

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

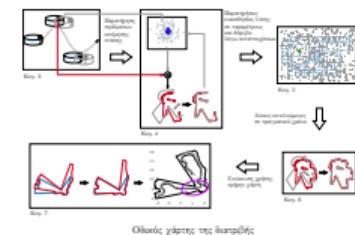
Μέθοδοι εκτίμησης στάσης  
αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων  
μέσω  
ευλιγράφηματης πραγματικών με επενδυτικές συρίσεις

Αλέξανδρος Φύλασθηνος

TUMUIT, ABB



## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



Αυτό που βλέπουμε εδώ είναι μία γραφική σύνοψη της δουλειάς μου. Αρχικά ωστε σας παρουσιάσω πώς μπορούμε να σχεδιάσουμε μία μέθοδο αξιολόγησης με υψόδων αυτόνομης πλοήγησης για επίγεια ρομπότ, όπου κατά την πειραματική εφαρμογή της ωστε παρατηρήσουμε την ύπαρξη σφαλμάτων θέσης και προσανατολισμού τους. Από εκεί ωστε οδηγηθούμε στο κύριο αντικείμενο της διατριβής, δηλαδή το πώς είναι δυνατό να μειώσουμε το σφάλμα θέσης και προσανατολισμού παρατηρητών για ρομπότ που αισθάνονται το περιβάλλον μέσω lidar, και συγκεκριμένα εδώ του φίλτρου σωματιδίων. Στη συνέχεια ωστε λύσουμε το πρόβλημα του global localisation για αυθαίρετα περιβάλλοντα, χρησιμοποιώντας τον μοχλό στον οποίο βρίσκεται η συμβολή της διατριβής μου, δηλαδή αυτό στο οποίο αναφέρομαι ως ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές σαρώσεις. Αυτό ωστε μας οδηγήσει στην εφεύρεση λύσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κατά τη διάρκεια της κίνησης του αισθητήρα σε γνωστό περιβάλλον, και στο τέλος ωστε γενικεύσουμε αυτές τις μεθόδους και στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει πρότερη γνώση του περιβάλλοντος, για παράδειγμα για την εκτίμηση της οδομετρίας ενός οχήματος.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ To érgo RELIEF: motivation

Τώρα—όλα αυτά που θα δούμε ξεκινάνε από μία πραγματική και εκτεταμένη απάιτηση στην αγορά λιανικών προϊόντων. Εκεί υπάρχουν εταιρείες που πουλάνε τα προϊόντα τους σε καταστήματα, και των οποίων το συνολικό απόθεμα στεγάζεται σε κεντρικές αποθήκες. Εν γένει αυτές οι εταιρείες θα ήθελαν να γνωρίζουν σε καθημερινή βάση το απόθεμά που βρίσκεται στις αποθήκες τους, όμως αυτό είναι τόσο κοστοβόρο ώστε μπορούν να το μετρούν μόνο λίγες φορές μέσα σε ένα οικονομικό έτος. Έπειτα θα ήθελαν επίσης να γνωρίζουν τις θέσεις των προϊόντων τόσο για λόγους γρήγορης ανάκτησης όσο και για λόγους που τους επιβάλλονται από τρίτα μέρη.

To érgo RELIEF: motivation

- Αποθήκες προϊόντων: ανάγνωση για
- ▶ συνεχή απογραφή
  - ▶ γνωστή θέση προϊόντων



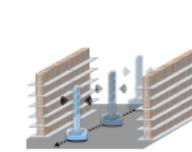
Πηγή: BBC—Aeroscan software built by 'Vattenfall' found cargo ships, <https://www.bbc.com/news/technology-42518275>

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

### └ To érgo RELIEF: η λύση

To érgo RELIEF στο οποίο εργάσθηκα εδώ στο πανεπιστήμιο είχε ως στόχο την κατασκευή μίας σειράς από αυτόνομα ρομπότ τα οποία είναι ικανά να καταγράφουν το απόθεμα μίας αποθήκης και να εκτιμούν τη θέση των εμπορευμάτων μέσω τεχνολογίας RFID, ώστε αυτές οι ενέργειες να γίνονται ακόμα και σε καθημερινή βάση, με ελάχιστη εμπλοκή ανθρώπων. Η πρώτη λοιπόν απαίτηση που τέθηκε για τα επίγεια ρομπότ του έργου ήταν να είναι ικανά να πλοηγούνται αυτόνομα στο χώρο. Η αυτονομία της πλοήγησης είναι κρίσιμη γιατί αφαιρεί την απαίτηση για ακριβό εξωτερικό εξοπλισμό πάνω στον οποίο θα μπορούσε να οδηγείται ένα ρομπότ, ενώ ταυτόχρονα το κάνει εν δυνάμει ικανό να μπορεί να εκτελεί τις ενέργειες του απρόσκοπτα ενώ υπάρχουν γύρω του κινούμενα εμπόδια όπως ανθρώποι ή μηχανήματα.

To érgo RELIEF: η λύση



- Τοποθέτηση RFID επενδύσεων σε πράσινα
- Αυτόνομα επίγεια αρχέτυπα με RFID αναγνώστες

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

- Εξαντλητικός αισθητήρας (lidar, rgl(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  των περιβάλλοντας
- Επικρατησμένη στάσης  $\dot{p}_t$  (μέση EKF/PF)
- Λεγχός συνθήκη στάσης  $p_t^M$
- Τέλος συνθήκη στάσης  $p_{\infty}^M$



Εικόνα αριστερά: ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΑΙΓΑΝΟΥ ΣΤΡΑΤΟΥ

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

Πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας εξωδεκτικός αισθητήρας

Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

- Εξαεροσκόπιος αισθητήρας (lidar, rgl(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  των περιβάλλοντας
- Επικρατησαντής  $\rho_t$  (μέση EKF/PF)
- Λεγόμενη συνθήκη στάσης  $p_0^M$
- Τέλος συνθήκη στάσης  $p_{\infty}^M$



Εικόνα αριστερά: ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΕΧΝΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΙΓΑΙΟΝ ΝΗΣΟΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ. Φωτογραφία από την ιστοσελίδα της ΔΗΠΕΠ.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

Πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας εξωδεκτικός αισθητήρας,

ο χάρτης του περιβάλλοντος στο οποίο πλοηγείται το ρομπότ

- Εξαεροσώματος αισθητήρας (lidar, rgh(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Επιμέρη στάσης  $\dot{p}_t$  (μέσα EKF/PF)
- Λεγχοτ συνθήκη στάσης  $p_t^M$
- Τέλειοι συνθήκη στάσης  $p_t^{M*}$



Εικόνα αριστερά: ΒΙΒΛΙΟΦΟΡΤΙΚΗ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΟΤΥΠΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

Πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας εξωδεκτικός αισθητήρας,

ο χάρτης του περιβάλλοντος στο οποίο πλοιηγείται το ρομπότ,

μία μέθοδος εκτίμησης της στάσης του ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων του χάρτη

- Εξαεροσκόπικοι αισθητήρες (lidar, rgh(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$  (μέσω EKF/PF)
- Λεγχών συνθήκη στάσης  $p_t^M$
- Τέλος συνθήκη στάσης  $p_t^{M^*}$



Εικόνα αριστερά: ΒΙΒΛΙΟΦΟΡΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΤΖΙΑΖΙΤΣ ΛΔΙΑΝΗΣ Λαζαρίδη - Καταστήματα Βιβλίων

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

Πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας εξωδεκτικός αισθητήρας,  
ο χάρτης του περιβάλλοντος στο οποίο πλοιηγείται το ρομπότ,  
μία μέθοδος εκτίμησης της στάσης του ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων του χάρτη,  
μία αρχική στάση

- Εξαιστοποίηση αισθητήρας (lidar, righ(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$  (μέση EKF/PF)
- Λεγχος συνθήκη στάσης  $p_t^M$
- Τέλος συνθήκη στάσης  $p_t^{M_f}$



Εικόνα αρχείου HELPER. Ηλεκτρονικό Σύστημα ΚΛΙΝΙΚΩΝ ΑΙΓΑΙΟΥ



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

Πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας εξωδεκτικός αισθητήρας,  
ο χάρτης του περιβάλλοντος στο οποίο πλοιηγείται το ρομπότ,  
μία μέθοδος εκτίμησης της στάσης του ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων του χάρτη,  
μία αρχική στάση και μία τελική στάση.

- Εξαιστούμενος αισθητήρας (lidar, righ(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$  (μέση EKF/PF)
- Λεγχος συνθήκη στάσης  $p_t^M$
- Τέλος συνθήκη στάσης  $p_t^M$



Εικόνα αρχείου HELPER. Ηλεκτρονικό γραφείο ΥΠΟΙΚΕΠ. ΑΕΙΘ. Ήπηρ Απόρριψη Εντατικών αποτυπώσεων γραμμών

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

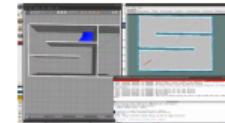
Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

Πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας εξωδεκτικός αισθητήρας,  
ο χάρτης του περιβάλλοντος στο οποίο πλοιηγείται το ρομπότ,  
μία μέθοδος εκτίμησης της στάσης του ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων του χάρτη,  
μία αρχική στάση και μία τελική στάση.

Ως στάση ορίζουμε το διάνυσμα που συνίσταται από τη θέση και τον προσανατολισμό του ρομπότ ως προς  
το σύστημα αναφοράς του χάρτη.

- Εξαντελετικός αισθητήρας (lidar, rgh(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$  (μέσα EKF/PF)
- Λεγχός συνθήκη στάσης  $p_t^M$
- Τέλειος συνθήκη στάσης  $p_{t+1}^M$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



## └ Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά

Δεδομένων αυτών η αυτόνομη πλοήγηση συνίσταται σε δύο μέρη:

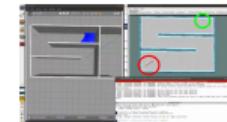
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά

Δεδομένων αυτών η αυτόνομη πλοήγηση συνίσταται σε δύο μέρη:

αφενός χρειάζεται ένας αλγόριθμος που δέχεται τον χάρτη, την αρχική, και τελική στάση  $M$

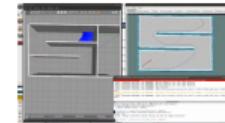
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Συστατικά

Δεδομένων αυτών η αυτόνομη πλοιήγηση συνίσταται σε δύο μέρη:  
αφενός χρειάζεται ένας αλγόριθμος που δέχεται τον χάρτη, και την αρχική και τελική στάση  
και παράγει ένα μονοπάτι το οποίο τις συνδέει χωρίς να τέμνει εμπόδια του χάρτη



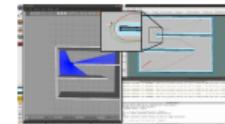
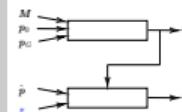
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά

Δεδομένων αυτών η αυτόνομη πλοήγηση συνίσταται σε δύο μέρη:

αφενός χρειάζεται ένας αλγόριθμος που δέχεται τον χάρτη, και την αρχική και τελική στάση και παράγει ένα μονοπάτι το οποίο τις συνδέει χωρίς να τέμνει εμπόδια του χάρτη,

και αφετέρου ένας ελεγκτής κίνησης, ο οποίος, δεδομένου του μονοπατιού, της στιγμιαίας εκτίμησης για τη στάση του ρομπότ, και μετρήσεις από αισθητήρες, παράγει εντολές κίνησης τις οποίες λαμβάνουν ως είσοδο οι κινητήρες του ρομπότ ώστε αυτό να κινείται πάνω στο μονοπάτι που παρήγαγε ο πρώτος αλγόριθμος



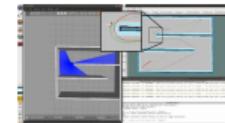
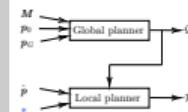
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Συστατικά

Δεδομένων αυτών η αυτόνομη πλοιήγηση συνίσταται σε δύο μέρη:

αφενός χρειάζεται ένας αλγόριθμος που δέχεται τον χάρτη, και την αρχική και τελική στάση και παράγει ένα μονοπάτι το οποίο τις συνδέει στάση χωρίς να τέμνει εμπόδια του χάρτη, και αφετέρου ένας ελεγκτής κίνησης, ο οποίος, δεδομένου του μονοπατιού, της στιγμιαίας εκτίμησης για τη στάση του ρομπότ, και μετρήσεις από αισθητήρες, παράγει εντολές κίνησης τις οποίες λαμβάνουν ως είσοδο οι κινητήρες του ρομπότ ώστε αυτό να κινείται πάνω στο μονοπάτι που παρήγαγε ο πρώτος αλγόριθμος.

Στη σχετική ορολογία ο αλγόριθμος κατασκευής μονοπατιών ονομάζεται global planner, και ο ελεγκτής κίνησης local planner.



## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Η ανάγκη για πειραματική αξιολόγηση του state-of-the-art

Για να υλοποιηθεί το συνολικό σύστημα αυτόνομης πλοήγησης στα πλαίσια του έργου αρχικά στραφήκαμε στη διαθέσιμη λογισμικογραφία, όπου ανακάλυψαμε πως υπήρχαν πολλαπλοί αλγόριθμοι global και local planners.

Global Planners	Local planners		
	dsu	okstd	trb
navfn			
global_planar			
aar_navfn			
NavIt!			
stpl_lattice_planner			
stpl_global_planner			
lattice_planner			
wvpaint_global_planner			
voronoi_planner			

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Η ανάγκη για πειραματική αξιολόγηση του state-of-the-art

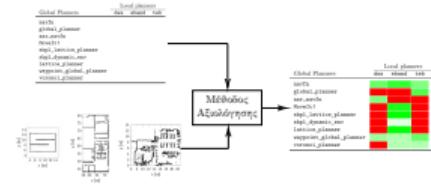
Πουθενα ομως στη διαθεσιμη βιβλιογραφια δεν υπηρχε συγκριτικη αναλυση της συνδυαστικής επιδοσης τους στο έργο της αυτόνομης πλοήγησης ώστε να επιλεχθεί ποιός συνδυασμός θα εκπλήρωνε τους στόχους μας στα πλαίσια του έργου.

Global Planners	Local planners		
	des	obstacles	traj
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sgip_lattice_planner	?	?	?
sgip_dynamis_asr	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
swypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Η ανάγκη για πειραματική αξιολόγηση του state-of-the-art

Συνεπώς αποφασίστηκε πως θα ήταν επωφελής τόσο για το έργο όσο και για άλλους μηχανικούς ρομποτικής ο σχεδιασμός μία μεθόδου αξιολόγησης των διαθέσιμων αλγορίθμων global και local planners και των συνδυασμών τους, την οποία θα χρησιμοποιούσαμε μέσω προσομοιώσεων και πειραμάτων ώστε να καταλήξουμε σε συμπεράσματα για την επίδοση των τρέχοντων διαθέσιμων αλγορίθμων που υλοποιούν αυτόνομη πλοήγηση σε επίγειες κινητές ρομποτικές βάσεις.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Προκαταρκτική αξιολόγηση: ποιοτικά κριτήρια λογισμικού

Αρχικά συγκεντρώσαμε όλα τα διαθέσιμα πακέτα λογισμικού και τα υποβάλλαμε σε αξιολόγηση με βάση ποιοτικά κριτήρια, δηλαδή τα ίδια κριτήρια που θα χρησιμοποιούσε ένας μηχανικός λογισμικού προτού φτάσει στο σημείο να εξετάσει εάν πρακτικά η επίδοση ενός πακέτου είναι επαρκής. Στα αριστερά βρίσκονται τα ονόματα των global και local planners και πάνω στην οριζόντια γραμμή οι συντομογραφίες των ποιοτικών κριτηρίων, όπως εάν το πακέτο διαθέτει τεκμηρίωση, εάν είναι παραμετροποιήσιμο, ή τι ανάγκες έχει σε υπολογιστικούς πόρους. Στο τέλος αυτού του φιλτραρίσματος απέμειναν τρεις αλγορίθμοι χάραξης μονοπατιών και τρεις ελεγκτές κίνησης, οπότε η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε συνολικά εννέα συνδυασμούς αλγορίθμων.

Προκαταρκτική αξιολόγηση: ποιοτικά κριτήρια λογισμικού

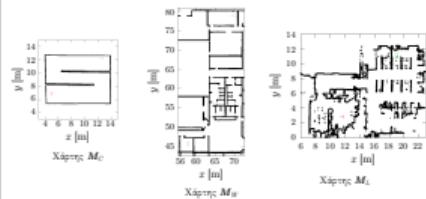
Planner	Βασικές Μητρικές						Αναλογία	
	BOU	UTD	ENST	SC/U	PARAM	CON	COMP	
naive	•	•	•	•	•	•	•	•
global_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
acc_neuro	•	•	•	•	•	•	•	•
MoveIt!	***	•	**	•	•	7	***	•
simple_lattice_planner	**	•	•	•	•	•	•	•
slip_gazebo	•	•	•	•	•	•	•	•
lattice_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
waypoint_global_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
vectornav_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
dsn_local_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
eband_local_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
ted_local_planner	•	•	•	•	•	•	•	•

Αληθινό τοιχίο μεταξύ BOU και ENST δείχνει μεταξύ των δύο μετρητών προστασίας, ότι ανάγκη αποδεικνύεται προτού προχωρήσει στην επόμενη μετρική. Οι αριθμοί μεταξύ των μετρητών παραπέμπουν την ανάγκη αποδεικνύσσεται προτού προχωρήσει στην επόμενη μετρική.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική αξιολόγηση: διάταξη

Πειραματική αξιολόγηση: διάταξη



Η αξιολόγηση κάθε συνδυασμού έγινε σε δύο περιβάλλοντα προσομοίωσης και σε ένα πραγματικό περιβάλλον. Και στις τρεις περιπτώσεις τέθηκε μία αρχική και μία τελική στάση και από κάθε συνδυασμό global και local planners ζητήθηκε να πλοηγήσουν το ρομπότ από την αρχική στην τελική στάση με βάση το μονοπάτι που θα σχεδίαζε ο global planner, και τις εντολές κίνησης του local planner. Κάθε συνδυασμός από planners επανέλαβε αυτή τη διαδικασία 10 φορές σε κάθε περιβάλλον, και κάθε φορά καταγράφηκε ένας αριθμός από μετρικές προκειμένου να γίνει η αξιολόγηση κάθε συνδυασμού, και να υπάρχει ένα κοινό σύστημα χρίσης για όλους, ώστε στο τέλος να προκύψει μία ιεραρχία συνδυασμών.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική αξιολόγηση: μετρικές

Οι μετρικές αυτές είναι τριών ειδών: αφορούν είτε αποκλειστικά στους global planners, όπως για παράδειγμα το μήκος των σχεδιασθέντων μονοπατιών, είτε αποκλειστικά στους local planners όπως για παράδειγμα ο αριθμός αποτυχιών ένρεσης ταχυτήτων προς τον συνολικό αριθμό κλήσεων του ελεγκτή, ή αποκλειστικά στο συνδυασμό τους, όπως για παράδειγμα ο χρόνος πλοήγησης.

### Πειραματική αξιολόγηση: μετρικές

#### Global planners (8 μετρικές)

- ♦ Μήκος μέρους χαραγόθεντων μονοπατίων
- ♦ Μήκος ελάχιστης απόστασης από φρέσκια
- ♦ ...

#### Local planners (8 μετρικές)

- Αριθμός αποτυχιών διάρκετης ταχυτήτων προς συνολικό αριθμό κλήσεων
- ...

#### Global o Local (12 μετρικές)

- ▼ Χρόνος πλοήγησης
- ▼ Ολοκλ. ελάχιστης απόστασης από φρέσκια
- ▼ ...

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική αξιολόγηση: Στόχος

Με βάση τις τιμές των μετρικών που έχουμε καταγράψει, αυτό που θέλουμε στο τέλος είναι να μπορέσουμε να αποδώσουμε μία τιμή σε κάθε συνδυασμό από planners. Τα προβλήματα εδώ είναι δύο: πώς θα δώσουμε μία τιμή όταν οι μετρικές εκφράζονται σε διαφορετικές μονάδες μέτρησης, και πώς θα κατασκευάσουμε μία συνάρτηση απόδοσης αξίας σε κάθε συνδυασμό, η οποία να είναι γνησίως αύξουσα, όταν κάποιες μετρικές συνεισφέρουν σε αξία αναλογικά με την αύξησή τους, ενώ άλλες αντιστρόφως ανάλογα.

- Διαφορετικές μονάδες μέτρησης μετριών
- Κατασκευή  $V(c) \uparrow$  όταν  $c(m_0) \uparrow$  και  $c(m_j) \downarrow$ ,  $m_0 \in Q, m_j \in \overline{Q}, Q \cup \overline{Q} = \text{Univ}$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Κατασκευή συνάρτησης απόδοσης αξίας V

Για να αποκτήσουμε ένα κοινό σύστημα αναφοράς αρχικά κανονικοποιούμε τις τιμές των μετρικών μέσω της συνάρτησης  $N$ , δηλαδή εξετάζουμε την τιμή της μετρικής  $m$  για έναν συνδυασμό και τις ακραίες τιμές της για κάθε συνδυασμό, ώστε στο τέλος η τιμή της να εκφράζεται στο διάστημα  $[0,1]$ . Κατασκευάζουμε την συνάρτηση απόδοσης αξίας για ένα περιβάλλον μέσω της συνάρτησης  $V$ . Εδώ  $w$  είναι ένα βάρος που αποδίδουμε σε κάθε μετρική ώστε να είναι δυνατή η απόδοση μεγαλύτερης ή μικρότερης βαρύτητας ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε αξιολόγησης, και  $I$  είναι η συνάρτηση δείκτης. Για να συνεκτιμήσουμε την αξία των συνιστωσών ενός συνδυασμού ακόμα και όταν η πλοιήγηση ήταν αποτυχημένη, χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση  $I(C,m)$ , η οποία είναι μηδέν μόνο για μετρικές που αφορούν σε συνδυασμό από planners όταν η πλοιήγηση ήταν αποτυχημένη

Κατασκευή συνάρτησης απόδοσης αξίας V

• Κανονικοποίηση πάμιν μετρούς:

$$N(m) \triangleq \frac{m - \min m}{\max m - \min m} \in [0, 1]$$

• Βασικό περιβάλλον/χάρτη  $M$ 

$$V_M(c) \triangleq \sum_m L_Q(m) \cdot V_Q(c, m) + L_{\overline{Q}}(m) \cdot V_{\overline{Q}}(c, m)$$

$$V_Q(c, m) \triangleq w_m \cdot I(c, m) \cdot N(m), \quad m \in Q$$

$$V_{\overline{Q}}(c, m) \triangleq w_m \cdot I(c, m) \cdot (1 - N(m)), \quad m \in \overline{Q}$$

$$I(c, m) \triangleq I_S(c) \parallel I_D(m)$$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αποτελέσματα

Μέσω της V και των τιμών όλων των μετρικών που έχουν καταγραφεί για κάθε πείραμα στο τέλος λαμβάνουμε τα αποτελέσματα του πίνακα, τα οποία εμφανίζουν την αξία κάθε συνδυασμού για κάθε περιβάλλον, και τη συνολική αξία κάθε συνδυασμού με βάση αυτά τα αποτελέσματα. Η εκτέλεση πειραμάτων σε διαφορετικά και διαφορετικής δυσκολίας περιβάλλοντα και με διαφορετικούς αισθητήρες έφερε στο φως το μοτίβο που βλέπετε. Δηλαδή ο καλύτερος local planner είναι ο teb, μετά ο eband, και μετά ο dwa, και δεδομένου ενός local planner ο καλύτερος global planner είναι για όλους τους local planners ο navfn, μετά ο global planner, και μετά ο sbpl.

Αποτελέσματα

global planner	local planner	$V_{M_1}$	$V_{M_2}$	$V_{M_3}$	$V$	Kαλύτερη
navfn	teb	21.41	20.09	18.74	60.15	1
globalplanner	teb	19.29	21.99	16.84	50.03	2
sbpl	teb	20.35	12.27	13.57	46.19	3
navfn	eband	19.05	19.05	18.74	57.85	4
globalplanner	eband	14.70	11.95	14.26	49.93	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	5.56	4.85	6.47	17.88	9

Η απόδειξη πάνω από V σε ημέρες διαστάσεων περιήγησης από ελεύθερη στην επιτρεπτική περιοχή στην οποία διαπλέουν τα περιβάλλοντα.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφαπτό

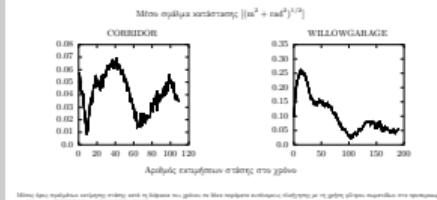
└ Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα  
είναι εφικτό

Αυτό που είναι σήμερα δυνατόν που δεν ήταν πριν αυτή τη μελέτη, είναι καταρχάς η ύπαρξη μίας περιεκτικής και επεκτάσιμης μεθοδολογίας αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομης πλοιήγησης. Έπειτα ένας μηχανικός ρομποτικής που έχει αντικείμενο την αυτόνομη πλοιήγηση μπορεί να προσδιορίσει τα δικά του κριτήρια με βάση διαφορετικές απαιτήσεις δίνοντας διαφορετικά βάρη στη συνεισφορά της κάθε μετρικής. Και τέλος, υπάρχει πλέον το υπόβαθρο για την αξιολόγηση οποιοασδήποτε νέας μεθόδου, είτε χαράσσει μονοπάτια, είτε είναι ελεγκτής κίνησης, και σε οποιοδήποτε περιβάλλον.

- Επεκτόπιμη μεθοδολογία αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομης πλοιήγησης
- Προσαρμογή αξιολόγησης σε είδους μεταθέσεις ( $w_m \neq 1.0$ )
- Ενεπαρχίαση οπουνανθήστε μεθόδου & ad hoc περιβαλλόντων

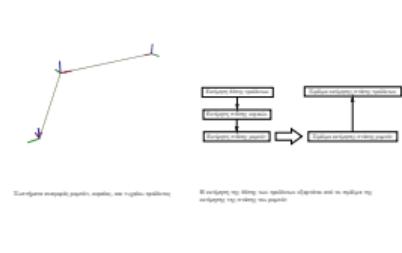
J. Flöcken, E. Tsakalos, A. Dimakos, A. Spyrosidis, L. Petrou, "Quantitative and qualitative evaluation of RGB-enabled local and global planners in 3D static environments", Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2020

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



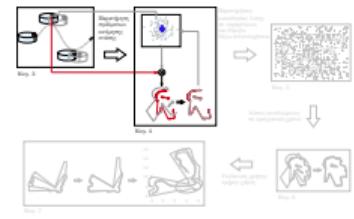
Κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι η εκτίμηση της στάσης εμφάνιζε σφάλματα παρατηρήσιμα ακόμα και με γυμνό μάτι. Σε αυτή τη διαφάνεια βλέπουμε την εξέλιξη του μέσου σφάλματος εκτίμησης στάσης στα δύο προσομοιωμένα περιβάλλοντα, το οποίο δεν εμφανίζει σταθερό μέτρο ούτε στην πορεία του χρόνου ούτε ανά περιβάλλον. Το μέτρο του σφάλματος εδώ μετριέται σε εκατοστά γιατί η στάση του ρομπότ υπόκειται σε εκτίμηση και όχι μέτρηση, δηλαδή το ρομπότ εκτίμα το ίδιο τη στάση του μέσω των αισθητήρων του.

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



Σε γενικές γραμμές το <sup>antenna</sup><sub>frame</sub> φαντόμενο του σφάλματος στάσης είναι φυσιολογικό λόγω της χρήσης παρατηρητή για την εκτίμηση της, όμως στην περίπτωση του έργου RELIEF αυτό το σφάλμα κληροδοτείται στο σφαλμα θέσης των προϊόντων, καθώς η εκτίμηση της θέσης τους προκύπτει μέσω της εκτίμησης της στάσης των κεραιών που φέρει το ρομπότ, οι οποίες με τη σειρά τους είναι μετασχηματισμοί της εκτίμησης της στάσης <sup>base</sup><sub>pose</sub> του robotprint

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



Έτσι περνάμε στο επόμενο πρόβλημα, το οποίο είναι το πρόβλημα της ελάττωσης του σφάλματος εκτίμησης στάσης παρατηρητών, όπου συγκεκριμένα εστιάζουμε σε φίλτρα σωματιδίων που χρησιμοποιούν αισθητήρες lidar.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης στάσης ωίτων σωματιδίων

Εδώ χρησιμοποιούμε το φίλτρο σωματιδίων διότι είναι περισσότερο ευέλικτο και επιδεκτικό στη βελτίωση. Στη διαθέσιμη βιβλιογραφία υπάρχουν δύο μέθοδοι ελάττωσης του σφάλματος εκτίμησής του: η προσθετική ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων με εικονικές σαρώσεις, και η ανατροφοδότηση του αποτελέσματος στον πληθυσμό του φίλτρου. Η συμβολή μου σε αυτό το κεφάλαιο αφορά στη δεύτερη μέθοδο, ενώ εισάγω και μία ακόμη, αυτήν της διαλογής σωματιδίων.

- πρωτεινής ευθυγράμμισης πραγματικών σφάλματων με εικονικές
- ανατροφοδότησης
- ιεράρχης σωματιδίων

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω διαλογής σωματιδίων

Όσο αφορά στην εκτίμηση της στάσης ενός οχήματος, όλοι οι πιθανοτικοί παρατηρητές στη ρομποτική εκτιμούν τη στάση του, με βάση το μοντέλο παρατήρησης του αισθητήρα που φέρει το όχημα, και του κινηματικού μοντέλου του. Το φίλτρο σωματιδίων χρησιμοποιεί πολλαπλές υποθέσεις στάσης, και η τελική του εκτίμηση προκύπτει ως ο μέσος όρος των στάσεων αυτών των υποθέσεων, βεβαρυμένος κατά το βάρος της κάθε μίας. Ως βάρος εδώ νοείται η πιθανότητα παρατήρησης μίας δεδομένης μέτρησης από τη στάση της κάθε υπόθεσης, η οποία ποσοτικοποιείται από το μοντέλο παρατήρησης, και συνεπώς υποθέσεις των οποίων το σφάλμα είναι μικρότερο από άλλες εμφανίζουν μεγαλύτερο βάρος, και άρα επηρεάζουν περισσότερο την τελική εκτίμηση.

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω διαλογής σωματιδίων

Εκτίμηση στάσης  $\hat{p} = [\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{\theta}]^\top$

$$p(\hat{p}_t | z_{1:t}, u_{1:t}, M) \propto \underbrace{p(z_t | p_t)}_{\text{Μοντέλο παρατήρησης}} \int p(\hat{p}_t | \hat{p}', u_t) \cdot p(\hat{p}' | z_{1:t-1}, u_{1:t-1}, M) d\hat{p}'$$

• Πληθυσμός υποθέσεων  $\mathcal{P} = \{(\hat{p}', u')\}$

• Βάρος σωματιδίου είναι  $w' = p(z| \hat{p}')$

• Τελική εκτίμηση:  $\hat{p}(\mathcal{P}) = \frac{\sum w' \cdot \hat{p}'}{\sum w'}$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω διαλογής σωματιδίων

Με βάση αυτον τον συλλογισμό τυποποιούμε την πρώτη υπόθεση, η οποία εν ολίγοις αναφέρει ότι εάν για την εξαγωγή της εκτίμησης του φίλτρου χρησιμοποιηθεί, όχι όλος ο πληθυσμός, αλλά ένα υποσύνολο του, το οποίο περιέχει τα πιο βαρέα του σωματιδία, τότε αναμένουμε η εκτίμηση του να έχει χαμηλότερο σφάλμα.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω sm2

Ευθυγράμμιση πραγματικών σφάλματων με εικονικές σφάλματα γάρτη (sm2<sup>1</sup>)  
Ευθυγράμμιση πραγματικών σφάλματων (sm)

## └ Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω sm2

Ένας δέυτερος τρόπος με τον οποίον μπορεί να ελαττωθεί το σφάλμα ενός παρατηρητή για οχήματα που φέρουν αισθητήρα lidar είναι μέσω ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές σαρώσεις, όπου με τον όρο σάρωση αναφερόμαστε σε μία μέτρηση του αισθητήρα. Αυτή η μέθοδος θα μας ακολουθήσει σε όλη την υπόλοιπη έρευνά μου, και για λόγους οικονομίας θα αναφέρομαι σε αυτήν συντομογραφικά ως sm2. Η τεχνική sm2 είναι υποσύνολο της γενικής μεθόδου ευθυγράμμισης πραγματικών σαρώσεων, στην οποία θα αναφέρομαι είτε ως scan-matching είτε ως σκέτο sm.

└ scan-to-ground matching → sm2 → sm  
└ scan-matching → sm

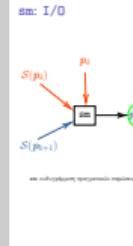
## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων (sm)  $\mathcal{S}(p_k)$   $\mathcal{S}(p_{k+1})$   $\Delta p = sm(\mathcal{S}(p_k), \mathcal{S}(p_{k+1}))$

Η τεχνική scan-matching υποθέτει έναν αισθητήρα lidar ο οποίος συλλαμβάνει από δύο διαφορετικές στάσεις δύο διαφορετικές σαρώσεις, όπως στο σχήμα που απεικονίζεται στα αριστερά. Στη μέση βλέπουμε τη διαδικασία ευθυγράμμισης των δύο αυτών σαρώσεων, και στα δεξιά σε εστίαση την εξέλιξη της εκτίμησης της δεύτερης στάσης του ρομπότ στο σύστημα αναφοράς της πρώτης σάρωσης. Η ευθυγράμμιση δύο σαρώσεων έχει ως στόχο τον υπολογισμό εκείνου του μετασχηματισμού που όταν εφαρμοσθεί στα σημεία της πρώτης σάρωσης θα τα κάνει να συμπέσουν στα σημεία της δεύτερης με το ελάχιστο σφάλμα, και αυτός ο μετασχηματισμός είναι ο ίδιος που εκφράζει τη στάση από την οποία συνελήφθη η δεύτερη σάρωση στο σύστημα αναφοράς που ορίζει η πρώτη. Για αυτό το λόγο η ευθυγράμμιση σαρώσεων είναι θεμελιώδες κομμάτι της ρομποτικής κινητής βάσης, και χρησιμοποιείται κατά κόρον για την εκτίμηση της οδομετρίας ενός οχήματος.

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

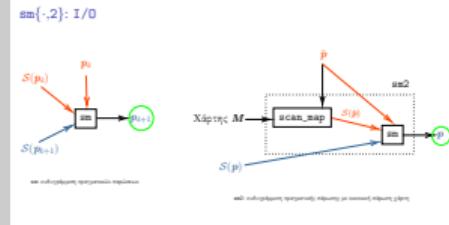
└ sm: I/O



Με άλλα λόγια εάν διαθέτουμε δύο σαρώσεις και γνωρίζουμε τη στάση από την οποία συνελήφθη μία από τις δύο: η ευθυγράμμιση σαρώσεων μπορεί να εκτιμήσει την άγνωστη στάση από την οποία συνελήφθη η άλλη.

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

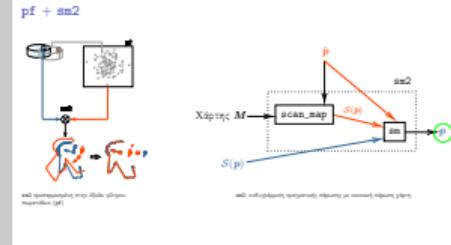
└ sm{·,2}: I/O



Σε αυτό το γεγονός κρύβεται μία δεύτερη χρησιμότητα της ευθυγράμμισης σαρώσεων. Εάν αντικαταστήσουμε τη μία από τις δύο μετρήσεις με μία εικονική σάρωση, δηλαδή με μία σάρωση που προσομοιώνει την αρχή λειτουργίας του lidar στο χάρτη αντί για το περιβάλλον, η οποία υπολογίζεται από την εκτίμηση της στάσης του ρομπότ, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε το μετασχηματισμό ανάμεσα στην εκτίμηση και την άγνωστη πραγματική στάση του ρομπότ, και αφού γνωρίζουμε την εκτίμηση, μπορούμε να υπολογίσουμε την πραγματική του στάση.

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

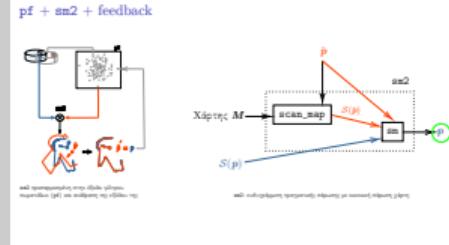
└ pf + sm2



Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να προσαρμόσουμε τη μέθοδο sm2 στην έξοδο του φίλτρου σωματιδίων, όπου λόγω ύφορύβου μέτρησης και ατελούς αναπαράστασης του χάρτη σε σχέση με το περιβάλλον, η τελική έξοδος της μεθόδου sm2 φέρει και αυτή σφάλμα, και συνεπώς αποτελεί μία **δεύτερη** εκτίμηση.

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ pf + sm2 + feedback



Αυτή η δεύτερη εκτίμηση είναι μία υπόθεση για την οποία το ίδιο το φίλτρο δεν έχει γνώση, και συνεπώς θα ήταν ωφέλιμο, εάν η υπόθεση φέρει όντως μικρότερο σφάλμα, να εισαχθεί στον πληθυσμό του, ώστε το σφάλμα του ίδιου του φίλτρου να μειωθεί.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

- Ανάδοση με τη μηρή μεταβάσεις απόστασης  
→ αργή σύγκλιση / αυξημένα σφάλματα

## └ Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδοσης εξόδου sm2

Κατά μία μέθοδο της βιβλιογραφίας, η υπόθεση που παράγεται μέσω sm2 εισάγεται στον πληθυσμό του φίλτρου ως ένα, διαχριτό σωματίδιο, το οποίο σε έναν πληθυσμό αρκετών εκατοντάδων σωματιδίων έχει μεν επίδραση, αλλά σχεδόν αμελητέα. <CLICK>

Κατά μία άλλη μέθοδο η εκτίμηση της sm2 αντικαθιστά τον πληθυσμό του φίλτρου στο σύνολό του. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου εξαρτάται αποκλειστικά από την επιτυχία της ευθυγράμμισης, η οποία δεν είναι εγγυημένη, και μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφική αποτυχία της συνέχειας της εκτίμησης της στάσης του ρομπότ, και συνεπώς και της ασφάλειας της πλοήγησης. <CLICK>

Μπορούμε να ελαττώσουμε το σφάλμα εκτίμησης χωρίς να επιφέρουμε αυτές τις παρενέργειες εάν εισάγουμε το αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης στον πληθυσμό του φίλτρου ως πολλαπλά σωματίδια αλλά σε πληθικότητα μικρότερη από τον πληθυσμό του φίλτρου. Τότε αυτό θα έχει θεωρητικά ως αποτέλεσμα πιο γρήγορη σύγκλιση σε σχέση με την περίπτωση που το εισάγαμε ως ένα σωματίδιο, χωρίς ταυτόχρονα να διωκινδυνεύεται σε περίπτωση αποτυχίας της ευθυγράμμισης η ανθεκτικότητα του φίλτρου, γιατί το ίδιο θα συνεχίσει να περιέχει υποθέσεις που εξηγούν καλύτερα τις μετρήσεις από αυτές που έχουν καταλήξει σε λανθασμένες τοποθεσίες. <CLICK>

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

- ▲ Ανάδοση με τη μηρή βασικής ανάθεσης  
→ αρχή σύγκλιση / αμελητά συμβαλλει
- ▲ Εξ απολαύσεων αρχαιοελληνικών γραμμάτων  
→ απόλειτα ανθεκτικότερες σε περίπτωση απογραφας sm2

## └ Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδοσης εξόδου sm2

Κατά μία μέθοδο της βιβλιογραφίας, η υπόθεση που παράγεται μέσω sm2 εισάγεται στον πληθυσμό του φίλτρου ως ένα, διαχριτό σωματίδιο, το οποίο σε έναν πληθυσμό αρκετών εκατοντάδων σωματιδίων έχει μεν επίδραση, αλλά σχεδόν αμελητέα. <CLICK>

Κατά μία άλλη μέθοδο η εκτίμηση της sm2 αντικαθιστά τον πληθυσμό του φίλτρου στο σύνολό του. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου εξαρτάται αποκλειστικά από την επιτυχία της ευθυγράμμισης, η οποία δεν είναι εγγυημένη, και μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφική αποτυχία της συνέχειας της εκτίμησης της στάσης του ρομπότ, και συνεπώς και της ασφάλειας της πλοήγησης. <CLICK>

Μπορούμε να ελαττώσουμε το σφάλμα εκτίμησης χωρίς να επιφέρουμε αυτές τις παρενέργειες εάν εισάγουμε το αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης στον πληθυσμό του φίλτρου ως πολλαπλά σωματίδια αλλά σε πληθυκότητα μικρότερη από τον πληθυσμό του φίλτρου. Τότε αυτό θα έχει θεωρητικά ως αποτέλεσμα πιο γρήγορη σύγκλιση σε σχέση με την περίπτωση που το εισάγαμε ως ένα σωματίδιο, χωρίς ταυτόχρονα να διακινδυνεύεται σε περίπτωση αποτυχίας της ευθυγράμμισης η ανθεκτικότητα του φίλτρου, γιατί το ίδιο θα συνεχίσει να περιέχει υποθέσεις που εξηγούν καλύτερα τις μετρήσεις από αυτές που έχουν καταλήξει σε λανθασμένες τοποθεσίες. <CLICK>

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδοσης εξόδου sm2

Κατά μία μέθοδο της βιβλιογραφίας, η υπόθεση που παράγεται μέσω sm2 εισάγεται στον πληθυσμό του φίλτρου ως **ένα, διαχριτό σωματίδιο**, το οποίο σε έναν πληθυσμό αρκετών εκατοντάδων σωματιδίων έχει μεν επίδραση, αλλά σχεδόν αμελητέα. <CLICK>

Κατά μία άλλη μέθοδο η εκτίμηση της sm2 αντικαθιστά τον πληθυσμό του φίλτρου στο σύνολό του. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου εξαρτάται αποκλειστικά από την επιτυχία της ευθυγράμμισης, η οποία δεν είναι εγγυημένη, και μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφική αποτυχία της συνέχειας της εκτίμησης της στάσης του ρομπότ, και συνεπώς και της ασφάλειας της πλοήγησης. <CLICK>

Μπορούμε να ελαττώσουμε το σφάλμα εκτίμησης χωρίς να επιφέρουμε αυτές τις παρενέργειες εάν εισάγουμε το αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης στον πληθυσμό του φίλτρου ως πολλαπλά σωματίδια αλλά σε πληθυκότητα μικρότερη από τον πληθυσμό του φίλτρου. Τότε αυτό θα έχει θεωρητικά ως αποτέλεσμα πιο γρήγορη σύγκλιση σε σχέση με την περίπτωση που το εισάγαμε ως ένα σωματίδιο, χωρίς ταυτόχρονα να διωκινδυνεύεται σε περίπτωση αποτυχίας της ευθυγράμμισης η ανθεκτικότητα του φίλτρου, γιατί το ίδιο θα συνεχίσει να περιέχει υποθέσεις που εξηγούν καλύτερα τις μετρήσεις από αυτές που έχουν καταλήξει σε λανθασμένες τοποθεσίες. <CLICK>

- ▲ Ανάδοση με τη μορφή μονάδων ανθεκτικής αρχής σύγκλιση / αμελητέα σφάλματα
- ▲ Εξ απολαύσεων αρχαιοποίηση του γάμου τρού → απόλετα ανθεκτικότητας σε περίπτωση απονομής sm2
- ▲ Ανάδοση με τη μορφή πολλαπλών υποθέσεων → πρήγματι σύγκλιση και διευθύνηση ανθεκτικότητας

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω  
ανάδοσης εξόδου sm2

Με βάση αυτά συντάσσουμε άλλες δύο υποθέσεις. Η πρώτη είναι ότι το αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης της πραγματικής σάρωσης από το lidar και της εικονικής σάρωσης από την εκτιμώμενη στάση του φίλτρου έχει μικρότερο σφάλμα από την εκτίμηση του φίλτρου. Η δεύτερη αφορά στην ανάδραση αυτής της εκτίμησης, και λέει ότι εάν το αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης εισαχθεί στον πληθυσμό του φίλτρου ως μία πλειάδα σωματιδίων, τότε, εάν στέκει η προηγούμενη υπόθεση, το σφάλμα εκτίμησης θα είναι χαμηλότερο από το σφάλμα του ονομαστικού φίλτρου, χαμηλότερο από το σφάλμα του φίλτρου εάν η υπόθεση εισάγετο ως μόνο ένα σωματίδιο, και ο πληθυσμός του φίλτρου θα είναι πιο ανθεκτικός σε σχέση με τον πληθυσμό του εάν ο αυτός αρχικοποιείτο κάθε φορά με το αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης.

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδρασης εξόδου sm2

Έστω  $\mathcal{P} = \{(\hat{\mu}_i, m_i)\}$  ο συνολικός πληθυσμός του φίλτρου και  $\hat{\mu}^* \leftarrow \text{sm2}(S(\mathcal{P}), \mathbf{M}, \hat{\mu}(\mathcal{P}))$ . Τότε

Τούλιπη Τ2:

$$\|\hat{\mu} - \hat{\mu}^*\| < \|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P})\|$$

Τούλιπη Τ3:

Εάν  $\mathcal{P}^* = \mathcal{P} \cup \{\hat{\mu}^*\}_{q \in [\mathcal{P}^*]}$ , δύος  $q \gg 0.01$  και  $q \ll 1.0$ :

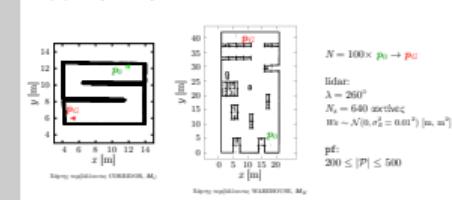
- $\|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P}^*)\| < \|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P})\|$
- $\|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P}^*)\| < \|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P} \cup \{\hat{\mu}^*\}_1)\|$
- $\mathcal{P} \cup \{\hat{\mu}^*\}_{q \in [\mathcal{P}^*]}$  ποι ανθεκτικός από  $\mathcal{P} \cup \{\hat{\mu}^*\}_{[\mathcal{P}^*]}$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική διάταξη

Για να δοκιμάσουμε τις τρεις υποθέσεις χρησιμοποιούμε δύο προσομοιωμένα περιβάλλοντα, ένα απλό, και ένα που ομοιάζει σε αποθήκη, δηλαδή το αναμενόμενο περιβάλλον των ρομπότ που κατασκευάσαμε για το έργο RELIEF. Για κάθε περίπτωση διαλογής σωματιδίων και μεθόδου ανάδρασης, από το ρομπότ ζητήθηκε να πλοηγηθεί αυτόνομα από μία αρχική σε μία τελική στάση 100 διαφορετικές φορές. Το ρομπότ φέρει έναν αισθητήρα lidar γωνιακού εύρους 260 μοιρών, με θόρυβο μέτρησης κανονικά κατανεμημένο με τυπική απόκλιση ένα εκατοστό. Ο πληθυσμός του φίλτρου είναι κυμαινόμενος με ελάχιστη πληθυκότητα 200 σωματίδια, και μέγιστη 500.

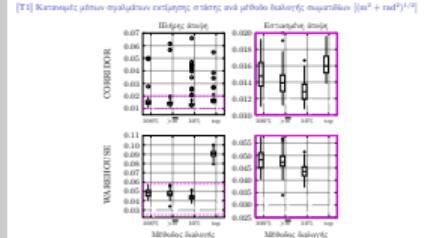
Πειραματική διάταξη



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ [Υ1] Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο διαλογής σωματιδίων

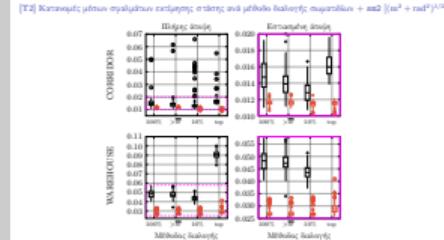
Σε αυτή τη διαφάνεια βλεπουμε τις κατανομές των μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά διαδρομή για 100 επαναλήψεις σε κάθε περιβάλλον, ανά μέθοδο διαλογής, σε πλήρη άποψη στα αριστερά και σε εστίαση στα δεξιά. Με τη συντομογραφία 100% εννοούμε την ονομαστική κατάσταση του φίλτρου, της οποίας το σφάλμα είναι κατά μέσο όρο μεγαλύτερο από την κατάσταση που σημαίνουμε με μεγαλύτερο από μέσο W, η οποία είναι η κατάσταση όπου επιλέγονται να φηφίσουν μονο εκείνα τα σωματίδια των οποίων το βάρος είναι μεγαλύτερο από το μέσο βάρος του πληθυσμού, της οποίας το σφάλμα είναι με τη σειρά του μεγαλύτερο από εκείνη τη διαφόρφωση που σημαίνουμε με 10%, κατά την οποία μόνο το 10% των βαρύτερων σωματιδίων φηφίζουν. Το αντιδιαισθητικό σε αυτά τα πειράματα είναι πως η κατάσταση όπου η εκτίμηση διαμορφώνεται από το σωματίδιο που εμφανίζει το μεγαλύτερο βάρος, η οποία σημαίνεται με τη λέξη τοπ, δηλαδή η εκτίμηση που εξηγεί την τρέχουσα μέτρηση στο μεγαλύτερο βαθμό με βάση το μοντέλο παρατήρησης, εμφανίζει το μεγαλύτερο σφάλμα ανάμεσα σε όλες τις διαμορφώσεις. Το συμπέρασμα που αντλούμε από αυτά τα αποτελέσματα είναι ότι ναι μεν επιβεβαιώνεται η υπόθεσή μας, αλλά η βελτίωση είναι μικρή, και έχει ένα οριακό σημείο ως προς τον αριθμό των πιο βαρέων σωματιδίων που επιλέγονται.



## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ [Υ2] Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης  
στάσης ανά μέθοδο διαλογής σωματιδίων + sm2

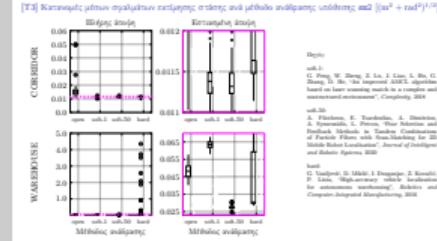
Σε αυτή τη διαφάνεια με κόκκινο φαίνονται τα σφάλματα του αποτελέσματος της μεθόδου sm2 για κάθε μέθοδο διαλογής, τα οποία είναι κατά μέσο όρο στο σύνολό τους χαμηλότερα από εκείνα των εκτιμήσεων του φίλτρου.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ [Υ3] Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο ανάδρασης υπόθεσης sm2

και σε αυτή τη διαφάνεια βλέπουμε τα μέσα σφάλματα ανά μέθοδο ανάδρασης. Εδώ με open συμβολίζουμε την open-loop κατάσταση, δηλαδή και πάλι την ονομαστική κατάσταση του φίλτρου, με soft-1 τη διαμόρφωση όπου το αποτέλεσμα του sm2 εισάγεται στον πληθυσμό του φίλτρου με τη μορφή ενός μόνο σωματιδίου, με soft-50 τη διαμόρφωση όπου η νέα εκτίμηση εισάγεται στον πληθυσμό με τη μορφή τόσων σωματιδίων όσων να αποτελούν το 50% του τελικού πληθυσμού, και hard τη διαμόρφωση όπου το φίλτρο αρχικοποιείται εκ του μηδενός γύρω από το αποτέλεσμα του sm2. Εδώ βλέπουμε πως η μέθοδος που εισάγαμε εμφανίζει κατά μέσο όρο τα χαμηλότερα σφάλματα, και πως είναι πιο ανθεκτική από τη μέθοδο hard.



- σημ.2:  
G. Peng, W. Zhou, Z. Lin, J. Liou, S. Bo, G. Zhang, "A fast adaptive algorithm based on laser scanning matrix in a complex environment", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2013.  
σημ.3:  
A. Filatovas, E. Tzortzinis, A. Dimassis, A. Paliogianni, "Methods in Random Contexts and their Application to Lidar Data Processing for 3D Mobile Robot Localization", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2013.  
σημ.4:  
G. Vandeborre, D. Maki, I. Draganescu, Z. Kováčik, R. Vondrák, "A novel approach for lidar data processing for autonomous navigation", *Sensors and Computer Integrated Manufacturing*, 2010.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφετό

- Ελάττωση σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ψηλήρου σωματιδίων μέσω
  - διεύρυνσης σωματιδίων
  - ανάληψης αποτελέσματος από χαράς απώλεια ανθεκτικότητας για

└ Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα  
είναι εφετό

Τί είναι σήμερα δυνατόν που δεν ήταν πριν από αυτή την έρευνα; Το κύριότερο είναι ότι σήμερα μπορούμε να εγγυηθούμε τη μείωση των σφαλμάτων ενός φίλτρου σωματιδίων με δύο διαφορετικούς τρόπους, και χωρίς να διακινδυνεύσουμε την ανθεκτικότητά του. Εδώ ο τρόπος ανάδρασης που εισάγαμε είναι καυθοριστικός γιατί η ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές σαρώσεις δεν είναι πάντα επιτυχής, όπως είδαμε από τα αποτελέσματα της μεθόδου ανάδρασης hard. Το οποίο εγείρει το φυσικό ερώτημα:

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

Παράμετροι

Θέρμανση

### └ Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

ποιός ο λόγος αυτής της αποτυχίας των μεθόδων ευθυγράμμισης σαρώσεων? Εκ πρώτης όψεως τα τρωτά σημεία τους είναι η ευαισθησία της λύσης στη ρύθμιση των παραμέτρων και στον θόρυβο.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: παραμετροποίηση

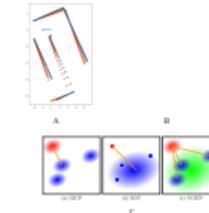
Το πρόβλημα με την παραμετροποίηση που αφορά τουλάχιστον στη μέθοδο που παρήγαγε τα αποτελέσματα μου μόλις είδαμε, η οποία είναι μάλιστα η καλύτερη μέθοδος στη βιβλιογραφία, είναι ότι δεν είναι διαισθητική διαδικασία, ότι μικρές μεταβολές των τιμών των παραμέτρων παράγουν δυσανάλογα μεγάλες μεταβολές στην έξοδο, και ότι για κάποιες παραμέτρους δεν υπάρχουν τιμές που να μπορούν να καλύψουν όλες τις στάσεις σε ένα περιβάλλον.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης



- Α: Σημεία πριν σημείωσε ICP στη σημείωση
- Β: Σημεία πριν επιλύγησε τρέμα (θέρι)
- Γ: (a) Κατανομή πριν κατανομή, (b) Επίπεδη πριν κατανομή, (c) Κατανομή πριν κατανομή

- Διαβολοποιηση:
- Α: Διαβολοποιηση πριν Regressor διαβολοποιησης εργαζεται λεπτομερεία?
- Β: Α: CEP: The CEP metric using a point-to-line matching algorithm for point-to-point registration.
- Γ: Α: CEP: The CEP metric using a point-to-line matching algorithm for point-to-point registration.

Δεν είναι τυχαίο πως αυτά τα προβλήματα εμφανίζονται για τις παραμέτρους που αφορούν στη διαδικασία εύρεσης αντιστοιχίσεων ανάμεσα στις ακτίνες των σαρώσεων εισόδου. Αν ψάξει κανείς τη βιβλιογραφία θα ανακαλύψει μάλιστα ότι δεν υπάρχει μέθοδος ευθυγράμμισης που να μην χρησιμοποιεί κάποιου είδους μηχανισμό αντιστοίχισης ο οποίος—τι κάνει?—προσπαθεί να εκτιμήσει την αντιστοίχιση σημείων ή κατανομών σημείων της μίας σάρωσης προς σημεία, ευθύγραμμα τμήματα, ή κατανομές της άλλης.

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



### └ Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

Και εδώ φτάνουμε στο δεύτερο τρωτό σημείο, το οποίο αφορά σε όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης της βιβλιογραφίας, επειδή ακριβώς όλες χρησιμοποιούν αυτόν το μηχανισμό: δηλαδή το πρόβλημα του θορύβου μέτρησης.

Εδώ το πρόβλημα δεν είναι μόνο ότι δυσχεραίνεται η διαδικασία διάκρισης αληθών από ψευδείς αντιστοιχίσεις, αλλά ότι αυτή η διάκριση καθίσταται ατελής λόγω παρουσίας θορύβου.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: κενές αντιστοιχίες

Ταυτόχρονα, ακόμα και αν υποθέσουμε ιδανικές συνθήκες, η ίδια η διαδικασία εύρεσης αντιστοιχίεων καθίσταται πιθανά προβληματική γιατί ακόμα και αν οι σαρώσεις έχουν εύρος 360 μοίρες, δεν υπάρχει εγγύηση ότι όλα τα σημεία της μίας σάρωσης θα αντιστοιχούν σε όλα τα σημεία της δεύτερης, όπως βλέπουμε σε αυτή τη διαφάνεια. Εδώ και στις δύο εικόνες ευθυγραμμίζουμε τη σάρωση με μπλε στη σάρωση με κόκκινο, και ευθυγραμμίζουμε τις ίδιες δύο σαρώσεις, αλλά μεταβάλλουμε το ποιά σάρωση ευθυγραμμίζεται σε ποιά. Στα δεξιά, σε αντίθεση με την ευθυγράμμιση στα αριστερά, η σάρωση με μπλε αποτελείται από σημεία που λείπουν από την άλλη, και συνεπώς υπάρχουν κενές αντιστοιχίες, οι οποίες οδηγούν στη αποτυχία της ευθυγραμμισης

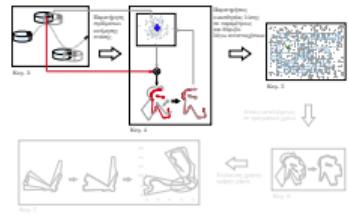
## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

### └ Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

Εν ολίγοις το συμπέρασμά μου είναι ότι το πιο τρωτό σημείο των μεθόδων ευθυγράμμισης σαρώσεων όλης της βιβλιογραφίας είναι ο ίδιος ο μηχανισμός εύρεσης αντιστοιχίσεων.



## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



Για αυτό το λόγο ξεκινάμε να ερευνούμε τρόπους με τους οποίους θα ήταν δυνατή η ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές σαρώσεις χωρίς την εύρεση αντιστοιχίσεων ανάμεσα τους.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Απόπειρα λύσης sm2 δίχως αντιστοιχίσεις

- Αναγκαία συνθήρη:  $\lambda = 2\pi \text{ rad}$
- Παραπομπή:  $L_{\text{out}} \neq L_{\text{in}}$

Εδώ καταρχάς αναζητούμε τις συνθήκες εκείνες κάτω από τις οποίες είναι δυνατόν απλά να είναι επιτυχής η ευθυγράμμιση, και καταλήγουμε πως πρώτα από όλα μία αναγκαία συνθήκη είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των σημείων που είναι ορατά από μία σάρωση αλλά όχι από την άλλη, δηλαδή είναι αναγκαίο το γωνιακό εύρος όρασης του αισθητήρα να είναι 360 μοίρες. Έπειτα, επειδή ακριβώς το πρόβλημα της ευθυγράμμισης χωρίς την εύρεση αντιστοιχίσων, αν είναι επιλύσιμο, είναι καινοφανές, στόχος μας είναι να εστιάσουμε στην επι της αρχής λύση του, δηλαδή χωρίς χρονικούς περιορισμούς.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Απόπειρα λύσης sm2 δίχως αντιστοιχίσεις

Το μεγάλο πρόβλημα εδώ όμως είναι ότι δεν μπορούμε να πατήσουμε στη βιβλιογραφία της ευθυγράμμισης σαρώσεων γιατί ακριβώς όλες οι μέθοδοι της λύνουν το πρόβλημα μέσω εύρεσης αντιστοιχίσεων. Το ζητούμενο εδώ είναι η εύρεση δύο μεθόδων: μίας που θα αναλάβει τη λύση του προβλήματος της εκτίμησης της περιστροφής του συνόλου σημείων της μίας σάρωσης ως προς αυτά της δεύτερης, και μίας που αφορά στην εκτίμηση της μετατόπισης τους.

## Προβλήματα:

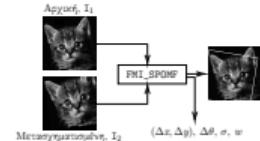
- Απούσα βιβλιογραφία στο συντριβέ πεδίο
- Εύρεση μεθόδου(ουλων) εκλήρησης θέσης και προσανατόλιμπου

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από  
ευθυγράμμιση εικόνων:

Μέσα από την αναζήτησή μας βρήκαμε τη μέθοδο FMI-SPOMF, η οποία χρησιμοποιείται στον κλάδο της υπολογιστικής όρασης για την εκτίμηση ανάμεσα σε δύο εικόνες της μετατόπισης τους, της γωνίας περιστροφής τους, της κλιμάκωσης τους, και του βαθμού ομοιότητάς τους.

Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων:  
FMI\_SPOMF [1]: Fourier-Mellin invariant (descriptor using) Symmetric Phase-Only Matched Filtering

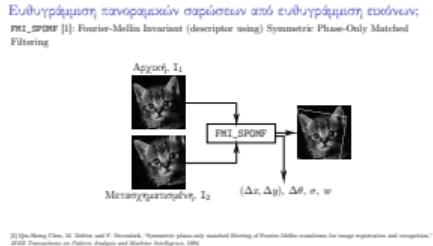


[1] Qia-Meng Chen, M. Ullah and F. Devernay, "Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από  
ευθυγράμμιση εικόνων:

Αυτές οι παράμετροι υπολογίζονται με κλειστό τρόπο και χωρίς να υπολογίζονται αντιστοιχίσεις ανάμεσα στις δύο εικόνες.



$$Q(u, v) = \frac{\mathcal{F}\{I_1\}^* \cdot * \mathcal{F}\{I_2\}}{|\mathcal{F}\{I_1\}| \cdot |\mathcal{F}\{I_2\}|}$$

$$q(\theta, \lambda) = \mathcal{F}^{-1}\{Q\}$$

$$\Delta\theta = \arg \max_{\theta} q$$

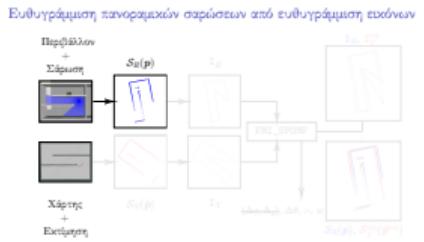
$$\sigma = \exp \arg \max_{\lambda} q$$

$$w = \max q$$

Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

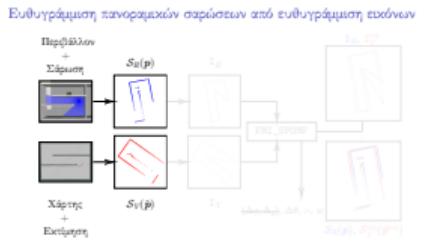
Ας υποθέσουμε λοιπόν πως έχουμε στη διάθεσή μας μία πανοραμική σάρωση  $S_R$ , το χάρτη του περιβάλλοντος, και μία εκτίμηση για τη στάση του αισθητήρα lidar.



## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

- └ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σφρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

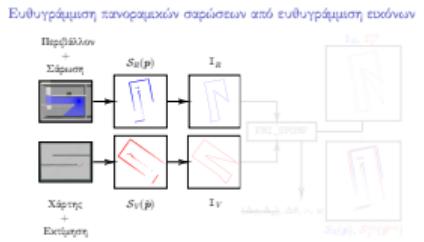
Μέσω της εκτίμησης και του χάρτη είναι δυνατός ο υπολογισμός της εικονικής σάρωσης  $S_V$  μέσω raycasting.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

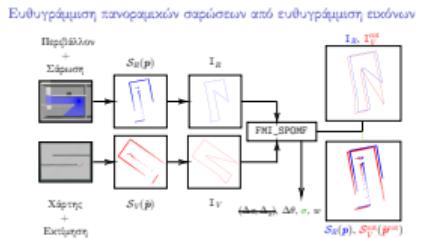
Εάν προβάλλουμε τις δύο σαρώσεις εισόδου στο χαρτεσιανό επίπεδο, και στη συνέχεια τις διακριτοποιήσουμε, το αποτέλεσμα είναι δύο πίνακες, δηλαδή δύο εικόνες  $I_R$  και  $I_V$ , αντίστοιχα, για τις οποίες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο FMI-SPOMF για να υπολογίσουμε τα ζητούμενά μας.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σφρώσεων από  
ευθυγράμμιση εικόνων

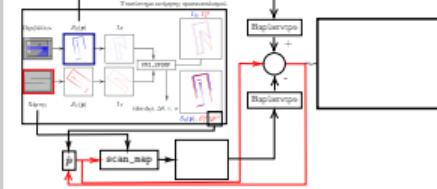
Αν και ο FMI SPOMF εξάγει την εκτίμηση της μετατόπισης μεταξύ των δυο εικόνων, είναι προτιμότερο να μην τη χρησιμοποιήσουμε ώστε να μην υπάρχει εξάρτηση του σφάλματος εκτίμησης θέσης από την ανάλυση των εικόνων.



## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

### └ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

Για την εκτίμηση της μετατόπισης ανάμεσα στις δύο σαρώσεις χρησιμοποιούμε μία μέθοδο η οποία εφαρμόζεται μετά την περιστροφή της δεύτερης σάρωσης ως προς την πρώτη. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει το βαρύκεντρο των δύο σαρώσεων στο καρτεσιανό επίπεδο και μεταφέρει επαναληπτικά τη δεύτερη σάρωση ώστε να συμπέσει με την πρώτη με βάση τη διαφορά των κεντροειδών τους.

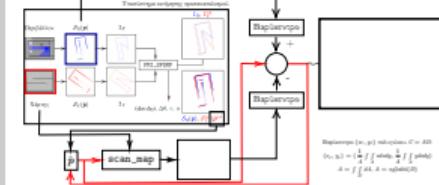


## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από  
ευθυγράμμιση εικόνων

Τυπολογίζοντας με αυτόν τον τρόπο τη διαφορά ως προς τη θέση και και μέσω FMI-SPOMF τη διαφορά ως προς τον προσανατολισμό, αποφεύγουμε ρητά την αντιστοίχιση ακτίνων ανάμεσα στις δύο σαρώσεις.

Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων



$$\text{Ευθυγράμμιση εικόνων: } C = A\tilde{A} \\ (x_i, y_i) = \left( \frac{1}{A} \int f_i^2 d\Omega, \frac{1}{A} \int f_i g_i d\Omega \right) \\ A = \int f_i^2 d\Omega, \tilde{A} = \sqrt{\int f_i^2 d\Omega}$$

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

$t_{\text{track\_start}} > t_{\text{pose tracking}}$   
⇒  
ια2 προς επίλυση του προβλήματος (passive) Global Localisation

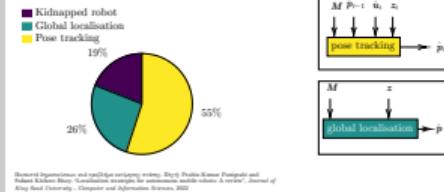
Στην πραγματικότητα ο χρόνος εκτέλεσης αυτής της μεθόδου ευθυγράμμισης sm2 είναι πολύ μεγαλύτερος από τον χρόνο εκτέλεσης που απαιτείται για να εφαρμοσθεί η μέθοδος σε συνδυασμό με ένα φίλτρο σωματιδίων και, επειδή ο χρόνος εκτέλεσης δεν είναι σε αυτό το σημείο ζήτημα, τη χρησιμοποιούμε για την επίλυση της παθητικής έκδοσης του προβλήματος του global localisation, η οποία δεν κάνει παραδοχές για το χρόνο εκτέλεσης της λύσης του προβλήματος.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Global localisation: Το δεύτερο μεγαλύτερο ποσόβλημα ρομποτικής κινητής βάσης

Τι σημαίνει global localisation.. Κατά κύριο λόγο τα μεγάλα προβλήματα εκτίμησης στάσης στη ρομποτική κινητής βάσης διαχρίνονται στα προβλήματα της παρατήρησης της στάσης ενός ρομπότ καθώς αυτό κινείται, και στο πρόβλημα του global localisation, το οποίο είναι το πρόβλημα του προσδιορισμού της στάσης ενός οχήματος δεδομένων μόνο του χάρτη και μετρήσεων, όταν δεν υπάρχει καμία πληροφορία για τη θέση και τον προσανατολισμό του.

Global localisation: Το δεύτερο μεγαλύτερο προβλήμα ρομποτικής κινητής βάσης

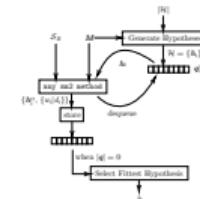


Ημερησιανό με τριήμερη περίοδο σύστημα. Βασή: Pradeep Kumar Patelgudi and Balaji Srinivasan, "A Survey of Global Localization in Mobile Robotics", International Journal of King Abdulaziz University - Computer and Information Sciences, 2022

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Passive Global Localisation: επιλύσιμο μέσω sm2

Το πρόβλημα του passive global localisation μπορεί να λυθεί μέσω οποιασδήποτε τεχνικής sm2 ως εξής: δεδομένου του χάρτη  $M$  του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται το φυσικό ρομπότ, διασπείρονται με τυχαίο τρόπο σε αυτόν ένας αριθμός από υποθέσεις στάσης  $H$ , οι οποίες τοποθετούνται σε μία ουρά  $q$ . Από κάθε υπόθεση υπολογίζεται η εικονική σάρωση, και στη συνέχεια μέσω sm2 επιχειρείται η ευθυγράμμιση της με τη σάρωση που συλλαμβάνεται από το φυσικό αισθητήρα  $S_R$ . Στο τέλος κάθε ευθυγράμμισης αποθηκεύονται μία υποψήφια τελική εκτίμηση στάσης και η τιμή μίας μετρικής που αποτυπώνει το βαθμό ομοιότητας ή τελικής ευθυγράμμισης ανάμεσα στην πραγματική σάρωση και την εικονική σάρωση που συλλαμβάνεται από κάθε υποψήφια στάση. Στο τέλος το σύστημα εξάγει ως τελική εκτίμηση στάσης εκείνη που σημειώνει τη μεγαλύτερη τιμή ομοιότητας.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική διαδικασία: διάταξη

Για να δοκιμαστεί εάν το πρόβλημα της ανεύρεσης της στάσης ενός ρομπότ που είναι εξοπλισμένο με έναν πανοραμικό αισθητήρα lidar είναι επιλύσιμο μέσω sm2 χωρίς αντιστοιχίσεις: δοκιμάζουμε το σύστημα επίλυσης σε πέντε προσομοιωμένα περιβάλλοντα και ένα πραγματικό, για συνολικά 49 στάσεις, οι οποίες δημιουργήθηκαν είτε τυχαία είτε έτσι ώστε να δοκιμάσουν την επίδοση των μεθόδων sm2 που θα δοκιμαστούν σε αυτό το πρόβλημα. Οι δοκιμές στα προσομοιωμένα περιβάλλοντα επαναλήφθηκαν για 100 φορές ανά στάση, και στο πραγματικό περιβάλλον για 5 φορές ανά στάση. Στα προσομοιωμένα περιβάλλοντα χρησιμοποιούμε έναν αισθητήρα μεγίστου βεληνεκούς δέκα μέτρων με θόρυβο μέτρησης κανονικά κατανεμημένο, με τιμές τυπικής απόκλισης ένα, δύο, και πέντε εκατοστά, ενώ στα πραγματικά πειράματα χρησιμοποιούμε έναν αισθητήρα μάρκας YDLIDAR μέγιστου βεληνεκούς τριάντα μέτρων με κατανομή θορύβου μέτρησης που φαίνεται σε αυτόν τον πίνακα.

### Πειραματική διαδικασία: διάταξη

- Ήπιες προσομοιωτικές περιβάλλοντα / Ένα πραγματικό
- Προσομοιωτικό:
  - 38 διαφορετικές στάσεις
  - 100 επαναλήψεις ανά στάση
  - LIDAR:  $W_d \sim \mathcal{N}(0, \sigma_d^2 = [0.01^2, 0.02^2, 0.05^2])$  [m, m<sup>2</sup>],  $r_{max} = 10.0$  m
- CSAL AUTH:
  - 11 διαφορετικές στάσεις
  - 5 επαναλήψεις ανά στάση
  - LIDAR: YDLIDAR TG30,  $r_{max} = 30.0$  m



Απόσταση d [mm]	Μέση στάση [mm]
20-500	≤ ±60
5000-30000	≤ ±40
20000-30000	≤ ±30

Ημερολόγιο σταθμών από την ΕΛΛΑΣΕ. Το παρόν παρατελλεί την ανάπτυξη της στάσης.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική διαδικασία: μη αποδεκτές λύσεις

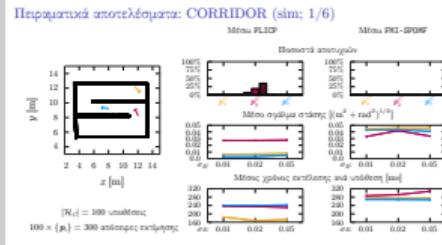
Σε όλες τις δοκιμές καταγράφουμε το τελικό σφάλμα θέσης και προσανατολισμού και ονομάζουμε επιτυχημένη ανέυρεση στάσης κάθε περίπτωση όπου το τελικό σφάλμα θέσης είναι μικρότερο από ένα μέτρο, διότι μετά την επίλυση του προβλήματος global localisation, τυπικά ακολουθεί η παρατήρηση της στάσης του ρομπότ, η οποία γίνεται κατά κόρον με πιθανοτικά μέσα, τα οποία έχουν την ικανότητα να συγκλινουν, γιατί είναι εύρωστα σε τέτοια μεγέθη σφάλματος θέσης.

- Καταγραφή σφάλματος εκτίμησης θέσης  $\hat{x}$  και προσανατολισμού  $\hat{\theta}$  τελικής στάσης  $\hat{p}$
- Επιτυχημένη εκτίμηση στάσης όταν  $\hat{I} < 1.0 \text{ m}$   
καθώς  
global localisation  $\Rightarrow$  (probabilistic) pose tracking

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

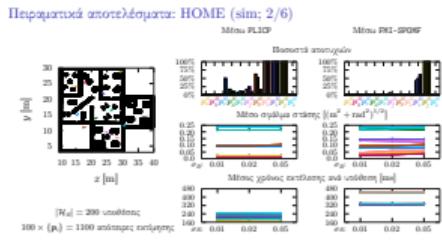
## └ Πειραματικά αποτελέσματα: CORRIDOR (sim: 1/6)

Σε όλα τα πειράματα δοκιμάζουμε δύο υποκείμενες μεθόδους sm2. Από τη μία δοκιμάζουμε την καλύτερη μέθοδο της βιβλιογραφίας, δηλαδη την plicp που είδαμε και πριν, και από την άλλη τη μέθοδο που αποτελείται από τον FMI-SPOMF σε συνδυασμό με τη μέθοδο των κεντροειδών. Σε αυτή τη διαφάνεια βλέπουμε τα αποτελέσματα ανά τιμή τυπικής απόκλισης μετρητικού θορύβου στο προσομοιωμένο περιβάλλον corridor. Στην πάνω σειρά βλέπουμε τα ποσοστά αποτυχημένων εκτιμήσεων στάσης, στη δεύτερη σειρά το μέσο σφάλμα στάσης, και στην κάτω σειρά απεικονίζονται οι χρόνοι εκτέλεσης των μεθόδων ανά υπόθεση. Αυτή η διαφάνεια συνοψίζει αυτά που θα δούμε και στις επόμενες, δηλαδή πως ο plicp εμφανίζει μεγαλύτερα ποσοστά αποτυχιών ανέυρεσης της στάσης του αισθητήρα, πως τα σφάλματα του FMI-SPOMF είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτά του plicp, και πως ο χρόνος εκτέλεσής του είναι της ίδιας τάξης αλλά ελαφρώς μεγαλύτερος από αυτόν του plicp.



Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Πειραματικά αποτελέσματα: HOME (sim; 2/6)

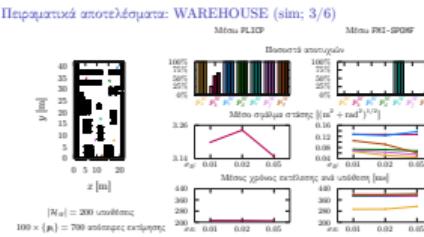


Στο περιβάλλον HOME βλέπουμε τα ίδια αποτελέσματα, με τον plicp να μην μπορεί να βρει ποτε σε καποιες περιπτώσεις τη στάση του αισθητήρα λόγω συμμετριών του περιβάλλοντος,

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματικά αποτελέσματα: WAREHOUSE (sim: 3/6)

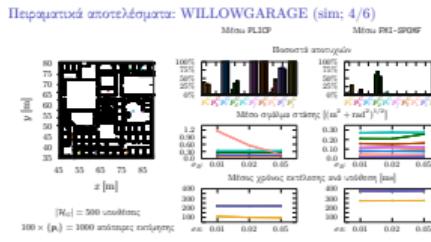
σε αυτή τη διαφάνεια βλέπουμε τα αποτελέσματα σε μία αποθήκη, όπου η έλλειψη ειδικής παραμετροποίησης για το γεγονός ότι το βεληνεκές του αισθητήρα είναι μικρό σε σχέση με τη γεωμετρία του περιβάλλοντος κάνει τον plicp να αποτυγχάνει σχεδόν παντού.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματικά αποτελέσματα: WILLOWGARAGE (sim: 4/6)

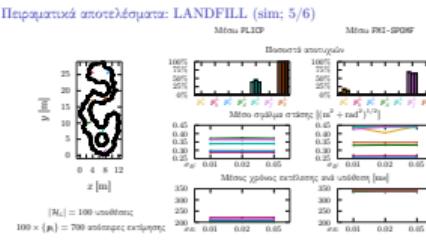
Στο περιβάλλον WILLOGARAGE εμφανίζεται πως ο plicp απαιτεί να έχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους οι στάσεις από τις οποίες συλλαμβάνονται οι δύο μετρήσεις ώστε να είναι ικανός να τις ευθυγραμμίσει, και πως το ίδιόν του κριτήριο επιλογής τελικής στάσης δεν είναι ικανό να ξεδιαλύνει ασάφειες, όπως δηλαδή και στο περιβάλλον HOME.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματικά αποτελέσματα: LANDFILL (sim; 5/6)

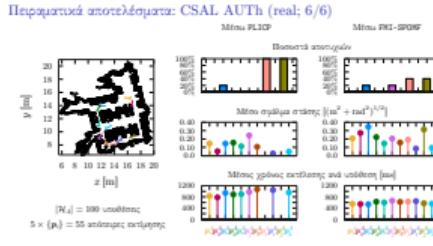
Το περιβάλλον LANDFILL το φτιάξαμε από το μηδέν ως ένα περιβάλλον που δεν περιλαμβάνει ευθείες γραμμές, ή γωνίες, ώστε να δείξουμε πως σε αντίθεση με μία κλάση μεθόδων της βιβλιογραφίας, η μέθοδος που οικοδομήσαμε είναι αναλογική των περιβαλλόντων και δεν απαιτεί να εμφανίζουν συγκεκριμένα features,



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματικά αποτελέσματα: CSAL AUTH (real: 6/6)

και εδώ βλέπουμε τα αποτελέσματα που διενεργήσαμε στο εργαστήριο υπολογιστών και αρχιτεκτονικής στο τμήμα μας, στα οποία βλέπουμε την αντιστροφή του μοτίβου που αφορά στο χρόνο εκτέλεσης λόγω αύξησης των ακτίνων του αισθητήρα.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Συμπεράσματα πειραμάτων

Εν κατακλείδι, μέσα από τις προσομοιώσεις και τα πειράματα παρατηρήσαμε πως η μέθοδος που σχεδιάσαμε εμφανίζει σφάλματα στάσης τα οποία είναι συγχρίσιμα σε σχέση με την καλύτερη μέθοδο της βιβλιογραφίας,—ύστερα την ανάγκη, από τις μεθόδους ευθυγράμμισης που βασίζονται στις αντιστοιχίεις, για custom-made παραμετροποίηση ανά περιβάλλον, και για πρώτη φορά χάτι που αναφέρεται στη βιβλιογραφία και αφορά γενικά στην κλάση των ICP αλγορίθμων, δηλαδή πως η σύγκλισή τους απαιτεί τη σύλληψη των δύο εισόδων από μικρή απόσταση μεταξύ τους.

- ♦ Εργάσματα επίμηρης αε2: μέσω FMI-SPDMF ~ μέσα μεθόδων-με-αντιστοιχίες
- ♦ Ευανθράξ μεθόδων με αντιστοιχίες σε:
  - παραμήδρας (e.g. απονεγκάθι WAREHOUSE)
  - αρχαίες συνθήκες μεταπόστασης (e.g. 1 υπόθετη από 4 m<sup>2</sup> @ WAREHOUSE, WILLOWGARAGE)

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα  
είναι ευικτό

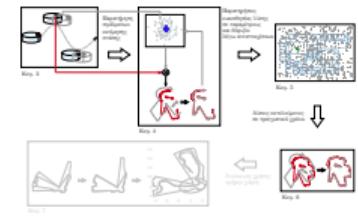
Το σημαντικότερο όμως, και αυτό που δεν υπήρχε προηγουμένως είναι η πρώτη μέθοδος που λύνει το πρόβλημα  $sm^2$  για πανοραμικά lidar χωρίς να υπολογίζει αντιστοιχίσεις ανάμεσα στις σαρώσεις εισόδου.

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι ευικτό

Ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές επάρσεις πανοραμικού lidar  
ρυθμίζοντας την επίσημη πανοραμική παραστασία

A. Pitsikalis, A. Tsiotsis, E. Tsakalos, I. Dimakos, A. Kyriacou, L. Proven, "Faster Global Localization of Mobile Robot via 3D Fusing Multi-Frame Lidar Images", In: Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2022

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



Το πρόβλημα εδώ είναι ότι εάν θέλαμε να τοποθετήσουμε τη μέθοδο που μόλις κατασκευάσαμε στην έξοδο του φίλτρου σωματιδίων, αυτό δεν θα ήταν δυνατόν, γιατί οι λύσεις της μεθόδου δεν παράγονται σε πραγματικό χρόνο σε σχέση με το ρυθμό παραγωγής εκτιμήσεων από το φίλτρο. Και συνεπώς ο επόμενος μας στόχος είναι ακριβώς αυτός.

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

### └ Ευθυγράμμιση sm2 δίχως αντιστοιχίσεις, υπό γνονικούς πεοιοισμούς

Για την ακρίβεια εδώ θα ήθελα να θέσω το πρόβλημα το οποίο θα επιχειρήσουμε να λύσουμε με λεπτομέρεια. Το πρόβλημα είναι η κατασκευή μίας συνάρτησης η οποία λύνει το πρόβλημα sm2, δεδομένων μίας πανοραμικής σάρωσης δύο διαστάσεων, του χάρτη του περιβάλλοντος, και μίας εκτίμησης της στάσης του αισθητήρα, της οποίας η θέση βρίσκεται σε μία γειτονιά της πραγματικής του θέσης, τέτοια ώστε η εκτίμηση που παράγεται από την συνάρτηση να έχει μικρότερο σφάλμα εκτίμησης από αυτό της εκτίμησης εισόδου, και που να εκτελείται σε χρόνο που να συμβαδίζει με το ρυθμό παραγωγής εκτιμήσεων από παρατηρητές, όπως για παράδειγμα το φίλτρο σωματιδίων.

<p>Ευθυγράμμιση sm2 δίχως αντιστοιχίσεις, υπό χρονούς περιορισμούς</p> <p>Πρόβλημα:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Καπασιτής ή: sm2 χρειάζεται περιορισμούς, έπειτα:</li> <li>■ Προγραμματισμένη σύρραγη <math>S_{\text{sm2}}(\vec{p})</math>: <math>\text{FOV} = 360^\circ</math></li> <li>■ Χάρτης <math>M</math> του περιβάλλοντος</li> <li>■ Εκτίμηση <math>\hat{\vec{p}}(L, \theta)</math></li> <li>■ Η εκτίμηση θέσης <math>\hat{L} = (\hat{x}, \hat{y})</math> είναι σε μία γειτονιά της <math>L = (x, y)</math></li> </ul>
<p>τέτοιας ώστε</p> <p>(Σ1) <math>\vec{p}' \leftarrow h(S_{\text{sm2}}, M, \hat{\vec{p}})</math>:</p> $\ \vec{p}' - p\  < \ \hat{\vec{p}} - p\ $ <p>(ΣΤ) <math>f_{\text{out}}(h) \geq f_{\text{out}}(\vec{p}')</math></p>

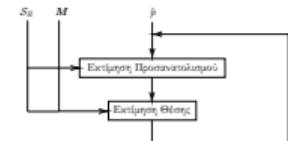
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αποσύνθεση προβλήματος

Αρχικά εδώ αποσυνθέσαμε το πρόβλημα ρητά σε δύο διακριτά υποπροβλήματα. Το πρώτο είναι η εκτίμηση της θέσης του αισθητήρα δεδομένου ότι γνωρίζουμε ποιός είναι ο προσανατολισμός του, και το δεύτερο είναι η εκτίμηση του προσανατολισμού του δεδομένου ότι γνωρίζουμε ποιά είναι η θέση του. Η υπόθεσή εδώ είναι πως εάν λυθούν επαναληπτικά και σειριακά αυτά τα δύο προβλήματα τότε με αυτόν τον τρόπο θα λυθεί και το ολικό πρόβλημα. Εδώ η ανάγκη για επαναληπτικότητα προκύπτει από το γεγονός ότι ο πραγματικός προσανατολισμός μπορεί να εκτιμηθεί μόνο από την πραγματική θέση, και η πραγματική θέση μπορεί να εκτιμηθεί μόνο από τον πραγματικό προσανατολισμό, αλλά επί της αρχής η στάση και η εκτίμησή της είναι άνισες ως προς και τις δύο παραμέτρους.

Αποσύνθεση προβλήματος

- Εκτίμηση θέσης  $\hat{x}(x, y)$  όταν  $\hat{\theta} = \theta$
- Εκτίμηση προσανατολισμού  $\hat{\theta}$  όταν  $\hat{x} = x$



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Εκτίμηση θέσης όταν  $\hat{\theta} = \theta$

Το πρώτο υποπρόβλημα έχει μία λύση η οποία μας έρχεται από πρώτες αρχές. Αυτή λέει πως δεδομένων των παραδοχών του προβλήματος και της επιπρόσθετης παραδοχής ότι γνωρίζουμε τον προσανατολισμό του αισθητήρα, τότε μπορούμε να εκτιμήσουμε τη θέση του εάν μετατρέψουμε την εκτίμηση θέσης στο διάνυσμα κατάστασης ενός συστήματος το οποίο ανανεώνουμε επαναληπτικά με το διάνυσμα  $u$ , το οποίο είναι συνάρτηση της διαφοράς των πρώτων όρων του μετασχηματισμού Fourier των σαρώσεων που συλλαμβάνονται από την πραγματική στάση του αισθητήρα και την εκτιμώμενη του στάση ανά επανάληψη.

Εκτίμηση θέσης όταν  $\hat{\theta} = \theta$

$$\tilde{q}[k+1] = \tilde{q}[k] + u[k]$$

$$u[k] = \frac{1}{N_v} \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & \sin \hat{\theta} \\ \sin \hat{\theta} & -\cos \hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1,i}(\mathcal{S}_R, \mathcal{S}_V|y_R|) \\ X_{1,i}(\mathcal{S}_R, \mathcal{S}_V|y_V|) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} X_1(\mathcal{S}_R, \mathcal{S}_V|y_R|) &= X_{1,i}(\mathcal{S}_R, \mathcal{S}_V|y_R|) + i \cdot X_{1,i}(\mathcal{S}_R, \mathcal{S}_V|y_R|) \\ &= \sum_{n=0}^{N_v-1} (\mathcal{S}_R[n] - \mathcal{S}_V[n]|y_R|) \cdot e^{-j\frac{2\pi n}{N_v}} \end{aligned}$$

G. Tsigas, D. Mihai, I. Dragomir, Z. Kovacic, P. Liotta, "High-accuracy vehicle localization for autonomous navigation", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Εκτίμηση θέσης όταν  $\hat{\theta} = \theta$

Εκτίμηση θέσης όταν  $\hat{\theta} = \theta$

- ♦ Όταν  $\sigma_B = 0.0$  και  $M = W$  τότε:  
    [!] συγχέονται ομοιόμορφα αποτελεσματικά στην πραγματική θέση  $I$  καθώς  $k \rightarrow \infty$
- ♦ Όταν  $\sigma_B > 0.0$  ή/και  $M \neq W$  τότε:  
    [!] ορθόστατη ομοιόμορφα σε γενικότερη πραγματική θέση  $I$  όταν  $k \geq k_0$

Για την ακρίβεια μπορούμε να αποδείξουμε μέσω των εργαλείων που μας κληροδότησε ο lyapunov ότι στην ιδανική περίπτωση που δεν υπάρχει πουθενά ύδρυτος στο σύστημα, με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να εκτιμήσουμε με αυθαίρετη ακρίβεια την πραγματική θέση του αισθητήρα, και πως στη γενική περίπτωση η εκτίμηση θέσης φράσσεται ομοιόμορφα σε μία γειτονιά της πραγματικής θέσης, της οποίας η ακτίνα εξαρτάται από τα μέτρα των ύδρυτων που επενεργούν στα δύο είδη σαρώσεων.

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

Εκτίμηση προσανατολισμού όταν  $\hat{l} = l$

└ Εκτίμηση προσανατολισμού όταν  $\hat{l} = l$

- rc\_xl
- rc\_fm
- rc\_uf

Το δεύτερο πρόβλημα, δηλαδή της εκτίμησης του προσανατολισμού του αισθητήρα δεδομένης της θέσης του, χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων και σε πραγματικό χρόνο παραμένει αναπάντητο στη βιβλιογραφία της ρομποτικής. Παρ' όλα αυτά κατάφερα να μεταγγίσω ή να εφεύρω μία τριλογία μεθόδων για τη λύση αυτού του προβλήματος.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Εκτίμηση προσανατολισμού όταν  $\hat{l} = l$   
(rc\_x1—1/3)

Η πρώτη προχύπτει από τη μέθοδο εκτίμησης όψης που είδαμε μόλις, εάν αντί για γνωστό προσανατολισμό ψεωρήσουμε γνωστή τη όψη του αισθητήρα. Ανανεώνοντας την εκτίμηση προσανατολισμού με τη διαφορά των ορισμάτων των πρώτων όρων του μετασχηματισμού fourier της πραγματικής σάρωσης και της εικονικής σάρωσης που έχει υπολογιστεί από την εκτίμηση στάσης οδηγεί σε ένα επίλοιπο σφάλμα προσανατολισμού  $\phi$  που εξαρτάται από τον αριθμό των ακτίνων του αισθητήρα.

Εκτίμηση προσανατολισμού όταν  $\hat{l} = l$  (rc\_x1—1/3)

$$\hat{\theta}[k+1] = \hat{\theta}[k] + \angle \mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_R\} - \angle \mathcal{F}_1\{\mathcal{S}\}_{[j]\hat{\theta}}$$

Επόμενο σημείο:

$$\phi = \angle \mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\} - \tan^{-1} \frac{|\mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}| \sin(\angle \mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}) - \mathbf{N}_v[\delta]|}{|\mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}| \cos(\angle \mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}) - \mathbf{N}_v[\delta]| \cos(\theta + \angle \delta)}$$

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Εκτίμηση προσανατολισμού όταν  $\hat{l} = l$   
(rc fm—2/3)

Η δεύτερη μέθοδος είναι απευθείας μετασχηματισμός της μεθόδου FMI-SPOMF που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο εάν χρησιμοποιήσουμε εξαρχής πολική αναπαράσταση για τις σαρώσεις και παρακάμψουμε έτσι την ανάγκη για τη δημιουργία εικόνων των οποίων η επεξεργασία είναι δαπανηρή σε πόρους. Ανανεώνοντας την εκτίμηση προσανατολισμού με την ποσότητα  $\xi$  επί γάμμα, όπου γάμμα είναι η γωνιακή ανάλυση του αισθητήρα και όπου βλέπετε  $F$  σημαίνει το μετασχηματισμό fourier της αντίστοιχης σάρωσης, έχει ως αποτέλεσμα ένα επίλοιπο σφάλμα προσανατολισμού το οποίο εξαρτάται και αυτό από τη αριθμό ακτίνων που εκπέμπει ο αισθητήρας.

Εκτίμηση προσανατολισμού όταν  $\hat{l} = l$  (rc\_fm—2/3)

$$\begin{aligned}\tilde{\theta} &= \theta + \xi\gamma, \text{ άσκηση} \\ \xi &\triangleq \operatorname{argmax}_{\xi} \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{\mathcal{F}(S_V)^* \cdot \mathcal{F}(S_R)}{|\mathcal{F}(S_V)| \cdot |\mathcal{F}(S_R)|} \right\}, \text{ και} \\ \gamma &\triangleq \frac{2\pi}{N_s}\end{aligned}$$

Επιπλέον σημάδια:

$$\phi \leq \frac{\pi}{2}$$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Εκτίμηση προσανατολισμού όταν  $\hat{l} = l$   
(rc uf—3/3)

Και το ίδιο ισχύει και για την τρίτη μέθοδο, η οποία μας έρχεται από τα πεδία της χρυσταλλογραφίας και της φυχομετρικής, η οποία στη βιβλιογραφία ονομάζεται η μέθοδος του προκρούστη. Εδώ το μειονέκτημα είναι ότι πρέπει να περιστρέψουμε τα σημεία της εικονικής σάρωσης τόσες φορές όσος είναι ο αριθμός των ακτίνων του, ώστε να καταγράψουμε ισάριθμα μέτρα ευθυγράμμισης, τα οποία προκύπτουν από την αποσύνθεση σε ιδιάζουσες τιμές του γινόμενου των πινάκων των σημείων των σαρώσεων. Με αυτόν τον τρόπο βρίσκουμε το μέγιστο μέτρο ευθυγράμμισης, το οποίο και αυτό αντιστοιχεί όπως και για την προηγούμενη μέθοδο σε μία περιστροφή κατά ακέραιο πολλαπλάσιο της γωνιακής ανάλυσης του αισθητήρα.

Εκτίμηση προσανατολισμού όταν  $\hat{l} = l$  (rc uf—3/3)

Επίπλωση

- $P_B, P_V$  οι προβολές των  $S_B, S_V$  στο οριζόντιο επίπεδο

- $UDV^T = \text{svd}(P_B P_V^T)$

- $S = \text{diag}(1, \det(UV))$

Τότε  $\text{tr}(DS)$  είναι μέτρο ευθυγράμμισης ανάμεσα στα σύνολα  $P_B, P_V$  και

$$R^* = USV^T = \underset{R}{\arg \min} \|P_B - R \cdot P_V\|_F^2$$

ούτε θ γνωστή [1].

Όμως θ θεωρητικός διγναστή ⇒ περιτροφή  $P_V$  κατά  $k \cdot \gamma$ ,  $0 \leq k < N_v$ .  
Τότε εάν  $\theta^* = \theta + k^* \gamma$ ,  $k^* = \arg \min_k \text{tr}(DS)$ , το επίπεδο σφάλμα:

$$\phi \leq \frac{\gamma}{2}$$

[1] H. Umeyama, "Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Apr. 1988.

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Το πρόβλημα του πεπερασμένου των ακτίνων:  
 $\phi = f(N_e)$

Ο κοινός παρονομαστής και των τριών μεθόδων είναι το μέγιστο μειονέκτημα τους, δηλαδή ότι, σε αντίθεση με τη λύση του προβλήματος της εκτίμησης της θέσης του αισθητήρα, δεν είναι δυνατόν να προσεγγίσουμε με αυθαίρετη ακρίβεια τον προσανατολισμό του ακόμα και σε ιδανικές συνθήκες γιατί η ακρίβεια και των τριών μεθόδων εξαρτάται από τον αριθμό των ακτίνων που εκπέμπει ο αισθητήρας.

To πρόβλημα του πεπερασμένου των ακτίνων:  $\phi = f(N_e)$

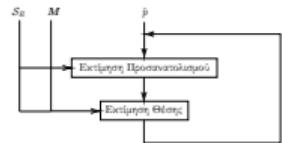
• rc\_xl  
• rc\_fm  
• rc\_uf

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Το πρόβλημα του πεπερασμένου των ακτίνων:  
 $\phi = f(N_e)$

Σαν να μην έφτανε αυτό, η ελάττωση του σφάλματος εκτίμησης προσανατολισμού είναι χρήσιμης σημασίας γιατί το σφάλμα αυτό μεταφέρεται στη μέθοδο εκτίμησης θέσης, και το σφάλμα θέσης που προκύπτει εμποδίζει το ίδιο την εκτίμηση του προσανατολισμού γιατί το ελάχιστο σφάλμα προσανατολισμού προκύπτει για το ελάχιστο σφάλμα θέσης, και έτσι το σφάλμα στάσης παγιδεύεται σε φαύλο κύκλο.

Το πρόβλημα του πεπερασμένου των ακτίνων:  $\phi = f(N_e)$

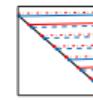


## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

- └ Υπερδειγματοληψία πραγματικής σάρωσης σε  
γραμμικές περιοχές ✓

$S_R^{-\text{interp}}(\theta)$   $S_V^{-\text{oversamp}}(\hat{\theta})$   
Η μόνη λύση για την περαιτέρω ελάττωση του σφάλματος προσανατολισμού χωρίς τη χρήση αντιστοιχί-  
σεων είναι η γωνιακή υπερδειγματοληψία. Προφανώς όμως μπορούσαμε να υπερδειγματοληπτήσουμε και την  
πραγματική σάρωση και το χάρτη, και δεν όμως προέκυπτε πρόβλημα σε γραμμικές περιοχές του περιβάλλο-  
ντος,

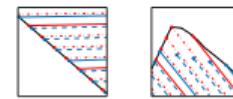
## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



└ Υπερδειγματοληψία πραγματικής σάρωσης σε  
μη γραμμικές περιογές  $X$

$\mathcal{S}_R^{-\text{-interp}}(\theta)$   $\mathcal{S}_V^{-\text{-oversamp}}(\hat{\theta})$   $\mathcal{S}_R^{-\text{-interp}}(\theta)$   $\mathcal{S}_V^{-\text{-oversamp}}(\hat{\theta})$   
αλλά σε μη γραμμικές περιοχές η υπερδειγματοληψία της πραγματικής σάρωσης θα εισήγαγε τα δικά της  
σφάλματα.

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



└ Λύση: Υπερδειγματοληφία του χάρτη  $\Rightarrow$   
παραγωγή  $2^{\nu}$  εκτιμήσεων

$$\mathcal{S}_R^{-\text{-interp}}(\theta) \quad \mathcal{S}_V^{-\text{-oversamp}}(\hat{\theta}) \quad \mathcal{S}_R^{-\text{-interp}}(\theta) \quad \mathcal{S}_V^{-\text{-oversamp}}(\hat{\theta}) \quad \mathcal{S}_R(\theta) \quad \mathcal{S}_V(\hat{\theta} + \{0 \dots 2^{\nu_{\max}} - 1\} \cdot \frac{\gamma}{2^{\nu_{\max}}})$$

Κατά τη γνώμη μου ο μόνος τρόπος για τη μείωση του γωνιακού σφάλματος χωρίς την ακούσια εισαγωγή  $\gamma_{\max}$  σφαλμάτων είναι η υπερδειγματοληφία μόνο του χάρτη. Αυτό σημαίνει ότι αν θέλουμε να ελαττώσουμε το σφάλμα κατά 2 εις την  $\nu$  φορές, αρκεί να υπολογίσουμε 2 εις την  $\nu$  εικονικές σαρώσεις με μέγεθος ίσο με την πραγματική σάρωση, να ευθυγραμμίσουμε την κάθε μία με αυτήν, και να εκτιμήσουμε ποιά από τις 2 εις την  $\nu$  εκτιμήσεις εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα. Οπότε τώρα εμφανίζεται μπροστά μας άλλο πρόβλημα. Δεδομένου ενός συνόλου εκτιμήσεων οι οποίες όλες έχουν την ίδια θέση αλλά διαφορετικό προσανατολισμό, ποιά από αυτές εμφανίζει το χαμηλότερο σφάλμα προσανατολισμού;

$$\phi' = \frac{\phi}{2^{\nu_{\max}}} \leq \frac{\gamma}{2^{1+\nu_{\max}}}$$

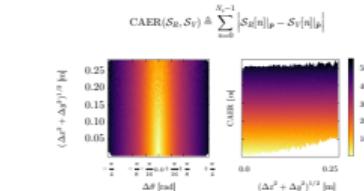
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Ιεράρχηση σφαλμάτων εκτιμήσεων: η μετρική  
CAER\* \* Cumulative Absolute Error per Ray

Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα σε γενικές συνθήκες, όπου η εκτίμηση θέσης δεν είναι ίση με την πραγματική θέση, εφηύραμε τη μετρική CAER, τις οποίας προφίλ βλέπουμε σε αυτή τη διαφάνεια. Στα αριστερά βλέπουμε στον άξονα x τα σφάλματα προσανατολισμού και πως η μετρική εμφανίζει χαμηλότερες τιμές για χαμηλότερα σφάλματα προσανατολισμού. Αντίστοιχα στα δεξιά στον άξονα x βλέπουμε τα σφάλματα θέσης και η μετρική CAER εμφανίζει χαμηλότερες τιμές για χαμηλότερα σφάλματα θέσης.

Ιεράρχηση σφαλμάτων εκτιμήσεων: η μετρική CAER\*

\* Cumulative Absolute Error per Ray

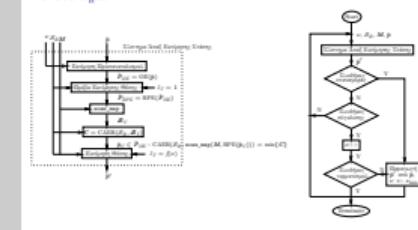


# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Το σύστημα fsm2

Με την εισαγωγή της μετρικής CAER μπορούμε τώρα να συνθέσουμε το τελικό σύστημα που επιλύει το πρόβλημα sm2 χωρίς αντιστοιχίσεις και σε πραγματικό χρόνο. Δεδομένων των παραδοχών του προβλήματος, το σύστημα fsm2 ελαττώνει επαναληπτικά το σφάλμα στάσης με τον εξης τρόπο. Αρχικά πραγματοποιείται εκτίμηση του προσανατολισμού, η οποία παράγει 2 εις την ν εκτιμήσεις, όλες με την ίδια θέση αλλα διαφορετικό προσανατολισμό. Στη συνέχεια κάθε εκτίμηση οδευεται στο σύστημα εκτίμησης θέσης για μία επανάληψη, και σε αυτό το στάδιο παράγονται 2 εις την ν εκτιμήσεις, όλες με διαφορετικό προσανατολισμό και θέση. Με αυτόν τον τρόπο εκτιμήσεις που έχουν μεγαλύτερο σφάλμα προσανατολισμού αποκτούν ακόμα μεγαλύτερο σφάλμα θέσης, και έτσι γίνεται ευκολότερη η διάκριση της εκτίμησης με το μικρότερο σφάλμα με βάση τη μετρική CAER. Στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή CAER για όλους τους συνδυασμούς της πραγματικής σάρωσης με την εικονική σάρωση που προκύπτει από τις εκτιμήσεις, και η έξοδος του συστήματος εκτίμησης προσανατολισμού θεωρείται εκείνη που παράγει την ελάχιστη τιμή ανάμεσά τους. Αυτή η εκτίμηση οδεύεται στο σύστημα εκτίμησης θέσης, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται με είσοδο αυτή την εκτίμηση, εως ότου ικανοποιηθεί μια σειρά συνθηκών σύγκλισης και τερματισμού.

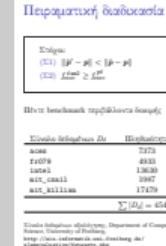
Το σύστημα fsm2



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική διαδικασία

Για να δοκιμάσουμε την επίδοση των τριών εκδόσεων του συστήματος fsm2 ως προς τους στόχους που έχουμε θέσει χρησιμοποιούμε πέντε benchmark datasets συνολικής πληθυσμότητας 45 χιλιάδων περιβαλλόντων.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική διαδικασία

Για να δοκιμάσουμε τις επιδόσεις τους σε πραγματικές συνθήκες χρησιμοποιούμε πέντε επίπεδα θορύβου μέτρησης τα οποία εμφανίζουν εμπορικά διαθέσιμοι αισθητήρες, σε συνδυασμό με δύο επίπεδα διαφυλοράς του χάρτη σε σχέση με το περιβάλλον που αντιπροσωπευεί, και αρχικά σφάλματα θέσης και προσανατολισμού που έρχονται από τη βιβλιογραφία. Ταυτόχρονα δοκιμάζουμε την επίδοση μεθόδων της τρέχουσας βιβλιογραφίας, δηλαδή μεθόδων που όλες χρησιμοποιούν αντιστοιχίσεις για να φέρουν εις πέρας το έργο της ευθυγράμμισης. Συνολικά κάθε αλγόριθμος έτρεξε για δέκα φορές για κάθε διαμόρφωση, δηλαδή συνολικά κάθε μέθοδος κλήθηκε περίπου 4.5 εκατομμύρια φορές. Εδώ χρησιμοποιούμε πανοραμικές σαρώσεις μεγέθους 360 ακτίνων, και θέτουμε τις τιμές των τριών παραμέτρων που χρησιμοποιεί ο fsm2.

### Πειραματική διαδικασία

Έπιπλα
(31) $\ \hat{y} - y\  < \ \hat{y} - p\ $
(32) $\frac{\ x\ _{\text{fsm2}}}{\ x\ _{\text{true}}} \geq \frac{\ x\ }{\ x\ }$

Ημετέρευτη περιόδευτη θεωρία:

Εύρος διαφοράς $D_\theta$	Ημετέρευτη
αστ	7378
ρατσ	4813
ιατελ	13630
αιτ_εαστ	1997
αιτ_αιγαίνη	17479
$\sum  D_\theta  = 45402$	

Εύρος διαφοράς διαθέσιμης πληθωριστικής και μεθόδων:  
 $30 \times \sum |D_\theta| \times |\sigma| > |\sigma_M| \approx 4.5 \cdot 10^6$

Μητρική επιρροή:  $N_t = 36 \cdot 360$

$\sigma \in [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}] = [2, 1]$

$L_T = 1 + \nu$

Ταυτότητα διαθέσιμης μετρήσεως και συντεταγμένων γεγονότων:

$$W_M \sim N(0, \sigma_M^2 = (0.01^2, 0.02^2, 0.05^2, 0.10^2, 0.20^2)) \text{ [m, m^2]}$$

$$W_M \sim N(0, \sigma_M^2 = (0.0, 0.02^2)) \text{ [m, m^2]}$$

Περιεγέλλεται προσέταση σημερινής στάσης:

$$\Delta \hat{y}_1 = (-4, -20, +6, +20) \text{ [m]}$$

$$\Delta \hat{y}_2 = (-4, -20, +6, +20) \text{ [m]}$$

$$\Delta \hat{y}_3 = (-\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{4}) \text{ [rad]}$$

Συνολικές προβλέψεις τοπογραφίας και μεθόδων:

$$30 \times \sum |D_\theta| \times |\sigma| > |\sigma_M| \approx 4.5 \cdot 10^6$$

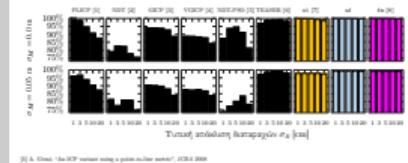
Μητρική επιρροή:  $N_t = 36 \cdot 360$

$\sigma \in [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}] = [2, 1]$

$L_T = 1 + \nu$

Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar  
δισδιάστατων μετρήσεων ...

Ποσοστά επίτευξης στόχου Σ1



## └ Ποσοστά επίτευξης στόχου Σ1

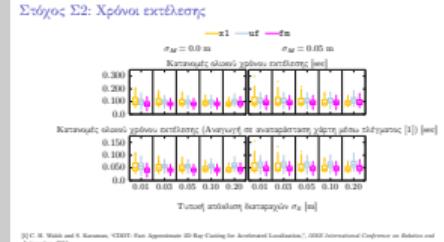
Και επιτέλους είμαι στην ευτυχή ώρα να σας αναφέρω το κύριο αποτέλεσμα της εργασίας μου. Αυτό το γράφημα δείχνει τα ποσοστά των περιπτώσεων στις οποίες το σφάλμα στάσης μειώθηκε ως αποτέλεσμα εφαρμογής της κάθε μεθόδου. Οι τρεις εκδόσεις του fsm2 φαίνονται στα δεξιά με χρώματα, και οι μέθοδοι της βιβλιογραφίας φαίνονται στα αριστερά με μαύρες ράβδους. Η άνω σειρά περιέχει τα αποτελέσματα της περίπτωσης όπου ο χάρτης και το περιβάλλον συμπίπτουν ακριβώς, ενώ στην κάτω σειρά κάθε συντεταγμένη του χάρτη έχει διαφθαρθεί με θόρυβο κανονικά κατανευμημένο με τυπική απόκλιση 5 εκατοστών. Κάθε ράβδος που βλέπετε αφορά σε ένα επίπεδο θορύβου μέτρησης, και σε 450 χιλιάδες ευθυγραμμίσεις. Αν παρατηρήσουμε καταρχάς την επίδοση των εκδόσεων του ICP ως δούμε πως γενικά αυτή φθίνει καθώς αυξάνει ο θόρυβος μέτρησης. Οι εκδόσεις του NDT δεν εμφανίζουν ευθεία αναλογία με το θόρυβο μέτρησης, και ο TEASER είναι σχεδόν το ίδιο ένυρωστος όσο οι εκδόσεις του fsm2, αλλά το πρόβλημα του είναι ότι δεν μπορεί να εκτελεστεί σε πραγματικό χρόνο. Για την ακρίβεια χρησιμοποιώντας τετραπλάσιους πόρους ο ελάχιστος χρόνος εκτέλεσής του είναι δεκαπλάσιος από αυτόν του fm. Εδώ ο x1 εμφανίζει λιγο χαμηλότερα ποσοστά μείωσης από τον teaser, αλλά οι υπόλοιπες δύο εκδόσεις του fsm2 εμφανίζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά και τα πιο εύρωστα.

- [3] A. Gross, "The ICP variant using a polar distance metric," *ICRA 2008*
- [4] M. Neumann, "The normal distribution transform - a new approach to local scene matching," *ICRA 2012*
- [5] S. Rusu, "Fast Point Feature Matching for Point Cloud Registration," *ICRA 2010*
- [6] R. Rusu, B. Tavakoli, C. Chitu, & M. Benati, "Generalized GIFT for Fast and Accurate 3D Point Cloud Registration," *ICRA 2011*
- [7] A. Fähnrich, A. Syrmakos, G. Seglada, & A. Dimiceli, "Fast and Robust Point Cloud Registration Using Polar Distance Transform," *ICRA 2012*
- [8] A. Fähnrich, A. Syrmakos, G. Seglada, & A. Dimiceli, "TEASER: Fast and Reliable Point Cloud Registration," *ICRA 2013*
- [9] A. Fähnrich, A. Syrmakos, G. Seglada, & A. Dimiceli, "Correspondence-aware nearest neighbor matching of 3D point clouds," *ISPRS 2013*
- [10] A. Fähnrich, G. Seglada, & A. Dimiceli, "3D Correspondence-aware matching of pointclouds using local polar distance transform," *ICRA 2014*

Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar  
δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Στόχος Σ2: Χρόνοι εκτέλεσης

Πάμε τώρα στο δεύτερο στόχο. Σε αυτή τη διαφάνεια βλέπουμε τους χρόνους εκτέλεσης των τριών εκδόσεων του fsm2 για κάθε τιμή ψηφιακού μέτρησης και διαφυγούς του χάρτη. Στην άνω σειρά βλέπουμε τα ευθεία αποτελέσματα από την πειραματική διαδικασία και στην κάτω σειρά τους χρόνους εκτέλεσης που θα είχαν οι μέθοδοι εάν ο χάρτης αναπαρίστατο ως εικόνα. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο αναπαραστάσεις είναι μεγάλη λόγω του χρόνου υπολογισμού εικονικών σαρώσεων που είναι η πιό δαπανηρή πράξη, και που στην περίπτωση της αναπαράστασης μέσω εικόνας μπορεί να γίνει στο ένα τρίτο του χρόνου σε σχέση με τον τρόπο που την έχω υλοποιήσει εδώ. Τώρα: ο στόχος μας εδώ είναι κάθε μέθοδος να εκτελείται με μεγαλύτερη συχνότητα από τη συχνότητα παραγωγής εκτιμήσεων από τον παρατηρητή στάσης, η οποία δεν έχει ακριβή τιμή, αλλά θα μπορούσαμε να πούμε πως ένα απόλυτο κάτω όριο είναι τα 5 Hz. Ο χαμηλότερος ρυθμός εκτέλεσης είναι της μεθόδου x1 όταν ο χάρτης είναι διεφύγαρμένος, κατά μέσο όρο στα 6.5 Hz, ενώ οι υπόλοιπες δύο μέθοδοι λειτουργούν περίπου στα 13 με 20 Hz.



[1] C. H. Walin and S. Karanovic, "CEST: Fast Approximate 3D Ray Casting for Accurate Localization", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2020.

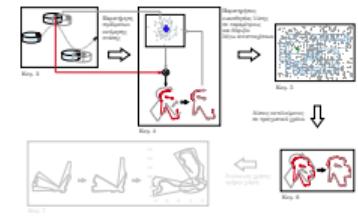
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα  
είναι ευικτό

Αυτό λοιπόν που είναι σήμερα δυνατόν που δεν ήταν προηγουμένως είναι η ύπαρξη μεθόδων που λύνουν το πρόβλημα sm2 χωρίς να χρησιμοποιούν αντιστοιχίσεις, και που εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες είναι περισσότερο ακριβείς και εύρωστες από τις αντίστοιχες της βιβλιογραφίας. Οποιαδήποτε από αυτές τις τρεις μεθόδους είναι ικανή να βελτιώσει τη λύση του προβλήματος της παρατήρησης της στάσης ενός οχήματος καθώς αυτό κινείται, και να λύσει το πρόβλημα της εκ του μηδενός εκτίμησης της στάσης του, χωρίς να χρησιμοποιούνται πουθενά ad hoc μεταβλητές ή features.

- Είναι τεχνητής απεικόνισης {pose tracking, θέσην πρόσων}
- Άλλη global localisation
  - Χωρίς ad hoc παραμετροποίηση (κατανομή ή μεταβλήτα)
  - Ταχείατρα από FRT-SIFT (⇒ παραπότασης υποθέσεων → λιγότερες υποτιθέσεις εκτίμησης)

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



Κάπου εδώ θα τελείωνε η έρευνά μου, αλλά όσο περισσότερο καταλάβαινα το ίδιο το πρόβλημα sm2 τόσο περισσότερο είχα τη διαίσθηση πως το γενικότερο πρόβλημα της ευθυγράμμισης πραγματικών σαρώσεων θα μπορούσε να λυθεί μέσω της λύσης της ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές σαρώσεις.

Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Μετά το sm2 τι;

Αν ξανακοιτάζουμε το πρόβλημα  $sm2$  όπως το θέσαμε, θα δούμε στα δεδομένα του προβλήματος μία πραγματική σάρωση, η οποία συλλαμβάνεται από την πραγματική  $S_R(p_1)$  και πρώτη στάση του αισθητήρα, και ύστερα το χάρτη του περιβάλλοντος και μία αρχική εκτίμηση  $S_V(\hat{p}_0)$ . Από αυτά τα δύο δεδομένα υπολογίζουμε την πρώτη εικονική σάρωση  $SV$ . Από τα προηγούμενα πειράματα είδαμε πως ο στόχος που θέσαμε, δηλαδή η ελάττωση του σφάλματος στάσης επετεύχθη. Εάν έχουμε καταφέρει να εκτιμήσουμε με μεγάλη ακρίβεια τη θέση του αισθητήρα, δεδομένου ακριβώς ότι η αρχική εκτίμησή του βρίσκεται σε μία γειτονιά της, τότε χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορούμε να υποθέσουμε ότι όλες οι ενδιάμεσες εκτιμήσεις θέσης βρίσκονται και αυτές σε μία γειτονιά της πραγματικής, και, πιο σημαντικό, ότι η αρχική εικονική σάρωση αποτελεί μία τοπική προσέγγιση του χάρτη και συνεπώς του περιβάλλοντος στη γειτονιά της πραγματικής στάσης του αισθητήρα. Οπότε το ερώτημα εδώ είναι: εάν αντικαταστήσουμε τον χάρτη—από τον οποίον υπολογίζουμε εικονικές σαρώσεις—με μία δεύτερη πραγματική σάρωση, θα ήταν εφικτό η ίδη υπάρχουσα μέθοδος να λύσει το γενικότερο πρόβλημα  $sm$ ?

Menzel 2002

Ειναι γραμμής από  $\mathbb{R}^n$  με παραγόμενη, ωστόσο γραμμή της παραγόμενης  
Πράξης.

- Είναι γραμμή παραγόμενη, λέμε:
- Βασικός γωνιασμός γραμμής:  $POL = 360^\circ$
- Σχήμα:  $M \times M$  στρογγυλό
- Βαρύτης:  $\rho(M)$
- Η παραγόμενη  $L = [1, 2]$  σημαίνει ότι  $\rho(M) = L = [1, 2]$

Τέλος σετ:

(ΣΕΤ)  $p = 0.55, q = 0.45$

$|p - q| = |0.55 - 0.45|$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Εάν } \|I_N - I\| \ll \delta \text{ τότε} \\ \quad \nu \|I_N - I\| < \delta \\ \quad \nu \pi_1(p_0) \text{ πολλή προσέγγιση } M \text{ (άρα } W) \\ \text{στη γενικότερη της } p_i \text{, } \forall i = 0, 1, \dots, N \end{array} \right\} \text{Εάν } M \leftarrow S_E(p_2) \Rightarrow \text{h λύθηκε σωτερώς.}$$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Ευθυγράμμιση sm

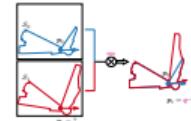
Σας υμίζω πως το πρόβλημα του sm υποθέτει πως έχουμε στη διάθεσή μας μόνο δύο πραγματικές σαρώσεις που έχουν συλληφθεί από δύο διαφορετικές στάσεις, και ο στόχος της λύσης του είναι η εύρεση του μετασχηματισμού εκείνου που εάν εφαρμοσθεί στην πρώτη στάση μας δίνει τη δεύτερη σε κάποιο σύστημα αναφοράς.

Ευθυγράμμιση sm

Πρόβλημα:

Καπακιού: Δι. διδύμων:

- Πρωταρχική σάρωση  $S_0(p_0)$ : FOV =  $360^\circ$
- Πρωταρχική σάρωση  $S_1(p_1)$ : FOV =  $360^\circ$
- $p_0$  γνωστή (αυθαίρετη)



τέτοιας ωστε

- $q^{-1} = h(S_0, S_1)$
- $p_1 = q^{-1} \cdot p_0$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Βαρύτητα μετατροπής fsm2 σε fsm

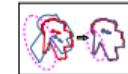
Εάν όντως είναι εφικτή η λύση του προβλήματος sm μέσω κατάλληλων μετατροπών της μεθόδου fsm2 που έχουμε φτιάξει, τότε όχι μόνο ότι έχουμε δώσει λύση στα δύο κύρια προβλήματα της εκτίμησης στάσης στη ρομποτική, που είδαμε στα δύο προηγούμενα κεφάλαια, αλλά ότι έχουμε παράξει μία μέθοδο οδομετρίας μέσω lidar. Και αυτό είναι σημαντικό γιατί η οδομετρία που μας παρέχεται μέσω των τροχών ή γενικά των άκρων που έρχονται σε επαφή με το δάπεδο αποκλίνει μέσα στο χρόνο, και εξαρτάται βαρέως από τις συνθήκες τριβής ανάμεσα τους.

- sm μέσω fsm2 → λύση pose tracking & global localisation
- sm μέσω παραγνής οδομετρίας μέσω lidar → απλέστερη μόδη
  - Αποδίδουσα οδομετρία τροχών / άκρων
  - Συνθήκες τριβής με προς επερόντα επερήξη

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

Προκλήσεις μετατροπής fsm2 σε fsm

- $t_{\text{vmax}} \leq \frac{1.0}{20 \text{ Hz}} = 50 \text{ ms}$  ( $t_{\text{vmax}} = T_{\text{vmax}} \approx 100 \text{ ms}$ )
- $SV(p_0)$  παλής προσέγγισης του χάρτη M  $\Rightarrow$  απάτηση ευρωσίας σε "κανές αντιστοιχίες"



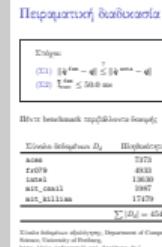
## └ Προκλήσεις μετατροπής fsm2 σε fsm

Στο πρόβλημα του scan matching, η τελική μέθοδος, την οποία θα ονομάσουμε fsm, έχει ξεκάθαρες απαιτήσεις χρόνου εκτέλεσης. Θα πρέπει να εκτελείται σε χρόνο μικρότερο από τον ελάχιστο χρόνο ανανέωσης μετρήσεων, ο οποίος για τους εμπορικά διαθέσιμους αισθητήρες είναι πεντήντα ms, και η πρόκληση εδώ είναι η μείωση του χρόνου εκτέλεσης  $SV(p_0)$  πιο γρήγορης έκδοσης του fsm2, η οποία έχει χρόνο εκτέλεσης 100 ms. Ακόμα πιο πολύ όμως, η πρόκληση εδώ απευθύνεται στην ευρωστία της μεθόδου ευθυγράμμισης στις κενές αντιστοιχίσεις. Στην εικόνα εδώ βλέπουμε την αρχική και τελική διαμόρφωση σε μία επιτυχή λύση του προβλήματος fsm2, όπου από την  $SV(p_0)$  <sup>fsm2</sup>, η εικονική σάρωση έχει την ίδια μορφή με την πραγματική, ακριβώς επειδή υπάρχει γνώση του χάρτη του περιβάλλοντος. Στο sm όμως, εάν μετατρέψουμε την πρώτη σάρωση ως τον χάρτη μέσα στον οποίο θα εφαρμόσουμε την τεχνική sm2, τότε στο τέλος είναι δυνατόν η ευθυγράμμιση να αποτύχει, λόγω του γεγονότος ότι καμία εικονική σάρωση δεν θα φτάσει να έχει τη μορφή της πραγματικής, αφού ο χάρτης τώρα δεν περιγράφει το περιβάλλον στο σύνολό του, αλλά το περιβάλλον από μία στάση, και λόγω του γεγονότος ότι ο fsm2 δεν υπολογίζει αντιστοιχίσεις ώστε να απορρίψει στους υπολογισμούς του περιοχές ή σημεία της μίας σάρωσης που δεν αντιστοιχούν στην άλλη.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

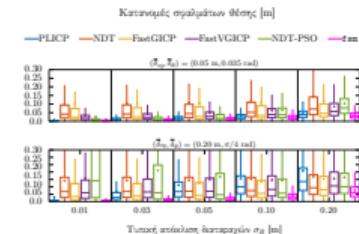
## └ Πειραματική διαδικασία

Για να εξετάσουμε εάν είναι δυνατή η μετατροπή της λύσης που δώσαμε στο πρόβλημα sm2 σε λύση του προβλήματος scan-matching διεξάγουμε πειράματα στα οποία οι στόχοι μας είναι δύο: πρώτον όταν επιυθυμούσαμε τα σφάλματα των μετασχηματισμών του fsm να είνωι μικρότερα από αυτά των μεθόδων της βιβλιογραφίας, και δεύτερον όταν υέλαμε ο fsm να εκτελείται σε πραγματικό χρόνο. Εδώ χρησιμοποιούμε και πάλι τα ίδια πέντε σύνολα περιβαλλόντων όπως και πριν, και,



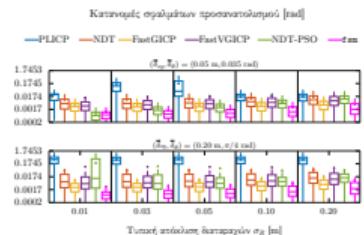


# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



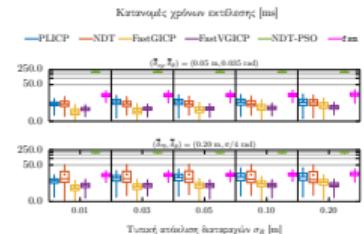
Σε αυτή τη διαφάνεια βλέπουμε τις κατανομές των τελικών σφαλμάτων θέσης. Στην άνω σειρά βρίσκονται τα αποτελέσματα για το χαμηλότερο επίπεδο μετατόπισης μεταξύ σαρώσεων και στην κάτω αυτά για το υψηλότερο επίπεδο μετατόπισης. Κάθε μαύρο block αναφέρεται σε ένα επίπεδο θορύβου μέτρησης. Θα δείτε πως σε χαμηλές ταχύτητες ο fsm είναι ισοδύναμος και λίγο καλύτερος από την καλύτερη μέθοδο, που εδώ είναι ο plicp με μπλε χρώμα, και κυριαρχεί σε υψηλές ταχύτητες ιδιαίτερα όσο αυξάνει ο θόρυβος μέτρησης.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



Ως προς τα σφάλματα προσανατολισμού ο fsm κυριαρχεί σε όλα τα επίπεδα εκτός από εκείνο που αναφέρεται στο χαμηλότερο επίπεδο μετατόπισης και το χαμηλότερο επίπεδο όφελου, όπου ο NDT-PSO εμφανίζει χαμηλότερα σφάλματα.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

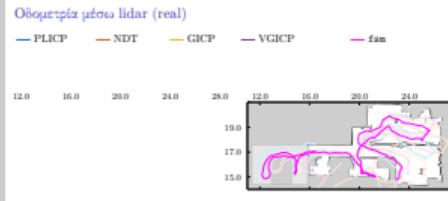


Όμως ο NDT-PSO δεν τρέχει σε πραγματικό χρόνο. Εδώ βλέπουμε τις κατανομές των χρόνων εκτέλεσης, όπου ο NDT-PSO τρέχει σε 140 ms, ενώ ο fsm τρέχει κατά μέσο όρο σε λιγότερο από 25 ms για κάθε επίπεδο αρχικής μετατόπισης και θορύβου μέτρησης.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Οδομετρία μέσω lidar (real)

Κλείνοντας θέλω να σας δείξω πώς μεταφράζονται στην πράξη αυτά τα σφάλματα. Εδώ βλέπουμε την εκτίμηση της τροχίας ενός πραγματικού αισθητήρα—από τους αλγορίθμους της πειραματικής διαδικασίας που τρέχουν σε πραγματικό χρόνο στα αριστερά, και στα δεξιά τον fsm. Εδώ παρατηρούμε πως το σφάλμα θέσης κάθε μεθόδου αυξάνει στις μεταβάσεις του αισθητήρα από δωμάτιο σε δωμάτιο ακριβώς λόγω των καινούριων περιοχών που μπαίνουν στο πεδίο όρασης του αισθητήρα, και οι οποίες συνεπώς παράγουν κενές αντιστοιχίσεις ανάμεσα σε δύο διαδοχικές σαρώσεις. Ο αισθητήρας περνάει από πέντε τέτοια σημεία για συνολικά εννιά φορές, και η εκτιμώμενη απόσταση που διένυσε είναι 43 μέτρα. Οι εκτιμώμενες τροχιές του έχουν ευθυγραμμισθεί με βάση αυτά τα σημεία επειδή δεν έχουμε πρόσβαση στην πραγματική τροχιά του αισθητήρα, και από ότι βλέπετε ο fsm έχει τη μικρότερη απόκλιση μέσα στο χρόνο σε σχέση με τις μεθόδους της τρέχουσας βιβλιγραφίας.

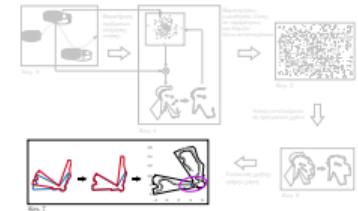


## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ fsm: Ευρωστία

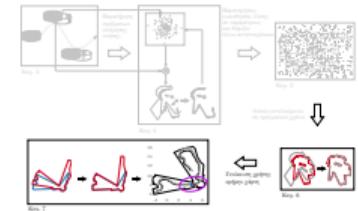
Συνοψίζοντας για τον fsm, μπορούμε να πούμε ότι είναι εύρωστος όχι μόνο στο θόρυβο μέτρησης, αλλά επίσης σε συνιστώσες υψηλών συχνοτήτων και σε κενές αντιστοιχίσεις,

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



ότι είναι η πρώτη scan matching μεθόδος που λειτουργεί χωρίς αντιστοιχίσεις, η οποία

## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

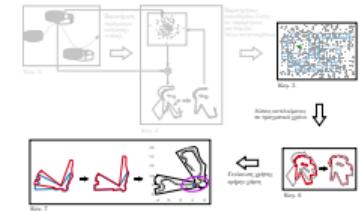


ταυτόχρονα επιλύει **χωρίς αντιστοιχίσεις** το πρόβλημα της ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές σαρώσεις, και η οποία συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση ή βελτίωση των λύσεων των δύο κυριότερων προβλημάτων εκτίμησης στάσης στο πεδίο της ρομποτικής κινητής βάσης,—

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



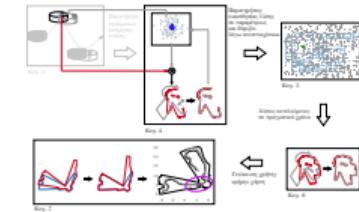
δηλαδή του προβλήματος του global localisation,



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



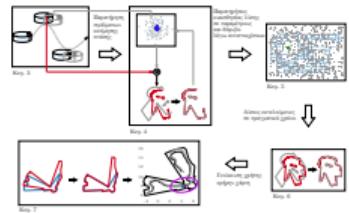
και του pose tracking.



## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

Σάς ευχαριστώ για τον χρόνο και την προσοχή σας

Σάς ευχαριστώ για τον χρόνο και την προσοχή σας



Σάς ευχαριστώ πολύ.