

計測・制御
セレクション
シリーズ

6

計測自動制御学会 編

センサ技術の基礎と応用

次世代センサ協議会 編

小林 彬・臼田 孝
栗山 敏秀・室 英夫
高田 敬輔・石垣 武夫
柴崎 一郎・石森 義雄 共著
浅野 安人・大木 眞一
関口 眞吾・足立 正二
五十嵐 朗・菰田 夏樹

コロナ社

刊行のことは

近年の科学技術は、情報化・グローバル化の中で驚くべき速さで発展している。計測・制御分野も例外ではなく、次々と新しい概念・理論・技術が発表され、その核心を理解するのに多大な努力を要する状況にある。さらに、各種の技術が単一の分野に閉じることなく、さまざまな分野が横断的に発展・連携・融合し、新たな分野へ多種多様な広がりを見せている。例えば、計測技術の発展は、知的システムを構築するための人工知能やデータサイエンスの発展にも大きく寄与し、両技術分野の融合による技術革新も期待されている。

計測自動制御学会（SICE）が扱う、計測、制御、システム・情報、システムインテグレーション、ライフエンジニアリングといった分野は、もともと分野横断的な性格を備えていることから、SICE が社会において果たすべき役割がより一層重要なものとなってきている。SICE では、2018 年に完結した「計測自動制御学会（SICE）計測・制御テクノロジーシリーズ」の次世代となるシリーズ企画の在り方について模索し、議論を重ねてきた。その結果、めまぐるしく技術動向が変化する時代に活躍する技術者・研究者・学生の助けとなる書籍を、SICE ならではの視点からタイムリーに提供するというシリーズの方針を立てた。

この方針に基づき、従来のシリーズでのテーマや執筆者の選定から出版までのプロセスを見直し、これまでとは異なるプロセスでシリーズ企画を進めていくことにした。ユニークな取り組みとして、SICE がシリーズの執筆者の公募を行い、会誌出版委員会での選考を経て収録テーマを決定している点がある。また、公募と並行して、会誌出版委員会によるテーマ選定や、学会誌「計測と制御」での特集から本シリーズの方針に合うテーマを選定するなどして、収録テーマを決定している。テーマの選定に当たっては、SICE が今の時代に出版

ii 刊 行 の こ と ば

する書籍としてふさわしいものかどうかを念頭に置きながら進めている。このようなシリーズの企画・編集プロセスを鑑みて、本シリーズの名称を「計測・制御セレクションシリーズ」とした。

本シリーズは、計測、制御、システム・情報、システムインテグレーション、ライフエンジニアリングに関わる多種多様なテーマがタイムリーに収録されていくことをねらっている。本シリーズが変化の大きな時代の中で活躍する研究者・技術者・学生の役に立てば幸いである。最後に、このシリーズ企画を進めるに当たってご尽力いただいたコロナ社の各氏に感謝したい。

2021年5月

計測自動制御学会 会誌出版委員会 出版ワーキンググループ

ま え が き

近年、IoT、Society5.0の時代が始まったといわれ、その基盤技術としてセンサ技術にも多大な関心が寄せられている。

一方、これまでセンサ技術は、オートメーションの中、主としてインダストリー（製造業）の分野で、機器計測化、自動化のための中核的役割を果たし、日本技術の発展に貢献してきた。

そして今、インダストリーとは異なる分野（医療や防災、社会インフラ、農業、水産業、流通業、飲食業、アミューズメント、教育業など）にまでセンシング技術（計測技術、センサ技術）の応用範囲が広がろうとしており、新たな役割を担おうとしている。

新たな分野への展開に伴い、必ずしもセンシング技術の専門家ではない人たちもセンシング技術を活用する必要に迫られ、関連技術の利用者としてその基本を理解しておくことが求められるようになってきている。

センシング技術の出発点は、センサ技術にあることはいうまでもないが、センサ技術は千差万別といわれるようにきわめて多様であり、本書ですべての分野を網羅して説明することはページ数的にも制約があるため、実務的ではない。そこで、広い分野の中で、代表的ニーズがあると考えられるセンシング技術を対象を絞ることとし、本書のタイトルを「センサ技術の基礎と応用」として、内容を基礎編と応用編に分け、以下の構成をとることとした。

I. 基礎編

●第1章「センシングとはどのようなことか」

センシング技術の基礎的全体像についての解説

●第2章「単 位」

●第3章～第10章：センサ基礎各論

II. 応用編

●第11章～第16章：センサ応用各論

●第17章「これからのセンシング技術とは」

本書の締めくくりとして、センシング技術の今後の新しい可能性を解説
全国の大学などで「計測」と名のつく学科等が目立たなくなっている状
況だが、新研究の成果や新システム開発の実証には、なんらかのセンシング技
術による検証が不可欠である。すなわち、センシング技術は基盤技術として必
須であり、科学教育上重要視されるべきものとする。本書は、その種の人材
養成に役立てるべく企画されたものでもある。

なお、特に第17章「これからのセンシング技術とは」は各章の執筆者で集
まって意見交換会を開き、そこでの議論を担当者が、私見も交えまとめたもの
であり、新センシング技術の開発に多くのヒントを与えるとする。

本書が、教育の場などで広く活用されることを願うとともに、センシング技
術の振興に貢献し、社会状況の改善にも寄与することを期待したい。

執筆者は、次世代センサ協議会関係者を中心に、各分野での専門家の方々に
お願いしたものである。また、出版にあたってコロナ社の皆様にはたいへんお
世話になった。あわせて、関係者の皆様はこの場をお借りしてお礼申し上げる。

執筆分担

小林 彬	1章, 17章	白田 孝	2章
栗山 敏秀	3章	室 英夫	4章, 6章
高田 敬輔	5章	石垣 武夫	7章, 10章
柴崎 一郎	8章	石森 義雄	9章
浅野 安人	11章	大木 眞一	12章
関口 眞吾	13章	足立 正二	14章
五十嵐 朗	15章	菰田 夏樹	16章

目 次

I. 基礎編

1. センシングとはどのようなことか

1.1 はじめに	1
1.2 センサの基本的使命	1
1.2.1 センサの役割（機能の観点から）	1
1.2.2 センサとは総称である	2
1.2.3 留意すべき専門用語	3
1.2.4 社会の発展とセンシングの関わり	3
1.3 センシング系における2種類の測定方式	4
1.3.1 測定方式の種類	4
1.3.2 直接測定方式の例	5
1.3.3 間接測定方式の実現（諸法則・諸効果）	6
1.3.4 諸効果の測定への応用例	6
1.3.5 計測機能実現手法3つの柱	8
1.4 センシング系の品質の評価	10
1.4.1 静的測定と動的測定	10
1.4.2 センシング系の評価	11
1.4.3 3種類の誤差	12
1.4.4 偶然誤差の評価（正規分布による分析）	12
1.4.5 計測系の基本構造	13

1.5 測定系（センサ）の選択性	14
1.5.1 測定系における選択性とは	14
1.5.2 選択性実現が阻害される例	14
1.5.3 測定環境と雑音	15
1.6 センサ利用上の留意点	16
1.6.1 なにを測るべきか	16
1.6.2 どのような場所に配置して使用するのか	16
1.6.3 信号伝送の信頼性の確認	17
1.6.4 使用すべき測定器の絞込み	17
1.7 おわりに	17

2. 単 位

2.1 はじめに	18
2.2 単位系の変遷	19
2.3 国際単位系 (SI)	21
2.4 計量標準技術	24
2.4.1 基本単位の定義	25
2.4.2 一次標準と計量標準機関	25
2.4.3 一次標準（現示）と校正技術	26
2.5 おわりに	30

3. センサの基礎物理

3.1 はじめに	32
3.2 半導体の物理	33
3.2.1 量子力学の基礎	33
3.2.2 半導体のエネルギーバンド構造	39

3.3 半導体のセンサ応用	43
3.3.1 半導体の光導電効果	43
3.3.2 pn 接合と光起電力	44
3.3.3 ピエゾ抵抗効果	46
3.4 おわりに	49

4. MEMS とセンサ

4.1 はじめに	50
4.2 MEMS センサの構成と特徴	50
4.3 マイクロマシニング技術	52
4.3.1 フォトリソグラフィ技術	53
4.3.2 バルクマイクロマシニング	55
4.3.3 表面マイクロマシニング	56
4.4 要素プロセス技術	58
4.4.1 エッチング技術	58
4.4.2 基板接合技術	60
4.5 実装技術	61
4.6 おわりに	62

5. センサ信号処理とアナログ回路

5.1 はじめに	64
5.2 センサ信号の信号変換	65
5.2.1 センサ出力と信号変換	65
5.2.2 センサの基本特性	66
5.3 OP アンプ回路	67
5.3.1 OP アンプ増幅回路	67

5.3.2 OP アンプ応用回路	72
5.4 A/D 変換回路	75
5.5 センサシステムとノイズ	77
5.6 お わ り に	80

6. 機械量センサ

6.1 は じ め に	82
6.2 変位・角度センサ	82
6.3 加速度センサ	85
6.4 角速度センサ	90
6.5 圧力センサ	94
6.6 お わ り に	96

7. 光センサ

7.1 は じ め に	97
7.2 可視光センサ	98
7.2.1 受光素子	98
7.2.2 イメージセンサ	103
7.3 赤外線センサ	104
7.3.1 受光素子	106
7.3.2 赤外線センサの性能評価	107
7.3.3 量子型赤外線センサ	107
7.3.4 熱型赤外線センサ	108
7.3.5 赤外イメージセンサ	109
7.4 お わ り に	110

8. 磁気センサ

8.1 はじめに	112
8.2 ホール（効果）素子	112
8.2.1 ホール効果とホール素子	112
8.2.2 ホール素子材料とその要件	114
8.2.3 実用的な磁気センサとしてのホール素子概説	115
8.3 ホール IC	123
8.3.1 ホール IC 序論	123
8.3.2 デジタル型のホール IC	124
8.3.3 ホール IC の高感度化（ハイブリッドホール IC, CMOS ホール IC）	125
8.3.4 リニアハイブリッドホール IC	126
8.4 InSb 単結晶薄膜磁気抵抗素子	128
8.4.1 InSb 薄膜の磁気抵抗効果	128
8.4.2 Snドープ単結晶 InSb 薄膜の磁気抵抗効果と MR 素子応用	129
8.4.3 MR 素子の回転センサ応用	131
8.5 おわりに	133

9. 化学センサ

9.1 はじめに	134
9.2 ガスセンサ	135
9.3 イオンセンサ	138
9.3.1 固体電解質イオン選択性電極	139
9.3.2 ISFET	139
9.4 バイオセンサ	140
9.4.1 電気化学的バイオセンサ	142

9.4.2 バイオセンサの将来像 143

9.5 お わ り に 144

10. 温 度 セ ン サ

10.1 は じ め に 145

10.2 金属测温抵抗体 147

10.3 熱 電 対 150

10.4 IC 化温度センサ 151

10.5 発振型温度センサ 152

10.6 放 射 温 度 計 154

10.7 お わ り に 154

II. 応用編

11. 超 音 波 セ ン サ

11.1 は じ め に 155

11.2 音 響 物 理 155

 11.2.1 弾性体の性質 155

 11.2.2 弾性波の波動方程式 158

11.3 超音波応用計測 161

 11.3.1 超音波の特性 161

 11.3.2 パルス反射法 162

 11.3.3 伝送時間差法とシングアラウンド法による流速測定 164

 11.3.4 ドップラー法 166

 11.3.5 超音波による画像形成 167

 11.3.6 パ ッ シ ブ 法 168

11.3.7 海底地形・資源調査	169
11.4 おわりに	171

12. 流量・流速センサ

12.1 はじめに	172
12.2 流量・流速センサの分類	172
12.3 各種の流量・流速センサの原理と構造	175
12.3.1 差圧式流量計	175
12.3.2 面積式流量計	176
12.3.3 渦式流量計	176
12.3.4 電磁式流量計	178
12.3.5 超音波式流量計	178
12.3.6 コリオリ式流量計	179
12.3.7 熱式流量計	180
12.3.8 容積式流量計	181
12.3.9 タービン式流量計	181
12.3.10 ピトー管式流速計	182
12.3.11 熱線式流速計	182
12.3.12 レーザドップラー式流速計 (LDV)	183
12.4 おわりに	184

13. イメージセンシング

13.1 はじめに	185
13.2 イメージセンシングの方法	186
13.2.1 2次元画像撮影の方法	186
13.2.2 撮像レンズと光学系	188

13.2.3 その他のイメージセンシング 191

13.3 画像処理（イメージプロセッシング）の概要 193

13.3.1 画像変換処理 194

13.3.2 画像計測 195

13.3.3 画像認識 196

13.4 画像処理の応用例 201

13.5 おわりに 202

14. 光ファイバセンサ

14.1 はじめに 203

14.2 光ファイバの基礎 204

14.2.1 光ファイバの構造と種類 204

14.2.2 光ファイバの特性 205

14.2.3 光ファイバ型光学部品 206

14.3 光ファイバセンサの分類 207

14.3.1 光ファイバセンサの分類方法 207

14.3.2 伝送路型光ファイバセンサ 207

14.3.3 機能型光ファイバセンサ 209

14.3.4 多点化/多重化 210

14.4 分布型光ファイバセンサ 211

14.4.1 光ファイバ中の散乱光と分布型センシング 211

14.4.2 レイリー散乱光を利用した分布型光ファイバセンサ 213

14.4.3 ラマン散乱光を利用した分布型光ファイバセンサ 214

14.4.4 ブリュアン散乱光を利用した分布型光ファイバセンサ 216

14.5 準分布型光ファイバセンサ 217

14.6 センシング用光ファイバ 219

14.7 おわりに 220

15. 生体計測における各種センサの利用

15.1 はじめに	221
15.2 血圧計	221
15.2.1 血圧の定義	221
15.2.2 血圧の計測方法	223
15.2.3 聴診法	224
15.2.4 オシロメトリック法	225
15.2.5 その他の間接法	226
15.3 心電計	227
15.3.1 双極肢誘導	228
15.3.2 単極肢誘導	229
15.4 パルスオキシメータ	231
15.5 おわりに	233

16. RFID センサ

16.1 はじめに	235
16.2 RFIDの動作原理	235
16.3 RFIDの方式	236
16.4 RFIDタグの構造	238
16.5 RFIDセンサの原理	238
16.6 RFIDセンサタグの構造	240
16.7 おわりに	242

17. これからのセンシング技術とは

17.1 はじめに	244
17.2 センシング技術応用範囲の飛躍的拡大	244
17.3 生産性向上 1.0 から生産性向上 2.0 へ	245
17.4 ビッグデータの活用と SoT&IoT そして見える化	247
17.5 複合計測化の推進	249
17.6 メタデータへの着目	250
17.6.1 メタデータとはなにか	251
17.6.2 センシングにおけるメタデータの効用	252
17.7 センシング技術のための新しいシーズ	254
17.7.1 量子センシング系への期待	254
17.7.2 新素材の出現	254
引用・参考文献	256
索引	263

第 1 章

センシングとは どのようなことか

1.1 はじめに

近年、IoT, Society5.0 の時代が始まったといわれ、その基盤技術としてセンサ技術にも関心が寄せられ、これまでのインダストリー（製造業）とは異なる分野にまでもセンシング技術（計測技術、センサ技術）の応用範囲が広がろうとしている。これに伴い、必ずしもセンシング技術の専門家ではない人たちも、その利用者としてセンシング技術の基本を理解しておくことが求められるようになってきている。

そこで本章では、本書を始めるにあたり、「センサの基本的使命」、「センシング系における 2 種類の測定方式」、「センシング系の品質の評価」、「測定系（センサ）の選択性」、「センサ利用上の留意点」について、総括的な解説を述べることにしたい。

1.2 センサの基本的使命

1.2.1 センサの役割（機能の観点から）

センサを利用する場合、まず必ずなんらかの目的のために、状況を把握したい対象が存在していることに留意すべきである。つまり、計測ニーズが生じる

2 1. センシングとはどのようなことか

源があるわけで、センサが適用される対象や環境が想定されている。

この場合、センサは、対象からその状況や状態を記述するのに必要な情報を取り出すデバイス（情報抽出や信号発信機能）の役割を果たすことになる。また、状況や状態を直接把握しなければならないので、仮に対象環境が過酷であっても、センサはそのような過酷な現場に密着した形で配置されなければならない。対象から隔離されて設置されるのでは、知るべき情報を正しく取り出すことはできない。センシング技術の辛いところではあるが、このことを十分認識しておく必要がある。

一方、センサを利用することの目的になることはきわめて多様であり、ますますその範囲を広げている。その一部を例示すれば、製造工程・製造機器の管理、自動車の運転状況の把握、居住空間の安全・安心・快適さ、道路・橋梁状況の把握、農業・漁業（育成・飼育環境の管理）、健康管理（病状の把握）などが挙げられる。

1.2.2 センサとは総称である

一般にセンサと一口でいわれることが多いが、誤解を生む可能性のある表現である（図 1.1）。すなわち、センサで温度を測る、センサで圧力を測る、センサで加速度を測るなどのいい方は、なにかセンサという 1 つの万能なデバイスがあり、それで種々の必要な情報がすべて測れるように受け取られる危惧があ

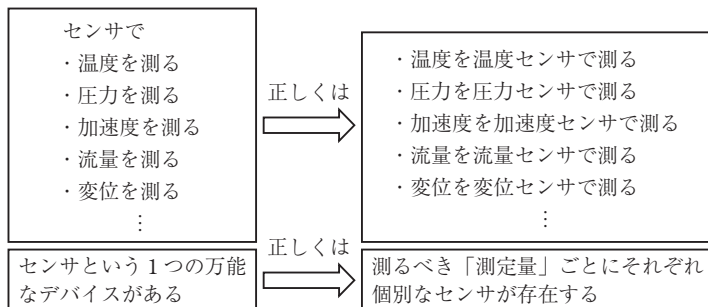


図 1.1 センサとは総称

る。正しくは、温度を温度センサで測る、圧力を圧力センサで測る、加速度を加速度センサで測るわけで、測るべき「測定量」ごとにそれぞれ個別なセンサが存在している。センサは千差万別であるといわれる理由である。

トリリオンセンサという言葉もあるが、種々のセンサの個数の総計がトリリオン個（1兆 = 10^{12} ）の意味で、トリリオンセンサというセンシングデバイスがあるわけではない。

1.2.3 留意すべき専門用語^{1)†}

計測技術の中でよく使われながら場合によってあいまいに用いられる言葉がある。特に以下の例は意味の相違に留意すべきである。

- ・ **センサとセンシング** 「センサ」は素子つまりハードウェアであり、「センシング」は計測行為を意味しており、「もの」と「こと」との違いがある。
- ・ **測定と計測** 文献1)の計測用語に規定されているように、「測定」とは、「ある量を、基準として用いる量と比較し数値または符号を用いて表すこと」であり、「計測」とは「特定の目的をもって、事物を量的にとらえるための方法・手段を考究し、実施し、その結果を用い所期の目的を達成させること」で、「計測」は複合計測の意味合いをもっている。

例えば、部屋の空調に関し、温度や湿度、風量をそれぞれ測ることは測定であるが、それらを総合し室内の快適度を評価することは計測である。

- ・ **検出** 測定や計測以外に類似する専門用語として「検出」がある。文献1)の計測用語では「測定量を信号として取り出すこと」と定義されており、対象物の存在やドアの開閉状況などをオンオフ的に信号として取り出すことである。

1.2.4 社会の発展とセンシングの関わり

計測技術は数千年前の**度量衡**，すなわち、長さ・体積・質量の測定に始まる

† 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献番号を表す。

4 1. センシングとはどのようなことか

長い歴史を有している。それだけ長く社会の変遷や発展に関わり、それらに呼応しさまざまな貢献を果たしてきたわけで、今後も必要とされる情報の科学的・客観的獲得手段としてますますの期待が寄せられている。

図 1.2 は計測技術の貢献の姿を測定・計測すべき量の種類の数の変遷として概念的に示したものである。

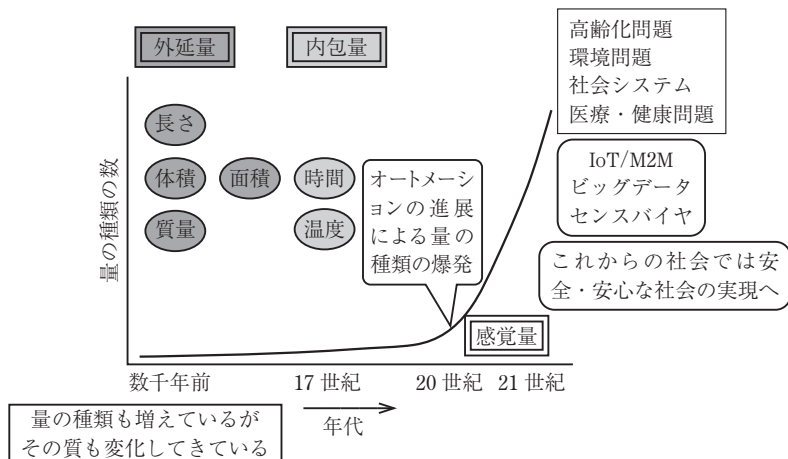


図 1.2 測定・計測すべき量の種類の数の変遷（外延量：量として加法性のある量，内包量：対象の状態や物性を表す量）

図 1.2 において、量の種類の数は 20 世紀後半（第二次世界大戦後）に製造業の自動化（オートメーション）の進展とともに爆発的に増加しており、この傾向は現在も継続中である。量の種類も増えているが、**感覚量**の出現などその質も変化してきており、多様な量の創出は新たな学術的興味の対象であるばかりでなく、安全・安心な社会の実現に向け大きな役割が託されている。

1.3 センシング系における 2 種類の測定方式

1.3.1 測定方式の種類

センシング系を実現するには測定方式というものがあり、直接測定方式と間接測定方式に大別される。

(1) **直接測定方式** 直接測定方式は、測るべき量につき、それと同一の種類の基準量を多種類系統的に用意し、それらの組合せの和で定まる基準値と測定量との大小比較結果に基づいて測定値を定める方式である。

(2) **間接測定方式** 間接測定方式は、測るべき量を、一定の関数関係で関係付けられている測定しやすい他の量に変換し、変換後の量の測定結果を逆変換して測定値を定める方式である。この場合、測定しやすい量としては、一般に電圧や電流、電気抵抗が利用されることが多い（電気応用計測の基本）。

1.3.2 直接測定方式の例

一般に利用されている測定方法については、間接測定方式が大半であり、直接測定方式の例は少なく、長さ、体積、質量、電圧の測定程度である（図 1.3）。

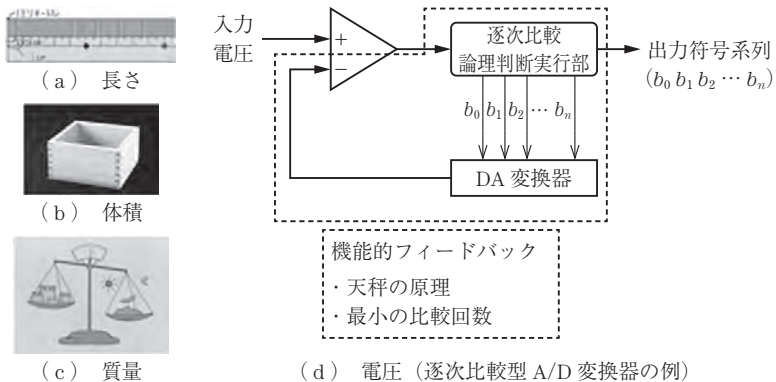


図 1.3 直接測定方式（長さ、体積、質量、電圧）

- ・ **長さ測定における例** 基準となる目盛の付いている「ものさし」を利用し、目視などによる長さの大小比較を行うことによって長さを測ることができる。
- ・ **体積測定における例** 基準の体積として、いくつかの大きさのます升を用意し、升の大きさの組合せおよび繰り返し計数操作により、最小の升の大きさの分解能で与えられた液体（または粒体）の体積値を測定することができる。

索 引

【あ】	
アイントーベンの三角形	228
アクセプタ	44
アクティブタイプ	236
アコースティックエミッショ ン法	169
圧縮波	159
圧電式	92
圧力センサ	94
アバランシェフォトダイオー ド	101
アンペロメトリックバイオセ ンサ	142

【い】	
イオンセンサ	138
位相敏感 OTDR	214
一次標準	24
異方性エッチング	58
異方性磁気抵抗効果素子	112
イメージセンサ	103
イメージセンシング	185

【う】	
渦式流量計	176
埋込酸化膜	57

【え】	
永久磁石	133
エッチング	58
エネルギー準位	35
エネルギーバンド構造	32

【お】	
応 力	155
オシロメトリック法	225
帯構造	40
温度センサ	147

【か】	
カーボンナノチューブ	254
開口数	206
解像限界	186
回転検出の原理	131
回転数依存性	132
回転センサ	131
回転センサの特性	132
化学センサ	134
角速度センサ	90

拡張期血圧	222
角度センサ	82
加算回路	72
可視光センサ	98
ガスセンサ	135
画像計測	195
画像処理	193
画像認識	196
画像変換	194
加速度センサ	85
価電子	37
価電子帯	40
カフ圧迫法	224
カフレス血圧計	227
感覚量	4
干渉計	209
間接測定方式	5
間接法	223

【き】	
機械学習	198
機械量センサ	82
規格化周波数	205
基礎物理定数	22
機能型	207
基本単位	21
教師データ	200
共振角周波数	86
共有結合	37
魚群探知器	164
巨大磁気抵抗効果素子	112
禁制帯	40
金属測温抵抗体	147

【く】	
空間周波数特性	189
組立単位	22
グラフェン	254
グレーデッド型光ファイバ	204

【け】	
形状磁気抵抗効果	128
係数パターン	194
計 測	3
計量標準技術	24
ゲージ圧	223
下水道の流量計	167
血 圧	221
血圧計	221
血流速度計	167
検 出	3
減衰比	86

【こ】	
高感度 InSb 薄膜ホール素子	115
校正	10
剛性率	157
光電流	46
光導電効果	33, 43
国際単位系	19
誤差逆伝搬法	200
固体電解質イオン選択性電極	139
固体物理学	32
コモンモードノイズ	79
コリオリ式流量計	179
コリオリ力	90
コロトコフ音	224
【さ】	
差圧式流量計	175
サーミスタ	148
最高血圧	222
最低血圧	222
撮像面照度	190
差動増幅回路	70
差動トランス	83
サニャック効果	90, 209
酸化ヘモグロビン	231
【し】	
磁気センサ	133
磁気抵抗効果	128
磁気抵抗素子	84
時分割多重	210
収縮期血圧	222
集積回路技術	133
周波数応答特性	10
周波数変調連続波	213
縮小投影露光	54
受信信号強度	239
受動型	208
シュレーディンガー方程式	34, 41

準分布型	219
障害物探知システム	164
焦点距離	188
常用定数	22
ショートバー電極	129
シングア라운드法	165
シングルモード光ファイバ	205
信号媒体	17
真性半導体	44
シンチレータ	191
心電計	227
心電図	227
振動ジャイロ	90
【す】	
水晶温度センサ	152
水頭圧差	223
スカラポテンシャル	159
ステップ	54
ステップ型光ファイバ	204
ステレオカメラ	192
すべり波	160
【せ】	
正規化相関	198
正孔	43
生体計測	221
静電式	92
静電誘導ノイズ	77
静電容量式	86
ゼーベック効果	150
赤外イメージセンサ	109
赤外線センサ	106
積分回路	74
接触式温度センサ	147
接頭語	22
セミアクティブタイプ	236
センサ	3
センサ外付け型	240
センサ内蔵型	240
センシング	3
船体の移動速度計	167

【そ】	
双極肢誘導	228
双極誘導	227
測深器	164
測定	3
測定目的	16
測距器	164
【た】	
タービン式流量計	181
ダイアフラム	51, 94
耐環境性	16
胎児心音計	167
体積弾性率	157
体積膨張率	157
ダイナミックレンジ	187
ダイヤモンド NV 中心	254
縦波	159
多点計測	203
多モード光ファイバ	205
単一モード光ファイバ	205
単極肢誘導	229
単極誘導	227
弾性コンプライアンス定数	156
弾性定数	156
弾性表面波	153
短絡電極	129
【ち】	
逐次比較型 A/D 変換回路	75
超音波液面計	164
超音波式流速計	166
超音波式流量計	166, 178
超音波車両感知器	163
超音波積雪計	164
聴診法	224
直接接合	60
直接測定方式	5
直接法	223

【て】

ディーブラーニング 199
 抵抗変化型温度センサ 147
 鉄歯車 131
 電圧測定型バイオセンサ 142
 電気化学エッチング 59
 電気化学的バイオセンサ 142
 電子移動度 113
 電磁式 92
 電磁式流量計 178
 電磁誘導ノイズ 78
 電磁誘導方式 236
 伝送路型 207
 伝導帯 40
 電波方式 236
 伝搬モード 205
 テンプレートマッチング 197
 電流磁気効果 113
 電流測定型バイオセンサ 142

【と】

等エネルギー面 47
 透過型 208
 等色関数 187
 導波モード 205
 等方性エッチング 58
 動脈血酸素飽和度 231
 特徴空間 196
 特徴ベクトル 197
 ドップラーナピゲータ 167
 ドップラー光周波数シフト 208
 ドナー 44
 トノメータ法 226
 度量衡 3
 トレーサビリティ 24
 トンネル磁気抵抗素子 112

【に】

ニュートンの法則 158
 ニューラルネットワーク 199

【ね】

熱型赤外線センサ 108
 熱式流量計 180
 熱線式流速計 182
 熱電対 150
 ネルンスト式 136

【の】

ノイズ 77
 能動型 208
 ノーマルモードノイズ 79

【は】

バイオセンサ 140
 ハイブリッドホール IC 125
 波数ベクトル 42
 波長分割多重 210
 白金測温抵抗体 147
 パッシブソナー 168
 パッシブタイプ 236
 バルクマイクロマシニング 52
 パルスオキシメータ 231
 反射型 208
 反転増幅回路 69
 半導体薄膜磁気センサ 112
 反応性イオンエッチング 60

【ひ】

ピエゾ抵抗係数 48
 ピエゾ抵抗効果 33, 46, 51
 ピエゾ抵抗式 86
 比較増幅回路 72
 光起電力 46
 光起電力効果 33
 光時間領域反射計 212
 光周波数領域反射計 213

光センサ 97
 光ファイバ 203
 光ファイバジャイロ 209
 光ファイバセンサ 203
 光ファイバブラッググレーティング 217
 光誘起屈折率変化 217
 光 AE センサ 209
 比屈折率差 206
 微弱音検出器 169
 微小圧振動 225
 ひずみ 155
 非製造業分野 244
 非接触式温度センサ 147
 非接触センサ 115
 ビッグデータ 247
 ピトー管式流速計 182
 非反転増幅回路 69
 表層探査装置 169
 表面マイクロマシニング 52
 非 SI 単位 22

【ふ】

ファラデー型センサ 209
 ファラデー効果 209
 風向風速計 166
 フーリエ変換 41
 フェルミ準位 45
 フォトダイオード 99
 フォトトランジスタ 103
 フォトリソグラフィ 52
 複合計測化 249
 フックの法則 156
 負の屈折率 254
 ブラッグ波長 217
 ブラッグ反射 40
 ブリュアン光時間領域反射計 216
 ブリルアンゾーン 42
 分布型光ファイバ音響センサ 214
 分布型光ファイバ温度センサ 216

分布型光ファイバセンサ	211			CCD イメージセンサ	104
		【も】		CMOS イメージセンサ	104
分布型光ファイバひずみセンサ	217	モード	205	CMOS ホール IC	126
分布計測	203	モノリシックホール IC	115	CNT	254
		【や】		CTR サーミスタ	149
【へ】		ヤング率	158	CVD	55
ベクトルポテンシャル	159			DA 変換回路	73
ヘモグロビン	231	【ゆ】		DAS	214
変位センサ	82	有効質量	47	DC ブラシレスモータ	133
偏波保持光ファイバ	204			DRIE	57
		【よ】		DSS	217
【ほ】		陽極接合	60, 95	DTS	216
ポアソン比	158	容積式流量計	181	EMC	77
ホイートストンブリッジ	48	容積補償法	226	EMI	77
ポイント型センサ	209	横波	160	EMS	77
放射温度計	154	読み取り機	235	F 値	188, 189
ホール IC	123			FBG	217
ホール係数	113	【ら】		FMCW	213
ホール効果	112	ラーメの定数	156	GaAs ホール素子	122
ホール素子	84, 113	ラインセンサ	188	HDR カメラ	188
ホールモータ	133	ラマン OTDR	214	HF 帯	236
ポテンショメータ	83			IC 化温度センサ	151
ポテンショメトリックバイオセンサ	142	【り】		IC チップ	235
		リーダー	235	InAs 量子井戸ホール素子	121
【ま】		リニアハイブリッドホール IC	126	InSb 単結晶薄膜	129
マイクロマシニング	50	流速流向計	166	ISFET	139
マイケルソン干渉計	209	流量・流速センサ	172	Lambert-Beer の法則	232
マスクアライナ	54	量子型赤外線センサ	107	LSI	54
マルチモード光ファイバ	205			MEMS	50, 82
		【れ】		MEMS 圧力センサ	94
【み】		レーザドップラー式流速計	183	MR 素子	128
見える化学法	247			MTF	189
ミラー研削	132	レーザドップラー速度計	208	NN	199
		レゾルバ	84	OFDR	213
【め】				OP アンプ	64
メタデータ	251			OTDR	212
メタマテリアル	254			PD	100
面積式流量計	176			PIN 型フォトダイオード	101
		【欧文】		PIN-PD	101
		AE	209	PN 型フォトダイオード	100
		BOTDA	216	PSG	56
		BOTDR	216	PTC サーミスタ	149

RC ローパスフィルタ	79	SH 波	160	SOI	57
RFID	235	SI	19	sp^3 混成軌道	38
RFID センサ	235	Si 集積回路増幅器	125	SV 波	160
RFID タグ	235	Si ドープ InAs 単結晶薄膜		TDM	210
ROTDR	214	ホール素子	120	TOF	192
RSSI	239	SMR	128	UHF 帯	236
SAW 温度センサ	153	Sn ドープ InSb 単結晶薄膜		V パラメータ	205
SfM	192		132	WDM	210

— 著者略歴 —

小林 彬 (こばやし あきら)

1965年 東京工業大学工学部制御工学科卒業
1967年 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了(制御工学専攻)
1969年 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了(制御工学専攻), 工学博士
1969年 東京工業大学工学部助手
1975年 東京工業大学工学部助教授
1987年 東京工業大学教授
2005年 東京工業大学名誉教授
2005年 大学評価学位授与機構客員教授
2005年 帝京平成大学現代ライフ学部教授
2010年 帝京平成大学健康メディカル学部教授
2014年 次世代センサ協議会 会長
現在に至る

栗山 敏秀 (くりやま としひで)

1971年 東京大学工学部物理工学科卒業
1973年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了(物理工学専攻)
1977年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(電子工学専攻), 工学博士
1977年 日本電気株式会社 勤務
2006年 近畿大学教授
2020年 次世代センサ協議会 理事/企画委員長
現在に至る

高田 敬輔 (たかだ けいすけ)

1962年 金沢大学工学部電気工学科卒業
1962年 株式会社東芝 勤務
2000年 ワイズ福祉情報研究所 設立
2001年 金沢工業大学非常勤講師
2020年 次世代センサ協議会 専務理事/事務局長
現在に至る

臼田 孝 (うすだ たかし)

1987年 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了(精密機械システム専攻)
1990年 通産省工業技術院計量研究所(現 産業技術総合研究所) 入所
2000年 博士(工学)(東京工業大学)
2017年 次世代センサ協議会 理事
2021年 産業技術総合研究所 執行役員
現在に至る
2021年 計量標準総合センター 総合センター長(兼務)

室 英夫 (むろ ひでお)

1976年 東京大学工学部電子工学科卒業
1978年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了(電子工学専攻)
1981年 日産自動車株式会社 勤務
1997年 博士(工学)(東京大学)
2006年 千葉工業大学教授
2019年 次世代センサ協議会 理事/技術委員長
現在に至る

石垣 武夫 (いしがき たけお)

1966年 早稲田大学第一理工学部応用物理学科卒業
1968年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了(応用物理学専攻)
1968年 松下技研株式会社 勤務
2005年 次世代センサ協議会 理事/広報委員長
2022年 次世代センサ協議会 監事
現在に至る

柴崎 一郎 (しばさき いちろう)

1966年 東京理科大学理学部物理学科卒業
1968年 東京教育大学(現 筑波大学)大学院理学研究科修士課程修了(物理学専攻)
1971年 東京教育大学大学院理学研究科博士課程修了(物理学専攻), 理学博士
1974年 旭化成工業株式会社(現 旭化成株式会社)勤務
2003年 旭化成グループフェロー
2009年 豊橋技術科学大学特命教授
2009年 野口研究所 学術顧問
現在に至る

浅野 安人 (あさの やすひと)

1972年 静岡大学理学部物理学科卒業
1972年 静岡大学理学部物性物理学実験助手
1973年 日本軽金属株式会社 勤務
2011年 株式会社 SGK システム技研 顧問
2016年 次世代センサ協議会 事業委員
現在に至る

関口 眞吾 (せきぐち しんご)

1972年 東京都立工業高等専門学校機械工学科卒業
1982年 東京電機大学電子工学科卒業
1984年 東京電機大学大学院工学研究科修士課程修了(電気工学専攻)
1984年 株式会社東芝 勤務
2016年 次世代センサ協議会 社会インフラモニタリング研究会・委員
現在に至る

石森 義雄 (いしもり よしお)

1978年 東京工業大学工学部高分子工学科卒業
1980年 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了(電子化学専攻)
1982年 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了(電子化学専攻), 工学博士
1982年 株式会社東芝 勤務
2018年 次世代センサ協議会 理事/事業委員会委員長
現在に至る

大木 眞一 (おおき しんいち)

1974年 早稲田大学理工学部機械工学科卒業
1976年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了(制御工学専攻)
1976年 横河電機株式会社 勤務
2015年 次世代センサ協議会 理事/技術委員
2015年 日本工業大学特別研究員
現在に至る

足立 正二 (あだち しょうじ)

1979年 信州大学工学部電子工学科卒業
1981年 信州大学大学院工学研究科修士課程修了(電子工学専攻)
1981年 安藤電機株式会社 勤務
2004年 茨城大学大学院理工学研究科博士後期課程修了(情報・システム科学専攻), 博士(工学)
2004年 横河電機株式会社 勤務
2015年 光ファイバセンシング振興協会 副理事長/事務局長
現在に至る

五十嵐 朗（いからし あきら）

- 1987年 新潟大学工学部情報工学科卒業
- 1989年 北海道大学大学院工学研究科修士課程
修了（生体工学専攻）
- 1989年 日本電気株式会社 勤務
- 2009年 金沢大学大学院自然科学研究科博士後
期課程修了（システム創成科学専攻）、
博士（工学）
- 2010年 藍野大学講師
- 2012年 藍野大学准教授
- 2014年 藍野大学教授
現在に至る

菰田 夏樹（こもだ なつき）

- 2008年 大阪府立大学（現 大阪公立大学）工学
部機械システム工学科卒業
- 2010年 大阪大学大学院工学研究科修士課程修
了（知能・機能創成工学専攻）
- 2013年 大阪大学大学院工学研究科博士課程修
了（知能・機能創成工学専攻）、博士
（工学）
- 2013年 トップバン・フォームズ株式会社 勤務
現在に至る

センサ技術の基礎と応用

Foundations and Applications of Sensor Technology

© 公益社団法人 計測自動制御学会 2023

2023年3月10日 初版第1刷発行

検印省略

編者 公益社団法人
計測自動制御学会
一般社団法人
次世代センサ協議会

著者 小林 彬
白田 孝
栗山 敏秀
室 英夫
高田 敬輔
石垣 武夫
柴崎 一郎
石森 義雄
浅野 安人
大木 眞一
関口 眞吾
足立 正二
五十嵐 朗
菰田 夏樹

発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来 真也

印刷所 美研プリンティング株式会社
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 978-4-339-03386-1 C353 Printed in Japan

(新井)



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。