

# 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)

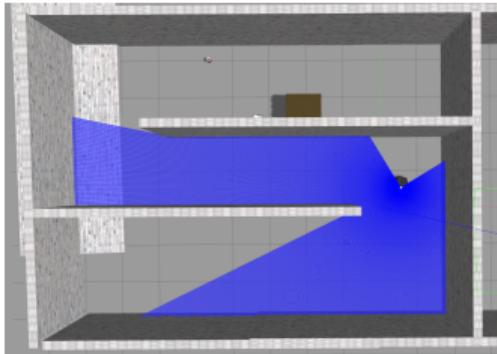


Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων (sm)

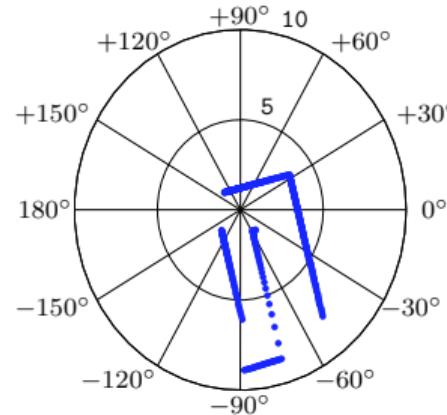
scan-to-map-scan matching  $\rightarrow$  smsm  $\rightarrow$  sm2

scan-matching  $\rightarrow$  sm

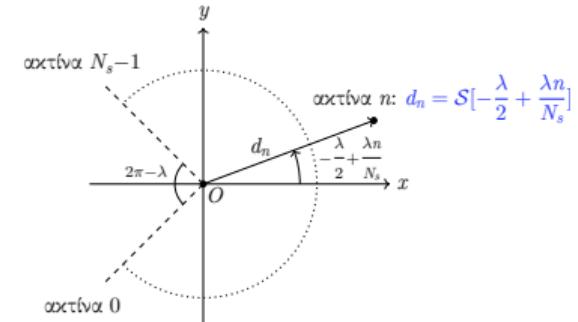
# Αισθητήρας lidar δισδιάστατων μετρήσεων απόστασης



**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

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

$\lambda$  : Γωνιακό εύρος όρασης και  $N_s$  : αριθμός εκπεμπόμενων ακτίνων

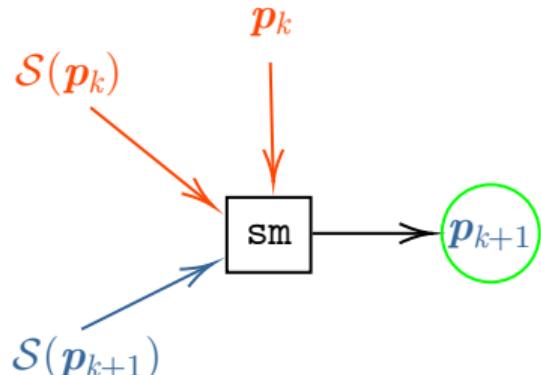
# Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων (sm)

$$\mathcal{S}(\mathbf{p}_k) \quad \mathcal{S}(\mathbf{p}_{k+1}) \quad \Delta \mathbf{p} = \text{sm}(\mathcal{S}(\mathbf{p}_k), \mathcal{S}(\mathbf{p}_{k+1}))$$

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

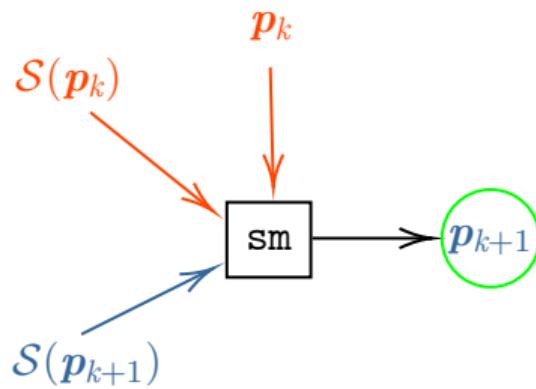
**Σχήμα:** Ευθυγράμμιση σαρώσεων → εκτίμηση μετασχηματισμού στάσεων από τις οποίες συνελήφθησαν οι σαρώσεις

sm: I/O

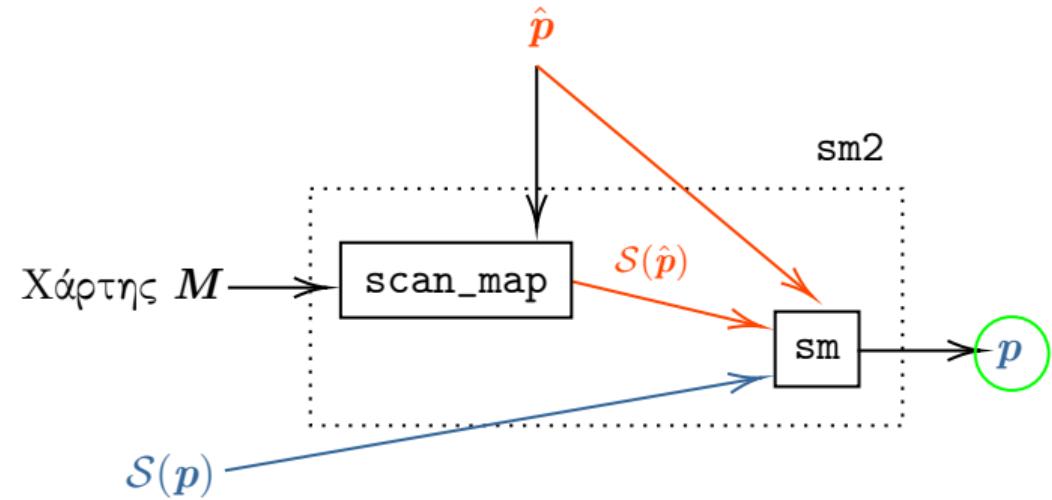


Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων

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

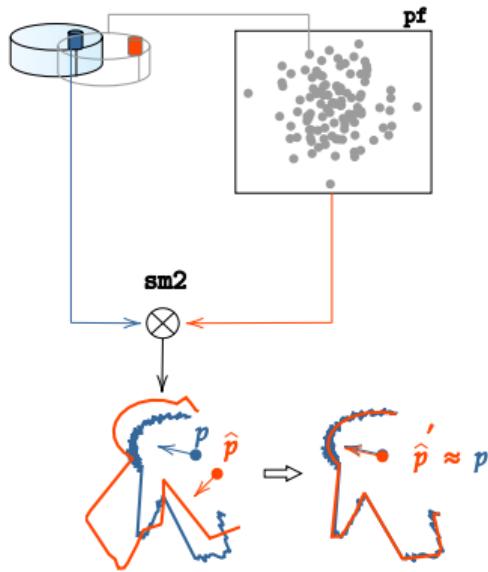


Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικών σαρώσεων

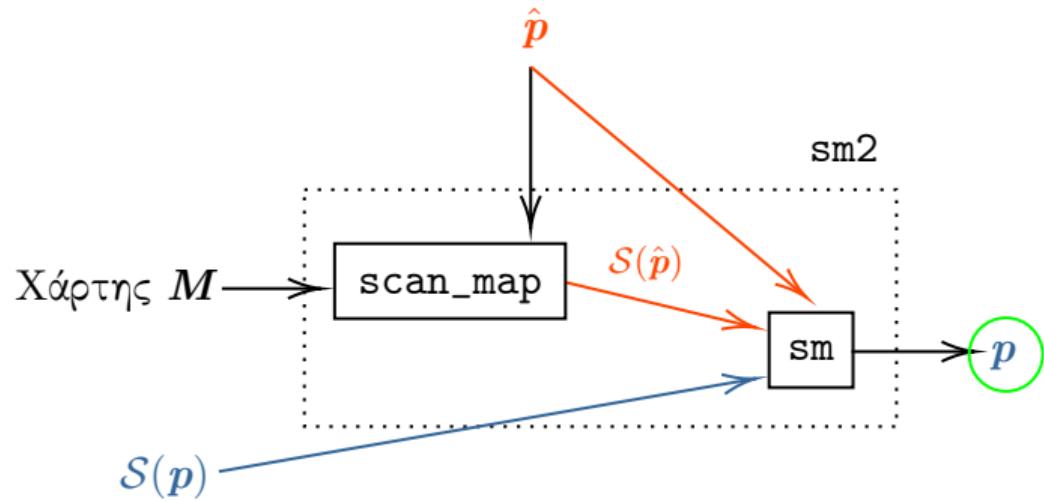


Σχήμα: Ευθυγράμμιση πραγματικής σάρωσης με εικονική σάρωση χάρτη

pf + sm2

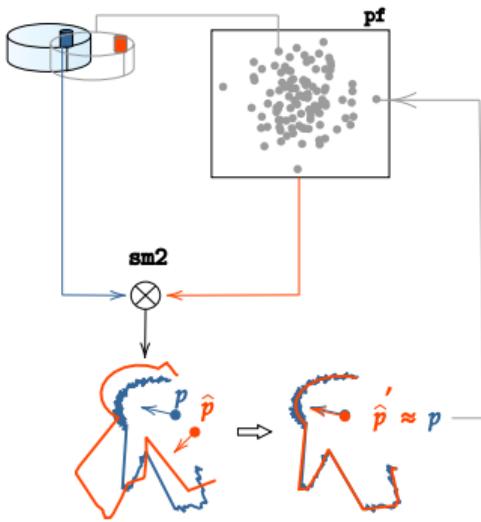


**Σχήμα:** sm2 προσαρμοσμένη στην  
έξοδο φίλτρου σωματιδίων (pf)

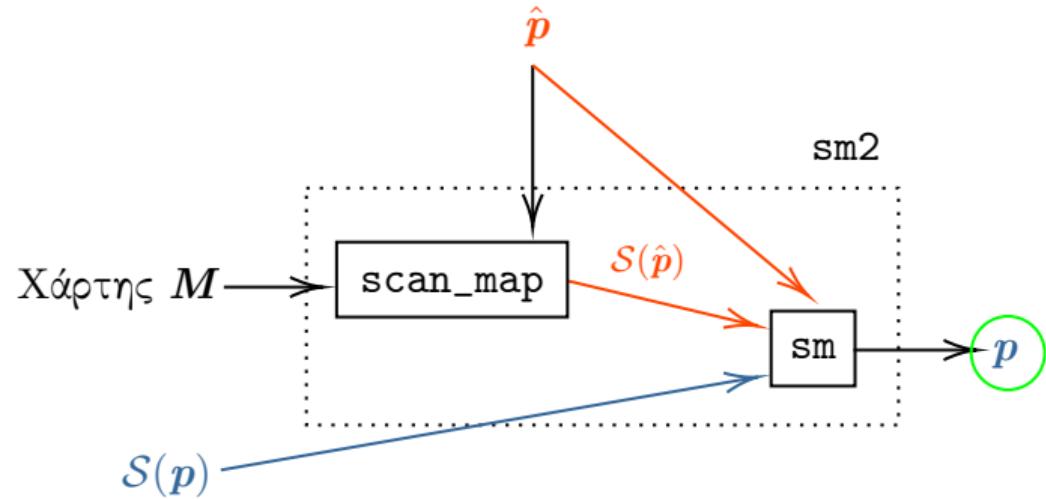


**Σχήμα:** Ευθυγράμμιση πραγματικής σάρωσης με εικονική σάρωση χάρτη

# 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:

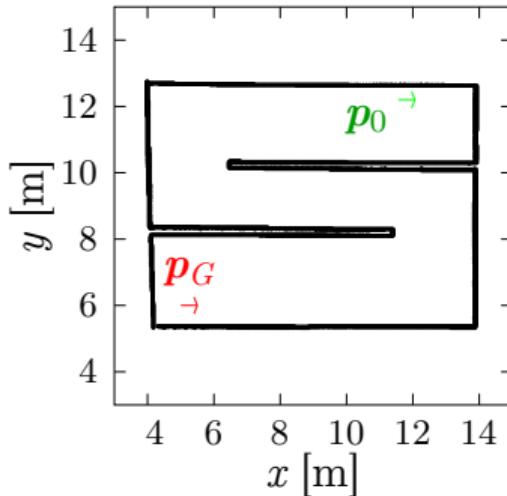
$$\|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}^*\| < \|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}(\mathcal{P})\|$$

Υπόθεση Υ3:

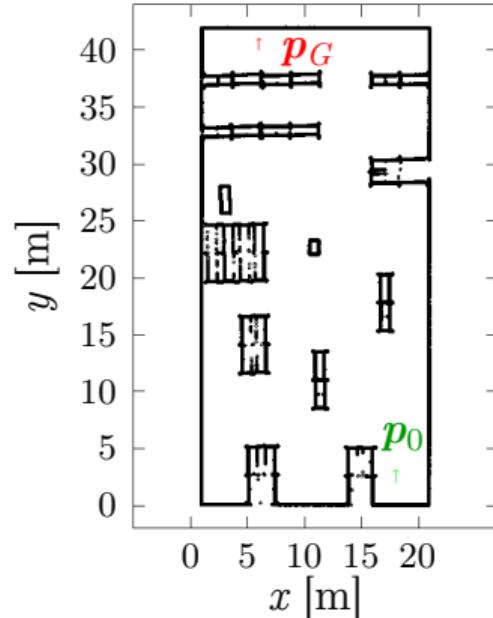
Εάν  $\mathcal{P}^\circlearrowright = \mathcal{P} \circlearrowright \{\hat{\mathbf{p}}^*\}_{q \cdot |\mathcal{P}^\circlearrowright|}$ , όπου  $q \gg 0.01$  και  $q \ll 1.0$ :

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

$$\lambda = 260^\circ$$

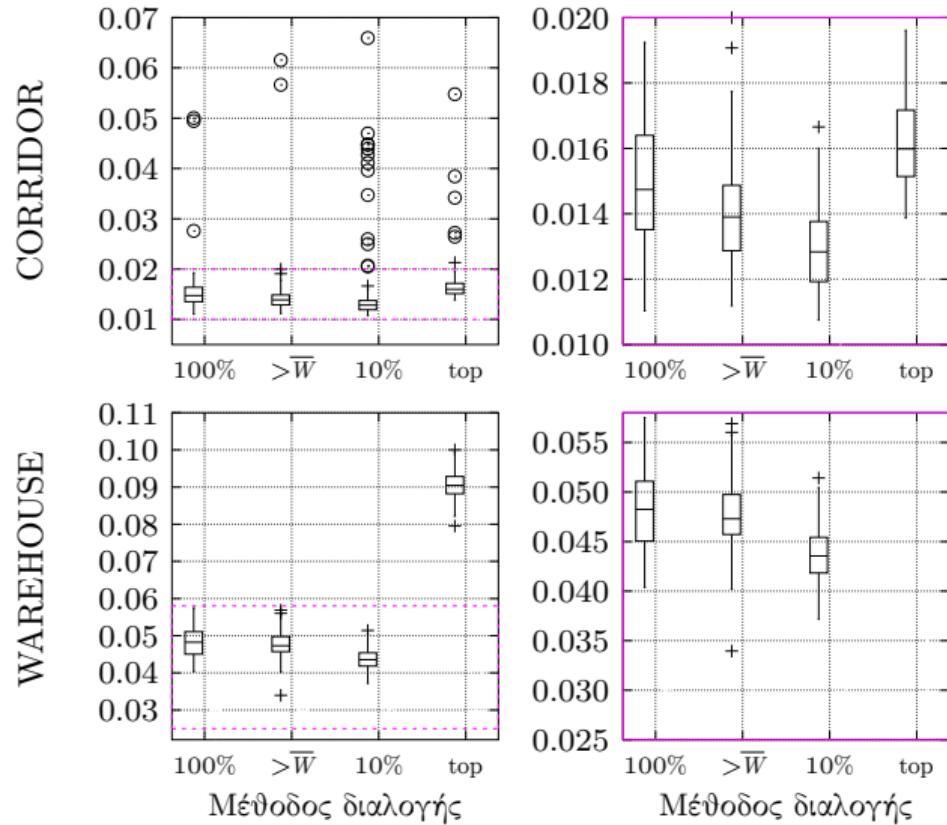
$$N_s = 640 \text{ ακτίνες}$$

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

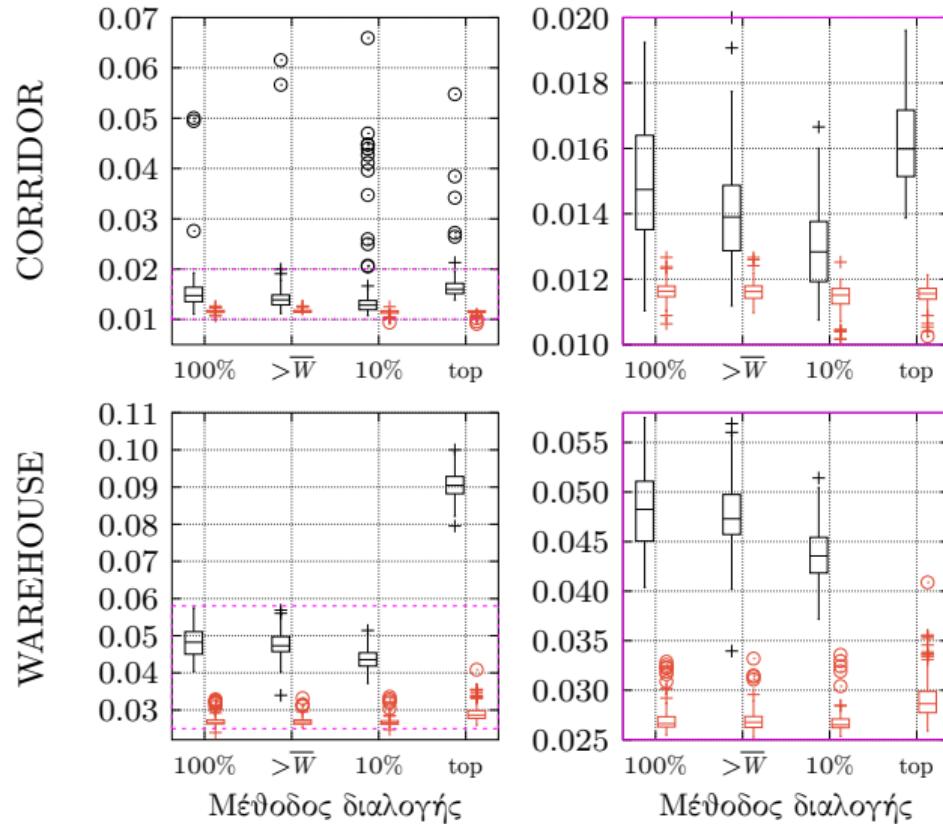
pf:

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

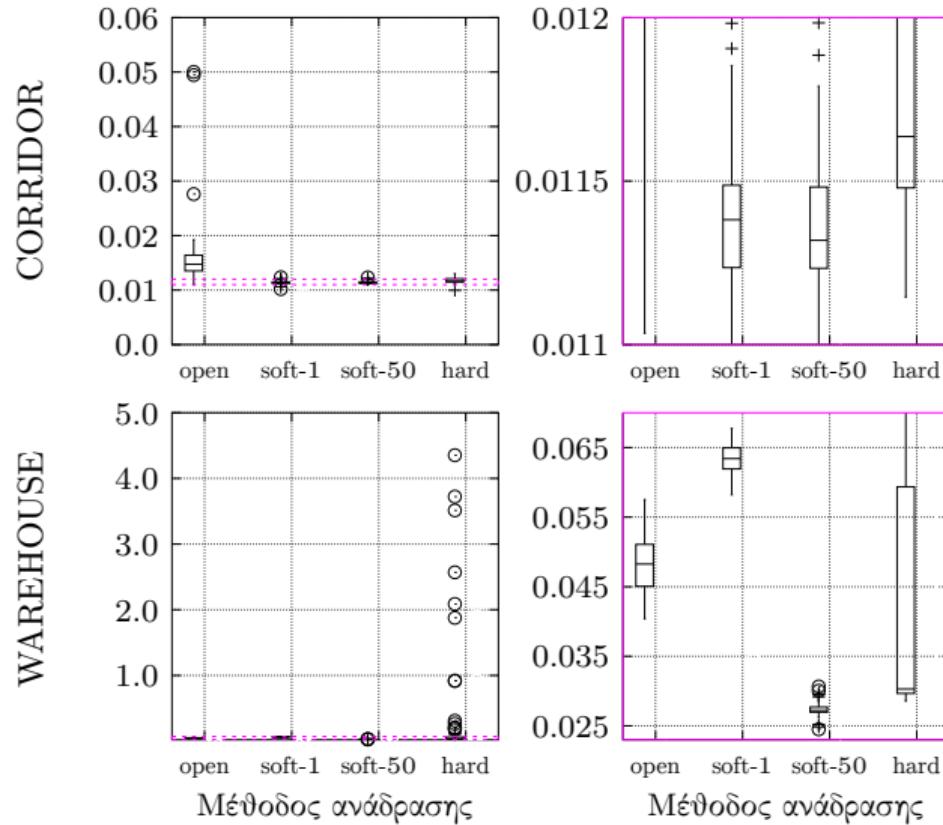
Κατανομές μέσων σφαλμάτων εκτίμησης στάσης ανά μέθοδο διαλογής σωματιδίων  $[(m^2 + rad^2)^{1/2}]$



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

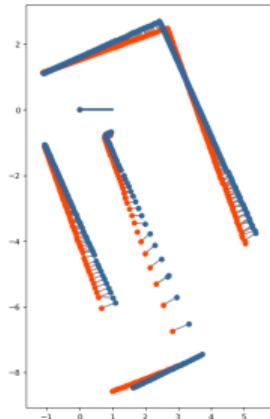
# Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

Παράμετροι

Θόρυβος

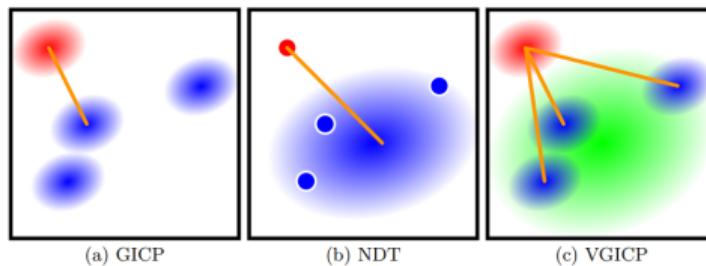
- Αντιδιαισθητική ρύθμιση
- Μικρές μεταβολές → μεγάλες διαφορές λύσης

# Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης



Σχήμα: Α

Σχήμα: Β



Σχήμα: Γ

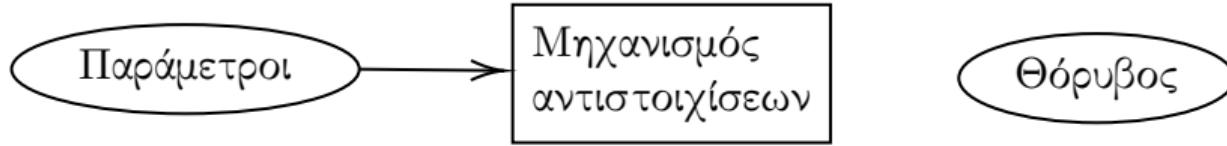
A: ICP επί της αρχής (σημείο προς σημείο)

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

# Τρωτά σημεία μεθόδων ευθυγράμμισης

