

異種触覚デバイスを用いた協調作業のための触覚計算モデル

矢野 博明 *¹ 笥 直之 *² 小木 哲朗 *³ 廣瀬 通孝 *³ 岩田 洋夫 *¹ 池井 寧 *⁴ 広田 光一 *⁵

Calculation Model for Cooperative Work Using Heterogeneous Haptic Devices

Hiroaki Yano *¹ Naoyuki Kakehi *² Tetsuro Ogi *³ Michitaka Hirose *³ Hiroo Iwata *¹ Yasushi Ikei *⁴ Kouichi Hirota *⁵

Abstract – This paper describes a calculation method of haptic feedback for cooperative work. There are many kinds of haptic devices. Using these devices, we can construct cooperative 3D shape modeling environments. However haptic devices have own data formats and it is difficult to connect directly each other in same environment. In this research, we developed a calculation method that converts input and output data of haptic devices to uniform data. We developed a cooperative 3D shape modeling system using our method. The effectiveness of it is examined.

Keywords : virtual reality, haptic device, cooperative work, 3D shape modeling, deformation, haptic server

1. はじめに

インターネットが一般に広く利用されるようになり、次世代高速ネットワークであるギガビットネットワークが注目を集めるようになってきた。ギガビットネットワークは遠隔地同士を高速通信回線により接続でき、さらにインターネットとは違い転送速度が保証されている。

このネットワークを用いたアプリケーションとして、3次元仮想空間を遠隔地間で共有し、様々な協調作業を行うことが一つの大きなトピックとなっている。この3次元協調作業空間に触覚情報を付加することで、仮想物体の形状認識が容易になるだけでなく、3次元物体を移動変形して任意の形状を作り出すことが容易になる、触覚を使って相手とコミュニケーションできるなど様々なメリットが期待できる。

ところでこのような協調作業環境を構築する際に、必ずしも同じ触覚デバイスを用いることができるとは限らない。これまで触覚デバイスは、様々なタイプのもので研究開発されており、入力されるデータも制御の方法もユーザに対するフィードバックデータもそれぞれのデバイスに応じて様々である。また、近年ハプティックレンダリング^[1]と呼ばれる触覚を生成するためのアルゴリズムの研究も盛んになってきており、変

形や移動などの際の触覚計算アルゴリズムもいくつか開発されている^{[2][3]}。しかし入出力データの種類が様々で、デバイスによってはデータの種類がまったく異なる場合もある。このような動作原理の異なる触覚デバイスを複数用いて、同じハプティックレンダリングアルゴリズムを実装した仮想物体を操作する場合、変形や移動などの計算をそれぞれのデバイス毎に個別にプログラムを用意することになり、プログラムが複雑化し、汎用性が低くなりがちである。

そこで本研究では、動作原理の異なる触覚デバイスを用いて協調作業するために、触覚デバイスを分類し、入出力データを統一的に扱う触覚計算モデルの開発を行った。移動や変形などの法則エンジンへのこのモデルの適用方法について述べ、触覚サーバを用いて仮想物体の移動、変形を協調して行える環境を開発し、実験によりその有効性を検証した。

2. 従来の研究

これまで触覚デバイスを用いて協調作業するシステムは、いくつか報告されている。東工大の石井らは2台のSPIDARをネットワークを用いて接続したNetworked SPIDAR^[4]を開発している。このシステムは仮想環境の情報を各サイトに分散して持ち、操作者の操作内容のみを通信して協調作業を行う。触覚提示により排他制御無しで仮想物体の手渡し作業が可能である。また筑波大の矢野らは2台の力覚デバイスを接続し、分散仮想環境における教示作業を行っている^[5]。これは、遠隔地の被教示者に教示者の手との間に引力を提示することで教示を行う。ミュンヘン工科大のBaierらはEtherNet上で視覚、触覚、音声、温度を共有する集中型協調作業環境を構築し、仮想物体の変

*1: 筑波大学 機能工学系

*2: 日本電信電話株式会社

*3: 東京大学 工学部

*4: 東京都立科学技術大学 工学部

*5: 豊橋技術科学大学 情報工学系

*1: University of Tsukuba

*2: Nippon Telegraph and Telephone Corporation

*3: the University of Tokyo

*4: the Tokyo Metropolitan Institute of Technology

*5: Toyohashi University of Technology

形等を行っている [6]。

しかし、これらは同一か形こそ違おうが指先の一点に力覚を提示する、触覚生成の原理という観点では等価な触覚デバイスを用いて構築されており、触覚生成の原理が異なる触覚デバイスを用いた例はない。

ところでネットワークを介した協調作業環境は、各サイトでの仮想環境のデータの保持方式により、大きく分けて分散型仮想環境と集中型仮想環境の2種類に分類する事が出来る。分散型仮想環境は同じデータをそれぞれのサイトが持つ方法で、通信するデータ量は少なくなるが、データの整合性の管理を厳しく行う必要があり、仮想物体の変形等の複雑な処理を実装するのは困難である。一方の集中型仮想環境は一つのサーバーサイトがすべてのデータを持つサーバークライアント方式で、データの整合性の問題はないが、その転送速度が問題となる。現在のインターネットは速度が固定されていないので集中型は不向きであるがたとえばギガビットネットワークでは帯域が保証されているため、高速なデータ転送が可能で、集中型仮想環境を構築することが可能である。とくに、触覚デバイスを制御するような高速なデータ転送も可能で、触覚用のサーバを構築することが可能といえる。

本研究は、この触覚サーバを用いた協調作業環境で触覚生成の原理が異なるデバイス同士でも作業でき、触覚デバイスの種類によらず、種々の法則エンジンを利用可能であることが特徴である。

3. 触覚デバイスの分類

触覚デバイスには様々なものがあるが、ユーザと仮想物体とのインタラクションの方式に注目すると3種類に分類できる(図1)。

3.1 点型デバイス

ペン先のようにユーザと仮想物体が一点で仮想物体と接触するデバイスである。点型デバイスは一点の位置、力とモーメントの関係が計算され、ユーザに拘束力を提示する。Sensible TechnologiesのPHANToM [7] や筑波大学で開発されたHapticMaster [8] がこのタイプに含まれる。

3.2 面型デバイス

指や手全体のように仮想物体と面で接触するデバイスである。面型デバイスは、面の形状、面に働いている力の関係が計算され、ユーザに面の形状を提示する。東京大学で開発されたSurfaceDisplay [9] や筑波大学で開発されたHapticScreen [10] がこのタイプに含まれる。

3.3 テクスチャ型デバイス

仮想物体の凹凸など微細な表面形状を表現するデバイスである。テクスチャ型デバイスでは、ある領域の

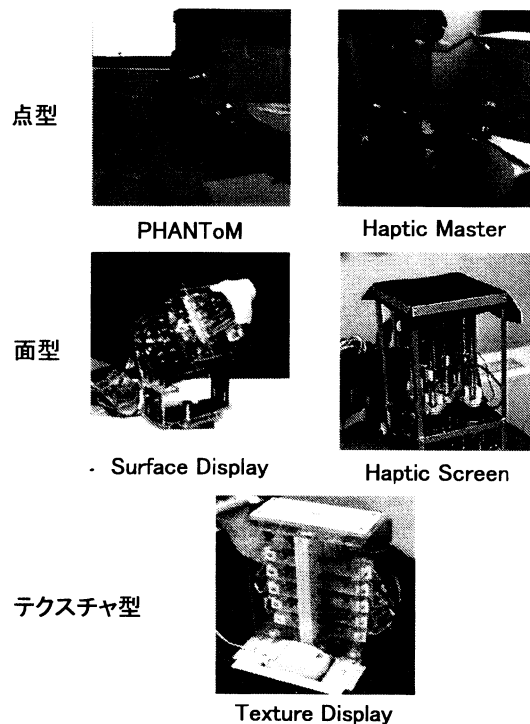


図1 点型、面型、テクスチャ型デバイス
Fig.1 haptic devices of point type, surface type and texture type

触覚刺激分布がユーザに提示される。東京都立科学技術大学で開発されたTextureDisplay [11] がこのタイプに含まれる。

4. 法則エンジン

人間が行う代表的な触動作としては、把持して移動する、変形するという2つが考えられる。人間が仮想世界に対し何らかの触動作を行ったときに仮想世界を更新し、人間に提示する物理量を計算する法則エンジンが必要である。

把持して移動する場合、現在の触覚デバイスの効果器の位置から把持している物体がその位置に動くために必要な力を計算し、それを反作用としてユーザに提示する必要がある。これは重心位置などをあらかじめ計算しておけば、高速な処理が可能である。

変形については、有限要素法を用いて変形計算を行う有限要素モデル、仮想物体を質点の集まりと考え質点同士がばねのネットワークによって結合しているばねモデルが考えられる。有限要素モデルはマトリクス計算や収束計算を行うため、モデルが複雑になると計算量が膨大なものになり、リアルタイム性に問題が生じるが、ある程度正確な変形計算が可能である。ばねモデルは、マトリクス計算、収束計算を行わないのであまり正確ではないが、比較的リアルタイム性が高い。

異種触覚デバイスを用いた協調作業のための触覚計算モデル

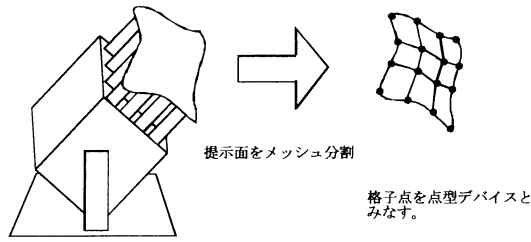


図2 面型、テクスチャ型デバイスを点の集合で近似する

Fig. 2 an approximation of surface type and texture type haptic device

触覚デバイス	型名	接触箇所	入出力方法
PHANTOM	点型	空間上の1点	位置入力-力出力
Haptic Master	点型	空間上の1点	位置入力-力出力
Surface Display	面型	手の平全体	力入力-位置出力
Haptic Screen	面型	手の平全体	力入力-位置出力
Texture Display	テクスチャ型	指先腹部	位置入力-力出力

表1 触覚デバイスの分類

Table 1 classification of haptic devices

5. 触覚計算モデル

本研究では異種触覚デバイスを統一的に扱うモデルを考えるため、デバイスに依存する部分とモデル演算機能に依存する部分について検討した。本論文は形状設計を主なアプリケーションとして取り上げているので、特に、点型デバイスと面型デバイスの統一化について述べる。

5.1 デバイス依存部分

前述の面型デバイスをそれぞれパッチ面によって近似し、その格子点を点型デバイスの点と同じと見なす(図2)。パッチ面に働く力はそれを構成する格子点に分配する事とする。これにより両デバイスを点型デバイスの集合したものを見なすことができ、面型デバイスの近似格子点の数だけ点型デバイスのためのプログラムを呼び出せばよいことになる。

ところが、本研究で扱う触覚デバイスを入出力データで分類する(表1)と、面型デバイスの多くは力入力-位置出力である。点型デバイスの多くは位置入力-力出力のデバイスである。面型の提示面形状のパッチ面による近似だけではうまく統一することができない。

5.2 モデル演算機能依存部分

ここで前述の法則エンジン毎にデータの入出力の違いを整理する。

物体を把持しているときのモデルは、触覚デバイスの位置が物体の位置となるので、物体の位置を入力しその位置に物体が移動するときに必要な力が出力される。つまり位置入力-力出力の計算である。

一方、変形モデル(有限要素モデル、ばねモデル)では、触覚デバイスから加えられる外力によって変形

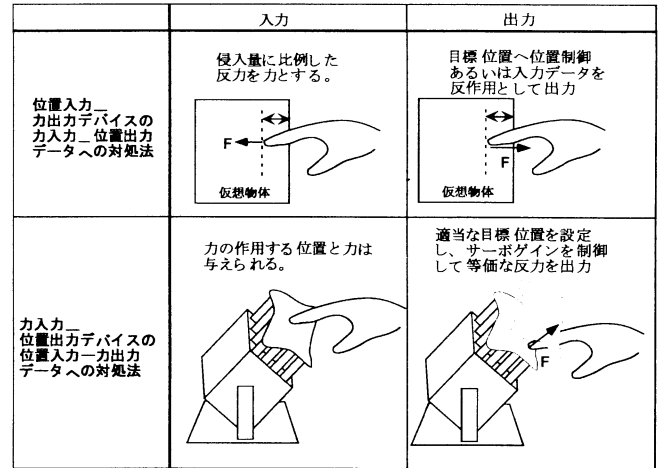


図3 「力入力-位置出力」と「位置入力-力出力」のデータ変換

Fig. 3 data conversion of force input-position output type and position input-force output type.

が起こり変形後の形状が出力される、力入力-位置出力の計算と言える。

すなわち、仮想空間で行う作業は位置入力-力出力の作業と力入力-位置出力の作業に分けられるといえる。

6. 統一的触覚計算モデル

前章で述べたように、触覚デバイス、法則エンジンともに2種類に分類できる。本研究で提案する触覚計算モデルでは、以下に提案する手法により触覚デバイスからの入出力データが異なっても、同じ法則エンジンを使用することが可能である。

位置入力-力出力のデバイスを、力入力-位置出力の法則エンジンに適用するために、本手法では仮想物体内部に触覚デバイスの効果器が侵入しないと仮定し、仮想物体の面の位置と現在の触覚デバイスの効果器の位置から、面への侵入量に比例した力を入力データとして法則エンジンに代入する。位置データ(法則エンジンの出力データ)は位置制御するか、面の変位速度よりも触覚デバイスの制御速度が十分早いと仮定して、入力として計算した力データを反作用として出力することで対応できる。(図3上段)。たとえば、図4左に示すように3角形ポリゴンの変形を考えると、変形は力入力-出力の計算であり、PHANTOMなどの位置入力-力出力デバイスに本モデルを適用すると実際の指先がPoにあるとき、物体表面におろした垂線の足Pの場所に外力Fが加わっているとする。PoとPとの距離 $dx=Po-P$ から物体に加わる外力Fは $F=Kdx$ (Kは定数) で求める。このPとFの値をバネモデルや有限要素モデルに渡す。これらの変形モデ

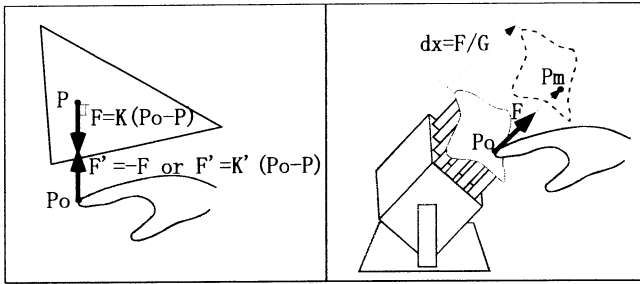


図4 触覚統一モデルの例
Fig. 4 example of data conversion model

ルからは変形後の物体の形状が出力される。この値をもとにユーザに提示する反力 F' を計算するには、 F の反作用 $-F$ を反力とするか Po から物体表面に垂線を下ろしその点 P' に拘束するよう $F'=K'(Po-P')$ 等の式から反力を計算する。

逆に力入力位置出力のデバイスは、ほとんどの場合力の作用する位置は計測可能であるが、出力が位置制御のため位置入力力出力の法則エンジンにはそのままでは適用できない。そこで、与えられた力（法則エンジンの出力データ）から、目標位置や位置制御のゲインを逐次変更することで目標の反力を提示する。（図3下段）。たとえば、図4右に示すように、立方体を把持したまま移動することを考える。この場合位置入力力出力の計算モデルとなり、SurfaceDisplayなどの力入力位置出力デバイスでは利用できない。本モデルを適用すると入力値としての把持した位置とそこに加わるカベクトルはデバイスから直接得られるのでそのまま移動計算モデルに渡す。移動計算モデルからは物体をその場所に移動するための力 F が反作用として計算され出力される。目標位置 Pm 、物体を把持している位置を P 、サーボゲインを G とすると、仮想変位 dx は、 $F=Gdx$ として $dx=F/G$ 。目標位置 $Pm=P+dx=P+F/G$ で求まる。またサーボゲインを変更できるデバイスの場合は dx が制御精度以下になったり、可動範囲を大幅に越えないよう調節適宜することも考えられる。

これらの処理により、点型デバイス、面型デバイスあるいは位置入力-力出力デバイス、力入力-位置出力デバイスいずれも同じ法則エンジンを用いて計算することが可能となった。

7. システム構成

7.1 触覚ライブラリ HIP の利用

触覚計算モデルを実装する仮想環境構築ソフトウェアとして HIP^[2] を利用した。HIP では、図5のように触覚用ソフトウェアを「デバイスドライバ」、「触覚レンダラ」、「モデル演算機能」の3つにモジュール化

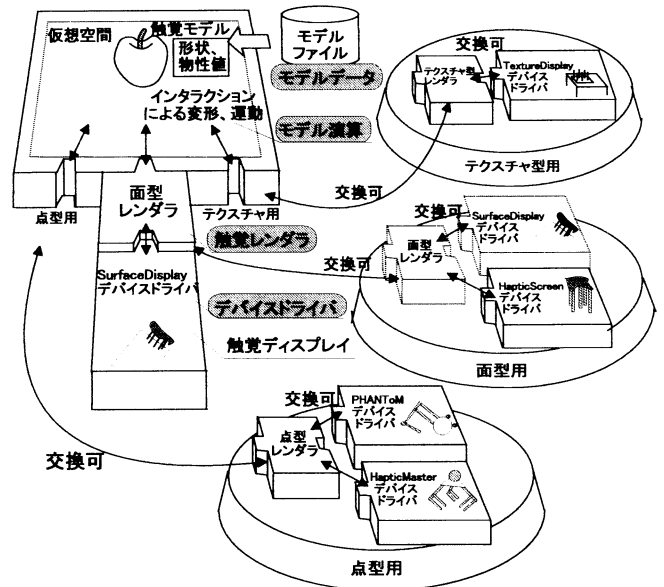


図5 HIPの基本概念図
Fig. 5 basic concept of Haptic Interface Platform(HIP).
caption

することで、触覚デバイスの形態に依存すること無く仮想環境を構築できる。つまりデバイスに依存する部分を切り離し、仮想世界シミュレーション部とデバイスとの入出力形式を整理することでソフトウェアに汎用性を持たせている。「デバイスドライバ」は触覚デバイスを駆動するための機能であり、それぞれの触覚デバイスに固有のものである。開発者がデバイスの差を意識することなくプログラミングできるように、デバイス固有の情報はデバイスドライバだけで処理するようになっている。「触覚レンダラ」は仮想空間のモデルから、ユーザの近傍のモデルデータだけを抽出する機能を実現する。つまり仮想空間で用いる世界座標系とデバイスで用いるデバイス座標系の変換を行うことで、デバイスの多様性を吸収する。このため触覚レンダラはレンダラは点型、面型、テクスチャ型それぞれのデバイスについて用意されている。「モデル演算機能」は物体の把持、移動、ボリュームデータに関する演算機能が用意されている。それぞれ関係する部分を入れ替えることで簡単に仮想環境の法則エンジンや触覚デバイスを入れ替えることが可能である。

デバイスの違いを吸収するので、本研究で開発した触覚計算モデルは触覚レンダラの中に実装した。

7.2 実装環境

実際のシステム（図6）は、触覚デバイスとして点型デバイスの PHANTOM, HapticMaster、面型デバイスの SurfaceDisplay を使用した。本研究では、触覚サーバとして1台のグラフィックスワークステーション (SGI Origin2000 あるいは O2) を使い、3台の触覚

異種触覚デバイスを用いた協調作業のための触覚計算モデル

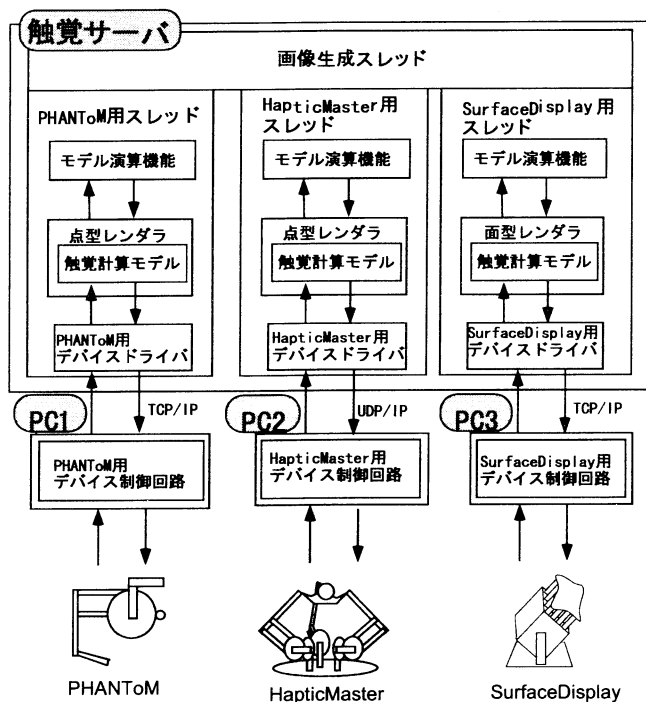


図6 システム構成

Fig. 6 system configuration

デバイスを100BaseTXのネットワーク上でTCP/IP、およびUDP/IPあるいはRS232cを用いて接続した。触覚サーバでは、各デバイスの制御および仮想世界の更新、画像生成をスレッドに分けて同時に処理している。触覚生成にはHIPを用い、画像生成にはOpenGLを用いている。なお本研究で開発した触覚計算モデルは、各デバイスへの制御情報を計算する触覚レンダラの部分に組み込まれている。

8. 評価実験

本研究で実装した触覚計算モデルの有効性を検証するために把持移動実験および形状変形実験を行った。

8.1 把持移動実験

図7に示すように、4つの立方体を奥にある平面上の決められた場所に配置するという作業を被験者に与える。

立方体と平面との間の奥行き差は7cmで、物体移動は点型デバイス（PHANToM及びHapticMaster）で物体を把持することにより行われる。原理的には面型デバイスによる把持移動も可能だが、現在使用可能な面型デバイスは可動範囲や自由度が小さく移動を行うのは困難である。ここではまず動作原理は同じである異種デバイスを用いた協調作業についての評価を行った。把持条件は、触覚デバイスの効果器（以下、指先）が仮想物体に侵入し、スイッチを押した場合を把持とする。触覚情報としては、物体を把持していない場合は指先が物体に侵入した時に物体表面に指先を拘束す

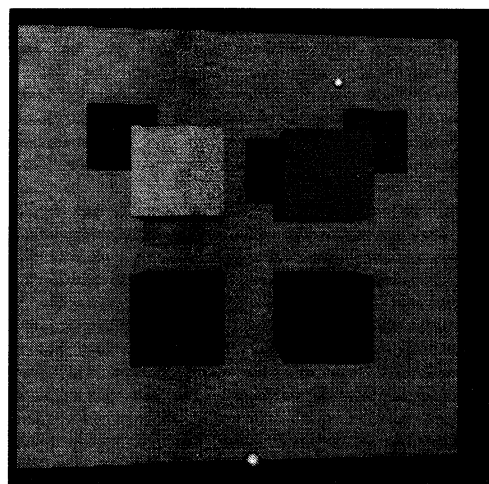


図7 移動実験環境

Fig. 7 environment of experiment of moving virtual objects

る力を提示する。把持している場合は、把持した物体が奥にある平面に侵入した時に平面上に物体を拘束する力を提示した。なお実験中に視点は変化しない。

この物体配置作業を以下の4つの場合について、それぞれ触覚フィードバックあり、なしで被験者に作業してもらった。

- (1) PHANToMのみによる作業
- (2) HapticMasterのみによる作業
- (3) PHANToMとHapticMasterによる分担作業
- (4) PHANToMとHapticMasterによる共同作業

(3)ではPHANToMとHapticMasterが異なる立方体を同時に動かし、分担して配置作業を行う。(4)ではPHANToMとHapticMasterの操作者2人で物体を把持しないと動かなくなっている。すなわち2人で共同して物体を動かすことが必要となる。この場合、物体は2人の指先位置の midpoint に動くようにし、また2人の指先の間には物体を把持した際のそれぞれの相対位置を維持する力を提示し、仮想物体が平面に侵入した場合は物体を平面に拘束する力をフィードバックしている。物体の重さの情報は提示していない。実験の被験者は5人である。

物体配置作業における総作業時間と各作業の配置誤差は図8のようになった。配置誤差は視覚のみの場合が大きく、特に奥行き方向のずれが大きかった。力覚ありの場合は反力がフィードバックされるので、配置誤差は小さくなり力覚は物体移動作業において有効であることが分かる。分担作業では、作業時間が1台を用いて行った場合の半分程度になっている。

また共同作業では2台のデバイスで同時に把持した場合を把持条件としているので、1台のときの把持条件より難しくなっている。それにも関わらず、作業時

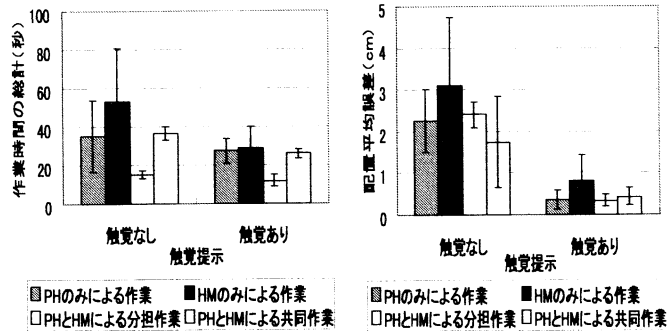


図8 移動実験結果

Fig. 8 result of the experiment of moving virtual objects

間や誤差は1台のときとそれほど変わっていない。これは2台のデバイス間に相対位置を維持する力を提示しているため、1台が素早く動作すれば、他方もそれに追従して動くことによると考えられる。

被験者の感想は、触覚ありで分担作業のモードが最も作業しやすくつぎに共同作業を行ったものが相手が動くとそれにつられて自分も引っ張られて動かしやすいというものが多かった。

この実験により位置入力力出力デバイスを用いて、環境が正しく動作していることが確認できた。すなわち、PHANToMとHapticMasterとの異機種間の触覚デバイスによる協調作業が正常に行われ、同一の仮想空間を異なる触覚デバイスで共有できることを確認した。

8.2 形状変形実験

前章で述べた環境を用いてバネモデル演算機能を用いた3次元仮想物体の形状モデリング協調作業環境を構築した。

本実験では、16×32枚のポリゴンで形成された円筒に、触覚デバイスから力を入力すると、垂直軸対称に変形する力入力位置出力の制御が行われている。つまり仮想のロクロのような変形環境となっている。

被験者は触覚デバイスを用いて図9に示すモデル形状と同じものを作成する。実験条件としては、点型(HapticMaster:H)、面型(SurfaceDisplay:S)、点型と面型(HapticMaster+SurfaceDisplay:H+S)、2台の点型と1台の面型(HapticMaster+PHANToM+SurfaceDisplay:H+P+S)の3種類で行い、作業時間と出来上りの形状を記録した。実験の被験者数は5人である。なお実験前に各デバイスの操作に慣れるため事前に練習を行い、協調作業の場合は作業分担をあらかじめ決めてから行った。なめらかな曲面の作成は面型デバイスのほうが有効であるが、局所的なくびれは点型デバイスを用いたほうが有効である。すべての条件

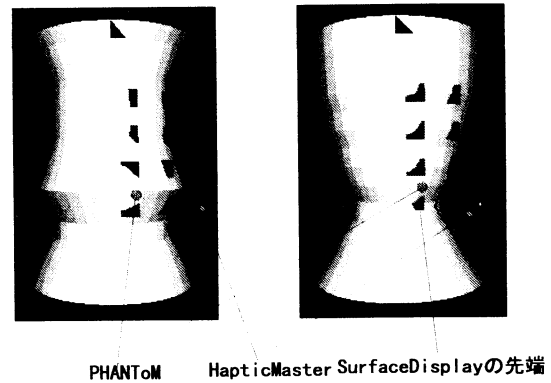


図9 形状変形実験環境

Fig. 9 experimental environment of cooperative 3D shape modeling

で、物体内部に指先が侵入した場合、物体表面への拘束力を提示した。

実験の結果を図10の左に作業時間平均、右に体積誤差の平均を示す。体積誤差は、垂直軸方向に物体をスライスし、その切口の面積の差を平均した。

作業時間に関しては、面型、点型、点型と面型、3台の協調の順に作業時間が短くなっている。

形状(体積誤差)に関しては面型デバイスのみの場合の誤差が大きく、そのほかはほぼ同じ程度まで変形ができていた。面型デバイス(S)以外の組み合わせでは統計的な有意差はみられなかった。面型は細かい作業が難しいので、誤差が大きくなっていると考えられる。点型だけでも変形は可能であるが協調することで作業時間が短くなることがわかる。

被験者からは面型と点型で物体のやわらかさが若干異なるものの同じ弾性体を変形している感じがする、協調してやる場合、面型で大まかに整形してもらい点型が細かい変形をほぼ時間差なくできるのでやりやすい、徐々に元の形に戻ろうとするバネモデルがあることで滑らかな形状を作りやすく、変形に多少失敗しても取り返しがついてよい、面型のみでは微調整が難しいので変形しづらい等の感想を得た。やわらかさの違いについては、提示可能反力や応答速度など使用したデバイスの性能の違いが原因と考えられるがその他は数値データと傾向が一致する。

これらの結果から、システムが有効に動作していることが確認された。

9. 考察

本研究で提案した触覚計算モデルでは、これまで開発された面型デバイスは提示面の垂直方向の反力しか提示できないため、物体を把持して移動するモデルでは、限られた方向の反力しか提示できない。廣瀬ら^[12]が提案するように映像と組み合わせることである程度

異種触覚デバイスを用いた協調作業のための触覚計算モデル

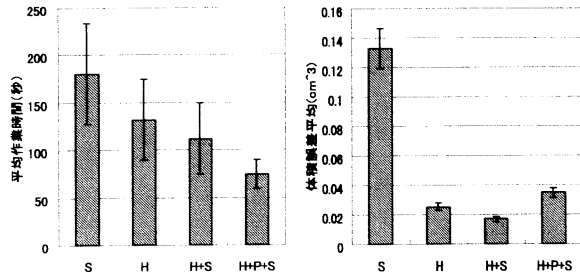


図10 実験結果 作業時間(左)、平均体積誤差(右)

Fig.10 result of experiment, mean completion time(left) and mean volumetric error(right)

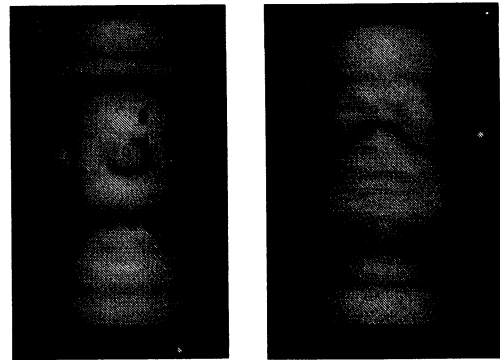


図11 本システムを用いた形状設計例
Fig.11 examples of 3D shape modeling

までは反力の方向をカバーすることもできるが、全く同じ環境を提供するためには、新たな面型デバイスを開発するか、例えばGUIを工夫して方向と反力の大きさを別々に提示するなど何らかの工夫が必要である。また、テクスチャ型デバイスについては、拘束力を提示できないので本研究では述べなかったが、物体表面の粗さ分布を振動強度分布に変換してユーザに出力するデバイスであるので、拘束力の大きさを振動強度にマッピングすると考えれば位置入力型と見なすこともでき、点型デバイスが分布しているデバイスとして捉え、触覚計算モデルを適用することも可能である。

本研究で考えている触覚サーバでは、サーバに高い処理能力を持たせクライアントの映像も生成させれば、分散型のようにそれぞれのサイトの計算機が高い処理能力を持たなくても良い。したがって遠隔地のクライアントの処理能力がさほど高くなくてもサーバ内の大規模なデータや複雑なシミュレーション結果をリアルタイムで遠隔地から触れることが出来る。もし、ギガビットネットワークが無線で利用できるようになれば、携帯型の触覚デバイスからの触覚サーバの利用や、遠隔地同士での触覚付きのコミュニケーションも簡単に実現できるようになる。さらに本研究で提案した動作原理の異なる触覚デバイスを用いた協調作業環境では、それぞれのデバイスの特徴を生かした作業が行える。たとえば本研究で構築したシステムでデバイスの特長を生かして作成した作品例を図11に示す。帽子や顔の輪郭など大まかな形状変形を面型デバイスでおこない、鼻や口耳など細かい部分を点型デバイスを用いて作成した。そのほかにも、遠隔指示や触覚を使ったコミュニケーション、手術支援システム、ハンディキャップのある人との協調作業などへの応用も考えられる。

10. まとめ

本研究では、触覚サーバ上で動作原理の異なる触覚デバイスを用いた協調作業環境を容易に構築するための触覚計算モデルを提案した。実際に点型デバイス、面型デバイスを接続して協調作業環境を行う環境を構築し、その有効性を検証した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、日商エレクトロニクス株式会社に協力していただいた。ここに感謝の意を表したい。

参考文献

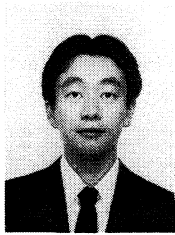
- [1] K.Salisbury,D.Brock,et al:Haptic Rendering:Programing Touch Interaction With Virtual Objects, Symposium on Interactive 3D Graphics, pp.123-130(1995)
- [2] 廣瀬、岩田、池井、小木、広田、矢野、寛：触覚用共通ソフトウェア(HIP)の開発；日本バーチャルリアリティ学会論文誌,Vol.3,No.3,pp.111-119,(1998)
- [3] 田中広田、金子：力覚をとまなう変形・切断操作による造形作業、日本バーチャルリアリティ学会論文誌,Vol.4,No.3,pp.573-583,(1999)
- [4] M.Ishii and M.Sato: Networked SPIDAR: A Networked Virtual Environment with Visual,Auditory and Haptic Interactions; Presence, Vol.3,No.4,pp.351-359,(1994)
- [5] 矢野、岩田：力覚帰還型仮想環境における協同作業；第69回グラフィックスとCAD研究会,pp.31-34,(1994)
- [6] Baier.M, et.al : Distributed PC-Based Haptic , Visual and Acoustic Telepresence System - Experiments in Virtual and Remote Environments - ; Proc.of IEEE Virtual Reality,pp118-125,(1999)
- [7] Thomas H.Massie : Virtual Touch Through Point Interaction ; International Conference on Artificial Reality and Tele-existence,p19-38,(1996)
- [8] 浅野、矢野、岩田：フォースディスプレイを用いた仮想環境における手術シミュレーションの要素技術開発；日本バーチャルリアリティ学会第1回大会論文集,pp95-98,(1996)
- [9] 広田、廣瀬：面提示型触覚ディスプレイのための曲面表現デバイス；第10回ヒューマンインターフェースシンポジウム,pp193-196,(1994)

- [10] 岩田、市ヶ谷：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第1回大会論文集,pp7-10,(1996)
- [11] 若松、池井、福田：触覚テキストの表示におけるデータ依存特性；日本バーチャルリアリティ学会第1回大会論文集,pp185-186,(1996)
- [12] 廣瀬、小木、矢野、筧、中垣：ワイヤーテンションを用いたウェアラブルフォースディスプレイの開発；日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集,pp1-4,(1998)

(1999年5月14日受付, 2000年1月4日再受付)

著者紹介

矢野 博明 (正会員)



1997年筑波大学大学院工学研究科構造工学専攻修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD), 1999年より筑波大学機能工学系講師。バーチャルリアリティ, 特に触力覚デバイスの開発, および仮想環境構築ソフトウェアの研究開発に従事。日本バーチャルリアリティ学会, 計測自動制御学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。博士(工学)。

筧 直之



1999年東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻修士課程修了。同年より日本電信電話株式会社勤務。バーチャルリアリティ, 特に触力覚デバイスの開発, および仮想環境構築ソフトウェアの研究開発に従事。日本バーチャルリアリティ学会会員。

小木 哲朗 (正会員)



1986年東京大学工学系研究科修士課程修了。同年(株)三菱総研入社。1994年東京大学大学院博士課程修了。1996年同大学院工学系研究科助教授。1999年より三菱総研主任研究員, 通信・放送機構委託研究員, 東大IML客員研究員。バーチャルリアリティ, ビジュアルライゼーションの研究に従事。博士(工学)

廣瀬 通孝 (正会員)



1982年東京大学大学院博士課程修了。同年同大学工学部産業機械工学科専任講師。1983年同大学工学部産業機械工学科助教授。1999年より同大先端科学技術研究センター教授。ヒューマン・インタフェース, バーチャルリアリティの研究に従事。情報処理学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。

岩田 洋夫 (正会員)



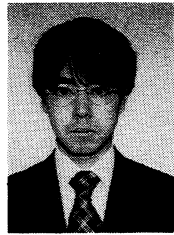
1981年東京大学工学部機械工学科卒業。1986年東京大学大学院工学系研究科修了(工学博士)同年筑波大学構造工学系助手、1988年同大講師、1993年同大助教授、現在に至る。1996年より日本バーチャルリアリティ学会理事、論文委員長。専門は、バーチャルリアリティ、とくに力覚フィードバック技術の実現とその情報メディアとしての活用に焦点を絞っている。

池井 寧 (正会員)



1988年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(産業機械工学専攻)。大阪大学助手。東京都立科学技術大学講師を経て、現在同大生産情報システム工学科助教授。バーチャルリアリティ, ヒューマンインタフェースの研究に従事。バーチャルリアリティ学会, 日本機械学会, ヒューマンインタフェース学会, 計測自動学会, IEEEなどの会員。工学博士。

広田 光一 (正会員)



1988年東京大学工学部産業機械工学科卒業、1990年同大学院産業機械工学専攻修士課程修了、1994年同博士課程修了。1995年豊橋技術科学大学助手。2000年東京大学助教授。現在に至る。専門はヒューマンインタフェース、バーチャルリアリティ。日本バーチャルリアリティ学会, 日本機会学会, 計測自動制御学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。博士(工学)。