

## H 5 ダイレクトドライブマニピュレータの適応制御に関する研究

発表者 9jeem016 霜鳥文紀  
 指導教員 落合康住 教授  
 平田弘志 助教授

### A Study on Adaptive Control of Direct Drive Manipulator

**Abstract:** This study proposes to decrease the tracking error caused by the load change by means of adaptive control in the trajectory control of direct drive manipulator of SICE. The availability of the proposed method is verified through both simulation and experiment.

#### 1. 研究目的

SICE標準のダイレクトドライブマニピュレータは、粘性摩擦とクーロン摩擦の影響が非常に大きく、非線形項の影響が小さいという特徴を持つ。

本研究では、ダイレクトドライブマニピュレータの軌道制御における追従誤差の低減化を図るために制御系に外乱オブザーバを付加することにより実現する。さらに、マニピュレータの負荷変化による追従性能の劣化を抑制する方法として制御系の適応化を提案し、シミュレーションと実機によりその有効性を実証する。

#### 2. 制御対象

制御対象であるダイレクトドライブマニピュレータはFig.1に示すような2リンクマニピュレータである。

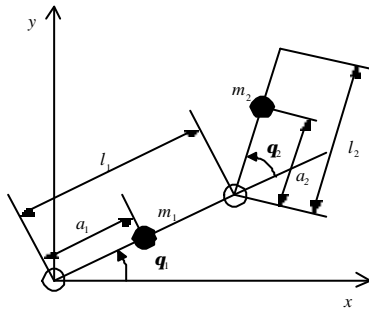


Fig.1 マニピュレータの概略図

ここで、 $m_i, I_i$ をそれぞれ、リンク*i*の質量、重心まわりの慣性モーメント、 $l_i, a_i$ をそれぞれ、リンク*i*の長さ、重心位置とし、 $q_i, t_i$ を第*i*関節の角度、及び入力トルクとすると、その連続時間運動方程式は式(1)で記述できる。

$$J(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + D\dot{\mathbf{q}} + B(\dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{t} \quad (1)$$

$J(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}$ は慣性項、 $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は遠心力・コリオリ力項、 $D\dot{\mathbf{q}}$ は粘性摩擦項、 $B(\dot{\mathbf{q}})$ は動摩擦項を表わし、それぞれ以下のようなになる。

$$J(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} J_1 + J_2 + 2Rl_1C_2 & J_2Rl_1C_2 \\ J_2 + Rl_1C_2 & J_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} -Rl_1S_2(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \\ Rl_1S_2\dot{q}_1^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 \\ 0 & d_2 \end{bmatrix} \quad (4), \quad B(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} b_1 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ b_2 \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

ただし、 $J_1 = I_1 + m_1a_1^2 + m_2l_1^2$ ,  $J_2 = I_2 + m_2a_2^2$ ,  $R = m_2a_2$ ,  $\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2]^T$ ,  $\mathbf{t} = [t_1 \quad t_2]^T$ である。

#### 3. 基本パラメータ推定

式(1)は次の基本パラメータ、

$$\mathbf{s} = [J_1 \quad J_2 \quad R \quad d_1 \quad d_2 \quad b_1 \quad b_2] \quad (6)$$

を用いると、

$$\mathbf{t} = \Phi \cdot \mathbf{s} \quad (7)$$

のようなパラメータに対する線形方程式とすることができる。ただし、 $\Phi$ は次の計測値に基づいた運動データベクトルである。

$$\Phi = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & \dot{q}_1 + \dot{q}_2 & l_1C_2(2\dot{q}_1 + \dot{q}_2) - l_1S_2(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) & \dot{q}_1 & 0 & \operatorname{sgn}\dot{q}_1 & 0 \\ 0 & \dot{q}_1 + \dot{q}_2 & l_1(C_2\dot{q}_1 + S_2\dot{q}_1^2) & 0 & \dot{q}_2 & 0 & \operatorname{sgn}\dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

したがって、 $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{t}$ といった運動データが得られればマニピュレータの基本パラメータが推定できることがわかる。本研究では運動データの獲得にローパスフィルタを用いる方法を採用した。近似微分による方法と違い、フィルタ特性を同じくすることで獲得された運動データの特性の違いによる推定系への影響を抑制することができる。フィルタとして2次の2項係数標準形のものを使用している。Fig.2にフィルタ処理による信号処理系を示す。

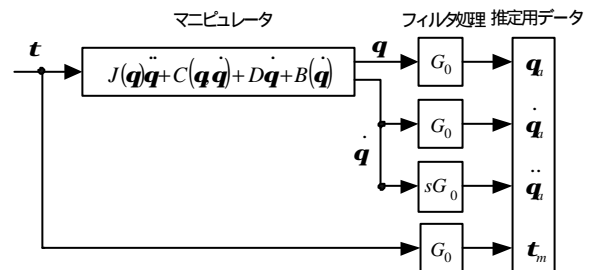


Fig.2 パラメータ推定のための信号処理系

#### 4. 軌道制御実験

マニピュレータの先端に円軌道を描かせる軌道制御実験を実施した。目標軌道は半径 50[mm]の円軌道、サンプリングタイムは 0.001[sec]とし、各軸に2型サーボを設計する。制御系のブロック図を Fig.3 に、2

型サーボ極指定の等価時定数 $T_c$ を0.1と選定したと

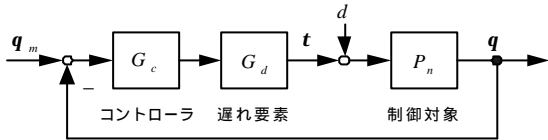


Fig.3 2型サーボ系

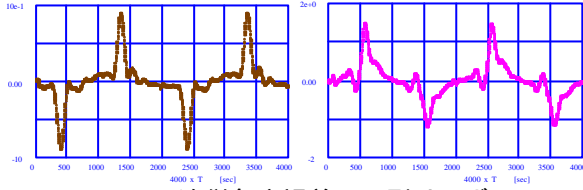


Fig.4 追従角度誤差 (2型サーボ)

きの各軸の目標軌道に対する追従角度誤差を Fig.4 に示す。周期的に現れている大きな誤差は外乱 $d$ の影響である。Fig.5は外乱オブザーバを付加した制御系のブロック図である。この制御系では、外乱オブザーバで推定された推定値によって外乱 $d$ の影響を除去することができる。外乱オブザーバのフィルタ時定数 $T_{d1}$ 、 $T_{d2}$ と、2型サーボの等価時定数 $T_c$ をそれぞれ0.001、0.0025、0.07と選定したときの追従角度誤差を Fig.6 に示す。また同じ条件での実験をマニピュレータ先端に2[kg]の錘をのせて実施したときの追従角度誤差を Fig.7 に示す。外乱オブザーバを付加することで外乱 $d$ の影響がなくなり追従誤差の低減化を実現できたが、マニピュレータの負荷変化には対応できないことが明らかになった。

制御系を適応化する提案法のブロック図を Fig.8 に示す。基本パラメータ推定に用いるフィルタの時定数 $T_s$ を0.006と選定し、マニピュレータ先端が1周する2秒後からオンラインによるパラメータ修正を実施

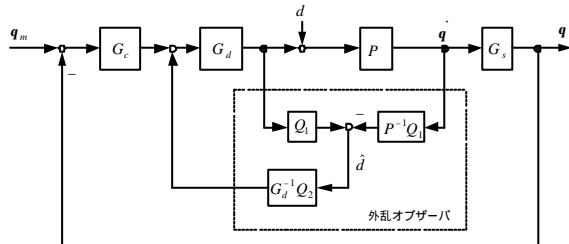


Fig.5 外乱オブザーバを付加した制御系

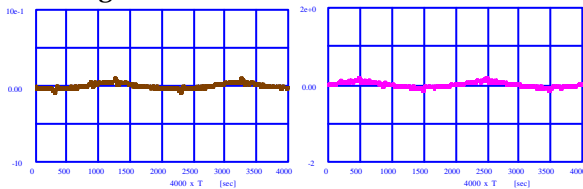


Fig.6 追従角度誤差 (外乱オブザーバ)

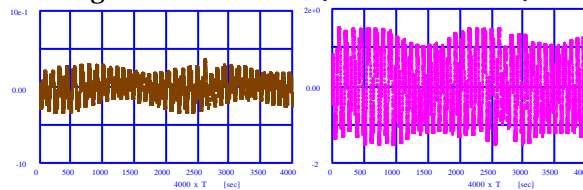


Fig.7 追従角度誤差 (重負荷)

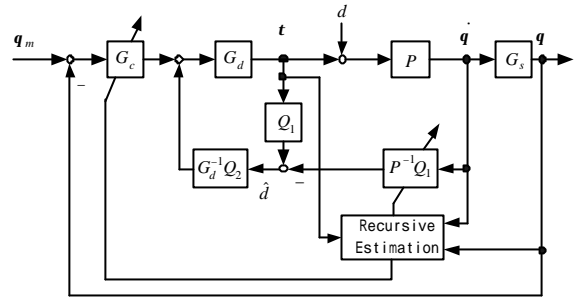


Fig.8 適応化された制御系

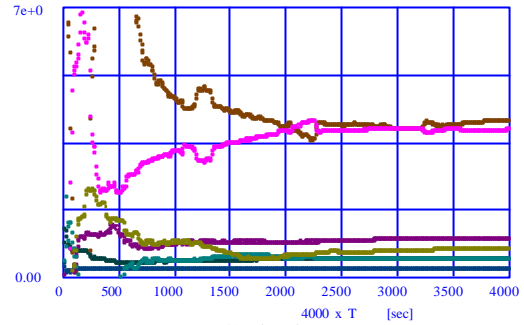


Fig.9 推定パラメータ

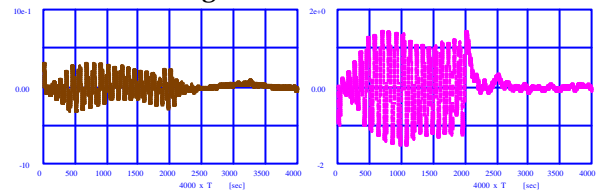


Fig.10 追従角度誤差 (適応制御)

したときの推定パラメータの推移を Fig.9 に、追従角度誤差を Fig.10 に示す。制御系の適応化が開始された2秒後まもなく振動が消滅し追従誤差が劇的に低減していることがわかる。

## 5. まとめ

この研究で得られた結果は以下の通りである。

- (1) 2型サーボに外乱オブザーバを付加することで軌道制御における追従誤差の大幅な低減化を実現した。
- (2) マニピュレータの負荷変化による追従性能の劣化を改善する手法として制御系の適応化を提案し、その有効性を確認した。

制御系設計は、マニピュレータの非線形性の影響が小さかったためこれを無視して行った。良好な実験結果を得るに至ったが、非線形補償による線形化を行って制御系を設計した場合との比較が今後の研究課題として考えられる。

## 参考文献

- 1) 小山：サーボモータの適応制御，SICEセミナー“適応制御”テキスト，p69-81，(1993)
- 2) ロボット制御の実際，SICE，(1997)
- 3) SICE マニピュレータ取扱説明書，東京エレクトロニックシステムズ(株)，(1998)
- 4) Jhon J.Craig：Adaptive Control of Mechanical Manipulator, Addison-Wesley，(1998)