—ロボットアームの制御—

1　目的

本実験では，ロボット工学における基本要素の実践と，プログラミング言語の学習，デバッグ方法の習得を目的とする．ロボット工学において基本的な要素である 1)DH 法による座標，2) 同次変換行列，3) 順運動学，4) 逆運動学を小型卓上ロボットアームを対象に定義する．そして，プログラミング言語 python による計算式の実装を通して，基本的な算術計算の実行とエラー処理，デバッグ方法についても同時に学習する．最終的に，ロボットアームの手先位置を制御することで，物体を移動させるタスクを実現する．

2　事前準備

一日目の実験開始前に各自のノート PC（Windows10 または 11）に各種インストーラを必ずダウンロードし，一部は自分でインストールしておくこと．詳細は「開発環境構築__実験 B __ロボットアーム.pdf」の pp.1–7 に記載している．

実験の時期によっては各インストーラのバージョン情報（プログラム名以下の数字）は異なる可能性があるが問題ない．なお，MAC ユーザやノート PC 不所持の学生は，実験開始前に slack の DM などで小山に事前連絡すること．

3　実験装置

小型卓上ロボットアーム myCobot 280 Pi（Elephant Robotics 社製）を用いる．本ロボットアームは内部にオンボードコンピュータボード（RaspberryPi4B）を備えており，Linux ベースの OS（Ubuntu18.04）が起動する．ファイルサーバサービス samba を用いることで，ノート PC から python プログラムをオンボードコンピュータボードに転送し，プログラムを実行する．リンクパラメータなどの詳細は別紙「演習・実験__実験 B __ロボットアーム.pdf」を参照のこと．

4　ロボットアームの運動学

ロボットアームの各リンク，手先の位置，速度などの関係を幾何学的関係から定めることを運動学と呼び，関節駆動力，関節変位と各リンクの変位，速度，加速度の関係を定めるのが動力学である．本節では，この実験のロボットアームの位置制御を行うための運動学について説明する．

4.1　同次変換

ロボットの運動学の計算では，同次変換による座標変換を行う．まず基準となる座標系 Σ_0 と空間上を移動する座標系 Σ_1 を用いて説明する．任意の点 p から x_1 軸，y_1 軸，z_1 軸に下ろした垂線の足の座標がそれぞれ a，b，c であったとする（図 1）．このとき Σ_1 で表した p の座標は $[a\ b\ c]^T$ であり

$$ {}^{1}p = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{1} $$

と表す．座標変換とは Σ_1 で表した座標 ${}^1p$ を Σ_0 で表した座標 ${}^0p$ に変換することである．

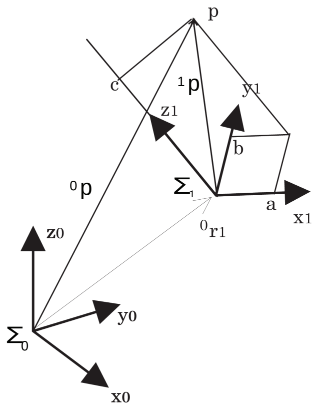

図 1: 座標系

座標系 Σ_0 における座標系 Σ_1 の x_1 軸方向の単位ベクトルを ${}^0e_{x1}$， y_1 軸方向の単位ベクトルを ${}^0e_{y1}$ ，z_1 軸方向の単位ベクトルを ${}^0e_{z1}$ とおく．p から x_1 軸，y_1 軸，z_1 軸に下ろした垂線の足と原点との距離は a，b，c なので，図 1 より

$$\begin{bmatrix} {}^0p_x \\ {}^0p_y \\ {}^0p_z \end{bmatrix} = a\,{}^0e_{x1} + b\,{}^0e_{y1} + c\,{}^0e_{z1} + \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \tag{2}$$

である．なお ${}^0r_1 = [r_x\ r_y\ r_z]^T$ は Σ_0 における座標系 Σ_1 の原点の位置である．ここで，式 (2) を次のように書き直す．

$$\begin{bmatrix} {}^0p_x \\ {}^0p_y \\ {}^0p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0e_{x1} & {}^0e_{y1} & {}^0e_{z1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \tag{3}$$

さて，行列 ${}^0R_1$ を

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} {}^0e_{x1} & {}^0e_{y1} & {}^0e_{z1} \end{bmatrix} \tag{4}$$

と定義すると式 (3) は

$${}^0p = {}^0R_1\,{}^1p + {}^0r_1 \tag{5}$$

という形で表現される．この式は ${}^1p$ すなわち Σ_1 における p の座標が与えられたときに，${}^0p$ すなわち Σ_0 における座標を得るための座標変換式である．この変換の仕方を定めるのは，行列 ${}^0R_1$ とベクトル ${}^0r_1$ であり，それぞれ,「座標軸がどれだけ回転しているのか」と「座標原点がどれだけ並行移動しているのか」を表している．よって，${}^0R_1$ のことを回転行列，${}^0r_1$ のことを平行移動ベクトルと呼ぶ．${}^0R_1$ および ${}^0r_1$ 内の各要素がすべて Σ_0 から見た値であることにも注意しておこう．

なお，式 (5) はさらに簡潔にすることができる．すなわち

$${}^0\hat{p} = \begin{bmatrix} {}^0p \\ 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1\hat{p} = \begin{bmatrix} {}^1p \\ 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

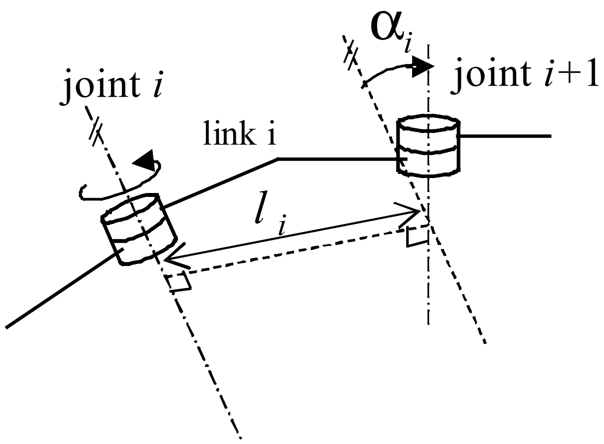

図 2: リンクパラメータ

および

$$
{}^0T_1 = \begin{bmatrix} {}^0R_1 & {}^0r_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}
$$

と定義すれば

$$
{}^0\hat{p} = {}^0T_1 \ {}^1\hat{p} \tag{8}
$$

となる．これは乗算と加算を一度に行っており同次変換と呼ばれる．${}^0T_1$ を同次変換行列という．

この表記法は座標系が 3 つ以上ある時にも有効である．さらなる座標系 Σ_2 に対して，${}^1T_2$ が分かっていれば

$$
{}^0\hat{p} = {}^0T_1 \ ({}^1T_2 \ {}^2\hat{p}) = ({}^0T_1 \ {}^1T_2) \ {}^2\hat{p} \tag{9}
$$

という関係を利用して，Σ_2 における座標から Σ_0 における座標を知ることができる．すなわち ${}^0T_2 = {}^0T_1 \ {}^1T_2$ であり，成分から ${}^0R_2 = {}^0R_1 \ {}^1R_2$ および ${}^0r_2 = {}^0R_1{}^1r_2 + {}^0r_1$ が成り立つ．

最後にこれらの行列の逆行列について述べておく．$||{}^0e_{x1}|| = 1$ や ${}^0e_{x1} \perp {}^0e_{y1}$ 等から ${}^0R_1^{T\,0}R_1 = I$，すなわち ${}^0R_1^{-1} = {}^0R_1^T$ である．また容易に確認できるように

$$
{}^0T_1^{-1} = \begin{bmatrix} {}^0R_1^T & -{}^0R_1^{T\,0}r_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}
$$

が成り立つ．明らかに ${}^1R_0 = {}^0R_1^{-1}$, ${}^1T_0 = {}^0T_1^{-1}$ も成り立つ．

4.2 リンク座標系と変換行列

4.2.1 リンクを表すパラメータ

図 2 はリンクの模式図を示したものである．関節は回転，又は直動とし，回転軸や直動軸を関節の軸とする．この時，リンク i には関節 i と関節 $i+1$ が定義されるが，この 2 関節軸の共通垂線に沿った軸間距離をリンクの長さ l_i，また共通垂線周りの 2 軸の相対角度をリンクのねじれ角 α_i と定義する．

4.2.2　リンク座標系の定義（DH 法）

リンクはそれぞれ独立に運動する．このリンクの運動を表すために，各リンクにそれぞれ固有の直交座標系を定義し，それぞれの座標系間の位置関係を座標変換行列で表す．この座標系をリンク座標系と呼ぶ．例えば，リンク i に定義される座標系は第 i リンク座標系である．座標系の定義の仕方は任意であるが，順運動学を求める場合は繰り返し計算などを用いる可能性があり，できる限り統一的な規則にしたがって定義することが望ましい．ここでは，よく知られている Denavit-Hartenberg の方法（DH 法）に従った定義を紹介する．リンク i の先端にある関節 $i+1$ の種類に応じて次の (a)(b) の 2 通りに分かれる．

(a) 関節 $i+1$ が回転関節の場合

i) z_i を関節 $i+1$ 軸上に回転方向に対して右ねじの進む方向に定義する．

ii) x_i は z_{i-1} と z_i の共通垂線上にとる．

* z_{i-1} と z_i が交錯する時
  x_i は z_{i-1} と z_i に共に垂直で，z_{i-1} から z_i に回転した時に右ねじが進む向きを正として定義する．
* z_{i-1} と z_i が平行の時
  x_i は z_{i-1} との交点が $i-1$ 座標系の原点と一致するような共通垂線上にとる．（このとき，$i-1$ 座標系原点から関節 $i+1$ 軸へ下ろした垂線が交わる点が i 座標系の原点となる．）

iii) x_{i-1} と x_i との成す角 θ_i が関節変位となる．

iv) x_i と z_i 軸に対して，座標系が右手系になるように y_i を設定する．

(b) 関節 $i+1$ が直動関節の場合

i) 第 $i+2$ 関節が回転関節ならば，一つ先のリンク $i+1$ 座標系の原点をあらかじめ定義する．

ii) $i+1$ 座標系の原点を通り，$i+1$ 関節軸に平行な直線を定める．直動関節が動くとこの直線上を $i+1$ 座標系の原点が移動するので，z_i をこの直線上に定義する．

iii) x_i と x_{i+1}，y_i と y_{i+1} の決め方は (a) の回転関節の場合に同じ．

iv) d_i が関節変位となる．なお，第 $i+2$ 関節も直動関節の場合は，さらにその先の回転関節を持つリンクの座標系の原点を定め，以上の手順を適用する．

4.2.3　リンク座標系間の座標変換行列

リンク $i-1$ 座標系 (Σ_{i-1}) とリンク i 座標系 (Σ_i) 間の座標変換を表す同次座標変換行列 ${}^{i-1}T_i$ を求める．DH 法で定義された座標系では，$i-1$ 座標系から i 座標系への移動と回転が次の順番で起こる．

① z_{i-1} 軸方向に d_i 並進移動する．

② 続いて z_{i-1} 軸周りに θ_i 回転する．(このとき x_{i-1} 軸の方向が変わっている：x_i 軸に一致)

③ さらに，x_i 軸方向に l_i 並進移動する．

④ 最後に，x_i 軸周りに α_i 回転する．(このとき z_{i-1} 軸の方向が変わっている：z_i 軸に一致)

これらの並進移動と回転を表す同次座標変換行列を順次左から掛けあわせることにより,${}^{i-1}T_i$ が次のように求まる．

$$
\begin{aligned}
{}^{i-1}T_i &= Trans(z,d_i)Rot(z,\theta_i)Trans(x,l_i)Rot(x,\alpha_i) \\
&= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
\begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i\sin\theta_i & \sin\alpha_i\sin\theta_i & l_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i\cos\theta_i & -\sin\alpha_i\cos\theta_i & l_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
\end{aligned}
\tag{11}
$$

なお，回転関節の場合は θ_i が，直動関節の場合は d_i が関節変位となる．

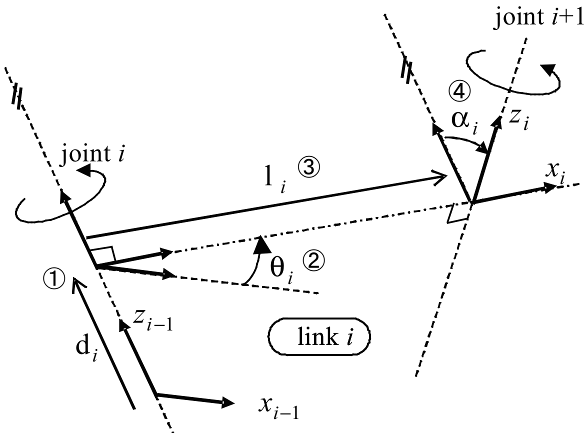

図 3: 二つの座標系の幾何的関係

4.3　順運動学

順運動学の例を簡単な 2 自由度マニピュレータで説明する．図 4 に示す平面 2 関節マニピュレータを考える．リンクの長さを l_1, l_2 とし，回転角を θ_1, θ_2 とおく．基準座標系 $\Sigma_0(O_0, x_0, y_0, z_0)$ をリンク 1 の根元部分に設定する．リンク 1 の先部分に座標系 $\Sigma_1(O_1, x_1, y_1, z_1)$ を固定し，リンク 2 の手先部分に座標系 $\Sigma_2(O_2, x_2, y_2, z_2)$ を固定する．リンクの回転軸を z_0，z_1 とする．リンクが回転すると，これらの座標もリンクとともに移動する．このとき次の問題を考える．

問題 1 (順運動学問題) 関節角 θ_1，θ_2 が与えられたときに，手先位置の基準座標系における位置 ${}^0p_t$ を求めよ．

問題 1 を同次変換を使って解く事を考えよう．すると

$$
{}^0\hat{p}_t = {}^0T_1 \, {}^1T_2 \, {}^2\hat{p}_t \tag{12}
$$

という関係があるので，${}^0T_1$, ${}^1T_2$, ${}^2p_t$ を求めればいいことがわかる．

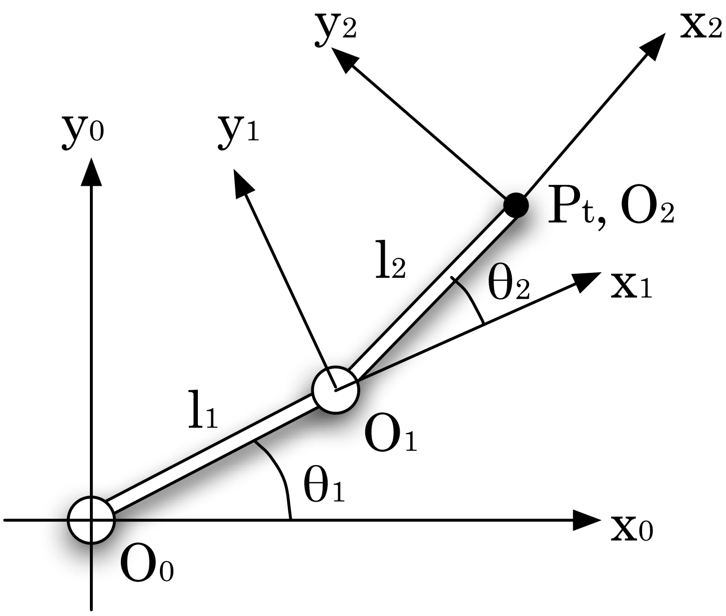

図 4: 平面 2 自由度マニピュレータ

まず ${}^0T_1$ をもとめる．$S_1 = \sin\theta_1$, $C_1 = \cos\theta_1$ と定義すると式 (11) より，

$$
{}^0T_1 = \begin{bmatrix} {}^0R_1 & {}^0r_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} C_1 & -S_1 & 0 & l_1C_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & l_1S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \tag{13}
$$

を得る．同様にして

$$
{}^1T_2 = \begin{bmatrix} {}^1R_2 & {}^1r_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} C_2 & -S_2 & 0 & l_2C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \tag{14}
$$

を得る．よって $S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$, $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ と定義すると

$$
{}^0T_2 = {}^0T_1\ {}^1T_2 = \left[\begin{array}{ccc|c} C_{12} & -S_{12} & 0 & l_1C_1 + l_2C_{12} \\ S_{12} & C_{12} & 0 & l_1S_1 + l_2S_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \tag{15}
$$

である．また，Σ_2 座標系における p_t は原点なので，

$$
{}^2\hat{p}_t = \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \hline 1 \end{array}\right] \tag{16}
$$

よって，

$$
{}^0\hat{p}_t = {}^0T_2\ {}^2\hat{p}_t = \left[\begin{array}{c} l_1C_1 + l_2C_{12} \\ l_1S_1 + l_2S_{12} \\ 0 \\ \hline 1 \end{array}\right] \tag{17}
$$

となる．

4.4 逆運動学問題

前節のマニピュレータの手先位置を任意に与えられた目標位置に持っていくことを考える．

問題 2 (逆運動学問題) 基準座標系上に目標位置 ${}^0p_d = [\,{}^0x_d\ {}^0y_d\ 0\,]^T$ が与えられたときに，${}^0p_d = {}^0p_t$ を満足する θ_1, θ_2 を求めよ．

式 (17) より

$$
\left\{\begin{array}{lcl} {}^0x_d &=& l_1C_1 + l_2C_{12} \\ {}^0y_d &=& l_1S_1 + l_2S_{12} \end{array}\right. \tag{18}
$$

を解けばよい．式 (18) で θ_1 に関する部分を分離すると

$$
\left[\begin{array}{c} {}^0x_d \\ {}^0y_d \end{array}\right] = \left[\begin{array}{cc} l_1 + l_2C_2 & -l_2S_2 \\ l_2S_2 & l_1 + l_2C_2 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} C_1 \\ S_1 \end{array}\right] \tag{19}
$$

となる．ここで極座標表現を導入する．$r = \sqrt{({}^0x_d)^2 + ({}^0y_d)^2}$ および $\alpha = \mathrm{atan2}({}^0y_d,\ {}^0x_d)$ とおくと（次節参照）

$$
{}^0x_d = r\cos\alpha, \quad {}^0y_d = r\sin\alpha \tag{20}
$$

であり，$h = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2C_2}$ および $\beta = \mathrm{atan2}(l_2S_2,\ l_1 + l_2C_2)$ とおくと

$$
l_1 + l_2C_2 = h\cos\beta, \quad l_2S_2 = h\sin\beta \tag{21}
$$

となる．以上を式 (19) に代入すると

$$
r\left[\begin{array}{c} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{array}\right] = h\left[\begin{array}{cc} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} C_1 \\ S_1 \end{array}\right] = h\left[\begin{array}{c} \cos(\theta_1 + \beta) \\ \sin(\theta_1 + \beta) \end{array}\right] \tag{22}
$$

となる．式 (22) より $r = h$，よって

$$
\begin{array}{rcl} \theta_2 &=& \pm\mathrm{arccos}\dfrac{r^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \\ &=& \pm\mathrm{atan2}\left(\sqrt{(r^2 + l_1^2 + l_2^2)^2 - 2(r^4 + l_1^4 + l_2^4)},\ r^2 - l_1^2 - l_2^2\right) \end{array} \tag{23}
$$

を得る．また，式 (22) より $\theta_1 = \alpha - \beta$ なので

$$
\begin{array}{rcl} \theta_1 &=& \mathrm{atan2}({}^0y_d,\ {}^0x_d) - \mathrm{atan2}(l_2S_2,\ l_1 + l_2C_2) \\ &=& \mathrm{atan2}({}^0y_d,\ {}^0x_d) \mp \mathrm{atan2}\left(\sqrt{(r^2 + l_1^2 + l_2^2)^2 - 2(r^4 + l_1^4 + l_2^4)},\ r^2 + l_1^2 - l_2^2\right) \end{array} \tag{24}
$$

となる．

4.5　atan2 について

一般に $\tan\theta = y/x$ という関係を満たす θ は，Atan (y/x) と $\mathrm{Atan}(y/x)+\pi$ の二つが存在する．また，$x=0$ の場合には $\theta=\pm\pi/2$ が対応するが，このとき y/x は定義されない．以上の理由より，逆運動学における複数の解を正しく求める場合や，$x=0$ となるおそれがある場合に，$\mathrm{Atan}(y/x)$ という式を使うのは望ましくない．このような問題を解決するために，$\mathrm{atan2}(y,x)$ という関数を用いる．これは i を虚数単位として

$$\mathrm{atan2}(y,x) = \arg(x+iy) \tag{25}$$

として定義される．ただし arg は複素数の偏角を表す．すなわち

$$x+iy = \sqrt{x^2+y^2}\exp(i\,\mathrm{atan2}(y,x)) \tag{26}$$

である．なお，$x>0$ であれば，

$$\mathrm{atan2}(y,x) = \mathrm{Atan}(y/x) \tag{27}$$

が成り立つ．また，$k>0$ に対して

$$\mathrm{atan2}(y,x) = \mathrm{atan2}(ky,kx) \tag{28}$$

が成り立つ．

python には math 関数ライブラリ内に `atan2(float y, float x)` という関数があるので，atan2 を使った式をそのまま計算させることができる．

4.6　姿勢の計算

ロボットの手先を制御するには，手先に固定した座標系を表す変換行列を用いれば良い．手先はリンク n に固定されているとし，リンク n に固定された座標系を Σ_n とする．手先の姿勢を定めると ${}^0e_{xn}$, ${}^0e_{yn}$, ${}^0e_{zn}$ が求まるのでそこから ${}^0R_n = [{}^0e_{xn}\ {}^0e_{yn}\ {}^0e_{zn}]^T$ が求まる． ${}^0R_n$ は θ_i の関数なので，ここから θ_i に関する拘束式が求まる．この拘束式を満足する範囲で逆運動学を解くことにより，位置と姿勢を同時に満足させる関節角を求めることができる．3 自由度マニピュレータで説明する．

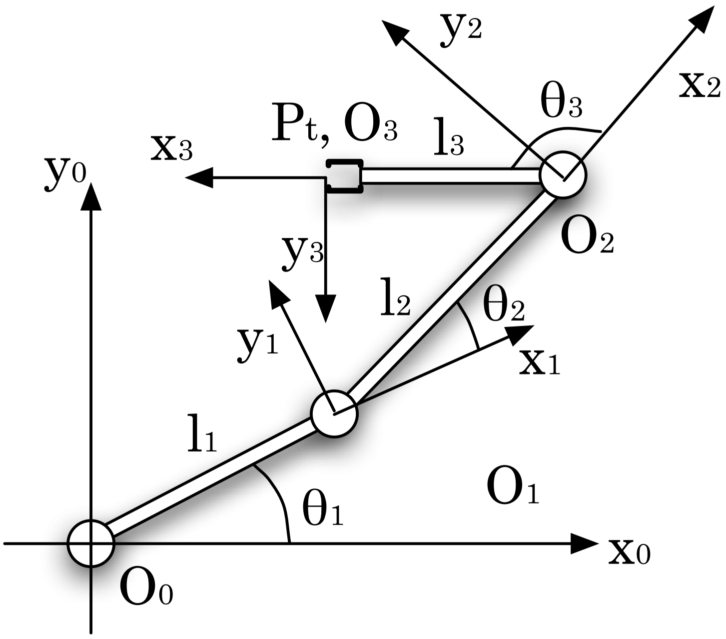

図 5: 平面 3 自由度マニピュレータ

図 5 に示す平面 3 関節マニピュレータを考える．リンクの長さを l_i $(i = 1, 2, 3)$，回転角を θ_i とおく．リンク i の先部分に座標系 $\Sigma_i(O_i, x_i, y_i, z_i)$ を固定する．リンクの回転軸を z_i とする．基準座標系 Σ_0 はマニピュレータの根本に固定する．リンク 3 の長手方向が $-x_0$ 軸方向を向いているときの手先の姿勢を目標姿勢とする．このとき次の問題を考える．

問題 3 (逆運動学問題 2) 基準座標系上に目標位置 ${}^0p_d = [\,{}^0x_d\ {}^0y_d\ 0]^T$ が与えられたときに，${}^0p_d = {}^0p_t$ を満足し，なおかつ手先が目標姿勢となる θ_1, θ_2，θ_3 を求めよ．

図 5 より手先が目標姿勢となっているときには，${}^0e_{x3} = -{}^0e_{x0}$，${}^0e_{y3} = -{}^0e_{y0}$，${}^0e_{z3} = {}^0e_{z0}$ である．したがって

$$R_d = \left[\begin{array}{ccc} -{}^0e_{x0} & -{}^0e_{y0} & {}^0e_{z0} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{ccc} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \tag{29}$$

とおくとき，${}^0R_3 = R_d$ が成立していれば手先は基準姿勢となる．

$${}^0T_3 = \left[\begin{array}{cc} {}^0R_3 & {}^0r_3 \\ 0 & 1 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{ccc|c} C_{123} & -S_{123} & 0 & l_1C_1 + l_2C_{12} + l_3C_{123} \\ S_{123} & C_{123} & 0 & l_1S_1 + l_2S_{12} + l_3S_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \tag{30}$$

なので ${}^0R_3 = R_d$，${}^0p_t = {}^0p_d$ より

$$C_{123} = -1 \tag{31}$$

$$S_{123} = 0 \tag{32}$$

$$l_1C_1 + l_2C_{12} + l_3C_{123} = {}^0x_d \tag{33}$$

$$l_1S_1 + l_2S_{12} + l_3S_{123} = {}^0y_d \tag{34}$$

式 (31),(32) より $\theta_1+\theta_2+\theta_3=\pi$ を得る．$\xi={}^0x_d+l_3$，$\eta={}^0y_d$ とおくと

$$\left\{\begin{array}{lcl}\xi & = & l_1C_1+l_2C_{12}\\ \eta & = & l_1S_1+l_2S_{12}\end{array}\right. \tag{35}$$

となる．問題 2 と同様にして θ_1，θ_2 が求まり，そこから $\theta_3=\pi-\theta_1-\theta_2$ も求まる．

5 実験内容

授業一日目に DH 法による座標，同次変換行列，順運動学の定義を行い，二日目に順運動学のプログラム実装とロボットの動作確認を行う．そして，三日目に逆運動学を導出し，四日目に手先位置制御のプログラムを実装することで物体移動タスクを実現する．内容の詳細は別紙「演習・実験__実験 B __ロボットアーム.pdf」を参照のこと．

6 レポートについて

期日までに CLE 上で提出すること．提出先は，CLE コース上のロボットアームのフォルダ内に配置された「X 班レポート提出」とする（X は各自の班のアルファベット）．なお，レポート形式と詳細は以下の通り．

- ファイル形式：pdf 形式，1 ファイルのみ（プログラムは pdf 内に貼り付けること）
- 1 ページ目は必ず共通フォーマットの表紙とする．なお，必要項目が記載されていれば word や tex で記述し直したものであっても良い． レポート本文の内容は，1) 実験の目的，2) 演習問題の導出過程と解答，3) 実験装置と開発環境（環境構築の手順は記載なしで良い），4) プログラム課題内容と実行結果，5) 考察，6) 感想，7) 結論とし，付録としてレポート末尾に 8) 作成したプログラムを記載すること．なお，指導書の文章をコピーした内容に関しては加点対象としない（自分なりに目的や実験装置などの説明を分かりやすくまとめていた場合は加点対象とする）．
- 演習問題に関して：導出過程を部分的に示しつつ（全て記載する必要はない），全ての問題の解答を記載すること．授業中に手書き計算した際の用紙を写真撮影して画像として貼り付けても良い．ただし，目視可能な画像解像度と字の丁寧さであることに注意すること．
- プログラム課題に関して：プログラム 3~9 は必ずレポートの末尾に記載すること（プログラム 10 は自由課題のため取り組まなかった場合は記載なしで良い，なお，プログラム 10 は加点対象ではある）．各設問で「エラーを raise せよ」「エラー内容を確認せよ」と記載があるものに関しては，入力例に対するエラー表示をレポート本文（プログラム課題内容と実行結果）で説明すること．また，フローチャートにより，プログラムの処理フローが説明されている場合は加点対象とする．
- 図，プログラム，フローチャート，その他添付した資料には通し番号とキャプション（表題）を必ず挿入し，必ず本文において（図 1 に示す，等の形で）参照すること．
- 実験で作成したプログラムのリストを添付すること．プログラムにはコメントをつけること．
- フローチャートを用いてプログラムにおける処理の流れを表現すること．
- 考察は自由に行うこと．実験がうまく行った場合にはなぜうまくいったのか，プログラムにどのような工夫を行ったからできたのかを考えること．実験に失敗した場合には，なぜ失敗したのか，どんな工夫をすればその失敗を回避できたのかを考えること．