

没入型仮想空間における力覚呈示デバイス HapticGEARの開発とその評価

筧 直之^{*1} 矢野 博明^{*2} 齊藤 允^{*3} 小木 哲朗^{*4} 廣瀬 通孝^{*3}

Development and Evaluation of a Wearable Force Display "HapticGEAR" for Immersive Projection Displays

Naoyuki Kakehi^{*1}, Hiroaki Yano^{*2}, Makoto Saito^{*3}, Tetsuro Ogi^{*4} and Michitaka Hirose^{*3}

Abstract: In this paper, we describe the design and the implementation of a force display for immersive projection displays such as CAVE or CABIN. To give the user maximum freedom of motion in a large virtual space, it is necessary to use a portable force display that is grounded on the user's body. Various nonportable force displays have been developed, but their workspace is small and restricted. Therefore, we developed a portable (wearable) force display called HapticGEAR which makes use of the tension of wires grounded on the user's back. HapticGEAR is designed to have fewer effects on the user's motion and to maximize output force in user's workspace. Finally, we evaluated this device through the basic experiments in CABIN.

Keywords: force display, haptic device, wearable, immersive projection display, HapticGEAR

1. はじめに

近年、大規模な仮想空間生成技術の一つとして、複数のスクリーンで構成された空間に立体映像を映し出す没入型多面ディスプレイ技術が注目を集めている。イリノイ大学のCAVE[1]をはじめ、東京大学のCABIN[2]や岐阜県のCOSMOS[3]等、世界各地でこのタイプのディスプレイが開発され、バーチャル・モックアップなど様々な分野への応用が期待されている[4]。

このような没入型ディスプレイ内においては、視覚情報による高い臨場感とインタラクティブ性が提供されるものの、ユーザは見えている映像を直接触ることができない。しかしながら、仮想物体の形状認識や操作を行う場合には、力覚情報の呈示による触るという感覚の実現は重要な要素であると考えられる。そのため、没入型仮想環境において利用可能な、大きな可動範囲を有し、かつユーザの動作を制限しない力覚デバイスの開発が望まれる。

一方、現在開発されている力覚デバイスは、PHANTOM[5]やHapticMaster[6]に代表されるように、デバイス自体が

机等に固定された形で使用されるデスクトップ型のものが多い。デスクトップ型は、デバイス重量の負荷をユーザにかけない等の利点はいくつかあるが、多くのシステムは可動範囲が小さく、ユーザの動きを机上に制限するという欠点を持つ。比較的大きな可動範囲を持つ力覚デバイスとしては、糸の張力を利用したSPIDAR[7]があるが、没入型多面ディスプレイの利用においては、ユーザが動き回るため、糸との干渉を避けることができない。従って、ユーザが自由に動く環境においては、デバイス自体をユーザに固定したポータブル型の力覚デバイスが有効であると考えられる。

そこで本研究では、没入型多面ディスプレイ内での利用を前提として、ユーザへの負担が少なく、かつ動作の妨げにならないポータブル型のウェアラブルフォースディスプレイHapticGEARの設計、開発を行った。さらに、その表現力等に関する実験を行い、本デバイスの評価を行った。

2. 従来のポータブル型力覚デバイス

ポータブル型の力覚デバイスとしては、既に幾つかのシステムが発表されている。これらのデバイスはユーザの体のどの部位に固定するかで、幾つかの種類に分類することができる。

手にデバイスを固定するタイプとしては、Rutgers Master II [8]やVirtual Technologies社のCyberGrasp[9]などがある。前者は各指に取り付けられた空気圧アク

*1 東京大学(現在、日本電信電話株式会社)

*2 筑波大学

*3 東京大学

*4 通信・放送機構

*1 University of Tokyo

(Now, Nippon Telegraph and Telephone Corporation)

*2 University of Tsukuba

*3 University of Tokyo

*4 Telecommunications Advancement Organization of Japan

チュエータにより、後者はワイヤーテンションにより主に把持感覚を呈示することができる。しかし、いずれのタイプも手に対する指への反力呈示であるため、等身大の物体からの反力や物体形状などを表現することは難しい。また、これらのデバイスは装着やキャリブレーションに時間がかかるという問題もある。

腕にデバイスを固定するタイプとしては、筑波大学の腕装着型ジョイスティック[10]などがある。このデバイスは腕と指先の間に力覚を呈示し、仮想物体の形状を表現するものである。しかしながら、腕と指先との内力を呈示するため、腕の位置によっては指先が仮想物体に大きくめり込むという問題がある。

これらのシステムに対して、本研究で開発したHapticGEARは、デバイスを背中に装着することで、ユーザへの疲労や拘束感を少なくしたまま、かつ指先への力覚を表現することができる。そのため、没入型仮想環境内で等身大の仮想物体の形状を表現できる力覚デバイスである。

3. HapticGEAR の設計と実装

3.1 基本的設計指針

没入型仮想空間において視覚情報に力覚情報を重ね合わせてユーザに呈示するために、本力覚デバイスは以下の基本指針を満たすように配慮した。

- (指針1) 手や腕にデバイス重量による負荷をかけない
- (指針2) ユーザの動作の妨げにならない
- (指針3) ユーザの視界の妨げにならない
- (指針4) ユーザの安全性を重視する
- (指針5) 容易にデバイスを脱着することができる

これらの指針を満たすために、著者らは力覚の発生機構として糸の張力を用いることにした。図1にHapticGEARの概念図を示すが、アクチュエータやセンサなどの張力発生機構を手や腕ではなく、背中に固定できるため、ユーザへの負担を軽減し(指針1)、またユーザの動作を自由にする(指針2)。手の回りの機構が簡単なため、視界の妨げになるものが少なくなる(指針3)。可動部分が小さいために安全である(指針4)。リュックサックにデバイスを固定することでデバイスの脱着が容易になる(指針5)。この方式では、先の5つの指針を満たすことができる。

しかしながら、糸の張力により力覚を呈示する場合には、人間の体前方から数本の糸で引っ張らない限り、あらゆる方向の反力を発生することは難しい。しかし体前方から糸で引っ張る場合には、デバイス自体も体前方に大きく張り出すことになり、デバイスが人間の動作や視界の妨げになってしまう。また没入型仮想環境では、ユーザ自身が動き回れることや仮想物体の裏側を触る場合に腕と仮想物体との隠蔽関係がくずれ、違和感が生じることを考えれば、ユーザ側に正対する物体表面の力覚呈示を行うことができれば、没入型ディスプレイ内での使用を前提としたHapticGEARでは十分に有効であるものと期待される。

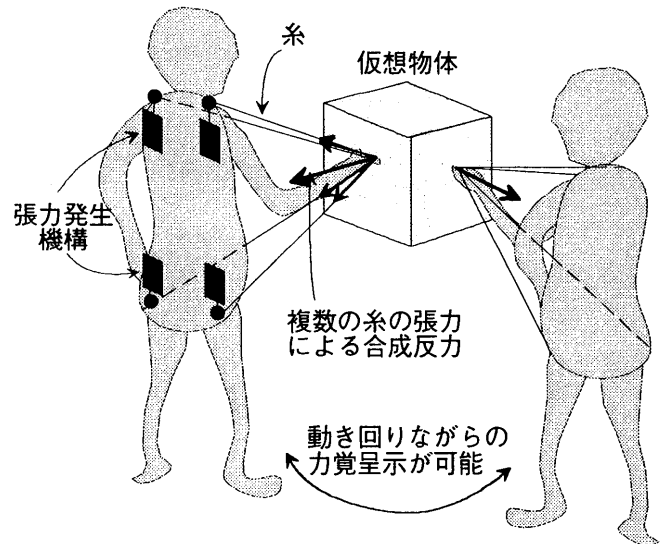


図1.HapticGEAR の概念図

Fig1.Concept of HapticGEAR

3.2 人間の作業空間測定

繰り返しになるが、HapticGEARでは呈示可能な反力の方向はある程度限定されている。その反力の方向は糸の取付位置および指先位置によって、大きく左右されるものである。そのため、まず人間が手で作業を行う場合に最もよく使う空間、すなわち人間の作業空間を特定する予備実験を行った。

実験では静止した被験者に手を動かしてもらい、指先の動きを計測した。被験者には視覚刺激や肉体的負荷を与えず、「目の前に大きさのわからない物体があると仮定し、手で確かめるつもりで自由に手を動かして下さい」と指示を与えている。なお、ここでは右利きの人間の立位状態での作業空間を求めることにし、健常な右利きの男性6人を被験者として抽出した。

実験の結果、右利きの人間の作業空間は図2のようになった。図2は被験者の指先の軌跡から、指先の存在確率の分布図を求めたものであり、右手が通過した全空間内の存在確率を格子点上に等高線を描いたものである。座標系は肩に水平方向にx軸、体から前方にy軸、鉛直方向にz軸である。

もちろん、身長差などによるばらつきはあるが、図2から、右利きの人間の作業空間の中心は

$$(x, y, z) = (100, 400, -200) \text{ (mm)}$$

付近にあることが分かった。

3.3 HapticGEAR の設計

図2から開発する力覚ディスプレイの呈示空間を、人間の作業空間の中心を中心とする600(W)×400(D)×500(H)(mm)の直方体の内部、すなわち $-200 < x < 400$, $200 < y < 600$, $-450 < z < 50$ を満たす領域と設定した。この内部の領域で、呈示可能な反力の方向や大きさが大きく、かつ3.1の基本指針を満たすような力覚ディスプレイの糸の取付位置を考慮した。

物体の表面形状を表現するために呈示反力の大きさは、

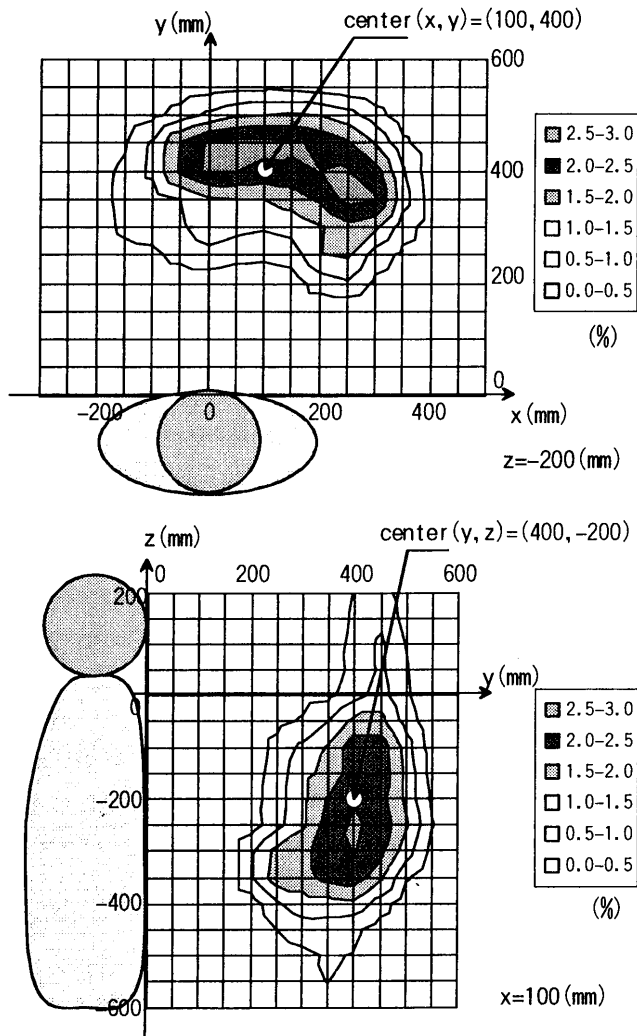


図2. 右利きの人間の作業空間
Fig2. Working Space of Right-handed Persons

既存のハプティックインタフェースの仕様を参考にし、また背中に取り付けるモータの最大トルクと重量を考慮して、1kgf以上を目標とした[11].

またペン先の3次元位置を計測するためには、理論上3本の糸があれば十分であるが、糸の数が増えるほど合力としての呈示反力の大きさは大きくなり、反力の呈示可能な立体角も大きくなる。ここでは、対称性も考慮し、糸の本数を4本に決定した[12].

3.4 HapticGEARの実装

以上に述べたデバイスの設計指針をもとに、著者らが開発したウェアラブルフォースディスプレイHapticGEARの構造およびその全景をそれぞれ図3と図4に示す。

HapticGEARの背中部分には、磁場のひずみを少なくするため木製のフレームを用いて、アクチュエータして最大出力が約1kgfのDCモータを、センサとして540パルス/回転のロータリーエンコーダを配置している。糸はモータに取り付けられたプーリーから、パイプの中を通して肩と腰の両側4箇所からユーザの前方へ張り出すようにし

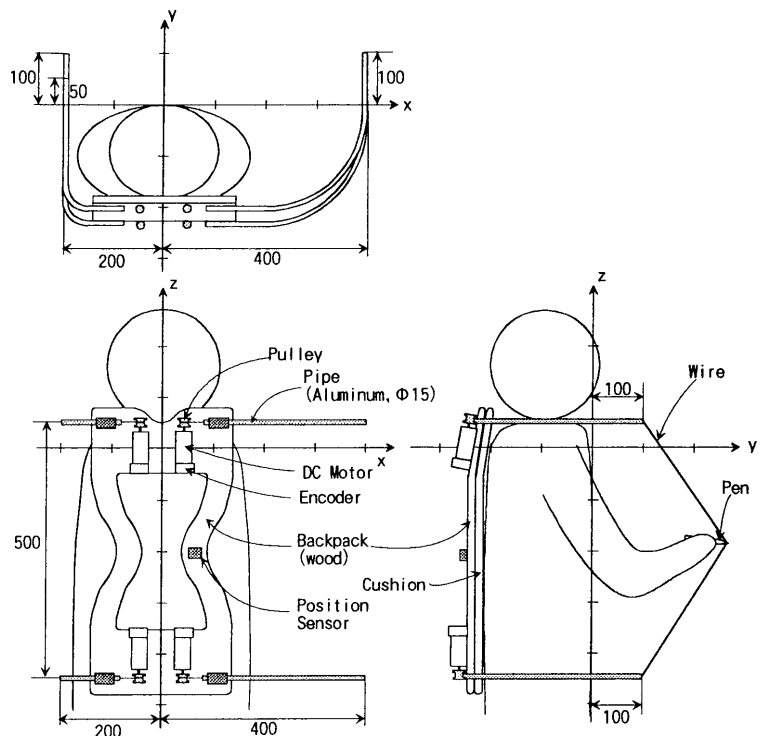


図3. HapticGEARの設計図
Fig3. Design of HapticGEAR

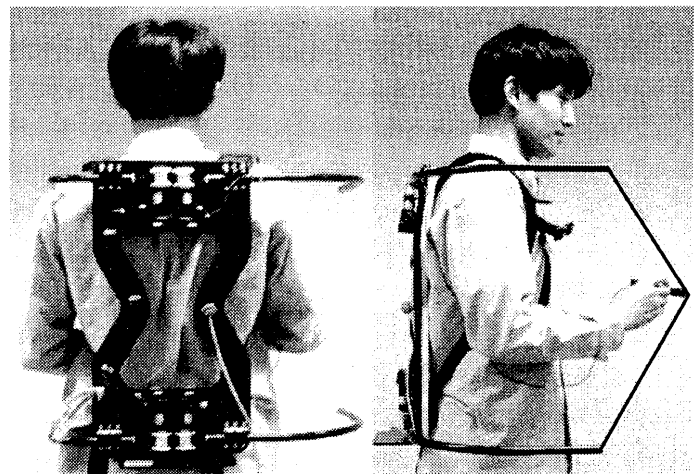


図4. HapticGEARの全景
Fig4. Photos of HapticGEAR

ている。全ての糸はユーザの把持部であるペン先の1点に取り付けられている。これによってペン先の3次元位置を計測し、対応する力を呈示することができる。また、ペンにはスイッチがついており、仮想物体把持などの情報入力に用いることができる。

4本の糸により所望の反力を呈示するための計算方法を以下に示す。4本を使うとそれぞれの糸にどのような張力を与えるかは一意には決まらない。そこで、以下のように計算している。ただし、 $i=1\sim 4$, $j=1\sim 3$ である。

糸の取付位置を $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 、取付位置からの糸の長

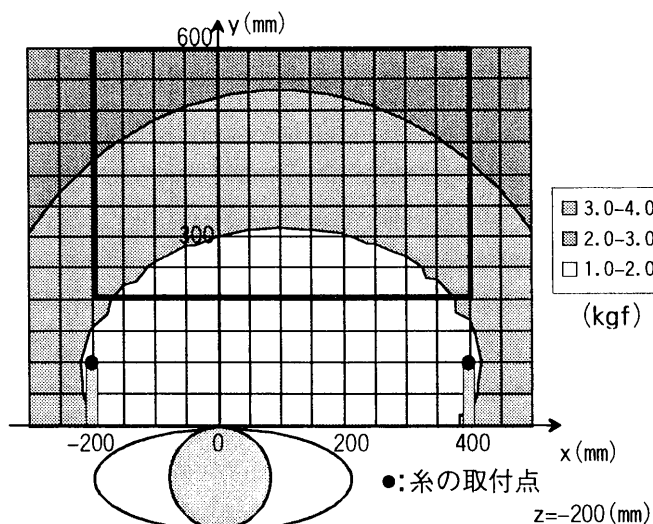


図5. 最大呈示反力の分布

Fig5. Intensity of the Maximum Output Force

さを l_i 、計測するペン先の位置を $P(x, y, z)$ とする。糸 4 本により合成される呈示反力を F 、ペン先から取付位置への単位ベクトルを f_i とすると、 f_i は、

$$f_i = (x_i - x, y_i - y, z_i - z) / l_i \quad (1)$$

である。4本の糸のうち3本を選んで、反力 F を発生すると考える。このとき、必要な各糸の張力をそれぞれ a_j, b_j, c_j, d_j とすると、以下の4本の等式が成立する。

$$\begin{cases} a_1 f_1 + b_1 f_2 + c_1 f_3 = F \\ a_2 f_1 + b_2 f_2 + d_1 f_4 = F \\ a_3 f_1 + c_2 f_3 + d_2 f_4 = F \\ b_3 f_2 + c_3 f_3 + d_3 f_4 = F \end{cases} \quad (2)$$

a_j, b_j, c_j, d_j は、各々の式に(1)を代入して簡単に計算できる。さて、式(2)の4式を辺々加えると、

$$(\sum_j a_j) f_1 + (\sum_j b_j) f_2 + (\sum_j c_j) f_3 + (\sum_j d_j) f_4 = 4F$$

となり、目標とする各ワイヤーの張力値 I_i は、

$$I_1 = \sum_j a_j / 4, I_2 = \sum_j b_j / 4, I_3 = \sum_j c_j / 4, I_4 = \sum_j d_j / 4$$

と求められる。また解 I_i が負になった場合あるいは最大値を超えた場合には、モータにより出力可能な最小値あるいは最大値の反力をそれぞれ出力し、その合力をユーザに呈示している。

次にパイプの位置をどのように決定したかを述べる。図3からも分かるように、右側のパイプが左側のパイプよりも20cm外に張り出すように設計されている。これは3.3で設定した呈示空間内で、反力の方向を大きくするためである。パイプの間隔をより広くすると呈示可能な反力方向もより大きくできるが、逆に3.1の設計指針を満たすことが難しくなる。そのため、パイプの水平方向の間隔は60cmと設計した。鉛直方向も同様である。

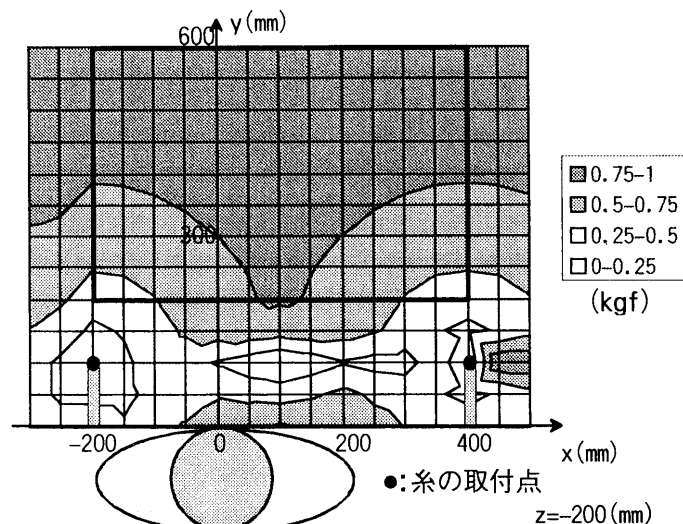


図6. 最小呈示反力の分布

Fig6. Intensity of the Minimum Output Force

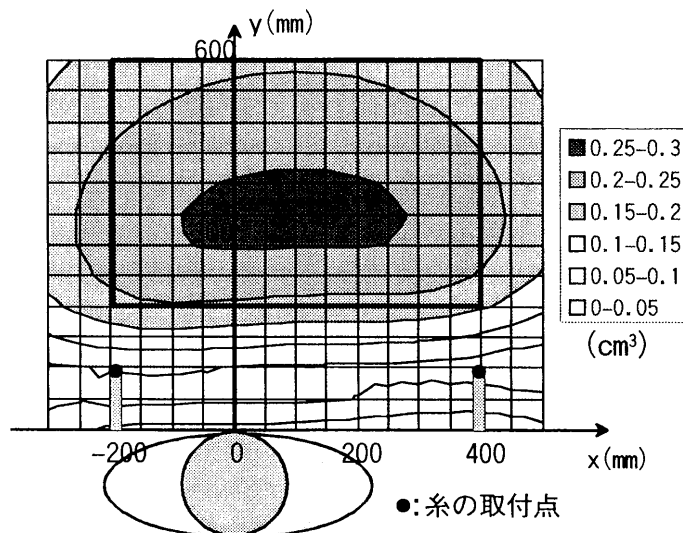


図7. 反力の大きさと方向を考慮した反力範囲による評価

Fig7. Evaluation of the Force Index

Considered the Force Intensity and Range

またパイプの長さは、模型を使った予備実験により、動作の妨げにならず、またCABIN内での視覚の妨げにもならないと、被験者5人が答えた数値を設計に反映した。その結果、左上を体から5cm前に、それ以外を10cm前に張り出すように設計されている。目に一番近い左上だけが他と比べて5cm短くなっている。前にパイプを出すことで、設定した呈示空間内における呈示反力の立体角を大きくすることができるが、ここでも3.1の設計指針を重視した。

デバイスの総重量は約2.4kgであり、背中に背負うことを考えれば、それほどユーザの負担にはならない重量である。またペン先の位置決め精度は約1cmである。呈示可能な最大反力は、ユーザから40cm前方のところ約1.6kgfであり、その分布は図5のようになっている。逆に呈示可能な反力方向内で、最低限保証される最小反力の分布は図6のようになっている。図5と図6から、設

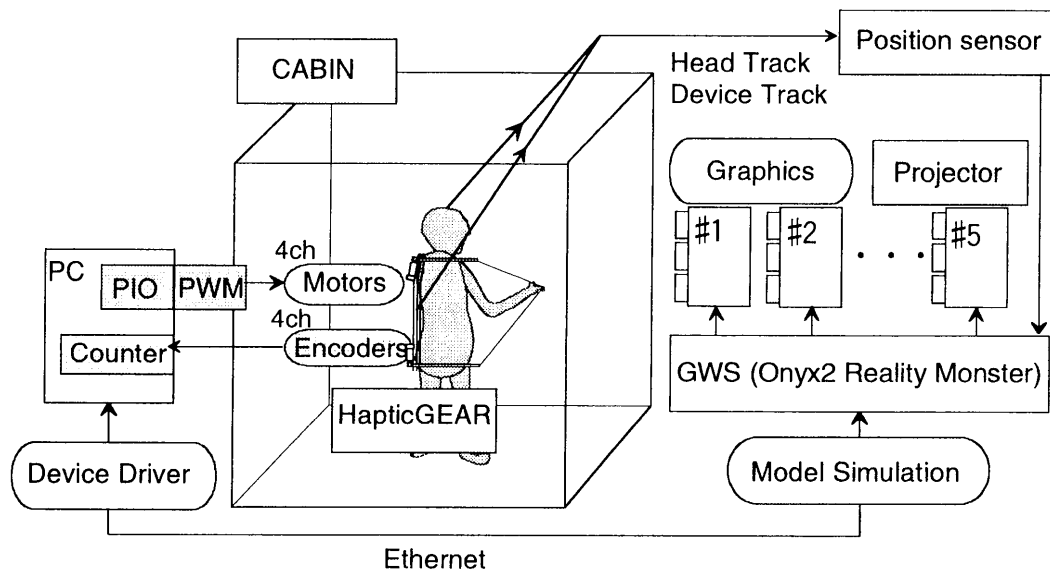


図8. システム全体構成
Fig8. System Configuration

定した呈示空間内で1kgf前後出力できていることが分かる。なお、位置計測のため常時糸にテンションをかけておくのに必要な操作反力は50gf程度である。

一方、反力の大きさと方向の双方を考慮した反力範囲による評価を図7に表す。この反力範囲は、呈示反力をペン先の1点からの糸方向の単位ベクトル4本で張られる四角錐の体積の大きさと計算されたものである。図2と図7を比較すると、人間の作業空間の中心と今回設計したデバイスによる呈示反力のスイートスポットとがほぼ重なっていることが分かる。

4. システム構成

4.1 ハードウェア構成

現在HapticGEARはCABINの中で用いることができるようになっており、図8に示すようなシステム構成で動作している。デバイス自体はPCで制御され、DCモータは0～255の制御命令をPIOを通してPWM方式の駆動回路に送ることで動作する。PCはグラフィックスワークステーション(以下GWS)とEthernetを介して接続され、必要なデータをUDPにより送受信している。また、CABIN内におけるデバイス自体の位置姿勢は、背中部の木製フレーム中央に取り付けられた磁気センサ(Polhemus社製のUltraTrak)により計測される。GWSでは、PCからの受信データと磁気センサからのデバイス自体の位置姿勢データをもとにCABIN内でのペン先位置を算出する。さらに仮想物体との接触判定等の処理を行い、仮想世界を更新するとともにデバイスで呈示する反力を計算し、反力が発生される。

4.2 ソフトウェア構成

力覚呈示には、触覚用共通ソフトウェアHIP[13]を用いている。HIPはVRMLなどの共通フォーマットデータを読



図9. CABIN内での力覚呈示の様子
Fig9. HapticGEAR in CABIN

み込むことができ、仮想物体の形状を簡単に定義でき、触ることができるライブラリである。また視覚呈示には、OpenGLを用いている。力覚のフィードバックは視覚に比べて、非常に速い更新レートを必要とするため、力覚用と視覚用の2つにプロセスを分け、並列処理を行っている[14]。こうすることで力覚の制御は、通信などすべてを含めて約2kHzで更新できている。

実際にCABINの中でHapticGEARを用い、自動車モデルを触りながら、自動車の仮想分解作業をしている様子を図9に示す。

5. 評価実験

5.1 仮想物体のなぞり実験

実際に仮想物体を呈示し、HapticGEARでどの程度正しく仮想物体をなぞれているかをペン先位置の軌跡を取って調べた。作業空間の中心(x, y, z)=(100, 400, -200)(mm)に

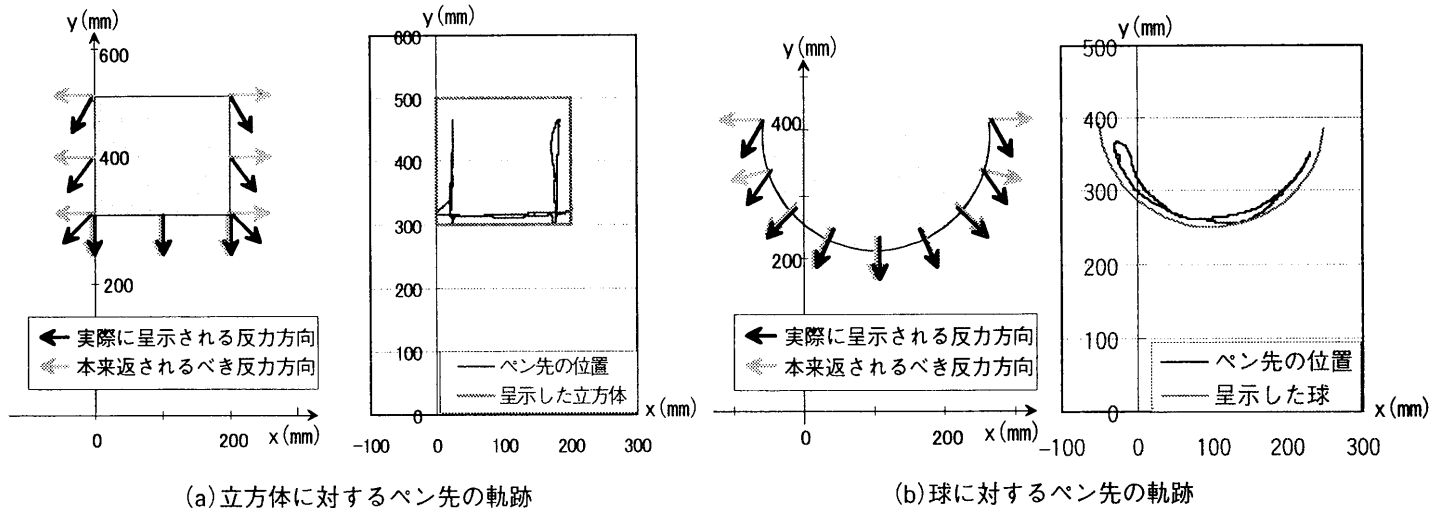


図10. 仮想物体に対するペン先の軌跡
Fig10. Trajectory of the Pen Tip Tracing Virtual Objects

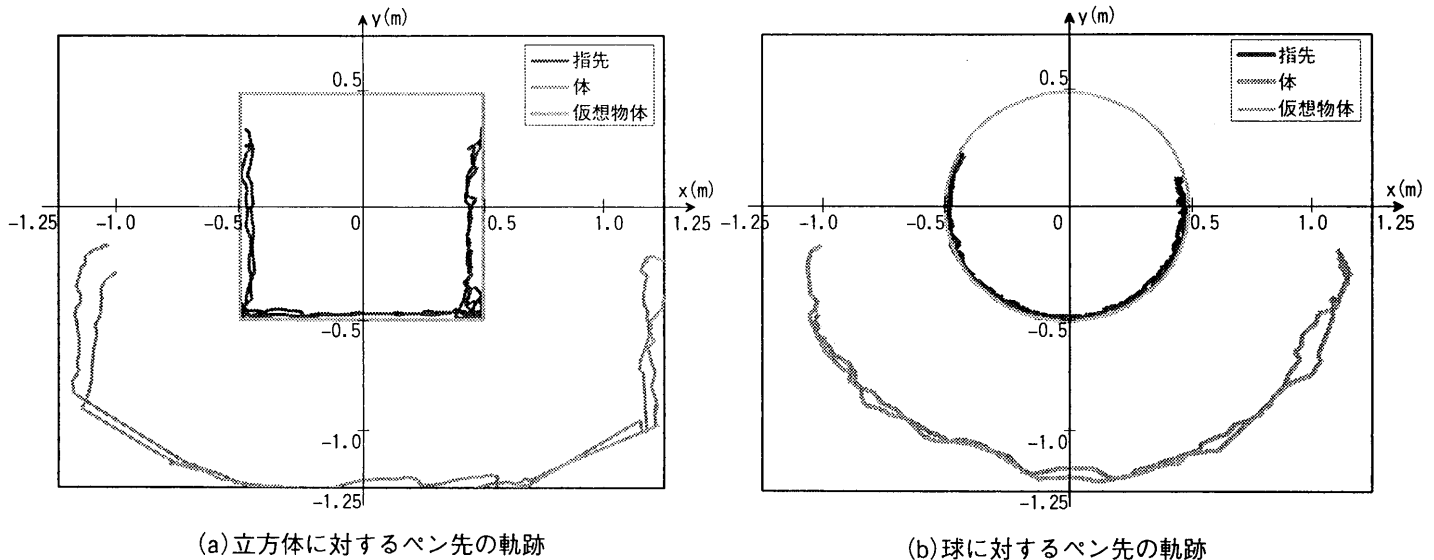


図11. CABIN内での等身大仮想物体に対するペン先の軌跡
Fig11. Trajectory of the Pen Tip Tracing Large-scale Virtual Objects in CABIN

一辺 200mm の立方体を呈示したときのペン先の軌跡を図 10(a) に示す。また図 10 の左では、本来呈示される反力方向と実際に呈示した反力方向の違いを示している。

この実験においてユーザは直立した状態で、手のみを動かしている。この図から立方体の前面も側面もかなり正確になぞられていることが分かる。側面に関しては構造的な理由から面に垂直な成分を呈示することができないが、呈示される反力には側面に垂直な反力の成分もあり、ペン先の位置は側面に拘束することができている。また、直径 300mm の球を同じ位置に置いたときのペン先位置の軌跡を図 10(b) に示すが、球のような曲面に対しても、ユーザはかなりなめらかに曲面をなぞることができている。

5.2 等身大仮想物体のなぞり実験

次に CABIN の中で、等身大の仮想物体をなぞったときの

ペン先位置の軌跡を調べた。このときユーザは手だけでなく、ユーザ自身も仮想物体の周りを動きながらモデルをなぞっている。一辺 1m の立方体モデルと直径 1m の球モデルに対するペン先位置とユーザ位置の軌跡を図 11(a) と (b) にそれぞれ示す。図 11 で軌跡が二重になっているのは、ユーザが右から左、左から右と一回りしたからである。ユーザ自身も動きながら触っているため、図 10 ほどペン先の軌跡がなめらかでないが、ペンがモデルにきちんと拘束されていることが分かる。これは、ユーザ自身が動いて、触る面に正対することで、呈示すべき反力が HapticGEAR により正しく表現できているためである。この実験から、等身大の大きなモデルに対しても HapticGEAR が有効に動作することが分かった。

5.3 力覚方向の知覚実験

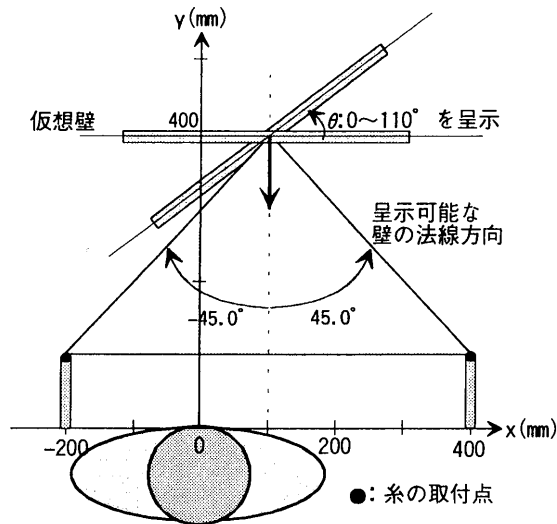


図12. 実験で呈示した仮想壁

Fig12.Virtual Walls Presented by Experiments

HapticGEARではあらゆる方向の反力を呈示することはできないが、図10のなぞり実験から、実際に呈示される反力方向と本来返される反力方向が異なる場合においても、ペン先の位置は面にほぼ拘束されることが分かった。そこで、呈示される力覚方向が実際に異なる場合においても、人間がどの程度違和感なく感じられるかを調べる力覚方向の知覚実験を行った。

実験では、作業空間の中心(x, y, z)=(100, 400, -200) (mm)に仮想の壁を視覚と力覚を用いて呈示した。仮想の壁は図12に示すように人間と面との角度 θ を $0 \sim \pm 110$ 度の範囲で傾けてランダムに呈示される。被験者は壁の中央付近をなぞり、呈示された壁を視覚情報と力覚情報のずれによる違和感なく認識できるかを答えてもらった。実験方法には上下法を用い、上限値と下限値の平均をとることで閾値を算出した。

呈示した面の位置で、HapticGEARの呈示可能な反力方向は図12に示される通り、理論値では ± 45 度の範囲である。これが理論的に呈示可能な壁面の法線の範囲でもある。

被験者5人に対して行った実験の結果を図13と表1に示す。結果として、デバイスの呈示可能な反力方向の約2倍の $-98.7 \sim 82.8$ 度の範囲で、違和感のない仮想壁の呈示が可能であると示されている。これは、仮想物体の裏側を除く目に見える全ての面に関して違和感のない力覚呈示ができることを意味している。

デバイスの呈示可能な反力方向は大きくないが、実際には呈示できない方向の反力に対しても、感覚的には違和感の少ないことが実験により確認された。このことは、非常に興味深い結果といえ、結果的には触覚の錯覚を積極的に利用したといえる。

さらに没入型仮想環境内では、ユーザ自身が歩き回ることができるため、呈示反力の制限をカバーできると考えられる。

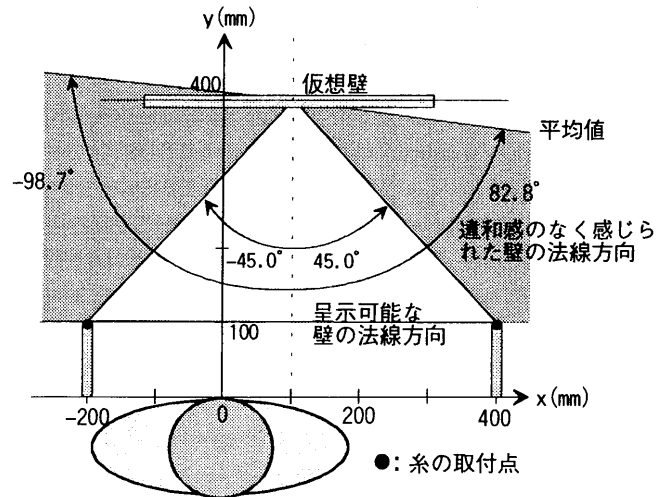


図13. 被験者が壁と認識した仮想壁の範囲

Fig13.Directions of Virtual Walls

Recognized as Walls by Users

表1. 力覚方向の知覚実験結果

Table1.Results of Perception Experiments

触方向	理論値	実験値	
	呈示可能値	平均値	標準偏差
右から	45.0°	82.8°	13.1°
左から	-45.0°	-98.7°	11.7°

5.4 使用感の評価実験

HapticGEARは没入型仮想環境で用いることを前提とし、人間の動作や呈示される映像の妨げにならないことを第一に優先して、設計された。ここでは、3.1で設定した設計指針が満たされているかどうかをアンケートにより評価した。HapticGEARを用いた図9の自動車の仮想分解作業を10人の被験者に実際にCABIN内で体験してもらい、アンケートによる使用感の評価を行った。アンケートでは、(Q1)デバイスの重量が気になったか？

(Q2)デバイス(特にパイプ)が動作の妨げになったか？

(Q3)デバイス(パイプ、糸等)が視覚的に気になったか？

という質問を行った。1:ほとんど気にならない \longleftrightarrow 5:かなり気になるの5段階評価で、被験者に答えてもらったところ、結果は図14のようになった。全ての項目で被験者はほとんど気にならなかったとしている。動作時にデバイスが気になったと答えた被験者も、パイプが気になったわけではなく、手と糸の干渉がやや気になったと答えている。糸4本が取り付けられているペンを通常のペンを持つような持ち方で持つと、確かに手と糸が干渉する場合がある。そのため、ペンの後方を持つように最初に指導するか、把持部の改良をしなければならない。

他にも、非作業時には手からペンを離すと、糸のテンションによりペンが体に吸い付くため、両手がフリーになって使いやすいというコメントもあった。

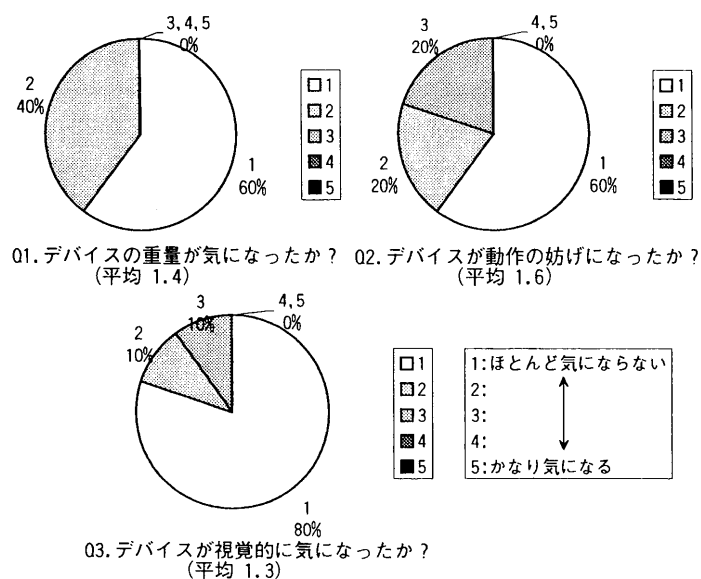


図 14. HapticGEAR に対するアンケート結果
Fig14.Result the questionnaire of HapticGEAR

6. 考察

HapticGEAR は、ユーザの使用感や装着感を重視し、設計された。そのため呈示可能な反力の方向は十分大きいものではなかったが、なぞり実験により、仮想物体の表面をきれいになぞれることが確認された。また力覚方向の知覚実験により、実際には呈示できない方向の反力に対しても、感覚的に違和感の少ないことが分かった。

とは言うものの、細かく厳密な作業を行う場合には、今回設計したHapticGEARの呈示可能な反力の方向ではやはり不十分と考えられる。厳密な作業をする場合には、ユーザの使用感よりも、デバイスの基本性能を第一に考えて設計すべきであろう。

しかし、CABIN等の没入型多面ディスプレイ内での利用を考えると、その中で厳密な作業をするアプリケーションより、例えば、物体の組立作業をしたり、物体の大まかな造形作業をするアプリケーションの方が多く考えられる。後者のアプリケーションにおいて、HapticGEARは十分有効に使うことができる、と考えられる。

また今回、CABIN内でのデバイスの位置計測に磁気センサを用いた。磁気センサには多少ノイズがあるため、仮想物体の厳密な表面形状を表現するのは困難であるが、CABIN内でのなぞり実験から分かるように、大まかな物体の表面形状は十分に表現可能である。モータの励磁による誤差は、計測の結果3mm程度で、ほとんど影響はなかった。しかし、磁気センサの誤差等によるデバイスのペン先とCABIN内に表示したポイントのずれ、すなわち視覚と触覚のずれが数cmある場合があった。CABIN内でのデバイスの正確な位置計測は今後の課題である。

7. まとめ

本研究では、没入型仮想環境で等身大の仮想物体に対す

る力覚呈示が可能なウェアラブルフォースディスプレイ HapticGEAR の開発を行った。視覚と力覚を重ねて呈示するためのHapticGEARの基本的な設計方針を述べ、実際にデバイスの実装を行った。HapticGEARには呈示反力の制限はあるものの、評価実験により、HapticGEARが人間の感覚レベルでは違和感なく有効に動作することを確認した。

またHapticGEARは持ち運びが容易なために、没入型多面ディスプレイに限らず、1枚の大きなスクリーンから成るHapticWorkBench[15]やHMDなどの、他の視覚デバイスとも容易に併用することができる。今後は、没入型仮想環境での様々なアプリケーションにHapticGEARを組み込んでいきたい。

参考文献

- [1]C. Cruz-Neira, D. Sandin and T. DeFanti: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, Proc. of SIGGRAPH '93, pp.135-142 (1993)
- [2]廣瀬, 小木, 石綿, 山田: 多面型全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその特性評価, 電子情報通信学会論文誌 Vol. J81-D-II No. 5 pp.888-896 (1998)
- [3]山田, 棚橋, 小木, 廣瀬: 完全没入型6面ディスプレイCOSMOSの開発と空間ナビゲーションにおける効果, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol. 4 No. 3 pp.531-538 (1999)
- [4]H. Bullinger, O. Riedel, R. Breining: Immersive Projection Technology - Benefits for the Industry, 1st International IPT Workshop pp.13-25 (1997)
- [5]T. Massie: Virtual Touch Through Point Interaction, Proc. of ICAT'96 pp.19-38 (1996)
- [6]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 pp.95-98 (1996)
- [7]L. Buoguil, Y. Cai, M. Sato: New Haptic Device For Human-Scale Virtual Environment: Scaleable-SPIDAR, Proc. of ICAT'97 pp.93-98 (1997)
- [8]D. Gomez, G. Burdea, N. Langrana: Integration of the Rutgers Master II in a Virtual Reality Simulation, Proc. of IEEE VRAIS' 95 Conference pp.198-202 (1995)
- [9]<http://www.virtex.com/>
- [10]中川, 岩田: 着用型力覚帰還ジョイスティック, Human Interface News and Report Vol.13 No.2 pp.135-138 (1998)
- [11]Burdea: FORCE and TOUCH FEEDBACK for VIRTUAL REALITY, John Wiley & Sons, Inc. (1996)
- [12]廣瀬, 小木, 矢野, 寛, 中垣: ワイヤータ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大会論文集 Vol.3 pp.1-4 (1998)
- [13]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)
- [14]矢野, 岩田: 力覚帰還型仮想環境構築ソフトウェア, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.2 No.1 pp.1-9 (1997)
- [15]矢野, 寛, 小木, 廣瀬, 中垣: 多種触覚デバイスに対応したHapticWorkBenchの開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.4 No.4 pp.723-730 (1999)

(2000年7月14日受付)