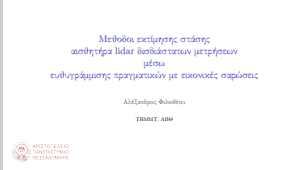
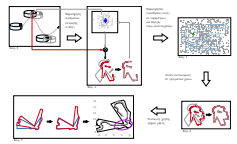


Μεθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων μέσω ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές σαρώσεις

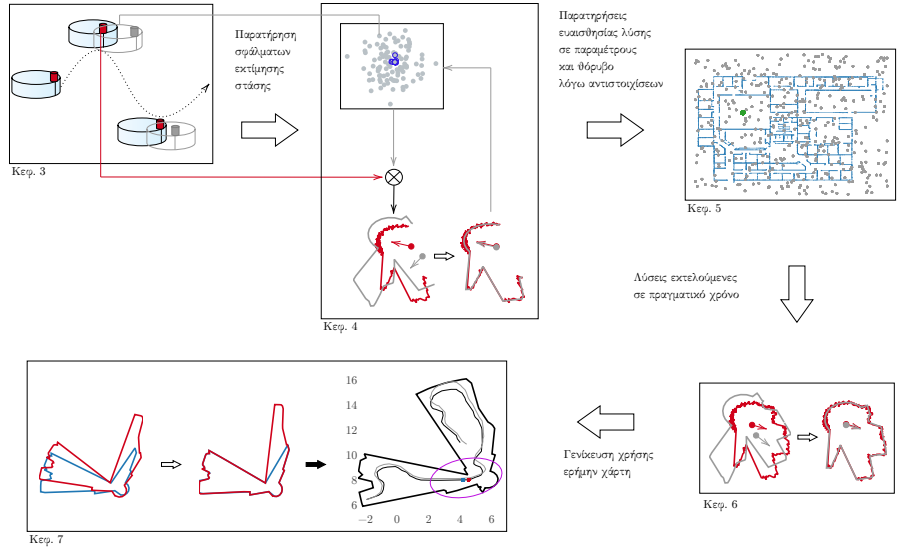
Αλέξανδρος Φιλοθέου

ΤΗΜΜΥ, ΑΠΘ

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



Σχήμα: Οδικός χάρτης της διατριβής



Σχήμα: Οδικός χάρτης της διατριβής

To έργο RELIEF: motivation
Αποθήκες προϊόντων: ανάγκη για
• συνεχή απογραφή
• γνώση θέσης προϊόντων
Σχήμα: Πηγή: BBC, *Amazon sellers hit by 'extensive' fraud campaign*,
https://www.bbc.com/news/technology-48215073

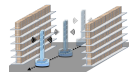
To έργο RELIEF: motivation

Αποθήκες προϊόντων: ανάγκη για

- συνεχή απογραφή
- γνώση θέσης προϊόντων

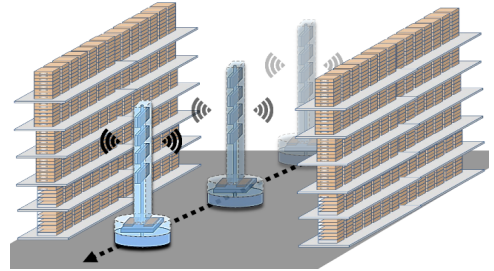
Σχήμα: Πηγή: BBC, *Amazon sellers hit by 'extensive' fraud campaign*,
https://www.bbc.com/news/technology-48215073

Το έργο RELIEF: η λύση

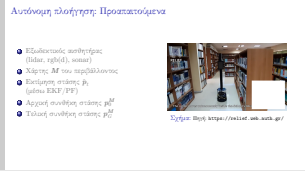


- Τοποθέτηση RFID ετικετών σε προϊόντα
- Αυτόνομα επίγεια οχήματα με RFID αναγνώστες

Το έργο RELIEF: η λύση



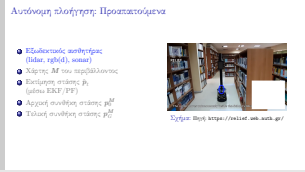
- Τοποθέτηση RFID ετικετών σε προϊόντα
- Αυτόνομα επίγεια οχήματα με RFID αναγνώστες



Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

1. Εξωδεκτικός αισθητήρας (lidar, rgb(d), sonar)
2. Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
3. Εκτίμηση στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}_t$ (μέσω EKF/PF)
4. Αρχική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_0^{\boldsymbol{M}}$
5. Τελική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_G^{\boldsymbol{M}}$

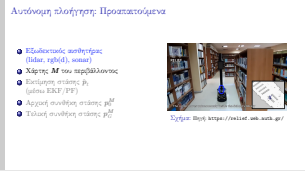
Σχήμα: Πηγή: `https://relief.web.auth.gr/`



Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

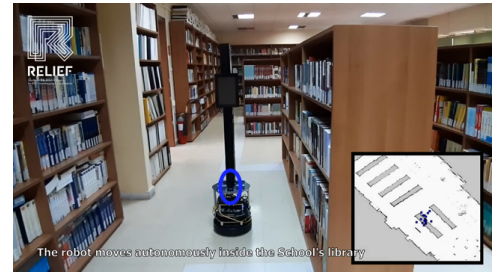
1. Εξωδεκτικός αισθητήρας (lidar, rgb(d), sonar)
2. Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
3. Εκτίμηση στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}_t$ (μέσω EKF/PF)
4. Αρχική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_0^{\boldsymbol{M}}$
5. Τελική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_G^{\boldsymbol{M}}$

Σχήμα: Πηγή: `https://relief.web.auth.gr/`

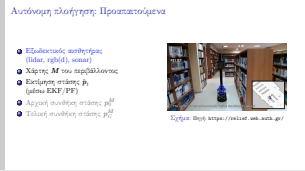


Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

1. Εξωδεκτικός αισθητήρας (lidar, rgb(d), sonar)
2. Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
3. Εκτίμηση στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}_t$ (μέσω EKF/PF)
4. Αρχική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_0^M$
5. Τελική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_G^M$

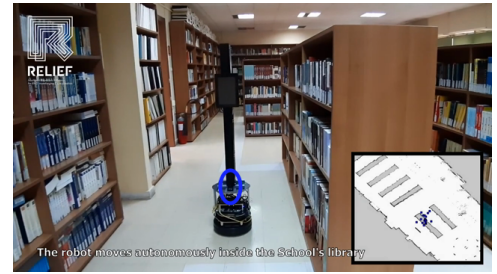


Σχήμα: Πηγή: `https://relief.web.auth.gr/`

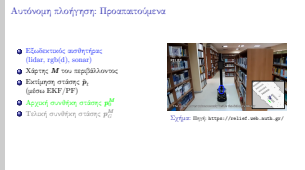


Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

1. Εξωδεκτικός αισθητήρας (lidar, rgb(d), sonar)
2. Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
3. Εκτίμηση στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}_t$ (μέσω EKF/PF)
4. Αρχική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_0^M$
5. Τελική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_G^M$

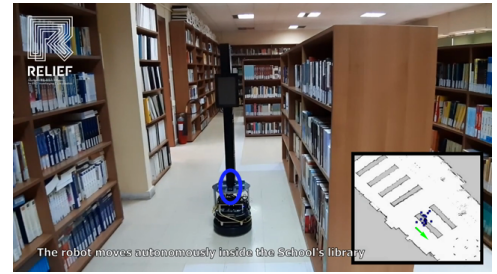


Σχήμα: Πηγή: `https://relief.web.auth.gr/`

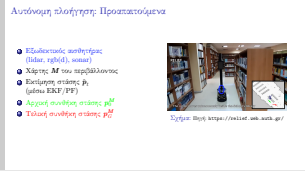


Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

1. Εξωδεκτικός αισθητήρας (lidar, rgb(d), sonar)
2. Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
3. Εκτίμηση στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}_t$ (μέσω EKF/PF)
4. Αρχική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_0^{\boldsymbol{M}}$
5. Τελική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_G^{\boldsymbol{M}}$

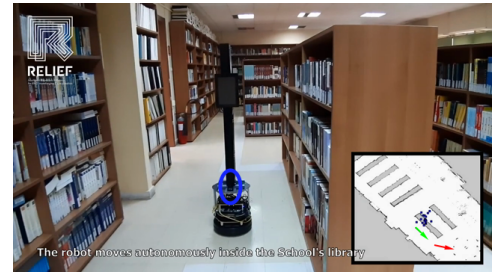


Σχήμα: Πηγή: `https://relief.web.auth.gr/`

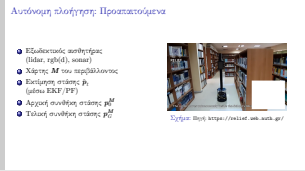


Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

1. Εξωδεκτικός αισθητήρας (lidar, rgb(d), sonar)
2. Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
3. Εκτίμηση στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}_t$ (μέσω EKF/PF)
4. Αρχική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_0^{\boldsymbol{M}}$
5. Τελική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_G^{\boldsymbol{M}}$



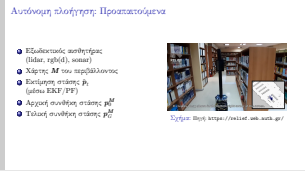
Σχήμα: Πηγή: `https://relief.web.auth.gr/`



Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

1. Εξωδεκτικός αισθητήρας (lidar, rgb(d), sonar)
2. Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
3. Εκτίμηση στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}_t$ (μέσω EKF/PF)
4. Αρχική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_0^{\boldsymbol{M}}$
5. Τελική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_G^{\boldsymbol{M}}$

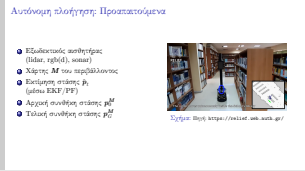
Σχήμα: Πηγή: `https://relief.web.auth.gr/`



Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

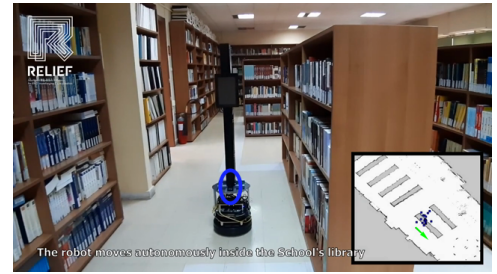
1. Εξωδεκτικός αισθητήρας (lidar, rgb(d), sonar)
2. Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
3. Εκτίμηση στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}_t$ (μέσω EKF/PF)
4. Αρχική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_0^{\boldsymbol{M}}$
5. Τελική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_G^{\boldsymbol{M}}$

Σχήμα: Πηγή: `https://relief.web.auth.gr/`

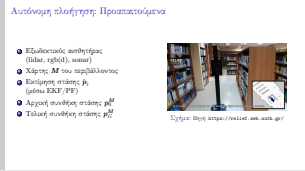


Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

1. Εξωδεκτικός αισθητήρας (lidar, rgb(d), sonar)
2. Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
3. Εκτίμηση στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}_t$ (μέσω EKF/PF)
4. Αρχική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_0^{\boldsymbol{M}}$
5. Τελική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_G^{\boldsymbol{M}}$



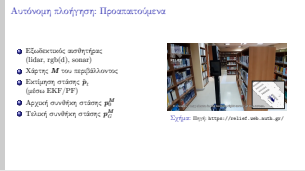
Σχήμα: Πηγή: `https://relief.web.auth.gr/`



Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

1. Εξωδεκτικός αισθητήρας (lidar, rgb(d), sonar)
2. Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
3. Εκτίμηση στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}_t$ (μέσω EKF/PF)
4. Αρχική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_0^{\boldsymbol{M}}$
5. Τελική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_G^{\boldsymbol{M}}$

Σχήμα: Πηγή: `https://relief.web.auth.gr/`

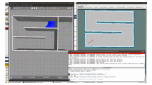


Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

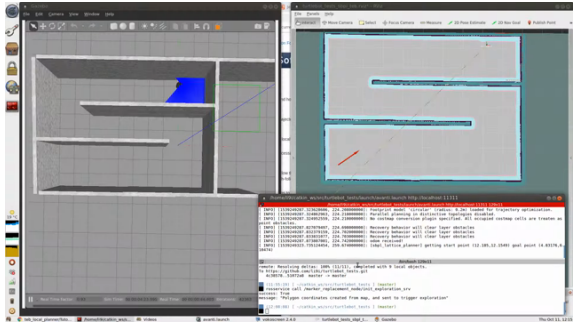
1. Εξωδεκτικός αισθητήρας (lidar, rgb(d), sonar)
2. Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
3. Εκτίμηση στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}_t$ (μέσω EKF/PF)
4. Αρχική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_0^{\boldsymbol{M}}$
5. Τελική συνθήκη στάσης $\boldsymbol{p}_G^{\boldsymbol{M}}$

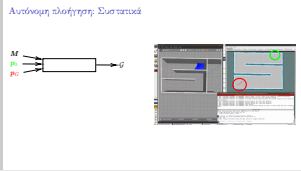
Σχήμα: Πηγή: `https://relief.web.auth.gr/`

Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά

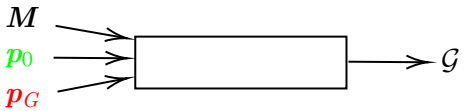


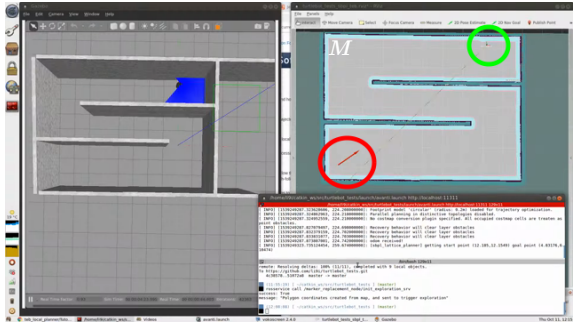
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά

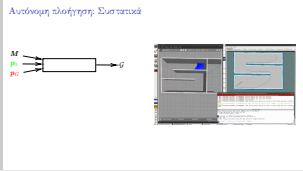




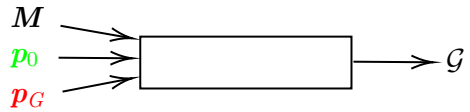
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά

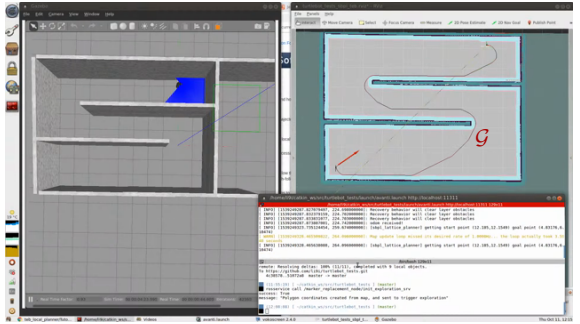


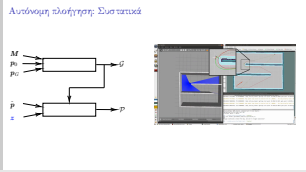




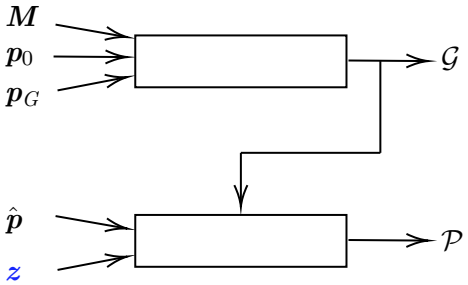
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά

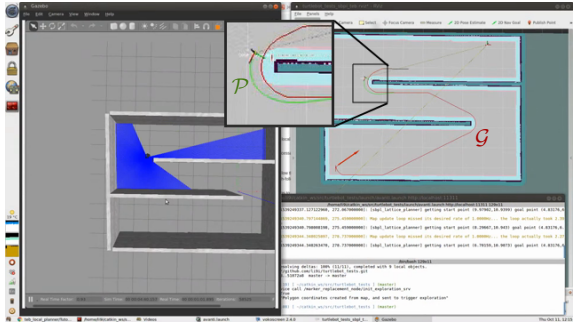


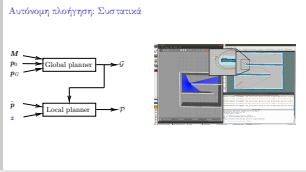




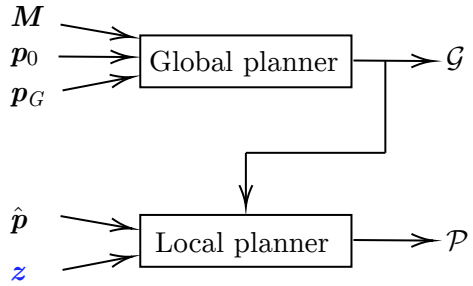
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά

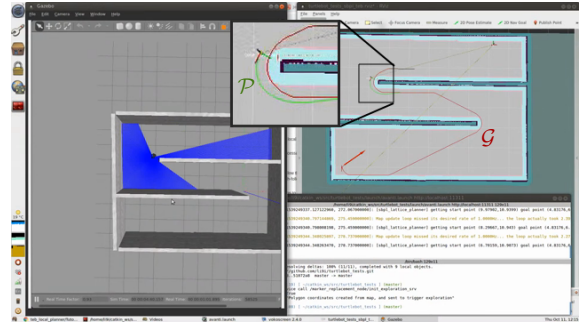






Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά





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

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

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn			
global_planner			
asr_navfn			
MoveIt!			
sbpl_lattice_planner			
sbpl_dynamic_env			
lattice_planner			
waypoint_global_planner			
voronoi_planner			

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

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

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

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

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

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

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

Global Planners	Local planners		
	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

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

Global Planners	Local planners		
	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

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

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

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

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

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

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

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

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

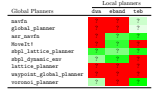
Η ανάγκη για πειραματική αξιολόγηση του state-of-the-art

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

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

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

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



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

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

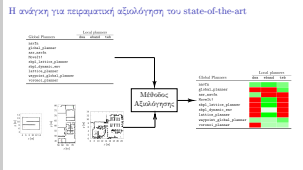
Η ανάγκη για πειραματική αξιολόγηση του state-of-the-art

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

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?

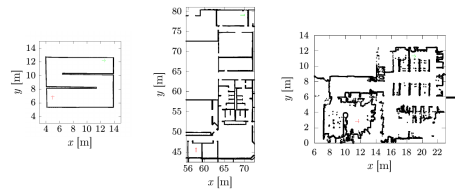
Η ανάγκη για πειραματική αξιολόγηση του state-of-the-art

	Local planners		
Global Planners	dwa	eband	teb
navfn	?	?	?
global_planner	?	?	?
asr_navfn	?	?	?
MoveIt!	?	?	?
sbpl_lattice_planner	?	?	?
sbpl_dynamic_env	?	?	?
lattice_planner	?	?	?
waypoint_global_planner	?	?	?
voronoi_planner	?	?	?



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

Global Planners	Local planners: dwa	eband	teb
navfn			
global_planner			
asr_navfn			
MoveIt!			
sbpl_lattice_planner			
sbpl_dynamic_env			
lattice_planner			
waypoint_global_planner			
voronoi_planner			



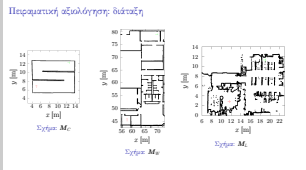
Μέθοδος Αξιολόγησης

Global Planners	Local planners: dwa	eband	teb
navfn			
global_planner			
asr_navfn			
MoveIt!			
sbpl_lattice_planner			
sbpl_dynamic_env			
lattice_planner			
waypoint_global_planner			
voronoi_planner			

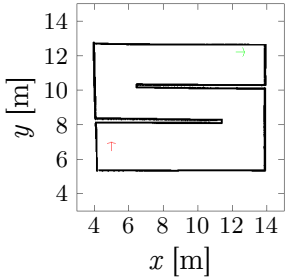
Προκαταρκτική αξιολόγηση: ποιοτικά κριτήρια λογισμικού

	Ποιοτικές Μετρικές							
Planner	DOC	UTD	INST	SC/C	PARAM	CON	COMP	Αποδοχή
navfn	●	●	●●	●	●	●	●	●
global_planner	●	●	●●	●	●	●	●	●
asr_navfn	●	○	●	●	●	●	●	○
MoveIt!	●●●	●	●●	●	●●●	?	●●●	○
sbpl_lattice_planner	●●	●	●●	●	●	●	●	●
sbpl_dynamic_env	●	○	●	○	●	?	●	○
lattice_planner	●	○	●	●	●	●	●	○
waypoint_global_planner	●	○	●	○	○	●	●	○
voronoi_planner	●	○	●	●	●	●	●	○
dwa_local_planner	●	●	●●	●	●	●	●	●
eband_local_planner	●	○	●●	●	●●	●	●●	●
teb_local_planner	●●●	●	●●	●	●●●	●●	●●	●

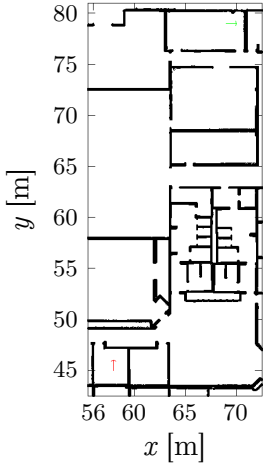
Πίνακας: Αξιολόγηση των πακέτων ROS που αποτελούν συνιστώσες αυτόνομους πλοήγησης με βάση ποιοτικές μετρικές λογισμικού, και απόφαση αποδοχής για συμπερίληψη στην πειραματική αξιολόγηση. Οι κενές κουκκίδες υποδηλώνουν ανεπάρκεια σε σχέση με κάθε μετρική. Τα ερωτηματικά υποδηλώνουν άγνωστη κατάσταση



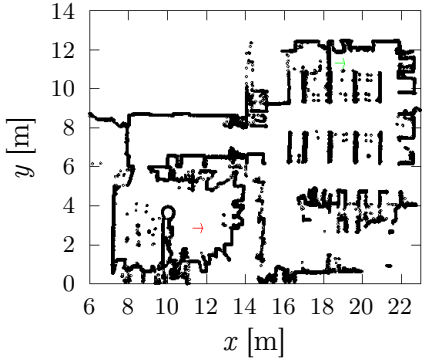
Πειραματική αξιολόγηση: διάταξη



Σχήμα: $\boldsymbol{M}_C$



Σχήμα: $\boldsymbol{M}_W$



Σχήμα: $\boldsymbol{M}_L$

Πειραματική αξιολόγηση: μετρικές
Global planners (8 μετρικές)
- Μέσο μήκος χαραχθέντων μονοπατιών
- Μέση ελάχιστη απόσταση από εμπόδια
- ...

Local planners (8 μετρικές)
- Αριθμός αποτυχιών έυρεσης ταχυτήτων προς συνολικό αριθμό κλήσεων
- ...

Global ∘ Local (12 μετρικές)
- Χρόνος πλοήγησης
- Ολικά ελάχιστη απόσταση από εμπόδια
- ...

Πειραματική αξιολόγηση: μετρικές

Global planners (8 μετρικές)

- Μέσο μήκος χαραχθέντων μονοπατιών
- Μέση ελάχιστη απόσταση από εμπόδια
- ...

Local planners (8 μετρικές)

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

Global ∘ Local (12 μετρικές)

- Χρόνος πλοήγησης
- Ολικά ελάχιστη απόσταση από εμπόδια
- ...

Πειραματική αξιολόγηση: Στόχος

Απόδοση μίας τιμής-αξίας $V(c_{i,j})$ σε κάθε συνδυασμό $c_{i,j} = g_i \circ l_j$ για όλα τα περιβάλλοντα με βάση όλες τις μετρικές m_k

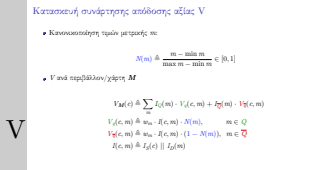
Προβλήματα:
- Διαφορετικές μονάδες μέτρησης μετρικών
- Κατασκευή $V(c) \uparrow$ όταν $c(m_q) \uparrow$ και $c(m_{\overline{q}}) \downarrow$, $m_q \in Q, m_{\overline{q}} \in \overline{Q}, Q \cup \overline{Q} = \cup m$

Πειραματική αξιολόγηση: Στόχος

Απόδοση μίας τιμής-αξίας $V(c_{i,j})$ σε κάθε συνδυασμό $c_{i,j} = g_i \circ l_j$ για όλα τα περιβάλλοντα με βάση όλες τις μετρικές m_k

Προβλήματα:

- Διαφορετικές μονάδες μέτρησης μετρικών
- Κατασκευή $V(c) \uparrow$ όταν $c(m_q) \uparrow$ και $c(m_{\overline{q}}) \downarrow$, $m_q \in Q, m_{\overline{q}} \in \overline{Q}, Q \cup \overline{Q} = \cup m$



Κατασκευή συνάρτησης απόδοσης αξίας V

- Κανονικοποίηση τιμών μετρικής m:

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

- V ανά περιβάλλον/χάρτη $\boldsymbol{M}$

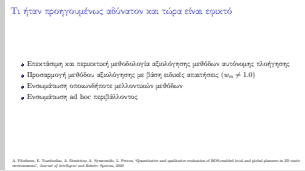
$$\begin{aligned}
V_{\boldsymbol{M}}(c) &\triangleq \sum_m I_Q(m) \cdot V_q(c,m) + I_{\overline{Q}}(m) \cdot V_{\overline{q}}(c,m) \\
V_q(c,m) &\triangleq w_m \cdot I(c,m) \cdot N(m), && m \in Q \\
V_{\overline{q}}(c,m) &\triangleq w_m \cdot I(c,m) \cdot (1 - N(m)), && m \in \overline{Q} \\
I(c,m) &\triangleq I_S(c) \mid\mid I_D(m)
\end{aligned}$$

Αποτελέσματα

Αποτελέσματα

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

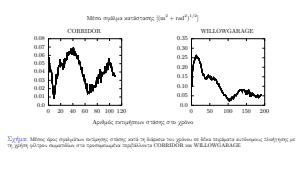
Πίνακας: Η σύνθετη τελική τιμή V και η κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης σε επαναληπτικές προσομοιώσεις και πειράματα στα περιβάλλοντα της πειραματικής διάταξης



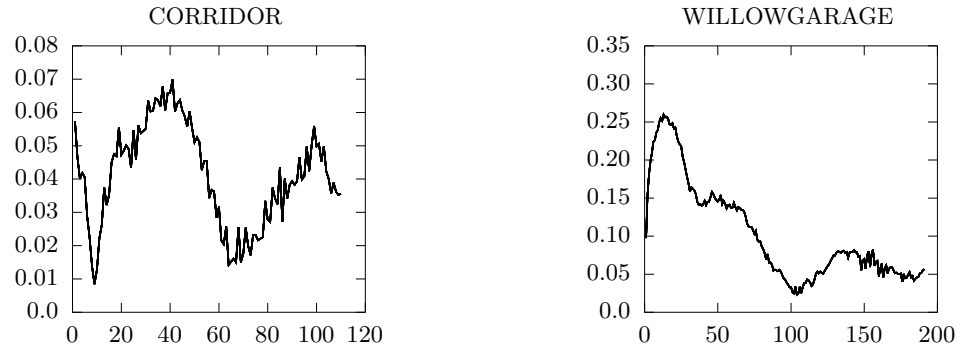
Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

- Επεκτάσιμη και περιεκτική μεθοδολογία αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομης πλοήγησης
- Προσαρμογή μεθόδου αξιολόγησης με βάση ειδικές απαιτήσεις ($w_m \neq 1.0$)
- Ενσωμάτωση οποιωνδήποτε μελλοντικών μεθόδων
- Ενσωμάτωση ad hoc περιβάλλοντος

A. Filotheou, E. Tsardoulias, A. Dimitriou, A. Symeonidis, L. Petrou, "Quantitative and qualitative evaluation of ROS-enabled local and global planners in 2D static environments", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2020

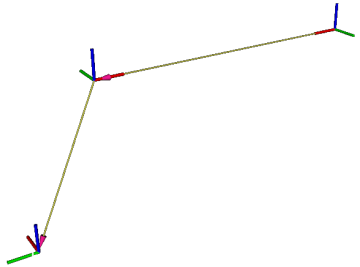


Μέσο σφάλμα κατάστασης $[(\mathrm{m}^2 + \mathrm{rad}^2)^{1/2}]$

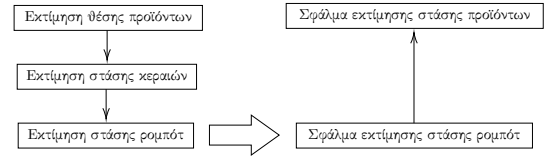


Αριθμός εκτιμήσεων στάσης στο χρόνο

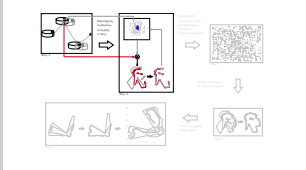
Σχήμα: Μέσος όρος σφαλμάτων εκτίμησης στάσης κατά τη διάρκεια του χρόνου σε δέκα πειράματα αυτόνομους πλοήγησης με τη χρήση φίλτρου σωματιδίων στα προσομειωμένα περιβάλλοντα CORRIDOR και WILLOWGARAGE

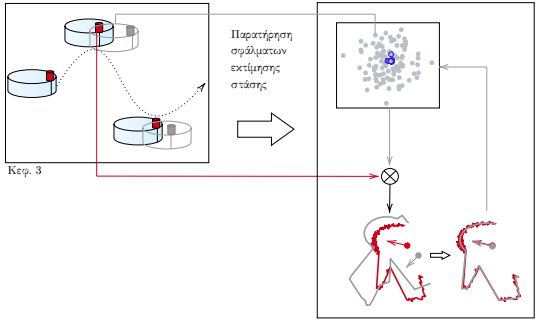


Σχήμα: Συστήματα αναφοράς ρομπότ, κεραίας, και τυχαίου προϊόντος



Σχήμα: Η εκτίμηση της θέσης των προϊόντων εξαρτάται από το σφάλμα της εκτίμησης της στάσης του ρομπότ

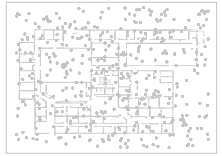




Κεφ. 3

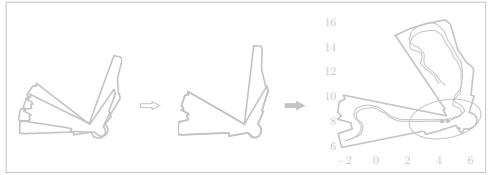
Κεφ. 4

Παρατηρήσεις ευαισθησίας λύσης σε παραμέτρους και θόρυβο λάγκω αντιστοιχίσεων



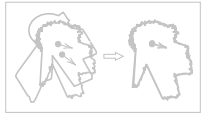
Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες σε πραγματικό χρόνο



Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης ερήμην χάρτη



Κεφ. 6

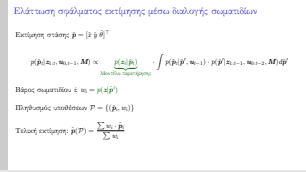
Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης στάσης φίλτρων σωματιδίων

Μέσω
- προσθετικής ευθυγράμμισης πραγματικών σαρώσεων με εικονικές
- ανατροφοδότησης
- διαλογής σωματιδίων

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης στάσης φίλτρων σωματιδίων

Μέσω

- προσθετικής ευθυγράμμισης πραγματικών σαρώσεων με εικονικές
- ανατροφοδότησης
- διαλογής σωματιδίων



Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω διαλογής σωματιδίων

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

$$p(\hat{\boldsymbol{p}}_t|\boldsymbol{z}_{1:t}, \boldsymbol{u}_{0,t-1}, \boldsymbol{M}) \propto \underbrace{p(\boldsymbol{z}_t|\hat{\boldsymbol{p}}_t)}_{\text{Μοντέλο παρατήρησης}} \cdot \int p(\hat{\boldsymbol{p}}_t|\hat{\boldsymbol{p}}', \boldsymbol{u}_{t-1}) \cdot p(\hat{\boldsymbol{p}}'|\boldsymbol{z}_{1:t-1}, \boldsymbol{u}_{0:t-2}, \boldsymbol{M})\, d\hat{\boldsymbol{p}}'$$

Βάρος σωματιδίου i: $w_i = p(\boldsymbol{z}|\hat{\boldsymbol{p}}^i)$

Πληθυσμός υποθέσεων $\mathcal{P} = \{(\hat{\boldsymbol{p}}_i, w_i)\}$

Τελική εκτίμηση: $\hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P}) = \dfrac{\sum w_i \cdot \hat{\boldsymbol{p}}_i}{\sum w_i}$

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω διαλογής σωματιδίων

Υπόθεση Υ1:

Έστω
$\mathcal{P} = \{(\hat{\boldsymbol{p}}_i, w_i)\}$ ο συνολικός πληθυσμός.
$\mathcal{Q} = \texttt{sort}(\mathcal{P}|w) = \{(\hat{\boldsymbol{p}}_j, w_j)\} : w_0 \geq w_1 \geq \dots$
$\overline{\mathcal{Q}} \subset \mathcal{Q} : \overline{\mathcal{Q}} = \{(\hat{\boldsymbol{p}}_0, w_0), (\hat{\boldsymbol{p}}_1, w_1), \dots\}$ και $|\overline{\mathcal{Q}}| < |\mathcal{Q}|$.

Τότε
$\|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\overline{\mathcal{Q}})\| < \|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P})\|$

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω διαλογής σωματιδίων

Υπόθεση Υ1:

Έστω

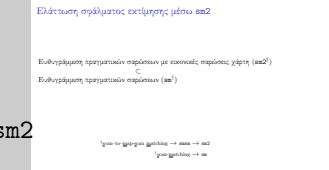
$\mathcal{P} = \{(\hat{\boldsymbol{p}}_i, w_i)\}$ ο συνολικός πληθυσμός.

$\mathcal{Q} = \texttt{sort}(\mathcal{P}|w) = \{(\hat{\boldsymbol{p}}_j, w_j)\} : w_0 \geq w_1 \geq \dots$

$\overline{\mathcal{Q}} \subset \mathcal{Q} : \overline{\mathcal{Q}} = \{(\hat{\boldsymbol{p}}_0, w_0), (\hat{\boldsymbol{p}}_1, w_1), \dots\}$ και $|\overline{\mathcal{Q}}| < |\mathcal{Q}|$.

Τότε

$\|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\overline{\mathcal{Q}})\| < \|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P})\|$



Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω sm2

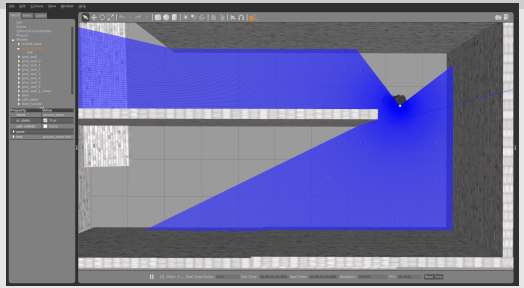
Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων με εικονικές σαρώσεις χάρτη (sm2‡)

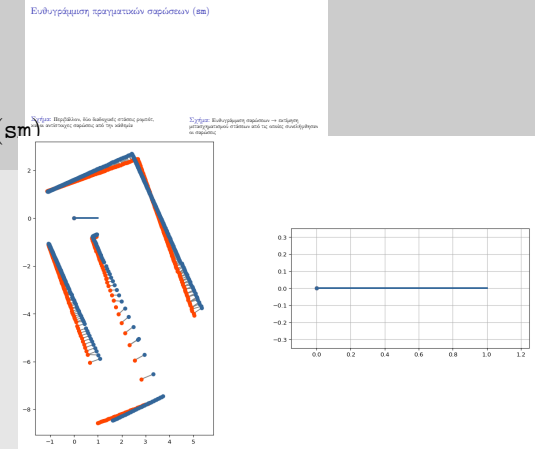
$\subset$

Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων (sm†)

‡scan–to–map-scan matching → smsm → sm2

†scan-matching → sm





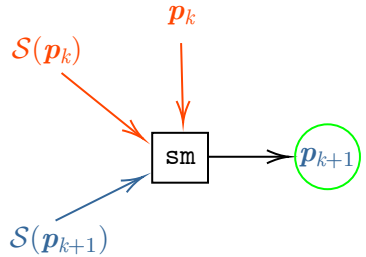
Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων (sm)

$\mathcal{S}(\boldsymbol{p}_k)$ $\mathcal{S}(\boldsymbol{p}_{k+1})$ $\mathcal{S}(\boldsymbol{p}_k)$ $\mathcal{S}(\boldsymbol{p}_{k+1})$

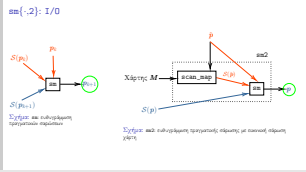
Σχήμα: Περιβάλλον, δύο διαδοχικές στάσεις ρομπότ, και οι αντίστοιχες σαρώσεις από την κάθεμία

Σχήμα: Ευθυγράμμιση σαρώσεων → εκτίμηση μετασχηματισμού στάσεων από τις οποίες συνελήφθησαν οι σαρώσεις

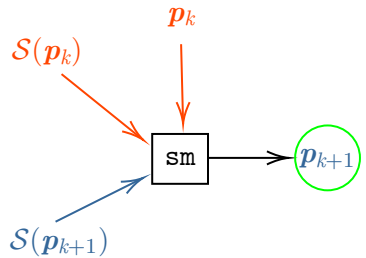
sm: I/O



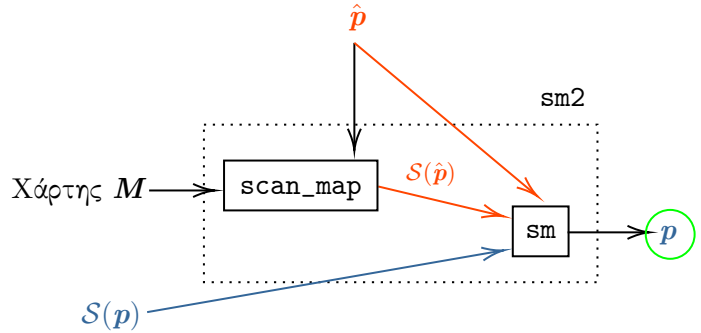
Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων



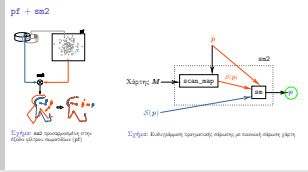
sm{·,2}: I/O



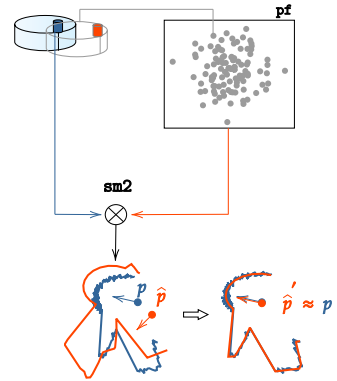
Σχήμα: sm: ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων



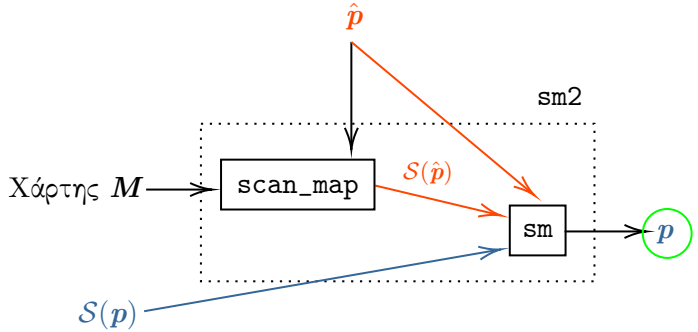
Σχήμα: sm2: ευθυγράμμιση πραγματικής σάρωσης με εικονική σάρωση χάρτη



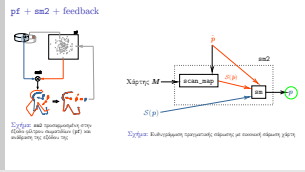
pf + sm2



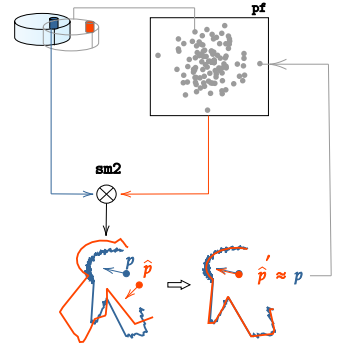
Σχήμα: sm2 προσαρμοσμένη στην έξοδο φίλτρου σωματιδίων (pf)



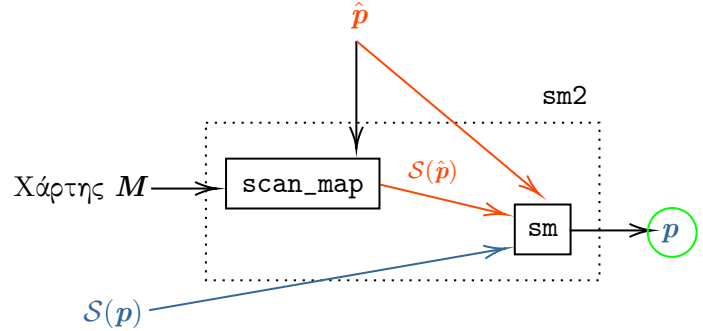
Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικής σάρωσης με εικονική σάρωση χάρτη



pf + sm2 + feedback



Σχήμα: sm2 προσαρμοσμένη στην έξοδο φίλτρου σωματιδίων (pf) και ανάδραση της εξόδου της



Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικής σάρωσης με εικονική σάρωση χάρτη

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδρασης εξόδου sm2

- Ανάδραση με τη μορφή μοναδικής υπόθεσης
  → αργή σύγκλιση / αμελητέα συμβολή

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδρασης εξόδου sm2

- Ανάδραση με τη μορφή μοναδικής υπόθεσης
  → αργή σύγκλιση / αμελητέα συμβολή

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδρασης εξόδου sm2

- Ανάδραση με τη μορφή μοναδικής υπόθεσης
  → αργή σύγκλιση / αμελητέα συμβολή
- Εξ ολοκλήρου αρχικοποίηση του φίλτρου
  → απώλεια ανθεκτικότητας σε περίπτωση αποτυχίας sm2

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδρασης εξόδου sm2

- Ανάδραση με τη μορφή μοναδικής υπόθεσης
  → αργή σύγκλιση / αμελητέα συμβολή
- Εξ ολοκλήρου αρχικοποίηση του φίλτρου
  → απώλεια ανθεκτικότητας σε περίπτωση αποτυχίας sm2

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδρασης εξόδου sm2

- Ανάδραση με τη μορφή μοναδικής υπόθεσης
  → αργή σύγκλιση / αμελητέα συμβολή
- Εξ ολοκλήρου αρχικοποίηση του φίλτρου
  → απώλεια ανθεκτικότητας σε περίπτωση αποτυχίας sm2
- Ανάδραση με τη μορφή πολλαπλών υποθέσεων
  → γρήγορη σύγκλιση και διατήρηση ανθεκτικότητας

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδρασης εξόδου sm2

- Ανάδραση με τη μορφή μοναδικής υπόθεσης
  → αργή σύγκλιση / αμελητέα συμβολή
- Εξ ολοκλήρου αρχικοποίηση του φίλτρου
  → απώλεια ανθεκτικότητας σε περίπτωση αποτυχίας sm2
- Ανάδραση με τη μορφή πολλαπλών υποθέσεων
  → γρήγορη σύγκλιση και διατήρηση ανθεκτικότητας

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδρασης εξόδου sm2
Έστω $\mathcal{P} = \{(\hat{\boldsymbol{p}}_i, w_i)\}$ ο συνολικός πληθυσμός του φίλτρου και $\hat{\boldsymbol{p}}^\star \leftarrow \texttt{sm2}(\mathcal{S}(\boldsymbol{p}), \boldsymbol{M}, \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P}))$. Τότε
Υπόθεση Υ2:
$\|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}^\star\| < \|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P})\|$
Υπόθεση Υ3:
Εάν $\mathcal{P}^{\circlearrowleft} = \mathcal{P} \circlearrowleft \{\hat{\boldsymbol{p}}^\star\}_{q\cdot|\mathcal{P}^{\circlearrowleft}|}$, όπου $q \gg 0.01$ και $q \ll 1.0$:
- $\|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P}^{\circlearrowleft})\| < \|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P})\|$
- $\|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P}^{\circlearrowleft})\| < \|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P} \circlearrowleft \{\hat{\boldsymbol{p}}^\star\}_1)\|$
- $\mathcal{P} \circlearrowleft \{\hat{\boldsymbol{p}}^\star\}_{q\cdot|\mathcal{P}^{\circlearrowleft}|}$ πιο ανθεκτικός από $\mathcal{P} \circlearrowleft \{\hat{\boldsymbol{p}}^\star\}_{|\mathcal{P}^{\circlearrowleft}|}$

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω ανάδρασης εξόδου sm2

Έστω $\mathcal{P} = \{(\hat{\boldsymbol{p}}_i, w_i)\}$ ο συνολικός πληθυσμός του φίλτρου και $\hat{\boldsymbol{p}}^\star \leftarrow \texttt{sm2}(\mathcal{S}(\boldsymbol{p}), \boldsymbol{M}, \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P}))$. Τότε

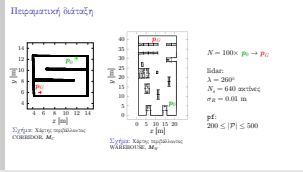
Υπόθεση Υ2:

$$\|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}^\star\| < \|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P})\|$$

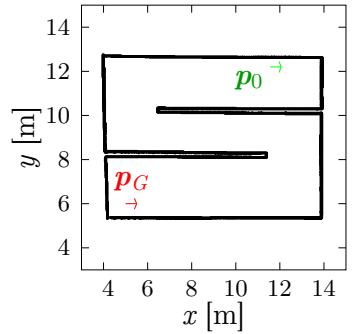
Υπόθεση Υ3:

Εάν $\mathcal{P}^{\circlearrowleft} = \mathcal{P} \circlearrowleft \{\hat{\boldsymbol{p}}^\star\}_{q\cdot|\mathcal{P}^{\circlearrowleft}|}$, όπου $q \gg 0.01$ και $q \ll 1.0$:

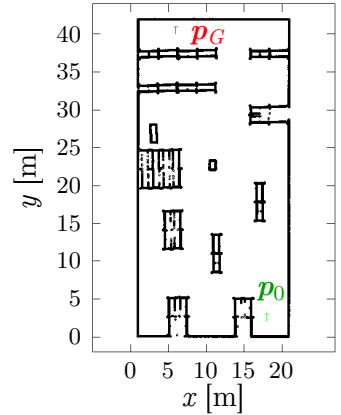
- $\|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P}^{\circlearrowleft})\| < \|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P})\|$
- $\|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P}^{\circlearrowleft})\| < \|\boldsymbol{p} - \hat{\boldsymbol{p}}(\mathcal{P} \circlearrowleft \{\hat{\boldsymbol{p}}^\star\}_1)\|$
- $\mathcal{P} \circlearrowleft \{\hat{\boldsymbol{p}}^\star\}_{q\cdot|\mathcal{P}^{\circlearrowleft}|}$ πιο ανθεκτικός από $\mathcal{P} \circlearrowleft \{\hat{\boldsymbol{p}}^\star\}_{|\mathcal{P}^{\circlearrowleft}|}$



Πειραματική διάταξη



Σχήμα: Χάρτης περιβάλλοντος CORRIDOR, $\boldsymbol{M}_C$

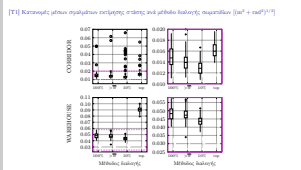


Σχήμα: Χάρτης περιβάλλοντος WAREHOUSE, $\boldsymbol{M}_W$

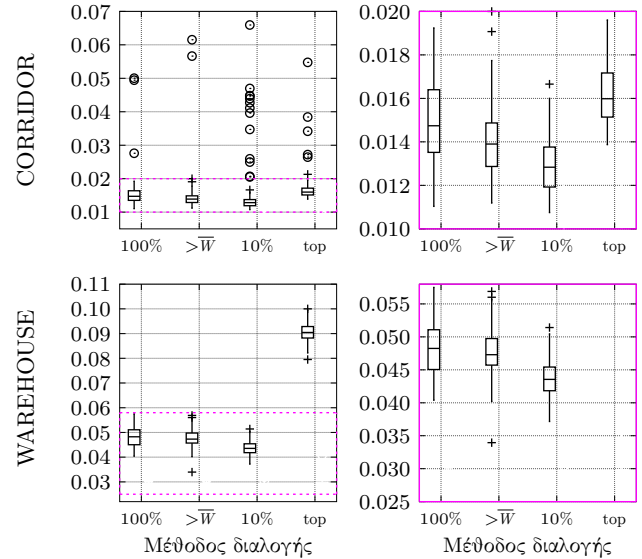
$N = 100\times\ \boldsymbol{p}_0 \rightarrow \boldsymbol{p}_G$

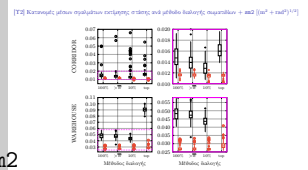
lidar:
$\lambda = 260°$
$N_s = 640$ ακτίνες
$\sigma_R = 0.01$ m

`pf`:
$200 \leq |\mathcal{P}| \leq 500$

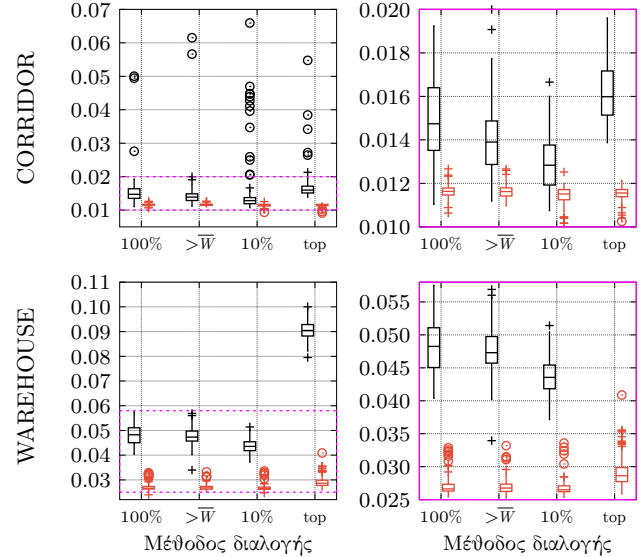


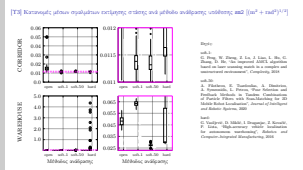
[Υ1] Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο διαλογής σωματιδίων $[(\mathrm{m}^2 + \mathrm{rad}^2)^{1/2}]$



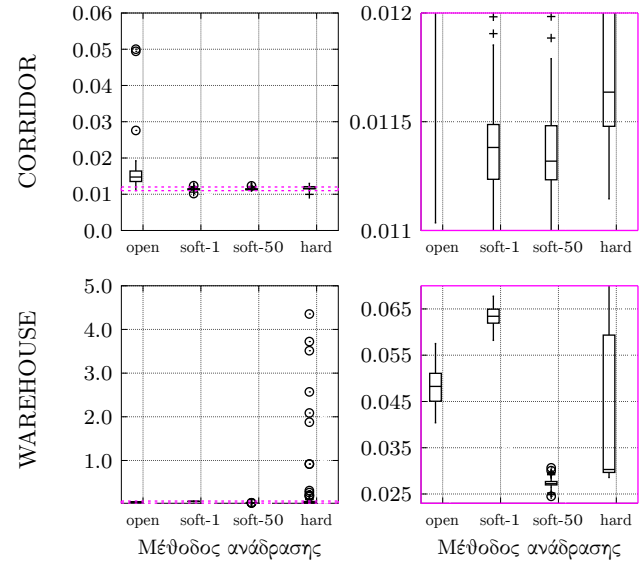


[Υ2] Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο διαλογής σωματιδίων + sm2 $[(\mathrm{m}^2 + \mathrm{rad}^2)^{1/2}]$





[Υ3] Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο ανάδρασης υπόθεσης sm2 $[(\mathrm{m}^2 + \mathrm{rad}^2)^{1/2}]$



Πηγές:

soft-1:
G. Peng, W. Zheng, Z. Lu, J. Liao, L. Hu, G. Zhang, D. He, "An improved AMCL algorithm based on laser scanning match in a complex and unstructured environment", *Complexity*, 2018

soft-50:
A. Filotheou, E. Tsardoulias, A. Dimitriou, A. Symeonidis, L. Petrou, "Pose Selection and Feedback Methods in Tandem Combinations of Particle Filters with Scan-Matching for 2D Mobile Robot Localisation", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2020

hard:
G. Vasiljević, D. Miklić, I. Draganjac, Z. Kovačić, P. Lista, "High-accuracy vehicle localization for autonomous warehousing", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

Ελάττωση σφαλμάτων εκτίμησης στάσης φίλτρου σωματιδίων μέσω
- διαλογής σωματιδίων
- ανάδρασης αποτελέσματος sm2 χωρίς απώλεια ανθεκτικότητας pf

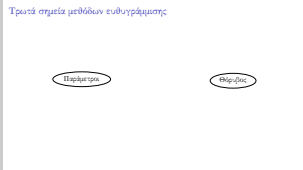
A. Filotheou, E. Tsardoulias, A. Dimitriou, A. Symeonidis, L. Petrou, "Pose Selection and Feedback Methods in Tandem Combinations of Particle Filters with Scan-Matching for 2D Mobile Robot Localisation", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2020

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

Ελάττωση σφαλμάτων εκτίμησης στάσης φίλτρου σωματιδίων μέσω

- διαλογής σωματιδίων
- ανάδρασης αποτελέσματος `sm2` χωρίς απώλεια ανθεκτικότητας `pf`

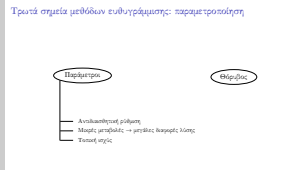
A. Filotheou, E. Tsardoulias, A. Dimitriou, A. Symeonidis, L. Petrou, "Pose Selection and Feedback Methods in Tandem Combinations of Particle Filters with Scan-Matching for 2D Mobile Robot Localisation". *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2020



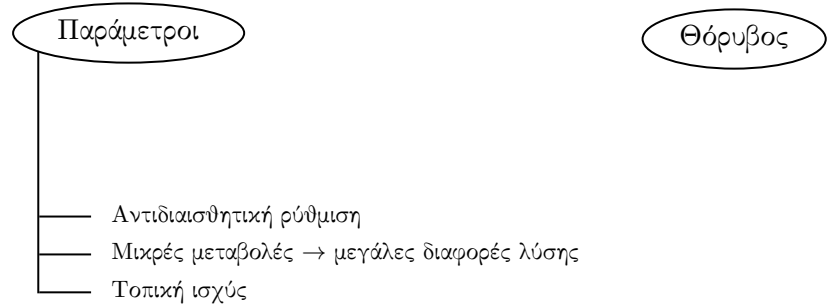
Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

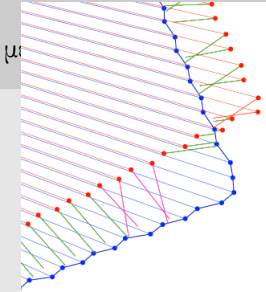
Παράμετροι

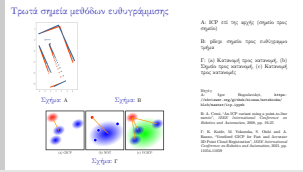
Θόρυβος



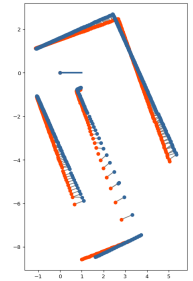
Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: παραμετροποίηση





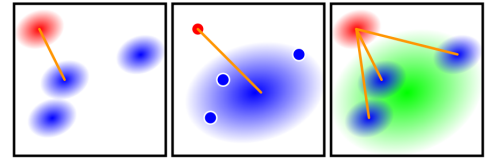


Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης



Σχήμα: A

Σχήμα: B



Σχήμα: Γ

A: ICP επί της αρχής (σημείο προς σημείο)

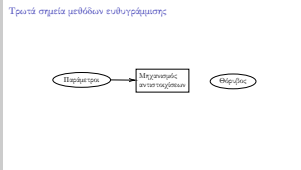
B: plicp: σημείο προς ευθύγραμμο τμήμα

Γ: (a) Κατανομή προς κατανομή, (b) Σημείο προς κατανομή, (c) Κατανομή προς κατανομές

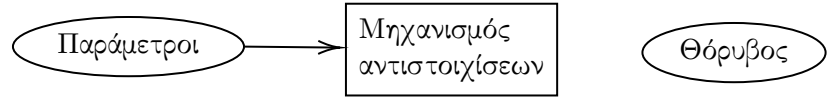
Πηγές:
A: Igor Bogoslavskyi, `https://nbviewer.org/github/niosus/notebooks/blob/master/icp.ipynb`

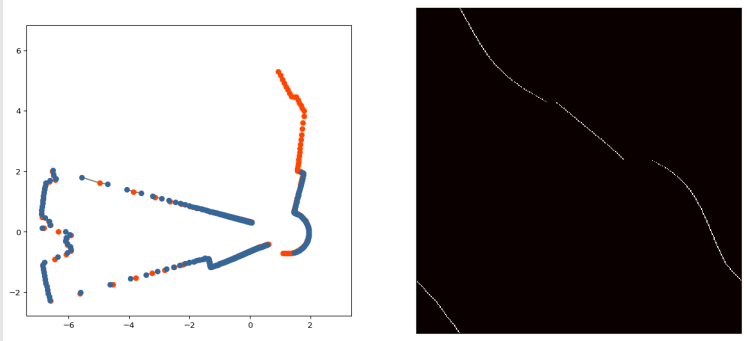
B: A. Censi, “An ICP variant using a point-to-line metric”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008, pp. 19-25

Γ: K. Koide, M. Yokozuka, S. Oishi and A. Banno, “Voxelized GICP for Fast and Accurate 3D Point Cloud Registration”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2021, pp. 11054-11059

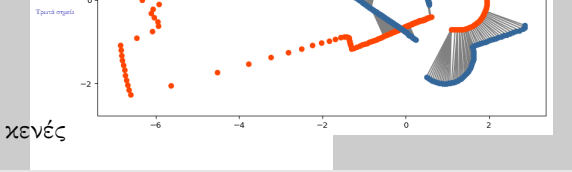


Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

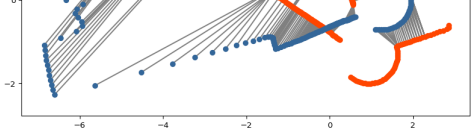




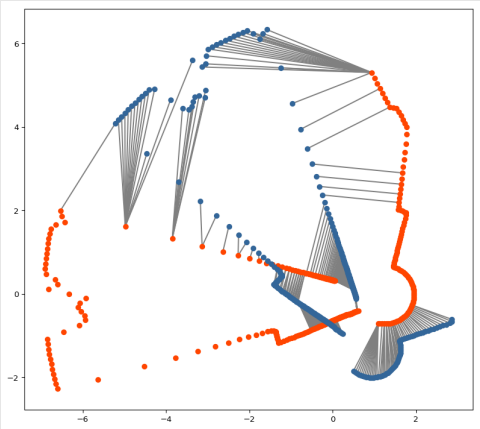
Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: θόρυβος (ατελείς αντιστοιχίσεις)

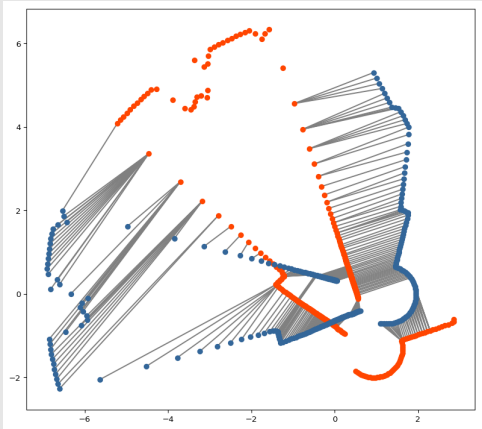


Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: κενές αντιστοιχίσεις (αλλιώς outliers)

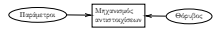


Ευθυγράμμιση σάρωσης $\mathcal{S}_k$ ως προς $\mathcal{S}_{k+1}$

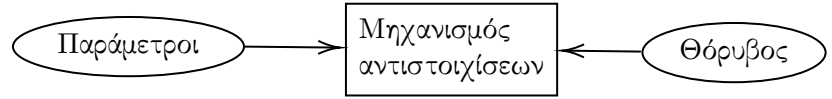




Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

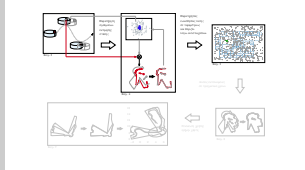


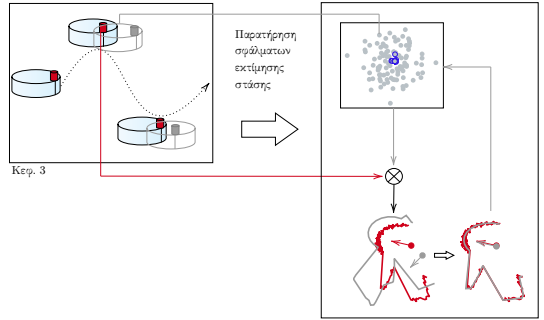
Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης



2023-05-29

Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

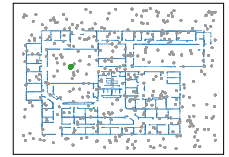




Κεφ. 3

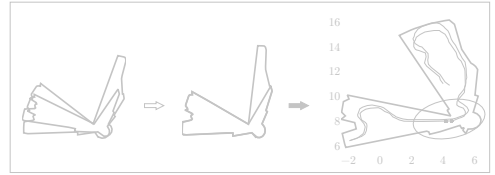
Κεφ. 4

Παρατηρήσεις ευαισθησίας λύσης σε παραμέτρους και θόρυβο λόγω αντιστοιχίσεων



Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες σε πραγματικό χρόνο



Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης ερήμην χάρτη

Κεφ. 6

Απόπειρα ευθυγράμμισης sm2 δίχως αντιστοιχίσεις

- Αναγκαία συνθήκη: $\lambda = 2\pi$ rad
- Παραδοχή: $t_{\text{exec}} \not< t_{\text{max}}$

Απόπειρα ευθυγράμμισης sm2 δίχως αντιστοιχίσεις

- Αναγκαία συνθήκη: $\lambda = 2\pi$ rad
- Παραδοχή: $t_{\text{exec}} \not< t_{\text{max}}$

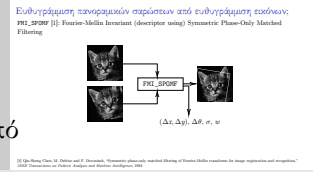
Απόπειρα ευθυγράμμισης sm2 δίχως αντιστοιχίσεις

Προβλήματα:
- Απούσα βιβλιογραφία στο συναφές πεδίο
- Εύρεση μεθόδ{ου,ων} εκτίμησης θέσης και προσανατολισμού

Απόπειρα ευθυγράμμισης sm2 δίχως αντιστοιχίσεις

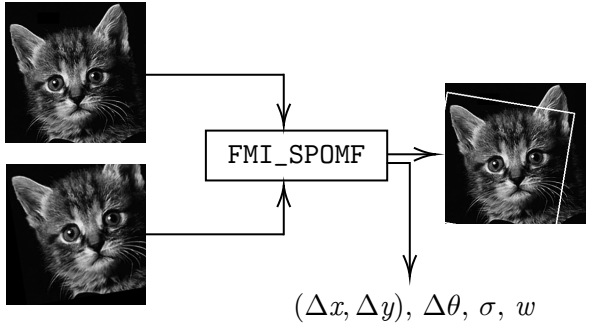
Προβλήματα:

- Απούσα βιβλιογραφία στο συναφές πεδίο
- Εύρεση μεθόδ{ου,ων} εκτίμησης θέσης και προσανατολισμού

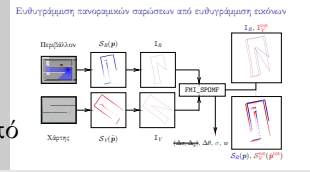


Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων;

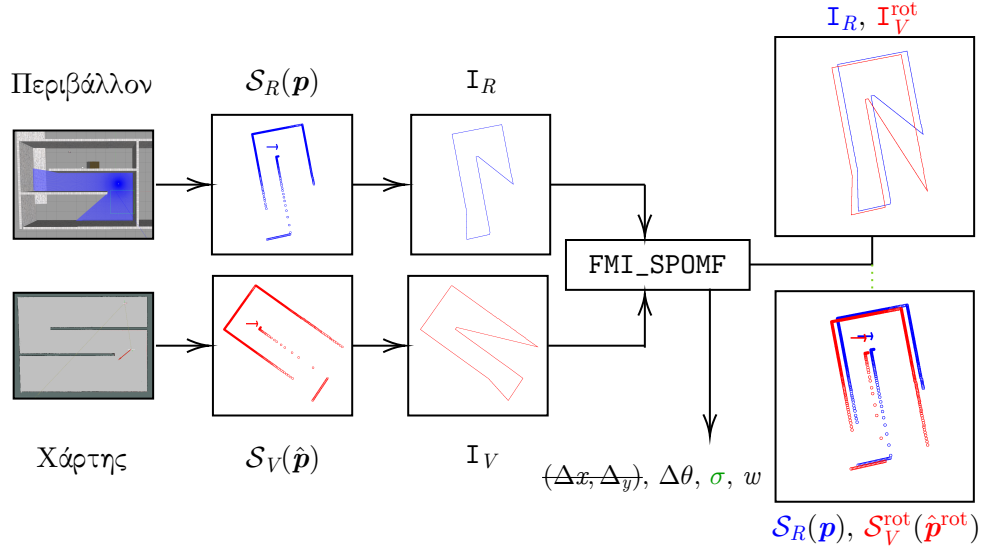
`FMI_SPOMF` [1]: Fourier-Mellin Invariant (descriptor using) Symmetric Phase-Only Matched Filtering

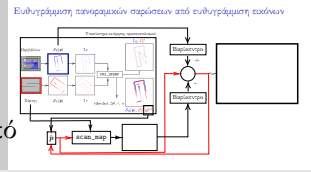


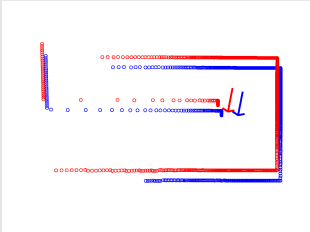
[1] Qin-Sheng Chen, M. Defrise and F. Deconinck, "Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994



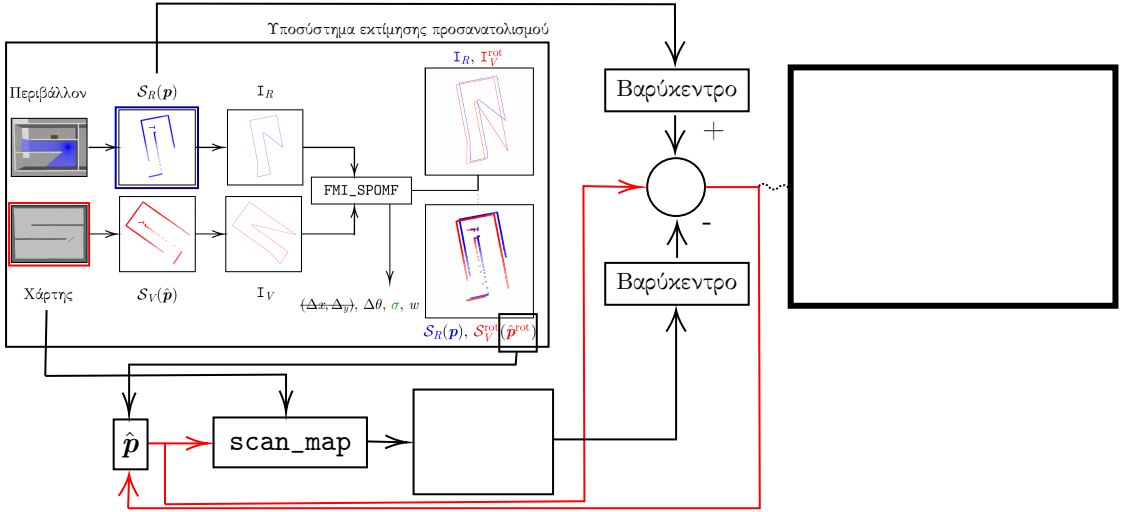
Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων







υθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

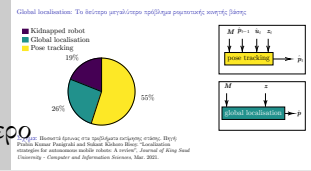


$t_{\text{exec}}^{\texttt{FMI_SPOMF}} > t_{\text{exec}}^{\text{pose tracking}}$
$\Rightarrow$
sm2 προς επίλυση του προβλήματος Global Localisation

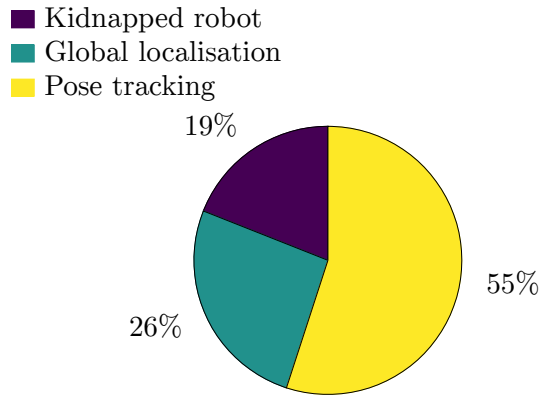
$$t_{\text{exec}}^{\texttt{FMI_SPOMF}} > t_{\text{exec}}^{\text{pose tracking}}$$

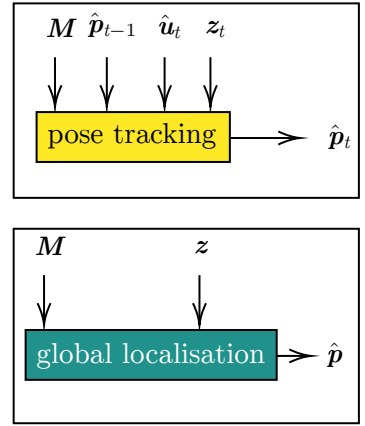
$$\Rightarrow$$

sm2 προς επίλυση του προβλήματος Global Localisation

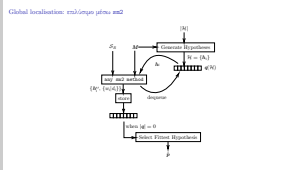


Global localisation: Το δεύτερο μεγαλύτερο πρόβλημα ρομποτικής κινητής βάσης

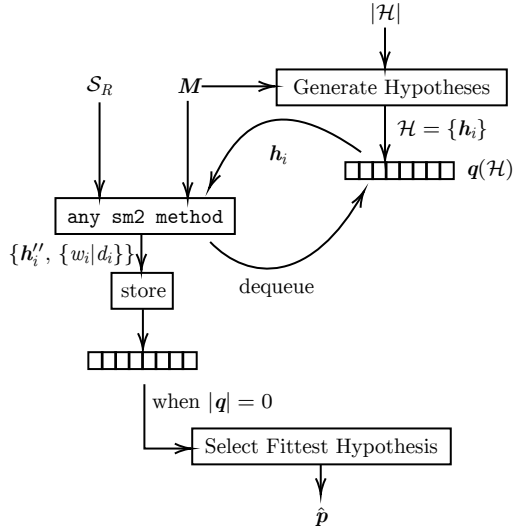




Σχήμα: Ποσοστά έρευνας στα προβλήματα εκτίμησης στάσης. Πηγή: Prabin Kumar Panigrahi and Sukant Kishoro Bisoy. "Localization strategies for autonomous mobile robots: A review", *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, Mar. 2021.



Global localisation: επιλύσιμο μέσω sm2



Πειραματική διαδικασία: διάταξη

- Πέντε προσομοιωμένα περιβάλλοντα / Ένα πραγματικό
- Προσομοιωμένα:
  - 38 δοκιμαστικές στάσεις
  - 100 επαναλήψεις ανά στάση
  - LIDAR: $\sigma_R = \{0.01, 0.02, 0.05\}$ cm, $r_{\max} = 10.0$ m
- CSAL AUTh:
  - 11 δοκιμαστικές στάσεις
  - 5 επαναλήψεις ανά στάση
  - LIDAR: YDLIDAR TG30, $r_{\max} = 30.0$ m

Απόσταση d [mm]	Μέσο σφάλμα [mm]
50-5000	$\leq \pm 60$
5000-20000	$\leq \pm 40$
20000-30000	$\leq \pm 100$

Πίνακας: Μέσο σφάλμα μέτρησης αισθητήρα ανά επιστρεφόμενη τιμή απόστασης. Πηγή: datasheet κατασκευαστή

Πειραματική διαδικασία: διάταξη

- Πέντε προσομοιωμένα περιβάλλοντα / Ένα πραγματικό
- Προσομοιωμένα:
  - 38 δοκιμαστικές στάσεις
  - 100 επαναλήψεις ανά στάση
  - LIDAR: $\sigma_R = \{0.01, 0.02, 0.05\}$ cm, $r_{\max} = 10.0$ m
- CSAL AUTh:
  - 11 δοκιμαστικές στάσεις
  - 5 επαναλήψεις ανά στάση
  - LIDAR: YDLIDAR TG30, $r_{\max} = 30.0$ m

Απόσταση d [mm]	Μέσο σφάλμα [mm]
50-5000	$\leq \pm 60$
5000-20000	$\leq \pm 40$
20000-30000	$\leq \pm 100$

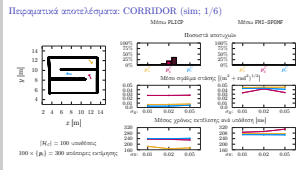
Πίνακας: Μέσο σφάλμα μέτρησης αισθητήρα ανά επιστρεφόμενη τιμή απόστασης. Πηγή: datasheet κατασκευαστή

Πειραματική διαδικασία: μη αποδεκτές λύσεις

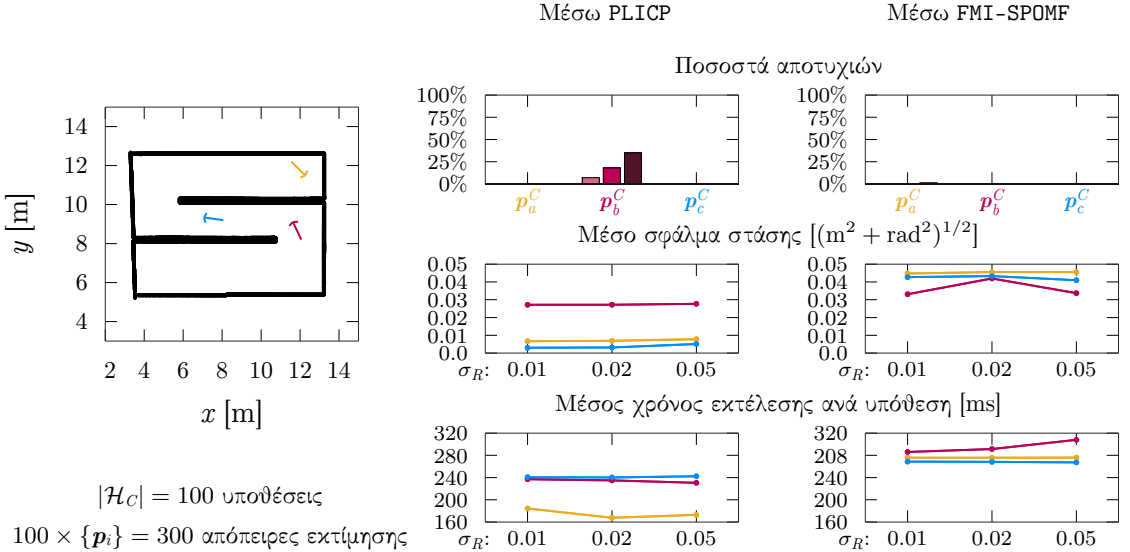
Καταγραφή σφάλματος εκτίμησης θέσης $\hat{\boldsymbol{l}}$ και προσανατολισμού $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ τελικής στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}$
inliers / επιτυχημένη εκτίμηση στάσης: $\hat{\boldsymbol{l}} < 1.0$ m
καθώς
global localisation ⇒ (probabilistic) pose tracking

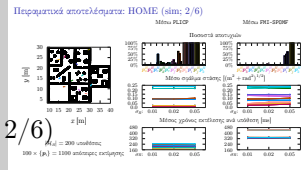
Πειραματική διαδικασία: μη αποδεκτές λύσεις

Καταγραφή σφάλματος εκτίμησης θέσης $\hat{\boldsymbol{l}}$ και προσανατολισμού $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ τελικής στάσης $\hat{\boldsymbol{p}}$
inliers / επιτυχημένη εκτίμηση στάσης: $\hat{\boldsymbol{l}} < 1.0$ m
καθώς
global localisation ⇒ (probabilistic) pose tracking

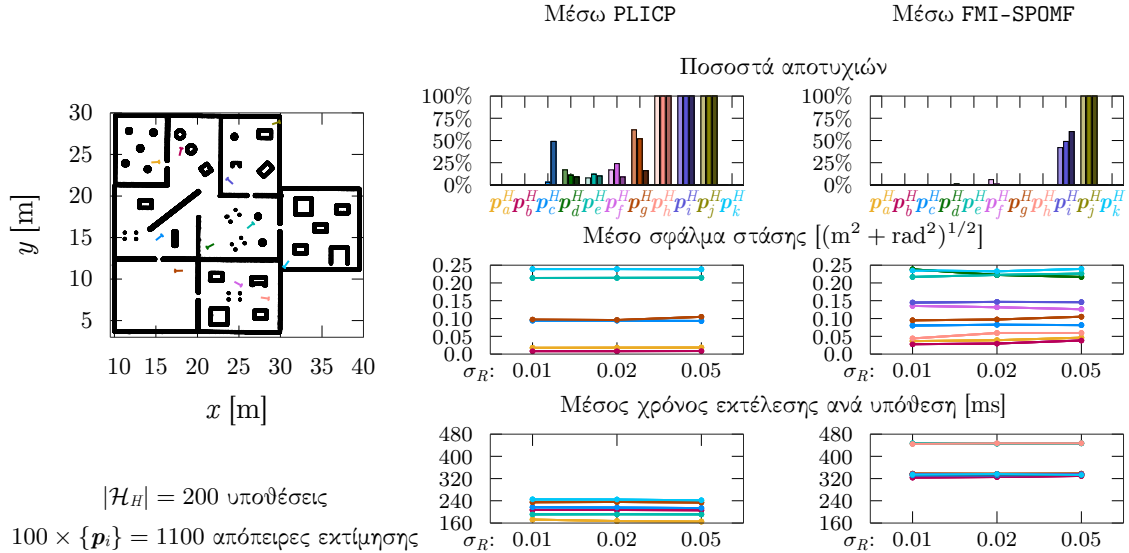


Πειραματικά αποτελέσματα: CORRIDOR (sim; 1/6)

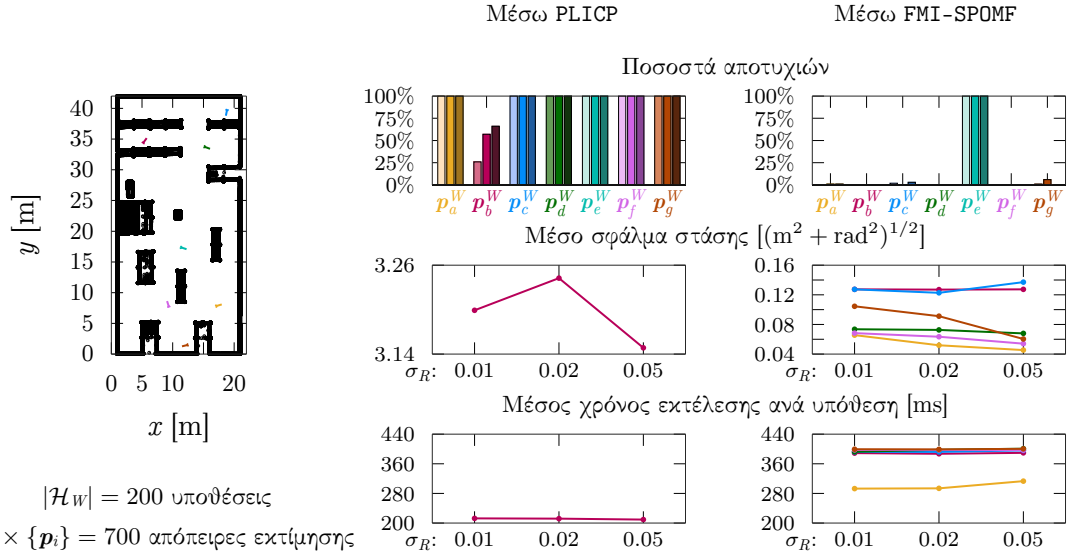




Πειραματικά αποτελέσματα: HOME (sim; 2/6)

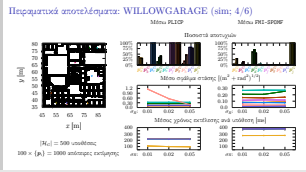


Πειραματικά αποτελέσματα: WAREHOUSE (sim; 3/6)

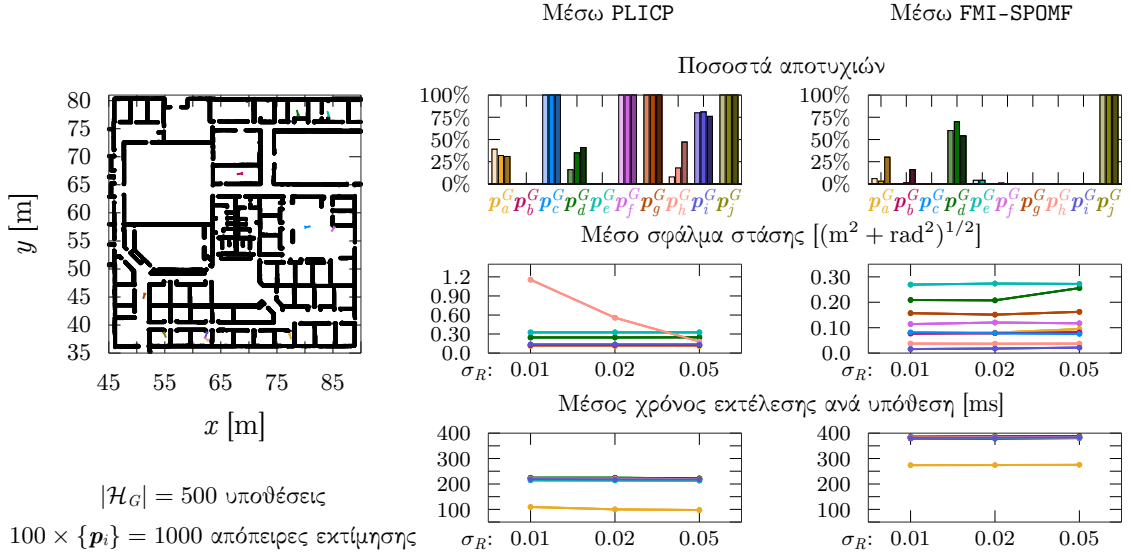


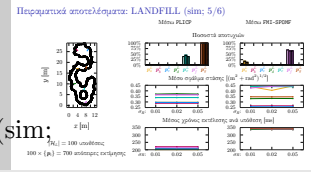
$|\mathcal{H}_W| = 200$ υποθέσεις

$100 \times \{\boldsymbol{p}_i\} = 700$ απόπειρες εκτίμησης

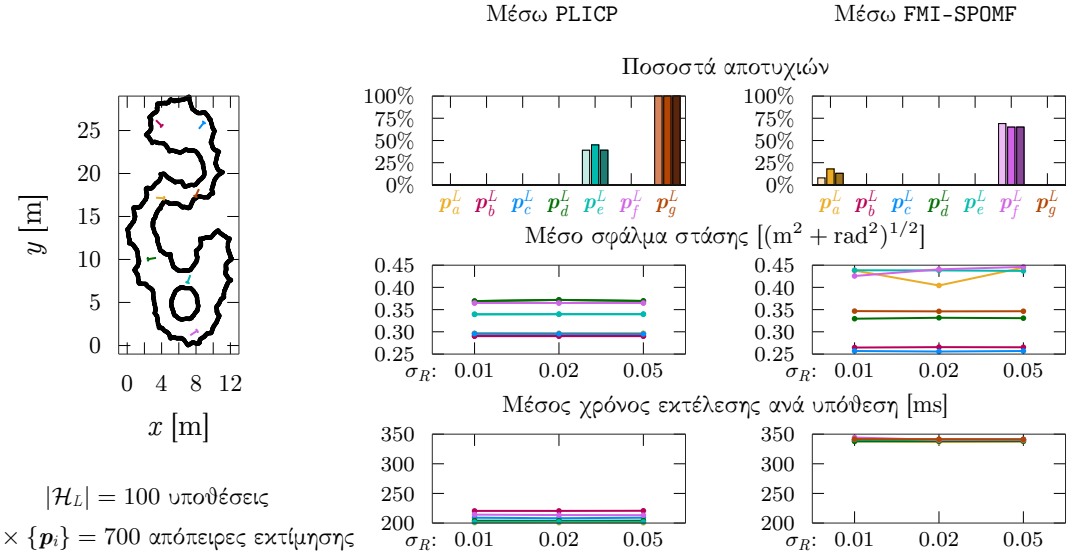


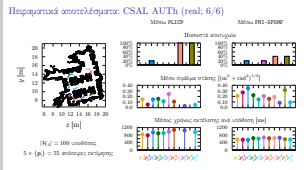
Πειραματικά αποτελέσματα: WILLOWGARAGE (sim; 4/6)



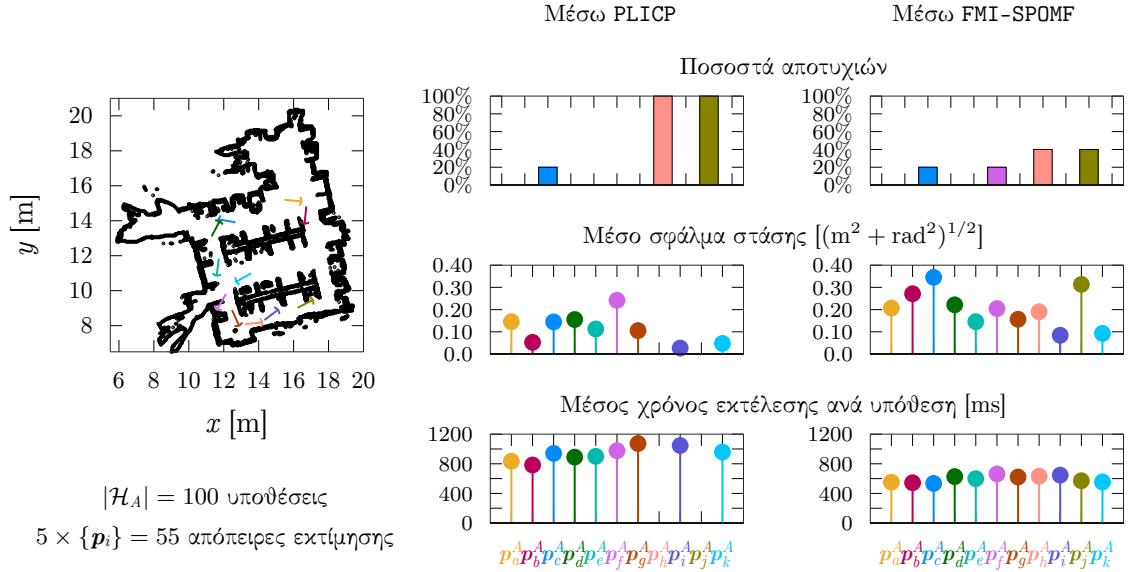


Πειραματικά αποτελέσματα: LANDFILL (sim; 5/6)





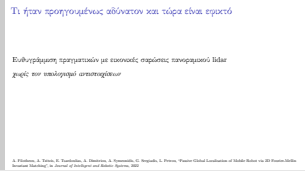
Πειραματικά αποτελέσματα: CSAL AUTh (real; 6/6)



Συμπεράσματα πειραμάτων
- Μέθοδοι με αντιστοιχίσεις:
  - Ευαισθησία λύσης σε παραμέτρους—π.χ. αποτυχίες @ WAREHOUSE
  - Ευαισθησία λύσης σε αρχικές συνθήκες μετατόπισης—π.χ. 1 υπόθεση ανά 4 m^2 @ WAREHOUSE, WILLOWGARAGE
- Σφάλματα εκτίμησης sm2: μέσω FMI-SPOMF ∼ μέσω μεθόδων με αντιστοιχίσεις

Συμπεράσματα πειραμάτων

- Μέθοδοι με αντιστοιχίσεις:
  - Ευαισθησία λύσης σε παραμέτρους—π.χ. αποτυχίες @ WAREHOUSE
  - Ευαισθησία λύσης σε αρχικές συνθήκες μετατόπισης—π.χ. 1 υπόθεση ανά 4 m^2 @ WAREHOUSE, WILLOWGARAGE
- Σφάλματα εκτίμησης `sm2`: μέσω `FMI-SPOMF` ∼ μέσω μεθόδων με αντιστοιχίσεις



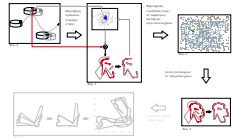
Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

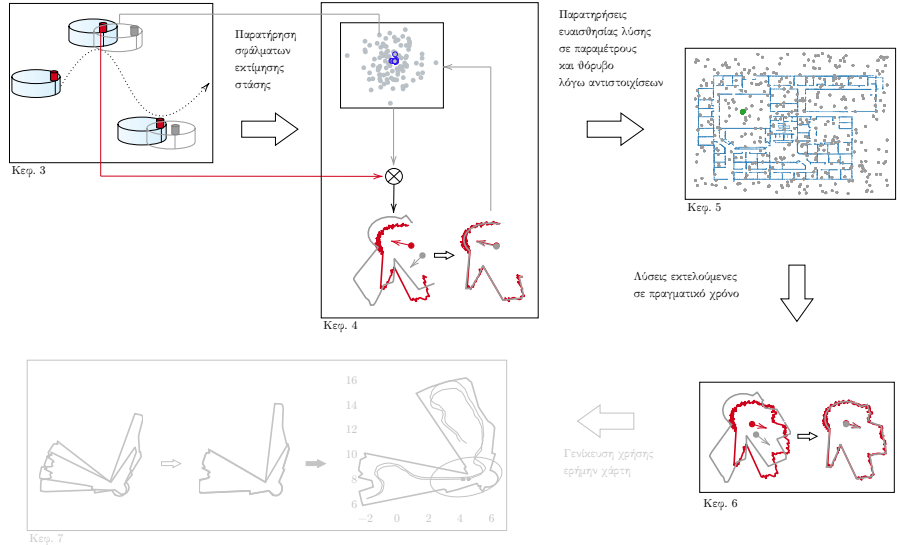
Ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές σαρώσεις πανοραμικού lidar

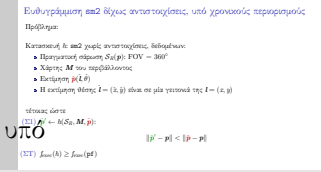
χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων

A. Filotheou, A. Tzitzis, E. Tsardoulias, A. Dimitriou, A. Symeonidis, G. Sergiadis, L. Petrou, "Passive Global Localisation of Mobile Robot via 2D Fourier-Mellin Invariant Matching", in *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2022

Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...







Ευθυγράμμιση sm2 δίχως αντιστοιχίσεις, υπό χρονικούς περιορισμούς

Πρόβλημα:

Κατασκευή h: sm2 χωρίς αντιστοιχίσεις, δεδομένων:

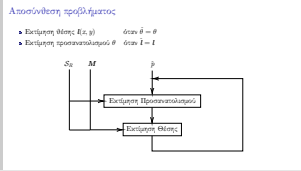
- Πραγματική σάρωση $\mathcal{S}_R(\boldsymbol{p})$: FOV $= 360^\circ$
- Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση $\hat{\boldsymbol{p}}(\hat{\boldsymbol{l}}, \hat{\theta})$
- Η εκτίμηση θέσης $\hat{\boldsymbol{l}} = (\hat{x}, \hat{y})$ είναι σε μία γειτονιά της $\boldsymbol{l} = (x, y)$

τέτοιας ώστε

(Σ1) $\hat{\boldsymbol{p}}' \leftarrow h(\mathcal{S}_R, \boldsymbol{M}, \hat{\boldsymbol{p}})$:

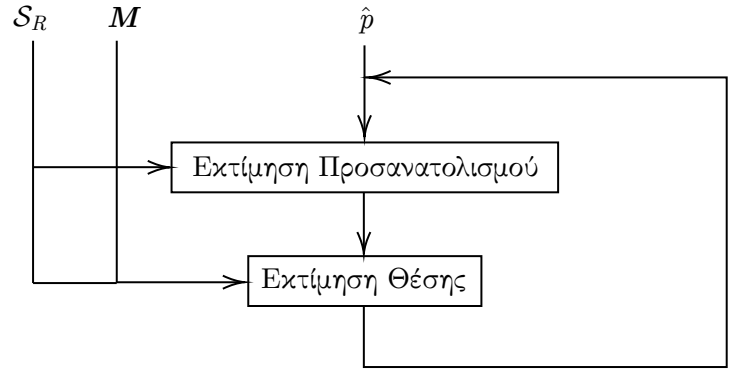
$$\|\hat{\boldsymbol{p}}' - \boldsymbol{p}\| < \|\hat{\boldsymbol{p}} - \boldsymbol{p}\|$$

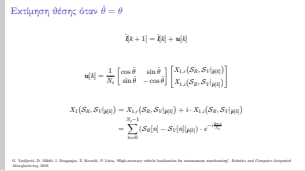
(ΣΤ) $f_{\text{exec}}(h) \geq f_{\text{exec}}(\texttt{pf})$



Αποσύνθεση προβλήματος

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





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

$$\hat{\boldsymbol{l}}[k+1] = \hat{\boldsymbol{l}}[k] + \boldsymbol{u}[k]$$

$$\boldsymbol{u}[k] = \frac{1}{N_s}\begin{bmatrix}\cos\hat{\theta} & \sin\hat{\theta}\\ \sin\hat{\theta} & -\cos\hat{\theta}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_{1,r}\big(\mathcal{S}_R,\mathcal{S}_V|_{\hat{\boldsymbol{p}}[k]}\big)\\ X_{1,i}\big(\mathcal{S}_R,\mathcal{S}_V|_{\hat{\boldsymbol{p}}[k]}\big)\end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}X_1\big(\mathcal{S}_R,\mathcal{S}_V|_{\hat{\boldsymbol{p}}[k]}\big) &= X_{1,r}\big(\mathcal{S}_R,\mathcal{S}_V|_{\hat{\boldsymbol{p}}[k]}\big) + i\cdot X_{1,i}\big(\mathcal{S}_R,\mathcal{S}_V|_{\hat{\boldsymbol{p}}[k]}\big)\\ &= \sum_{n=0}^{N_s-1}\big(\mathcal{S}_R[n] - \mathcal{S}_V[n]|_{\hat{\boldsymbol{p}}[k]}\big)\cdot e^{-i\frac{2\pi n}{N_s}}\end{aligned}$$

G. Vasiljević, D. Miklić, I. Draganjac, Z. Kovačić, P. Lista, "High-accuracy vehicle localization for autonomous warehousing". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016

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

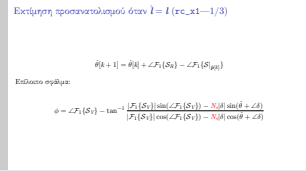
- Όταν $\sigma_R = 0.0$ και $\boldsymbol{M} \equiv W$ τότε:
  $\hat{\boldsymbol{l}}[k]$ συγκλίνει ομοιόμορφα ασυμπτωτικά στην πραγματική θέση $\boldsymbol{l}$ καθώς $k \to \infty$
- Όταν $\sigma_R > 0.0$ ή/και $\boldsymbol{M} \not\equiv W$ τότε:
  $\hat{\boldsymbol{l}}[k]$ φράσσεται ομοιόμορφα σε γειτονιά της πραγματικής θέσης $\boldsymbol{l}$ όταν $k \geq k_0$

A. Filotheou, "Correspondenceless scan-to-map-scan matching of homoriented 2D scans for mobile robot localisation", *Robotics and Autonomous Systems*, 2022

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

- Όταν $\sigma_R = 0.0$ και $\boldsymbol{M} \equiv W$ τότε:
  $\hat{\boldsymbol{l}}[k]$ συγκλίνει ομοιόμορφα ασυμπτωτικά στην πραγματική θέση $\boldsymbol{l}$ καθώς $k \to \infty$
- Όταν $\sigma_R > 0.0$ ή/και $\boldsymbol{M} \not\equiv W$ τότε:
  $\hat{\boldsymbol{l}}[k]$ φράσσεται ομοιόμορφα σε γειτονιά της πραγματικής θέσης $\boldsymbol{l}$ όταν $k \geq k_0$

A. Filotheou, "Correspondenceless scan-to-map-scan matching of homoriented 2D scans for mobile robot localisation", *Robotics and Autonomous Systems*, 2022

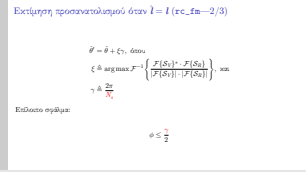


Εκτίμηση προσανατολισμού όταν $\hat{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{l}$ (rc_x1—1/3)

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

Επίλοιπο σφάλμα:

$$\phi = \angle\mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\} - \tan^{-1}\frac{|\mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}|\sin(\angle\mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}) - N_s|\delta|\sin(\hat{\theta}+\angle\delta)}{|\mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}|\cos(\angle\mathcal{F}_1\{\mathcal{S}_V\}) - N_s|\delta|\cos(\hat{\theta}+\angle\delta)}$$



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

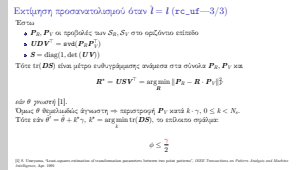
$$\hat{\theta}' = \hat{\theta} + \xi\gamma, \text{ όπου}$$

$$\xi \triangleq \arg\max \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{\mathcal{F}\{\mathcal{S}_V\}^* \cdot \mathcal{F}\{\mathcal{S}_R\}}{|\mathcal{F}\{\mathcal{S}_V\}| \cdot |\mathcal{F}\{\mathcal{S}_R\}|}\right\}, \text{ και}$$

$$\gamma \triangleq \frac{2\pi}{N_s}$$

Επίλοιπο σφάλμα:

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


Εκτίμηση προσανατολισμού όταν $\hat{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{l}$ (rc_uf—3/3)
Έστω
- $\boldsymbol{P}_R, \boldsymbol{P}_V$ οι προβολές των $\mathcal{S}_R, \mathcal{S}_V$ στο οριζόντιο επίπεδο
- $\boldsymbol{UDV}^\top = \mathtt{svd}(\boldsymbol{P}_R\boldsymbol{P}_V^\top)$
- $\boldsymbol{S} = \mathrm{diag}(1, \det(\boldsymbol{UV}))$

Τότε $\mathrm{tr}(\boldsymbol{DS})$ είναι μέτρο ευθυγράμμισης ανάμεσα στα σύνολα $\boldsymbol{P}_R, \boldsymbol{P}_V$ και
$$\boldsymbol{R}^\star = \boldsymbol{USV}^\top = \arg\min_{\boldsymbol{R}} \|\boldsymbol{P}_R - \boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{P}_V\|_F^2$$
εάν θ γνωστή [1].
Όμως θ θεμελιωδώς άγνωστη ⇒ περιστροφή $\boldsymbol{P}_V$ κατά $k\cdot\gamma$, $0 \le k < N_s$.
Τότε εάν $\hat{\theta}' = \hat{\theta} + k^\star\gamma$, $k^\star = \arg\min_k \mathrm{tr}(\boldsymbol{DS})$, το επίλοιπο σφάλμα:
$$\phi \le \frac{\gamma}{2}$$
[1] S. Umeyama, "Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Apr. 1991

Εκτίμηση προσανατολισμού όταν $\hat{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{l}$ (rc_uf—3/3)

Έστω

- $\boldsymbol{P}_R, \boldsymbol{P}_V$ οι προβολές των $\mathcal{S}_R, \mathcal{S}_V$ στο οριζόντιο επίπεδο
- $\boldsymbol{UDV}^\top = \mathtt{svd}(\boldsymbol{P}_R\boldsymbol{P}_V^\top)$
- $\boldsymbol{S} = \mathrm{diag}(1, \det(\boldsymbol{UV}))$

Τότε $\mathrm{tr}(\boldsymbol{DS})$ είναι μέτρο ευθυγράμμισης ανάμεσα στα σύνολα $\boldsymbol{P}_R, \boldsymbol{P}_V$ και

$$\boldsymbol{R}^\star = \boldsymbol{USV}^\top = \arg\min_{\boldsymbol{R}} \|\boldsymbol{P}_R - \boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{P}_V\|_F^2$$

εάν θ γνωστή [1].
Όμως θ θεμελιωδώς άγνωστη ⇒ περιστροφή $\boldsymbol{P}_V$ κατά $k\cdot\gamma$, $0 \le k < N_s$.
Τότε εάν $\hat{\theta}' = \hat{\theta} + k^\star\gamma$, $k^\star = \arg\min_k \mathrm{tr}(\boldsymbol{DS})$, το επίλοιπο σφάλμα:

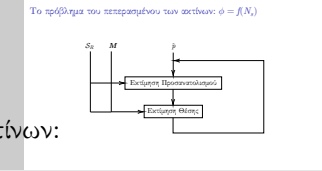
$$\phi \le \frac{\gamma}{2}$$

[1] S. Umeyama, "Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Apr. 1991

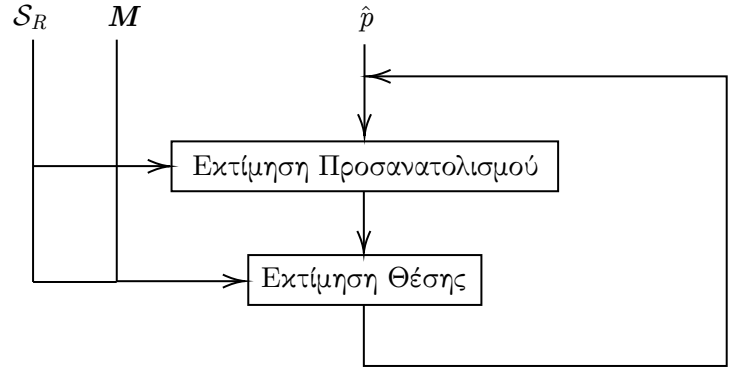
Το πρόβλημα του πεπερασμένου των ακτίνων: $\phi = f(N_s)$

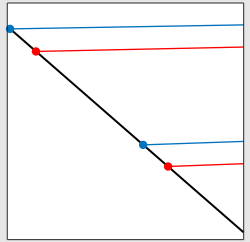
- `rc_x1`
- `rc_fm`
- `rc_uf`

} επίλοιπο σφάλμα $\phi = f(N_s)$



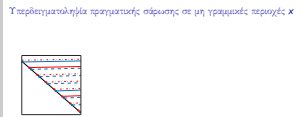
Το πρόβλημα του πεπερασμένου των ακτίνων: $\phi = f(N_s)$

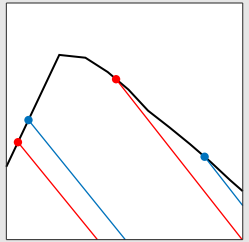




Υπερδειγματοληψία πραγματικής σάρωσης σε γραμμικές περιοχές ✓

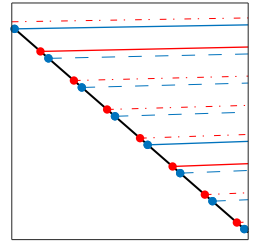
$\mathcal{S}_R^{\text{-interp}}(\theta)$ $\mathcal{S}_V^{\text{-oversamp}}(\hat{\theta})$



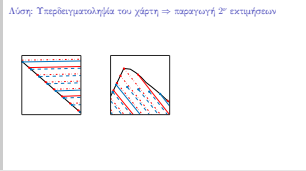


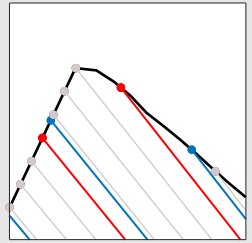
Υπερδειγματοληψία πραγματικής σάρωσης σε μη γραμμικές περιοχές x

$\mathcal{S}_R^{\text{-interp}}(\theta)$ $\mathcal{S}_V^{\text{-oversamp}}(\hat{\theta})$



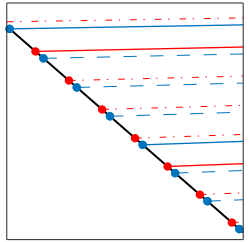
$\mathcal{S}_R^{\text{-interp}}(\theta)$ $\mathcal{S}_V^{\text{-oversamp}}(\hat{\theta})$



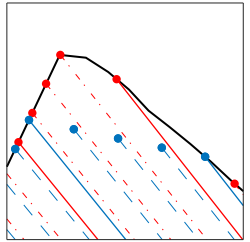


Λύση: Υπερδειγματοληψία του χάρτη ⇒ παραγωγή 2^ν εκτιμήσεων

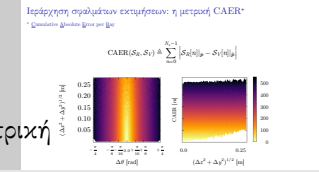
$\mathcal{S}_R^{\text{-interp}}(\theta)$ $\mathcal{S}_V^{\text{-oversamp}}(\hat{\theta})$



$\mathcal{S}_R^{\text{-interp}}(\theta)$ $\mathcal{S}_V^{\text{-oversamp}}(\hat{\theta})$



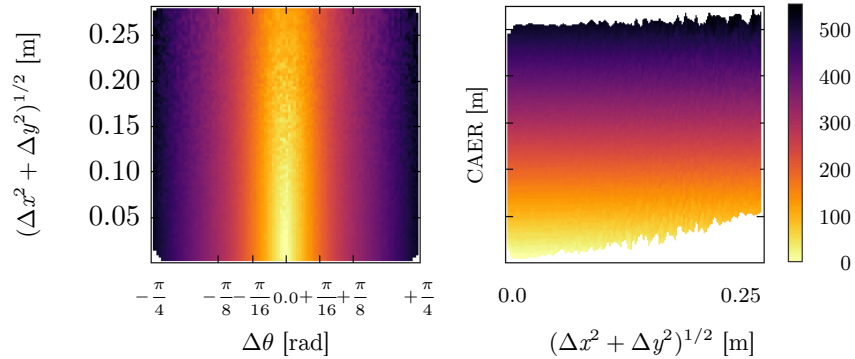
$\mathcal{S}_R(\theta)$ $\mathcal{S}_V(\hat{\theta} + \{0 \ldots 2^{\nu_{\max}} - 1\} \cdot \frac{\gamma}{2^{\nu_{\max}}})$

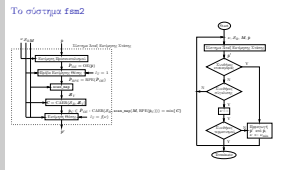


Ιεράρχηση σφαλμάτων εκτιμήσεων: η μετρική CAER*

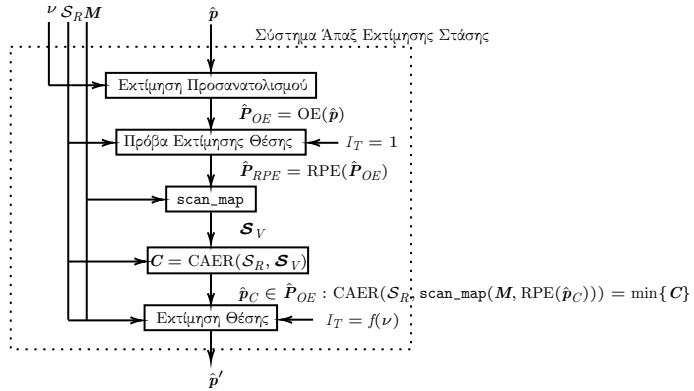
* Cumulative Absolute Error per Ray

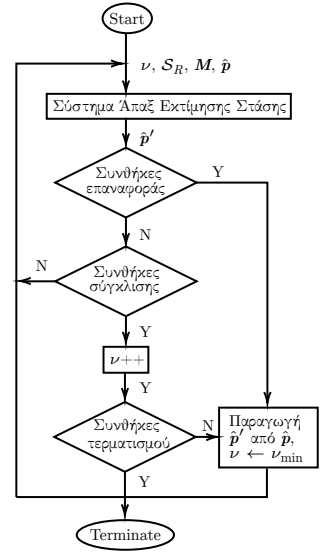
$$\mathrm{CAER}(\mathcal{S}_R, \mathcal{S}_V) \triangleq \sum_{n=0}^{N_s-1} \left| \mathcal{S}_R[n]|_{\boldsymbol{p}} - \mathcal{S}_V[n]|_{\hat{\boldsymbol{p}}} \right|$$

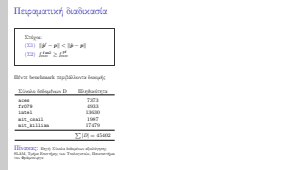




Το σύστημα fsm2







Πειραματική διαδικασία

Στόχοι:

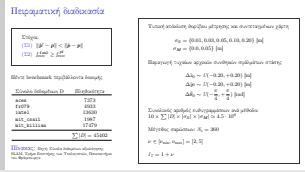
(Σ1) $\|\hat{\boldsymbol{p}}' - \boldsymbol{p}\| < \|\hat{\boldsymbol{p}} - \boldsymbol{p}\|$

(Σ2) $f_{\text{exec}}^{\texttt{fsm2}} \geq f_{\text{exec}}^{\texttt{pf}}$

Πέντε benchmark περιβάλλοντα δοκιμής

Σύνολο δεδομένων D	Πληθικότητα
`aces`	7373
`fr079`	4933
`intel`	13630
`mit_csail`	1987
`mit_killian`	17479
	$\sum \lvert D \rvert = 45402$

Πίνακας: Πηγή: Σύνολα δεδομένων αξιολόγησης SLAM, Τμήμα Επιστήμης των Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο του Φράιμπουργκ



Πειραματική διαδικασία

Στόχοι:

(Σ1) $\|\hat{\boldsymbol{p}}' - \boldsymbol{p}\| < \|\hat{\boldsymbol{p}} - \boldsymbol{p}\|$

(Σ2) $f_{\text{exec}}^{\texttt{fsm2}} \geq f_{\text{exec}}^{\texttt{pf}}$

Πέντε benchmark περιβάλλοντα δοκιμής

Σύνολο δεδομένων D	Πληθικότητα
`aces`	7373
`fr079`	4933
`intel`	13630
`mit_csail`	1987
`mit_killian`	17479
	$\sum \lvert D\rvert = 45402$

Πίνακας: Πηγή: Σύνολα δεδομένων αξιολόγησης SLAM, Τμήμα Επιστήμης των Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο του Φράιμπουργκ

Τυπική απόκλιση θορύβου μέτρησης και συντεταγμένων χάρτη

$$\sigma_R = \{0.01, 0.03, 0.05, 0.10, 0.20\} \text{ [m]}$$
$$\sigma_{\boldsymbol{M}} = \{0.0, 0.05\} \text{ [m]}$$

Παραγωγή τυχαίων αρχικών συνθηκών σφάλματων στάσης

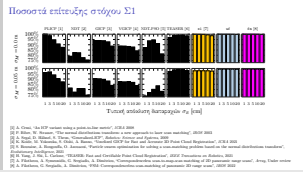
$$\Delta\hat{x}_0 \sim U(-0.20, +0.20) \text{ [m]}$$
$$\Delta\hat{y}_0 \sim U(-0.20, +0.20) \text{ [m]}$$
$$\Delta\hat{\theta}_0 \sim U(-\frac{\pi}{4}, +\frac{\pi}{4}) \text{ [rad]}$$

Συνολικός αριθμός ευθυγραμμίσεων ανά μέθοδο:
$10 \times \sum |D| \times |\sigma_R| \times |\sigma_{\boldsymbol{M}}| \simeq 4.5 \cdot 10^6$

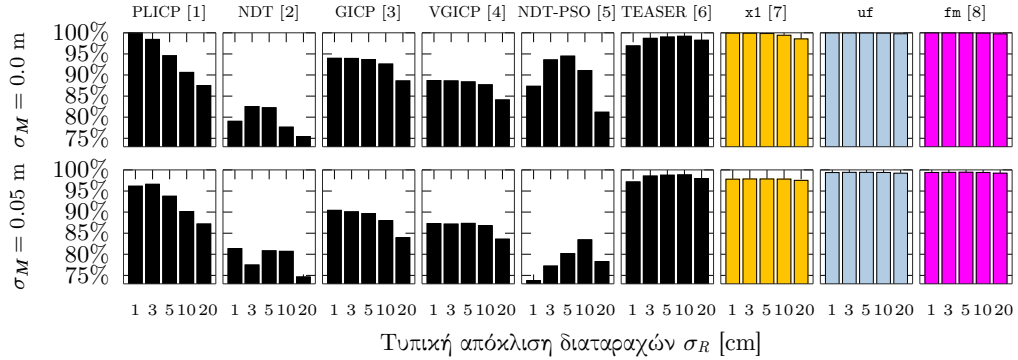
Μέγεθος σαρώσεων: $N_s = 360$

$\nu \in [\nu_{\min}, \nu_{\max}] = [2, 5]$

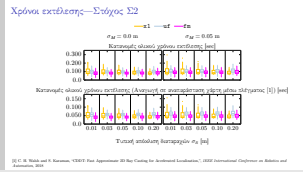
$I_T = 1 + \nu$



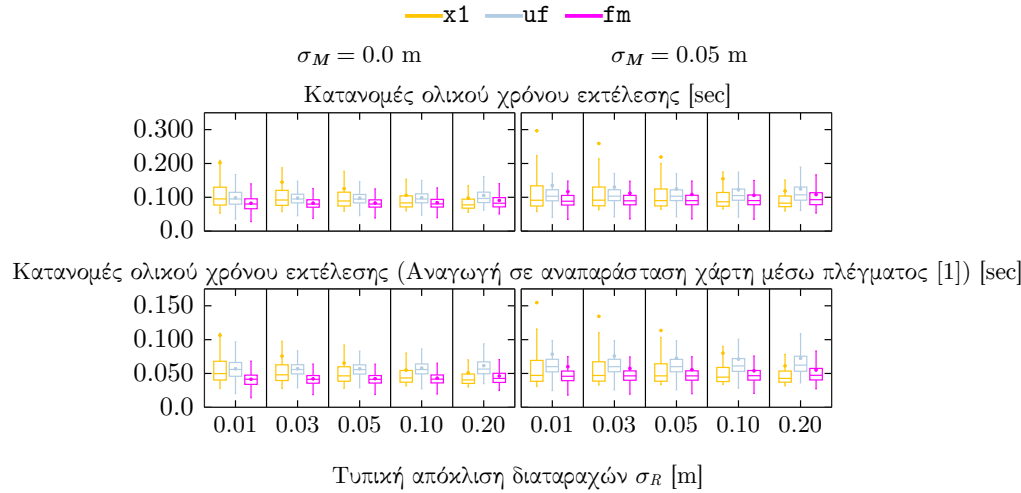
Ποσοστά επίτευξης στόχου Σ1



[1] A. Censi, "An ICP variant using a point-to-line metric", *ICRA* 2008
[2] P. Biber, W. Strasser, "The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching", *IROS* 2003
[3] A. Segal, D. Hähnel, S. Thrun, "Generalized-ICP", *Robotics: Science and Systems*, 2009
[4] K. Koide, M. Yokozuka, S. Oishi, A. Banno, "Voxelized GICP for Fast and Accurate 3D Point Cloud Registration", *ICRA* 2021
[5] S. Bouraine, A. Bougouffa, O. Azouaoui, "Particle swarm optimization for solving a scan-matching problem based on the normal distributions transform", *Evolutionary Intelligence*, 2021
[6] H. Yang, J. Shi, L. Carlone, "TEASER: Fast and Certifiable Point Cloud Registration", *IEEE Transations on Robotics*, 2021
[7] A. Filotheou, A. Symeonidis, G. Sergiadis, A. Dimitriou, "Correspondenceless scan-to-map-scan matching of 2D panoramic range scans", *Array*, Under review
[8] A. Filotheou, G. Sergiadis, A. Dimitriou, "FSM: Correspondenceless scan-matching of panoramic 2D range scans", *IROS* 2022



Χρόνοι εκτέλεσης—Στόχος Σ2



[1] C. H. Walsh and S. Karaman, "CDDT: Fast Approximate 2D Ray Casting for Accelerated Localization,", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2018

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

Τρεις μέθοδοι ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές (δισδιάστατες και πανοραμικές) σαρώσεις *χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων*:

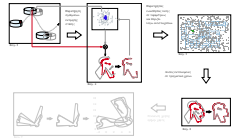
- Εύρωστη βελτίωση ακρίβειας {pose tracking, θέσεων προϊόντων} σε πραγματικό χρόνο
- Λύση global localisation
  - Χωρίς ad hoc παραμετροποίηση (features ή μεταβλητές)
  - Ταχύτερα από FMI-SPOMF (⇒ περισσότερες υποθέσεις → λιγότερες αποτυχίες εκτίμησης)

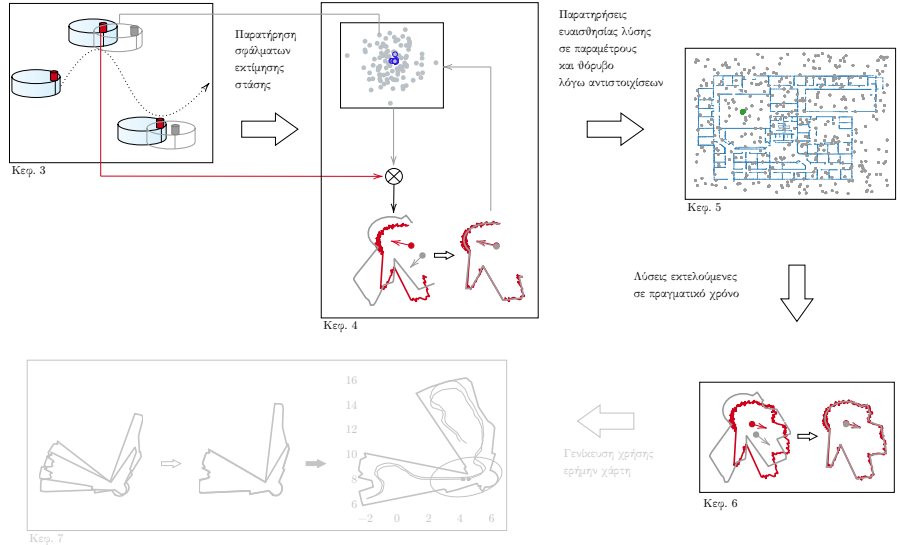
Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

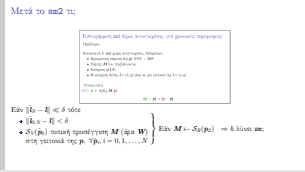
Τρεις μέθοδοι ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές (δισδιάστατες και πανοραμικές) σαρώσεις *χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων*:

- Εύρωστη βελτίωση ακρίβειας {pose tracking, θέσεων προϊόντων} σε πραγματικό χρόνο
- Λύση global localisation
  - Χωρίς ad hoc παραμετροποίηση (features ή μεταβλητές)
  - Ταχύτερα από FMI-SPOMF (⇒ περισσότερες υποθέσεις → λιγότερες αποτυχίες εκτίμησης)

Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...







Μετά το sm2 τι;

Ευθυγράμμιση sm2 δίχως αντιστοιχίσεις, υπό χρονικούς περιορισμούς

Πρόβλημα:

Κατασκευή h: sm2 χωρίς αντιστοιχίσεις, δεδομένων:

- Πραγματική σάρωση $\mathcal{S}_R(\boldsymbol{p})$: FOV $= 360°$
- Χάρτης $\boldsymbol{M}$ του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση $\hat{\boldsymbol{p}}(\hat{\boldsymbol{l}}, \hat{\theta})$
- Η εκτίμηση θέσης $\hat{\boldsymbol{l}} = (\hat{x}, \hat{y})$ είναι σε μία γειτονιά της $\boldsymbol{l} = (x, y)$

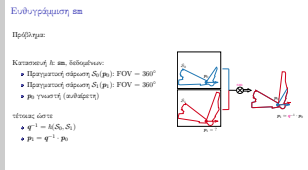
τέτοιας ώστε

(Σ1) $\hat{\boldsymbol{p}}' \leftarrow h(\mathcal{S}_R, \boldsymbol{M}, \hat{\boldsymbol{p}})$:

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

Εάν $\|\hat{\boldsymbol{l}}_N - \boldsymbol{l}\| \ll \delta$ τότε

$$\left.\begin{array}{l} \bullet\ \|\hat{\boldsymbol{l}}_{0:N} - \boldsymbol{l}\| < \delta \\ \bullet\ \mathcal{S}_V(\hat{\boldsymbol{p}}_0) \text{ τοπική προσέγγιση } \boldsymbol{M} \text{ (άρα } \boldsymbol{W}) \\ \quad \text{στη γειτονιά της } \boldsymbol{p},\ \forall \hat{\boldsymbol{p}}_i, i = 0, 1, \ldots, N \end{array}\right\} \text{Εάν } \boldsymbol{M} \leftarrow \mathcal{S}_R(\boldsymbol{p}_2) \quad \Rightarrow h \text{ λύνει sm;}$$



Ευθυγράμμιση sm

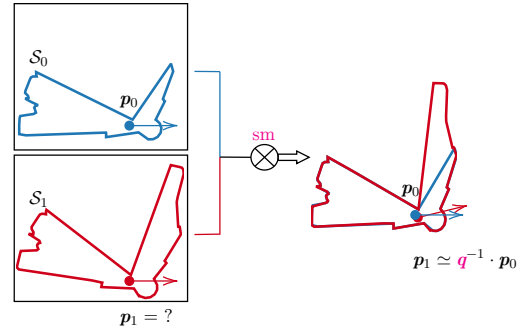
Πρόβλημα:

Κατασκευή h: sm, δεδομένων:

- Πραγματική σάρωση $\mathcal{S}_0(\boldsymbol{p}_0)$: FOV $= 360°$
- Πραγματική σάρωση $\mathcal{S}_1(\boldsymbol{p}_1)$: FOV $= 360°$
- $\boldsymbol{p}_0$ γνωστή (αυθαίρετη)

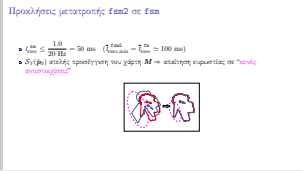
τέτοιας ώστε

- $\boldsymbol{q}^{-1} = h(\mathcal{S}_0, \mathcal{S}_1)$
- $\boldsymbol{p}_1 = \boldsymbol{q}^{-1} \cdot \boldsymbol{p}_0$



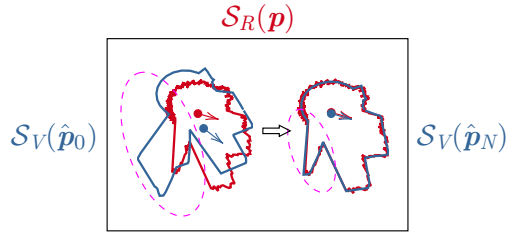
Βαρύτητα μετατροπής fsm2 σε fsm

- sm ως μέσο sm2 ⇒ λύση pose tracking & global localisation
- sm ως μέσο παραγωγής οδομετρίας μέσω lidar ⇒ απεξάρτηση από
  - Αποκλίνουσα οδομετρία τροχών / άκρων
  - Συνθήκες τριβής ως προς επιφάνεια επαφής
- Πρώτη μέθοδος sm χωρίς υπολογισμό αντιστοιχίσεων



Προκλήσεις μετατροπής fsm2 σε fsm

- $t_{\text{exec}}^{\texttt{sm}} \leq \dfrac{1.0}{20\ \text{Hz}} = 50\ \text{ms} \quad (\bar{t}_{\text{exec,min}}^{\texttt{fsm2}} = \bar{t}_{\text{exec}}^{\texttt{fm}} \simeq 100\ \text{ms})$
- $\mathcal{S}_V(\hat{\boldsymbol{p}}_0)$ ατελής προσέγγιση του χάρτη $\boldsymbol{M} \Rightarrow$ απαίτηση ευρωστίας σε "κενές αντιστοιχίσεις"



Πειραματική διαδικασία

Στόχοι:

(Σ1) $\|\hat{\boldsymbol{q}}^{\texttt{fsm}} - \boldsymbol{q}\| \overset{?}{\leq} \|\hat{\boldsymbol{q}}^{\texttt{sota}} - \boldsymbol{q}\|$

(Σ2) $\bar{t}_{\text{exec}}^{\texttt{fsm}} \leq 50.0$ ms

Πέντε benchmark περιβάλλοντα δοκιμής

Σύνολο δεδομένων D	Πληθικότητα
aces	7373
fr079	4933
intel	13630
mit_csail	1987
mit_killian	17479
	$\sum \lvert D \rvert = 45402$

Πίνακας: Πηγή: Σύνολα δεδομένων αξιολόγησης SLAM, Τμήμα Επιστήμης των Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο του Φράιμπουργκ

Πειραματική διαδικασία

Στόχοι:

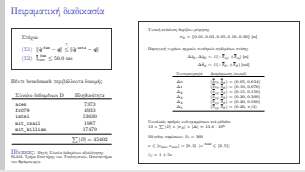
(Σ1) $\|\hat{\boldsymbol{q}}^{\texttt{fsm}} - \boldsymbol{q}\| \overset{?}{\leq} \|\hat{\boldsymbol{q}}^{\texttt{sota}} - \boldsymbol{q}\|$

(Σ2) $\bar{t}_{\text{exec}}^{\texttt{fsm}} \leq 50.0$ ms

Πέντε benchmark περιβάλλοντα δοκιμής

Σύνολο δεδομένων D	Πληθικότητα
aces	7373
fr079	4933
intel	13630
mit_csail	1987
mit_killian	17479
	$\sum \lvert D \rvert = 45402$

Πίνακας: Πηγή: Σύνολα δεδομένων αξιολόγησης SLAM, Τμήμα Επιστήμης των Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο του Φράιμπουργκ



Πειραματική διαδικασία

Στόχοι:

(Σ1) $\|\hat{\boldsymbol{q}}^{\texttt{fsm}} - \boldsymbol{q}\| \overset{?}{\leq} \|\hat{\boldsymbol{q}}^{\texttt{sota}} - \boldsymbol{q}\|$

(Σ2) $\bar{t}_{\text{exec}}^{\texttt{fsm}} \leq 50.0$ ms

Πέντε benchmark περιβάλλοντα δοκιμής

Σύνολο δεδομένων D	Πληθικότητα
`aces`	7373
`fr079`	4933
`intel`	13630
`mit_csail`	1987
`mit_killian`	17479
	$\sum \lvert D \rvert = 45402$

Πίνακας: Πηγή: Σύνολα δεδομένων αξιολόγησης SLAM, Τμήμα Επιστήμης των Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο του Φράιμπουργκ

Τυπική απόκλιση θορύβου μέτρησης

$$\sigma_R = \{0.01, 0.03, 0.05, 0.10, 0.20\} \text{ [m]}$$

Παραγωγή τυχαίων αρχικών συνθηκών σφάλματων στάσης

$$\Delta\hat{x}_0, \Delta\hat{y}_0 \sim U(-\overline{\delta}_{xy}, +\overline{\delta}_{xy}) \text{ [m]}$$

$$\Delta\hat{\theta}_0 \sim U(-\overline{\delta}_{\theta}, +\overline{\delta}_{\theta}) \text{ [rad]}$$

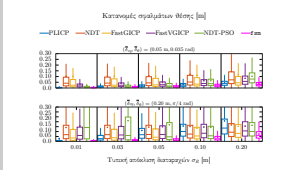
Συντομογραφία	Διαμόρφωση (m,rad)
Δ_0	$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_{\theta}) = (0.05, 0.034)$
Δ_1	$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_{\theta}) = (0.10, 0.070)$
Δ_2	$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_{\theta}) = (0.15, 0.150)$
Δ_3	$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_{\theta}) = (0.20, 0.300)$
Δ_4	$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_{\theta}) = (0.20, 0.560)$
Δ_5	$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_{\theta}) = (0.20, \pi/4)$

Συνολικός αριθμός ευθυγραμμίσεων ανά μέθοδο:
$10 \times \sum |D| \times |\sigma_R| \times |\Delta| \simeq 13.6 \cdot 10^6$

Μέγεθος σαρώσεων: $N_s = 360$

$\nu \in [\nu_{\min}, \nu_{\max}] = [0, 3]$ $(\nu^{\texttt{fsm2}} \in [2, 5])$

$I_T = 1 + 5\nu$



Κατανομές σφαλμάτων θέσης [m]

PLICP NDT FastGICP FastVGICP NDT-PSO fsm

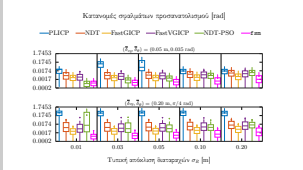
$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_\theta) = (0.05\text{ m}, 0.035\text{ rad})$

$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_\theta) = (0.20\text{ m}, \pi/4\text{ rad})$

0.30 0.25 0.20 0.15 0.10 0.05 0.0

0.01 0.03 0.05 0.10 0.20

Τυπική απόκλιση διαταραχών σ_R [m]



Κατανομές σφαλμάτων προσανατολισμού [rad]

PLICP NDT FastGICP FastVGICP NDT-PSO fsm

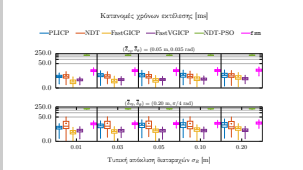
$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_\theta) = (0.05\text{ m}, 0.035\text{ rad})$

$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_\theta) = (0.20\text{ m}, \pi/4\text{ rad})$

1.7453
0.1745
0.0174
0.0017
0.0002

0.01 0.03 0.05 0.10 0.20

Τυπική απόκλιση διαταραχών σ_R [m]



Κατανομές χρόνων εκτέλεσης [ms]

PLICP NDT FastGICP FastVGICP NDT-PSO fsm

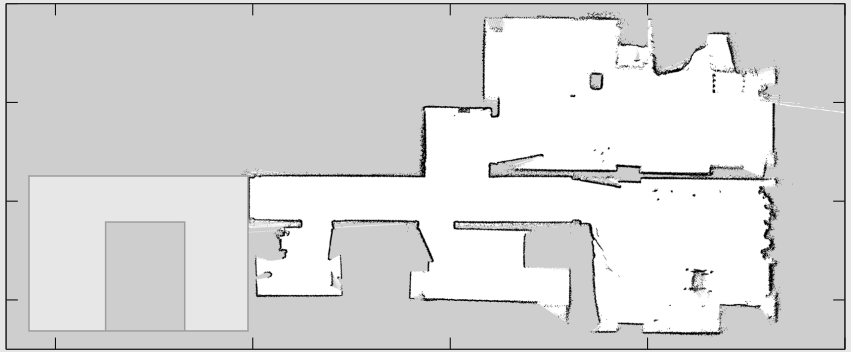
$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_{\theta}) = (0.05\text{ m}, 0.035\text{ rad})$

$(\overline{\delta}_{xy}, \overline{\delta}_{\theta}) = (0.20\text{ m}, \pi/4\text{ rad})$

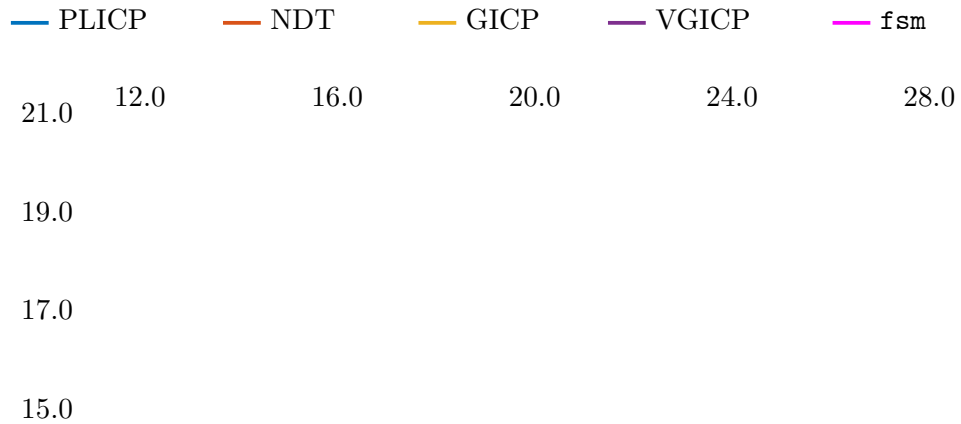
250.0 50.0 0.0

0.01 0.03 0.05 0.10 0.20

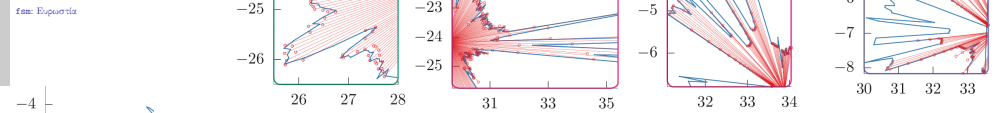
Τυπική απόκλιση διαταραχών σ_R [m]

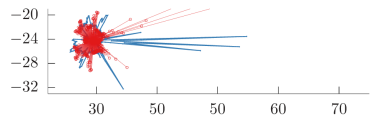


Οδομετρία μέσω lidar (real)

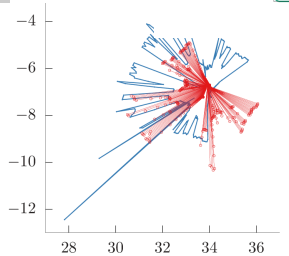


Μέθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων ...

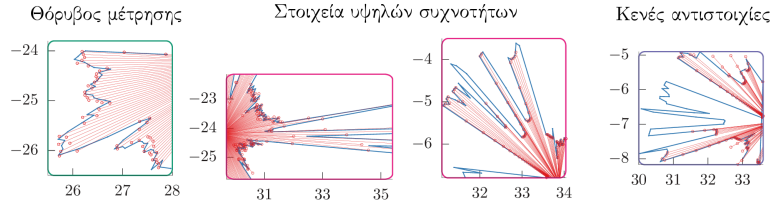




$\Delta x = -0.03252$ m
$\Delta y = 0.03603$ m
$\Delta \theta = -0.35689$ rad



$\Delta x = -0.02856$ m
$\Delta y = -0.19805$ m
$\Delta \theta = -1.31500$ rad



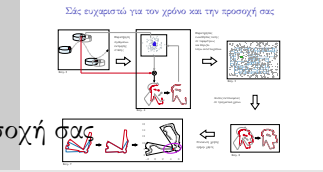
Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

Ευθυγράμμιση πραγματικών (δισδιάστατων πανοραμικών) σαρώσεων
- χωρίς αντιστοιχίσεις
- με τρεις (διαισθητικές, προαιρετικές) παραμέτρους

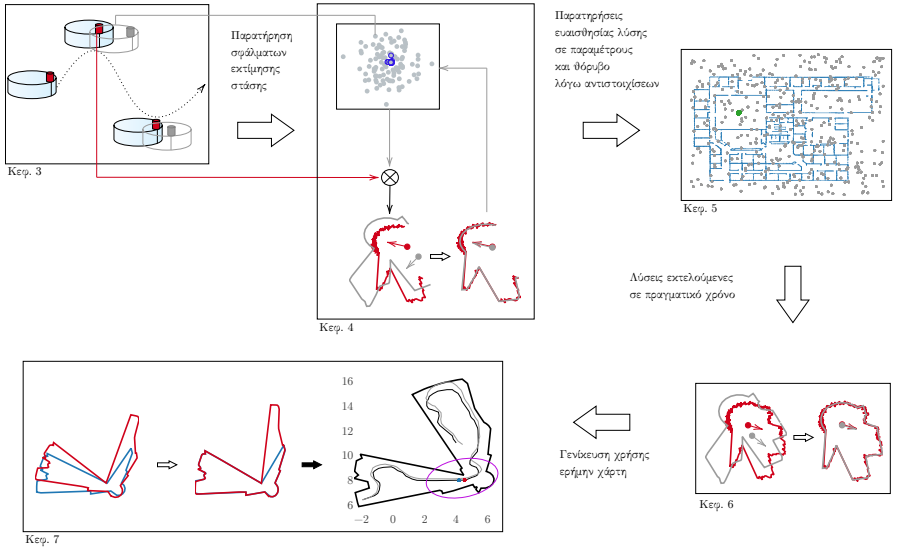
Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

Ευθυγράμμιση πραγματικών (δισδιάστατων πανοραμικών) σαρώσεων

- χωρίς αντιστοιχίσεις
- με τρεις (διαισθητικές, προαιρετικές) παραμέτρους



Σάς ευχαριστώ για τον χρόνο και την προσοχή σας



Κεφ. 3

Κεφ. 4

Κεφ. 5

Κεφ. 6

Κεφ. 7