PTP ロボットの制御における大変位問題の解*

汐 崎 勤** 牧 野 洋***

On the Solution of Large Displacement Problem in Controlling PTP Robot

Tsutomu SHIOSAKI, Hiroshi MAKINO

It is frequently observed that a PTP (point-to-point) robot shows unexpected singular motion in case of large displacement. This is because of the controlling method used which attempts to give the maximum speed to any axis. In this report another method of controlling is proposed, which gives the same motion characteristics to all axes in the same period, just like as cam-controlled. Computer simulation has proved that the resultant hand motion is very similar to the given axes motion, and the motion locus is smooth and has no singularity by utilizing this method.

1. 緒 言

PTP (point-to-point) 方式の産業用ロボットにおいて、ハンドの位置姿勢が細かい分割で指定される場合には問題は少ないが、ハンドを初期位置から最初の作業位置まで動かすような大変位を与える場合において、現在のロボットの制御方法では各軸のモータを独立にそれぞれの最高速度・最高加速度で動かしているために腕の動きがなめらかでなくなり、特に回転関節の多いロボットにおいては運動軌跡にうねりを生じ、行きすぎや回り道などの予期しない動作を行う場合がある。

本研究においては、与えられた目標位置および姿勢からシンセシスの解によって各軸の所要ストロークを求め、これを仮想カム曲線によって時間配分することにより各軸に対して相似的な加減速特性を与える軸速度制御方法を考案し、シミュレーションによってこの方法の可否を検討した。この方法によれば、大変位の始点から終点までをなめらかに、かつ、ゆるやかな弧を描かせるように、ロボットのハンドを動かすことができる。

ロボットとしては川崎ユニメート 2600 BSS を想定し、仮想カム曲線による制御を行った場合のハンドの軌跡および速度・加速度を計算し、これを従来方式と比較した。

2. 理論解析

2.1 ロボットの特性方程式

図1は川崎ユニメート 2600 BSS をベクトル表示した

ものである。このロボットは6自由度の極座標型ロボットであって、 $\theta_1, \theta_2, l_5(\theta_3)$ で極座標を構成し、 θ_4 が bend, θ_5, θ_6 が swivel となっている。

ハンドの代表点であるつかみ点に至る位置ベクトル P は下記のロボットの特性方程式¹⁾で表すことができる。

$$P = C_1^k + E^{k\theta_1}(C_2^k + C_3^k + E^{j\theta_2}(C_4^k + L_5^k + E^{j\theta_3}(C_6^k + E^{i\theta_4}(C_7^k + C_8^k + E^{j\theta_5}(G_9^{j*})))))) \quad (1)$$

一方、ハンドにおける工具あるいはこれに把持されるワークの姿勢はワークの主軸および副軸方向をそれぞれ単位ベクトル a, b で表すと、 θ_1 ないし θ_6 の値がすべてゼロであるときのこれらの値をそれぞれ a_0, b_0 として、下式によって求めることができる。

$$a = E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} E^{j\theta_3} E^{j\theta_4} E^{j\theta_5} E^{j\theta_6}(a_0) \quad (2)$$

$$b = E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} E^{j\theta_3} E^{j\theta_4} E^{j\theta_5} E^{j\theta_6}(b_0) \quad (3)$$

ここで $E^{k\theta}$ 等は回転変換テンソル¹⁾であり、 $E^{k\theta_1}$ はその後記されたベクトルを k 軸のまわりに θ_1 だけ反時計まわりに回転させることを示す。 i, j, k はそれぞれ x, y, z 方向の単位ベクトルである。

2.2 ロボットのシンセシスの解

各軸の変位がゼロの状態を初期位置として、このロボットのハンドを初期位置から大きく離れた目標位置まで

図1 川崎ユニメート 2600 BSS のベクトル表示

* 原稿受付 昭和53年3月27日。昭和52年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和52年10月17日)にて発表。

** 学生会員 山梨大学工学部(甲府市武田4-3-11)

*** 正会員 山梨大学工学部

図2 初期位置および目標位置におけるハンドの位置姿勢

動かすような大変位問題を一例として考える(図2)。

目標位置における位置 P および姿勢 a, b が与えられると、式(1),(2),(3)を解いて各軸変位 θ_i を求めることができる。この場合のように、与えられた位置姿勢から各軸変位を求める解を位置姿勢に関するシンセシスの解と呼び、この解は空間ベクトル方程式を解くための標準サブルーチンのセット(空間四面体の解および空間三角の解)、既知の基底ベクトルと回転ベクトルとから回転角を求めるサブルーチン(回転角の逆解のサブルーチン)、および直角座標を一般(軸順序を任意に選択できる)極座標に変換するサブルーチンの組合せによって解くことができる。この方法はヤコビアン法²⁾のように逆行列を求める必要がなく、また繰返し演算を必要としないので、短時間に正確な解を求めることができる。

川崎ユニメート 2600 BSS は 6 自由度のロボットであり、空間内における位置姿勢の合計 6 自由度に対応しているので解が存在する。両者間に過不足のある場合には何らかの条件を付与しないとシンセシスの解を求めることができない。

逆に各軸変位 θ_i を与えてハンドの位置姿勢を求めることをアナリシスの解と呼ぶ。これはシンセシスの解に比べて簡単であり、ロボットの特性方程式からただちにベクトルの足し算とマトリクスの掛け算を行うことによって求めることができ、自由度に過不足があっても解は得られる。以下、この例におけるシンセシスの解を求める手順を示す。

まず、式(1)のかわっこをははずすと、位置ベクトル P はベクトル $R_{12}, R_3, R_4, R_5, R_{07}, R_{09}$ の和として表現される(図3)。

図3 ロボットの位置姿勢に関するシンセシスの解

いま、位置 P および姿勢 a, b が与えられれば、グリップベクトル G_9^* はワークに固定されているから R_{09} の方向は b に等しく、長さも既知であるから R_{09} は既知である。一方、 R_{12} も定数ベクトルの和であり、したがってベクトル $\overrightarrow{AE}$ は既知ベクトルとなる。未知ベクトル R_3, R_4, R_5, R_{07} の各成分を求めてこの和をベクトル $\overrightarrow{AE}$ に等しく置くと、まず θ_1 が求まる。次に、 θ_1 が既知になったので既知ベクトル R_{09} を $-\theta_1$ だけ回転させたベクトルも既知となり、このベクトルの直角座標を一般極座標に変換すると $\theta_2 + \theta_4, \theta_5$ が求まる。 $\theta_1, \theta_2 + \theta_4$ が求まれば R_3, R_{07} が既知となる。さらに $\triangle BCD$ を考えると、ベクトル $\overrightarrow{BD}$ は既知になっており、 R_4 は一つの回転角のみ未知なベクトル、 R_5 は長さが未知で一つの回転角が未知なベクトルであるが、 R_5 と R_4 は直角をなしているので R_5 の長さが既知となり、初期状態からの偏差値として $l_5(\theta_3)$ が求まる。よって $\triangle BCD$ は既知ベクトル $\overrightarrow{BD}$ と一つの回転角のみ未知なベクトル R_4, R_5 からなり、空間三角の解のサブルーチンから R_4, R_5 を求めることができる。こうして R_4 が既知になったので、回転角の逆解のサブルーチンを用いて θ_2 が求まる。未知数 θ_4 は回転角の逆解のサブルーチンを用いて R_{07} の値から求めることができ、 θ_4 が求まれば、さらに同じサブルーチンを用いて θ_6 の値を求めることができる。以上の手順によって、すべての軸変位が求められる。

表1は電子計算機によるシンセシスの解の計算結果を示している。各軸変位 θ_i をデータとして与え(表の“GIVEN”の項)、これからアナリシスの解によって位置姿勢 P, a, b を計算し、さらにこれらの値をもとにシンセシスの解を求めている(表の“SOLVED”の項)。この

表1 電子計算機によるシンセシスの解の計算結果
(川崎ユニメート 2600 BSS)

TH	GIVEN	SOLVED	ERROR
1	55.000 00	55.000 00	0.000 00
2	15.000 00	15.000 00	0.000 00
3	600.000 00	600.000 00	-0.000 00
4	55.000 00	55.000 00	-0.000 00
5	90.000 00	90.000 00	-0.000 00
6	90.000 00	90.000 00	-0.000 00
	P	A	B
1	1 322.509	0.196 17	0.538 99
2	1 888.738	0.280 17	0.769 75
3	584.205	-0.939 69	0.342 02

計算結果によってシンセシスの解の正しいことが証明された。

2.3 仮想カム曲線による制御

シンセシスの解によって、始点における各軸変位（この場合はすべてゼロ）、および終点における各軸変位（この場合は θ_i ）が求まり、両者の差として各軸ごとのストローク（この場合は θ_i に等しい）が求まる。これによって各軸のモータをそれぞれ何度ずつ回転させればよいかが分かったので、次にこの値をどのように時間的に配分するか、すなわち各軸の速度および加速度をどのように制御するかを考える。

ここで従来の方法は各軸のモータを独立にそれぞれの最高角速度、最高角加速度で動かしているために、ストロークの小さい軸の運動は早く終了して軌跡に偏りを与え、ストロークの大きい軸があとからこの偏りを修正する形となる。そのため軌跡にうねりを生じ、行きすぎや回り道などの特異な運動の原因となる。

このため、次に記す「仮想カム曲線」による制御方法を考案した。これは与えられた目標位置および姿勢からシンセシスの解によって各軸の所要ストロークを求めたのち、各軸変位をあたかもカムによって動かすように同一の運動曲線を想定して時間配分し、各軸に対して相似的な加減速特性を与えることにより、なめらかな軌跡を得ようとする軸速度制御方法である。この場合、系の動的特性は十分にすぐれており、与えた運動曲線の通りの出力が得られることを想定しているが、たとえすぐれていなくても、系の特性が既知である場合には、これを考慮に入れて、出力が与えられた運動曲線に一致して動くような入力関数を設定することは可能である。

各軸に与えるべき仮想カム曲線としては一例として図4のごとき曲線が考えられる。この曲線は早送り区間 t_1 と微小送り区間 t_2 を持ち、全体を通じて速度および加

図4 仮想カム曲線（実時間特性）

表2 ロボットの各軸の制限値

軸番号	動作範囲	v_c (度/s)	a_{m1} (度/s²)	$-a_{m2}$ (度/s²)
θ_1	$-110^\circ \leq \theta_1 \leq 110^\circ$	10	200	-25
θ_2	$-30^\circ \leq \theta_2 \leq 27^\circ$	3	55	-25
θ_3	$0 \leq \theta_3 \leq 895\text{mm}$	80*	1 640**	-176**
θ_4	$-110^\circ \leq \theta_4 \leq 110^\circ$	10	200	-25
θ_5	$-180^\circ \leq \theta_5 \leq 180^\circ$	8	165	-25
θ_6	$-180^\circ \leq \theta_6 \leq 180^\circ$	10	200	-25

* 単位 mm/s, ** 単位 mm/s²

速度が連続になるように設計してある。

早送り区間においては加速区間と減速区間の比を1: z_1 とし、微小送り区間においては等速区間と減速区間の比を1: z_2 とする。早送り、微小送りには無次元化された早送り用曲線³⁾、微小送り用曲線をサブルーチンで与える。

2.4 仮想カム曲線の各軸への割当て

ロボットの各軸変位には構造上、例えば表2のような制限値がある（この数値例は試算のための仮の数字である）。

各軸に与えるべき運動は無次元特性（カム曲線）としては同一であり、これを同一の送り時間 $t_h (=t_1+t_2)$ 間に各軸に対して同期して与える。

各軸のストロークはまちまちであるため、 t_h の設定に当たっては各軸の最大角速度および最大角加速度がそれぞれの許容値を超えないように設定する必要がある。これらの許容値は表2に示したようにそれぞれの軸の負荷

条件等によって異なるので、六つの軸のうちで最も t_h の大きくなる軸を求め、これを t_h として他の軸にも適用する。そして、前述のカム曲線の定数 z_1, z_2 はこのクリティカルな軸における等速時の角速度 v_c および最大角加速度 a_{m1}, a_{m2} がともに許容値になるように決定する。

2.5 ロボットのハンドの運動

仮想カム制御によってロボットの各軸を動かした場合のハンドの動きを知るために、ロボットの特性方程式を微分する。式(1)の両辺を t で微分して速度 $\dot{P}$ を求めると

$$\begin{aligned} \dot{P} = & \dot{\theta}_1 J_3^k E^{k\theta_1} (C_2^k + C_3^i + E^{j\theta_2} (C_4^k + L_5^i + E^{j\theta_4} (C_6^i \\ & + E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} (G_9^{j*})))))) \\ & + \dot{\theta}_2 E^{k\theta_1} J_3^j E^{j\theta_2} (C_4^k + L_5^i + E^{j\theta_4} (C_6^i + E^{i\theta_5} (C_7^i \\ & + C_8^j + E^{j\theta_6} (G_9^{j*})))))) \\ & + E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} (\dot{L}_5^i) \\ & + \dot{\theta}_4 E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} J_3^j E^{j\theta_4} (C_6^i + E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} \\ & (G_9^{j*}))) \\ & + \dot{\theta}_5 E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} E^{j\theta_4} J_3^i E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} (G_9^{j*})) \end{aligned} \quad (4)$$

$\dot{P}$ の絶対値を $\dot{s}$ とおくと、これはハンドの運動軌跡における接線速度を表す。式(4)を再度 t で微分して加速度 $\ddot{P}$ を求めると

$$\begin{aligned} \ddot{P} = & \ddot{\theta}_1 J_3^k E^{k\theta_1} (C_2^k + C_3^i + E^{j\theta_2} (C_4^k + L_5^i + E^{j\theta_4} (C_6^i \\ & + E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} (G_9^{j*})))))) \\ & + \ddot{\theta}_2 E^{k\theta_1} J_3^j E^{j\theta_2} (C_4^k + L_5^i + E^{j\theta_4} (C_6^i + E^{i\theta_5} (C_7^i \\ & + C_8^j + E^{j\theta_6} (G_9^{j*})))))) \\ & + E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} (\ddot{L}_5^i) \\ & + \ddot{\theta}_4 E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} J_3^j E^{j\theta_4} (C_6^i + E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} \\ & (G_9^{j*}))) \\ & + \ddot{\theta}_5 E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} E^{j\theta_4} J_3^i E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} (G_9^{j*})) \\ & - (\dot{\theta}_1)^2 J_2^k E^{k\theta_1} (C_2^k + C_3^i + E^{j\theta_2} (C_4^k + L_5^i + E^{j\theta_4} \\ & (C_6^i + E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} (G_9^{j*})))))) \\ & - (\dot{\theta}_2)^2 E^{k\theta_1} J_2^j E^{j\theta_2} (C_4^k + L_5^i + E^{j\theta_4} (C_6^i + E^{i\theta_5} \\ & (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} (G_9^{j*})))))) \\ & - (\dot{\theta}_4)^2 E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} J_2^j E^{j\theta_4} (C_6^i + E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j \\ & + E^{j\theta_6} (G_9^{j*}))) \\ & - (\dot{\theta}_5)^2 E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} E^{j\theta_4} J_2^i E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} \\ & (G_9^{j*})) \\ & + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 J_3^k E^{k\theta_1} J_3^j E^{j\theta_2} (C_4^k + L_5^i + E^{j\theta_4} (C_6^i \\ & + E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} (G_9^{j*})))))) \\ & + 2\dot{\theta}_1 J_3^k E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} (\dot{L}_5^i) \\ & + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 J_3^k E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} J_3^j E^{j\theta_4} (C_6^i + E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j \\ & + E^{j\theta_6} (G_9^{j*}))) \\ & + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_5 J_3^k E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} E^{j\theta_4} J_3^i E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} \\ & (G_9^{j*})) \end{aligned}$$

図5 同期制御および非同期制御におけるハンドの接線速度・接線加速度

$$\begin{aligned} & + 2\dot{\theta}_2 E^{k\theta_1} J_3^j E^{j\theta_2} (\dot{L}_5^i) \\ & + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 E^{k\theta_1} J_3^j E^{j\theta_2} J_3^j E^{j\theta_4} (C_6^i + E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j \\ & + E^{j\theta_6} (G_9^{j*}))) \\ & + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_5 E^{k\theta_1} J_3^j E^{j\theta_2} E^{j\theta_4} J_3^i E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} \\ & (G_9^{j*})) \\ & + 2\dot{\theta}_4 \dot{\theta}_5 E^{k\theta_1} E^{j\theta_2} J_3^j E^{j\theta_4} J_3^i E^{i\theta_5} (C_7^i + C_8^j + E^{j\theta_6} \\ & (G_9^{j*})) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。以上各式における J_2, J_3 はそれぞれ第二成分演算テンソルおよび第三成分演算テンソル¹⁾である。

$\dot{P}$ 方向の単位ベクトルを $v(\lambda_v, \mu_v, \nu_v)$ とすると $\ddot{P}$ の $\dot{P}$ 方向の成分 $\ddot{s}$ は

$$\ddot{s} = v \cdot \ddot{P} \quad (6)$$

となり、ハンドの運動軌跡における接線加速度を求めることができる。

3. シミュレーション結果

3.1 ハンドの接線速度および接線加速度

式(4)、式(6)を用いてハンドの接線速度、接線加速度を電子計算機によって計算した結果を図5に実線で示す。この図を図4と比較すると、ハンドの接線速度・接線加速度が各軸に与えた運動曲線にきわめて近いことが分かる。

各軸に与えた仮想カム曲線と合成された結果として得られたハンドの運動曲線の差を定量的に比較するために両者の無次元値をとって比較する。比較の特性値として $V_{m1}, V_c, A_{m1}, -A_{m1}, -A_{m2}$ をとった(表3)。これらの

表3 各軸に与えた運動特性(仮想カム曲線)と結果として得られるハンドの運動特性との比較

特性値	仮想カム曲線の無次元値	ハンドの接線速度・接線加速度の無次元値	差(%)
V_{m_1}	1.70	1.71	0.59
V_c	1.26	1.26	0.00
A_{m_1}	5.06	4.69	-7.31
$-A_{m_1}$	-5.06	-5.35	5.73
$-A_{m_2}$	-3.72	-3.72	0.00

値はそれぞれ v_{m_1} , v_c , a_{m_1} , $-a_{m_1}$, $-a_{m_2}$ に相当する無次元値を示している。この表より速度の特性値はよく一致し、加速度においても早送り区間の加速区間で -7.31% と小さく、減速区間で 5.73% と大きくなってはいるが、全般によく一致していることが分かる。以上の結果によってハンドの接線速度・接線加速度が与えた運動曲線にほぼ等しいことが立証された。

3.2 各軸を同期させて制御した場合の優位性

仮想カム制御方式により各軸を同期させて制御した場合と従来の方式により同期させないで制御した場合の比較を述べる。

両者におけるハンドの接線速度・接線加速度を比較したものが図5である。実線が各軸を同期させて制御した場合、一点鎖線が各軸を同期させないで制御した場合を示す。一般に同期させない場合には各軸の速度が折線的に変化する曲線が採用されているのが普通であるが、ここでは、比較のために図4と同じ曲線を採用し、各軸における角速度・角加速度が許容値に一致するようにそれぞれの軸の送り時間を決めた。各軸を同期させて制御する場合には、早送り区間の加速部・減速部において接線加速度は小さく、微小送り区間においてきわめてなめらかな運動をしながら減速していくが、各軸を同期させないで制御した場合には、加速度の変動が激しく、増減を繰返しながら減速していく。これが目標位置附近でのハンドの振れの大きな原因と考えられる。なお、以上に述べた解析は準静的な運動におけるものであり、実際のロボットの運動においてはこれにさらに慣性力の影響に基づく動的な振動が加わることになる。

図6は位置ベクトル $\mathbf{P}$ の各成分の時間的変化を調べたものである。この図より各軸を同期させて制御する場合はなめらかに変化しているが、各軸を同期させないで制御した場合は z 成分に見られるように一度腕を持ち上げてから下ろすような動きをし、 y 成分においては目標値を越えて行きすぎを起こし、目標位置で溶接作業を行うような場合電極の先端がワークに衝突する可能性がある。

(a) 同期制御

(b) 非同期制御

図6 同期制御および非同期制御におけるハンドの位置の変化

図7はロボットの腕の軌跡を示したものである。各軸を同期させて制御した場合ロボットの腕の軌跡はゆるやかな弧を描きながら目標位置まで移動するが、各軸を同期させないで制御した場合別の軌道を通りながら移動し、目標位置附近でハンドの動きが激しいことがわかる。

以上に述べた同期制御と非同期制御との差は、与えられた変位が大きく、かつ非同期制御時における各軸動作時間の不一致度が大きいほど大きくなる。また、上例では特性の良いカム曲線を想定して比較したが、一般に採用されている運動曲線では加速度が不連続なため、非同期時における軌跡変動はもっと激しくなる。

4. リアルタイム制御の可能性

本研究においては仮想カム曲線による同期制御の優位性を電子計算機によるシミュレーションによって立証したにとどまり、実際のロボットを動かしたわけではない。実際のロボットを動かす場合には、これらの演算がリアルタイムでロボットを動かすに足るほど短時間内にできるかどうかということが問題になるであろう。

教示再生型のロボットを用いるならば位置姿勢は各軸変位 θ_i の値として記憶されるわけであり、シンセシス

図7 同期制御および非同期制御におけるハンドの運動軌跡

の解は必ずしも必要ではない。しかしながら図面情報によって位置姿勢が与えられたり、あるいは追従制御を行うような場合にはシンセシスの解が必要になる。

本論文に述べたシンセシスの解の方法は繰返し計算を用いていないので計算時間は短い。著者らが用いた計算機 (ACOS 77-NEAC 300) では一組の P, a, b のデータから $\theta_1 \sim \theta_6$ を求めるのに要する時間は平均 0.26 s であった。なお、このプログラムの長さは FORTRAN で 217 ステップであるが、他のロボットにも使えるようサブルーチンを標準化してあるので、特定のロボットに限ればプログラムはもっと短縮できると思われる。また、ここで述べたものよりも簡単な構成のロボットであれば計算時間も短い。

各軸変位が求められた後の軸速度・軸加速度の与え方はここでいう仮想カム曲線の記憶方法と関係する。本論文においてはパラメータ z_1, z_2 に自由度のある曲線を用いたが、これを固定してしまえばカム曲線は一通りとなり、その場合にはどれか1軸だけの最高速度あるいは最高加速度のいずれかを限界値に設定することになる。マイクロコンピュータの進歩に伴い、これらの演算および各軸モータの速度制御が容易に行えるようになることが期待される。

5. 結 論

本研究によって次の結論が明らかになった。

ハンドの位置 P および姿勢 (a, b) の初期値と終値から各軸変位 θ_i の初期値と終値を求め、これによって θ_i の瞬時値が任意の運動曲線 (仮想カム曲線) に従って変化するように各軸変位を与えるならば、ハンドの位置 P の接線速度および接線加速度は与えた運動曲線にほぼ等しく、大変位の場合にもなめらかな運動軌跡を与えることができる。

参 考 文 献

- 1) 牧野 洋: 自動機械機構学, 日刊工業新聞社 (1976) 324.
- 2) D.E. Whitney: The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators, ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Dec. (1972).
- 3) 牧野 洋: カム機構の自動設計, 精機学会自動組立専門委員会第 43 回研究発表会資料 (1977) 51.