

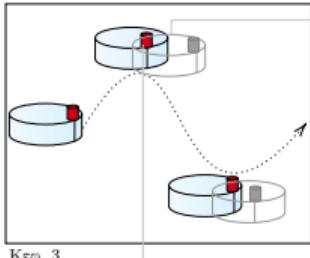
Μεθοδοι εκτίμησης στάσης αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων μέσω ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές σαρώσεις

Αλέξανδρος Φιλοθέου

ΤΗΜΜΥ, ΑΠΘ

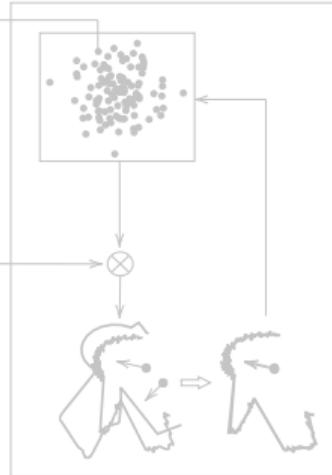


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



Κεφ. 3

Παρατήρηση
σφάλματων
εκτίμησης
στάσης



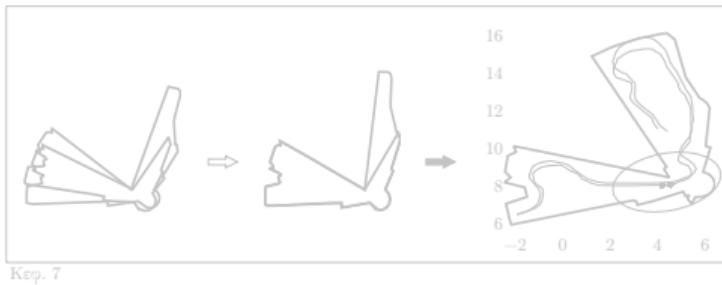
Κεφ. 4

Παρατηρήσεις
ευαποθητίας λύσης
σε παραμέτρους
και υόρυβο
λόγω ανταστοχίσεων



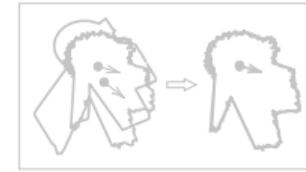
Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες
σε πραγματικό χρόνο



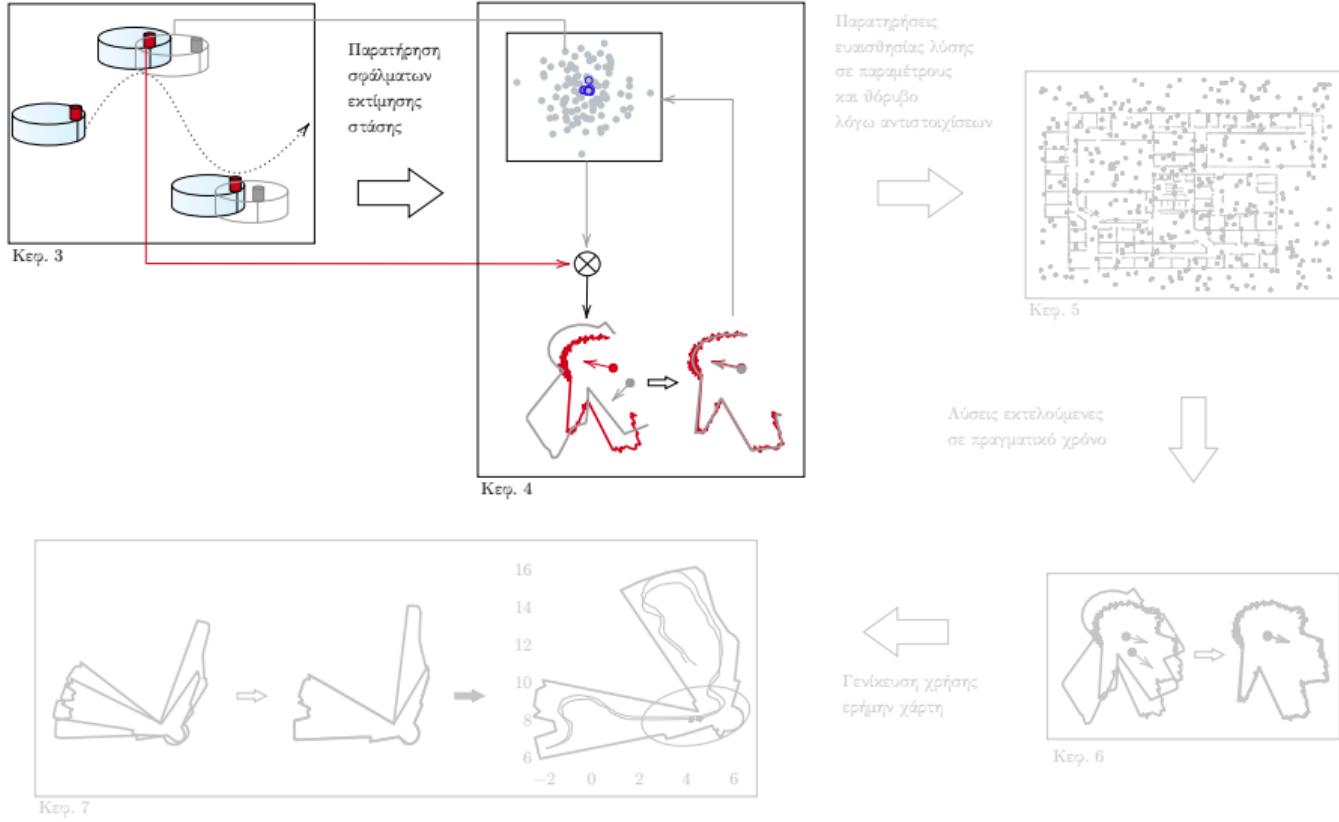
Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης
εργάμην χάρτη

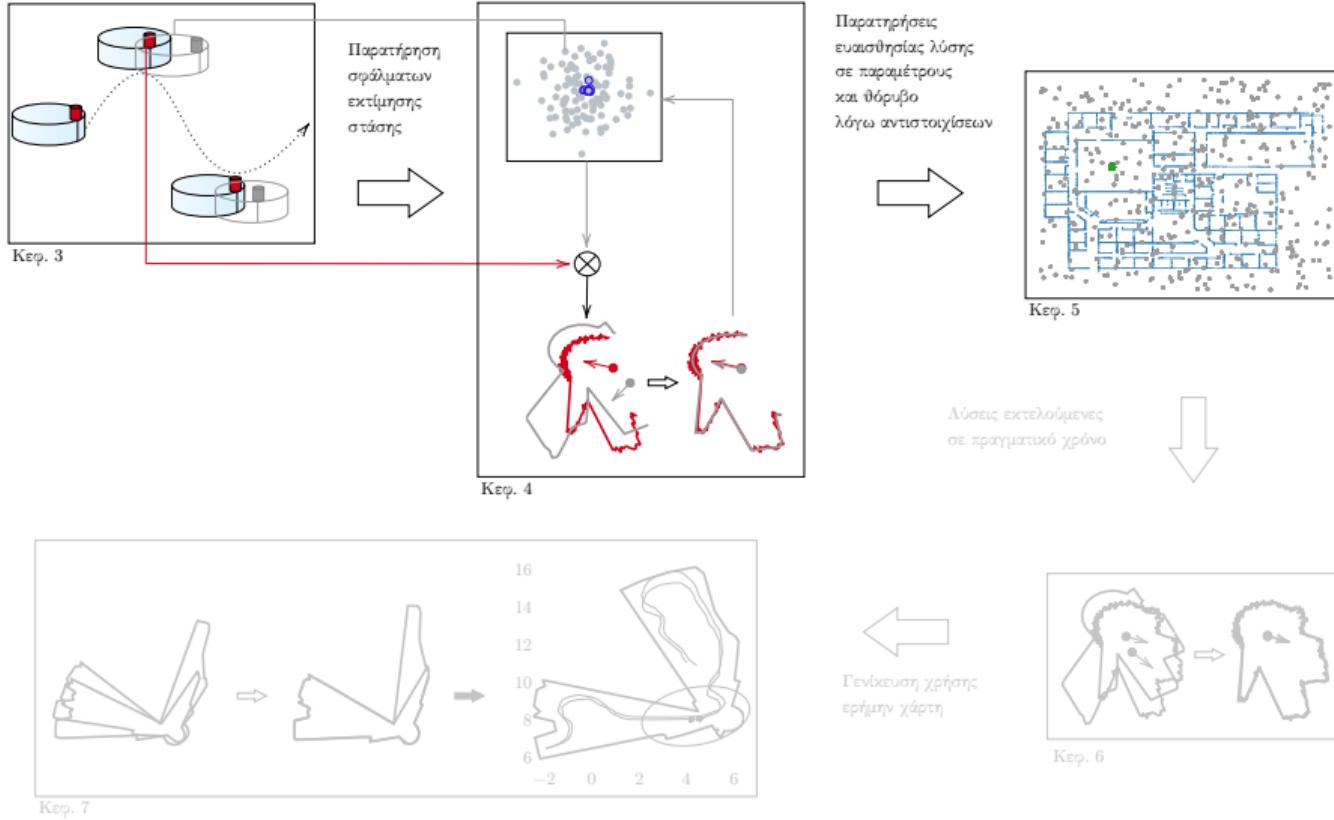


Κεφ. 6

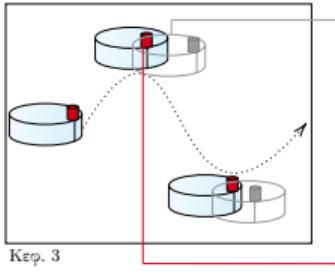
Σχήμα: Οδικός χάρτης της διατριβής (1/5)



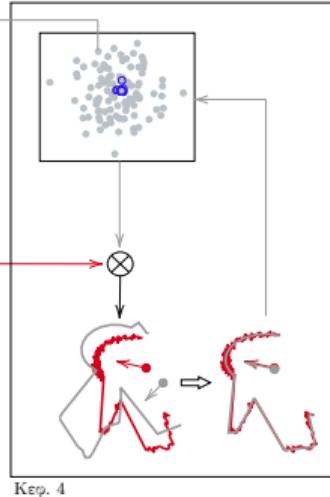
Σχήμα: Οδικός χάρτης της διατριβής (2/5)



Σχήμα: Οδικός χάρτης της διατριβής (3/5)



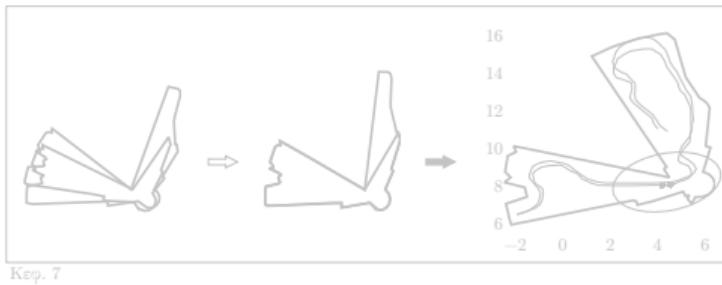
Παρατήρηση
σφάλματων
εκτίμησης
στάσης



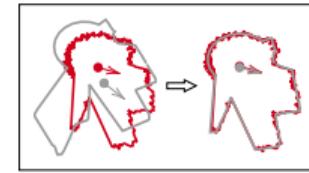
Παρατηρήσεις
ευαποθητίας λύσης
σε παραμέτρους
και υόρυβο
λόγω αντιστοιχίσεων



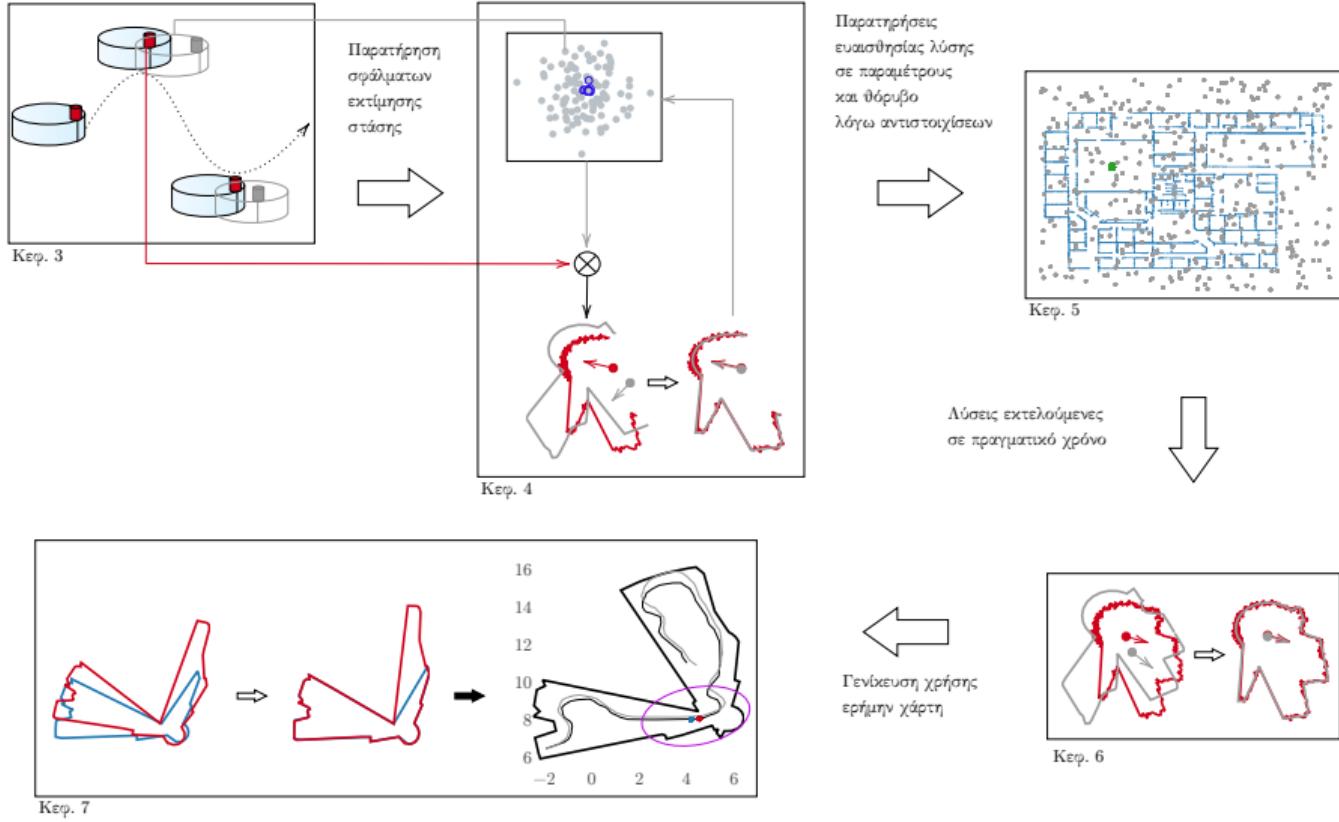
Λύσεις εκτελούμενες
σε πραγματικό χρόνο



Γενίκευση χρήσης
ερήμων χάρτη



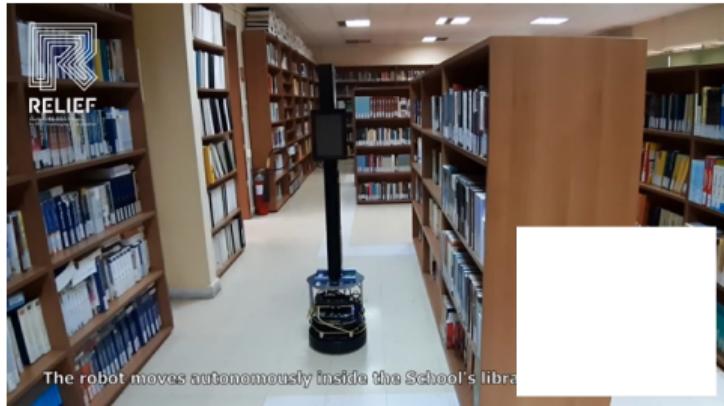
Σχήμα: Οδικός χάρτης της διατριβής (4/5)



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

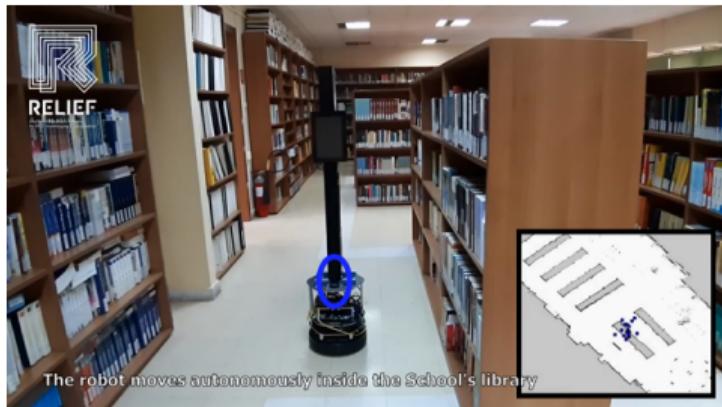
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M



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

Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

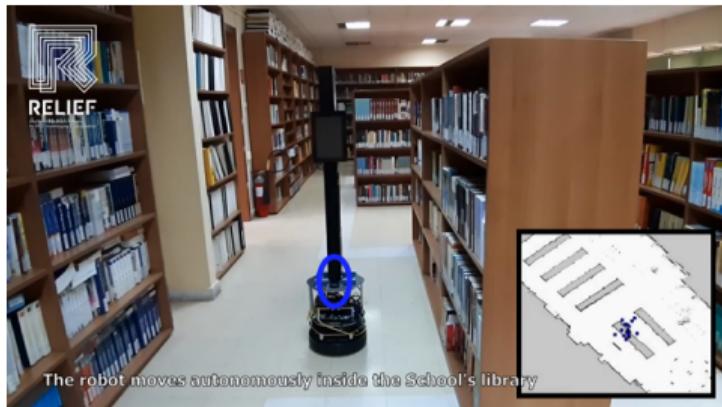
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M



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

Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

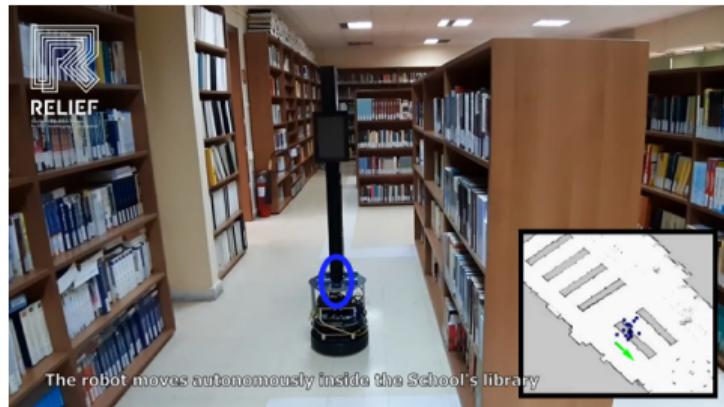
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M



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

Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

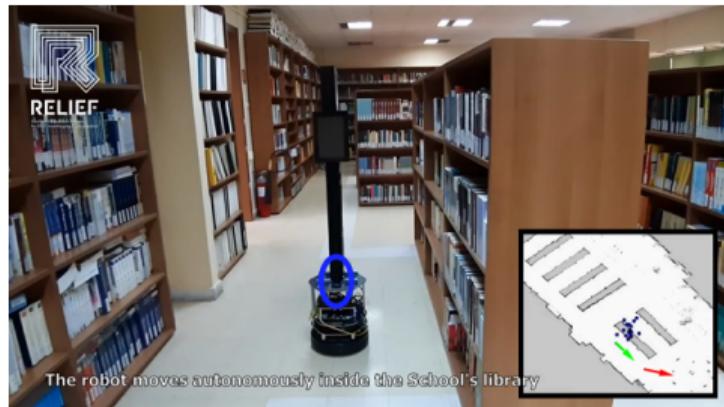
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M



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



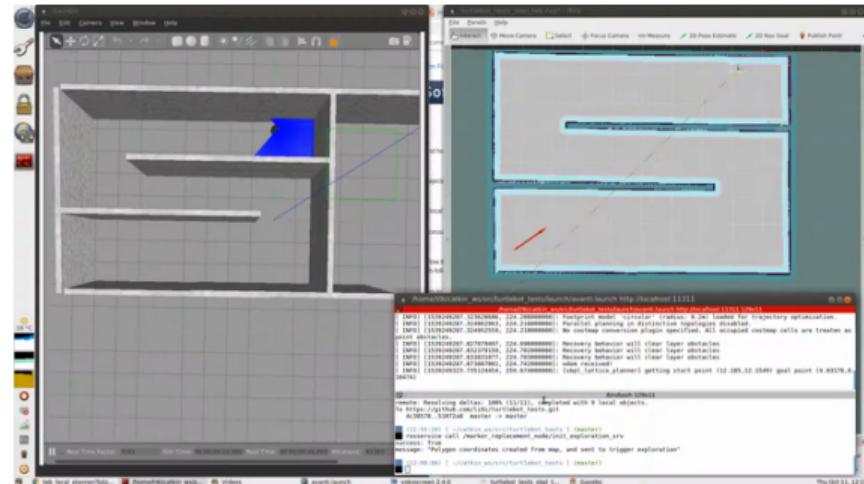
Σχήμα: Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

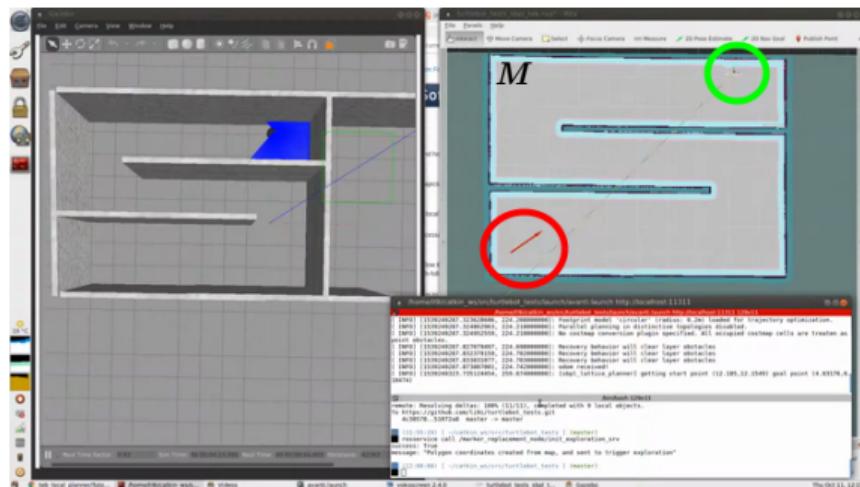
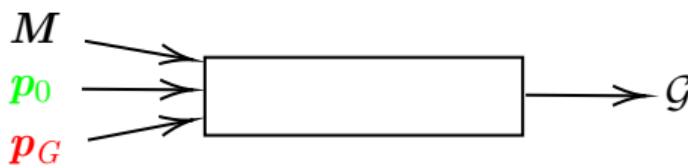
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας
(lidar, $rgb(d)$, sonar)
- ② Χάρτης M του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης \hat{p}_t
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης p_0^M
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης p_G^M

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

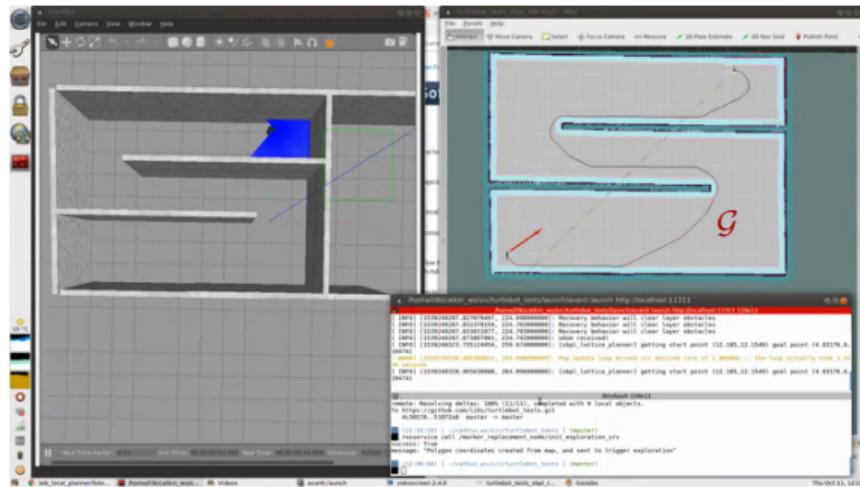
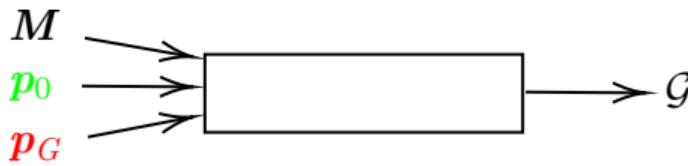
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



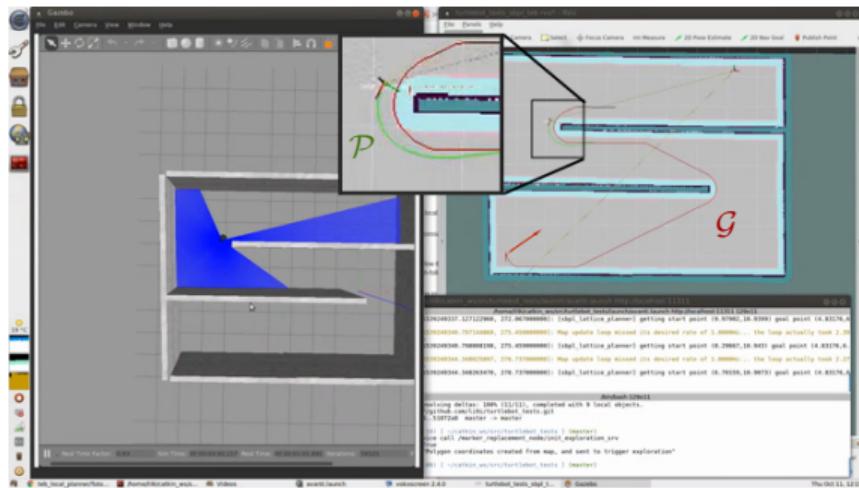
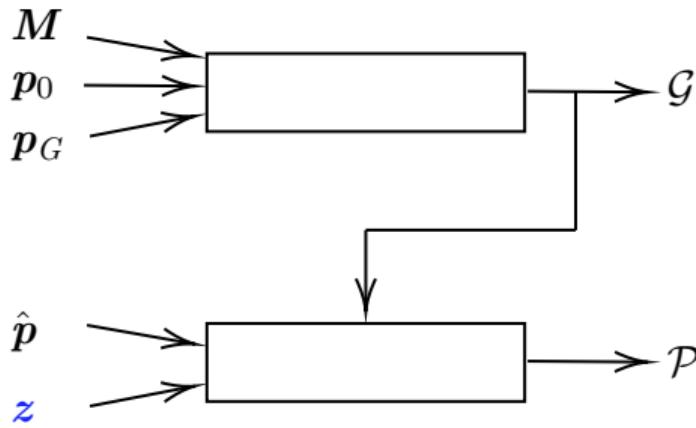
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



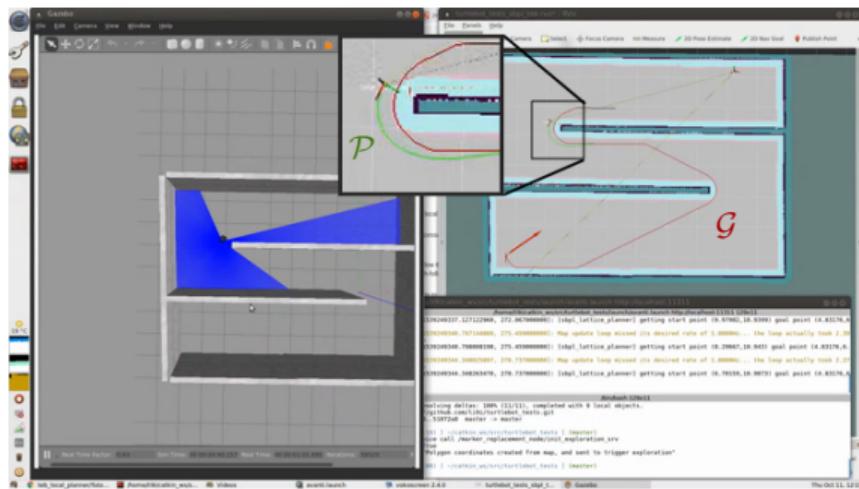
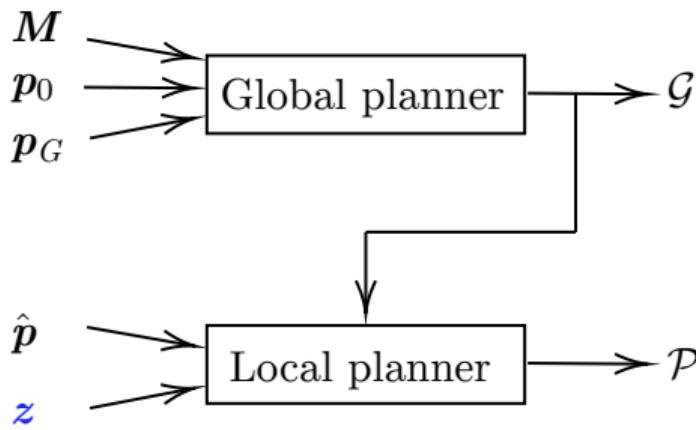
Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



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	?	?	?

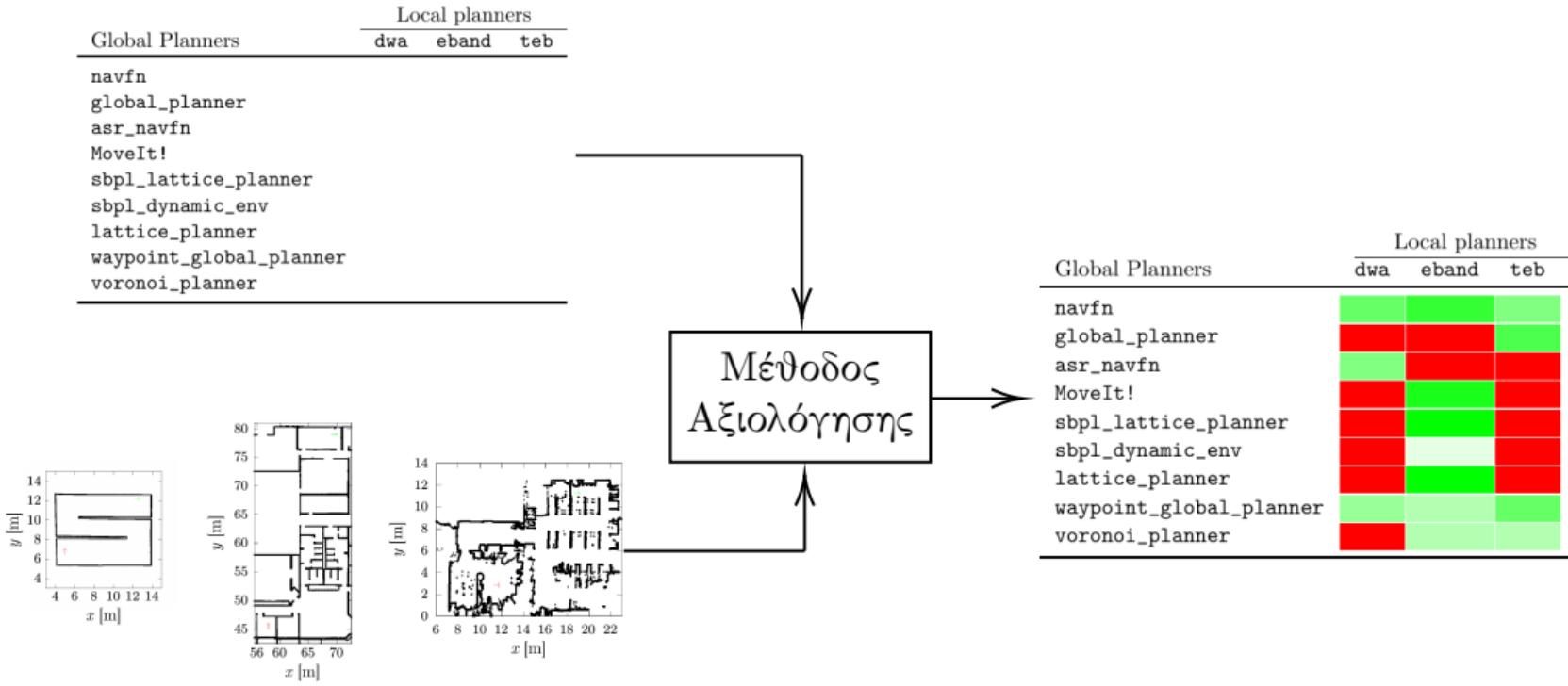
Η ανάγκη για πειραματική αξιολόγηση του state-of-the-art

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

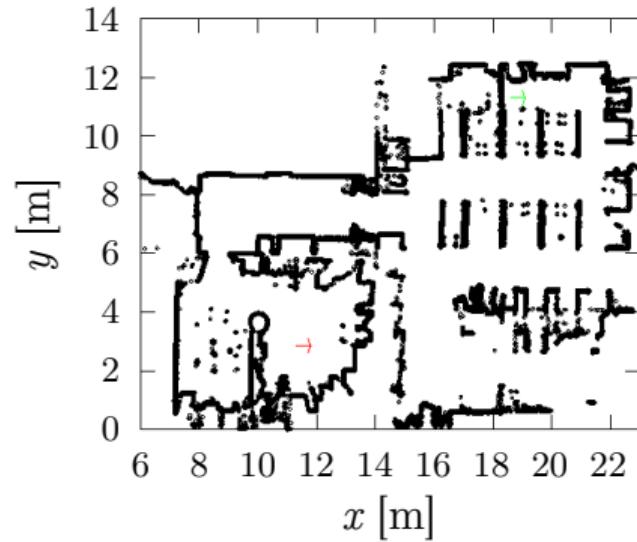
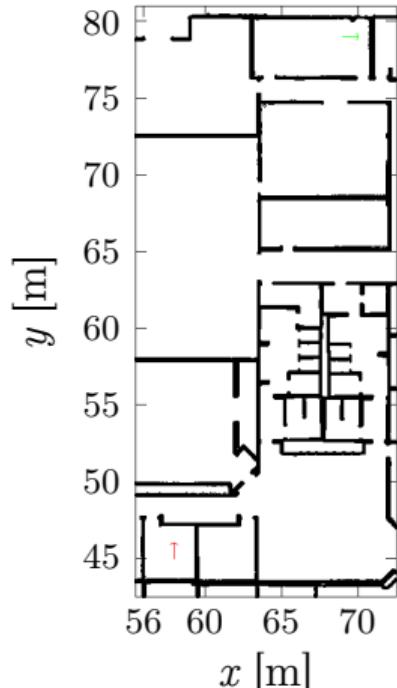
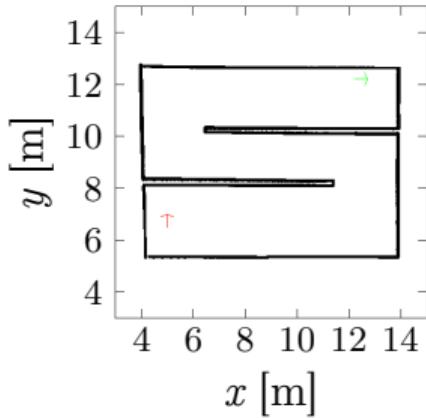


Προκαταρκτική αξιολόγηση: ποιοτικά κριτήρια λογισμικού

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 πλοιήγησης 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



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 πλοήγησης
- 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 $c(m_{\bar{q}}) \downarrow$, $m_q \in Q, m_{\bar{q}} \in \overline{Q}, Q \cup \overline{Q} = \cup m$

Κατασκευή συνάρτησης απόδοσης αξίας V

- Κανονικοποίηση τιμών μετρικής m :

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

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

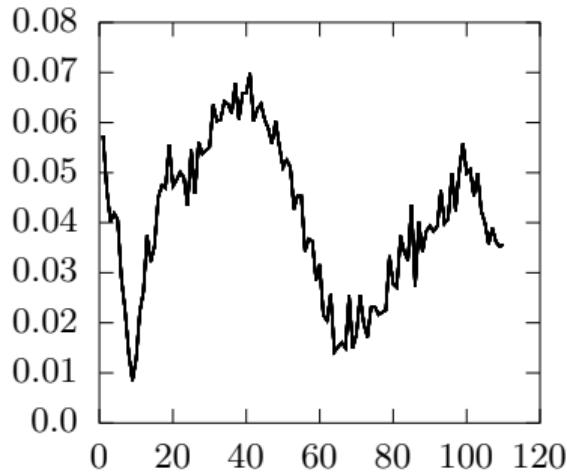
Πίνακας: Η σύνθετη τελική τιμή V και η κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγχτών κίνησης σε επαναληπτικές προσομοιώσεις και πειράματα στα περιβάλλοντα της πειραματικής διάταξης

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

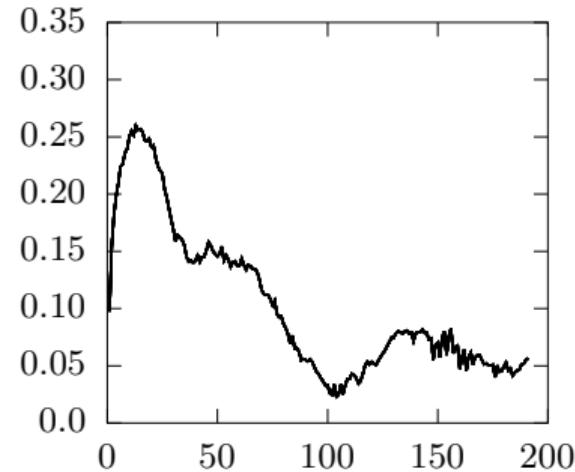
- Επιλογή συνδυασμού planners off-the-shelf
- Προσαρμογή μεθόδου αξιολόγησης με βάση ειδικές απαιτήσεις ($w_m \neq 1.0$)
- Ενσωμάτωση οποιωνδήποτε μελλοντικών μεθόδων
- Ενσωμάτωση ad hoc περιβάλλοντος

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

CORRIDOR

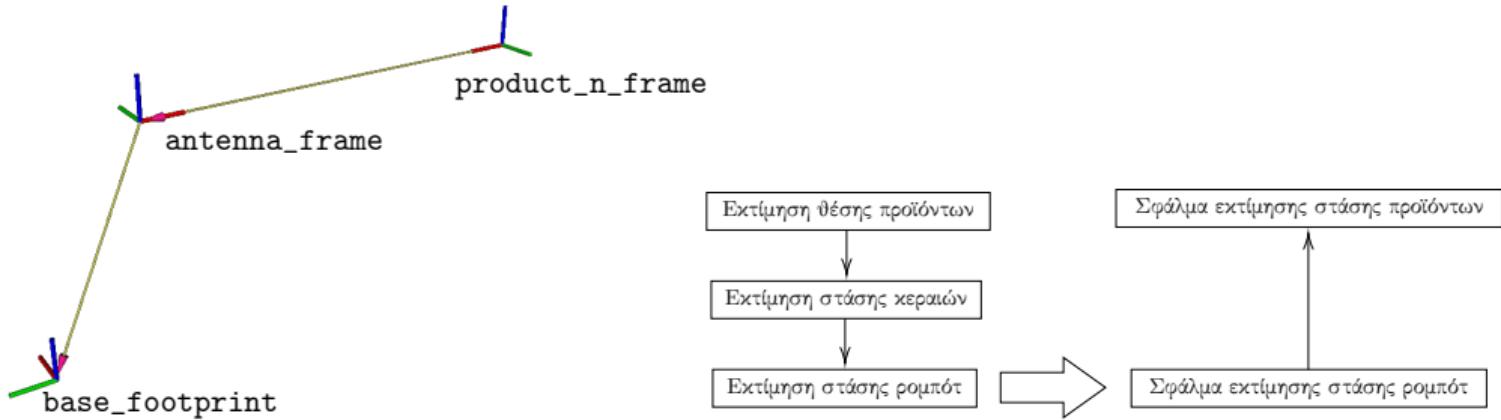


WILLOWGARAGE



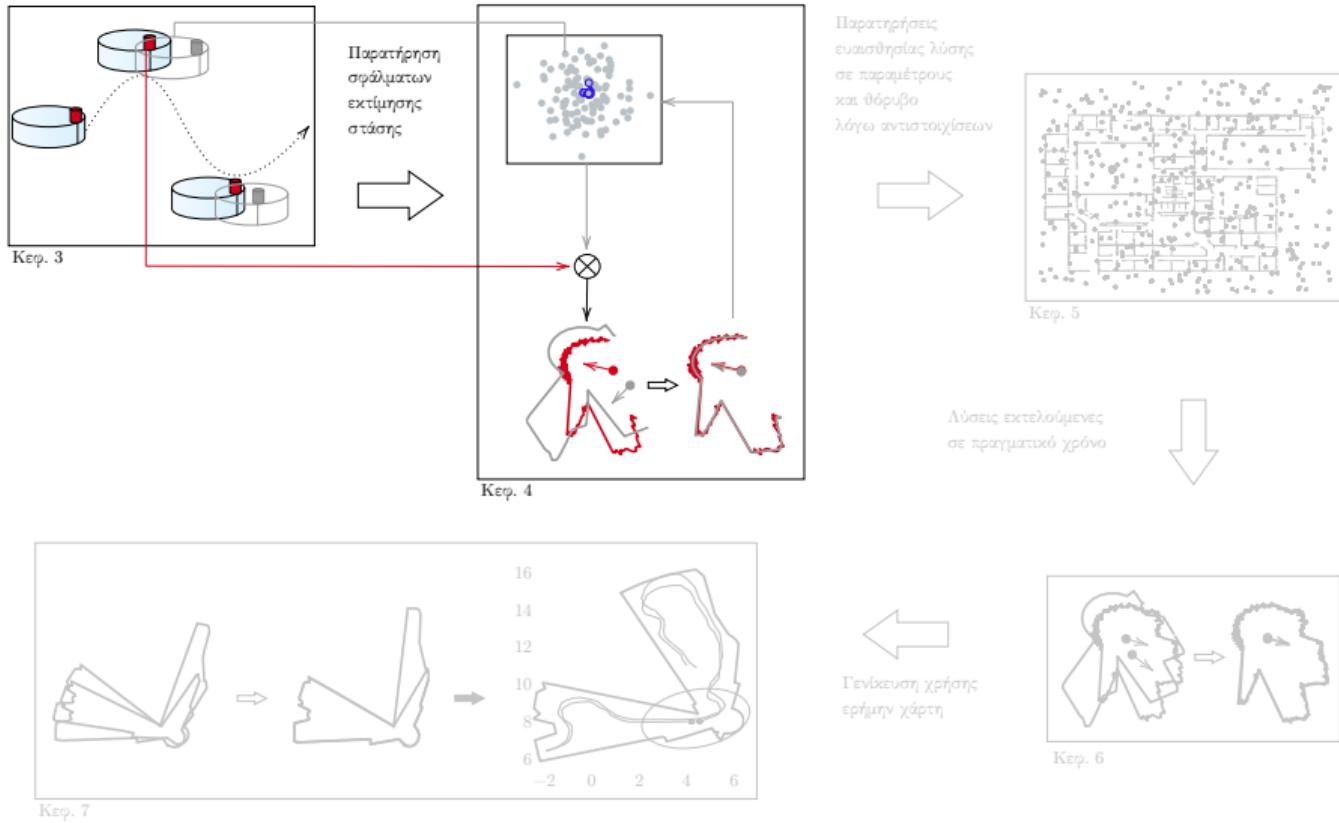
Αριθμός εκτιμήσεων στάσης στο χρόνο

Σχήμα: Μέσος όρος σφαλμάτων εκτίμησης στάσης κατά τη διάρκεια του χρόνου σε δέκα πειράματα αυτόνομους πλοιήγησης 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



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)

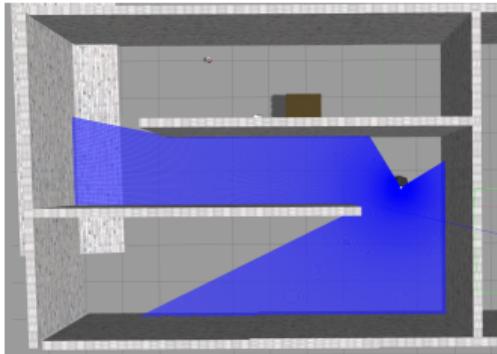


Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων (sm)

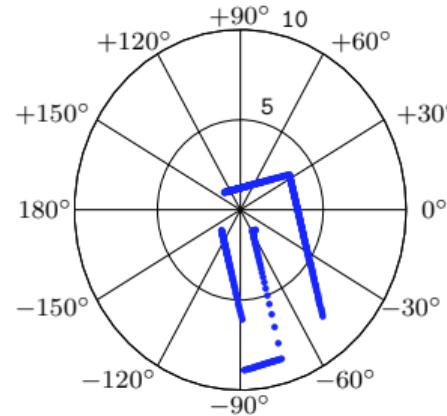
scan-to-map-scan matching \rightarrow smsm \rightarrow sm2

scan-matching \rightarrow sm

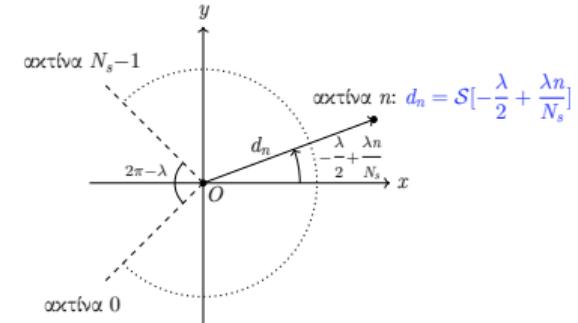
Αισθητήρας lidar δισδιάστατων μετρήσεων απόστασης



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

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

λ : Γωνιακό εύρος όρασης και N_s : αριθμός εκπεμπόμενων ακτίνων

Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων (sm)

$$\mathcal{S}(p_k)$$

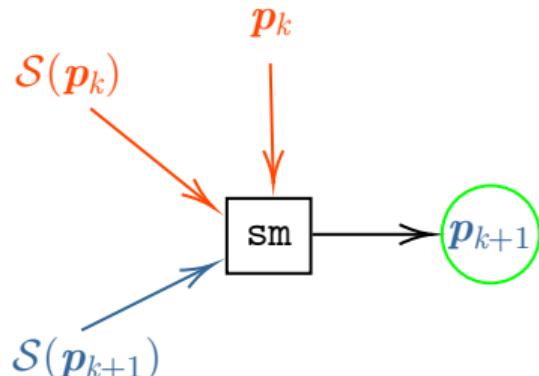
$$\mathcal{S}(p_{k+1})$$

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

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

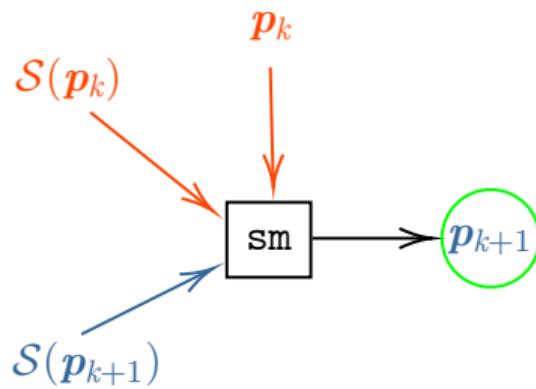
Σχήμα: Ευθυγράμμιση σαρώσεων → εκτίμηση μετασχηματισμού στάσεων από τις οποίες συνελήφθησαν οι σαρώσεις

sm: I/O

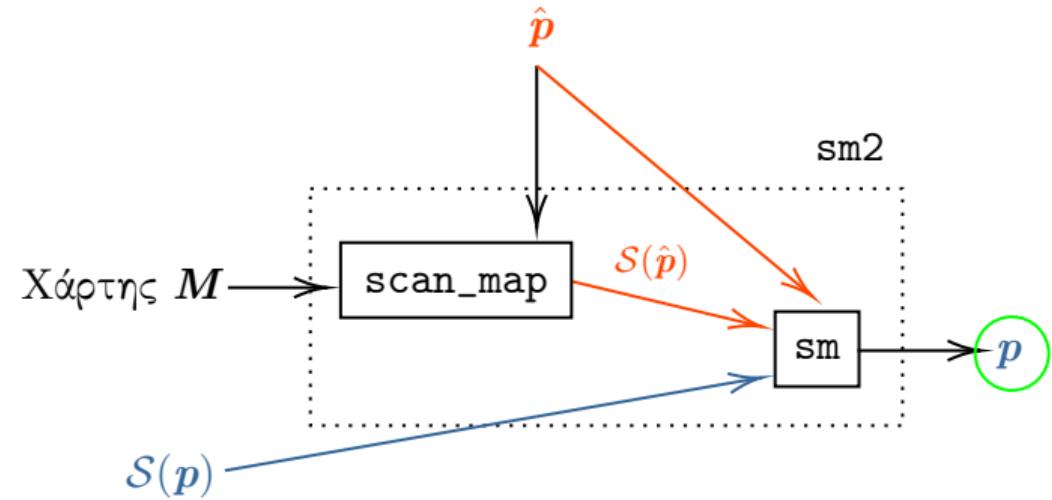


Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων

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

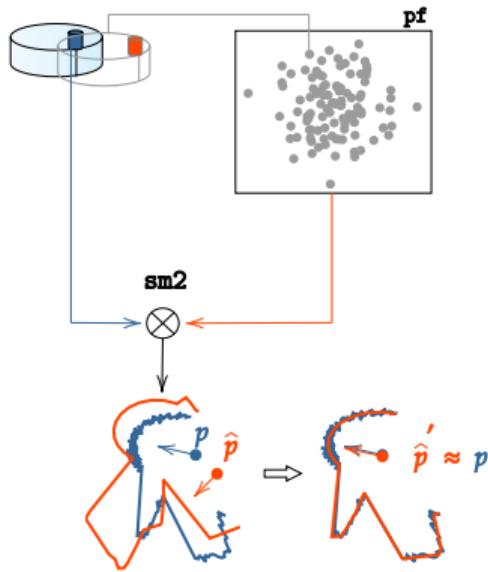


Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων

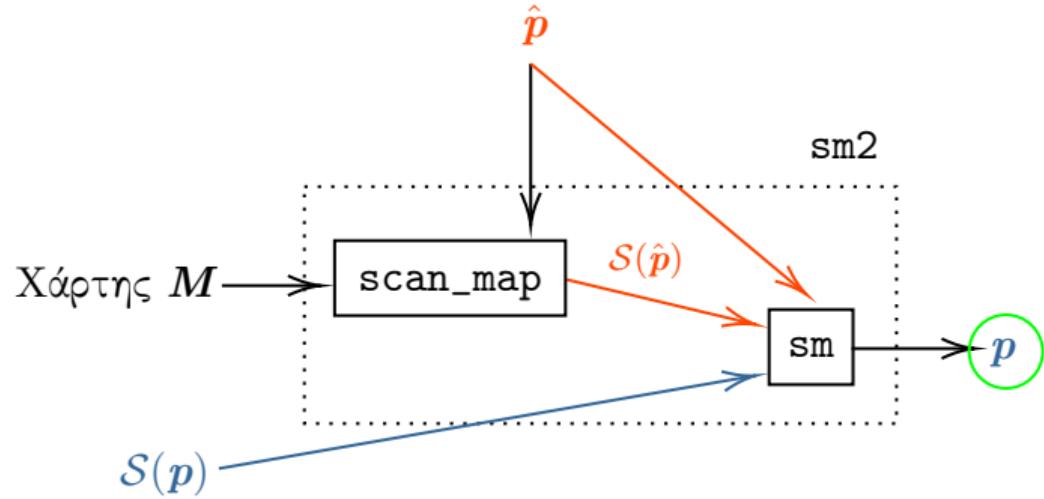


Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικής σάρωσης με εικονική σάρωση χάρτη

pf + sm2

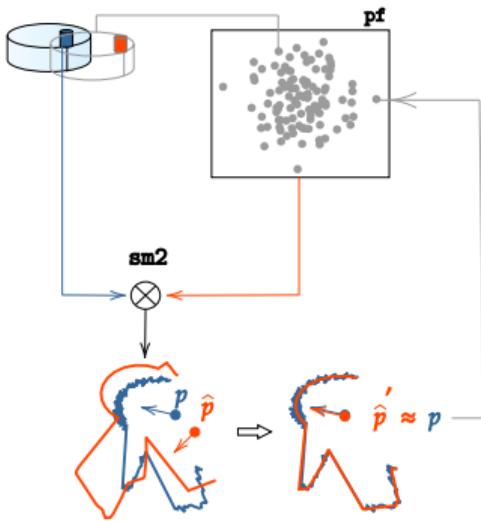


Σχήμα: sm2 προσαρμοσμένη στην
έξοδο φίλτρου σωματιδίων (pf)

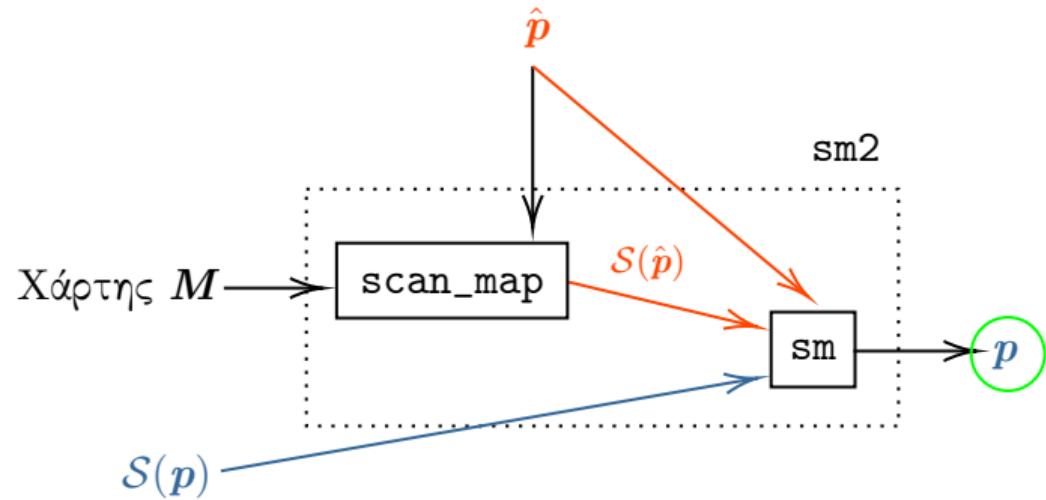


Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικής σάρωσης με εικονική σάρωση χάρτη

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 υπόψεσης
→ 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 υπόψεσης
→ αργή σύγκλιση / αμελητέα συμβολή
- Εξ ολοκλήρου αρχικοποίηση του φίλτρου
→ απώλεια ανθεκτικότητας σε περίπτωση αποτυχίας sm2
- Ανάδραση με τη μορφή πολλαπλών υποψέσεων
→ 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:

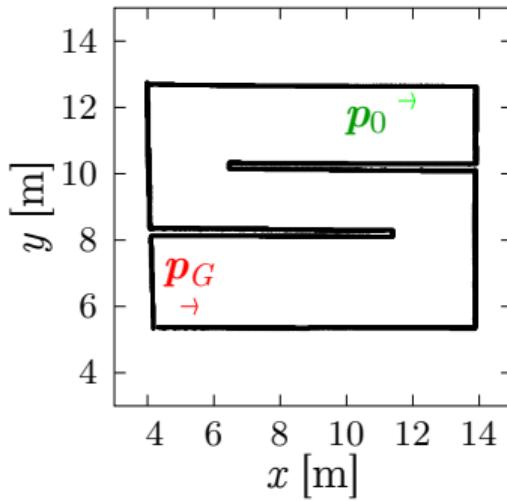
$$\|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}^*\| < \|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}(\mathcal{P})\|$$

Υπόθεση Υ3:

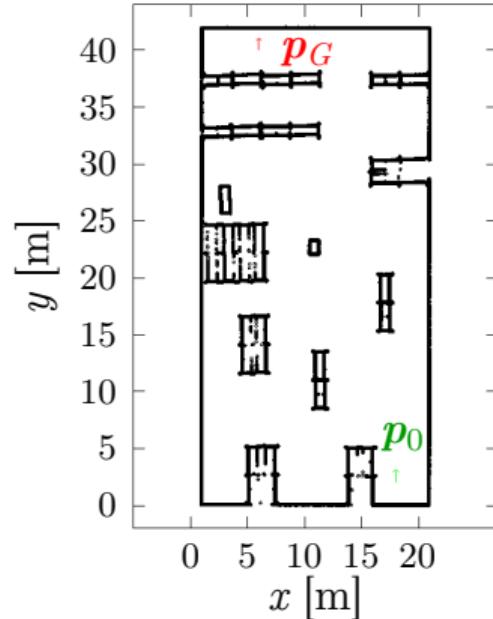
Εάν $\mathcal{P}^\circlearrowright = \mathcal{P} \circlearrowright \{\hat{\mathbf{p}}^*\}_{q \cdot |\mathcal{P}^\circlearrowright|}$, όπου $q \gg 0.01$ και $q \ll 1.0$:

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

Πειραματική διάταξη



Σχήμα: Χάρτης περιβάλλοντος CORRIDOR, M_C



Σχήμα: Χάρτης περιβάλλοντος WAREHOUSE, M_W

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

lidar:

$$\lambda = 260^\circ$$

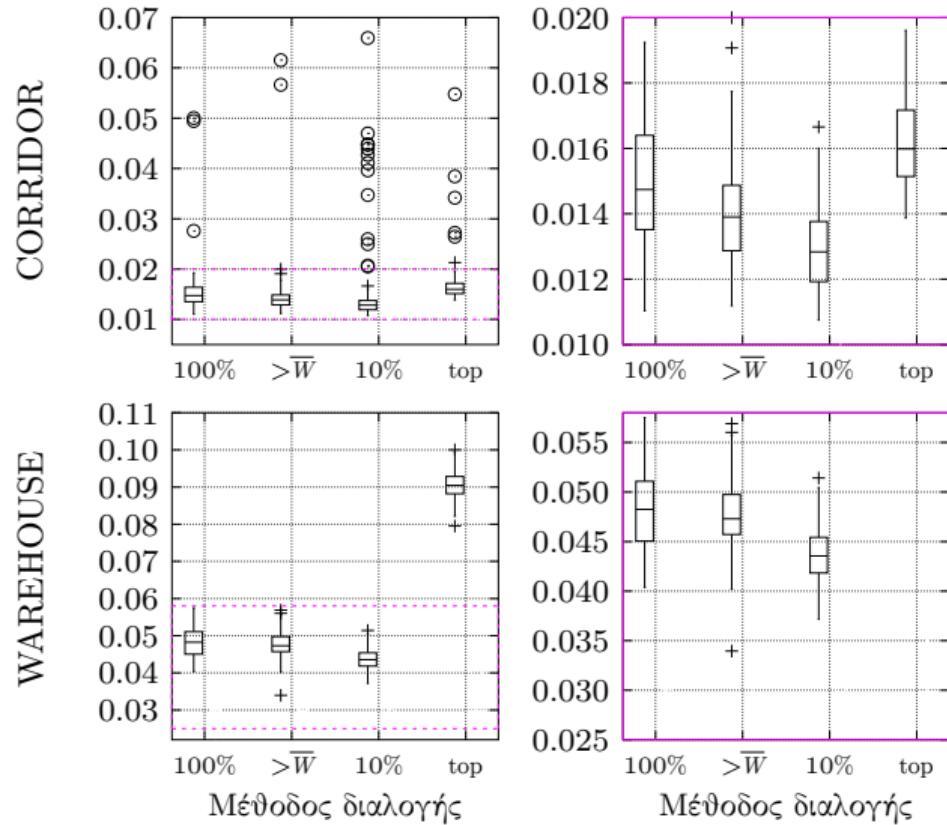
$$N_s = 640 \text{ ακτίνες}$$

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

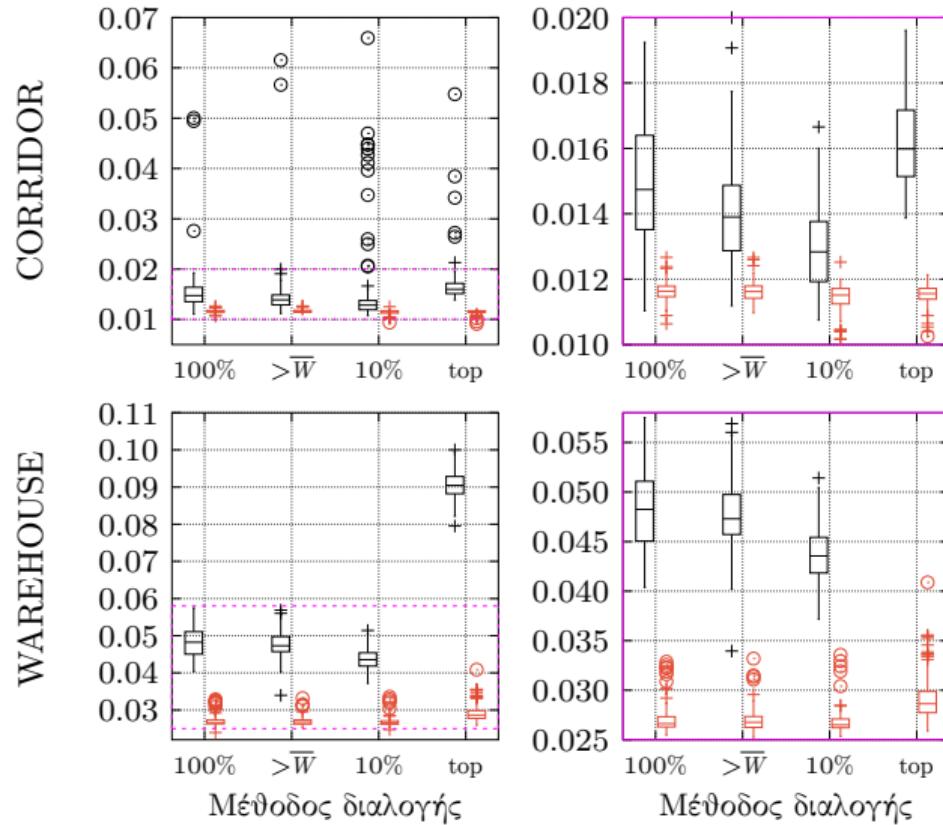
pf:

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

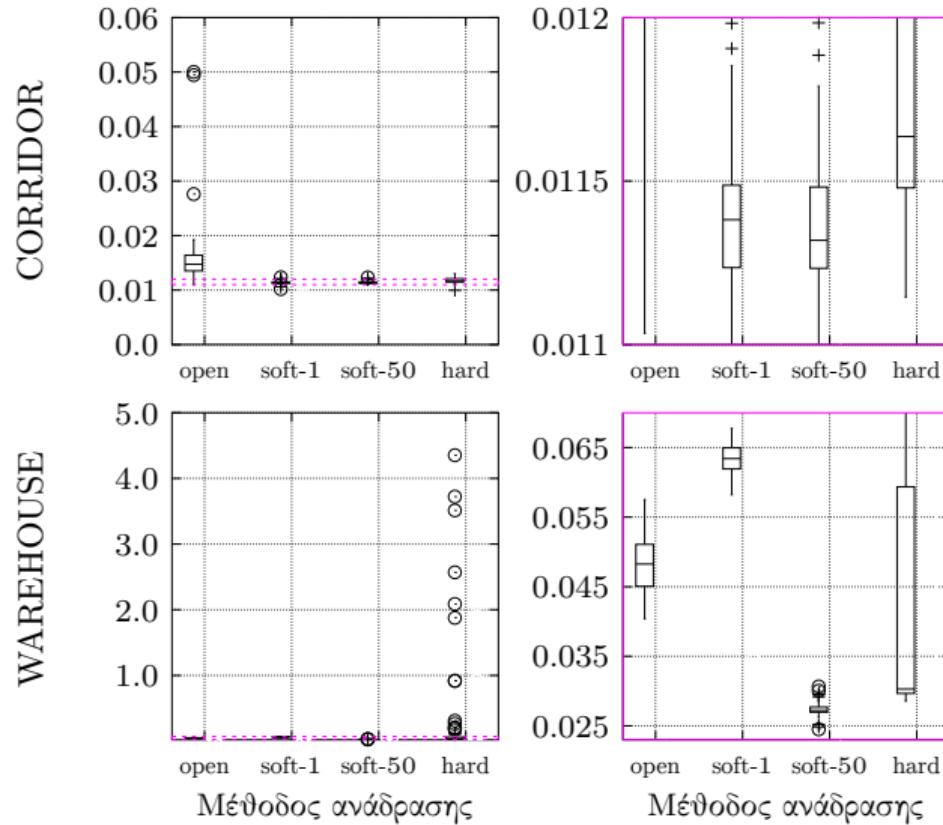
Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο διαλογής σωματιδίων $[(m^2 + rad^2)^{1/2}]$



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



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

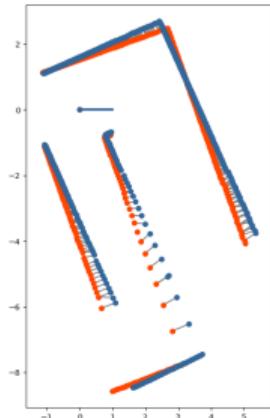
Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: παραραμετροποίηση

Παράμετροι

Θόρυβος

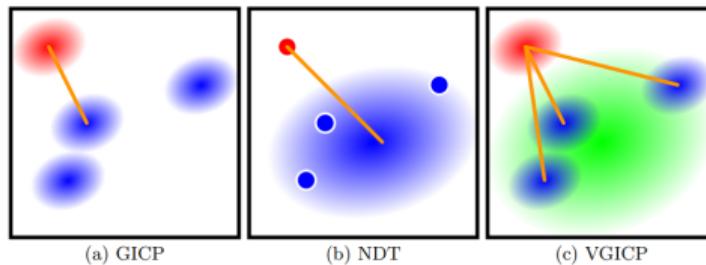
- Αντιδιαισθητική ρύθμιση
- Μικρές μεταβολές → μεγάλες διαφορές λύσης

Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης



Σχήμα: Α

Σχήμα: Β



Σχήμα: Γ

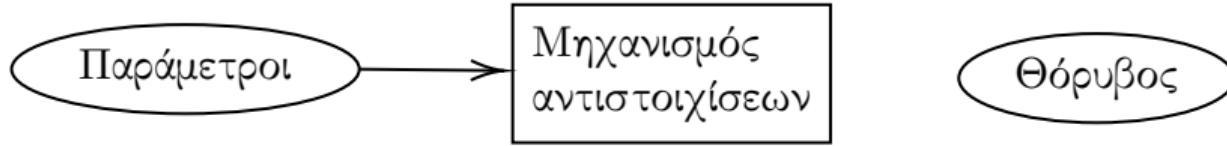
A: ICP επί της αρχής (σημείο προς σημείο)

B: plicp: σημείο προς ευθύγραμμο τμήμα. Πηγή: Andrea Censi, <https://censi.science/research/robot-perception/plicp/>

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

Πηγή: *Voxelized GICP for Fast and Accurate 3D Point Cloud Registration*, ICRA 2021

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: εξωκείμενα σημεία (outliers)

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

Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

