SCARA 型ロボットの運動制御 の高精度化に関する研究*

——ロボット駆動実験と解析——

古 屋 信 幸**

A Study on the Improvement of the SCARA Robot Motion
—Measurement and Simulation of the SCARA Robot Motion—

Nobuyuki FURUYA

This paper describes the study on the SCARA robot motion. The accurate motion control of the robot becomes more important as it is introduced to various kinds of works, especially the robot is used in continuous path control mode. But there are many kinds of factors lying down in the robot motion. They are very complicated, and it is not so easy to find out the factors of robot motion error. In this report, the method applying the experimental measurement and the numerical simulation jointly, is taken to find out the factors. In conclusion of the application, it is pointed out that the main factor of the SCARA robot motion error is the delay of two motors controlled by servo system. The positional error of the tool point path is mainly caused by the delay unbalance of two motors which actuate the first and the second arms.

Key words : the SCARA robot, robot motion, motion control, continuous path control, servo system, simulation

1. ま え が き

SCARA 型ロボット¹⁾は当初、組立用ロボットとして開発されたものであり、その動作形態は、ほとんどの場合、PTP (Point to Point) 動作で十分であった。しかし、近年、この型のロボットの応用範囲が一般の組立作業からさらに広がるにつれて、CP (Continuous Path) 動作も含めた運動制御の高精度化が期待されている。

一般にロボットの動作制御を行う場合に、工具先端の運動軌跡から、単純に機構学的な入力指令値を求め、その値を入力するという方式が採られている。しかし、この方法だとロボットの機械的特性および制御系の特性が考慮されないことから、実際のロボットの工具先端の動きは、最初に計画していたものと違ったものになってしまう。ロボット運動制御の高精度化とは、あらかじめ、これらの効果を予測し、目的にあった動作を行わせることである。そのためには、ロボットの運動に影響を及ぼす諸要因を定量的に明らかにしておく

必要がある。しかし、ロボットの運動には多くの要因が関与しており、そのメカニズムを解明することは容易ではない。

今まで、ロボットの数値モデルによるシミュレーションを行い、発生する振動解析を行った例²⁾およびシミュレーションを応用し、目的とする運動に適した制御則を提案した例^{3)~5)}などが報告されている。しかし、これらの研究の多くは数値的な研究にのみとどまっている場合が多い。

本論文では、これらの研究で用いられている数値モデルによるシミュレーションと実験による手法を併用し、ロボットの運動を支配する諸要因を定量的に決定し、それらの要因の比重の軽重を考えながら、SCARA 型ロボットの運動制御の改善を図ることを目的としている。

2. SCARA ロボットの運動特性の実測

2.1 SCARA ロボット

図 1 には本研究で動作特性の実測およびシミュレーションに用いた SCARA ロボットを示す。このロボットは SCARA 2 号機と呼ばれているもので、関節 θ_1 , θ_2 軸上に取り付けた 2 つの DC サーボモータによっ

* 原稿受付 昭和 61 年 5 月 6 日、昭和 59 年度精機学会秋季大会学術講演会 (昭和 59 年 10 月 3 日) にて発表

** 正 会 員 山梨大学工学部 (甲府市武田 4-3-11)

Fig. 1 The structure of the SCARA robot II

Fig. 2 The DC servo motor controlling system of the SCARA robot II

て第一アーム、第二アームを駆動し、工具軸の位置決めを行うものである。DC サーボモータはマイクロコンピュータから出力されるパルス列によって制御される。そのサーボドライブシステムを図2に示す。DC サーボモータは、入力されるパルス列の周波数に比例した速度で、入力されたパルス数分だけ回転する。モータ速度の検出は同軸上のタコジェネレータ（以下TGと略）で、位置検出もモータ軸上のパルスジェネレータ（以下PG）で行っている。

2.2 ロボット運動特性の実測

ロボットの運動特性の測定方法としては、工具先端で、加速度などを直接測定する方法も考えられるが、ここでは直観的に理解しやすく、測定法が簡便であることから、SCARA ロボットの工具先端にペンを取り付け、方眼紙上にロボットの運動軌跡を描かせた。同時に $\theta 1, \theta 2$ 軸のDCモータ上のTGからの速度

信号と、サーボアンプからモータに供給される電流を測定した。図3(a)に示したのは、SCARA ロボットへの入力軌跡である。この軌跡は、まず、作業域の中心点1から、点2、点3、点4、点5、点2とたどり、最後に点1に戻る。動作はすべてPTPモードで行い、通過点で一度停止するような動作は入らない。SCARA ロボットの制御では、PTP動作においても、NC2曲線による加減速制御と2軸間の同期制御を

Fig. 3 Tested tool point path and NC 2 curve

Fig. 4 Measured tool point path of the SCARA robot II

行っている。NC 2 曲線は図 3 (b) に示す加速度特性をもち、前半の 1/3 の部分で加速を、後半の 2/3 の部分で正弦曲線状の減速を行っている。パルス列でモータを制御する場合、モータは入力パルス列の周波数で速度の、また入力されたパルス数の累積量によって位置の指定が行われる。そのため、入力するパルス列のパターンの与え方により、速度と位置は一意的に定まる。この意味で始点と終点の位置のみを問題とし、途中の経路は問題としない厳密な意味での PTP 動作とは異なり、CP 制御の方に近いといえる。

図 4 に SCARA ロボットで実測された工具先端軌跡を示す。この測定結果から、例えば点 1 と点 2 の間の動作について、点 1 から 2 へ至る動きと点 2 から 1 へ戻る動きで、その描く軌跡が大きく異なっていることがわかる。ロボットの 2 つの軸の間では同期制御を行っているので、工具先端が入力指令パルスに正確に追従しているならば、その描く軌跡は 1 本の弧となるはずであり、この軌跡から、入力指令に対してロボット工具先端が大幅に違った動きをしていることがわかる。また、点 2、点 3、点 5 を通るような軌跡のように、目標とする点を通過せずに軌跡が途中から方向を変えてしまっているのは、入力指令に対して工具先端の動作が遅れていることを示している。なお、同図では同じ動作を 3 回繰り返している。

図 5 に示したのは、この 6 つの区間の PTP 動作における $\theta 1$ 軸、 $\theta 2$ 軸を駆動する DC サーボモータの回転速度と電機子電流を測定したものである。

(a) が TG の出力電圧から測定

したモータ回転速度であり、(b) が電機子電流である。 $\theta 1$ 軸、 $\theta 2$ 軸のモータともに、最大 18 A 程度の電流値で飽和する。これは電流をオン-オフしているパワーランジスタの容量から制約されるものである。 $\theta 1$ 軸のモータに関しては、区間 I, II, IV, VI において、 $\theta 2$ 軸のモータに関しては、区間 III, V において飽和に達している。それぞれの軸に過負荷のかかる区間で、このような現象が発生する。これらの現象もロボットの運動精度を悪化させる原因の一つと考えられる。ほかにもロボットの機構上の問題点が精度悪化をもたらすと考えられ、ロボットの動的な特性はこれらの効果が複合した状態で表れる。その問題点の原因を明らかにすることは、単なる動作現象の観測だけでは困難である。

3. SCARA ロボットの運動シミュレーション

ロボットの機構部および DC モータの制御部までも含めた総合的なモデルを構成し、運動シミュレーションを行う。こうすることにより、各構成部分の及ぼす効果が、全体的なロボットの動的精度に、どのようにかわってくるのかを分析することが可能となる。

3.1 SCARA 型ロボットアームの力学モデル

図 6 は SCARA 型ロボットアームの関節部における弾性、およびダンピングも考慮に入れた力学モデルを平面的に示したものである。SCARA ロボット 2 号

Fig. 5 Measured motor speed and armature current

Fig. 6 The dynamical model of the SCARA type robot

機においては、関節部でカップ型のハーモニックドライブ減速機を使用しているために、この部分での剛性が低下する。このことは、停止時における残留振動等の特性の悪化の原因となるとともに、運動制御上の精度の悪化をもたらすものと考えられる。このモデルに用いられている記号は次のとおりである。

I_{m1}, I_{m2} : DC サーボモータの慣性モーメント

I_{l1}, I_{l2} : ロボットアームの慣性モーメント

K_1, K_2 : 減速機の剛性

H_1, H_2 : 減速機部分での粘性減衰係数

r_1, r_2 : 減速比

θ_1, θ_2 : モータ軸回転角

ϕ_1, ϕ_2 : ロボットアーム軸の回転角

ロボットの運動を表す変数は、関節部で分離され、入力軸側の回転角 θ_i とアーム軸側の回転角を表す ϕ_i ($i=1, 2$) に分かれている。ロボットの運動方程式を次に示す。

$$\begin{aligned} & (J_1 + J_2 + L_1^2 M_2 + 2L_1 L_2 M_2' \cos \varphi_2) \ddot{\phi}_1 \\ & + (J_2 + L_1 L_2 M_2' \cos \varphi_2) \ddot{\phi}_2 - 2L_1 L_2 M_2' \sin \varphi_2 \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_2 \\ & - L_1 L_2 M_2' \sin \varphi_2 \dot{\phi}_2^2 + H_1 (\dot{\phi}_1 - \dot{\theta}_1 / r_1) \\ & + K_1 (\phi_1 - \theta_1 / r_1) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & (J_1 + L_1 L_2 M_2' \cos \varphi_2) \ddot{\phi}_1 + J_2 \ddot{\phi}_2 + L_1 L_2 M_2' \sin \varphi_2 \dot{\phi}_1^2 \\ & + H_2 (\dot{\phi}_2 - \dot{\theta}_2 / r_2) + K_2 (\phi_2 - \theta_2 / r_2) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & I_{m1} \ddot{\theta}_1 - H_1 / r_1 (\dot{\phi}_1 - \dot{\theta}_1 / r_1) - K_1 / r_1 (\phi_1 - \theta_1 / r_1) \\ & - \mu_{m1} \dot{\theta}_1 = T_1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & I_{m2} \ddot{\theta}_2 - H_2 / r_2 (\dot{\phi}_2 - \dot{\theta}_2 / r_2) - K_2 / r_2 (\phi_2 - \theta_2 / r_2) \\ & - \mu_{m2} \dot{\theta}_2 = T_2 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、アーム側の慣性モーメント I_{l1}, I_{l2} は式 (1), (2) における ϕ_1, ϕ_2 項の係数で表されるような変化をする。式 (1)~(4) において、 J_1, J_2 はそれぞれ第一アーム、第二アームの関節まわりの慣性モーメント、 M_2 は第二アームの質量、 M_2' は第二アームの重心位置により変化する質量で、 $M_2' = G/L_2 M_2$ (G : 第二アーム重心位置) で表される。 L_1, L_2 は第一、第二アームの長さである。また、 T_1, T_2 はモータ側から供給される駆動トルクである。 μ_m はサーボ系のダンピング定数である。

これらのパラメータの値は表 1 に示す。この値は SCARA ロボット 2 号機から求めたものである。表 2 にはハーモニックドライブ減速機のパラメータの値を示す。 r_1, r_2 は θ_1 軸、 θ_2 軸の減速比、 K_1, K_2 は剛性、 Jh_1, Jh_2 は入力軸慣性モーメントである。粘性摩擦係数 H_1, H_2 はこの部分での振動の効果を明確に評価する目的で 0 とおいた。

3.2 DC サーボモータ制御系の数値モデル

SCARA ロボット 2 号機の DC サーボモータ制御系

Table 1 Parameters of the SCARA robot II

J_1	0.982 kgm ²
J_2	0.196 kgm ²
M_2	6.37 kg
L_1	40 cm
L_2	25 cm
L_{g2}	12.5 cm

Table 2 Parameters of the harmonic drive reducer

Reduction ratio r_1	1/157
Reduction ratio r_2	1/80
K_1	81.7 MNm/rad
K_2	37.2 MNm/rad
H_1	0 Nms/rad
H_2	0 Nms/rad
Inertia Jh_1	9.36 kgcm ²
Inertia Jh_2	3.39 kgcm ²

の構成は図 2 に示したが、このモデルを数式化したのが以下の式である。

i) ポジションバック部

入力されたパルス列から、サーボバック部への速度指令値を生成するのがこの部分の機能である。

$$V_{in} = \begin{cases} G_V (\theta_{in} - \theta_0) / \theta_c & |\theta_{in} - \theta_0| < \theta_c \\ G_V & |\theta_{in} - \theta_0| \geq \theta_c \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 V_{in} : 速度指令、 θ_{in} : 入力パルス列の累積、 θ_0 : モータ側フィードバックパルスの累積、 θ_c : カウンタ部の容量、 G_V : 速度ゲイン。

これらの値は、すべてモータの出力軸側に統一してある。

ii) サーボバック部

$$I_B = \begin{cases} G_{cur} \cdot \{(V_{in} - \dot{\theta}_0) + G_{p1}(\theta_{in} - \theta_0)\} & |V_{in} - \dot{\theta}_0| > V_{lim} \\ G_{cur} \cdot \{(V_{in} - \dot{\theta}_0)\} & |V_{in} - \dot{\theta}_0| \leq V_{lim} \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 $I_B \geq I_{max}$ の場合には $I_B = I_{max}$ に電流を制限している。ここで、 I_{B1} : モータ電機子電流、 I_{max} : 最大供給可能電流値、 G_{cur} : 電流ゲイン、 G_{LP1} : 位置ループゲイン、 V_{lim} : 位置フィードバックをかける速度偏差の限界値。

これらのパラメータについては、実際のロボットの運動特性から実測を行い値を決定した。その値を表 3 に示す。

iii) モータでの出力トルク

ii) におけるサーボコントローラによってモータに供給される電流によって、モータにトルクが発生する。その関係は式 (7) で与えられる。

Table 3 Parameters of servo controller

Parameters	Axis $\theta 1$	Axis $\theta 2$
G_v rad/s	5 000	3 000
G_{cur} As/rad	2.0	0.3
G_{Lp1} 1/s	0.05	0.02
I_{max} A	18.0	18.0
θ_c rad	0.68	1.34
V_{lim} rad/s	0.1	0.1
μ_m Nms/rad	10.0	10.0

Table 4 Parameters of DC motor

Parameters	Axis $\theta 1$	Axis $\theta 2$
Wattage W	200	100
T_{con} Ncm/A	11.0	4.96
I_m kgcm ²	1.6	0.46

$$T = T_{con} \cdot I_B \quad (7)$$

ここで、 T_{con} ：モータトルク定数、 T ：モータ出力トルク、 I_B ：モータ電機子電流。

上に示したモータに関する諸定数は、メーカー側の資料に基づき、表 4 のように与えた。

以上のように数値計算モデルにおける諸パラメータは、機械要素のカタログから主に得たが、カタログに記載のないものは、ロボット単軸ごとの実験を行い、パラメータの決定を行った。特に摩擦に関するデータは実測により決定した。アームの入力軸側の慣性モーメントは、モータのロータとハーモニックドライブ減速機の慣性モーメントの和として計算している。

3.3 SCARA ロボット運動シミュレーションによる結果

SCARA ロボットアーム部の力学モデル、ならびにそれを駆動する DC サーボモータ制御系の数値モデルを総合して、ロボットの運動シミュレーションを行った。具体的な方法を説明すると、入力パルス列のパター

Fig. 7 Simulated tool point path of the SCARA robot II

Fig. 8 The input and simulated speed

ンを微小時間きざみで離散化し、各区間で予測子修正法⁷⁾(ミルン法)を用い、式(1)から(7)で示される運動方程式を解いてゆく方法を採用した。

図 3 (a) に示した動作を SCARA ロボットに行わせた場合の工具先端軌跡のシミュレーション結果を図 7 に示す。そのとき、各軸に入力される速度曲線と、モータ軸の回転速度およびアーム軸の回転速度を図 8 に示す。

なお、図 8 において、アーム軸の回転速度は、比較しやすいように、すべてモータ軸での速度に換算して示した。

図 9 (a), (b) には、それぞれ $\theta 1$ 軸、 $\theta 2$ 軸を駆動するモータの電機子電流のシミュレーション結果を示す。

以上の結果は、実測された SCARA ロボット 2 号機の動作特性とよく一致している。

4. 結果と考察

SCARA ロボット 2 号機に関して実際にロボットを駆動して得られた実測データと数値モデル化してシミュレーションを行って得られた結果とを比較検討し、次のような結論を得た。

- (1) SCARA ロボット 2 号機の入力軌跡と出力軌跡との誤差は、アームを駆動するサーボモータの

Fig. 9 The simulated armature current

遅れが主な原因である。入力軌跡に対する位置精度だけに限れば、2軸間でのモータの遅れ量の差が大きな比重を占めている。すなわち、 $\theta 1$ 軸のモータの遅れが $\theta 2$ 軸のモータの遅れに対して大き過ぎる。これに対して、もう一つの原因と考えられるロボットアームの剛性の問題は比較的影響が小さい。

(2) 運動の各段階(図3(a), I~VI)の速度パターンを比較すると、 $\theta 1$ 軸に関して、モータの遅れによる誤差が入力指令速度の50%にも及ぶのに対して、関節部の弾性による速度変動分はわずか16%程度でしかない。 $\theta 2$ 軸側に関しては、ほとんど存在しない。これは、シミュレーションの結果から、モータ軸側の動きとアーム軸側の動きを比較することによりわかる。

以上得られた結果を通して、現状での SCARA 型ロボット運動制御の改善の指針が得られる。まず、サーボ系の遅れに対する対策が必要である。また、遅れ量を予測し、それを補償する制御法を採用が必要があり、

これらは今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 牧野 洋, 村田 誠, 古屋信幸: SCARA ロボットの開発, 精密機械, 48, 3 (1982) 378.
- 2) 増田隆仁, 二川暁美, 古賀英士, 井上健二: シミュレーション解析によるロボットアームの振動に関するパラメータスタディ, 日本ロボット学会誌, 3, 3 (1985) 25.
- 3) I. Imam, L. M. Sweet, J. E. Davis, M. Good & K. Strobel: Simulation and Display of Dynamic Path Errors for Robot Motion Off-line Programming, Proc. Robots, 8, (1984) 4.
- 4) E. Freund & H. Klein: Practical Results with Nonlinear Control Strategy for Computer-controlled Industrial Robots, Proc. 14th ISIR, (1984) 347.
- 5) T. Mita & E. Kato: Iterative Control of Robot Manipulators, Proc. 15th ISIR, (1985) 665.
- 6) 古屋信幸, 相馬勝男, 陳 栄進, 牧野 洋: 選択的コンプライアンス構造を持つ組立用ロボットの開発研究(第2報)——SCARA 制御装置のハードウェアとソフトウェア, 精密機械, 49, 7 (1983) 835.
- 7) 雨宮綾夫, 田口武夫編: 数値解析と Fortran, 丸善(1969) 384.