

電 347, 電 397

システム工学 I

担当者: 半場 滋  
(専門: 制御工学)

# 教科書

小郷, 美多, システム制御理論入門, 実教出版, 1979

- 第33刷まで出ている(2015年)定番的な教科書であるが, 古いため, 最近の話題は網羅されていない.
- 教科書にはあまりこだわらずに講義を進める.

# 第1回 授業導入・ 制御工学の歴史

# システム工学

- システム: 個々の要素が有機的に組み合わされた, まとまりをもつ体系 (大辞林第2版)
- システム工学: 複雑な人工的システムの最適化をはかるための手順・方法・考え方を体系的に扱う工学の一分野. その応用は生産工程の管理, 情報処理システム, 経営管理や宇宙開発など広汎な領域におよぶ (大辞林第2版).

# 制御システム (1)

- システム工学の守備範囲は非常に広いが、この講義では、その中で、制御システムに関する話題を取り扱う。
- 「制御」「制御システム」とは何か？

## 制御システム (2)

制御とは …

- 機械・装置などを目的とする状態に保つために、適当な操作を加えること (大辞林第2版).
- 目的に向けた影響力の行使である (J. R. Beniger; 木村, 制御工学の考え方, 講談社, 2002より引用)

## 制御システム (3)

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、なんらかの目標とする動作になるように、その対象物の操作を加える行為 (大須賀, 足立, システム制御へのアプローチ, コロナ社, 1999)

## 制御システム (4)

制御とは … (JIS Z8116 自動制御用語—一般)

制御 (**control**) ある目的に適合するように, 制御対象に所要の操作を加えること

制御対象 (**controlled object**) 制御の対象となる系で, 機械, プロセス, プラントなどの全体又は一部がこれに当たる



## 制御システム (5)

- プラントとは一連の工業設備や作業の総称であるが、形だけの工場や機械そのものの意味ではなく、実際に稼働、運営できるように整備されたものの全体を含めての意味に使う (ブリタニカ国際大百科事典)
- プロセス制御とは、化学、鉄鋼、製紙、窯業などのプロセス工業で、特に物質やエネルギーの流れの処理工程からなる部分の制御をいう (岩波 理化学辞典)

## 制御システム (6)

- 制御システムとは、特定の入力を与えられたとき、望ましい性能の出力が得られるように、サブシステムやプラントを組み合わせたものである (N. S. Nice, Control Systems Engineering, 7/e, Wiley, 2015)
- これだけでは意味不明と思われるので具体例を挙げる。

## 制御システム (7)

- エアコンによって部屋を適切な温度まで冷房することを考える.
- 室温が設定温度を上回ったらその度合いに応じて冷房装置を動かし, 設定温度を下回ったら冷房装置を止める, という動作を継続すれば, 室温と設定温度とのずれは一定に収まると期待される.

## 制御システム (8)

- 先の例では, 入力是人が指定する設定温度で, 出力は室温である. 制御したい対象 (プラント) は部屋の空気であり, 制御装置はエアコンである.
- エアコンの中身はどうなっているか?

<http://www.id-c.co.jp/contents/web/chishiki/acshikumi.html>

## 制御システム (9)

- エアコンは室内機と室外機から成る。これらはエアコンのサブシステムである。サブシステムは結合されていて、相互に物質・エネルギー・信号をやりとりする。
- 室内機は熱交換器, ファンおよびコントロールパネルなどから成る。これらは室内機のサブシステムである。

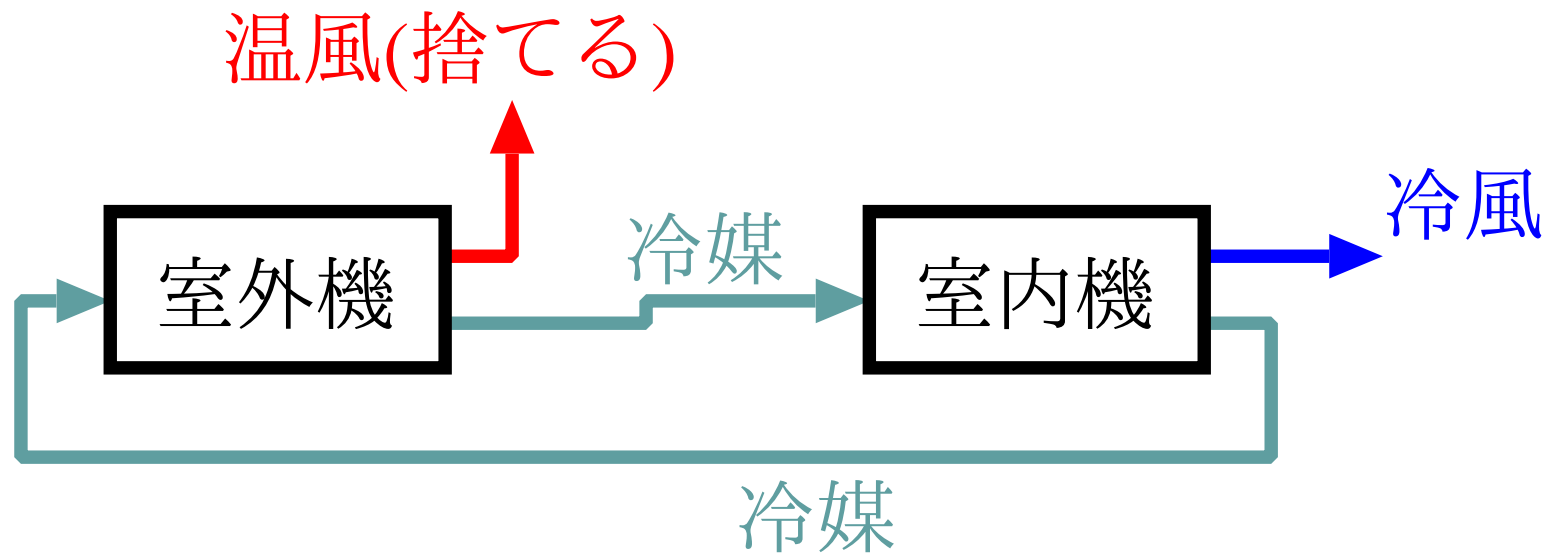
## 制御システム (10)

- 室外機はコンプレッサー, 熱交換器, ファン, 弁などから成る. これらは室外機のサブシステムである.
- エアコンによる冷房のしくみは次の通り (暖房は逆の動作).

## 制御システム (11)

1. 室外機のコンプレッサーで冷媒を圧縮し、熱交換器で冷却してから減圧して室内器に送る.
2. 室内器の熱交換器に冷媒を送り、そこで気化させる。気化熱で冷やされた熱交換器からファンによって冷風を送る.
3. 気化した冷媒を室外器に送る (1に戻る).

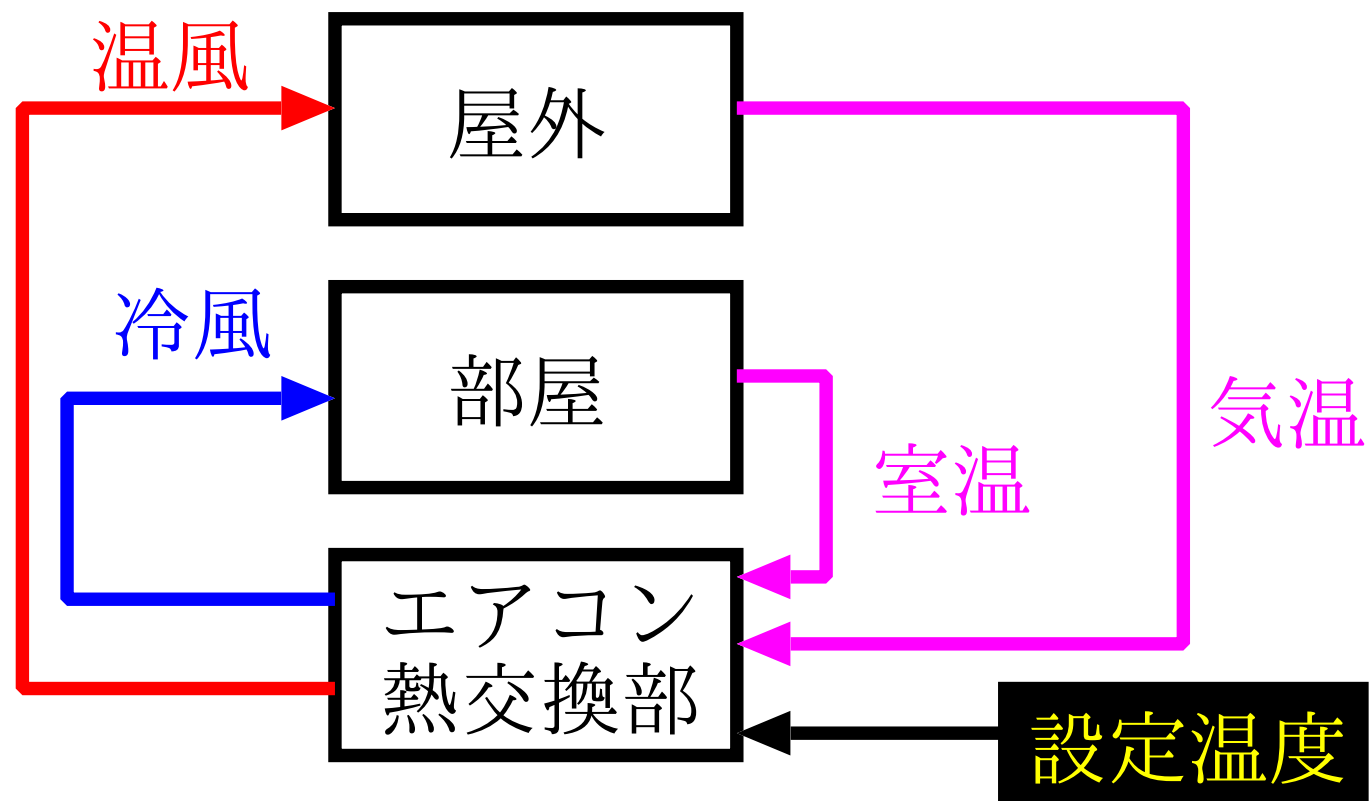
## 制御システム (12)



- これだけでは「冷やしっぱなし」で、設定温度にならない；実際には…



# 制御システム (13)



## 制御システム (14)

- 室温とエアコンの冷風がフィードバックループを構成している
- 気温とエアコンの温風にもフィードバックループがある (こちらは無視される場合もある)
- エアコンの運転は室温と設定温度の比較値に応じて調整される

## 制御システム (15)

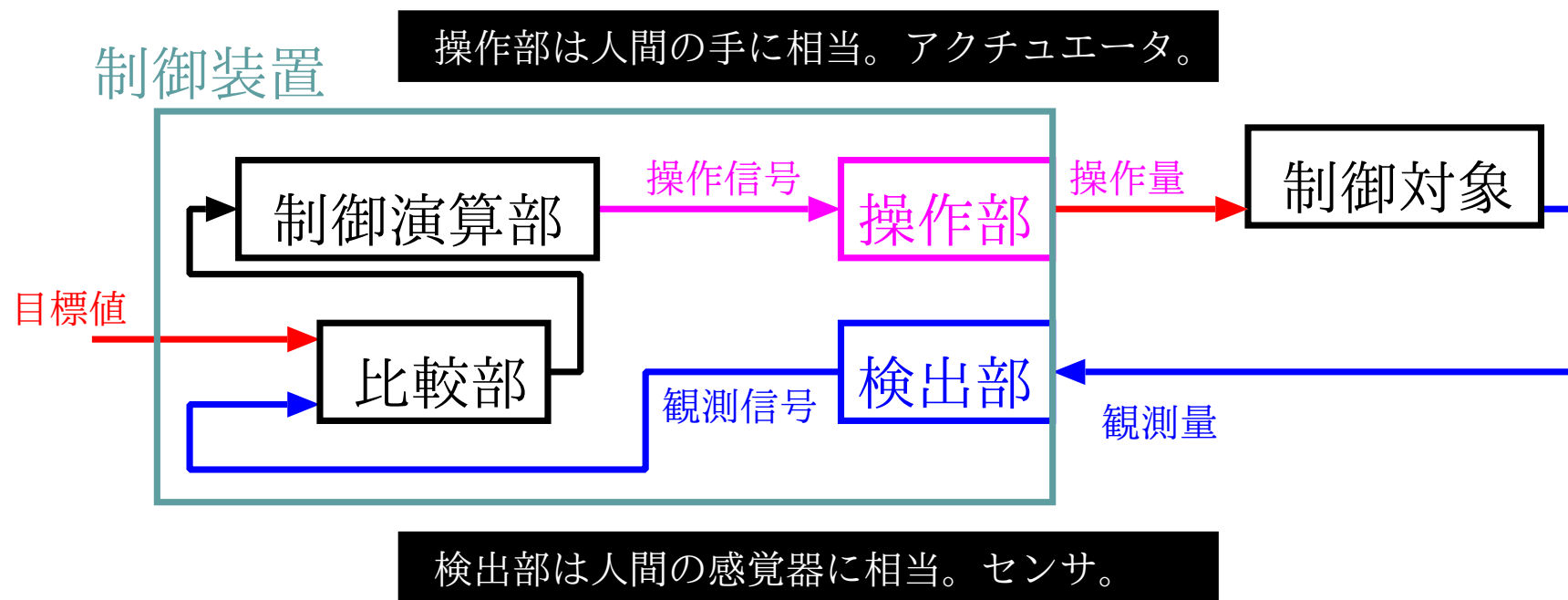
制御系 (制御システム) とは (JIS Z8116)

制御系 (control system) 制御のために制御対象に制御装置を結合して構成された系

制御装置 (controller, control device) 検出部, 比較部, 制御演算部, 操作部からなり, 操作量を生成する装置

上記に含まれる各用語については図で説明する.

# 制御システム (16)



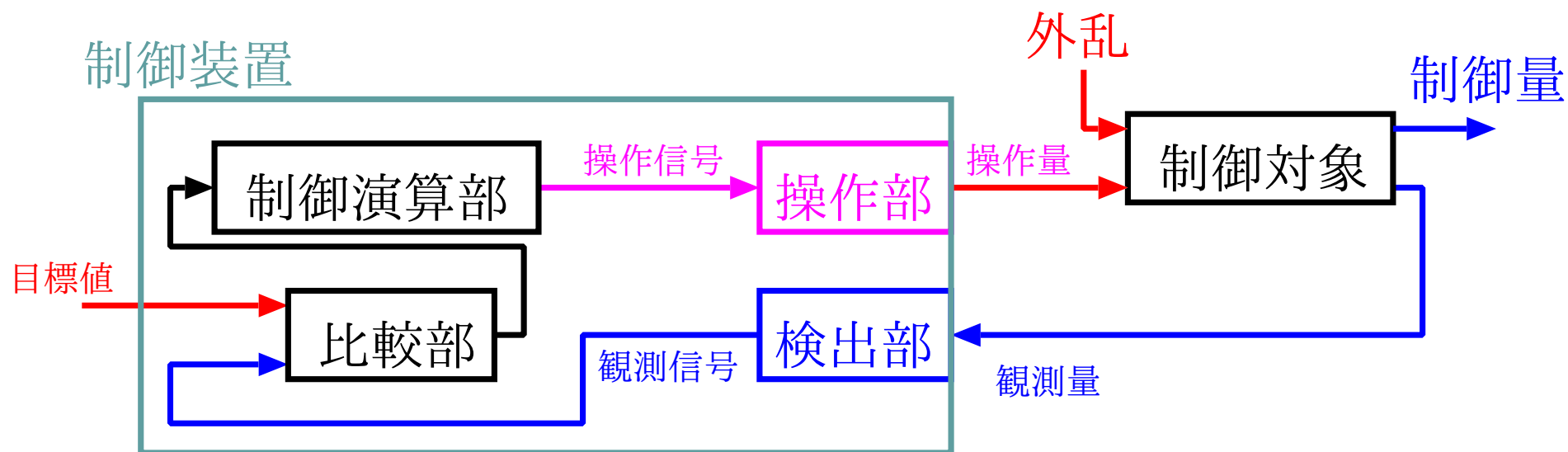
([大須賀, 足立] 図 4.1 を JIS 規格に合うように変更)

## 制御システム (17)

- それを制御することが目的となっている量のことを制御量という (JIS Z8116).
- 制御量と関係があり観測できる量を観測量という ([大須賀, 足立]).
- 制御対象に働きかける人為的に操作できない量を外乱という ([大須賀, 足立]).

# 制御システム (18)

上記を先の図に書き加えると次のようになる。



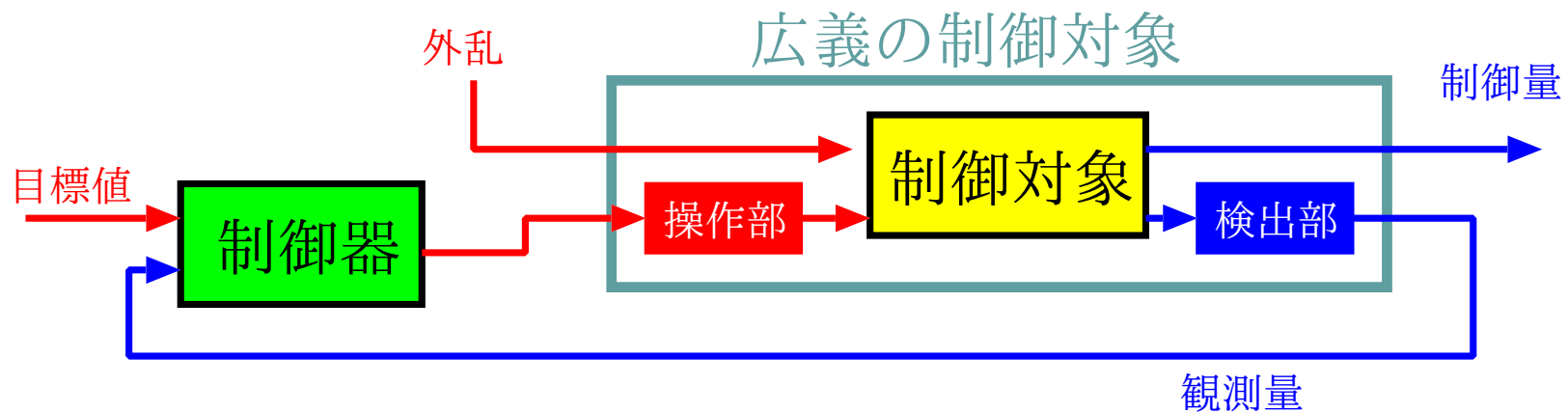
([大須賀, 足立] 図 4.1 を JIS 規格に合うように変更)

## 制御システム (19)

- 操作部と検出部は制御対象に含まれるという解釈をすることもある。
- 比較器を制御演算部と分ける必然性はあまりないので、これらをまとめて制御器と呼ぶこともある。
- 文献によって用語が違うことがあるので注意。

# 制御システム (20)

上記を先の図に書き加えると次のようになる。



([大須賀, 足立] 図 4.2)



## 制御システム (21)

- 図の書き方には色々なバリエーションがあり、「これが正しい」というものがあるわけではないので注意.
- 特に, 外乱や観測雑音が入る箇所については, 色々な書き方がある.

# 制御システムの分類 (1)

- システムの出力がその時点での入力のみで決まれば**静的システム**, 過去の入力の履歴に依存すれば**動的システム**
- 常微分方程式で記述されるシステムは**集中定数システム**, 偏微分方程式で記述されるシステムは**分布定数システム**

## 制御システムの分類 (2)

- システムという言葉と系という言葉は同じ意味で使われる。
- 制御システムの出力が入力に戻る経路があればフィードバック制御システム, そうでなければフィードフォワード制御システム,

## 制御システムの分類 (3)

- 入力が1個のシステムは**1入力システム (single-input system)**, 2個以上のシステムは**多入力システム (multi-input system)**
- 出力が1個のシステムは**1出力システム (single-output system)**, 2個以上のシステムは**多出力システム (multi-output system)**

## 制御システムの分類 (4)

- 1 入力 1 出力システム (Single-Input Single-Output System) を **SISO** システム
- 多入力多出力システム (Multi-Input Multi-Output System) を **MIMO** システム

## 制御システムの分類 (5)

- 初期時刻によってシステムの挙動が変わることがないシステムは**時不変システム (Time-Invariant System; TI システム)**, そうでないシステムは**時変システム (Time-Varying System; TV システム)**
- 非線形要素を含まなければ**線形システム**, 含めば**非線形システム**

## 制御システムの分類 (5)

- 時間が連続値のシステムは**連続時間システム**, 離散値のシステムは**離散時間システム**
- 確率的な要素を含まないシステムは**確定システム (deterministic system)**, そうでないシステムは**確率システム (stochastic system)**

# フィードバック制御の歴史 (1)

- ハードウェアとしてのフィードバック制御の歴史は古く、紀元前 300BC 頃には、水時計のタンクの調整のためにフィードバック機構が使われていたという説がある (信憑性は高くないが).
- フィードバックによる温度調整を用いた孵化器が 1620 年に発明された.



## フィードバック制御の歴史 (2)

- ワットの蒸気機関 (1789 年) には遠心調整速機が使われた。このシステムの振動現象が制御理論が始まる契機となった。
- 上記に関し、1868 年に J. C. Maxwell が 3 次のシステムの安定性条件を導いた。Routh の安定性条件は 1877 年に導出された。

## フィードバック制御の歴史 (3)

- 1890年に非線形システムの安定性がLyapunovによって研究された。これは時代に先行しすぎた研究であり、数十年間あまり注目されなかった。
- Heavisideの演算子法 (Laplace変換) が1893年に完成した。

## フィードバック制御の歴史 (4)

- 20 世紀前半は古典制御の時代.
- 古典制御とは, 1 入力 1 出力の線形時不変システムを対象とし, 周波数領域において制御系の解析と設計をおこなう手法をいう.

## フィードバック制御の歴史 (5)

- 古典制御の時代に開発された技法は、たとえば以下の通り。ジャイロスコープと自動航行システム (1910), フィードバック増幅器 (1920-1940), Nyquist の安定条件 (1932), PID 補償器 (1936), Bode の周波数応答法 (1938), Nichols 図 (1947), Evans の根軌跡法 (1948)

## フィードバック制御の歴史 (6)

- サイバネティクス: 動物および機械における情報通信と制御作用を研究する学問. 1948年に N. Wiener が「サイバネティクス」を著したことから, 急に着目された (後略) (ブリタニカ国際大百科事典). これは今日の通信工学や情報理論の基礎のひとつになっている.

## フィードバック制御の歴史 (7)

- 20 世紀中盤は現代制御の時代.
- 現代制御とは, 多入力多出力システムの線形システムを対象とし, 時間領域および周波数領域で制御系の解析と設計をおこなう手法をいう.

## フィードバック制御の歴史 (8)

- 状態空間法 (Kalman ら) と伝達関数行列は現代制御の時代が開発された。システム工学 II で取り扱われる、線形代数を駆使してシステムの可制御性や可観測性、レギュレータやオブザーバを構成する技法は、この時代の産物である。

## フィードバック制御の歴史 (9)

- 最適制御 (1950 頃-) : 制約条件を満たす範囲内で制御目的に対応する評価関数を最小 (あるいは最大) とする制御器を数学的に求める手法. それ以前の最適化法と異なり, 不連続関数を取り扱う必要があったため, 新たにいろいろな技法が開発された. Pontryagin による最大値原理と Bellman の動的計画法が有名.



## フィードバック制御の歴史 (10)

- 最適制御自体は線形系も非線形系も区別せずに扱える手法であるが、線形時不変システムに対する最適制御は、行列に関する Riccati 方程式という方程式と解けば補償器が求まるという意味で比較的取り扱いやすく、大流行した。

## フィードバック制御の歴史 (11)

- 1970年の前後から、我々が制御対象に関して持っている知識は不完全なので、不完全な知識が制御系に与える影響を小さくするべきである、という考え方が出て来た。これがロバスト制御である。ロバスト制御には色々な手法があるが、 $H_\infty$  制御が有名。  $H_\infty$  制御は1990年代前半に完成した。

## フィードバック制御の歴史 (12)

- $H_\infty$  制御理論の完成をもって、線形時不変システムの制御理論は一応完成.
- 制御理論の主要研究テーマは、非線形システム、ネットワークシステム、ハイブリッドシステム、確率システム、無限次元システムなど. 線形時不変システムは理論研究の対象にはなりにくい.

(典拠 (1))

- S. Bennett, A history of control engineering 1800-1930, The Institute of Engineering and Technology, 1979
- S. Bennett, A history of control engineering 1930-1955, Pater Peregrinus, 1993
- N. S. Nise, Control Systems Engineering, 7/e, Wiley, 2015
- G. F. Franklin, J D. Powell and A. Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, 4/e, 2002
- T. Kailath, Linear Systems, Prentice-Hall, 1980.
- M. S. Safonv, Origins of robust control: Early history and future speculations, Annual Reviews in Control, Vol. 36, No. 2, pp. 173-181, 2012.

## (典拠 (2))

- 大須賀, 足立, システム制御へのアプローチ, コロナ社, 1999.
- 木村, 制御工学の考え方, 講談社, 2002.
- [https://www.gwu.edu/asc/cyber\\_definition.html](https://www.gwu.edu/asc/cyber_definition.html)  
(Viewed: April 10, 2016).
- <http://www.asc-cybernetics.org/foundations/history.htm>  
(Viewed: April 10, 2016).
- [http://www.wow.com/wiki/Operational\\_calculus](http://www.wow.com/wiki/Operational_calculus) (Viewed: April 10, 2016).

## この講義で取り扱う内容

- この講義は線形システムを対象とし、おもに現代制御理論で使われる手法を取り扱う。
- この講義で学ぶ内容は、直接学術的な研究につながるわけではないが、制御を使うためにも、学術的な研究に取りかかるためにも、必要な事項である。

# 線形代数について

- 現代制御理論の主要な「道具」は線形代数
- 講義第7回を線形代数の復習のために確保してあるが、過多になることを防ぐために、少しずつ復習してゆく。なお、1年次の線形代数にはないが今後必要となる事項についても説明する。

## 線形代数の復習 (1)

- 実数を  $2 \times 2$  の形にならべたものを 2 行 2 列の実行列という.
- 行列全体を括弧で括ることが普通であるが, どのような括弧を使うかは文献によって異なる. 比較的多いのは, 丸括弧と角括弧である. 教科書は角括弧になっている.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \pi & 2 \\ -e & 3.1 \end{pmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \pi & 2 \\ -e & 3.1 \end{bmatrix}$$



## 線形代数の復習 (2)

- 実数を  $m \times n$  の形にならべたものを  $m$  行  $n$  列の実行列という. 第  $i$  行  $j$  列にある数を, その行列の  $(i, j)$  要素という.
- 行列を英文字の大文字であらわし, その要素を対応する小文字であらわすことが多い.

- $A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}$  のようにする. ドットは要素を略するときに使われる (慣れが必要).

## 線形代数の復習 (3)

- $A = (a_{ij})$  のように書くこともある.
- 行列の加減算は成分ごとにおこなわれる. 行列  $A$  と  $B$  の加減算が定義できるのは, これらの行列の型 (行および列の数) が同じ場合に限られる. また, 行列のスカラー倍を, 全要素に一斉にある数をかける演算として定義する.
- $m$  行  $n$  列の実行列全体の集合は, 加算およびスカラー倍に関してベクトル空間をなす.

## 線形代数の復習 (4)

- 行列  $A = (a_{ij})$  を  $m$  行  $n$  列,  $B = (b_{ij})$  を  $n$  行  $p$  列とする.
- 行列  $A$  と  $B$  の積は次のように定義される:  $C = AB$  ( $A$  と  $B$  の積) とし,  $C = (c_{ij})$  と書くことにすると,  $C$  は  $m$  行  $p$  列の行列で,  $c_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik}b_{kj}$  となる. この一見不自然な定義は, 行列  $B$  を線形写像  $Bx$  に対応させ, 行列  $A$  を線形写像  $Ay$  に対応させたとき (ただし  $x$  は  $n$  次,  $y$  は  $p$  次の実ベクトル), 合成写像と行列の積が対応するように行列の積を定めたことに由来する.

## 線形代数の復習 (5)

- $n$  次の実ベクトルとは、実数を  $n$  個ならべたものである。要素を縦にならべたものを縦ベクトルあるいは列ベクトル、横にならべたものを横ベクトルあるいは行ベクトルという。この講義では、特に断らない限り、ベクトルは縦ベクトル (列ベクトル) であるものとする。
- ベクトルおよび行列の要素は実数とは限らない。要素が自然数, 整数, 有理数, 複素数の場合もある。

## 線形代数の復習 (6)

- 要素が多項式の行列を多項式行列, 関数の行列を関数行列という. 制御では要素が有理関数の行列が頻出する (伝達関数行列). 制御であらわれる多項式行列や有理関数行列は 1 変数であるが, 画像処理では 2 変数や 3 変数の多項式行列や有理関数行列があらわれる.
- 零行列 (要素がすべて零の行列) と零ベクトル (要素がすべて零のベクトル) をともに記号  $\mathbf{0}$  であらわす. 次元を明示する必要があるときには,  $\mathbf{0}_{m \times n}$  ( $m$  行  $n$  列の零行列),  $\mathbf{0}_n$  ( $n$  次の零ベクトル) などのように書くことがある.

## 線形代数の復習 (7)

- $A = (a_{ij})$  を  $m$  行  $n$  列の行列としたとき, そこから, 第  $(j, i)$  が  $a_{ij}$  である  $n$  行  $m$  列の行列を作ることができる. ( $i$  と  $j$  の役割が入れ変わっていることに注意). この行列を  $A$  の転置行列といい,  $A^T$ ,  $A'$ ,  ${}^tA$  などの記号であらわす.
- 転置はベクトルに対しても定義される. 縦ベクトルを転置すると横ベクトルに, 横ベクトルを転置すると縦ベクトルになる.
- 行の数と列の数が同じ行列を正方行列という. 正方行列以外の行列を長方形行列と呼ぶことがある.

## 線形代数の復習 (8)

- 右下がりの対角線上の要素を除く全要素が零の正方行列を対角行列という. 第  $(i, i)$  要素が  $d_i$  で, 他の要素が零の  $n$  次対角行列を,  $\text{diag}(d_1, \dots, d_n)$  と書くことがある. 対角行列において, 対角要素は零であってもなくてもよい. 特に, 正方な零行列は対角行列である.
- 対角要素がすべて 1 の対角行列を単位行列とよび,  $\mathbf{I}$  であらわす. 次数を明示する必要があるときには  $\mathbf{I}_n$  のように書く.

## 線形代数の復習 (9)

- 単位行列は, 行列の積に関して単位元の役割を果たす. すなわち,  $A$  が  $m$  行  $n$  列の行列のとき,  $I_m A = A$ ,  $A I_n = A$  である.
- 行列の積は一般に可換ではない. すなわち,  $AB \neq BA$  となることが普通である.  $AB = BA$  となる場合には,  $A$  と  $B$  は可換であるという.