



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	冗長型マニピュレータのシンセシス解 : ロボット・シミュレータのための基礎研究
Author(s)	嘉数, 侑昇; Kakazu, Yukinori; 沖野, 教郎 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 120, 75-85
Issue Date	1984-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41862
Type	departmental bulletin paper
File Information	120_75-86.pdf



冗長型マニピュレータのシンセシス解

——ロボット・シミュレータのための基礎研究——

嘉 数 侑 昇 沖 野 教 郎
吉 村 齋 仲 村 人 也

(昭和58年11月30日受理)

A Synthetic Solution of an Equation for Motion of Redundant Robot Manipulator

—A Study for Constructing a Robot Simulator—

Yukinori KAKAZU, Norio OKINO, Hitoshi YOSHIMURA
and Hitoya NAKAMURA

(Received November 30, 1983)

Abstract

In introducing an new robot system, it is often difficult and expensive to simulate and know how it will work, what the problems to be solved are.

“Robot simulator” is one of the answers to this problem—it is a kind of virtual (it does not exist as physical object) system which is modeled inside a computer and this virtual simulates the motion which the real robots will take.

In this report, we assume that robots have more than 6 degrees of freedom and we mention.

- (1) how to arrange the link mechanism for robots,
- (2) to solve equations which are expressed in terms of Jacobian matrix, how we introduced Moore-Penrose Pseudo Inverse to the equation and to obtain synthetic solutions for the motion of robots, and
- (3) show results of the experiment by using the robot simulator which we have constructed.

1. はじめに

近年のロボット研究開発は目覚ましいものがあり、特に産業用ロボットの各分野における実用化は、生産形態そのものの変革をもたらしつつある。具体的には柔軟型生産体系 (Flexible Manufacturing System) の実現、極限作業用ロボット開発プロジェクト開始、あるいは無人化工場指向のロボット工場の出現等があり、これらが生産形態を含む社会形態に及ぼす影響は図り知れないものがある。

一方、各種分野への産業用ロボットの導入後の利用実績データの分析から、現在のティーチング・プレイバック方式では、ロボットの持つ機能を十分に発揮することが出来ず、その有効利用が

らはほど遠いことが指摘されている¹⁾。この問題を解決する一つの方法として提案されているものが AL³⁾、MCL⁸⁾ 等に代表される OLPM (Off Line Programming Method) であり、現在開発途中のものを含めると数多く存在する。これらは数値制御工作 (Numerical Controlled Machining) における APT に代表される N/C 言語と同様、動作レベル、作業レベル等により相違はあるが一般にロボット言語と呼ばれる。

本研究でとりあげるロボット・シミュレータは OLPM の新しい展開である。すなわち、通常の OLPM がその対象を実ロボット空間に限定しているのに対し、ロボット・シミュレータはその対象を仮想ロボット空間 (Virtual Robot Space²⁾) に置く。仮想ロボット空間にその対象を置くことにより、ロボット・シミュレータは、現実ロボットの実ロボット空間に於ける各種の問題のシミュレーションが可能であり、また、実在しない仮想ロボットの同様なシミュレーションが可能となる。

更に、仮想ロボット空間、すなわち情報空間でのロボット問題の議論は、他の情報空間、例えば CAD/CAM (Computer-Aided Design/Manufacturing)、CIM (Computer Integrated Management) や AI (Artificial Intelligence) 等との接続を容易にし、知能ロボット研究開発へと連なって行くであろう。

2. 問題の設定

- ロボット・シミュレータに必要な解決すべき問題群は次の3領域に大別出来る。すなわち、
- マン・マシン・インターフェイスに関する問題群
 - ロボット本体に関する問題群
 - ロボットとその置かれている環境に関する問題群

これら3領域の問題群が解決されて、具体的なインプリメンテーションが行われることにより、理想的なロボット・シミュレータが構築される。本研究では、ロボット本体に関する問題群の一部を扱う。ロボット本体に関わる問題も数多く存在するが、それらの中でも特に基礎的な問題である仮想ロボット機構の数式モデルの設定と、その機構方程式の解法、あるいは各関節 (Joints) の制御に関する問題に対象を絞ることとする。

一般に自由度 n のロボットは、回転関節 (Revolutional Joint)、旋回関節 (Rotational Joint) 及び直動関節 (Prismatic Joint) の幾つかの組合せ及び連続する2関節間リンク定数により構成可能であるが、理論上回転関節と旋回関節は統一して表現出来るのでこれを R-Joint とし、ロボットの機構数式モデルを R-Joint と P-Joint (直動関節) の組合せと連続する2関節間リンク定数により表現するものとする。

さて、3次元空間におけるある物体の位置と姿勢を表現するには6自由度が要求されるが、一端固定オープン・ループなリンク機構であるロボット機構の場合、その自由端リンクを任意の位置と姿勢 (機構的な制約範囲内で) にするためには、ロボット自身最少6自由度が要求される。

しかし、ロボット・シミュレータは仮想ロボットの構築を対象にすることも目的の一つであるから、ロボットの機構数式モデルとして6自由度向きのものを用意しておけば充分というわけにはいかない。そこで、ここでは自由度が6以上をも可能な、いわゆる冗長型マニピュレータ機構モデルを考える。すなわち、具体的問題の設定としては、冗長型マニピュレータ機構の構成方法とそのシンセシス解としての機構方程式の解法、及びそれらのインプリメンテーションを考える。なお、以下では未だにその定義不明確なロボットという用語の代りにロボット・マニピュレータ

(あるいは単にマニピュレータ)を用いる。

3. 機構の構成

図1に機構モジュールとして用いる R-Joint と P-Joint を示す。 J_n は関節番号、 L_n はリンク番号である。座標系は、図に示すごとく局所座標系とする。R-Joint に関するリンク・パラメータは、リンク長 a_n 、関節ねじれ角 α_n で関節変数は関節角度 θ_n 、関節パラメータは関節変位量 d_n である。P-Joint の場合、P-Joint に関する θ_n は一定なのでこれは関節パラメータであり、並進変位量 d_n が関節変数になる。なお、P-Joint の手前の R-Joint はその座標系のとり方に若干の注意を要する。更に Z_n と Z_{n-1} が一点で交わる時、 X_n の方向は $Z_{n-1} \times Z_n$ の正負どちらかの方向にとられる。

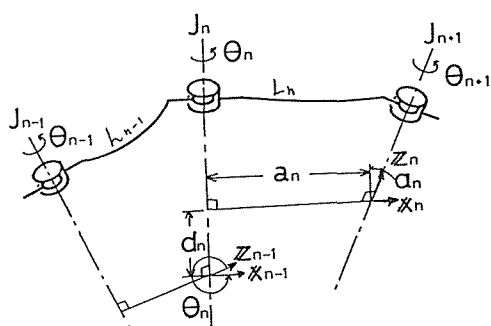


図1(a) 回転関節モデル

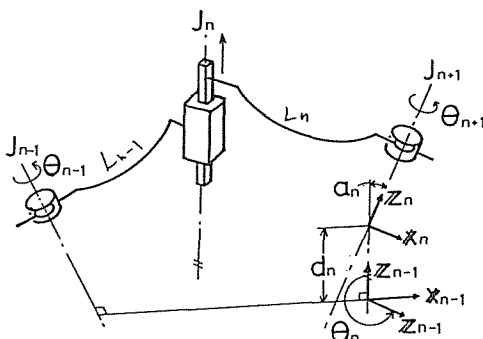


図1(b) 直動関節モデル

図2に機構の構成のために用意したパラメータ ITYP, IDIR を示す。ITYP は関節の型で IDIR は初期状態に於ける定義軸 ($x:10, y:20, z:30$) 方向を示す。その他リンク長 a_n を DIST として入力すればよい。これらを各関節毎に順次入力することにより機構モデルが構築されることになる。図3に Stanford Manipulator¹⁾の本手法による機構モデルの構成例を示す。

ITYP \ IDIR	1	2	3	4
10				
20				
30				

ITYP - JOINT TYPE
IDIR - JOINT DIRECTION

図2 機構構成用パラメータ

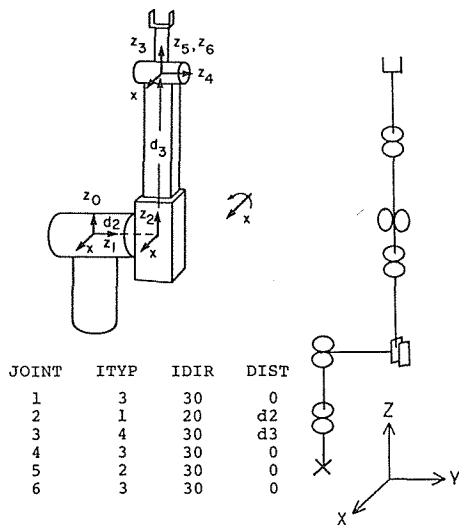


図3 スタンフォードマニピュレータの場合

4. 冗長型マニピュレータのシンセシス解

以下に、ヤコビアン・マトリクスを用いた冗長型マニピュレータのシンセシス解の求め方を示す。一般にマニピュレータの先端部の制御パラメータ（入力情報）の数を m とし、マニピュレータの持つ自由度を n とすると、 $m = n$ であっても R-Joint が多いときは、その解は一意ではないことが知られている。マニピュレータを制御するには、その機構方程式の解を求めなければならないので、ある評価基準の下に解集合の中から一つを決定しなければならない。例えば、障害物が存在するならばそれを回避するように腕の位置や姿勢を定めることが考えられ、障害物との干渉可能性がないならば、各関節変数値の変化分が最小の解を選択すること等が考えられる。また、先端部の位置姿勢の一連の解は、前のステップから次のステップの目標動作を遂行するとき、各関節の相対速度最小化の規範を満たす必要も生じる。

以下に一般化逆マトリクス法を用いてこれらの問題を解決する手法を冗長型マニピュレータのシンセシス解として示す。

回転変換と並進変換を、Denavit-Hartenberg^{1,5)} 記法に従い 4×4 の \mathbf{A} マトリクスで同時表現し、これを変換マトリクスとする。今、対象としている関節は R-Joint と P-Joint のみゆえ、 \mathbf{A} マトリクスは式(1)で表現出来る。ただし、P-Joint の場合、式(1)において $a = 0$ である。また、図1にも示したごとく、 $\alpha_n \equiv \angle(\mathbf{Z}_n, \mathbf{Z}_{n-1})$ 、 $a_n \equiv |\mathbf{Z}_n, \mathbf{Z}_{n-1}|$ 、 $\theta_n \equiv \angle(\mathbf{X}_n, \mathbf{X}_{n-1})$ 、 $d_n \equiv |\mathbf{X}_n, \mathbf{X}_{n-1}|$ である。

$$\mathbf{A}_n = \begin{pmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & a_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & a_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

歴史的に n 個の変換マトリクス \mathbf{A}_i ($i = 1, 2, \dots, n$) の積からなる変換マトリクスは \mathbf{T} マトリクス¹⁾ と呼ばれるが、 \mathbf{T} マトリクスは式(2)で計算する。

$$\mathbf{T}_n = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_{i+1} \mathbf{A}_{i+2} \dots \mathbf{A}_n \quad (2)$$

絶対座標系における微小平行移動ベクトルを \mathbf{d} 、微分回転ベクトルを δ で表わし \mathbf{T} 座標系（変換マトリクスはそれ自身局所座標系を構成する）に関する \mathbf{d} 及び δ を各々、 $\mathbf{T}\mathbf{d}$ 、 $\mathbf{T}\delta$ とすると、式(3)が成立する。

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^n \mathbf{d}_x &= \mathbf{n} \cdot ((\delta \times \mathbf{p}) + \mathbf{d}) \\ \mathbf{T}^n \mathbf{d}_y &= \mathbf{o} \cdot ((\delta \times \mathbf{p}) + \mathbf{d}) \\ \mathbf{T}^n \mathbf{d}_z &= \mathbf{a} \cdot ((\delta \times \mathbf{p}) + \mathbf{d}) \\ \mathbf{T}^n \delta_x &= \mathbf{n} \cdot \delta \\ \mathbf{T}^n \delta_y &= \mathbf{o} \cdot \delta \\ \mathbf{T}^n \delta_z &= \mathbf{a} \cdot \delta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{a} , \mathbf{o} , \mathbf{n} , 及び \mathbf{p} は各々マニピュレータ先端部 (End Effector) の絶対座標系における接近ベクトル (Approach Vector), 姿勢ベクトル (Orientation Vector), 法線ベクトル (Normal Vector = $\mathbf{a} \times \mathbf{o}$) 及び, 先端部中心を示す位置ベクトルであり, \mathbf{T} マトリクスの列ベクトルをなす。この様相を図 4¹⁾ に示す。

式(3)において, i 番目の関節が R-Joint ならば
 $\mathbf{d}_i = 0, \delta = 0\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 1\mathbf{k}$ とすると,

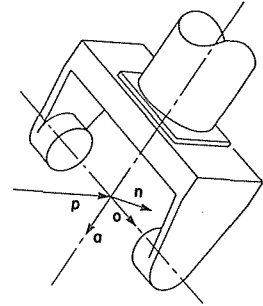


図 4 \mathbf{a} , \mathbf{o} , \mathbf{n} , \mathbf{p} ベクトル

$${}^n \mathbf{d}_i = (-n_x p_y + n_y p_x) \mathbf{i} + (-o_x p_y + o_y p_x) \mathbf{j} + (-a_x p_y + a_y p_x) \mathbf{k} \quad (5)$$

$${}^n \delta_i = n_z \mathbf{i} + o_z \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} \quad (6)$$

i 番目の関節が P-Joint ならば, $\delta = 0, \mathbf{d} = 0\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 1\mathbf{k}$ として, 次式を得る。

$${}^n \mathbf{d}_i = n_z \mathbf{i} + o_z \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} \quad (7)$$

$${}^n \delta_i = 0\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 0\mathbf{k} \quad (8)$$

これらの式によりヤコビアン・マトリクスは式(9)で示される。

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} {}^n d_{1x} & {}^n d_{2x} & \dots & {}^n d_{nx} \\ {}^n d_{1y} & {}^n d_{2y} & \dots & {}^n d_{ny} \\ {}^n d_{1z} & {}^n d_{2z} & \dots & {}^n d_{nz} \\ {}^n \delta_{1x} & {}^n \delta_{2x} & \dots & {}^n \delta_{nx} \\ {}^n \delta_{1y} & {}^n \delta_{2y} & \dots & {}^n \delta_{ny} \\ {}^n \delta_{1z} & {}^n \delta_{2z} & \dots & {}^n \delta_{nz} \end{pmatrix} \quad (9)$$

ここで, \mathbf{T}_n の位置と姿勢の微小変化 $\Delta \mathbf{S}$ と, 局所関節座標系における微小変化 $\Delta \mathbf{q}$ を式(10)及び(11)で定義する。

$$\Delta \mathbf{S} \equiv [{}^n \mathbf{d}_x \quad {}^n \mathbf{d}_y \quad {}^n \mathbf{d}_z \quad {}^n \delta_x \quad {}^n \delta_y \quad {}^n \delta_z]^T \quad (10)$$

$$\Delta \mathbf{q} \equiv [dq_1 \quad dq_2 \quad \dots \quad dq_n]^T \quad (11)$$

すると, 式(9)と $\Delta \mathbf{S}$, $\Delta \mathbf{q}$ の関係により式(12)が成立する。

$$\mathbf{J} \Delta \mathbf{q} = \Delta \mathbf{S} \quad (12)$$

ここで式(9)は $(m \times n)$ のマトリクスであるが, マニピュレータ先端部の制御変数は $m = 6$ が一般的である。このことを考慮して式(12)を解くことを試みる。

式(12)により, マニピュレータ先端部情報 $\Delta \mathbf{S}$ が与えられた場合, 各関節の微小変位量 $\Delta \mathbf{q}$ を求めることが出来る。

式(12)から $\Delta \mathbf{q}$ を求める逆問題のための制約条件として式(13)を置く。

$$\Delta \mathbf{q}_{\min} \leq \Delta \mathbf{q} \leq \Delta \mathbf{q}_{\max} \quad (13)$$

$$\text{ここで } \Delta \mathbf{q}_{\min} \equiv \mathbf{q}_{\min} - \mathbf{q}_a \quad (14)$$

$$\Delta \mathbf{q}_{\max} \equiv \mathbf{q}_{\max} - \mathbf{q}_a \quad (15)$$

\mathbf{q}_a : 前ステップにおける関節座標値

\mathbf{q}_{\min} : 関節座標値の下限値

\mathbf{q}_{\max} : 関節座標値の上限値

このとき、式(12)は Moore-Penrose の擬似逆マトリクス (Pseudo inverse)^{6,7)} を導入することにより、その解を式(16)で与えることができる。

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}^+ \Delta \mathbf{S} + \bar{\mathbf{Q}}^+ \Delta \bar{\mathbf{q}} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J})(\mathbf{I} - \bar{\mathbf{Q}}^+ \bar{\mathbf{Q}})(\mathbf{y}) \quad (16)$$

式(16)は常に minimize $\|\Delta \bar{\mathbf{q}} - \Delta \mathbf{q}\|^2$ を満たす。

ここで各記号は以下の意味を持つ。

$$\Delta \bar{\mathbf{q}} = (\Delta \mathbf{q}_{\max} + \Delta \mathbf{q}_{\min}) / 2$$

\mathbf{J}^+ : Moore-Penrose の Pseudo Inverse

\mathbf{Q} : 正定重み行列

$$\bar{\mathbf{Q}} = \mathbf{Q}(\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J})$$

$\bar{\mathbf{Q}}^+$: $\bar{\mathbf{Q}}$ の Pseudo Inverse

\mathbf{I} : $(n \times n)$ 単位マトリクス

$$\Delta \bar{\mathbf{q}} = \mathbf{Q}(\Delta \bar{\mathbf{q}} - \mathbf{J}^+ \Delta \mathbf{S})$$

\mathbf{y} : 任意の n 次元ベクトル

$\mathbf{y} \neq 0$ の場合は、これまでの評価規範の上に更に付加的な規範を導入して重ね合わせが出来る。

$\mathbf{y} = 0$ の場合は、最小化ノルムを持ち、各関節間の相対速度を最小化する。また \mathbf{Q} を適当に定めることによって式(16)によりマニピュレータの動的挙動を与え得るので、ロボットマニピュレータの置かれている環境からの情報を組み込むことが可能になることが予想される。

5. 数 値 実 験

作成したシミュレータの中で、冗長型マニピュレータの機構数式モデルのシンセシス解を求めるために構築したサブシステムのゼネラルフローを図5に示す。その概略を以下に述べる。まず図2及び3で示したように、マニピュレータの型を入力する。これには関節数 (JN)、関節の型 (ITYP)、関節の初期状態における方向 (IDIR) 及びリンク長 (DIST) がある。

次に各関節の初期変位角、マニピュレータ先端部分の目標位置及び姿勢、その間の軌道を入力する。式(16)は微小変量に基づいた理論展開の結果ゆえ、初期状態と最終状態 (初期及び目標地点における位置情報と姿勢情報) 間を微小に分割することが必要である。この

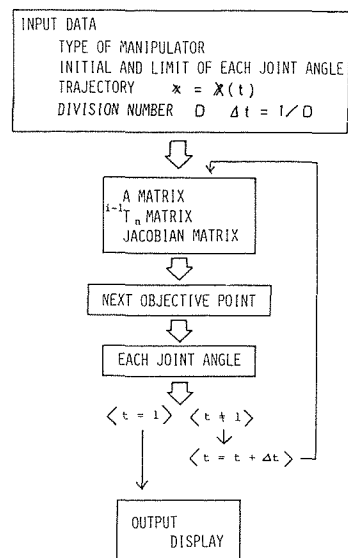


図5 システムの流れ

ために、マニピュレータ先端部分の軌道が次式で与えられるものとする。すなわち

$$\left. \begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \\ z &= z(t) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$(0 \leq t \leq 1)$

パラメータ t に関し、ある分割数 D を与え $\Delta t = 1/D$ として t を Δt だけ増分させて軌道分割を実行し、その度に式(16)を求める手順をくり返すことになる。図5に示すように、入力されたデータを基にして、式(1), (2)で示される \mathbf{A} マトリクス及び \mathbf{T} マトリクスが作成され、さらにヤコビアンマトリクス \mathbf{J} が作成される。次に現時点でのパラメータ t の値に対応する手先の目標位置姿勢 $\Delta \mathbf{S}$ を計算する。これらを用いて式(16)より対応する各関節変位を求める。

次に本システムを用いて行った計算機実験例を示す。使用した計算機システムは北大大型計算

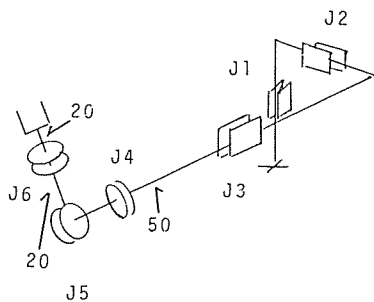


図6 直動型ロボット

```
*****  ROBOT SIMULATOR OUTPUT  *****
```

TYPE OF MANIPULATOR

JOINT	ITYP	IDIR	DIST	INITIAL VALUE
1	4	30	0.0	0.0
2	4	20	0.0	0.0
3	4	10	0.0	0.0
4	3	10	50.000	0.0
5	1	10	20.000	0.0
6	3	10	20.000	0.0

OBJECTIVE

X=	300.000	PHI=	0.175
Y=	100.000	THI=	1.396
Z=	100.000	PSI=	0.175

CURRENT

X=	250.000	PHI=	0.0
Y=	0.0	THI=	1.571
Z=	0.0	PSI=	0.0

CALCULATION NUMBER 100

CPU TIME = 0.28208

VALUE	DIFFERENCE	JOINT	VALUE
X	-0.000	1	74.348
Y	-0.000	2	100.390
Z	-0.000	3	52.210
PHI	0.000	4	0.015
THI	0.000	5	-0.172
PSI	0.000	6	0.015

図7 初期データと結果

機センター HITAC M280H システムである。

○実験例1：図6に示すような6自由度を持つ SIGMA Robot 型の直角座標型ロボットに関するものである。図中 J_i は関節番号 i を意味し、各関節間の矢印付きの数値はリンク長を示すものとする。これは以下の実験例でも同様である。その初期状態入力データの詳細は図7の最初のテーブルに出力されている。ここで INITIAL VALUE は各関節の関節変数の初期値である。次に、図7では OBJECTIVE が目標地点の位置とそこにおけるマニピュレータ先端部分の姿勢であり、CURRENT が現時点におけるそれである。つづいて分割回数、CPU 時間が示され、最後のテーブルでは、式(16)により計算された結果のシンセシスとしてのマニピュレータ先端部分の最終の

位置及び姿勢が示され、それと与えた目標地点とデータとの差が DIFFERENCE として比較のために出力されている。これを見ることによりシンセシス解の精度がチェック可能である。最後の JOINT VALUE はマニピュレータの最終状態における各関節変数の値を示す。なおこの時与えた軌道は直線軌道である。

○実験例 2：図 8 に示すように 8 自由度を持つ関節型ロボットの例である。与えた情報及び結果が図 9 に示される。図 9 の見方は図 7 と同様であるが、この時の軌道は $x = 300 t$, $y = 30 \sin(2 \pi t) + 50$, $z = -300 t + 560$ である。図 10 は、この例のときの分割数と到達までに要する計算時間の関係性を調べた結果である。横軸に (軌道の長さ / 分割数), 縦軸に単位移動距離あたりの計算時間をとったものであり、この結果, 冗長型マニピュレータの式(16)による解法では一回

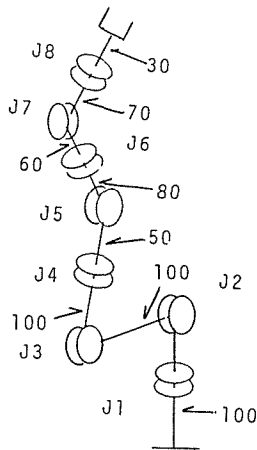


図 8 8 自由度関節型ロボット

***** ROBOT SIMULATOR OUTPUT *****

TYPE OF MANIPULATOR

JOINT	ITYP	IDIR	DIST	INITIAL VALUE
1	3	30	100,000	0.0
2	1	10	100,000	0.0
3	2	30	100,000	0.0
4	3	30	50,000	0.0
5	2	30	80,000	0.0
6	3	30	60,000	0.0
7	2	30	70,000	0.0
8	3	30	30,000	0.0

OBJECTIVE

X= 200,000 PHI= 0.0
 Y= 50,000 THT= 0.0
 Z= 260,000 PSI= 0.0

CURRENT

X= 100,000 PHI= 0.0
 Y= 0.0 THT= 0.0
 Z= 560,000 PSI= 0.0

CALCULATION NUMBER 199

CPU TIME = 0.56458

VALUE	DIFFERENCE	JOINT	VALUE
X 200,000	-0,000	1	0.278
Y 50,000	-0,000	2	1.764
Z 260,000	0,0	3	-0.095
PHI -0,000	0,000	4	0.951
THT -0,000	0,000	5	-1.169
PSI 0,000	-0,000	6	-0.095
		7	-0.592
		8	-0.190

図 9 初期データと結果

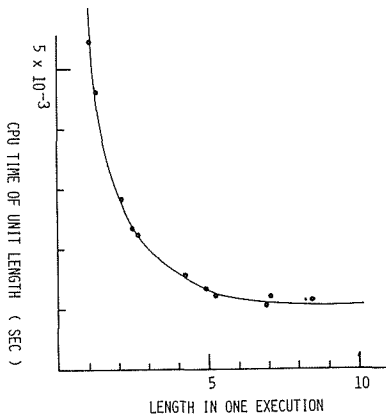


図 10 分割数と計算時間の関係

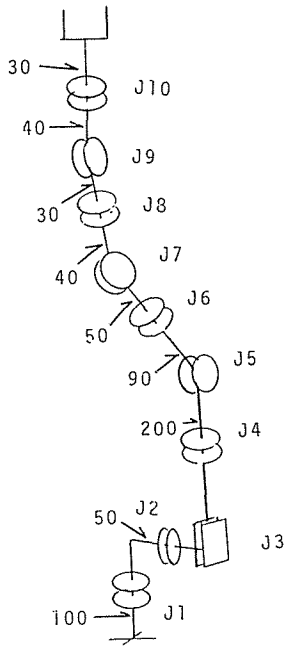


図11 自由度10の関節型ロボット

***** ROBOT SIMULATOR OUTPUT *****

TYPE OF MANIPULATOR

JOINT	ITYP	IDIP	DIS1	INITIAL VALUE
1	3	30	100,000	0,000
2	3	20	50,000	0,000
3	4	30	150,000	0,0
4	3	30	200,000	-0,000
5	2	30	90,000	0,000
6	3	30	50,000	0,000
7	2	30	40,000	0,000
8	3	30	30,000	0,000
9	2	30	40,000	0,000
10	3	30	30,000	0,000

OBJECTIVE

X= 300,000 PHI= 0,0
 Y= 50,000 THT= 0,0
 Z= 800,000 PSI= 0,0

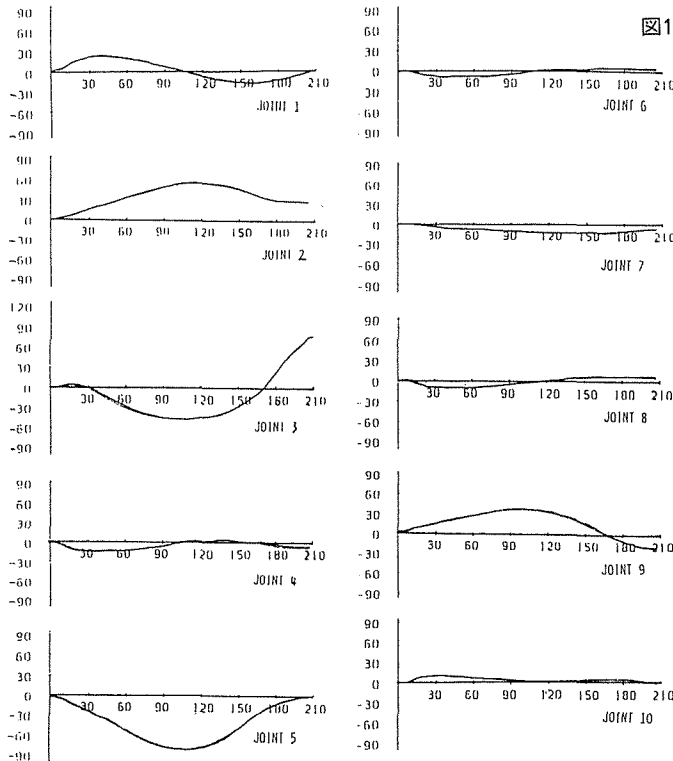
CURRENT

X= 0,013 PHI= -0,000
 Y= 50,000 THT= 0,000
 Z= 800,000 PSI= -0,000

CALCULATION NUMBER 205

CPU TIME = 0,77833

VALUE	DIFFERENCE	JOINT	VALUE
X 300,000	0,0	1	-0,060
Y 50,000	-0,000	2	0,444
Z 800,000	-0,000	3	75,704
PHI -0,000	0,000	4	0,549
THT -0,000	0,000	5	0,178
PSI 0,000	-0,000	6	-0,231
		7	-0,067
		8	-0,194
		9	-0,536
		10	-0,081



JOINT DISPLACEMENT

図13 各関節変数の変化の様相

図12 初期データと結果

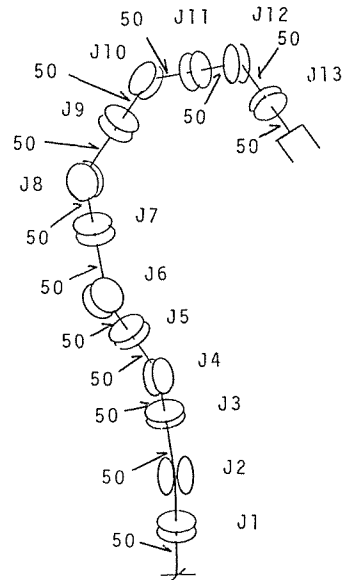


図14 自由度13の関節型ロボット

当りの移動距離が大きいほど、目標地点に到達する時間は速くなるが、その効率はだんだん悪くなっていくのがわかる。

```

***** ROBOT SIMULATOR OUTPUT *****

TYPE OF MANIPULATOR

-----
! JOINT ! I T Y P ! I D I R ! D I S T ! I N I T I A L   V A L U E !
! 1 ! 3 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 2 ! 2 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 3 ! 3 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 4 ! 2 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 5 ! 3 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 6 ! 2 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 7 ! 3 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 8 ! 2 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 9 ! 3 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 10 ! 2 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 11 ! 3 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 12 ! 2 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
! 13 ! 3 ! 30 ! 50.000 ! 0.087 !
-----

OBJECTIVE

X= 50.000      PHI= 0.175
Y= 200.000    THT= 0.175
Z= 200.000    PSI= 0.175

CURRENT

X= 205.096    PHI= 0.666
Y= 51.714    THT= 0.490
Z= 677.240    PSI= 0.173

CALCULATION NUMBER 204
CPU TIME = 1.14271

----- VALUE ----- DIFFERENCE ----- JOINT ----- VALUE -----
! X 50.000 ! -0.000 !! 1 -0.257 !
! Y 200.000 ! 0.000 !! 2 -1.531 !
! Z 200.000 ! 0.000 !! 3 0.441 !
! PHI 0.175 ! -0.000 !! 4 0.430 !
! THT 0.175 ! 0.000 !! 5 0.657 !
! PSI 0.175 ! -0.000 !! 6 1.427 !
! ! ! ! ! 7 0.619 !
! ! ! ! ! 8 1.149 !
! ! ! ! ! 9 0.565 !
! ! ! ! ! 10 -0.021 !
! ! ! ! ! 11 0.259 !
! ! ! ! ! 12 -1.979 !
! ! ! ! ! 13 -0.214 !
-----

```

図15 初期データと結果

○実験例3：図11は自由度10の関節型ロボットを示す。図12は図11に対応した諸データと実験結果を示す。このとき与えた軌道は $x=300t$ 、 $y=70\sin(2\pi t)+50$ 、 $z=100\cos(2\pi t)+700$ である。図13は各分割点（横軸）における各軸の関節変数値の変化の様相を示す。この結果を見る限り、各関節の変位量には整合性が見られず、これがいわゆる gentle motion の際のネックになる可能性が残されている。

○実験例4：冗長型マニピュレータのシンセシス解のための実験例の最後として、図14に示すような自由度13を持つ、いわゆるスネークタイプ・マニピュレータをとりあげる。その結果は図15に示されている。

6. あとがき

緒言でも述べた如く、ロボット・シミュレータはここで述べたようなマニピュレータの機構方程式の解法ルーチンを一つの核として、種々の仮想ロボットを構築することが出来^{2,4)}。著者等は3次元ソリッドモデラー CAD/CAM システム TIPS-1に接続したプロトタイプロボット・シミュレータ^{2,4)}を開発中であるがこれまでに得られた結果の一部を図16に示す。図は6自由度のマニピュレータ(仮想ロボット)に、プロトタイプロボット言語システムを用いて命令を実行させている様相のオーバーラップ図である。機会があればこれらについても報告したい。

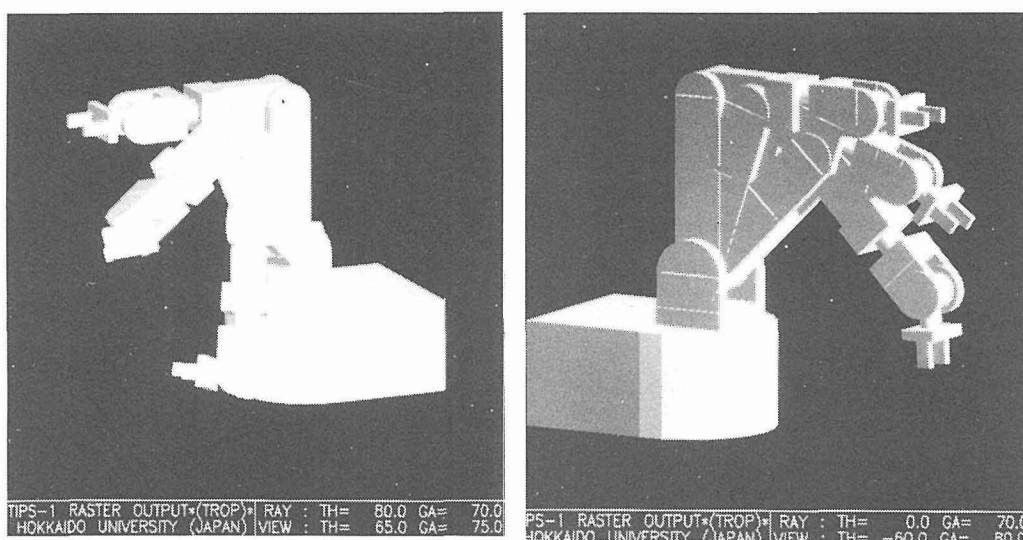


図16 (a) 仮想ロボットラスタ出力図(TIPS-1) 図16 (b) 仮想ロボットラスタ出力図(TIPS-1)

参考文献

- 1) R. P. Paul; Robot Manipulators; Mathematics, Programming and Control, The MIT Press (1981).
- 2) 沖野教郎; ロボットシミュレータ(1)ロボット空間のモデリング技術, 第1回精機学会サマーセミナー, ロボットのソフトウェア技術資料, (1982).
- 3) 嘉教侑昇; ロボット言語 AL 他, 第1回精機学会サマーセミナー, ロボットのソフトウェア技術資料, (1982).
- 4) 嘉教侑昇; ロボット・シミュレータ(2)ロボット作業のシミュレーション, 第1回精機学会サマーセミナー, ロボットのソフトウェア資料, (1982).
- 5) R. S. Hartenberg and J. Denavit; Kinematics Synthesis of Linkages, McGraw Hill, New York (1964).
- 6) A. Albert; Regression and the Moore-Penrose Pseudo Inverse, Academic Press, (1972).
- 7) M. S. Konstantinov and M. D. Markov; Discrete Position Method in Kinematics and Control of Special Linkages, Mechanism and Machine Theory, Vol 15, pp 47-60 (1980).
- 8) L. A. Oldroyd, MCL; An APT Approach to Robotic Manufacturing, CAM-I Report R-82-ATPC-01, (1981).