

没入型仮想環境における装着型力触覚提示装置

山内 久幸

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

雨宮 賢一

(株)ナナオ

田中 豊

法政大学工学部機械工学科

近年、大型のスクリーンに仮想環境の立体映像を投影する没入型ディスプレイが多く開発されている。このような没入感のある広い仮想環境内で、操作者へ臨場感のある作業感覚を提示するためには、操作者が直接装着する事が可能であり、人間の持つ力覚、触覚といった複数の感覚へ作業情報をフィードバックする感覚ディスプレイの開発が重要である。本報では、作動源に空気圧を用いた装着型力触覚提示装置による、力触覚提示システムを構築し、仮想空間内における物体把握時の力触覚提示実験、および物体の姿勢認識実験の結果からシステムの評価と検討を行う。

1. はじめに

現在、バーチャルリアリティの分野において、仮想環境の作業感覚を操作者に提示する感覚提示用インターフェイス¹⁾の重要性が指摘されている。特に、仮想環境下の物体を知覚・操作するための力触覚提示装置が注目を集めている。

今日まで提案されているさまざまな力触覚提示装置は、据え置き型と装着型の2つに大別される。据え置き型は、装置自体の重量負担が操作者にかからない。装置が固定されているため位置精度が高いなどの長所がある。しかし、可動範囲が小さいため操作者の作業範囲に制限がある。一方、装着型は操作者に装置を直接装着することにより、広い作業範囲を確保できる反面、操作者に装置の負担がかかるという短所を持つ。

近年、高解像度プロジェクタを用いて大型スクリーンに仮想環境の立体映像を投影する没入型ディスプレイが多く開発されている²⁾³⁾。大型スクリーンにより操作者の視野が覆われるため仮想環境への没入感が高く、操作者は仮想環境内を自由に行動できる。このような没入感のある広い仮想環境で操作者の力覚や触覚へ作業情報をフィードバックするためには、広い作業範囲の確保が可能で、操作者に装置の重量負担がかからない小型、軽量の装着型力触覚提示装置と、それを実現するための感覚提示用アクチュエータの開発が必要である。空気圧アクチュエータは小型、軽量かつ安全性に優れているため、操作者が直接装着して広い作業範囲を確保する事ができる。

本研究では、没入型仮想環境で利用可能な力触覚提示装置の開発を目的として、物体を把握するときの力覚・触覚に注目し、空気圧ペローズをアクチュエータとする力覚提示装置と、圧縮空気噴流を用いた触覚提示装置を融合させた力触覚提示システムを構築する。このシステムは力覚提示装置と触覚提示装置の2つの感覚提示用インターフェイスを用いるため、力覚と触覚という複数の感覚を提示することが可能であり、より多様な感覚表現が期待できる。本報では、仮想空間内における物体把握時の力触覚提示実験、および物体の姿勢認識実験の結果から、力触覚提示システムの評価と検討を行う。

2. 力覚・触覚

人間の体の部位が物体に触れたりぶつかったりする際に生じる力や感覚は、広義では力触覚と呼ばれる。しかし、厳密には深部感覚と皮膚感覚に分けられ、それぞれの感覚は機能的、物理的な面で全く異なっている¹⁾。深部感覚と



Fig.1(a) Photograph of Fluid Power Glove

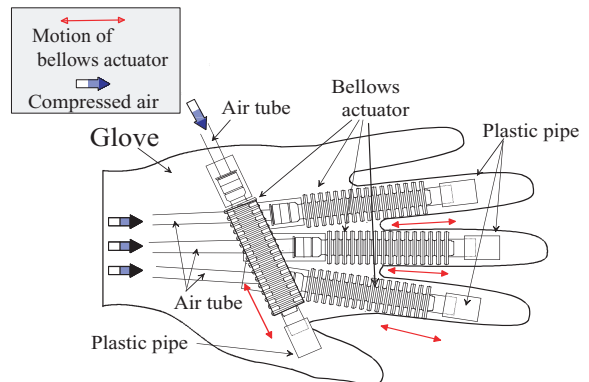


Fig.1(b) Line drawing illustrating components in Fig.1(a)

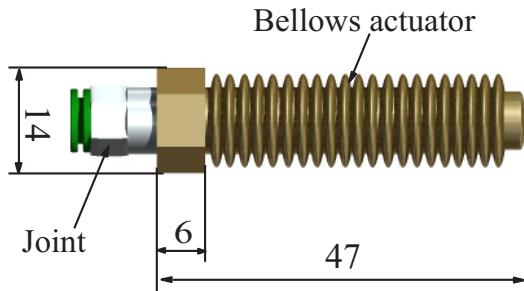


Fig.2 Pneumatic bellows

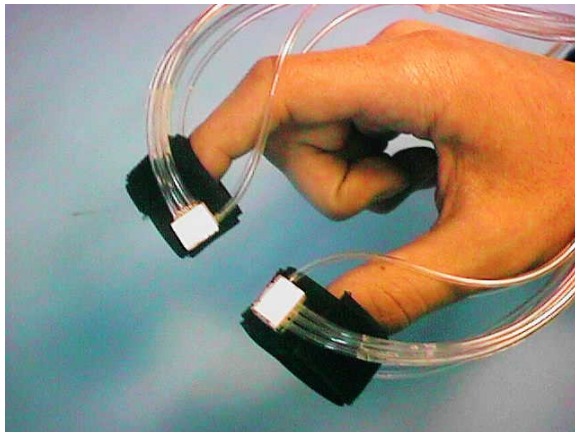


Fig.3(a) Photograph of Fluid Tactile Displays

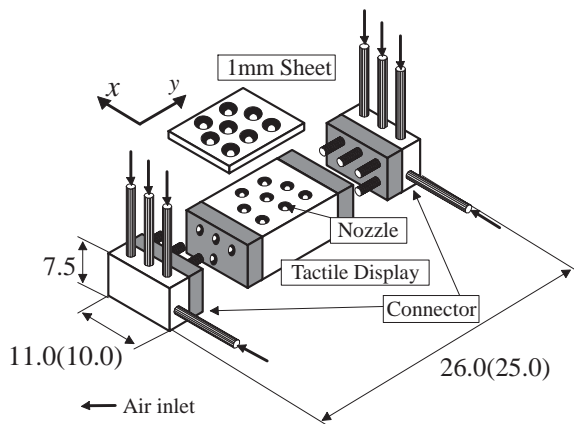
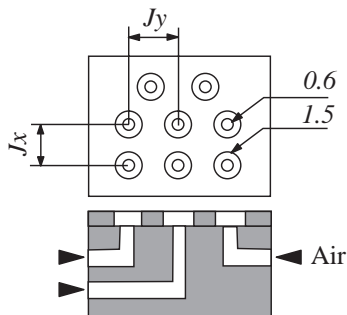


Fig.3(b) Configuration of Fluid Tactile Display

は、体内の比較的深い場所に存在する筋や腱が持つ感覚受容器から得られる感覚であり、物体を把握したときの力や、物体の重さなどの情報を提供する。一方、皮膚感覚は、人間の皮膚上に存在する感覚受容器から得られる感覚であり、物体の形状、表面の粗さやなめらかさといったテクスチャなどの情報を提供する。本研究では深部感覚を力覚、皮膚感覚を触覚と定義し、それぞれを提示するための感覚提示用インターフェイスを用いる。

3. 力覚提示装置

3.1 構造

Fig.1 に本研究で用いた力覚提示装置 ~ Fluid Power Glove⁴⁾⁵⁾ を示す。Fluid Power Glove とは、流体（空気）を利用して指に直接、力覚を提示するグローブ式力覚提示装置である。Fluid Power Glove には力を発生するアクチュエータとして空気圧ベローズを用いており、内部に圧縮空気を送入し加圧することでアクチュエータの剛性を増し、復元トルクを発生させ指に拘束力を与えるという動作原理になっている。ベローズの取付位置は、小指を除いた各指の手の平側である。圧縮空気の送入は、各指に取り付けられたベローズへ、それぞれ個別におこなうため、各指ごとに異なった力覚の提示を行うことができる。空気圧ベローズは、それ自体の剛性のため無加圧においても曲げに対して抵抗力をもっている。しかし、物体を把握していない状態（無加圧時）においては指に抵抗力を与えないことが望ましい。そこで、固定部の一端（指先側）を可動式にすることで、抵抗力による違和感を軽減している。Fluid Power Glove の質量は各指のベローズの質量を含めて 210g である。

3.2 空気圧ベローズ

Fig.2 に Fluid Power Glove の感覚提示用アクチュエータに用いた空気圧ベローズを示す。空気圧ベローズは、内径 7.5 mm、外径 12.0 mm、肉厚 0.09 mm、自由長 41 mm のペリリウム製で、ヒステリシスがほとんど無視できる。公称ばね定数は 1.96 N/mm、有効断面積は 0.77 cm²、山数は 22 山である。空気圧ベローズの一端は閉鎖、他端には配管継ぎ手を取り付けられるように加工されている。

4. 触覚提示装置

4.1 原理

Fig.3(a) および (b) に、本研究で用いた触覚提示装置 ~ Fluid Tactile Display⁶⁾ の装着時外観と構成図を示す。Fluid Tactile Display は操作者の親指と人差し指の指先に装着し、複数の空気噴射ノズルから、圧縮空気の噴流刺激を指先腹部へ与えることによって、指先が仮想物体に触れた形状を擬似的に提示する。空気噴射ノズルはマトリクス状に配列されており、この空気噴射ノズルからの圧縮空気の噴出パターンを変化させることにより、仮想物体のおおまかな形状を提示することができる。例えば、仮想物体の角に触れた場合は、仮想の指先が触れた場所に最も近い角のノズルから噴流刺激を与える。同様に、縁に触れた場合、列に配列されたノズルから、平面に触れた場合、すべてのノズルから噴流刺激を与える。ここで問題になるのは、なめらかな形状の仮想物体に接触する場合、噴流刺激が疎だと凹凸

した刺激になり、物体の形状をうまく提示できなくなってしまうことである。これはノズルを密に配列すれば解決できる。しかし、ノズルの数を増やせば装置自体が大きく重くなり、空気噴流の制御が困難になる。また、刺激が密になりすぎると刺激のマスク効果が発生し、それぞれの刺激が他の刺激をぼかしてしまうという現象が起こる。そこで、必要最小限のノズルを用い、なめらかな物体形状を提示するため、空気噴流刺激による指先感覚受容器の2点弁別閾を調べる基礎実験を行うことで、ノズルの配列、口径、及び噴流の供給圧力を決定し装置は設計された。なお、2点弁別閾とは2点の刺激を1点の刺激に感じる閾値である。人間の指先の感覚受容器には時間、空間的に閾値が存在するため、点を点と認識させないで曲線と錯覚させることが可能である。離散的に配列されたノズルからの噴流刺激を、連続的な刺激として錯覚させることができることは、別途行った基礎実験[6]により確認されている。

4.2 構造

Fig.3(b)に Fluid Tactile Display の構造を示す。噴出口の配置には、ノズル径 $d=0.6\text{mm}$ 、弁供給圧力 $p=0.4\text{MPa}$ 、ノズルと指先との隙間 $h=1\text{mm}$ での2点弁別閾を用いた。親指用は、8個の口径0.6mmのノズルを、それぞれの中心間距離が Fig.3(b)に示すように、 x 軸方向に3.1mm、 y 軸方向に3.4mmで配置されている。同様に、人差し指用は、噴出口が x 軸方向に2.6mm、 y 軸方向に2.8mmで配置されている。外形寸法はそれぞれ $26\text{mm} \times 11\text{mm} \times 7.5\text{mm}$ 、 $25\text{mm} \times 10\text{mm} \times 7.5\text{mm}$ である。空気噴出部材料は、ノズルの製作加工を容易にするため、無色透明なアクリル樹脂を使用した。噴出口は外部のウレタンチューブ

(外径2mm、内径1mm)とコネクタを介して接続される。また、指先と提示部の間に厚さ1mmのマフラースポンジと、口径1.5mmの噴出口を提示部と同様に配列した厚さ1mmのシートをそれぞれ挟む。このシートはノズルと指先との隙間を設けるために使用した。質量は親指と人差し指用とで合計22gである。

5. 力触覚提示システム

Fig.4に、前述の力覚提示装置と触覚提示装置を融合した力触覚提示システムの構成図を示す。また、Fig.5に2つの装置を装着したときの外観を示す。本システムは、力覚提示装置である Fluid Power Glove、触覚提示装置である Fluid Tactile Display、Fluid Power Glove のアクチュエータに送る圧縮空気の圧力を調整する電空レギュレータ (KOGANEI ETR200)、Fluid Tactile Display の空気噴流をオンオフ制御する電磁弁 (KOGANEI 010E1)、作業環境である仮想空間を生成するグラフィック WS Indigo2 (Silicon Graphics 社)、制御用 PC (Pentium Pro 200MHz, 64MB) から成り立っている。操作者の手の位置と指の曲げは、磁気トラッカ Fastrak (Pohemus 社) とグローブ型の曲げセンサ Super Glove (日商エレクトロニクス社) により測定され、そのデータは、A/Dコンバータを介して WS に取り込まれ、WS の仮想空間に反映される。WS は仮想空間内で操作者の手と仮想物体との接触判定を行い、接触状態にあると、その接触情報を PC に TCP/IP によるソケット通信を用いて送信する。PC は送信されたデータをもとに、Fluid Power Glove の反力発生用アクチュエータである空気圧ペローズに加える圧縮空気の圧力の計算を行ない、D/Aコンバータを介して、電空レギュレータに信号を送る。また、接触した仮想物体の形状に合致する Fluid Tactile Display の空気噴

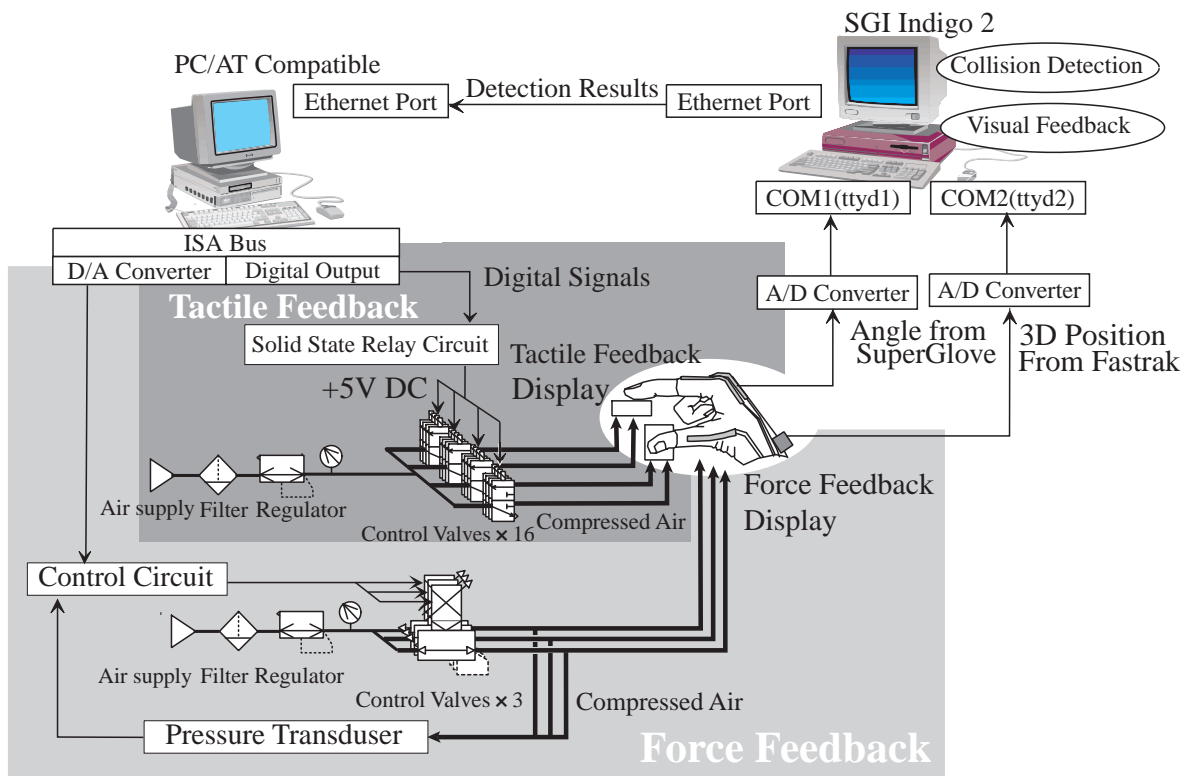


Fig.4 Schematic diagram of the haptic display system

流パターンを提示するためのデジタル信号を SSR(Solid State Relay) 回路を介して電磁弁に送る。このとき、Fluid Power Glove の空気圧ペロ - ス内に圧縮空気が供給され、操作者は指の曲げに対して拘束力を受けるとともに Fluid Tactile Display から接触状態に見合う空気噴流が指先に噴射される。この指の拘束力と空気噴流の刺激により、物体を把握したときの力覚と触覚が提示される。

WS 内の作業環境となる仮想空間は仮想空間作成用ライブラリである World Tool Kit Release 6(SENCE8 社) を使用して記述された。Fig.6 に作成した仮想空間を示す。仮想空間内には操作者の手に相当する仮想ハンドと、作業対象となる仮想物体が存在する。操作者の手の動きと指の曲げ角度は、仮想ハンドにリアルタイムで反映される。操作者は手を動かし、仮想空間内で仮想ハンドと仮想物体の接触、および把握操作を行う。

6. 力触覚提示実験

実際の物体を把握した感覚と、力触覚提示装置を用いて仮想物体を把握した感覚との比較実験を行った。本実験では力覚だけを提示した場合と、力覚と触覚の両方を提示した場合それぞれについて比較を行った。

6.1 実験方法

実験では健康な 20 代の男女 18 名を被験者とした。被験者は、立方体形状の仮想物体と同じ大きさ、形状の

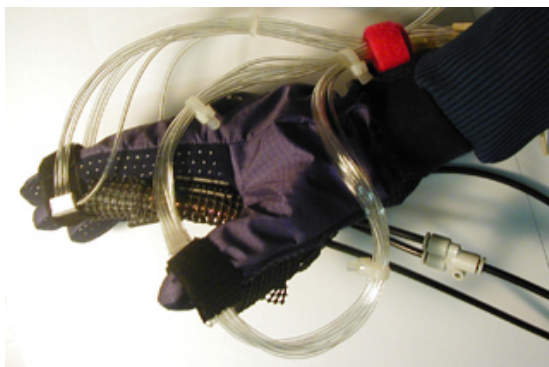


Fig.5 Photograph of wearable haptic displays

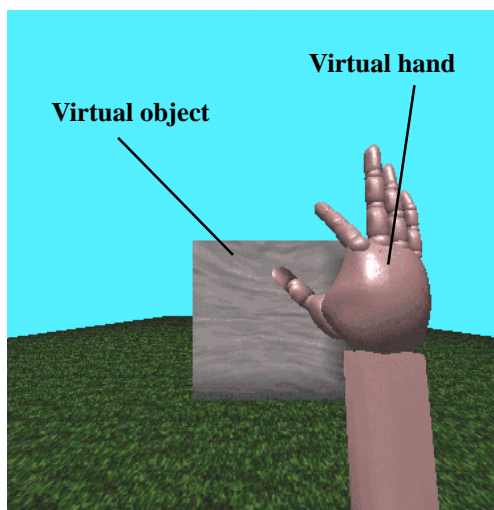


Fig.6 Virtual environment

実物体を自由に把握する。その後、Fluid Power Glove のみを装着して仮想空間内で同様の動作を行い、その感覚を実際の物体を触った感覚と比較し、「同じ感覚」、「ほとんど同じ感覚」、「ほとんど異なる感覚」、「異なる感覚」、の 4 段階で評価し回答してもらった。さらに、Fluid Power Glove と Fluid Tactile Display の両方を装着した場合にも、再び同様の動作を仮想空間内で行い、その感覚を同じ 4 段階で評価し回答してもらった。

6.2 実験結果

Fig.7 に実験結果を示す。横軸に提示する感覚 (Fluid Power Glove による力覚のみの場合と、Fluid Power Glove と Fluid Tactile Display による力・触覚を提示した場合) を、縦軸に被験者の評価の回答率を示す。

実験の結果、Fluid Power Glove を装着した場合、その感覚に類似性があると回答した被験者は全体の 55% 程度である。それに対し、Fluid Power Glove と Fluid Tactile Display の両方を装着した場合の感覚は 70% 以上の被験者が、実際の物体を把握した感覚と類似性があることを認めている。この実験結果から、力覚のみを提示するよりも、力覚と触覚の両方を同時に提示することの有効性を確かめることができた。特に、力覚と触覚の両方を提示した場合には、実際の物体を把握した感覚を提示できないものの、擬似的な感覚の提示が可能であることがわかる。

人間が物体を手で把握する場合、まず“物体に触った”という皮膚表面に受容器を持つ皮膚感覚と、その後、指に力を入れ“物体を握る”という筋、腱、関節に受容器を持つ深部感覚の 2 つのチャンネルを介して得られる情報から、その動作の認知が可能となる。感覚に類似性があると回答した被験者は“Fluid Power Glove のみを装着した場合は、物体に触る瞬間がわかりにくい。しかし、Fluid Tactile Display を装着したときは、はっきりとその瞬間がわかる。”と回答している。この回答からも Fluid Power Glove と、Fluid Tactile Display の両方を用いることで、実際に物体を把握するときの 2 種類の感覚受容器による感覚認知のプロセスの再現が可能なる事が確認できた。

7. 姿勢認識実験

視覚情報の提示がない場合に、本システムによる力覚と触覚の提示によってどの程度、物体姿勢の認識が可能であるかを検証した。

7.1 実験方法

本実験でも健康な 20 代の男女 18 名を被験者とした。被験者の視覚はアイマスクによって、完全に遮断した。まず、Fluid Power Glove と Fluid Tactile Display の両方を装着した被験者に、物体の姿勢を知らせずに 3 種類の仮想物体をランダムに提示し、把握した仮想物体がどのような姿勢であったかを自由に回答してもらった。次に、比較のために提示する 3 種類の姿勢を被験者に伝えた後、同様の提示を行い、いずれの形状に触れたかを回答してもらった。Fig.8 に提示した仮想物体の姿勢の種類を示す。

7.2 実験結果

Fig.9 に被験者が姿勢の未知な物体を触った場合と、既知の物体を触った場合の平均正答率および標準偏差を示

■ have similarity ■ hardly have similarity
 □ mostly have similarity ■ have no similarity at all

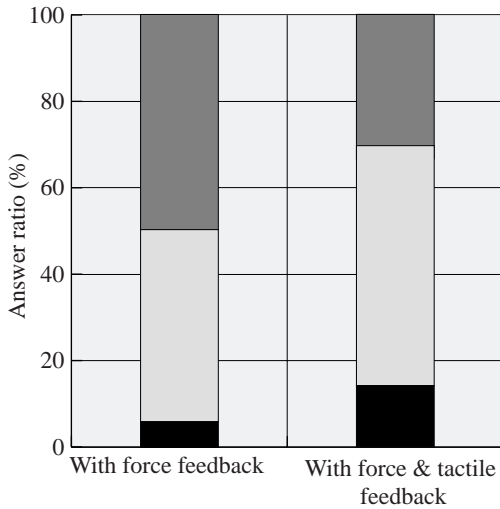


Fig.7 Experimental results of haptic sensations

す。また, Fig.9には正答に占める各姿勢の割合も示す。全体の正答率は物体の姿勢が未知の場合23.1%,既知の場合は70.5%となった。

この結果から,本システムを使用する場合,適当な視覚情報を提示する,もしくは使用者が触れる物体の姿勢をあらかじめ知っておく必要がある。被験者はある程度の物体の形状を予想し,物体の平面,エッジ,角の様な大まかな形状の認知をおこなうことでその姿勢を判断することが可能である。

8. おわりに

没入型の仮想環境で利用可能な,空気圧ペローズをアクチュエータとする力覚提示装置と圧縮空気噴流を用いた触覚提示装置を融合させた力触覚提示システムを構築した。実験により,本システムが物体を把握した感覚を擬似的に提示できることを確認した。今後も,より複雑な物体形状の提示を可能にするために力覚提示装置と触覚装置の改良を行い,実際の没入型仮想環境で本システムを利用する事によって本システムの有効性を検討していく。

最後に,本研究を行うにあたり,空気圧機器を提供していただいた(株)コガネイの伊藤三郎氏ならびに,空気圧ペローズを製作していただいた(株)鷺宮製作所の高田進氏はじめ関係者の方々に謝意を表します。

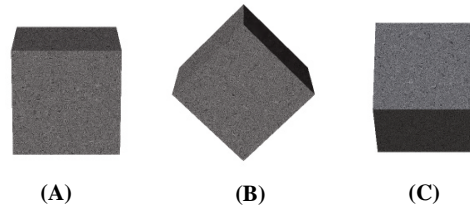


Fig.8 Three positions of virtual object

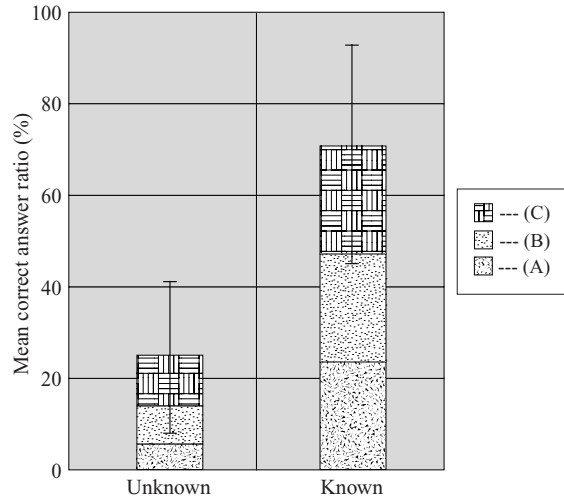


Fig.9 Experimental results of discrimination for three positions

・参考文献

- [1] G.C.Burdea, Force and Touch Feedback Display for Virtual Reality, New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [2] C.Curz-Neira, D.Sandin, T.Defante: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, Proc. ACM SIGGRAPH 93, Annual Conference Series, 1993, ACM SIGGRAPH, New York, pp.135-142, 1993.
- [3] 廣瀬, 小木, 石綿, 山田: "多面全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその特性評価", 信学会論文誌 D-11 vol. J18-D-No.5, pp.888-896 1998.
- [4] TANAKA, Y., KIKUCHI, T., KANEKO, A., Dynamic Force Display in Virtual World by Fluid Power Glove, Fourth JHPS International Symposium on Fluid Power, pp187-192, 1999.
- [5] 山内, 田中: "空気圧ペローズによる装着型力感覚提示ディスプレイ", ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集 CD-ROM 1A1-36-048.
- [6] AMEMIYA, K., TANAKA, Y.: Portable Tactile Display Interface Using Air Jet, ICAT 99, pp.115-122, 1999.
- [7] 大山正, 今井省吾, 和気典二: "感覚・知覚ハンドブック", 誠信書房, pp.18-28, 1994.

キーワード

装着型インターフェース, 力触覚提示装置, 空気圧アクチュエータ, バーチャルリアリティ, 没入型仮想環境

Summary.

Wearable Haptic Display for Immersive Virtual Environment

Hisayuki Yamauchi

Graduate School of Engineering, Hosei University

Kenichi Amemiya

EIZO NANA Corporation

Yutaka Tanaka

Department of Mechanical Engineering, Hosei University, Tokyo Japan

Recently, a number of immersive displays that project virtual environment on large-sized screens have been developed. In applications of virtual reality technology for such large immersive environments, it is important to develop some haptic display that gives a real feedback sensation such as force or tactile to users from the virtual environment. Especially, it is necessary to develop small, light and safety actuators for the wearable haptic display. In this paper, the haptic display system for the immersive virtual environment is proposed and developed. The system consists of a tactile and a force reflecting type wearable haptic displays using pneumatic pressure control. Experiments for grasping virtual objects and recognizing positions and figures of virtual objects in the virtual environment are performed by the wearable haptic displays using pneumatic actuators. It is experimentally verified that the performance of the haptic display system is effective to touch and grasp the virtual objects.

Keywords.

Wearable Interface, Haptic Display, Pneumatic Actuator, Virtual Reality, Immersive Virtual Environment