

ロボティクスシリーズ **3**

# メカトロニクス計測の基礎

工学博士 石井 明  
博士(工学) 木股 雅章 共著  
工学博士 金子 透

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（ $\pi$ 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となる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 $\pi$ 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

計測技術は、産業活動に限らず広く社会生活を支える上で不可欠な技術である。その内容は自然科学の各分野の知識を基盤とし広く深い。したがって、一編の教科書で取り上げることができる技術内容はおのずと限られる。本書は初学者を対象とし、大学のセメスタ 15 週の講義の範囲で扱える内容として、基本的な測定の実施方法と測定結果の表現方法およびメカトロニクス分野における主要な測定信号の検出と変換に必要なセンサ技術に限ることとした。そのため、信号処理技術の詳細や具体的なセンサ応用・計測システムについては触れていない。また部品材料の試験や感覚量の計測において、測定の効率的実施と測定結果の判定に有用な統計解析手法である、実験計画法、分散分析、 $t$  検定等についても割愛した。これらに関し、信号処理技術とセンサ応用・計測システムについては、それぞれ本シリーズの「信号処理論」と「応用センサ工学」において、統計解析については同シリーズの「感覚生理工学」において取り上げられているので、読者の関心に応じて参照していただければ計測の知識を広げるのに有効であろう。

上記執筆方針により、本書による学習の狙いをつぎの点においた。まず、測定の基本的な実施方法と測定結果の表現方法については、測定のトレーサビリティを軸に、国際標準から測定現場にいたるトレーサビリティの連鎖、国際的なトレーサビリティの進展を支えるため近年導入が広がってきた測定値の不確かさの表現、そして、その基礎となる誤差分布の統計解析についての理解を得ることを狙いとする。また、実験学習、卒業研究の場など身近な測定機会で要求される基礎知識として、測定条件、特に測定の要求精度の設定、測定値の有効数字の表示、さらに測定値列が示す現象のグラフなどによる可視的表現について習得することを狙いとする。測定信号の検出と変換については、各種物理

現象の応用とセンサ技術の適用による代表的な物理量の検出変換方法について述べ、電気量、力学量、温度などの基本的な測定量の具体的な測定方法について基礎知識を得ることを狙いとする。これらの狙いから、本書を以下のように構成した。

1章では、計測の基本的な概念を理解するために、計測の役割と計測システムの構成および種々の測定法について概説する。2章では、国際単位系と測定標準のネットワークとしてのトレーサビリティについて述べる。3章では、個々の物理量から測定信号を得るための基本的な原理と手段について述べ、4章では、電圧、電流、変位、圧力、温度などの基本的な物理量の測定方法について述べる。5章では、測定値の誤差分布について統計的に解析し、誤差の母集団の平均および分散を推定する方法および誤差解析の基盤となる正規分布の統計的性質について述べる。6章では、得られた測定値の精度と信頼性を統計的に評価する方法を述べた後、統計的方法以外の評価も合わせた測定値の不確かさの概念の導入と不確かさの評価方法について述べる。なお、初学者においては、6章を飛ばして、先に、7章へ進むことができる。最後の7章では、実際の測定の場合で出会うことが多い基本的な測定値の取り扱い方について、複数の測定量の測定結果から一つの測定量の値を算出する際の各測定の要求精度の設定、測定値の計算結果における有効数字の把握、さらに測定値列から現象の全体的傾向を理解するためのグラフによる表示および最小二乗法を用いた近似関数の当てはめについて述べる。執筆は、1章、2章、5章、6章を石井、3章、4章を木股、7章を金子が担当した。

2012年12月

著者代表 石井 明

# 目 次

## 1. 計測の概要

|                 |    |
|-----------------|----|
| 1.1 計測の役割       | 1  |
| 1.2 測定の種類       | 2  |
| 1.2.1 直接測定と間接測定 | 2  |
| 1.2.2 絶対測定と比較測定 | 3  |
| 1.3 測定の方法       | 4  |
| 1.3.1 零位法       | 4  |
| 1.3.2 偏位法       | 6  |
| 1.3.3 置換法       | 6  |
| 1.3.4 合致法       | 7  |
| 1.3.5 補償法       | 10 |
| 1.3.6 差動法       | 10 |
| 章末問題            | 11 |

## 2. 単位と標準

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 2.1 測定量               | 12 |
| 2.2 測定標準              | 13 |
| 2.2.1 現象を特徴づける数値による定義 | 13 |
| 2.2.2 計測器による定義        | 14 |
| 2.2.3 標準試料による定義       | 14 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 2.3 国際単位系              | 14 |
| 2.3.1 SIの構成            | 15 |
| 2.3.2 SI単位の表記と使用に関する規則 | 19 |
| 2.4 標準の供給              | 20 |
| 2.4.1 標準器と標準物質         | 20 |
| 2.4.2 トレーサビリティ         | 21 |
| 章末問題                   | 23 |

### 3. 信号の検出と変換

|                   |    |
|-------------------|----|
| 3.1 力学の利用         | 24 |
| 3.1.1 サイズモ系       | 24 |
| 3.1.2 コリオリ力       | 26 |
| 3.1.3 フックの法則      | 27 |
| 3.1.4 ベルヌーイの定理    | 28 |
| 3.1.5 カルマン渦       | 30 |
| 3.2 光学，音響学の利用     | 31 |
| 3.2.1 量子型光電変換     | 31 |
| 3.2.2 熱型光電変換      | 34 |
| 3.2.3 干渉          | 36 |
| 3.2.4 光てこ         | 38 |
| 3.2.5 ドップラー効果     | 39 |
| 3.2.6 画像の利用       | 40 |
| 3.2.7 光速，音速の利用    | 42 |
| 3.3 電気電子工学の利用     | 42 |
| 3.3.1 抵抗の温度依存性の利用 | 42 |
| 3.3.2 ピエゾ抵抗効果     | 43 |



|                    |    |
|--------------------|----|
| 3.3.3 静電容量の利用      | 45 |
| 3.3.4 圧電効果         | 46 |
| 3.3.5 焦電効果         | 46 |
| 3.3.6 ゼーベック効果      | 47 |
| 3.3.7 ホール効果・磁気抵抗効果 | 49 |
| 3.3.8 電磁誘導         | 51 |
| 章末問題               | 53 |

#### 4. メカトロニクスの基本測定

|                    |    |
|--------------------|----|
| 4.1 電圧, 電流, 抵抗の測定  | 54 |
| 4.2 位置, 速度, 加速度の測定 | 60 |
| 4.3 応力・ひずみ・圧力の測定   | 65 |
| 4.4 流速・流量の測定       | 68 |
| 4.5 温度・熱量の測定       | 71 |
| 4.6 光, 放射線の測定      | 76 |
| 章末問題               | 78 |

#### 5. 測定値の誤差と精度

|               |    |
|---------------|----|
| 5.1 測定値と誤差    | 79 |
| 5.1.1 真の値と誤差  | 79 |
| 5.1.2 測定値の母集団 | 79 |
| 5.1.3 正確さと精密さ | 80 |
| 5.2 誤差の種類     | 81 |
| 5.2.1 系統誤差    | 81 |
| 5.2.2 偶然誤差    | 81 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 5.3 誤差の法則                       | 81 |
| 5.3.1 誤差の性質                     | 81 |
| 5.3.2 誤差の確率分布のモデル               | 82 |
| 5.3.3 正規分布の性質                   | 83 |
| 5.3.4 誤差伝播の法則                   | 85 |
| 5.4 母集団の平均と分散の推定                | 87 |
| 5.4.1 母平均と母分散の不偏推定量             | 87 |
| 5.4.2 試料平均の母集団における母平均と母分散の不偏推定量 | 89 |
| 章 末 問 題                         | 90 |

## 6. 測定値の信頼性評価と不確かさの評価

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 6.1 母平均と母分散の区間推定           | 92  |
| 6.1.1 母平均 $\mu$ の信頼区間      | 93  |
| 6.1.2 母分散 $\sigma^2$ の信頼区間 | 95  |
| 6.2 測定の不確かさの評価             | 96  |
| 6.2.1 測定量の関数によるモデル化        | 97  |
| 6.2.2 標準不確かさの A タイプ評価      | 99  |
| 6.2.3 標準不確かさの B タイプ評価      | 99  |
| 6.2.4 合成標準不確かさの評価          | 101 |
| 6.2.5 拡張不確かさの評価            | 102 |
| 6.2.6 不確かさの表記              | 104 |
| 6.2.7 ブロックゲージの校正における不確かさ解析 | 104 |
| 章 末 問 題                    | 112 |

## 7. 測定値の取り扱い方

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 7.1 間接測定における各測定の精度の選定 .....    | 113 |
| 7.1.1 間 接 測 定 .....            | 113 |
| 7.1.2 精 度 の 選 定 .....          | 114 |
| 7.2 有効数字と計算の精度 .....           | 115 |
| 7.2.1 有 効 数 字 .....            | 115 |
| 7.2.2 数 値 の 丸 め 方 .....        | 116 |
| 7.2.3 測 定 値 の 演 算 .....        | 117 |
| 7.3 測定結果の表し方 .....             | 119 |
| 7.3.1 グ ラ フ 表 示 .....          | 119 |
| 7.3.2 グラフに対する直線や曲線の当てはめ .....  | 122 |
| 7.4 関数の当てはめ .....              | 122 |
| 7.4.1 最 小 二 乗 法 .....          | 122 |
| 7.4.2 外 れ 値 の 処 理 .....        | 126 |
| 7.4.3 複数の関数を当てはめる場合 .....      | 127 |
| 7.4.4 ヘッセの標準形を用いた直線の当てはめ ..... | 128 |
| 章 末 問 題 .....                  | 133 |
| 引用・参考文献 .....                  | 134 |
| 章末問題解答 .....                   | 136 |
| 索 引 .....                      | 145 |

# 1

## 計測の概要

本章では、計測の役割と計測システムの成り立ちについて述べ、計測の基盤となる測定の概念と方法について基本的な理解を得ることを目的とする。

### 1.1 計測の役割

計測について、日本工業規格 (Japanese Industrial Standard, JIS) では「特定の目的をもって、事物を量的にとらえるための方法・手法を考究し、実施し、その結果を用い所期の目的を達成すること」と定義している (JIS 計測用語 Z 8103:2000)。特定の目的としては、最先端の科学技術研究から農業・鉱工業生産や公共システムにいたるまで幅広い範囲に存在する。それぞれの分野で特定の目的に<sup>かな</sup>適った計測を実現するためには、分野特有の知識や技術が必要となるが、各計測に共通に使える計測の方法が存在する。計測は測定から始まる。測定 (measurement) は、「ある量を、基準として用いる量と比較し、数値又は符号を用いて表すこと」と定義される (同上 JIS 計測用語)。計測システムは、測定量を信号に変換する検出器 (detector) またはセンサ (sensor)、入力信号を処理しやすい信号 (通常は電気信号) に変換する変換器またはトランスデューサ (transducer)、検出器からの信号を伝送に適した信号に変換する伝送器または発信器 (transmitter)、および伝送された信号を受け、指示、記録、警報などを行う受信器 (receiver) から構成される (図 1.1)。検出器はセンサとも呼ばれ、計測または測定の目的に応じた最適なセンサ技術が使用される。計測システムの開発にあたって新たにセンサ技術が開発されることもあり、センサが計測シ

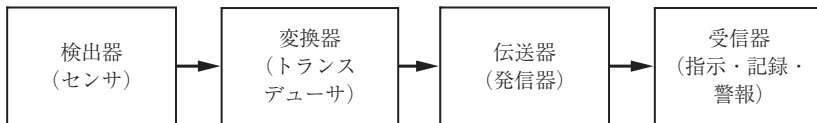


図 1.1 計測システムの構成

システムを特徴づける構成要素となることがある。受信器は単なる指示計器に止まらず、高度の信号処理、情報処理を行う情報処理装置であることもある。

## 1.2 測定の種類

測定は、**直接測定** (direct measurement) と**間接測定** (indirect measurement) で、また**絶対測定** (absolute measurement) と**比較測定** (relative measurement) で、基本的に実施方法が異なる。

### 1.2.1 直接測定と間接測定

測定量をそれと同種類の基準として用いる量（標準器、あるいは公的な基準器による）と比較して単位量との比を直接数値化する測定を直接測定という。例えば、長さを長さの基準である目盛りのついた物差しやブロックゲージと比較し、電気抵抗をホイートストンブリッジ回路（図 1.2）を用いて標準抵抗と比較し、電位差を標準電池から作られた標準の電位差と比較して行う測定である。これに対し、測定量と一定の関係にあるいくつかの独立の測定結果から測定値を計算によって導き出す測定を間接測定という。例えば、速さの測定値を時間とその時間に移動した距離の二つの独立した測定から、電位差の測定値を独立した抵抗と電流の測定から導く測定がこれにあたる。

計測の実際的立場からは、直接測定は必要な測定量が直接的に測定できる場合であり、間接測定は必要な測定量が直接に測定できないので、その量と関係のあるいくつかの量を測定して、それらの値から間接的に計算によって目的の測定量を求める場合である。

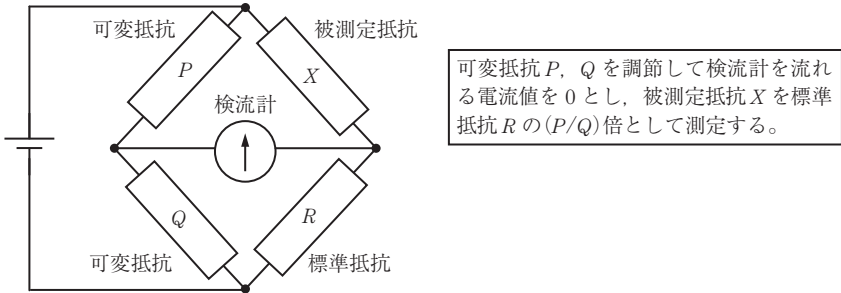


図 1.2 ホイートストンブリッジ回路による電気抵抗の測定

### 1.2.2 絶対測定と比較測定

絶対測定は、厳密には基本測定法 (fundamental method of measurement) と定義測定法 (definitive method of measurement) に分けられる。基本測定法は、基本量 (2.1 節で詳述) を組み合わせて定義される組立量を基本量の測定によって決定する測定方法 (間接測定) である。ここで、測定量は組立量であって、それ以外の一般の測定量は除かれる。例としては、水銀気圧計 (mercurial barometer) において、水銀柱の高さ、密度、重力の加速度の測定から圧力を導く測定、またピストン圧力計 (piston gauge) (図 1.3) において、ピストンに働く重力とピストンの断面積を質量、重力の加速度および直径の測定値から求めて圧力の測定値を導く測定が挙げられる。定義測定法は、ある量をその量の単位の定義に従って、測定する測定方法である。例えば、 $^{133}\text{Cs}$  原子周波数標準器 (cesium-beam atomic frequency standard) が示す周波数と直接比較して行う周波数の測定がこれにあたる。

比較測定法は、同種類の量と比較して行う測定である。電流計 (ammeter) は、目盛板に記された既知の電流量と測定電流量を指針の振れにより比較して行う比較測定であり、一般の測定の多くは比較測定法によっている。

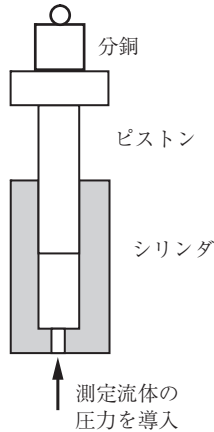


図 1.3 ピストン圧力計

### 1.3 測定の方法

測定を実施する方法はさまざまであるが、基本的には以下の六つに分類される測定系の構成と比較の方法のいずれかによっていると考えることができ、測定の目的に応じて、測定の精度、システム構築の費用、利便性などを判断して最適の方法が選択される。

#### 1.3.1 零位法

零位法 (null method) は、測定量と独立に大きさを調整できる同種類の既知量を別に用意し、既知量を測定量と比較して差を検出し、差が0となるように差に応じて既知量を調節し、差が0となる既知量の大きさから測定量を求める方法である。ただし、測定量と既知量を直接比較するのではなく、それぞれから導かれる量を比較する場合もある。調節の都度、再比較のため既知量は測定量とともに差検出手段に入力されるので、ここに差検出段から既知量調節段を経て既知量出力段から再び差検出段に戻るフィードバックループ (feedback loop) ができている。このフィードバックループの存在が零位法の特徴である。

天秤<sup>びん</sup> (balance) は、零位法により質量を測る代表的な測定器である。図 1.4

に示すように、二つの皿が中央を支えられた長さ  $2l$  の棹さおの両端につるされ、左の皿に質量  $M$  の測定したい物体を載せ、右の皿には既知の質量  $M_s$  の分銅を載せる。重力加速度を  $g$  とすると、棹には逆方向の力のモーメント  $Mgl$ ,  $M_sgl$  が働く。分銅の質量  $M_s$  を調節して棹を水平にすることができれば、 $M = M_s$  として物体の未知質量  $M$  の値を測定することができる。天秤の場合、測定量と既知量（分銅）をそれぞれに対応する力のモーメントに変換して比較している。モーメントの差の検出は、棹の傾きを測定者が見て行い、分銅の調整は測定者の手により分銅を皿に載せたり皿から取り除いたりして行っている（図 1.5）。

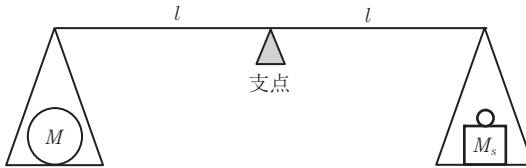


図 1.4 零位法による天秤

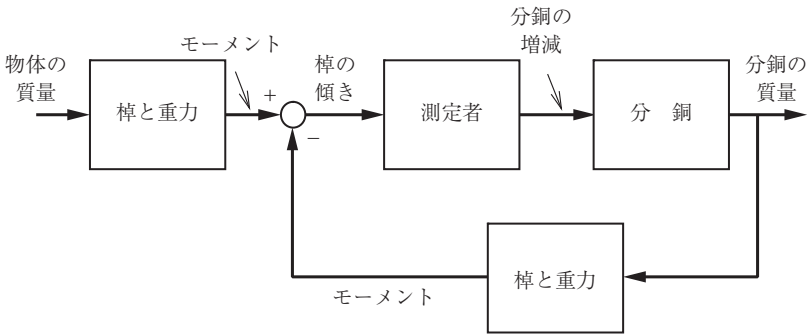


図 1.5 フィードバックループを持つ天秤の測定系

その他の零位法の例として、電位差計 (potentiometer) では、滑り抵抗器の接点位置を調整することにより測定範囲内にある任意の標準電位差を作り出し、それを測定量である電位差と平衡させ、滑り抵抗器の接点位置から測定電位差を求めるようになっている。マイクロメータ (micrometer) では、ねじの回転によって、測定面の間に任意の間隔を作り出せるようになっていて、それを測



定しようとする長さまたは厚みに等しく調整し、そのときのねじの回転角から測定値を求める。

### 1.3.2 偏位法

偏位法 (deflection method) は、測定量を原因とし、その直接の結果として生じる測定系の状態変化の指示から測定量を知る方法である。したがって、測定量は変換され信号として伝送されて指示に至るが、信号が測定系のある段階で測定量あるいはその変換量にフィードバックされることはない。

ばね秤 (spring balance) は偏位法によっている。ばねばかりの一端を固定し、他端に荷重を加えると、フックの法則により荷重に比例してばねの伸び縮みが生じ、荷重の大きさがばねの変位として指示される。したがって、指示の正しさは、ばね定数の安定性に依存する。ばね秤は重力下で物体の質量の測定に用いられる。その他の偏位法の例として、ダイヤルゲージ (dial gauge) は、棒状の測定スピンドルの変位 (測定量) が基になり、歯車で拡大された変位が直接指針の振れとして指示される。また、可動コイル指示電流計では、可動コイルを流れる測定量の電流が基になって電磁力が生じ、可動コイル自身の回転による連結指針の振れにより測定電流量が指示される。

### 1.3.3 置換法

置換法 (substitution method) は、未知量と既知量とを置換して 2 回の測定結果から測定量を知る方法である。正確な基準と比較し、測定器自身の不正に基づく誤差を除くことができる。天秤の例では、図 1.6 に示すように、初めに右の皿に未知量  $M$  を載せ、分銅  $M_1$  と平衡させる。つぎに左右を置換して、左の皿に未知量  $M$  を載せ、右の皿の分銅  $M_2$  と平衡させる。棹の左右の腕の長さを  $l_L$ ,  $l_R$  とすると、 $Ml_R = M_1l_L$ ,  $Ml_L = M_2l_R$  から  $M^2 = M_1M_2$  として、左右の腕の長さ  $l_L$ ,  $l_R$  に影響されずに測定値を得ることができる (ガウスの二重秤量法)。天秤の腕の長さが等しくないという装置固有の誤差が除かれる。

# 索 引

|  |   |   |
|--|---|---|
| <p style="text-align: center;"><b>【あ】</b></p> <p>アクセプターレベル 32</p> <p>圧電効果 46</p> <p>圧電セラミックス 64</p> <p>圧 力 28</p> <p>アブソリュート型エンコーダ 62</p> <p>アルメル 73</p> <p style="text-align: center;"><b>【い】</b></p> <p>位置の測定 60</p> <p>一致性 89</p> <p>移動度 42</p> <p>異方性エッチング 63</p> <p>イメージセンサ 40</p> <p>インクリメント型エンコーダ 62</p> <p>インピーダンス 54</p> <p style="text-align: center;"><b>【え】</b></p> <p>エアバッグシステム 63</p> <p>A タイプ評価 97</p> <p>A-D 変換 54</p> <p>SI 15</p> <p>n 型半導体 32</p> <p>エネルギーバンド構造 31</p> <p>エラーバー 120</p> <p style="text-align: center;"><b>【お】</b></p> <p>応 力 27</p> <p>オペアンプ 59</p> <p>オリフィス 69</p> <p>温度測定 71</p> <p>温度補償回路 67</p> | <p style="text-align: center;"><b>【か】</b></p> <p>ガイガー・ミュラー計数管 77</p> <p><math>\chi^2</math> 分布 95</p> <p>開放電圧 34</p> <p>ガウスの誤差法則 82</p> <p>角速度計 26</p> <p>拡張不確かさ 102</p> <p>隔膜真空計 67</p> <p>画 素 41</p> <p>加速度 24</p> <p>——の測定 62</p> <p>加速度センサ 63</p> <p>かたより 80</p> <p>合致法 7</p> <p>カットオフ波長 32</p> <p>価電子帯 31</p> <p>可変抵抗 56</p> <p>カルマン渦列 30</p> <p>干 渉 36</p> <p>慣性力 26</p> <p>間接測定 2</p> <p>感度係数 101</p> <p>ガンマ関数 94</p> <p style="text-align: center;"><b>【き】</b></p> <p>器 差 81</p> <p>期待値 87</p> <p>起電力 33</p> <p>基本測定法 3</p> <p>基本単位 14</p> <p>基本量 12</p> <p>逆圧電効果 46</p> <p>逆方向飽和電流 34</p> <p>キャパシタンスマノメータ 67</p> <p>キャリヤ 32</p> <p>キュリー温度 47</p> | <p>金属測温抵抗体 72</p> <p>金属抵抗体温度計 42</p> <p style="text-align: center;"><b>【く】</b></p> <p>偶然誤差 81</p> <p>空乏層 33</p> <p>区間推定 92</p> <p>矩形分布 100</p> <p>組立単位 14</p> <p>組立量 13</p> <p>クラーメルとラオの下界 90</p> <p>グローバルシャッタ 41</p> <p>クロメル 73</p> <p style="text-align: center;"><b>【け】</b></p> <p>計 測 1</p> <p>携帯端末 64</p> <p>系統誤差 81</p> <p>ゲージ率 44</p> <p>減算器 59</p> <p>原子周波数標準器 3</p> <p>検出器 1</p> <p>検流計 58</p> <p style="text-align: center;"><b>【こ】</b></p> <p>工業量 12</p> <p>光 子 32</p> <p>校 正 12, 21</p> <p>合成標準不確かさ 98</p> <p>光電変換 32</p> <p>光量子 32</p> <p>光路差 36</p> <p>国際単位系 14</p> <p>国際度量衡委員会 15</p> <p>国際度量衡総会 15</p> <p>国際標準 12</p> <p>国際標準化機構 19</p> |
|--|---|---|

|            |        |                 |        |            |        |
|------------|--------|-----------------|--------|------------|--------|
| 黒体         | 75     | 信頼の水準           | 102    | 直接測定       | 2      |
| 誤差         | 79     | 心理物理量           | 12     |            |        |
| 誤差関数       | 82     |                 |        | <b>【て】</b> |        |
| 誤差伝播の法則    | 86     | <b>【す】</b>      |        | 定義測定法      | 3      |
| 国家標準       | 12, 21 | 水銀気圧計           | 3      | 抵抗温度係数     | 43, 72 |
| コリオリ力      | 26     | スキヤナ            | 61     | 抵抗分圧器型電位差計 | 56     |
| コンスタンタン    | 73     | スチューデントの $t$ 分布 | 93     | 抵抗ポロメータ    | 77     |
|            |        | ステファン・ボルツマン定数   | 75     | 抵抗率        | 43     |
| <b>【さ】</b> |        |                 |        | デジタル信号     | 54     |
| サーミスタ      | 72     | ストローハル数         | 30     | デジタルマルチメータ | 54     |
| サーモグラフィ    | 76     | スピニングロータゲージ     | 68     | 電位差計       | 5      |
| サーモパイル     | 48     |                 |        | 電気マイクロメータ  | 10     |
| 最小二乗法      | 123    | <b>【せ】</b>      |        | 電磁誘導       | 51     |
| 最尤推定法      | 123    | 正確さ             | 80     | 点推定        | 92     |
| 最尤法        | 123    | 正規分布            | 82     | 伝送器        | 1      |
| 最良推定値      | 90     | 正規方程式           | 124    | 伝導帯        | 31     |
| 差動増幅器      | 59     | 正孔              | 32     | 天秤         | 4      |
| 差動変圧器      | 10     | 静電容量            | 45     | 電離箱        | 77     |
| 差動法        | 10     | 精度              | 81     | 電流計        | 3      |
| サニャック効果    | 64     | 精密さ             | 80     |            |        |
| 三角分佈       | 101    | ゼーベック係数         | 49     | <b>【と】</b> |        |
| 残差         | 79     | ゼーベック効果         | 48     | 特定二次標準器    | 21     |
|            |        | 積分器             | 59     | 特定標準器      | 21     |
| <b>【し】</b> |        | 絶対温度            | 34     | 特定副標準器     | 21     |
| GPS        | 60     | 絶対測定            | 2      | ドップラー効果    | 39     |
| 磁気抵抗効果     | 49     | センサ             | 1      | ドナーレベル     | 32     |
| 次元         | 12     | 全地球測位システム       | 60     | トランスデューサ   | 1      |
| 実験標準偏差     | 99     |                 |        | トルク        | 66     |
| 自発分極       | 46     | <b>【そ】</b>      |        | トレーサビリティ   | 12, 21 |
| 絞り流量計      | 69     | 増幅              | 54     |            |        |
| 自由度        | 88     | 測定              | 1      | <b>【な】</b> |        |
| 受光素子       | 62     | 測定値             | 79     | 内部抵抗       | 54     |
| 受信器        | 1      | 測定標準            | 12, 13 |            |        |
| 出力推定値      | 98     | 測定量             | 12     | <b>【に】</b> |        |
| 焦電効果       | 46     | 速度の測定           | 62     | 二光束干渉計     | 8      |
| 焦電体        | 46     |                 |        | 日本工業規格     | 1      |
| 常用参照標準     | 21     | <b>【た】</b>      |        | ニュートンリング   | 37     |
| 試料         | 79     | ダイオード           | 33     | 入力推定値      | 98     |
| 試料平均       | 79     | 体積流量            | 70     |            |        |
| 真性半導体      | 31     | ダイヤルゲージ         | 6      | <b>【ね】</b> |        |
| シンチレーション   | 77     | 短絡電流            | 34     | 熱型光電変換     | 76     |
| シンチレータ     | 77     |                 |        | 熱型光検出器     | 34     |
| 振動ジャイロ     | 64     | <b>【ち】</b>      |        | 熱コンダクタンス   | 35     |
| 真の値        | 79     | 置換法             | 6      | 熱線型流量計     | 58     |
| 信頼区間       | 92     | 中心極限定理          | 103    | 熱線式流速計     | 68     |
| 信頼水準       | 92     | 張力              | 27     | 熱抵抗        | 34     |

|            |        |             |     |              |        |
|------------|--------|-------------|-----|--------------|--------|
| 熱電対        | 48     | フィルタリング     | 54  |              |        |
|            |        | 4 アクティブゲージ法 | 66  | <b>【ま】</b>   |        |
| <b>【の】</b> |        | フォトダイオード    | 76  | マイクロメータ      | 5      |
| ノギス        | 7      | フォノン散乱      | 42  | マイケルソン干渉計    | 36     |
| ノズル        | 69     | 副 尺         | 7   | 丸 め          | 116    |
| 伸びひずみ      | 27     | 不確かさ        | 96  | <b>【め】</b>   |        |
|            |        | ——の伝播法則     | 101 | MEMS 技術      | 36     |
| <b>【は】</b> |        | フックの法則      | 27  | <b>【や】</b>   |        |
| 外れ値        | 126    | 物理量         | 12  | ヤング率         | 27     |
| 白金測温抵抗体    | 72     | 不偏推定値       | 87  | <b>【ゆ】</b>   |        |
| 発光素子       | 62     | 不偏推定量       | 87  | 有効推定量        | 90     |
| 発信器        | 1      | 不偏性         | 87  | 有効数字         | 115    |
| ばね秤        | 6      | 不偏標準偏差      | 88  | 誘電ポロメータ      | 47     |
| 反転加算器      | 59     | 不偏分散        | 88  | 誘電率          | 45     |
| 反転増幅器      | 59     | ブロックゲージ     | 8   | 尤 度          | 123    |
| 半導体サーミスタ   | 42     | 分光放射発散度     | 75  | <b>【よ】</b>   |        |
| 半導体ひずみゲージ  | 66     |             |     | 四端子抵抗測定器     | 57     |
| バンドギャップ    | 31     | <b>【へ】</b>  |     | <b>【ら】</b>   |        |
|            |        | ヘッセの標準形     | 128 | ラグランジュの未定乗数法 | 129    |
| <b>【ひ】</b> |        | ヘテロダイン法     | 10  | <b>【り】</b>   |        |
| p 型半導体     | 33     | ベルヌーイの定理    | 28  | リソグラフィ技術     | 72     |
| B タイプ評価    | 97     | 変 位         | 24  | リニアエンコーダ     | 62     |
| ヒートシンク     | 34     | 偏位法         | 6   | 流 速          | 28     |
| ピエゾ抵抗効果    | 45     | 変換器         | 1   | 量            | 12     |
| 比較測定       | 2      | 偏 差         | 80  | 量子型光電変換      | 32, 76 |
| 光チョッパ      | 47     | <b>【ほ】</b>  |     | <b>【れ】</b>   |        |
| 光てこ        | 38     | ポアソン比       | 44  | 零位法          | 4      |
| ピストン圧力計    | 3      | ホイートストンブリッジ | 57  | レイノルズ数       | 30     |
| ひずみゲージ     | 44     | 包含確率        | 102 | レーザダイオード     | 60     |
| ピトー管       | 69     | 包含係数        | 102 | レーザレーダ       | 60     |
| 非反転増幅器     | 59     | 放射温度測定法     | 71  | 連続の式         | 28     |
| 標準器        | 12, 20 | 放射定数        | 75  | <b>【ろ】</b>   |        |
| 標準誤差       | 120    | 放射発散度       | 75  | ロータリーエンコーダ   | 61     |
| 標準試料       | 14     | ホール効果       | 49  | ロードセル        | 66     |
| 標準正規分布     | 82     | ホール電圧       | 50  | ローリングシャッタ    | 41     |
| 標準電池       | 56     | 母集団         | 80  | ローレンツ力       | 49     |
| 標準不確かさ     | 98     | 補償法         | 10  |              |        |
| 標準物質       | 14, 21 | 母 数         | 87  |              |        |
| 標 本        | 79     | 補 正         | 80  |              |        |
| 標本平均       | 79     | 母標準偏差       | 80  |              |        |
| ピラニ真空計     | 68     | 母分散         | 80  |              |        |
| 比例係数管      | 77     | 母平均         | 80  |              |        |
|            |        | ボルツマン定数     | 34  |              |        |
| <b>【ふ】</b> |        | ボルテージホロワ    | 59  |              |        |
| フィードバックループ | 4      |             |     |              |        |

— 著者略歴 —

石井 明 (いしい あきら)  
1966年 早稲田大学理工学部  
電気通信学科卒業  
1968年 早稲田大学大学院理工学研究科  
修士課程修了 (電気工学専攻)  
1968年 日本電信電話公社 (現 日本  
電信電話株式会社) 入社  
1981年 工学博士 (早稲田大学)  
1992年 エヌ・ティ・ティ・ファネット・  
システムズ株式会社取締役  
1995年 立命館大学教授  
2009年 立命館大学特任教授  
現在に至る

木股 雅章 (きまた まさふみ)  
1976年 名古屋大学大学院工学研究科  
修士課程修了  
1976年 三菱電機株式会社入社  
1992年 博士 (工学) (大阪大学)  
2004年 立命館大学教授  
現在に至る

金子 透 (かねこ とおる)  
1972年 東京大学工学部物理工学科卒業  
1974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)  
1974年 日本電信電話公社 (現 日本  
電信電話株式会社) 入社  
1986年 工学博士 (東京大学)  
1997年 静岡大学教授  
現在に至る

メカトロニクス計測の基礎

Introduction to Measurement in Mechatronics

© Akira Ishii, Masafumi Kimata, Toru Kaneko 2013

2013年2月25日 初版第1刷発行

検印省略

著者 石井 明  
木股 雅章  
金子 透  
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 978-4-339-04514-7 (大井) (製本: 愛千製本所)

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  
き禁じられております。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