

**SYSTÈMES  
AUTOMATISÉS**

**Information - Commande - Communication**

# **La robotique mobile**

*sous la direction de*  
**Jean-Paul Laumond**

**hermes**

---

## Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	17
Jean-Paul LAUMOND	
<b>Chapitre 1. Planification de mouvement pour robots mobiles non holonomes</b> . . . . .	21
Jean-Paul LAUMOND, Florent LAMIRAUX, Sepanta SEKHAVAT	
1.1. Introduction . . . . .	21
1.2. Les données du problème . . . . .	22
1.3. Modélisation et commandabilité d'un robot mobile . . . . .	25
1.3.1. Commandabilités . . . . .	25
1.3.2. Robots mobiles : du modèle dynamique au modèle cinématique . . . . .	26
1.3.2.1. Le robot à deux roues motrices . . . . .	27
1.3.2.2. La voiture . . . . .	28
1.3.3. Robots tractant des remorques . . . . .	32
1.3.4. Chemins admissibles et trajectoires . . . . .	34
1.3.4.1. Chemins et trajectoires . . . . .	34
1.3.4.2. Des chemins aux trajectoires . . . . .	35
1.4. Planification de chemins et commandabilités . . . . .	36
1.5. Commandes en boucle ouverte . . . . .	39
1.5.1. Des champs de vecteur aux chemins . . . . .	39
1.5.2. Systèmes nilpotents et nilpotentisation . . . . .	41
1.5.3. Le cas des systèmes chaînés . . . . .	44
1.5.4. Le cas des systèmes plats . . . . .	47
1.5.5. Méthodes de guidage par chemins optimaux . . . . .	51
1.6. Planification de chemins pour systèmes commandables en temps petit . . . . .	52
1.6.1. La méthode de planification par approximation de chemin géométrique . . . . .	53
1.6.2. Méthodes de guidage et commandabilité en temps petit . . . . .	54

1.6.2.1. Chemins optimaux . . . . .	55
1.6.2.2. Systèmes chaînés et entrées sinusoïdales . . . . .	55
1.6.2.3. Une méthode de guidage pour systèmes à remorques basée sur la platitude . . . . .	56
1.6.3. Planification de chemins en présence d'obstacles . . . . .	59
1.6.3.1. Retour sur la méthode par approximation de chemins géo- métriques . . . . .	59
1.6.3.2. Approximation itérative de chemin géométrique . . . . .	61
1.6.3.3. Les méthodes de planification de chemin par réseaux aléa- toires . . . . .	63
1.6.3.4. L'algorithme du fil d'Ariane . . . . .	65
1.7. Planification et complexité . . . . .	66
1.8. Conclusions . . . . .	69
1.9. Annexes . . . . .	71
1.9.1. Preuve de commandabilité en temps petit d'un robot mobile de type voiture . . . . .	72
1.9.1.1. Preuve directe de commandabilité . . . . .	72
1.9.1.2. Preuve utilisant la formule de Campbell-Baker-Hausdorff- Dynkin . . . . .	73
1.9.1.3. Approximation de la distance non holonome . . . . .	75
1.9.2. Combinatoire sur les crochets de Lie . . . . .	77
1.9.2.1. Filtrations et degré de non-holonomie . . . . .	78
1.9.2.2. Algèbres de Lie libres . . . . .	79
1.9.3. Plus courts chemins pour un robot de type voiture . . . . .	82
1.9.3.1. Forme des plus courts chemins . . . . .	83
1.9.3.2. Synthèses . . . . .	84
1.9.3.3. Domaines d'accessibilité . . . . .	84
1.9.3.4. Plus courts chemins en position . . . . .	85
1.9.3.5. Distances aux obstacles . . . . .	86
1.9.4. Une méthode de guidage pour un robot tractant une remorque . . . . .	86
1.9.4.1. Paramétrage d'une configuration . . . . .	88
1.9.4.2. Courbes canoniques . . . . .	88
1.9.4.3. Combinaisons convexes de courbes canoniques . . . . .	89
1.9.4.4. Projection de $X_2$ sur $\Gamma(X_1, s)$ . . . . .	90
1.9.4.5. Introduction d'un point de rebroussement . . . . .	91
1.9.5. Autres approches, autres systèmes . . . . .	92
1.9.5.1. Grilles et commandes constantes par morceaux . . . . .	92
1.9.5.2. Méthode des contraintes progressives . . . . .	92
1.9.5.3. Sur les voitures qui ne se déplacent qu'en marche avant . . . . .	93
1.9.5.4. Plusieurs robots mobiles . . . . .	93
1.9.5.5. Terrain accidenté . . . . .	94
1.10. Bibliographie . . . . .	95

<b>Chapitre 2. Commande des robots mobiles à roues</b> . . . . .	103
Pascal MORIN et Claude SAMSON	
2.1. Introduction . . . . .	103
2.2. Modèles de commande . . . . .	106
2.2.1. Choix du cadre cinématique . . . . .	106
2.2.2. Modélisation dans un repère de Frenet . . . . .	109
2.3. Adaptation des méthodes de commande des systèmes holonomes . . . . .	111
2.3.1. Stabilisation de trajectoires d'un point non contraint . . . . .	112
2.3.2. Suivi de chemin sans contrôle d'orientation . . . . .	113
2.4. Méthodes spécifiques aux systèmes non holonomes . . . . .	115
2.4.1. Passage aux modèles en forme chaînée . . . . .	116
2.4.2. Poursuite d'un véhicule de référence . . . . .	118
2.4.3. Suivi de chemin avec contrôle d'orientation . . . . .	124
2.4.3.1. Cas de l'unicycle . . . . .	124
2.4.3.2. Généralisation à la voiture et au chariot avec remorques . . . . .	127
2.4.4. Stabilisation asymptotique de configurations fixes . . . . .	128
2.4.4.1. Retours d'état instationnaires . . . . .	130
2.4.4.2. Retours d'état hybrides . . . . .	134
2.5. Repères bibliographiques . . . . .	136
2.6. Bibliographie . . . . .	137
<b>Chapitre 3. Perception pour la localisation</b> . . . . .	141
Patrick RIVES et Michel DEVY	
3.1. Introduction . . . . .	142
3.2. Localisation basée sur des mesures de déplacement . . . . .	143
3.2.1. Localisation par odométrie . . . . .	143
3.2.1.1. Exemple du robot de type « char » . . . . .	144
3.2.1.2. Modélisation des erreurs d'odométrie . . . . .	146
3.2.1.3. Réduction des erreurs systématiques . . . . .	147
3.2.2. Localisation par capteurs inertiels . . . . .	148
3.2.2.1. Les gyromètres . . . . .	148
3.2.2.2. Les accéléromètres . . . . .	149
3.2.2.3. Modélisation des termes de dérive . . . . .	149
3.2.3. Localisation par corrélation entre images . . . . .	153
3.2.4. Autres types de capteur proprioceptif . . . . .	155
3.2.4.1. Capteurs à effet Doppler . . . . .	155
3.2.4.2. Capteurs d'attitude : compas, inclinomètres . . . . .	155
3.3. Localisation basée sur des amers connus <i>a priori</i> . . . . .	156
3.3.1. Localisation par goniométrie : triangulation sur balises . . . . .	157
3.3.1.1. Observabilité . . . . .	158
3.3.1.1.1. Localisation statique ( $U = 0$ ) . . . . .	158
3.3.1.1.2. Localisation dynamique ( $U \neq 0$ ) . . . . .	160

3.3.1.2. Application à la localisation dynamique . . . . .	161
3.3.1.2.1. Utilisation de trois balises ( $p = \dim(Y) = 3, n = \dim(X) = 3$ ) . . . . .	161
3.3.1.2.2. Utilisation de deux balises ( $p = \dim(Y) = 2, n = \dim(X) = 3$ ) . . . . .	162
3.3.2. Localisation fondée sur des capteurs de distance . . . . .	163
3.3.3. Localisation fondée sur l'indexation d'images . . . . .	165
3.3.4. Localisation basée sur des amers naturels . . . . .	166
3.4. Approches hybrides : localisation et cartographie simultanée dans un environnement inconnu . . . . .	168
3.4.1. La carte stochastique . . . . .	169
3.4.2. Construction et mise à jour de la carte stochastique . . . . .	171
3.4.2.1. Le robot change d'emplacement . . . . .	171
3.4.2.2. Le robot perçoit un nouvel amer . . . . .	172
3.4.2.3. Le robot reperçoit un amer . . . . .	173
3.4.3. Sélection des amers . . . . .	174
3.4.3.1. Amers de type primitive géométrique . . . . .	175
3.4.3.2. Amers de type objet . . . . .	176
3.4.3.3. Amers de type hybride : primitives ou objets . . . . .	178
3.4.4. Mise en œuvre de la construction d'une carte stochastique . . . . .	180
3.4.4.1. Prise en considération des corrélations . . . . .	180
3.4.4.2. La procédure de recalage-fusion . . . . .	183
3.4.4.3. Structuration d'une carte stochastique . . . . .	184
3.4.5. Exemples de constructions de cartes stochastiques . . . . .	185
3.4.5.1. Amers de type primitive en milieu intérieur . . . . .	186
3.4.5.2. Amers de type objet en milieu intérieur . . . . .	187
3.4.5.3. Amers de type primitive en environnement naturel . . . . .	187
3.5. Autres approches . . . . .	189
3.6. Conclusion . . . . .	191
3.7. Annexes . . . . .	192
3.7.1. Propagation de l'incertitude . . . . .	192
3.7.2. Rappel sur le filtre de Kalman étendu . . . . .	193
3.8. Bibliographie . . . . .	195
<b>Chapitre 4. Perception pour la navigation et la commande . . . . .</b>	<b>199</b>
Patrick RIVES et Michel DEVY	
4.1. Introduction . . . . .	200
4.2. Perception et modélisation de l'environnement . . . . .	201
4.2.1. Structuration des représentations . . . . .	202
4.2.1.1. Les différentes représentations . . . . .	202
4.2.1.2. Exemple d'un modèle hétérogène . . . . .	204
4.2.2. Modèle de l'espace navigable à partir de primitives géométriques . . . . .	205
4.2.2.1. Environnement structuré . . . . .	205

4.2.2.2. Environnement naturel . . . . .	206
4.2.3. Modèle de l'espace navigable de type carte d'occupation . . . . .	207
4.2.3.1. Approche classique . . . . .	207
4.2.3.1.1. Définition des cartes d'occupation . . . . .	207
4.2.3.1.2. Modélisation du capteur à ultrasons . . . . .	208
4.2.3.1.3. Evaluation de l'approche classique . . . . .	210
4.2.3.2. Améliorations de l'approche classique . . . . .	212
4.2.3.2.1. Segmentation des données ultrasoniques . . . . .	212
4.2.3.2.2. Remplissage du cône à ultrasons . . . . .	213
4.2.3.2.3. Diminution de l'erreur angulaire . . . . .	214
4.2.3.2.4. Evaluation des améliorations . . . . .	214
4.2.3.3. Discussion sur les grilles d'occupation . . . . .	216
4.2.4. Modèle de l'espace navigable de type carte d'élévation . . . . .	217
4.2.4.1. Définition des cartes d'élévation . . . . .	217
4.2.4.2. Construction d'une carte d'élévation . . . . .	218
4.2.4.2.1. La méthode Locus en coordonnées sphériques . . . . .	220
4.2.4.2.2. Méthode d'interpolation en coordonnées cartésiennes . . . . .	222
4.2.4.3. Fusion de cartes d'élévation . . . . .	224
4.2.5. Modèle qualitatif de l'espace libre . . . . .	225
4.2.6. Représentations de la topologie de l'environnement . . . . .	226
4.2.6.1. Milieu intérieur . . . . .	227
4.2.6.2. Milieu naturel . . . . .	229
4.2.7. Conclusion pour la modélisation . . . . .	229
4.3. Percevoir pour la commande . . . . .	231
4.3.1. Tâche de régulation exprimée dans l'espace de configuration . . . . .	232
4.3.2. Tâche de régulation exprimée dans l'espace de perception . . . . .	232
4.3.2.1. Existence et caractérisation d'un difféomorphisme . . . . .	233
4.3.2.1.1. Rappels et notations . . . . .	233
4.3.2.1.2. Le torseur d'interaction . . . . .	234
4.3.2.1.3. Calcul du torseur d'interaction . . . . .	235
4.3.2.2. Synthèse de la commande . . . . .	238
4.3.2.2.1. L'approche « fonction de tâche » . . . . .	238
4.3.2.2.2. Utilisation de signaux capteurs . . . . .	239
4.3.2.3. Application à la commande des robots mobiles . . . . .	240
4.3.2.4. Commande cinématique d'un repère capteur situé sur l'effecteur d'un manipulateur mobile [PIS 91] . . . . .	241
4.3.2.5. Enchaînement de tâches référencées capteurs pour la navigation . . . . .	244
4.3.3. Conclusion pour la commande . . . . .	246
4.4. Annexe: calcul du torseur d'interaction pour des capteurs télémétriques (télémètre à champ étroit [SAM 91]) . . . . .	250
4.5. Bibliographie . . . . .	252

<b>Chapitre 5. Planification et décision</b> . . . . .	259
Malik GHALLAB	
5.1. Introduction . . . . .	259
5.2. Planification classique . . . . .	261
5.2.1. Modèle de base . . . . .	262
5.2.2. Représentation . . . . .	263
5.2.3. Calcul du changement . . . . .	266
5.2.4. Espace d'états . . . . .	266
5.2.5. Espace des plans partiels . . . . .	268
5.2.6. Plans partiels et espace d'états . . . . .	272
5.2.7. Contraintes disjonctives . . . . .	272
5.2.7.1. GraphPlan . . . . .	273
5.2.7.2. Planification et CSP . . . . .	276
5.2.7.3. Planification par satisfiabilité de clauses propositionnelles . . . . .	279
5.3. Planification temporelle . . . . .	281
5.4. Intégration de la planification de mouvement à la planification de tâches . . . . .	284
5.5. Planification non déterministe . . . . .	285
5.6. Planification et supervision . . . . .	287
5.6.1. Divers types de superviseurs . . . . .	288
5.6.2. Couplage supervision-planification . . . . .	289
5.6.3. Architectures . . . . .	290
5.7. Bibliographie . . . . .	292
<b>Chapitre 6. Les robots marcheurs bipèdes</b> . . . . .	297
Bernard ESPIAU et Frank GÉNOT	
6.1. Introduction . . . . .	297
6.2. Un aperçu de la marche humaine . . . . .	299
6.2.1. Un modèle « mécanique » de la marche . . . . .	299
6.2.1.1. Généralités . . . . .	299
6.2.1.2. Cinématique . . . . .	300
6.2.1.3. Forces et moments . . . . .	302
6.2.2. Marche humaine, marche robotique : applicabilité des modèles . . . . .	303
6.3. Introduction à la marche passive des robots . . . . .	305
6.3.1. Le modèle « en compas » . . . . .	305
6.3.2. Régimes cycliques des systèmes passifs . . . . .	308
6.3.3. Allures périodiques naturelles . . . . .	311
6.3.4. Allures naturelles pour l'homme et le robot . . . . .	314
6.4. Les robots marcheurs comme systèmes à liaisons unilatérales . . . . .	316
6.4.1. Espace de configuration et contraintes unilatérales . . . . .	317
6.4.1.1. Liaisons bilatérales . . . . .	318
6.4.1.2. Liaisons unilatérales . . . . .	319
6.4.2. Liaisons unilatérales et relations de complémentarité . . . . .	319

6.4.3. Intégration de la dynamique . . . . .	320
6.4.4. Influence de l'unilatéralité des contacts sur la loi de commande . . . . .	323
6.4.4.1. Dynamique continue . . . . .	323
6.4.4.2. <i>Impact-shaping</i> . . . . .	326
6.5. Quelques éléments pour la commande des robots bipèdes . . . . .	330
6.5.1. Dynamique contrainte en un mode donné . . . . .	331
6.5.2. Une forme générale de commande découplante . . . . .	332
6.5.3. Principes de base sur la constitution des fonctions de sortie . . . . .	334
6.5.4. Calcul des couples articulaires de commande . . . . .	335
6.5.5. Perspectives . . . . .	336
6.6. Bibliographie . . . . .	338
<b>Index</b> . . . . .	<b>343</b>