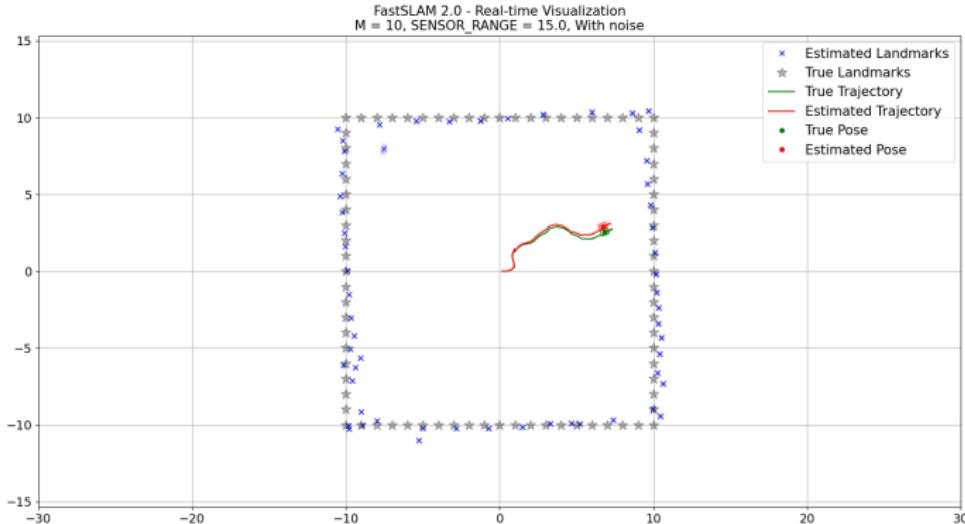


Particle Filter-Based SLAM

for Differential Drive Robots



Βραχωρίτη Αλεξάνδρα, Γιάννη Νικόλαος

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Πανεπιστήμιο Πατρών

Το πρόβλημα Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)

- Εκτίμηση της θέσης του ρομπότ.

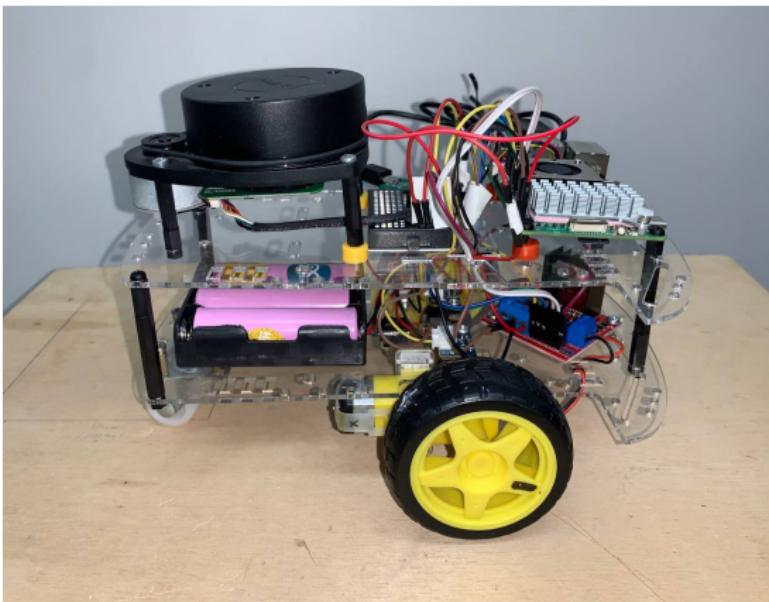
Μοντέλο κίνησης: $p(s_t | u_t, s_{t-1}) = h(u_t, s_{t-1}) + \delta_t$

- Εκτίμηση του χάρτη περιβάλλοντος στο οποίο κινείται το ρομπότ.

Μοντέλο μέτρησης: $p(z_t | s_t, \theta_{n_t}, n_t) = g(\theta_{n_t}, s_t) + \varepsilon_t$



Η πραγματική διάταξη του ρομπότ



Η διάταξη που αναπαρίσταται στην προσομοίωση είναι ένα δίτροχο ρομπότ διαφορικής κίνησης με αισθητήρα LiDAR.

Επίλυση του προβλήματος SLAM

με Extended Kalman Filter (EKF)

- Δυνατότητα αναπαράστασης μη-γραμμικών μοντέλων κίνησης και μέτρησης.
- Αδυναμία περιγραφής πολλαπλών χαρτών όταν εμφανίζονται όμοια ορόσημα σε διαφορετικά σημεία.
 - ▶ Είτε κατάρρευση αλγορίθμου σε περίπτωση λάθους συσχέτισης δεδομένων.
 - ▶ Είτε μεγάλη πολυπλοκότητα, που δεν επιτρέπει την ολοκλήρωση του αλγορίθμου σε πραγματικό χρόνο.

Επίλυση του προβλήματος SLAM

με τον αλγόριθμο FastSLAM 2.0

Ο αλγόριθμος FastSLAM 2.0 συνδυάζει:

- τα EKFs, για την αναπαράσταση των ορόσημων στο περιβάλλον,
- τα Particle Filters (PFs), για την εκτίμηση της θέσης του ρομπότ και των ορόσημων στο χώρο.

Επίλυση του προβλήματος SLAM

με τον αλγόριθμο FastSLAM 2.0

Ο αλγόριθμος FastSLAM 2.0 συνδυάζει:

- τα EKFs, για την αναπαράσταση των ορόσημων στο περιβάλλον,
 - τα Particle Filters (PFs), για την εκτίμηση της θέσης του ρομπότ και των ορόσημων στο χώρο.
- Posterior πιθανότητα που υπολογίζουν οι αλγόριθμοι SLAM:

$$p(s_t, \Theta | z^t, u^t, n^t)$$

Επίλυση του προβλήματος SLAM

με τον αλγόριθμο FastSLAM 2.0

Ο αλγόριθμος FastSLAM 2.0 συνδυάζει:

- τα EKFs, για την αναπαράσταση των ορόσημων στο περιβάλλον,
- τα Particle Filters (PFs), για την εκτίμηση της θέσης του ρομπότ και των ορόσημων στο χώρο.

- Posterior πιθανότητα που υπολογίζουν οι αλγόριθμοι SLAM:

$$p(s_t, \Theta | z^t, u^t, n^t)$$

- Posterior πιθανότητα που υπολογίζει ο FastSLAM:

$$p(s^t, \Theta | z^t, u^t, n^t)$$

Επίλυση του προβλήματος SLAM

με τον αλγόριθμο FastSLAM 2.0

Ο αλγόριθμος FastSLAM 2.0 συνδυάζει:

- τα EKFs, για την αναπαράσταση των ορόσημων στο περιβάλλον,
- τα Particle Filters (PFs), για την εκτίμηση της θέσης του ρομπότ και των ορόσημων στο χώρο.

- Posterior πιθανότητα που υπολογίζουν οι αλγόριθμοι SLAM:

$$p(s_t, \Theta | z^t, u^t, n^t)$$

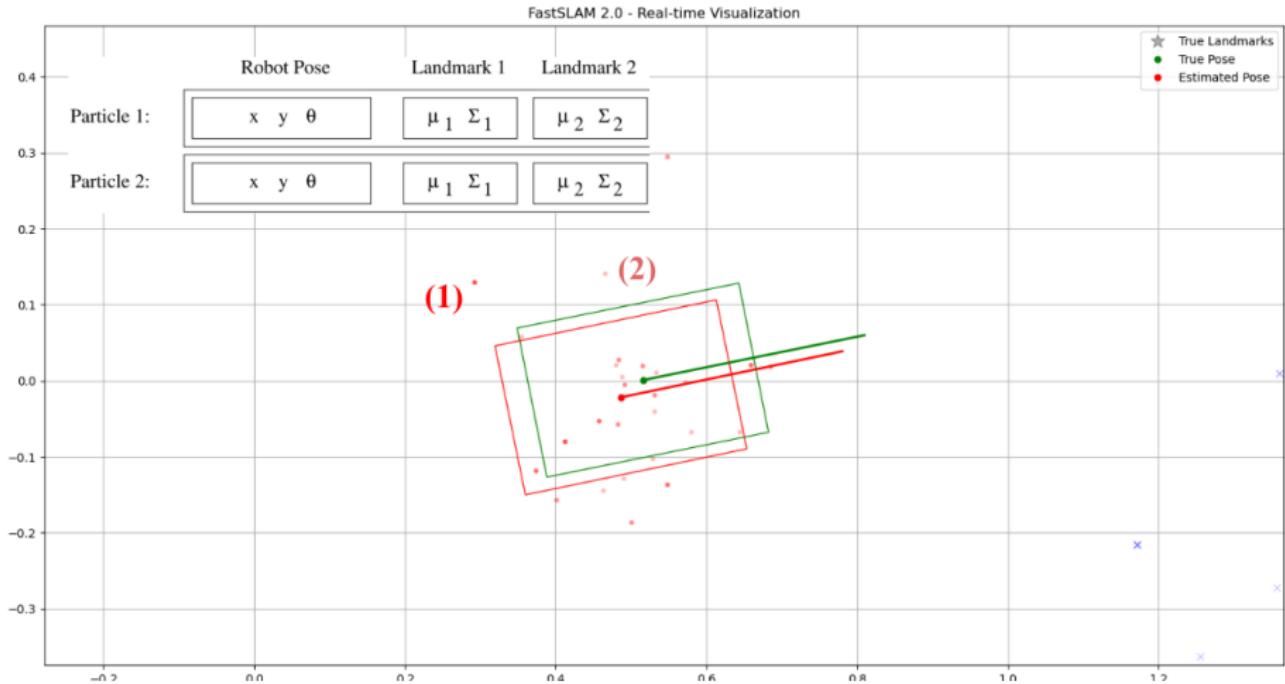
- Posterior πιθανότητα που υπολογίζει ο FastSLAM:

$$p(s^t, \Theta | z^t, u^t, n^t)$$

η οποία αναλύεται ως:

$$p(s^t, \Theta | z^t, u^t, n^t) = p(s^t | z^t, u^t, n^t) \prod_{n=1}^N p(\theta_n | s^t, n^t, z^t)$$

Ανάλυση των Particle Filters



Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 1: εκτίμηση θέσης του particle (1)

Δειγματοληψία επόμενης κατάστασης του particle από Gaussian
κατανομή: $s_t^{[m]} \sim p(s_t | s^{t-1,[m]}, u^t, z^t, n^t)$

$$\Sigma_{s_t}^{[m]} = \left[G_s^T Q_t^{[m]-1} G_s + P_t^{-1} \right]^{-1}$$

$$\mu_{s_t}^{[m]} = \Sigma_{s_t}^{[m]} G_s^T Q_t^{[m]-1} (z_t - \hat{z}_t^{[m]}) + \hat{s}_t^{[m]}$$

$$Q_t^{[m]} = R_t + G_\theta \Sigma_{n_t, t-1}^{[m]} G_\theta^T$$

$$G_\theta = \nabla_{\theta_{n_t}} g(\theta_{n_t}, s_t) \Big|_{s_t=\hat{s}_t^{[m]}, \theta_{n_t}=\mu_{n_t, t-1}^{[m]}}$$

$$G_s = \nabla_{s_t} g(\theta_{n_t}, s_t) \Big|_{s_t=\hat{s}_t^{[m]}, \theta_{n_t}=\mu_{n_t, t-1}^{[m]}}$$

$$\hat{z}_t^{[m]} = g(\mu_{n_t, t-1}^{[m]}, \hat{s}_t^{[m]})$$

$$\hat{s}_t^{[m]} = h(s_{t-1}^{[m]}, u_t)$$

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 1: εκτίμηση θέσης του particle (2)

Ποιο ορόσημο παρατήρησε το ρομπότ;

- Αυτό με τη μεγαλύτερη πιθανότητα (maximum likelihood estimator):

$$p_{n_t} = |2\pi Q_{t,n_t}^{[m]}|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(z_t - g(\mu_{n_t,t-1}^{[m]}, s_{n_t,t}^{[m]}))^T Q_{t,n_t}^{[m] -1} (z_t - g(\mu_{n_t,t-1}^{[m]}, s_{n_t,t}^{[m]}))\right\}$$

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 1: εκτίμηση θέσης του particle (2)

Ποιο ορόσημο παρατήρησε το ρομπότ;

- Αυτό με τη μεγαλύτερη πιθανότητα (maximum likelihood estimator):

$$p_{n_t} = |2\pi Q_{t,n_t}^{[m]}|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(z_t - g(\mu_{n_t,t-1}^{[m]}, s_{n_t,t}^{[m]}))^T Q_{t,n_t}^{[m] -1} (z_t - g(\mu_{n_t,t-1}^{[m]}, s_{n_t,t}^{[m]}))\right\}$$

- Αν $p_{n_t} < p_0$, τότε έχει εντοπιστεί νέο ορόσημο, όπου $p_0 \in [0, 1]$ το κατώφλι.

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 2: αναβάθμιση των ορόσημων και υπολογισμός των βαρών των particles (1)

- ① Ορόσημο που παρατηρείται ξανά: αναβάθμισή του με EKF.

$$\mu_{\hat{n}_t,t}^{[m]} = \mu_{\hat{n}_t,t-1}^{[m]} + K_t^{[m]}(z_t - \hat{z}_{t,\hat{n}_t}^{[m]})$$

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 2: αναβάθμιση των ορόσημων και υπολογισμός των βαρών των particles (1)

- ① Ορόσημο που παρατηρείται ξανά: αναβάθμισή του με EKF.

$$\mu_{\hat{n}_t, t}^{[m]} = \mu_{\hat{n}_t, t-1}^{[m]} + K_t^{[m]}(z_t - \hat{z}_{t, \hat{n}_t}^{[m]})$$

$$\Sigma_{\hat{n}_t, t}^{[m]} = (I - K_t^{[m]} G_{\theta, \hat{n}_t})) \Sigma_{\hat{n}_t, t-1}^{[m]}$$

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 2: αναβάθμιση των ορόσημων και υπολογισμός των βαρών των particles (1)

- ① Ορόσημο που παρατηρείται ξανά: αναβάθμισή του με EKF.

$$\mu_{\hat{n}_t,t}^{[m]} = \mu_{\hat{n}_t,t-1}^{[m]} + K_t^{[m]}(z_t - \hat{z}_{t,\hat{n}_t}^{[m]})$$

$$\Sigma_{\hat{n}_t,t}^{[m]} = (I - K_t^{[m]} G_{\theta,\hat{n}_t}^{[m]}) \Sigma_{\hat{n}_t,t-1}^{[m]}$$

$$K_t^{[m]} = \Sigma_{\hat{n}_t,t-1}^{[m]} G_{\theta,\hat{n}_t}^T Q_{t,\hat{n}_t}^{[m]}^{-1}$$

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 2: αναβάθμιση των ορόσημων και υπολογισμός των βαρών των particles (1)

- ① Ορόσημο που παρατηρείται ξανά: αναβάθμισή του με EKF.

$$\mu_{\hat{n}_t,t}^{[m]} = \mu_{\hat{n}_t,t-1}^{[m]} + K_t^{[m]}(z_t - \hat{z}_{t,\hat{n}_t}^{[m]})$$

$$\Sigma_{\hat{n}_t,t}^{[m]} = (I - K_t^{[m]} G_{\theta,\hat{n}_t}^{[m]}) \Sigma_{\hat{n}_t,t-1}^{[m]}$$

$$K_t^{[m]} = \Sigma_{\hat{n}_t,t-1}^{[m]} G_{\theta,\hat{n}_t}^T Q_{t,\hat{n}_t}^{[m]-1}$$

$$w_t^{[m]} = |2\pi L_t^{[t]}|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(z_t - \hat{z}_{t,\hat{n}_t})^T L_t^{[t]-1} (z_t - \hat{z}_{t,\hat{n}_t})\right\}$$

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 2: αναβάθμιση των ορόσημων και υπολογισμός των βαρών των particles (1)

- ① Ορόσημο που παρατηρείται ξανά: αναβάθμισή του με EKF.

$$\mu_{\hat{n}_t, t}^{[m]} = \mu_{\hat{n}_t, t-1}^{[m]} + K_t^{[m]}(z_t - \hat{z}_{t, \hat{n}_t}^{[m]})$$

$$\Sigma_{\hat{n}_t, t}^{[m]} = (I - K_t^{[m]} G_{\theta, \hat{n}_t}^{[m]}) \Sigma_{\hat{n}_t, t-1}^{[m]}$$

$$K_t^{[m]} = \Sigma_{\hat{n}_t, t-1}^{[m]} G_{\theta, \hat{n}_t}^T Q_{t, \hat{n}_t}^{[m]-1}$$

$$w_t^{[m]} = |2\pi L_t^{[t]}|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(z_t - \hat{z}_{t, \hat{n}_t})^T L_t^{[t]-1} (z_t - \hat{z}_{t, \hat{n}_t})\right\}$$

$$L_t^{[t]} = G_{s, \hat{n}_t} P_t G_{s, \hat{n}_t}^T + G_{\theta, \hat{n}_t} \Sigma_{n_t, t-1}^{[m]} G_{\theta, \hat{n}_t}^T + R_t$$

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 2: αναβάθμιση των ορόσημων και υπολογισμός των βαρών των particles (1)

- ① Ορόσημο που παρατηρείται ξανά: αναβάθμισή του με EKF.

$$\mu_{\hat{n}_t, t}^{[m]} = \mu_{\hat{n}_t, t-1}^{[m]} + K_t^{[m]}(z_t - \hat{z}_{t, \hat{n}_t}^{[m]})$$

$$\Sigma_{\hat{n}_t, t}^{[m]} = (I - K_t^{[m]} G_{\theta, \hat{n}_t}^{[m]}) \Sigma_{\hat{n}_t, t-1}^{[m]}$$

$$K_t^{[m]} = \Sigma_{\hat{n}_t, t-1}^{[m]} G_{\theta, \hat{n}_t}^T Q_{t, \hat{n}_t}^{[m]-1}$$

$$w_t^{[m]} = |2\pi L_t^{[t]}|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(z_t - \hat{z}_{t, \hat{n}_t})^T L_t^{[t]-1} (z_t - \hat{z}_{t, \hat{n}_t})\right\}$$

$$L_t^{[t]} = G_{s, \hat{n}_t} P_t G_{s, \hat{n}_t}^T + G_{\theta, \hat{n}_t} \Sigma_{n_t, t-1}^{[m]} G_{\theta, \hat{n}_t}^T + R_t$$

$$\tau = \tau + \rho^+$$

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 2: αναβάθμιση των ορόσημων και υπολογισμός των βαρών των particles (2)

- ② Ορόσημο που παρατηρείται πρώτη φορά.

$$\mu_{n,t}^{[m]} = g^{-1}(z_t, s_{n,t}^{[m]})$$

$$\Sigma_{n,t}^{[m]} = (G_{\theta,n} R_t^{-1} G_{\theta,n}^T)^{-1}$$

$$w_t^{[m]} = p_0$$

$$\tau = \rho^+$$

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 2: αναβάθμιση των ορόσημων και υπολογισμός των βαρών των particles (2)

- ② Ορόσημο που παρατηρείται πρώτη φορά.

$$\mu_{n,t}^{[m]} = g^{-1}(z_t, s_{n,t}^{[m]})$$

$$\Sigma_{n,t}^{[m]} = (G_{\theta,n} R_t^{-1} G_{\theta,n}^T)^{-1}$$

$$w_t^{[m]} = p_0$$

$$\tau = \rho^+$$

Σημείωση: για την αναβάθμιση της κατάστασης του ρομπότ γίνεται χρήση μόνο του μοντέλου κίνησης, του σήματος ελέγχου και της προηγούμενης κατάστασής του.

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

Βήμα 2: αναβάθμιση των ορόσημων και υπολογισμός των βαρών των particles (3)

③ Ορόσημο που δεν παρατηρήθηκε.

- ▶ Ορόσημο εκτός του εύρους του αισθητήρα \Rightarrow καμία αλλαγή στην κατάσταση του ορόσημου.
- ▶ Ορόσημο εντός του εύρους του αισθητήρα $\Rightarrow \tau = \tau - \rho^-$.

Σημείωση: Αν $\tau < 0$, το ορόσημο διαγράφεται οριστικά από τη λίστα του particle.

Αλγόριθμος FastSLAM 2.0

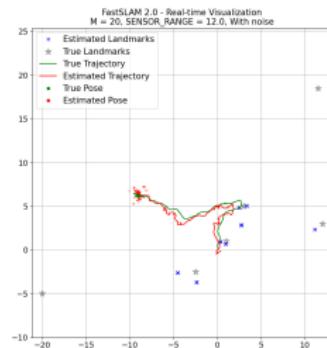
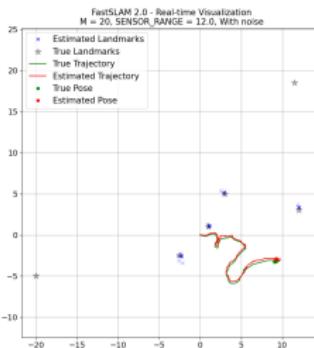
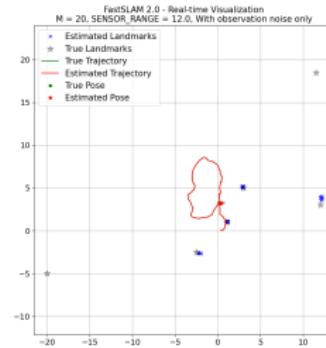
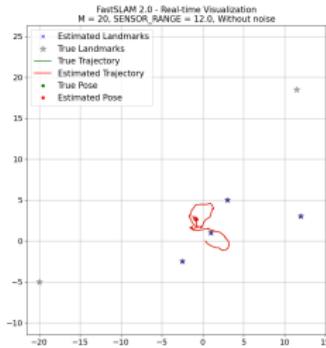
Βήμα 3: επαναδειγματοληψία

Τα M particles για το νέο σύνολο επιλέγονται τυχαία, με πιθανότητα ανάλογη του βάρους τους w_i και χρησιμοποιούνται στο επόμενο βήμα της προσομοίωσης.

Σημείωση: η κατάσταση του ρομπότ βρίσκεται από τον μέσο όρο των καταστάσεων των particles. Επιπλέον, ο λόγος που τα particles επιλέγονται στοχαστικά είναι γιατί υπάρχει πιθανότητα λάθους συσχέτισης δεδομένων.

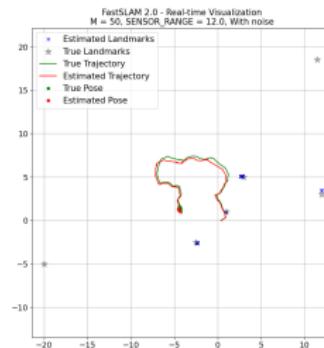
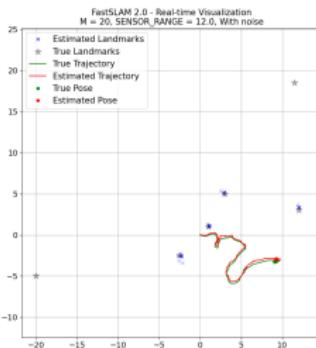
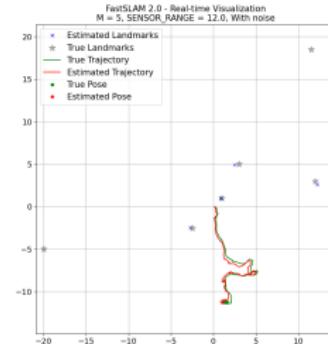
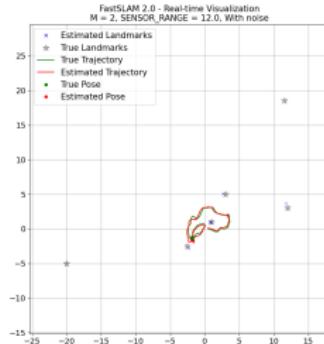
Πειραματικά Αποτελέσματα

Μεταβαλλόμενος θόρυβος, $M = 20$, εύρος LiDAR = 12



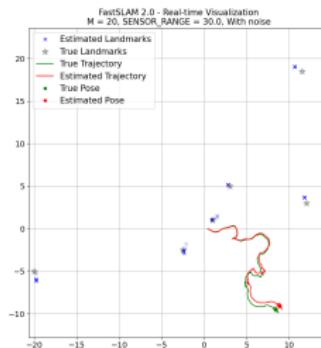
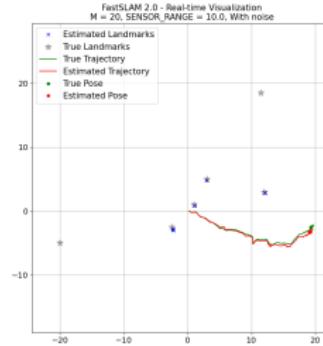
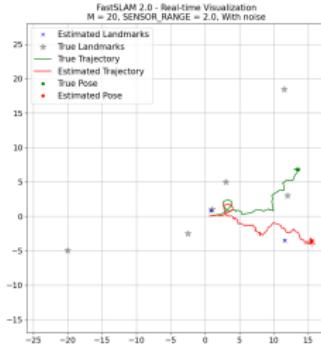
Πειραματικά Αποτελέσματα

Μεταβαλλόμενος αριθμός Particles, κανονικά επίπεδα θορύβου, εύρος LiDAR = 12



Πειραματικά Αποτελέσματα

Μεταβαλλόμενο εύρος LiDAR, $M = 20$, κανονικά επίπεδα θορύβου



Σας ευχαριστούμε για την προσοχή σας!

Ερωτήσεις: