3232 宇宙用2リンク柔軟ロボットアームの 姿勢変化とペイロードの不確かさを考慮したH ∞ ロバスト制御

H-infinity robust servo control of two links flexible robot arm
taking account of posture change and uncertain payload

○ 相川 量太 (日大), 両方 康朗 (日大),
正 渡辺 亨 (日大), 正 背戸 一登 (背戸振動制御研究所)

Ryouta AIKAWA, Nihon University, 1-8 Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo
Yasuaki RYOKATA, Nihon University, 1-8 Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo
Toru WATANABE, Nihon University, 1-8 Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo
Kazuto SETO, Seto-Vibration Control Laboratory, 5-8-4 Minami Shinagawa, Shinagawa, Tokyo

This paper presents a design procedure of H-infinity robust controller of three dimensional two links flexible robot arm taking account of posture change and uncertain payload. Bending and torsional coupled vibration characteristic of the arm is fluctuated by posture change and uncertain payload. Two-degree-of freedom (2DOF) model is applied to denote the two links flexible robot arm. Parameters of the model is identified experimentally by utilizing Seto's modeling method. To design robust H-infinity controller, two models are identified. Nominal model case denotes the state that two links are extended straight, while fluctuated model case denotes the state that two links are vertical to each links. Robust servo controller design procedure is introduced that applies the H-infinity control theory in consideration of the parameter change due to the posture change and holding payload. The H-infinity controller is obtained using a generalized plant including error matrices and two filters; Error matrices represent the fluctuation of parameters between nominal and fluctuated model. One filter is high-pass filter to avoid spillover, and the another filter is low-pass filter with integral characteristic to be used as an pseudo-integrator to achieve servo control. The effectiveness of the obtained controller are verified by the simulation and the control experiment.

Key Words: H-infinity control method, Motion and Vibration Control, Robust control
Flexible robot arm, Bending and Torsional Coupled Vibration.

1. 緒言

近年、宇宙空間において国際宇宙ステーションなどの大型構造物の建造、破損した人工衛星の回収など宇宙用ロボットアームが用いられており、その研究が盛んに行われている¹⁾。宇宙用ロボットアームには打ち上げコスト削減の為に軽量化や作業領域を拡大する為の長腕化が求められ、これらの要求はアームの柔軟化を招き、振動が容易に励起される。柔軟ロボットアームに生じる振動は作業効率の低下だけでなく、作業の安全性の低下やアームの破損を招き危険な要因であり、振動の制御が必要となる。

ロボットアームが作業を行う際にその姿勢は変化し、アームの姿勢により、曲げ振動のみが励起されたり、曲げとねじれ振動が励起されたりとアームの振動特性は変化する。またアーム先端に物体を把持することにより、アームの振動特性は変化する。そこで柔軟ロボットアームにおいて変化する振動特性に対してロバストな振動制御が求められる。

そこで過去にアームの姿勢変化による制御器の制御性能の低下を回避する方法を提案し、シミュレーションと作成した2リンク柔軟ロボットアームに対する制御実験よりその有効性を検証した²⁾。しかし、アーム先端に把持する質量を増加させ、制御実験を行ったところ制御器が不安定となり、発散した。そこでペイロード把持に対してもロバストな制御系の構築が求められる。

本研究では、アームの姿勢変化及びペイロード把持による制御器の制御性能の低下を回避する方法を提案する。アーム肘関節を伸ばした姿勢と肘関節を直角に曲げた姿勢共にペイロードを把持した状態でそれぞれ物理モデルを作成し、姿勢変化を物理モデルのパラメータ変動ととらえ、これをH ∞ 制御問題の一つである構造的な不確かさに関するロ

バスト安定化問題として扱う³⁾。これより、アームの姿勢変化、ペイロード把持に対して制御器の安定性を保つことができる。この構造的な不確かさのほかに、即応性、目標追従性、外乱抑圧、スピルオーバー回避の設計仕様を満たすH ∞ ロバストサーボ制御器を作成し、その有効性をコンピュータシミュレーションと実験装置による制御実験により検証する。さらに提案する手法を用いて作成した制御器がペイロードを考慮しない制御器と比較し、アーム先端の質量変化に対してロバスト性を有するのか、作成した柔軟アーム実験装置にペイロードを付加し、制御実験より検証する。

2. 制御対象構造物

2.1 制御対象構造物

本研究では図1に示した肩関節、肘関節と各リンクの平板構造物で構成される2リンク柔軟アームを制御対象構造物とする。全長 1111[mm]、質量 3.2[kg]、各リンクはステンレス材(sus304)で1stリンク、2ndリンクの緒元は表1に示す。肘関節は長さ l_h : 111[mm]、重さ 1.87[kg]である。本研究では、肘関節を伸ばした姿勢をノミナル姿勢、肘関節を90度曲げた姿勢を変動姿勢とする。

Fig.1 Control object

Table 1 Parameters of 1st and 2nd links

	Length l_1 / l_2 [mm]	Width b_1 / b_2 [mm]	Thickness t_1 / t_2 [mm]	Weight [g]
1st link	600	60	4	1078
2nd link	400	40	2	244

2.2 FEM 解析による実験モード解析

制御対象構造物の振動特性を得るために実験モード解析を行い、その結果を図2に示す。ノミナルモデルの1次、2次モードは主に曲げモードであった。変動モデルでは、1次モードは主に曲げモード、2次モードは主に振れモードであることが確認された。これにより、アームの姿勢が変化するとアームの振動特性も変化することが確認された。本研究では、アクチュエータの性能等を考慮し、制御対象をノミナル、変動モデル共に1次、2次モードまでとする。

Fig.2 Mode shape of control object

3. 物理モデルの作成

3.1 低次元化物理モデルの作成

本研究では、制御対象である2リンク柔軟アームを低次元化物理モデル作成法⁴⁾を用いてノミナル姿勢、変動姿勢のそれぞれの姿勢を2自由度集中定数系物理モデルに低次元化した。この際、モデリングポイントは両モデルとも質点1をアーム手先に質点2を肘関節に配置した。図3、図4に物理モデルの概要図に示す。また前述のとおり、両物理モデルを作成する際に図5のようにアームの手先にペイロードを把持させた状態で物理モデルを作成した。ペイロードには冷間圧延材(SPCC)を用いた。ペイロードの諸元を表2に示す。

Fig.3 Modeling points of nominal model

Fig.4 Modeling points of fluctuated model

Fig.5 Payload

Table 2 Parameters of payload

Length [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Weight [g]
40	40	5.8	77.0

実験装置のアームと作成した物理モデルの周波数応答の比較を行い、作成した物理モデルの妥当性を検証する。その結果を図6,7に示す。これより、制御対象である1次、2次の固有振動数の位置と高さが一致していることから本研究で作成した物理モデルが先端に質量を把持したアーム平板の振動特性をよく表現できていることが確認できる。

Fig.6 Frequency response of nominal model

Fig.7 Frequency response of fluctuated model

3.2 アクチュエータモデルの作成

実際の実験装置では慣性モーメントが変化するためアクチュエータの特性も影響を受ける。そのため各々のモデルに対してアクチュエータの伝達関数を同定した。作成方法は、アクチュエータへの入力電圧 u [V] と軸の角度 θ [rad] を計測しモデルを式(1)より同定した。

$$\frac{\theta}{u} = \frac{K_p K \omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1)$$

$$\zeta_{\text{nominal}} = 0.75[-], \omega_{n_{\text{nominal}}} = 20 \times 2\pi [\text{rad/s}], K_{\text{nominal}} = 1.7[-]$$

$$\zeta_{\text{fluctuated}} = 0.75[-], \omega_{n_{\text{fluctuated}}} = 25 \times 2\pi [\text{rad/s}], K_{\text{fluctuated}} = 1.75[-]$$

$$K_p = \frac{175}{15} [\text{rad/V}]$$

ここで ω_n はアクチュエータの固有振動数、 ζ は減衰比、 K_p はポテンシオメータの係数、 K はゲインである。

また、状態方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}u \end{aligned} \quad (2)$$

本研究では、後述のように制御においてアームの手先の加速度を観測し、制御トルクは肩関節より入力する。よって本来であれば $\mathbf{D}$ 行列は 0 である。しかし、慣性モーメント等の影響により制御力の伝達がモデルと実機に誤差が生じたために、付加的に $\mathbf{D}$ 行列に値を持たせ調整することにより、モデルの精度を向上させている。

4 H_∞ 制御系設計

本研究では、制御系設計に H_∞ 制御理論を用いた。 H_∞ 制御理論では、スモールゲイン定理を用いることでロバスト安定化問題を陽に扱うことができ、感度最適化や外乱抑圧問題などで非常に有効である。外乱としては、入力外乱や観測雑音などがあり、それらの影響を抑えたい物理量にとれば外乱抑圧問題となる。

本研究では、次の 4 つの設計仕様を満たす H_∞ 制御器を作成していく。

1. アームの姿勢変化に対する制御器の安定性の確保
2. 即応性、目標値追従性の向上
3. モデル化誤差によるスピルオーバーの回避
4. 外乱による振動の抑制

4.1 構造的誤差とパラメータ変動の表現

作成した 2 つの姿勢状態のモデル間のパラメータ変化をアーム姿勢変化の誤差とみなしている。その誤差は、モデルでは状態行列 $\mathbf{A}$ 、制御入力行列 $\mathbf{B}$ 、観測行列 $\mathbf{C}$ 、直達行列 $\mathbf{D}$ の誤差で表現され、それぞれシステム誤差行列 $\Delta\mathbf{A}$ 、入力誤差行列 $\Delta\mathbf{B}$ 、出力誤差行列 $\Delta\mathbf{C}$ 、直達誤差行列 $\Delta\mathbf{D}$ と呼ぶ。この誤差を以下のように最大誤差行列として定義する。

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{A} &= \mathbf{A}_{\text{nominal}} - \mathbf{A}_{\text{fluctuated}}, & \Delta\mathbf{B} &= \mathbf{B}_{\text{nominal}} - \mathbf{B}_{\text{fluctuated}} \\ \Delta\mathbf{C} &= \mathbf{C}_{\text{nominal}} - \mathbf{C}_{\text{fluctuated}}, & \Delta\mathbf{D} &= \mathbf{D}_{\text{nominal}} - \mathbf{D}_{\text{fluctuated}} \end{aligned} \quad (3)$$

これを誤差マトリクスとして一般化プラント作成時に状態量に作用する重み行列として用い、アームの姿勢変化に対しても制御器の安定性を保つことが出来る。

4.2 フィルタの成形及び外乱の選定

本研究では、ロバストサーボ系の設計方法の一つである積分特性をもつローパスフィルタを成形し、目標値の追従制御を目指す。ここで、本研究で用いているローパスフィルタは、純粋な積分器を持たせず、近似積分を用いて設計している。また、本研究では制御対象を 2 質点モデルに低次元化するゆえに、無視した 3 次モード以降のモデル化誤差よりスピルオーバーが生じる可能性がある。そこで、3 次モード以降のモデル化誤差等をハイパスフィルタを成形して考慮する。

3 次のローパスフィルタの伝達関数は以下である。

$$W_{\text{sp}}(s) = \frac{k_{\text{sp}} \omega_{\text{sp}}^2}{s^3 + (2\zeta_{\text{sp}} \omega_{\text{sp}} + \varepsilon)s^2 + (\omega_{\text{sp}}^2 + 2\zeta_{\text{sp}} \omega_{\text{sp}} \varepsilon)s + \omega_{\text{sp}}^2 \varepsilon} \quad (4)$$

$$\omega_{\text{sp}} = 1.7 \times 2\pi [\text{rad/s}], \zeta_{\text{sp}} = 0.30, \varepsilon = 10^{-6}, k_{\text{sp}} = 10000$$

2 次のハイパスフィルタの伝達関数は以下の通りである。

$$W_{\text{se}}(s) = \frac{k_{\text{se}}(s^2 + 2\zeta_{\text{se1}} \omega_{\text{se1}} s + \omega_{\text{se1}}^2)}{s^2 + 2\zeta_{\text{se2}} \omega_{\text{se2}} s + \omega_{\text{se2}}^2} \quad (5)$$

$$\omega_{\text{se1}} = 10 \times 2\pi [\text{rad/s}], \omega_{\text{se2}} = 50 \times 2\pi [\text{rad/s}], \zeta_{\text{se1}} = 0.76$$

$$\zeta_{\text{se2}} = 0.16, k_{\text{se}} = 700$$

図 8 に、成形したローパスフィルタとハイパスフィルタの形状を示す。

Fig.8 Gain characteristic of shaped filters

また柔軟アームへの外乱を、本研究ではインパルス外乱として考える。

4.3 一般化プラントの作成

本研究で作成した一般化プラントの概念図を図 9 に示す。本研究では、制御力は肩関節アクチュエータのトルク、観測は手先の加速度及び肩関節の角度である。

4.1, 4.2 節の表現を用いて一般化プラントを作成する。ここで $\mathbf{A}_r$ 、 $\mathbf{B}_r$ は変動モデルの状態マトリクス及び制御入力マトリクスである。また、閉ループ系の誤差 $\Delta\mathbf{A}$ を重み出力 $\mathbf{z}_a$ 、仮想入力外乱 $\mathbf{w}_a$ を用いて開ループ化する。誤差 $\Delta\mathbf{B}$ 、 $\Delta\mathbf{C}$ 、 $\Delta\mathbf{D}$ も同様に開ループ化する。

これより、パラメータ変動に対してもロバスト性を確保することができる。また、ローパスフィルタは目標値と軸

の応答との差に作用するように配置し、ハイパスフィルタは制御入力電圧に作用するように配置する。外乱マトリクスは状態量の速度項に作用するように配置する。以上を組み込んで一般化プラントを導出し、数値計算ソフト MATLAB を用いて制御器を導出した。

$$\begin{aligned}\dot{X} &= A_{1z} X + B_{1z} W + B_{2z} u \\ Z &= C_{1z} X + D_{11z} W + D_{12z} u \\ Y &= C_{2z} X + D_{21z} W + D_{22z} u\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}X &= [X_f \quad X_{sp} \quad X_{se}]^T \\ W &= [W_a \quad W_b \quad W_c \quad W_d \quad W_{sp} \quad W_{se} \quad r]^T\end{aligned}$$

Fig.9 The generalized plant

5. シミュレーション

数値解析ソフト MATLAB を用いて 4 章で作成した H_∞ 制御器をアームに適用したシミュレーション結果を以下に示す。

シミュレーション条件は、肘関節固定、肩関節の目標値を 30[deg] 回転させた時の肩関節角の時刻歴応答、アームの先端の加速度の時刻歴応答を示す。また、振動制御効果の比較として軸の位置制御（目標角との角度差に対する比例フィードバック制御、以下 P 制御と呼ぶ。）のみで振動非制御の結果を一緒に示す。P 制御の条件は、軸の目標値を 30[deg]、P ゲインを 20 とした。図 10 にノミナル姿勢、図 11 に変動姿勢時のシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果より肩関節角とアーム先端の加速度の時刻歴応答より P 制御と同等の目標値追従性しており、加速度も P 制御に比べて速やかに収束しており、作成したコントローラが制御対象に変動が生じた場合でも良好に運動と振動の制御が行えることを確認できた。

(a) Time response of shoulder angle

(b) Time response of acceleration of the tip
Fig.10 Simulation results of nominal model

(a) Time response of shoulder angle

(b) Time response of acceleration of the tip
Fig.11 Simulation results of fluctuated model

6. 制御実験

6.1 実験装置

本研究で使用する実験装置と制御システム概要を図 12 図 13 に示す。制御方法としては、アーム手先の加速度を加速度ピックアップで計測し、肩関節の角度を回転型ポテンシオメータで計測する。得られた信号は、AD ボードを介し制御用パソコンに入力される。制御用パソコンにおいてシミュレーションで求めたコントローラで制御入力を算出し、制御入力 DA ボードを介してアクチュエータに入力され、アクチュエータよりアームに制御トルクを与える。

Fig.12 Experimental apparatus

Fig.13 Experimental setup

6.2 実験結果

制御実験の実験条件は、シミュレーションと同条件であり、アーム先端に 77.0[g]のペイロードが付加されている。図 14 はノミナル姿勢、図 15 変動姿勢の実験装置における制御実験結果を示す。(a)は肩関節角の時刻歴応答、(b)はアーム手先の加速度の時刻歴応答である。図 14(a), 15(a)の肩関節角応答より、それぞれの姿勢に対してシミュレーションと同様に速やかに目標値の追従制御を行うことを確認した。また図 14(b), 15(b)のアーム手先の加速度応答より、シミュレーションと同様に作成した 1つの制御器でそれぞれの姿勢においても高い振動抑制効果を得ていることがわかる。以上の制御実験結果より、本研究で提案した手法は同一コントローラで、ペイロードを把持した柔軟アームの姿勢の変化に対して、良好な運動と振動の制御がされることが確認された。

さらにロボットアームの把持質量の変化に対する検討として、アーム先端の把持質量を変えて検証する。アーム先端に 369.3[g]のペイロードを付加した状態において、制御実験を行った。図 16, 図 17 に先端に 369.3[g]の質量を付加したアームのノミナル姿勢と変動姿勢時の制御実験結果を示す。図 16(a), 17(a)は肩関節角の時刻歴応答であり、いずれの姿勢に対しても良好な運動の制御が行えており、また 77.0[g]の質量付加の結果である。図 14, 図 15 と比べても把持質量変化による追従性能の劣化もなく、良好な追従運動制御を得ている。また図 16(b), 17(b)はアーム先端の加速度応答の時刻歴応答であり、アーム先端に 369.3[g]の質量を付加したアームのいずれの姿勢に対しても良好な振動抑圧性能を得ていることが確認された。さらに図 18, 図 19 は姿勢変化のみを考慮し、把持質量を考慮しないで設計した制御器²⁾を図 16, 図 17 の制御時と同条件のアーム先端に 369.3[g]の質量を付加したアームに適用時の肩関節角と加速度の時刻歴応答である。この結果より把持質量を考慮せずに把持質量を増加させると変動姿勢において制御器が発散する。よって図 17 と図 19 より、アーム手先の質量を考慮することによって、質量変化に対するロボаст性が拡大されることを制御実験により検証した。

(a) Time response of shoulder angle

(b) Time response of acceleration of the tip

Fig.14 Experimental result of nominal posture(77.0)

(a) Time response of shoulder angle

(b) Time response of acceleration of the tip

Fig.15 Experimental results of fluctuated posture(77.0)

(a) Time response of shoulder angle

(b) Time response of acceleration of the tip
Fig.16 Experimental result of nominal posture(369.3)

(a) Time response of shoulder angle

(b) Time response of acceleration of the tip
Fig.17 Experimental result of fluctuated posture(369.3)

(a) Time response of shoulder angle

(b) Time response of acceleration of the tip
Fig.18 Experimental result of nominal model of applied previous controller(369.3)

(a) Time response of shoulder angle

(b) Time response of acceleration of the tip
Fig.19 Experimental result of fluctuated model of applied previous controller(369.3)

7. 結論

本研究では、アーム先端に質量を把持したアームの姿勢変化により、不確かな曲げとねじれ振動が生じるフレキシブルロボットアームにおいて、アーム先端の質量変化に対するロバスト性を拡大する H_∞ ロバストサーボ系設計手法を提案した。設計条件とした4項目すべてを満たし、シミュレーションと実機による制御実験結果より姿勢変化及び把持質量に対して同一コントローラで良好に運動と振動の制御を行うことを検証し、さらに把持質量を変えて制御実験を行い、把持質量の変化に対するロバスト性の拡大を検証し、提案した制御系設計手法の有効性を確認した。

参考文献

- (1)F.Matsuno, S.Umeyama, S.Kasai, T.Kanzawa., Robust Bending and Torsional Vibrations and Contact Force Control of a Flexible Arm, Vibrations of a Flexible Arm, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.33, No.7 (1997), pp.674-679.(In Japanese)
- (2)Ryokata, Y. Nakagawa, K. Watanabe, T. Seto, K : H-infinity Robust Servo Motion and Vibration Control of Two Links Flexible Robot Arm in Consideration to Variations of Posture ,8th International Conference on Motion and Vibration Control (Movic2006) (2006-8) , pp766-771.
- (3)T.Watanabe, K.Yoshida., Robust Vibration Control of a Flexible Structure Taking Account of Parameter Variations and Model Errors in Uncontrolled Modes, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.32, No.7 (1996), pp.1001-1010. .(In Japanese)
- (4)Seto, K. Mitsuta. S. : A New Method for Making a Reduced-order Model of Flexible Structures Using Unobservability and Uncontrollability and Its Application in Vibration Control, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.57, No.542 (1991), pp.3393-3399. .(In Japanese)