

ワイヤープリー系を利用した多関節ロボットアームの駆動と制御

斉藤 俊 (機械工学科)

Driving and Control of a Multi Joint Robot Arm by Wire-Pulley System

Takashi SAITO (Department of Mechanical Engineering)

As a driving device, wire-pulley system is employed. It enables the weight of a multi joint robot arm to lighten and to have flexibility in motion. One link is driven by a pair of wires wounded by two motors or a couple of a motor and an electromagnetic clutch. The input forces that originate in the tension of the wire are incorporated in the mathematical model for the robot arm that has three degrees of freedom. LQI control is applied on the model and the experiments are performed based on the strategy. Simulation results show that this system has the antagonistic effect.

1. まえがき

産業用ロボットのアクチュエータには主として、高回転・低トルクの小型のサーボモータと減速機が使用されており、高速化あるいは高精度化の要求から、減速機無しのダイレクトドライブ方式も実現されている。多関節型ロボットにおいては、これらのアクチュエータはすべて、各関節に配備されており、アームの駆動に際しては、各アームと各関節毎のこれらのアクチュエータを動かすためにエネルギーを費やす必要がある。一方、ロボットに柔軟な構造を持たせたり、柔軟に作業を行わせることが必要となる場合がある^{1),2)}。これを解決するために、ロボットに手先効果器などを付加したり、力フィードバック制御の採用により、実現を試みているが、様々な作業内容や作業状況に対応可能な手先効果器、制御方法を実現することは現段階では容易ではない。

本研究では、多関節型のロボットアームを駆動するアクチュエータをなるべく根本部分に集め、アームの軽量化をはかることによりエネルギー消費を小さくすること及びアーム自体に柔軟な構造を持たせることにより、作業の幅の拡大を目的として、多関節ロボットアームをワイヤープリー系により駆動・制御することを考える。1本のアームに対して1個のプリーと2本の糸を配し、各糸を2個のモータで駆動する方法と1個のモータと電磁クラッチを組み合わせ駆動する方法について考え、前者の方法を採用して実験及びシミュレーションによりその特性について検討する。

2. 制御モデル

2.1 3自由度ロボットアーム 本研究で取り扱う制御対象は、図1に示すような座標系を持つ3自由度の多関節型のロボットアームであり、台座、第1腕および第2腕の回転をそれぞれ $\theta_i(i=0,1,2)$ と

する。第1腕、第2腕の全長を L_i 、回転軸から重心までの長さを $L_{gi}(i=1,2)$ とする。腕の軸回りの慣性モーメントは無視し、台座、第1腕、第2腕の回転軸と平行で重心を通る軸回りの慣性モーメントをそれぞれ I_i 、第1腕、第2腕および搬送物の質量を $m_i(i=1,2,3)$ とする。また、各関節の粘性減衰定数を D_i 、各関節に加えられる入力トルクを M_i とする。系全体の運動エネルギー、位置エネルギー及び散逸関数を求め、Lagrange方程式に代入することにより、3自由度のロボットアームに対する運動方程式が次のように求められる。

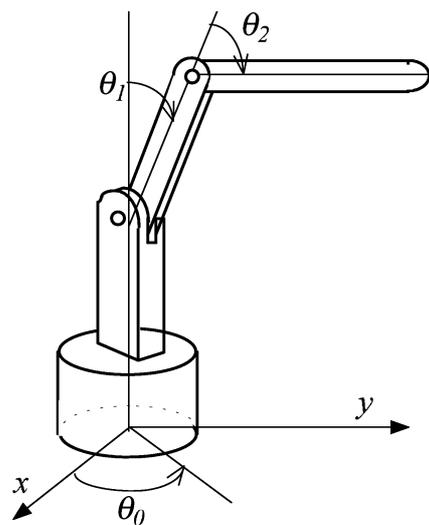


Figure 1 Coordinate system

$$\left. \begin{aligned} J_0 \ddot{\theta}_0 + D_0 \dot{\theta}_0 &= M_0 - n_0 \\ J_1 \ddot{\theta}_1 + J_3 \ddot{\theta}_2 + D_1 \dot{\theta}_1 &= M_1 - n_1 \\ J_3 \ddot{\theta}_1 + J_2 \ddot{\theta}_2 + D_2 \dot{\theta}_2 &= M_2 - n_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで,

$$\left. \begin{aligned} J_0 &= I_0 + I_1 + I_2 + a_1 \sin^2 \theta_1 \\ &\quad + a_2 \sin^2 (\theta_1 + \theta_2) + 2a_3 \sin \theta_1 \sin (\theta_1 + \theta_2), \\ J_1 &= I_1 + I_2 + a_1 + a_2 + 2a_3 \cos \theta_2, \\ J_2 &= I_2 + a_2, \quad J_3 = I_2 + a_2 + a_3 \cos \theta_2, \\ n_0 &= 2 [a_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \\ &\quad \times \cos (\theta_1 + \theta_2) + a_3 \sin (2\theta_1 + \theta_2)] \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_1, \\ n_1 &= - [a_1 \sin \theta_1 \cos \theta_1 + a_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \\ &\quad \times \cos (\theta_1 + \theta_2) + a_3 \{ \sin \theta_1 \cos (\theta_1 + \theta_2) \\ &\quad + \cos \theta_1 \sin (\theta_1 + \cos \theta_2) \}] \dot{\theta}_0^2 \\ &\quad - 2a_3 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - a_3 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 - a_4 \sin \theta_1 \\ &\quad - a_5 \sin (\theta_1 + \theta_2) \\ n_2 &= a_3 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 - \{ a_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \\ &\quad + a_3 \sin \theta_1 \cos (\theta_1 + \theta_2) \} \dot{\theta}_0^2 \\ a_1 &= m_1 L_{g1}^2 + (m_2 + m_3) L_1^2, \\ a_2 &= m_2 L_{g2}^2 + m_3 L_2^2, \\ a_3 &= m_2 L_1 L_{g2} + m_3 L_1 L_2, \\ a_4 &= (m_1 L_{g1} + m_2 L_1 + m_3 L_1) g, \\ a_5 &= (m_2 L_{g2} + m_3 L_2) g \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2.2 アームの駆動方法 本研究では、各アームに加える入力トルク M_i ($i=0,1,2$) を、アームに取り付けた2本の糸を図2に示すようにそれぞれモーターで巻き取ることにより生み出す方法と、図3に示すように、各関節に1個のモーターを配し、電磁クラッチによりモーターの回転伝達方向を左右に切り替えることにより同様の運動を実現したもの2通りを考えた。ここで、 $\theta_i = \pi/2$ でワイヤのたるみのない状態を基準として、そこからモーターがワイヤを巻き取った回転角を θ_{ia} , θ_{ib} , 糸に発生する引張力を f_{ia} , f_{ib} , アームのプ

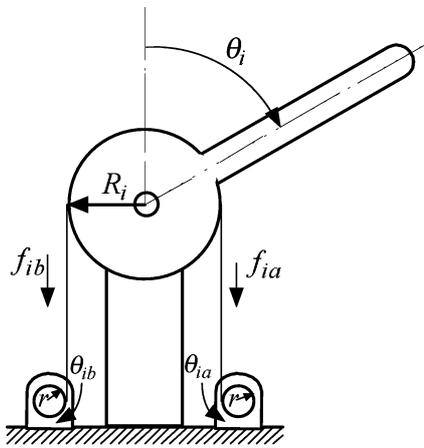


Figure 2 Input by a pair of motors

ーリ半径を R_i , モーターの糸巻半径を r としている。糸に発生する引張力は、糸の縦弾性係数、断面積、歪をそれぞれ E , A , ε_{ia} , ε_{ib} として次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} f_{ia} &= EA\varepsilon_{ia} \equiv k_f \varepsilon_{ia} \\ f_{ib} &= EA\varepsilon_{ib} \equiv k_f \varepsilon_{ib} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

糸に生じる歪は、アームの回転角とモーターの回転角との相対差で生じ、糸がたるんでいる時は零となる。ここで、糸の伸び方向座標を ξ , 対応する変位を u , l_i を糸の長さとして、 $\partial u / \partial \xi = \eta$ を次式で近似する。

$$\eta_{ia} = \begin{cases} [r\theta_{ia} - R_i(\theta_i - \pi/2)] / l_i & ; r\theta_{ia} - R_i(\theta_i - \pi/2) > 0 \\ 0 & ; r\theta_{ia} - R_i(\theta_i - \pi/2) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\eta_{ib} = \begin{cases} [r\theta_{ib} + R_i(\theta_i - \pi/2)] / l_i & ; r\theta_{ib} + R_i(\theta_i - \pi/2) > 0 \\ 0 & ; r\theta_{ib} + R_i(\theta_i - \pi/2) \leq 0 \end{cases}$$

したがって、有限歪³⁾を考慮すると

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} \right)^2$$

であるから、式(3)は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} f_{ia} &= k_f (1 + \eta_{ia}/2) \eta_{ia} \equiv K_{fa} \eta_{ia} \\ f_{ib} &= k_f (1 + \eta_{ib}/2) \eta_{ib} \equiv K_{fb} \eta_{ib} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 K_{fa} , K_{fb} をみかけのばね定数と呼ぶことにする。よって、各関節に加えられる入力トルクは次式で与えられることになる。

$$\begin{aligned} M_i &= R_i (f_{ia} - f_{ib}) \\ &= \frac{K_A R_i}{l_i} \{ r(\theta_{ia} - \theta_{ib}) - 2R_i(\theta_i - \pi/2) \} \end{aligned} \quad (6)$$

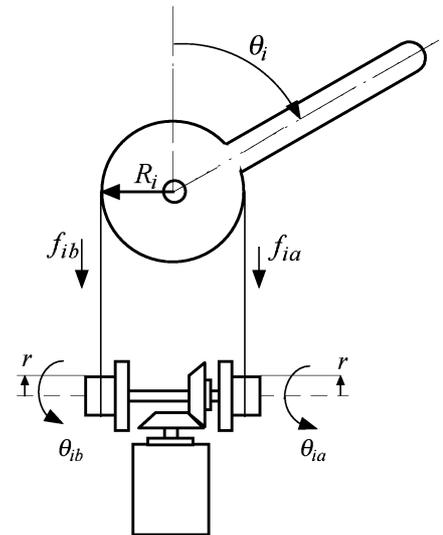


Figure 3 Input by a motor and an electromagnetic clutch

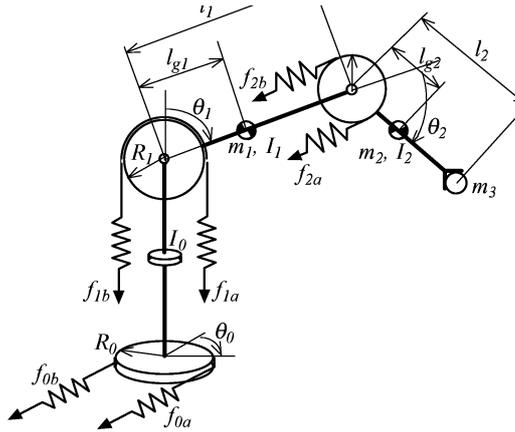


Figure 4 A mathematical model

ここで、 $K_A = f_{fa} + K_{fb} - k_f$ とおいている。さらに、各モータに関して、電流 i_{ia} , i_{ib} を入力として、次の運動方程式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} J_m \ddot{\theta}_{ia} + D_m \dot{\theta}_{ia} + r f_{ia} + T_{fia} \text{sign}(\dot{\theta}_{ia}) &= K_T i_{ia} \\ J_m \ddot{\theta}_{ib} + D_m \dot{\theta}_{ib} + r f_{ib} + T_{fib} \text{sign}(\dot{\theta}_{ib}) &= K_T i_{ib} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで、 J_m , D_m , T_{fia} (T_{fib}), K_T はそれぞれモータの慣性モーメント、粘性減衰係数、乾性摩擦及びトルク定数である。入力を含めた形の本研究におけるロボットアームモデルは図4のようになる。

3. 制御方法

3.1 状態方程式 本研究では、式(7)における電流値 i_{ia} , i_{ib} を入力として、各モータの回転角 θ_{ia} , θ_{ib} およびアームの回転角 θ_i を制御することによりアームを駆動する。そこで、デジタル制御系を構成し、LQI 制御^{4),5)}を応用して、状態ベクトルフィードバックゲインを求め、状態ベクトルフィードバック制御を行うことを考える。まず、状態ベクトルを次のように取る。

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \theta_0 & \theta_{0a} & \theta_{0b} & \theta_1 & \theta_{1a} & \theta_{1b} \\ & \dot{\theta}_2 & \dot{\theta}_{2a} & \dot{\theta}_{2b} & \dot{\theta}_0 & \dot{\theta}_{0a} & \dot{\theta}_{0b} \\ & \dot{\theta}_1 & \dot{\theta}_{1a} & \dot{\theta}_{1b} & \dot{\theta}_2 & \dot{\theta}_{2a} & \dot{\theta}_{2b} \end{Bmatrix}^T \quad (8)$$

また、入力ベクトルを次のように取る。

$$\mathbf{u} = \{ i_{0a} \ i_{0b} \ i_{1a} \ i_{1b} \ i_{2a} \ i_{2b} \} \quad (9)$$

式(1)における J_i あるいは、式(5)における K_f を一定とみなし、非線形項を \mathbf{n} として分離すれば、式(1)~(7)より、次式のような状態方程式が求められる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (10)$$

\mathbf{A} は、 16×16 , \mathbf{B} は 16×6 の行列、 $\mathbf{n}(t)$ は 16 次の列ベクトルとなるが、各要素については、冗長な式となるので、紙面の関係上省略する。また、出力を各モータの角変位とすると出力方程式は次式となる。

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (11)$$

ここで、

$$\mathbf{y} = \{ \theta_{0a} \ \theta_{0b} \ \theta_{1a} \ \theta_{1b} \ \theta_{2a} \ \theta_{2b} \}^T \quad (12)$$

3.2 LQI 制御 式(10)における \mathbf{A} は、角変位 θ_i , θ_{ia} , θ_{ib} の関数となっているため、アームの姿勢によってその値は変化する。従って、実際にはアームの運動に従って、LQI 制御における状態ベクトルフィードバックゲインは、時々刻々変化する。しかしながら、実時間でアームの姿勢に応じて、状態ベクトルフィードバックゲインを算出し、制御を行うのは现阶段では困難である。そこで、本研究では、代表的な姿勢に対する \mathbf{A} を求め、それに対して得られる状態ベクトルフィードバックゲインを用いて制御を行う。即ち、状態ベクトルフィードバックゲイン \mathbf{G} は、LQI 制御に順じて以下の手順により求めた。まず、式(10), (11)を離散時間系に変換する。次に w を重みとして

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\mathbf{y}^2(k+1) + w \{ \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1) \}^2 \right] \quad (13)$$

なる評価関数を考えることにより得られる行列リカッチ式を解き、状態ベクトルフィードバックゲインを算出する。得られた I 動作に関するゲイン、状態ベクトルフィードバックゲイン及び設定点をそれぞれ \mathbf{G}_0 , \mathbf{G}_1 , \mathbf{r} とし、次式で与えられる制御入力により、制御を行う。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_0 &= \mathbf{G}_0 \mathbf{x}_0(k) - \mathbf{G}_1 \{ \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}_0(k) \} \\ \mathbf{x}_0(k) &= \mathbf{x}_0(k-1) + [\mathbf{r}(k) - \mathbf{y}(k)] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

4. 実験

4.1 実験装置 本研究において製作した実験装置の概略図を図5に示す。製作したロボットアームは、図中の細線及び破線で示されている2本の糸を巻き取り、アームの関節部に取り付けたプーリを回転することにより、駆動・制御を行うものである。モータから関節への動力の伝達は、プーリの1点に固定され、円周上の反対側を經由してモータに至る2本の糸によって行う。ここで、第2腕では、モータとプーリが離れた

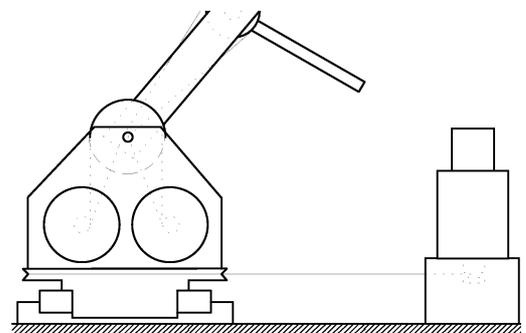


Figure 5 Experimental apparatus

ところにあるため直接糸を張ることが不可能である。そこで、第1関節の軸に小さな穴をあけておき、第2関節のプーリから出る2本の糸をその穴を通してからモータに導く方法を取る。このように、モータと第2関節を結ぶ糸が第1腕の回転中心を通ることによって、それぞれの糸の距離が常に等しくなり、第1腕と第2腕の運動がお互いに影響を及ぼし合わないようになっている。実験系及びシミュレーションに用いる物理量を以下に示す。モータに関する諸量は、規格表に掲載されていた値を用いたが、摩擦に関してはモータ毎に実際にはばらつきがあったので、多少修正してある。

Table 1 Parameter values

Moment of inertia for each rotating part (kgm ²)	
I_0	1.000×10^{-4}
I_1	1.482×10^{-6}
I_2	1.888×10^{-6}
J_m	2.504×10^{-5}
Damping coefficient for each rotating part (i=0,1,2) (kgm ² s)	
D_i	1.0×10^{-2}
D_{mia}	1.0×10^{-4}
D_{mib}	1.0×10^{-4}
Mass for each link (kg)	
m_1	1.365
m_2	1.365
m_3	0
Length for each link (m)	
L_1	0.333
L_2	0.098
Position of the center of gravity from each joint (m)	
L_{g1}	0.0587
L_{g2}	0.002
Radius for each pulley (m)	
r	0.007
R_0	0.0874
R_1	0.060
R_2	0.0254
Length for each line (m)	
l_0	0.537
l_1	0.204
l_2	0.305
Elastic constant for each line (N)	
k_{f0}	40000
k_{f1}	1200
k_{f2}	1200
Torque constant for each motor (i=0,1,2) (Nm/A)	
K_{Tia}	0.0780
K_{Tib}	0.0780
Dry friction constant for each motor (i=0,1,2) (Nm)	
T_{fia}	0.0400
T_{fib}	0.0400

他の値はすべて実測値である。

4.2 制御方式 本研究において用いた制御方式の概要を図6に示す。ホストコンピュータは、C言語で書かれたプログラムに従って、各コントローラへの角変位の目標値、あらかじめ計算しておいたフィードバックゲイン等を与え、スタート信号を出力して制御を開始する。終了後は、モータの角変位、角速度、入力データを各コントローラから受け取り、CRT画面及びフロッピーディスクに出力できるようになっている。各モータの制御を行うのはそれぞれ設けたソフトウェアサーボコントローラであり、その構成を図7に示す。8ビットマイクロプロセッサZ80Aを中心として、制御プログラムを書きこむためのEP-ROM、各データを一時記憶させておくためのRAM、エンコーダから送られてくるパルスをカウントして各変位を求めるためのカウンタ及びホストコンピュータとのインターフェースのためのパラレルI/Oポートから成っている。本実験における制御のサンプリングは300Hz前後となっていた。

4.3 実験 実験は、 $\theta_0 = 0, \theta_1 = \theta_2 = \pi/2$ を基本姿勢として、ステップ入力を加え、目標位置にアームを駆動する際のモータの巻き取り角及びほどいた角度に関する応答を調べることにより行った。ここでは、一对のモータを用いて駆動を行った場合の結果のみを示す。まず、図8は、目標値を $\theta_0 = 0, \theta_1 = \theta_2 = \pi/3$ とした場合の各関節に取り付けられているモータの角変位を示している。ここで、各モータの目標値は、

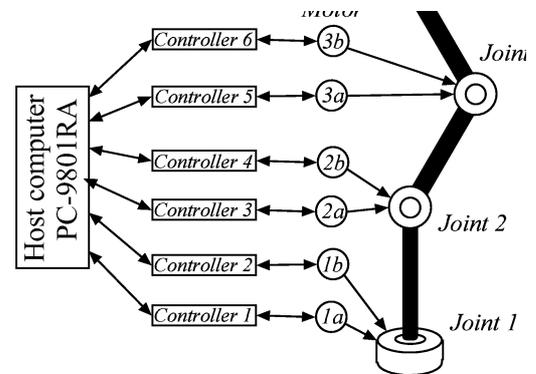


Figure 6 Schematic view of the control system

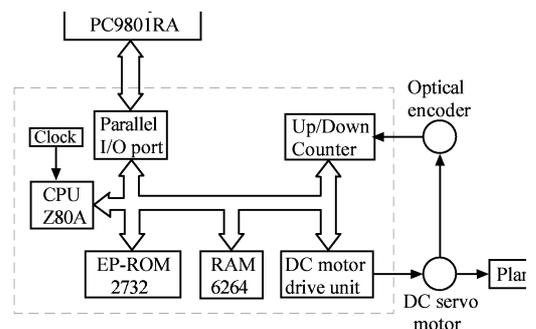


Figure 7 Software servo controller

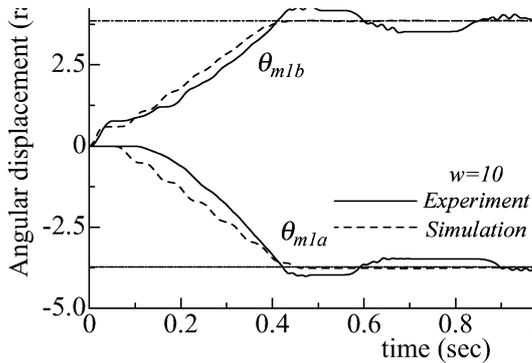
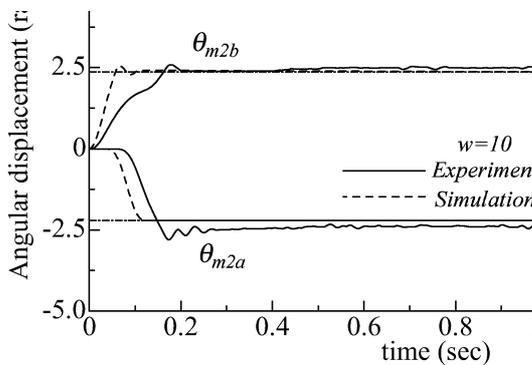
(a) θ_{m1a} and θ_{m1b} (b) θ_{m2a} and θ_{m2b}

Figure 8 Comparison of experimental results with simulation

各関節が目標値に到達し、重力と釣り合った状態で重力と抗する側のみの糸の伸びを考慮した値としており、図中の一点鎖線で示してある。図番 (a), (b) は、第1腕、第2腕を駆動するモータの角変位に対するものであることを示し、フィードバックゲインを定める式 (13) における重み w は、10 としている。また、実線、破線はそれぞれ実験結果とシミュレーション結果であることを示している。この場合、 θ_{m1b} は、正の値を取っているが、これはモータを巻き取る方向に回転していることを意味しており、負の値を取っている θ_{m1a} は、逆に糸を解いていることを示す。実験とシミュレーション共に、グラフで上側にあたる巻き取り側のモータは、始め急激に立ち上がり、一旦速度をゆるめ、また振動しながら目標値に向かっている。これは、アームが動き始めるのに必要なトルクに達するまで糸が伸び、その後アームを動かしながらゆっくりと回り始めるためと考えられる。巻き取られる側のモータは、アームの動きに引きずられて動き始めるため、巻き取り側に比べて、遅れた動きとなる。

次に、目標値を $\theta_0 = 0$, $\theta_1 = \pi/3$, $\theta_2 = \pi/2$ として駆動した結果を図9に示す。この場合、フィードバックゲインを定める重み w は、100 としている。図8、図9より、実験とシミュレーションはほぼ一致しており、モデル化及びシミュレーション計算の妥当性が検証できる。

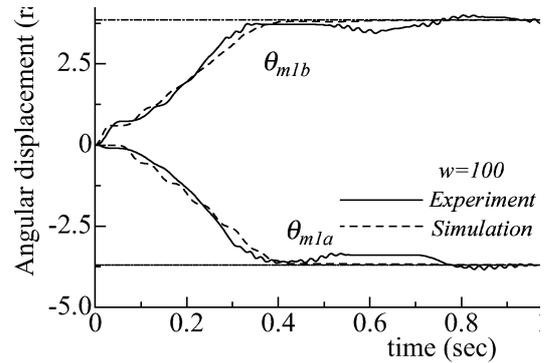
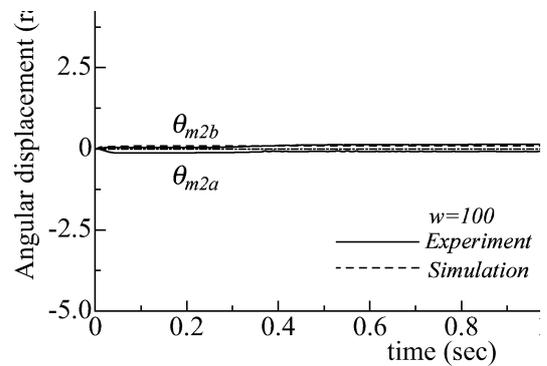
(a) θ_{m1a} and θ_{m1b} (b) θ_{m2a} and θ_{m2b}

Figure 9 Comparison of experimental results with simulation

5. 考察

ここでは、シミュレーションにより、ワイヤープリー系を用いたロボットアームの駆動に関して考察を加える。式 (5), (6) より明らかなように、アームを駆動する糸に歪を生じさせることにより、糸の見かけのばね定数を変化させることができ、人間の腕に見られるようなコンプライアンス変化を生じさせることが可能である。そこで、アームの目標角度は同じで、モータの角変位の目標値を変化させることにより、拮抗した状態を生成することを試みる。即ち、各関節が目標値に到達した状態において重力と抗する側のモータに一定電流を流し、その反対側のモータには、その電流値から重力補償に必要な値を差し引いた電流値を流すとした場合のモータの角変位を新たな目標値とする。 $\theta_0 = 0$, $\theta_1 = \theta_2 = \pi/2$ の位置から、それぞれ $\pi/6$ だけ動かした場合の結果を図10に示す。実線がモータの目標値を拮抗させた状態で実現したもの、破線が、重力補償のみを考慮した場合の結果である。また、一点鎖線がアーム回転角の目標値であり、図は、上からそれぞれ台座、第1腕、第2腕の一对のモータの回転角とアームの回転角の時間変化を示している。式 (13) における重み w は1としている。拮抗的な状態を形成することにより、モータ、アームの回転角共、大きく

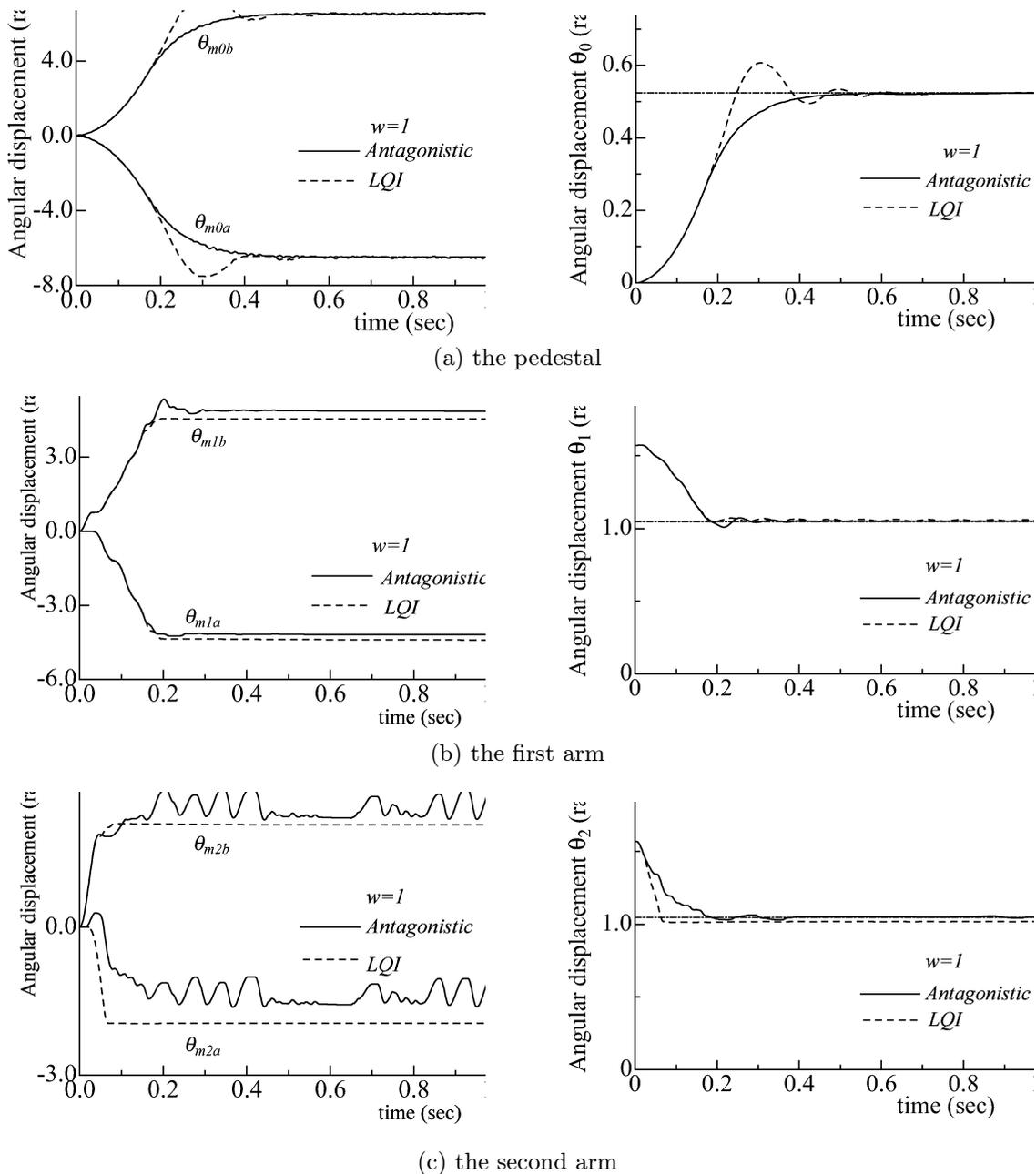


Figure 10 Comparison of control method

挙動が変化しており、モータの目標位置を変化させることにより、様々なアームの釣合い状態を作り出せることがわかる。

6. まとめ

軽量化及び柔軟化を目的としてワイヤープーリ系を用いたロボットアームを考え、数学モデル及び実験装置を作成し、実験及びシミュレーションを行った。目的の実現度に関して定量的な評価はできていないが、この方式によれば、2つの拮抗する力により、様々な釣合い状態が実現できると考えることができ、様々な状況が生じるロボットアームの作業時などにおいていくつかの利点が生じる可能性があることがわかった。

参考文献

- 1) 平井慎一, "柔軟物操作", 日本ロボット学会誌, 16(2), 136-139, 1998.
- 2) 内山 勝, "ソフトロボティクス", 日本ロボット学会誌, 17(6), 756-757, 1999.
- 3) Fung, Y. C., "Foundations of Solid Mechanics", Prentice-Hall, Inc., 95, 1965.
- 4) 高橋安人, "デジタル制御", 116, 岩波書店, 1985.
- 5) 滝田好宏, 背戸一登, 中溝高好, "ソフトウェアサーボ系によるロボットマニピュレータの最適制御", 日本機械学会論文集 (C編), 51(468), 2145-2151, 1985.

(平成 11 年 11 月 30 日受理)