バランス型作業支援ロボットに関する研究

○圓山　航平[*1]　入江　寿弘[*2]　新宮　清志[*3]

キーワード：多目的数値最適化　線形制御　ロボット

1.　はじめに

手術などで手先の細かい作業を行うとき，肘を浮かしたままの立ち作業を長時間することになる．作業者の負担は大きく，肘を浮かしたままでの作業は非常に大変である．そこで，本研究では，作業者の肘を支えることで，腕を無重力状態にすることができるロボットアームの試作研究を行う．

このロボットの特徴は，負荷を直接駆動しないでカウンターウエイトでバランスさせることで，外力により自由に動かせることである．これは，患者が突然動いたときなどで，作業者の緊急回避が必要なときに動きを妨げることがないような制御を行うためである．

本稿では,7 自由度ロボットアームと単純化したモデルの運動計算を行い,制御方法を検討する．

2.　7 自由度ロボットアーム

2.1　構造

本研究で使用するロボットアームの構造図を図 1 に示す．本ロボットアームは，人間と同じ肩部(3 自由度)，肘部(1 自由度)，手首部(3 自由度)からなる 7 自由度の開リンク機構を用いる．

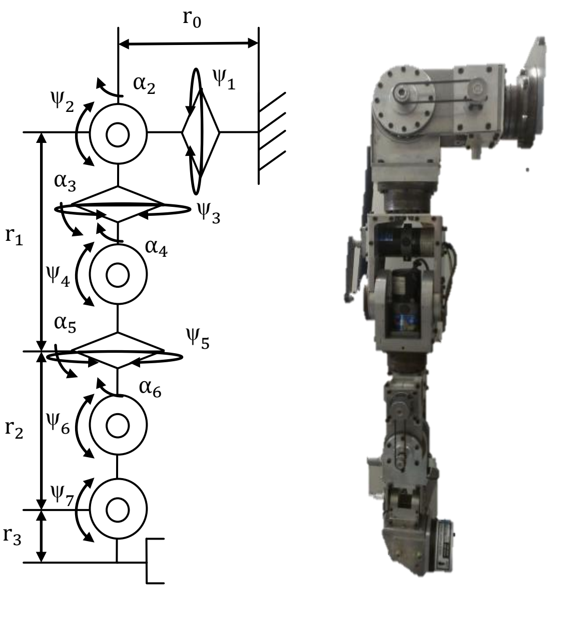

図 1　7 自由度ロボットアームの構造図

また, Denavit-Hartenberg 表記法[1)]を用いたリンクパラメーターを表 1 に示す．関節軸 i，リンク間角度ψ_i，リンク間距離r_i，リンクのねじれ角α_i，リンク長さa_i(中心軸からのずれ)を表す．

表 1　リンクパラメーター

i	a_i	α_i	r_i	ψ_i
1	0	0	r_0	ψ_1
2	0	$-\pi/2$	0	ψ_2
3	0	$\pi/2$	r_1	ψ_3
4	0	$-\pi/2$	0	ψ_4
5	0	$\pi/2$	r_2	ψ_5
6	0	$-\pi/2$	0	ψ_6
7	0	0	r_3	ψ_7

2.2　逆運動学

逆運動学とは，手先位置などが与えられたとき，それを実現することが可能な各関節の変位(角度)を手先位置から逆算して求める計算である．しかし，冗長ロボットアームの場合，手先の位置・姿勢が拘束されても関節角度がひとつに定まらない．そこで，今回は清水らの手法[2)]を参考にし，逆運動学計算を行う．

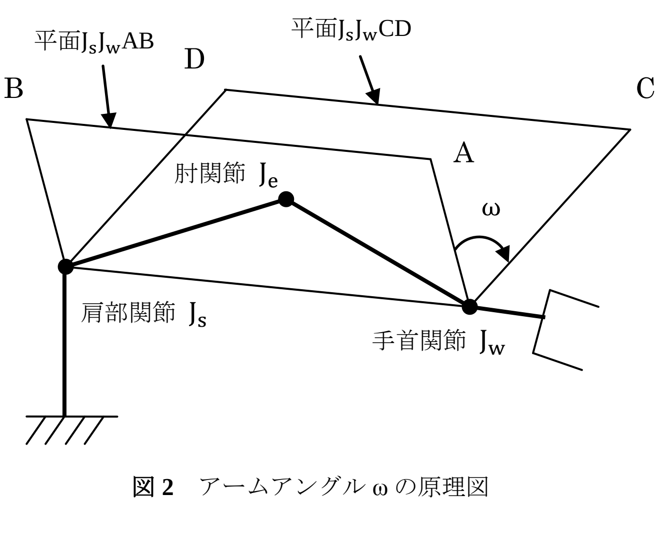

図 2　アームアングル ω の原理図

この手法は，アームアングルというパラメーターを導入して第 3 関節を固定にすることにより、非冗長ロボットア

ームと考えることが可能になる. また, 第 2 関節と第 4 関節の軸方向が一致するときに, 肩-肘-手首により形成される面を参照面とする. 肩部関節 J_sはψ_1, ψ_2, 肘関節 J_eはψ_3, ψ_4, 手首関節 J_wはψ_5, ψ_6, ψ_7の自由度がそれぞれある. また, 平面J_sJ_wAB 内にJ_e はある. アームアングル ω は, 平面J_sJ_wAB と平面J_sJ_wCD との間の角度で図 2 に原理図を示す.

ここで, x_{sw}は肩から手首までのベクトル, r_1 , r_2はリンク間距離, a_{sij}, b_{sij}, c_{sij}, a_{wij}, b_{wij}, c_{wij}は回転行列で行列(i,j)成分(i =1~3, j=1~3)を表す. これらの式は, 紙面上の都合により省略する.
この手法を用いると式(1)～(7)のように各関節角が求まる.

$$\psi_1 = \tan^{-1}\frac{-a_{s22}\sin\omega - b_{s22}\cos\omega - c_{s22}}{-a_{s12}\sin\omega - b_{s12}\cos\omega - c_{s12}} \tag{1}$$

$$\psi_2 = \cos^{-1}(-a_{s32}\sin\omega - b_{s32}\cos\omega - c_{s32}) \tag{2}$$

$$\psi_3 = \tan^{-1}\frac{a_{s33}\sin\omega + b_{s33}\cos\omega + c_{s33}}{-a_{s31}\sin\omega - b_{s31}\cos\omega - c_{s31}} \tag{3}$$

$$\psi_4 = \cos^{-1}\left(\frac{\|x_{sw}\|^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1r_1}\right) \tag{4}$$

$$\psi_5 = \tan^{-1}\frac{a_{w23}\sin\omega + b_{w23}\cos\omega + c_{w23}}{a_{w13}\sin\omega + b_{w13}\cos\omega + c_{w13}} \tag{5}$$

$$\psi_6 = \cos^{-1}(a_{w33}\sin\omega + b_{w33}\cos\omega + c_{w33}) \tag{6}$$

$$\psi_7 = \tan^{-1}\frac{a_{w32}\sin\omega + b_{w32}\cos\omega + c_{w32}}{-a_{w31}\sin\omega - b_{w31}\cos\omega - c_{w31}} \tag{7}$$

3. バランス型作業支援ロボットの動作原理

ロボットはアーム先端にある作業台にかかる負荷に対して, カウンターウエイト(CW)を動かすことで重心を変化させ, 作業支援用アーム(SA)が動きバランスを保つことが可能である. 作業支援用アームの軸は常にフリーにすることにより, 機械的拘束をしない柔軟な動作が可能になる.

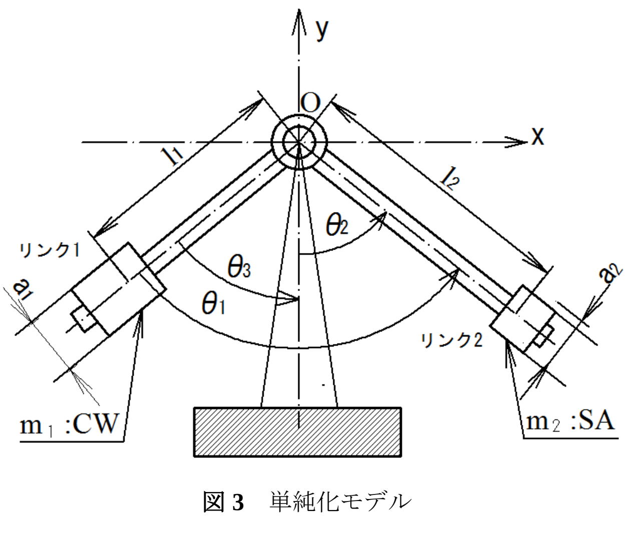

図 3 単純化モデル

本稿では, 前述した 7 自由度ロボットアームの根元(肩)の部分のみをバランス型にした単純化モデルでの導出をする. 単純化したモデルを図 3 に各パラメーターを表 2 示す.

表 2 単純化モデルのパラメーター

m_1	カウンターウエイトの質量
m_2	ロボットにかかる負荷の質量
l_1, l_2	リンク 1、リンク 2 の各々の長さ
θ_1	リンク 1 とリンク 2 の相対角度
θ_2	Y 軸とリンク 2 の角度
θ_3	Y 軸とリンク 1 の角度
a_1	CW の一辺の長さ
a_2	SA の一辺の長さ
c_1	リンク 1 とリンク 2 の粘性係数
c_2	ベースプレートとリンク 2 の粘性係数
g	重力加速度
J_1, J_2	リンク 1, リンク 2 の重心回り慣性モーメント
τ	リンク 1 に加わるトルク

3.1 運動方程式の導出

この単純モデルの運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを求める. 反時計回りを正とし, CW の位置座標(x_1, y_1)と SA の位置座標(x_2, y_2)は, 式(9)~(12)で表される. なお, $\theta_i[t]$(i=1~3)は時間関数を意味する.

$$\theta_3[t] = \theta_2[t] - \theta_1[t] \tag{8}$$

$$x_1 = l_1 \sin[\theta_3[t]] \tag{9}$$

$$y_1 = -l_1 \cos[\theta_3[t]] \tag{10}$$

$$x_2 = l_2 \sin[\theta_2[t]] \tag{11}$$

$$y_2 = -l_2 \cos[\theta_2[t]] \tag{12}$$

上記の座標位置より運動エネルギーは次式になる.

$$T_1 = \frac{1}{2}J_1(\dot{\theta}_2[t] - \dot{\theta}_1[t])^2 + \frac{1}{2}m_1(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) \tag{13}$$

$$T_2 = \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2[t] + \frac{1}{2}m_2(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) \tag{14}$$

また，位置エネルギーは

$$U = m_1 g(l_1 - y_1) + m_2 g(l_2 - y_2) \tag{15}$$

となる．よって，運動エネルギーと位置エネルギーよりラグラジアン L は

$$\begin{aligned} L &= (T_1 + T_2) - U \\ &= \frac{1}{2}\left(J_1 + m_1 {l_1}^2\right)\left(\dot{\theta_2}[t] - \dot{\theta_1}[t]\right)^2 + \frac{1}{2}(J_2 + m_2 l_2)\dot{\theta}_2^2 \\ &\quad + m_1 g l_1 + m_1 g l_1 \cos(\theta_2[t] - \theta_1[t]) + m_2 g l_2 \\ &\quad + m_2 g l_2 \cos\theta_2[t] \end{aligned} \tag{16}$$

摩擦による減衰ついては粘性減衰と仮定し，レイリーの散逸関数により次のように損失エネルギーとする．

$$D = \frac{1}{2} c_1 \dot{\theta}_1^2[t] + \frac{1}{2} c_2 \dot{\theta}_2^2[t] \tag{17}$$

次式のラグランジ方程式を用いて運動方程式を求める．

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} + \frac{\partial D}{\partial \theta_i} = F \tag{18}$$

(i =1,2,3…n)　F：一般化力

このラグランジュ方程式に運動エネルギー, 位置エネルギー，損失エネルギーを代入し各 θ_1，θ_2 のラグランジュ方程式は次式になる．

θ_1 のラグランジュ方程式

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} + \frac{\partial D}{\partial \theta_1} = \tau \\ &(J_1 + m_1 l_1^2)\ddot{\theta_1}[t] - (J_1 + m_1 l_1^2)\ddot{\theta_2}[t] \\ &\qquad - m_1 g l_1 \sin(\theta_2[t] - \theta_1[t]) \\ &\qquad - c_1\left(\dot{\theta_2}[t] - \dot{\theta_1}[t]\right) = \tau \end{aligned} \tag{19}$$

θ_2 のラグランジュ方程式

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} + \frac{\partial D}{\partial \theta_2} = 0 \\ &-(J_1 + m_1 l_1^2)\ddot{\theta_1}[t] + (J_1 + m_1 l_1^2 + J_2 + m_2 l_2^2)\ddot{\theta_2}[t] \\ &\qquad + m_1 g l_1 \sin(\theta_2[t] - \theta_1[t]) \\ &\qquad + m_2 g l_2 \sin\theta_2[t] + c_1\left(\dot{\theta_2}[t] - \dot{\theta_1}[t]\right) \\ &\qquad + c_2 \dot{\theta_2}[t] = 0 \end{aligned} \tag{20}$$

上記の 2 つのラグランジュ方程式を連立して解くことにより θ_1 と θ_2 の運動方程式を導く．

$$\begin{aligned} &\ddot{\theta_1}[t] \\ &= \frac{m_1 g l_1 J_{22} \sin(\theta_2[t] - \theta_1[t]) - m_2 g l_2 J_{11} \sin\theta_2[t]}{J_{11} J_{22}} \\ &+ \frac{-c_1 J_{22} \dot{\theta_1}[t] + (c_1 J_{22} - c_2 J_{11})\dot{\theta_2}[t] + (J_{11} + J_{22})\tau}{J_{11} J_{22}} \end{aligned} \tag{21}$$

$$\ddot{\theta_2}[t] = \frac{\tau - m_2 g l_2 \sin\theta_2[t] - c_2 \dot{\theta_2}[t]}{J_{22}} \tag{22}$$

ただし，

$$J_{11} = J_1 + m_1 l_1^2$$
$$J_{22} = J_2 + m_2 l_2^2$$

である．

3.2　状態方程式の導出

前述で求めた運動方程式にテイラー展開を用いて線形化を行う．

$$\begin{aligned} &\ddot{\theta_1}[t] \\ &= \frac{-m_1 g l_1 J_{22} \theta_1 + (m_1 g l_1 J_{22} - m_2 g l_2 J_{11})\theta_2}{J_{11} J_{22}} \\ &+ \frac{-c_1 J_{22} \dot{\theta_1} + (c_1 J_{22} - c_2 J_{11})\dot{\theta_2} + (J_{11} + J_{22})\tau}{J_{11} J_{22}} \end{aligned} \tag{23}$$

$$\ddot{\theta_2}[t] = \frac{\tau - m_2 g l_2 \theta_2 - c_2 \dot{\theta_2}}{J_{22}} \tag{24}$$

この線形化した式を次式のような状態方程式で表す．

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \tag{25}$$

今回の状態変数x(t)の各成分は, $x_1 = \theta_1$, $x_2 = \dot{\theta_1}$, $x_3 = \theta_2$, $x_4 = \dot{\theta_2}$である．

$$x(t) = [x_1\ \ x_2\ x_3\ x_4]^T$$

また，入力u(t)は

$$u(t) = \tau$$

各制御行列は次のようになる．

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dfrac{-m_1 g l_1 J_{22}}{J_{11} J_{22}} & \dfrac{-c_1 J_{22}}{J_{11} J_{22}} & \dfrac{m_1 g l_1 J_{22} - m_1 g l_1 J_{11}}{J_{11} J_{22}} & \dfrac{c_1 J_{22} - c_2 J_{11}}{J_{11} J_{22}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dfrac{-m_2 g l_2}{J_{22}} & \dfrac{-c_2}{J_{22}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{J_{11} + J_{22}}{J_{11} J_{22}} \\ 0 \\ \dfrac{1}{J_{22}} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

4.　制御系の構成

前述した運動方程式から求めた制御対象の状態方程式からフィードバック制御の構成は図 4 に示す．システムの特性根は，-10.76，-9.00，-2.25+5.79i，-2.25-5.79i となり，システムが安定であることが確認できた．また，MATLAB からゲイン$K_s = 2.26$なる．

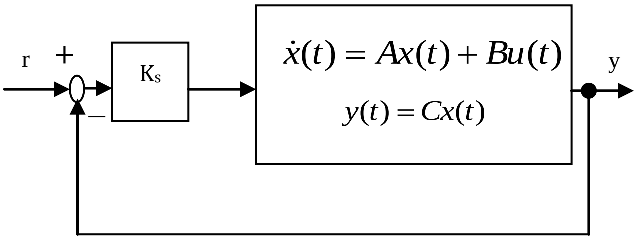

図 4　フィードバック制御系の構成

5.　シミュレーション

MATLAB の Simulink で目標角 30[°]でのシミュレーションを行った．単純化モデルのシミュレーションを行うにあたり使用したm_1などの固定パラメーターを表 3 に示す．また，シミュレーション結果を図 5 に示す．

表 3　固定パラメーター

m_1，m_2	0.1[kg]，0.08[kg]
l_1，l_2	0.6[m]，0.7[m]
a_1，a_2	0.03[m]，0.03[m]
c_1，c_2	0.15[kg・m/s^2]，0.01[kg・m/s^2]
g	9.8[m/s^2]

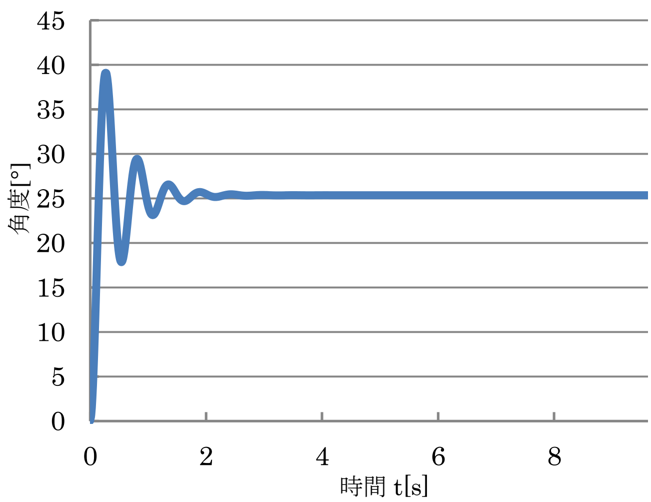

図 5　シミュレーション結果

6.　まとめ

シミュレーションによりロボットの位置制御での応答を行った．その結果から，位置制御を行う際に固有振動数，減衰係数などの動特性が変化し，一定の制御ゲインでは制御が困難であることが判明した．今後は，実機をバランス型に改良し，安定した制御を実現するための制御アルゴリズムを考案し，実機への適用を行う．

[参考文献]

1)　川崎晴久，ロボット工学の基礎，森北出版株式会社 pp.38-76 (2009)

2)　清水昌幸,角谷啓,尹祐根,北垣高成，小菅一弘，　関節の可動範囲を考慮に入れた 7 自由度マニピュレータの解析的逆運動学解法，日本ロボット学会誌，25-4，pp.606-617 (2007)

3)　野波健蔵，西村秀和，MATLAB による制御理論の基礎，東京電機大学出版局(2001)

4)　川田昌克，　MATLAB/Simulink による現代制御入門，森北出版株式会社(2011)

5)　入江敏博，山田元，工業力学，理工学社(2007)

*1　日本大学大学院理工学研究科精密機械工学専攻　大学院生

*2　日本大学理工学部精密機械工学科　教授　博士(工学)

*3　日本大学名誉教授　工学博士