

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

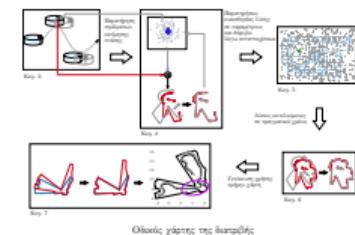
Μέθοδοι εκτίμησης στάσης  
αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων  
μέσω  
ευλιγράφηματης πραγματικών με επενδυτικές συρίσεις

Αλέξανδρος Φύλαθηνος

TUMIT, 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 μεθόδων 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 μελέτης μου, 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 φίλτρο 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

To érgo RELIEF: motivation

- Αποθήκες προϊόντων: ανάγνωση για
- ▶ συνεχή παραγραφή
  - ▶ γνώση θέσης προϊόντων



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

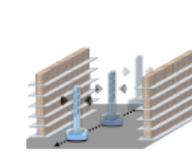
Τώρα—όλα αυτά που θα δούμε ξεκινάνε από μία πραγματική και εκτεταμένη απάιτηση στην αγορά λιανικών προϊόντων. Εκεί υπάρχουν εταιρείες που πουλάνε τα προϊόντα τους σε καταστήματα, και των οποίων το συνολικό απόθεμα στεγάζεται σε κεντρικές αποθήκες. Εν γένει αυτές οι εταιρείες θα ήθελαν να γνωρίζουν σε καθημερινή βάση το απόθεμά που βρίσκεται στις αποθήκες τους, όμως αυτό είναι τόσο κοστοβόρο ώστε μπορούν να μετρούν το απόθεμά τους 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.

## 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 το 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 επενδύση σε πράσινα
- Αυτόνομα επίγεια αγήθεα με RFID αναγνώστες

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

- Εξαντλητικής αποθήκευσης (lidar, rgh(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  των περιβάλλοντας
- Επικρατησμένης  $\rho_t$  (μέση EKF/PF)
- Λεγχών συνθήκης στάσης  $p_0^M$
- Τέλος συνθήκης στάσης  $p_{\infty}^M$



Εικόνα προς διάθεση: Βιβλιοθήκη ΤΕΙ Αθηνών

Πηγή: Wikipedia - Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

# 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 ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΥΠΟΙΚΕΤ ΑΙΓΑΝΟΥ

Εικόνα δεξιά: Κατάστημα με βιβλία γραμμάτων

# 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, rfid(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Επικρατησμένη ρήτρα (μέσα EKF/PF)
- Λεγχός συνθήκη στάσης  $p_0^M$
- Τέλειος συνθήκη στάσης  $p_0^M$



Επαγγελματική φωτογραφία από την Εθνική Βιβλιοθήκη της Ελλάς.



# 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

- Εξαεροσκοπικοί αισθητήρες (lidar, rgh(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$  (μέση EKF/PF)
- Λεγχών συνθήκη στάσης  $p_t^M$
- Τέλος συνθήκη στάσης  $p_{t+1}^M$



Εικόνα αριστερά: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΣΥΝΔΕΣΤΙΚΟΣ ΛΟΓΙΣΜΟΣ



# 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 αποθητήρας (lidar, rgh(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$  (μέση EKF/PF)
- Λεγχός συνθήκης στάσης  $p_t^M$
- Τέλος συνθήκης 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.

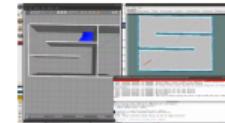
Ως στάση ορίζουμε το διάνυσμα που συνίσταται από τη θέση και τον προσανατολισμό του ρομπότ ως προς  
το σύστημα αναφοράς του χάρτη.

- Εξαντελετικός αισθητήρας (lidar, rgh(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$  (μέσα EKF/PF)
- Λεγχος συνθήκη στάσης  $p_t^M$
- Τελική συνθήκη στάσης  $p_{\text{fin}}^M$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά

Δεδομένων αυτών η αυτόνομη πλοήγηση συνίσταται σε δύο μέρη:



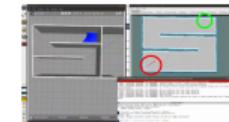
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ 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  $M$

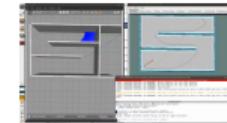
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



# 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



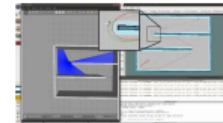
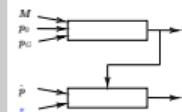
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ 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



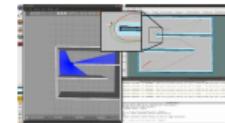
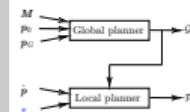
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ 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			

2023-06-22

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

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

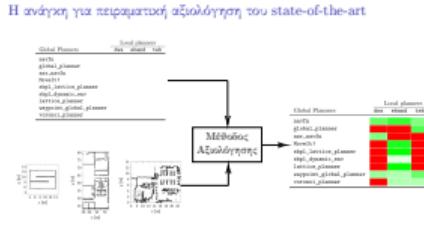
Πουθενα ομως στη διαθεσιμη βιβλιογραφια δεν υπηρχε συγκριτικη αναλυση της συνδυαστικής επιδοσης τους στο έργο της αυτόνομης πλοήγησης ώστε να επιλεχθεί ποιός συνδυασμός θα εκπλήρωνε τους στόχους μας στα πλαίσια του έργου.

Global Planners	Local planners		
	des	obstacle	traj
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sgpl_lattice_planner	?	?	?
sgpl_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 πλοϊκή γηση σε επίγειες κινητές ρομποτικές βάσεις.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Προκαταρκτική αξιολόγηση: ποιοτικά κριτήρια λογισμικού

Αρχικά συγκεντρώθηκαν όλα τα διαθέσιμα πακέτα λογισμικού και υποβλήθηκαν 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.

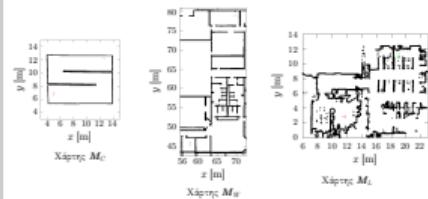
Planner	Βασικές Μητρικές						Αναλογία	
	BOU	UTD	ENST	SC/U	PARAM	CON	COMP	
naive	•	•	•	•	•	•	•	•
global_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
arc_neigh	•	•	•	•	•	•	•	•
MoveIt!	***	•	**	•	•	•	***	•
sgpl_lattice_planner	**	•	•	•	•	•	•	•
sgpl_neigh_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
lattice_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
wpqrptz_global_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
wpqrptz_local_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
dsn_local_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
eband_local_planner	•	•	•	•	•	•	•	•
tab_local_planner	•	•	•	•	•	•	•	•

Αληθινό τοιχίο MIL με ανελάσιμη μεμονωμένη επιδόση σε όλη την περιοχή λειτουργίας, όπως ανέρχεται στην παραπάνω αξιολόγηση. Οι αριθ. μετρικές υπολογίζονται με σύγχρονη Έλληνα περιοχή. Τα σημερινά υπολογισμοί δεν περιλαμβάνουν

# 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 πλοηγηθεί αυτόνομα 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 κρίσης 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 μήκος χρησιμότερων 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 μετρική πλέον είναι η V και η κατατάξη διαφορετικών συνδυασμών γύρω από την μέση πλέον είναι απότομη της προηγούμενης διατάξης.

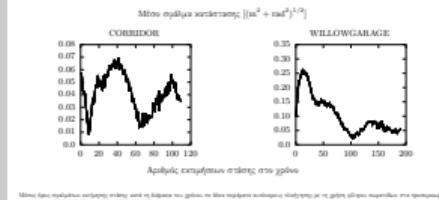
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα  
είναι ευικτό

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, με το βλέμμα στο μέλλον, υπάρχει πλέον το υπόβαθρο για την αξιολόγηση οποιοασδήποτε νέας μεθόδου που είτε χαράσσει μονοπάτια, είτε είναι ελεγκτής κίνησης, και σε οποιοδήποτε περιβάλλον.

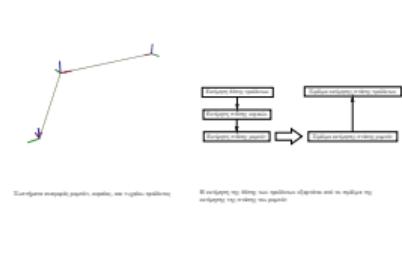
- Επεκτόπιμη και περιεκτική μεθοδολογία αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομης πλοιήγησης
- Προσαρμογή μεθόδου αξιολόγησης με βάση ειδικές παραίτησης ( $w_0 \neq 1.0$ )
- Ενεργάλματα στον ανθρώπινο μετλονυμικό μεθόδου
- Ενεργάλματα ad hoc περιβάλλοντος

# 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 υποθέτουμε ότι στο περιβάλλον που κινείται το ρομπότ δεν υπάρχει μετρητικός εξοπλισμός, αλλά το ρομπότ εκτίμα το ίδιο τη στάση του μέσω των αισθητήρων του.

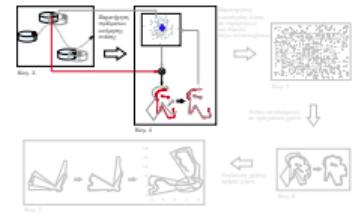
## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



product\_n\_frame

Σε γενικές γραμμές ~~to antenna-frame~~ το σφάλματος είναι φυσιολογικό λόγω της χρήσης παρατηρητή για την εκτίμηση της στάσης, 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 ~~base\_footprint~~

## 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.

- προσθετική ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων 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, όχ όλος ο πληθυσμός, αλλά ένα υποσύνολο του το οποίο περιέχει τα πιο βαρέα του σωματιδια του, τότε αναμένουμε η εκτίμηση του φίλτρου να έχει χαμηλότερο σφάλμα εκτίμησης.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω sm2

Ευθυγράμμιση πραγματικών σπάνισμαν με εικονικές σαρώσεις γάρτη ( $sm^2$ )  
Ευθυγράμμιση πραγματικών σπάνισμαν ( $sm$ )

## └ Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω sm2

'from-to-ground matching' → mask → sm  
'from-ground' → sm

Ένας δέυτερος τρόπος με τον οποίον μπορεί να ελαττωθεί το σφάλμα ενός παρατηρητή της στάσης ενός οχήματος που φέρει αισθητήρα lidar είναι μέσω ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές σαρώσεις. Αυτή η μέθοδος όμως μας ακολουθήσει σε όλη την υπόλοιπη έρευνά μου, και για λόγους οικονομίας όμως αναφέρομαι σε αυτήν συντομογραφικά ως sm2. Η τεχνική sm2 είναι υποσύνολο της γενικής μεθόδου ευθυγράμμισης πραγματικών σαρώσεων, στην οποία όμως αναφέρομαι ως σκέτο sm, εκ της φράσεως scan-matching.

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

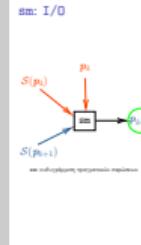
└ Ευθυγράμμιση πραγματικών σφράσεων (sm)  $\mathcal{S}(p_k)$   $\mathcal{S}(p_{k+1})$

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

Η τεχνική sm υποθέτει έναν αισθητήρα lidar ο οποίος συλλαμβάνει από δύο διαφορετικές στάσεις δύο διαφορετικές σφράσεις, όπως στο σχήμα που απεικονίζεται στα αριστερά. Στη μέση βλέπουμε τη διαδικασία ευθυγράμμισης των δύο αυτών σφράσεων, και στα δεξιά σε εστίαση την εξέλιξη της εκτίμησης της δεύτερης στάσης του ρομπότ στο σύστημα αναφοράς της πρώτης σάρωσης. Αυτή η εκτίμηση είναι δυνατή διότι η ευθυγράμμιση των δύο πραγματικών σφράσεων 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, ο οποίος 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 σφράσεων είναι υεμελιώδες κομμάτι της ρομποτικής, και χρησιμοποιείται κατά κόρον για την εκτίμηση της οδομετρίας ενός οχήματος.

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

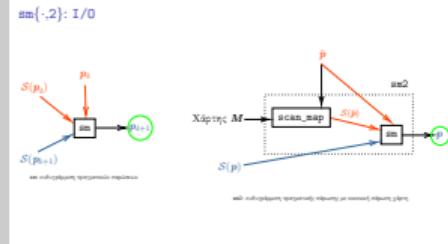
└ sm: I/O



Με λίγα 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 ...

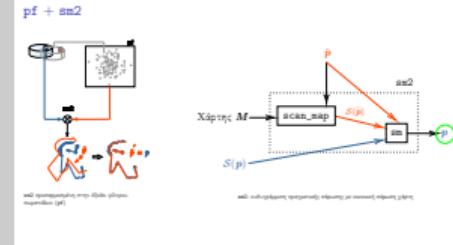
└ sm{·,2}: I/O



Σε αυτό το γεγονός κρύβεται μία δεύτερη χρησιμότητα της ευθυγράμμισης σαρώσεων. Εαν 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 ...

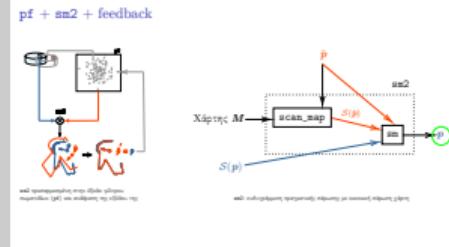
└ pf + sm2



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 το φίλτρου να μειωθεί.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

- Ανάδοση με τη μεριή μεταβάσεως απόθεσης  
→ αργή σύγκλιση / αυξηητικά συγκριτικά

## └ 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 ...

- ▲ Ανάδοση με τη μηρή βασικής ανάθεσης  
→ αργή σύγκλιση / αυξημένα σφάλματα
- ▲ Εξ απολαύσεων αρχαιοελληνικού γηγετού  
→ απώλεια ανθεκτικότητας σε περίπτωση απογοής 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 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 διακινδυνεύεται σε περίπτωση αποτυχίας της ευθυγράμμισης η ανθεκτικότητα του φίλτρου, γιατί το ίδιο θα συνεχίσει να περιέχει υποιθέσεις 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 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 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>

- Ανάδραση με τη μορφή μακρινής απόστασης  
→ αργή σύγκλιση / αμελητέα σφάλμα
- Εξ ολευθέρου αρχαιωσίης του γάμου  
→ απόλλητα ανθεκτικότητας σε περίπτωση απονομίας sm2
- Ανάδραση με τη μορφή πλάκανσης υποθέσεων  
→ τρέχουση σύγκλιση και διεπίφερη 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 του φίλτρου θα είναι χαμηλότερο από τον σφάλμα εκτίμησης του ονομαστικού φίλτρου, χαμηλότερο από το σφάλμα εκτίμησης του φίλτρου εάν η υπόθεση εισάγετο ως μόνο ένα σωματίδιο, και ο πληθυσμός του φίλτρου είναι πιο ανθεκτικός σε σχέση με τον πληθυσμό του φίλτρου εάν ο αυτός αρχικοποιείται 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  $\hat{\mu}^* \leftarrow \text{sm2}(S(\hat{\mu}), \mathbf{M}, \hat{\mu}(\mathcal{P}))$ . Τότε

Τούλιθη Τ2:

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

Τούλιθη Τ3:

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

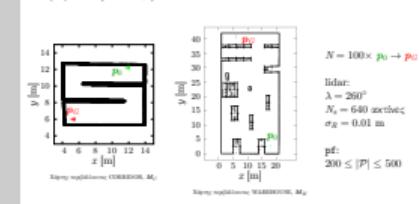
- $\|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P}^*)\| < \|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P})\|$
- $\|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P}^*)\| < \|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P} \cup \{\hat{\mu}^*\}_1)\|$
- $\mathcal{P} \cup \{\hat{\mu}^*\}_{q \in [\mathcal{P}^*]}$  ποι ανθεκτικός από  $\mathcal{P} \cup \{\hat{\mu}^*\}_{[\mathcal{P}^*]}$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική διάταξη

Για να δοκιμάσουμε τις τρεις υποθέσεις χρησιμοποιούμε δύο περιβάλλοντα, ένα απλό το οποίο ονομάζεται corridor, 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, 640 ακτίνων, με θόρυβο μέτρησης κανονικά κατανεμημένο με τυπική απόκλιση ενός εκατοστού. Ο πληθυσμός του φίλτρου είναι κυμαινόμενος με ελάχιστη πληθυκότητα 200 σωματίδια, και μέγιστη 500.

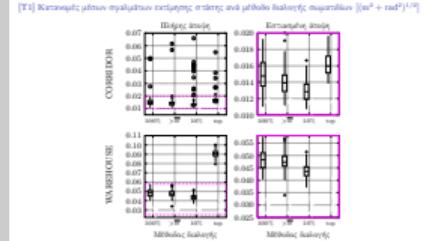
Πειραματική διάταξη



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

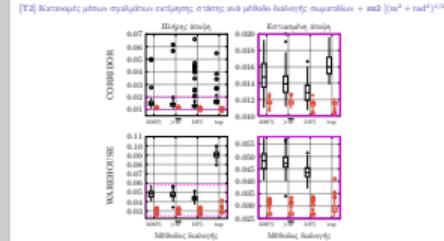
Σε αυτή τη διαφάνεια βλεπουμε την κατανομές των μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά διαδρομή για 100 επαναλήψεις σε κάθε περιβάλλον, ανά μέθοδο διαλογής. Με τη συντομογραφία 100% εννοούμε την ονομαστική κατάσταση του φίλτρου. Με μεγαλύτερο από μέσο W εννοούμε την κατάσταση που επιλέγονται να ψηφίσουν μονο εκείνα τα σωματίδια των οποίων το βάρος είναι μεγαλύτερο από το μέσο βάρος του πληθυσμού, με 10% την κατάσταση που μόνο το 10% των βαρύτερων σωματιδίων ψηφίζουν, και με τοπ συμβολίζουμε το σωματίδιο που φέρει το υψηλότερο βάρος του πληθυσμού. Με βάση τα πειραματικά δεδομένα βλέπουμε πως η διαλογή των σωματιδίων με βάρος μεγαλύτερο από το μέσο βάρος του συνολικού πληθυσμού εμφανίζει μικρότερο σφάλμα από την ονομαστική κατάσταση, και πως το σφάλμα μειώνεται ακόμα περισσότερο όταν επιλέγουμε το άνω 10% των σωματιδίων. Το αντιδιαισθητικό σε αυτά τα πειράματα είναι πως το σωματίδιο που εμφανίζει το μεγαλύτερο βάρος, δηλαδή αυτό 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

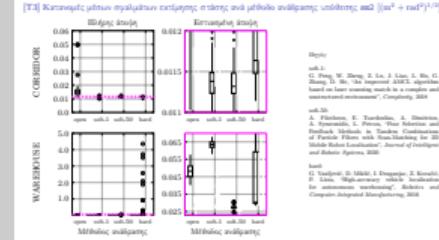
Σε αυτή τη διαφάνεια με κόκκινο φαίνονται τα σφάλματα του αποτελέσματος της μεθόδου sm2 για κάθε μέθοδο διαλογής, τα οποία είναι κατά μέσο όρο στο σύνολό τους χαμηλότερα από εκείνα των εκτιμήσεων του φίλτρου.



# 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 το αποτέλεσμα του sm2 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.



Εργα:  
 G. Peng, W. Zhou, Z. Lin, J. Liang, S. Bai, G. Zhang, "The 'Open-loop' approach ALIDR: a novel method based on laser scanning match in a complex and unstructured environment", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2018.  
 sub-20:  
 A. Filaková, E. Tzortzinis, A. Dimiceli, A. Pachidis, "A New Way to Implement Lidar-based SLAM Using Multiple Methods in Random Contexts", *Journal of Field Robotics*, 2018.  
 hard:  
 G. Vandebroek, D. Mihale, I. Dragomir, Z. Kossmehl, R. Veltkamp, "A novel tracking method for autonomous walking", *Sensors and Computer Integrated Manufacturing*, 2018.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα  
είναι ευικτό

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 που αρχικοποιεί το φίλτρο γύρω από το αποτέλεσμά της.

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

Παράτρια

Θλούβος

### └ Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

Οπότε εδώ γεννάται το φυσικό ερώτημα: ποιά είναι τα τρωτά σημεία των μεθόδων ευθυγράμμισης σαρώσεων? Εκ πρώτης όψεως τα τρωτά σημεία είναι η ευαισθησία της λύσης στη ρύθμιση των παραμέτρων και στον θόρυβο.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: παραμετροποίηση

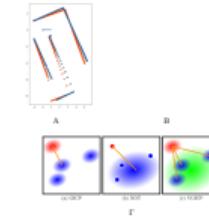
Το πρόβλημα με την παραμετροποίηση που αφορά τουλάχιστον στη μέθοδο που παρήγαγε τα αποτελέσματα μου μόλις είδαμε, η οποία είναι μάλιστα η καλύτερη μέθοδος στη βιβλιογραφία, είναι ότι δεν είναι διαισθητική διαδικασία, ότι μικρές μεταβολές των τιμών των παραμέτρων παράγουν δυσανάλογα μεγάλες μεταβολές 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



A: NCP επί της αρχής (αρχικό προσεγγισμό)  
B: πλέον σημεία προς παραγόμενα γέμισμα  
Γ: (a) Κατανομή προς κατανομή, (b) Σημεία προς κατανομή, (c) Κατανομή προς κατανομή

Draft: Δρ. Γεώργιος Βαρβαρόπουλος, λαζαρετός  
Επίκουρης Καθηγητής στην Επαγγελματική Καταπληκτική Ακαδημία

B. A. Cross, "On ICP variant using a point-to-line metric for registration," *Proceedings on Robotics and Automation*, 2000.

E. K. Mueller, M. Voloshin, R. Ghosh and A. Bernoulli, "Fast Point Cloud Registration," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011.

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: το οποίο είναι το πρόβλημα του θορύβου μέτρησης.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Τρωτά σημεία με ψόδων ευθυγράμμισης:  
 $\sigma_R = 0.0 \text{ m}$     $\sigma_R = 0.1 \text{ m}$   
ψόουβος (ατελείς αντιστοιχίσεις)

Χώρος αντιστοιχίσεων

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

# 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

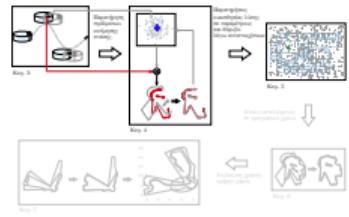
## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



### └ 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:  $\lambda = 2\pi \text{ rad}$
- Παραποτή:  $\text{loss} \neq \text{loss}$

Εδώ καταρχάς αναζητούμε τις συνθήκες εκείνες κάτω από τις οποίες είναι δυνατόν 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 σάφωση 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 βιβλιογραφίας λύνουν το πρόβλημα μέσω εύρεσης αντιστοιχίσεων, και συνεπώς αρχίζουμε να ερευνούμε άλλα πεδία. Εδώ το ζητούμενο 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.

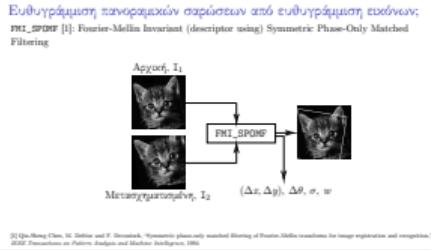
### Προβλήματα:

- Απούσα βιβλιογραφία στο συντριβές πεδίο
- Εύρεση μεθόδου(οιων) εκτίμησης θέσης και προσανατόλιμου

## 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.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από  
ευθυγράμμιση εικόνων:

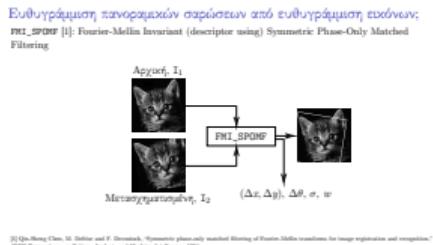
Μέσα από την αναζήτησή μας βρήκαμε τη μέθοδο FMI-SPOMF, η οποία χρησιμοποιείται στον κλάδο της υπολογιστικής όρασης για την εκτίμηση ανάμεσα σε δύο εικόνες της μετατόπισης τους, της γωνίας περιστροφής τους, της κλιμάκωσης τους, και του βαθμού ομοιότητάς τους. Αυτές οι παράμετροι υπολογίζονται  $Q(u, v) = \frac{|\mathcal{F}\{I_1\} \cdot \mathcal{F}\{I_2\}|}{|\mathcal{F}\{I_1\}| \cdot |\mathcal{F}\{I_2\}|}$  με κλειστό τρόπο και χωρίς να υπολογίζονται αντιστοιχίσεις ανάμεσα στις δύο εικόνες.

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

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

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

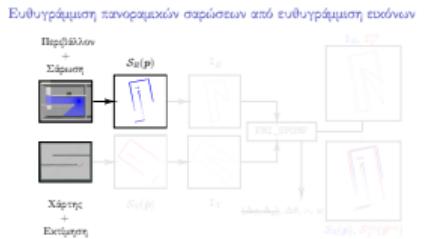
$$w = \max q$$



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

- └ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

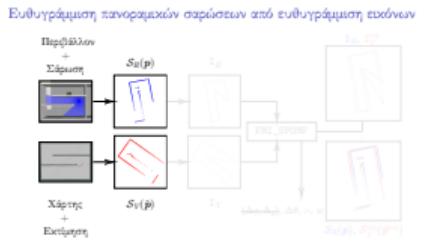
Ας υποθέσουμε λοιπόν πως έχουμε στη διάθεσή μας μία πανοραμική σάρωση  $S_R$ , το χάρτη του περιβάλλοντος, και μία εκτίμηση για τη στάση του αισθητήρα lidar.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

- └ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

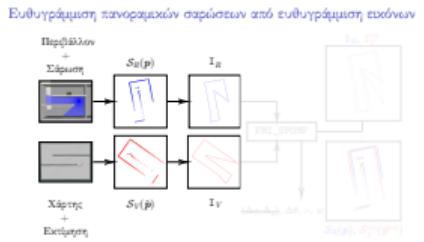
Ας υποθέσουμε λοιπόν πως έχουμε στη διάθεσή μας μία πανοραμική σάρωση  $S_R$ , το χάρτη του περιβάλλοντος, και μία εκτίμηση για τη στάση του αισθητήρα lidar. Μέσω της εκτίμησης και του χάρτη είναι δυνατός ο υπολογισμός της εικονικής σάρωσης  $S_V$  μέσω raycasting.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

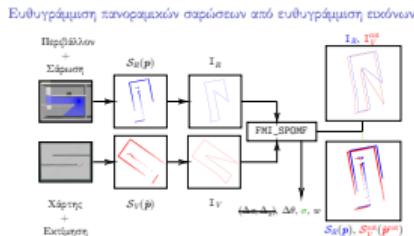
Ας υποθέσουμε λοιπόν πως έχουμε στη διάθεσή μας μία πανοραμική σάρωση  $S_R$ , το χάρτη του περιβάλλοντος, και μία εκτίμηση για τη στάση του αισθητήρα lidar. Μέσω της εκτίμησης και του χάρτη είναι δυνατός ο υπολογισμός της εικονικής σάρωσης  $S_V$  μέσω raycasting. Εάν προβάλλουμε τις δύο σαρώσεις εισόδου στο καρτεσιανό επίπεδο, εκφρασμένες στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων, και στη συνέχεια τις διαχριτοποιήσουμε, 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 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. Μέσω της εκτίμησης και του χάρτη είναι δυνατός ο υπολογισμός της εικονικής σάρωσης  $S_V$  μέσω raycasting. Εάν προβάλλουμε τις δύο σαρώσεις εισόδου στο καρτεσιανό επίπεδο, εκφρασμένες στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του κάθε αισθητήρα, 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. Αν και ο FMI SPOMF εξάγει την εκτίμηση της μετατόπισης μεταξύ των δύο εικόνων, είναι προτιμότερο να μην τη χρησιμοποιήσουμε ώστε να μην υπάρχει εξάρτηση του σφάλματος εκτίμησης θέσης από την ανάλυση των εικόνων.

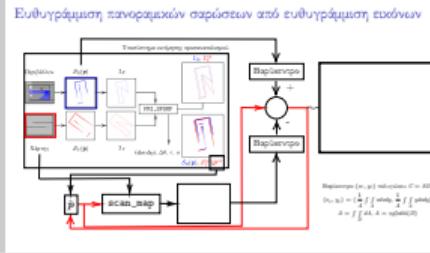


# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγραμμιστή 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.

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



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

$t_{pose\_stop}^{POSE\_STOP} > t_{pose\_tracking}$   
⇒  
από την πρώτη επίλυση της προβλήματος Global Localisation

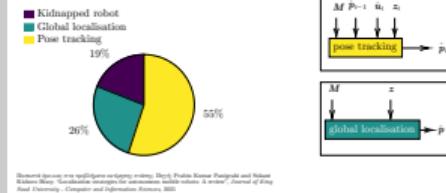
Στην πραγματικότητα ο χρόνος εκτέλεσης αυτής της μεθόδου ευθυγράμμισης sm2 είναι πολύ μεγαλύτερος από τον χρόνο εκτέλεσης που απαιτείται για να εφαρμοσθεί η μέθοδος σε συνδυασμό με ένα φίλτρο σωματιδίων και, επειδή ο χρόνος εκτέλεσης δεν είναι σε αυτό το σημείο ζήτημα, τη χρησιμοποιούμε για την επίλυση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

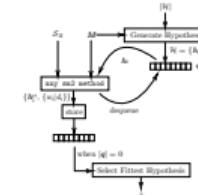
Τι σημαίνει αυτό.. Κατά κύριο λόγο τα μεγάλα προβλήματα εκτίμησης στη ρομποτικής κινητής βάσης διαχρίνονται στα προβλήματα της παρατήρησης της στάσης ενός ρομπότ καθώς αυτό κινείται, και στο πρόβλημα του global localisation, το οποίο είναι το πρόβλημα του προσδιορισμού της στάσης ενός αισθητήρα δεδομένων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

Global localisation: Το δεύτερο μεγαλύτερο προβλήμα ρομποτικής κινητής βάσης



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

└ Global localisation: επιλύσιμο μέσω sm2



Το πρόβλημα του 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  $H$  από υποψέσεις στάσης, οι οποίες τοποθετούνται σε μία ουρά  $q$ . Από κάθε υπόψη 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 την υποψήφια στάση. Για τις τεχνικές sm2 που λειτουργούν με αντιστοιχίσεις αυτό το μέτρο υπολογίζεται εσωτερικά σε κάθε μέθοδο ως το άθροισμα των αποστάσεων των σημειών της μίας σάρωσης ως προς τα σημεία, τις γραμμές ή τις κατανομές της δεύτερης, και στο δικό μας σύστημα αυτό το μέτρο προέρχεται απευθείας από τον FMI-SPOMF. 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 πανοραμικό αισθητήρα lidar 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 YDLIDAR μεγίστου 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:  $\sigma_d = \{0.01, 0.02, 0.05\}$  m,  $r_{max} = 10.0$  m

■ CSAL AUTH:

- 11 διαφορετικές στάσεις
- 5 επαναλήψεις ανά στάση
- LIDAR: YDLIDAR TG30,  $r_{max} = 30.0$  m



Απόσταση d [m]	Μέση στάτη στα [m]
20-500	≤ ±60
5000-30000	≤ ±40
20000-30000	≤ ±100

Ημερολόγιο πειραματικής διαδικασίας. Τοποθετείται στην πρώτη σελίδα της παραστασίας.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική διαδικασία: μη αποδεκτές λύσεις

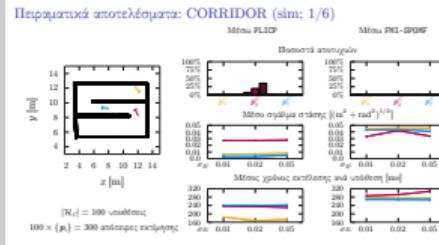
Σε όλες τις δοκιμές καταγράφουμε το τελικό σφάλμα θέσης και προσανατολισμού και ονομάζουμε επιτυχημένη ανέυρεση στάσης κάθε περίπτωση όπου το τελικό σφάλμα θέσης ήταν μικρότερο από ένα μέτρο, διότι μετά την επίλυση του προβήματος global localisation, τυπικά ακολουθεί η παρατήρηση της στάσης του ρομπότ, 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 ...

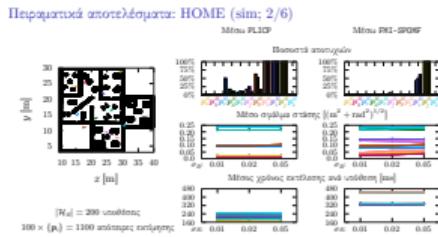
## └ Πειραματικά αποτελέσματα: CORRIDOR (sim: 1/6)

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 στο προσομοιωμένο περιβάλλον corridor. Στην πάνω σειρά βλέπουμε τα ποσοστά αποτυχημένων εκτιμήσεων στάσης, στη δεύτερη σειρά το μέσο σφάλμα στάσης ανά τιμή τυπικής απόκλισης μετρητικού θορύβου, 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)

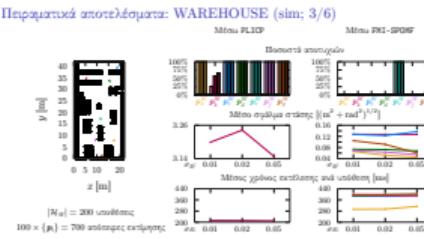


Στο περιβάλλον HOME βλέπουμε τα ίδια αποτελέσματα, με τον plicp να μην μπορεί να βρει ποτε σε καποιες περιπτώσεις τη στάση του αισθητήρα λόγω συμμετριών του περιβάλλοντος,

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

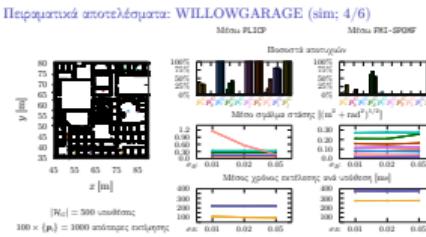
σε αυτή τη διαφάνεια βλέπουμε τα αποτελέσματα σε μία αποθήκη, όπου η έλλειψη ειδικής παραμετροποίησης για το γεγονός ότι το βεληνεκές του αισθητήρα είναι μικρό σε σχέση με τη γεωμετρία του περιβάλλοντος κάνει τον plicp να αποτυγχάνει σχεδόν παντού, ενώ ο SPOMF δεν εμφανίζει αυτό το πρόβλημα.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

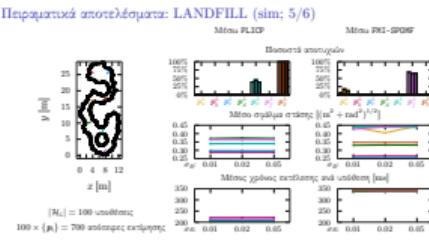
Στο περιβάλλον WILLOGARAGE φαίνεται πως ο plicp απαιτεί οι στάσεις από τις οποίες συλλαμβάνονται οι δύο μετρήσεις να έχουν μικρή απόσταση ώστε να είναι ικανός να τις ευθυγραμμίσει, και πως το ίδιόν του κριτήριο επιλογής τελικής στάσης δεν είναι ικανό να ξεδιαλύνει ασάφειες, όπως δηλαδή στο περιβάλλον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



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

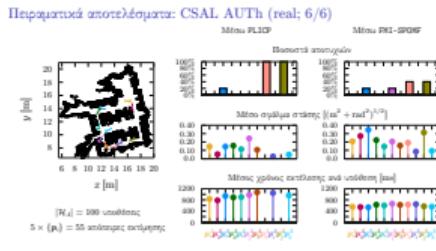
Το περιβάλλον LANDFILL το φτιάξαμε από το μηδέν ως ένα περιβάλλον που δεν περιλαμβάνει ευθείες γραμμές, ή γωνίες, ώστε να δείξουμε πως σε αντίθεση με μία κλάση μεθόδων της βιβλιογραφίας, η μέθοδος που οικοδομήσαμε είναι αναλογιώτη των περιβαλλόντων και δεν απαιτεί να εμφανίζουν συγκεκριμένα features,



# 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 τα πειράματα ξαναπαρατηρήσαμε την ανάγκη από τις μεθόδους ευθυγράμμισης που βασίζονται στις αντιστοιχίσεις για custom-made παραμετροποίηση ανά περιβάλλον, και παρατηρήσαμε για πρώτη φορά κάτι 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. Το μεγαλύτερο αποτέλεσμα όταν έλεγα είναι πως η μέθοδος που σχεδιάσαμε εμφανίζει σφάλματα στάσης τα οποία είναι συγκρίσιμα σε σχέση με την καλύτερη μέθοδο της βιβλιογραφίας.

- Μέθοδοι με αντιστοιχίες:
  - Ευανθράκια λίστες σε παραμετροποίηση χ. πανηγύρις @ WAREHOUSE
  - Ευανθράκια λίστες σε αρχεία συνθήκες μετατόπισης—π.χ. 1 ισόθετη συνά 4 m<sup>2</sup> @ WAREHOUSE, WILLOWGARAGE
- Σημάντικα επείγοντα απ2: μέσου FM1-SPDMF ~ μέσου μεθόδων με αντιστοιχίες

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα  
είναι ευικτό

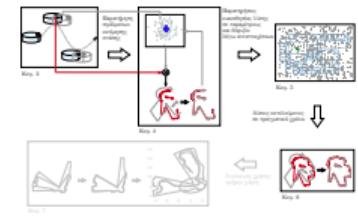
Αυτό που δεν ήταν προηγουμένως δυνατόν και είναι σήμερα είναι η πρώτη μέθοδος που λύνει το πρόβλημα  $sm^2$  για πανοραμικά lidar χωρίς να υπολογίζει αντιστοιχίσεις ανάμεσα στις σαρώσεις εισόδου.

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι ευικτό

Ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές επιφάνειες πανοραμικού lidar  
ρυθμό που επιλέγεται αποτελεσματικά

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

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



Το πρόβλημα εδώ βέβαιως είναι ότι εάν θέλαμε να αντικαταστήσουμε τη μέθοδο που χρησιμοποιήσαμε στην έξοδο του φίλτρου σωματιδίων με τη μέθοδο που κατασκευάσαμε σε αυτό το κεφάλαιο αυτό δεν θα ήταν δυνατόν γιατί οι λύσεις της 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 ρυθμό παραγωγής εκτιμήσεων από τη μέθοδο που τις παράγει, δηλαδή για παράδειγμα ένα φίλτρο σωματιδίων.

- Προγραμματισμένη άποψη  $S_2(p)$ : FOV =  $360^\circ$
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση  $\hat{p}(\tilde{L}, \theta)$
- Η εκτίμηση θέσης  $\tilde{L} = (\tilde{x}, \tilde{y})$  είναι σε μία γειτονιά της  $L = (x, y)$

$$\|\hat{p}' - p\| < \|\hat{p} - p\|$$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αποσύνθεση προβλήματος

Αρχικά εδώ το πρόβλημα αποσυντέθηκε 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  $\hat{R}(x, y)$  όταν  $\hat{\theta} = \theta$
- Εκτίμηση προσανατολισμού  $\hat{\theta}$  όταν  $\hat{R} = R$



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

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

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

$$u[k] = \frac{1}{N_v} \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & \sin \hat{\theta} \\ \sin \hat{\theta} & -\cos \hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1,i}(\mathcal{S}_R, \mathcal{S}_V|q[k]) \\ X_{2,i}(\mathcal{S}_R, \mathcal{S}_V|q[k]) \end{bmatrix}$$

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

G. Tsigas, D. Mihali, I. Dragomir, Z. Kovacic, P. Liotta, "High-accuracy vehicle localization for autonomous navigation", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023.

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.

# 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  $\hat{l} = l$

- rc\_xl
- rc\_fm
- rc\_sf

Το δεύτερο πρόβλημα, δηλαδή της εκτίμησης του προσανατολισμού του αισθητήρα δεδομένης της θέσης του, χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων 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 ύφεσης που είδαμε μόλις, εάν αντί για γνωστό προσανατολισμό ψεωρήσουμε γνωστή τη ύφεση 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:

$$\phi = \angle \mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\} - \tan^{-1} \frac{|\mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}| \sin(\angle \mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}) - \textcolor{red}{N}_2[\delta] \sin(\hat{\theta} + \angle \delta)}{|\mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}| \cos(\angle \mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}) - \textcolor{red}{N}_2[\delta] \cos(\hat{\theta} + \angle \delta)}$$

## 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.

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

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

# 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 ψυχομετρικής, η οποία στη βιβλιογραφία ονομάζεται η μέθοδος του προκρούστη. Εδώ εάν PR και PV είναι οι προβολές των δύο σαρώσεων στο χαρτεσιανό επίπεδο, και αποσυνθέσουμε το γινόμενό των δύο πινάκων σε ιδιάζουσες τιμές, μπορούμε να λάβουμε τον πίνακα περιστροφής που εάν εφαρμοσθεί στον πίνακα των σημείων της εικονικής σάρωσης θα τα μετασχηματίσει έτσι ώστε να ευθυγραμμιστούν με αυτά της πραγματικής σάρωσης με το ελάχιστο τετραγωνικό σφάλμα. Επειδή όμως δεν γνωρίζουμε τον προσανατολισμό του αισθητήρα, πρέπει να περιστρέψουμε τα σημεία της εικονικής σάρωσης όσες φορές όσος είναι ο αριθμός των ακτίνων του, και να καταγράψουμε τον μέτρο ευθυγράμμισης που προκύπτει από την αποσύνθεση. 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)

Έτσι:

•  $P_B, P_V$  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  $\theta$  γνωστή [1].

Όμως  $\theta$  θρησκιδές θίγνεται  $\Rightarrow$  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:  $\phi = f(N_s)$

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

• rc\_xl  
• rc\_fm  
• rc\_uf

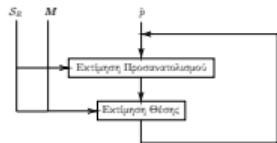
Ο κοινός παρονομαστής και των τριών μεθόδων είναι το μέγιστο μειονέκτημα τους, δηλαδή ότι, σε αντίθεση με τη λύση του προβλήματος της εκτίμησης της θέσης του αισθητήρα, δεν είναι δυνατόν να προσεγγίσουμε με αυθαίρετη ακρίβεια τον προσανατολισμό του ακόμα και σε ιδανικές συνθήκες γιατί η ακρίβεια και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

## 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,

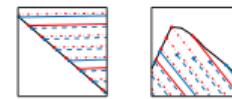
## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



└ 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

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

Η γνώμη μου είναι ότι ο μόνος τρόπος για τη μείωση του γωνιακού σφάλματος χωρίς την ακουστική εισαγωγή 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 την πραγματική σάρωση, και να καταλήξουμε στο ποιά από τις 2 εις την  $\nu$  εκτιμήσεις εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα. Οπότε τώρα εμφανίζεται μπροστά μας άλλο πρόβλημα. Δεδομένου ενός συνόλου εκτιμήσεων στάσης οι οποίες όλες έχουν την ίδια εκτίμηση θέσης αλλά διαφορετικές εκτιμήσεις προσανατολισμού, ποιά από αυτές εμφανίζει το χαμηλότερο σφάλμα προσανατολισμού?

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

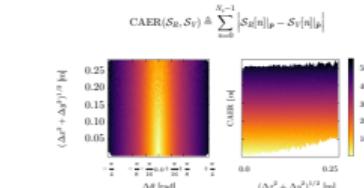
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ 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\*

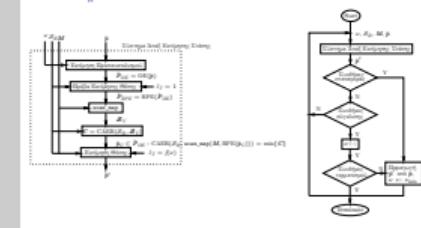
\* Cumulative Absolute Error per Ray



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Το σύστημα fsm2

Το σύστημα fsm2

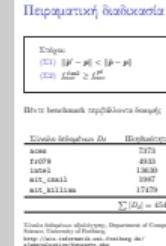


Με την εισαγωγή της μετρικής CAER μπορούμε τώρα να συνθέσουμε το τελικό σύστημα που επιλύει το πρόβλημα sm2 χωρίς αντιστοιχίσεις. Δεδομένων των παραδοχών του προβλήματος, το σύστημα fsm2 ελαττώνει επαναληπτικά το σφάλμα στάσης με τον εξης τρόπο. Αρχικά πραγματοποιείται εκτίμηση του προσανατολισμού, η οποία παράγει 2 εις την ν εκτιμήσεις στάσης, 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 στάσης, 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 στάσης με το μικρότερο σφάλμα από 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 CAER. Στη συνέχεια αυτή η εκτίμηση στάσης οδεύεται στο σύστημα εκτίμησης θέσης, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται με βάση αυτή την εκτίμηση εως ότου ικανοποιηθεί μια σειρά συνθηκών σύγκλισης και τερματισμού.

# 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

Πειραματική διαδικασία

Έπιπλα
(31) $ \hat{y} - y  <  \hat{y} - \bar{y} $
(32) $\frac{\hat{y}_{\text{true}}}{\hat{y}_{\text{true}}} \geq \frac{y_{\text{true}}}{\hat{y}_{\text{true}}}$

Ηλικία διεύθυνσης περιβάλλοντος έστιματος	
Εύροση	Ηλικία
αστερ	7378
τεστB	4113
τεστC	13630
αστ_αστι	1987
αστ_αστιαν	17479
$\sum  D_{ij}  = 45402$	

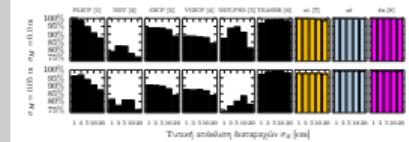
Εύροση διεύθυνσης περιβάλλοντος έστιματος  
 $\Delta \hat{y}_1 = (-1, +0.20, +0.20)$  [m]  
 $\Delta \hat{y}_2 = (-1, +0.20, +0.20)$  [m]  
 $\Delta \hat{y}_3 = (-1, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$  [m]

Τυπική απόδοση διεύθυνσης μετρήσεων και συντεταγμένων γεγονότων	
$\sigma_x = [0.01, 0.03, 0.05, 0.10, 0.20]$ [m]	$\sigma_y = [0.0, 0.05]$ [m]
Παραγόμενη ποσότητα σύγχρονης παρατήρησης στάσης:	
$\Delta \hat{y}_1 = (-1, +0.20, +0.20)$ [m] $\Delta \hat{y}_2 = (-1, +0.20, +0.20)$ [m] $\Delta \hat{y}_3 = (-1, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ [m]	
Συνολικής προβολής της περιβάλλοντος μετρήσεων	
$30 \times \sum  D_{ij}  \times  \sigma  <  \hat{y} M < 4.5 \cdot 10^6$ Μέγιστης παράτησης: $M = 360$ $\nu \in [\nu_{\text{min}}, \nu_{\text{max}}] = [2, 5]$ $\delta_T = 1 + \nu$	

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 τρεις παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο fsm2. Αυτό πάει να πει πως για το κομμάτι της εκτίμησης του προσανατολισμού υπερδειγματοληπτούμε το χάρτη κατ' ελάχιστον 2 στην δευτέρα φορές και το μέγιστο κατά 2 στην πέμπτη, και πως κάθε φορά που πραγματοποιείται εκτίμηση της θέσης, ο αριθμός των επαναλήψεων του υποσυστήματος εκτίμησης είναι ανάλογος της ακρίβειας προσέγγισης του προσανατολισμού.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

Ποσοστά επίτευξης στόχου Σ1



[1] A. Gross, "The ICP variant using a point-to-line metric," *ICRA 2008*  
[2] M. Neira, "The normal distribution transform: a new approach to local scene matching," *ICRA 2002*  
[3] S. Rusinkiewicz, "Efficient RGB and Accurate 3D Point Cloud Registration," *ICRA 2003*  
[4] S. Rusinkiewicz, "Efficient RGB and Accurate 3D Point Cloud Registration," *ICRA 2003*  
[5] A. Fähnlein, "TEASER: Fast and Reliable Point Cloud Registration," *IEEE Transactions on Robotics*, 2021  
[6] A. Fähnlein, "TEASER: Fast and Reliable Point Cloud Registration," *IEEE Transactions on Robotics*, 2021  
[7] A. Fähnlein, A. Symeonidis, G. Seglada, & Dimitris, "Correspondence-aware-to-map matching of 3D panoramic range scans," *Arxiv*, 2022  
[8] A. Fähnlein, G. Seglada, & Dimitris, "3D Correspondence-aware-to-map matching of panoramic 3D range scans," *ICRA 2022*

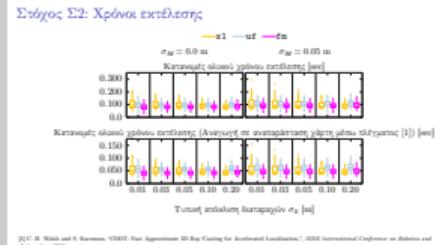
## └ Ποσοστά επίτευξης στόχου Σ1

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.

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 ύψορύβου 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 τρόπου που την έχω υλοποιήσει εδώ. Τώρα: ο στόχος μας εδώ είναι κάθε μέθοδος να εκτελείται σε μεγαλύτερη συχνότητα από τη συχνότητα παραγωγής εκτιμήσεων από το σύστημα που εκτελεί το pose tracking, η οποία δεν έχει ακριβή ορισμό. Στην πράξη αυτό που θα θέλαμε είναι η συχνότητα εκτέλεσης να είναι τουλάχιστον 5 Hz. Ο χαμηλότερος ρυθμός εκτέλεσης είναι της μεθόδου x1 όταν ο χάρτης είναι διεφθαρμένος, κατά μέσο όρο στα 6.5 Hz, ενώ οι υπόλοιπες δύο μέθοδοι λειτουργούν με τιμή περίπου στα 13 με 20 Hz.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

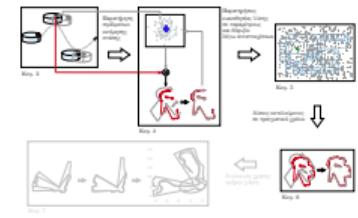
└ Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα  
είναι εφεκτό

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

Τρεις μέθοδοι ευθυγράμμισης πραγματισμένης με επικονιάζες (πινακίδες ταχύτητας και πανοραμής) περάσους χωρίς να παλέρησε αποτελέσματα:

- Είναι τρεις βασικές απεικόνισης {pose tracking, θέσην πρόσδιπτων} σε πραγματικό χρόνο
- Άλλη global localisation
  - Χωρίς ad hoc παραμετροποίηση (στατικές ή μεταβλητές)
  - Ταχύτηρα από FRT-SIFT (⇒ παραπότερες υποθέσεις → λιγότερες αποτελέσεις 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;

Μετά το sm2 τι;

Ευθύγραμη οπίδη αντιστοίχου των γεωμετρικών παραμέτρων	
Παραμέτροι ή μετρικές στοιχεία:	
• Αριθμός κλασών Zeigt: $Z_{\text{E}} = 30^{\circ}$	
• Διαστάσεις λαβής: $L$	
• Βάρος μετρητή: $m$	
• Βάρος μετρητή $M$ : $M = 10 \text{ kg}$ (περιήγηση της Εγκατάστασης)	
• Ταχύτης $v$ : $v = 10 \text{ m/s}$	
• Ταχύτης $v$ : $v = 10 \text{ m/s}$	

Εάν  $\|\hat{I}_S - I\| \ll \delta$  τότε
 
$$\left. \begin{array}{l} \bullet \|\hat{I}_{S,p_i} - I\| \\ \bullet S_{V,p_i}(\text{υποκήπη } M \text{ (άρα } W)) \end{array} \right\} \text{Εάν } M \leftarrow S_{V,p_i} \Rightarrow \text{h λύνει όπις στη γειτονιά της } p, \forall p, i = 0, 1, \dots, N$$

Αν ξανακοιτάζουμε το πρόβλημα sm2 όπως το θέσαμε, θα δούμε στα δεδομένα του προβλήματος μία πραγματική σάρωση, η οποία συλλαμβάνεται από την πραγματική  $S_R(p)$  τη στάση του αισθητήρα, και ύστερα το χάρτη του περιβάλλοντος και μία αρχική εκτίμηση για  $S_V(p_0)$  την θέση του αισθητήρα. Από αυτά τα δύο δεδομένα υπολογίζουμε την πρώτη εικονική σάρωση SV. Από τα προηγουμένα 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 αρχική εκτίμησή του βρίσκεται σε μία γειτονιά της, τότε χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορούμε να υποθέσουμε ότι όλες οι ενδιάμεσες εκτιμήσεις θέσεις βρίσκονται και αυτές σε μία γειτονιά της πραγματικής θέσης του, και, πιο σημαντικό, η αρχική εικονική σάρωση αποτελεί μία τοπική προσέγγιση του χάρτη M 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 ήδη υπάρχουσα μέθοδος να λύσει το γενικότερο πρόβλημα sm?

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Ευθυγράμμιση sm

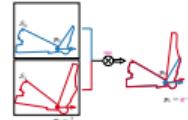
Σας υμίζω πως το πρόβλημα του sm υποθέτει πως έχουμε στη διάθεσή μας μόνο δύο πραγματικές σαρώσεις που έχουν συλληφθεί από δύο διαφορετικές στάσεις, και ο στόχος της λύσης του είναι η εύρεση του μετασχηματισμού εκείνου που εάν εφαρμοσθεί στην πρώτη στάση μας δίνει τη δεύτερη σε κάποιο σύστημα αναφοράς.

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 φόρμας

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

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Βαρύτητα μετατροπής fsm2 σε fsm

Βαρύτητα μετατροπής fsm2 σε fsm

- όπως μέτρο fsm2 → λύση pose tracking & global localisation
- όπως μέτρο παραγωγής οδομετρίας μέτρο lidar → απλότερη από
  - Αποδιάνοντα οδομετρία τροχών / δρόμου
  - Συνθήκες τρόπης ως προς επιφάνεια επαργής
- ▼ Πρώτη μέθοδος από χαρκί υπολογισμό αντιστοιχίαν

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 συνυθήκες τριβής ανάμεσα τους. Αν η λύση είναι λοιπόν εφικτή μέσω της μεθόδου fsm2 τότε αυτή θα είναι και η πρώτη μέθοδος στη βιβλιογραφία που λύνει το πρόβλημα του scan matching χωρίς να υπολογίζει αντιστοιχίσεις ανάμεσα στις σαρώσεις εισόδου.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

Προκλήσεις μετατροπής fsm2 σε fsm

- $t_{\text{vmax}} \leq \frac{1.0}{20 \text{ Hz}} = 50 \text{ ms}$  ( $\tilde{\tau}_{\text{max}} = \tilde{\tau}_{\text{min}} \approx 100 \text{ ms}$ )
- $SV(p_0)$  παλίδης προσέγγιση του χάρτη  $M \Rightarrow$  απάτηση ευφωνίας σε "κανάλι αντιστοιχίας"



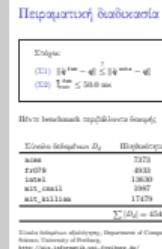
## └ Προκλήσεις μετατροπής fsm2 σε fsm

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. Η πρόκληση εδώ είναι η μείωση του χρόνου εκτέλεσης της πιο γρηγορικής του fsm2, η οποία είναι η fm, η οποία έχει χρόνο εκτέλεσης 100 ms. Η μεγάλη πρόκληση όμως εδώ είναι η ευρωστία της μεθόδου ευθυγράμμισης στις κενές αντιστοιχίσεις. Στην εικόνα εδώ βλέπουμε πως στο πρόβλημα sm2, από την τελική παραγώμενη εκτίμηση η εικονική σάρωση  $SV(p_0)$  <sup>fsm2</sup> έχει την ίδια μορφή με την πραγματική  $SV(p_N)$  επειδή έχουμε τον χάρτη. Στο sm όμως, εάν μετατρέψουμε την πρώτη σάρωση ως τον χάρτη μέσα στον οποίο θα εφαρμόσουμε την τεχνική sm2 τότε λόγω του γεγονότος ότι από διαφορετικές θέσεις μέσα σε ένα περιβάλλον είναι ορατά διαφορετικά σημεία του, στο τέλος είναι δυνατόν η ευθυγράμμιση να αποτύχει λόγω των γεγονότων ότι οι καμία εικονική σάρωση δεν θα φτάσει να έχει τη μορφή της πραγματικής και 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 θέλουμε να ανακαλύψουμε ποιά είναι η σχέση των σφαλμάτων των μετασχηματισμών του fsm σε σχέση με αυτά των μεθόδων της βιβλιογραφίας, και δεύτερον ο fsm θα πρέπει 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 ...

## └ Πειραματική διαδικασία

οπως και πριν, δοκιμάζουμε πέντε επίπεδα θορύβου μέτρησης, όπως αυτά ορίζονται από εμπορικά διαθέσιμους αισθητήρες. Οι δύο σαρώσεις που συλλαμβάνουμε σε κάθε περιβάλλον διαφέρουν στη θέση και τον προσανατολισμό κατά ποσότητες που εξάγονται όπως και πριν από ομοιόμορφες κατανομές. Εδώ ακολουθούμε την τυποποίηση του censi που έφτιαξε τον plicp, και δοκιμάζουμε έξι διαφορετικά επίπεδα μετατόπισης, ξεκινώντας από μικρές τιμές, δηλαδή όταν ο αισθητήρας κινείται με χαμηλές ταχύτητες, και προοδευτικά τις αυξάνουμε για να προσομοιώσουμε όλο και μεγαλύτερες ταχύτητες κίνησης. Κάθε πείραμα επαναλήφθηκε δέκα φορές σε κάθε περιβάλλον με τυχαίες αρχικές συνθήκες στάσης και μετατόπισης, με αποτέλεσμα κάθε μέθοδος να ευθυγραμμίζει περίπου 13 εκατομμύρια ζευγάρια σαρώσεων. Όπως και πριν υποθέτουμε πανοραμικές σαρώσεις 360 ακτίνων, αλλά σε αντίθεση με τον fsm2 εδώ έχουμε ελαττώσει το ρυθμό γωνιακής δειγματοληψίας για να ελαττώσουμε αντίστοιχα το χρόνο εκτέλεσης.

Πειραματική διαδικασία

Επίπεδο	$\ \mathbf{y}^{\text{true}} - \mathbf{y}\  \leq \ \mathbf{y}^{\text{true}} - \mathbf{y}\ $
(1)	$\ \mathbf{y}^{\text{true}} - \mathbf{y}\  \leq 5.0 \cdot 10^{-3}$
(2)	$\ \mathbf{y}^{\text{true}} - \mathbf{y}\  \leq 5.0 \cdot 10^{-4}$

Πέντε διαφορετικά διαδικασίες

Σύνολο δεδομένων $D_{\text{tot}}$	Πληθυσμός
αστερ	7375
fr079	4933
int09	13630
int_earth	397
int_mars	17479
	$\sum D_{\text{tot}} = 45440$

Επίπεδο σταθερότητας  $\Delta \theta_{\text{tot}}$  (μετρητές)  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.012$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.020$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.030$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.040$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.050$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.060$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.070$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.080$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.090$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.100$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.110$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.120$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.130$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.140$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.150$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.160$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.170$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.180$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.190$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.200$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.210$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.220$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.230$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.240$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.250$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.260$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.270$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.280$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.290$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.300$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.310$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.320$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.330$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.350$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.370$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.390$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.410$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.430$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.450$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.470$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.490$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.510$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.530$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.550$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.570$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.590$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.610$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.630$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.650$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.670$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.690$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.710$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.730$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.750$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.770$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.790$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.810$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.830$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.850$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.870$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.890$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.910$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.930$  $\Delta \theta_{\text{tot}} = 0.01 \cdot 0.950$ 

Τοπική σταθερότητα μετρήσεων

 $\sigma_x = [0.01, 0.02, 0.05, 0.10, 0.20] \text{ [m]}$ 

Βαρυτική σταθερότητα μετρήσεων μετρήσεων

 $\Delta \theta_x = \left(1 - \frac{\sigma_x}{\sigma_y}\right) \text{ [rad]}$  $\Delta \theta_y = \left(1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right) \text{ [rad]}$ 

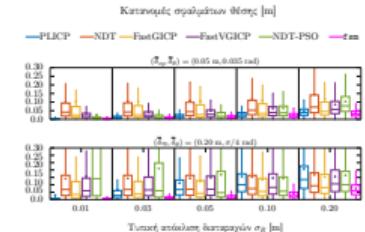
Κοινωνική σταθερότητα μετρήσεων

 $\Delta \theta_{xy} = \sqrt{\Delta \theta_x^2 + \Delta \theta_y^2} \text{ [rad]}$ 

Επιπλέον σταθερότητα μετρήσεων μετρήσεων

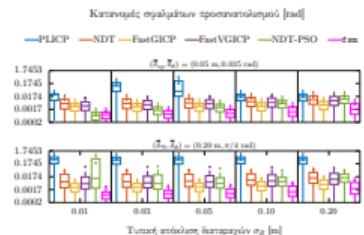
 $\Delta \theta_{yy} = \sqrt{\Delta \theta_x^2 + \Delta \theta_y^2} \text{ [rad]}$ Μετρήσεις σταθερότητας  $\Delta \theta_{yy} = 0.001$  $x \in [0, 10], y \in [0, 10]$  $\Delta \theta_{yy} = 0.001 \text{ [rad]}$  $\Delta \theta_{yy} = 0.001 \text{ [rad]}$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



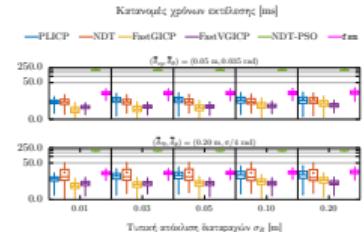
Σε αυτή τη διαφάνεια βλέπουμε τις κατανομές των τελικών σφαλμάτων θέσης. Στην άνω σειρά βρίσκονται τα αποτελέσματα για το χαμηλότερο επίπεδο μετατόπισης μεταξύ σαρώσεων και στην κάτω αυτά για το υψηλότερο επίπεδο μετατόπισης. Κάθε μαύρο block αναφέρεται σε ένα επίπεδο θορύβου μέτρησης. Θα δείτε πως σε 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 ...



Η εικόνα είναι διαφορετική ως προς τα σφάλματα προσανατολισμού, όπου ο fsm κυριαρχεί σε όλα τα επίπεδα εκτός από εκείνο που αναφέρεται στο χαμηλότερο επίπεδο μετατόπισης και το χαμηλότερο επίπεδο θιρύβου, όπου ο NDT-PSO εμφανίζει χαμηλότερα σφάλματα.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

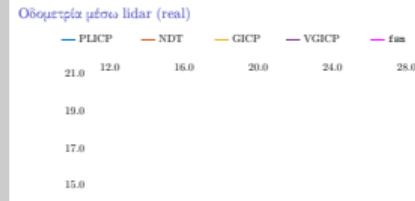


Όμως ο NDT-PSO δεν τρέχει σε πραγματικό χρόνο. Εδώ βλέπουμε τις κατανομές των χρόνων εκτέλεσης, όπου ο NDT-PSO τρέχει σε 140 ms, ενώ ο fsm τρέχει κατά μέσο όρο σε λιγότερο από 25 ms για κάθε επίπεδο αρχικής μετατόπισης και θορύβου μέτρησης.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Οδομετρία μέσω lidar (real)

Εδώ τώρα θέλω να σας δείξω πώς μεταφράζονται στην πράξη αυτά τα σφάλματα. Εδώ βλέπουμε με διαφορετικά χρώματα την εκτίμηση της τροχίας ενός πραγματικού αισθητήρα YDLIDAR από τους αλγορίθμους της πειραματικής διαδικασίας που τρέχουν σε πραγματικό χρόνο. 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, οι οποίες δεν υπάρχουν στις προηγούμενες σαρώσεις, και οι οποίες συνεπώς παράγουν κενές αντιστοιχίες ανάμεσα σε δύο διαδοχικές σαρώσεις. Ο αισθητήρας περνάει από πέντε τέτοια σημεία για συνολικά εννιά φορές. Η εκτιμώμενη απόσταση που διένυσε ο αισθητήρας 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.



2023-06-22

Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar  
δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ fsm: Ευρωστία

Εν τέλει μπορούμε να πούμε πως ο fsm είναι εύρωστος όχι μόνο στο θόρυβο μέτρησης, αλλά επίσης σε κενές αντιστοιχίσεις, και συνιστώσες υψηλών συχνοτήτων,

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

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφαπτό

└ Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα  
είναι εωικτό

και πως είναι η πρώτη scan matching μεθόδος για πανοραμικούς αισθητήρες που λειτουργεί χωρις αντιστοιχίσεις και μόνο με τρεις προαιρετικές παραμέτρους.

Ευθυγράμμιση πραγματικών (διδάσκαλων πανοραμών) σπαστών  
♦ χωρίς αντιστοχίσης  
♦ με τρεις (διαισθητικές, προσφετικές) παραμέτρους