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

4/13 第1回　イントロダクション
4/20 第2回　フーリエ変換
4/27 第3回フーリエ変換と線形システム
5/4　みどりの日
5/11　出張により休講
5/18 第4回　信号処理の基礎
5/25 第5回　信号処理応用1（相関）
6/1 第6回　　信号処理応用2（画像処理）
6/08　インタラクティブシステムの実際（小泉先生）
6/15 第7回　ラプラス変換
6/22 第8回　古典制御の基礎
6/29　中間確認テスト（出張予定）
7/6 第9回　　行列
7/13 第10回　行列と最小二乗法
7/20 第11回　インタラクティブシステムと機械学習
7/27 第12回　ロボティクス
8/3　期末テスト（出張中）

行列

行列．．．１，２年でやったはず

今日の内容

●固有値とは，固有ベクトルとは
●行列の対角化：なにをしたことになるか，なぜうれしいのか
●情報理論・制御における行列の応用事例

キーワードは，
固有値，固有ベクトル，対角化

行列：データ列を変換するもの

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \qquad \mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{y}$$

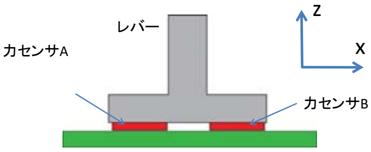
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

（例1）
y:観測データ，A:システムの性質，x:媒介変数

（例2）
y:フーリエ空間での周波数成分，A:フーリエ変換行列，
x:実空間でのデータ系列

（例）2軸力センサ

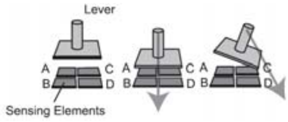
（例）2軸力センサ



$$F_Z = x_A + x_B$$
$$F_X = k(x_A - x_B)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} F_Z \\ F_X \end{bmatrix}}_{\text{2x1ベクトル}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k & -k \end{bmatrix}}_{\text{2x2行列}} \underbrace{\begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix}}_{\text{2x1ベクトル}}$$

（例）多軸力センサ



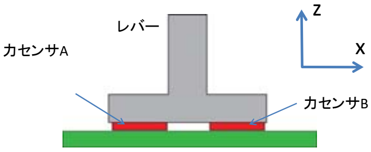
$$F_Z = k_1(x_A + x_B + x_C + x_D)$$
$$F_X = k_2((x_A + x_B) - (x_C + x_D))$$
$$F_Y = k_3((x_A + x_C) - (x_B + x_D))$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} F_z \\ F_x \\ F_y \end{bmatrix}}_{3} = \underbrace{\begin{bmatrix} \quad \end{bmatrix}}_{\text{3x4行列}} \underbrace{\begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \\ x_D \end{bmatrix}}_{4}$$

一般には正方行列ではない！！

（例）6軸力センサには8つ以上のセンサエレメント内蔵

力センサのキャリブレーション（較正）

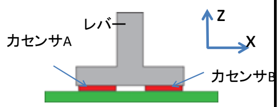


$$F_Z = k_1 x_A + k_2 x_B$$
$$F_X = k_3 x_A + k_4 x_B$$

$$\begin{bmatrix} F_Z \\ F_X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix}$$

k1～k4のパラメータは元々未知．
これを求めなければ使えない！！

逆行列



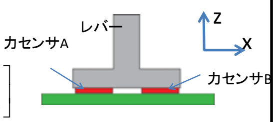
$$\begin{bmatrix} F_Z \\ F_X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix}$$

これを $\mathbf{f} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ と書く．

ここで，
「ある力を加えたときの各センサ出力は？」
という逆の関係を考える．

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{f} = \mathbf{G}\mathbf{f} \qquad \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 \\ g_3 & g_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_Z \\ F_X \end{bmatrix}$$

逆行列の「測定」



$$\mathbf{x} = \mathbf{G}\mathbf{f} \qquad \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 \\ g_3 & g_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_Z \\ F_X \end{bmatrix}$$

(1) Fz=1，Fx=0の力を加え，各センサの出力を記録

$$\begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix} = \qquad =$$

各センサの出力に，逆行列の成分g1，g3が現れる！

(2) Fz=0,Fx=1の力を加え，各センサの出力を記録

$$\begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix} = \qquad =$$

各センサの出力に，逆行列の成分g2，g4が現れる！

逆行列の「測定」

$$\mathbf{x} = \mathbf{G}\mathbf{f} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{f} \qquad \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 \\ g_3 & g_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_Z \\ F_X \end{bmatrix}$$

G=A⁻¹の成分，g1～g4が得られたので，
その逆行列を計算すればAが得られる．

$$\mathbf{f} = \mathbf{A}\mathbf{x}$$

まとめると，

$$\left.\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} g_1 & g_2 \\ g_3 & g_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_3 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} g_1 & g_2 \\ g_3 & g_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_2 \\ g_4 \end{bmatrix} \end{aligned}\right\} \begin{bmatrix} g_1 & g_2 \\ g_3 & g_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 \\ g_3 & g_4 \end{bmatrix}$$

行列に単位行列をかけたことに相当

単位力でなくて良い

1回目の入力　1回目の出力

$$\begin{bmatrix} g_1 & g_2 \\ g_3 & g_4 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} f_{z1} & f_{z2} \\ f_{x1} & f_{x2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ m_1 & m_2 \end{bmatrix}$$

2回目の入力　2回目の出力

$$\mathbf{GF} = \mathbf{M}$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{MF}^{-1}$$

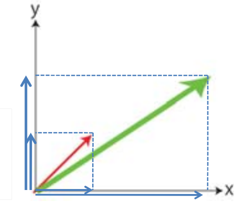
1. 2回**既知の**力ベクトルを加えて，各センサの出力を得る
2. 力ベクトルを並べたものを力行列**F**，
   センサ出力を並べたものを行列**M**とする
3. 力行列の逆行列**F**$^{-1}$を**M**にかければ，行列**G**が得られる．
4. **Gの逆行列が望んだ「較正行列」A**

ほとんどすべての行列は，ベクトルを「引き延ばす」ものである（1）

$$\mathbf{v} = \mathbf{Au} \quad \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$$

$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$ の時，

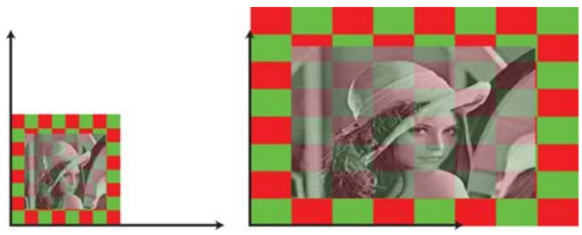
$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} =$$



（作用）x軸成分を3倍，y軸成分を2倍に引き延ばす

ほとんどすべての行列は，ベクトルを「引き延ばす」ものである（1）

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$



（作用）x軸成分を3倍，y軸成分を2倍に引き延ばす

ほとんどすべての行列は，ベクトルを「引き延ばす」ものである（2）

$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$ は，x軸成分を3倍，y軸成分を2倍に引き延ばす

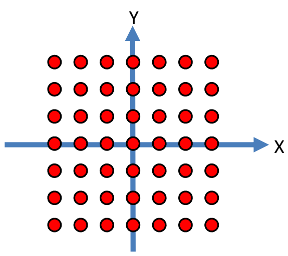
では，

$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 8 & -2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$ の時は？．．．．よく分からない．

試してみる

$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 8 & -2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$ で，平面上の点群はどう移動するか

X=-3～3，Y=-3～3の点群で検証

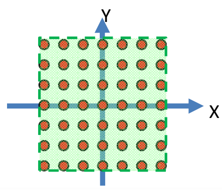


Scilabコード

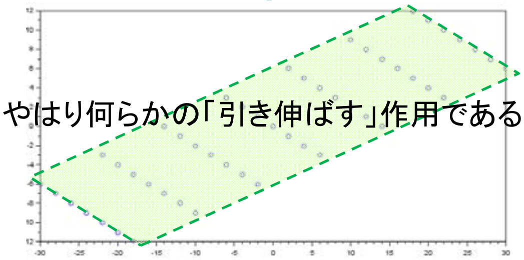
```
A=[8,-2;3,1];
s=[];
t=[];
for x=-3:3
    for y=-3:3
        r=A*[x;y];
        s=[s,r(1)]; //x座標格納
        t=[t,r(2)]; //y座標格納
    end
end
plot(s,t,'o');
```

試してみる

変換前



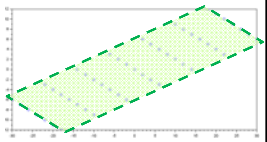
変換後



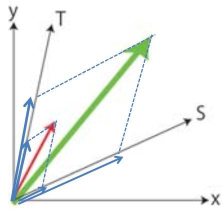
やはり何らかの「引き伸ばす」作用である

ほとんどすべての行列は，ベクトルを「引き延ばす」ものである（2）

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}8 & -2\\ 3 & 1\end{bmatrix}$$ の作用は



●謎のS軸成分をs倍，
●謎のT軸成分をt倍
に引き延ばすことである

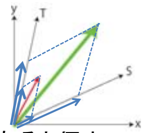


ただしもはや，
このS,T軸は直交していない．

固有ベクトルと固有値

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}8 & -2\\ 3 & 1\end{bmatrix}$$

固有ベクトル，固有値とは，
謎のS，T軸，およびs,t倍
のことである．



（求める手続き）
(1) λ倍されるだけで方向不変のベクトルがあると仮定

$$\mathbf{Au}=\lambda\mathbf{u}$$

(2) 式変形

$$\mathbf{Au}=\lambda\mathbf{u}=\lambda\mathbf{Iu}$$
$$(\mathbf{A}-\lambda\mathbf{I})\mathbf{u}=\mathbf{0}$$
$$\begin{bmatrix}8-\lambda & -2\\ 3 & 1-\lambda\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_x\\ u_y\end{bmatrix}=0$$

固有ベクトルと固有値

$$\begin{bmatrix}8-\lambda & -2\\ 3 & 1-\lambda\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_x\\ u_y\end{bmatrix}=0$$

$$\begin{bmatrix}a-\lambda & b\\ c & d-\lambda\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_x\\ u_y\end{bmatrix}=0$$

$$(a-\lambda)u_x+bu_y=0 \longrightarrow u_y=-(a-\lambda)u_x/b$$
$$cu_x+(d-\lambda)u_y=0$$
$$cu_x-(d-\lambda)(a-\lambda)u_x/b=0$$
$$\left((a-\lambda)(d-\lambda)-bc\right)u_x=0$$
$$\therefore (a-\lambda)(d-\lambda)-bc=0$$

この解λ1，λ2を固有値と呼び，
対応するベクトルを固有ベクトルと呼ぶ．

固有ベクトルと固有値

$$\begin{bmatrix}8-\lambda & -2\\ 3 & 1-\lambda\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_x\\ u_y\end{bmatrix}=0$$

$\lambda_1=2$ に対応する固有ベクトルは

$$\begin{bmatrix}8-2 & -2\\ 3 & 1-2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_x\\ u_y\end{bmatrix}=0$$

大きさを1とすれば， $k=1/\sqrt{10}$

$\lambda_2=7$ に対応する固有ベクトルは

$$\begin{bmatrix}8-7 & -2\\ 3 & 1-7\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_x\\ u_y\end{bmatrix}=0$$

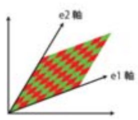
大きさを1とすれば， $k=1/\sqrt{5}$

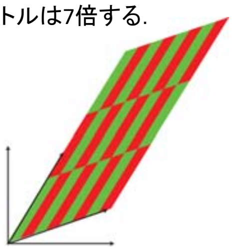
作用：e1軸上のベクトルは2倍，
e2軸上のベクトルは7倍する．

固有ベクトルと固有値

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}8 & -2\\ 3 & 1\end{bmatrix}$$

作用：e1軸上のベクトルは2倍，
e2軸上のベクトルは7倍する．



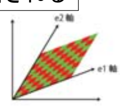


•やはり引き延ばす作用である
•固有ベクトル上のベクトルは，固有値倍される

行列と座標変換

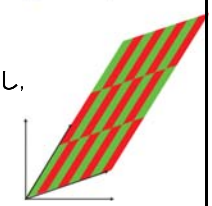
•引き延ばす作用である
•固有ベクトル上のベクトルは，固有値倍される

わかりにくい．．．



行列の作用を，

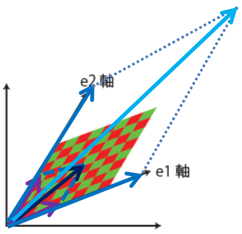
（1）引き延ばし軸での成分表示に変換し，
（2）各成分を引き延ばし，
（3）合成して元に戻す



ように分解すればわかりやすいはず？？

まとめると

行列Tの作用は次の3段階に分解できる.
（1）引き延ばし軸での成分表示に変換し,
（2）各成分を引き延ばし,
（3）合成して元に戻す



（3）合成して元に戻す操作，から考える

行列の作用を,
（1）引き延ばし軸での成分表示に変換し,
（2）各成分を引き延ばし,
（3）合成して元に戻す

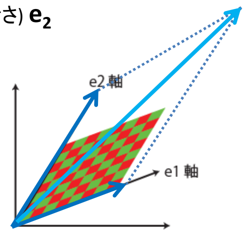
この操作は単なるベクトルの足し算にすぎない

($\mathbf{e}_1$成分の大きさ) $\mathbf{e}_1$＋($\mathbf{e}_2$成分の大きさ) $\mathbf{e}_2$

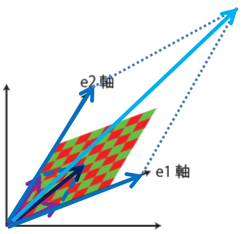
$$= [\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1\text{軸成分} \\ \mathbf{e}_2\text{軸成分} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{P} = [\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2]$ とおいて

$$= \mathbf{P} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1\text{軸成分} \\ \mathbf{e}_2\text{軸成分} \end{bmatrix}$$



行列Tの作用は次の3段階に分解できる.
（1）引き延ばし軸での成分表示に変換し,
（2）各成分を引き延ばし,
（3）合成して元に戻す

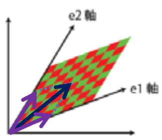


（1）引き延ばし軸での成分表示

行列の作用を,
（1）引き延ばし軸での成分表示に変換し,
（2）各成分を引き延ばし,
（3）合成して元に戻す

（3）「合成」が,

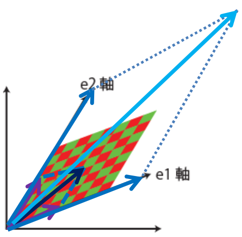
$$\mathbf{P} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1\text{軸成分} \\ \mathbf{e}_2\text{軸成分} \end{bmatrix}$$



で出来るのだから,（1）はその逆のはず.
すなわち

$$\mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} x\text{軸成分} \\ y\text{軸成分} \end{bmatrix}$$ により**引き延ばし軸での成分表示**ができる

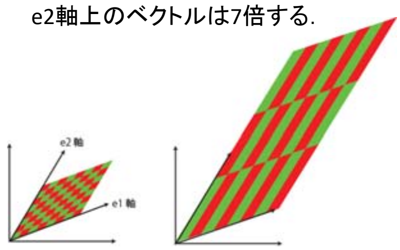
行列Tの作用は次の3段階に分解できる.
（1）引き延ばし軸での成分表示に変換し,
（2）各成分を引き延ばし,
（3）合成して元に戻す



固有ベクトルと固有値（再）

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 8 & -2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$$

作用：e1軸上のベクトルは2倍,
e2軸上のベクトルは7倍する.



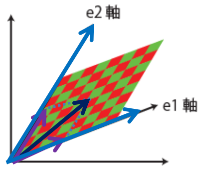
- やはり引き延ばす作用である
- 固有ベクトル上のベクトルが，固有値倍される

（2）引き延ばし軸での引き延ばし

行列の作用を，
（1）引き延ばし軸での成分表示に変換し，
（2）各成分を引き延ばし，
（3）合成して元に戻す

各成分を
固有ベクトル$\mathbf{e}_1$軸に沿って固有値λ_1倍，
固有ベクトル$\mathbf{e}_2$軸に沿って固有値λ_2倍する．

この操作は，

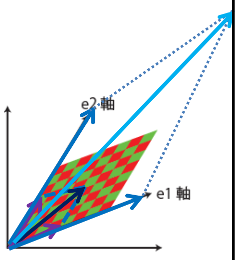


$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_1\text{軸成分を}\lambda_1\text{倍} \\ \mathbf{e}_2\text{軸成分を}\lambda_2\text{倍} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1\text{軸成分} \\ \mathbf{e}_2\text{軸成分} \end{bmatrix}$$

まとめると

行列Tの作用は次の3段階に分解できる．
（1）引き延ばし軸での成分表示に変換し，
（2）各成分を引き延ばし，
（3）合成して元に戻す

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{P}\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_0 \end{bmatrix}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{x}$$



固有値を対角成分に並べた行列を**T**と置く． $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_0 \end{bmatrix}$

$$\mathbf{Ax} =$$

行列の対角化を数式で導出

行列の対角化を数式で導出する。
まず、2つの固有値をλ1、λ2、固有ベクトルをe1,e2とする。

2つの式を「まとめて」書くと次のようになる。

[e1,e2]をP、固有値を対角成分に持つ行列をTと書き、左辺のPを右辺に移項すると

（こちらのほうが簡単！
この式が持つ意味は前述のとおり）

レポート課題（1）

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3 & -3 \\ 1 & 7 \end{bmatrix}$$

の作用について，xy平面上の点群（X=-3～3，Y=-3～3）がどのように移動するか，例と同様に試してみること

またこの移動が，固有ベクトル，固有値の観点から妥当であることを確認すること

重要な応用：$\mathbf{A}^n$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^n\mathbf{x} &= \left(\mathbf{PTP}^{-1}\right)^n\mathbf{x} \\ &= \mathbf{PTP}^{-1}\mathbf{PTP}^{-1}\mathbf{PTP}^{-1}\cdots\mathbf{PTP}^{-1}\mathbf{x} \\ &= \mathbf{PT}^n\mathbf{P}^{-1}\mathbf{x} \\ &= \mathbf{P}\begin{bmatrix} \lambda_1^{\ n} & 0 \\ 0 & \lambda_2^{\ n} \end{bmatrix}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{x} \end{aligned}$$

$$\because \mathbf{T}^n = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}\cdots\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1^{\ n} & 0 \\ 0 & \lambda_2^{\ n} \end{bmatrix}$$

行列のn乗を簡単に計算することができる

重要な結論：nが非常に大きくなった時の$\mathbf{A}^n$

$$\mathbf{A}^n\mathbf{x} = \mathbf{P}\begin{bmatrix} \lambda_1^{\ n} & 0 \\ 0 & \lambda_2^{\ n} \end{bmatrix}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{x}$$

行列の固有値λの絶対値が引き延ばしの倍率だから，

固有値が

●一つでも1より大きければ，A^nは**発散**する
●全て1より小さければ，A^nは0に収束する

例 : $\mathbf{A}^n$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 8 & -2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}^2 = \begin{bmatrix} 8 & -2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 8 & -2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 58 & -18 \\ 27 & -5 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}^3 = \begin{bmatrix} 8 & -2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 8 & -2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 8 & -2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 58 & -18 \\ 27 & -5 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 8 & -2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 410 & -134 \\ 201 & -59 \end{bmatrix}$$

$P = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{10} & 2/\sqrt{5} \\ 3/\sqrt{10} & 1/\sqrt{5} \end{bmatrix}$ $\lambda_1 = 2$ $\lambda_2 = 7$ を代入して,

$$\mathbf{A}^3 = \mathbf{P}\mathbf{T}^3\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{10} & 2/\sqrt{5} \\ 3/\sqrt{10} & 1/\sqrt{5} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 2^3 & 0 \\ 0 & 7^3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1/\sqrt{10} & 2/\sqrt{5} \\ 3/\sqrt{10} & 1/\sqrt{5} \end{bmatrix}^{-1}$$

$$= \cdots = \begin{bmatrix} 410 & -134 \\ 201 & -59 \end{bmatrix}$$

固有値が大きいのでどんどん大きくなる

ほとんどすべての行列は, ベクトルを「引き延ばす」ものである（3）

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

の時は？. . . . 回転と習ったはず

以前と同様に固有値と固有ベクトルを求めてみる.

$$\begin{bmatrix} \cos\theta - \lambda & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta - \lambda \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = 0$$

$$(a-\lambda)(d-\lambda) - bc = 0$$

$$(\cos\theta - \lambda)(\cos\theta - \lambda) + \sin^2\theta = 0$$

回転行列の固有値＝exp(jθ)

$$(\cos\theta - \lambda)(\cos\theta - \lambda) + \sin^2\theta = 0$$

$$\cos^2\theta - 2\lambda\cos\theta + \lambda^2 + \sin^2\theta = 0$$

$$\lambda^2 - 2\lambda\cos\theta + 1 = 0$$

$$\lambda = \frac{2\cos\theta \pm \sqrt{4\cos^2\theta - 4}}{2}$$

$$= \frac{2\cos\theta \pm j\sqrt{4\sin^2\theta}}{2}$$

$$= \cos\theta \pm j\sin\theta$$

$$= \exp(\pm j\theta)$$

回転行列の固有ベクトル

$\cos\theta + j\sin\theta$ に対応する固有ベクトルは

$$\begin{bmatrix} \cos\theta - \lambda & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta - \lambda \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta - \cos\theta - j\sin\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta - \cos\theta - j\sin\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$$

$$= \sin\theta\begin{bmatrix} -j & -1 \\ 1 & -j \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = 0$$

$\therefore u_x = ju_y$ $\mathbf{e}_1 = k\begin{bmatrix} j \\ 1 \end{bmatrix}$ 大きさを1とすれば例えば, $k = 1/\sqrt{2}$

$\cos\theta - j\sin\theta$ に対応する固有ベクトルは

$\mathbf{e}_2 = k\begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$ 大きさを1とすれば例えば, $k = 1/\sqrt{2}$

（参考） 回転行列も（拡張された）引き延ばしである

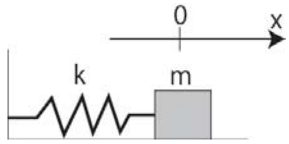
•一般の行列は, 固有値, 固有ベクトル共に複素数.

•x,y軸に加えて, 複素軸も含めた4次元空間中でこれまでと同様の引き延ばしを行う演算とみなせる.

•複素固有値の絶対値が引き延ばし倍率, 偏角が回転角度を表す.

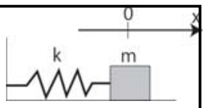
制御における行列

おもりの挙動をシミュレートしたい




```
m=1.0;   //重さ
k=1.0;   //ばね定数
x=1.0;   //初期位置
v=0;     //初期速度
dt=0.1;  //時間刻み
record=[];//記録用
for time= 0:dt:10          //時刻
    F=-k*x;                //ばねによって生じる力
    a=F/m;                 //生じる加速度
    v= v+a*dt;             //速度
    x= x+v*dt;             //位置
    record = [record,x]; //記録（※テクニック：ベクトルが伸びていく）
end
plot([0:dt:10],record);
```

制御における行列



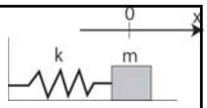

```
for time= 0:dt:10          //時刻
    F=-k*x;                //ばねによって生じる力
    a=F/m;                 //生じる加速度
    v= v+a*dt;             //速度
    x= x+v*dt;             //位置
end
```

位置，速度，加速度を並べた「状態ベクトル」xを定義 $\mathbf{x}=\begin{bmatrix} x \\ v \\ a \end{bmatrix}$

上の関係から，dt時間後の新たな位置，速度，加速度は

$$\begin{bmatrix} x_n \\ v_n \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \quad \\ \quad \\ \quad \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n-1} \\ v_{n-1} \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \mathbf{Ax}$$

制御における行列



Scilabコード

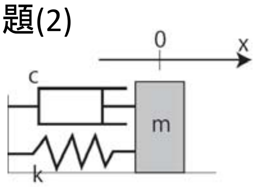
```
m=1.0;    //重さ
k=1.0;    //ばね定数
x=1.0;    //初期位置
v=0;      //初期速度
a=-k/m*x;  //初期加速度
dt=0.01;   //時間刻み
record=[];//記録用

state=[x;v;a];

A=[1,dt,0;0,1,dt;-k/m,0,0];

for time= 0:dt:10  //時刻
  state= A*state;
  record = [record,state(1)];
end

plot([0:dt:10],record);
```

$$\begin{bmatrix} x_n \\ v_n \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & dt & 0 \\ 0 & 1 & dt \\ -k/m & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n-1} \\ v_{n-1} \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \mathbf{Ax}_{n-1} = \cdots = \mathbf{A}^n \mathbf{x}_0$$

•行列Aのn乗を使えば，
n時刻先の状態をシミュレート可能

•行列Aの固有値を見れば，
システムが将来(n=∞）収束するか
発散するか予測可能！

レポート課題(2)



●ダンパを加えた際の行列を考え，
同様のシミレーションプログラムを書け

●行列Aの固有値の絶対値が1よりも小さいこと，
すなわち位置が収束することを確認し，コメントに記せ
(Scilabでは固有値はspec()で求められる）

注意：ここで導入した行列はあくまで導入編用で，
シミュレーションとしては不正確です．