

# 3-8 身体・運動

東京大学 数理・情報教育研究センター  
2021年5月7日

# 概要

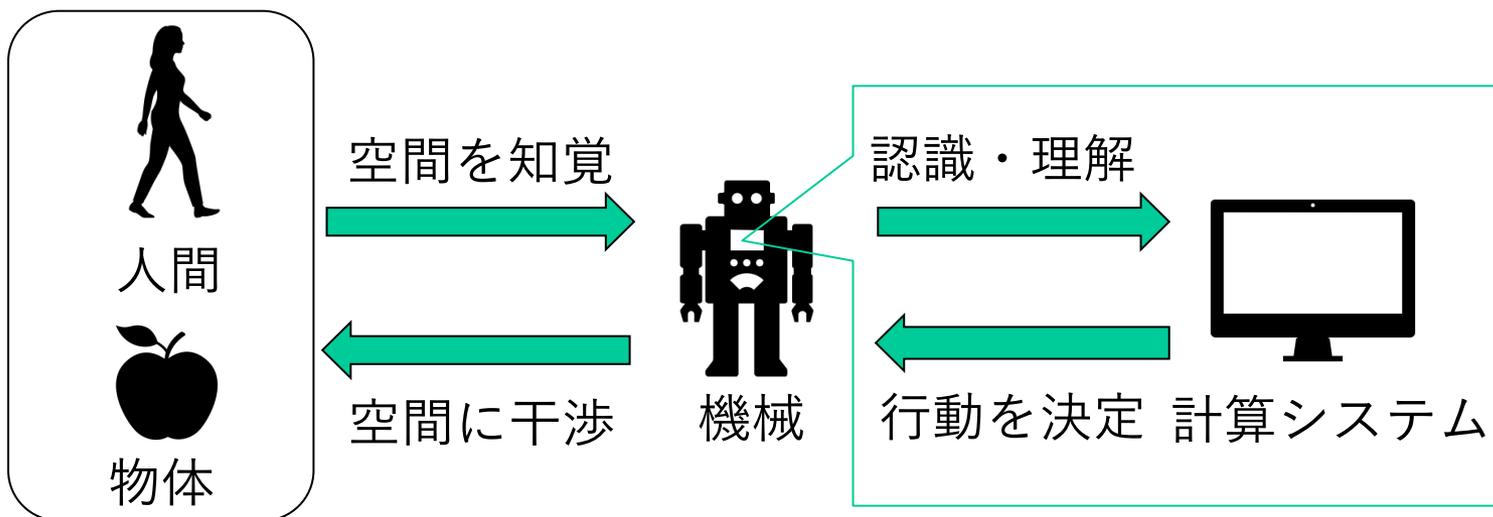
- 物理的な空間でのコンピュータと人間の接点を作り出す、ロボット技術について学ぶ
- ロボット技術における身体の動き、運動を実現するアクチュエータや、知覚・感覚としての働きを持つセンサー技術を知る
- ロボットとAIの関係、ロボットのためのデータサイエンス技術を学ぶ

# 本教材の目次

1. 人間の運動とロボット、コンピュータ	4
2. 自動化機械	7
2.1 センサー	8
2.2 アクチュエータ	9
3. シーケンス制御とフィードバック制御	13
4. ロボットとデータサイエンス	20

# 人間の運動とコンピュータ

- 人間がコンピュータと情報をやりとりするとき、パソコンにキーボードで情報を与えたり、ディスプレイに表示された情報を読むことが一般的です。
- ロボットは内蔵のコンピュータによって自律的に動作する機械で、人間とコンピュータが物理的な空間で行う手段を実現します。
- 人間が日常的に行う身体の運動による交流活動を、ロボットによって拡張することができます。



# ロボットとAI

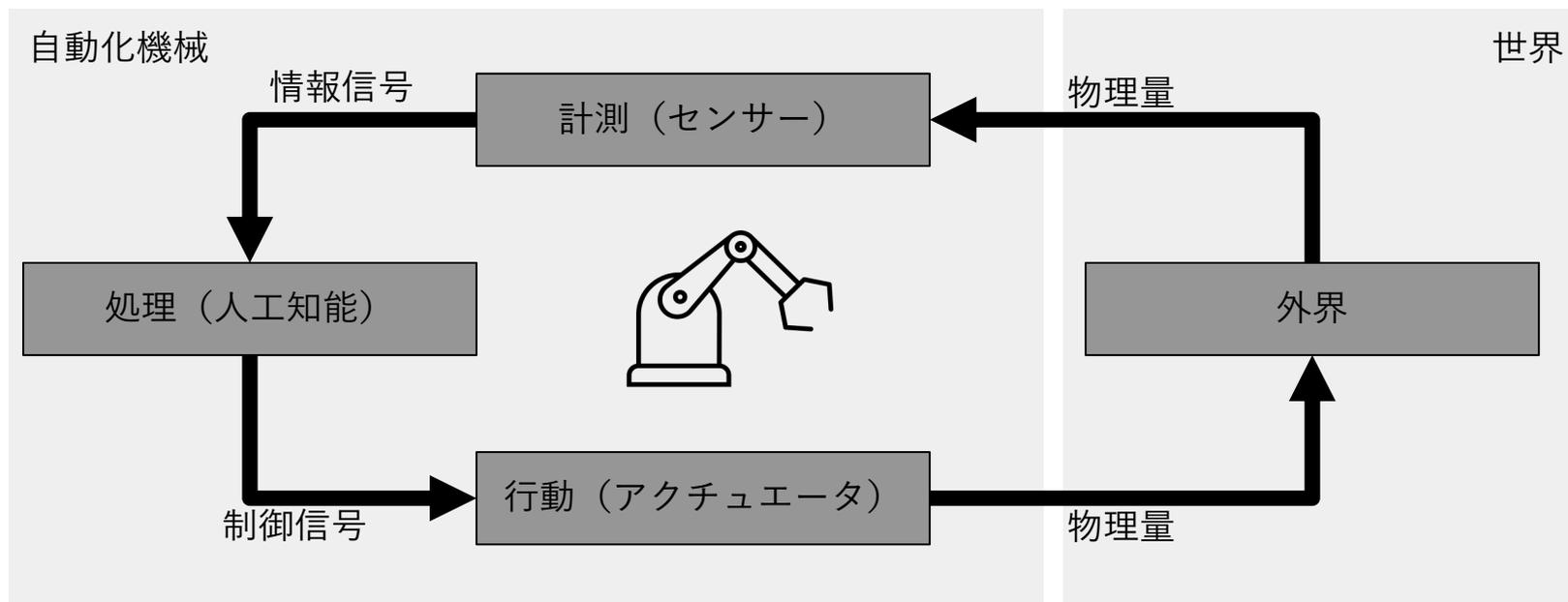
- ロボット
  - 戯曲『R.U.R.』(カレル・チャペック作, 1920)における造語
  - 劇中では「人間の姿をした人工生命体」
- 人工知能(artificial intelligence, AI)
  - 人工的に頭脳を作る代わりに、知能活動を行う機械の名前として、1956年のダートマス会議で命名 (3-1 参照)
- ロボットとAIはそれぞれの分野で (歴史的には独立して) 発展
  - ロボット技術とともに発展した分野
    - 制御工学、産業用ロボット、自動化機械
  - AI技術とともに発展した分野
    - 知識工学、機械学習、データサイエンス

# 広義のロボット

- ロボットは自動的・自律的に動作する機械として広い意味で使用されています。
- 産業用ロボット
  - 工場などで人間の代わりに組み立てなどの作業を行う機械
  - 人間の腕のように複数の関節を持つ
- サービスロボット
  - 主にサービス業で使用されるロボット
    - 警備、清掃、医療、人命救助、接客など
- 家庭用ロボット
  - 家事や人間とのコミュニケーションで使われるロボット

# 自動化機械

- 外界の情報を計測により仕入れ、外界に干渉する行動を起こすシステムです。
- 自動化機械は3つの要素によって構成されていると言えます。
  - 計測、処理、行動



# センサー

- 物理量を観測・処理可能な情報信号に変換する装置です。
  - 人間の五感に相当する装置
- 物理量
  - 機械的
    - 位置、力、トルク、振動、加速度、角加速度、圧力（気圧）、熱
  - 電磁的
    - 電場、磁場、静電容量、光、通電性
  - 化学的
    - 空気・液体中の物質の量、濃度



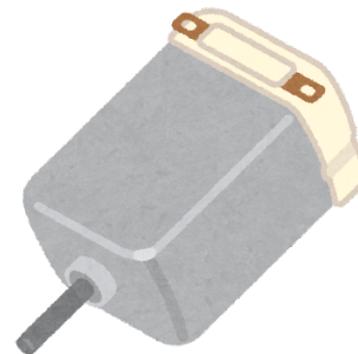
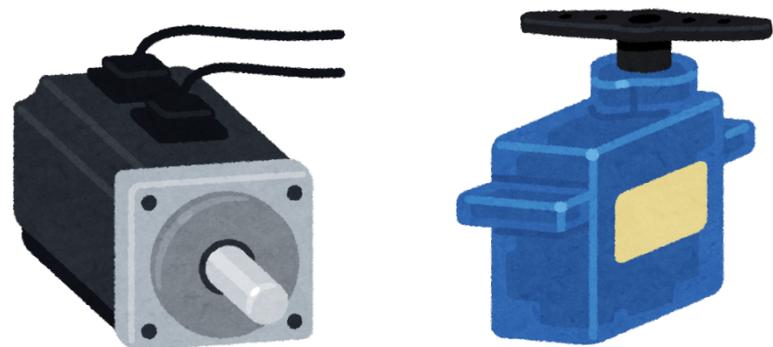
# 身近な例：携帯電話

- センサーは様々な物理量を情報に変換して生活に役立てています。
- 例えば、日頃から多くの方が身につけている携帯電話は：
  - 輝度センサーによって画面の明るさを変えます。
  - カメラで写真を取ります。
  - 加速度センサーで拾われたことを感知します。
  - 静電容量センサーで画面を触った位置を感知します。



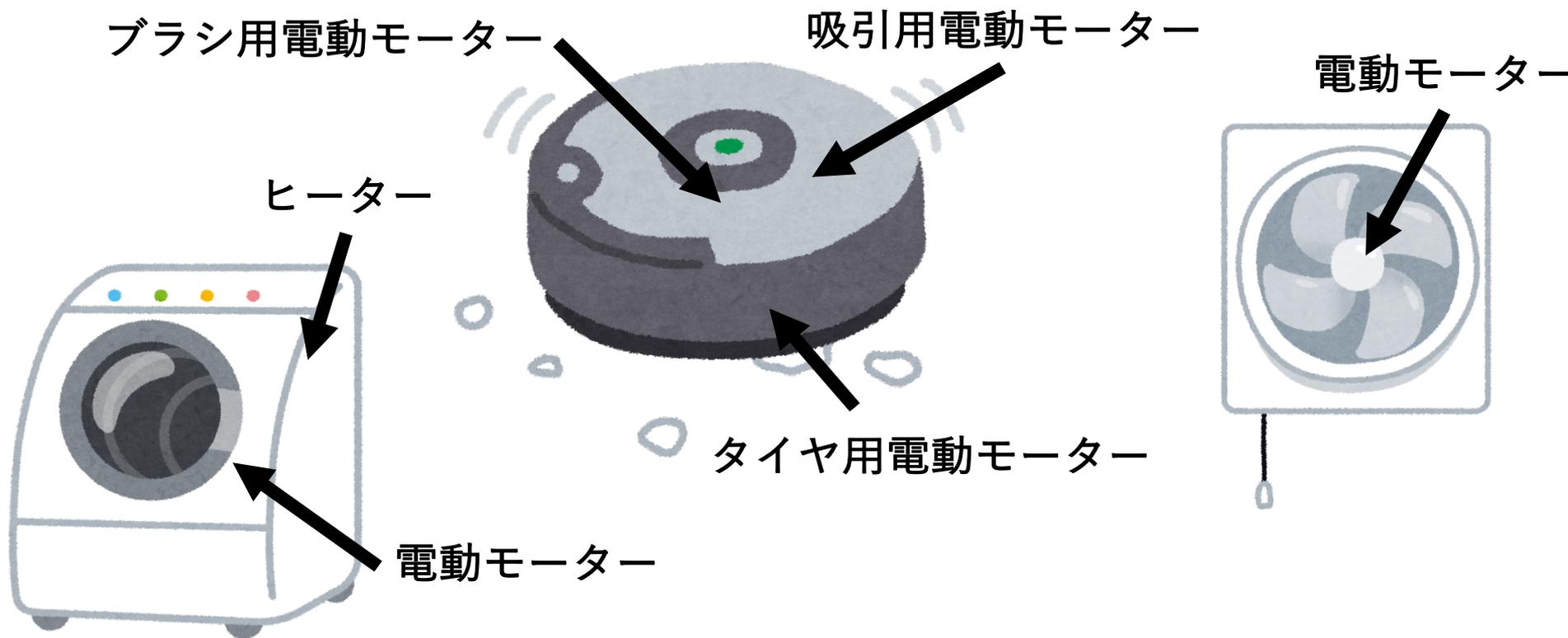
# アクチュエータ

- 制御信号を物理量に変換する装置です。
  - 人間の手足・発声器官に相当します。
- 広義な定義はあらゆる装置を指します。
  - 発光ダイオード（LED）、スピーカー、ペルチェ素子（発熱冷機）
- 普段は運動を発生させる装置を指します。
  - 電気式
    - 電動モーター、ソレノイド
  - 圧力式
    - 油・水・空気圧シリンダー



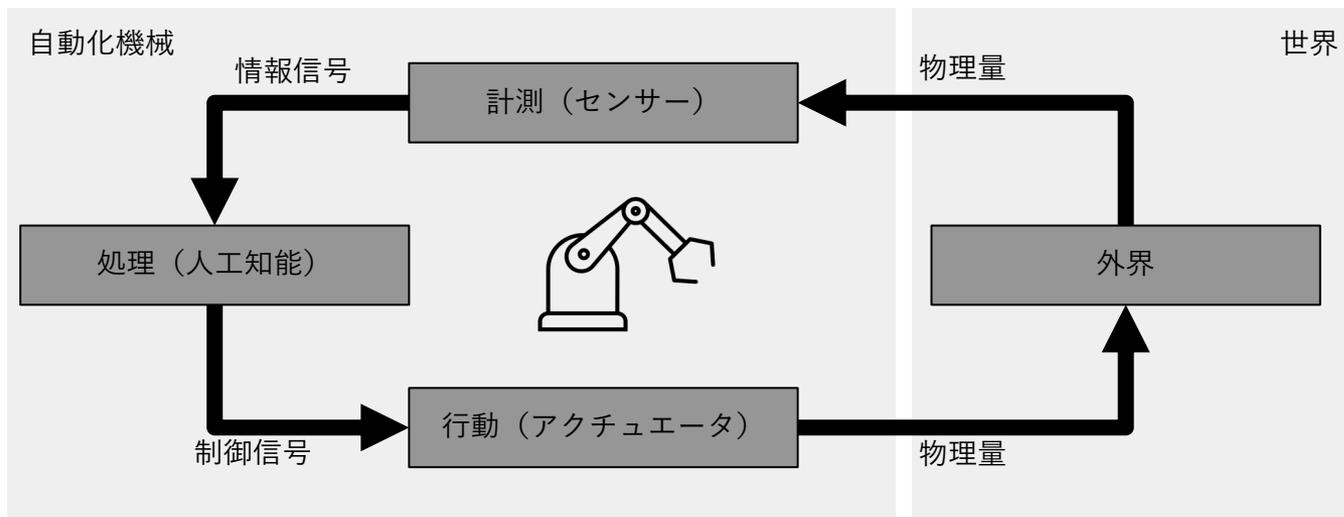
# 身近な例：家電

- 身近で勝手に動くものがあれば  
アクチュエータが積み込まれています。
- 日常的に役立つ家電にもたくさん入っています。
  - 洗濯乾燥機：ドラムを回す電動モーター、水を温めるヒーター
  - 自動掃除機：ブラシ、吸引、タイヤを回す電動モーター
  - 換気扇：吸引用ファンを回す電動モーター



# では家電とロボットの違いは？

- 自動化機械はセンサーとアクチュエーターを備えて行動をするものです。
  - 洗濯をしてくれる洗濯機
  - 掃除をしてくれるロボット掃除機
- 前者はそうでもなくとも、後者は一般的にロボットと呼びます。
- ですが、どちらも自動化機械なのです。
- 違いの答えは処理（知性）の部分にあると思えます。
  - 単純な計測と反応、あらかじめ定められた順序に従うだけでなく状態を計測し、（人工知能により）情報を処理して行動を行うのがロボットなのです。

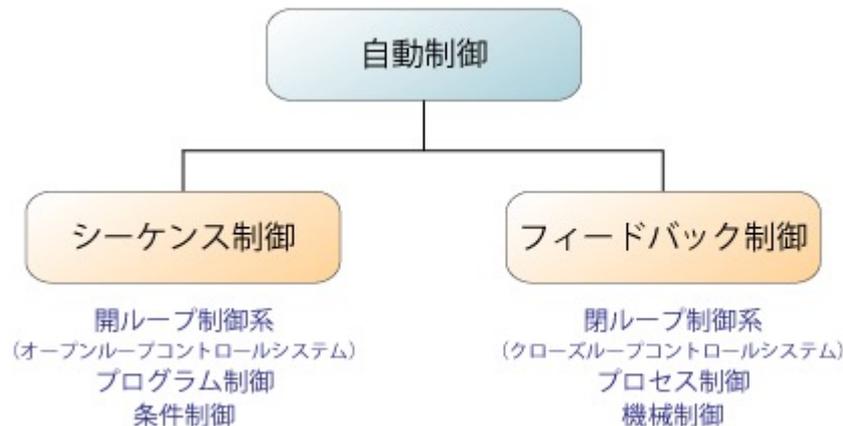


# シーケンス制御とフィードバック制御

制御工学： 入力および出力を持つシステムにおいて、その出力を自由に制御する方法全般にかかわる学問分野を指します。



- 自動制御は制御工学のメインピック
- 二つの方法に大別



## シーケンス制御：

あらかじめ定められた順序に従う制御です  
(信号機、家庭電化製品など)。

## フィードバック制御：

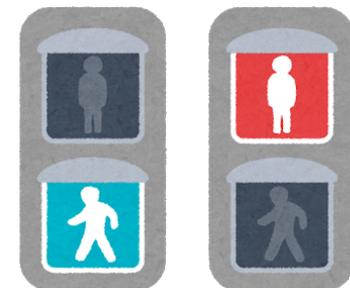
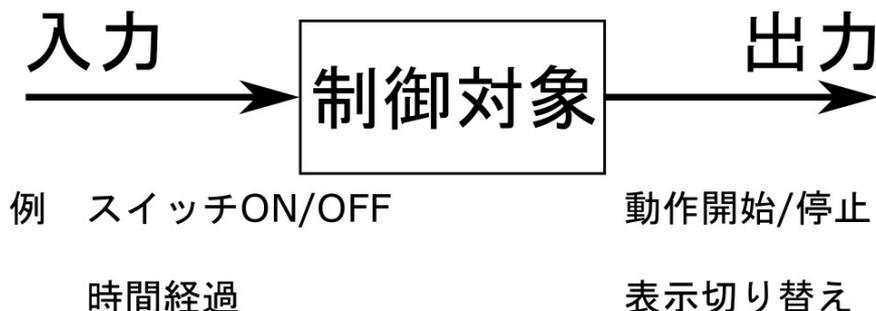
状態を計測しながら、訂正のための動作を加えて、目的の状態に近づけていく制御です (温室の暖房や換気、最近のエアコンなど)。

# シーケンス制御

シーケンス (Sequence) の意味：

連続、(連続して起こる)結果、ひと続き、(起こる)順序、など  
(参考web: <https://ejje.weblio.jp/content/sequence>)

- スイッチなどで開始の合図を送ると、後は事前に決めた手順通りに動作を行う制御です。
- 身近な自動化機械に多く採用されている実用的な制御方法です。
- 情報の流れが一方向、比較的シンプルな制御です。
- 例： テレビ、信号機



- 弱点：ノイズ (予期せぬ入力、誤差) に弱いです。
- ノイズが多い場合、フィードバック制御が有効です。

# フィードバック制御

フィードバック (Feedback) の意味：

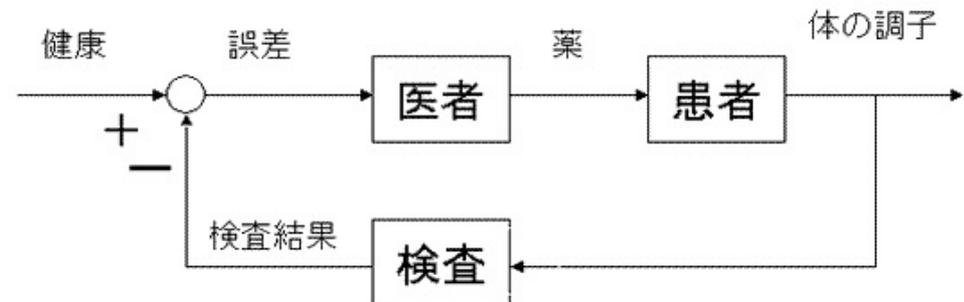
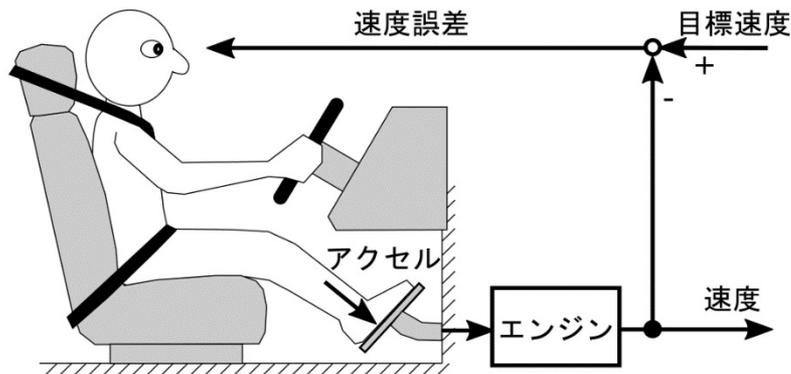
(情報・質問を受ける側からの)反応、意見、帰還(きかん)、など

(参考web: <https://ejje.weblio.jp/content/feedback>)

- 出力の信号を入力側に送り返すことで、適切な目標値または基準値になるように出力を制御します。
- **ノイズがある場合も、その影響を小さくすることが可能です。**
- フィードバック制御には、センサ (計測手段) が必要です。
- センサを増やせば多くの情報が制御に利用可能となるが、システム全体のコスト増加と複雑化にもつながります (トレードオフ)。

速度誤差が小さくなるように  
アクセル踏み込み量を調整

例： 自動車の運転、病院の診察



# 代表的なフィードバック制御の紹介

## 比例制御

Proportional control, P制御

目標値と計測値の誤差に比例した制御入力を与える方法です。

例：物体の位置を  $x_{\text{ref}}$  に合わせる制御入力を

$$u = K_p(x_{\text{ref}} - x)$$

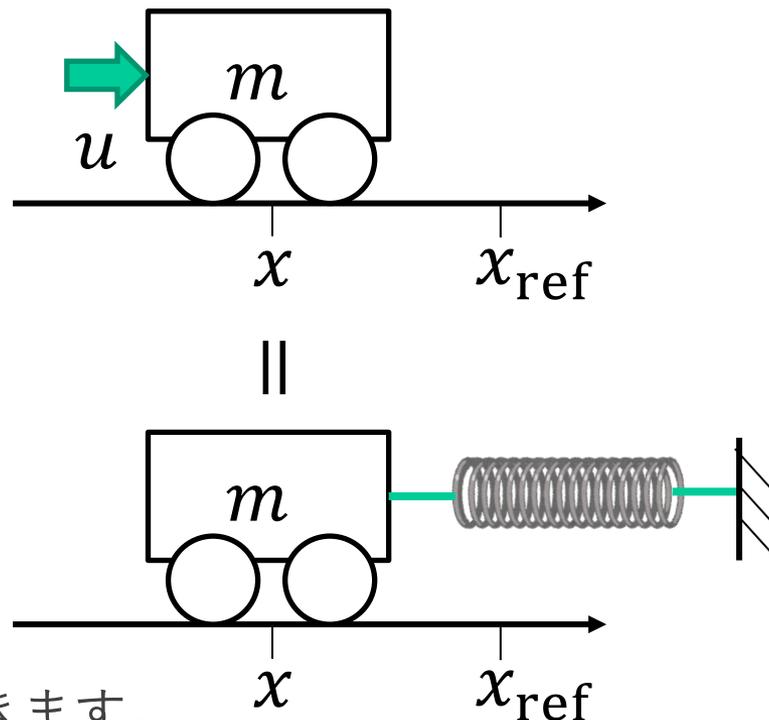
とすると、物体が  $x_{\text{ref}}$  のほうに動きます。

$K_p$  はPゲインという定数で、ばね定数に相当します。

( $x_{\text{ref}}$  で自然長になるばねをつけているのと同じ)

もし（水の中など）粘性抵抗があれば、時間の経過でそのうちに  $x_{\text{ref}}$  で止まります。

しかし、そうでないと振動します。→ 粘性の追加（微分制御）



# 微分制御

Differential control, D制御

計測値の微分に比例した制御入力を与える方法です。

この例で、制御入力を

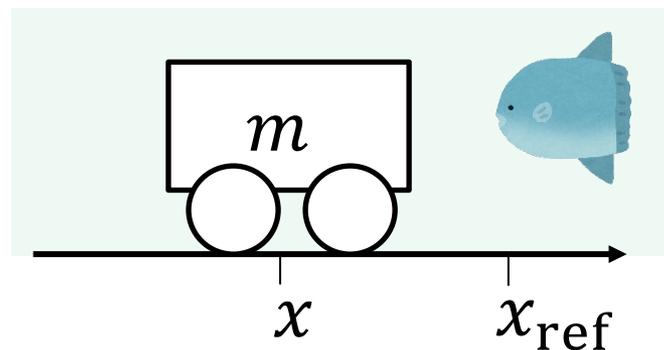
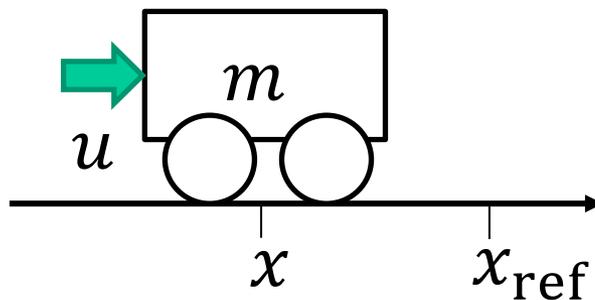
$$u = -K_d \dot{x}$$

とすると、粘性抵抗があるかのように動きが止まっていきます。

比例制御と組み合わせて、

$$u = K_p(x_{\text{ref}} - x) - K_d \dot{x}$$

とすれば、振動を抑えつつ、物体を  $x_{\text{ref}}$  の位置に合わせることができます。(PD制御)



# 積分制御

Integral control, I制御

誤差の積分に比例した制御入力を与える方法です。

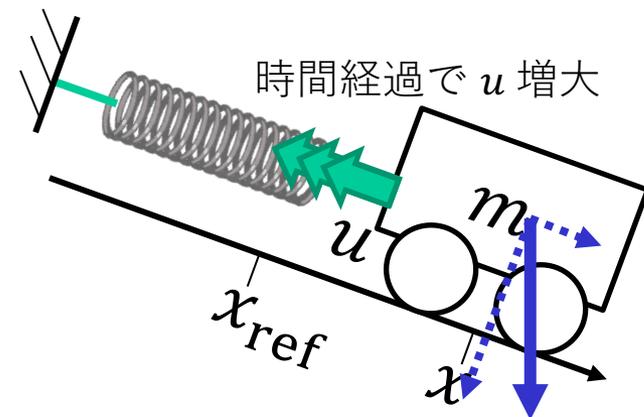
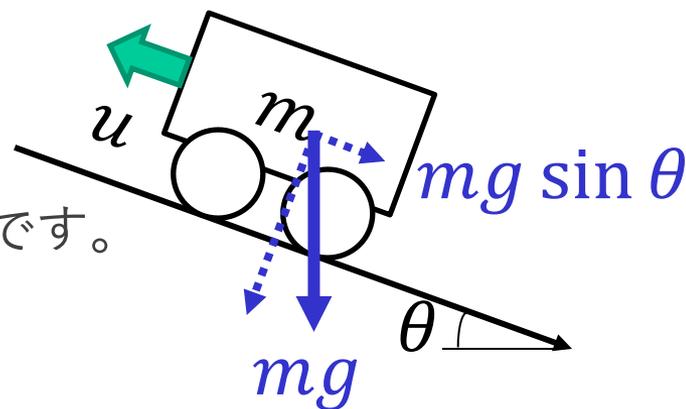
前の例で、もし地面が角度  $\theta$  だけ傾いていたら、PD制御では

$$x = \frac{mg \sin \theta}{K_P} + x_{\text{ref}}$$

の位置で  $u$  と重力が釣り合ってしまう、目標位置に到達することができません。

$$u = K_i \int_0^t (x_{\text{ref}} - x) dt$$

とすると、誤差のある状態が続くと誤差と逆向きの力が徐々に増えていき、物体を  $x_{\text{ref}}$  のほうに動かすことができます（重力補償）。



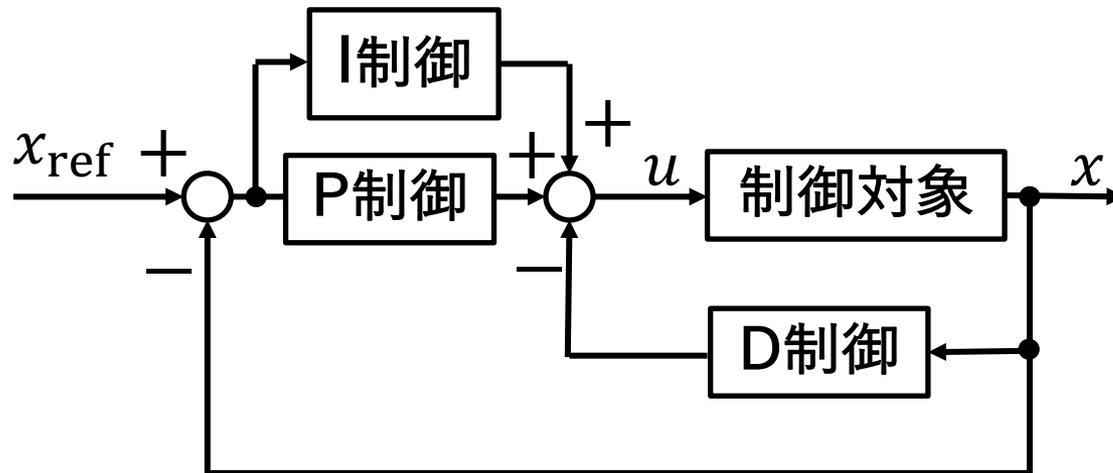
# PID制御

比例制御・微分制御・積分制御を組み合わせた制御方法です。

$$u = K_p(x_{\text{ref}} - x) + K_i \int_0^t (x_{\text{ref}} - x) dt - K_d \dot{x}$$

非常によく使われる基本的な制御方法です（PD制御、PI制御も）。  
ゲイン（ $K_p, K_i, K_d$ ）を適切に調節する必要があります。

下図はPID制御（微分先行型PID制御、PI-D制御）のブロック線図です。



# ロボットとデータサイエンスのつながり

- センサーで得られた信号を処理するために機械学習などのデータサイエンス技術が使われることがあります。
  - カメラの映像から周囲の物体を認識
  - マイクから周囲の音や声を認識
  - 速度・加速度センサーからの行動推定
- アクチュエータの制御にもデータサイエンス技術が使用されることがあります。
  - PID制御やモデル予測制御のパラメータをデータから決定
  - 強化学習による複雑な制御システムを学習

# 画像認識による行動推定

- カメラの映像と、映像データの画像処理によって、人がどこで何をしているかを認識することができます。
- ジェスチャー認識は手や体の動きから人間が何をしているかを識別する技術です。
- 複数カメラや赤外線カメラによって距離の推定が可能なデプスカメラを用いることで、高精度な認識を行うことができます。
- OpenPoseやOpenPifPafなど、カメラ画像だけから人間の骨格を推定するオープンソースソフトウェアの開発も進められています。
- ジェスチャーや骨格のパターンからの行動推定によって、防犯や異常検知、仕事効率化、エンターテインメントなどへの応用ができます。



iPadのTrueDepthカメラ

# 自動運転技術

- 自動車を自律的に運転させる自動運転技術はセンサーや制御、AI技術など数多くの技術の発展とともに実現に向かっていきます。
- センサー
  - LiDAR (light detection and ranging)はレーザー光の反射によって周囲の物体との距離を検知するセンサーです。
  - ビデオカメラ、GPS (global positioning system)、車両の動き検知など多数のセンサーの組み合わせでより正確な状況を把握できます。
- アクチュエータ
  - アクセル、ブレーキ、ステアリングなど通常の自動車と同様のアクチュエータが使用可能です。
- 制御
  - 車両の動きを考慮したコマンド発信を行います。その際、周囲の車との車間距離や異常の予測を行いそれに基づいて行動します。

# 自動運転とデータ・AI技術

- AI技術
  - センサーデータから、周囲の自動車、歩行者、道路を認識します。さらに、機械学習や時系列予測によって、周囲の自動車や歩行者の動作が予測可能です。
  - SLAM (simultaneous localization and mapping) は、センサーデータから周囲の地図の作成と車両の位置情報の特定を同時に行うシステムで、屋内や地図データのない場所での走行を可能にします。
- データ活用・データ通信
  - ダイナミックマップは3次元地図情報と、渋滞や事故といった交通情報、信号機データから成るデジタル地図の情報基盤です。
  - 集約された情報基盤を用いることで、ルート作成や危険予測への応用が可能です。
  - V2X(vehicle-to-X)は車両と、他の車両や歩行者の持つスマートフォンとの通信によって、自動運転の安全性を確保する仕組みです。