

弾性分布を呈示する面型ハプティックインタフェース

河村 亮^{*1} 矢野 博明^{*2} 岩田 洋夫^{*2}

Surface Type Haptic Interface for Presentation of Rigidity Distribution

Ryo Kawamura^{*1} Hiroaki Yano^{*2} Hiroo Iwata^{*2}

Abstract — This paper describes design of a surface type haptic interface for presentation of hardness distribution in an elastic object. The haptic interface is composed of an elastic plate and a linear actuator array. It provides a spatially continuous surface on which users can effectively touch virtual objects using any part of their bare hand. The elastic plate is made of rubber and sponge. When the actuator pushes the plate, its hardness increases. The user feels as if hard object is submerged in a soft object. We analyze the performance of the device through measurements of rigidity and psychophysical tests.

Key Words : Haptic Interface, Array Force Display, Surface contact, Elastic Plate

1. はじめに

バーチャルリアリティとして研究、実用されている例として、視覚、聴覚、歩行感覚、触力覚に関するものがある。これらのうち、触力覚に関する研究分野は「ハプティクス」と呼ばれる。ハプティックインタフェースとは、人間がバーチャル世界に触れた際に発生するであろう感覚を呈示する装置のことを意味する^[1]。視覚、聴覚に加えて、物体に触れたときの触力覚を与えることで、バーチャル物体の認識がより容易になる。

ところで、現実世界の中で手足等の感触により認識できるものが、必ずしも視覚で認識できるとは限らない。医師が患者の体を触れることにより、体の中にある腫瘍を見つけ出すといった例がある。体中の腫瘍は表面上、目には見えないことが多く、触る

ことではじめてその存在を認識できる。本研究で対象としているものは、凹凸のない様な表面を指先で触ることで、はじめて内部で生じる硬さの変化を感じるような「触覚による物体認識」を再現しようとするものである(図1)。

本研究では、このような目的に使用できるシステムとして「高密度対象指向型フォースディスプレイ」と「弾性体」を組み合わせた、従来にない構成の装置に「力センサ」を実装した「面型ハプティックインタフェース」を開発した。性能測定と評価実験を通して装置の有効性を検証し、ユーザの心理的特性を評価した。

2. 装置の基本コンセプト

2.1 従来の研究

装置の設計において、装置自体を変形させることでバーチャル物体の形状を模擬する「対象指向型フォースディスプレイ」の方式を採用した。この方式に相当するものとしては、直動アクチュエータアレイを手の動きに合わせて伸縮させるもの^[2]、面や稜線などの形状要素を模擬する立体を手が接触する位置に遭遇させるもの^[3]等が提案されている。

本研究の目的に近い研究の一例として、著者らが開発している「ハプティックスクリーン^[4]」がある。映像を投影するスクリーンの下に力センサを取り付けた直動アクチュエータを40mm間隔で平面に配置し、映像にあわせて動かすことで映像に直接触れる感覚が得られることがこの装置の特徴である。駆動ユニットの機構は、モータによる送りネジを利用しており、セルフロックを利用することで物体形状呈示時に連続的なトルクの発生を必要としないという

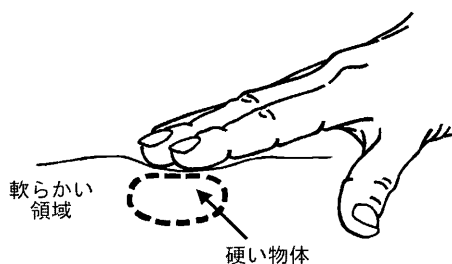


図1 触覚による物体認識

Fig 1 Basic idea of hardness distribution

^{*1}: 筑波大学 理工学研究科 (現在: 松下電工株式会社 先行技術研究所)

^{*2}: 筑波大学 機能工学系

^{*1}: Master's Program in Science and Engineering, Univ. of Tsukuba (Advanced Technology Research Lab., Matsushita Electric Works, Ltd.)

^{*2}: Institute of Engineering Mechanics and Systems, Univ. of Tsukuba

メリットがある。しかしながら、送りネジによる硬さの変化には時間がかかるため、軟らかい物体の呈示が難しい。さらに、この装置ではロッドの間隔が40mmのため、指先で感じるような小さな物体を表現できない。

高密度な小型ピンアレイは皮膚感覚を呈示するタクトイルディスプレイに用いられる。池井氏ら^[5]やKontarinis, Howe^[6]を含め、これまでに多くの研究が行われてきた。これらの装置は平面状の形状分布を再現することができ、目の不自由な人のコミュニケーション手段のひとつとなっている。高密度に配置されたピンの昇降移動により微小形状を呈示する装置の一例として、下条氏らのシステム^[7]がある。このシステムは2mm間隔でピンを平面上にしきつめ、呈示形状と同じブロックをピンの下に配置することで形状を呈示する。小型ピンアレイによる形状呈示手法は本装置と同様であるが、ピンを稼動させるアクチュエータがないため、動的な形状変化を呈示することができない。

ロッドやピンの昇降移動によって形状を表現する面呈示型の対象指向型フォースディスプレイでは、ロッド配置の密度を高めるほど微小な形状や多様な表現が呈示可能となる。しかしその反面、高密度に配置されたロッドをアクチュエータで稼動させ、硬さの変化を再現する装置の製作には多くの困難が生じる。弾性分布を呈示する高密度な面型ハプティックインタフェースの開発にあたって、従来にはない構成を提案する必要がある。

2.2 装置の設計指針

本研究で開発する面型ハプティックインタフェースの仕様として次の4点が挙げられる。

- ① 指先で感知するような、微小物体が呈示できる。
- ② 表面に凹凸が現れず、常に一様である。
- ③ 内部の硬さの分布をリアルタイムに変化させることができる。
- ④ 接触表面での指先の動作が検知できる。

前述したハプティックスクリーンのような構成で高密度化を目指そうとすると、同時に②・③の実現を考えたとき、小型で高性能なアクチュエータとセンサ、さらに精密な制御が必要となり、多くの困難が生じる。そこで本研究では、“硬さ”と“物体形状”の変化をアクチュエータの速度制御のみで実現するのではなく、それぞれ独立して実現し、装置の構成を簡素化させて高密度化を行った。“硬さ”の変化の担い手となるものとして注目したのは、ゴムやスポンジなどの「弾性体」である。ある程度の厚みと弾力性のある弾性体の片側から圧力を加えると、その部分の硬さが瞬時に変化するが、反対側の表面には

凹凸の変化が現れない。この特性を有する弾性体の下に高密度な対象指向型フォースディスプレイを設置し、直動アクチュエータで弾性体の任意の場所を押圧することで、硬い領域の“形状”を変化させることができる。「高密度な対象指向型フォースディスプレイ」と「弾性体」を組み合わせただけにはない構成によって、視覚的に一様な接触表面の内部の硬さの変化を呈示することを試みた。

弾性体の特性を利用した装置の一例として、東大で開発された「3次元形状操作インタフェース^[8]」がある。弾性物体を手にとって曲げる、ねじる等の形状変化させることにより、手応え（物体からの受動的反力）を得ながら、コンピュータ内に構成された弾性物体と同様の3次元形状に変形を加えることができるシステムであり、入力装置の変形時に弾性体の特性を活かして力覚を呈示している。3次元操作インタフェースは入力装置を目的としているため、アクチュエータが実装されておらず、能動的な弾性変化を表現することはできない。

本研究で開発する装置において、バーチャル物体を指先で押して動かすようなインタラクティブな制御を実現するために、接触表面での指先の動作を検知する必要がある。指先で感知するような微小物体を再現する直動アクチュエータは細く、その先端にセンサをつけることができない。そこで、アクチュエータとして用いたサーボモータにセンサを実装し、指先が接触表面を押す位置と力の大きさを検知する「力センサ」を実現することにした。

3. 装置の構成

3.1 システム構成

本装置のシステムは「PC」と「ハプティックインタフェース」、「制御回路」により構成される(図2)。また、ハプティックインタフェースを構造上、「弾性分布呈示部」と「駆動装置部」、「力センサ部」に分割した。

駆動装置部のサーボモータ内部には制御回路が組み込まれており、PC内部のPIOを通してPWM信号

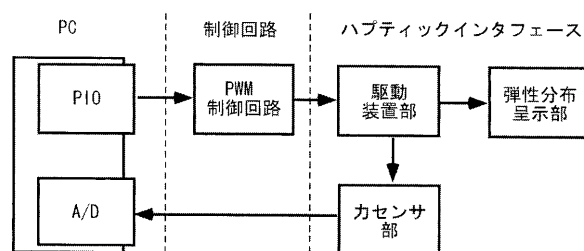


図2 システム図

Fig 2 Basic structure of the system

ジェネレータより出力される信号によって目標回転角度を制御する。駆動装置部に接続した力センサの出力は、A/D コンバータを通して測定される。

以下に詳細を述べる。

3. 2 弾性分布呈示部

弾性分布の呈示は「弾性体」とその下に配置した「直動アクチュエータの上下動」によって実現する。接触表面の面積は指3本が入る範囲として直径70mmの円形とした。ロッドは弾性体にスムーズに圧力を加えることができることと、指先への印象を考慮して6mmの太さとし、本装置の構成で実現可能な最小間隔(8mm)で格子状に27本のロッドを配置することにした(図3)。

選考実験より、一枚の厚い弾性体を使用した場合、材質が軟性のものでは個々のロッドの先端が感じられ、滑らかな一つの固体として認識されにくく、硬い材質ではロッドの押圧による内部の硬さの変化が認識されにくいことが確認された。そこで本装置では、特性の異なる3つの弾性体を重ね合わせて設置することにした。凹凸のない様な表面を指先で触れることで、内部の硬さの変化が認識できるといった表現を実現するために、3つの弾性体には以下の特性が要求される。

- ・最下層：ロッドの押圧量に比例して内部の圧縮率が変化する素材。
- ・中間層：ロッドの上昇で押し上げられる最下層の膨らみを吸収する圧縮性の高い素材。
- ・最上層(接触面)：内部の硬さの変化を指先に伝やすい柔軟な素材。

市販されている材料の中から目的に合うものを試行錯誤的に選び、選定実験をした結果、最下層にはゴムスポンジ(厚さ5mm)、中間層にはスポンジ(厚さ5mm)、そして最上層にはプレーンゴム(最上層：厚さ2mm)を採用した(図4)。

各弾性体の特性を測定し、本装置で使用する有効性を検証した。まず、板の上に弾性体を設置し、上方からかけた荷重に対する圧縮の様子を測定した(図5)。弾性体によって厚さが異なるため、圧縮に関しては測定結果を圧縮率(弾性体の厚さに対する圧縮の割合)で表すことにした。測定結果を図6に示す。次に、中央に穴のあいた板の上に弾性体を設置し、上方からかけた荷重に対する伸長の様子測定した(図7)。測定結果を図8に示す。

測定結果より、ゴムスポンジは荷重の大きさにほぼ比例的に圧縮率が増加している。また、ゴムスポンジは荷重に対する伸長性が低く、下側からロッドで押圧しても上側に膨らみが現れにくいといえる。スポンジは0.2kgf以上の荷重で大幅に圧縮されて

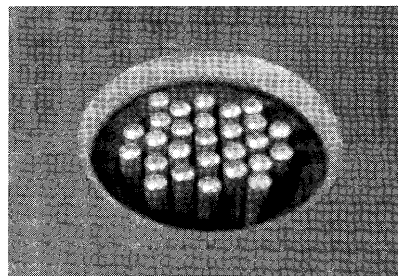


図3 ロッドの配置

Fig 3 Top end of the rods

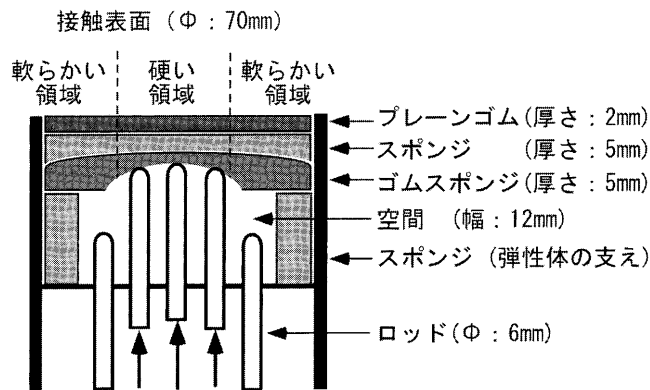


図4 弾性分布呈示部

Fig 4 Method of presentation of hardness distribution

おり、最下層で発生した膨らみを吸収することが可能である。プレーンゴムは3種類の弾性体の中で最も伸長性が高く、柔軟な素材であるといえる。以上のことより、これらの弾性体は各階層に求められる特性を有し、本装置に有効であると考えられる。

弾性体を装置に固定すると外周周辺の弾性分布の制御が困難になるため、軟性の円筒スポンジを支えとして用いた。また、最低位置にあるロッドの先端と弾性体の間に12mmの空間を設けることで、接触表面を指先で押しても最低位置にあるロッドの先端には指先が当たらないようにした。これにより、圧力を加えていない弾性体自身の硬さを呈示することが可能となる。

3. 3 駆動装置部

駆動装置のアクチュエータとしてラジコン用のサーボモータ(PS-401, KO PROPO)を使用した。このモータは定格で寸法:41mm×35mm×21mm、重量:47g、回転角度:120°(0.16s/60°)、出力トルク:3.2kg-cm(6V時)であり、小型ながら回転速度、トルクは十分な値を持っている。PWM(12Hz)のデューティ比によって目標回転角度を制御する。サーボモータの配置にあたっては、モータの幅(21mm)に対してロッドの配置間隔(8mm)が小さいため、ロッ

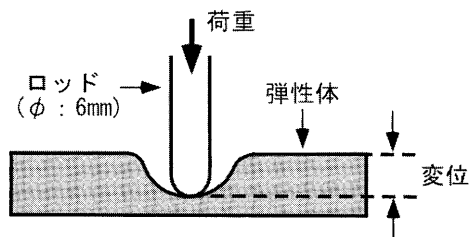


図 5 圧縮の測定方法

Fig 5 Method of compression of the elastic plate

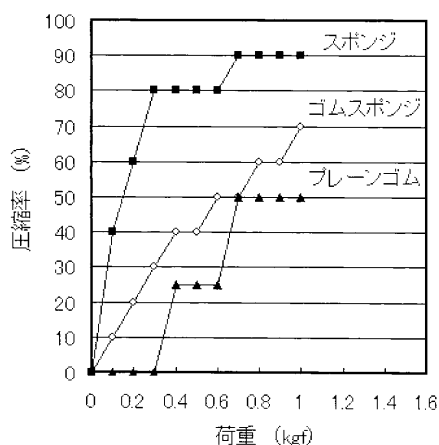


図 6 各弾性体の圧縮率

Fig 6 Result of measurement : compression

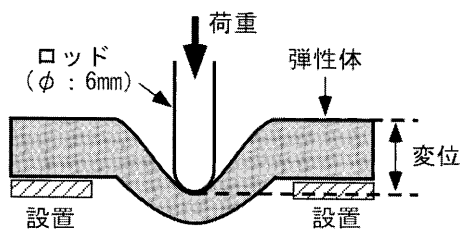


図 7 伸長の測定方法

Fig 7 Method of extension of the elastic plate

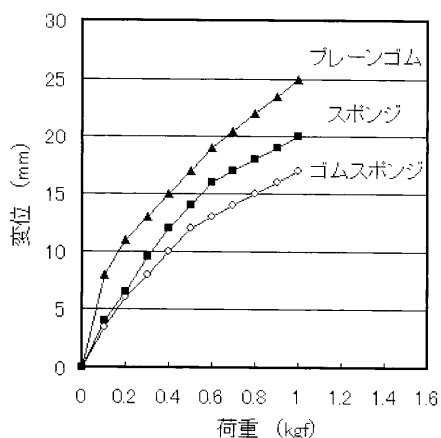


図 8 各弾性体の伸長

Fig 8 Result of measurement : extension

ドとモータを直線上に配置することができない。幾つかの試みから、図 9 に示すような配列とした。それぞれの列はロッドの配置間隔にあわせて、8mm ずつ階段状にずらしてある (図 9: 側面図)。サーボモータの回転運動をロッドの上下運動に変換するため、アルミ棒 (φ3mm) をリンクに用いたピストン・クランク機構で接続した (図 10)。

この機構方法ではロッドとアルミリンクのなす角 (Pr : 図 10) が大きくなると、回転運動が上下運動にスムーズに変換されない。15° おきに Pr を変えて運動変換の様子を測定したところ、 Pr が 60° 以下のときスムーズに変換可能であると確認された。

また、10 名の被験者に対して、本装置の接触表面を押す力の大きさを測定したところ、各被験者の最大値の平均はおおよそ 1.1kgf となり、本装置のアクチュエータに必要なトルクの大きさは 1.1kgf であると確認された。この結果とモータのトルクを考慮してクランクシャフトの長さは 20mm とした。それによる各ロッドの有効ストロークは、平均で 20mm である。

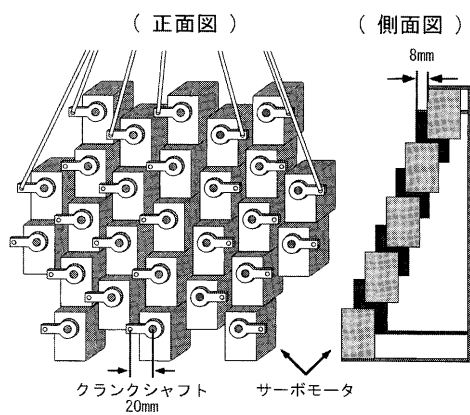


図 9 モータの配列

Fig 9 Arrangement of motors

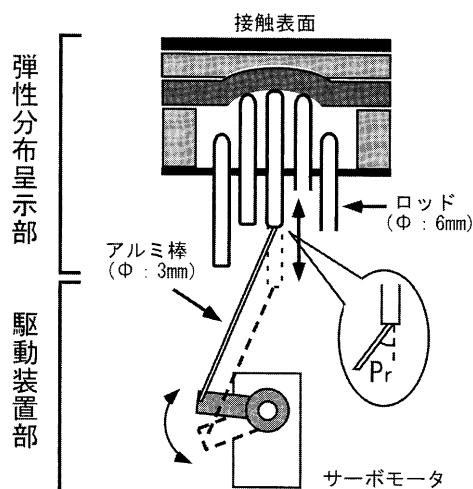


図 10 ピストン・クランク機構

Fig 10 Piston-crank mechanism

3. 4 カセンサ部

ロッドの先端に力が加わると、サーボモータの内部にロッドの先端を目標位置に保持する保持トルクが発生する。モータトルクと内部に流れる電流量は比例するため、電流センサをモータに接続し、トルク発生時に流れる電流量を検出することにより「カセンサ」を実現した。電流センサは定格電流 $\pm 3A$ (PMC-3PD: ルックス工業株式会社) を用いた。センサ出力は周波数 26Hz の矩形波 (0V-1V) で、電流の増加に比例して 1 周期における高値の割合が増加する。本装置で使用した PC の周波数はおよそ 4.15kHz であり、PC がセンサ出力を連続して 160 回読み取ることによって周波数が一致する。そこで PC の出力は 160 回のデータ取得を 1 周期として、それに占める高値の割合とした。ロッドの先端に 0.15kgf (センサの出力が現れる最小値) から 1.1kgf (アクチュエータに必要な最大トルク) までを 0.05kgf 間隔で与え、センサ出力の様子を測定したところ、センサ出力の有効領域は 0.3kgf から 0.85kgf であることが確認された^[9]。この領域における力の分解能は 0.04kgf であり、本装置のカセンサは 13 段階の計測が可能である。

本研究で開発した装置の概観を図 11 に示す。

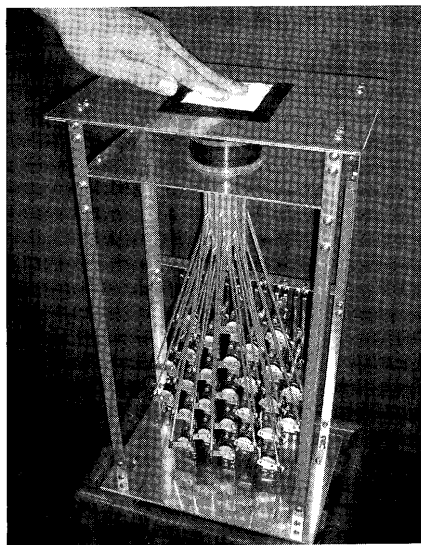


図 11 面型ハプティックインタフェース

Fig 11 Overall view of the haptic interface

4. 弾性変化の測定

ロッドが弾性体に圧力を加えることで発生する接触表面の膨らみと、弾性体内部の硬さの変化を測定し、本装置の表現精度を検証した。

4. 1 無負荷時の形状変化

ロッドの上昇によって接触表面にどのような変化

が発生するか検証した。すべてのロッド (27 本) の先端を接触表面から 14mm の位置にそろえて基準平面 (図 12) とし、中央に配置されたロッド 1 本の上昇位置 (H: 図 12) を 7 パターン (基準平面から 0mm、1mm、2mm、3mm、5mm、7mm、9mm) に設定した。弾性体の厚さは 12mm のため、ロッドが基準平面から 2mm 上昇するとロッドの先端と弾性体が接触する。

ロッドの上昇位置によって発生する接触表面の膨らみを図 13 に示す。ロッドの先端が 5mm 以上上昇すると表面に微小な凹凸が現れることがわかる。装置の使用にあたって、ユーザは上から接触表面を見下ろすため 2mm 程度の膨らみがあっても、視覚的に表面の凹凸は認識されにくいことが 5 人の被験者の感想から確認された。測定結果より、本装置の構成ではロッドの先端を基準平面から 5mm 上昇させても視覚的に様な表面を再現できるといえる。

4. 2 負荷を与えた時の弾性変化

ゴムなどの弾性体の特性として、圧縮すると内部の弾性値が変化する。そこで、ロッドの上昇による弾性体への押圧量の変化で、内部にどのような弾性変化が発生するか検証した。中央に配置したロッドを一定距離上昇させた状態において、接触表面の変位と荷重 (F: 図 12) の関係を測定した。ロッドの上昇距離は無負荷時の形状変化の測定と同様の 7 パターンであり、荷重は 0.01kgf (測定器の重さ) から 1.5kgf までを 0.1kgf 間隔で与えた。

測定結果を図 14 に示す。ロッドの上昇位置によって接触表面と荷重の関係が変化しており、ロッドの上昇位置が高いほど接触表面の変位に必要な荷重が大きくなっている。接触表面を変位させるために必要な力が大きければ「硬い」、小さければ「軟らかい」と定義すると、ロッドの上下動で弾性体内部の硬さを変化させることが可能であるといえる。各上昇位置における弾性変化の特徴として、グラフの傾きが 3 段階ほど変化していることが挙げられる。

本装置では 3 種類の弾性体を重ねて呈示部に設置している (図 4 参照)。3 種類の弾性体は硬さと厚さ

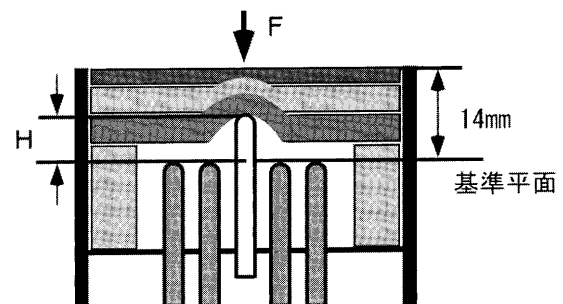


図 12 ロッドの設定

Fig 12 Definition of rod height

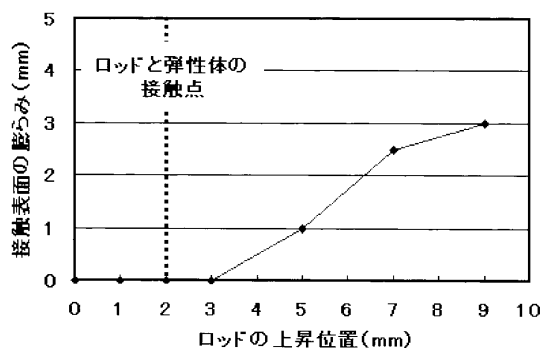


図 13 接触表面の膨らみ

Fig 13 Relationship between the top position of the rod and the swell of elastic surface

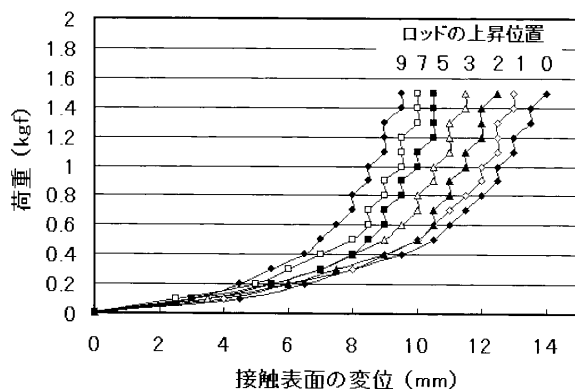


図 14 弾性変化の測定結果

Fig 14 Relationship between displacement and applied force

が異なるため、各弾性体が荷重によって受ける影響は均一ではない。微小な負荷を接触表面にかけた場合、もっとも圧縮率の高い中間層のスポンジが変形し (3. 2 参照)、負荷が大きくなると残りの弾性体にも影響がおよび、全体的に圧縮して内部の硬さが増加する。この 3 種類の弾性体を重ねた設置方法のため、荷重の大きさによってグラフの傾きが変化していると考えられる。

5. 評価実験

5. 1 硬さ分布に関する従来の心理物理実験

現在までに体性感覚に関する多くの研究がなされているが、これらの多くは皮膚感覚に関係しており、触力覚を含む研究例は少ない。その中で Lederman と Klatzky の研究はフォースディスプレイの開発に密接に関係している^[10]。彼らは触診に関する実験を行った^[11]。その内容は、フォームラバーの下に置いた鋼球を見つけるものである。実験結果より、鋼球の直径が 8mm 以下であると、スコアが下がるということが明らかになった。この知見は、本装置のロッドの間隔を 8mm に設定した理由の一つとなっている。

5. 2 弾性分布認識の弁別閾測定

弾性変化の測定結果より、ロッドの先端の上昇位置に対応して弾性体内部の硬さが増加することが確認された。そこで、となりあう領域に硬さの違いを呈示し、弾性分布にどれくらいの勾配を与えれば、ユーザは硬さの違いを識別できるか検証した。

5. 2. 1 実験方法

12 名の被験者に対して、弾性分布認識の弁別閾測定を実施した。実験に際して、接触表面の中央に赤い印をつけ、接触表面以下の部分を布で覆い隠した。すべてのロッドを基準平面 (4 章: 図 12 参照) にそろえ、図 15 に示した 4 本のロッドのうち 1 本を上昇させて、硬さの変化を発生させた。ロッドの上昇位置は基準平面から 1mm、2mm、3mm の 3 パターンに設定した。上昇させるロッドの周りに 6 本のロッドを格子状に配置することで、硬さの変化が起こる周辺を一樣な弾性分布にすることができる。

被験者は利き腕の人差し指のみを使って接触表面に触れてもらい、硬さの変化が認識された位置 (赤い印の上、下、左、右) の回答を得た。呈示位置の 4 パターンとロッドの上昇位置の 3 パターンを組み合わせた 12 パターンをランダムに呈示したものを 1 セットとして各被験者に 2 セットずつ行った。

5. 2. 2 実験結果と考察

各ロッドの上昇位置における被験者の正解率の平均と標準偏差を図 16 に示す。ロッド 1 本が基準平面から 1mm、2mm 上昇することで発生する弾性変化に対する正解率は 31%、89%であり、3mm の上昇では 100% の正解率が得られた。各上昇位置における正解率を被験者別に見ると、1mm では 65%以上の正解率の被験者は存在せず、3 名の被験者においては正解率が 0% であった。2mm では 10 名の被験者が正解率 80%を超えており (うち、7 名が正解率 100%)、残りの 2 名も 50%以上の正解率が得られた。

以上のことより、ロッドの上昇位置が 2mm 以上の格差で発生する弾性変化の勾配をユーザは硬さの違いとして識別可能であると確認された。

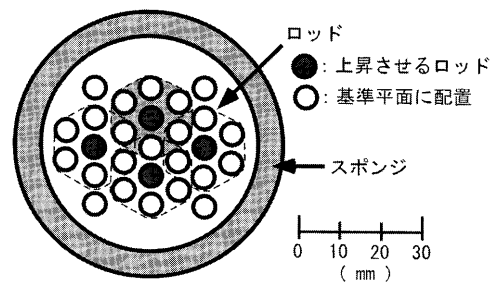


図 15 弁別閾の測定方法

Fig 15 Method of measurement of discrimination threshold

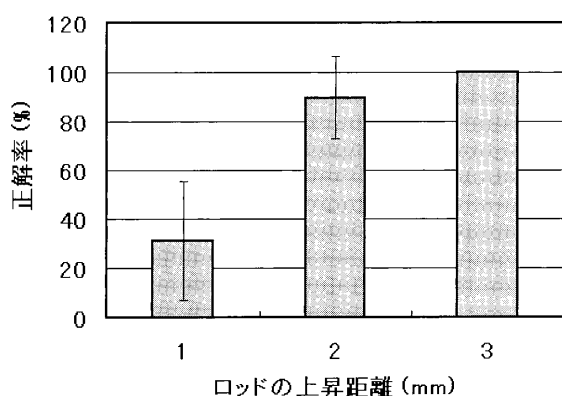


図 16 弁別閾の測定結果

Fig 16 Result of discrimination threshold

5. 3 硬弾性領域認識実験

接触表面に再現される硬い領域（以下、硬弾性領域）の形状は、弾性体に圧力を加えるロッドの本数と上昇位置によって決定される。接触表面には厚さ 12mm の弾性体が設置させているため、ロッドの上下動により形成される形状とユーザが知覚する硬弾性領域が一致するとは限らない。そこで、本装置が呈示する硬弾性領域が、どのようにユーザに認識されるか検証した。

5. 3. 1 実験方法

9 名の被験者に対して、硬弾性領域の認識実験を実施した。実験に際して、被験者にはロッドの太さおよび配置方法は知らせず、接触表面以下の部分を布で覆い隠した。すべてのロッドを接触平面から 24mm の位置に設定し、何本かを基準平面（4 章：図 12 参照）から 5mm の高さまで上昇させて、弾性体に硬さの変化を与えた。無負荷時の形状変化（4. 1 参照）において、ロッドを基準平面から 5mm 上昇させても接触表面は視覚的に一様であると確認され、また、弾性分布認識の弁別閾測定（5. 2 参照）では、ロッドを基準平面から 3mm 上昇させて発生する硬さの変化の認識率が 100%であったことから、本実験で呈示する硬弾性領域の大きさや位置は視覚では把握できず、指先で触ることではじめて認識できるものであるといえる。上昇させるロッドの本数によって 4 種類の大きさの硬弾性領域を実現した（図 17）。各硬弾性領域の直径はおよそ 6mm（パターン 1）、12mm（パターン 2）、20mm（パターン 3）、34mm（パターン 4）である。

パターン 1 からパターン 3 までをそれぞれ異なる位置で 3 回、パターン 4 を同一位置で 3 回、計 12 試行をランダムに呈示し、1 試行ごとに知覚した領域を装置の接触表面（φ70mm）と同じ大きさの方眼紙に記入することのみを被験者に指示した。知覚領

域と重心位置の計測に関して、1mm 四方の方眼紙に描かれた被験者の知覚領域の形状についてコマ数を数えることで面積を算出し、縦方向と横方向の面積二等分線の交点を重心位置とした。

5. 3. 2 実験結果と考察

被験者が知覚した領域の直径と重心位置のずれの平均値、および標準偏差を図 18、19 に示す。4 つのパターン間における知覚領域の有意差を分散分析により算出した結果、直径 12mm 以下の呈示領域に対する認識結果に有意差が認められなかった。硬弾性領域が大きい呈示の場合、硬い領域と軟らかい領域の違いが明確に現れるため境界が認識しやすいが、パターン 1 のように硬弾性領域が小さい場合は硬さの境界がはっきりせず、実際の呈示領域よりも大きな範囲で硬さの境界を識別してしまう。このため、パターン 1 とパターン 2 の有意差が出なかったものと考えられる。また、知覚領域に個人差があった理由の一つとして、知覚領域を図に描き表すことの得手不得手があることも考えられる。しかしながら、直径 12mm 以上の呈示領域では、すべてのパターン間に有意差が認められ、ユーザは呈示領域の大きさの違いを認識しているといえる。

重心位置のずれはすべてのパターンで 6mm 以下であり、装置の呈示能力に比べて小さな誤差となった。被験者は本装置が呈示する硬弾性領域の位置を認識しているといえる。

実験結果より、ユーザが識別可能な最小の呈示刺激量は直径 12mm の円形であり、その呈示に対してユーザは直径 15mm 程度に知覚していることから、本装置では直径 15mm 程度の微小物体を呈示できるといえる。

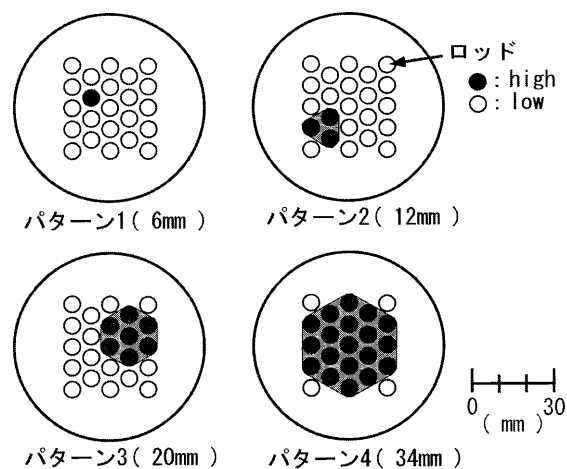


図 17 硬弾性領域の設定

Fig 17 Displayed objects

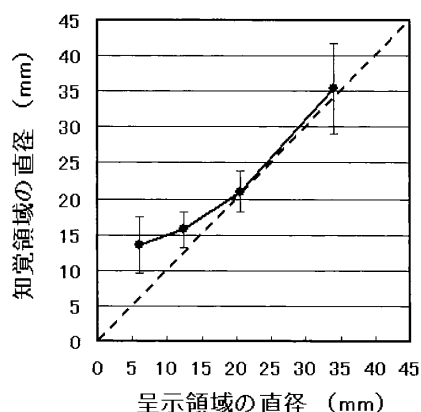


図 18 知覚形状の大きさ

Fig 18 Size of perceived objects

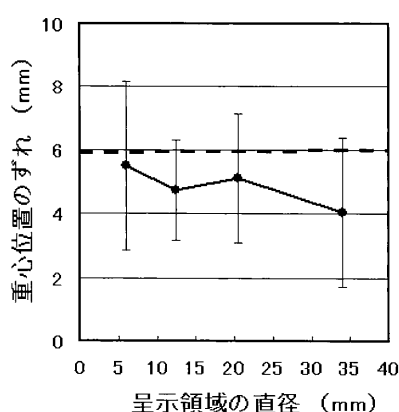


図 19 重心位置のずれ

Fig 19 Position error of perceived objects

5. 4 仮現運動認識実験

5. 4. 1 仮現運動

2つの光点 A、B を同時に示すと A、B は離れて見えるが、A をさきに出して、それを消した後に B を適当な時間 (約 100msec) で継時的に示すと A から B へ光点が動いたように感じ、しかも A は途中を通って B に達するように見える。この現象を視覚の「仮現運動 (apparent movement)」という^[12]。

Frey & Metzner (1902) は触覚の継時的 2 点弁別実験中、たまに刺激位置が移動するような、なでられるような感覚が生じると報告した。その後、Wertheimer の視覚における仮現運動の研究報告を契機として、触覚でも仮現運動の研究が行われるようになった。しかし、Benussi (1913) は触覚では仮現運動は生じないとし、Whitchurch (1921) と Hulin (1929) は最適条件でも、せいぜい 60%程度しか生じないと報告した。このように触覚仮現運動は不安定で、完全な運動はまれにしか生じないとされてきた。ところが振動刺激素子が用いられるようになると、仮現運動は明瞭に観察されるようになった。仮現運動が生じるためには異なる部位に継時的に呈示され

る刺激間に時間的・空間的相互作用が要求されるため、持続的な刺激効果をもつ振動刺激の場合が単一圧刺激よりも適しているであろう。仮現運動に影響を与える刺激変数として、刺激周波数、刺激強度、呈示時間、呈示時間間隔、刺激間距離などが考えられる。これらの変数の中で最も重要な変数は呈示時間と呈示時間間隔 (onset interval) であることが知られている。(Kirman, 1974, 1975; Sherrick, 1968; Sherrick & Rogers, 1966; 和気・斎田・清水・和気・久米, 1978) ^[13]

これまでに本装置を用いて著者らが行った「硬弾性領域の移動表現^[9]」では、接触表面上の 2 点に一定時間間隔で交互に硬弾性領域を発生させる表現において、時間間隔の違いがユーザの認識に与える影響を検証した。時間間隔の長い呈示では 2 点の硬い刺激がはっきりと認識され、時間間隔の短い呈示では硬い刺激の認識率は落ちるものの、2 点間で連続的な平行移動のように認識されることが確認された。2 点の刺激が連続的な平行移動に感じられる現象は、触覚の仮現運動が起こっていると考えられる。本装置の構造で触覚の仮現運動が起これば、硬弾性物体の移動表現において移動方向にロッドを 1 本ずつ動作させる必要がなく、一定距離間隔でロッドを動作させればよいというメリットになる。しかしながら、時間間隔の短い呈示では、装置が呈示したよりも 2 点間の距離が短く認識されるといったデメリットも発生する。そこで、手のひらに 2 点の硬い刺激を様々な時間間隔で交互に与え、仮現運動と 2 点間の距離の認識率を検証した。

5. 4. 2 実験方法

10 人の被験者に対して、仮現運動の認識実験を実施した。離れた位置にある 2 本のロッドを一定時間周期 (T: Hz) で交互に上下動させることで、接触表面の 2 点に硬さの刺激を発生させた。接触表面に触れたユーザが、硬い物体が 2 点間を水平方向に移動したと感じられたとき、触覚の仮現運動が起こったとする。ロッドの振動幅は 5mm とした。本装置では、ロッドが 5mm 上昇 (下降) するのに 0.1 秒かかるため、一定時間をおかずに 2 本のロッドを連続して作動させた最短周期は 5Hz となる。そこで、実験における 2 点刺激の呈示周期として 0.5Hz~5Hz までも 0.5Hz 間隔で設定した。また、仮現運動の認識に影響を与えるもう一つの要因として 2 点間の距離が考えられるため、2 本のロッドの距離 (S: 図 20) を 16mm と 32mm に設定し、距離の影響についても検証した。接触表面で 2 点の刺激が現れる線上に赤い線を引き、被験者に赤い線に合わせて手の部位 (①親指のつけね、②手のひら、③人差し指、④人差し指・

中指・薬指（図 21）を当ててもらった。手の各部位ごとに呈示周期の 10 パターンと 2 点間の距離の 2 パターンを組み合わせた 20 試行をランダムに呈示し、1 試行ごとに 10 秒間体験した後で仮現運動の認識についての回答を得た。

5. 4. 3 実験結果と考察

すべての部位における仮現運動の認識率の平均を図 22 に、各部位ごとの認識率を図 23 に示す。

すべての部位での結果より、1.5Hz 以上の呈示周期から仮現運動を認識する被験者が現れ、3Hz 程度の呈示周期で被験者の半数以上に仮現運動が認識されていることがわかる。また、硬さの変化が発生する 2 点間の距離は短いほうが認識率は高い。

各部位ごとの結果より、親指のつけねや手のひらでは、2 点間の距離による認識率の差があまり見られないが、人差し指や中指など指先による認識では 32mm 距離の呈示は認識率が低く、特に④（人差し指・中指・薬指）の実験での認識率の差が目立った。④の部位での認識において、32mm の間隔は指 1 本の太さよりも広いため、人差し指と薬指に刺激が与えられても中指には刺激がないため、仮現運動の感覚が得られなかったと考えられる。

実験結果を被験者ごとに見ると、仮現運動が認識された呈示周期の違いによって、3 つのグループに分類することができる。3.5Hz 以上の速い周期で仮

現運動を多く認識した被験者の A グループと 1.0Hz から 3.0Hz の遅い周期で多く認識した B グループ、2.5Hz 以上の広範囲にわたって仮現運動を認識した C グループである。2 点間の距離や手の部位の違いにより、グループを入れ替わる被験者が多少見られるが、各グループの割合は、およそ A : 30%、B : 10%、C : 60%であった。実験後の感想において、A グループに含まれる被験者から「遅い呈示は個々の刺激が強く感じられ、移動しているような感覚は得られない」という意見が聞かれたのに対し、B、C グループに含まれる被験者からは「呈示周期が速いものは移動ではなく、その場で振動しているように感じられた」という意見が聞かれた。3Hz から 4Hz の間がグループの境界となるため、その地点での仮現運動の認識率が低下している。

以上より、視覚と同様、触覚においても仮現運動が感じられる呈示周期の範囲が存在すると確認された。しかし、その範囲は被験者によって差があるといえる。

6. 考察

本研究で開発した「面型ハプティックインタフェース」の大きなメリットとして以下のことが挙げられる。

- 指先を用いた自然な動作で操作するため、指示を与えなくても直感的に体験できる。
- 弾性体を呈示部に設置することにより、簡素な構成で硬さの変化を可能とし、ロッドの高密度配置や応答速度の遅れによる違和感の解消を実現した。

本装置は、装置自体が変形する対象指向型フォースディスプレイで構成されており、道具を持ったり、特殊な装置を体に取り付ける必要がなく、自然な動作で装置を操作することができる。道具媒介型やエグゾスケルトン型のフォースディスプレイでは、バーチャル物体との接触点の制御が困難であり、接触点で発生する振動や不要な力のフィードバックは、時にユーザを危険にさらすことがある。本装置は高い安全性を備え、ユーザは気軽に体験することができる。また、力センサによってユーザの接触表面での力のベクトルを検知することにより、硬弾性物体を指で押して動かすなどの操作が可能である^[9]。

本装置の強調すべき特長は、ロッドの上下運動と呈示面に設置した弾性体で硬さの変化を実現していることである。送りネジ機構によるロッド移動の速度制御のみで硬さの変化を呈示していたハプティックスクリーンでは応答速度の遅れやロッド移動の遅れにより「軟らかい」表現の呈示が困難であった。

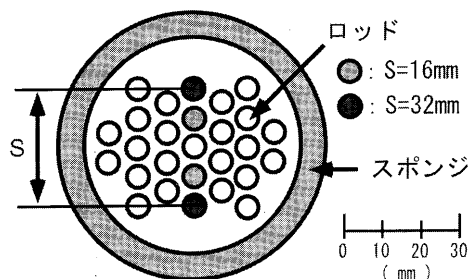


図 20 仮現運動認識実験の設定

Fig 20 Method of generation of apparent movement

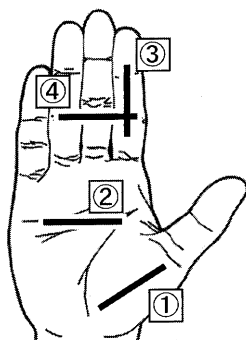


図 21 手の部位

Fig 21 Position of generation of apparent movement

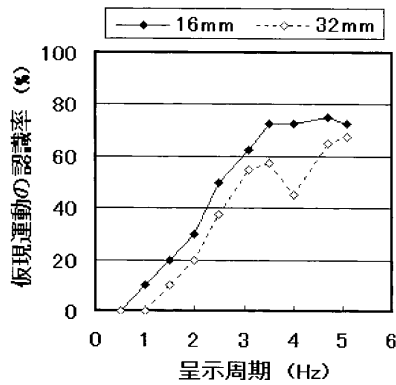


図 22 仮現運動の認識率

Fig 22 Ratio of perceived apparent movement

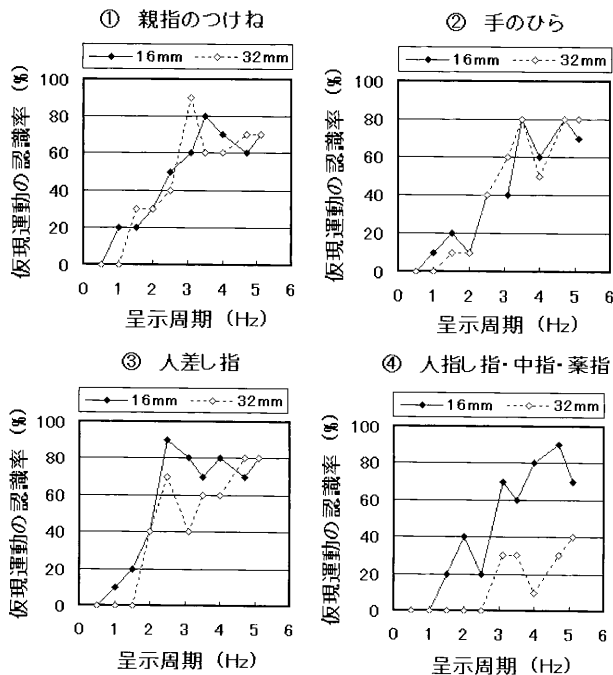


図 23 各部位での認識率

Fig 23 Ratio of perceived apparent movement : each part

しかしながら、弾性体を用いた本装置の構成では、ロッドの上昇位置に対応して弾性体内部の硬さが変化するため、視覚的に一様な接触表面の内部の硬さを変化させる表現を簡素な構成で可能とし、装置の高密度化を実現した。さらに、ロッドが弾性体を押圧することで瞬時に弾性体内部の硬さが変化し、時間遅れによる違和感を解消した。

その反面、本装置のデメリットとして以下のことが挙げられる。

- 装置の製作（拡張）、制御が難しい。
- 再現できる形状に限界がある。

8mm 間隔で配置された 27 本のロッドの上昇位置をサーボモータで制御する装置の製作は極めて困難であった。今後、呈示領域を拡張するためアクチュエータの個数を増加させるのであれば、ピストン・ク

ランク機構ではなく、新しい機構を開発しなければならない。著者らは、ワイヤーを用いた駆動装置部の開発により、装置の拡張に対する一つの解法を導いた^[14]。また、弾性分布の呈示には多くのアクチュエータを同時に動かす必要がある。27 個のアクチュエータを用いた現時点の装置において、それほどトラブルは起こっていないが、アクチュエータの個数を増やすことでトラブルが起こりやすくなることが予測される。呈示領域を拡張するにあたり、これらの問題をクリアしなければならない。

もうひとつのデメリットとして、再現できる形状に限界があることが挙げられる。本装置の構成では角がある物体を再現できない。さらに、直動アクチュエータによる物体形状の呈示では、物体の裏側を表現することは不可能である。現在、同研究室では 3 次元形状を再現するハプティックインタフェースの研究が進められている。

7. おわりに

本論文では、「高密度対象指向型フォースディスプレイ」と「弾性体」を用いたこれまでにない構成に力センサを実装した「面型ハプティックインタフェース」を開発し、弾性変化の測定と評価実験を通して、装置の有効性を検証した。

凹凸のない一様な表面の内部に硬さの変化を発生させる手法として、呈示部に弾性体を設置した。従来のように硬さの変化をアクチュエータの速度制御のみで実現する必要がないため、装置の構成が簡素化され、呈示部の高密度化を可能とした。さらに、ロッドによる弾性体への押圧で瞬時に弾性体内部の硬さが変化するため、応答速度の遅れによる違和感を解消した。

ロッドの先端に力が加わると、サーボモータ内部に保持トルクが発生する。そこで電流センサをモータに接続し、トルク発生時に流れる電流量を検出する方法で力センサを実現した。

弾性変化の測定結果より、ロッドの上昇位置に対応して弾性体内部の硬さが変化することが確認された。また、評価実験により本装置がユーザに与える影響を検証した。実験結果より、ユーザはロッドの上昇位置が 2mm 以上の格差で生じる弾性分布の勾配を硬さの違いとして識別することができ、硬弾性領域の呈示においては直径 15mm の円程度の微小な領域が認識可能であると確認された。また、仮現運動認識実験において、16mm 離れた 2 点に硬さの変化を 3Hz 以上の速さで発生させることによりユーザに仮現運動が認識されることがわかった。

バーチャルリアリティの医療応用は 1990 年後半

になってから急速に進展しており^[15]、道具媒介型フォースディスプレイを用いた様々な手術シミュレータが開発されている。本研究で開発した装置は、凹凸のない様な表面を指先で触ることで、はじめて内部で生じる硬さの変化を知覚する「触覚による物体認識」を再現するものであり、触診シミュレータとしての医療応用が考えられる。医師の話によると、癌の腫瘍を診断するにあたって注意すべきことは腫瘍の硬さと、触ったときに腫瘍が動くかどうかであるという。腫瘍が動かなければ癌は進行していると診断される。CTやMRIのデータをもとにバーチャルな腫瘍を呈示できれば、手術をすることなく体内の腫瘍を触診することができる。さらに、この技術を用いた2つ装置を通信させることで医師は遠隔地にいる患者を触診するといった遠隔医療も考えられる。

本論文で述べた「面型ハプティックインタフェース」をさらに改良し、触診シミュレータとして実用することが将来に向けた展望である。

参考文献

- [1] 岩田洋夫：ハプティックインタフェース，計測と制御 Vol.38, pp.391-396 (1999)
- [2] Hirota and Hirose：Simulation and Presentation of Curved Surface in Virtual Reality Environment Through Surface Display, Proc. IEEE VRAIS'95 (1995)
- [3] 平田，星野，前田，館：“人工現実感システムにおける物体形状を提示する力触覚ディスプレイ”日本バーチャルリアリティ学会論文集, 11-1 (1996)
- [4] 岩田洋夫，市ヶ谷敦郎：ハプティックスクリーン，日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，Vol.1, pp.7-10 (1996)
- [5] Ikei, Y., Wakamatsu, K., and Fukuda, S., Vibratory Tactile Display of Image-based Textures, Computer Graphics and Applications, 17(6), pp.53-61 (1997)
- [6] Kontarinis, D., Howe, R., : Tactile Display of Vibratory Information in Teleoperation and Virtual Environment, PRESENCE, 4(4), pp.387-402 (1995)
- [7] 下条誠，篠原正美，福井幸男：3次元触覚ディスプレイにおける提示ピン配置密度と形状判別特性，電子情報通信学会，Vol.J80-D-II, No5, pp.1202-1208 (1997)
- [8] 村上存，石丸温，ファン シャオフェイ，中島尚正：可変形物体を入力装置とする3次元形状操作インタフェース，日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，Vol.3, pp.177-180 (1998)
- [9] 河村亮，矢野博明，岩田洋夫：面型フォースディスプレイを用いた動的弾性分布呈示手法，日本機械学会第10回設計工学・システム部門講演会講演論文集，pp.325-328 (2001)
- [10] Lederman, S.J. and Klatzky, R.L., Hand movements: : A window into haptic object recognition, Cognitive Psychology, 19(3), pp.342-368 (1987)
- [11] Lederman, S.J. and Klatzky, R.L., Sensing and displaying spatially distributed fingertip forces in haptic interfaces for teleoperators and virtual environment system. PRESENCE 8(1), pp.86-103 (1999)
- [12] 渡部，坂田，長谷川，吉田，畑田：視覚の時間的性質，視覚の科学，写真工業出版社 pp.101-114 (1981)
- [13] 大山正，今井省吾，和気典二：感覚・知覚心理学ハンドブック，誠信書房，pp.1241-1242 (1994)
- [14] 河村亮，矢野博明，岩田洋夫：ワイヤー駆動を用いた面型ハプティックインターフェイスの開発，日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，Vol.6, pp.51-54 (2001)
- [15] 日高俊明：バーチャルリアリティ応用の最先端をいく医療分野，VR革命，オーム社 pp.69-94 (2000)
- [16] 河村亮，矢野博明，岩田洋夫：弾性分布を呈示する面型ハプティックインターフェイスの開発，日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，Vol.5, pp.51-54 (2000)
- [17] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Fumitaka Nakaizumi, Ryo Kawamura：Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics, Proceedings of SIGGRAPH 2001 (2001)

(2002年4月20日受付)

[著者紹介]

河村 亮 (正会員)



2002年筑波大学大学院理工学研究科卒業，同年松下電工(株)入社，現在に至る。人工現実感技術を利用したシステムの研究開発に従事。

矢野 博明 (正会員)



1997年筑波大学大学院工学研究科修了，同年日本学術振興会特別研究員(PD)，99年筑波大学機能工学系講師，現在に至る。力覚呈示，移動感覚呈示に関する研究に従事。(工学博士)

岩田 洋夫 (正会員)



1986年東京大学大学院工学系研究科修了，同年筑波大学構造工学系助手，88年同講師，93年同助教授，99年同大学機能工学系助教授，2002年同教授，現在に至る。人工現実感に関する研究に従事。(工学博士)