

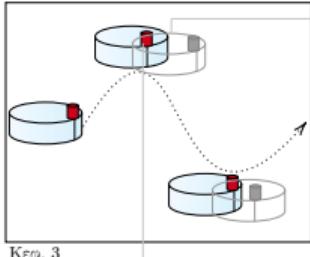
Μεθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων
μετρήσεων μέσω ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές σαρώσεις

Αλέξανδρος Φιλοθέου

ΤΗΜΜΥ, ΑΠΘ

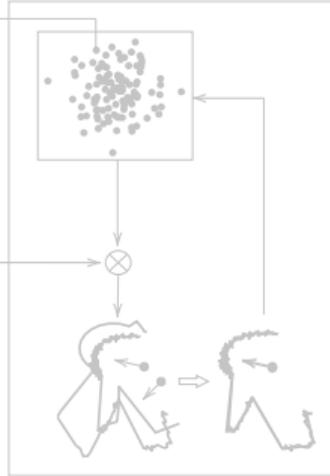


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



Κεφ. 3

Παρατήρηση
σφράμπτων
εκτίμησης
στάσης



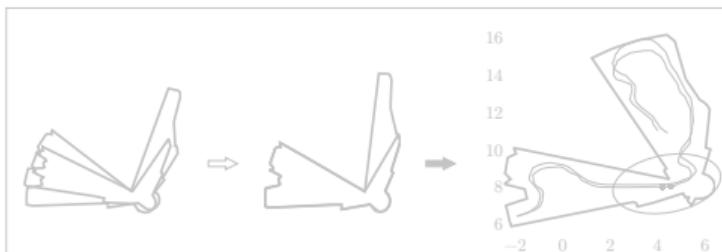
Κεφ. 4

Παρατηρήσεις
ευαισθησίας λόστης
σε παραμέτρους
και θύρωβο
λόγω αντιστοιχίσεων



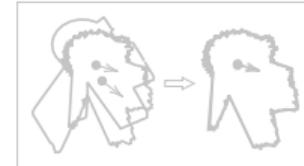
Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες
σε πραγματικό χρόνο



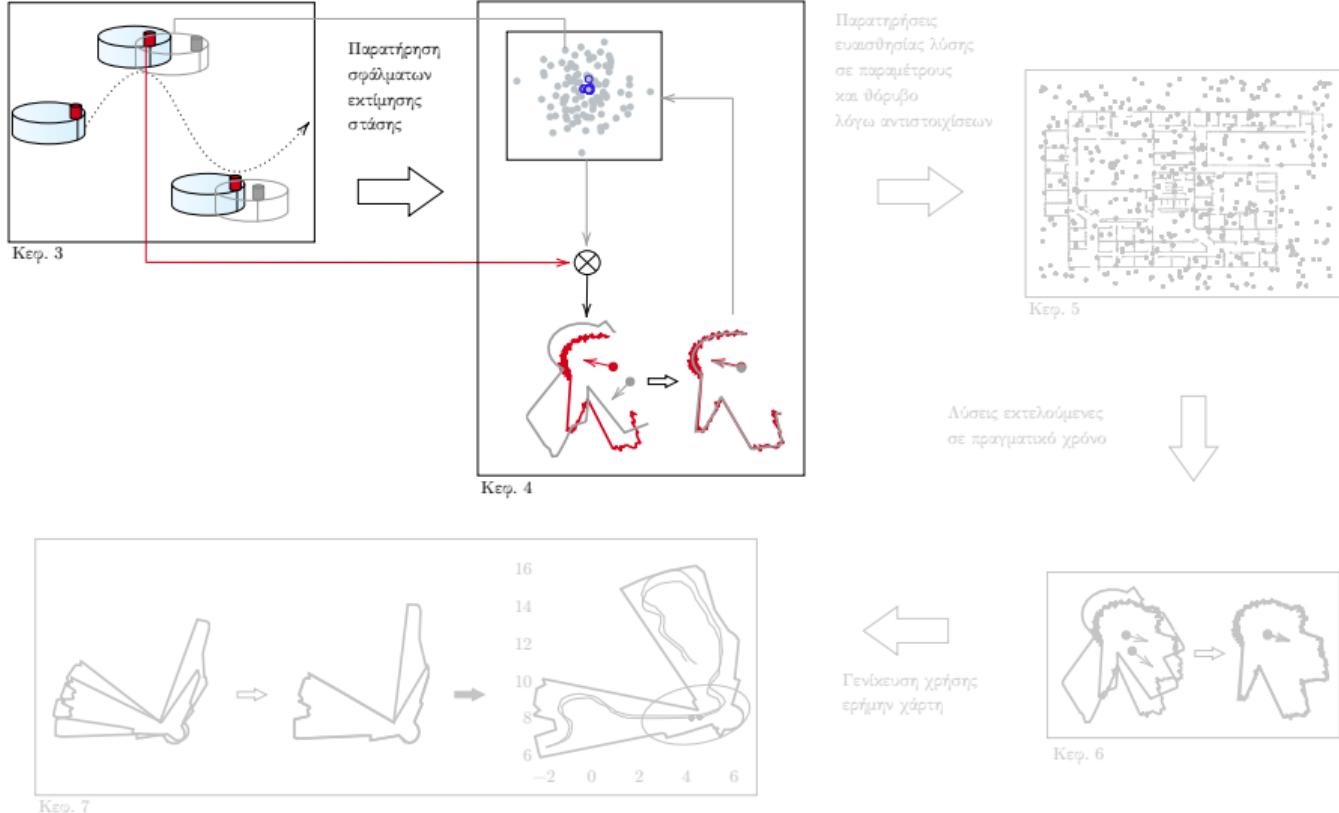
Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης
ερήμην χάρτη

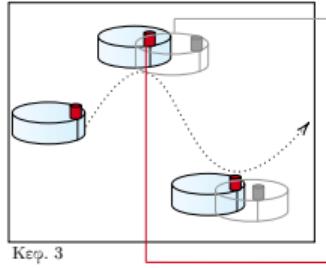


Κεφ. 6

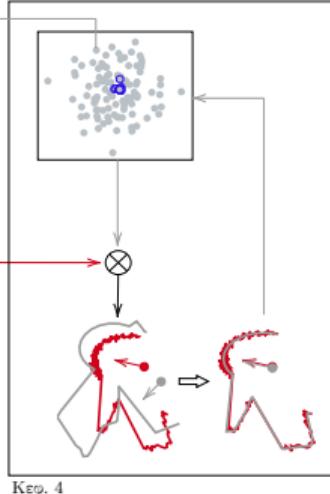
Σχήμα: Οδικός χάρτης της διατριβής (1/5)



Σχήμα: Οδικός χάρτης της διατριβής (2/5)



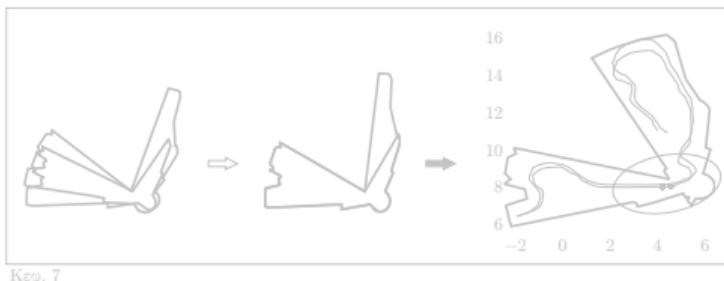
Παρατήρηση σφράματων εκτίμησης στάσης



Παρατήρησης ευαισθησίας λύσης σε παραμέτρους και θόρυβο λόγω αντιστοιχίσεων



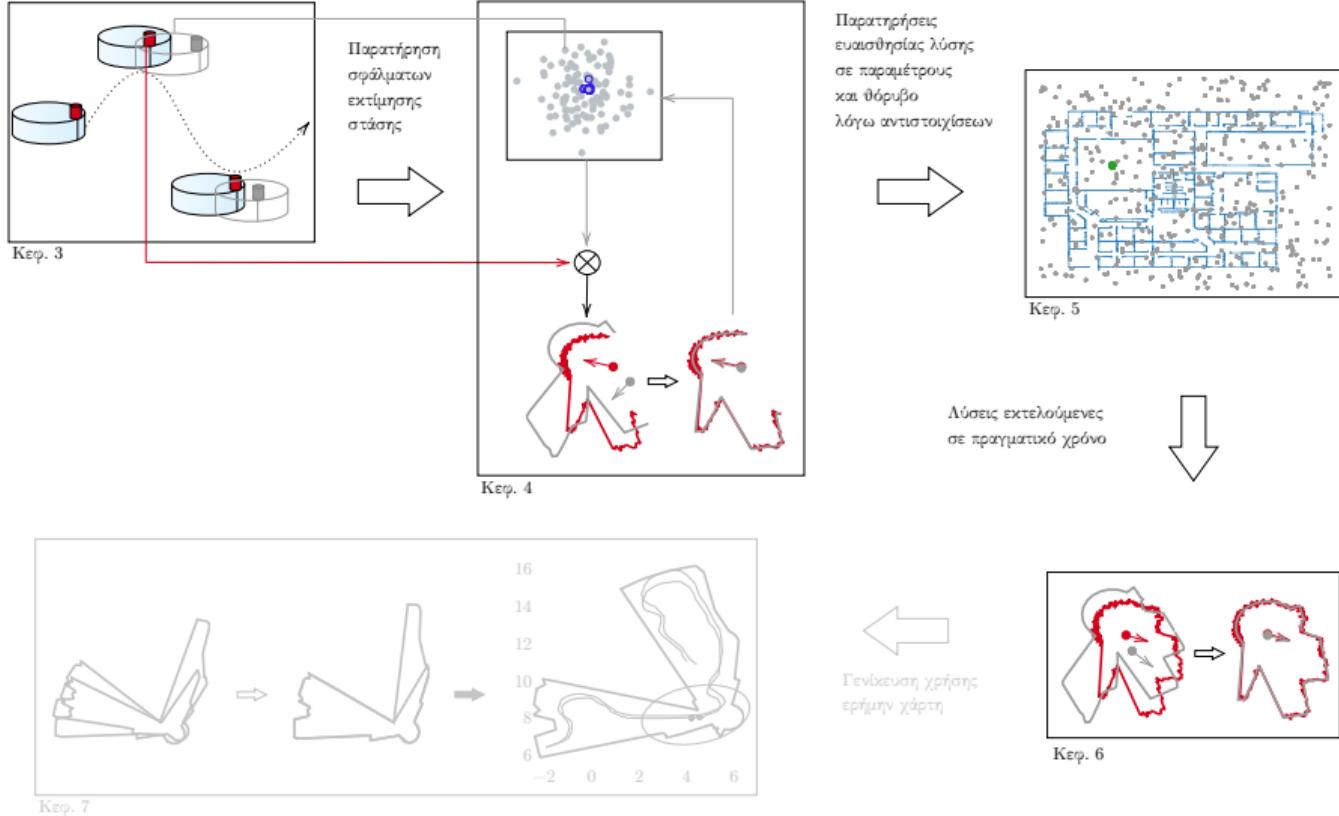
Λύσεις εκτελούμενες σε πραγματικό χρόνο



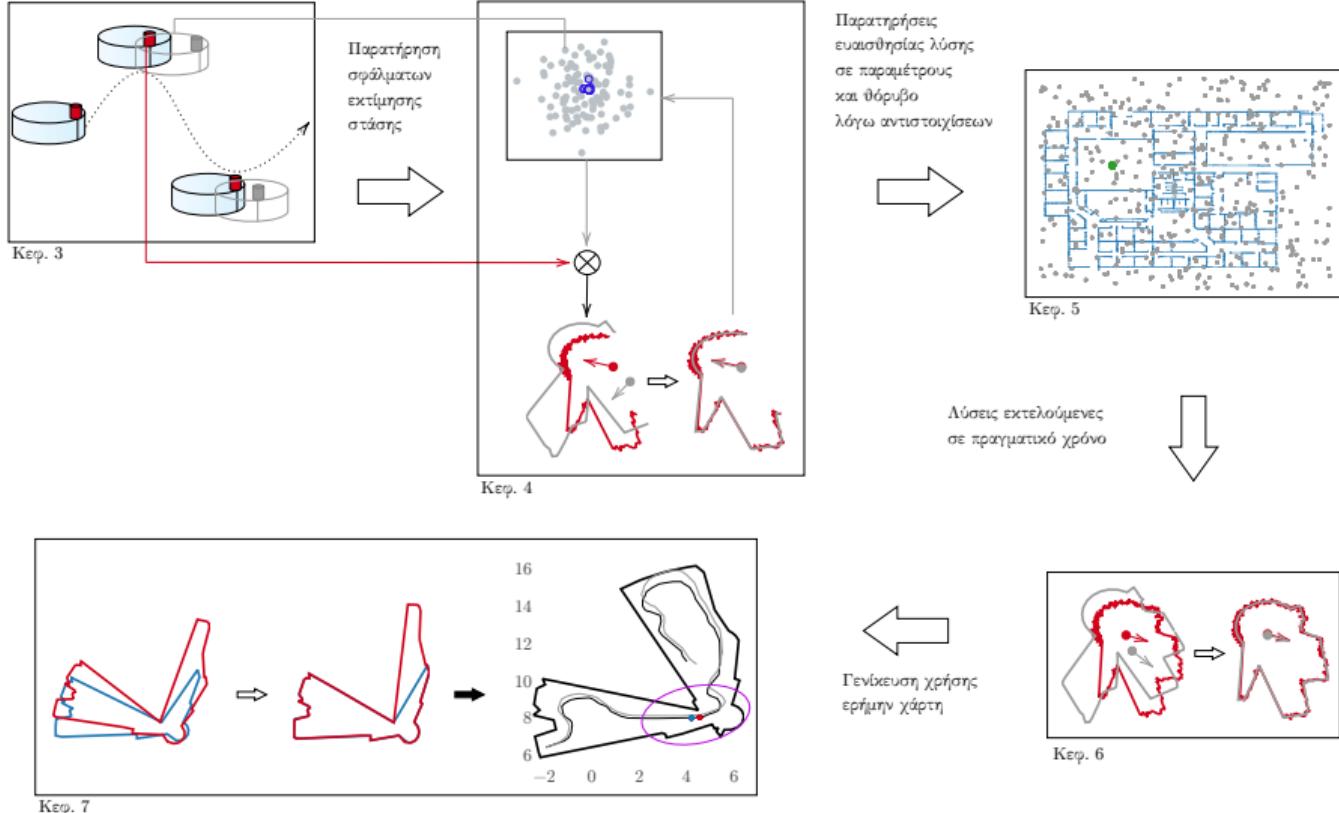
Γενίκευση χρήσης ερήμην χάρτη



Σχήμα: Οδικός χάρτης της διατριβής (3/5)



Σχήμα: Οδικός χάρτης της διατριβής (4/5)



Σχήμα: Οδικός χάρτης της διατριβής (5/5)

Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M



Σχήμα: Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

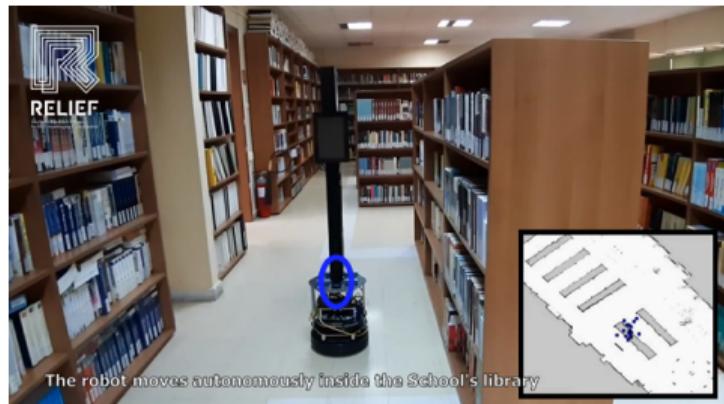
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M



Σχήμα: Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M



Σχήμα: Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M



The robot moves autonomously inside the School's library

Σχήμα: Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M



Σχήμα: Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M



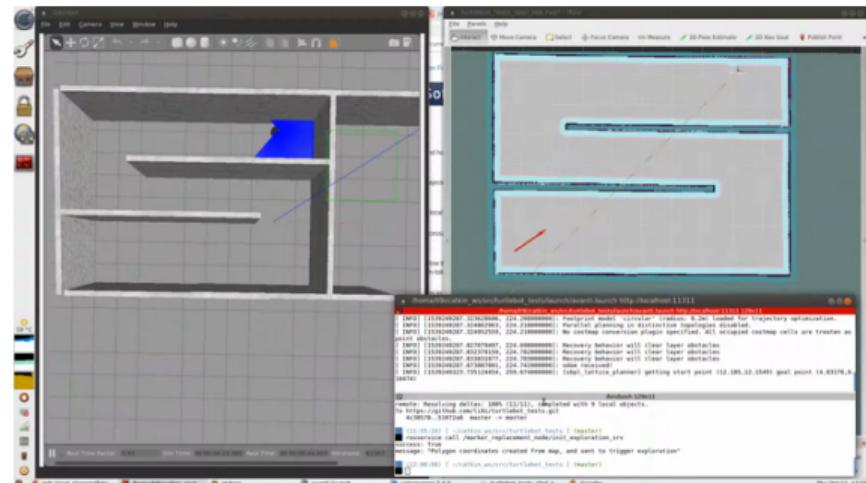
Σχήμα: Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

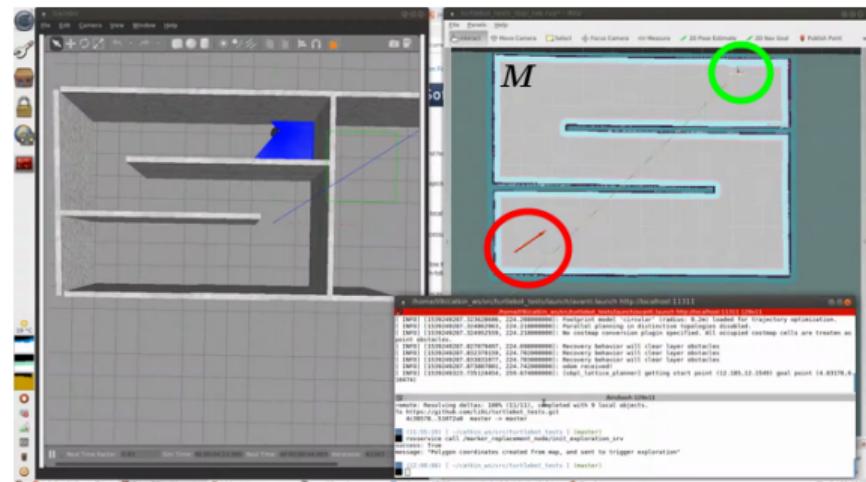
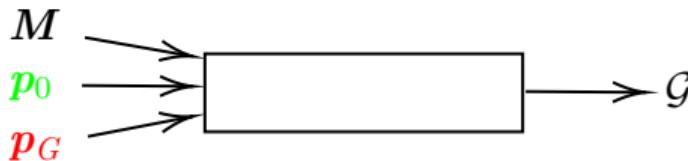
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, $\text{rgb}(d)$, sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M

Σχήμα: Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

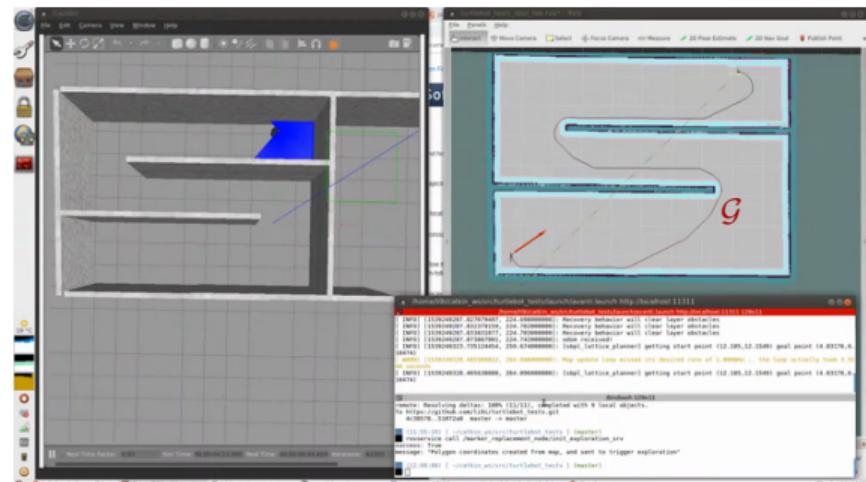
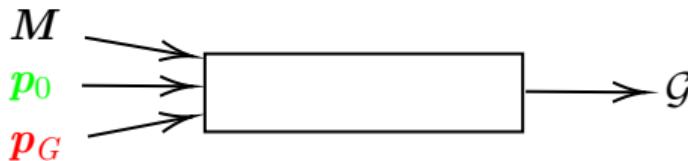
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



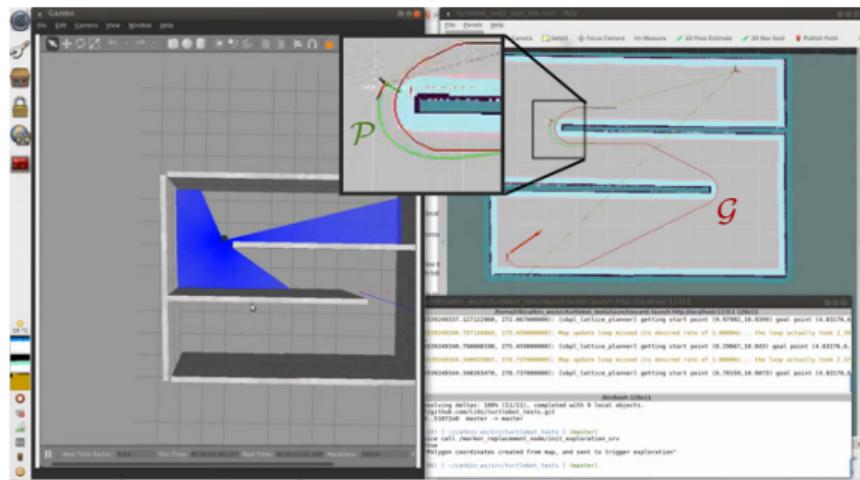
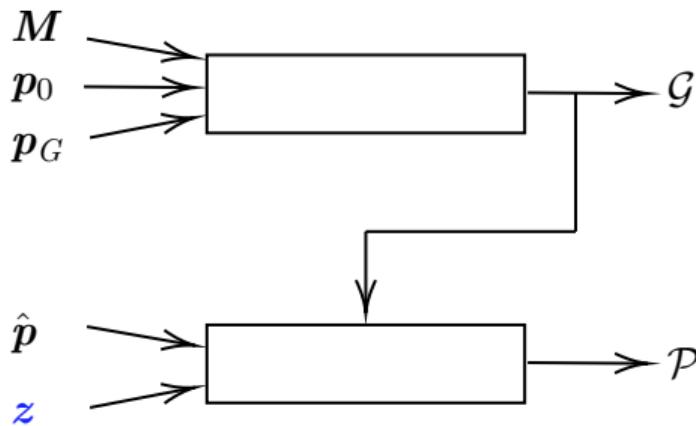
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



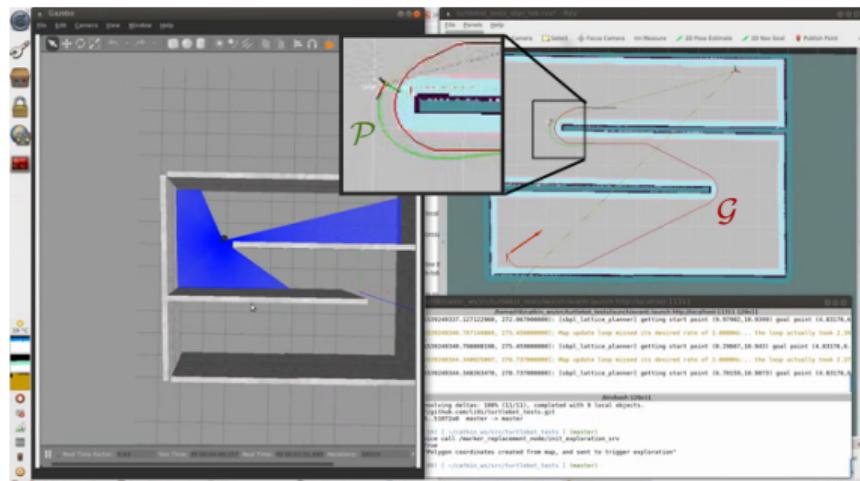
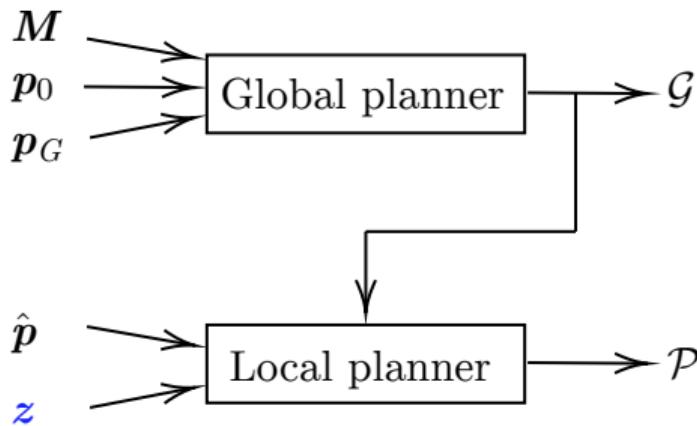
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



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

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

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

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

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

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	?	?	?

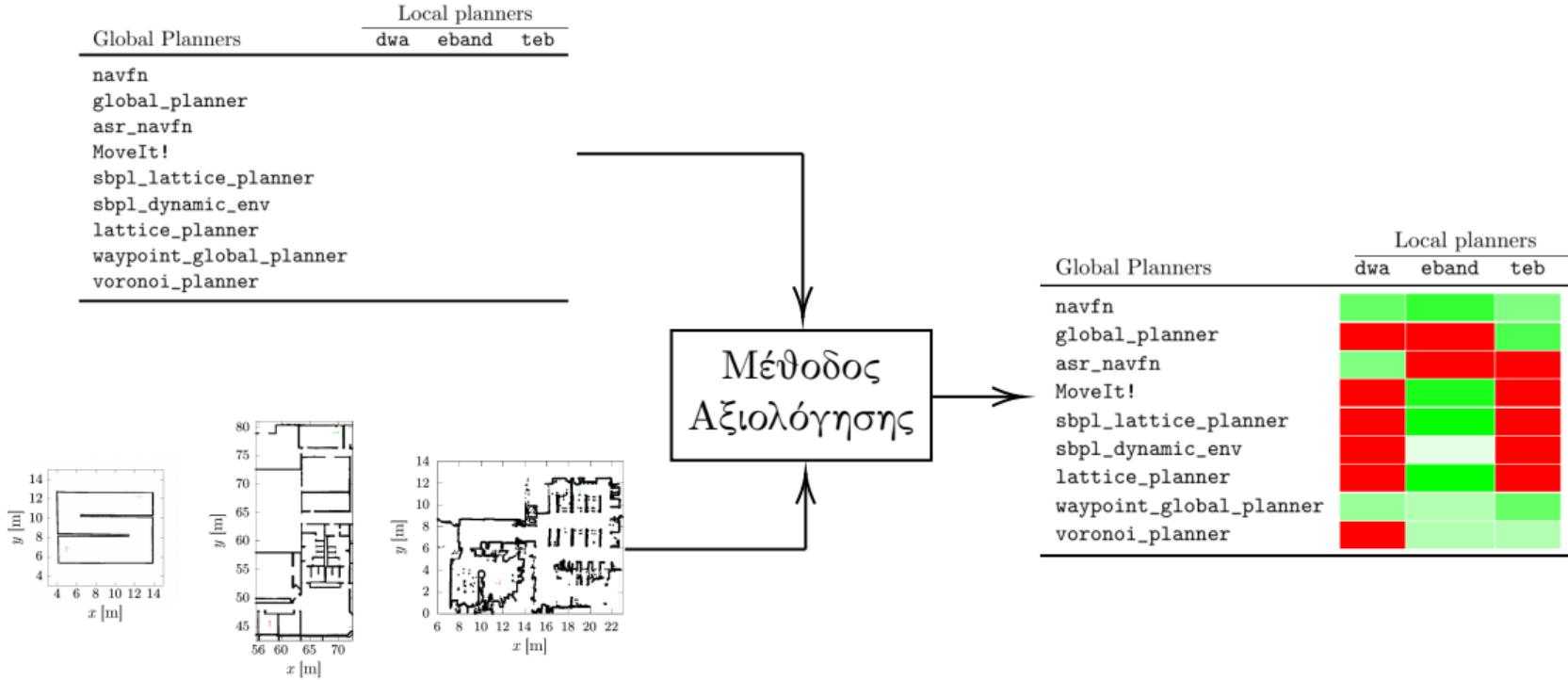
Η ανάγκη για πειραματική αξιολόγηση του state-of-the-art

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

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

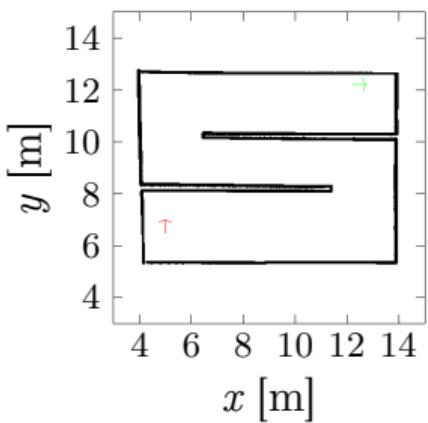


Προκαταρκτική αξιολόγηση: ποιοτικά κριτήρια λογισμικού

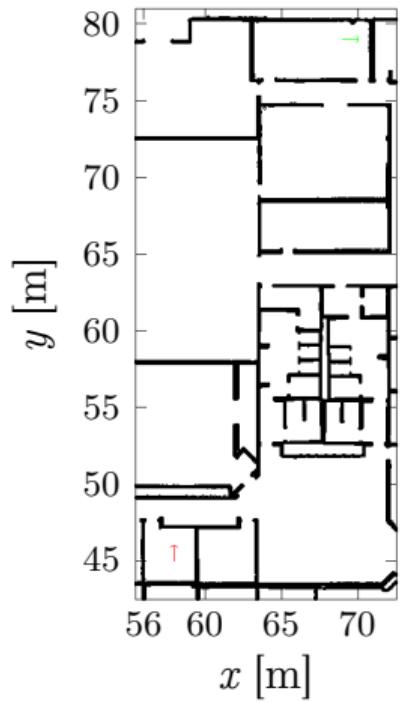
Planner	Ποιοτικές Μετρικές								Αποδοχή
	DOC	UTD	INST	SC/C	PARAM	CON	COMP		
navfn	•	•	••	•	•	•	•		•
global_planner	•	•	••	•	•	•	•		•
asr_navfn	•	○	•	•	•	•	•		○
MoveIt!	•••	•	••	•	•••	?	•••		○
sbpl_lattice_planner	••	•	••	•	•	•	•		•
sbpl_dynamic_env	•	○	•	○	•	?	•		○
lattice_planner	•	○	•	•	•	•	•		○
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 συμπεριληφθη στην πειραματική αξιολόγηση. Οι κενές κουκλίδες υποδηλώνουν ανεπάρκεια σε σχέση με κάθε μετρική. Τα ερωτηματικά υποδηλώνουν άγνωστη κατάσταση

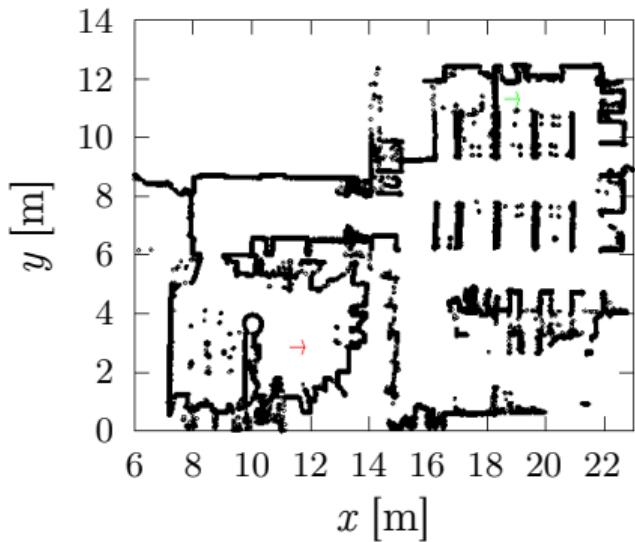
Πειραματική αξιολόγηση: διάταξη



Σχήμα: M_C



Σχήμα: M_W



Σχήμα: M_L

Πειραματική αξιολόγηση: μετρικές

Global planners (8 μετρικές)

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

Local planners (8 μετρικές)

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

Global \circ Local (12 μετρικές)

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

Πειραματική αξιολόγηση: Στόχος

Απόδοση μίας τιμής-αξίας $V(c_{i,j})$ σε κάθε συνδνασμό $c_{i,j} = g_i \circ l_j$ 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 $c(m_{\bar{q}}) \downarrow$, $m_q \in Q, m_{\bar{q}} \in \bar{Q}, Q \cup \bar{Q} = \cup m$

Κατασκευή συνάρτησης απόδοσης αξίας V

- Κανονικοποίηση τιμών μετρικής m :

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

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 M

$$V_M(c) \triangleq \sum_m I_Q(m) \cdot V_q(c, m) + I_{\bar{Q}}(m) \cdot V_{\bar{q}}(c, m)$$

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

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

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

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

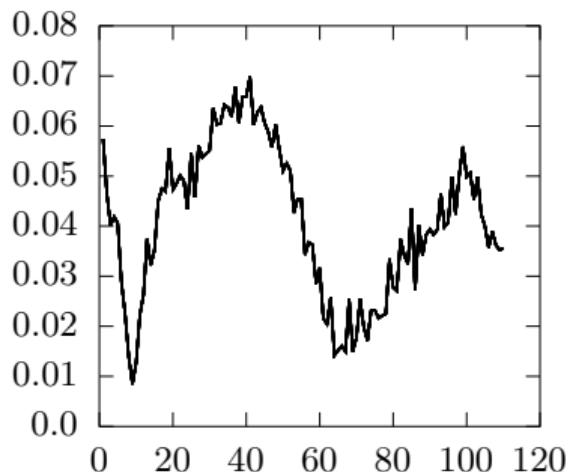
Πίνακας: Η σύνθετη τελική τιμή V και η κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης σε επαναληπτικές προσομοιώσεις και πειράματα στα περιβάλλοντα της πειραματικής διάταξης

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

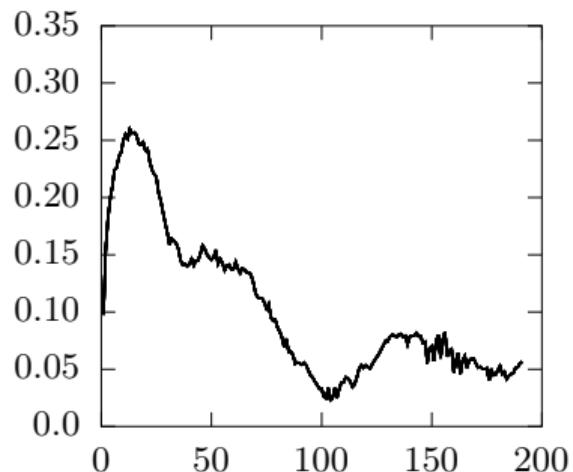
- Επιλογή συνδυασμού planners off-the-shelf
- Προσαρμογή μεθόδου αξιολόγησης με βάση ειδικές απαιτήσεις ($w_m \neq 1.0$)
- Ενσωμάτωση οποιωνδήποτε μελλοντικών μεθόδων
- Ενσωμάτωση ad hoc περιβάλλοντος

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

CORRIDOR

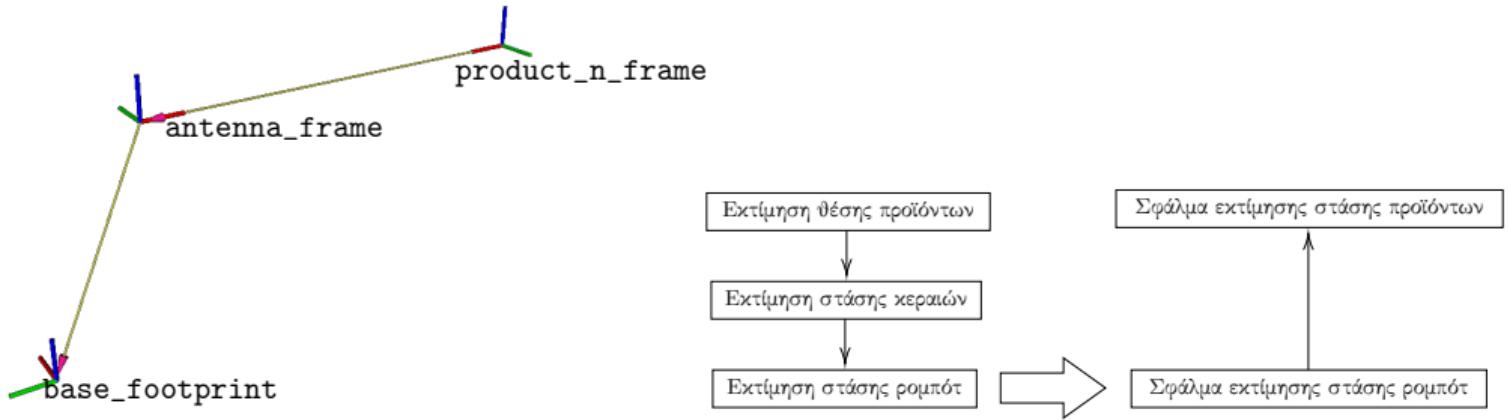


WILLOWGARAGE



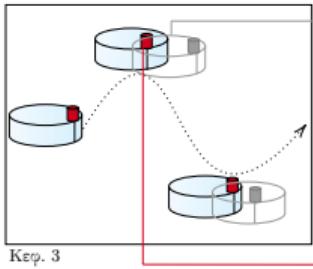
Αριθμός εκτιμήσεων στάσης στο χρόνο

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

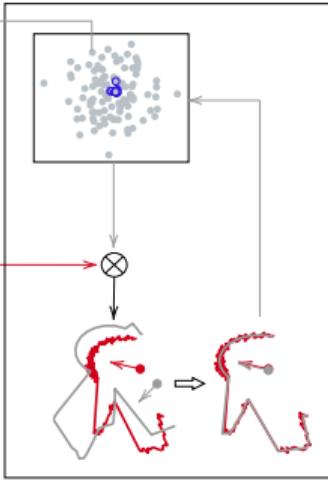


Σχήμα: Συστήματα αναφοράς ρομπότ, κεφαλών, και τυχαίου προϊόντος

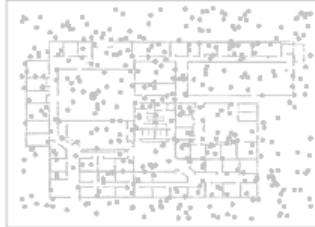
Σχήμα: Η εκτίμηση της θέσης των προϊόντων εξαρτάται από το σφάλμα της εκτίμησης της στάσης του ρομπότ



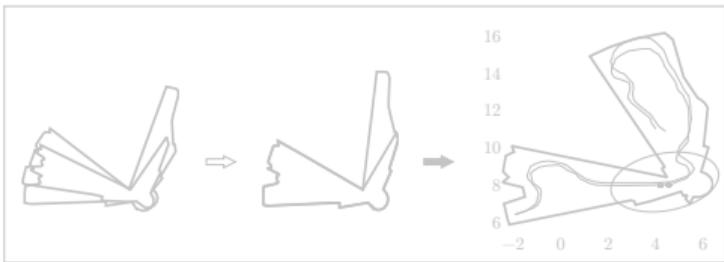
Παρατήρηση
σφάλματων
εκτίμησης
στάσης



Παρατηρήσεις
ευαισθησίας λύσης
σε παραμέτρους
και θόρυβο
λόγω αντιστοιχίσεων



Λύσεις εκτελούμενες
σε πραγματικό χρόνο



Γενήκευση χρήσης
ερήμην χάρτη



Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης στάσης φίλτρων σωματιδίων

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

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης στάσης φίλτρων σωματιδίων

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

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω διαλογής σωματιδίων

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

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

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

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

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

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω διαλογής σωματιδίων

Τπόθεση Υ1:

Έστω

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

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

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

Τότε

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

Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω sm2

Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων με εικονικές σαρώσεις χάρτη (sm2)

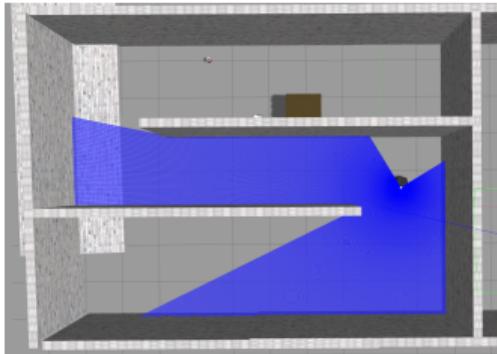


Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων (sm)

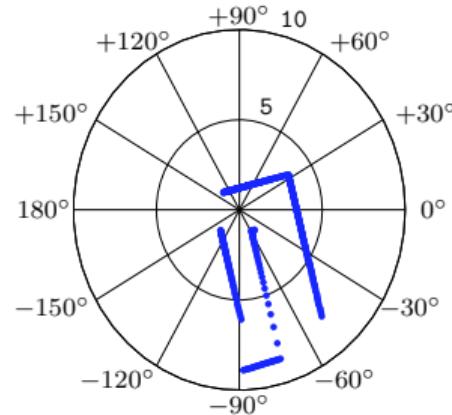
scan-to-map-scan matching → smsm → sm2

scan-matching → sm

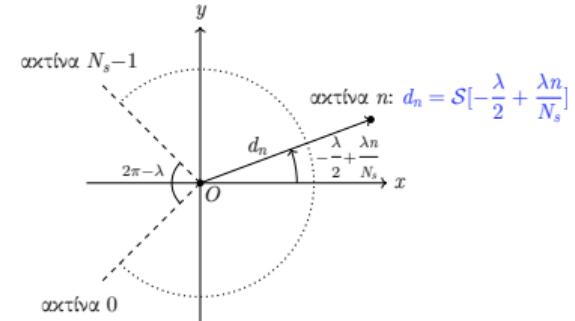
Αισθητήρας lidar δισδιάστατων μετρήσεων απόστασης



Σχήμα: Κάτοψη περιβάλλοντος και ακτίνες αισθητήρα



Σχήμα: Η σάρωση στο σύστημα αναφοράς αισθητήρα



Σχήμα: Τοπικό σύστημα αναφοράς αισθητήρα

Σάρωση $S : \Theta \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$, όπου

$$\Theta = \left\{ \theta_n \in \left[-\frac{\lambda}{2}, +\frac{\lambda}{2} \right) : \theta_n = -\frac{\lambda}{2} + \lambda \frac{n}{N_s}, n = 0, 1, \dots, N_s - 1 \right\}, \text{ όπου}$$

λ : Γωνιακό εύρος όρασης και N_s : αριθμός εκπεμπόμενων ακτίνων

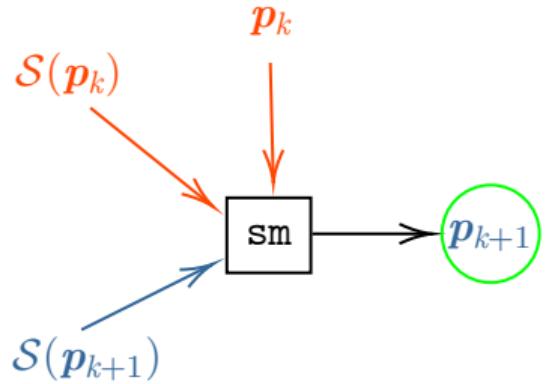
Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων (sm)

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

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

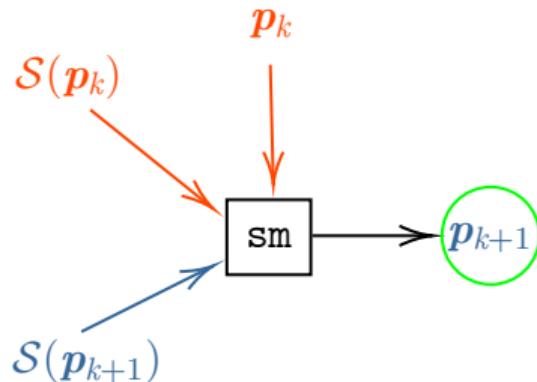
Σχήμα: Ευθυγράμμιση σαρώσεων → εκτίμηση μετασχηματισμού στάσεων από τις οποίες συνελήφθησαν οι σαρώσεις

sm: I/O

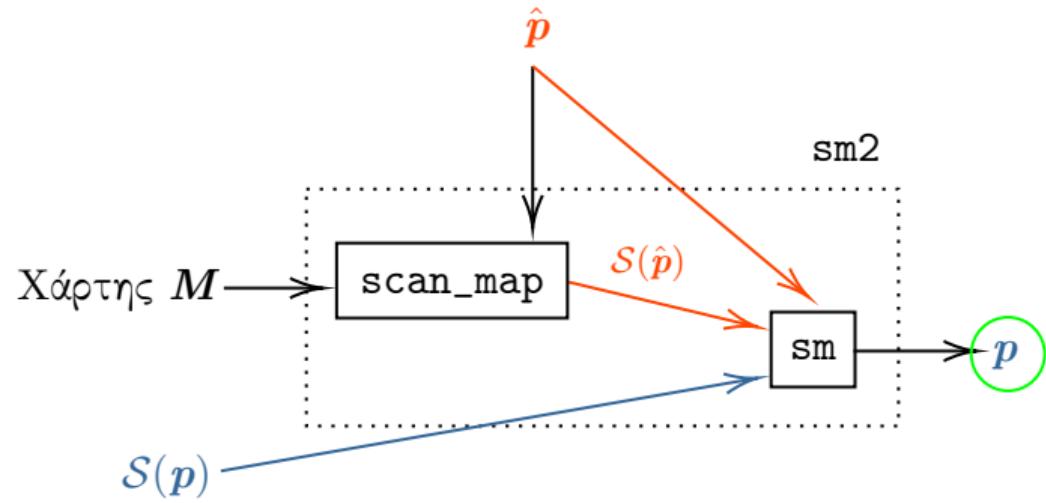


Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων

$\text{sm}\{\cdot, 2\}$: I/O

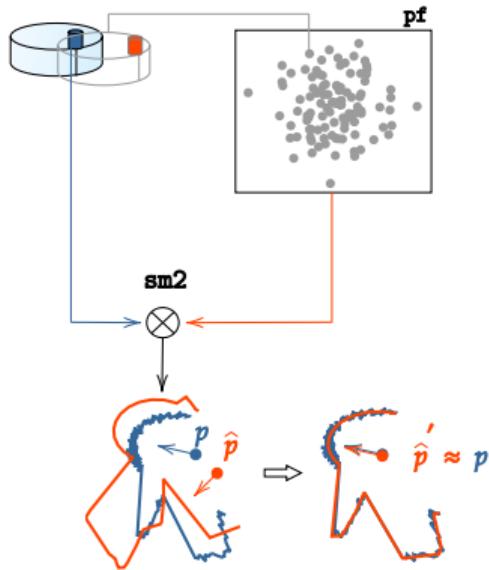


Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων

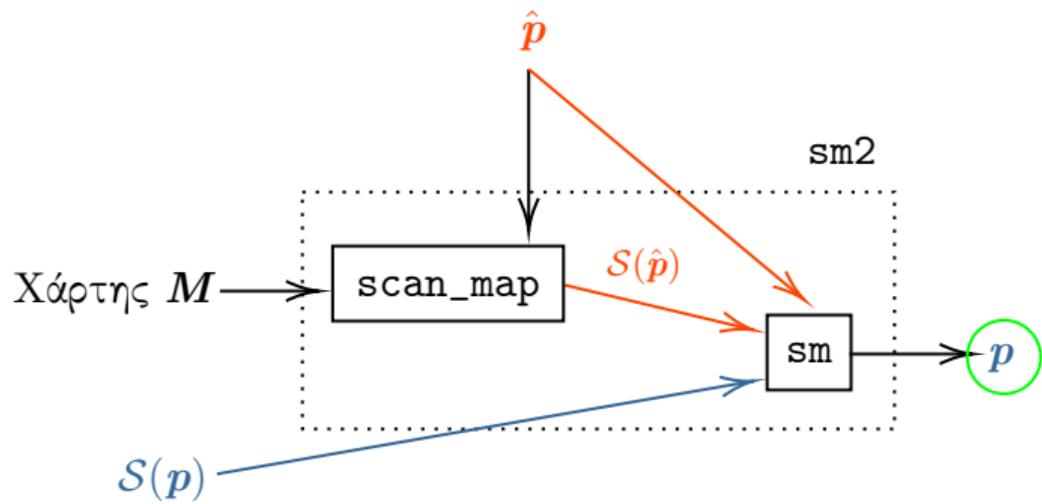


Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικής σάρωσης με εικονική σάρωση χάρτη

pf + sm2

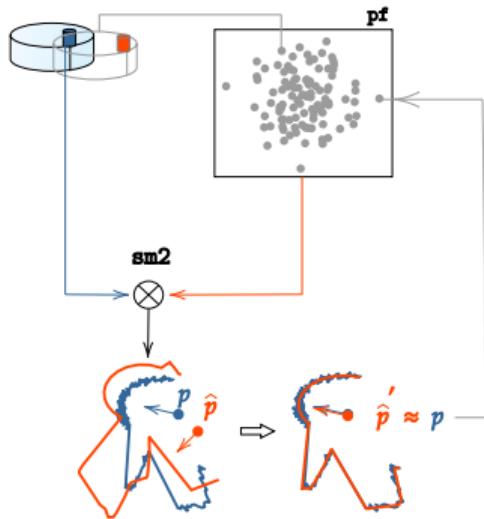


Σχήμα: sm2 προσαρμοσμένη στην
έξοδο φίλτρου σωματιδίων (pf)

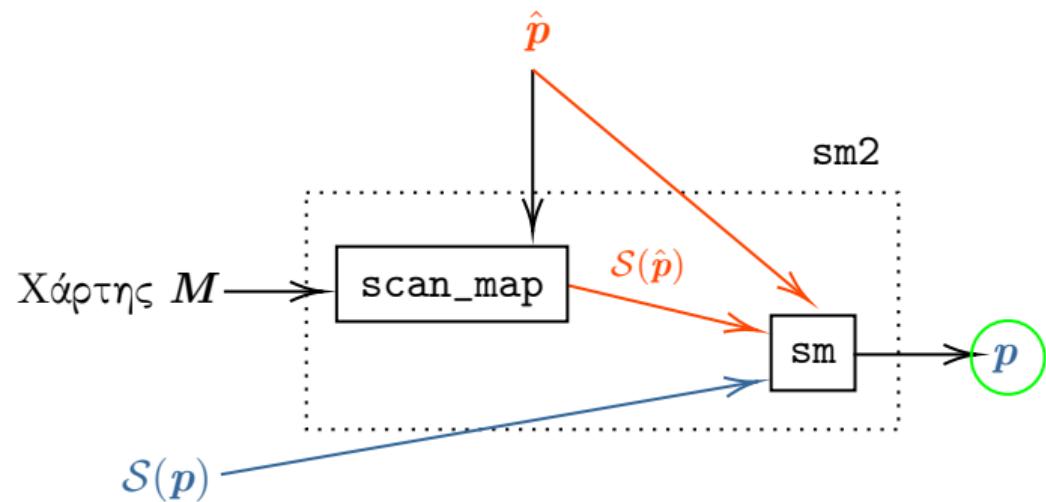


Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικής σάρωσης με εικονική σάρωση χάρτη

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
- 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 ανάδρασης εξόδου sm2

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

Υπόθεση Υ2:

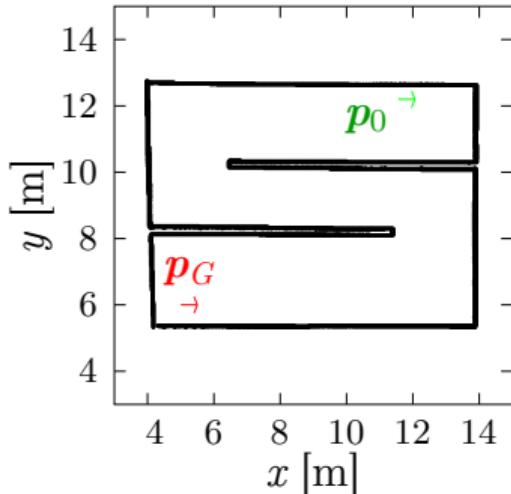
$$\|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}^*\| < \|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}(\mathcal{P})\|$$

Υπόθεση Υ3:

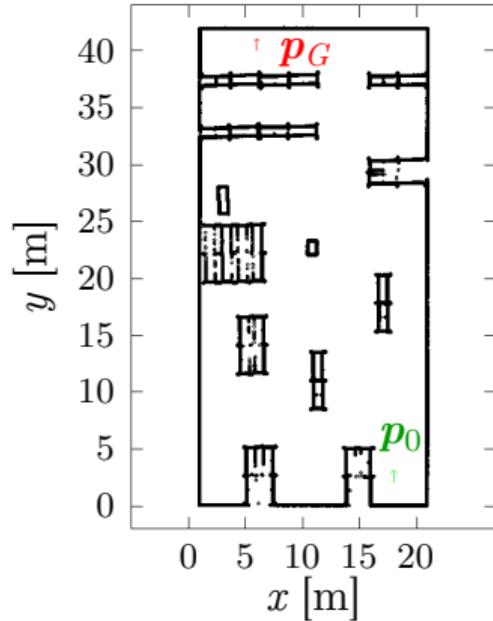
Εάν $\mathcal{P}^\circlearrowleft = \mathcal{P} \circlearrowleft \{\hat{\mathbf{p}}^*\}_{q \cdot |\mathcal{P}^\circlearrowleft|}$, όπου $q \gg 0.01$ και $q \ll 1.0$:

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

Πειραματική διάταξη



Σχήμα: Χάρτης περιβάλλοντος
CORRIDOR, M_C



Σχήμα: Χάρτης περιβάλλοντος
WAREHOUSE, M_W

$$N = 100 \times p_0 \rightarrow p_G$$

lidar:

$$\lambda = 260^\circ$$

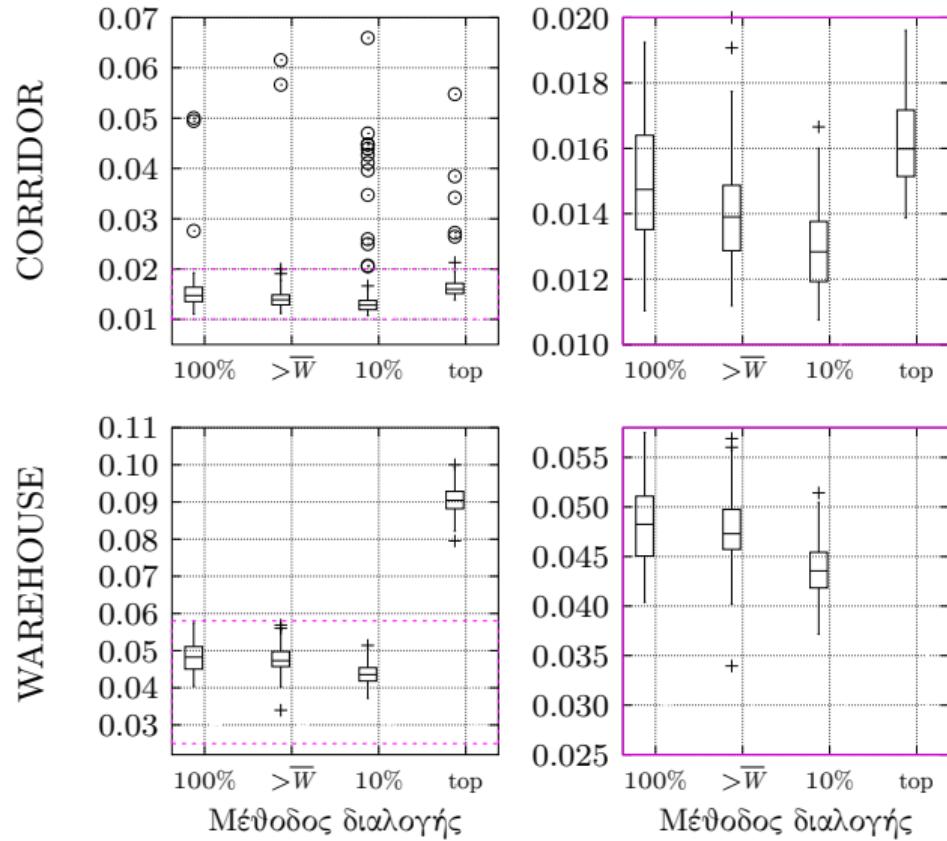
$$N_s = 640 \text{ ακτίνες}$$

$$\sigma_R = 0.01 \text{ m}$$

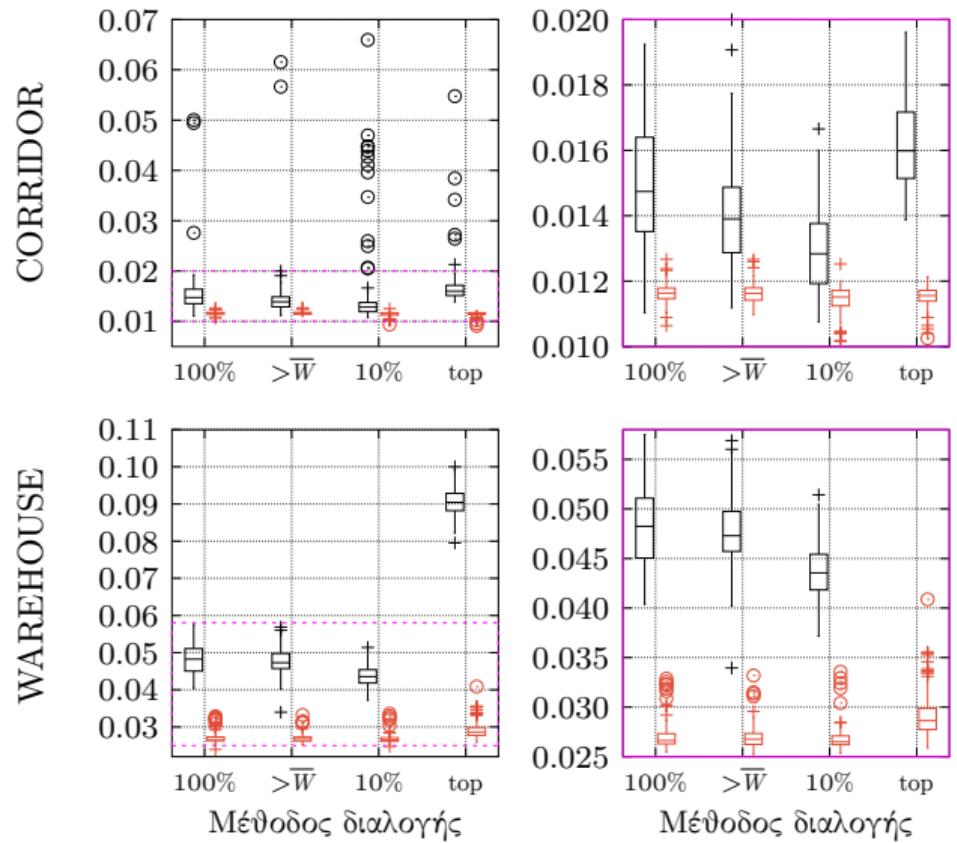
pf:

$$200 \leq |\mathcal{P}| \leq 500$$

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

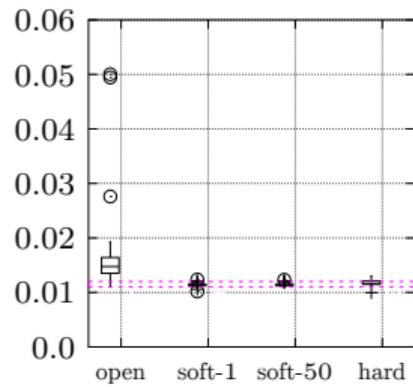


Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο διαλογής σωματιδίων + sm2 $[(m^2 + rad^2)^{1/2}]$

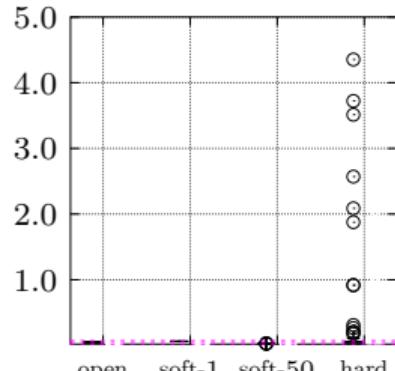


Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο ανάδρασης υπόθεσης sm2 [$(m^2 + rad^2)^{1/2}$]

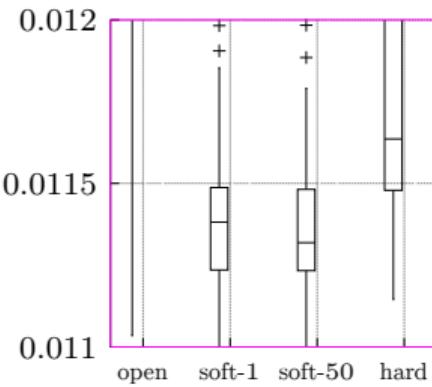
CORRIDOR



WAREHOUSE



Μέθοδος ανάδρασης



Μέθοδος ανάδρασης

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". *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2016

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό
Αξιόπιστη* ελάττωση σφαλμάτων εκτίμησης στάσης φίλτρου σωματιδίων μέσω sm2

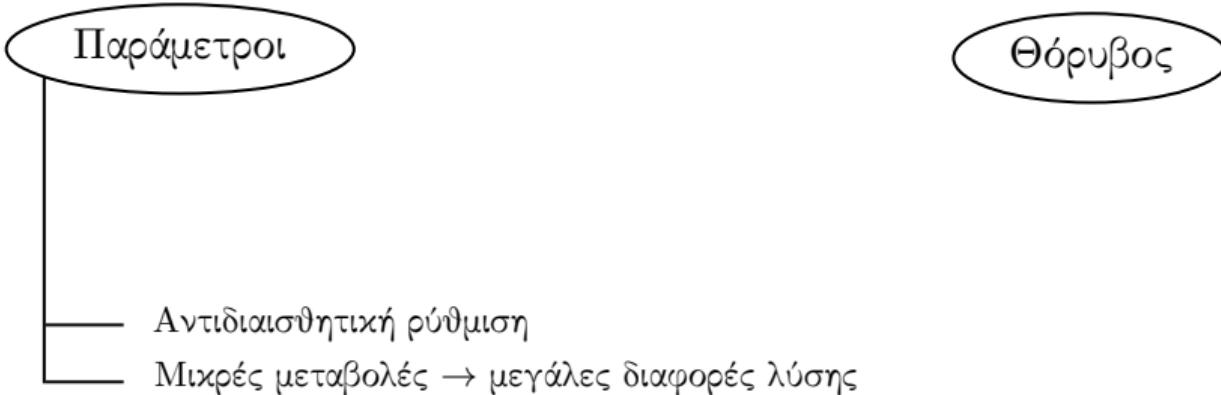
*Θωράκιση φίλτρου έναντι απώλειας ευρωστίας λόγω αποτυχίας sm2 μέσω ανάδρασης

Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

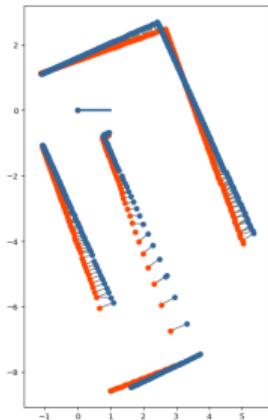
Παράμετροι

Θόρυβος

Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: παραραμετροποίηση

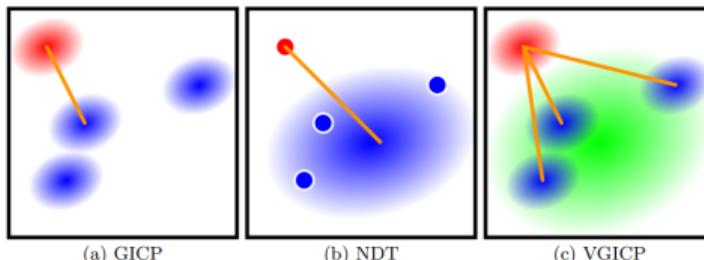


Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης



Σχήμα: Α

Σχήμα: Β



Σχήμα: Γ

Α: ICP επί της αρχής (σημείο προς σημείο)

Β: plicp: σημείο προς ευθύγραμμο τμήμα

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

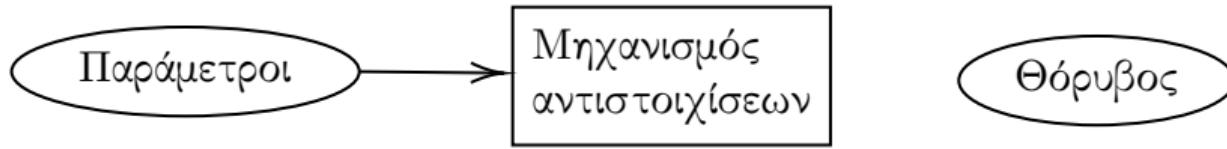
Πηγές:

Α: Igor Bogoslavskyi, <https://nbviewer.org/github/niosus/notebooks/blob/master/icp.ipynb>

Β: A. Censi, "An ICP variant using a point-to-line metric," 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, 2008, pp. 19-25

Γ: K. Koide, M. Yokozuka, S. Oishi and A. Banno, "Voxelized GICP for Fast and Accurate 3D Point Cloud Registration," 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Xi'an, China, 2021, pp. 11054-11059

Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης



Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: θόρυβος (ατελείς αντιστοιχίσεις)

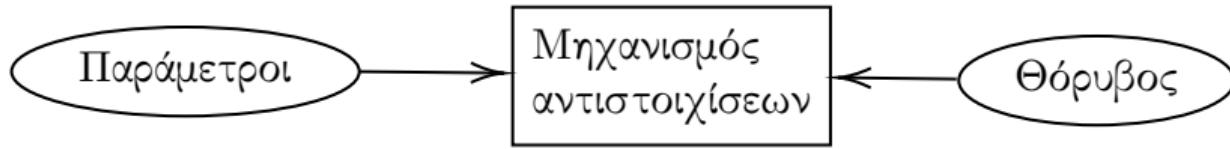
$$\sigma_R = 0.0 \mid \sigma_R = 0.1 \text{ m}$$

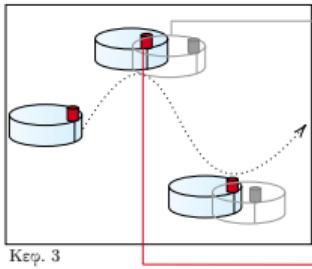
Χώρος αντιστοιχίσεων

Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: απούσες αντιστοιχίσεις (outliers)

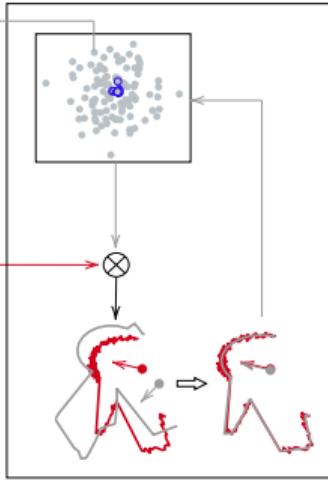
Ευθυγράμμιση σάρωσης \mathcal{S}_k ως προς \mathcal{S}_{k+1}

Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης





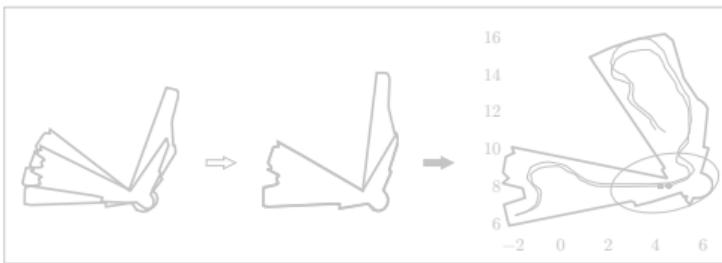
Παρατήρηση
σφάλματων
εκτίμησης
στάσης



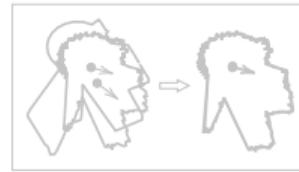
Παρατηρήσεις
ευαισθησίας λύσης
σε παραμέτρους
και θόρυβο
λόγω αντιστοιχίσεων



Λύσεις εκτελούμενες
σε πραγματικό χρόνο



Γενίκευση χρήσης
ερήμην χάρτη



Απόπειρα ευθυγράμμισης sm2 δίχως αντιστοιχίσεις

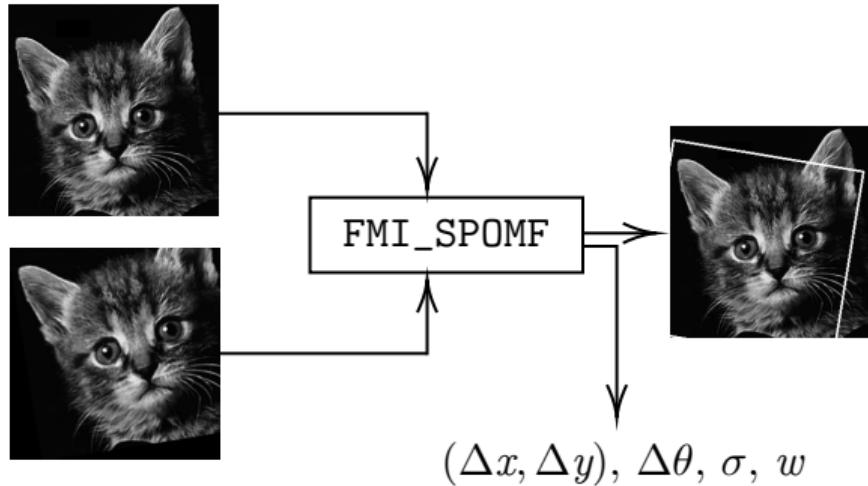
- Αναγκαία συνθήκη: $\lambda = 2\pi \text{ rad}$
- Παραδοχή: $t_{\text{exec}} \not\prec t_{\text{max}}$

Απόπειρα ευθυγράμμισης sm2 δίχως αντιστοιχίσεις

Προβλήματα:

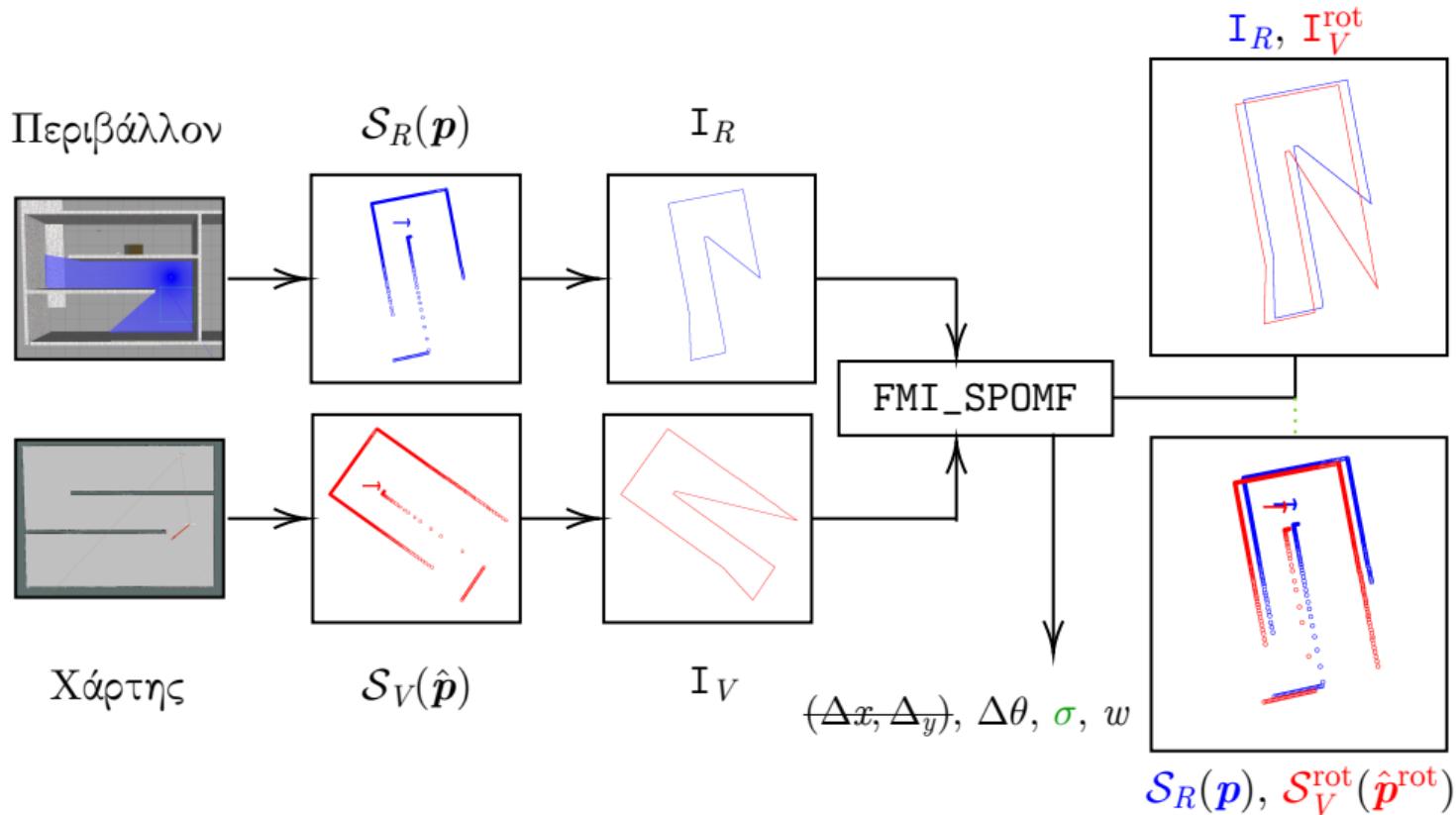
- Απούσα βιβλιογραφία στο συναφές πεδίο
- Εύρεση μεθόδου{ου,ων} εκτίμησης θέσης και προσανατολισμού

Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων;
FMI_SPOMF [1]: Fourier-Mellin Invariant (descriptor using) Symmetric Phase-Only Matched Filtering

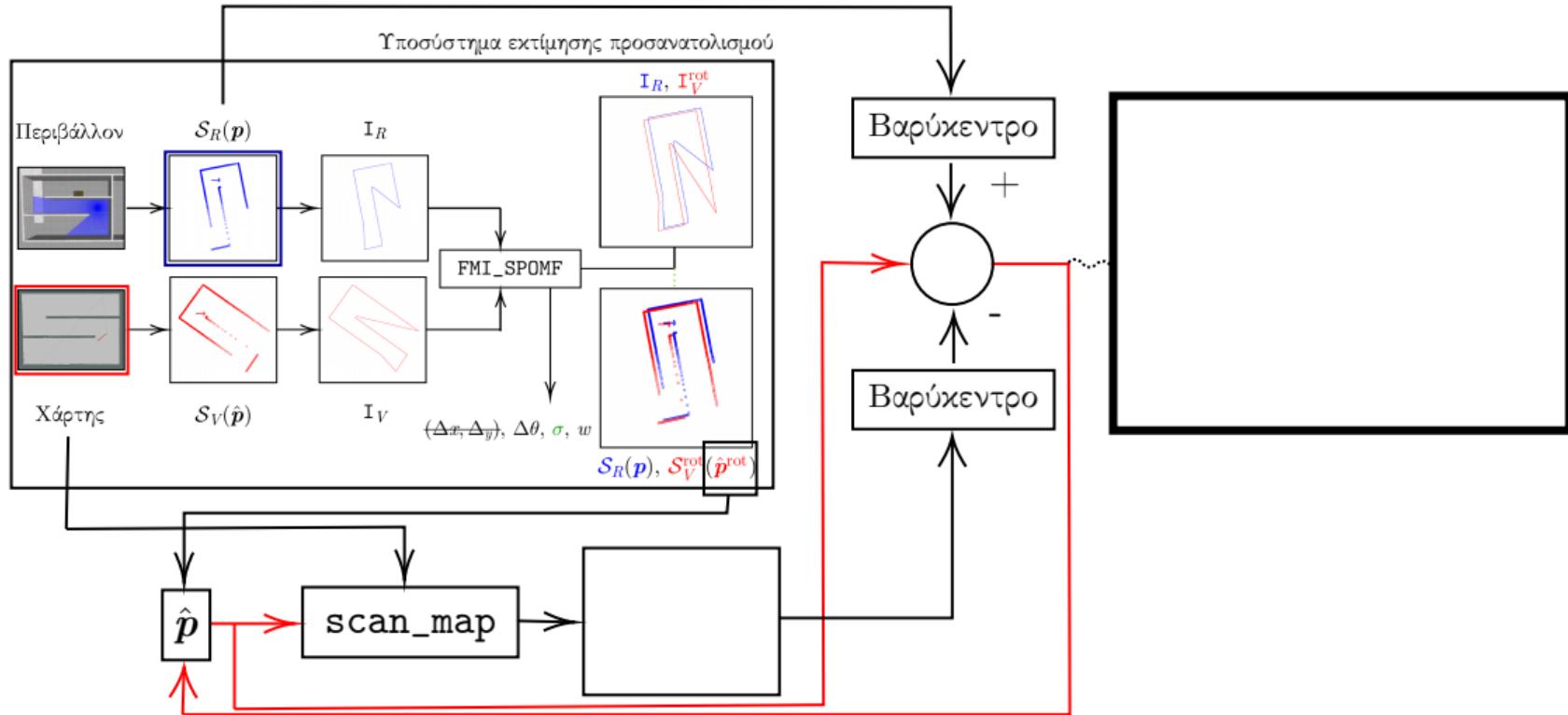


[1]: Qin-Sheng Chen, M. Deffrise and F. Deconinck, "Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, no. 12, pp. 1156-1168, Dec. 1994

Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων



Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

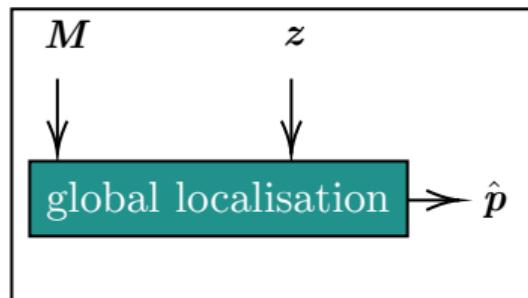
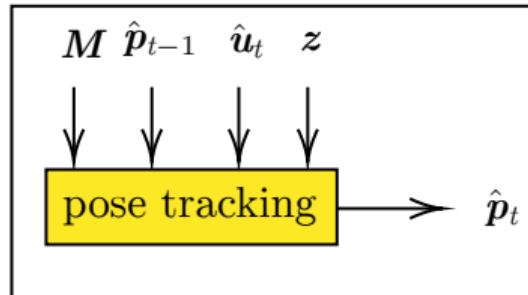
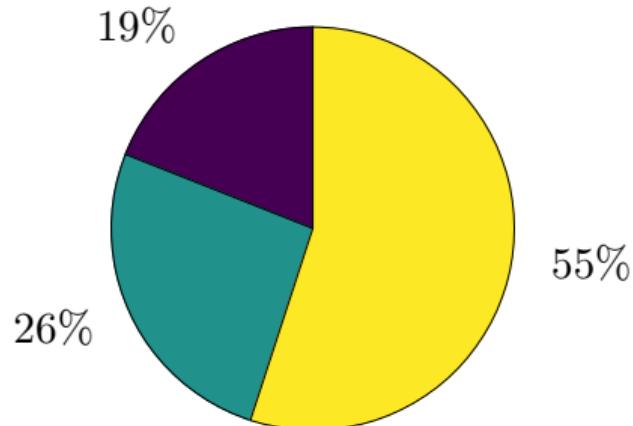


$$t_{\text{exec}}^{\text{FMI-SPOMF}} > t_{\text{exec}}^{\text{pose tracking}}$$
$$\Rightarrow$$

sm2 προς επίλυση του προβλήματος Global Localisation

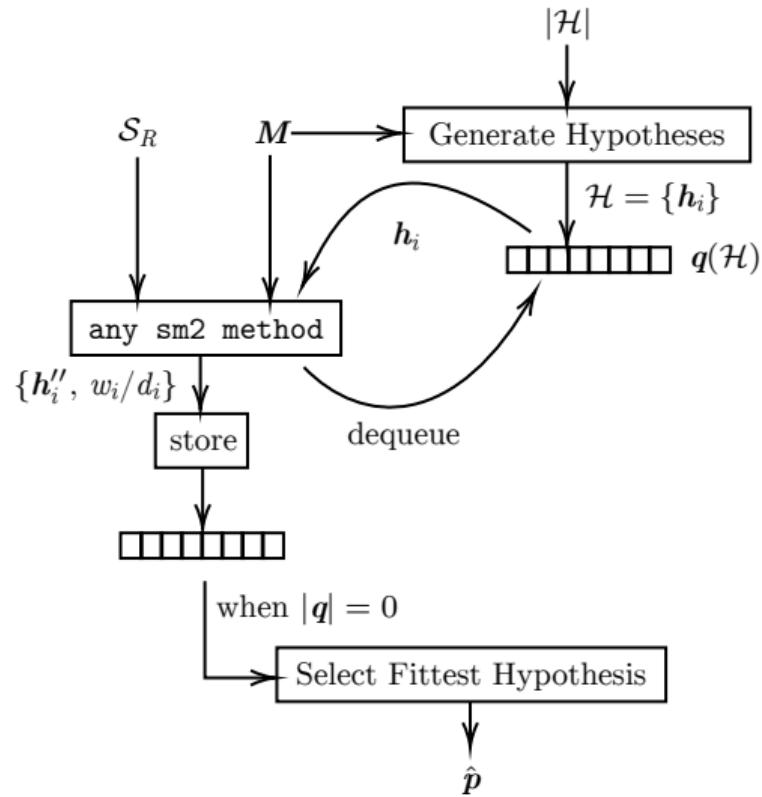
Global localisation: Το δεύτερο μεγαλύτερο πρόβλημα ρομποτικής κινητής βάσης

- Kidnapped robot
- Global localisation
- Pose tracking

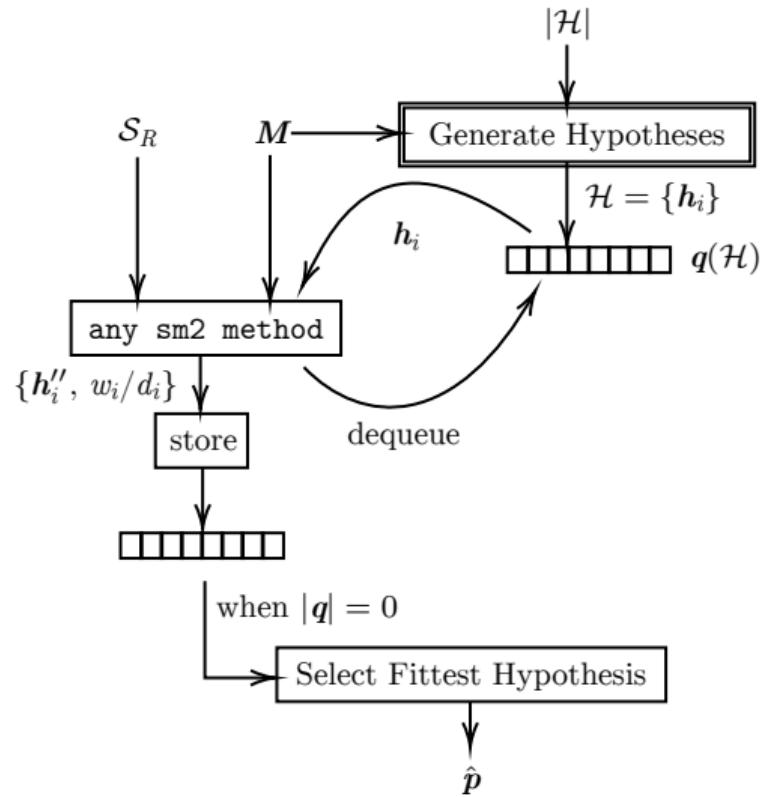


Σχήμα: Κατάτμηση του προβλήματος της εκτίμησης στάσης σε κατηγορίες και τα ποσοστά έρευνας σε αυτές. Πηγή: Prabin Kumar Panigrahi and Sukant Kishoro Bisoy. “Localization strategies for autonomous mobile robots: A review”, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, Mar. 2021.

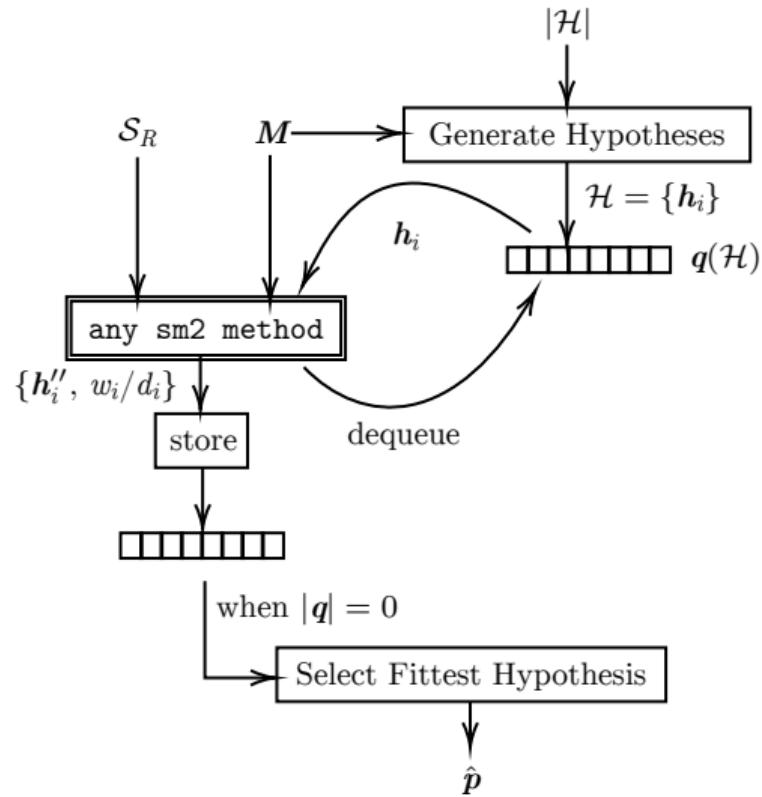
Global localisation: επιλύσιμο μέσω sm2



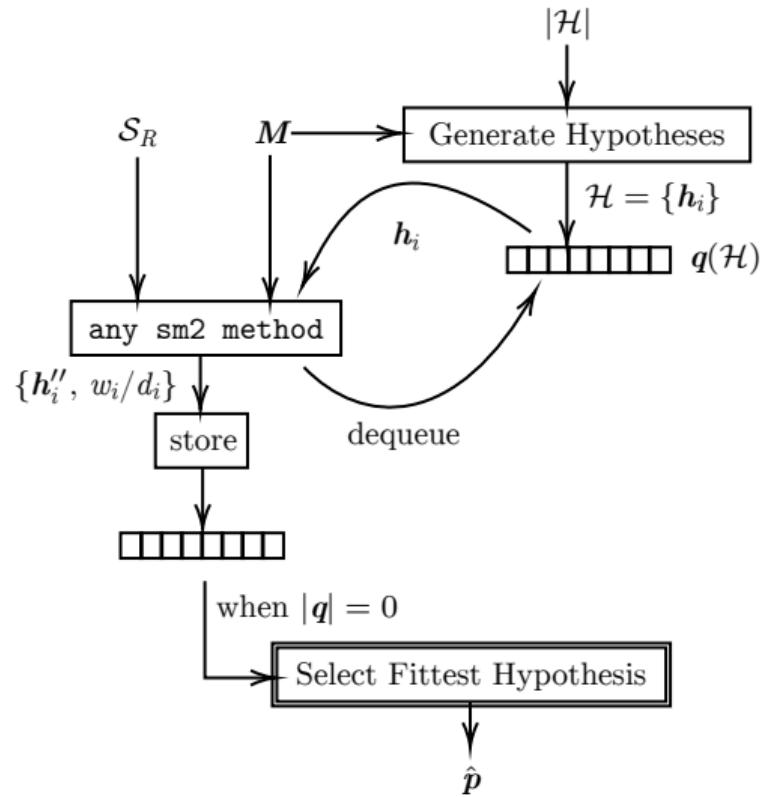
Global localisation: επιλύσιμο μέσω sm2



Global localisation: επιλύσιμο μέσω sm2



Global localisation: επιλύσιμο μέσω sm2



Πειραματική διαδικασία

- 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



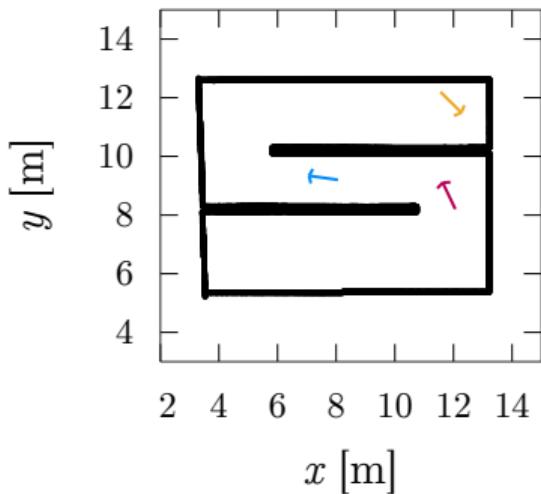
Απόσταση d [mm]	Μέσο σφάλμα [mm]
50-5000	$\leq \pm 60$
5000-20000	$\leq \pm 40$
20000-30000	$\leq \pm 100$

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

Πειραματική διαδικασία

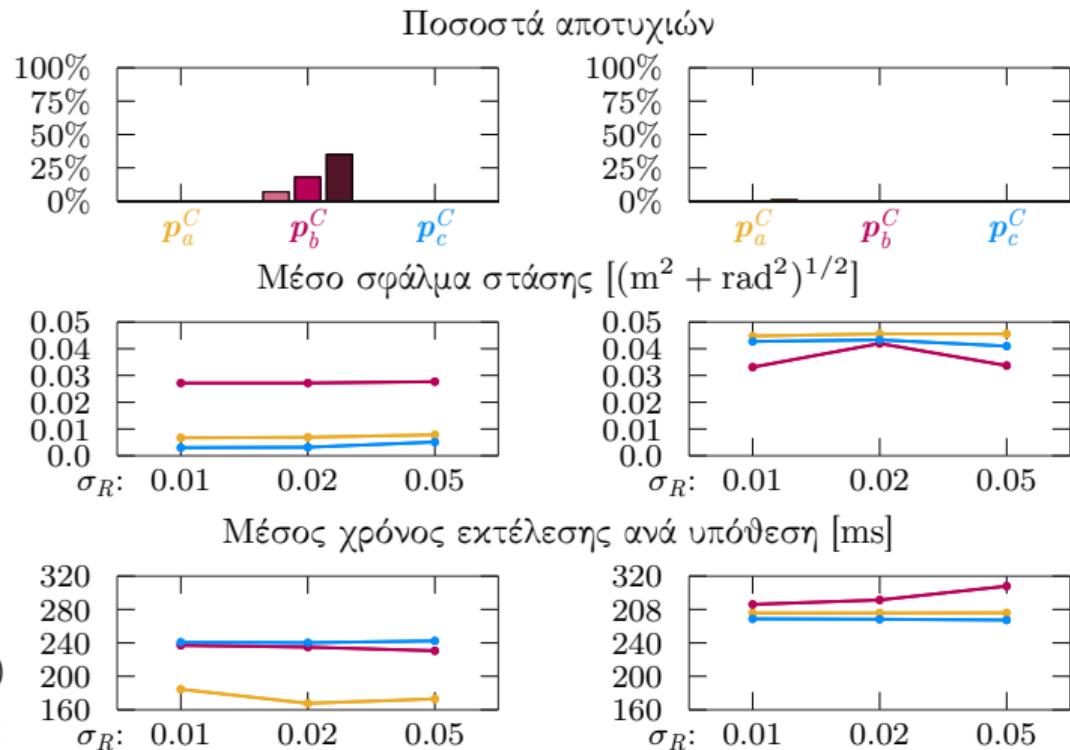
Καταγραφή σφάλματος εκτίμησης θέσης \hat{l} και προσανατολισμού $\hat{\theta}$ τελικής στάσης \hat{p}
inliers / επιτυχημένη εκτίμηση στάσης: $\hat{l} < 1.0$ m
καθώς
global localisation \Rightarrow (probabilistic) pose tracking

Πειραματικά αποτελέσματα: CORRIDOR (sim; 1/6)



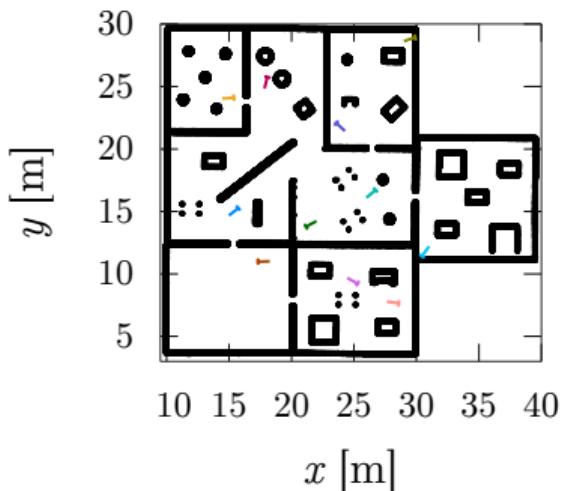
$|\mathcal{H}_C| = 100$ υποθέσεις (1.1 υπ./1.0 m²)
 $100 \times \{p_i\} = 300$ απόπειρες εκτίμησης

Μέσω PLICP



Πειραματικά αποτελέσματα: HOME (sim; 2/6)

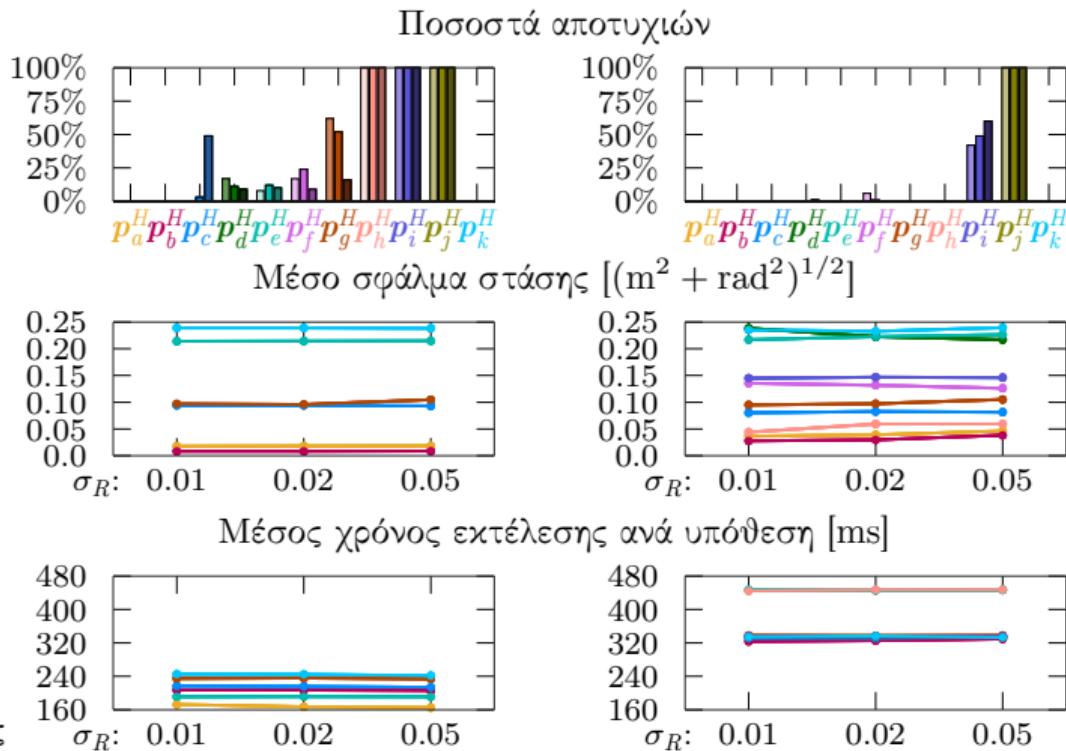
Mέσω PLICP



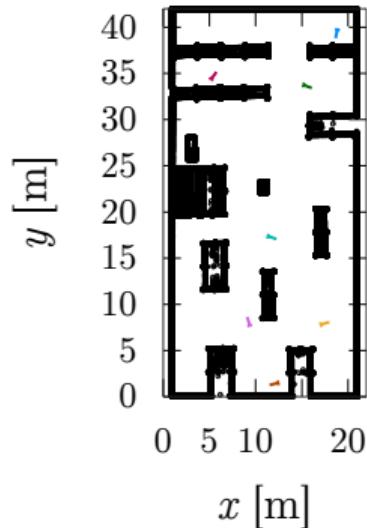
$|\mathcal{H}_H| = 200$ υποθέσεις (1 υπ./3.0 m²)

$100 \times \{p_i\} = 1100$ απόπειρες εκτίμησης

Mέσω FMI-SPOMF



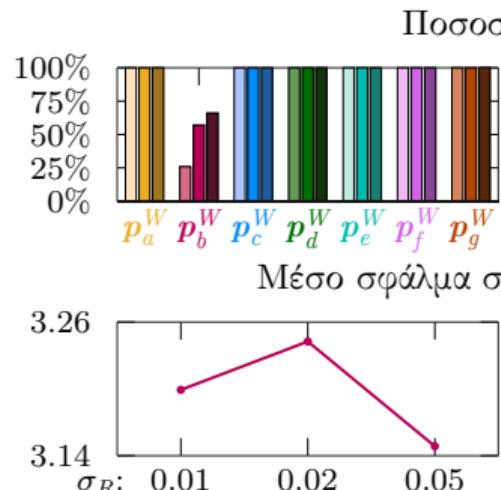
Πειραματικά αποτελέσματα: WAREHOUSE (sim; 3/6)



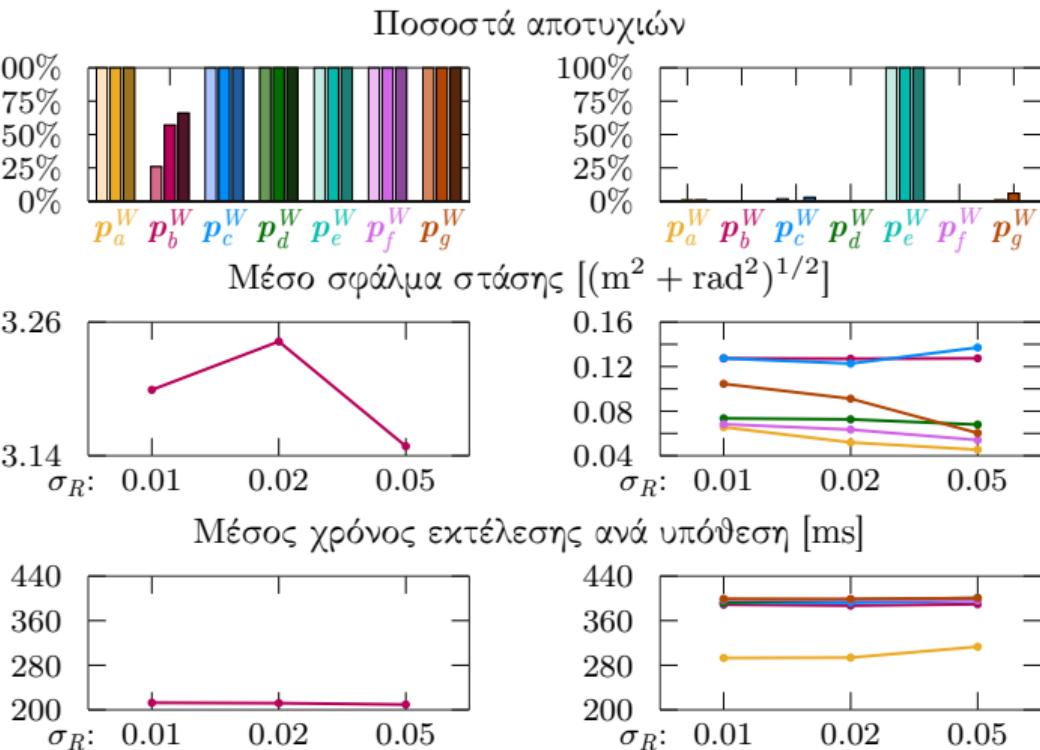
$$|\mathcal{H}_W| = 200 \text{ υποθέσεις} \quad (1 \text{ υπ.}/4.0 \text{ m}^2)$$

$$100 \times \{p_i\} = 700 \text{ απόπειρες εκτίμησης}$$

Μέσω PLICP

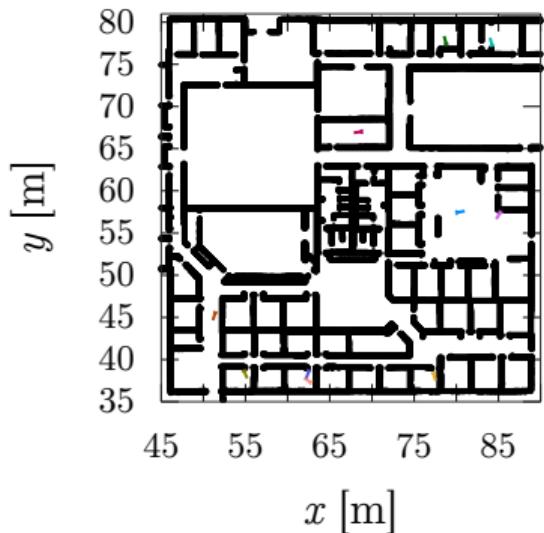


Μέσω FMI-SPOMF



Πειραματικά αποτελέσματα: WILLOWGARAGE (sim; 4/6)

Μέσω PLICP

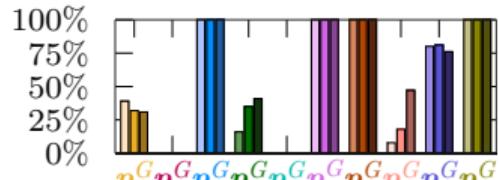


$$|\mathcal{H}_G| = 500 \text{ υποθέσεις} \quad (1 \text{ υπ.}/4.0 \text{ m}^2)$$

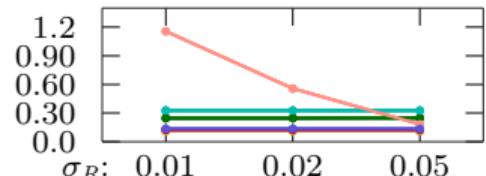
$$100 \times \{p_i\} = 1000 \text{ απόπειρες εκτίμησης}$$

Μέσω FMI-SPOMF

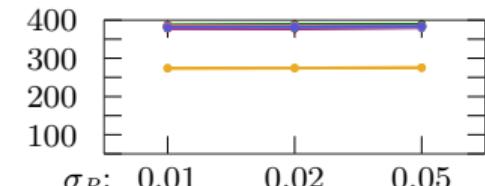
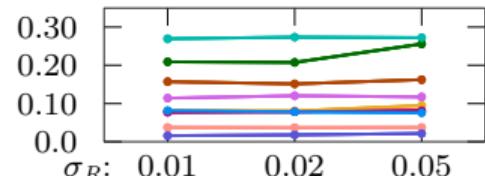
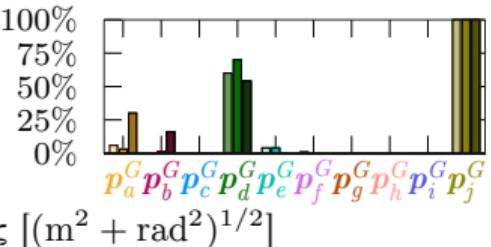
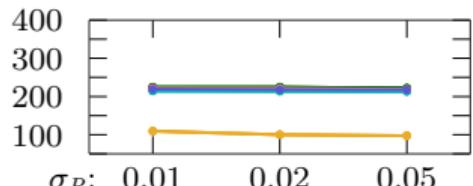
Ποσοστά αποτυχιών



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

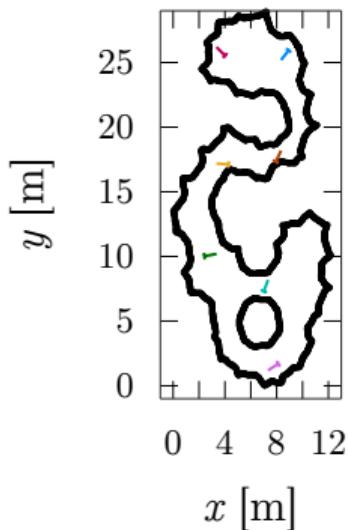


Μέσος χρόνος εκτέλεσης ανά υπόθεση [ms]



Πειραματικά αποτελέσματα: LANDFILL (sim; 5/6)

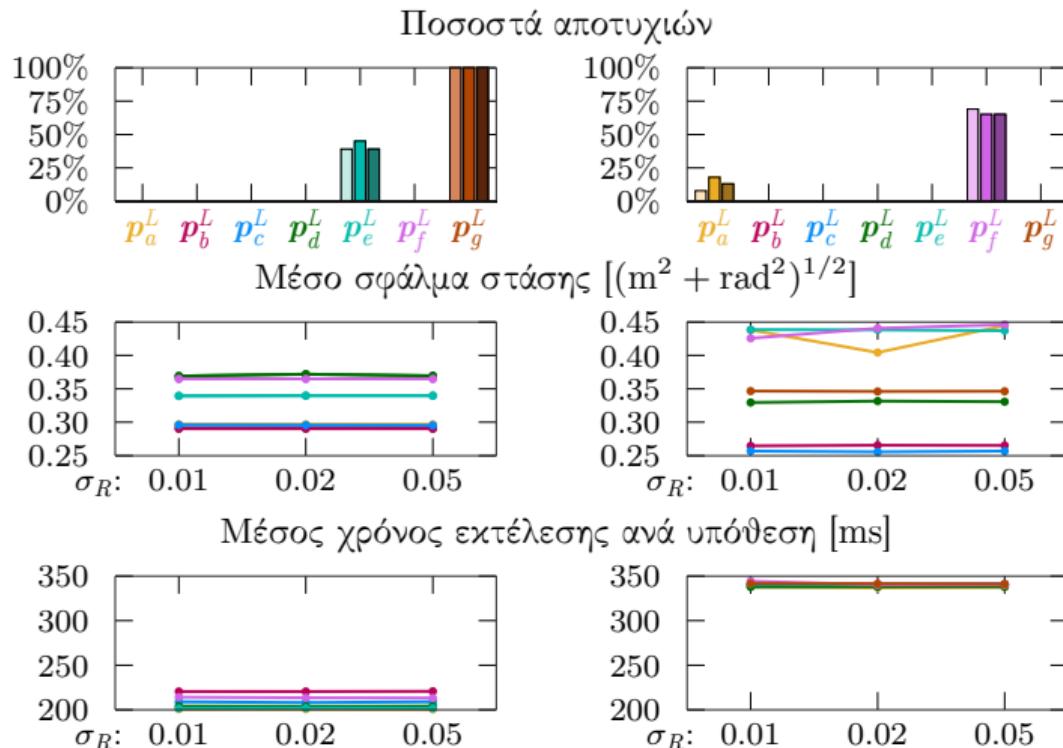
Mέσω PLICP



$|\mathcal{H}_L| = 100$ υποθέσεις ($1 \text{ υπ.}/2.4 \text{ m}^2$)

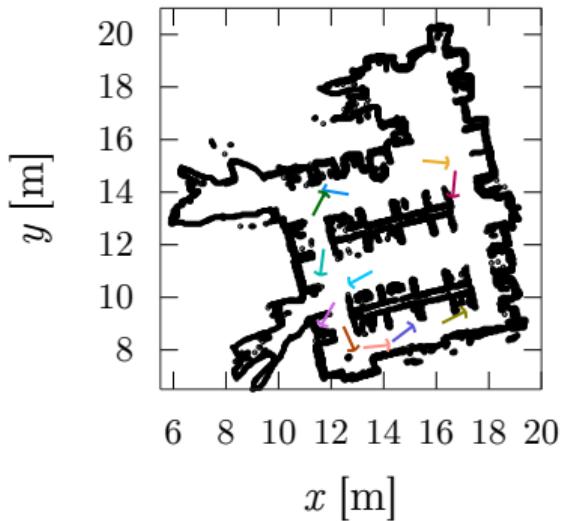
$100 \times \{p_i\} = 700$ απόπειρες εκτίμησης

Mέσω FMI-SPOMF



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

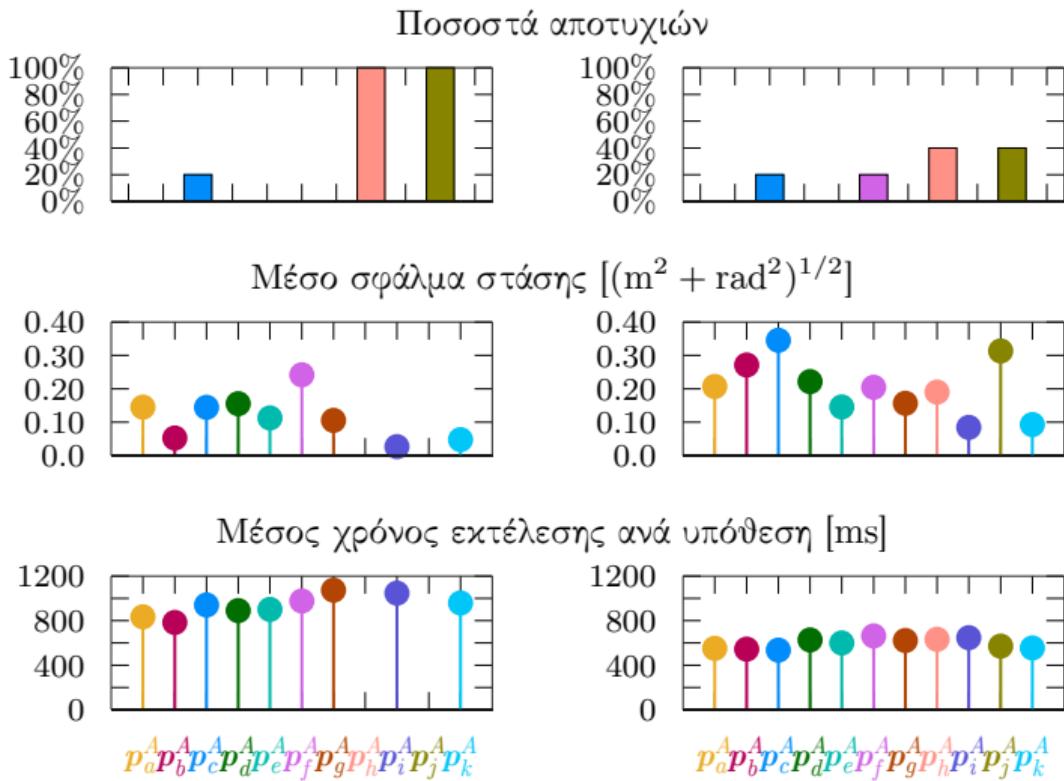
Μέσω PLICP



$$|\mathcal{H}_A| = 100 \text{ υποθέσεις} \quad (1 \text{ υπ.}/1.0 \text{ m}^2)$$

$$5 \times \{p_i\} = 55 \text{ απόπειρες εκτίμησης}$$

Μέσω FMI-SPOMF



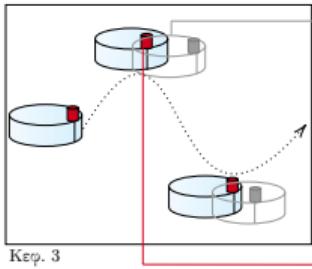
Συμπεράσματα πειραμάτων

- 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
- $$\frac{dt_{\text{exec}}^{\text{FMI-SPOMF}}}{d|\mathcal{S}|} < \frac{dt_{\text{exec}}^{\text{PLICP}}}{d|\mathcal{S}|}$$
- Σφάλματα εκτίμησης sm2: μέσω FMI-SPOMF \sim μέσω μεθόδων με αντιστοιχίσεις

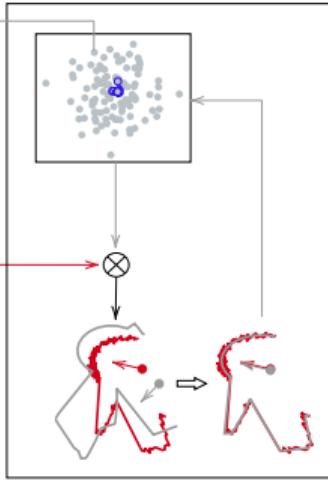
Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

Ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές σαρώσεις πανοραμικού lidar
χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων

(αλλά με χρόνο εκτέλεσης ακατάλληλο για γενίκευση σε pose tracking)



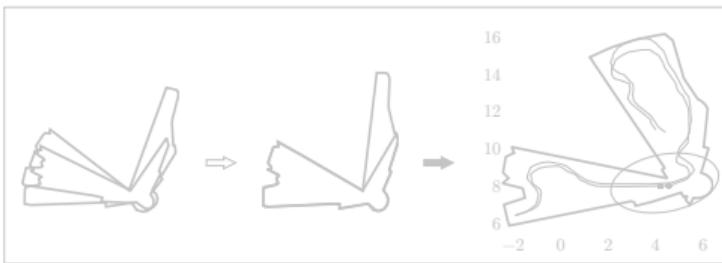
Παρατήρηση
σφάλματων
εκτίμησης
στάσης



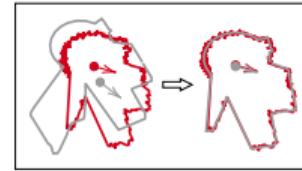
Παρατηρήσεις
ευαισθησίας λύσης
σε παραμέτρους
και θόρυβο
λόγω αντιστοιχίσεων



Λύσεις εκτελούμενες
σε πραγματικό χρόνο



Γενίκευση χρήσης
ερήμην χάρτη



Ευθυγράμμιση sm2 δίχως αντιστοιχίσεις, υπό χρονικούς περιορισμούς
Πρόβλημα:

Κατασκευή h : sm2 χωρίς αντιστοιχίσεις, δεδομένων:

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

τέτοιας ώστε

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

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

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

Αποσύνθεση προβλήματος

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Επίλοιπο σφάλμα:

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

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

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

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

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

Επίλοιπο σφάλμα:

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

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

Έστω

- $\mathbf{P}_R, \mathbf{P}_V$ οι προβολές των $\mathcal{S}_R, \mathcal{S}_V$ στο οριζόντιο επίπεδο
- $\mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^\top = \text{svd}(\mathbf{P}_R \mathbf{P}_V^\top)$
- $\mathbf{S} = \text{diag}(1, \det(\mathbf{U} \mathbf{V}))$

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

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^\top = \arg \min_{\mathbf{R}} \|\mathbf{P}_R - \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_V\|_F^2$$

εάν θ γνωστή [1].

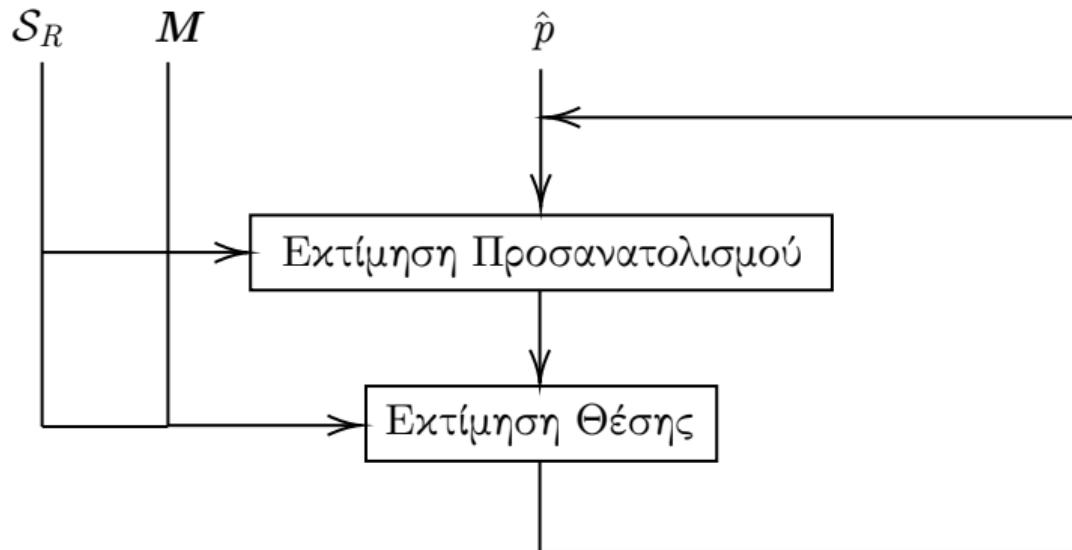
Όμως θ θεμελιωδώς άγνωστη \Rightarrow περιστροφή \mathbf{P}_V κατά $k \cdot \gamma$, $0 \leq k < N_s$.

Τότε εάν $\hat{\theta}' = \hat{\theta} + k^* \gamma$, $k^* = \arg \min_k \text{tr}(\mathbf{DS})$, το επιλοιπο σφάλμα:

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

[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: $\phi = f(N_s)$

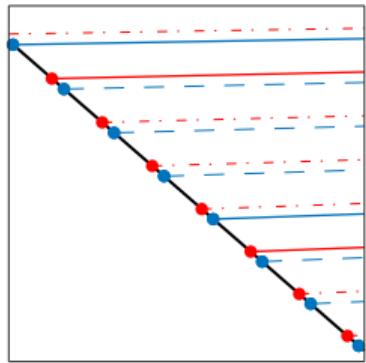


Υπερδειγματοληψία πραγματικής σάρωσης σε γραμμικές περιοχές ✓

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

Υπερδειγματοληψία πραγματικής σάρωσης σε μη γραμμικές περιοχές x

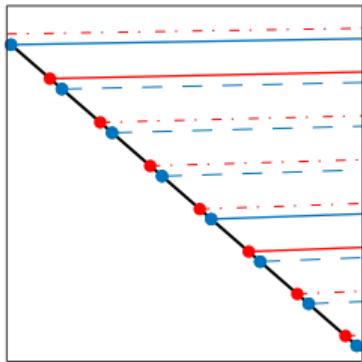
$$\mathcal{S}_R^{-\text{-interp}}(\theta) \quad \mathcal{S}_V^{-\text{-interp}}(\hat{\theta})$$



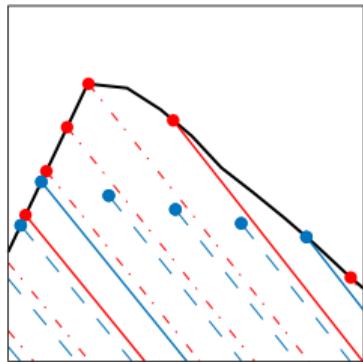
$$\mathcal{S}_R^{-\text{-interp}}(\theta) \quad \mathcal{S}_V^{-\text{-interp}}(\hat{\theta})$$

Λύση: Υπερδειγματοληψία του χάρτη \Rightarrow παραγωγή 2^ν εκτιμήσεων

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



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



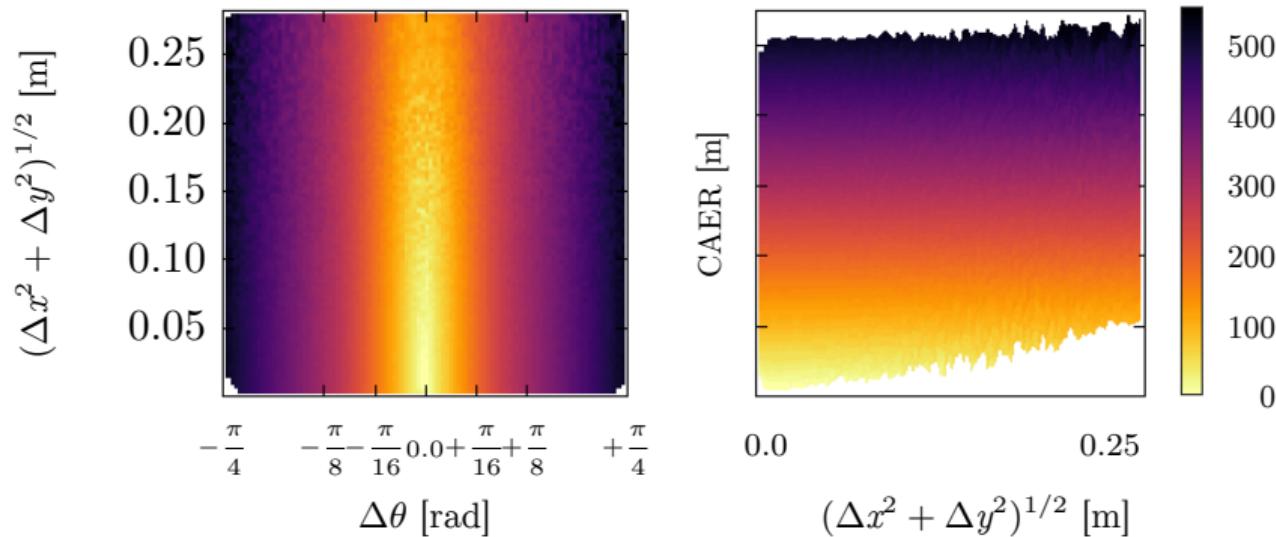
$$\mathcal{S}_R(\theta) \quad \mathcal{S}_V(\hat{\theta} + \{0 \dots 2^{\nu_{\max}} - 1\} \cdot \frac{\gamma}{2^{\nu_{\max}}})$$

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

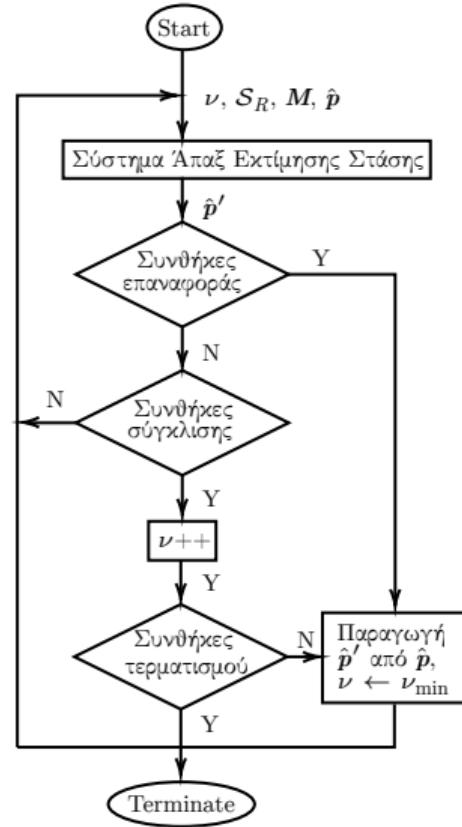
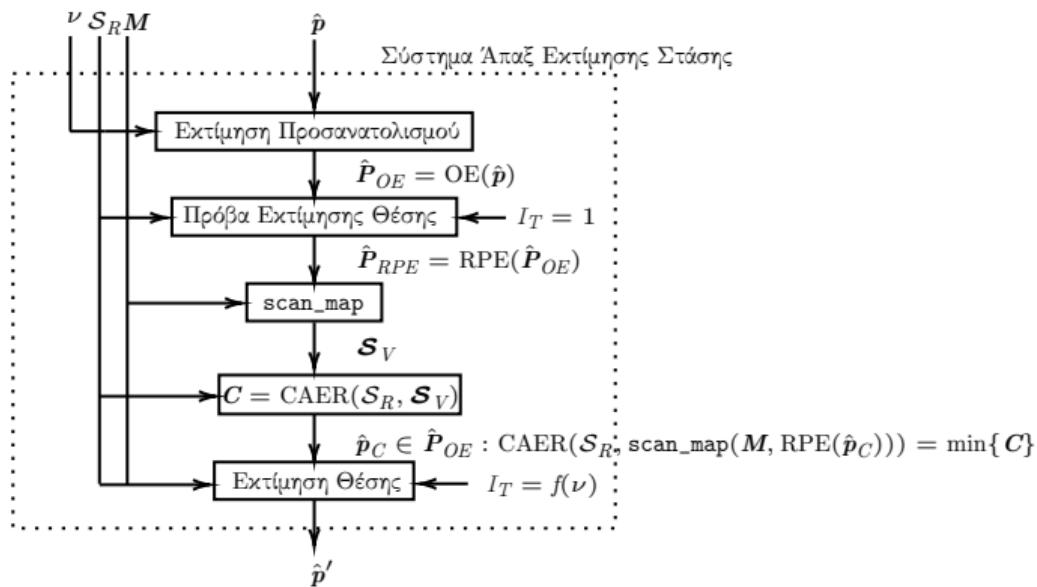
Ιεράρχηση σφαλμάτων εκτιμήσεων: η μετρική CAER*

* Cumulative Absolute Error per Ray

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



Το σύστημα fsm2



Πειραματική διαδικασία

Στόχοι:

$$(\Sigma 1) \quad \|\hat{p}' - p\| < \|\hat{p} - p\|$$

$$(\Sigma 2) \quad f_{\text{exec}}^{\text{fsm2}} \geq f_{\text{exec}}^{\text{pf}}$$

Πέντε benchmark περιβάλλοντα δοκιμής

Σύνολο δεδομένων D	Πληθυκότητα
aces	7373
fr079	4933
intel	13630
mit_csail	1987
mit_killian	17479
<hr/>	
$\sum D = 45402$	

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

Πειραματική διαδικασία

Στόχοι:

$$(\Sigma 1) \quad \|\hat{p}' - p\| < \|\hat{p} - p\|$$

$$(\Sigma 2) \quad f_{\text{exec}}^{\text{fsm2}} \geq f_{\text{exec}}^{\text{pf}}$$

Πέντε benchmark περιβάλλοντα δοκιμής

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

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

Τυπική απόκλιση θορύβου μέτρησης και συντεταγμένων χάρτη

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

$$\sigma_M = \{0.0, 0.05\} \text{ [m]}$$

Παραγωγή τυχαίων αρχικών συνθηκών σφάλμάτων 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:

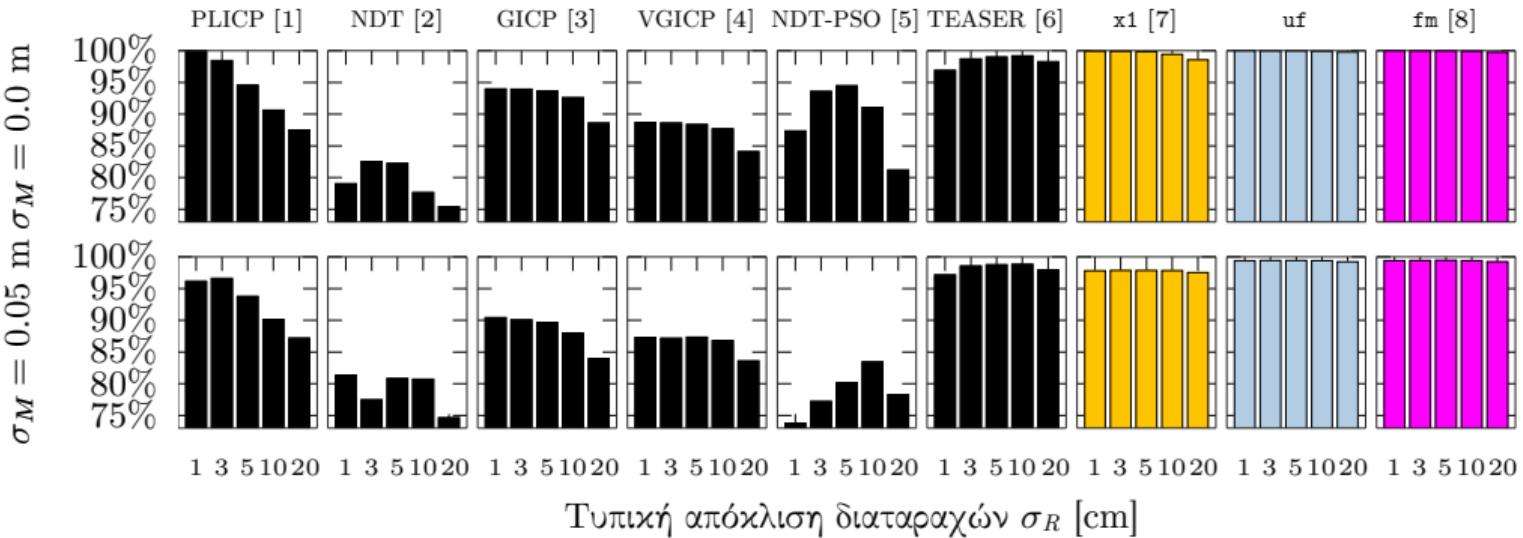
$$10 \times \sum |D| \times |\sigma_R| \times |\sigma_M| \simeq 4.5 \cdot 10^6$$

Μέγεθος σαρώσεων: $N_s = 360$

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

$$I_T = 1 + \nu$$

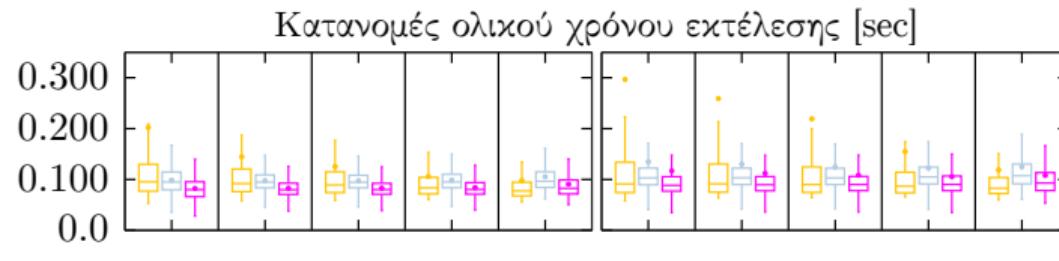
Ποσοστά επίτευξης στόχου Σ1



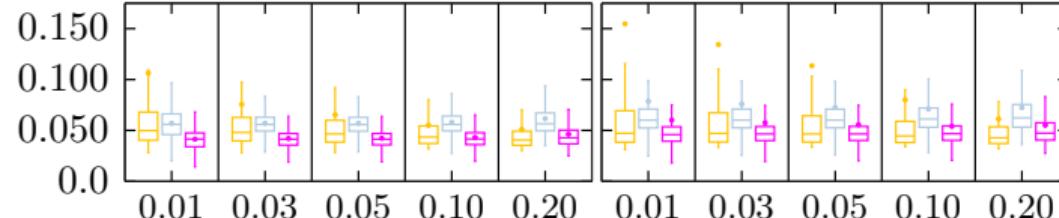
- [1] A. Censi, “An ICP variant using a point-to-line metric”, *ICRA* 2008
- [2] P. Biber, W. Strasser, “The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching”, *IROS* 2003
- [3] A. Segal, D. Hähnel, S. Thrun, “Generalized-ICP”, *Robotics: Science and Systems*, 2009
- [4] K. Koide, 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 Transactions 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

—x1 —uf —fm
 $\sigma_M = 0.0 \text{ m}$ $\sigma_M = 0.05 \text{ m}$



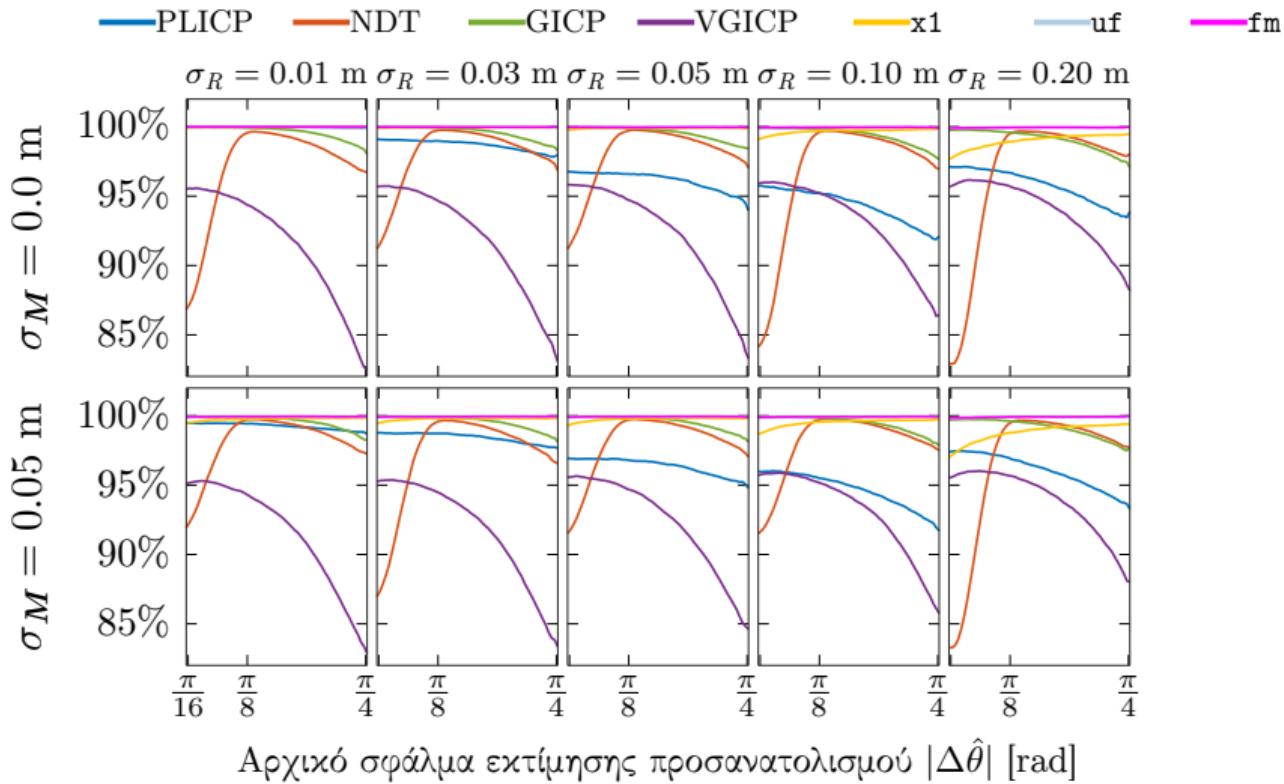
Κατανομές ολικού χρόνου εκτέλεσης (Αναγωγή σε αναπαράσταση χάρτη μέσω πλέγματος [1]) [sec]



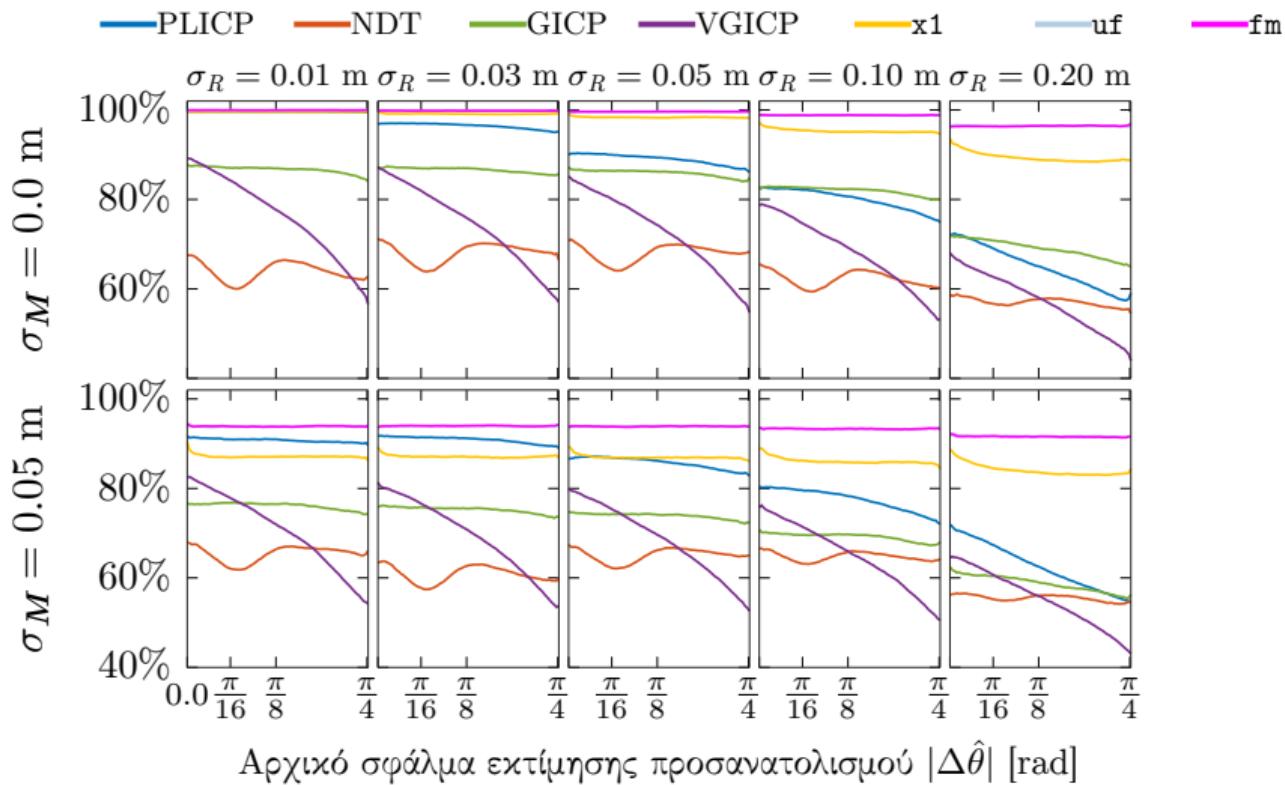
Τυπική απόκλιση διαταραχών σ_R [m]

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

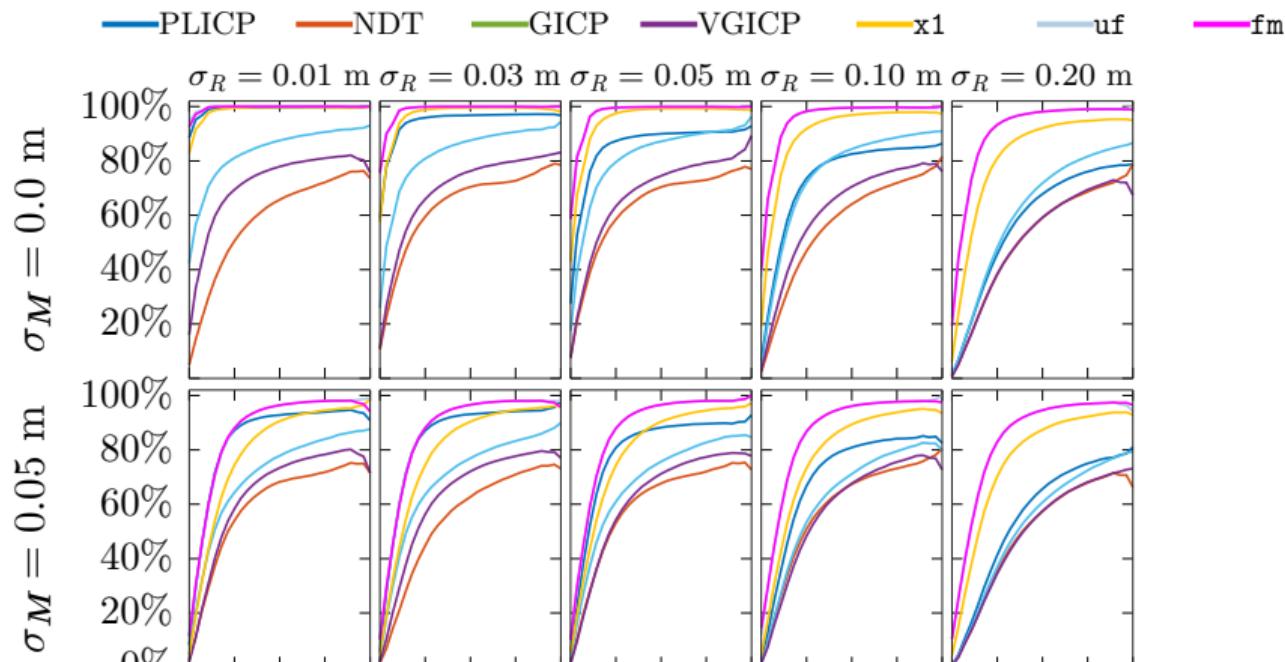
Ποσοστά επίτευξης στόχου Σ1
ως προς προσανατολισμό ανά μονάδα αρχικού σφάλματος εκτίμησης προσανατολισμού $|\Delta\hat{\theta}|$



Ποσοστά επίτευξης στόχου Σ1
ως προς ψέση ανά μονάδα αρχικού σφάλματος εκτίμησης προσανατολισμού $|\Delta\hat{\theta}|$

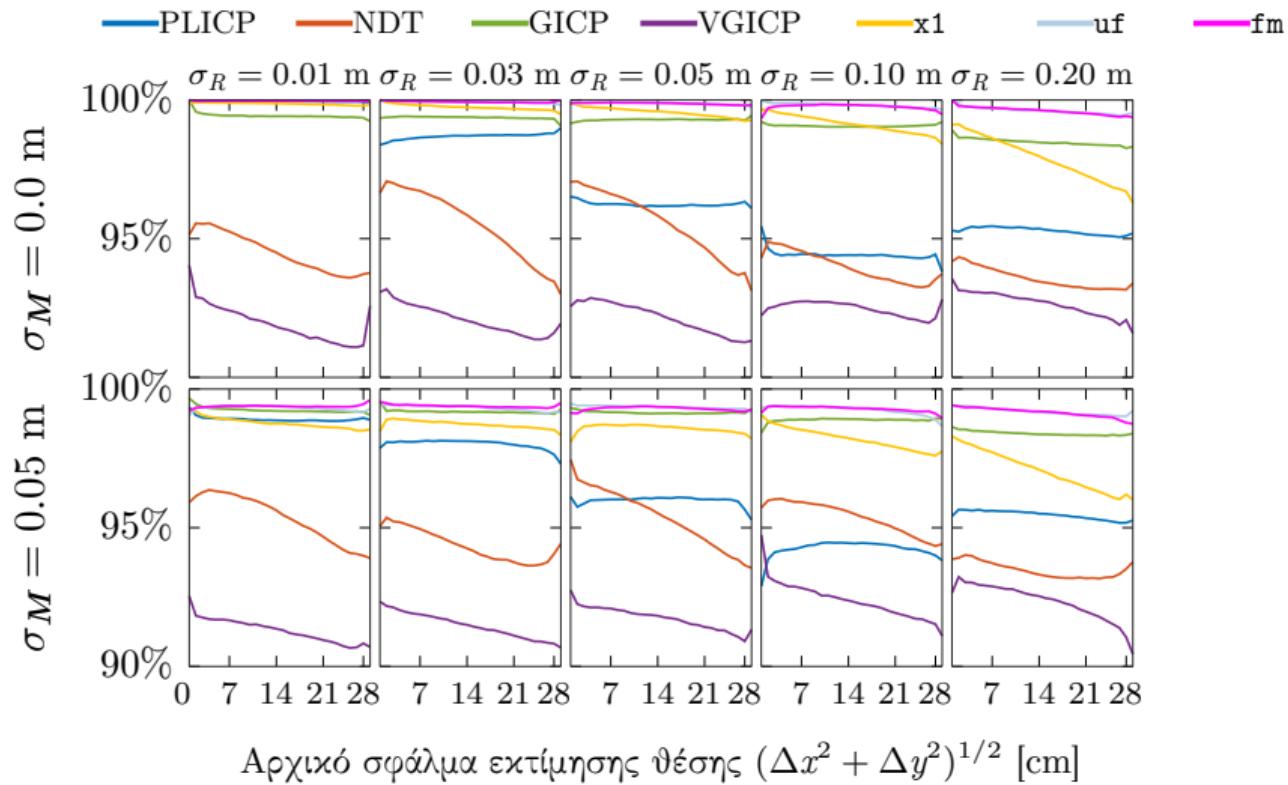


Ποσοστά επίτευξης στόχου Σ1
ως προς θέση ανά μονάδα αρχικού σφάλματος εκτίμησης θέσης $(\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}$



Αρχικό σφάλμα εκτίμησης θέσης $(\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}$ [cm]

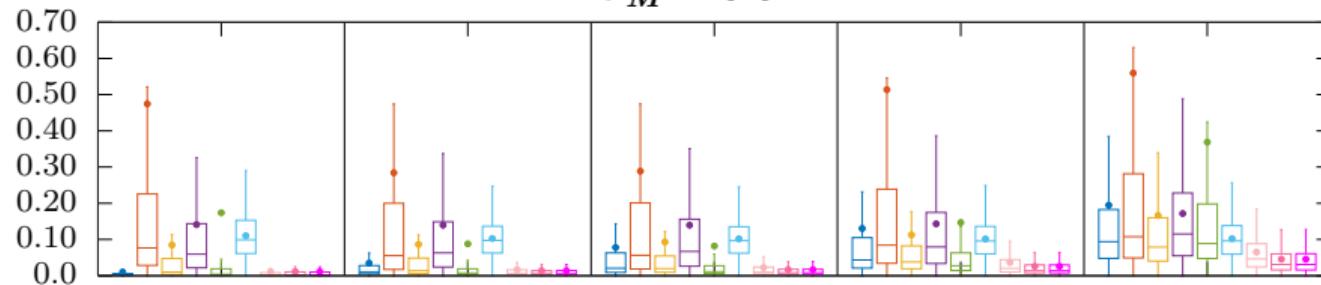
Ποσοστά επίτευξης στόχου Σ1
ως προς προσανατολισμό ανά μονάδα αρχικού σφάλματος εκτίμησης θέσης $(\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}$



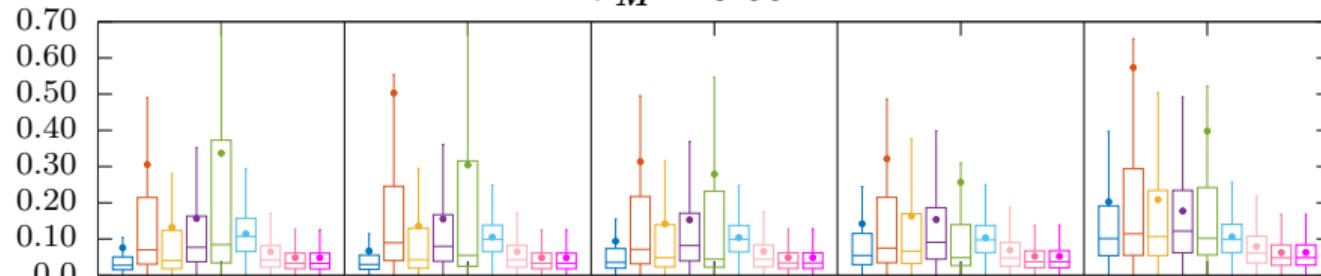
Κατανομές σφαλμάτων θέσης [m]

— PLICP — NDT — GICP — VGICP — NDT-PSO — TEASER — x1 — uf — fm

$\sigma_M = 0.0 \text{ m}$



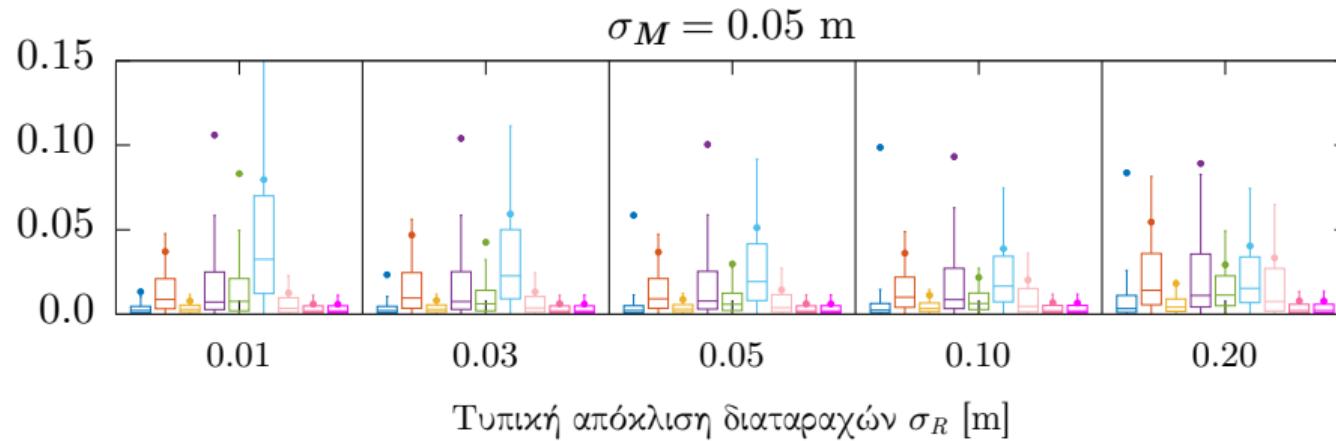
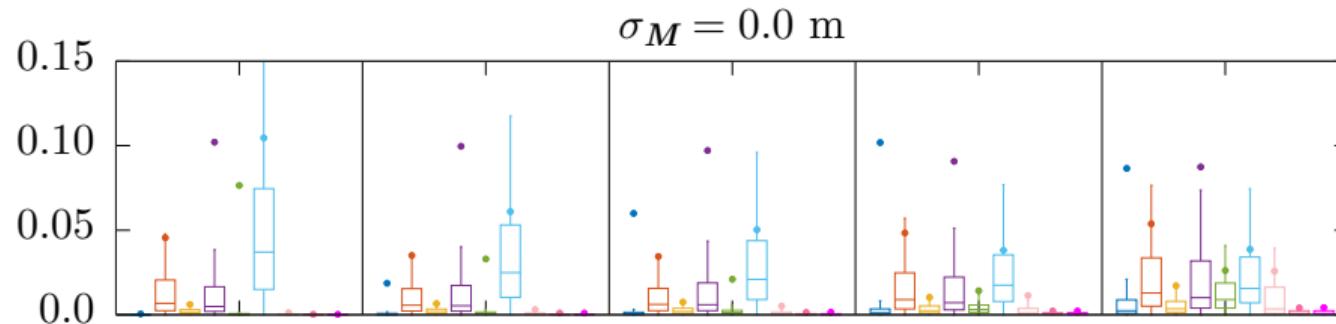
$\sigma_M = 0.05 \text{ m}$



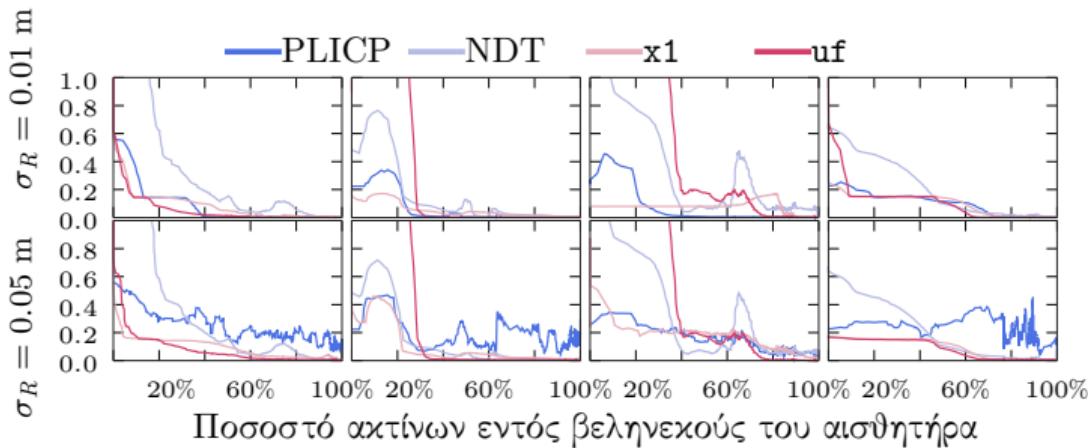
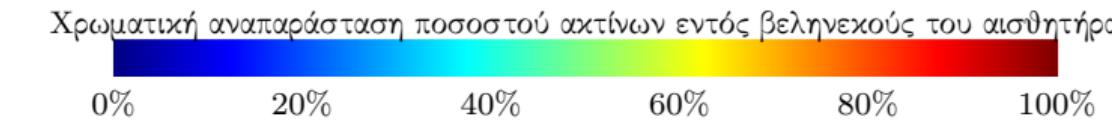
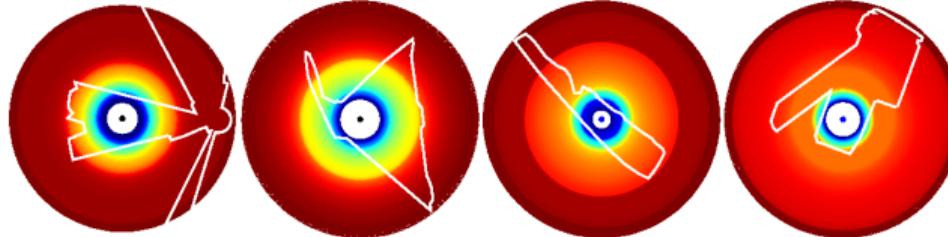
Τυπική απόκλιση διαταραχών σ_R [m]

Κατανομές σφαλμάτων προσανατολισμού [rad]

— PLICP — NDT — GICP — VGICP — NDT-PSO — TEASER — x1 — uf — fm



Σφάλμα εκτίμησης στάσης υπό περιορισμούς βεληνεκούς



Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

Τρεις μέθοδοι ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές (δισδιάστατες και πανοραμικές) σαρώσεις χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων: $\hat{\mathbf{p}}' \leftarrow h(\mathcal{S}_R, M, \hat{\mathbf{p}})$:

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

Τρεις μέθοδοι ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές (δισδιάστατες και πανοραμικές) σαρώσεις χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων: $\hat{\mathbf{p}}' \leftarrow h(\mathcal{S}_R, M, \hat{\mathbf{p}})$:

- Εύρωστη βελτίωση ακρίβειας pose tracking (\Rightarrow navigation) σε πραγματικό χρόνο:
 $f_{\text{exec}}(\textcolor{green}{h}) \geq f_{\text{exec}}(\textcolor{red}{pf})$

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

Τρεις μέθοδοι ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές (δισδιάστατες και πανοραμικές) σαρώσεις χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων: $\hat{\mathbf{p}}' \leftarrow h(\mathcal{S}_R, M, \hat{\mathbf{p}})$:

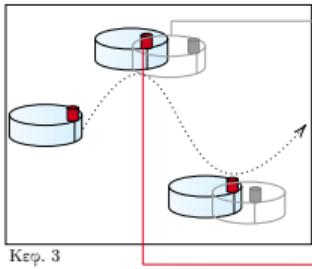
- Εύρωστη βελτίωση ακρίβειας pose tracking (\Rightarrow navigation) σε πραγματικό χρόνο:
 $f_{exec}(\textcolor{green}{h}) \geq f_{exec}(\textcolor{red}{pf})$
- Global localisation
 - ▶ Χωρίς ad hoc παραμετροποίηση (features ή μεταβλητές)
 - ▶ Ταχύτερα από FMI-SPOMF (\Rightarrow περισσότερες υποθέσεις)

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

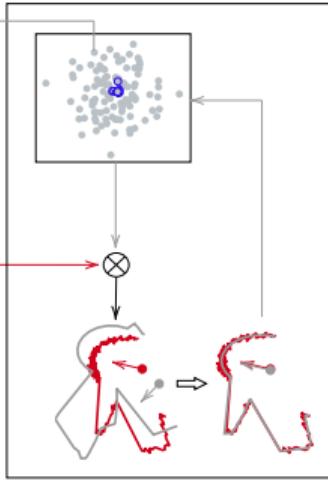
Τρεις μέθοδοι ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές (δισδιάστατες και πανοραμικές) σαρώσεις χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων: $\hat{\mathbf{p}}' \leftarrow h(\mathcal{S}_R, M, \hat{\mathbf{p}})$:

- Εύρωστη βελτίωση ακρίβειας pose tracking (\Rightarrow navigation) σε πραγματικό χρόνο:
 $f_{\text{exec}}(\textcolor{green}{h}) \geq f_{\text{exec}}(\textcolor{red}{pf})$
- Global localisation
 - ▶ Χωρίς ad hoc παραμετροποίηση (features ή μεταβλητές)
 - ▶ Ταχύτερα από FMI-SPOMF (\Rightarrow περισσότερες υποθέσεις)
- {Αναγνώριση, ευθυγράμμιση} κλειστών (convex ή non-convex) 2D σχημάτων (π.χ. computer vision [1])

[1] G. Doğan, J. Bernal, C. Hagwood, "FFT-based Alignment of 2D Closed Curves with Application to Elastic Shape Analysis", *Proceedings of the 1st International Workshop on DIFFerential Geometry in Computer Vision for Analysis of Shapes, Images and Trajectories 2015*; British Machine Vision



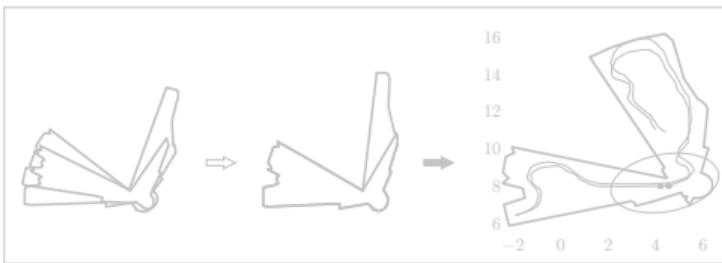
Παρατήρηση
σφάλματων
εκτίμησης
στάσης



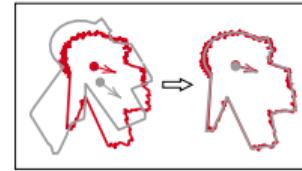
Παρατηρήσεις
ευαισθησίας λύσης
σε παραμέτρους
και θόρυβο
λόγω αντιστοιχίσεων



Λύσεις εκτελούμενες
σε πραγματικό χρόνο



Γενήκευση χρήσης
ερήμην χάρτη



Μετά το sm2 τι;

Ευθυγράμμιση sm2 δίχως αντιστοιχίσεις, υπό χρονικούς περιορισμούς

Πρόβλημα:

Κατασκευή h : sm2 χωρίς αντιστοιχίσεις, δεδομένων:

- Πραγματική σάφωση $\mathcal{S}_R(\mathbf{p})$: FOV = 360°
- Χάρτης M του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση $\hat{\mathbf{p}}(\hat{\mathbf{l}}, \hat{\theta})$
- Η εκτίμηση θέσης $\hat{\mathbf{l}} = (\hat{x}, \hat{y})$ είναι σε μία γειτονιά της $\mathbf{l} = (x, y)$ $\|\hat{\mathbf{l}}_0 - \mathbf{l}\| < \delta$

τέτοιας ώστε

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

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

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

- $\|\hat{\mathbf{l}}_{0:N} - \mathbf{l}\| < \delta$
 - $\mathcal{S}_V(\hat{\mathbf{p}}_0)$ τοπική προσέγγιση M (άρα W)
στη γειτονιά της \mathbf{p} , $\forall \hat{\mathbf{p}}_i, i = 0, 1, \dots, N$
- $M \leftarrow \mathcal{S}_V(\hat{\mathbf{p}}_0) \Rightarrow h$ λύνει sm;

Ευθυγράμμιση sm

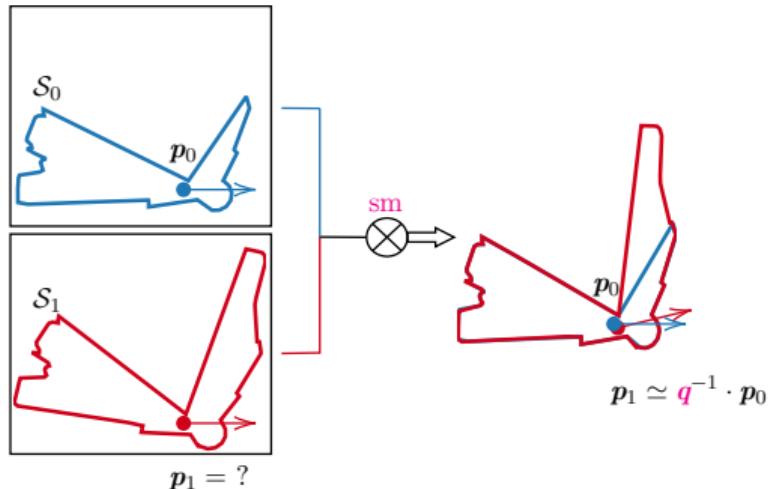
Πρόβλημα:

Κατασκευή h : sm, δεδομένων:

- Πραγματική σάρωση $\mathcal{S}_0(p_0)$: FOV = 360°
- Πραγματική σάρωση $\mathcal{S}_1(p_1)$: FOV = 360°
- p_0 γνωστή (αυθαίρετη)

τέτοιας ώστε

- $q^{-1} = h(\mathcal{S}_0, \mathcal{S}_1)$
- $p_1 = q^{-1} \cdot p_0$

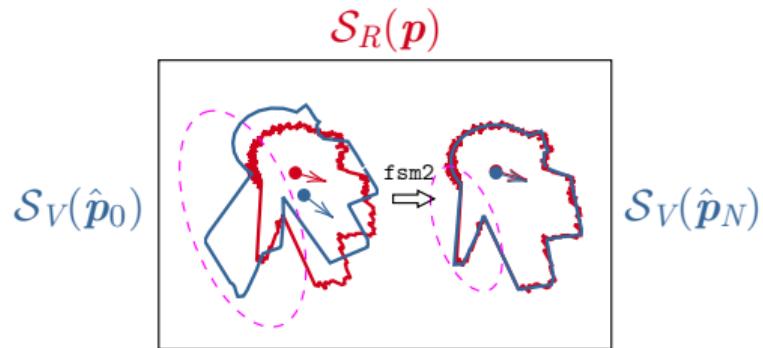


Βαρύτητα μετατροπής fsm2 σε fsm

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

Προκλήσεις μετατροπής fsm2 σε fsm

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



Πειραματική διαδικασία

Στόχοι:

$$(\Sigma 1) \quad \|\hat{q}^{\text{fsm}} - q\| \leq \|\hat{q}^{\text{sota}} - q\|$$

$$(\Sigma 2) \quad \bar{t}_{\text{exec}}^{\text{fsm}} \leq 50.0 \text{ ms}$$

Πέντε benchmark περιβάλλοντα δοκιμής

Σύνολο δεδομένων D	Πληθυκότητα
aces	7373
fr079	4933
intel	13630
mit_csail	1987
mit_killian	17479
<hr/>	
$\sum D = 45402$	

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

Πειραματική διαδικασία

Στόχοι:

$$(\Sigma 1) \quad \|\hat{q}^{\text{fsm}} - q\| \leq \|\hat{q}^{\text{sota}} - q\|$$

$$(\Sigma 2) \quad \bar{t}_{\text{exec}}^{\text{fsm}} \leq 50.0 \text{ ms}$$

Πέντε benchmark περιβάλλοντα δοκιμής

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

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

Τυπική απόκλιση θορύβου μέτρησης

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

Παραγωγή τυχαίων αρχικών συνθηκών σφάλμάτων στάσης

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

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

Συντομογραφία	Διαμέρφωση (m,rad)
Δ_0	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.05, 0.035)$
Δ_1	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.10, 0.070)$
Δ_2	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.15, 0.150)$
Δ_3	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.20, 0.300)$
Δ_4	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.20, 0.560)$
Δ_5	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.20, \pi/4)$

Συνολικός αριθμός ευθυγραμμίσεων ανά μέθοδο:

$$10 \times \sum |D| \times |\sigma_R| \times |\Delta| \simeq 13.6 \cdot 10^6$$

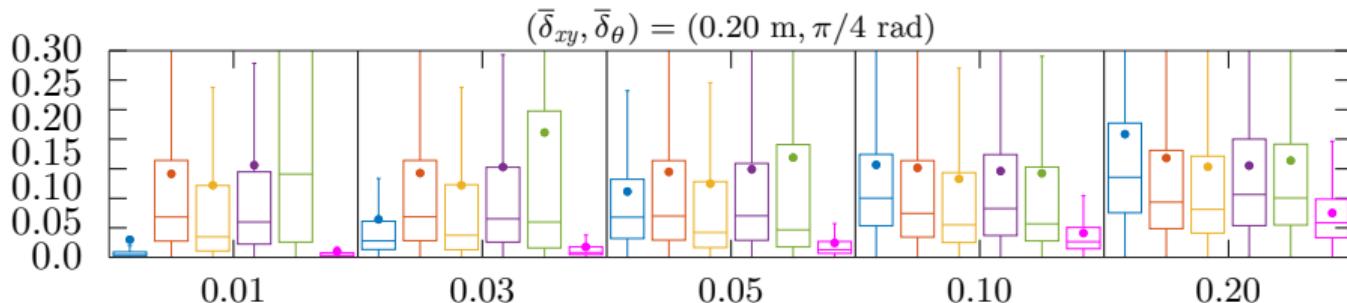
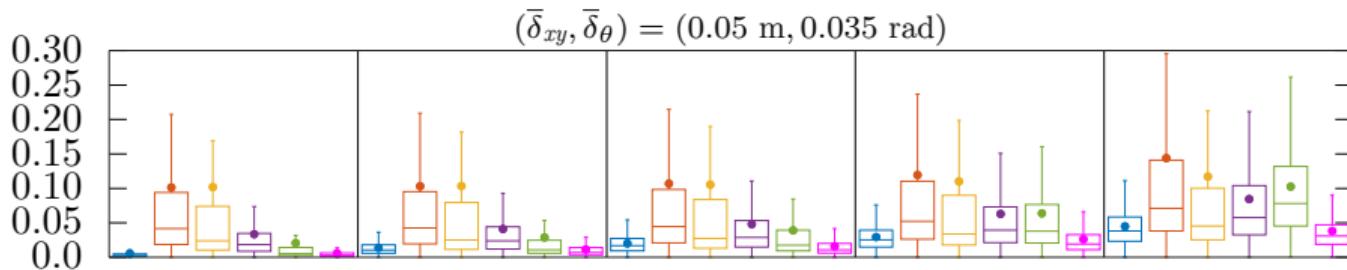
Μέγεθος σαρώσεων: $N_s = 360$

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

$$I_T = 1 + 5\nu$$

Κατανομές σφαλμάτων θέσης [m]

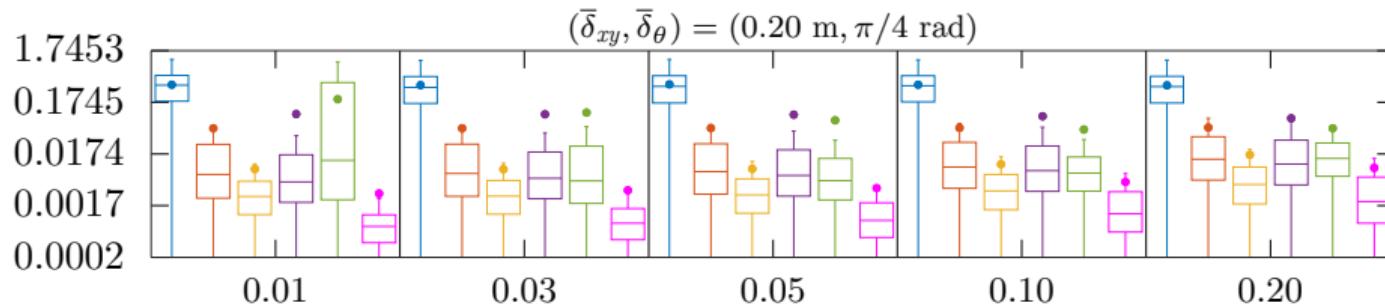
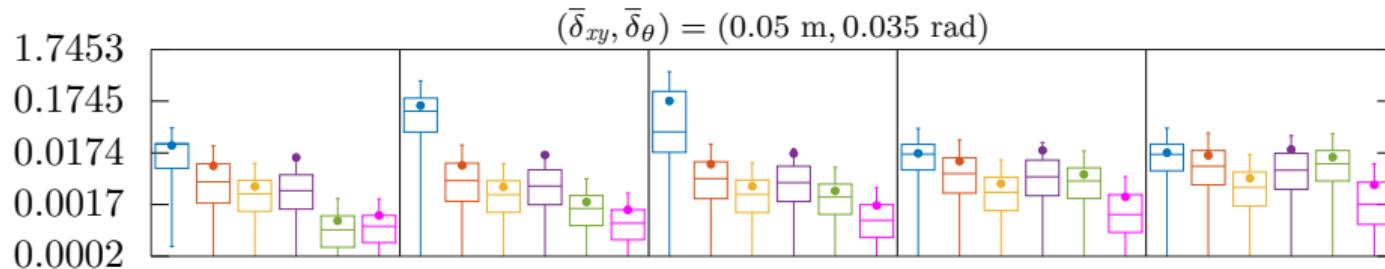
— PLICP — NDT — FastGICP — FastVGICP — NDT-PSO — fsm



Τυπική απόκλιση διαταραχών σ_R [m]

Κατανομές σφαλμάτων προσανατολισμού [rad]

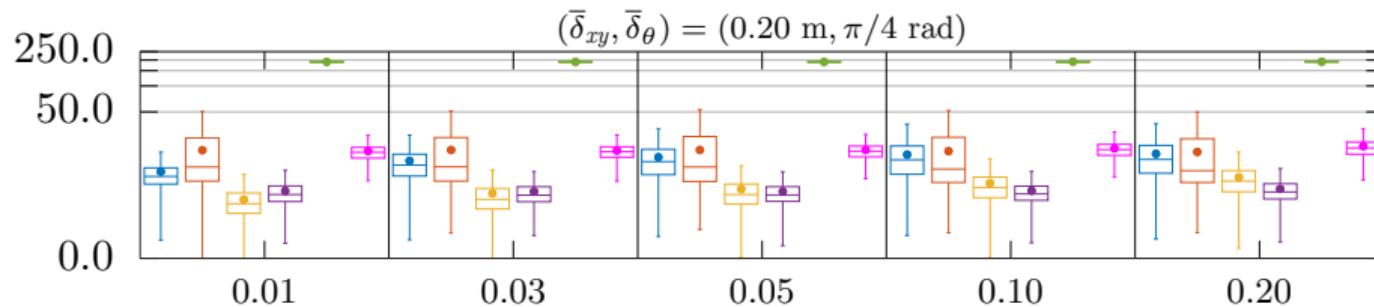
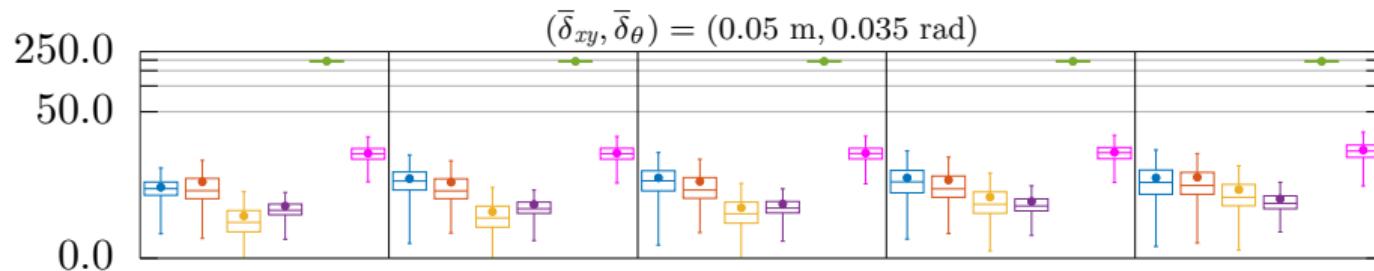
— PLICP — NDT — FastGICP — FastVGICP — NDT-PSO — fsm



Τυπική απόκλιση διαταραχών σ_R [m]

Κατανομές χρόνων εκτέλεσης [ms]

— PLICP — NDT — FastGICP — FastVGICP — NDT-PSO — fsm



Τυπική απόκλιση διαταραχών σ_R [m]

Οδομετρία μέσω lidar (sim)

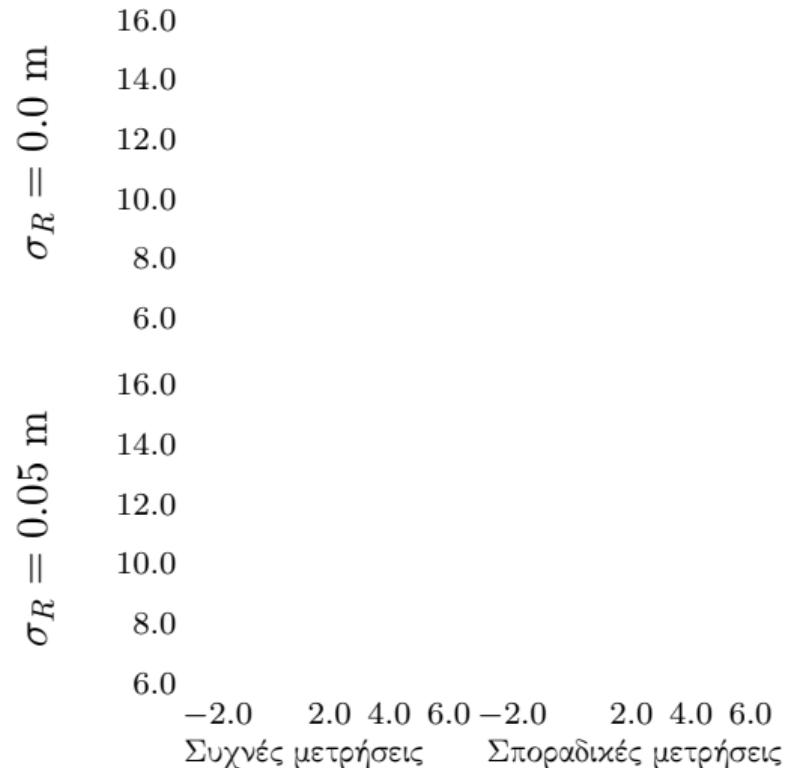
Εκτιμώμενη τροχιά μέσω

— Τροχιά αισθητήρα

—PI

P —

NDT — fsm



Οδομετρία μέσω lidar (real)

— PLICP — NDT — GICP — VGICP — fsm

21.0 12.0 16.0 20.0 24.0 28.0

19.0

17.0

15.0

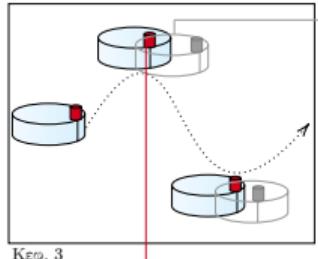
fsm: Ευρωστία

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

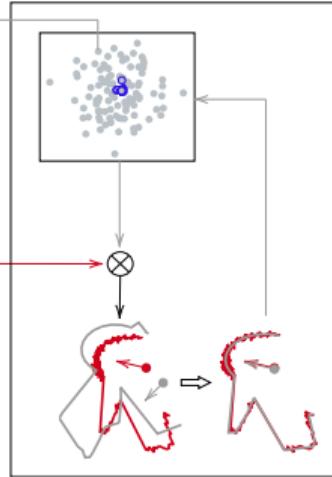
Ευθυγράμμιση πραγματικών (δισδιάστατων πανοραμικών) σαρώσεων

- χωρίς αντιστοιχίσεις
- με δύο διαισθητικές παραμέτρους

Σάς ευχαριστώ για τον χρόνο και την προσοχή σας



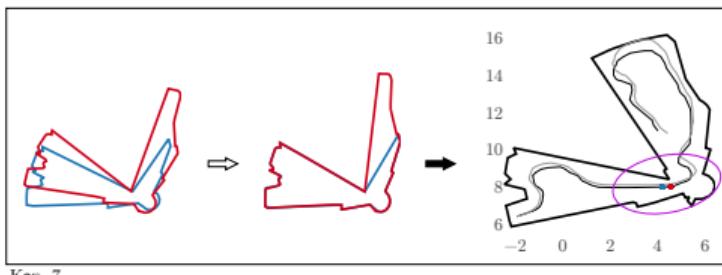
Παρατήρηση
σφάλματων
εκτίμησης
στάσης



Παρατήρησης
ευασθητίας λύσης
σε παραμέτρους
και θόρυβο
λόγω αντιστοιχίσεων



Λύσεις εκτελούμενες
σε πραγματικό χρόνο



Γενίκευση χρήσης
εργάμην χάρτη

