

動的可操作性を考慮したマニピュレータの研究

田 口 幹・河原崎 徳 之

Development of a Manipulator Considering Dynamic Manipulability

Kan TAGUCHI and Noriyuki KAWARAZAKI

Abstract

In order not only to design but to control a manipulator, it is very important to evaluate its manipulating ability objectively. The dynamic manipulability of a manipulator is proposed as basis of evaluation for manipulating ability which takes the manipulator dynamics into consideration.

The authors have developed the manipulator adopting parallel link mechanisms and considered its dynamic manipulability. In this paper the authors describe the results of computer simulation of dynamic manipulability of the prototype manipulator, and experimental results for movement of the actual manipulator. The both results shows the dynamic manipulability in computer simulation and actual movement are resemble closely.

1. はじめに

ロボットは、さまざまな目的で使用されるため、汎用性の高いものでなければならない。物をつかんで所定の場所に置く・部品を組み立てる・さまざまな道具を操作するなど、ロボットが汎用性を発揮できるのは、人間でいえば「手」であり、ロボットでいうマニピュレータの機能によるところが大きい。

マニピュレータを合理的に設計、制御するためには、その性能を客観的に評価する必要がある。評価基準としては、機構性能、制御性能、安全性、信頼性などの多岐にわたる基準が考えられる。このうち、とくに機構性能は、最も基本的なもので重要である。機構性能の評価基準は¹⁻³⁾としては、作動領域の大きさが最も普通に用いられているが、同じ大きさの作動領域をもつロボットでも、特異点の分布のしかたによっては、機構性能に違いがでてくる。特異点とその近傍では、アームの作業性能が著しく劣化するからである。アームの作業性能の評価をより精密に行うためには、作動領域の大きさだけでなく、特異点を含む作動領域内の各

点で、アームの作業性能を定量的に評価する必要がある。

ロボットの作業能力の一つの目安として、アーム先端に取り付けられた手先効果器をどの程度自由に動かせるかという可操作度⁴⁾および可操作性楕円体がある。しかし、これらの概念は運動学的なものであり、動力学的な要素は全く入っていない。多自由度のマニピュレータは、関節相互の運動の干渉や、腕の姿勢に応じて変化する慣性モーメント、さらにコリオリ力・遠心力などの速度に比例する非線形の慣性力のため、複雑な動力学特性を有する。特にロボットの運動速度が速く、要求される精度が高くなるにつれ、これらの複雑な特性は一層駆動系に直接的な影響を与える。そのため、制御系設計の段階はもちろんのこと、機械設計の段階でも動力学特性について十分な解析を行うことが必要である。京都大学の吉川氏は、先に述べた手先効果器を操作する能力を、動力学的な面を考慮に入れて定量化した概念として、動的可操作度⁵⁾、及び動的可操作性楕円体を提案し、2自由度リンク機構を動的可操作度の観点から解析している。

本研究では、動的可操作性を考慮した平行四辺形リンクから成る垂直多関節型マニピュレータを設計・製作した後、動的可操作性に関してシミュレーションと

1992年9月25日受理

* 機械システム工学科

試作機による比較実験を行ったので報告する。

2. マニピュレータの動的可操作性

2.1 平行リンク2自由度マニピュレータの動的可操作度

本研究で扱うマニピュレータのモデルとパラメータを図2-1のように設定する。今回製作した試作機は、基部の旋回を含む3自由度マニピュレータであるが、動的可操作性を考慮するのは、リンクを含む平面内に限ることとする。したがって以下の議論は平面2自由度平行リンク型の場合になる。

マニピュレータの手先効果器を操作する能力を、動力学的観点から定量化した概念として、動的可操作度がある。本節では、平面2自由度平行リンク機構を動的可操作度の観点から解析する。使用するパラメータを、表2-1に示す。

いま、マニピュレータの手先位置を $r=(x, y)^T$ とすれば、ヤコビ行列 J 及び慣性行列 M は式(1)のように表せる。

$$J = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} \\ j_{21} & j_{22} \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

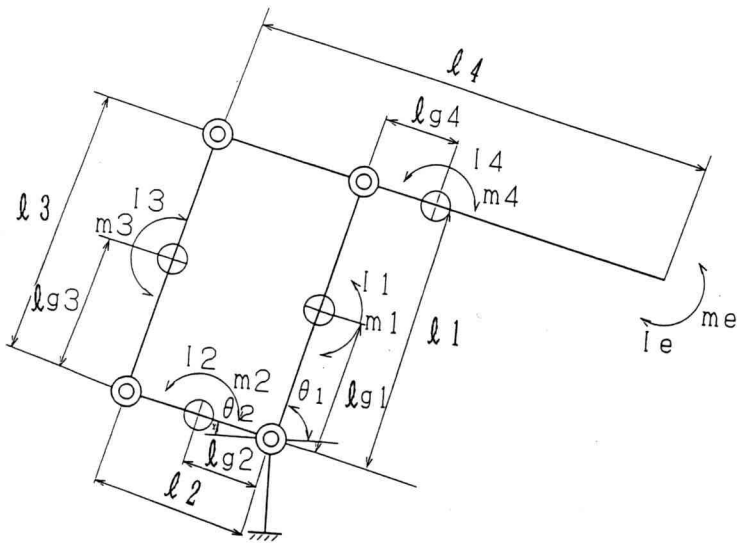
ここで、

$$\begin{aligned} j_{11} &= -l_1 s_1 \\ j_{12} &= (l_2 - l_4) s_2 \\ j_{21} &= l_1 c_1 \\ j_{22} &= -(l_2 - l_4) c_2 \end{aligned} \quad (2)$$

であり、

$$\begin{aligned} M_{11} &= I_1 + I_3 + m_1 l_{g1}^2 + m_3 l_{g3}^2 + m m_4 l_1^2 \\ M_{12} &= (-l_{g3} l_2 m_3 + l_1 l_{g4} m m_4) \cdot C_{1(-2)} \\ M_{21} &= M_{12} \\ M_{22} &= I_2 + I_4 + m_2 l_{g2}^2 + m_3 l_2^2 + m m_4 l_{g4}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

である。ただし、



- l_i : リンク i の長さ m_i : リンク i の質量
- l_{gi} : 関節 i からリンク i までの質量中心までの長さ
- I_i : リンク i の質量中心まわりの慣性モーメント
- m_e : 手先効果器の質量 I_e : 手先効果器の慣性モーメント

図2-1 動的可操作性を考慮するマニピュレータのモデル

表 2-1 パラメータ

| | |
|---------------|--------------------------------|
| m_i | リンク i の質量 |
| I_i | リンク i の慣性モーメント |
| l_i | リンク i の長さ |
| l_{gi} | 関節 i からリンク i までの質量中心までの長さ |
| m_e | 手先効果器および負荷の質量 |
| I_e | 手先効果器および負荷の慣性モーメント |
| J | ヤコビ行列 |
| M | 慣性行列 |
| Mg | 重力を考慮した慣性行列 |
| mm_4 | 手先効果器をリンク 4 の一部と見なした場合の質量 |
| ll_{g4} | 手先効果器をリンク 4 の一部と見なした場合の質量中心 |
| II_4 | 手先効果器をリンク 4 の一部と見なした場合の慣性モーメント |
| $g(\theta)$ | $i=2$ としたときの重力行列 |
| w_d | 動的可操作性 |
| w | 可操作性 |
| τ_i | 関節駆動力 |
| τ_{imax} | 最大関節駆動力 |
| τ_i^* | 重力の影響が最も大きい場合の関節駆動力 |
| τ_{imax} | 重力の影響が最も大きい場合の最大関節駆動力 |
| T_i^{-1} | 関節駆動力の逆数の対角行列 |
| v | 手先速度ベクトル |
| V_d | 手先速度ベクトルの直交行列 |
| σ_d | JM^{-1} の特異値 |
| Σ_d | σ_d の直交行列 |
| u_d | JM^{-1} の固有ベクトル |
| U_d | u_d の直交行列 |
| λ_i | JM^{-1} の固有値 |
| I_n | 単位行列 |
| S_D | DME の体積 |
| c_{md} | DME の体積に対する動的可操作性の比例定数 |

$$\begin{aligned}
 s_1 &= \sin \theta_1 \\
 c_1 &= \cos \theta_1 \\
 s_2 &= \sin \theta_2 \\
 c_2 &= \cos \theta_2 \\
 s_{12} &= \sin (\theta_1 + \theta_2) \\
 c_{12} &= \cos (\theta_1 + \theta_2) \\
 c_{1(-2)} &= \cos (\theta_1 - \theta_2) \\
 mm_4 &= m_4 + m_e \\
 ll_{g4} &= (m_4(l_{g4} + l_2) + m_e l_4) \\
 &\quad / (m_4 + m_e) \\
 II_4 &= I_4 + m_4(ll_{g4} - (l_{g4} + l_2))^2 \\
 &\quad + I_e + m_e(l_4 - l_{g4})^2
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

である。

重力項を考慮しない水平面内 2 自由度マニピュレータの動的可操作性 w_d は、次の式で表される。

$$w_d = \frac{|\det J|}{|\det M|} \tag{5}$$

M が関節駆動力と関節加速度の関係を示し、 J が関節加速度と手先加速度の関係を示す行列であることに注意するとき、(5) 式右辺の分母は、 w_d に対するマニピュレータの動力学的効果を、また分子は可操作性 w に相当し、運動学的な効果を示すものであるといえる。次に図 2-1 の中で、 y 軸の負の方向に重力がかかる

場合について考える。重力の加速度の大きさを g とすると、重力負荷は

$$g(\theta) = \begin{bmatrix} m_1 l_{g1} C_1 + m m_4 (l_{C1} + l_{l_{g4}} C_2) \\ m m_4 l_{l_{g4}} C_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。

重力負荷による関節駆動力は駆動可能な条件から、

$$|\tau_i^*| < \tau_{i\max}^* \quad (7)$$

である。ただし、

$$\tau_{i\max}^* = \tau_{i\max} - |g_i(\theta)| \quad (8)$$

であり、 $\tau_{i\max}^* > 0$ でなければならない。式(8)は重力の影響が最も大きな関節部の駆動トルクの条件を設定している。

また、関節駆動力の逆数の対角行列 T_i は

$$T_i = \text{diag} \left(\frac{1}{\tau_{i\max}^*}, \frac{1}{\tau_{i+1\max}^*}, \dots, \frac{1}{\tau_{n\max}^*} \right) \quad (9)$$

ただし、 $\text{diag}[\cdot]$ は対角行列を表す。

となる。さらに、重力の影響を考慮したマニピュレータの慣性行列 M_g を求めると

$$M_g = T_i M \quad (10)$$

となる。

したがって重力項を考慮した動的可操作度は、式(10)の M_g を用いて、

$$W_a = \frac{|\det J|}{|\det M_g|} \quad (11)$$

と表すことができる。

2.2 マニピュレータの動的可操作性楕円体

関節駆動力 τ が、 $\|\tau^*\| \leq 1$ を満足する時の、手先加速度 \dot{v} のすべての集合を考えると、

$$\dot{v}(J^+)^T M^T M J^+ \dot{v} \leq 1 \quad (12)$$

によって定まる楕円体となる。これを動的可操作性楕円体 (Dynamic Manipulability Ellipsoid) と呼ぶ。以下、DME と略記する。

これは、マニピュレータの関節駆動力 τ^* に課されたある制約条件のもとに、手先加速度 v を自由に変えることが出来る度合いを定量化し、これをマニピュレータの操作性の指標にしようというものである。ただし、 J^+ は J の疑似逆行列、 M^T は行列 M の転置行列である。次に JM^{-1} の特異値分解を用いて、DME の

主軸を求める。

マニピュレータの手先加速度 v と関節駆動力 τ^* の関係を示す式は、

$$\dot{v} = JM^{-1} \tau^* \quad (13)$$

となるが、 (JM^{-1}) の特異値分解を

$$JM^{-1} = U_a \Sigma_a V_a^T \quad (14)$$

とすると、DME の主軸は $\sigma_{a1} u_{a1} \sigma_{a2} u_{a2} \dots \sigma_{am} u_{am}$ で与えられる。

ただし、

$$\Sigma_a = \begin{bmatrix} \sigma_{a1} & & & 0 \\ & \sigma_{a2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_{am} \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$U_a = [u_{a1} \quad u_{a2} \dots u_{am}] \quad (16)$$

である。

ここで、 σ_{ai} は JM^{-1} の特異値、 V_a は手先速度ベクトル v の直交行列、 U_a は固有ベクトルの行列である。

また、 λ_i を固有値とすると、特異値 σ_{ai} は

$$\sigma_{ai} = \sqrt{\lambda_i} \quad (17)$$

となり、 I_n を単位行列とすると、 JM^{-1} の固有値 λ_i は、次式の解で与えられる。

$$\det(\lambda I_n - JM^{-1T} JM^{-1}) = 0 \quad (18)$$

特異値 σ_{ai} を求めるには、式(18)より λ を求め、式(17)へ代入すると得られる。なお、

$$JM^{-1} JM^{-1T} U_a = U_a \Sigma_{a2} \quad (19)$$

が成り立ち、式(19)より U_a について連立方程式を解くと、DME の主軸の単位ベクトルである $u_{a1} u_{a2}$ が得られる。

DME の主軸の向きは手先加速度の向きを、主軸の長さは加速度の大きさを示している。DME から誘導されるもうひとつの操作能力の目安として、楕円体の体積がある。楕円体の体積を S_D とすると

$$S_D = C_m a W_a \quad (20)$$

となる。

ただし、

$$W_a = \sigma_{a1} \sigma_{a2} \dots \sigma_{am} \quad (21)$$

$$C_{md} = (2\pi)^{md/2} / [2 \cdot 4 \cdot 6 \dots (md-2) \cdot md]$$

(md : 偶数)

$$C_{md} = (2\pi)^{(md-1)/2} / [1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (md-2) \cdot md]$$

(md : 奇数)

である。係数 C_{md} は、手先効果器位置ベクトルの次元 md が与えられれば定数であるから、動的可操作性 w_a と DME の体積は比例関係にある。

求める DME は、主軸半径の大きさを $\sigma_1 \sigma_2$ とし、主軸の向きを示す単位ベクトルを $v_{1x} u_{1y} u_{2x} u_{2y}$ とした楕円体となる。DME と単位ベクトルの関係を図 2-2 に示す。また、DME のモデルを図 2-3 に示す。

DME の主軸の半径の長い方向は、大きな手先加速度を出し易いことを示し、主軸の短い方向は、小さい手先加速度しか出すことが出来ないことを意味している。またこの楕円体の形状が、真円に近ければ近いほど、あらゆる方向に加速し易いといえる。

2.3 平行 2 リンク マニピュレータの動的可操作性のシミュレーション

前節の理論を基に、重力の影響を考慮した動的可操作性楕円体及び、動的可操作性を表 2-2 に示すパラメータを用いてシミュレーションすると図 2-4 のようになる。図 2-4 に用いたパラメータは、各リンクの重心の位置をリンクの中心にとったものである。また駆動トルクは、アクチュエータが最もトルクを必要とする、腕を前方に伸ばした状態の必要トルクに、重力の

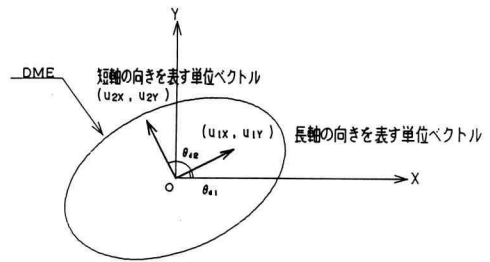


図 2-2 DME と単位ベクトル

伝達系の効率を考慮したときのトルクである。前節で、DME の主軸の長軸の向きは、アームが加速し易い方向を示し、楕円の各軸の長さは、加速度の大きさを示すことを述べたが、図 2-4 では、楕円の面積は小さく、図の下側に描かれた動的可操作性も全体的に小さい。そこで関節駆動トルクを表 2-3 にした場合のシミュレーションの出力を図 2-5 に示す。図 2-5 では、図 2-4 に比べ、楕円の面積も大きくなり、手先を前方に伸ばした状態での動的可操作性も向上していることがわかる。

マニピュレータの機構設計をする場合、マニピュレータの各リンクの長さには、可動範囲の制約が、また各リンクの質量には、アームの剛性などの制約条件が課せられる。そこで、もうひとつの動力学パラメータである各リンクの重心の位置を、機構的に可能な限り旋回軸の近くに持ってくれば、動的可操作性が向上することが知られている。そこで各リンクの質量中心

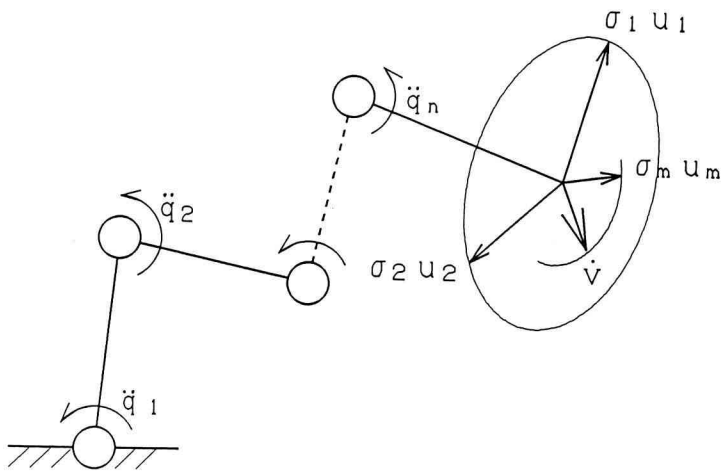


図 2-3 DME のモデル

表 2-2 (図 2-4) に用いたモデルの仕様

| | | |
|--------------|----------------|------|
| 第 1 リンクの長さ | $l_1=0.25$ | [m] |
| 第 2 リンクの長さ | $l_2=0.1$ | [m] |
| 第 3 リンクの長さ | $l_3=0.25$ | [m] |
| 第 4 リンクの長さ | $l_4=0.35$ | [m] |
| 第 1 リンクの重心位置 | $l_{g1}=0.125$ | [m] |
| 第 2 リンクの重心位置 | $l_{g2}=0.05$ | [m] |
| 第 3 リンクの重心位置 | $l_{g3}=0.125$ | [m] |
| 第 4 リンクの重心位置 | $l_{g4}=0.125$ | [m] |
| 第 1 リンクの質量 | $m_1=0.6$ | [kg] |
| 第 2 リンクの質量 | $m_2=0.17$ | [kg] |
| 第 3 リンクの質量 | $m_3=0.12$ | [kg] |
| 第 4 リンクの質量 | $m_4=0.5$ | [kg] |
| エンドエフェクタの質量 | $m_e=0.5$ | [kg] |
| 第 1 関節駆動トルク | $t_1=7.84$ | [Nm] |
| 第 2 関節駆動トルク | $t_2=3.92$ | [Nm] |

表 2-3 (図 2-5) に用いたモデルの仕様

| | | |
|-------------|-------------|------|
| 第 1 関節駆動トルク | $t_1=17.64$ | [Nm] |
| 第 2 関節駆動トルク | $t_2=9.31$ | [Nm] |

が回転軸の近くにある場合のシミュレーション出力を図 2-6 に示し、そのシミュレーションに用いたパラメータを表 2-4 に示す。図 2-6 では図 2-5 のときに比べ、どの姿勢でも全体の動的可操作度が約 35% 向上し、第 1 腕の回転軸から手先へ伸ばした状態の中間位

表 2-4 (図 2-6) に用いたモデルの仕様

| | | |
|--------------|----------------|-----|
| 第 1 リンクの重心位置 | $l_{g1}=0.045$ | [m] |
| 第 2 リンクの重心位置 | $l_{g2}=0.05$ | [m] |
| 第 3 リンクの重心位置 | $l_{g3}=0.125$ | [m] |
| 第 4 リンクの重心位置 | $l_{g4}=0.025$ | [m] |

置で、楕円の形状が円に近くなり、手先を前方に伸ばした状態での動的可操作性の低下も減少している。したがって、図 2-6 に用いたパラメータによりマニピュレータを試作した。

3. 試作マニピュレータの仕様及び設計

シミュレーション結果を参考にして動的可操作性を考慮したマニピュレータを以下のような方針で試作した。

- 動的可操作を考慮し、各リンクの重心は、出来る限り回転軸の近くに設定する。
- シミュレーションより、手先に 0.5 (kg) の手先効果器をつけ、手先を前方に最も伸ばした状態で必要な静止トルクの約 2.5 倍となるようにモータを選定する。
- 動特性を考慮するため、高速動作が可能なマニピュレータを設計する。各リンクの回転軸の回転速度は、台座部が約 4.2 (rad/sec)、第 1 腕と第 2 腕が約 5.3 (rad/sec) とする。
- 手先効果器の定格質量は動的可操作性を考慮し

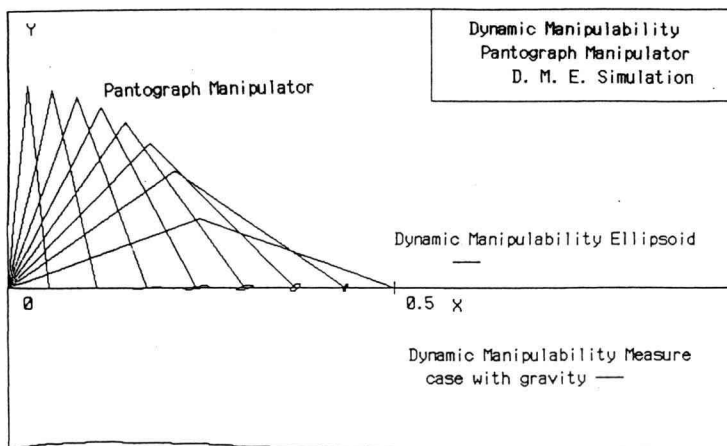


図 2-4 平行 2 リンクマニピュレータの重力を考慮した動的可操作度 (下部) と DME (上部)

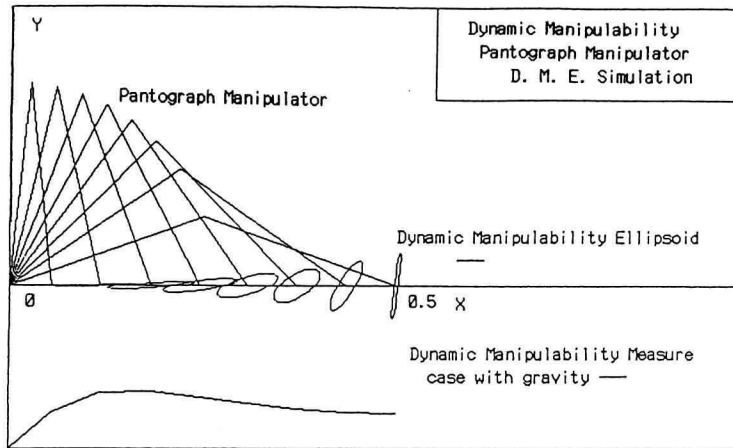


図 2-5 各リンクの駆動トルクを改善した動的可操作度と DME

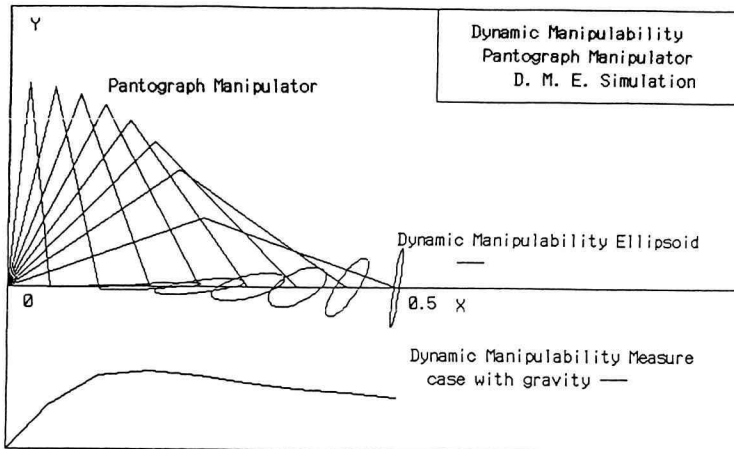


図 2-6 試作したマニピュレータの動的可操作度と DME

た場合は 0.5 (kg)であるが、強度計算及び、トルク計算では最大 1 (kg)として設計する。試作したマニピュレータの各パラメータ、仕様および可動範囲をそれぞれ表 3-1、表 3-2、図 3-1 に示す。また、試作機の概観を図 3-2、図 3-3 に示す。

4. 試作機による実験

(1) 実験システム

動的可操作性楕円体の面積は、動的可操作度に比例し、その主軸の向きは、加速のし易さを表していることは既に述べた。そこで試作機の機構の評価、即ちマ

ニピュレータの手先の動かし易さを評価するため、試作したマニピュレータの手先に加速度計を取り付け、手先の加速度を測定する実験を行った。まず、先に述べたシミュレーションと環境を一致させるために、マニピュレータの手先に 0.5 (kg)の質量の手先効果器を取り付け、2つの加速度計を、図 4-1 のように X' 軸、 Y' 軸の向きを測定できるように取り付けた。また測定器としてペンレコーダーとコンピュータを用い、加速度計から得られる電圧を測定器に取り込むことにした。これらの実験システムの構成図を図 4-1 に示す。

(2) 実験内容

本実験では、DME の主軸の向きを求めることを前

表 3-1 試作したマニピュレータの各パラメータ

| 軸間のリンク長さ | | 各リンクの質量 | | 各リンクの質量中心 | |
|-----------|------|-----------|-----|--------------|------|
| $l_1=250$ | [mm] | $m_1=600$ | [g] | $l_{g1}=45$ | [mm] |
| $l_2=250$ | [mm] | $m_2=500$ | [g] | $l_{g2}=25$ | [mm] |
| $l_3=250$ | [mm] | $m_3=120$ | [g] | $l_{g3}=125$ | [mm] |
| $l_4=100$ | [mm] | $m_4=170$ | [g] | $l_{g4}=50$ | [mm] |

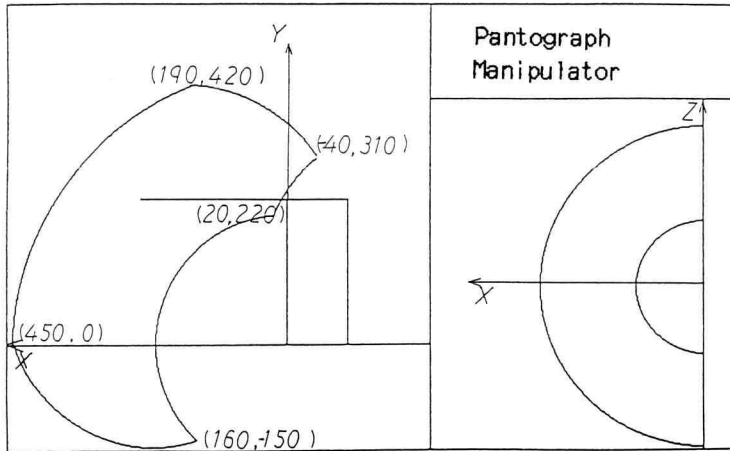


図 3-1 試作したマニピュレータの可動範囲

表 3-2 マニピュレータの仕様

| | |
|----------|------------------|
| 分類 | 垂直多関節型 |
| 重量 | 12 [kg] |
| 自由度 | 3 自由度 |
| 動作自由度の範囲 | 図 3-1 に掲載 |
| 定格可搬重量 | 0.5 [kg] |
| 動力電源 | DC 24 [V] |
| 駆動方式 | DC サーボモータ |
| 駆動機構 | 平行リンク機構 |
| 制御方式 | 円弧補間, 直線補間, 関節補間 |
| 制御軸数 | 同時 3 軸 |
| 制御機器 | PC-9801 |
| 制御言語 | C 言語 |
| 速度検出器 | タコ・ジェネレータ |
| 位置検出器 | ポテンショメータ |

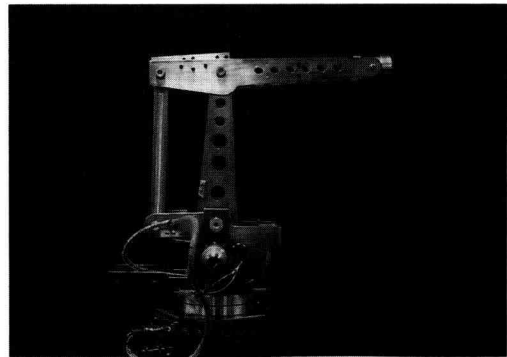


図 3-2 初期姿勢

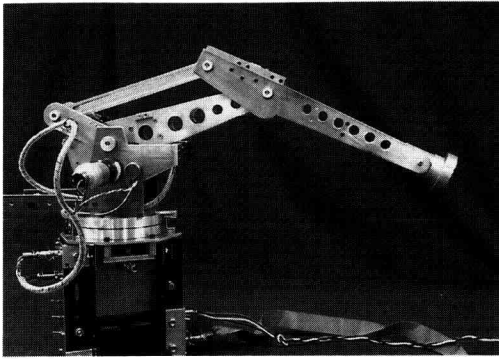


図 3-3 手先を前方に伸ばした状態

提として、実験を進めることにした。第1腕の旋回軸から前方へ水平に0.3(m)の位置を中心とし、マニピュレータの可動範囲の影響を考慮して、中心から6方向へ、計算機から位置の指令を与え、加速度をペンレコーダーで記録した。その時の詳しい測定位置を図4-2に示す。

(3) 実験結果および考察

加速度計によって得られた各座標での加速度の測定結果に、測定時に使用したレンジを考慮しそれらの各座標までにかかった加速度の大きさ(X' Y' 方向)を算出した。表4-1に測定結果を示す。そして、その加速度の大きさの X' 、 Y' 成分より、始点から各座標に移動する際に発生する加速度の大きさと向きを始点中心

にベクトル表示し、その先端を線で結んで楕円を描いた。図4-3に実験結果の楕円を示す。その結果、シミュレーションで得られた加速度の大きさを示す楕円とほぼ一致した。

DMEの長軸の長さや長軸に対する短軸の比率が、シミュレーションの値と一致しなかった原因としては、ギヤのバックラッシュや駆動伝達機構から生じるトルク損失などが考えられる。長軸および短軸の長さが理論値に対して、長軸は1.21倍長く、短軸は0.89倍短かった。これは、試作機が、理論値に比べて Y' 方向に動きやすく、 X' 方向に動きにくいという特性があるためと思われる。さらに、試作機の手先の位置や姿勢などによって変化する重力バランスも影響していると思われる。

5. おわりに

本研究において、動的可操作性を考慮した重力の影響のもとにおける2自由度平行リンク形マニピュレータのシミュレーションおよび試作機による実験より、以下の結論を得た。

1) 重力を考慮に入れた2自由度平行リンク形マニピュレータについて、アクチュエータとなるモータのトルクが大きいほど動的操作性が高くなるということが確認できた。

2) 重力を考慮に入れた2自由度平行リンク形マニピュレータについて、各リンクの旋回軸から質量中心

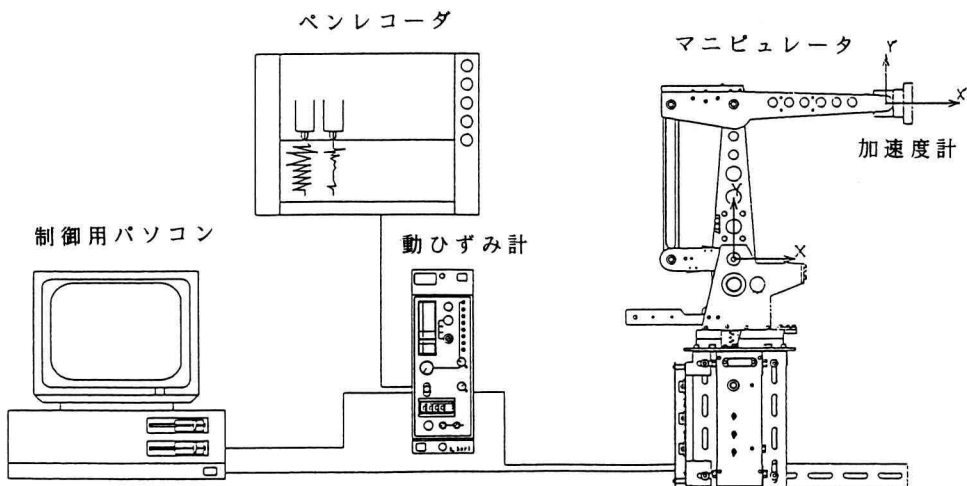
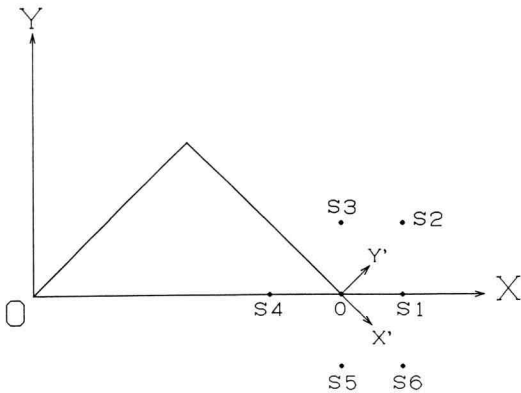


図 4-1 実験システム



- O: (350,0) [mm]
 S1: (450,0) [mm] S2: (450, 100) [mm]
 S3: (350, 100) [mm] S4: (250, 0) [mm]
 S5: (250, -100) [mm] S6: (450, -100) [mm]

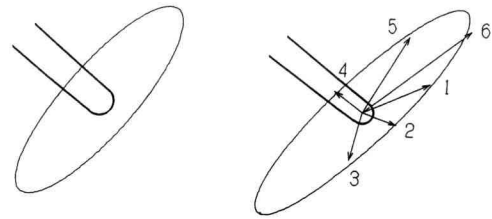
図 4-2 測定位置

表 4-1 試作機による実験値

| | X' 方向 | Y' 方向 |
|----|---------------------------|---------------------------|
| S1 | 11.97 [m/s ²] | 22.44 [m/s ²] |
| S2 | 11.97 | 4.11 |
| S3 | 7.11 | -16.08 |
| S4 | -11.97 | 0.00 |
| S5 | -13.47 | 38.53 |
| S6 | 15.71 | 51.24 |

までの距離が短いほどマニピュレータが手先を伸ばした状態での動的可操作性が高くなるということが確認できた。

3) 重力を考慮に入れた 2 自由度平行リンク形マニピュレータについて、各リンクの長さが短いほど手先を伸ばした状態での動的可操作性が高くなるということが確認できた。



(a) 理論値 (b) 試作機による測定結果

図 4-3 動的可操作性楕円体 (DME)

4) 動的可操作性楕円体の主軸の向きは、マニピュレータの加速性の実験により得られた主軸の向きとほぼ一致し、動的可操作性楕円体の有効性が確認できた。

今回は、2次元 (X-Y 平面) においてのみ動的可操作性の解析を行ったが、今後さらに 1 次元増やして、3次元 (X-Y-Z 平面) の動的可操作性の解析を行う必要がある。また、マニピュレータの上腕、下腕の比率は 1:1 であったが、可動範囲を広げるためにも上腕、下腕の比率の最適値を求める必要がある。

なお本研究、特にマニピュレータの製作には本研究室の卒業研究生橋元達志君、柳沢忠志君の協力によって行われた。記して感謝の念を表したい。

参 考 文 献

- 1) 浅田晴比古: ロボットアーム動特性の幾何学的解析法, 計測自動制御学会論文集, 19-6, 500/505 (1984)
- 2) 内山 勝, 清水邦敏, 箱森京次郎: ヤコビ行列式によるロボットアームの機構評価, 計測自動制御学会論文集, 21-2, 190/196 (1985)
- 3) 内山 勝: ロボットアームの機構解析と評価, コンピュートロール No. 9, コロナ社 35/46 (1985)
- 4) 吉川恒夫: ロボット制御基礎論, コロナ社 (1988)
- 5) 吉川恒夫: ロボットアームの動的可操作性, 計測自動制御学会論文集, 21-9, 970/975 (1984)