

ロボティクスシリーズ 5

応用センサ工学

工学博士 川村 貞夫 編著

博士(工学) 下ノ村和弘

博士(工学) 前野 隆司

博士(情報理工学) 牧野 泰才

博士(工学) 西浦 敬信

工学博士 玉置 純

博士(工学) 柴田 瑞穂

博士(保健学) 岡田 志麻

博士(工学) 安藤 妙子

共著

コロナ社

ロボティクスシリーズ編集委員会

編集委員長 有本 卓 (立命館大学)

幹 事 川村貞夫 (立命館大学)

編 集 委 員 石井 明 (立命館大学)

(五十音順) 手嶋教之 (立命館大学)

渡部 透 (立命館大学)

(2009 年 1 月現在)

刊行のことば

本シリーズは、1996年、わが国の大学で初めてロボティクス学科が設立された機会に企画された。それからほぼ10年を経て、卒業生を順次社会に送り出し、博士課程の卒業生も輩出するに及んで、執筆予定の教員方からの脱稿が始まり、出版にこぎつけることとなった。

この10年は、しかし、待つ必要があった。工学部の伝統的な学科群とは異なり、ロボティクス学科の設立は、当時、世界初の試みであった。教育は手探りで始まり、実験的であった。試行錯誤を繰り返して得た経験が必要だった。教える前に書いたテキストではなく、何回かの講義、テストによる理解度の確認、演習や実習、実験を通じて練り上げるプロセスが必要であった。各巻の講述内容にも改訂と洗練を加え、各章、各節の取捨選択も必要だった。ロボティクス教育は、電気工学や機械工学といった単独の科学技術体系を学ぶ伝統的な教育法と違い、二つの専門（T型）を飛び越えて、電気電子工学、機械工学、計算機科学の三つの専門（ π 型）にまたがって基礎を学ばせ、その上にロボティクスという物づくりを指向する工学技術を教授する必要があった。もっとたいへんなことに、2000年を迎えると、パーソナル利用を指向する新しいさまざまなロボットが誕生するに及び、本来は人工知能が目指していた“人間の知性の機械による実現”がむしろロボティクスの直接の目標となった。そして、ロボティクス教育は単なる物づくりの科学技術から、知性の深い理解へと視野を広げつつ、新たな科学技術体系に向かう一歩を踏み出したのである。

本シリーズは、しかし、新しいロボティクスを視野に入れつつも、ロボットを含めたもっと広いメカトロニクス技術の基礎教育コースに必要な科目をそろえる当初の主旨は残した。三つの専門にまたがる π 型技術者を育てるとき、広くてもそれぞれが浅くなりがちである。しかし、各巻とも、ロボティクスに

ii 刊 行 の こ と ば

直接的にかかわり始めた章や節では、技術深度が格段に増すことに学生諸君も、そして読者諸兄も気づかれよう。恐らく、工学部の伝統的な電気工学，機械工学の学生諸君や，情報理工学部の諸君にとっても，本シリーズによってそれぞれの科学技術体系がロボティクスに焦点を結ぶときの意味を知れば，工学の面白さ，深さ，広がり，といった科学技術の醍醐味が体感できると思う。本シリーズによって幅の広いエンジニアになるための素養を獲得されんことを期待している。

2005年9月

編集委員長 有本 卓

ま え が き

ロボットは実世界で機能するので、実世界の情報を計算機内に取り込むことが必要となる。この役割を果たすものがロボットのセンサである。ロボットと人間は、さまざまな視点から比較されることが多い。本書が対象とするセンサは、人間では、視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚などに相当する機能実現のための要素である。ロボットが適切に機能するためには、実世界に存在するロボット自身の状態とロボットのまわりの実環境を理解することが必要になる。このために、人間の感覚器に相当する各種のセンサをロボットに搭載する。ただし、ロボットの設計者にとって、センサ単体での知識だけではロボット全体の機能は実現できず、ロボットシステム全体としてのセンサの役割を理解することが求められる。本書は、このような視点から、ロボットに利用されている、または今後利用されるセンサを解説したものである。

メカトロニクス・ロボティクス分野で利用されるセンサは多様であり、その測定原理も多様である。本書の目的の一つは、センサの原理とその応用を学習する人に、メカトロニクス・ロボティクス分野で重要なセンサを紹介することである。ただし、すでに優れた成書、特にセンサハンドブックなどが出版されており、各種センサの系統的な情報としては十分であると判断して、代表的なものを精選して記述した。また、センサ単体の解説に留まらず、システム全体の機能の実現のためのセンサの役割、およびセンサに求められる性能などを可能な限り記述した。

より具体的には、以下の方針を立てた。(1) 各センサの原理の説明と、そのセンサの製作例・利用例の紹介を行う。(2) センサ工学を専門としないロボティクス、情報、人間工学、スポーツ科学など諸分野の研究者、大学院生、学部学生にも有用なテキストとする。(3) 参考文献・参考書などを紹介し、より深い内容

の理解，より多様なセンサ種類の検索，より新しいセンサの製作例・利用例の獲得などに役立つ情報を十分に提供する。

以上のような基本的な考え方に立脚し，1章「ロボットとセンサ」を川村真夫^{かわむらさだお}（立命館大学），2章「視覚センサ」を下ノ村和弘^{しも のむらかずひろ}（立命館大学），3章「触覚センサ」を前野隆司^{まえの たかし}（慶應義塾大学），牧野泰才^{まきの やすとし}（慶應義塾大学），4章「聴覚センサ」を西浦敬信^{にしうらたかのぶ}（立命館大学），5章「嗅覚センサ」を玉置純^{たまき じゆん}（立命館大学），6章「運動感覚センサ」を柴田瑞穂^{しばた みずほ}（近畿大学），7章「生体計測センサ」を岡田志麻^{おかだ しま}（立命館大学），8章「マイクロセンサ」を安藤妙子^{あんどうたえこ}（立命館大学）が担当した。紙面の制約のみならず，著者らの浅学非才から，多くの不十分な点を含んでいると思われる。これらの点に関しては，今後多くのご指摘を賜りたいと思っている。

2012年7月

著者ら記す

目 次

1. ロボットとセンサ

1.1	センサ, コンピュータ, アクチュエータ	1
1.2	内界センサと外界センサ	2
1.3	アクティブセンシング	2
1.4	生体におけるセンサ	3
1.5	分布的センシング	4
1.6	センサフュージョン	5
1.7	今後のロボットとセンサ	5
章 末 問 題	6

2. 視 覚 セ ン サ

2.1	ロボットビジョンの構成要素	7
2.2	視覚センサの原理	11
2.3	視覚センサの諸特性	17
2.4	視覚センサとシステムインテグレーション	18
2.5	今後の視覚センサ	22
章 末 問 題	23

3. 触覚センサ

3.1 触覚センサの基礎	25
3.1.1 能動と受動	25
3.1.2 完全触覚センサ	26
3.1.3 触覚センサの現状	26
3.1.4 触感の認識	27
3.2 ヒトの触覚受容器の特性	28
3.3 指先型触覚センサ	32
3.3.1 ヒト指模倣型触感センサ	32
3.3.2 CoP センサ	33
3.3.3 ゲルフォース	34
3.4 全身触覚センサ	35
3.4.1 2次元通信を利用した触覚センサ	35
3.4.2 切り貼り触覚センサ	38
3.5 力覚センサ	39
3.6 ヒトの触感認識機構の解析	39
3.6.1 四つの触感因子	39
3.6.2 触感センサによる識別	41
3.7 今後の触覚センサ	42
章末問題	43

4. 聴覚センサ

4.1 聴覚の基本的性質	44
4.1.1 聴覚の特徴	44

4.1.2	両耳効果	45
4.1.3	頭部伝達関数	45
4.2	聴覚センサの基礎技術	46
4.2.1	聴覚センサの構成要素	46
4.2.2	マイクロホンの分類と特徴	47
4.2.3	音源検出	49
4.2.4	音源位置推定	50
4.2.5	音源抽出・分離	53
4.2.6	音源識別・認識	56
4.3	高度な聴覚センサ	57
4.3.1	頭部伝達関数に基づく音源到来方向推定	58
4.3.2	視聴覚センサを融合した音源到来方向推定	59
4.3.3	聴覚センサに基づく音環境のディクテーション	59
4.4	聴覚センサの応用例	60
4.4.1	聴覚センサに基づくビデオカメラ制御	60
4.4.2	聴覚センサに基づく騒音制御	61
4.5	今後の聴覚センサ	61
	章末問題	62

5. 嗅覚センサ

5.1	ガスセンサとは	63
5.2	半導体ガスセンサ	65
5.3	固体電解質ガスセンサ	66
5.4	絶縁体ガスセンサ	69
5.5	圧電体ガスセンサ	70
5.6	光ファイバガスセンサ	71

5.7 今後の嗅覚センサ	72
章 末 問 題	73

6. 運動感覚センサ

6.1 傾斜角センサ	74
6.2 角速度センサ	76
6.3 加速度センサ	78
6.4 その他の運動感覚を計測できるセンサ	80
6.4.1 圧力センサ	80
6.4.2 超音波センサ	80
6.4.3 遮光センサ	81
6.5 応 用 例	82
6.5.1 水中ロボットの姿勢角の計測	82
6.5.2 水中ロボットの水深の計測	84
6.5.3 水中ロボットの方位の計測	85
6.6 今後の運動感覚センサ	86
章 末 問 題	86

7. 生体計測センサ

7.1 生 体 と は	89
7.2 生体計測センサの概要	90
7.3 加速度・振動計測	91
7.3.1 心 弾 図	91
7.3.2 加速度センサを用いた無拘束心拍計測	92
7.4 変 位 計 測	94

7.4.1	変位計測としての新しい心弾図技術	95
7.4.2	静電容量型の心拍・呼吸計測	95
7.5	光 計 測	98
7.5.1	生体と赤外線	98
7.5.2	赤外線を利用した消化器官の蠕動運動計測	99
7.5.3	サーモグラフィを利用した皮膚温度計測	101
7.6	磁 場 計 測	103
7.7	今後の生体計測センサ	104
	章 末 問 題	105

8. マイクロセンサ

8.1	マイクロセンサの特徴	106
8.1.1	MEMS と は	106
8.1.2	スケール効果	108
8.1.3	加工方法（マイクロマシニング技術）	109
8.2	MEMS センサ	111
8.2.1	ピエゾ抵抗型センサ	111
8.2.2	静電型センサ	112
8.2.3	振動型センサ	114
8.2.4	熱 型 センサ	115
8.3	並列化・集積化	116
8.4	今後のマイクロセンサ	117
	章 末 問 題	119
	引用・参考文献	120
	章末問題解答	130
	索 引	136

1

ロボットとセンサ

一般に、センサはロボット以外の人工物にも数多く利用されている^{1)~3)†}。一方、すでに多くのロボットが開発され、多種多様なセンサも利用されている。ロボットには最低限どのようなセンサが必要だろうか、そのセンサにはどの程度の精度が必要だろうか、人間と同じような作業をする場合には同じようなセンサを利用すべきだろうか、センサを複合するとどのような利点があるだろうかなど、多くの疑問が浮かび上がる。これらの疑問に対して明快に解答することは、現時点では難しい。

本章では、これらの疑問に答える準備として、以下の章で説明される各種のセンサに共通するロボットとの関係、利用可能になりつつあるセンシング技術、今後のロボット用のセンサ研究開発の動向などを簡単に説明する。

1.1 センサ、コンピュータ、アクチュエータ

ロボットとセンサの関係を考える際に、ロボットがなにかを示す必要がある。しかし、一般に「ロボット」を定義することは、容易ではない。なぜならば、ロボットと呼ばれるものには、多様な人工物が含まれるからである。例えば、人間の形に近いヒューマノイドなどは、ロボットと呼ばれる可能性が最も高いものである。このヒューマノイドを人工物のシステムとして見たとき、センサ、コンピュータ、アクチュエータ（エネルギー源を含む）の統合体と考えることがで

† 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

きる。その意味では、人間の形態に似ていない人工物のうち、どの程度までがロボットであって、それ以外はロボットではないと明確な定義が困難であることに気がつく。そこで、本書では人間や生物の形態の類似性に限定せず、広い意味で、センサ、コンピュータ、アクチュエータの統合システムとしてロボットを考え、そのようなロボットとセンサとの関係を考える。

1.2 内界センサと外界センサ

コンピュータシステムとロボットシステムは、前者が計算機内の世界で機能し、後者が実世界で機能する点が異なる。ロボットが実世界で機能するためには、実世界の情報を収集することが重要である。この実世界の情報の中でも、ロボットは実世界に存在するので、ロボットシステム自身の情報とロボットを取り巻く環境の情報の二つの情報を収集する必要がある。前者を内界センサ、後者を外界センサと呼ぶ場合がある。例えば、産業用ロボットでは、ロボットの形状をセンシングするために、各関節に取り付けられたエンコーダから関節角度を情報として得る。これは、内界センサのエンコーダでロボット自身の情報を得たことになる。一方、外界としてみた場合、もしロボットを固定する際に座標位置に誤差が含まれると、エンコーダの値の目標値にロボットが到達しても、ロボットの手先は目標物に到達しないということが起こる。この問題を解消するためには、カメラなどの外界センサを設置し、目標物とロボットの手先の位置をセンシングすることが必要となる。

1.3 アクティブセンシング

ロボットのセンシングの大きな特徴の一つは、センシングのための運動が可能な点にある。センサシステムのみの場合、センシングの計測方向、範囲、方法はセンサ設計時に最適な状況に設定される。しかし、ロボットの場合、アク

チュエータとの統合システムであるので、ロボットの運動によって、センシングの計測方向、範囲、方法などを変化させることが可能である。例えば、固定された1台のカメラシステムで、ある方向から花瓶を計測したとする。この場合、カメラの視野に入らない花瓶の様子は情報として入手できない。しかし、ロボットシステムでは、初めの画像に映らない花瓶の裏側に回り込んで、画像を入手することが可能である。これらは広くアクティブセンシングと呼ばれ、ロボットなどの分野では重要となっている。

1.4 生体におけるセンサ

ロボットを考える際に、生体の観察は重要である。ただし、生体の単純な模倣から効果的な人工物を実現することは困難である場合が多い。生体の機能を明確にした上で、人工物実現の最適性を考慮した設計が重要になる。ここでは、センサシステムの実現例として、生体の指先の位置決めを考察してみよう。

人間の指先の運動で、両手の人指し指同士を合わせる動作をゆっくり行う。視覚によって両指先位置を確認しながら合わせると、正確に指先同士を合わせることができる。つぎに、閉眼状態で同じ動作を行うと、指先がわずかにずれて、正確に指を合わせることができないことが多い。この事実は、つぎのように解釈できる。視覚情報なしでも、指先の位置は筋肉の運動、すなわち内界センサからセンシングすることが可能である。しかし、この内界センサだけからの情報は、人間の場合あまり精度が高くなく、誤差が生じる。内界センサに視覚という外界センサを付加することによって、正確な指運動が可能となっている。

「なぜ、人間には複数のセンサがあるのか?」「なぜ、人間の内界センサは低精度に作られているのか?」「なぜ、複数のセンサが利用されているにもかかわらず、統合システムとして、洗練された運動を実現できるのか?」など、多くの未解決問題が人間科学として提起されている。一方、生体のセンサシステムの設計例は、ロボットシステム実現として、「視覚センサと併用する場合には、

ロボットの各関節のエンコーダの精度は高める必要はないのではないか？」などの、設計論として興味深い示唆を与える。

1.5 分布的センシング

20世紀の計算機の発達により、センサ計測のサンプリングタイムを小さくすることが可能になった。その結果、ロボットの状態をセンサによって計測したデータの時間分解能は飛躍的に向上した。例えば、運動をフィードバック制御で実現する場合、サンプリングタイムを小さくできることで、より大きなフィードバックゲインを設定することが可能になった。その結果、目標運動への追従が精度良く実現できるようになった。また、画像データの処理も実時間で実現できる場合が多くなり、ロボットシステムへの利用が可能になった。

一方、空間分解能を高めようとするれば、計測ポイントを増やす必要がある。一般に、複雑な対象を集中系でモデル化する方法が利用されてきた。これは、センサ数を少なくして、実現システムの保守点検を容易化し、価格も下げる効果があり、工学的に重要な方法論である。しかし、一方で、集中系モデル化では対応できない場合へのセンシングが残されている。例えば、ロボットが対象物体を操作する際に、対象物体が剛体であれば、力学の基本となる力とトルクを集中系モデルとして適用することができる。しかし、対象が柔軟体であれば、トルクという概念は意味を持たなくなる。このような場合には、柔軟体の変形などの形状変化を分布的に計測・解析することが、一つの解決法である。

このような分布的センシングのためには、センサ数を増やすことが必要になる。一般にセンサ数が増えると、システム全体の体積、価格、信号処理負担などが増大する。これらの問題の解決法として、MEMS (micro electrical mechanical systems) の技術が挙げられる。MEMS技術によって、センサを小型化、軽量化するとともに、価格を下げることも予想される。センサ数の増加に伴う信号処理の問題も、ICチップ化により解決することが期待されている。

1.6 センサフュージョン

今後のロボットでは、複数の種類のセンサによってセンシングする場合が増えると予想される。例えば、産業用ロボットにおいては、関節角度をエンコーダなどで計測すると同時に、カメラ画像を用いて、ロボット手先位置を計測することなどが挙げられる。今後、MEMS 技術により、さまざまなセンサが小型化・軽量化・低価格化されれば、センサフュージョンを実現する可能性が高まる。その際、目的に応じて、どのような種類のセンサを付加するかを検討する必要がある。

1.4 節に前述した人間の例題は、センサフュージョンの視点からも興味深い。人間も複数の種類のセンサの情報を統合して、判断や行動に結び付けていると予想される。指の運動の場合、筋にあるセンサは、高精度ではなく、指先の高精度な位置決めは視覚に依存している。ロボットのセンサフュージョンの問題に置き換えると、内界センサに対応するエンコーダの精度は、現在利用されているエンコーダほど高精度でなくともよく、最終的な位置精度は外界センサの視覚システムから得られればよい。それでは、どのように2種類のセンサ信号を融合すればよいか。この問題はシステムの設計科学として、興味深いテーマである。

1.7 今後のロボットとセンサ

ロボットに利用されるセンサの今後の動向を考えてみよう。ロボットに利用されるセンサは、以下の二つに分けて考えることができる。

(1) 別分野で開発済みのセンサの導入

ロボット分野以外の別分野ですでに開発済みのセンサをロボットに利用する場合に相当する。この場合、各センサの動作範囲、形状、体積、重量など

の性質を調査した後、ロボットシステムとして実現する。既存のセンサを利用する場合においても、どのような種類のセンサを、どのような性能レベルで利用するかなどは、センサフュージョンとなる。さらに、コンピュータ、アクチュエータも含めたシステム全体を効率的、経済的に実現するための、システム設計の科学が研究の対象となる。

(2) ロボットのニーズからのセンサ開発

既存のセンサではロボットのニーズに合うものがないために、新たにセンサを開発する場合に相当する。このようなセンサ開発が研究対象となっている。このようなセンサ開発では、ロボット研究者がセンサ開発する場合と、物理学、化学、電気工学などの分野の研究者がロボットのニーズを理解して開発する場合が想定される。後者では、ロボット研究者と他分野の研究者の共同研究体制が重要になる。

章 末 問 題

- 【1】 人間や生物の形態と大きく異なるが、センサ、コンピュータ、アクチュエータのシステムと思われる例を挙げ、それらについて説明せよ。
- 【2】 アクティブセンシングの例を挙げよ。
- 【3】 片手の指先で把持して持ち上げられる二つの物体がある。これらは同じ重量で、体積が異なる。人がこの二つの物体を持ち上げた際の重量感覚は同じ重さとなるか、異なるかを考えよ。
- 【4】 曲面上の各点での圧力が、分布的に計測できるシステムの利用例を考えよ。
- 【5】 センサフュージョンの例として、カーナビゲーションを説明せよ。

索引

【あ】	近赤外光	99	触覚	24
アクティブセンシング		3	シリコン網膜	19
アクティブノイズ	【く】		心弾図	91
コントロール	グローバルシャッタ	14	振動ジャイロ	77
圧電体ガスセンサ	グロッタス導電	69		
圧力センサ		80	【す】	
	【け】		スケール効果	108
【い】	傾斜角センサ	74	スマートイメージセンサ	19
イメージセンサ	限界電流型ガスセンサ	68	スマートセンサ	116
インタフェース		9		
	【こ】		【せ】	
【え】	光学系	8	静電容量型加速度センサ	113
エッチング	光学フィルタ	8	静電容量検知型センサ	96
	光電変換	11	赤外線	98
	固体ガスセンサ	63	赤外 (IR) カットフィルタ	8
【お】	固体電解質ガスセンサ	66	絶縁体ガスセンサ	69
音源位置推定	ゴニオメータ	94	ゼロ交差検出法	49
音源検出	コリオリの力	77	センサフェュージョン	5
音源抽出	コンデンサ (静電形)		全指向性マイクロホン	49
音源分離	マイクロホン	47		
	コンピューテーションアルカメラ	21	【そ】	
	コンピューテーションアル		走査	15
	フォトグラフィ	21		
	【さ】		【た】	
【か】	サーモグラフィ	101	ダイアフラム	111
外界センサ	撮像素子	8	ダイナミック (動電形)	
角速度センサ	サニャック効果	77	マイクロホン	47
隠れマルコフモデル			ダイナミックレンジ	18
可視光カットフィルタ	【し】		単結晶シリコン	109
画像形成	磁気式モーションキャプチャ	103	短時間エネルギー閾値法	49
画像処理系				
加速度センサ	ジャイロセンサ	76	【ち】	
片持ち梁	遮光センサ	81	遅延和マイクロホンアレー	54
カラーフィルタ			蓄積動作	13
【き】				
擬似頭部				
共振周波数				

超音波センサ	80			マイクナー小体	28
【て】		【ひ】		【む】	
適応形マイクロホンアレー	55	ピエゾ抵抗型センサ	111	無拘束心拍計測	92
【と】		光導波路型ガスセンサ	71	【め】	
頭部伝達関数	45	光ファイバガスセンサ	71	メルケル触盤	28
トランスデューサ	90	ビデオフレームレート	10	【り】	
【な】		表面マイクロマシニング	109	力 覚	24
内界センサ	2	【ふ】		力覚センサ	39
【ね】		フォトダイオード	12	両耳効果	45
熱型アクチュエータ	115	フォトリングラフイ	109	【る】	
ネルンストの式	67	フライホイール	76	ルフィニ終末	28
【は】		フレームレート	17	【れ】	
パチニ小体	28	分布的センシング	4	レーザジャイロ	77
バルクマイクロマシニング	109	【へ】		レンズ	8
半導体ガスセンサ	65	ベイヤー配列	16	【ろ】	
		【ほ】		ローリングシャッタ	14
		ポーラスシリコン	112	ロボットビジョン	7
		【ま】			
		マイクロマシニング	109		

【A】		【D】		【M】	
A-D 変換ボード	93	DMD	107	MEMS	106
【C】		【F】		MUSIC 法	51
CCD イメージセンサ	9	FPGA	10	【P】	
CMOS イメージセンサ	9	【G】		pn 接合	12
CSP 法	51	GPGPU	10	~~~~~	
		GPS	78	2D-MUSIC 法	53

— 編著者略歴 —

- 1981 年 大阪大学基礎工学部生物工学科卒業
1983 年 大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了
(物理系専攻機械工学分野)
1986 年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了
(機械工学専攻)
工学博士
1986 年 大阪大学助手
1987 年 立命館大学助教授
1995 年 立命館大学教授
現在に至る

応用センサ工学

Sensor Engineering for Robotic Application

© Sadao Kawamura 2012

2012 年 9 月 3 日 初版第 1 刷発行

検印省略

編著者 かわ 村 貞 夫
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

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 <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04516-1 (大井) (製本:愛千製本所) G

Printed in Japan



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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします