνάρτηση για μία μετρική m είναι $N(m)$:

$$N(m) = \frac{m - \min m}{\max m - \min m} \quad (4.8)$$

Έστω S το σύνολο των συνδυασμών C που κατάφεραν να κάνουν το ρομπότ να πλοηγηθεί από τη στάση p_0^M στην p_G^M για τον χάρτη M . Έστω D το σύνολο των μετρικών που δεν εξαρτώνται από την επιτυχία μιας αποστολής (με την παραπάνω έννοια), δηλαδή μετρικές που αφορούν αποκλειστικά σε global και local planners αλλά όχι στο συνδυασμό τους. Έστω επίσης η συνάρτηση-δείκτης (indicator function) $I_A(x)$ για τη μετρική x και το σύνολο A : η $I_A(x)$ ισούται με ένα αν $x \in A$ και με μηδέν αλλιώς. Τότε η συνάρτηση δείκτης για το συνδυασμό C όσον αφορά στη μετρική m , $I(C, m) = I_S(C) \parallel I_D(m)$, είναι μηδέν όταν ο C ήταν ανεπιτυχής στην αποστολή του και m είναι μετρική που αφορά το συνδυασμό αλγορίθμων—σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η $I(C, m)$ ισούται με ένα. Η διατύπωση αυτής της συνάρτησης δείκτη με τέτοιο τρόπο καθιστά δυνατή τη συνεκτίμηση όλων των μετρικών που περιγράφηκαν μέχρι σε αυτό το σημείο, και μέσω αυτής ο υπολογισμός της V είναι εφικτός.

Για τους αλγορίθμους παραγωγής μονοπατιών, τους ελεγχτές κίνησης, ή τους συνδυασμούς τους, εάν η τιμή τους όσον αφορά στη μετρική m είναι ευθέως ανάλογη της τιμής της m (όπως η τιμή της μετρικής της συνολικής ελάχιστης απόστασης του ρομπότ από τα εμπόδια), η τιμή-αξία που αποδίδεται σε έναν αλγόριθμο, ελεγκτή, ή συνδυασμό τους C για τη μετρική m εκφράζεται στο διάστημα $\mathbb{R}_{\geq 0} \times [0, 1]$ και εκφράζεται ως $V_q(C, m)$:

$$V_q(C, m) = w_m \cdot I(C, m) \cdot N(m) \quad (4.9)$$

Κατ' αναλογία, για τους αλγορίθμους παραγωγής μονοπατιών, τους ελεγχτές κίνησης, ή τους συνδυασμούς τους, εάν η τιμή τους όσον αφορά στη μετρική m είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής της m (όπως η τιμή της μετρικής του χρόνου που απαιτείται για να πλοηγηθεί το ρομπότ από την αρχική του στάση στη στάση-στόχο), η τιμή-αξία που αποδίδεται σε έναν αλγόριθμο, ελεγκτή, ή συνδυασμό τους C για τη μετρική m εκφράζεται στο διάστημα $\mathbb{R}_{\geq 0} \times [0, 1]$ και εκφράζεται ως $V_{\bar{q}}(C, m)$:

$$V_{\bar{q}}(C, m) = w_m \cdot I(C, m) \cdot (1 - N(m)) \quad (4.10)$$

Επομένως, με βάση τα παραπάνω, ένας γενικός αλλά ακριβής τύπος για την ανάθεση τιμής $V(C)$ σε κάθε συνδυασμού αλγορίθμων και ελεγκτών C για όλες τις προαναφερθείσες μετρικές αξιολόγησης σε N προσομοιώσεις ή πειράματα στο χάρτη M είναι μέσω της

$$V_M(C) = \sum_m I_Q(m) \cdot V_q(C, m) + I_{\bar{Q}}(m) \cdot V_{\bar{q}}(C, m) \quad (4.11)$$

όπου Q συμβολίζει το σύνολο των μετρικών των οποίων η τιμή είναι ευθέως ανάλογη της τιμής ενός συνδυασμού, και $I_Q(m)$ είναι η συνάρτηση-δείκτης για τη μετρική m . Η συνάρτηση V_M , όπως ορίζεται στην εξίσωση 4.11, είναι γνησίως αύξουσα για όλες τις τιμές μιας μετρικής $m \in [\min m, \max m]$ σε ένα δεδομένο χάρτη, δηλαδή για όλες τις τιμές των μετρικών που προκύπτουν είτε από επιτυχείς είτε από ανεπιτυχείς συνδυασμούς C στον εν λόγω χάρτη (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επιτυχημένοι με την έννοια της ολοκλήρωσης του συνόλου των αποστολών πλοήγησης).

Η τελική συνολική κατάταξη των επιδόσεων όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης σε έναν χάρτη M είναι επομένως το αποτέλεσμα της ταξινόμησης των τιμών της $V_M(C)$, όπως δίνεται από την εξίσωση 4.11, με φθίνουσα σειρά. Η τελική συνολική κατάταξη της επίδοσης όλων των συνδυασμών σε διαφορετικούς χάρτες θα είναι το αποτέλεσμα μιας πράξης ταξινόμησης στα αθροίσματα των τιμών του V_M σε όλους τους χάρτες M .

4.3.4 Ορισμός μετρικών ποιότητας πακέτων λογισμικών πλοήγησης

Μαζί με τις ποσοτικές μετρικές αξιολόγησης που αναφέρθηκαν παραπάνω θα αξιολογήσουμε επίσης και την κατάσταση της μορφής του λογισμικού των διαθέσιμων αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών (ενότητα 4.2.3.1) και ελεγκτών κίνησης (ενότητα 4.2.3.1) σε σχέση με τις μετρικές που ακολουθούν:

- Η ποιότητα και ο πλούτος της τεκμηρίωσής τους—μια ποιότητα που έχει αξία για τους μηχανικούς και προγραμματιστές ρομποτικής, καθώς χωρίς τεκμηρίωση δυσχεραίνεται η χρήση τους

- Η επικαιροποίησή τους—μια σύνθετη ποιότητα που αθροίζει (α) το πόσο ενημερωμένο είναι ένα πακέτο λογισμικού σε σχέση με τα ομοειδή του, (β) την υποστήριξη που προσφέρεται από τους συντηρητές του, (γ) την κατάσταση συντήρησης του πακέτου και (δ) την ικανότητά του να εγκατασταθεί σε ένα ρομπότ, δηλαδή τη συμβατότητά του με ενημερωμένα λειτουργικά συστήματα, μεταγλωττιστές και διερμηνευτές
- Η ευκολία εγκατάστασής τους
- Η αυτοτέλειά τους, δηλαδή κατά πόσο ένα πακέτο εξαρτάται από άλλα, ξεχωριστά εγκαταστάσιμα, πακέτα
- Οι υπολογιστικές τους ανάγκες
- Η δυνατότητα παραμετροποίησής τους. Αν και ο αριθμός των παραμέτρων ενός πακέτου αυξάνει την πολυπλοκότητα του, η ικανότητα προσαρμογής της επίδοσης και συμπεριφοράς αλγορίθμων ανάλογα με (α) συγκεκριμένες ιδιότητες των ρομπότ (τη γεωμετρία τους στο χώρο, το κινηματικό τους μοντέλο, κ.λπ.), και (β) κάτω από διάφορες και μεταβλητές προδιαγραφές, είναι υψίστης σημασίας για την επίτευξη της επιθυμητής επίδοσης κίνησης από ένα ρομπότ. Αυτή η ποιότητα συνδυάζεται με την πρώτη μετρική: ο πλούτος των παραμέτρων προς ρύθμιση είναι μη σχετικός εάν υπάρχει ανεπαρκής τεκμηρίωση σχετικά με την ταυτότητα/επιρροή τους στη συμπεριφορά του ρομπότ
- Η συνέπειά ως προς την απόδοσή τους, δηλαδή αστοχίες που παρουσιάζουν που οφείλονται σε ανεπαρκή μετάφραση της θεωρίας σε κώδικα προγραμματισμού (αυτό περιλαμβάνει την (μη) συνέπεια στην εμφάνιση σφαλμάτων λογισμικού και την ταχύτητα εκτέλεσης)

Προτού προχωρήσουμε στην αξιολόγηση των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης, θα φιλτράρουμε τα αντίστοιχα συνιστώντα πακέτα του λογισμικού τους με βάση τις ποιοτικές μετρικές που ορίστηκαν παραπάνω. Καθώς η αξιολόγηση περνάει αναγκαστικά μέσα από τη διαδικασία της πειραματικής υλοποίησης μέσω λογισμικού, η ποιοτική αξιολόγηση έχει ως σκοπό να εξετάσει την ποιότητα των διαθέσιμων υλοποιήσεων των αλγορίθμων που πραγματώνουν το έργο της αυτόνομους πλοήγησης, και να απορρίψει εκείνες που είναι ακατάλληλες για σταθερή και βιώσιμη χρήση: ένα παρωχημένο, μη αυτοτελές ή δυσεγκαταστάσιμο πακέτο είναι ένα πακέτο που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη. Ένα

πακέτο που στερείται τεκμηρίωσης είναι ένα πακέτο το οποίο, ακόμη και αν είναι χρησιμοποιήσιμο, στερεί από τον μηχανικό την εικόνα της μεθόδου του, παρεμποδίζει την πρόσβαση ή συσκοτίζει το νόημα των παραμέτρων του και συνεπώς παρεμποδίζει την παραμετροποίηση του και, τελικά, τη χρηστικότητα και τη μακροζωία της χρήσης του. Τέλος, ένα πακέτο που καταναλώνει αρκούντως πολλούς πόρους είναι ένα πακέτο που αρνείται σε άλλους κόμβους τους πόρους που αυτοί χρειάζονται, και συνεπώς θέτει σε κίνδυνο την επίδοσή τους και την επίδοση του συνολικού ρομποτικού συστήματος.

4.4 Πειραματική αξιολόγηση

4.4.1 Προκαταρκτική αξιολόγηση

Τα πακέτα `navfn` και `global_planner` θεωρούνται ότι είναι οι προεπιλεγμένες επιλογές για αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών στο ROS: είναι οι παλαιότερες και (θεωρούνται ότι είναι οι—) ασφαλέστερες επιλογές για το έργο της πλοήγησης. Επιπλέον, απαιτούν ελάχιστη παραμετροποίηση. Συντηρούνται συνεχώς από την απαρχή του ROS (αυτό ισχύει ειδικά για το `navfn`) και, ως οι *de facto* global planners του ROS, θα θεωρηθούν ως το βασικό μέτρο σύγκρισης για όλους τους άλλους global planners που θα περάσουν από την αρχική φάση διαλογής.

Θεωρούμε ότι το πακέτο `asr_navfn` είναι περιττό καθώς (α) η συμπεριφορά του είναι ακριβώς η ίδια με αυτή του `navfn` και (β) η δυνατότητά χρήσης του βασίζεται στην πιθανή αποτυχία του επιλογέα στόχου του ρομπότ. Επιπλέον, δεν συντηρείται επί του παρόντος. Ως εκ τούτου, αυτό το πακέτο δεν θα αξιολογηθεί σύμφωνα με την δεύτερο κριτήριο της ενότητας 4.3.4.

Παρόλο που το πακέτο `MoveIt!` είναι επαρκώς τεκμηριωμένο, υποστηριζόμενο, και ενημερωμένο, δεν απευθύνεται σε πλοήγηση κινητών βάσεων στον δισδιάστατο χώρο. Επομένως, το πακέτο αυτό θα δεν θα αξιολογηθεί, σύμφωνα με το δεύτερο κριτήριο.

Το πακέτο `sbpl_lattice_planner` τεκμηριώνεται τόσο στη θεωρία όσο και από άποψης παραμέτρων. Είναι επί του παρόντος ενημερωμένο στην τελευταία έκδοση του ROS, συντηρείται, και υποστηρίζεται από τους συντηρητές του ROS (ένα σφάλμα λογισμικού που ανακαλύφθηκε κατά τη διάρκεια της αξιολόγησής που διενεργήσαμε εξαλείφθηκε μέσα σε 8

ημέρες). Για την εγκατάστασή του (εκτός από εκείνη της βασικής βιβλιοθήκης SBPL) δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη προσπάθεια.

Η δυναμική έκδοση του `sbpl_lattice_planner`, το πακέτο `sbpl_dynamic_env_global_planner`, θεωρείται περιττό δεδομένου ότι η παρούσα μελέτη ασχολείται με την πλοήγηση σε στατικά περιβάλλοντα. Παρ' όλα αυτά, η σελίδα αναφοράς του προειδοποιεί τον αναγνώστη ότι ο ιχνηλάτης που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση κινούμενων αντικειμένων δεν είναι εύρωστος (ειδικά όταν το ρομπότ κινείται), συμβουλεύοντάς τον να κατευθυνθεί σε κάποια καλύτερη εναλλακτική λύση. Επιπλέον, απαιτεί την αντικατάσταση ολόκληρου του πακέτου `move_base` με μια τροποποίηση αυτού, έτσι ώστε οι `global` και `local planners` να εκτελούνται ταυτόχρονα. Τέλος, αξιολογείται ως μη επικαιροποιημένο πακέτο, δεδομένου ότι η τελευταία υποστηριζόμενη διανομή ROS είναι η `diamondback`, και η τελευταία ενημέρωσή της ήταν πάνω από οκτώ χρόνια πριν, κατά το χρόνο συγγραφής της διατριβής. Συνεπώς αυτό το πακέτο δεν είναι αυτοτελές, ενημερωμένο, και, σύμφωνα με το δεύτερο, το τέταρτο, και το έβδομο κριτήριο, δεν θα ληφθεί υπόψη στην προσεχή αξιολόγηση.

Παρόλο που το πακέτο `lattice_planner` είναι τεκμηριωμένο και αυτοτελές, δεν συντηρείται ενεργά (η τελευταία του έκδοση του στο `github` είναι πέντε ετών) και, ως εκ τούτου, δεν θα αξιολογηθεί, σύμφωνα με την δεύτερο κριτήριο αξιολόγησης ποιότητας.

Το ίδιο ισχύει και για το πακέτο `waypoint_global_planner`: είναι ελάχιστα τεκμηριωμένο, δεν συντηρείται ενεργά, και δεν είναι αυτοτελές, με την έννοια ότι η παροχή της αρχικής και τελικής στάσης του ρομπότ δεν επαρκούν για τη δημιουργία μιας διαδρομής που τις συνδέει, δεδομένου ότι ο αλγόριθμος δεν είναι σε θέση να λάβει υπόψη του τα εμπόδια του χάρτη κόστους. Συνεπώς, θα δεν θα ληφθεί υπόψη για αξιολόγηση, σύμφωνα με το πρώτο, το δεύτερο, και το τέταρτο κριτήριο.

Όσον αφορά το πακέτο `voronoi_planner`, είναι επίσης ανεπαρκώς τεκμηριωμένο, και δεν συντηρείται ενεργά (η τελευταία υποστηριζόμενη έκδοση ROS είναι η `indigo` και η τελευταία έκδοσή του στο `github` είναι έξι ετών). Ως εκ τούτου, δεν θα ληφθεί υπόψη για αξιολόγηση, σύμφωνα με το πρώτο και δεύτερο κριτήριο.

Όσον αφορά στους ελεγκτές κίνησης, η κατάσταση του `dwa_local_planner` είναι ισοδύναμη με εκείνη των `navfn` και `global_planner`: είναι το βασικό πακέτο υλοποίησης ελεγκτή κίνησης στο ROS.

Ο ελεγκτής κίνησης `eband_local_planner` τεκμηριώνεται, εγκαθίσταται μέσω της τυ-

πικής διαδικασίας εγκατάστασης πακέτων, και είναι αυτοτελής. Ωστόσο, δεν έχει ενημερωθεί ώστε να ταιριάζει με την τελευταία έκδοση του ROS,²³ και φαίνεται ότι δεν συντηρείται επί του παρόντος. Παρ' όλα αυτά θα το συμπεριλάβουμε στην αξιολόγηση των τοπικών σχεδιαστών μας ως εξαίρεση λόγω της κρίσιμης έλλειψης ελεγκτών κίνησης στο ROS. Στον πίνακα 4.5, κάτω από τη στήλη για τις υπολογιστικές ανάγκες, ο `eband_local_planner` λαμβάνει δύο κύκλους λόγω της ανάγκης επίλυσης ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης με περιορισμούς κατά τη διάρκεια εκτέλεσης.

Τέλος, ο ελεγκτής κίνησης `teb_local_planner` είναι το πιο διεξοδικά τεκμηριωμένο πακέτο λογισμικού μεταξύ όλων αυτών που έχουμε αναφέρει μέχρι στιγμής, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο παραμέτρων. Είναι ενημερωμένο στην τελευταία έκδοση του ROS, αυτοτελές, και είναι ο πιο παραμετροποιήσιμος ελεγκτής κίνησης. Ακριβώς όπως και ο `eband_local_planner`, ο `teb_local_planner` λαμβάνει δύο κύκλους στη στήλη για υπολογιστικών αναγκών στον πίνακα 4.5 λόγω της αρχής λειτουργίας του που περιλαμβάνει την επίλυση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης με χωροχρονικούς περιορισμούς κατά τη διάρκεια εκτέλεσής του.

Συνολικά, κανένας από τους σχεδιαστές που συζητήθηκαν παραπάνω δεν έχει υπερβολικές απαιτήσεις σε πόρους, και επομένως η ταυτόχρονη λειτουργία τους μαζί με άλλα πακέτα (παρακολούθησης στάσης ή χαρτογράφησης SLAM, για παράδειγμα) δεν θέτει σε κίνδυνο τη λειτουργία των τελευταίων.

Ο πίνακας 4.5 απεικονίζει τον πλήρη κατάλογο αξιολόγησης με βάση τα ποιοτικά κριτήρια της ενότητας 4.3.4 για όλα τα πακέτα λογισμικού αυτόνομους πλοήγησης των ενότητων 4.2.3.1 και 4.2.3.2.

Ο πίνακας 4.6 δείχνει την τελική λίστα των πακέτων ROS που θα αξιολογηθούν πειραματικά. Οι συμβολισμοί GP και LP που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια στην επικεφαλίδα των πινάκων είναι συντομογραφία των φράσεων “Global Planner” και “Local Planner” αντίστοιχα.

4.4.2 Αξιολόγηση στο περιβάλλον CORRIDOR

Συνολικά, όλοι οι συνδυασμοί του `dwa_local_planner` με οποιονδήποτε global planner απέτυχαν να πλοηγήσουν το ρομπότ στην επιθυμητή στάση, και το ίδιο παρατηρείται για το

²³https://github.com/utexas-bwi/eband_local_planner/issues/28

Planner	Ποιοτικές Μετρικές							Αποδοχή
	DOC	UTD	INST	SC/C	PARAM	CON	COMP	
navfn	•	•	••	•	•	•	•	•
global_planner	•	•	••	•	•	•	•	•
asr_navfn	•	○	•	•	•	•	•	○
MoveIt!	•••	•	••	•	•••	?	•••	○
sbpl_lattice_planner	••	•	••	•	•	○	•	•
sbpl_dynamic_[...]	•	○	•	○	•	?	•	○
lattice_planner	•	○	•	•	•	•	•	○
waypoint_global_planner	•	○	•	○	○	•	•	○
voronoi_planner	•	○	•	•	•	•	•	○
dwa_local_planner	•	•	••	•	•	•	•	•
eband_local_planner	•	○	••	•	••	•	••	•
teb_local_planner	•••	•	••	•	•••	••	••	•

Πίνακας 4.5: Αξιολόγηση των πακέτων ROS που αποτελούν συνιστώσες αυτόνομους πλοήγησης με βάση τις μετρικές που ορίζονται στην ενότητα 4.3.4, και απόφαση αποδοχής για συμπερίληψη στην πειραματική αξιολόγηση. Οι συντομογραφίες εισάγονται για λόγους εξοικονόμησης χώρου. DOC: συντομογραφία ποιότητας τεκμηρίωσης, UTD περί του αν είναι ενημερωμένο, INST της ευκολίας εγκατάστασης του, SC/C για την αυτοτέλεια/πληρότητα του, PARAM για την παραμετροποιεσιμότητα του, CON της συνέπειας στην εκτέλεσή του, και COMP για τις ανάγκες του σε υπολογιστικούς πόρους. Οι κενές κουκκίδες υποδηλώνουν ανεπάρκεια σε σχέση με κάθε μετρική. Τα ερωτηματικά υποδηλώνουν άγνωστη κατάσταση.

Global planners (GP)	Local planners (LP)
navfn	dwa_local_planner
global_planner	eband_local_planner
sbpl_lattice_planner	teb_local_planner

Πίνακας 4.6: Ο κατάλογος των πακέτων ROS των αλγορίθμων κατασκευής μονοπατιών (Global Planners) και ελεγκτών κίνησης (Local Planners) των οποίων η ξεχωριστή και συνδυαστική χρήση θα αξιολογηθεί πειραματικά. Κάθε πακέτο ικανοποιεί όλα τα κριτήρια της λίστας της ενότητας 4.3.4

GP	LP	επιτυχημένες αποστολές / N	V_{MC}	Κατάταξη
navfn	teb	10/10	21.41	1
sbpl	teb	10/10	20.35	2
global_planner	teb	10/10	19.29	3
navfn	eband	10/10	15.96	4
global_planner	eband	10/10	14.70	5
sbpl	eband	0/10	10.99	6
sbpl	dwa	0/10	6.56	7
navfn	dwa	0/10	6.46	8
global_planner	dwa	0/10	5.50	9

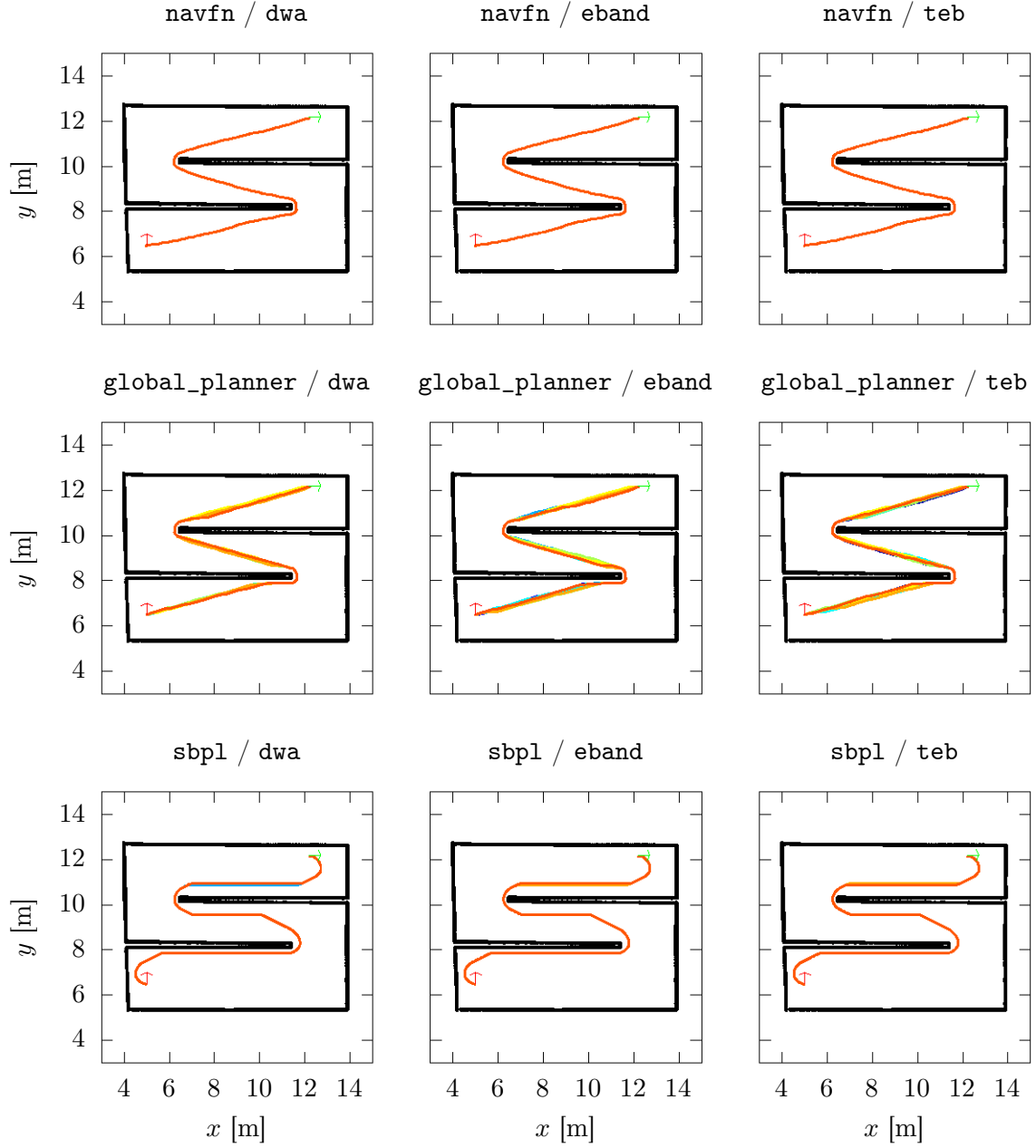
Πίνακας 4.7: Οι αριθμοί επιτυχίας αποστολών, η τιμή-αξία V_{MC} , και η κατάταξη όλων των συνδυασμών των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που αξιολογούνται για την επίδοσή τους στο περιβάλλον CORRIDOR σε $N = 10$ προσομοιώσεις

συνδυασμό του `sbpl_lattice_planner` με τον `eband_local_planner`.

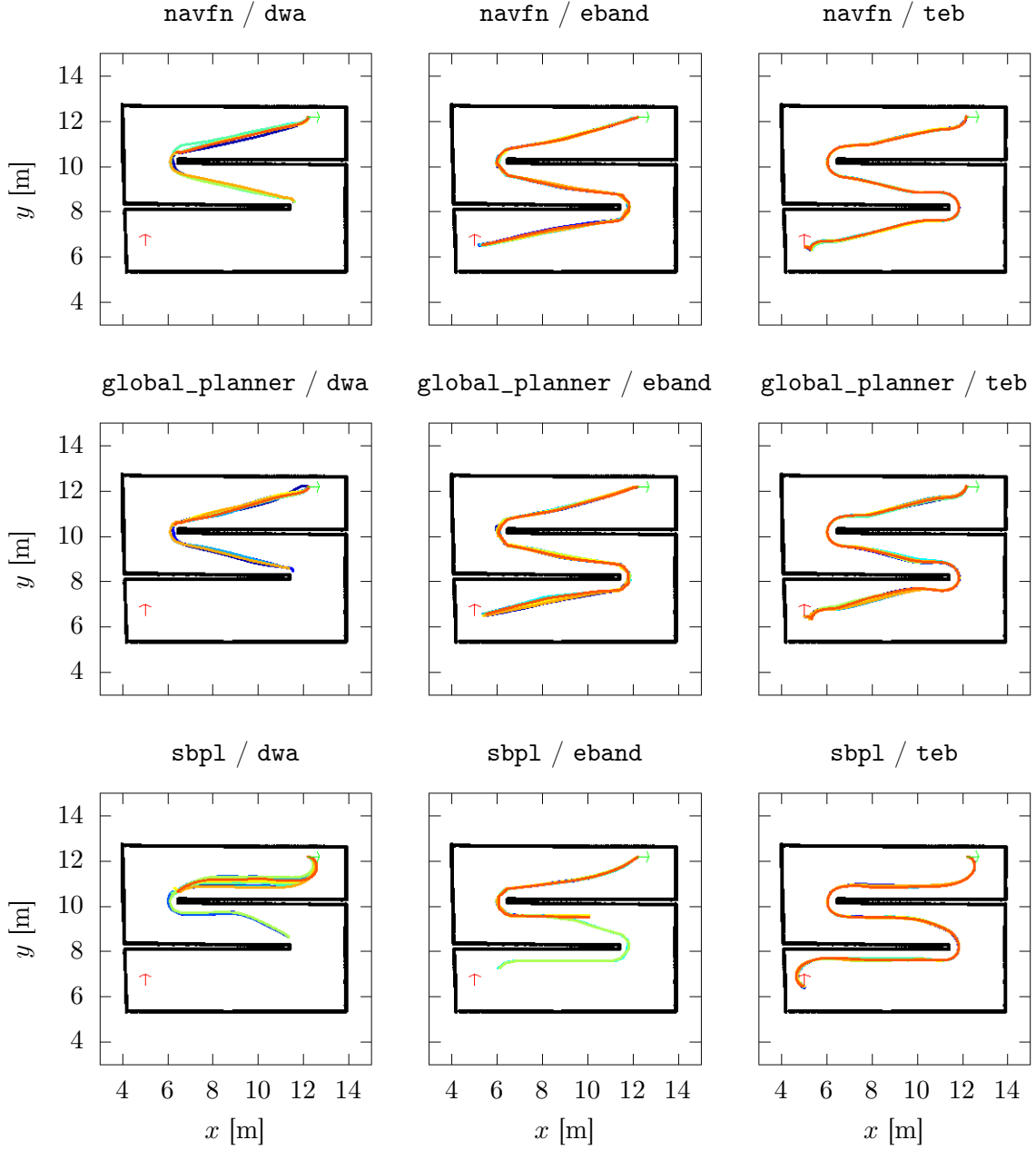
Το σχήμα 4.5 απεικονίζει τα μονοπάτια προς ακολουθήση που παρήχθησαν από όλους τους global planners που εμφανίζονται στην πρώτη στήλη του πίνακα 4.6, για όλους τους συνδυασμούς global και local planner του ίδιου πίνακα, για $N = 10$ προσομοιώσεις κάθε συνδυασμού.

Το σχήμα 4.6 απεικονίζει τις πραγματικές διαδρομές που διήνυσε το ρομπότ για όλους τους συνδυασμούς αλγορίθμων σχεδίασης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης του ίδιου πίνακα, για $N = 10$ προσομοιώσεις για κάθε συνδυασμό.

Ο πίνακας 4.7 καταγράφει την τιμή-αξία V_{MC} και την κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που αξιολογήθηκαν με βάση τις τιμές όλων των μετρικών που παρουσιάζονται στους πίνακες Δ'.1-Δ'.7, όσον αφορά στις επιδόσεις τους στην πλοήγηση στο περιβάλλον CORRIDOR. Για τον υπολογισμό της τιμής όλων των συνδυασμών, όλα τα βάρη $w_m = 1.0$ εκτός από αυτό που αφορά στη μετρική μ_{PF}/μ_{LPC} , λόγω του γεγονότος ότι ο `eband_local_planner` δεν παρέχει πρόσβαση στον αριθμό των κλήσεων του ελεγκτή. Συνολικά, ο ελεγκτής κίνησης `teb_local_planner` κατέλαβε όλες τις θέσεις του βάρους, με τον συνδυασμό του με τον αλγόριθμο `navfn` να είναι αυτός με τις καλύτερες επιδόσεις μεταξύ των τριών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών. Λεπτομέρειες σχετικά με τις επιδόσεις των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών, των ελεγκτών κίνησης, και των συνδυασμών τους, βρίσκονται στο παράρτημα Δ'.2.1.



Σχήμα 4.5: Τα σχεδιασθέντα μονοπάτια προς ακολουθήση \mathcal{G} που παρήχθησαν από τους τρεις αλγόριθμους χάραξης μονοπατιών για κάθε συνδυασμό τους με ελεγκτή κίνησης του πίνακα 4.6, σε σχέση με τις ορισμένες αρχικές και τελικές στάσεις του περιβάλλοντος CORRIDOR



Σχήμα 4.6: Τα διανυθέντα μονοπάτια \mathcal{P} του ρομπότ, όπως ορίστηκαν από τους τρεις ελεγχτές κίνησης για κάθε συνδυασμό τους με αλγόριθμο παραγωγής μονοπατιών του πίνακα 4.6, σε σχέση με τις ορισμένες αρχικές και τελικές στάσεις του περιβάλλοντος CORRIDOR.

4.4.3 Αξιολόγηση στο περιβάλλον WILLOWGARAGE

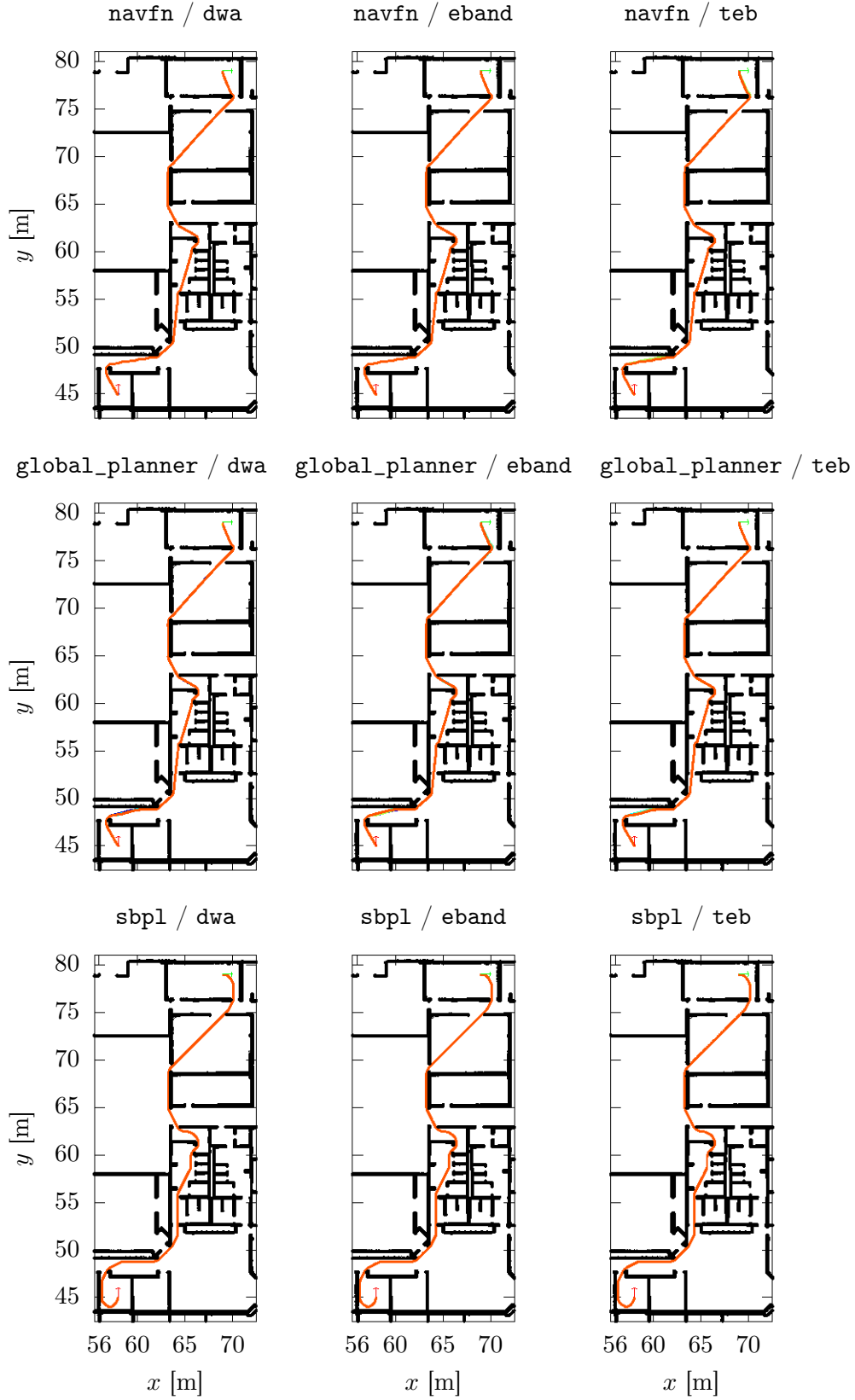
Συνολικά, όλοι οι συνδυασμοί των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών με τους ελεγκτές κίνησης `dwa_local_planner` και `eband_local_planner` απέτυχαν να πλοηγήσουν το ρομπότ στην τελική του στάση. Οι υπόλοιποι συνδυασμοί (όλοι με τον `teb_local_planner` ως ελεγκτή κίνησής τους) ήταν αξιόπιστοι σε κάθε προσομοίωση.

Το σχήμα 4.7 απεικονίζει τα μονοπάτια προς ακολούθηση που παρήχθησαν από όλους τους global planners που εμφανίζονται στην πρώτη στήλη του πίνακα 4.6, για όλους τους συνδυασμούς global και local planner του ίδιου πίνακα, για $N = 10$ προσομοιώσεις κάθε συνδυασμού.

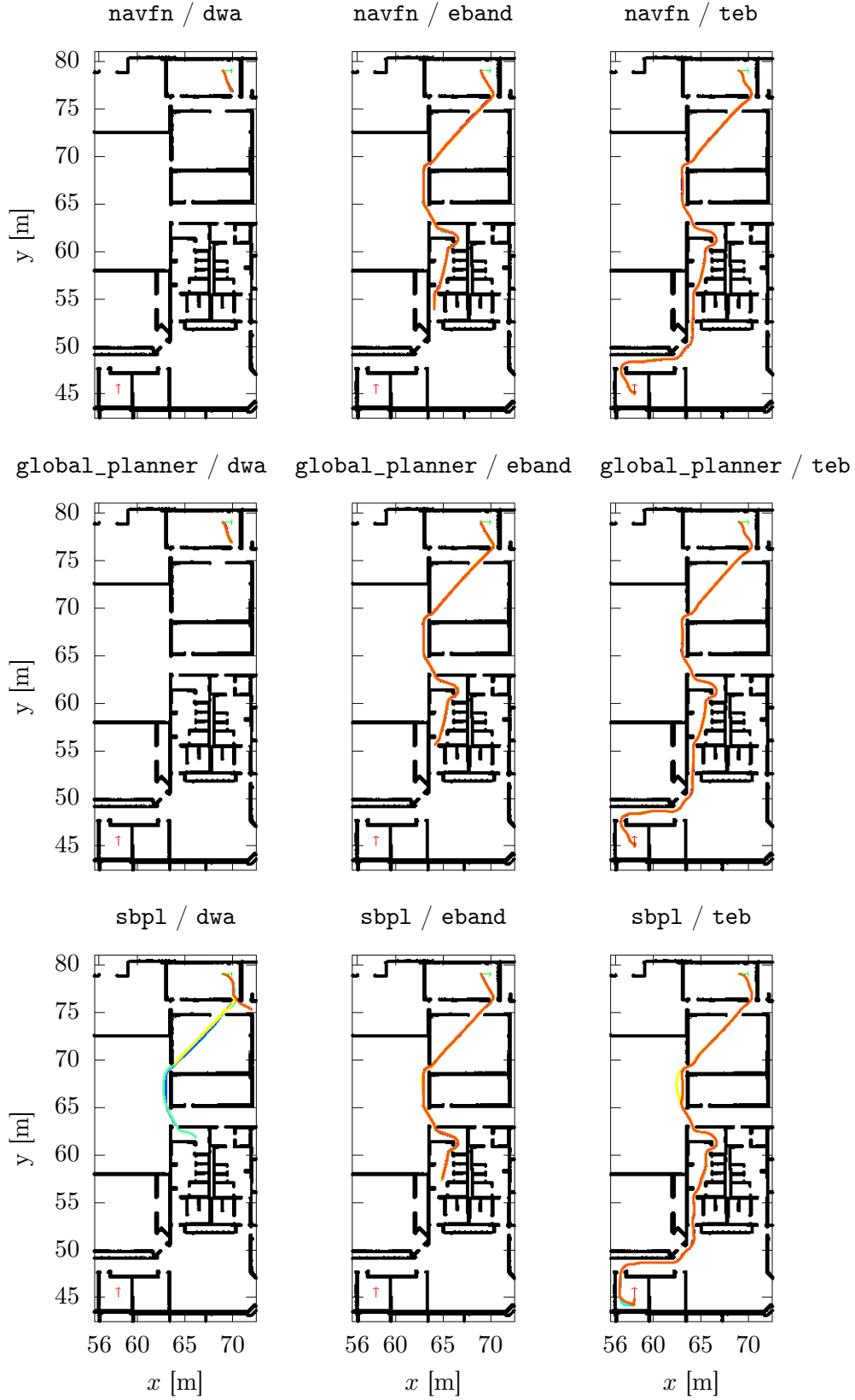
Το σχήμα 4.8 απεικονίζει τις πραγματικές διαδρομές που διένυσε το ρομπότ για όλους τους συνδυασμούς αλγορίθμων σχεδίασης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης του ίδιου πίνακα, για $N = 10$ προσομοιώσεις για κάθε συνδυασμό.

Ο πίνακας 4.8 καταγράφει την τιμή-αξία V_{M_W} και την κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που αξιολογήθηκαν με βάση τις τιμές όλων των μετρικών που παρουσιάζονται στους πίνακες Δ'.8- Δ'.14 όσον αφορά στις επιδόσεις τους στην πλοήγηση στο περιβάλλον WILLOWGARAGE. Για τον υπολογισμό της τιμής όλων των συνδυασμών, όλα τα βάρη $w_m = 1.0$ εκτός από αυτό που αφορά στη μετρική μ_{PF}/μ_{LPC} , λόγω του γεγονότος ότι ο `eband_local_planner` δεν παρέχει πρόσβαση στον αριθμό των κλήσεων του ελεγκτή. Συνολικά, ο ελεγκτής κίνησης `teb_local_planner` κατέλαβε και πάλι όλες τις θέσεις του βάρους (αυτή τη φορά λόγω της αποτυχίας όλων των άλλων ελεγκτών κίνησης να ολοκληρώσουν την αποστολή του ρομπότ), με το συνδυασμό του με τον `global_planner` να ξεπερνά αυτόν με τον `navfn`, ο οποίος ήταν ο συνολικά καλύτερος στο περιβάλλον CORRIDOR. Ενδιαφέρον αποτελεί ότι ο `sbpl_lattice_planner` βοήθησε την επίδοση του `dwa_local_planner` περισσότερο από τους άλλους global planners, κάτι που πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι ο πρώτος λαμβάνει υπόψιν του κατά την σχεδίαση των μονοπατιών τους περιορισμούς του κινηματικού μοντέλου της βάσης του ρομπότ, το οποίο σε αυτήν την περίπτωση είναι διαφορικής κίνησης.

Λεπτομέρειες σχετικά με τις επιδόσεις των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών, των ελεγκτών κίνησης, και των συνδυασμών τους, βρίσκονται στο παράρτημα Δ'.2.2.



Σχήμα 4.7: Τα σχεδιασθέντα μονοπάτια προς ακολούθηση \mathcal{G} που παρήχθησαν από τους τρεις αλγόριθμους χάραξης μονοπατιών για κάθε συνδυασμό τους με ελεγκτή κίνησης του πίνακα 4.6, σε σχέση με τις ορισμένες αρχικές και τελικές στάσεις του περιβάλλοντος WILLOWGARAGE



Σχήμα 4.8: Τα διανυθέντα μονοπάτια \mathcal{P} του ρομπότ, όπως ορίστηκαν από τους τρεις ελεγχτές κίνησης για κάθε συνδυασμό τους με αλγόριθμο παραγωγής μονοπατιών του πίνακα 4.6, σε σχέση με τις ορισμένες αρχικές και τελικές στάσεις του περιβάλλοντος WILLOWGARAGE

GP	LP	επιτυχημένες αποστολές / N	V_{M_W}	Κατάταξη
globalplanner	teb	10/10	21.90	1
navfn	teb	10/10	20.00	2
sbpl	teb	10/10	12.27	3
globalplanner	eband	0/10	11.95	4
navfn	eband	0/10	11.76	5
sbpl	eband	0/10	9.85	6
navfn	dwa	0/10	9.31	7
globalplanner	dwa	0/10	8.86	8
sbpl	dwa	0/10	4.85	9

Πίνακας 4.8: Οι αριθμοί επιτυχίας αποστολών, η τιμή-αξία V_{M_W} , και η κατάταξη όλων των συνδυασμών των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που αξιολογούνται για την επίδοσή τους στο περιβάλλον WILLOWGARAGE σε $N = 10$ προσομοιώσεις

4.4.4 Αξιολόγηση στο περιβάλλον CSAL

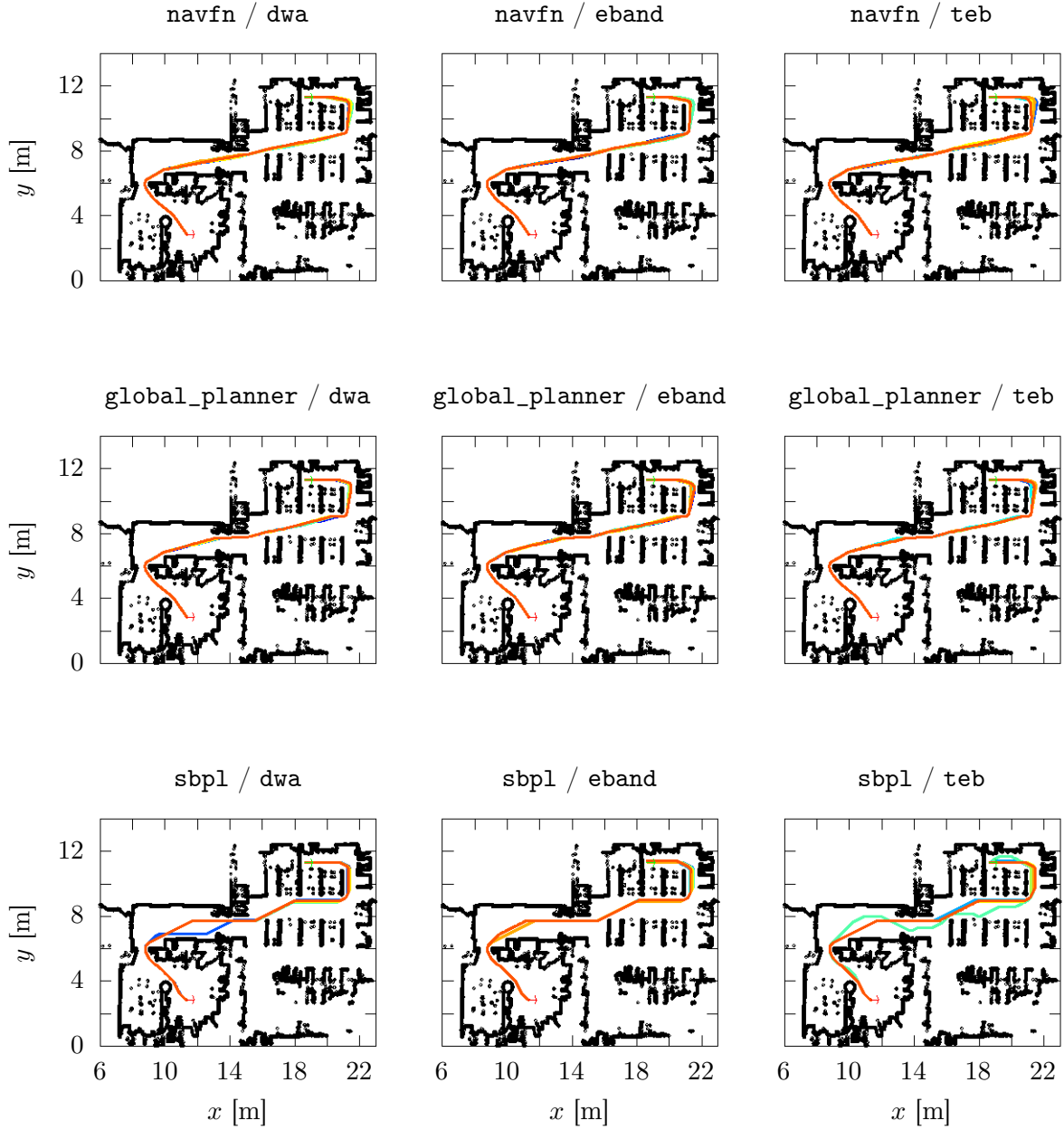
Συνολικά, όπως και στις προσομοιώσεις, όλοι οι συνδυασμοί αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών με τον ελεγκτή κίνησης `dwa_local_planner` απέτυχαν να πλοηγήσουν το ρομπότ από την αρχική του στάση στην τελική. Οι υπόλοιποι συνδυασμοί ήταν αξιόπιστοι σε κάθε εκτέλεση.

Το σχήμα 4.9 απεικονίζει τα μονοπάτια προς ακολούθηση που παρήχθησαν από όλους τους global planners που εμφανίζονται στην πρώτη στήλη του πίνακα 4.6, για όλους τους συνδυασμούς global και local planner του ίδιου πίνακα, για $N = 10$ προσομοιώσεις κάθε συνδυασμού.

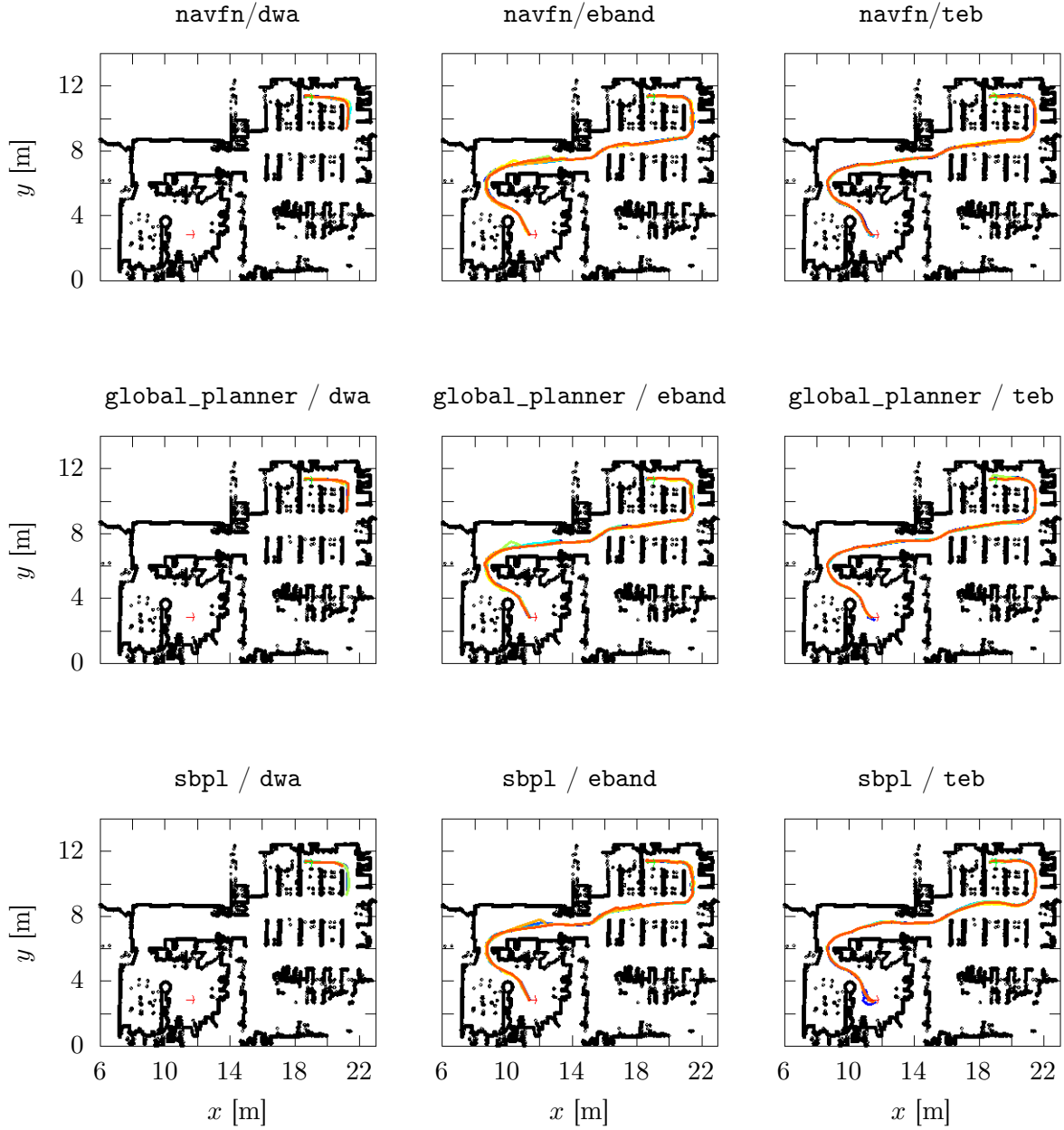
Το σχήμα 4.10 απεικονίζει τις εκτιμώμενες²⁴ διαδρομές που διένυσε το ρομπότ για όλους τους συνδυασμούς αλγορίθμων σχεδίασης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης του ίδιου πίνακα, για $N = 10$ προσομοιώσεις για κάθε συνδυασμό.

Ο πίνακας 4.9 καταγράφει την τιμή-αξία V_{M_L} και την κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που αξιολογήθηκαν με βάση τις τιμές όλων των μετρικών που παρουσιάζονται στους πίνακες Δ'.15-Δ'.21 όσον αφορά στις επιδόσεις τους στην πλοήγηση στο περιβάλλον CSAL. Για τον υπολογισμό της τιμής όλων των

²⁴Το εργαστήριο CSAL, σε αντίθεση με το περιβάλλον προσομοίωσης Gazebo, δεν διαθέτει υποδομή μέτρησης της πραγματικής στάσης ενός οχήματος. Οι εκτιμώμενες διαδρομές βασίζονται στην εκτίμηση της στάσης του ρομπότ, η οποία εξάγεται μέσω της χρήσης φίλτρου σωματιδίου. Η λειτουργία του φίλτρου βασίζεται στο κινηματικό μοντέλο της βάσης του Turtlebot, η οποία είναι διαφορετικής φύσης, και σε έναν αισθητήρα αποστάσεων 2D lidar.



Σχήμα 4.9: Τα σχεδιασθέντα μονοπάτια προς ακολούθηση \mathcal{G} που παρήχθησαν από τους τρεις αλγόριθμους χάραξης μονοπατιών για κάθε συνδυασμό τους με ελεγκτή κίνησης του πίνακα 4.6, σε σχέση με τις ορισμένες αρχικές και τελικές στάσεις του περιβάλλοντος CSAL



Σχήμα 4.10: Τα διανυθέντα μονοπάτια \mathcal{P} του ρομπότ, όπως ορίστηκαν από τους τρεις ελεγχτές κίνησης για κάθε συνδυασμό τους με αλγόριθμο παραγωγής μονοπατιών του πίνακα 4.6, σε σχέση με τις ορισμένες αρχικές και τελικές στάσεις του περιβάλλοντος CSAL

συνδυασμών, όλα τα βάρη $w_m = 1.0$ εκτός από αυτό που αφορά στη μετρική μ_{PF}/μ_{LPC} , λόγω του γεγονότος ότι ο `eband_local_planner` δεν παρέχει πρόσβαση στον αριθμό των κλήσεων του ελεγκτή. Λεπτομέρειες σχετικά με τις επιδόσεις των αλγορίθμων κατασκευής μονοπατιών, των ελεγκτών κίνησης, και των συνδυασμών τους, βρίσκονται στο παράρτημα Δ'.2.3.

Αυτό που ξεχωρίζει στα πειράματα στο πραγματικό περιβάλλον CSAL είναι ότι η επίδοση των συνδυασμών του `sbpl_lattice_planner` με ελεγκτές κίνησης μειώθηκε, επιτρέποντας στον `eband_local_planner` και τους συνδυασμούς του να εκτοπίσουν τον συνδυασμό του `teb_local_planner` με τον `sbpl_lattice_planner` από τις πρώτες θέσεις. Εκτός από αυτήν την αλλαγή, οι συνδυασμοί των υπόλοιπων αλγορίθμων παρουσιάζουν το ίδιο μοτίβο που παρατηρήθηκε στις προσομοιώσεις: (α) δεδομένου ενός αλγορίθμου κατασκευής μονοπατιών, ο `teb_local_planner` υπερτερεί του `eband_local_planner`, ο οποίος με τη σειρά του υπερτερεί του `dwa_local_planner`, και (β) δεδομένου ενός ελεγκτή κίνησης, ο `navfn` υπερτερεί του `global_planner`.

GP	LP	επιτυχημένες αποστολές / N	V_{M_C}	Κατάταξη
navfn	teb	10/10	18.74	1
globalplanner	teb	10/10	16.84	2
navfn	eband	10/10	14.77	3
globalplanner	eband	10/10	14.26	4
sbpl	teb	10/10	13.57	5
navfn	dwa	0/10	8.10	6
sbpl	eband	10/10	7.80	7
sbpl	dwa	0/10	6.47	8
globalplanner	dwa	0/10	6.13	9

Πίνακας 4.9: Οι αριθμοί επιτυχίας αποστολών, η τιμή-αξία V_{M_L} , και η κατάταξη όλων των συνδυασμών των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που αξιολογούνται για την επίδοσή τους στο περιβάλλον CSAL σε $N = 10$ πειράματα

4.4.5 Συνολική αξιολόγηση

Ο πίνακας 4.10 καταγράφει τις τελικές συνδυαστικές τιμές-αξίες όλων των συνδυασμών των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών της αριστερής στήλης του πίνακα 4.6 με όλους τους

GP	LP	V_{M_C}	V_{M_W}	V_{M_L}	V	Κατάταξη
navfn	teb	21.41	20.00	18.74	60.15	1
globalplanner	teb	19.29	21.90	16.84	58.03	2
sbpl	teb	20.35	12.27	13.57	46.19	3
navfn	eband	15.96	11.76	14.77	42.49	4
globalplanner	eband	14.70	11.95	14.26	40.91	5
sbpl	eband	10.99	9.85	7.80	28.94	6
navfn	dwa	6.46	9.31	8.10	28.64	7
globalplanner	dwa	5.50	8.86	6.13	20.49	8
sbpl	dwa	6.56	4.85	6.47	17.88	9

Πίνακας 4.10: Η σύνθετη τελική τιμή V και η κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης του πίνακα 4.6 ως αποτέλεσμα της αξιολόγησης της επίδοσής τους βάσει των μετρικών των πινάκων 4.2, 4.3, και 4.4, σε επαναληπτικές προσομοιώσεις και πειράματα στα περιβάλλοντα CORRIDOR (σχήμα 4.2), WILLOWGARAGE (σχήμα 4.3) και CSAL (σχήμα 4.4)

ελεγκτές κίνησης της δεξιάς στήλης του ίδιου πίνακα, για όλα τα πειράματα και προσομοιώσεις που διεξήχθησαν.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία δύο καθοριστικά πρότυπα αναδύονται με σαφήνεια: Όσον αφορά στους ελεγκτές κίνησης: ο `teb_local_planner` υπερτερεί του `eband_local_planner`, ο οποίος υπερτερεί με τη σειρά του του `dwa_local_planner`. Όσον αφορά στους αλγόριθμους σχεδιασμού μονοπατιών: δεδομένου ενός ελεγκτή κίνησης, ο `navfn` υπερτερεί του `global_planner` με μικρή διαφορά, μικρότερη από εκείνη μεταξύ του τελευταίου και του `sbpl_lattice_planner`.

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα (ενότητα 4.3.1 και παράρτημα Δ'), τις μετρικές αξιολόγησης τους (ενότητα 4.3.2), τη μεθοδολογία αξιολόγησης (ενότητα 4.3.3) και τις ποιοτικές μετρικές αξιολόγησης πακέτων λογισμικού ROS (ενότητα 4.3.4), συμπεραίνουμε ότι ο πιο αποτελεσματικός συνδυασμός πακέτων για χρήση στην αυτόνομη πλοήγηση στο πεδίο εφαρμογής ΠΕ χρησιμοποιεί τον `navfn` ως αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών (ενότητα 4.2.3.1), και τον `teb_local_planner` ως ελεγκτή κίνησης (ενότητα 4.2.3.2).

Επιπλέον, οι καλύτεροι υποψήφιοι για την αντικατάσταση των παραπάνω αλγορίθμων, ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τις απαιτήσεις/στόχους πλοηγήσεις, είναι ο `global_planner` και ο `eband_local_planner` αντίστοιχα.

4.5 Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα

4.5.1 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο αξιολογήσαμε την επίδοση των τελευταίας τεχνολογίας πακέτων λογισμικού ROS που είναι ικανά να φέρουν εις πέρας το έργο της αυτόνομους πλοήγησης στο πεδίο εφαρμογής ΠΕ. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι δύο ειδών: αλγόριθμοι χάραξης μονοπατιών ανάμεσα σε δύο στάσεις του χάρτη του περιβάλλοντος στο οποίο κινείται μία κινητή βάση ρομπότ, και αλγόριθμοι ελέγχου της κίνησης του ρομπότ στο περιβάλλον του. Ο συνδυασμός τους αποτελεί τον πυρήνα της πλοήγησης μίας κινητής βάσης ρομπότ άνευ εξωτερικών χειροκίνητων χειρισμών της.

Η αξιολόγηση είχε ως στόχους

- το σχεδιασμό μίας ολοκληρωμένης, περιεκτικής, και επεκτάσιμης μεθοδολογίας αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομους πλοήγησης κινητών βάσεων ρομπότ, και
- την εφαρμογή της για την αξιολόγηση της επίδοσης τρεχόντων υλοποιήσεών τους μέσω του μεσολογισμικού ROS

Προκειμένου να διακρίνουμε τα εύρωστα και εύχρηστα πακέτα λογισμικού από τα μη, συστήσαμε μία μεθοδολογία προκαταρκτικής αξιολόγησής τους με βάσει ποιοτικά κριτήρια που τίθενται από την εμπειρία ανάπτυξης και συντήρησης λογισμικού. Στη συνέχεια σχεδιάσαμε μία μεθοδολογία αξιολόγησης με βάση ποσοτικές μετρίκες, οι οποίες αποτελούν αντικειμενικά κριτήρια της επίδοσης ενός ρομπότ στο έργο της αυτόνομους πλοήγησης, και στις οποίες ένας μηχανικός ρομποτικής μπορεί να θέσει επιπλέον ή λιγότερο βάρος αναλόγως των σκοπών της εφαρμογής των εν λόγω πακέτων αυτόνομους πλοήγησης. Έπειτα εφαρμόσαμε τη μεθοδολογία ποσοτικής αξιολόγησης σε εννιά συνδυασμούς πακέτων, πραγματοποιώντας χρήση τους για αυτόνομη πλοήγηση σε δύο ετερογενή προσομοιωμένα περιβάλλοντα και σε ένα πραγματικό. Τα περιβάλλοντα και οι διαδρομές πλοήγησης επιλέχθηκαν έτσι ώστε να δοκιμάσουν τους υποκείμενους αλγόριθμους με μία σειρά κριτηρίων, και με κλιμακωτή δυσκολία. Το αποτέλεσμα ήταν μία ιεράρχηση των συνδυασμών των πακέτων λογισμικού, στην κορυφή της οποίας βρίσκεται ένας συνδυασμός ο οποίος φέρει εις πέρας το έργο της αυτόνομους πλοήγησης με ελάχιστα σφάλματα πλοήγησης, σε εύλογους χρόνους, και, συνολικά, άριστη επίδοση στο σύνολο των τριών περιβαλλόντων δοκιμής.

4.5.2 Αιτίες περαιτέρω έρευνας

Για το σκοπό της αυτόνομους πλοήγησης είναι απαραίτητη η γνώση ή η εκτίμηση της τρέχουσας στάσης του ρομπότ: μόνο με βάση αυτήν είναι δυνατή η εύρεση ταχυτήτων προς είσοδο στους κινητήρες των τροχών της κινητής βάσης έτσι ώστε να ακολουθείται το σχεδιασθέν μονοπάτι. Στο πεδίο εφαρμογής ΠΕ η γνώση της στάσης δεν είναι δυνατή: μόνο η παρατήρησή της είναι δυνατή, μέσω των αισθητήρων που φέρει το ρομπότ (παρατήρηση Ι). Για την παρατήρηση της στάσης του ρομπότ κατά τη διενέργεια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήσαμε το φίλτρο σωματιδίων (ενότητα 1.2.3).

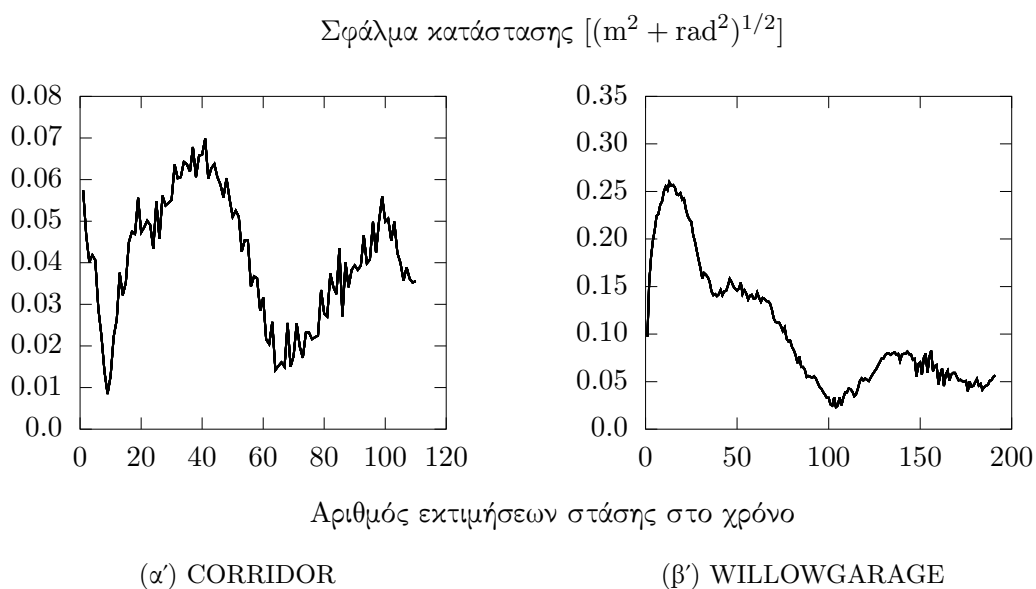
Αυτό που παρατηρήσαμε δια ζώσης και με γυμνό μάτι κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας ήταν ότι η εκτίμηση της στάσης του ρομπότ δεν σύναδε πάντοτε με την πραγματική του στάση: σε λίγες περιπτώσεις παρατηρήσαμε ότι η εκτίμηση της θέσης ταλαντωνόταν απότομα ανάμεσα σε μερικές υποψήφιες θέσεις—σε άλλες στιγμές παρατηρούσαμε ότι η εκτίμηση της στάσης του ρομπότ είχε ορατό σφάλμα σε σχέση με την πραγματική του στάση. Το σχήμα 4.11 δείχνει την εξέλιξη του μέσου όρου των σφαλμάτων κατάστασης (του διανύσματος της στάσης) κατά τις δέκα διαδρομές του συνδυασμού του ελεγκτή `teb_local_planner` με τον αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών `navfn` στο περιβάλλον CORRIDOR (αριστερά) και με τον `global_planner` στο περιβάλλον WILLOWGARAGE (δεξιά). Σε αυτά τα σχήματα παρατηρούμε τέσσερα πράγματα για το σφάλμα κατάστασης: (α) δεν έχει σταθερά μηδενική (ή αμελητέα) τιμή, (β) δεν έχει σταθερή τιμή μέσα στο χώρο και κατά τη διάρκεια του χρόνου, (γ) δεν έχει παρόμοιες καμπύλες εξέλιξης σε διαφορετικά περιβάλλοντα, και (δ) δεν έχει το ίδιο άνω ή κάτω όριο σε διαφορετικά περιβάλλοντα.²⁵

Ανάλογα με τους σκοπούς ρομποτικών εφαρμογών το σφάλμα κατάστασης μπορεί να έχει μεταβλητές προδιαγραφές. Για παράδειγμα, σε αποθήκες με μεγάλους χώρους και πλατειά περάσματα, όπου ο στόχος είναι η απογραφή της θέσης προϊόντων με αδρή ακρίβεια θέσης (της τάξης των δεκάδων εκατοστών του μέτρου), ούτε η πλοήγηση δυσχεραίνεται, ούτε και διαταράσσεται η ακρίβεια της απογραφής. Αντιθέτως, σε περιβάλλοντα με στενά περάσματα ή απαιτήσεις ακριβείας στάσης (για παράδειγμα σε αυτόνομα παλετοφόρα οχήματα), η αυτόνομη πλοήγηση δυσχεραίνεται σε αναλογία με το σφάλμα στάσης και το πόσο στενά είναι τα περάσματα, και το έργο που απαιτεί ακρίβεια στάσης του ρομπότ (η φόρτωση των παλετών

²⁵ Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων για όλους τους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών με ελεγκτές κίνησης προκύπτει, όπως είναι εύλογο, ότι το σφάλμα κατάστασης είναι ανεξάρτητο από αυτούς.

από το όχημα) σε αναλογία με το μέγεθος του σφάλματος στάσης. Στο πλαίσιο της βιομηχανίας η ελάττωση του σφάλματος εκτίμησης της στάσης ενός αυτόνομου ρομπότ προς το παρόν επιτυγχάνεται είτε με επιπρόσθετο και κοστοβόρο εξοπλισμό, είτε με την απόρριψη της αυτονομίας λόγω των υψηλών διακυβευμάτων σε κόστος και ασφάλεια.

Η έρευνα επί της ελάττωσης του σφάλματος της εκτίμησης της στάσης ενός ρομπότ στο πεδίο εφαρμογής ΠΕ θα είναι επικερδής για τους σκοπούς της διάχυσης της αυτονομίας, και σε υπάρχουσες εφαρμογές που απαιτούν αυξημένη ακρίβεια εκτίμησης σε σχέση με τις συμβατικές προσεγγίσεις εκτίμησης της στάσης ενός αυτόνομου ρομπότ στο χώρο.



Σχήμα 4.11: Μέσος όρος σφαλμάτων εκτίμησης στάσης κατά τη διάρκεια του χρόνου σε δέκα πειράματα αυτόνομους πλοήγησης με τη χρήση φίλτρου σωματιδίων

Κεφάλαιο 5

Μέθοδοι ελάττωσης σφάλματος εκτίμησης στάσης φίλτρου σωματιδίων

Η έρευνα που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο αντλεί τις πηγές της από τις αιτίες περαιτέρω έρευνας του προηγούμενου κεφαλαίου, όπως αυτές διατυπώθηκαν στην τελευταία του ενότητα. Στο παρόν κεφάλαιο επιζητούμε την αύξηση της ακρίβειας εκτίμησης της στάσης ενός ρομπότ μέσω της ελάττωσης του σφάλματος εκτίμησης στάσης που προέρχεται από φίλτρο σωματιδίων, το οποίο αντλεί πληροφορίες για το περιβάλλον του μέσω ενός δισδιάστατου αισθητήρα αποστάσεων lidar.

Παράλληλα, στον παρόν κεφάλαιο αρχίζει δειλά να προβάλλει ο θεματικός άξονας που θα μας απασχολήσει στο επόμενο και κυρίως στο μεθεπόμενο κεφάλαιο, και το όφελος του σε ό,τι αφορά την εύρεση της στάσης ενός ρομπότ και τη βελτίωση της εκτίμησής της, ήτοι η ευθυγράμμιση μετρήσεων δισδιάστατου αισθητήρα αποστάσεων lidar με σαρώσεις χάρτη.

5.1 Στόχοι του κεφαλαίου και δομή

Ο στόχος του κεφαλαίου είναι η εφεύρεση μεθόδων μείωσης του σφάλματος εκτίμησης της στάσης ενός ρομπότ κινητής βάσης του πεδίου εφαρμογής ΠΕ, η οποία εκτίμηση είναι αποτέλεσμα της διεργασίας του φίλτρου σωματιδίων βάσει των μετρήσεων ενός αισθητήρα δισδιάστατων μετρήσεων απόστασης τύπου lidar. Πιο συγκεκριμένα επιζητούμε τη λύση του

προβλήματος Π1 με βάση την παραδοχή II και τα επακόλουθα I και II. Οι παραδοχές του εν λόγω σύνθετου προβλήματος είναι οι συνθήκες αυτόνομους πλοήγησης του κεφαλαίου 4, και οι αιτίες έρευνας επί αυτού είναι αυτές της ενότητας 4.5.2.

Πρόβλημα Π1. Έστω ένα ρομπότ κινητής βάσης ικανό να κινείται στο επίπεδο $x - y$ εξοπλισμένο με έναν οριζόντια τοποθετημένο αισθητήρα lidar μετρήσεων δύο διαστάσεων που εκπέμπει N_s ακτίνες. Έστω επίσης τα ακόλουθα να είναι διαθέσιμα ή να ευσταθούν:

- Ο χάρτης M του περιβάλλοντος στο οποίο κινείται το ρομπότ
- Μια δισδιάστατη μέτρηση S_R , που λαμβάνεται από την—άγνωστη και αναζητούμενη—στάση $p(l, \theta)$, $l = (x, y)$
- Μια εκτίμηση της θέσης του αισθητήρα $\hat{p}(\hat{l}, \hat{\theta})$ στο σύστημα αναφοράς του χάρτη, όπου $\hat{l} = (\hat{x}, \hat{y})$ είναι σε μία γειτονιά του l

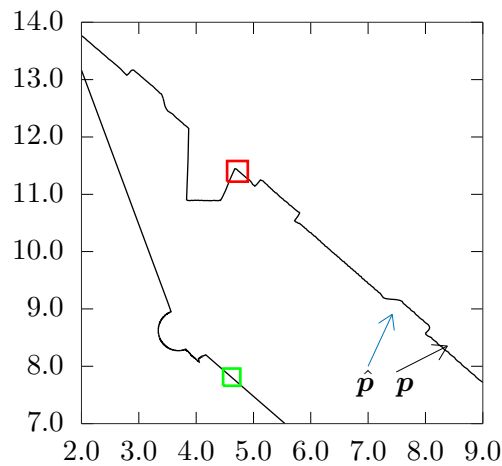
Τότε ο στόχος είναι να μειωθεί το μέγεθος του σφάλματος στάσης του αισθητήρα $e(p, \hat{p}) \triangleq p - \hat{p}$ από την αρχική του τιμή

$$\|e(p, \hat{p})\|_2 = ((x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + (\theta - \hat{\theta})^2)^{1/2} \quad (5.1)$$

βελτιώνοντας την εκτίμηση της στάσης του αισθητήρα σε $\hat{p}'(\hat{x}', \hat{y}', \hat{\theta}')$ έτσι ώστε

$$\|e(p, \hat{p}')\|_2 < \|e(p, \hat{p})\|_2 \quad (*)$$

Υποθέτοντας ότι η στάση του αισθητήρα σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του ρομπότ είναι γνωστή, η διόρθωση της εκτίμησης της στάσης του αισθητήρα είναι ίση με το διόρθωση της εκτίμησης της στάσης του ρομπότ σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του χάρτη. Ένα παράδειγμα μιας συνήθους συνθήκης του προβλήματος Π1 απεικονίζεται στο σχήμα 5.1. Η εκτίμηση της στάσης \hat{p} παρέχεται εξωτερικά από ένα σύστημα εντοπισμού στην περίπτωση της παρακολούθησης της στάσης, ή ως υπόθεση στάσης στην περίπτωση του προβλήματος εύρεσης της στάσης του ρομπότ βάσει καθολικής αβεβαιότητας.



Σχήμα 5.1: Μια επί της αρχής τυπική συνθήκη εντοπισμού: Η πραγματική στάση του ρομπότ είναι p αλλά η εκτίμησή της \hat{p} είναι μετατοπισμένη ως προς τη θέση και τον προσανατολισμό. Ο ρυθμός των μεταβολών του τμήματος του περιβάλλοντος που περιβάλλεται με κόκκινο χρώμα είναι μεγαλύτερος από από εκείνον του τμήματος που περιβάλλεται με πράσινο

Παραδοχή II. Για τη λύση του προβλήματος Π1 θεωρούμε ότι το σύστημα εκτίμησης και παροχής της στάσης του αισθητήρα αποστάσεων είναι το φίλτρο σωματιδίων.

Επακόλουθο I. Συνέπεια της παραδοχής II είναι ότι τα συμπεραζόμενα της επίλυσης του προβλήματος Π1 είναι εκείνα της εύρεσης της στάσης του ρομπότ βάσει περιορισμένης αβεβαιότητας (pose tracking).

Επακόλουθο II. Συνέπεια του επακόλουθου I είναι ότι η επίλυση του προβλήματος πρέπει να αναζητηθεί κατά τη διάρκεια πλοήγησης, και με χρόνο εκτέλεσης που να συμβαδίζει με το ρυθμό ανανέωσης εκτιμήσεων στάσης που παρέχει η βασική μέθοδος εκτίμησης στάσης.

Για την επίλυση του εν λόγω προβλήματος εμβαθύνουμε στη βιβλιογραφία του φίλτρου σωματιδίων (1.2.3), και τη βιβλιογραφία της ελάττωσης του σφάλματος του. Αρχικά αναζητούμε μία λύση του προβλήματος εντός του μηχανισμού του φίλτρου: δεδομένου ότι σε κάθε υπόθεσή του κωδικοποιείται ένα βαθμωτό μέγεθος της ακρίβειας εκτίμησής της, σκεφτόμαστε ορθολογικά και συμπεραίνουμε ότι, θεωρητικά, η επιλογή υποθέσεων μεγαλύτερου δείκτη ακρίβειας για την εξαγωγή της εκτίμησης του φίλτρου οφείλει να εμφανίζει χαμηλό-

τερα σφάλματα εκτίμησης στάσης. Το περιεχόμενο αυτής της συλλογιστικής βρίσκεται στην ενότητα 5.3.1.

Στη συνέχεια, δεδομένου ότι οι πιθανοτικές προσεγγίσεις εκτίμησης της στάσης ενός ρομπότ φέρουν εγγενώς ένα σφάλμα εκτίμησης λόγω των θορύβων μέτρησης και συστήματος, δοκιμάζουμε την άρμωση μίας τεχνικής της βιβλιογραφίας στην έξοδο του φίλτρου, η οποία στη βιβλιογραφία εμφανίζει σφάλματα χαμηλότερα από εκείνα του φίλτρου: την ευθυγράμμιση μετρήσεων του αισθητήρα αποστάσεων με σαρώσεις χάρτη (ενότητα 1.2.6). Η συλλογιστική και το περιεχόμενο της εν λόγω τεχνικής βρίσκεται στην ενότητα 5.3.2.

Έπειτα παρατηρούμε ότι η εκτίμηση-έξοδος του συστήματος που αποτελείται από την αλυσίδα του φίλτρου σωματιδίων και της μεθόδου ευθυγράμμισης είναι μία εκτίμηση για την οποία το φίλτρο (α) δεν είναι ενημερωμένο, και (β) υποθέτοντας ότι εμφανίζει χαμηλότερο σφάλμα εκτίμησης, θα ωφελούτο από την εισαγωγή του στον πληθυσμό του. Βάσει ανεπάρκειας των διαθέσιμων στη βιβλιογραφία μεθόδων ανάδρασης αυτής της εκτίμησης, προτείνουμε μία που ελαττώνει τα σφάλματα εκτίμησης, και ταυτόχρονα είναι εύρωστη σε αποτυχίες τις μεθόδου ευθυγράμμισης. Η εν λόγω συλλογιστική βρίσκεται στην ενότητα 5.3.3.

Στην ενότητα 5.3.4 παρουσιάζουμε το σύστημα που περιλαμβάνει όλες τις παραπάνω συνιστώσες μείωσης του σφάλματος εκτίμησης, οι οποίες ελέγχονται ως προς την ευστάθειά της θεωρητικής τους συλλογιστικής στην πράξη στην ενότητα 5.4. Τέλος, στην ενότητα 5.5 παρουσιάζουμε τα συμπεράσματα της μελέτης μας, και τους αιτίες για περαιτέρω έρευνα στο πεδίο της ευθυγράμμισης δισδιάστατων μετρήσεων αισθητήρα lidar με σαρώσεις χάρτη. Η επόμενη ενότητα προσφέρει την επισκόπηση της βιβλιογραφίας, η οποία συμπληρώνεται με επιπρόσθετες αναφορές στις επιμέρους υποενότητες της ενότητας 5.3.

5.2 Σχετική βιβλιογραφία

5.2.1 Ευθυγράμμιση μετρήσεων δισδιάστατου αισθητήρα lidar

Η ευθυγράμμιση μετρήσεων δισδιάστατου αισθητήρα lidar (ενότητα 1.2.5) ήταν το αποτέλεσμα της γενικότερης έρευνας επί της ευθυγράμμισης νεφών σημείων στον τρισδιάστατο χώρο. Η ευθυγράμμιση νέφους σημείων προέκυψε από τις ανάγκες της κοινότητας της υπολογιστικής όρασης με το θεμελιώδες άρθρο των Besl και McKay [BM92], στο οποίο εισήγαγαν τον αλγόριθμο Iterative Closest Point (ICP). Ο ICP είναι μια μέθοδος που προσδιορίζει

τον πλήρη χωρικό μετασχηματισμό έξι βαθμών ελευθερίας που ευθυγραμμίζει βέλτιστα ένα σύνολο τρισδιάστατων σημείων ελεύθερης μορφής με ένα δεύτερο σύνολο τρισδιάστατων σημείων ελεύθερης μορφής—βέλτιστα σύμφωνα με τη μετρική της μέσης τετραγωνικής απόστασης. Στον ICP κάθε σημείο του δεύτερου συνόλου συσχετίζεται με ένα σημείο αναφοράς του πρώτου συνόλου με τον προσδιορισμό του πλησιέστερου σημείου αναφοράς μέσω της ευκλείδειας απόστασης. Μόλις προσδιοριστεί αυτό το σύνολο αντιστοιχίσεων ο ICP υπολογίζει το μετασχηματισμό που ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των ζευγαρωμένων σημείων. Στο τελευταίο του βήμα εφαρμόζει αυτόν τον μετασχηματισμό στα σημεία του δεύτερου συνόλου σημείων και ενημερώνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα να πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο.

Οι Lu και Milios ήταν οι πρώτοι που διατύπωσαν και χρησιμοποίησαν μεθόδους ευθυγράμμισης μετρήσεων δισδιάστατων αισθητήρων lidar προκειμένου να εκτιμηθεί η σχετική μετατόπιση και περιστροφή μεταξύ δύο στάσεων ρομπότ. Παρόλο που μια μέτρηση αντιπροσωπεύει ένα 2D σχήμα (ένα περίγραμμα του ορατού κόσμου από την προοπτική του ρομπότ), το σχήμα αυτό αναπαρίσταται από θορυβώδη διακριτά σημεία αντί για ένα μοντέλο υψηλής ποιότητας και πιστότητας, γεγονός που καθιστά τον αξιόπιστο ορισμό ή την εξαγωγή χαρακτηριστικών (features) από αυτό ένα δύσκολο και ενδεχομένως ανακριβές εγχείρημα [Gri91]. Στο [FM94] διατυπώνονται δύο ξεχωριστοί αλγόριθμοι που χειρίζονται τον θόρυβο του αισθητήρα και δεν βασίζονται σε διακριτά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος λειτουργίας του ρομπότ (όπως γραμμές ή γωνίες), αποφεύγοντας έτσι τη διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών και της αντιστοίχισής τους. Η πρώτη μέθοδος, που ονομάστηκε Iterative Matching Range to Point (IMPR), εξετάζει ξεχωριστά τις περιστροφικές και μεταφορικές συνιστώσες του προβλήματος ευθυγράμμισης, θεωρώντας σταθερή εναλλάξ τη μία και βελτιστοποιώντας την άλλη. Η λύση του προβλήματος διατυπώνεται ως αναζήτηση σε μια συνάρτηση απόστασης για την εκτίμηση της σχετικής περιστροφής μεταξύ των μετρήσεων εισόδου και χρησιμοποιεί μια διαδικασία ελαχίστων τετραγώνων για την επίλυση της σχετικής μετατόπισης. Η δεύτερη μέθοδος, που ονομάζεται Iterative Dual Correspondence (IDC), αποδίδει σημαντικά ακριβέστερες εκτιμήσεις της περιστροφής από την IMPR, και βασίζεται σε επαναληπτικές λύσεις ελαχίστων τετραγώνων, χρησιμοποιώντας αντιστοιχίσεις από σημείο σε σημείο, παρομοίως με τον αλγόριθμο ICP. Ουσιαστικά ο IDC συνδυάζει τον ICP και τον IMPR χρησιμοποιώ-

ντας τον ICP για να υπολογισμό της μετατόπισης μεταξύ των δύο σαρώσεων και τον IMPR για τον υπολογισμό της σχετικής περιστροφής τους.

Οι συγγραφείς του [Pfi+] ήταν οι πρώτοι που επεξέτειναν τη συμπερίληψη πηγών αβεβαιότητας στη λύση του προβλήματος ευθυγράμμισης, αναπτύσσοντας μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους τις επιδράσεις του θορύβου των μετρήσεων, της γωνίας πρόσπτωσης του αισθητήρα, και του σφάλματος ευθυγράμμισης μεταξύ των μετρημένων οριακών σημείων του περιβάλλοντος. Παρόλο που δεν λαμβάνουν υπόψη τους την αβεβαιότητα της στάσης του αισθητήρα ενσωματώνουν την οδομετρία του ρομπότ. Σε αυτό το άρθρο εισάγεται ένας σταθμισμένος αλγόριθμος ευθυγράμμισης δισδιάστατων μετρήσεων lidar για την εκτίμηση του μετασχηματισμού κίνησης του ρομπότ μεταξύ των στάσεων από όπου λαμβάνονται διαδοχικές μετρήσεις, με καλύτερες επιδόσεις από τις μη σταθμισμένες μεθόδους, όπως οι αλγόριθμοι του [FM94]. Επιπλέον, με τον υπολογισμό της πραγματικής συνδιακύμανσης των μετασχηματισμών, ο σταθμισμένος αλγόριθμος ευθυγράμμισης παρέχει την βάση για τη βέλτιστη συγχώνευση αυτών των εκτιμήσεων με οδομετρικές ή/και αδρανειακές μετρήσεις, καθιστώντας τον έτσι υποψήφιο για την υποστήριξη των έργων του εντοπισμού στάσης και της ταυτόχρονης χαρτογράφησης και παρακολούθησης της στάσης ενός ρομπότ.

Στο [Che+] παρουσιάζεται μια εύρωστη επέκταση του ICP, η οποία ονομάζεται Trimmed Iterative Closest Point (TrICP). Αυτός ο αλγόριθμος αίρει την υπόθεση του ICP για την ισότητα των μεγεθών των δύο μετρήσεων εισόδου και, υποθέτοντας τη γνώση (ή τη δυνατότητα απόκτησης) του ελάχιστου αριθμού εγγυημένων αντιστοιχίσεων μεταξύ των δύο συνόλων, κάνει εκτεταμένη χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων [Rou84] προκειμένου να ενισχύσει τον βρόχο εκτέλεσης του ICP. Ο ICP διαπιστώνεται ότι αποτελεί ειδική περίπτωση του TrICP στην περίπτωση που τα δύο σύνολα έχουν το ίδιο μέγεθος και όλα τα σημεία και από τα δύο σύνολα μπορούν να αντιστοιχιστούν το ένα με το άλλο.

Οι Biber και Strasser εισήγαγαν τον μετασχηματισμό κανονικών κατανομών Normal Distributions Transform (NDT) στο [BS], σε μια προσπάθεια να υποστηρίξουν το έργο της κατασκευής χαρτών από ρομπότ. Υποθέτοντας 2D μετρήσεις lidar ως είσοδο, ο NDT υποδιαιρεί το οριζόντιο επίπεδο σε ένα πλέγμα παρόμοιο με ένα πλέγμα κατάληψης—αλλά σε αντίθεση με το πλέγμα κατάληψης που αντιπροσωπεύει δυαδικά εάν ένα κελί είναι κατειλημμένο, ο NDT αναπαριστά σε αυτό την πιθανότητα μέτρησης ενός σημείου-δείγματος μιας μέτρησης απόστασης για κάθε θέση εντός ενός κελιού. Το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού

είναι μία συνεχής και διαφορίσιμη πυκνότητα πιθανότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιστοίχιση μιας δεύτερης μέτρησης, εδώ χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Νεύτωνα [SM03]. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τρόπου αναπαράστασης είναι ότι (α) όλες οι εμπλεκόμενες παράγωγοι μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά, γρήγορα, και με εγκυρότητα, και, το σημαντικότερο, (β) η αντιστοίχιση σημείων της δεύτερης μέτρησης σε κατανομές σημείων της πρώτης σημαίνει ότι δεν υπάρχει καμία ρητή αντιστοίχιση μεταξύ δύο διακριτών σημείων μεταξύ δύο μετρήσεων, μειώνοντας έτσι το βαθμό στον οποίο όλες οι αντιστοιχίσεις σάρωσης είναι επιρρεπείς σε σφάλματα. Η σχετική μετατόπιση και περιστροφή μεταξύ μιας μέτρησης εισόδου και μιας μέτρησης αναφοράς υπολογίζονται επαναληπτικά με μεγιστοποίηση (μέσω της εκτέλεσης ενός βήματος του αλγορίθμου του Νεύτωνα) μιας συνάρτησης βαθμολογίας, η οποία είναι το άθροισμα της αξιολόγησης όλων των κατανομών της μέτρησης εισόδου που αντιστοιχίζονται στο σύστημα αναφοράς της πρώτης μέτρησης, με βάση μια αρχική εκτίμησή τους (π.χ. που λαμβάνεται από οδομετρικές μετρήσεις).

Στο [CIG] οι συγγραφείς επεκτείνουν τη δυνατότητα εφαρμογής της ευθυγράμμισης μετρήσεων στα προβλήματα εύρεσης της στάσης ενός ρομπότ βάσει πεπερασμένης και καθολικής αβεβαιότητας. Μεταφέροντας το πρόβλημα της ευθυγράμμισης μετρήσεων στο πεδίο Hough, εκμεταλλεύονται αρκετές από τις ιδιότητές του: συγκεκριμένα ότι δεν υπάρχει απώλεια πληροφορίας κατά τη διαδικασία μετασχηματισμού, και ότι η αναλλοιωσιμότητα του μετασχηματισμού επιτρέπει την αποσύνδεση του προβλήματος της εύρεσης της διαφοράς προσανατολισμού ανάμεσα σε δύο μετρήσεις από το πρόβλημα εύρεσης της διαφοράς της θέσης από τις οποίες ελήφθησαν. Ο αλγόριθμος Hough Scan Matching (HSM) είναι ένας καθολικός, πολυτροπικός (multi-modal), μη επαναληπτικός αλγόριθμος ευθυγράμμισης δισδιάστατων μετρήσεων απόστασης που μπορεί να λειτουργήσει σε μη δομημένα περιβάλλοντα. Ο HSM δεν βασίζεται στην εξαγωγή χαρακτηριστικών, αλλά αντιστοιχίζει πυκνά δεδομένα, δηλαδή σαρώσεις απόστασης που μπορούν να ερμηνευθούν ως κατανομές χαρακτηριστικών σε ένα διαφορετικό χώρο παραμέτρων, επιτρέποντας του την ευθυγράμμιση μη γραμμικών επιφανειών, με ταυτόχρονη ευρωστία στον θόρυβο μέτρησης.

Στο [MMM05] οι συγγραφείς παρουσιάζουν μια πιθανοτική μέθοδο για την ευθυγράμμιση μετρήσεων που λαμβάνονται σε μη δομημένα περιβάλλοντα. Ενώ ο αλγόριθμός τους, probabilistic Iterative Correspondence (pIC), έχει σχεδιαστεί ώστε να χειρίζεται τον θόρυβο μέτρησης του αισθητήρα, σε αντίθεση με τον [Pfi+] είναι επίσης σε θέση να χειριστεί και

την αβεβαιότητα της στάσης του αισθητήρα. Ο pIC ακολουθεί μια διαδικασία δύο βημάτων, σύμφωνα με την οποία προσδιορίζει πιθανοτικά αντιστοιχίσεις μεταξύ δύο μετρήσεων. Στη συνέχεια αποτυπώνει ταυτόχρονα τη σχετική μετατόπιση και περιστροφή τους. Πειράματα έναντι των ICP και IDC δείχνουν ταχύτερη σύγκλιση της ευθυγράμμισης σε σχέση με τον ICP και, στο έργο της χαρτογράφησης, αποδεικνύεται ότι ο pIC υπερτερεί και των δύο όσον αφορά στην ευρωστία, την ακρίβεια, και την ταχύτητα σύγκλισης.

Σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες μεθόδους, οι συγγραφείς του [DK05] υποστηρίζουν ότι είναι επωφελές για έναν αλγόριθμο ευθυγράμμισης μετρήσεων να λειτουργεί στο εγγενές πολικό σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα. Η μέθοδός τους, Polar Scan Matching (PSM), ανήκει στην οικογένεια των προσεγγίσεων ευθυγράμμισης από σημείο σε σημείο. Ο PSM αποφεύγει την αναζήτηση συσχετίσεων σημείων μέσω της αντιστοίχισης σημείων παρόμοιας κατεύθυνσης, και εναλλάσσεται μεταξύ προβολής μέτρησης ακολουθούμενη από εκτίμηση μετατόπισης, και προβολής μέτρησης ακολουθούμενη από εκτίμηση προσανατολισμού. Σε πειράματα ο PSM αποδεικνύεται ότι είναι υπολογιστικά ταχύτερος από τον ICP, τόσο όσον αφορά στον αριθμό επαναλήψεων όσο και στο χρόνο επεξεργασίας, καθώς και από απόψεως ακρίβειας.

Μια νέα συνάρτηση απόστασης εισάγεται στο [MLM], κατάλληλη για διανύσματα κατστάσεων στο χώρο (x, y, θ) : η απόσταση μεταξύ δύο πλήρων διανυσμάτων στάσης (σε αντίθεση με την περίληψη μόνο της θέσης στη μετρική της απόστασης) είναι ο μικρότερος μετασχηματισμός στερεού σώματος που οδηγεί τη μία στάση στην άλλη. Αυτό το μέτρο απόστασης χρησιμοποιείται και στα δύο βήματα του αλγορίθμου του που εισάγουν οι συγγραφείς του, ο οποίος ονομάζεται Metric-Based Iterative Closest Point (MB-ICP): τα σημεία από μια 2D δισδιάστατη μέτρηση αποστάσεων αρχικά αντιστοιχίζονται με εκείνα μιας μέτρησης αναφοράς (η ακριβώς προηγούμενη μέτρηση), και στη συνέχεια η σχετική μετατόπιση και περιστροφή μεταξύ των δύο μετρήσεων υπολογίζεται ταυτόχρονα, χάρει στην ενσωμάτωση του ολικού μετασχηματισμού στη μετρική απόστασης, με επαναληπτική ελαχιστοποίηση του σφάλματος ελαχίστου τετραγώνου της νέας μετρικής σε σχέση με τα αντιστοιχισμένα σημεία. Με αυτή τη διατύπωση οι συγγραφείς είναι σε θέση να βελτιώσουν τον IDC όσον αφορά στην ευρωστία, την ταχύτητα σύγκλισης, και την ακρίβεια.

Ο Censi, με κίνητρο το γεγονός ότι οι αντιστοιχίσεις μεταξύ δύο μετρήσεων μπορεί να μην υπάρχουν—αφού ο αισθητήρας δειγματοληπτεί αραία το περιβάλλον και συνεπώς διαφορε-

τικές μετρήσεις μπορεί να δειγματοληφτούν διαφορετικά μέρη του—, αντί να χρησιμοποιήσει μια μετρική απόστασης σημείου-προς-σημείο, χρησιμοποιεί μια μετρική σημείου-προς-γραμμή στο [Cen08]. Σε αυτό το άρθρο εισάγεται ο αλγόριθμος Point-to-Line Iterative Closest Point (PLICP). Το πλεονέκτημα της χρήσης μιας μετρικής απόστασης από σημείο σε γραμμή είναι ότι μπορεί να βρεθεί μία κλειστή μορφή για την ελαχιστοποίηση αυτής της μετρικής απόστασης, αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια και την ταχύτητα σύγκλισης της ευθυγράμμισης. Πράγματι, ο αλγόριθμος που προκύπτει συγκλίνει τετραγωνικά (ενώ ο ICP συγκλίνει γραμμικά) και σε πεπερασμένο αριθμό βημάτων. Στο ίδιο άρθρο ο PLICP συγκρίνεται με τους ICP, IDC και MB-ICP, και διαπιστώνεται ότι είναι ανώτερος ως προς την ακρίβεια, τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση (περισσότερες από τρεις φορές λιγότερο), και στο χρόνο εκτέλεσης (περισσότερο από 40 φορές λιγότερο). Η διαισθητική εξήγηση πίσω από αυτή την αύξηση της ακρίβειας είναι ότι η μετρική σημείου-προς-γραμμή προσεγγίζει την πραγματική απόσταση επιφάνειας καλύτερα από τη μετρική σημείο-προς-σημείο. Ωστόσο, ειδικά σε αντίθεση με την MB-ICP, ο PLICP είναι τόσο επιρρεπής σε σφάλματα όσο αυξάνει η απόσταση θέσης και η περιστροφή μεταξύ των στάσεων από όπου ελήφθησαν οι μετρήσεις. Παρ' όλα αυτά ο αλγόριθμος PLICP έχει υιοθετηθεί ευρέως λόγω της αυξημένης του ακρίβειας ανάμεσα στις παραλλαγές του ICP, και της διαθεσιμότητας του πηγαίου κώδικα της υλοποίησής του.

Ο ICP και οι παραλλαγές του, ωστόσο, παρουσιάζουν διακυμάνσεις στις επιδόσεις τους [DAM17], οι οποίες ορίζονται από το επίπεδο θορύβου που φέρουν οι μετρήσεις εισόδου, την επιλογή της εκ-των-προτέρων υπόθεσης για τον μετασχηματισμό εξόδου, και τη διαμόρφωση των τιμών των παραμέτρων που διέπουν την απόκρισή τους. Για τους λόγους αυτούς, καθώς και για λόγους ευρωστίας, η έρευνα πάνω στις μεθόδους ευθυγράμμισης με τη χρήση αντιστοιχίσεων μετατοπίστηκε από προσεγγίσεις βασισμένες στην εύρεση αντιστοιχίσεων από-σημείο-προς-σημείο ή σημείο-προς-γραμμή σε χαρακτηριστικά-προς-χαρακτηριστικά (feature-to-feature). Συνήθως χρησιμοποιούμενα χαρακτηριστικά για αναγνώριση είναι τα ευθύγραμμα τμήματα [XLX; Moh+17; Wen+18], οι γωνίες [Wan+18], χαρακτηριστικά SIFT [Li+16], ή, ιδίως τα τελευταία χρόνια, χαρακτηριστικά που εξάγονται μέσω της χρήσης τεχνικών βαθιάς μάθησης (deep learning) [Li+17; LW20]. Παράλληλα, και για λόγους ανεξαρτησίας από τυχαία χαρακτηριστικά ή προσαρμογής των μεθόδων σε συγκεκριμένες συνθήκες, αναπτύχθηκε έρευνα γύρω από μεθόδους που εξάγουν ή εκμεταλλεύονται μαθηματικές ιδιότητες από μετρή-

σεις αποστάσεων, ή που εξετάζουν το πρόβλημα της ευθυγράμμισης σαρώσεων ως πρόβλημα βελτιστοποίησης. Παραδείγματα είναι οι τεχνικές βασισμένες στην συσχέτιση (correlation) [Ols09; Ols15; Kon+16], και στη θεωρία πιθανοτήτων. Μεταξύ των τελευταίων, ο NDT έχει κερδίσει δημοτικότητα λόγω της ρητής μοντελοποίησης των αβεβαιοτήτων μέτρησης και στάσης, και την επεκτασιμότητά του σε τρεις διαστάσεις [MLD07; Zho+17; WHZ18; CJK19; QJ19; Lee+20].

Ο Olson [Ols09] υποστηρίζει ότι τα σύγχρονα υπολογιστικά μηχανήματα είναι αρκετά ικανά υπολογιστικά ώστε οι μέθοδοι ευθυγράμμισης μετρήσεων να προχωρήσουν από τις ευρηστικές μεθόδους σε αναλυτικές μεθόδους μεγαλύτερης ακριβείας. Πράγματι, ο κύριος όγκος των μεθόδων ευθυγράμμισης δισδιάστατων μετρήσεων χρησιμοποιεί ευρηστικές μεθόδους οι οποίες είναι ατελείς και επιρρεπείς σε αστάθεια λόγω αδύναμων εκ-των-προτέρων υποθέσεων για τη στάση του ρομπότ. Αυτές οι ευρηστικές εφαρμόζονται για να προσδώσουν ταχύτητα εκτέλεσης, αντί να εστιάζουν πρώτα στην ποιότητα ευθυγράμμισης και στη συνέχεια στην ταχύτητα. Υποστηρίζει ότι η ευθυγράμμιση σαρώσεων είναι σπανίως κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, με την επιφάνεια της συνάρτησης κόστους να έχει πολλά τοπικά ελάχιστα, καθιστώντας έτσι έναν τοπικό βελτιστοποιητή ευάλωτο στο να παγιδευτεί σε αυτά. Ταυτόχρονα, καθίσταται δυσκολότερος ο εντοπισμός του ολικού ελαχίστου της συνάρτησης. Στο [Ols09] διατυπώνεται ένας πιθανοτικός αλγόριθμος ευθυγράμμισης δισδιάστατων μετρήσεων αποστάσεων ο οποίος παράγει αποτελέσματα υψηλότερης ποιότητας σε σχέση με αυτούς της βιβλιογραφίας, με κόστος τον πρόσθετο υπολογιστικό χρόνο εκτέλεσης, αν και η μέθοδος είναι σε θέση να εκτελεστεί σε πραγματικό χρόνο. Αντί να εμπιστεύεται έναν τοπικό αλγόριθμο αναζήτησης για την εύρεση του ολικού μεγίστου (ο μετασχηματισμός στερεού σώματος που μεγιστοποιεί την πιθανότητα να έχει παρατηρηθεί η δεύτερη μέτρηση), ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκτελεί αναζήτηση σε ολόκληρο το χώρο των πιθανών μετασχηματισμών. Η περιοχή αυτή προκύπτει από μια εκ των προτέρων πιθανότητα, η οποία με τη σειρά της προκύπτει από οδομετρικές μετρήσεις. Η μέθοδος που παρουσιάζεται με βάση τη συσχέτιση αποδεικνύεται ότι είναι πολύ ακριβής και εύρωστη στην αβεβαιότητα της στάσης του αισθητήρα.

Η Πολική Ευθυγράμμιση μετρήσεων με βάση την Περίμετρο (Perimeter-based polar scan matching—PB-PSM) [FCR15] είναι μια τεχνική που βασίζεται στην [DK05], η οποία ευνοεί τις ευθυγραμμίσεις με τη μεγαλύτερη περιμετρική επικάλυψη μεταξύ των δύο εισόδων,

ενώ χρησιμοποιεί μια διαδικασία ελαχιστοποίησης του κόστους, δηλαδή μια προσαρμοστική μέθοδο άμεσης αναζήτησης, η οποία καθίσταται δυνατή χάρη σε μία τεχνικής συσχέτισης δεδομένων γραμμικής πολυπλοκότητας. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους δεν απαιτείται ως είσοδος μία αρχική υπόθεση για τη στάση του ρομπότ, αν και, εάν αυτή παρέχεται, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ευρωστίας και τη μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων. Οι μετρήσεις εισόδου πρώτα φιλτράρονται, στη συνέχεια αναζητούνται συσχετίσεις σημείων ανάμεσά τους και, τέλος, προσδιορίζεται μια συνάρτηση κόστους η οποία κατασκευάζεται από τα συσχετιζόμενα ζεύγη σημείων. Το κόστος είναι ανάλογο της επικάλυψης μεταξύ των μετρήσεων, και η βέλτιστη λύση βρίσκεται με την ελαχιστοποίηση του χρησιμοποιώντας μια μορφή εξαντλητικής αναζήτησης. Η διαδικασία ελαχιστοποίησης εκτελείται πρώτα για την περιστροφή, ακολουθούμενη από τη μετατόπιση, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί επαρκής σύγκλιση.

Οι συγγραφείς του [Kon+16] ανέπτυξαν μια μέθοδο για την εξαγωγή του μετασχηματισμού μεταξύ δύο μετρήσεων με την κατασκευή μιας συνάρτησης συσχέτισης που αντικατοπτρίζει το βαθμό ευθυγράμμισής τους σύμφωνα με κάποιο όρισμα περιστροφο-μετατόπισης. Αυτό εξάγεται φυσικά μεγιστοποιώντας την εν λόγω συνάρτηση. Η μεθόδός τους έχει χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις και απευθύνεται σε ενσωματωμένες συσκευές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, που συναντώνται συνήθως σε πλατφόρμες ρομπότ κινητής βάσης. Σε σύγκριση με τον ICP είναι περίπου δέκα φορές ταχύτερη και έχει ευρύτερο εύρος λειτουργίας. Ωστόσο, τα διανύσματα μετασχηματισμού πάσχουν από μια σχετικά αδρή ανάλυση και ελαφρώς υψηλότερα σχετικά σφάλματα στάσης.

Στα [YZD18] και [Jia+18] εμφανίζονται οι μόνες μέθοδοι που δεν χρησιμοποιούν αντιστοιχίσεις: χρησιμοποιούν Phase-Only Matched Filtering (POMF) [QDD94] για τη λύση της εκτίμησης της περιστροφής και της μετατόπισης: η πρώτη σε μία διάσταση και η δεύτερη σε δύο διαστάσεις. Στην τελευταία, οι απαιτήσεις για λύση σε πραγματικό χρόνο και επαρκή ακρίβεια δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα λόγω της αδυναμίας εξισορρόπησης της υψηλής ανάλυσης πλέγματος (και συνεπώς υψηλής ακρίβειας) με τακτικές ενημερώσεις των μετρήσεων του αισθητήρα απόστασης. Η πρώτη αμβλύνει αυτόν τον περιορισμό λειτουργώντας σε μία διάσταση, αλλά η ακρίβεια των λύσεών της πάσχει από τις ίδιες αιτίες με την πρώτη, δηλαδή τα σφάλματα διακριτοποίησης. Ενώ η δεύτερη εξαρτάται από την ανάλυση του πλέγματος, η πρώτη εξαρτάται από την αμετάβλητη διακριτική γωνία του αισθητήρα (angle

increment). Και στις δύο περιπτώσεις επηρεάζεται τόσο η περιστροφική όσο και η μεταφορική συνιστώσα, αλλά καμία τεχνική αποσόβησης ή μετριάσμού δεν χρησιμοποιείται για τη μείωση των σφαλμάτων των συνιστωσών τους.

Τα τελευταία χρόνια ένας αριθμός νέων μεθόδων ευθυγράμμισης μετρήσεων έχει παρουσιαστεί, οι οποίες προσφέρουν βελτιώσεις σε καθιερωμένες μεθόδους ή εισάγουν νέες καινοτομίες. Στα [BBA20; BBA21] ο NDT χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του περιβάλλοντος του αισθητήρα προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αβεβαιότητες και οι περιορισμοί του. Ο μετασχηματισμός μεταξύ διαδοχικών στάσεων—η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης της εξίσωσης 1.4—δίνεται από μία τροποποιημένη προσέγγιση βελτιστοποίησης στοχαστικού σμήνους σωματιδίων που ενσωματώνει στη διατύπωσή της βάρη αδράνειας. Αυτά τα βάρη κωδικοποιούν την ορμή που εκφράζεται από δυνάμεις που έλκουν το σωματίδιο στη διατήρηση της τρέχουσας ταχύτητάς του, δυνάμεις που στρέφουν την κίνησή του προς την κατεύθυνση της ατομικά βέλτιστης στάσης του σωματιδίου, και δυνάμεις που το κατευθύνουν προς τη βέλτιστη στάση του σμήνους.

Σε αντίθεση όμως με τον NDT, ο οποίος υπολογίζει αντιστοιχίσεις λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση των θέσεων των σημείων από κατανομές κελιών πλέγματος, η VGICP [Koi+21] αθροίζει την κατανομή κάθε σημείου στο κελί και υπολογίζει αντιστοιχίσεις μεταξύ αυτών των κατανομών και των κατανομών της μέτρησης-στόχου, καθιστώντας έτσι τον VGICP μια προσέγγιση ευθυγράμμισης κατανομών-με-κατανομές. Αυτή η προσέγγιση αποδίδει έγκυρες κατανομές πλέγματος ακόμη και όταν υπάρχουν λίγα σημεία σε ένα κελί, με αποτέλεσμα έναν αλγόριθμο που είναι εύρωστος σε αλλαγές στην ανάλυση του πλέγματος. Ο VGICP επεκτείνει τον GICP [SHT09] προκειμένου να αποφεύγονται οι δαπανηροί υπολογισμοί αναζήτησης των πλησιέστερων γειτόνων, μειώνοντας παράλληλα τον χρόνο εκτέλεσής του.

Στο [YSC21] εισάγεται ένας πιστοποιήσιμος αλγόριθμος ευθυγράμμισης νεφών σημείων στις τρεις διαστάσεις. Ο μετασχηματισμός του δεύτερου νέφους προς το πρώτο γίνεται αρχικά αναίσθητος σε μεγάλο αριθμό ή ψευδείς αντιστοιχίες με την αναδιατύπωση του προβλήματος εύρεσης του μετασχηματισμού ευθυγράμμισης με τρόπο που χρησιμοποιεί ένα αποκομμένο κόστος ελαχίστων τετραγώνων. Η περιστροφή, η μετατόπιση, και η κλίμακα μεταξύ των δύο εισόδων αποσυνδέονται μεταξύ τους με τη χρήση ενός γενικού θεωρητικού πλαισίου γράφων, το οποίο επιτρέπει το κλάδεμα των ακραίων τιμών με την εύρεση της μέγιστης “κλίμακας” του γράφου. Η κλίμακα και η μετατόπιση αποδεικνύεται ότι είναι επιλύσιμες σε πολυωνυμικό

χρόνο μέσω ενός προσαρμοστικού συστήματος ψηφοφορίας, ενώ η περιστροφή επιλύεται με χαλάρωση σε ένα ημιπεριορισμένο πρόγραμμα (semi-definite programming).

5.2.2 Ευθυγράμμιση μετρήσεων δισδιάστατου αισθητήρα lidar με σαρώσεις χάρτη

Το έργο της ευθυγράμμισης μετρήσεων με εικονικές σαρώσεις (ενότητα 1.2.6) είναι υπο-πρόβλημα αυτού της ευθυγράμμισης μετρήσεων, καθώς το πρώτο κάνει την επιπρόσθετη παραδοχή ότι ο χάρτης του περιβάλλοντος είναι διαθέσιμος. Ως εκ τούτου το πρώτο πρόβλημα επιδέχεται λύσης από οποιονδήποτε αλγόριθμο που επιλύει το γενικό πρόβλημα. Παρ' όλα αυτά, έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός μεθόδων που προσπαθεί στοχευμένα να επιλύσει το υπο-πρόβλημα, μοχλεύοντας επιπρόσθετες πληροφορίες για την επίλυση του προβλήματος από τη γνώση του χάρτη.

Η ευθυγράμμιση μετρήσεων για τον εντοπισμό ρομπότ βάσει καθολικής αβεβαιότητας έχει διερευνηθεί στο [XLX]. Υποθέτοντας ότι το περιβάλλον λειτουργίας ενός ρομπότ είναι δομημένο και ότι ευθύγραμμα τμήματα είναι διάσπαρτα σε αυτό, ο αλγόριθμος των συγγραφέων, που ονομάστηκε Complete Line Segments (CLS), αντιστοιχίζει πλήρη ευθύγραμμα τμήματα που εξάγονται από τις δισδιάστατες μετρήσεις εισόδου σε πλήρη ευθύγραμμα τμήματα που εξάγονται από το χάρτη που αναπαριστά το περιβάλλον λειτουργίας του ρομπότ, παρέχοντας έτσι έναν ακριβή τρόπο εξαγωγής της συνολικής στάσης του ρομπότ στο χάρτη.

Στο [Lin+05] παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος ευθυγράμμισης πραγματικών μετρήσεων με εικονικές που εξάγει χαρακτηριστικά (features) για την επίλυση του προβλήματος. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ανιχνεύοντας χαρακτηριστικά των πραγματικών και των εικονικών σαρώσεων που είναι αναλλοίωτα κατά την περιστροφή και τη μετατόπιση, τα οποία είναι υπολογίσιμα μόνο σε πραγματικό χρόνο (όπως ακραίες τιμές στην πολική αναπαράσταση μίας μέτρησης). Στη συνέχεια δημιουργούνται αντιστοιχίσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών που εξήχθησαν. Η μετατόπιση μεταξύ των δύο σαρώσεων υπολογίζεται στη συνέχεια ως ο βέλτιστος μετασχηματισμός για την αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών της δεύτερης στα χαρακτηριστικά της πρώτης.

Στο [SWW09] παρουσιάζεται ένας στοιχειώδης στοχαστικός αλγόριθμος αναζήτησης που διορθώνει τα μεταφορικά και περιστροφικά σφάλματα του ρομπότ λόγω της αποκλίνουσας οδομετρίας. Αυτή η βοηθητική συμπεριφορά εντοπισμού και διόρθωσης της στάσης του

ρομπότ ενεργοποιείται κάθε φορά που μία μετρική σφάλματος διαπιστώνεται ότι είναι πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο. Η μετρική αυτή βασίζεται στη σχετική απόκλιση των ανιχνευόμενων αποστάσεων μεταξύ των ακτίνων μίας πραγματικής σάρωσης και μιας σάρωσης χάρτη. Για την αποφυγή της διόρθωσης της κίνησης του ρομπότ κατά τη διάρκεια της ευθυγράμμισης το ρομπότ θεωρείται ότι παραμένει ακίνητο καθ' όλη τη διάρκεια της. Επομένως, όποτε η μετρική σφάλματος βρίσκεται πάνω από το προκαθορισμένο όριο, ο αλγόριθμος σταματά την κίνηση του ρομπότ και επιλέγει μια τυχαία στάση στη γειτονιά της εκτιμώμενης στάσης του. Στη συνέχεια, πραγματοποιεί μία εικονική μέτρηση από αυτή τη στάση και υπολογίζει την τιμή της παραπάνω μετρικής. Εάν αυτή είναι χαμηλότερη από αυτήν που βρέθηκε για την προηγούμενη εκτιμώμενη στάση, ξεκινά μια νέα επανάληψη, αυτή τη φορά με επίκεντρο τη νέα στάση. Εάν όχι, ο αλγόριθμος συνεχίζει να μαντεύει στάσεις με τυχαίο τρόπο, μέχρι να βρει μία της οποίας το σφάλμα να είναι μικρότερο από το προηγούμενο. Η τελική στάση λαμβάνεται στη συνέχεια ως η πραγματική στάση του ρομπότ, επιτρέποντας τη διόρθωση της οδομετρίας. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με αυτή τη μέθοδο έδειξαν ότι ήταν σε θέση να διορθώσει ένα ακτινικό σφάλμα της τάξεως των 0.3 m στα 0.07 m, και ένα γωνιακό σφάλμα από 0.393 rad σε 0.01 rad.

Οι συγγραφείς του [ZZY11] χρησιμοποιούν την ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές σαρώσεις προκειμένου να βελτιώσουν τη λύση του συνολικού προβλήματος εντοπισμού της στάσης ενός ρομπότ. Υποθέτοντας ότι το περιβάλλον του ρομπότ είναι δομημένο και χωρίς κανενός είδους συμμετρίες, η μέθοδος προσδιορίζει τον προσανατολισμό του ρομπότ χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του HSM. Έχοντας βρει τον προσανατολισμό του ρομπότ, η μέθοδος εκτιμά τη θέση του ρομπότ υπολογίζοντας την πιθανότητα ότι κάθε θέση στο πλέγμα του χάρτη παρήγαγε την μέτρηση που προέρχεται από τον φυσικό αισθητήρα lidar. Αυτή η πιθανότητα εξάγεται με τη χρήση του μοντέλου τελικού σημείου δέσμης [TBF05]. Η θέση του ρομπότ είναι η θέση από την οποία αποτυπώθηκε η εικονική σάρωση που σημειώνει τη μέγιστη πιθανότητα.

Ομοίως, στα πλαίσια της επίλυσης του προβλήματος εκτίμησης της στάσης ενός ρομπότ βάσει καθολικής αυτή τη φορά αβεβαιότητας, η μέθοδος του [PP14] παράγει πρώτα το γεωμετρικό διάγραμμα Voronoi του δεδομένου δισδιάστατου χάρτη πλέγματος. Οι κόμβοι του θεωρούνται ως αρχικές υποθέσεις για τη θέση του ρομπότ. Από αυτούς τους κόμβους υπολογίζονται εικονικές μετρήσεις σε γωνιακό εύρος 2π με τη χρήση δεσμοβολής (raycasting)

στο χάρτη. Στη συνέχεια υπολογίζονται αντιστοιχίες μεταξύ κάθε εικονικής σάρωσης και της σάρωσης που καταγράφηκε από τον φυσικό αισθητήρα με τη χρήση μίας φασματικής τεχνικής [LH05]. Η τελευταία βρίσκει γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ των δύο σαρώσεων εισόδου κατά ζεύγη σημείων. Αυτές οι αντιστοιχίες χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη δημιουργία γεωμετρικών δισδιάστατων ιστογραμμάτων που κωδικοποιούν μια αίσθηση ομοιότητας μεταξύ της πραγματικής σάρωσης και όλων των εικονικών σαρώσεων. Στη συνέχεια οι κόμβοι από τους οποίους αποτυπώθηκαν οι τελευταίες κατατάσσονται σύμφωνα με αυτό το μέτρο ομοιότητας, και ένα κατώφλι που βασίζεται στο συντελεστή συσχέτισης όλων των συνδυασμών των σαρώσεων χρησιμοποιείται για την εξαγωγή ενός υποσυνόλου υποψήφιων στάσεων. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται για να φιλτράρει γρήγορα όλες τις υποψήφιες στάσεις. Η τελική εκτίμηση στάσης είναι εκείνη που επιτυγχάνει τον μέγιστο αριθμό αντιστοιχούντων ζευγών.

Στο [Zha+17] ο χάρτης πλέγματος πληρότητας μετατρέπεται πρώτα σε μία μορφή χάρτη προσημασμένης καταλληλότητας (fitness map). Αυτός κωδικοποιεί σε κάθε κελί του την απόσταση του πλησιέστερου εμποδίου για μία δεδομένη εκτίμηση της θέσης του αισθητήρα. Μέσω του χάρτη καταλληλότητας οι μετρήσεις του αισθητήρα συσχετίζονται με το χάρτη του περιβάλλοντος χωρίς να εξάγονται χαρακτηριστικά από κανένα από τα δύο δεδομένα. Το πρόβλημα της εύρεσης της στάσης του αισθητήρα διατυπώνεται στη συνέχεια ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Εδώ χρησιμοποιείται βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων για την εξερεύνηση του χώρου στάσεων για την αναζήτηση της πιο πιθανής λύσης. Αυτό γίνεται με τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης καταλληλότητας. Για την περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας αναζήτησης, γίνεται μία σειρά ευθυγραμμίσεων της πραγματικής μέτρησης με εικονικές μετρήσεις από τις εκτιμήσεις της στάσης του αισθητήρα μέσω του ICP: από τις στάσεις των σωματιδίων που κατέχουν την κορυφαίες καταλληλότητες συλλαμβάνονται εικονικές σαρώσεις και αντιστοιχίζονται με την πιο πρόσφατη σάρωση-μέτρηση. Η εκτίμηση της στάσης που εξάγεται από τον αλγόριθμο είναι αυτή της οποίας η ενημερωμένη τιμή καταλληλότητας είναι η μέγιστη μεταξύ όλων των επεξεργασμένων σωματιδίων.

Αντίθετα, για την επίλυση του προβλήματος Π1, στα πλαίσια της εκτίμησης της στάσης αυτόνομων περνοφόρων ανυψωτικών μηχανημάτων, η μέθοδος που παρουσιάζεται στο [Vas+16] επιλύει την ευθυγράμμιση μετρήσεων με σαρώσεις σε δύο βήματα: Δεδομένης της εκτίμησης της στάσης ενός οχήματος, που γίνεται μέσω της χρήσης φίλτρου σωματιδίων με δειγματοληψία KLD (ενότητα 1.2.3), επιχειρείται η μείωση του σφάλματος της εκτίμησης

του προσανατολισμού της στάσης μέσω ευθυγράμμισης της πραγματικής και της εικονικής σάρωσης χρησιμοποιώντας μία παραλλαγή του ICP. Συγκεκριμένα, η ευθυγράμμιση πραγματοποιείται μέσω της ολοκληρωμένης, υψηλής ακρίβειας, αποδοτικής, και με τις καλύτερες επιδόσεις μέθοδο του PLICP. Τα ευρήματα των συγγραφέων δείχνουν ότι η βελτίωση της εκτίμησης της θέσης μέσω του ίδιου μηχανισμού και με τη χρήση του PLICP είναι ασταθής. Επομένως καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η χρήση της PLICP σε βιομηχανικές συνθήκες, όπου απαιτείται ακρίβεια χιλιοστών του μέτρου, προκειμένου να εξαχθεί η σχετική μετατόπιση μεταξύ των δύο σαρώσεων είναι επισφαλής και ακατάλληλη. Για αυτόν τον λόγο, δεδομένου ότι το το σφάλμα εκτίμησης του προσανατολισμού ενός οχήματος έχει μειωθεί σε μόλις 0.13° , το σφάλμα εκτίμησης θέσης διορθώνεται με επαναληπτική εκτέλεση ευθυγράμμισης μετρήσεων με εικονικές σαρώσεις, μέσω μίας διαδικασίας που εκτιμά το σφάλμα μετατόπισης μεταξύ των δύο με έναν επαναληπτικό τρόπο και μέσω μίας συνάρτησης του πρώτου όρου του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier της διαφοράς των δύο σημάτων-σαρώσεων.

Ένας παρόμοιος τρόπος ευθυγράμμισης παρουσιάζεται στο [Pen+18]. Αντί της χρήσης του PLICP οι συγγραφείς αναπτύσσουν έναν αλγόριθμο ευθυγράμμισης με τη χρήση του αλγορίθμου Gauss-Newton. Αυτή η ευθυγράμμιση πραγματοποιείται με κλιμακωτά αυξανόμενη ανάλυση του χάρτη από τον οποίον εξάγονται οι εικονικές μετρήσεις. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με ένα πραγματικό ρομπότ σε μη δομημένα περιβάλλοντα δείχνουν ότι η μέθοδός τους επιτυγχάνει κατά μέσο όρο ακρίβεια θέσης 0.017 m και μέση ακρίβεια προσανατολισμού 0.5° . Στα [CHM19] και [Liu+19] ο PLICP χρησιμοποιείται επιπλέον ως μέσο οδομετρίας κάθε φορά που μία μετρική σφάλματος οδομετρίας βρίσκεται να είναι μεγαλύτερη από ένα κατώτατο όριο. Ωστόσο, σε αντίθεση με τη μέθοδο του [Pen+18], η ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές μετρήσεις πραγματοποιείται με την αλυσιδωτή σύνδεση του PLICP με τον GPM [Cena] προκειμένου να μετριάσουν οι επιπτώσεις των μεγάλων γωνιακών σφαλμάτων του PLICP.

Η μέθοδος που παρουσιάζεται στο [BAJ19] εξετάζει από κοινού την οδομετρία, την ευθυγράμμιση δισδιάστατων μετρήσεων αισθητήρα lidar, και την ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές σαρώσεις χάρτη, για κτηματολογικές χρήσεις, και συγκεκριμένα για τον εντοπισμό αυτόνομων οχημάτων σε εξωτερικούς χώρους. Αυτές χρησιμοποιούνται ως περιορισμοί στην επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης γράφου που υπολογίζει την πιο πιθανή στάση του οχήματος δεδομένων των μετρήσεων αισθητήρα απόστασης. Όσον αφορά στα κτηματο-

λογικά σχέδια, τα μη κτιριακά αντικείμενα φιλτράρονται από την πραγματική παρατήρηση του αισθητήρα με τη χρήση μιας προσέγγισης διαχωρισμού και συγχώνευσης (split and merge), η οποία συνδυάζεται με σταθμισμένη άρμωση γραμμών (line fitting). Η μέτρηση εισόδου και αυτή που προκύπτει από την εκτιμώμενη στάση της στο χάρτη ευθυγραμμίζονται στη συνέχεια μέσω του GICP, και ο προκύπτων μετασχηματισμός στάσης προστίθεται στο γράφο εάν και μόνο εάν ο αλγόριθμος που τον παρήγαγε έχει συγκλίνει. Παράλληλα, στο ίδιο άρθρο εισάγεται μια μέθοδος για τη λύση της ασάφειας όσον αφορά στη διαμήκη θέση του οχήματος που προκύπτει σε περιβάλλοντα που προσομοιάζουν σε διαδρόμους.

Στο [Wan+21] η προτεινόμενη μέθοδος εντοπισμού της στάσης ενός οχήματος βάσει πεπερασμένης αβεβαιότητας χωρίζεται σε δύο φάσεις: μια offline και μια online. Κατά τη διάρκεια της πρώτης ο χάρτης χωρίζεται σε ένα δισδιάστατο πλέγμα καθορισμένης ανάλυσης. Στη συνέχεια δημιουργείται μια υπογραφή θέσης, η οποία είναι αναλλοίωτη σε περιστροφές, για κάθε εικονική πανοραμική σάρωση που λαμβάνεται από κάθε διασχίσιμο κελί του χάρτη. Όλες οι προκύπτουσες υπογραφές εισάγονται στη συνέχεια σε μια αναζήτηση δένδρου ANN. Στη δεύτερη φάση, για κάθε εισερχόμενη πραγματική μέτρηση παράγεται η υπογραφή της με τον ίδιο τρόπο όπως και κατά την πρώτη φάση. Στη συνέχεια η υπογραφή χρησιμοποιείται για την ανάκτηση των γειτονικών υποψήφιων θέσεων από το δένδρο αναζήτησης: η θέση της εκτίμησης στάσης είναι εκείνη η θέση της οποίας η υπογραφή της εικονικής μέτρησης είναι ο πλησιέστερος γείτονας της υπογραφής της πραγματικής μέτρησης. Για να ληφθεί ο προσανατολισμός της στάσης του ρομπότ δημιουργείται μια εικονική σάρωση από την εκτιμώμενη θέση και η οποία ευθυγραμμίζεται με την πανοραμική μέτρηση μετά από βήματα προεπεξεργασίας και προ-ευθυγράμμισης. Η γωνιακή ευθυγράμμιση πραγματοποιείται σε βήματα μίας μοίρας και ο προσανατολισμός του ρομπότ είναι αυτός που καταγράφει την ελάχιστη σχετική εντροπία μεταξύ της εικονικής και της πραγματικής μέτρησης.

5.3 Μεθοδολογία ελάττωσης σφάλματος εκτίμησης στάσης

5.3.1 Μέσω επιλογής σωματιδίων

Έστω ένα ρομπότ κινητής βάσης του πεδίου εφαρμογής ΠΕ. Τα φίλτρα σωματιδίων διατηρούν την εκτίμηση της στάσης του σε κάθε χρονικό βήμα t , $\hat{x}_t(x, y, \theta)$, εντός ενός χάρτη \mathbf{M} , με τη μορφή ενός συνόλου από “σωματίδια”, δηλαδή τυχαία δείγματα από την κατανομή πιθανότητας $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{z}_t, \mathbf{M})$. Εδώ \mathbf{z}_t είναι το διάνυσμα παρατηρήσεων, οι οποίες ανιχνεύονται τη χρονική στιγμή t από το ρομπότ μέσω της χρήσης των αισθητήρων του, και οι οποίοι, στα συμφραζόμενα της παρούσας διατριβής αποτελούνται αποκλειστικά από έναν δισδιάστατο αισθητήρα αποστάσεων τύπου lidar. Η αναπαράσταση της κατανομής $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{z}_t, \mathbf{M})$ από ένα σύνολο δειγμάτων οφείλεται στην ουσιαστική δυϊκότητα μεταξύ των δύο [SG92].

Αυτή η ιδιότητα των φίλτρων σωματιδίων τους επιτρέπει την ικανότητα αναπαράστασης πολυτροπικών (multi-modal) κατανομών—μια προϋπόθεση για τον εντοπισμό της στάσης του ρομπότ βάσει καθολικής αβεβαιότητας—αλλά, με την ίδια λογική, καθιστά ασαφή την απάντηση στο ερώτημα του συνδυασμού όλων των πιθανών υποθέσεων (κάθε σωματίδιο εκφράζει μια διακριτή υπόθεση για την κατάσταση του ρομπότ εντός του \mathbf{M}) μέσω του υπολογισμού μιας ενιαίας εκτίμησης της στάσης του ρομπότ. Στα φίλτρα Kalman, σε αντίθεση, τα οποία είναι αυστηρά μονοτροπικοί (uni-modal) εκτιμητές, για την εκτίμηση του φίλτρου αρκεί το διάνυσμα της στάσης και η συνδιακύμανση της για τον υπολογισμό της εκτίμησης της κατάστασης \mathbf{x}_t [May79]. Αντιθέτως, στα φίλτρα σωματιδίων δεν υπάρχει μία ενιαία λύση κλειστής μορφής για αυτό το πρόβλημα. Η επικρατούσα προσέγγιση για τον υπολογισμό της εκτιμώμενης στάσης και της διακύμανσης είναι έμμεση, και υποθέτει την ταυτοποίηση μέσα στην κατανομή των σωματιδίων της υποκατανομής με το μεγαλύτερο συνολικό βάρος, τον υπολογισμό του σταθμισμένου κέντρου της, και στη συνέχεια τον υπολογισμό της διακύμανσης γύρω από αυτό. Στην περίπτωση όπου η εκτίμηση έχει συγκλίνει και η κατανομή έχει γίνει μονοτροπική, αυτή η προσέγγιση είναι ισοδύναμη με τη εξαγωγή της μέσης τιμής των εκτιμήσεων όλων των σωματιδίων σταθμισμένη με το ατομικό βάρος του καθενός.

Η βιβλιογραφία σχετικά με την εξαγωγή της τελικής εκτίμησης στάσης ενός φίλτρου σωματιδίων με βάση κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τους είναι μάλλον ισχνή: μόνο τα

[LCV10] και [CV13] επικεντρώνονται σε αυτό το έργο στα συμφραζόμενα των ανθρωποειδών ρομπότ, λόγω της ανάγκης ελάττωσης του αρκούντως υψηλού σφάλματος εκτίμησης της στάσης τους, η οποία προκύπτει από τη χρήση μικρών σε μέγεθος και θορυβωδών αισθητήρων. Πρώτα, τη χρονική στιγμή t προσδιορίζουν το σωματίδιο με το μεγαλύτερο βάρος μέσα σε συγκεκριμένα όρια μεταφορικής και περιστροφικής απόστασης από την εκτίμηση της στάσης τη χρονική στιγμή $t-1$. Οι συγγραφείς εκτελούν την επιλογή με αυτόν τον τρόπο προκειμένου να αμβλυνθεί η ασυνέχεια της εκτίμησης της στάσης στο χώρο. Στη συνέχεια η τελική στάση υπολογίζεται ως το κεντροειδές όλων των σωματιδίων εντός μιας προκαθορισμένης ακτίνας γύρω από αυτό το σωματίδιο, εάν το βάρος της συστάδας τους ξεπερνά ένα κατώφλι βάρους. Ωστόσο, εάν η τιμή του είναι μικρότερη από το κατώφλι, η τελική εκτίμηση του φίλτρου εξάγεται ως το σωματίδιο με το μεγαλύτερο βάρος. Στη συνέχεια θα αποδείξουμε ότι αυτή η δεύτερη απόφαση, ενώ διαισθητικά ορθή, στην πραγματικότητα δεν είναι σοφή και, επομένως, δεν αποτελεί βιώσιμη λύση για επέκταση σε άλλες συνθήκες πέρα από τα πλαίσια αυτών των δύο έργων.

Στα φίλτρα σωματιδίων κάθε σωματίδιο χαρακτηρίζεται από έναν παράγοντα βαρύτητας, ο οποίος ονομάζεται “βάρος” του κάθε σωματιδίου. Το βάρος w_t^i ενός σωματιδίου i τη χρονική στιγμή t ποσοτικοποιεί την πιθανότητα το ρομπότ να έχει παρατηρήσει τις πραγματικές μετρήσεις z_t από την εκτιμώμενη στάση του σωματιδίου $\hat{x}_t^i(x_i, y_i, \theta_i)$. Αυτό σημαίνει ότι, δεδομένου ενός χάρτη M πιστότητας στη λειτουργική κατάσταση του περιβάλλοντος, όσο πιο ακριβής είναι η εκτίμηση της στάσης του ρομπότ $\hat{x}_t^i(x_i, y_i, \theta_i)$, τόσο πιο κοντά είναι στην πραγματική του στάση $x_t(x, y, \theta)$, και επομένως τόσο μεγαλύτερη είναι η συμφωνία των πραγματικών μετρήσεων z_t και των προβλεπόμενων μετρήσεων \hat{z}_t^i . Επομένως, θεωρητικά, υπάρχει μια άμεση δυσαναλογία μεταξύ του σφάλματος εκτίμησης ενός σωματιδίου (η απόκλιση των εκτιμώμενης στάσης από την πραγματική της τιμή) και της τιμής του βάρους του: όσο μικρότερο είναι το σφάλμα εκτίμησης της στάσης του, τόσο μεγαλύτερο είναι το βάρος του, και αντίστροφα.

Αυτό το τελικό συμπέρασμα, σε αντιδιαστολή με την κυρίαρχη προσέγγιση εξαγωγής της εκτίμησης του φίλτρου, αποτέλεσε το κίνητρό μας για τη διερεύνηση της εξαγωγής της εκτίμησης της στάσης του μέσω άλλων μεθόδων από την επικρατούσα. Θεωρητικά, λοιπόν, θα περιμέναμε ότι η επιλογή σωματιδίων με υψηλό βάρος (που ισοδυναμεί με την απόρριψη σωματιδίων με χαμηλό βάρος—σωματίδια των οποίων η εκτίμηση της στάσης εξηγεί τις με-

τρήσεις z_t με λιγότερο ικανοποιητικό τρόπο σε σύγκριση με άλλα σωματίδια του πληθυσμού) για τον υπολογισμό της σύνθετης εκτίμησης του φίλτρου θα είχε ως αποτέλεσμα καλύτερες εκτιμήσεις στάσης, δηλαδή εκτιμήσεις με μικρότερο σφάλμα για τη στάση ρομπότ σε κάθε χρονικό βήμα. Δεδομένου ότι το βάρος ενός σωματιδίου είναι ένα καθορισμένο, ποσοτικοποιήσιμο, και οριστικό μέτρο της ευθυγράμμισης των μετρήσεων των αισθητήρων και των αναμενόμενων μετρήσεων τους, και δεδομένου ότι η τιμή που αποδίδεται στο βάρος ενός σωματιδίου γίνεται με αναλογικό τρόπο, όλες οι μέθοδοι επιλογής σωματιδίων για την εξαγωγή της εκτίμησης του φίλτρου που θα καλύψουμε είναι βασισμένες στο βάρος. Περιορίζουμε τις μεθόδους επιλογής μας σε προσεγγίσεις με βάση το βάρος διότι στα πλαίσια των φίλτρων σωματιδίων το βάρος ενός σωματιδίου είναι ο μοναδικός δείκτης της ποιότητας (του σφάλματος) της εκτίμησής του.

Έστω \mathbf{P}_t το σύνολο του πληθυσμού των σωματιδίων τη χρονική στιγμή t . Τότε $\mathbf{P}_t \equiv \{(\hat{x}_t^i, w_t^i)\}, i = 0, 1, \dots, |\mathbf{P}_t| - 1$, όπου \hat{x}_t^i είναι η εκτίμηση του i -οστού σωματιδίου της στάσης του ρομπότ τη χρονική στιγμή t , και w_t^i είναι το βάρος που σχετίζεται με το σωματίδιο i την ίδια χρονική στιγμή. Επιπλέον, έστω $\bar{W}_t = \frac{1}{|\mathbf{P}_t|} \sum_{i=0}^{|\mathbf{P}_t|-1} w_t^i$ το μέσο βάρος των σωματιδίων του \mathbf{P}_t . Στη συνέχεια, διακρίνουμε δύο διακριτές μεθόδους επιλογής: (α) απόλυτες και (β) σχετικές μεθόδους επιλογής. Στις μεθόδους απόλυτης επιλογής ένα απόλυτο ποσοστό του πληθυσμού \mathbf{P}_t καλείται να ψηφίσει για την εκτίμηση της στάσης του ρομπότ τη χρονική στιγμή t . Η επικρατούσα μέθοδος υπολογισμού της στάσης είναι μια ειδική περίπτωση της απόλυτης επιλογής, όπου το ποσοστό των επιλεγμένων σωματιδίων είναι 100%. Στις μεθόδους σχετικής επιλογής τα σωματίδια επιλέγονται για ψηφοφορία υπό την προϋπόθεση ικανοποίησης κάποιας σχέσης των βαρών τους w_t^i με το συνολικό βάρος του πληθυσμού \bar{W}_t : για παράδειγμα, μόνο τα σωματίδια των οποίων $w_t^i > \bar{W}_t$ επιλέγονται να έχουν λόγο στην συνολική εκτίμηση της στάσης του φίλτρου. Ο αλγόριθμος I απεικονίζει σε ψευδοκώδικα τη διαδικασία επιλογής σωματιδίων για την εξαγωγή της τελικής εκτίμησης του φίλτρου.

Στον αλγόριθμο I, αν επιλεγεί ο απόλυτος τρόπος επιλογής (absolute), ο πληθυσμός σωματιδίων ταξινομείται πρώτα με βάση το βάρος του καθενός σε φθίνουσα σειρά (γραμμή 4), και στο ταξινομημένο σύνολο σωματιδίων δίνεται η ονομασία \mathbf{P}'_t . Στη συνέχεια τα πρώτα $\lceil \text{fraction} \cdot |\mathbf{P}'_t| \rceil$ σωματίδια λαμβάνονται υπόψη προς υπολογισμό της τελικής εκτίμησης, όπου το $\text{fraction} \in [0, 1]$ εκφράζει την αναλογία των σωματιδίων που θα ληφθούν υπόψη (γραμμή 6)—η σύμβαση $\text{fraction} = 0$ προορίζεται για την επιλογή του σωματιδίου με το μεγαλύτερο

Αλγόριθμος I particle_selection

Input: $P_t \equiv \{(\hat{x}_t^i, w_t^i)\}$, selection_manner, fraction

Output: pose estimate \hat{x}_t

```

1: assert selection_manner = ABSOLUTE | | RELATIVE
2: assert fraction  $\in [0, 1]$ 
3: if selection_manner = ABSOLUTE then
4:    $P'_t \leftarrow \text{sort } P_t \text{ by weight } w_t^i, \text{ descending}$ 
5:   if fraction > 0.0 then
6:      $P''_t \leftarrow P'_t[0 : \lfloor \text{fraction} \cdot |P'_t| \rfloor - 1]$ 
7:   else
8:      $P''_t \leftarrow P'_t[0]$ 
9:   end if
10: end if
11: if selection_manner = RELATIVE then
12:    $\overline{W}_t \leftarrow \frac{1}{|P_t|} \sum_{i=0}^{|P_t|-1} w_t^i$ 
13:    $P''_t \leftarrow \hat{x}_t^i : w_t^i > \overline{W}_t$ 
14: end if
15:  $\hat{x}_t \leftarrow (0, 0, 0)$ 
16: for  $j = 0 : |P''_t| - 1$  do
17:    $\hat{x}_t \leftarrow \hat{x}_t + P''_t[j].w_t \cdot P''_t[j].\hat{x}_t$ 
18: end for
19: return  $\hat{x}_t$ 

```

βάρος μεταξύ όλων του συνόλου P_t . Ο συμβολισμός $P'_t[a]$ δηλώνει το σωματίδιο του P'_t με δείκτη a , και ο συμβολισμός $P'_t[a:b]$ δηλώνει το σύνολο των σωματιδίων που αποτελούνται από τα στοιχεία του P'_t από τον δείκτη a μέχρι και τον δείκτη b . Από την άλλη πλευρά, αν επιλεγεί η σχετική επιλογή (relative), πρώτα υπολογίζεται το μέσο βάρος του πληθυσμού (γραμμή 12), και στη συνέχεια όλα τα σωματίδια των οποίων το βάρος υπερβαίνει αυτή την τιμή περιλαμβάνονται στο σύνολο σωματιδίων που μεταφέρεται εμπρός (γραμμή 13). Και στις δύο περιπτώσεις το σύνολο P''_t περιλαμβάνει τις υποθέσεις του συνόλου σωματιδίων που έχουν επιλεγεί για να προσδώσουν την τελική εκτίμηση του φίλτρου. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο σταθμισμένος κατά βάρος μέσος όρος των εκτιμήσεων στάσης αυτού του συνόλου (γραμμή 17) και η προκύπτουσα στάση θεωρείται ως η έξοδος της λειτουργίας επιλογής σωματιδίων. Ο συμβολισμός $P''_t[j].x$ για το σύνολο σωματιδίων P''_t δηλώνει τη συνιστώσα x (δηλαδή το βάρος w_i ή την εκτίμηση της στάσης \hat{x}_i) του στοιχείου του P''_t στο δείκτη j για τη χρονική στιγμή t .

Ένα εύλογο ερώτημα που μπορεί να τεθεί είναι γιατί δεν κρατάμε το συνολικό μέγεθος του πληθυσμού στο κλάσμα επιλογής $\text{fraction} \cdot |P_t|$ ώστε να απαλλαγούμε συνολικά από τον μηχανισμό επιλογής. Αυτό θα ήταν δυνητικά καταστροφικό, καθώς η διατήρηση ενός χαμηλότερου αριθμού σωματιδίων θα αύξανε τον κίνδυνο αποστέρησης σωματιδίων (particle deprivation) [TBF05]. Έπειτα, καθώς το μέγεθος του πληθυσμού αυξάνει, αυξάνεται και η πιστότητα της εκ των υστέρων πιθανότητας εκτίμησης της στάσης του ρομπότ (εξίσωση 1.2) ως προς την αληθινή του στάση. Αντίστροφα, όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των σωματιδίων του φίλτρου τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα απόκλισης της εκτίμησης του. Με τον παραπάνω τρόπο προσέγγισης προφυλασσόμαστε και από τη στέρηση σωματιδίων (διατηρώντας ένα αυξημένο μέγεθος του πληθυσμού) και ταυτόχρονα χρησιμοποιούμε ένα καθεστώς επιλογής ώστε το σύστημα να αυξάνει την ακρίβειά του χωρίς να θυσιάζει την ποιότητα/ακρίβεια της εκ των υστέρων πιθανότητας εκτίμησης της στάσης του ρομπότ ή την ευστάθεια του φίλτρου.

Αν και θεωρητικά οι παραπάνω μέθοδοι επιλογής είναι ορθές (δεδομένου ότι η επιλογή βαρύτερων σωματιδίων, η οποία απορρίπτει τα σωματίδια με περισσότερο ανακριβή εκτίμηση, βελτιώνει την ποιότητα της συνολικής εκτίμησης), στην πράξη (ενότητα 5.4.3) παρατηρούμε ποικίλα ή δυσμενή αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να αποδοθούν (α) στην απώλεια συνολικής πληροφορίας, (β) στον υψηλότερο βαθμό επιρροής που αποκτούν τα σωματίδια όταν

η πληθικότητα του συνόλου ψηφοφορίας μειώνεται, ή/και (γ) στην απομάκρυνση σωματιδίων με σχεδόν συμμετρικές θέσεις που υπάρχουν στον πληθυσμό λόγω της τυχαιότητας που εισάγεται κατά τη διάρκεια του φίλτρου κατά τη φάση πρόβλεψης (prediction stage) του φίλτρου.

Στην επόμενη ενότητα αιτιολογούμε πώς το χάσμα μεταξύ της εκτιμώμενης στάσης του MCL και της πραγματικής στάσης μπορεί να μειωθεί με τον επιπρόσθετο τρόπο της ευθυγράμμισης εικονικών μετρήσεων που λαμβάνονται εντός του χάρτη M από την πρώτη με πραγματικές μετρήσεις που λαμβάνονται από τον φυσικό αισθητήρα από την δεύτερη.

5.3.2 Μέσω ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη

Στην παρούσα μελέτη επιδιώκουμε να βελτιώσουμε την εκτίμηση ενός φίλτρου σωματιδίων με διάφορα μέσα: στην προηγούμενη ενότητα αναλύσαμε θεωρητικά τον τρόπο με τον οποίο η επιλογή σωματιδίων με μεγάλη βαρύτητα για τον προσδιορισμό της στάσης εξόδου του φίλτρου στρέφει το φίλτρο στον υπολογισμό ακριβέστερων εκτιμήσεων. Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε πώς η ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές μετρήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσθετικά στο φίλτρο σωματιδίων (ή σε οποιαδήποτε άλλη τεχνική εντοπισμού μέσω της χρήσης δισδιάστατου αισθητήρα lidar), έτσι ώστε η τελική εκτίμηση του συστήματος να πλησιάζει περισσότερο στην αληθινή στάση του ρομπότ. Αυτή η τεχνική είναι εμπνευσμένη από το [Vas+16] και καλύπτεται λεπτομερέστερα εδώ για τους σκοπούς σχολαστικότητας και πληρότητας.

Έστω ότι ένα ρομπότ του πεδίου εφαρμογής ΠΕ φέρει έναν δισδιάστατο αισθητήρα αποστάσεων τύπου lidar, και ότι λειτουργεί σε ένα καθορισμένο περιβάλλον το οποίο αναπαρίσταται μέσω ενός χάρτη πλέγματος κατάληψης M . Έστω επίσης ότι τη χρονική στιγμή t το φίλτρο σωματιδίων έχει εξάγει μια εκτιμώμενη στάση $\hat{x}_t(x, y, \theta)$ χρησιμοποιώντας κάποια μέθοδο επιλογής σωματιδίων, και ότι μία μέτρηση S_t^R μέσω του αισθητήρα, η οποία έχει ληφθεί από την πραγματική στάση του ρομπότ, είναι επίσης διαθέσιμη τη χρονική στιγμή t . Τότε, αν συλλάβουμε μια εικονική σάρωση S_t^V από την εκτιμώμενη στάση \hat{x}_t , η οποία είναι το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της αρχής λειτουργίας του πραγματικού αισθητήρα αλλά αυτή τη φορά στο χάρτη M για το ίδιο γωνιακό εύρος και μέγιστη αισθητή απόσταση του, είναι δυνατόν με την ευθυγράμμιση των δύο σαρώσεων (ενότητα 1.2.6) να προκύψει ο

μετασχηματισμός \mathbf{q}_t ο οποίος, αν εφαρμοστεί στην εκτίμηση $\hat{\mathbf{x}}_t$, θα την κάνει συμπίπτει με την πραγματική στάση \mathbf{x}_t .

Ωστόσο, λόγω (α) της παρουσίας θορύβου στις μετρήσεις \mathcal{S}_t^R του αισθητήρα, (β) της αναπόφευκτης αναντιστοιχίας μεταξύ του χάρτη \mathbf{M} του περιβάλλοντος λειτουργίας και του ίδιου του περιβάλλοντος, (γ) της διακριτής φύσης του χάρτη (ο \mathbf{M} είναι ένας χάρτης πλέγματος πεπερασμένης ανάλυσης), και (δ) του γεγονότος ότι ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος ευθυγράμμισης δεν είναι απαραίτητα ένας τέλειος τελεστής, αναμένουμε ότι αυτό που πραγματικά θα συμβαίνει είναι ότι η εφαρμογή του \mathbf{q}_t στην εκτίμηση της στάσης $\hat{\mathbf{x}}_t$ θα μετακινήσει την εκτίμηση αυτή σε μία γειτονιά της πραγματικής στάσης και όχι ακριβώς σε αυτήν. Το προκύπτον σφάλμα εκτίμησης εξαρτάται από ένα πλήθος παραμέτρων, μεταξύ άλλων, από την ποιότητα της οδομετρίας του ρομπότ, την αντιστοιχία του κινηματικού μοντέλου του ρομπότ με την πραγματική δυναμική του, το μέγεθος του θορύβου του αισθητήρα, την ανάλυση του χάρτη, την ακρίβεια του αλγορίθμου ευθυγράμμισης στην εκτίμηση του μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συνόλων σημείων, το μέγεθος του πληθυσμού των σωματιδίων, την κατάσταση του χάρτη σε συνδυασμό με την ικανότητα του αλγορίθμου ευθυγράμμισης στο να απορρίπτει ακραίες ή μη-αντιστοιχούσες τιμές, το μέγιστο εύρος του αισθητήρα σάρωσης, καθώς και το γωνιακό του εύρος.

Ανάλογα με τη διαμόρφωση του MCL, θα θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε έναν αλγόριθμο ευθυγράμμισης που να μπορεί να συμβαδίζει με τη συχνότητα των εκτιμήσεων του φίλτρου, δηλαδή να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο ως προς το ρυθμό ανανέωσής τους. Ο αλγόριθμος που επιλέγουμε είναι ο PLICP [Cen08] για τους ακόλουθους λόγους: (α) ξεπερνά τους τελευταίους τεχνολογίας αλγορίθμους ευθυγράμμισης σε ακρίβεια, αριθμό επαναλήψεων μέχρι τη σύγκλιση, και μέσο χρόνο εκτέλεσης, και (β) διαθέτει μία πληθώρα ρυθμιστικών παραμέτρων, οι οποίες μπορούν να προσαρμοστούν στον χρησιμοποιούμενο αισθητήρα και γενικότερα στα χαρακτηριστικά των ορισμάτων του προβλήματος ευθυγράμμισης.

Στην επόμενη ενότητα αιτιολογούμε πώς το σφάλμα της εκτιμώμενης στάσης του MCL σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο ευθυγράμμισης πραγματικών και εικονικών σαρώσεων μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με την ανάδραση της εκτίμησης του συνολικού τους συστήματος πίσω στον πληθυσμό του φίλτρου σωματιδίων.

5.3.3 Μέσω ανάδρασης

Παρόλο που η εξαγόμενη από την τεχνική ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές σαρώσεις εκτίμηση \hat{x}' υποφέρει από τις παραπάνω πηγές σφάλματος, είναι, με βάση τη βιβλιογραφία (ενότητα 5.2.2), ακριβέστερη από την εκτίμηση \hat{x} που εξάγεται από τον MCL. Αυτό σημαίνει ότι το συνολικό σύστημα που αποτελείται από το φίλτρο σωματιδίων και τον αλγόριθμο ευθυγράμμισης κατέχει μια εκτίμηση την οποία αγνοεί το ίδιο το φίλτρο. Συνεπώς, καταλήγουμε ότι η εισαγωγή της εκτίμησης \hat{x}' στον πληθυσμό υποθέσεων του είναι επωφελής, και, στη βιβλιογραφία, αυτό επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

- Ο πρώτος τρόπος ανατροφοδότησης της βελτιωμένης εκτίμησης \hat{x}' στον MCL είναι η αρχικοποίησή του με αυτή την εκτίμηση. Αυτό σημαίνει ότι ο πληθυσμός σωματιδίων που διατηρείται από το φίλτρο δημιουργείται εκ νέου σε κάθε εκτέλεση, με τα σωματίδια να διασκορπίζονται γύρω από την \hat{x}' με προκαθορισμένη διακύμανση. Αυτή είναι η προσέγγιση που ακολουθείται στο [Vas+16], και θα αναφέρεται στο υπόλοιπο της παρούσας μελέτης ως **hard loop-closure**.
- Ο δεύτερος τρόπος είναι η εισαγωγή στον πληθυσμό των σωματιδίων μίας επιπρόσθετης διακριτής υπόθεσης που αντιπροσωπεύει την εκτίμηση \hat{x}' . Αυτή είναι η προσέγγιση που ακολουθείται στο [Pen+18], και θα αναφέρεται στο εξής ως **soft-1 loop-closure**.

Ένα από τα πιθανά προβλήματα μπορεί να δημιουργηθούν με τον πρώτο τρόπο ανάδρασης είναι ότι δεν μπορεί να είναι εύρωστος σε αποτυχίες εντοπισμού: εάν η έξοδος του αλγορίθμου ευθυγράμμισης σαρώσεων είναι ανακριβής (έστω μία φορά και για οποιοδήποτε μέγεθος σφάλματος), τότε το σύνολο του πληθυσμού του MCL θα αρχικοποιηθεί γύρω από αυτή τη στάση, με ενδεχόμενες καταστροφικές επιπτώσεις στον εντοπισμό της πραγματικής στάσης του ρομπότ: καθώς το σφάλμα εκτίμησης του αλγορίθμου ευθυγράμμισης μπορεί να είναι μη φραγμένο, η πρώτη ανακριβεία εκτίμησης (α) θα μεταφέρει την εκτίμηση αυτομάτως σε μία κατάσταση απόκλισης, (β) θα θέσει το ρομπότ και το περιβάλλον του σε πιθανό κίνδυνο (ενδέχεται να νομίζει ότι βρίσκεται ολοκληρωτικά αλλού από ότι βρίσκεται), και (γ) θα πρέπει να προκαλέσει εν τέλει τον πρόωρο τερματισμό της πλοήγησής του.

Επιπλέον, όσον αφορά στον δεύτερο τρόπο ανάδρασης, η εισαγωγή ενός σωματιδίου σε έναν πληθυσμό αρκετών εκατοντάδων σωματιδίων χρειάζεται περισσότερο χρόνο σύγκλισης

σε μικρότερα σφάλματα από ό,τι αν ένα μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού αντικαθίστατο από τη βελτιωμένη εκτίμηση. Συνεπώς, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι η εισαγωγή στον πληθυσμό των σωματιδίων της βελτιωμένης εκτίμησης με τη μορφή πλειάδας σωματιδίων θα καταστήσει τη σύγκλισή του πιο επιταχυνόμενη και βελτιωμένη σε σχέση με την εισαγωγή της μέσω ενός σωματιδίου (με επιφύλαξη για την περίπτωση όπου όλα τα σωματίδια αντικαθίστανται από πολλαπλά αντίγραφα της ίδιας εκτίμησης της στάσης—η επισφάλεια αυτής της προσέγγισης έγκειται στην απουσία της διακύμανσης του φίλτρου και στους πιθανούς κινδύνους που εγχυμονούνται για τον πρώτο τρόπο ανάδρασης).

Παρακινούμενοι από τις παραπάνω υποθέσεις, εισάγουμε μια υβριδική στρατηγική κλεισίματος του βρόχου, όπου η εκτίμηση \hat{x}' εισάγεται στον πληθυσμό των σωματιδίων ως *μια πληθώρα σωματιδίων*. Η αναλογία τους στο συνολικό τελικό πληθυσμό είναι σταθερή και έχει οριστεί εκ των προτέρων. Εδώ, υποθέτοντας ότι το μέγιστο μέγεθος του πληθυσμού είναι N_{max} , ότι το επιθυμητό μέγεθος του εισαγόμενου πληθυσμού σε σύγκριση με το μέγεθος του πληθυσμού μετά την εισαγωγή του είναι $q \in (0, 1)$, και ότι τη χρονική στιγμή t το μέγεθος του πληθυσμού είναι N_t , διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

- $N_t = N_{max}$

Όταν ο πληθυσμός βρίσκεται στη μέγιστη χωρητικότητά του, τα σωματίδια ταξινομούνται κατά φθίνουσα βαρύτητα, και τα χαμηλότερα $\lfloor qN_{max} \rfloor$ σωματίδια διαγράφονται, δίνοντας τη θέση τους σε ίσο αριθμό σωματιδίων, όλα κλώνους της εκτίμησης \hat{x}' . Είναι προφανές ότι $qN_{max}/N_{max} = q$.

- $N_t \leq (1 - q)N_{max}$

Σε αυτή την περίπτωση, δεν διαγράφονται σωματίδια και προστίθενται $\frac{q}{1 - q}N_t$ σωματίδια. Είναι εύκολο να δούμε ότι

$$\frac{\frac{q}{1 - q}N_t}{\frac{q}{1 - q}N_t + N_t} = \frac{qN_t}{qN_t + (1 - q)N_t} = \frac{qN_t}{N_t} = q$$

- $(1 - q)N_{max} < N_t < N_{max}$

Στην περίπτωση αυτή, ο πληθυσμός των σωματιδίων N_t ταξινομείται κατά φθίνουσα βαρύτητα, διαγράφονται τα χαμηλότερα $\lfloor N_t - (1 - q)N_{max} \rfloor$ σωματίδια, και $\lfloor qN_{max} \rfloor$ αντίγραφα της υπόθεσης που εξάγεται από την ευθυγράμμιση σαρώσεων εισάγονται

στο πληθυσμό. Και πάλι ο πληθυσμός που εισάγεται είναι, ως ποσοστό, q φορές το τελικό μέγεθος του πληθυσμού:

$$\frac{qN_{max}}{N_t - (N_t - (1 - q)N_{max}) + qN_{max}} = \frac{qN_{max}}{N_{max}} = q$$

Η προτεινόμενη στρατηγική ανάδρασης (α) μπορεί να κατευθύνει το σύστημα μακριά από την παγίδα ελαττωματικών εκτιμήσεων στάσης που εξάγονται από την ευθυγράμμιση σαρώσεων—κάτι αναπόφευκτο για την προσέγγιση *hard loop-closure*—με τη μη αντικατάσταση του συνόλου των σωματιδίων στο πληθυσμό του MCL, αλλά αντίθετα διατηρώντας ένα μέρος των καλύτερων εκτιμήσεών του (καλύτερων με την έννοια της υψηλότερης βαρύτητας) από τη μία επανάληψη του φίλτρου στην επόμενη, έτσι ώστε, ακόμη και αν η ευθυγράμμιση σαρώσεων παράγει μια αποκλίνουσα εκτίμηση, το φίλτρο να μπορεί να διατηρήσει την ευστάθεια του λόγω της διατήρησης των προηγούμενων εκτιμήσεων που βρίσκονται κοντά στην πραγματική στάση, και (β) μπορεί να επιταχύνει τη σύγκλιση και να διατηρήσει χαμηλότερα σφάλματα στάση εισάγοντας όχι μόνο ένα σωματίδιο—όπως στην περίπτωση της προσέγγισης *soft-1 loop-closure*—αλλά ένα πλήθος σωματιδίων χαμηλότερου σφάλματος εκτίμησης από αυτού του ίδιου του φίλτρου.

Η προτεινόμενη στρατηγική ανατροφοδότησης θα αναφέρεται στο εξής ως **soft- p loop-closure**, όπου το p εκφράζει ποσοστό: π.χ. στο καθεστώς κλεισίματος βρόχου *soft-50*, κάθε φορά που το φίλτρο σωματιδίων εξάγει ένα αποτέλεσμα στον PLICP, ο τελευταίος βελτιώνει την εκτίμησή του φίλτρου, και ο μηχανισμός ανάδρασης εισάγει—και ενδεχομένως διαγράφει—τόσα σωματίδια όσα απαιτούνται ώστε η τελική αναλογία των αντιγράφων της εξόδου του PLICP να είναι το 50% του τελικού συνολικού πληθυσμού του φίλτρου σωματιδίων. Ο όρος *soft-1 loop-closure* θα διατηρηθεί για την αναφορά στην αρχική ιδέα της εισαγωγής μόνο ενός σωματιδίου στον πληθυσμό του φίλτρου.

Η αλγοριθμική μορφή του μηχανισμού ανατροφοδότησης απεικονίζεται σε ψευδοκώδικα στον αλγόριθμο II, και η διαδικασία του μηχανισμού ανάδρασης απεικονίζεται σε μορφή μπλοκ στο σχήμα 5.2. Στον αλγόριθμο II οι ενδείξεις “HARD”, “SOFT_1”, “SOFT_P” είναι συντομογραφίες των τριών προαναφερθέντων τρόπων ανάδρασης. Η συντομογραφία “OPEN” εννοεί την έλλειψη ανάδρασης.

Αλγόριθμος Π feedback_selection

Input: $P_t \equiv \{(\hat{x}_t^i, w_t^i)\}$, q , \hat{x}_t' , feedback_manner

Output: P_{t+1}

```

1: assert
   feedback_manner  $\in$  {HARD, SOFT_1, SOFT_P, OPEN}
2: if feedback_manner = HARD then
   
$$P_{t+1} \leftarrow \overbrace{\{\hat{x}_t'\} \cup \{\hat{x}_t'\} \cup \dots \{\hat{x}_t'\}}^{N_{max}}$$

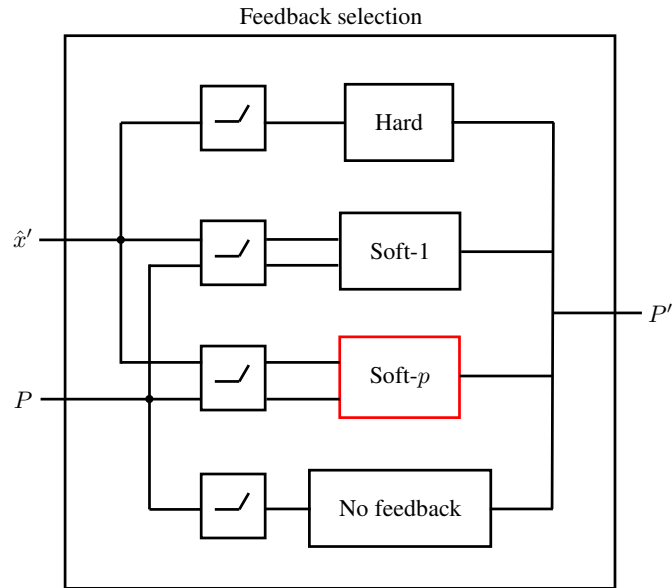
   Perturb  $P_{t+1}.\hat{x}_t^i$  according to MCL init params
3: end if
4: if feedback_manner = SOFT_1 then
   if  $|P_t| = N_{max}$  then
      $P_t \leftarrow$  Sort  $P_t$  by weight, ascending
     Delete  $P_t[0]$ 
   end if
    $P_{t+1} \leftarrow P_t \cup \hat{x}_t'$ 
6: end if
7: if feedback_manner = SOFT_P then
   assert  $q \in (0, 1)$ 
    $S \leftarrow \{\}$ 
   if  $|P_t| \leq (1 - q)N_{max}$  then
     
$$S \leftarrow \overbrace{\{\hat{x}_t'\} \cup \{\hat{x}_t'\} \cup \dots \{\hat{x}_t'\}}^{\left\lfloor \frac{q}{1-q} |P_t| \right\rfloor}$$

   else if  $|P_t| = N_{max}$  then
      $P_t \leftarrow$  Sort  $P_t$  by weight, ascending
     Delete  $P_t[0 : \lfloor qN_{max} \rfloor - 1]$ 
     
$$S \leftarrow \overbrace{\{\hat{x}_t'\} \cup \{\hat{x}_t'\} \cup \dots \{\hat{x}_t'\}}^{\lfloor qN_{max} \rfloor}$$

   else
      $P_t \leftarrow$  Sort  $P_t$  by weight, ascending
     Delete  $P_t[0 : \lfloor |P_t| - (1 - q)N_{max} \rfloor - 1]$ 
     
$$S \leftarrow \overbrace{\{\hat{x}_t'\} \cup \{\hat{x}_t'\} \cup \dots \{\hat{x}_t'\}}^{\lfloor qN_{max} \rfloor}$$

   end if
    $P_{t+1} \leftarrow P_t \cup S$ 
8: end if
9: if feedback_manner = OPEN then
    $P_{t+1} \leftarrow P_t$ 
10: end if
11: return  $P_{t+1}$ 

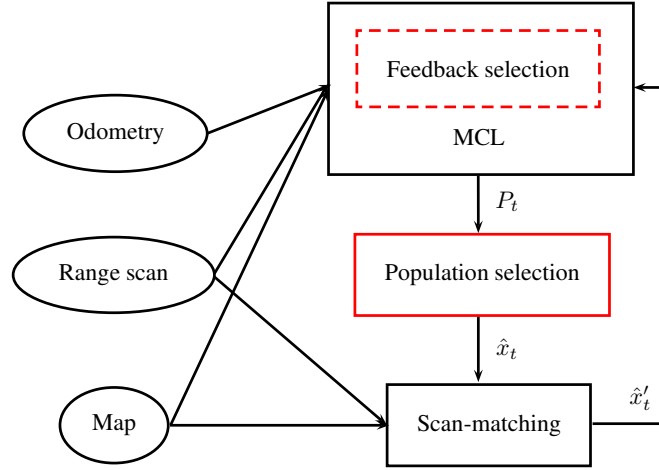
```



Σχήμα 5.2: Εσωτερικά στην τροποποιημένη έκδοση του MCL υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί και αμοιβαίως αποκλειόμενοι τρόποι ανατροφοδότησης. Με \hat{x}' συμβολίζεται η έξοδος της διαδικασίας ευθυγράμμισης σαρώσεων, με P ο πληθυσμός σωματιδίων του φίλτρου, και με P' ο πληθυσμός που εξάγεται από την εφαρμογή της ανατροφοδότησης. Το κόκκινο χρώμα χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τη συμβολή της προσέγγισής μας σε σχέση με την ανατροφοδότηση σε συστήματα φίλτρων σωματιδίων συνδυασμένα με ευθυγράμμιση σαρώσεων της τρέχουσας βιβλιογραφίας

5.3.4 Το ολικό σύστημα ελάττωσης του σφάλματος εκτίμησης

Η δομή του ολικού συστήματος ελάττωσης του σφάλματος εκτίμησης της στάσης ενός φίλτρου σωματιδίων απεικονίζεται στο σχήμα 5.3. Το προτεινόμενο συνολικό σύστημα είναι πιο ευέλικτο από έναν συνδυασμό φίλτρου σωματιδίων με δειγματοληψία KLD και ευθυγράμμιση μετρήσεων με σαρώσεις, καθώς αυτή είναι μία ειδική περίπτωση του προτεινόμενου συστήματος: επιλέγοντας 100% των σωματιδίων από τον πληθυσμό του MCL για την εξαγωγή της εκτίμησης της στάσης του και δίχως προσδιορίζοντας ανατροφοδότηση, το προκύπτον σύστημα μεταβάλλεται στην απλούστερη περίπτωση του εισαγόμενου συστήματος, δηλαδή αυτό στον απλό MCL με δειγματοληψία KLD. Επιπρόσθετα οι δύο προσεγγίσεις που παρουσιάζονται στα [Vas+16] και [Pen+18] αποτελούν ειδικές διαμορφώσεις του προτεινόμενου συστήματος. Στη συνέχεια, όταν αναφερόμαστε στην εκτίμηση της στάσης που εξάγεται από τον MCL θα αναφερόμαστε στην \hat{x}_t , και όταν αναφερόμαστε στην έξοδο του συστήματος, ή στο σύνθετο σύστημα, ή το συνολικό σύστημα, θα αναφερόμαστε στην εκτίμηση \hat{x}'_t .



Σχήμα 5.3: Το συνολικό σύστημα σε δομή μπλοκ. Τα παραλληλόγραμμα υποδεικνύουν υποσυστήματα, ενώ οι ελλείψεις τις εισόδους τους. Το κόκκινο χρώμα χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τα σημεία των συμβολών της προσέγγισής μας στα συστήματα συνδυασμού φίλτρων σωματιδίων με ευθυγράμμιση πραγματικών και εικονικών σάρωσεων δισδιάστατου αισθητήρα lidar. Εδώ η ευθυγράμμιση σάρωσεων αντιμετωπίζεται ως προσθετικό σύστημα του MCL. Ο πληθυσμός του MCL P_t υπόκειται σε πιθανή επιλογή σωματιδίων τη χρονική στιγμή $t > 0$. Η εκτίμηση εξόδου του μηχανισμού επιλογής προκύπτει από το σταθμισμένο μέσο όρο των στάσεων των επιλεγμένων στάσεων. Η προκύπτουσα στάση χρησιμοποιείται ως η στάση από την οποία συλλαμβάνεται μία εικονική σάρωση εντός του χάρτη. Η πραγματική και η εικονική σάρωση ευθυγραμμίζονται στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο PLICP. Η έξοδος της διαδικασίας ευθυγράμμισης \hat{x}'_t είναι, καταρχήν, πιο ακριβής από εκείνη του MCL, \hat{x}_t , το οποίο σημαίνει ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως βοηθητικό μέσο ελάττωσης του σφάλματος εκτίμησης του ίδιου το MCL με την ανατροφοδότησή της πίσω στον πληθυσμό του

5.4 Πειραματική αξιολόγηση

5.4.1 Πειραματική διαδικασία

Το περιεχόμενο της παρούσας ενότητας εξυπηρετεί τον έλεγχο τριών διακριτών υποθέσεων, όπως αρθρώθηκαν στις ενότητες 5.3.1, 5.3.2, και 5.3.3:

- (H1) Η επιλογή σωματιδίων υψηλού βάρους από τον πληθυσμό του MCL—ισοδύναμα: η απόρριψη σωματιδίων χαμηλού βάρους από αυτόν—και ο υπολογισμός της εκτίμησης του φίλτρου ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των στάσεων τους έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη ακρίβεια στάσης σε σύγκριση με την επιλογή όλων των σωματιδίων από τον πληθυσμό
- (H2) Η ευθυγράμμιση μεταξύ α) μιας μέτρησης που λαμβάνεται μέσω του φυσικού αισθητήρα lidar του ρομπότ από την πραγματική του στάση και (β) μιας εικονικής σάρωσης που λαμβάνεται εντός του χάρτη στον οποίο πλοηγείται το ρομπότ από την εκτιμώμενη στάση του αισθητήρα, και η εφαρμογή του προκύπτοντος μετασχηματισμού στην εκτί-

μηση της στάσης του MCL έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη ακρίβεια στάσης σε σύγκριση με τον MCL απουσία ανατροφοδότησης

- (H3) Η ανατροφοδότηση της (υποθετικά βελτιωμένης) στάσης στον πληθυσμό του MCL με τη μορφή μιας ομάδας σωματιδίων που αποτελούν το $p\%$ του τελικού πληθυσμού σωματιδίων, όπου p είναι αρκετά μικρότερο από 100 και αρκετά μεγαλύτερο από 1, (α) έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη ακρίβεια στάσης σε σύγκριση με τον MCL, (β) έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη ακρίβεια στάσης σε σύγκριση με την ανατροφοδότηση μόνο ενός σωματιδίου με την εν λόγω διορθωμένη στάση, και (γ) είναι πιο εύρωστη από την εκ νέου αρχικοποίηση του MCL γύρω από τη μετασχηματισμένη στάση

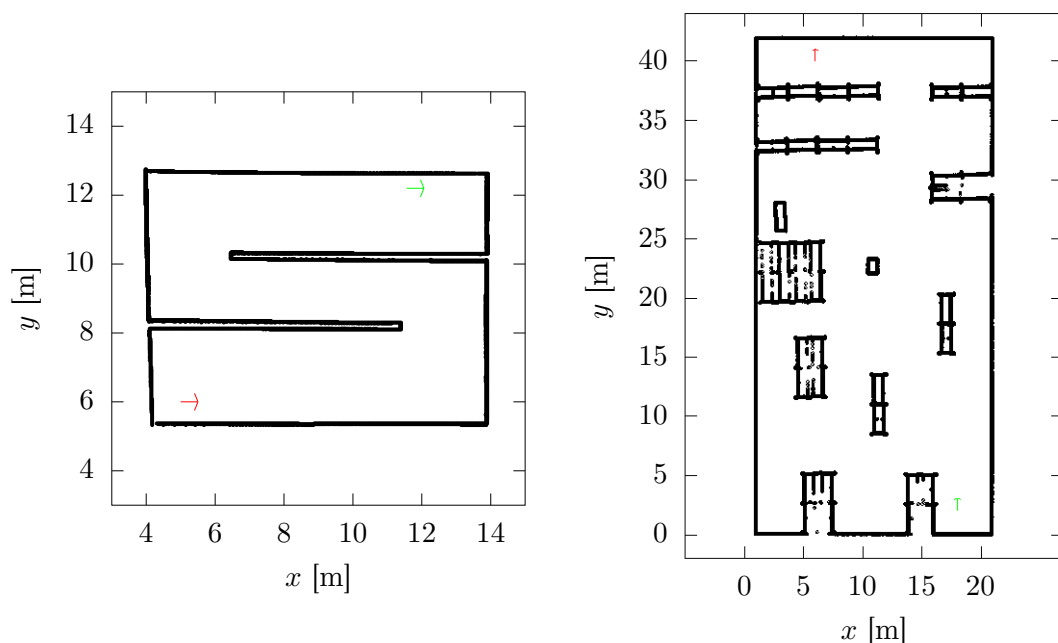
Στην τρίτη υπόθεση αναφερόμαστε στην ευρωστία με την έννοια της ικανότητας ενός συστήματος να αποφεύγει την αποτυχία και όχι να ανακάμπτει από αυτήν, η οποία ικανότητα αναφέρεται ως “ανθεκτικότητα” (resilience) [ZB11; TBD11]. Η ικανότητα ανάκαμψης από αποτυχίες είναι μια ιδιότητα του ίδιου του φίλτρου σωματιδίων, ενώ η ικανότητα αποφυγής αποτυχίας (στην προκειμένη περίπτωση η επανεκκίνηση γύρω από μία καταστροφικά λανθασμένη στάση) είναι ιδιότητα της μεθόδου ανατροφοδότησης.

Οι υποθέσεις αυτές δοκιμάζονται σε δύο διακριτά προσομοιωμένα περιβάλλοντα. Το πρώτο περιβάλλον ονομάζεται CORRIDOR, συμβολίζεται με M_C , και παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4(α'). Το δεύτερο ονομάζεται WAREHOUSE, συμβολίζεται με M_W , και παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4(β'). Η ανάλυση και των δύο χαρτών είναι 0.01 m × 0.01 m ανά κελί πλέγματος. Ο πρώτος χρησιμοποιείται για να δείξει την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος σε μη σύνθετα περιβάλλοντα, όπου όλα τα όριά του βρίσκονται εντός της μέγιστης εμβέλειας του αισθητήρα lidar του ρομπότ ανά πάσα στιγμή. Αντίθετα, το δεύτερο είναι μια μεγάλη αποθήκη, που προορίζεται να θέσει μεγαλύτερη πρόκληση στο σύστημα και συνεπώς στην απόδοσή του: τα εμπόδια βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους από ότι στο CORRIDOR, πράγμα που σημαίνει ότι είτε δεν φέρουν όλες οι ακτίνες του αισθητήρα αξιοποιήσιμη πληροφορία, είτε αλλοιώνονται περισσότερο από θόρυβο, καθώς το σφάλμα απόστασης αυξάνεται με την μετρήσιμη απόσταση, ή και τα δύο. Η πρώτη πρόκληση επηρεάζει (α) τον MCL, καθώς πρέπει να βασίζεται περισσότερο στην οδομετρία του, η οποία είναι επιρρεπής στη συσσώρευση σφαλμάτων, και λιγότερο στις μετρήσεις απόστασης και (β) την ευθυγράμμιση σαρώσεων, καθώς υπάρχουν λιγότερα μετρούμενα σημεία σάρωσης και άρα

μεγαλύτερη ανεπάρκεια πληροφοριών κατά την ευθυγράμμιση μετρήσεων με σαρώσεις. Η δεύτερη πρόκληση επηρεάζει (α) τον MCL δεδομένου ότι η εκτίμηση της στάσης διαταράσσεται από θόρυβο μέτρησης, και (β) την ευθυγράμμιση μετρήσεων με σαρώσεις, καθώς ο θόρυβος αυξάνει την πιθανότητα λανθασμένων αντιστοιχίσεων και, γενικά, της εσφαλμένης ευθυγράμμισης συνολικά. Για το σκοπό αυτό ρυθμίσαμε τον αισθητήρα αποστάσεων ώστε να λειτουργεί με μέγιστη εμβέλεια 10.0 μέτρα. Σε όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ο MCL παράλληλα με τη δειγματοληψία KLD, με ελάχιστο και μέγιστο αριθμό σωματιδίων $N_{\min} = 200$ και $N_{\max} = 500$. Οι τρεις ως άνω υποθέσεις δοκιμάζονται κατά τη διαδικασία αυτόνομης πλοήγησης στα δύο ως άνω περιβάλλοντα. Οι αρχικές και τελικές στάσεις για κάθε χάρτη ήταν (α) \mathbf{M}_C : $\mathbf{x}_0^{M_C} \equiv (11.56 \text{ m}, 12.20 \text{ m}, 0.0 \text{ rad})$, και $\mathbf{x}_G^{M_C} \equiv (5.0 \text{ m}, 6.0 \text{ m}, 0.0 \text{ rad})$, αντίστοιχα, και (β) \mathbf{M}_W : $\mathbf{x}_0^{M_W} \equiv (17.98 \text{ m}, 2.08 \text{ m}, \pi/2 \text{ rad})$, και $\mathbf{x}_G^{M_W} \equiv (6.0 \text{ m}, 40.0 \text{ m}, \pi/2 \text{ rad})$ αντίστοιχα. Οι αρχικές και οι τελικές στάσεις για κάθε χάρτη σχεδιάζονται με πράσινο και κόκκινο χρώμα στα αντίστοιχα σχήματα. Το ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία είναι το Turtlebot v.2, εξοπλισμένο με αισθητήρα απόστασης μέγιστης εμβέλειας $r_{\max} = 10.0 \text{ m}$, γωνιακού εύρους $\alpha = 260^\circ$, και αριθμό ακτίνων $N_s = 640$, του οποίου οι μετρήσεις αλλοιώνονται από θόρυβο κανονικά κατανεμημένο, με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση $\sigma_R = 0.01 \text{ m}$.

Για να ελέγξουμε την πρώτη υπόθεση πραγματοποιούμε προσομοιώσεις με τον MCL σε λειτουργία ανοικτού βρόχου. Συμβολίζοντας με $|\mathbf{P}_t|$ το μέγεθος του πληθυσμού σε χρόνο $t > 0$, πραγματοποιούμε $N = 100$ προσομοιώσεις πλοήγησης για κάθε μέθοδο επιλογής σωματιδίων, όπως αυτές ορίστηκαν στην ενότητα 5.3.1: (α) $100\% \times |\mathbf{P}_t|$ των σωματιδίων (η ονομαστική λειτουργία του MCL), (β) υποσυνόλου σωματιδίων $\{i\}$ από το \mathbf{P}_t των οποίων το βάρος w_i^t είναι μεγαλύτερο από το μέσο βάρος του πληθυσμού \overline{W}_t τη χρονική στιγμή $t > 0$, (γ) $10\% \times |\mathbf{P}_t|$, και (δ) μόνο το σωματίδιο με το μεγαλύτερο βάρος από όλα τα σωματίδια του \mathbf{P}_t .

Για να ελέγξουμε την τρίτη υπόθεση πραγματοποιούμε $N = 100$ προσομοιώσεις πλοήγησης για κάθε τρόπο ανάδρασης, όπως αυτοί ορίστηκαν στην ενότητα 5.3.3, επιλέγοντας όλα τα σωματίδια $|\mathbf{P}_t|$ για τον υπολογισμό της τελικής στάσης του MCL, δοκιμάζοντας την απόδοση του σύνθετου συστήματος (εικόνες 5.2 και 5.3) όταν ο τρόπος ανάδρασης που χρησιμοποιείται είναι (α) κανένας (ανοικτός βρόχος), (β) soft-1 loop-closure, (γ) soft-50 loop-closure, και (δ) hard loop-closure.

(α') Χάρτης του CORRIDOR, M_C (β') Χάρτης του WAREHOUSE, M_W

Σχήμα 5.4: Οι χάρτες των περιβαλλόντων CORRIDOR, M_C και WAREHOUSE M_W . Η αρχική στάση του ρομπότ φαίνεται με πράσινο χρώμα, ενώ η στάση στόχος του με κόκκινο χρώμα

Για να ελέγξουμε τη δεύτερη υπόθεση παρατηρούμε τα αποτελέσματα όλων των 4×100 προσομοιώσεων που εκτελούνται σε ανοικτό βρόχο και ανά μέθοδο επιλογής σωματιδίων (η ανάδραση του αποτελέσματος της ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις στον MCL εκ των πραγμάτων αλλοιώνει την τυπική επίδοσή του και, συνεπώς, δεν επιτρέπει την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τη συμβολή της ευθυγράμμισης σαρώσεων σε διάκριση με το συνολικό σύστημα σε κατάσταση κλειστού βρόχου).

Το κριτήριο στο οποίο στηρίζεται η αξιολόγηση όλων των ελέγχων είναι το πλάτος του συνολικού σφάλματος στάσης (εξίσωση 5.1) όπου $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\theta})$ είναι η εκτιμώμενη στάση του ρομπότ (η οποία εκτιμάται από τον MCL ή το σύστημα μετά την ευθυγράμμιση σαρώσεων, ανάλογα με τα συμφραζόμενα), και (x, y, θ) είναι η πραγματική του στάση, και επιλέχθηκε ως τέτοιο λόγω της έκφρασης του συνολικού σφάλματος της κατάστασης του συστήματος και της ικανότητάς του να παρέχει έναν κεντρικό τόπο που διευκολύνει την άμεση σύγκριση των επιδόσεων της κάθε παραλλαγής του συστήματος όσον αφορά στην ακρίβεια της στάσης. Για κάθε στάση που εξάγεται από τον MCL σε μία διαδρομή πλοήγησης (συμβολίζεται με \hat{x}_t στο σχήμα 5.3) και το σύστημα μετά την ευθυγράμμιση σαρώσεων (\hat{x}'_t) κατά τη διάρκεια μίας προσομοίωσης, καταγράφουμε τα σφάλματά τους από την πραγματική στάση του ρομπότ με τη

μορφή του συνολικού σφάλματος. Στη συνέχεια καταγράφουμε το μέσο όρο των σφαλμάτων τους για μία προσομοίωση, και αναφέρουμε την κατανομή αυτών των τιμών για όλες τις $N = 100$ προσομοιώσεις της ίδιας διαμόρφωσης. Η μονάδα μέτρησης του συνολικού σφάλματος στάσης είναι $(\text{m}^2 + \text{rad}^2)^{1/2}$, και παραλείπεται στα σχήματα των παρακάτω ενοτήτων για λόγους οικονομίας χώρου.

Σε αντίθεση με τις στάσεις από όπου αξιολογήθηκαν οι επιδόσεις των συστημάτων των [Row+12] και [Vas+16] (τα σφάλματα των συστημάτων τους αξιολογήθηκαν μόνο κοντά σε προκαθορισμένες θέσεις ενδιαφέροντος του περιβάλλοντος), εμείς αξιολογούμε την επίδοση των ανωτέρω διαμορφώσεων *κατά μήκος ολόκληρης της διαδρομής* από x_0 έως x_G : αυτό προσφέρει πιο πλήρη εικόνα για την επίδοση των εν λόγω διαμορφώσεων.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον προσομοίωσης Gazebo¹ μέσω ROS² στο λειτουργικό σύστημα Linux Ubuntu 16.04, με έναν επεξεργαστή 12 νημάτων και συχνότητας 4.00 GHz, χρησιμοποιώντας έως και 32 Gb μνήμης RAM. Για την υλοποίηση του MCL με δειγματοληψία KLD χρησιμοποιήσαμε το ROS πακέτο `amcl`,³ το οποίο τροποποιήσαμε προκειμένου για την επιλογή και εισαγωγή σωματιδίων από και στον πληθυσμό του φίλτρου. Το σύστημα καταλαμβάνει δύο διεργασίες επεξεργαστή, περίπου 300MB μνήμης, ενώ η διαδικασία ευθυγράμμισης σαρώσεων χρησιμοποιεί περίπου 5.2% ενός νήματος της CPU.

5.4.2 Αποτελέσματα

Στα σχήματα 5.5(α') και 5.5(β') απεικονίζονται οι κατανομές των μέσων σφαλμάτων στάσης του MCL σε κατάσταση ανοικτού βρόχου και του σύνθετου συστήματος (σχήμα 5.3) ανά διαδρομή του ρομπότ στα περιβάλλοντα CORRIDOR και WAREHOUSE, ανά μέθοδο επιλογής σωματιδίων. Τα υποκείμενα σφάλματα θέσης και προσανατολισμού απεικονίζονται στα σχήματα του παραρτήματος Ε'.1.

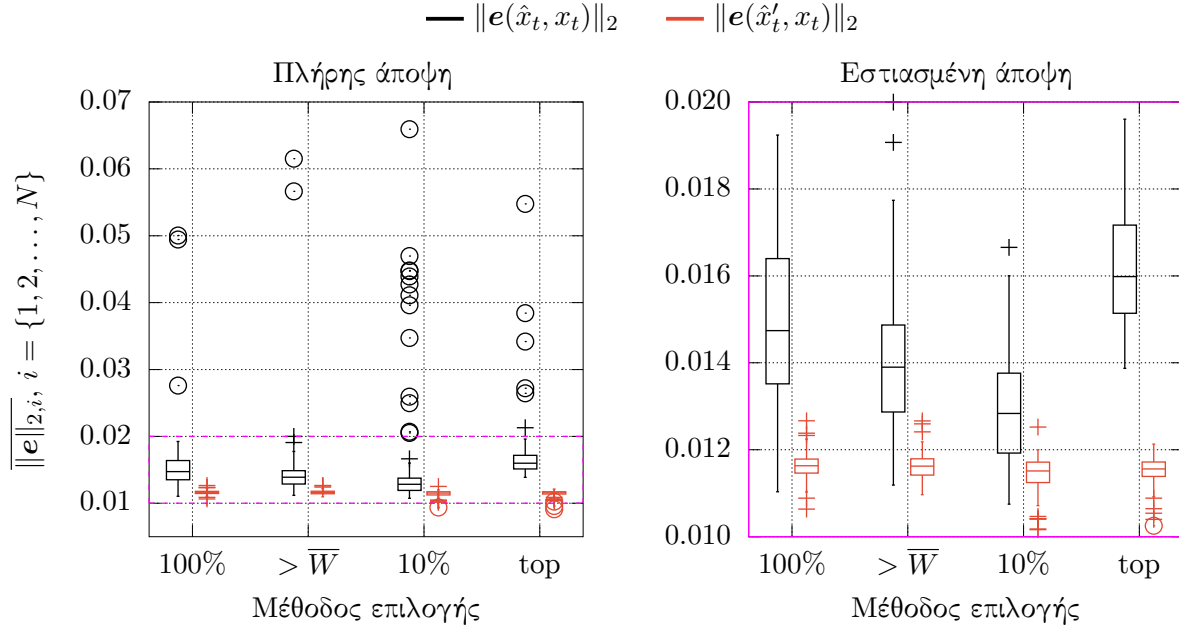
Στα σχήματα 5.6(α') και 5.6(β') απεικονίζονται οι κατανομές των μέσων σφαλμάτων στάσης του MCL κλειστού βρόχου και του σύνθετου συστήματος ανά διαδρομή του ρομπότ στα περιβάλλοντα CORRIDOR και WAREHOUSE, ανά μέθοδο ανάδρασης. Τα υποκείμενα σφάλματα θέσης και προσανατολισμού απεικονίζονται στα σχήματα του παραρτήματος Ε'.2.

¹<http://gazebo.org/>

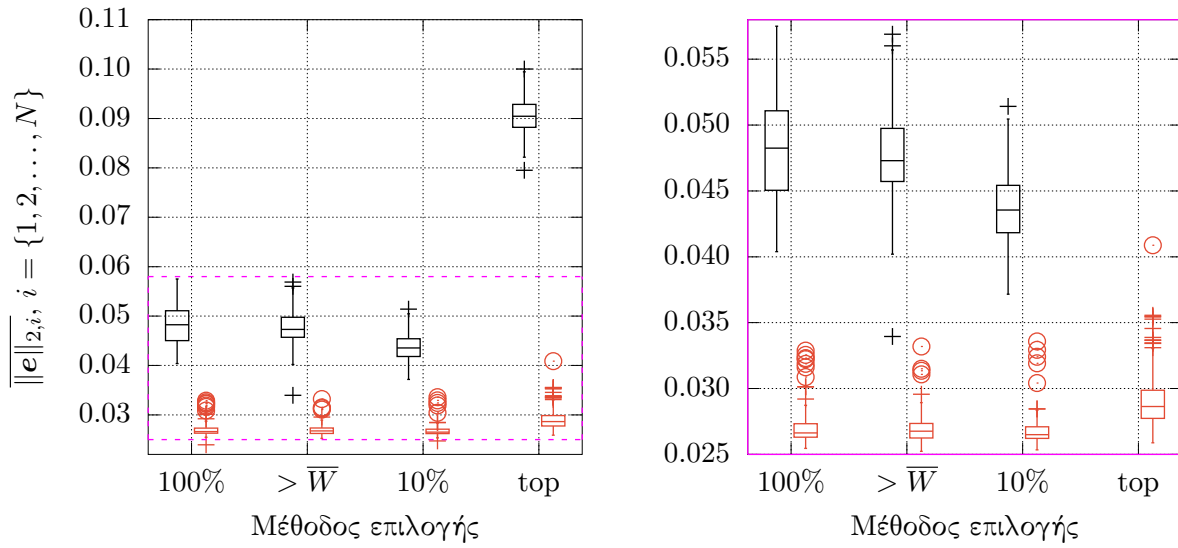
²<https://www.ros.org/>

³<http://wiki.ros.org/amcl>

Κατανομή μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο επιλογής σωματιδίων

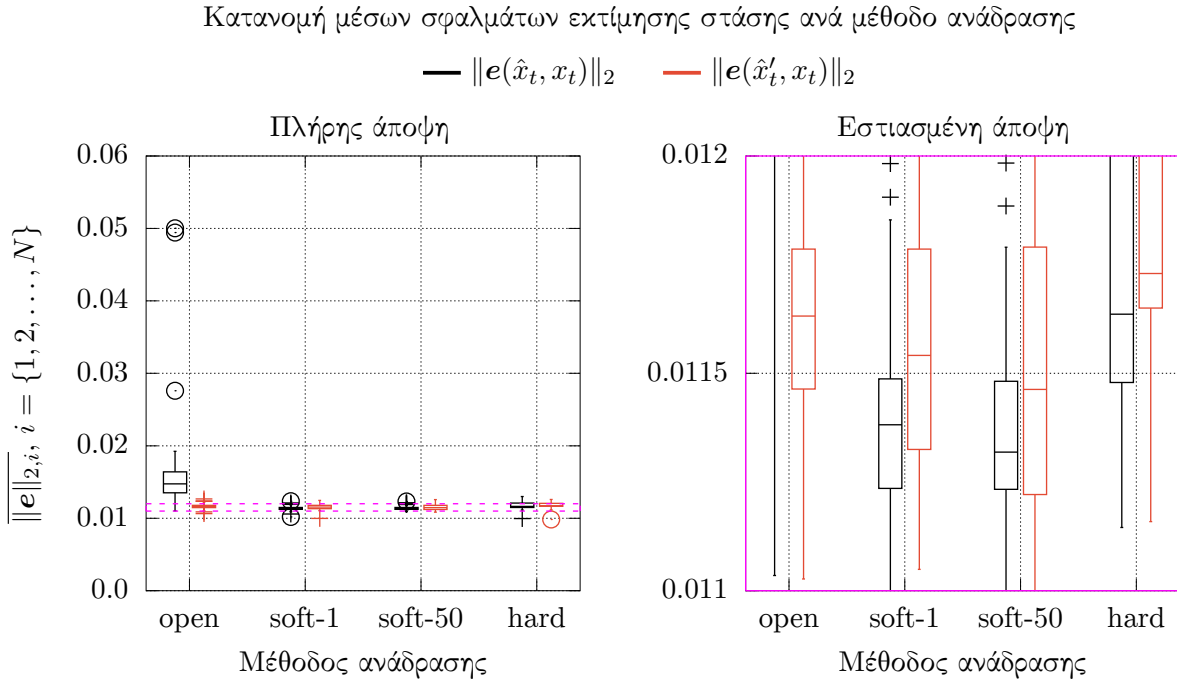


(α') Περιβάλλον CORRIDOR

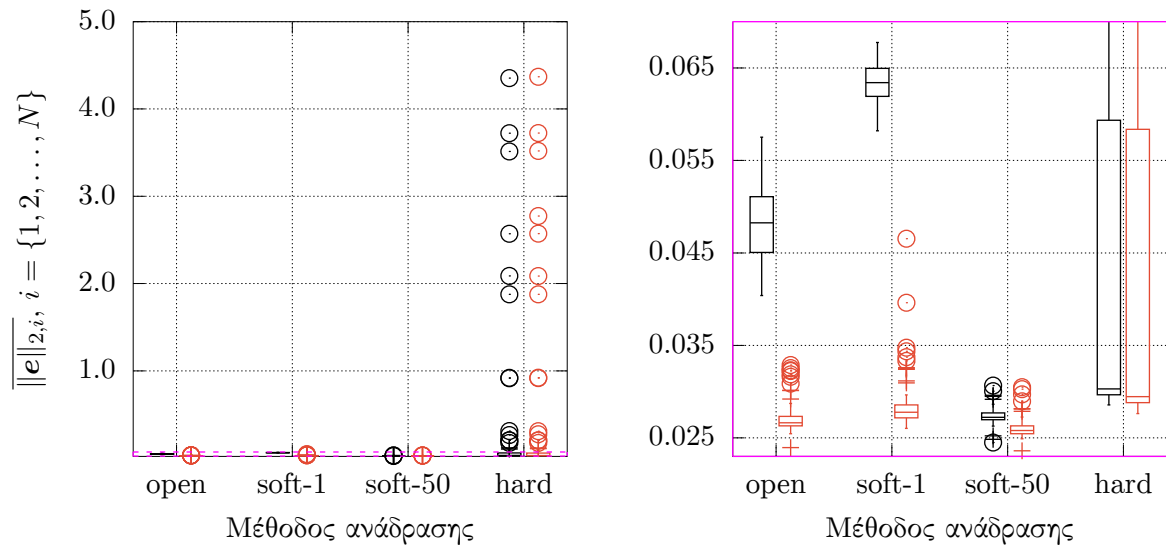


(β') Περιβάλλον WAREHOUSE

Σχήμα 5.5: Η κατανομή του μέσου σφάλματος στάσης ανά διαδρομή πλοήγησης για τον MCL σε ανοιχτό βρόχο (στα αριστερά κάθε υποδεικνυόμενης μεθόδου επιλογής, με μαύρο χρώμα) και του σύνθετου συστήματος (δεξιά, με κόκκινο), σε $N = 100$ προσομοιώσεις, ανάλογα με την μέθοδο επιλογής πληθυσμού. Το σύμβολο “100%” υποδηλώνει τη διαμόρφωση του συστήματος όπου όλα τα σωματίδια του συνόλου του πληθυσμού επιλέγονται κατά τη διαδικασία εξαγωγής της εκτίμησης της στάσης του συστήματος, το σύμβολο “ $> \bar{W}$ ” υποδηλώνει εκείνη της επιλογής των σωματιδίων των οποίων το βάρος είναι μεγαλύτερο από το μέσο βάρος του πληθυσμού του φίλτρου, το “10%” εκείνη που μόνο το άνω 10% των βαρύτερων σωματιδίων επιλέγονται, και “top” τη διαμόρφωση όπου επιλέγεται μόνο το σωματίδιο με το μεγαλύτερο βάρος μεταξύ όλων των σωματιδίων του πληθυσμού



(α') Περιβάλλον CORRIDOR



(β') Περιβάλλον WAREHOUSE

Σχήμα 5.6: Η κατανομή του μέσου σφάλματος στάσης ανά διαδρομή πλοήγησης για τον MCL (στα αριστερά κάθε υποδεικνυόμενης μεθόδου ανάδρασης, με μαύρο χρώμα) και του σύνθετου συστήματος (δεξιά, με κόκκινο) σε $N = 100$ προσομοιώσεις, ανάλογα με τη μέθοδο ανατροφοδότησης του αποτελέσματος της ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη. Η φράση “open” είναι συντομογραφία για την έλλειψη ανάδρασης (ανοιχτός βρόχος), η φράση “soft-1” για τη διαμόρφωση όπου η έξοδος του συνολικού συστήματος επιστρέφει στο φίλτρο σωματιδίων με τη μορφή ενός σωματιδίου, “soft-50” για την περίπτωση που επιστρέφει με τη μορφή τόσων σωματιδίων όσα το μισό μέγεθος του πληθυσμού, και “hard” για τη διαμόρφωση όπου το φίλτρο σωματιδίων αρχικοποιείται γύρω από τη στάση που υπολογίζεται μετά τη διαδικασία ευθυγράμμισης

5.4.3 Αξιολόγηση μεθόδων επιλογής σωματιδίων

Όσον αφορά στις μεθόδους επιλογής σωματιδίων εστιάζουμε στα σφάλματα του MCL ανοικτού βρόχου (τα boxplots μαύρου χρώματος του σχήματος 5.5) διότι η επίδοση της κάθε μεθόδου επιλογής σωματιδίων μπορεί να διακριθεί με σαφήνεια, καθώς δεν αλλοιώνεται από την ανατροφοδότηση ή την επίδοση της ευθυγράμμισης σαρώσεων. Στρέφοντας την προσοχή μας στα σχήματα διακρίνουμε καταρχάς ότι επιλέγοντας σωματίδια των οποίων το βάρος είναι μεγαλύτερο από το μέσο βάρος του πληθυσμού κατά τη στιγμή της επιλογής τους έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερα σφάλματα στάσης σε σύγκριση με την επιλογή όλων των σωματιδίων, και στα δύο προσομοιωμένα περιβάλλοντα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι διαισθητικά λογικό, δεδομένου ότι αναμένει κανείς ότι τα σωματίδια που συμβάλλουν στη συνολική στάση με βάρος μικρότερο από το μέσο βάρος του πληθυσμού έχουν συνολικά αρνητική συνεισφορά στην ακρίβεια της στάσης, η οποία, όπως φαίνεται από τα δεδομένα, είναι σχεδόν αμελητέα. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις άλλες δύο πρακτικές επιλογής σωματιδίων που παρουσιάστηκαν, αυτή είναι η λιγότερο καταστροφική, αφού αγκυροβολεί την πρακτική απόρριψης σωματιδίων στη μεταβαλλόμενη μέση τιμή βάρους του πληθυσμού και, επομένως, επιλέγει σωματίδια των οποίων ο αριθμός είναι δυναμικός, αντί να την βασίζει στον αριθμό των βαρύτερων σωματιδίων και να επιλέγει σωματίδια των οποίων ο αριθμός είναι σταθερός.

Τούτου λεχθέντος, η επιλογή του 10% των βαρύτερων σωματιδίων σε κάθε επανάληψη υπερτερεί της επιλογής σωματιδίων των οποίων το βάρος είναι μεγαλύτερο του μέσου βάρους του πληθυσμού. Για την ακρίβεια, το μοτίβο της ελάττωσης του σφάλματος στάσης και στα δύο περιβάλλοντα είναι το ίδιο: η επιλογή του 10% των βαρύτερων σωματιδίων σε κάθε επανάληψη υπερτερεί της επιλογής σωματιδίων των οποίων το βάρος είναι μεγαλύτερο από το μέσο βάρος του πληθυσμού κατά τη στιγμή της επιλογής τους, η οποία, με τη σειρά της, υπερτερεί της τυπικής επιλογής όλων των σωματιδίων.

Αυτό που είναι αντιδιαισθητικό είναι τα αυξημένα σφάλματα στάσης όταν επιλέγεται μόνο το βαρύτερο σωματίδιο ως εκτίμηση της στάσης του φίλτρου, και στα δύο περιβάλλοντα: αυτό που θα περίμενε κανείς είναι ότι το σωματίδιο με το μεγαλύτερο βάρος, δηλαδή το σωματίδιο του οποίου η εκτίμηση στάσης εξηγεί καλύτερα από όλα τα υπόλοιπα σωματίδια του πληθυσμού τις εισερχόμενες μετρήσεις, και το οποίο είναι τότε, θεωρητικά, η καλύτερη εκτίμηση του φίλτρου—θα περίμενε κανείς ότι θα παρουσίαζε το χαμηλότερο σφάλμα στάσης. Στην

πραγματικότητα όμως, σύμφωνα με τα δεδομένα αποτελέσματα, το βαρύτερο σωματίδιο είναι λιγότερο ακριβές από τη συλλογική εκτίμηση του φίλτρου. Αυτή η ασυμφωνία υποδηλώνει ότι ίσως υπάρχει ένα κατώφλι από το οποίο και άνω επιβεβαιώνεται η ελεγχόμενη υπόθεση⁴ και ότι, δεδομένων των αποδεικτικών στοιχείων, το σωματίδιο που υπολογίζει καλύτερα τις εισερχόμενες μετρήσεις δεν κατέχει την καλύτερη αξιοπιστία σε σύγκριση με εκείνη του πληθυσμού ως συλλογικότητα. Αυτή είναι ουσιαστικά η θεωρία πίσω από τη μη απόρριψη σωματιδίων με χαμηλό βάρος, δεδομένου ότι το καλύτερο σωματίδιο μπορεί να είναι βέλτιστο τοπικά (για τις τελευταίες επαναλήψεις) αλλά όχι σε καθολικό επίπεδο. Αυτή η συμπεριφορά μας ωθεί να θεωρήσουμε ότι ένα φίλτρο σωματιδίων δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μια συνάνθροιση ξεχωριστών εκτιμήσεων, αλλά μάλλον ως μια κατακερματισμένη εκτίμηση, όπου κανένα κέρμα⁵ δεν μπορεί να υποκαταστήσει το σύνολο χωρίς ανεπανόρθωτη απώλεια πληροφορίας και μείωση της ποιότητας της εκτίμησης.⁶ Αυτή η αντιστροφή στην ποιότητα της εκτίμησης μπορεί να αποδοθεί στην περιθωριοποίηση της πληροφορίας που φέρει ο υπόλοιπος πληθυσμός, συμπεριλαμβανομένης της τυχαιότητας που εισάγει η δειγματοληψία KLD καθώς δημιουργεί νέα σωματίδια.

Αυτή η συμπεριφορά δεν υποσκάπτει τη μέθοδο επιλογής των κορυφαίων 10% βαρύτερων σωματιδίων, καθώς, αν και υποδεικνύει την πιθανότητα ότι θα είχε την ίδια τύχη αν το μέγιστο μέγεθος του πληθυσμού ήταν σημαντικά μικρότερο, η αξιοπιστία του φίλτρου θα διακυβευόταν επίσης με ένα τόσο χαμηλό μέγιστο μέγεθος—και εν πάση περιπτώσει ένα χαμηλό μέγεθος πληθυσμού μειονεκτεί όσον αφορά τόσο στην ποιότητα της εκτίμησης του συνολικού πληθυσμού (η εξάντληση των σωματιδίων είναι ο κίνδυνος εδώ) όσο και σε ό,τι αφορά εκείνη ενός υποσυνόλου του.

5.4.4 Αξιολόγηση ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη

Όσον αφορά στη συγκριτική επίδοση της ευθυγράμμισης μετρήσεων lidar με σαρώσεις χάρτη σε σχέση με την επίδοση του φίλτρου σωματιδίων, εστιάζουμε στα σφάλματα του συνολικού συστήματος (τα boxplots κόκκινου χρώματος του σχήματος 5.5), και τα μεγέθη

⁴ Αν το βαρύτερο σωματίδιο εμφανίζει υψηλότερο σφάλμα από το συλλογικό πληθυσμό, αλλά το 10% των βαρύτερων σωματιδίων εμφανίζει χαμηλότερο σφάλμα από τον πληθυσμό, τότε, επί της αρχής, υπάρχει ένα κατώφλι αριθμού βαρύτερων σωματιδίων των οποίων ο σταθμισμένος μέσος όρος εκτίμησης εμφανίζει την ίδια ακρίβεια με εκείνον του πληθυσμού, κατ' αναλογία με το θεώρημα Bolzano.

⁵ **κέρμα, -ατος, τό (χείρω)**, 1. τεμάχιο· απ' όπου, μικρό νόμισμα, οβολός.

⁶ [...] πάντων γὰρ ὅσα πλείω μέρος ἔχει καὶ μὴ ἔστιν οἷον σωρὸς τὸ πᾶν ἄλλ' ἔστι τι τὸ ὅλον παρὰ τὰ μέρη [...]. Αριστοτέλης, Μετά τα Φυσικά

τους σε σχέση με τα σφάλματα στάσης του MCL σε κατάσταση ανοικτού βρόχου (τα boxplots μαύρου χρώματος του ίδιου σχήματος).

Εν γένει η στάση που εξάγεται μέσω της ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις είναι λιγότερο εσφαλμένη από εκείνη που εξάγεται από τον MCL για όλες τις διαμορφώσεις μεθόδων επιλογής σωματιδίων σε ανοικτό βρόχο, με τη μείωση του σφάλματος να κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά (στην περίπτωση του απλού χάρτη CORRIDOR) έως μερικά εκατοστά (στην περίπτωση του πιο σύνθετου χάρτη WAREHOUSE).

5.4.5 Αξιολόγηση μεθόδων ανάδρασης

Όσον αφορά στις μεθόδους ανάδρασης εστιάζουμε στα σφάλματα του MCL (τα boxplots μαύρου χρώματος του σχήματος 5.6). Η διαφορά της επίδοσης μεταξύ της μεθόδου soft-50 loop-closure και του MCL σε κατάσταση ανοικτού βρόχου: τα σφάλματα στάσης της πρώτης είναι περίπου 32% χαμηλότερα από εκείνα του MCL στο περιβάλλον CORRIDOR, και περίπου 89% χαμηλότερα στο περιβάλλον WAREHOUSE. Η διαφορά της επίδοσης της μεθόδου κλεισίματος βρόχου soft-50 loop-closure σε σύγκριση με εκείνη της soft-1 είναι αμελητέα στο απλό περιβάλλον CORRIDOR, ωστόσο, στο σύνθετο περιβάλλον WAREHOUSE τα σφάλματα της πρώτης μεθόδου είναι μειωμένα κατά σχεδόν 121% έναντι της δεύτερης.

Κατά τη σύγκριση της διαφοράς της επίδοσης των μεθόδων ανατροφοδότησης soft-50 και hard-loop-closure παρατηρούμε ότι στο περιβάλλον CORRIDOR είναι συγκρίσιμες, με την πρώτη να υπερέχει της δεύτερης συνολικά. Αυτό που είναι εντυπωσιακό όμως είναι η διαφορά στις επιδόσεις τους στο περιβάλλον WAREHOUSE (σχήμα 5.6(β'), αριστερά): κατά το κλείσιμο του βρόχου με τη μέθοδο hard-loop-closure το σύστημα δεν μπόρεσε να ανακάμψει από σοβαρά σφάλματα εκτίμησης στάσης μετά την εφαρμογή του αποτελέσματος της ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη, καθώς ο πληθυσμός του φίλτρου αρχικοποιείται εκ νέου σε κάθε στάση που εξάγεται από την τελευταία, ανεξάρτητα από την ακρίβειά της. Αντιθέτως, υποθέτοντας ότι, στατιστικά, ένας αριθμός παρόμοιων σφαλμάτων προέκυψε στα πειράματα όπου χρησιμοποιήθηκε το κλείσιμο του βρόχου soft-50, αυτή η συμπεριφορά απουσίαζε. Ο λόγος για αυτή την εύρωστη συμπεριφορά είναι ο ακόλουθος: μετά την εισαγωγή του αποτελέσματος της ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις στον πληθυσμό του φίλτρου σωματιδίων ως ένας αριθμός νέων υποθέσεων, το φίλτρο αποδίδει εσωτερικά ένα βάρος σε κάθε μία από αυτές (ενότητα 1.2.3), και, εάν οι στάσεις αυτών των σωματιδίων

είναι σοβαρά λανθασμένες, αυτό αντικατοπτρίζεται στις τιμές των βαρών τους, καθώς αυτές οι στάσεις εξηγούν τις εισερχόμενες μετρήσεις μάλλον ανεπαρκώς. Δεδομένου ότι η στάση εξόδου του MCL είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος όλων των εκτιμήσεων του πληθυσμού, αυτά τα σωματίδια συμμετέχουν στην τελική ψηφοφορία σε ελάχιστο ποσοστό και, επομένως, η εκτίμηση του φίλτρου είναι σε μεγάλο βαθμό αδιατάρακτη από τις χαμηλής ποιότητας υποθέσεις, παρουσιάζοντας την ίδια εύρωστη συμπεριφορά με τον τυπικό MCL. Το πλεονέκτημα της ενσωμάτωσης της δειγματοληψίας KLD στον MCL είναι ότι τα σωματίδια των οποίων το βάρος είναι ελάχιστο απορρίπτονται στη συνέχεια από τον πληθυσμό, μην αφήνοντάς τους χώρο να επηρεάσουν την συνοχή της εσωτερικής του εκτίμησης στις επόμενες επαναλήψεις. Αντιθέτως, κατά την ανατροφοδότηση του αποτελέσματος της ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη μέσω της μεθόδου ανάδρασης hard-loop-closure, το σύνολο του πληθυσμού των σωματιδίων του φίλτρου μεταφέρεται και διασπείρεται γύρω από την εσφαλμένη στάση, την οποία το φίλτρο εσφαλμένα θεωρεί ως μία στη γειτονιά της πραγματικής στάσης του ρομπότ. Στη συνέχεια, η μέθοδος MCL αδυνατεί να γεφυρώσει μεγάλα κενά είτε στη θέση είτε στον προσανατολισμό ανάμεσα σε διαδοχικές εκτελέσεις, με αποτέλεσμα τον κίνδυνο της ακεραιότητας του ρομπότ, του περιβάλλοντός του, και, εν πάση περιπτώσει, την αδυναμία συνέχισης της πλοήγησής του, και συνεπώς της αποστολής του.

5.5 Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα

5.5.1 Συμπεράσματα κεφαλαίου

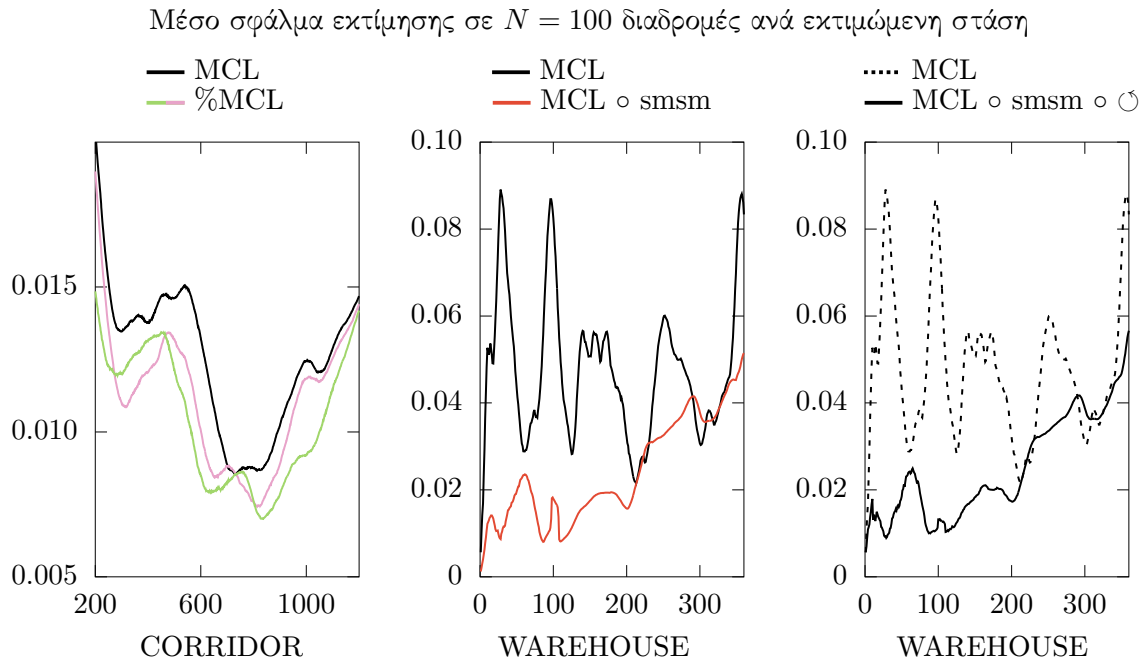
Σε αυτό το κεφάλαιο μάς απασχόλησε η ελάττωση του σφάλματος εκτίμησης στάσης με αιτία τα ευρήματά μας στο προηγούμενο κεφάλαιο (ενότητα 4.5.2). Με δεδομένο τη χρήση του φίλτρου σωματιδίων για το έργο της παρακολούθησης της στάσης ενός ρομπότ, αναλύσαμε τη διαθέσιμη βιβλιογραφία γύρω από την ελάττωση του σφάλματος εκτίμησης του, και προτείναμε δύο επιπρόσθετους τρόπους με τους οποίους είναι δυνατή η επίτευξη του στόχου. Πιο συγκεκριμένα:

- Επικεντρωθήκαμε στο μοντέλο παρατηρήσεων του φίλτρου, και, σκεπτόμενοι αναλυτικά, θέσαμε την υπόθεση ότι η επιλογή υποσυνόλων από υποθέσεις στάσης του, των οποίων οι αναμενόμενες μετρήσεις από αυτές συμβαδίζουν περισσότερο με τις εισερχό-

μενες στο φίλτρο μετρήσεις του αισθητήρα αποστάσεων σε σχέση με άλλες υποθέσεις— η επιλογή αυτών των υποθέσεων στάσης ως η εκτίμηση του φίλτρου οφείλει να παράγει χαμηλότερα σφάλματα στάσης (ενότητα 5.3.1). Τα ευρήματά μας επιβεβαιώνουν την υπόθεση, αλλά έως ένα κατώφλι πληθικότητας αυτών των υποσυνόλων: στο όριο, η μοναδική υπόθεση στάσης που εμφανίζει τη μεγαλύτερη πιθανότητα παρατήρησης των μετρήσεων από αυτήν εμφανίζει μεγαλύτερα σφάλματα στάσης από ότι η συλλογική εκτίμηση του φίλτρου. Βάσει αυτού του ευρήματος συμπεράναμε ότι το φίλτρο σωματιδίων δεν αποτελεί άθροισμα υποθέσεων, αλλά μία κατακερματισμένη μορφή εκτίμησης.

- Ερευνήσαμε και ζητήσαμε να ελέγξουμε την ευστάθεια της υπόθεσης ότι το αποτέλεσμα της εφαρμογής του μετασχηματισμού της ευθυγράμμισης μετρήσεων δισδιάστατου αισθητήρα lidar με σαρώσεις χάρτη από την παραγόμενη εκτίμηση του φίλτρου στην ίδια την εκτίμηση του εμφανίζει χαμηλότερα σφάλματα εκτίμησης στάσης σε σχέση με την αρχική εκτίμηση (ενότητα 5.3.2). Με βάση τη διαμόρφωση της πειραματικής διαδικασίας, τα ευρήματα αποδεικνύουν ότι η εφαρμογή της διαδικασίας ευθυγράμμισης έχει σημαντικά οφέλη στην ελάττωση του σφάλματος εκτίμησης.
- Παρακινούμενοι από ελλείψεις και μειονκτήματα μεθόδων της τρέχουσας βιβλιογραφίας προτείναμε έναν τρόπο ανάδρασης του αποτελέσματος της ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη στον πληθυσμό του φίλτρου σωματιδίων (ενότητα 5.3.3): δεδομένων ότι το αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης (α) είναι πιο ακριβές από την εκτίμηση του φίλτρου και (β) είναι άγνωστο στο ίδιο το φίλτρο, σχεδιάσαμε έναν μηχανισμό ανάδρασης που (i) προκαλεί πιο γρήγορη σύγκλιση και χαμηλότερα σφάλματα εκτίμησης σε σχέση με έναν μηχανισμό ανάδρασης της βιβλιογραφίας, (ii) προκαλεί την αποφυγή απόκλισης του φίλτρου σε σχέση με έναν δεύτερο μηχανισμό ανάδρασης της βιβλιογραφίας, και (iii) εμφανίζει χαμηλότερα σφάλματα στάσης σε σχέση με το φίλτρο σε κατάσταση ανοιχτού βρόχου.

Στο σχήμα 5.7 απεικονίζονται συνοπτικά οι συμβολές του παρόντος κεφαλαίου στη μεθοδολογία ελάττωσης του σφάλματος εκτίμησης φίλτρου σωματιδίων με χρήση αισθητήρων απόστασης τύπου 2D lidar.



Αριθμός εκτιμήσεων στάσης στο χρόνο

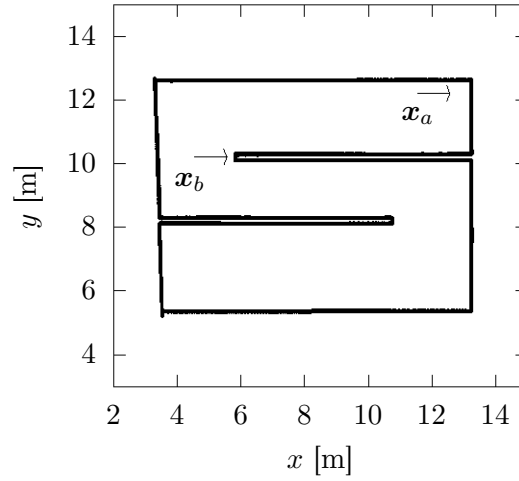
Σχήμα 5.7: Η συμβολή των μεθόδων που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο ως προς το μέσο σφάλμα εκτίμησης ανά στάση στα διενεργηθέντα πειράματα. Αριστερά: με μαύρο χρώμα το αποτέλεσμα του MCL και με άλλα χρώματα το αποτέλεσμα της επιλογής υποσυνόλων σωματιδίων στο περιβάλλον CORRIDOR. Μέση: με μαύρο χρώμα το αποτέλεσμα του MCL και με κόκκινο το αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης μετρήσεων δισδιάστατου αισθητήρα lidar με σαρώσεις χάρτη (smsg). Δεξιά: με διακεκομμένη γραμμή το αποτέλεσμα του MCL και με συνεχή το αποτέλεσμα του ολικού συστήματος (σχήμα 5.3) μετά την ανατροφοδότηση του αποτελέσματος της ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη στον πληθυσμό του φίλτρου μέσω της προτεινόμενης μεθόδου ανατροφοδότησης

5.5.2 Αιτίες περαιτέρω έρευνας

Η κυριότερη αιτία και το πιο γόνιμο έδαφος για περαιτέρω έρευνα αφορά στη μέθοδο ευθυγράμμισης δισδιάστατων μετρήσεων αισθητήρα lidar με σαρώσεις χάρτη. Κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της υλοποίησης του σύνθετου συστήματος περάσαμε από το στάδιο ενσωμάτωσης μίας εκ των υλοποιήσεών της, ήτοι του PLICP, και, προτού την ενσωματώσουμε οριστικά στο σύνθετο σύστημα, την υποβάλαμε σε μία σειρά από δοκιμές ώστε να επαληθεύσουμε τη ορθότητά των αποτελεσμάτων που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία και αφορούν σε αυτήν, αλλά στα συμφραζόμενα της έρευνας μας. Κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών καταλήξαμε σε μία σειρά από πορίσματα που στηρίζουν το συμπέρασμα της πρώτης πρότασής μας, τα οποία παρουσιάζουμε παρακάτω.

Ένα κύριο πρόβλημα—αν όχι το κυριότερο—στο οποίο πρέπει να δοθεί προσοχή όσο αφορά στους αλγορίθμους ευθυγράμμισης σαρώσεων είναι η πρακτική της εύρεσης αντιστοιχίσεων ανάμεσα στις ακτίνες των εισόδων τους. Αυτό αφορά σε όλες τις προσεγγίσεις ευθυγραμμίσεων σαρώσεων με σαρώσεις (πραγματικών μετρήσεων με πραγματικές μετρήσεις ή με εικονικές μετρήσεις από χάρτη), και όχι μόνο στη μέθοδο ICP και την πληθώρα των παραλλαγών της. Το πρόβλημα εδώ είναι ότι, δεδομένου του θορύβου του αισθητήρα μέτρησης και των αποκλίσεων μεταξύ του χάρτη και περιβάλλοντος που αναπαριστά, η δημιουργία αντιστοιχίσεων μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα ή συνολικά σε αποκλίνοντα αποτελέσματα. Στην πράξη, όσον αφορά στις μεθόδους που λειτουργούν απευθείας στο χώρο των μετρήσεων, η αντιστοίχιση πραγματοποιείται μέσω διαδικασιών που εξαρτώνται από την ικανοποίηση παραδοχών-υποθέσεων, και από την ακριβή ρύθμιση εξωτερικά παρεχόμενων παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, την εκτίμηση της τυπικής απόκλισης του κανονικά κατανομημένου θορύβου μηδενικής μέσης τιμής που επιδρά στις μετρήσεις ενός αισθητήρα αποστάσεων—όταν οι μετρήσεις του αισθητήρα μπορεί στην πραγματικότητα να είναι μεροληπτικές (biased), ή να μην ικανοποιούν την παραδοχή της κανονικής κατανομής του θορύβου τους [CRP18]—, ή την εκτίμηση του ποσοστού των ακτίνων που δεν αντιστοιχούν σε άλλες μεταξύ των εισόδων τους (κάτι που είναι εκ των προτέρων θεμελιωδώς άγνωστο και αδύνατο να εκτιμηθεί).

Αυτό μας οδηγεί σε ένα άλλο κρίσιμο σημείο: το ζήτημα της παραμετροποίησης. Η επίδοση της πλειονότητας των μεθόδων ευθυγράμμισης σάρωσης στηρίζεται στον ακριβή καθορισμό



Σχήμα 5.8: Ο χάρτης του περιβάλλοντος CORRIDOR, M_C , και δύο στάσεις μέσα σε αυτόν, $x_a(11.56, 12.2, 0.0)$, και $x_b(4.56, 10.2, 0.0)$

της τιμής των παραμέτρων που διέπουν τις εσωτερικές τους διαδικασίες. Γενικά, θεωρείται ορθά ότι οι εν λόγω παράμετροι πρέπει να καθορίζονται για ένα συγκεκριμένο περιβάλλον και για συγκεκριμένο επίπεδο θορύβου, αλλά στην πραγματικότητα, ελλείψει αυτόματης ρύθμισης των παραμέτρων, διαφορετικές παραμετροποιήσεις μπορεί να οδηγήσουν σε ασταθή ή μη διαισθητικά αποτελέσματα—και το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να εμφανιστεί ακόμη και για την ίδια στάση στο ίδιο περιβάλλον. Θα αποσαφηνίσουμε αυτές τις ιδιότητες με ένα απλό αλλά χαρακτηριστικό παράδειγμα.

Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται ο χάρτης του μη σύνθετου περιβάλλοντος CORRIDOR, M_C , στο οποίο πραγματοποιήσαμε έναν αριθμό πειραμάτων ευθυγράμμισης μετρήσεων lidar με σαρώσεις χάρτη, με τη χρήση ενός πανοραμικού αισθητήρα δισδιάστατων μετρήσεων και τον αλγόριθμο ευθυγράμμισης PLICP. Η πειραματική διαδικασία είναι η εξής: μέσα στον ελεύθερο χώρο του χάρτη διασπείρεται ένας αριθμός από υποθέσεις στάσεων, ενώ η πραγματική στάση του αισθητήρα τίθεται ως x_a ή x_b . Στη συνέχεια πραγματοποιούνται τόσες ευθυγραμμίσεις μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη όσες αυτές οι υποθέσεις, ανάμεσα στη μέτρηση του πραγματικού αισθητήρα, που λαμβάνεται από την πραγματική του στάση, και εικονικές σαρώσεις που λαμβάνονται από τις στάσεις των υποθέσεων. Ως τελική εκτίμηση λαμβάνεται η διορθωμένη στάση της υπόθεσης για την οποία το σφάλμα ευθυγράμμισης (εξ. 1.4) καταγράφει τη μικρότερη τιμή ανάμεσα σε όλες τις διορθώσεις των στάσεων-υποθέσεων. Ένα αρχικό σύνολο παραμέτρων αποτελεί τη βάση από την οποία τροποποιούνται 8 βασικές παρά-

			Σφάλμα στάσης			
			$\ e(\mathbf{x}_a, \hat{\mathbf{x}}_a^*)\ _2$		$\ e(\mathbf{x}_b, \hat{\mathbf{x}}_b^*)\ _2$	
Θόρυβος μέτρησης $\mathcal{N}(0, \sigma)$, σ :			0.0	0.01	0.0	0.01
Αρχικό σύνολο παραμέτρων			0.0065	0.0056	0.0368	0.0377
Τροποποιημένη παράμετρος	Τιμή	Αρχική				
<code>use_corr_tricks</code>	<code>true</code>	<code>false</code>	0.0065	0.0064	0.0368	0.0377
<code>restart</code>	<code>true</code>	<code>false</code>	0.0065	0.0074	0.0368	0.0377
<code>clustering_threshold</code>	1.025	0.025	0.0065	0.0060	0.0368	0.0381
<code>do_alpha_test</code>	<code>false</code>	<code>true</code>	0.0065	0.0069	0.0368	0.0384
<code>orientation_neighbourhood</code>	2	20	0.0065	0.0066	0.0368	0.0372
	200		15.425	15.425	9.9153	9.9153
<code>outliers_maxPerc</code>	0.9	1.0	0.0043	0.0060	0.0357	0.0358
	0.8		0.0044	0.0051	0.0359	0.0384
	0.7		4.7091	0.0047	10.298	0.0377
<code>outliers_adaptive_order</code>	0.9	1.0	0.0044	0.0047	0.0355	0.0363
	0.8		0.0043	0.0057	0.0366	0.0368
	0.7		0.0042	0.0040	2.9225	4.4985
<code>outliers_remove_doubles</code>	<code>true</code>	<code>false</code>	0.0062	0.0064	0.0362	0.0367

Πίνακας 5.1: Το σφάλμα στάσης $\|e(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}^*)\|_2$ της διορθωμένης υπόθεσης $\hat{\mathbf{x}}^*$ η οποία εμφανίζει το χαμηλότερο σφάλμα ευθυγράμμισης που βρέθηκε από τον PLICP στο περιβάλλον CORRIDOR (εικ. 5.8) σε N πειράματα, για ένα προεπιλεγμένο σύνολο παραμέτρων και για διαφορετικές τιμές βασικών παραμέτρων, και δύο επίπεδα θορύβου του αισθητήρα, ο οποίος υποτίθεται ότι είναι κανονικά κατανοημένος με τυπική απόκλιση σ [m]. Η μονάδα του μέτρησης του σφάλματος στάσης είναι $(\text{m}^2 + \text{rad}^2)^{1/2}$

μετροι για μία φορά και στη συνέχεια τίθενται στην προεπιλεγμένη τιμή τους. Προκειμένου να ερευνηθεί η συμπεριφορά του PLICP εκτελέσαμε την παραπάνω πειραματική διαδικασία για τις στάσεις \mathbf{x}_a και \mathbf{x}_b , και δύο διαφορετικά επίπεδα θορύβου, με σταθερό αριθμό σταθερών στάσεων-υποθέσεων, για 10 φορές, διενεργώντας έτσι $N = 2 \times 2 \times 14 \times 10 = 560$ πειράματα. Η τοποθέτηση των στάσεων διατηρήθηκε σταθερή ώστε να είναι δυνατή η εκτέλεση άμεσων συγκρίσεων ανάμεσα σε όλες τις διαμορφώσεις. Ο πίνακας 5.1 απεικονίζει τις παραμέτρους υπό τροποποίηση και το συνολικό σφάλμα στάσης για κάθε λύση. Λεπτομέρειες σχετικά με τη σημασία και τη χρήση κάθε παραμέτρου βρίσκονται στα [Cenb] και [Cenc].

Θα ξεκινήσουμε την ανάλυση της άστατης συμπεριφοράς του PLICP εστιάζοντας στα αποτελέσματα που αφορούν στην ευθυγράμμιση ελλείψει μετρητικού θορύβου. Για τις δύο συγκεκριμένες στάσεις, του συγκεκριμένου περιβάλλοντος, η τροποποίηση των παραμέτρων που σχετίζονται με τη χρήση ενισχυμένων μεθόδων εύρεσης αντιστοιχίσεων (`use_corr_tricks`), την επανεκκίνηση όταν μια λύση υπερβαίνει ένα κατώφλι (`restart`), την ομαδοποίηση σημείων (`clustering_threshold`), τη δοκιμή μιας λύσης λαμβάνοντας υπόψη τον προσανατολισμό του κάθετου στην επιφάνεια των σαρώσεων διανύσματος (`do_alpha_test`), και τον

αριθμό των γειτονικών ακτίνων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του προσανατολισμού (`orientation_neighbourhood`)—η τροποποίηση αυτών των παραμέτρων έχει μηδενική επίδραση στη λύση του αλγορίθμου, για κάθε στάση του αισθητήρα. Εάν εξετάσουμε το σφάλμα στάσης σε σχέση με αυτές τις παραμέτρους όταν υπάρχει θόρυβος τότε παρατηρούμε ότι η τροποποίηση μιας παραμέτρου μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στη λύση για μια στάση, αλλά αρνητικό για άλλη (π.χ. `use_corr_tricks`, `clustering_threshold`). Επιπλέον, η τροποποίηση παραμέτρων που αφορούν σε λειτουργικότητες των οποίων ο σκοπός είναι η βελτίωση της επίδοσης της μεθόδου δεν οδηγεί πάντα στο επιθυμητό αποτέλεσμα (π.χ. `use_corr_tricks`, `restart`). Η τροποποίηση άλλων παραμέτρων προς τη θετική κατεύθυνση (δηλαδή τροποποίηση που έχει ως σκοπό τη μείωση του σφάλματος ευθυγράμμισης, π.χ. `outliers_remove_doubles`) παράγει συνεπή αποτελέσματα για όλα τα επίπεδα θορύβου των μετρήσεων του αισθητήρα για μια στάση (x_b), ασυνεπή για άλλα (x_a), ή συνολικά καταστροφικά λανθασμένα αποτελέσματα (`orientation_neighbourhood` = 200).

Η υψηλότερη ευαισθησία των λύσεων του PLICP, ωστόσο, παρουσιάζεται όσον αφορά παραμέτρους που σχετίζονται με το φιλτράρισμα των μη έγκυρων αντιστοιχίσεων, οι οποίες συμβολίζονται με το πρόθεμα `outliers_`. Η τιμή 1.0—`outliers_maxPerc` καθορίζει το ποσοστό των αντιστοιχίσεων με το μεγαλύτερο σφάλμα που πρέπει να απορρίφθούν, ενώ η τιμή `outliers_adaptive_order` καθορίζει το κατώτερο ποσοστό των αντιστοιχίσεων (ανάλογα με το σφάλμα τους) για το οποίο εκτελείται προσαρμοστικός (adaptive) αλγόριθμος για την απόρριψή τους. Όσον αφορά στην πρώτη παράμετρο, αυτό που παρατηρούμε και για τις δύο πραγματικές στάσεις του αισθητήρα είναι ότι η απόρριψη του κορυφαίου 30% των πιο λανθασμένων αντιστοιχίσεων οδηγεί σε καταστροφική αποτυχία ελλείψει θορύβου, αλλά ακριβή συμπεριφορά στην αντίθετη περίπτωση. Όσον αφορά σε άλλες τιμές, δεν παρατηρείται συνεπής συμπεριφορά, αν και όλες οδηγούν σε σωστή σύγκλιση. Όσον αφορά στη δεύτερη παράμετρο, η ασυνέπεια μεταξύ των αποτελεσμάτων προκύπτει στο επίπεδο διαφορετικών στάσεων—η ρύθμιση αυτής της παραμέτρου στην τιμή 70% παρουσιάζει αυξημένη ακρίβεια για τη στάση x_a , αλλά καταστροφική αποτυχία σύγκλισης για την x_b . Ακόμη και αν όλες οι τιμές που δοκιμάστηκαν είχαν ως αποτέλεσμα τη σωστή σύγκλιση, θα παρέμενε το ζήτημα της (α-)συνέπειας σε διαφορετικά επίπεδα θορύβου του αισθητήρα και διαφορετικές στάσεις εντός του ίδιου χάρτη, και, μαζί με αυτό, το ζήτημα της διαισθητικής ασυνέπειας σχετικά με την επίδρασή τους.

Η παραπάνω ανάλυση καταδεινύει τις παγίδες στις οποίες μπορεί να βρεθεί μια μέθοδος επίλυσης του προβλήματος VI όταν βασίζεται στην ανάπτυξη αντιστοιχίσεων και τον ακριβή καθορισμό λεπτών εσωτερικών παραμέτρων (οι οποίες αφορούν και σε αυτές). Πιο συγκεκριμένα, με βάση τα παραπάνω αποδεικτικά στοιχεία, καταλήγουμε στα κάτωθι συμπεράσματα:

- Η δυνατότητα προσαρμογής παραμέτρων σε συγκεκριμένες περιστάσεις δεν είναι χωρίς τα πλεονεκτήματά της, αλλά ταυτόχρονα και χωρίς τις παρενέργειές της. Η αύξηση του μεγέθους του συνόλου των παραμέτρων αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος, και μειώνει την προβλεψιμότητα και τη συνέπειά των λύσεών του.
- Σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας [DAM17; Ber+21], η μεθοδολογία ευθυγράμμισης συνόλων σημείων που λειτουργεί χωρίς την ανακάλυψη αντιστοιχίσεων ανάμεσα στις ακτίνες των σαρώσεων εισόδου θα ήταν άξια έρευνητικής προσπάθειας. Αυτό το συμπέρασμα στηρίζεται στο γεγονός ότι (α) όσο αυξάνει ο θόρυβος μέτρησης τόσο δυσχεραίνεται η διάκριση έγκυρων από άκυρες αντιστοιχίες, και (β) η αφαίρεση αυτής της δομικής βάσης λειτουργίας μειώνει την πολυπλοκότητα του συστήματος λόγω της ταυτόχρονης αφαίρεσης της ανάγκης καθορισμού των παραμέτρων που διέπουν την απόκρισή της

Μέρος ΙΙΙ

Συμπεράσματα

Μέρος IV

Αναφορές

- [Fré06] M. Maurice Fréchet. “Sur quelques points du calcul fonctionnel”. Στο: *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo* 22.1 (Δεκ. 1906), σσ. 1–72. ISSN: 0009-725X. DOI: 10.1007/BF03018603. URL: <http://link.springer.com/10.1007/BF03018603>.
- [LW79] Tomás Lozano-Pérez και Michael A. Wesley. “An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles”. Στο: *Communications of the ACM* 22.10 (Οκτ. 1979), σσ. 560–570. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/359156.359164. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/359156.359164>.
- [May79] Peter S. Maybeck. “Stochastic models, estimation, and control - Introduction”. Στο: *Stochastic models, estimation, and control*. Τόμ. 1. 1979.
- [Rou84] Peter J. Rousseeuw. “Least Median of Squares Regression”. Στο: *Journal of the American Statistical Association* 79.388 (Δεκ. 1984), σσ. 871–880. ISSN: 0162-1459. DOI: 10.1080/01621459.1984.10477105. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1984.10477105>.
- [BK91] J. Borenstein και Y. Koren. “The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots”. Στο: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 7.3 (Ιούν. 1991), σσ. 278–288. ISSN: 1042296X. DOI: 10.1109/70.88137. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/88137/>.
- [Gri91] W. Eric L. Grimson. *Object Recognition by Computer*. 1991. ISBN: 9780262071307. URL: <https://mitpress.mit.edu/books/object-recognition-computer>.
- [Lat91] Jean-Claude Latombe. *Robot Motion Planning*. 1991. ISBN: 978-1-4615-4022-9.
- [BM92] P.J. Besl και Neil D. McKay. “A method for registration of 3-D shapes”. Στο: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14.2 (Φεβ. 1992), σσ. 239–256. ISSN: 0162-8828. DOI: 10.1109/34.121791. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/121791/>.
- [SG92] A. F. M. Smith και A. E. Gelfand. “Bayesian Statistics without Tears: A Sampling–Resampling Perspective”. Στο: *The American Statistician* 46.2 (Μάι. 1992), σσ. 84–88. ISSN: 0003-1305. DOI: 10.1080/00031305.1992.10475856.

URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00031305.1992.10475856>.

- [FM94] Feng Lu και Milios. “Robot pose estimation in unknown environments by matching 2D range scans”. Στο: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR-94*. IEEE Comput. Soc. Press, 1994, σσ. 935–938. ISBN: 0-8186-5825-8. DOI: 10.1109/CVPR.1994.323928. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/323928/>.
- [QDD94] Qin-Sheng Chen, M. Defrise και F. Deconinck. “Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition”. Στο: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 16.12 (1994), σσ. 1156–1168. ISSN: 01628828. DOI: 10.1109/34.387491. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/387491/>.
- [Kav+96] L.E. Kavraki κ.ά. “Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces”. Στο: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12.4 (1996), σσ. 566–580. ISSN: 1042296X. DOI: 10.1109/70.508439. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/508439/>.
- [FBT97] D. Fox, W. Burgard και S. Thrun. “The dynamic window approach to collision avoidance”. Στο: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 4.1 (Μαρ. 1997), σσ. 23–33. ISSN: 10709932. DOI: 10.1109/100.580977. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/580977/>.
- [Lav98] S. Lavalle. *Rapidly-exploring random trees : a new tool for path planning*. Αδημοσίευτη ερευνητική εργασία. 1998, σ. 4.
- [RW98] R. Tyrrell Rockafellar και Roger J. B. Wets. *Variational Analysis*. 1998. ISBN: 978-3-642-02431-3.
- [BK00] R. Bohlin και L.E. Kavraki. “Path planning using lazy PRM”. Στο: *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*. IEEE, 2000, 521–528 vol.1. ISBN: 0-7803-5886-4. DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844107. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/844107/>.

- [GC00] S.S. Ge και Y.J. Cui. “New potential functions for mobile robot path planning”. Στο: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 16.5 (2000), σσ. 615–620. ISSN: 1042296X. DOI: 10.1109/70.880813. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/880813/>.
- [Fox01] Dieter Fox. *KLD-Sampling: Adaptive Particle Filters and Mobile Robot Localization*. Αδημοσίευτη ερευνητική εργασία. 2001. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/KLD-Sampling%7B%5C%%7D3A-Adaptive-Particle-Filters-and-Mobile-Fox/bc83280b12828a45366368294001f5890c07e02b>.
- [Gus+02] Fredrik Gustafsson κ.ά. “Particle filters for positioning, navigation, and tracking”. Στο: *IEEE Transactions on Signal Processing* 50.2 (2002). ISSN: 1053587X. DOI: 10.1109/78.978396.
- [Lac+02] Simon Lacroix κ.ά. “Autonomous Rover Navigation on Unknown Terrains: Functions and Integration”. Στο: *The International Journal of Robotics Research* 21.10-11 (Οκτ. 2002), σσ. 917–942. ISSN: 0278-3649. DOI: 10.1177/0278364902021010841. URL: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0278364902021010841>.
- [Thr02] Sebastian Thrun. “Particle Filters in Robotics”. Στο: *Smithsonian* 1.4 (2002). ISSN: 00222275.
- [LGT03] Maxim Likhachev, Geoff Gordon και Sebastian Thrun. “ARA*: Anytime A* with Provable Bounds on Sub-Optimality”. Στο: *Proceedings of (NeurIPS) Neural Information Processing Systems*. 2003.
- [SM03] Endre Süli και David F. Mayers. *An Introduction to Numerical Analysis*. Cambridge University Press, Αύγ. 2003. ISBN: 9780511801181. DOI: 10.1017/CB09780511801181. URL: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9780511801181/type/book>.
- [MOM04] J. Minguez, J. Osuna και L. Montano. “A ”divide and conquer” strategy based on situations to achieve reactive collision avoidance in troublesome scenarios”. Στο: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*. IEEE, 2004, 3855–3862 Vol.4. ISBN: 0-7803-8232-3. DOI: 10.1109/ROBOT.2004.1308869. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1308869/>.

- [Phi04] Roland Philippsen. “Motion planning and obstacle avoidance for mobile robots in highly cluttered dynamic environments”. Διδακτορική διατρ. EPFL, 2004. DOI: 10.5075/epfl-thesis-3146.
- [DK05] A. Diosi και L. Kleeman. “Laser scan matching in polar coordinates with application to SLAM”. Στο: *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2005, σσ. 3317–3322. ISBN: 0-7803-8912-3. DOI: 10.1109/IRoS.2005.1545181. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1545181/>.
- [LH05] M. Leordeanu και M. Hebert. “A spectral technique for correspondence problems using pairwise constraints”. Στο: *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV’05) Volume 1*. IEEE, 2005, 1482–1489 Vol. 2. ISBN: 0-7695-2334-X. DOI: 10.1109/ICCV.2005.20. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1544893/>.
- [Lik+05] Maxim Likhachev κ.ά. “Anytime Dynamic A*: An Anytime, Replanning Algorithm”. Στο: *Proceedings of 15th International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2005.
- [Lin+05] Kai Lingemann κ.ά. “High-speed laser localization for mobile robots”. Στο: *Robotics and Autonomous Systems* 51.4 (Ιούν. 2005), σσ. 275–296. ISSN: 09218890. DOI: 10.1016/j.robot.2005.02.004. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921889005000254>.
- [Mik05] Alonzo Kelly Mikhail Pivtoraiko. “Efficient constrained path planning via search in state lattices”. Στο: *Proceedings of 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*. 2005.
- [MMM05] L. Montesano, J. Minguez και L. Montano. “Probabilistic scan matching for motion estimation in unstructured environments”. Στο: *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2005, σσ. 3499–3504. ISBN: 0-7803-8912-3. DOI: 10.1109/IRoS.2005.1545182. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1545182/>.

- [TBF05] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard και Dieter Fox. *Probabilistic robotics*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2005. ISBN: 9780262201629. URL: <http://www.amazon.de/gp/product/0262201623/102-8479661-9831324?v=glance%7B%5C%26%7Dn=283155%7B%5C%26%7Dn=507846%7B%5C%26%7Ds=books%7B%5C%26%7Dv=glance>.
- [TGL05] Benjamín Tovar, Luis Guilamo και Steven M. LaValle. “Gap Navigation Trees: Minimal Representation for Visibility-based Tasks”. Στο: Οκτ. 2005, σσ. 425–440. DOI: 10.1007/10991541_29. URL: [http://link.springer.com/10.1007/10991541_29](http://link.springer.com/10.1007/10991541%7B%5C%26%7Dn=283155%7B%5C%26%7Dn=507846%7B%5C%26%7Ds=books%7B%5C%26%7Dv=glance).
- [Gar+06] Santiago Garrido καί. “Path Planning for Mobile Robot Navigation using Voronoi Diagram and Fast Marching”. Στο: *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, Οκτ. 2006, σσ. 2376–2381. ISBN: 1-4244-0258-1. DOI: 10.1109/IR0S.2006.282649. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4058742/>.
- [BG07] Priyadarshi Bhattacharya και Marina L. Gavrilova. “Voronoi diagram in optimal path planning”. Στο: *4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (ISVD 2007)*. IEEE, Ιούλ. 2007, σσ. 38–47. ISBN: 0-7695-2869-4. DOI: 10.1109/ISVD.2007.43. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4276103/>.
- [Gho07] Subir Kumar Ghosh. *Visibility Algorithms in the Plane*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN: 9780511543340. DOI: 10.1017/CB09780511543340. URL: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9780511543340/type/book>.
- [GSB07] Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss και Wolfram Burgard. “Improved Techniques for Grid Mapping With Rao-Blackwellized Particle Filters”. Στο: *IEEE Transactions on Robotics* 23.1 (Φεβ. 2007), σσ. 34–46. ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/TR0.2006.889486. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4084563/>.
- [KF07] Hanna Kurniawati και Thierry Fraichard. “From path to trajectory deformation”. Στο: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE,

- Οκτ. 2007, σσ. 159–164. ISBN: 1424409128. DOI: 10.1109/IR0S.2007.4399235. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4399235/>.
- [LSK07] Henry. G. Liddell, Robert Scott και Α. Κωνσταντινίδου. *Επιτομή του μεγάλου λεξικού της ελληνικής γλώσσας*. 2007.
- [MLD07] Martin Magnusson, Achim Lilienthal και Tom Duckett. “Scan registration for autonomous mining vehicles using 3D-NDT”. Στο: *Journal of Field Robotics* 24.10 (Οκτ. 2007), σσ. 803–827. ISSN: 15564959. DOI: 10.1002/rob.20204. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20204>.
- [MWS07] Sean R. Martin, Steve E. Wright και John W. Sheppard. “Offline and Online Evolutionary Bi-Directional RRT Algorithms for Efficient Re-Planning in Dynamic Environments”. Στο: *2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. IEEE, Σεπτ. 2007, σσ. 1131–1136. ISBN: 978-1-4244-1153-5. DOI: 10.1109/COASE.2007.4341761. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4341761/>.
- [Cen08] Andrea Censi. “An ICP variant using a point-to-line metric”. Στο: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, Μάι. 2008, σσ. 19–25. ISBN: 978-1-4244-1646-2. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543181. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4543181/>.
- [DB08] J.W. Durham και F. Bullo. “Smooth Nearness-Diagram Navigation”. Στο: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, Σεπτ. 2008, σσ. 690–695. ISBN: 978-1-4244-2057-5. DOI: 10.1109/IR0S.2008.4651071. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4651071/>.
- [MMM08] Luis Montesano, Javier Minguez και Luis Montano. “Modeling dynamic scenarios for local sensor-based motion planning”. Στο: *Autonomous Robots* 25.3 (Οκτ. 2008), σσ. 231–251. ISSN: 0929-5593. DOI: 10.1007/s10514-008-9092-9. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10514-008-9092-9>.
- [NH08] J. W. Nicholson και A. J. Healey. “The present state of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) applications and technologies”. Στο: *Marine Technology Society Journal* 42.1 (2008), σσ. 44–51. ISSN: 00253324. DOI: 10.4031/002533208786861272.

- [GFC09] Julien Guitton, Jean-Loup Farges και Raja Chatila. “Cell-RRT: Decomposing the environment for better plan”. Στο: *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, Οκτ. 2009, σσ. 5776–5781. ISBN: 978-1-4244-3803-7. DOI: 10.1109/IR0S.2009.5354106. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5354106/>.
- [Ng09] Morgan Quigley; Ken Conley; Brian Gerkey; Josh Faust; Tully Foote; Jeremy Leibs; Rob Wheeler; Andrew Y. Ng. *ROS: an open-source Robot Operating System*. 2009.
- [Ols09] E.B. Olson. “Real-time correlative scan matching”. Στο: *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, Μάι. 2009, σσ. 4387–4393. ISBN: 978-1-4244-2788-8. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152375. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5152375/>.
- [SWW09] David Sandberg, Krister Wolff και Mattias Wahde. “A Robot Localization Method Based on Laser Scan Matching”. Στο: 2009, σσ. 171–178. DOI: 10.1007/978-3-642-03983-6_21. URL: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-03983-6_21.
- [SHT09] A. Segal, D. Haehnel και S. Thrun. “Generalized-ICP”. Στο: *Robotics: Science and Systems V*. Robotics: Science και Systems Foundation, Ιούν. 2009. ISBN: 9780262514637. DOI: 10.15607/RSS.2009.V.021. URL: <http://www.roboticsproceedings.org/rss05/p21.pdf>.
- [JCS10] Léonard Jaillet, Juan Cortés και T Siméon. “Sampling-Based Path Planning on Configuration-Space Costmaps”. Στο: *IEEE Transactions on Robotics* 26.4 (Αύγ. 2010), σσ. 635–646. ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/TR0.2010.2049527. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5477164/>.
- [KF10] S. Karaman και E. Frazzoli. “Incremental Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning”. Στο: *Robotics: Science and Systems VI*. Robotics: Science και Systems Foundation, Ιούν. 2010. ISBN: 9780262516815. DOI: 10.15607/RSS.2010.VI.034. URL: <http://www.roboticsproceedings.org/rss06/p34.pdf>.

- [LCV10] Somchaya Liemhetcharat, Brian Coltin και Manuela Veloso. “Vision-Based Cognition of a Humanoid Robot in Standard Platform Robot Soccer”. Στο: *Proceedings of the 5th Workshop on Humanoid Soccer Robots*. Nashville USA, 2010.
- [KKK11] Jungtae Kim, Munsang Kim και Daijin Kim. “Variants of the Quantized Visibility Graph for Efficient Path Planning”. Στο: *Advanced Robotics* 25.18 (Ιαν. 2011), σσ. 2341–2360. ISSN: 0169-1864. DOI: 10.1163/016918611X603855. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1163/016918611X603855>.
- [NB11] Noboru Noguchi και Oscar C. Barawid. “Robot Farming System Using Multiple Robot Tractors in Japan Agriculture”. Στο: *IFAC Proceedings Volumes* 44.1 (Ιαν. 2011), σσ. 633–637. ISSN: 14746670. DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.03838. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667016436815>.
- [PL11] Mike Phillips και Maxim Likhachev. “SIPP: Safe interval path planning for dynamic environments”. Στο: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, Μάι. 2011, σσ. 5628–5635. ISBN: 978-1-61284-386-5. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980306. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5980306/>.
- [TBD11] Madjid Tavana, Timothy E. Busch και Eleanor L. Davis. “Fuzzy Multiple Criteria Workflow Robustness and Resiliency Modeling with Petri Nets”. Στο: *International Journal of Knowledge-Based Organizations* 1.4 (Οκτ. 2011), σσ. 72–90. ISSN: 2155-6393. DOI: 10.4018/ijkbo.2011100105. URL: <http://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/ijkbo.2011100105>.
- [ZZY11] Jihua Zhu, Nanning Zheng και Zejian Yuan. “An Improved Technique for Robot Global Localization in Indoor Environments”. Στο: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 8.1 (Μαρ. 2011), σ. 7. ISSN: 1729-8814. DOI: 10.5772/10525. URL: <http://journals.sagepub.com/doi/10.5772/10525>.
- [ZB11] Quanyan Zhu και Tamer Basar. “Robust and resilient control design for cyber-physical systems with an application to power systems”. Στο: *IEEE Conference*

- on Decision and Control and European Control Conference*. IEEE, Δεκ. 2011, σσ. 4066–4071. ISBN: 978-1-61284-801-3. DOI: 10.1109/CDC.2011.6161031. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6161031/>.
- [CSC12] Sachin Chitta, Ioan Sucan και Steve Cousins. “MoveIt! [ROS Topics]”. Στο: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19.1 (Μαρ. 2012), σσ. 18–19. ISSN: 1070-9932. DOI: 10.1109/MRA.2011.2181749. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6174325/>.
- [Oli+12] Ayrton Oliver κ.ά. “Using the Kinect as a navigation sensor for mobile robotics”. Στο: *Proceedings of the 27th Conference on Image and Vision Computing New Zealand - IVCNZ '12*. New York, New York, USA: ACM Press, 2012, σσ. 509–514. ISBN: 9781450314732. DOI: 10.1145/2425836.2425932. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2425836.2425932>.
- [Rös+12] Christoph Rösmann κ.ά. “Trajectory modification considering dynamic constraints of autonomous robots”. Στο: *7th German Conference on Robotics, ROBOTIK 2012*. 2012, σσ. 74–79.
- [Row+12] Jorg Rowekamper κ.ά. “On the position accuracy of mobile robot localization based on particle filters combined with scan matching”. Στο: *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, Οκτ. 2012, σσ. 3158–3164. ISBN: 978-1-4673-1736-8. DOI: 10.1109/IRoS.2012.6385988. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6385988/>.
- [CV13] Brian Coltin και Manuela Veloso. “Multi-observation sensor resetting localization with ambiguous landmarks”. Στο: *Autonomous Robots* 35.2-3 (Οκτ. 2013), σσ. 221–237. ISSN: 0929-5593. DOI: 10.1007/s10514-013-9347-y. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10514-013-9347-y>.
- [GG13] Subir K. Ghosh και Partha P. Goswami. “Unsolved problems in visibility graphs of points, segments, and polygons”. Στο: *ACM Computing Surveys* 46.2 (Νοέ. 2013), σσ. 1–29. ISSN: 0360-0300. DOI: 10.1145/2543581.2543589. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2543581.2543589>.

- [Ok+13] Kyel Ok κ.ά. “Path planning with uncertainty: Voronoi Uncertainty Fields”. Στο: *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, Μάι. 2013, σσ. 4596–4601. ISBN: 978-1-4673-5643-5. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631230. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6631230/>.
- [BFR14] Jenay M Beer, Arthur D Fisk και Wendy A Rogers. “Toward a Framework for Levels of Robot Autonomy in Human-Robot Interaction”. Στο: *Journal of Human-Robot Interaction* 3.2 (Ιούν. 2014), σ. 74. ISSN: 2163-0364. DOI: 10.5898/JHRI.3.2.Beer. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3109833>.
- [MDM14] Tanwi Mallick, Partha Pratim Das και Arun Kumar Majumdar. “Characterizations of Noise in Kinect Depth Images: A Review”. Στο: *IEEE Sensors Journal* 14.6 (Ιούν. 2014), σσ. 1731–1740. ISSN: 1530-437X. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2309987. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6756961/>.
- [PP14] Soonyong Park και Sung-Kee Park. “Global localization for mobile robots using reference scan matching”. Στο: *International Journal of Control, Automation and Systems* 12.1 (Φεβ. 2014), σσ. 156–168. ISSN: 1598-6446. DOI: 10.1007/s12555-012-9223-0. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s12555-012-9223-0>.
- [FCR15] Chen Friedman, Inderjit Chopra και Omri Rand. “Perimeter-Based Polar Scan Matching (PB-PSM) for 2D Laser Odometry”. Στο: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 80.2 (Νοέ. 2015), σσ. 231–254. ISSN: 0921-0296. DOI: 10.1007/s10846-014-0158-y. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10846-014-0158-y>.
- [Ols15] Edwin Olson. “M3RSM: Many-to-many multi-resolution scan matching”. Στο: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, Μάι. 2015, σσ. 5815–5821. ISBN: 978-1-4799-6923-4. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7140013. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7140013/>.
- [DB16] Murat Dikmen και Catherine M. Burns. “Autonomous Driving in the Real World”. Στο: *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive*

- User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. New York, NY, USA: ACM, Οκτ. 2016, σσ. 225–228. ISBN: 9781450345330. DOI: 10.1145/3003715.3005465. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3003715.3005465>.
- [Kon+16] Jaromir Konecny κ.ά. “Novel Point-to-Point Scan Matching Algorithm Based on Cross-Correlation”. Στο: *Mobile Information Systems 2016* (2016), σσ. 1–11. ISSN: 1574-017X. DOI: 10.1155/2016/6463945. URL: <http://www.hindawi.com/journals/misy/2016/6463945/>.
- [Li+16] Jiayuan Li κ.ά. “Feature-Based Laser Scan Matching and Its Application for Indoor Mapping”. Στο: *Sensors* 16.8 (Αύγ. 2016), σ. 1265. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s16081265. URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1265>.
- [Par16] Jong Jin Park. “Graceful Navigation for Mobile Robots in Dynamic and Uncertain Environments”. Διδακτορική διατρ. University of Michigan, Horace H. Rackham School of Graduate Studies, 2016.
- [Vas+16] Goran Vasiljević κ.ά. “High-accuracy vehicle localization for autonomous warehousing”. Στο: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 42 (Δεκ. 2016), σσ. 1–16. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.05.001. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584515300314>.
- [DAM17] F.A. Donoso, K.J. Austin και P.R. McAree. “How do ICP variants perform when used for scan matching terrain point clouds?” Στο: *Robotics and Autonomous Systems* 87 (Ιαν. 2017), σσ. 147–161. ISSN: 09218890. DOI: 10.1016/j.robot.2016.10.011. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921889016301282>.
- [GPG17] Dhiraj Gandhi, Lerrel Pinto και Abhinav Gupta. “Learning to fly by crashing”. Στο: *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, Σεπτ. 2017, σσ. 3948–3955. ISBN: 978-1-5386-2682-5. DOI: 10.1109/IROS.2017.8206247. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8206247/>.

- [Li+17] Jiaxin Li κ.ά. “Deep learning for 2D scan matching and loop closure”. Στο: *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, Σεπτ. 2017, σσ. 763–768. ISBN: 978-1-5386-2682-5. DOI: 10.1109/IROS.2017.8202236. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8202236/>.
- [Moh+17] Haytham Mohamed κ.ά. “A Novel Real-Time Reference Key Frame Scan Matching Method”. Στο: *Sensors* 17.5 (Μάι. 2017), σ. 1060. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s17051060. URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/5/1060>.
- [RHB17] Christoph Rosmann, Frank Hoffmann και Torsten Bertram. “Kinodynamic trajectory optimization and control for car-like robots”. Στο: *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, Σεπτ. 2017, σσ. 5681–5686. ISBN: 978-1-5386-2682-5. DOI: 10.1109/IROS.2017.8206458. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8206458/>.
- [Zha+17] Qibin Zhang κ.ά. “Mobile Robot Global Localization Using Particle Swarm Optimization with a 2D Range Scan”. Στο: *Proceedings of the 2017 International Conference on Robotics and Artificial Intelligence - ICRAI 2017*. New York, New York, USA: ACM Press, 2017, σσ. 105–109. ISBN: 9781450353588. DOI: 10.1145/3175603.3175618. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3175603.3175618>.
- [Zho+17] Bo Zhou κ.ά. “A LiDAR Odometry for Outdoor Mobile Robots Using NDT Based Scan Matching in GPS-denied environments”. Στο: *2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. IEEE, Ιούλ. 2017, σσ. 1230–1235. ISBN: 978-1-5386-0490-8. DOI: 10.1109/CYBER.2017.8446588. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8446588/>.
- [CRP18] Matthew Cooper, John Raquet και Rick Patton. “Range Information Characterization of the Hokuyo UST-20LX LIDAR Sensor”. Στο: *Photonics* 5.2 (Μάι. 2018), σ. 12. ISSN: 2304-6732. DOI: 10.3390/photonics5020012. URL: <http://www.mdpi.com/2304-6732/5/2/12>.

- [Jia+18] Guolai Jiang κ.ά. “FFT-Based Scan-Matching for SLAM Applications with Low-Cost Laser Range Finders”. Στο: *Applied Sciences* 9.1 (Δεκ. 2018), σ. 41. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app9010041. URL: <http://www.mdpi.com/2076-3417/9/1/41>.
- [Lim+18] Pedro F. Lima κ.ά. “Experimental validation of model predictive control stability for autonomous driving”. Στο: *Control Engineering Practice* 81 (Δεκ. 2018), σσ. 244–255. ISSN: 09670661. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.09.021. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967066118305926>.
- [Pen+18] Gang Peng κ.ά. “An Improved AMCL Algorithm Based on Laser Scanning Match in a Complex and Unstructured Environment”. Στο: *Complexity* 2018 (Δεκ. 2018), σσ. 1–11. ISSN: 1076-2787. DOI: 10.1155/2018/2327637. URL: <https://www.hindawi.com/journals/complexity/2018/2327637/>.
- [Wan+18] Yun-Ting Wang κ.ά. “A Single LiDAR-Based Feature Fusion Indoor Localization Algorithm”. Στο: *Sensors* 18.4 (Απρ. 2018), σ. 1294. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18041294. URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/1294>.
- [Wen+18] Jian Wen κ.ά. “A Novel 2D Laser Scan Matching Algorithm for Mobile Robots Based on Hybrid Features”. Στο: *2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*. IEEE, Αύγ. 2018, σσ. 366–371. ISBN: 978-1-5386-6869-6. DOI: 10.1109/RCAR.2018.8621744. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8621744/>.
- [WHZ18] Weisong Wen, Li-Ta Hsu και Guohao Zhang. “Performance Analysis of NDT-based Graph SLAM for Autonomous Vehicle in Diverse Typical Driving Scenarios of Hong Kong”. Στο: *Sensors* 18.11 (Νοέ. 2018), σ. 3928. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18113928. URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3928>.
- [Wil+18] Kenneth H. Williford κ.ά. “The NASA Mars 2020 Rover Mission and the Search for Extraterrestrial Life”. Στο: *From Habitability to Life on Mars*. Elsevier, 2018, σσ. 275–308. DOI: 10.1016/B978-0-12-809935-3.00010-4. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128099353000104>.

- [YZD18] Heng Yu, Yadan Zeng και Houde Dai. “A Novel Scan Matching Method for Mobile Robot Based on Phase Only Matched Filtering *”. Στο: *2018 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*. IEEE, Αύγ. 2018, σσ. 391–394. ISBN: 978-1-5386-8069-8. DOI: 10.1109/ICInfA.2018.8812336. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8812336/>.
- [BAJ19] Guillaume Bresson, Zayed Alsayed και Sylvain Jonchery. “Graph-based Map-Aided Localization using Cadastral Maps as Virtual Laser Scans”. Στο: *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. IEEE, Οκτ. 2019, σσ. 4074–4080. ISBN: 978-1-5386-7024-8. DOI: 10.1109/ITSC.2019.8917506. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8917506/>.
- [CHM19] Weili Chen, Ting Huang και Allam Maalla. “Research on Adaptive Monte Carlo Location Method Based on Fusion Posture Estimation”. Στο: *2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*. IEEE, Οκτ. 2019, σσ. 1209–1213. ISBN: 978-1-7281-0513-0. DOI: 10.1109/IMCEC46724.2019.8983808. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8983808/>.
- [CJK19] Baehoon Choi, HyungGi Jo και Euntai Kim. “Normal Distribution Mixture Matching based Model Free Object Tracking Using 2D LIDAR”. Στο: *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, Νοέ. 2019, σσ. 455–461. ISBN: 978-1-7281-4004-9. DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8967876. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8967876/>.
- [Kow19] Wojciech Kowalczyk. “Rapid Navigation Function Control for Two-Wheeled Mobile Robots”. Στο: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 93.3-4 (Μάρ. 2019), σσ. 687–697. ISSN: 0921-0296. DOI: 10.1007/s10846-018-0879-4. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10846-018-0879-4>.
- [Liu+19] Xiaohui Liu κ.ά. “Research on Improved Localization and Navigation Algorithm for Automatic Guided Vehicle”. Στο: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 611.1 (Οκτ. 2019), σ. 012076. ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/611/1/012076. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/611/1/012076>.

- [QJ19] Wang Qingshan και Zhang Jun. “Point Cloud Registration Algorithm Based on Combination of NDT and PLICP”. Στο: *2019 15th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS)*. IEEE, Δεκ. 2019, σσ. 132–136. ISBN: 978-1-7281-6092-4. DOI: 10.1109/CIS.2019.00036. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9023760/>.
- [Sim+19] Jesse R. Simpson κ.ά. “An estimation of the future adoption rate of autonomous trucks by freight organizations”. Στο: *Research in Transportation Economics* 76 (Σεπτ. 2019), σ. 100737. ISSN: 07398859. DOI: 10.1016/j.retrec.2019.100737. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0739885919302495>.
- [VKA19] Juan P. Vasconez, George A. Kantor και Fernando A. Auat Cheein. “Human–robot interaction in agriculture: A survey and current challenges”. Στο: *Biosystems Engineering* 179 (Μαρ. 2019), σσ. 35–48. ISSN: 15375110. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.12.005. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511017309625>.
- [Wan+19] L. Wang κ.ά. “Symbiotic human-robot collaborative assembly”. Στο: *CIRP Annals* 68.2 (2019), σσ. 701–726. ISSN: 00078506. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.05.002. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850619301593>.
- [BBA20] Sara Bouraine, Abdelhak Bougouffa και Ouahiba Azouaoui. “NDT-PSO, a New NDT based SLAM Approach using Particle Swarm Optimization”. Στο: *2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. IEEE, Δεκ. 2020, σσ. 321–326. ISBN: 978-1-7281-7709-0. DOI: 10.1109/ICARCV50220.2020.9305519. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9305519/>.
- [KSL20] Zeashan Hameed Khan, Afifa Siddique και Chang Won Lee. “Robotics Utilization for Healthcare Digitization in Global COVID-19 Management”. Στο: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17.11 (Μάι. 2020), σ. 3819. ISSN: 1660-4601. DOI: 10.3390/ijerph17113819. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/11/3819>.

- [Lee+20] Sumyeong Lee κ.ά. “Robust 3-Dimension Point Cloud Mapping in Dynamic Environment Using Point-Wise Static Probability-Based NDT Scan-Matching”. Στο: *IEEE Access* 8 (2020), σσ. 175563–175575. ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3025537. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9201452/>.
- [LW20] Zhichao Li και Naiyan Wang. “DMLO: Deep Matching LiDAR Odometry”. Στο: *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, Οκτ. 2020, σσ. 6010–6017. ISBN: 978-1-7281-6212-6. DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9341206. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9341206/>.
- [Qi+20] Xianyu Qi κ.ά. “Building semantic grid maps for domestic robot navigation”. Στο: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 17.1 (Ιαν. 2020). ISSN: 1729-8814. DOI: 10.1177/1729881419900066. URL: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1729881419900066>.
- [SCD20] Kyle H. Sheetz, Jake Claflin και Justin B. Dimick. “Trends in the Adoption of Robotic Surgery for Common Surgical Procedures”. Στο: *JAMA Network Open* 3.1 (Ιαν. 2020), e1918911. ISSN: 2574-3805. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2019.18911. URL: <https://jamanetwork.com/journals/jamanetworkopen/fullarticle/2758472>.
- [Ber+21] Lukas Bernreiter κ.ά. “PHASER: A Robust and Correspondence-Free Global Pointcloud Registration”. Στο: *IEEE Robotics and Automation Letters* 6.2 (2021), σσ. 855–862.
- [BBA21] Sara Bouraine, Abdelhak Bougouffa και Ouahiba Azouaoui. “Particle swarm optimization for solving a scan-matching problem based on the normal distributions transform”. Στο: *Evolutionary Intelligence* (Ιαν. 2021). ISSN: 1864-5909. DOI: 10.1007/s12065-020-00545-y. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s12065-020-00545-y>.
- [Che+21] Cheng Chen κ.ά. “The adoption of self-driving delivery robots in last mile logistics”. Στο: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 146 (Φεβ. 2021), σ. 102214. ISSN: 13665545. DOI: 10.1016/j.tre.

- 2020.102214. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1366554520308565>.
- [Dim+21] Antonis Dimitriou κ.ά. “Autonomous Robots, Drones and Repeaters for Fast, Reliable, Low-Cost RFID Inventorying & Localization”. Στο: *2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*. IEEE, Σεπτ. 2021, σσ. 01–06. ISBN: 978-953-290-112-2. DOI: 10.23919/SpliTech52315.2021.9566425. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9566425/>.
- [Koi+21] Kenji Koide κ.ά. “Voxelized GICP for Fast and Accurate 3D Point Cloud Registration”. Στο: *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, Μάι. 2021, σσ. 11054–11059. ISBN: 978-1-7281-9077-8. DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9560835. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9560835/>.
- [PB21] Prabin Kumar Panigrahi και Sukant Kishoro Bisoy. “Localization strategies for autonomous mobile robots: A review”. Στο: *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* (Μαρ. 2021). ISSN: 13191578. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.02.015. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1319157821000550>.
- [SSC21] Bogdan Ilie Sighencea, Rareş Ion Stanciu και Cătălin Daniel Căleanu. “A Review of Deep Learning-Based Methods for Pedestrian Trajectory Prediction”. Στο: *Sensors* 21.22 (Νοέ. 2021), σ. 7543. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21227543. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/22/7543>.
- [smp21] smprobatics. 2021. URL: https://smprobatics.com/security_robot.
- [Wan+21] Zhong Wang κ.ά. “Global Localization With a Single-Line LiDAR by Dense 2D Signature and 1D Registration”. Στο: *IEEE Sensors Journal* 21.10 (Μάι. 2021), σσ. 11497–11506. ISSN: 1530-437X. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3021049. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9184826/>.
- [YSC21] Heng Yang, Jingnan Shi και Luca Carlone. “TEASER: Fast and Certifiable Point Cloud Registration”. Στο: *IEEE Transactions on Robotics* 37.2 (Απρ. 2021), σσ. 314–333. ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/TR0.2020.3033695. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9286491/>.

- [rev22] revfine. 2022. URL: <https://www.revfine.com/hotel-robots/>.
- [BS] P. Biber και W. Strasser. “The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching”. Στο: *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*. Τόμ. 3. IEEE, σσ. 2743–2748. ISBN: 0-7803-7860-1. DOI: 10.1109/IROS.2003.1249285. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1249285/>.
- [BV] J. Bruce και M. Veloso. “Real-time randomized path planning for robot navigation”. Στο: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*. Τόμ. 3. IEEE, σσ. 2383–2388. ISBN: 0-7803-7398-7. DOI: 10.1109/IRDS.2002.1041624. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1041624/>.
- [Cena] A. Censi. “Scan matching in a probabilistic framework”. Στο: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006*. IEEE, σσ. 2291–2296. ISBN: 0-7803-9505-0. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642044. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1642044/>.
- [CIG] A. Censi, L. Iocchi και G. Grisetti. “Scan Matching in the Hough Domain”. Στο: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, σσ. 2739–2744. ISBN: 0-7803-8914-X. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570528. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1570528/>.
- [Cenb] Andrea Censi. *PLICP code headers*. URL: <https://github.com/AndreaCensi/csm/blob/master/sm/csm/algos.h>.
- [Cenc] Andrea Censi. *PLICP manual*. URL: https://github.com/AndreaCensi/csm/blob/master/csm%7B%5C_%7Dmanual.pdf.
- [Che+] D. Chetverikov κ.ά. “The Trimmmed Iterative Closest Point algorithm”. Στο: *Object recognition supported by user interaction for service robots*. Τόμ. 3. IEEE Comput. Soc, σσ. 545–548. DOI: 10.1109/ICPR.2002.1047997. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1047997/>.
- [CTT] Chieh-Chih Wang, C. Thorpe και S. Thrun. “Online simultaneous localization and mapping with detection and tracking of moving objects: theory and results

- from a ground vehicle in crowded urban areas”. Στο: *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*. Τόμ. 1. IEEE, σσ. 842–849. ISBN: 0-7803-7736-2. DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241698. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1241698/>.
- [Del+] F. Dellaert κ.ά. “Monte Carlo localization for mobile robots”. Στο: *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*. Τόμ. 2. IEEE, σσ. 1322–1328. ISBN: 0-7803-5180-0. DOI: 10.1109/ROBOT.1999.772544. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/772544/>.
- [GK] J.-S. Gutmann και K. Konolige. “Incremental mapping of large cyclic environments”. Στο: *Proceedings 1999 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. CIRA’99 (Cat. No.99EX375)*. IEEE, σσ. 318–325. ISBN: 0-7803-5806-6. DOI: 10.1109/CIRA.1999.810068. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/810068/>.
- [Hah+] D. Hahnel κ.ά. “An efficient fastslam algorithm for generating maps of large-scale cyclic environments from raw laser range measurements”. Στο: *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*. Τόμ. 1. IEEE, σσ. 206–211. ISBN: 0-7803-7860-1. DOI: 10.1109/IROS.2003.1250629. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1250629/>.
- [HSZ] D. Hsu, G. Sanchez-Ante και Zheng Sun. “Hybrid PRM Sampling with a Cost-Sensitive Adaptive Strategy”. Στο: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, σσ. 3874–3880. ISBN: 0-7803-8914-X. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570712. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1570712/>.
- [KB] Y. Koren και J. Borenstein. “Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation”. Στο: *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Comput. Soc. Press, σσ. 1398–1404. ISBN: 0-8186-2163-X. DOI: 10.1109/ROBOT.1991.131810. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/131810/>.

- [MLM] J. Minguez, F. Lamiraux και L. Montesano. “Metric-Based Scan Matching Algorithms for Mobile Robot Displacement Estimation”. Στο: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, σσ. 3557–3563. ISBN: 0-7803-8914-X. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570661. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1570661/>.
- [MM] J. Minguez και L. Montano. “Nearness diagram navigation (ND): a new real time collision avoidance approach”. Στο: *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113)*. Τόμ. 3. IEEE, σσ. 2094–2100. ISBN: 0-7803-6348-5. DOI: 10.1109/IROS.2000.895280. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/895280/>.
- [MMM] J. Minguez, L. Montesano και L. Montano. “An architecture for sensor-based navigation in realistic dynamic and troublesome scenarios”. Στο: *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*. Τόμ. 3. IEEE, σσ. 2750–2756. ISBN: 0-7803-8463-6. DOI: 10.1109/IROS.2004.1389825. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1389825/>.
- [NSL] C. Nissoux, T. Simeon και J.-P. Laumond. “Visibility based probabilistic roadmaps”. Στο: *Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human and Environment Friendly Robots with High Intelligence and Emotional Quotients (Cat. No.99CH36289)*. Τόμ. 3. IEEE, σσ. 1316–1321. ISBN: 0-7803-5184-3. DOI: 10.1109/IROS.1999.811662. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/811662/>.
- [Pfi+] S.T. Pfister κ.ά. “Weighted range sensor matching algorithms for mobile robot displacement estimation”. Στο: *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*. Τόμ. 2. IEEE, σσ. 1667–1674. ISBN: 0-7803-7272-7. DOI: 10.1109/ROBOT.2002.1014782. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1014782/>.
- [QK] S. Quinlan και O. Khatib. “Elastic bands: connecting path planning and control”. Στο: *[1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Comput. Soc. Press, σσ. 802–807. ISBN: 0-8186-3450-2. DOI: 10.1109/

- ROBOT . 1993 . 291936. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/291936/>.
- [Sch+] D. Schulz κ.ά. “Tracking multiple moving targets with a mobile robot using particle filters and statistical data association”. Στο: *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*. Τόμ. 2. IEEE, σσ. 1665–1670. ISBN: 0-7803-6576-3. DOI: 10.1109/ROBOT.2001.932850. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/932850/>.
- [staa] statista.com. URL: <https://www.statista.com/statistics/430086/automotive-sales-of-automotive-lidar-systems-worldwide/>.
- [stab] statista.com. URL: <https://www.statista.com/statistics/880147/global-robotic-vehicle-sensors-market-size-by-segment/>.
- [UBa] I. Ulrich και J. Borenstein. “VFH*: local obstacle avoidance with look-ahead verification”. Στο: *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*. Τόμ. 3. IEEE, σσ. 2505–2511. ISBN: 0-7803-5886-4. DOI: 10.1109/ROBOT.2000.846405. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/846405/>.
- [UBb] I. Ulrich και J. Borenstein. “VFH+: reliable obstacle avoidance for fast mobile robots”. Στο: *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*. Τόμ. 2. IEEE, σσ. 1572–1577. ISBN: 0-7803-4300-X. DOI: 10.1109/ROBOT.1998.677362. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/677362/>.
- [XLX] Xu Zezhong, Liu Jilin και Xiang Zhiyu. “Scan matching based on CLS relationships”. Στο: *IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing, 2003. Proceedings. 2003*. Τόμ. 1. IEEE, σσ. 99–104. ISBN: 0-7803-7925-X. DOI: 10.1109/RISSP.2003.1285556. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1285556/>.

Μέρος V

Παραρτήματα

Παράρτημα Α΄

Αξιολόγηση αλγορίθμων αυτόνομης πλοήγησης

Α΄.1 Τύποι αναλογικότητας μετρικών αξιολόγησης με- θόδων αυτόνομης πλοήγησης

Σχετικά με την τιμή-αξία ενός συνδυασμού αλγορίθμου χάραξης μονοπατιών και ελεγκτή κίνησης που αφορά στις μετρικές αξιολόγησης ενός **global planner** του κάνουμε τις εξής παραδοχές. Η αξία ενός συνδυασμού είναι:

- υψηλότερη όσο πιο σύντομο σε μήκος είναι ένα σχέδιο μονοπατιού—ένα ρομπότ που το διασχίζει σε σταθερή ταχύτητα χρειάζεται λιγότερο χρόνο για να φτάσει από την αρχική στάση στην τελική
- υψηλότερη όσο υψηλότερη είναι η ανάλυση του σχεδιασθέντος μονοπατιού—όσο πιο λεπτομερής είναι η ανάλυση ενός μονοπατιού τόσο περισσότερο πιο πιθανό είναι να υπάρχει ένας (υπο)στόχος εντός του ορίζοντα του τοπικού χάρτη κόστους, και τόσο πιο ομαλή μπορεί να είναι η διαδρομή
- υψηλότερη όσο πιο ομαλό είναι το σχεδιασθέν μονοπάτι—όσο πιο ομαλό είναι το μονοπάτι τόσο πιο πιθανό είναι ότι το ρομπότ χρειάζεται λιγότερο χρόνο για να διασχίσει τη διαδρομή από την αρχική στάση μέχρι τη στάση-στόχο (η πιστή τήρηση του συνολικού

σχεδίου είναι θέμα του ελεγκτή κίνησης ως προς το πόσο κατάλληλο και εφικτό θεωρεί το μονοπάτι προς ακολούθηση)

- τόσο υψηλότερη όσο μεγαλύτερη είναι η μέση ελάχιστη απόστασή των στάσεων που το απαρτίζουν από τα εμπόδια του χάρτη—ώστε οι συγκρούσεις με εμπόδια να είναι λιγότερο πιθανό να συμβούν
- υψηλότερη όσο μεγαλύτερη είναι η ολική ελάχιστη απόστασή του μονοπατιού από τα εμπόδια σε ένα χάρτη σε όλα τα πειράματα και τις προσομοιώσεις, και
- χαμηλότερη όσο πιο μεγάλη είναι η διακύμανση της τιμή κάθε μετρικής—έτσι ώστε ένας μηχανικός ρομποτικής να μπορεί να υπολογίζει στην προβλεψιμότητά της

Σχετικά με την τιμή-αξία ενός συνδυασμού αλγορίθμου χάραξης μονοπατιών και ελεγκτή κίνησης που αφορά στις μετρικές αξιολόγησης ενός **local planner** του κάνουμε τις εξής παραδοχές. Η αξία ενός συνδυασμού είναι:

- χαμηλότερη όσο υψηλότερος είναι ο μέσος αριθμός των ματαιωμένων αποστολών κατά το σύνολο των πειραμάτων και προσομοιώσεων
- χαμηλότερη όσο υψηλότερος είναι ο μέσος αριθμός ανακτήσεων με περιστροφή που εκτελέστηκαν
- χαμηλότερη όσο υψηλότερος είναι ο μέσος αριθμός εκτελούμενων εκκαθαρίσεων χαρτών κόστους
- χαμηλότερη όσο υψηλότερος είναι ο μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής
- χαμηλότερη όσο υψηλότερος είναι ο σχετικός αριθμός αποτυχιών διαδρομής, και
- χαμηλότερη όσο πιο μεγάλη είναι η διακύμανση των τιμών της κάθε μετρικής

Όπως είναι προφανές όλες οι παραπάνω μετρικές είναι ανεξάρτητες από την επιτυχία ή την αποτυχία των συνδυασμών των αλγορίθμων κατασκευής μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης στην επίτευξη της πλοήγησης στην στάση-στόχο p_G από την αρχική p_0 . Συνεπώς οι τιμές τους περιλαμβάνονται στον υπολογισμό της αξίας κάθε συνδυασμού ανεξάρτητα από το αν ο εν λόγω συνδυασμός απέτυχε να ολοκληρώσει όλες τις αποστολές.

Α.1. ΤΥΠΟΙ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

Σχετικά με την τιμή-αξία ενός συνδυασμού αλγορίθμου χάραξης μονοπατιών και ελεγκτή κίνησης που αφορά στις μετρικές αξιολόγησης του **συνδυασμού** τους κάνουμε τις εξής παραδοχές. Η αξία ενός συνδυασμού είναι:

- χαμηλότερη όσο μεγαλύτερη είναι η μέση απόκλιση των πραγματικών διαδρομών που ακολούθησε το ρομπότ ως αποτέλεσμα της δράσης του ελεγκτή κίνησης από τα μονοπάτια που ο αλγόριθμος κατασκευής μονοπατιών σχεδίασε για να ακολουθήσει
- χαμηλότερη όσο μεγαλύτερη είναι η μέση συνολική απόκλιση των πρώτων από τα δεύτερα
- χαμηλότερη όσο μεγαλύτερη είναι η μέση απόσταση Frechet των πρώτων από τα δεύτερα
- υψηλότερη όσο χαμηλότερος είναι ο χρόνος διαδρομής από την αρχική προς την τελική επιθυμητή στάση
- υψηλότερη όσο μικρότερη σε μήκος είναι η πραγματική διαδρομή που ακολούθησε το ρομπότ
- χαμηλότερη όσο λιγότερο ομαλές είναι οι πραγματικές διαδρομές που ακολούθησε το ρομπότ
- υψηλότερη όσο μεγαλύτερη είναι η μέση ελάχιστη απόσταση του ρομπότ από τα εμπόδια του χάρτη
- υψηλότερη όσο μεγαλύτερη είναι η ολική ελάχιστη απόσταση του ρομπότ από τα εμπόδια σε έναν χάρτη σε όλες τις προσομοιώσεις και τα πειράματα, και
- χαμηλότερη όσο πιο μεγάλη η διακύμανση της τιμής της κάθε μετρικής

Οι παραπάνω μετρικές εξαρτώνται από την επιτυχία ή την αποτυχία του συνδυασμού των αλγορίθμων κατασκευής μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης στην επίτευξη της πλοήγησης στην στάση-στόχο και, επομένως, δεν συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό της τιμής-αξίας ενός συνδυασμού εάν ο συνδυασμός αυτός απέτυχε να πλοηγηθεί μέχρι την επιθυμητή στάση για κάθε προσομοίωση ή πείραμα που συνέβη αυτό.

Α'.2 Λεπτομέρειες αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομους πλοήγησης

Α'.2.1 Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον CORRIDOR

Α'.2.1.1 Σχετικά με τους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών

Οι πίνακες Α'.1 και Α'.2 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών που ορίζονται στον πίνακα 4.2 και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CORRIDOR.

Όσον αφορά στα παραγόμενα μονοπάτια ο `global_planner` παράγαγε διαδρομές με το μικρότερο μήκος (πίνακας Α'.1), ο `sbpl_lattice_planner` εκείνα με το μεγαλύτερο μήκος και τη μικρότερη ανάλυση αλλά με τη μεγαλύτερη ομαλότητα (μικρότεροι αριθμοί υποδηλώνουν υψηλότερη ομαλότητα), και ο `navfn` παράγαγε τα λιγότερο πυκνά μονοπάτια αλλά με τη χαμηλότερη ομαλότητα. Οι επιδόσεις του `sbpl_lattice_planner` σε σχέση με το μήκος είναι λογικές, δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψη το κινηματικό μοντέλο του ρομπότ, το οποίο, όντας διαφορικής κίνησης, και επομένως μη ολόνομικό (non-holonomic), περιορίζεται στην κίνησή του. Αντίθετα, οι `navfn` και `global_planner` δεν λαμβάνουν υπόψη τέτοιους περιορισμούς και, καθώς ο τελευταίος είναι ο διάδοχος του πρώτου, παράγουν ελαφρώς παρόμοια μονοπάτια (αυτό παρατηρείται επίσης όταν εξετάζονται τα στοιχεία των δύο παραγόμενων μονοπατιών: φαίνονται σχεδόν πανομοιότυπα με γυμνό μάτι, σε πλήρη αντίθεση με εκείνα του `sbpl_lattice_planner`). Μια άλλη παρατηρήσιμη διαφορά στο σχήμα 4.5 είναι ότι τα μονοπάτια που χαράζει ο `navfn` και τα περισσότερα του `sbpl_lattice_planner` είναι ντετερμινιστικά: δεδομένης μιας αρχικής στάσης \mathbf{p}_0 , μιας θέσης στόχου \mathbf{p}_G , και ενός χάρτη, αυτά παράγουν το ίδιο μονοπάτι κάθε φορά, ενώ ο `global_planner` εισάγει έναν μικρό βαθμό τυχαιότητας, το οποίο εξηγεί γιατί η τυπική απόκλιση των σχεδίων του είναι μη μηδενική σε σύγκριση με τους άλλους δύο αλγορίθμους.

Όσον αφορά στην κρίσιμη ικανότητα ενός αλγορίθμου κατασκευής μονοπατιών να σχεδιάζει γύρω από εμπόδια (πίνακας Α'.2), ο `global_planner` παράγαγε διαδρομές που δεν λαμβάνουν πλήρως υπόψη τους το αποτύπωμα του ρομπότ στο οριζόντιο επίπεδο (η αφαίρεση της ακτίνας του ρομπότ από την ολικά ελάχιστη απόσταση των μονοπατιών του από το πλησιέστερο εμπόδιο δίνει -0.02 m), και επομένως ένας ελεγχτής κίνησης πλήρους πι-

GP	LP	Μετρικές επίδοσης αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών				
		$\mu_l(\mathcal{G})$ [m]	$\sigma_l(\mathcal{G})$ [m]	$\mu_r(\mathcal{G})$ [στάσεις/m]	$\mu_s(\mathcal{G})$ [rad]	$\sigma_s(\mathcal{G})$ [rad]
navfn	dwa	19.63	0.00	76.18	2.42	0.00
navfn	eband	19.63	0.00	76.18	2.42	0.00
navfn	teb	19.61	0.02	76.20	2.42	0.00
global_planner	dwa	19.60	0.01	74.43	2.40	0.00
global_planner	eband	19.59	0.01	74.70	2.40	0.00
global_planner	teb	19.60	0.01	74.70	2.40	0.00
sbpl	dwa	22.92	0.00	53.25	2.39	0.00
sbpl	eband	22.92	0.00	53.41	2.39	0.00
sbpl	teb	22.92	0.00	53.33	2.39	0.00

Πίνακας Α'.1: Μέσο συνολικό μήκος μονοπατιών $\mu_l(\mathcal{G})$ και τυπική απόκλιση $\sigma_l(\mathcal{G})$, μέση ανάλυση μονοπατιών $\mu_r(\mathcal{G})$, μέση τιμή ομαλότητας $\mu_s(\mathcal{G})$, και τυπική απόκλιση $\sigma_s(\mathcal{G})$, για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CORRIDOR

στότητας στο σχεδιασθέν μονοπάτι θα ανάγκαζε, με βεβαιότητα, το ρομπότ να ματαιώσει την αποστολή του (μέχρι να τεθεί ίσως ένας νέος στόχος), ή ακόμη και να συγκρουστεί με εμπόδια στο περιβάλλον του. Οι δύο εναπομείναντες αλγόριθμοι παρήγαγαν διαδρομές που θα ανάγκαζαν το ρομπότ να συγκρουστεί με εμπόδια τουλάχιστον μία φορά. Επιπλέον, ο `sbpl_lattice_planner` θέτει το ρομπότ να κινηθεί παράλληλα με τοίχους, μια συμπεριφορά που μπορεί στην πραγματικότητα να υπαγορευτεί στον αλγόριθμο (ο οποίος ρυθμίστηκε έτσι ώστε το ρομπότ να προτιμά να κινείται σε ευθείες γραμμές), το οποίο μπορεί να θεωρηθεί πλεονέκτημα, δεδομένου ότι υπάρχει πάντα ένα εμπόδιο αρκετά κοντά ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί ως σημείο αναφοράς κατά τη διάρκεια χαρτογράφησης ή εντοπισμού της στάσης ενός ρομπότ.

Α'.2.1.2 Σχετικά με τους ελεγκτές κίνησης

Ο πίνακας Α'.3 καταγράφει τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους ελεγκτές κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.3 και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CORRIDOR.

Κανένας από τους συνδυασμούς του ελεγκτή κίνησης `dwa_local_planner` με αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών δεν ολοκλήρωσε αποστολή, και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο ελεγκτής ξόδεψε τον περισσότερο χρόνο του εκτελώντας συμπεριφορές ανάκτησης (έχει τον

GP	LP	Μετρικές επίδοσης αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών σχετικές με εμπόδια		
		$\inf(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_C))$ [m]	$\mu(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_C))$ [m]	$\sigma(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_C))$ [m]
navfn	dwa	0.00	0.52	0.32
navfn	eband	0.00	0.52	0.32
navfn	teb	0.00	0.52	0.32
global_planner	dwa	0.00 (-0.02)	0.48	0.31
global_planner	eband	0.00 (-0.02)	0.48	0.31
global_planner	teb	0.00 (-0.02)	0.48	0.32
sbpl	dwa	0.00	0.29	0.20
sbpl	eband	0.00	0.29	0.20
sbpl	teb	0.00	0.29	0.20

Πίνακας Α'.2: Ολικά ελάχιστη απόσταση μονοπατιών \mathcal{G} από οποιοδήποτε εμπόδιο $\inf(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_C))$, μέση ελάχιστη απόσταση $\mu(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_C))$ και τυπική απόκλιση $\sigma(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_C))$ από όλα τα εμπόδια, για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CORRIDOR

υψηλότερο μέσο όρο ανακτήσεων με περιστροφή και εκκαθαρίσεων χαρτών κόστους μεταξύ των τριών ελεγκτών). Αυτό το γεγονός είχε ως αποτέλεσμα είτε τη ματαίωση των αποστολών, είτε την αποτυχία λόγω χρονικού time-out. Εν τέλει αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο `dwa_local_planner` ακολουθεί τα σχεδιασθέντα μονοπάτια με υψηλή πιστότητα, τα οποία όμως είναι στην πραγματικότητα ανέφικτα, αφού η ολικά ελάχιστη απόσταση από τα εμπόδια είναι το πολύ μηδέν (πίνακας Α'.2). Επιπλέον, διαθέτει την υψηλότερη αναλογία αποτυχιών διαδρομής ανά σύνολο κλήσεων του.

Ο ελεγκτής `eband_local_planner` είχε καλύτερες επιδόσεις από τον `dwa_local_planner`: δεν διέκοψε ποτέ αποστολή, και δεν εκτέλεσε συμπεριφορές ανάκτησης. Η τελική αποτυχία του είναι ότι δεν προκαλεί κινήσεις σε εύλογα χρονικά διαστήματα (αυτό μπορεί να παρατηρηθεί στους μέσους χρόνους διαδρομής που παρουσιάζονται στον πίνακα Α'.4—υπενθυμίζουμε ότι $t_C^{max} = 120$ sec), δηλαδή η προσέγγισή του είναι υπερβολικά ασφαλής. Ο συνδυασμός του με τον αλγόριθμο `sbpl_lattice_planner` ήταν ο χειρότερος, κάτι που θα μπορούσε θεωρητικά να αποδοθεί εν μέρει στο γεγονός ότι ο τελευταίος παράγει τα πιο πυκνά και μακρύτερα σχέδια, αλλά στην πραγματικότητα οφείλεται σε ένα άγνωστο ζήτημα που προκαλεί τον ελεγκτή να ανακηρύξει ότι το ρομπότ έφτασε στο στόχο του ενώ στην πραγματικότητα εξακολουθεί να βρίσκεται στη μέση της διαδρομής σε ορισμένες προσομοιώσεις (αυτός είναι ο δεύτερος λόγος για τον οποίο στον `sbpl_lattice_planner` δόθηκε κατάσταση ανεπάρκειας

στον πίνακα 4.5—ο πρώτος είναι το σφάλμα που βρέθηκε και επιλύθηκε που αναφέρθηκε στην ενότητα 4.4.1).

Αντίθετα, ο ελεγκτής κίνησης `teb_local_planner` είχε την καλύτερη επίδοση ανά μετρική: δεν ματαίωσε ποτέ αποστολή, δεν εκτέλεσε ούτε μία συμπεριφορά ανάκτησης, δεν απέτυχε ποτέ να υπολογίσει έγκυρες ταχύτητες κινητήρων, και ποτέ δεν απέτυχε στο να οδηγήσει το ρομπότ στη στάση-στόχο μέσα στο προκαθορισμένο χρονικό όριο.

GP	LP	Μετρικές επίδοσης ελεγκτών κίνησης							
		μ_A/N	μ_{RR}	σ_{RR}	μ_{CC}	σ_{CC}	μ_{PF}	σ_{PF}	μ_{PF}/μ_{LPC}
navfn	dwa	0.90	2.90	0.57	3.30	0.67	53.50	17.35	0.11
global_planner	dwa	0.90	3.30	1.16	2.70	0.95	58.90	22.29	0.10
sbpl	dwa	0.50	3.30	0.67	3.00	1.41	8.50	5.58	0.02
navfn	eband	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	1.66	N/A
global_planner	eband	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.60	1.84	N/A
sbpl	eband	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.42	N/A
navfn	teb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
global_planner	teb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
sbpl	teb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας Α'.3: Μέσος αριθμός ματαιωμένων αποστολών επί του αριθμού των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν μ_A/N , μέσος αριθμός ανακτήσεων με περιστροφή μ_{RR} και η τυπική τους απόκλιση σ_{RR} , μέσος αριθμός εκκαθαρίσεων χαρτών κόστους μ_{CC} και η τυπική τους απόκλιση σ_{CC} , μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής μ_{PF} και η τυπική τους απόκλιση σ_{PF} , και μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής επί του μέσου αριθμού των κλήσεων του ελεγκτή κίνησης μ_{PF}/μ_{LPC} , για όλους τους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6, για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CORRIDOR.

Α'.2.1.3 Σχετικά με το συνδυασμό τους

Οι πίνακες Α'.4, Α'.5, Α'.6, και Α'.7 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.4, και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CORRIDOR.

Σε όρους χρόνου που απαιτείται για την επίτευξη πλοήγησης από την αρχική στάση στην στάση-στόχο (πίνακας Α'.4), όλοι οι συνδυασμοί των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών με τον `dwa_local_planner` αποκλείονται από αξιολόγηση (αφού αποτελεί προϋπόθεση το ρομπότ να φτάσει στο στόχο του), και το ίδιο ισχύει και για το συνδυασμό των

`sbpl_lattice_planner` και `eband_local_planner`. Για τους υπόλοιπους συνδυασμούς (α) η χρήση του `teb_local_planner` επιφέρει τις χαμηλότερου χρόνου διαδρομές (πράγμα αναμενόμενο, αφού προσεγγίζει το πρόβλημα της πλοήγησης με όρους βελτιστοποίησης σε σχέση με το χρόνο), (β) ο `eband_local_planner` είναι ο πιο αργός μεταξύ των δύο—με σημαντική διαφορά, αφού χρειάζεται περισσότερο από το διπλάσιο χρόνο για να ολοκληρώσει μια αποστολή, και (γ) οι διαδρομές του πρώτου είναι οι πιο συνεπείς μεταξύ τους. Το γεγονός ότι ο `sbpl_lattice_planner` παράγει μονοπάτια μεγαλύτερου μήκους—περίπου 17% μακρύτερα από εκείνα των άλλων δύο αλγορίθμων (πίνακας Α'.1)—έκανε τον συνδυασμό του με τον `teb_local_planner` να εμφανίσει χρόνους πλοήγησης με διαφορά άνω των δύο δευτερολέπτων, το οποίο μεταφράζεται σε περίπου 10% αύξηση του χρόνου διαδρομής σε σύγκριση με εκείνους του `teb_local_planner` με τον `navfn` και τον `global_planner`.

GP	LP	Μετρικές που αφορούν στον χρόνο πραγματικής διαδρομής	
		μ_t [sec]	σ_t [sec]
<code>navfn</code>	<code>dwa</code>	47.53	14.85
<code>global_planner</code>	<code>dwa</code>	55.98	24.87
<code>sbpl</code>	<code>dwa</code>	78.72	25.80
<code>navfn</code>	<code>eband</code>	107.52	0.81
<code>global_planner</code>	<code>eband</code>	106.86	1.00
<code>sbpl</code>	<code>eband</code>	70.80	17.93
<code>navfn</code>	<code>teb</code>	44.89	0.44
<code>global_planner</code>	<code>teb</code>	44.83	0.44
<code>sbpl</code>	<code>teb</code>	46.61	0.24

Πίνακας Α'.4: Μέσος χρόνος διαδρομής μ_t από την αρχική στην τελική στάση και τυπική απόκλιση σ_t για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CORRIDOR. Οι συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν όλες τις αποστολές και οι τιμές των αντίστοιχων μετρικών σημειώνονται με έντονη γραφή

Όσον αφορά στο μέσο μήκος των διανυόμενων διαδρομών (πίνακας Α'.5), οι ίδιοι συνδυασμοί `global planners` με τους `eband_local_planner` και `teb_local_planner` έκαναν το ρομπότ να διανύσει μεγαλύτερα μήκη σε σύγκριση με τα σχεδιασθέντα μονοπάτια τους: και οι δύο προσεγγίσεις παραμορφώνουν το παγκόσμιο σχέδιο προκειμένου να κερδίσουν μεγαλύτερη απόσταση από εμπόδια, και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ο `dwa_local_planner` αποτυγχάνει σε κάθε προσομοίωση. Επιπλέον, οι διαδρομές που ο `teb_local_planner` υπαγόρευσε στο ρομπότ ήταν οι μακρύτερες αλλά οι πιο συνεπείς, και η πιο συνεπής από όλες

παρατηρήθηκε όταν χρησιμοποιήθηκε ο `navfn` ως αλγόριθμος χάραξης μονοπατιών, κάτι που είναι αναμενόμενο, αφού τα σχεδιασθέντα μονοπάτια του είναι ντετερμινιστικά. Όσον αφορά στην ομαλότητα των διαδρομών, ο συνδυασμός του `sbpl_lattice_planner` με τον `teb_local_planner` παρουσίασε την υψηλότερη τιμή και τη μικρότερη διακύμανση.

GP	LP	Μετρικές σχετικές με τις διανυθείσες διαδρομές			
		$\mu_l(\mathcal{P})$ [m]	$\sigma_l(\mathcal{P})$ [m]	$\mu_s(\mathcal{P})$ [rad]	$\sigma_s(\mathcal{P})$ [rad]
<code>navfn</code>	<code>dwa</code>	9.24	3.37	1.56	0.16
<code>global_planner</code>	<code>dwa</code>	8.62	3.23	1.66	0.15
<code>sbpl</code>	<code>dwa</code>	9.12	3.01	1.60	0.23
<code>navfn</code>	<code>eband</code>	20.15	0.09	2.36	0.01
<code>global_planner</code>	<code>eband</code>	20.04	0.07	2.36	0.01
<code>sbpl</code>	<code>eband</code>	12.79	3.52	1.78	0.27
<code>navfn</code>	<code>teb</code>	20.87	0.03	1.66	0.06
<code>global_planner</code>	<code>teb</code>	20.88	0.04	1.69	0.09
<code>sbpl</code>	<code>teb</code>	22.99	0.06	1.65	0.02

Πίνακας Α'.5: Μέσο μήκος διαδρομής $\mu_l(\mathcal{P})$ και τυπική απόκλιση $\sigma_l(\mathcal{P})$, και μέση τιμή ομαλότητας διαδρομής $\mu_s(\mathcal{P})$ και τυπική απόκλιση $\sigma_s(\mathcal{P})$ για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CORRIDOR. Συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν όλες τις αποστολές σημειώνονται με έντονη γραφή

Όσον αφορά στην απόσταση από τα εμπόδια στο χάρτη M_C (πίνακας Α'.6), ο συνδυασμός του `eband_local_planner` με τον `sbpl_lattice_planner` δεν επέφερε συγκρούσεις με εμπόδια, ενώ οι αποστάσεις του από αυτά ήταν χαμηλότερες από εκείνες του `teb_local_planner`. Η δυνατότητα παραμετροποίησης του τελευταίου όσον αφορά στην ελάχιστη απόσταση από τα εμπόδια (που ορίστηκε σε 0.10m) έπαιξε σαφώς σημαντικό ρόλο στην απόσταση του ρομπότ από τα εμπόδια: όντας 0.18 m σε όλα τα πειράματα έδωσε στο ρομπότ τη μεγαλύτερη ελάχιστη απόσταση από εμπόδια σε σύγκριση με του άλλους ελεγκτές (αυτός ήταν ένας ακόμη λόγος για τον οποίο σημείωσε τέτοια βαθμολογία όσον αφορά στην ποιοτική μετρική της παραμετροποιησιμότητας στον πίνακα 4.5). Επιπλέον, το ίδιο παρατηρείται όσον αφορά στη μέση απόσταση κάθε στάσης του ρομπότ από το πλησιέστερο εμπόδιο στο χάρτη του κόσμου CORRIDOR, ενώ η διακύμανσή της είναι η μικρότερη (σε σύγκριση με τους συνδυασμούς που ολοκλήρωσαν την αποστολή). Παρεμπιπτόντως, ο ελεγκτής `dwa_local_planner` απέτυχε να αποφύγει εμπόδιο τουλάχιστον μία φορά σε N προσομοιώσεις όταν ο αντίστοιχος αλγόριθμος χάραξης μονοπατιών που χρησιμοποιήθηκε λειτουργεί με άγνοια του κινηματικού

μοντέλου του ρομπότ. Από την άλλη πλευρά, όταν χρησιμοποιήθηκε ως αλγόριθμος χάραξης μονοπατιών ο `sbpl_lattice_planner` το ρομπότ δεν συγκρούστηκε ούτε μία φορά με εμπόδιο. Επιπλέον, η μέση απόστασή του από εμπόδια ήταν η υψηλότερη μεταξύ των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ η τυπική της απόκλιση ήταν η χαμηλότερη.

GP	LP	Μετρικές που αφορούν στα εμπόδια και τις πραγματικές διαδρομές		
		$\inf(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_C))$ [m]	$\mu(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_C))$ [m]	$\sigma(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_C))$ [m]
<code>navfn</code>	<code>dwa</code>	0.00 (-0.02)	0.17	0.19
<code>global_planner</code>	<code>dwa</code>	0.00 (-0.02)	0.15	0.18
<code>sbpl</code>	<code>dwa</code>	0.06	0.21	0.16
<code>navfn</code>	<code>eband</code>	0.07	0.55	0.27
<code>global_planner</code>	<code>eband</code>	0.09	0.53	0.27
<code>sbpl</code>	<code>eband</code>	0.10	0.40	0.17
<code>navfn</code>	<code>teb</code>	0.18	0.64	0.19
<code>global_planner</code>	<code>teb</code>	0.18	0.64	0.20
<code>sbpl</code>	<code>teb</code>	0.18	0.49	0.16

Πίνακας Α'.6: Ολικά ελάχιστη απόσταση των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που διήνυσε το ρομπότ από οποιοδήποτε εμπόδιο σε όλες τις προσομοιώσεις $\inf(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_C))$, μέση ελάχιστη απόσταση $\mu(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_C))$ από όλα τα εμπόδια για $N = 10$ προσομοιώσεις στο χάρτη CORRIDOR \mathbf{M}_C , και μέση τυπική απόκλιση $\sigma(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_C))$. Συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν όλες τις αποστολές σημειώνονται με έντονη γραφή

Όσον αφορά στην απόκλιση των διανυθέντων μονοπατιών από τα αντίστοιχα σχεδιασθέντα μονοπάτια (πίνακας Α'.7), ο ελεγκτής κίνησης `dwa_local_planner` παρουσίασε τη χαμηλότερη μέση απόκλιση θέσης στους συνδυασμούς του με αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών που δεν λαμβάνουν υπόψη τους το κινηματικό μοντέλο του ρομπότ, κάτι που είναι αναμενόμενο, καθώς, όπως συζητήθηκε προηγουμένως, είναι ο ελεγκτής με τη μεγαλύτερη πιστότητα στο σχεδιασθέν μονοπάτι μεταξύ των τριών ελεγκτών. Ωστόσο, λόγω της αδυναμίας του να ολοκληρώσει έστω και μία αποστολή, όλοι οι συνδυασμοί του με αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών αποκλείονται από την αξιολόγηση, και το ίδιο ισχύει και για τον συνδυασμό του `sbpl_lattice_planner` με τον `eband_local_planner`. Από τους υπόλοιπους συνδυασμούς, εκείνοι που χρησιμοποιούν τον `teb_local_planner` παρουσιάζουν τη μικρότερη μέση απόκλιση κάθε στάσης σε σχέση με το συνολικό σχέδιο, και, ειδικότερα, ο συνδυασμός του με τον `sbpl_lattice_planner` παρουσιάζει τη μικρότερη συνολική απόκλιση μεταξύ όλων των άλλων συνδυασμών. Επιπλέον, η μέση διακριτή απόσταση Frechet ήταν σταθερά χαμηλότερη

από εκείνη του `eband_local_planner`.

GP	LP	Μετρικές σχετικές με την απόκλιση διαδρομών από σχεδιασθέντα μονοπάτια		
		$\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ [m]	$\mu_\Delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ [m]	$\mu_\delta^F(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ [m]
<code>navfn</code>	<code>dwa</code>	0.04	45.98	5.58
<code>global_planner</code>	<code>dwa</code>	0.04	39.39	5.28
<code>sbpl</code>	<code>dwa</code>	0.09	101.28	5.08
<code>navfn</code>	<code>eband</code>	0.10	104.96	0.38
<code>global_planner</code>	<code>eband</code>	0.13	139.69	0.47
<code>sbpl</code>	<code>eband</code>	0.13	145.06	5.06
<code>navfn</code>	<code>teb</code>	0.07	81.96	0.26
<code>global_planner</code>	<code>teb</code>	0.08	89.89	0.29
<code>sbpl</code>	<code>teb</code>	0.07	73.59	0.26

Πίνακας Α'.7: Μέση απόκλιση $\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$, μέση συνολική απόκλιση $\mu_\Delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$, και μέση απόσταση Frechet $\mu_\delta^F(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ μεταξύ των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που ακολούθησε το ρομπότ και των αντίστοιχων σχεδιασθέντων μονοπατιών \mathcal{G} για $N = 10$ προσομοιώσεις στο χάρτη CORRIDOR M_C . Συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν τουλάχιστον μία αποστολή σημειώνονται με έντονη γραφή

Α'.2.2 Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον WILLOWGARAGE

Α'.2.2.1 Σχετικά με τους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών

Οι πίνακες Α'.8 και Α'.9 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών που ορίζονται στον πίνακα 4.2 και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE.

Όσον αφορά στα παραγόμενα μονοπάτια (πίνακας Α'.8), και σε σχέση με τις μετρικές που αφορούν την αξιολόγηση των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών, τίποτα δεν άλλαξε σε σύγκριση με εκείνες που αφορούν στο περιβάλλον CORRIDOR: ο `global_planner` παρήγαγε και πάλι μονοπάτια με το μικρότερο μήκος, ο `sbpl_lattice_planner` εκείνα με το μεγαλύτερο μήκος και τη χαμηλότερη ανάλυση αλλά με τη μεγαλύτερη ομαλότητα, και ο `navfn` παρήγαγε τα λιγότερο πυκνά μονοπάτια, αλλά με τη χαμηλότερη ομαλότητα.

Αυτό που άλλαξε ήταν η ολική ελάχιστη απόσταση των μονοπατιών του `sbpl_lattice_planner` από τα εμπόδια (πίνακας Α'.9): ενώ στο χάρτη του κόσμου CORRIDOR δεν σχεδίασε ούτε μία φορά μέσα από εμπόδια, στο χάρτη του κόσμου WILLOWGARAGE το έκανε—όπως έκανε και πάλι ο `global_planner`. Εκτός από αυτό, παρουσίασε και πάλι τη χαμηλότερη μέση ελάχιστη απόσταση από εμπόδια και τη μεγαλύτερη συνέπεια απόστασης γύρω από τη

GP	LP	Μετρικές επίδοσης αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών				
		$\mu_l(\mathcal{G})$ [m]	$\sigma_l(\mathcal{G})$ [m]	$\mu_r(\mathcal{G})$ [στάσεις/m]	$\mu_s(\mathcal{G})$ [rad]	$\sigma_s(\mathcal{G})$ [rad]
navfn	dwa	44.50	0.02	37.15	1.99	0.00
navfn	eband	44.50	0.02	37.15	1.99	0.00
navfn	teb	44.53	0.04	37.10	1.99	0.00
global_planner	dwa	44.48	0.00	36.76	1.97	0.00
global_planner	eband	44.49	0.01	36.61	1.97	0.00
global_planner	teb	44.49	0.01	36.64	1.97	0.00
sbpl	dwa	48.01	0.00	30.93	2.02	0.00
sbpl	eband	48.01	0.00	30.93	2.02	0.00
sbpl	teb	48.01	0.01	30.95	2.02	0.00

Πίνακας Α'8: Μέσο συνολικό μήκος μονοπατιών $\mu_l(\mathcal{G})$ και τυπική απόκλιση $\sigma_l(\mathcal{G})$, μέση ανάλυση μονοπατιών $\mu_r(\mathcal{G})$, μέση τιμή ομαλότητας $\mu_s(\mathcal{G})$, και τυπική απόκλιση $\sigma_s(\mathcal{G})$, για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE

μέση τιμή. Από την άλλη πλευρά, ο navfn κέρδισε, κατά μέσο όρο, ένα εκατοστό απόστασης, και η απόδοσή του σε σχέση με τη μέση ελάχιστη απόσταση κάθε στάσης από εμπόδια ήταν ισοδύναμη με εκείνη του global_planner, όπως ήταν επίσης και η τυπική του απόκλιση.

GP	LP	Μετρικές επίδοσης αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών σχετικές με εμπόδια		
		$\inf(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_W))$ [m]	$\mu(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_W))$ [m]	$\sigma(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_W))$ [m]
navfn	dwa	0.01	0.51	0.52
navfn	eband	0.01	0.51	0.52
navfn	teb	0.01	0.51	0.52
global_planner	dwa	0.00 (-0.02)	0.51	0.53
global_planner	eband	0.00 (-0.02)	0.51	0.53
global_planner	teb	0.00 (-0.02)	0.51	0.53
sbpl	dwa	0.00 (-0.02)	0.35	0.43
sbpl	eband	0.00 (-0.02)	0.35	0.43
sbpl	teb	0.00 (-0.02)	0.35	0.43

Πίνακας Α'9: Ολική ελάχιστη απόσταση μονοπατιών \mathcal{G} από οποιοδήποτε εμπόδιο $\inf(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_W))$, μέση ελάχιστη απόσταση $\mu(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_W))$ και τυπική απόκλιση $\sigma(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_W))$ από όλα τα εμπόδια, για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE

Α'.2.2.2 Σχετικά με τους ελεγκτές κίνησης

Ο πίνακας Α'.10 καταγράφει τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους ελεγκτές κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.3 και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE.

Το αυξημένο επίπεδο δυσκολίας πλοήγησης του κόσμου WILLOWGARAGE εξέθεσε τις περισσότερες αδυναμίες των ελεγκτών κίνησης. Αυτό που είναι εντυπωσιακό είναι ότι όλοι οι συνδυασμοί αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών με τους `dwa_local_planner` και `eband_local_planner` απέτυχαν να μεταφέρουν το ρομπότ από την αρχική στην τελική στάση σε όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Όταν χρησιμοποιήθηκαν αλγόριθμοι χάραξης μονοπατιών που δεν λαμβάνουν υπόψη το κινηματικό μοντέλο του ρομπότ, ο πρώτος ματαίωσε όλες τις αποστολές, ενώ ματαίωσε τις περισσότερες από αυτές (7 στις 10) στην αντίθετη περίπτωση (—είναι σαφές ότι η χρήση ενός αλγορίθμου χάραξης μονοπατιών που λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς κίνησης του ρομπότ είναι πλεονέκτημα στην περίπτωση ενός “άκαμπτου” ελεγκτή κίνησης). Ο πρώτος παρουσίασε και πάλι τον υψηλότερο αριθμό αποτυχιών ελέγχου στην πρώτη περίπτωση και, στη δεύτερη περίπτωση, τον υψηλότερο μέσο αριθμό εκκαθαρίσεων χαρτών κόστους.

Όσον αφορά στην επίδοση του `eband_local_planner` στο χάρτη M_W , ισχύει το ίδιο που ισχύει και στο χάρτη M_C στην περίπτωση του συνδυασμού του με τον `sbpl_lattice_planner`: παρουσίασε τον χαμηλότερο αριθμό αποτυχιών διαδρομής (τουλάχιστον τρεις φορές μικρότερο από τον αμέσως επόμενο χαμηλότερο συνδυασμό). Παρόλο που ο `eband_local_planner` κατάφερε να κάνει το ρομπότ να διανύσει σημαντικά μεγαλύτερες αποστάσεις σε σύγκριση με τον `dwa_local_planner` (εικόνα 4.8), και παρόλο που ήταν συνεπής στην πλοήγησή του (το σφάλμα λογισμικού που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα σχετικά με το συνδυασμό του με `sbpl_lattice_planner` δεν εμφανίστηκε στο περιβάλλον WILLOWGARAGE), χρειάστηκε και πάλι περισσότερο από τον προκαθορισμένο χρόνο σε κάθε προσομοίωση, δείχνοντας την υπερβολικά ασφαλή προσέγγισή του (οι μέσοι χρόνοι του ήταν σταθερά αργοί, όπως παρατηρήθηκε και στις προσομοιώσεις του στο περιβάλλον CORRIDOR). Οι μέσοι χρόνοι πλοήγησης απεικονίζονται στον πίνακα Α'.11 (υπενθυμίζεται ότι $t_W^{max} = 180$ sec).

Σε αντίθεση με όλους τους συνδυασμούς των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών με τους `dwa_local_planner` και `eband_local_planner`, όλοι οι συνδυασμοί τους με τον `teb_local_planner`

κατάφεραν να διανύσουν τη διαδρομή από την αρχική στην τελική στάση. Και πάλι ήταν πρώτος στη μη ματαίωση αποστολής, στην επίτευξη της στάσης στόχου σε όλες τις προσομοιώσεις, στη μη εκτέλεση έστω και μιας συμπεριφορά ανάκαμψης. Μόνο ο συνδυασμός του με τον αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών `sbpl_lattice_planner` απέτυχε να εξασφαλίσει έγκυρες εισόδους κινητήρων, αλλά μόνο ελάχιστα (—η χρήση ενός global planner που λαμβάνει υπόψη του το κινηματικό μοντέλο της βάσης του ρομπότ δεν φαίνεται να είναι ιδιαίτερα επωφελής στην περίπτωση ενός ευέλικτου ελεγκτή κίνησης όπως στην περίπτωση ενός άκαμπτου ελεγκτή).

GP	LP	Μετρικές επίδοσης ελεγκτών κίνησης							
		μ_A/N	μ_{RR}	σ_{RR}	μ_{CC}	σ_{CC}	μ_{PF}	σ_{PF}	μ_{PF}/μ_{LPC}
navfn	dwa	1.00	2.00	0.00	3.00	0.00	45.80	10.97	0.09
global_planner	dwa	1.00	2.30	0.48	3.00	0.00	35.40	10.94	0.08
sbpl	dwa	0.70	3.20	1.48	3.60	1.07	12.00	4.85	0.03
navfn	eband	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.10	25.78	N/A
global_planner	eband	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.00	10.87	N/A
sbpl	eband	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.20	2.15	N/A
navfn	teb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
global_planner	teb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
sbpl	teb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.32	0.00

Πίνακας Α'.10: Μέσος αριθμός ματαιωμένων αποστολών επί του αριθμού των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν μ_A/N , μέσος αριθμός ανακτήσεων με περιστροφή μ_{RR} και η τυπική τους απόκλιση σ_{RR} , μέσος αριθμός εκκαθαρίσεων χαρτών κόστους μ_{CC} και η τυπική τους απόκλιση σ_{CC} , μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής μ_{PF} και η τυπική τους απόκλιση σ_{PF} , και μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής επί του μέσου αριθμού των κλήσεων του ελεγκτή κίνησης μ_{PF}/μ_{LPC} , για όλους τους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6, για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE

Α'.2.2.3 Σχετικά με το συνδυασμό τους

Οι πίνακες Α'.11, Α'.12, Α'.13, και Α'.14 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.4, και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE.

Όσον αφορά στο χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη της πλοήγησης από την αρχική στην επιθυμητή στάση (πίνακας Α'.11), όλοι οι συνδυασμοί που περιλαμβάνουν τους

`dwa_local_planner` και `eband_local_planner` αποκλείονται από την αξιολόγηση λόγω της αδυναμίας τους να οδηγήσουν το ρομπότ στο στόχο του. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ οι συνδυασμοί του `dwa_local_planner` με αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών που αγνοούν το κινηματικό μοντέλο του ρομπότ δεν μπόρεσαν να το περάσουν ούτε από το πρώτο άνοιγμα (μια πόρτα), ο συνδυασμός του με τον `sbpl_lattice_planner` κατάφερε να το κάνει, και μάλιστα για τα επόμενα τέσσερα ανοίγματα, προτού κολλήσει στο έκτο. Οι υπόλοιποι συνδυασμοί—όλοι εκείνοι που διαθέτουν τον `teb_local_planner` ως ελεγκτή κίνησής τους—έκαναν το ρομπότ να χρειαστεί λίγο περισσότερο από το μισό του μέγιστου χρόνου για να διανύσει το σύνολο της διαδρομής από τη στάση p_0^W στην p_G^W . Το γεγονός ότι ο `sbpl_lattice_planner` παράγει σχέδια μεγαλύτερου μήκους—περίπου 4.5% μακρύτερα από αυτά των άλλων δύο αντίστοιχων αλγορίθμων (πίνακας Α'.8)—είχε αντίκτυπο στο συνολικό χρόνο πλοήγησης του ρομπότ στον συνδυασμό του με τον `teb_local_planner`, με αύξηση λίγο πάνω από 5 δευτερόλεπτα, η οποία μεταφράζεται σε περίπου την ίδια (5%) αύξηση στους χρόνους διαδρομής σε σύγκριση με εκείνους τους συνδυασμούς του `teb_local_planner` με τον `navfn` και τον `global_planner`.

GP	LP	Μετρικές που αφορούν στον χρόνο πραγματικής διαδρομής	
		μ_t [sec]	σ_t [sec]
<code>navfn</code>	<code>dwa</code>	20.46	19.24
<code>global_planner</code>	<code>dwa</code>	22.76	18.85
<code>sbpl</code>	<code>dwa</code>	78.91	48.12
<code>navfn</code>	<code>eband</code>	158.14	5.25
<code>global_planner</code>	<code>eband</code>	151.23	2.00
<code>sbpl</code>	<code>eband</code>	147.53	2.46
<code>navfn</code>	<code>teb</code>	95.45	0.34
<code>global_planner</code>	<code>teb</code>	95.50	0.41
<code>sbpl</code>	<code>teb</code>	100.55	1.56

Πίνακας Α'.11: Μέσος χρόνος διαδρομής μ_t από την αρχική στην τελική στάση και τυπική απόκλιση σ_t για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE. Οι συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν όλες τις αποστολές και οι τιμές των αντίστοιχων μετρικών σημειώνονται με έντονη γραφή

Όσον αφορά στο μέσο μήκος των διανυόμενων διαδρομών (πίνακας Α'.12), παρατηρείται και πάλι ότι, λόγω της παραμόρφωσης του σχεδιασθέντος μονοπατιού από το `teb_local_planner` έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η καθορισμένη ελάχιστη απόσταση από εμπόδια, οι πραγματικές

διαδρομές είναι μεγαλύτερες από τα αντίστοιχα σχεδιασθέντα μονοπάτια—και αυτό σε βαθμό περίπου 4.5% όσον αφορά στον `navfn` και τον `global_planner`, και 1.5% όσον αφορά στο `sbpl_lattice_planner`. Όσον αφορά στην ομαλότητα της διαδρομής, ο συνδυασμός του με τον `navfn` έδωσε τα πιο ομαλά μονοπάτια, με τους άλλους δύο συνδυασμούς να ακολουθούν σε κοντινή απόσταση.

GP	LP	Μετρικές σχετικές με τις διανυθείσες διαδρομές			
		$\mu_l(\mathcal{P})$ [m]	$\sigma_l(\mathcal{P})$ [m]	$\mu_s(\mathcal{P})$ [rad]	$\sigma_s(\mathcal{P})$ [rad]
<code>navfn</code>	<code>dwa</code>	2.35	0.03	0.67	0.13
<code>global_planner</code>	<code>dwa</code>	2.35	0.03	0.63	0.17
<code>sbpl</code>	<code>dwa</code>	7.94	7.62	0.81	0.35
<code>navfn</code>	<code>eband</code>	29.80	1.26	1.83	0.02
<code>global_planner</code>	<code>eband</code>	28.83	0.43	1.84	0.01
<code>sbpl</code>	<code>eband</code>	26.98	0.53	1.78	0.02
<code>navfn</code>	<code>teb</code>	46.53	0.08	1.57	0.04
<code>global_planner</code>	<code>teb</code>	46.55	0.04	1.61	0.02
<code>sbpl</code>	<code>teb</code>	48.73	0.09	1.61	0.01

Πίνακας Α'.12: Μέσο μήκος διαδρομής $\mu_l(\mathcal{P})$ και τυπική απόκλιση $\sigma_l(\mathcal{P})$, και μέση τιμή ομαλότητας διαδρομής $\mu_s(\mathcal{P})$ και τυπική απόκλιση $\sigma_s(\mathcal{P})$ για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE. Συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν όλες τις αποστολές σημειώνονται με έντονη γραφή

Όσον αφορά στην απόσταση σε σχέση με τα εμπόδια του χάρτη M_W (πίνακας Α'.13), ο `teb_local_planner` κατάφερε να επιτύχει την ελάχιστη τεθειμένη απόσταση ρομπότ-εμποδίων (που έχει οριστεί όπως προηγουμένως σε 0.10 m) όταν συνδυάστηκε με τους προεπιλεγμένους αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών του ROS. Όταν συνδυάστηκε με τον `sbpl_lattice_planner`, ωστόσο, απέτυχε. Ο συνδυασμός του με τον `navfn` έδωσε στο ρομπότ τη μεγαλύτερη μέση απόσταση από τα εμπόδια σε όλες τις προσομοιώσεις. Ο συνδυασμός του με τον `sbpl_lattice_planner` του έδωσε το μικρότερο μέσο όρο απόστασης και τη μικρότερη διακύμανση γύρω από αυτήν (5 cm λιγότερο), μια συμπεριφορά που συνάδει με αυτή που παρουσιάζεται στο χάρτη του κόσμου CORRIDOR.

Όσον αφορά στην απόκλιση των διανυθέντων μονοπατιών από τα αντίστοιχα σχεδιασθέντα μονοπάτια (πίνακας Α'.14), δεν παρατηρείται συνέπεια σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο περιβάλλον CORRIDOR. Ενώ ο συνδυασμός του `teb_local_planner` με τον `global_planner` στον χάρτη M_C του περιβάλλοντος CORRIDOR παρουσίασε τη

GP	LP	Μετρικές που αφορούν στα εμπόδια και τις πραγματικές διαδρομές		
		$\inf(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_W))$ [m]	$\mu(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_W))$ [m]	$\sigma(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_W))$ [m]
navfn	dwa	0.33	0.37	0.14
global_planner	dwa	0.30	0.38	0.14
sbpl	dwa	0.01	0.36	0.23
navfn	eband	0.03	0.61	0.51
global_planner	eband	0.01	0.61	0.52
sbpl	eband	0.00	0.65	0.53
navfn	teb	0.10	0.82	0.47
global_planner	teb	0.10	0.79	0.48
sbpl	teb	0.09	0.67	0.42

Πίνακας Α'.13: Ολικά ελάχιστη απόσταση των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που διήνυσε το ρομπότ από οποιοδήποτε εμπόδιο σε όλες τις προσομοιώσεις $\inf(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_W))$, μέση ελάχιστη απόσταση $\mu(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_W))$ από όλα τα εμπόδια για $N = 10$ προσομοιώσεις στο χάρτη WILLOWGARAGE \mathbf{M}_W , και μέση τυπική απόκλιση $\sigma(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_W))$. Συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν όλες τις αποστολές σημειώνονται με έντονη γραφή

μεγαλύτερη μέση απόκλιση, τη μεγαλύτερη συνολική μέση απόκλιση, και τη μεγαλύτερη μέση διακριτή απόσταση Frechet, στον χάρτη \mathbf{M}_W του περιβάλλοντος WILLOWGARAGE παρουσίασε τις μικρότερες—και ο συνδυασμός του με τον sbpl_lattice_planner έδωσε τη μεγαλύτερη μέση διακριτή απόσταση Frechet, όταν στον χάρτη \mathbf{M}_C έδωσε τη μικρότερη.

Α'.2.3 Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον CSAL

Α'.2.3.1 Σχετικά με τους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών

Οι πίνακες Α'.15 και Α'.16 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών που ορίζονται στον πίνακα 4.2 και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CSAL.

Όσον αφορά στα παραγόμενα μονοπάτια (πίνακας Α'.15), και όσον αφορά στις μετρικές αξιολόγησης των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών, ο navfn παρήγαγε τα μονοπάτια με το μικρότερο μήκος, και ο sbpl_lattice_planner εκείνα με το μεγαλύτερο, με τη μεγαλύτερη διακύμανση, με τη χαμηλότερη πυκνότητας στάσεων, αλλά και την υψηλότερης ομαλότητας. Ο global_planner παρήγαγε τα λιγότερο πυκνά σχέδια.

Ο αλγόριθμος χάραξης μονοπατιών sbpl_lattice_planner παρουσίασε την ίδια συμπεριφορά με εκείνη στον προσομοιωμένο κόσμο WILLOWGARAGE: η ολικά ελάχιστη από-

GP	LP	Μετρικές σχετικές με την απόκλιση διαδρομών από σχεδιασθέντα μονοπάτια		
		$\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ [m]	$\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ [m]	$\mu_\delta^F(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ [m]
navfn	dwa	0.14	226.98	34.12
global_planner	dwa	0.12	185.54	34.06
sbpl	dwa	0.27	457.42	31.29
navfn	eband	0.12	194.53	11.98
global_planner	eband	0.12	190.02	12.74
sbpl	eband	0.18	271.59	15.89
navfn	teb	0.11	174.18	0.43
global_planner	teb	0.10	152.02	0.43
sbpl	teb	0.11	162.33	0.54

Πίνακας Α'.14: Μέση απόκλιση $\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$, μέση συνολική απόκλιση $\mu_\Delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$, και μέση απόσταση Frechet $\mu_\delta^F(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ μεταξύ των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που ακολούθησε το ρομπότ και των αντίστοιχων σχεδιασθέντων μονοπατιών \mathcal{G} για $N = 10$ προσομοιώσεις στο χάρτη WILLOWGARAGE M_W . Συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν τουλάχιστον μία αποστολή σημειώνονται με έντονη γραφή

σταση των σχεδίων του από τα εμπόδια (πίνακας Α'.16) ήταν μηδέν, όπως και εκείνη του `global_planner`, ο οποίος και στις τρεις περιπτώσεις σχεδίασε σταθερά μέσα από εμπόδια. Εκτός από αυτό, ο `sbpl_lattice_planner` παρουσίασε και πάλι τη χαμηλότερη μέση ελάχιστη απόσταση από τα εμπόδια και τη μεγαλύτερη συνέπεια απόστασης γύρω από αυτά. Από την άλλη πλευρά, ο `navfn` παρήγαγε τα καλύτερα σχέδια όσον αφορά στη μέση απόσταση από εμπόδια, αλλά με τη μεγαλύτερη ασυνέπεια μεταξύ των τριών αλγορίθμων.

Α'.2.3.2 Σχετικά με τους ελεγκτές κίνησης

Ο πίνακας Α'.17 καταγράφει τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους ελεγκτές κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.3 και που προέκυψαν κατά τα $N = 10$ πειράματα στο περιβάλλον CSAL.

Αυτό που είναι εντυπωσιακό εδώ είναι ότι όλοι οι συνδυασμοί των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών με τον ελεγκτή κίνησης `dwa_local_planner` απέτυχαν και πάλι να μεταφέρουν το ρομπότ από την αρχική στην τελική στάση σε όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν. Όσον αφορά στην επίδοση του `teb_local_planner` στο περιβάλλον CSAL, δεν ματαίωσε ποτέ αποστολή και δεν έκανε καμία προσπάθεια ανάκαμψης, παρόλο που παρουσίασε έναν μικρό αριθμό αποτυχιών διαδρομής. Όσον αφορά στον `eband_local_planner` αυτός παρουσίασε ελάχιστες προσπάθειες ανάκαμψης, αλλά σημαντικές αποτυχίες διαδρομής όταν συνδυάστηκε

GP	LP	Μετρικές επίδοσης αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών				
		$\mu_l(\mathcal{G})$ [m]	$\sigma_l(\mathcal{G})$ [m]	$\mu_r(\mathcal{G})$ [στάσεις/m]	$\mu_s(\mathcal{G})$ [rad]	$\sigma_s(\mathcal{G})$ [rad]
navfn	dwa	21.87	0.14	199.84	2.33	0.00
navfn	eband	21.78	0.13	199.96	2.33	0.00
navfn	teb	21.87	0.16	199.95	2.33	0.00
global_planner	dwa	21.90	0.06	200.06	2.33	0.00
global_planner	eband	21.89	0.10	200.06	2.33	0.00
global_planner	teb	21.84	0.13	200.07	2.33	0.00
sbpl	dwa	22.07	0.04	131.61	2.31	0.01
sbpl	eband	22.09	0.10	131.66	2.31	0.01
sbpl	teb	22.12	0.39	133.03	2.30	0.04

Πίνακας Α'.15: Μέσο συνολικό μήκος μονοπατιών $\mu_l(\mathcal{G})$ και τυπική απόκλιση $\sigma_l(\mathcal{G})$, μέση ανάλυση μονοπατιών $\mu_r(\mathcal{G})$, μέση τιμή ομαλότητας $\mu_s(\mathcal{G})$, και τυπική απόκλιση $\sigma_s(\mathcal{G})$, για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CSAL

με αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών που δεν λαμβάνουν υπόψη τους το κινηματικό μοντέλο του ρομπότ.

Α'.2.3.3 Σχετικά με το συνδυασμό τους

Οι πίνακες Α'.18, Α'.19, Α'.20, και Α'.21 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.4, και που προέκυψαν κατά τα $N = 10$ πειράματα στο περιβάλλον CSAL.

Όσον αφορά στο χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη της πλοήγησης από τη στάση p_0^I προς τη στάση-στόχο p_G^I (πίνακας Α'.18), όλοι οι συνδυασμοί που περιλαμβάνουν τον `dwa_local_planner` αποκλείονται από αξιολόγηση λόγω της αδυναμίας του να πλοηγήσει το ρομπότ με τρόπο τέτοιο ώστε να φτάσει στην επιθυμητή στάση. Ο ελεγκτής κίνησης `teb_local_planner` διέσχισε τα σχεδιασθέντα μονοπάτια σε λιγότερο μέσο χρόνο σε σύγκριση με τον `eband_local_planner` για τον ίδιο αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών.

Όσον αφορά στο μέσο μήκος των διανυόμενων διαδρομών (πίνακας Α'.19), ο `teb_local_planner` δεν παραμόρφωσε τα σχεδιασθέντα μονοπάτια στο βαθμό που το έκανε στις προσομοιώσεις, και αυτό είναι παρατηρήσιμο καθώς παρήγαγε διαδρομές με το μικρότερο μέσο μήκος. Από την άλλη πλευρά, οι διαδρομές που παρήγαγε ο `eband_local_planner` ήταν οι μακρύτερες,

GP	LP	Μετρικές επίδοσης αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών σχετικές με εμπόδια		
		$\inf(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_L))$ [m]	$\mu(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_L))$ [m]	$\sigma(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_L))$ [m]
navfn	dwa	0.01	0.47	0.42
navfn	eband	0.01	0.47	0.42
navfn	teb	0.01	0.47	0.42
global_planner	dwa	0.00 (-0.02)	0.45	0.40
global_planner	eband	0.00 (-0.02)	0.45	0.40
global_planner	teb	0.00 (-0.02)	0.45	0.41
sbpl	dwa	0.00 (-0.02)	0.41	0.37
sbpl	eband	0.00 (-0.02)	0.41	0.37
sbpl	teb	0.00 (-0.02)	0.41	0.37

Πίνακας Α'.16: Ολικά ελάχιστη απόσταση μονοπατιών \mathcal{G} από οποιοδήποτε εμπόδιο $\inf(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_L))$, μέση ελάχιστη απόσταση $\mu(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_L))$ και τυπική απόκλιση $\sigma(d(\mathcal{G}, \mathbf{M}_L))$ από όλα τα εμπόδια, για $N = 10$ πειράματα στο περιβάλλον CSAL

αλλά οι πιο συνεπείς σε μήκος. Ο τελευταίος παρήγαγε μονοπάτια με χαμηλότερη ομαλότητα σε σύγκριση με τον `teb_local_planner`, και μονοπάτια με τη μεγαλύτερη συνέπεια όσον αφορά την ομαλότητα.

Όσον αφορά στην απόσταση από τα εμπόδια στο χάρτη \mathbf{M}_L (πίνακας Α'.20), ο `teb_local_planner` δεν κατάφερε να επιτύχει την ελάχιστη τεθειμένη απόσταση ρομπότ-εμποδίων (που είχε οριστεί όπως προηγουμένως σε 0.10 m), ωστόσο, υπό τον έλεγχό του, η μέση ελάχιστη απόσταση του ρομπότ από τα εμπόδια και η τυπική απόκλισή της ήταν μικρότερες από εκείνες του `eband_local_planner`. Ο τελευταίος ήταν ο μόνος ελεγκτής που κατάφερε να παρουσιάσει απόσταση ρομπότ-εμποδίων μεγαλύτερη από το κατώφλι που τέθηκε, και μάλιστα με συνέπεια.

Όσον αφορά στην απόκλιση των διανυθέντων διαδρομών από τα αντίστοιχα σχεδιασθέντα μονοπάτια (πίνακας Α'.21), ο `teb_local_planner` παρήγαγε μονοπάτια με τη χαμηλότερη μέση και συνολική απόκλιση, η οποία είναι σύμφωνη με τη μέση ελάχιστη απόσταση ρομπότ-εμποδίων που παρουσιάστηκε. Αντίθετα, ο `eband_local_planner` παρήγαγε διαδρομές με τη μεγαλύτερη μέση και συνολική απόκλιση από σχεδιασθέντα μονοπάτια, και, συνολικά, διαδρομές με τη μεγαλύτερη απόσταση Frechet.

GP	LP	Μετρικές επίδοσης ελεγκτών κίνησης							
		μ_A/N_s	μ_{RR}	σ_{RR}	μ_{CC}	σ_{CC}	μ_{PF}	σ_{PF}	μ_{PF}/μ_{LPC}
navfn	dwa	1.00	2.20	0.42	3.00	0.00	37.40	17.85	0.08
global_planner	dwa	1.00	2.60	0.70	3.20	0.63	30.20	23.66	0.06
sbpl	dwa	1.00	2.40	0.70	3.30	0.95	4.10	3.14	0.01
navfn	eband	0.00	0.60	0.97	0.90	1.45	57.00	26.72	N/A
global_planner	eband	0.00	1.00	0.67	0.40	0.97	65.00	29.84	N/A
sbpl	eband	0.00	1.40	0.52	1.10	1.37	5.80	4.13	N/A
navfn	teb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	0.88	0.00
global_planner	teb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40	1.17	0.00
sbpl	teb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.70	3.27	0.00

Πίνακας Α'.17: Μέσος αριθμός ματαιωμένων αποστολών επί του αριθμού των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν μ_A/N , μέσος αριθμός ανακτήσεων με περιστροφή μ_{RR} και η τυπική τους απόκλιση σ_{RR} , μέσος αριθμός εκκαθαρίσεων χαρτών κόστους μ_{CC} και η τυπική τους απόκλιση σ_{CC} , μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής μ_{PF} και η τυπική τους απόκλιση σ_{PF} , και μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής επί του μέσου αριθμού των κλήσεων του ελεγκτή κίνησης μ_{PF}/μ_{LPC} , για όλους τους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6, για $N = 10$ πειράματα στο περιβάλλον CSAL

GP	LP	Μετρικές που αφορούν στον χρόνο πραγματικής διαδρομής	
		μ_t [sec]	σ_t [sec]
navfn	dwa	47.47	15.29
global_planner	dwa	56.24	15.44
sbpl	dwa	60.30	22.58
navfn	eband	356.25	9.88
global_planner	eband	354.89	10.05
sbpl	eband	392.16	21.29
navfn	teb	326.70	12.88
global_planner	teb	330.25	13.77
sbpl	teb	363.16	42.35

Πίνακας Α'.18: Μέσος χρόνος διαδρομής μ_t από την αρχική στην τελική στάση και τυπική απόκλιση σ_t για $N = 10$ πειράματα στο περιβάλλον CSAL. Οι συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν όλες τις αποστολές και οι τιμές των αντίστοιχων μετρικών σημειώνονται με έντονη γραφή

GP	LP	Μετρικές σχετικές με τις διανυθείσες διαδρομές			
		$\mu_l(\mathcal{P})$ [m]	$\sigma_l(\mathcal{P})$ [m]	$\mu_s(\mathcal{P})$ [rad]	$\sigma_s(\mathcal{P})$ [rad]
navfn	dwa	2.97	1.00	0.58	0.42
global_planner	dwa	2.65	1.50	1.16	0.51
sbpl	dwa	2.99	1.36	0.79	0.54
navfn	eband	22.81	0.12	2.32	0.01
global_planner	eband	22.79	0.13	2.33	0.01
sbpl	eband	22.78	0.13	2.32	0.01
navfn	teb	22.71	0.18	2.35	0.02
global_planner	teb	22.73	0.28	2.34	0.02
sbpl	teb	23.47	0.87	2.30	0.04

Πίνακας Α'.19: Μέσο μήκος διαδρομής $\mu_l(\mathcal{P})$ και τυπική απόκλιση $\sigma_l(\mathcal{P})$, και μέση τιμή ομαλότητας διαδρομής $\mu_s(\mathcal{P})$ και τυπική απόκλιση $\sigma_s(\mathcal{P})$ για $N = 10$ πειράματα στο περιβάλλον CSAL. Συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν όλες τις αποστολές σημειώνονται με έντονη γραφή

GP	LP	Μετρικές που αφορούν στα εμπόδια και τις πραγματικές διαδρομές		
		$\inf(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_L))$ [m]	$\mu(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_L))$ [m]	$\sigma(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_L))$ [m]
navfn	dwa	0.02	0.24	0.09
global_planner	dwa	0.02	0.25	0.07
sbpl	dwa	0.03	0.26	0.04
navfn	eband	0.11	0.52	0.20
global_planner	eband	0.11	0.54	0.20
sbpl	eband	0.13	0.57	0.19
navfn	teb	0.08	0.51	0.18
global_planner	teb	0.08	0.52	0.19
sbpl	teb	0.08	0.56	0.17

Πίνακας Α'.20: Ολικά ελάχιστη απόσταση των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που διήνυσε το ρομπότ από οποιοδήποτε εμπόδιο σε όλες τις προσομοιώσεις $\inf(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_L))$, μέση ελάχιστη απόσταση $\mu(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_L))$ από όλα τα εμπόδια για $N = 10$ πειράματα στο χάρτη CSAL \mathbf{M}_L , και μέση τυπική απόκλιση $\sigma(d(\mathcal{P}, \mathbf{M}_L))$. Συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν όλες τις αποστολές σημειώνονται με έντονη γραφή

GP	LP	Μετρικές σχετικές με την απόκλιση διαδρομών από σχεδιασθέντα μονοπάτια		
		$\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ [m]	$\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ [m]	$\mu_\delta^F(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ [m]
navfn	dwa	0.03	1.74	12.69
global_planner	dwa	0.05	3.41	12.43
sbpl	dwa	0.04	2.32	12.58
navfn	eband	0.12	48.34	0.35
global_planner	eband	0.13	51.63	0.35
sbpl	eband	0.15	62.71	0.43
navfn	teb	0.10	40.19	0.31
global_planner	teb	0.11	42.84	0.33
sbpl	teb	0.12	50.56	0.35

Πίνακας Α'.21: Μέση απόκλιση $\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$, μέση συνολική απόκλιση $\mu_\Delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$, και μέση απόσταση Frechet $\mu_\delta^F(\mathcal{P}, \mathcal{G})$ μεταξύ των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που ακολούθησε το ρομπότ και των αντίστοιχων σχεδιασθέντων μονοπατιών \mathcal{G} για $N = 10$ πειράματα στο χάρτη CSAL M_L . Συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν τουλάχιστον μία αποστολή σημειώνονται με έντονη γραφή

Παράρτημα Β΄

Μέθοδοι ελάττωσης σφάλματος στάσης φίλτρου σωματιδίων

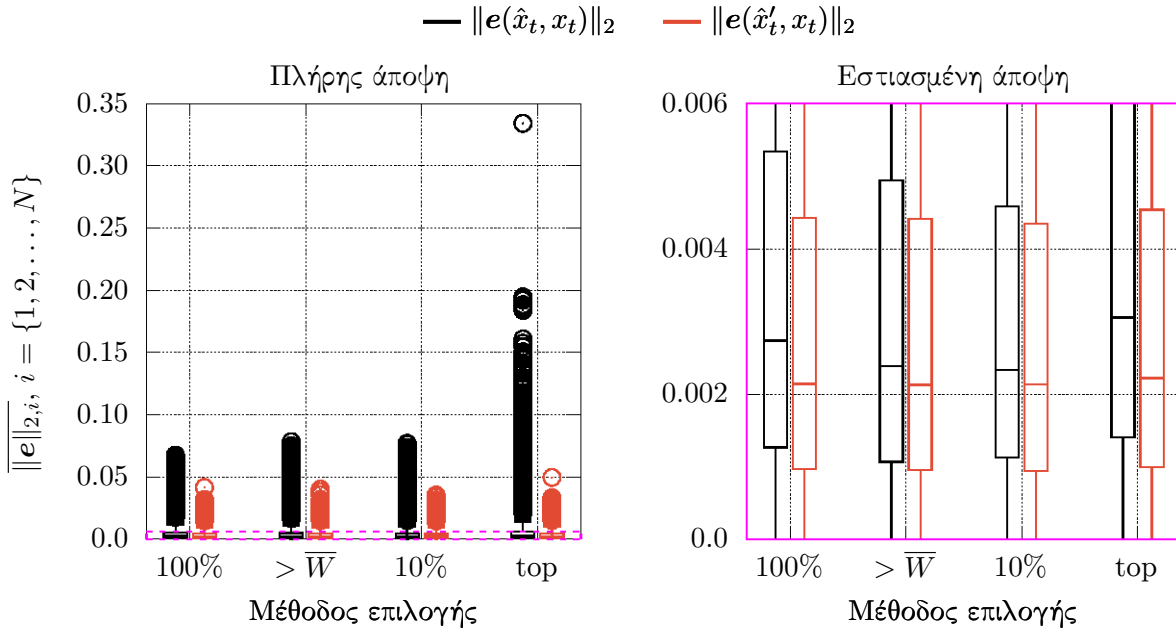
Β΄.1 Σφάλματα εκτίμησης στάσης μεθόδου επιλογής σωματιδίων

Τα σχήματα Β΄.1 και Β΄.2 δείχνουν την κατανομή όλων των σφαλμάτων εκτίμησης προσανατολισμού και θέσης, αντίστοιχα, των μεθόδων επιλογής σωματιδίων από τον πληθυσμό του MCL για την ελάττωση του σφάλματος εκτίμησης του.

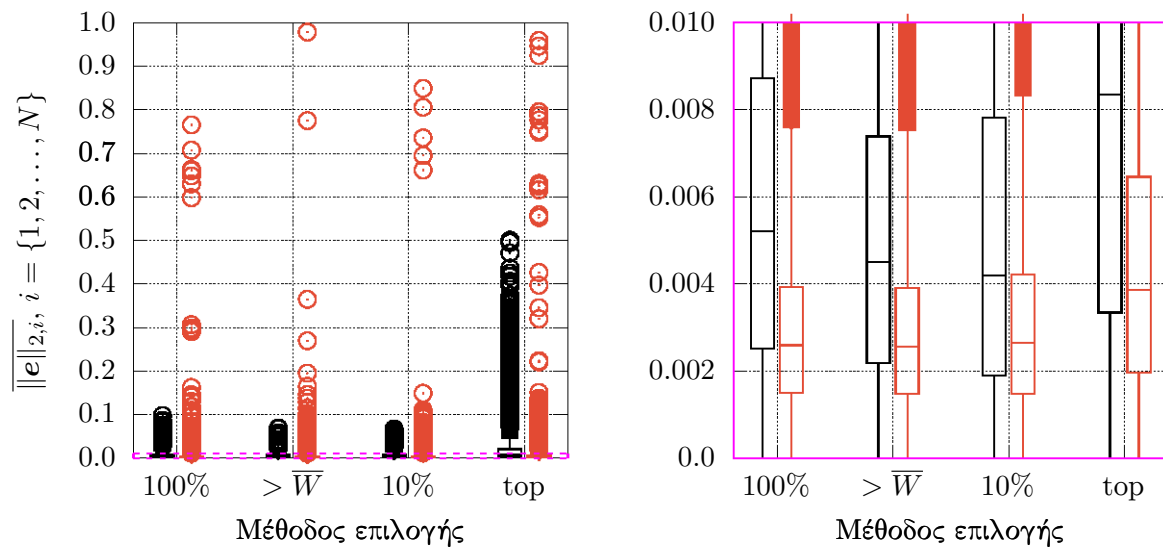
Β΄.2 Σφάλματα εκτίμησης στάσης μεθόδου ανάδρασης σωματιδίων

Τα σχήματα Β΄.3 και Β΄.4 δείχνουν την κατανομή όλων των σφαλμάτων εκτίμησης προσανατολισμού και θέσης, αντίστοιχα, των μεθόδων ανάδρασης του αποτελέσματος της διαδικασίας ευθυγράμμισης μετρήσεων lidar με σαρώσεις χάρτη στον πληθυσμό του MCL για την ελάττωση του σφάλματος εκτίμησης του.

Κατανομή σφαλμάτων εκτίμησης προσανατολισμού ανά μέθοδο επιλογής σωματιδίων [rad]

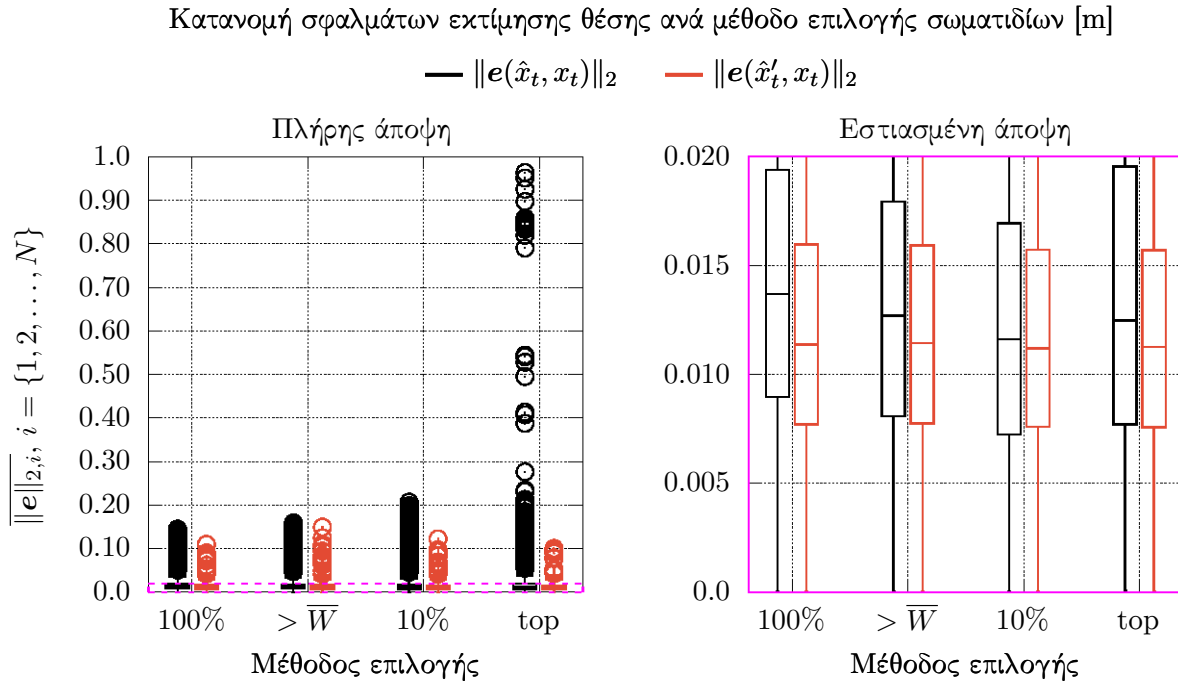


(α') Περιβάλλον CORRIDOR

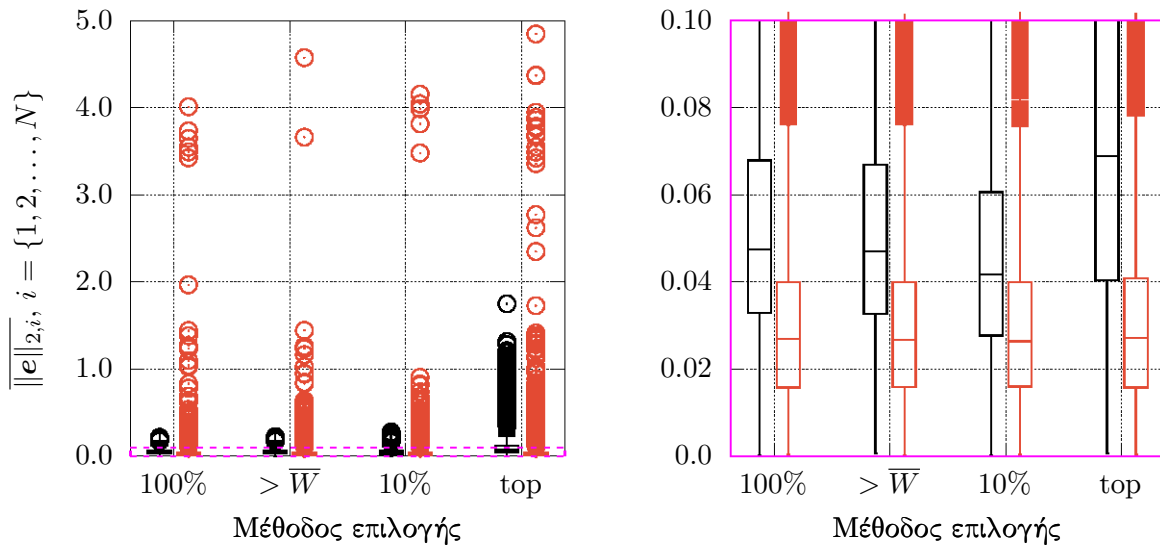


(β') Περιβάλλον WAREHOUSE

Σχήμα Β'.1: Η κατανομή του μέσου σφάλματος προσανατολισμού ανά διαδρομή πλοήγησης για τον MCL σε ανοιχτό βρόχο (στα αριστερά κάθε υποδεικνυόμενης μεθόδου επιλογής, με μαύρο χρώμα) και του σύνθετου συστήματος (δεξιά, με κόκκινο), σε $N = 100$ προσομοιώσεις, ανάλογα με την μέθοδο επιλογής πληθυσμού. Το σύμβολο “100%” υποδηλώνει τη διαμόρφωση του συστήματος όπου όλα τα σωματίδια του συνόλου του πληθυσμού επιλέγονται κατά τη διαδικασία εξαγωγής της εκτίμησης της στάσης του συστήματος, το σύμβολο “ $> \bar{W}$ ” υποδηλώνει εκείνη της επιλογής των σωματιδίων των οποίων το βάρος είναι μεγαλύτερο από το μέσο βάρος του πληθυσμού του φίλτρου, το “10%” εκείνη που μόνο το άνω 10% των βαρύτερων σωματιδίων επιλέγονται, και “top” τη διαμόρφωση όπου επιλέγεται μόνο το σωματίδιο με το μεγαλύτερο βάρος μεταξύ όλων των σωματιδίων του πληθυσμού



(α') Περιβάλλον CORRIDOR

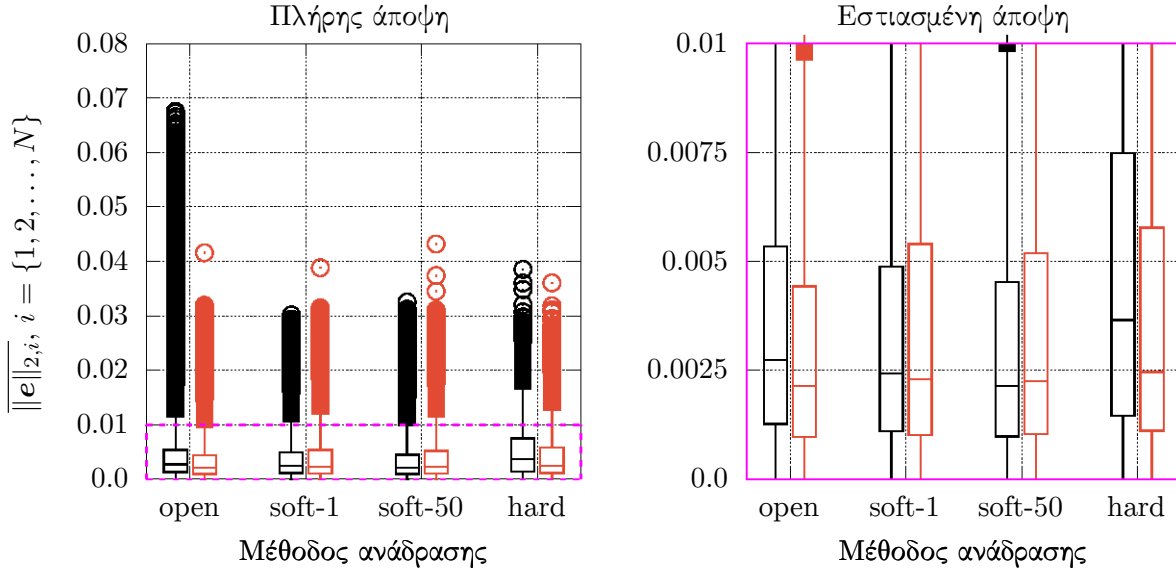


(β') Περιβάλλον WAREHOUSE

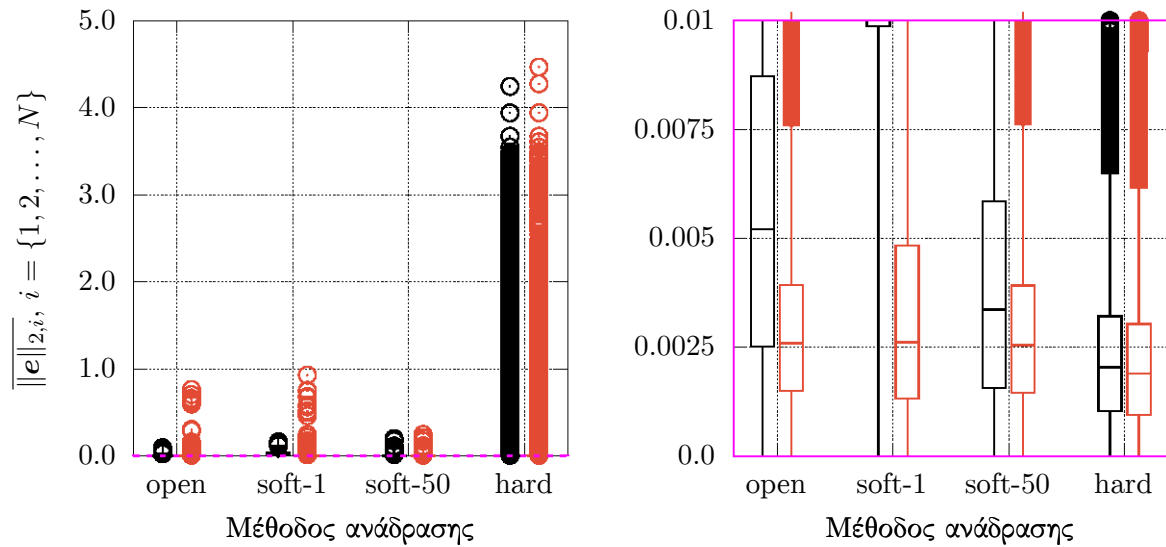
Σχήμα Β'.2: Η κατανομή του μέσου σφάλματος θέσης ανά διαδρομή πλοήγησης για τον MCL σε ανοιχτό βρόχο (στα αριστερά κάθε υποδεικνυόμενης μεθόδου επιλογής, με μαύρο χρώμα) και του σύνθετου συστήματος (δεξιά, με κόκκινο), σε $N = 100$ προσομοιώσεις, ανάλογα με την μέθοδο επιλογής πληθυσμού. Το σύμβολο “100%” υποδηλώνει τη διαμόρφωση του συστήματος όπου όλα τα σωματίδια του συνόλου του πληθυσμού επιλέγονται κατά τη διαδικασία εξαγωγής της εκτίμησης της στάσης του συστήματος, το σύμβολο “ $> \bar{W}$ ” υποδηλώνει εκείνη της επιλογής των σωματιδίων των οποίων το βάρος είναι μεγαλύτερο από το μέσο βάρος του πληθυσμού του φίλτρου, το “10%” εκείνη που μόνο το άνω 10% των βαρύτερων σωματιδίων επιλέγονται, και “top” τη διαμόρφωση όπου επιλέγεται μόνο το σωματίδιο με το μεγαλύτερο βάρος μεταξύ όλων των σωματιδίων του πληθυσμού

Κατανομή σφαλμάτων εκτίμησης προανατολισμού ανά μέθοδο ανάδρασης [rad]

$$\text{— } \|e(\hat{x}_t, x_t)\|_2 \quad \text{— } \|e(\hat{x}'_t, x_t)\|_2$$

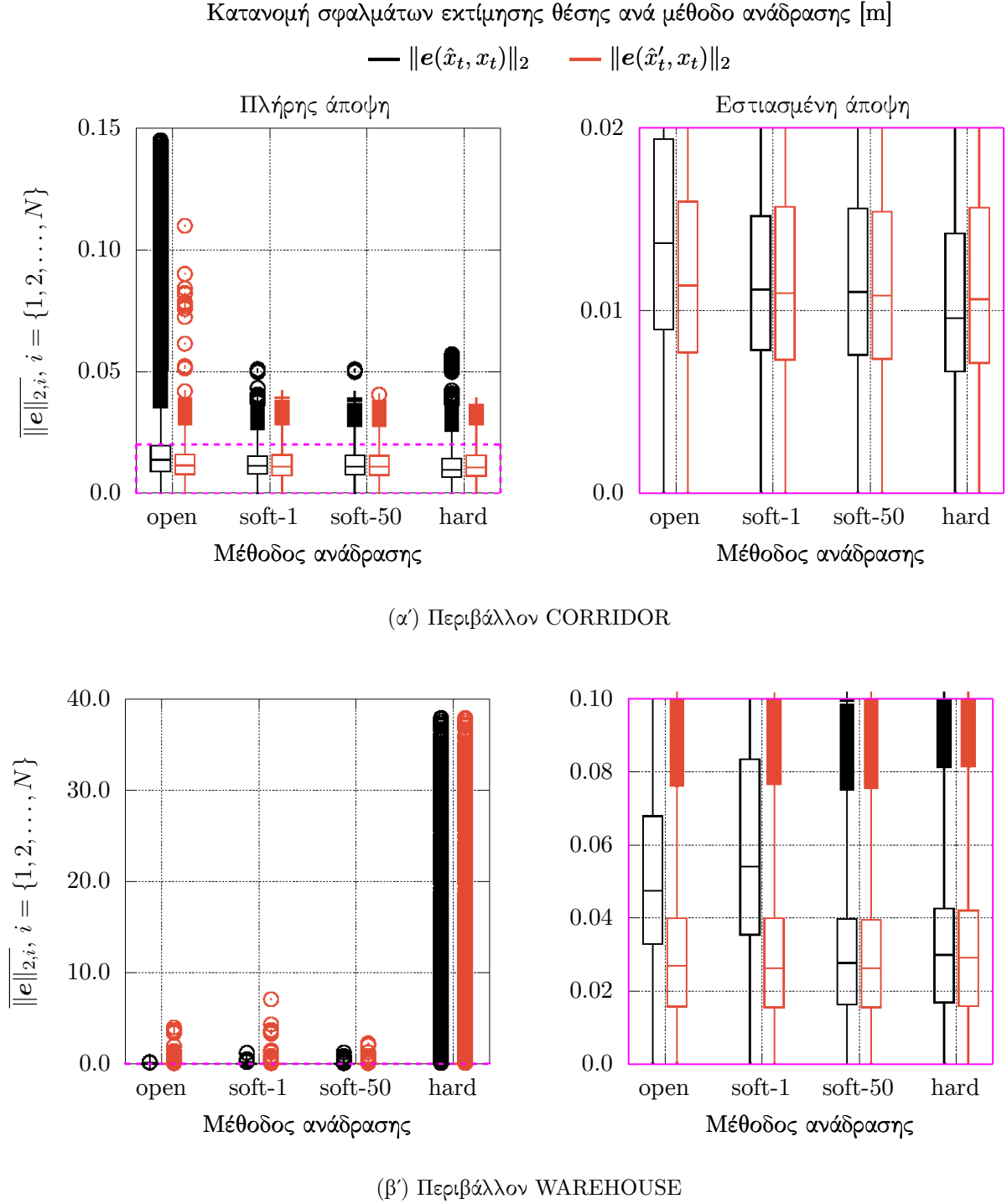


(α') Περιβάλλον CORRIDOR



(β') Περιβάλλον WAREHOUSE

Σχήμα Β'3: Η κατανομή του μέσου σφάλματος προανατολισμού ανά διαδρομή πλοήγησης για τον MCL (στα αριστερά κάθε υποδεικνυόμενης μεθόδου ανάδρασης, με μαύρο χρώμα) και του σύνθετου συστήματος (δεξιά, με κόκκινο) σε $N = 100$ προσομοιώσεις, ανάλογα με τη μέθοδο ανατροφοδότησης του αποτελέσματος της ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη. Η φράση “open” είναι συντομογραφία για την έλλειψη ανάδρασης (ανοιχτός βρόχος), η φράση “soft-1” για τη διαμόρφωση όπου η έξοδος του συνολικού συστήματος επιστρέφει στο φίλτρο σωματιδίων με τη μορφή ενός σωματιδίου, “soft-50” για την περίπτωση που επιστρέφει με τη μορφή τόσων σωματιδίων όσα το μισό μέγεθος του πληθυσμού, και “hard” για τη διαμόρφωση όπου το φίλτρο σωματιδίων αρχικοποιείται γύρω από τη στάση που υπολογίζεται μετά τη διαδικασία ευθυγράμμισης



Σχήμα Β'.4: Η κατανομή του μέσου σφάλματος θέσης ανά διαδρομή πλοήγησης για τον MCL (στα αριστερά κάθε υποδεικνυόμενης μεθόδου ανάδρασης, με μαύρο χρώμα) και του σύνθετου συστήματος (δεξιά, με κόκκινο) σε $N = 100$ προσομοιώσεις, ανάλογα με τη μέθοδο ανατροφοδότησης του αποτελέσματος της ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη. Η φράση “open” είναι συντομογραφία για την έλλειψη ανάδρασης (ανοιχτός βρόχος), η φράση “soft-1” για τη διαμόρφωση όπου η έξοδος του συνολικού συστήματος επιστρέφει στο φίλτρο σωματιδίων με τη μορφή ενός σωματιδίου, “soft-50” για την περίπτωση που επιστρέφει με τη μορφή τόσων σωματιδίων όσα το μισό μέγεθος του πληθυσμού, και “hard” για τη διαμόρφωση όπου το φίλτρο σωματιδίων αρχικοποιείται γύρω από τη στάση που υπολογίζεται μετά τη διαδικασία ευθυγράμμισης