

## バーチャルリアリティにおけるテレマニピュレーションの研究

### Tele-manipulation used for Virtual Reality

笠島 孝文\*1, 平松 誠治\*2, 加藤 厚生\*3

T. Kasashima, S. Hiramatsu, A. Kato

**Abstract** In the robotics, tele-manipulation is the technology that overcomes the problem of distance, gives the operator the sense that he is by the side of a slave robot. As for Virtual Reality, virtual space is the technology that operates from the actual space. There is no reality if the physical reflect force corresponding to contact can't be received. Therefore, I made the movements of the objects inside virtual space mimic the movements of the objects in actual space. And when users touch an object in the virtual space, they have the sensation of touching the object itself.

#### 1. はじめに

一般にテレマニピュレーションとは、人が近付き難い環境や遠く離れた場所においてロボットを作業させたとき、離れた場所にいる人間（操作者）がロボットのある場所であたかも直接作業しているかのような臨場感を与える技術である。

バーチャルリアリティにおけるテレマニピュレーションとは、実空間から仮想空間を操作する技術である。コンピュータ内における仮想空間と現実空間における人間との関係を扱うバーチャルリアリティの分野において、視覚情報の表示だけでは、仮想空間内で物体同士の接触が発生しても現実には環境からの反力を得られないため、仮想空間内で物体同士が突き抜けてしまう。すなわち、接触に応じた物理的な反力を受けることができないので仮想空間としてのリアリティが損なわれてしまう。本稿では現実空間の手先の動きに

仮想空間内の手先の動きを追随させ、逆に仮想空間の情報逆に仮想空間の情報から現実空間への力覚を呈示する手法について報告する。

#### 2. マスターアーム

テレマニピュレーションでは、操作者によって操られるマスターアームの動きを作業環境に配置したスレーブアームに伝え作業を実行させるマスタースレーブ制御<sup>2)</sup>が採用される。今回スレーブを仮想空間内の手先とし、壁に衝突した時に発生される反力をマスタ側に返す。実験に用いたマスターアームは次の検討を加えて製作した。マスターアームとするマニピュレータの駆動方式には、間接駆動方式と直接駆動方式がある<sup>3)</sup>。

間接駆動方式は、アクチュエータの駆動力を減速機、ワイヤ、ベルトなどを経由して関節に伝える方式である。この方式では、減速機等の比率により、小トルクのモータでも駆動できるという特長がある。一方、直接駆動方式は、アクチュエータの出力軸とアームの関節軸とをダイレクトに接続し、駆動力を直接伝達する方式である。減速機を用

\*1 愛知工業大学工学部電気電子専攻

\*2 愛知工業大学工学部電子工学科

\*3 愛知工業大学工学部電子工学科

いていないため原理的には正確なトルク制御・位置制御ができる。

- 本研究では、直接駆動方式を採用した。直接駆動方式は、
- ・ギヤのバックラッシュがないため、位置決め精度が高い。
  - ・ギヤの摩擦によるトルクのロスがない。
  - ・手先効果器の力調節をモータのトルクで直接制御できるので、高精度の力調節が可能。
  - ・減速機構によるトルクリップルがない。
  - ・保守やメンテナンスが容易である。
  - ・外部力による逆駆動が可能。
  - ・摩擦など非線形要素がないため、運動方程式がたやすい。

という長所をもち、能動形マニピュレータの抱える問題の抜本的な解析策となり、理想的なメカニズムであるが、いくつかの弱点や限界も指摘される。それは、

- ・駆動装置に減速増幅する機構を持たないので、モータは高トルク、低スピードである必要がある。そのため、モータの重量も大きくなる。
- ・高重量モータを直列アームの各関節に取り付けると、モータ自身の重さが下位関節モータの負荷になる。

ということである。

この問題を解決するために、パラレルリンクマニピュレータ方式がある<sup>4)</sup>。

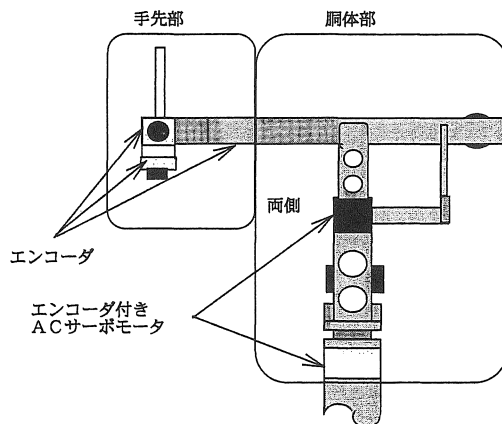


図1 パラレルリンクマニピュレータ

パラレルリンクマニピュレータは、駆動力を伝達するリンクを主構造リンクとは別に設けており、これによってモータの配置を自由に変える事ができるため、モータをペー

スに取り付けることができる。よって、上位モータの自重が下位のモータの負荷にはならず、リンク的重量の増加を防ぐことができる。さらにここでは、水平軸を駆動する2つのモータを同軸上に配置し関節運動の干渉をなくした。

また、手先部には関節を3個もたせた。そしてそれぞれの関節にアクチュエータのないエンコーダを取り付け、関節角度を検出できるようにした。

### 3. マニピュレータの制御方式

マニピュレータに用いる制御方法として、インピーダンス制御<sup>5)</sup>を行った。インピーダンス制御は、弾性制御や粘性制御を一般化したもので、マニピュレータの位置、速度と力の関係を制御しようとする方式である。

弾性制御とは、与えられた位置の変位に対して変位に比例した力を元の方向に発生させる制御方式で、弾性係数が一定ならばその力は加えられた変位に比例する。

これに対し、粘性制御とは位置ではなく速度に比例した力とその運動を妨げる方向に働かせる制御方式のことで、油や水の中を掻き回すときに働く力がこれにあたる。

この2つの性質をあわせてインピーダンス制御を行う。インピーダンスの要素として、他に慣性があるが、加速度が低いので省略した。

### 4. 仮想空間の構築と現実空間からの反映

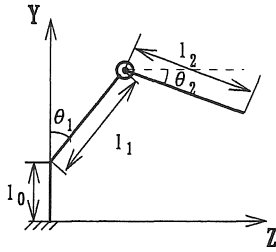
さて、マニピュレータの作業空間をディスプレイに表示する場合、3次元空間で任意の位置から眺めたシーンを2次元平面に投影して表示する必要がある。そのため、本質的に疑似3次元方式でポリゴンを用いて仮想空間を生成する。

3次元空間にある物体を扱う場合、その物体の状態を知る必要がある。状態は、空間内の物体の場所を表す位置と、その物体が向いている方向を表す姿勢がある。使用したマニピュレータは図1のように、角度検出エンコーダを腕体部と手先部にそれぞれ3個ずつ持つ。仮想空間上の手先位置はマスターアームの腕体部に取り付けたエンコーダによって検出する。そして姿勢は手先部に取り付けたエンコーダによって検出する。検出した6つの角度を使って、画面上の手先をマスターアームの動きに追従させる。手先の位

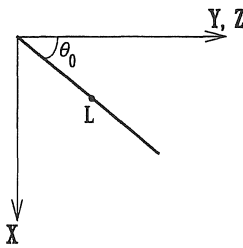
置、姿勢の計算は次のようになる

### 4.1 手先の位置

画面上的手先の位置は、算出した現実空間の手先位置で表わす。



1)横から見た図



2)上から見た図

図2 手先の位置

x, y, z 軸方向の各成分は、図2の1)から

$$y = l_1 \cos \theta_1 - l_2 \sin \theta_2 + l_0$$

図2の2)から

$$z = (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \cos \theta_2) \cdot \cos \theta_0$$

$$x = (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \cos \theta_2) \cdot \sin \theta_0$$

このx, y, zにより、手先の位置をディスプレイ上に表示する。

### 4.2 手先の姿勢

仮想空間上で動作する物体の姿勢を示すためには、座標系の回転を考えなければならない。このため、基本となるX-Y-Z固定角(回転座標系)の回転行列を求めた。

まず基準となるフレームを考える。手先の各軸に取り付けられたエンコーダからの角度情報をものにx, y, zの各軸まわりに基準となるフレームを回転させることで手先の姿勢を示す。

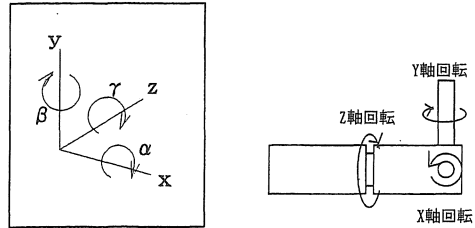


図3 基本フレームと回転方向

基準フレームDを次のように決める。

x軸を(1, 0, 0)

y軸を(0, 1, 0)

z軸を(0, 0, 1)

また、エンコーダからの角度を次のように決める

x軸まわりの回転角度 $\alpha$

y軸まわりの回転角度 $\beta$

z軸まわりの回転角度 $\gamma$

このフレームを使ったx, y, zの各軸まわりの回転は次のようになる。

まず、x軸まわりの回転 $\alpha$ を考える。

x軸を固定しそのまわりを回転させるので

x軸は(1, 0, 0)

y軸は(0,  $\cos \alpha$ ,  $\sin \alpha$ )

z軸は(0,  $-\sin \alpha$ ,  $\cos \alpha$ )

次にy軸まわりの回転 $\beta$ は

x軸は( $\cos \beta$ , 0,  $-\sin \beta$ )

y軸は(0, 1, 0)

z軸は( $\sin \beta$ , 0,  $\cos \beta$ )

z軸まわりの回転 $\gamma$ は

x軸は( $\cos \gamma$ ,  $\sin \gamma$ , 0)

y軸は( $-\sin \gamma$ ,  $\cos \gamma$ , 0)

z軸は(0, 0, 1)

手先部が、Z軸・X軸・Y軸の順番に回転するものと仮定すれば、回転行列は

$$\gamma \cdot \alpha \cdot \beta$$

で表される。

したがって, 回転行列は

$$\begin{bmatrix} s\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma + c\beta \cdot c\gamma & c\alpha \cdot s\gamma & s\alpha \cdot c\beta \cdot s\gamma - s\beta \cdot c\gamma \\ s\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma - c\beta \cdot s\gamma & c\alpha \cdot c\gamma & s\alpha \cdot c\beta \cdot c\gamma + s\beta \cdot s\gamma \\ c\alpha \cdot s\beta & -s\alpha & c\alpha \cdot c\beta \end{bmatrix}$$

この式により, 手先の姿勢を表す。

### 4.3 仮想空間への反映

前記の式によって計算された位置・姿勢で仮想空間内の手先を生成する。生成を随時行うことにより, 現実空間の手先の状態を仮想空間内の物体の状態に反映させる。

仮想空間上の手先の位置を現実空間上の手先の位置に反映させることは, ほぼ期待通りに実現できた。

また手先の姿勢は, 固定された基準フレームの3つの軸まわりにそれぞれ回転させることで表現される。しかし, スタート時における基準フレームからの回転で表示される手先の姿勢は, 実際の手先に追従するが, 次にその手先が姿勢を変える場合に現在のフレームを基準にとる為, ディスプレイされる手先と実際の手先にズレが生じてくる。またエンコーダの分解能が低いため, 誤差が次第に大きくなった。

## 5. 力覚呈示の実験

### 5.1 装置の概要

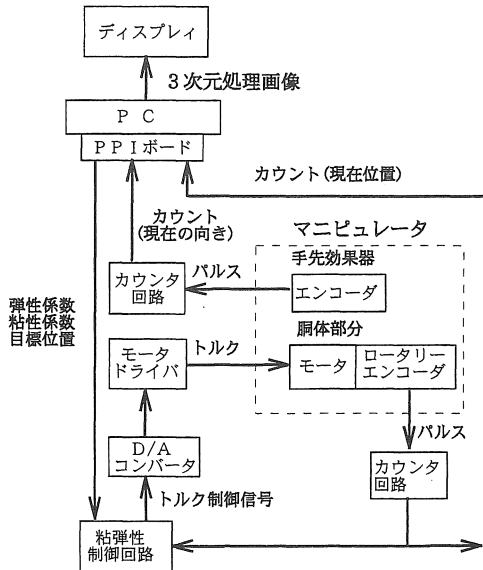


図4 装置の概要

実験装置の概要を, 図4に示す。マニピュレータの胴体部分と手先部のエンコーダからのパルスカウンタ回路によりカウントする。そしてそのカウントから手先の位置・姿勢情報が算出され, ディスプレイに3次元表示した手先をマスターアームの動きに追従させる。ディスプレイ上で接触が発生したときは, パソコンから位置, 弾性係数, 粘性係数として粘弾性制御回路へ指令値を送る。この粘弾性制御回路によってトルク制御信号に変換し, ACサーボモータにトルクを発生させる。

### 5.2 実験装置の構成

実験装置の構成は, 図5とした。まず画面上にマニピュレータと仮想物体を配置する。仮想物体は手先の初期位置の真下にセットし, 手先が仮想物体に接触したときに反力を返す。

仮想空間で実現するとき, 理想的な接触では仮想物体面上で手先を滑らせる動作ができるべきだが, インピーダンス制御では弱く接触した状態でマニピュレータに呈示される力は非常に小さい。そこで, 十分な力を呈示するために物体中への手先の侵入を許した。実験では, 現実空間に2cm間隔の格子状のマスを水平に設置し, このマスにマニピュレータの手先効果器を通し, 先端を2.5cm沈ませたときに発生する力を, ばねばかりによって測定した。反力は, 手先を物体の表面まで押し返す力と, 進入速度に比例する粘性によって表現される。しかし, この実験では, 静止状態で実験したので, 粘性力は発生していない。

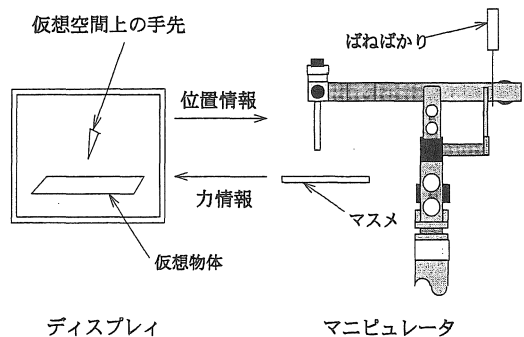


図5 力学提示実験装置の構成

### 5.3 実験結果

測定は、手先がマニピュレータ胴体の手前20cmの場所を基準とし2cm間隔で左右+-10cm 手前へ16cmの範囲で行った。実験結果は次のようになる。

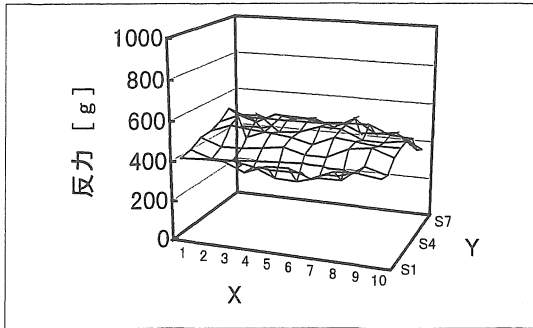


図6 実験結果

### 5.4 結果の考察

仮想空間上に平面を設定し、反力の一様性を実験した。グラフを見ると、表面に凹凸が発生している。この原因として、次のような原因が考えられる。

第1に手先部は自由な姿勢をとりえるため、マスメへの進入角度に偏差がある。第2に、ばねばかりの読み取り誤差があげられる。これは、ばねばかりの弾性とモータに与えた弾性によって発生する、振動が原因である。第3に、マスメと手先の接触による摩擦があげられる。接触しないように測定は注意して行ったが、接触した可能性を否定できない。

測定結果では、関節角度による反力の増減が見られる。そのため、重力補償を行ったが稼働範囲全域にわたる補償は実現できていない。今後の研究である。

## 6. まとめ

現実空間の手先の位置をマスターアームに取り付けたエンコーダから読み取る事によって仮想空間内の手先位置を決定し、また仮想空間内で発生した接触を現実空間のマスターアームに反映させる実験を行った。これにより、仮想現実感における臨場感を向上させる事が出来た。

実験では、マニピュレータの位置を画像へ反映させる事は、ほぼ期待通り実現できた。しかし、マニピュレータの手先効果器の姿勢は、軌道の取り方によっては誤差が累積し、画像中の手先の位置とのずれが次第に大きくなった。この原因は、手先のエンコーダの分解能不足にある。

現実空間内の接触を現実空間に反映させる実験では、凹凸はあるがおおむね平面を表現する事が出来た。このことにより、接触判定の条件を変える事により立体を表現する事が可能となる。

### 参考文献

- 1) 佐藤知正, テレロボティクス研究の動向  
日本ロボット学会誌 Vol.11 No.6,p777~p781,1993
- 2) 横小路泰義, マスタースレーブ制御の理論  
日本ロボット学会誌 Vol.11 No.6,p794~p802,1993
- 3) 日本ロボット学会編 ロボット工学ハンドブック  
p190~p192
- 4) 浅田春比古, DDロボットの構造設計  
日本ロボット学会誌 Vol.5 No.1,p48~p53,1987
- 5) 小菅一弘, 力制御の分類と制御システムの設計法  
日本ロボット学会誌 Vol.9 No.6,p751~p757,1991

(受理 平成10年3月20日)