

視・触覚 複合現実環境提示技術

稲見 昌彦*・館

璋**

*, ** 東京大学大学院 情報理工学系研究科
東京都文京区本郷 7-3-1*, ** Dept. of Mathematical Engineering and Information Physics,
Faculty of Engineering, The University of Tokyo 7-3-1 Hongo,
Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

* E-mail: inami@computer.org

** E-mail: tachi@star.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード：視・触覚ディスプレイ (visio-haptic display), 頭部
搭載型プロジェクタ (head-mounted projector), 立体ディスプレ
イ (stereoscopic display).

JL 0009/02/4109-0639 © 2002 SICE

1. はじめに

万博や博物館などで眼前に迫り来る立体映像を見て思わず手をさしのべた経験のある方は多いのではなからうか。しかしながら手は空を切るばかりであり、そこに広がるのは虚ろな世界であることを改めて認識させられる。頬をつねることにより夢と現実とを区別するように、触覚は現実感を認識する上できわめて重要な手がかりであると言える。

バーチャルリアリティの分野でよく用いられているデバイスとして頭部搭載型ディスプレイ (Head-Mounted Display: HMD)¹⁾ や CAVE²⁾/CABIN³⁾ に代表される没入型多面ディスプレイ (Immersive Projection Technology: IPT) を挙げることができる。これらのディスプレイは高度な臨場感でバーチャルな視空間を構築することには適しているが単体では従来の立体映画同様、触覚情報を提示することはできない。

一方 PHANTOM⁴⁾, AED⁵⁾ 等触覚ディスプレイに関する研究も盛んに行われている。当然それら触覚提示ディスプレイと視覚ディスプレイとを組み合わせる試みも多数行われている⁶⁾。物体の視覚情報と触覚情報とを同一のディスプレイにて同時に提示することで、コンピュータの中のバーチャルな物体を現実物体と同様に実際に物体を手で持って操作しているかのように取り扱うことが可能となる。1つの理想とされるのわれわれが通常生活しているのと同様な状況—「見たものが触れるもの (What You See Is What You Feel)」, WYSIWYF ディスプレイ^{7), 8)} である。しかしながらこの WYSIWYF ディスプレイを実現するためにはさまざまな問題を解決する必要がある。本稿では視・触覚 複合現実環境提示を行うに当たり重要な課題を整理した後にそれら問題点を低減するために筆者らが開発したシステムについて解説を行う。

2. システム構成のための問題点

2.1 輻輳と調節の不一致

人間の両眼による奥行き知覚の手がかりとしては、物体の遮蔽関係以外では両眼網膜像の視差量と輻輳とが重要な役割を果たしていることが知られており、HMD をはじめとして、各種立体ディスプレイに二眼式の立体視が広く用

いられている。

立体ディスプレイにおいては、理想的には両眼像の輻輳角の条件や網膜上の像の大きさ、水晶体調節を実際に見たものと同じ条件に調整する必要がある。しかしながら、現在一般的に用いられている HMD では、提示画像の光学的距離が 1~2[m] に固定されているものがほとんどであり水晶体調節の条件は満たされていない。

水晶体の調節と眼球の輻輳との間には密接な関係があり、調節が起きると輻輳が起きる accommodative convergence や、逆に輻輳が起きたときには調節が連動して起きる convergence accommodation などの現象が知られている。

調節を一定に保ったままでも輻輳はある程度は変化可能であり、一般的な HMD の像面提示距離である 1~2[m] の距離に調節を固定した場合、50[cm]~無限遠の範囲に輻輳を変化可能とされている。よって手元作業に適切とされる 30[cm] 前後の距離の物体を提示しようとした場合、両眼像の融像が困難な状況となる。

融像範囲内であっても、輻輳と水晶体調節とのずれは奥行き認知精度の狂いや眼精疲労を引き起こすといった問題が指摘されている。

頭部の目と共役な位置に搭載したカメラの映像を CG 映像と電子的に合成した上で提示するビデオシースルーによる合成手法は、現実世界と CG との像面の位置を一致させることが可能であるばかりか、実装によっては次節で述べる遮蔽矛盾や頭部運動による CG の時間のずれまで補正も可能であり複合現実感 (Mixed Reality: MR) 用のデバイスの 1つとして将来性が期待できる。

しかし、本手法は立体視時の輻輳と調節の不一致や視野の狭さなどの従来の HMD の問題点をもそのまま引き継いでいる。

2.2 遮蔽矛盾

遮蔽関係は人間の奥行き認知にとって最も強力な手がかりの 1つであり視覚情報と相補的に機能することが知られている。たとえば、両眼の非対応領域は通常視野闘争を引き起こす要因となるが遮蔽によって生じたものならばむしろ遮蔽を手がかりとした空間認知に寄与するという事例が知られている⁹⁾。画像視覚情報の奥行き順序情報の矛盾が生じる現象は「遮蔽矛盾」と呼ばれ、透明視解釈を始めと

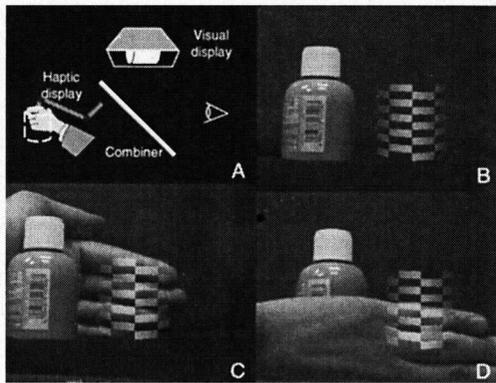


図1 遮蔽矛盾問題の例

するさまざまな立体視の阻害が生じることが報告されている^{10),11)}。

しかしながらバーチャル空間と現実空間を融合させる場合、バーチャル物体と現実物体の本来提示されるべき奥行き順序情報と実際に提示されている画像視覚情報の奥行き順序情報が一致していないことがある。たとえば、視覚的な複合現実感生成にハーフミラーを介し現実空間とバーチャル空間を重畳させる光学式シースルーHMDが多用されている(図1A)。図1Bは光学式シースルーHMDと同様のハーフミラーを利用した光学系を用いて、現実物体である小瓶とバーチャル物体である市松模様の円筒が観察者から等距離に配置されているよう生成された画像である。図1Cは手を物体の背面に差入れた状態である。このとき、手と円筒の前後関係の矛盾は生じないが、本来は円筒によって隠される手が透けて見えてしまい、現実感が著しく損なわれる。また、図1Dは手を物体の前面に差し出した状態である。この際、本来は手によって隠れるべき円筒の画像が見え、手と円筒の前後関係の解釈が阻害される。

この問題は、MR・ARにおいて操作者に対する触覚提示をはじめとするなんらかの物理的フィードバックを行うときにきわめて生じやすい。なぜならば、なんらかの物理的フィードバックを行うためには触覚提示をはじめとするデバイスが必要となり、多くの場合デバイスとバーチャル物体との間に遮蔽が生じるためである。さらに不幸なことに、多くの場合この遮蔽は操作の対象物体近辺、すなわちもっとも映像を詳細に見せたい場所で発生する。触覚提示デバイスなどが十分小さい場合は問題にはならないが、特に触覚提示デバイスはその性質上遮蔽が気にならないほどに小さくはない。また、もうひとつの遮蔽問題として、デバイスがその背景の現実世界を隠してしまうことにも着目したい。

3. オブジェクト指向型ディスプレイ

筆者らは、輻輳と水晶体調節の不一致を解消することが可能な焦点深度優先型ディスプレイの実装としてのマクス

ウェル光学系を利用した視覚提示装置の開発を行っている¹²⁾。

頭部搭載型ディスプレイは近年一層の小型化、軽量化が進み、パーソナルな情報空間をコンパクトに生成するためのキーデバイスとして今後とも有望であると考えられる。しかし、頭部搭載型ディスプレイはいわば目隠しでもあり、現実空間がディスプレイ自身によって遮蔽されることになり、現実空間での作業性を低減させている。

ハーフミラーや頭部搭載カメラを用い、現実空間の映像に情報空間の映像を重畳提示することを試みたシースルー型のHMDも提案されているが、ワークスペース部分において、提示物体同士の焦点位置の不一致など、作業に著しく不利となる問題が発生することは先に述べたとおりである。特に、物体同士の遮蔽関係の不一致に関する問題点は近年多用されているCAVE、CABIN等没入型の投影式ディスプレイにおいても存在する問題であり、筆者らが開発したマクスウェル光学系を利用したとしても解決は困難である。

近年になり、遮蔽問題を解決するための手法として、プロジェクタを実世界の照明光源として利用する方法¹³⁾、透過型LCDを用いる方法¹⁴⁾等いくつか提案されている。筆者らは単一のディスプレイで近距離から遠距離までのMR空間をすべてカバーすることは現状の技術ではきわめて困難であると考え、提示したい対象に応じさまざまな距離、さまざまな大きさのデバイスを用意することにより問題の解決を試みた。その1つが手元でバーチャル物体を観察、操作することに適したディスプレイとして開発した、オブジェクト指向型ディスプレイである^{15),16)}。

さらにその考えを拡張し、「近くの物体は近くのディスプレイ、遠くの物体(景色)は遠くのディスプレイ」であたかも舞台における書き割りのように提示することによって、より広い範囲でシームレスなMR空間を生成することも可能である。この手法はImage Based Renderingの分野での書き割り法による3次元仮想空間生成手法¹⁷⁾の現実世界における実装と考えることもできる。

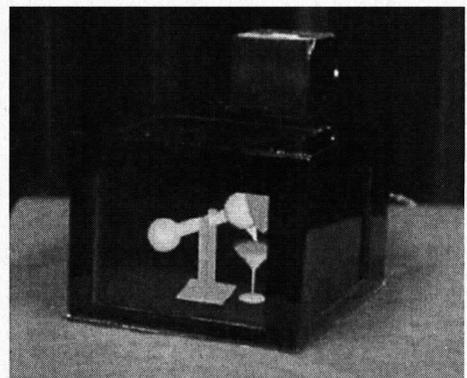


図2 オブジェクト指向型ディスプレイ MEDIA 3

しかし、広範囲でMR空間を生成するためにはディスプレイを遍在させる、いわば ubiquitous display を構成する必要がある。しかし、従来のディスプレイでは空間的、金銭的成本が多大なものとなってしまう実用的ではない。そこで筆者らはディスプレイの代わりに再帰性反射材とプロジェクタを用いる新たなシステムを開発した。

4. X'tal Vision

X'tal Vision とは、オブジェクト指向型ディスプレイの一環として研究した映像提示手法を指し、図3に示すように

- (1) ディスプレイ面として再帰性反射材(リトロフレクタ)を利用する
- (2) 観察者の目と(立体視を行う場合は両眼それぞれに対して)光学的に共役な位置より画像を投影する
- (3) 画像投影部の開口径を光量の許す限り絞り込むことにより、それぞれ、

(1) 高い輝度、指向性反射を有し、再帰性反射材を塗布可能なすべての物体をスクリーンとして利用でき、非常に軽量のディスプレイ部を実現できる。また、スクリーン部の形状も自在かつ材質も発泡スチロールや布、壁などかなりの自由度がある

(2) スクリーン形状に起因する像の歪みが生じない。また、観察者や実物体の影が投影映像の影と重なり、スクリーン上に落影が観察されない

(3) 大きな焦点深度を持ち、任意形状、任意位置のスクリーンに対し、広い範囲で結像可能

といった特長を有することになる。さらに、それぞれの要素を融合することで、

- (1)+(2) スクリーン輝度の距離依存性の減少
- (1)+(3) 手などの物体とスクリーン面との大きな輝度差による適切な遮蔽関係
- (1)+(2)+(3) 両眼像の空間的分離による裸眼立体視といったように各要素を同時に満たすことにより、単独では生まれえない効果も発生する。

本光学系の最大の特徴としてプロジェクタに設けられた小絞りを挙げることができる。この絞りにより、プロジェクタは大きな焦点深度をもつことが可能となり、さまざま

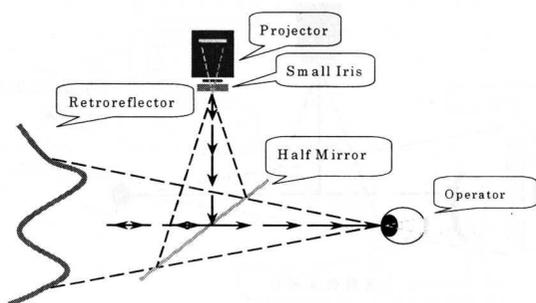


図3 X'tal Vision 光学系

な距離、さまざまな形のスクリーンにピンボケすることなく映像を投影することが可能となる。ただし、プロジェクタの開口径を小さくすると投影映像の輝度の低下と、回折による画質の低下が起きる。

本光学系のもう1つの特長は再帰性反射材をスクリーンとして用いることである。図4に示すように通常の物体表面は入射光を拡散反射し、鏡は入射した向きと反対の方向に光を反射する。それに対して再帰性反射材とは光を入射した方向に反射する性質を持つ素材を指し、道路標識や自転車の反射材などによく用いられている。

再帰性反射機能をもつ素材としてはコーナーキューブアレイ、フライアイレンズ(ハエの目レンズ)+拡散板、マイクロビーズの3種の方法が一般的である。本研究においてはあらゆる形状の物体をディスプレイとして用いることを想定し、入射光の角度を広く取ることのできるマイクロビーズを用いた再帰性反射材を用いている。

再帰性反射材が理想的な再帰性反射特性をもっている場合、投影された像面の位置は再帰性反射材の位置によらずプロジェクタの焦点距離となるはずである。しかしながら実際の再帰性反射材はスクリーン上で拡散するため、像面の位置はスクリーン上に位置し、観察者の水晶体の調節位置もスクリーン位置近傍となる。

また、プロジェクタに設けた絞り径およびプロジェクタ輝度を調節することにより、通常の物体上に投影された映像は屋内光の下では知覚不可能となるよう設定できる。こ

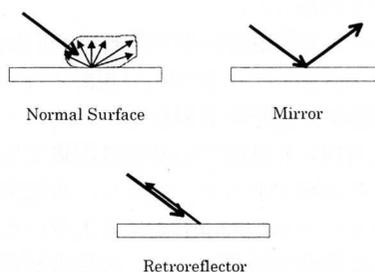


図4 再帰性反射材

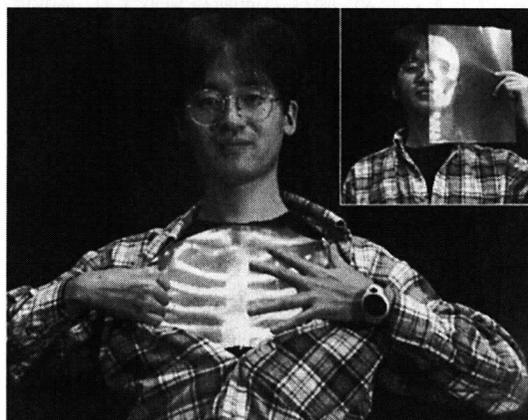


図5 X'tal Vision による映像

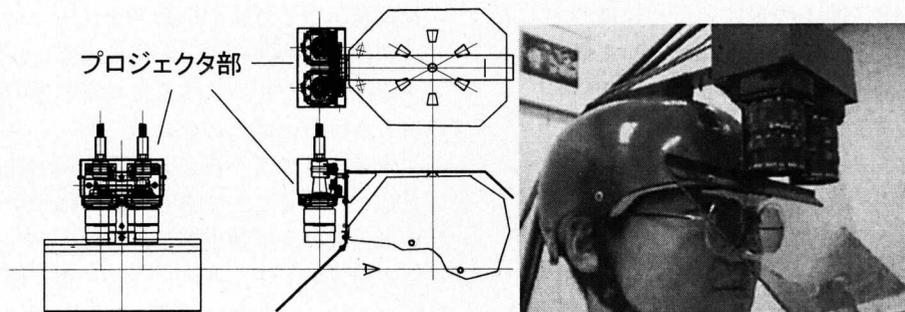


図6 HMP model-2

のとき再帰性反射材は通常の物体と比較して数十～数百倍の反射ゲインをもっているため再帰性反射スクリーン上に投影された映像はそれより手前の物体によりあたかも遮蔽されているかのように観察されることになる(図5)。

以上のことからバーチャル物体を提示したい場所近傍に再帰性反射材を配置することにより、輻輳・調節問題、遮蔽問題の影響を低減することが可能となる。

5. 頭部搭載型プロジェクタ

X'tal Vision 光学系を頭部に搭載可能にしたシステムが頭部搭載型プロジェクタ(HMP: Head Mounted Projector)である。本システムは、プロジェクタ部、位置・姿勢計測部、制御部、グラフィックエンジン、スクリーン部から構成される。

プロジェクタ部(図6)は、小型化、軽量化を図るため、自作したものを利用した。

12.5[mm]レンズ利用時の水平視野は60[deg]となり一般的なHMDと比較してもやや広い視野となっている。

また、一般的な広視野のHMDはアイリリーフが小さいため、眼鏡を着用した状態での装着は困難であり、視度調整機構を設ける必要があった。しかし、本光学系は広視野ながらアイリリーフが70[mm]近くと大きいため、図6右の写真のように眼鏡を着用しつつ、の装着が可能となっている。さらに、スクリーン位置が50[cm]のとき、瞳径は20[mm]以上あるため、眼球の運動や装着ずれ、眼間距離の個人差の影響をうけにくくなっている。

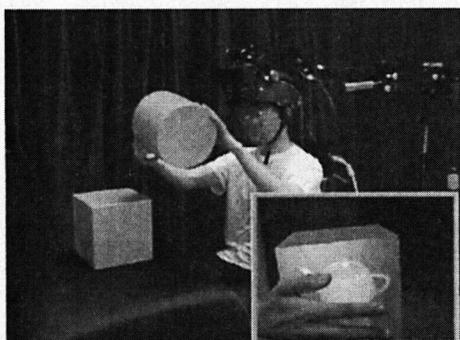


図7 頭部搭載型プロジェクタと提示映像

プロジェクタ部を頭部に搭載することで頭部運動に同期し回り込み観察が可能な投影式オブジェクト指向型ディスプレイを実現することが可能となる。本システムを用いることにより図7に示すように操作者の手と適切な遮蔽関係を保ちつつ、バーチャル物体の立体像を提示し、かつ頭部を動かすことによりさまざまな角度からバーチャル物体を観察することに成功した¹⁸⁾。なお、HMPは現在MR分野での新たなキーデバイスの1つとして各所で研究されている¹⁹⁾²⁰⁾。

6. 視・触覚 複合現実環境

6.1 光学迷彩

一般的なMR映像提示技術は、現実空間にバーチャル空間の映像を重畳させるいわば映像の「加算」である。逆に現実空間の物体を視覚的に透明化、すなわち映像の「減算」を可能とする「光学迷彩(Optical Camouflage)」技術を用いることによりWYSIWIFディスプレイを構築することができる。光学迷彩は遮蔽物体に再帰性反射材を貼付した上で背景映像をX'tal Visionで投影することにより実現する。図8に光学迷彩の構成図を示し、図9に実施例を示す。モデルが保持しているブロック状の物体があたかも透明になったかのように観察できている。

6.2 光学迷彩を用いた視・触覚 複合現実環境

WYSIWIFディスプレイを実現するにあたって、触覚提示部に光学迷彩の技術を適用することで提示部自身による遮蔽の問題から開放される。本稿では視覚提示装置とし

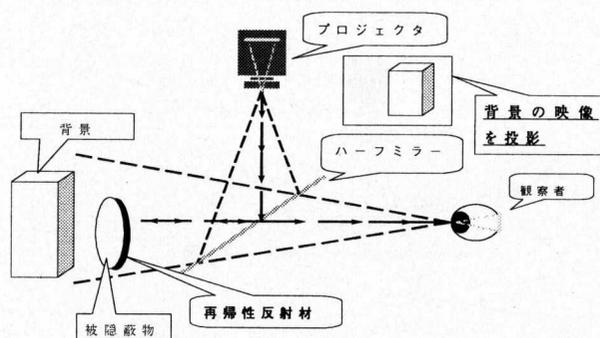


図8 光学迷彩の構成図

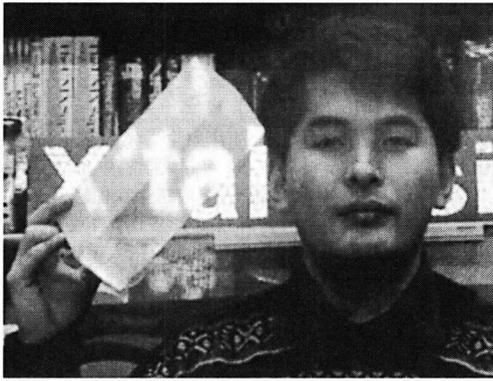


図9 光学迷彩の実施例

バーチャル世界の情報を適切に演算することで、操作者に提示する視覚情報（両眼）・触覚情報を生成し、HMP、PHANToMを通じてそれぞれを出力する。図11が実際に出力されたイメージである。

本構成により触覚提示装置であるPHANToMが視覚的に透明化され、視覚ディスプレイと触覚のディスプレイを統合することが可能となり、今自分が実際に見ているものに触れるといった機能を実現することに成功した。

7. おわりに

本稿では現実世界とバーチャル世界とを、視覚・触覚の双方で融合提示する上での問題点を解説するとともに、その問題点を解決するための試験的実装について述べた。

具体的には触覚提示デバイスに再帰性反射塗料を貼付し、視覚提示デバイスに光学迷彩技術を応用することで、触覚提示デバイスを歪みなく透明化することができ、視覚触覚融合ディスプレイ、WYSIWYFディスプレイを実現した。実現したディスプレイは両眼立体視が可能であり、提示されているバーチャル物体の触覚を、実際に指で触ることによって感じる事が可能である。さらに操作者の手・指により適切に表示物体を遮蔽することができた。

筆者らの提案したX'tal Visionは「オブジェクト指向型の視・触覚ディスプレイ」として位置づけることができる。今後は医療やテレプレゼンテーションへの応用など、より、実世界指向の複合現実空間においてもシステム構築することを目指してゆく。

(2002年6月19日受付)

参考文献

- 1) I. Sutherland: A head-mounted three dimensional display. Proc. Fall Joint Computer Conference, AFIPS Conf. Proc., 33, 757/764 (1968)
- 2) Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin and Thomas A. DeFanti: Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE, Proc. of Computer Graphics, 27, 135/142, August (1993)
- 3) 廣瀬, 小木, 石綿, 山田: 没入型多面ディスプレイ (CABIN) の開発, 日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集, 137/140 (1997)
- 4) T. Massie and J. Salisbury: The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, Proc. ASME Winter Annual Meeting (1994)
- 5) 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誌, 1-1, 23/32 (1996)
- 6) B. Grant, A. Helser and R.M. Taylor II: Adding Force Display to a Stereoscopic Head-Tracked Projection Display, Proc. Virtual Reality Annual International Symposium 98, 81/88, Mar (1998)
- 7) Y. Yokokohji, R. L. Hollis and T. Kanade: What You can See Is What You can Feel-Development of a Visual/Haptic Interface to Virtual Environment, In Proc., VRAIS'96, 46/53 (1996)
- 8) 横小路, ホリス, 金出: 仮想環境への視覚/力覚インタフェース:

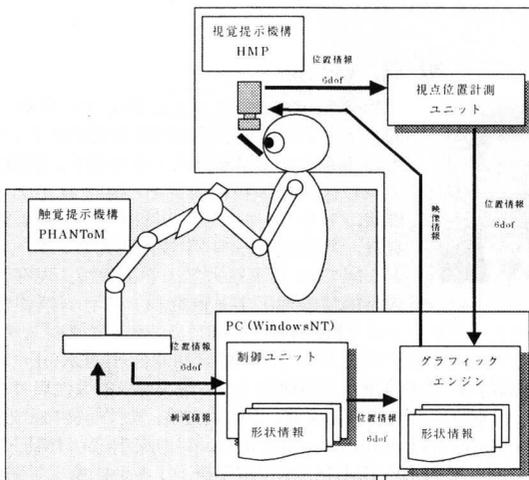


図10 HMPを用いた視・触覚 複合現実環境ブロック図

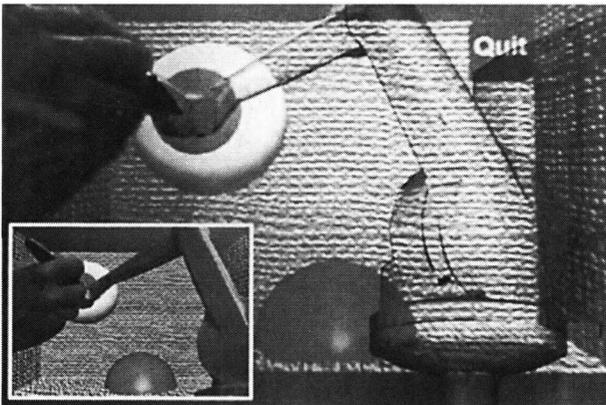


図11 光学迷彩を用いた視・触覚 複合現実環境 (枠内は通常に構成した場合)

て先に述べたX'tal Visionを頭部搭載化したシステムHMP (Head-Mounted Projector) を、触覚提示部として再帰性反射材を貼付したPHANToMを用いた。

図10にシステムの構成図を示す。システムは視覚提示機構であるHMP部と触覚提示機構であるPHANToM部および、両者を制御するPCから構成される。得られた指先の位置・姿勢情報、視点位置情報とPC内に格納されている

WYSWYF ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2-4, 17/26 (1997)

- 9) K. Nakayama and S. Shimojo: Da Vinti Stereo-optics: Depth and Subjective Occluding Contours from unpaired Image Points, *Vision Research*, 30-11, 1811/1825 (1990)
- 10) 鈴木, 前田, 館: 人工現実感における遮蔽矛盾問題の知覚への影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2-3, 1/8 (1997)
- 11) S. B. Lei Liy and C. M. Schor: Quantitative stereoscopic depth without binocular correspondence, *Nature*, 367, 66/69 (1994)
- 12) 稲見, 川上, 柳田, 前田, 館: マクスウェル光学系による広視野立体ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 4-1, 287/294 (1999)
- 13) 伴, 野田, 佐藤, 千原: 実時間計測と動的パターン照明による光学シーンスルー型複合現実感ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 4-4, 665/670 (1999)
- 14) K. Kiyokawa, Y. Kurata and H. Ohno: An Optical See-through Display for Mutual Occlusion of Real and Virtual Environments, *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality 2000 (ISAR 2000)*, 60/67 (2000)
- 15) 稲見, 川上, 前田, 館: 物体近傍映像提示ディスプレイ「バーチャルホログラム」の提案, 日本バーチャルリアリティ学会第1回大会論文集, 139/142 (1996)
- 16) 川上, 稲見, 柳田, 前田, 館: オブジェクト指向型ディスプレイの研究, *情報処理学会論文誌*, 40-6, 2725/2733 (1999)
- 17) 尾崎, 館: 自然風景を仮想空間内で再生するシステムの開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2-2, 1/8 (1997)
- 18) 稲見, 川上, 関口, 高幣, 柳田, 遠藤, 小林, 上田, 前田, 満洲, 館: 頭部搭載型プロジェクトの研究(第2報) - 試験的実装 -, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, 59/62 (1999)
- 19) 木島, 廣瀬: 頭部搭載型プロジェクトを用いた仮想環境とデスクトップ環境の融合, *計測自動制御学会第10回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集*, 399/404 (1994)
- 20) J. Parsons and J. P. Rolland: A Non-Intrusive Display Technique for Providing Real-Time Data Within a Surgeons Critical Area of Interest, *Medicine Meets Virtual Reality-Art, Science, Technology: Healthcare (R)evolution*, IOS Press and Ohmsha, 246/251 (1998)

[著者紹介]

いな み まさ ひこ
稲見 昌彦 君



1972年生。94年東京工業大学生命理工学部生物工学科卒業。96年同大学院生命理工学研究科バイオテクノロジー専攻修士課程修了。99年東京大学工学系研究科先端学際工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年より東京大学国際・産学共同研究センターリサーチ・アソシエイト。2001年東京大学大学院情報理工学系研究科助手となり現在に至る。ロボットおよびバーチャルリアリティの

研究に従事。平成10年度情報処理学会山下記念研究賞、平成11年度同学会論文賞、平成12年度日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞受賞。IEEE Computer Society, 日本ロボット学会, 日本バーチャルリアリティ学会の会員。

たち すすむ
館 暲 君 (正会員)



1968年東京大学工学部計数工学科卒業。73年同大学大学院工学系研究科博士課程修了(工学博士)。東京大学工学部計数工学科助手, 通商産業省工業技術院機械技術研究所バイオロボティクス課長, マサチューセッツ工科大学(MIT)客員研究員, 東京大学先端科学技術研究センター教授などを経て94年東京大学工学部教授。現在同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻

教授。バースペクトルの分析, 盲導犬ロボット, テレグジスタンス, アールキューブなどの研究を行う。国際計測連合(IMEKO)ロボティクス会議議長, 文部省重点領域研究「人工現実感」領域代表者などを務める。日本ロボット学会論文賞, 本会論文賞, 同技術賞などのほか, *Electrocutaneous Communication in Guide Dog Robot (MELDOG)*の研究に対してIEEE/EMBS(米国電気電子工学会医療工学部門)論文賞を, また「人間と共存する第三世代ロボットの研究」によって通商産業大臣賞を受賞。本会フェロー。