第1章 制御工学の全体像

本章では，制御工学の全体像について，基本的な力学系（物理システム）を例にとって説明する．本章の目的は，高等学校までに学ぶ初等的な数学を使って直観的に制御系設計について理解することである．そのため，制御の専門用語の厳密な定義を与えることなしに議論を進めていくので，理解が難しい部分については流し読みしてもかまわない．続く第2章以降で詳細な説明を与えていく．

1.1 制御から連想するものは？

まず，制御あるいは**コントロール**（control）という単語を聞いて，読者は何をイメージするだろうか？　予想される回答をいくつか列挙してみよう．

- 理工学（技術）分野
  - 人工衛星やロケットの姿勢制御，軌道制御
  - 自動車のエンジン制御，電気自動車のモータ制御，充電池の制御
  - 二足歩行ロボットの制御，ロボットマニピュレータの制御
  - 原子力発電所の制御棒
  - スマートグリッド（電力網）の制御
  - コンピュータ制御，電子制御，ファジィ制御
- スポーツ分野
  - あのサッカー選手のボールコントロールはすごい！
  - あのピッチャーはコントロール（制球力）が良い
- 日常生活
  - 自転車を倒れないように運転する
  - 目的地まで自動車を運転する

◇ エアコンで部屋の温度を制御する

このように，本書で学ぶ「制御」は，理工学分野だけでなく，それ以外の分野においても幅広く使われている非常に一般的な用語である．

まず，「制御」の辞書的な定義を与えておこう．

✤ Point 1.1 ✤ 制御とは

注目している対象物に属する注目している動作が，何らかの目標とする動作になるように，その対象物に操作を加えること．

技術試験衛星V型 ©JAXA　ジェットエンジン ©IHI　火星飛行機 ©JAXA

石油プラント ©ROSLAN RAHMAN/AFP　洋上風力発電 ©TOBIAS SCHWARZ/AFP　電気自動車 リーフ ©日産自動車

コピー機 ©リコー　立体音響 ©NHK　二足歩行ロボット　レジェンド ©HONDA

図 1.1　制御の幅広い応用分野

この定義に基づけば，たとえば，

- 自動車の速度を 80 km/h に保つように運転すること
- 二足歩行ロボットを倒れないように歩かせること
- 部屋の温度が 26°C になるようにエアコンをかけること

などはすべて制御であることが理解できるだろう．

工学の分野における制御の応用分野の例を図 1.1 に示す．これは産業製品への応用例の一部であり，これ以外のさまざまな分野でも制御工学は応用されている．

1.2　力学系の制御――フィードバック制御の概観

制御系設計の基本的な手順は，制御対象のモデリング，アナリシス（解析），フィードバック制御系のデザイン（設計）からなる．これを図 1.2 に示す．この手順に沿って，図 1.3 に示すような，滑らかな床の上に置かれた質点の並進運動を制御する問題を考えよう．

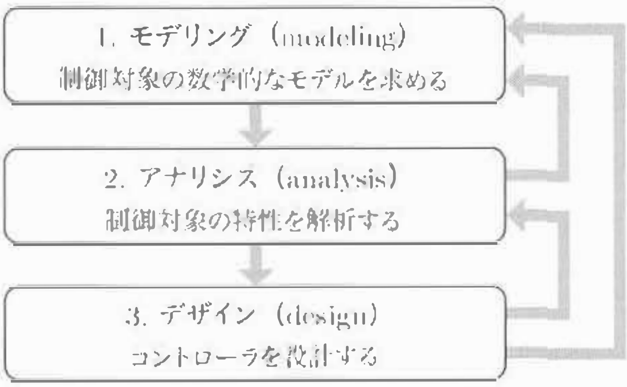


図 1.2　制御系設計の基本的な手順

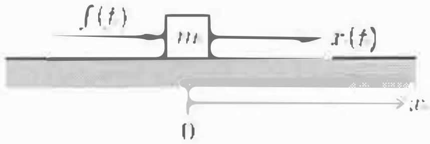


図 1.3　質点の並進運動

1.2.1　制御対象のモデリング

[1] ニュートンの運動方程式

図1.3において，質量 m の質点に力 $f(t)$ を加えたとき，微分方程式

$$m\frac{\mathrm{d}^2x(t)}{\mathrm{d}t^2} = f(t) \tag{1.1}$$

が成り立つ．ただし，$x(t)$ は質点の位置（変位）であり，t は時間である．この式は，（質量）×（加速度）=（力）を表し，**ニュートンの運動方程式**（第2法則）としてよく知られている．

いま，力と位置はともに時間の関数であるので，この微分方程式は質点の時間的な振る舞いを記述している．このような時間的な振る舞いのことを**ダイナミクス**（dynamics）といい，ダイナミクスは機械や物理の世界では**動力学**，電気の世界では**動特性**と訳されている．対象の振る舞いを微分方程式で記述することがモデリングの第1段階である．

いま，微分方程式(1.1)において，力 $f(t)$ を入力，位置 $x(t)$ を出力とすると，図1.4が得られる．このような図を制御工学では**ブロック線図**と呼ぶ．図において，矢印は信号を表し，箱は**システム**を表す．ここで，システムとは，与えられた信号に対して何らかの処理を施すものである．あるいは，入力信号を出力信号に写像するものである．この例では，力が入力信号，位置が出力信号である．

ここでは物理システムを対象としたが，電気回路も同様に対象と考えることができ，そのときには，図1.5に示すように，たとえば入力は電圧，出力は電流になる．このように，ブロック線図を用いれば，さまざまな対象を統一的に取り扱うことが

図1.4　ニュートンの運動方程式の入出力表現

図1.5　電気回路の入出力表現の例

でき，このことは制御工学において重要である．ひとたび実際の制御対象をブロック線図で表現できれば，そこは力学や電気などの世界ではなく，制御工学の世界であり，巨大な建築構造物の制振制御から，ナノオーダのハードディスクのヘッドの位置決め制御まで，同じように取り扱うことができる．これが制御工学の大きな強みである．

さて，さまざまな微分方程式の解法があるが，その中にラプラス変換を用いた方法がある．初期値を 0 として式 (1.1) をラプラス変換すると，

$$ms^2x(s) = f(s) \tag{1.2}$$

が得られる．ただし，ラプラス変換の s は

$$s = \sigma + j\omega \tag{1.3}$$

で与えられる複素数であり，その虚部 ω は**角周波数**[1]を表す．ここで重要な点は，ラプラス変換を用いると，高校生（あるいは大学生）にならないと勉強しない微分方程式を，中学生でも理解できる代数方程式（この例では2次方程式）に変換できることである．

式 (1.2) は，次式のように変形できる．

$$x(s) = \frac{1}{ms^2}f(s) \tag{1.4}$$

この式をブロック線図で表したものが図1.6である．ここで，

$$G(s) = \frac{x(s)}{f(s)} = \frac{1}{ms^2} \tag{1.5}$$

をシステムの入力から出力までの**伝達関数**という．これは，制御工学では非常に重要なシステムの表現である．

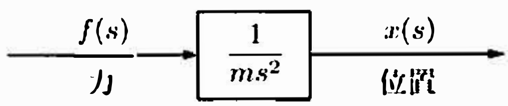


図1.6　ニュートンの運動方程式の伝達関数表現

[1] 以下では，角周波数のことを単に「周波数」と呼ぶこともある．

以上のように、対象のダイナミクスを微分方程式や伝達関数のような数式で記述する作業を，制御対象のモデリングと呼ぶ．自然界に存在するシステムの最も一般的なモデルが微分方程式であり，それを制御工学で利用しやすいように変換したものが伝達関数である．

[2] バネ・マス・ダンパシステム

ニュートンの運動方程式をより現実的なものに拡張したバネ・マス・ダンパシステムについて考えよう（図1.7）．図において，マスは質量 m の質点、ダンパは粘性摩擦係数 c の減衰器であり，バネのバネ定数を k とする．

バネ・マス・ダンパシステムにおける質点の運動は、微分方程式

$$m\frac{\mathrm{d}^2x(t)}{\mathrm{d}t^2}+c\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t}+kx(t)=f(t) \tag{1.6}$$

で記述される．この式において、$c=k=0$ とおけば式(1.1)のニュートンの運動方程式が得られ、$m=c=0$ とおけば、よく知られたフックの法則になる．

初期値を0として式(1.6)をラプラス変換すると，

$$(ms^2+cs+k)x(s)=f(s)$$

が得られ，これより $x(s)$ は次式のように表される．

$$x(s)=\frac{1}{ms^2+cs+k}f(s)$$

したがって，バネ・マス・ダンパシステムの入力（力）から出力（位置）までの伝達関数は，次式で与えられる．

$$G(s)=\frac{x(s)}{f(s)}=\frac{1}{ms^2+cs+k} \tag{1.7}$$

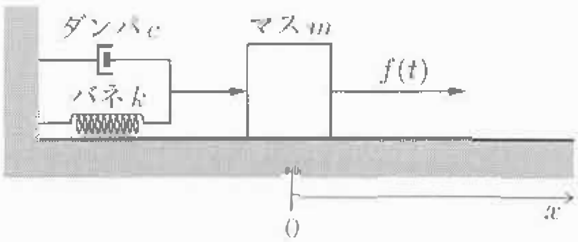


図1.7　バネ・マス・ダンパシステム

図1.8にバネ・マス・ダンパシステムのブロック線図を示す．

さて，物理の世界のバネ・マス・ダンパシステムに対応する電気回路は，図1.9に示す RLC 回路である．ここで，R は抵抗，L はインダクタ，C はキャパシタを表す．図においてキャパシタの電荷を $q(t)$ とすると，キルヒホッフの電圧則より，微分方程式

$$L\frac{\mathrm{d}^2 q(t)}{\mathrm{d}t^2} + R\frac{\mathrm{d}q(t)}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{C}q(t) = v(t) \tag{1.8}$$

が成り立つ．ただし，$v(t)$ は印加電圧である．また，電流 $i(t)$ は

$$i(t) = \frac{\mathrm{d}q(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1.9}$$

より計算される．この場合，ラプラス変換を用いると，

$$q(s) = \frac{1}{Ls^2 + Rs + 1/C}v(s)$$

が得られる．これを図1.10に示す．

式(1.8)を式(1.6)と比較すると，ともに同じ形式の2階微分方程式であり，

$$m = L, \quad c = R, \quad k = \frac{1}{C} \tag{1.10}$$

の対応関係があることがわかる．この対応関係を，物理システムと電気回路のアナロジー（analogy）という．また，この二つの例だけでなく，重要な物理法則は2階微分方程式で記述されることが多い．

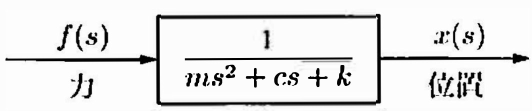


図1.8　バネ・マス・ダンパシステムの入出力表現

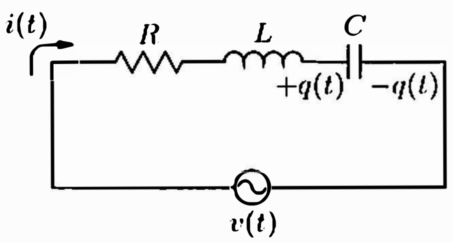


図1.9　RLC 回路

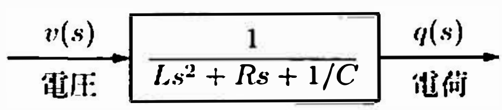


図1.10　RLC 回路の入出力表現

1.2.2　制御対象の解析

まず，微分方程式 (1.1) で記述されたニュートンの運動方程式の意味について考えよう．たとえば，この物理システムに一定の力（制御ではこれを**ステップ入力**という）f を加えると，加速度は一定値をとる．すなわち，**等加速度運動**である．すると，加速度の積分である速度は常に増加（あるいは減少）し続け，さらには，速度の積分である変位は常に増加（あるいは減少）し続けてしまうことになる．これより，ステップ入力に対する変位の応答（これを**ステップ応答**という）は有限な範囲に留まらず，発散してしまう．制御工学では，このようなシステムは**不安定**であると言われる．それでは，どのようにしてシステムが安定かどうかを調べたらよいのだろうか？

いま，伝達関数の分母多項式を 0 とした方程式（これは**特性方程式**と呼ばれる）の根を**極**と呼ぶ．式 (1.5) のニュートンの運動方程式では，

$$ms^2 = 0 \tag{1.11}$$

の根，すなわち $s=0$（重根）が極である．いま，s は複素数なので，実部と虚部からなる複素平面（**s 平面**と呼ばれる）上に極をプロットすると，図 1.11 が得られる．

本書の次章以降で，安定性の詳細な理論を学んでいくが，その結果だけをここで述べておこう．図 1.12 に示すように，すべての極が s 平面の左側（**左半平面**と呼ばれる）に存在する（ただし，虚軸は含まない）ときに限り，システムは安定であることが知られている．今考えている物理システムの極はちょうど虚軸上の原点に存在するため，このシステムは不安定である．

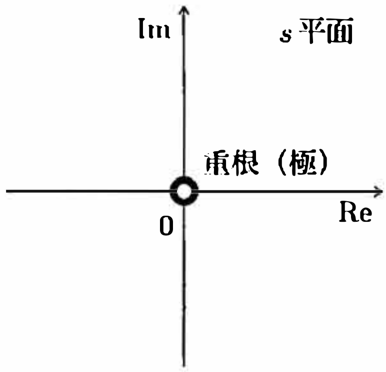


図 1.11　複素平面上に極をプロットする（ニュートンの運動方程式）

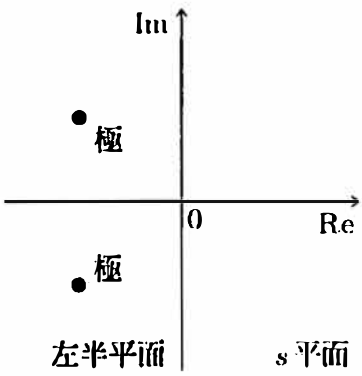


図 1.12 システムが安定であるための極の位置の条件

次に，式 (1.7) で伝達関数が与えられるバネ・マス・ダンパシステムの安定性について考えよう．このシステムの特性方程式は，

$$ms^2 + cs + k = 0 \tag{1.12}$$

となるので，この 2 次方程式を解くと，次の極が得られる．

$$s = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} \tag{1.13}$$

ここで，m, c, k はすべて非負の物理定数であることに注意しよう．この場合の二つの極は，式 (1.13) の平方根の中の符号により，二つの実根，重根，複素共役根，純虚根に分類される．次章以降でこの四つの分類の重要性について学んでいくが，$c^2 - 4mk < 0$ の場合，すなわち複素共役根の場合についてここで考えてみよう．このとき，二つの極は

$$s = \frac{-c \pm j\sqrt{4mk - c^2}}{2m} \tag{1.14}$$

となる．ただし，$j = \sqrt{-1}$ である．これを複素平面上にプロットすると，図 1.13 が得られる．図より明らかなように，バネ・マス・ダンパシステムにおける極は，左半平面に存在するため，このシステムは安定である．物理的には，このシステムにはバネと減衰（摩擦）の項が入ったため，たとえばステップ入力を加えても，発散することなく，ある値に落ち着くことを意味している．

バネ・マス・ダンパシステムにおいて，もしも減衰項がなかったら，すなわち $c = 0$ だったら，どうなるだろうか？ このときの伝達関数は，

$$G(s) = \frac{1}{ms^2 + k} \tag{1.15}$$

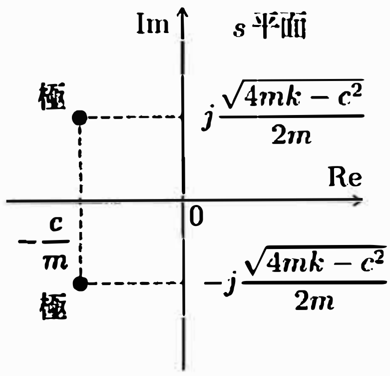


図1.13　バネ・マス・ダンパシステムは安定である

なので，極は，

$$s = j\sqrt{\frac{k}{m}} = j\omega_n \tag{1.16}$$

となる．このときの極の位置を図1.14に示す．図より明らかなように，二つの極は虚軸（これは周波数軸とも呼ばれる）上に存在するため，このシステムは安定ではない．

式(1.16)において，ω_n は

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1.17}$$

で与えられ，**固有角周波数**あるいは共振角周波数と呼ばれる．これは高校物理で学習した単振動

$$x(t) = \sin \omega_n t \tag{1.18}$$

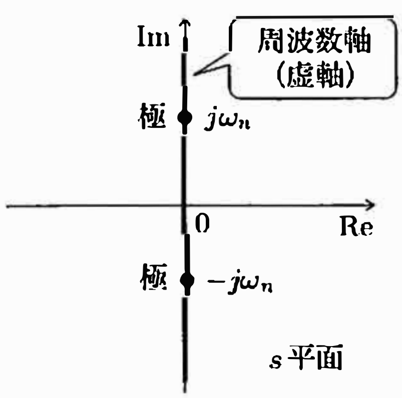


図1.14　減衰項がないときの極の位置

の振動数[2]である．単振動の時間波形を図 1.15 に示す．図より，この場合には，時間とともに $x(t)$ は無限大に発散していないが，0 に収束してもいない．そのため，これを制御工学では**安定限界**と呼ぶ．安定限界は，厳密には不安定な状態である．直観的には，これは減衰項がないためブレーキ（制動力）が効かない状況に対応する．

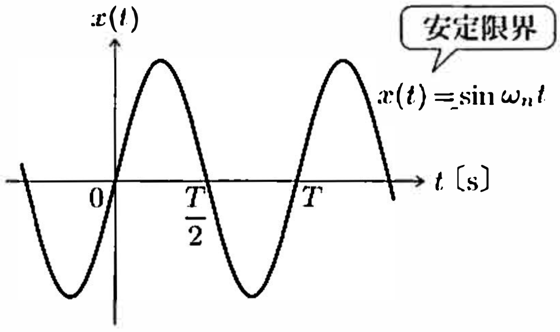


図 1.15　単振動の時間波形

1.2.3　制御系の設計

前項において，式 (1.1) のニュートンの運動方程式で記述される質点は不安定であることがわかった．そこで，**フィードバック制御**（feedback control）という方法を用いて安定化することを考える．これは，たとえばそのままでは不安定で倒れてしまう自転車を，人間というコントローラがペダルを上手に漕ぐことによって倒れないようにする（すなわち安定化する）状況に対応する．

[1] 位置フィードバック

まず，質点の位置をセンサで計測し，それをフィードバックしてみよう．そのときのフィードバック制御系の構成を図 1.16 に示す．

図において，目標とする位置を r とし，それと実際の位置 x の差（**偏差**と呼ぶ）を e とおく．すなわち，

$$e = r - x \tag{1.19}$$

とする．図において，位置を目標値のところまで戻しているので，「フィードバック」

---

2. 物理学では「振動数」といい，制御工学や電気などの工学では「周波数」というが，英語では “frequency” という同じ単語である．

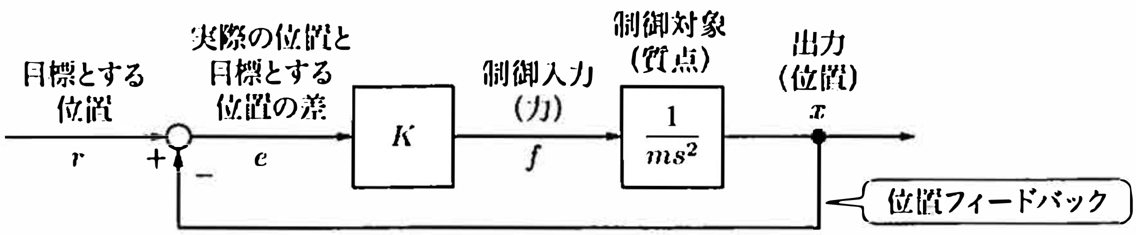


図1.16　位置フィードバック

という用語が用いられている．また，コントローラとして，偏差の大きさを K でスカラ倍する**比例コントローラ**を用いている．すなわち，

$$f = K(r - x) = Ke \tag{1.20}$$

である．制御系が正しく設計されていれば，目標とする位置と実際の位置は一致するはずなので，$e = 0$ になる．しかし，実際には外乱や雑音などの影響により一致しないので，偏差の大きさに比例して制御入力の大きさを決定しようとする．これが，この比例コントローラの考え方である．比例コントローラは，フィードバック制御の最も単純なコントローラである．このとき，K は制御の強さを決めるパラメータであり，ボリュームのつまみのようなものをイメージすればよい．K の大きさを大きくすればするほど制御の効きは良くなるが，その一方で，安定性が損なわれやすくなるという問題点も生じる．このような相反する関係はトレードオフと呼ばれ，制御系設計における重要な問題の一つである．

図1.16より，次式が得られる．

$$x = \frac{1}{ms^2} f = \frac{K}{ms^2} e \tag{1.21}$$

この式に式(1.19)を代入し，x について解くと，

$$x = \frac{K}{ms^2 + K} r \tag{1.22}$$

が得られる．これより目標値 r から位置 x までの伝達関数は

$$W(s) = \frac{x}{r} = \frac{K}{ms^2 + K} \tag{1.23}$$

となり，これはフィードバックループを閉じた状態での伝達関数なので，**閉ループ伝達関数**と呼ばれる．これより，図1.16の位置フィードバック制御系は図1.17のように変形できる．

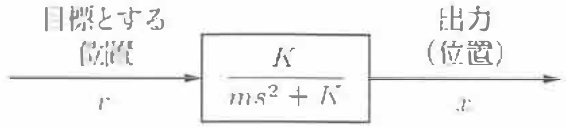


図1.17 位置フィードバックによる閉ループシステム

式(1.23)より，このときの極は，

$$s = \pm j\sqrt{\frac{K}{m}} \tag{1.24}$$

であり，依然として不安定であるが，位置フィードバックにより原点に存在していた2重極を虚軸上へ移動することができた．このように，s平面上で極の位置を移動できることが，フィードバックの効果である．

[2] 速度フィードバック

次に，質点の速度をセンサにより計測できるものと仮定し，図1.18に示すように，位置フィードバックだけでなく速度情報をフィードバックしよう．図より，制御入力は次式で与えられる．

$$f(t) = Ke(t) - C\dot{x}(t) = K\{r(t) - x(t)\} - C\dot{x}(t) \tag{1.25}$$

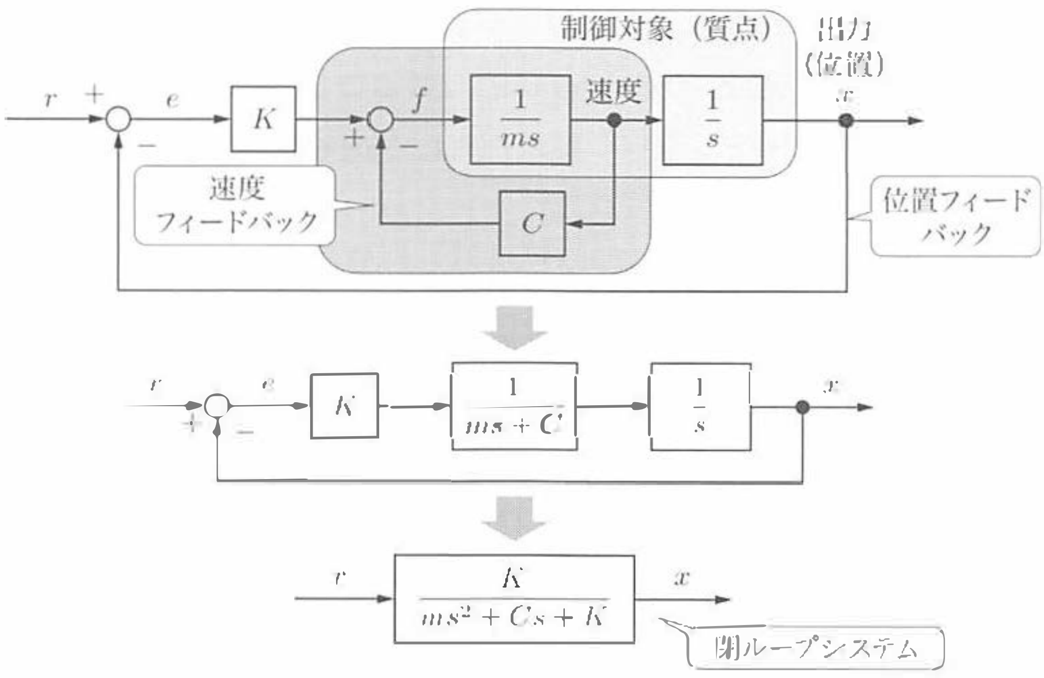


図1.18 位置フィードバックと速度フィードバックによる制御系の構成

ここで，$\dot{x}(t)$ は $x(t)$ の時間微分である．位置フィードバックのときと同様にブロック線図を簡単化していくと，図中に示したように，最終的に閉ループ伝達関数は

$$W(s) = \frac{x}{r} = \frac{K}{ms^2 + Cs + K} \tag{1.26}$$

となる．このとき，二つの極は

$$s = \frac{-C \pm j\sqrt{4mK - C^2}}{2m} \tag{1.27}$$

となり，左半平面内に存在するので，安定である．ここでも極は複素共役根であると仮定したが，それ以外の場合でも必ず二つの極は左半平面内に存在する．

以上で示したように，もともと不安定であった質点の運動に対して，位置フィードバックと速度フィードバックを施すことによって，安定にすることができた．位置・速度フィードバックによる極の移動の様子を図1.19に示す．不安定な制御対象を安定化できるということは，フィードバック制御の特徴である．

以上，物理システムを例にとって，基本的な制御系設計法の手順を示した．

さて，通常われわれが制御する対象は，物理システムに代表される，第一原理（物理・化学法則）に従うシステムである．そのような**物理の世界**（physical world）の制御系を設計するためには，対象のモデリング，アナリシス，そしてコントローラのデザインを仮想的な世界（紙と鉛筆とコンピュータの世界）で行うことになる．この仮想的な世界を**情報の世界**（cyber world）と呼ぶことにする．このように，モデリング，アナリシス，デザインを行う制御工学は，物理の世界と情報の世界を結び付

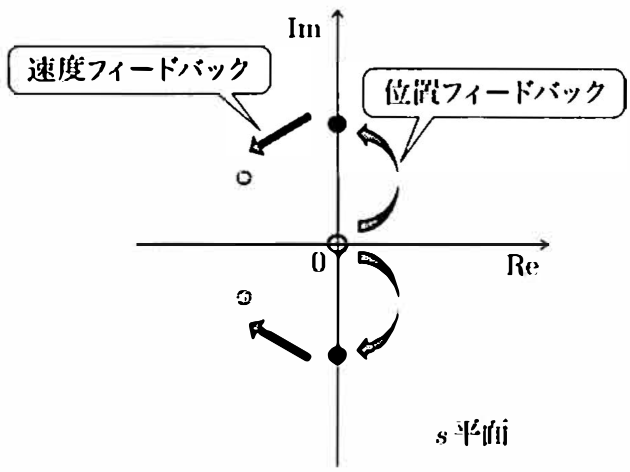


図1.19　位置・速度フィードバックによる極の移動

ける重要な工学である（図1.20）．

ダイナミクスを持つ対象であれば，どんなものにも制御工学を適用することが可能である．機械工学，電気工学，化学工学など，具体的な対象に対する学問体系を「縦型の工学」と名付けるならば，制御工学はそれらを結ぶ「横型の工学」である．横型の工学には，制御工学のほかに，システム工学，計測工学などがある．大学で一般的に教育されている電気回路，電磁気学，流体力学などの縦型の工学は自然科学に基礎を持つが，制御工学などの横型の工学は，自然科学に基礎を持たないことが特徴である．

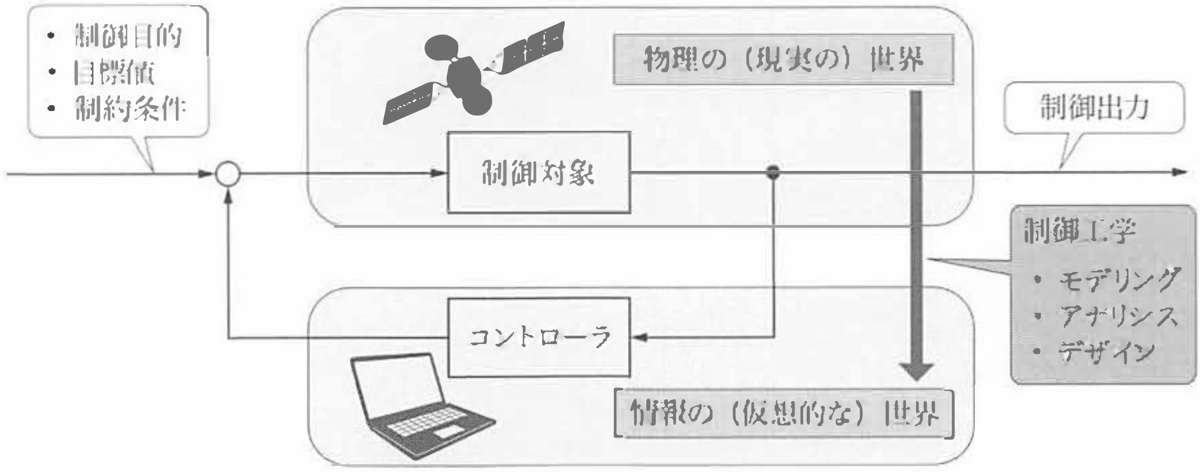


図1.20　物理の世界と情報の世界

1.3　制御系設計の手順

本節では，制御系設計（control systems design）の基本的な手順を説明する．これを次のPoint 1.2にまとめる．Point 1.2から明らかなように，制御系設計は基本的にStep 1からStep 8までの幅広い項目から構成される．これまで制御系設計はStep 5「コントローラの設計」の中の制御則の設計として認識されることが多かったが，実際はより広い範囲が含まれ，制御工学者はそれ以外のステップについて十分理解しておくべきである．しかし，本書は制御工学の入門書なので，これらすべてのステップにわたっては説明せず，Step 2〜5の内容に話題を限定する．

✤ Point 1.2 ✤　制御系設計の基本的な手順

❒ 情報の世界

Step 1　構造設計（structure design）

制御入力を発生させるアクチュエータと制御出力信号を計測するセンサを選定し，それらの配置を決定する．

Step 2　制御対象のモデリング（modeling）

制御対象の数学モデルを構築し，必要なら得られたモデルを簡略化する．

Step 3　制御対象の解析（analysis）

Step 2 で得られたモデルを解析し，制御対象の性質を調べる．

Step 4　制御性能仕様（control performance specification）の決定

設計する制御系に要求する制御性能を，仕様として定量的に記述する．

Step 5　コントローラの設計（design）

1. 用いるコントローラの構造を決定する．
2. 制御性能仕様を満たすように，コントローラの制御パラメータを調整する．これは制御則の設計とも呼ばれる．

仕様を満たすコントローラが設計できなければ，

1. 制御性能仕様を修正する．
2. 用いるコントローラの構造を変更する．

仕様を満たすコントローラが設計できれば，次に進む．

❒ 物理の世界

Step 6　設計結果の検証（validation）

計算機あるいはパイロットプラントを用いて，設計した制御系をシミュレーションし，制御性能を調べる．

Step 7　コントローラの実装（implementation）

制御用ソフトウェアとハードウェアを選定し，設計したコントローラを実装する．

Step 8　現場調整（tuning）

必要があれば，コントローラの制御パラメータを現場で調整（チューニング）する．

Point 1.2 の内容を見ていこう.

まず, Step 1「構造設計」では, アクチュエータ, センサなどのハードウェアの選定と配置を行う. これらの配置と制御性能とは密接に関連しており, アクチュエータ, センサの最適配置問題としても知られている. 従来の制御系設計では, これらの構造があらかじめ決まってしまっている場合がよくあり, 限定された構造のもとで制御系設計を行わなければならないことが多かった. しかし, 制御の観点から構造設計を考えることも非常に重要であり, 構造と制御の同時設計は重要な研究テーマである.

Step 2「制御対象のモデリング」とは, 制御対象の**数学モデル** (mathematical model), たとえば, インパルス応答, 伝達関数, 周波数伝達関数, 状態方程式を構築することである. 制御系設計のためのモデリングの方法は, **第一原理モデリング** (first principle modeling)[3] と**システム同定** (system identification) に大別される. 第一原理モデリングとは, 制御対象の第一原理 (たとえば, 運動方程式, 回路方程式, 電磁界方程式などの物理法則, 化学反応式などの化学法則) に基づいて数学モデルを導出する方法であり, ロボットなどの**メカトロニクス**の分野などで多用される. それに対して, システム同定は, 制御対象に適当な入力信号を印加し, その応答データを計測し, それらの入出力信号から統計的な手法で数学モデルを構築する方法である. 本書では, この二つのモデリングの方法論については触れず, 基本的な数学モデルについてのみ説明する.

Step 3「制御対象の解析」とは, 制御系の安定性, 制御系の過渡特性, そして制御系の定常特性などを調べることであり, これらについては本書で詳しく説明する.

Step 4「制御性能仕様の決定」とは, 構成したい制御系の特性を具体的な数値で与えることである. たとえば, 「応答の速い制御系を構成したい」という定性的な表現ではなく, 「1 秒以内に目標値の 63.2 % に達する制御系を構成したい」というような定量的な表現で制御性能仕様を与える. このとき, 制御系の特性を表す量は Step 3 で定義される.

Step 5「コントローラの設計」は, 制御系設計の主目的である. 代表的なコントローラの設計法として,

(1) 古典制御理論 (PID 制御, 位相進み遅れ補償など)

[3] 物理モデリングと呼ばれることも多い.

(2) 現代制御理論（最適レギュレータ，極配置法など）

(3) ポスト現代制御理論（$\mathcal{H}_\infty$ 制御など）

に基づく方法などがある．本書では，主に古典制御理論に基づく方法を紹介する．

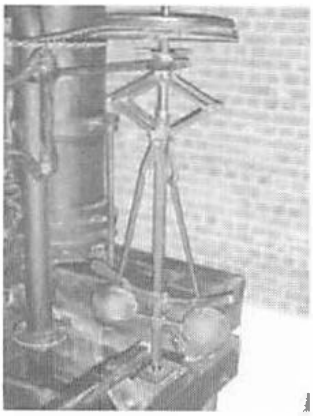
Step 6「設計結果の検証」，Step 7「コントローラの実装」，そして Step 8「現場調

コラム1 ── 制御の始まり：ワットの調速機

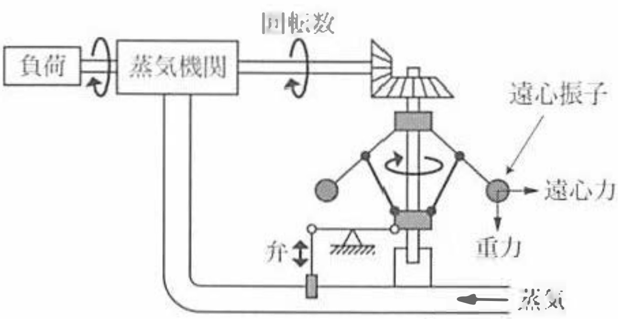
18世紀後半，ジェームス・ワット（James Watt）(1736〜1819) の蒸気機関は産業革命に大きな影響を与えた．蒸気からエネルギーを取り出そうと考える人はそれまでにもいたが，ワットは，ガバナ（調速機）と呼ばれる装置を蒸気機関に取り付けることによって，蒸気機関から安定してエネルギーを取り出すことに成功し，蒸気機関の実用化に貢献した．

下図に示すように，ガバナは，回転する軸のまわりの二つの重りが遠心力により上に持ち上がることを利用する．重りは，遠心力と重力がつり合った位置で保たれる．そして，重りが上に持ち上がるに従って，シリンダへ蒸気を導くバルブを閉じる方向に作用する仕組みを作っておく．蒸気機関の出力が上がり回転が速くなると重りは上に上がるが，ガバナの仕組みによってバルブは閉じる方向に動き，出力が抑えられる．逆に，出力が下がると重りが戻り，バルブは開く方向に動き，出力が上がる．これはまさに，本書でこれから学習するフィードバック制御の考え方であり，これにより蒸気機関の出力を一定に保つことができる．

ワットのガバナは機械的なフィードバック制御装置であり，歴史的にこれが最初の制御のハードウェアである．制御工学は産業革命とともに始まった．



(a) ロンドン科学博物館のワットのガバナ



(b) ガバナの仕組み

整」は，制御理論の実用化の観点からは非常に重要な項目であるが，本書では説明を省略する．

本章のポイント

▼ 力学系のフィードバック制御の例を通して，制御工学の全体像を理解すること．

▼ 制御系設計の手順を知ることにより，本書で学ぶ内容を明確にすること．

Control Quiz

1.1 これまで学んできたものの中から制御対象になりうるシステムを選び，それに対するフィードバック制御系のブロック線図を描きなさい．

1.2 図1.21のブロック線図を変換して，図中の $L(s)$ と $W(s)$ を求めなさい．

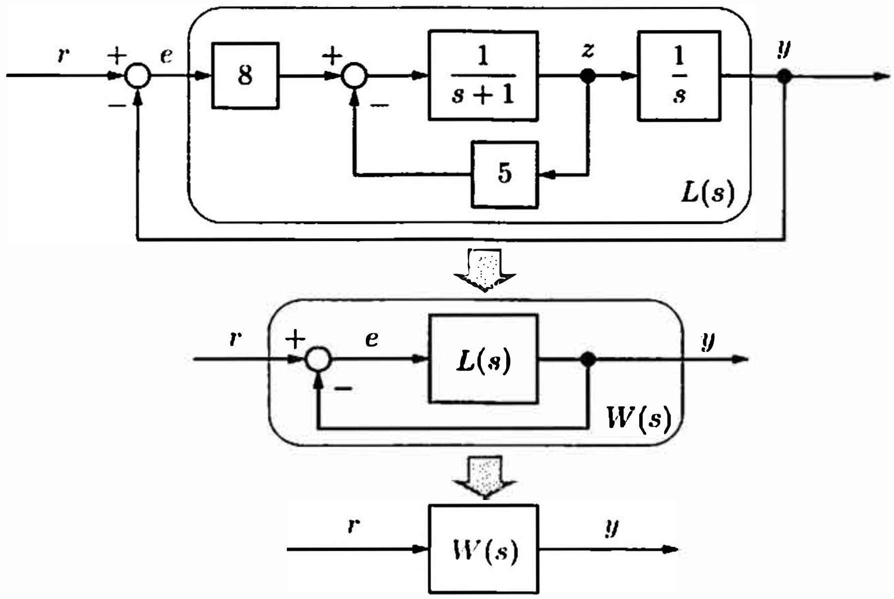


図1.21