令和 7 年度

実 験 レ ポ ー ト

題目	〜2 軸ロボットの運動制御実験〜 Quanser Consulting 社製　2軸ロボット

学　　科	電気電子システム工学コース
学籍番号	a0527
氏　　名	野口 史遠
提 出 日	令和 7 年 5 月 12 日

舞鶴工業高等専門学校
電子制御工学科

目 次

第 1 章　概要

図 1.1, 1.2 に示す 4 リンク 2 軸ロボット実験装置は，ギアを介して軸 P_1, P_5 に取り付けられた 2 つのモータにより手先の位置 P_3 を目標位置に追従させることを目的とした実験装置である．このことを実現するためには，手先位置からモータの回転角度を求める逆動力学とモータの回転角度から手先位置を求める順動力学を理解する必要がある．

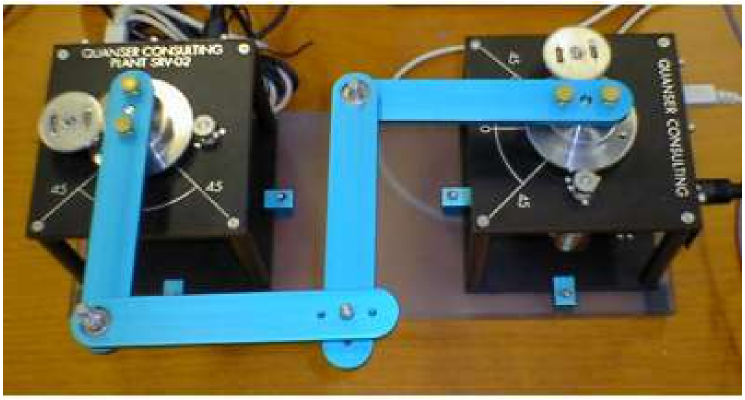

図 1.1 ： 4 リンク 2 軸ロボット実験装置（型番：55023）

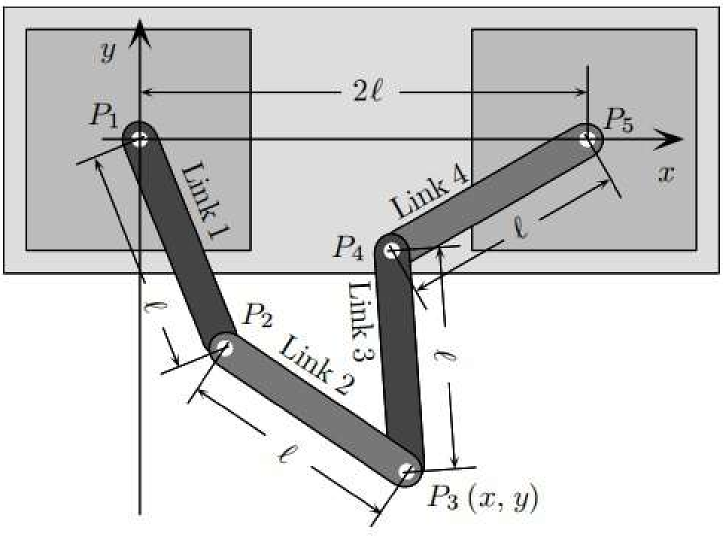

図 1.2 ： 4 つリンクの関係

第 2 章　順運動学と逆運動学

2.1　運動方程式

リンク 1 を手で基準位置から回転させてリンク 1 の基準位置からの回転角 $\theta_x(t)$ がさほど大きくなければ、リンク 4 は静止したままである。したがって、P_1, P_5 の角度 $\theta_x(t)$, $\theta_y(t)$ がその基準角度の近傍で動作するとすると、リンク 1 とリンク 4 との干渉は無視できる（実際、リンク 1 あるいはリンク 4 を手で微小回転させてもリンク 4 あるいはリンク 1 は静止したままである）。このとき、リンク 1、リンク 4 の運動方程式は

$$
\begin{aligned}
J_x\ddot{\theta}_x(t) &= -c_x\dot{\theta}_x(t) + \tau_x(t) \\
J_y\ddot{\theta}_y(t) &= -c_y\dot{\theta}_y(t) + \tau_y(t)
\end{aligned}
\tag{2.1}
$$

となる。ただし、$\tau_x(t)$, $\tau_y(t)$ は軸 P_1, P_5 に加わるトルク、J_x, J_y はリンク 1、リンク 4 の慣性モーメントであり、c_x, c_y は軸 P_1, P_5 の粘性摩擦係数である。また、モータドライバに加える電圧 $v_x(t)$, $v_y(t)$ とトルク $\tau_x(t)$, $\tau_y(t)$ が比例関係

$$
\begin{cases}
\tau_x(t) = k_{fx}v_x(t) \\
\tau_y(t) = k_{fy}v_y(t)
\end{cases}
\tag{2.2}
$$

にあると仮定すると、

$$
\begin{aligned}
J_x\ddot{\theta}_x(t) &= -c_x\dot{\theta}_x(t) + k_{fx}v_x(t) \\
J_y\ddot{\theta}_y(t) &= -c_y\dot{\theta}_y(t) + k_{fy}v_y(t)
\end{aligned}
\tag{2.3}
$$

であるから、$v_x(t)$, $v_y(t)$ から $\theta_x(t)$, $\theta_y(t)$ への伝達関数 $G_x(s)$, $G_y(s)$ は

$$
\begin{cases}
G_x(s) = \dfrac{b_x}{s(s+a_x)}, \quad a_x = \dfrac{c_x}{J_x}, \quad b_x = \dfrac{k_{fx}}{J_x} \\
G_y(s) = \dfrac{b_y}{s(s+a_y)}, \quad a_y = \dfrac{c_y}{J_y}, \quad b_y = \dfrac{k_{fy}}{J_y}
\end{cases}
\tag{2.4}
$$

となる。

2.2　逆運動学

ここでは，手先にあたる軸 P_3 の座標 (x, y) からモータの回転軸 P_1, P_5 の角度 θ_x, θ_y を求める．このように，手先の座標から回転角を求めることを逆運動学という．

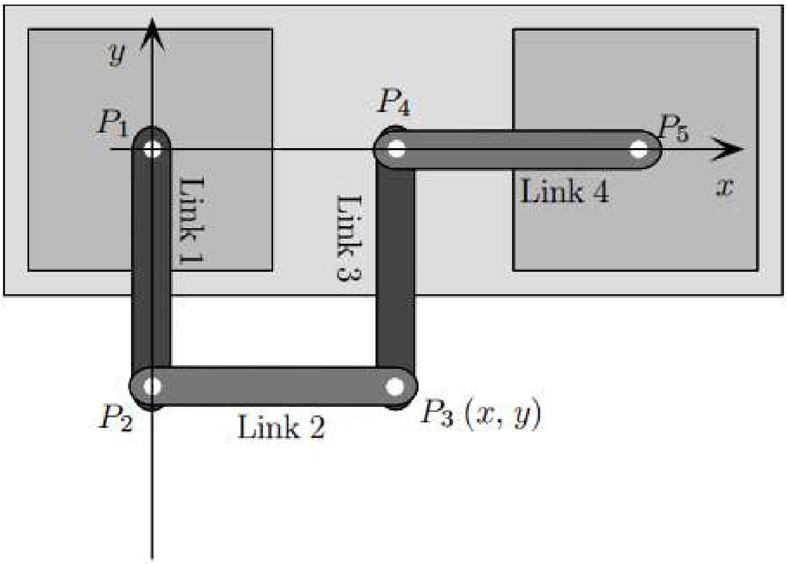

図 2.1 ：初期位置（基準位置）

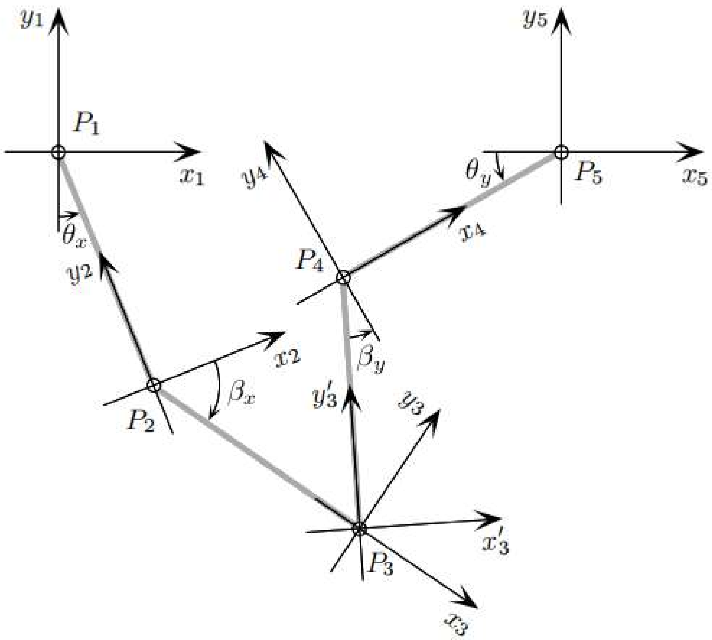

図 2.2 ：逆運動学のための各座標系

図 2.2 に示すように，リンク 1，リンク 2 に関しては x_1y_1 座標系と x_2y_2 座標系，x_2y_2 座標系と x_3y_3 座標系は

$$
\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ell\sin\theta_x \\ -\ell\cos\theta_x \end{bmatrix} \tag{2.5}
$$

$$
\begin{aligned}
\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(-\beta_x) & -\sin(-\beta_x) \\ \sin(-\beta_x) & \cos(-\beta_x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ell\cos\beta_x \\ -\ell\sin\beta_x \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\beta_x & \sin\beta_x \\ -\sin\beta_x & \cos\beta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ell\cos\beta_x \\ -\ell\sin\beta_x \end{bmatrix} \qquad (2.6)
\end{aligned}
$$

という関係にある．(2.5)，(2.6) 式を書き換えると，

$$
\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \end{bmatrix}^T = T_{12} \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & 1 \end{bmatrix}^T \tag{2.7}
$$

$$
\begin{bmatrix} x_2 & y_2 & 1 \end{bmatrix}^T = T_{23} \begin{bmatrix} x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix}^T \tag{2.8}
$$

$$
T_{12} = \begin{bmatrix} \cos\theta_x & -\sin\theta_x & \ell\sin\theta_x \\ \sin\theta_x & \cos\theta_x & -\ell\cos\theta_x \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_{23} = \begin{bmatrix} \cos\beta_x & \sin\beta_x & -\ell\sin\beta_x \\ -\sin\beta_x & \cos\beta_x & \ell\cos\beta_x \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

となるから，x_1y_1 座標系と x_3y_3 座標系との間に以下の関係式が成立する．

$$
\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \end{bmatrix}^T = T_{13} \begin{bmatrix} x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix}^T, \quad T_{13} = T_{12}T_{23} \tag{2.9}
$$

(2.9) 式を利用して，x_3y_3 座標系の原点 P_3 を x_1y_1 座標系で表すと，

$$
\begin{aligned}
\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix}^T &= T_{13} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \\
&= [\ell\cos\theta_x\cos\beta_x + \ell\sin\theta_x\sin\beta_x + \ell\sin\theta_x, \quad -\ell\cos\theta_x\sin\beta_x + \ell\sin\theta_x\cos\beta_x - \ell\cos\theta_x, \quad 1]^T \\
&= [\ell\cos(\theta_x - \beta_x) + \ell\sin\theta_x, \quad \ell\sin(\theta_x - \beta_x) - \ell\cos\theta_x, \quad 1]^T \qquad (2.10)
\end{aligned}
$$

となる．(2.10) 式より

$$
\begin{cases} x = \ell\cos(\theta_x - \beta_x) + \ell\sin\theta_x \\ y = \ell\sin(\theta_x - \beta_x) - \ell\cos\theta_x \end{cases} \tag{2.11}
$$

$$
\begin{aligned}
&\Longrightarrow \begin{cases} x - \ell\sin\theta_x = \ell\cos(\theta_x - \beta_x) \\ y + \ell\cos\theta_x = \ell\sin(\theta_x - \beta_x) \end{cases} \\
&\Longrightarrow (x - \ell\sin\theta_x)^2 + (y + \ell\cos\theta_x)^2 = \ell^2 \qquad (2.12)
\end{aligned}
$$

であるから，P_3 は中心 $(\ell\sin\theta_x, -\ell\cos\theta_x)$，半径 ℓ の円上を移動することがわかる．(2.12) 式を書き換えると

$$x^2 + y^2 - 2\ell(\sin\theta_x x - \cos\theta_x y) = 0$$

$$\Longrightarrow \quad x^2 + y^2 - 2\ell\sqrt{x^2+y^2}\sin(\theta_x + \phi_x) = 0 \quad , \quad \begin{cases} \cos\phi_x = \dfrac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} \\ \sin\phi_x = \dfrac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \quad \sin(\theta_x + \phi_x) = \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{2\ell} \quad , \quad \theta_x = \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{2\ell}\right) - \phi_x \tag{2.13}$$

となる．したがって，P_3 の座標 (x, y) からモータの回転軸 P_1 の角度 θ_x が次式により求まる．

$$\theta_x = \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{2\ell}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \tag{2.14}$$

同様に，リンク 3，リンク 4 に関して考えると，x_1y_1 座標系と x_5y_5 座標系，x_5y_5 座標系と x_4y_4 座標系，x_4y_4 座標系と $x_3'y_3'$ 座標系は

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\ell \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

$$\begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & -\sin\theta_y \\ \sin\theta_y & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\ell\cos\theta_y \\ -\ell\sin\theta_y \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(-\beta_y) & -\sin(-\beta_y) \\ \sin(-\beta_y) & \cos(-\beta_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3' \\ y_3' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\ell\sin\beta_y \\ -\ell\cos\beta_y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\beta_y & \sin\beta_y \\ -\sin\beta_y & \cos\beta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3' \\ y_3' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\ell\sin\beta_y \\ -\ell\cos\beta_y \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2.17}$$

という関係にある．(2.15)，(2.16)，(2.17) 式を書き換えると，

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \end{bmatrix}^T = T_{15} \begin{bmatrix} x_5 & y_5 & 1 \end{bmatrix}^T \tag{2.18}$$

$$\begin{bmatrix} x_5 & y_5 & 1 \end{bmatrix}^T = T_{54} \begin{bmatrix} x_4 & y_4 & 1 \end{bmatrix}^T \tag{2.19}$$

$$\begin{bmatrix} x_4 & y_4 & 1 \end{bmatrix}^T = T_{43}' \begin{bmatrix} x_3' & y_3' & 1 \end{bmatrix}^T \tag{2.20}$$

ここで各変換行列は

$$T_{15} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2\ell \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{54} = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & -\sin\theta_y & -\ell\cos\theta_y \\ \sin\theta_y & \cos\theta_y & -\ell\sin\theta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T'_{43} = \begin{bmatrix} \cos\beta_y & \sin\beta_y & -\ell\sin\beta_y \\ -\sin\beta_y & \cos\beta_y & -\ell\cos\beta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

となるから，x_1y_1 座標系と $x'_3y'_3$ 座標系との間に以下の関係式が成立する．

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \end{bmatrix}^T = T'_{13}\begin{bmatrix} x'_3 & y'_3 & 1 \end{bmatrix}^T, \quad T'_{13} = T_{15}T_{54}T'_{43} \tag{2.21}$$

(2.21) 式を利用して，$x'_3y'_3$ 座標系の原点 P_3 を x_1y_1 座標系で表すと，

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix}^T &= T'_{13}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} -\ell\cos\theta_y\sin\beta_y + \ell\sin\theta_y\cos\beta_y - \ell\cos\theta_y + 2\ell \\ -\ell\cos\theta_y\cos\beta_y + \ell\sin\theta_y\sin\beta_y - \ell\sin\theta_y \\ 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} -\ell\cos(\theta_y+\beta_y) - \ell\cos\theta_y + 2\ell \\ -\ell\sin(\theta_y+\beta_y) - \ell\sin\theta_y \\ 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.22}$$

となる．(2.22) 式より

$$\begin{cases} x' = x - 2\ell = -\ell\cos(\theta_y+\beta_y) - \ell\cos\theta_y \\ y = -\ell\sin(\theta_y+\beta_y) - \ell\sin\theta_y \end{cases} \tag{2.23}$$

$$\Longrightarrow \begin{cases} x' + \ell\cos\theta_y = -\ell\cos(\theta_y+\beta_y) \\ y + \ell\sin\theta_y = -\ell\sin(\theta_y+\beta_y) \end{cases} \Longrightarrow (x'+\ell\cos\theta_y)^2 + (y+\ell\sin\theta_y)^2 = \ell^2 \tag{2.24}$$

であるから，P_3 は中心 $(2\ell - \ell\cos\theta_y,\ -\ell\sin\theta_y)$，半径 ℓ の円上を移動することがわかる．(2.24) 式を書き換えると

$$\begin{aligned}
& x'^2 + y^2 + 2\ell(x'\cos\theta_y + y\sin\theta_y) = 0 \\
\Longrightarrow\quad & x'^2 + y^2 - 2\ell\sqrt{x'^2+y^2}\sin(\theta_y+\phi_y) = 0, \quad \begin{cases} \cos\phi_y = -\dfrac{y}{\sqrt{x'^2+y^2}} \\ \sin\phi_y = -\dfrac{x'}{\sqrt{x'^2+y^2}} \end{cases} \\
\Longrightarrow\quad & \sin(\theta_y+\phi_y) = \frac{\sqrt{x'^2+y^2}}{2\ell} \\
\Longrightarrow\quad & \theta_y = \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{x'^2+y^2}}{2\ell}\right) - \phi_y
\end{aligned} \tag{2.25}$$

したがって，P_3 の座標 (x, y) からモータの回転軸 P_5 の角度 θ_y が次式により求まる．

$$
\begin{aligned}
\theta_y &= \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{x'^2 + y^2}}{2\ell}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x'}{y}\right) \\
&= \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{(x - 2\ell)^2 + y^2}}{2\ell}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x - 2\ell}{y}\right)
\end{aligned}
\tag{2.26}
$$

2.3 順運動学

ここでは、モータの回転軸 P_1，P_5 の角度 θ_x，θ_y から手先 P_3 の座標 (x, y) を求める。このように、回転軸から手先の座標を求めることを順運動学という。

軸 P_2，P_4 の回転角 β_x，β_y が検出可能であれば (2.11) 式や (2.23) 式により手先 P_3 の座標 (x, y) を求めることができるが、本実験装置は軸 P_2，P_4 にはセンサが取り付けられていない。そこで、x_1y_1 座標系、x_2y_2 座標系、x_3y_3 座標系を考える代わりに、図 2.3 に示す x_1y_1 座標系、x_2y_2 座標系、x_my_m 座標系、$x_3'y_3'$ 座標系を考える。

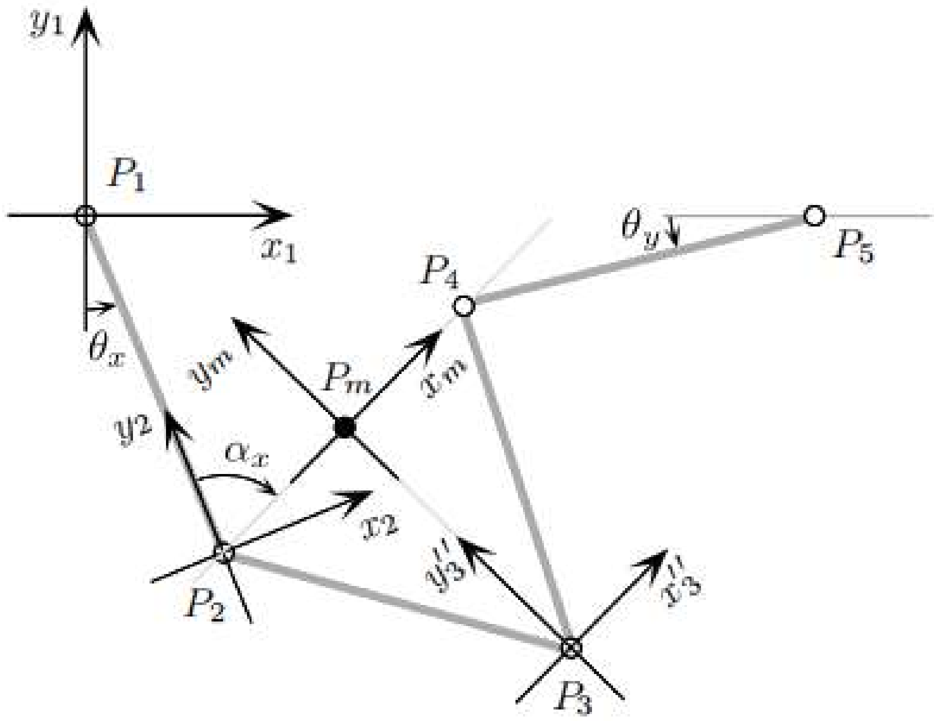

図 2.3 ：順運動学のための各座標系 1

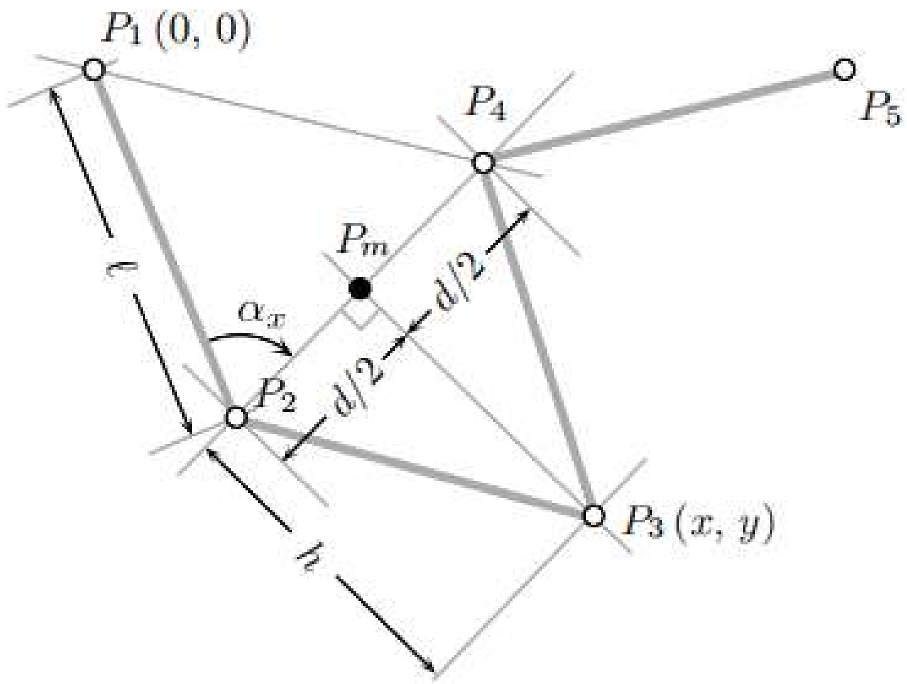

図 2.4 ：順運動学のための各座標系 2

図 2.3，2.4 より x_2y_2 座標系と x_my_m 座標系，x_my_m 座標系と $x_3'y_3'$ 座標系は

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}x_2\\y_2\end{bmatrix} &= \begin{bmatrix}\cos\left(\dfrac{\pi}{2}-\alpha_x\right) & -\sin\left(\dfrac{\pi}{2}-\alpha_x\right)\\ \sin\left(\dfrac{\pi}{2}-\alpha_x\right) & \cos\left(\dfrac{\pi}{2}-\alpha_x\right)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_m\\y_m\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dfrac{d}{2}\cos\left(\dfrac{\pi}{2}-\alpha_x\right)\\ \dfrac{d}{2}\sin\left(\dfrac{\pi}{2}-\alpha_x\right)\end{bmatrix}\\ &= \begin{bmatrix}\sin\alpha_x & -\cos\alpha_x\\ \cos\alpha_x & \sin\alpha_x\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_m\\y_m\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dfrac{d}{2}\sin\alpha_x\\ \dfrac{d}{2}\cos\alpha_x\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{2.27}$$

$$\begin{bmatrix}x_m\\y_m\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & 0\\0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_3''\\y_3''\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\-h\end{bmatrix} \tag{2.28}$$

という関係にある．(2.27)，(2.28) 式を書き換えると，

$$\begin{bmatrix}x_2 & y_2 & 1\end{bmatrix}^T = T_{2m}\begin{bmatrix}x_m & y_m & 1\end{bmatrix}^T \tag{2.29}$$

$$\begin{bmatrix}x_m & y_m & 1\end{bmatrix}^T = T''_{m3}\begin{bmatrix}x_3'' & y_3'' & 1\end{bmatrix}^T \tag{2.30}$$

$$T_{2m} = \begin{bmatrix}\sin\alpha_x & -\cos\alpha_x & \dfrac{d}{2}\sin\alpha_x\\ \cos\alpha_x & \sin\alpha_x & \dfrac{d}{2}\cos\alpha_x\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix},\quad T''_{m3} = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\0 & 1 & -h\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

となるから，x_1y_1 座標系と $x_3''y_3''$ 座標系との間に以下の関係式が成立する．

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \end{bmatrix}^T = T_{13}'' \begin{bmatrix} x_3'' & y_3'' & 1 \end{bmatrix}^T, \quad T_{13}'' = T_{12}T_{2m}T_{m3}'' \tag{2.31}$$

(2.31) 式を利用して，$x_3''y_3''$ 座標系の原点 P_3 を x_1y_1 座標系で表すと，

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix}^T &= T_{13}'' \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \\
&= \begin{bmatrix} h(\cos\theta_x \cos\alpha_x + \sin\theta_x \sin\alpha_x) - \dfrac{d}{2}(\sin\theta_x \cos\alpha_x - \cos\theta_x \sin\alpha_x) + \ell \sin\theta_x \\ h(\sin\theta_x \cos\alpha_x - \cos\theta_x \sin\alpha_x) + \dfrac{d}{2}(\cos\theta_x \cos\alpha_x + \sin\theta_x \sin\alpha_x) - \ell \cos\theta_x \\ 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} h\cos(\theta_x - \alpha_x) - \dfrac{d}{2}\sin(\theta_x - \alpha_x) + \ell \sin\theta_x \\ h\sin(\theta_x - \alpha_x) + \dfrac{d}{2}\cos(\theta_x - \alpha_x) - \ell \cos\theta_x \\ 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.32}$$

となる．したがって，d，h，α_x が求まれば手先 P_3 の座標が

$$\begin{cases} x = h\cos(\theta_x - \alpha_x) - \dfrac{d}{2}\sin(\theta_x - \alpha_x) + \ell \sin\theta_x \\ y = h\sin(\theta_x - \alpha_x) + \dfrac{d}{2}\cos(\theta_x - \alpha_x) - \ell \cos\theta_x \end{cases} \tag{2.33}$$

により求まる．

x_1y_1 座標系における P_2，P_4 の座標をそれぞれ (p_{2x}, p_{2y})，(p_{4x}, p_{4y}) とすると，

$$\begin{cases} p_{2x} = \ell \sin\theta_x \\ p_{2y} = -\ell \cos\theta_x \end{cases}, \quad \begin{cases} p_{4x} = 2\ell - \ell \cos\theta_y \\ p_{4y} = -\ell \sin\theta_y \end{cases} \tag{2.34}$$

であるから，d は

$$d = P_2P_4 = \sqrt{(p_{2x} - p_{4x})^2 + (p_{2y} - p_{4y})^2} \tag{2.35}$$

と定まる．

また，h は三角形 $P_mP_2P_3$ における三平方の定理より

$$h = \sqrt{\ell^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \tag{2.36}$$

と定まり，α_x は三角形 $P_1P_2P_4$ における余弦定理より

$$(P_1P_4)^2 = \ell^2 + d^2 - 2d\ell \cos\alpha_x$$

$$
\begin{aligned}
&\Rightarrow \quad p_{4x}^2 + p_{4y}^2 = \ell^2 + d^2 - 2d\ell\cos\alpha_x \\
&\Rightarrow \quad \alpha_x = \cos^{-1}\left(\frac{\ell^2 + d^2 - (p_{4x}^2 + p_{4y}^2)}{2d\ell}\right) \qquad (2.37)
\end{aligned}
$$

と定まる.

参 考 文 献

1) 唐橋 需：農業用ロボットへの期待, 農業機械学会誌 57 巻 6 号 pp.145-150 (2021)
2) 有山 達也，伊藤 和寿：農業用搬送台車の自立移動における課題と開発事例, システム/制御/情報 Vol.65,No.12,pp.489-494 (2021)
3) 佐賀大学プレスリリース: カメラ映像のみで経路を自律走行するロボット車両を開発, https://www.saga-u.ac.jp/koho/press/2021120623170, [Accessed: Dec. 25, 2024].
4) 伊藤，阿部，今西，奥野，辻，三宅：比例航法を用いた自立移動ロボットの誘導，学術講演会前刷集 No.76-10 368-20105161,
P13 (2010)
5) 出村 公成, 萩原 良信, 升谷 保博, タン ジェフリー トゥ チュアン：ROS2 と Python で作って学ぶ AI ロボット入門, 講談社 (2018)
6) インテル® RealSense™ デプスカメラ D435i / : https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/products/sku/190004/intel-realsense-depth-camera-d435i/specifications.html, [Accessed: Dec. 25, 2024].
7) STM32 Nucleo-64: https://www.st.com/ja/evaluation-tools/nucleo-f446re.html, [Accessed: Dec. 25, 2024].
8) AMT102: https://www.sameskydevices.com/product/resource/amt10e-v.pdf, [Accessed: Dec. 25, 2024].
9) ROS 2 Design Documents: https://design.ros2.org/, [Accessed: Dec. 25, 2024].
10) ROS 2 Documentation: https://docs.ros.org/en/humble/index.html, [Accessed: Dec. 25, 2024].
11) ultralytics: https://docs.ultralytics.com/ja/yolov5/, [Accessed: Dec. 25, 2024].