

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

# 目 次

第 1 章	概要	1
第 2 章	順運動学と逆運動学	2
2.1	運動方程式	2
2.2	逆運動学	2
2.3	順運動学	7
第 3 章	アクチュエータ, センサの動作確認	11
3.1	2 軸ロボット実験装置におけるアクチュエータとセンサ	11
3.2	D/A 変換とアクチュエータの動作確認	11
3.2.1	実験装置のセッティングと MATLAB/Simulink の起動	11
3.2.2	モデルの移動と結線	12
3.2.3	Simulation Parameters のパラメータ設定	13
3.2.4	コンパイル	13
3.2.5	実験	14
3.3	A/D 変換とセンサの動作確認	15
3.4	4 リンク 2 軸ロボットの Simulink での表現	17
第 4 章	時間応答に基づくパラメータ同定	19
4.1	パラメータ同定とは?	19
参考文献		20

# 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．

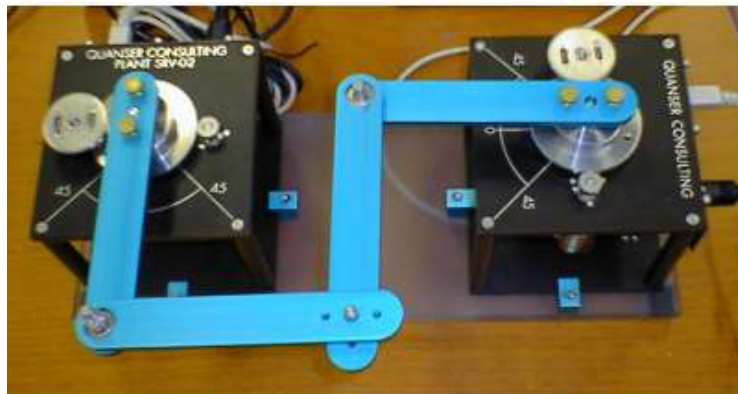


図 1.1 : 4 リンク 2 軸ロボット実験装置 (型番 : 55023)

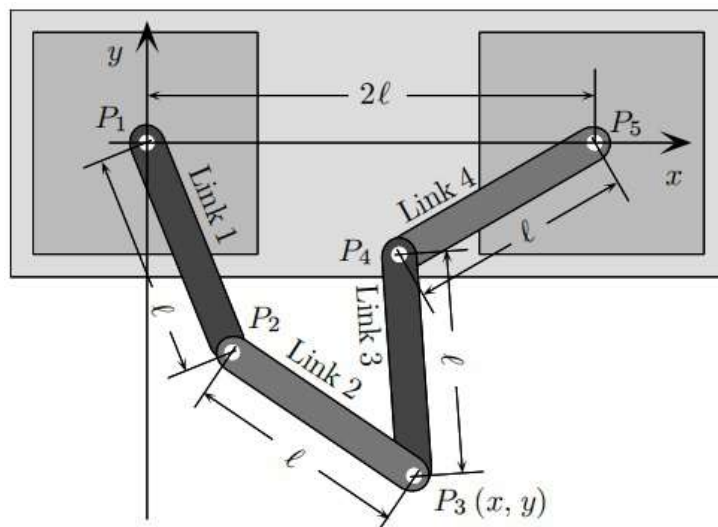


図 1.2 : 4 つリンクの関係

## 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

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

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

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

にあると仮定すると、

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

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

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

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  $\theta_x, \theta_y$  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。

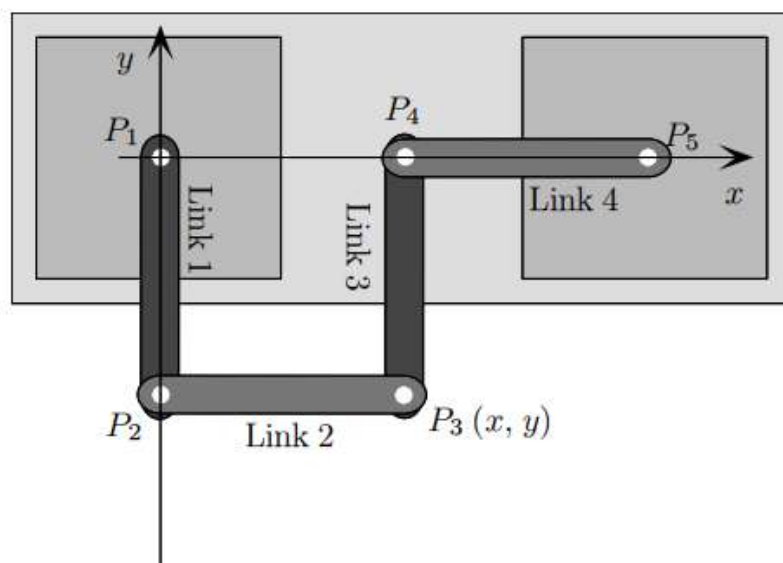


図 2.1 : 初期位置 (基準位置)

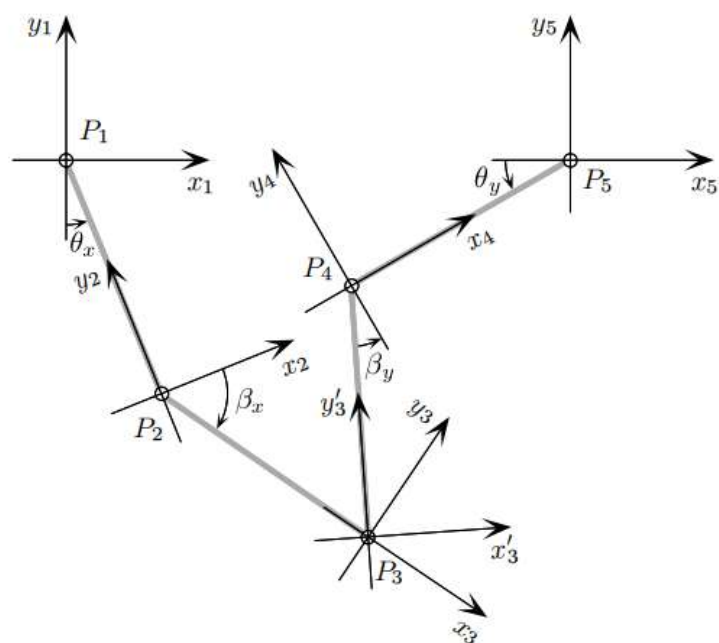


図 2.2 : 逆運動学のための各座標系

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

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

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

という関係にある．(2.5)，(2.6) 式を書き換えると，

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

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

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

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．

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

(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，

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

となる．(2.10) 式より

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

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

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

$$\begin{aligned}
 x^2 + y^2 - 2\ell(\sin \theta_x x - \cos \theta_x y) &= 0 \\
 \Rightarrow x^2 + y^2 - 2\ell\sqrt{x^2 + y^2} \sin(\theta_x + \phi_x) &= 0 \quad , \quad \begin{cases} \cos \phi_x = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \sin \phi_x = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \\
 \Rightarrow \sin(\theta_x + \phi_x) = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{2\ell} \quad , \quad \theta_x = \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{2\ell} \right) - \phi_x & \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

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  $\theta_x$  が次式により求まる.

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

同様に, リンク 3, リンク 4 に関して考えると,  $x_1 y_1$  座標系と  $x_5 y_5$  座標系,  $x_5 y_5$  座標系と  $x_4 y_4$  座標系,  $x_4 y_4$  座標系と  $x'_3 y'_3$  座標系は

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

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

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(-\beta_y) & -\sin(-\beta_y) \\ \sin(-\beta_y) & \cos(-\beta_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_3 \\ y'_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\ell \sin \beta_y \\ -\ell \cos \beta_y \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \beta_y & \sin \beta_y \\ -\sin \beta_y & \cos \beta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_3 \\ y'_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\ell \sin \beta_y \\ -\ell \cos \beta_y \end{bmatrix} \quad (2.17)
 \end{aligned}$$

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

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

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

$$\begin{bmatrix} x_4 & y_4 & 1 \end{bmatrix}^T = T'_{43} \begin{bmatrix} x'_3 & y'_3 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2.20)$$

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.

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

(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,

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

となる. (2.22) 式より

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

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

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

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



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  $\theta_y$  が次式により求まる．

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

## 2.3 順運動学

ここでは、モータの回転軸  $P_1$ ,  $P_5$  の角度  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  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  $\beta_x$ ,  $\beta_y$  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、 $x'_3y'_3$  座標系を考える．

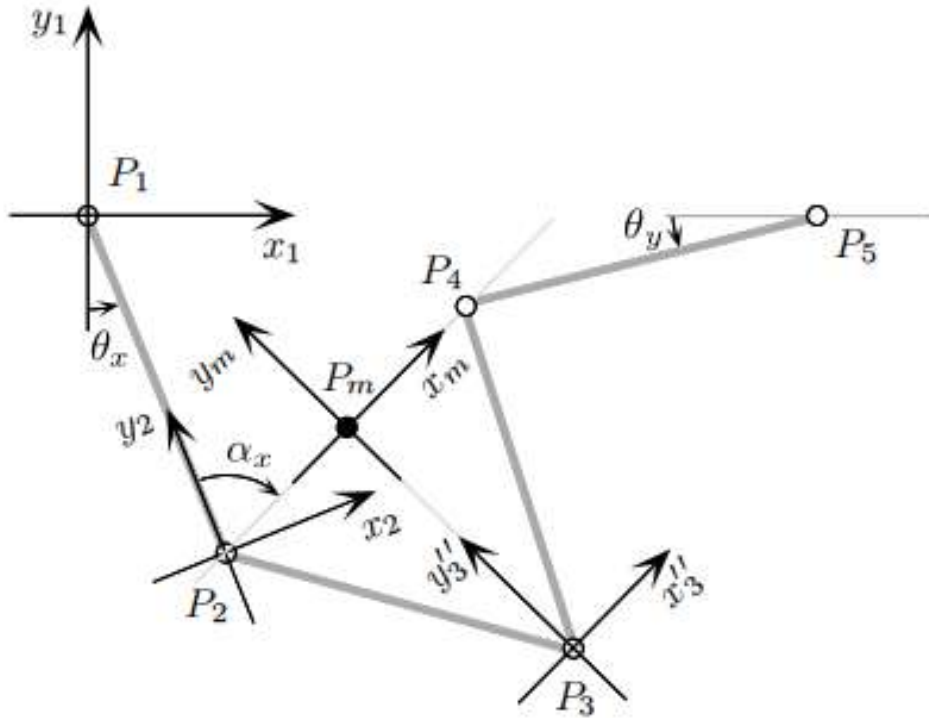


図 2.3 : 順運動学のための各座標系 1

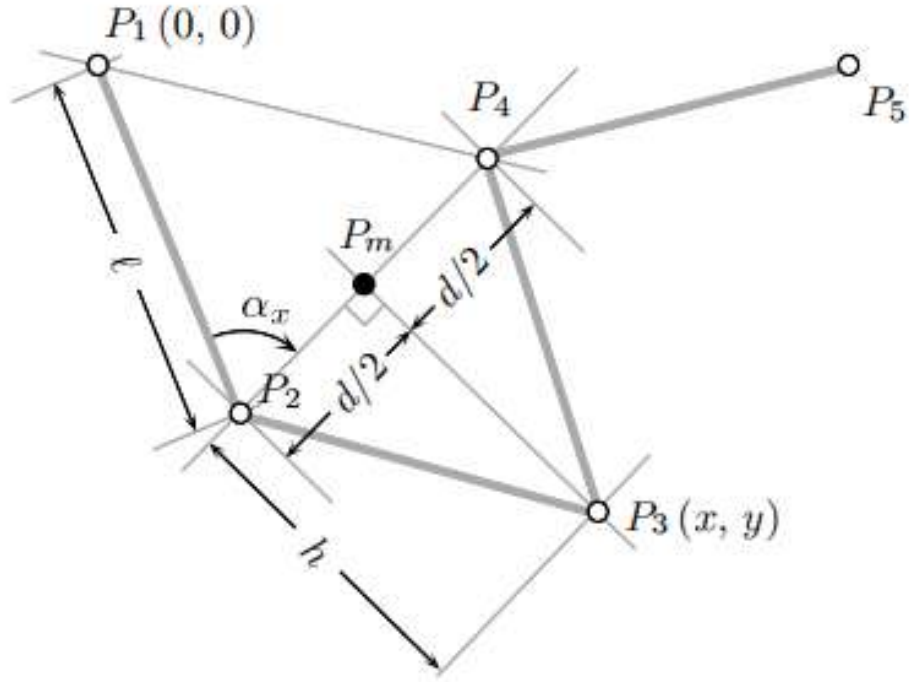


図 2.4 : 順運動学のための各座標系 2

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  $x'_3y'_3$  座標系は

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

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x''_3 \\ y''_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -h \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

という関係にある. (2.27), (2.28) 式を書き換えると,

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

$$\begin{bmatrix} x_m & y_m & 1 \end{bmatrix}^T = T''_{m3} \begin{bmatrix} x''_3 & y''_3 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2.30)$$

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

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.

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

(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、

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

となる. したがって、 $d$ ,  $h$ ,  $\alpha_x$  が求まれば手先  $P_3$  の座標が

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

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、

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

であるから、 $d$  は

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

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

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

と定まり、 $\alpha_x$  は三角形  $P_1P_2P_4$  における余弦定理より

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

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

と定まる.

## 第 3 章 アクチュエータ，センサの動作確認

### 3.1 2軸ロボット実験装置におけるアクチュエータとセンサ

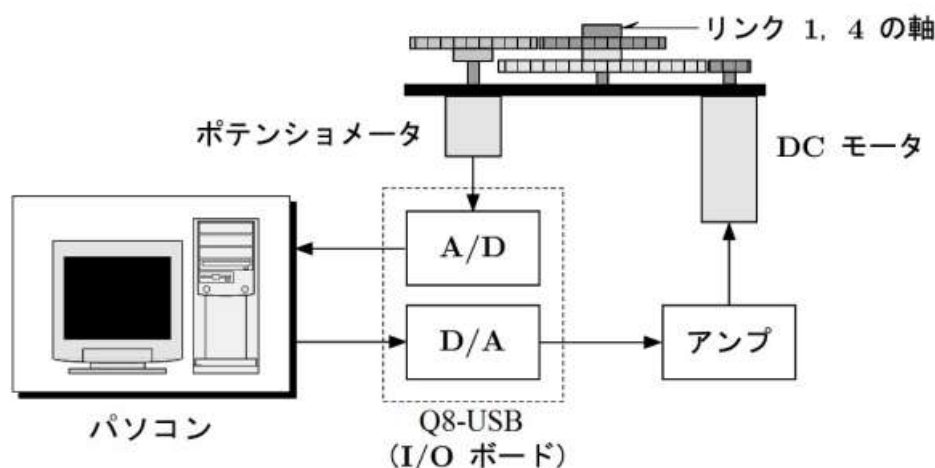


図 3.1 : アクチュエータ（DC モータ）とセンサ（ポテンシオメータ）

図 3.1 に示すように、2 軸ロボット実験装置はリンク 1，リンク 4 がギアを介して DC モータにより回転するようになっている。DC モータを駆動させるためにパソコンにより計算された指令電圧は、I/O ボード Q8-USB で D/A 変換された後、アンプを介して DC モータに入力される。また、リンク 1，リンク 4 の回転角は角度センサであるポテンシオメータにより電圧値として検出され、I/O ボード Q8-USB で A/D 変換された後、パソコンに取り込まれている。

### 3.2 D/A 変換とアクチュエータの動作確認

#### 3.2.1 実験装置のセッティングと MATLAB/Simulink の起動

図 3.2 に示すように、実験装置の 2 つの軸にそれぞれリンクを取り付ける。また、図 3.3 のようにターミナル、Universal Power Module、2 軸ロボットのケーブルが接続されていることを確認する。ただし、左側の DC モータおよびポテンシオメータに対するチャンネルを **CH0**（チャンネル 0）、右側の DC モータおよびポテンシオメータに対するチャンネルを **CH1**（チャンネル 1）とする。

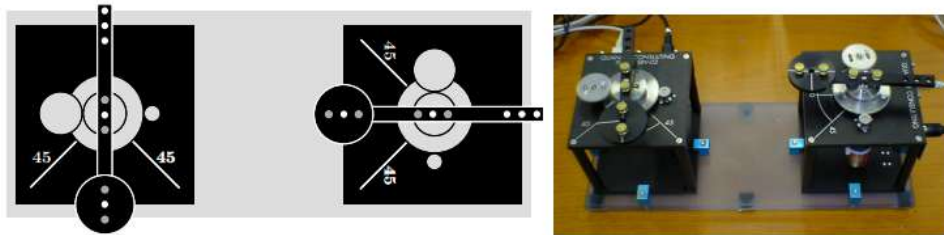


図 3.2 : 実験装置

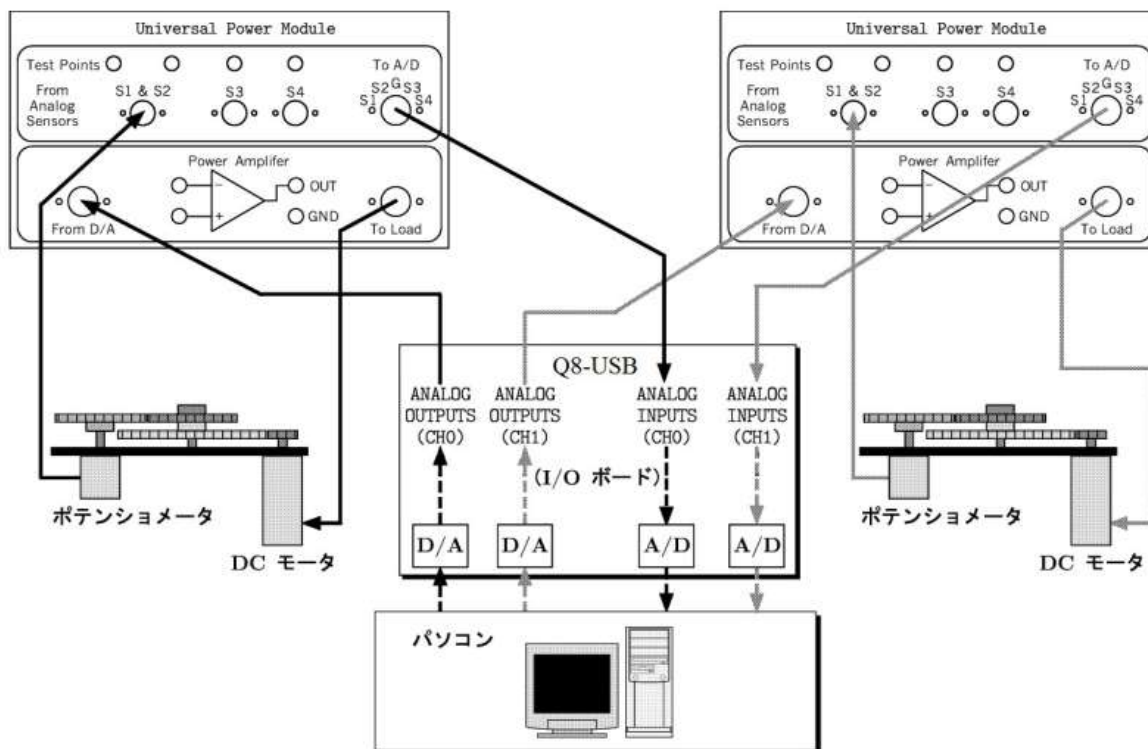


図 3.3 : 実験装置の接続

つぎに、Windows スタートメニューより MATLAB R2013a を起動する。MATLAB のコマンドウィンドウ上で以下のように入力し、カレントディレクトリ（作業するフォルダ）を変更する。（X は自分の班名に置き換える。）

```
cd D:\student_senkouka\group_X
```

### 3.2.2 モデルの移動と結線

左右の DC モータに 2[V] の電圧を加えたときのリンクの動きを調べてみよう。MATLAB の“現在のフォルダー”にある，“da”フォルダーを選択し，“da\_conv.slx”をダブルクリックして Simulink モデルを起動する。起動したモデルを図 3.4 のように結線する。また、各ブロックをダブルクリッ

クして、パラメータを変更する。

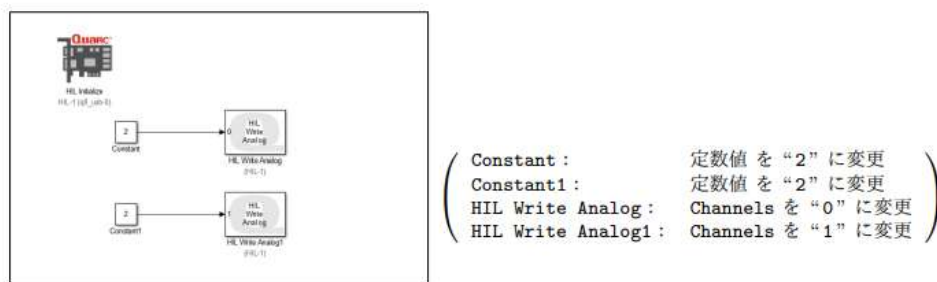


図 3.4 : da\_conv.slx

### 3.2.3 Simulation Parameters のパラメータ設定

Simulink モデルウィンドウのツールバーから“モデルコンフィグレーションパラメーター”を選択し，“ソルバー”を選択，図 3.5 のようにパラメータを設定する。

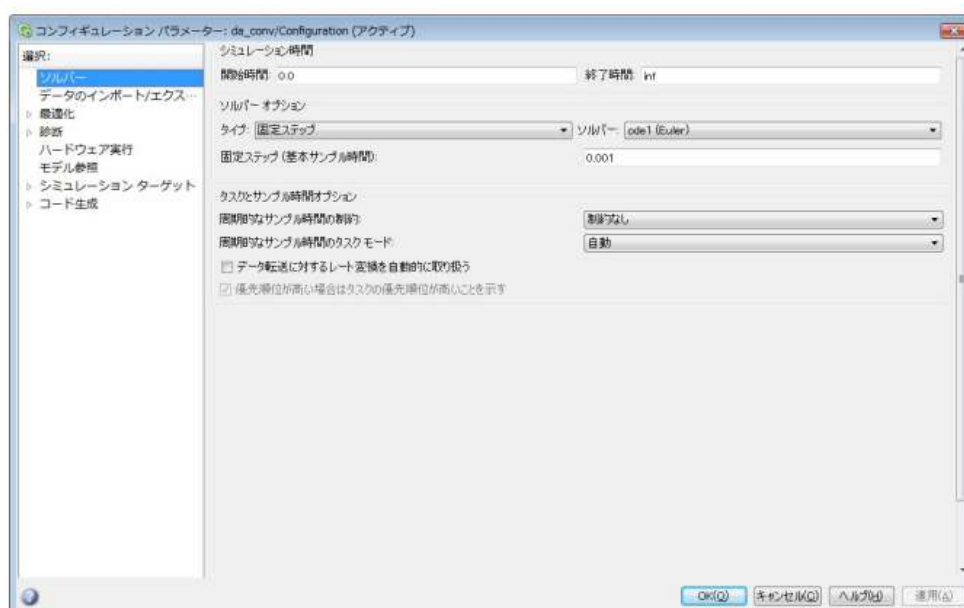


図 3.5 : Simulation Parameters のパラメータ設定

### 3.2.4 コンパイル

Dドライブのディレクトリ（フォルダ）D:\student\_senkouka\group-X\da（Xは自分の班名）がカレントディレクトリとなっているかどうか確かめる。カレントディレクトリとなっていない場合は現在のフォルダーを操作してカレントディレクトリを変更する。

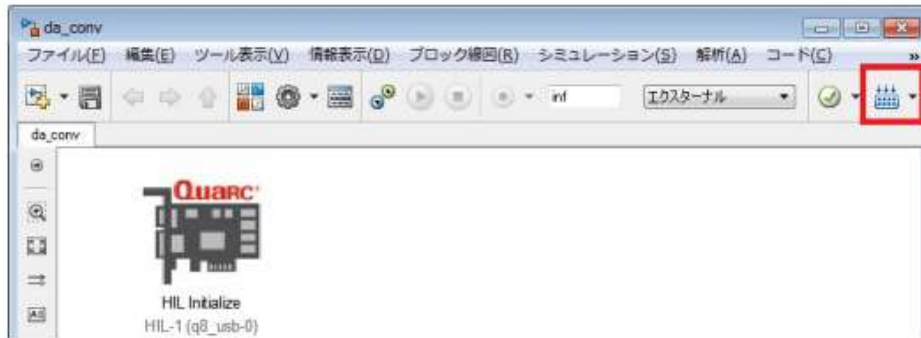


図 3.6 : コンパイル

つぎに，“da\_conv.slx”をコンパイルするためには，図 3.6 に示すように Simulink モデルのツールバーの右端にあるアイコンをクリック，モデルのビルドを選択すればよい．別の方法としては Simulink モデルのメニューから「QUARC/Build」を選択しても良い．このとき，エラーがなければ MATLAB Command Window に以下のようなメッセージが表示され，コンパイルが終了する．

```

### コードをビルドフォルダーに生成しています: D:\student_senkouka\group_xx\da\da_conv_quarc_win64
### Invoking Target Language Compiler on da_conv.rtw
### Using System Target File: C:\Program Files\Quanser\QUARC\quarc_win64.tlc
### Loading TLC function libraries
..... 《略》 .....
### Created executable da_conv.rtw-win64
### Downloading da_conv to target ' shmem://quarc-target:1' ...
### Model da_conv has been downloaded to target ' shmem://quarc-target:1'

```

### 3.2.5 実験

コンパイル終了後，図 3.7 に示すように Simulink モデルのツールバーで “ターゲットに接続” アイコンをクリックし，その右のアイコンの “実行” をクリックすると，モータドライバに一定の電圧 2 [V] が加わり，リンクが一定速度で時計回りに回転することが確認できる．停止させる場合には “実行” アイコンの右にある “停止” アイコンをクリックすればよい．実行の方法として，Simulink モデルのメニューから「QUARC/Start」を選択しても実行ができる．また停止方法として Simulink モデルのメニューから「QUARC/Stop」を選択してもよい．



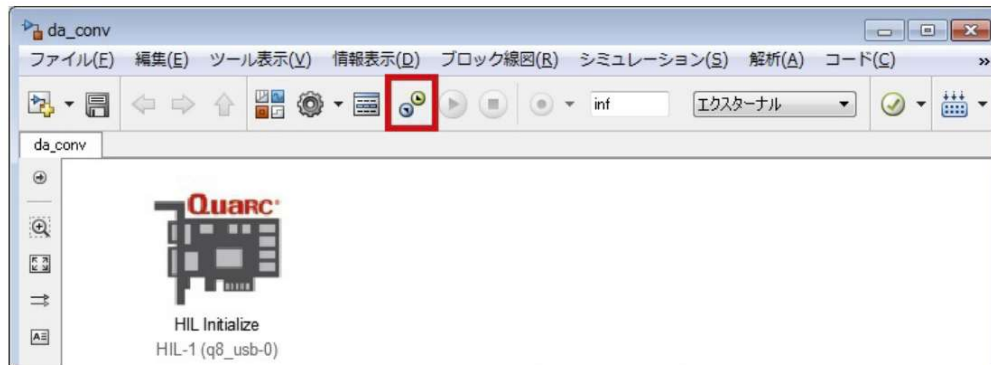


図 3.7 : 実機実験の開始

### 3.3 A/D 変換とセンサの動作確認

本実験装置では、角度センサにポテンショメータを用いている。このポテンショメータは軸の回転角に比例した電圧  $-5 \sim +5$  [V] をアナログ信号として出力し、また、この電圧と軸の回転角との関係は、 $1$  [V] あたり  $-35$  [deg] である。

ポテンショメータの動作確認をするために、図 3.8 の実機実験モデル “ad\_conv.slx” を作成する。

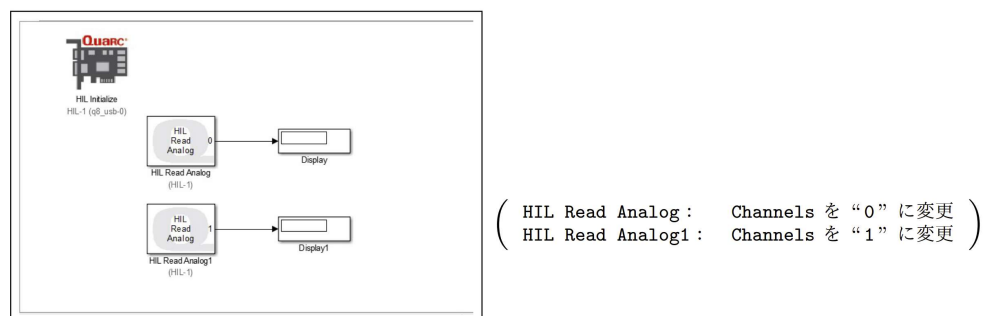


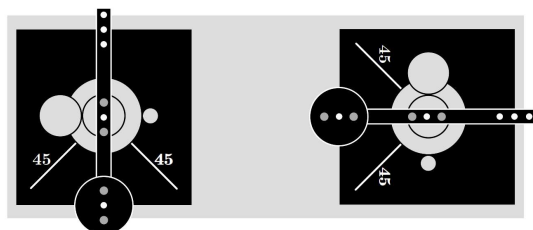
図 3.8 : “ad\_conv.slx”

つぎに、図 ?? で示したようにパラメータ設定を行い、図 ?? 節で示したように “ad\_conv.slx” をコンパイルする。

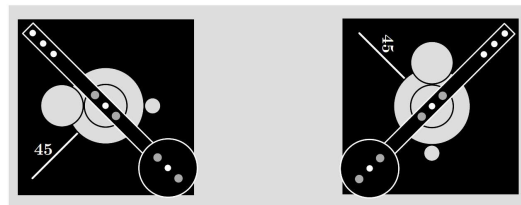
以上の準備の下、リンクを図 3.9 (a) の状態にして、“Start” アイコンをクリックすると、センサからの電圧が図 3.10a (a) のように  $0$  [V] 程度であることが確認できる。

先に述べたように、本実験装置で用いているポテンショメータは、 $1$  [V] あたり  $-35$  [deg] ( $= -0.6109$  [rad]) であるから、リンクを反時計回りに  $45$  [deg]  $= \pi/4$  [rad] 回転させると  $-1.2857$  [V] の電圧が発生するはずである。

実際、リンクを図 3.9 (b) のように反時計回りに  $45$  [deg] 回転させると、センサからの電圧が図 3.10b (b) のように  $-1.2857$  [V] 程度であることが確認できる。

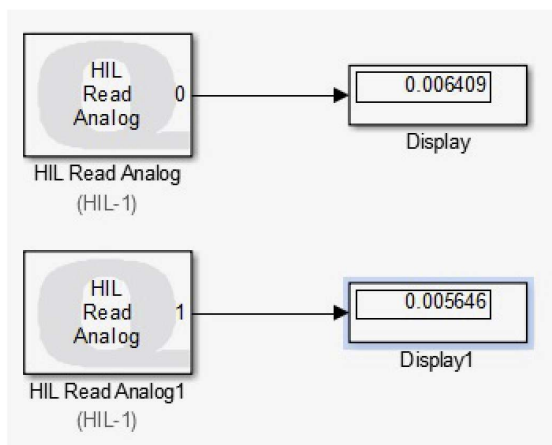


(a) 初期状態

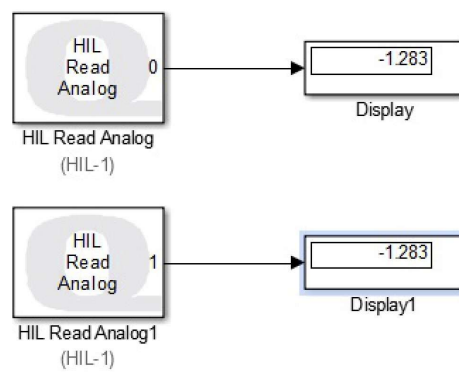


(b) リンクを反時計回りに 45 [deg] 回転させた状態

図 3.9 : リンクを手で反時計回りに 45 [deg] 回転させた状態



(a) 初期状態

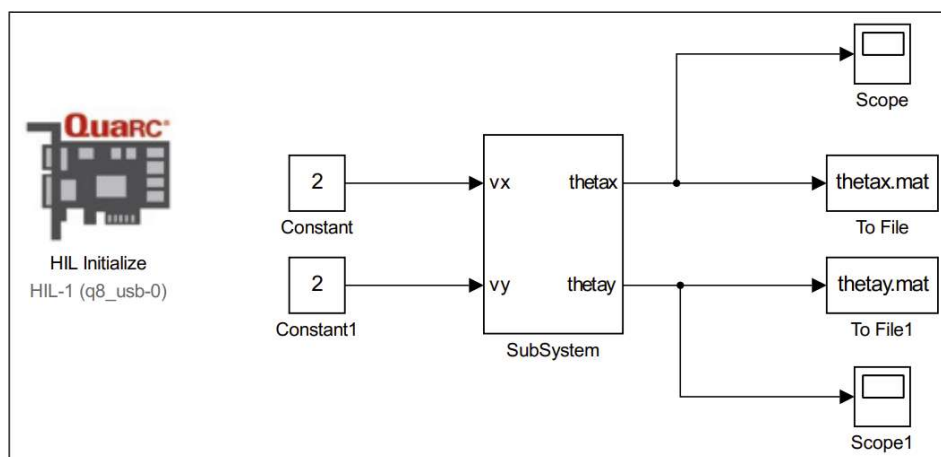


(b) リンクを反時計回りに 45 [deg] 回転させた状態

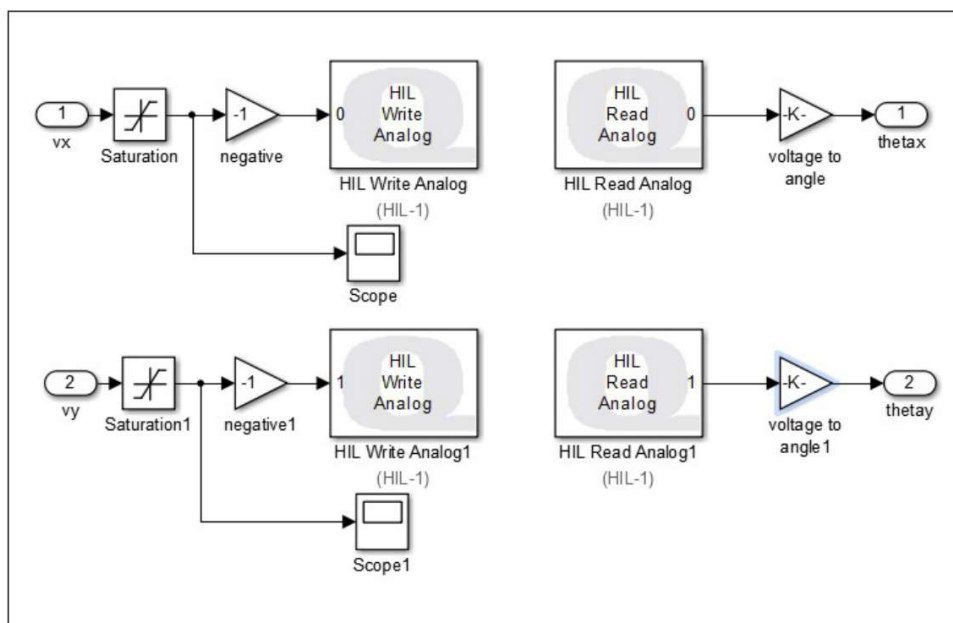
図 3.10 : リンクを手で反時計回りに 45 [deg] 回転させたときの出力電圧

### 3.4 4リンク2軸ロボットのSimulinkでの表現

アクチュエータの動作確認を行った結果、正の電圧を DC モータに加えるとリンクが時計回りに回った。また、センサの動作確認を行った結果、センサにより角度に相当する電圧が検出できた ( $1\text{ [V]}$  あたり  $-35\text{ [deg]} = -0.6109\text{ [rad]}$ )。このことを考慮し、4リンク2軸ロボットを Simulink で表現すると、図 3.11 となる。



(a) “ad\_da\_conv.slx”

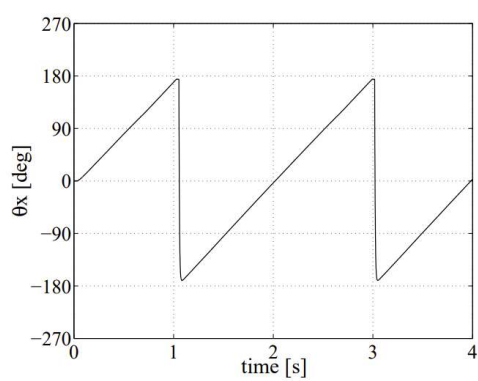


(b) Subsystem “2D Robot” の内容

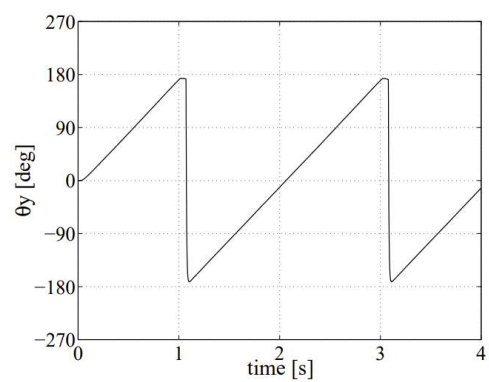
図 3.11 : 4リンク2軸ロボットの Simulink での表現

ad\_da\_conv.slx をコンパイルして実行すると、図 3.12 の実験結果が得られ、DC モータに  $2\text{ [V]}$  の電圧を加えると、リンクが時計回りに回転し、リンクの角度  $\theta_x(t)$ ,  $\theta_y(t)$  が弧度法の単位  $[\text{rad}]$  で得られていることがわかる。また、ポテンシオメータが有効な範囲は  $-175 \sim 175\text{ [deg]}$  程度である

ことも確認できる.



(a)  $\theta_x(t)$  の応答



(b)  $\theta_y(t)$  の応答

図 3.12 : 一定電圧を加えたときの時間応答

## 第 4 章 時間応答に基づくパラメータ同定

### 4.1 パラメータ同定とは？

制御対象の物理パラメータの値は、はかりやメジャーなどの測定器で直接はかることができるに限らない。制御対象の物理パラメータの値がわからないと、制御対象の数学モデルに基づいたコントローラ設計やシミュレーションを行うことができない。そこで、測定器で直接はかることができない物理パラメータを定めるため、制御対象に様々な信号を加え、このときの出力応答から物理パラメータの値を定める必要がある。このことを**パラメータ同定**と呼ぶ。

本実験装置の場合、?? 節で述べたように、 $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$  から  $\theta_x(t)$ ,  $\theta_y(t)$  への伝達関数  $G_x(s)$ ,  $G_y(s)$  は

$$\begin{cases} G_x(s) = \frac{b_x}{s(s+a_x)}, & a_x = \frac{c_x}{J_x}, & b_x = \frac{k_{fx}}{J_x}, \\ G_y(s) = \frac{b_y}{s(s+a_y)}, & a_y = \frac{c_y}{J_y}, & b_y = \frac{k_{fy}}{J_y} \end{cases} \quad (4.1)$$

であるから、 $a_x$ ,  $b_x$ ,  $a_y$ ,  $b_y$  の値を実験により定めることになる。パラメータ同定を行う方法には、ステップ応答などの時間応答に基づく方法と周波数応答に基づく方法があるが、ここでは、時間応答に基づく方法を用いる。

## 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].