

2023-06-05

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

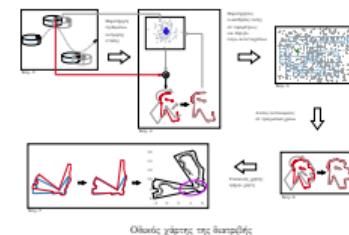
Μέθοδοι εκτίμησης στάσης  
αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων  
μέσω  
ευλιγράφηματης πραγματικών με επενδυτικές συρίσεις

Αλέξανδρος Φύλασθηνος

ΤΕΙΑΘΤ, ΑΕΒΘ



## 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 κατάστασης παρατηρητών θέσης και προσανατολισμού 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 γνώση του περιβάλλοντος, για παράδειγμα για την εκτίμηση της οδομετρίας ενός οχήματος.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ To érgo RELIEF: motivation

Τώρα—όλα αυτά που θα δούμε ξεκινάνε από μία πραγματική και εκτεταμένη απάιτηση στην αγορά λιανικών προϊόντων. Εκεί υπάρχουν εταιρείες που πουλάνε τα προϊόντα τους σε καταστήματα, και των οποίων το συνολικό απόθεμα αποθηκεύεται 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 που μπορούν να μετρούν το απόθεμά τους μόνο λίγες φορές μέσα σε ένα οικονομικό έτος. Έπειτα θα ήθελαν επίσης να γνωρίζουν τις θέσεις των προϊόντων μέσα σε ένα κατάστημα ή μία αποθήκη τόσο για λόγους γρήγορης ανάκτησης όσο και για λόγους που τους επιβάλλονται από τρίτα μέρη.

To érgo RELIEF: motivation

Αποθήκες προϊόντων: ανάγνωση για  
► συνεχή απογραφή  
► γνωστή θέσης προϊόντων



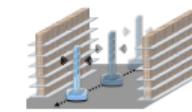
Πηγή: BBC—Aeroscan makes lidar by 'Vattenfall' found out through, <https://www.bbc.com/news/technology-42518272>

# 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 οδηγηθεί το ρομπότ, ενώ ταυτόχρονα το κάνει εν δυνάμει ικανό να μπορεί να εκτελεί τις ενέργειες του απρόσκοπτα ενώ γύρω του υπάρχουν κινούμενα εμπόδια όπως ανθρώπους ή μηχανήματα.

To érgo RELIEF: η λύση



- Τοποθέτηση RFID επενδύση σε πράσινα
- Αυτόνομα επίγεια αρχέτα με RFID αναγνώστες

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

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



Εικόνα αριστερά: ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΗΛΙΟΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ. Φωτογραφία από την ιστοσελίδα του βιβλιοπωλείου.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

Πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας εξωδεκτικός αισθητήρας

Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

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



Εικόνα αριστερά: ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΕΧΝΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ

Εικόνα δεξιά: Επίπεδη στάση από την ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

Πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας εξωδεκτικός αισθητήρας,

ο χάρτης του περιβάλλοντος στο οποίο πλοηγείται το ρομπότ

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



Εικόνα αριστερά: ΒΙΒΛΙΟΦΟΡΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗΣ ΚΑΙ ΛΙΔΟΥ Ηλεκτρονική Βιβλιοθήκη

# 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  $\hat{p}_t$  (μέσω EKF/PF)
- Λεγχών συνθήκη στάσης  $p_t^M$
- Τέλειος συνθήκη στάσης  $p_t^{M*}$



Εικόνα αριστερά: ΒΙΒΛΙΟΦΟΡΟΣ ΘΕΟΦΙΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ



Εικόνα δεξιά: ΒΙΒΛΙΟΦΟΡΟΣ ΘΕΟΦΙΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοιήγηση: Προαπαιτούμενα

Η αυτόνομη πλοιήγηση υποθέτει 5 προαπαιτούμενα.

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

- Εξαιστοποίηση αισθητήρας (lidar, rfid(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.

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



Εικόνα αρχείου HELPER. Ηλεκτρονικό γραφείο ΥΠΟΙΚΕΠ. ΑΕΙΘ. Ήπηρ Απόρριψη Εντατικών Συστημάτων για την Επίτελη Διάσπαση Καταστημάτων.

# 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.

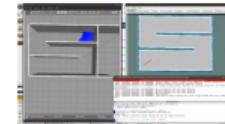
Ως στάση ορίζουμε το διάνυσμα κατάστασης που συνίσταται από τη θέση και τον προσανατολισμό του ρομπότ ως προς το σύστημα αναφοράς του χάρτη.

- Εξαντλητικός αισθητήρας (lidar, rgh(d), sonar)
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$  (μέσα EKF/PF)
- Λεγχος συνθήκη στάσης  $p_t^M$
- Τέλειος συνθήκη στάσης  $p_t^{M_0}$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά

Δεδομένων αυτών η αυτόνομη πλοήγηση συνίσταται σε δύο μέρη:

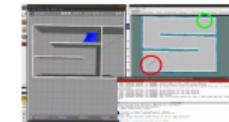


# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά

Δεδομένων αυτών η αυτόνομη πλοήγηση συνίσταται σε δύο μέρη:

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



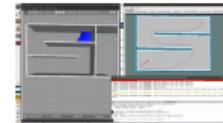
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ 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 συνδέει την αρχική με την τελική στάση χωρίς να τέμνει εμπόδια του  
χάρτη

*g*



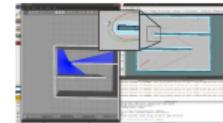
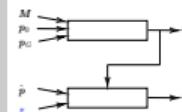
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ 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 συνδέει την αρχική με την τελική στάση~~P~~<sup>G</sup> 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

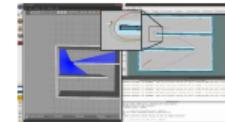
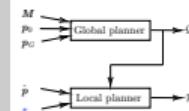


# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ 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 συνδέει την αρχική με την τελική 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 υλοποιήσω το συνολικό σύστημα αυτόνομης πλοήγησης στα πλαίσια του έργου αρχικά στράφηκα στη διαθέσιμη λογισμικογραφία, όπου ανακάλυψα πως υπήρχαν πολλαπλοί αλγόριθμοι global και local planners.

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

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

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

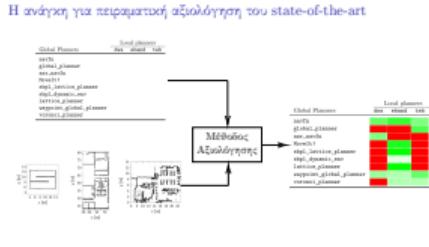
Πουθενα ομως στη διαθεσιμη βιβλιογραφια δεν υπηρχε συγκριτικη αναλυση της συνδυαστικής επιδοσης τους στο έργο της αυτόνομης πλοήγησης ώστε να επιλέξω ποιός συνδυασμός θα εκπλήρωνε τους στόχους μας στα πλαίσια του έργου.

| Global Planners          | Local planners |           |      |
|--------------------------|----------------|-----------|------|
|                          | des            | obstacles | traj |
| navfn                    | ?              | ?         | ?    |
| global_planner           | ?              | ?         | ?    |
| arr Navfn                | ?              | ?         | ?    |
| MoveIt!                  | ?              | ?         | ?    |
| sgpl_dynamics_planner    | ?              | ?         | ?    |
| sgpl_dynamics_ars        | ?              | ?         | ?    |
| lattice_planner          | ?              | ?         | ?    |
| wavefront_global_planner | ?              | ?         | ?    |
| voronoi_planner          | ?              | ?         | ?    |

Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

Συνεπώς αποφασίσαμε πως θα ήταν επωφελές τόσο για το έργο όσο και για άλλους μηχανικούς ρομποτικής να σχεδιάσουμε μία μέθοδο αξιολόγησης των διαθέσιμων αλγορίθμων global και local planners και των συνδυασμών τους, την οποία θα χρησιμοποιούσαμε μέσω πειραματικής διαδικασίας ώστε να καταλήξουμε σε συμπεράσματα για την επίδοση των τρέχοντων διαθέσιμων αλγορίθμων που υλοποιούν αυτόνομη πλοϊκήγηση σε επίγειες κινητές ρομποτικές βάσεις.



Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

Αρχικά συγκεντρώσαμε όλα τα διαθέσιμα πακέτα λογισμικού και τα υποβάλλαμε σε αξιολόγηση με βάση ποιοτικά κριτήρια, δηλαδή τα ίδια κριτήρια που θα χρησιμοποιούσε ένας μηχανικός λογισμικού προτού φτάσει στο σημείο να εξετάσει εάν πρακτικά η επίδοση του πακέτου λογισμικού 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, και τι ανάγκες έχει σε υπολογιστικούς πόρους. Στο τέλος αυτού του φιλτραρίσματος απέμειναν τρεις αλγορίθμοι χάραξης μονοπατιών και τρεις ελεγχτές κίνησης, οπότε η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε συνολικά εννέα συνδυασμούς αλγορίθμων.

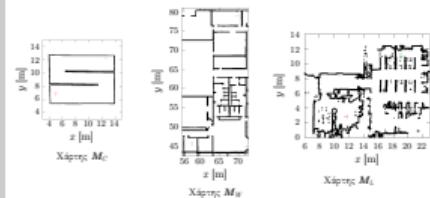
└ Προκαταρκτική αξιολόγηση: ποιοτικά κριτήρια λογισμικού

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική αξιολόγηση: διάταξη

Η αξιολόγηση κάθε συνδυασμού έγινε σε δύο περιβάλλοντα προσομοίωσης και σε ένα πραγματικό περιβάλλον. Και στις τρεις περιπτώσεις θέσαμε μία αρχική και μία τελική στάση και ζητήσαμε από κάθε συνδυασμό global και local planners 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 το πείραμα 10 φορές σε κάθε περιβάλλον, και για κάθε πείραμα 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.

Πειραματική αξιολόγηση: διάταξη



# 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 ή η μέση ελάχιστη απόσταση ενός μονοπατιού από εμπόδια (8 μετρικές), είτε αποκλειστικά στους local planners (8 μετρικές), όπως για παράδειγμα ο αριθμός αποτυχιών έυρεσης ταχυτήτων προς τον συνολικό αριθμό κλήσεων του ελεγκτή, ή αποκλειστικά στο συνδυασμό τους, όπως για παράδειγμα ο χρόνος πλοήγησης, ή πραγματική ολικά ελάχιστη απόσταση από εμπόδια κατά τη διάρκεια μίας πλοήγησης (12 μετρικές).

### Πειραματική αξιολόγηση: μετρικές

#### Global planners (8 μετρικές)

- ♦ Μήκος μέρους χαραγόθεντων μονοπατίων
- ♦ Μέση ελάχιστη απόσταση από φυσόδεινα
- ♦ ...

#### Local planners (8 μετρικές)

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

#### Global o Local (12 μετρικές)

- ▼ Χρόνος πλοήγησης
- ▼ Ολικά ελάχιστη απόσταση από φυσόδεινα
- ▼ ...

# 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 με τρόπο ανάλογο καυώς αυξάνονται (όπως η μέση απόσταση από εμπόδια, όσο μεγαλύτερη η απόσταση από εμπόδια τόσο ασφαλέστερη είναι η πλοιήγηση) ενώ άλλες με τρόπο αντιστρόφως ανάλογο (όπως ο χρόνος πλοιήγησης).

Απόδοση μίας τιμής-αξίας  $V(c_{ij})$  σε κάθε συνδυασμό  $c_{ij}$  = για για όλα τα περιβάλλοντα με βάση μίας τις μετράς  $m_i$

### Προβλήματα:

- Διαφορετικές μονάδες μέτρησης μετρών
- Κατασκευή  $V(c)$  ↑ όπων  $c(m_0)$  ↑ και  $c(m_f)$  ↓,  $m_0 \in Q, m_f \in \overline{Q}, Q \cup \overline{Q} = \text{Univ}$

# 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. Η συνάρτηση  $I(C,m)$  είναι μηδέν μόνο για μετρικές που αφορούν σε συνδυασμό από planners όταν η πλοιήγηση ήταν αποτυχημένη, και τη χρησιμοποιούμε για να συνεκτιμήσουμε την αξία των συνιστωσών ενός συνδυασμού ακόμα και όταν η πλοιήγηση ήταν αποτυχημένη.

Κατασκευή συνάρτησης απόδοσης αξίας V

• Κανονισμόδημα πιού μετρούς:

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

• Βασικές περιβάλλον/χάρτη  $M$

$$\begin{aligned} V_M(c) &\triangleq \sum_m I_C(m) \cdot V_d(c, m) + I_{\overline{D}}(m) \cdot V_{\overline{d}}(c, m) \\ V_d(c, m) &\triangleq w_m \cdot I(c, m) \cdot N(m), \quad m \in Q \\ V_{\overline{d}}(c, m) &\triangleq w_m \cdot I(c, m) \cdot (1 - N(m)), \quad m \in \overline{Q} \\ I(c, m) &\triangleq I_S(c) \parallel I_D(m) \end{aligned}$$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Αποτελέσματα

Μέσω της V και των τιμών όλων των μετρικών που έχουμε καταγράψει 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 τα αποτελέσματα κάθε περιβάλλοντος. 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, μετα  
ο eband, και μετα ο dwa, και δεδομένου ενός local planner ο καλύτερος global planner είναι για όλους τους local planners ο navfn, μετα ο global planner, και μετα 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         | 19.29     | 21.99     | 16.84     | 50.03 | 4        |
| globalplanner  | eband         | 14.79     | 11.95     | 14.26     | 49.93 | 5        |
| sbpl           | eband         | 10.99     | 9.85      | 7.80      | 28.94 | 6        |
| navfn          | dwa           | 6.46      | 9.31      | 8.10      | 28.64 | 7        |
| globalplanner  | dwa           | 5.50      | 8.86      | 6.13      | 20.49 | 8        |
| sbpl           | dwa           | 5.56      | 4.85      | 6.47      | 17.88 | 9        |

Η απόδειξη γιατί V είναι καλύτερη στα τρία περιβάλλοντα γιατί παρέχει τα ελαχίστα στόχα για την επιτυχία της προσπάθειας στην εφαρμογή της.

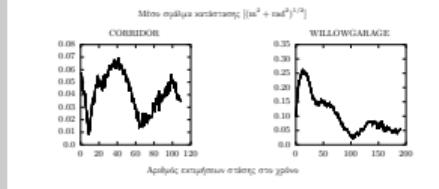
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ 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. Έπειτα, 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.

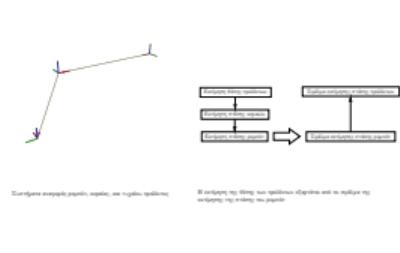
- Επεκτόπιμη και περιεπιτελή μεθοδολογία αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομης πλοιήγησης
- Προσαρμογή μεθόδου αξιολόγησης με βάση ειδικές παραίτησης ( $w_0 \neq 1.0$ )
- Ενεργαλέστερη οπουανάθηση μετλονυμιών μεθόδων
- Ενεργαλέστερη ad hoc περιβάλλοντος

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



Κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας αυτό που παρατήρησα 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 είτε στην πορεία του χρόνου είτε 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.

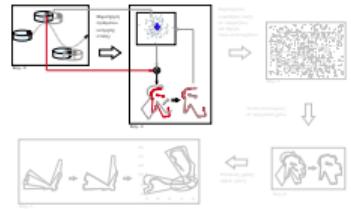
# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



## product\_n\_frame

Σε γενικές γραμμές ~~το~~-<sup>antenna-frame</sup> φαίνομενο του 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 ενός προϊόντος προκύπτει μέσω της εκτίμησης της στάσης των κεραιών που φέρει το ρομπότ, οι οποίες με τη σειρά τους είναι μετασχηματισμοί της εκτίμησης ~~της~~ <sup>της</sup> στάσης του ρομπότ.

## 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.

2023-06-05

# 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, δηλαδή της προσθετικής ευθυγράμμισης πραγματικών σαρώσεων με εικονικές σαρώσεις, και της ανατροφοδότησης του αποτελέσματος στον πληθυσμό του φίλτρου. Η συμβολή μου σε αυτό το κεφάλαιο αφορά στη δεύτερη μέθοδο, ενώ εισάγω και μία δεύτερη, αυτήν της διαλογής σωματιδίων.

Μέθοδοι

- Ερευνητικής ενθυγράμμισης πραγματικών σαρώσεων με εικονικές
- ανατροφοδότησης
- θελητής 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 ειδικά, σε αντίθεση με το φίλτρο καλμαν, 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, και συνεπώς υποθέσεις των οποίων το σφάλμα εκτίμησης είναι μικρότερο από άλλες εμφανίζουν μεγαλύτερο βάρος, και συνεπώς επηρεάζουν περισσότερο την τελική εκτίμηση.

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω διαλογής σωματιδίων

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

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

• 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 ένα υποσύνολο των πιο βαρέων σωματιδίων αντί για όλο τον πληθυσμό, 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 σφάλματων με εικονικές σφάλματα γάρτη ( $sm^2$ )  
Ευθυγράμμιση πραγματικών σφάλματων ( $sm$ )

## └ Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω sm2

Ένας δέυτερος τρόπος με τον οποίον μπορεί να ελαττωθεί το σφάλμα ενός παρατηρητή είναι μέσω ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές σφάλμεις αισθητήρα lidar. Αυτή η μέθοδος θα μας ακολουθήσει σε όλη την υπόλοιπη έρευνά μου, και για λόγους οικονομίας θα αναφέρομαι σε αυτήν συντομογραφικά ως sm2. Η τεχνική sm2 είναι υποσύνολο της γενικής μεθόδου ευθυγράμμισης πραγματικών σφάλμεων, η οποία ονομάζεται scan-matching.

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

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

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

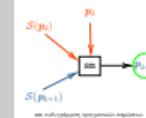
$\Delta p = sm(\mathcal{S}(p_k), \mathcal{S}(p_{k+1}))$

Αυτή η τεχνική 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

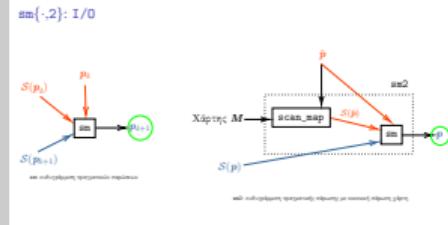
sm: I/O



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 ...

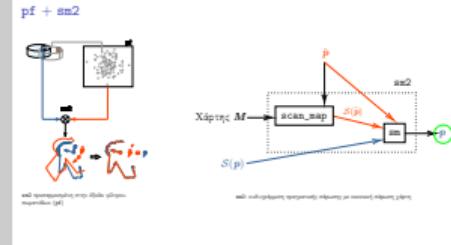
└ sm{·,2}: I/O



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

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

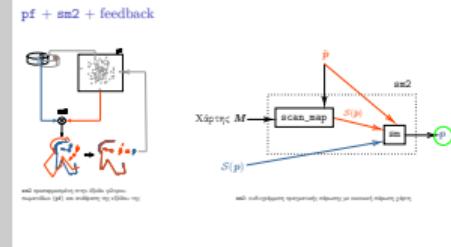
└ pf + sm2



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

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

└ pf + sm2 + feedback



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

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

- Ανάδοση με τη μερήσμησης ανάθεσης  
→ αργή σύγκλιση / απλήση σφάλματος

## └ 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.

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.

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 υποιθέσεις που εξηγούν καλύτερα τις μετρήσεις από αυτές που έχουν καταλήξει σε λανθασμένες τοποθεσίες.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

- Ανάδοση με τη μηρή βασικής ανάθεσης  
→ αργή σύγκλιση / απλή ηλεκτρονική απόδοση
- Εξ αναλόγου αρχαιοτέρης του γιδών  
→ απλή αυτοδοτήσας σε περίπτωση απογραφ. 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.

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.

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 υποιθέσεις που εξηγούν καλύτερα τις μετρήσεις από αυτές που έχουν καταλήξει σε λανθασμένες τοποθεσίες.

# 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.

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.

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.

- Ανάδοση με τη μορφή μονάδων ανάθεσης  
→ αργή σύγκλιση / ακρίβεια συγκριτική

- Εξ απολαύσεως αρχαιοποίηση του γάμου του  
→ απλότερη ανθεκτικότητα σε περίπτωση απονομίας sm2

- Ανάδοση με τη μορφή πολλαπλών υποθέσεων  
→ γρήγορη σύγκλιση και διετήρηση 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

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

Τιμήση T2:

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

Τιμήση T3:

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

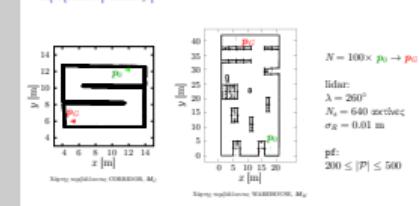
- $\|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P}^*)\| < \|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P})\|$
- $\|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P}^*)\| < \|\hat{\mu} - \hat{\mu}(\mathcal{P} \cup \{\hat{\mu}^*\}_1)\|$
- $\mathcal{P} \cup \{\hat{\mu}^*\}_{q \in [\mathcal{P}^*]}$  ποι ανθεκτικός από  $\mathcal{P} \cup \{\hat{\mu}^*\}_{[\mathcal{P}^*]}$

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική διάταξη

Για να δοκιμάσουμε τις τρεις υποθέσεις χρησιμοποιούμε δύο 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.

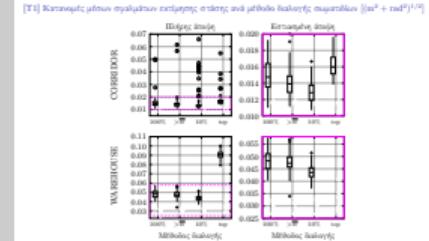
Πειραματική διάταξη



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

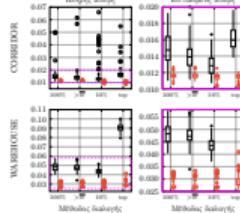
## └ [Υ1] Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο διαλογής σωματιδίων

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 μονο εκείνα τα σωματίδια των οποίων το βάρος είναι μεγαλύτερο από το μέσο βάρος του πληθυσμού επιλέγονται να ψηφίσουν, 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 τοπ 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

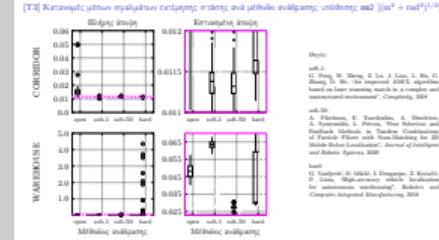
[Υ2] Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο διαλογής σωματιδίων + sm2  $(m^2 + rad^2)^{1/2}$ 

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. Wang, W. Zhou, Z. Lin, J. Liang, S. Bai, G. Zhang, "The 'Open' approach: A tracking method based on laser scanning match in a complex and unstructured environment", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2019.  
 ωρ.20:  
 A. Filatovas, E. Tzortzinis, A. Dimou, A. Paliogianni, "A New Way of Using Probabilistic Methods in Random Contexts and its Application in Quality Control", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2019.  
 hard:  
 G. Vandebroek, D. Mihale, I. Dragomir, Z. Kosmidis, D. Stoyanov, "A novel tracking method for autonomous swimming", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019.

# 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 καθοριστικός 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.

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι ευικτό

Ελάττωση σφαλμάτων εκτίμησης στάσης φίλτρου σωματιδίων μέσω  
♦ διεύρυνσης σωματιδίων  
♦ ανάληψης αποτάλεσματος από χαράς απώλεια ανθεκτικότητας για

J. Flidström, E. Tsiarakis, S. Dianatian, A. Symeonidis, L. Petros, "Prior Selection and Feedback Method in Tandem Combinations of Particle Filters with Scan-Matching for 3D Mobile Robot Localization", Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2020

## 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.

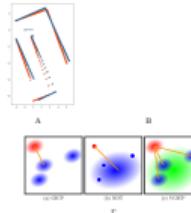


Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

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 προσπαθεί να εκτιμήσει την αντιστοίχιση σημείων ή κατανομών σημείων της μίας σάρωσης προς σημεία, ευθύγραμμα τμήματα, ή κατανομές της άλλης.

## Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράφωσης



A. KCP επ της αρχής: (σημείο προ σημείου)

B. πάρει σημείο προς επικύρωση  
τέλους

(a) Κατανομή προς καταναφέρ. (b)  
Χρήση προς καταναφέρ. (c) Κατανομή προς καταναφέρ.

Εργαλεία:

A. Ισρ. (Ημερολόγιο), <http://www.eisr.gr/greek/index/keratoulis/>  
<http://www.eisr.gr/greek/typo>

B. A. Cossi, "The ECP variant using a polar classifier", IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2002

E. K. Mandel, M. Vlahogianni, S. Psarros and A. G. Kaklis, "ECP for Speaker and Document Recognition", IEEE International Conference on Pattern Recognition, 2002

## 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.

└ Τρωτά σημεία με υψόδων ευθυγράμμισης:  
 $\sigma_R = 0.0$     $\sigma_R = 0.1 \text{ m}$   
 όρους (ατέλεις αντιστοιχίσεων)

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

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: κενές αντιστοιχίες (αλλιώς outliers)

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, όπου ενώ ευθυγραμμίζουμε και στις δύο εικόνες τις ίδιες δύο σαρώσεις, στα δεξιά έχουμε αντιστρέψει τη φορά ευθυγράμμισης.

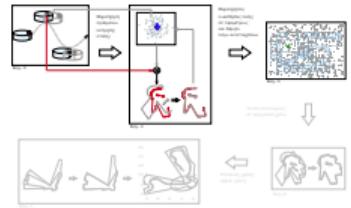
## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

### └ 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 ξεκινάω να ερευνώ τρόπους με τους οποίους θα ήταν δυνατή η ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές σαρώσεις χωρίς την εύρεση αντιστοιχίσεων ανάμεσα στις σαρώσεις εισόδου.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Απόπειρα λύσης sm2 δίχως αντιστοιχίσεις

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

Εδώ καταρχάς αναζητώ τις συνθήκες εκείνες χάτω από τις οποίες είναι δυνατόν να είναι επιτυχής η ευθυγράμμιση, και καταλήγω 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 μου είναι να εστιάσω 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 μπορώ να πατήσω στη βιβλιογραφία της ευθυγράμμισης σαρώσεων γιατί ακριβώς όλες οι μέθοδοι της βιβλιογραφίας λύνουν το πρόβλημα μέσω εύρεσης αντιστοιχίσεων, και συνεπώς αρχίζω να ερευνώ 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:

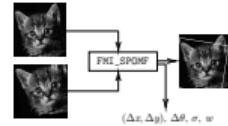
- Απούσα βιβλιογραφία στο συντριβές πεδίο
- Εύρεση μεθόδου(οιων) εκτίμησης θέσης και προσανατόλισμού

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

└ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από  
ευθυγράμμιση εικόνων:

Μέσα από την αναζήτησή μου βρήκα τη μέθοδο FMI-SPOMF, η οποία χρησιμοποιείται στον κλάδο της υπολογιστικής όρασης για την εκτίμηση ανάμεσα σε δύο εικόνες της μετατόπισης τους, της διαφοράς της γωνίας περιστροφής τους, της κλιμάκωσης τους, και του βαθμού ομοιότητάς τους. Αυτές οι παράμετροι υπολογίζονται με κλειστό τρόπο και χωρίς να υπολογίζονται αντιστοιχίσεις ανάμεσα στις δύο εικόνες.

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

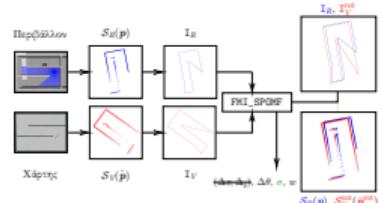


[1] Qia-Meng Chen, M. Ullah and F. Dehneek, "Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

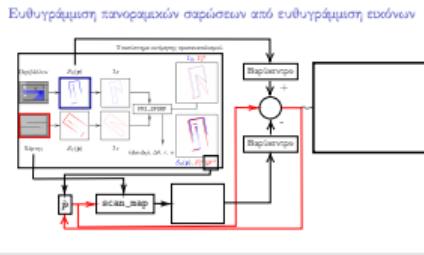
Ας υποθέσουμε λοιπόν πως έχουμε στη διάθεσή μας μία πανοραμική σάρωση  $S_R$ , το χάρτη του περιβάλλοντος, και μία εκτίμηση για τη στάση του αισθητήρα lidar. Μέσω της εκτίμησης και του χάρτη είναι δυνατός ο υπολογισμός της εικονικής σάρωσης  $S_V$  μέσω raycasting. Εάν προβάλλουμε τις δύο σαρώσεις εισόδου 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. Από τη μία δε χρειάζεται να υπολογίσουμε τον συντελεστή κλιμάκωσης ανάμεσα στις δύο εικόνες γιατί γνωρίζουμε τον συντελεστή κλιμάκας του χάρτη ως προς το περιβάλλον που αναπαριστά, από την άλλη όμως είναι προτιμότερο να μην χρησιμοποιήσουμε το αποτέλεσμα μετατόπισης του SPOMF ώστε να μην υπάρχει εξάρτηση του σφάλματος εκτίμησης θέσης από την ανάλυση των εικόνων.



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

- └ Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

Για την εκτίμηση της μετατόπισης ανάμεσα στις δύο σαρώσεις χρησιμοποιούμε μία μέθοδο η οποία εφαρμόζεται μετά την περιστροφή της δεύτερης σάρωσης ως προς την πρώτη. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει το βαρύκεντρο των δύο σαρώσεων στο καρτεσιανό επίπεδο και μεταφέρει επαναληπτικά τη δεύτερη σάρωση ώστε να συμπέσει με την πρώτη με βάση τη διαφορά των κεντροειδών τους. Για τον υπολογισμό της μετατόπισης δεν χρησιμοποιούνται πουθενά αντιστοιχίσεις, διότι τα κεντροειδή υπολογίζονται προφανώς το ένα ανεξάρτητα από το άλλο.



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

$t_{pose\_stop}^{POSE\_STOP} > t_{pose\_tracking}$   
⇒  
από την πρώτη επίλυση του 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

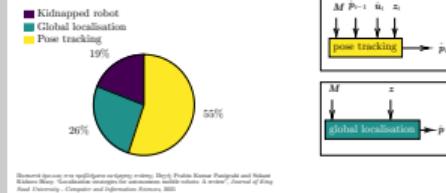
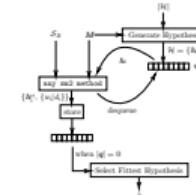


Illustration based on a paper titled "Global Positioning Using Lidar" by Dr. Pravin Patel, Paragade and Indian Institute of Technology Bombay, Department of Electrical Engineering, Mumbai, India. © 2009, IIT-Bombay. All rights reserved. Used with permission. Computer and Information Sciences, 2009.

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

└ Global localisation: επιλύσιμο μέσω sm2

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 επολογίζεται 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 η τελική εκτίμηση στάσης  $h$  δίστονος, και η τιμή μίας μετρικής που αποτυπώνει το βαθμό ομοιότητας ή τελικής ευθυγράμμισης ανάμεσα στην πραγματική σάρωση και την εικονική σάρωση. Για τις τεχνικές sm2 που λειτουργούν με αντιστοιχίσεις αυτό το μέτρο υπολογίζεται εσωτερικά σε κάθε μέθοδο ως το άνθροισμα 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. Τα πειράματα 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 1,2, και 5 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 διαρραγότες στάσεις
- 100 επιπλέοντες ανά στάση
- LIDAR:  $\sigma_d = \{0.01, 0.02, 0.05\}$  m,  $r_{max} = 10.0$  m

#### CSL AUT:

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



| Αντιτίτιτος στάσης | Μέση στάση στάση |
|--------------------|------------------|
| 20-500             | ≤ ±60            |
| 5000-20000         | ≤ ±40            |
| 20000-30000        | ≤ ±30            |

Μέση στάση στάση = ημέρα στάση στάση / ημέρα στάση στάση. Επίσης, ημέρα στάση στάση = ημέρα στάση στάση / ημέρα στάση στάση.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική διαδικασία: μη αποδεκτές λύσεις

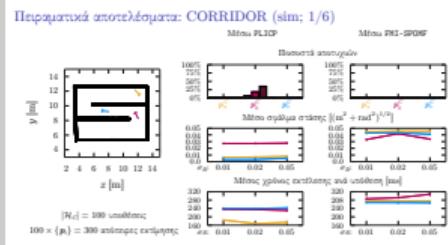
Σε όλα τα πειράματα καταγράφουμε το τελικό σφάλμα θέσης και προσανατολισμού και ονομάζουμε επιτυχημένη ανέυρεση στάσης κάθε περίπτωση όπου το τελικό σφάλμα θέσης ήταν μικρότερο από ένα μέτρο, διότι μετά την επίλυση του προβήματος global localisation, τυπικά ακολουθεί η παρατήρηση της στάσης του ρομπότ, 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  $\hat{y}$
- Επιτυχημένη εκτίμηση στάσης όταν  $\hat{x} < 1.0 \text{ m}$   
καθώς  
global localisation  $\Rightarrow$  (probabilistic) pose tracking

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

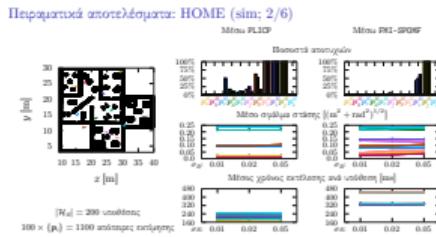
## └ Πειραματικά αποτελέσματα: CORRIDOR (sim: 1/6)

Σε όλα τα πειράματα δοκιμάζουμε δύο υποκείμενες μεθόδους sm2. Από τη μία δοκιμάζουμε την καλύτερη μέθοδο της βιβλιογραφίας, η οποία ονομάζεται plicp, 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 μεγαλύτερος από αυτόν το plicp.



Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar  
δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

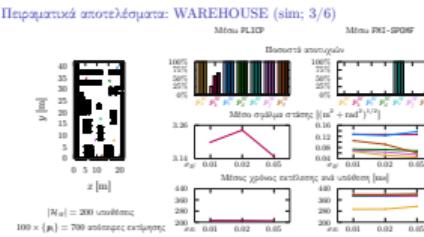


Στο περιβάλλον HOME βλέπουμε τα ίδια, με τον plicp να μην μπορεί να βρει ποτε σε χαποιες περιπτώσεις τη στάση του αισθητήρα λόγω συμμετριών του περιβάλλοντος,

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

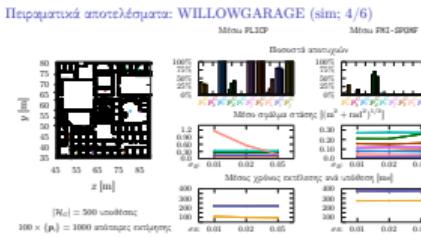
σε αυτή τη διαφάνεια βλέπουμε τα αποτελέσματα σε μία αποθήκη, όπου η έλλειψη ειδικής παραμετροποίησης για το γεγονός ότι το βεληνεκές του αισθητήρα είναι μικρό σε σχέση με τη γεωμετρία του περιβάλλοντος κάνει τον plicp να αποτυγχάνει σχεδόν παντού, ενώ ο SPOMF δεν εμφανίζει αυτό το πρόβλημα.



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

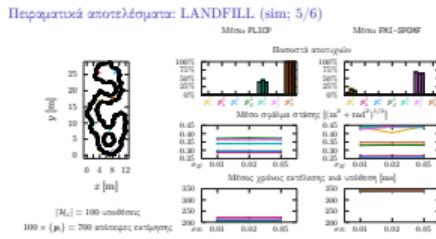
Στο περιβάλλον WILLOGARAGE φαίνεται πως ο plicp απαιτεί οι στάσεις από τις οποίες συλλαμβάνονται οι δύο μετρήσεις να έχουν μικρή απόσταση ώστε να είναι ικανός να τις ευθυγραμμίσει, και πως το ίδιόν του κριτήριο επιλογής τελικής στάσης δεν είναι ικανό να ξεδιαλύνει ασάφειες, όπως δηλαδή στο περιβάλλον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



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

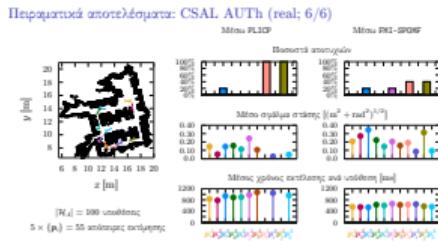
Το περιβάλλον LANDFILL το φτιάξαμε από το μηδέν ως ένα περιβάλλον που δεν περιλαμβάνει ευθείες γραμμές, ή γωνίες, ώστε να δείξουμε πως σε αντίθεση με μία κλάση μεθόδων της βιβλιογραφίας, η μέθοδος που οικοδομήσαμε είναι αναλογιώτη των περιβαλλόντων και δεν απαιτεί να εμφανίζουν συγκεκριμένα features,



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 για custom-made παραμετροποίηση ανά περιβάλλον από τις μεθόδους ευθυγράμμισης που βασίζονται στις αντιστοιχίσεις, 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:
  - Ευσεβήρια λέση σε περιμέτρους—π.χ. πατωγές @ WAREHOUSE
  - Ευσεβήρια λέση σε αρχεία συνθήκες μετατόπισης—π.χ. 1 υπόθεση ανά 4 m<sup>2</sup> @ WAREHOUSE, WILLOWGARAGE
- Σημάντικα επείγοντα απ2: μέσω PMI-SPDMF ~ μέσω μεθόδων με αντιστοιχίες

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα  
είναι ευικτό

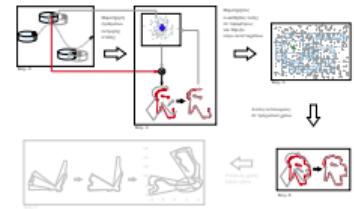
Αυτό που δεν ήταν προηγουμένως δυνατόν και είναι σήμερα είναι η πρώτη μέθοδος που λύνει το πρόβλημα  $sm^2$  για πανοραμικά lidar χωρίς να υπολογίζει αντιστοιχίσεις ανάμεσα στις σαρώσεις εισόδου.

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι ευικτό

Ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές εικόνες πανοραμικού lidar  
ρυθμό που επιλέγεται αποτελεσματικά

A. Pitsikalis, A. Tsiotsis, E. Tsakiris, I. Dimakou, 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 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 επόμενός 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 αποσυνέθεσα ρητά το πρόβλημα 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 μου εδώ είναι πως εάν λυσουμε επαναληπτικά και σειριακά αυτά τα δύο προβλήματα τότε θα καταλήξουμε να λύσουμε το ολικό πρόβλημα. Εδώ η ανάγκη για επαναληπτικότητα προκύπτει από το γεγονός ότι δεδομένης αυτής της αποσύνθεσης του προβλήματος, 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  $\hat{I}(x, y)$  όταν  $\hat{\theta} = \theta$
- Εκτίμηση προσανατολισμού  $\hat{\theta}$  όταν  $\hat{I} = I$



# 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. Tsipras, D. Mihali, I. Drapapa, Z. Kovacic, P. Liatsis, "High-accuracy vehicle localization for autonomous navigation", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016.

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 στάση του 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  $k \geq k_0$

A. Pitsikalis, "Correspondence analysis matching of binocular 3D scans for mobile robot localisation", Robotics and Mechatronics Systems, 2022.

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.

2023-06-05

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

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. Η πρώτη προκύπτει από τη μέθοδο εκτίμησης θέσης που είδαμε μόλις, εάν αντί για γνωστό προσανατολισμό θεωρήσουμε γνωστή τη θέση 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.

Επιπλέον σημάτων:

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

Επιπλέον σημάτων:

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

## 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.

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

$$\begin{aligned}\tilde{\theta} &= \theta + \xi\gamma, \text{ άσκηση} \\ \xi &\triangleq \operatorname{argmax}_{\xi} F^{-1} \left\{ \frac{F(S_1)^* \cdot F(S_2)}{|F(S_1)| \cdot |F(S_2)|} \right\}, \text{ και} \\ \gamma &\triangleq \frac{2\pi}{N_s}\end{aligned}$$

Επιπλέον σημάδια:

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

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

Και το ίδιο ισχύει και για την τρίτη μέθοδο, η οποία μας έρχεται από τα πεδία της χρυσταλλογραφίας και της 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

•  $UDV^T = \text{svd}(P_B P_V^T)$

•  $S = \text{diag}(1, \det(UV))$

Tότε  $\text{tr}(DS)$  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:  
 $\phi = f(N_e)$

Ο κοινός παρονομαστής και των τριών μεθόδων είναι το μέγιστο μειονέκτημα τους, δηλαδή ότι σε αντίθεση με τη λύση του προβλήματος της εκτίμησης της θέσης του αισθητήρα δεν είναι δυνατόν να προσεγγίσουμε με αυθαίρετη ακρίβεια τον προσανατολισμό του αισθητήρα 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 σταθερά.

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

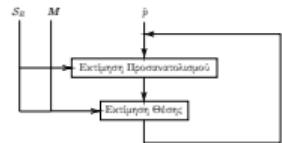
• rc\_xl  
• rc\_fm  
• rc\_uf

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

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

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

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



2023-06-05

## 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,

2023-06-05

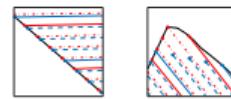
## Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



└ 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

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

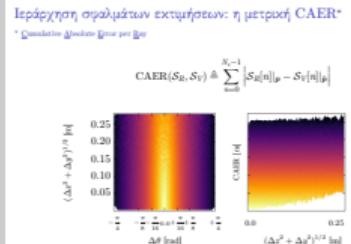
Η γνώμη μου είναι ότι ο μόνος τρόπος για τη μείωση του γωνιακού σφάλματος χωρίς την ακουστική εισαγωγή σφαλμάτων είναι η υπερδειγματοληφία μόνο του χάρτη. Αυτό σημαίνει ότι αν θέλουμε να ελαττώσουμε το σφάλμα κατά 2 εις την  $\nu$  φορές, αρκεί να υπολογίσουμε 2 εις την  $\nu$  εικονικές σαρώσεις με 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, εφηύρα τη μετρική CAER, τις οποίας προφίλ βλέπουμε σε αυτή τη διαφάνεια. Στα αριστερά βλέπουμε πως ανεξαρτήτως του σφάλματος θέσης εμφανίζει χαμηλότερες τιμές για χαμηλότερα σφάλματα προσανατολισμού και στα δεξιά πως ανεξαρτήτως του σφάλματος προσανατολισμού εμφανίζει χαμηλότερες τιμές για χαμηλότερα σφάλματα θέσης.

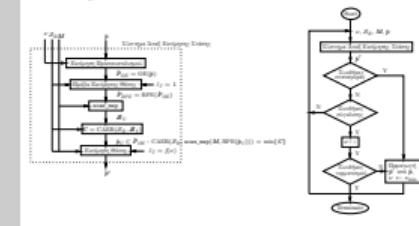


# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Το σύστημα fsm2

Με την εισαγωγή της μετρικής CAER μπορούμε τώρα να συνθέσουμε το τελικό σύστημα που επιλύει το πρόβλημα sm2 χωρίς αντιστοιχίσεις. 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 με την ίδια εκτίμηση θέσης αλλα διαφορετικές εκτιμήσεις προσανατολισμού. Στη συνέχεια κάθε εκτίμηση στάσης 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 σύκκλισης και περιπτώσεων.

Το σύστημα fsm2



# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική διαδικασία

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

Πειραματική διαδικασία

| Επίπεδο  |
|--|
| (31) $\ \hat{y} - \hat{y}\  < \ y - p\ $                                     |
| (32) $\hat{z}_{\text{true}}^{\text{fsm2}} \geq z_{\text{true}}^{\text{fsm}}$ |

Ηνίτη δείχνεται περιβάλλοντα δεδομένων:

| Σύνολο δεδομένων ID | Πληθυσμός |
|---------------------|-----------|
| asos                | 7373      |
| raw09               | 4953      |
| raw1                | 11630     |
| air_casual          | 1987      |
| air_holiday         | 17479     |

 $\sum |D| = 45492$ 

Επίσημη διεύθυνση αεροπορίας, Department of Computer  
Science, University of Erlangen-Nürnberg  
<http://www.aeronet.cs.uni-erlangen.de/>  
<http://www.aeronet.cs.uni-erlangen.de/index.html>

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Πειραματική διαδικασία

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

Πειραματική διαδικασία

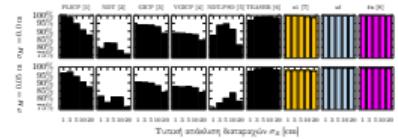
| Έπιπεδο | $\ \hat{y} - y\  < \ \hat{y} - p\ $                | $\ \hat{y} - y\  \geq \ \hat{y} - p\ $ |
|---------|--|--|
| (31)    | $\sigma_1 = \{0.01, 0.03, 0.05, 0.10, 0.20\}$ [m]  | $\sigma_M = \{0.0, 0.05\}$ [m]         |
| (32)    | $\Delta y_{\text{min}} \leq \Delta y_{\text{max}}$ |  |

| Διάνοια διαθέσιμης περιοχής θέσης: |               |
|------------------------------------|---------------|
| Υπόλοιπο διάνοια                   | Πλήρη διάνοια |
| ασε5                               | 7.073         |
| ασε10                              | 4.933         |
| ασε20                              | 1.1630        |
| ασε_ceil                           | 1.007         |
| ασε_kiliam                         | 17.479        |
| $\Sigma^*  D  = 45.002$            |               |

Ευαγγελία Δημητρίου, Department of Computer  
Science, University of Patras  
<http://www.cs.upatras.gr/~dimitris/research/>

| Τυπική απόσταση διαφύλωσης από συστατικά ράγη:  |  |
|---|--|
| $\Delta x = \{-1,-0.20,+0.20\}$ [m]   |  |
| $\Delta y = \{-1,-0.20,+0.20\}$ [m]   |  |
| $\Delta h = \{-1,-\frac{1}{2},\frac{1}{2}\}$ [m]  |  |
| Συνολική απόσταση διαφύλωσης από ράγη:<br>$10 \times \sum  D  \times  \sigma_D  \times  \sigma_M  \approx 4.5 \cdot 10^6$ |  |
| Μήγιστης σταθερότητας: $N_c = 300$  |  |
| $x \in [\mu_{\text{min}}, \mu_{\text{max}}] = [2, 5]$   |  |
| $z = 1 + i$   |  |

Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar  
δισδιάστατων μετρήσεων ...



## └ Ποσοστά επίτευξης στόχου Σ1

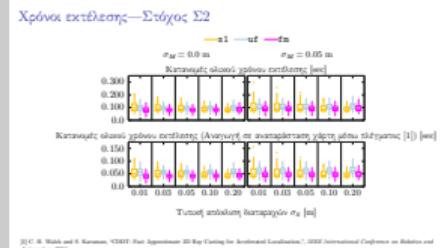
Και επιτέλους είμαι στην ευτυχή ώέση να σας αναφέρω το κύριο αποτέλεσμα της εργασίας μου: Αυτό το γράφημα δείχνει τα ποσοστά των περιπτώσεων στις οποίες το σφάλμα στάσης μειώθηκε ως αποτέλεσμα εφαρμογής της κάθε μεθόδου. Οι τρεις εκδόσεις του fsm2 φαίνονται στα δεξιά με χρώματα, και οι μέθοδοι της βιβλιογραφίας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

- [3] A. Gross, "The ICP variant using a polar-inlier metric," *ICRA 2008*
- [4] M. Neira, "The normal distribution transform: a new approach to laser point matching," *ICRA 2012*
- [5] S. Rusu, "Fast Point Feature Histograms for 3D Point Cloud Registration," *ICRA 2010*
- [6] R. Rusu, B. Valentin, C. Chitu, & M. Benko, "Generalized CPD for Fast and Accurate 3D Point Cloud Registration," *ICRA 2011*
- [7] A. Gross, "The Polar Inlier Metric: A New Metric for 3D Point Cloud Registration," *ICRA 2012*
- [8] A. Gross, "A Comparison of Polar Inlier Metrics for 3D Point Cloud Registration," *ICRA 2013*
- [9] A. Gross, "TEASER: Fast and Certified Point Cloud Registration," *ICRA Transactions on Robotics*, 2021
- [10] A. Plikkonen, A. Symeonidis, G. Sengul, & A. Dimiceli, "Correspondence-aware-to-map-area matching in 3D panoramic maps," *Arxiv*, 2022
- [11] A. Plikkonen, G. Sengul, & A. Dimiceli, "3D Correspondence-aware-to-map-area matching of panoramic 3D scans," *ICRA 2022*

Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar  
δισδιάστατων μετρήσεων ...

## └ Χρόνοι εκτέλεσης—Στόχος Σ2

Πάμε τώρα στο δεύτερο στόχο. Σε αυτή τη διαφάνεια βλέπουμε τους χρόνους εκτέλεσης των τριών εκδόσεων του fsm2 για κάθε τιμή ψηφιακού μέτρησης και διαφυγούς του χάρτη. Στην άνω σειρά βλέπουμε τα ευθεία αποτελέσματα από την πειραματική διαδικασία και στην κάτω σειρά τους χρόνους εκτέλεσης που θα είχαν οι μέθοδοι εάν ο χάρτης αναπαρίστατο ως εικόνα. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο αναπαραστάσεις είναι μεγάλη λόγω του χρόνου υπολογισμού εικονικών σαρώσεων που είναι η πιό δαπανηρή πράξη, και που στην περίπτωση της αναπαράστασης μέσω εικόνας μπορεί να γίνει στο ένα τρίτο του χρόνου σε σχέση με τον 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 8 με 10 Hz, οπότε μόνο η μέθοδος x1 εδώ υπολείπεται αυτής της συχνότητας όταν ο χάρτης είναι διεφυγαρμένος. Οι υπόλοιπες δύο μέθοδοι όμως λειτουργούν ψηλότερα από αυτά τα όρια με μέση τιμή περίπου στα 13 με 20 Hz.



2023-06-05

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

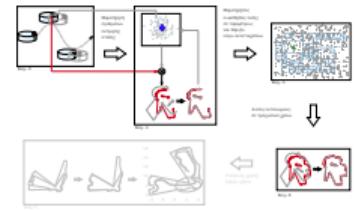
└ Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα  
είναι εφεκτό

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 πραγματισμένων με πυκνούς (πυκνάστατες και πυκνόφρεσκες) περιόδους χωρίς να παλέρησε αποτελέσματα:

- Είναι τρεις βασικές απειλές {pose tracking, θέσην πρόσδιπτων} σε πραγματικό χρόνο
- Άλλη global localisation
  - Χωρίς ad hoc παραμετροποίηση (στατικό ή μεταβλητό)
  - Ταχεία και PNT-SPDIF (⇒ παραπότατες υποθέσεις → λιγότερες απονεγκάδες εκτίμησης)

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



Κάπου εδώ θα τελείωνε η έρευνά μου, αλλά στο τέλος της έρευνάς μου είχα τη διαίσθηση πως το γενικότερο πρόβλημα της ευθυγράμμισης πραγματικών σαρώσεων θα μπορούσε να λυθεί μέσω της λύσης του προβλήματος της ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές σαρώσεις.

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

└ Μετά το sm2 τι;

Μετά το sm2 τι;

| Επιλεγόμενη από λίγους αντιτύπων, ώστε διανομής περιορισμένης                   |  |
|---|--|
| Πρόβλημα:   |  |
| • Απαιτείται λίγη ΔΙΑΓΙΑ: $F_{\text{DIAG}} = 10^3$                              |  |
| • Απαιτείται λίγη ΔΙΑΣΤΑΣΗ: $L_D = 10^3$  |  |
| • Απαιτείται $\mu_{L_D}$  |  |
| • Επιτρέπεται $L_D = 10^3$ μετρήσεις για σύντομη ημερομηνία $T = 10^3$ ημέρες   |  |
| • Το πρόβλημα είναι: $\hat{\mathbf{x}}(T) = \hat{\mathbf{x}}(0), \mathbf{M}(T)$ |  |
| $\ \hat{\mathbf{x}}_0 - \mathbf{x}_0\  = \ \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}\ $     |  |

Εάν  $\|\hat{\mathbf{x}}_0 - \mathbf{x}_0\| \ll \delta$  τότε

- $\|\hat{\mathbf{x}}_0 - \mathbf{x}_0\| < \delta$
- $\mathcal{S}_{\mathbf{f}}(\mathbf{p}_0)$ : ταυτή προσέγγιση  $M$  (άρα  $W$ )  $\rightarrow$   $\hat{\mathbf{x}}$  λύνει τις στις γενικότερες προβλήματα

Ας ξανακοιτάξουμε το πρόβλημα sm2 όπως το θέσαμε. Στα δεδομένα του προβλήματος έχουμε μία πραγματική σάρωση, η οποία συλλαμβάνεται από την πραγματική κατά  $S_R(\mathbf{p})$  στάση του αισθητήρα, και ύστερα το χάρτη του περιβάλλοντος και μία αρχική εκτίμηση για 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 υποβλέπω 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.

Ευθυγράμμιση sm

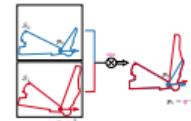
Πρόβλημα:

Καπνοστομή ή αι. δεδομένων:

- Πραγματοποιείται σε περιοχή  $S_0(p_0)$ : FOV =  $360^\circ$
- Πραγματοποιείται σε περιοχή  $S_1(p_1)$ : FOV =  $360^\circ$
- $p_0$  γνωστή (αυθαίρετη)

τέλος της σειράς

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



# 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

- $t_{\text{sm}} \leq \frac{1.0}{20 \text{ Hz}} = 50 \text{ ms}$  ( $T_{\text{scanning}} = T_{\text{sm}} \approx 100 \text{ ms}$ )
- Σύμβολο παλός προσέγγισης που χάρτη  $M \leftrightarrow$  απάξηση ευρεσίας σε "κανές αντιστοιχία"



## └ 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 γρήγορης έκδοσης του fsm2, η οποία είναι η fm, η οποία έχει χρόνο εκτέλεσης 100 ms. Η μεγάλη πρόκληση όμως είναι η ευρωστία της μεθόδου ευθυγράμμισης στις κενές αντιστοιχίσεις. Στην εικόνα εδώ βλέπουμε πως στο πρόβλημα sm2 ακριβώς επειδή έχουμε τον χάρτη από την τελική εκτίμηση η εικονική σάρωση έχει την ίδια μορφή με την πραγματική. Στο sm όμως, εάν μετατρέψουμε την πρώτη σάρωση ως ~~τελικό χάρτη~~ μέσα στον οποίο θα εφαρμόσουμε την τεχνική sm2 τότε λόγω του γεγονότος ότι από διαφορετικές θέσεις μέσα στον χάρτη ~~στην πρώτη~~ α 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

Πειραματική διαδικασία

| Επίπεδο:   |
|--|
| (ΟΙ) $\ \hat{q}^{true} - q\  \leq \frac{1}{2}\ \hat{q}^{true} - q\ $ |
| (ΟΙΙ) $\hat{q}^{true} \leq 50.0 \text{ μm}$                          |

Ηλικία δειγμάτων περιβάλλοντα διαφορών:

| Εύρος διάστασης D  | Πληθυσμός |
|--------------------|-----------|
| acess              | 7373      |
| intel              | 4930      |
| intel              | 13630     |
| int_casill         | 1987      |
| int_billiam        | 17470     |
| $\sum  D  = 45492$ |           |

Στην Εύρος διάστασης εξαιρένται ΟΑΙΑΙ, Τύποι  
διάστασης και Επαγγελματικές διαδικασίες.

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.

Приложитъ

$$\Sigma_{\text{max}} =$$

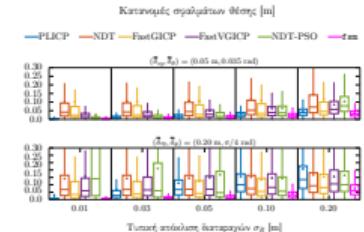
Після встановлення підтримуючих доз

| Último Símbolo B | Probabilidad |
|------------------|--------------|
| ace              | 7.373        |
| tau79            | 4933         |
| late1            | 13630        |
| ant_cail1        | 1987         |
| ant_killing      | 17479        |

Σεργίο Κλινική Βασιλείου από την περιοχή ΕΛΑΣΜ, Τριτοβάθμιος συντονιστής Τελωνευτικού Σταθμού στην

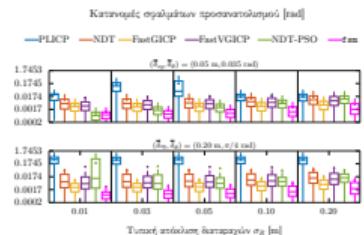
| Тест на наличие корня в отрезке   |   |
|---|---|
| $x_0$   | $[0.01; 0.1; 0.01; 0.1; 0.01] \text{ [в]}$    |
| Несколько, когда количество нулей неизвестно:   |   |
|   |   |
| $\Delta_{k_1}, \Delta_{k_2} \approx \left[ -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right] \text{ [рад]}$ |   |
| $\Delta_{k_1} \approx \left[ -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right] \text{ [рад]}$               |   |
| <u>Комментарий</u> (наш случай)   |   |
| $\Delta_1$  | $\boxed{\Delta_1 = [0, 0.1; 0, 0.01]}$        |
| $\Delta_2$  | $\boxed{\Delta_2 = [0.1, 0.2; 0.01, 0.02]}$   |
| $\Delta_3$  | $\boxed{\Delta_3 = [0.2, 0.3; 0.02, 0.03]}$   |
| $\Delta_4$  | $\boxed{\Delta_4 = [0.3, 0.4; 0.03, 0.04]}$   |
| $\Delta_5$  | $\boxed{\Delta_5 = [0.4, 0.5; 0.04, 0.05]}$   |
| $\Delta_6$  | $\boxed{\Delta_6 = [0.5, 0.6; 0.05, 0.06]}$   |
| $\Delta_7$  | $\boxed{\Delta_7 = [0.6, 0.7; 0.06, 0.07]}$   |
| $\Delta_8$  | $\boxed{\Delta_8 = [0.7, 0.8; 0.07, 0.08]}$   |
| $\Delta_9$  | $\boxed{\Delta_9 = [0.8, 0.9; 0.08, 0.09]}$   |
| $\Delta_{10}$   | $\boxed{\Delta_{10} = [0.9, 1.0; 0.09, 0.1]}$ |

# Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...



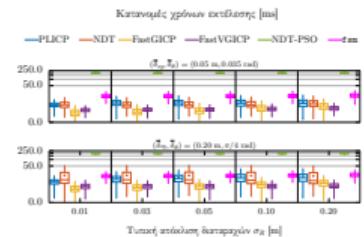
Σε αυτή τη διαφάνεια βλέπουμε τις κατανομές των τελικών σφαλμάτων θέσης. Στην άνω σειρά βρίσκονται τα αποτελέσματα για το χαμηλότερο επίπεδο μετατόπισης μεταξύ σαρώσεων και στην κάτω αυτά για το υψηλότερο επίπεδο μετατόπισης. Κάθε κουτί αναφέρεται σε ένα επίπεδο θορύβου μέτρησης. Θα δείτε πως σε χαμηλές ταχύτητες ο fsm είναι ισοδύναμος και λίγο καλύτερος από την καλύτερη μέθοδο, που εδώ είναι ο plicp, αλλά 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 αυτή η μέθοδος δεν τρέχει σε πραγματικό χρόνο. Εδώ βλέπουμε τις κατανομές των χρόνων εκτέλεσης, όπου ο NDT-PSO τρέχει σε 140 ms, ενώ ο fsm τρέχει σε λιγότερο από 25 ms για κάθε επίπεδο αρχικής μετατόπισης και υιορύβου 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.



## 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 και σε κενές αντιστοιχίσεις, και συνιστώσες υψηλών συχνοτήτων.

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

└ 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.