

AFCを用いた 2リンクフレキシブルアームの制御

Control of 2 Link Flexible Arm by Active Force Control

○佐藤 勝俊*, 竹谷 基*

○Katsutoshi Sato*, Motoi Takeya*

*八戸工業高等専門学校

*Hachinohe National College of Technology

キーワード: AFC (Active Force Control), フレキシブルアーム (flexible arm), マニピュレータ (manipulator), 端点制御 (tip control), 2リンク (two link)

連絡先: 〒039-1192 八戸市田面木字上野平16-1 八戸工業高等専門学校 機械工学科
佐藤勝俊, Tel.: (0178)27-7265, Fax.: (0178)27-7265, E-mail: sato-m@hachinohe-ct.ac.jp

1. 緒言

ロボットアームの軽量化と高速化は、ロボットの作業効率を向上させるために重要な課題である。しかしアームを軽量化すると剛性が低下する。このためにアームの運動にともなう弾性振動が発生し、この弾性振動に対する制御が必要不可欠となる。このようなフレキシブルアームの制御に関する問題は、宇宙ロボット分野を初めとして、振動抑制・制御の分野でも関心が高く、これまでもたくさんの研究がなされてきている¹⁾。

フレキシブルアームを制御する場合、アームの根元角度を制御してもアームの弾性のため先端は振れてしまい、先端位置が安定しない。このためにアーム先端の制御を必要とするが、各関節の根元から見たアーム先端角度の検出が難しい。たとえば、CCDカメラなどでアーム先端角度の検出などアーム先端角度を知り得たとしても、画像処理に時間がかかりサーボ系を構成するにはまだ十

分な速さではない。また、フレキシブルアームの場合、アクチュエータとセンサのノンコロケーションの問題、さらには制御対象が分布定数系となるのでスピルオーバーの問題が生じるなど、その制御が難しいとされている。

筆者らは加速度情報を用いて外乱オブザーバフレキシブルアームの制御方法として、アーム根元の角度情報と、リンク先端の加速度情報を用いて外乱オブザーバ²⁾に相当する制御を行うActive Force Control³⁾ (AFC)をフレキシブルアームの制御に適用し、アーム根元角度とリンク先端の加速度情報を用いて端点制御を行ったときのアームの挙動をシミュレーションで調べている^{4,5)}。また、1リンクフレキシブルアームのシミュレーションと実験を行い、フレキシブルアームの制御にAFCが有効であることを明らかにしている⁶⁾。しかしながら1リンクでは、先端の位置変化を記録できなかったため、ビデオでしかその有効性を示せなかった。

本研究では、1リンクフレキシブルアームの制御実験を発展させ、関節を増やした2リンクフレキシブルアームのAFCによる端点制御に関するシミュレーションと制御実験を行い、加速度情報を用いたAFCの有効性を検討した。

2. シミュレーション

2.1 2リンクフレキシブルアームの運動方程式

フレキシブルアームの運動方程式は、Asada⁷⁾のモデルを用いた。この誘導にはラグランジュ法を採用している。ラグランジュ法は、リンク全体の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーからラグランジュ関数を求め、ラグランジュ方程式に代入することにより機械的に運動方程式が導かれる方法であるが、フレキシブルアームの場合、アームがたわむことによって、弾性エネルギーが蓄積されるのでこのひずみエネルギーの考慮が必要となる。

n 本のリンクからなるフレキシブルアームの全運動エネルギーは、

$$T = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \int_0^{L_k} \rho_k A_k \dot{R}_k^T \dot{R}_k dx \quad (1)$$

ただし、 \dot{R}_k はFig.1で示される k 番目のリンクの任意点の速度ベクトル、 ρ_k は k 番目のリンクに使用されている材料の密度、 A_k は k 番目のリンクの面積である。

また、リンクのひずみによる弾性エネルギーを考慮して、ポテンシャルエネルギーは次の式で計算される。

$$U = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \int_0^{L_k} E_k I_k \left(\frac{\partial^2 v_k}{\partial x_k^2} \right)^2 dx_k \quad (2)$$

ただし、 $E_k I_k$ は k 番目のリンクの曲げこわさである。また、 v_k はアームの変形量であり、リッツ関

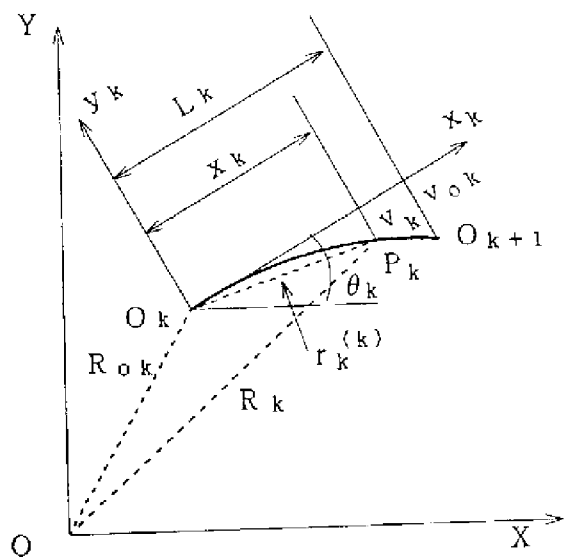


Fig. 1 k 番目のリンク

数を用いて次式で表される。

$$v_k = \sum_{p=1}^{m_k} \phi_{kp} q_{kp} \quad (3)$$

ただし、 p は振動モードの次数であり、 ϕ_{kp} 、 q_{kp} はそれぞれ各モードの変位量、時間関数である。

ラグランジュ関数 L は次式で与えられる。

$$L(\theta_i, \dot{\theta}_i) = T - U \quad (4)$$

これより、一般化座標を関節変位 θ_i にとり、 θ_i に対応する一般化力を関節駆動力 τ_i とすると、ラグ

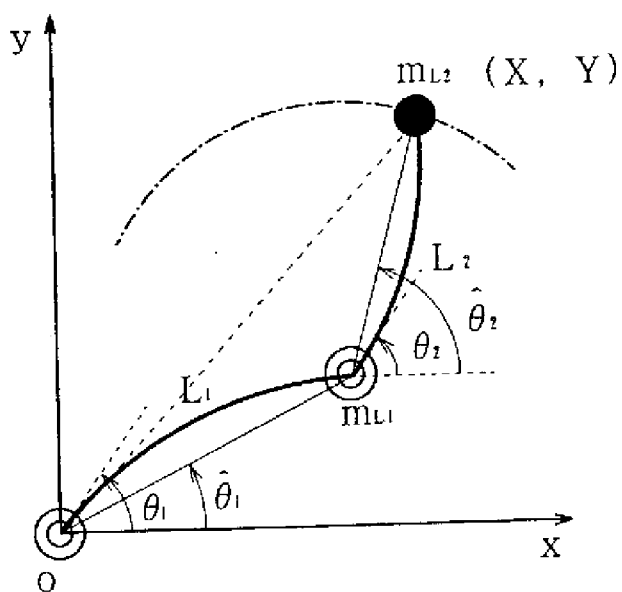


Fig. 2 VLCS座標系

ランジュ方程式は次のようになる。

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (5)$$

シミュレーションではアームを単純支持はりとして扱い、Fig.2に示すようなフレキシブルアームの始点と端点を結んだ仮想の剛体アームを想定して、仮想アームがX軸とのなす角度を仮想リンク角度 $\hat{\theta}$ とし、この座標系に基づき運動方程式を導いている。Asadaはこの座標系をのV L C S [Virtual Link Coordinate System] と名付けている。ここでは、結果のみを示す。

$$\hat{m}_{ip} \ddot{\hat{q}}_{ip} + \hat{c}_{ip} \dot{\hat{q}}_{ip} + \hat{k}_{ip} p \hat{q}_{ip} - \sum_{j=1}^2 \hat{T}_{jir} \ddot{\hat{\theta}}_j \cos \hat{\theta}_{ij} = \hat{f}_{ip} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^2 X_{ij} \ddot{\hat{\theta}}_j \cos \hat{\theta}_{ij} - \sum_{j=1}^2 \sum_{r=1}^3 \hat{T}_{jir} \dot{\hat{q}}_{jr} \cos \hat{\theta}_{ij} = \hat{\tau}_{\theta i} \quad (7)$$

ただし、

$$\hat{f}_{1p} = (-1)^{p+1} p \pi \tau_1 / L_1 + (-1)^{p+1} p \pi \tau_2 / L_1 \quad (8)$$

$$\hat{f}_{2p} = (-1)^{p+1} p \pi \tau_2 / L_2 (p = 1, 2, 3) \quad (9)$$

$$\hat{\tau}_{\theta 1} = \tau_1 - \tau_2 \quad (10)$$

$$\hat{\tau}_{\theta 2} = \tau_2 \quad (11)$$

$$\hat{m}_{ip} = \rho_i A_i L_i / 2 \quad (12)$$

$$\hat{k}_{ip} = E_i I_i (p \pi)^4 / L_i^3 / 2 \quad (13)$$

$$\hat{c}_{ip} = 2 \mu_i \sqrt{\hat{m}_{ip} \hat{k}_{ip}} \quad (14)$$

$$\hat{T}_{ijp} = \begin{cases} 0 & \text{for } i < j \\ (-1)^{p+1} \rho_i A_i L_i^2 / p \pi & \text{for } i = j \\ \{1 - (-1)^p\} \rho_i A_i L_i L_j / p \pi & \text{for } i > j \end{cases} \quad (15)$$

$$X_{11} = (\rho_1 A_1 L_1 / 3 + \rho_2 A_2 L_2 + m_{L1} + m_{L2}) L_1^2 \quad (16)$$

$$X_{22} = (\rho_2 A_2 L_2 / 3 + m_{L2}) L_2^2 \quad (17)$$

$$X_{12} = X_{21} = (\rho_1 A_1 L_1 / 2 + \rho_2 A_2 L_2 + m_{L1} + m_{L2}) L_1 L_2 \quad (18)$$

である。ただし式中の記号はそれぞれ次の値を表している。

m : アームの質量 q : アームのたわみ量

τ : 関節駆動力 $\hat{\theta}$: 仮想リンク角度

i : リンク数 p : 振動のモード

L : アームの長さ ρ : 密度

A : 断面積 μ : 減衰比

EI : 曲げこわさ m_L : 先端の重りの質量

上式でリンクの数を2、振動のモード数を3とした場合、2リンクフレキシブルアームの運動方程式は、(6)式から6つ、(7)式から2つ、合計8つとなる。これらの運動方程式に関節駆動力の値を与えることでアームの端点角度 $\hat{\theta}$ が計算される。また、求められた端点角度 $\hat{\theta}$ にたわみ量 q を加えることで、実際にエンコーダで検出されるモータ角度 θ を求めている。なお本モデルは、仮想の剛体アームの長さが常に一定であるという仮定がなされている。このため、本来はフレキシブルアームにたわみが発生すると仮想リンクの長さは短くならなければならないが、仮想リンクの長さに変化はなく、常に一定とした扱いをしている。これによりアームがたわんでいるときはゴムのようにフレキシブルアームが伸び、仮想リンクの長さは常に $L(m)$ である、という仮定のもとにシミュレーションをしていることになる。

2.2 軌道計画

2.2.1 作業座標での軌道計画

2リンクフレキシブルアームにどのような運動をさせるか、その軌道計画にはAFCの場合、軌道だけでなく指令値に速度、加速度も必要である。ここでは作業座標すなわちx、y座標およびそれらの速度、加速度をFig.3のように与えた。

初めに一定加速度で直線運動を行い、次に一定周速度での円運動を行わせた。端点の円運動時の周速度は、直線運動での最終値の速度を保持するようにした。時間と位置、速度、加速度の関係をFig.4に示す。

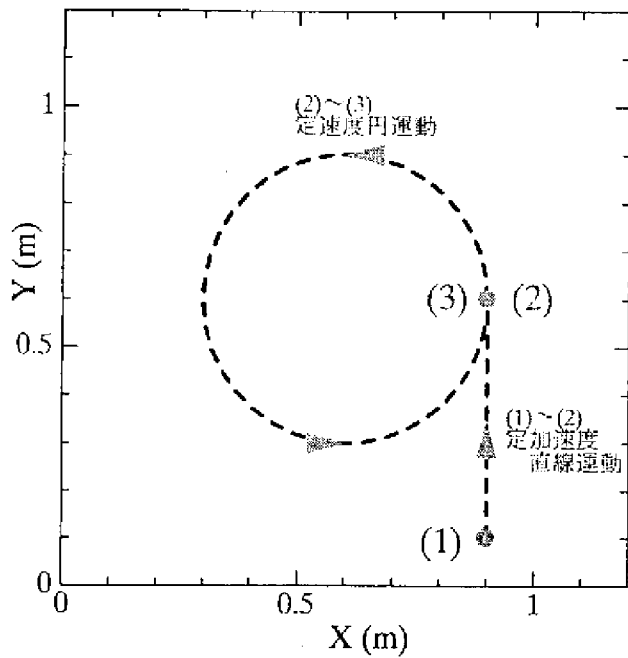


Fig. 3 作業座標における目標軌跡

2.2.2 作業座標から関節座標への変換

シミュレーションでは仮想リンク角度 $\hat{\theta}$ を端点角度として与えている。目標の端点角度は次の式で計算される。

$$\hat{\theta}_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 - L_2^2 + X^2 + Y^2}{2L_1\sqrt{x^2 + Y^2}}\right) \quad (19)$$

$$\hat{\theta}_2 = \pi - \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - X^2 - Y^2}{2L_1L_2}\right) \quad (20)$$

上式から $\hat{\theta}$ は作業座標(X,Y)の値を与えることで計算されていることが分かる。これはアームの変位を示す値が、作業座標から関節座標へと変換されていることも示す。この目標角度を時間微分することで、目標角速度、角加速度を求めている。次にFig.5に作業座標から求めた関節座標での角加速度、角速度、角度の目標値を示す。実線がlink1の値、波線がlink2を表している。

角加速度の変化を見ると、5秒後にステップ状の急激な変化が見られる。5秒後は直線運動から円運動に移行する時である。作業座標ではアームの運動は、一定加速度の直線運動から一定速度の円運動へ移行しており、その加速度も滑らかに変化しているように見える。しかし、関節座標では非常に複雑なまた大きな角加速度変化が生じてい

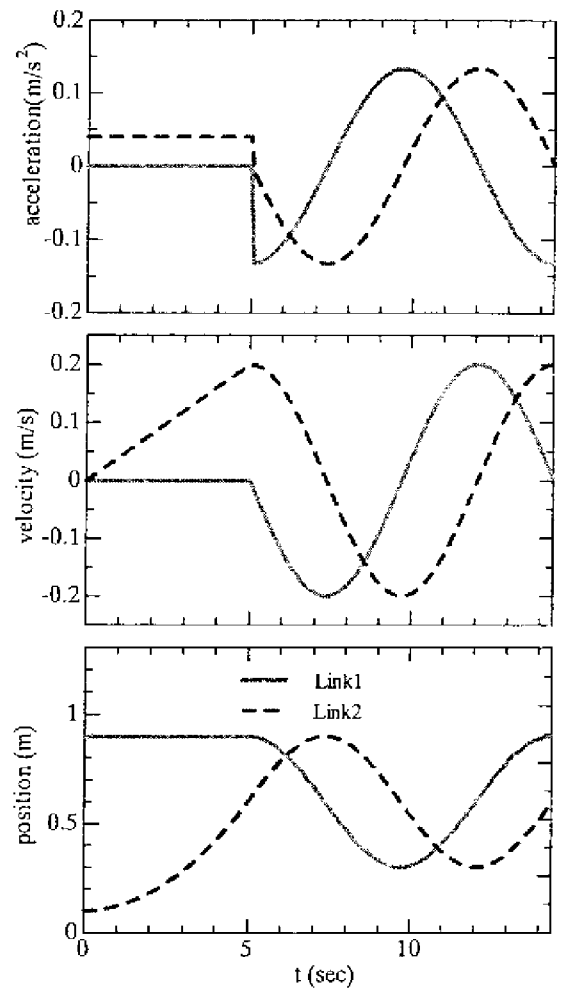


Fig. 4 作業座標における目標軌道、速度、加速度の時間変化

ることが分かる。AFCでは、角加速度がフィードフォワード入力として加えられるので、急激な角加速度入力は系を振動的にすることが予想できる。したがって、AFCの場合には角加速度入力急激に変化しないような与え方に工夫が必要である。

2.3 急激な角加速度入力を与える影響

急激な角加速度入力により軌跡の変化とアームのたわみがどの程度生じるかを計算した例をFig.6に示す。実線で描いているのが、目標軌道で、波線で描いているのがシミュレーションにおいて実際にリンク先端が描いた軌跡である。ただしこの場合軌跡の乱れを強調する意味で、周速度を速くし、円の軌跡に明確な歪みを生じさせた。直線運

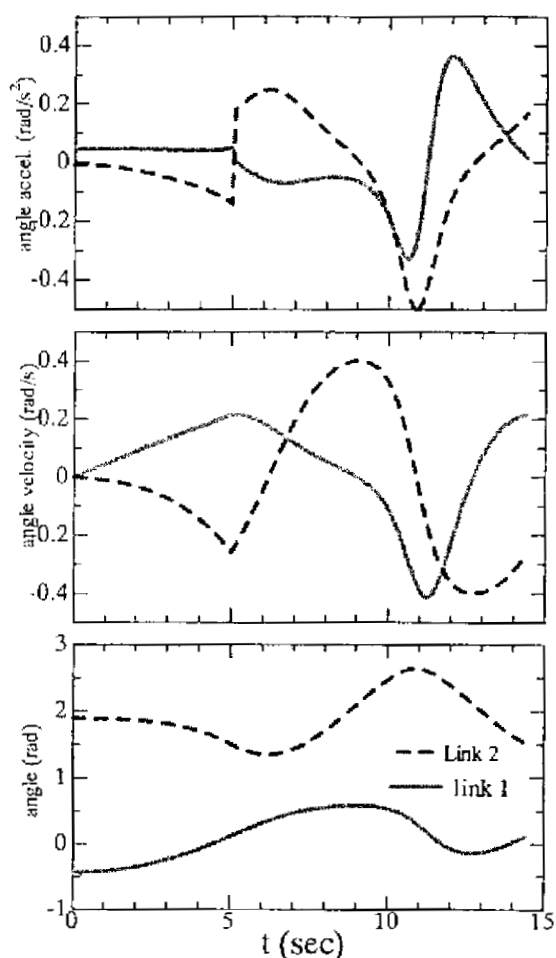


Fig. 5 関節座標における目標軌道、速度、加速度の時間変化

動から円運動へと移行してからの軌跡が目標軌道から外れていることが分かる。サンプリング時間を1 msecとしてシミュレーションしたが、周速度を速くし過ぎたため目標軌道からはずれてしまっている。またアームのひずみも非常に大きいことがわかる。

3. 実験

3.1 実験装置

実験装置の概略をFig.7に示す。既に報告した1リンクフレキシブルアームの先端にモータを新しく取り付け2リンクとした。第一モータ軸から第二モータ軸までの距離は930mm、第二モータ軸から加速度計までの距離は500mmとした。アームはアルミ板を用い、幅50mm、厚さ3mmとなってい

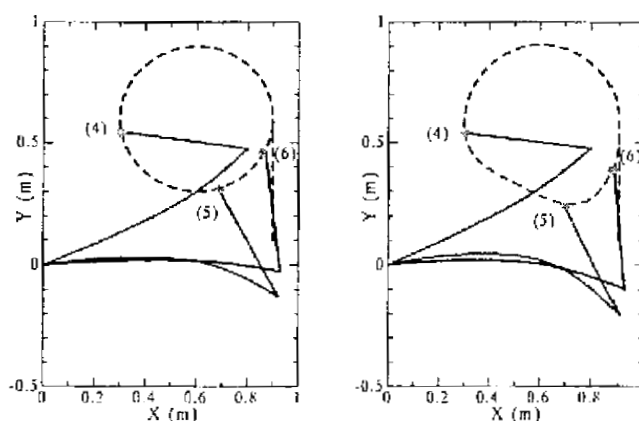


Fig. 6 軌跡の比較

る。第2アーム取り付け部の質量は加速度計含んで約2.1kg、第2アーム先端には加速度計含めて負荷質量約0.3kgが取り付けられている。モータの減速機にはハーモニックギアを用いているので、アームだけでなく、減速機もフレキシビリティを有している非常に柔軟な構造となっている。この制御に用いたAFCの構成ブロック図をFig.8に示す。本実験では先端の加速度が計測されているが先端の位置は計測できない。このため、位置のフィードバックにはモータ角度を用いており、セミクローズドタイプとなっている。

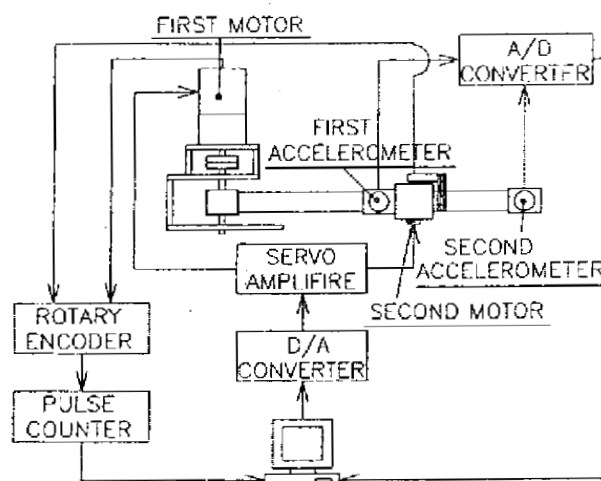


Fig. 7 実験装置略図

3.2 実験方法

実験はシミュレーションと同様に等加速度直線運動を5秒間、直線運動終了時速度で一定周速度

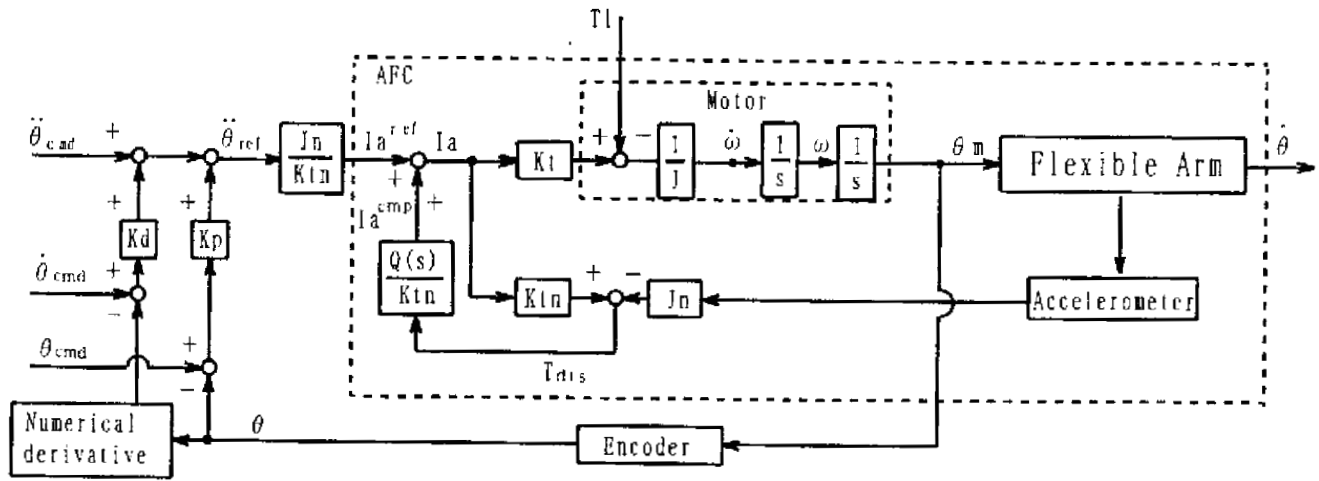


Fig. 8 AFC構成ブロック図

円運動を40秒間行った。アームの下方に板を置き、第2アーム先端にペンを取り付けて先端の軌跡を描けるようにした。第2アームは短く、先端に取り付けた重りの質量も軽いので比較的剛性が高くなり、アームの歪みは少なく軌跡の歪みに与える影響は少ない。よって実験では第2アームのゲインを $k_p = 150, k_d = 60, J_n = 0.06$ の一定値に固定し、第1アームのゲインを様々に変えて軌跡を描かせた。またアームの下に板を置かずに先端を自由端として軌跡を描かる実験も行ったが、板がない場合にはPD制御、AFC制御共にアームが上下に振動してしまった。特に第2アームの姿勢により1アームに大きなモーメントがかかる姿勢では、アームのねじれも生じてしまった。シミュレーションはもちろんのこと、実験でもアームを重力に対して垂直な水平面内で運動させることを考えていたので、上下の振動制御を行っていない。したがって、アームの上下の振動を完全には消去させることは出来なかった。

3.3 実験結果

3.3.1 PD制御法による実験結果

k_p が高いほど k_d は低いほど目標どおりの円を描いていた。PD制御法では最も予定通りの円を描いた $k_p=500, k_d=20$ の時の先端軌跡をFig.9に示す。また、この時の目標角度とアームの根元角度

との比較をFig.10に示す。これらのグラフからPD制御ではアームの根元はしっかりと制御されて目標値と完全に一致しているが、アーム先端の円軌道に歪みが生じていることがわかる。

すなわちフレキシブルアームの軌道制御に関しては、先端の情報が必要であることが理解できる。その他のゲインの組み合わせでも数々実験を行った($k_p=500$ から100、 $k_d=80$ から20までの範囲)が、 k_p が低いと全く円を描こうとせず、むしろ菱形などに近い形を描いていた。また、PD制御のみでは下に板を敷かない場合、第1アームのたわみとねじれがひどく、上下の激しい振動も抑えることができなかった。

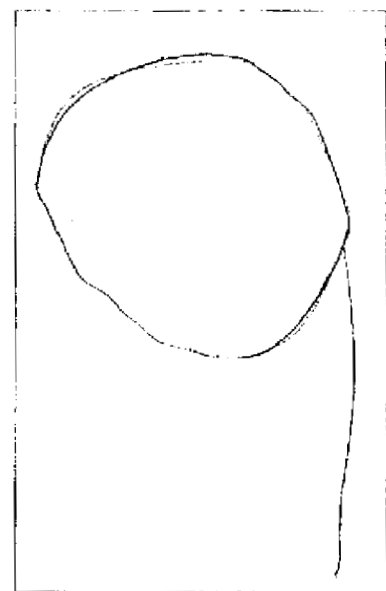


Fig. 9 PD制御時の先端軌跡

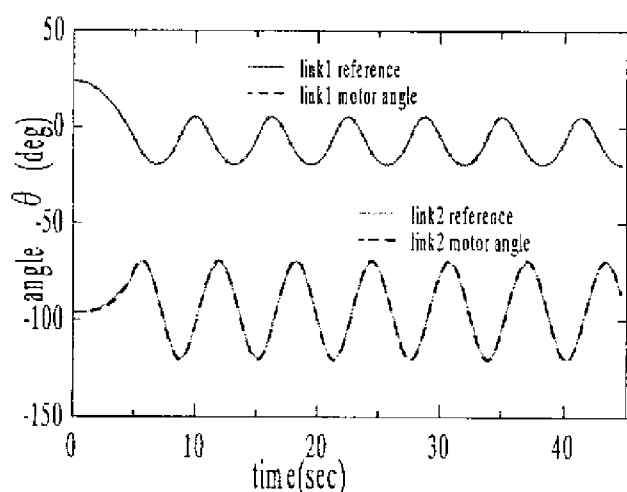


Fig. 10 PD制御時の目標角度とモータ角度

3.3.2 AFC制御法による実験結果

$k_p = 300, k_d = 80, J_n = 0.125$ の条件での、各リンクの先端の加速度計の時間的变化、アーム先端の目標角度と実際に動いたモータ角度、さらには先端の軌跡をそれぞれFig.11、Fig.12、Fig.13に示す。AFCでは外乱の推定時にノイズが乗りやすいため、一般には高次のフィルタ $Q(s)$ を用いて高周波を取り除くことが行われているが、今回はフィルタを使用せずに実験した。このため、円軌道を描いているときは目標とする角加速度の値は正弦波状であるが、加速度計から得られたFig.11の波形は、高周波のノイズが大きくでて、鋸状の形となっている。しかしながら、Fig.12を見ると目標角度と実際に動いたモータ角度は、リンク1、2ともほとんど一致しているのが分かる。PD制御と同様にモータ角度は目標通り制御されている。Fig.13のアーム先端の軌跡を見ると、PD制御の場合の軌跡とは異なり、かなり目標の円軌道に近くなっている。しかしながら円が歪んでおり、完全にアーム先端が目標通りには動いていない。このように、AFC制御では、円運動にはいるとPD制御時よりは目標どおりの円を描いているが、完全にアーム先端が制御されているわけではない。

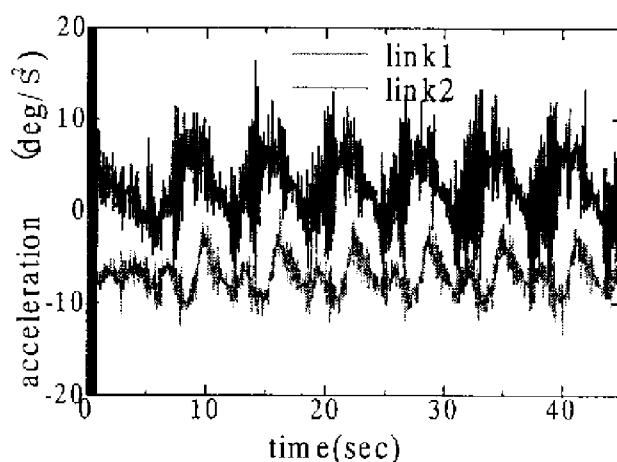


Fig. 11 AFC制御時の角加速度応答

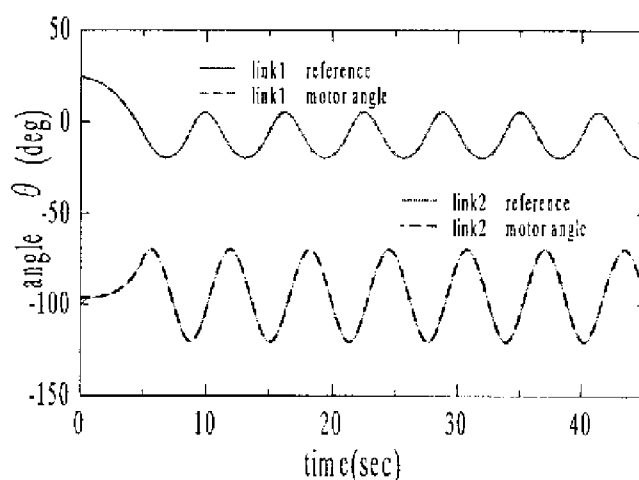


Fig. 12 AFC制御時の目標角度とモータ角度

3.4 考察

シミュレーションではアームは目標どおり完全な軌道を描くことができた。しかしながら実験ではPD制御、AFC制御共にアームの根元角度つまりモータ角度は目標どおり制御されているが、アーム先端の制御においてはAFC制御時の方が良好な結果を表している。しかしながらAFC制御でも完全な円軌道は得られていない。目標に近い円だが完全な軌道を描いていなかった。この原因としては板から受ける摩擦力や速度変動の影響を大きく受けているためだと思われる。アームがたわんでいても先端が摩擦力などにより動かない場合がある。これによりアーム先端の軌道が大きくずれても加速度計には影響しないので、モータ

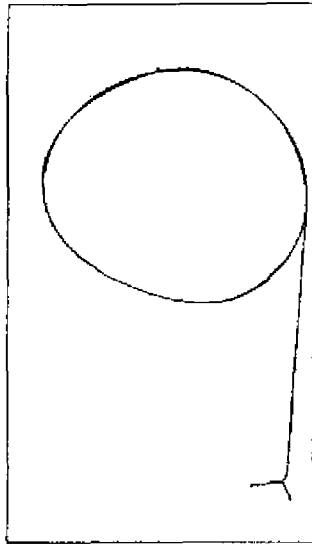


Fig. 13 AFC制御時の先端軌跡

がアームのたわみを無くすような働きをしない。他の原因としては動作モードとゲインが対応していないためだと思われる。第2アームの角度により第1モータにかかる慣性モーメントが変化しますが、実験では慣性モーメントを一定値にして行った。よって、完全に先端を制御するには動作モードに合わせてゲインを時々刻々調整する必要があると思われる。

AFC制御は初期位置から直線運動を始めるときに一瞬大きく振動しているのが分かる。これはシミュレーションでも述べたが、AFCではスタート時に急激な変化のステップ状の角加速度が入力されるためである。この振動を取り除くためには直線運動の初期は角加速度を徐々に増加させた後、一定加速度値にする必要がある。

シミュレーションと実験結果は定性的な比較しかできていない。これはシミュレーションはアーム先端の作業座標を入力し、VLC Sによりアームのたわみを考慮して第1、第2モータの関節座標を求めているのに対して、実験ではアームのたわみは検出できないので先端の加速度計を用いており、位置検出方法が異なるためである。また、シミュレーションでは、小さなたわみを仮定しており、大きなたわみが発生したときには適用できない。VLC Sによる近似計算をより厳密なものに

改める必要がある。

4. 結言

各リンク先端の加速度情報を利用して外乱を推定するAFC法が多リンクのフレキシブルアームの制御にも有効であることをシミュレーションと実験により立証した。実験ではPD制御、AFC制御共にモータの制御は目標どおり行っていたが、アーム先端の軌道制御においてはAFC制御でなければ振動を止めることができず、また円軌道に近い軌跡を得ることができなかった。

2リンクの実験は始まったばかりであり、

- 1) 軌道生成時の加速度の与え方の工夫
- 2) ゲイン k_p, k_d 、慣性モーメント I_n の決定法
- 3) 厳密な動特性モデルの誘導
- 4) アームの上下方向の振動の低減

など、解決しなければならない課題が残っている。また、より正確な制御を行うためには、動作モードにあわせて k_p, k_d などのゲインを適応的に調整する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 特集:フレキシブル・マニピュレータ, 日本ロボット学会誌, 12巻2号, 1/62(1994).
- 2) 大西公平:外乱オブザーバによるロボスタ・モーションコントロール, 日本ロボット学会誌, 11巻, 4号, 486/493(1993).
- 3) Hewit, J.R., Burdess, J.S.: Fazy dynamic decoupled control for robotics using active force control, Mechanism and Machine Theory.
- 4) J.R.Hewit, J.R.Morris, K.Sato, F.Ackermann: Active Force Control of a Flexible Manipulator by Distal Feedback, Mechanism and Machine Theory, Vol.32, No.5, 583/596(1997).
- 5) 佐藤勝俊, J.R.Hewit: AFCによるフレキシブルアームの制御, 八戸高専紀要, 第32号, 9/15(1997).
- 6) 佐藤勝俊: AFCを用いた1リンクフレキシブルアームの先端位置制御, 計測自動制御学会東北支部35周年記念学術講演会予稿集, 71/72(1999).
- 7) H.Asada, Z.D.Ma: Inverse Dynamics of Flexible Robot Arms: Modeling and Computation for Trajectory Control, Trans.ASME, J. of DSMC, Vol.122, 177/185(1990).