計測自動制御学会東北支部 第224回研究集会 (2005.10.14)
資料番号 224-5

水平多関節ロボットの制御

Control of horizontal Multi-link Robot

○菊池貴行*, 大久保重範*, 及川一美*, 高橋達也*

○Takayuki kikuchi*, Sigenori Okubo*,Kazumi Oikawa*,Tatsuya Takahashi*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード： ジャーク信号 (Jerk signal), 安定多項式 (Stable polynomial), 状態方程式実現 (Realization of state equation)

連絡先： 〒992-8510 米沢市城南4-3-16 山形大学 工学部 機械システム工学科 大久保研究室
大久保重範, Tel.: (0238)26-3245,E-mail: sokubo@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

ロボットマニピュレータの制御では、定常特性や即応性、減衰性などの過渡特性に着目し、これらの三大特性を満足するように制御システムを構成しなければならない。しかし、実際には実システムのモデルを作成するときにはシステム構造の簡略化や物理システムに含まれる非線形性を線形近似することなどによる誤差が発生し、制御系に不安定性や応答性の劣化が生じる。これらの不確定性により制御系の安定性などに対して無視できない重大な影響を与えることがある。このシステムの変動や不確定性に耐えうる性質がロバスト性であり、その性質を持つ制御系がロバスト制御系である。本研究では、プラントに不確定性を含むシステムパラメータを用いて、モデル追従形制御系の設計を行い、かつ入力信号にリンクパラメータの３次微分（ジャーク信号）を使用することにより、規範モデルとの出力誤差を安定にゼロへ収束させることのできるロバスト制御系が設計されることを示す。それと同時に、モデルである水平多関節ロボットに制御系を取り入れた上で、より高度な位置決め動作を実現することを最終目標とする。

2. 水平多関節ロボットの概観

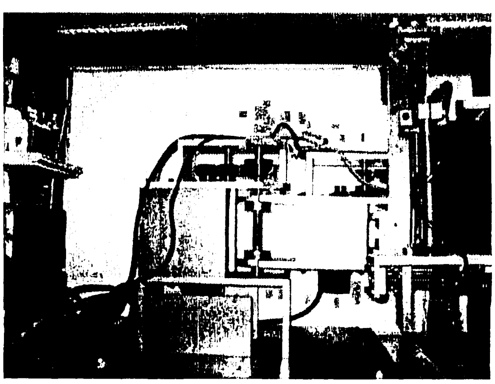

Fig. 1　水平多関節ロボットの概観

上の図で、リンク1、2は横方向、リンク3は上下方向の移動ができ、リンク4はワークハンドであ

る。また、関節1、2はACサーボモータ、関節3、4はステッピングモータで構成されている。

3. システム構成

PCからの数値データはコントロールボード内のパルス発生LSIでパルス信号に変換され、各モータドライバに送られモータを駆動させている。逆にACサーボモータ内のエンコーダからは、モータの角度、角速度のパルス信号データがコントロールボードに戻され数値データに変換された後、PCの画面上に表示される。ステッピングモータにはエンコーダが搭載されていないので、指令値が画面に表示される。構成要素は以下の通りである。

- OS：Windows　NT
- ソフト：Visual　C++
- コントロールボード：HPC-PPD234A
- ACサーボモータ:KXS230HG-ALZ･KXP230GD-ALZ
- ステッピングモータ:CSK566-NAP･PMC33A-MG3

4. コントロールボード

4.1 コントロールボード

HPC-PPD234Aは4軸位置決め制御ボードで、制御LSIとしてPCL5014を使用している。今回使用しているボードの指令パルス出力は、パルス列入出力形式のサーボドライバと接続してAC／DC サーボモータあるいはパルスモータの位置および速度制御を簡単に行うことができる。

特徴

- 最高4.9Mbpsの高速制御
- S字加減速、直線加減速
- 次ブロック自動実行機能ソフトリミット機能
- 複数ボード間同時スタート・ストップ機能
- 現在位置読み出し（指令位置／エンコーダ位置可能）

仕様

- 制御軸－４軸位置決め（PPD２３４A）
- 制御LSI－PCL5014（日本パルスモータ製）
- 加減速制御－直線およびS字加減速
- 移動量－268,435,445パルスまたは-134,217,728～+134,217,727パルス
- 指令パルス速度－0.1bps～4.9Mbps
- エンコーダ信号入力－カプラ受け（差動またはオープンコレクタ）
- 軸センサ信号入力（各軸あたり、フォトカプラ絶縁）－ストロークエンド入力（+ELS）、センサ原点入力（OLS）、原点減速センサ入力（DLS）エンコーダ原点入力（Z相）
- サーボインターフェース（各軸あたり、フォトカプラ絶縁）－2入力、3出力

4.2 パルス発生ＬＳＩ

PCL5014は、PCL3013とのハード（ピン端子）、ソフトの互換仕様となっている。PCL5013の豊富な機能をそのままに、加速や減速時間を別々に設定できることと、S字加減速制御ではS字区間の設定ができる機能が付加されている。また、最高速度の自動修正が行えるので三角駆動にならず滑らかに制御ができる

5. ロボットの運動方程式

ラグランジュ法で求めた運動方程式について、トルク、重量、粘性摩擦、外乱を含めた場合の式の一般形は以下のように表すことができる。

$$M(q(t))\ddot{q}(t)+h(q(t),\dot{q}(t))+Vq(t)+g(q(t)) = \tau(t)+d(t) \tag{1}$$

ここで、$q(t) \in R^{n\times 1}$:リンクパラメータ、$M(q(t)) \in R^{n\times n}$: 慣性行列、$h(q(t),\dot{q}(t)) \in R^{n\times n}$: 遠心力及びコリオリ力,$V \in R^{n\times n}$: 粘性摩擦行列,$g(q(t)) \in R^{n\times 1}$: 重力負荷,$\tau(t) \in R^{n\times 1}$: 制御入力, $d(t) \in R^{n\times 1}$: 外乱、である。さらに、(1)式は確定的な関数$K(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))$と不確定性を含むシステムパラメータ$\phi$を使って(2)式のようになる。

$$K(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))\phi = \tau(t)+d(t) \tag{2}$$

ここで、$\Delta\phi = \hat{\phi}-\phi$: 不確定性のシステムパラメータの誤差、ϕ : 真値$\hat{\phi}$: 公称値、である。(2)式で入力$\tau(t)$を(3)式のように定める。

$$\tau(t) = \mu\{v(t)-q^{[3]}\}+K(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))\hat{\phi} \tag{3}$$

ここで、$v(t)$: 新しい制御入力、μ : ジャーク信号強度、$q^{[3]}(t) = D(p)q = p^3 q$、$p=\frac{d}{dt}$ である。これより全体の運動方程式は(4)式で与えられる。

$$q^{[3]}(t) = v(t)+\frac{1}{\mu}K(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))\Delta\phi+\frac{1}{\mu}d(t) \tag{4}$$

6. 外乱を考慮したロボットの制御系設計

(4)式から、参照モデルおよびシステムの制御対象は以下のように与えられる。

$$D_m(p)q_m(t) = r_m(t) \tag{5}$$

$$D(p)q(t) = v(t)+\frac{1}{\mu}K(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))\Delta\phi+\frac{1}{\mu}d(t) \tag{6}$$

出力誤差は(7)式のように定める。

$$e(t) = q(t)-q_m(t) \tag{7}$$

ここで、容易のために外乱$d(t)$: 線形自由系の出力、とする。$d(t)$は(8)式を満足する特性多項式$D_d(p)$を持っていると仮定する。安定多項式$T(p)$を選び、(9)式より$R(p)$、$S(p)$を定める。

$$\begin{aligned} D_d(p)d(t) &= 0 && (8) \\ T(p)D_m(p) &= D_d(p)D(p)R(p)+S(p) && (9) \end{aligned}$$

ここで、安定多項式の次元は(10)〜(15)式のようになる。

$$\begin{aligned} \partial T(p) &= \rho && (10) \\ \partial D_m &= n_m && (11) \\ \partial D(p) &= n_p = 3 && (12) \\ \partial D_d(p) &= n_d && (13) \\ \partial R(p) &= \rho+n_m-n_p-n_d && (14) \\ \partial S(p) &= n_p+n_d-1 && (15) \end{aligned}$$

(7)〜(9)式により、$T(p)D_m(p)e(t)$の結果を整理すると、(16)〜(19)式のようになる。

$$\begin{aligned} T(p)D_m(p)e(t) &= T(p)D_m(p)\{q(t)-q_m(t)\} && (16) \\ &= \{D_d(p)D(p)R(p)+S(p)\}q(t) \\ &- T(p)D_m(p)q_m(p) && (17) \\ &= D_d(p)R(p)[v(t) \\ &+ \frac{1}{\mu}\{K(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))\Delta\phi+\frac{1}{\mu}d(t)\}] \\ &+ S(p)q(t)-T(p)D_m(p)q_m(t) && (18) \\ &= D_d(p)R(p)v(t) \end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&+ \quad D_d(p)R(p)\frac{1}{\mu}K(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))\Delta\phi \\
&+ \quad S(p)q(t) - T(p)r_m(t) \qquad (19)
\end{aligned}
$$

$Q(p)$はモニックな安定多項式（$\partial Q(p) = \rho + n_m - n_p$）に選ぶならば、(19)式により誤差$e(t)$は(20)式および(21)式に書き直すことができる。

$$
\begin{aligned}
e(t) &= \frac{1}{T(p)D_m(p)}[\{D_d(p)R(p) - Q(p)\}v(t) \\
&+ Q(p)v(t) + S(p)q(t) - T(p)r_m(t)] \\
&+ \frac{D_d(p)R(p)}{T(p)D_m(p)}\frac{1}{\mu}K(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))\Delta\phi \quad (20) \\
&= \frac{Q(p)}{T(p)D_m(p)}[v(t) \\
&+ Q^{-1}(p)\{D_d(p)R(p) - Q(p)\}v(t) \\
&+ Q^{-1}(p)S(p)q(t) - Q^{-1}(p)T(p)r_m(t)] \\
&+ \frac{D_d(p)R(p)}{T(p)D_m(p)}\frac{1}{\mu}K(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))\Delta\phi \quad (21)
\end{aligned}
$$

ここで、

$$
\begin{aligned}
&v(t) + Q^{-1}(p)\{D_d(p)R(p) - Q(p)\}v(t) \\
&+Q^{-1}(p)S(p)q(t) - Q^{-1}(p)T(p)r_m(t) = 0 \quad (22)
\end{aligned}
$$

とおけば$v(t)$は

$$
\begin{aligned}
&v(t) = -Q^{-1}(p)\{D_d(p)R(p) - Q(p)\}v(t) \\
&-Q^{-1}(p)S(p)q(t) + Q^{-1}(p)T(p)r_m(t) \quad (23)
\end{aligned}
$$

ここで、各伝達関数の状態方程式実現を考慮すれば以下のようになる。

$$H_1(pI - F_1)^{-1}G_1 = Q^{-1}(p)\{D_d(p)R(p) - Q(p)\} \quad (24)$$

$$E_2 + H_2(pI - F_2)^{-1}G_2 = Q^{-1}(p)S(p) \quad (25)$$

$$E_m + H_m(pI - F_m)^{-1}G_m = Q^{-1}(p)S(p) \quad (26)$$

これより(27)〜(29)式の状態方程式実現が得られる。

$$
\begin{aligned}
\dot{\zeta}_1(t) &= F_1\zeta_1(t)G_1v(t) && (27) \\
\dot{\zeta}_2(t) &= F_2\zeta_2(t)G_2q(t) && (28) \\
\dot{\zeta}_m(t) &= F_m\zeta_m(t)G_mr_m(t) && (29)
\end{aligned}
$$

$|pI - F_i| = |Q(p)|(i = 1 \sim 4)$であり、$F_i$、$G_i$、$H_i$は可制御正準形にとるものとする。$v(t)$ は(23)式より(30)式となる。外部信号$v_m(t)$は(31)式になる。

$$
\begin{aligned}
v(t) &= -H_1\zeta_1(t) - (E_2q(t) + H_2\zeta_2(t)) \\
&+ v_m(t) && (30) \\
v_m(t) &= E_mr_m(t) + H_m\zeta_m(t) && (31)
\end{aligned}
$$

ここで、$\partial Q(p) = \rho + n_m - n_p$、$\rho \geqq 2n_p + n_d - n_m - 1$、$n_m \geqq n_p$である。$D_d(p) = p$とすれば$n_d = 1$である。$\rho = 3$として、安定多項式$T(p)$を選び、多項式の次数が(10)〜(15)式より、計算すると、$\partial T(p) = 3$、$\partial D_m(p) = 3$、$\partial D(p) = 3$ である。したがって$R(p)$、$S(p)$等を求めると以下のようになる。

$$
\begin{aligned}
T(p) &= (p+\alpha)^3 && (32) \\
Q(p) &= (p+\alpha)^3 && (33) \\
D_m(p) &= (p+\beta)^3 && (34) \\
D(p) &= p^3 && (35) \\
R(p) &= p^2 + 3(\alpha+\beta)p \\
&+ 3(\alpha\ 2 + \alpha\beta + \beta^2) && (36) \\
S(p) &= (\alpha+\beta)(\alpha^3 - \alpha\beta + \beta^3)p^3 \\
&+ 3\alpha\beta(\alpha^2 + 3\alpha\beta + \beta^2)p^2 \\
&+ 3\alpha^2\beta^2(\alpha+\beta)p + \alpha^3\beta^3 && (37)
\end{aligned}
$$

また、(21)式より

$$e(t) = \frac{D_d(p)R(p)}{T(p)D_m(p)}\frac{1}{\mu}K(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))\Delta\phi \quad (38)$$

$K(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))$内で$q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t)$が三角関数および多項式関数の積和となる。$\mu$が大きいとき$e(t)$は十分小さくなる。

7. シミュレーション

モデル追従形制御系設計により設計された式を用い、リンクの応答波形によるシミュレーション結果を示す。ロボットのパラメータは$m_1 = 2(kg)$、$m_2 = 1.5(kg)$、$m_3 = 1(kg)$、$l_1 = 0.24(m)$、$l_2 = 0.27(m)$、$V_1 = 0.1(kgm^2/sec)$、$V_2 = 0.1(kgm^2/sec)$、$V_3 = 0.1(kgm^2/sec)$、$g = 9.8(m/sec^2)$とする。

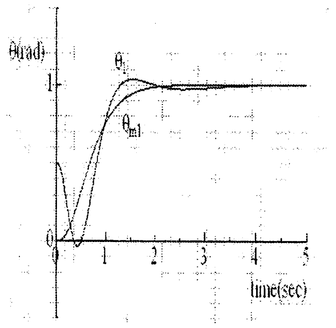

Fig. 2　10％誤差(リンク１)

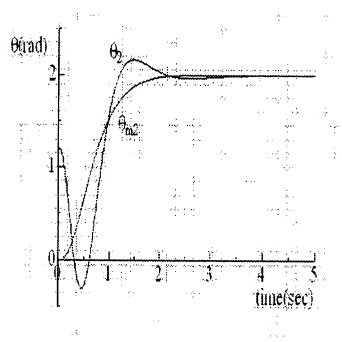

Fig. 3　10％誤差（リンク２）

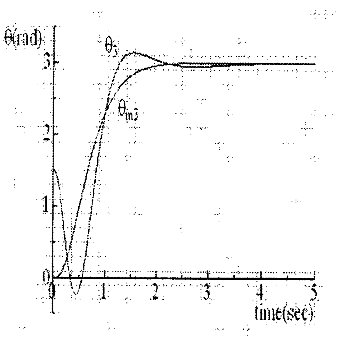

Fig. 4　10％誤差（リンク３）

8. 今後の課題

・外乱を考慮したロボットの制御系に関する状態方程式の安定性についての考察

・実モデルにプログラムを組み込んだ上での動作の確認

参考文献

1) 孫信偉，大久保重範：ロボットマニピュレータのロバスト制御、計測自動制御学会東北支部第184回研究集会資料、184-7（1999）

2) 木村英紀、藤井隆雄、森武宏：ロバスト制御、コロナ社（1994）

3) 加藤一郎、他：ロボット工学、日本ロボット学会、コロナ社（1990）

4) 吉川恒夫：ロボット制御基礎論、コロナ社（1988）