

## 基礎論文

## 高密度力覚ディスプレイによる弾性分布呈示

小峯 圭太<sup>\*1</sup> 矢野 博明<sup>\*2</sup> 岩田 洋夫<sup>\*2</sup>

## Rigidity Distribution Rendering Using High-resolution Surface Type Haptic Display

Keita Komine<sup>\*1</sup>, Hiroaki Yano<sup>\*2</sup> and Hiroo Iwata<sup>\*2</sup>

**Abstract** – This paper describes development of a small and high-resolution surface type haptic display. This device consists of 64 (8×8) linear actuators that are set with no space between them. Each linear actuator consists of a lead screw, a DC servomotor, and a force sensor. It has ability to present arbitrary force and shape by changing its length interactively. The size of its base is 4mm (width) × 4mm (depth), therefore, the device is practicable to present high resolution force rendering. Some rigidity distribution rendering algorithms were evaluated through experiments.

**Keywords:** surface type haptic display, rigidity distribution, linear actuator

## 1. はじめに

医療をはじめ、科学技術の分野では、膨大で複雑な3次元データを分かりやすく呈示することが重要である。これらのデータの中には、力覚呈示を用いることで、ユーザが直感的な理解と全体の把握をすることが容易になるものがあり、力覚呈示による情報呈示手法は「可触化」と呼ばれる。3次元データを可触化する研究は過去にも行われており、ボリュームデータを力覚呈示した例[1]や、科学技術データの可触化という目的で力覚を導入した例[2][3]もある。最近では超音波エコーにより、非侵襲で生体組織の弾性分布データを得ることが可能となっており、このデータを用いて、道具媒介型力覚インターフェースで弾性分布の呈示を行い、その知覚特性について研究がなされている[4]。道具媒介型力覚インターフェースを用いた場合、高解像度の弾性分布呈示が可能だが、道具の先端での点接触となり、データの全体像をつかむ、細かな分布変化の違いを見つけるといった動作には時間がかかってしまう。

バーチャルな物体をユーザが面で知覚するためには、面呈示が行える対象指向型の力覚呈示装置である面型ハプティックインターフェースが有効である。対象指向型とは、装置自体が変形したり、移動したりしてバーチャル物体を模擬することでユーザに力覚呈示を行う方式である。面型ハプティックインターフェースには、上下動可能な力覚呈示ピンを平面

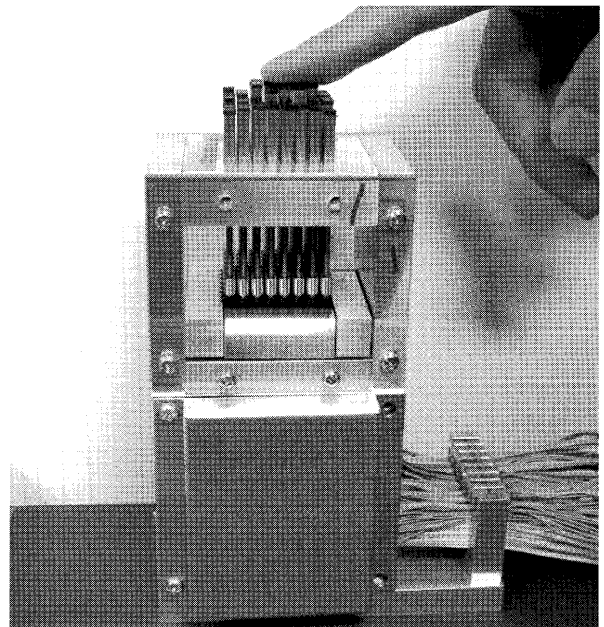


図1 高密度力覚ディスプレイ概観図

Fig.1 Overview of the high-resolution surface type haptic interface

上に多数配置することでバーチャルな形状、力覚の呈示を行う装置があり、ユーザは実物体を触るときと同様に装置に触れる事で直感的に呈示物体を認識することができる。

本研究では、面型ハプティックインターフェースを用いた高解像度な弾性分布呈示を目指し、小型の直動アクチュエータ[5]を、間隔を密に配置した高密度力覚ディスプレイを開発した。さらに、開発した装置を用いた弾性分布の呈示アルゴリズムを開発し、識別実験によってその有効性を検証した。

<sup>\*1</sup>: 筑波大学大学院システム情報工学研究科

<sup>\*2</sup>: 筑波大学 システム情報工学研究科

<sup>\*1</sup>: Graduate School of Systems and Information Engineering, Univ. of Tsukuba

<sup>\*2</sup>: Department of Intelligent Interaction Technologies, Univ. of Tsukuba

## 2. 従来の研究

装置の設計において、上下に動作するピンやロッドを平面上に配置することで面呈示を行う方式を採用した。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で形状を呈示し、力を入力する面呈示型デバイス[6]、コイル状形状記憶合金を用いた形状ディスプレイ[7]などのシステムが提案されている。この装置では、形状や力の入力による形状変化を呈示することができる。

面型ハプティックインターフェースを用いた弾性分布呈示の研究では、36本の力覚呈示ピンを40mm間隔に配置した「ハプティックスクリーン」がある[8]。これは、手のひら全体に弾性分布及び形状呈示を行う装置である。また、より小さな物体を表現するために27本の呈示ピンを8mm間隔で配置した力覚ディスプレイ「FEELEX2」が研究されている[9]。この装置ではピストン・クランク機構を用いることでモータの回転を呈示ピンの上下運動としており、ユーザは呈示ピンをスポンジなどの弾性体の上から触れることで弾性分布呈示を行う面型ハプティックインターフェースである。この装置では直径14mm程度の硬弾性領域を識別することができ、体内の腫瘍を呈示するアプリケーションが開発されている。しかし、生体組織データを呈示するにはより高解像度の弾性呈示が行える力覚ディスプレイが必要であり、この装置の機構ではこれ以上の小型化、高解像度化は難しい。

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。高密度に配置された呈示ピンによる形状呈示を行う装置としては、低融点金属を利用して呈示ピンのクラッチ及びリリースを行うシステムが研究されている[10]。このシステムは2mm間隔でピンを平面上に敷き詰め形状呈示を行う。他にステッピングモータによる送りねじ機構の直動アクチュエータを3mm間隔で配置した装置[11]、圧電素子を用いた装置など多くの研究がされている。これらのシステムは高解像度な形状呈示を行えるが、弾性面呈示などの力覚呈示を行うための駆動機構や出力を備えていない。

ロッドやピンの上下動によって形状を表現し面呈示を行う装置では、ロッドやピンの配置密度を高めるほど形状や表現する解像度を高める事ができる。一方、高密度に配置されたロッドやピンを稼働させ、弾性呈示を行うには製作において煩雑さが伴う。従って、高解像度な弾性分布呈示を行うためには装置の駆動機構の簡素化、小型化が求められる。

## 3. 装置の概要

### 3.1 装置の設計指針

装置の呈示解像度を決定するにあたり、医師が触診を行う時に識別可能な生体組織の弾性分布が呈示できる解像度を目標とした。触診を行う医師らは約8mm程度の腫瘍を識別できることから、「FEELEX2」では呈示ピンが8mm間隔に配置された。しかし、呈示ピンの上に配置した弾性体により、硬さの異なる物体の最小知覚面積は直径14mm程度、重心の位置誤差は6mm以下となった。本研究では、さらなる解像度向上を目指し、市販品として最小サイズのアクチュエータにより呈示ピンを4mm間隔で配置することとした。また、直動アクチュエータを細くすることで、呈示ピン配置の集積度を上げ、配置の簡素化、装置自体の小型化を図る。そのために本研究では4mm角に収まる細さの直動アクチュエータを開発し、各直動アクチュエータを隙間なく配置することで力覚ディスプレイを構成した。

弾性分布呈示においては、呈示ピンが剛体であるためにユーザが直接ピンに触れると硬い印象を受ける。過去の研究例において、「ハプティックスクリーン」ではプレーンゴムを、「FEELEX2」ではゴム、スポンジから構成される弾性体を載せることでこの感覚の緩和を図っている。本研究でも各呈示ピンの上に厚さ1mmのプレーンゴム(弾性体)を配置し、後述する静的呈示手法、ハイブリッド手法では厚さ10mmの弾性体を呈示ピンの上に配置することでユーザが受ける硬い感覚を緩和する。これにより、低荷重域では弾性体自体の硬さが呈示されることになるが、弾性体の硬さを目的用途である生体組織などに近づけることで、自然な呈示とすることができる。

### 3.2 装置の機構

高密度力覚ディスプレイは、直動アクチュエータを平面上に配置することで構成される。直動アクチュエータの機構には送りネジ機構を採用した。送りネジは他の触覚ディスプレイで用いられている圧電素子、記憶形状合金等に比べて精密な制御ができ、比較的大きなストロークをとれる特徴を持つ。また、モータを用いる他のリンク機構などと比較しても直動アクチュエータを直線的に配置できるため装置の集積度を上げやすい。更に、送りネジ機構の特徴であるセルフロックを利用することにより、物体形状呈示時に定常的な姿勢保持トルクの発生を必要としないというメリットがある。これは比較的硬い物体を呈示するときに有効であり、力を入れて押すと呈示物体を突き抜けてしまうという問題を回避することができる。

直動アクチュエータは、DCサーボモータ(並木精密宝石(株)製3相ブラシレスモータSBL04-0829PG18、

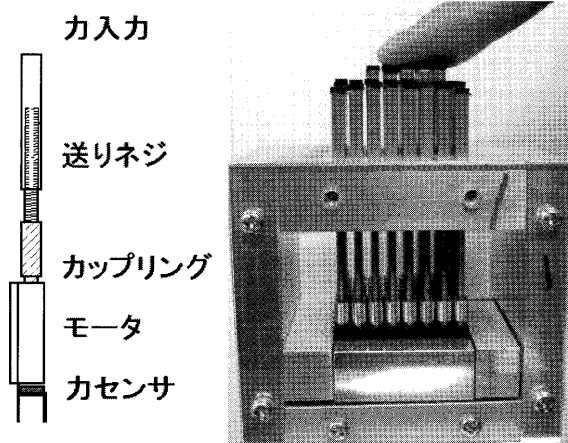


図2 直動アクチュエータ配置図

Fig.2 Configuration of the linear actuator

ギア比 18:1)、送りネジ(M2、ピッチ 0.4mm)、カセンサ(イナバゴム製感圧ゴムセンサ、イナストマー SF2-LT)の3つで成り立ち、図2のように配置する。それぞれが直径4mm、3mm角、3.5mm角と小さいため、全体が4mm四方に収まる大きさを実現した。

高密度力覚ディスプレイのアクチュエータの数は多いほど広い面積での呈示が行えるが、配線、制御時の煩雑さが増す。そこで、本装置では指1本で呈示面に触れることを想定し、縦横各8列ずつ、計64個のアクチュエータを配置した。呈示面積は約32mm四方となり、指先での使用においては十分である。直動アクチュエータを高密度に配置するために、モータを格子状に配置した際にできる隙間をモータの突起が埋める事で、各モータの固定と回転を防ぐ。この機構により、モータ同士の隙間をなくし、直動アクチュエータを4mm間隔で配置することが可能である。また、カセンサを用いることでインタラクティブな動作を可能とした。カセンサはモータの下に取り付けることで配線を簡素化し、モータは上述の配置により上下方向に滑ることで指先からの力入力

直動アクチュエータ  
(64本)

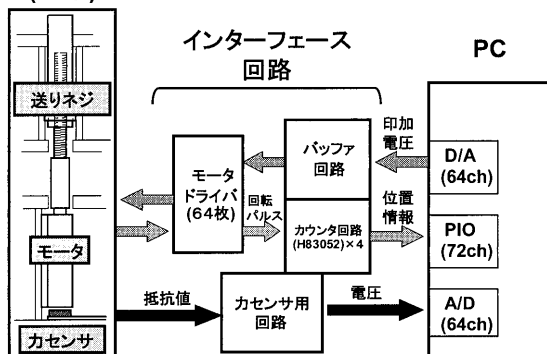


図3 高密度力覚ディスプレイのシステム構成図

Fig.3 System configuration of high-resolution surface type haptic interface

をカセンサに伝達することができる。

### 3.3 システム構成

本システムの構成を図3に示す。装置におけるシステムの制御は、64本の直動アクチュエータを並列接続して行う。回路構成は複雑になるが、処理速度が上がり、インタラクティブな制御をするのに適している。本装置で全ての呈示ピンを動作させた時の制御周波数は90Hzとなる。

### 3.4 装置の基本性能

各直動アクチュエータにおけるカセンサの出力特性、最大動作速度、上昇・下降時の動作限界荷重、位置制御時の精度について測定した。位置精度は、PD制御を行い測定した。本装置の基本性能を表1に示す。高密度配置によるモータ同士の摩擦や製作・配置誤差、センサやモータの個体差などの原因で、各アクチュエータの動作限界荷重にばらつきがあるが、弾性面呈示では位置制御を行うため、このまま使用する。

表1 高密度力覚ディスプレイの基本性能

Table 1. Basic performance of the actuators

アクチュエータの可動範囲	20[mm]
カセンサ測定範囲	30~150[ $gf$ ]
最大動作速度	19.4[mm/s]
動作限界荷重(上昇時)	90~190[ $gf$ ]
動作限界荷重(下降時)	190~410[ $gf$ ]
アクチュエータの位置精度	$\pm 0.1$ [mm]

## 4. 弾性分布呈示のアルゴリズム

力覚ディスプレイを用いた弾性分布呈示手法として、動的呈示手法[8]、静的呈示手法[9]が提案されている。本研究では上述の2つの手法に加えて動的呈示手法と静的呈示手法を組み合わせたハイブリッド手法を提案し、検証を行う。

### 4.1 動的呈示手法のアルゴリズム

動的呈示手法とは各力覚呈示ピンがユーザの力入力に応じた位置の呈示をリアルタイムに行うことで、バーチャルな弾性定数に応じた弾性呈示を行う手法である。この呈示手法では、ストロークが大きくなると、形状呈示と弾性呈示を同時に行うことができる。一方、呈示ピン間に高低差があるとそこに角ができてしまい、不自然な面呈示になる場合があるという特徴を持つ。

動的呈示手法を用いて、本装置の直動アクチュエータで呈示できる弾性定数の範囲を測定した。1, 3, 5, 10, 20, 40, 60, 70, 80, 100, 150 $gf/mm$ の弾性定数の弁別域を測定し、各弾性定数に対する弁別域の割

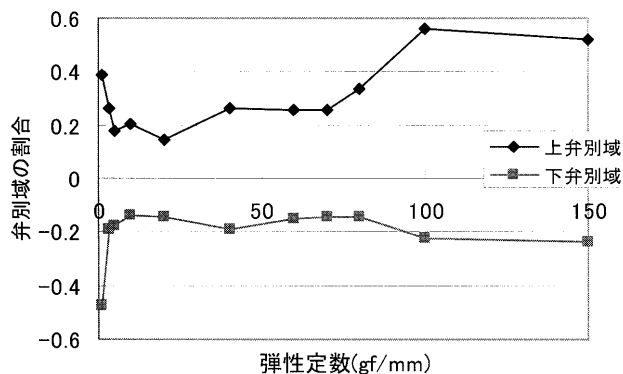


図4 弾性定数に対する弁別域の割合

Fig.4 Normalized differential limens of elasticity

合を図4に示す。この結果から、70gf/mm以上では判別が難しくなる。1gf/mm近辺でも振動により判別が難しくなることから、本直動アクチュエータで有効に呈示できる弾性体の弾性定数は約3~70gf/mmである。

動的呈示手法による弾性定数の呈示範囲は、アクチュエータ1本では十分有効であるといえるが、本装置は人差し指で使用し、12本程度のアクチュエータに触れる。従って指に呈示できる弾性定数は約36gf/mm以上となり、硬めの物体呈示しか行えない。また、本装置の使用では各アクチュエータの動作による振動を知覚し、弾性分布を行った場合に弾性値の知覚が鈍る。更に、制御周波数が十分でないために呈示ピン間の動作が揃わず個々に振動を起し、呈示面全体がノイズのように動作するため、領域での硬さの識別が行えないという欠点を持つ。

#### 4.2 静的呈示手法のアルゴリズム

静的呈示手法では、ゴムやスポンジなどの弾性体を力覚呈示ピンの上に配置し、下の呈示ピンが弾性体に圧力を加えた時に弾性体の硬さが変化することを利用して弾性呈示を行う。この手法では、弾性面の呈示ではアクチュエータの動作が不要なため、制御が簡素化される。また、呈示ピンの凹凸による角も比較的滑らかに知覚することで、弾性分布の呈示では自然な弾性面として知覚しやすい。しかし、硬さの呈示範囲は配置する弾性体による制限があり、弾性体の厚さによってストロークも短くなる特徴を持つ。

静的呈示手法を用いて力覚呈示ピンのオフセットに応じた弾性変化を測定した。ゴムスポンジ(厚さ2mm)、スポンジ(厚さ8mm)の2層からなる弾性体を用意し、呈示ピンの上に配置した(図5)。呈示ピンのオフセットは、弾性体底面を基準とし、そこからの上昇位置とした。測定は指先の接触面積の代表値を測定から求め、荷重をかけて行った。硬弾性領域

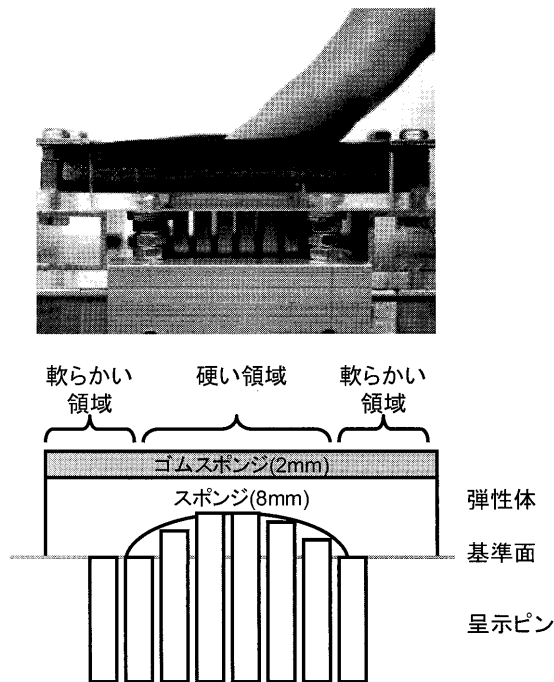


図5 静的呈示手法を用いた弾性分布呈示

Fig.5 Configuration of the flexible surface

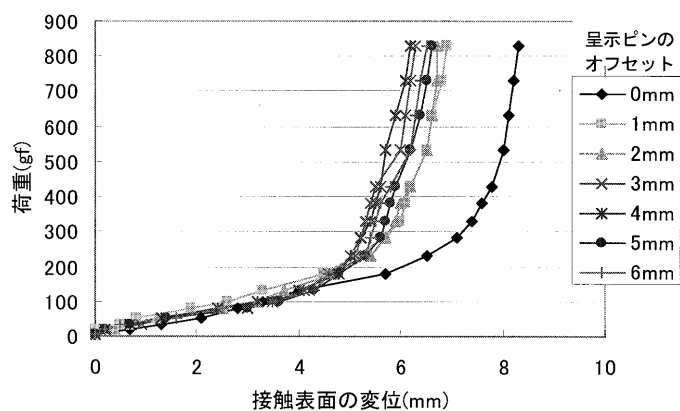
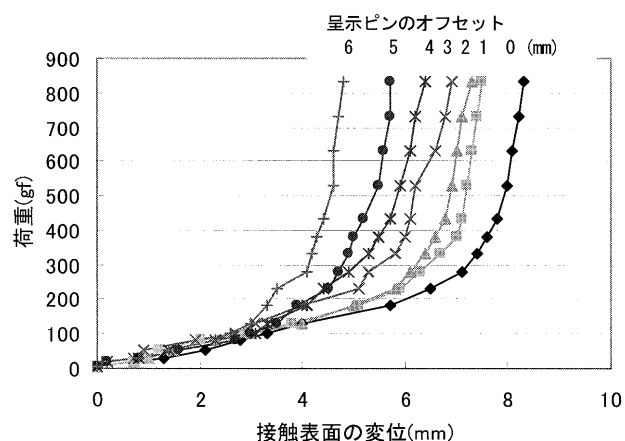


図6 静的呈示手法を用いたオフセットによる表面変位

Fig.6 Rigidity based on offset values and displacement of the surface in the static rendering mode

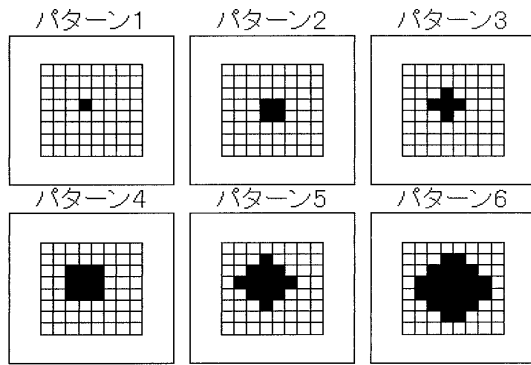


図7 硬弾性領域の呈示パターン

Fig.7 Displayed patterns of hard areas

が呈示ピン1本分（図7：パターン1）の場合における、オフセットごとの荷重による接触表面の変位を図6(上)に示す。図6ではグラフの傾きが弾性値を表す。呈示ピンのオフセットが高くなるほど傾きが大きくなり弾性体が硬くなる一方、変位幅も小さくなる。このことから力覚呈示ピンの上下動で弾性体内部の弾性値を変化させることが可能であるといえる。しかし、硬弾性領域が大きくなるに従い、弾性体が圧縮されずに持ち上がる傾向がある。図6(下)に呈示ピン12本分の硬弾性領域（図7：パターン5）の場合における接触表面の変位を示す。このように、静的呈示手法では、硬弾性領域が大きい場合には呈示ピンのオフセットでは弾性体の硬さが変化しないことが明らかになった。

#### 4.3 ハイブリッド手法のアルゴリズム

静的呈示手法では呈示ピンのオフセットが高くなるほど弾性体が圧縮されて硬くなるが、ユーザが押し込むことができるストロークが短くなる。結果、呈示ピンのオフセットが大きくなると硬さの違いよりも弾性体の下にある呈示ピンの高低差を直接知覚しやすくなる。また、押し込む変位によって硬さが異なるという問題点がある。さらに、呈示する硬弾性領域が大きくなると硬さが変わらなくなり、限られた弾性分布の呈示となる。

これらを解決するために、上昇した呈示ピンをユーザの力に応じて動作を行い、荷重に対する弾性体の圧縮を制御する手法を考える（図8）。アルゴリズムを以下に述べる（図9参照）。

初期オフセット： $offset$  は各硬弾性領域で弾性体の圧縮が認められる最大値とし、ユーザが与える荷重を  $l$ 、呈示ピンの位置を  $x$ （基準面を0として上向き）とする。また、オフセットが  $offset$  で固定された時の荷重による接触表面の変位を  $f(l)$  と表す。

静的呈示手法では図6に示すように、低荷重域ではオフセットに関わらず同様の表面変位をとる。オフセットによって表面変位が変化し始める荷重を  $l_0$ 、

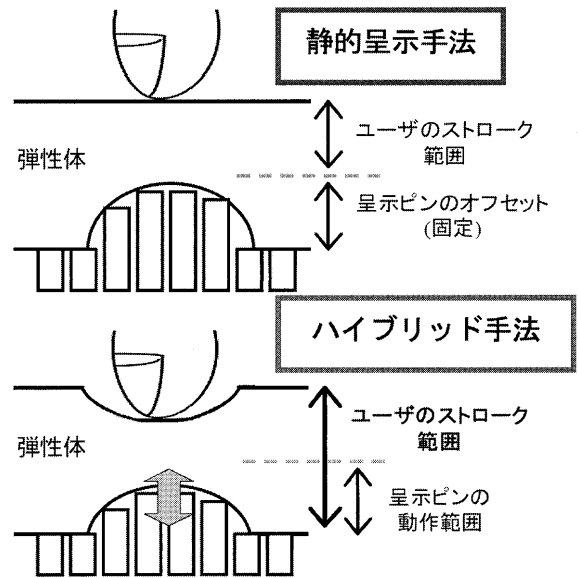


図8 静的呈示手法とハイブリッド手法におけるストローク範囲の比較

Fig.8 Comparison of stroke between the static rendering mode and the hybrid rendering mode

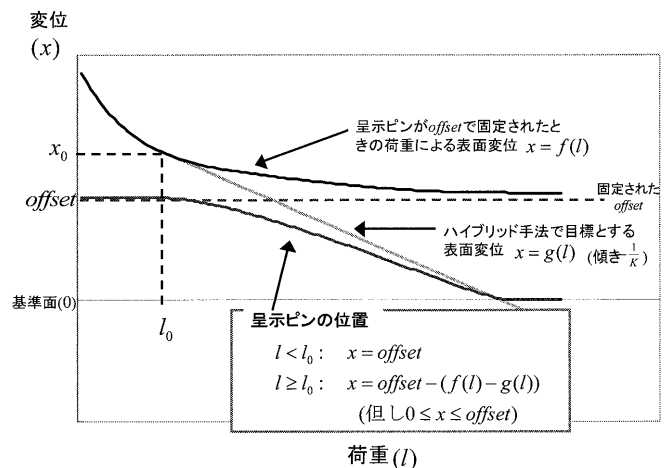
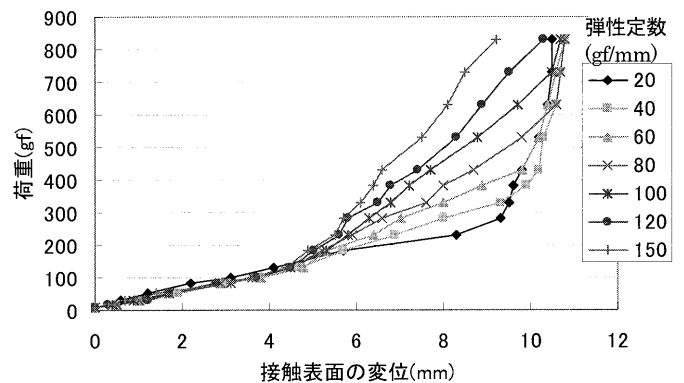


図9 ハイブリッド手法のアルゴリズム

Fig.9 Algorithm of hybrid rendering mode

図10 ハイブリッド手法の弾性定数による表面変位  
Fig.10 Rigidity difference and displacement of the surface based on elasticity in the hybrid rendering mode

変位を  $x_0$  とする。荷重が  $l_0$  未満では、呈示ピンは初期オフセットのまま動作せず、荷重が  $l_0$  以上で弾性定数  $K$  を呈示するための動作を行う。この時、目標とする接触表面の変位は

$$g(l) = -\frac{1}{K}(l - l_0) + x_0 \quad (1)$$

と表され、呈示ピンは接触表面の変位が  $g(l)$  となるように動作する。以上から、呈示ピンの制御目標位置は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} l < l_0 \text{ の時} \quad & x = \text{offset} \\ l \geq l_0 \text{ の時} \quad & x = \text{offset} - (f(l) - g(l)) \quad (2) \\ (\text{但し } 0 \leq x \leq \text{offset}) \end{aligned}$$

この静的呈示手法と動的呈示手法を組み合わせた呈示手法(以下、ハイブリッド手法)で、硬弾性領域として図7のパターン5を呈示したときの弾性定数ごとの荷重による接触表面の変位を図10に示す。硬弾性領域を変更した場合にも同様の特性が得られた。

低荷重域( $l \leq l_0$ )では弾性体の硬さが呈示され、非線形になるが、弾性分布呈示において、呈示ピンの剛性を知覚しにくくする上で必要であるため、このまま使用する。静的呈示手法を用いた場合(図6・下)と比較して、接触表面の変位による弾性値の変化が減少し線形に近くなる。また、上昇した呈示ピンが下降するためにストロークが長くとれ、硬弾性領域の大きさによらずに硬さの呈示が可能となる。さらに、動的呈示手法と異なり硬い領域だけ呈示ピンが動作するため制御周波数が上がり、生じる振動も少なくなるという特徴を持つ。また、呈示ピンの上に配置している弾性体も振動を軽減していると考えられる。

## 5. 評価実験

本装置で弾性分布呈示を行い、その有効性を検証する。そのためにハイブリッド手法を用いて硬弾性領域を呈示したときの弾性認識の弁別域測定と大きさの異なる硬弾性領域の認識実験を行った。各実験、測定において用いた弾性体は図5に示す厚さ10mmの2層からなるスポンジであり、接触表面はピンの呈示面積である32mm四方に10mm余白を設けた52mm四方の大きさとした。

### 5.1 弾性分布認識の弁別閾測定

ハイブリッド手法を用いて、硬さの異なる硬弾性領域を呈示し、どれくらいの違いで弾性値の違いを識別できるか検証した。

6名の被験者(20代の健康な男女)に対して図7、

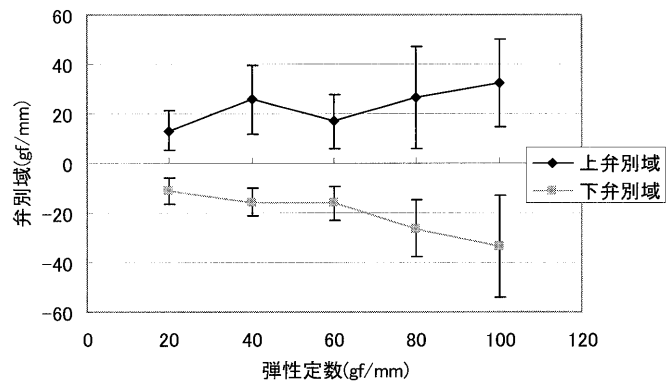


図11 ハイブリッド手法を用いた弾性定数による弁別域

Fig.11 Differential limens of elasticity in the hybrid rendering mode

パターン5で示す硬弾性領域を呈示し、上下法により弁別域の測定を行った。20gf/mmから100gf/mmまで20gf/mmきざみに測定を行い、結果を図11に示す。動的呈示手法を用いた直動アクチュエータ1本あたりの弁別域(図4)と比較して弁別域が大きくなる傾向があるが、弾性定数が大きくなるにつれて弁別域も大きくなる特徴があり、一番柔らかい試行である20gf/mmの硬さでは約12gf/mm、100gf/mmの硬さでは約35gf/mmの硬さの違いを識別できることが明らかになった。これにより本装置では5段階程度、硬さの違う弾性呈示を行う事ができる。動的呈示手法では弾性分布の呈示は振動により正しく行えないが、ハイブリッド手法では本装置を用いて硬さの異なる弾性分布の呈示が行えることがいえる。

### 5.2 硬弾性領域の識別実験

本装置の接触表面に呈示される硬弾性領域は、呈示ピンが弾性体に圧力を加えることで発生し、その形状は呈示ピンの位置や数によって決定される。そこで、本装置が呈示する硬弾性領域がユーザにどのように認識されるか実験を行った。硬弾性領域として用意したのは、図7の呈示パターンであり、呈示面の硬さは呈示ピンを基準面に固定した柔らかい領域、ハイブリッド手法で60gf/mmの硬さの呈示する領域(硬弾性領域)の2段階に設定した。それぞれのパターンの図形を3カ所の異なる位置にランダムに呈示し、7名の被験者に知覚した硬弾性領域を装置の接触表面(52mm四方)と同じ大きさの方眼紙に記入させた。図12は被験者が知覚した硬弾性領域の面積と実際の面積の比較である。呈示パターンは円形の記入回答を期待して製作したが、実際にはパターン3、5、6などでは角のとれた菱形や、縦に細長い楕円を記入する被験者が多かった。これは人差し指で縦に触って知覚していることや、正方形を組み合わせでできる角を知覚し、より正しく弾性分布の形状把握ができていると考えられる。全体的に大きく知覚さ

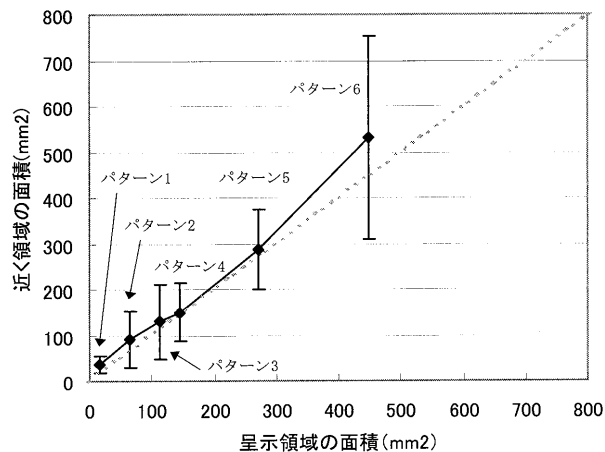


図 12 被験者の硬弾性領域の知覚面積

Fig.12 Comparison with perceived area and displayed area

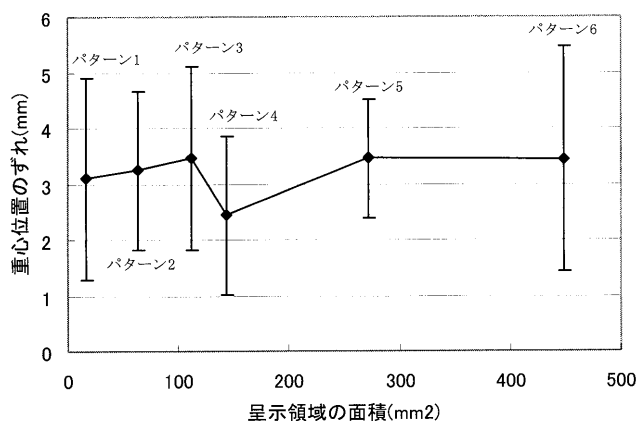


図 13 硬弾性領域の重心位置の知覚誤差

Fig.13 Position error of perceived object

れる傾向があるが、面積に応じた大きさを識別している。最小面積であるパターン 1 では、全ての被験者が円形の領域と知覚し、直径は約 6mm であった。この実験結果より、本装置でユーザが識別可能な最小の呈示刺激量は呈示ピン 1 本分であり、直径 6mm 程度の円形に知覚していることが確認された。

知覚領域の重心位置のずれは図 13 のようになる。どの硬弾性領域においても重心位置の知覚誤差は 4mm 以内となった。

## 6. 考察

本研究により、以下のことが明らかになった。

本装置ではハイブリッド手法により弾性値の違いを約 12~35gf/mm の弁別域を持ち認識することができる。呈示した弾性定数に対して 25~60%の識別誤差となるが、生体組織の弾性分布呈示では組織中で発見するべき腫瘍細胞は約 3 倍の硬さを持つため、本

装置を使用してこれらの弾性分布の有効な呈示が可能であるといえる。

また、硬弾性領域について形状は最小直径 6mm の円形領域を、重心位置については約 4mm の誤差を含んで認識できる。面積については上昇した呈示ピンの面積より大きく認識される傾向があるが、これは弾性体によって硬弾性領域が拡大し、領域の境界が鈍っていること、指の形状による認識誤差などが考えられる。重心位置のずれは呈示ピン 1 本分程度あるが、形状がおおむね正しく識別できていること、被験者が記入する際の誤差を考慮すると正しく位置の識別が行えていると考えられる。

ハイブリッド手法では、静的呈示手法を用いたときのオフセットによるストロークの減少や変位による硬さの変化を改善することが可能となる。しかし、用いる弾性体により呈示できる硬さの範囲に制限がある。また、弾性体を使用することで低荷重域では呈示する弾性値によらず同じ柔らかさとなる。本研究で使用した弾性体では、弾性値が 20gf/mm 以下の呈示を行うと、表面近傍の方が硬い呈示となってしまう、不自然な弾性呈示となるため 20gf/mm 以上の弾性値の呈示を行った。従って呈示する弾性分布に応じて適切な弾性体を選ぶ必要があるだろう。

以上から弾性値の違いを識別し、本装置で弾性分布が有効に行えることが確認された。「FEELEX2」では最小知覚面積が直径 14mm 程度であったため、本装置を使用することで、解像度を高めた弾性呈示を行うことができる。また、これにより触診で医師が識別することができる 8mm 程度の腫瘍を本装置で呈示し、見つけ出す動作において十分な解像度となった。しかし、装置の 4mm という呈示ピンの間隔は力覚呈示など主に深部感覚への刺激としては十分な解像度といえるが、皮膚感覚への刺激を行う触覚呈示では 2mm 以下の呈示能力が必要であり[12]、更に高い解像度が必要である。本装置の直動アクチュエータを上下に互い違いに配置するなどの高解像度化を行えば力覚と触覚を同時に刺激する装置が実現できると考えられる。

また、本装置において呈示面積は 32mm 四方であり、大きな形状や広い面積の呈示を行うには十分ではない。呈示ピンの本数を増やすことで解決を図れるが、直動アクチュエータの本数を増やすと制御や配線システムが煩雑になりトラブルが起りやすい。たとえば遭遇型インターフェースに本装置を取り付けることで広い面積における力覚呈示を実現することが考えられる。

## 7. まとめ

本研究では、4mm 間隔に力覚呈示ピンを配置した高密度力覚ディスプレイを開発した。本装置を用いた弾性分布の呈示手法として、動的呈示手法、静的呈示手法、ハイブリッド手法の評価を行った。弾性分布識別実験を通して本装置ではハイブリッド手法で生体組織を呈示するのに十分な硬さの識別が行え、弾性領域の呈示においては直径 6mm の円程度の微小な領域が識別可能であると確認された。

今後は、本稿での結果を基に生体組織データなど実用的なデータを用いて複雑で詳細な知覚を必要とする弾性分布呈示を行い、どのようにユーザに知覚されるか検証を行いたい。

## 参考文献

- [1] Galyean, T. and Hughes, J :Sculpting :An interactive volumetric modeling technique, Computer Graphics, Vol. 25, No. 4, pp. 267-274 (1991)
- [2] Iwata, and Noma: Volume Haptization, Proc. Of IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality, pp. 16-23 (1993)
- [3] 野間春生, 他 : フォースディスプレイを用いた高次元ボリュームデータの力覚表現, ヒューマンインターフェースシンポジウム論文集, pp. 121-128 (1993)
- [4] 棚島正起, 矢野博明, 岩田洋夫 : 道具媒介型力覚インターフェースを用いた弾性分布の知覚特性, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 93-96 (2004)
- [5] 小峯圭太, 矢野博明, 岩田洋夫 : 高密度力覚ディスプレイのための直動アクチュエータ, ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol. 6, No. 3 (2004)
- [6] K. Hirota, and M. Hirose: Providing force feedback in virtual environments, Proc. Of IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 15, Issue5, pp22-30 (1995)
- [7] 仲谷正史, 他: 形状記憶合金を用いた 3 次元形状ディスプレイの提案, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 247-248, (2003)
- [8] 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, pp7-10 (1996)

- [9] 河村亮, 矢野博明, 岩田洋夫 : 弾性分布を提示する面型ハプティックインターフェース, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 3, pp. 301-312 (2002)
- [10] 中茂睦裕, 広田光一, 廣瀬道孝 : 高密度点刺激型ディスプレイにおける駆動機構の検討, ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol. 6, No. 3, (2004)
- [11] M. Shinohara, Y. Shimizu, and A. Mochizuki : Three-Dimensional Tactile Display for the Blind, IEEE Trans. on Rehabilitation Engineering, Vol. 3, p. 249 (1998)
- [12] Weinstein, S: Intensive and Extensive Aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex and Laterality, the First Int'l symp. on the Skin Senses, pp. 195-222 (1968)

(2005 年 10 月 11 日受付)

## [著者紹介]

### 小峯 圭太 (学生会員)



平成 16 年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。現在、同大学院博士課程システム情報工学研究科在学中。力覚呈示装置に関する研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会学生会員。

### 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、04 年同大システム情報工学研究科講師、06 年同助教授、現在に至る。力覚呈示、移動感覚呈示に関する研究に従事。博士(工学)。

### 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、02 年同教授、04 年同大システム情報工学研究科教授、現在に至る。人工現実感に関する研究に従事(工学博士)。