

— マニピュレータのインピーダンス制御 —

機械技術研究所 舘 晴 荒井裕彦 西澤昭一郎
安川電機製作所 ○ 榎 泰輔

Study on Tele-existence (XV)
— Impedance control of 2 degrees of freedom DD manipulator —

Mechanical Engineering Laboratory S. Tachi, H. Arai, S. Nishizawa
Yaskawa Electric Mfg. Co. Ltd T. Sakaki

Abstract : This research is concerned with the Impedance control of the master-slave manipulator system in Tele-existence. A method is proposed to control the impedance of a manipulator without using force sensors, and is verified by the surface following experiment using a 2 degrees of freedom DD manipulator.

1 はじめに 遠隔地に存在する人間が、ロボットの動作する場所で直接作業しているかのような高度の臨場感を持ってロボットを遠隔操作する技術、トレイグジスタンスの研究を行っている。¹⁾

インピーダンス制御は、ロボットと環境の動力学的相互作用を中心概念とする制御であり、特に接触作業を行うときに安定的な力制御が実現できる。²⁾

本研究では、力センサを用いないインピーダンス制御法を提案し、臨場感のあるマスタ・スレーブマニピュレータへ応用する。今回は、その第一ステップとして、二軸の垂直多関節型DDマニピュレータを用いて、平面内での接触作業の制御実験を行ったので報告する。

2 力センサを用いないインピーダンス制御 力センサを用いないインピーダンス制御システムの構成をFig. 1に示す。

マニピュレータの運動方程式を次のように表す。

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D_v \frac{d\theta}{dt} + C(\theta, \frac{d\theta}{dt}) = T_a - J^T F_e \quad (1)$$

但し、 I : 慣性行列

D_v : 粘性摩擦行列

$C(\theta, \frac{d\theta}{dt})$: 重力項などの非線形項

以上の係数は既知とする。また、

T_a : アクチュエータの出力行列

F_e : 環境から受ける外力の行列

θ : 各軸の回転角度行列

J : ヤコビアン

J^T : ヤコビアン転置行列

次に、環境と接触した際の仮想インピーダンス $Z(s)$ を

$$Z(s) = \frac{s}{Ms^2 + Bs + K}$$

と設定すると外力 F_e は、

$$F_e = M \frac{d^2 X}{dt^2} + B \frac{dX}{dt} + K(X - X_0) \quad (2)$$

但し、 M : 仮想イナーシャ行列

B : 仮想粘性摩擦行列

K : 仮想剛性行列

X : カートesian空間上の座標行列

X_0 : 仮想平衡点 時間 t の関数で軌道を表す。

ここで、 θ と X は、座標変換により次の関係を持つ。

$$\frac{dX}{dt} = J \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{dJ}{dt} \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

$$X = L(\theta) \quad (5)$$

これらを(2)式に代入すると、

$$J^T F_e = J^T M J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + J^T M \frac{dJ}{dt} \frac{d\theta}{dt} + J^T B J \frac{d\theta}{dt} + K(L(\theta) - X_0) \quad (6)$$

従って、アクチュエータの実際の出力トルクは、

$$T_a = (I - J^T M J) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (D_v - J^T M \frac{dJ}{dt} - J^T B J) \frac{d\theta}{dt} + K(X_0 - L(\theta)) + C(\theta, \frac{d\theta}{dt}) \quad (7)$$

この(7)式からわかるように、マニピュレータの各係数を同定し、マニピュレータの内部センサからモータの回転角度・角速度・角加速度が計測できれば、力センサを用いることなくアクチュエータのトルクが計算でき、(2)式の目標とするインピーダンスを持った制御ができる。

3 マニピュレータの構成

3.1 ハードウェア Fig. 2にハードウェアの全体の構成を示す。このマニピュレータ(Fig. 3)は、垂直多関節型で

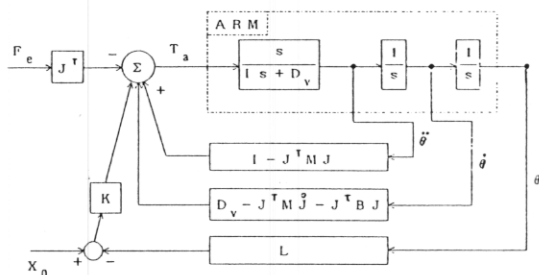


Fig. 1 Block Diagram of Impedance Control

あり3自由度を持つ。今回は第一軸を固定し、垂直平面内で稼働する2自由度マニピュレータとして使用している。各軸のアクチュエータは精密な力制御のためにDDモータを採用している。

3.2 運動方程式の導出 運動方程式の導出には、ラグランジェの運動方程式を用いた。運動方程式のパラメータを同定するために、各軸を振子の支点として減衰振動させ、その周期と振幅から慣性Iと粘性摩擦係数D、クーロン摩擦係数を求めた。

3.3 制御回路及びプログラム 各軸の回転センサとして2000 p/rのロータリエンコーダを4通倍して用いた。(7)式の制御を行う場合、角速度・角加速度の正確な値が必要となるが、それをパルス数の差分によって求めると、低速回転域では有効桁数が小さくなって、精度が非常に悪くなる。そこで本装置ではパルス間隔を基準クロック1MHzで測定し、その逆数をもって角速度とした。

なお、プログラミング言語にはCを用い、制御周期は5.0 msである。

4 制御実験 次にこのシステムを用いて行った制御実験の概要を説明する。水平軸、垂直軸方向に各々仮想インピーダンスを設定し、ある平面に接触させながらその面に沿って動作させる。その面の少し下を面から一定の距離を保ちながら仮想平衡点を等速で動かしていくと、マニピュレータは平面に接触して面に垂直に一定の力を加えながら仮想平衡点を追従する。この時、途中で半円状の障害物を置くと仮想平衡点からの位置偏差に比例した力を障害物に加えながらこれに沿って動作する。この時各軸方向に加える力の値をFig. 4に示す。

この図を見ると、時間軸に沿った垂直方向の力の値は半円状ではないが、これは、マニピュレータが曲面上を動作する時、その曲面の接線方向に一定の力を必要とするからである。従って、障害物の前半部分では、接線方向に十分な力を得られる程仮想平衡点との位置偏差が大きくなるまで待機し、後半では逆に小さい位置偏差で動作している。

このようにマニピュレータは、仮想したインピーダンスを保ちながら安定した接触作業を行うことができた。

5 まとめと今後の課題 本研究は、臨場感のあるマスター・スレーブシステムを構築することを目指している。このシステムの基本概念として、インピーダンス制御を用いる。

今回は、力センサを用いないインピーダンス制御により、二軸のDDマニピュレータを垂直平面内で動作させる制御実験を行った。次のステップでは、マニピュレータの作業空間を3次元に拡張し、マスターアームとしての操作性を研究する所存である。

<謝辞>

本研究を進めるにあたり安川電機製作所研究所前波武所長、筑波研究室坪井 定一室長、下園直登氏、中村裕司氏から多大な協力をいただきました。感謝致します。

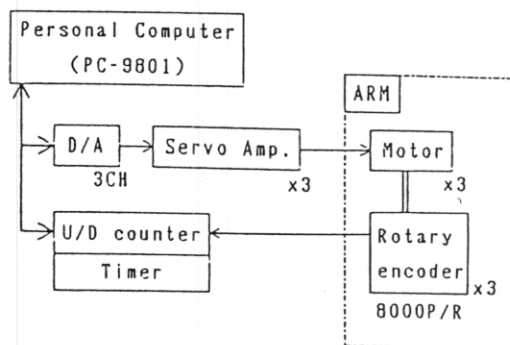


Fig.2 Control system of manipulator

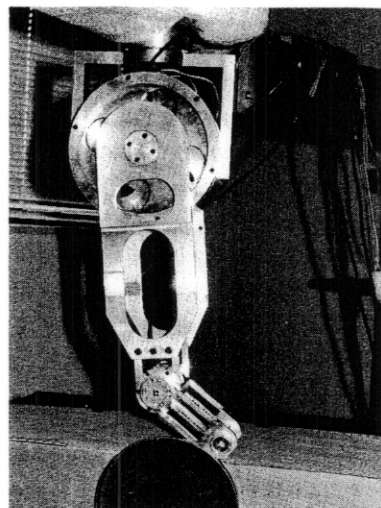


Fig.3 General view of the manipulator

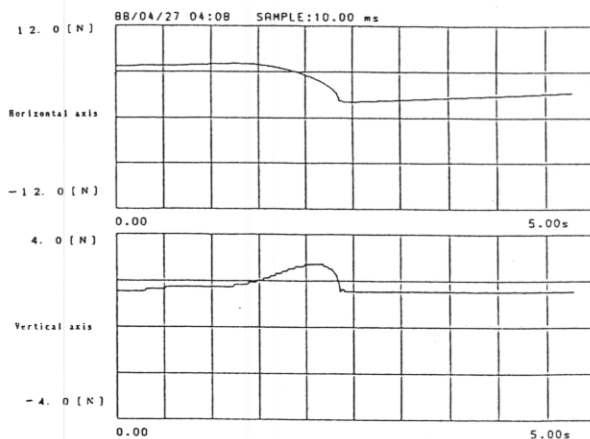


Fig.4 Data of impedance control

<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：Stable Execution of Contact Tasks using Impedance Control, Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Autom, 1987