



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 Μέθοδοι ελάττωσης σφάλματος εκτίμησης στάσης φίλτρου σωματιδίων	35
4.1 Στόχοι του κεφαλαίου και δομή	35
4.2 Σχετική βιβλιογραφία	37
4.2.1 Ευθυγράμμιση μετρήσεων δισδιάστατου αισθητήρα lidar	37
4.2.2 Ευθυγράμμιση μετρήσεων δισδιάστατου αισθητήρα lidar με σαρώσεις χάρτη	44
4.3 Μεθοδολογία	49
4.3.1 Ελάττωση σφάλματος μέσω επιλογής σωματιδίων	49
4.3.2 Ελάττωση σφάλματος μέσω ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη	54
4.3.3 Ελάττωση σφάλματος μέσω ανάδρασης	55
4.3.4 Το ολικό σύστημα ελάττωσης του σφάλματος εκτίμησης	60
4.4 Πειραματική αξιολόγηση	61
4.4.1 Πειραματική διαδικασία	61
4.4.2 Αξιολόγηση της μεθόδου επιλογής σωματιδίων	65
4.4.3 Αξιολόγηση της μεθόδου ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη και ανάδραση	65
4.5 Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα	65
III Συμπεράσματα	69
IV Αναφορές	71
V Παραρτήματα	91
Αξιολόγηση αλγορίθμων αυτόνομης πλοήγησης	93

.1	Τύποι αναλογικότητας μετρικών αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομης πλοήγησης	93
.2	Λεπτομέρειες αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομους πλοήγησης	96
.2.1	Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον CORRIDOR	96
.2.2	Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον WILLOWGARAGE	103
.2.3	Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον CSAL	109
Pose selection		117
.1	Σφάλματα εκτίμησης στάσης μεθόδου επιλογής σωματιδίων	117
.1.1	Σφάλματα προσανατολισμού	117
.1.2	Σφάλματα θέσης	117
.2	Σφάλματα εκτίμησης στάσης μεθόδου ανάδρασης σωματιδίων	117
.2.1	Σφάλματα προσανατολισμού	117
.2.2	Σφάλματα θέσης	117

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 I. 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

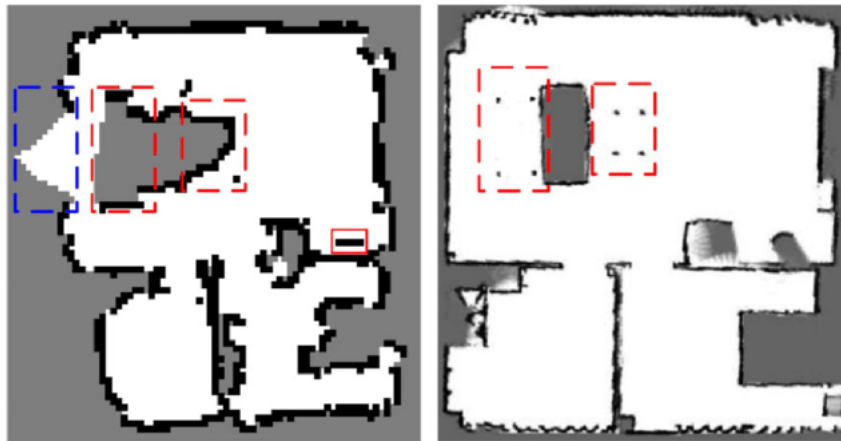
Η επιτυχής λύση του προβλήματος της αυτόνομης πλοήγησης προϋποθέτει την ύπαρξη και χρήση εξωδεκτικών αισθητήρων. Χωρίς αυτούς τα προβλήματα των οποίων η λύση είναι αναγκαία για την αυτόνομη πλοήγηση (κατασκευή χάρτη, εύρεση και παρακολούθηση της θέσης του ρομπότ) δεν είναι επιλύσιμα. Για την αντίληψη 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.

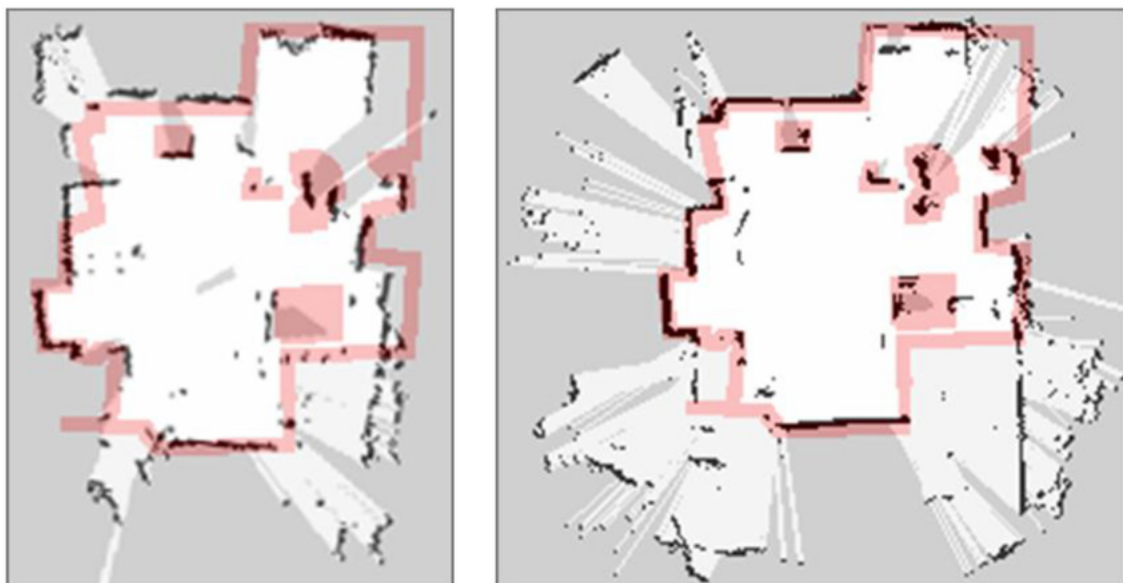
Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αισθητήρων εικόνας και η βελτίωση της ποιότητάς τους τους κατέστησε και πηγές εξωδεκτικών μετρήσεων στη ρομποτική. Το σημαντικό τους πρότερημα είναι η χρωματική πληροφορία του περιβάλλοντος, το μεγάλο οριζόντιο και κάθετο εύρος όρασής τους, και ο υψηλός ρυθμός ανανέωσης των 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

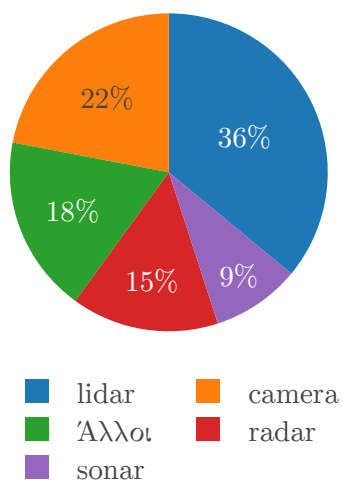
δίου εφαρμογής ΠΕ ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμοι. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους αισθητήρες εξαρτώνται από τις συνθήκες φωτισμού του χώρου στον οποίο λειτουργούν και συνεπώς η ποιότητα των μετρήσεων είναι ευμετάβλητη. Σε σχέση με τους αισθητήρες lidar εμφανίζουν σημαντικά περιορισμένο γωνιακό εύρος 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).

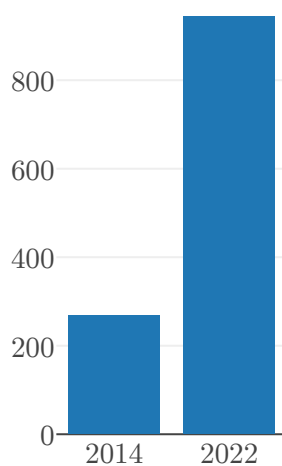


Σχήμα 1.3: Αριστερά: διδιάστατος χάρτης από μετρήσεις αισθητήρα τύπου RGBD προβεβλημένες στο οριζόντιο επίπεδο. Δεξιά: χάρτης του ίδιου χώρου από μετρήσεις αισθητήρα τύπου lidar σε δύο διαστάσεις [Oli+12]. Οι κόκκινες γραμμές αναπαράσταν το πραγματικό περιβάλλον

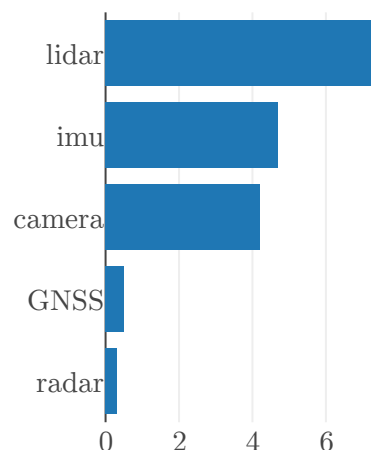
Παγκόσμια αγορά αισθητήρων
στην αυτοκινητοβιομηχανία



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

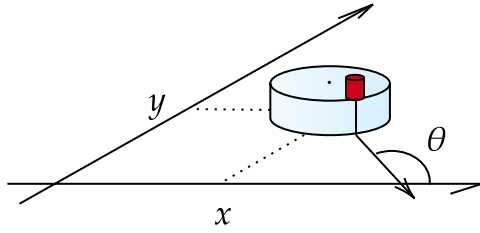
1.2.1 Εκτιμητέο διάνυσμα κατάστασης

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

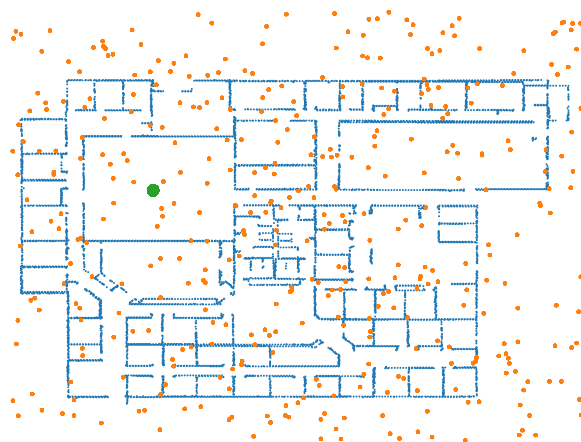
Η ακριβής γνώση της στάσης του οχήματος είναι απαγορευμένη (παρατήρηση II): η *εκτίμηση* $\hat{\mathbf{p}}$ της στάσης του είναι το αντικείμενο των αλγορίμων εύρεσης στάσης.

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).



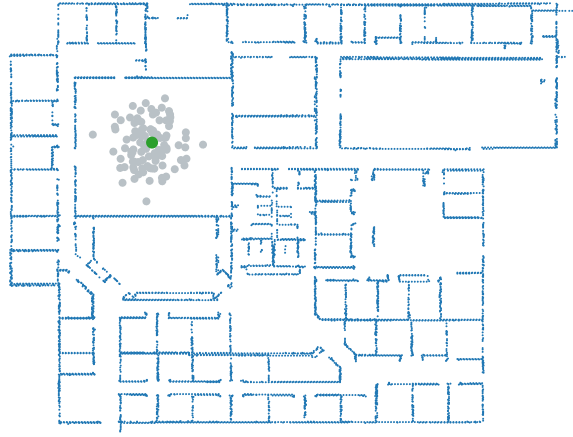
Σχήμα 1.6: Το πρόβλημα της εκτίμησης της στάσης ενός ρομπότ βάσει καθολικής αβεβαιότητας της στάσης του. Το ρομπότ βρίσκεται στη θέση που σημειώνεται με πράσινο. Οι κουκίδες που σημειώνονται με πορτοκαλί δείχνουν υποθέσεις προς εξέταση για την εκτίμηση της στάσης του

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

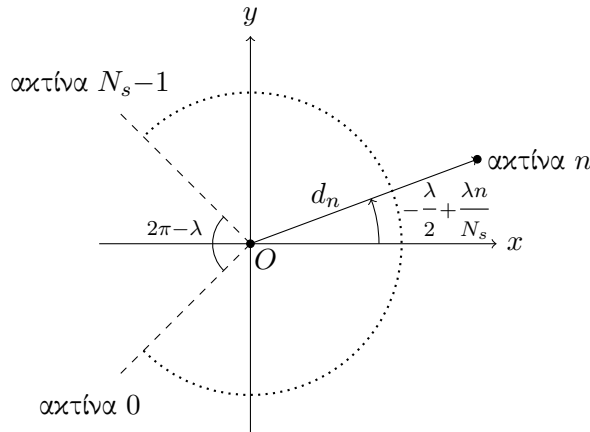
Μία μέτρηση συμβατικού αισθητήρα 2D lidar αποτελείται από έναν πεπερασμένο αριθμό αποστάσεων σε αντικείμενα σε οπτική επαφή εντός της μέγιστης εμβέλειάς του. Οι μετρήσεις λαμβάνονται εγκαρσώς προς το σώμα του, σε κανονικά γωνιακά και χρονικά διαστήματα, σε ένα καθορισμένο γωνιακό εύρος [CRP18].

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*

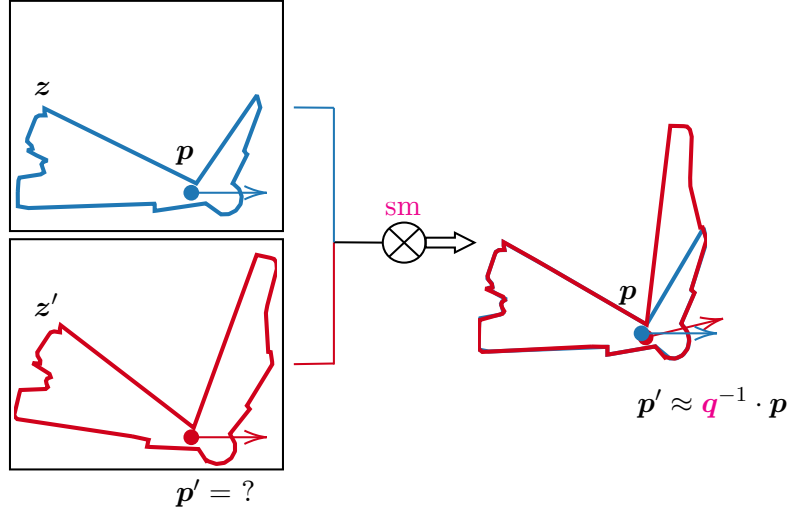
Το γωνιακό εύρος ενός 2D lidar είναι συμμετρικά κατανεμημένο ως προς τον τοπικό του x άξονα. Κάθε ακτίνα έχει την ίδια γωνιακή απόσταση από τις γειτονικές της, εξαιρέσει των δύο ακραίων ακτίνων όταν $\lambda < 2\pi$. Όταν $\lambda = 2\pi$ ο αισθητήρας ονομάζεται πανοραμικός.

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

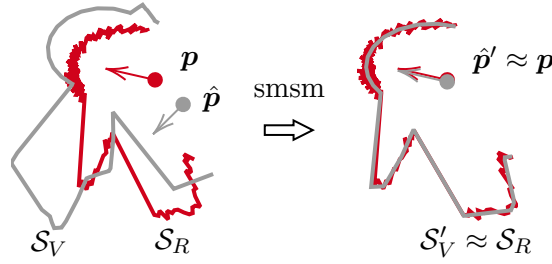
σε αποστάσεις σε εμπόδια εντός του χάρτη του περιβάλλοντος του ρομπότ και όχι εντός του το ίδιου του περιβάλλοντος—εξ ου και η εικονικότητά του. Μία σάρωση χάρτη λαμβάνεται από έναν εικονικό αισθητήρα και προκύπτει μέσω του εντοπισμού των τομών των ακτίνων που προέρχονται από την εκτίμηση της στάσης 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 διαδικασιών². 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

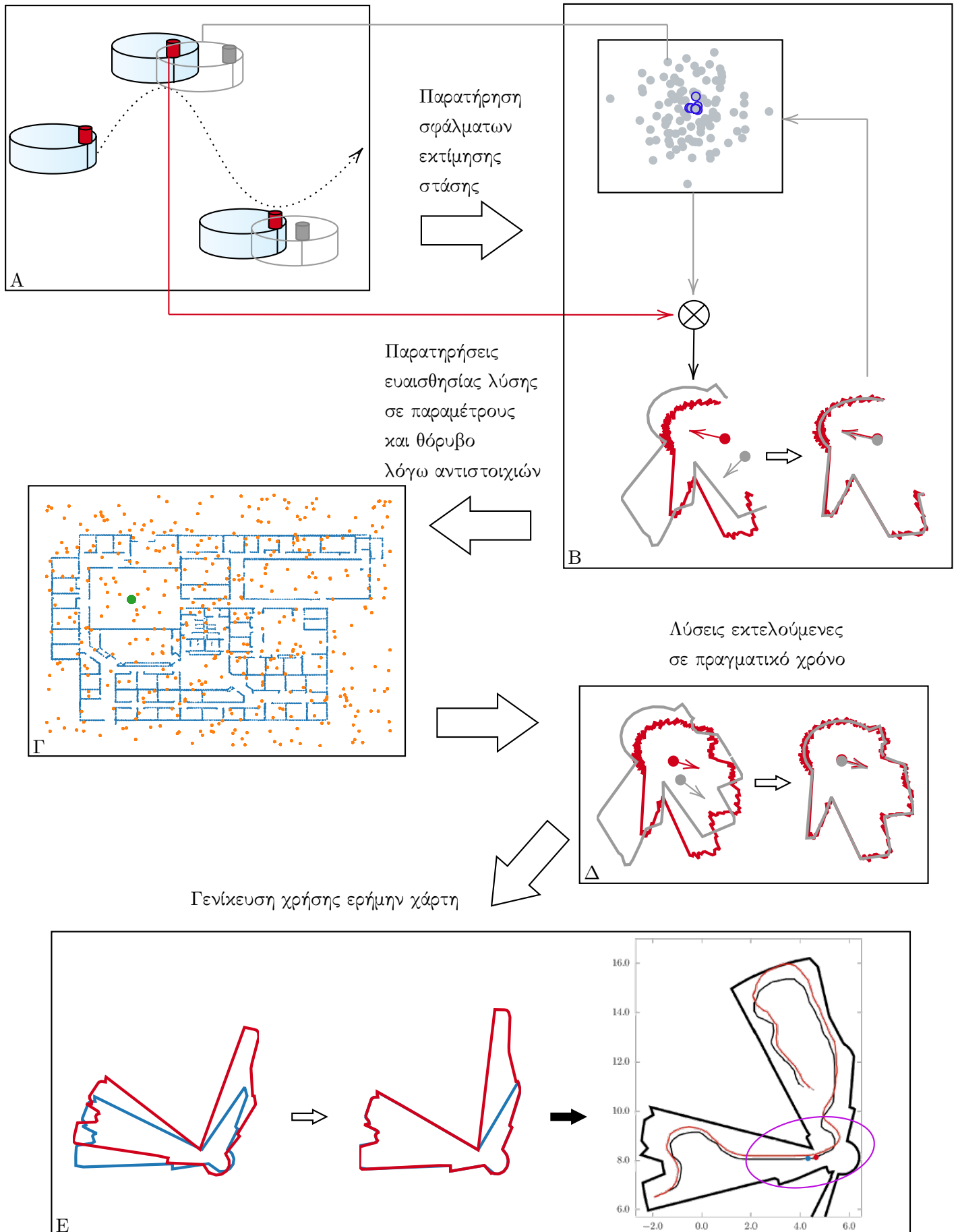
οχήματος βάσει περιορισμένης αβεβαιότητας είναι ότι ο χρόνος εκτέλεσής της είναι τέτοιος που δεν μπορεί να συμβαδίσει με το ρυθμό ανανέωσης των μετρήσεων που προέρχονται από έναν συμβατικό αισθητήρα lidar. Αντιθέτως, στο πρόβλημα της εκτίμησης βάσει καθολικής αβεβαιότητας, ο χαμηλός χρόνος εκτέλεσης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



Σχήμα 2.1: Ο οδικός χάρτης της διατριβής

Κεφάλαιο 3

Συμβολές και Διάρθρωση της διατριβής

3.1 Συμβολές της διατριβής

3.2 Διάρθρωση

Μέρος II

Προβλήματα—Λύσεις— Συμβολές

Κεφάλαιο 4

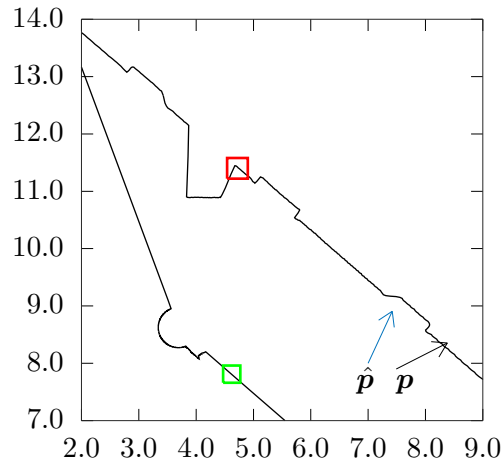
Μέθοδοι ελάττωσης σφάλματος εκτίμησης στάσης φίλτρου σωματιδίων

Ξεκινάει ο κυριος κλαδος ερευνας / θεματικη ενοτητα — smsm

4.1 Στόχοι του κεφαλαίου και δομή

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 \mathcal{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



Σχήμα 4.1: Μια επί της αρχής τυπική συνθήκη εντοπισμού: Η πραγματική στάση του ρομπότ είναι \mathbf{p} αλλά η εκτίμησή της $\hat{\mathbf{p}}$ 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

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

$$\|\mathbf{e}(\mathbf{p}, \hat{\mathbf{p}})\|_2 = ((x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + (\theta - \hat{\theta})^2)^{1/2} \quad (4.1)$$

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

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

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 4.1. Η εκτίμηση της στάσης $\hat{\mathbf{p}}$ 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.

4.2 Σχετική βιβλιογραφία

4.2.1 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 χρησιμοποιώντας 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 αναλλοίωσιμότητα 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 βασίζε-

ται 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 μεθοδός 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 καταστάσεων 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 δειγματοληπτει αραία το περιβάλλον και συνεπώς διαφορετικές 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.

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 ευθυγραμμισεις 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 αντικατο-

πτρίζει το βαθμό ευθυγράμμισής τους σύμφωνα με κάποιο όρισμα περιστροφο-μετατόπισης. Αυτό εξάγεται φυσικά μεγιστοποιώντας την εν λόγω συνάρτηση. Η μέθοδός 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.

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).

4.2.2 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 αναλοίωτα 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 μετα-

σχηματισμός 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 ρομποτού βάσει καθολικής αυτή τη φορά αβεβαιότητας, η μέθοδος του [PP14] παράγει πρώτα το γε-
νικευμένο διάγραμμα Voronoi του δεδομένου δισδιάστατου χάρτη πλέγματος. Οι κόμβοι του
θεωρούνται ως αρχικές υποθέσεις για τη θέση του ρομποτού. Από αυτούς τους κόμβους υπο-
λογίζονται 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 ιστογράμματος 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 ομοιό-
τητας, 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 πρό-
βλημα 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 ακρί-
βειας αναζήτησης, γίνεται μία σειρά ευθυγραμμίσεων της πραγματικής μέτρησης με εικονικές
μέτρησεις από τις εκτιμήσεις της στάσης του αισθητήρα μέσω του ICP: από τις στάσεις των
σωματιδίων που κατέχουν την κορυφαίες καταλληλότητες συλλαμβάνονται εικονικές σαρώ-
σεις 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 ??, στα πλαίσια της εκτίμησης της στάσης αυτόνομων περονοφόρων 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 [Cen] προκειμένου να μετριάσουν οι επιπτώσεις των μεγάλων γωνιακών σφαλμάτων του PLICP.

Η μέθοδος που παρουσιάζεται στο [BAJ19] εξετάζει από κοινού την οδομετρία, την ευθυ-

γράφμιση 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 κτηματολογικά 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 διασχισμό 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.

4.3 Μεθοδολογία

4.3.1 Ελάττωση σφάλματος 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 δειγμάτα 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 διückότητα 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 ακούοντως 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 μετρήσεις 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 εκτίμησης του.

Έστω \mathbf{P}_t το σύνολο του πληθυσμού των σωματιδίων τη χρονική στιγμή t . Τότε $\mathbf{P}_t \equiv \{(\hat{\mathbf{x}}_t^i, w_t^i)\}, i = 0, 1, \dots, |\mathbf{P}_t| - 1$, όπου $\hat{\mathbf{x}}_t^i$ 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 $\overline{W}_t = \frac{1}{|\mathbf{P}_t|} \sum_{i=0}^{|\mathbf{P}_t|-1} w_t^i$ 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 \overline{W}_t : για παράδειγμα, μόνο τα σωματίδια των οποίων $w_t^i > \overline{W}_t$ 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 βάρος μεταξύ όλων του συνόλου \mathbf{P}_t . Ο συμβολισμός $\mathbf{P}'_t[a]$ δηλώνει το σωματίδιο του \mathbf{P}'_t με δείκτη a , και ο συμβολισμός $\mathbf{P}'_t[a:b]$ δηλώνει το σύνολο των σωματιδίων που αποτελούνται

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:    $P'_t \leftarrow$  sort  $P_t$  by weight  $w_t^i$ , 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:    $\bar{W}_t \leftarrow \frac{1}{|P_t|} \sum_{i=0}^{|P_t|-1} w_t^i$ 
13:    $P''_t \leftarrow \hat{x}_t^i : w_t^i > \bar{W}_t$ 
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  $\hat{x}_t$ 

```

από τα στοιχεία του \mathbf{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 \mathbf{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 $\mathbf{P}_t''[j].x$ για το σύνολο σωματιδίων \mathbf{P}_t'' δηλώνει τη συνιστώσα x (δηλαδή το βάρος w_t ή την εκτίμηση της στάσης \hat{x}_t) του στοιχείου του \mathbf{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 $\text{fraction} \cdot |\mathbf{P}_t|$ 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 προφυλάσσόμαστε 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 ??) 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 πληροφορίας 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.

4.3.2 Ελάττωση σφάλματος 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 q_t ο οποίος, αν εφαρμοστεί στην εκτίμηση \hat{x}_t , θα την κάνει συμπίπτει με την πραγματική στάση x_t .

Ωστόσο, λόγω (α) της παρουσίας θορύβου στις μετρήσεις S_t^R του αισθητήρα, (β) της αναπόφευκτης αναντιστοιχίας μεταξύ του χάρτη M του περιβάλλοντος λειτουργίας και του ίδιου του περιβάλλοντος, (γ) της διακριτής φύσης του χάρτη (ο 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 q_t στην εκτίμηση της στάσης \hat{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.

4.3.3 Ελάττωση σφάλματος 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 βι-

βιβλιογραφία (ενότητα 4.2.2), 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 ανακριβής 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 εγκυμονούνται 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 4.2. Στον αλγόριθμο II οι ενδείξεις “HARD”, “SOFT_1”, “SOFT_P” είναι συντομογραφίες των τριών προαναφερθέντων τρόπων ανάδρασης. Η συντομογραφία “OPEN” εννοεί την έλλειψη ανάδρασης.

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 .

Αλγόριθμος II 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
   
$$P_{t+1} \leftarrow \overbrace{\{\hat{x}_t'\} \cup \{\hat{x}_t'\} \cup \dots \{\hat{x}_t'\}}^{N_{max}}$$

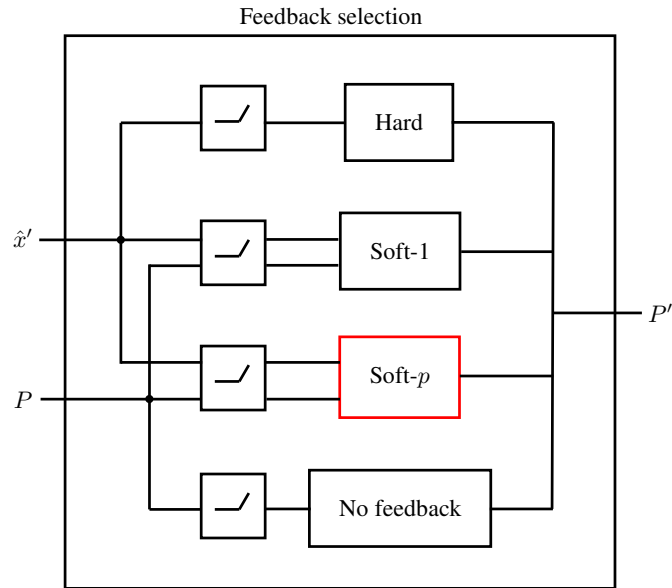
3:   Perturb  $P_{t+1}.\hat{x}_t^i$  according to MCL init params
4: end if
5: if feedback_manner = SOFT_1 then
6:   if  $|P_t| = N_{max}$  then
7:      $P_t \leftarrow$  Sort  $P_t$  by weight, ascending
8:     Delete  $P_t[0]$ 
9:   end if
10:   $P_{t+1} \leftarrow P_t \cup \hat{x}_t'$ 
11: end if
12: if feedback_manner = SOFT_P then
13:  assert  $q \in (0, 1)$ 
14:   $S \leftarrow \{\}$ 
15:  if  $|P_t| \leq (1 - q)N_{max}$  then
16:    
$$S \leftarrow \overbrace{\{\hat{x}_t'\} \cup \{\hat{x}_t'\} \cup \dots \{\hat{x}_t'\}}^{\left\lfloor \frac{q}{1-q} |P_t| \right\rfloor}$$

17:  else if  $|P_t| = N_{max}$  then
18:     $P_t \leftarrow$  Sort  $P_t$  by weight, ascending
19:    Delete  $P_t[0 : \lfloor qN_{max} \rfloor - 1]$ 
20:    
$$S \leftarrow \overbrace{\{\hat{x}_t'\} \cup \{\hat{x}_t'\} \cup \dots \{\hat{x}_t'\}}^{\lfloor qN_{max} \rfloor}$$

21:  else
22:     $P_t \leftarrow$  Sort  $P_t$  by weight, ascending
23:    Delete  $P_t[0 : \lfloor |P_t| - (1 - q)N_{max} \rfloor - 1]$ 
24:    
$$S \leftarrow \overbrace{\{\hat{x}_t'\} \cup \{\hat{x}_t'\} \cup \dots \{\hat{x}_t'\}}^{\lfloor qN_{max} \rfloor}$$

25:  end if
26:   $P_{t+1} \leftarrow P_t \cup S$ 
27: end if
28: if feedback_manner = OPEN then
29:   $P_{t+1} \leftarrow P_t$ 
30: end if
31: return  $P_{t+1}$ 

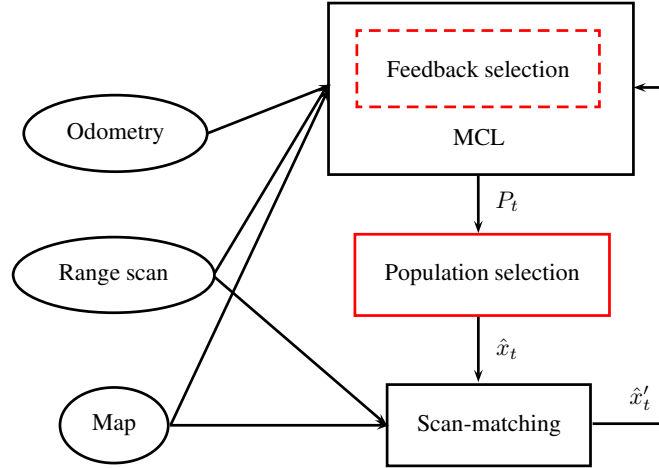
```



Σχήμα 4.2: 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

4.3.4 Το ολικό σύστημα ελάττωσης του σφάλματος εκτίμησης

Η δομή του ολικού συστήματος ελάττωσης του σφάλματος εκτίμησης της στάσης ενός φίλτρου σωματιδίων απεικονίζεται στο σχήμα 4.3. 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.



Σχήμα 4.3: 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, ανατροφοδοτώντας την πίσω στον πληθυσμό του

4.4 Πειραματική αξιολόγηση

4.4.1 Πειραματική διαδικασία

Το περιεχόμενο της παρούσας ενότητας εξυπηρετεί τον έλεγχο τριών διακριτών υποθέσεων, όπως αρθρώθηκαν στις ενότητες 4.3.1, 4.3.2, και 4.3.3:

- (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, και η εφαρμογή του προκύπτοντος μετασχηματισμού στην εκτίμηση 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 την αποτυχία, 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 4.4(α’). Το δεύτερο ονομάζεται WAREHOUSE, συμβολίζεται με M_W , και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4(β’). Η ανάλυση και των δύο χαρτών είναι 0.01 m \times 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 το θόρυβο, και (β) την ευθυγράμμιση μετρήσεων με σαρώσεις, καθώς ο θόρυβος αυξάνει την πιθανότητα λανθασμένων αντιστοιχίσεων και, γενικά, της λανθασμένης ευθυγράμμισης συνολικά. Για το σκοπό αυτό ρυθμίσαμε τον αισθητήρα αποστάσεων ώστε να λειτουργεί με μέγιστη εμβέλεια 10.0 μέτρα.

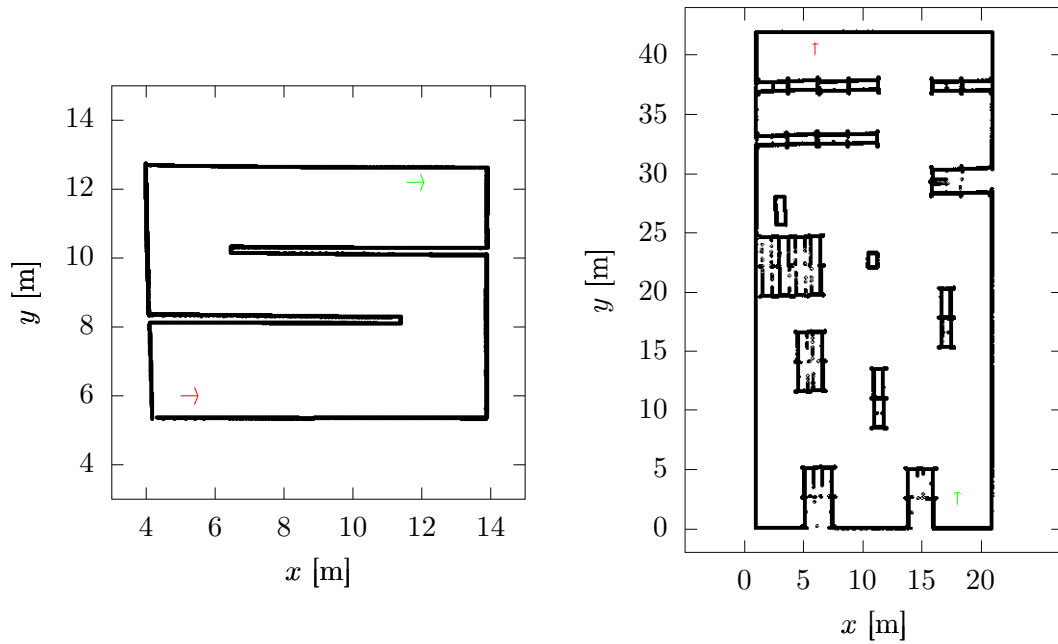
Σε όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ο MCL παράλληλα με τη δειγματοληψία KLD, με ελάχιστο και μέγιστο αριθμό σωματιδίων $N_{\min} = 200$ και $N_{\max} = 500$.

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) M_C : $\mathbf{p}_0^{M_C} \equiv (11.56 \text{ m}, 12.20 \text{ m}, 0.0 \text{ rad})$, και $\mathbf{p}_G^{M_C} \equiv (5.0 \text{ m}, 6.0 \text{ m}, 0.0 \text{ rad})$, αντίστοιχα, και (β) M_W : $\mathbf{p}_0^{M_W} \equiv (17.98 \text{ m}, 2.08 \text{ m}, \pi/2 \text{ rad})$, και $\mathbf{p}_G^{M_W} \equiv (6.0 \text{ m}, 40.0 \text{ m}, \pi/2 \text{ rad})$ 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 ένα Turtlebot v.2, εξοπλισμένο με αισθητήρα απόστασης μέγιστης εμβέλειας $r_{\max} = 10.0 \text{ m}$, γωνιακού εύρους $\alpha = 260^\circ$, και αριθμό ακτίνων $n_r = 640$, του οποίου οι μετρήσεις αλλοιώνονται από θόρυβο κανονικά κατανομημένο, με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση $\sigma = 0.01 \text{ m}$.

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, αποτελούμενες από τις επιλογές (α) $100\% \times |\mathbf{P}_t|$ των σωματιδίων (η ονομαστική λειτουργία του MCL), (β) σωματιδίων $\{i\}$ από το \mathbf{P}_t των οποίων το βάρος w_t^i 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 προσομοιώσεις επιλέγοντας όλα τα σωματίδια $|\mathbf{P}_t|$ για τον υπολογισμό της τελικής θέσης του MCL, δοκιμάζοντας την απόδοση του σύνθετου συστήματος (εικόνες 4.2 και 4.3) 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, όπως αυτοί ορίστηκαν στην ενότητα 4.3.3.

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

Σχήμα 4.4: 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 $2 \times 4 \times 100$ προσομοιώσεων που εκτελούνται σε ανοικτό βρόχο ανά μέθοδο επιλογής σωματιδίων.

Το κριτήριο στο οποίο στηρίζεται η αξιολόγηση όλων των ελέγχων είναι το πλάτος του συνολικού σφάλματος στάσης (εξίσωση 4.1) 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 την ακρίβεια της στάσης. Για κάθε στάση που εξάγεται από τον MCL σε μία διαδρομή πλοήγησης (συμβολίζεται με \hat{x}_t στο σχήμα 4.3) και το σύστημα μετά την ευθυγράμμιση σαρώσεων (\hat{x}'_t) σε μία προσομοίωση, καταγράφουμε το σφάλμα τους από την πραγματική στάση του ρομπότ με τη μορφή του συνολικού σφάλματος (εξ. 4.1). 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 $(m^2 + rad^2)^{1/2}$, και παραλείπεται στα σχήματα της παρακάτω υποενότητα 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 p_0 έως p_G : αυτό προσφέρει πιο πλήρη εικόνα για την επίδοση των εν λόγω διαμορφώσεων.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον προσομοίωσης Gazebo¹ μέσω ROS² σε Ubuntu 16.04, με έναν επεξεργαστή 12 νημάτων και συχνότητας 4.00 GHz, χρησιμοποιώντας έως και 32 Gb μνήμης RAM. Για το την υλοποίηση της 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 CPU διεργασίες, περίπου 300MB μνήμης, ενώ η διαδικασία ευθυγράμμισης σαρώσεων χρησιμοποιεί περίπου 5.2% ενός πυρήνα της CPU.

4.4.2 Αξιολόγηση της μεθόδου επιλογής σωματιδίων

Στα σχήματα 4.5(α') και 4.5(β') απεικονίζονται οι κατανομές των μέσων σφαλμάτων στάσης του MCL ανοικτού βρόχου και του σύνθετου συστήματος ανά διαδρομή του ρομπότ στα περιβάλλοντα CORRIDOR και WAREHOUSE, ανά μέθοδο επιλογής σωματιδίων. Τα υποκείμενα σφάλματα θέσης και προσανατολισμού απεικονίζονται στα σχήματα του παραρτήματος Δ'.1.

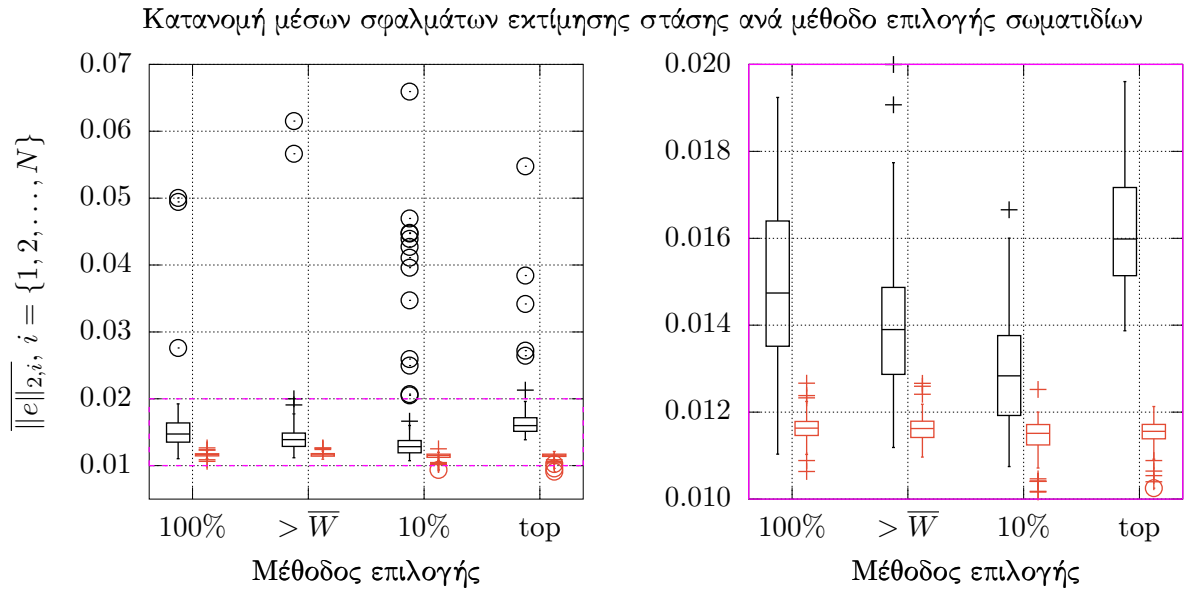
4.4.3 Αξιολόγηση της μεθόδου ευθυγράμμισης μετρήσεων με σαρώσεις χάρτη και ανάδραση

4.5 Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα

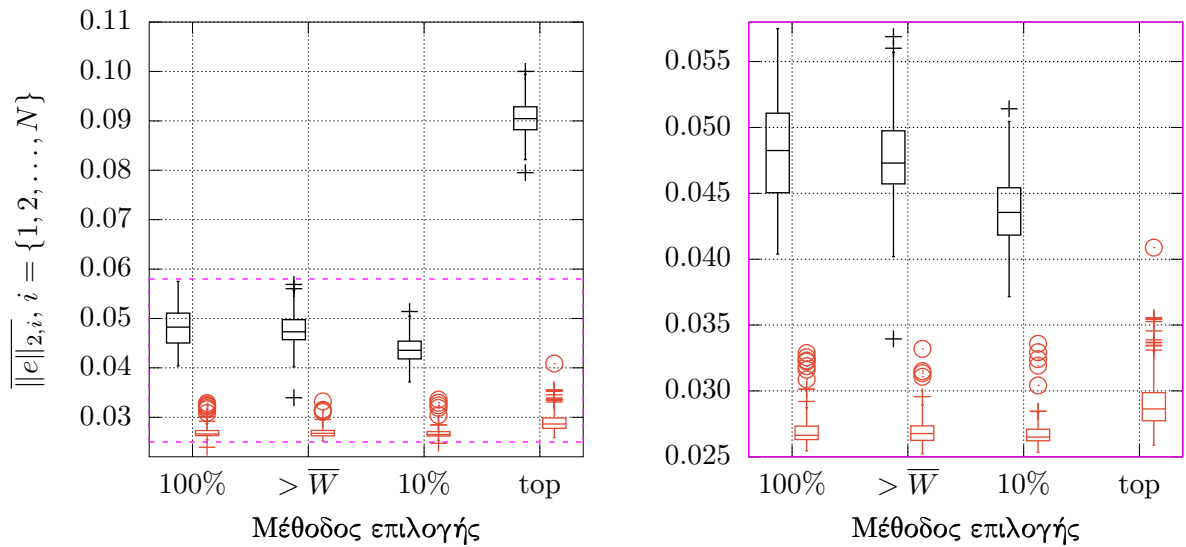
¹<http://gazebo.org/>

²<https://www.ros.org/>

³<http://wiki.ros.org/amcl>

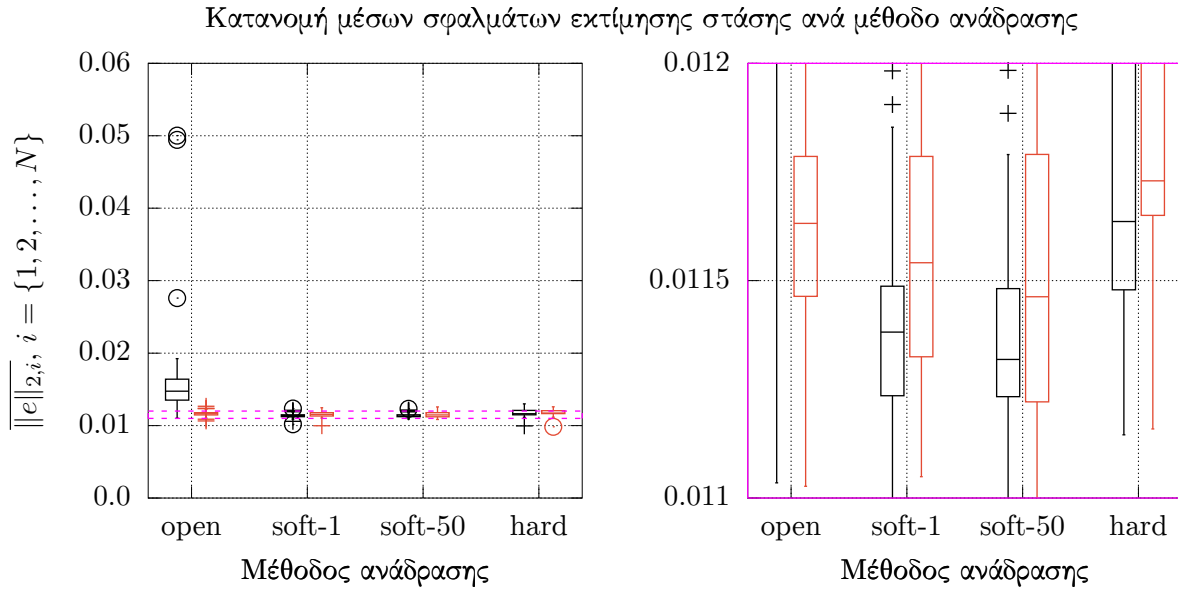


(α') Περιβάλλον CORRIDOR

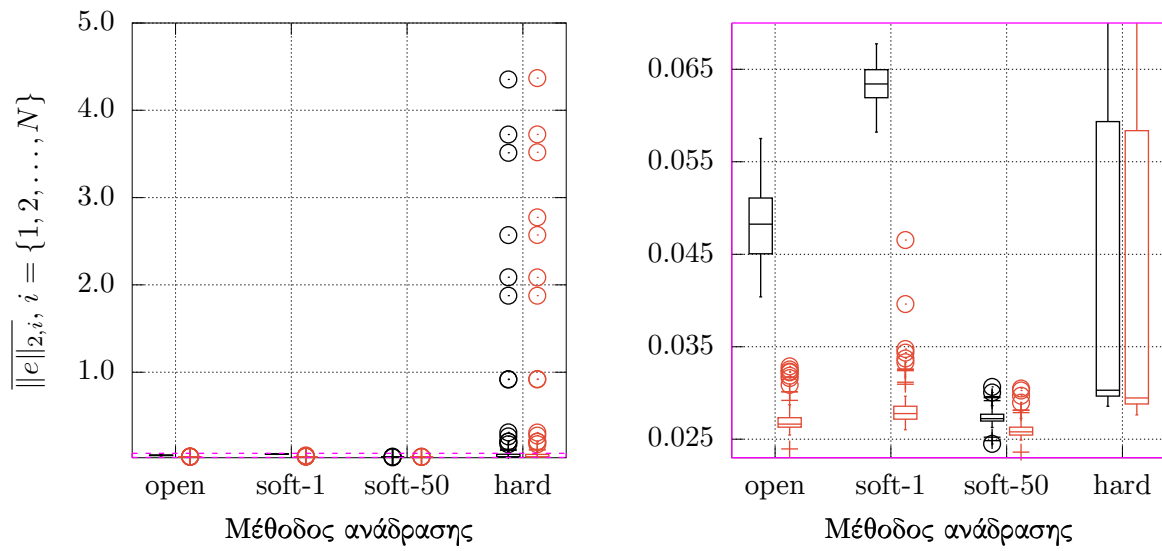


(β') Περιβάλλον WAREHOUSE

Σχήμα 4.5: Η κατανομή του μέσου σφάλματος στάσης του MCL σε ανοιχτό βρόχο (στα αριστερά κάθε υποδεικνυόμενης μεθόδου επιλογής, με μαύρο χρώμα) και του σύνθετου συστήματος (δεξιά, με κόκκινο) ανά προσομοίωση, 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

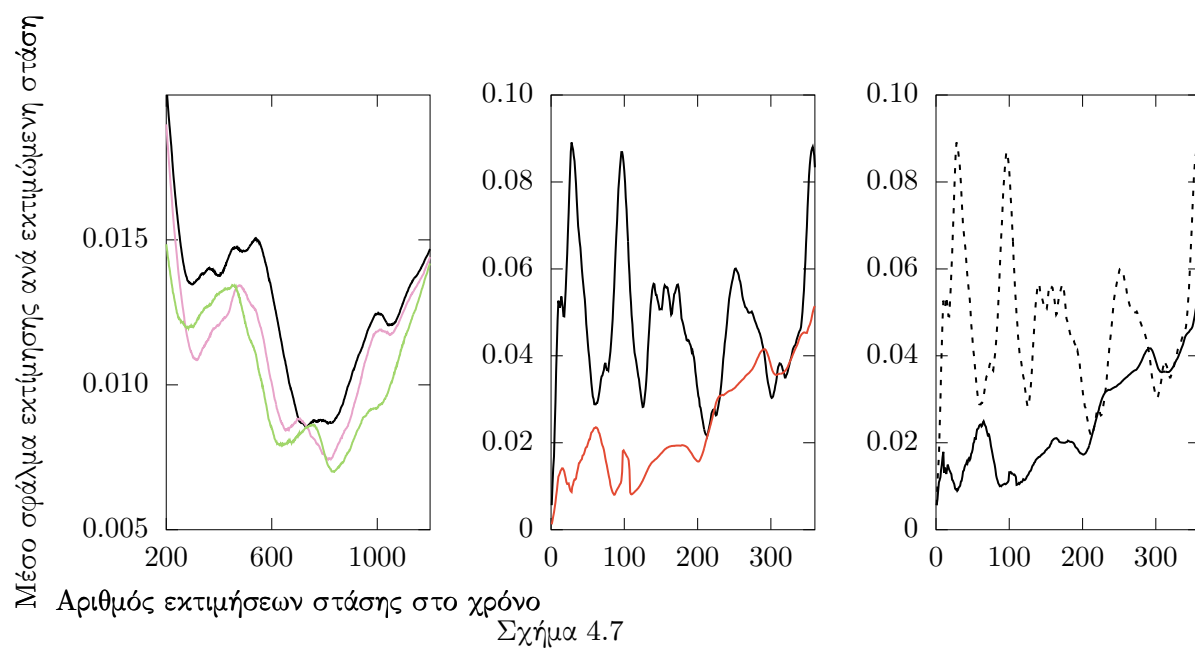


(α') Περιβάλλον CORRIDOR



(β') Περιβάλλον WAREHOUSE

Σχήμα 4.6



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/>.
- [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 (Μάρ. 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/IRDS.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. Minguéz 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/IRDS.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%7Dn=283155%7B%5C%7Dn=507846%7B%5C%7Ds=books%7B%5C%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%7B%5C_%7D29.
- [Gar+06] Santiago Garrido κ.ά. “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.

- [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/TRO.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>.
- [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/>.
- [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>.

- [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/>.
- [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>.
- [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>.
- [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/>.
- [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>.
- [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/>.
- [Kow19] Wojciech Kowalczyk. “Rapid Navigation Function Control for Two-Wheeled Mobile Robots”. Στο: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 93.3-4 (Μαρ. 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>.
- [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>.
- [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>.
- [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/>.
- [Cen] 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/>.
- [Che+] D. Chetverikov κ.ά. “The Trimmed 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. Lamiroux 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 ανακλήσεων 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 ?? 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 ?? 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 ?? 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 ??—ο πρώτος είναι το σφάλμα που βρέθηκε και επιλύθηκε που αναφέρθηκε στην ενότητα ??).

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 ??, 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 ??, 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 ??). 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 ?? 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 ολικά 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 ελεγχτές κίνησης

Ο πίνακας Α'.10 καταγράφει τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους ελεγχτές κίνησης που ορίζονται στον πίνακα ?? 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 ??), 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 ??, 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 ??, 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 ?? 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 ?? 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 ??, 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 ??, 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΄

Pose selection

B΄.1 Σφάλματα εκτίμησης στάσης μεθόδου επιλογής σωματιδίων

B΄.1.1 Σφάλματα προσανατολισμού

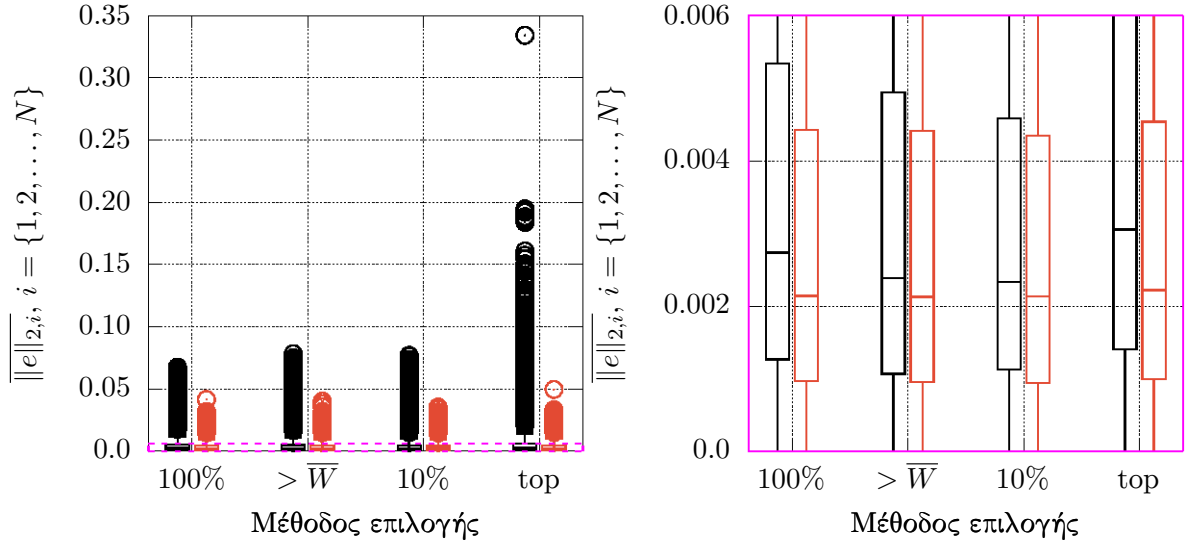
B΄.1.2 Σφάλματα θέσης

B΄.2 Σφάλματα εκτίμησης στάσης μεθόδου ανάδρασης σωματιδίων

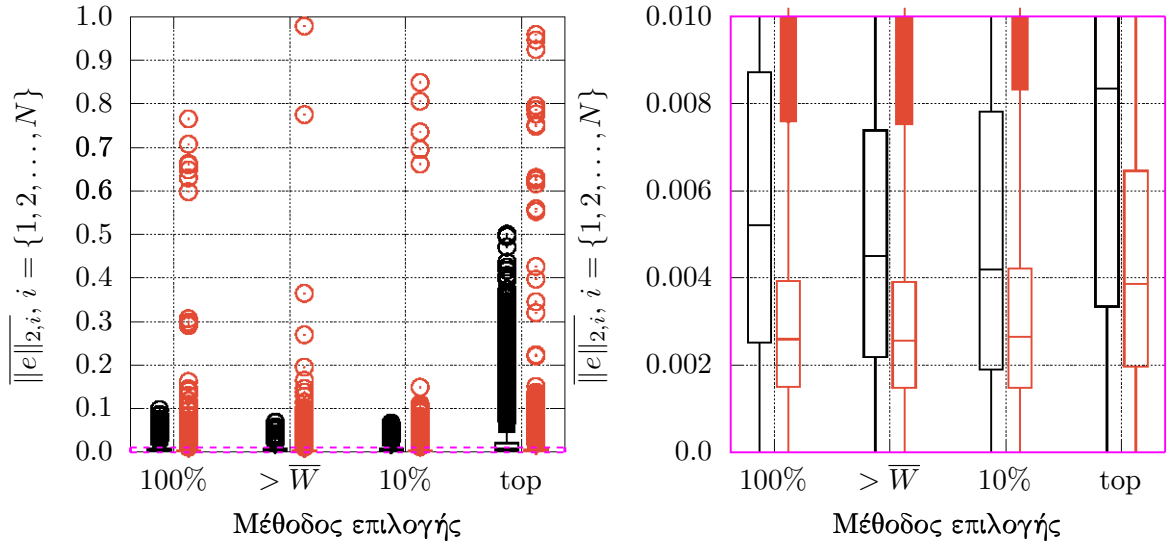
B΄.2.1 Σφάλματα προσανατολισμού

B΄.2.2 Σφάλματα θέσης

Κατανομή σφαλμάτων εκτίμησης προανατολισμού ανά μέθοδο επιλογής σωματιδίων [rad]

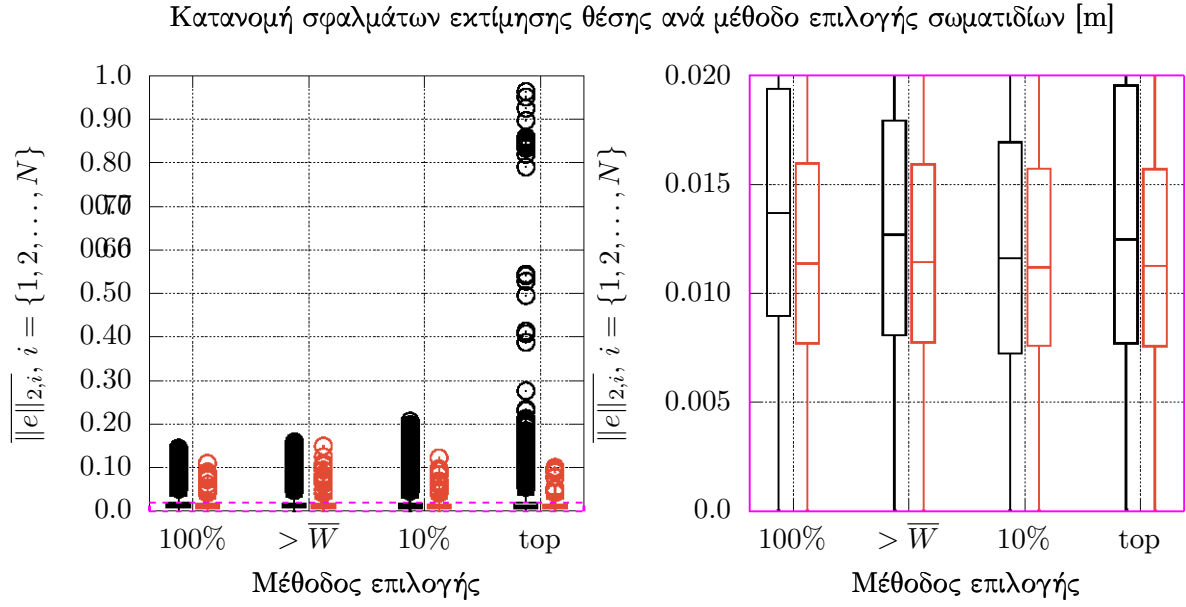


(α') Περιβάλλον CORRIDOR

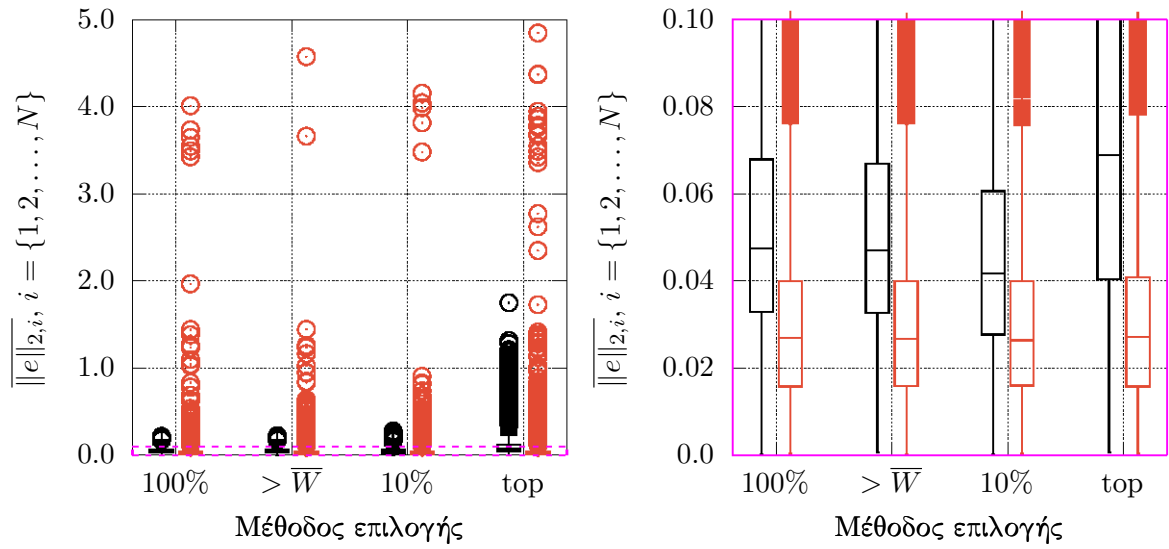


(β') Περιβάλλον WAREHOUSE

Σχήμα Β'.1

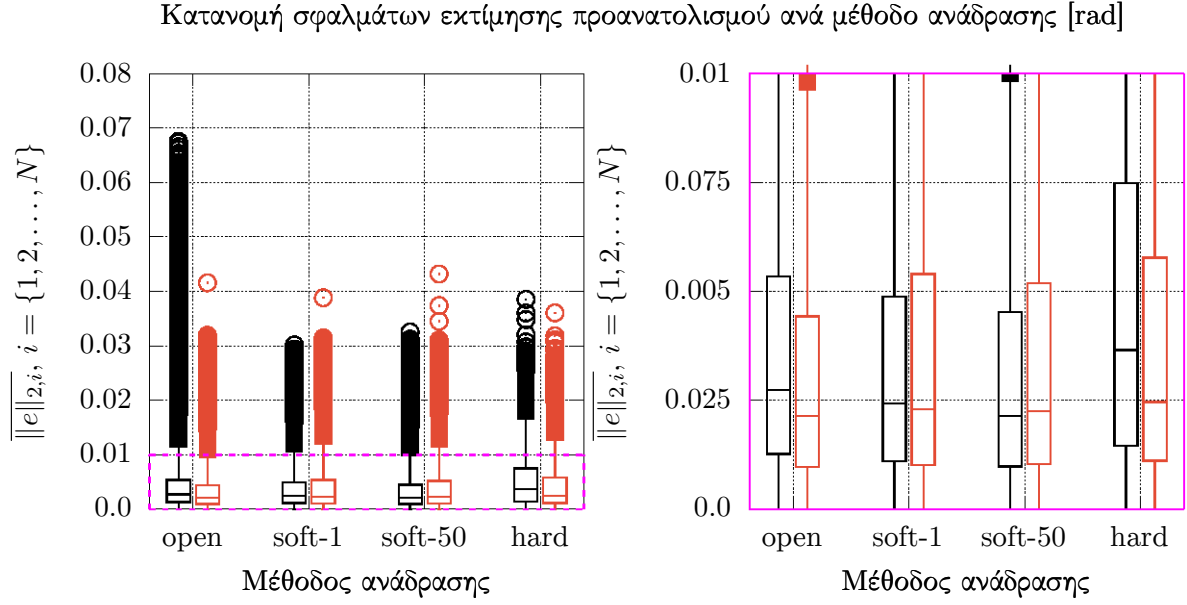


(α') Περιβάλλον CORRIDOR

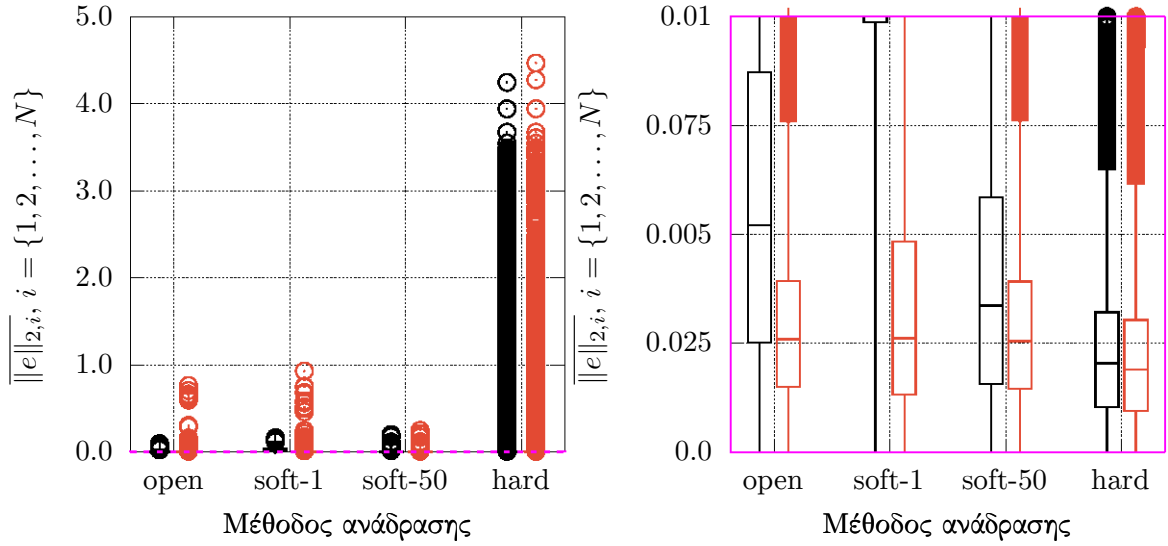


(β') Περιβάλλον WAREHOUSE

Σχήμα Β'.2

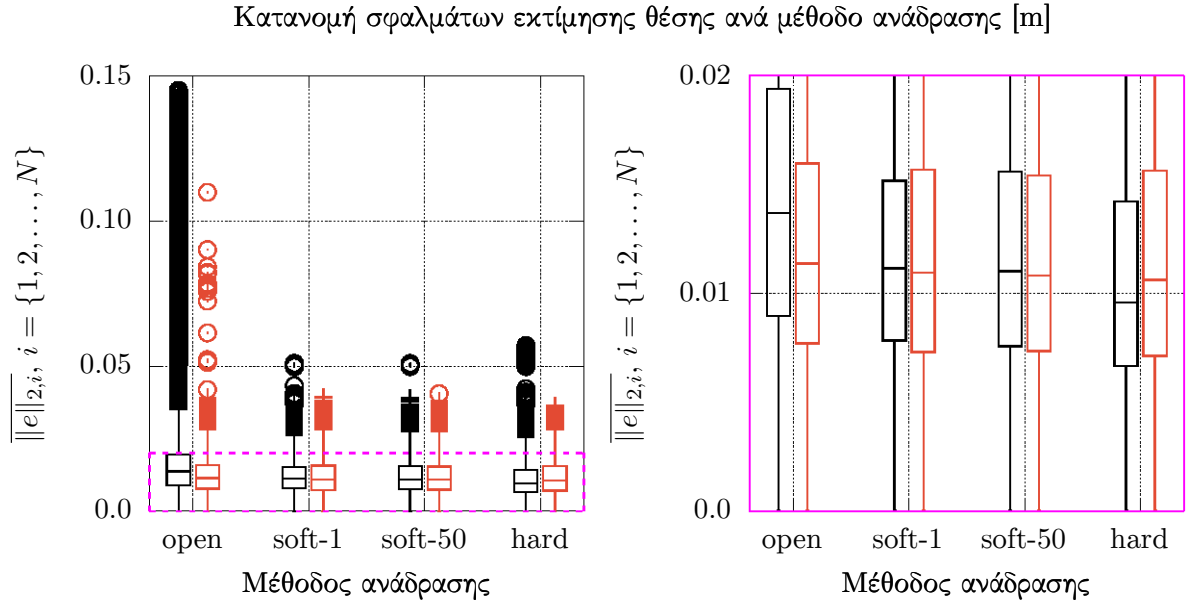


(α') Περιβάλλον CORRIDOR

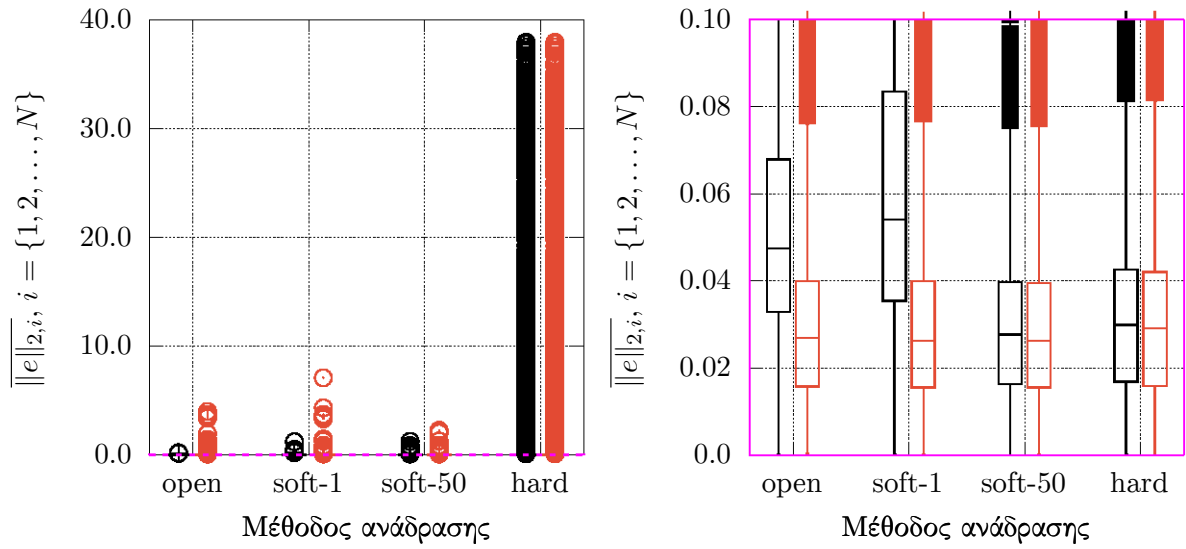


(β') Περιβάλλον WAREHOUSE

Σχήμα Β'.3



(α') Περιβάλλον CORRIDOR



(β') Περιβάλλον WAREHOUSE

Σχήμα Β'.4