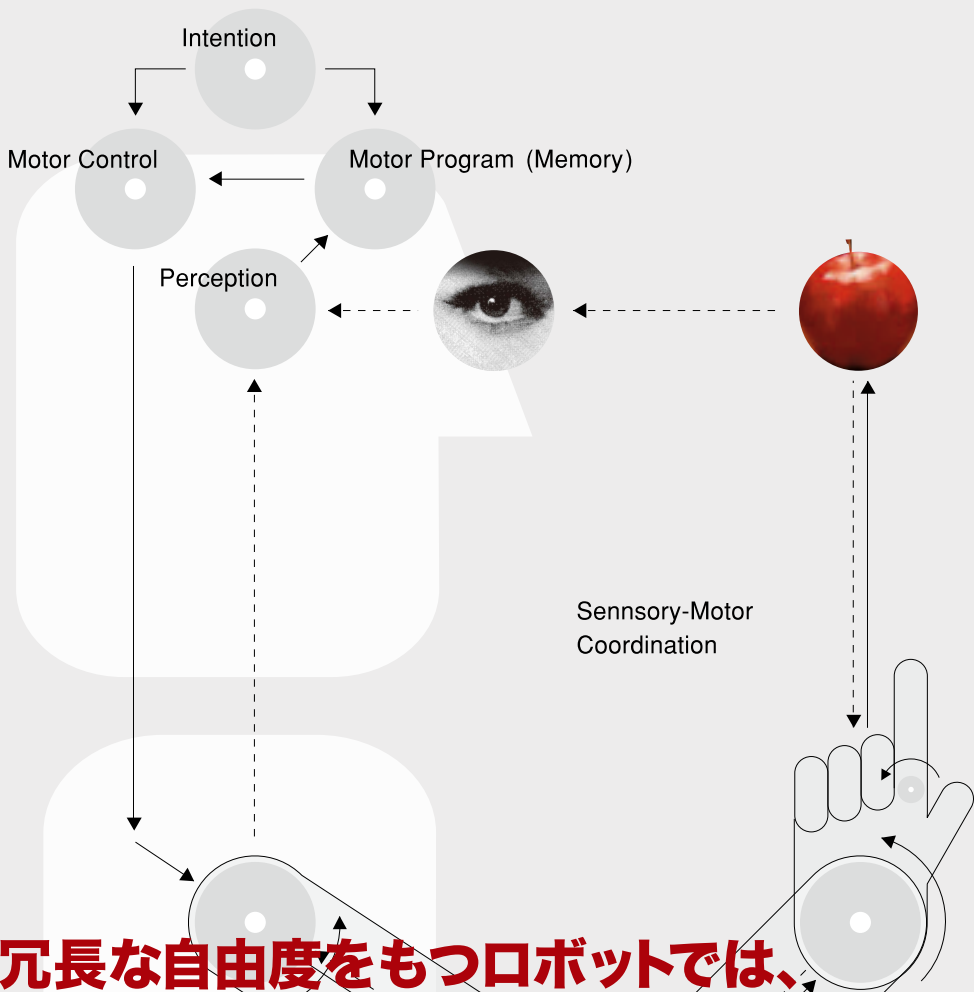


“巧みさ”とロボットの力学

有本卓、関本昌紘 著



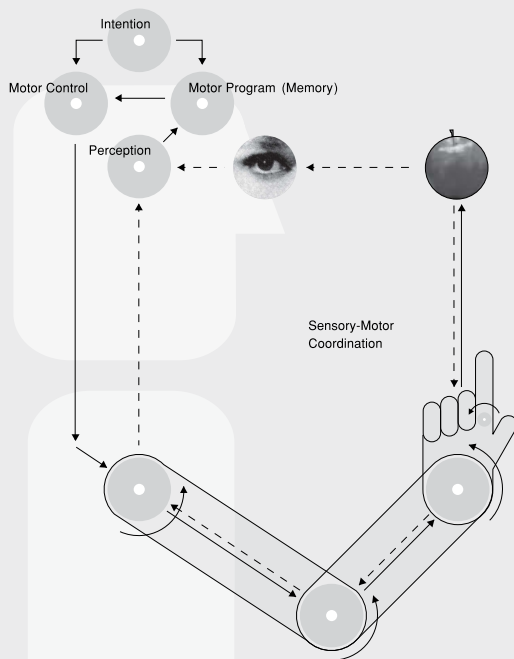
冗長な自由度をもつロボットでは、逆運動学の不良設定性が問題となり、これをいかに解決するかがロボットの“巧みさ”を実現する鍵となる。

本書ではロボットのもつ多自由度が生き、不良設定性が解消される数理科学的な道筋を示し、“巧みさ”の源泉を探る。



“巧みさ”とロボットの力学

有本卓, 関本昌紘 著



■本書は『“巧みさ”とロボットの力学』（2008年5月、株式会社毎日コミュニケーションズ、現株式会社マイナビ出版）を元にした復刊（プレミアムブックス版）です。

■本文の内容は上記書籍から変更されておりませんので、ご了承ください。

■本書の内容によって生じる直接的または間接的被害について、著者ならびに弊社では一切の責任を負いかねます。

■本書中の社名、製品・サービス名などは、一般に各社の商標、または登録商標です。本文中に（C）、（R）、TMは表示していません。

まえがき

Preface

ロボットの腕や手を造っても、日常生活で使えるようにするのは至難である。それは、我々の四肢が、赤ちゃんから幼児、少年少女を経て大人に成長する間に、日常生活の中で様々な動作を学び取ったことを知ると、うなづける。腕や手が学び取った“巧みさ”は、計算可能な形式でロボットの脳に相当するコンピュータに明示できないからである。確かに、日常生活の中で手の使い方は驚くほど多種多様である。それらに共通してあるはずの巧みさとは、一体、何なのだろうか、という疑問が起こる。筆者は21世紀が始まる頃、ロシアのベルンシュタインが半世紀も前に提唱した身体運動の科学について知り、“巧みさ”と“運動の協応”に関する深い洞察があることを知った。しかし、その議論は、あくまでも心理学と運動生理学の言説によって展開されており、ロボティクスの立場に立つと、本質的な限界が見えてくる。何故なら、ロボティクスでは、巧みさや協応をロボットアームやロボットハンドを通じて具現化しなければならないからである。ロボットの中樞神経系はコンピュータが受けもつので、究極的には、巧みさや協応を具現する計算可能な制御アルゴリズムまで明示しなければならない。

ロボットのアームやハンドは、我々の腕や手に似せると、多関節系で構成され、作業目標に比べると多自由度系とみなせることが多くなる。したがって、ロボット制御には、ダイナミクスの非線形性や関節間の干渉性などの上に、冗長自由度をもつことまで考慮することが必要であった。ロボット制御の歴史は1970年前後に始まり、既に40年の歴史をもつようになったが、実は、冗長自由度系を正面から取り扱うようになったのは21世紀に入ってからであり、ま

だ、体系化は進んでいない。本書では、ロボットのアームについては冗長自由度をもつ多関節到達運動と、ロボットハンドについては、多関節をもつロボット指一対による精密把持を取り扱う。両方に共通して、巧みさと協応は、それぞれの作業様式に共生する力学的原理によって制御アルゴリズムが組み込まれると、巧みさと運動の協応が自然に機能し得ることを明示的に議論する。そのためには、多関節剛体系の運動学や動力学の基礎を初歩から講述したが、十分には意をつくせなかったことを恐れている。読者諸賢からの批判を待ちたい。

本書では、視覚や触覚、力覚を含めた感覚の協応はほとんど議論しなかった。また、我々の身体運動では重要な役割を果たす筋と腱のダイナミクスについても触れなかった。ともに今後の研究の発展を待望する。

最後に、“手”が人類の“証”であったことを古代の人々は意識していたことを書きとめておこう。からくり人形の起源は中国古代の王朝で造られた指南車にある。車上の仙人をモデルにして彫られた木像の手指は常に南に向くよう制御された。これが制御装置の起源である。

手の研究者には千手観音は驚異である。中でも、葛井寺（大阪府藤井寺市）の十一面千手千眼観世音菩薩（坐像）は最古の千手観音の一つである。小さな脇手は1001本、間から長い脇手が40本伸び、杖、弓など人々を救い導く道具をもつ。驚くことに、それぞれ手1本ごとに眼が彫刻されている。眼と手が一体となり、あるいは道具をつけ、“千の手”となり、人々を救い、守る。観音菩薩の手が眼をもち、悟りの道へと歩む人々を見守る。

有本 卓
(著者を代表して)

2008年4月

目次

Contents

1 手や腕の巧みさの源泉（脳科学，発達心理学，ロボティクスの観点）

1.1	身体運動の巧みさは遊びから育つ	002
1.2	手や腕に似せたロボットに巧みさは備わるか	003
1.3	冗長関節系と自由度問題	004
1.4	冗長関節系としての手指	011
1.5	日常物理学の困難	016
1.6	運動と行動の動機づけ	020

2 冗長自由度に関するベルンシュタイン問題

2.1	ベルンシュタイン問題（冗長自由度問題）	026
2.2	冗長自由度と協応	028
2.3	冗長関節系のヤコビ行列	032
2.4	運動学に基づく最適性	037
2.5	作業空間におけるジャーク最小規範	038
2.6	ベクトルの内積と外積（剛体の運動学）	044

3 運動の法則と解析力学

3.1	ニュートンの運動の法則	052
3.2	仕事とポテンシャルエネルギー	055
3.3	1自由度系の運動	059
3.4	剛体の回転運動と慣性モーメント	063
3.5	変分原理とエネルギー保存則	065
3.6	平面ロボットの運動方程式	070

4 リヤプノフの安定論と受動性解析

4.1	線形システムの安定性	078
4.2	可制御性と可観測性, 可安定性と可検出性	083
4.3	リヤプノフ関数と受動性	091
4.4	倒立振子の安定化制御	095
4.5	冗長自由度系として見た倒立振子	099
4.6	PD フィードバックに基づくロボット制御	105
4.7	作業空間における PD 制御	108

5 冗長多関節リーチング (仮想バネ・ダンパー仮説)

5.1	これまでのリーチング研究	114
5.2	仮想バネ仮説	121
5.3	冗長多関節運動の難しさ	129

5.4	冗長多関節運動とリヤプノフの安定論	132
5.5	多様体上の安定論	134
5.6	冗長多関節リーチングの漸近安定性	137
5.7	仮想バネ・ダンパー仮説	140
5.8	熟練動作の再現	144

6 仮想バネ・ダンパー仮説とロボット制御

6.1	産業用ロボットアームによるリーチング実験	150
6.2	摩擦軽減時のリーチングと仮想ダンパー効果	158
6.3	自由度を残した制御法の利点	161

7 手の巧みさと知能の高さ

7.1	ころがり接触による物体操作	165
7.2	最小作用の法則と巧みさ制御	172
7.3	ピンチングの数学的モデル	176
7.4	重力下における安定なピンチング	185
7.5	ピンチングの巧みさ：Blind Grasping	191
7.6	巧みさの源：力学的原理	199

8 学習による巧みさの獲得

8.1	線形システムの繰返し学習	203
-----	--------------	-----

8.2	平面 2 関節アームによる手先動作の繰返し学習	210
8.3	冗長多関節アームによる手先動作の繰返し学習	213

9 巧みさと脳

9.1	発達心理学の観点：到達運動の創発	221
9.2	身体運動の構築モデルをめぐる論争	225
9.3	感覚の協応と学習	232

A リヤプノフの安定解析

B LaSalle の不変定理，および一様連続関数

C 冗長多関節リーチングの安定性の証明

D 倒立平衡多様体への指数関数収束の証明

参考文献	255
------	-----

索引	263
----	-----

我々の日常的に行う手、腕、脚の四肢動作は脳機能としての“知”の反映である。

手や腕の巧みさの源泉

(脳科学，発達心理学，ロボティクスの観点)

人間の手にそっくり似せた義手やロボットハンドは多くの大学や研究所で作られている。腕の形をしたロボットアームが工場の特定制業に導入されて早や30年余りたつ。しかし、一台のロボットハンド、あるいはロボットアームが種々雑多に変動する対象や環境に応じて巧みに作業する様は未だ見えてこない。日常生活において、たとえば、料理するとき、どれほど手指と腕を協調させて使うか、観察してみるといい。食事をするとき、箸かナイフとフォークを食べ物の態様に依じて巧みに操作しているはずである。身体が不自由な老人介護の現場では、食事介護が最も人手と時間を要するが、ロボット研究開発の現状を見ると、このような厳しい現場でロボットハンドが人手に取って変わるの、はるかに遠い未来のように思える。

本書では、多関節をもち、自由度が3から20位に及ぶロボットアームやロボットハンドを多種多様な環境下で変動し得る作業に使える能力を“versatility”（多機能性）と呼ぼう。また、指定した作業を器用にかつ巧みに遂行し得る能力を“dexterity”（巧みさ）と呼ぶことにする。我々の手にはこのような能力が備わるが、それは何処から来るか、あるいは、どのようにしてその能力を獲得するか、議論しておきたい。これらの能力がロボットアームやロボットハンドに備わるにはどうしたら良いか、考えるための動機づけを行うことで本書の序章とする。

1.1 身体運動の巧みさは遊びから育つ

遊ばない子供に異変が起きている。2007年の暮れ、12月17日のクローズアップ現代（NHK、p.m. 7:30～8:00）の放映は、当該の子供をもつ親ならずとも、ショッキングな内容であった。幼稚園から小学生低学年の子供たちが外で遊ぶ時間が、この20年間で、半分に減った。子供が犠牲になる兇悪犯罪が起こるたびに、子供を外に出さないようにするブレーキが親の心理に働く。その上、一人で遊べるおもちゃや機器が増え、家の中でゲームに熱中する時間が増えてきた。幼稚園や小学校の校庭が、放課後や休日、自由に開放されることは無くなった。そして、何が起こったか。子供の数は確実に減っているにもかかわらず、顔のケガはこの30年間で倍増した。以前では考えられなかった子供のケガが増えたのである。転んだとき、かばい手をしないので、顔から転ぶ。腕や脚の普通には考えられない骨折の多さが報告されている。その日NHKで放映された状況を見ると、小学生になっても、真直ぐに走れない、立ち幅跳びすると、膝から先に着地する。瞬間的にバランスを取る能力が養われていないことが見えてくる。

既に親達は気づいていて、東京都や福岡市の一部の子供は、体育の家庭教師から外遊び（木登りなど）や基本運動（起き上がる、這う、ころぶ、走る、跳ぶ、投げる、打つ等々、30から50種類に及ぶ）を教わらなければならなくなった。

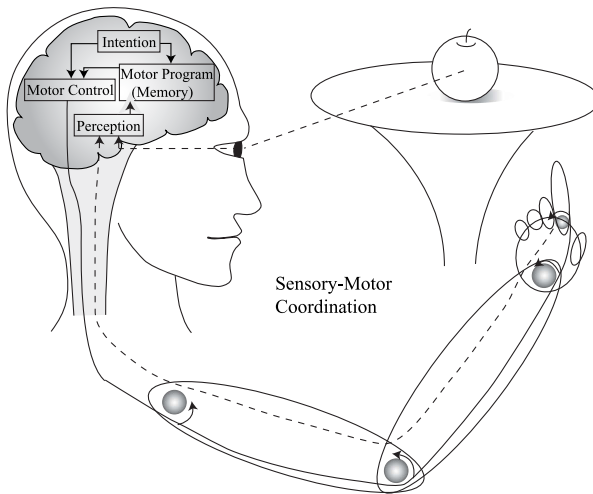
昔は（と言っても、ほんの20年から30年前）、日常生活に必要なバランスの良い様々な身体運動の能力は、小学校の低学年が明けるまでに、自然に身につけていたのである。子供の遊びは、日本では伝統的に、手足の巧みさを養うものが多かった。特に、女の子供達は、“あや取り”、“おはじき”、“お手玉”、“折り紙”等、腕と手の動作の「器用さ」と「巧みさ」を遊びで培うことができたのである。これらの遊びをもっと深く分析すれば、遊びに上達しつつ、頭脳を働かせ、思考する能力が自然に養われることに気がつく。身体運動の基本の基本は、母親の胎内にあるときから見られるが、その様々な能力の大半が誕生した瞬間から小学3年生頃までに育まれる。これらの様々な身のこなしや手の発達

は、日常生活を人並みに送るために必要不可欠である。小学校低学年までに獲得したこの多様な身体運動の能力は、その後の日常生活の中で、無意識下においてさえも発揮されているのである。

1.2 手や腕に似せたロボットに巧みさは備わるか——

ロボットの腕（アーム）や手（ハンド）に、あるいはヒューマノイドに、子供達が獲得し得る様々な身体運動能力を装備できるだろうか。ここでは、身体の一部である手と腕の巧みさに話を限るが、それでもロボットアームやハンドに多様な仕事を自由自在にやらせることは至難である。何故なら、多様な運動の個々が何故に巧みなのか、それぞれの巧みさが言葉や数式でどのように表現できるか、判っていないからである。我々人間では、手や腕を動かすときの司令が、運動神経信号（ニューロモータ信号）として、脳から筋肉細胞に運ばれ、筋が収縮し、沢山の関節が回転して運動が生成する（**図 1.1**）。ロボットの場

■ 図 1.1 感覚と運動の協応

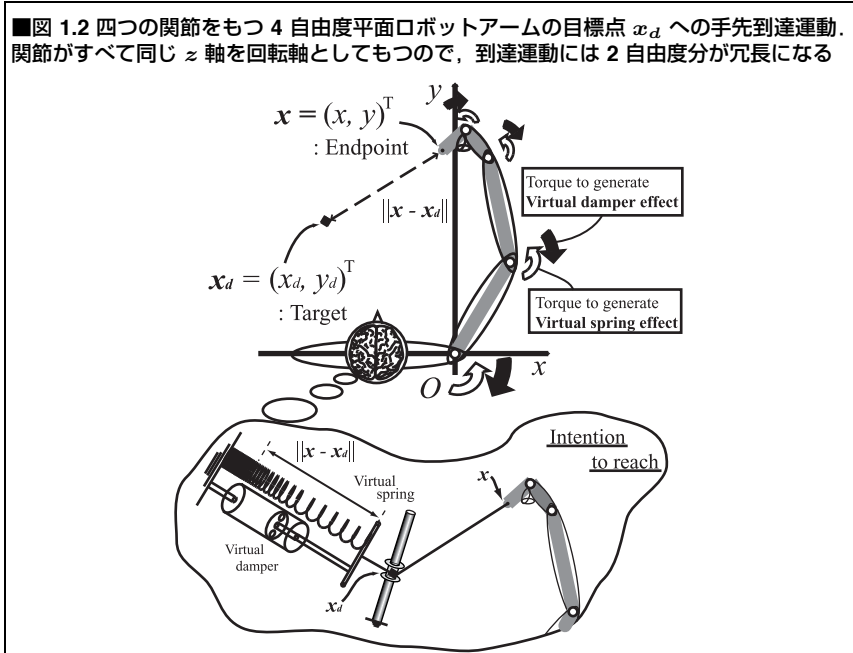


合、各関節を動かすモータへの司令は、コンピュータが生成する。制御司令をどのようにして出すか、それは結局は制御プログラムの作り方になるが、その基本となる制御アルゴリズムを設計し、製作するためには、運動の巧みさがコンピュータ言語によって一連の手続き（プログラム、あるいはアルゴリズム（算法））として表現されるか、あるいは数式表現される必要がある。実は、幼稚園児や小学校低学年の児童の遊びについてさえ、それぞれの身のこなしや手の運動の巧みさを演出するはずの数式表現は、ほとんど、秘密のヴェールに隠されて、思いもつかないのが現状である。現在、格段に進んだと思えるロボティクス研究においても、赤ちゃんがつかまり立ちし、2本足でよちよち歩き始めた2足歩行の研究が未だ最前線である。腕の運動については、生後10週間前後の赤ちゃんが初めて試みる多関節到達運動（reaching といい、目の前にある食べ物や、玩具に手を伸ばして取ろうとする腕の運動）についてさえ、判っていないことが数多くある。もっと単純に、人差指を突き出して目標物を指差し始めるのは生後数ヶ月の赤ちゃんには見られるが、チンパンジーには、相当に訓練させないとできない。人間の赤ちゃんでは、親指と人差指で小さい物体をつまむピンチング動作は、1歳の誕生日前後には既に見られる。これらの、単純に見える動作は、ロボットハンドを作りさえすれば、簡単に実現できるように思えるが、対象物体を様々に変えたときに、どうなるか、定かではない。ピンチング動作についてさえ、多様な物体に対処できる能力が赤ちゃんにでも備わるが、この多様性（versatility）と巧みさ（dexterity）についてさえも、未だ計算モデル（computational modeling）で表しきれていない。

1.3 冗長関節系と自由度問題

多関節到達運動やピンチングをロボットの腕やハンドで実現させるのが何故困難になるか。その主たる理由として、目標運動に対して関与する関節の自由度（Degrees-of-Freedom）の合計が多くなることが挙げられる。関節自由度については、正確な定義と詳細な議論は第3章で与えるが、人間の腕の場合、肩

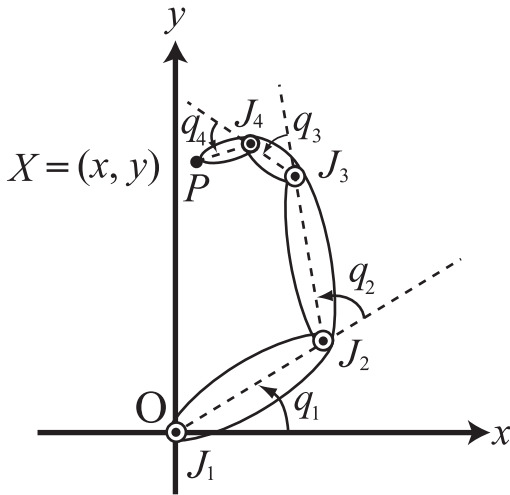
■図 1.2 四つの関節をもつ 4 自由度平面ロボットアームの目標点 x_d への手先到達運動. 関節がすべて同じ z 軸を回転軸としてもつので, 到達運動には 2 自由度分が冗長になる



関節は三つの回転軸が想定できるので 3 自由度, 肘は 1 自由度, 手首は 3 自由度あり, 手指を動かさないとしても, 腕全体は 7 自由度をもつ. つまり, 手指の関節を動かさないとしても, 腕の姿勢を表すには七個の関節角変数が必要になる. ところが, 目の前のテーブルに置かれ, 静止した物体の位置 (物体の代表的な点とする) は 3 次元空間中の一点の座標 (x, y, z) で表せば十分である (図 1.1 参照). したがって, 目標物体に手先が触れるように腕を伸ばすとき, 手先が物体に触れたときの腕の姿勢は様々に取り得る (姿勢の取り方は無限にある). 従って, 腕を動かし, 手先を点 (x, y, z) に到達させる運動は様々にあり得て, どのように各関節を回転させれば良いか, 一意に決めようがないことが判る.

もっと厳密に, 2 次元の平面内で運動する四つの関節をもつ 4 自由度平面ロボットアームを取り上げてみよう (図 1.2 参照). 四つの関節のそれぞれの回転

■図 1.3 4 自由度平面ロボットアーム



軸はすべて xy 平面（ここでは紙面を xy 平面に取る）に直行する z 方向にあるとし、上腕に相当する剛体リンクの端は肩関節に相当する関節 J_1 を通る z 軸まわりで自由回転できるとする。前腕に相当するリンク 2 は関節 J_2 を介して上腕に連結し、掌に相当するリンク 3 は J_3 を介して下腕に連結し、人差指に相当するリンク 4 は手根関節に相当する関節 J_4 を介して掌に連結しているとする。関節 J_1 まわりの角 q_1 は x 軸の正方向からリンク 1 の中心軸（ J_1 と J_2 を結ぶ直線）までの回転角（“radian” を単位とする）を表すとし、その正負の符号は、その回転が xy 平面の原点を左に見るとき、正にとる。その他の回転角 q_2, q_3, q_4 の取り方は図 1.3 に図示した通りとするが、符号は q_1 と同様に、原点 O を左に見るように回転するとき、正にとる。図 1.3 の場合、 q_1, q_2, q_3, q_4 はいずれも正であり、その姿勢はベクトル $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3, q_4)^T$ で表されることになる。なお、本書では、ベクトルは原則として太文字で表し、縦ベクトル表示とするので、横ベクトル表示 (q_1, q_2, q_3, q_4) の肩に転置記号 “T” をつけた記法 $(q_1, q_2, q_3, q_4)^T$ は縦ベクトルを表すことになる。本書では $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_4)^T$ を

関節ベクトル (joint vector) と呼び、これらを 4 次元ユークリッド空間 \mathcal{R}^4 の点で表すようにしたとき、その一点が四関節ロボットアームの一つの姿勢を配置 (あるいは配位) することになるので、この \mathcal{R}^4 を配位空間 (Configuration space) と呼ぶ。ただし、ロボットアームの一つの姿勢は配位空間の一つの点 $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3, q_4)^T$ を表すだけでなく、任意の座標 q_i を $q_i + 2\pi$ だけずらした点も、同じアーム姿勢を取ることに注意しておかねばならない。ただし、このような角度の 2π だけのずらしによる多義性は、各角度 q_i を $-\pi$ から π までの主値を取る (すなわち、 $q_i \in (-\pi, \pi]$, $i = 1, \dots, 4$, とする) ことと暗黙裡に定めておけば、アーム姿勢の一つが配位空間の一点に一意に対応することになる。

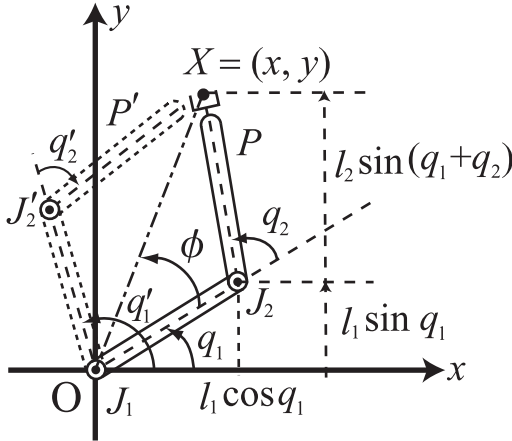
他方、アーム姿勢 $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_4)^T$ が与えられると、手先の位置は自動的に定まり、2次元空間 (xy 平面) \mathcal{R}^2 の点 $X = (x, y)$ によって与えられる (図 1.3 参照)。このとき、手先の位置を表示するユークリッド空間 \mathcal{R}^2 のことを作業空間 (task space) と呼ぶことにしよう。後の章で述べる 3次元運動するロボットの手先の位置 X は、3次元ユークリッド空間 \mathcal{R}^3 の一点 $X = (x, y, z)$ によって表される。図 1.3 の 2次元運動するロボットの手先位置 $X = (x, y)$ は、そのときの姿勢ベクトル $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_4)^T$ の各成分によって、次のように表される。

$$\begin{cases} x = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ \quad + l_4 \cos(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) \\ y = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\ \quad + l_4 \sin(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) \end{cases} \quad (1.1)$$

ここに、 l_i は関節中心 J_i から次の関節中心 J_{i+1} に至る距離を表すが、ここでは、これら l_i をリンク長 (link length) と呼ぶことにする。式 (1.1) の右辺は姿勢角 q_i ($i = 1, \dots, 4$) の三角関数となっているが、これらの関数を一般的に

$$\begin{cases} x = x(q_1, \dots, q_4) \\ y = y(q_1, \dots, q_4) \end{cases} \quad (1.2)$$

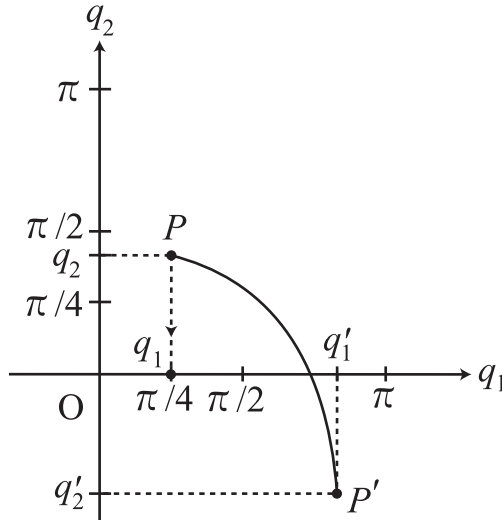
■図 1.4 2 自由度平面ロボットアームでは同じ手先位置を取る姿勢が二つあり得る



と表示し、このようにして一意に定まる関数表現を順運動学 (forward kinematics) と呼ぶ。逆に、作業空間上に一点 $X = (x, y)$ を与えたとき、 X を手先位置とする姿勢ベクトル \mathbf{q} は配位空間 \mathcal{R}^d 上に一意に定まるだろうか。一般に、作業空間と配位空間の次元が同じであれば、普通には作業空間から配位空間への逆変数 (逆写像ともいう) が存在し、そのような逆変数を表す逆関節表現を逆運動学 (inverse kinematics) と呼ぶ。図 1.3 の例では、配位空間は 4 次元であり、手先作業空間は 2 次元なので、逆写像は、無限個の可能性があり得て、一意には定まらない。このことを逆運動学の不良設定性 (ill-posedness) と呼ぶ。なお、一般に手先の作業変数の数 (次元数) に比して関節変数の数 (一般には自由度に等しい) が多いとき、そのロボットアームは冗長であるという。関節冗長ロボットアームでは、上で述べたように、一般には、逆運動学が一意に定まらず、不良設定となる。

手先作業空間と配位空間が同じ次元をもつとき、普通には逆運動学が定まることを、最も簡単な 2 自由度平面ロボットアームを例にして、見ておこう。図 1.4 で示すように、二つの関節をもつアームが右側の姿勢 (ポーズ) P をとるとき、

■図 1.5.2 自由度平面ロボットアームの姿勢を配位空間の点で対応させる



q_1 と q_2 はともに区間 $[0, \pi/2]$ に値をもち、手先位置 $X = (x, y)$ は次のように表される。

$$\begin{cases} x = x(\mathbf{q}) = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ y = y(\mathbf{q}) = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) \end{cases} \quad (1.3)$$

ここに、 l_1 は J_1 と J_2 の間の距離、 l_2 は J_2 と手先 X の距離を表す。この姿勢 P では $\cos(q_1 + q_2)$ は負になっている。逆に、 (x, y) が与えられたとき、 $\mathbf{q} = (q_1, q_2)^T$ はどのように定まるか。この問題を考える前に、同じ手先位置 $X = (x, y)$ をもつが、もう一つ別の姿勢 P' があり得ることは容易に判る。この別の姿勢 P' の姿勢ベクトルを $\mathbf{q} = (q'_1, q'_2)^T$ で表すと、 P と P' は配位空間上では異なる点となって、図 1.5 のように表されることが判る。さらに、一つの手先位置 $X = (x, y)$ に対して、この二つの姿勢 P, P' 以外には考えられないことも、直観的に判明するだろう。主題に帰って、逆運動学を求めるために、式 (1.3) の x, y の右辺をそれぞれ 2 乗して足し合わせると、

$$\begin{aligned}
x^2 + y^2 &= \{l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2)\}^2 + \{l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2)\}^2 \\
&= l_1^2 \{(\cos q_1)^2 + (\sin q_1)^2\} + l_2^2 \left[\{\cos(q_1 + q_2)\}^2 + \{\sin(q_1 + q_2)\}^2 \right] \\
&\quad + 2l_1 l_2 \{\cos q_1 \cos(q_1 + q_2) + \sin q_1 \sin(q_1 + q_2)\} \\
&= l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos q_2
\end{aligned} \tag{1.4}$$

となる。この式を変形すると

$$\cos q_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \tag{1.5}$$

となる。ここで、

$$r = r(x, y) = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \tag{1.6}$$

と置けば、 q_2 は x, y の関数

$$q_2 = q_2(x, y) = \pm \cos^{-1}\{r(x, y)\} \tag{1.7}$$

で表されることが判った。ここに、右辺の先頭に付けた記号“±”は、符号“+”か“−”のどちらかを取り得ることを示している。図 1.5 の場合、姿勢 P では q_2 の符号は“+”を取り、 P' では“−”を取らねばならない。

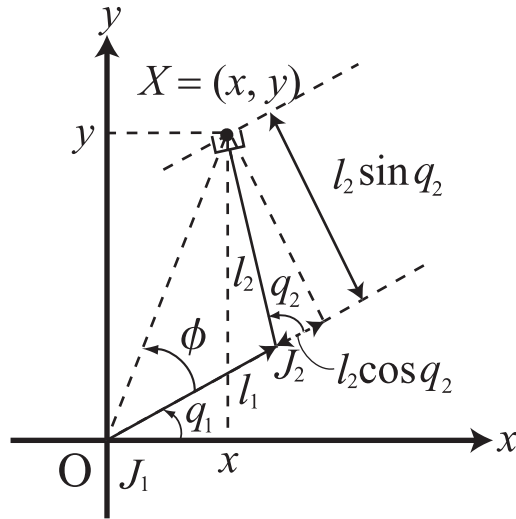
次に、与えられた (x, y) と上で求めた q_2 より、第一関節の関節角 q_1 を求めておこう。図 1.4 に示す姿勢 P を図 1.6 のように詳述し、直線 $\overline{OJ_2}$ と \overline{OX} の成す角を ϕ で表そう。この図から明らかに次式が成立する。

$$\begin{cases} \tan \phi = \frac{l_2 \sin q_2}{l_1 + l_2 \cos q_2} \\ \sin(q_1 + \phi) = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \tag{1.8}$$

こうして、 q_1 は

$$q_1 = \sin^{-1} \left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - \phi \tag{1.9}$$

■図 1.6.2 自由度平面ロボットアームの手先座標と関節座標の関係



と与えられる．ここに， ϕ は式(1.5)で求めた q_2 を用いて，

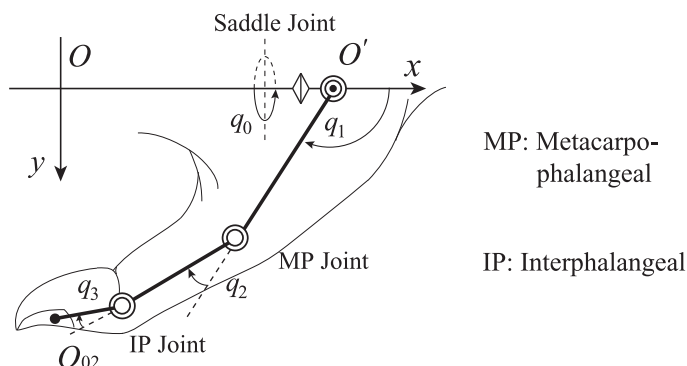
$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{l_2 \sin q_2}{l_1 + l_2 \cos q_2} \right) \quad (1.10)$$

と求められる． q_2 が正値をとるとき ϕ は正値を取り，関節ベクトル $\mathbf{q} = (q_1, q_2)^T$ は図1.4のポーズ P を表すことになる．式(1.7)で q_2 の符号を負にとるとき， ϕ は負になり，式(1.9)で求めた q_1 と負値をもつ q_2 から成るベクトル $\mathbf{q} = (q_1, q_2)^T$ は図1.4のポーズ P' を表すことになる．

1.4 冗長関節系としての手指

人間の手は脳の出張所と言われる．片手には五本の指があり，親指は根元の関節が鞍(saddle 様式)関節になっているので，2自由度をもち，MP関節とDIP関節を含めて，合計で4自由度をもつ(図1.7参照)．人間の親指は，人類

■図 1.7 親指の関節. 手根関節は鞍関節であり, 自由度は 2 である. 関節全体は 4 自由度となる



に最も近いとされるチンパンジーに比べて, 大きく, 太く, 指先から鞍関節までの長さは人差指のそれにほぼ等しい. 英語の “thumb” は不器用であることを意味するが, それは見かけから類推した故にすぎない. 実際には使い込むと驚くほど器用に動作し得る. 事実, 老年になって初めて携帯電話をもった人でも, いつのまにか片手にもって親指で器用にボタン操作している. しかも, 親指は強く, マッサージや指圧療法では中心的な役割を果たす (図 1.8).

人類進化の系統図をたどると, 霊長類の中で人類はチンパンジーと約 700 万年前に枝分かれしたに過ぎない. 遺伝子の DNA 連鎖で比べれば, 人間とチンパンジーでは 98~99% も一致し, 猿 (日本猿等) と比べれば約 92% が一致する. しかし, 手の形や機能については, 著しい相違が見られる. チンパンジーの手では, 親指が他の四本の指に比べて極端に短く, 小さい. チンパンジーは木片や石等を道具として使うが, 親指はほとんど役立っていない. 親指を除く四本の指は, 木の枝から枝へと伝わるブラキエーション運動に熟練する必要があったために, よく発達している. 人間では親指が大きくなったばかりでなく, 根元の鞍関節が進化して, 親指は人差指や中指と向き合えるようになり (これを拇指対向性 (fingers-thumb opposability) と呼ぶ), 様々な物体を拇指を中心にしてつかみ, 操作できるようになった.

■ 図 1.8 東京都文京区の伝通院にある指塚。日本指圧協会によって寄贈された、とある



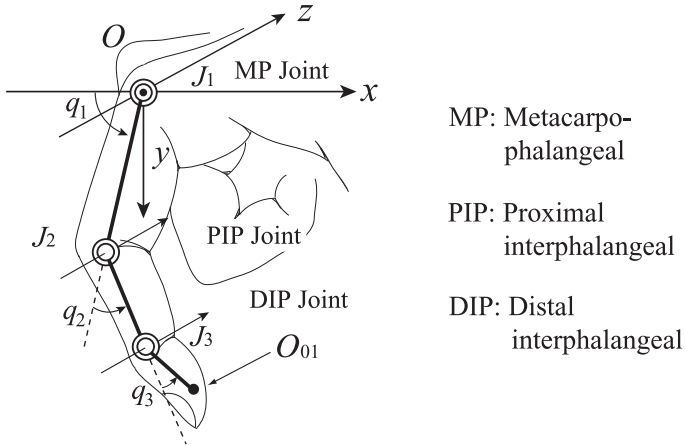
人類が他の類人猿と異なる証（あかし）として、次の三つがよく列挙される。1) 二足歩行 (bipedal walking), 2) 道具造り (tool-making), 3) 音声言語の使用 (speech communication). 霊長類学者であり、人類の先祖にあたるアウstralピテクス（猿人）やピテカントロプス（原人）の化石研究で業績のあった J. Napier は、その名著 “Hands” [1-1] の中で、親指の発達と拇指対向性が人間の証であることを詳しく論証している。J. Napier の本には、万有引力を発見したニュートンが “親指こそが神様からの贈り物である” (Isaac Newton once remarked that, in the absence of any other proof, the thumb alone would convince him of God’s existence.) と述べていることを指摘している。非常に興味あることに、我々の足についても、親指は異常に発達している。その骨は他の足指と比べてよく発達し、お地藏さんの形に似て分厚く、頑丈そうに見えるので、地藏指と呼ぶならわしさえ残っている。これは明らかに二足歩行に原因しているが、手の親指の発達と拇指対向性はどのようにして進化したのだろうか。

■図 1.9 箱根の彫刻の森美術館で見られる L. クリスターの手（彫刻の森美術館所蔵）



人類の人差指もよく発達している。むしろ他の三本の指に比べて形が異なるというよりも、筋肉や腱の発達と関節の働きが異なり、特別である。人差指の関節を図 1.10 に示すが、根元の MP 関節は z 軸まわりに回転するばかりでなく、実は x 軸まわりに少しではあるが回転し得る。この回転角は大きくは取れないが、人差指を強い力で中指方向に傾けて、くっつけたり、反対に中指と人差指を強く離間させる。そのような x 軸まわりの回転モーメントを与える腱が実際に存在し、手が重い物を持ち、操作するとき大いに威力を発揮している。もう一つの人差指の特長は、その関節それぞれの回転角制御の独立性が他の指に比べて高いことである。実際、親指と他の三本の指は曲げたまま、自然に包み込みつつ、人差指だけを真直ぐに伸ばして、人や目標物を指し示す。生まれたばかりの赤ちゃんではこれではできないが、歩き始める 1 歳の誕生日前には人差指で物を指し示し始めている。人差指の独立性は、赤ちゃんが指しゃぶりをするとき、人差指が口に入れ易いためだけではなく、 x 軸まわりの回転モーメントを与える腱の発達のおかげかもしれない。もう一つは、人差指の DIP 関節と PIP 関節は連動し易いが、成長するにつれて、あるいは訓練することにより、

■図 1.10 人差指の関節



MP: Metacarpophalangeal

PIP: Proximal interphalangeal

DIP: Distal interphalangeal

独立に回転角制御することができる。しかし、中指や薬指、小指の DIP 関節と PIP 関節は、皆、連動してしまい、関節ごとに独立に制御するのは、特別に訓練しない限り不可能である。なお、チンパンジーには、人差指を使って指し示す仕草は自然には見られず、人が教え、特別に訓練させない限り、人差指を単独に使うことはないようである。

親指と人差指で小さい物体をはさみ込み、安定的に把持させるピンチング動作は人間に特徴的である。母親に抱っこされた満 1 歳を迎えた頃の赤ちゃんが、乗物の切符を親指と人差指にしっかりとらしている姿はよく見かける。このようなピンチング動作はチンパンジーには見られない。面白いことに、拇指対向性は日本猿の方が高く、親指はよく発達し、使い込むが、それは日本猿の集団には毛繕いによるコミュニケーションが非常に進んでいることと関係している。人は、しかし、手指と腕の様々な動作を組み合わせることで手話を構成し、音声言語と同じようにコミュニケーションすることもできる。楽器演奏においても、手の動きがどれだけ多様に音楽表現を行っているか。人間の手の素晴らしさは神様からの贈り物としか考えられない。

手は五感（視覚，聴覚，触覚と力覚，味覚，嗅覚）に加えて，第六の感覚器となることも指摘されている．手先は，背中の一部を除いて，身体のどの部分にも触れ得る．腕と一体となって狭い所にも手先をもぐり込ませることができる．闇夜でも手探りして，身の状況を探り，知覚することができる．指先の触感覚は驚くほど鋭敏に，研ぎ澄ませることもできる．視覚障害者にとっては，手は，真に総合的感覚器としての役割を演じているに違いない．

人差指と親指は，人間が外界を感覚して脳に取り込む最初の道具であろう．赤ちゃんは生まれる前，母親の胎内で指しゃぶりしていることはよく知られている．指を口に運び，口唇が触れ，吸い込む動作は，運動と感覚が神経ネットワークでつながり得ることを示唆する．声帯および声道と口唇まわりの運動による音声生成も非常に高い自由度をもつ運動生成であることが知られている．人が成長するに従って，声を自由自在に操ることができるようになるのは，どのような自然の摂理が働いているからなのだろう．

1.5 日常物理学の困難

ここで，少し長くなるが，筆者の一人が2002年に日本ロボット学会誌に寄稿した解説記事 [1-2] の三つの文節を引用する．

コンピュータが何でもできると錯覚

「この20年間，ロボティクスに関する様々な国際会議や国内シンポジウムに参加し，先達の講演を聞いたが，その中で最も印象に残っている言葉が三つある．

1) 1983年に開かれた第1回のISRR (Int. Symp. on Robotics Research) でM. Brady教授 (当時MIT, 現Oxford Univ.) が提案したロボティクスの定義: “Robotics is the intelligent connection of perception to action”.

2) 2000年のIEEE ICRAにおけるB. Roth教授 (Stanford Univ.) の招待

講演で，1980年代初期の頃のロボティクス研究の態様を次の一言で総括した：
“Computer does it all”.

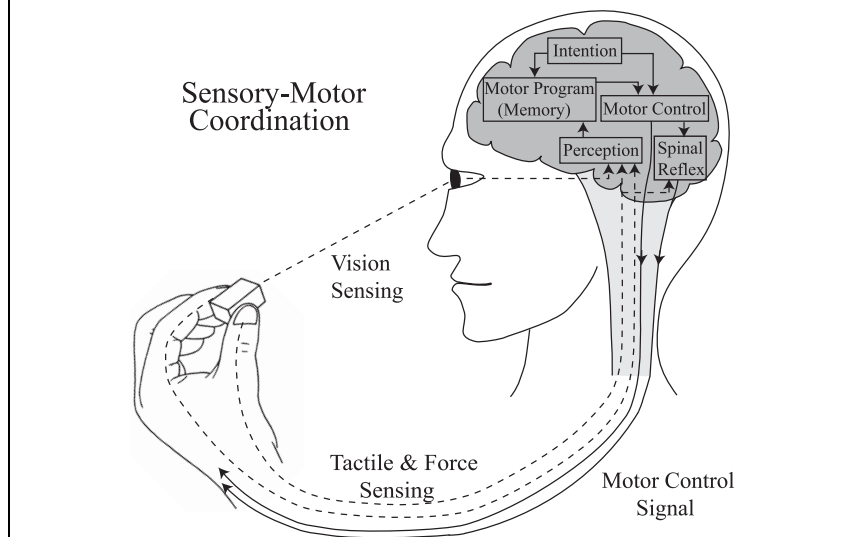
3) 1998年の日本ロボット学会学術講演会における梅谷陽二教授（本会元会長）の講演：“catering robots が実現できるのだろうか”.

Brady 教授の定義を聞いたとき，簡にして要を得ていると思いはしたが，それはむしろ AI やロボット視覚の専門家の見方になるのかと断定し，いつか忘れていた。再び思い出したのは，1990年代の後半になって，ある国際会議のパネル討論で話題になってからである。そして，2000年の Roth 教授の講演で，目から鱗が落ちた思いをしたのである。ロボットはコンピュータにやらせば何でもできるようになるのだ，と錯覚していたのではないかと。ロボットはとにかく面白いものを造る。そして，動かすのはすべて計算ずくでできると。こうして，ロボティクスの理論的研究は，ほとんどが逆運動学や逆動力学の計算論的研究に終始した。そして，ロボット視覚はむしろ独立して発展しはしたが，サーボループと直結する研究は数少なかった。後で述べるように，コンピュータの計算資源は主に“perception”のための信号処理に使うべきであると思えるにもかかわらず。」

日常物理学の困難性

「梅谷教授の講演の主題は，ロボティクスの学問体系の未熟さに関する危機感にあったと理解したが，その典型例として“catering robot”の難しさを挙げられた。人間に代替させる目的でロボットを考えるなら，人間が日常的に普通にできる能力をもたせなければならない。視覚と手の技能は其中で最たるものである。目で見つつ手作業をこなしている背景には明らかに“sensory-motor coordination”が働いている。しかし，このときの感覚から行動に直結しているはずのフィードバックループを我々は解明しただろうか（図 1.11 参照）。人間にあるはずのフィードバックループを解明するのは運動生理学の分野かもしれない。しかし，ロボットハンドにも知的な手先作業をさせたいなら，有効に

■図 1.11 感覚から行動へ直結するフィードバックループ



働くはずの種々のセンサーフィードバックを見出しておかねばならない。自由度が2~4の指を複数本用いたロボットハンドは幾多も設計され造られはしたが、物体を把持し、操作する幾何拘束下のダイナミクスのもとで、明白に記述できるフィードバック形式によって何ができるようになるか、我々は実はいまだ深い研究を試みていないように思う。ここでは、逆運動学や逆動力学はそれほど意味はない。指と物体との間に種々の幾何拘束が起こるが、物体の物理パラメータ（質量、慣性モーメント、その他）が分からなくても（したがって、ダイナミクスは計算できない）、好きなように把持し、操作できるようにするには“sensing to action”の明白かつ有効な（したがって、知的になる）“connection”を見つけるしかないのではなからうか。」



試し読みはお楽しみ
いただけましたか？

ここからはManatee
おすすめの商品を
ご紹介します。

Manatee Tech Book Zone 

**実践で使えるアイデア集！
電子工作の入門におすすめ**

電子工作



3

**【はんだ付け不要】
Raspberry Pi アイデア実験室**

Raspberry Pi の応用として、ブレッドボードを利用した電子工作を解説。LED をコントロールして光らせたり、トースターが使われたことを Twitter ボットでつぶやいたりできます。はんだ付けなどの高度な技術は不要です。

シーアンドアール研究所
坂本俊之 (著者)
208 ページ 価格：2,041 円 (PDF)

**Web 上で電子工作を
シミュレートしよう**

電子工作



4

**Autodesk Circuits で学ぶ
電子工作入門**

Web の画面上で電子回路を設計 / 試運転できる Autodesk Circuits を使い、電子工作の基本を解説。半田付けや、部品を揃える必要がありません。電子回路で使う抵抗や LED、各種センサーなどについても丁寧に説明します。

シーアンドアール研究所
浦生睦男 (著者)
208 ページ 価格：3,140 円 (PDF・EPUB)

**フライス盤の仕組みから
制御ソフトの操作法まで**

電子工作



5

**ミニフライス盤
CNC 化実践マニュアル**

個人でもフライス盤などを購入できるようになり、購入した工作機器をコンピュータ制御 (CNC) へと改造する人も出てきています。本書は CNC フライス盤の基礎的な知識、改造の実例、ソフトの紹介などをまとめました。

インプレス
榊正憲 (著者)
216 ページ 価格：2,700 円 (PDF)

**ロボットが“巧みさ”を
手に入れるには？**

ロボット みざとロボットの力学



6

**“巧みさ”とロボットの力学
プレミアムブックス版**

人が日常的に何気なく行っている動作をロボットで実現するには、プログラム (計算式) を用意しなければなりません。本書では、ロボットが自然にこの問題を解消するための数学的道筋に言及し、巧みさの源泉を探ります。

マイナビ出版
有本卓・関本昌祐 (著者)
256 ページ 価格：4,104 円 (PDF・書籍)

**ロボットデザインの
本格的な解説書！**

ロボット
Introduction to robot design Takasue Seungma
ロボットデザイン概論



7

**ロボットデザイン概論
プレミアムブックス版**

ロボットが外の世界に出るのに避けて通れないデザインの問題。本書ではロボットデザインを、コンセプトメイクから機構の設計、ソフトウェアやヒューマンインタフェースのデザインまで含む総合設計と位置づけて解説。

マイナビ出版 岡山隆輔 (著者) 256 ページ
価格：3,283 円 (PDF)・4,104 円 (書籍)

**普及が期待されている
自律ロボットの入門書**

ロボット



8

**自律ロボット概論
プレミアムブックス版**

自律ロボットとは実世界で実体を持ち、外部からの明示的な人間の制御なしでタスクを実行できる知的な機械を指します。本書では、自律ロボットの研究の軌跡と将来的な展望を実際のロボットを紹介しながら説明します。

マイナビ出版
George A. Bekey (著者)、松田晃一・細部博史 (翻訳)
512 ページ 価格：5,875 円 (PDF)・7,344 円 (書籍)