

頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価

前田 太郎* 荒井 裕彦* 館 璋**

Design and Evaluation of Binocular Head-Mounted Displays

Taro MAEDA Hirohiko ARAI Susumu TACHI

It has become necessary to develop a light-weight head-mounted display as a man-machine interface with a sensation of presence in tele-existence teleoperation and virtual-reality technology. Design for such displays needs knowledge of human factor and physiological optics. However, on general method has been proposed yet for the design of such displays. In this paper, we propose a method for designing head-mounted displays, and have developed four light-weight head-mounted stereoscopic full-color displays for remote operation. These displays are designed to give 3D sensation with a sensation of reality. Two of them are very light weighted, and have wide angle of view, which are designed to teleoperate a mobile robot. The others have a link mechanism to support their weight, and have very fine resolution of view, which are designed so teleoperate a robot for fine manipulation tasks. Dynamic responses of a human operator using these displays are measured by tracking experiments. These results show which parameters of displays are related to dynamic performance. Such parameters are important factors for general design procedure of head-mounted displays with good dynamic performance.

Key Words : Tele-existence, Telepresence, Virtual Reality, Artificial Reality, Head-mounted Display

1. 緒 言

近年、人工現実感技術¹⁾やテレイグジスタンス技術²⁾が次世代の技術として注目を集めている。これらの技術ではオペレータに高い臨場感をもって仮想環境あるいは実環境を提示することが求められる。これを実現するヒューマンインターフェイスとしては、提示できる情報量の多さから、臨場感の高い視覚提示系が最も重要な役割を果たすと考えられる。

立体視覚情報の提示技術としてはホログラフィのような3次元画像提示系がある。しかし、リアルタイムでの記録・通信・再生が困難であり、これに代わる様々な提示系が提案されている。中でも有力なものとして、両眼立体視による奥行情報の提示機能と、頭部運動に伴う広

域な視野の変動に対応できる頭部運動追従型立体視覚提示装置があげられる。このタイプの提示装置は装着者の頭部運動を実時間計測する事によって、運動にともなう実時間で変化する視野の映像を両眼に与えて仮想的に装着者の周囲に3次元の視空間を構成するもので、Head-Mounted Display (以下 HMD と略記) として知られている。

高い臨場感を与える視覚提示法としては、ステレオ写真に代表されるように、左右眼に別々の2次元像を提示し、これを両眼視させることで奥行感を得る提示法が知られており、古くから研究されている。こうした従来の3次元画像提示系に対してHMDは、頭部運動を計測しつつリアルタイムにその動きを反映した像を提示することにより、より広い視野を与え、視点を能動的に変更できる特徴を持っている。

HMD のアイデアは Comeau ら³⁾によって最初に提案された。これは単眼視HMDと頭部運動追従型カメラ

原稿受付 1991 年 10 月 24 日

* 機械技術研究所

** 東京大学先端科学技術研究センター

の組み合わせによるミサイル追尾用の装置であった。その後、所謂テレプレゼンス技術の研究においてはNOSCの人間類似型スレーブロボットのマスター装置の視覚提示用に両眼視を用いたHMDが採用されている⁹⁾。一方、人工視実感の分野では、両眼視HMDを用いた奥行情報を含む仮想環境の提示システムがSutherlandによって提案された⁵⁾。その後、Furnessらによって空軍パイロット用のヘッドアップディスプレイの究極の形態としてHMDの研究⁶⁾がなされ、またFisherらはVirtual Environment Display System⁷⁾の研究でLCDを用いた軽量のHMDを開発し、仮想環境の視覚提示に用いている。後者の研究は、初の製品化されたHMDであるEyePhoneの開発へとつながった。

一方、我々は大型プロジェクト極限作業ロボットの研究の一環として進められたテレグジスタンス技術において、ロボットの遠隔制御を高い臨場感をもって行うための視覚提示装置として1981年以来HMDの研究を行ってきた⁸⁾。

最初にモノクロ両眼視提示系を開発し、これは水平1自由度の頭部運動に追従するテレグジスタンス系に用いられた。そして同装置を用いた基礎実験によって、直接視と同様の正確な奥行知覚を再現する提示系の設計条件が求められた⁹⁾。その後提示画像のカラー化¹⁰⁾や、許容する頭部運動の多自由度化を進めるとともに、ディスプレイ重量を補償する技術として、DCサーボモータによる5自由度重力補償型提示系¹⁰⁾、DDモータ制御による1自由度¹¹⁾及び2自由度慣性補償型提示系¹²⁾を開発した。また、1988年頃からは一層軽量のHMDの開発を進め、これらの提示系は移動ロボット及び作業ロボットの遠隔制御用に用いられ作業実験が行われている¹³⁾。

しかし、従来のHMDの研究においては光学系の明確な設計指針が示されておらず、視覚提示系にとって不可欠な生理光学からの考察も不足している。また、HMDの性格上、装置の軽量化も重要な要素であるが、これに関する評価法も提案されていないのが実情である。

本研究では主にテレグジスタンスに用いるマスター装置の視覚提示部としての観点から4種類のHMDを設計・開発し、これを通して適切な視覚提示系の設計法について提案する。加えて、これらのHMDを用いた追従実験を行い、軽量化・広視野化の効果を評価する方法を提案する。

2. 立体視覚提示装置への要求

HMDがオペレータに与える臨場感のうちで運動を伴わない成分は主に両眼視による立体感の提示によるものである。すなわち、こうした運動を伴わない両眼立体視

型提示系における臨場感の向上は立体知覚が有効に働くかどうかにかかっている。視覚提示系における立体視の要因の主なものと、それらが有効に働く距離範囲は次のようになる¹⁴⁾。

- | | |
|-------------------|--------------|
| 1) 水晶体による焦点調節とボケ量 | (単眼) 2~3m 以内 |
| 2) 輻輳 | (両眼) 30m 以内 |
| 3) 両眼視差 | (両眼) 100m 以内 |
| 4) 運動視差 | (単眼) 200m 以内 |

両眼立体視型提示系を設計する際にはこれらの要素をいかに有効に再現するかが課題となる。このうち1), 2), 3) についてはマニピュレーション作業等の比較的近距离における静止系の提示において有効であり、3), 4) についてはむしろ高速な移動を伴う場合の相対運動系を提示する際に有効である。

実際のHMDシステムの設計では1)の再現は困難なため排除することにし、他の立体知覚要素を効果的に働かせるようにする。このためには各要素ごとに最も効果的な条件を整える必要がある。その条件としては以下の様なものが知られている。

まず第1に焦点調節の効果の排除である。提示系における焦点調節の再現は機構的に複雑になり、重量的にも実現困難のため省略し画面の結像位置を固定する。この場合、他の立体知覚要素との食い違いによる競合を避ける必要がある。ことに輻輳と焦点調節の間には生得的な反射による相互作用が存在し、両者の奥行知覚量の食い違いが生理的な許容限界を越えると両眼融像が破れ、両眼視が成立しなくなることが知られている。この人間の特性を考慮し、焦点調節に関して表示面の虚像が1mの距離に見えるように光学系を決定する。これによって輻輳は200mmから無限遠までの範囲を許容することが可能となる¹⁵⁾。また、この条件下で像を提示すれば臨場感が損なわれないことは筆者らがおこなった空間知覚実験においても確認されている²⁾。

第2に輻輳の効果的な再現である。輻輳による奥行知覚は焦点調節機能を固定にした視覚提示系において頭部を静止させた場合に絶対距離を与える唯一の生理的てがかりである。このため、正確な視覚提示から得た位置感覚に基づき遠隔作業を行う場合の作業特性向上には最も重要な要素となる。正確な輻輳を得るためには正確な視線方向角を得る必要がある。このためには正確な視点と視野を再現せねばならず、提示系と眼球の関係を対象とカメラ入力系の関係に光学的に正確にマッチングさせる必要がある。

このための条件としては、

- 1) オペレータの左右眼間距離と提示系及びカメラ系

の左右眼間距離を一致させる。

2) 提示系の視野角とカメラ系の視野角を一致させる。

3) 提示系の光軸とカメラ系の光軸を一致させる。

などがその要素となる¹⁶⁾。

第3に両眼視差の効果的な再現である。両眼視差による奥行知覚は融像状態下の対象間の相対距離を与える生理的てがかりであり、その分解能の高さ故に両眼視による空間知覚においては常に重要な要素である。両眼視差の正確な再現のための条件は、輻輳の場合と同く同じである。両眼視差による弁別能力は視野が約45°より狭くなると低下することが知られており、水平に45°以上の融合領域を確保することが望ましい¹⁵⁾。

第4に運動視差の効果的な再現があげられる。運動視差は視点の移動の際に奥行量を知覚させる生理的てがかりである。移動感覚を伴う臨場感の創出に不可欠な要素といえる。運動視差が効果的に作用するだけの視野角としておおよそ水平60°垂直45°以上が要求される¹⁵⁾。

以上の様に、視覚への立体提示装置において十分な臨場感を得るためには視野角を大きくとることが要求されることが分かる。ことにスレーブ側が移動ロボットの場合には両眼視差のみならず運動視差も効果的に作用するだけの視野角が要求されることになる。

また一方、スレーブ側が作業ロボットの場合にはマニピュレータ等の動作分解能を十分満たすだけの視野中の画素の分解能が要求されることになる。

しかるに実際に提示可能な画像情報の画素数には限界が有り、画素数は視野角と分解能の積である。このために、視野角と分解能の条件を同時に満たすことは困難であり、提示条件に基づくトレードオフで分解能と視野角を適切に設定しなければならない。さらに、正しい空間認識を得るためには系の光学的な関係を本来の視覚に一致させることが重要であり、これは直観的な空間認識による作業特性を左右する¹⁷⁾。以上の条件を満たし非拘束に、なおかつレイグジスタンス系の特徴である頭部運動の計測による視野領域の変更を可能にする装置として考えられたのが頭部運動追従型のディスプレイである。

頭部運動の追従には幾つかの方式があるが、本論では頭部とディスプレイの密着度の高い軽量のHMDタイプのものを採り上げる。このタイプは装着感の排除が困難であるものの、頭部の動きとのずれが無く、外部からの複雑な運動補償制御が不要で運動の自由度を高くとることが容易なため、リアルタイムの制御を要求されるレイグジスタンスによる作業や仮想現実感環境の提示に適している。しかし従来のHMDは映像提示に主としてCRTを用いていたために装置の重量及び慣性モーメントが大きく、外部からの補償制御なしには操作が困難で

Table 1 Comparison of two types of head-mounted display

	頭部装着型	リンク支持型
構成上の制約	全重量で制限(約2kg以下)	慣性モーメントで制限
運動上の制約	頭部運動の測定法に難	自由度増に機構上の困難

であった^{11),12)}。そこで本論では軽量で慣性モーメントの小さいディスプレイの設計・試作を行なう。

3. 頭部装着型 HMD の試作

HMDは支持機構の点から頭部装着型とリンク支持型に分類される。**Table 1**にそれぞれの特徴を示す。今回試作を行ったHMDは頭部装着型2タイプとリンク支持型2タイプの計4タイプである。以下、この分類に基づいて設計・評価を行う。

頭部装着型の特徴は外部からの支持機構等がなく、オペレータが装置全体を頭部に被った状態で使用する点にある。このため、頭部運動が拘束されず、リンク支持型に比べて装置が小型化できる。しかし、装置全体の重量をオペレータの首で支えなければならないため、技術的な問題点の多くはその小型・軽量化に有る。また、頭部運動の計測には非接触型のセンサを用いる場合が多く、高速な制御系の構成においては計測精度及びサンプリング周波数上の制約が問題となる場合が多い。

本論で紹介するこのタイプのディスプレイは主に遠隔操作型移動ロボットのマスター装置における視覚提示系として設計された。移動用の視覚提示系においては運動視差を有効に利用する提示系が要求される。この点から視覚提示系として水平視野角60°以上が要求される。

Fig. 1に頭部装着型HMDの試作一号機を示す。総重量1.7kg、ディスプレイ部のみの重量620gで、4インチカラーLCD(H320×V220dot)を2台並べて用いている。頭部の位置・姿勢の計測には3次元デジタイザを用いた。位置信号のサンプリングレートは60Hzである。提示系のシステム構成を**Fig. 2**に示す。接眼レンズは軽量化のため眼鏡フレームに収めて着用する。前述の焦点調節と輻輳の条件より、接眼レンズの焦点距離はディスプレイ面の虚像提示距離が1mになるように設定した。また、LCDに4インチのものをを用いたために左右のLCDパネル間の距離が眼間距離に収らず、**Fig. 3(a)**に示すようにLCD中央が視野外側21.5°に位置し、視線中央とずれている。ミラー等を用いてこのずれを除去するように光学系を構成することは可能であるが、この装置では軽量化のために光学系を省略し、ディスプレイを直視するようにしている。このために同装置

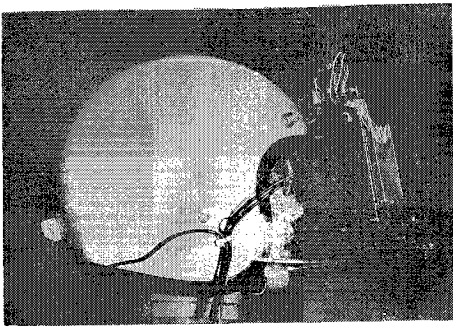


Fig. 1 Head-mounted display prototype MK.1

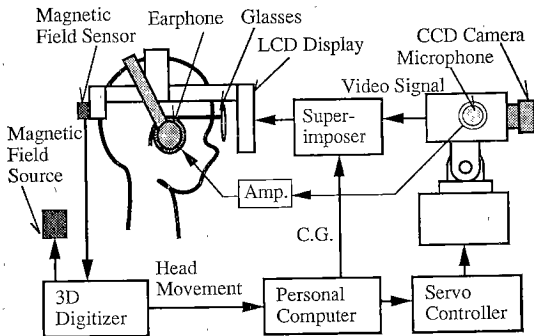


Fig. 2 Blockdiagram of head-mounted display

による画像の提示に際しては、画像の入力系にこれと同様のずれを持たせた光学系を用いる必要がある。

この提示系に対し画像入力として CGC 画像と CCD カメラによる実環境像を用いて臨場感を調べた。その結果、つぎのような問題点が明らかになった。

- 1) 画質が粗い。
- 2) 立体感のある領域と無い領域の境界が目立つ。
- 3) 光学的な歪みによって左右像の融合が妨げられる場合がある。

1) は LCD の画素数と視野角の関係から計算される解像度が視力換算で 0.07* しかない為である。高速移動する遠隔操作型ロボットなどへの応用例を想定した場合、単眼視力にして 0.3 程度の解像度が必要と考えられる。また、2) は次の理由によるものと推測される。Fig. 3 (a) に示すように、この系は鼻側視野角が 22.5° であるから約 45° の両眼像の融合可能領域をもつ (Fig. 3(a))。この立体視可能な領域は有効視野 100° の半分以下であるために、融像領域外にある両眼で非対応な領域が視野闘争を起こしているものと考えられる。対策としては有効視野の非対称性の原因となっているディスプレイ中央と視線中央のずれを物理的もしくは光学的に除去して、非対応領域を縮小することで改善できると思われる。

一方、3) は実環境画像入力時に特有の現象で、視野

が単眼で 72° 両眼で 100° と広角になったために画像入力用カメラに広角レンズを用いたことによる。この入力系では提示系に対応したずれを持たせてあるために融合視野内の対象はレンズの端に近い所で捉えることになる。広角レンズの収差による周辺部の像の変形が激しいために融合が困難な状況が生じたと考えられる。入力光学系の特性を改善するか、視線中央に光学系の中央を一致させるような措置が必要である。

また一方で次の様なこともわかった。接眼レンズ系を眼鏡を用いて装着する方式は従来の“のぞき窓”型の提示系よりも目にレンズ系を接近させて配置できるため広視野角を確保し易く、度の強い接眼レンズを用いても位置ずれの影響を避けやすい。また、逆説的な効果とも言えるが、広視野角ではあるが極めて度の強いレンズを用いた今回の装置の場合、レンズ中央から大きくずれた位置に視線を向けた際の焦点調節が困難になることが、有効視野角の「枠」の存在を意識させずに眼球運動を制限する効果を生み¹⁸⁾、その結果、頭部運動を誘発させやすく臨場感を阻害しにくいようである。これは頭部運動追従型の視覚提示装置において広い単眼視野角を確保しづらい場合においては重要な要素となる可能性がある。

以上の問題点を考慮して 2 号機を試作した Fig. 4 にこれを示す。総重量は 600 g にまで軽量化されている。画像提示用のカラー LCD には 3 インチ (H 372×V 240

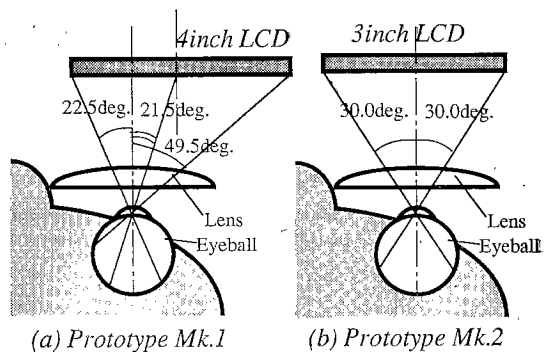


Fig. 3 Viewer design (Top view of right eye)

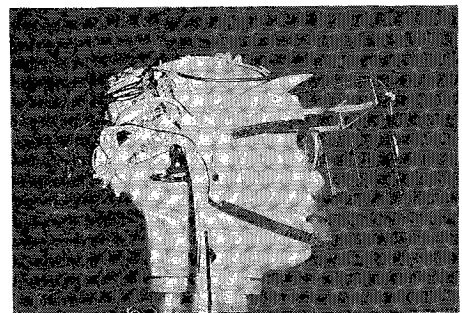


Fig. 4 Head-mounted display prototype Mk.2

* 換算視力 = $1 / (1 \text{ 画素あたりの視野角 } [\text{min}])$

の素子を用い、駆動用回路を分離して頭部後方に配置することによって重量配分が前方に偏らないようにした。この LCD の小型・軽量化と装置の重心を頭部重心に近づける重量配置によって、頭部への固定具が1号機より簡単なもので済むようになった。これは装置重量の大幅な軽量化に多大の効果をもたらした。また、小型の LCD を用いたことにより視線中央が表示面中央に一致する構造となり、1号機での問題点を回避した。視野は内側・外側共に 30° (Fig. 3 (B)), 解像度は換算視力で 0.1 である。これは解像度の不足を除けば、両眼融合領域水平 45° 以上、単眼視野角水平 60° 以上垂直 45° 以上という視野角に関する前述の要求をほぼ満たすものである。同様の条件下では、NTSC コンポジット信号によってカラー画像を伝送する限り、解像度は最大でも換算視力にして 0.13 であり、これが上限となる。視覚提示系の一層の高性能化の一手法として、さらなる高解像度化・広視野化が考えられるが、水平 60° 垂直 45° の視野、視力換算で 0.3 の解像度という基本的要求を満たすには水平解像度 1080 本、垂直解像度 810 本もの画像信号が要求されることになる。このような高解像度画像信号としては RGB 信号等を用いる方法が考えられるものの、テレビジョンシステムなどでは信号の無線伝達を必要とする場合もあり、常に導入できるとは限らない。最終的なこの課題の解決には高品位 TV 放送技術の適用が必要となる。ただし、頭部装着型 HMD においては主に重量上の問題から、現在の高解像度画像を提供するディスプレイ系の搭載は困難である。軽量・高解像度なディスプレイの開発が待たれる。

4. リンク支持型 HMD の試作

リンク支持型 HMD の特徴はディスプレイ部の重量を外部リンク機構で支持する為、重量的な制約が頭部装着型に比べて少ないこと、リンク機構を利用したオペレータの頭部運動計測が容易なことが挙げられる。反面、頭部運動の自由度はリンク機構の自由度で規定されるため、拘束感の排除の為にはリンク機構の多自由度化が要求される。これによる機構の複雑化や運動質量の増大が技術的な問題点となる。

本研究で開発されたこのタイプの HMD は主にマニピュレータを用いた作業用ロボットのマスター装置用視覚提示系として設計された。このマニピュレータの位置決め精度が先端で 1 mm、視点からの先端到達半径が 1 m の場合、その空間分解能は視覚提示系の視力換算で 0.291 相当である。作業用提示系としてはこれと同等の分解能をもつことが要求される。またマニピュレータ作業時には把持対象の視認のためにマスターアームを顔前方にも

ってくる場合があり、ディスプレイはこのためのスペースを確保した設計にせねばならない。

ディスプレイの支持リンク機構 (Fig. 5) は 6 自由度で、運動中でもディスプレイとリンク機構全体の重心が常に基部の支点上にあるようにカウンターウェイトを配置した。これによって、ディスプレイ重量の影響を受けずに自由な頭部姿勢をとることが可能である。頭部運動はリンクに取り付けられた 6 つのエンコーダによって計測される。この機構においては姿勢 3 軸と並進 3 軸を非干渉に測定することができる¹⁹⁾。

リンク支持型の試作 1 号機を (Fig. 6) に示す。総重量 5.5 kg、ディスプレイとして 4 インチ CRT を 2 台用いている。2 枚のミラーによって光路を折返し、頭部周辺に CRT を配置することで、慣性モーメントの低減を図った (Fig. 7)。また同時にこの光学系の導入により作業時に必要となる顔前方の空間を確保することが可能となった。接眼レンズは頭部装着型と同様、焦点調節による立体視上の制約を避けるため、ディスプレイの虚像提示距離が 1 m になるように設定した。眼間距離は 65 mm、

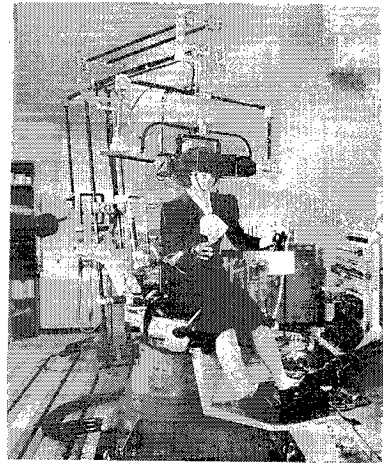


Fig. 5 6-degrees of freedom link mechanism to support a head-coupled display



Fig. 6 Head-coupled display prototype Mk. 1

視野角は単眼 33° 、解像度は視力換算で 0.3 である。また反射系により生じる不要な鏡像は偏光板によって視界から除去した。そのため、遮光板を用いる場合に生じる視点のずれによる視野の欠如を防ぐことが出来た。この原理を Fig. 8 に示す。ミラーに対する入射光と反射光を含む面に対し 45° をなす向きに直線偏光板を配置し、入射光がこれを通過するようにすると反射光の偏光方向は 135° となる。これを 135° の偏光板を通して観察すると直接光は除去され、反射光のみを観察することができる。すなわち反射系の構造によらず観察に用いる偏光板の向きが 45° のとき正像を、 135° のとき鏡像を選択的に観察することができる。

この提示系を用いてマスタースレーブ系を構成し作業実験を行った結果、つぎのような問題点が明らかになった。

- 1) 作業によっては視野の狭さが作業の障害になる。
- 2) 慣性が大きく、手による補助なしでの素速い頭部運動が困難。
- 3) 長時間の連続使用の際にレンズが曇る。

1) は作業用ということで水平方向に視力換算で 0.3 の解像度を確保することを重視したため、現状のディス

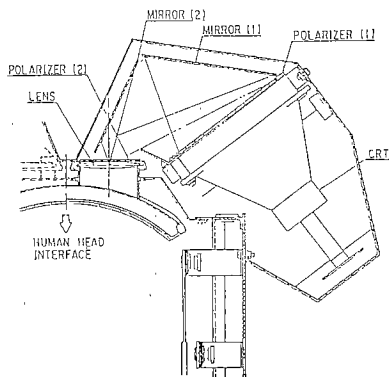


Fig. 7 Viewer design (for right eye)

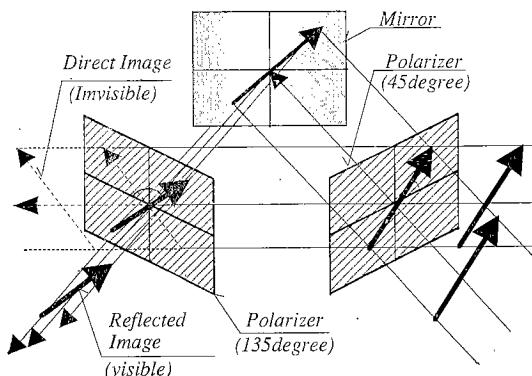


Fig. 8 Selection of mirror-image by polarizer

プレイの画素数上の制限から、視野角が 33° と狭くなったことによる。特に作業対象が動いている場合、2) の条件とあいまって追従動作が困難になった。

ことにトレイグジスタンス型マスタースレーブ系において正確な作業を行うためには、調整しきれない感覚量の個人差を補正するために、自分の腕の位置（トレイグジスタンス状態においてはスレーブアームの位置）をししばし視覚的に確認する必要がある。作業のために手が塞がっている場合、頭部の運動を手で補助することは期待できない。この追従性は作業効率に大きく影響すると考えられるため、作業時の提示系としてはより追従性に優れた提示系を設計することが必要である。

1) についてはより解像度の高いディスプレイを用いて視野角を広げることによって、2) については提示系の慣性モーメントを小さくし、頭部への固定法をより密着性の高いものに変更することによって改善可能と考えられる。また 3) については、接眼レンズが装置固定である為に頭部との位置ずれを防ぐ目的でレンズ周りを顔面に密着させるように設計しており、頭部装着型の系に比べてレンズと目の間の空間の密閉度が高く、通気性が悪くなっていることが原因である。系全体のフィードバックを視覚に頼っている以上、作業用提示系として連続作業の妨げとなる要素は除去する必要がある。

以上の問題点を考慮して 2 号機を試作した Fig. 9 にその外観を示す。軽量・高解像度化のためにディスプレイとして 6 インチの LCD を使い、手による補助なしでも素速い動きが可能のように頭部への固定法として密着度の高いヘルメットを採用している。Fig. 10 に構造を示す。着脱機構によりヘルメットを交換することでサイズの変化にも対応できる。総重量は 5.5 kg（内ヘルメット 1.4 kg）と 1 号機に比して必ずしも軽量ではないが、各部を頭部により密着した位置に配置した構成とすることにより、慣性モーメントを小さく押えている。

LCD には RGB 信号入力の 6 inch (H 720 × V 240 dot)

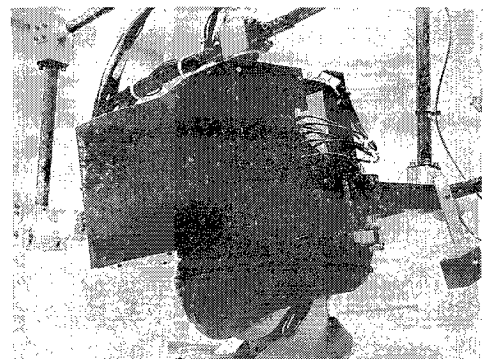


Fig. 9 Head-Coupled Display Prototype Mk. 2

の素子を用いた。また、2枚のミラーによって光路を立体的に構成することにより LCD を縦に配置し、コンパクトな光学系を構成した (Fig. 11)。これによって作業時に必要となる顔前方の空間を確保することができる。

また1号機同様、接眼レンズはディスプレイ面の虚像提示距離が1mになるように設定し、不要な鏡像は偏光板によって視界から除去した。眼間距離は65mm、視野角は単眼40°、解像度は視力換算で0.3である。またレンズの曇り防止の為に送風ファンを内蔵した。これにより長時間の連続着用の際にも視界が悪化することは無くなった。

5. 追 従 実 験

テレグジスタンス視覚提示系においては、位置と距離を直接視と同一に保つ、高度の臨場感を有する立体視覚が達成されることは、ホロプタを用いた定量的実験により既に実証されている¹⁰⁾。本論ではこの成果に基づいた設計・試作を行ったことで、各試作提示系は静的な提示条件での立体知覚においては高度の臨場感を実現することができた。しかし実際の応用においてHMDに求められる臨場感はこちらの静的なものだけではなく、動的な要素も含んでいる。この動的な要素とはオペレータ

が意図した方向に顔を向ける際の追従性であり、あたかも装置を被っていないかのような操作性が得られることが理想である。こうした特性を比較するために、本論では追従実験シミュレータを用いた追従実験により各HMDの動的な操作特性を計測した。シミュレータとしては参考文献20)で提案したものを用いる。この実験は立体知覚についての評価を行うものではなく、頭部運動追従型の視覚提示系としての操作特性について評価を行うためのものであり、単眼提示によって行われる。

この追従実験において想定した状況を Fig. 12 に示す。これはパン・ティルトの2自由度を持つカメラ系を頭部運動に追従するスレーブ系として、これに対面した平面上を動き回る視標Bをカメラ視野中心に固定された視標Aで追従するもので、平面上には視標Bの他に格子状の背景も表示される。背景が無い場合、オペレータに視覚的にフィードバックされる情報は頭部運動(すなわち視標A)に対する視標Bの相対運動だけであるが、静止した背景の存在はオペレータに対し視標B及び頭部運動の絶対運動を視覚によりフィードバックする効果を与える。

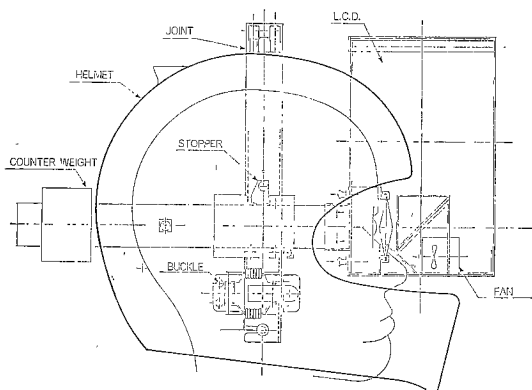


Fig. 10 Visual display design

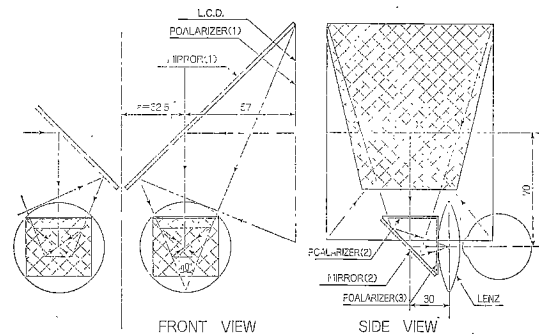


Fig. 11 Viewer design

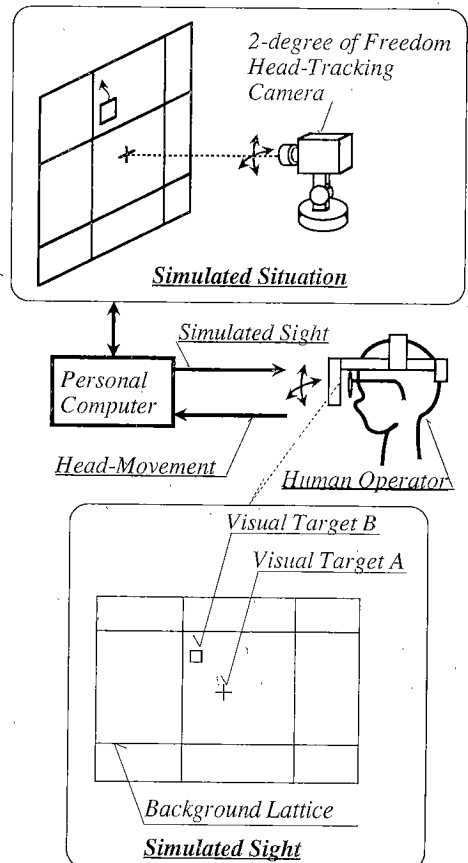


Fig. 12 Model of Tracking Simulation

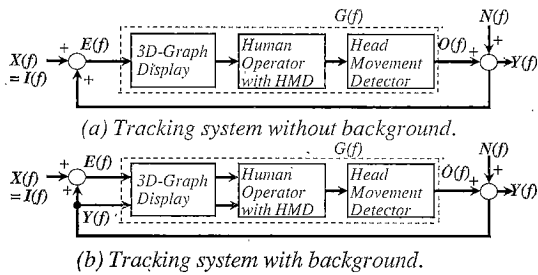


Fig. 13 Block Diagram of Tracking Simulation System

このため、背景の有無はオペレータを含む実験系の制御構造に Fig. 13 のような違いをもたらし、追従特性を変化させることが著者らが行った実験において確認されている²⁰⁾。なお実際の実験は、頭部運動を計測するパーソナルコンピュータ上でこの環境（カメラ、格子、視標 A、B）をシミュレートして生成させた CG 画像を用いて行った。これによって本実験ではカメラ系の動特性の影響は除去されている。

視標 B の動き $i(t) = x(t)$ は (1) 式のような正弦波の組合せによる疑似ランダム信号を用いる。各正弦波の周波数は対数目盛で等間隔となるようにし、振幅は周波数に反比例させてある。これによって各周波数成分のエネルギー及び速度振幅は一定となっている。

$$x(t) = \sum_{k=0}^n a_k p^{-k} \sin(2\pi f_{\min} p^k t + \phi_k) \quad (1)$$

($p=1.25$, $n=17$, $f_{\min}=0.0222$ Hz, ϕ_k は乱数)

また提示にはダブルバッファリングを用い、提示上のちらつき・ばらつきを排除した。提示及びサンプリングの周期は 44 ms である。トラッキングの結果は、実際のオペレータの指令値 $o(t)$ に対し、ノイズ $n(t)$ が加わった $y(t) = o(t) + n(t)$ の形で計測される。

ここで評価すべきオペレータを含んだ提示・操作系の開ループ特性 $G(f)$ は、閉ループ特性 $T(f)$ から (2) 式を用いて算出できる。

$$G(f) = T(f) / [1 - T(f)] \quad (2)$$

閉ループ特性 $T(f)$ は入出力 $i(t)$, $o(t)$ のフーリエ変換 $I(f)$, $O(f)$ を用いて (3) 式のように定義される。

$$T(f) \equiv O(f) / I(f) \quad (3)$$

さらに (3) 式は系の入力信号のパワースペクトル及び入出力の信号のクロススペクトルを用いて (4) 式のように表せる。

$$O(f) / I(f) = \Phi_{IO} / \Phi_{II} \quad (4)$$

これらのスペクトルは $I(f)$ と $O(f)$ のアンサンブル平均を用いて (5) 式のように表わせる。

$$\begin{aligned} \Phi_{IO} &= E[I(f) * O(f)], \\ \Phi_{II} &= E[I(f) * I(f)] \end{aligned} \quad (5)$$

一方、直接計測可能なパラメータ $x(t)$, $y(t)$ のフーリエ変換 $X(f)$, $Y(f)$ は $y(t)$ がノイズ成分 $n(t)$ を含むため、

$$\begin{aligned} X(f) &= I(f), \\ Y(f) &= O(f) + N(f) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。しかし、ノイズ成分 $N(f)$ は入力 $I(f)$ と無関係であると考えられるため、アンサンブル平均を用いて $N(f)$ と $I(f)$ のクロススペクトルを求めると、0 になる。

$$\begin{aligned} \Phi_{IN} &= E[I(f) * N(f)] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

よって (6), (7) 式より $X(f)$, $Y(f)$ のスペクトルは、

$$\begin{aligned} \Phi_{xy} &= E[E(f) * Y(f)] \\ &= E[I(f) * \{O(f) + N(f)\}] \\ &= \Phi_{IO} + \Phi_{IN} \\ &= \Phi_{IO}, \\ \Phi_{xx} &= E[X(f) * X(f)] \\ &= E[I(f) * I(f)] \\ &= \Phi_{II} \end{aligned} \quad (8)$$

となり、閉ループ特性 $T(f) = X(f) / Y(f)$ はより、次の様に求めることが出来る²¹⁾。

$$\begin{aligned} T(f) &= \Phi_{xy} / \Phi_{xx} \\ &= E[X(f) * Y(f)] / E[X(f) * X(f)] \end{aligned} \quad (9)$$

プログラム上では 1024 点のサンプリング結果の Fourier 変換から $X(f) = I(f)$, $Y(f) = O(f) + N(f)$ を求め、これのアンサンブル平均を Φ_{xy} , Φ_{xx} とする。

さらに $G(f)$ の評価としてここではヒューマンオペレータの特性モデルである McRuer のクロスオーバーモデル

$$G'(f) = f_c \exp(-j2\pi f t_d) / jf \quad (10)$$

を用いて解析し、クロスオーバー周波数 f_c と等価時間遅れ t_d によってその特性を評価した。

この実験方法に基づき、リンク支持型 1 号機、2 号機（以下 L1, L2 と呼称）及び頭部装着型 2 号機（以下 M2 と呼称）を採り上げ、動特性の比較を行った。なお頭部装着型 1 号機については他の装置との提示条件の違いが多いため実験対象として用いない。

6. 実験結果

実験の結果得られた周波数特性と最小二乗法によるクロスオーバーモデルへのあてはめの例を Fig. 14 に示す。このようにして得られたクロスオーバー周波数 f_c と等価時間遅れ t_d を各装置間で比較してみる。結果を

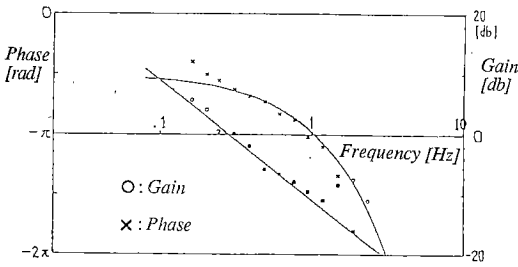


Fig. 14 Frequency Response.

Table 2 Dynamic Responses

Device	back	f_c [Hz]	t_d [s]
L 1	on	0.3090	0.2802
	off	0.3042	0.2627
L 2	on	0.4033	0.2673
	off	0.3613	0.2420
M 2	on	0.4272	0.2567
	off	0.3762	0.2067

Table 2 及び Fig. 15 に示す。 f_c については、L1, L2, M2 の順に大きく、 t_d については、L1, L2, M2 の順に小さいという傾向が見てとれる。L1, L2, M2 の順に各装置の慣性モーメントは軽減され視野角は拡大されていることから、これらが f_c を増加させ t_d を減少させて動特性を向上させている要因となっていることが分かる。ことに装置重量的には差の無いリンク支持型の提示系において、L1 に比して L2 の特性が格段に改善され、はるかに軽量の M2 に近い動特性を示していることから、重力補償のなされているリンク支持型においては装置重量の軽減よりも頭部周りの慣性モーメントを軽減することが動特性の改善においては効果的であることがわかる。

また、背景の表示によって f_c と t_d の双方が増加する傾向がみられるが、これは参考文献 21) における筆者らの他の追従実験においてもみられた傾向である。

7. 考 察

McRuer のクロスオーバーモデルにおいて f_c は $G(f)$ のゲインを、 t_d は等価時間遅れを決定する要素である。(10) 式を変形することにより f_c とゲイン、 t_d と位相の関係 (11) 式の様に表わすことができる。

$$G(f) = \exp(-j2\pi(t_d f + 0.25)) \times \{f_c/f\}$$

$$\angle G(f) = 2\pi(t_d f + 0.25), |G(f)| = f_c/f \quad (11)$$

$G(f)$ がヒューマンオペレータの動特性のモデルであることを考えると、等価時間遅れ要素 $\angle G(f)$ すなわち t_d は知覚特性、ゲイン $|G(f)|$ すなわち f_c は操作特性を

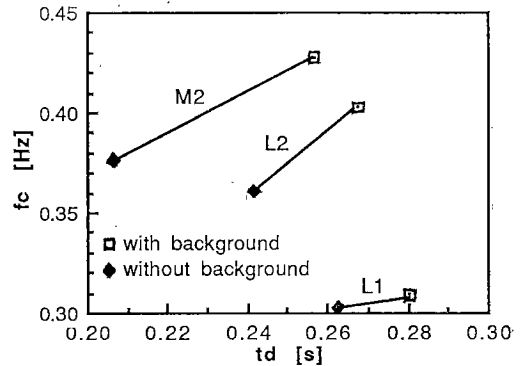


Fig. 15 Performance of Devices.

代表していると考えられる。

この考え方に基づくと各装置の周波数特性に係わっていると思われる要素を次の様にまとめることができる。

E [追従特性]

= O [オペレータの基本的追従特性]

+ P [慣性モーメントによる操作負荷の増加]

+ Q [視野角の制限による知覚特性の低下]

+ R [背景表示による操作特性の向上]

+ S [背景表示による知覚負荷の増加]

これらの要素によって f_c と t_d を分解すると

$$f_c = f_o K_p K_r$$

$$t_d = t_o + t_q + t_s$$

ここで f_o, t_o は背景無しのトラッキング実験における直視状態のオペレータの基本的な追従特性におけるゲインと等価時間遅れを表わす。これに対し K_p は HMD の慣性モーメントによるゲインの変化比率を示し、 K_r は背景表示によるゲインの変化比率を示す。一方 t_q は視野角の制限による時間遅れ成分、 t_s は背景表示による知覚負荷の増加による時間遅れ成分を表わす。

この各要素によるパラメータの分解を (11) 式のクロスオーバーモデルに適用すると、(12a), (12b) 式の様にモデル化することができる。

$G(f)$ の背景の有るトラッキング実験の場合、

$$G(f) = \exp(-j2\pi(f(t_o + t_q + t_s) + 0.25)) \times \{f_o K_p K_r / f\} \quad (12a)$$

一方、背景の無いトラッキング実験の場合、 $K_r = 1.0$, $t_s = 0.0$ と見なせるため、

$$G(f) = \exp(-j2\pi f(t_o + t_q) + 0.25)) \times \{f_o K_p / f\} \quad (12b)$$

今回の実験は直視状態と HMD 使用時の比較実験ではなく、HMD 間の特性比較実験であるから、 f_o, t_o を実際に直視実験によって求める必要はない。そこで最も操作負荷が小さく視野角の大きい装置 M2 における背景無しの追従特性を直視に準ずる基準の特性として、この

ときの $K_p K_r = 1.0$, $t_q + t_s = 0.0$ とする。これによって基準となるゲインと等価時間遅れである f_0, t_0 を決定する。このモデルに基づき各定数を求めると、Table 3 のようになる。

K_p, t_q は装置間の特性差であるから、操作負荷である慣性モーメントと提示領域の視野角の違いを反映し、 K_r, t_s は背景表示による変化量であるから主に視覚刺激の視野角の違いを反映していると考えられる。Fig. 16 に提示領域の視野角とこれらのパラメータとの関係を示す。それぞれ視野角 33° のものが L1, 40° のものが L2, 60° のものが M2 である。

ゲインの変化については Fig. 16 (a) に示す。 K_p は主として慣性モーメントの変化によると考えられる成分であるが、慣性モーメントが L1, L2, M2 の順に小さくなっていくにつれて K_p は大きくなっている。これは、HMD は頭部運動に対して純粋に慣性として働くと考えられることから、ゲインに対して慣性モーメントが逆数的に働いているためと考えられる。また、 K_r は背景表示による成分であるが、すべての装置において 1.0 より大きく、背景表示によって指標及び頭部の絶対運動がフィードバックされることによってゲインが向上していることがわかる。さらに K_r は L1, L2, M2 の順に大きくなっており、背景表示領域の視野角上の拡大につれて増加していることがわかる。従って、ゲインの増加率が視野角の拡大によっても大きくなっていることが分かる。

一方、等価時間遅れの変化を Fig. 16 (b) に示す。ディスプレイの有効視野角の変化による成分 t_q については L1, L2, M2 の順に小さくなっており、提示領域の視野角の拡大によって等価時間遅れは軽減されている。これは視標の速度が視野角の拡大によって見かけの速度刺激として大きくなったことにより、視覚の遅延時間が短縮されたものと考えられる。これに対し、背景提示による成分 t_s は L1, L2, M2 の順に大きくなっており、背景の表示される視野角の増大とともに等価時間遅れの増加量は増大していることがわかる。これは網膜上の視覚刺激の提示面積が増加するにつれて視覚情報処理に必要な時間も単調に増加しているものと考えられる。

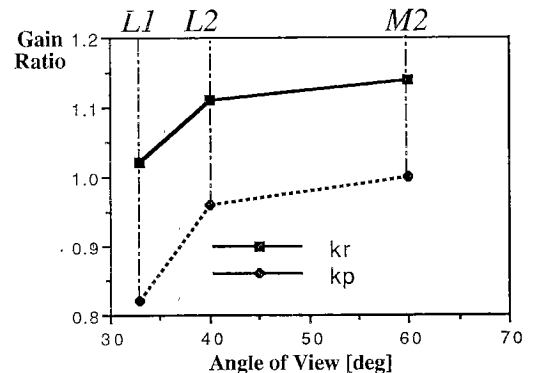
以上の考察から HMD の設計にあたって、動的操作性を向上させるために、重量配置と提示視野角について以

下の様な指針を得ることができる。重量配置の観点からは、ゲインについて、L1 に対して L2 の特性が著しく改善され、M2 に近い値を示していることから、リンク支持を行う限り、総重量よりも慣性モーメントの軽減が動的操作性の向上において重要である。また、提示視野角の観点からは、視野角の拡大によってゲインの増加と等価時間遅れの減少がみられるため、動的操作性の向上のためには視野角の拡大が効果的といえる。

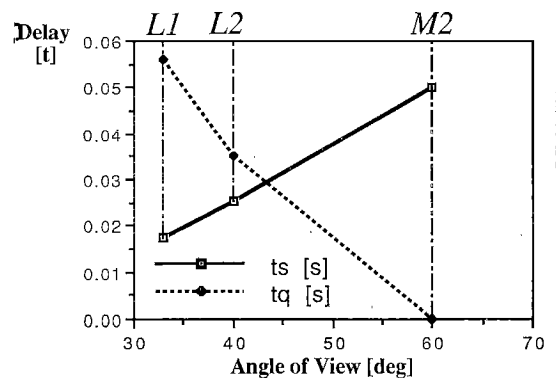
また、背景の存在によるゲインと等価時間遅れの増加は、視野角の拡大とともにいずれも増える傾向にある。この関係を用いれば、作業環境を設計する際に背景の有無によって、動的操作性についてゲインと等価時間遅れのトレードオフを行うことができるわけである。この場合は広視野角のほうが大きな変化が得られることになる。

8. 結 言

移動用及び作業用テレリグジスタンスシステムのための頭部運動追従型の立体視覚提示装置を設計・試作した。また、この装置を用いた追従実験を行いその動特性を調べた。さらに、実験結果から装置間の違いを比較することでその動特性を左右する要因を考察した。



(a) Gain ratio



(b) Delay time

Fig. 16 Comparison of each device's performance

Table 3 Comparison among Tracking Schemes.

Device	K_p	t_q [s]	K_r	t_s [s]
L 1	.821	.0560	1.02	.0175
L 2	.961	.0353	1.12	.0253
M 2	1.00	.0000	1.14	.0500

($t_0 = 0.2067$ s, $f_0 = 0.3762$ Hz)

HMD は今後、人工現実感技術やテレグジスタンス技術の普及に伴って、高い臨場感を与えるヒューマンインターフェースとして広く用いられていくことになると思われるデバイスである。同提示系については、今後の表示デバイスの高性能化にともな着一層の軽量化・高解像度化・広視野化をはかることが考えられるが、本論で示したような設計要素、及び評価基準はこうしたヒューマンインターフェースの視覚提示技術の開発における基盤となるものであると考える。

最後に本研究の推進にあたって多大なご支援をいただいた機械技術研究所大山尚武ロボット工学部長に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) J.D.Foley, "Interlaces for Advanced Computing", Scientific American, pp. 83-90, Dec. 1987.
- 2) S.Tachi, K.Komoriya and M.Kaneko, "Tele-existence(I)—Design and evaluation of a visual display with sensation of presence—", Proceedings of 5th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (Ro Man Sy 84), pp.245-254, CISM-IFTOMM, Udine, Italy, June 1984.
- 3) C.Comeau and J.Bryan, "Headsight Television System Provides Remote Surveillance", Electronics, pp.86-90, Nov.10, 1961.
- 4) D.L.Akin, M.L.Minsky, E.D.Thiel and C.R.Kurtzman, "Space Applications of Automation, Robotics and Machine Intelligence Systems (ARAIMIS)—Phase II", NASA Contractor report, 1983.
- 5) I.E.Sutherland, "Head-Mounted Three-Dimensional Display", Proc. of the Fall Joint Computer Conference, Vol.33, pp.757-764, 1968.
- 6) E.J.Lerner, "Toward the omnipotent pilot," Aerospace America, pp.18-22, Oct. 1986.
- 7) S.S.Fisher et al., "Virtual Environment Display System", ACM 1986 WORKSHOP ON INTERACTIVE 3D GRAPHICS, pp.1-11, 1986.
- 8) 館 暉ほか, "マニピュレータの操縦方式", 特願 56-4135, 1981.
- 9) 館 暉, 阿部 稔, "テレグジスタンスの研究第1報—視覚ディスプレイの設計—", 第21回 SICE, 学術講演会予稿集, pp.167-168, 1986.
- 10) S.Tachi and H.Arai, "Study on tele-existence (II)—Three-dimensional color display with sensation of presence—", Proceedings of the '85 International Conference on Advanced Robotics (ICAR), pp.345-352, Tokyo, Japan, Sept. 1985.
- 11) 荒井裕彦, 館 暉, 宮島 勇, "DD モータを用いた力補助型可動 CRT ディスプレイ装置の開発", 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.1, pp.23-26, 1987.
- 12) 荒井裕彦, 館 暉, "テレグジスタンスのための力補助型可動ディスプレイの開発 (第2報: 2自由度モデルの試作)", 機械技術研究所所報, Vol.42, No.5, pp.210-218, 1988.
- 13) 館 暉, 荒井裕彦, 前田太郎, 常本直貴, "テレグジスタンスの研究第19報—マスタスレーブ作業実験—", 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, No.1, pp.55-56, 1989.
- 14) 渡辺ほか, "視覚の科学", 写真工業出版 (1975).
- 15) 畑田豊彦, "両眼視機能と眼鏡", 眼鏡の科学, Vol.1, No.1, pp.27-65, 1977.
- 16) 館 暉, 荒井裕彦, "テレグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価", 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.4, pp.314-326, 1989.
- 17) S.Tachi, Hirohiko Arai and T.Maeda, "Tele-existence simulator with artificial reality (I)—Design and evaluation of a binocular visual display using solid models—", Proceedings IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.719-724, Tokyo, Japan, Oct. 1988.
- 18) 金子弘ほか, "すり分けレンズによる眼球運動制限眼鏡の試作", 日本眼科学学会誌, Vol.7, No.1, 1986.
- 19) 館ほか, "テレグジスタンスの研究第18報—テレグジスタンス作業用マスタシステム—", 第28回 SICE 学術講演会予稿集, pp.433-434, 1989.
- 20) 荒井ほか, "テレグジスタンスの研究第12報—遠隔操作カメラの追従特性—", 第5回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.97-98, 1987.
- 21) S.Tachi, R.W.Mann and D.Rowell, "Quantitative comparison of alternative sensory displays for mobility aids for the blind", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. BME-30, No.9, pp.571-577, 1983.

前田太郎 (Taro MAEDA)



1987年東京大学工学部計数工学科卒業。同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所、ロボット工学部バイオリボティクス課研究員を経て、1992年9月より東大先端科学技術センター助手。人間の知覚特性とそのモデル化、神経回路網モデル、マンマシンインターフェイス、テレグジスタンスなどの研究に従事。計測自動制御学会、電子情報通信学会、IEEE、日本ロボット学会、神経回路学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

館 暉 (Susumu TACHI)



1968年東京大学工学部計数工学科卒業。1973年同大学院博士課程修了。工学博士。同年東京大学助手。1975年通産省機械技術研究所研究員。主任研究員、遠隔制御課長。ロボット工学部バイオリボティクス課長を経て、1989年より東京大学先端科学技術研究センター助教授、1992年4月東京大学先端科学技術研究センター教授、現在に至る。1979-1980年マサチューセッツ工科大学(MIT)客員研究員。バイスペクトルを用いる信号処理、盲導犬ロボット、テレグジスタンスなどの研究を行う。IEEE/EMBS学会賞、通産産業大臣賞研究業務優秀者表彰などを受賞。現在、IMEKO(国際計測連合学会) TC17(Robotics)議長。SICEフェロー。(日本ロボット学会正会員)

荒井裕彦 (Hirohiko ARAI)



1959年5月9日生。1982年東京大学工学部計数工学科卒業。同年本田技研工業(株)入社。1984年通産省工業技術院機械技術研究所入所。現在ロボット工学部バイオリボティクス課研究員。マニピュレータの動的制御、テレグジスタンスなどの研究に従事。1991年日本ロボット学会技術賞受賞。計測自動制御学会、日本機械学会、IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)