

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, Shigenori Okubo, Kazumi Oikawa, Tatsuya Takahashi

山形大学

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
菊池貴行, Tel.: (090)7076-2486 E-mail: dmk52868@di.p.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、制御系には不安定性や応答の劣化が生じる。これらの不確実性が、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システムの不確実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、プラントに不確実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出来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とり入れた上で、より高度な位置決め動作を実現する事を最終目標とする。

2. 水平多関節ロボットの概観

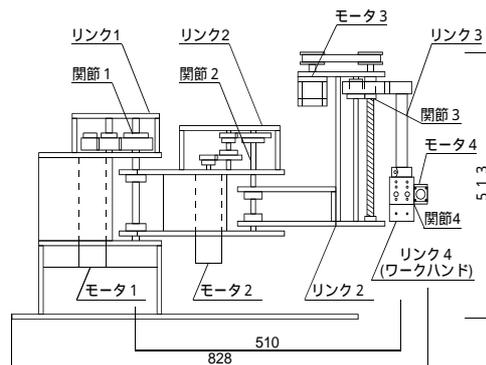


Fig. 1 水平多関節ロボットの概観

上の図で、リンク1・2は横方向、リンク3は上下方向の移動でリンク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

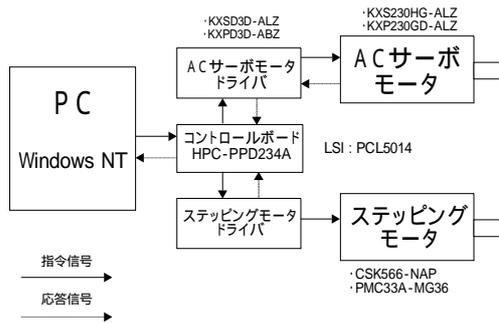


Fig. 2 システム構成

計算機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て、各モータドライバに送られて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、計算機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。

- è OS : Windows NT
- è プログラム開発ソフト : VisualC++
- è コントロールボード : HPC-PPD234A
- è ACサーボモータ:KXS230HG-ALZ・KXP230GD-ALZ
- è 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4.9Mpps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 è 制御軸 - 4軸位置決め(PPD234A)

è 制御LSI - PCL5014(日本パルスモータ製)

è 加減速制御 - 直線およびS字加減速

è 移動量 - 268,435,445パルスまたは-134,217,728 ~ +134,217,727パルス

è 指令パルス速度 - 0.1pps ~ 4.9Mpps

è 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)

è 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)

è 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。P

C L 5 0 1 3 の豊富な機能をそのままに、加速、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滑らか動作を実現する制御ができる。

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式で与えられる。

$$M(q(t))\ddot{q}(t) + h(q(t); \dot{q}(t)) + g(q(t)) = \dot{u}(t) + d(t) \quad (1)$$

ここで、 $q(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: リンクパラメータ、 $M(q(t)) \in \mathbb{R}^{n \times n}$: 慣性行列、 $h(q(t); \dot{q}(t)) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: 遠心力及びコリオリ力、 $V \in \mathbb{R}^{n \times n}$: 粘性摩擦行列、 $g(q(t)) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: 重力負荷、 $\dot{u}(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: 制御入力、 $d(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: 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 \hat{u} を使って (2) 式のようになる。

$$K(q(t); \dot{q}(t); \ddot{q}(t))\hat{u} = \dot{u}(t) + d(t) \quad (2)$$

$$K(q(t); \dot{q}(t); \ddot{q}(t)) \in \mathbb{R}^{n \times n}; \hat{u} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$$

ここで、 $\hat{u} = \hat{u} \hat{u}$ は不確定性のシステムパラメータの誤差、 \hat{u} は真値、 \hat{u} は公称値である。(2)式で入力 $\dot{u}(t)$ を (3) 式のように定める。

$$\dot{u}(t) = \tilde{r}v(t) + K(q(t); \dot{q}(t); \ddot{q}(t))\hat{u} \quad (3)$$

ここで、 $v(t)$: 新しい制御入力、 \tilde{r} : ジャーク信号の強さ、 $q^{[3]}(t) = D(p)q = p^3q, p = \frac{d}{dt}$ である。これより全体の動的方程式は (4) 式で与えられる。

$$q^{[3]}(t) = v(t) + \frac{1}{\tilde{r}}K(q(t); \dot{q}(t); \ddot{q}(t))\hat{u} + \frac{1}{\tilde{r}}d(t) \quad (4)$$

6. 外乱を考慮したロボットの制御系設計

(4)式から、システムの制御対象と参照モデルは (5)、(6) 式で与えられる。

$$D(p)q(t) = v(t) + \frac{1}{\tilde{r}}K(q(t); \dot{q}(t); \ddot{q}(t))\hat{u} + \frac{1}{\tilde{r}}d(t) \quad (5)$$

$$d_m(p)q_m(t) = r_m(t) \quad (6)$$

出力誤差は (7) 式で定める。

$$e(t) = q(t) - q_m(t) \quad (7)$$

ここで、容易のために、外乱 $d(t)$ を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 $D_d(p)$ を持っているとして仮定する。安定多項式 $T(p)$ を選び、(9) 式より $R(p)$ 、 $S(p)$ を定める。

$$D_d(p)d(t) = 0 \quad (8)$$

$$T(p)D_m(p) = D_d(p)D(p)R(p) + S(p) \quad (9)$$

ここで、各多項式の次元は、(10)式 ~ (15) 式のようになる。

$$\text{deg} T(p) = \ddot{0} \quad (10)$$

$$\text{deg} D_m = n_m \quad (11)$$

$$\text{deg} D(p) = n_p = 3 \quad (12)$$

$$\text{deg} D_d(p) = n_d \quad (13)$$

$$\text{deg} R(p) = \ddot{0} + n_m \ddot{A} n_p \ddot{A} n_d \quad (14)$$

$$\text{deg} S(p) = n_p + n_d \ddot{A} 1 \quad (15)$$

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

$$T(p)D_m(p)e(t) = T(p)d_m(p)(q(t) - q_m(t)) \quad (16)$$

$$= D_d(p)D(p)R(p) + S(p)q(t)$$

$$\ddot{A} T(p)D_m(p)q_m(t) \quad (17)$$

$$= D_d(p)R(p)[v(t)$$

$$+ \frac{1}{\tilde{r}}K(q(t); \dot{q}(t); \ddot{q}(t))\hat{u} + \frac{1}{\tilde{r}}d(t)]$$

$$\begin{aligned}
& + S(p)q(t) \ddot{\Delta} T(p)D_m(p)q_m(t) \quad (18) \\
& = D_d(p)R(p)v(t) \\
& + D_d(p)R(p)\frac{1}{\bar{r}}K(q(t); \dot{q}(t); \ddot{q}(t))\hat{\Delta} \hat{u} \\
& + S(p)q(t) \ddot{\Delta} T(p)r_m(t) \quad (19)
\end{aligned}$$

$Q(p)$ はモノックな安定多項式 ($@Q(p) = \ddot{\Delta} + n_m \hat{\Delta} n_p$) に選ぶならば、(19) 式より誤差 $e(t)$ は (20) 式及び (21) 式に書き直すことができる。

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

ここで、

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

とおけば $v(t)$ は、

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

ここで、各伝達関数の状態方程式実現を考慮すれば以下になる。

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

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

$$E_m + H_m(pI \ddot{\Delta} F_m)^{\hat{\Delta}1} G_m = Q(p)^{\hat{\Delta}1} T(p) \quad (26)$$

これより (27) 式 ~ (29) 式の状態方程式実現が得られる。

$$\hat{e}(t) = F_1 \hat{e}(t) + G_1 v(t) \quad (27)$$

$$\hat{e}_2(t) = F_2 \hat{e}_2(t) + G_2 q(t) \quad (28)$$

$$\hat{e}_m(t) = F_m \hat{e}_m(t) + G_m r_m(t) \quad (29)$$

$j|l \ddot{\Delta} F_{ij} = jQ(p)j (i = 1 \ddot{\Delta} 4)$ 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。

$$\begin{aligned}
v(t) & = \ddot{\Delta} H_1 \hat{e}(t) \ddot{\Delta} (E_2 q(t) + H_2 \hat{e}_2(t)) \\
& + v_m(t) \quad (30)
\end{aligned}$$

$$v_m(t) = E_m r_m(t) + H_m \hat{e}_m(t) \quad (31)$$

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

$$T(p) = (p + \hat{a})^3 \quad (32)$$

$$Q(p) = (p + \hat{a})^3 \quad (33)$$

$$D_m(p) = (p + \hat{a})^3 \quad (34)$$

$$D(p) = p^3 \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
R(p) & = p^2 + 3(\hat{a} + \hat{a})p \\
& + 3(\hat{a}^2 + \hat{a}\hat{a} + \hat{a}^2) \quad (36)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S(p) & = (\hat{a} + \hat{a})(\hat{a}^2 \ddot{\Delta} \hat{a}\hat{a} + \hat{a}^3)p^3 \\
& + 3\hat{a}\hat{a}(\hat{a}^2 + 3\hat{a}\hat{a} + \hat{a}^2)p^2 \\
& + 3\hat{a}^2\hat{a}^2(\hat{a} + \hat{a})p + \hat{a}^3\hat{a}^3 \quad (37)
\end{aligned}$$

また、(21) 式より、

$$e(t) = \frac{D_d(p)R(p)}{T(p)D_m(p)} \frac{1}{\bar{r}} K(q(t); \dot{q}(t); \ddot{q}(t)) \hat{\Delta} \hat{u} \quad (38)$$

$K(q(t); \dot{q}(t); \ddot{q}(t))$ の $q(t)$ 、 $\dot{q}(t)$ 、 $\ddot{q}(t)$ が三角関数及び多項式関数の積和である。 \bar{r} が大きいとき、 $e(t)$ は十分小さくなる。

7. 今後の課題

\hat{e} Mathematica を用いたマニピュレータ運動方程式の構築

è 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

è 実モデルである水平多関節ロボットの実用的ドライバソフトの開発

è 実モデルに設計した制御系を取り入れたときの各リンクモータの応答特性の考察

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)