ロボットと倫理，講義の復習

ロボット概論　15

第15回（2020/1/20）
担当：山﨑

はじめに

- 前回の内容
  - 人工知能とは
  - ニューラルネットと深層学習
  - 強化学習
- 今回の内容
  - ロボット利用の倫理
  - 復習と演習

⇨ ロボット概論全体をふりかえる

（復習）ロボット工学三原則

第一条　ロボットは人間に危害を加えてはならない．また，その危険を見過ごすことによって，人間に危害を及ぼしてはならない．（人間の安全）

第二条　ロボットは人間に与えられた命令に服従しなければならない．ただし，与えられた命令が第一条に反する場合はこの限りではない．（命令への服従）

第三条　ロボットは前掲第一条および第二条に反する恐れのない限り，自己を守らなければならない．（自己防衛）

アイザック・アシモフ
「われはロボット」
早川書房(1950)

ロボットと倫理

- ロボットの発達とともに，ロボットに関する倫理的な問題が考えられるようになっている
- 2017年8月　専門家，企業トップらが国連に対し，殺人ロボット兵器の規制を求める公開書簡
- 2017年11月　殺人ロボット兵器の規制をめぐる国連初の公式専門家会議

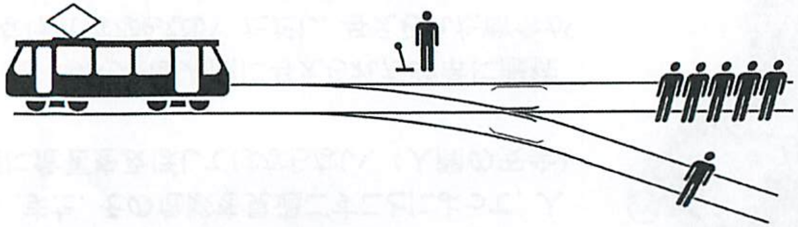
RQ-1 プレデター

BigDog

TALOS
軍用パワードスーツ

自動運転車とトロッコ問題

- 進路を変えて5人を助ける代わりに，1人を轢いても良いのか？
- 乗員の命か？歩行者の命か？
- 犯罪者なら？高齢者なら？子供なら？



図出典：wikipedia

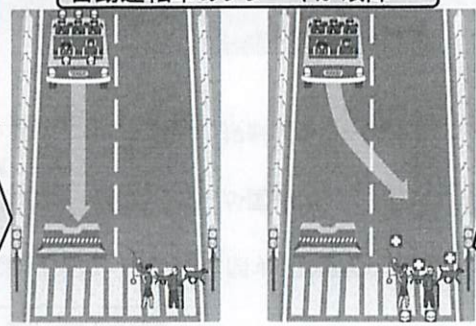
- どのようなプログラムにすべきだろう？
- ドイツ運輸・デジタル基盤省倫理委員会のガイドライン（2017）
  - 避けられない事故状況において、個人的な特徴（年齢、性別、身体的もしくは精神的な構成）に基づく区別は厳密に禁止される。

Moral Machine

- 自動運転のトロッコ問題について，MITの研究者がWeb上で調査
- 様々なシナリオに基づいてアンケート（233カ国，4000万回）
- Nature誌にて発表（2018）

A:
直進し障害物に衝突
【結果】
死亡：
・1　男性
・1　少女
・1　犯罪者

自動運転車のブレーキが故障



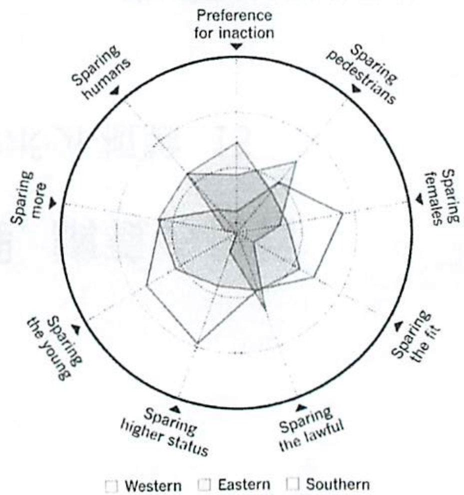
B:
他のレーンに移る
【結果】
死亡：
・1　アスリート体型の男性
・1　男性高齢者

※歩行者は青信号で交通規則を守っている

- 図出典：http://moralmachine.mit.edu/hl/ja

Moral Compass

- 一般的傾向
  - 人　＞　動物
  - 子供　＞　高齢者
  - 多数　＞　少数
- モラルには地域差が見られる



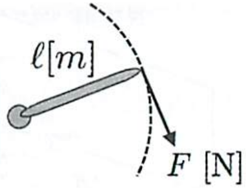
前回課題集の回答結果（上位）

① 歯車の歯数と減速比，角速度，トルクの計算（24）
② 外積を用いたトルクの計算（21）
③ ヤコビ行列の計算と逆運動学計算（18）
④ 同次変換行列と各座標系で見た手先位置の計算（17）
⑤ 自由度の計算（14）
⑤ 二輪型ロボットの速度，移動距離の計算（14）
⑦ 図記号による機構の表現（12）
⑦ 各種センサ（ポテンショメータ，エンコーダ，加速度センサ，ジャイロセンサ，超音波センサ，レーザ距離センサ，触覚センサ，イメージセンサ，力覚センサなど）で計測できる物理量と基本原理（12）
⑨ 電動，油圧，空気圧アクチュエータの特性比較（9）

※他は5票以下

復習1：歯車の歯数と減速比，角速度，トルクの計算

- 物体を回転させようとする能力をトルクという

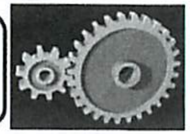


> トルク＝回転軸までの距離×（接線方向の）力
> [Nm]

※ベクトルでは外積 $\ell \times F$ で計算

- 歯数が少→多と歯車をつなげると，歯数が多い歯車の回転は遅く，トルクは大きくなる

$$\text{減速比} = \frac{\text{回転数1}}{\text{回転数2}} = \frac{\text{角速度1}}{\text{角速度2}} = \frac{\text{歯数2}}{\text{歯数1}} = \frac{\text{トルク2}}{\text{トルク1}}$$



角速度 rad/s：
1秒間に何ラジアン回るか

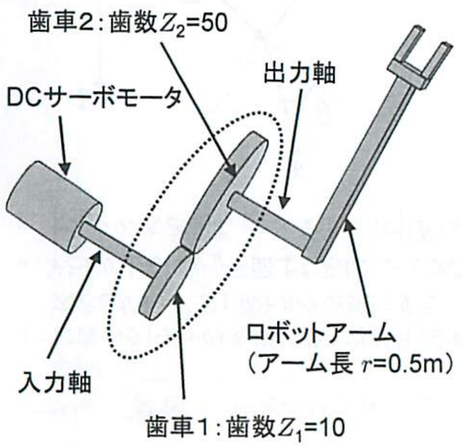
rpm：1分間での回転回数
（revolution per minute）

図出典：wikipedia

演習1（続き）

$\mu = \frac{T_2}{T_1}$　$T_2 = \mu \times T_1 = 5 \times 3$

- 次に，DCサーボモータを3 Nmのトルクで回転させると，



出力軸のトルクは

$$\tau = \boxed{T_{in} \times R = 3 \times 5 = 15\ \mathrm{Nm}}$$

アーム先端が回転の接線方向に発生する力は

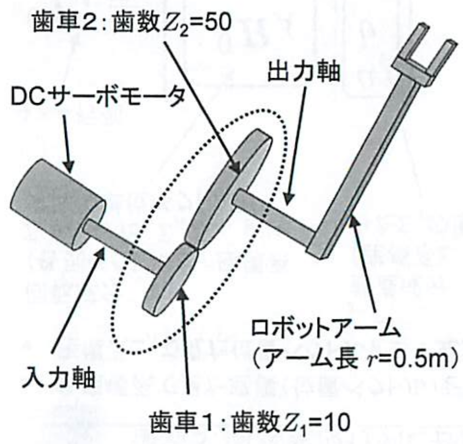
$$F = \boxed{T_2 / x_2 = 15/0.5 = 30\ \mathrm{N}}$$

となる。（ただし損失は無視するとする）

$F x = \tau$

演習1

- DCサーボモータが回転し，その先に下図のように歯車，ロボットアームがつながれている



減速比Rは，

$$R = \boxed{\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{50}{10} = 5}$$

100 rpmで入力軸が回転するとき，歯車2の回転数N_2は

$$N_2 = \boxed{N_1/5 = 100/5 = 20\ \mathrm{rpm}}$$

その角速度は，

$$\omega = \boxed{\frac{2}{3}\pi\ \mathrm{rad/s}}$$

また，アーム先端の（接線方向の）速度は

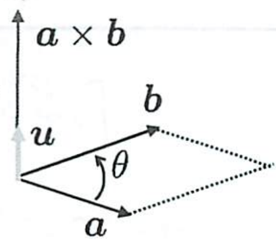
$$v = \boxed{\frac{2}{3}\pi \times 0.5 = \frac{1}{3}\pi}\ \mathrm{m/s}$$

$\omega r = v$

復習2：ベクトルの外積

$$\boldsymbol{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}$$

> 工学では，2つのベクトルに垂直なベクトルが欲しいときがある



$$\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = (a_y b_z - a_z b_y)\boldsymbol{i} + (a_z b_x - a_x b_z)\boldsymbol{j} + (a_x b_y - a_y b_x)\boldsymbol{k}$$

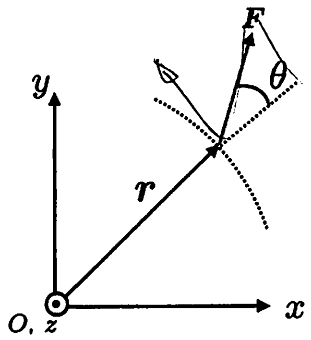
$$= \begin{bmatrix} a_y b_z - a_z b_y \\ a_z b_x - a_x b_z \\ a_x b_y - a_y b_x \end{bmatrix}$$

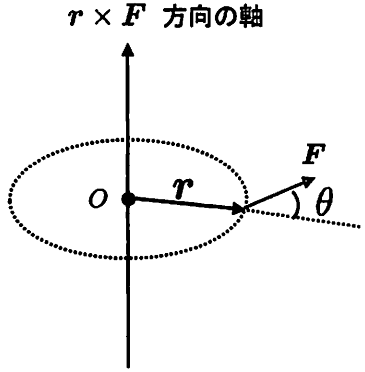
よく使われる覚え方（たすきがけの形）

$$\begin{vmatrix} \boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} \boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} \boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$

復習2：トルク（力のモーメント）のベクトル表現

- 位置ベクトルrの先端にFの力が作用するとき，外積 $r \times F$ の向きが回転軸，大きさが$|r \times F|$ のトルクが発生する
- rとFがともにx-y平面上ならば，トルクのベクトルの向きは，平面に垂直になる
- トルクの大きさは $|\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}| = |\boldsymbol{r}||\boldsymbol{F}|\sin\theta$

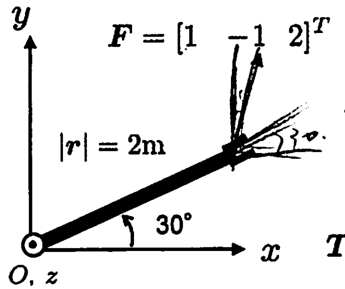




※ ⊙ は画面の奥から手前に向けてz軸があることを示す

演習2

下図のように，x-y平面上を動くロボットアームの位置ベクトルrの先端に，力F[N] が作用している。このときのロボットアームのトルクTを求めよ。



位置ベクトル $\boldsymbol{r}$ = $[\sqrt{3} \quad 1 \quad 0]^T$

よって

$$\boldsymbol{T} = r \times F = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \cdot 2 - 0 \cdot (-1) \\ 0 \times 1 - \sqrt{3} \times 2 \\ \sqrt{3} \times (-1) - 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 2 - 0 \\ 0 - 2\sqrt{3} \\ -\sqrt{3} - 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ -2\sqrt{3} \\ -\sqrt{3} - 1 \end{bmatrix}$$

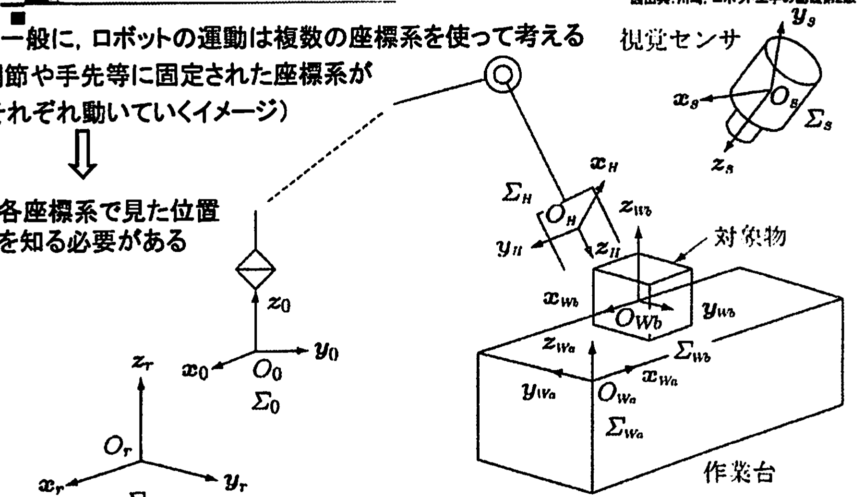
復習3：同次変換行列と各座標系で見た手先位置の計算

図出典：川崎，ロボット工学の基礎第2版

- 一般に，ロボットの運動は複数の座標系を使って考える
（関節や手先等に固定された座標系がそれぞれ動いていくイメージ）

⇓

- 各座標系で見た位置を知る必要がある



Σ_r：基準座標系（ワールド座標系）
Σ_0：ベース座標系　　Σ_s：センサ座標系
Σ_H：手先（ハンド）座標系　　Σ_{Wi}：対象物iの作業座標系

復習3：同次変換行列と各座標系で見た手先位置の計算

- 各座標系で見た座標（位置ベクトル）を計算するには，同次変換行列が使われる
- 座標系Σ_Aで見た位置ベクトルをΣ_0で見た位置ベクトルに変換する

回転成分
（各列ベクトルが，座標系Σ_0からみた，Σ_Aのx，y，z方向の単位ベクトル）

並進成分
（座標系Σ_0からみたΣ_Aの原点）

座標系Σ_0での位置ベクトル

座標系Σ_Aでの位置ベクトル

4×4行列

$$^0\boldsymbol{T}_A = \left[\begin{array}{ccc|c} & {}^0\boldsymbol{R}_A & & \begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \qquad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0T_A \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}$$

常に0　　常に1　　ここは常に1

復習3: 同次変換行列と各座標系で見た手先位置の計算

- 並進変換

$$\mathbf{Trans}(a,\ b,\ c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- y軸回りの回転変換

$$\mathbf{Rot}(y,\theta) = \begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- z軸回りの回転変換

$$\mathbf{Rot}(z,\theta) = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- x軸回りの回転変換

$$\mathbf{Rot}(x,\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta & 0 \\ 0 & S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- 任意の同次変換行列はTrans(・)とRot(・)の組み合わせで表される
- 複数の変換をつなげることで、複雑な座標系の変換も扱える

$$^{0}\boldsymbol{T}_C = {}^{0}\boldsymbol{T}_A {}^{A}\boldsymbol{T}_B {}^{B}\boldsymbol{T}_C$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

演習3

- xyz直交座標系において、座標系Σ_0から(2, 0, -1)だけ平行移動した座標系Σ_1と、そこからz軸回りに$\pi/2$ rad回転し、さらにx軸回りに$\pi/2$ rad回転した座標系Σ_2がある
- なお、x, y, z軸回りの回転行列Rx, Ry, Rzは以下で表される

$$\boldsymbol{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta \\ 0 & S\theta & C\theta \end{bmatrix},\ \boldsymbol{R}_y = \begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta \end{bmatrix},\ \boldsymbol{R}_z = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- 座標系Σ_iからΣ_jへ位置ベクトルを移す同次変換行列を$^{j}T_i$で表すと、

$$^{0}T_1 = \boxed{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}$$

$$^{1}T_2 = \boxed{\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}$$

演習3(続き)

$$^{0}T_2 = {}^{0}T_1 {}^{1}T_2 = \boxed{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}$$

- 座標系Σ_2で点pを見た位置ベクトルが $^{2}\boldsymbol{p} = [2\ \ 3\ \ -1]^T$ のとき、これをΣ_0で見たときの位置ベクトル$^{0}\boldsymbol{p}$を求めると、

$$\begin{bmatrix} {}^{0}p \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{0}T_2 \begin{bmatrix} {}^{2}p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1\times(-1)+2\times1 \\ 2 \\ 3-1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$\therefore {}^{0}p = [1\ 2\ 2]^T$ //

復習4: ヤコビ行列の計算と逆運動学計算

- 各関節角度から手先位置を求めるのが順運動学計算、その逆が逆運動学計算
- 逆運動学計算を簡単にするために、ヤコビ行列を使う方法がある
- 手先位置x, yと関節角度θ_1, θ_2について以下の関係が成り立つとする

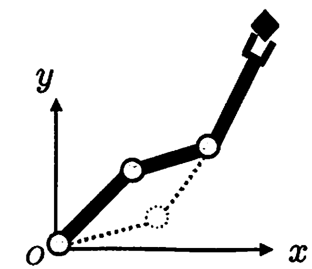
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\theta_1, \theta_2) \\ f_2(\theta_1, \theta_2) \end{bmatrix}$$

例) $f_1(\theta_1, \theta_2) = L_1 \cos\theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$
$f_2(\theta_1, \theta_2) = L_1 \sin\theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$

両辺を微分すると

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\theta_1}{dt} \\ \frac{d\theta_2}{dt} \end{bmatrix}$$

この行列をヤコビ行列という



復習4: ヤコビ行列の計算と逆運動学計算

ここで，手先位置ベクトル $r = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T$ ヤコビ行列 $J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} \end{bmatrix}$

関節角度ベクトル $q = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 \end{bmatrix}^T$

とおくと，

$$\dot{r} = J\dot{q}$$

各関節の速度($\dot{q}$)で，手先の速度($\dot{r}$)がどう変化するか

となるので，（Jに逆行列があれば，）

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{r}$$

手先の速度($\dot{r}$) で，各関節の速度($\dot{q}$)がどう変化するか

となる。

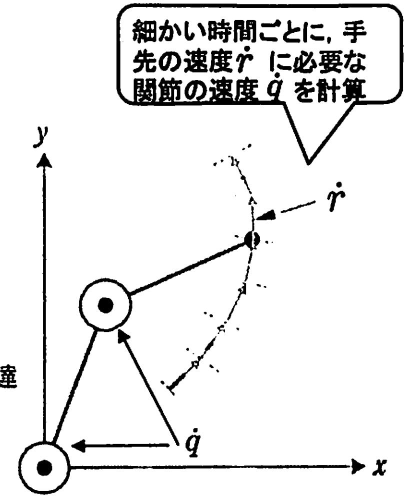
復習4: ヤコビ行列の計算と逆運動学計算

- こう動かしたいという手先位置の目標軌道（各時刻での位置，r)が与えられている
- これを微分すれば，各時刻での軌道上の目標速度（$\dot{r}$）が分かる
- 目標速度に必要な各関節の速度を

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{r}$$

で求め，関節を動かす

- ごく短い時間間隔Δtごとに $\dot{r}$ から $\dot{q}$ を繰り返し計算し，動かしていくことで目標軌道を達成する。（分解速度法）



図出典:木野・谷口，イラストで学ぶロボット工学

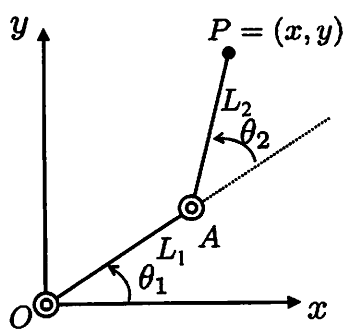
- 逆運動学計算を直接行わずに，手先の軌道制御を実現できる！

$$\frac{1}{-0.6\times 0-(-0.6)\times 0.4}\begin{bmatrix} 0 & 0.6 \\ -0.4 & -0.6 \end{bmatrix} = \frac{1}{0.24}\begin{bmatrix} 0 & 0.6 \\ -0.4 & -0.6 \end{bmatrix}$$

演習4

- 順運動学計算により

$$\begin{cases} x = L_1 \cos\theta_1 + L_2 \cos(\theta_1+\theta_2) \\ y = L_1 \sin\theta_1 + L_2 \sin(\theta_1+\theta_2) \end{cases}$$



が得られている。L_1=40 cm, L_2=60 cm,, θ_1=0 rad, $\theta_2=\frac{\pi}{2}$ radのとき，ヤコビ行列Jを計算すると，

$\sin\theta_1 = \sin 0 = 0$，$\cos\theta_1 = \cos 0 = 1$

$\sin(\theta_1+\theta_2) = \sin(0+\frac{\pi}{2}) = 1$，$\cos(\theta_1+\theta_2) = 0$

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{pmatrix} = \begin{matrix} -L_1\sin\theta_1 - L_2\sin(\theta_1+\theta_2) & -L_2\sin(\theta_1+\theta_2) \\ L_1\cos\theta_1 + L_2\cos(\theta_1+\theta_2) & L_2\cos(\theta_1+\theta_2) \end{matrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -0.4\times 0 - 0.6\times 1 & -0.6\times 1 \\ 0.4\cdot 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.6 & -0.6 \\ 0.4 & 0 \end{pmatrix}$$

演習4（続き）

$$|J| = \frac{1}{0.6\times(-0.6)-(-0.6)\times 1} = \frac{1}{0.24}$$

$-0.36+0.6$

手先を現在の位置からx方向に 0.2 m/s, y方向に-0.3 m/s で動かしたいときは，

$\dot{r} = \begin{bmatrix} 0.2 \\ -0.3 \end{bmatrix}$

$$J^{-1} = \frac{1}{0.24}\begin{bmatrix} 0 & 0.6 \\ -0.4 & -0.6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{5}{2} \\ -\frac{5}{3} & -\frac{5}{2} \end{bmatrix}$$

より，

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = J^{-1}\dot{r} = J^{-1}\begin{bmatrix} 0.2 \\ -0.3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{3}{4} \\ \frac{5}{12} \end{bmatrix}$$

となり，各関節を

$\dot{\theta}_1 = \boxed{-\frac{3}{4} \text{ rad/s}}$ $\dot{\theta}_2 = \boxed{\frac{5}{12} \text{ rad/s}}$

で動かせば良い