

運動の単位に基づくロボットマニピュレータの制御

7V-2

自由運動の構成

高山 訓治 ・ 狩野 弘之

富士通(株)国際情報社会科学研究所

1. はじめに

我々は、一般のロボットマニピュレータに対してその原始的な運動を意味する運動単位という概念を提案してきた[1]。その目的は、自由および拘束運動を含む一般的な運動を組織的に構成することにある。運動単位による運動の構成理論は、特に自由運動の場合には、自由曲線の合成理論に類似し、穂坂、黒田の特性多角形[2]を用いることができる。

2. 制御系の構成

一般に、マニピュレータの運動方程式は

$$P(\theta)\ddot{\theta} + q(\theta, \dot{\theta}) = \tau + \tau^e \quad (1)$$

のように表すことができる。ここで、 θ , τ , $\tau^e \in \mathbb{R}^n$ は、それぞれ関節の角度、トルク、およびマニピュレータ先端 $x \in \mathbb{R}^n$ に加わる外力 $f^e \in \mathbb{R}^n$ により関節に働くトルクを表す。手先空間上で系の動的挙動を制御するために Hoganが提案したインピーダンス制御系[3]を構成する。(1)に、状態フィードバック

$$\tau = \tau(\theta, \dot{\theta}, f^e; \underline{z}^*, \underline{\gamma}, \underline{\zeta}, \underline{\omega}, \underline{\phi}) \quad (2)$$

をかけると、次のようにすることができる。

$$\begin{aligned} \underline{x} &= T(\phi) \underline{z} \\ \ddot{\underline{z}} + 2 \text{diag}(\underline{\zeta}) \text{diag}(\underline{\omega}) \dot{\underline{z}} + \text{diag}(\underline{\omega})^2 \underline{z} &= \text{diag}(\underline{\omega})^2 \underline{z}^* \\ &+ \text{diag}(\underline{\gamma})^{-1} T^{-1}(\phi) f^e \end{aligned} \quad (3)$$

$\underline{z} \in \mathbb{R}^n$ は \underline{x} を座標変換したものであり、 \underline{z}^* および $\underline{\gamma}$, $\underline{\zeta}$, $\underline{\omega}$, $\underline{\phi}$ は新しい系の入力およびインピーダンスに関する制御量である。

3. 運動単位の定義

\underline{z}^* , $\underline{\gamma}$, $\underline{\zeta}$, $\underline{\omega}$, $\underline{\phi}$ を次のように決める。

$$\underline{z}^*(t) = \sum_{i=1}^m \underline{z}^*_i \circ U_k(\alpha(t - t_{i-1})) ; \underline{\zeta}, \underline{\omega} \quad (4)$$

$$\underline{a}(t) = \sum_{i=1}^m \underline{a}_i \cdot B_k(\alpha(t - t_{i-1}))$$

\underline{a} は $\underline{\gamma}$, $\underline{\zeta}$, $\underline{\omega}$, $\underline{\phi}$ の各々を表す (5)

$$t_i = i/\alpha \quad (6)$$

ここで、 \underline{z}^*_i , $\underline{\gamma}_i$, $\underline{\zeta}_i$, $\underline{\omega}_i$, $\underline{\phi}_i$; $i = 1, 2, \dots, m$, および、 $\alpha > 0$ は定数とする。 \circ は要素ごとの積を意味し、 U_k は

$$\begin{aligned} U_k(s; \underline{\zeta}, \underline{\omega}) &\equiv [\alpha^2 I B_k''(s) \\ &+ 2 \alpha \text{diag}(\underline{\zeta}) \text{diag}(\underline{\omega}) B_k'(s) \\ &+ \text{diag}(\underline{\omega})^2 B_k(s)]^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

のように定義される。 $''$, $'$ は s に関する微分を表し、 $B_k(s)$ は実軸上の $k+2$ 個の点 $0, 1, \dots, k+1$ を節点としてもつ正規化された k 次のB-スプライン関数である。

(4), (5)において i 番目の項を入力したときにマニピュレータが発現する運動を i 番目の運動単位 M_i と定義し、これを

$$M_i \equiv (\underline{z}^*_i, \underline{\gamma}_i, \underline{\zeta}_i, \underline{\omega}_i, \underline{\phi}_i) \quad (8)$$

のように表すことにする。一般の運動 M は、(4), (5)の入力によって構成され、これを

$$M = M_1 M_2 \cdots M_m \quad (9)$$

のように書くことにする。

4. 自由運動の構成

自由運動すなわち $f^e = 0$ の場合について考える。 $\underline{\zeta}$, $\underline{\omega}$ は等方かつ一定とする。

$$\underline{\zeta} = (\zeta, \zeta, \dots, \zeta)^T, \quad \zeta > 0$$

$$\underline{\omega} = (\omega, \omega, \dots, \omega)^T, \quad \omega > 0 \quad (10)$$

このとき, (3)は

$$\ddot{\underline{x}} + 2\zeta\omega\dot{\underline{x}} + \omega^2\underline{x} = \omega^2\underline{x}^* \quad (11)$$

のようになり, (4), (5)によって

$$\underline{x}(t) = \underline{x}^s(t) + \underline{\mu}(t; \zeta, \omega) \quad (12)$$

$$\underline{x}^s(t) = \sum_{i=1}^m \underline{x}^*_i B_k(\alpha(t - t_{i-1})) \quad (13)$$

なる運動が発現する. \underline{x}^s は(11)の特殊解で, また, $\underline{\mu}$ は斉次式の基本解であり, 初期条件

$$\begin{cases} \underline{\mu}(t_1) = \underline{x}(t_1) - \underline{x}^s(t_1) \\ \dot{\underline{\mu}}(t_1) = \dot{\underline{x}}(t_1) - \dot{\underline{x}}^s(t_1) \end{cases} \quad (14)$$

を満たし, $\zeta, \omega > 0$ のとき

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \underline{\mu}(t) = \underline{0} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \underline{\mu}(t_1) = \dot{\underline{\mu}}(t_1) = \underline{0} \\ \rightarrow \underline{\mu}(t) = \underline{0} \end{aligned} \quad (16)$$

なる性質を有する.

自由運動においては, (8)の M_i は

$$M_i = (\underline{x}^*_i, \underline{1}, \zeta, \omega, \underline{0}) \quad (17)$$

となり, 構成(9)においては \underline{x}^*_i ; $i = 1, 2, \dots, m$ が特に問題となる. \underline{x} が初期条件

$$\begin{cases} \underline{x}(t_1) = \underline{x}^s(t_1) \\ \dot{\underline{x}}(t_1) = \dot{\underline{x}}^s(t_1) \end{cases} \quad (18)$$

を満たすとき, これらの点を順に結んだ特性多角形 $\underline{x}^*_1 \underline{x}^*_2 \dots \underline{x}^*_m$ により $\underline{x} (= \underline{x}^s)$ を設計する手法は, 穂坂, 黒田による自由曲線の合成理論[2]と一致する. \underline{x} が(18)を満たさないときにも(15)により \underline{x}^s に漸近するので, 結局, 自由運動の構成に特性多角形を用いることができる. そのときB-スプライン関数が局所的な基底になっているので, 自由運動の修正および動的な構成が容易になる.

5. 例題

図1に, $k=5$, $n=2$, $\zeta=1/\sqrt{2}$, $\omega=5$, $\alpha=5$ の場合の例を示す. \underline{x} は(18)を満たしていないが \underline{x}^s に漸近している.

6. おわりに

本研究の機会を与えていただいた当研究所の北川敏男会長, 榎本肇所長に感謝致します.

参考文献

- [1] 高山, 狩野, "運動の単位に基づくロボットマニピュレータの運動制御," 計測自動制御学会, 第3回ロボット工学部会研究会資料, pp.1-10, 1987.
- [2] 穂坂, 黒田, "CADにおける曲線曲面の創成について," 情報処理, vol.17, no.12, pp.1120-1127, 1976.
- [3] N.Hogan, "Impedance control: an approach to manipulation," Trans. ASME J. Dynamic Syst., Meas., Contr., vol.107, pp.1-24, 1985.

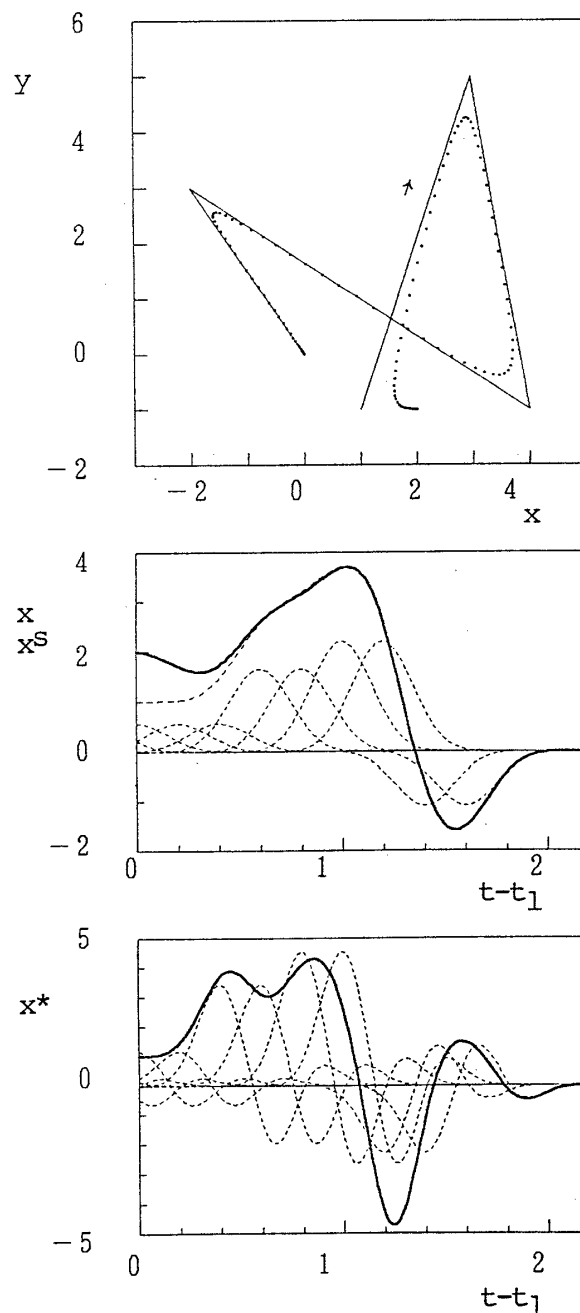


図1 運動単位による自由運動の構成例