

Contributions à la planification de mouvement

Habilitation à Diriger des Recherches

Thierry Fraichard



Robotique

Robotique et planification de mouvement

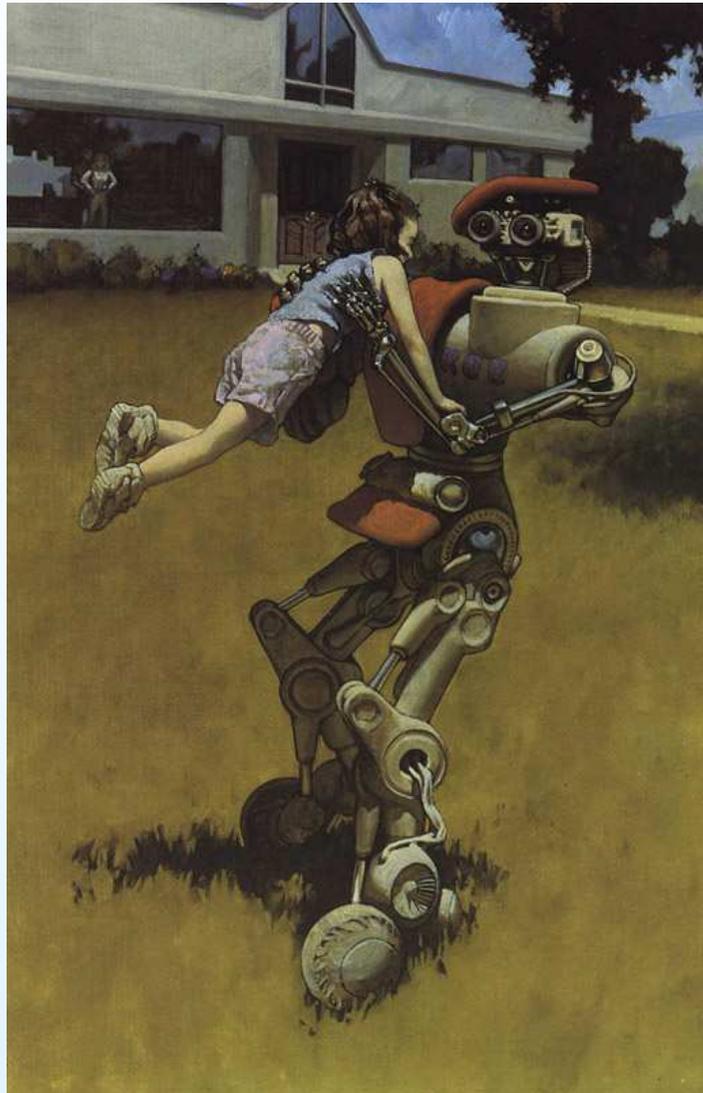
● Robotique

- Planif. de mouvement
- Contributions

Planification de trajectoire

Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives

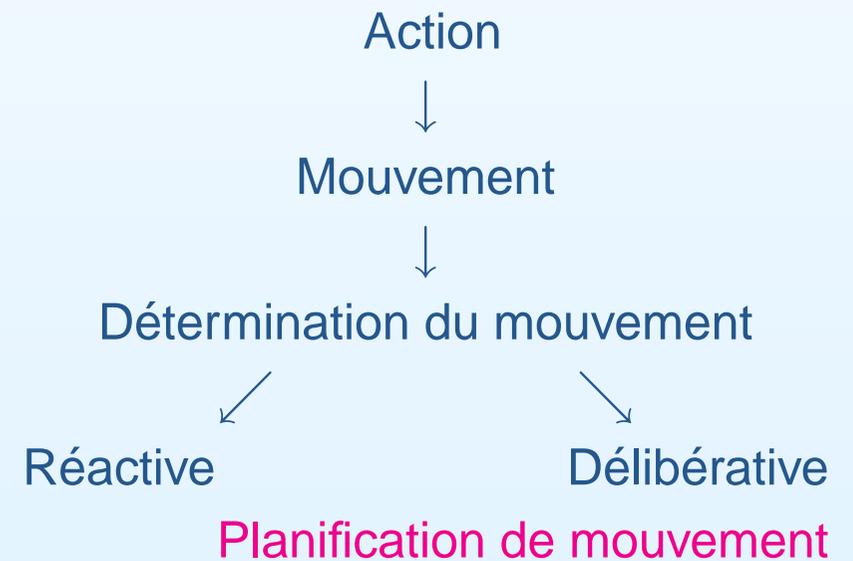


©Mark Zug

Robot: “Machine agissante”

- Perception
- Décision
- Action

- Autonomie



Planification de mouvement

Robotique et planification de mouvement

- Robotique
- Planif. de mouvement
- Contributions

Planification de trajectoire

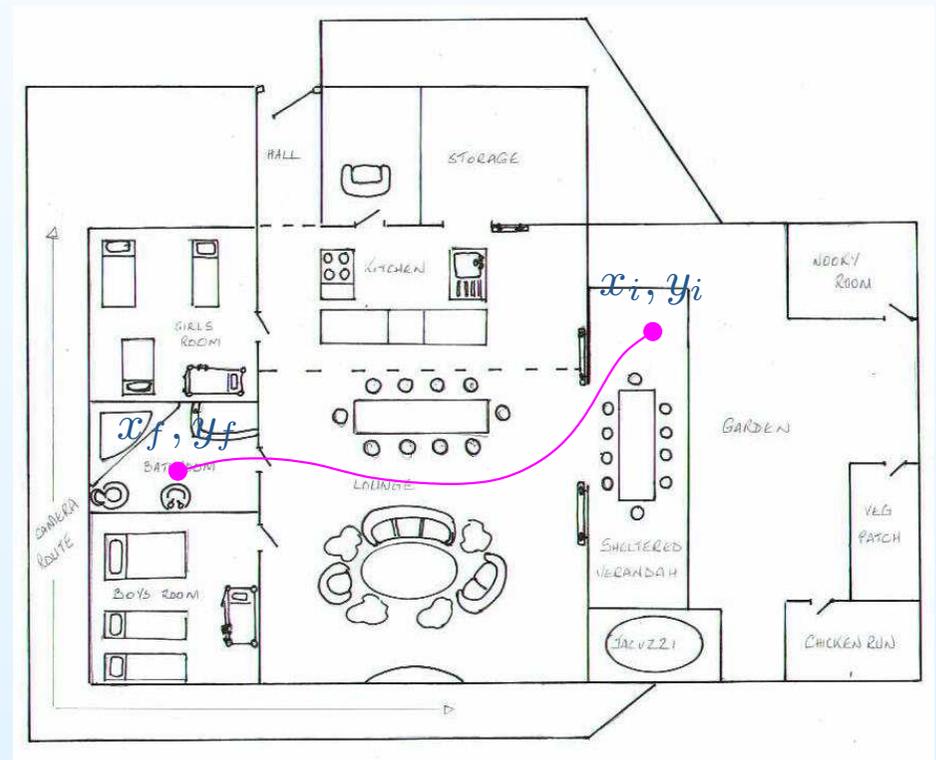
Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives

Calcul d'un mouvement **complet** jusqu'au but

Entrées: { modèles du robot et de l'environnement, départ, arrivée }

Sortie: { mouvement }



Chemin: séquence continue de **configurations:** $q = (x, y)$

Contributions

Robotique et planification
de mouvement

- Robotique
- Planif. de mouvement
- **Contributions**

Planification de trajectoire

Modélisation de
l'environnement

Conclusion, perspectives

Inspiration/application: véhicule de type voiture

Environnement dynamique

Planification de trajectoire

- Contraintes dynamiques
- Contrainte temps-réel
- Sûreté

... introduisons le temps

Modélisation de l'environnement

- Prédiction du futur

... un regard en amont

Planification de trajectoire

Trajectoire vs chemin

Robotique et planification
de mouvement

Planification de trajectoire

- **Trajectoire**

- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sécurité
- ECI
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de
l'environnement

Conclusion, perspectives

Chemin:

$$\pi : [0, 1] \longrightarrow \mathcal{C}, \text{ espace des configurations}$$

... où?

Trajectoire: chemin + temps

$$\Pi : [0, t] \longrightarrow \mathcal{C}$$

... quand, comment?

~> **Contraintes dynamiques, ie dépendantes du temps:**

- Dynamique du système robotique
- Mobiles de l'environnement

Dynamique, mobiles

Robotique et planification de mouvement

Planification de trajectoire

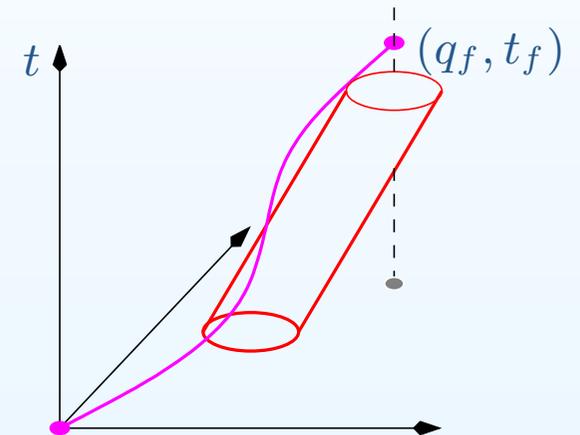
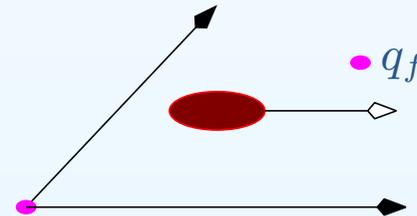
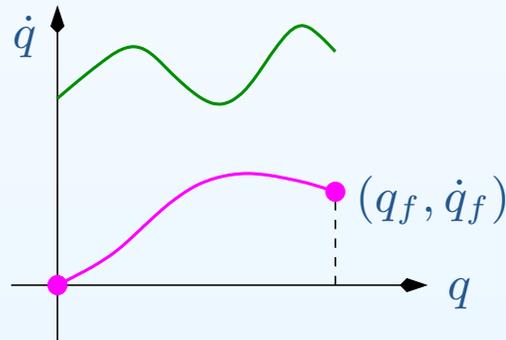
- Trajectoire
- **Dynamique, mobiles**
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sécurité
- ECI
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives

Dynamique: Espace des états (q, \dot{q})

Mobiles: Espace des configurations-temps (q, t)



Objectif: dynamique + mobiles

Espace des états-temps [Fraichard 92]

Robotique et planification de mouvement

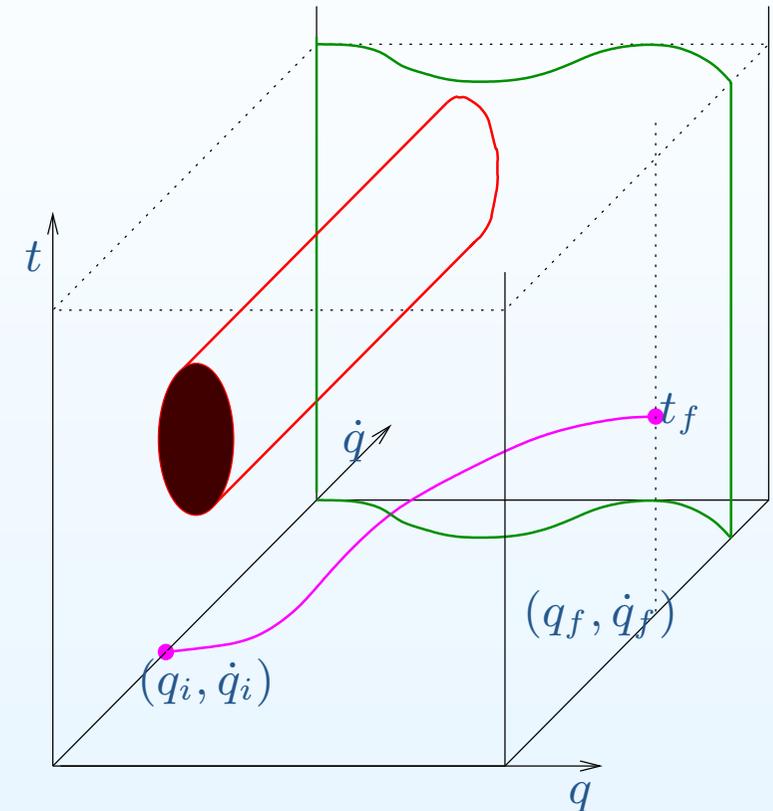
Planification de trajectoire

- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sécurité
- ECI
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives

- $(q, \dot{q}) + (q, t) \rightsquigarrow (q, \dot{q}, t)$
- Dynamique + mobiles
 \rightsquigarrow régions interdites
- Trajectoire: $[0, t] \longrightarrow \mathcal{ST}$



Méthodes déterministes: 1D (robot le long d'un chemin) ☹️

Méthodes aléatoires: 2D (robot dans le plan) 😊

[Frazzoli et al. 01; Bruce & Veloso 02; Hsu et al. 02; etc]

Contrainte temps-réel

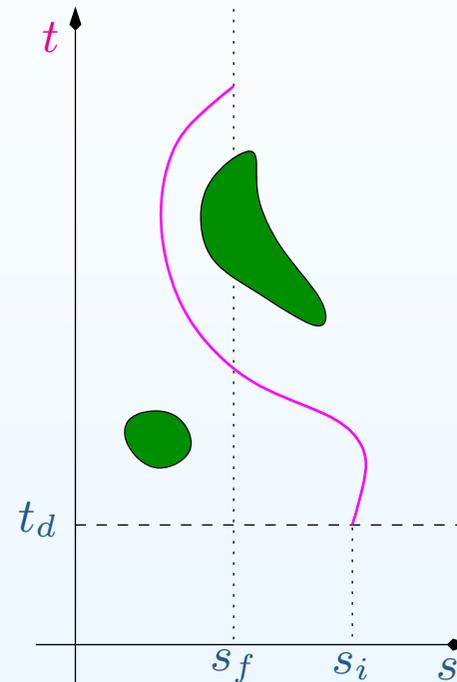
Robotique et planification de mouvement

Planification de trajectoire

- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- **Contrainte temps-réel**
- PMP
- Sécurité
- ECI
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives



- Mobiles \leadsto **ancrage temporel** des trajectoires planifiées: temps de planification $T_p \leq t_d$, instant de début prévu de la trajectoire
- Mobiles \leadsto danger potentiel (aveugle/dynamique/hostile): t_d dicté par l'environnement
- Méthodes aléatoires \leadsto temps de planification non borné. . .

Planification de mouvement partiel (PMP) [Fraichard 01]

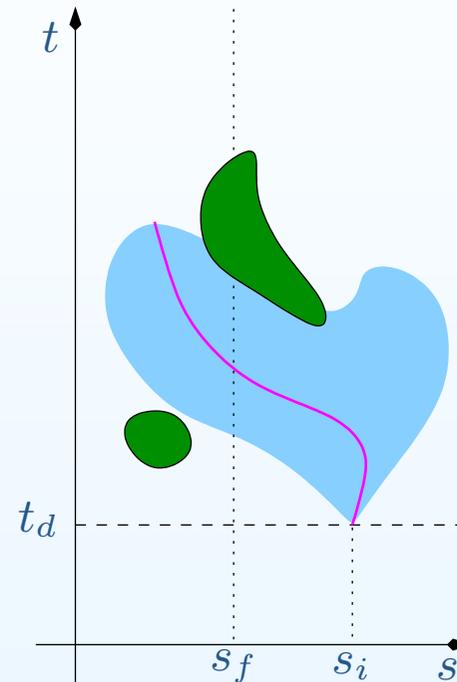
Robotique et planification de mouvement

Planification de trajectoire

- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sûreté
- ECI
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives



- PMP: schéma de planification **interrupible** à tout moment
~> Meilleure **trajectoire partielle** vers le but

Cycle PMP

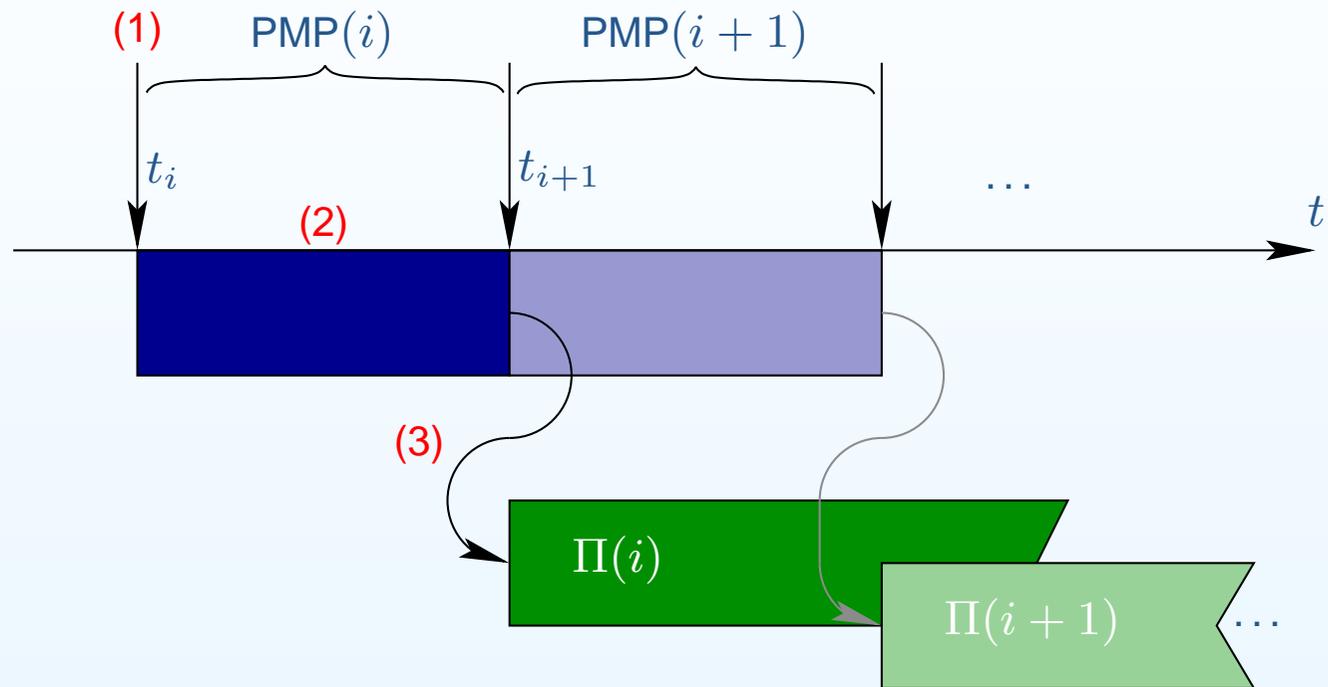
Robotique et planification de mouvement

Planification de trajectoire

- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sécurité
- ECI
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives



Mise en œuvre sur véhicule de type voiture [Petti 06]

Analyse de PMP

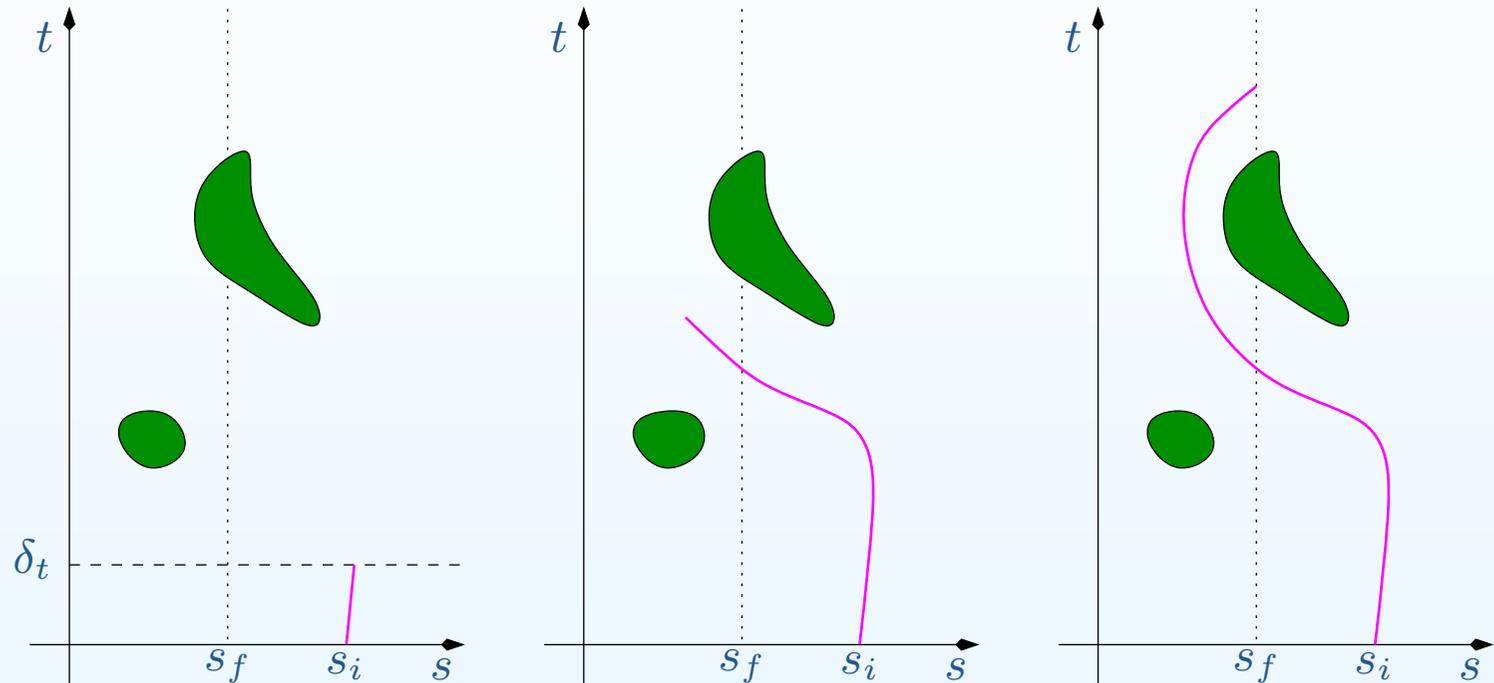
Robotique et planification de mouvement

Planification de trajectoire

- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sécurité
- ECI
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives



	Réactive	PMP	Planification
Temps-réel	+	+	-
Convergence	?	?	+
Sûreté	?	?	+

Sûreté (absence de)

Robotique et planification de mouvement

Planification de trajectoire

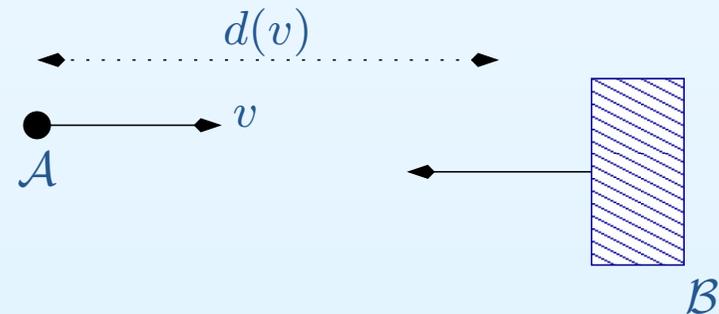
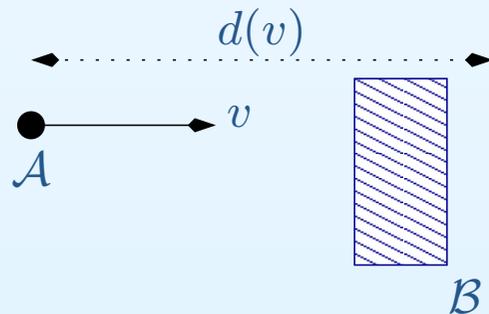
- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sûreté
- ECI
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives

Les trois raisons qui peuvent mettre un système robotique en danger:

1. Raisonnement sur un horizon temporel
2. Ignorance de la dynamique du système robotique
3. Ignorance de la dynamique des mobiles



États de collision inévitable (ECI) [Fraichard 03]

Robotique et planification de mouvement

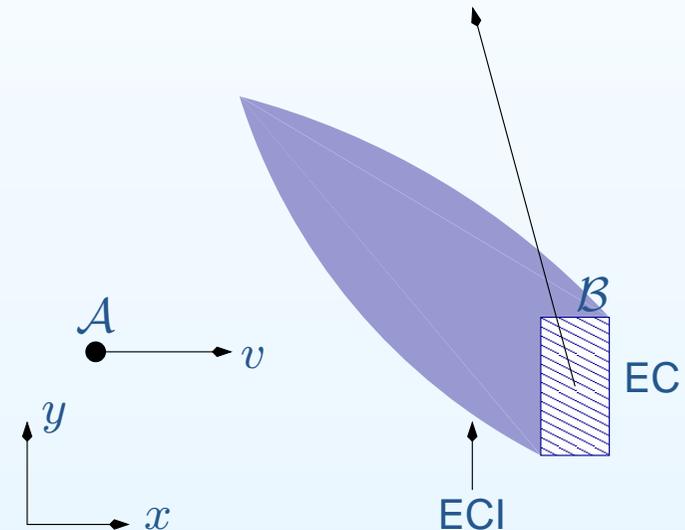
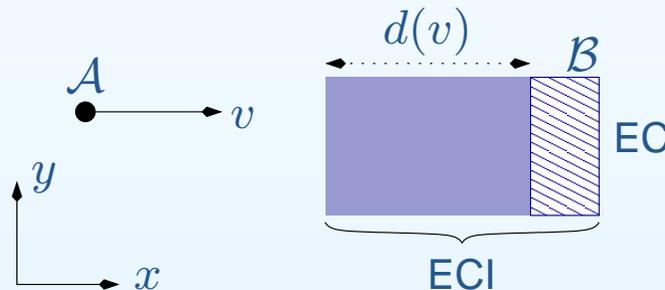
Planification de trajectoire

- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sécurité
- ECI
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives

État de collision inévitable: quelque soit la trajectoire future suivie, une collision survient



- $A : s = (x, y, v); u = \{\dot{v}\}, u \in \mathcal{U}$
- $\phi : [0, t] \longrightarrow \mathcal{U}; \phi \in \Phi$

États de collision inévitable

Robotique et planification
de mouvement

Planification de trajectoire

- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sûreté
- **ECI**
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de
l'environnement

Conclusion, perspectives

ECI: concept général: \forall système robotique, \forall environnement

- Dynamique du système robotique
- Dynamique des mobiles
- Horizon temporel

Clé de la sûreté: ne jamais se trouver dans un ECI

Sûreté de PMP/méthodes réactives: trajectoire partielle **ECI-libre**

États de collision inévitable

Robotique et planification
de mouvement

Planification de trajectoire

- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sécurité
- **ECI**
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de
l'environnement

Conclusion, perspectives

ECI: s est un ECI ssi $\forall \phi \in \Phi, \exists t, \phi(s, t)$ est un état de collision

Caractérisation:

$$ECI(\mathcal{B}) = \bigcap_{\Phi} ECI(\mathcal{B}, \phi) = \bigcap_{\Phi} \bigcup_i ECI(\mathcal{B}_i, \phi)$$

Problème: complexité de la caractérisation des ECI (Φ infini)

Propriété d'approximation: $\mathcal{I} \subset \Phi$

$$ECI(\mathcal{B}) \subset \bigcap_{\mathcal{I}} ECI(\mathcal{B}, \phi)$$

Propriété de réduction: $\Pi : [0, t_f] \longrightarrow \mathcal{ST}$ est ECI-libre
ssi Π est sans collision et $\Pi(t_f)$ est un ECI

Étude au cas par cas: choix de \mathcal{I} ?

ECl: cas de la voiture

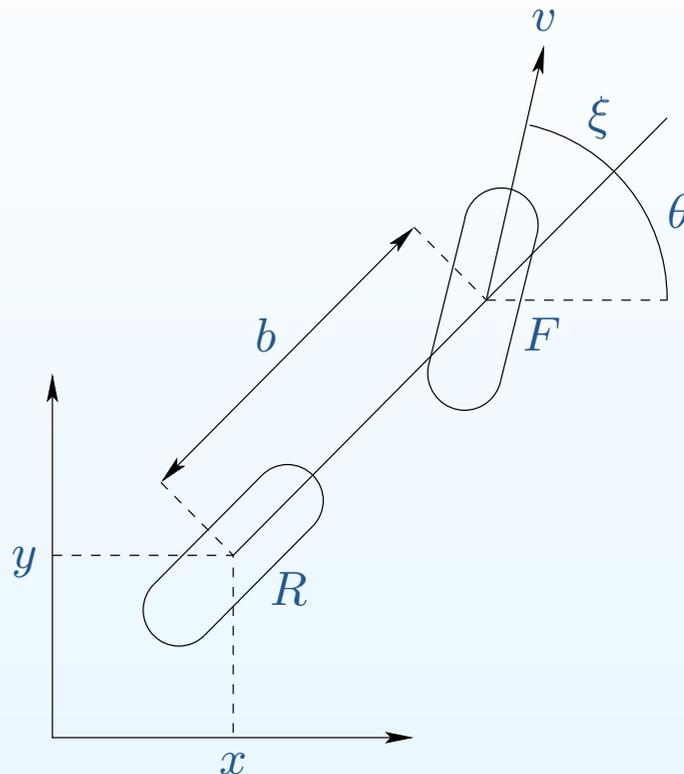
Robotique et planification
de mouvement

Planification de trajectoire

- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sécurité
- ECl
- **ECl (voiture)**
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de
l'environnement

Conclusion, perspectives



\mathcal{A} :

- $s = (x, y, \theta, v)$
- $u = \{\xi, \dot{v}\} \in \mathcal{U}$
- $|\xi| \leq \xi_{\max}$
- $|\dot{v}| \leq \dot{v}_{\max}$
- $\phi : [0, t] \longrightarrow \mathcal{U}$

I. Environnement statique

Choix de \mathcal{I} :

- Trajectoires de freinage
- ξ constant

ECI: cas de la voiture

Robotique et planification de mouvement

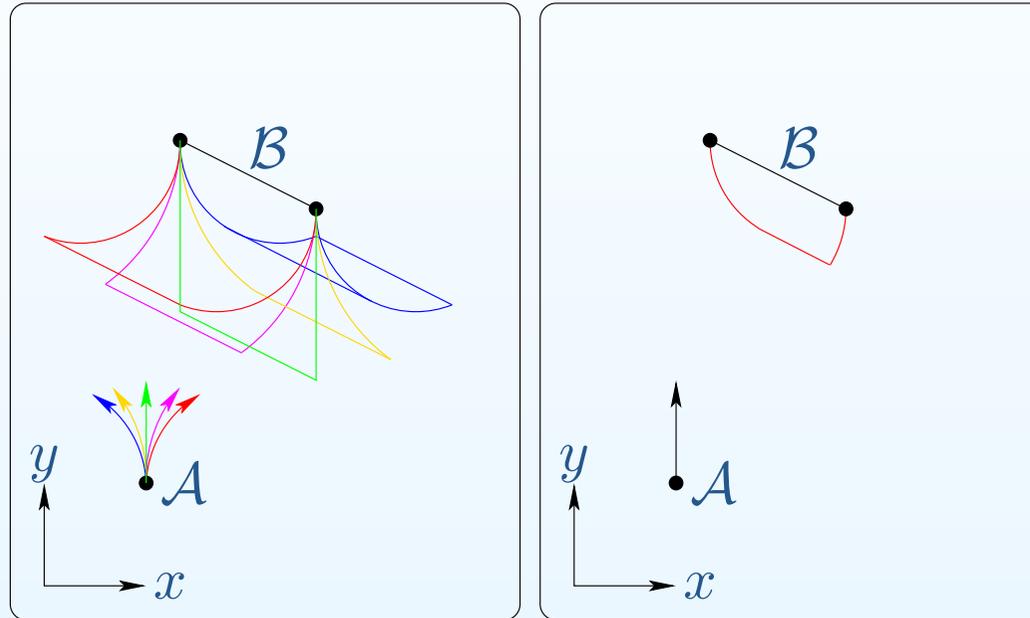
Planification de trajectoire

- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sécurité
- ECI
- **ECI (voiture)**
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives

Caractérisation par $v\theta$ -tranches



$$ECI(\mathcal{B}) = \bigcap_{\Phi} ECI(\mathcal{B}, \phi)$$

II. Environnement dynamique

[Parthasarathi 06]

Mise en œuvre de PMP [Petti 06] (vidéo)

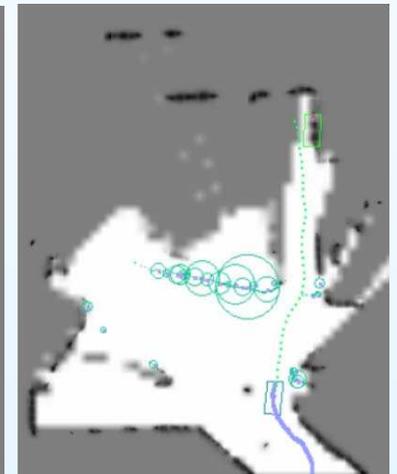
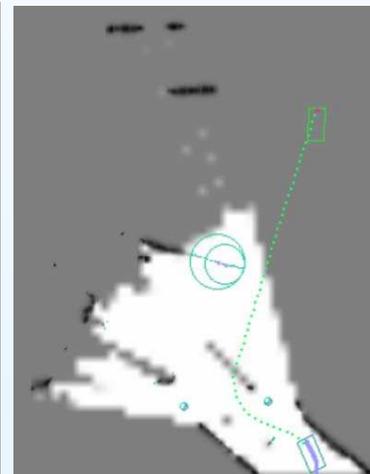
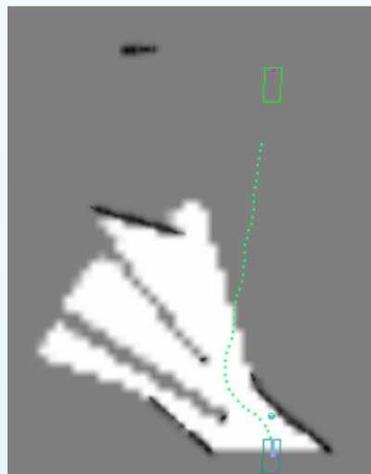
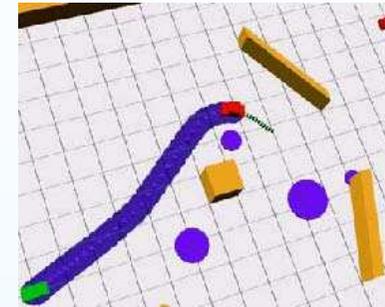
Robotique et planification de mouvement

Planification de trajectoire

- Trajectoire
- Dynamique, mobiles
- État-Temps
- Contrainte temps-réel
- PMP
- Sécurité
- ECI
- ECI (voiture)
- Mise en œuvre de PMP

Modélisation de l'environnement

Conclusion, perspectives



Modélisation de l'environnement

Prédiction du futur

Robotique et planification
de mouvement

Planification de trajectoire

Modélisation de
l'environnement

● **Prédiction du futur**

● Contribution

● Résultats

Conclusion, perspectives

Environnement dynamique: modèle du futur

Prédiction de mouvement: si futur inconnu a priori

Approches court-terme:

- Filtre bayésien: $s(t) \rightsquigarrow s(t + 1)$

Approches long-terme

- *Mouvement typique*
- *Mouvement intentionnel*

Mais... “apprendre puis prédire”

Prédiction du futur: contribution [Vasquez 06]

Robotique et planification
de mouvement

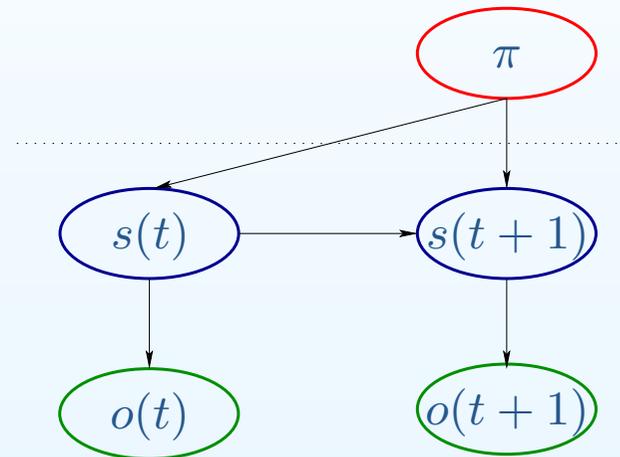
Planification de trajectoire

Modélisation de
l'environnement

- Prédiction du futur
- **Contribution**
- Résultats

Conclusion, perspectives

- “Apprendre **et** prédire” (A&P) mouvement intentionnel
- Modèle de Markov Caché + **but**: \rightsquigarrow transition $P(s(t+1)|s(t)\gamma)$



- Apprentissage des paramètres: transition (“Viterbi”), observation
- Prédiction: filtre à particule
- **Apprentissage de la structure**: états (nombre, topologie), buts
- **Algorithme incrémental et adaptatif**
- Coût apprentissage et prédiction: $O(N) \rightsquigarrow$ **traitement en-ligne**

A&P: dispositif expérimental

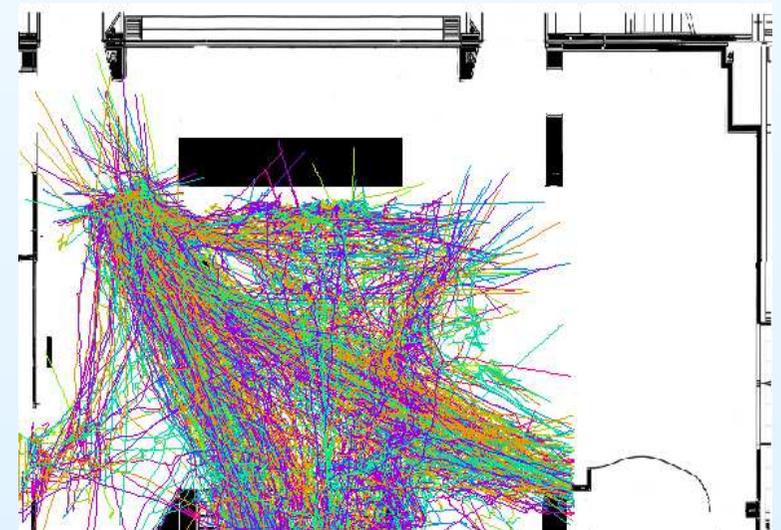
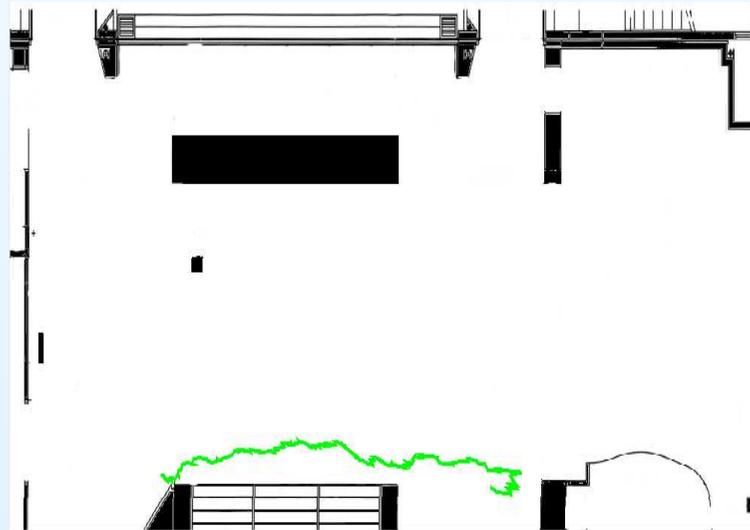
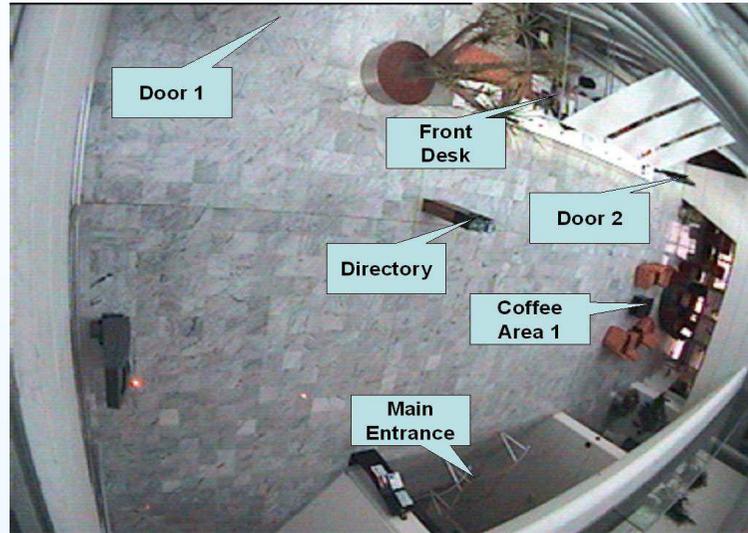
Robotique et planification de mouvement

Planification de trajectoire

Modélisation de l'environnement

- Prédiction du futur
- Contribution
- Résultats

Conclusion, perspectives



A&P: résultats (vidéo)

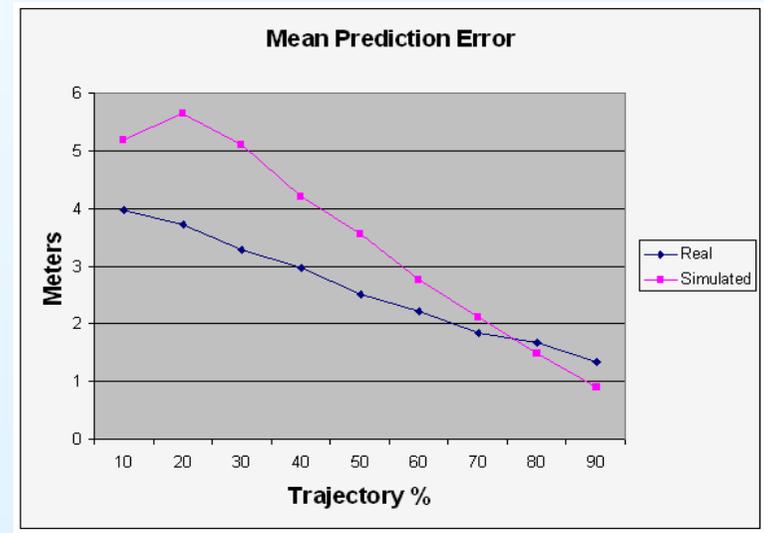
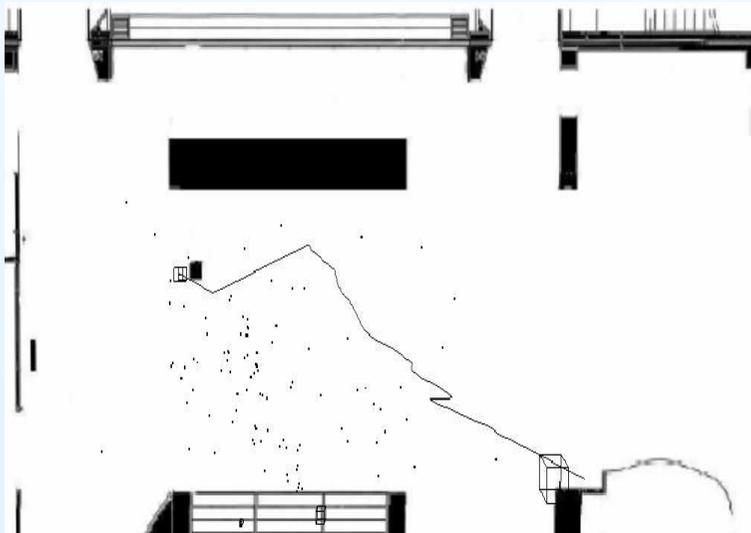
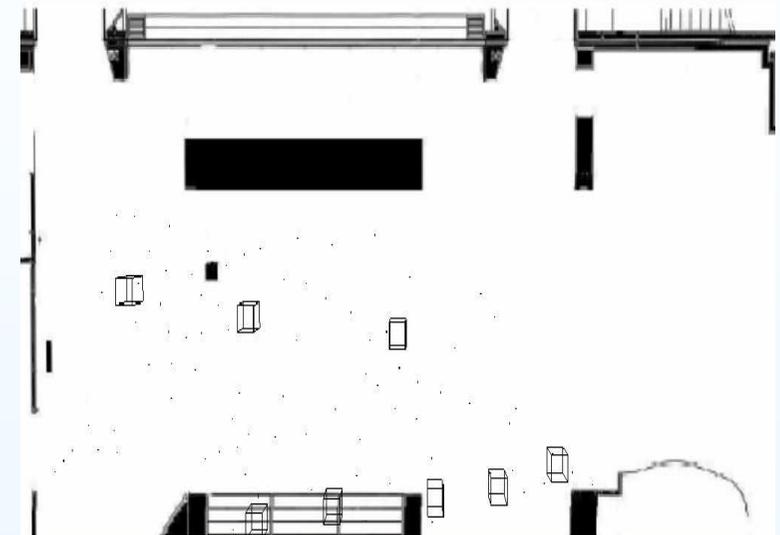
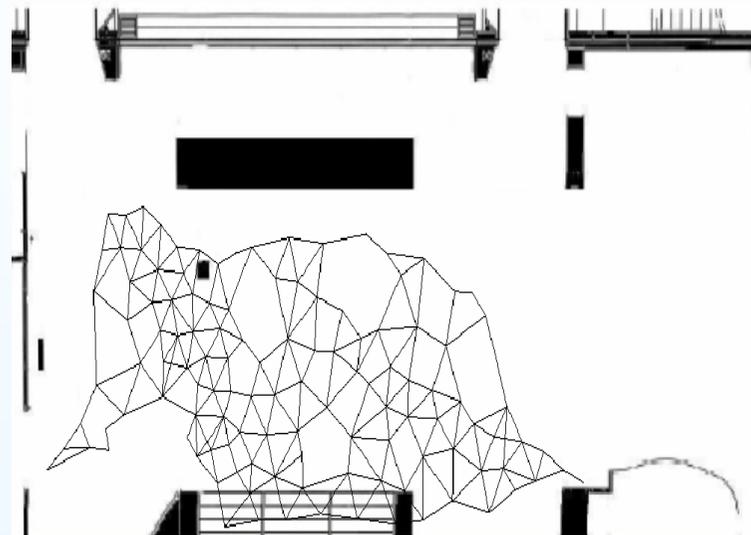
Robotique et planification de mouvement

Planification de trajectoire

Modélisation de l'environnement

- Prédiction du futur
- Contribution
- Résultats

Conclusion, perspectives



Conclusion, perspectives

Conclusion

Planification en environnement dynamique

Espace des états-temps: cadre pour aborder la planification de mouvement en environnement dynamique

Planification de mouvement partiel: réponse à la contrainte temps-réel imposée par un environnement fortement dynamique

États de collision inévitable: concept pour aborder le problème de la sûreté des systèmes robotiques

Prédiction à long-terme de mouvement: un pré-requis à tout déplacement en environnement dynamique

Robotique et planification
de mouvement

Planification de trajectoire

Modélisation de
l'environnement

Conclusion, perspectives

● Conclusion

● Perspectives

Perspectives expérimentales

Robotique et planification
de mouvement

Planification de trajectoire

Modélisation de
l'environnement

Conclusion, perspectives

- Conclusion
- Perspectives



Perspectives scientifiques

Robotique et planification
de mouvement

Planification de trajectoire

Modélisation de
l'environnement

Conclusion, perspectives

- Conclusion
- Perspectives

1. Planification de mouvement partiel
 - Performance
 - Convergence
2. État de collision inévitable
 - Étude théorique/pratique
 - Point de vue probabiliste
3. Modélisation de l'environnement
 - Modélisation du présent (détection, suivi des mobiles)
4. Navigation
 - Prise en compte des réactions des mobiles