études en mécanique
des matériaux et des structures

La CAO en robotique

outils et méthodologies

Patrick Chedmail
Etienne Dombre
Philippe Wenger

HERMES

La CAO en robotique

REMERCIEMENTS

Les auteurs témoignent toute leur gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cet ouvrage. Ils sont particulièrement reconnaissants envers Jorge Angelès, professeur à l'Université McGill de Montréal, pour son accompagnement pendant l'élaboration du manuscrit, ainsi qu'envers Jean-Yves Hascoët, maître de conférences à l'Ecole Centrale de Nantes, Alain Liégeois, professeur à l'Université Montpellier II et François Pierrot, chargé de recherches CNRS au LIRMM pour la relecture attentive du manuscrit.

© Editions HERMES, Paris, 1998

Editions HERMES
8, quai du Marché-Neuf
75004 Paris

ISBN 2-86601-695-5

ISSN 1264-4692

Catalogage Electre-Bibliographie
Chedmail, Patrick*Dombre, Etienne*Wenger, Philippe
La CAO en robotique – outils et méthodologies. – Paris : Hermès, 1998.
ISBN 2-86601-695-5
RAMEAU : conception assistée par ordinateur
robotique
DEWEY : 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.

La CAO en robotique

outils et méthodologies

Patrick Chedmail
Etienne Dombre
Philippe Wenger

HERMES

Collection dirigée par Paul Germain et Pierre Ladevèze

Cette collection a pour vocation d'éditer des ouvrages qui devraient permettre de mieux faire connaître les avancées et acquis les plus récents en Mécanique des Matériaux et Structures. Les textes, rédigés en français ne doivent pas seulement s'adresser aux spécialistes. Les lecteurs sont des étudiants de maîtrise ou de dernière année d'école d'ingénieur, des étudiants de DEA ou préparant une thèse, des chercheurs et ingénieurs, enfin tous ceux qui s'intéressent à la Mécanique et notamment à ses applications à des fins industrielles. La diffusion sera élargie ultérieurement par des versions en langue anglaise.

COMITÉ DE LECTURE

Jean-Louis BATOZ
Université Technologique de Compiègne
Michel BRUNEAU
Université du Mans
Jean-Louis CHABOCHE
ONERA
Patrick CHEDMAIL
Ecole Centrale de Nantes
Jean-Loup CHENOT
CEMEF
Félix DARVE
Ecole Centrale d'Hydraulique
et de Mécanique
Jean FRENE
Université de Poitiers
Michel GERADIN
Université de Liège
Paul GERMAIN
Académie des Sciences de Paris
Louis JEZEQUEL
Ecole Centrale de Lyon
Pierre LADEVÈZE
Ecole Normale Supérieure de Cachan
Jacques LAMON
Laboratoire des Composites
Thermostructuraux de Bordeaux
Jean-Baptiste LEBLOND
Université Paris VI
Roger OHAYON
CNAM
Gilles PIJAUDIER-CABOT
Ecole Normale Supérieure
de Cachan
Michel POTIER-FERRY
Université de Metz
Nguyen Quoc SON
Ecole Polytechnique
Pierre SUQUET
Laboratoire de Mécanique
et d'Acoustique
André ZAOUI
Ecole Polytechnique

EXTRAIT DU CATALOGUE GÉNÉRAL

Le prototypage rapide, Alain BERNARD, Georges TAILLANDIER, 1998.
Les surfaces complexes, *pratique et applications*, Jean-Pierre FAVROLLES, 1998.
Perception de l'environnement en robotique, Florent CHAVAND, Etienne COLLE, 1998.
Poutres à parois minces – *étude du cisaillement*, Jean-Armand CALGARO, 1998.
Les robots parallèles, 2e édition revue et augmentée, Jean-Pierre MERLET, 1997.
Mécanique – *Eléments de mécanique rationnelle – cours et exercices*, Roger BOUDET, Alain CHAUVIN, 1997.
Structure et cinématique des mécanismes, Viguen ARAKÉLIAN, 1997.
Mécanique non linéaire des structures, Pierre LADEVÈZE, 1996.
Planification de trajectoire en robotique mobile, Alain PRUSKI, 1996.
Représentation du mouvement des corps solides, Grigore GOGU, Philippe COIFFET, 1996.
Représentation des déplacements des robots – *mathématiques pour la robotique*, Grigore GOGU, Philippe COIFFET, 1996.
Algorithmes génétiques et réseaux de neurones, Jean-Pierre RENDERS, 1995.
Vision par ordinateur, 2e édition revue et augmentée, Radu HORAUD, Olivier MONGA, 1995.

Serveur web : http://www.editions-hermes.fr

Table des matières

Préface 11

Chapitre 1. Introduction 13
1.1. Objectif général du livre 13
1.2. Description générale de l'ouvrage 17
1.3. Les autres applications de la CAO-Robotique 20
1.4. Public visé et prérequis pour la lecture de l'ouvrage 22

Chapitre 2. Outils d'analyse des performances des robots : aspects géométriques et cinématiques 23
2.1. Introduction 23
2.2. Notion d'accessibilité : espace de travail 25
2.2.1. Accessibilité 25
2.2.1.1. Définition 25
2.2.1.2. Condition d'accessibilité 26
2.2.2. Espace de travail d'un robot manipulateur 28
2.2.2.1. Définition 28
2.2.2.2. Espace des positions accessibles 30
2.2.2.3. Espace primaire et espace secondaire 31
2.2.2.4. Espace de travail à orientation donnée 33
2.2.2.5. Espace de travail libre 34
2.2.2.6. Géométrie et topologie des espaces de travail 36
2.2.2.7. Applications de l'espace de travail 43
2.2.3. Représentation de l'espace de travail 44
2.2.3.1. Représentation par les frontières 45
2.2.3.2. Représentation par balayage 52
2.2.3.3. Récapitulatif des différentes méthodes 59
2.3. Concept d'aspect 59

2.3.1. Définition d'un aspect 59
2.3.1.1. Définition 59
2.3.1.2. Notions voisines 60
2.3.1.3. Mode de calcul des aspects 61
2.3.2. Aspects libres 62
2.3.2.1. Définition 62
2.3.2.2. Calcul des aspects libres 63
2.3.2.3. Exemples 63
2.3.3. Application des aspects 64
2.3.3.1. Etude de trajectoires dans l'espace opérationnel 64
2.3.3.2. Calcul de l'espace de travail 65
2.3.3.3. Calcul des sous-espaces t-parcourables 66
2.4. Notion de parcourabilité 66
2.4.1. Introduction 66
2.4.2. Terminologie 68
2.4.2.1. Trajectoires discrètes, trajectoires continues 68
2.4.2.2. Connexité 69
2.4.3. Caractérisation de la n-parcourabilité 69
2.4.3.1. Définition 69
2.4.3.2. Condition nécessaire et suffisante 70
2.4.3.3. Généralisation aux sous-espaces n-parcourables 71
2.4.3.4. Autres propriétés de n-parcourabilité 72
2.4.4. Caractérisation de la t-parcourabilité 73
2.4.4.1. Faisabilité de trajectoires continues 73
2.4.4.2. Définition 76
2.4.4.3. Condition nécessaire et suffisante 76
2.4.4.4. Généralisation aux sous-espaces t-parcourables 77
2.4.4.5. t^+-parcourabilité 78
2.4.5. Récapitulatif des différentes propriétés de parcourabilité 79
2.4.6. Analyse de t-parcourabilité pour les robots redondants 80
2.4.6.1. Introduction 80
2.4.6.2. Une méthode pratique d'analyse de faisabilité d'une trajectoire continue 81
2.5. Outils d'analyse des performances locales des robots 87
2.5.1. Introduction 87
2.5.2. Mesures de dextérité 87
2.5.2.1. Définition 87
2.5.2.2. Manipulabilité 88
2.5.2.3. Plus petite valeur singulière 93
2.5.2.4. Indice d'isotropie 93
2.5.3. Angles et distances d'approche 94
2.5.3.1. Angles d'approche 94
2.5.3.2. Distances d'approche 94

2.6. Cas des robots de morphologie générale **95**
2.6.1. Introduction 95
2.6.2. Classification des porteurs 96
2.6.2.1. Porteurs quadratiques et quartiques 96
2.6.2.2. Porteurs binaires et quaternaires 98
2.6.2.3. Porteurs génériques et non génériques 99
2.6.3. Les robots de morphologie cuspidale 102
2.6.3.1. Introduction 102
2.6.3.2. Définition 104
2.6.3.3. Caractérisation des morphologies non cuspidales 105
2.6.3.4. Analyse de t-parcourabilité pour les robots de morphologie cuspidale 108
2.7. Conclusion 114

Chapitre 3. Synthèse de robots et de sites robotisés 115
3.1. Introduction 115
3.2. Intégration des robots dans l'entreprise 117
3.3. Les variables de conception d'un robot et d'un site robotisé 120
3.3.1. Variables de conception d'un robot. 120
3.3.2. Variables de conception d'un site robotisé 122
3.4. Les critères et contraintes géométriques de conception d'un robot ou d'un site robotisé 128
3.4.1. Critère d'accessibilité à un repère 129
3.4.1.1. Méthodes existantes 129
3.4.1.2. Accessibilité et liaisons virtuelles 130
3.4.2. Critère de parcourabilité d'une trajectoire 138
3.4.3. Critère de parcourabilité d'un espace de travail 143
3.5. Synthèse de robot - critères et contraintes mécaniques de conception d'un robot 146
3.5.1. Etat de l'art sur la synthèse de morphologie de robots et de mécanismes 147
3.5.1.1. Critères mécaniques utilisés en robotique 147
3.5.1.2. Synthèse de mécanismes 148
3.5.2. Conception mécanique des robots 160
3.5.2.1. Critères et contraintes mécaniques de conception de robot . . 161
3.5.2.2. Configurations et trajectoires pénalisantes 164
3.5.2.3. Deux méthodes de dimensionnement mécanique de robots . . 177
3.6. Synthèse de site robotisé 179
3.6.1. Synthèse de site robotisé : approche manuelle actuelle 179
3.6.2. Approche algorithmique - Exemple 181
3.6.3. Exemple de synthèse topologique de mécanisme de robots 185
3.7. Conclusion 189

Chapitre 4. Simulation et programmation hors ligne des sites robotisés 191
4.1. Introduction 191
4.2. Outils de simulation 192
4.2.1. Intégration des capteurs 192
4.2.1.1. Généralités 193
4.2.1.2. Placement de capteurs 194
4.2.2. Les approches métier 199
4.2.2.1. Position du problème et limitations 199
4.2.2.2. Soudage par points 201
4.2.2.3. Soudage à l'arc 201
4.2.2.4. Peinture 206
4.2.2.5. Projection 211
4.2.2.6. Evolution 212
4.3. Planification de trajectoires sans collisions 213
4.3.1. Introduction 213
4.3.1.1. Complexité algorithmique 213
4.3.1.2. Complexité algorithmique et planification de trajectoires . . . 214
4.3.2. Méthodes locales 216
4.3.2.1. Méthode des potentiels 216
4.3.2.2. Méthode des contraintes 221
4.3.3. Méthodes globales 224
4.3.3.1. Espace des configurations vs. espace opérationnel 224
4.3.3.2. Méthodes d'acquisition du graphe 224
4.3.3.3. Exploitation du graphe 226
4.3.4. Méthodes mixtes 226
4.3.4.1. Apprentissage incrémental de l'environnement 227
4.3.4.2. Déformation globale de la trajectoire par des potentiels fictifs 228
4.3.4.3. Minimisation de la surface balayée par déformation locale de la trajectoire 230
4.3.5. Minimisation des temps de cycle 231
4.3.6. Cas multirobot 236
4.3.6.1. Méthodes locales 236
4.3.6.2. Méthodes globales 237
4.3.6.3. Méthodes distribuées 239
4.4. Programmation des sites robotisés 240
4.4.1. Généralités sur la programmation des robots 240
4.4.1.1. Principe 240
4.4.1.2. Les méthodes classiques 242
4.4.2. Programmation hors ligne à partir de bases de données CAO-Robotique 247
4.4.2.1. Introduction 247
4.4.2.2. Principe 248

4.4.2.3. Justification 250
4.4.2.4. Limitations 252
4.4.2.5. Correction des trajectoires CAO 254
4.4.2.6. Conclusion 255
4.4.3. Etalonnage géométrique des cellules robotisées 255
4.4.3.1. Introduction 255
4.4.3.2. Outils mathématiques 258
4.4.3.3. Mise en œuvre 266
4.5. Conclusion 279

Annexe 1. Les modèles en robotique 281
A.1.1. Modèles géométrique et cinématique 282
A.1.2. Modèle dynamique du robot rigide 284
A.1.3. Modèle des déformations de structure 286
A.1.4. Modèle cinématique des transmissions 287
A.1.5. Modèle électro-thermique des actionneurs 288
A.1.6. Modèles technologiques 290

Annexe 2. Modèles géométriques de l'environnement 291
A.2.1. Les structures de type 2^k-arbre – Cas particulier des arbres quaternaires (quadtrees) et octaux (octrees) 291
A.2.2. Sommes de Minkowski 293

Annexe 3. Outils d'analyses de parcourabilité de l'espace de travail . . . 295
A.3.1. Analyses plus fines de parcourabilité 295
A.3.2. Algorithme général d'analyse de parcourabilité 301
A.3.3. Détermination pratique des sous-espaces parcourables 304

Annexe 4. L'algorithme A* 306

Annexe 5. Méthode du polyèdre "déformable" 307

Annexe 6. Les morphologies usuelles de robot 309
A.6.1. Morphologie anthropomorphe 309
A.6.2. Morphologie de type Scara 309
A.6.3. Morphologie cylindrique 311
A.6.4. Morphologie sphérique 311
A.6.5. Morphologie cartésienne 311

Annexe 7. L'offre industrielle en CAO-Robotique 313
A.7.1. Introduction 313
A.7.2. Les plates-formes matérielles 314
A.7.3. L'intégration et les interfaces CAO 314
A.7.4. La base commune 315
A.7.4.1. Fonctionnalités robotiques disponibles 315
A.7.5. Spécificité des systèmes de CAO-Robotique 317

Bibliographie 359

Index 381

Préface

Entre la première édition de l'ouvrage pionnier de Philippe Coiffet en 1981 (une édition plus récente de 1988 est mentionnée dans la bibliographie) et celui-ci, la robotique a connu un progrès considérable. Née vers la fin des années soixante et reconnue très vite comme technologie d'intérêt industriel, la robotique a incontestablement atteint sa maturité. Il faut souligner que les progrès de la robotique n'auraient pas pu être réalisés sans le concours d'un outil remarquable qui a fêté son 25e anniversaire en 1996 : le microprocesseur. A l'heure actuelle, la résolution du modèle géométrique inverse des robots sériels en temps réel ne constitue plus un problème majeur pour le roboticien. D'autre part, la robotique a connu une explosion de travaux sur les robots parallèles, leur modèle géométrique direct étant maîtrisé à l'heure actuelle comme l'était le modèle géométrique inverse des robots sériels il y a une dizaine d'années. Voici un échantillon des progrès en robotique à la fin du 20e siècle.

Une attestation de l'état de maturité atteint par la robotique est sans doute la parution du livre de MM. Chedmail, Dombre et Wenger, qui porte sur une gamme de thèmes spécialisés dans ce domaine, tout en mettant l'accent sur les applications en productique. Certes, la robotique trouve aujourd'hui des applications dans d'autres domaines comme la médecine, la sécurité publique, l'exploration sous-marine et interplanétaire, etc. Cet ouvrage est le produit des années de recherches réalisées à l'Institut de Recherche en Cybernétique de Nantes (anciennement Laboratoire d'Automatique de Nantes) et au Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier. Les trois auteurs ont mené des études portant sur la topologie de l'espace de travail des manipulateurs, très importante dans la conception des robots, sur l'optimisation des robots et des sites robotisés, et sur la simulation et la modélisation des systèmes robotiques, que le lecteur pourra trouver ici traitées d'une façon approfondie. Une partie de l'ouvrage est dédiée aux logiciels destinés à ce que l'on appelle aujourd'hui la CAO-Robotique.

Du point de vue du contenu et du niveau des thèmes, ce livre-ci est unique, non seulement dans la littérature technique en langue française, mais aussi au sens large. Aucun livre n'existe sur le marché couvrant les thèmes étudiés ici avec cette profondeur. En dehors des aspects théoriques, le lecteur plus intéressé aux applications pourra trouver ici des techniques de conception testées en milieu industriel ainsi que des informations assez larges sur le marché des logiciels en CAO-Robotique. Voici un livre que le chercheur et l'ingénieur roboticien trouveront utile tant à l'heure actuelle que dans l'avenir.

Jorge ANGELES
Département de génie mécanique
Centre de recherches sur les machines intelligentes
Université McGill
Montréal, Québec, Canada

Chapitre 1

Introduction

1.1. Objectif général du livre

La recherche en mécanique sur les mécanismes polyarticulés de robots a connu durant ces vingt dernières années un essor très important qui venait s'appuyer – tout en l'accompagnant – sur l'introduction massive de ces machines dans l'entreprise. Plusieurs centaines de milliers d'entre elles sont ou ont été installées dans les sites de production, réalisant ainsi l'embryon de l'usine presse-bouton que certains appelaient de leurs vœux.

Ce mouvement a connu des fortunes diverses avec cependant un point fort durant les années 1980 : des taux de diffusion supérieurs à 10 voire 15 % ont ainsi pu être enregistrés dans la plupart des pays industrialisés. Depuis 1990, un net ralentissement est perçu dans le monde bien que les taux de croissance de l'industrie robotique restent encore supérieurs à ceux des autres secteurs d'activité. Plusieurs arguments viennent expliquer cet état de fait. Tout d'abord, la concurrence acharnée entre fournisseurs a conduit à une réduction très sévère du nombre de fabricants de robots dans le monde. Ce phénomène, particulièrement sensible en France, a pu donner l'impression d'un essoufflement du secteur. D'autre part, dans son désir d'introduire systématiquement des robots, le monde industriel est parfois allé trop loin au regard des capacités d'adaptation de ces systèmes. La réalité a rapidement fait prendre conscience des difficultés de l'exercice : la machine ne chassera pas avant longtemps l'homme de l'usine. Les facultés de perception de ce dernier, ses possibilités d'adaptation dans un environnement nouveau, sa capacité à élaborer des tactiques originales face à des événements imprévus ou des stratégies nouvelles pour mettre en œuvre ses objectifs échappent presque totalement aux possibilités des machines actuelles. Celles-ci restent cantonnées à des activités hautement répétitives ou dangereuses, ou bien à celles où la force brute est encore nécessaire. Une autre

raison du ralentissement du développement de la robotique tient à des arguments économiques et sociologiques : à l'heure où le spectre du chômage touche douloureusement des pans entiers de la société civile, les investissements en robotique dans les entreprises sont passés au crible des critères économiques ou sociologiques. On peut à juste titre répugner à automatiser alors que des ouvriers attendent leur place sur le marché du travail. Ce dernier argument ne tient bien sûr qu'une place conjoncturelle tant il est vrai que le progrès ou les évolutions technologiques se sont toujours imposés face aux résistances naturelles des acteurs économiques.

En dépit de ces variations, la recherche en mécanique sur les mécanismes des robots poursuit son effort continu pour au moins deux raisons de fond. Tout d'abord l'activité de recherche d'un pays se fonde sur une analyse à long terme que des mouvements conjoncturels ne devraient pas remettre en cause. D'autre part, les ambitions initiales liées à l'introduction des robots ont soulevé un ensemble de questions nouvelles qui sont venues interpeller les disciplines traditionnelles sur lesquelles se fondait la robotique. On n'oublie pas la triple filiation de cette dernière avec la mécanique bien sûr, mais aussi l'automatique et l'informatique. Ce partage des origines induit des recouvrements de concepts et des points de vue différents. La mise en œuvre des robots posait des questions qui n'avaient été envisagées jusqu'à ce jour par aucune des trois disciplines. Les couplages complexes qui peuvent apparaître sur ce type de machine en font un domaine à part tout à fait original. Par ailleurs, l'utilisation effective de résultats théoriques dans un cadre expérimental complexe a soulevé des questions qui n'avaient pas été envisagées à ce jour. La question de la complexité géométrique en robotique est le plus bel exemple de ce nouveau paradigme.

Les différents objectifs de ce livre se placent dans ce contexte général :

1. Tout d'abord, nous présentons les principaux problèmes – et les solutions actuelles – ouverts depuis vingt ans en robotique dans le domaine de la mécanique. Ceux-ci portent principalement sur :

- la complexité géométrique ;
- la cinématique des systèmes multicorps ;
- la programmation et la simulation graphique en CAO de systèmes mécaniques à grand nombre de degrés de liberté ;
- la conception des systèmes mécaniques robotisés avec l'introduction des concepts de synthèse de robot, synthèse de mécanisme et synthèse de site robotisé.

Un corpus de connaissance identifiable est progressivement apparu sur la base d'une problématique spécifique. Celle-ci est issue de la nécessité d'étudier un système mécanique possédant six degrés de liberté indépendants, motorisés et contrôlés, qu'il faut manipuler de manière simultanée. La prise en compte de ces degrés de liberté est

faite à tous les stades de la conception puis de la mise en œuvre d'un robot dans son site : analyse, synthèse, conception, simulation, programmation. Cette manipulation est complexe car l'homme n'est pas habitué à analyser de manière simultanée la mise en position et l'orientation d'objets. De plus celle-ci doit se faire au travers de systèmes de transformation de mouvement dont les actions ne sont ni linéaires, ni même en relation bijective avec les mouvements de l'objet manipulé. Ceci conduit à des problèmes informatiques évidents, ne serait-ce que ceux des systèmes temps réels. L'automaticien est sollicité car le système couplé que constituent la mécanique du robot et son environnement nécessite des approches novatrices : il doit élaborer des systèmes de contrôle hiérarchisés dans un ensemble complexe où les actions des différents sous-systèmes sont en général couplées. Enfin le mécanicien est confronté à des classes de problèmes qui lui sont parfois familières – non-linéarités du fait des grands déplacements, couplage de modèles de comportement –, d'autres fois non, comme lors de l'élaboration de méthodes originales de conception ou de synthèse de machine.

2. Comme le lecteur pourra le noter, les problématiques qui sont abordées dans cet ouvrage sont souvent illustrées par des exemples industriels. Ce parti pris résulte d'une constatation très fréquente dans la discipline où les questions avancées par les chercheurs sont le plus souvent issues de problèmes posés dans le monde industriel. Réciproquement, toute idée nouvelle doit être validée pratiquement, expérimentalement, dans ce dernier. Cet "aller-retour" entre expérimentation et théorie est semblable à ce qui se passe dans d'autres domaines d'application de la science. Le "monde industriel" doit ici être entendu au sens le plus large en intégrant ce qui touche aux services, à l'exploration, et plus généralement à tout ce qui relève de l'esprit d'entreprise de l'homme.

Par suite, la robotique, contrairement à de nombreuses disciplines en physique, n'est pas – ou peu – d'ordre phénoménologique mais beaucoup plus méthodologique. Son objet est un artefact réalisé par l'homme, un outil au même titre que celui de l'homme préhistorique ou du forgeron, le métier à tisser de Jacquard au XVIIIe siècle, le tour ou la fraiseuse manipulée par l'ouvrier du XXe siècle. Il est possible d'effectuer sur un robot toutes les modifications souhaitées. On ne se trouve pas devant un objet dont on chercherait à comprendre le fonctionnement ou le comportement, il est connu *a priori* de son concepteur ; le problème plus fondamental est de savoir pourquoi il a été conçu de telle ou telle manière, quels sont les critères qui sous-tendent son dessin. Cette question centrale de l'ouvrage fera l'objet du chapitre 3. Elle sera complétée par l'analyse des moyens modernes permettant de mettre en œuvre de manière effective les robots sur leur site, à commencer par les outils de CAO et simulation ainsi que de programmation de ces machines (chapitre 4).

Pour être tout à fait exact, il faut reconnaître que même si la mécanique permettait, par exemple, d'écrire en toute généralité les équations de comportement

dynamique de tout système de corps rigides articulés entre eux, et placés dans des conditions de fonctionnement suffisamment standard, il a fallu attendre près de vingt ans avant d'être capable de produire effectivement ces équations sous une forme adaptée à la commande dynamique d'un robot. Rappelons que, il y a seulement quinze ans, ces équations écrites sans précaution, dans le cas d'un robot à six degrés de liberté, pouvaient occuper plusieurs dizaines de pages de listes d'ordinateur. Elles étaient dans ces conditions inutilisables dans la pratique dans un contexte de calcul en temps réel. Ce nombre a pu être ramené à quelques unités [KHA 94] grâce à une réflexion approfondie sur l'adaptation des outils de calcul formel. Ce faisant il devenait possible d'utiliser dans les systèmes de commande des modèles pourtant connus de manière théorique depuis plus de trois siècles. On ne s'étonnera donc pas de retrouver dans cet ouvrage une place importante réservée à l'analyse des systèmes mécaniques sous leurs aspects géométriques et cinématiques (chapitre 2). En effet, l'élaboration de critères de performance géométrique, cinématique, voire dynamique, suppose de disposer au départ de l'outillage méthodologique fondamental qui permettra de les décrire par la suite. Or, le "simple" problème de l'analyse des performances géométriques d'un robot dans un environnement encombré – la description de sa capacité à atteindre des cibles, à parcourir des trajectoires ou bien une zone déterminée de son espace de travail – se révèle particulièrement ardu, comme pourra s'en assurer par la suite le lecteur. Ceci est dû à la complexité de l'opérateur géométrique qui transforme les six composantes cartésiennes de l'organe effecteur du robot en ses composantes articulaires et réciproquement. Cet opérateur est en général non linéaire, il possède une ou plusieurs solutions, il peut en avoir une infinité, et la topologie des espaces de solutions se révèle infiniment plus complexe qu'on ne l'imaginait il y a seulement une dizaine d'années. On ne parle pourtant à ce stade que de géométrie, science ancienne s'il en est, qui se révèle à l'usage riche en chausse-trappes pour un esprit peu averti.

3. Un troisième objectif de ce livre sera de contribuer à la diffusion et la publication de résultats scientifiques récents. Nous utiliserons une approche aussi synthétique que possible afin de mettre en perspective des résultats publiés durant ces dix dernières années. Au-delà des résultats proprement dits, que chacun peut retrouver dans les références citées, un effort particulier est fait afin de les mettre en relation et de mieux comprendre les arguments physiques, mathématiques, méthodologiques qui ont pu conduire à les proposer.

4. Un dernier objectif de cet ouvrage sera de participer modestement au mouvement de mise en culture de la science, cher à J.M. Lévy-Leblond dans [LEV 84], qui ouvre ainsi sur la technologie (objet de culture) ; la science permet de structurer la connaissance, de défricher les champs du possible qui sont ensuite mis à la disposition de la société grâce à la technologie. Nous aurons tenté en la matière d'apporter notre contribution à ce mouvement de va et vient qui permet de transposer vers la société les résultats de la recherche qu'elle supporte.

1.2. Description générale de l'ouvrage

La réflexion que nous proposons dans cet ouvrage est articulée selon le schéma suivant (figure 1.1). Nous considérons une question classique, dans l'industrie mais aussi en robotique de service, de choix ou de conception d'un système robotisé dédié à la réalisation d'une tâche complexe déterminée. Cette dernière est notée "modèle de représentation de la tâche" (figure 1.1). Il s'agit alors de décrire une approche générique qui permette de parvenir à la spécification détaillée du site robotisé finalement retenu qui satisfera le cahier des charges initial. Ceci se traduira par la donnée de trois types d'information :

- les types de robots retenus,
- leur agencement dans le site de production,
- les actions, en particulier les trajectoires, qu'ils réaliseront dans le site.

De fait, ces informations devront être analysées en composantes élémentaires que nous appellerons variables de conception du site robotisé. Il s'agira par exemple du nombre d'articulations, de leur nature ou de leur disposition relative pour ce qui concerne le type de robot, de la position et de l'orientation de ce dernier dans le site ou encore de l'ordre d'exécution des tâches, des trajectoires durant la réalisation de ces dernières ou bien entre elles.

Trois types de modèles sont habituellement sollicités pour résoudre un tel problème. Il s'agit des modèles de représentation de l'environnement, ceux du robot et enfin ceux associés à ses performances. Les modèles de représentation de l'environnement sont le plus souvent de nature géométrique car la plus grande partie des tâches robotisées relèvent de ce type d'action : la manutention sans collision d'objets. Parfois, il s'agira de mettre en œuvre des procédés physiques réalisés sans effort sur l'environnement (dépôt de produits comme la peinture ou des joints collés, réalisation en continu de cordons de soudure). Enfin, quelques applications (nettoyage, finition, polissage, ébavurage, soudage par point) introduisent des efforts physiques sur l'environnement ; ceci nécessite de prendre en compte un modèle des efforts sur ce dernier (compliance locale, nature des matériaux, configuration de la structure associée).

Le modèle de représentation du robot n'est bien sûr pas unique. Suivant le point de vue retenu il fera appel à des connaissances sur sa géométrie, sa cinématique, sa dynamique, sa structure, ses actionneurs ou ses transmissions. Ces modèles sont en général couplés : la dynamique du robot dépend évidemment de la masse des actionneurs utilisés ; en retour, la température dans les actionneurs dépend de l'utilisation en dynamique de ceux-ci.

Le modèle de représentation des performances du robot est fondamental. Il permettra en particulier d'estimer la qualité d'une machine en situation et par suite d'évaluer des critères ou des coûts qui seront repris durant l'élaboration d'une