

Sûreté de fonctionnement des systèmes robotiques complexes
28 Juin 2016

Détection de fermeture de boucles, comparaison approche
ensembliste / prédicteur de Kalman

Clément Aubry

`clement.aubry@isen-bretagne.fr`

LABISEN / SEACOM
ISEN Brest, 20 rue Cuirassé Bretagne
29228 Brest Cedex 2, France

Plan

- 1 Robotique mobile
- 2 Détection de fermeture de boucles par mesures proprioceptives
- 3 Résultats et conclusion

Plan

- 1 Robotique mobile
 - Perception, navigation et localisation
 - SLAM
 - Fermeture de boucle
- 2 Détection de fermeture de boucles par mesures proprioceptives
- 3 Résultats et conclusion

Perception, navigation et localisation

Différents modes de perceptions

Proprioceptif observation de l'évolution (u),

Extéroceptif observation de l'environnement (y).

Suivi de posture et phénomène de dérive.

Modélisation d'état :

$$\dot{x} = f(x, u),$$

$$y = g(x).$$

Différentes compétences

- navigation à l'estime,
- localisation.

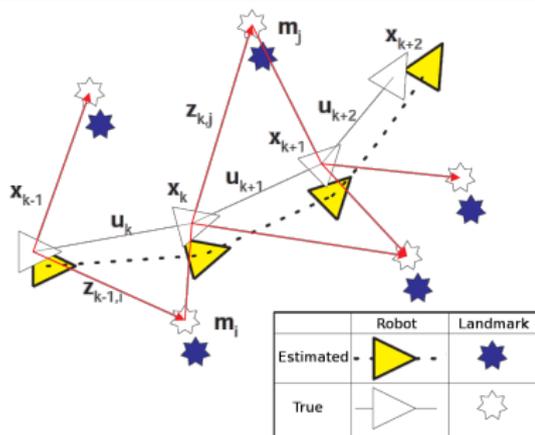
SLAM

SLAM - Simultaneous Localization And Mapping - [LDW92]

- \mathbf{x}_k : vecteur d'état du robot,
- \mathbf{u}_k : vecteur de contrôle,
- \mathbf{m}_i : position \mathbf{m} de l'amer i ,
- \mathbf{z}_{ik} : observation de l'amer i à l'instant k .

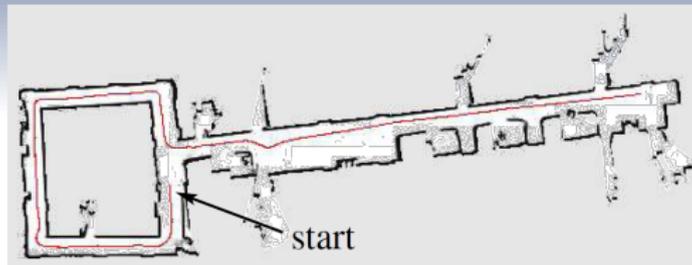
Résolution :

- probabiliste : EKF-SLAM([DNC⁺01]),
- ensembliste : SLAM par intervalles ([Jau09, Bar11]).

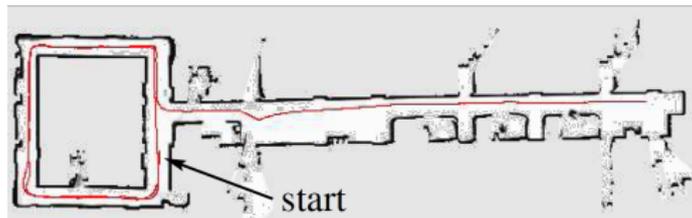


Le problème SLAM, [DWB06].

Fermeture de boucle



(a)



(b)

Utilisation de l'information de fermeture de boucle [SHB04].

Plan

- 1 Robotique mobile
- 2 Détection de fermeture de boucles par mesures proprioceptives
 - Introduction
 - Méthode ensembliste
 - Prédicteur de Kalman
- 3 Résultats et conclusion

Introduction

Boucle

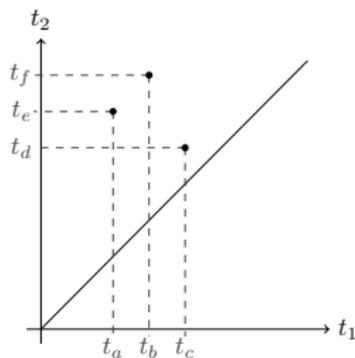
- deux positions identiques,
- deux instants différents,
- mouvement significatif.

Illustration : un robot effectue une boucle.

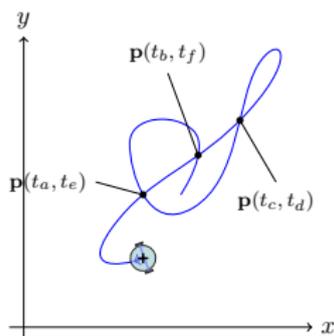
Définition

Définition (Ensemble des boucles d'une trajectoire)

$$\mathbb{T}^* = \left\{ (t_1, t_2) \in [0, t_{\max}]^2 \mid \mathbf{p}(t_1) = \mathbf{p}(t_2), t_1 < t_2 \right\}.$$



(a)



(b)

En (a) le **t-plan** correspondant à la trajectoire (b).

Méthode ensembliste

Contexte

- sans informations extéroceptives, $\mathbf{p}(t)$ n'est pas connue,
- on a un tube $[\mathbf{v}](t)$ pour la vitesse,
- $\mathbf{p}(t_2) \in \mathbf{p}(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} [\mathbf{v}](\tau) d\tau$.

Problématique

$$\mathbb{T} = \left\{ (t_1, t_2) \mid 0 \leq t_1 < t_2 \leq t_{max}, \exists \mathbf{v} \in [\mathbf{v}], \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{v}(\tau) d\tau = \mathbf{0} \right\}.$$

Et trouver un encadrement $\mathbb{T}^- \subset \mathbb{T} \subset \mathbb{T}^+$. [ADJ13]

Prédicteur de Kalman (1)

Equations d'états d'un robot

$$x_{k+1} = A_k x_k + u_k, \text{ avec } \begin{cases} u_k & \text{les entrées} \\ A_k & \text{la matrice d'état} \\ x_k & \text{l'état du robot} \end{cases} \cdot \quad (1)$$

Pour estimer x ,

Prédicteur de Kalman (pas de mesures exteroceptives)

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + u_k \\ \Gamma_{k+1} = A_k \Gamma_k A_k^T + \Gamma_\alpha \end{cases} \quad (2)$$

avec Γ_{k+1} la matrice de covariance d'état et Γ_α la covariance associée à un bruit de distribution normale.

Prédicteur de Kalman (2)

Les travaux [NJP14], nous donnent:

$$\hat{x}_k = P_k^0 \hat{x}_0 + \sum_{i=0}^{k-1} P_{k+1}^i u_i \quad (3)$$

$$\Gamma_k = P_k^0 \Gamma_0 \left(P_k^0\right)^T + \sum_{i=1}^k P_k^i \Gamma_\alpha \left(P_k^i\right)^T \quad (4)$$

où les matrices de transition P_k^i sont définies par

$$P_k^i = A_{k-1} A_{k-2} \dots A_i I,$$

$$P_k^k = I,$$

$$P_k^i = P_k^l P_l^i,$$

$$P_k^i = P_k^0 \left(P_i^0\right)^{-1}.$$

Prédicteur de Kalman (3)

Nous avons donc une évaluation $\hat{x}_{k_1}, \Gamma_{k_1}$ et $\hat{x}_{k_2}, \Gamma_{k_2}$ qui nous permet de calculer une distance entre ces deux estimées :

Distance operator:

- Euclidean distances $d(\hat{x}_{k_1}, \hat{x}_{k_2})$.

- Mahalanobis distance

$$D_m(\hat{x}_{k_1}, \hat{x}_{k_2}) = \sqrt{(\hat{x}_{k_1} - \hat{x}_{k_2})^T \Gamma_{k_1, k_2}^{-1} (\hat{x}_{k_1} - \hat{x}_{k_2})}.$$

Avec

$$\Gamma_{k_1, k_2} = \sum_{i=k_1+1}^{k_2} P_{k_2}^i \Gamma_{\alpha} \left(P_{k_2}^i \right)^T \quad (5)$$

Plan

- 1 Robotique mobile
- 2 Détection de fermeture de boucles par mesures proprioceptives
- 3 Résultats et conclusion
 - Application sur données réelles
 - Comparaison

Application sur données réelles

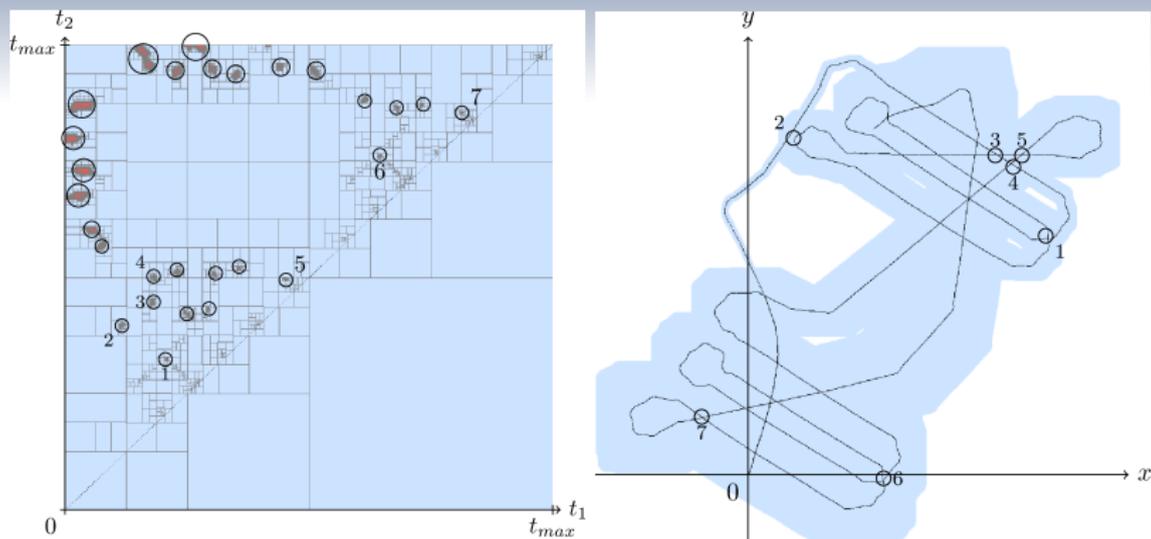
Présentation de l'expérience

- robot sous-marin (Redermor),
- équations d'état connues,
- mesure de vitesse par DVL bornée,
- mesure de cap par gyrocompas bornée.



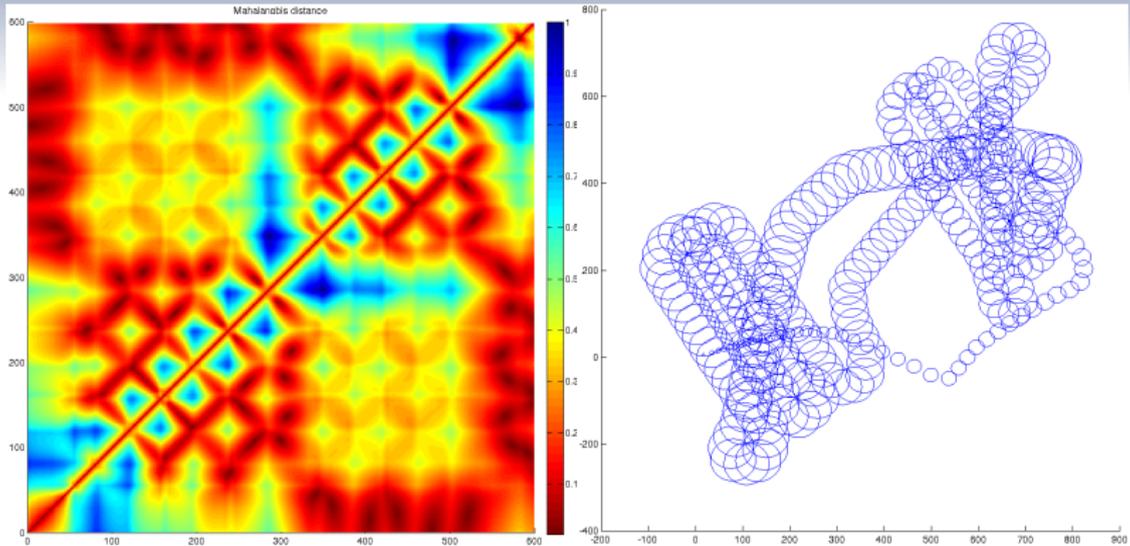
Le Redermor du
GESMA.

Résolution ensembliste



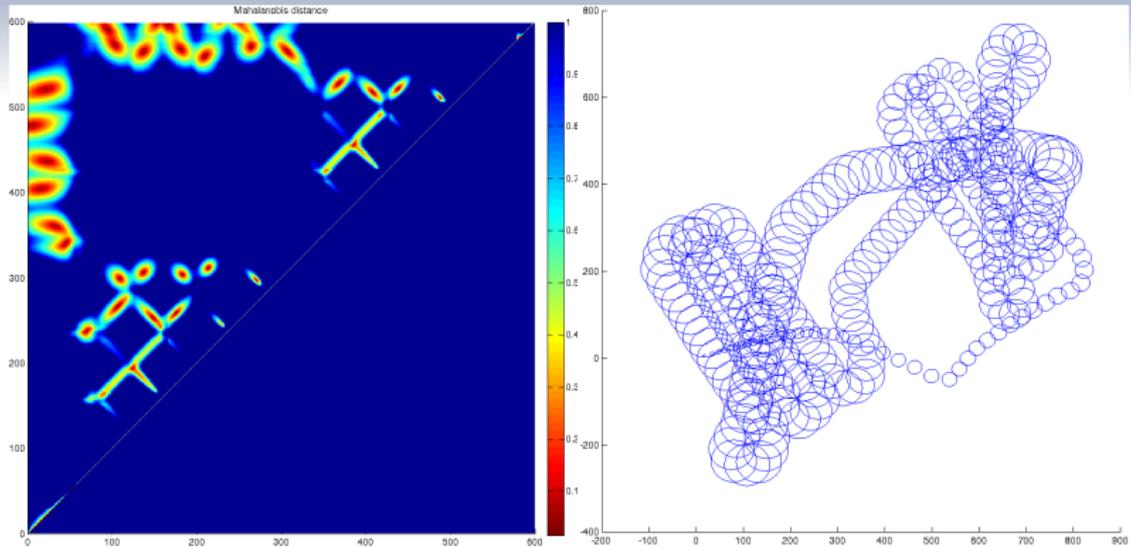
Résultats de l'algorithme LOOP sur les données du GESMA. Affichage des boucles et correspondance sur le t-plan.

Résolution par Kalman



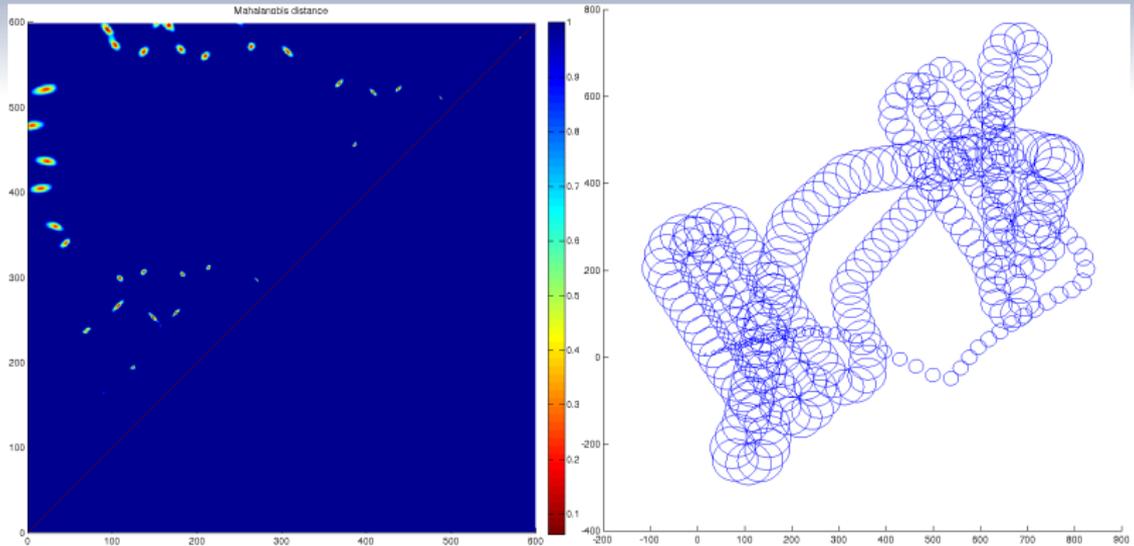
Estimation par Kalman de la position du Redermor, mesures de distances par Mahalanobis normalisées.

Résolution par Kalman



Estimation par Kalman de la position du Redermor, mesures de distances par Mahalanobis normalisées et seuillées (200m).

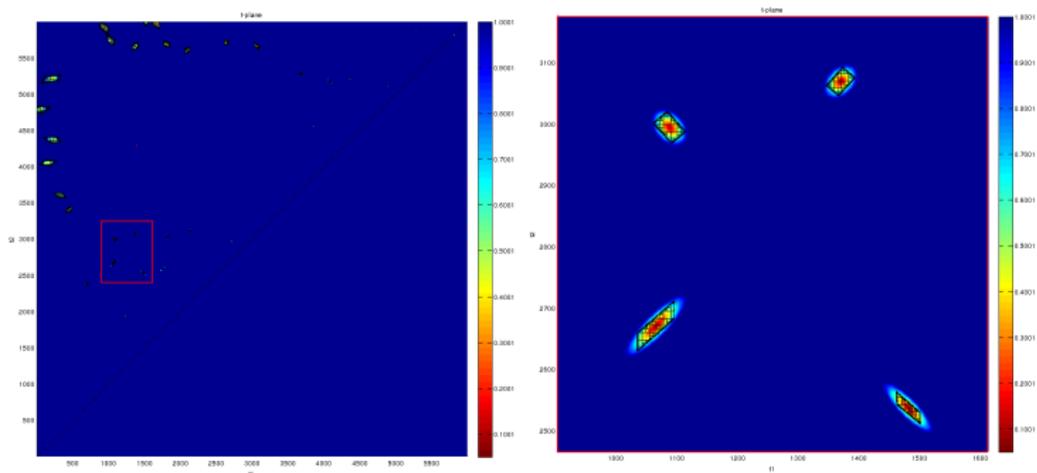
Résolution par Kalman



Estimation par Kalman de la position du Redermor, mesures de distances par Mahalanobis normalisées et seuillées (50m).

Comparaison des résultats (1)

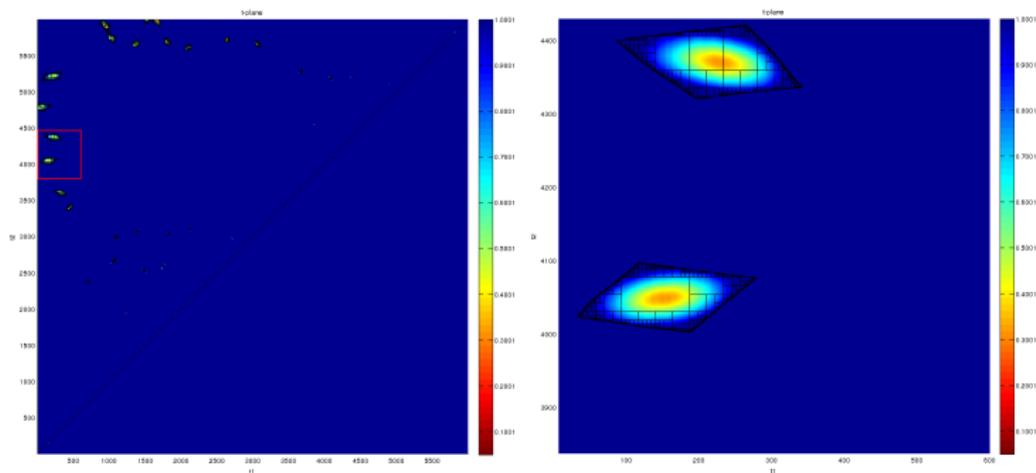
Sur chaque figure : t-plan issu de Kalman/Mahalanobis (seuillé à 10m) à l'arrière plan; sous-pavage intérieur du t-plan ensembliste.



A droite : zoom sur la boîte rouge du t-plan de la figure de gauche.

Comparaison des résultats (2)

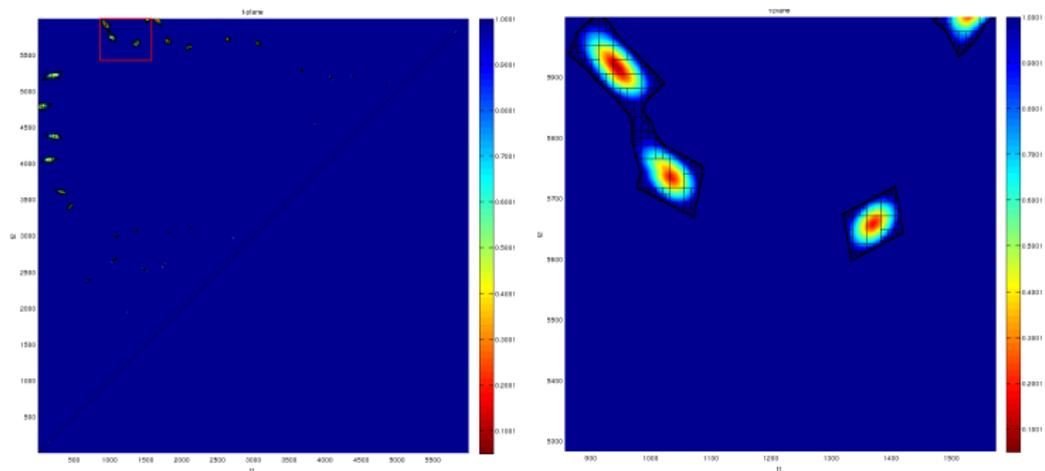
Sur chaque figure : t-plan issu de Kalman/Mahalanobis (seuillé à 10m) à l'arrière plan; sous-pavage intérieur du t-plan ensembliste.



A droite : zoom sur la boîte rouge du t-plan de la figure de gauche.

Comparaison des résultats (3)

Sur chaque figure : t-plan issu de Kalman/Mahalanobis (seuillé à 10m) à l'arrière plan; sous-pavage intérieur du t-plan ensembliste.



A droite : zoom sur la boîte rouge du t-plan de la figure de gauche.

Conclusion

Méthode ensembliste :

- Méthode automatisée et rapide.
- Utilisation de données proprioceptives.
- Nouvelle représentation des boucles.
- Garantie des résultats.
- Existence et unicité des boucles (pas abordé aujourd'hui) :
 - Newton contractor, Topological Degrees

Prédicteur de Kalman :

- Dans le cas traité, la modélisation aide beaucoup : $A_k = I$.
- Kalman apporte une nouvelle information : position (probable!) de la boucle dans un sous pavage.

Merci de votre attention.

Références I

-  C. Aubry, R. Desmare, and L. Jaulin, Loop detection of mobile robots using interval analysis, *Automatica* 49 (2013), no. 2, 463–470.
-  Fabrice Le Bars, Analyse par intervalles pour la localisation et la cartographie simultanées ; application à la robotique sous-marine, PhD dissertation, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 2011.
-  G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H. F. Durrant-Whyte, and M. Csorba, A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem, *IEEE Transactions Robotics and Automation* 3 (2001), no. 17, 229–241.
-  H.F Durrant-Whyte and T Bailey, Simultaneous localization and mapping: part i, *Robotics & Automation Magazine*, *IEEE* 13 (2006), no. 2, 99–110.
-  L. Jaulin, A Nonlinear Set-membership Approach for the Localization and Map Building of an Underwater Robot using Interval Constraint Propagation, *IEEE Transaction on Robotics* 25 (2009), no. 1, 88–98.
-  J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte, Directed sonar sensing for mobile robot navigation, Kluwer, Boston, 1992.

Références II



Jeremy Nicola, Luc Jaulin, and Sébastien Pennec, Toward the hybridization of probabilistic and set-membership methods for the localization of an underwater vehicle., 7th Small Workshop on Interval Methods, Uppsala, Sweden, 2014.



Cyrill Stachniss, Dirk Hahnel, and Wolfram Burgard, Exploration with active loop-closing for fastslam, Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on, vol. 2, IEEE, 2004, pp. 1505–1510.