

産業用ロボットの操作性と軌道制御（第一報）

和田 憲造*・香川 浩之**・早野 延男*

Manipulation Ability and Trajectory Control of a Industrial Robot (1st Report)

Kenzou WADA, Hiroyuki KAGAWA and Nobuo HAYANO

Abstract

Industrial robots have been applied in many fields. So far these robots have been controlled by the "Point to Point" or "Continuous Path" control methods.

At the present stage, robot manipulators with finer performances at high speed and accuracy are required; therefore, we must consider the control method, taking into account the dynamics of robots.

In this report, we used "Move Master II" (Mitsubishi Electric Works) as our sample and made the equations of dynamics based on Lagrangian's equations. As for the experimental system, we composed a software servo system by feedback control of the positions with compensation of the non-linear terms (Coriolis and centripetal forces).

Basically, we can not ignore the effects of Coriolis and centripetal forces when the manipulator moves at high speed. But in the case of lower speed operation, the influence of these non-linear terms became small. Therefore, this time, we composed the servo system by ignoring the effects of the non-linear terms.

Usually, though "Move Master II" has five links, as the first step, we performed the simulation experiments of trajectory control of two links (link1 and link2) with the feedback of the information of the positions.

First, to analyze the robot's movement, we examined the singular points and the extent of manipulation ability with the term "measure of manipulatability" of the arms (link1 and link2) by using a Jacobian matrix of the small displacement of each joint. We performed the simulation of the trajectory control with the method described above.

Through the simulation experiments, we could obtain a good response (trajectory) compared with the reference trajectory by regulating feedback gains and, as a result, the availability of the proposed control method was confirmed.

1. 序論

産業用ロボットは多くの分野で用いられている。今までは主に、ロボットマニピュレータの制御方式として PTP あるいは CP 制御方式が用いられてきた。しか

し現在では、高速・高精度な位置決めが要求されており、このためロボットのダイナミクスを考慮した制御が必要となっている。

本研究はロボットとしてシムーブマスタIIを用い、ラグランジュの運動方程式をもとにロボットの動特性方程式を求め、これをもとに位置のフィードバックコントロールによるソフトウェアサーボ系を構成した。通常、マニピュレータを高速で動作させる場合、コ

*生産機械工学科

**大学院生産機械工学専攻

リオリ力・求心力の影響は無視できないとされているが、ムーブマスタIIの場合、非線形項の影響は殆んどなかったため、今回はこの非線形項の影響は無視してサーボ系を構成した。

マニピュレータの制御に関しては、滝田らのLQI制御¹⁾、西らの連続軌跡制御²⁾、大塚らのソフトウェアサーボによる関節形ロボットの制御³⁾などの報告があるが、現在のところマルチCPU方式による現代制御理論を用いた多軸同時制御についての報告は殆んどない。本研究は最終的には、この多軸同時制御を行うことを目的とし、まず第一段階として2軸について軌道制御のシミュレーションを行った。

まず最初に軌道の設定を行う上で必要な特異点、可操作性をヤコビ行列および可操作度を用いて検討し、これをもとにシミュレーションを行った。

軌道制御は、設定軌道を各関節変数ごとに分解し、それぞれを目標設定軌道とし、このとき各関節をその設定軌道に追従させることにより行う。このとき、マニピュレータの動特性には種々の変動が生じる。すなわちパラメータ（慣性項、重力項、コリオリ力、求心力など）の変動および各関節の摩擦、バックラッシュ、負荷などの外乱による変動が生じる。制御を行う上で

これらの影響を低減し、制御性能を許容範囲内におさえるためには、フィードバック制御が必要となる。ここでは、各軸独立に位置のフィードバック制御を行うことにより、ソフトウェアサーボ系を構成し、軌道制御のシミュレーションを行う。また、より高速な動作を設定した場合について、追従性の評価を偏差の2乗積分(ISE)を用いて行った。その結果、ムーブマスタIIは通常の動作範囲内においては、操作性は良好であり、また設定軌道に対する応答では、制御系のゲインを調整することにより良好な応答を得ることができ、本制御方式の有効性が示された。

2. 可操作性について

本研究で使用するムーブマスタIIの外観図をFig. 1に示す。ムーブマスタIIは5リンクのマニピュレータであるが、ソフトウェアサーボ系の適用性を調べるため、簡単のために2リンクのみについてシミュレーションを行った。

マニピュレータの先端の手先効果器の位置・姿勢を考える場合、通常操作空間の次元は6次元である。しかしここでは2リンクの場合を考え、しかも手先効果器の姿勢を問題にしなくてよい場合なので、2次元と

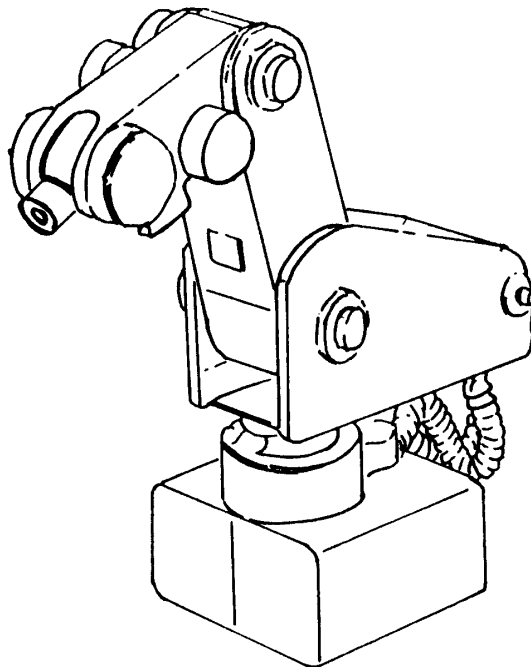


Fig.1 Appearance of Move master II

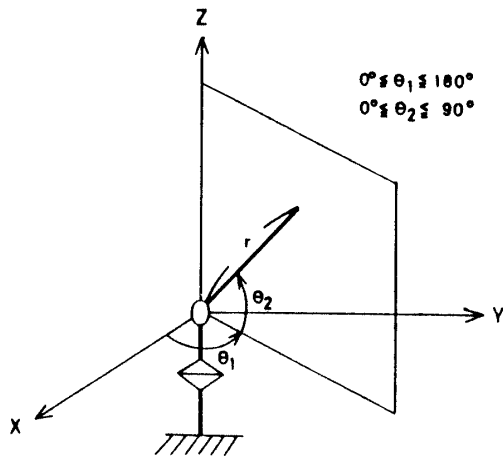


Fig. 2 Mechanism of two links manipulator

して取り扱う。この2次元のリンクの構造を Fig. 2 に示す。これより2リンクマニピュレータのヤコビ行列は次式で表わせる。

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} -r \sin\theta_1 \cos\theta_2 & -r \cos\theta_1 \sin\theta_2 \\ 0 & r \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

軌道の設定を行うとき、特異点の有無が問題となる。特異点では、マニピュレータの作業座標の自由度が退化する。すなわち、この点およびその近傍では、作業性能は著しく劣化する。

特異点は $\det\{J(\theta)\} = 0$ で表わされる点である。 $\det\{J(\theta)\}$ は

$$\det\{J(\theta)\} = -r^2 \sin\theta_1 \cos^2\theta_2 = 0 \quad (2)$$

となり、リンク2の長さ $r \neq 0$ より、特異点は $\theta_1 = 0^\circ, 180^\circ, \theta_2 = 90^\circ$ の点となり、すなわちリンクが Fig. 3 (a), (b), (c) に示す位置にあるときが特異点となる。(a), (b), (c) いずれの場合でも特異点は動作範囲の端点に存在す

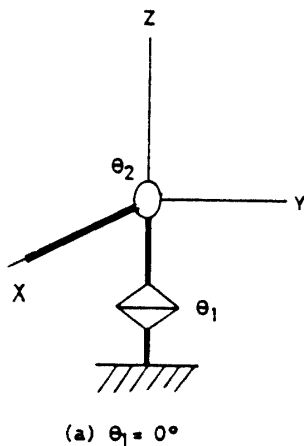
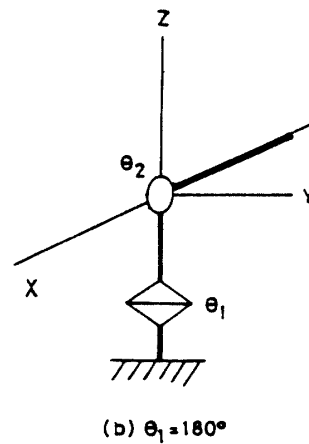
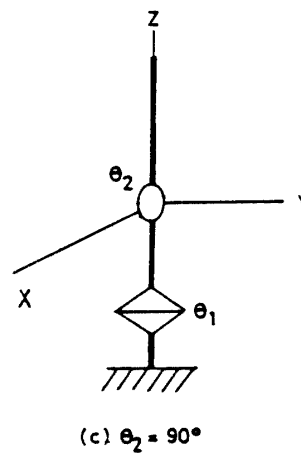
(a) $\theta_1 = 0^\circ$ (b) $\theta_1 = 180^\circ$ (c) $\theta_2 = 90^\circ$

Fig. 3 States which the links are set at singular points

るため、ムーブマスタIIの場合、動作範囲内では特異点を考慮しなくてよいことになる。

次に、マニピュレータの可操作度⁴⁾について考える。可操作度はマニピュレータの操作能力を示すものであり、操作空間の次元と自由度が一致している場合、すなわち冗長性をもたないマニピュレータの可操作度は、

$$\omega = |\det J(\theta)| \quad (3)$$

で定義される。これより2リンクマニピュレータの可操作度は、

$$\omega = r^2 |\sin\theta_1 \cdot \cos^2\theta_2| \quad (4)$$

となる。 θ_1 と θ_2 が関与するXY平面とXZ平面、あるいはYZ平面は互いに垂直であることから、 r の値に関係なく、 $\theta_2 = \text{const}$ のとき $\theta_1 = 90^\circ$ 、 $\theta_1 = \text{const}$ のとき $\theta_2 = 0^\circ$ で最もよい操作能力を示す。これをFig. 4, Fig. 5に示す。図中、太線が可操作度を表わしている。($\omega = 0$ になるとき、可操作度が最低となる。) Fig. 4, Fig. 5とも、特異点近傍で可操作度は悪くなり、特異点では0となっている。

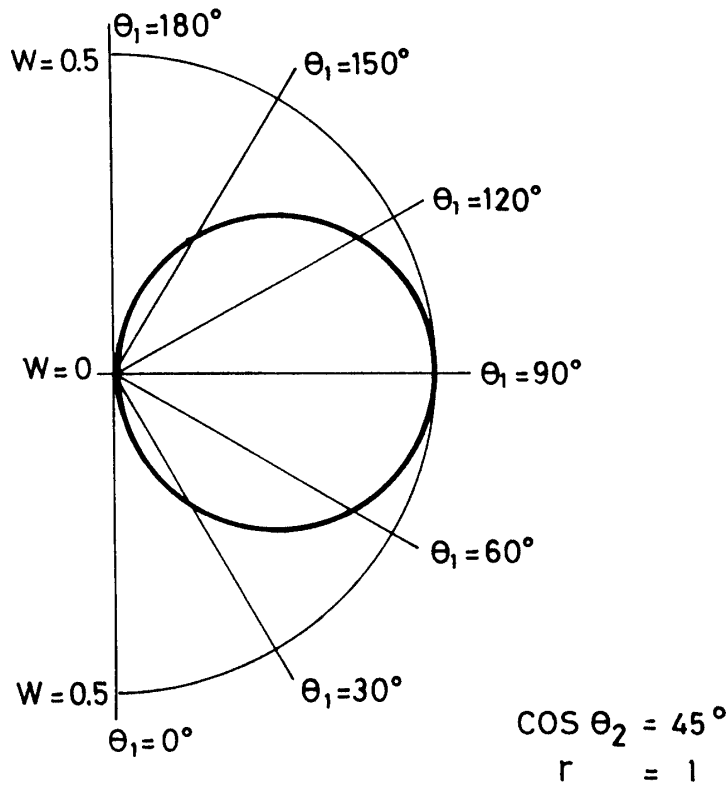


Fig.4 The measure of manipulability for θ_1

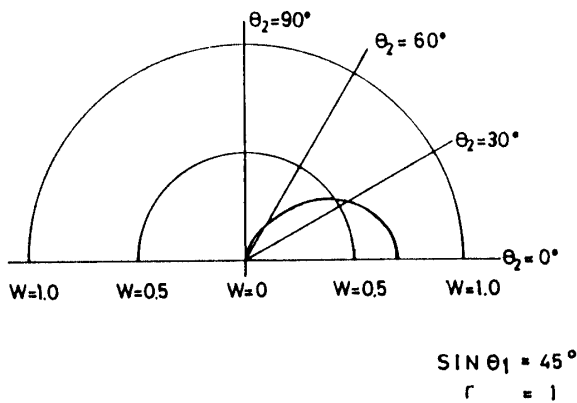


Fig.5 The measure of manipulability for θ_2

Table 1 Velocity table

Speed	Number of pulse for acceleration (pulse)	Number of pulse for deceleration (pulse)	Min. frequency (pulse/sec)	Max. frequency (pulse/sec)
0	—	—	156	156
1	36	72	156	320
2	69	138	156	492
3	102	204	156	673
4	135	270	156	865
5	168	336	156	1069
6	201	402	156	1276
7	234	468	156	1509
8	267	534	156	1744
9	300	600	156	2000

3. 軌道計画

3.1 速度設定

ムーブマスタIIの制御方式はPTP制御方式である。実際に動作させるには、動作速度ならびに任意の位置までの距離の設定を行う必要がある。速度は、Table 1に示す速度表により、パルスの周波数で与えられ、Fig. 6に示す速度図にしたがって動作する。Table

1においてパルス数とは、DCサーボモータに直結されたエンコーダの回転により発生するパルス数である。

多軸同時動作の場合は、最大設定パルス数をもつ軸のみが設定速度で動作し、他の軸は最大設定パルス数

をもつ軸の加速, 等速, 減速域に合わせて動作する。すなわち, 各々の軸は同時に動き始め, 同時に等速域に達し, 同時に停止する。したがって, 他の軸の加減速域のパルス数および最大周波数は以下に示すようになる。

多軸同時動作の場合の速度図を Fig. 7 に示す。図より, 設定パルス数 P_r は

$$P_r = \frac{1}{2} F_x t_{AC} + F_x t_{UN} + \frac{1}{2} F_x t_{DE} \quad (4)$$

で得られる。式(4)より最大周波数 F_x は

$$F_x = \frac{P_r}{1/2 t_{AC} + t_{UN} + 1/2 t_{DE}} \quad (5)$$

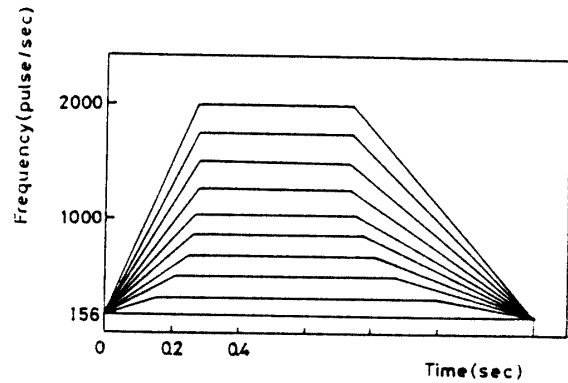


Fig. 6 Profile of the velocity change

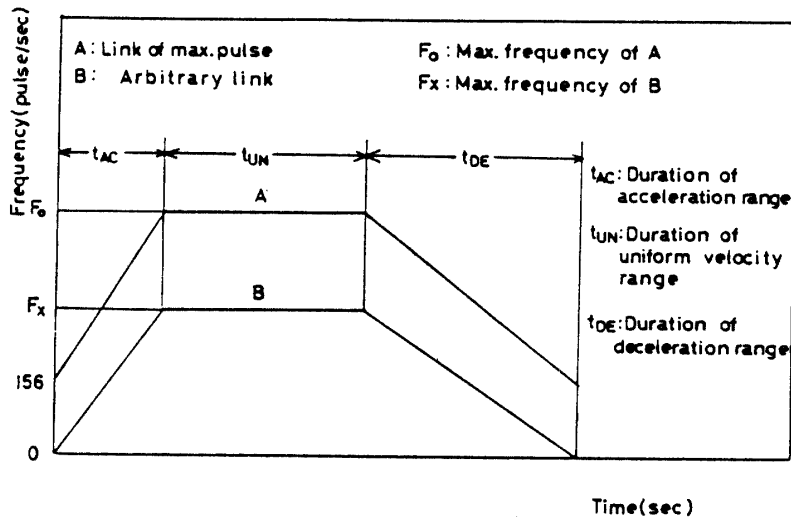


Fig. 7 Velocity profile of arbitrary link

で得られる。これより等速域のパルス数 P_{UN} は

$$P_{UN} = F_x t_{UN} \quad (6)$$

となる。また上式より, 加減速域のパルス数 P_{AC} , P_{DE} はそれぞれ

$$P_{AC} = \frac{1}{3} (P_r - P_{UN}) \quad (7)$$

$$P_{DE} = 2P_{AC} \quad (8)$$

となる。マニピュレータをある目標位置に動かす場合, 行き過ぎを生じることがあってはならない。PTP の場合は, オープンループの制御となっているため, アームの慣性などを考慮して, 加減速域が決められている。したがってフィードバック制御を行うことにより, より高速動作の実現が期待される。

3.2 軌道設定⁵⁾

ムーブマスタIIの軌道を考える場合, 動作開始およ

び停止区間の動きに対称性をもたせ, 4次の時間関数とする。任意の軸が設定距離 ΔC だけ移動する軌道は, Fig. 8 のようになる。微係数を求め境界条件を適用すると, それぞれの区間中の位置 q , 速度 \dot{q} , 加速度 \ddot{q} は以下のように定まる。

(1)動作開始区間 (点0を原点とする。)

$$q = \Delta C \frac{t_{ACC}}{2T_1} (2-h) h^3 \quad (9)$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta C}{T_1} (3-2h) h^2 \quad (10)$$

$$\ddot{q} = \frac{\Delta C}{T_1} (1-h) \frac{6h}{t_{ACC}} \quad (11)$$

$$\text{ただし } h = \frac{t + 1/2 t_{ACC}}{t_{ACC}} \quad (12)$$

(2)動作停止区間 (点0'を原点とする。)

$$q = \{\Delta B' (2-h) h^2 - 2\Delta B'\} h \quad (13)$$

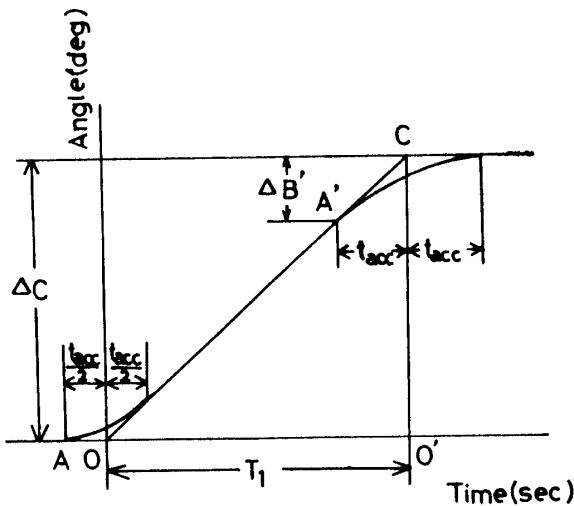


Fig.8 Reference trajectory

$$\dot{q} = \frac{1}{t_{ACC}} \{ \Delta B' (3-2h) h^2 - \Delta B' \} \quad (14)$$

$$\ddot{q} = \frac{3h}{t_{ACC}} \Delta B' (1-h) \quad (15)$$

ただし

$$h = \frac{t + t_{ACC}}{2t_{ACC}} \quad (16)$$

以上をもとに軌道の設定を行った。

4. マニピュレータの動特性

マニピュレータを高速で動作させる場合、非線形項の影響が大きくなると思われるが、この影響を考慮して制御を行おうとすると、マニピュレータの動特性を考慮した動特性方程式⁹⁾が必要となる。一般のマニピュレータの動特性方程式は、ラグランジュの運動方程式により、次式で表わされる。

$$\tau = A(q)\ddot{q} + V(q)\dot{q} + G(q) \quad (17)$$

ここで

τ : 関節に入力すべき一般化力

q : 一般化座標

$A(q)$: 慣性項

$V(q)$: コリオリ力・求心力

$G(q)$: 重力項

各関節は DC サーボモータで駆動されており、制御を行う場合、このマニピュレータの動特性方程式に DC サーボモータのダイナミクスを含めた運動方程式を求める必要がある。モータの発生トルクは、モータのシャフトと減速機に関する駆動トルクおよび摩擦項と、マニピュレータのその関節に関する駆動トルクの和に等

しいことから、関節 i について次式が成り立つ。

$$r_i \tau_i + J_i \dot{\omega}_i + b_{o_i} \omega_i = \tau_{m_i} \quad (18)$$

ここで

τ_{m_i} : モータの発生トルク

r_i : 減速比

τ_i : 駆動トルク

J_i : モータのシャフトと減速機からなる慣性モーメント

ω_i : 関節 i のモータの回転角速度

b_{o_i} : 減速機の粘性摩擦係数

ムーブマスタ II の場合関節は、すべて回転関節であることから、 q_i はその関節の角度を示す。したがって

$$\dot{q}_i = r_i \omega_i \quad (19)$$

また、モータについて次の関係が成立つ。

$$R_{a_i} \dot{i}_{a_i} + K_{e_i} \omega_i = v_{a_i} \quad (20)$$

$$\tau_i = K_{t_i} i_{a_i} \quad (21)$$

ここで、

R_{a_i} : 電機子回路の抵抗

K_{e_i} : 誘起電圧定数

v_{a_i} : サーボモータの電機子電圧

K_{t_i} : トルク定数

i_{a_i} : 電機子電流

したがって、サーボモータの動特性方程式は、式(18)、(19)、(20)、(21)より次式のように表わされる。

$$(A(q) + J)\ddot{q} + V(q)\dot{q} + B\dot{q} + G(q) = KV \quad (22)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} J_{ii} &= J_i / r_i^2, \quad b_{ii} = (b_{o_i} + K_{t_i} K_{e_i} / R_{a_i}) / r_i^2 \\ K_{ii} &= K_{t_i} / (R_{a_i} r_i) \\ J &= \text{diag}(J_{ii}), \quad B = \text{diag}(b_{ii}) \\ K &= \text{diag}(K_{ii}) \\ V &= (v_{a_1}, v_{a_2}, \dots, v_{a_n})^T \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

以上をもとに、2リンクの同時制御を行うための、システム全体の状態方程式を求めると次式となる。

$$\dot{x}(t) = Cx(t) + Dx(t) + Eu(t) + Fg(t) \quad (24)$$

ここで

$$H = \det(A(q) + J)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -b_{ii}(A_{jj} + J_{jj})/H & 0 & b_{jj}A_{ij}/H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & b_{ii}A_{ij}/H & 0 & -b_{jj}(A_{ii} + J_{ii})/H \end{bmatrix}$$

$$D = -\frac{1}{H} \begin{bmatrix} 0 \\ (A_{jj} + J_{jj})A_{iii} - A_{ij}A_{jii} \\ 0 \\ -A_{jii}A_{iii} + (A_{ii} + J_{ii})A_{jii} \end{bmatrix}$$

$$E = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K_{ii}(A_{jj}+J_{jj}) & -K_{jj}A_{ij} \\ 0 & 0 \\ -K_{ii}A_{ji} & K_{jj}(A_{ii}+J_{ii}) \end{bmatrix}$$

$$F = -\frac{1}{H} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A_{jj}+J_{jj} & -A_{ij} \\ 0 & 0 \\ -A_{ji} & A_{ii}+J_{ii} \end{bmatrix}$$

$$\dot{x}(t) = [\dot{x}_1^2(t) \quad \dot{x}_1(t)\dot{x}_2(t) \quad \dot{x}_2(t)\dot{x}_1(t) \quad \dot{x}_2^2(t)]^T$$

ただし、添字 i, j はそれぞれリンク i , リンク j を表わす。各々の係数は

A_{ii} : 関節 i の有効慣性

A_{ij} : 関節 i と j の間の相互慣性

A_{ijj} : 関節 j における速度によって関節 i に生じる求心力係数

A_{iij} : 関節 i および j における速度によって関節 i に生じるコリオリ力係数

式(24)の右辺の第2項は非線形項であり、したがってこの非線形項を入力で補償することにより制御系を構成する。ここでは、非線形項を外乱とみなして操作入力で補償することを考える。よって状態方程式は、

$$\dot{x}(t) = Cx(t) + Eu(t) + Fg(t) + DX(t) \quad (25)$$

となる。

このマニピュレータのブロック線図を Fig. 9 に示す。状態変数 $x_1 \sim x_4$ はそれぞれ、 x_1 : リンク 1 の位置、 x_2 :

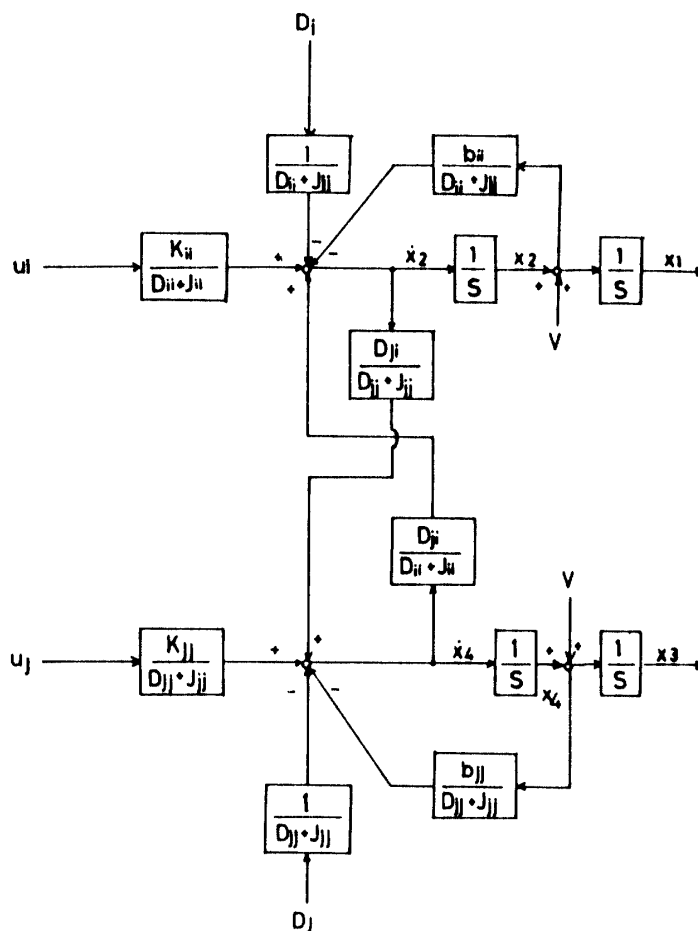


Fig.9 Block diagram of two links manipulator

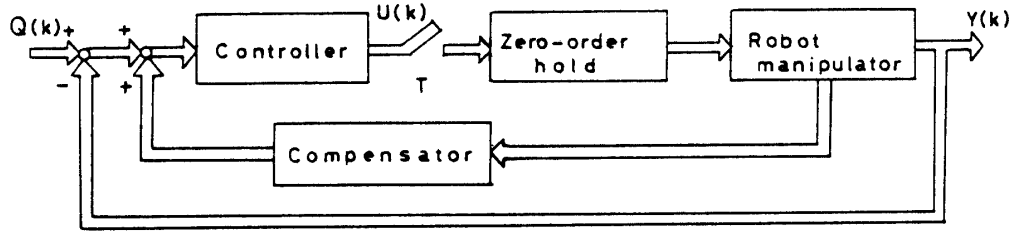


Fig.10 Block diagram of the system

リンク1の速度, x_3 :リンク2の位置, x_4 :リンク2の速度を表わしている。式(25)より, サンプル周期を T として, システムの離散値系状態推移方程式を求めると,

$$x(k+1) = Px(k) + Qu(k) + Rg(k) + Sx(k) \quad (26)$$

ここで, $P = e^{CT}$, $Q = \int_0^T e^{C\lambda} E d\lambda$

$$R = \int_0^T e^{C\lambda} F d\lambda, \quad S = \int_0^T e^{C\lambda} D d\lambda$$

となる。操作入力, 前述したように非線形項を補償したものであり, また速度と重力項の補償も考慮すると以下に示すようになる。

$$u_1(k) = -K_1(q_1 - x_1) + C_1 + C'_1 \quad (27)$$

$$u_2(k) = -K_2(q_2 - x_3) + C_2 + C'_2 \quad (28)$$

ここで,

K_1, K_2 : フィードバックゲイン

q_1, q_2 : 1, 2リンクの設定位置

C_1, C_2 : 重力・速度項の補償項

C'_1, C'_2 : 非線形項の補償項

これより, フィードバック制御システム全体のブロック線図は Fig.10のように表わされる。このシステムの特性格方程式をもとに, リンクがオーバーシュートを生じないように, ゲインの決定を行う。リンク1, リンク2の位置のフィードバックゲインをそれぞれ, $K_1=30$, $K_2=30$, ($\xi=0.95$) に定めた。ここで, サンプル周期は $T=0.01$ (s) に設定する。このサンプル周期は, 実時間でマニピュレータを制御しようとする際, 十分対応できるものである。

5. シミュレーション結果および考察

5.1 非線形項の影響

前述のように, 制御式(27), (28)をもとに非線形項を操作入力に補償した形で決定し, 非線形項を外乱とみな

した場合の操作量 $u(k)$ に対する外乱の影響は, 位置の制御においてはほとんどみられなかった。これは非線形項が速度の積に比例するコリオリ力・求心力であるため, マニピュレータの速度が高速にならないかぎり, またリンクの長さが長くないかぎり, 影響は少ないと考えられる。ムーブマスタIIの場合, 最大設定速度は400mm/sであるため, 高速とは考えられない。また, 設定速度を2倍にした場合についても調べてみたが, 非線形の影響はほとんどなかった。

したがって, ここでは外乱としての非線形項の影響を無視して, 重力項と速度項のみを補償した形でシミュレーションを行うことにする。すなわち, 式(28)において右辺の第3項を省略し, 式(27), (28)の C'_1, C'_2 を省略する。

5.2 速度表にそった応答

マニピュレータが速度表に示される速度により動作する場合について調べる。設定速度を速度表で Speed 9 に, リンク1の回転角度を150°, リンク2の回転角度を30°に設定する。各リンクを駆動するDCサーボモータの分解能は0.025deg/pulseであるから, 設定パルス数はリンク1で6000pulse, リンク2で1200pulseとなる。Fig.11, Fig.12, Fig.13, Fig.14にシミュレーションによる応答波形を示す。Fig.11, Fig.12において, 上段はリンク1, 下段はリンク2の応答を示す。図は設定軌道とその時の応答を表わしているが, 両者の線が一致しているため, 一本の線となっている。目標位置・速度によく追従しているのがわかる。また, 加減速域においては, 設定軌道通りになめらかに動作しているのがわかる。Fig.13, Fig.14は, このときの位置・速度の偏差を示している。加減速域において, 若干の偏差が生じているが, 設定角度に比べて十分小さく, よい応答性を示していると言える。ここで角度誤差を実際の位置のずれとして考えてみる。角度誤差の最大値は, -6.34×10^{-5} deg であり, ムーブマスタIIのリン

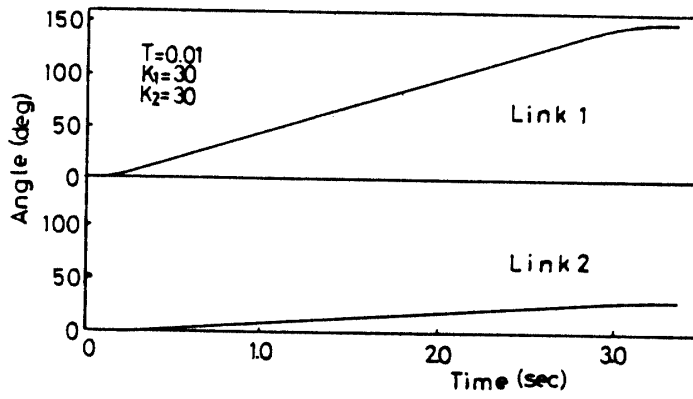


Fig.11 Responses of the position of links

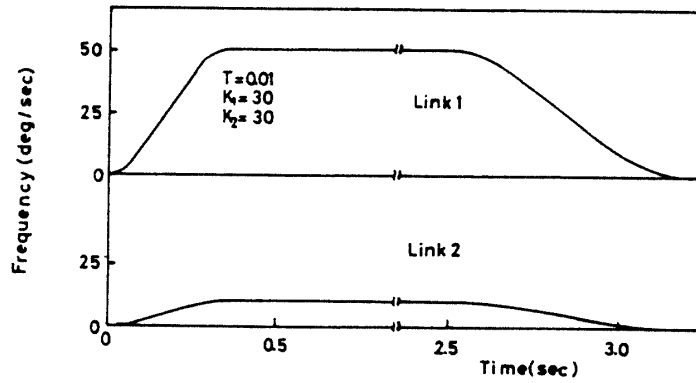


Fig.12 Responses of the velocity of links

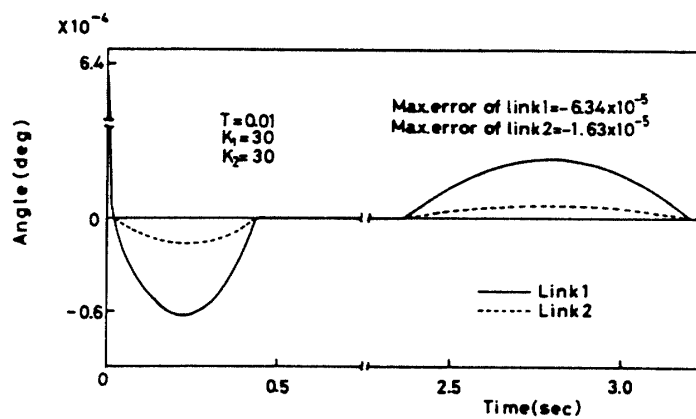


Fig.13 Errors of the position of links

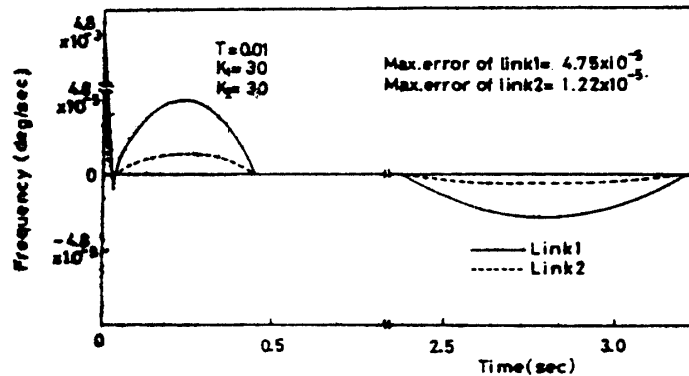


Fig.14 Errors of the velocity of links

ク1の回転軸からリンク2の手先効果器の先端の位置までの長さが445mmであるから、先端における目標位置とのずれは、 4.92×10^{-4} mmであり、これは実際に動作させるうえで、非常に小さいものであり、高精度の位置決めが行えていると言える。また、リンク1とリンク2では、リンク1のほうが偏差が大きくなっている。これは、リンク1のほうが慣性が大きいためと考えられる。

シミュレーションによるマニピュレータの実際の動きをみるために、ムーブマスタIIをモデル化し、3次元グラフィックスで表わしたものをFig.15に示す。ここで先端の軌道を明確にするため破線で示す。動作開始・停止区間付近で設定軌道と動作軌道がずれているのは、加減速域における位置の偏差を表わしている。

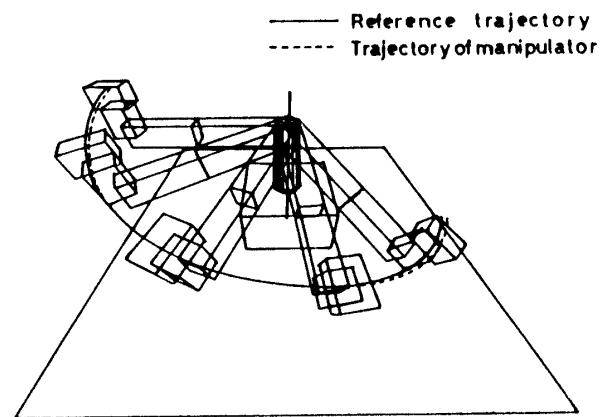


Fig.15 3-D graphics view of simulation results

マニピュレータを動作させるうえで、オーバーシュートが生じることは好ましくない。そこでゲインを調整して、オーバーシュートを生じないようにした。位置のフィードバックゲイン K_1 , K_2 をそれぞれ、 $K_1=5$, $K_2=5$ に設定したときの応答をFig.16, Fig.17, Fig.18, Fig.19に示す。オーバーシュートは、また非

5.3 最高速を2倍に設定した場合の応答

同じ設定角度で最高速度を2倍に設定し、加減速を瞬間的に行うため加減速域のパルス数を各々10pulseとする。

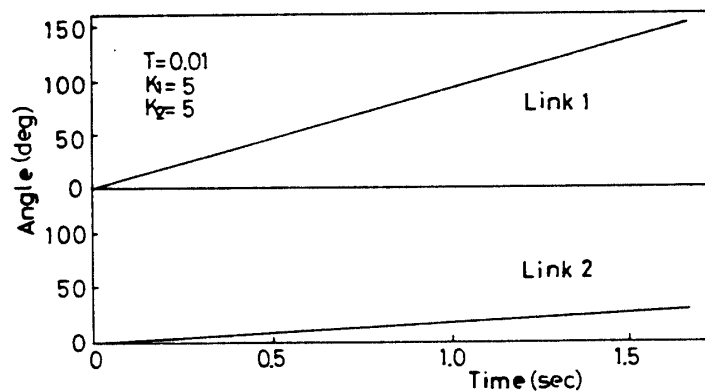


Fig.16 Responses of the position of links

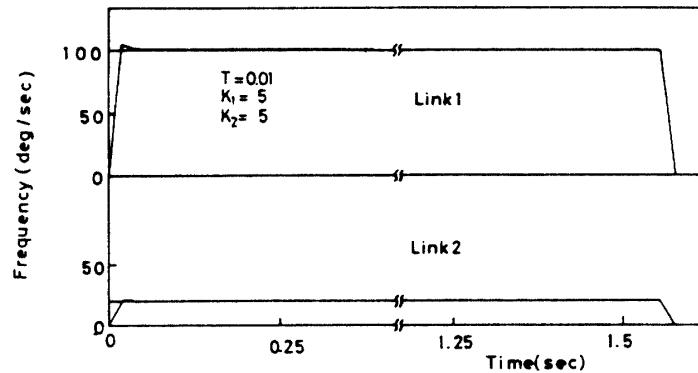


Fig. 17 Responses of the velocity of links

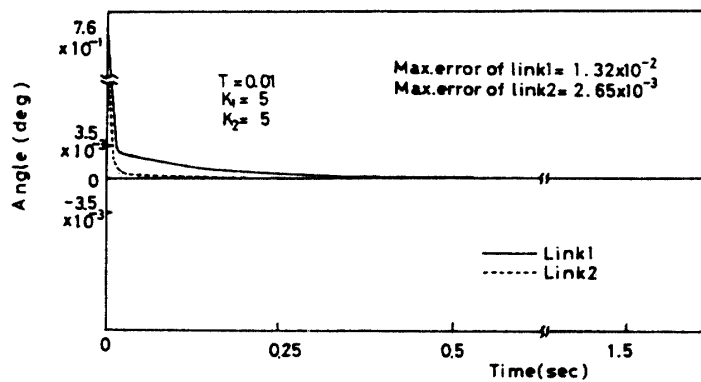


Fig. 18 Errors of the position of links

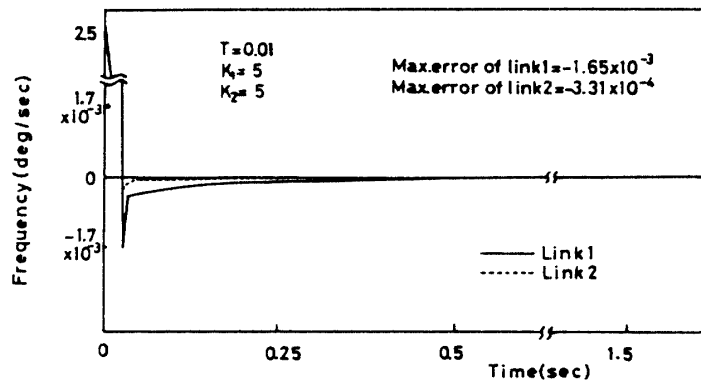


Fig. 19 Errors of the velocity of links

常に早く等速域に到達している。

次に、高速で立上げた場合について加速域のパルス数と制御性能の関係について調べた。

5.4 高速な立上がりの性能評価

ここでは加速域のパルス数を変化させて、そのときの制御性能について調べた。設定速度を速度表の Speed

9 に設定し、加速域の設定パルス数を 1 ~ 300pulse に変化させ、その時の $ISE (= \sum_{k=0}^n e^2(k))$ について調べた。

この結果を Fig. 20 に示す。これよりリンク 1 では加速域の設定パルス数が 20pulse をこえると、ISE は急激に小さくなり偏差が減少している。リンク 2 では 1 pulse から偏差が小さいので、非常に高速に立上げることが

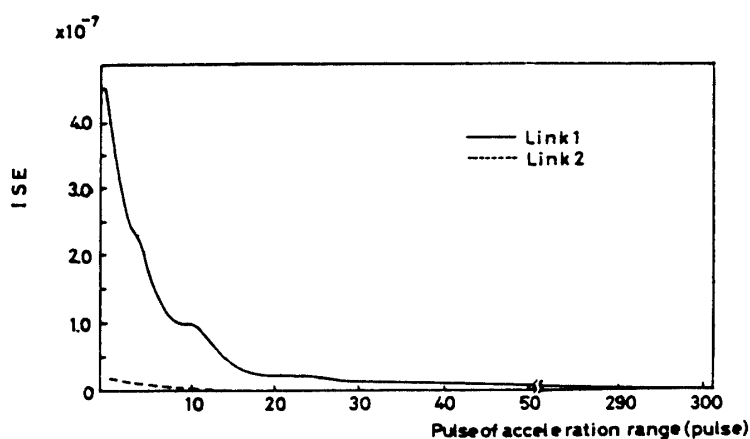


Fig.20 ISE of the controlled trajectory

できる。また20pulse以下ではリンク2に比べてリンク1の偏差が大きいのは、やはり慣性の影響と考える。したがって、ムーブマスタIIの加速域の設定パルス数を20pulseに改善することにより、より高速の位置決めができる。

6. 結論

ムーブマスタIIについて操作能力の良好性を示したうえで重力項および速度の項を補償し、位置のフィードバックによる軌道制御のシミュレーションを行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) ムーブマスタIIの速度表に促した動作を行わせた場合には、十分よい追従がみられた。
- 2) 速度を2倍に設定した場合、フィードバックゲインを調整することによりオーバーシュートをなくすこ

とができる。

- 3) ムーブマスタIIをより高速で立上がらせようとした場合、加速域の設定最小パルス数は20pulseである。これより多くなると、ISEが増大し追従性が悪くなる。

参考文献

- 1) 滝田好宏, 背戸一登, 中溝高好: 日本機械学会論文集, 51—468, 2145 (1985)
- 2) 西義和他5名: システムと制御, 24—3, 192 (1980)
- 3) 大築康生他3名: システムと制御, 27—9, 571 (1983)
- 4) 吉川恒夫: 日本ロボット学会誌, 2—1, 63 (1984)
- 5) R. P. Paul 著 (吉川恒夫訳): ロボット・マニピュレータ, コロナ社, (1985)

(昭和61年10月15日受理)