

ロボット運動計算論

山本 江・鮎澤 光・石垣 泰暉

【共著】

コロナ社

ま え が き

ロボットの運動計算理論はおよそ 2000 年代までにその運動学・動力学についての基礎が体系化された。多くのロボットの身体は金属などの材料で構成されることから、その運動を表すのに各身体部位を剛体とみなすリンク系のモデルが用いられ、ロボットのみならず人間の筋骨格モデルにも応用されている。現在までに数十以上の自由度をもつヒューマノイドロボットや環境との接触を伴うロボットの力学シミュレーションがリアルタイムに実行できるようになってきた。

ロボット、特にヒューマノイドロボットのような複雑なシステムの制御は、二足歩行における倒立振子モデルのような低次元化モデルにおいて制御則を考え、それを全身運動に分解する階層的な手法が成果を挙げてきた。一方で、ロボットの力学シミュレーションの高速化に伴い、近年、特に 2020 年代以降ではロボットの制御は「運動を最適化する」問題として一般化された形で解かれつつある。例えばヒューマノイドロボットのような大自由度を有する複雑なロボットにおいても非線形モデル予測制御が実時間に近いスピードで適用されつつある。非線形モデル予測制御もしくは最適制御問題は将来のロボットの状態をシミュレーションすることを繰り返して最適な入力を求める。これは力学シミュレーションの高速化と最適化のアルゴリズムにおいて必要となる評価関数の勾配計算によって可能になってきた。特に、剛体リンク系の速度や加速度、その一階微分である躍度といった量に関する解析的微分を計算する枠組みを提供するシミュレータは「微分可能な」シミュレータと呼ばれ、オープンソースのシミュレータがだれでも利用できるようになってきている。これらのシミュレータは GPU 上での並列実行によって強化学習と統合され、現在では、GPU を搭載したラップトップ PC 上においてヒューマノイドロボットの二足歩行制御器を強化学習により数十分～数時間程度で学習することが可能となりつつある。

このように、ロボットの制御や学習においてその運動を計算し高速にシミュレーションすること、それに基づき効率的に運動を最適化することがますます重要になってきている。そこで本書ではおもにロボットの運動計算理論に焦点をあて、日本語のロボティクスの教科書では扱われることが少ない6次元の速度、加速度、力のベクトルの演算を用いることでロボットの運動学、動力学の計算理論を体系化することを目指す。剛体の回転と並進の運動を合わせた6次元のベクトルを空間ベクトルと呼び、これによって Articulated Body Algorithm (ABA) のような高速な計算アルゴリズムを見通しよく記述できる。

なお、空間ベクトルやその座標変換の背景にはリー群という数学的な性質が存在するが、本書ではそれらについて*を付けたセクションで補足的に説明し、リー群についての知識がなくとも大学高学年～大学院生であれば読み進められるように工夫した。同様に、読み飛ばしても構わないような高度に専門的な説明の箇所には*を付けた。一方で、一般的なロボティクスの教科書で解説されるアクチュエータやセンサといったメカトロニクスや減速機などのロボットの構成要素についてはおもには扱わないため、初めてロボット工学を学ぶ人は基本的な教科書（例えば文献1)～6)など）も適宜参考にすることを推奨する。

本書の執筆に際して多くの方にご協力いただいた。青野達人氏には本書の表紙イラストを作成いただいた。東京大学力学制御システム研究室の菊竹潤氏、早見星吾氏、工藤大和氏、秋吉拓真氏には原稿の校正に協力いただいた。また、コロナ社の皆様には執筆段階から出版までご尽力いただいた。ご協力いただいた方々に深く感謝する。

最後に、長年ご指導いただいた中村仁彦先生に深く感謝申し上げます。先生の著書を通じてロボティクスの基礎を学ぶとともに、ロボットの力学・制御・知能に関する最先端の研究を通して多くの示唆をいただきました。本書は、その学びの積み重ねの上に成り立っています。

2026年3月

山本 江, 鮎澤 光, 石垣泰暉

目 次

1. ロボットの機構と運動計算の基礎

1.1	ロボットの機構	1
1.1.1	関節とリンク	1
1.1.2	多リンク系	2
1.2	平面2自由度マニピュレータを例にとって	5
1.2.1	順運動学	5
1.2.2	逆運動学	7
1.2.3	ヤコビ行列と特異姿勢	8
1.3	本書で用いる記号	11
	章末問題	11

2. 順運動学

2.1	座標系による多リンク系の運動の記述	12
2.1.1	世界座標系と局所座標系	12
2.1.2	姿勢行列と $SO(3)$	13
2.1.3	座標変換と相対姿勢	19
2.1.4	同次変換行列と $SE(3)$	21
2.2	運動の自由度と一般化座標	26
2.2.1	自由度と一般化座標	26
2.2.2	剛体の自由度と一般化座標	27
2.2.3	対偶の自由度と関節変位量	29
2.3	運動学	34

2.3.1 順運動学	34
2.3.2 コンフィギュレーション/タスク空間と冗長性	35
2.4 姿勢のそのほかの表現方法	38
2.4.1 オイラー角	38
2.4.2 剛体回転に関するオイラーの定理	41
2.4.3 単位クォータニオン (オイラーパラメータ)	42
章末問題	43

3. 微分運動学

3.1 角速度ベクトル	44
3.1.1 角速度ベクトルと $so(3)$	44
3.1.2 $SO(3)$ と $so(3)$	46
3.1.3 局所座標系から見た角速度ベクトル	48
3.2 速度に関する順運動学	52
3.2.1 座標系間の角速度・並進速度の変換	52
3.2.2 空間速度と $se(3)$	55
3.2.3 多リンク系の空間速度の計算	61
3.3 ヤコビ行列	63
3.3.1 ヤコビ行列と微分運動学	63
3.3.2 基礎ヤコビ行列	65
3.4 リー群*	69
3.4.1 群と多様体	69
3.4.2 リー群とリー代数	71
3.4.3 随伴表現	73
章末問題	74

4. 逆運動学

4.1 逆運動学と特異姿勢/冗長性	75
-------------------	----

4.1.1	逆運動学と微分逆運動学	75
4.1.2	特異姿勢と冗長性	77
4.2	微分逆運動学	81
4.2.1	微分逆運動学の解	81
4.2.2	特異姿勢にロバストな微分逆運動学	88
4.3	逆運動学の数値計算	92
4.3.1	ニュートン・ラフソン法による逆運動学	92
4.3.2	非線形最適化による逆運動学	99
	章末問題	102

5. 剛体リンク系の運動方程式

5.1	ラグランジュの運動方程式	103
5.1.1	ラグランジュの運動方程式の概要	103
5.1.2	運動エネルギーとポテンシャルエネルギー	106
5.1.3	空間レンヂとオイラーの運動方程式	112
5.2	剛体リンク系のラグランジュの運動方程式とその性質	115
5.2.1	ラグランジュの運動方程式の導出	115
5.2.2	ラグランジュの運動方程式の性質	120
5.3	外部環境との接触を伴う場合の運動方程式	124
5.3.1	仮想仕事の原理とダランベールの原理	124
5.3.2	浮遊リンク系の運動方程式	127
5.3.3	拘束を伴う運動	130
	章末問題	135

6. ニュートン・オイラー運動方程式と逆動力学計算

6.1	空間加速度と空間レンヂの座標変換	137
6.1.1	空間加速度とその座標変換	137

6.1.2	空間レンチの座標変換	139
6.2	剛体リンクのニュートン・オイラーの運動方程式	141
6.2.1	リンク重心座標系におけるニュートン・オイラー運動方程式	141
6.2.2	リンク座標系におけるニュートン・オイラー運動方程式	143
6.3	逆動力学計算	146
6.3.1	漸化的ニュートン・オイラー法	146
6.3.2	接触力を含む逆動力学計算	149
	章 末 問 題	152

7. 順動力学シミュレーション

7.1	順動力学の数値計算アルゴリズム	153
7.1.1	単位ベクトル法による順動力学計算	153
7.1.2	Articulated Body Algorithm (ABA)	155
7.2	加速度・速度の数値積分	160
7.2.1	離散化と数値積分	160
7.2.2	数 値 積 分	162
7.2.3	姿 勢 の 積 分	163
7.3	外部環境との接触を伴うシミュレーション	165
7.3.1	ペナルティ法	165
7.3.2	Operational Space Formulation (OSF)	166
7.3.3	完全非弾性衝突モデル	168
7.3.4	相 補 性 条 件	169
	章 末 問 題	171

8. ロボット制御の基礎

8.1	コンフィギュレーション空間におけるフィードバック制御	172
8.1.1	位置制御と力制御	172

8.1.2	ロボットの PD 制御とその安定性	175
8.1.3	計算トルク法	179
8.2	コンプライアンス制御/インピーダンス制御	180
8.2.1	機械インピーダンスとコンプライアンス	180
8.2.2	手先のコンプライアンス	182
8.2.3	アドミッタンス制御	183
8.3	分解加速度制御と Operational Space Control	185
8.3.1	分解加速度制御	185
8.3.2	Operational Space Control (OSC)	186
8.3.3	分解加速度制御と OSC の関係	188
	章末問題	195

9. 最適化のための包括的運動計算と剛から柔への展開

9.1	運動の包括表現	197
9.1.1	6次元から18次元へ	197
9.1.2	包括運動変換行列	198
9.1.3	包括運動変換行列の微分	203
9.1.4	包括運動変換行列の数学的性質	209
9.2	運動の包括微分	211
9.2.1	運動学計算の微分	211
9.2.2	動力学計算の微分	217
9.3	運動の最適化	220
9.3.1	運動最適化問題	220
9.3.2	多リンク系の物理量に関するヤコビ行列	224
9.3.3	時間軌道関数	231
9.3.4	運動最適化の例	238
9.4	ソフトロボットの運動計算	241
9.4.1	ソフトロボットとその連続体モデル	241
9.4.2	区分的一定ひずみモデル (PCS モデル)	242

9.4.3 PCS モデルの動力学	248
付 録	253
A.1 ベクトル・行列の演算に関する基礎	253
A.1.1 2 次 形 式	253
A.1.2 行列の正定値性	253
A.1.3 ベクトルの微分	254
A.1.4 2次形式の微分	254
A.1.5 最適性の条件	255
A.1.6 特異値分解	256
A.2 $SO(3)$ と $SE(3)$ に関する性質	257
A.2.1 $\mathbf{R} \in SO(3)$ の性質	257
A.2.2 $[\mathbf{x}\times]$ の 性 質	257
A.2.3 $[\mathbf{x}\times_4]$ と $[\mathbf{x}\times_6]$ の指数写像の計算	257
A.2.4 角速度と角軸ベクトルの関係式	261
A.2.5 角加速度と角軸ベクトルの関係式	263
引用・参考文献	266
索 引	274

1

ロボットの機構と運動計算の基礎

本章では、イントロダクションとしてロボットの身体を構成する機構についての基本的な用語を説明する。また、最も単純なロボットの例である平面2自由度マニピュレータを題材にして、順/逆運動学、ヤコビ行列や特異姿勢といったロボットの運動計算の基礎を解説する。平面2自由度マニピュレータでは、高校や大学で学ぶ初等数学の知識のみを使って順/逆運動学を定式化でき、ヤコビ行列や特異姿勢の考え方も理解しやすい。第2章以降では一般的な n 個のリンクから構成されるロボットを扱うが、その前段階としてロボットの運動計算の基礎を理解してもらえれば幸いである。

1.1 ロボットの機構

1.1.1 関節とリンク

人間の身体では骨と骨が靭帯じんたいと腱けんで連結され、関節(joint)を構成している。同様に、ロボットの身体も骨に相当する構造に剛性の高い(ヤング率の大きい)材料を用いて、それらを機械的に拘束することで類似の機構を作ることができる。機械工学では「二つの機械要素が接触しながら運動しているとき、その組合せのこと」を対偶(pair)と呼ぶ。対偶を複数組み合わせることでロボットの身体を構成することができる。対偶による可動部分がロボットの関節となり、関節と関節の間の「継ぎ手」となる構造部をリンク(節, link)と呼ぶ。

図1.1(a)にロボットでよく使用される回転関節(revolute joint)の例を示す。回転関節を2次元の模式図で表す際、図1.1(b), (c), (d)のような記号が用いられることが多く、それぞれ図中の矢印で示した回転方向をもつ関節を表す。図1.2(a)に示した直動関節(prismatic joint)もよく使用され、図1.2(b)

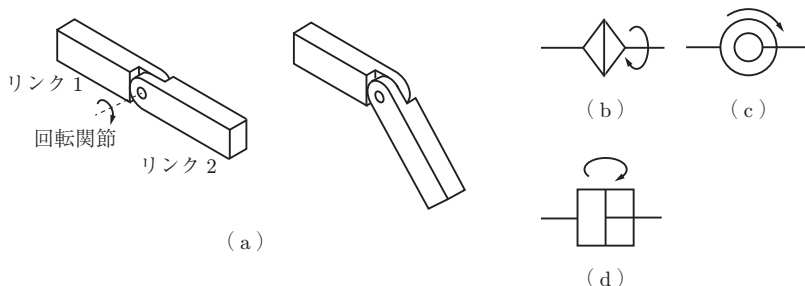


図 1.1 回転関節と模式図において使用される記号

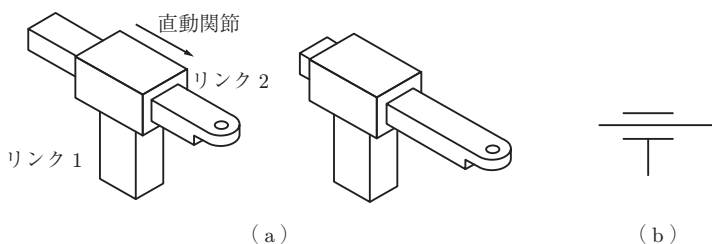


図 1.2 直動関節と模式図において使用される記号

のような記号が用いられる。

剛性の高い材料で作られたリンクは理想的に変形しないと仮定することができ、剛体 (rigid body) として近似することができる。剛体の数学的な定義については 2.2.1 項で説明する。剛体として近似されたリンクを剛体リンク (rigid-body link) と呼ぶ。

柔らかい材料で作られたリンクは弾性リンクや柔軟リンク (flexible link) などと呼ばれる。また、そもそも関節とリンクという区別をもたず、軟体動物のように柔らかく連続的に変形する身体構造をもったロボットがソフトロボットの分野で研究されている。

1.1.2 多リンク系

複数のリンクを関節で連結したシステムを多リンク系 (multi-link system) と呼ぶ。図 1.3 のようなロボットアームを例に多リンク系について説明しよう。ロ

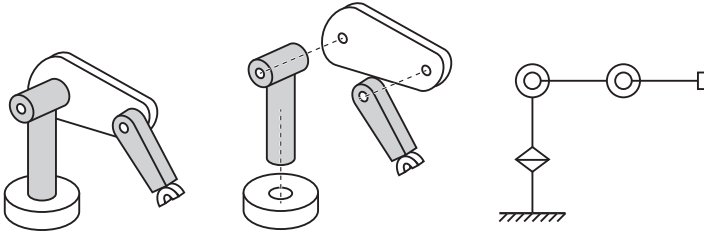


図 1.3 三つの関節で構成されるロボットアームの例

ロボットアームはマニピュレータ (manipulator) とも呼ばれる。多リンク系の一番根本のリンクはベースリンク (base link) やルートリンク (root link) と呼ばれ、多くの産業用ロボットアームのベースリンクは環境に固定されているとみなせる。ベースリンクから順にリンクをたどって、手先に相当する末端リンクにはロボットハンドを取り付けたり、作業用の道具を直接取り付たりすることができる。これらはまとめて エンドエフェクタ (手先効果器, end-effector) と呼ばれる。

(1) 運動連鎖 多リンク系では、ベースリンクに近い側のリンクの運動によって、そのリンクに連結された別のリンクの運動が決まり、これが末端リンクに連鎖していくことから、多リンク系は運動連鎖 (kinematic chain) とも呼ばれる。多リンク系の中から連結された二つのリンクに注目すると、ベースリンクに近い側のリンクの運動によってもう一方のリンクの運動が決まる親子関係があることから、前者を親リンク (parent link)、後者を子リンク (child link) と呼ぶ。

(2) 開リンク系と閉リンク系 リンク同士が直列に連結されたリンク系をシリアルリンク系 (serial link system) と呼ぶ。一方、リンクの連鎖の中に閉じたループ構造を少なくとも一つもつリンク系を閉リンク系 (closed kinematic chain) と呼ぶ。代表的なものは平行リンク機構 (parallel link mechanism) であり、例えば図 1.4 のようなロボットアームを構成することができる。この例では四つのリンクが平行リンク機構を構成し、それらを連結する四つの関節のうち一つ、例えば図 1.4 の関節 1 にアクチュエータを取り付けて回転させることでアーム全体を動かすことができる。

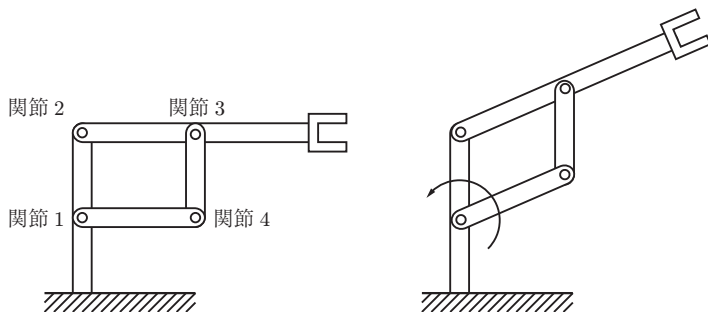


図 1.4 平行リンク機構を利用したロボットアームの例

閉リンク系との対比から、シリアルリンク系は開リンク系 (open kinematic chain) とも呼ばれる。開リンク系のロボットアームの場合には、リンク系の末端側にもアクチュエータが必要であり、全体の重量化と根本側のアクチュエータの大型化を招きやすいのに対し、閉リンク系ではアクチュエータを根本側に配置して全体を軽量化できることが特徴である。一方で、ループ構造を有することから、開リンク系に比べて運動の計算が複雑になる。

(3) 木構造 多リンク系には、一つのリンクに対し二つ以上のリンクが連結された「分岐」が存在する、すなわち木構造 (tree structure) をもつものがある。例えば、ロボットハンドは手首から複数の指が生えた木構造をもつ多リンク系とみなせる。また、閉リンク系ではループを構成する一つの関節を仮想的に切断し、木構造をもつ多リンク系として考え、切断前の関節の拘束条件を考慮に入れることで運動を計算できる。

ある子リンクにとって共通の親リンクをもつ別のリンクを本書ではきょうだいリンク (sibling link) と呼ぶこととする。例として、図 1.4 に示した閉リンク機構を関節 4 で切断してできる木構造を図 1.5 に示す。リンク 0 に共通して接続されているリンク 1 とリンク 2 がきょうだいリンクとなる。

図 1.6 に示すような二足歩行ロボットや脚ロボットは体幹から複数の脚が生えた木構造をもつ多リンク系として表すことができるが、特徴として、どのリンクも環境に固定されていない。このようなリンク系は浮遊リンク系 (floating-base link system) と呼ばれる。

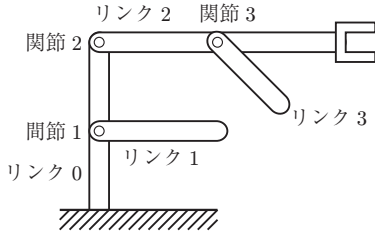


図 1.5 図 1.4 に示した閉リンク機構を関節 4 で切断してできる木構造の例

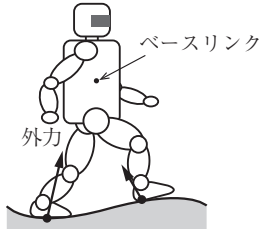


図 1.6 浮遊リンク系の例：二足歩行するヒューマノイドロボット

浮遊リンク系の例としては、ほかにドローンなどの飛行ロボット、水中ロボット、宇宙ロボットなどが挙げられる。浮遊リンク系では、どのリンクをベースリンクに選んでもよいが、一般的に最も大きなリンクや木構造の根本に相当するリンクを選ぶことが多い。例えば、二足歩行ロボットや脚ロボットの場合は体幹リンクや人間の骨盤に相当するリンクをベースリンクとして選ぶことが一般的である。

ドローンなどではベースリンクを駆動する推進力を発生させることでロボットの運動を制御するが、二足歩行ロボットや脚ロボットではベースリンクを直接駆動するアクチュエータは存在せず、床をはじめとする外部環境との接触力（外力）を利用してベースリンクが駆動される。接触力を制御する場合には、垂直抗力や摩擦力に関する拘束条件を適切に考慮する必要がある。

1.2 平面2自由度マニピュレータを例にとって

1.2.1 順運動学

図 1.7 のような二つの回転関節と棒状の二つのリンクによって構成されたマ

索引

<p>【あ】</p> <p>アドミッタンス制御 184</p> <p>【い】</p> <p>位置制御 173</p> <p>一般化座標 27</p> <p>一般化速度 65</p> <p>一般化力 104</p> <p>陰解法 163</p> <p>因果律 136, 184</p> <p>陰関数定理 9</p> <p>陰的オイラー積分 163</p> <p>インピーダンス 181</p> <p>インピーダンス制御 181</p> <p>【う】</p> <p>運動最適化 220</p> <p>運動リターゲティング 239</p> <p>運動連鎖 3</p> <p>【え】</p> <p>エンドエフェクタ 3</p> <p>【お】</p> <p>オイラー角 38</p> <p>オイラー近似 161</p> <p>オイラー積分 162</p> <p>オイラーパラメータ 42</p> <p>重み行列 84</p> <p>重み付き 2乗ノルム 84</p> <p>親リンク 3</p> <p>【か】</p> <p>解析解 76</p>	<p>回転関節 1, 30</p> <p>回転行列 14</p> <p>回転対偶 30</p> <p>外力 127</p> <p>開リンク系 4</p> <p>ガウス・ニュートン法 101</p> <p>角運動量 142</p> <p>角軸表現 94</p> <p>角速度ベクトル 45</p> <p>過拘束 132</p> <p>可操作空間 78</p> <p>可操作性楕円体 89</p> <p>可操作度 90</p> <p>仮想仕事の原理 125</p> <p>括弧積 72</p> <p>慣性行列 108</p> <p>慣性テンソル 108</p> <p>慣性力 126</p> <p>関節 1</p> <p>関節角度 6</p> <p>関節角度ベクトル 36</p> <p>感度 64</p> <p>感度行列 64</p> <p>【き】</p> <p>木構造 4</p> <p>擬似逆行列 81, 82</p> <p>基礎ヤコビ行列 66</p> <p>逆運動学 7, 75</p> <p>逆動力学 136</p> <p>逆方向計算 148</p> <p>球面関節 32</p> <p>きょうだいリンク 4</p> <p>行列指数関数 46</p> <p>行列対数関数 94</p>	<p>局所最小解 255</p> <p>局所座標系 12, 71</p> <p>【く】</p> <p>空間加速度 137</p> <p>空間速度 54, 56</p> <p>空間変換行列 57</p> <p>空間変分ベクトル 203</p> <p>空間レンチ 114</p> <p>区分的一定ひずみモデル 242, 245</p> <p>クーロン摩擦 151</p> <p>群 70</p> <p>【け】</p> <p>計算トルク法 179</p> <p>【こ】</p> <p>構成曲線 242</p> <p>拘束条件 130</p> <p>拘束力 132</p> <p>剛体 2, 27</p> <p>交代行列 44</p> <p>剛体座標系 28</p> <p>剛体リンク 2</p> <p>勾配ベクトル 83, 100, 254</p> <p>勾配法 99</p> <p>後方差分 161</p> <p>誤差ダイナミクス 179</p> <p>コセラ連続体 242</p> <p>コリオリ行列 119</p> <p>子リンク 3</p> <p>コンフィギュレーション空間 35</p> <p>コンプライアンス 182</p>
---	---	--

【さ】

最急降下法 100
 再帰呼び出し 148
 最小慣性主軸 111
 最小慣性モーメント 111
 最小ノルム解 82
 最小 2 乗解 81
 最大慣性主軸 111
 最大慣性モーメント 111
 最適性の 1 次の必要条件 255
 最適性の 2 次の十分条件 256
 最適性の 2 次の必要条件 256
 座標変換 20

【し】

姿勢行列 14
 持続的励起軌道 240
 実一般線形群 70
 質量中心 108
 シューアの補元 193
 自由関節 32
 重心 108
 重心ヤコビ行列 118
 自由度 26
 受動性 123
 柔軟リンク 2
 重力補償 174
 重力補償付き PD 制御 174
 受動的コンプライアンス 182
 順運動学 7, 35
 順動力学 136
 順方向計算 147
 冗長空間 78
 冗長自由度 38
 冗長性 38
 冗長ロボット 38
 シリアルリンク系 3

【す】

垂直抗力 150
 随伴表現 73
 すべり対偶 30

【せ】

正準形 257
 正 則 9
 正定値 253
 静力学 124
 世界座標系 12
 積分制御 173
 接空間 71
 接操作 247
 絶対座標系 12
 零空間 78
 漸化的ニュートン・
 オイラー法 146
 漸近安定 176
 線形相補性問題 170
 前方差分 161

【そ】

相対姿勢 20
 双 対 126
 双対性 126
 相補性条件 169
 双腕ロボット 37

【た】

大域的最小解 255
 第 1 種クリストッフエル記号 119
 対 偶 1
 台形積分 162
 ダイレクトドライブ・モータ 175
 タスク空間 36
 畳み込み積分 247
 多点接触 37
 多様体 70
 グランベールの原理 126
 多リンク系 2
 単位クォータニオン 42
 単位ベクトル法 153

【ち】

値域空間 77
 力制御 175
 チホノフの正則化 92
 中心軸座標 242
 蝶 番 30
 直動関節 1, 31
 直交行列 18
 直交群 19

【と】

等価角軸変換 94
 同次変換行列 23
 特異姿勢 77
 特異値 256
 特異値低感度逆行行列 92
 特異値分解 79, 256
 特異点 77
 特殊直交群 19
 特殊ユークリッド群 25
 トルク 105

【に】

ニュートン法 101

【ね】

ねじ対偶 30

【の】

能動的コンプライアンス 182

【は】

バイアス項 116
 ハイブリッドシステム 170
 ハイブリッドリンク系 250
 バネ・ダンパモデル 165
 汎関数 104
 半正定値 253

【ひ】

ひずみベクトル 243
 ピッチ角 41

微分運動学	64				
微分逆運動学	76				
微分制御	173				
微分包含	170				
非ホロノミック	131				
比例制御	173				
					【ふ】
負定値	253				
浮遊リンク系	4				
フルランク	77				
分解加速度制御	185				
分解速度制御	82				
					【へ】
閉形式の解	76				
平衡軸の定理	144				
平行リンク機構	3				
閉リンク系	3				
ベースリンク	3				
ヘッセ行列	83, 100, 254				
					【ほ】
包括運動変換行列	199				
包括運動変分ベクトル	204				
包括関節変分ベクトル	215				
包括空間変分ベクトル	205				
ホロノミック	131				
					【ま】
摩擦円錐	152				
摩擦力	150				
マニピュレータ	3				
					【も】
		モーメント	105		
					【や】
		ヤコビ行列	9, 64		
					【ゆ】
		有限要素法	241		
					【よ】
		余因子	257		
		陽解法	163		
		陽的オイラー積分	162		
		ヨー角	41		
					【ら】
		ラグランジュの未定乗数法	85		
					【り】
		リアプノフ関数	176		
		リアプノフの意味で安定	176		
		力学パラメータ	123		
		リー群	60, 70		
		離散時間	161		
		リー代数	72		
		リンク	1		
		リンク座標系	12		
					【る】
		ルートリンク	3		
		ルンゲ・クッタ法	162		
					【れ】
		劣駆動系	128		
		レーベンバーク・マルカート法	102		
		連鎖律	21		
		連続時間	161		
		レンチ	113		
					【ろ】
		ロドリゲスの回転公式	17		
		ロール角	41		
		ロール・ピッチ・ヨー角	41		
					【わ】
		歪対称行列	44		
					【英字】
		Articulated Body Algorithm (ABA)	159		
		Articulated Body Inertia (ABI)	158		
		operational space	36		
		Operational Space Control (OSC)	187		
		Operational Space Formulation (OSF)	167		
					【数字】
		0次モーメント	107		
		1次モーメント	107		
		2次計画問題	150		
		2次形式	253		
		2自由度制御	174		

— 著者略歴 —

山本 江 (やまもと こう)

2004年 東京大学工学部機械情報工学科卒業
2006年 東京大学大学院情報理工学系研究科
修士課程修了 (知能機械情報学専攻)
2009年 東京大学大学院情報理工学系研究科
博士課程修了 (知能機械情報学専攻)
博士 (情報理工学)
東京工業大学産学官連携研究員
2012年 名古屋大学助教
スタンフォード大学客員助教
2014年 東京大学助教
2016年 東京大学特任講師
東京大学准教授
2024年
～25年 スタンフォード大学客員准教授
2026年 筑波大学教授
現在に至る

鮎澤 光 (あゆさわ こう)

2006年 東京大学工学部機械情報工学科卒業
2008年 東京大学大学院情報理工学系研究科
修士課程修了 (知能機械情報学専攻)
2010年 日本学術振興会特別研究員 (DC2)
2011年 東京大学大学院情報理工学系研究科
博士課程修了 (知能機械情報学専攻)
博士 (情報理工学)
東京大学大学院特任研究員
2013年 東京大学大学院特任助教
2014年 産業技術総合研究所研究員
2018年 産業技術総合研究所主任研究員
2019年 東京農工大学大学院客員准教授
2023年 産業技術総合研究所上級主任研究員
現在に至る
2024年 東京理科大学大学院客員准教授
東京大学大学院特定客員准教授

石垣 泰暉 (いしがき たいき)

2019年 横浜国立大学理工学部機械工学・
材料系学科卒業
2021年 東京大学大学院情報理工学系研究科
修士課程修了 (知能機械情報学専攻)
2024年 東京大学大学院情報理工学系研究科
博士課程修了 (知能機械情報学専攻)
博士 (情報理工学)
東京大学大学院特任研究員
産業技術総合研究所協力研究員
2025年 東京理科大学助教
現在に至る

ロボット運動計算論

Theory of Robot Motion Computation

© Ko Yamamoto, Ko Ayusawa, Taiki Ishigaki 2026

2026年5月18日 初版第1刷発行



検印省略

著者 山本 江
鮎澤 光
石垣 泰 暉
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来 真也
印刷所 三美印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10
発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan

振替 00140-8-14844 ・ 電話 (03) 3941-3131(代)
ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04723-3 C3053 Printed in Japan

(田中)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。