

Study on Tele-existence (XVI)

Intelligent Master-Slave System using Impedance Control

Mechanical Engineering Laboratory

Susumu TACHI

Yaskawa Electric Mfg. Co. Ltd.

○ Taisuke SAKAKI

1 はじめに 一般にテレイグジスタンス¹⁾では、遠く離れたところに存在する操作者がまるで作業を行っている場所にいるかのような錯覚を操作者にもたせて臨場感を出す²⁾が、それは単に作業環境での反応をそのまま操作者に伝えれば良いと言うわけではない。なぜならロボットのアームと人間の腕のサイズ・出力や、作業環境と操作環境の動特性が一般に異なっているからである。また、作業環境によっては作業の支障となる動特性を有したり、逆に作業に必要な動特性が欠落している場合があり得る。以上のことから、使いやすく臨場感のあるマスタ・スレーブシステムを得るには、操作者の作業能力をスレーブマニピュレータの能力へと拡張し、さらに作業環境での見かけ上の操作感を任意に設定できるようにすることが必要である。即ち、環境の同定・制御といった作業が不可欠である。この報告ではインピーダンス制御^{3,4)}を応用したマスタ・スレーブシステムを提案し、その基本設計を行う。概念図を Fig. 1 に示す。

2 環境の同定作業 未知の動特性 (J_{obj} , D_{obj} , K_{obj}) を持つ対象物に、インピーダンス制御により動特性を (J_d , D_d , K_d) に調整されたマニピュレータが接触する場合を考える。いま、速度・加速度を零とすると最初に指定した仮想平衡点 X_0 と対象物との接触点 X_s の間のある点 X_e で静止する。

この時、見かけ上マニピュレータは対象物であるバネに対し次の反力 F_m を与える。

$$F_m = K_d \cdot (X_0 - X_e) \quad (1)$$

このとき対象物は次のように動作する。

$$F_m = K_{obj} \cdot (X_e - X_s) \quad (2)$$

これは、ある与えられた外力 F_m に対し直列に接続された2つのバネ (合成した弾性係数を K_s とす

る) が距離 $X_0 - X_s$ だけ収縮したと解釈される。

$$F_m = K_s \cdot (X_0 - X_s) \quad (3)$$

よって、

$$\frac{F_m}{K_s} = X_0 - X_s = (X_0 - X_e) + (X_e - X_s) = F_m \left(\frac{1}{K_d} + \frac{1}{K_{obj}} \right) \quad (4)$$

したがって、求める対象物の弾性係数 K_{obj} は、

$$K_{obj} = 1 / \left(\frac{1}{K_s} - \frac{1}{K_d} \right) \quad (5)$$

次に、マニピュレータが対象物に接触している際の速度を一定すなわち加速度を零とする。マニピュレータへの外力 F_m にたいし、マニピュレータの速度を $\frac{dX_1}{dt}$ 、対象物のマニピュレータに対する相対速度を $\frac{dX_2}{dt}$ とすると、ある与えられた外力 F_m に対し直列に接続された2つのダッシュポット (合成した粘性係数を D_s とする) をもつ物体が速度 $\frac{dX_s}{dt}$ で動作していると考えられる。先と同様にして求める対象物の粘性係数 D_{obj} は、

$$D_{obj} = 1 / \left(\frac{1}{D_s} - \frac{1}{D_d} \right) \quad (6)$$

以上と同様の方法を用いて対象物の慣性 J_{obj} を求めると、

$$J_{obj} = 1 / \left(\frac{1}{J_s} - \frac{1}{J_d} \right) \quad (7)$$

3 マスタ・スレーブシステムの構成

3.1 ハードウェア構成 Fig. 2 にハードウェアの構成を示す。システムはマスタシステムとスレーブシステムから成る。それぞれのアームは各システムのコンピュータに接続され制御される。アームのセンサはその運動を計測しコンピュータに送信する。コンピュータはアームのコントローラと環境シミュレータから成り、環境シミュレータはセンサからの出力にもとづいて自律的に、あるいは操作者からの指令により、環境のモデルを作成する。マスタシステムとスレーブシステムは、アームと環境のそれぞれのインピーダンス及び運動についての情報を通信する。

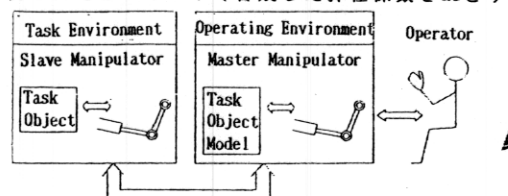


Fig. 1 Master-Slave System in Tele-existence mode

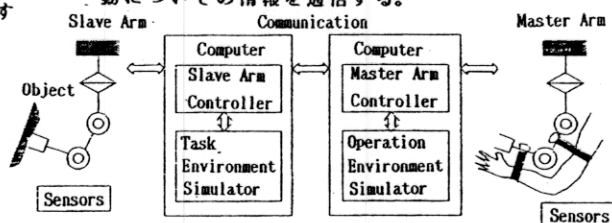


Fig. 2 Master-Slave System

3. 2 システムの基本動作 (1) スレーブ マニピュレータを作業環境で動作させて同定 作業を行うことによりスレーブシステム内に 作業環境のモデルを作り、環境の位置及びイ ンピーダンス (位置と姿勢の関数) をマスタ システムに送信する。マスタシステムは、そ のデータから作業環境に一致するように操作 環境のモデルを作成する。

(2) マスタシステムのみを動作させ、操作者 がマスタマニピュレータを用いて操作環境に 接触する。

操作者はその時得られた操作感をもとに操作環境 を作業に都合の良いように調整する。調整結果は スレーブシステムへ送信され、作業環境も操作環 境に一致するように調整される。

(3) マスタ・スレーブシステム全体を動作させ、 マスタマニピュレータを動かすことにより作業を 行う。マスタシステムのコントローラは操作環境 のモデルをもとにマスタマニピュレータの運動方 程式を組み立てており、マスタマニピュレータの 運動をその式に代入して操作者への反力を計算し、 必要な出力トルクを指令する。同時にマスタマニ ピュレータの運動がスレーブシステムへ実時間で 送信される。スレーブシステムのコントローラは、 その運動データからマスタシステムと同様にして 必要な出力トルクを計算しスレーブマニピュレー タを制御する。

4 環境モデルの作成 一般に環境を3次元空間 とすると、環境モデルの各座標に対するインピー ダンスは次のようになる。

$$Z(X)=[Z_{01} \ Z_{02} \ Z_{03} \ Z_{r1} \ Z_{r2} \ Z_{r3}]^T \quad (8)$$

各マニピュレータを等しい目標インピーダンス に沿って動作させるために、作業環境と操作環境 の異なる座標系間に1対1の対応をつけ、対応す る座標のインピーダンスを等しくする。

座標間の原点を一致させる操作TRNS()、座標の 方向を一致させる操作ROT()、座標をあるスケール 倍する操作SCL()から成る、作業環境モデルの座標 から操作環境モデルの座標への変換 Γ を

$$\Gamma(\cdot)=SCL(ROT(TRNS(\cdot))) \quad (9)$$

とすると、作業環境モデルの座標 X_t における目標 インピーダンス Z_t 、座標 X_t に対応する操作環境モ デルの座標 X_o における目標インピーダンス Z_o は、

$$Z_t(X_t)=Z_o(X_o), \quad X_o=\Gamma(X_t) \quad (10)$$

のとき等しくなる。このとき、マスタマニピュレー タの運動を V_m とすると、スレーブマニピュレー タの運動 V_s は次のように求められる。

$$V_m=[X_m \ \frac{dX_m}{dt} \ \frac{d^2X_m}{dt^2}]^T \quad (11)$$

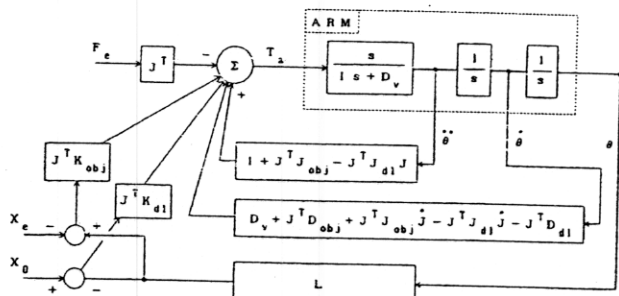


Fig.3 Block Diagram of Impedance Control with an Object

$$V_s=\Gamma^{-1}(V_m) \\ =[\Gamma^{-1}(X_m) \ \frac{d}{dt}(\Gamma^{-1}(X_m)) \ \frac{d^2}{dt^2}(\Gamma^{-1}(X_m))]^T \quad (12)$$

4 環境の制御 マニピュレータの運動方程式が 次式で与えられているとする。

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D_v \frac{d \theta}{dt} = T_a + J^T F_e \quad (13)$$

マニピュレータが対象物に接触している時の全 体の目標インピーダンス $Z(j\omega)$ を

$$Z(j\omega)=D_d I + j(J D_{d1} \omega - \frac{K_d I}{\omega}) \quad (14)$$

とすると、インピーダンス制御によりシステムの 運動方程式は次のようになる。

$$F_e = J D_{d1} \frac{d^2 X}{dt^2} + D_d I \frac{dX}{dt} + K_d I (X - X_0) \quad (15)$$

以上のことから、既知の動特性 (I, D_v) を持つマ ニピュレータが先に同定した動特性 $(J_{obj}, D_{obj}, K_{obj})$ を持つ対象物に接触している時、(14)式の 目標インピーダンスを実現するために必要なアク チュエータの出力は以下のように決定される。

$$T_a = (I + J^T J_{obj} - J^T J_{d1}) \frac{d^2 \theta}{dt^2} \\ + (D_v + J^T D_{obj} + J^T J_{obj} \frac{dJ}{dt} - J^T J_{d1} \frac{dJ}{dt} - J^T D_{d1}) \frac{d \theta}{dt} \\ + J^T \{K_{obj}(L(\theta) - X_e) + K_d I (X_0 - L(\theta))\} \quad (16)$$

このブロック線図をFig.3に示す。

5 まとめ 本報告は、テレイグジスタンスの研究の一環として、高度の臨場感を持つマスタ・スレーブシステムを開発することを目的としている。このシステムを構成するにあたり、基本となる概念としてインピーダンス制御を採用した。この制御法を適用して、環境をリアルに把握し、さらに環境を制御することによって臨場感を保ちつつ作業性を向上するシステムの基本設計を行った。

<参考文献>

- 1) 館ほか:テレイグジスタンスの研究 第1報, 第21回SICE学術講演会予稿集, 1982
- 2) N.Hogan:Impedance Control I II III, ASME Trans., March 1985
- 3) N.Hogan:Stable Execution of Contact Task using Impedance Control, Proc.1987 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, vol.2, 1987
- 4) 館、榊ほか:マニピュレータのインピーダ ンス制御, 第27回SICE学術講演会予稿集, 1988