

トルク制御によるフレキシブルアームの端点軌道制御

Tip Trajectory Control of Flexible Arm by Torque Control

齊藤斐*, 黒沢忠輝*, 佐藤勝俊*

Akira Saito*, Tadateru Kurosawa*, Katutoshi Sato*

*八戸高専

*Hachinohe National College of Technology,

キーワード：トルク制御(torque control), フレキシブルアーム(flexible arm), 外乱オブザーバ(disturbance observer), AFC(Active Force Control), 軌道制御(trajjectory control)

連絡先：〒039-1192 青森県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

ロボットは剛体リンクが用いられているが介護ロボットの場合, 人に対する安全性の面からシステムに柔らかさを導入することが要求される¹⁾. 柔らかさを実現するにはソフト的にアクティブコンプライアンスを導入する方法もあるが, ハード的にアームに弾性素材を利用したり, ジョイントにハーモニックギアを利用することにより柔らかさを実現することができる. しかし柔軟性のため, たわみや弾性振動が生じやすく位置制御の精度も低い. このようなフレキシブルアームに関する研究は, これまでにも多くの研究がなされている²⁾. そこで我々も2リンクを対象に, フレキシブルアームのたわみの影響を外乱とみなし, これらの外乱を除去するいわゆる外乱オブザーバ³⁾に相当するトルク制御方法を検討してきた^{4,5)}. 本来この制御対象はセミクロ

ーズドループとなるが, アーム先端の加速度情報を用いて, クローズドループ化するAFC⁶⁾ (Active Force Control)制御を採用している. 今回はシミュレーションにより各パラメータの影響を調べ, 2リンクの制御実験を行った.

2. フレキシブルアームとトルク制御

2.1 セミクローズドループ

本研究において, 最終的に制御したいのはモータ角ではなく, アーム先端の位置である. アームがフレキシビリティを持つ場合, 図1のようにモータ角とアームの先端角度が一致しないセミクローズドループとなってしまう. このためアーム先端の位置を制御する場合, アームの先端情報を知り, 何らかの補正を行う必要がある.

そこで本研究では, セミクローズドループをクルーズドループ化するため, アームの先

端情報として加速度を検出し，それによって外乱を除去しようと考えている．

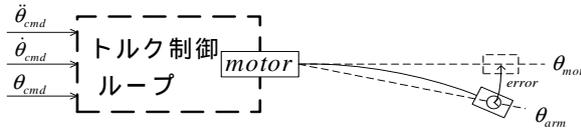


図1 セミクローズドループ

2.2 外乱オブザーバとAFC

外乱を除去するために，外乱トルクを算出する．アーム軸におけるモータの運動方程式を考えると，

$$J \frac{d\omega}{dt} + T_L = T_m \quad (2.2.1)$$

T_m : モータの発生トルク[Nm]

T_L : 負荷トルク[Nm]

ω : 角速度[rad/sec]

J : モータ軸換算の慣性値[kgm²]

で表され，これをブロック線図で表すと図2のようになる．

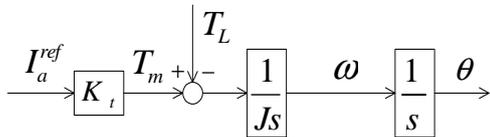


図2 モータにおける運動方程式のブロック線図

モータのトルクは，トルク係数を K_t とすると

$$T_m = K_t I_a^{ref} \quad (2.2.2)$$

よって(2.2.1)式は

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_t I_a^{ref} - T_L \quad (2.2.3)$$

ここで，負荷トルク T_L は次式となる．

$$T_L = T_{int} + T_{ext} + (F + D\omega) \quad (2.2.4)$$

T_{int} : モータ軸が受ける負荷

T_{ext} : ロボットが接触作業により対象から受ける反作用による負荷

$F + D\omega$: クーロン摩擦力 F と粘性係数 D による摩擦

ここでロボットの慣性モーメント J ，トル

ク係数 K_t は姿勢やギヤ位置などによって変動し， J_n, K_m から $\Delta J, \Delta K_t$ だけずれるので，

$$J = J_n + \Delta J \quad (2.2.5)$$

$$K_t = K_m + \Delta K_t \quad (2.2.6)$$

上述の慣性トルクの変動とモータのトルクリプルに，先に求めた負荷トルクを合わせたトルクが，外乱トルクとなる．

$$\begin{aligned} T_{dis} &= T_L + \Delta J s \omega - \Delta K_t I_a^{ref} \\ &= T_{int} + T_{ext} + F + D\omega + (J - J_n) s \omega + (K_m - \Delta K_t) I_a^{ref} \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

(2.2.3)式に(2.2.5)・(2.2.6)式を代入すると，

$$(J_n + \Delta J) \frac{d\omega}{dt} = (K_m - \Delta K_t) I_a^{ref} - T_L \quad (2.2.8)$$

(2.2.7)・(2.2.8)式より

$$J_n \frac{d\omega}{dt} = K_m I_a^{ref} - T_{dis} \quad (2.2.9)$$

となる．(2.2.9)式を図3で示す．(2.2.9)式を変換すると

$$T_{dis} = -J_n \frac{d\omega}{dt} + K_m I_a^{ref} \quad (2.2.10)$$

(2.2.10)式は角加速度と，電流参照値から外乱が算出できることを意味する．算出した外乱をフィードバックし，コントローラの命令トルクに加えることで，システム全体の外乱を打ち消す効果を実現できる．

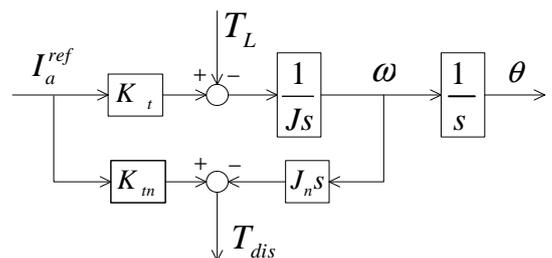


図3 電流参照値と速度微分に基づく外乱トルクの算出

この算出した外乱トルクの推定値は，システムの外乱を減少させるために用いられる補償電流を発生させ，フィードバックされる．この方法による外乱除去の様子を図4に示す．

本研究では、モータ角の制御にアームのたわみ，弾性振動などの影響を抑え，振動を抑えるためにAFCを用いている．本研究で用いたシステム全体のブロック線図を図5に示す．

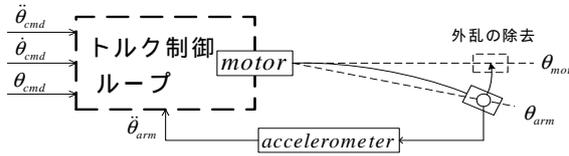


図4 アーム先端の加速度フィードバックによる外乱の除去

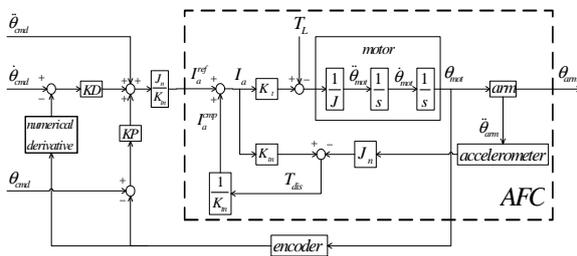


図5 アーム先端の加速度を用いたAFCブロック線図

でシミュレーションを行った．アーム先端の角度 θ_a はモータ角度 θ_m の急激な変化によって生じ，その振動はアームの弾性によって引き起こされる．1リンクアームの先端に加速度計を取り付け計測した加速度の波形からアームの固有周波数と減衰定数を求め，次式でアームの動特性を近似しアームのバネ定数 K ，と粘性摩擦係数 D を算出した．

$$J\ddot{\theta}_a + D\dot{\theta}_a = K(\theta_m - \theta_a) \quad (2.3.1)$$

シミュレーションに用いた値は $J = 1 \text{ kgm}^2$ ， $K_f = 233 \text{ Nm}$ ， $D = 1.83 \text{ Nm sec}$ である．

当初本研究の目的であるアームの角加速度を用いて外乱の推定をするシミュレーションを行おうとしたが，応答が発散してしまい計算ができなかった．そこで今回はモータの角加速度を用いて外乱推定することにした．またモータの目標角度は 1 rad としてシミュレーションを行った．モータに加える入力としては一定の角加速度を t_1 時間与えて加速し，

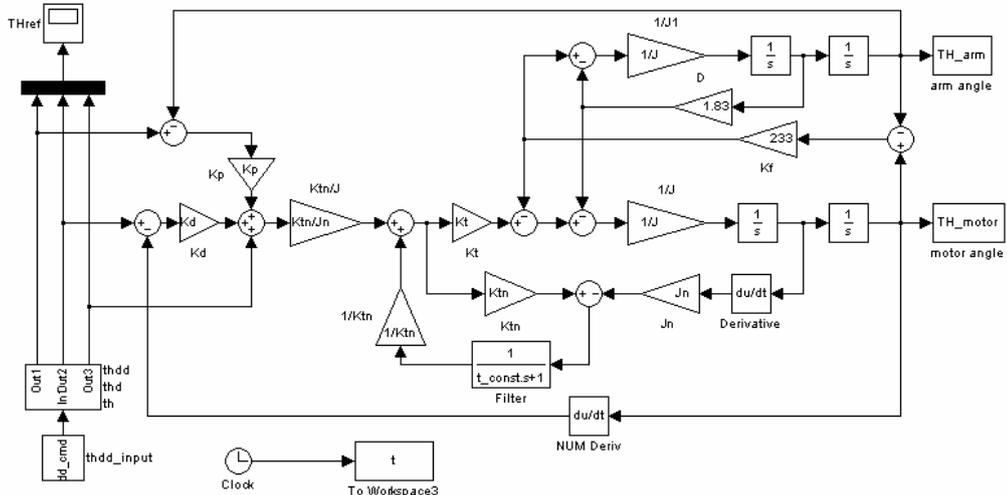


図6 システム概略図

2.3 シミュレーション

外乱オブザーバの各パラメータが応答に及ぼす影響を調べることを目的として，フレキシブルアームの一次の振動モードのみを考慮して図6のシステムを対象にmatlabを用い

同じ加速度で同時間減速することにより目標値に到達させることにした． t_1 を変えてモータ角度の応答とアーム角度の応答を計算した結果をそれぞれ図7，8に示す．モータ角度は t_1 が短いときはアームの振動の影響を

受けてわずかに変化しているがほとんど目標角度で静止している．これに対してアーム角度は $t_1 = 1 \text{ sec}$ 以外では振動が生じている．このようにこのシステムではモータ角度を制御できてもアームの制御は行えない．したがって，急激な角度変化はアームの振動を引き起こしてしまうので，比較的低速度での運動が必要である．

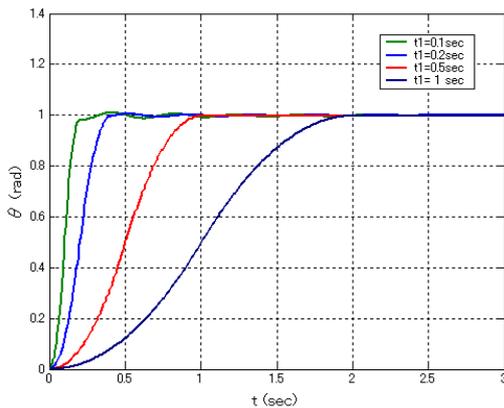


図7 外乱オブザーバ制御時のモータ角度変化

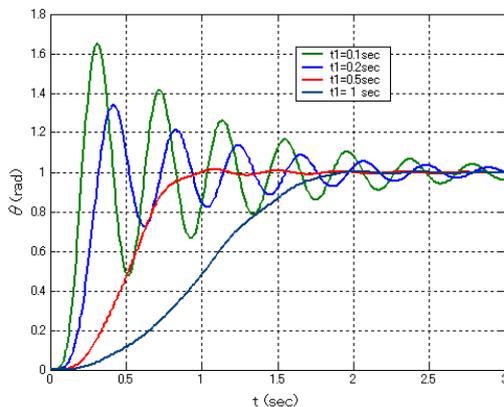


図8 外乱オブザーバ制御時のアーム角度変化

図9，図10にそれぞれ外乱推定に用いられる慣性モーメント J_n とトルク係数 K_{tn} の影響について調べた結果を示す．図より， J_n がモータの慣性モーメント J と等しい場合には最終角度が目標値 1 rad と一致しているが， J_n を J の倍にした場合，最終到達角度は $1/2$ 倍になっている．また， K_{tn} がモータのトルク係数

より大きい場合は最終角度が増加し，逆に小さい場合は減少する応答が得られている．

外乱推定には t_{const} が重要であることは ACSL によるシミュレーション⁶⁾でも明らかにしている．今回のシミュレーションでも外乱オブザーバのフィルタ t_{const} の時定数の応答に及ぼす影響を調べた．図11に示すように t_{const} が 0.1 msec の時は目標値と一致しているが，それ以外の値では応答が振動的でありアームの振動の影響が顕著に現れている．また t_{const} が大きくなるにしたがい応答の遅れが顕著になっており目標応答とはかけ離れてしまっている．

以上の結果から外乱オブザーバを適用する場合，外乱推定に用いられる J_n ， K_{tn} ， t_{const} を正確に与える必要があることが確認できた．

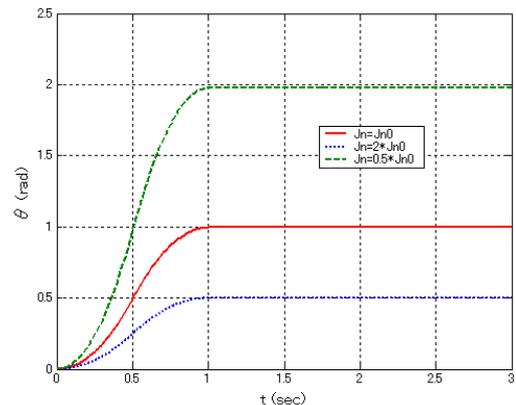


図9 モータ角度応答に及ぼす J_n の影響

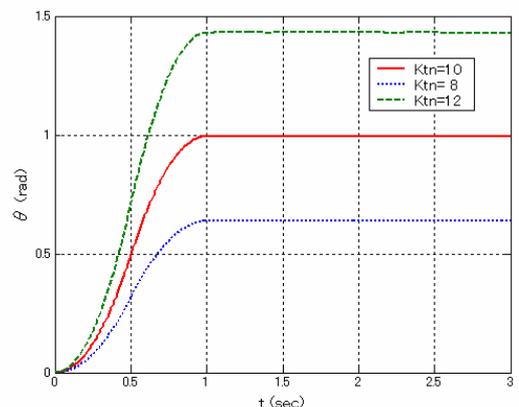


図10 モータ角度応答に及ぼす K_{tn} の影響

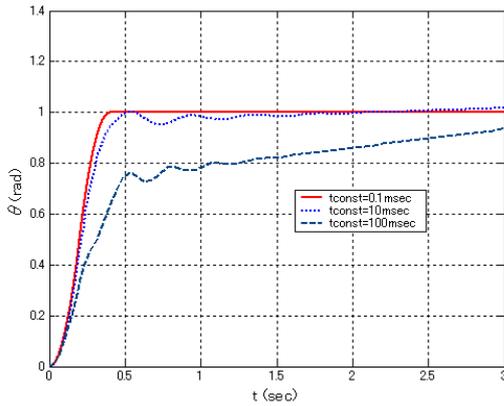


図 1.1 モータ角度応答に及ぼすフィルタ定数の影響

3. 2リンクアームの制御

3.1 目標軌道計画

トルク制御の場合，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，その計画には軌道だけでなく指令値に速度，加速度も必要なので次のようにした．図 1.2 に目標軌跡を示す．初めに一定加速度で直線運動を行い，次に一定加速度での円運動を行った．

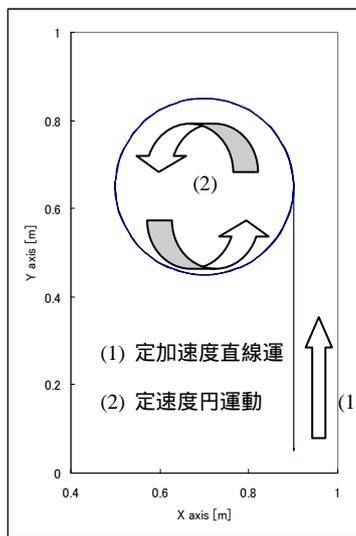


図 1.2 目標軌跡

シミュレーションではモータからアームリンク角度までの θ を端点角度としている．目標の端点角度は次の式で計算される．関節座標 θ は作業座標(X,Y)の値を与えることで計

算される．各 θ は次のようになる．

$$\theta_1 = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) - \text{Cos}^{-1}\left(\frac{L_1^2 - L_2^2 - r_d^2}{2L_1r_d}\right) \quad (3.1.1)$$

$$\theta_2 = \pi - \text{Cos}^{-1}\left(\frac{L_1^2 - L_2^2 - r_d^2}{2L_1L_2}\right) + \theta_1 \quad (3.1.2)$$

$$r_d = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.1.3)$$

この目標角度を時間微分することで，目標角速度を求めている．図 1.3，1.4，1.5 には関節座標における目標値を示す．第1リンクと第2リンクともに直線運動から円運動への変化時もアームの目標角度と角速度は，滑らかに変化している．

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．しかし，角加速度も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不安定にすることが予想できる．

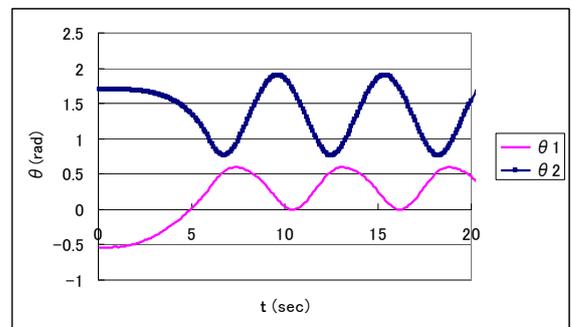


図 1.3 目標端点角度

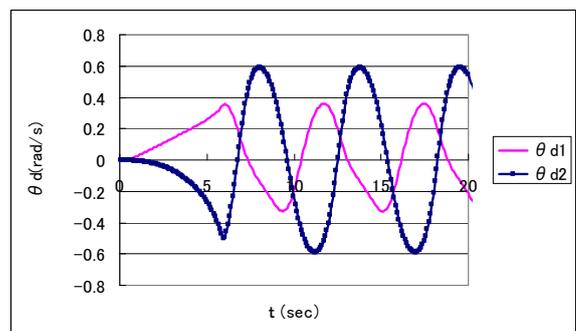


図 1.4 目標端点角速度

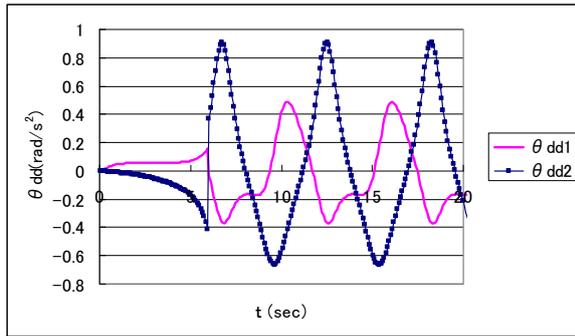


図 1 5 目標端点角加速度

3.2 目標角加速度

2リンクのフレキシブルアームでは、まず位置姿勢ベクトルを時間ごとに指定してやり、その姿勢から逆運動学を用いて、目標角度、目標角速度、および目標角加速度を算出している。

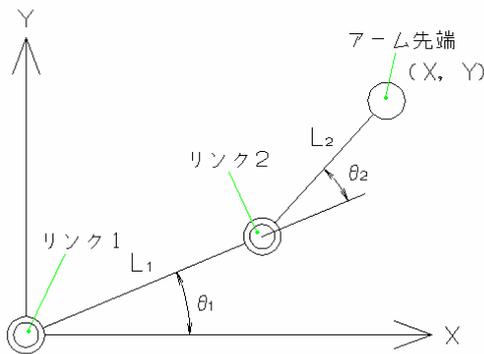


図 1 6 2リンクアームモデル図

図 1 6 より、2リンクアームについて作業座標と関節座標の間には次の関係がある。

$$X = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.2.1)$$

$$Y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.2.2)$$

これらより $\ddot{\theta}_1$ 、 $\ddot{\theta}_2$ はそれぞれ、

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{\ddot{X} \cos(\theta_1 + \theta_2) + \ddot{Y} \sin(\theta_1 + \theta_2) + \dot{\theta}_1^2 L_1 \cos \theta_2 + (\dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_1^2) L_2^2}{L_2 \sin \theta_2} \quad (3.2.3)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_2 = & \frac{1}{-L_1 L_2 \sin \theta_2} \times [\ddot{X} \{L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)\} \\ & + \ddot{Y} \{L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\} + L_1 \dot{\theta}_1^2 (L_1 + L_2 \cos \theta_2) \\ & + L_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) (L_1 \cos \theta_2 + L_2^2)] \end{aligned} \quad (3.2.4)$$

4. フレキシブルアームの端点制御

4.1 実験装置

実験装置の概略を図 1 7 に示す。実験装置の写真を図 1 8 に示す。長さ500[mm]、幅50[mm]、厚さ3[mm]のアルミ板を第1アーム、幅、厚さは同様の、長さ400[mm]のアルミ板を第2アームとした。第1モータと第2モータの軸間距離は700[mm]であり、第2アームの先端には加速度計、ペンホルダーを含み、約0.3[kg]の先端質量が取り付けられている。情報の処理、指令はパーソナルコンピュータで行っており、言語にはC言語を使用し、コンパイラはTURBO C++を使用した。制御則に基づき計算された指令電流値は、12ビットD/Aコンバータを介し、アナログ指令電圧としてPWMサーボアンプに出力される。また、PWMサーボアンプに出力された指令電圧は、指令電流に変換されDCモータへと供給される。これにより、モータが駆動し、ハーモニックギアを介し、100:1の減速がなされ、フレキシブルアームが動作する。

この時の、モータ回転量、回転方向の情報は、分解能1000[pulse/rev]のロータリーエンコーダからパルス信号として出力される。このパルス信号は、12ビットカウンタを介し、パラレルI/OからPCへと取り込まれる。

また、アームの先端に取り付けられた加速度計は、アームに対し直角方向の加速度を検出する。加速度計からの信号を取り込むためのインターフェースには、12ビットのA/Dコンバータを使用した。角加速度の値は、取り込んだ加速度の値を、アームの長さで割ることで算出し、外乱の推定に利用する。

そして、推定された外乱を基に、サーボアンプへ供給される指令電圧を調整し、フレキシブルアームの端点軌道制御を行う。

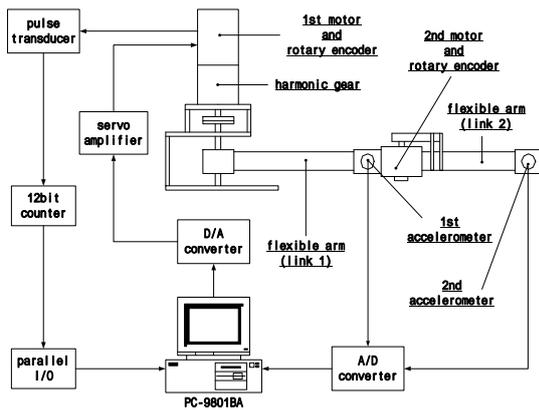


図 1 7 実験装置構成図

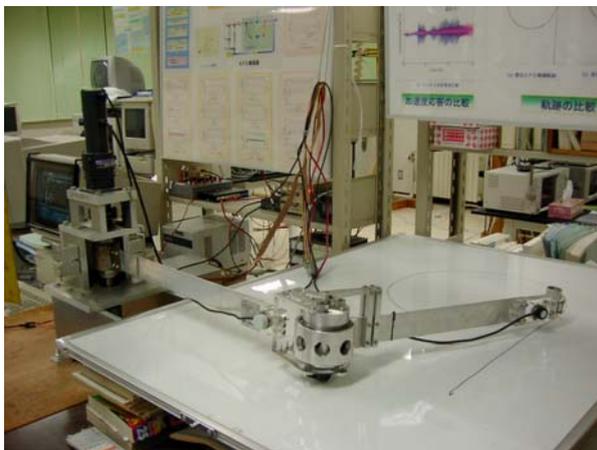


図 1 8 実験装置

4.2 実験方法

AFCを2リンクに適応させ、図形を描画させるという実験を行った。描画させる図形は3.1で述べていた直線と半径0.2[m]の円である。実験開始前に、加速度計の零点不平衡誤差を無くすために、リンク1とリンク2のアームを1直線上に伸ばした状態でエンコーダをリセットする。その後、初期姿勢まで移動させ、アームの振動が収まってからペンをセットする。

4.3 AFCによる描画

実験から得られたモータ角の変動を図19に示す。モータ角と目標角度との誤差は少なく、目標角度をほぼ追従出来ている。

図20に、実験時の目標加速度、およびア

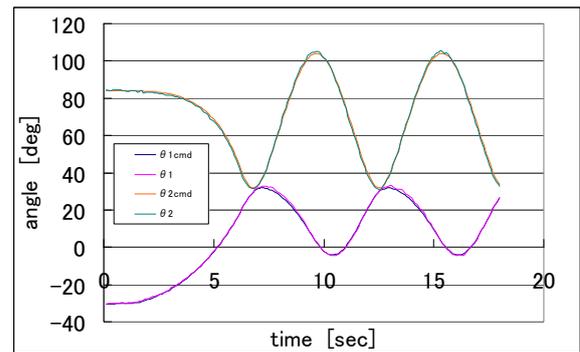


図 1 9 モータ角の変動

ームの先端の加速度を示す。リンク1,リンク2共に、目標加速度にほぼ追従できているが、大きいノイズが表れているので高次のフィルタが必要である。

実験から得られた図19のモータ角を基に、アームが剛体であると仮定した場合に、描画するであろう軌跡を算出した。図21に、その計算による軌跡を示す。算出した軌跡は、目標値からずれてしまっていることがわかり、このようなアームの制御にはわずかな角度差が大きな歪みとなって軌道に現れることがわかる。また、ふらつきや、振動していることが見てとれる。これはアームとハーモニックギアのフレキシビリティによるものだと考えられる。

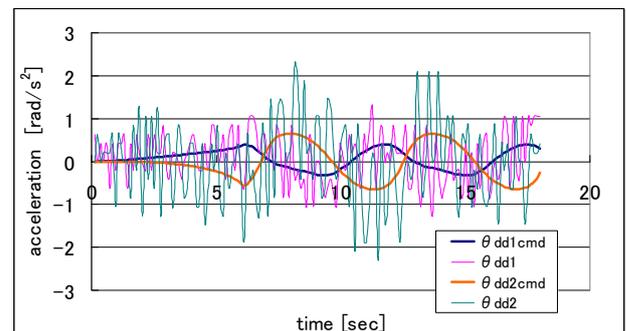


図 2 0 加速度の変動

図22にAFCにより描画した軌跡の写真を示す。描画した軌跡は、歪んでおり、真円には程遠い軌跡である。また、直線運動も振動

とふらつきが見られる．これはアームのフレキシビリティの影響が出てしまいアーム先端が振るえるので，大きな歪みが生じてしまったためと考えられる．

図2 1と図2 2を比較すると，実際に描画した軌跡は，モータ角から算出した軌跡に近い部分とそうでない部分がある．これは，AFCにより，たわみや弾性振動などの外乱が除去され，フレキシブルアームが，ほぼ剛体の状態に保たれて描画していることを示し，そうでないところはたわみや弾性振動が除去しきれないことがわかる．

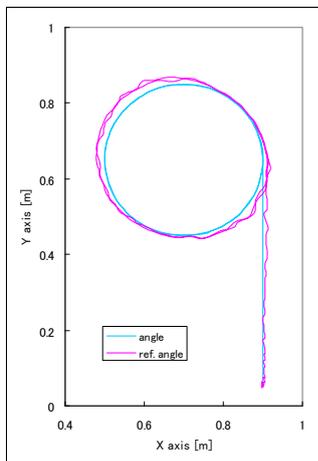


図2 1 算出された軌跡 図2 2 描写軌跡

5 . 結言

AFCを2リンクに適応することで，計算上では目標に近い軌跡を描画する事が出来るが，実際にはフレキシビリティが及ぼす影響を除去しきれない．つまり，クローズドループに相当する制御が実現できていないことになる．しかしながらシミュレーションによって外乱オブザーバによるパラメータの影響が理解できたので，これらのパラメータを適切に調整して完全な直線軌道・円軌道を描写させていきたい．

参考文献

- 1) 岡田昌史，紀晋太郎，菅野侑司：構造的
特異性を利用した零/極高剛性を実現する
トルク伝達機構とそのロボット関節への
応用，日本ロボット学会誌 27 巻 4 号，
pp74~79, (2009).
- 2) 松野文俊：フレキシブルマニピュレータ，
日本ロボット学会誌，Vol.12, No.2,
pp.1~38．(1997).
- 3) 大西公平：外乱オブザーバによるロボ
スト・モーションコントロール，日本ロボ
ット学会誌，Vol.11, No.4, pp.486 493．
(1993).
- 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,
Vol32,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，八戸工業高等専
門学校紀要，第3 8号，pp.9~14(1997)..
- 6) J.R.Hewit,J.S.Burdess：Fast dynamic
decoupled control for robotics, using active
force control，Mechanism and Machine
Theory, Vol.16, No.5, pp.535 542 (1981).

