

可変粘性楕円体を用いたインピーダンスモデル追従型
マスタスレーブシステム*千田 和 範^{*1}, 疋 田 弘 光^{*2}
山 下 光 久^{*2}, 花 島 直 彦^{*2}Master-Slave System with Automatically Adjusted Impedance Model
Using Variable Viscosity EllipsoidKazunori CHIDA^{*3}, Hiromitsu HIKITA,
Mitsuhisa YAMASHITA and Naohiko HANAJIMA^{*3}Muroran Institute of Technology, Dept. of Production and Information Systems Engineering,
27-1, Mizumoto-cho, Muroran, Hokkaido, 050-8585 Japan

A design method is proposed of a master-slave system executing a continuous contact task with high maneuverability. We introduce a variable viscosity-ellipsoid that represents the viscosity coefficients of the mechanical impedance model. This model determines the dynamic behavior of the master-slave system. The viscosity parameters of the impedance model are changed according to the characteristics of the ellipsoid. As a result, the damping to the direction of a stiff environment increases and that to the maneuvering direction decreases. In addition, the shape and posture of the ellipsoid are automatically adjusted to reflect the operator's intention. With the experimental results of trace work, we show the validity of the proposed method.

Key Words: Master-Slave Robot, Impedance Control, Contact Problem, Variable Viscosity

1. は じ め に

極限環境下での作業を目的として研究開発が始められたマスタスレーブシステム(以下, MSS)は, 近年, Telerobotics⁽¹⁾や Shared autonomy⁽²⁾という概念の下で人間との協調・協同作業が重視されつつある⁽³⁾. 同時に, 人間機械系として一般化⁽⁴⁾⁽⁵⁾する動きや遠隔外科手術用⁽⁶⁾など, MSSの応用範囲が拡大している.

従来の研究では, 横小路らにより MSSの理想応答が定式化され^{(7)~(9)}, Hogan⁽¹⁰⁾によって提案されたインピーダンス制御法を適用し MSSの操作性を改善するさまざまな努力がなされてきた^{(11)~(14)}. この制御方式を用いれば MSSの動特性を規定するインピーダンスを等価的に小さくすることができる. したがって, 対象物を直接操作しているような感覚を得ることができ, また, 操作者の疲労を低減することも容易となる. しかし, インピーダンスを小さくすることで高い臨場感が得られると同時にトレードオフの問題も現れる. MSSが想定している作業は, 例えば Peg in Hole やトレース作業のように対象物との接触作業が多い. この時, MSSのインピーダンスが小さければ, 剛性の高い

対象物とは振動的な接触となる⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾. そのため, 従来の研究では暗黙のうちに低剛性な対象物や定常状態に限って検討している場合が多い. また, 環境の同定により適切なインピーダンスを設定し, 高剛性な対象物を扱う事例⁽¹²⁾もあるが, 同定精度の問題⁽¹⁵⁾や同定モデルの制約など, その適用に限界がある.

以上の観点から, MSSの実環境での利用を考えると, 環境の剛性によらず作業できることが望ましい. さらに, 実際の作業は非定型作業であるために, 作業をこなすには環境変化への適応, 臨機応変さ, 高い認知力などが要求される. しかし, これらをすべて操作者に要求するのは大きな負担となるため好ましくない. そこで, ここでは人間が常に自らのインピーダンスを調節しながら作業している点^{(17)~(19)}に着想を得て, 操作者を支援する MSSの提案を行う. これは, 筆者らが提案した手法⁽¹⁴⁾に可変インピーダンスモデル構造を組み込み, 高い臨場感と操作性を維持しつつ高剛性環境でも安定な接触作業を実現することを目的としている.

本論文では, 新たに可変粘性楕円体を提案し, インピーダンスモデルを変更する手法を示す. 次に, 本手法を組み込んだモデル追従制御型 MSSについて説明する. 最後に, 2自由度の実験用 MSSに提案手法を実装し, 高剛性対象物への接触作業を行い有効性を確認する.

* 原稿受付 2000年4月17日.

^{*1} 正員, 室蘭工業大学大学院 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1).^{*2} 正員, 室蘭工業大学機械システム工学科.

E-mail: chida@mondo.mech.muroran-it.ac.jp

2. 可変粘性楕円体とモデル追従制御系

2.1 可変粘性楕円体とその性質 前章で述べたようにインピーダンス制御を施した MSS にはトレードオフ問題が存在した。つまり、インピーダンスパラメータの粘性値を小さく設定すると良好な操作性を期待できるが不安定接触問題が生じ、逆に粘性値を大きく設定すると安定接触が可能となるが操作性の低下が問題となる。そこで本論文では、状況に応じて粘性を変化させることでトレードオフ問題に対処することを考える。つまり、可変粘性楕円体（以下、粘性楕円体）と呼ぶ粘性ベクトルで表される集合を新たに導入し、この粘性楕円体により状況に応じ作業に適した粘性ベクトルを選択する。そしてこの粘性ベクトルを理想インピーダンスモデル（以下、理想モデル）の粘性ベクトルとすることで作業に相応しい手先挙動を実現することを考える。なお、MSS は 3 次元空間で動くので、これに対する粘性はベクトルとなる。これをここでは粘性ベクトルと呼んでいる。また、理想モデルとは、インピーダンス制御を適用する際、制御対象が外力に対して望ましい動特性となるように設定する力学モデルである。

以下に、提案する粘性楕円体と、これに付与する性質について説明する。

図 1 のような短軸を回転軸とした回転楕円体を考える。この楕円体表面上の点へのベクトルが、その方向への理想モデルの粘性ベクトルを表す。また、このベクトルの大きさが、この方向への粘性値の大きさである。本論文では、この楕円体を（可変）粘性楕円体と呼ぶ。なお“可変”を使っているのは、後で述べる粘性楕円体の変形を考慮したものである。

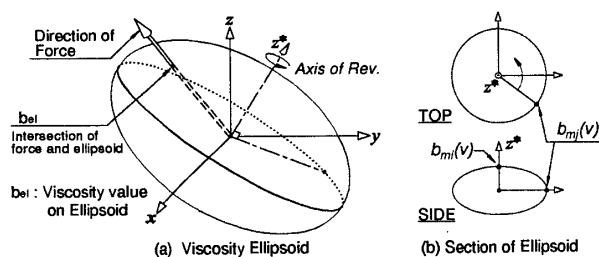


Fig. 1 Image of viscosity ellipsoid

MSS の作業中は、それに作用する力方向に一致する粘性ベクトルを常に選び、その時の理想モデルの粘性ベクトルとする。したがって、長軸方向に力が作用すれば理想モデルの粘性ベクトルは長くなり、短軸方向に作用すれば粘性ベクトルは短くなることを意味する。

この粘性楕円体から粘性値がどのように決定されるか、その理解を助ける例として、図 2(a) のような例を

考える。ここでは、アーム手先を x 方向に直進させるが、その間に高剛性の対象物に非接触の状態から、接触状態に移る。ここで、粘性楕円体の短軸方向は図のようになっていると仮定する。非接触の状態では、MSS に作用する力は操作者の操作力のみとなっており、その力方向と粘性楕円体の短軸方向がほぼ一致する。したがって、この場合、最小値に近い粘性値が決定される。次いで、そのまま手先を直進させ、高剛性な対象物にある程度大きな力を加えながらゆっくり移動させたとすれば、MSS は対象物から大きな反力を受け、操作力と反力の合力方向は、長軸方向に近い方向となる。したがって、この場合は大きい粘性値が決定されることになる。このように力の方向と粘性楕円体に基づき粘性値の大きさが状況に応じて変化することになる。

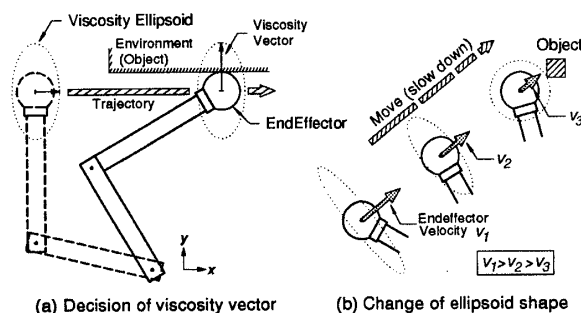


Fig. 2 Motion of arm with ellipsoid

粘性楕円体の軸方向の決定法と、その形状に持たせる性質は次の通りである。

(1) 短軸方向は手先速度方向と常に一致させる。

操作者がアームを動かして作業を行っているとする。アームの手先速度方向がその時点において操作者がアームを動かしたい方向、つまり操作意図を反映していると考え、その速度方向に粘性楕円体の短軸方向を一致させることにする。したがって、操作方向が常に低粘性となり、操作性を低下させずに操作可能となる。実は、図 2(a) における粘性楕円体の短軸方向はそう選ばれていたことになる。その結果、アームの直進方向へは操作抵抗が常に小さく、接触移動状態では反力によるエネルギーが消散されるため、安定に接触させながら手先を移動させることができる。

(2) 手先速度に応じて粘性楕円体の形状を変化させる。

ここで、図 2(b) のアームを対象物に接近させていく状況を考える。一般に、操作者はアームが対象物に接近すると減速し慎重に作業しようとする。この時、粘性楕円体の形状が固定されていると低粘性状態で衝突し、その後の応答が振動的になり好ましくない。そこで、手先速度が低下すれば短軸を伸長、長軸を収縮さ

せ、粘性楕円体は球体に近づくようにする。これにより減速時は操作方向の粘性値が回復し、接触時の衝撃などに対応可能となる。反対に、増速時は逆の状況を生じさせることで操作方向が低粘性となり操作性を確保する。

2.2 可変粘性楕円体の数式表現 2.1 節で説明した可変粘性楕円体の数式表現を求めよう。粘性楕円体の中心は、基底を $\{e_x, e_y, e_z\}$ とする作業空間 X の原点にあるものとする。この粘性楕円体面上の点 $[b_{ex}, b_{ey}, b_{ez}]$ が後述する理想モデルの x, y, z 軸方向の粘性値を表わす。

次に、2.1 節で述べたことに基づき、この粘性楕円体が満たすべき条件を次のように設定する。

手先位置ベクトルを \mathbf{x} 、速度ノルムを $v = |\dot{\mathbf{x}}|$ とおき、

1. $v = 0$ では、粘性楕円体はその中心から全方向に対して粘性が等しく球体となる。
2. $v > 0$ であれば、短軸方向の粘性値は低下し、長軸方向の粘性値は増大する。そのため粘性楕円体が変形しても、その体積は一定で、 $v = 0$ の時の球体体積を保持するものとする。

これらの条件を満足する短軸 (semiminor axis) を表す粘性値関数 $B_{mi}(v)$ は

$$B_{mi}(v) = B_0 \left(1 - w \frac{v}{v_{max}} \right), \quad 0 \leq w < 1 \quad (1)$$

と選べる。ただし、 B_0 は基準粘性値、 w は重み、 v_{max} は最大手先速度を表す。なお $w = 0$ とすれば粘性値は変化せず B_0 となり、従来の粘性を固定したインピーダンスモデルと同じになる。

また、長軸 (semimajor axis) を表す粘性値関数 $B_{mj}(v)$ は、条件から式 (1) に依存すると同時に、粘性楕円体の体積が $v = 0$ 時の体積値 $4\pi \cdot 3 \cdot B_0^3$ と常に等しくなければならないので、

$$B_{mj}(v) = \sqrt{\frac{B_0^3}{B_{mi}(v)}} \quad (2)$$

となる。ところで、粘性楕円体を空間 X で記述するには短軸の方向も必要となる。この短軸方向は速度ベクトル $\dot{\mathbf{x}}$ を用いて、 $\dot{\mathbf{x}}/|\dot{\mathbf{x}}|$ と表わす。

ここで粘性楕円体を表わす方程式が複雑になるのを避けるため、基底を $\{e_x^*, e_y^*, e_z^*\}$ とする新たな座標空間 X^* を導入しよう。この時、 $e_z^* = \dot{\mathbf{x}}/|\dot{\mathbf{x}}|$ とすれば座標軸が短軸方向と一致するため、この方程式をもっとも簡単な形に表せる。よって、 X^* 上の点を \mathbf{u}^* で表すと、粘性楕円体面は短軸回りの回転楕円体であることに留意して、二次形式で表せば、

$$\mathbf{u}^{*T} \mathbf{B}^* \mathbf{u}^* = 1 \quad (3)$$

を満足する点 \mathbf{u}^* の集合となる。ただし \mathbf{B}^* は次式である。

$$\mathbf{B}^* = \text{diag} [B_{mj}^{-2}(v), B_{mj}^{-2}(v), B_{mi}^{-2}(v)] \quad (4)$$

2.3 理想モデルの粘性値算出 本節では、前節で求めた式 (3) の粘性楕円体と力方向から粘性値を決定する手順を説明する。まず、準備として座標空間 X と X^* の関係を求めておく。

図 3 は、 X と X^* の基底ベクトル方向に座標軸をとった時の 2 つの空間の関係を表している。この関係を一般軸回りの等価回転行列⁽²⁰⁾を導入することで求めよう。

等価回転行列とは、ある空間を単位ベクトル \mathbf{k} を軸に角度 α で回転させた場合、回転後の空間と元の空間との関係を表す行列である。 \mathbf{k} 、 α は等価回転軸、等価回転角と呼ばれる。なお、ここでは結果のみを利用する。詳細は文献 (20) を参照されたい。

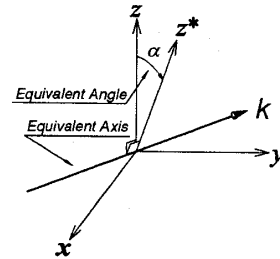


Fig. 3 Equivalent Axis/Angle

等価回転行列を得るため、まず等価回転軸 \mathbf{k} を求める。図 3 より、 $\mathbf{k} = [k_x, k_y, 0]^T$ は e_z, e_z^* に必ず直交する必要がある。よって \mathbf{k} は単位ベクトルだから、

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_z^*}{|\mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_z^*|} \quad (5)$$

である。この時、 $\mathbf{e}_z = [0, 0, 1]^T$ である。等価回転角 α は、 \mathbf{e}_z と \mathbf{e}_z^* との角度より得られるから、 $|\mathbf{e}_z| = |\mathbf{e}_z^*| = 1$ を考慮して、

$$\alpha = \cos^{-1}(\mathbf{e}_z \cdot \mathbf{e}_z^*) \quad (6)$$

と求められる。以上より、等価回転行列 $\mathbf{R}_k(\alpha)$ は

$$\mathbf{R}_k(\alpha) = \begin{bmatrix} k_x^2 V_\alpha + C_\alpha & k_x k_y V_\alpha & k_y S_\alpha \\ k_x k_y V_\alpha & k_y^2 V_\alpha + C_\alpha & -k_x S_\alpha \\ -k_y S_\alpha & k_x S_\alpha & C_\alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

で与えられる。ただし $V_\alpha = 1 - \cos \alpha$ 、 $S_\alpha = \sin \alpha$ 、 $C_\alpha = \cos \alpha$ である。式 (7) より X^* 上の点 \mathbf{b}^* を X 上で表せば、

$$\mathbf{b} = \mathbf{R}_k(\alpha) \mathbf{b}^* \quad (8)$$

となる。以上で、座標空間 X と粘性楕円体を記述した座標空間 X^* の関係が得られた。なお、変換行列 $R_k(\alpha)$ は直交行列であることに留意する。

次に粘性ベクトルの決定のために用いる力の方向を求めよう。まず、作業空間上の理想インピーダンスモデル(以下、理想モデル)に加わる力ベクトル f を、

$$f = f_m - f_s, \quad (\in R^3) \quad (9)$$

とする。ただし、 f_m, f_s はマスタとスレーブアームに作用する力ベクトルである。なお、両者の比率が異なる場合は、スケーリング変換後に式(9)を適用する。こうして得られた f を正規化した単位ベクトルを $f_n (= f/|f|)$ とすると、これは力の方向を表す。

次に、この f_n と粘性楕円体から粘性値を求めよう。 f_n を式(8)を用いて変換すれば

$$f^* = R_k^T(\alpha) f_n \quad (10)$$

を得る。ただし、 $f^* = [f_x^*, f_y^*, f_z^*]^T$ とする。

この時、 f^* をスカラー倍したものは、その幾何学的関係から粘性楕円体面上に交点 b_{el} をもつ。そこで b_{el} を f^* を用いて表せば、式(3)より

$$b_{el} = \pm \frac{B_{m_j}(v) B_{m_i}(v)}{\sqrt{B_{m_i}^2(v)(f_x^{*2} + f_y^{*2}) + B_{m_j}^2(v) f_z^{*2}}} f^* \quad (11)$$

となる。さらに、式(8)から座標空間 X 上の値 $b_e = [b_{ex}, b_{ey}, b_{ez}]^T$ を求めれば、

$$b_e = R_k(\alpha) b_{el} = \pm \frac{B_{m_j}(v) B_{m_i}(v)}{\sqrt{B_{m_i}^2(v)(f_x^{*2} + f_y^{*2}) + B_{m_j}^2(v) f_z^{*2}}} f_n \quad (12)$$

となり、モデルに作用する力 f と手先速度 v が与えられた時、粘性ベクトルが式(12)により求められる。ただし b_e の成分は正值のみをとることに注意する。

2.4 可変理想インピーダンスモデル 本節では、式(12)の粘性ベクトルを用いた可変理想モデルを表す。

まず、作業空間での理想モデルを、

$$M_e d\ddot{x}_d + B_e d\dot{x}_d + K_e dx_d = f_d \quad (13)$$

とする。なお、 $dx_d = x_{eq} - x_d$ であり、 x_d は理想モデルの位置と姿勢を、 x_{eq} はそれらの平衡点を表す。 M_e, B_e, K_e は質量行列、粘性行列、剛性行列を表す。 f_d は理想モデルへの力入力で、文献(14)で与えられているように、次式で決まるものとする。

$$f_d = K_{Pf} f + K_{If} \int_0^t f d\tau \quad (14)$$

ただし、 K_{Pf}, K_{If} はPI制御器のゲインである。

ここで、粘性行列 B_e の対角成分のうち、 x, y, z 軸方向の成分は式(12)で決まるため、式(13)は手先速度と力によって変化する可変理想モデルとなっている。また、式(13)の係数行列の各要素は、式(12)から得られるものを除き、良好な操作感を得るためにアームの動特性の許容範囲で小さくするのが望ましい⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾。

以上で、作業空間における理想モデルが式(13)より得られた。しかし、アームを制御する上で、関節空間で理想モデルが得られれば、目標値が角度、角速度となり都合が良い。また、人間と同様な作業に対する柔軟性⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾も期待できる。そこで、式(13)を関節空間における、理想モデルに変換することを考える。

関節空間における理想モデルを、

$$M_j d\ddot{q}_d + B_j d\dot{q}_d + K_j dq_d = \tau_d \quad (15)$$

とする。ただし、 $dq_d = q_{eq} - q_d$ であり、 q_d は関節角度を、 q_{eq} はその平衡点を表す。 M_j, B_j, K_j は、それぞれ慣性行列、粘性行列、剛性行列、 τ_d はトルク入力である。この時、ヤコビ行列 J を用いることで、次の関係が得られる。

$$dx_d = J dq_d \quad (16)$$

$$d\dot{x}_d = J d\dot{q}_d \quad (17)$$

また、角速度は微小と仮定すれば、

$$d\ddot{x}_d \cong J d\ddot{q}_d \quad (18)$$

が得られる。関節トルクと外力の関係は、 J^T を用いて、

$$\tau_d = J^T f_d \quad (19)$$

となる。なお、 f_d は式(14)で与えられる。式(13)に式(16)~(18)を代入し、左から J^T を乗じ、

$$J^T M_e J \ddot{q}_d + J^T B_e J \dot{q}_d + J^T K_e J q_d = J^T f_d \quad (20)$$

を得る。さらに、式(19)から、式(15)、(20)は等価となり、次式の対応関係をもつ理想モデルが得られる。

$$M_j = J^T M_e J \quad (21)$$

$$B_j = J^T B_e J \quad (22)$$

$$K_j = J^T K_e J \quad (23)$$

2.5 理想モデル追従制御系 本節では、式(15)の関節空間上の理想モデルをもとに、MSSにモデル追従制御系を構成し、各アームへの制御入力を導出する。

アームの動特性は一般に次式で表される。

$$\tau = M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + B\dot{q} + D(\dot{q}) \quad (24)$$

ここで τ は関節駆動力, $M(q)$ は慣性行列, $H(q, \dot{q})$ は遠心力・コリオリ力, B は粘性摩擦行列, $D(\dot{q})$ は動摩擦行列, q は関節角度を表す.

式 (15) に入力 τ_d が与えられた時の応答 q_d, \dot{q}_d に, 式 (24) の q, \dot{q} を追従させることを考える⁽¹⁴⁾. そのため PID 制御系を導入すると, 両アームへの関節駆動力 $\tau_i, i = m, s$ は次式で与えられる.

$$\tau_i = k_p e + k_i \int_0^t e d\tau + k_d \frac{de}{dt}, \quad i = m, s \quad (25)$$

ただし, $e = q_d - q_i$ とし, 添字の m はマスタ, s はスレーブを表している. また k_p, k_i, k_d は PID 制御器のゲインである. さらに, 両アームは十分に大きな減速比で駆動され, 上の各ゲインは高ゲインとする.

以上のモデル追従構成により, 両アームが共通の理想モデルに追従し, アームがあたかも理想モデルの動特性を持つように振舞う. つまり, 作業空間で設定した動特性通りの動作をすることが可能となり, 操作者がマスタアームを操作していながらも, 直接スレーブアームを操作しているような感覚が得られる.

なお, 図 4 は提案手法に基づく MSS の構成である.

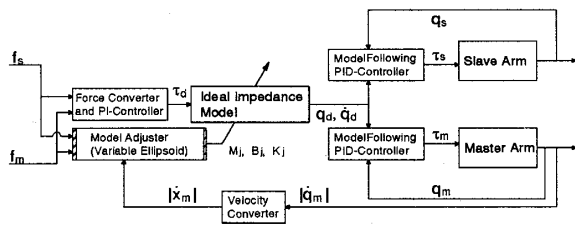


Fig. 4 Signal Flow of MSS

3. 実験

3.1 実験システム構成 提案手法を検証するため, 図 5 の同構造型マスタスレーブアームを作成した.

構造部材は A2024/A2017 を用いており, 可動域は肩関節 $|q_1| \leq 150[\text{deg}]$, 肘関節 $|q_2| \leq 95[\text{deg}]$ である. 角度は各関節軸にあるエンコーダにより検出され, 操作力および接触力は手首に取りつけた 6 軸力覚センサによって検出される. 各信号は 1024[Hz] でサンプリングされ, アーム制御に必要な角速度, 角度を計算している. マスタアーム (以下, マスタ) の手先にはスティック状の握りが取り付けられており, 操作者はこれを握ってマスタを操作する. スレーブアーム (以下, スレーブ) の手先には接触用プローブとして真鍮製の球を用いた. なお, 本実験機の諸特性を表 1 に示す.

ここで, $M_i, B_i, D_i, i = 1, 2$ は, それぞれ関節空間における慣性, 粘性, 動摩擦係数を表し, 添字の 1 は上腕部を, 2 は前腕部を意味する.

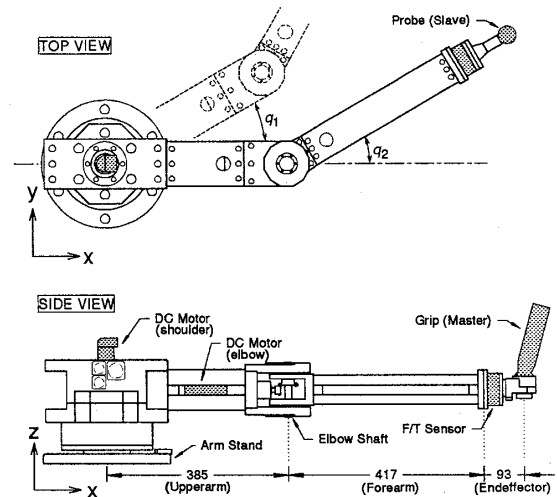


Fig. 5 Overview of MSS (Experimental System)

Table 1 Parameters of mechanical system

Upperarm	M_1 [kgm ²]	B_1 [Nms]	D_1 [Nm]
Master Arm	1.022	1.360	2.136
Slave Arm	1.001	2.351	1.838
Forearm	M_2 [kgm ²]	B_2 [Nms]	D_2 [Nm]
Master Arm	0.326	1.645	1.717
Slave Arm	0.554	1.399	2.165

実験に用いた理想モデルおよび追従制御系のゲインパラメータを表 2, 3 に示す. ただし, 理想モデルの質量, 粘性, 剛性行列 $M_e, B_e, K_e (\in R^{2 \times 2})$ は対角行列とし, 対角成分は同じ値を用いている. 表 2 の数値はその各対角成分である. 表 3 は各追従制御系の PID ゲインで, (m) はマスタ, (s) はスレーブを表す.

Table 2 Parameters of ideal impedance models

mode	M_e [kg]	B_e [Ns/m]	K_e [N/m]
Variable model	1.5	1300	0.0
Fixed model	1.5	400, 900	0.0

Table 3 Gain of PID-controllers

	k_p	k_i	k_d		K_{P_f}	K_{I_f}
Shoulder(m)	7.5	63.0	1.2	f_x	4.0	4.2
Elbow(m)	7.5	40.0	2.0	f_y	2.0	2.8
Shoulder(s)	7.5	62.0	1.2			
Elbow(s)	7.5	38.0	1.2			

3.2 実験方法 提案手法を, スレーブが対象物に対して, 非接触状態から持続的な接触状態, そして再度非接触状態へと, 連続的に変化する状況で検証する. スレーブ側には, 対象物として図 6(b) に示すように, 鉄製プレートを基準点から $x = 0.68[\text{m}]$ の位置に水平面に対し垂直, y 軸に平行に設置する. 実験ではスレーブが一定経路 (A-B-C-D-A) で動作するように常に確認しながらマスタを操作する (図 6(a)). 特に経路 (A-B) では対象物に一定の接触力を加えるものとする.

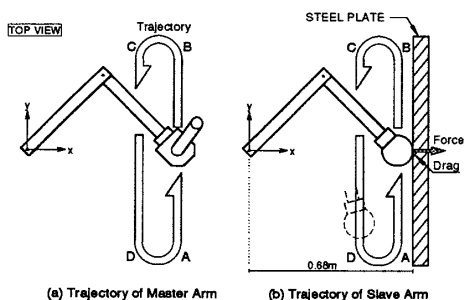


Fig. 6 Trajectories of Master-arm and Slave-arm

3.3 実験結果 図7はマスタ、スレーブの手先軌道を xy 平面上に表した。ただし対象物に接触する直前を起点(図中■▲)とし、以後8秒間の応答を抽出している。なお、図中において実線と点線はそれぞれマスタとスレーブの軌跡であり、破線はスレーブ側のみ設置してある対象物の位置を表している。

経路 A-B は持続接触動作中(以下、接触動作)で、スレーブが対象物と接触している状態である。経路 B-C-D-A は起点復帰動作中で、スレーブは対象物を含む外界と接触せず、さらに短時間で B 点から起点 A にアームを移動させている状態である。

図8は、起点 A からの両アームの力応答を表している。上段がマスタ(実線)とスレーブ(点線)の x 軸方向の力応答、下段が y 軸方向の力応答である。

図9は、この8秒間における、理想モデルに作用した力方向(実線)と粘性楕円体短軸角度(点線)を、図10は、粘性楕円体長軸(実線)、短軸長さ(点線)の変化を表した。

3.3.1 接触動作時の挙動 図7から、接触動作ではスレーブが対象物に沿って移動するが、振動的にならずに安定に接触移動している様子が読み取れる。

図8より、接触動作が起点出発後から5秒間継続していることがわかる。その過程において x 軸方向の力応答は、マスタ、スレーブ共にほぼ $10[\text{N}]$ の力を示し、非常によく一致していると言える。

図9から、接触動作時には粘性楕円体短軸方向は 90 度近辺、力の向きは 20 度付近を推移している。これらの方向をもとに、接触動作中の粘性楕円体、力方向、粘性の大きさを概念図にしたものが、図11(a)である。

手先は対象物表面に沿う方向で移動するのに対し、力方向は約 20 度となっている。これより、理想モデルは操作力よりも持続接触による反力の影響を大きく受けていることになる。この時、力と粘性楕円体長軸がほぼ同じ方向になるため、力方向の粘性も大きくなる。よって、操作性を低下させる外力を大きく減衰させ、安定した接触作業を行なうことが可能となっている。

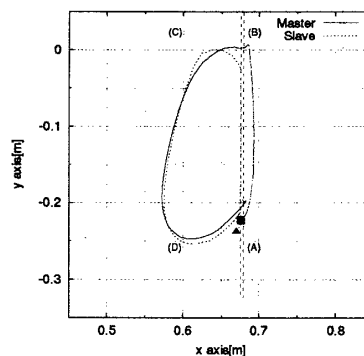


Fig. 7 Trajectories of MSS with variable model

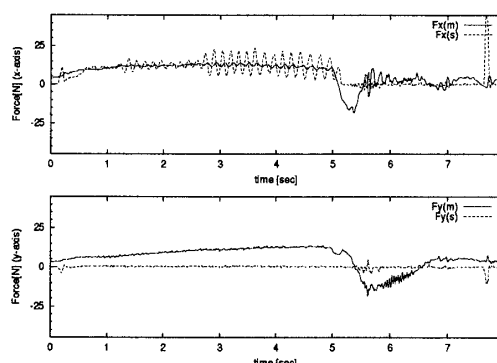


Fig. 8 Force responses of MSS with variable model

なお、図8上段の $F_x(s)$ の応答において、およそ 2.8 秒以降に若干の振動が見られるが、図7のスレーブ側の手先軌道の応答からも分かる通り、粘性楕円体の効果により接触作業は阻害されていないと言える。

3.3.2 起点復帰時の挙動 図7(B)点から始まる起点復帰動作は、図8では約5秒目以降の応答がそれに相当する。図8から、起点復帰動作開始時に、瞬間的に停止させてから動作方向を切り替えるため操作力が若干大きくなるが、それ以降の起点復帰動作では接触動作時よりも手先速度が速いにも関わらず $\pm 10[\text{N}]$ 程度と操作に大きな力を必要としていないことがわかる。

図7より、両アームの軌道がほぼ一致していることがわかる。さらに、図9より、力方向と短軸方向がほぼ一致しながら推移し、図10の短軸長さの変化より、アーム移動方向の粘性値は常に低く抑えられていることが確認できる。

以上の結果から、操作者は意図した通りに、しかも抵抗感をほとんど感じることなく操作可能であることがわかる。この起点復帰時の状態を図11(b)に示す。ただし、各ベクトル角度は7秒付近の値を用いた。

3.3.3 衝突時の挙動 この節では、対象物との衝突によるアームの挙動について取り上げる。

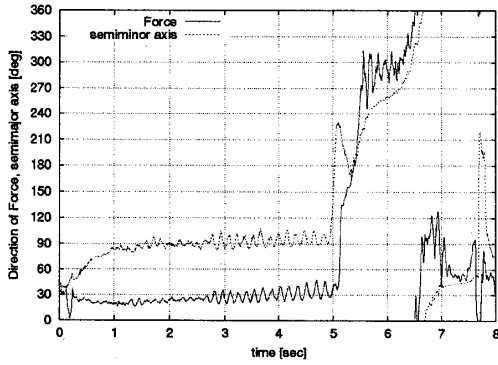


Fig. 9 Direction of semimajor axis and force

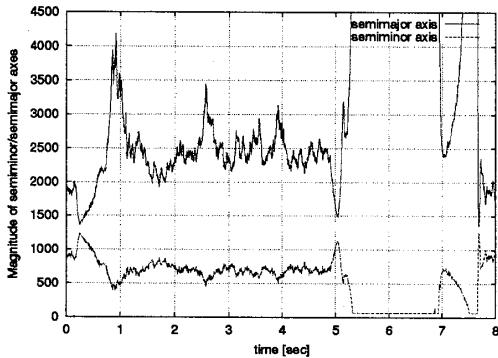


Fig. 10 Magnitude of semimajor/semimajor axes

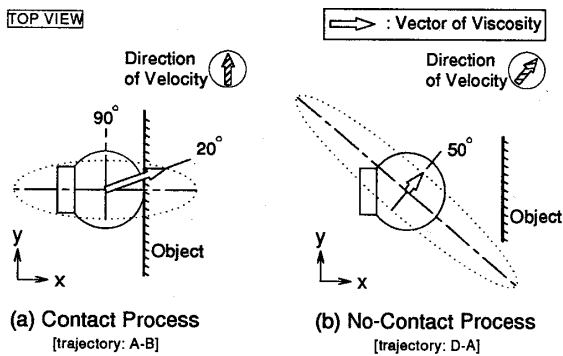


Fig. 11 Images of Experimental Process

まず、スレーブと対象物の衝突が、図8の7.5秒前後のインパルス状の力応答より確認できる。また、その後の力応答は振動していない。この時、図9から7秒から衝突するまで短軸方向と力方向がほぼ一致しているので図11(b)で示した起点復帰状態のまま対象物に衝突したことがわかる。

この時の粘性楕円体の挙動を図10にて確認する。衝突直前には大きな開きがあった短軸、長軸は、衝突直後には両者とも基準粘性値1300[Nm/s]に近づいている。このことから、粘性楕円体は急速に球体に復元していることがわかる。したがって、低粘性な状態で大

きな力外乱を受けると瞬間的には大きな力が加わるが、球体に復帰することで素早く減衰させることが確認できる。

3.3.4 従来型 MSS との比較実験 比較のために、粘性値を固定した従来型 MSS の実験結果も図示する。実験条件は提案手法と一致するように、接触動作を5秒、起点復帰動作を3秒とし、接触中は対象物に10[N]前後の押付け力を加えるようにした。

図12, 13は粘性値を400[Ns/m]とした結果である。

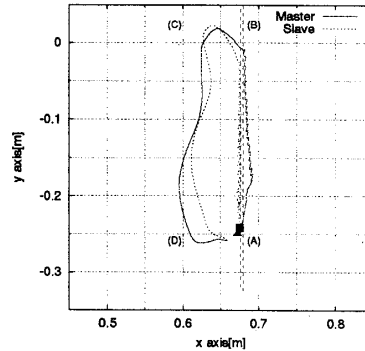


Fig. 12 Trajectories of MSS($B_0=400$)

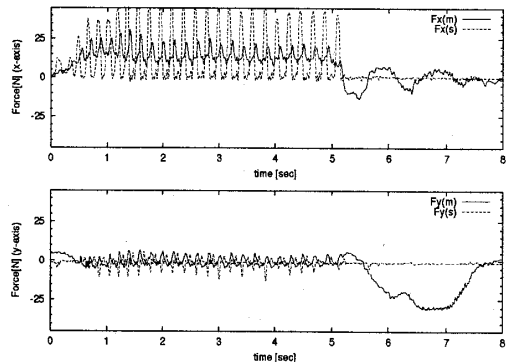
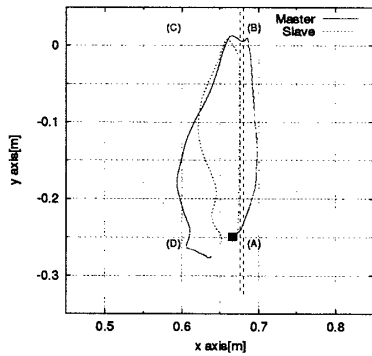
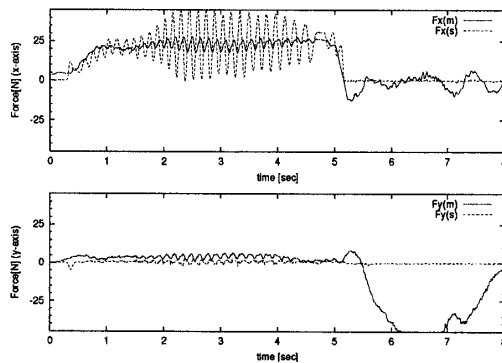


Fig. 13 Force responses of MSS ($B_0=400$)

図13より、接触動作では接触時の衝撃を吸収しきれず対象物に接触/非接触を繰り返す振動的な応答を示し、それに伴い図12にも同様の振動的な軌跡が現れている。

図14, 15は粘性値を900[Ns/m]とした結果である。図14より、起点復帰動作で両アーム間の軌道追従誤差が拡大し、また、図15から $B_0 = 400$ の結果よりも操作力がかなり増大していることも確認できる。

以上、粘性値が小さければ接触安定性が低下し、粘性値が大きければ操作力は増大し操作性が著しく低下することがわかる。これに対し提案手法は操作性を低下させずに接触/非接触の作業を実現できた。

Fig. 14 Trajectories of MSS($B_0=900$)Fig. 15 Force responses of MSS($B_0=900$)

4. まとめ

本論文では、可変粘性楕円体により理想インピーダンスモデルを変更する MSS を提案し、高剛性な環境での接触作業を実現しつつ、良好な操作感を維持する手法を示した。また、実験により提案手法と従来手法の比較を行ない、従来手法では実現困難だった高剛性な環境への接触作業を可能とし、さらに操作者の負担を低減することも確認できた。なお、本手法は衝突時の実験結果からわかるように、接触/非接触を断続的に行うような作業でも衝撃力による持続的な振動を引き起こさないと考えられる。

文 献

- (1) T.B.Sheridan, "Telerobotics", *Automatica*, **25**-4, (1989), pp.487-507
- (2) 平井成興, "Shared Autonomy の理論", 日本ロボット学会論文集, **11**-6, (1993), pp.788-793
- (3) H.Kazerooni, C.L.Moore, "An Approach to Telerobotic Manipulations", *Journal of Dyna., Systems, Measur., and Control*, **119**, (1997), pp.431-438
- (4) 榊泰輔・坂本武志・館暲, "仮想インピーダンスを介する人間機械系", 計測自動制御学会学術講演会論文集'95, (1995), pp.97-98
- (5) 大須賀公一・小野敏郎, "ロボティックフォロワ", 日本ロボット学会学術講演会論文集, (1997), pp.735-736
- (6) 佐野明人・小谷和也・村瀬康宏・藤本英雄, "マイクロマニピュレーションのためのマスタスレーブ一体型ツールの開発", *ROBOMECH '95(B)*, (1995), pp.1412-1415
- (7) 横小路泰義・吉川恒夫, "マスタ・スレーブ型遠隔操縦システムの操作性", 計測自動制御学会論文集, **26**-5, (1990), pp.572-579
- (8) 横小路泰義・吉川恒夫, "理想的な筋運動感覚を与えるマスタ・スレーブマニピュレータのバイラテラル制御", 計測自動制御学会論文集, **27**-1, (1991), pp.56-63
- (9) 横小路泰義, "マスタ・スレーブ制御の理論", 日本ロボット学会論文集, **11**-6, (1993), pp.794-802
- (10) N.Hogan, "Impedance Control part I-III", *ASME Journal Dynamic Systems, Measurement and Control*, **107**-1, (1985), pp.1-24
- (11) 館暲・榊泰輔, "インピーダンス制御型マスタ・スレーブシステム (I)", 日本ロボット学会論文集, **8**-2, (1990), pp.241-252
- (12) 榊泰輔・館暲, "インピーダンス制御型マスタ・スレーブシステム (II)", 日本ロボット学会論文集, **8**-2, (1990), pp.253-263
- (13) 小菅一弘・伊藤友孝・福田敏男・大塚まなぶ, "力と運動のスケーリングを考慮したテレマニピュレータの Task-oriented 制御", *ROBOMECH'95*, (1988), pp.1220-1221
- (14) 疋田弘光・千田和範・山下光久・花島直彦, "インピーダンスモデル追従構造を持つマスタスレーブシステム", 日本機械学会論文集 **C 63**-314, (1997), pp.3577-3585
- (15) C.H.An, C.G.Atkeson, J.M.Hollerbach; 松本治彌訳, モデルに基づくロボットマニピュレータの制御, 実教出版, (1991)
- (16) 榊泰輔・館暲, "インピーダンス制御の接触安定性についての考察", 日本ロボット学会論文集, **12**-3, (1994), pp.489-496
- (17) 辻敏夫・伊藤宏司・長町三生・池本貴志, "筋運動制御系のインピーダンス調節機構と手先操作性", 計測自動制御学会論文集 **24**-4, (1988), pp.385-392
- (18) 伊藤正美・伊藤宏司, 生体とロボットにおける運動制御, 計測自動制御学会, (1991)
- (19) R. Ikeura and H. Inooka, "Variable Impedance control of Robot for Cooperation with a Human", *IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, (1995), pp 3097-3102
- (20) John J.Craig; 三浦宏文・下山勲訳, ロボティクス: 機構・力学・制御, 共立出版, (1991)