



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. Γιούλτσης

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 κατάσταση	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	15
1.2.5	Ευθυγράμμιση σαρώσεων lidar	16
1.2.6	Ευθυγράμμιση σαρώσεων lidar με σαρώσεις χάρτη	18
1.2.7	Το λειτουργικό σύστημα ρομπότ ROS	22
2	Οδικός χάρτης	23
2.1	Οδικός χάρτης	23
3	Συμβολές και Διάρθρωση της διατριβής	29
3.1	Συμβολές της διατριβής	29
3.2	Διάρθρωση	29

II Προβλήματα—Λύσεις—Συμβολές	31
4 Αξιολόγηση αλγορίθμων αυτόνομης πλοήγησης	33
4.1 Στόχοι του κεφαλαίου και δομή	33
4.2 Σχετική βιβλιογραφία	33
4.2.1 Αλγόριθμοι χάραξης μονοπατιών	34
4.2.2 Ελεγκτές κίνησης	36
4.2.3 Αυτόνομη πλοήγηση με το ROS	39
4.3 Μεθοδολογία αξιολόγησης	46
4.3.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης, περιβάλλοντα, και συμβολισμοί	46
4.3.2 Ορισμός μετρικών αξιολόγησης	49
4.3.3 Μεθοδολογία συνολικής και ιεραρχημένης αξιολόγησης	51
4.3.4 Ορισμός μετρικών ποιότητας πακέτων λογισμικών πλοήγησης	57
4.4 Πειραματική αξιολόγηση	59
4.4.1 Προκαταρκτική αξιολόγηση	59
4.4.2 Αξιολόγηση στο περιβάλλον CORRIDOR	63
4.4.3 Αξιολόγηση στο περιβάλλον WILLOWGARAGE	66
4.4.4 Αξιολόγηση στο περιβάλλον CSAL	69
4.4.5 Συνολική αξιολόγηση	70
4.5 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα	73
5 Pose selection	77
6 Global localisation	79
7 smsm	81
8 sm	83

III	Συμπεράσματα	85
IV	Παραρτήματα	87
.1	Τύποι αναλογικότητας μετρικών αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομης πλοήγησης	89
.2	Λεπτομέρειες αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομους πλοήγησης	91
.2.1	Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον CORRIDOR	91
.2.2	Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον WILLOWGARAGE	99
.2.3	Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον CSAL	104
V	Αναφορές	113
	Αναφορές	115

Μέρος Ι

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1

Περιγραφή του πεδίου εφαρμογής

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

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

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

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

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

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

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

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

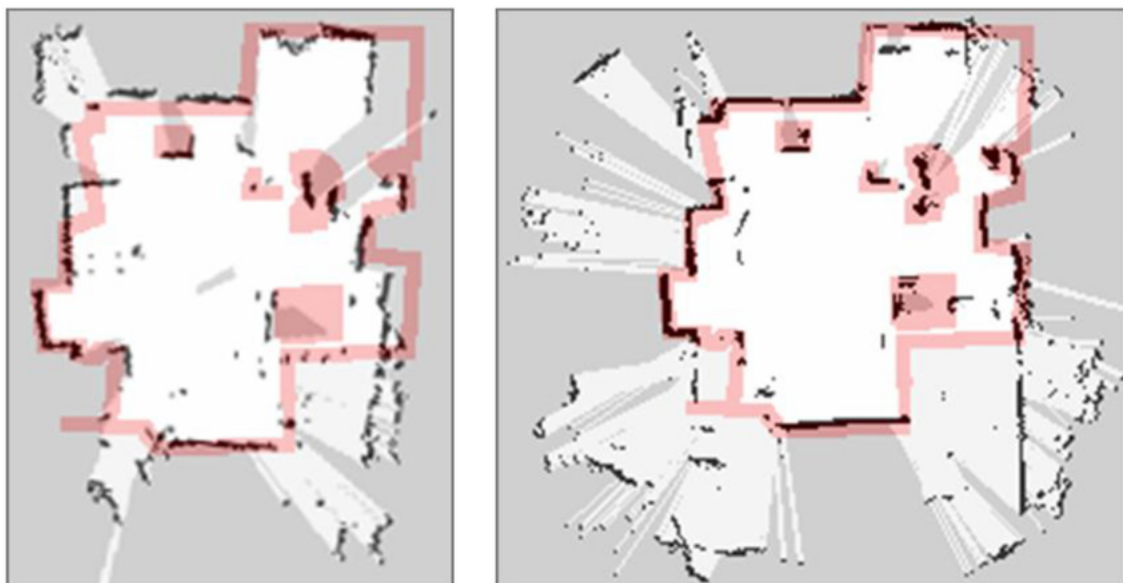
Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αισθητήρων εικόνας και η βελτίωση της ποιότητάς τους τους κατέστησε και πηγές εξωδεκτικών μετρήσεων στη ρομποτική. Το σημαντικό τους πρότερημα είναι η χρωματική πληροφορία του περιβάλλοντος, το μεγάλο οριζόντιο και κάθετο εύρος όρασής τους, και ο υψηλός ρυθμός ανανέωσης των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

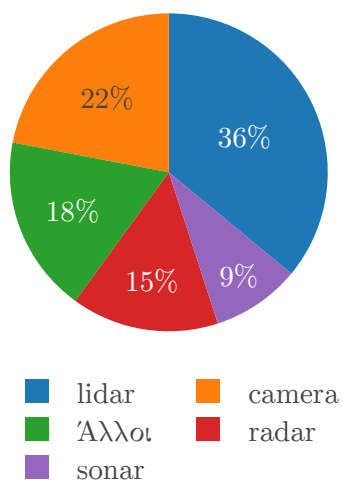
δίου εφαρμογής ΠΕ ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμοι. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους αισθητήρες εξαρτώνται από τις συνθήκες φωτισμού του χώρου στον οποίο λειτουργούν και συνεπώς η ποιότητα των μετρήσεων είναι ευμετάβλητη. Σε σχέση με τους αισθητήρες lidar εμφανίζουν σημαντικά περιορισμένο γωνιακό εύρος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

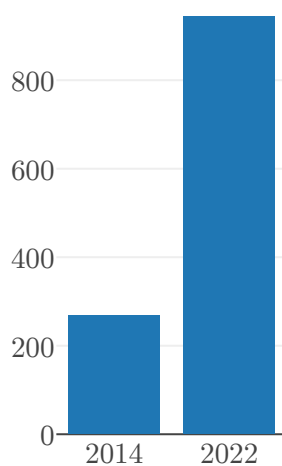


Σχήμα 1.3: Αριστερά: διδιάστατος χάρτης από μετρήσεις αισθητήρα τύπου RGBD προβεβλημένες στο οριζόντιο επίπεδο. Δεξιά: χάρτης του ίδιου χώρου από μετρήσεις αισθητήρα τύπου lidar σε δύο διαστάσεις [Oli+12]. Οι κόκκινες γραμμές αναπαράσταν το πραγματικό περιβάλλον

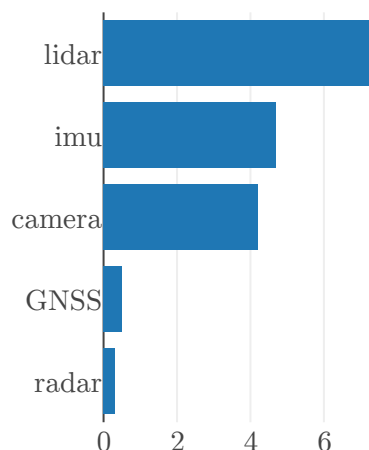
Παγκόσμια αγορά αισθητήρων
στην αυτοκινητοβιομηχανία



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

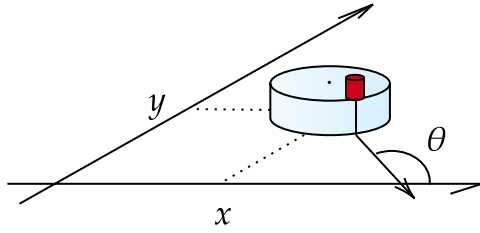
1.2.1 Εκτιμητέο διάνυσμα κατάστασης

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

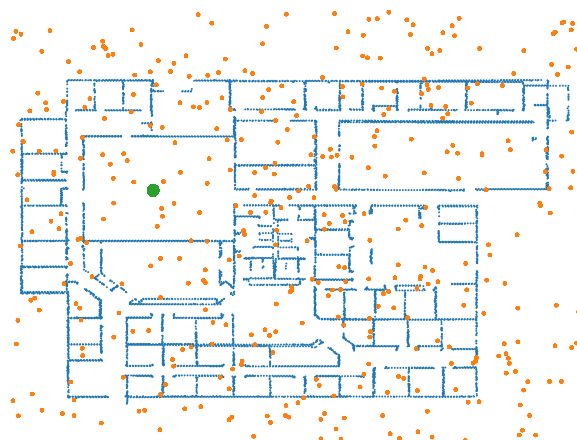
Η ακριβής γνώση της στάσης του οχήματος είναι απαγορευμένη (παρατήρηση II): η *εκτίμηση* $\hat{\mathbf{p}}$ της στάσης του είναι το αντικείμενο των αλγορίμων εύρεσης στάσης.

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).



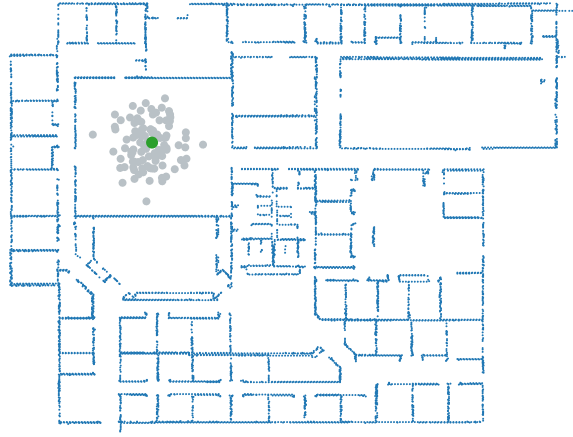
Σχήμα 1.6: Το πρόβλημα της εκτίμησης της στάσης ενός ρομπότ βάσει καθολικής αβεβαιότητας της στάσης του. Το ρομπότ βρίσκεται στη θέση που σημειώνεται με πράσινο. Οι κουκίδες που σημειώνονται με πορτοκαλί δείχνουν υποθέσεις προς εξέταση για την εκτίμηση της στάσης του

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 ευανάγνωσης. 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.

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

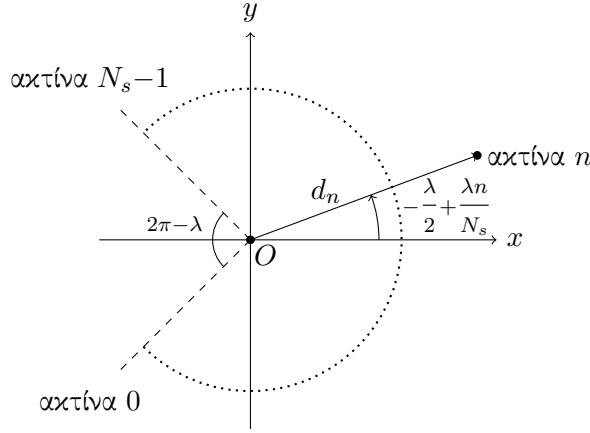
Μία μέτρηση συμβατικού αισθητήρα 2D lidar αποτελείται από έναν πεπερασμένο αριθμό αποστάσεων σε αντικείμενα σε οπτική επαφή εντός της μέγιστης εμβέλειάς του. Οι μετρήσεις λαμβάνονται εγγαρσίως προς το σώμα του, σε κανονικά γωνιακά και χρονικά διαστήματα, σε ένα καθορισμένο γωνιακό εύρος [CRP18].

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

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

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

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



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

Ορισμός III. Πανοραμικός αισθητήρας 2D lidar

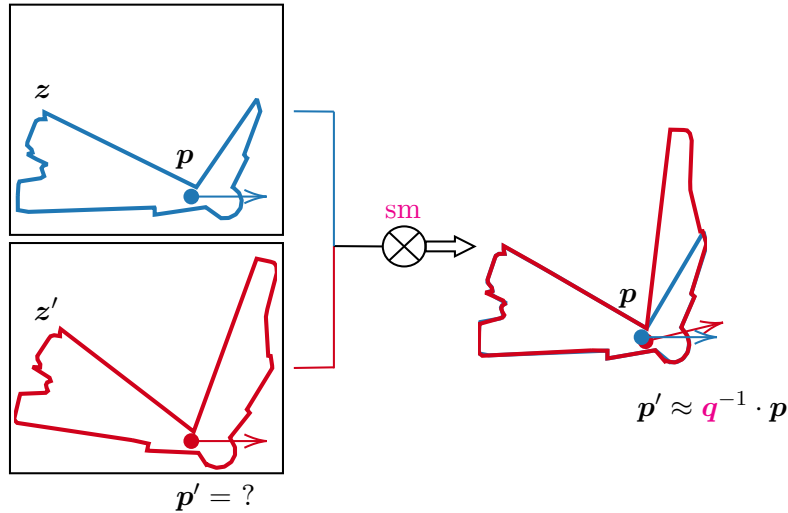
Το γωνιακό εύρος ενός 2D lidar είναι συμμετρικά κατανομημένο ως προς τον τοπικό του x άξονα. Κάθε ακτίνα έχει την ίδια γωνιακή απόσταση από τις γειτονικές της, εξαιρέσει των δύο ακραίων ακτίνων όταν $\lambda < 2\pi$. Όταν $\lambda = 2\pi$ ο αισθητήρας ονομάζεται πανοραμικός.

1.2.5 Ευθυγράμμιση σαρώσεων lidar

Η ευθυγράμμιση σαρώσεων μέσω αισθητήρων lidar βρίσκεται στο επίκεντρο των περισσότερων εφαρμογών χαρτογράφησης και εκτίμησης της στάσης ενός οχήματος λόγω της ικανότητάς της να εξάγει τη σχέση μεταξύ στάσεων από όπου ελήφθησαν μετρήσεις του αισθητήρα. Έστω ένα ρομπότ εξοπλισμένο με έναν αισθητήρα 2D lidar που καταγράφει δύο σαρώσεις, z και z' , την πρώτη ενώ ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος στη στάση $\mathbf{p}(x, y, \theta)$, και την δεύτερη ενώ βρίσκεται στη στάση $\mathbf{p}'(x', y', \theta')$, 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 \mathbf{p} όσο και από τη \mathbf{p}' είναι γενικά δυνατή η εύρεση του τρισδιάστατου μετασχηματισμού \mathbf{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 \mathbf{q} ονομάζεται ευθυγράμμιση σαρώσεων (scan-matching—εδώ σε μετρήσεις δύο διαστάσεων). Η λύση \mathbf{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 \mathbf{p} στην \mathbf{p}' : $\mathbf{p} = \mathbf{R}(\Delta\theta) \cdot \mathbf{p}' + [\Delta x, \Delta y]^\top$, όπου $\mathbf{R}(\cdot)$ 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 \mathbf{q}^{-1} στο διάνυσμα \mathbf{p} δεν ισούται ακριβώς με \mathbf{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 $z(\mathbf{p})$ και $z'(\mathbf{p}')$ (scan-matching) παράγει την εκτίμηση \mathbf{p}' από την \mathbf{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 $\mathbf{p}_V(x_V, y_V, \theta_V)$ η στάση από την οποία ο αισθητήρας

κατέγραψε την \mathcal{S}_V , εκπεφρασμένη σε κάποιο σύστημα συντεταγμένων. Στόχος της ευθυγράμμισης σαρώσεων σε δύο διαστάσεις είναι να βρεθεί ο τρισδιάστατος μετασχηματισμός $\mathbf{q} = (\mathbf{t}, \theta)$, $\mathbf{t} = (\Delta x, \Delta y)$, που ελαχιστοποιεί την απόσταση των τελικών σημείων της μετασχηματιζόμενης κατά \mathbf{q} μέτρησης \mathcal{S}_V από την προβολή της στην \mathcal{S}_R . Συμβολίζοντας τα τελικά σημεία του \mathcal{S}_V με $\{\mathbf{p}_V^i\}$:

$$\min_{\mathbf{q}} \sum_i \left\| \mathbf{p}_V^i \oplus \mathbf{q} - \prod \{\mathcal{S}_R, \mathbf{p}_V^i \oplus \mathbf{q}^{-1}\} \right\|^2 \quad (1.4)$$

Το σύμβολο “ \oplus ” δηλώνει τον τελεστή μετασχηματισμού $\mathbf{p}_V^i \oplus (\mathbf{t}, \theta) \triangleq \mathbf{R}(\theta)\mathbf{p}_V^i + \mathbf{t}$, όπου $\mathbf{R}(\theta)$ είναι ο δισδιάστατος πίνακας περιστροφής με όρισμα θ , και $\prod \{\mathcal{S}_R, \mathbf{p}_V^i \oplus \mathbf{q}\}$ είναι η ευκλείδεια προβολή στην \mathcal{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 ευθυγράμμιση 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.

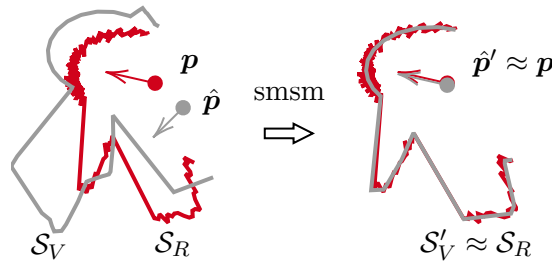
Ορισμός VI. *Ευθυγράμμιση σαρώσεων 2D lidar με σαρώσεις χάρτη*

Η ευθυγράμμιση σαρώσεων 2D lidar με σαρώσεις χάρτη ορίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως η ευθυγράμμιση σαρώσεων 2D lidar (ορισμός IV) αλλά με το 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 S_V είναι μια αμετάβλητη μέτρηση επιφορτωμένη με αναπόφευκτα σφάλματα λόγω τυφλών σημείων, στην ευθυγράμμιση πραγματικών μετρήσεων και εικονικών σαρώσεων η 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 S_V με την αμετάβλητη μέτρηση 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

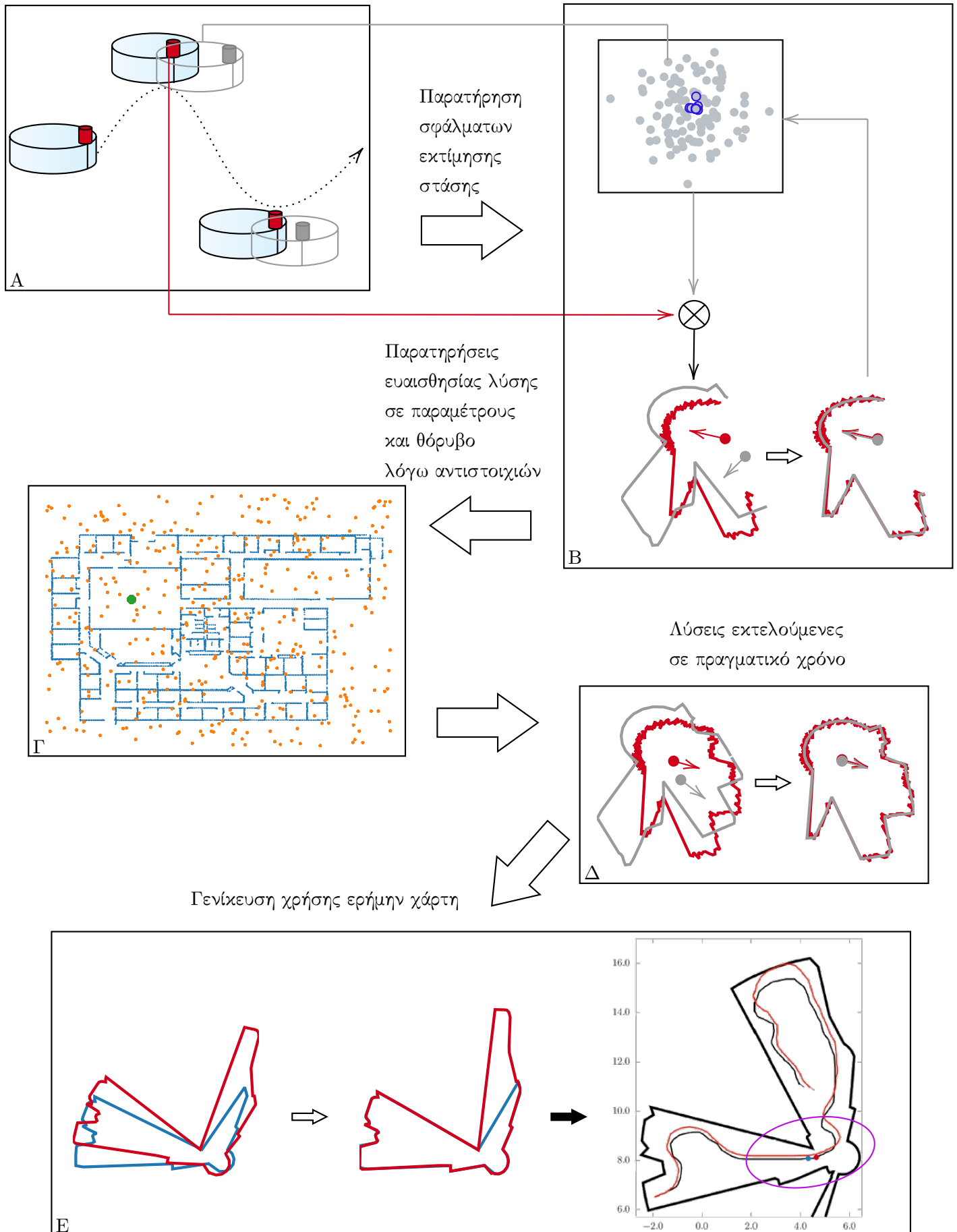
οχήματος βάσει περιορισμένης αβεβαιότητας είναι ότι ο χρόνος εκτέλεσής της είναι τέτοιος που δεν μπορεί να συμβαδίσει με το ρυθμό ανανέωσης των μετρήσεων που προέρχονται από έναν συμβατικό αισθητήρα lidar. Αντιθέτως, στο πρόβλημα της εκτίμησης βάσει καθολικής αβεβαιότητας, ο χαμηλός χρόνος εκτέλεσης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



Κεφάλαιο 3

Συμβολές και Διάρθρωση της διατριβής

3.1 Συμβολές της διατριβής

3.2 Διάρθρωση

Μέρος II

Προβλήματα—Λύσεις— Συμβολές

Κεφάλαιο 4

Αξιολόγηση αλγορίθμων αυτόνομης πλοήγησης

4.1 Στόχοι του κεφαλαίου και δομή

4.2 Σχετική βιβλιογραφία

Για να διασχίσει ένα αυτόνομο επίγειο ρομπότ το περιβάλλον του πρέπει να είναι διαθέσιμες μία σειρά από προϋποθέσεις και λειτουργίες. Πρώτον είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός στόχου για να φτάσει το ρομπότ. Αυτός ο στόχος είναι συνήθως η επιθυμητή τελική στάση του ρομπότ στον $2D$ χώρο ($[x, y, \theta]$ —σχήμα 1.5). Στη συνέχεια πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος ικανός να λάβει ως είσοδο τη ρομποτική αντίληψη για τον περιβάλλοντα κόσμο (συνήθως ένας $2D$ ή $3D$ χάρτης), καθώς και την εκτίμηση για την αρχική στάση του ρομπότ, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της στάσης του ρομπότ ενόσω αυτό κινείται αυτόνομα προς τον ανωτέρω στόχο (pose tracking—ενότητα 1.2.2). Έπειτα απαιτείται η ύπαρξη ενός γεωμετρικού μονοπατιού το οποίο, εάν ακολουθηθεί από το ρομπότ, θα το οδηγήσει από την αρχική στην επιθυμητή του στάση. Αυτό το μονοπάτι παράγεται από έναν αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών, του οποίου το αντικείμενο είναι το σύνολο του (στατικού) χάρτη. Τέλος, ένας ελεγκτής κίνησης είναι απαραίτητος, ο οποίος θεωρεί ως εισόδους του το μονοπάτι και την τοπική αντίληψη του ρομπότ,¹ και παράγει ταχύτητες κινητήρων έτσι ώστε να οδηγηθεί το

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

ρομπότ στο να ακολουθήσει το μονοπάτι. Ταυτόχρονα, είναι αρμοδιότητα του τελευταίου να πλοηγείται το ρομπότ με την μεγαλύτερη δυνατή ασφάλεια (υποθέτοντας ότι το ρομπότ θα πρέπει να αποφεύγει συγκρούσεις με στατικά ή κινούμενα αντικείμενα, αν και αυτό δεν συμβαίνει πάντοτε [GPG17]).

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

4.2.1 Αλγόριθμοι χάραξης μονοπατιών

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

Οι Γράφοι Ορατότητας ήταν μία από τις πρώτες μεθόδους σχεδιασμού μονοπατιών. Προτάθηκαν από τους Losano-Perez και Wesley το 1979 [LW79], και περιγράφουν μια μέθοδο δημιουργίας μονοπατιών σε κυρτά περιβάλλοντα, όπου τα εμπόδια μετασχηματίζονται με τρόπο τέτοιο ώστε να απεικονίζουν περιοχές που δεν μπορούν να διασχιστούν λόγω των γεωμετρικών περιορισμών του αποτυπώματος του ρομπότ. Στη συνέχεια δημιουργείται ο γράφος ορατότητας, ο οποίος περιέχει ως κόμβους τα μετασχηματισμένα εμπόδια. Τέλος εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος αναζήτησης για τη δημιουργία της τελικής διαδρομής. Όπως περιγράφεται στα [Gho07] και [GG13] οι γράφοι ορατότητας υποφέρουν από υψηλές απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους και από την πολυπλοκότητα των γεωμετρικών περιορισμών των εμποδίων. Ως εκ τούτων, έχουν προταθεί άλλες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων [KKK11].

Μεταξύ των τεχνικών σκελετοποίησης το Γενικευμένο Διάγραμμα Voronoi (GVD) είναι ο κυρίαρχος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται προκειμένου να παραχθεί ένας σκελετός του ελεύθερου χώρου στον οποίο κινείται το ρομπότ, και συνεπώς μονοπατιών πλοήγησης των οποίων τα σημεία ισαπέχουν από τα εμπόδια του περιβάλλοντος. Παραδείγματα χρήσης του GVD σε αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών αναφέρονται (α) στο [BG07], όπου το GVD χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μιας ομαλής διαδρομής που εάν ακολουθηθεί κατά γράμμα

δεν επιφέρει συγκρούσεις του ρομπότ με το περιβάλλον του, (β) στο [Gar+06], όπου το GVD ακολουθείται από την εφαρμογή της μεθόδου Fast Marching για την ελαχιστοποίηση του μήκους της διαδρομής, και (γ) στο [Ok+13], το οποίο εισάγει τα Πεδία Αβεβαιότητας Voronoi (VUF), και που συνδυάζει το GVD για την κατασκευή μονοπατιών και έναν ελεγχτή κίνησης για την πλοήγηση του οχήματος.

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

Μια άλλη μεθοδολογία σχεδιασμού μονοπατιών είναι αυτή των Τυχαίων Δένδρων Ταχείας Εξερεύνησης (RRT), που προτάθηκε αρχικά από τον La Valle το 1998 [Lav98]. Τα RRT δημιουργούν επαναληπτικά δενδροειδείς δομές, ξεκινώντας από έναν κόμβο-ρίζα και τερματίζουν όταν ένα φύλλο φτάσει στον επιθυμητό στόχο. Υπάρχουν διάφορες τροποποιήσεις, όπως, μεταξύ άλλων, το Execution Extended RRT (ERRT) [BV], τα αμφίδρομα RRT [MWS07], RRT* [KF10], Cell-RRT [GFC09], και T-RRT [JCS10].

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

Αυτός ο χώρος κωδικοποιεί τις τοπικές συνδέσεις και εξαλείφει τους πλεονασμούς έτσι ώστε ένα ερώτημα σχεδιασμού στο συνδεδεμένο γράφημα αναζήτησης να μπορεί να εκτελεστεί με αποδοτικό τρόπο.

Οι Συναρτήσεις Πλοήγησης είναι μια ειδική κατηγορία Συναρτήσεων Δυναμικού για την πλοήγηση ρομπότ κινητής βάσης [Lat91]. Η συναρτήσεις δυναμικού προϋποθέτουν έναν γνωστό χάρτη, και αποδίδουν μια τιμή δυναμικού σε κάθε σημείο του (σε χάρτες που βασίζονται σε ορόσημα) ή σε κάθε κελί πλέγματος (σε χάρτες που βασίζονται σε πλέγμα): κάθε ένα από αυτά λαμβάνει τιμή δυναμικού αντιστρόφως ανάλογη με την απόστασή του από ένα εμπόδιο. Αντίθετα, στη στάση του στόχου αποδίδεται χαμηλή τιμή δυναμικού. Η αρχή του δυναμικού πεδίου είναι ελκυστική λόγω της απλότητας και της κομψότητάς της, ωστόσο, στη βιβλιογραφία αναφέρεται ένας αριθμός ουσιαστικών ελλείψεων [KB][GC00], όπως η ευαισθησία της μεθόδου στο να παγιδεύει το ρομπότ σε τοπικά ελάχιστα, και η αύξηση των ταλαντώσεων όταν ένα ρομπότ πλησιάζει εμπόδια ή στενά περάσματα. Οι Συναρτήσεις Πλοήγησης προσπαθούν να ξεπεράσουν αυτά τα προβλήματα: είναι συναρτήσεις (α) για τις οποίες το δυναμικό του στόχου λαμβάνει μηδενική τιμή ή, εάν ο στόχος είναι απρόσιτος, άπειρη τιμή, και (β) που έχουν μονοτονική κλίση, δηλαδή δεν περιλαμβάνουν τοπικά ελάχιστα, εκτός από αυτό του στόχου. Ωστόσο, η μέθοδος της συνάρτησης πλοήγησης μπορεί παρουσιάσει αργή σύγκλιση, ιδίως όταν το περιβάλλον του ρομπότ περιλαμβάνει στενά περάσματα, και επομένως απαιτεί προσαρμοσμένη ρύθμιση [Kow19]. Επιπλέον, στην χώρους υψηλών διαστάσεων, όπου τα σχήματα του ρομπότ ή των εμποδίων είναι πολύπλοκα, το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται απότομα [Par16].

4.2.2 Ελεγκτές κίνησης

Αφού δημιουργηθεί το μονοπάτι που συνδέει την αρχική στάση του ρομπότ με την επιθυμητή με τη χρήση ενός κατασκευαστή μονοπατιών, ένας ελεγκτής κίνησης πρέπει να χρησιμοποιηθεί προκειμένου το ρομπότ να ακολουθήσει το μονοπάτι στον πραγματικό χώρο, με βάση μετρήσεις από τους εξωδεκτικούς αισθητήρες του. Ο ελεγκτής πρέπει ταυτόχρονα να βεβαιωθεί ότι αποφεύγει τόσο τα στατικά όσο και τα δυναμικά εμπόδια του περιβάλλοντος της κινητής βάσης. Οι ελεγκτές κίνησης ανήκουν κατά κύριο λόγο σε μία από πέντε οικογένειες προσεγγίσεων: *Ιστογράμματα Διανυσματικών Πεδίων* (Vector-Field Histograms), *Προσέγγιση Δυναμικού Παραθύρου* (Dynamic Window Approach), *Δένδρα Πλοήγησης Κε-*

κών (Gap Navigation Trees), Προσέγγιση Πλοήγησης με Διαγράμματα Εγγύτητας (Nearness Diagram navigation approach), και Ελαστικής Ζώνης (Elastic band).

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

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

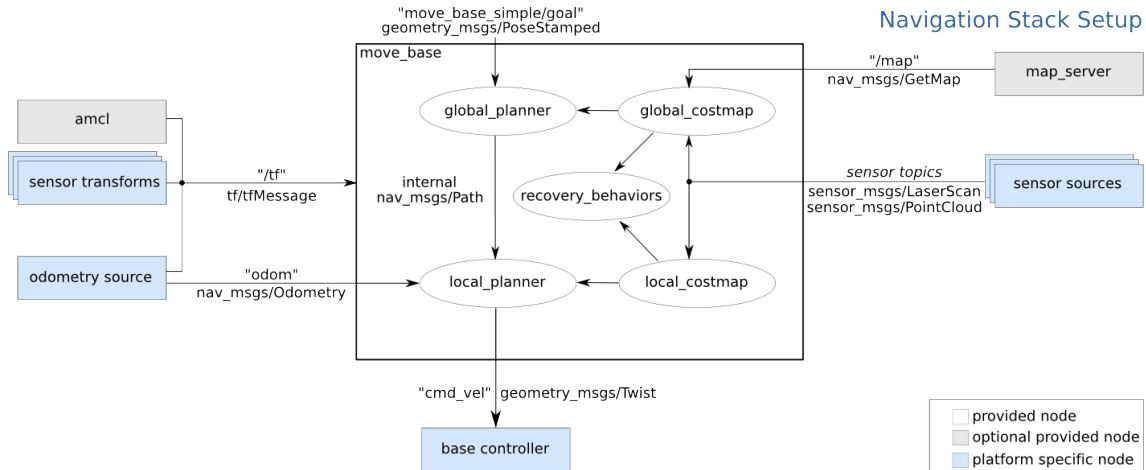
Τα Δένδρα Πλοήγησης Κενών (GNT) είναι δενδροειδείς δομές που δημιουργούνται από τρέχουσες μετρήσεις των αισθητήρων του ρομπότ, που κωδικοποιούν διαδρομές από την τρέχουσα θέση του ρομπότ σε οποιοδήποτε σημείο του περιβάλλοντος [TGL05]. Ένα GNT ενημερώνεται καθώς το ρομπότ κινείται, και παράγει βέλτιστες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

Ένα άλλο σχέλος ελεγκτών κίνησης ξεκίνησε το 2004 με την Προσέγγιση Πλοήγησης με Διάγραμμα Εγγύτητας (ND) από τους Minguez και Montano [MM]. Η μεθοδολογία ND παράγει αρχικά δύο διαγράμματα εγγύτητας: το PND (από το κεντρικό σημείο του ρομπότ) και

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

Η προσέγγιση Ελαστικής Ζώνης (Elastic Band) των Quinlan και Khatib [QK] γεφυρώνει το μονοπάτι προς ακολούθηση με τη θεωρία ελέγχου: με βάση ένα συνολικό μονοπάτι ο ελεγκτής κίνησης παράγει μια παραμορφώσιμη διαδρομή σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε οι αλλαγές στο περιβάλλον (που ανιχνεύονται από τους αισθητήρες του ρομπότ), οι αβεβαιότητες στις μετρήσεις, το μοντέλο αβεβαιότητας του κινηματικού μοντέλου, και τα κινούμενα αντικείμενα να ενσωματώνονται στον σχεδιασμό και την ακολούθηση της προγραμματισμένης διαδρομής. Για την επίτευξη των στόχων του (ένας από τους οποίους είναι η διατήρηση της ακεραιότητας της προγραμματισμένης διαδρομής), η προσέγγιση βασίζεται σε τεχνητές δυνάμεις: προκαθορισμένες εσωτερικές δυνάμεις συστέλλουν τη διαδρομή και την καθιστούν πιο ομαλή, ενώ εξωτερικές δυνάμεις διατηρούν τον διαχωρισμό από τα εμπόδια. Ωστόσο, η αρχική προσέγγιση δεν ενσωματώνει ρητά χρονικούς περιορισμούς ή περιορισμούς που επιτάσσονται από το ίδιο το κινηματικό μοντέλο του ρομπότ. Μια επέκταση της αρχικής προσέγγισης, που παραμορφώνει τις τροχιές αλλά όχι τα προγραμματισμένα μονοπάτια, παρουσιάζεται στο [KF07].

Η προσέγγιση Χρονισμένης Ελαστικής Ζώνης (Timed-Elastic Band) [Rös+12], από την άλλη πλευρά, εμπνευσμένη από την ιδέα της μεθόδου της Ελαστικής Ζώνης, λαμβάνει υπόψη τόσο τους χρονικούς περιορισμούς όσο και τους περιορισμούς του κινηματικού μοντέλου της κινητής βάσης. Η αρχική προσέγγιση παρέχει σε πραγματικό χρόνο τον προγραμματισμό της τροχιάς για ρομπότ με διαφορεική κίνηση. Μιμούμενη έναν ελεγκτή πρόβλεψης μέσω μοντέλου



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

(Model Predictive Controller), αναδιαμορφώνει το σχεδιασμό της τροχιάς και τον υπολογισμό ταχυτήτων σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που υπόκειται σε κινηματοδυναμικούς περιορισμούς και περιορισμούς αποφυγής εμποδίων, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη και το συνολικό χρόνο πλοήγησης. Μια επέκταση της προσέγγισης Χρονισμένης Ελαστικής Ζώνης παρουσιάζεται στο [RHB17], όπου παρουσιάζεται μια πιο γενική διατύπωση, επεκτείνοντάς την στην υποστήριξη κινηματικών μοντέλων τύπου *ackerman*, καθιστώντας δυνατή και την οπισθοπορεία (και συνεπώς δυνατό το αυτόνομο παρκάρισμα κινητών βάσεων με κινηματικό μοντέλο τύπου αυτοκινήτου).

4.2.3 Αυτόνομη πλοήγηση με το ROS

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

κινητής βάσης.²

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

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

Επιπλέον, το ROS προσφέρει την αναπαράσταση του περιβάλλοντος με μορφή χάρτη κόστους (`costmap`), που περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τη δυνατότητα διέλευσης του ρομπότ μέσα στο περιβάλλον του και μέσα στον χάρτη αυτού, με βάση το αποτύπωμα του ρομπότ και τα στατικά και δυναμικά εμπόδια (υποθέτοντας ότι είναι πιο δαπανηρό να κινηθεί κοντά σε εμπόδια). Όταν θεωρείται ως λευκό κουτί, το `move_base` περιλαμβάνει:

- Έναν ολικό χάρτη κόστους (`global costmap`), που αναπαριστά το κόστος διέλευσης πλησίον των στατικών εμποδίων του χάρτη
- Έναν τοπικό χάρτη κόστους (`local costmap`), ο οποίος δημιουργείται και ανανεώνεται σε πραγματικό χρόνο στην άμεση γειτονιά του ρομπότ, και που βασίζεται στις μετρήσεις

²<http://wiki.ros.org/navigation>

³<http://wiki.ros.org/amcl>

των εξωδεκτικών αισθητήρων προκειμένου να αντιμετωπίσει τα στατικά και δυναμικά εμπόδια του πραγματικού περιβάλλοντός του

- Έναν αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών (global planner), ο οποίος λαμβάνει ως είσοδο μία στάση-στόχο, και τον ολικό χάρτη κόστους, και παράγει το γεωμετρικό μονοπάτι που ενώνει την αρχική στάση του ρομπότ με την επιθυμητή
- Έναν ελεγκτή κίνησης (local planner), ο οποίος δέχεται ως είσοδο το ως άνω μονοπάτι και τον τοπικό χάρτη κόστους, και υπολογίζει εντολές ταχύτητας
- Μια ενότητα που ονομάζεται συμπεριφορές ανάκτησης (recovery_behaviours) που δέχεται και τους δύο χάρτες κόστους ως είσοδο, εντοπίζει πότε το ρομπότ δεν μπορεί να προχωρήσει με την επιθυμητή ταχύτητα, και εφαρμόζει προκαθορισμένα σύνολα κινήσεων, με στόχο την "απεγκλωβισμό" του. Αυτές οι ενέργειες ενεργοποιούνται κάθε φορά που (α) το ρομπότ γίνεται αντιληπτό ότι ταλαντώνεται, (β) ένα σχέδιο κίνησης δεν έχει ληφθεί για πάνω από κάποιο χρονικό διάστημα, ή (γ) ο ελεγκτής κίνησης έχει αποτύχει να εξάγει έγκυρες εντολές ταχύτητας για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα, το move_base εφαρμόζει δύο είδη ανάκτησης του ελέγχου του ρομπότ: (α) μια περιστροφή 360 μοιρών που στοχεύει στην εκκαθάριση του τοπικού χάρτη κόστους από τυχόν ψευδείς μετρήσεις (ψευδώς θετικά αντιληπτά εμπόδια) και (β) μια επαναφορά του χάρτη κόστους που καθαρίζει την στοίβα πλοήγησης, επαναφέροντάς τον στον στατικό χάρτη έξω από τα όρια μιας δεδομένης ακτίνας μακριά από το ρομπότ⁴. Η τελευταία χρησιμοποιείται συνήθως πολλαπλές φορές και σε έναν ιεραρχικό τρόπο, ξεκινώντας από κάποια ακτίνα εντός του ημιπλάτους του τοπικού χάρτη κόστους και προχωρώντας πιο κοντά στο ίχνος του ρομπότ. Εάν το ρομπότ εξακολουθεί να θεωρείται παγιδευμένο μετά την εκτέλεση όλων των προκαθορισμένων συμπεριφορών αποκατάστασης η πλοήγηση διακόπτεται και το ρομπότ σταματά την κίνησή του, τουλάχιστον μέχρι να δοθεί ένας νέος στόχος.

4.2.3.1 Αλγόριθμοι χάραξης μονοπατιών

Αυτή η ενότητα παρέχει μια σύντομη επισκόπηση των αλγορίθμων-πακέτων κατασκευής μονοπατιών που είναι διαθέσιμοι στο ROS.

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

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

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

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

Σε αντίθεση με τον `navfn` και την πλειονότητα των άλλων πακέτων χάραξης μονοπατιών που παρουσιάζονται εδώ, το `MoveIt!` δεν αποτελεί ένα plugin του `move_base` [CSC12]. Οι κύριοι περιορισμοί του σε σχέση με το σχεδιασμό διαδρομών για ρομπότ κινητής βάσης είναι ότι (α) απευθύνεται και αναπτύχθηκε κυρίως για ρομποτικούς βραχίονες πολλαπλών αρθρώσεων, (β) δεν μπορεί να σχεδιάσει διαδοχικές διαμορφώσεις για αρθρώσεις πολλαπλών βαθμών ελευθερίας (δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για το σχεδιασμό της κίνησης ολονομικών (holonomic) βάσεων), και γ) απαιτεί την μετατροπή των χαρτών κόστους στο δικό του χώρο καταστάσεων OMPL. Όσον αφορά στους αλγορίθμους σχεδίασης διαδοχικών διαμορφώσεων, το `MoveIt!` μπορεί να χρησιμοποιήσει εσωτερικά το OMPL (Open Motion Planning Library⁷), STOMP (Στοχαστική βελτιστοποίηση τροχιάς για κίνηση).

⁵<http://wiki.ros.org/navfn>

⁶http://wiki.ros.org/asr_navfn

⁷<http://ompl.kavrakilab.org/>

Planning⁸), SBPL (Βιβλιοθήκη σχεδιασμού με βάση την αναζήτηση⁹) ή CHOMP (Covariant Hamiltonian Optimisation for Motion Planning¹⁰).

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

Το πακέτο `sbpl_dynamic_env_global_planner`¹² είναι παρόμοιο με το `sbpl_lattice_planner`, ωστόσο είναι ικανό να ενσωματώνει πληροφορίες τόσο από τον ολικό (στατικό) χάρτη κόστους όσο και από προβλεπόμενες μελλοντικές τροχιές των κινούμενων εμποδίων, οι οποίες εξάγονται από τον τοπικό (δυναμικό) χάρτη. Αυτό γίνεται με την ομαδοποίηση χωροχρονικών πληροφοριών για το πού και πότε η κίνηση θα είναι ασφαλής, και ο σχεδιασμός πραγματοποιείται στις τυπικές τρεις χωρικές διαστάσεις, συμπεριλαμβανομένης μιας τέταρτης που είναι σχετική με την ασφάλεια.

Το πακέτο `lattice_planner`¹³ παρέχει ένα χρονικά περιορισμένο αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών τύπου πλέγματος καταστάσεων A*. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιεί τον ολικό χάρτη κόστους ROS και μπορεί να παράγει χρονοεξαρτώμενες, δυναμικά εφικτές διαδρομές πλοή-

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

⁹<http://wiki.ros.org/sbpl>

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

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

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

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

γησης για ρομπότ με διαφορικούς περιορισμούς κίνησης.

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

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

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

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

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

¹⁵http://wiki.ros.org/voronoi_planner

4.2.3.2 Ελεγκτές Κίνησης

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

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

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

Ο `teb_local_planner`¹⁸ δέχεται ως είσοδο το προγραμματισμένο μονοπάτι που δημιουργείται από τον αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών και ελαχιστοποιεί κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης τον χρόνο ακολούθησής του, ικανοποιώντας τους περιορισμούς για αποφυγή εμποδίων, τους περιορισμούς του κινηματικού μοντέλου του ρομπότ, καθώς και περιορισμούς που αφορούν σε μέγιστες και ελάχιστες ταχύτητες και επιταχύνσεις κίνησης. Βασίζεται στη θεωρητική εργασία που παρουσιάστηκε στο [RHB17], η οποία βελτιώνει τη θεωρία των ελαστικών ζωνών. Ο `teb_local_planner` υποστηρίζει την αποφυγή κινουμένων εμποδίων.

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

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

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

4.3 Μεθοδολογία αξιολόγησης

4.3.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης, περιβάλλοντα, και συμβολισμοί

Η αξιολόγηση όλων των συνδυασμών των μεθόδων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή πραγματοποιείται σε προσομοιωμένα και πραγματικά περιβάλλοντα. Το ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις συνθήκες είναι η δεύτερη έκδοση του Turtlebot¹⁹, ένα ρομπότ με διαφορική κίνηση και κυκλικό αποτύπωμα ακτίνας $r = 0.175$ m. Τα δύο προσομοιωμένα περιβάλλοντα στα οποία έγινε συγκριτική αξιολόγηση όλων των αλγορίθμων είναι διαθέσιμοι κόσμοι του περιβάλλοντος προσομοίωσης Gazebo.²⁰ Αυτοί οι κόσμοι προσομοιώνουν με ακρίβεια τις περισσότερες από τις συνθήκες που θα αντιμετώπιζε μια επίγεια κινητή βάση σε ένα στατικό περιβάλλον εσωτερικού χώρου: διαδρόμους διαφορετικού πλάτους, στενά περάσματα όπου η ικανοποίηση των περιορισμών είναι κρίσιμη και ευκολότερα παραβιάσιμη ενώ δοκιμάζουν την ικανότητα των ελεγκτών κίνησης να εκτελούν λεπτές κινήσεις, αναστροφές, πολλαπλές διαδοχικές στροφές, και εμπόδια που ο ελεγκτής κίνησης πρέπει να αποφύγει στην πορεία του ρομπότ προς τον στόχο. Το πραγματικό περιβάλλον όπου δοκιμάστηκαν οι μέθοδοι είναι το εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών (CSAL) του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΑΠΘ.

Στο σχήμα 4.2 απεικονίζεται ο χάρτης του προσομοιωμένου κόσμου CORRIDOR, που στο εξής συμβολίζεται με M_C . Το σχήμα 4.3 απεικονίζει έναν τμήμα από έναν σημαντικά μεγαλύτερο σε μέγεθος χάρτη που ονομάζεται WILLOWGARAGE, ο οποίος συμβολίζεται με M_W . Το σχήμα 4.4 απεικονίζει το χάρτη του CSAL, που συμβολίζεται με M_L .

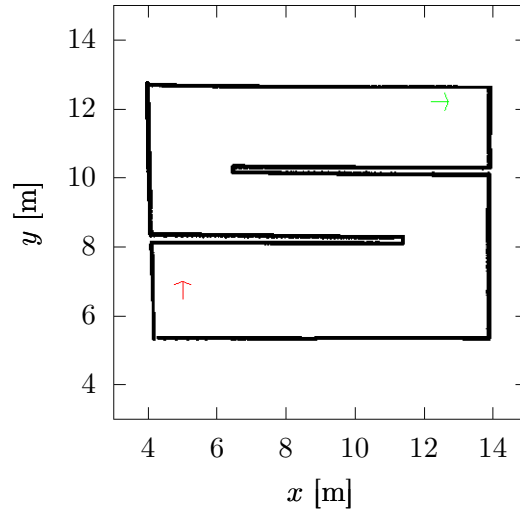
Τα πράσινα βέλη υποδηλώνουν την αρχική στάση του ρομπότ, ενώ τα κόκκινα τον στόχο. Οι χάρτες των δύο προσομοιωμένων περιβαλλόντων κατασκευάστηκαν με τη χρήση του ROS πακέτου SLAM `gmapping`²¹, ενώ αυτός του πραγματικού περιβάλλοντος κατασκευάστηκε με τη χρήση του `open-karto`²². Ενώ ο M_C είναι ένας χάρτης που μοιάζει με τη δομή μιας τυπικής αποθήκης, ο χάρτης M_W είναι μια κάτοψη που μοιάζει με αυτή ενός τυπικού ορόφου γραφείων. Η δυσκολία του πρώτου είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σύγκριση με εκείνη του

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

²⁰<http://gazebo.org/>

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

²²http://wiki.ros.org/open_karto

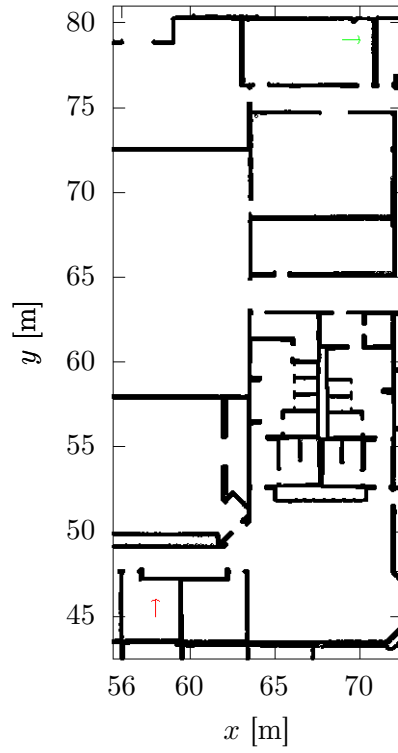


Σχήμα 4.2: Ο χάρτης M_C του προσομοιωμένου περιβάλλοντος CORRIDOR. Το πράσινο βέλος (άνω δεξιά) δείχνει την αρχική στάση του ρομπότ p_0^C . Το κόκκινο βέλος (κάτω αριστερά) δείχνει τη στάση-στόχο p_G^C .

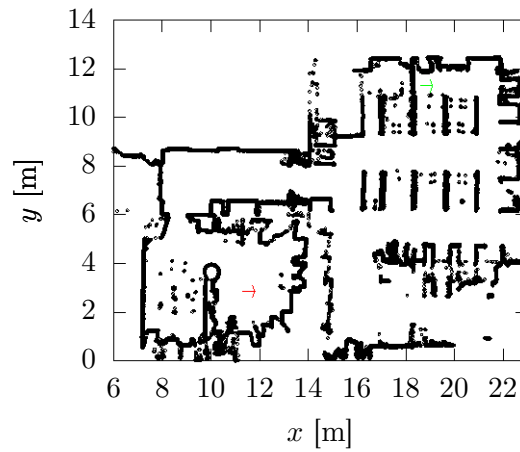
δεύτερου: οι διάδρομοι είναι φαρδείς, δεν υπάρχουν στενά περάσματα και υπάρχουν μόνο δύο στροφές των οποίων η απόσταση είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αναμένεται ότι οι αλγόριθμοι πλοήγησης θα κατευθύνουν το ρομπότ μακριά και από τα δύο άκρα των τοίχων με ευκολία—αν και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ακόμη και αυτή η προσδοκία είναι αισιόδοξη για ορισμένους συνδυασμούς μεθόδων πλοήγησης.

Οι στάσεις των στόχων ορίστηκαν έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η δυσκολία των κατασκευαστών μονοπατιών στην εύρεση ενός εφικτού μονοπατιού και η δυσκολία των ελεγκτών κίνησης στη διάσχισή του. Ως εκ τούτου διευκολύνουν την έκθεση των αδυναμιών των του. Για το χάρτη CORRIDOR η αρχική θέση του ρομπότ ήταν $p_0^C \equiv (12.2 \text{ m}, 12.2 \text{ m}, 0.0 \text{ rad})$ και η θέση-στόχος ήταν $p_G^C \equiv (5.0 \text{ m}, 6.5 \text{ m}, \pi/2 \text{ rad})$. Για το χάρτη WILLOWGARAGE $p_0^W \equiv (69.0 \text{ m}, 79.0 \text{ m}, 0.0 \text{ rad})$ και $p_G^W \equiv (58.0 \text{ m}, 45.0 \text{ m}, \pi/2 \text{ rad})$. Τέλος, για τον χάρτη CSAL $p_0^L \equiv (18.6 \text{ m}, 11.3 \text{ m}, 0.0 \text{ rad})$ και $p_G^L \equiv (11.3 \text{ m}, 2.86 \text{ m}, 0.0 \text{ rad})$.

Κάθε συνδυασμός από global και local planner δοκιμάστηκε σε κάθε περιβάλλον με τις ίδιες αρχικές και τελικές στάσεις για $N = 10$ φορές, και επομένως η αξιολόγηση των απόδοσης όλων των συνδυασμών έγινε με τη χρήση στατιστικών μέσων. Κάθε συνδυασμός έλαβε μια χρονική περίοδο για να εκτελέσει την πλοήγησή του από την αρχή ως τον στόχο, η οποία ορίστηκε σε $t_C^{max} = 120 \text{ sec}$ για τον κόσμο CORRIDOR, $t_W^{max} = 180 \text{ sec}$ για τον κόσμο WILLOWGARAGE, και $t_L^{max} = 600 \text{ sec}$ στο περιβάλλον CSAL.



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



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

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

4.3.2 Ορισμός μετρικών αξιολόγησης

Σε αυτήν την ενότητα κάνουμε τις ακόλουθες παραδοχές και ορισμούς.

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

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

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

Ορισμός IX. Ένας χάρτης πλέγματος πληρότητας (Occupancy Grid Map, OGM) $M : [1, q] \rightarrow \mathbb{R}^2$ είναι ένα μη ταξινομημένο σύνολο σημείων στο καρτεσιανό επίπεδο: $M \equiv ((x_1^M, y_1^M), (x_2^M, y_2^M), \dots, (x_q^M, y_q^M))$. Επιπλέον, $\mu(x), \sigma(x)$ υποδηλώνουν τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της μεταβλητής x .

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

πλησιέστερη στάση της στο P_2 :

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

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

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

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

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

Συμβολίζοντας με \mathcal{G} μια συλλογή από N συνολικά μονοπάτια προς ακολούθηση που παράγονται σε N πειράματα και προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, $\mathcal{G} = \{G_1, G_2, \dots, G_N\}$, και με \mathcal{P} μια συλλογή από N διανυόμενες διαδρομές $\mathcal{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$, οι μετρικές αξιολόγησης για τους κατασκευαστές μονοπατιών global planners, τους ελεγκτές κίνησης local planners, και τους συνδυασμούς τους παρουσιάζονται στους πίνακες 4.1, 4.2, και 4.3.

4.3.3 Μεθοδολογία συνολικής και ιεραρχημένης αξιολόγησης

Η συνολική αξιολόγηση κάθε συνδυασμού global και local planner πραγματοποιείται με βάση την κοινή τους επίδοση και τις επιδόσεις των δύο συνιστωσών του. Κάθε μετρική m που

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

Πίνακας 4.1: Μετρικές αξιολόγησης για τους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών (global planners) (αριστερά), την περιγραφή τους (μέση) και τη φύση των της συμβολής τους στην αξία ενός συνδυασμού αλγορίθμων για αυτόνομη πλοήγηση (δεξιά): τα βέλη που δείχνουν προς τα πάνω υποδηλώνουν ότι όσο υψηλότερη είναι η τιμή μιας μετρικής τόσο υψηλότερη είναι η αξία του συνδυασμού. Τα βέλη που δείχνουν προς τα κάτω υποδεικνύουν ότι η αξία ενός συνδυασμού είναι τόσο υψηλότερη όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της εν λόγω μετρικής

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

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

Μετρική αξιολόγησης
συνδυασμών global
και local planner

Τύπος

Τύπος
αναλογικότητας

$\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$	Η μέση απόκλιση μεταξύ των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που ακολούθησε το ρομπότ σε σύγκριση με τα σχεδιασθέντα μονοπάτια \mathcal{G} που επρόκειτο να ακολουθήσει $\mu_\delta(\mathcal{P}, \mathcal{G}) = \mu(d_\delta(P_j, G_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\mu_\Delta(\mathcal{P}, \mathcal{G})$	Η μέση συνολική απόκλιση μεταξύ των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που ακολούθησε το ρομπότ σε σύγκριση με τα σχεδιασθέντα μονοπάτια \mathcal{G} που επρόκειτο να ακολουθήσει $\mu_\Delta(\mathcal{P}, \mathcal{G}) = \mu(d_\Delta(P_j, G_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\mu_\delta^F(\mathcal{P}, \mathcal{G})$	Η μέση απόσταση Frechet μεταξύ των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που ακολούθησε το ρομπότ και των αντίστοιχων σχεδιασθέντων μονοπατιών \mathcal{G} , $\mu_\delta^F(\mathcal{P}, \mathcal{G}) = \mu(d_{dF}(P_j, G_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
μ_t	Ο μέσος χρόνος διαδρομής από την αρχική στάση p_0 στη στάση-στόχο p_G [sec]	↘
σ_t	Η τυπική απόκλιση γύρω από το μέσο χρόνο διαδρομής [sec]	↘
$\mu_l(\mathcal{P})$	Το μέσο μήκος των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που ακολούθησε το ρομπότ ως αποτέλεσμα του ελεγκτή κίνησης $\mu_l(\mathcal{P}) = \mu(l(P_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\sigma_l(\mathcal{P})$	Η τυπική απόκλιση γύρω από το μέσο πραγματικό μήκος διαδρομής $\sigma_l(\mathcal{P}) = \sigma(l(P_j))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$ —ένα μέτρο της συνέπειας των διαδρομών που υπαγόρευσε ο ελεγκτής κίνησης στο ρομπότ	↘
$\mu_s(\mathcal{P})$	Η μέση ομαλότητα των διανυόμενων διαδρομών $\mu_s(\mathcal{P}) = \mu(s(P_j))$ [rad], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\sigma_s(\mathcal{P})$	Η τυπική απόκλιση γύρω από τη μέση ομαλότητα των διανυόμενων διαδρομών $\sigma_s(\mathcal{P}) = \sigma(s(P_j))$ [rad], $j = 1, 2, \dots, N$	↘
$\inf(d(\mathcal{P}, M_C))$	Η συνολική ελάχιστη απόσταση των πραγματικών διαδρομών που ακολούθησε το ρομπότ από τα εμπόδια του χάρτη M σε όλα τα πειράματα ή τις προσομοιώσεις $\inf(d(\mathcal{P}, M))$ [m]—ένα μέτρο του πόσο καλά ο ελεγκτής κίνησης σχεδιάζει και εκτελεί τη διαδρομή του ρομπότ γύρω από τα εμπόδια ώστε να μην παραβιάζει περιορισμούς αποφυγής σύγκρουσης	↗
$\mu(d(\mathcal{P}, M_C))$	Η μέση ελάχιστη απόσταση των πραγματικών διαδρομών που διέσχισε το ρομπότ από τα εμπόδια του χάρτη M , $\mu(d(P_j, M))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↗
$\sigma(d(\mathcal{P}, M_C))$	Η τυπική απόκλιση γύρω από τη μέση ελάχιστη απόσταση των πραγματικών διαδρομών του ρομπότ από τα εμπόδια του χάρτη M , $\sigma(d(P_j, M))$ [m], $j = 1, 2, \dots, N$	↘

Πίνακας 4.3: Μετρικές αξιολόγησης για τον συνδυασμό ενός αλγορίθμου χάραξης μονοπατιών (global planner) με έναν ελεγκτή κίνησης (local planner), η περιγραφή τους (μέση) και η φύση της συμβολής τους στην αξία του συνδυασμού τους (δεξιά): τα βέλη που δείχνουν προς τα πάνω υποδηλώνουν ότι όσο υψηλότερη είναι η τιμή μιας μετρικής τόσο υψηλότερη είναι η αξία του συνδυασμού. Τα βέλη που δείχνουν προς τα κάτω υποδεικνύουν ότι η αξία ενός συνδυασμού τόσο υψηλότερη όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της εν λόγω μετρικής

περιγράφεται ανωτέρω λαμβάνεται υπόψη και της αποδίδεται ένα βάρος $w_m \in \mathbb{R}_{\geq 0}$, έτσι ώστε η γενική αξιολόγηση να είναι εφικτή για μεταβλητές προδιαγραφές (ανάλογα με την εφαρμογή και την αβεβαιότητα του μοντέλου του ρομπότ, ένας μηχανικός μπορεί να προτιμήσει να αποδώσει περαιτέρω σημασία, για παράδειγμα, στο μήκος των διαδρομών του σε σχέση με τη συνολική ελάχιστη απόσταση του ρομπότ από τα εμπόδια). Απώτερος στόχος είναι η απόδοση μίας τιμής-αξίας σε κάθε συνδυασμό αλγορίθμων πλοήγησης, η οποία θα τους διακρίνει και θα τους κατατάσσει με βάση της συνολική τους επίδοση.

Αρχικά κάνουμε την υπόθεση ότι η τιμή ενός συνδυασμού πρέπει να είναι αυστηρά αύξουσα, έτσι ώστε οι μεγαλύτερες τιμές να αντικατοπτρίζουν καλύτερες επιδόσεις. Η τιμή αυτή εξαρτάται όχι μόνο από την τιμή κάθε μετρικής που συζητήθηκε μέχρι τώρα, αλλά, πιο συγκεκριμένα, από τη φύση της συμβολής μιας μετρικής. Για παράδειγμα, οι χρόνοι πλοήγησης μεταξύ p_0^{MC} και p_G^{MC} συμβάλλουν περισσότερο όσο μικρότερη είναι η τιμή τους, αλλά, σε σχέση με τη συνολική απόσταση μεταξύ των εμποδίων, η τιμή ενός συνδυασμού θα πρέπει να αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η απόσταση. Επομένως, η τιμή ενός συνδυασμού σχεδιαστών εξαρτάται από τον τύπο της αναλογικότητας της συνεισφοράς κάθε συγκεκριμένης μετρικής. Οι πίνακες 4.1-4.3 συνοψίζουν τη συμβολή κάθε μετρικής που αφορά τους αλγόριθμους κατασκευής μονοπατιών, τους ελεγκτές κίνησης, και του συνδυασμού τους. Τα βέλη που δείχνουν προς τα πάνω υποδηλώνουν ευθεία αναλογικότητα. Τα βέλη που δείχνουν προς τα κάτω υποδηλώνουν αντίστροφη αναλογικότητα. Περισσότερες λεπτομέρειες υπάρχουν στο παράρτημα Δ'1.

Δεδομένου ότι αυτό που επιδιώκουμε είναι η απόδοση μιας κλιμακωτής τιμής $V(C)$ σε κάθε συνδυασμό C από αλγόριθμους σχεδιασμού μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης, πρέπει να περάσουμε από την κατασκευή μιας έγκυρης συνάρτησης αξίας V . Η συνάρτηση V πρέπει (α) να είναι γνησίως αύξουσα (ώστε να εκφράζει με ακρίβεια την αξία ενός συνδυασμού με βάση τις μετρικές επίδοσης του, και ταυτόχρονα να παρέχει ένα νόημα στις διαφορές τους, η οποία να μπορεί να αναχθεί στη διαφορά μεταξύ της επίδοσης ξεχωριστών μετρικών τους) και (β) να λαμβάνει υπόψη μετρικές διαφορετικών μονάδων μέτρησης. Για τον σκοπό αυτό ξεκινάμε με την κανονικοποίηση των τιμών των μετρικών εντός του αντίστοιχου διαστήματος ελάχιστων και μέγιστων τιμών για όλους τους συνδυασμούς—έτσι ώστε η τιμή όλων των μετρικών να εκφράζεται στο διάστημα $[0, 1]$ άνευ μονάδας μέτρησης—και ανάλογα με τα συμφραζόμενα. Το τελευταίο σημαίνει ότι η τιμή, για παράδειγμα, του μέσου μήκους N σχεδίων μονοπατιών

θα εκφράζεται μεταξύ του ελάχιστου μέσου μήκους και του μέγιστου μέσου μήκους όλων των μονοπατιών και όλων των συνδυασμών—αφού αυτή η μετρική είναι ανεξάρτητη από την επιτυχία ή την αποτυχία της αποστολής ενός συνδυασμού—, αλλά ο μέσος χρόνος πλοήγησης μεταξύ p_0^M και p_G^M στον χάρτη M , ο οποίος εξαρτάται από την επιτυχία της αποστολής, θα εκφράζεται μόνο μεταξύ του ελάχιστου μέσου και του μέγιστου μέσου χρόνου διαδρομής των συνδυασμών που κατάφεραν να μεταφέρουν το ρομπότ από τη στάση p_0^M στην p_G^M . Η κανονικοποιητική συνάρτηση για μία μετρική m είναι $N(m)$:

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

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

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

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

Κατ' αναλογία, για τους αλγορίθμους παραγωγής μονοπατιών, τους ελεγχτές κίνησης, ή τους συνδυασμούς τους, εάν η τιμή τους όσον αφορά στη μετρική m είναι αντιστρόφως

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

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

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

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

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

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

4.3.4 Ορισμός μετρικών ποιότητας πακέτων λογισμικών πλοήγησης

Μαζί με τις ποσοτικές μετρικές αξιολόγησης που αναφέρθηκαν παραπάνω θα αξιολογήσουμε επίσης και την κατάσταση της μορφής του λογισμικού των διαθέσιμων αλγορίθμων

χάραξης μονοπατιών (ενότητα 4.2.3.1) και ελεγκτών κίνησης (ενότητα 4.2.3.1) σε σχέση με τις μετρικές που ακολουθούν:

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

Προτού προχωρήσουμε στην αξιολόγηση των συνδυασμών αλγορίθμων κατασκευής μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης, θα φιλτράρουμε τα αντίστοιχα συνιστώντα πακέτα του λογι-

σμικού τους με βάση τις ποιοτικές μετρικές που ορίστηκαν παραπάνω. Καθώς η αξιολόγηση περνάει αναγκαστικά μέσα από τη διαδικασία της πειραματικής υλοποίησης μέσω λογισμικού, η ποιοτική αξιολόγηση έχει ως σκοπό να εξετάσει την ποιότητα των διαθέσιμων υλοποιήσεων των αλγορίθμων που πραγματώνουν το έργο της αυτόνομους πλοήγησης, και να απορρίψει εκείνες που είναι ακατάλληλες για σταθερή και βιώσιμη χρήση: ένα παρωχημένο, μη αυτοτελές ή δυσεγκαταστάσιμο πακέτο είναι ένα πακέτο που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη. Ένα πακέτο που στερείται τεκμηρίωσης είναι ένα πακέτο το οποίο, ακόμη και αν είναι χρησιμοποιήσιμο, στερεί από τον μηχανικό την εικόνα της μεθόδου του, παρεμποδίζει την πρόσβαση ή συσκοτίζει το νόημα των παραμέτρων του και συνεπώς παρεμποδίζει την παραμετροποίησή του και, τελικά, τη χρηστικότητα και τη μακροζωία της χρήσης του. Τέλος, ένα πακέτο που καταναλώνει αρκούντως πολλούς πόρους είναι ένα πακέτο που αρνείται σε άλλους κόμβους τους πόρους που αυτοί χρειάζονται, και συνεπώς θέτει σε κίνδυνο την επίδοσή τους και την επίδοση του συνολικού ρομποτικού συστήματος.

4.4 Πειραματική αξιολόγηση

4.4.1 Προκαταρκτική αξιολόγηση

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

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

Παρόλο που το πακέτο `MoveIt!` είναι επαρκώς τεκμηριωμένο, υποστηριζόμενο, και ενημερωμένο, δεν απευθύνεται σε πλοήγηση κινητών βάσεων στον διδιάστατο χώρο. Επομένως,

το πακέτο αυτό θα δεν θα αξιολογηθεί, σύμφωνα με το δεύτερο κριτήριο.

Το πακέτο `sbpl_lattice_planner` τεκμηριώνεται τόσο στη θεωρία όσο και από άποψης παραμέτρων. Είναι επί του παρόντος ενημερωμένο στην τελευταία έκδοση του ROS (έκδοση `melodic`), συντηρείται, και υποστηρίζεται από τους συντηρητές του ROS (ένα σφάλμα λογισμικού που ανακαλύφθηκε κατά τη διάρκεια της αξιολόγησής του εξαλείφθηκε μέσα σε 8 ημέρες). Για την εγκατάστασή του (εκτός από εκείνη της βασικής βιβλιοθήκης `SBPL`) δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη προσπάθεια.

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

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

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

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

σύμφωνα με το πρώτο και δεύτερο κριτήριο.

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

Ο ελεγκτής κίνησης `eband_local_planner` τεκμηριώνεται, εγκαθίσταται μέσω της τυπικής διαδικασίας εγκατάστασης πακέτων, και είναι αυτοτελής. Ωστόσο, δεν έχει ενημερωθεί ώστε να ταιριάζει με την τελευταία έκδοση του ROS²³, και φαίνεται ότι δεν συντηρείται επί του παρόντος. Παρ' όλα αυτά θα το συμπεριλάβουμε στην αξιολόγηση των τοπικών σχεδιαστών μας ως εξαίρεση λόγω της κρίσιμης έλλειψης ελεγκτών κίνησης στο ROS. Στον πίνακα 4.4, κάτω από τη στήλη για τις υπολογιστικές ανάγκες, ο `eband_local_planner` λαμβάνει δύο κύκλους λόγω της ανάγκης επίλυσης ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης με περιορισμούς κατά τη διάρκεια εκτέλεσης.

Τέλος, ο ελεγκτής κίνησης `teb_local_planner` είναι ο πιο διεξοδικά τεκμηριωμένος αλγόριθμος μεταξύ όλων που έχουμε αναφέρει μέχρι στιγμής, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο παραμέτρων. Είναι ενημερωμένος στην τελευταία έκδοση του ROS, αυτοτελής, και είναι ο πιο παραμετροποιήσιμος ελεγκτής κίνησης. Ακριβώς όπως και ο `eband_local_planner`, ο `teb_local_planner` λαμβάνει δύο κύκλους στη στήλη για υπολογιστικών αναγκών στον πίνακα 4.4 λόγω της αρχής λειτουργίας του που περιλαμβάνει την επίλυση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης με χωροχρονικούς περιορισμούς κατά τη διάρκεια εκτέλεσής του.

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

Ο πίνακας 4.4 απεικονίζει τον πλήρη κατάλογο αξιολόγησης με βάση τα ποιοτικά κριτήρια της ενότητας 4.3.4 για όλα τα πακέτα λογισμικού αυτόνομους πλοήγησης των ενότητων 4.2.3.1 και 4.2.3.2.

Ο πίνακας 4.5 δείχνει την τελική λίστα των πακέτων ROS που θα αξιολογηθούν πειραματικά. Οι συμβολισμοί GP και LP που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια στην επικεφαλίδα

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

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

Πίνακας 4.4: Αξιολόγηση των πακέτων ROS που αποτελούν συνιστώσες αυτόνομους πλοήγησης με βάση τις μετρικές που ορίζονται στην ενότητα 4.3.4, και απόφαση αποδοχής για συμπερίληψη στην πειραματική αξιολόγηση. Οι συντομογραφίες εισάγονται για λόγους εξοικονόμησης χώρου. DOC: συντομογραφία ποιότητας τεκμηρίωσης, UTD περί του αν είναι ενημερωμένο, INST της ευκολίας εγκατάστασης του, SC/C για την αυτοτέλεια/πληρότητα του, PARAM για την παραμετροποιεσιμότητα του, CON της συνέπειας στην εκτέλεσή του, και COMP για τις ανάγκες του σε υπολογιστικούς πόρους. Οι κενές κουκκίδες υποδηλώνουν ανεπάρκεια σε σχέση με κάθε μετρική. Τα ερωτηματικά υποδηλώνουν άγνωστη κατάσταση.

των πινάκων είναι συντομογραφία των φράσεων “Global Planner” και “Local Planner” αντίστοιχα.

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

Πίνακας 4.5: Ο κατάλογος των πακέτων ROS των αλγορίθμων κατασκευής μονοπατιών (Global Planners) και ελεγκτών κίνησης (Local Planners) των οποίων η ξεχωριστή και συνδυαστική χρήση θα αξιολογηθεί πειραματικά. Κάθε πακέτο ικανοποιεί όλα τα κριτήρια της λίστας της ενότητας 4.3.4

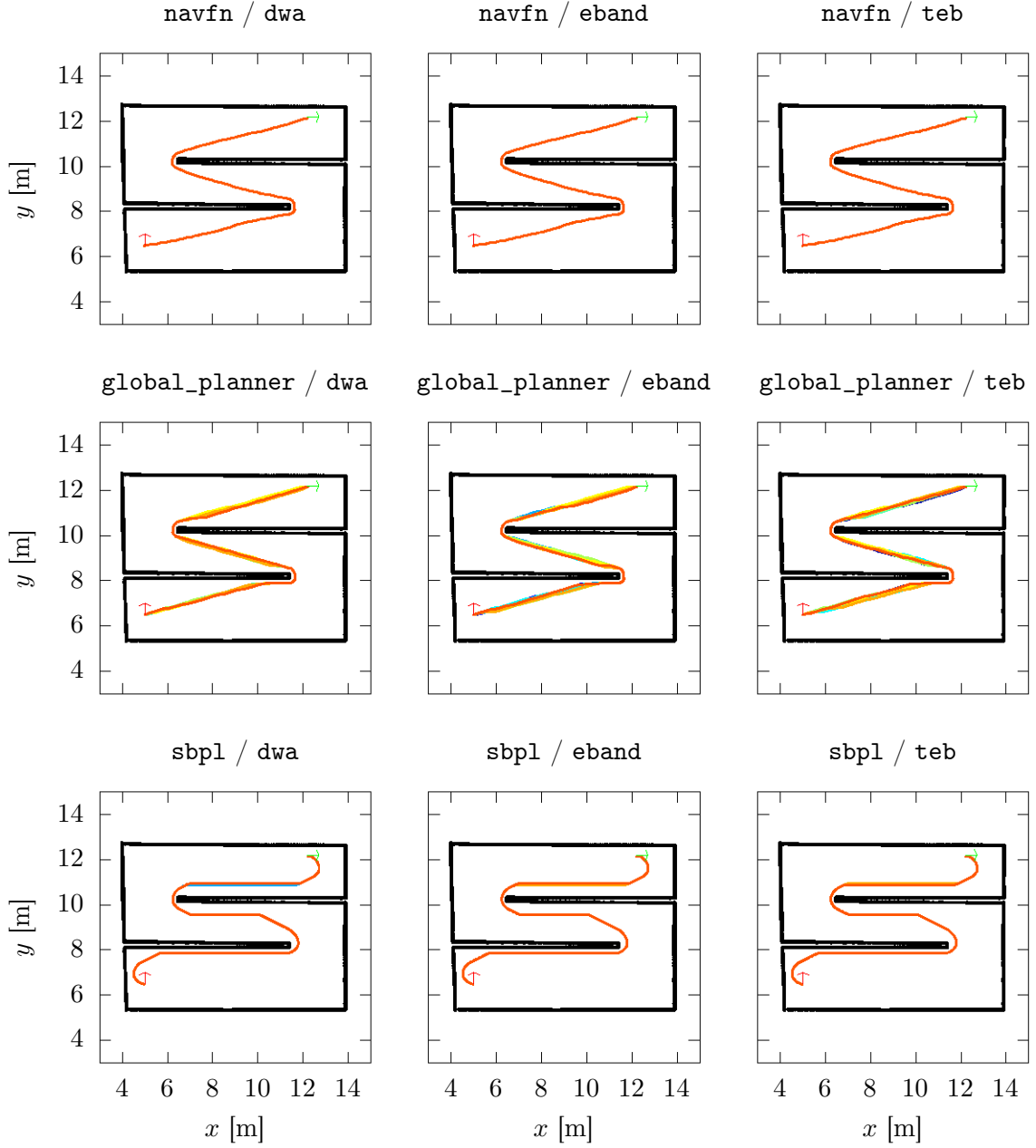
4.4.2 Αξιολόγηση στο περιβάλλον CORRIDOR

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

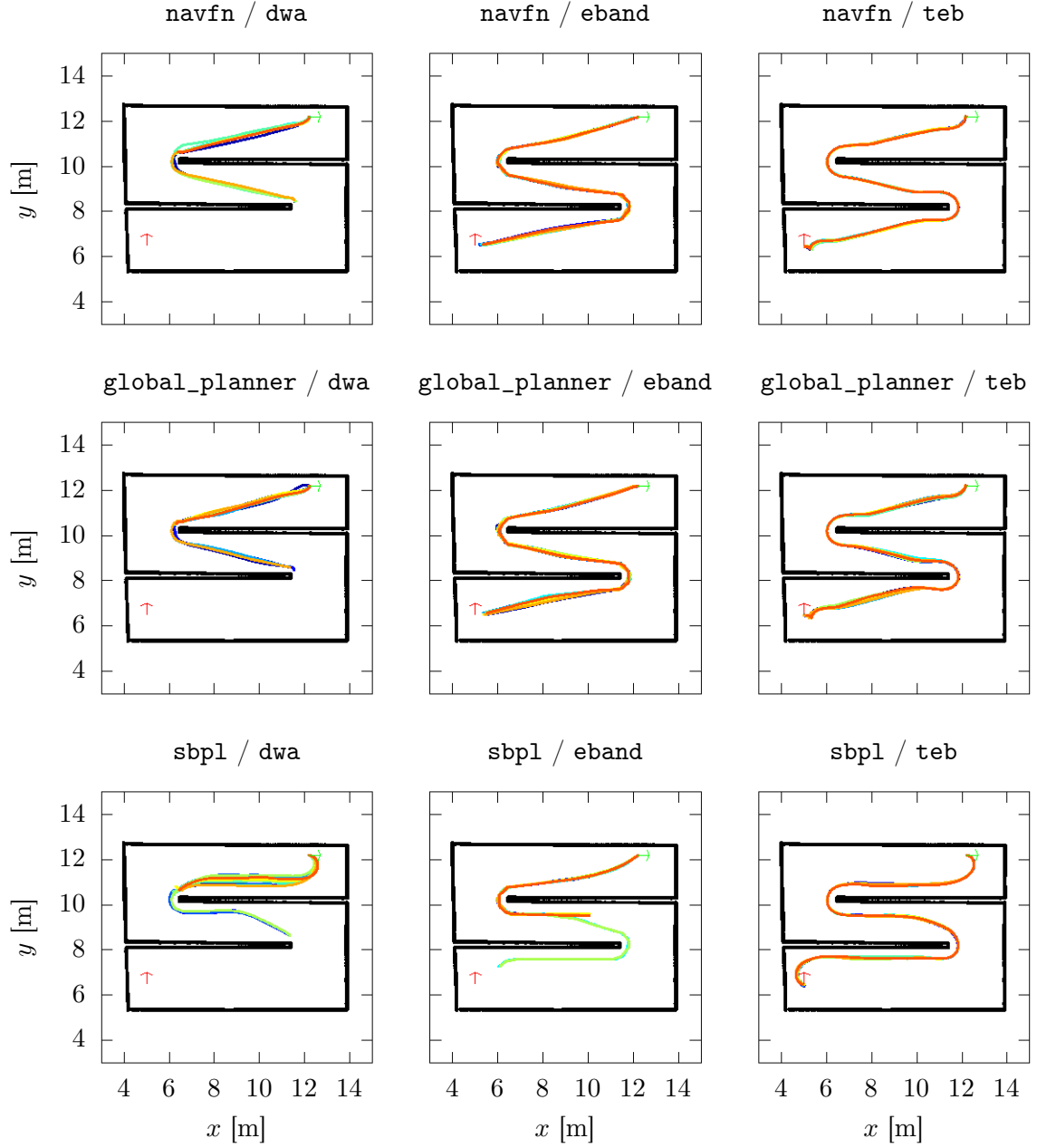
Το σχήμα 4.5 απεικονίζει τα μονοπάτια προς ακολουθήση που παρήχθησαν από όλους τους global planners που εμφανίζονται στην πρώτη στήλη του πίνακα 4.5, για όλους τους συνδυασμούς global και local planner του ίδιου πίνακα, για $N = 10$ προσομοιώσεις κάθε συνδυασμού.

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

Ο πίνακας 4.6 καταγράφει την τιμή-αξία V_{MC} και την κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που αξιολογήθηκαν με βάση τις τιμές όλων των μετρικών, που παρουσιάζονται στους πίνακες 1-7, όσον αφορά στις επιδόσεις τους στην πλοήγηση στο περιβάλλον CORRIDOR. Για τον υπολογισμό της τιμής όλων των συνδυασμών, όλα τα βάρη $w_m = 1.0$ εκτός από αυτό που αφορά στη μετρική μ_{PF}/μ_{LPC} , λόγω του γεγονότος ότι ο `eband_local_planner` δεν παρέχει πρόσβαση στον αριθμό των κλήσεων του ελεγκτή. Συνολικά, ο ελεγκτής κίνησης `teb_local_planner` κατέλαβε όλες τις θέσεις του βάθρου, με τον συνδυασμό του με τον αλγόριθμο `navfn` να είναι ο με τις καλύτερες επιδόσεις μεταξύ των τριών. Λεπτομέρειες σχετικά με τις επιδόσεις των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών, των ελεγκτών κίνησης, και των συνδυασμών τους, βρίσκονται στο παράρτημα Δ'.2.1.



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



Σχήμα 4.6: Τα διανυθέντα μονοπάτια \mathcal{P} του ρομπότ, όπως ορίστηκαν από τους τρεις ελεγχτές κίνησης για κάθε συνδυασμό τους με αλγόριθμο παραγωγής μονοπατιών του πίνακα 4.5, σε σχέση με τις ορισμένες αρχικές και τελικές στάσεις του περιβάλλοντος CORRIDOR.

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

Πίνακας 4.6: Οι αριθμοί επιτυχίας αποστολών, η τιμή-αξία V_{MC} , και η κατάταξη όλων των συνδυασμών των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που αξιολογούνται για τους την επίδοσή τους στο περιβάλλον CORRIDOR σε $N = 10$ προσομοιώσεις

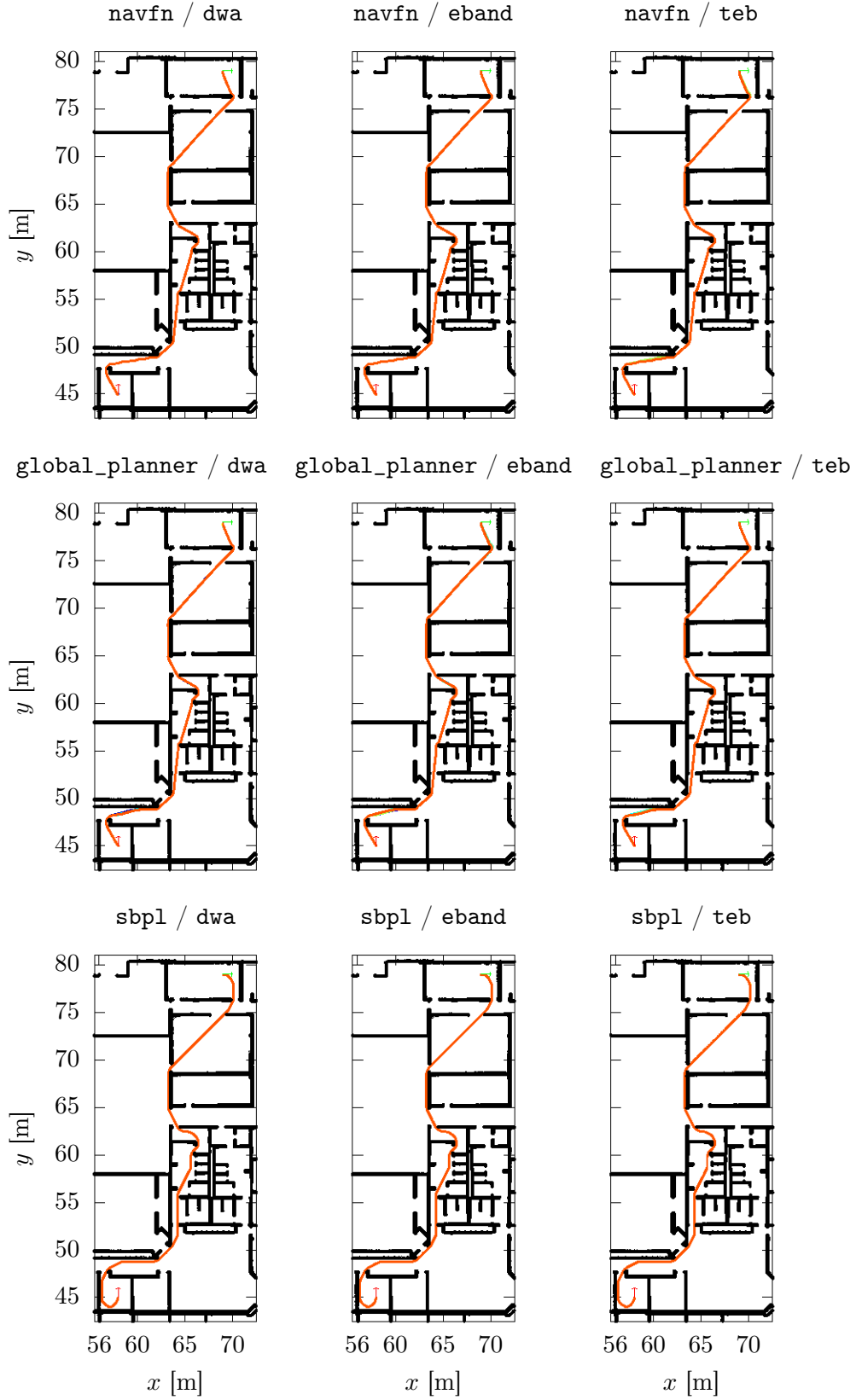
4.4.3 Αξιολόγηση στο περιβάλλον WILLOWGARAGE

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

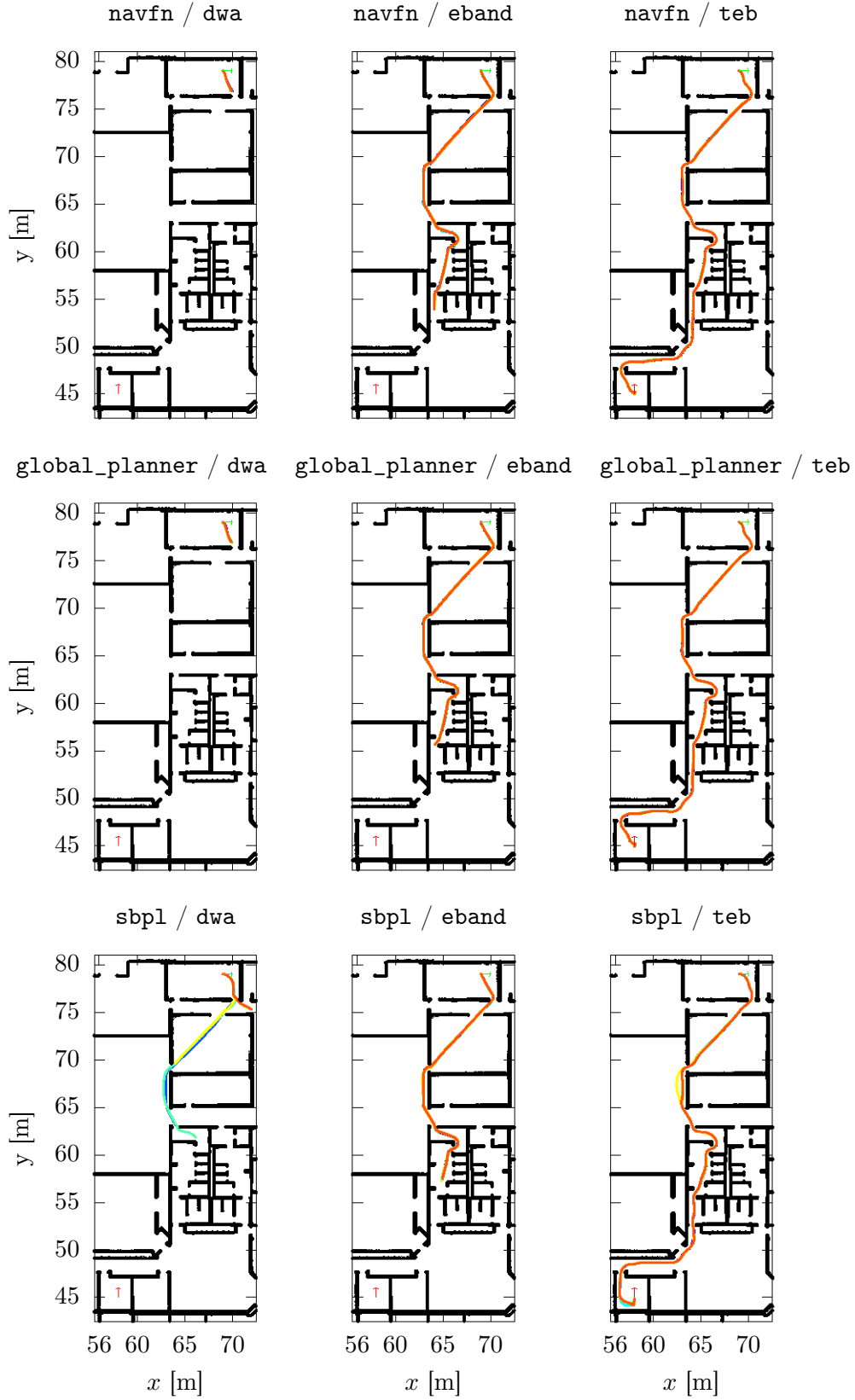
Το σχήμα 4.7 απεικονίζει τα μονοπάτια προς ακολουθήση που παρήχθησαν από όλους τους global planners που εμφανίζονται στην πρώτη στήλη του πίνακα 4.5, για όλους τους συνδυασμούς global και local planner του ίδιου πίνακα, για $N = 10$ προσομοιώσεις κάθε συνδυασμού.

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

Ο πίνακας 4.7 καταγράφει την τιμή-αξία V_{M_W} και την κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που αξιολογήθηκαν με βάση τις τιμές όλων των μετρικών, που παρουσιάζονται στους πίνακες 8- 14 όσον αφορά στις επιδόσεις τους στην πλοήγηση στο περιβάλλον WILLOWGARAGE. Για τον υπολογισμό της τιμής όλων των συνδυασμών, όλα τα βάρη $w_m = 1.0$ εκτός από αυτό που αφορά στη μετρική $\mu PF/\mu LPC$, λόγω του γεγονότος ότι ο `eband_local_planner` δεν παρέχει πρόσβαση στον αριθμό των κλήσεων του ελεγκτή. Συνολικά, ο ελεγκτής κίνησης `teb_local_planner` κατέλαβε



Σχήμα 4.7: Τα σχεδιασθέντα μονοπάτια προς ακολούθηση \mathcal{G} που παρήχθησαν από τους τρεις αλγόριθμους χάραξης μονοπατιών για κάθε συνδυασμό τους με ελεγκτή κίνησης του πίνακα 4.5, σε σχέση με τις ορισμένες αρχικές και τελικές στάσεις του περιβάλλοντος WILLOWGARAGE



Σχήμα 4.8: Τα διανυθέντα μονοπάτια \mathcal{P} του ρομπότ, όπως ορίστηκαν από τους τρεις ελεγχτές κίνησης για κάθε συνδυασμό τους με αλγόριθμο παραγωγής μονοπατιών του πίνακα 4.5, σε σχέση με τις ορισμένες αρχικές και τελικές στάσεις του περιβάλλοντος WILLOWGARAGE

και πάλι όλες τις θέσεις του βάθρου (αυτή τη φορά λόγω της αποτυχίας όλων των άλλων ελεγκτών κίνησης να ολοκληρώσουν την αποστολή του ρομπότ), με το συνδυασμό του με τον `global_planner` να ξεπερνά αυτόν με τον `navfn`, ο οποίος ήταν ο συνολικά καλύτερος στο περιβάλλον CORRIDOR. Ενδιαφέρον αποτελεί ότι ο `sbpl_lattice_planner` βοήθησε την επίδοση του `dwa_local_planner` περισσότερο από τους άλλους global planners, κάτι που πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι ο πρώτος λαμβάνει υπόψιν του κατά την σχεδίαση των μονοπατιών τους περιορισμούς του κινηματικού μοντέλου της βάσης του ρομπότ, το οποίο σε αυτήν την περίπτωση είναι διαφορικής κίνησης.

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

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

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

4.4.4 Αξιολόγηση στο περιβάλλον CSAL

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

Το σχήμα 4.9 απεικονίζει τα μονοπάτια προς ακολούθηση που παρήχθησαν από όλους τους global planners που εμφανίζονται στην πρώτη στήλη του πίνακα 4.5, για όλους τους

συνδυασμούς global και local planner του ίδιου πίνακα, για $N = 10$ προσομοιώσεις κάθε συνδυασμού.

Το σχήμα 4.10 απεικονίζει τις εκτιμώμενες ²⁴ διαδρομές που διένυσε το ρομπότ για όλους τους συνδυασμούς αλγορίθμων σχεδίασης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης του ίδιου πίνακα, για $N = 10$ προσομοιώσεις για κάθε συνδυασμό.

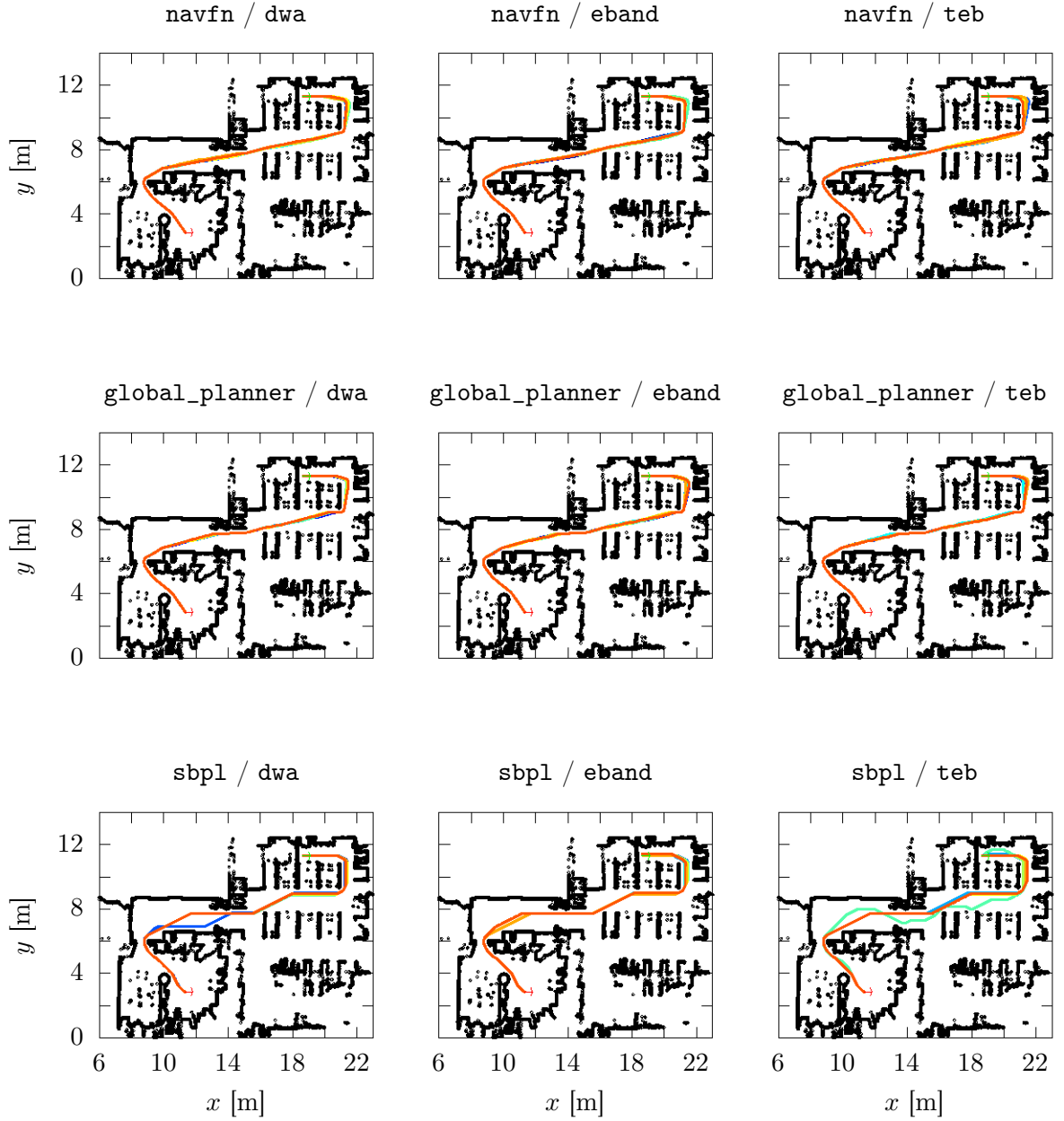
Ο πίνακας 4.8 καταγράφει την τιμή-αξία V_{M_L} και την κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που αξιολογήθηκαν με βάση τις τιμές όλων των μετρικών, που παρουσιάζονται στους πίνακες 15-21 όσον αφορά στις επιδόσεις τους στην πλοήγηση στο περιβάλλον CSAL. Για τον υπολογισμό της τιμής όλων των συνδυασμών, όλα τα βάρη $w_m = 1.0$ εκτός από αυτό που αφορά στη μετρική μ_{PF}/μ_{LPC} , λόγω του γεγονότος ότι ο `eband_local_planner` δεν παρέχει πρόσβαση στον αριθμό των κλήσεων του ελεγκτή. Λεπτομέρειες σχετικά με τις επιδόσεις των αλγορίθμων κατασκευής μονοπατιών, των ελεγκτών κίνησης, και των συνδυασμών τους, βρίσκονται στο παράρτημα Δ'.2.3.

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

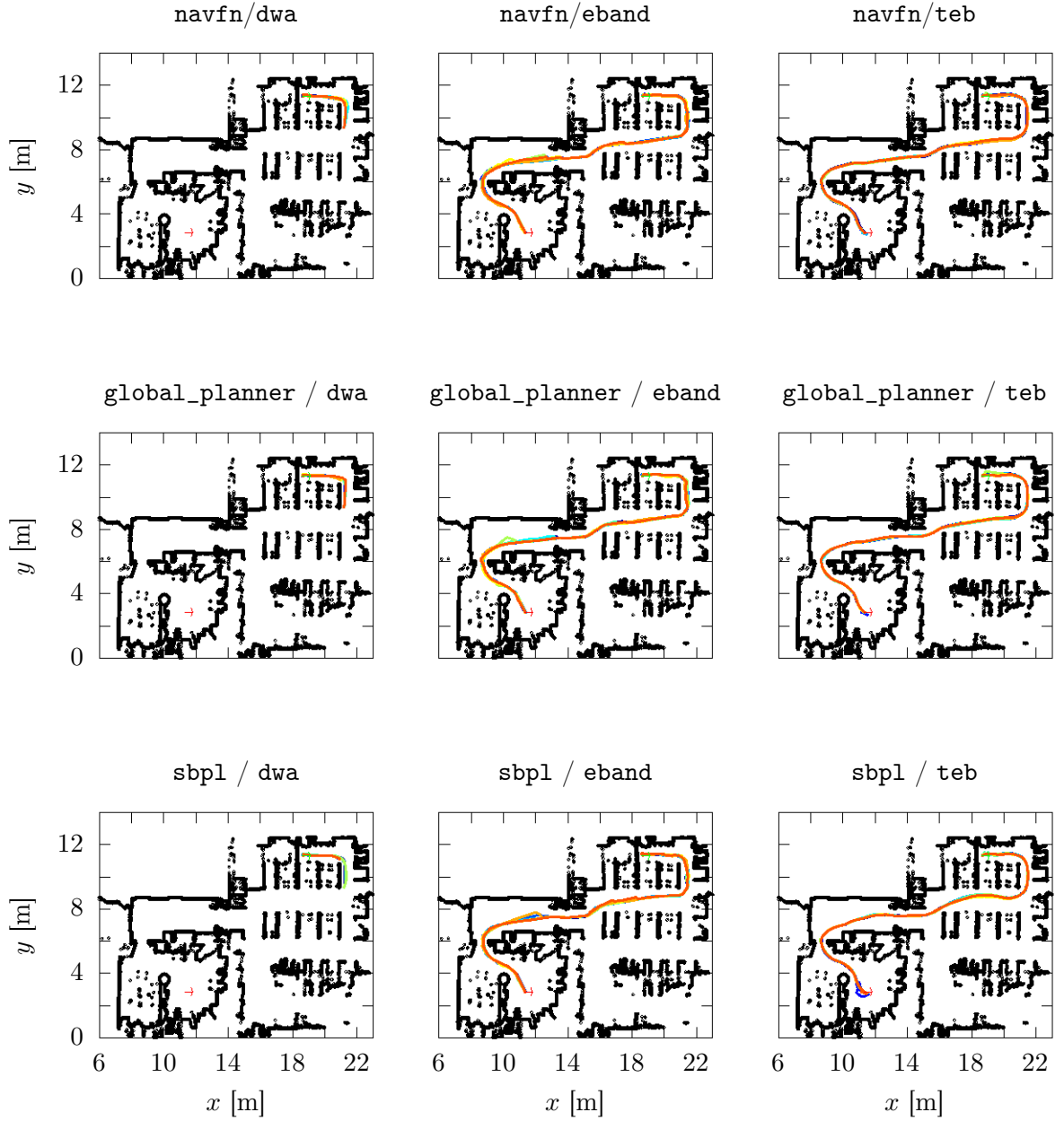
4.4.5 Συνολική αξιολόγηση

Ο πίνακας 4.9 καταγράφει τις τελικές συνδυαστικές τιμές-αξίες όλων των συνδυασμών των αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών της αριστερής στήλης του πίνακα 4.5 με όλους τους

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



Σχήμα 4.9: Τα σχεδιασθέντα μονοπάτια προς ακολούθηση \mathcal{G} που παρήχθησαν από τους τρεις αλγορίθμους χάραξης μονοπατιών για κάθε συνδυασμό τους με ελεγκτή κίνησης του πίνακα 4.5, σε σχέση με τις ορισμένες αρχικές και τελικές στάσεις του περιβάλλοντος CSAL



Σχήμα 4.10: Τα διανυθέντα μονοπάτια \mathcal{P} του ρομπότ, όπως ορίστηκαν από τους τρεις ελεγχτές κίνησης για κάθε συνδυασμό τους με αλγόριθμο παραγωγής μονοπατιών του πίνακα 4.5, σε σχέση με τις ορισμένες αρχικές και τελικές στάσεις του περιβάλλοντος CSAL

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

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

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

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία δύο καθοριστικά πρότυπα αναδύονται με σαφήνεια: Όσον αφορά στους ελεγκτές κίνησης: ο `teb_local_planner` υπερτερεί του `eband_local_planner`, ο οποίος υπερτερεί με τη σειρά του του `dwa_local_planner`. Όσον αφορά στους αλγορίθμους σχεδιασμού μονοπατιών: δεδομένου ενός ελεγκτή κίνησης, ο `navfn` υπερτερεί του `global_planner` με μικρή διαφορά, μικρότερη από εκείνη μεταξύ του τελευταίου και του `sbpl_lattice_planner`. Επομένως, με βάση τα πειραματικά δεδομένα, συμπεραίνουμε ότι ο καλύτερος συνδυασμός πακέτων λογισμικού ROS για χρήση στην αυτόνομη πλοήγηση στο πεδίο εφαρμογής ΠΕ χρησιμοποιεί τον `navfn` ως αλγόριθμο χάραξης μονοπατιών, και τον `teb_local_planner` ως ελεγκτή κίνησης. Επιπλέον, οι καλύτεροι υποψήφιοι για την αντικατάσταση των παραπάνω αλγορίθμων, ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τις απαιτήσεις/στόχους πλοηγήσεις, είναι ο `global_planner` και ο `eband_local_planner` αντίστοιχα.

4.5 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Αυτή η εργασία αξιολογεί τους τελευταίους τεχνολογίας παγκόσμιους και τοπικούς σχεδιαστές των οποίων η πηγή κώδικας είναι διαθέσιμος για άμεση ανάπτυξη μέσω του Robot Operating System (ROS) στο έργο της πλοήγησης μη επανδρωμένων επίγειων οχημάτων –

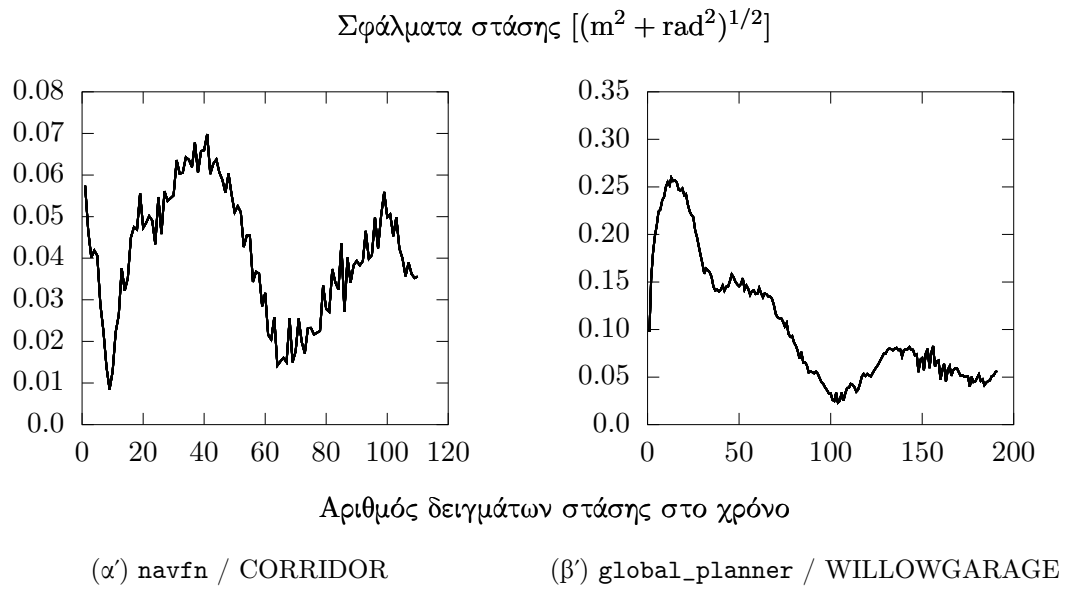
GP	LP	V_{M_C}	V_{M_W}	V_{M_L}	V	Κατάταξη
navfn	teb	21.41	20.00	18.74	60.15	1
globalplanner	teb	19.29	21.90	16.84	58.03	2
sbpl	teb	20.35	12.27	13.57	46.19	3
navfn	eband	15.96	11.76	14.77	42.49	4
globalplanner	eband	14.70	11.95	14.26	40.91	5
sbpl	eband	10.99	9.85	7.80	28.94	6
navfn	dwa	6.46	9.31	8.10	28.64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

Πίνακας 4.9: Η σύνθετη τελική τιμή V και η κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης του πίνακα 4.5 ως αποτέλεσμα της αξιολόγησης της επίδοσής τους βάσει των μετρικών των πινάκων 4.1, 4.2, και 4.3, σε επαναληπτικές προσομοιώσεις και πειράματα στα περιβάλλοντα CORRIDOR (σχήμα 4.2), WILLOWGARAGE (σχήμα 4.3) και CSAL (σχήμα 4.4)

συγκεκριμένα σε αυτή την εργασία ένα Turtlebot v2 — σε χάρτες πλέγματος κατάληψης 2D. Πραγματοποιήθηκε ένα αρχικό κοσκίνισμα προκειμένου να διακριθούν εύρωστοι σχεδιαστές με βάση με βάση ποιοτικές μετρήσεις προσανατολισμένες στο λογισμικό. Οι σχεδιαστές που πέρασαν από αυτό το κόσκινο συνδυάστηκαν έτσι ώστε η απόδοση όλων των συνδυασμών των παγκόσμιων και τοπικών σχεδιαστών να αξιολογούνταν. Η απόδοσή τους ελέγχθηκε σε δύο ετερογενή προσομοιωμένα περιβάλλοντα και σε ένα περιβάλλον του πραγματικού κόσμου, έτσι ώστε και τα δύο στοιχεία να αντιμετωπίσουν τις κατάλληλες δοκιμασίες καταπόνησης.

Συνολικά, διακρίνουμε τον τοπικό σχεδιαστή `teb_local_planner` ως τον πιο στιβαρό και οριστικά επιτυχημένος τοπικός σχεδιαστής μεταξύ αυτών που δοκιμάστηκαν: είναι ποτέ δεν απέτυχε να πλοηγηθεί από μια αρχική θέση σε μια θέση-στόχο, και πάντα έκανε το έκανε πάντα στον ελάχιστο χρόνο. Τοπικός σχεδιαστής `eband_local_planner` ήρθε δεύτερος, αποτυγχάνοντας να πλοηγηθεί σε κατάλληλο χρονικό διάστημα σε μία προσομοιωμένο χάρτη περιβάλλοντος, ενώ κατεύθυνε σαφώς την κίνηση του ρομπότ με υπερβολικά ασφαλή τρόπο. Ωστόσο, σε πειράματα στον πραγματικό κόσμο, είχε επιδόσεις καλύτερα από ό,τι στις προσομοιώσεις. Ο τρίτος τοπικός σχεδιαστής, `dwa_local_planner` δεν ολοκλήρωσε επιτυχώς ούτε μία αποστολή σε κανένα περιβάλλον, προσομοιωμένο ή πραγματικό.

Όσον αφορά τους παγκόσμιους σχεδιαστές, οι `navfn` και `global_planner` είναι σχεδόν ισοδύναμοι, με τον πρώτο να υπερέχει του δεύτερου συνολικά. Από την άλλη πλευρά, η διαφορά απόδοσης του `sbpl_lattice_planner` μεταξύ του `global_planner` είναι μεγαλύτερη



Σχήμα 4.11: Overall caption

από εκείνη μεταξύ του τελευταίου και του navfn.

Κεφάλαιο 5

Pose selection

Κεφάλαιο 6

Global localisation

Κεφάλαιο 7

smsm

Κεφάλαιο 8

sm

Μέρος ΙΙΙ

Συμπεράσματα

Μέρος IV

Παραρτήματα

.1 Τύποι αναλογικότητας μετρικών αξιολόγησης μεθόδων 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.

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

.2. ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ91

- 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 ελεγχτών 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.

.2 Λεπτομέρειες αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομους πλοήγησης

.2.1 Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον CORRIDOR

.2.1.1 Σχετικά με τους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών

Οι πίνακες 1 και 2 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών που ορίζονται στον πίνακα 4.1 και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CORRIDOR.

Όσον αφορά στα παραγόμενα μονοπάτια ο `global_planner` παρήγαγε διαδρομές με το μικρότερο μήκος (πίνακας 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` παρήγαγε τα λιγότερο πυκνά μονοπάτια αλλά με τη χαμηλότερη ομαλότητα. Οι επιδόσεις του `sbpl_lattice_planner` σε σχέση με το μήκος είναι λογικές, δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψη το κινηματικό μοντέλο του ρομπότ, το οποίο, όντας διαφορικής κίνησης, και επομένως μη ολόνομικό (non-holonomic), περιορίζεται στην

κίνησή του. Αντίθετα, οι `navfn` και `global_planner` δεν λαμβάνουν υπόψη τέτοιους περιορισμούς και, καθώς ο τελευταίος είναι ο διάδοχος του πρώτου, παράγουν ελαφρώς παρόμοια μονοπάτια (αυτό παρατηρείται επίσης όταν εξετάζονται τα στοιχεία των δύο παραγόμενων μονοπατιών: φαίνονται σχεδόν πανομοιότυπα με γυμνό μάτι, σε πλήρη αντίθεση με εκείνα του `sbpl_lattice_planner`). Μια άλλη παρατηρήσιμη διαφορά στο σχήμα 4.5 είναι ότι τα μονοπάτια που χαράζει ο `navfn` και τα περισσότερα του `sbpl_lattice_planner` είναι ντετερμινιστικά: δεδομένης μιας αρχικής στάσης \mathbf{p}_0 , μιας θέσης στόχου \mathbf{p}_G , και ενός χάρτη, αυτά παράγουν το ίδιο μονοπάτι κάθε φορά, ενώ ο `global_planner` εισάγει έναν μικρό βαθμό τυχαιότητας, το οποίο εξηγεί γιατί η τυπική απόκλιση των σχεδίων του είναι μη μηδενική σε σύγκριση με τους άλλους δύο αλγορίθμους.

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]
<code>navfn</code>	<code>dwa</code>	19.63	0.00	76.18	2.42	0.00
<code>navfn</code>	<code>eband</code>	19.63	0.00	76.18	2.42	0.00
<code>navfn</code>	<code>teb</code>	19.61	0.02	76.20	2.42	0.00
<code>global_planner</code>	<code>dwa</code>	19.60	0.01	74.43	2.40	0.00
<code>global_planner</code>	<code>eband</code>	19.59	0.01	74.70	2.40	0.00
<code>global_planner</code>	<code>teb</code>	19.60	0.01	74.70	2.40	0.00
<code>sbpl</code>	<code>dwa</code>	22.92	0.00	53.25	2.39	0.00
<code>sbpl</code>	<code>eband</code>	22.92	0.00	53.41	2.39	0.00
<code>sbpl</code>	<code>teb</code>	22.92	0.00	53.33	2.39	0.00

Πίνακας 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

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

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 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

.2.1.2 Σχετικά με τους ελεγκτές κίνησης

Ο πίνακας 3 καταγράφει τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους ελεγκτές κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.2 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 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 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 4—υπενθυμίζουμε ότι $t_C^{max} = 120$ sec), δηλαδή η προσέγγισή του είναι υπερβολικά ασφαλής. Ο συνδυασμός του με τον αλγόριθμο `sbpl_lattice_planner` ήταν ο χειρότερος, κάτι που θα μπορούσε θεωρητικά να αποδοθεί εν μέρει στο γεγονός ότι ο τελευταίος παράγει τα πιο πυκνά και μακρύτερα σχέδια, αλλά στην πραγματικότητα οφείλεται σε ένα άγνωστο ζήτημα που προκαλεί τον ελεγκτή να ανακηρύξει ότι το ρομπότ έφτασε στο στόχο του ενώ στην πραγματικότητα εξακολουθεί να βρίσκεται στη μέση της διαδρομής σε ορισμένες προσομοιώσεις (αυτός είναι ο δεύτερος λόγος για τον οποίο στον `sbpl_lattice_planner` δόθηκε κατάσταση ανεπάρκειας στον πίνακα 4.4—ο πρώτος είναι το σφάλμα που βρέθηκε και επιλύθηκε που αναφέρθηκε στην ενότητα 4.4.1).

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

.2.1.3 Σχετικά με το συνδυασμό τους

Οι πίνακες 4, 5, 6, και 7 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.3, 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 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`

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 3: Μέσος αριθμός ματαιωμένων αποστολών επί του αριθμού των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν μ_A/N , μέσος αριθμός ανακλήσεων με περιστροφή μ_{RR} και η τυπική τους απόκλιση σ_{RR} , μέσος αριθμός εκκαθαρίσεων χαρτών κόστους μ_{CC} και η τυπική τους απόκλιση σ_{CC} , μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής μ_{PF} και η τυπική τους απόκλιση σ_{PF} , και μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής επί του μέσου αριθμού των κλήσεων του ελεγκτή κίνησης μ_{PF}/μ_{LPC} , για όλους τους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5, για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CORRIDOR

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 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`.

Όσον αφορά στο μέσο μήκος των διανυόμενων διαδρομών (πίνακας 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` υπα-

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

Πίνακας 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

γόρευσε 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]
navfn	dwa	9.24	3.37	1.56	0.16
global_planner	dwa	8.62	3.23	1.66	0.15
sbpl	dwa	9.12	3.01	1.60	0.23
navfn	eband	20.15	0.09	2.36	0.01
global_planner	eband	20.04	0.07	2.36	0.01
sbpl	eband	12.79	3.52	1.78	0.27
navfn	teb	20.87	0.03	1.66	0.06
global_planner	teb	20.88	0.04	1.69	0.09
sbpl	teb	22.99	0.06	1.65	0.02

Πίνακας 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 6), ο συνδυασμός

του `eband_local_planner` με τον `sbpl_lattice_planner` δεν επέφερε συγκρούσεις με εμπόδια, ενώ οι αποστάσεις του από αυτά ήταν χαμηλότερες από εκείνες του `teb_local_planner`. Η δυνατότητα παραμετροποίησης του τελευταίου όσον αφορά στην ελάχιστη απόσταση από τα εμπόδια (που ορίστηκε σε 0.10m) έπαιξε σαφώς σημαντικό ρόλο στην απόσταση του ρομπότ από τα εμπόδια: όντας 0.18 m σε όλα τα πειράματα έδωσε στο ρομπότ τη μεγαλύτερη ελάχιστη απόσταση από εμπόδια σε σύγκριση με του άλλους ελεγκτές (αυτός ήταν ένας ακόμη λόγος για τον οποίο σημείωσε τέτοια βαθμολογία όσον αφορά στην ποιοτική μετρική της παραμετροποιησιμότητας στον πίνακα 4.4). 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		
		$\inf(d(\mathcal{P}, \mathcal{M}_C))$ [m]	$\mu(d(\mathcal{P}, \mathcal{M}_C))$ [m]	$\sigma(d(\mathcal{P}, \mathcal{M}_C))$ [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 6: Ολικά ελάχιστη απόσταση των πραγματικών διαδρομών \mathcal{P} που διήνυσε το ρομπότ από οποιοδήποτε εμπόδιο σε όλες τις προσομοιώσεις $\inf(d(\mathcal{P}, \mathcal{M}_C))$, μέση ελάχιστη απόσταση $\mu(d(\mathcal{P}, \mathcal{M}_C))$ από όλα τα εμπόδια για $N = 10$ προσομοιώσεις στο χάρτη CORRIDOR \mathcal{M}_C , και μέση τυπική απόκλιση $\sigma(d(\mathcal{P}, \mathcal{M}_C))$. Συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν όλες τις αποστολές σημειώνονται με έντονη γραφή

Όσον αφορά στην απόκλιση των διανυθέντων μονοπατιών από τα αντίστοιχα σχεδιασθέντα μονοπάτια (πίνακας 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]
navfn	dwa	0.04	45.98	5.58
global_planner	dwa	0.04	39.39	5.28
sbpl	dwa	0.09	101.28	5.08
navfn	eband	0.10	104.96	0.38
global_planner	eband	0.13	139.69	0.47
sbpl	eband	0.13	145.06	5.06
navfn	teb	0.07	81.96	0.26
global_planner	teb	0.08	89.89	0.29
sbpl	teb	0.07	73.59	0.26

Πίνακας 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

.2.2 Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον WILLOWGARAGE

.2.2.1 Σχετικά με τους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών

Οι πίνακες 8 και 9 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών που ορίζονται στον πίνακα 4.1 και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE.

Όσον αφορά στα παραγόμενα μονοπάτια (πίνακας 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` παράγαγε 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` παράγαγε τα λιγότερο πυκνά μονοπάτια, αλλά με τη χαμηλότερη ομαλότητα.

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 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

Αυτό που άλλαξε ήταν η ολικά ελάχιστη απόσταση των μονοπατιών του `sbpl_lattice_planner` από τα εμπόδια (πίνακας 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 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]
<code>navfn</code>	<code>dwa</code>	0.01	0.51	0.52
<code>navfn</code>	<code>eband</code>	0.01	0.51	0.52
<code>navfn</code>	<code>teb</code>	0.01	0.51	0.52
<code>global_planner</code>	<code>dwa</code>	0.00 (-0.02)	0.51	0.53
<code>global_planner</code>	<code>eband</code>	0.00 (-0.02)	0.51	0.53
<code>global_planner</code>	<code>teb</code>	0.00 (-0.02)	0.51	0.53
<code>sbpl</code>	<code>dwa</code>	0.00 (-0.02)	0.35	0.43
<code>sbpl</code>	<code>eband</code>	0.00 (-0.02)	0.35	0.43
<code>sbpl</code>	<code>teb</code>	0.00 (-0.02)	0.35	0.43

Πίνακας 9: Ολικά 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

.2.2.2 Σχετικά με τους ελεγκτές κίνησης

Ο πίνακας 10 καταγράφει τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους ελεγκτές κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.2 και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE.

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

στην πρώτη περίπτωση και, στη δεύτερη περίπτωση, τον υψηλότερο μέσο αριθμό εκκαθαρίσεων χαρτών κόστους.

Όσον αφορά στην επίδοση του `eband_local_planner` στο χάρτη M_W , ισχύει το ίδιο που ισχύει και στο χάρτη M_C στην περίπτωση του συνδυασμού του με τον `sbpl_lattice_planner`: παρουσίασε τον χαμηλότερο αριθμό αποτυχιών διαδρομής (τουλάχιστον τρεις φορές μικρότερο από τον αμέσως επόμενο χαμηλότερο συνδυασμό). Παρόλο που ο `eband_local_planner` κατάφερε να κάνει το ρομπότ να διανύσει σημαντικά μεγαλύτερες αποστάσεις σε σύγκριση με τον `dwa_local_planner` (εικόνα 4.8), και παρόλο που ήταν συνεπής στην πλοήγησή του (το σφάλμα λογισμικού που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα σχετικά με το συνδυασμό του με `sbpl_lattice_planner` δεν εμφανίστηκε στο περιβάλλον WILLOWGARAGE), χρειάστηκε και πάλι περισσότερο από τον προκαθορισμένο χρόνο σε κάθε προσομοίωση, δείχνοντας την υπερβολικά ασφαλής 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 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).

.2.2.3 Σχετικά με το συνδυασμό τους

Οι πίνακες 11, 12, 13, και 14 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.3, και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE.

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 10: Μέσος αριθμός ματαιωμένων αποστολών επί του αριθμού των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν μ_A/N , μέσος αριθμός ανακλήσεων με περιστροφή μ_{RR} και η τυπική τους απόκλιση σ_{RR} , μέσος αριθμός εκκαθαρίσεων χαρτών κόστους μ_{CC} και η τυπική τους απόκλιση σ_{CC} , μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής μ_{PF} και η τυπική τους απόκλιση σ_{PF} , και μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής επί του μέσου αριθμού των κλήσεων του ελεγκτή κίνησης μ_{PF}/μ_{LPC} , για όλους τους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5, για $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον WILLOWGARAGE

Όσον αφορά στο χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη της πλοήγησης από την αρχική στην επιθυμητή στάση (πίνακας 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 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 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 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.

Όσον αφορά στην απόσταση σε σχέση με τα εμπόδια του χάρτη M_W (πίνακας 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 αλγόριθμους 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.

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	2.35	0.03	0.67	0.13
global_planner	dwa	2.35	0.03	0.63	0.17
sbpl	dwa	7.94	7.62	0.81	0.35
navfn	eband	29.80	1.26	1.83	0.02
global_planner	eband	28.83	0.43	1.84	0.01
sbpl	eband	26.98	0.53	1.78	0.02
navfn	teb	46.53	0.08	1.57	0.04
global_planner	teb	46.55	0.04	1.61	0.02
sbpl	teb	48.73	0.09	1.61	0.01

Πίνακας 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 απόκλιση των διανυθέντων μονοπατιών από τα αντίστοιχα σχεδιασθέντα μονοπάτια (πίνακας 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 μεγαλύτερη μέση απόκλιση, τη μεγαλύτερη συνολική μέση απόκλιση, και τη μεγαλύτερη μέση διακριτή απόσταση Frechet, στον χάρτη 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 M_C έδωσε τη μικρότερη.

.2.3 Στοιχεία αξιολόγησης στο περιβάλλον CSAL

.2.3.1 Σχετικά με τους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών

Οι πίνακες 15 και 16 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους αλγορίθμους κατασκευής μονοπατιών που ορίζονται στον πίνακα 4.1 και που προέκυψαν κατά τις $N = 10$ προσομοιώσεις στο περιβάλλον CSAL.

Όσον αφορά στα παραγόμενα μονοπάτια (πίνακας 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

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 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 χώρο 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

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 απόσταση των σχεδίων του από τα εμπόδια (πίνακας 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.

.2.3.2 Σχετικά με τους ελεγχτές κίνησης

Ο πίνακας 17 καταγράφει τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους ελεγχτές κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.2 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

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 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 \mathcal{M}_W . Συνδυασμοί που ολοκλήρωσαν τουλάχιστον μία αποστολή σημειώνονται με έντονη γραφή

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

.2.3.3 Σχετικά με το συνδυασμό τους

Οι πίνακες 18, 19, 20, και 21 καταγράφουν τις τιμές των ποσοτικών μετρικών που αφορούν στους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που ορίζονται στον πίνακα 4.3, 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 \mathbf{p}_0^L προς τη στάση-στόχο \mathbf{p}_G^L (πίνακας 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.

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 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

Όσον αφορά στο μέσο μήκος των διανυόμενων διαδρομών (πίνακας 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, 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 M_L (πίνακας 20), ο `teb_local_planner` δεν κατάφερε να επιτύχει την ελάχιστη τεθειμένη απόσταση ρομπότ-εμποδίων (που είχε οριστεί όπως προηγούμενως 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 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

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 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

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 17: Μέσος αριθμός ματαιωμένων αποστολών επί του αριθμού των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν μ_A/N , μέσος αριθμός ανακλήσεων με περιστροφή μ_{RR} και η τυπική τους απόκλιση σ_{RR} , μέσος αριθμός εκκαθαρίσεων χαρτών κόστους μ_{CC} και η τυπική τους απόκλιση σ_{CC} , μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής μ_{PF} και η τυπική τους απόκλιση σ_{PF} , και μέσος αριθμός αποτυχιών διαδρομής επί του μέσου αριθμού των κλήσεων του ελεγκτή κίνησης μ_{PF}/μ_{LPC} , για όλους τους συνδυασμούς αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5, 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 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 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 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 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

Μέρος V

Αναφορές

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.
- [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/>.
- [Lat91] Jean-Claude Latombe. *Robot Motion Planning*. 1991. ISBN: 978-1-4615-4022-9.
- [Kav+96] L.E. Kavraki κ.ά. “Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces”. Στο: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12.4 (1996), σσ. 566–580. ISSN: 1042296X. DOI: 10.1109/70.508439. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/508439/>.
- [FBT97] D. Fox, W. Burgard και S. Thrun. “The dynamic window approach to collision avoidance”. Στο: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 4.1 (Μαρ. 1997),

- σσ. 23–33. ISSN: 10709932. DOI: 10.1109/100.580977. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/580977/>.
- [Lav98] S. Lavalley. *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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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/>.
- [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.
- [JCS10] Léonard Jaillet, Juan Cortés και T Siméon. “Sampling-Based Path Planning on Configuration-Space Costmaps”. Στο: *IEEE Transactions on Robotics* 26.4 (Αύγ. 2010), σσ. 635–646. ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/TR0.2010.2049527. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5477164/>.
- [KF10] S. Karaman και E. Frazzoli. “Incremental Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning”. Στο: *Robotics: Science and Systems VI*. Robotics: Science και Systems Foundation, Ιούν. 2010. ISBN: 9780262516815. DOI: 10.15607/RSS.2010.VI.034. URL: <http://www.roboticsproceedings.org/rss06/p34.pdf>.
- [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/>.
- [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.
- [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/>.
- [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>.
- [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/IR0S.2017.8206458. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8206458/>.
- [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>.
- [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>.
- [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>.
- [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>.

- [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>.
- [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/>.
- [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 (Noέ. 2021), σ. 7543. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21227543. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/22/7543>.
- [smp21] smrobotics. 2021. URL: https://smrobotics.com/security_robot.
- [rev22] revfine. 2022. URL: <https://www.revfine.com/hotel-robots/>.
- [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/>.
- [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 και. “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 και. “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/>.
- [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/IR0S.1999.811662. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/811662/>.
- [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/>.