

# 広可動範囲フォースディスプレイの開発

岩田 洋夫・中川 隆志・矢野 博明 (筑波大学・構造工学系)

**Abstract:** In proportion to the generalization of virtual reality, need for force feedback has been recognized. We have developed mechanical manipulators as force display for virtual environments. This paper describes a method of developing the force display system which covers all the working volume of human arm. The force display consists of 6DOF serial linked manipulator for arm and compact force display using strings for fingers. These devices are controlled personal computers and V25 board computers. Using this system, we observed the motion characteristics of human arm in transforming virtual objects. The system is planned to be applied to cooperative working environment for multiple users.

**Keywords:** virtual reality, force display, master manipulator, cooperative work

## §1 はじめに

近年、情報技術の進歩は著しく、計算機から得られる情報は膨大なものになっているが、人間とのインターフェースは視覚によるところがほとんどである。ところが、人間が外界を認識する場合、視角、聴覚、触覚といった感覚器官を統合する機能が駆使されている。

この観点より、「人工現実感」に関する研究では、仮想世界内の仮想物体を認識し、直接手を使って操作する際、視覚だけでなく、触覚などの体性感覚を提示することができるデバイスの開発が求められている。本研究では、人間の腕全体の動きに追従できる大きな可動範囲を想定した6軸リアルリンク型のマニピュレータと、糸を利用して指先の位置を計測し同時にモーター及びク

ラッチ機構を用いて反力を提示する装置と組み合わせて広可動範囲のフォースディスプレイシステムの開発を行った。

このシステムにより仮想空間内での腕の位置、指の位置を計測し、腕と指に反力を提示することにより仮想物体の重量と、把持対象物の硬さを認識させることが可能である。

また、ハンド部フォースディスプレイに対して、有限要素法を用いて仮想弾性体モデルを表現する試みを行った。

広可動範囲フォースディスプレイシステムを用いて腕全体を使って作業をする場合と、指先だけを使って作業する場合の違いを調べるため、作業対象物の移動経過を見る実験を行っている。

---

Development of a Force Display for Large Working Volume  
IWATA Hiroo, NAKAGAWA Takashi, YANO Hiroaki (Institute of  
Engineering, University of Tsukuba)

現在、これらのフォースディスプレイをはじめ、我々の研究室で開発されたフォースディスプレイ、HMDを通信により結合し、複数の人間が仮想空間を共有する協調作業システムについて研究を進めているがこれらについてその概要等を報告する。

## § 2 システム構成

本研究で開発したシステムは、腕全体の動きに追従する6軸シリアルリンク型マニピュレータ、及びマニピュレータの手先部に取付けられた糸とモーター及びクランチ機構を制動装置として利用し指先に反力を生成させるハ

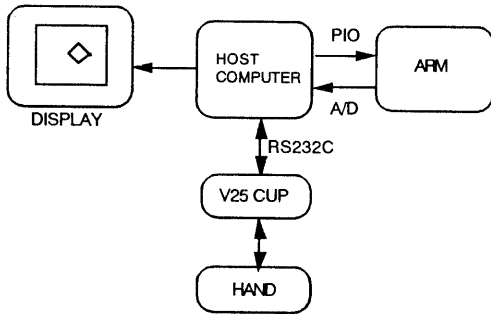


Fig. 1 広可動範囲フォースディスプレイ構成図

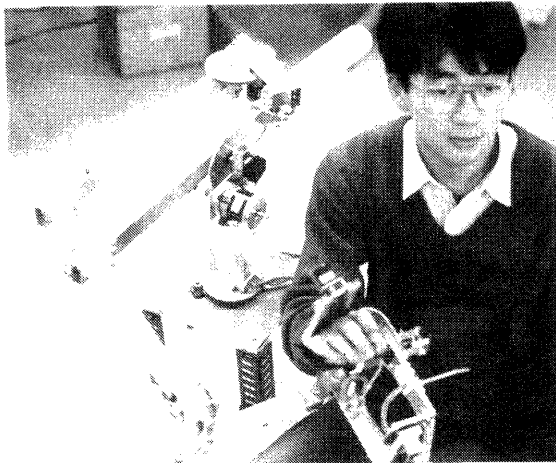


Fig. 2 マスターマニピュレータの装着の様子

ンド部、ハンド部を管理するためのV25CPUボード、これらの装置を総括的に管理し仮想世界の幾何モデルを管理する計算機からなる。(Fig.1 Fig.2)

本システムは6軸シリアルマニピュレータとハンド部がそれぞれ異なる計算機によって管理されているという特徴をもつ。ハンド部に関してはシリアルマニピュレータ以外の別の装置と結合させて使うことができるようにV25CPUボードで指先の位置計測及び反力の計算を行い、RS232Cを通じて他の計算機との通信を可能にしている。また、ハンド単体だけでも動作するように作られている。

シリアルマニピュレータ及びハンド部の各軸にモーターが取付けてあり、それぞれのモーターのトルクを制御することにより任意の方向に反力を発生することができる。

さらに反力を提示できる範囲が人の腕の可動範囲のほとんどを包含しており指先を使ったこまごました作業から腕全体を大きく動かしてする作業まで幅広く対応できることも特長である。

現在、広可動範囲フォースディスプレイ、視覚情報を提示するHMD (Head Mounted Display)を1ユニットとして、複数のユニットを結合し、複数の人間が一つの仮想空間内で協調して作業するシステム(協調作業システ

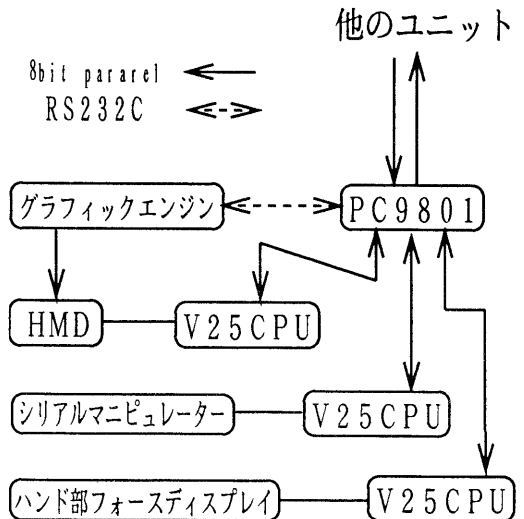


Fig. 3 協調作業システム構成図

ム)の研究を進めている。

協調作業システムのシステム構成図をFig.3に示す。この図は1人分のユニットで、同一のユニットが人数分必要となる。

仮想空間幾何モデルの管理と他のユニットとの通信をPC9801が行い、シリアルマニピュレータ、ハンド部、HMDはV25CPUボードを使って制御し、位置情報、幾何モデル情報などをPC9801と交換している。グラフィックエンジンはHMDのための3次元の視覚情報を作成、表示する。各PC9801が持つ幾何モデル情報の交換には高速通信が求められるため8bitの複送路双方向パラレル通信をおこなう。各V25CPUボードとPC9801間の通信には8bit単送路双方向パラレル通信をおこなう。グラフィックエンジンとPC9801間の通信にはRS232Cを用いる。

仮想空間の幾何モデルの管理は、各ユニットごとにPC9801が一括して行う。処理の流れをfig.4に示す。デバイス管理部ではユニット内のフォースディスプレイの位置を計測し、内部と外部のユニットの位置情報を交換する。オブジェクト管理部はデバイス管理部から内外を問わず全てのデバイスの位置情報を得て、各オブジェクトとの干渉チェックの後、デバイスの位置を確定する。仮想空間イメージ作成部では、デバイスとオブジェクトの位置情報と、描画情報データベースが持つデバイスとオブジェクトの属性をもとに仮想空間のイメージを作成し、HMDに出力する。

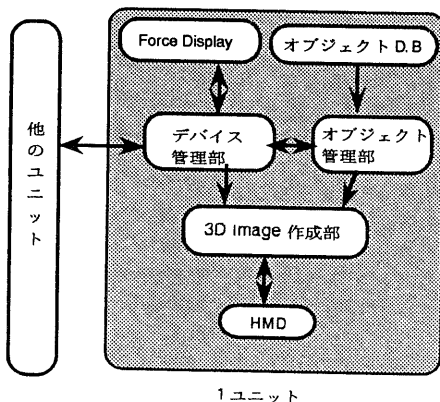


Fig.4 協調作業システムの処理の流れ

協調作業システムのアプリケーションとしてシリアルリンク機構を対象としたCADシステムを作成する。

このシステムでは、仮想空間内でリアルタイムにシリアルリンク機構をデザインし、作成されたリンク機構をデバイスを介して手にふれ、動かすことができる。また、可動範囲や特異点をユーザーに示すことにより直感的に製品の評価をする事を目標にしている。複数の人が仮想空間を共有することができるので、熟練者が初心者に対して教育することも可能である。

### §3 ハンド部

手にフォースディスプレイを装着した様子をFig.5に示す。

現在、指に反力を返して触覚情報を与える機構は主に、リンク機構にモータを使ったものや、糸の張力を利用したものが考えられている。リンク機構は可動範囲を大きくとれる反面、自由度が増すと機構が複雑になり制御がむずかしいという欠点を持つ。一方、糸は可動範囲は少ないが指の動作を拘束しないという利点がある。手の甲に装着して指先に反力を与えるようなフォースディスプレイを構成する場合には、指の可動範囲が小さいため糸の持つ利点を生かすことができる。

把持対象物が剛体の場合と弾塑性体の場合では、指にかかる反力の質が著しく異なる。そこで本システムではクラッチ機構によって剛体の表面を表現しDCモーターによって弾塑性体の変形時の反力を表現する方式を採用している。

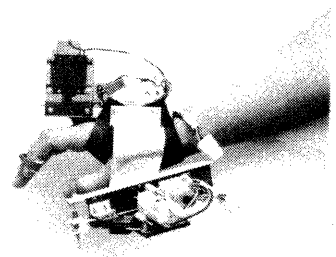


Fig.5 ハンド部装着図

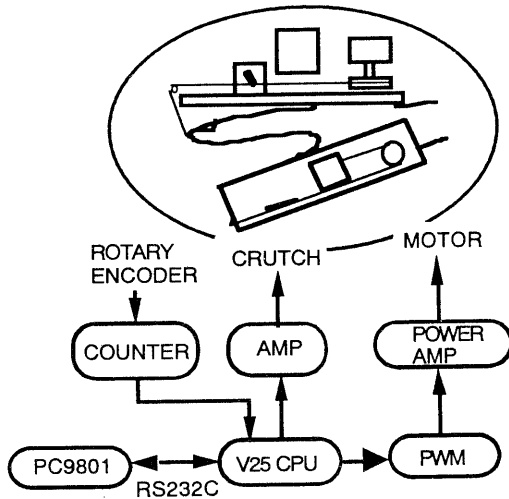


Fig. 6 ハンド部構成図

ハンド部の1チャンネル分のシステム構成図(Fig. 6)を示す。一端を指に取り付けられた糸はプーリーを介しクラッチ機構を経てロータリーエンコーダーにつながったプーリーを回転させモーターの糸車につながっている。この図は人差し指のものであるが、親指も同様のシステムであり、対象とする指の本数だけのチャンネルを増設すればよい。

糸は可動範囲が大きく取れないという欠点を持つが、Fig. 6のようにプーリーを設置すれば指の全ての可動範囲に対して反力を提示することができるほか、多少の手の大きさのばらつきに対しても違和感なく装着することができる。

仮想立体の硬さを表現するには、それに触れたとき指に返す反力を適切に制御する必要がある。つまり、仮想立体が剛体に近いほど、指に返す反力のゲインを大きくすればよいことになる。アクチュエータにモータだけを用いた場合、モータのトルクの限界から正確な指の位置制御が難しく、仮想剛体に指がめり込むという現象が起きる。このため、クラッチ機構を用いて糸の動きを止め剛体表面のめり込みを防いでいる。一方弾性体の表現は糸の端をモータで巻きとり、指に返す反力を制御する方法を用いている。

また、指先の位置を求めるために、ロータリーエンコーダで読みとった糸の長さを対応させるテーブルを、実測した指先の位置から製作した。指の動く位置は、このテーブルの値より求められる。

この機構は手の甲に固定されたマニピュレータ上に収まっているため、腕の動きは制限されることが無く、フォースフィードバックを実現している。

ここで、仮想弾性体モデルを表現するためには有限要素法による挙動解析を行わなければならない。しかし、人工現実感システムではリアルタイム性が必要条件であ

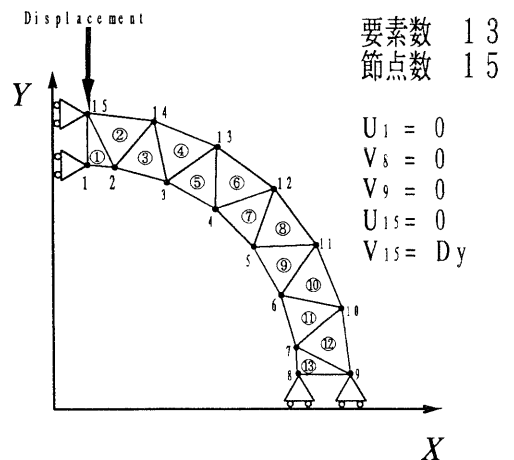
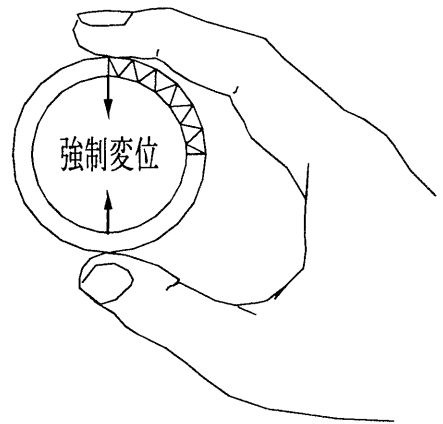


Fig. 7 仮想リングの有限要素解析

るため、弾性体モデルを扱うのは非常にむずかしい。ここでは弾性体の表現を実現するための一つの試みとして、Fig. 7のような弾性体平面リングを扱うアプリケーションを作成した。指の動きに応じたリングの変形と、それによる反力をリアルタイムで計算することは必要である。そのため平面リングの対称性から右上4分の1を対象にあらかじめ有限要素解析を行い、各変形量に応じたリングの形状とそれに伴う反力をテーブル化し、これを参照する方式をとっている。

#### § 4 アーム部

本研究で開発されたシリアルマニピュレータは腕全体の動きに追従するような大きな可動範囲を持つ6軸シリアルリンク型のマニピュレータである。このマニピュレ

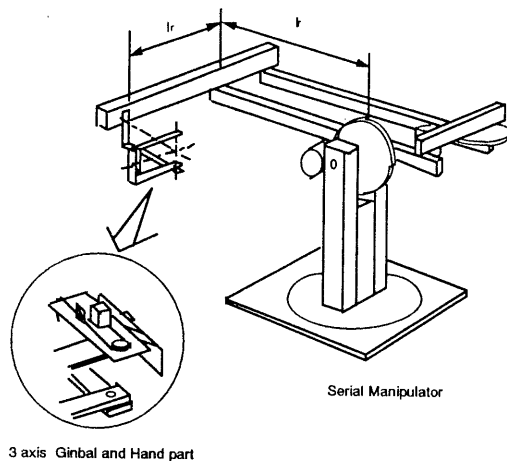


Fig. 9 アーム部機構図

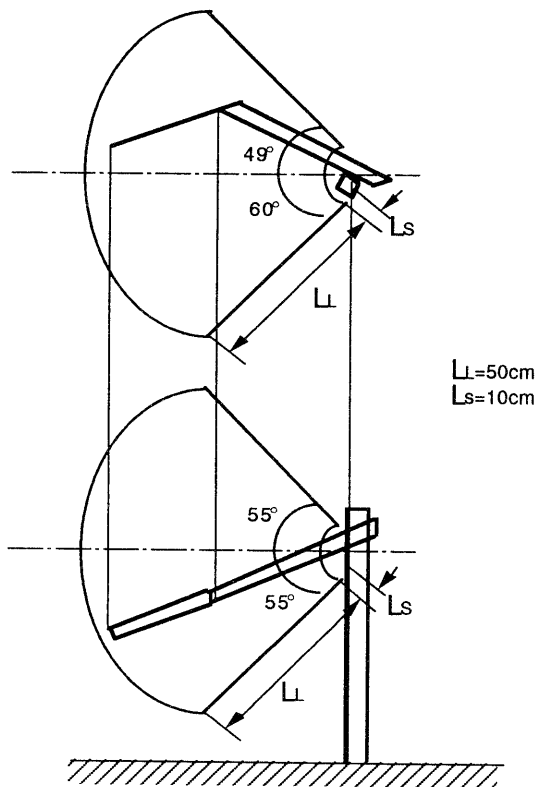


Fig. 8 アーム部可動範囲図

ータは作業者の腕全体の動きに伴う作業に対応するために、各部の関節位置、腕部のリンク長等を、人間のサイズ及び骨格に合わせた設計となっている。マニピュレータの可動範囲は、水平方向には $+60^\circ$  から $-49^\circ$  までの範囲で半径60cmの扇状で鉛直方向では $\pm 55^\circ$  の半径60cmの扇状である。(fig.8)

具体的には、肩に当たる関節に2軸、肘関節に当たる部分に1軸の計3軸によって手先の並進に関する動きに追従する。手首の部分には3つの回転軸がありそれらの軸が1点で交わるようにリンクを組み合わせてジンバルを形成し、手首の回転に関する動きに追従している。(fig.9)

ジンバル構造にすることによって、手の平の位置はジンバルのついているアームから見ていつも同じ位置に存在し、基準座標系から見た手の平の位置は腕の部分の動きだけに依存することになる。従って、手の平とは独立して指先だけを動かすことが可能となり、また指先乗位置の計算も比較的容易になっている。

このマニピュレータの各軸にはポテンショメータ及びDCモーターが配してある。ポテンショメータの値をA/D変換することにより各関節の角度情報を得、その情報を元にしてモーターにより反力を提示する。尚、このポテンショメータの測定範囲は $\pm 150^\circ$ 、0.07°の精度で角度検出ができる。この情報を元にして同次座標変換行列によって手先部の位置及び姿勢を計算する。

このときの手先の位置の精度はマニピュレータと計算機を結ぶ信号線にのるノイズ等の原因により $\pm 0.25$  cm、姿勢（オイラー角）は $\pm 0.5^\circ$ となっている。

特定の大きさと方向の力や偶力を出すには、どのモーターにどれだけのトルクを出させればよいかは、各軸の角度情報をもとにベクトル計算で求めることができるので、ハンド部に固定する操作者の手に適当な反力を発生させることが可能となっている。この反力は並進で最大約400 g重、回転偶力は最大約200 g重・cmとなっている。それぞれの変換式に関しては後ほど述べる。尚、力センサーなどによるフィードバックは行っていない。

パーソナルコンピューターとのインターフェイスは12ビットA/Dコンバータを入力とし48ビットPIOを出力としている。

計算機の内部で行なっているのは、手先の位置変換の方法及び反力の計算でありその方法について述べる。

手先の位置と姿勢を求めするために本システムでは同次変換行列を用いている。

本システムではアーム部のマニピュレータの土台の底の中央を原点に取ったワールド座標系から見た、手先の位置を求めている。前述のように手先の位置と姿勢はジンバル構造にすることによって、位置と姿勢を分離して考えることができるので最終的に求まった変換式は、かなりシンプルなものとなっている。

反力はそれぞれのモーターによって手先に提示される力ベクトルをすべて足しあわせてx、y、z軸方向の力を求めその行列を逆変換することによってもとめている。このときもアーム部のジンバル構造から並進と、回転について別々に求めることができる。

また、このアーム部には2つの特異点が存在する。そのうちの一つは操作者が手に装着して使用する場合、通常ではとらない姿勢なので問題はない。

しかし、もう一つの特異点は手を肩関節近くにもって来たときに、肩の軸とジンバルの軸の一つが一直線になることで、生じるもので、腕部分はその軸を中心として自由に動くようになる。さらに、大抵の場合、腕部が自重で下がってしまうので操作者の腕を動かしくなってしまう。

この特異点に対し本システムでは、特異点領域も狭いことを考慮して、特異点領域に入ったときは領域に入っ

たときの姿勢を保つように肩関節の位置を保持している。また、特異点領域に入った場合反力提示は行なわないようにしており、肩の角度を保持することで腕部の下がり回避している。このようにすることで、特異点での操作性がかなり改善されている。

## §5 実験

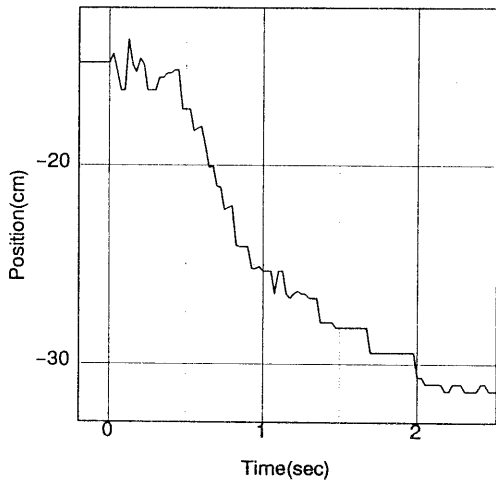
我々が、日常絵などを書くとき、ラフなスケッチを書くことがある。スケッチを書くスペースがあまりないなどといった場合は別として、そのようなときは完成した絵がどんなに大きくても小さくても形が相似で書く人に固有な大きさになっていることが多い。スケッチなどは形がわかればいいわけであってその大きさを普段気にして書くことは少ない。したがってこれは、ものを書いたり、動かしたりするときに、書きやすい大きさ、動かしやすい大きさがあることを意味しており、大きい絵を書くような腕全体を使った作業と、小さな絵を書くような指先だけでする作業の間に何らかの違いがあることがうかがわれる。このような観点から、手先だけで行なう作業と腕全体を使ってする作業の間にどのような違いがあるのかを調べるために、本研究で開発したフォースディスプレイを用い、仮想空間内の正方形の大きさを変えするという作業を行なった。そしてその物体の頂点の動き方に焦点を絞りどんな特徴があるのかを見る実験を行なった。

まず、仮想空間内に正方形を1対角線が鉛直方向と一致するように置き、各頂点をつかんで対角線の長さが2倍になるまで引き伸ばすというタスクを対角線の長さ30cmのものと2cmのものの2種類について被験者に行なってもらい扱う対象物体の大きさによって各頂点の動きの違いがあるのかどうかを観察する実験を本研究で開発したフォースディスプレイを用いて行なった。

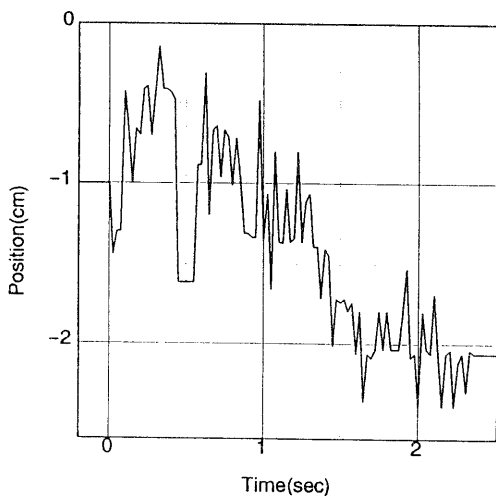
実験ではまず計算機のディスプレイ上に被験者の仮想世界での手の位置および仮想正方形、目標地点をグラフィックスで提示する。本実験では、HMDなどの立体視を可能にする装置は特に使用していない。奥行き情報は、床面を表示させそのうえに正方形や手の位置を投影することで被験者に与えている。表示する正方形の大きさはディスプレイの画面が実際の大きさを表現するには小さすぎるため、対角線の長さ30cmの仮想正方形は大きさ

が60cmになったときにディスプレイに入りきるような大きさを約8cmにし、2cmのものはこれと等倍率にすると見えなくなってしまうので約3cmで表示して大きさが違うことがわかるようにしてある。

仮想正方形の頂点を把持するには、把持点に指先を持っていき、指を閉じるとアーム部が反力を提示しハンド



対角線長さ30cm



対角線長さ2cm

Fig. 10 指先位置の時間変化

部のクラッチが閉鎖することによって頂点をつかんだことを表している。頂点をつかんだかどうかの判定は、親指と人指し指の指の距離が最小になっていることと、正方形の頂点と指先の距離が判定距離内であることという2つの条件でおこなっている。また、頂点を把持した場合、手先の仮想空間内の座標が頂点の座標に一致するようにしてあるので、指先を移動させるべき距離は頂点を把持したと判定されたときの指先の座標に関係なくはない。頂点を把持した際に提示する反力は把持する直前の頂点の位置からの距離に比例し、ばねのように反力を返す仮想物体を想定している。対角線長さによって小さいものはゲインを大きく、大きいものはゲインを小さくとってある。

実験は対角線距離の大きいものと小さいものそれぞれ5回ずつ測定を行なった。測定の際に被験者には小さいものを動かすときにはなるべく手先だけで動かすようにという指示を出した以外は自由に行なってもらった。測定したデータは各頂点の位置で、25msecに1回測定している。また座標変換及び反力の計算は約50Hzで、グラフィックスの更新は5から6Hzで行なっている。

実験によってえられた各頂点の座標から、各点の始点から目標点までの最短距離方向で原点を正方形の中心にとったものを縦軸とし、横軸を把持した点を0secとした時間にとったグラフを示す。(fig.10) このデータは被験者の学習効果を考慮して一番最後の実験のデータである。

得られたデータから手先だけで頂点を動かす場合頂点を等速で動く傾向があり、腕全体で動かす場合は始めに早い速度で動きその後ゆっくりした速度で動くという傾向が見られた。

これは、動かす距離が大きいとまず始めに大きく動いて目標点付近で正確な位置合わせのために速度を落としている結果であると思われる。

指先だけで動かす場合は動かす範囲が非常に小さいため、始めから位置合わせをする速度で動かすので速度変化が見られないと思われる。

対角線長さ2cmのものの手の動きがかなりぶれている理由は、ポテンショメータのノイズによる振動と、アーム部の軸受けの座りが悪くモーターのトルクがかかるとアーム部全体が偏心を起こしがたつてしまうことによる手先のぶれなどが考えられる。

## § 6 まとめ

本研究では、人間が仮想空間内で仮想物体をつかんだときなどに反力を提示する広可動範囲のフォースディスプレイの開発を行なった。

仮想の正方形をこのフォースディスプレイを用いて引き伸ばすというタスクを被験者にやらせてもらうことで腕全体の作業と、指先だけの作業とで、その遂行の仕方に違いがあるのかを見る実験を行なった。この実験から、腕全体の作業では腕を動かすときにまず目標点近くまで移動してその後正確な位置決めをしていること、指先だけの作業では、正確な位置決めをすることが主になっていることがわかった。

今後の展望として、手先部の重さが約1kgとかなり重いので腕が疲れたり、慣性が大きいので動かすにくいことも、今後このシステムを運用するにあたり障害になることが考えられる。よって自重を軽くし、モーターによる重力補償を行なうなど対策を考える必要がある。

尚、本研究は（財）東電記念科学技術研究所の助成の元に行なわれた。

## 参考文献

- [1] 岩田,中川,中島：仮想立体の硬さを表現するためのフォースディスプレイ,第7回ヒューマンインターフェースシンポジウム,pp55-58(1991)
- [2] 竹村,岸野：人口現実感を利用した協調作業環境について,第7回ヒューマンインターフェースシンポジウム,pp571-576(1991)
- [3] 岩田,野間：人口現実感を利用した遠隔共同作業システムの試作,第6回ヒューマンインターフェースシンポジウム,pp231-234(1990)