

〔公 開〕

TR-C-0140

V R 研究における力覚提示装置の  
分類と T O C U S を利用した  
試作装置の提案

野間 春生  
Haruo NOMA

宮里 勉  
Tsutomu MIYASATO

岸野 文郎  
Fumio KISHINO

1 9 9 6 3 . 1 5

A T R 通信システム研究所

# VR研究における力覚提示装置の分類と TOCUS を利用した試作装置の提案

野間 春生

ATR 通信システム研究所

## 1. はじめに

頭部搭載型ディスプレイ (HMD: Head Mount Display) と特殊手袋を用いた手形状入力装置、磁気3次元位置姿勢計測装置 (磁気センサー) による全く新しいインタフェースが1986年にFisherらにより提案されて以来 [1]、計算機内部に構築される仮想の世界をあたかも現実の世界であるかのごとく模倣して再現し、ユーザーに体験させる手法が人工現実感 (Virtual Reality) と名付けられ、広く研究され実用化されてきた。

Fisherらのシステムは現在までに提案された多くのVRシステムの基本構成となっている。彼らのシステムではユーザーの視点移動を磁気センサーにより計測し、仮想世界で対応する視点からの立体CG映像をHMD内に表示した。また、特殊手袋と磁気センサーによってユーザーの手形状と手先位置情報を計測し、実世界で自身の手が本来存在する位置に装着者の指先の曲げ動作にまで連動した手首のCGをHMD内に表示した。これらのような自身の体の動きに連動したCG映像と自分の手を用いた直感的な仮想物体の操作手法により、ユーザーは現実感のある仮想世界を体験できた。

Fisherらのシステムから現在に至るまで、多くのVRインタフェースは人間の諸感覚器への物理的刺激の入出力のレベルで仮想世界をシミュレーションするように設計

されている。従って本編では人間の諸感覚への入出力関係の面から既存のVRデバイスを検討してみる。人間の感覚機能を分類すると、図1に示すように、特殊な感覚器官によって知覚されるため特殊感覚と呼ばれる視覚、聴覚、味覚、嗅覚、平衡覚に加え、皮膚感覚と深部感覚からなる体性感覚 (Haptic sensation) に分類可能である。皮膚感覚はさらに触圧覚と温冷覚、深部感覚は運動感覚、位置覚、深部圧覚に細分類される。

これらの諸感覚の中でも研究と実用化が進んでいるのは、視覚、聴覚、および体性感覚に関するインタフェースである。(表1) VRインタフェースを感覚へのフィードバックとみなした場合、視覚に関しては、利用者の目の位置を入力とし、視点位置に追従した立体画像提示装置による視覚情報でフィードバックを構成する。この時、ユーザーは運動感覚と位置感覚 (kinaesthetic sensation) により自分の姿勢を制御し、これらから得られる空間的情報と視覚情報の統合の結果として視覚の臨場感が形成されると考えられる。聴覚に関しても同様に、耳の位置を入力として3次元音場生成を行い、ユーザーは視覚の自身の位置姿勢の制御情報と聴覚からの情報を統合して臨場感を強化していると考えられる。これらの場合、単に目や耳などの感覚器だけでなく、身体の姿勢情報が重要な役割を果たしている点がVRインタフェースの特徴で

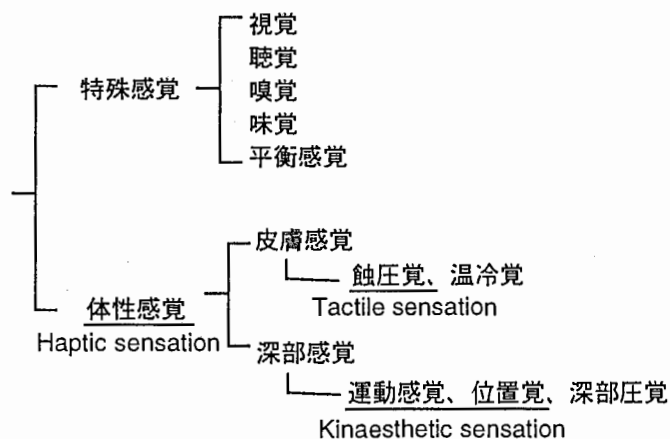


図1 感覚の分類

	Input	Output Device
Visual Sensation	Position of user's eyes	3D Display : HMD, Large screen
Audio Sensation	Position of user's ears	3D Acoustic Display
Haptic Sensation	Position of user's body	Mechanical Link Device

表1 感覚へのフィードバック手法

ある。

一方、体性感覚に対しては、ユーザーの体各部の位置情報を入力として、装着者の体性感覚に対して物理的な刺激を提示可能な装置によるフィードバックをおこなう。この際に問題となる点として、体性感覚に関する感覚器が触覚に相当する皮膚触覚や関節の曲げ角などに相当する深部知覚といった身体全体に網羅されたセンサー群であり、それぞれの感覚器に対応した個々のセンサーと刺激提示装置 (Haptic Display) が必要となる。

次章以降においてこれまでに報告されてきた多様な Haptic Display 関連の研究例について、その提示可能な感覚刺激と使用形体に基づいた分類を与える。さらに、ATR 通信システム研究所で進められてきた臨場感通信会議システムでの利用を目指して開発したトルク制御型超音波モーター TOCUS ( Torque Controlled Ultra Sonic Motor) を用いた Force Display の構成と試作 TOCUS の特徴と性能についてまとめる。

## 2. Haptic Display の分類

前章で述べたように、体性感覚 (Haptic Sensation) とは身体の位置姿勢や身体に直接作用する物理的刺激に対する感覚であり、そのセンサーである感覚器は全身に分布する。従って、体性感覚全般に対して作用可能な理想的な Haptic Display の実現はデバイスの物理的 (機械的) 制約により難しい。例えば、ある物体を掴んで持ち上げる動作に関連する体性感覚を提示しようとするならば、

接触する全ての指先に与える触覚感と腕全体に対する挙重感を同時に再生せねばならない。しかし、触覚感と挙重感は提示する刺激の強度や振動数が大きく異なるため [2,3]、指先だけ、あるいは、腕全体といった単一の機械式の刺激提示装置では実現が難しくなる。必然的に、これまでに行われてきた多くの Haptic Display の関連研究では、全身に分布する体性感覚の中のある一部の感覚について一般化した装置、あるいは、目的を高度に特化した装置の提案となる。従って、本章では既存の研究例に対して Haptic Display の刺激提示の方式に基づいた分類と整理を行う。

本稿で提案する分類を図 2 に示す。ここではまず刺激を提示する部位について、手先 (腕部全体)、指先 (触覚)、その他部位の 3 項目について分類し、さらにそれらを刺激提示の方式について分類する。ここで示す分類項目では、特に腕部に関する Haptic Display を中心とした。これは Haptic Display の応用分野として、ユーザーの手を用いて遠隔操作や 3 次元 CAD でのオブジェクト操作の高精度化・高効率化・高臨場感生成を目指す研究例が多勢を占めるためである。腕部以外への Haptic Display としては歩行感覚や平衡感覚などの、全身的な感覚に対するデバイスが提案されている。

以降では、この分類に対して特徴と研究例を示す。

### 2.1 手先 (腕部全体) への Haptic Display

体性感覚を対象とする VR 研究の中でも、腕部、特に手先への力覚の提示を行う装置に関する研究例が数多い。この分類に含まれるインタフェースは、仮想物体を把持した時の指先への把持感、持ち上げて移動させた際の重力や慣性による挙重感、さらに把持した物体へ作用する他の物体との衝突感など、比較的マクロな力学的刺激 (操作反力) を対象として、身体各部に提示するデバイスを用いたものである。一般にこれらの操作反力提示を行うためのデバイスは Force Display と呼ばれる。Force Display の必須条件として、身体各部に操作反力を作用させる結果生じる反作用を支持する力学的な関係を身体各部と地面との間に構築せねばならない [4]。本分類では、主にリンク構成 (マニピュレータ) 又は糸による張力などによる機械的な作用を用いている。

ここではさらに操作反力を提示する手法として、操作型と環境提示型の 2 グループに分ける。操作型とは、何らかのデバイスを装着し操作することにより操作反力を得る手法であり、一方、環境提示型とはユーザー側には一切の装置を取り付けず、デバイスが擬似的に物体を生成する手法である。

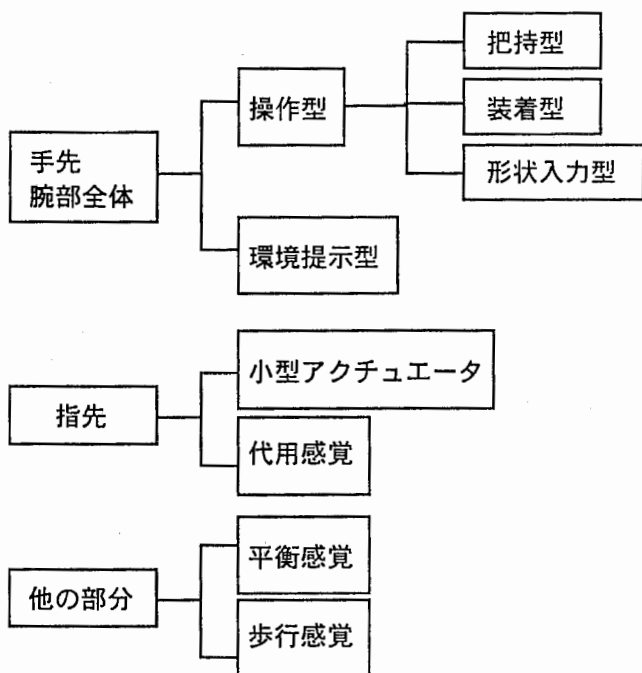


図 2 Haptic Display の分類

### 2.1.1 操作型

操作型は利用形態により、a) 把持型、b) 装着型、c) 形状入力型にさらに分類される。この項目について研究例をもって解説する。

#### a) 把持型インタフェース

把持型のインタフェースは、一般的には通常のロボットアームの先端にグリップを取り付け、利用の際のみユーザーがこのグリップ部を把持して操作入力を行う形態をとる(図3)。人間がグリップ部を握った際にマニピュレータがユーザーの動きを疎外しないためには、グリップ部に並進と回転の6自由度を与えながら、同時にユーザーの手先の到達可能領域内を十分に包含する稼動範囲が要求される。さらに、グリップ部にはユーザーが作用させる腕力を支持可能なだけの平行3軸および回転3軸の6自由度に対応可能な操作反力が要求される。また、マニピュレータの構造部材の慣性や重量を考慮した剛性の高い力制御系が要求される。実際に自由度と稼動範囲、操作反力の面ですべて実現可能なマニピュレータは複雑な構成になり、あわせて高速な制御系が必要となる。したがって、それぞれの項目のトレードオフをとりながら、応用分野をある程度限定したForce Displayの提案が数多くなされている。以下にこの分類に属する研究例を示す。

可動範囲を重視し、大型の6自由度マニピュレータを用いた例として、Brooks [5,6]らは蛋白質分子の合成のシミュレーションの支援を目的としたGROPE-IIIを提案した。ここでは天井から吊り下げる形式の大型6自由度マニピュレータを用い、映像情報としてユーザーの正面に大型プロジェクターを配置して、仮想空間内の分子を接合させる際の結合エネルギーの変化を操作反力により提

示している。同様のシステムとして、福井 [7]らはボールネジとウォームスクリーを用いた高剛性・高精度のCartesian Manipulatorを、神徳 [8]はダイレクトドライブモーターを用いた吊り下げ型の高剛性Force Displayを、足立 [9]はデスクサイド型の高剛性Force Displayをそれぞれ提案している。

一方、Force Displayの小型化を目指した研究例として、岩田 [10]は小型の3自由度マニピュレータ2基を組み合わせたペンタイプのForce Displayを提案し、仮想空間内でペン先を数種類の道具に変更しながら物体の変形作業を実現した。野間 [11]はデスクトップに配置可能なパラレルリンク型の6自由度Force Displayにより、本来不可視情報である翼周りの流れ場の圧力や流速を力覚により提示するシステムを提案している。ここでは、稼動範囲を半径30cmの半球内に制限し、6自由度の十分な操作反力を実現したForce Displayを用いた。Millman [12]は回転2自由度を切り捨て、稼動範囲と操作反力の面で優位な4自由度のForce Displayを提案した。吉川 [13]は2基の小型3自由度マニピュレータにインピーダンス制御を用いて物体の慣性や摩擦などの動特性を考慮した操作感を実現した。

これまでに示したForce Displayはアクチュエータとして電磁モーターを利用していたが、これらには一般に振動を押さえるために高速な制御が必要とされる。高橋 [14]は電磁ブレーキによりグリップの運動に摩擦を与えて操作反力を生成するForce Displayを提案した。この構成ではブレーキの利用により、本質的に振動が発生しない。

既存のインタフェースに操作反力を付加した例として、Minsky [15]はDCモーターを取り付けた3自由度

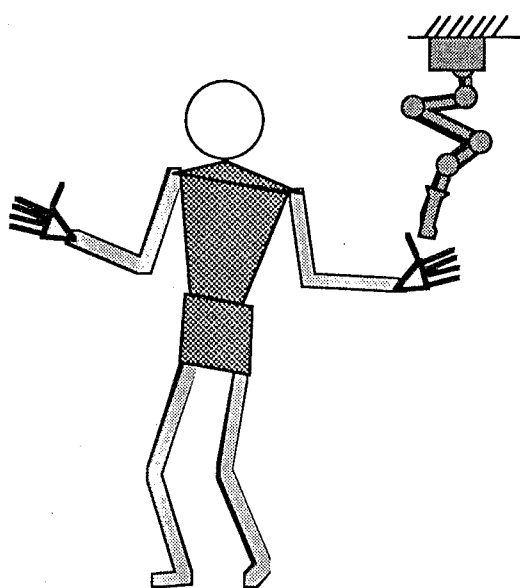


図3 把持型インタフェース

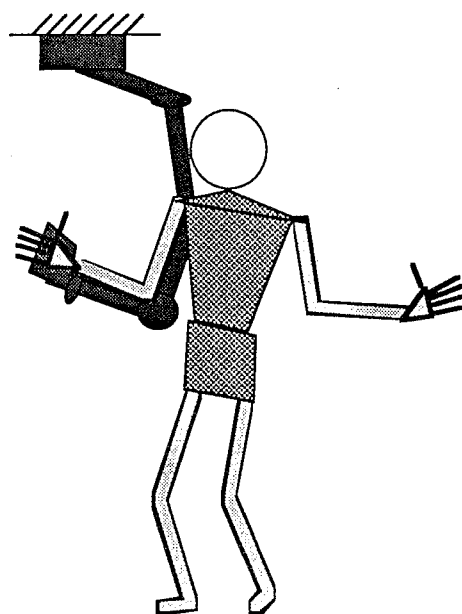


図4 装着型インターフェース

ジョイスティックでCRT上に表示された面の質感を表示する Force Display を提案し、荒井 [16] は 2 自由度ジョイスティックを用いて微細手術用のカテーテルの 3 次元的操作インタフェースを実現した。小堀 [17] はブレーキを用いて 3 自由度ジョイスティックにより仮想物体の形状モデラーをそれぞれ提案している。マウスについては、赤松 [18] が、電磁石と小型ソレノイドを用いて操作感を提示可能な装置を提案している。

使用目的を高度に特化した例として、Wiley [19] の Lumbar Puncture Simulator では、延髄に針を差し込む感触を、実際に人体に使用する器具と直動型アクチュエータを組み合わせた 3 自由度 Force Display により実現している。

#### b) 装着型インターフェース

装着型のインターフェースは、常にデバイスを直接ユーザーの体に固定するものであり、ロボット工学分野のパイラテラルシステムの研究成果である外骨格型マスターマニピュレータに相当する (図 4)。一般に、人間の腕部の全自由度に対応する外骨格型マニピュレータは複雑かつ巨大な装置となるため、一部の特定用途を除き完全な外骨格型よりも前述の把持型インターフェースのグリップ部をストラップに変えたタイプのデバイスが多い。また装着型インターフェースは指先にも装着可能であり、把持型のものでは難しかった指先への微細な反力提示を可能とする。反面、常にデバイスを装着するために、機構自体の可動範囲や自由度の制約がさらに厳しく、ユーザーのストレスの面でも問題となる。

Salisbury [16,17] は小型の平行リンク式 3 自由度マニピュレータに 3 軸ジンバルを組み合わせた PHANToM と呼ばれる Force Display を提案した。先端には指サックを取り付け、ユーザーの指先に並進 3 方向の操作反力を提

示する。複数の PHANToM を組み合わせることで、多指への反力提示を可能とする。佐藤 [18] らは 4 本の糸の張力を用いて、ユーザーの指先に並進 3 方向の操作反力を提示する SPIDER を提案している。これは、装着型でありながら比較的広い可動範囲が確保できる手法である。

人間の腕部の形状に合わせた装着型インターフェースの研究例として竹田 [18] の空気圧式のゴム人工筋を用いた Force Display が挙げられる。これは肩、肘部の 3 軸について追従するマニピュレータであり前腕部で固定する。また、橋本 [19] は手首に 3 自由度、人差指に 3 自由度、親指に 2 自由度、残りの指に 2 自由度の 10 自由度を有する Dynamic Force Simulator を提案した。装置は机上に半固定されているものの、多指による物体の把持感覚をシミュレートできる Force Display である。

また、上記の Force Display はすべて地面と装着者の間に力覚的な作用と反作用の関係を生成するものであったが、Burdia [20] の PDMFF では小型の空気圧ピストンを指先と掌の間に配置し、掌に対する指先の操作反力を実現した。厳密にはこの方式では物体の把持感しか表現できないが、装置がすべて手先に搭載されてしまう利点がある。

#### c) 形状入力型インターフェース

形状入力型インターフェースとは、実際にユーザーがある基本形状をもつ柔軟な物体を変形させ、その形状変化を仮想物体の形状に反映させて仮想物体を任意に変形させる方式である (図 5)。ユーザーは操作入力のための形状センサー付きの物体 (入力装置) を直接変形させ、その変形に伴う反力により操作感を獲得する。この手法では前述の 2 方式のような機械式のリンク等を必要としない。村上 [21] らは導電スポンジを用い、内部に 90 個の変形センサーを持つ立方体形状の入力装置を提案した。この

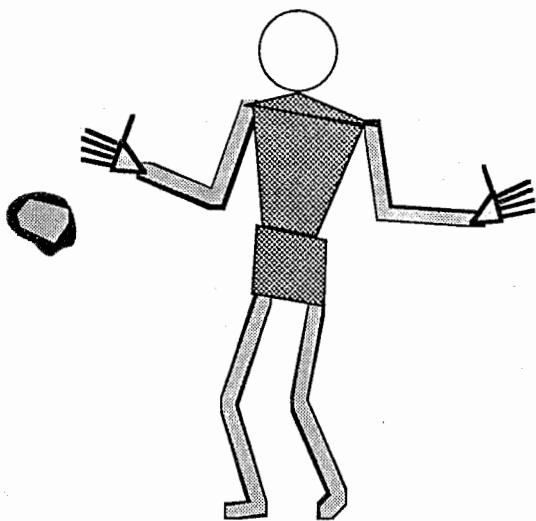


図 5 形状入力型インターフェース

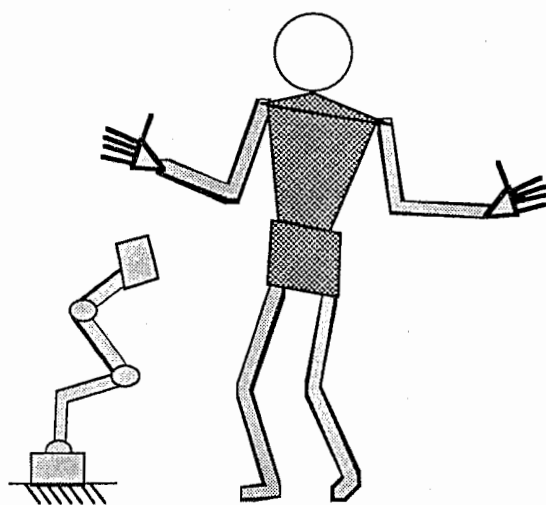


図 6 環境提示型

立方体状入力装置を仮想物体の境界ボックスに相当させ、仮想物体の形状変化を立方体への操作により実行する。

### 2.1.2 環境提示型

操作型のインタフェースは、基本的に何らかのデバイスを把持または装着する必要がある。これは、仮想世界と実世界の界面を人間の感覚器の表面、あるいは、把持した道具の表面で行っているといえる。環境提示型はこの刺激生成の界面を環境の対象物の表面で行う方式である(図6)。具体的には、ユーザーが仮想世界で触れる面を能動的に実世界で再現し、ユーザーに現実を変らない触覚を与える手法である。広田[22]は7自由度のマニピュレータの先端をユーザーの指先の動きに追従させ、仮想世界で指先が触れるべき面やエッジをマニピュレータ先端部により再現する手法をとった"Surface Display Device"を提案した。前田[23]は6自由度マニピュレータの先端に特殊な形状を持つデバイス"SAD"(Shape Approximation Device)をとりつけ、複雑な面やエッジ、カーブ形状を再現する手法を提案した。また、広田[24]は複数のロッドから構成される擬似的な面をユーザーの操作入力に合わせて変形させる手法による面提示デバイスを提案した。

### 2.2 指先への Haptic Display

指先の触覚に対するHaptic Displayは前述の手先への刺激提示に比べて、よりマイクロな物理的刺激を用いる。従って、小型のエアジェットやバルーンなどを指先に装着して直接的な刺激を与えて触覚を再現する手法の他、振動や弱い電気ショックなどの代替感覚により触覚を提示する手法が提案される(図7)。伊福部[25]は指先に圧電素子によって上下する複数の小型ピンを配置したVocoderを取り付け、このピンの上下振動と信号の走帰を連動させて日本語を触覚により認識させる手法を、池井[26]は同様の装置を用いて平面のテクスチャーをピンの振動により提示する方式を提案した。

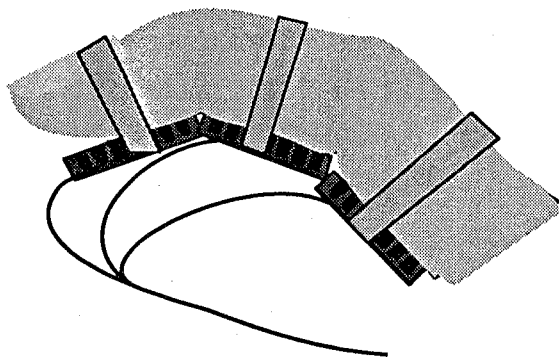


図7 指先の触覚へのディスプレイ

### 2.3 その他の Haptic Display

腕部以外へのHaptic Displayとしては歩行感覚や平衡感覚などの、全身的な感覚に対するデバイスが提案されている(図8)。多くの大規模仮想空間を扱うVR装置では空間内の移動のために手振りやスイッチを併用するが、移動に伴う加速感や振動が感じられず現実感に乏しい。実際に体性感覚を用いた歩行感覚を提示する研究例として、Brooksらは医療用歩行機にハンドルを付加した装置を用いた装置を、岩田[27]はセンサーを配置した特殊なローラースケートを装着させる手法をそれぞれ提案している。また車両等による移動感覚を提示する例として、エンターテインメント分野における通称"体感シミュレーター"や航空機などのシミュレーターがここに分類される。これらでは、ユーザーが乗り込むコックピット全体を大型のモーションベッドによって傾け、映像と連携して重力による擬似加速感を誘導する。広瀬[28]はこの手法を用い、固定プロジェクターとモーションベッドを組み合わせた前庭感覚ディスプレイを提案している。

### 3. 臨場感通信会議における Force Display の役割

ATR通信システム研究所では人工現実感の応用として臨場感通信会議のコンセプトを提唱してきた。臨場感通信会議の目的は遠隔地にいるユーザー同士をネットワークで接続し、かつ、そのユーザーに間に介在するインタフェース機器の存在を全く感じさせないコミュニケーション空間を創出することにある。1994年に発表した臨場感通信会議試作システム[29]では、3地点を結び仮想会議空間で3ユーザーが協調して組立て作業可能なシス

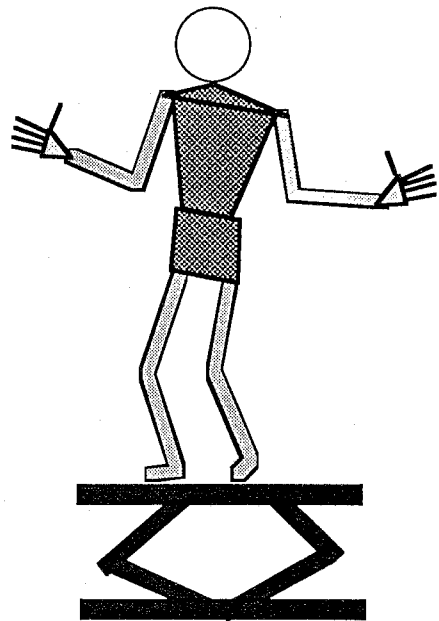


図8 その他の体性感覚へのディスプレイ

テムを実現した。ユーザーは70インチスクリーンを2面用いた広視野立体映像を提示するブースに着座し、磁気センサーと特殊手袋を装着する。スクリーンには会議空間と作業対象のオブジェクト、さらに他の会議参加者達がすべて3次元CGで表示される。ある仮想オブジェクトを操作するには、ユーザーは同様に仮想会議空間に表示される自分の手を対象オブジェクトに当たった後、手を握ることでオブジェクトを把持できる。

この試作システムでの問題点として、オブジェクトへの接触、オブジェクトの把持、さらに把持物体を他の物体に衝突させる等の操作の結果がすべて映像情報による出力に依存していた点が挙げられる。特に精密なオブジェクト操作を要求される際に、この本来は体性感覚への情報出力の欠落が問題となった。そこで、操作感を改善するために、我々はこれらの操作反力を提示可能なForce Displayを開発した。

臨場感通信会議システムに用いるForce Displayへの要求として、ユーザが使用するにあたってのストレスを可能な限り抑えることが求められる。ストレスの原因は前章でも述べたように、装着感や可動範囲、提示可能な感覚情報と刺激強度などに渡る。これらの要求から、ここではユーザーが体性感覚による臨場感を必要とする時のみユーザーの手先に操作反力を提示可能な把持型のForce Displayを採用した [30,31]。

試作機を図9に示す。試作機は平行リンクを用いた3自由度のロボットアームの先端に3軸ジンバルを介して球状グリップを装着している。装置の機構に関しては一般的な3自由度マスターアームの構成を採用したが、アームの基部には特に我々の開発したTOCUSを3基配置した。TOCUSは単一のアクチュエータで任意の駆動トルクと停止トルクを発生可能である等、VRデバイス

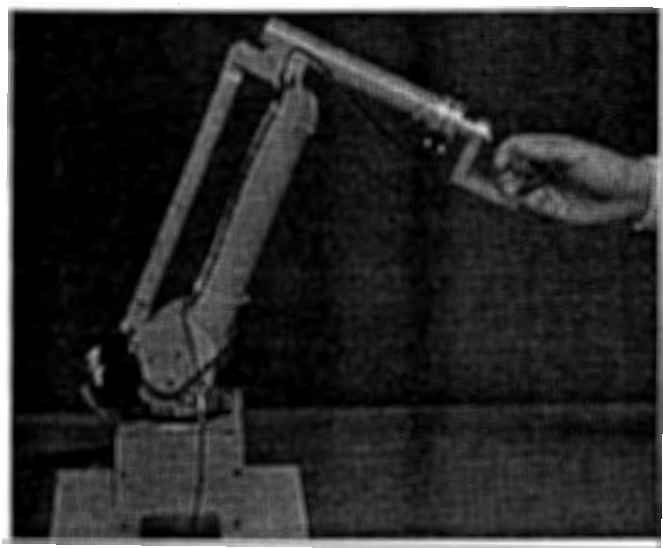


図9 TOCUS-Force Display

として有利な特徴を有したアクチュエータである。試作機では、ユーザーが把持するグリップ部に任意方向への操作反力と摩擦力が生成できる。試作機の可動範囲は半径60cmの半球内であり、減速比3のギヤを介したTOCUSにより先端に最悪のケースでも500gfの反力提示を可能とする。

以降でTOCUSについて詳細についてまとめる。

## 4. TOCUS

### 4.1 TOCUSの動作原理

TOCUSはカメラのレンズの駆動などに広く用いられる進行波を用いた摩擦駆動型の超音波モーター（以下USM: Ultra Sonic Motor）を機能拡張し、任意の駆動トルクと停止トルクを制御可能としたアクチュエータである。

図10にUSMの駆動原理を示す [32]。USMは弾性体に圧電セラミックを張り付けたstatorとrotorが同軸に加圧接触されている（図10-a）。このstator上に表面弾性進行波を励起し、statorとrotorの間に発生する動摩擦力を駆動力として取り出す。

電気信号を一切加えない状態（図10-a）では、単にrotor

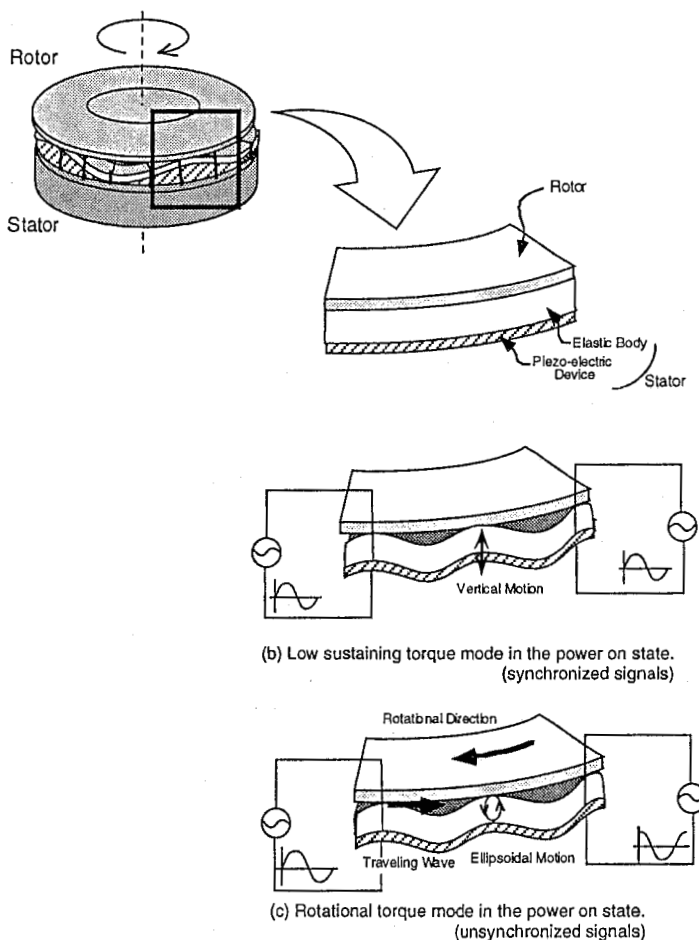


図10 超音波モーターの動作原理

は stator に加圧接触させているため、stator 側を固定して  
いれば USM はブレーキとして作用する (USM の自己保  
持特性)。図 10-b に示すように圧電セラミックに高周波  
電圧を印可すると、信号の正負に合わせて圧電体が伸縮  
を繰り返すことで弾性体表面は上下運動する。この状態  
を定在波駆動と呼び、印可する高周波電圧の振幅を変化  
させることで、停止トルクを制御可能なブレーキとして  
利用できる。

USM をモーターとして利用するには、前述のように  
stator 上に超音波振動レベルの表面弾性進行波を励起す  
る。そのために、圧電セラミックを stator の表面に 2 群に  
分けて適当に配置し、それぞれに位相差を 90 度とった高  
周波電圧を作用させる。これによって、2 種類の高周波  
電圧により励起される振動の合成により stator 上の弾性  
体表面のある 1 点は楕円運動を行い、表面弾性進行波を  
発生する (図 10-c)。

弾性体表面に発生する振動は、印可する高周波電圧の  
周波数 ( $F$ )、振幅 ( $V$ )、さらに 2 つの信号の位相差  
( $\phi$ ) によって制御可能である。通常の USM の利用では、  
位相差を 90 度とした信号の電圧制御によって駆動力を制  
御するが、TOCUS では図 11 示すよに、位相差の制御と  
振幅の制御を組み合わせ、(a) 最大停止トルク (フルブレ  
キ) を発生する状態から、(b) 自由回転状態を経て、(c)  
最大回転トルク発生状態まで連続的にコントロール可能  
とした。自由回転状態は、前述のように定在波の振幅が  
最大になった状態に相当する。この状態から印可高周波  
電圧の振幅を制御して停止トルクを変化させる。また、  
自由回転状態の定在波は印可する 2 種類の高周波信号の  
位相差を同位相にすることで実現されているが、この位  
相差を 0 度から 90 度まで変化させることにより、弾性体  
の上下運動が徐々に楕円運動に移行し、それにつれて

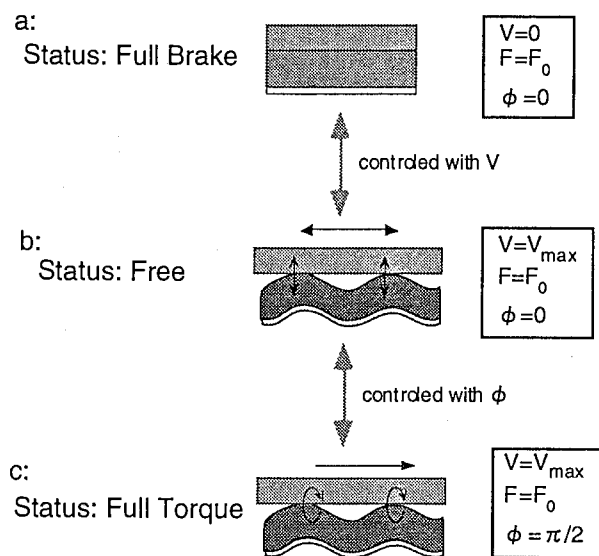


図 11 TOCUS の駆動原理

USM が発生する回転トルクも 0 から最大トルクまで変化  
する。位相差をマイナス方向に変化させることにより回  
転方向を反転可能である。

USM の停止および駆動トルクを連続的に制御する他の  
方式として、金子 [33] らが提案する 2 自由度 PWM 方式  
が挙げられる。この方式は、高速で位相差の符号を切り  
替えてトルクを変更するが、我々の利用している高出力  
タイプの USM では位相差の方向の反転時に生ずる動作  
音が無視できず、これが連続的に発生する PWM 方式の  
採用は難しい。

#### 4.2 TOCUS の特徴

USM の改良である TOCUS の特徴について、特に従来  
同じ用途で用いられてきた電磁気駆動のモーター  
(EMM: Electro Magnetic Motor) との比較しながらまとめ  
る。

##### 小型軽量

USM は rotor の周縁部に発生する動摩擦によりトルク  
を発生するため、機構内部に減速ギヤを有している  
EMM と構造的に等価である。従って EMM と比較して、  
サイズおよび重量あたりの出力が大きい。表 2 に我々の  
TOCUS とほぼ同程度の出力、および同程度の重量を有す  
る市販品の EMM との性能比較を示す。

##### 自己保持特性

前述のように、USM は信号を加えない状態でブレーキ  
として働く。TOCUS ではさらにこの摩擦力の制御を可能  
にしている。EMM で同様の機構を装備するには、EMM  
の他に何らかの電磁クラッチ等の機構をならない。

##### 低速回転での高効率

表 2 示すように、TOCUS の定格回転数は EMM に比べ  
て低い。これは、大きな減速比の減速機を用いることな  
くモーターの出力を取り出せることを意味する。マス  
ターマニピュレータのアクチュエータとして TOCUS を  
利用する場合、低減速比の減速機の使用により自由回転  
時におけるモーターの回転摩擦抵抗を抑えられる。

##### 磁気ノイズ

VR 装置に広く用いられる磁気 3 次元位置姿勢計測セ  
ンサーは、磁気ソースによって計測範囲内に励起される  
磁場の強度を被計測物体に取り付けられたセンサーに  
よって計測することで、被計測物体の位置姿勢を算出す  
る。したがって、励起される磁場を乱す金属や磁気ノ  
イズを発生す EMM などとの併用は難しい。TOCUS では基  
本的に電磁コイルを用いないために磁気ノイズをほとん  
ど発生しない。従って、構造部在の金属をアルミ等の磁  
場に影響の少ない物体を用いれば、磁気センサーと Force  
Display の併用が可能となる。



## 静粛性

statorとrotorは加圧接触されているために、機械的に衝突運動はしない。従って、駆動時にもほとんど動作音を発生しない。

## 4.3 試作 TOCUS と性能

図12に試作2号のTOCUSの構造を示す。このTOCUSでは2組のUSMを組み合わせて出力の向上をねらった。rotorは外輪部に固定されており、statorは内輪部に固定されている。側面にはロータリーエンコーダーが内蔵されており、単体でブレーキ、モーター、角度計測が可能なダイレクトドライブ型のアクチュエータである。現在は、さらに出力の向上した試作3号のTOCUSを開発し、利用している。図13に試作機の駆動回路のブロック図を示す。

## 駆動トルクの特性

図14に位相差と駆動トルクの関係について、試作3号TOCUSの計測結果を示す。横軸は印可する高周波信号の位相差であり、縦軸に軸トルクを取る。これにより、位

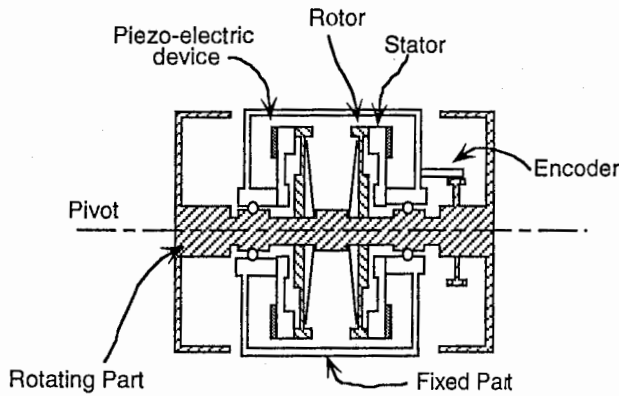


図12 試作 TOCUS の構造 (試作2号機)

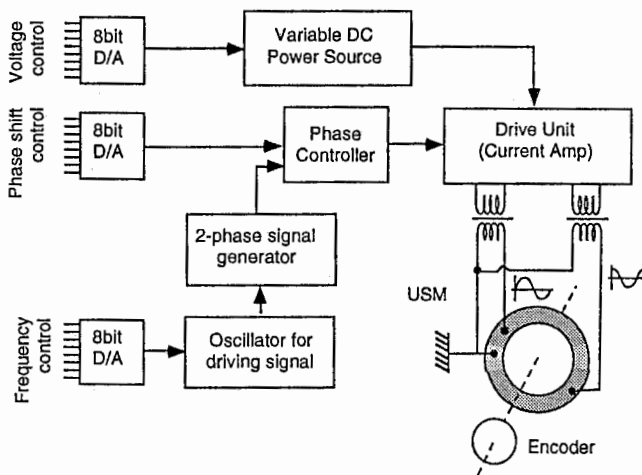


図13 TOCUS の駆動回路

相差により軸トルクが制御可能であることが分かる。

## 停止トルクの特性

図15に印可高周波信号の電圧と停止トルクの関係について、試作3号TOCUSの計測結果を示す。横軸は印可する高周波信号の電圧であり、縦軸に停止トルクを取る。これにより、高周波信号により停止トルクが制御可能であることが分かる。

## 磁気位置姿勢計測センサーに与える影響

表3に、TOCUSとEMMが磁気位置姿勢計測センサーの計測値に与える影響についてまとめる。表は磁気セン

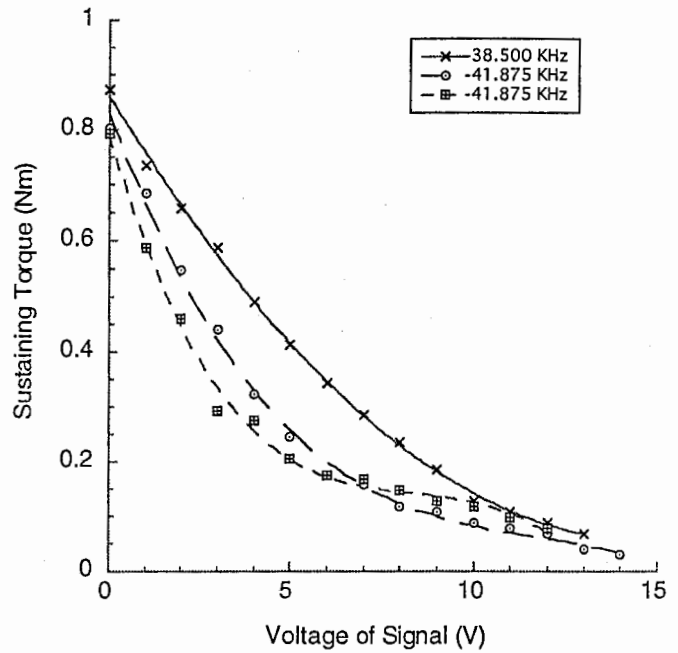


図14 停止トルクと印可電圧

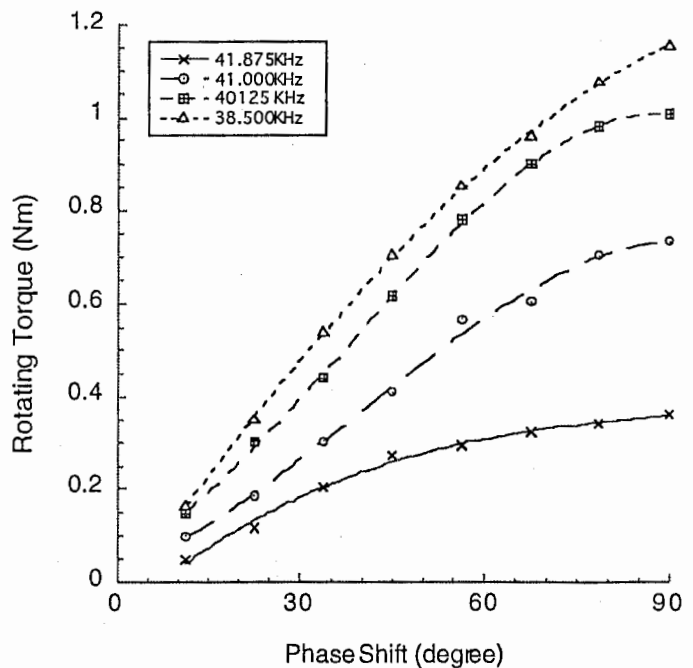


図15 駆動トルクと位相差

サーを机上に固定した状態で、2種類のモーターをセンサーの直上から5cm刻みで離して行った際に、系測値の精度を取ったものである。計測精度は、1秒間120サンプルの位置と姿勢データの95%信頼区間をもって定義した。利用したモーターはTOCUSの試作3号、EMMは定格電流720mAの小型DCモーター、磁気センサーはPolhimus社のFastrack(TM)を用いた。網掛け部はカタログ記載の計測精度(位置計測で0.8mm、角度計測で0.15度)を確保できなかったデータを示す。この結果ではTOCUSではほとんど計測に影響が出ていないが、DCモーターでは10cm以上センサーとモーターを離さなければ、計測精度が確保できない。今回使用したDCモーターは小型の物であったが、TOCUSと同程度の出力のモーターではさらに高い定格電流を必要とする。コイルが発生する磁場は電流に比例することを考慮すれば、通常用いるDCモーターが磁気センサーに与える影響はさらに大きいと推測される。

#### 4.4 試作TOCUSの問題点

これまでのアクチュエータにはない特徴を有するTOCUSの問題点として、耐久性と温度による特性変化の2点が挙げられる。Rotorとstatorの加圧接合面には高い精度が要求されるが、使用に伴いこの部分が磨耗する。

MotorType	USM USR-60	EMM1	EMM2
Regular Rotating Torque (Nm)	0.5	0.7	0.06
Max. Rotating Torque (Nm)	1.0	1.70	0.23
Max. sustaining torque (Nm)	1.0	X	X
Speed (rpm)	160	1200	2000
Volume (cm)	108*	707	80
Weight (kg)	0.35	1.6	0.24
Frequency of traveling waves (Hz)	40k	X	X

\* Without encoder

表2 超音波モーターと電磁モーターの性能比較

Position of the motor from the source	DC Motor		TOCUS	
	Position	Angle	Position	Angle
0	1.19	10.08	0.00	0.01
5	0.18	1.79	0.01	0.00
10	0.03	0.21	0.00	0.01
15	0.01	0.06	0.00	0.01
20	0.00	0.03	0.01	0.01

UNIT : cm,deg

表3 磁気位置センサーによる計測への影響

特に、停止トルク制御モードで用いる定在波駆動による上下振動がstator側の偏磨耗の原因となり、一定期間使用後の再研磨作業が必要となる。また、特に自由回転モードの多様によりTOCUS内部の温度が上昇する。これに伴いstatorの共振振動数が増加するために何らかの温度保証が必要となる。現在の駆動回路ではハードウェアによる自動補正と空冷ファンによるTOCUSの強制冷却を行っている。

#### 5. まとめ

本稿ではまず人工現実感研究のなかで用いられる体性感覚の位置付けを明らかにした後、2章において関連するHaptic Displayの分類を行った。ついで3章で、我々の提唱する臨場感通信会議システムにおけるHaptic Displayの必要性を示し、試作Force Displayについて述べた。4章では試作機に用いたTOCUSについて、その動作原理と制御方式を解説し、試作機に用いたTOCUSの性能と問題点について示した。TOCUSは従来のアクチュエータと比べ、小型で高出力、高応答であり、さらに磁気ノイズをほとんど発生しないという独特の特徴を有している。これらは、VRシステムでForce Displayを利用するにあたって、自由度の高いForce Displayの設計を実現する。

#### 謝辞

TOCUSは株式会社新生工業の指田年夫氏の協力により製作された。

#### 参考文献

- [1] S.S. Fisher, et al., "Virtual Environment Display System", Proc. of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, pp. 1-11, 1986
- [2] K.B. Shimoga, A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation : Part I. Finger Force Feedback", Proc. of IEEE VRAIS'93, pp.263-270, 1993
- [3] Barfield et al., "Comparison of Human Sensory Capabilities with Technical Specifications of Virtual Environment Equipment", Presence, Vol.4, No. 4, pp.329-356, 1995

- [4] 岩田, "設計・製造環境への人工現実感の応用", パーチャル・テック・ラボ, 工業調査会, ISBN4-7693-5054-6, pp.166-185, 1992
- [5] F.P. Brooks, Jr, et al., "Project GROPE-Haptic Hisplay for Scientific Visualization", ACM Computer Graphics, Vol.24, No. 4, pp.177-185, August 1990
- [6] "GRIP Project", <http://www.cs.unc.edu/Research/graphics/GRIP/index.html>.
- [7] 福井、下条, "力覚をフィードバックする操作デバイスによる仮想形状のなぞり動作", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-D-II, No.8, pp.1052-1059, 1991
- [8] T. Koutoku, K Komoriya, K Tanie, "A Force Display System for Virtual Environment and its Evaluation", Proc. of IEEE ROMAN'92, pp.246-251, 1992
- [9] Y. Adachi, "Touch and Trance on The Free-Form Surface on Virtual Object", Proc. of IEEE VRAIS'93, pp.162-168, 1993
- [10] H Iwata, "Pen-based Haptic Virtual Environment", Proc. of IEEE VRAIS'93, pp.287-292, 1993
- [11] 野間、岩田, "視覚と触覚を用いた高次元ポリュームデータの提示手法の提案", テレビジョン学会技術報告, Vol.18, No.46, pp.19-24, 1994
- [12] P.A.Millman, M Stanly, J.E. Colgate, "Desigen of a High Performance Haptic Interface to Virtual Environment", Proc. of IEEE VRAIS'93, pp.216-222, 1993
- [13] 吉川、鄭、森口, "摩擦表面を有する仮想対象物体の動的操作感提示", 日本機械学会論文集 (C編), Vol.60, No.576, pp.103-110, 1994
- [14] 高橋、金井、位守, "仮想クレイモデリングシステム (VCMS) の開発", Proc. of 9th Symposium on Human Interface, pp. 423-430, 1993
- [15] M. Minsky, M. Ouh-young, O. Steels, "Feeling and Seeing : Issues in Force Display", ACM Computer Graphics, Vol.24, No.2, pp.235-243, 1990
- [16] 小堀、他, "空間分割モデルを用いた形状モデラ", Proc. of 10th Symposium on Human Interface, pp. 177-182, 1994
- [17] 荒井、他, "知的医療支援システムに関する研究、能動カテーテル操作のために知的支援システム", Human Interface N&R, Vol.9, pp.309-312, 1994
- [18] M. Akamatsu, "Touch with a Mouse, A Mouse Type Interface Device with Tactile and Force Display", Proc. of ROMAN'94, pp.140-144, 1994
- [15] C.W. Wiley, M. Bostrom, S.K. Singh, "Design of an Interactive Lumbar Puncture Simulator with Tactile Feedback", Proc. of IEEE VRAIS'93, pp.280-286, 1993
- [16] K. Salisbury, et al., "Haptic Rendering : Progmming Touch Interaction with Virtual Object", Proc. of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, pp. 123-130, 1995
- [17] "Haptics", <http://www.ai.mit.edu/projects/handarm-haptics/haptics.html>.
- [18] M. Sato, M. Ishii, "A Virtual Workspace for the Collaborative Desigen", Proc. of ICAT'94, pp.139-145, 1994
- [19] H.Hashimoto et al., "Dynamic Force Simulator for Force Feedback Human-Machine Interaction", Proc. of IEEE VRAIS'93, pp.209-215, 1993
- [20] G. Burdea, et al., "A Portable Dexterous Master with Force Feedback", Presence, Vol.1, No.1, 1992
- [21] T.Murakami, N.Nakajima, "Direct and Intuitive Input Device for 3-D Shape Deformation", Proc. of CHI'94, pp. 465-470, 1994
- [22] 広田、広瀬, "仮想触覚環境の開発", ヒューマンインタフェース研究論文集, vol.1, pp. 41-48, 1993
- [23] S. Tachi, T. Maeda, "A Construction Method of Virtual Haptic Space", Proc. of ICAT'94, pp. 131-138, 1994
- [24] 広田、広瀬, "面提示型触覚ディスプレイのための曲面表現デバイス", Proc. of 10th Symposium on Human Interface, pp. 193-196, 1994
- [25] T. Ifukube, et al., "Proposal of a New Tactile Display Method of Speech Signals as a Nonverbal Communication for the Profoundly Hearing Impaired", Proc. of ROMAN'94, pp.95-100, 1994
- [26] 池野、池井、福田, "振動型触覚ディスプレイに関する研究", Human Interface N&R, Vol.9, pp.261-266, 1994
- [27] 岩田、藤尾, "ハーネスを用いないウォークスルーシミュレータの試作", Proc. of 9th Symposium on Human Interface, pp. 353-356, 1993
- [28] 広瀬、他, "前庭感覚ディスプレイの基礎研究", Proc. of 11th Symposium on Human Interface, pp. 511-514, 1995
- [29] H. Noma, et al., "Multi-Point Virtual Space Teleconferncing System", IECIE Trans. Commun, Vol.E78-B, No. 7, pp. 970-979, 1995
- [30] 竹村、伴野、岸野, "仮想空間操作における力フィードバックに関する一考察", 1991年春季信学会全国大会, vol.1, pp.251, 1991
- [31] 竹村、伴野、岸野, "仮想空間操作における力フィードバックに関する一考察 (II)", 1991年秋季信学会全国大会, vol.1, pp.127, 1991
- [32] 指田, "超音波モーター入門", 総合電子出版社, ISBN4-915449-60-2, 1991
- [33] 金子、西原、辻, "2自由度PWM制御による超音波モーターの機能拡大", 第12回ロボット学会学術講演会, pp.195-196, 1994