

インタラクティブシステム論 第9回

梶本裕之

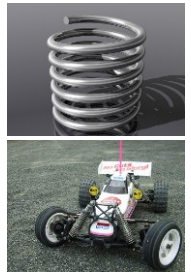
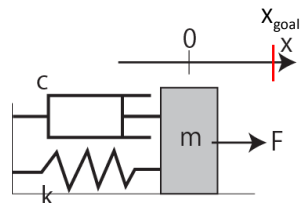
Twitter ID kajimoto
ハッシュタグ #ninshiki

日程

4/12 イントロダクション
4/19 Scilabの紹介(西6号館3階PCルーム)
4/26 フーリエ変換
5/03 休日
5/10 フーリエ変換と線形システム
5/17 信号処理の基礎
5/24 信号処理応用1(相關)
5/31 信号処理応用2(画像処理)
6/07 ~中間チェック~
6/14 出張により休講
6/21 ラプラス変換
6/28 古典制御の基礎
7/05 行列
7/12 行列と最小二乗法
7/19 ロボティクス
7/26 ~期末チェック~

制御の基礎の基礎

制御をしたい



時刻0に、 $x=0$ の位置にあったおもり m を、 $x=x_{goal}$ に移動したい。

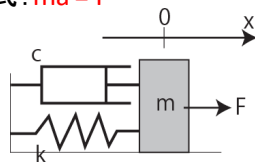
どのような力 $F(t)$ を加えたらよいだろうか？

モデルを作る

ニュートンの運動方程式: $ma = F$

おもりに加わる力

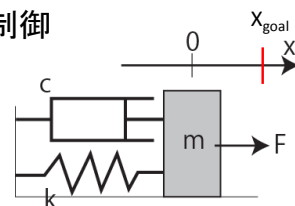
- 外力(制御入力): f
- ダンパ: $-cv$
- バネ: $-kx$



運動方程式:

2階微分まで考えるシステム=2次系
多くのシステムの近似モデルとして適用可能.

ON・OFF制御



•一番初めに考える制御

- 目的の位置より手前だったら $F=1$ を加える.
- 目的の位置を超えたら $F=0$ とする.

ON/OFF制御のシミュレーション

Scilabコード

```

m=1.0; //質量
c=1.0; //ダンパ
k=1.0; //バネ
xgoal=1.0; //目標値
x=0; //現在地
v=0; //現在速度
dt = 0.1; //時間間隔
xrecord=[]; //データ記録用

for t=1:300,

    a = F - k*x - c*v;
    v = v+a*dt;
    x = x+v*dt;
    xrecord = [xrecord,x];
end
plot(xrecord);
                
```

ON・OFF制御

- 制御の**最低限**は含まれている:
 - (1) 対象の状態を見て,
 - (2) 目的との差を見て
 - (3) 出力を変化させる
- 目標値付近で**永久に発振してしまう**
- ごく簡単なハードウェアで実現できる
- 実装例: ことつ(ただしヒステリシスを入れている)

フィードバックとは

- 制御の**最低限**:
 - (1) 対象の状態を見て,
 - (2) 目的との差を見て
 - (3) 出力を変化させる
- これを、「フィードバック制御」という

P制御

- ON/OFFだと発振してしまった.
- Fをもっと「なだらか」に変化させれば...
- 目標値 x_{goal} と現在値 x との「差」に**比例**した力を加えればよいのでは?
(比例 = Proportional)

P制御のシミュレーション

Scilabコード

```

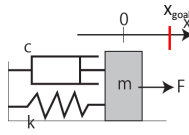
m=1.0; //質量
c=1.0; //ダンパ
k=1.0; //バネ
xgoal=1.0; //目標値
x=0; //現在値
v=0; //現在速度
dt = 0.1; //時間間隔
xrecord=[]; //記録用

for t=1:300,
    F=
    a = F - k*x - c*v;
    v = v+a*dt;
    x = x+v*dt;
    xrecord = [xrecord,x];
end
plot(xrecord);
                
```

P制御のシミュレーション

- 立ち上がり部分で**凹凸**
- 目標値 ($x=1.0$) に達していない

比例定数を大きくしてみる

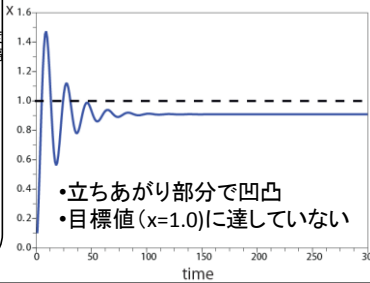


```

Scilabコード
m=1.0; //質量
c=1.0; //ダンパ
k=1.0; //バネ
xgoal=1.0; //目標値
x=0; //現在地
v=0; //現在速度
dt=0.1; //時間間隔
xrecord=[]; //記録用

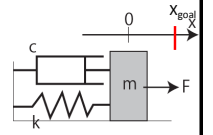
for t=1:300,
    F=10.0*(xgoal-x);
    a=F-k*x-c*v;
    v=v+a*dt;
    x=x+v*dt;
    xrecord=[xrecord,x];
end

plot(xrecord);
    
```



- 立ち上がり部分で凹凸
- 目標値(x=1.0)に達していない

比例定数を小さくしてみる

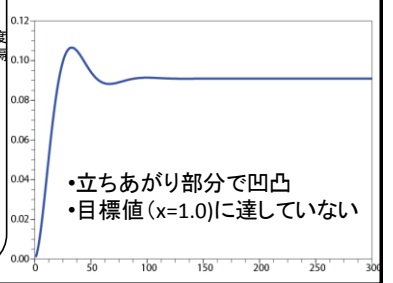


```

Scilabコード
m=1.0; //質量
c=1.0; //ダンパ
k=1.0; //バネ
xgoal=1.0; //目標値
x=0; //現在地
v=0; //現在速度
dt=0.1; //時間間隔
xrecord=[]; //記録用

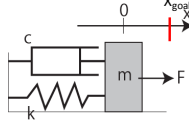
for t=1:300,
    F=0.1*(xgoal-x);
    a=F-k*x-c*v;
    v=v+a*dt;
    x=x+v*dt;
    xrecord=[xrecord,x];
end

plot(xrecord);
    
```



- 立ち上がり部分で凹凸
- 目標値(x=1.0)に達していない

ダンパが大きかったら?

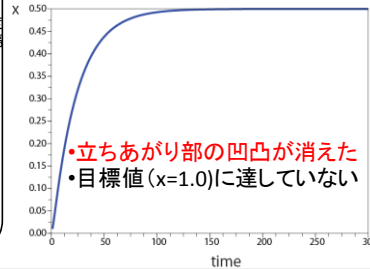


```

Scilabコード
m=1.0; //質量
c=5.0; //ダンパ
k=1.0; //バネ
xgoal=1.0; //目標値
x=0; //現在地
v=0; //現在速度
dt=0.1; //時間間隔
xrecord=[]; //記録用

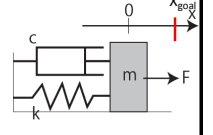
for t=1:300,
    F=1.0*(xgoal-x);
    a=F-k*x-c*v;
    v=v+a*dt;
    x=x+v*dt;
    xrecord=[xrecord,x];
end

plot(xrecord);
    
```

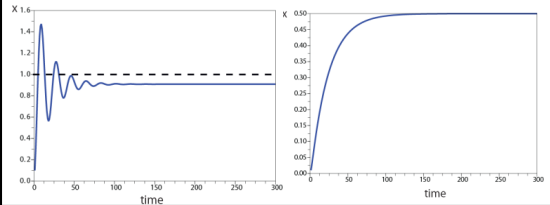


- 立ち上がり部の凹凸が消えた
- 目標値(x=1.0)に達していない

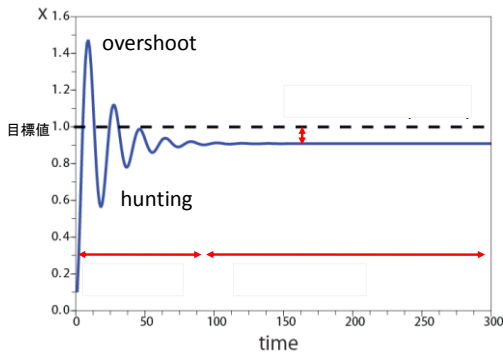
P制御のまとめ



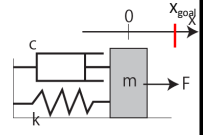
- どうやら...
- 最終的に目標値(x=1.0)に達しない?
 - はじめに振動するかどうかは、ダンパの大きさに依存?



用語



P制御の数学



- システム

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$$
- 力の制御の仕方

$$f = \text{_____}$$
- つまり

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \text{_____}$$
- 一般化して次の式を考えよう

$$\ddot{x} + a\dot{x} + bx = c$$

P制御の数学

$$\ddot{x} + a\dot{x} + bx = c$$

•ラプラス変換すると

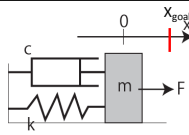
[Blank box for Laplace transform result]

•つまり、軌道 $x(t)$ のラプラス変換 $X(s)$ は、

[Blank box for X(s)]

•2次方程式の根を λ_1, λ_2 とすると、

[Blank box for roots]



P制御の数学

•2次方程式の根を λ_1, λ_2 とすると、

[Blank box]

•部分分数分解をすると、

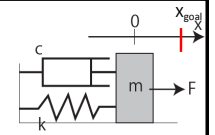
[Blank box]

•結局、逆ラプラス変換をすると

[Blank box]

つまり、

- 二次方程式の根 λ_1, λ_2 が過渡的なふるまいを決定し、
- 定数項 a_1 が、収束値を決定する。



P制御の数学(2次方程式の根)

•2次方程式の根 λ_1, λ_2 について

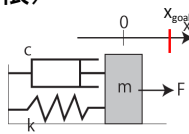
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = a(x_{goal} - x)$$

•根 λ_1, λ_2 は、 $ms^2 + cs + (k+a) = 0$ の根。

$$\lambda = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4m(k+a)}}{2m}$$

•高校生でもわかることが2つ！

- (1) λ の実部は負である
- (2) c^2 が $4m(k+a)$ よりも小さいと、 λ は虚部を持つ



P制御の数学(2次方程式の根)

$$\lambda = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4m(k+a)}}{2m}$$

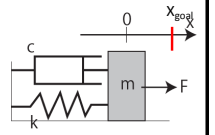
(1) λ の実部は負である

だから、

$$x(t) = a_1 + a_2 \exp(\lambda_1 t) + a_3 \exp(\lambda_2 t)$$

のexpの項はすぐに減衰する。

つまり、無限大に発散することはない(ひと安心！)



P制御の数学(2次方程式の根)

$$\lambda = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4m(k+a)}}{2m}$$

(2) c^2 が $4mk$ よりも小さいと、 λ は虚部を持つ

このとき、

$$x(t) = a_1 + a_2 \exp(\lambda_1 t) + a_3 \exp(\lambda_2 t)$$

の、expの項は、 $\exp(-c_1 t + ic_2 t) = \exp(-c_1 t) \cdot \exp(ic_2 t)$

つまり、

- 減衰する成分 $\exp(-c_1 t)$ と、
 - 振動する成分 $\exp(ic_2 t) = \cos(c_2 t) + i \sin(c_2 t)$
- に分けられる。

これこそが、はじめの振動の原因

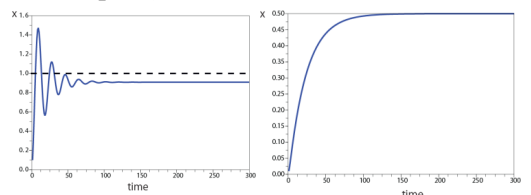
P制御の数学(2次方程式の根)

$$\lambda = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4m(k+a)}}{2m}$$

(2) c^2 が $4m(k+a)$ よりも小さいと、 λ は虚部を持つ

これこそが、はじめの振動の原因

つまり、「振動を抑えるためにはダンパ(ブレーキ)を大きくすればよい」ということ。



P制御の数学(再掲)

- 2次方程式の根を λ_1, λ_2 とすると,

$$X = \frac{c}{s(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)}$$

- 部分分数分解をすると,

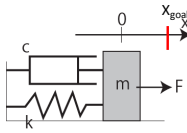
$$X = \frac{a_1}{s} + \frac{a_2}{(s-\lambda_1)} + \frac{a_3}{(s-\lambda_2)}$$

- 結局, 逆ラプラス変換をすると

$$x(t) = a_1 + a_2 \exp(\lambda_1 t) + a_3 \exp(\lambda_2 t)$$

- つまり,

- 二次方程式の根 λ_1, λ_2 が過渡的なふるまいを決定し,**
- 定数項 a_1 が, 収束値を決定する.**



P制御の数学(定数項)

$$X = \frac{c}{s(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)}$$

$$X = \frac{a_1}{s} + \frac{a_2}{(s-\lambda_1)} + \frac{a_3}{(s-\lambda_2)}$$

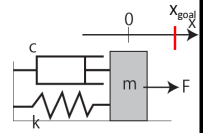
- 結局, 逆ラプラス変換をすると

$$x(t) = a_1 + a_2 \exp(\lambda_1 t) + a_3 \exp(\lambda_2 t)$$

- **a_1 以外は時間がたてば消えるので, a_1 が収束値となる.**

a_1 は部分分数分解を頑張らなければ求められない?

NO !



P制御の数学(定数項)

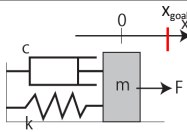
- システムの応答の式:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = a(x_{goal} - x)$$

- いま考えたいのは「定常的」になった時だから,

よって

すなわち



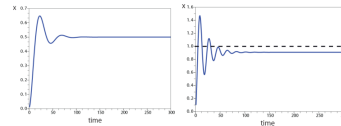
P制御の数学(定数項)

$$\text{収束値: } x = \frac{a}{k+a} x_{goal}$$

各定数の意味は, k:ばね定数, a:P制御の比例定数

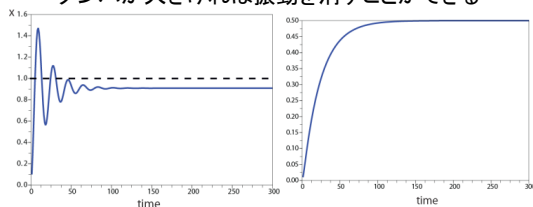
よって次のことがわかる

- (1) a を大きくすれば, 収束値は目標値に近づく
- (2) しかし, 収束値は目標値より常に小さい
- (3) ただし「ばね成分」が0ならちゃんと収束する.

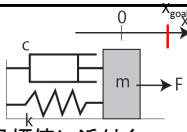


P制御のまとめ(再掲)

- 最終的に目標値 ($x=1.0$)には**達しない**
- ただし, 比例ゲインが大きければ目標値に近づく
- はじめに**振動**するかどうかは, **ダンパの大きさ**に依存.
- ダンパが大きければ振動を消すことができる



ラプラス変換によって, 数学的に理解できた

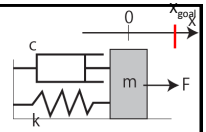


レポート課題(1)

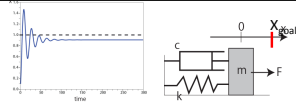
- P制御で振動しないためのダンパcの大きさの数値的な条件を求めよ.
- ただし, $k=1, m=1$ とする.

•ダンパをその値周辺(例えば ± 0.5)に設定したシミュレーションを行い, 実際に振動が抑えられることを確認せよ.

- すべてコード中に記載すること.



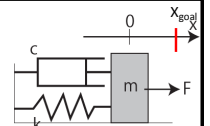
PI制御



- P(比例)制御は、実は絶対に目標値に収束しない
- これを改善するため、「積分(Integral)」を用意する。
- PI制御:
 - 目標値との誤差(P)成分と、
 - その誤差成分の時間的な累積(I)とを、
 - 適当な係数で足し合わせて制御信号とする。

PI制御のシミュレーション

P成分: 目標位置と現在位置の誤差
I成分: 誤差の積分(累積)



```

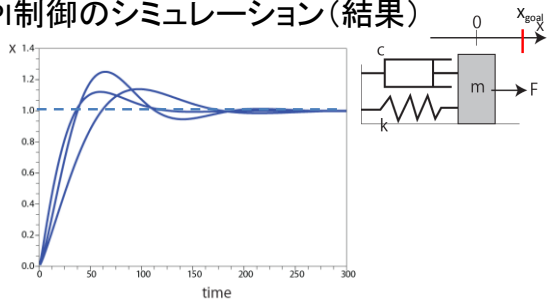
Scilabコード
m=1.0; //質量
c=5.0; //ダンパ
k=1.0; //バネ
xgoal=1.0; //目標値
x=0; //現在地
v=0; //現在速度
dt = 0.1; //時間間隔
xrecord=[]; //データ記録用
P=0.8; //P成分
I=0.05; //I成分
i_seibun = 0;

for t=1:300,
    p_seibun =
    i_seibun =
    F=
    a = F - k*x - c*v;
    v = v+a*dt;
    x = x+v*dt;
    xrecord = [xrecord,x];
end

plot(xrecord);
    
```

I成分のイメージ:
誤差があると、**どんどん累積**して無視できなくなる

PI制御のシミュレーション(結果)

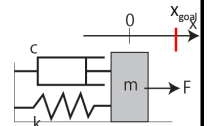


P成分とI成分を色々変えてみた。

- 確かに、収束値は目標値と一致する。
- ただし目標値を行きすぎる(振動成分を持つ)こともあるようだ。

PI制御の数学(最終状態について)

- システム $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$
- 制御方式



- つまり
- 両辺を微分して
- 時間が無限に経過した定常状態では
- よって、最終的に目標値に一致する。

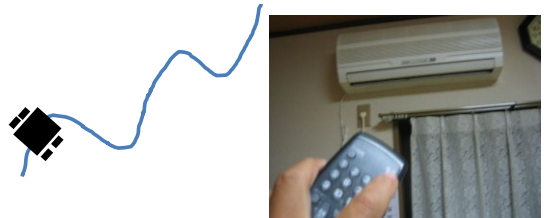
PI制御

- 最終的には目標値に一致する。
- 比例ゲインが大きいと振動する。
- 比例ゲインが小さいと収束は遅い。
- ゆっくりでもよいから完全に目標値に合わせたいときに使う。
- (例)温度制御
 - クーラー
 - 化学プラント

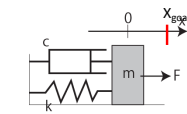


PI制御のデメリット

- Iは積分、すなわち**時間遅れを含む**。
- ある一定の目標に達するのが目標ならOK。だが、目標値が時々刻々に変化する(軌道に沿って動かす等)場合、I成分による**時間遅れ**が問題となる。

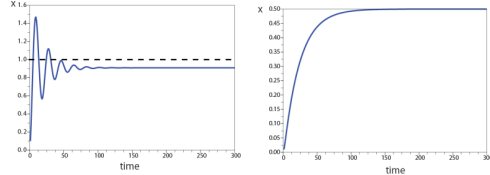


PD制御



- P(比例)制御では、**振動を抑えるために大きなダンパを用意する必要**。
- 言い換えれば、システムを**物理的に**変える必要。

•これを改善するため、**バーチャルなダンパ(ブレーキ)**を用意する。



PD制御のシミュレーション

- P成分: 目標値と現在地の差に比例
- D成分: 速度に比例したブレーキ。つまりダンパ

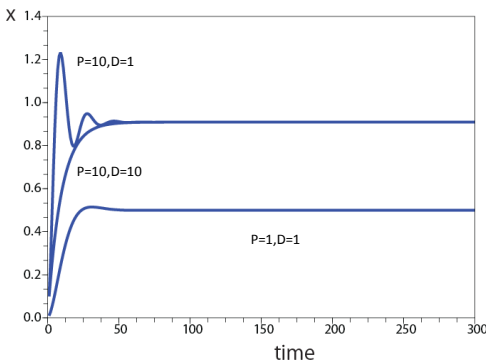
```

Scilabコード
m=1.0; //質量
c=1.0; //ダンパ
k=1.0; //バネ
xgoal=1.0; //目的地
x=0; //現在地
v=0; //現在速度
dt = 0.1; //時間間隔
xrecord=[]; //データ記録用
P=1.0; //P成分
D=1.0; //D成分

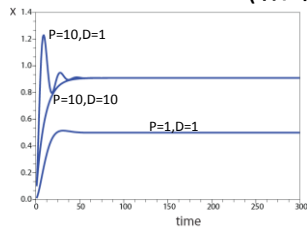
for t=1:300,
    F=
    a = F - k*x - c*v;
    v = v+a*dt;
    x = x+v*dt;
    xrecord = [xrecord,x];
end

plot(xrecord);
    
```

PD制御のシミュレーション(結果)

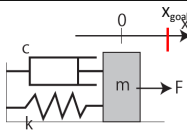


PD制御のシミュレーション(結果)



- (振動について)
 - Dを大きくすれば振動が抑えられる。
 - でもPを大きくしたらやっぱり振動する。
 - それでもDをもっと大きくすれば振動は抑えられる。
- (収束について)
 - P制御と同様に定常偏差がある(目標値に収束しない)

PD制御の数学



•システム

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$$

- 力の制御の仕方
- つまり

•これは、P制御において、ダンパ成分がcからb+cに増えたことを意味する。

PD制御の数学

•これは、P制御において、ダンパ成分がcからb+cに増えたことを意味する。

$$m\ddot{x} + (b+c)\dot{x} + kx = a(x_{goal} - x)$$

•P制御で振動しない条件は: $\lambda = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4m(k+a)}}{2m}$ が虚部を持たないことだった。つまり、

$$c^2 - 4m(k+a) \geq 0$$

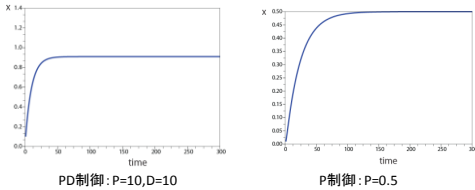
- これが、PD制御では、ダンパ成分が増えたことにより、 $(b+c)^2 - 4m(k+a) \geq 0$
- つまり、より振動しにくくなった。

•P制御と同じだから定常偏差が残る。

PD制御の利点

- ダンパが等価的に増えることで、「振動しにくくなる」
- だからPゲインを思い切り上げられる
- だから結果としてP制御に比べて目標到達速度が速い

•厳密に目標値に達することよりも、高速に移動することが目標の場合に多く使われる。(例)ロボットアーム



モータとPD制御

(再考) 収束値: $x = \frac{a}{k+a} x_{goal}$



- モータには通常「ばね成分」はない。
- よって収束値が目標値とずれるという問題が生じにくい
- このため、「目標値が時々刻々と変化する」(=軌道に沿って動かす)場合、PD制御が多く使われる。

重力

(再考) 収束値: $x = \frac{a}{k+a} x_{goal}$

- モータには通常「ばね成分」はない。
- しかし実際には、アームの姿勢によって、重力による復元力が働く。
- これはばね項とみなせる。
- よって、ただのPD制御では、収束値が目標値に達しないことが多い。



⇒「重力補償項」を考える。
現在の姿勢で必要な「重力に打ち勝つ力」を計算し、指令信号に加えることで、重力を無視した制御が可能。

PID制御

ここまでのすべてを合わせたもの。

- P:現在の値と目標値との誤差(比例成分=Proportional)
- I:誤差の積分(Integral)
- D:速度(微分成分=Derivative)

それぞれの役割は

- P:早く目標に達する。
- I:定常偏差を無くす
- D:振動を抑える。

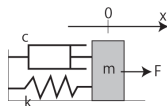
(再考)伝達関数と制御

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$$

両辺をラプラス変換すると

$$(ms^2 + cs + k)X = \frac{F}{s}$$

$$X(s) = \frac{F}{s(ms^2 + cs + k)}$$



つまり、制御とは、元のシステム

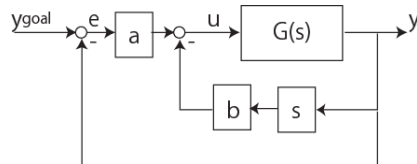
$$G(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k}$$

(伝達関数)

に、適切な入力 $F(s)$ を与えて、
望ましい軌道 $X(s)$ を得る操作である。

ブロック線図

制御の流れを図にしたもの。微分をs、積分を1/sと書く。



ygoal: 目標値, y: 現在の値, e: 誤差, u: システムへの入力
a: 比例ゲイン, b: 微分ゲイン, G: システムの伝達関数

流れに従って考えれば、自然にラプラス変換表現が得られる。
上図はPD制御の場合。

レポート課題(1)

これまでと同じバネマスダンパ系に対してPID制御を実装したうえで、P,I,Dの係数を変化させ、
 (1)なるべく早く目標値に達し、
 (2)振動しない(オーバーシュートがない)ようにせよ。

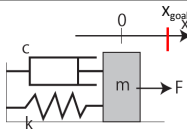
※実は大きければ大きいほどよくなる。実際の制御では、出力の制限が制御性能をほとんど決めてしまう。
 ※余裕があれば適当に出力の最大値の制限を設けたうえで試してみよ。

インピーダンス制御

一般化: インピーダンス制御

- システム(バネ成分は無いことも多い)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$$



- 力の制御の仕方

- つまり

- これは、元のインピーダンス m, c, k を、 $m+m', c+c', k+k'$ に変化させたことを意味する。

インピーダンス制御≡ロボットを「軽く」する。

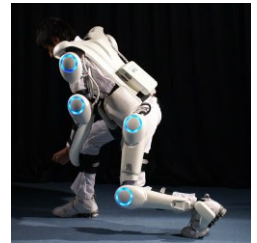
$$(m+m')\ddot{x} + (c+c')\dot{x} + (k+k')x = ax_{goal}$$

- $m'=-m, c'=-c, k'=-k$ としたら理想的には「無くなる」
- ロボットの場合、 x の代わりに θ (関節角)、 m の代わりに(慣性トルク)等々。

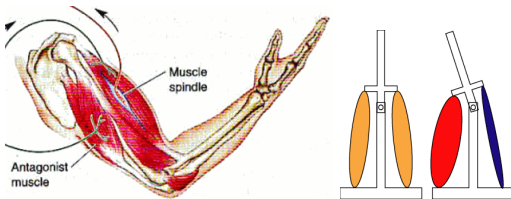
⇒ロボットのインピーダンスは0になる。

- このように制御されたロボットは、見かけ上「軽く」なる。
- ⇒対人安全性の向上。

⇒操作性の向上。



人間=インピーダンス可変ロボット



- 一つの自由度(関節)に対して、二つの筋肉で駆動(拮抗筋)
- 力とインピーダンス(やわらかさ)の二つの情報を出力している。
- 筋Aと筋Bの差=外力
- 筋Aと筋Bの和=柔らかさ

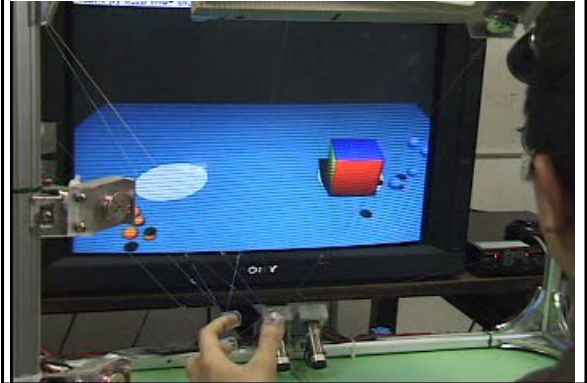
インピーダンス提示装置としての力覚ディスプレイ

(復習) 視覚ディスプレイ

- Sutherland "The Ultimate Display" (1965)



(復習) 触覚・力覚ディスプレイ



触覚・力覚ディスプレイに関して

世界の何を再生すればよい？

答(1) 世界の「形」

答(2) 世界の「柔らかさ」

• 柔らかさ = インピーダンス

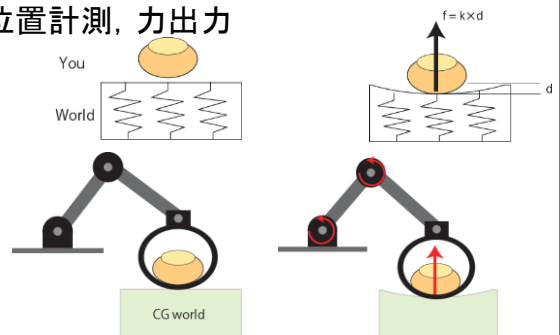
• 空中 = インピーダンス 0

• 物体と接触 = インピーダンス発生

• 物体と押し合う = インピーダンスを感じている

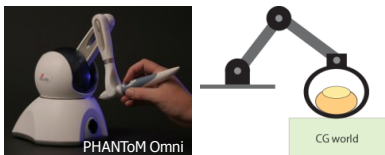


インピーダンスの提示(1): 位置計測, 力出力



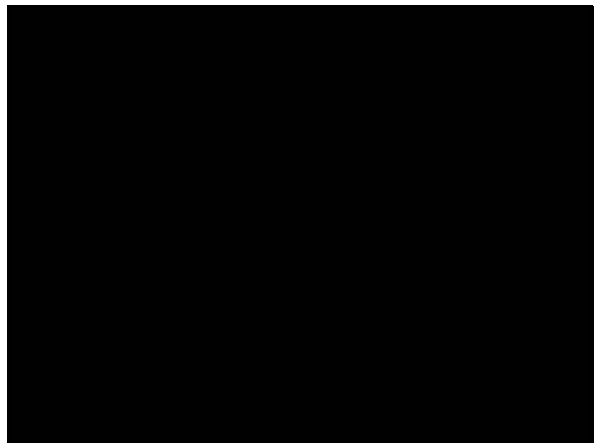
ロボットアームは、「位置」を計測し、必要な「力」を出すことで世界のインピーダンスを表現する。

位置計測, 力出力

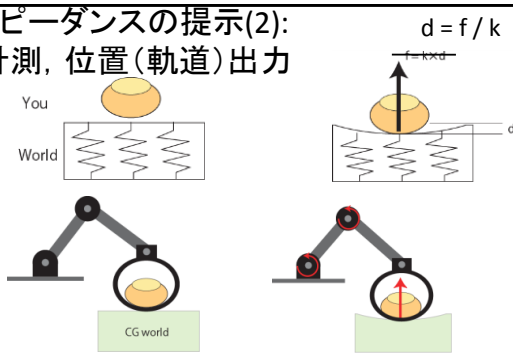


ロボットアームは、「位置」を計測し、必要な「力」を出すことで世界のインピーダンスを表現する。

- ロボットアームはものすごく軽い必要 (軽く作る + インピーダンス制御で軽くする)
- 位置センサ (モータのエンコーダ) があればよい. (ユーザの力を計測する必要はない)



インピーダンスの提示(2): 力計測, 位置(軌道)出力



ロボットアームは、「位置」とユーザの「力」を計測し、必要な「変位(軌道)」を計算し、実現することで世界のインピーダンスを表現する。

力計測, 軌道出力



ロボットアームは、「位置」とユーザの「力」を計測し、必要な「変位(軌道)」を計算し、実現することで世界のインピーダンスを表現する。

- ロボットアームは固くて重い産業用ロボットでOK
- 位置センサ(モータのエンコーダ)とユーザの力を計測する力センサが必要。

「振る舞い(軌道)」によってインピーダンスを表現する:
位置制御ベースインピーダンス制御と全く同じ

インピーダンス制御の問題点(再掲)

$$(m+m')\ddot{x} + (c+c')\dot{x} + (k+k')x = ax_{goal}$$

• $m'=-m$, $c'=-c$, $k'=k$ としたら理想的には「無くなる」

⇒バネ, マス, ダンパの正確な値が必要(システム同定問題)

⇒パラメータは動的に変化することがある(摩擦の変化等)

⇒安定な制御は難しい



安定な制御の難しさ

•システム $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$

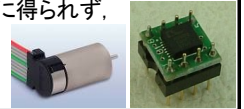
•制御則 $f = k'(x_{goal} - x) - c'\dot{x} - m'\ddot{x}$

•結果 $(m+m')\ddot{x} + (c+c')\dot{x} + (k+k')x = ax_{goal}$

制御のためには、位置、速度、加速度の計測が必要。

- ✓位置: エンコーダ(回転角センサ)
- ✓速度: 大抵は位置を微分して求める。場合によりタコジェネレータ
- ✓加速度: 大抵は速度を微分して求める。場合により加速度センサ

速度、加速度は位置ほど正確に得られず、ノイズを多く含む。



安定な制御の難しさ

•システム $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$

•制御則 $f = k'(x_{goal} - x) - c'\dot{x} - m'\ddot{x}$

•結果 $(m+m')\ddot{x} + (c+c')\dot{x} + (k+k')x = ax_{goal}$

速度、加速度は位置ほど正確に得られず、ノイズを多く含む。

⇒不安定な振動

⇒重さ(加速度項)の完全な補償($m'=-m$)は無理。
経験的には半分程度「軽く」するのがせいぜい。

⇒システムは設計段階から軽く作る必要。

位置制御ベースインピーダンス制御へ

•従来の手法

•システム $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$

•制御則 $f = k'(x_{goal} - x) - c'\dot{x} - m'\ddot{x}$

•結果 $(m+m')\ddot{x} + (c+c')\dot{x} + (k+k')x = ax_{goal}$

•システム同定が必要(m, c, k)

- 位置だけでなく、速度、加速度を求める必要
- 発振等の不都合を生じやすい

そもそも何をしたかったのか?

位置制御ベースインピーダンス制御へ

•そもそもやりたかったこと:

「固い」ロボットに、
まるで人のような「柔らかい」振りをさせたい。

•つまり, $m_o\ddot{x} + c_o\dot{x} + k_o x = f$

という元々の固さ(動特性)は無視して, あたかも

$$m_s\ddot{x} + c_s\dot{x} + k_s x = f$$

という動特性をもったロボットであるかのように「振舞わせれば」よい。

(o: original, s: simulated)

位置制御ベースインピーダンス制御

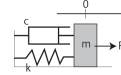
(1) 外力 f を計測する. (カセンサ)



(2) もしロボットが,

$$m_s\ddot{x} + c_s\dot{x} + k_s x = f$$

というインピーダンスを持っていたらこう動くはず,
という**未来の軌道**をシミュレーション.



(3) 軌道に沿った運動をPD(PID)制御で実現.

P, Dゲインは非常に高く設定し, **軌道を忠実に再現**

⇒まるで柔らかいようにふるまう

位置制御ベースインピーダンス制御

(短所)

- カセンサが必要.
- カセンサはロボットアームの先端に付けることが多い
⇒先端以外を押しても反応しない.
- カセンサもノイズが大きい.
- 早い制御ループが必要.



(長所)

- システム同定が不要.
- ものすごく「固い」産業用ロボットも柔らかく出来る.
- コンピュータの発達した今向きと言える.