

リンク先端加速度を用いたフレキシブルアームの軌道制御

Trajectory Control of Flexible Arm by Using Link Tip Accelerations

○佐藤 勝俊*, 鈴木 求*

○Katsutoshi Sato*, Motomu Suzuki*

*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), 軌道制御 (trajectory 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

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、これまでに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の場合、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に振れが生じてしまい、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。またこの場合、アクチュエータとセンサのノンコロケーションとなり、さらには制御対象が分布定数系となるのでスビルオーバーの問題が生じるなど、フレキシブルアームの制御が難しいとされている。

筆者らは、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⁾ (以下A

FCと略す)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⁾。さらに2リンクの実験装置を作り、PD制御とAFC制御を試みた⁷⁾。しかしながら目標軌道とはかけ離れたものしか得られなかった。

本研究では、前報と同様の制御実験とシミュレーションにおいて、加速度の与え方や制御パラメータの影響を調べることで、より正確な軌道を得るための条件について検討し、他リンクの場合でもリンク先端の加速度情報を用いたAFCが有効であるかどうか検討した。

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、Asada⁸⁾のモデルを用いた。

Asadaは、アームを単純支持はりとして扱い、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VLC S [Virtual Link Coordinate System]に基づき運動方程式を導いている。ここでは、結果のみを示す。

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

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

ただし、

$$\hat{f}_{1p} = (-1)^{p+1} p \pi / L_1 (\tau_1 + \tau_2) \quad (3)$$

$$\hat{f}_{2p} = (-1)^{p+1} p \pi \tau_2 / L_2 (p = 1, 2, 3) \quad (4)$$

$$\hat{\tau}_{\theta 1} = \tau_1 - \tau_2 \quad (5)$$

$$(6)$$

であり、

$$\hat{m}_{ip} = \rho_i A_i L_i / 2 \quad (7)$$

$$\hat{k}_{ip} = E_i I_i (p \pi)^4 / L_i^3 / 2 \quad (8)$$

$$\hat{c}_{ip} = 2 \mu_i \sqrt{\hat{m}_{ip} \hat{k}_{ip}} \quad (9)$$

$$T_{ijp} = \begin{cases} 0 & \text{for } i < j \\ (-1)^{p+1} \rho_i A_i L_i^2 / p \pi & \text{for } i = j \\ \{1 - (-1)^p\} \rho_i A_i L_i L_j / p \pi & \text{for } i > j \end{cases} \quad (10)$$

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

$$X_{22} = (\rho_2 A_2 L_2 / 3 + m_{L2}) L_2^2 \quad (12)$$

$$X_{12} = X_{21} = (\rho_1 A_1 L_1 / 2 + \rho_2 A_2 L_2 + m_{L1} + m_{L2}) L_1 L_2 \quad (13)$$

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_r	: 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、(1)式から6つ、(2)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 τ 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 が求まる。逆に目標とする軌道およびその速度、加速度を与えることによって、その軌道を実現するためのモータ駆動力 τ_1 、 τ_2 が計算されるいわゆる逆動学が得られる。

2.2 AFC制御

目標軌道を制御する上で、PD制御法がよく用いられている。しかしリンク間の干渉やコリオリ力、遠心力（以下内部干渉力）の影響が大きいと十分な軌道精度が得られない。そこでロボットの動特性を考慮した制御法の一つに計算トルク制御が挙げられるが、計算量が多くパラメータ変動にも弱いため実現は困難であった。そこで、Hewitt³⁾は、座標をX、Y軸上で表した作業座標系を用いて内部干渉力などの影響を消し、計算量も少ないAFC（加速度制御法）を提案した。AFCの全体の構成ブロック図を??に示す。軌道誤差を補正するために、外側にPDのループが設けらる。後述の実験では、加速度としてモータの角度から算出した値を用いた場合と先端の加速度を用いた場合について比較実験した。

3. 実験

3.1 実験装置

実験装置の構成をFig.4に示す。第1モータから第2モータまでの軸間距離は700mm, 第2モータ軸からアーム先端までの距離は500mmとした。アームには幅50mm, 厚さ3mmの軽量で薄板のアルミ板を用いている。第1アームの先端には加速度計を含めて2.1kg, 第2アームの先端には加速度計を含めて0.3kgの荷荷質量が取り付けられている。第1, 第2アームともDCモータによって駆動される。アームに供給される最大指令電圧はプログラムによって3Vを超えないように制限した。モータの回転角度はロータリーエンコーダで検出し, パルス信号を24ビットアップ/ダウンカウンタボードに取り込み, 位置情報としてPCに与えた。アーム先端に取り付けられた加速度計の信号を取り込むインターフェースには, 12ビットA/Dコンバータを使用している。開発言語にはTURBO C++を使用し, 制御則に基づいてデータを処理し, デジタル信号を出力する。処理されたデジタル信号はD/Aコンバータを介し, アナログ指令電圧としてPWMサーボコントローラに出力される。指令電圧は第1アーム用コントロールユニット, PWMサーボコントローラへ入力され, 指令電圧に相当する電流に変換されモータへ供給される。これによりモータが駆動し, アームの位置決め制御が行われる。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。前報では加速度はモータの角度を2回時間微分した値を用いていた。本実験では先端の加速度を計測してAFCを構成した。この場合でも先端の位置は計測できないので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。

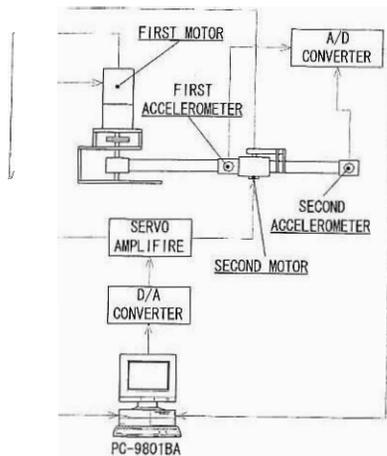


Fig. 4 実験装置略図

3.2 実験方法

急激な加速度変化を加えないように1秒間の加速度上昇時間を設け,その後,等加速度直線運動約5秒,一定周速度円運動24秒の総時間約30秒の実験を行なった。モータの角度を数値微分して求めた角加速度を用いたAFC(以下根元AFCと略す)と先端に取り付けた加速度計の情報を用いたAFC(以下先端AFCと略す)の2つの場合について実験した。アームの下方に板を置き,第2アーム先端にペンを取りつけて先端の軌跡を描けるようにした。またアームの下に板を置かず先端を自由端として軌跡を描かる実験も行った。

3.3 実験結果

3.3.1 初期振れの解消

前報では実験開始直後にアームが大きく振れながら移動を開始していた。この原因はアームが初期位置に移動した後に印加電圧等の値を初期化していたためのものだった。入力電流の計算では2サンプリング時間前までの加速度の値を用いて行なわれる。そのため各値を初期化されることに

より実験開始直後の入力電流の変位が非常に大きくなることがわかった。そこで初期化の命令を無くすることで初期位置までの移動に用いられた値が前の値として利用したところ変化量が少なくなり、アームの初期振れを解消できた。Fig.5に改良前の軌跡を、またFig.6にプログラム改良後の軌跡を示す。

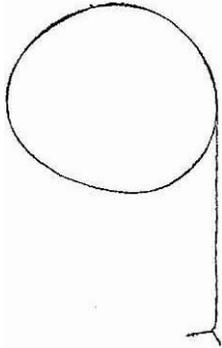


Fig. 5 改良前の軌跡

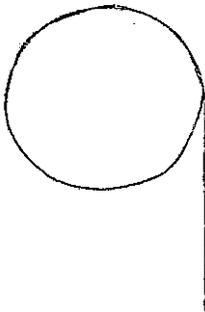


Fig. 6 改良後の軌跡

3.3.2 根元AFCによる実験結果

根元AFCではゲインは $KP_1 = 300, KD_1 = 80, Jm_1 = 0.125, KP_2 = 150, KD_2 = 60, Jm_2 = 0.06$ で行なった。KPが低いと縦に潰れた楕円を描いていた。Fig.7に根元AFCによる制御を行ったときの軌

跡を示す。この制御方法では、根元の角加速度を用いているため先端の情報は何もない状態である。つまりアーム先端の変形を無視した状態になっているのでアームが振れても対処しようとしていない。そのため開始位置から初期位置までの移動、直線運動から円運動に変わった時にアームが振れているのだが何もしていないので軌跡が曲がっている。Fig.8に角度応答を示す。目標角度に対して

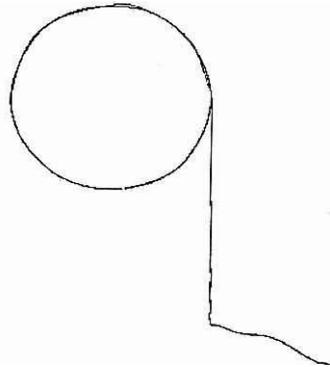


Fig. 7 根元AFCの軌跡

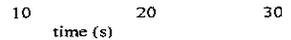


Fig. 8 根元AFCのときの角度変化

ほぼ同じ応答をしている。Fig.9に角速度応答を示す。リンク1は初期速度の変位が遅れた分の差を保ち、同じ様な応答している。リンク2は始めは目標に近い応答をしているが、時間が経過するにつれて誤差が累積しているためかずれが生じてきている。Fig.10にリンク2の加速度応答を示す。直線運動中の振れは少ないが、円運動に変わった途端

にアームの振れが大きくなる。そして時間が経過するにつれて振れが大きくなっている。リンク2の振れが大きいのはリンク1の振れも加わり振動が大きくなるものと思われる。下に板を敷かない場合は上下の振動により横方向の振動が助長されより激しく振動していた。

Fig. 9 根元AFCのときの角速度変化

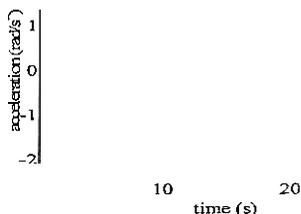


Fig. 10 根元AFCのときのリンク2の加速度変化

3.3.3 先端AFCによる実験結果

先端AFCでは $KP_1 = 300, KD_1 = 80, Jn_1 = 2.00, KP_2 = 170, KD_2 = 60, Jn_2 = 3.50$ というゲインで実験を行なった。制御中はアームの先端が細かく振動していた。外乱推定後にフィルタを設けていないため、加速度計のノイズがそのまま現れてしまうためではないかと思われる。Fig.11に先端AFC軌跡を示す。初期位置への移動中根元AFC軌跡に比べて軌跡が曲がっていない。確実に先端の

振れを抑えることが出来ている。直線運動では軌跡がふらついている。振れを抑えるために与えている加速度の誤差を累積してしまっているのではないだろうか。円軌跡では直線運動から変わった後も円軌道からそれることなく軌跡が描けている。

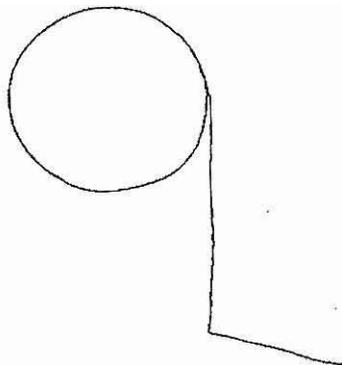


Fig. 11 先端AFCの軌跡

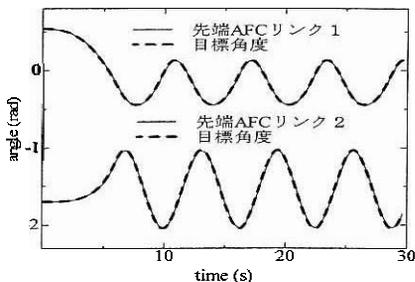


Fig. 12 先端AFCのときの角度変化

Fig.12に角度応答を示す。根元AFCと同じく目標角度とほぼ同じ波形を示している。Fig.13に角速度応答を示す。リンク1は目標に対して同じ様な応答をしているが、リンク2は目標に近い応答をしたり、ずれが生じてみたりと多少不規則な応答を繰り返している。Fig.14, Fig.15にリンク1, リンク2の加速度応答を示す。根元AFCと比べると直線運動中から大きく振れている。そして円運動に変わると振れが一層大きくなっている。しかし、時間

が経過すると共に振れを抑えることが出来ている。
特にリンク1は急激に振れが抑えられている。

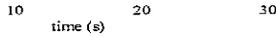


Fig. 13 先端AFCのときの角速度変化

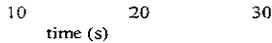


Fig. 14 先端AFCのときのリンク1の加速度変化

下に板を敷かない場合、根元AFCと同様に振れは大きくなるが、振動の減衰効果が生じているため、根元AFCよりはるかに振れは少なかった。

3.4 考察

初期位置までの移動ではPD制御からAFC制御に変更したことにより、軌道がより直線的になった。さらに先端の加速度を用いることでより良いものとなった。根元AFC、先端AFC共に角度応答はどちらも同じ様な応答をしている。しかし、アームの振れに対してはその差が明確に現れており、先端AFC制御の方が振れを抑えることが出来

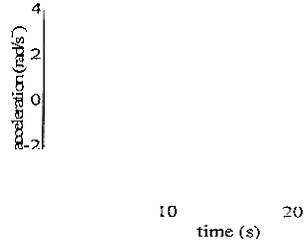


Fig. 15 先端AFCのときのリンク2の加速度変化

ていた。しかし、完全に振れを抑える事が出来ていない。そのため細かな振動がずっと生じていた。さらには直線運動から円運動に変わった時に振れが大きくなっている。これはフィルタがないことや加速度算出方法が正確でない可能性があるためと思われる。すなわち、リンク2で検出される加速度には、リンク1の運動で生じた加速度の影響が含まれるが、この大きさはアームの姿勢によって異なる。本実験では、アームの姿勢による影響を簡単な近似により考慮したが、今後より詳細な検討が必要である。アーム長さが短いため軌跡の比較では両者に顕著な差が見られなかった。アームを長くして振動が起こりやすい状況で実験をおこなうことで違いが大きく出てくるものと思われる。

ペンを持たない状態、持った状態では軌跡がわずかに違う。内山⁹⁾が言うジョイントアクチュエータによっては制振できない振動モードの存在、重力などの外力が加わり、アームが変形して先端に位置決め誤差が生じることが影響していると考えられる。しかし、今回の実験ではそれらの影響によって明白な差が出ることはなかった。アームが短く剛体に近いことも関係していると思うが、現状では先端AFCによる外乱除去効果が良い方向に機能していると考えられる。

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明らかにした。軌道制御の実験では、各リンクの根元部分の応答については入力に完全に追従していたが、先端の制御に関しては、モータの角加速度を用いたAFCより、先端の加速度を用いたAFCの方が目標に近い軌道が得られていた。また前報の実験軌跡より良い結果を得ることができた。しかし、完全な直線軌道や真円の軌道までには至っておらず各リンクの先端を完全に制御しているとはいえない。また各リンクの先端には細かい振動が絶えず生じていた。この振動を除去するには外乱推定後にフィルタを加える必要がある。また、リンク2の加速度の算出を今回は簡易的な式を用いて計算したが、より精密な加速度を計算する式を用いて制御を行なった場合の有効性を検討する必要がある。

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バスト・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 Flexiible 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) 佐藤勝俊: AFCを用いた2リンクフレキシブルアームの位置制御, 計測自動制御学会東北支部第188回研究集会, (2000), pp.1-8..
- 8) H.Asada, Z.D.Ma: Inverse Dynamics of Flexible Robot Arms: Modeling and Computation for Tra-

jectory Control, Trans.ASME, J. of DSMC, Vol.122, 177/185(1990).

- 9) 内山勝: フレキシブルアームの可補償性, 日本ロボット学会誌, 6巻5号, (1988), pp91-94.