水中ロボットマニプレータの運動制御*

(第 1 報, 一軸方向の流体力の適応補償方法)

福 田 敏 男^{*1}, 原 文 雄^{*1}

Motion Control of Underwater Robotic Manipulator (1st Report, Adaptive Compensation Method of One Directional Fluid Force)

Toshio FUKUDA and Fumio HARA

Robotic manipulators working under underwater environments have influences of fluid forces from liquid, unlike in the air. The fluid force gives problems to the manipulators, such as oscillations in the liquid, which cannot allow the manipulator to move at the higher speed. Thus, the working efficiency cannot be improved. In this paper, a method of adaptive fluid force compensation is shown by using the model reference adaptive control approach in a serial-parallel connection. The proposed adaptive compensation method employs only the position and velocity information. The nonlinear effects of fluid forces are compensated. Some comparisons were carried out with the simple fixed gain feedback control with/without the output feedback loop of strain gauges.

Key Words: Application of Control, Underwater Robotic Manipulator, Fluid Force, Model Reference Adaptive Control, Adaptive Compensation Method

1. は じ め に

水中での人手による作業は、環境の悪い場所での作業であり、これらの作業をロボットに代行させる考えが進められている。さらに、今後の海洋開発のためには、流体中(水中)で作業するロボット開発は不可欠である。従来開発された水中ロボットは、いずれも移動ロボットに関するものであるが、ロボットマニプレータも流体中で作業を行う場合には、流体の密度・粘性からくる力学的効果のため、各種の機構、制御上の問題点がある。特に、水中でのロボットの運動制御は、ロボットアームの運動と流体との強い連成干渉に起因する低速性が問題となっている。このため、作業性の改善も含め、水中でのマニプレータの高速性が望まれているが、高速化により、アームは大きな流体力を受け、振動を起こすことがある。そこで、本論文では、マニプレータに作用する流体力を補償するためのモデル規範形適応制御系を構成し、流体力による非線形項を適応補償させる方法の基礎的考え方について報告する。また、簡単な二自由度系の液中マニプレータを試作し、

これに本手法を適用し、それぞれの各軸方向の高速運動制御の実験を行い、その有効性を示す。

2. マニプレータの動特性

二自由度系のロボットマニプレータの座標系を図 1 に示す。ロボットマニプレータは、すべて均一な円筒からできている剛体系であるとする。それぞれのジョイント部に、モータトルク T_1, T_2 が作用するものとする。すると、この系の液中における運動方程式はそれぞれの運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを求め、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} & (I_1 + I_{21}) \ddot{\theta}_1 \\ &= T_1 - \frac{1}{2} \rho g S C_d \dot{\theta}_1^2 (l_2/2)^3 \cos \theta_2 \\ &+ \frac{1}{2} \rho g S C_l \dot{\theta}_2^2 (l_2/2)^3 \cos \theta_2 \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & I_2 \ddot{\theta}_2 - \frac{1}{2} \dot{\theta}_1^2 \partial I_{21} / \partial \theta_2 \\ &= T_2 - \frac{1}{2} \rho g S C_d \dot{\theta}_2^2 (l_2/2)^3 \\ &+ \frac{1}{2} \rho g S C_l \dot{\theta}_1^2 (l_2/2)^3 \\ &+ (m'_{2g} - \rho A_2 l_2) (l_2/2) \cos \theta_2 \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ただし、 C_d : 抗力係数、 C_l : 揚力係数、 g : 重力の加

* 昭和 63 年 8 月 24 日 第 951 回講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 11 月 9 日。

*¹ 正員、東京理科大学工学部(〒162 東京都新宿区神楽坂 1-3)。

速度, S : 射影面積, I_1 : アーム1の慣性モーメント, I_2 : アーム2の慣性モーメント, m_1 : アーム1の重さ, A_1 : アーム1の断面積, r_1 : アーム1の円筒断面半径, l_1 : アーム1の長さ, m_2 : アーム2の重さ, A_2 : アーム2の断面積, r_2 : アーム2の円筒断面半径, l_2 : アーム2の長さ, 水の密度を ρ とする. 付加質量も考慮した重さを, それぞれ, m_1, m_2 とすると,

$$m_1 = m_1' + \rho A_1 l_1$$

$$m_2 = m_2' + \rho A_2 l_2$$

となる⁽⁹⁾. また, 慣性モーメントは次のようになる⁽⁶⁾.

$$I_1 = m_1(r_1^2/2)$$

$$I_2 = m_2(3r_2^2 + l_2^2)/12 + m_2(l_2/2)^2$$

$$I_{21} = m_2(3r_2^2(1 + \sin^2 \theta_2)$$

$$+ l_2^2 \cos^2 \theta_2)/12 + m_2\left(\frac{1}{2}l_2 \cos \theta_2\right)^2$$

$$\partial I_{21}/\partial \theta_2 = \frac{m_2}{2}(r_2^2 - l_2^2) \sin \theta_2 \cos \theta_2$$

$$- \frac{m_2 l_2^2}{6} \sin \theta_2 \cos \theta_2$$

θ_2 が小さい場合には, $\cos \theta_2 \approx 1, \sin \theta_2 \approx \theta_2$, また, 液中でアーム2の重力と浮力を釣り合わせるため, 重力と浮力の補償項を省く. この結果, モータの減速比 n を考慮した負荷側の釣合い式は,

$$\{m_1 r_1^2/2 + m_2 r_2^2(1 + \theta_2^2)/4 + m_2 l_2^2/3\} \ddot{\theta}_1$$

$$= n T_1' - \frac{1}{2} \rho g S C_d \dot{\theta}_1^2 l_2^2/8$$

$$+ \frac{1}{2} \rho g S C_i \dot{\theta}_1^2 l_2^3/8 \dots \dots \dots (3)$$

$$I_2 \ddot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1^2 m_2 \theta_2 (4 l_2^2/3 - r_2^2)/4$$

$$= n T_2' - \frac{1}{2} \rho g S C_d \dot{\theta}_2^2 l_2^2/8$$

$$+ \frac{1}{2} \rho g S C_i \dot{\theta}_2^2 l_2^3/8 \dots \dots \dots (4)$$

となる. ただし, T_1', T_2' は, それぞれ, モータの出力トルクである.

次に, モータ側の釣合いを考える⁽⁷⁾.

$$T_1' = K_t K_g e_1/R - K_t K_m n \dot{\theta}_1/R$$

$$- I_m n \ddot{\theta}_1 \dots \dots \dots (5)$$

$$T_2' = K_t K_g e_2/R - K_t K_m n \dot{\theta}_2/R$$

$$- I_m n \ddot{\theta}_2 \dots \dots \dots (6)$$

ただし,

K_g : DC モータのゲイン

R : DC モータの電機子抵抗

I_m : モータの慣性モーメント

K_m : 逆起電力定数

K_t : モータトルク定数

また, モータのインダクタンス L , および, モータの摩擦抵抗 B_m は無視できるものとする. 式(5), (6)を式(3), (4)に代入し, 整理することにより, この系の動特性方程式を得ることができる.

$$\{m_1 r_1^2/2 + m_2 r_2^2/4 + m_2 l_2^2/3$$

$$+ m_2 r_2 \theta_2^2/4 + I_m n^2\} \ddot{\theta}_1 + K_t K_m n^2 \dot{\theta}_1/R$$

$$+ \frac{1}{2} \rho g S C_d \dot{\theta}_1^2 l_2^2/8 + \frac{1}{2} \rho g S C_i \dot{\theta}_1^2 l_2^3/8$$

$$= K_t K_g n e_1(t)/R \dots \dots \dots (7)$$

$$(I_2 + I_m n^2) \ddot{\theta}_2$$

$$+ (4 l_2^2/3 - r_2^2) m_2 \dot{\theta}_1^2 \theta_2/4$$

$$+ K_t K_m n^2 \dot{\theta}_2/R$$

$$+ \frac{1}{2} \rho g S C_d \dot{\theta}_2^2 l_2^2/8 - \frac{1}{2} \rho g S C_i \dot{\theta}_2^2 l_2^3/8$$

$$= K_t K_g n e_2(t)/R \dots \dots \dots (8)$$

θ_1 方向に限った動特性方程式は, $\theta_2 = \text{一定}$ として, 次のようになる. この場合, $\theta_{p1} = \theta_1$ とする. θ_{p2} も同様とする.

$$\ddot{\theta}_{p1} + a_1 \dot{\theta}_{p1} + a_2 \theta_{p1} + a_3 \dot{\theta}_{p1}^2 + a_4 \dot{\theta}_{p1}^3$$

$$= b_1 u \dots \dots \dots (9)$$

ただし,

$$a_0 = m_1 r_1^2/2 + m_2 r_2^2/4 + m_2 l_2^2/3$$

$$+ m_2 r_2 \theta_2^2/4 + I_m n^2$$

$$a_1 = K_t K_m n^2/R/a_0$$

$$a_2 = 0$$

$$a_3 = \frac{1}{2} \rho g S C_d (l_2/2)^3/a_0$$

$$a_4 = 0$$

$$b_1 = K_t K_g n/R/a_0 > 0$$

$$u = e_1$$

同様に, $\theta_1 = \text{一定}$ として, θ_2 方向に限った θ_{p2} に関する動特性方程式を得ることができる. 式(9)でわかるように, 一方方向に限っても, 流体力による非線形項が現れる. 以下式(9)を対象として, これらの流体力項の補償方法について述べる.

3. 流体力の適応補償制御

図2に, パラレル-シリアル形制御系のブロック線

図1 座標系

図を示す。まず, θ_1 方向に限って, 対象非線形システムは式(9)で示されるが, θ_{p1} , $\dot{\theta}_{p1}$, θ_{p2} , $\dot{\theta}_{p2}$ は測定可能, $a_1 \sim a_4$ は, パラメータ, u は制御入力である。式(9)に対し, 測定可能な非線形項 $\dot{\theta}_{p1}^2$, $\dot{\theta}_{p2}^2$ を外力項とみなして, 次の線形規範モデルをたてる。

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_{m1} + \alpha_1 \dot{\theta}_{m1} + \alpha_2 \theta_{m1} + \alpha_3 \dot{\theta}_{p1}^2 + \alpha_4 \dot{\theta}_{p2}^2 \\ = \beta_1 r \end{aligned} \quad (10)$$

ここで, $e = \theta_{p1} - \theta_{m1}$ として, 誤差方程式を求めると次のようになる。

$$\ddot{e} + \alpha_1 \dot{e} + \alpha_2 e = b_1(u - r) - \phi^T Z \quad (11)$$

ただし,

$$\phi_0 = b_1 - \beta_1, \phi_1 = a_1 - \alpha_1$$

$$\phi_2 = a_2 - \alpha_2, \phi_3 = a_3 - \alpha_3$$

$$\phi_4 = a_4 - \alpha_4$$

$$\phi^T = (\phi_0 \phi_1 \phi_2 \phi_3 \phi_4)$$

$$Z^T = (r \dot{\theta}_{p1} \theta_{p1} \dot{\theta}_{p1}^2 \dot{\theta}_{p2}^2)$$

ここで, 制御入力を $u(t) = r(t) + k(t)^T Z(t)$ とし,

$$\phi = b_1 k - \phi \quad (12)$$

とおくと, 誤差方程式は次のように表される。

$$\ddot{e} + \alpha_1 \dot{e} + \alpha_2 e = \phi^T Z \quad (13)$$

ここで, $\lambda_1 (> 0)$ を,

$$\frac{S + \lambda_1}{S^2 + \alpha_1 S + \alpha_2} \quad (14)$$

が正実関数となるように選ぶものとする。また,

$$w = \frac{1}{S + \lambda_1} Z \quad (15)$$

とする。誤差方程式が式(14)で表される伝達関数を有するように変形すると

$$\begin{cases} \dot{e} = Ae + b\phi^T w \\ e = h^T e \end{cases} \quad (16)$$

となる⁽⁷⁾。

ただし,

$$e = \begin{pmatrix} e \\ \dot{e} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 \end{pmatrix}$$

$$b = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad h = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

図2 パラレル-シリアル形制御系のブロック線図

この式をふまえて, リヤプノフ関数の候補を次式に示す。

$$V = \frac{1}{2} |b_1| e^T P e + \frac{1}{2} \phi^T G^{-1} \phi \quad (17)$$

ただし, $G = G^T > 0$, $P = P^T > 0$ である。

さらに,

$$\dot{\phi} = -|b_1| G e Z \quad (18)$$

と選ぶことにより, $\dot{V} \leq 0$ とし, 安定にすることができる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。これを制御入力として表すと,

$$\dot{k} = -\text{Sgn}(b_1) G e w \quad (19)$$

となり, 安定になる。ここでは b_1 の符号は正であるものとする。特に, $\phi_1 = \phi_2 = \phi_4 = 0$ の場合, パラメータミスマッチングは ϕ_3 のみである。よって, 制御入力は,

$$u = r + k_3 z_3 \quad (20)$$

である。また,

$$\begin{cases} \dot{k}_3 = -G e w_3 \\ w_3 = \frac{1}{S + \lambda_1} \dot{\theta}_{p1}^2 \end{cases} \quad (21)$$

上式から,

$$k_3 = k_{30} - G_I \int e w_3 dt - G_P e w_3 \quad (22)$$

となる⁽⁸⁾。この式では, 適応性を考えて, 比例項も加えてある。 k_{30} は k_3 の初期ゲイン, $G_I (G_I > 0)$, $G_P (G_P \geq 0)$ は積分, 比例ゲインを示す。この式より, k_3 は, $e w_3$ と $\int e w_3 dt$ の関数となっているので, これらを流体力がキャンセルされているかの判断に用い, k_3 を動かしていく。同様に, θ_2 方向も全く同じ方法で制御を行うことが可能である。式(19)は, 位置と速度情報のみで, 流体力補償を適応的に行うことができることを示している。

4. 実験装置

図3にDCモータ2個からなるロボットマニプレータ系の実験システムを, 図4に位置, 速度, 流体力(ひ

図3 実験装置システム

ずみゲージ出力) を固定ゲインを介してフィードバックする制御系のブロック線図を示す。また、実験装置の概観を図5に示す。ロボットアームは2リンク二自由度であり、アーム1、アーム2とも可動範囲は 180° となっている。また、移動レールを用いて、 $X \cdot Y$ 方向への移動も可能となっている。ロボットのアーム長は、アーム1が52 cm, アーム2が38 cmである。そして、水槽は $1\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1\text{ m}$ の大きさである。位置・速度はエンコーダ出力から、加速度は加速度ピックアップにより、ひずみはひずみゲージにより検出される。

5. 実験結果

図6, 7は、 K_3 , および、 K_8 に固定ゲインを用いて、位置制御を行った場合の進行方向振動の加速度のRMSを示している。横軸は、固定ゲインの実数倍値である。図6, 7からもわかるように、 θ_1 方向・ θ_2 方向とも固定ゲインの1倍近辺で、振動が空中での値に近づ

図4 ブロック線図

図5 実験装置の概観

いており、各方向とも固定ゲインの計算に信頼性があることがわかる。各位置制御時の進行方向振動の比較を図8に示す。図8(a)は通常的位置・速度フィードバックの場合(k_1, k_2), 図8(b)は固定ゲインを用いた位置・速度・流体力(ひずみ)フィードバックの場合(図4), 図8(c)は3章で述べた位置と速度のみの情報による可変ゲインを用い適応的に位置制御を行った場合の実験結果である。図8(a)に対して、流体力補

図6 θ_1 の制御結果(固定ゲイン)

図7 θ_2 の制御結果(固定ゲイン)

(a) 位置・速度フィードバック制御

(b) 流体力補償制御(固定ゲイン)

(c) 流体力補償制御(可変ゲイン)

図8 位置制御時の振動の比較

表 1 各方向の振動抑制効果

	θ_1	θ_2
in Air	1.00	1.00
in Water	1.43	1.20
Fixed Gain	1.13	1.02
Adaptive Gain	1.10	1.01

償を行った図 8 (b) や図 8 (c) では、振動が減少しているのがわかる。ここで、空中振動の RMS を基準にして、正規化すると、表 1 に示すとおりである。表 1 より、流体力補償を行った場合は、振動抑制に有効であることがわかる。

特に、図 8 (b) と比較して、図 8 (c) では、ひずみのフィードバックを行っておらず、位置と速度のみを用いた場合でも適応補償により、よい振動抑制効果がみられる。

6. ま と め

(1) 2 リンク系の中水ロボットマニプレータの動特性方程式を導き、その位置と速度情報のみによるシ

リアル-パラレル形適応制御系による各軸まわりの流体力による振動抑制方法を提案した。

(2) この流体力補償方法と、通常の固定フィードバックゲインを用いる制御系とを実験的に評価し、位置と速度のみを用いた適応補償により、良い振動抑制効果が得られることを実験的に示した。

今後は、各軸間の干渉を考慮した流体力補償方法が必要である。

実験に際し元本学学生矢崎耕一君の協力を得た。

文 献

- (1) Edahiro, K., *ICAR*, (1983), 99.
- (2) Ishino, Y., *ICAR*, (1983), 107.
- (3) 岩崎・ほか 5 名, 第 3 回知能移動ロボットシンポジウム予稿集, (昭 61), 31-36.
- (4) Adam, J. A., *IEEE Spectrum*, (1985), 55.
- (5) Narendra, K. S. and Peterson, B. B., *Prepr. IFAC Int. Symp. Adaptive Control*, (1980).
- (6) 日本機械学会編, 機械工学便覧(力学), (昭 41), 3-14.
- (7) 福田・ほか 2 名, 機論, 53-487, C (昭 62), 726.
- (8) 福田・柴田, Malfunction Diagnosis and Application of Stable Adaptive Schemes for a Nuclear Reactor System, 東京大学生産技術研究所報告, 27-9 (昭 54), 57.
- (9) 今井, 流体力学(前編), (昭 56), 127, 裳華房.