適応極配置によるスカラ型ロボットのロバスト制振制御*

江崎 昇二^{*1}, 内山 直樹^{*2}, 高木 章二^{*2}Robust Vibration Control for SCARA Robots Using
Adaptive Pole PlacementShoji ESAKI, Naoki UCHIYAMA^{*3} and Shoji TAKAGI^{*3} Toyohashi University of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
Hibarigaoka 1-1, Tempaku, Toyohashi, Aichi, 441-8580 Japan

SCARA robot motions generally consist of the following two motions: One is horizontally transportation of a load by actuating two revolute joints. The other is vertically transportation of a load by actuating a prismatic joint. This paper deals with an adaptive control for the former motion with vibration suppression of the prismatic joint. The controlled object is modeled as a double-input quadruple-output system. Firstly, we show a non-linear control method that guarantees a load to be transported to the neighborhood of its desired position. The mass of the load is estimated by the recursive least squares algorithm during the transportation. Then, the dynamics of the robot is linearized at the neighborhood of the desired position of the load. By using the linearized dynamics and the estimated mass, a pole placement controller for the robot is designed. We derive a sufficient condition for robust stability with respect to the estimation error of the mass. Under the condition, a pole placement method for robust performance is also presented. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Adaptive Control, Robust Control, Vibration Control, Robot, Double-Input Quadruple-Output System

1. 緒 言

スカラ型ロボットは標準的に、2つの旋回関節と1つの並進関節を有する。また、その基本的な動作は、

- (a1) 2つの旋回関節による搬送物の水平面内の移動
- (a2) 並進関節の伸縮による搬送物の上昇・下降

である。工場等における生産性向上のためには、スカラ型ロボットは高速で動作することが要求されるが、(a1)の動作の終了時における並進関節の残留振動がこのことの妨げになっていると考えられる。よって、本研究では、(a1)の動作における残留振動を抑制することのできる制御方法の開発を目的とした。本研究における制御対象の特徴は以下のようにまとめられる。

- (b1) 搬送物質量が大きく変化する可能性がある。

- (b2) 非線形2入力4出力系である。

(b1)より、本制御対象には適応制御を応用することが望ましいと考えられる。しかしながら、ロボットの全てのパラメータを未知とした場合には、推定するパラメータの数が非常に大きくなり、良好な制御性能が得られないおそれがある。例えば、加藤らはスカラ型ロボットの非線形適応制御手法を提案しているが、パラメータ推定のみを行うために予めロボットをランダムに移動させた後、それによって得られた値を初期値として適応制御を行っている⁽¹⁾。(b2)より線形適応制御理論を、そのままでは応用することができない。また、不足駆動系であるため、多関節型ロボットの制御において通常用いられている、非線形力を直接打ち消すような入力を加える方法を、そのままでは応用することができない。非線形系に対する適応制御手法⁽²⁾も存在しているが、制御対象が満たすべき条件が厳しいため、

* 原稿受付 1998年10月13日。

^{*1} 正員、久留米工業高等専門学校 (☎ 830-8555 久留米市小森野町1232)。^{*2} 正員、豊橋技術科学大学 (☎ 441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。

E-mail: uchiyama@mech.tut.ac.jp

応用することができない。本論文では、以上のような考察より、つぎのような2段階の適応制御手法を提案する。

- (c1) 2つの旋回関節の目標角度近傍までは並進関節の制振を行わずに搬送する。また、この間に搬送物質量のみを未知パラメータとして推定する。
- (c2) 目標角度近傍において制御対象を線形化し、(c1)において推定された搬送物の質量をもとにコントローラを設計し、制振を行う。

本論文では、(c1)、(c2)の段階をそれぞれ搬送、制振とよぶことにする。本論文では、まずはじめに、本研究で扱う制御対象の動特性を表わす数式モデルについて述べる。つぎに(c1)の制御方法と推定方法について述べる。(c1)では、2つの旋回関節が各々の目標角度近傍に到達できることが保証されなければならないが、不足駆動系ではないロボットに対して従来より行われている方法により、搬送物質量が未知の場合にも、それが実現できることを示す。搬送物質量の推定に関しては、線形適応制御において一般的に用いられている逐次最小二乗法⁽³⁾が応用できることを示す。このことによって搬送物質量の推定誤差を抑えることができる。(c2)においては、状態フィードバックによる極配置制御を用いる。多入出力系の極配置制御においては、フィードバック係数行列が唯一に定まらないことが知られているが⁽⁴⁾、本論文で述べる極配置の方法では、それは一意的に求められる。また、搬送物質量の推定誤差に対する制御系のロバスト安定性についての検討を行い、高いロバスト安定性を有することができるための一方法を示す。さらに、ロバスト性能を考慮した極配置の方法も提案する。最後に実験結果を通じて本論文で提案する方法の有効性を確認する。

本論文の関連研究としては、フレキシブルアームやクレーンの振動制御に関するものが挙げられ⁽⁵⁾⁻⁽¹⁴⁾、参考になっているが、本論文で扱っているような非線形2入力4出力系の適応制御に関するものは見当たらない。

2. 制御対象

本研究では、図1のような並進関節を有するスカラ型ロボットを制御対象とする。その $X-Y$ 平面におけるモデルを図2に示す。図2において第2リンク先端の局所座標系はその x_1 軸方向を第2リンクと平行な方向に、 x_2 軸方向を直角な方向に設定している。各旋回関節はDCサーボモータによって駆動されるものとし、旋回関節 i を駆動するモータをモータ i と記述する。

Fig. 1 Controlled object

Fig. 2 Controlled object in X-Y plane

運動方程式を導出するにあたり、以下のような仮定を設ける。

- (d1) 並進関節については、1次の振動モードのみを考慮する。
- (d2) 並進関節の振れ角 θ_i は十分小さいとし、 $\sin \theta_i \simeq \theta_i$, $\cos \theta_i \simeq 1$ が成り立つ。
- (d3) 並進関節の質量は無視できる。
- (d4) ギアのトルク伝達においては、エネルギー損失は無視できる。
- (d5) モータの電気的時定数は十分小さく無視できる。
- (d6) モータの粘性摩擦を除いた他の摩擦の影響は無視できる。

運動方程式における記号は以下のとおりである。

- q_i : 旋回関節 i の回転角
- q_{id} : 旋回関節 i の目標角度
- θ_i : 局所座標系 x_i 軸方向への並進関節の振れ角
- m_i : リンク i の質量
- I_{Gi} : リンク i の重心に関する慣性モーメント
- l_i : リンク i の長さ
- d_i : 旋回関節 i からリンク i の重心までの長さ

- l : 並進関節の長さ
 k : 並進関節のバネ定数
 m : 搬送物質量
 τ_i : 旋回関節 i における駆動トルク
 C_i : モータ i のトルク定数と電機子抵抗に依存する定数
 N_i : モータ i のギア比
 J_i : モータ i の慣性モーメント
 D_i : モータ i の粘性摩擦係数, トルク定数, 電機子抵抗, 誘起電圧定数に依存する定数
 u_i : モータ i への入力電圧

図2をもとにラグランジュの運動方程式を導出し、適当な変形を施し、さらに各旋回関節を駆動するモータ系の運動方程式

$$\tau_i = -\frac{J_i}{N_i^2} \ddot{q}_i - \frac{D_i}{N_i^2} \dot{q}_i + \frac{C_i}{N_i} u_i, i = 1, 2 \quad (1)$$

を考慮すると、スカラ型ロボットの運動方程式は以下のような θ_1, θ_2 に関する式においてのみ搬送物質量 m が現れる形になる。

$$\ddot{q}_1 = \frac{\alpha_3}{\alpha_4} (\gamma_1 + \frac{C_1}{N_1} u_1) - \frac{\alpha_2}{\alpha_4} (\gamma_2 + \frac{C_2}{N_2} u_2) \quad (2)$$

$$\ddot{q}_2 = -\frac{\alpha_2}{\alpha_4} (\gamma_1 + \frac{C_1}{N_1} u_1) + \frac{\alpha_1}{\alpha_4} (\gamma_2 + \frac{C_2}{N_2} u_2) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 = & \frac{1}{\alpha_4} \{ (\alpha_2 \beta_1 - \alpha_3 \beta_2) (\gamma_1 + \frac{C_1}{N_1} u_1) \\ & + (\alpha_2 \beta_2 - \alpha_1 \beta_1) (\gamma_2 + \frac{C_2}{N_2} u_2) \} \\ & + \frac{(l_2 + l \theta_1)}{l} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + \frac{l_1}{l} \cos q_2 \dot{q}_1^2 \\ & + 2\dot{\theta}_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) - \frac{k}{m} \theta_1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_2 = & \frac{1}{\alpha_4} \{ (\alpha_2 \beta_3 - \alpha_3 \beta_4) (\gamma_1 + \frac{C_1}{N_1} u_1) \\ & + (\alpha_2 \beta_4 - \alpha_1 \beta_3) (\gamma_2 + \frac{C_2}{N_2} u_2) \} \\ & + \theta_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 - \frac{l_1}{l} \sin q_2 \dot{q}_1^2 - 2\dot{\theta}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ & - \frac{k}{m} \theta_2 \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 $I_1, I_2, \alpha_1, \dots, \alpha_4, \beta_1, \dots, \beta_4, \gamma_1, \gamma_2$ は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} I_i &= I_{Gi} + m_i d_i^2, i = 1, 2 \\ \alpha_1 &= I_1 + m_2 l_1^2 + I_2 + 2m_2 l_1 d_2 \cos q_2 + \frac{J_1}{N_1^2} \\ \alpha_2 &= I_2 + m_2 l_1 d_2 \cos q_2 \\ \alpha_3 &= I_2 + \frac{J_2}{N_2^2} \\ \alpha_4 &= \alpha_1 \alpha_3 - \alpha_2^2 \\ \beta_1 &= -\theta_2 \\ \beta_2 &= \frac{l_1 \sin q_2 - l \theta_2}{l} \\ \beta_3 &= \frac{l_2 + l \theta_1}{l} \\ \beta_4 &= \frac{l_1 \cos q_2 + l_2 + l \theta_1}{l} \end{aligned}$$

$$\gamma_1 = m_2 l_1 d_2 \sin q_2 \dot{q}_2 (2\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + k l l_1 (\theta_1 \sin q_2 + \theta_2 \cos q_2) + k l l_2 \theta_2 - \frac{D_1}{N_1^2} \dot{q}_1$$

$$\gamma_2 = -m_2 l_1 d_2 \sin q_2 \dot{q}_1^2 + k l l_2 \theta_2 - \frac{D_2}{N_2^2} \dot{q}_2$$

3. 制御方法

本章では、本論文で提案する制御方法について述べる。ただし、以下のことを仮定する。

(e1) $\theta_i, \dot{\theta}_i$ は有界である。

(e2) $q_i, \dot{q}_i, \theta_i, \dot{\theta}_i$ は測定可能である。

3.1 搬送 本節では、(c1)において述べたように、並進関節の振動を抑制することなく、2つの旋回関節をそれぞれの目標角度まで駆動する方法について述べる。式(2)と式(3)の右辺には、搬送物質量に関する項が含まれていないため、以下の制御入力により、非干渉線形化を行うことができる。

$$u_i = \frac{N_i}{C_i} (-\gamma_i + \alpha_i v_1 + \alpha_{i+1} v_2), i = 1, 2 \quad (6)$$

これより、式(2)と式(3)は、

$$\ddot{q}_i = v_i, i = 1, 2 \quad (7)$$

となる。式(7)より、以下のようなPID制御則によって各旋回関節を目標角度まで駆動することができる。が分かる。

$$\begin{aligned} v_i &= k_{Pi} (q_{id} - q_i) + k_{Ii} \int_0^t \{q_{id} - q_i(\tau)\} d\tau - k_{Di} \dot{q}_i, \\ i &= 1, 2 \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 k_{Pi}, k_{Ii}, k_{Di} はPID制御則における調整パラメータである。

3.2 搬送物質量の推定 搬送の段階において、搬送物質量の推定を行う方法について述べる。

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{\alpha_4} \{ (\alpha_2 \beta_1 - \alpha_3 \beta_2) (\gamma_1 + \frac{C_1}{N_1} u_1) \\ & + (\alpha_2 \beta_2 - \alpha_1 \beta_1) (\gamma_2 + \frac{C_2}{N_2} u_2) \} \\ & + \frac{(l_2 + l \theta_1)}{l} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + \frac{l_1}{l} \cos q_2 \dot{q}_1^2 + 2\dot{\theta}_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \end{aligned} \quad (9)$$

とおくと、式(4)は、

$$\ddot{\theta}_1 + \frac{k}{m} \theta_1 = v \quad (10)$$

となる。式(10)は線形系である。パラメータ推定を行うためには離散時間形式が望ましいため、式(10)を式(11)を用いて双線形変換すると式(12)が得られる。

$$s = \frac{2(z-1)}{T(z+1)} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{4}{T^2} \{ \theta_1(j-1) - 2\theta_1(j-2) + \theta_1(j-3) \} \\ & + v(j-1) + 2v(j-2) + v(j-3) \\ & = \xi \{ \theta_1(j-1) + 2\theta_1(j-2) + \theta_1(j-3) \} \end{aligned} \quad (12)$$

ただし, s はラプラス変換の変数, z は z 変換の変数, T はサンプリング周期, j はサンプリング時点の意味し, $\xi = k/m$ である. よって, k/m を 1 パラメータとして, 逐次最小二乗法⁽³⁾により推定することができる. その推定アルゴリズムは以下のとおりである. ただし, $\hat{\xi}(j)$ は ξ の時点 j における推定値を意味する.

$$\hat{\xi}(j+1) = \hat{\xi}(j) + F(j)\phi(j)\epsilon(j+1) \quad (13)$$

$$F(j+1) = F(j) - \frac{F(j)^2\phi(j)^2}{1 + F(j)\phi(j)^2} \quad (14)$$

$$\epsilon(j+1) = \frac{y(j+1) - \hat{\xi}(j)\phi(j)}{1 + F(j)\phi(j)^2} \quad (15)$$

$$y(j+1) = -\frac{4}{T^2}\{\theta_1(j-1) - 2\theta_1(j-2) + \theta_1(j-3)\} + v(j-1) + 2v(j-2) + v(j-3) \quad (16)$$

$$\phi(j) = \{\theta_1(j-1) + 2\theta_1(j-2) + \theta_1(j-3)\} \quad (17)$$

3.3 制振 本節では (c2) の制振制御について述べる. 式(6)を式(2)~(5)に代入し, $q_1 = q_{10} + x_1, q_2 = q_{20} + x_2, \theta_1 = \theta_{10} + x_3, \theta_2 = \theta_{20} + x_4, v_1 = v_{10} + w_1, v_2 = v_{20} + w_2, x_5 = \dot{x}_1, x_6 = \dot{x}_2, x_7 = \dot{x}_3, x_8 = \dot{x}_4$ と置き換え, $q_{10} = q_{1d}, q_{20} = q_{2d}, \theta_{10} = \theta_{20} = \dot{q}_{10} = \dot{q}_{20} = \dot{\theta}_{10} = \dot{\theta}_{20} = v_{10} = v_{20} = 0$ において線形化し, まとめると, 以下の状態方程式が得られる.

$$\dot{x} = Ax + Bw \quad (18)$$

$$x = [x_1 \dots x_8]^T, w = [w_1 \ w_2]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\xi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\xi \end{matrix} & O_{4 \times 4} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \zeta_1 & \zeta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \zeta_3 \end{bmatrix}^T$$

$$\zeta_1 = -\frac{l_1 \sin q_{2d}}{l}, \zeta_2 = -\frac{l_1 \cos q_{2d} + l_2}{l}, \zeta_3 = -\frac{l_2}{l}$$

ただし, $O_{4 \times 4}, I_{4 \times 4}$ はそれぞれ 4 行 4 列の零行列, 単位行列を意味する.

式(18)に対する可制御性行列を構成すると, 可制御となるのは, $\sin q_{2d} \neq 0$ のときに限ることが分かる. よって, 以下では $q_{2d} \neq n\pi (n=0, 1, 2, \dots)$ を仮定する. 式(18)を可制御正準形式に変換するための変換行列は,

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & s_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_1 & 0 & s_2 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_3 & 0 \\ 0 & s_1 & s_4 & s_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_1 & s_4 & s_5 \\ 0 & 0 & s_6 & s_7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_6 & s_7 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$s_1 = \frac{1}{\xi}, s_2 = -\frac{1}{\xi\zeta_1}, s_3 = \frac{1}{\zeta_1}, s_4 = \frac{\zeta_2}{\xi\zeta_1\zeta_3}$$

$$s_5 = -\frac{1}{\xi\zeta_3}, s_6 = -\frac{\zeta_2}{\zeta_1\zeta_3}, s_7 = \frac{1}{\zeta_3}$$

となる⁽⁴⁾. 式(19)を用いて, 式(18)の可制御正準形式は,

$$\dot{z} = SAS^{-1}z + SBw = \hat{A}z + \hat{B}w \quad (20)$$

$$z = Sx$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\xi & 0 \end{matrix} & O_{4 \times 4} \\ O_{4 \times 4} & \begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\xi & 0 \end{matrix} \end{bmatrix}$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

と表わされる.

制御入力をフィードバック係数行列 F を用いて,

$$w = -Fx, F = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{18} \\ f_{21} & \dots & f_{28} \end{bmatrix} \quad (21)$$

とし,

$$\hat{F} = FS^{-1} = \begin{bmatrix} \hat{f}_{11} & \dots & \hat{f}_{18} \\ \hat{f}_{21} & \dots & \hat{f}_{28} \end{bmatrix} \quad (22)$$

とすると, 制御系の特性多項式は,

$$|sI_{8 \times 8} - (A - BF)| = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{vmatrix} \quad (23)$$

$$g_{11} = s^4 + \hat{f}_{14}s^3 + (\hat{f}_{13} + \xi)s^2 + \hat{f}_{12}s + \hat{f}_{11}$$

$$g_{12} = \hat{f}_{18}s^3 + \hat{f}_{17}s^2 + \hat{f}_{16}s + \hat{f}_{15}$$

$$g_{21} = \hat{f}_{24}s^3 + \hat{f}_{23}s^2 + \hat{f}_{22}s + \hat{f}_{21}$$

$$g_{22} = s^4 + \hat{f}_{28}s^3 + (\hat{f}_{27} + \xi)s^2 + \hat{f}_{26}s + \hat{f}_{25}$$

となる. ただし, $I_{8 \times 8}$ は 8 行 8 列の単位行列である.

制御系の望ましい特性多項式を以下のように設定するものとする.

$$|sI_{8 \times 8} - (A - BF)| = \prod_{i=1}^4 (s^2 + c_{2i-1}s + c_{2i}) \quad (24)$$

式(24)は $c_1, \dots, c_8 > 0$ であるときに限り安定多項式となる. 式(23)と式(24)の全ての係数を一致させることを考えると, 16 個の未知変数を含む 8 個の非線形方程式が得られる. 本論文では, それを線形方程式とし, 未知変数を一意的に定めるための一方法として,

$$\hat{f}_{15} = \hat{f}_{16} = \hat{f}_{17} = \hat{f}_{18} = \hat{f}_{21} = \hat{f}_{22} = \hat{f}_{23} = \hat{f}_{24} = 0 \quad (25)$$

とし, 式(23)の右辺を対角化することを提案する. このことにより, ξ の代わりにその推定値 $\hat{\xi}$ を用いること

にすると、フィードバック係数行列 F の要素が、以下のようになれる。

$$f_{11} = \frac{1}{\xi} c_2 c_4 \quad (26)$$

$$f_{12} = 0 \quad (27)$$

$$f_{13} = -\frac{1}{\zeta_1 \xi} \{-\hat{\xi}(c_1 c_3 + c_2 + c_4 - \hat{\xi}) + c_2 c_4\} \quad (28)$$

$$f_{14} = 0 \quad (29)$$

$$f_{15} = \frac{1}{\xi} (c_1 c_4 + c_2 c_3) \quad (30)$$

$$f_{16} = 0 \quad (31)$$

$$f_{17} = -\frac{1}{\zeta_1 \xi} \{-\hat{\xi}(c_1 + c_3) + c_1 c_4 + c_2 c_3\} \quad (32)$$

$$f_{18} = 0 \quad (33)$$

$$f_{21} = 0 \quad (34)$$

$$f_{22} = \frac{1}{\xi} c_6 c_8 \quad (35)$$

$$f_{23} = \frac{\zeta_2}{\zeta_1 \zeta_3 \xi} \{-\hat{\xi}(c_5 c_7 + c_6 + c_8 - \hat{\xi}) + c_6 c_8\} \quad (36)$$

$$f_{24} = -\frac{1}{\zeta_3 \xi} \{-\hat{\xi}(c_5 c_7 + c_6 + c_8 - \hat{\xi}) + c_6 c_8\} \quad (37)$$

$$f_{25} = 0 \quad (38)$$

$$f_{26} = \frac{1}{\xi} (c_5 c_8 + c_6 c_7) \quad (39)$$

$$f_{27} = \frac{\zeta_2}{\zeta_1 \zeta_3 \xi} \{-\hat{\xi}(c_5 + c_7) + c_5 c_8 + c_6 c_7\} \quad (40)$$

$$f_{28} = -\frac{1}{\zeta_3 \xi} \{-\hat{\xi}(c_5 + c_7) + c_5 c_8 + c_6 c_7\} \quad (41)$$

$\zeta_1 = -l_1 \sin q_{2d}/l$, $\zeta_3 = -l_2/l$ であるため, $\hat{\xi} \neq 0$, $\sin q_{2d} \neq 0$ ならば F は唯一に決定されることになる。

3・4 搬送物質量の推定誤差に関するロバスト安定性 オンラインで $\hat{\xi}$ を同定するので, $\hat{\xi} > 0$ を仮定し, また, 推定誤差 δ を

$$\xi = \hat{\xi}(1 + \delta) \quad (42)$$

と定義し, $|\delta| < 1$ を仮定することは妥当であると考ええる。以下, これらの仮定のもとに ξ の推定誤差に関して制御系がロバスト安定性を有する条件を導く。式(26)~(41)を式(22)と式(23)に代入すると, 制御系の特性多項式が以下のように得られる。

$$\begin{aligned} |sI - (A - BF)| = & \{s^4 + (c_1 + c_3)s^3 + (c_1 c_3 + c_2 + c_4 - \hat{\xi} + \xi)s^2 \\ & + (c_1 c_4 + c_2 c_3)\frac{\xi}{\hat{\xi}}s + c_2 c_4 \frac{\xi}{\hat{\xi}}\} \\ & \times \{s^4 + (c_5 + c_7)s^3 + (c_5 c_7 + c_6 + c_8 - \hat{\xi} + \xi)s^2 \\ & + (c_5 c_8 + c_6 c_7)\frac{\xi}{\hat{\xi}}s + c_6 c_8 \frac{\xi}{\hat{\xi}}\} \end{aligned} \quad (43)$$

Lienard と Chipart の安定判別法⁽¹⁵⁾によれば, 式(43)が安定であるための必要十分条件は, 以下のとおりである。

$$a_i, \dots, a_{i+3} > 0, i = 1, 5 \quad (44)$$

$$a_{i+2}(a_i a_{i+1} - a_{i+2}) - a_i^2 a_{i+3} > 0, i = 1, 5 \quad (45)$$

$$\begin{aligned} a_i &= c_i + c_{i+2}, a_{i+1} = c_i c_{i+2} + c_{i+1} + c_{i+3} - \hat{\xi} + \xi, \\ a_{i+2} &= (c_i c_{i+3} + c_{i+1} c_{i+2})\frac{\xi}{\hat{\xi}}, a_{i+3} = c_{i+1} c_{i+3} \frac{\xi}{\hat{\xi}}, i = 1, 5 \end{aligned}$$

式(44)と式(45)を満たす望ましい特性多項式の係数 $c_1, \dots, c_8$ の範囲を一般的に議論することは困難である。以下の議論では, 簡単化のために, 制御対象の固有周波数を保存するような極配置

$$c_4 = c_8 = \hat{\xi} \quad (46)$$

を仮定する。この仮定の下に, 式(44)は明らかに満足されている。式(45)の左辺は, 式(42)を考慮すると

$$\begin{aligned} & c_i^3 c_{i+2} \xi + c_i^2 c_{i+2}^2 \xi + c_i c_{i+2} \xi^2 - 2c_i c_{i+1} c_{i+2} \xi + c_i c_{i+1}^2 c_{i+2} \\ & + c_i^2 c_{i+1} c_{i+2}^2 + c_i c_{i+1} c_{i+2}^3 + c_i c_{i+1}^2 c_{i+2} \delta + c_i^2 c_{i+1} c_{i+2}^2 \delta \\ & + c_i c_{i+1} c_{i+2}^3 \delta + c_{i+1} c_{i+2}^2 \xi \delta - c_i c_{i+1} c_{i+2} \xi \delta - c_{i+1}^2 c_{i+2}^2 \delta \\ & - c_{i+1}^2 c_{i+2}^2 \delta^2, i = 1, 5 \end{aligned} \quad (47)$$

となる。

$\delta < 0$ の場合には, 式(47)の項の一部を以下のように組分けし, それぞれを比較する。

$$\begin{aligned} & (c_i^3 c_{i+2} \xi, -2c_i c_{i+1} c_{i+2} \xi), (c_i c_{i+1}^2 c_{i+2}, c_i c_{i+1}^2 c_{i+2} \delta), \\ & (c_i^2 c_{i+1} c_{i+2}^2, c_i^2 c_{i+1} c_{i+2}^2 \delta), (c_i c_{i+1} c_{i+2}^3, c_i c_{i+1} c_{i+2}^3 \delta), \\ & (c_i^2 c_{i+2}^2 \xi, c_{i+1} c_{i+2}^2 \xi \delta), (-c_{i+1}^2 c_{i+2}^2 \delta, -c_{i+1}^2 c_{i+2}^2 \delta^2); \\ & i = 1, 5 \end{aligned} \quad (48)$$

$\delta > 0$ の場合には, 以下の各組を比較する。

$$\begin{aligned} & (c_i^3 c_{i+2} \xi, -c_i c_{i+1} c_{i+2} \xi \delta), (c_i^2 c_{i+1} c_{i+2}^2 \delta, -c_{i+1}^2 c_{i+2}^2 \delta) \\ & (c_i^2 c_{i+1} c_{i+2}^2, -c_{i+1}^2 c_{i+2}^2 \delta^2); \quad i = 1, 5 \end{aligned} \quad (49)$$

式(48)と式(49)における比較により, 式(45)が満たされるための十分条件(ロバスト安定条件)の一つとして,

$$c_i^2 \geq 2c_2, c_5^2 \geq 2c_6 \quad (50)$$

が得られる。

3・5 搬送物質量の推定誤差に関するロバスト性能 前節では, 搬送物質量の推定誤差に関するロバスト安定性を確保するための十分条件を示した。本節では, その条件を満たしつつロバスト性能を確保するための一方法を提案する。定値制御においては, 制御系の代表極を図3(a)の斜線部分の範囲に選ぶことが良いとされている⁽¹⁶⁾。ただし, 図3(a)において, $\sigma = 12[^\circ] \sim 24[^\circ]$ である。本制御系がロバスト性能を有するために, 推定パラメータ $\hat{\xi}$ が真値に収束したときの代表極を実軸上に配置することとする。推定誤差が生じた場合にも図3(a)の斜線部分の範囲に代表極が配置される可能性が高くなるためである。

Fig. 3 Pole placement for robust performance

上記の前提下に前節のロバスト安定性解析の前提条件の一つである式(46)を考慮し、式(24)の残りの係数を以下のように指定することを提案する。

$$c_i = 2.0\kappa\sqrt{\xi}, c_{i+1} = \kappa^2\xi, c_{i+2} = 2.0\sqrt{\xi}, i = 1, 5 \quad (51)$$

ただし、 κ は代表極とそれ以外の極の間の位置関係を調整するための係数である。

式(51)の条件は、ロバスト安定性の十分条件である式(50)を満足している。

この方法により、 $\hat{\xi}$ が真値に収束したときの制御系の極は、図3の(b)のように配置される。図3の(b)における極 $-\sqrt{\xi}$ 、 $-\kappa\sqrt{\xi}$ はそれぞれ重極となっている。 κ の値によっては、いずれもが代表極になり得る。

4. 実験結果

実験により、本論文で提案した制御方法の有効性を検証した。実験装置の緒元は表1のとおりである。旋回関節の角度はロータリエンコーダにより、並進関節の振れ角はひずみゲージにより計測した。それぞれの角速度は角度の時間差分値を用い、サンプリング周期は5[msec]とした。旋回関節の初期状態における角度をそれぞれ $q_1 = 0^\circ$ 、 $q_2 = 90^\circ$ とし、目標角度を $q_{1d} = -50^\circ$ 、 $q_{2d} = 140^\circ$ とした。また、実際の制御においては、静止摩擦と動摩擦を補償するための入力を加えている。

搬送のみを行った結果を図4(a)に示す。式(8)の調整パラメータは、 $k_{p1} = k_{p2} = k_{r1} = k_{r2} = 25[1/\text{sec}^2]$ 、 $k_{D1} = k_{D2} = 15[1/\text{sec}]$ とした。式(13)の推定値の初期値は $\hat{\xi}(0) = 5[1/\text{sec}^2]$ とし、式(14)の適応ゲインの初期値は $F(0) = 5$ とした。旋回関節の角度はそれぞれの目標値に到達しているが、並進関節の振れ角 θ_1, θ_2 においては、共に残留振動が生じている。未知パラメータ $\hat{\xi}$ はほぼ真値に収束している。

つぎに制振を行った結果を図4(b)に示す。搬送の段階における各パラメータは、図4(a)の場合と同様である。極配置の方法は、式(51)において $\kappa = 0.5$ とした。 $\hat{\xi} = \xi$

Table 1 Parameter values for the experimental system

I_{G1}	2.82×10^{-2}	[kgm ²]
I_{G2}	1.91×10^{-2}	[kgm ²]
m_1, m_2	1.72	[kg]
l_1, l_2	0.2	[m]
d_1, d_2	0	[m]
m	0.57	[kg]
l	0.37	[m]
k	137	[N/m]
J_1	3.08×10^{-5}	[kgm ²]
J_2	7.84×10^{-6}	[kgm ²]
D_1	4.8×10^{-5}	[Nm sec/rad]
D_2	1.16×10^{-4}	[Nm sec/rad]
C_1	4.06×10^{-2}	[Nm/V]
C_2	2.89×10^{-2}	[Nm/V]
N_1	1/88	
N_2	1/100	

となった場合の極は、 $-15.503[1/\text{sec}]$ 、 $-7.752[1/\text{sec}]$ の重極となる。搬送から制振に制御則を切り換える条件は、 $|e_i| < 5^\circ$ 、($i = 1, 2$)とした。図4(b)により本論文で提案する制御方法の有効性が確認できる。

さらに、旋回関節の目標角度のみを $q_{1d} = -30^\circ$ 、 $q_{2d} = 120^\circ$ に変更した場合の実験結果を図4(c)に示す。この場合には、推定時間が短いため、推定誤差が大きいかにもかかわらず、ロバスト安定条件[式(50)]を満たす極配置[式(46), (51)]がなされているため、制振の効果は図4(b)の場合とほとんど変わっていない。

式(24)の望ましい特性多項式において、 $c_1 = c_3 = c_5 = c_7 = 5[1/\text{sec}]$ 、 $c_2 = c_6 = 150[1/\text{sec}^2]$ 、 $c_4 = c_8 = \hat{\xi}$ と指定し、他の条件を図4(c)の場合と同様にした実験結果を図4(d)に示す。これは式(50)の条件を満足していない場合であり、良好な制振が行われていない。よって、本論文で提案する望ましい特性多項式の指定方法は有効であるといえる。

図5は本実験で用いた $\kappa = 0.5$ において、推定誤差 δ が $\delta = -0.7 \sim 0.7$ の範囲で変化したときの制御系の極の軌跡を示したものである。丸印は $\delta = 0.0$ における極の位置である。推定誤差 δ が変化しても、制御系の極は図3(a)の斜線の範囲に存在しており、ロバスト性能を有していることが確認できる。

5. 結 言

本論文では、スカラ型ロボットによる搬送物の水平面内の移動のための一適応制御手法について述べた。はじめに、スカラ型ロボットの並進関節の振動を考慮した動特性を表わす数式モデルを導出した。つぎに、

Fig. 4 Experimental results

旋回関節を目標角度近傍まで駆動するために、不足駆動系でない多関節型ロボットに対して従来より用いられている方法が、搬送物質量が未知の場合にも応用できることを示した。さらに、旋回関節を目標角度近傍まで駆動する間に、搬送物質量を推定する方法を提案した。旋回関節の目標角度近傍における制御対象の線形化モデルを導出し、そのモデルを対象とした極配置制御系の設計方法を示した。その極配置制御系の搬送物質量の推定誤差に関するロバスト性についても検討を行った。最後に実験を通じて本論文で提案する制御方法の有効性を確認した。

文 献

- (1) 加藤典彦・藤井省三・早川義一, 機論, **57**-538, C(1991), 1952.
- (2) Sastry, S. S., and Ishidori, A., IEEE Trans. Auto. Contr., **34**-11, (1989), 1123.
- (3) Landau, I. D., System Identification and Control Design, (1990), 134, Prentice Hall.
- (4) 小郷寛・美田勉, システム制御理論入門 (1979), 133, 実教出版.
- (5) 坂和愛幸・中住晃, 計測自動制御学会論文集, **21**-3, (1985), 298.
- (6) 田村捷利・常川聡・小林正人, 機論, **54**-504, C(1988), 1795.
- (7) 山浦弘・小野京右, 機論, **54**-508, C(1988), 2997.
- (8) 相良慎一・大川不二夫, 機論, **56**-526, C(1990), 1494.
- (9) 平野信行・戸谷隆美, 機論, **57**-534, C(1991), 546.
- (10) 岩田義明・中田聡・渡辺敦, 機論, **57**-534, C(1991), 563.
- (11) 小林正人・田村捷利, 機論, **58**-548, C(1992), 1318.
- (12) 橋本幸男・土谷武士・松岡敏彦・杉岡一郎, 計測自動制御学会論文集, **30**-2, C(1994), 172.
- (13) 相良慎一・大川不二夫, 機論, **60**-578, C(1994), 3322.
- (14) 多田博夫・井上喜雄・大嶋真人・芳村敏夫, 機論, **63**-605, C(1997), 47.
- (15) 高本章二, メカトロニクスのための制御工学(1993), 115, コロナ社.
- (16) 文献(15)の156.

Fig. 5 Root locus with respect to δ