柔軟構造物のフレキシビリティ制御*

(第3報, 柔軟構造物ハンドリングのための物理パラメータ同定)

新井 史人^{*1}, 福田 敏男^{*1}

Flexibility Control of Flexible Structures

(3rd Report, Physical Parameters Identification for Flexible Structures)

Fumihito ARAI and Toshio FUKUDA

This paper proposes physical parameters identification of flexible structures handled by robots. A simplified physical model based on the constrained mode method is derived in this paper. Using this model, we present two kinds of identification algorithms: the first one uses the least squares method. In this algorithm, we analyze the effects of neglected residual modes on the identification results. In some cases, neglected residual modes in the algorithm causes degradation (bias) of the identification results. We reveal that this degradation (bias) can be removed to some extent by simply feeding back the velocity of the elastic displacement adequately. We also describe desirable sensor position. The second algorithm uses the extended kalman filter by which we can identify the physical parameters without using acceleration information. Some simulation examples of identification are shown to confirm the effectiveness of these two methods.

Key Words: Robotics, Identification, Filter, Distributed System, Flexible Material Handling, Least Squares Method, Desirable Sensor Position, Extended Kalman Filter

1. はじめに

産業用ロボットアームは基本的にエンドエフェクタ部で十分な位置決め精度ができるように設計されている。このため、ペイロードが剛体である場合には所望の精度での高速制御が容易に行える。ところが、金属板金に代表されるフレキシブルな薄板をペイロードとする場合、ペイロード自身の弾性変形によるたわみや振動が無視できないため、所望の位置決め精度や高速制御は望めず、作業効率は大幅に低下し、時にはペイロードを傷つけてしまう危険性すらある。近年、板金加工等における加工材は薄形化、大形化してきており、このような柔軟材の運搬、金属加工機への挿入等のハンドリング作業をロボット・マニピュレータを用いて自動化し、作業・生産効率を大幅に向上することへの期待が大きくなってきている。しかし、この実現性に関する具体的な研究成果は見当たらない。

最近では、大形宇宙構造物やフレキシブルロボット・マニピュレータ等に代表されるような柔軟構造物の制御に関する研究が盛んである^{(1)~(11)}。本研究では、

既報においてフレキシビリティ制御を提案し、柔軟構造物の機械振動を能動的に制御する方法および方策等について述べてきた^{(2)~(7)}。既報ではモデルのパラメータが既知である場合を取扱ってきたが、実際問題を考えると、一般にパラメータは未知である場合が多い。また、先に述べた柔軟材のハンドリング制御となると、基本的にパラメータは未知である。柔軟材のハンドリング制御は、柔軟材のたわみおよび振動をアクティブに補償⁽⁸⁾・制御⁽⁷⁾⁽¹¹⁾するという点で、一種の柔軟構造物の制御問題としてとらえることができ、基本的制御戦略は従来フレキシブルロボット・マニピュレータの制御等で論じられてきたものと同一である⁽⁷⁾⁽¹¹⁾。従来まで論じられてきた柔軟構造物の制御問題に比べ、ロボットによる柔軟材のハンドリング問題をより困難にしている要因は主に以下の点にある。

(1) パラメータ同定の必要性

一般にペイロードの種類は複数存在するため、パラメータは未知である。補償および振動制御を行うには、柔軟材のパラメータ同定が必要となる。

(2) センサ・アクチュエータ選定上の制約

振動制御においては差動形太陽電池センサやひずみゲージに代表される対象物設置形センサの有効性が示されている^{(1)~(5)}が、柔軟材を制御対象とする場合、間

* 原稿受付 平成2年3月30日。

*¹ 正員、名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町1)。

接的な振動センシング手法をとらざるをえない。また作業工程上、センサ・アクチュエータを複数使用することが困難であり、理論および実用上の制約が厳しくなる。

ロボットによる柔軟材のハンドリングにおいては、振動制御あるいは補償制御のための物理モデル同定あるいは形状計測を(2)の制約の元で実現する必要がある、アプローチ方法としては以下の手法が考えられる。

A. 形状計測(EX:テレビカメラ)・モデルデータベースマッチング+形状計測結果・データベースモデルに基づいた補償・振動制御

B. 既知入力単点励振による直接/反復的手法による物理モデル同定+同定モデルに基づいた補償・振動制御

C. 適応フィルタリングによるシステム同定・振動制御+同定モデルに基づいた補償制御

本論文では以上のような背景を踏まえ、物理パラメータが未知である柔軟構造物の位置/姿勢および振動をアクティブに補償・制御することを念頭に置き、B, Cの手法に基づいた物理モデルの同定手法を提案し、シミュレーションによりその有効性の検討を行う。

2. モデル化

本論文で取扱う対象モデルを図1~3に示す。図2におけるセンサは渦電流センサに代表されるような非接

図1 柔軟構造物(柔軟材)

図2 エンド・エフェクタ(柔軟材保持)

図3 モデル

触タイプのセンサを想定しており、間接的な振動センシングが可能であるとする。図3に示すような柔軟構造物の曲げ振動のモデル化手法⁽²⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾には各種の流儀があるが、ここでは物理モデルの同定を目的とし、拘束モード法によるモデル化を考える。重力はXY平面のY軸負方向に働くとし、仮定として

(1) w は微小である。

(2) 柔軟構造物の断面形状、密度 ρ 、断面積 A 、曲げ剛性 EI は x 軸にわたって一定である。

(3) 曲げ振動において回転慣性とせん断変形の影響を無視する。

の定める。柔軟構造物の曲げ振動のみを考えると、系の運動は次の偏微分方程式で記述される。

$$J_r \ddot{\theta}(t) + \rho A \int_0^L x \ddot{w}(x, t) dx = u(t) - \rho A g \cos \theta \int_0^L x dx \quad (1)$$

$$\rho A \{x \ddot{\theta}(t) + \ddot{w}(x, t)\} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x, t) = -\rho A g \cos \theta \quad (2)$$

ただし、 $w(x, t)$ は柔軟付属物の弾性変位で微小とする拘束モード法では

$$\ddot{\theta}(t) \equiv 0 \quad (3)$$

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) r_i(t) \quad (4)$$

を展開式としてモード関数を求める。

境界条件

$$w(0, t) = \frac{\partial w}{\partial x}(0, t) = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(L, t) = \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}(L, t) = 0 \quad (5)$$

および直交条件

$$\rho A \int_0^L \phi_i(x) \phi_j(x) dx = K \delta_{ij} \quad (6)$$

$$EI \int_0^L \phi_i''(x) \phi_j''(x) dx = K \Omega_i^2 \delta_{ij} \quad (7)$$

ただし、 $[\]'' \equiv d^2/dx^2[\]$

K は任意定数であるが、ここでは $K=1$ とおく。 Ω_i は1次モードの固有振動数である。

を用いて式(1)、(2)の偏微分方程式から次の集中化系を得る。

$$J_r \ddot{\theta}(t) + \rho A \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^L x \phi_i(x) dx \dot{r}_i(t) = u(t) - \rho A g L^2 / 2 * \cos \theta \quad (8)$$

$$\ddot{r}_i(t) + \Omega_i^2 r_i(t) + \rho A \int_0^L x \phi_i(x) dx \ddot{\theta}(t) = -\rho A g \cos \theta \int_0^L \phi_i(x) dx \quad (9)$$

ここで、 $x=x_s$ での弾性変形によるたわみを w_s と置くと、式(4)より w_s は

$$w_s(t) = w(x_s, t) \\ = \phi_1(x_s) r_1(t) + \sum_{i=2}^{\infty} \phi_i(x_s) r_i(t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

と書けるため、

$$r_1(t) = 1/\phi_1\{w_s(t) - \sum_{i=2}^{\infty} \phi_{is} r_i(t)\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし $\phi_{is} = \phi_i(x_s)$

となる。(11)をもとに式(8),(9)を変形すると次のような運動方程式を得る。

$$J_r \ddot{\theta}(t) + c_0 \dot{\theta}(t) + P_1(x_s, t) \dot{w}_s(t) + R_1(x_s, t) \\ = u(t) - \rho A g L^2 / 2 \cos \theta \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$P_1 = \rho A \int_0^L \phi_1(x) / \phi_1(x_s) dx \\ \dot{w}_s(t) + \Omega_1^2 w_s(t) + P_2(x_s, t) \ddot{\theta}(t) + R_2(x_s, t) \\ = -\phi_1(x_s) \rho A g \cos \theta \int_0^L \phi_1(x) dx \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$P_2 = \phi_1(x_s) \rho A \int_0^L x \phi_1(x) dx$$

ただし、 R_1, R_2 は2次モード以上の振動成分からなり次のように表される。

$$R_1(x_s, t) \\ = \sum_{i=2}^{\infty} \rho A \int_0^L x \{\phi_i(x) - \phi_1(x) \phi_i(x_s) / \phi_1(x_s)\} dx \ddot{r}_i \\ \dots\dots\dots (14)$$

$$R_2(x_s, t) \\ = -\sum_{i=2}^{\infty} \phi_i(x_s) \ddot{r}_i(t) - \Omega_1^2 \sum_{i=2}^{\infty} \phi_i(x_s) \ddot{r}_i(t) \dots\dots\dots (15)$$

w_s は渦電流センサ等により測定できるが、 R_1, R_2 は一般に測定不可能である。

さらに、式(12),(13)は静たわみ曲線 $\phi_1(x)$ を用いて簡略化することができる。すなわち

$$\phi_1 \doteq \hat{\phi}_1 \\ = c \phi_0 (2x^2/L^2 - 4/3 * x^3/L^3 + 1/3 * x^4/L^4) \\ = c \phi_0 F(x) \quad \dots\dots\dots (16)$$

ただし

$$\phi_0 = \rho A L^4 / (8EI) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$F(x) = (2x^2/L^2 - 4/3 * x^3/L^3 + 1/3 * x^4/L^4) \\ \dots\dots\dots (18)$$

とし、直行条件式(6),(7)を満足するように c を定めると、式(12),(13)は次のように変形できる。

$$J_r \ddot{\theta} + c_0 \dot{\theta} + P_{1a} \dot{w}_s + R_1 \\ = u - \frac{\rho A g L^2}{2} \cos \theta \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\dot{w}_s + \Omega_{1a}^2 w_s + P_{2a} \ddot{\theta} + R_2 = -81/52 F_s g \cos \theta \\ \dots\dots\dots (20)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} P_{1a} &= 13/45 \cdot \rho A L^2 / F_s \\ P_{2a} &= 9/8 \cdot L \cdot F_s \\ F_s &= F(x_s) \\ \Omega_{1a}^2 &= 12.36 EI / (L^4 \rho A) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

物理パラメータ同定用モデルとして、式(12),(13)あるいは式(19),(20)を導出したが、柔軟構造物の形状パラメータ、材質パラメータ等は同定用モデルの係数パラメータを同定した後、式(21)を連立して解くことにより容易に計算可能である。ただし、式(19),(20)には Ω_1 および ϕ_1 の近似が含まれているため、式(21)を用いて変換する場合は係数パラメータから他のパラメータへの変換時に誤差がのる可能性が高く、注意が必要である。厳密性を必要とする場合は式(12),(13)の係数パラメータと必要とするパラメータとの関係を調べ、あらかじめキャリブレーションをとっておく必要がある。

3. 最小二乗法による

物理パラメータの同定

3.1 残留モードの影響 ロボットのよる柔軟材のハンドリング制御を例に取って考えると、振動制御あるいは補償制御のための物理モデル同定あるいは形状計測が必要となる。柔軟材のパラメータは、(a)形状パラメータ (L, h, d, J_r)、(b)材質パラメータ (密度 ρ , 曲げ剛性 EI)、(c)モーダルパラメータその他と分類できるが、一般には(a)が未知であることが多い。ここでは、柔軟材の形状パラメータの同定を例にとり、物理モデルの同定手法として最小二乗法を用いた手法を提案する。すなわち、既知入力単点励振による直接/反復的手法による物理モデル同定手法について述べる。

式(12)より、原点まわりの運動方程式は

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ \dot{w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_r \\ c_0 \\ P_1 \end{bmatrix} = u - R_1 \quad \dots\dots\dots (22)$$

または

$$\mathbf{Z}^T \mathbf{P} = u - R_1 \quad \dots\dots\dots (23)$$

と書ける。式(23)を基にし、最小二乗法をベースとする同定アルゴリズムを用いて $\mathbf{P}(J_r, P_1)$ を同定できる。ただし、 $\mathbf{Z}$ より加速度情報 $\ddot{\theta}$ および $\dot{w}_s$ を必要とすることに注意を要する。加速度情報が得られるという前提の基では、 $t=1, 2, \dots, N$ と置いて得られる N 個の方程式をまとめた線形回帰モデル

$$\mathbf{ZP} = u - R_1 \quad \dots\dots\dots (24)$$

から、 $\mathbf{P}$ の推定値は最小二乗法より次式で与えられ

る。

$$\hat{P} = (Z^T Z)^{-1} Z^T u - (Z^T Z)^{-1} Z^T R_1 \dots\dots\dots (25)$$

一般に測定値 Z には雑音の影響が含まれるが、白色雑音を仮定すると、 R_1 が測定可能なときに P の最小二乗推定 $\hat{P}$ は一致推定量となる ($\hat{P} = P$, $N \rightarrow \infty$: 強一致性) ことが知られている⁽¹²⁾。ところが、実際は $R_1(i)$ は測定不可能なため、これを無視して

$$P = (Z^T Z)^{-1} Z^T u \dots\dots\dots (26)$$

により同定を行うと、推定値は

$$\hat{P} = P + (Z^T Z)^{-1} Z^T R_1 = P + P_E \dots\dots\dots (27)$$

となり推定値 $\hat{P}$ にはバイアスが生じる可能性がある。これは式(11)からの変形を考えれば、同定における一種の観測スピロオーバー(OS)の影響と考えることができる。これより、分布定数系の物理パラメータ同定における同定精度は

$$P_E = (Z^T Z)^{-1} Z^T R_1 \dots\dots\dots (28)$$

の大小で評価できることがわかる。 $R_1(i)$ の影響が全体的に無視できないほど大きい場合 P_E は 0 に収束せず同定精度の劣化を招くことになる。

$R_1(i)$ による同定精度の劣化をなるべく回避するには、 $N \rightarrow \infty$ で最終的に P_E をなるべく小さい値 (0) に収束させることを考えればよい。式(22), (28)をみると

① 制御スピロオーバー(CS)による残留モードの励起を極力抑える。

② 振動制御(特に2次モード以降に効果がある)を行いながら同定する。

が考えられる。以上を J_r のみを同定する場合を例にとって簡単に説明する。このときのバイアス J_{rE} は

$$J_{rE} = \sum_{i=1}^N \ddot{\theta}(i) R_1(i) / \sum_{i=1}^N \ddot{\theta}(i)^2 \dots\dots\dots (29)$$

となる。 J_{rE} を小さくするためには式(29)の分子が分母に比べて十分小さければよい。このとき

$$\lim_{N \rightarrow \infty} J_{rE} = 0 \dots\dots\dots (30)$$

となるならば $\hat{J}_r = J_r$ が言える。式(30)を成立しやすくするためには、具体的に次のような方策が考えられる。

(i) 振動制御をかけながら同定し、 $R_1(i) [\ddot{v}_2(i), \ddot{v}_3(i), \dots]$ を全体的に小さくする。

(ii) 式(14)における

$$\Gamma_i(x_s) = \int_0^L x \{ \psi_i(x) - \psi_1(x) \psi_i(x_s) / \psi_1(x_s) \} dx$$

が小さくなるような位置にセンサ w_s を置く。

ただし、振動制御を行う場合はポジティブダンピングに注意する。

3.2 逐次形最小二乗法によるシミュレーション例

図3に示すモデルを対象に分布定数系の物理パラメータの同定シミュレーションを行う。シミュレーションに用いるシステムモデルは厳密性を重視し、非拘束モード法によるものとし、系に働く粘性抵抗を各モード独立に扱えると仮定して考慮する ($c_0 = 0.0001$, $\zeta_i = 0.05$)。ただし、簡略化のために重力の影響は考慮しない。一方、同定用のモデルは式(12), (13)で示した拘束モード法をベースにしたモデルとする。モデルのパラメータを以下のように定める。

$$J_h = 0.01 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$\rho = 2070 \text{ [kg/m}^3]$$

$$A = 7 \times 10^{-5} \text{ [m}^2]$$

$$(H = 0.14 \text{ [m], } t = 0.0005 \text{ [m]})$$

$$EI = 5.73 \times 10^{-2} \text{ [N} \cdot \text{m}^2]$$

$$c_0 = 0.0001$$

R_1 無視によるバイアス発生をなるべく回避するため3.2節①, ② [(i), (ii)] を考慮し、制御入力を

$$u(t) = A \sin \omega_f t - k_v \dot{w}_s \dots\dots\dots (32)$$

とし、逐次形最小二乗法を用いて P すなわち J_r , P_1 を同定する場合を考える。柔軟材の形状パラメータ (L, A) は J_r , P_1 から算出できる。逐次形最小二乗法のアルゴリズムは、

$$\begin{aligned} \hat{P}(i) &= \hat{P}(i-1) + K(i) \\ &\times \{ u(i) - R_1(i) - Z(i) \hat{P}(i-1) \} \dots\dots\dots (33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K(i) &= P(i-1) Z(i)^T \\ &\times \{ Z(i) P(i-1) Z(i)^T + 1 \}^{-1} \dots\dots\dots (34) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(i) &= -P(i-1) Z(i)^T \\ &\times \{ Z(i) P(i-1) Z(i)^T + 1 \}^{-1} Z(i) P(i-1) \\ &\dots\dots\dots (35) \end{aligned}$$

となる⁽¹²⁾。(23)式において R_1 が既知の時、初期値

$$P(0) = 0$$

$$P(0) = \alpha I \quad (\alpha \text{ は十分大きな正数})$$

と選ぶと、文献(12)の138ページから、

$$\begin{aligned} P(N) &= \{ P(0)^{-1} + \sum_{i=1}^N Z(i) Z(i)^T \}^{-1} \\ &\times \{ \sum_{i=1}^N Z(i) [u(i) - R_1(i)] + P(0)^{-1} P(0) \} \\ &= \{ 1/\alpha \cdot I + \sum_{i=1}^N Z(i) Z(i)^T \}^{-1} \\ &\times \{ \sum_{i=1}^N Z(i) u(i) - \sum_{i=1}^N Z(i) R_1(i) + 1/\alpha \cdot P(0) \} \\ &\dots\dots\dots (36) \end{aligned}$$

となるため、

$$\begin{aligned} \lim_{N \rightarrow \infty} P(N) &= \{ \sum_{i=1}^N Z(i) Z(i)^T \}^{-1} \\ &\times \{ \sum_{i=1}^N Z(i) u(i) - \sum_{i=1}^N Z(i) R_1(i) \} \\ &= (Z^T Z)^{-1} (Z^T u - Z^T R_1) \end{aligned}$$

$$=(Z^T Z)^{-1} Z^T u - (Z^T Z)^{-1} Z^T R_1 \quad \dots\dots\dots (37)$$

から, α を大きく選べば最小二乗法 [式(25)] と逐次形最小二乗法 [式(37)] とでは同一の同定結果となる⁽¹²⁾. 式(32)において, (i) $k_v=0$, (ii) $K_v \neq 0$ 各場合について逐次形最小二乗法での同定結果の比較を表1に示す. 表1より, 振動制御を行い, 2次モード以上の高次モードの影響をなるべく小さくしながら同定を行うほうが,

1. 収束が速い
2. 推定精度が良い

の2点において優れることがわかる. 特にサンプル5 ($L=1.4$ [m]) の場合, 振動制御なしでは $L=1.1$ [m] となる. 図3において $\theta=0$ [°] のとき, 重力下での柔軟材先端のたわみ w_L は

$$w_L = \rho A g L^4 / (8EI) \quad \dots\dots\dots (38)$$

となることから, L の四乗が w_L に影響することがわ

表1 逐次形最小二乗法による柔軟材の長さ L の同定結果

Sample L [m]		0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
Convergence (error < 3%) Time [s]	$k_v = 0$	0.75	1.86	4.12	—	—
	$k_v \neq 0$	0.72	1.33	2.40	4.02	6.64
Identifi- cation Result L [m]	$k_v = 0$	0.61	0.80	1.00	1.15	1.17
	$k_v \neq 0$	0.61	0.81	1.01	1.21	1.38

図4 モード関数の比較

図5 センサ位置と Γ_i の関係

かる. このため, L の同定誤差がロボット・マニピュレータによる重力下での補償制御に悪影響を及ぼす可能性が高くなると言える. この点に関して式(32)における k_v の役割は極めて大きいといえる.

次にセンサ設置位置と同定精度との関係について調べる. $L=1.2$ [m] の場合を例にとると, このときのモード関数は図4のようになる. ϕ_i は非拘束モード法によるモード関数, ψ_i は拘束モード法によるモード関数を表す. センサ設置位置を $L_{sx}=0 \sim L$ で変化させたときの $\Gamma_i(x)$ は図5のようになる. 図5より, センサ設置位置は柔軟材の先端に近い位置にするほうがエンド

図6 逐次形最小二乗法による物理パラメータ同定 (振動制御なしの場合: $L_{sx}=0.1$ [m])

図7 逐次形最小二乗法による物理パラメータ同定 (振動制御ありの場合: $L_{sx}=0.1$ [m])

図8 逐次形最小二乗法による物理パラメータ同定 (振動制御なしの場合: $L_{sx}=0.4$ [m])

エフェクタ付近にする場合よりも Γ_i すやわち $R_i(i)$ の絶対値が小さくなるため、バイアス P_E は小さく収束スピードもよいことがわかる。{図 6 ($L_{sx}=0.1$ [m]), 図 8 ($L_{sx}=0.4$ [m]) で比較}。実用上からは柔軟材の先端付近の振動を計測することは困難であるが、エンドフェクタ付近の振動を計測する場合 [$L_{sx}/L=0.08$] でも振動制御との併用により同定時に生じるバイアスをかなり除去することができる(図 6 ($k_v=0$, $l_{sx}=0.1$ [m]), 図 7 ($k_v \neq 0$, $l_{sx}=0.1$ [m]) で比較)。以上、最小二乗法をベースとした本手法によれば、同定可能な L の範囲をかなり広くとれる。

4. 拡張カルマンフィルタによる 物理パラメータの同定

前章で述べた最小二乗法による物理パラメータ同定手法では同定可能範囲を広くとれたが、加速度情報が必要とした。加速度情報は速度情報、位置情報から差分近似、スプライン補間(例えば、ワン・パス法⁽¹³⁾)後の差分近似等から近似的に得ることが可能であるが、ノイズの影響あるいは同定モデル上で無視した残留モード成分の影響を受けやすく、実用的側面からは好ましいとはいえない。本節では位置情報(および速度情報)のみから柔軟材の物理パラメータを同定する手法として拡張カルマンフィルタを用いた方法を提案する。

式(12), (13), (19), (20)より、柔軟構造物の運動方程式は次のように書けるとする。ただし、ここでは重力の影響は考えない。

$$\begin{bmatrix} J_r & P_1 \\ P_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{w}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Omega_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ w_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (39)$$

ここで、状態ベクトル x および観測ベクトル y をそれぞれ

$$x(x_s, t) = [\theta \quad \dot{\theta} \quad w_s \quad \dot{w}_s]^T \quad \dots\dots\dots (40)$$

$$y(x_s, t) = [\theta \quad \dot{\theta} \quad w_s]^T \quad \dots\dots\dots (31)$$

と置くと、状態方程式および観測方程式は次のようになる。

$$\dot{x} = Ax + bu \quad \dots\dots\dots (42)$$

$$y = cx \quad \dots\dots\dots (43)$$

ただし、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b = [0 \quad 1/\beta \quad 0 \quad -P_2/\beta]^T$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\beta = J_r - P_1 P_2 \quad \dots\dots\dots (44)$$

$$a_1 = J_r \Omega_1^2 / \beta \quad \dots\dots\dots (45)$$

$$a_2 = P_1 \Omega_1^2 / \beta \quad \dots\dots\dots (46)$$

式(42), (43)を離散化し、未知パラメータ P を含む以下の線形システムを考える。

$$x(i+1) = A(P)x(i) + b(P)u(i) + w(i) \quad \dots\dots\dots (47)$$

$$y(i) = C(P)x(i) + v(i) \quad \dots\dots\dots (48)$$

ここで、 $w(i)$, $v(i)$ は平均値 0, 共分散行列

$$E[w(i)w(j)^T] = Q(P)\delta_{ij}$$

$$E[v(i)v(j)^T] = R(P)\delta_{ij}$$

なる互いに独立なガウス白色雑音とする。また、初期値 $x(0)$ は平均値 0, 共分散行列 Σ_0 のガウス確率ベクトルで、 $x(0)$ は $w(i)$, $v(i)$ とは独立であるとする。このモデルを対象にして拡張カルマンフィルタを用いれば、インパルス入力を加えたときの応答から a_1, a_2 を同定することが可能である。 a_1, a_2 がわかれば、柔軟構造物の形状パラメータ(例えば L)あるいは材質パラメータ(例えば EI)は式(12), (13)あるいは式(19), (20)の係数パラメータ式から得ることができる。

今、

$$P(i) = [a_1(i) \quad a_2(i)]^T \quad \dots\dots\dots (49)$$

$$Z(i) = [x(i)^T \quad P(i)^T]^T \quad \dots\dots\dots (50)$$

と置くと、拡張カルマンフィルタのアルゴリズムは次のようになる⁽¹⁴⁾。

$$\hat{x}(i+1/i) = A\{\hat{P}(i/i)\}\hat{x}(i/i) + b\{\hat{P}(i/i)\}u(i) \quad \dots\dots\dots (51)$$

$$\hat{P}(i+1/i) = \hat{P}(i/i) \quad \dots\dots\dots (52)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(i/i) &= \hat{x}(i/i-1) \\ &+ K(i)\{y(i) - C[\hat{P}(i/i-1)]\hat{x}(i/i-1)\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (53)$$

$$\begin{aligned} \hat{P}(i/i) &= P(i/i-1) \\ &+ L(i)\{y(i) - C[\hat{P}(i/i-1)]\hat{x}(i/i-1)\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (54)$$

ただし、 $K(i)$, $L(i)$ はゲイン行列であり、

図9 拡張カルマンフィルタによる物理パラメータ同定 ($L=0.8$ [m])

図10 拡張カルマンフィルタによる物理パラメータ同定 ($L=1.2$ [m])

$$F(i) = \begin{bmatrix} A(\hat{P}(i/i)) & \frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} [A(\hat{P}(i/i)) \hat{\mathbf{x}}(i/i) + \mathbf{b}(\hat{P}(i/i)) u(i)] \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

$$H(i) = \begin{bmatrix} c(\hat{P}(i/i-1)) & \frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} [c(\hat{P}(i/i)) \hat{\mathbf{x}}(i/i-1)] \end{bmatrix}$$

と置くと次式により決定される。

$$K_L(i) = P(i/i-1)H(i)^T \cdot [H(i)P(i/i-1)H(i)^T + R(i)]^{-1}$$

$$P(i+1/i) = F(i)P(i/i)F(i)^T + Q(i), \quad P(0/-1) = \Sigma_0$$

$$P(i/i) = P(i/i-1) - P(i/i-1)H(i)^T \cdot [H(i)P(i/i-1)H(i)^T + R(i)]^{-1}H(i)P(i/i-1)$$

ただし, $K_L(i) = [K(i)^T \quad L(i)^T]^T$

次に拡張カルマンフィルタを用いて, 3・2節と同様, 柔軟材の物理パラメータの同定シミュレーションを行う。ここでは L の同定について考え, L 以外のパラメータはすべて既知とする。 $L=0.8$ [m] および 1.2 [m], の各場合についての未知パラメータ a_1, a_2 の同定シミュレーション結果を図9, 10に示す。ただし, このときの各初期値 $P(0)$ はともに $L=0.9$ [m] の場合の a_1, a_2 の値とした。図より, モデルにおいて2次モード以上を無視しても a_1, a_2 を同定することが可能であることがわかる。 a_1 の推定値から非拘束モード法での1次固有振動数を参考にし, 非拘束モード法によるモデルとのマッチングにより L を求めると,

$$L=0.8 \text{ [m] のとき } L=0.80 \text{ [m]}$$

$$L=1.2 \text{ [m] のとき } L=1.17 \text{ [m]}$$

となる。 L の値を 0.8 [m] と 1.2 [m] の間で変化させ, 同様なシミュレーションを行ったところ, 同定誤差はすべて3%以内に収まった。各種柔軟材の L の分布範囲が上記範囲内である場合は, 重力下でのロボットによる柔軟材先端部の補償制御を考慮に入れても十分実用性があり得るといえる。 L が上記区間以外の柔軟材に対し, 同じ初期値からスタートして a_1, a_2 を同定すると, 一般に同定誤差は大きくなる。同定可能な L の範囲に関して言えば, 最小二乗法を用いたアルゴリズムのほうが広い。

5. まとめ

本報ではロボットによる柔軟材のハンドリング作業を念頭に置き, 柔軟材のたわみ補償制御を可能とするための, 柔軟構造物の物理モデルの同定方法を提案した。最小二乗法をベースにした方法では残留モードを無視したときの同定精度への影響を明らかにし, 残留モード無視によって生じるバイアスを除去するための方策を提案した。最小二乗法をベースにしたアルゴリズムは同定可能範囲を比較的広くとれるが, 加速度情報を必要とするという欠点がある。そこで, 加速度情報を必要としない拡張カルマンフィルタを用いた方法を提案しその有効性をシミュレーションにより示した。拡張カルマンフィルタの同定可能範囲は最小二乗法のそれと比べると狭いが, この問題の解決策として, 拡張カルマンフィルタを並列的に構成することが考えられる。今後はロボットによる柔軟材のハンドリング実験を行う必要があると考えている。

終わりに, 本研究については東京理科大学工学部, 細貝英実氏に協力いただいたので謝意を表する。

文 献

- (1) 福田, フレキシブルロボットアームの制御(第1報, 一, 二自由度系の位置決め時の振動制御), 機論, 51-468, C

- (1985), 2140.
- (2) 福田・栗林・細貝・矢島, 太陽電池バドルのフレキシビリティ制御(第1報, 太陽光センサを用いた振動抑制・姿勢制御の一考え方), 機論, 51-465, C(1985), 979.
- (3) 福田・栗林・細貝・矢島, 太陽電池バドルのフレキシビリティ制御(第2報, 差動形太陽電池センサと状態推定による振動抑制・姿勢制御の一方法), 機論, 52-473, C(1986), 344.
- (4) 福田・細貝・矢島, 太陽電池バドルのフレキシビリティ制御(第3報, リアクションホイールの動特性を考慮したバドルの振動・姿勢制御方法), 文献(3)の349ページ.
- (5) 福田・新井・細貝・矢島, 太陽電池バドルのフレキシビリティ制御(第4報, 差動形太陽電池センサを用いたバドルのねじり振動抑制・姿勢制御), 機論, 53-487, C(1987), 744.
- (6) 福田・新井・細貝・矢島, 柔軟構造物のフレキシビリティ制御(第1報, 曲げ・ねじり連成振動のモデル化と制御方法), 機論, 54-499, C(1988), 630.
- (7) 福田・新井・細貝・矢島, 柔軟構造物のフレキシビリティ制御(第2報, 曲げ・ねじり連成系の制御方策), 機論, 55-510, C(1989), 365.
- (8) 姜・内山, 日本ロボット学会誌, 6-5(1988), 416.
- (9) 嘉納, 文献(8)の430ページ.
- (10) Habrani, H., Constrained and Unconstrained Modes : Some Modeling Aspects of Flexible Spacecraft, *J. Guidance Control*, 5-2(1981).
- (11) Balas, M. J., Active Control of Flexible Systems, *J. Opt. Theory Appl.*, 25-3(1978), 415.
- (12) 中溝, 信号解析とシステム同定, (1988), 132 コロナ社.
- (13) 市田・吉本・清野, 情報処理, 15-6(1974), 414.
- (14) 片山, 応用カルマンフィルタ, (1983), 156 朝倉書店.