

1615 テレイグジスタンスの研究 第24報

—インピーダンス制御を用いたマスタースレーブ作業実験—

機械技術研究所 舘 暁 荒井 裕彦 大山 英明 前田 太郎 常本 直貴
安川電機製作所 ○井上 康之

Study on Tele-existence (X XIV)

—Master-Slave Manipulator Experiments using Impedance Control—

Mechanical Engineering Laboratory S.Tachi, H.Arai, E.Oyama, T.Maeda and N.Tsunemoto

Yaskawa Electric Mfg. Co. Lim. ○Y.Inoue

1. はじめに

テレイグジスタンスにおいて、マスター・スレーブ マニピュレータをオペレータ自身が作業を行っているかのように違和感なく操作できるためには、力感覚の制御が重要となる。我々はそのような制御を実現する方法としてインピーダンス制御形マスタースレーブシステムを提案している。¹⁾提案するシステムではマスターアーム、スレーブアーム共にアクティブな制御を仮定しているが、より基本的なシステム構成を考えた場合、位置の計測が可能なマスターアームとインピーダンス制御を行うスレーブアームを用いることで外界との接触作業が可能となる。

力制御ループをスレーブ側でのみ実行することでシステム全体の情報伝送量を削減するとともに、複雑な制御ループを単純化することにより制御系の安定性を確保することができる。これによって、多自由度アームにおける過大なハードウェアとソフトウェアに対する負荷を軽減することができる。

本報告では、第13報²⁾、第18報³⁾で報告したマスタースレーブ装置を使用して、インピーダンス制御形システムの評価と実作業における有効性を検証したのでその結果をしめす。

2. ハードウェア構成

2-1 アーム部

スレーブアームはFig1(b)に示されるスレーブロボットの右腕で、冗長性を持った7自由度を有し、形状や動作範囲も可能な限り人間に近づけている。肩部は胴体側から前後(B₄)、左右(B₃)、回内外(T₃)で、それらの回転軸は一点で交わる。肘は、屈曲(B₂)と回転(T₂)、手首部も屈曲(B₁)と回転(T₁)からなっている。各関節とも減速機を介した駆動を行っており、可搬重量は1Kg、先端最大速度は3m/secで動作可能である。

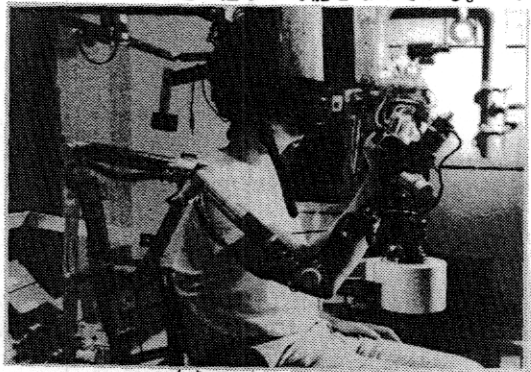
マスターアームはスレーブアームと同構造かつ同型の7自由度構成で、各関節は72000pulse/revの高分解能エンコーダにより回転角度の検出を行っている。

(Fig.1(a)) マスターアーム手先の把持部を握り、肩と前腕部を密着させ操作することで、オペレータの腕の運動を拘束感なく実時間で計測することができる。

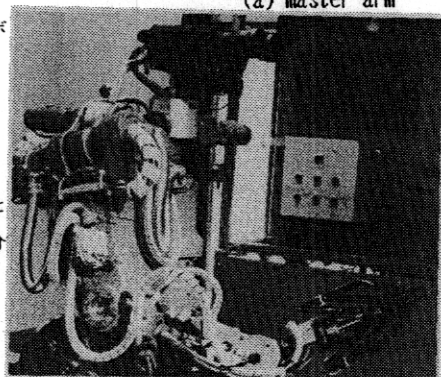
2-2 ハンド部⁴⁾

マスタ手先にはオペレータの把握運動を計測する1自由度のポテンショメータと補助スイッチが取り付けられている。このパッシブなマスタによりFig.2, Fig.3に示すスレーブハンドの開閉コントロールを行う。

スレーブハンドは1自由度の挟み動作を行う。一般に1自由度の挟み動作では、物体の2方向からの支持となり大きな物体の把握時には不安定となりやすいが、ボールネジと平行リンクの組合せにより物体の支持が3点できるため安定な握りが可能となっている。ハン

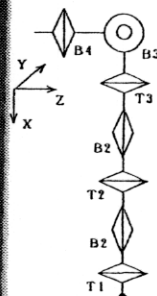


(a) master arm



(b) slave arm and joint arrangement

Fig.1 General view of the master slave arm



ドの最大開き幅は124mm、把握力は平均5kgで、指部材には把握力計測のために歪ゲージを貼付し、開き幅の計測はモータ軸端のエンコードにより平均分解能10 μ mの位置制御が可能である。また、スレーブアームの位置精度と可搬重量を低下させないよう、極力軽量化を行っている。リンク部材はジュラルミン製で、力センサを含めた手先総重量は620gである。

2-3. コントローラ

制御系の安定性を確保するため、アーム部とハンド部は異なったハードウェアによりコントロールされている。(第2報参照)

ハンド制御系では、物体を壊すことなく把持するため、歪ゲージの把握力情報をもとに、アームと同様にインピーダンスを制御している。

3. 制御方式

ロボットアームのインピーダンス制御方式はその内部ループである関節アクチュエータの制御方式から大きく2種類に分類できる。

1. 目標インピーダンス、位置、速度、作用外力(または加速度)、及びマニピュレータの動力学方程式から各関節で発生すべきトルクを決定する方式

2. 目標インピーダンス、位置、速度、作用外力から運動の指令(関節角の位置指令、または速度指令)を決定する方式

1. の方式ではマニピュレータの動力学により応答特性が決まり、目標インピーダンスに対する制御の精度は、動力学モデルパラメータと発生トルクの正確さに依存するため、目標インピーダンスからの誤差が大きくなることが予想される。特に、減速機構を有する一般のマニピュレータにこの方式を適用することは困難と思われる。

一方、2. の方式は、作業空間における目標の運動を関節角または関節角速度に変換し、内部ループに対する指令として出力するもので、パラメータ変動やトルク外乱の影響はループゲインや減速効果により低く抑えられるため、目標インピーダンスからのずれは小さい。また、周波数特性についても人間の応答特性が最高でも3-4 [Hz]であることを考えると、通常のマスタースレイブ作業においてはサーボ応答による遅れが精度に大きな影響を及ぼすことはない。制御実験においては2. の方式のうちパラメータ変動や外乱トルクに対して最もロバストであり、制御的に安定している、内部ループとして関節位置制御を用いた

インピーダンス制御方式にて実験を行った。

Fig. 4(a)(b)に制御系ブロック図を示す。

(a)は作業座標系から関節座標系への変換に逆運動学を用いる方法⁵⁾、(b)はスレーブアームとマスターアーム間の位置・姿勢偏差を微小量と見なしヤコビ行列により関節角への座標変換を行なう方法である。

(a)(b)方式に共通するインピーダンス制御演算の関係式を以下に示す。

$$F_{ex} = M \ddot{e} + B \dot{e} + K e \quad (1)$$

$$e = x_m - x_s^*$$

ここで、M: 目標インピーダンス 慣性 [Kg]

B: 目標インピーダンス 粘性 [N・s/m]

K: 目標インピーダンス 剛性 [N/m]

F_{ex} : 手先に作用する外力 [N]

x_m : マスタ位置・姿勢ベクトル

x_s^* : スレーブ位置・姿勢指令ベクトル

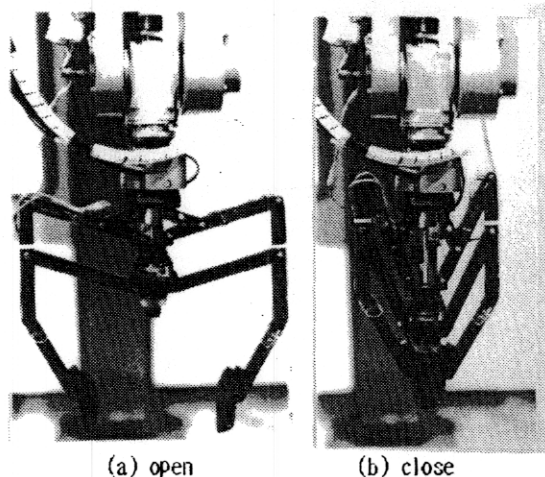


Fig. 2 General view of the slave hand

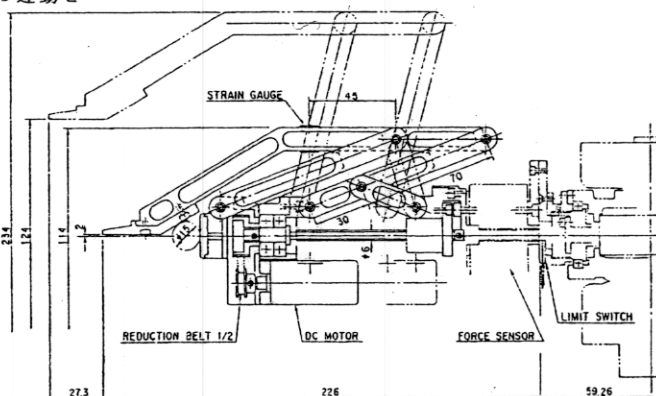


Fig. 3 Slave hand (right finger side)

k 時点におけるベクトル e を e_k とおいて, (1) 式を差分式に置き換えることにより, 次式の作業座標系における位置指令を得ることができる。

$$X_s^* = C_1 e_{k-1} + C_2 e_{k-2} + C_3 F_{ex} + X_m \quad (2)$$

$$C_1 = (2M + TsB) / (Ts^2 D)$$

$$C_2 = -M / (Ts^2 D)$$

$$C_3 = K / D$$

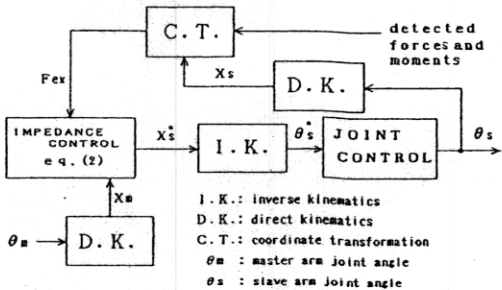
$$D = (M + BTs + K + Ts^2) / Ts^2$$

ここで, Ts : サンプル時間

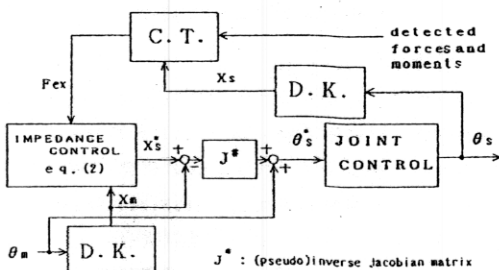
各方式の特徴を上げると, (a) の方式は逆運動学の解がもとめられる場合にのみ適用が可能であるが, 制御演算時間の面では有利であり, また, 目標インピーダンス通りの正確な制御が期待できる。(b) の方式は, 微小変位と見なせない領域では目標インピーダンスからの誤差が生ずることになるが, 逆運動学の解が求められないアームにおいても適用が可能であり, とくに冗長性を有するマニピュレータにおいては, マスターアームの関節変位とスレーバアームの関節変位の間に大きなずれを生ずることなく手先インピーダンスの制御が可能であり, 狭い場所での作業などにおいて有利となる。

4. 実験結果

制御実験では初めにインピーダンス制御の定量的評価実験を行い, その後, 実作業における有効性の確認

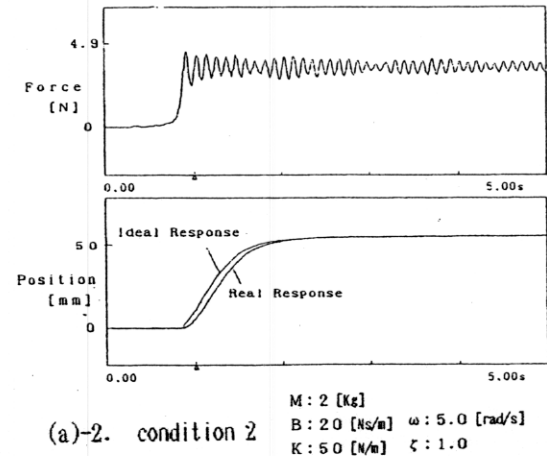
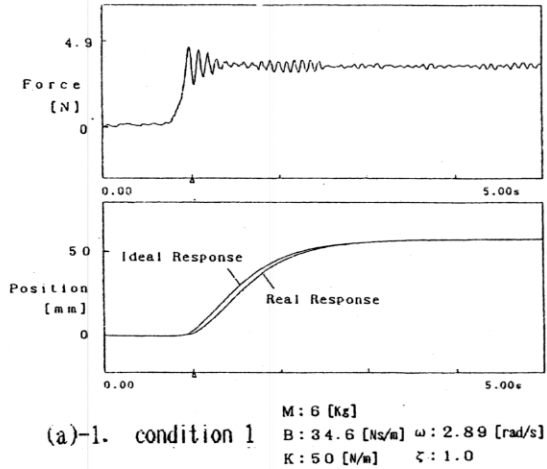


(a) Inverse kinematics method



(b) Jacobian method

Fig. 4 Block diagram of experimental system



(a) Position response by step force (I.K. method)

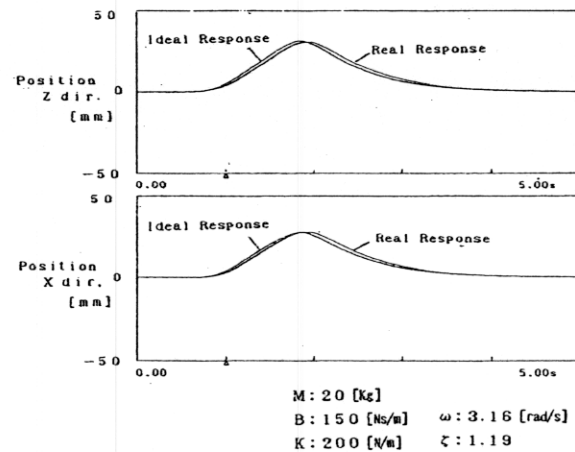


Fig. 5 Experimental results

実験を行った。

4-1 評価実験

Fig. 5は制御性の評価に関する実験結果の一例である。

Fig. 5(a)-1, 2はアーム先端にステップ力を加えた場合の位置応答を目標慣性をパラメータとして計測したもので、設定質量に応じて動特性が変化していることがわかる。また、どちらの応答も理想応答に近い特性が得られている。

Fig. 5(b)は、Fig. 4(b)の制御方式による位置応答を測定したもので、X、Z合成方向の力を加えそのときの理想応答と実応答を比較している。平衡点からの変位は比較的大きいにもかかわらず、理想応答からの誤差は小さい。

4-2 作業実験

作業例としてa)押しボタンスイッチの投入、b)レバーの回転、c)ベグの挿入を行った。(Fig. 6)

a)b)は煙が充満する特殊環境下での作業を想定して行ったものであるが、手先部が周囲物体と衝突した場合や、マスタによる位置指令の行き過ぎがある場合にもインピーダンス特性により人間の普通のスピードで作業を行うことができた。

c)の作業では、人間への力のフィードバックがない状態では、過大な力を発生し、くいつき現象をおこしやすい。また、簡単な挟み込みのハンドでは、ベグを取り落とすことがあり、作業性は人間より劣るが、両眼立体視と良い視点の確保、及び聴覚による力感覚の補助により、作業の遂行は十分可能であることがわかった。

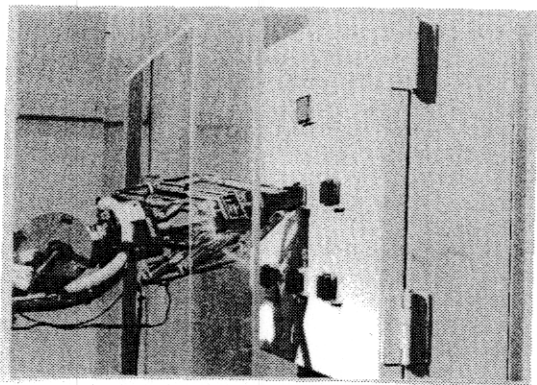
このように、パッシブなマスタアームでは力感覚を人間に伝えられないことが問題点ではあるが、第25報で報告する3次元CGモデルを利用して、例えばグラフィック（マスタ装置の位置データを用いたグラフィック画像）とカメラによる実視像とのずれにより静的外力を感覚的にとらえる、など何らかの補助的手段を用いることにより作業性の向上が可能である。

5. まとめ

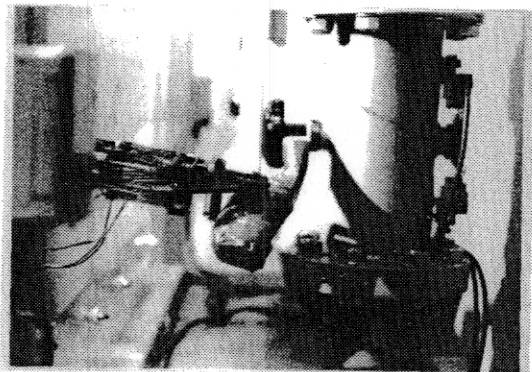
パッシブなマスタアームとアクティブなスレーブアームによりインピーダンス形マスタ・スレーブシステムを構成し評価実験と作業実験を行いその有効性を確認した。

参考文献

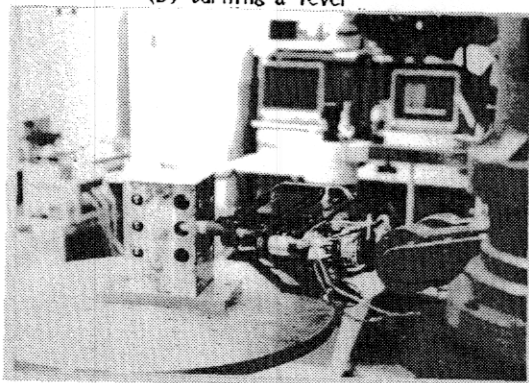
1) 館， 榊：インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム（Ⅰ）（Ⅱ），日本ロボット学会誌，



(a) pushing a button



(b) turning a lever



(c) Peg insertion

Fig. 6 Experiments of master-slave manipulation

vol. 8, No. 3, pp. 1-24, 1990

2) 館はか：テレグジスタンスの研究 第13報

第27回SICE学術講演会，249/250(1988)

3) 館はか：テレグジスタンスの研究 第18報

第28回SICE学術講演会，433/434(1989)

4) 加藤：ロボットハンド 工業調査会

5) 古田，小菅：マニピュレータの力制御アルゴリズム

とその実現，日本ロボット学会誌，vol. 7, No. 3, pp. 131-136, 1989