

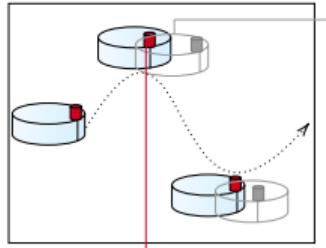
Μέθοδοι εκτίμησης στάσης  
αισθητήρα lidar δισδιάστατων μετρήσεων  
μέσω  
ευθυγράμμισης πραγματικών με εικονικές σαρώσεις

Αλέξανδρος Φιλοιθέου

ΤΗΜΜΥ, ΑΠΘ

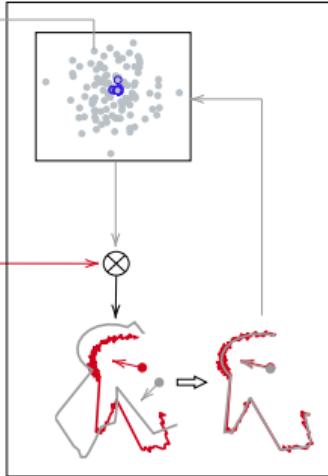


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



Κεφ. 3

Παρατήρηση σφράγιμων εκτίμησης στάσης



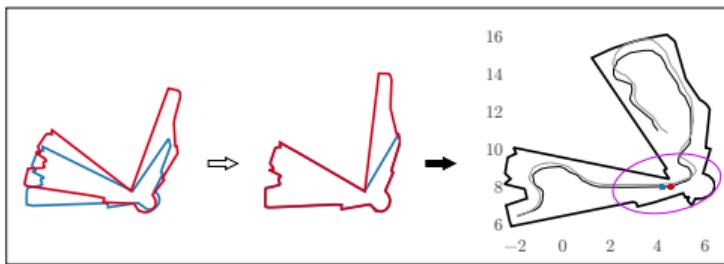
Κεφ. 4

Παρατηρήσεις ευαισθησίας λύσης σε παραμέτρους και θόρυβο λόγω αντιστοιχίσεων



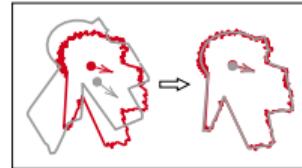
Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες σε πραγματικό χρόνο



Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης ερήμην χάρτη



Κεφ. 6

Οδικός χάρτης της διατριβής

# To érho RELIEF: motivation

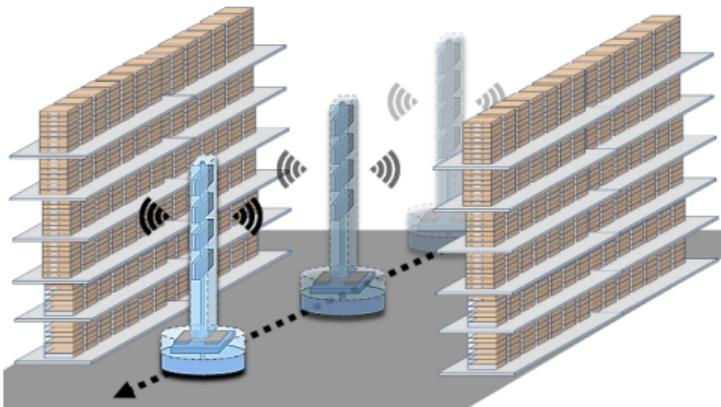
Αποθήκες προϊόντων: ανάγκη για

- συνεχή απογραφή
- γνώση θέσης προϊόντων



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

# To érho RELIEF: η λύση



- ① Τοποθέτηση RFID ετικετών σε προϊόντα
- ② Αυτόνομα επίγεια οχήματα με RFID αναγνώστες

# Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

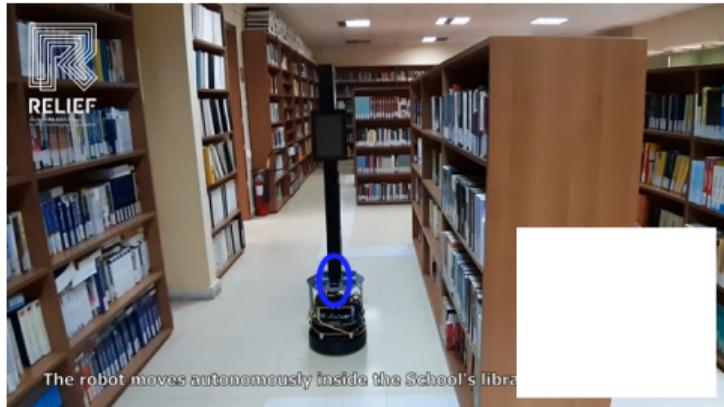
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας  
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$   
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης  $p_0^M$
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης  $p_G^M$



Εφαρμογή έργου RELIEF, βιβλιοθήκη ΤΗΜΜΥ, ΑΙΘ.  
Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

# Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

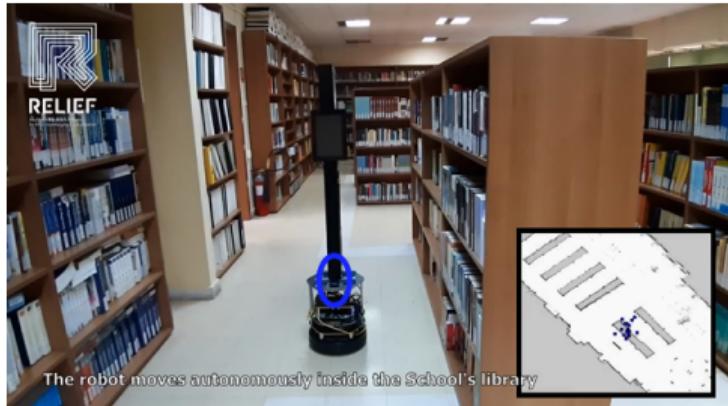
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας  
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$   
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης  $p_0^M$
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης  $p_G^M$



Εφαρμογή έργου RELIEF, βιβλιοθήκη ΤΗΜΜΥ, ΑΙΘ.  
Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

# Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

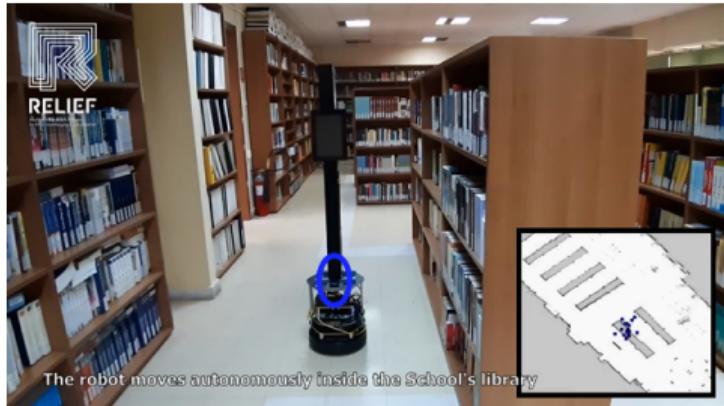
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας  
(lidar,  $rgb(d)$ , sonar)
- ② Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$   
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης  $p_0^M$
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης  $p_G^M$



Εφαρμογή έργου RELIEF, βιβλιοθήκη ΤΗΜΜΥ, ΑΙΘ.  
Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

# Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

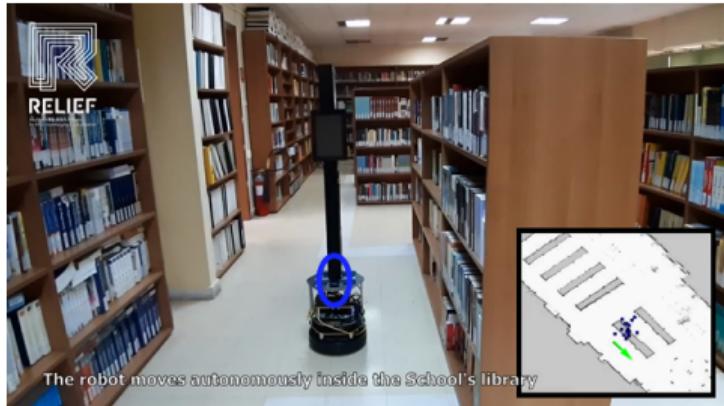
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας  
(lidar,  $rgb(d)$ , sonar)
- ② Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$   
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης  $p_0^M$
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης  $p_G^M$



Εφαρμογή έργου RELIEF, βιβλιοθήκη ΤΗΜΜΥ, ΑΙΘ.  
Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

# Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

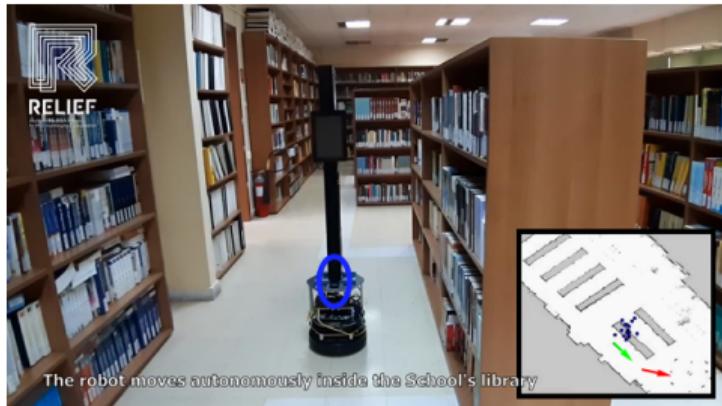
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας  
(lidar, rgb(d), sonar)
- ② Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$   
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης  $p_0^M$
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης  $p_G^M$



Εφαρμογή έργου RELIEF, βιβλιοθήκη ΤΗΜΜΥ, ΑΙΘ.  
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  $p_G^M$



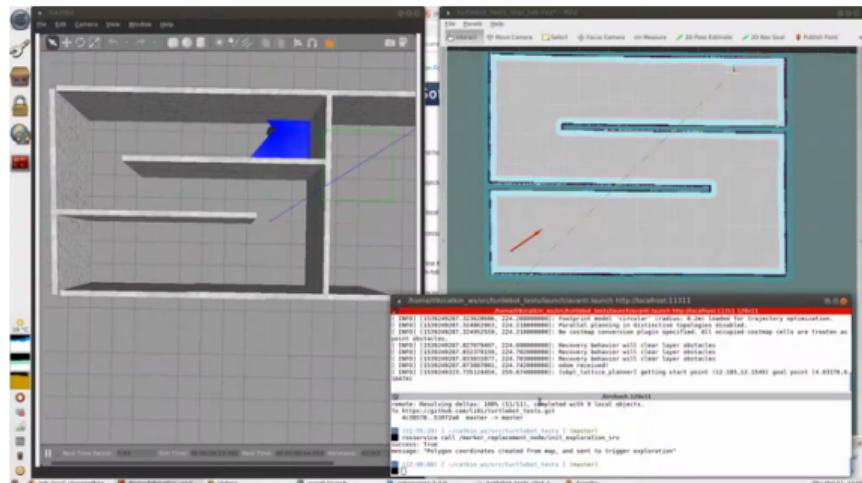
Εφαρμογή έργου RELIEF, βιβλιοθήκη ΤΗΜΜΥ, ΑΙΘ.  
Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

# Αυτόνομη πλοήγηση: Προαπαιτούμενα

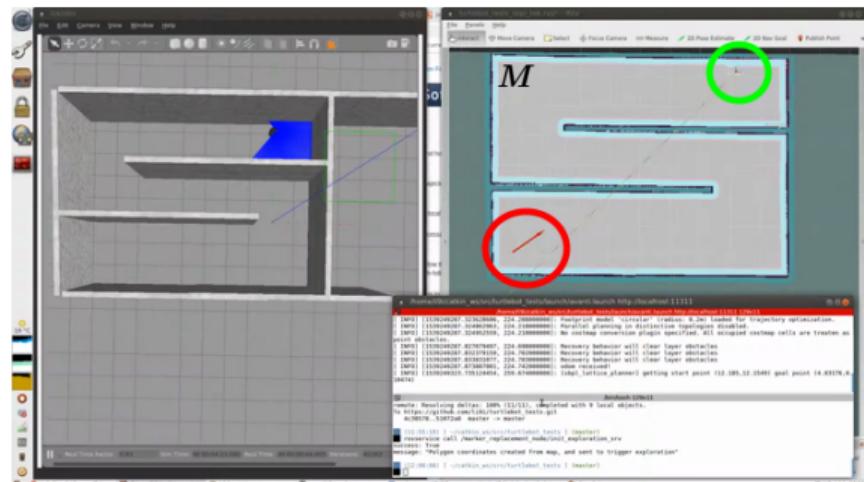
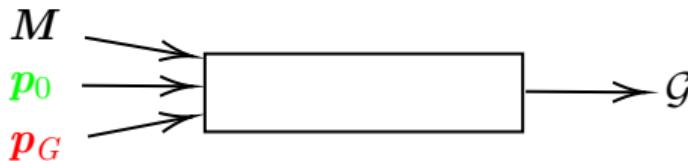
- ① Εξωδεκτικός αισθητήρας  
(lidar,  $\text{rgb}(d)$ , sonar)
- ② Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- ③ Εκτίμηση στάσης  $\hat{p}_t$   
(μέσω EKF/PF)
- ④ Αρχική συνθήκη στάσης  $p_0^M$
- ⑤ Τελική συνθήκη στάσης  $p_G^M$

Εφαρμογή έργου RELIEF, βιβλιοθήκη THMMY, ΑΙΘ.  
Πηγή: <https://relief.web.auth.gr/>

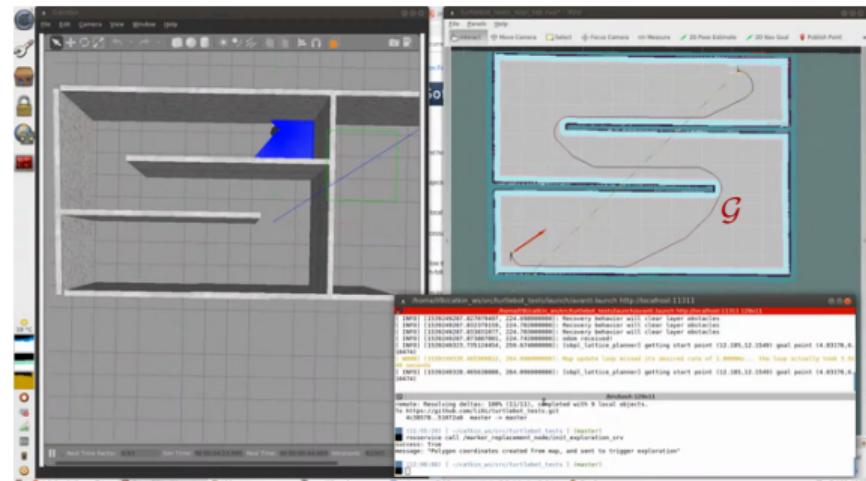
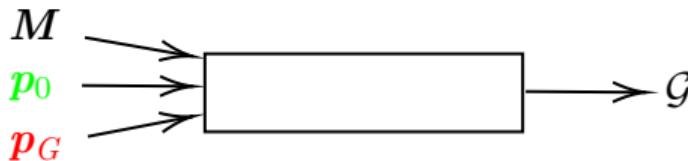
## Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



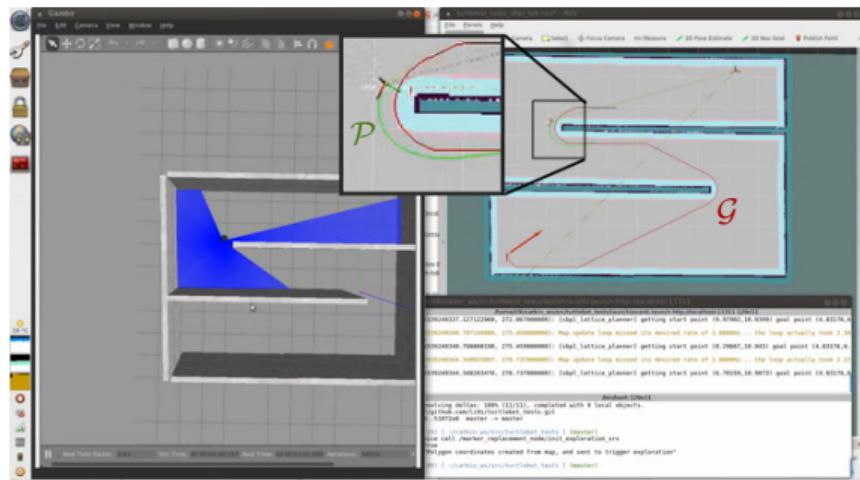
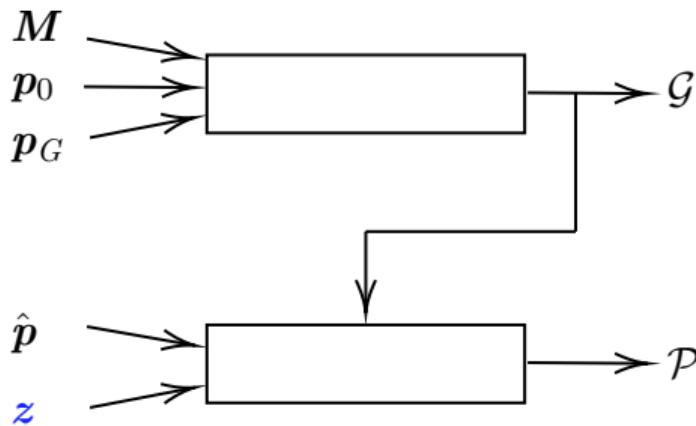
## Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



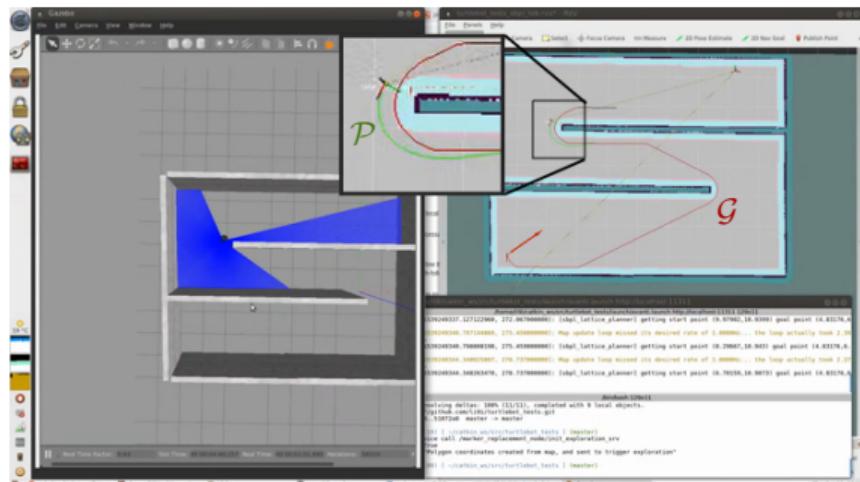
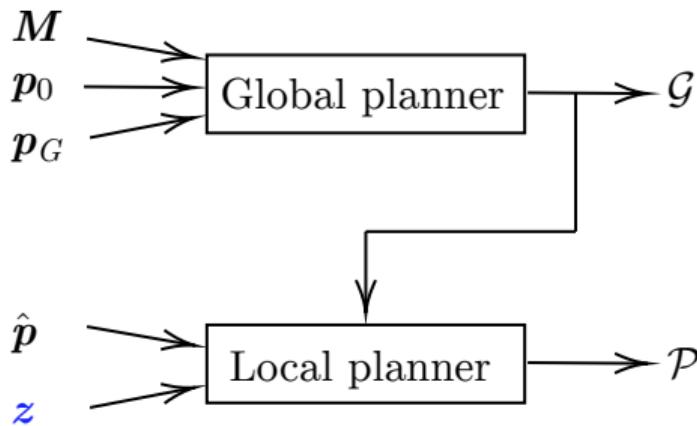
# Αυτόνομη πλοήγηση: Συστατικά



## 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	?	?	?

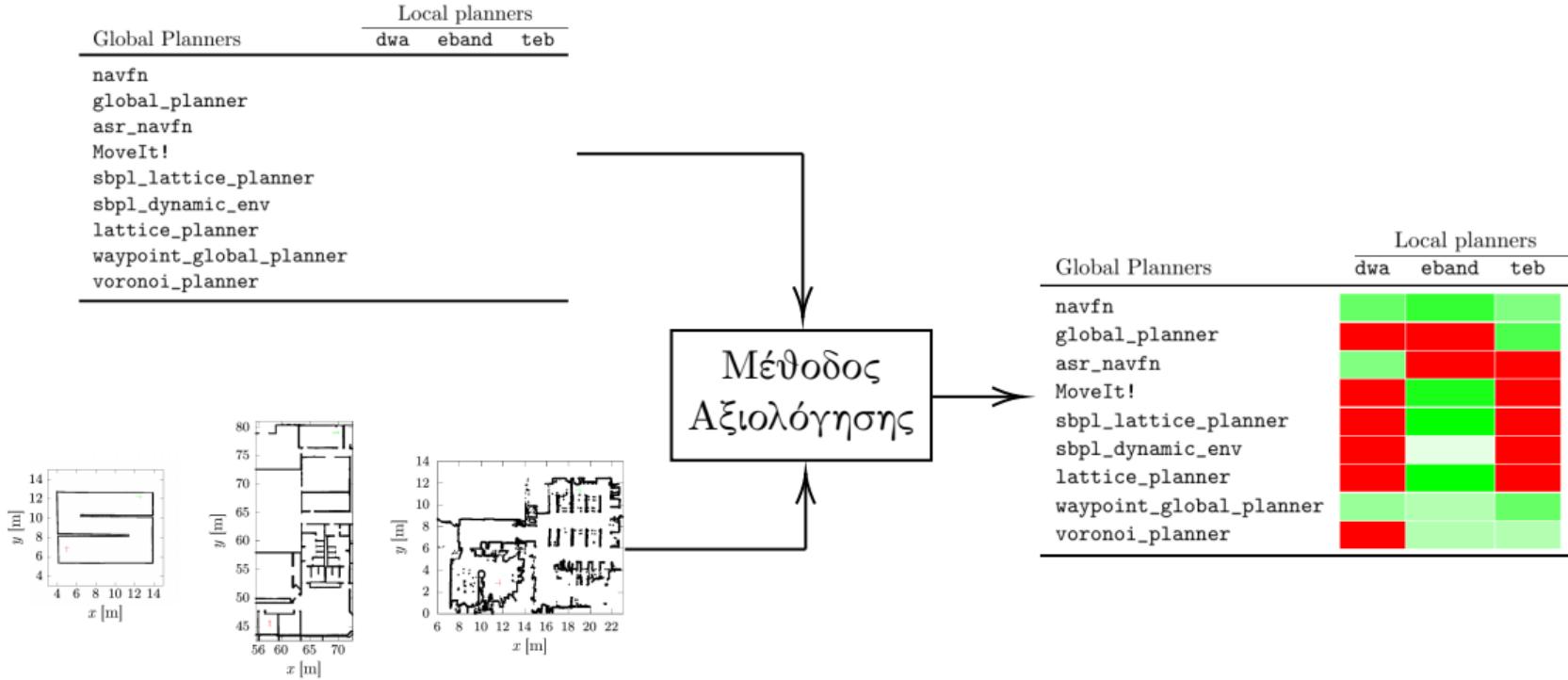
Η ανάγκη για πειραματική αξιολόγηση του state-of-the-art

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

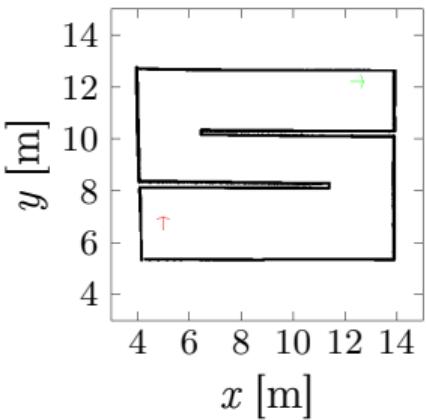


# Προκαταρκτική αξιολόγηση: ποιοτικά κριτήρια λογισμικού

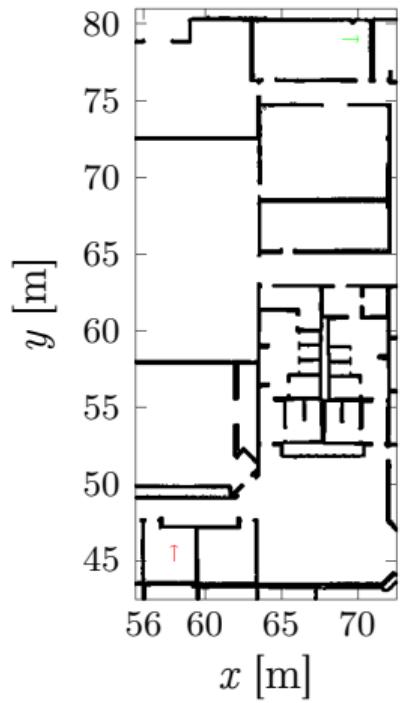
Planner	Ποιοτικές Μετρικές								Αποδοχή
	DOC	UTD	INST	SC/C	PARAM	CON	COMP		
navfn	●	●	●●	●	●	●	●		●
global_planner	●	●	●●	●	●	●	●		●
asr_navfn	●	○	●	●	●	●	●		○
MoveIt!	●●●	●	●●	●	●●●	?	●●●		○
sbpl_lattice_planner	●●	●	●●	●	●	●	●		●
sbpl_dynamic_env	●	○	●	○	●	?	●		○
lattice_planner	●	○	●	●	●	●	●		○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

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

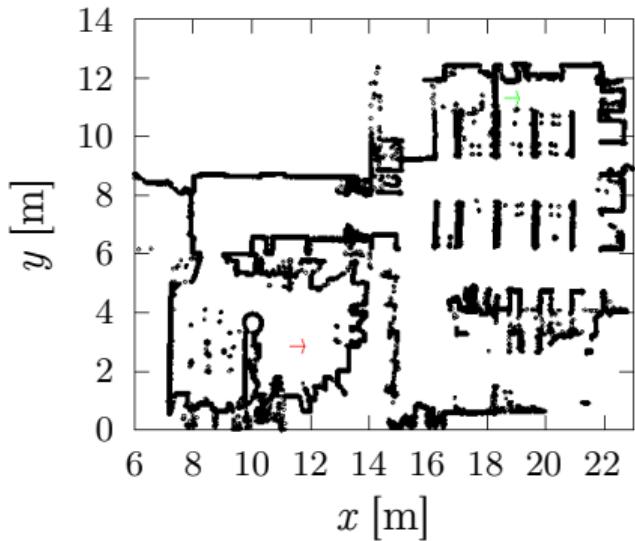
# Πειραματική αξιολόγηση: διάταξη



Χάρτης  $M_C$



Χάρτης  $M_W$



Χάρτης  $M_L$

## 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 συνδυασμό  $c_{i,j} = g_i \circ l_j$  για όλα τα περιβάλλοντα με βάση όλες τις μετρικές  $m_k$

Προβλήματα:

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

## Κατασκευή συνάρτησης απόδοσης αξίας $V$

- Κανονικοποίηση τιμών μετρικής  $m$ :

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

- $V$  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

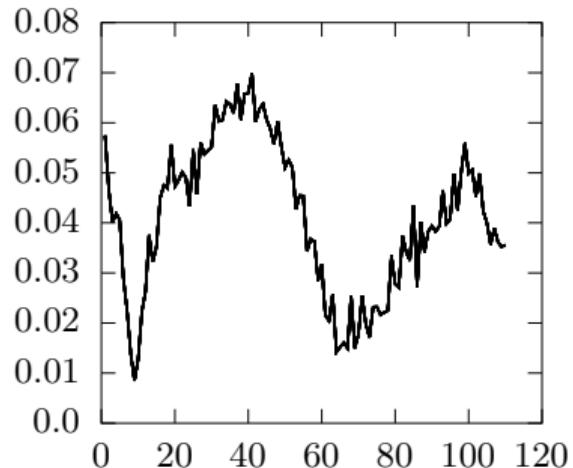
Η σύνθετη τελική τιμή  $V$  και η κατάταξη όλων των συνδυασμών αλγορίθμων χάραξης μονοπατιών και ελεγκτών κίνησης σε επαναληπτικές προσομοιώσεις και πειράματα στα περιβάλλοντα της πειραματικής διάταξης

## Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

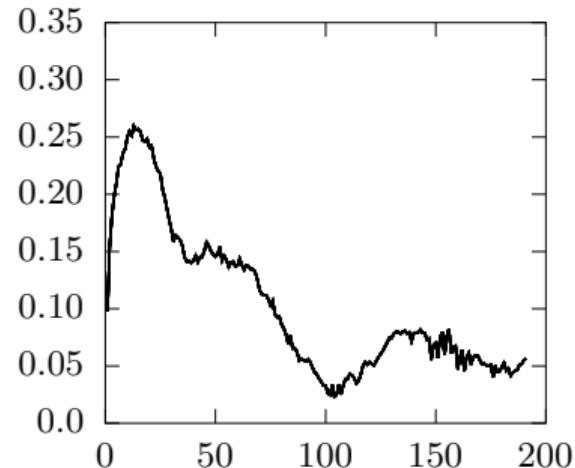
- Επεκτάσιμη μεθοδολογία αξιολόγησης μεθόδων αυτόνομης πλοήγησης
- Προσαρμογή αξιολόγησης σε ειδικές απαιτήσεις ( $w_m \neq 1.0$ )
- Ενσωμάτωση οποιωνδήποτε μεθόδων & ad hoc περιβαλλόντων

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

CORRIDOR

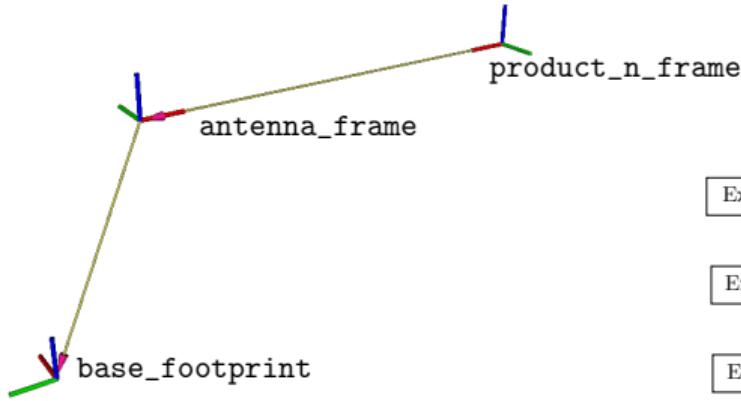


WILLOWGARAGE

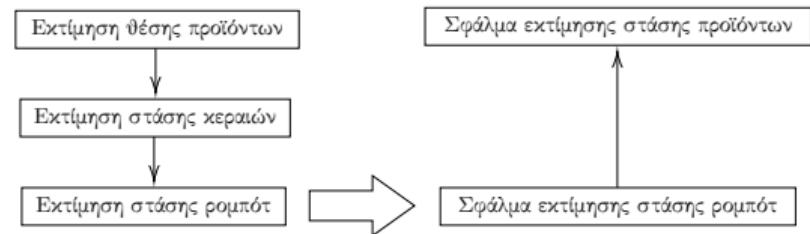


Αριθμός εκτιμήσεων στάσης στο χρόνο

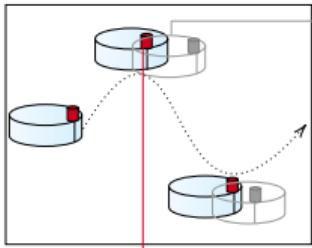
Μέσος όρος σφαλμάτων εκτίμησης στάσης κατά τη διάρκεια του χρόνου σε δέκα πειράματα αυτόνομους πλοιήγησης με τη χρήση φίλτρου σωματιδίων στα προσομοιωμένα περιβάλλοντα CORRIDOR και WILLOWGARAGE



Συστήματα αναφοράς ρομπότ, κεραίας, και τυχαίου προϊόντος

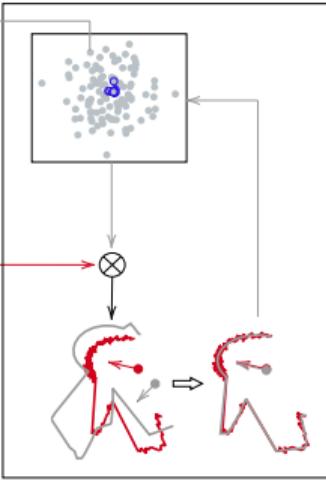


Η εκτίμηση της θέσης των προϊόντων εξαρτάται από το σφάλμα της εκτίμησης της στάσης του ρομπότ



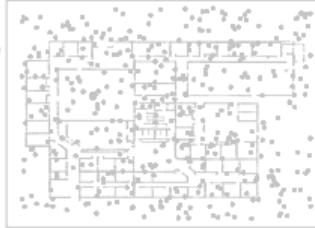
Κεφ. 3

Παρατήρηση σφάλματων εκτίμησης στάσης



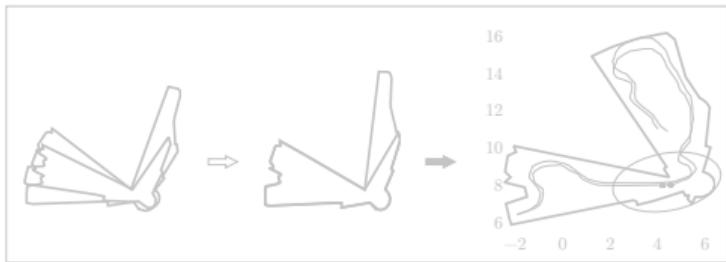
Κεφ. 4

Παρατηρήσεις ευαισθησίας λύσης σε παραμέτρους και ύδρυβο λόγω αντιστοιχίσεων



Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες σε πραγματικό χρόνο



Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης εργάμην χάρτη



Κεφ. 6

## Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης στάσης φίλτρων σωματιδίων

### Μέσω

- ① προσθετικής ευθυγράμμισης πραγματικών σαρώσεων με εικονικές
- ② ανατροφοδότησης
- ③ διαλογής σωματιδίων

## Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω διαλογής σωματιδίων

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

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

- Πληθυσμός υποθέσεων  $\mathcal{P} = \{(\hat{\mathbf{p}}^i, w^i)\}$

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

- 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

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

( $\hookrightarrow$  ψηφιοφορία βαρύτερων σωματιδίων  $\overline{\mathcal{Q}}$  αντί για  $\mathcal{P} \Rightarrow$  μικρότερο σφάλμα εκτίμησης)

## Ελάττωση σφάλματος εκτίμησης μέσω sm2

Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων με εικονικές σαρώσεις χάρτη ( $\text{sm}2^{\ddagger}$ )  
   $\subset$   
Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων ( $\text{sm}^{\dagger}$ )

${}^{\ddagger}\underline{\text{scan-to-map-scan matching}} \rightarrow \text{smsm} \rightarrow \text{sm2}$

${}^{\dagger}\underline{\text{scan-matching}} \rightarrow \text{sm}$

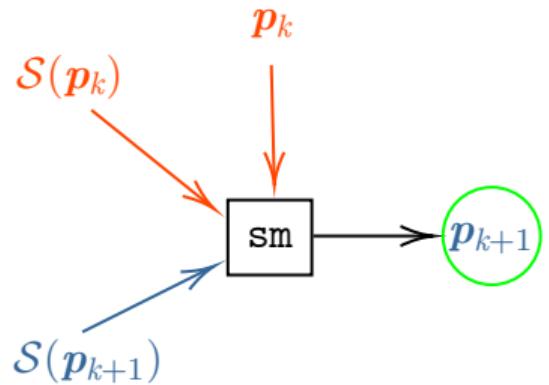
## Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων ( $\text{sm}$ )

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

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

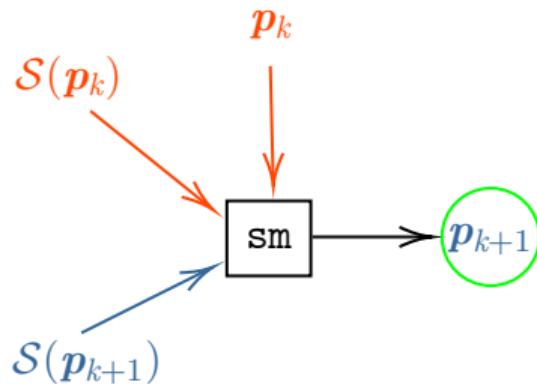
Ευθυγράμμιση σαρώσεων → εκτίμηση μετασχηματισμού στάσεων από τις οποίες συνελήφθησαν οι σαρώσεις

sm: I/O

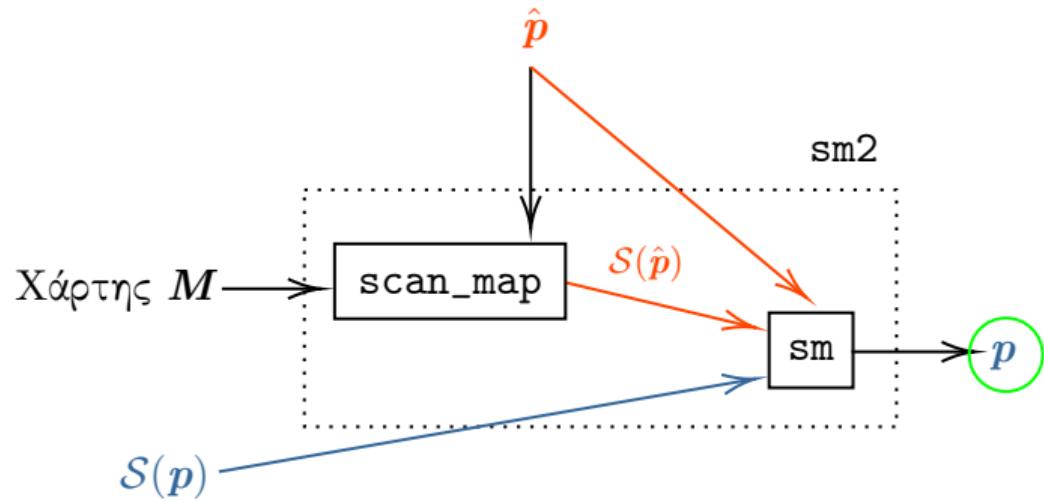


sm: ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων

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

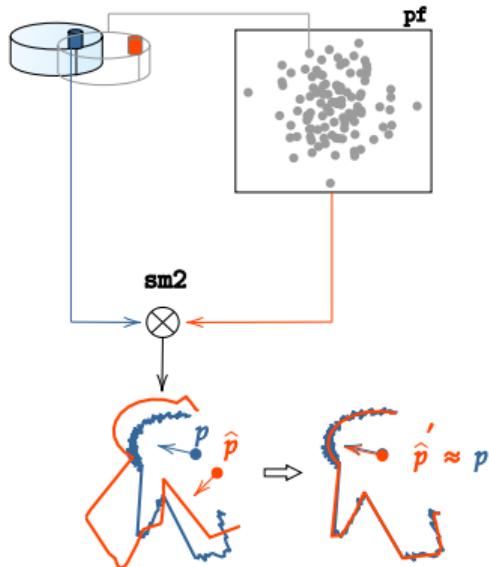


sm: ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων

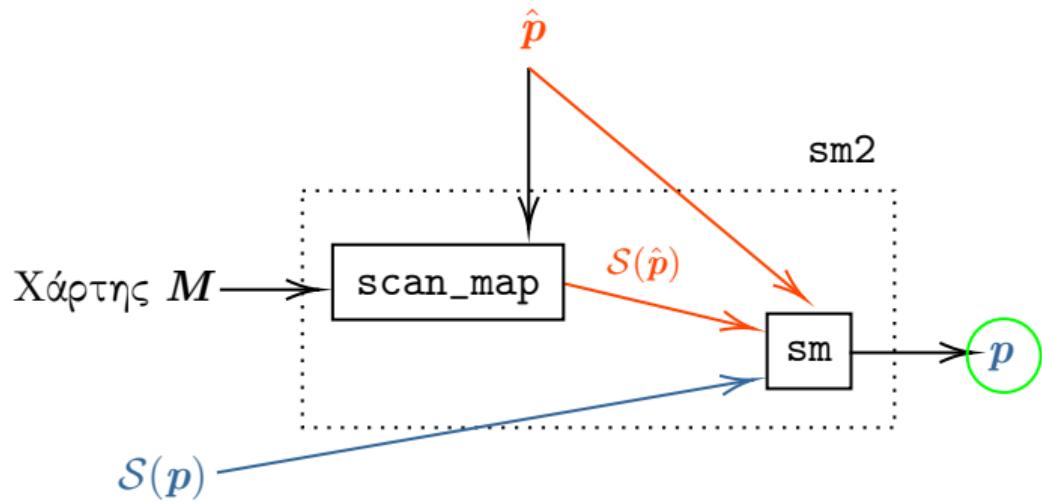


sm2: ευθυγράμμιση πραγματικής σάρωσης με εικονική σάρωση χάρτη

pf + sm2

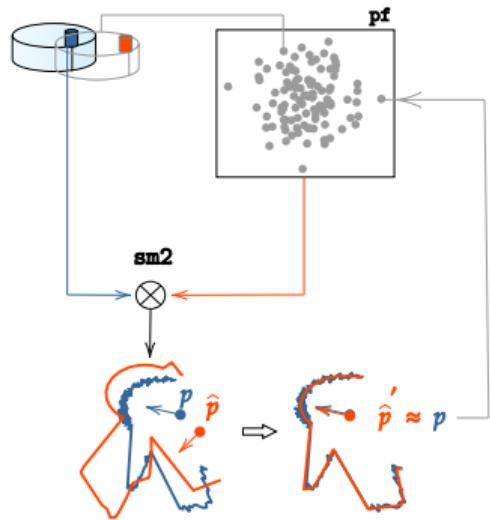


sm2 προσαρμοσμένη στην έξοδο φίλτρου σωματιδίων (pf)

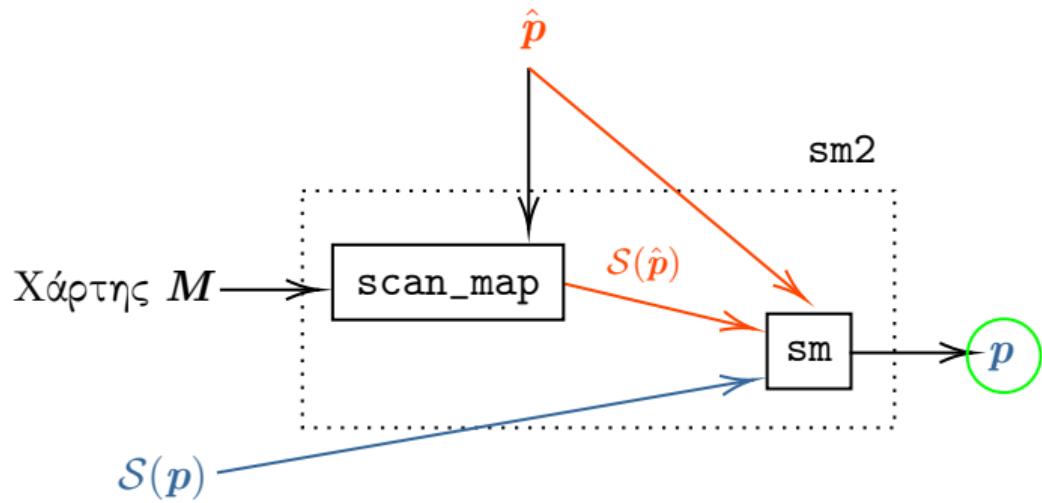


sm2: ευθυγράμμιση πραγματικής σάρωσης με εικονική σάρωση χάρτη

# pf + sm2 + feedback



sm2 προσαρμοσμένη στην έξοδο φύλτρου  
σωματιδίων (pf) και ανάδραση της εξόδου της



sm2: 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 μέσω ανάδρασης εξόδου sm2

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

Υπόθεση Υ2:

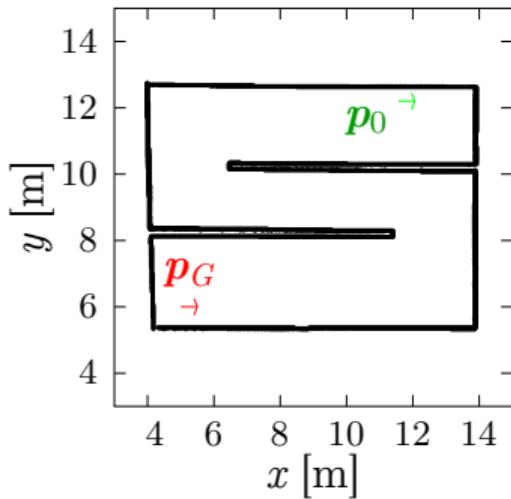
$$\|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}^*\| < \|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}(\mathcal{P})\|$$

Υπόθεση Υ3:

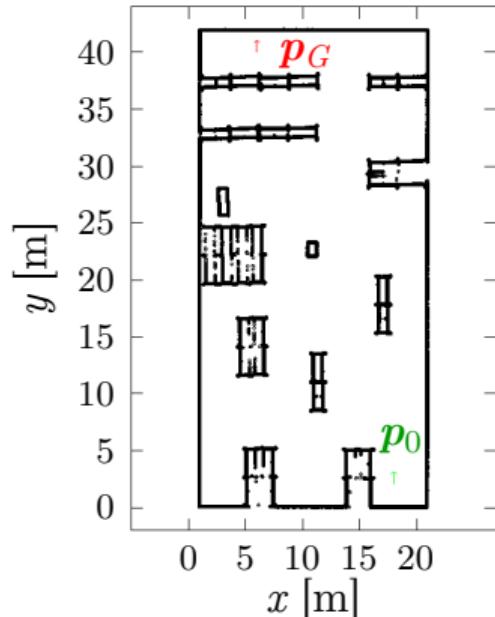
Εάν  $\mathcal{P}^\circlearrowleft = \mathcal{P} \circlearrowleft \{\hat{\mathbf{p}}^*\}_{q \cdot |\mathcal{P}^\circlearrowleft|}$ , όπου  $q \gg 0.01$  και  $q \ll 1.0$ :

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

# Πειραματική διάταξη



Χάρτης περιβάλλοντος CORRIDOR,  $M_C$



Χάρτης περιβάλλοντος WAREHOUSE,  $M_W$

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

lidar:

$$\lambda = 260^\circ$$

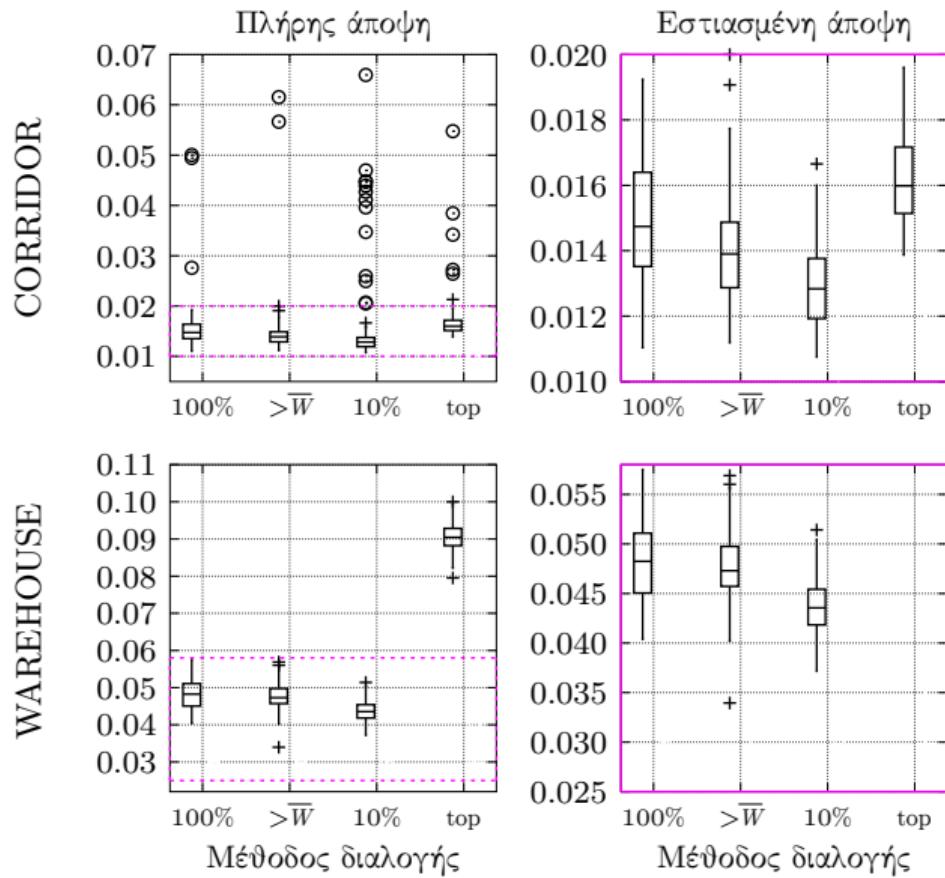
$N_s = 640$  ακτίνες

$$W_R \sim \mathcal{N}(0, \sigma_R^2 = 0.01^2) \text{ [m, m}^2\text{]}$$

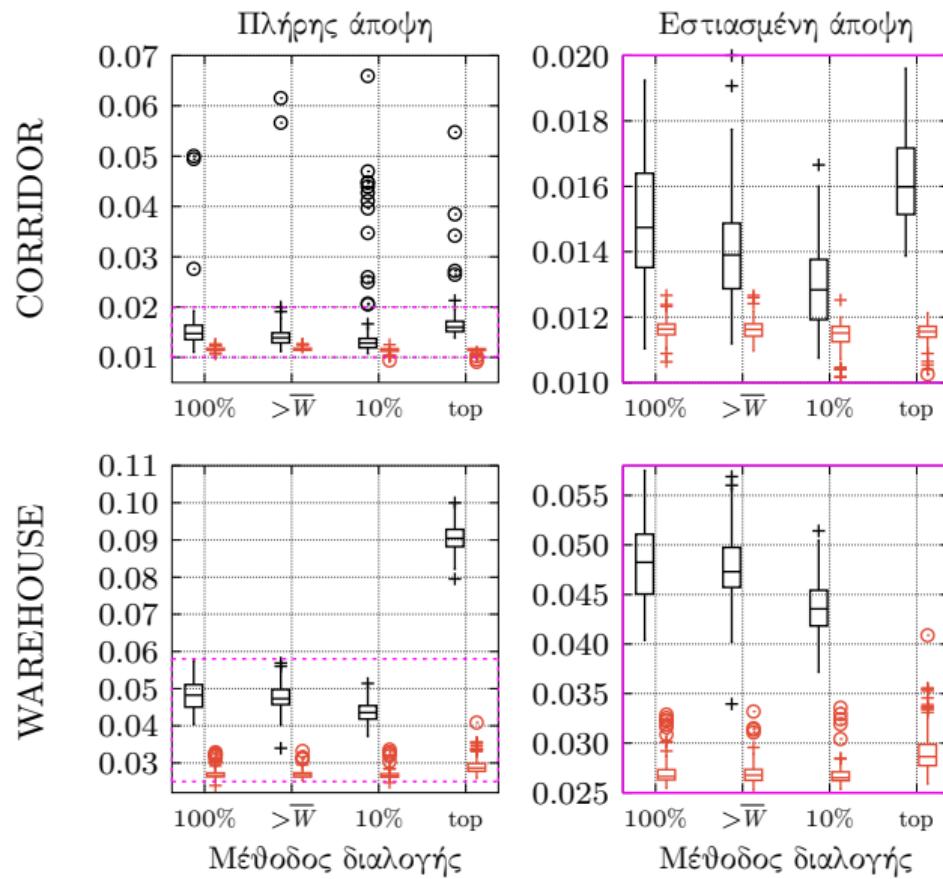
pf:

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

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

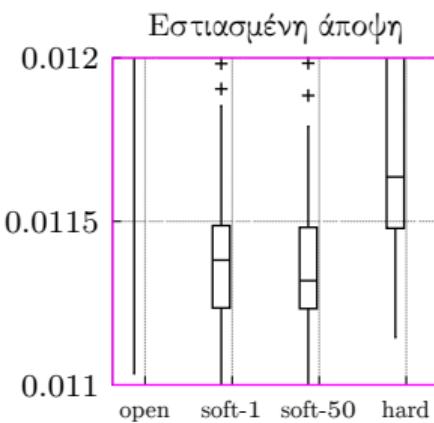
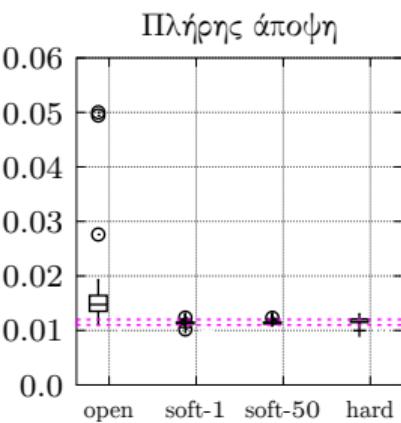


[Υ2] Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο διαλογής σωματιδίων +  $\text{sm2} [(m^2 + \text{rad}^2)^{1/2}]$

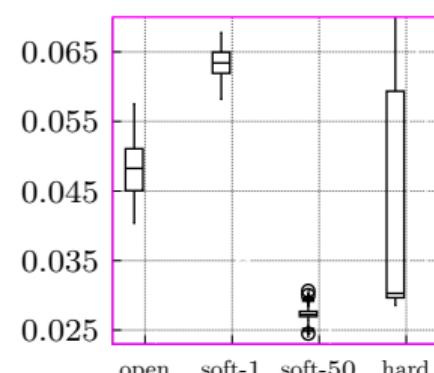
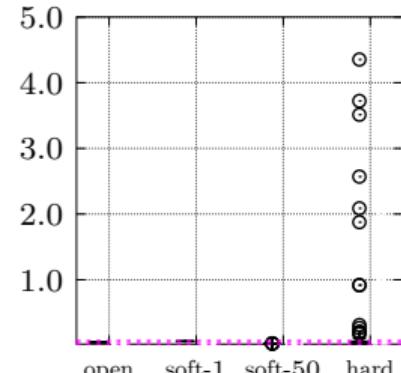


[Υ3] Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο ανάδρασης υπό θεσης sm2  $[(m^2 + rad^2)^{1/2}]$

CORRIDOR



WAREHOUSE



Πηγές:

soft-1:

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

soft-50:

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

hard:

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

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

Ελάττωση σφαλμάτων εκτίμησης στάσης φίλτρου σωματιδίων μέσω

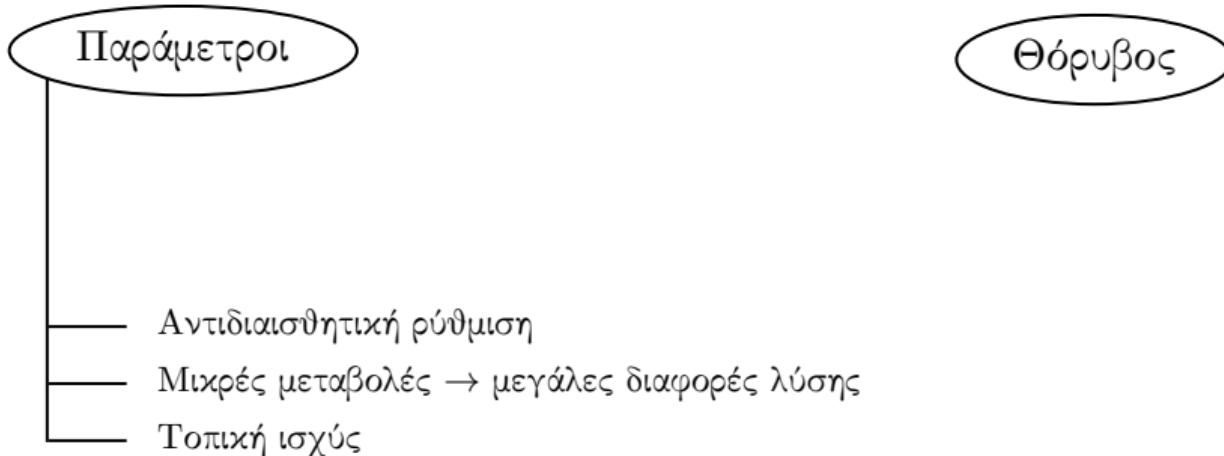
- διαλογής σωματιδίων
- ανάδρασης αποτελέσματος sm2 χωρίς απώλεια ανθεκτικότητας pf

## Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

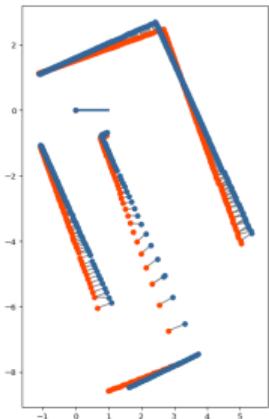
Παράμετροι

Θόρυβος

# Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: παραμετροποίηση

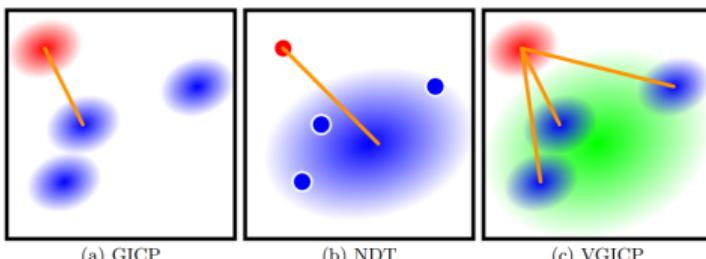


# Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης



B

A



Γ

A: ICP επί της αρχής (σημείο προς σημείο)

B: plicp: σημείο προς ευθύγραμμο τμήμα

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

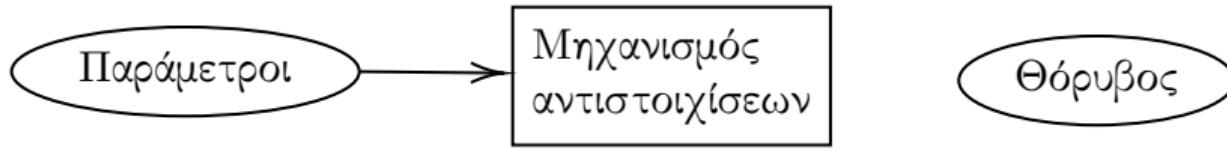
Πηγές:

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

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

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

## Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης



## Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: θόρυβος (ατελείς αντιστοιχίσεις)

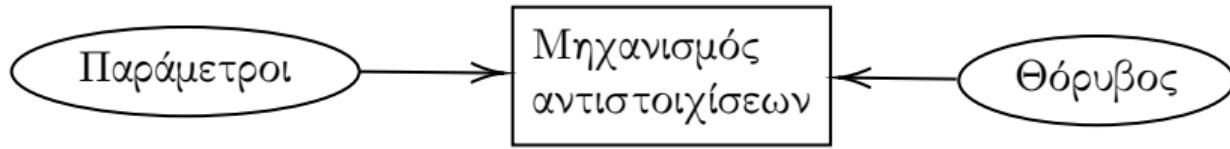
$$\sigma_R = 0.0 \mid \sigma_R = 0.1 \text{ m}$$

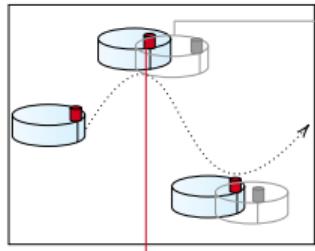
Χώρος αντιστοιχίσεων

Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης: κενές αντιστοιχίσεις

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

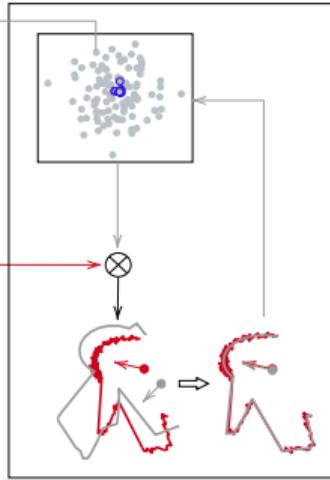
## Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης





Κεφ. 3

Παρατήρηση σφάλματων εκτίμησης στάσης



Κεφ. 4

Παρατηρήσεις ευαισθησίας λύσης σε παραμέτρους και ύδρυβο λόγω αντιστοιχίσεων



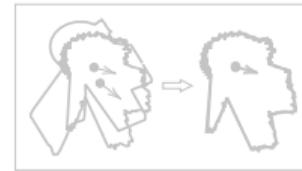
Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες σε πραγματικό χρόνο



Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης εργάμην χάρτη



Κεφ. 6

## Απόπειρα λύσης sm2 δίχως αντιστοιχίσεις

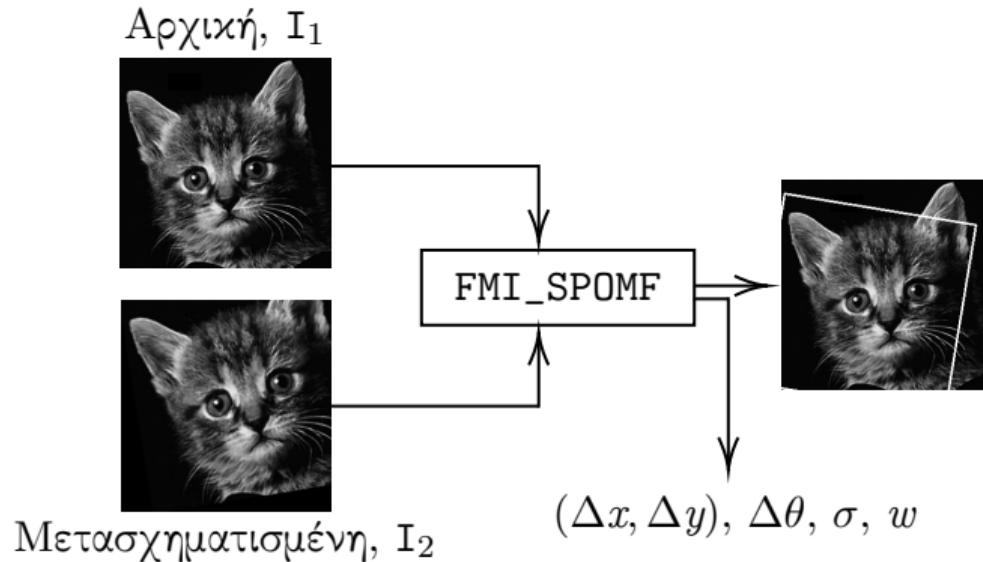
- Αναγκαία συνθήκη:  $\lambda = 2\pi \text{ rad}$
- Παραδοχή:  $t_{\text{exec}} \not\prec t_{\text{max}}$

## Απόπειρα λύσης sm2 δίχως αντιστοιχίσεις

Προβλήματα:

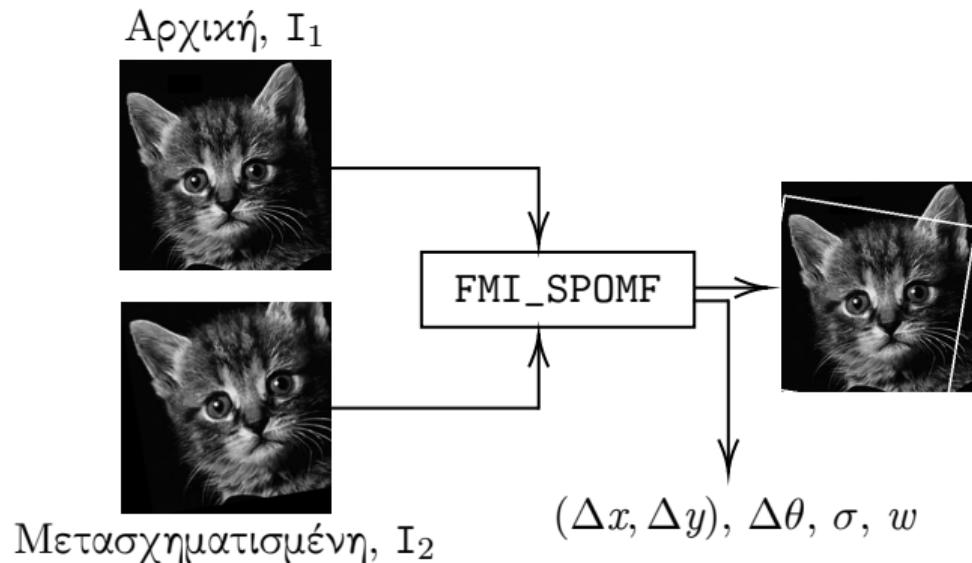
- Απούσα βιβλιογραφία στο συναφές πεδίο
- Εύρεση μεθόδου{ου,ων} εκτίμησης θέσης και προσανατολισμού

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



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

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



$$Q(u, v) = \frac{\mathcal{F}\{I_1\}^* \cdot * \mathcal{F}\{I_2\}}{|\mathcal{F}\{I_1\}| \cdot |\mathcal{F}\{I_2\}|}$$
$$q(\theta, \lambda) = \mathcal{F}^{-1}\{Q\}$$
$$\Delta\theta = \arg \max_{\theta} q$$
$$\sigma = \exp \arg \max_{\lambda} q$$
$$w = \max q$$

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

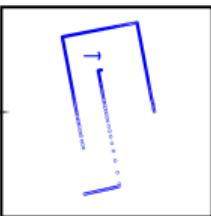
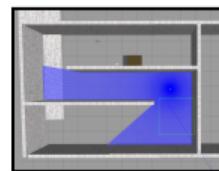
# Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

Περιβάλλον

+

Σάρωση

$$\mathcal{S}_R(\mathbf{p})$$



$$\mathbb{I}_R$$

$$\mathbb{I}_R, \mathbb{I}_V^{\text{rot}}$$



$$\mathbb{I}_V$$

$$(\Delta x, \Delta y), \Delta\theta, \sigma, w$$

Χάρτης

+

Εκτίμηση

$$\mathcal{S}_V(\hat{\mathbf{p}})$$

$$\mathcal{S}_R(\mathbf{p}), \mathcal{S}_V^{\text{rot}}(\hat{\mathbf{p}}^{\text{rot}})$$

FMI\_SPOMF

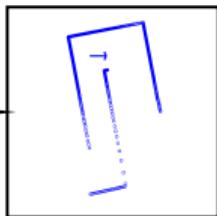
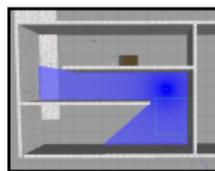
# Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

Περιβάλλον

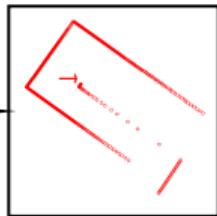
+

Σάρωση

$$\mathcal{S}_R(\mathbf{p})$$



$$\mathbb{I}_R$$



Χάρτης

+

Εκτίμηση

$$\mathcal{S}_V(\hat{\mathbf{p}})$$

$$\mathbb{I}_V$$

$$(\Delta x, \Delta y), \Delta\theta, \sigma, w$$

$$\mathbb{I}_R, \mathbb{I}_V^{\text{rot}}$$



$$\mathcal{S}_R(\mathbf{p}), \mathcal{S}_V^{\text{rot}}(\hat{\mathbf{p}}^{\text{rot}})$$

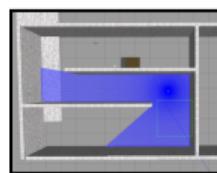
FMI\_SPOMF

# Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

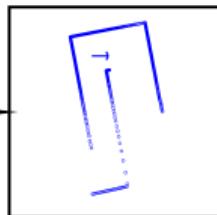
Περιβάλλον

+

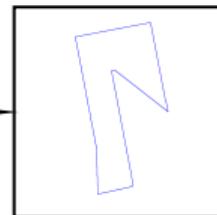
Σάρωση



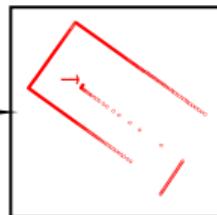
$$\mathcal{S}_R(\mathbf{p})$$



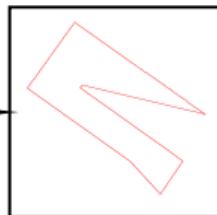
$$\mathbf{I}_R$$



$$\mathbf{I}_R, \mathbf{I}_V^{\text{rot}}$$



$$\mathcal{S}_V(\hat{\mathbf{p}})$$



$$\mathbf{I}_V$$

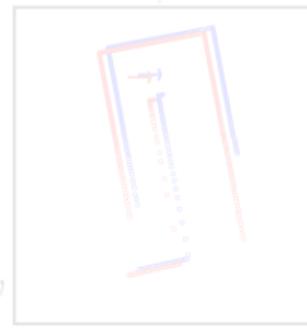
Χάρτης

+

Εκτίμηση



$$(\Delta x, \Delta y), \Delta\theta, \sigma, w$$



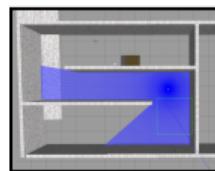
$$\mathcal{S}_R(\mathbf{p}), \mathcal{S}_V^{\text{rot}}(\hat{\mathbf{p}}^{\text{rot}})$$

# Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων

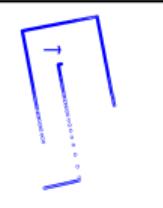
Περιβάλλον

+

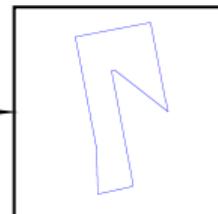
Σάρωση



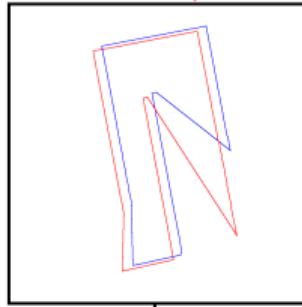
$$\mathcal{S}_R(\mathbf{p})$$



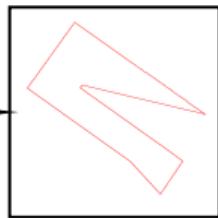
$$\mathbf{I}_R$$



$$\mathbf{I}_R, \mathbf{I}_V^{\text{rot}}$$

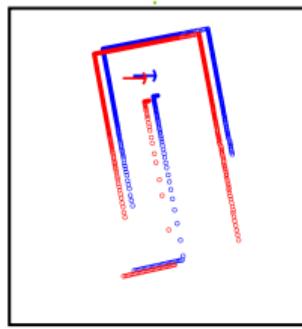


$$\mathcal{S}_V(\hat{\mathbf{p}})$$



$$\mathbf{I}_V$$

$$(\Delta x, \Delta y), \Delta\theta, \sigma, w$$



Χάρτης

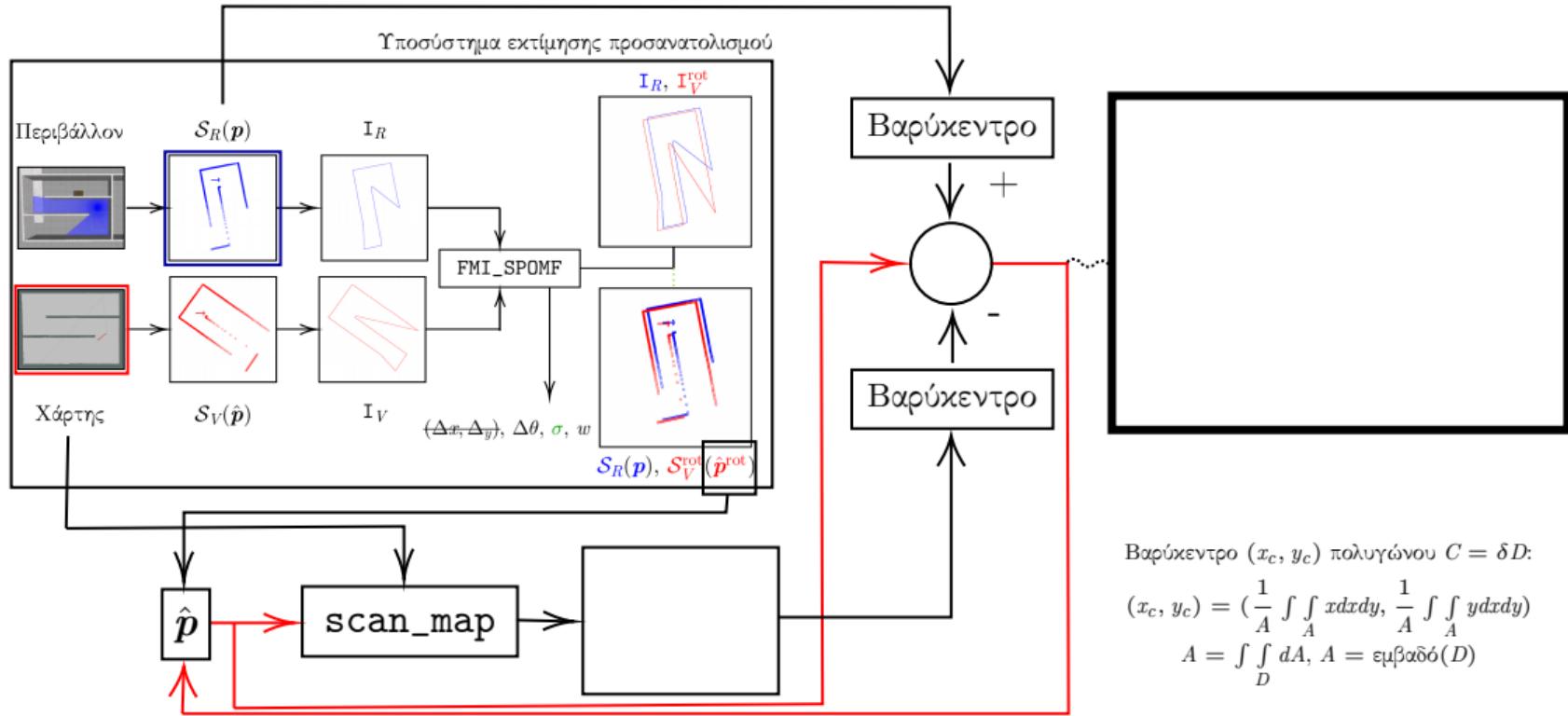
+

Εκτίμηση

FMI\_SPOMF



Ευθυγράμμιση πανοραμικών σαρώσεων από ευθυγράμμιση εικόνων



Βαρύκεντρο  $(x_c, y_c)$  πολυγώνου  $C = \delta D$ :

$$(x_c, y_c) = \left( \frac{1}{A} \int_A \int_A x dx dy, \frac{1}{A} \int_A \int_A y dx dy \right)$$

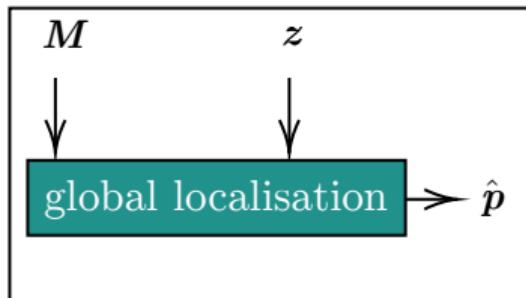
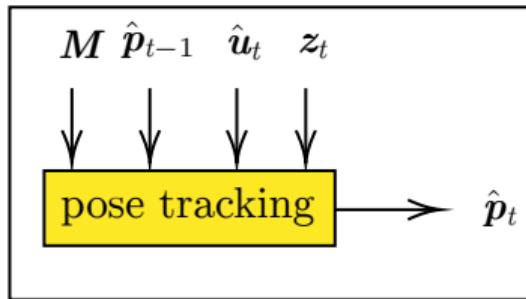
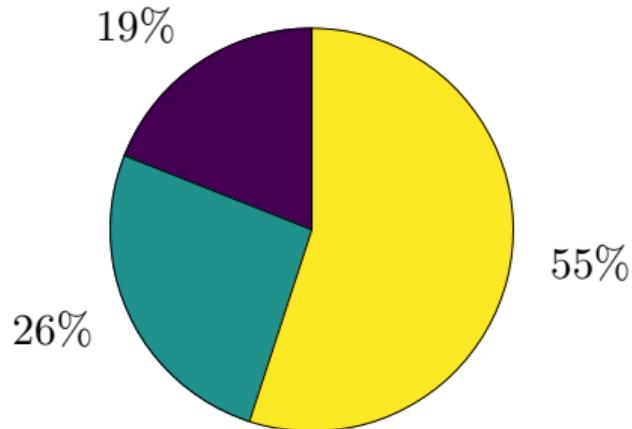
$$A = \int_A \int_D dA, A = \varepsilon \mu \beta \alpha \delta \delta(D)$$

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

sm2 προς επίλυση του προβλήματος (passive) Global Localisation

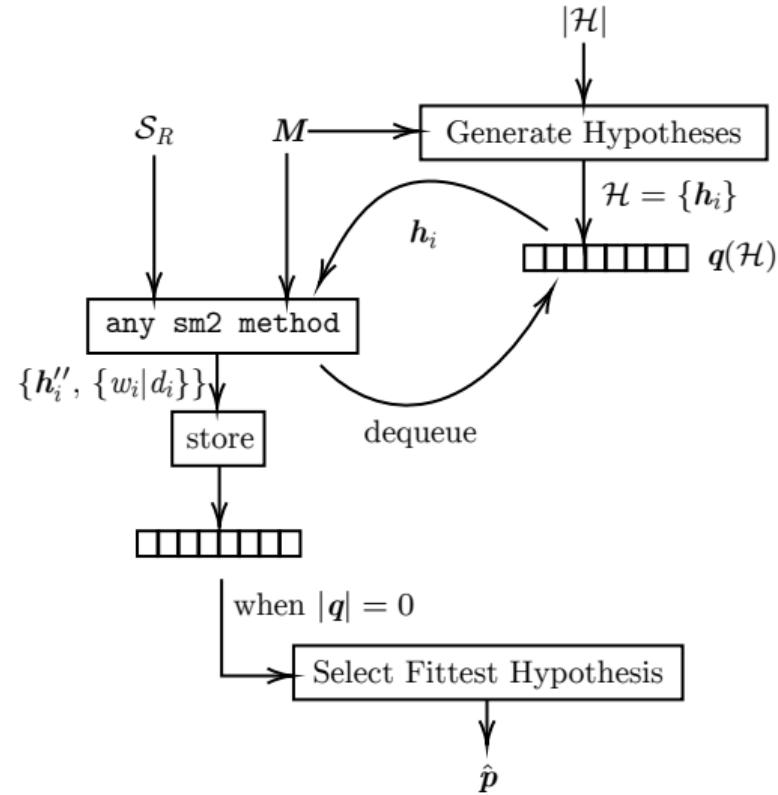
## Global localisation: Το δεύτερο μεγαλύτερο πρόβλημα ρομποτικής κινητής βάσης

- Kidnapped robot
- Global localisation
- Pose tracking



Ποσοστά δημοσιεύσεων ανά προβλήμα εκτίμησης στάσης. Πηγή: Prabin Kumar Panigrahi and Sukant Kishoro Bisoy. “Localization strategies for autonomous mobile robots: A review”, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2022

## Passive Global Localisation: επιλύσιμο μέσω sm2



## Πειραματική διαδικασία: διάταξη

- Πέντε προσομοιωμένα περιβάλλοντα / Ένα πραγματικό
- Προσομοιωμένα:
  - ▶ 38 δοκιμαστικές στάσεις
  - ▶ 100 επαναλήψεις ανά στάση
  - ▶ LIDAR:  $W_R \sim \mathcal{N}(0, \sigma_R^2 = \{0.01^2, 0.02^2, 0.05^2\})$  [m, m<sup>2</sup>],  $r_{\max} = 10.0$  m
- CSAL AUTH:
  - ▶ 11 δοκιμαστικές στάσεις
  - ▶ 5 επαναλήψεις ανά στάση
  - ▶ LIDAR: YDLIDAR TG30,  $r_{\max} = 30.0$  m



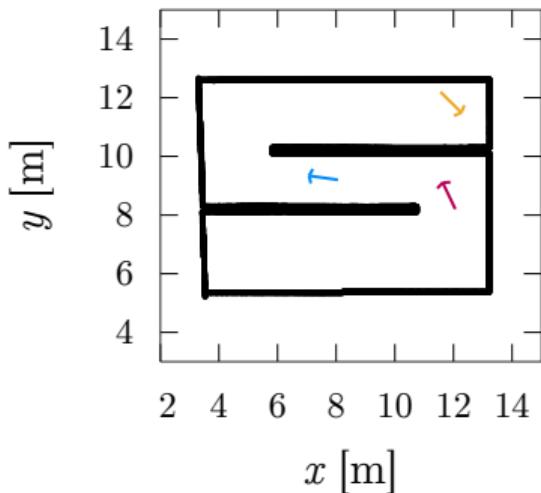
Απόσταση $d$ [mm]	Μέσο σφάλμα [mm]
50-5000	$\leq \pm 60$
5000-20000	$\leq \pm 40$
20000-30000	$\leq \pm 100$

Μέσο σφάλμα μέτρησης αισθητήρα YDLIDAR TG30 ανά επιστρεφόμενη τιμή απόστασης.  
Πηγή: datasheet κατασκευαστή

## Πειραματική διαδικασία: μη αποδεκτές λύσεις

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

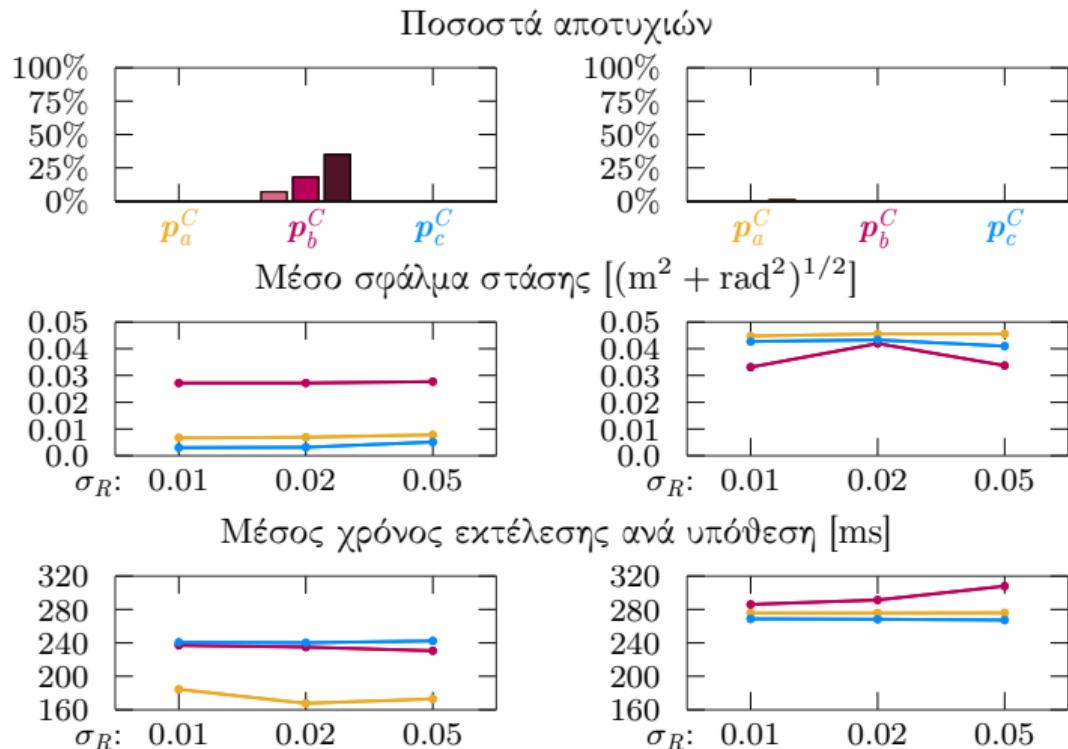
# Πειραματικά αποτελέσματα: CORRIDOR (sim; 1/6)



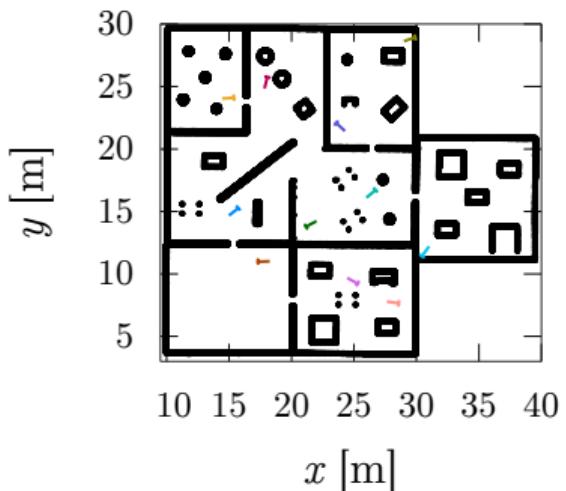
$|\mathcal{H}_C| = 100$  υποθέσεις

$100 \times \{p_i\} = 300$  απόπειρες εκτίμησης

Μέσω PLICP

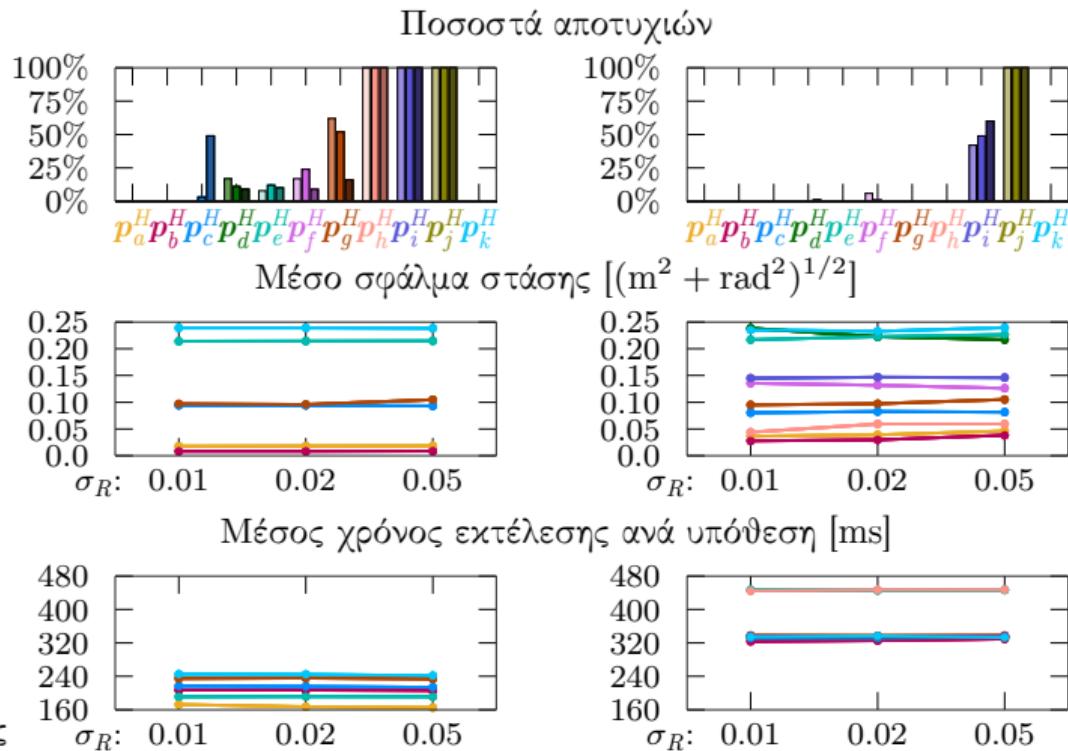


# Πειραματικά αποτελέσματα: HOMER (sim; 2/6)



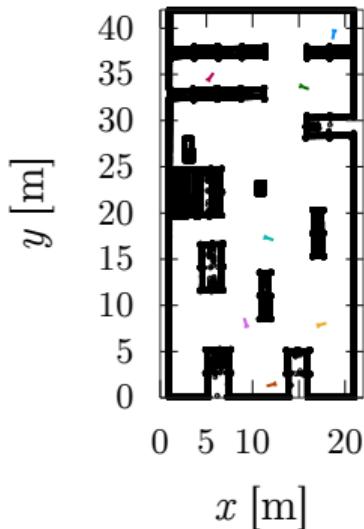
Μέσω PLICP

Μέσω FMI-SPOMF



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

Μέσω PLICP

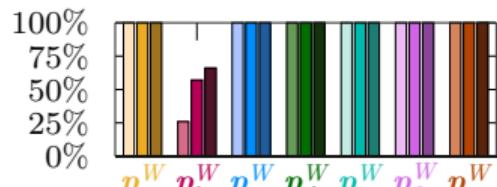


$|\mathcal{H}_W| = 200$  υποθέσεις

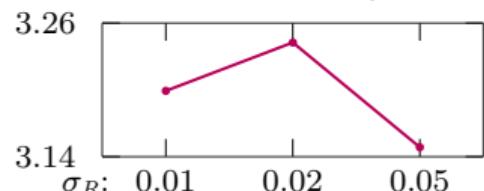
$100 \times \{p_i\} = 700$  απόπειρες εκτίμησης

Μέσω FMI-SPOMF

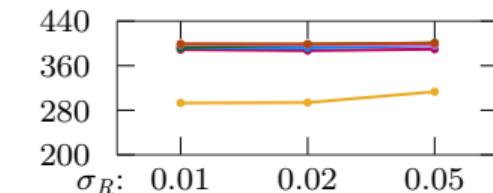
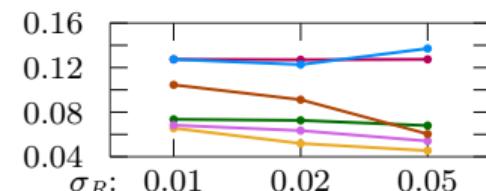
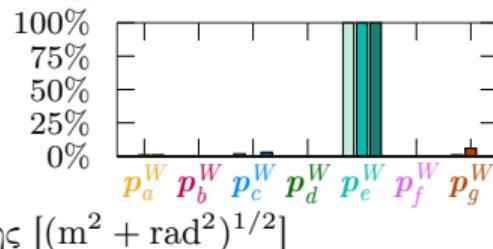
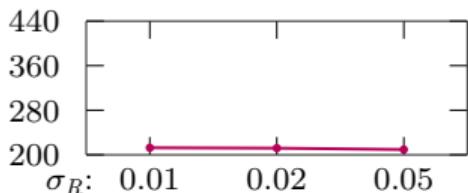
Ποσοστά αποτυχιών



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

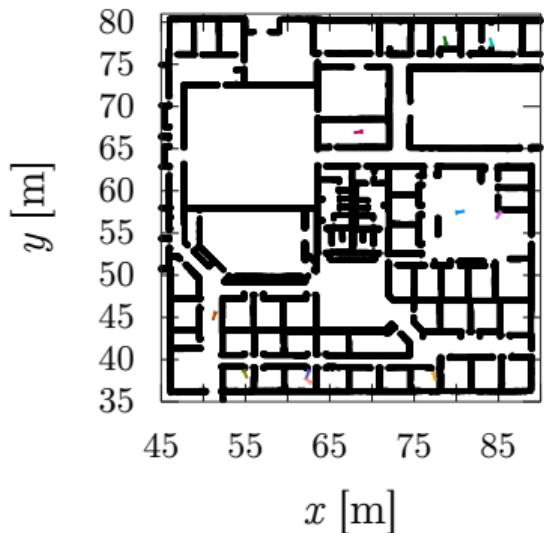


Μέσος χρόνος εκτέλεσης ανά υπόθεση [ms]



# Πειραματικά αποτελέσματα: WILLOWGARAGE (sim; 4/6)

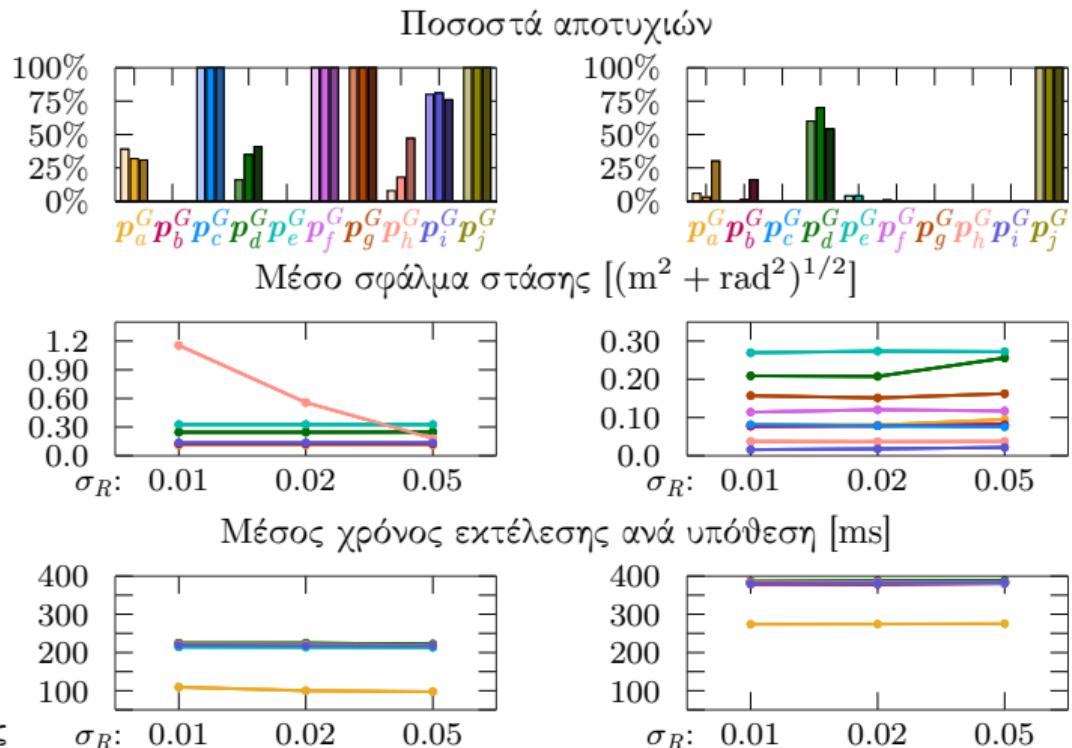
Μέσω PLICP



$$|\mathcal{H}_G| = 500 \text{ υποθέσεις}$$

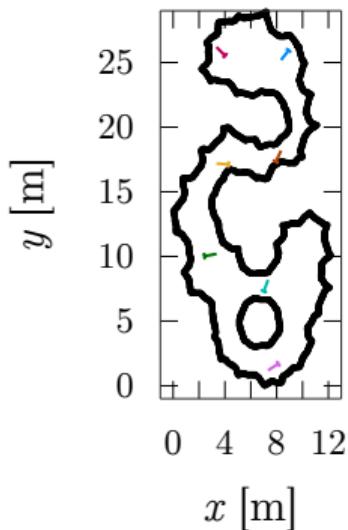
$$100 \times \{p_i\} = 1000 \text{ απόπειρες εκτίμησης}$$

Μέσω FMI-SPOMF



Πειραματικά αποτελέσματα: LANDFILL (sim; 5/6)

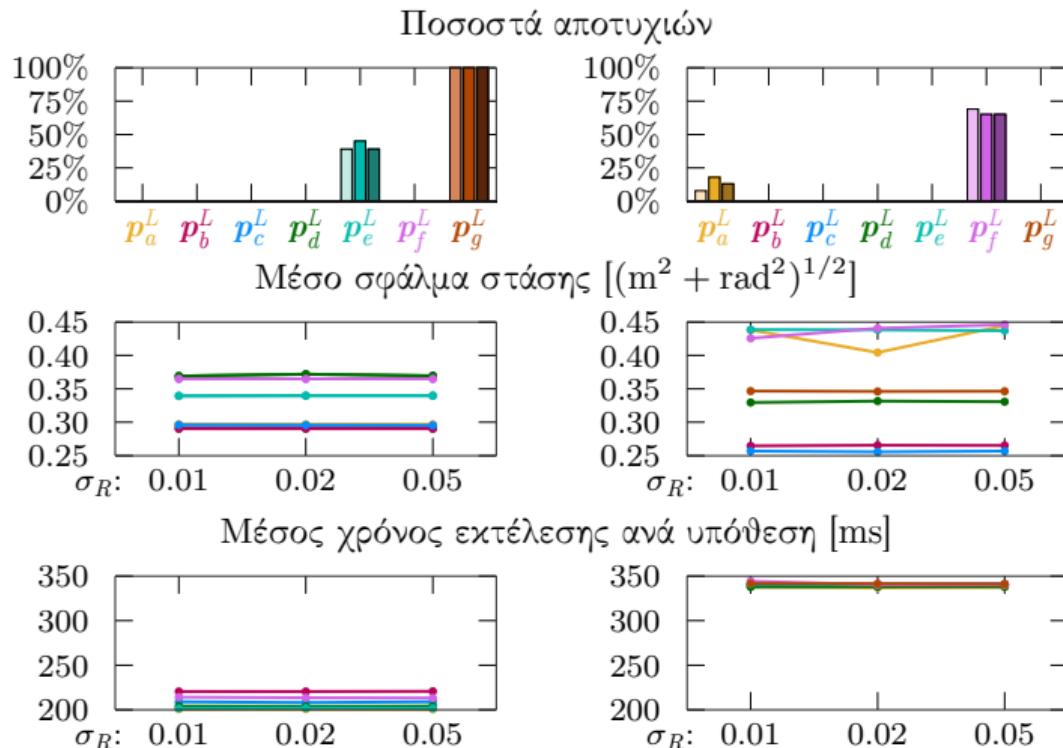
Mέσω PLICP



$|\mathcal{H}_L| = 100$  υποθέσεις

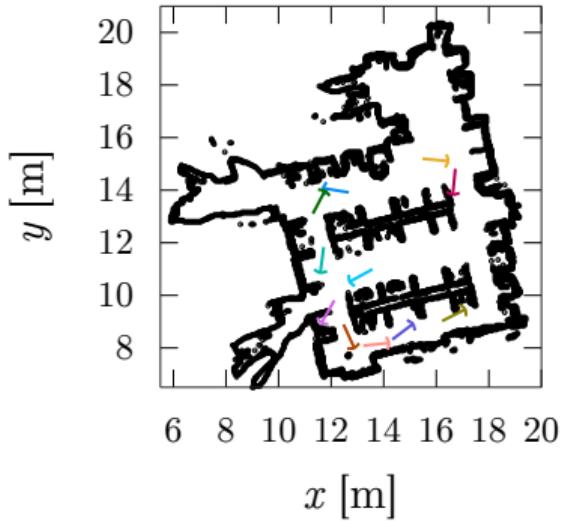
$100 \times \{p_i\} = 700$  απόπειρες εκτίμησης

Mέσω FMI-SPOMF



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

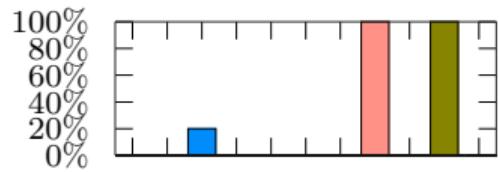
Μέσω PLICP



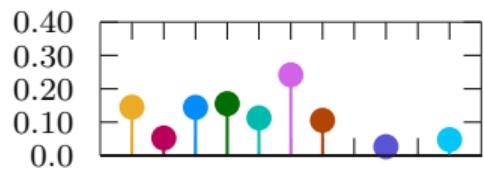
$|\mathcal{H}_A| = 100$  υποθέσεις

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

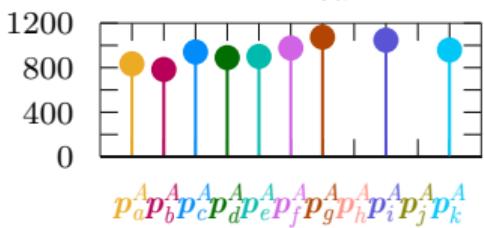
Ποσοστά αποτυχιών



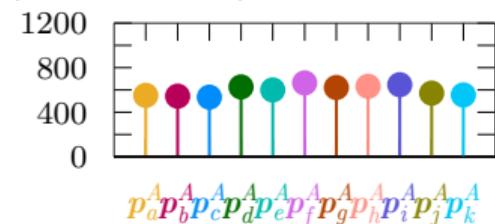
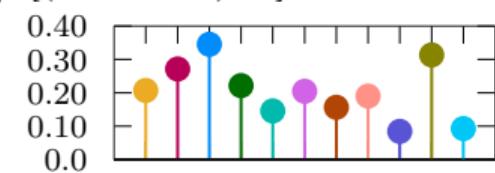
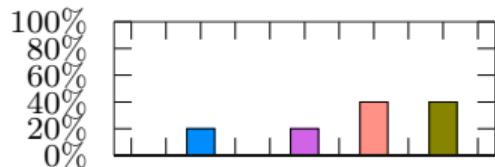
Μέσο σφάλμα στάσης  $[(m^2 + rad^2)^{1/2}]$



Μέσος χρόνος εκτέλεσης ανά υπόθεση [ms]



Μέσω FMI-SPOMF

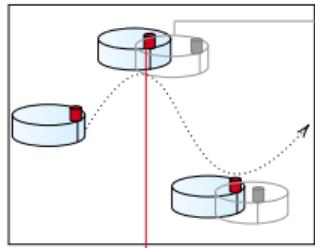


## Συμπεράσματα πειραμάτων

- Σφάλματα εκτίμησης sm2: μέσω FMI-SPOMF ~ μέσω μεθόδων-με-αντιστοιχίσεις
- Ευαισθησία μεθόδων με αντιστοιχίσεις σε:
  - ▶ παραμέτρους (π.χ. αποτυχίες @ WAREHOUSE)
  - ▶ αρχικές συνθήκες μετατόπισης (π.χ. 1 υπόθεση ανά  $4 \text{ m}^2$  @ WAREHOUSE, WILLOWGARAGE)

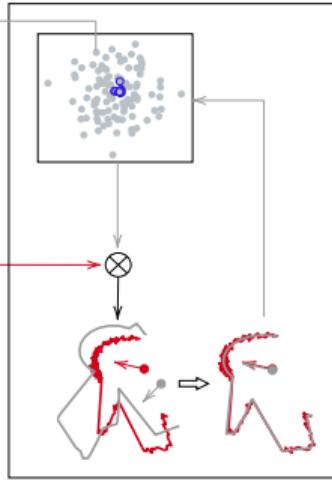
Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

Ευθυγράμμιση πραγματικών με εικονικές σαρώσεις πανοραμικού lidar  
χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων



Κεφ. 3

Παρατήρηση  
σφάλματων  
εκτίμησης  
στάσης



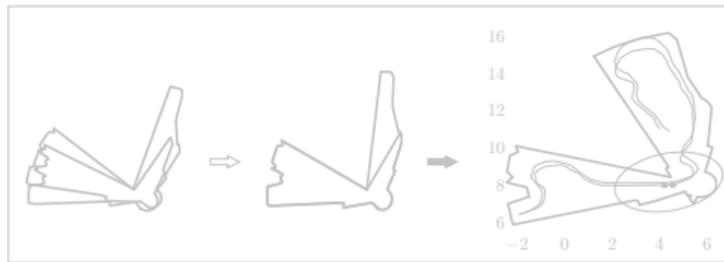
Κεφ. 4

Παρατηρήσεις  
ευαισθησίας λύσης  
σε παραμέτρους  
και ύδρυβο  
λόγω αντιστοιχίσεων



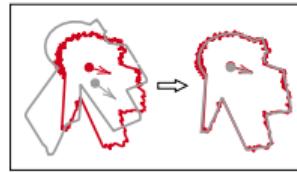
Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες  
σε πραγματικό χρόνο



Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης  
εργάμην χάρτη



Κεφ. 6

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

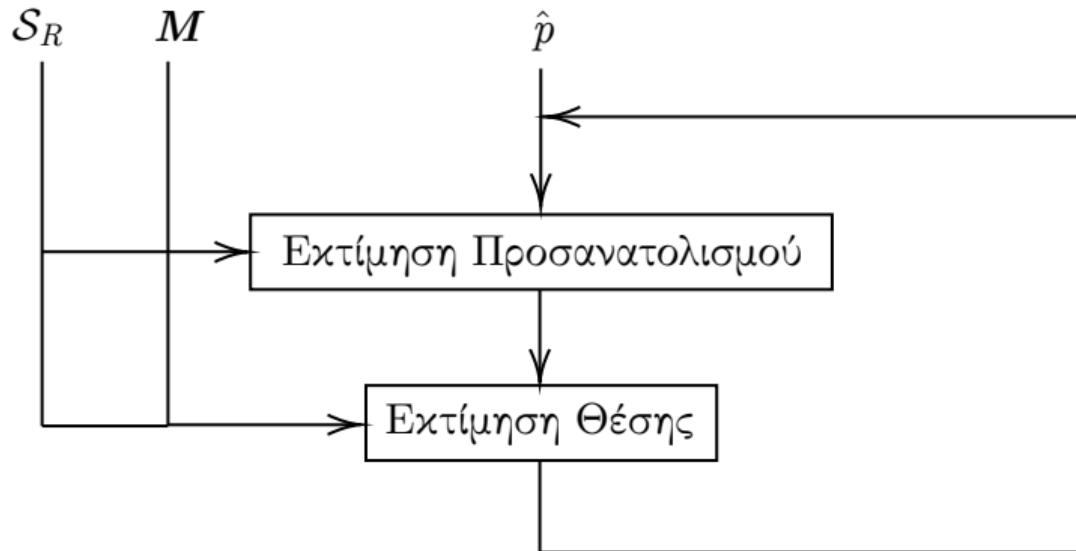
(Σ1)  $\hat{\mathbf{p}}' \leftarrow h(\mathcal{S}_R, M, \hat{\mathbf{p}})$ :

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

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

## Αποσύνθεση προβλήματος

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



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

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

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

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

## 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
- rc\_fm
- rc\_uf

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:

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

Εκτίμηση προσανατολισμού όταν  $\hat{l} = l$  (rc\_fm—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\_uf—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  $\theta$  γνωστή [1].

Όμως  $\theta$  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 επίλοιπο σφάλμα:

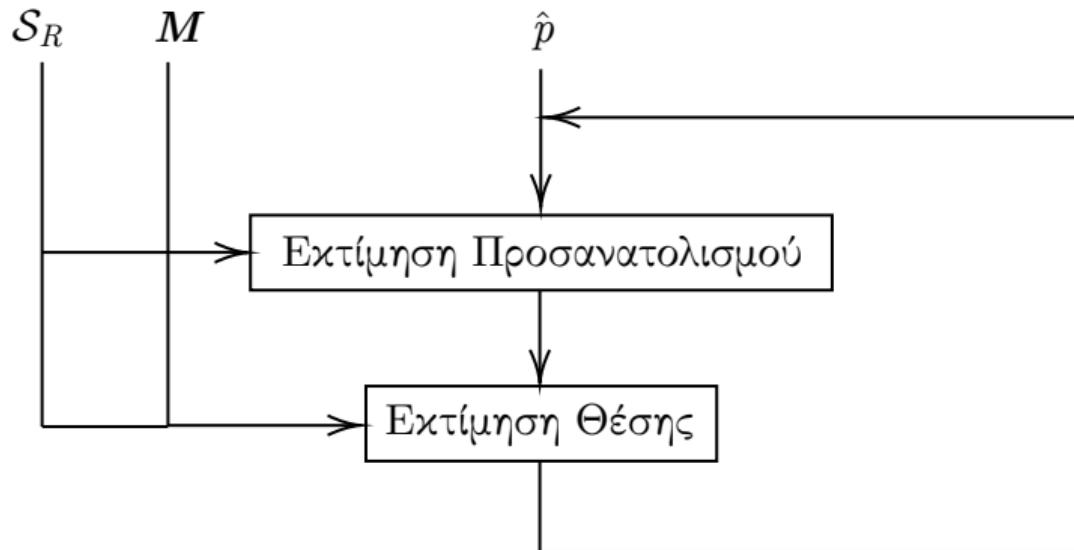
$$\phi \leq \frac{\gamma}{2}$$

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

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

- `rc_x1`
  - `rc_fm`
  - `rc_uf`
- } επίλοιπο σφάλμα  $\phi = f(N_s)$

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



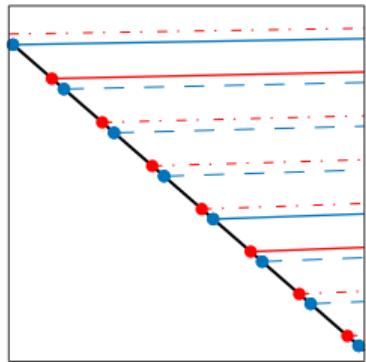
Υπερδειγματοληψία πραγματικής σάρωσης σε γραμμικές περιοχές ✓

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

Υπερδειγματοληψία πραγματικής σάρωσης σε μη γραμμικές περιοχές  $X$

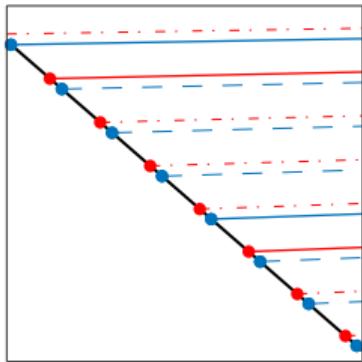
$$\mathcal{S}_R^{-\text{-interp}}(\theta) \quad \mathcal{S}_V^{-\text{-oversamp}}(\hat{\theta})$$

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

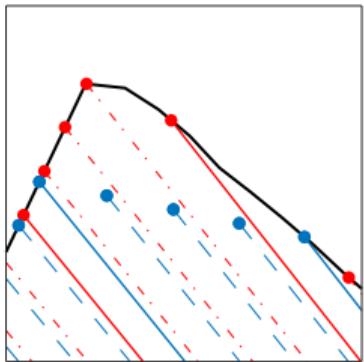


Λύση: Υπερδειγματοληψία του χάρτη  $\Rightarrow$  παραγωγή  $2^\nu$  εκτιμήσεων

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



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



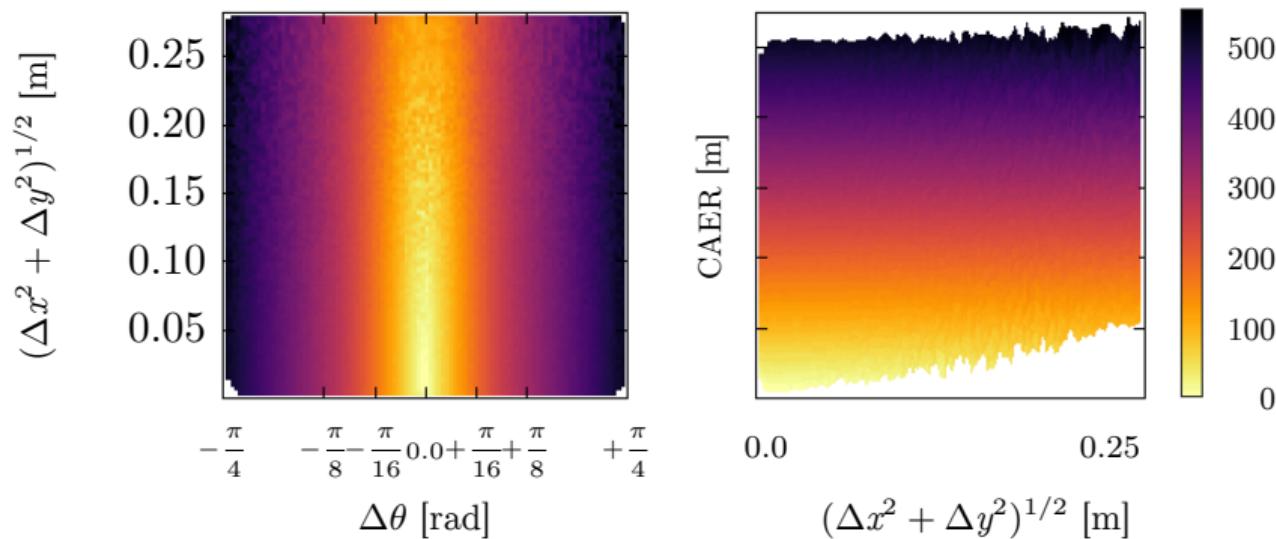
$$\mathcal{S}_R(\theta) \quad \mathcal{S}_V(\hat{\theta} + \{0 \dots 2^{\nu_{\max}} - 1\} \cdot \frac{\gamma}{2^{\nu_{\max}}})$$

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

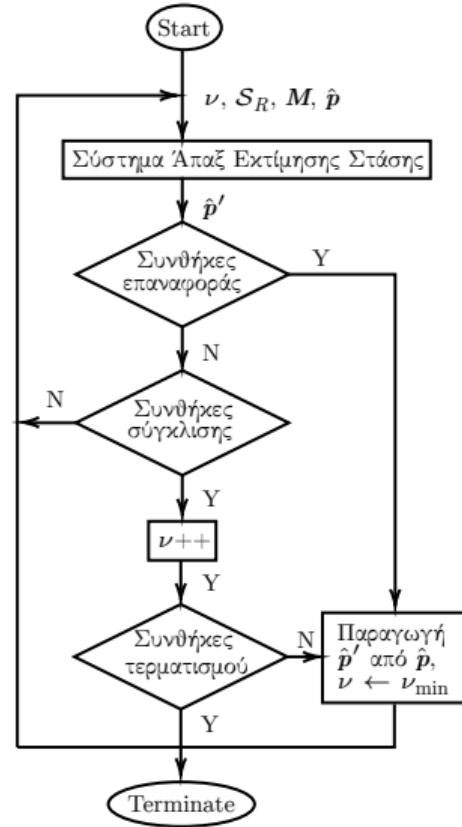
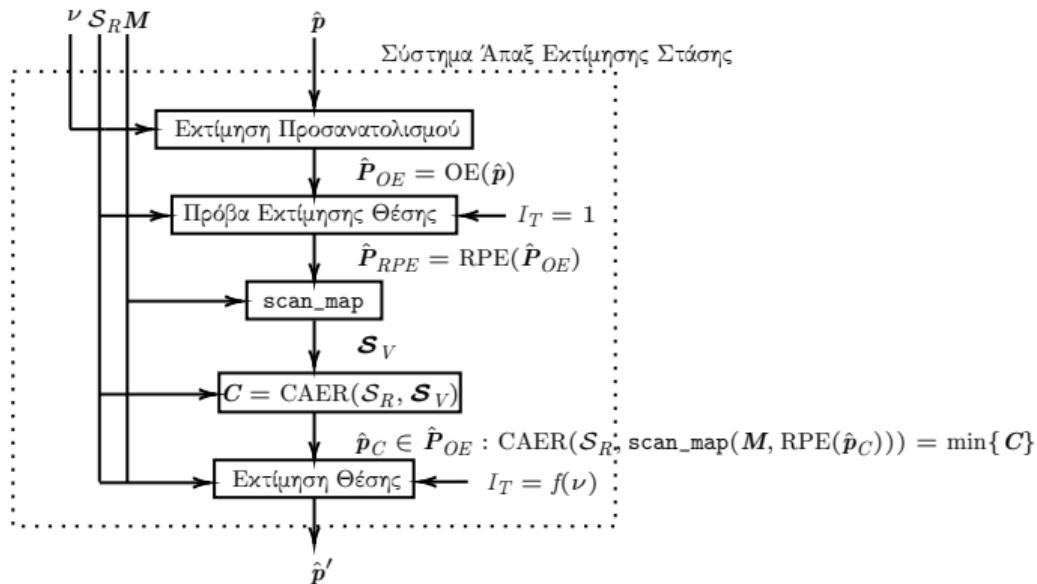
# Ιεράρχηση σφαλμάτων εκτιμήσεων: η μετρική CAER\*

\* 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 $D_d$	Πληθυκότητα
aces	7373
fr079	4933
intel	13630
mit_csail	1987
mit_killian	17479
$\sum  D_d  = 45402$	

# 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 $D_d$	Πληθυκότητα
aces	7373
fr079	4933
intel	13630
mit_csail	1987
mit_killian	17479
$\sum  D_d  = 45402$	

Σύνολα δεδομένων αξιολόγησης, Department of Computer Science, University of Freiburg,  
[http://ais.informatik.uni-freiburg.de/  
slamevaluation/datasets.php](http://ais.informatik.uni-freiburg.de/slamevaluation/datasets.php)

Τυπική απόκλιση θορύβου μέτρησης και συντεταγμένων χάρτη

$$W_R \sim \mathcal{N}(0, \sigma_R^2 = \{0.01^2, 0.03^2, 0.05^2, 0.10^2, 0.20^2\}) \text{ [m, m}^2]$$

$$W_M \sim \mathcal{N}(0, \sigma_M^2 = \{0.0, 0.05^2\}) \text{ [m, m}^2]$$

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:

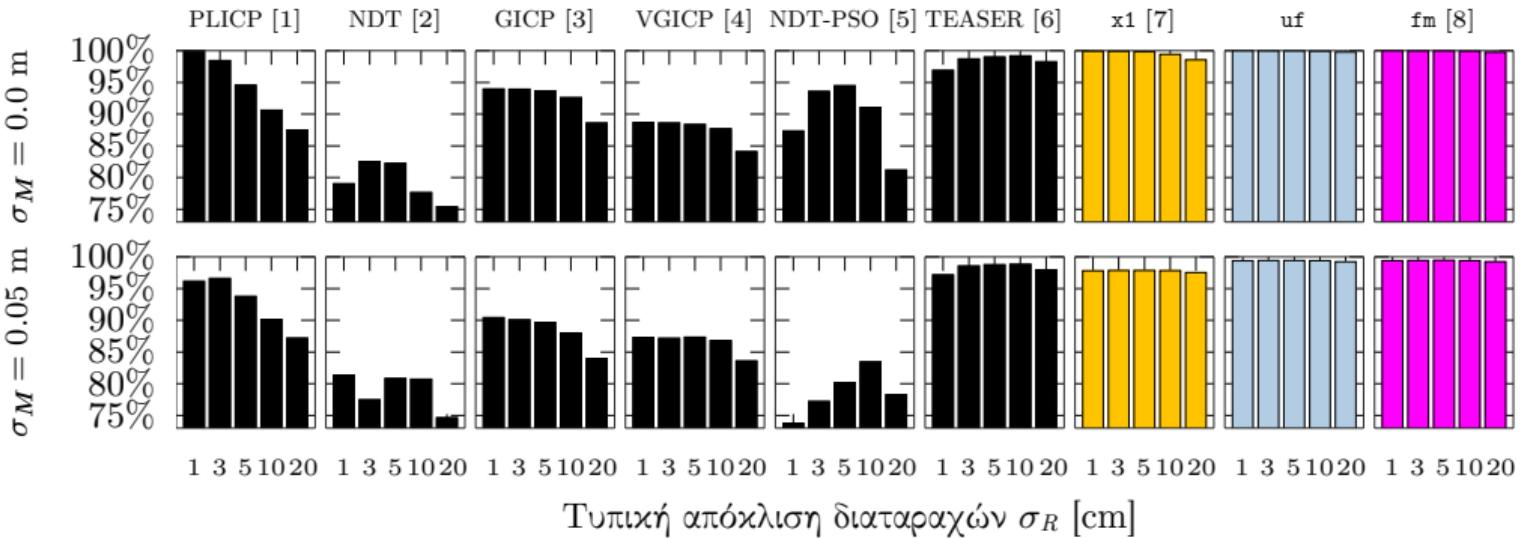
$$10 \times \sum |D_d| \times |\sigma_R| \times |\sigma_M| \simeq 4.5 \cdot 10^6$$

Μέγεθος σαρώσεων:  $N_s = 360$

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

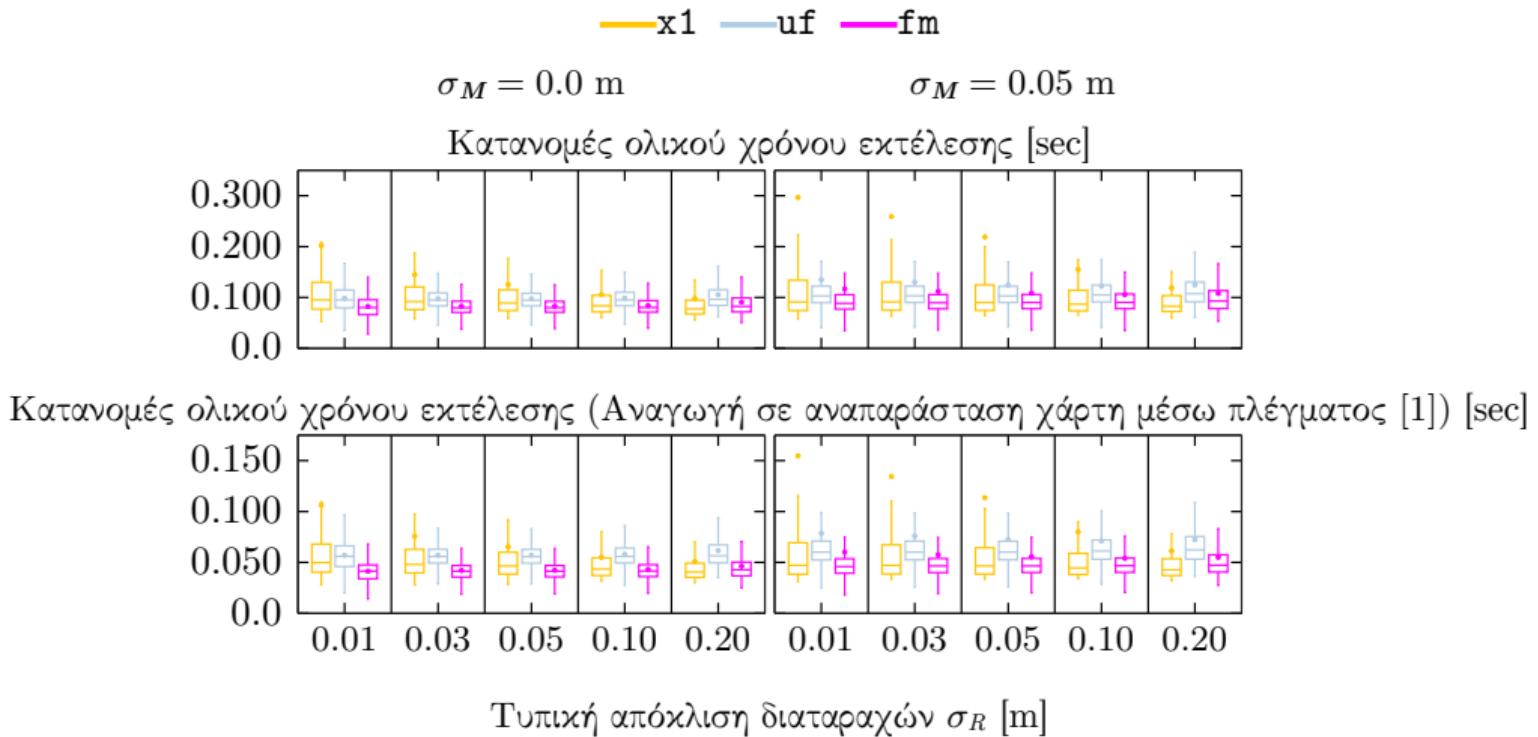
$$I_T = 1 + \nu$$

# 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*, 2023
- [8] A. Filotheou, G. Sergiadis, A. Dimitriou, "FSM: Correspondenceless scan-matching of panoramic 2D range scans", *IROS* 2022

## Στόχος Σ2: Χρόνοι εκτέλεσης

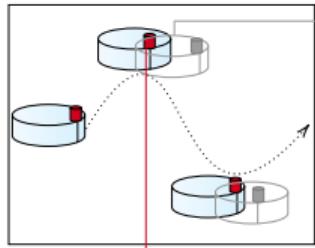


[1] C. H. Walsh and S. Karaman, “CDDT: Fast Approximate 2D Ray Casting for Accelerated Localization,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2018

Τι ήταν προηγουμένως αδύνατον και τώρα είναι εφικτό

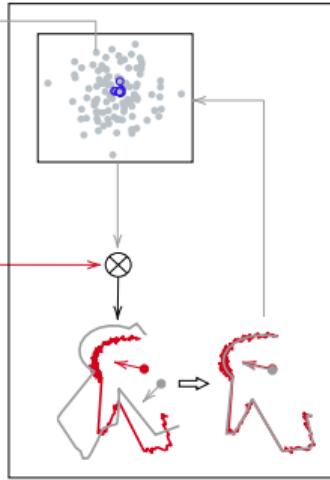
Real-time μέθοδοι sm2 χωρίς τον υπολογισμό αντιστοιχίσεων (για δισδιάστατες και πανοραμικές σαρώσεις):

- Εύρωστη βελτίωση ακρίβειας {pose tracking, θέσεων προϊόντων}
- Λύση global localisation
  - ▶ Χωρίς ad hoc παραμετροποίηση (features ή μεταβλητές)
  - ▶ Ταχύτερα από FMI-SPOMF ( $\Rightarrow$  περισσότερες υποθέσεις  $\rightarrow$  λιγότερες αποτυχίες εκτίμησης)



Κεφ. 3

Παρατήρηση  
σφάλματων  
εκτίμησης  
στάσης



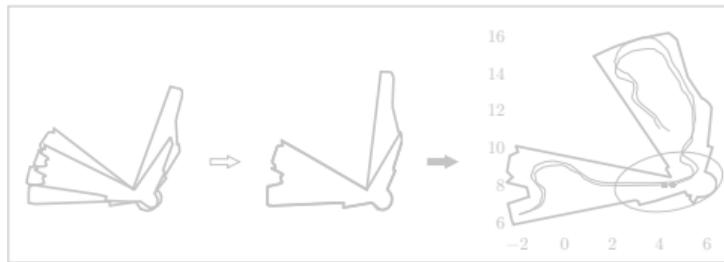
Κεφ. 4

Παρατηρήσεις  
ευαισθησίας λύσης  
σε παραμέτρους  
και ύδρυβο  
λόγω αντιστοιχίσεων



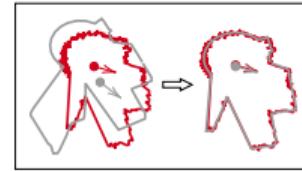
Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες  
σε πραγματικό χρόνο



Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης  
εργάμην χάρτη



Κεφ. 6

## 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 =  $360^\circ$
- Χάρτης  $M$  του περιβάλλοντος
- Εκτίμηση  $\hat{\mathbf{p}}(\hat{l}, \hat{\theta})$
- Η εκτίμηση θέσης  $\hat{l} = (\hat{x}, \hat{y})$  είναι σε μία γειτονιά της  $l = (x, y)$   $\|\hat{l}_0 - l\| < \delta$

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

- $\|\hat{l}_{0:N} - l\| < \delta$
  - $\mathcal{S}_V(\hat{\mathbf{p}}_0)$  τοπική προσέγγιση  $M$  (άρα  $W$ )
- στη γειτονιά της  $\mathbf{p}$ ,  $\forall \hat{\mathbf{p}}_i, i = 0, 1, \dots, N$
- $\left. \begin{array}{c} \rightarrow \mathcal{S}_R(\mathbf{p}_1) \\ \downarrow \mathcal{S}_V(\hat{\mathbf{p}}_0) \end{array} \right\}$  Εάν  $M \leftarrow \mathcal{S}_R(\mathbf{p}_2) \Rightarrow h$  λύνει sm;

# Ευθυγράμμιση sm

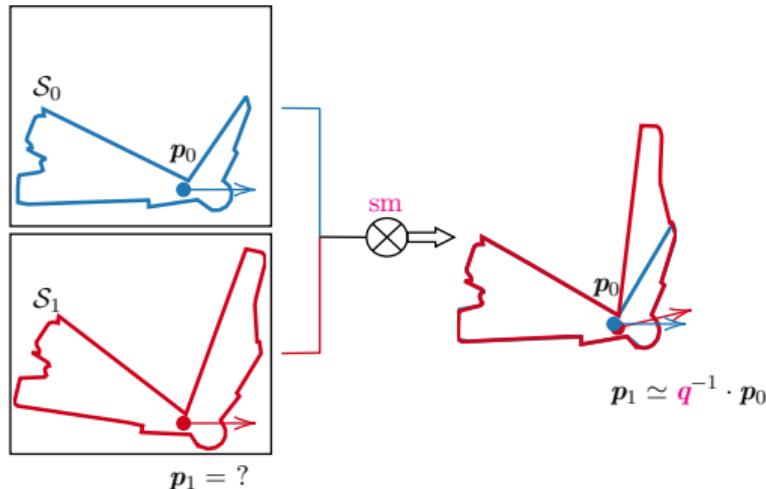
Πρόβλημα:

Κατασκευή  $h$ : sm, δεδομένων:

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

τέτοιας ώστε

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

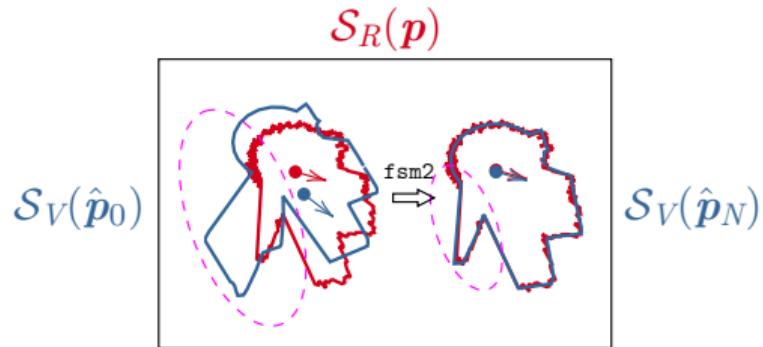


## Βαρύτητα μετατροπής fsm2 σε fsm

- 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

## 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:

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

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

Πέντε benchmark περιβάλλοντα δοκιμής

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

# Πειραματική διαδικασία

Στόχοι:

$$(\Sigma 1) \quad \| \hat{q}^{\text{fsm}} - q \| \stackrel{?}{\leq} \| \hat{q}^{\text{sota}} - q \|$$
$$(\Sigma 2) \quad \bar{t}_{\text{exec}}^{\text{fsm}} \leq 50.0 \text{ ms}$$

Πέντε benchmark περιβάλλοντα δοκιμής

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

Τυπική απόκλιση θορύβου μέτρησης

$$W_R \sim \mathcal{N}(0, \sigma_R^2 = \{0.01^2, 0.03^2, 0.05^2, 0.1^2, 0.20^2\}) [\text{m}, \text{m}^2]$$

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	Διαιρόφωση (m,rad)
$\Delta_0$	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.05, 0.034)$
$\Delta_1$	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.10, 0.070)$
$\Delta_2$	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.15, 0.150)$
$\Delta_3$	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.20, 0.300)$
$\Delta_4$	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.20, 0.560)$
$\Delta_5$	$(\bar{\delta}_{xy}, \bar{\delta}_\theta) = (0.20, \pi/4)$

Συνολικός αριθμός ευθυγραμμίσεων ανά μέθοδο:

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

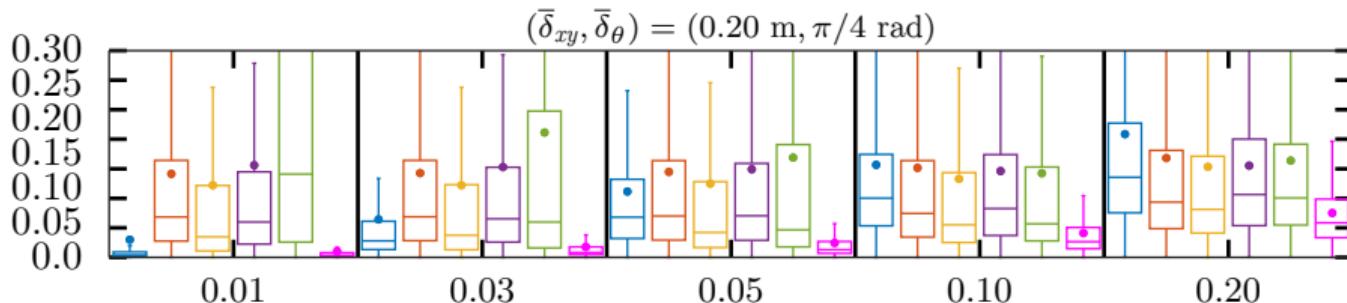
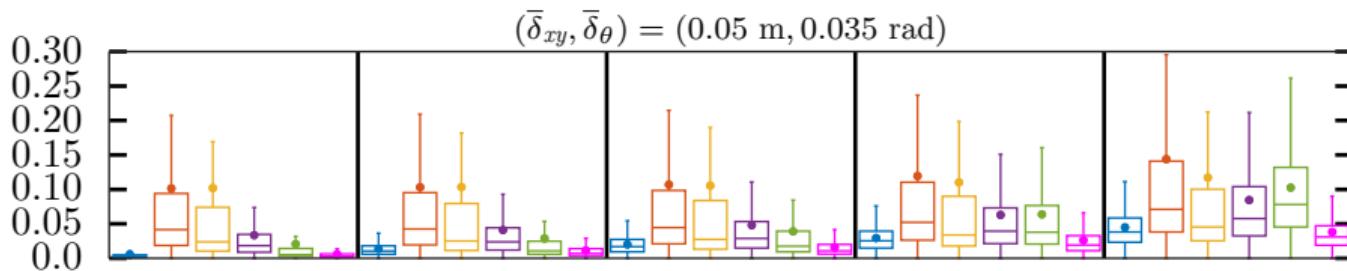
Μέγεθος σαρώσεων:  $N_s = 360$

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

$$I_T = 5(1 + \nu)$$

## Κατανομές σφαλμάτων θέσης [m]

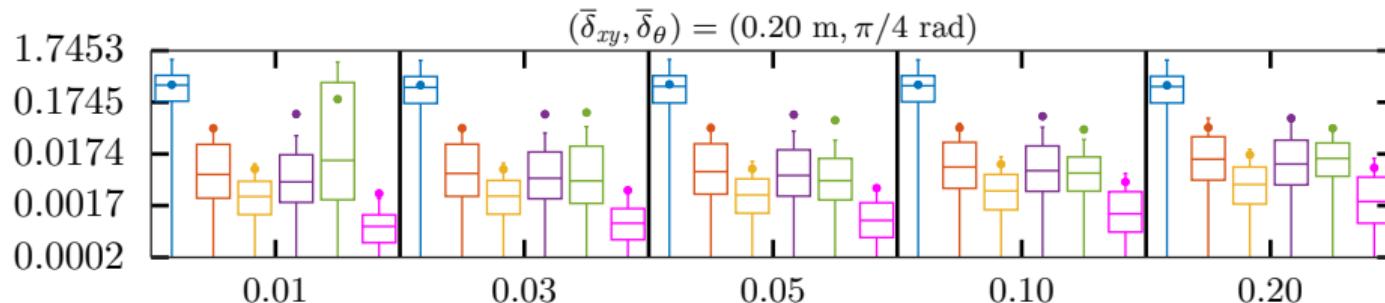
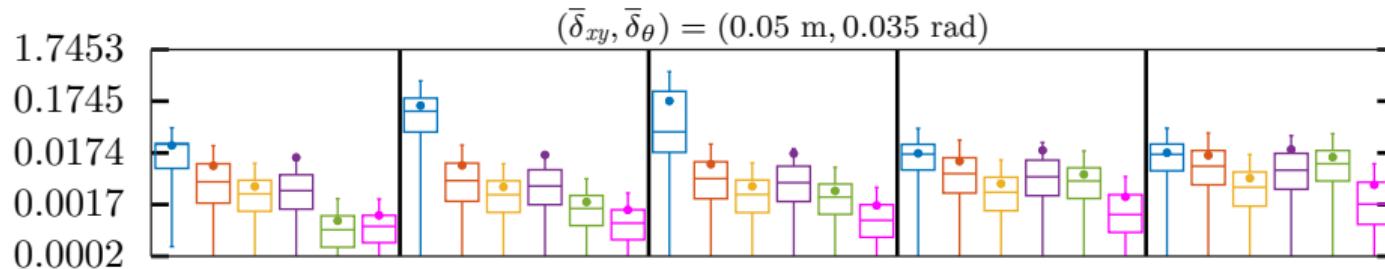
— PLICP — NDT — FastGICP — FastVGICP — NDT-PSO — fsm



Τυπική απόκλιση διαταραχών  $\sigma_R$  [m]

## Κατανομές σφαλμάτων προσανατολισμού [rad]

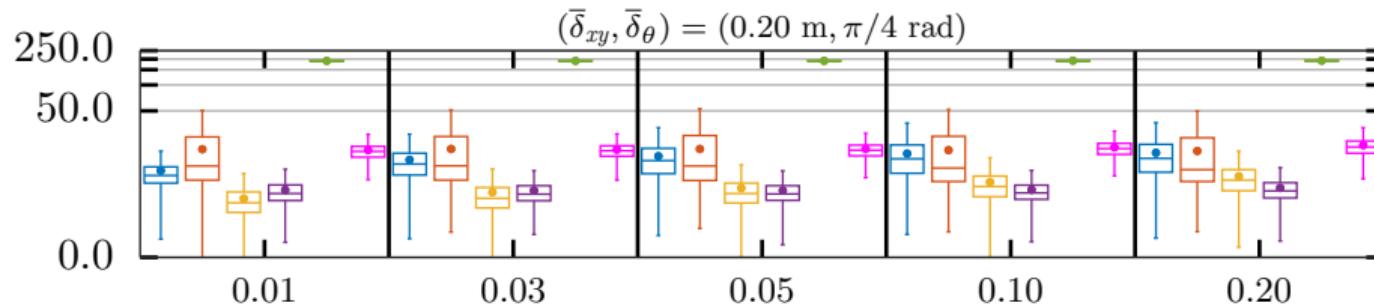
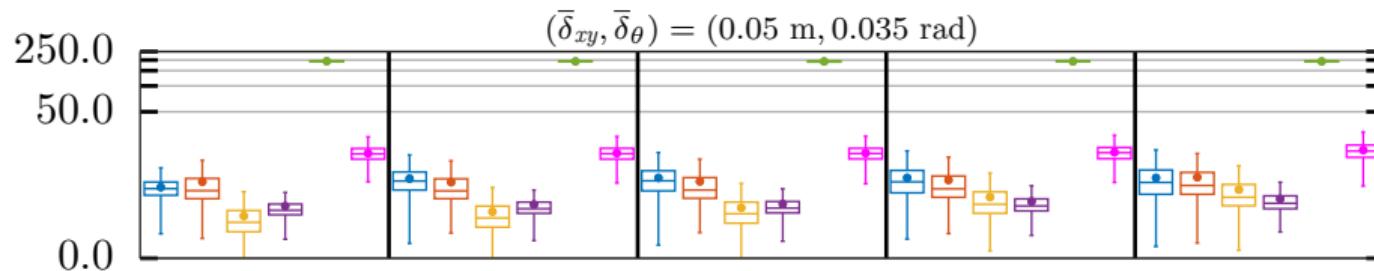
— PLICP — NDT — FastGICP — FastVGICP — NDT-PSO — fsm



Τυπική απόκλιση διαταραχών  $\sigma_R$  [m]

## Κατανομές χρόνων εκτέλεσης [ms]

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



Τυπική απόκλιση διαταραχών  $\sigma_R$  [m]

## Οδομετρία μέσω lidar (real)

— PLICP

— NDT

— GICP

— VGICP

— fsm

12.0

16.0

20.0

24.0

28.0

12.0

16.0

20.0

24.0

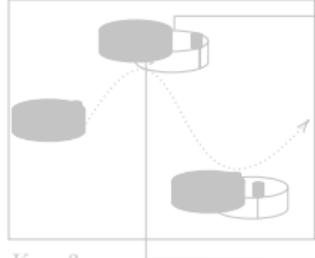
19.0

17.0

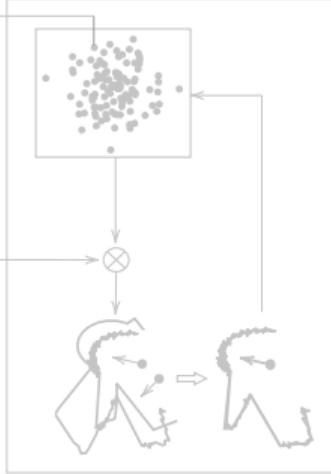
15.0



fsm: Ευρωστία



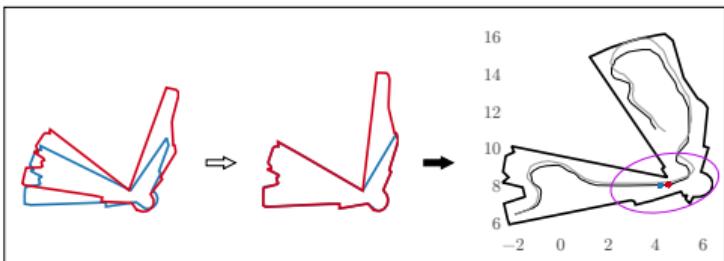
Παρατήρηση  
σφάλματων  
εκτίμησης  
στάσης



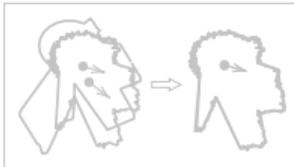
Παρατηρήσεις  
ευαισθησίας λύσης  
σε παραμέτρους  
και θόρυβο  
λόγω αντιστοιχίσεων

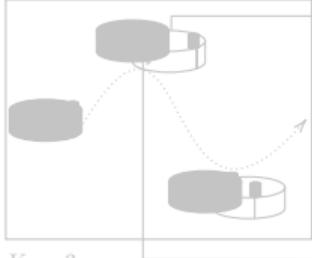


Λύσεις εκτελούμενες  
σε πραγματικό χρόνο



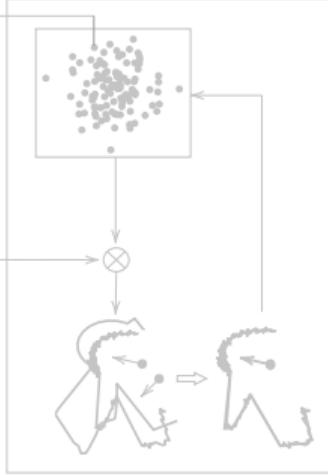
Γενίκευση χρήσης  
εργάμην χάρτη





Κεφ. 3

Παρατήρηση  
σφάλματων  
εκτίμησης  
στάσης



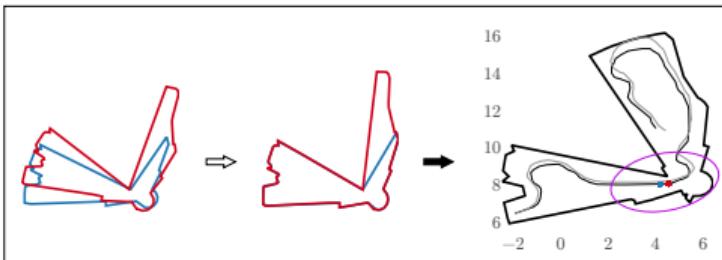
Κεφ. 4

Παρατηρήσεις  
ευαισθησίας λύσης  
σε παραμέτρους  
και ύδρυβο  
λόγω αντιστοιχίσεων



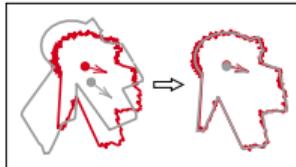
Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες  
σε πραγματικό χρόνο

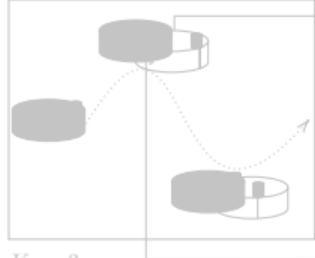


Κεφ. 7

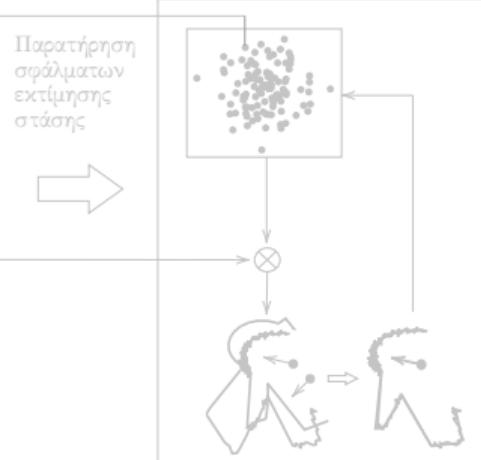
Γενίκευση χρήσης  
ερήμων χάρτη



Κεφ. 6



Κεφ. 3



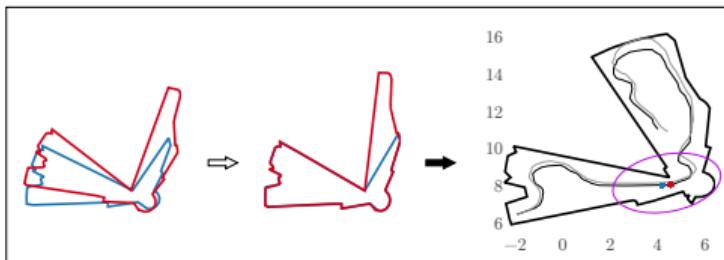
Κεφ. 4

Παρατηρήσεις ευαισθησίας λύσης σε παραμέτρους και ύδρυβο λόγω αντιστοιχίσεων



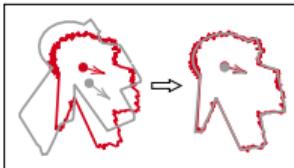
Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες σε πραγματικό χρόνο

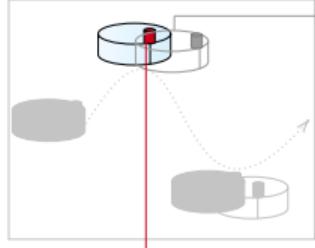


Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης ερήμην χάρτη

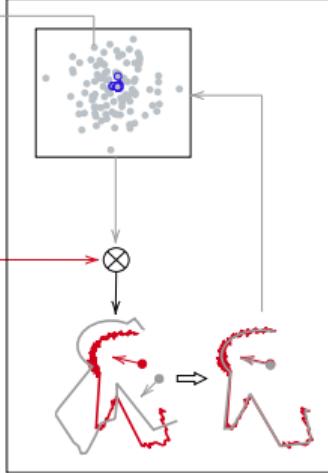


Κεφ. 6



Κεφ. 3

Παρατήρηση  
σφάλματων  
εκτίμησης  
στάσης



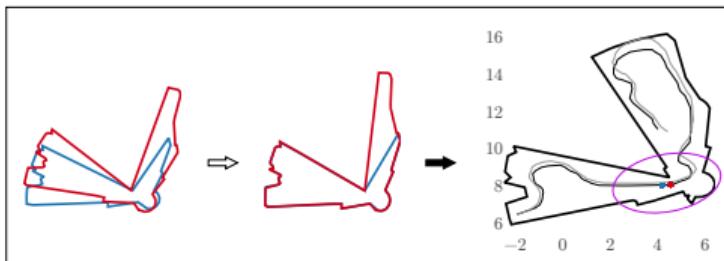
Κεφ. 4

Παρατηρήσεις  
ευαισθησίας λύσης  
σε παραμέτρους  
και θόρυβο  
λόγω αντιστοιχίσεων



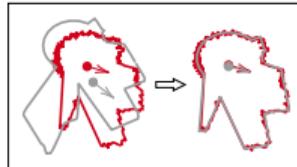
Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες  
σε πραγματικό χρόνο



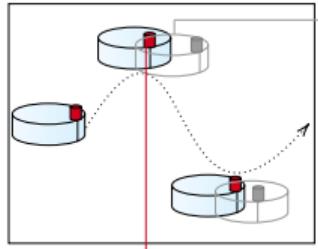
Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης  
ερήμων χάρτη

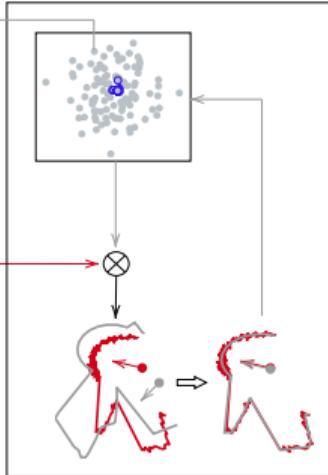


Κεφ. 6

Σάς ευχαριστώ για τον χρόνο και την προσοχή σας



Παρατήρηση  
σφράγιμων  
εκτίμησης  
στάσης

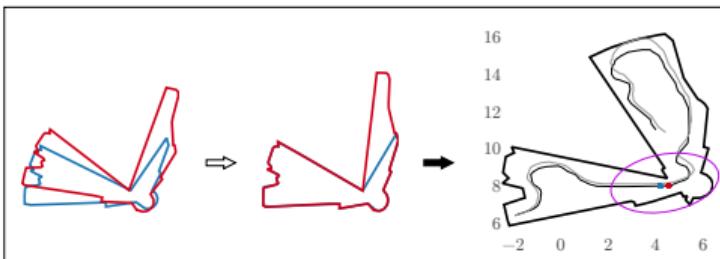


Παρατηρήσεις  
ευαισθησίας λύσης  
σε παραμέτρους  
και θρύψο  
λόγω αντιστοιχίσεων



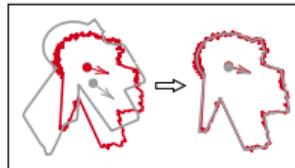
Κεφ. 5

Λύσεις εκτελούμενες  
σε πραγματικό χρόνο



Κεφ. 7

Γενίκευση χρήσης  
ερήμων χάρτη



Κεφ. 6