

Clément Gosselin

# Fondamentaux de la robotique

Géométrie, cinématique, dynamique  
et commande

2<sup>e</sup> édition

DUNOD

Direction et conception graphiques de la couverture :  
Nicolas Wiel et Elizabeth Riba (graphiste)

© Dunod, 2023, 2026  
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)  
ISBN 978-2-10-089448-2

---

## Dédicace

---

Ce livre est dédié à mon épouse Annette et à mes filles Marie-Joëlle et Alexandrine.

---

## Avant-propos de la deuxième édition

---

Cette deuxième édition de l'ouvrage comporte quelques changements par rapport à l'édition initiale. Un chapitre portant sur la cinématique des manipulateurs sériels redondants a été ajouté. En effet, l'utilisation de robots redondants est relativement répandue et il est donc important pour l'ingénieur roboticien de bien comprendre les techniques utilisées pour la résolution des problèmes associés à ces robots. Néanmoins, étant donné que ce nouveau chapitre fait appel à des notions mathématiques plus avancées, il est possible de l'omettre dans un cours de robotique de base.

Par ailleurs, la modélisation des robots parallèles sphériques a été ajoutée au chapitre 4 en raison de la pertinence de telles architectures dans plusieurs applications, incluant les robots humanoïdes. Cet ajout permet de bien compléter le chapitre 4, qui inclut maintenant les principaux types de robots parallèles.

Finalement, quelques erreurs présentes dans l'édition précédente ont été corrigées, particulièrement dans la section de réponses aux exercices. Je désire remercier sincèrement les étudiants et étudiantes qui ont signalé ces erreurs.

Clément Gosselin, Québec, le 30 septembre 2025

---

## Avant-propos

---

Ce livre rassemble les éléments essentiels pour la modélisation géométrique, cinématique et dynamique des systèmes robotiques articulés. Le dernier chapitre aborde également la commande de ces systèmes. Bien que la robotique regroupe plusieurs disciplines et recouvre aujourd’hui un grand nombre de concepts, il demeure qu’à la base, un robot est un système mécanique et que la compréhension de son fonctionnement implique nécessairement des notions de mécanique. Ainsi, ce livre a pour objectif de procurer à l’ingénieur roboticien les outils nécessaires pour analyser, utiliser et concevoir des systèmes robotiques. L’emphase est placée sur la généralité des concepts et leur applicabilité à toutes les formes de dispositifs robotiques. Par exemple, au chapitre 3, la résolution du problème géométrique inverse est traitée de façon générale, de sorte que les algorithmes fournis puissent être appliqués à n’importe quelle architecture de robot. De plus, on n’aborde pas les langages de programmation des robots, qui sont spécifiques à chaque produit commercial, mais on développe plutôt des outils qui permettent ensuite à l’ingénieur de travailler de façon autonome, peu importe le matériel utilisé. Il en va de même pour la modélisation dynamique, qui est basée sur une approche très générale pour la mise en place des équations du mouvement. Le livre convient donc parfaitement aux élèves ingénieurs qui ont un parcours en génie mécanique mais il est aussi tout à fait approprié pour des parcours en génie électrique ou informatique. En effet, le traitement est abordable pour des élèves fréquentant ces programmes et il leur permettra de généraliser leurs connaissances en robotique.

Ce livre est issu du matériel pédagogique que j’ai développé à l’université Laval dans le cadre du cours *Éléments de robotique* que j’enseigne depuis 1990. La plupart des exemples et exercices sont des problèmes qui ont été solutionnés en classe, soumis comme devoirs ou encore des anciennes questions d’examen. Les exemples et exercices couvrent donc un spectre large d’applications de la

théorie. Certains exemples proviennent de projets de recherche en robotique. En se basant sur les solutions détaillées des exemples présentés, le lecteur devrait pouvoir aisément compléter les exercices donnés à la fin de chaque chapitre. Ces exercices font partie intégrante de l'ouvrage et sont importants pour la consolidation de la maîtrise des concepts exposés.

Le logiciel de mise en page LaTeX a été utilisé pour la rédaction de ce livre. Les figures schématiques ont pour la plupart été créées à l'aide des logiciels XFig, IPE et Inkscape. Les figures qui incluent des représentations solides de systèmes robotiques ont été créées avec le logiciel de CAO CREO. Les graphes ont été générés à l'aide de Matlab.

J'aimerais exprimer ma reconnaissance envers plusieurs personnes qui ont contribué de près ou de loin à la rédaction de ce livre. Au fil des ans, plusieurs étudiants ou chercheurs du laboratoire de robotique de l'université Laval ont contribué à la création de plusieurs des figures dont Simon Foucault, Pierre-Luc Richard, Thierry Laliberté, Ian Tremblay, Alexandre Drouin et Dan Zhang. Par ailleurs, j'aimerais remercier particulièrement Boris Mayer St-Onge pour la formalisation de la solution polynomiale du problème géométrique inverse des robots sériels non découplables ainsi que pour ses multiples autres contributions et son aide avec LaTeX. De plus, de nombreux étudiants et étudiantes ont fourni des commentaires qui ont contribué à améliorer le document. Finalement, les prototypes décrits dans le chapitre d'introduction ont été mis au point par des membres du laboratoire de robotique de l'université Laval incluant Thierry Laliberté, Simon Foucault, Louis-Thomas Schreiber, Kefei Wen, Tan-Sy Nguyen, David Harton, Simon Rocheleau, Mathieu Goulet, Mathieu Baril, Samuel Bouchard, Moritz Arns et Eric Barnett. J'aimerais également remercier le professeur Jorge Angeles de l'université McGill, qui m'a enseigné une approche rigoureuse de la cinématique qui se reflète dans plusieurs sections de ce livre et le professeur Lionel Birglen de Polytechnique Montréal pour m'avoir encouragé à publier cet ouvrage.

Clément Gosselin, Québec, le 28 avril 2023

---

## Présentation de l'auteur

---

Clément Gosselin a obtenu le diplôme de baccalauréat en génie mécanique de l'université de Sherbrooke (Québec) en 1985 et il a reçu la médaille d'or du gouverneur général du Canada pour ses études de premier cycle. Il a ensuite obtenu un doctorat en génie mécanique (robotique) de l'université McGill (Québec) en 1988 où il a reçu le *D.W. Ambridge Award* pour la meilleure thèse de doctorat de l'année en sciences physiques et génie. Après un stage post-doctoral à l'INRIA (Sophia-Antipolis, France), il a débuté en 1989 une carrière de professeur à l'université Laval (Québec) où il a fondé le laboratoire de robotique. Il est professeur titulaire (équivalent au titre de professeur des universités en France) depuis 1997. De 2001 à 2021, il a occupé la chaire de recherche du Canada en robotique et mécatronique à l'université Laval. Il a aussi été chercheur invité à RWTH à Aix-la-Chapelle (Allemagne) en 1995, professeur invité à l'université de Victoria (Canada) en 1996 et professeur invité à l'IRCCyN (Nantes, France) en 1999. Il enseigne la robotique à l'université Laval depuis 1990.

Ses principaux intérêts de recherche sont la cinématique, la dynamique et la commande des systèmes robotiques, avec une emphase particulière sur la mécanique de la préhension, la cinématique et la dynamique des robots parallèles ainsi que le développement de robots collaboratifs et de dispositifs haptiques. Ses travaux dans ces différents domaines ont fait l'objet de nombreuses publications dans des revues savantes et des actes de conférences de calibre international ainsi que de nombreux brevets. Ses publications ont été citées plus de 44 000 fois dans la littérature. Il a dirigé plusieurs initiatives de recherche, incluant des collaborations avec des entreprises de haute technologie et il a dirigé les études supérieures de plus de 140 étudiants (mémoires de maîtrise et thèses de doctorat). Il est actuellement éditeur associé du journal *Mechatronics* et éditeur du journal *IEEE Robotics and Automation Letters*.

Clément Gosselin a reçu plusieurs distinctions, incluant le *ASME DED Mechanisms and Robotics Committee Award* en 2008, le *ASME Machine Design Award* en 2013, le *IFTOMM Award of Merit* en 2019, le Grand Prix d'excellence professionnelle de l'Ordre des ingénieurs du Québec en 2023, prix Urgel-Archambault de l'ACFAS en 2024 et le prix Killam en génie en 2024. Il a été fait Officier de l'Ordre du Canada en 2010 pour ses contributions à la recherche sur les robots parallèles et les systèmes sous-actionnés. Il est également *Fellow* de l'ASME, de l'IEEE et de la Société royale du Canada.



---

## Table des matières

---

|                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Dédicace</b>                                                        | <b>III</b> |
| <b>Avant-propos de la deuxième édition</b>                             | <b>IV</b>  |
| <b>Avant-propos</b>                                                    | <b>V</b>   |
| <b>Présentation de l’auteur</b>                                        | <b>VII</b> |
| <b>1 INTRODUCTION</b>                                                  | <b>1</b>   |
| 1.1 Robot et robotique . . . . .                                       | 1          |
| 1.2 Évolution et diversité de la robotique . . . . .                   | 2          |
| 1.3 Plan de l’ouvrage . . . . .                                        | 6          |
| <b>2 RAPPELS DE MATHÉMATIQUES ET DE CINÉMATIQUE</b>                    | <b>11</b>  |
| 2.1 Introduction . . . . .                                             | 11         |
| 2.2 Notation . . . . .                                                 | 12         |
| 2.3 Rappels mathématiques . . . . .                                    | 12         |
| 2.3.1 Algèbre vectorielle et matricielle . . . . .                     | 12         |
| 2.3.2 Valeurs et vecteurs propres . . . . .                            | 17         |
| 2.3.3 Produit vectoriel et matrices antisymétriques . . . . .          | 19         |
| 2.4 Rotations . . . . .                                                | 20         |
| 2.4.1 Rotations et matrices orthogonales . . . . .                     | 20         |
| 2.4.2 Matrice de rotation et invariants naturels . . . . .             | 22         |
| 2.4.3 Invariants linéaires . . . . .                                   | 25         |
| 2.4.4 Invariants quadratiques . . . . .                                | 29         |
| 2.4.5 Angles d’Euler et combinaison de rotations successives . . . . . | 31         |

|          |                                                                                                               |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5      | Changements de repères des vecteurs et des matrices de rotation                                               | 38        |
| 2.5.1    | Changement de base des vecteurs . . . . .                                                                     | 38        |
| 2.5.2    | Changement de base des matrices de rotation . . . . .                                                         | 42        |
| 2.6      | Ordre de multiplication des matrices de rotation . . . . .                                                    | 43        |
| 2.7      | Autres transformations linéaires utiles . . . . .                                                             | 45        |
| 2.7.1    | Les projections . . . . .                                                                                     | 45        |
| 2.7.2    | Les réflexions . . . . .                                                                                      | 46        |
| 2.8      | Vecteur de vitesse angulaire . . . . .                                                                        | 48        |
| 2.8.1    | Définition . . . . .                                                                                          | 48        |
| 2.8.2    | Application aux angles d'Euler . . . . .                                                                      | 49        |
| 2.8.3    | Vitesses généralisées . . . . .                                                                               | 51        |
| 2.9      | Chaînes cinématiques et degrés de liberté . . . . .                                                           | 51        |
| 2.10     | Exercices . . . . .                                                                                           | 56        |
| <b>3</b> | <b>CINÉMATIQUE DES MANIPULATEURS SÉRIELS</b>                                                                  | <b>67</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .                                                                                        | 67        |
| 3.2      | Notation de Denavit-Hartenberg . . . . .                                                                      | 68        |
| 3.3      | PGD du manipulateur sériel à 6 ddl découplable . . . . .                                                      | 73        |
| 3.4      | PGI du manipulateur sériel à 6 ddl découplable . . . . .                                                      | 78        |
| 3.4.1    | Problème du positionnement . . . . .                                                                          | 79        |
| 3.4.2    | Problème de l'orientation . . . . .                                                                           | 90        |
| 3.4.3    | Sommaire de la solution globale au problème géométrique<br>inverse pour un manipulateur découplable . . . . . | 95        |
| 3.5      | PGI du manipulateur sériel à 6 ddl non découplable . . . . .                                                  | 96        |
| 3.5.1    | Introduction à l'élimination dialytique . . . . .                                                             | 96        |
| 3.5.2    | Algorithme de résolution du PGI . . . . .                                                                     | 98        |
| 3.6      | Procédure numérique pour le PGI . . . . .                                                                     | 108       |
| 3.6.1    | Solution numérique d'un système d'équations non linéaires                                                     | 109       |
| 3.6.2    | Algorithme de Newton-Gauss . . . . .                                                                          | 110       |
| 3.6.3    | Amortissement et continuation . . . . .                                                                       | 113       |
| 3.6.4    | Application de l'algorithme au problème géométrique in-<br>verse . . . . .                                    | 113       |
| 3.7      | Équations de vitesse et matrice jacobienne . . . . .                                                          | 115       |
| 3.7.1    | Cas des articulations prismatiques . . . . .                                                                  | 118       |
| 3.7.2    | Manipulateurs à 3 degrés de liberté pour le positionnement                                                    | 119       |
| 3.7.3    | Manipulateurs à 3 degrés de liberté pour l'orientation .                                                      | 122       |
| 3.7.4    | Manipulateurs à 6 degrés de liberté . . . . .                                                                 | 124       |
| 3.8      | Évaluation de la matrice jacobienne . . . . .                                                                 | 126       |
| 3.9      | Singularités . . . . .                                                                                        | 127       |
| 3.9.1    | Singularités de la matrice jacobienne de positionnement                                                       | 128       |
| 3.9.2    | Singularités de la matrice jacobienne d'orientation . . .                                                     | 130       |

|          |                                                         |            |
|----------|---------------------------------------------------------|------------|
| 3.10     | Équations d'accélération . . . . .                      | 131        |
| 3.11     | Analyse statique . . . . .                              | 133        |
| 3.12     | Autres architectures de manipulateurs . . . . .         | 136        |
| 3.12.1   | Manipulateur plan à deux degrés de liberté . . . . .    | 136        |
| 3.12.2   | Manipulateur plan à trois degrés de liberté . . . . .   | 138        |
| 3.12.3   | Manipulateur SCARA à quatre degrés de liberté . . . . . | 140        |
| 3.13     | Sensibilité cinématique des manipulateurs . . . . .     | 141        |
| 3.13.1   | Sensibilité cinématique en position . . . . .           | 143        |
| 3.13.2   | Sensibilité cinématique en orientation . . . . .        | 145        |
| 3.14     | Exercices . . . . .                                     | 147        |
| <b>4</b> | <b>CINÉMATIQUE DES MANIPULATEURS PARALLÈLES</b>         | <b>161</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .                                  | 161        |
| 4.2      | Analyse cinématique et singularités . . . . .           | 162        |
| 4.3      | Manipulateur parallèle plan à 3 ddl . . . . .           | 165        |
| 4.3.1    | Problème géométrique direct . . . . .                   | 166        |
| 4.3.2    | Problème géométrique inverse . . . . .                  | 168        |
| 4.3.3    | Équations de vitesse . . . . .                          | 168        |
| 4.3.4    | Singularités . . . . .                                  | 169        |
| 4.4      | Manipulateur parallèle plan avec rails fixes . . . . .  | 170        |
| 4.4.1    | Problème géométrique inverse . . . . .                  | 170        |
| 4.4.2    | Problème géométrique direct . . . . .                   | 172        |
| 4.4.3    | Matrices jacobiennes . . . . .                          | 173        |
| 4.5      | Manipulateur spatial à 3 ddl . . . . .                  | 175        |
| 4.5.1    | Problème géométrique inverse . . . . .                  | 175        |
| 4.5.2    | Problème géométrique direct . . . . .                   | 176        |
| 4.5.3    | Matrices jacobiennes . . . . .                          | 177        |
| 4.6      | Manipulateur parallèle sphérique . . . . .              | 178        |
| 4.6.1    | Problème géométrique inverse . . . . .                  | 180        |
| 4.6.2    | Problème géométrique direct . . . . .                   | 181        |
| 4.6.3    | Équations de vitesse . . . . .                          | 182        |
| 4.6.4    | Singularités . . . . .                                  | 183        |
| 4.6.5    | Exemple de manipulateur parallèle sphérique . . . . .   | 183        |
| 4.7      | Manipulateur parallèle spatial à 6 ddl . . . . .        | 184        |
| 4.7.1    | Problème géométrique direct . . . . .                   | 186        |
| 4.7.2    | Problème géométrique inverse . . . . .                  | 186        |
| 4.7.3    | Équations de vitesse . . . . .                          | 187        |
| 4.7.4    | Singularités . . . . .                                  | 188        |
| 4.8      | Exercices . . . . .                                     | 189        |

|          |                                                                            |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5</b> | <b>PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE</b>                                        | <b>199</b> |
| 5.1      | Introduction . . . . .                                                     | 199        |
| 5.2      | Opérations de transfert ( <i>pick-and-place</i> ) . . . . .                | 199        |
| 5.2.1    | Continuité d'ordre 2 . . . . .                                             | 200        |
| 5.2.2    | Continuité d'ordre 3 . . . . .                                             | 206        |
| 5.2.3    | Profil de vitesse trapézoïdal (continuité d'ordre 1) . . .                 | 209        |
| 5.3      | Trajectoires continues . . . . .                                           | 215        |
| 5.4      | Exercices . . . . .                                                        | 223        |
| <b>6</b> | <b>DYNAMIQUE DES MANIPULATEURS</b>                                         | <b>227</b> |
| 6.1      | Introduction . . . . .                                                     | 227        |
| 6.2      | Mouvements exprimés par rapport à un repère mobile . . . .                 | 229        |
| 6.3      | Équations de Lagrange . . . . .                                            | 234        |
| 6.4      | Formulation lagrangienne des équations du mouvement . . . .                | 241        |
| 6.5      | Algorithme de Newton-Euler pour la dynamique inverse . . . .               | 251        |
| 6.5.1    | Calculs cinématiques préliminaires . . . . .                               | 251        |
| 6.5.2    | Calculs dynamiques . . . . .                                               | 254        |
| 6.6      | Problème dynamique direct . . . . .                                        | 256        |
| 6.7      | Équilibrage statique des manipulateurs . . . . .                           | 257        |
| 6.7.1    | Introduction . . . . .                                                     | 257        |
| 6.7.2    | Formulation mathématique de l'équilibrage statique . . .                   | 257        |
| 6.7.3    | Équilibrage d'un système à un ddl avec un ressort . . .                    | 259        |
| 6.7.4    | Exemples d'équilibrage statique de manipulateurs pa-<br>rallèles . . . . . | 260        |
| 6.7.5    | Effet d'un contrepoids sur l'inertie . . . . .                             | 266        |
| 6.8      | Exercices . . . . .                                                        | 268        |
| <b>7</b> | <b>COMMANDE DES MANIPULATEURS</b>                                          | <b>281</b> |
| 7.1      | Introduction . . . . .                                                     | 281        |
| 7.2      | Régulation et asservissement . . . . .                                     | 282        |
| 7.2.1    | Régulation . . . . .                                                       | 282        |
| 7.2.2    | Suivi de trajectoire ou asservissement . . . . .                           | 288        |
| 7.3      | Modélisation et commande d'une articulation . . . . .                      | 291        |
| 7.4      | Stratégies de commande d'un manipulateur . . . . .                         | 294        |
| 7.4.1    | Commande indépendante des articulations . . . . .                          | 296        |
| 7.4.2    | Commande par linéarisation et asservissement . . . . .                     | 297        |
| 7.5      | Exercices . . . . .                                                        | 303        |

|                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8 MANIPULATEURS SÉRIELS REDONDANTS</b>                               | <b>311</b> |
| 8.1 Introduction . . . . .                                              | 311        |
| 8.2 Modélisation . . . . .                                              | 313        |
| 8.2.1 Problème géométrique direct . . . . .                             | 313        |
| 8.2.2 Problème géométrique inverse . . . . .                            | 314        |
| 8.2.3 Équations de vitesse . . . . .                                    | 316        |
| 8.3 Systèmes algébriques linéaires sous-déterminés . . . . .            | 317        |
| 8.3.1 Systèmes linéaires . . . . .                                      | 317        |
| 8.3.2 Résolution des systèmes linéaires sous-déterminés . . . .         | 318        |
| 8.3.3 Sous-espaces vectoriels et pseudo-inverses . . . . .              | 319        |
| 8.3.4 Calcul des inverses généralisées et des solutions . . . . .       | 320        |
| 8.4 Planification de trajectoires à l'aide des équations de vitesse . . | 325        |
| 8.4.1 Interprétation géométrique des équations de vitesse . . .         | 325        |
| 8.4.2 Planification de trajectoires avec tâche auxiliaire . . . .       | 325        |
| 8.4.3 Utilisation de normes pondérées . . . . .                         | 326        |
| 8.5 Planification de trajectoire et mise en œuvre . . . . .             | 327        |
| 8.6 Statique des manipulateurs redondants . . . . .                     | 328        |
| 8.7 Exercices . . . . .                                                 | 329        |
| <b>Solutions des exercices</b>                                          | <b>335</b> |
| <b>Bibliographie</b>                                                    | <b>365</b> |
| <b>Index</b>                                                            | <b>368</b> |



# CHAPITRE 1

---

## INTRODUCTION

---

*Si je n'arrivais pas à faire cette chose si élémentaire, je ne serais d'aucune utilité.*

Michel Jean, *Kukum*, Libre Expression, 2019

### 1.1 Robot et robotique

Dans l'esprit de la plupart des gens, le mot robot évoque des machines à l'allure anthropomorphe et dotées de fonctionnalités qui s'approchent ou dépassent même celles des humains. Cette conception est soutenue par une profusion d'œuvres littéraires et cinématographiques racontant tantôt les mérites, tantôt les déboires, de robots imaginaires. En fait, la source du mot robot est une pièce de théâtre créée en 1920 par l'auteur tchèque Karel Čapek (le mot tchèque *robota* signifie travail ou corvée). Pour les ingénieurs roboticiens cependant, il importe plutôt de considérer les connaissances scientifiques et techniques qui sont nécessaires au développement des robots. En effet, bien que les robots humanoïdes soient maintenant une réalité, les robots fabriqués et utilisés de nos jours sont pour la plupart très différents des androïdes que l'on retrouve dans les œuvres de science-fiction, et ce, autant au niveau de leur aspect extérieur qu'au niveau de leurs performances. Ainsi, nous adopterons ici une définition d'un robot qui est fondée sur les aspects physiques et technologiques. Dans ce contexte, le dictionnaire nous propose la définition suivante :

- *Robot* : Appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe, modifiable ou adaptable.

Cette définition inclut la notion de mouvement, la notion de programmation et la notion d'adaptabilité, qui sont trois aspects fondamentaux des robots. En effet, les robots sont des machines capables d'imprimer un mouvement à des objets (manipulation) selon des trajectoires programmables. L'aspect programmation distingue les robots des machines fixes, dont le mouvement ne peut être modifié que par des changements matériels qui nécessitent des modifications physiques du dispositif. Enfin, l'adaptation, grâce à des capteurs, permet au robot de tenir compte de façon plus ou moins élaborée des changements dans son environnement immédiat. Cette dernière fonctionnalité fait l'objet de nombreux travaux récents, visant à rendre les robots de plus en plus autonomes dans des environnements non structurés. Le développement des robots a donné naissance à une science, la *robotique*, que l'on peut définir comme la *science et technique de la robotisation, de la conception et de la construction des robots*.

La définition présentée ci-dessus permet de constater que la robotique est une science multidisciplinaire qui fait intervenir plusieurs domaines du génie comme la mécanique, l'électronique, la commande, l'informatique, la science des données et l'intelligence artificielle. Dans cet ouvrage, nous nous intéressons aux fondements de la robotique, qui sont principalement mécaniques. En effet, avant même de vouloir commander ou programmer un robot, il faut en comprendre la géométrie, la cinématique et la dynamique. Ces fondements sont essentiels et un des buts de cet ouvrage est de permettre à l'ingénieur de développer une autonomie dans la modélisation et l'analyse des robots, peu importe leur architecture mécanique. Une fois ces notions bien maîtrisées, tous les autres aspects peuvent être abordés et reposeront alors sur des bases solides.

## 1.2 Évolution et diversité de la robotique

On considère généralement que la robotique industrielle est née au début des années 1960 avec l'installation d'un robot UNIMATE dans une usine de la compagnie General Motors aux États-Unis en 1961. Toutefois, l'idée de construire des robots est beaucoup plus ancienne. Même dans l'ère industrielle, on peut identifier plusieurs initiatives en ce sens qui précèdent le robot de UNIMATION. À titre d'exemple, le brevet de W.L.V. Pollard [1], publié en 1942, qui propose un robot spatial d'architecture parallèle, est présenté schématiquement à la figure 1.1.

Le paysage de la robotique industrielle est depuis longtemps dominé par les



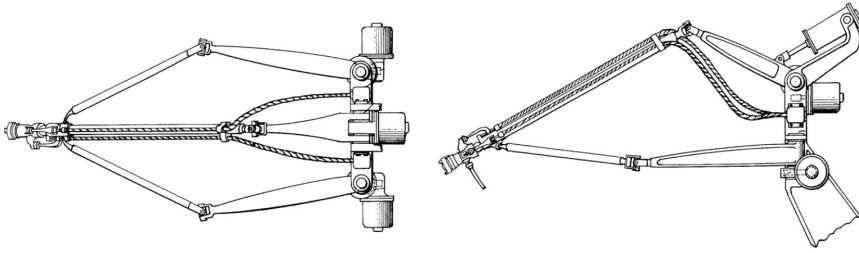


FIGURE 1.1. Robot parallèle spatial breveté par W.L.V. Pollard en 1942.

robots d'architecture sérielle, c'est-à-dire des bras manipulateurs construits selon une chaîne cinématique unique constituée d'une série d'articulations reliées par des membrures. Un exemple de robot construit selon cette architecture est montré à la figure 1.2. Étant donné l'importance de ce type de robot, il occupera une place prépondérante dans cet ouvrage. On s'intéressera entre autres aux problèmes fondamentaux de géométrie, de cinématique, de dynamique et de commande reliés à ce type d'architecture qui est présent partout dans l'industrie.

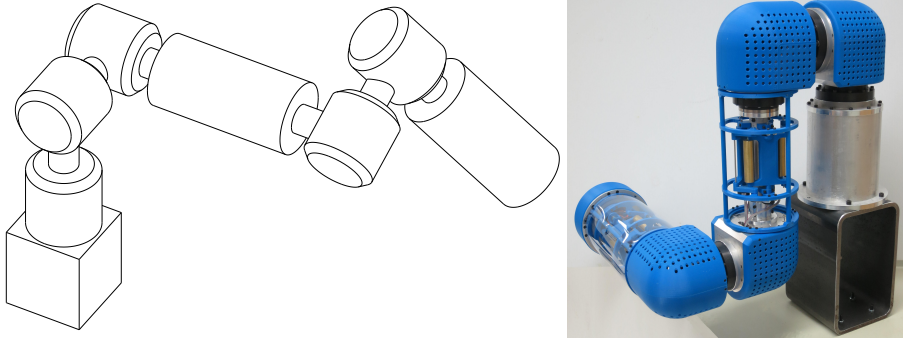


FIGURE 1.2. Robot sériel à 5 degrés de liberté développé au laboratoire de robotique de l'université Laval pour l'interaction physique humain-robot [2].

Bien que les robots sériels soient très répandus, il existe plusieurs autres systèmes robotiques que l'ingénieur roboticien doit pouvoir modéliser, concevoir ou commander. Par exemple, les robots d'architecture parallèle sont aussi utilisés dans plusieurs applications, particulièrement celles qui nécessitent la manipulation de charges lourdes ou la production de mouvements impliquant des accélérations très élevées. Un exemple d'application des robots parallèles est l'industrie alimentaire, où ces robots peuvent travailler à des cadences très élevées. Ainsi, on consacra un chapitre de cet ouvrage à l'étude de ce type

de robot, dont les caractéristiques diffèrent considérablement de celles des robots sériels. Contrairement aux robots sériels, les robots parallèles comportent plusieurs chaînes cinématiques reliant la base à l'effecteur, ce qui permet de déporter les actionneurs vers la base. Des exemples de robots parallèles sont illustrés à la figure 1.3.

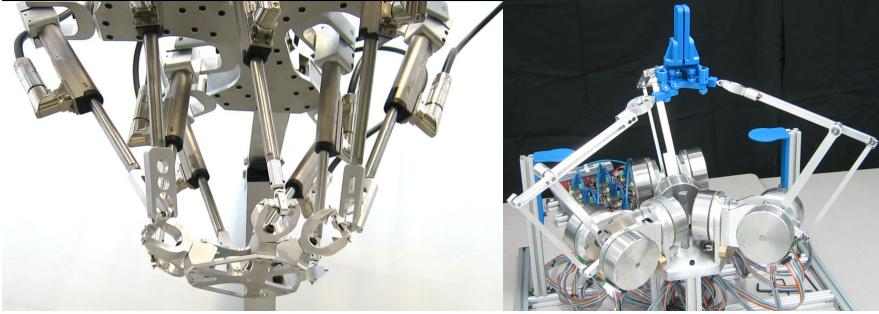


FIGURE 1.3. Robots parallèles redondants à  $(6 + 3)$  degrés de liberté développés au laboratoire de robotique de l'université Laval, voir [3] et [4].

Les notions fondamentales présentées dans cet ouvrage permettront également à l'ingénieur roboticien de modéliser des systèmes plus complexes. En effet, la robotique moderne se déploie sous de multiples formes, mais celles-ci reposent toutes sur les concepts mécaniques présentés dans cet ouvrage. On peut penser entre autres aux robots marcheurs tels que ceux montrés à la figure 1.4. Dans ce type de robot, les pattes possèdent l'architecture de robots sériels articulés qui doivent être commandés pour effectuer des trajectoires correspondant au patron de marche du robot.



FIGURE 1.4. Robots marcheurs à 6 pattes développés au laboratoire de robotique de l'université Laval, voir [5] et [6].

Un autre exemple de système robotique avancé est le concept de main ou préhenseur robotique, qui permet à un robot de saisir des objets de forme variée

de façon plus ou moins autonome. Deux exemples de ce type de préhenseur sont montrés à la figure 1.5. Dans ce cas, les doigts de la main peuvent être considérés comme des robots sériels faisant contact avec l'objet saisi non seulement à leur effecteur mais en plusieurs points de contact le long des membrures intermédiaires.

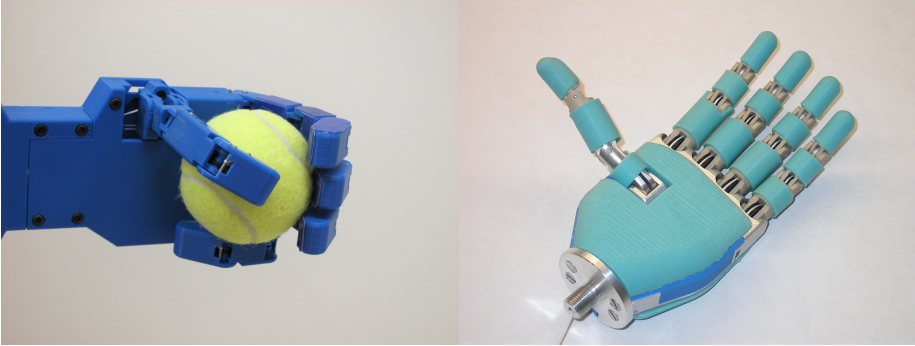


FIGURE 1.5. Mains robotiques développées au laboratoire de robotique de l'université Laval, voir [7] et [8].

Les robots parallèles entraînés par câbles constituent aussi des exemples de systèmes robotiques particuliers. Leur modélisation est semblable à celle des robots parallèles conventionnels traités dans ce livre. La particularité des robots entraînés par câbles est que les câbles peuvent fonctionner seulement en tension (et non en compression), ce qui impose des contraintes particulières. Un exemple de robot parallèle entraîné par câbles est donné figure 1.6.

Certains dispositifs robotiques sont aussi conçus pour interagir physiquement avec leur environnement ou avec des humains. Ce paradigme est de plus en plus présent dans les applications robotiques et implique aussi une modélisation reposant sur les concepts présentés dans ce livre. Un exemple d'interface haptique servant à émuler une poignée de main est montré à la figure 1.7.

Comme on peut le constater avec les exemples mentionnés ci-dessus, les systèmes robotiques prennent des formes variées. De plus, ils sont déployés dans un nombre grandissant d'applications qui peuvent représenter des conditions d'utilisation très différentes les unes des autres. Cependant, tous ces systèmes ont comme dénominateur commun qu'ils impliquent le mouvement de corps physiques articulés par des liaisons mécaniques. Ainsi, les notions fondamentales liées à la géométrie, la cinématique, la dynamique et la commande des systèmes articulés constituent un noyau de connaissances que l'ingénieur roboticien doit s'appliquer à maîtriser, ce qui est le but de cet ouvrage.