

Analyse et modélisation
des robots manipulateurs

© LAVOISIER, 2001

LAVOISIER
11, rue Lavoisier
75008 Paris

Serveur web : www.hermes-science.com

ISBN 2-7462-0300-6

Catalogage Electre-Bibliographie

Dombre, Etienne (sous la direction de)
Analyse et modélisation des robots manipulateurs
Paris, Hermès Science Publications, 2001
ISBN 2-7462-0300-6

RAMEAU : manipulateurs (mécanismes)
 robots industriels

DEWEY : robotique : simulation, méthodes de
 629.5 : Autres branches de l'art de l'ingénieur.
 Commande automatique. Robotique

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective" et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite" (article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Analyse et modélisation des robots manipulateurs

sous la direction de
Etienne Dombre

hermes
Science
— publications —

*Il a été tiré de cet ouvrage
25 exemplaires hors commerce réservés
aux membres du comité scientifique,
aux auteurs et à l'éditeur
numérotés de 1 à 25*

Analyse et modélisation des robots manipulateurs

sous la direction de Etienne Dombre

fait partie de la série SYSTÈMES AUTOMATISÉS dirigée par Claude Foulard

TRAITÉ IC2 INFORMATION – COMMANDE – COMMUNICATION sous la direction scientifique de Bernard Dubuisson

Le traité Information, Commande, Communication répond au besoin de disposer d'un ensemble complet des connaissances et méthodes nécessaires à la maîtrise des systèmes technologiques.

Conçu volontairement dans un esprit d'échange disciplinaire, le traité IC2 est l'état de l'art dans les domaines suivants retenus par le comité scientifique :

- Réseaux et télécoms
- Traitement du signal et de l'image
- Informatique et systèmes d'information
- Systèmes automatisés
- Productique

Chaque ouvrage présente aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux. Une classification des différents articles contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus dans le cas d'expérimentations réelles.

Blanche

Liste des auteurs

Pierre BESSIÈRE

GRAVIR

Institut national de recherche en informatique et en automatique
Grenoble

Maurice BÉTEMPS

LAI

Institut national des sciences appliquées
Lyon

Etienne DOMBRE

LIRMM

Université Montpellier II-CNRS

Maxime GAUTIER

IRCCyN

Université de Nantes

Alain JUTARD

LAI

Institut national des sciences appliquées
Lyon

Wisama KHALIL

IRCCyN

Ecole centrale de Nantes

Olivier LEBELTEL

GRAVIR

Institut national de recherche en informatique et en automatique
Grenoble

Emmanuel MAZER

GRAVIR

Institut national de recherche en informatique et en automatique
Grenoble

Kamel MEKHNACHA
GRAVIR
Institut national de recherche en informatique et en automatique
Grenoble

Jean-Pierre MERLET
Institut national de recherche en informatique et en automatique
Sophia-Antipolis

François PIERROT
LIRMM
Université Montpellier II-CNRS

Philippe WENGER
IRCCyN
Ecole centrale de Nantes

Table des matières

Introduction	15
Etienne DOMBRE	
 Chapitre 1. Constituants technologiques des robots manipulateurs	17
Maurice BÉTEMPS et Alain JUTARD	
1.1. Fonctionnalités d'un robot industriel	17
1.1.1. Le système robotique	17
1.1.2. Evolution et performances	19
1.2. Structure mécanique du porteur	20
1.2.1. Morphologie générale	20
1.2.2. Degrés de liberté et redondance	20
1.2.3. Le porteur	22
1.2.3.1. Structure série et structure parallèle.	22
1.2.3.2. Architectures les plus courantes de robot série	23
1.2.4. Technologie du porteur	24
1.2.4.1. Le matériau	24
1.2.4.2. La chaîne de transmission	25
1.2.5. Le poignet	26
1.3. L'actionnement	27
1.3.1. Motorisation des axes	27
1.3.2. L'actionnement hydraulique	27
1.3.3. L'actionnement pneumatique.	29
1.3.4. L'actionnement électrique	29
1.3.4.1. Moteurs à courant continu	29
1.3.4.2. Moteurs synchrones autopilotés	29
1.3.4.3. Les moteurs pas à pas	30
1.3.5. Fonctionnement en mode asservi	30
1.4. Les capteurs proprioceptifs	32

1.5. Les effecteurs	34
1.5.1. Les préhenseurs	34
1.5.2. Les outils.	37
1.5.3. Les dispositifs compliant.	38
1.6. Les performances	39
1.6.1. Capacité de charge	40
1.6.2. Capacité en vitesse	40
1.6.3. Précision et répétabilité	41
1.7. Les domaines d'application	43
1.8. Bibliographie	44
 Chapitre 2. Modélisation des robots de type série	 47
Wisama KHALIL et Etienne DOMBRE	
2.1. Introduction	47
2.2. Modélisation géométrique	48
2.2.1. Description géométrique	48
2.2.2. Modèle géométrique direct	51
2.2.3. Modèle géométrique inverse	53
2.2.3.1. Position du problème	53
2.2.3.2. Principe de la méthode de Paul	55
2.3. Modélisation cinématique	58
2.3.1. Modèle cinématique direct	58
2.3.1.1. Calcul de la matrice jacobienne par dérivation du MGD	59
2.3.1.2. Matrice jacobienne de base.	61
2.3.1.3. Décomposition de la matrice jacobienne en trois matrices	63
2.3.1.4. Dimension de l'espace opérationnel d'un robot	64
2.3.2. Modèle cinématique inverse	65
2.3.2.1. Forme générale du modèle cinématique	65
2.3.2.2. Modèle cinématique inverse dans le cas régulier.	66
2.3.2.3. Solution au voisinage des positions singulières.	67
2.3.2.4. Modèle cinématique inverse des robots redondants	68
2.4. Modélisation dynamique.	69
2.4.1. Formalisme de Lagrange	72
2.4.1.1. Forme générale des équations dynamiques	72
2.4.1.2. Calcul de l'énergie.	73
2.4.1.3. Propriétés du modèle dynamique	75
2.4.1.4. Prise en compte des frottements.	75
2.4.1.5. Prise en compte des inerties des actionneurs	77
2.4.1.6. Prise en compte des efforts exercés par l'organe terminal sur son environnement	77
2.4.2. Formalisme de Newton-Euler	78
2.4.2.1. Equations de Newton-Euler linéaires par rapport aux paramètres inertiels.	79
2.4.2.2. Forme pratique des équations de Newton-Euler	80
2.4.3. Détermination des paramètres inertiels de base	81

2.5. Conclusion	87
2.6. Bibliographie	87

Chapitre 3. Modélisation des robots parallèles 93

Jean-Pierre MERLET et François PIERROT

3.1. Introduction	93
3.1.1. Caractéristiques des robots classiques	93
3.1.2. Autres types d'architecture de robot	94
3.1.3. Avantages et inconvénients génériques.	97
3.1.3.1. Performances	97
3.1.3.2. Facilité d'usage.	98
3.1.3.3. Technologie.	98
3.1.3.4. Modélisation et singularités	99
3.1.4. Les utilisations aujourd'hui.	99
3.1.4.1. Les simulateurs et les applications spatiales.	99
3.1.4.2. Applications industrielles.	102
3.1.4.3. Applications médicales	104
3.1.4.4. Positionnement de précision	104
3.2. Typologie des machines	106
3.2.1. Introduction	106
3.2.2. Les robots plans à trois degrés de liberté.	109
3.2.3. Les robots à mouvement spatial	109
3.2.3.1. Manipulateurs à trois degrés de liberté.	111
3.2.3.2. Manipulateurs à quatre et cinq degrés de liberté	115
3.2.3.3. Manipulateurs à six degrés de liberté.	117
3.3. Modèles géométrique et cinématique inverses.	120
3.3.1. Modèle géométrique inverse	121
3.3.2. Modèle cinématique inverse	123
3.3.3. Configurations singulières	125
3.3.3.1. Singularités et statique	127
3.3.3.2. Etat de l'art	127
3.3.3.3. Méthode géométrique	128
3.3.3.4. Manipulabilité	131
3.3.3.5. Les singularités en pratique	132
3.4. Modèle géométrique direct	132
3.4.1. Méthode itérative.	132
3.4.2. Méthode algébrique	133
3.4.2.1. Rappels de géométrie algébrique	134
3.4.2.2. Robots plans	135
3.4.2.3. Mécanismes à six degrés de liberté	138
3.5. Conclusion	139
3.6. Bibliographie	139

Chapitre 4. Identification des paramètres des modèles 145
 Maxime GAUTIER et Wisama KHALIL

4.1. Introduction	145
4.2. Identification des paramètres géométriques	146
4.2.1. Définition des paramètres géométriques	147
4.2.1.1. Paramètres géométriques du robot	147
4.2.1.2. Paramètres géométriques de la situation de la base du robot dans l'environnement	148
4.2.1.3. Paramètres géométriques de l'effecteur	149
4.2.2. Modèle différentiel généralisé d'un robot	149
4.2.3. Principes des méthodes d'étalonnage	151
4.2.3.1. Forme générale du modèle d'étalonnage.	151
4.2.3.2. Méthode de résolution des équations d'étalonnage	152
4.2.3.3. Détermination des paramètres identifiables	154
4.2.3.4. Choix des configurations optimales.	155
4.2.4. Méthodes d'étalonnage des paramètres géométriques	156
4.2.4.1. Méthode d'étalonnage classique.	156
4.2.4.2. Méthodes d'étalonnage autonome (sans capteur externe)	158
4.2.5. Correction des paramètres géométriques	162
4.2.6. Conclusion sur l'identification des paramètres géométriques. . . .	163
4.3. Identification des paramètres dynamiques	163
4.3.1. Introduction	163
4.3.2. Modèles d'identification	164
4.3.2.1. Modèle dynamique inverse explicite	165
4.3.2.2. Modèle dynamique implicite.	167
4.3.2.3. Modèle de puissance	168
4.3.2.4. Modèle énergétique	168
4.3.3. Méthode d'identification : moindres carrés d'entrée avec modèle inverse	169
4.3.4. Identifiabilité structurelle : les paramètres inertiels de base.	171
4.3.5. Biais et variance des MC	173
4.3.6. Acquisition et filtrage des données	173
4.3.6.1. Estimation du couple moteur.	173
4.3.6.2. Estimation des dérivées des positions articulaires	174
4.3.6.3. Filtrage des mesures et de l'observation	176
4.3.7. Les critères d'excitation	177
4.3.7.1. Précision moyenne de l'estimation : conditionnement et perturbations	177
4.3.7.2. Précision absolue de l'estimation	178
4.3.7.3. Précision relative de l'estimation	180
4.3.8. Les mouvements excitants	181
4.3.9. Les paramètres essentiels	182
4.3.10. Prise en compte des connaissances <i>a priori</i>	182
4.3.10.1. Avant le calcul des MC	182
4.3.10.2. Dans le calcul des MC.	183

4.3.11. Moindres carrés pondérés	184
4.3.12. Moindres carrés itératifs par paquets	185
4.3.13. Validation	188
4.3.14. Applications	189
4.3.15. Conclusion sur l'identification des paramètres dynamiques	190
4.4. Bibliographie	191

Chapitre 5. Analyse des performances des robots de type série 199

Philippe WENGER

5.1. Introduction	199
5.2. Accessibilité	200
5.2.1. Les différents niveaux d'accessibilité	200
5.2.2. Condition d'accessibilité	202
5.3. Espace de travail d'un robot manipulateur	203
5.3.1. Définition générale	203
5.3.2. Espace des positions accessibles	206
5.3.3. Espace primaire et espace secondaire	207
5.3.4. Espace de travail à orientation donnée	208
5.3.5. Espace de travail libre	210
5.3.6. Calcul de l'espace de travail	213
5.4. Concept d'aspect	213
5.4.1. Définition	213
5.4.2. Mode de calcul des aspects	214
5.4.3. Aspects libres	216
5.4.4. Application des aspects	217
5.5. Notion de parcourabilité	219
5.5.1. Introduction	219
5.5.2. Caractérisation de la n-parcourabilité	221
5.5.2.1. Condition nécessaire et suffisante	221
5.5.2.2. Généralisation aux sous-espaces n-parcourables	223
5.5.3. Caractérisation de la t-parcourabilité	223
5.5.3.1. Faisabilité de trajectoires continues	223
5.5.3.2. Définition de la t-parcourabilité	227
5.5.3.3. Condition nécessaire et suffisante	227
5.5.3.4. Généralisation aux sous-espaces t-parcourables	227
5.6. Performances locales	229
5.6.1. Définition de la dextérité	229
5.6.2. Manipulabilité	230
5.6.2.1. Ellipsoïde des vitesses opérationnelles	230
5.6.2.2. Indice de manipulabilité	232
5.6.3. Plus petite valeur singulière	235
5.6.4. Indice d'isotropie	235
5.6.5. Angles et distances d'approche	236
5.6.5.1. Angles d'approche	236
5.6.5.2. Distances d'approche	236

5.7. Conclusion	237
5.8. Bibliographie	238
Chapitre 6. Simulation et programmation	243
Emmanuel MAZER, Olivier LEBELTEL, Pierre BESSIÈRE, Kamel MEKHNACHA	
6.1. Introduction	243
6.2. La programmation automatique	245
6.3. La programmation explicite	246
6.4. La programmation virtuelle	248
6.5. La programmation intégrée	249
6.6. Les suites de programmation	250
6.7. Les systèmes de recherche	251
6.8. Programmation bayésienne	253
6.8.1. Concepts de base	253
6.8.1.1. Définitions et notations	253
6.8.1.2. Règles de calcul	257
6.8.1.3. Résumé	260
6.8.1.4. Méthode	261
6.8.2. Programme et interpréteur probabiliste	268
6.8.2.1. Programme probabiliste (définition)	268
6.8.2.2. Interpréteur probabiliste (définition)	269
6.8.3. Exemple : apprentissage de comportements réactifs	270
6.8.3.1. Objectifs et protocole expérimental	270
6.8.3.2. Spécification	270
6.8.3.3. Identification	273
6.8.3.4. Utilisation	274
6.8.3.5. Résultats	275
6.9. Conclusion	276
6.10. Bibliographie	277
Index	279