位置情報だけを用いたマニピュレータの モーションコントロール

大 石 潔* 藤 田 昌 弘* 宮 崎 勝*

Manipulator Motion Control using only Position Information

Kiyoshi OHISHI Masahiro FUJITA Masaru MIYAZAKI

This paper proposes the fast motion control of robot manipulator based on the new acceleration controller. This acceleration controller constructed by using mixed sensitivity problem of H^∞ control. The proposed acceleration controller discusses the frequency performance taking sensor noise effect and disturbance rejection into account systematically. This acceleration controller is simple and robust. Moreover, this paper proposes the new fast motion controller based on H^∞ acceleration controller. This new fast motion controller is realized by using only information of position, and it makes the multi-degrees-of-freedom motion control system more simple. In this paper, the proposed controller is constructed by the software algorithm of DSP. The experimental results show that the proposed control is valid for motion control of three-degrees-of-freedom robot manipulator.

Key Word : H^∞ Control, Motion Control, Acceleration Controller.

1. ま え が き

ロボットマニピュレータを駆動させると、各関節のアクチュエータにはその動作に伴い様々な外力が印加され、且つパラメータ変動が生じる。これらの外力とパラメータ変動の補償を瞬時に行うために様々な方法が提案されてきた。その有効な手法の1つに、外乱オブザーバ¹⁾やモデル追従加速度制御系^{2),3)}等の線形のロバストな加速度制御系がある。しかしながら、これらの制御系を構成する際、ロバストな加速度コントローラをどのような周波数特性にするか。すなわち、観測ノイズと外乱抑圧の両者の周波数特性をどのように考慮するかが問題となる場合がある。このように周波数特性を適切に考慮に入れて制御系を設計する方法に、 H^∞ 制御の混合感度問題がある。

H^∞ 制御は制御系の周波数特性を望ましい形に整形するというループ整形の考え方に基づく設計理論であ

る^{4)~6)}。 H^∞ ノルムは、伝達関数の周波数応答のゲインの最大値である。この H^∞ ノルムを評価関数として用いて、閉ループ系が内部安定で且つ H^∞ ノルムがこちらで定めるある正数以下を満足するような補償器 $K(s)$ を求めている。この補償器 $K(s)$ を用いることで、制御系に所望の周波数特性を持たす事ができる。本論文では、外乱抑圧特性とロバスト安定性を同時に考慮する混合感度問題により補償器 $K(s)$ を求め、この補償器 $K(s)$ を用いて加速度コントローラを設計する⁷⁾。

加速度コントローラを用いると、ロボットマニピュレータのアクチュエータは加速度指令 $\ddot{\omega}^{cmd}$ によって駆動され、且つロバストな制御構造となる。本論文では、サーボ系の外乱抑圧特性及びロバスト安定性を H^∞ 制御の混合感度問題によって調整し、その特性を保ったままサーボ系を加速度コントローラにする。提案する加速度コントローラを、本論文では H^∞ 加速度コントローラと称している。この H^∞ 加速度コントローラを用いて高速なモーションコントロールを行うと、加速度情報 $\ddot{\omega}$ と速度情報 $\dot{\omega}$ を必要とせず、位置情報 θ だけで高速なモー

原稿受付 1991 年 12 月 18 日

* 大阪工業大学

ションコントロールを実現できることになる。さらに、多自由度マニピュレータのモーションコントロールに本加速度コントローラを適用すると、作業座標空間と関節座標空間との間の順変換と逆変換が非常に容易になる。提案する H^∞ 加速度コントローラにより、多自由度マニピュレータの高速モーションコントロールは容易に且つロバストに実現できることになる。

2. H^∞ 制御による加速度コントローラの構成

Fig. 1 にロボットマニピュレータの各関節であるサーボモータのブロック図を示す。このサーボモータに印加される外力 T_{dis} には、摩擦力 T_{fric} 、干渉力 T_{int} 、重力 T_g 、負荷トルク T_{load} が含まれる。この **Fig. 1** のブロック図は、**Fig. 2-(1)** のブロック図のように表すことができる。**Fig. 2-(1)** において、外力 T_{dis} は $P(s)$ の前段に挿入される外部入力変数となっているが、出力への影響という点で着目して考えれば、外力 T_{dis} を **Fig. 2-(2)** のように考えることができる。ここで、 $P(s)$ は制御対象のサーボモータを表している。外力 T_{dis} は制御理論において外乱 d として扱われる。この外乱 d の影響を抑圧するための制御系の設計方法に、**Fig. 3** に示すような感度低減問題がある。**Fig. 3** のブロック図において、 $W_1(s)$ は感度関数に対する重み関数であり、 $K(s)$ は感度低減問題を解いて得られた補償

器である。

次に、慣性力の変動やサーボモータの発生トルクのリップル等のパラメーター変動は、**Fig. 4** の $\Delta(s)$ のように表すことができる。この $\Delta(s)$ は乗法的な不確かさと呼ばれる⁶⁾。 $\Delta(s)$ の影響を抑圧するための制御系の設計方法には、**Fig. 5** に示されるロバスト安定化問題がある。**Fig. 5** において、 $W_2(s)$ はロバスト安定性を規定する相補感度関数に対する重み関数である。

本論文は、これら2つの問題を同時に考慮しなければならないので、混合感度問題として H^∞ 制御理論を用いて解くことになる。混合感度問題を扱うためのブロック図は、**Fig. 6** に示される。

(1) 式と (2) 式はそれぞれ外乱抑圧特性を表す感度関数 $S(s)$ と耐ノイズ特性を表す相補感度関数 $T(s)$ を表している。感度関数 $S(s)$ と相補感度関数 $T(s)$ の間には (3) 式のような関係があるので、両者を同時に小さくすることはできない。そこで、各感度関数に対する重み関数の $W_1(s)$ と $W_2(s)$ を、 $S(s)$ と $T(s)$ が

Fig. 4 Multipliable uncertainty.

Fig. 5 Augmented system for the robust stability problem.

Fig. 2 Block diagram of the transformed servo motor.

Fig. 3 Augmented system for the sensitivity reduction problem.

Fig. 6 Augmented system for the mixed sensitivity H^∞ design method.

Fig. 7 Frequency characteristic of $S(s)$ and $T(s)$.

重視している周波数領域で大きく取るようにする。ここでは、 $S(s)$ と $T(s)$ が Fig. 7 のような関係になるように、すなわち、 $W_1(s)$ は低い周波数領域で大きくなるように、 $W_2(s)$ は高い周波数領域で大きくなるように定めることになる。

$$S(s) = \frac{1}{1+P(s)K(s)} \quad (1)$$

$$T(s) = \frac{P(s)K(s)}{1+P(s)K(s)} \quad (2)$$

$$S(s) + T(s) = 1 \quad (3)$$

これより、所望の $S(s)$ と $T(s)$ を得るフィードバック補償器 $K(s)$ が、 H^∞ 制御理論の混合感度問題によって得られることになる。補償器 $K(s)$ は Fig. 6 のフィードバックループを安定させ、制御系に所望の外乱抑圧特性と耐ノイズ特性を与えるものになる。なお、そのとき $K(s)$ はほとんど (4) 式のような形になる。この $K(s)$ を用いて Fig. 8 に示す加速度コントローラを構成する^{7),8)}。Fig. 8 において、 w は観測ノイズを表す。加速度指令 $\dot{\omega}^{\text{cmd}}$ と位置 θ との伝達関数は (5) 式のように、外乱 d と位置 θ との伝達関数は (6) 式ようになる。よって、Fig. 8 の加速度コントローラは Fig. 9 のように表現することができることになる。即ち、これは相補感度関数で制限される周波数範囲において、加速度コントローラが成立していることを意味している。本論文では、この加速度コントローラを H^∞ 加速度コントローラと称する。 H^∞ 加速度コントローラは、外乱抑圧や観測ノイズの影響が所望の周波数特性に設計されるので、その周波数範囲において Fig. 10 に示す加速度コントローラが成立している。これより、制御対象のダイナミクスに何等依存されずに高性能なモーションコント

Fig. 8 Schematic diagram of proposed acceleration controller.

Fig. 9 Performance of proposed H^∞ acceleration controller.

Fig. 10 Structure of acceleration controller.

ロールを行うことができる。

$$K(s) = \frac{B_2 S^2 + B_1 S + B_0}{A_3 S^3 + A_2 S^2 + A_1 S + A_0} \quad (4)$$

$$\frac{\theta}{\dot{\omega}^{\text{cmd}}} = \frac{P(s)K(s)}{1+P(s)K(s)} \cdot \frac{1}{S^2} = T(s) \cdot \frac{1}{S^2} \quad (5)$$

$$\frac{\theta}{d} = \frac{1}{1+P(s)K(s)} = S(s) \quad (6)$$

3. 位置情報だけを用いた軌跡追従制御系の構成

H^∞ 加速度コントローラを用いて、高速なモーションコントロールを実現する軌跡追従制御系を構成すると、Fig. 11 のようになる³⁾。ここでの軌跡追従制御系とは、位置指令値 θ^{ref} 、速度指令値 ω^{ref} 、加速度指令値 $\dot{\omega}^{\text{ref}}$ に対して遅れなく追従する制御系をさしている。Fig. 11 において、各指令値に対する応答は相補感度関数 $T(s)$ の周波数範囲において (7) 式のように実現される。

ここで、Fig. 11 の積分器のカスケード結合を配置転換すると、Fig. 11 の軌跡追従制御系は Fig. 12 のシステムに等価変換することができる。Fig. 12 の等価変換システムは Fig. 11 の軌跡追従制御系と同じ伝達関数になるが、位置情報だけで軌跡追従制御を行うことができる。

$$\frac{\theta}{\theta^{\text{ref}}} = \frac{\omega}{\omega^{\text{ref}}} = \frac{\dot{\omega}}{\dot{\omega}^{\text{ref}}} = \frac{S^2 + K_2 S + K_1}{S^2 + K_2 S + K_1} = 1 \quad (7)$$

Fig. 12 の位置情報だけを用いた軌跡追従制御系の有効性を確認するために、Fig. 13 に示す 3 自由度ロボッ

Fig. 11 Fast motion controller based on H^∞ acceleration controller.

Fig. 12 Block diagram of the transformed fast motion controller.

トマニピュレータを用いてモーションコントロールの実験を行った。このロボットマニピュレータの各関節は AC サーボモータとハーモニックギアで構成されている。各関節のアクチュエータの特性は Table 1 に示す。実験は、Fig. 13 のロボットマニピュレータの 1 軸のみを用いて行った。提案する軌跡追従制御系は DSP (μ PD 77230) 上のアセンブリ言語によるソフトウェアで構成されている。実験に用いた H^∞ 加速度コントローラの感度関数 $S(s)$ と相補感度関数 $T(s)$ は Fig. 14 に示される。また、これらの感度関数と相補感度関数に対する重み関数 $W_1(s)$ と $W_2(s)$ は (8) 式と (9) 式に示す。そして、これらの重み関数を用いて H^∞ 制御の混合感度問題を解くと (4) 式の補償器 $K(s)$ の各係数が (10) 式のように求まる。

$$W_1(s) = \frac{0.4(0.0008s+1)}{0.0008s} \quad (8)$$

$$W_2(s) = \frac{4 \times 10^{-7}s^2}{1} \quad (9)$$

$$K(s) = \frac{B_2s^2 + B_1s + B_0}{A_3s^3 + A_2s^2 + A_1s + A_0} \quad (10)$$

但し、

$$A_3=1.0, A_2=3.3085 \times 10^3,$$

$$A_1=4.7801 \times 10^5, A_0=0$$

$$B_2=2.6972 \times 10^5, B_1=2.6972 \times 10^8,$$

$$B_0=1.1279 \times 10^{-1}$$

実験結果は Fig. 15 に示す。実験結果より、Fig. 11 と Fig. 12 に示されるどちらの軌跡追従制御系においても、位置 θ と速度 ω がよく追従していることがわかる。これより、 H^∞ 加速度コントローラに基づく軌跡追従制御系が有効に機能している事が確認できた。さらに、提案する位置情報だけを用いた軌跡追従制御系が、速度情報と加速度指令の両者も使用した軌跡追従制御系と比較しても、遜色のない応答をすることも確認できた。

Table 1 Specification of the tested robot manipulator.

	rated speed[rpm]	rated torque[kg·cm]	gear ratio
joint1	3000	6.49	1:80
joint2	3000	9.74	1:80
joint3	3000	6.49	1:50

Fig. 13 Tested three-degrees-of-freedom robot manipulator.

Fig. 14 Frequency characteristic of $S(s)$ and $T(s)$.

4. 多自由度ロボットマニピュレータの高速モーションコントロール法

多自由度ロボットマニピュレータのモーションコントロールを行うには、作業座標と関節座標との間の座標変換がともなう^{8),9)}。この座標変換を簡素化すると、多自由度マニピュレータの高速モーションコントロールが簡単に実現できることになる。ロボットマニピュレータに冗長性がない場合、(11)式と(12)式の関係が成り立っている。実験に用いたロボットマニピュレータは3自由度で冗長性がないので、以下は(11)式、(12)式が成立するとして考える。Fig. 11の軌跡追従制御系を用いて多自由度ロボットマニピュレータのモーションコントロールシステムを構築すると、Fig. 16のブロック図のように表される。ここで J はヤコビ行列を表している。作業座標系の加速度指令 $\ddot{p}_{cmd}$ は、Fig. 16の中で示す

Fig. 15 Experimental results of only one-degree-of-freedom robot manipulator.

Fig. 16 Fast motion controller of robot manipulator based H^∞ acceleration controller.

Fig. 17 Equivalent transformed block diagram of Fig. 12.

ように関節空間座標系の加速度指令 $\ddot{\omega}^{cmd}$ に変換される。このように、このシステムでは関節空間座標系の加速度指令 $\ddot{\omega}^{cmd}$ を得るための計算量が比較的多くなる。

$$\dot{P} = J\dot{\omega} \quad (11)$$

$$\ddot{P} = J\ddot{\omega} + \dot{J}\dot{\omega} \quad (12)$$

そこで本論文では多関節ロボットマニピュレータのモーションコントロールを簡単にするために、Fig. 12 の位置情報だけを用了軌跡追従制御系を Fig. 17 のように等価変換する。Fig. 17 のシステムは、 H^∞ 加速度コントローラを分解速度制御に基づく軌跡追従制御系へ応用させたものである¹⁰⁾。この Fig. 17 のシステムを用いて多自由度ロボットマニピュレータのモーションコントロールシステムを構築すると、Fig. 18 のブロック図

のようになる。

Fig. 16 の多自由度マニピュレータの作業座標系の加速度指令 $\ddot{\omega}^{cmd}$ は (13) 式で表される。すなわち、分解加速度制御則に基づいて多自由度の軌跡追従制御系を構成し、 H^∞ 加速度コントローラによって実現している。これに対して、Fig. 18 のシステムでは、位置情報だけから作業座標系の速度指令 $\dot{p}^{cmd}$ を作り、比較簡単な逆変換によって関節座標系の速度指令 $\dot{\theta}^{cmd}$ を得ている。これは分解速度制御則に基づいて多自由度の軌跡追従制御系を構成し、 H^∞ 制御理論で得られた補償器 $K(s)$ のサーボ系によって実現する形となる。Fig. 18 のシステムでは速度指令 $\dot{p}^{cmd}$ を座標変換してモーションコントロールを実現しているが、位置指令 p^{cmd} から

Fig. 18 Transformed fast motion controller of robot manipulator.

(1) Position reference P^{ref} of circular path trajectory (3) Position response P of fast motion controller with H^∞ acceleration controller (2) Position response P of fast motion controller without acceleration controller (4) Position response P of transformed fast motion controller

Fig. 19 Experimental results of fast motion controller to track the circular path trajectory of three-degree-of-freedom robot manipulator.

関節座標系の位置指令を θ^{cmd} を作り、逆運動学問題を解いてモーションコントロールを行うこともできる。しかしながら、位置指令 P^{cmd} から座標変換を行う方法は逆運動学問題に多大な計算を必要とする。そこで、本論文ではヤコビ行列の逆行列の計算だけで座標変換が終了する Fig. 18 のモーションコントロールシステムを提案した。Fig. 16 及び Fig. 18 はともに H^∞ 加速度コントローラを用いたロボットマニピュレータのモーションコントロールシステムであり、多自由度マニピュレータの高速モーションコントロールを行うことができる。

次に実験結果を示す。実験は Fig. 13 の 3 自由度ロボットマニピュレータを用いて、アームの先端に 2 次元平面の円軌道を描かせる位置指令 P^{ref} を与えたときの軌

跡 P の応答結果を Fig. 19 に示す。このときのロボットマニピュレータのアームの先端の速度は約 0.2 [m/sec] である。実験結果より、 H^∞ 加速度コントローラを用いると、ロバストなモーションコントロールが容易に行える事がわかった。さらに、Fig. 18 に提案する位置情報のみを用いたモーションコントロールシステムの場合でも、Fig. 16 のシステムと比較して遜色のないモーションコントロールが行えることが確認できた。

$$\ddot{P}^{cmd} = \ddot{P}^{ref} + K_2(\dot{P}^{ref} - \dot{P}) + K_1(P^{ref} - P) \quad (13)$$

5. ま と め

本論文は、 H^∞ 制御を用いて加速度コントローラを構成し、その加速度コントローラに基づいて位置情報だけ

を用いたモーションコントロールシステムを提案した。 H^∞ 加速度コントローラは、外乱抑圧と観測ノイズの影響を周波数領域で考えて系統的に設計することができる。

この加速度コントローラに基づくと、ロボットマニピュレータの高速モーションコントロールが簡単に且つ高性能に構成できる。本論文が、ロボットマニピュレータのモーションコントロールに対して御参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 駒田, 村上, 大西: 「加速度に基づく多自由度ロボットのフィードバック制御」, 電学論D, 109巻, 5号, pp. 101, 平元-5.
- 2) 松田, 大石: 「位置情報だけを用いたDSPによる加速度制御系」, 電学論D, 110巻, 2号, pp. 108-116, 平2-2.
- 3) 大石, 松田: 「DD アクチュエータの力とコンプライアンスのロバスト制御」, 電学論D, 110巻, 11号, pp. 1133-1140, 平2-11.
- 4) K. Glover and J. C. Doyle: "State-Space Formulae for all Stabilizing Controller that Satisfy an H^∞ -norm Bound and Relations to Risk Sensitivity", Systems and Control Letters, 11-3, pp. 167-172, 1988.
- 5) J. C. Doyle, et al.: "State-Space Solutions to Standard H_2 and H^∞ Control Problem", IEEE. Trans. on Automatic Control, Vol. 34, pp. 831-847, 1989.
- 6) 木村: 「LQG から H^∞ へ」, 計測と制御, Vol. 29, No. 2, pp. 111-119, 平 2-8.
- 7) K. Ohishi, et al.: "Robust Motion Control of Robot Manipulator Based on H^∞ Acceleration Controller", IEEE JAPAN-IAS '91, E. 1-1, pp. 9-12.
- 8) 松田, 大石 他: 「 H^∞ 最適制御を用いた加速度コントローラ的设计」, 平成3年電気学会全国大会, No. 642.
- 9) C. H. An et al.: "Model-Based Control of a Robot Manipulator", The MIT Press, 1988.
- 10) K. S. Fu, R. C. Gonzales, C. S. G. Lee: "ROBOTICS", McGRAW-HILL, 1987.

大石 潔 (Kiyoshi OHISHI)

1957年10月14日生。1981年慶応義塾大学工学部電気工学科卒業。1986年同大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月大阪工業大学電気工学科講師。1989年同大学助教授。現在に至る。工学博士。主として、電動機制御、ロボットに関する研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 電気学会, 日本機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

藤田昌弘 (Masahiro FUJITA)

1968年3月16日生。1991年大阪工業大学工学部電気工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科修士課程入学。現在、主として、ロボットのモーション制御の研究に従事。

宮崎 勝 (Masaru MIYAZAKI)

1968年10月1日生。1991年大阪工業大学工学部電気工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科修士課程入学。現在、主として、ロボットのモーション制御の研究に従事。