ステッピングモータを用いた 水平2リンク形ロボットの円軌道制御* (速度入力形状と円軌道精度の実験的考察)

稲毛 敏行*¹, 橋本 豪之*¹, 對馬 一憲*²

Circular Path Control of Horizontal Two-Link Robot Driven by Stepping Motor (Experimental Study of Velocity Pattern and Its Circular Path Accuracy)

Toshiyuki INAGE, Hideyuki HASHIMOTO
and Kazunori TSUSHIMA

In this paper we describe the circular path control of a horizontal two-link robot driven by a stepping motor. The stepping motor is less utilized for the robot-manipulator system than the D. C. servomotor, because it has a demerit called the step-out phenomenon. However, the stepping motor has the merit of not requiring a rotary sensor, and thus its control system is easily prepared. In this report, seven velocity patterns are used to perform circular path control. Varying the control time which the robot draw a circular path, the deviation between the theoretical path and the experimental one is discussed for each velocity pattern. Based on the experimental results, it is recommended to utilize the synthetic velocity pattern at the initial velocity for fast and highly accurate circular path control without the step-out phenomenon.

Key Words: Horizontal Two-Link Robot, Circular Path Control, Stepping Motor, Step-Out Velocity Pattern, Control Time, Circular Path Accuracy, Positioning

1. 結 論

近年産業用ロボットはFAシステムの中核的な機器として導入され、その作業の多様化ならびに高精度化が進んでいる。これに伴いPTP制御による位置決め精度だけでなく、CP制御による軌道精度も要求されている⁽¹⁾。このためその制御や諸特性についての研究が数多く行われている^{(2)~(4)}。

今日の産業用ロボットのアクチュエータは、DC、ACサーボモータが大半を占めている。またこのほかに油圧モータやダイレクトドライブモータを用いたものもある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。一方ステッピングモータはデジタルコンピュータの高性能化により、開ループ位置制御システムのデジタルアクチュエータとしてOA機器やFAシステムに広く用いられている。今後はさらにその応用範囲が広がっていくと予想される。しかしDC、ACサーボモータと比べ制御系の大幅な簡略化が可能であるにもかかわらず、慣性モーメントの影響を受けやすく脱調・乱調現象が生じるという欠点があるため

にロボットへの応用範囲はきわめて狭く、基礎研究の例も少ない⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

その中でもステッピングモータを用いた水平2関節形ロボットの軌道制御⁽⁸⁾では、ステッピングモータの励磁方式や軌道制御システムにおける速度指令値の形状などの因子が、ロボットの運動制御の性能やステッピングモータの乱調現象に及ぼす影響を実験により調べている。またステッピングモータを用いた水平2リンク形ロボットの円軌道制御⁽⁹⁾では、各リンクの駆動トルクをステッピングモータの定格トルク以下にすることにより、ステッピングモータ特有の脱調・乱調現象を起さず高速かつ安定した円軌道制御を実現している。これらの研究は、ステッピングモータのロボットへの適用においてその制御性のよさをいかした研究として非常に興味深い。

これまでロボットの運動特性に影響を及ぼす運動曲線はさまざまなものが提案されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。しかしこれらの運動曲線を用い加減速制御を行うには比較的複雑なアルゴリズムが必要となるために、実際にはせいぜい台形状や正弦波状が用いられているに過ぎない。

本研究ではこの点に着目し、ステッピングモータを用いた水平2リンク形の試作ロボットにおいて、そのエンド・エフェクタに与える速度入力形状が円軌道精

* 原稿受付 平成5年6月17日。

*¹ 学生員、慶應義塾大学大学院 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

*² 正員、慶應義塾大学理工学部。

度とステッピングモータの脱調・乱調現象に与える影響を調べた。その結果、前述した台形状や正弦波状の速度入力で制御時間を短縮した場合、ステッピングモータ特有の脱調・乱調現象が起きたり円軌跡精度が悪くなったりした。そこで制御時間を短縮した場合にも脱調・乱調現象を起さないと予想される初速度付の速度入力を考案した。この入力を用いることによりステッピングモータの脱調・乱調現象を回避し、高速かつ高精度な円軌道制御が可能であることを実験により明らかにし、その有効性を示すことを目的に研究が行われた。

2. 記 号

本論文中的おもな記号を説明し以下に示す。[]内は単位を表す。

A : 加速速度係数

C : 初速度係数

t : 時間 [s]

T : 制御時間 [s]

I_{xj} : リンク j の重心位置に関する慣性モーメント [kgm²]

L_j : リンク j の長さ [m]

L_{Gj} : リンク j の重心位置 [m]

m_j : リンク j の質量 [kg]

$1/X$: 制御時間に対する加速時間の割合

ϕ : エンド・エフェクタの回転角度 [rad]

ω : エンド・エフェクタの回転角速度 [rad/s]

ω_m : エンド・エフェクタの最大回転角速度 [rad/s]

θ_j : リンク j の回転角度 [rad]

$\dot{\theta}_j$: リンク j の回転角速度 [rad/s]

$\ddot{\theta}_j$: リンク j の回転角加速度 [rad/s²]

τ_j : リンク j の関節駆動トルク [Nm]

添字については以下に示す。

j : リンクの番号 ($j=1, 2$) を示す指標

3. 速度入力形状と運動方程式

本章ではロボットのエンド・エフェクタに与える速度入力と円軌道を描かせる方法について述べ、さらに実験用ロボットの運動方程式を求める。

3.1 エンド・エフェクタに与える速度入力 エンド・エフェクタの回転角速度 ω を五角形状速度入力 (図1参照) で与える場合 ω_m を最大回転角速度とすると、 ω および回転角度 ϕ はそれぞれの区間で

$$\textcircled{1} \left(0 \leq t < \frac{T}{X} \right)$$

$$\omega = \frac{A\omega_m X}{T} t$$

$$\phi = \frac{A\omega_m X}{2T} t^2$$

$$\textcircled{2} \left(\frac{T}{X} \leq t < \frac{T}{2} \right)$$

$$\omega = \frac{2(1-A)\omega_m X}{T(X-2)} t + \omega_m \left\{ 1 - \frac{(1-A)X}{X-2} \right\}$$

$$\phi = \frac{(1-A)\omega_m X}{T(X-2)} t^2 + \omega_m \left\{ 1 - \frac{(1-A)X}{X-2} \right\} t + \pi - \frac{\omega_m T}{2} \left\{ 1 - \frac{(1-A)X}{2(X-2)} \right\}$$

$$\textcircled{3} \left(\frac{T}{2} \leq t < T - \frac{T}{X} \right)$$

$$\omega = -\frac{2(1-A)\omega_m X}{T(X-2)} t + \omega_m \left\{ 1 + \frac{(1-A)X}{X-2} \right\}$$

$$\phi = -\frac{(1-A)\omega_m X}{T(X-2)} t^2 + \omega_m \left\{ 1 + \frac{(1-A)X}{X-2} \right\} t + \pi - \frac{\omega_m T}{2} \left\{ 1 + \frac{(1-A)X}{2(X-2)} \right\}$$

$$\textcircled{4} \left(T - \frac{T}{X} \leq t \leq T \right)$$

$$\omega = -\frac{A\omega_m X}{T} t + A\omega_m X$$

$$\phi = -\frac{A\omega_m X}{2T} t^2 + A\omega_m X t + 2\pi - \frac{A\omega_m X T}{2}$$

.....(1)

と表せる。また $t=T$ となったときエンド・エフェクタが円軌道を一周するとすれば、 ω_m , T , A , X の関係は

$$\phi = \omega_m T \left(\frac{A}{2} - \frac{1}{X} + \frac{1}{2} \right) = 2\pi \text{(2)}$$

となる。また三角形形状と台形状速度入力は、五角形状速度入力の特別な場合とみなせるので、式(1), (2)において

$$A = \frac{1}{2}, X = 4 \quad \text{とすると、三角形形状速度入力}$$

$$A = 1, X > 2 \quad \text{とすると、台形状速度入力}$$

を表すことができる。

3.2 各リンクの回転角度、角速度、角加速度の導

図1 五角形状速度入力

出 エンド・エフェクタには絶対座標上に、中心 (X_c, Y_c) 、半径 r の円軌道を描かせる。各リンクの回転角度 θ_1 と θ_2 を図2のように設定すると、絶対座標上でのエンド・エフェクタの位置 (X_e, Y_e) は

$$\left. \begin{aligned} X_e &= r \cos \phi + X_c \\ Y_e &= r \sin \phi + Y_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

と表せる。式(3)と幾何学的に逆運動学を用いると、各リンクの回転角度は

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \text{Arc sin} \frac{X_e}{\sqrt{X_e^2 + Y_e^2}} \\ &\quad - \text{Arc sin} \frac{L_2 \sin \theta_2}{\sqrt{X_e^2 + Y_e^2}} \\ \theta_2 &= -\text{Arc cos} \left\{ \frac{X_e^2 + Y_e^2 - (L_1^2 + L_2^2)}{2L_1 L_2} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

と表せる。この式(4)を数値微分して、各リンクの回転角速度 $\dot{\theta}_1$ と $\dot{\theta}_2$ を求め、それをさらに数値微分することにより回転角加速度 $\ddot{\theta}_1$ と $\ddot{\theta}_2$ を求めることができる。3・1節および本節で示した計算式は速度入力形状が五角形、三角形、台形状の場合であるが、正弦波状速度入力の場合もほぼ同様となるので省略する。

3・3 ロボットの運動方程式の導出 実験用ロボットの運動方程式を Newton-Euler 法により求めると、各リンクの駆動トルクは次のように表せる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix}$$

ただし

$$\begin{aligned} D_{11} &= m_1 L_{c1}^2 + I_{z1} + m_2 L_1^2 + m_2 L_{c2}^2 + I_{z2} \\ &\quad + 2m_2 \cos \theta_2 L_1 L_{c2}, \\ D_{12} &= m_2 L_{c2}^2 + I_{z2} + m_2 \cos \theta_2 L_1 L_{c2}, \end{aligned}$$

図2 ロボットのモデル

$$\begin{aligned} D_{21} &= m_2 L_{c2}^2 + I_{z2} + m_2 \cos \theta_2 L_1 L_{c2}, \\ D_{22} &= m_2 L_{c2}^2 + I_{z2}, \\ H_1 &= -m_2 \sin \theta_2 L_1 L_{c2} \dot{\theta}_2^2 \\ &\quad - 2m_2 \sin \theta_2 L_2 L_{c2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2, \\ H_2 &= m_2 \sin \theta_2 L_1 L_{c2} \dot{\theta}_1^2 \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

4. 速度入力形状とリンク駆動トルク

ステッピングモータをロボットに適用した場合、リンク駆動トルクがステッピングモータの定格トルクを越えると脱調現象が起る。本研究に用いるロボットの場合、リンク2の運動の影響を受けるリンク1(肩関節)を駆動するステッピングモータが脱調・乱調現象を起しやすい。このリンク1を駆動するステッピングモータの定格トルクは 3.92 [Nm] である。

4・1 速度入力とリンク駆動トルク

一般のロボットや駆動機構に用いられる速度入力は台形状がほとんどであるが、正弦波状や三角形を用いたものもある⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹¹⁾。式(5)よりこれらの一般的な速度入力を用いた場合のリンク駆動トルクを求める。またこのほかに台形状との中間的な形状である五角形状速度入力についても同様に求め、両形状との違いを調べる。

正弦波状速度入力を用いた場合、リンク駆動トルクの最大値がステッピングモータの定格トルクに近い値となるのは制御時間 2.0 [s] である。各速度入力を用いた場合のリンク駆動トルクを比較するためにこの制御時間を例にとる。正弦波状速度入力を用いた場合のリンク駆動トルクは図3(a)のようになる。また三角形速度入力では正弦波状の場合と定量・定性的にほぼ同じ変化を示すことがわかる(図3(b)参照)。さらに五角形状と台形状速度入力の場合は定性的に同じような変化を示す(図3(c), (d)参照)が、定速区間を含む台形状速度入力のほうがその最大値と変化の幅も小さい。この二つの速度入力による最大値は、三角形や正弦波状速度入力によるものの約 50 [%] になることがわかる。これは同じ制御時間においてもエンド・エフェクタの最大回転角速度が小さいために、リンク駆動トルクに影響を与えるリンクの回転角速度、角加速度も小さくなるからである。つまりこれらの速度入力を用いた場合はさらに制御時間を短縮することが可能となる。

またどの速度入力に関しても制御時間の 1/2 の時間 1.0 [s] 付近でその変化が大きく最大値となる。これはリンクの回転方向が逆転するこの時間に入力速度が最大値となるためである。

4・2 初速度付き速度入力とリンク駆動トルク

4・1節で述べたことを考慮し、初速度付台形状速度

入力(図4参照), 合成速度入力1(図5参照), 合成速度入力2(図6参照)の三つの初速度付き速度入力を新たに考案した。それぞれの特徴について述べると, 図4に示す初速度付台形状速度入力は, 台形状速度入力に初速度を付けることにより最大回転角速度を小さくしている。また図5に示す合成速度入力1は, 台形状速度入力に初速度を付け, さらに加速区間①の後に減速区間②を設け, リンクの回転方向が逆転する制御時間の1/2の時間での回転角速度を小さくしている。この

ほかリンク駆動トルクの変化をなめらかにするために減速区間②の後を定速区間③としている。図6に示す合成速度入力2は合成速度入力1と同様に減速区間②を設けているが, その後を加速区間③としている。

それぞれの速度入力によるリンク駆動トルクを求めると図7(a)~(c)のようになる。これらを図3(a)の正弦波状速度入力によるリンク駆動トルクと最大値を比較すると約20[%]となっており, またその変化の幅も小さいことがわかる。

(a) 正弦波状速度入力

(b) 三角形速度入力

(c) 五角形状速度入力

(d) 台形状速度入力

図3 リンク1のトルク

図4 初速度付台形状速度入力

図5 合成速度入力1(初速度付)

図6 合成速度入力2(初速度付)

(a) 初速度付台形状速度入力

(b) 合成速度入力1(初速度付)

(c) 合成速度入力2(初速度付)

図7 リンク1のトルク

これらの初速度付き速度入力を用いることにより、制御時間を短縮した場合でもステッピングモータ特有の脱調・乱調現象を起さずに制御可能となる。

5. 実験

5.1 実験装置 本研究の実験に用いたロボットの側面図を図8に、制御および計測システム構成図を図9に示す。またロボットの各リンクのパラメータを表1に示す。

5.2 実験方法 ロボットのエンド・エフェクタには、絶対座標上に中心(0.28[m], 0.0[m])、半径 $r=0.1$ [m]の円軌道を描かせた。この際エンド・エフェクタに与える速度入力を、

表1 実験用ロボットのリンクパラメータ

	mass [kg]	length [m]	moment of inertia [kgm ²]	center position of mass [m]
link1	3.11	0.20	0.0625	0.108
link2	1.05	0.20	0.0203	0.081

図8 実験用ロボットの側面図

図9 制御および計測システム

- (1) 正弦波状
- (2) 五角形状
- (3) 三角形状
- (4) 台形状
- (5) 初速度付台形状
- (6) 合成1(初速度付)
- (7) 合成2(初速度付)

の七つで円軌道制御を行い、それぞれについて制御時間を変化させた。

各速度入力を評価するにあたり制御時間と半径の理論値と実験値の差を偏差とした値を用いる。

制御時間2.0[s], 1.2[s], 1.1[s]において、それぞれの速度入力により円軌道制御を行った場合の最大偏差を表2に示す。

各速度入力を用い、最も長い制御時間10[s]で実験を行った結果その最大偏差は2.05~2.37[%]であった。これより試作したロボットの円軌跡精度は最もよい場合で2[%]程度であると言える。これに対し制御時間を2.0[s]としても新たに考案した5)~7)の速度入力はそれぞれ同程度の最大偏差で円軌道制御を行うことが可能であることがわかる。さらに制御時間を短縮すると1)の速度入力は制御時間1.8[s]でリンク1を駆動するステッピングモータが脱調現象を起し理論円軌道に追従できなくなった。これを図10, 11に示す。同様に3)の速度入力も1.77[s]で脱調現象を起した。

さらに制御時間1.1[s]に短縮した場合6)の速度入力では4.17[%], 7)の速度入力では3.87[%]の最大偏差で円軌道(図12参照)を描くことが可能であったが、ほかの速度入力では最大偏差が5[%]を超えている。また制御時間を1.0[s]とすると2), 4)~7)の速度入力のどれを用いてもリンク1を駆動するステッピングモータが脱調現象を起した。このときリンク駆動トルクはステッピングモータの定格トルクを超える値となっていた。

表2 速度入力形状と最大偏差

velocity pattern	T=2.0[s] error[%]	T=1.2[s] error[%]	T=1.1[s] error[%]
1) sin wave	6.34	step out	step out
2) pentagon	4.06	6.26	9.41
3) triangle	9.30	step out	step out
4) trapezoid	3.77	4.68	6.10
5) trapezoid with initial velocity	2.45	4.04	5.54
6) synthesis No.1 (initial velocity)	2.44	3.69	4.17
7) synthesis No.2 (initial velocity)	2.34	3.46	3.87

図 10 リンク 1 の回転角度(正弦波状速度入力)

図 12 円軌道(合成速度入力 2)

図 11 円軌道(正弦波状速度入力)

て、これらの合成速度入力を用いることにより制御時間を短縮した場合にもステッピングモータは脱調・乱調現象を起すことなく、高速かつ高精度の円軌道制御が可能であること、またそれらの有効性が確認された。現在、これら合成速度入力の有効性を理論的な解析によって確かめつつある。

オリエンタルモータ株式会社には本実験機のステッピングモータを御提供頂き深く感謝する。

文 献

- (1) 古屋, 精密工学会誌, 53-4(1987), 613.
- (2) 小島・ほか 2 名, 計測自動制御学会論文集, 26-4(1990), 420.
- (3) 阿波・ほか 4 名, 油圧と空気圧, 23-6(1992), 681.
- (4) 古屋・ほか 1 名, 精密工学会誌, 59-31(1993), 423.
- (5) 古屋・ほか 1 名, 精密工学会誌, 58-1(1992), 2075.
- (6) 樋口, システムと制御, 27-9(1983), 606.
- (7) 小島・ほか 3 名, 計測自動制御学会論文集, 23-12(1987), 1283.
- (8) 小島・ほか 3 名, 機論, 56-525, A(1990), 1217.
- (9) 橋本・ほか 2 名, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '91 講演論文集, No. 910-31, A(1991-6), 115.
- (10) 古屋・ほか 3 名, 精密工学会誌, 49-7(1983), 835.
- (11) 神崎・ほか 1 名, 精密工学会誌, 55-12(1989), 2215.

7. 結 論

ステッピングモータを用いた水平 2 リンク形ロボットの円軌道制御をする場合、これまで一般的に用いられている運動曲線である台形状や正弦波状速度入力では制御時間を短縮するとステッピングモータ特有の脱調・乱調現象が起きたり、円軌跡精度が悪くなったりする。本研究では、制御時間を短縮した場合にもこのような現象を起さないと予想される初速度付きの速度入力(合成速度入力 1, 2)を新たに考案し実験を行った。その結果、制御時間 1.1 [s] において 4 [%] 前後の最大偏差で円軌道制御を行うことができた。したがっ