3次元2リンクフレキシブルロボットアームの姿勢変化を考慮した 運動と振動の H_∞ ロバストサーボ制御*

中川 清春^{*1}, 渡辺 亨^{*2}, 背戸 一登^{*3}

H Infinity Robust Motion and Vibration Control of Three Dimensional Two Link Flexible Robot Arm Taking Account of Variation of Orientation

Kiyoharu NAKAGAWA^{*1}, Toru WATANABE and Kazuto SETO

^{*1} Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Nihon University
1-8-14 Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8308 Japan

This paper presents a design procedure of robust H_∞ controller for bending-torsional vibration of three dimensional two link flexible robot arm. As the posture of the arm and the payload varies according to tasks, it possesses uncertain vibration modes. The controller must be designed to be robust to such posture fluctuation. In this research, H_∞ robust control design with structured uncertainties is utilized to describe the model error in bending-torsional vibration. An experimental system is set up, and two physical models are identified by utilizing Seto's modeling method. A H_∞ controller is designed by using these models and an integrator to realize servo control for positioning. Control simulations and experiments are performed. According to these results, the presented modeling and controller design method is certified to be effective.

Key Words : Vibration Control, Motion Control, Flexible Structure, Robust Control, Coupled Vibration

1. 緒 言

近年、国際宇宙ステーションなど宇宙空間での大型構造物の建造、破損した人工衛星の回収など、宇宙空間で様々な作業が行われつつある。そのような作業で用いられているのがロボットアームであり、その研究が盛んに行われている。しかし、宇宙用ロボットアームの場合、作業領域拡大のための長腕化や、打ち上げコスト削減のための軽量化のためアームの剛性が低下し、アームが柔軟化してしまう。そのようなアームでは、振動が容易に励起されてしまう。ロボットアームの振動は作業効率の低下を招くだけでなく、作業の安全性にも影響を与えてしまい危険である。このような軽量化・長腕化されたフレキシブルロボットアームの問題に対する研究⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾は盛んに行われている。主なものとして、ロボットアームの物体把持時の制御性能劣化に対するロバスト性の検証⁽⁵⁾や、 H_∞ 制御を適用し、制御対象のモデル化のために生じるスピルオーバを回避する方法⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾などが報告されている。また、筆者らは、過去に、このようなアームが未知の物体を把持し、アームに不確かな曲げとねじれの振動が励起される場合におけるロボットアームの振動のロバスト制御手法を提案した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。この手法ではアームの物体把持の前後の両方を同一コントローラで良好に制御を行う手法について提案した。しかし、その手法ではアームの姿勢の変化については検討されなかった。実際のロボットアームは作業を行うため、その姿勢は変化し、姿勢の変化の前と後では別の構造物の特性を示すようになってしまう。本研究では、この問題に対して H_∞ 制御理論を適用し、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する。本研究では、アーム姿勢変化を物理モデルのパラメータ変動ととらえ、このパラメータ変動を 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。こうすることで、アームに変動が起きた場合でも制御系の安定性を保つことができる。

本研究では、この構造的な不確かさのほかに、即応性、目標値追従性、外乱抑圧、スピルオーバ回避の設計仕様

* 原稿受付 2011 年 7 月 15 日

^{*1} 正員, 日本大学大学院理工学研究科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

^{*2} 正員, 日本大学理工学部

^{*3} 正員, 名誉員, 日本大学理工学部上席研究員

E-mail: toruw@mech.cst.nihon-u.ac.jp

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。

2. 制御対象構造物

本研究の制御対象である2リンクロボットアームの概要を図1に示す。ロボットアームは肩関節、肘関節と各リンクの平板構造物からなっている。全長1.11m 質量3.2Kg、また各リンクはステンレス製(sus303)で、1stリンクの寸法は長さ600mm、幅60mm、厚さ4mm、重さ1.18Kgである。2ndリンクの寸法は長さ400mm、幅40mm、厚さ2mm、重さ0.239Kgである。そして、肘関節は長さ110mm、重さ1.87Kgである。本装置の肘関節の可動範囲は0度から90度までとなっている。本研究では、肘関節を伸ばしたものをノミナルモデルとし、アームのねじれが最大となる肘関節を90度曲げたものをアームの最大変動時として考え、変動モデルと呼ぶ。

また、本装置の肘アクチュエータは、軽量化のために運動の制御のみを実施可能な必要最小減のトルクとなっているため、振動制御は肩アクチュエータのみで手先まで行うものとしている。

Fig.1 Control object

3. 低次元化物理モデル

3・1 有限要素解析

制御対象の振動特性を得るために、FFTアナライザとME'SCOOPを用いて実験モード解析を行った。その結果を図2に示す。これより、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。また、変動モデルでは、1次モードは主に曲げモードであるが、2ndリンクの2次モードは曲げに対し、1stリンクは、ねじれ主体の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、制御対象モードをノミナルモデル、変動モデル共に1次、2次モードとする。

Fig.2 Mode shapes of control objects

3・2 低次元化物理モデルの作成

本研究では制御対象を低次元化物理モデル作成法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を用いて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アーム手先と肘関節に配置した。図3、図4に物理モデルの概要図を、表1、表2に低次元化物理モデル作成法より導出した物理パラメータを示す。

Fig.3 Modeling points of nominal model

Fig.4 Modeling points of fluctuated model

Table1 The physical parameters of the nominal model

Mass[Kg]	Length[m]	Stiffness[kN/m]	Damping[Ns/m]
m1=0.0793	l01=1.11	k01=1.3673	c01=0.0925
m2=2.5284	l02=0.655	k02=3.02245	c02=1.6204
		k12= -0.9365	c12= -0.0313

Table2 The physical parameters of the fluctuated model

Mass[Kg]	Length[m]	Stiffness[kN/m]	Damping[Ns/m]
m1=0.0667	l01=0.791	k01= 0.6153	c01= 0.0575
m2=1.9335	l02=0.655	k02= 1.5616	c02= 1.4604
		k12= -0.3423	c12= -0.0043

また、作成した物理モデルの妥当性を検証するために、実機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った。その結果を図5、6に示す。これより、本研究で作成した物理モデルが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.5 Frequency response of nominal model

Fig.6 Frequency response of fluctuated model

3・3 アクチュエータの伝達関数

実際の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。

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

$$\begin{aligned}\zeta_{\text{no min al}} &= 0.45[-], \omega_{n_ \text{no min al}} = 20 \times 2\pi [\text{Hz}], K_{\text{no min al}} = 1.6[-] \\ \zeta_{\text{fluctuated}} &= 0.60[-], \omega_{n_ \text{fluctuated}} = 25 \times 2\pi [\text{Hz}], K_{\text{fluctuated}} = 1.6[-] \\ K_p &= \frac{350}{30} [\text{rad/V}]\end{aligned}$$

ここで、 ω_n はアクチュエータの固有振動数、 ζ は減衰比、 $K_p K \omega_n^2$ は変換係数である。また、以下にモデルと実機の比較検討の図を示す。これによりモデルがアクチュエータの特性をよく表現していることが確認された。

Fig.7 Frequency response of Actuator model

3・4 制御対象モデルの状態方程式

求めた集中定数系モデルより制御対象の状態方程式を作成する。アクチュエータのダイナミクスを考慮した状態方程式は両モデルとも以下のように表される。

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

ただし、状態ベクトル $\mathbf{x}$ と係数行列 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ は以下のようにになっている。 $\mathbf{x}_1$ は、アームの手先位置、 $\mathbf{x}_2$ は肘関節の位置、 $\mathbf{A}_c(2,:) = \mathbf{A}_c$ の2行目である。また、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加速度センサより計測している。そのため、本研究においては、直達項の $\mathbf{D}$ 行列は0ではない。よってモデルにおいても直達項を含ませる必要がある。

$$\mathbf{x}_c = \{\ddot{\theta} \quad \dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \dot{\theta} \quad x_1 \quad x_2 \quad \theta\}^T\tag{3}$$

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix}\tag{4}$$

$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} -2\zeta\omega_n & 0 & 0 & -\omega_n^2 \\ 0 & -\frac{c_{01}+c_{12}}{m_1} & \frac{c_{12}l_1}{m_1l_2} & \frac{c_{01}l_1}{m_1} \\ 0 & \frac{c_{12}l_2}{m_2l_1} & -\frac{c_{02}+c_{12}}{m_2} & \frac{c_{02}l_2}{m_2} \end{bmatrix}\tag{5}$$

$$\mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_{01} + k_{12}}{m_1} & \frac{k_{12}l_1}{m_1l_2} & \frac{k_{01}l_1}{m_1} \\ \frac{k_{12}l_2}{m_2l_1} & -\frac{k_{02} + k_{12}}{m_2} & \frac{k_{02}l_2}{m_2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{A}_{21} = \mathbf{I}, \mathbf{A}_{22} = \mathbf{0} \quad (7)$$

$$\mathbf{B}_c = [\mathbf{K}_p \mathbf{K} \omega_n^2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{C}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_c(2,:) \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{D}_c = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

4. 構造的誤差と非構造的誤差を考慮した制御系設計

本研究では制御系設計に H_∞ 制御理論を用いた。 H_∞ 制御理論ではロバスト制御器を設計する手法として、主に次の 2 通りの方法がある。一つは、外乱やモデル化誤差を非構造的誤差とみなして、これらを包絡するような整形フィルタで置き換えて考える周波数領域で設計する方法である。もう一つの方法は、誤差を全てパラメトリックなものとし、これを構造的な不確かさを用いて表現してパラメータ変動に対するロバスト安定性を保証しようとするものである。

本研究では、ロボットアームの姿勢変化による制御性能の劣化を防ぐための、より大きなロバスト安定性を確保する方法として構造的誤差と非構造的誤差の両方を考慮する方法で制御系を設計する。

4・1 構造的誤差とパラメータ変動の表現

本研究の手法では、アーム姿勢変化の前後のパラメータ変化を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 $\mathbf{D}$ の誤差であり、この誤差を以下のように最大誤差行列として定義する。

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{A} &= \mathbf{A}_{\text{nominal}} - \mathbf{A}_{\text{fluctuated}}, & \Delta \mathbf{B} &= \mathbf{B}_{\text{nominal}} - \mathbf{B}_{\text{fluctuated}} \\ \Delta \mathbf{C} &= \mathbf{C}_{\text{nominal}} - \mathbf{C}_{\text{fluctuated}}, & \Delta \mathbf{D} &= \mathbf{D}_{\text{nominal}} - \mathbf{D}_{\text{fluctuated}} \end{aligned} \quad (11)$$

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することで、アームに変動が生じた場合でも制御系の安定性を保つことが出来る。

4・2 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は以下 (式 (12), 図 8) のようになる。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および肩関節の角度変位である。また、今回は変動モデルをベースに制御系を設計したほうがノミナルモデルベースより良好な結果が得られたために、変動モデルベースを採用した。加えて、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、運動性能の改善を目指す。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しているため、無視した 3 次モード以降でスビルオーバーが発生する可能性がある。そこで、3 次モード以降の感度を下げるようハイパスフィルタを成形した。4.1、及び上記で示した設計条件を用いて一般化プラントを作成する。図 9 に本研究で設計した一般化プラントの概念図を示す。ここで $\mathbf{A}_f$ 、 $\mathbf{B}_f$ 、 $\mathbf{C}_{p1}$ 、 $\mathbf{C}_{p2}$ 、 $\mathbf{D}_f$ は変動モデルの状態マトリクス、制御入力マトリクス、観測マトリクスである。

4・3 フィルタの成形

運動性能改善のための3次のローパスフィルタの伝達関数は以下のとおりである。

$$W_{sp}(s) = \frac{k_{sp} \omega_{sp}^2}{s^3 + (2\zeta_{sp} \omega_{sp} + \varepsilon)s^2 + (\omega_{sp}^2 + 2\zeta_{sp} \omega_{sp} \varepsilon)s + \omega_{sp}^2 \varepsilon} \quad (15)$$

$$\omega_{sp} = 2.0 \times 2\pi [\text{rad/s}], \quad \zeta_{sp} = 0.60 [-], \quad \varepsilon = 10^{-6} [-], \quad k_{sp} = 8000 [-]$$

スピルオーバ回避のための2次のハイパスフィルタの伝達関数は以下のとおりである。

$$W_{se}(s) = \frac{k_{se} (s^2 + 2\zeta_{se1} \omega_{se1} s + \omega_{se1}^2)}{s^2 + 2\zeta_{se2} \omega_{se2} s + \omega_{se2}^2} \quad (16)$$

$$\omega_{se1} = 5.0 \times 2\pi [\text{rad/s}], \quad \omega_{se2} = 50 \times 2\pi [\text{rad/s}], \quad \zeta_{se1} = 0.76, \zeta_{se2} = 0.16, \quad k_{se} = 700$$

図9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。それぞれの設計条件をみたすように形状を決定した。制御対象外の3次モード以降の感度が低下する形状となっている。

Fig.9 gain characteristic of shaped filters

また、フレキシブルアームへの外乱により生じる振動を、本研究ではインパルス外乱として考える。外乱の大きさはノミナルモデルの等価質量の逆数として、一般化プラントに組み込んだ。この外乱には、以下のような係数行列を乗ずる。

$$\mathbf{I}_{sv} = \begin{bmatrix} 0 & 1/m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

5. シミュレーション

4章で作成したH_∞制御器を使用して数値計算ソフトMATLABを用いて行っ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]とした時の肩関節角の応答と、アームの先端の加速度応答を示す。また、比較として肩関節軸の位置決めのみを行い振動制御は行わないP制御の結果を示す。P制御の条件は、肩関節軸の目標値を30[deg]、Pゲインを10とした。シミュレーション結果の図10及び図11より、本研究で作成した制御器が、制御対象に変動が生じた場合でも、振動制御を行わないP制御に比べ本研究で作成したH_∞制御器では振動を良好に制御できていることが確認できる。また、肩関節角応答の図では、オーバーシュートが生じているのは振動制御を行うためである。振動制御終了とともに関節角も目標値に速やかに追従している。これにより、目標値追従性能も満たしていることがわかる。また、図12の周波数応答はアーム固定時にアームの先端をインパルス加振した時の応答だが、どちらの場合でも振動が制御されていることが確認できる。この結果より、アームに衝撃等の外乱が入力された場合においても本制御器の有効性が確認された。

Fig.10 Simulation results of nominal model

Fig.11 Simulation results of fluctuated model

Fig.12 Frequency Response of Point1

6. 制御実験

6・1 実験装置

本研究で使用する実験装置を図 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 ボードを介して制御用パソコンに送られる。制御用パソコンでは導出した制御器で制御入力を算出する。算出された制御入力は DA ボードを介してアクチュエータに送られ、アクチュエータを駆動させ制御トルクを発生させる。このようにして制御力を発生させ、アームを制御する機構となっている。

Fig.13 Experimental setup

6・2 実験結果

図 14, 15, 16 に制御実験結果を示す. 制御実験の実験条件は, シミュレーションの条件と同条件である. 加速度応答より, 関節の運動時の振動はよく抑えられていることがわかる. 手先の残留振動は, 制御対象外の高次モードの振動であると推測される. 高次の振動のため手先の変異量は微小である. そのため, アームの運用に与える影響は小さく, また, 仮に高次の振動を制御対象とする場合, 非常に高性能なアクチュエータを必要とするため, コスト面で現実的ではないと思慮される. また, シミュレーションと同様に, 肩関節角応答の図では, オーバーシュートが生じているが振動制御を行うためである. 振動制御終了とともに肩関節軸も目標値に速やかに追従し, 運動の制御も良好に行われている. また, 図 16 の周波数応答はアーム固定時にアームの先端をインパルス加振した時の応答だが, どちらの場合でも全制御対象で振動が制御されていることが確認できる. この結果より, アームに不確かな衝撃等の外乱が入力された場合においても本制御器の有効性が確認された.

Fig.14 Experimental result of nominal model

Fig.15 Experimental results of fluctuated model

Fig.16 Frequency Response of Point1

6・3 ロバスト性の検証実験

本研究では、肘関節が0度および90度の場合を採用し、制御器を設計し両状態とも良好に制御可能であることは、シミュレーションと実験結果より検証した。この最大変動状態の両姿勢が良好に制御可能であれば、その間の姿勢においても良好な制御が期待できる。そこで、本研究では、肘関節が0度から90度の間姿勢についての制御性能を制御実験にて検証した。検証肘角度は、30度、45度、60度である。実験条件は前項と同様である。肩関節軸応答及び手先の加速度応答から、いずれの姿勢においても運動と振動は良好に制御されている。この結果より、考慮した姿勢の間の状態においても十分な効果が期待できることが確認された。

Fig.17 Experimental results (Elbow angle 30)

Fig.18 Experimental results (Elbow angle 45)

Fig.19 Experimental results (Elbow angle 60)

そして、図 20 は肩関節を起動すると同時に肘関節を $45[\text{deg/sec}]$ で 90 度回転させたときの肩関節の軸応答、肘関節の軸応答、手先の加速度応答である。肘関節は位置制御のみ行い、振動制御は肩関節のみで手先まで制御を行っている。この場合も安定的に制御が行われている。

これら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、アームの姿勢の変化前後共に、良好に運動と振動の制御がされており、アームの姿勢の変化に対して十分なロバスト性を持っていることが証明された。

Fig.20 Experimental results of posture fluctuation

7. 結論

本研究では、姿勢が変化し、不確かな曲げとねじれの振動が生じるフレキシブルロボットアームの運動と振動の制御を、 H_∞ 制御理論を用いて制御する手法を提案した。シミュレーション、実験結果より、姿勢が変化しア

ムに曲げ・ねじれ連成振動が生じた場合でも同一コントローラで制御性能が悪化することなく運動と振動の両方をロバストに制御することが可能であることを確認し、提案する制御器設計手法の有効性を確認した。

文献

- (1) K.Takamura, K.Yamamoto, T.Watanabe, K.Seto, "ROBUST CONTROL IN BENDING AND TORSIONAL VIBRATIONS OF A FLEXIBLE ROBOT ARM WITH UNCERTAINTY IN PAYLOAD", *Proceedings of motion and Vibration Control 2002*, Vol. 1, No. 02-201(2002), pp.426 - 431
- (2) 福田敏夫, 新井史人, 細貝英実, 矢島信之, "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)", 日本機械学会論文集C編, Vol. 54, No. 499(1988), pp.630-637.
- (3) 吉田和夫, 五島満, "2重テンドン機構による回転平板の位置決めおよび曲げ・ねじれ振動の制御", 日本機械学会論文集C編, Vol. 57, No. 534(1991), pp.557-562.
- (4) 羅正華, 坂和愛幸, "フレキシブルアームの曲げ・ねじり連成振動の制御実験", 計測自動制御学会論文集, Vol. 27, No.4(1991), pp.422-428.
- (5) 前川明寛, 川村武也, 田中幸雄, "2リンクフレキシブルアームの制御(第2報, アームの姿勢および先端付加変動に対するロバスト安定性と評価と実験)", 日本機械学会論文集C編, Vol. 57, No. 539(1991), pp.2321-2327.
- (6) 平澤修一, 野波健蔵, "1リンク弾性アームのQパラメトリゼーションに基づく H_{∞} 制御超平面を有するスライディングモード位置決め制御", 日本機械学会論文集C編, Vol. 64, No. 619(1998), pp.918-924.
- (7) 松野文俊, 梅山聡, 笠井正三郎, 神澤貴雄, "フレキシブル・アームの曲げ・ねじれ結合振動と力のロバスト制御", 計測自動制御学会論文集, Vol. 33, No. 7(1997), pp.674-679.
- (8) 背戸一登, 光田慎治, "不可制御・不可観測性の活用による弾性構造物の低次元化物理モデル作成法と振動制御法", 日本機械学会論文集C編, Vol. 57, No. 542(1991), pp.3393-3399.
- (9) 渡辺亨, 吉田和夫, "パラメータ変動と非制御モードのモデル化誤差を考慮する柔軟構造物のロバスト振動制御", 計測自動制御学会論文集, Vol. 32, No. 7(1996), pp.1001-1010.
- (10) 背戸一登, 松本幸人, パソコンで解く振動制御, (1999), p.261, 丸善
- (11) 野波健蔵, MATLABによる制御系設計, (1998), p. 103, 東京電気大出版局
- (12) Seto, K, *Active Control of Structures* (2008), p. 179, John Wiley & Sons,Ltd,Publication