

トレイグジスタンス研究における HMD

前田 太郎

近年、人工現実感技術¹⁾やト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ー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ーのような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³⁾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ことによって、運動に伴って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。

一方、筆者ら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トレイ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³⁾。遠隔制御技術において遠隔地側の作業がロボットの自律的な機能の限界を越えるような局面に遭遇した場合の対策として、ヒューマン・オペレーターによるマスタースレイブ制御をより高い臨場感をもって行

い得ることは重要である。トレイグジスタンスはこのために提案された技術であり、オペレーターがあたかも遠隔地にいるスレーブロボット自身になったかのような感覚で作業ができるようにする技術である。こうしたマスター操作を行っているオペレーターに対してスレーブ装置側の環境および状態を提示するにあたっては、主としてHMDを介した臨場感の高い視覚情報を用いる。遠隔臨場制御系においては、一般に系の特性を人体の特性に合致させることが望ましいとされている。そのためにはこれらの装置は人体にかかる負荷が小さく、視覚への提示条件が裸眼での観察条件に一致していることが設計上望ましい。そこでこれらの測定・提示をオペレーターに対して非拘束に行うための装置を設計・試作した。

1. 立体視覚提示装置への要求

HMDがオペレーター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、それらが有効に働く距離範囲は次のようになる⁴⁾。

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

Head-mounted display for the study on tele-existence (1995年11月16日受理)
Taro MAEDA 東京大学大学院工学系研究科 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

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 システムの設計指針としては以下のようなものが考えられている⁵⁾。

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のためには、リアルタイムな眼球状態の計測とそれに伴う提示光学系の制御を必要とするために機構的にかなり複雑になり、重量的にも実現困難となる。このために HMD では焦点調節の機構を省略し画面の結像位置を固定することが多い。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 1 m 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 200 mm から無限遠までの範囲を許容することが可能となる⁶⁾。また、この条件下で像を提示すれば臨場感が大きく損なわれることはないことは筆者らが行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状態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手がかりである。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⁷⁾。

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手がかりであり、その分解能の高さゆえ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、輻輳の場合と全く同じである。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⁸⁾。

第 4 に運動視差の効果的な再現が挙げられる。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手がかりである。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⁹⁾。

以上のように、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わかる。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。さらに、スレーブ側が作業ロボットの場合にはマニピュレーター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⁸⁾。

2. 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。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、オペレーター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ー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・軽量化にある。また、頭部運動上の制約を避けるために頭部位置の計測には非接触型のセンサー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およ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。本稿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。図 1 に頭部装着型 HMD の試作 1 号機を示す。総重量 1.7 kg、ディスプレイ部のみの重量 620 g で、4 インチカラー LCD (H 320×V 220 dot) を 2 台並べて用いている。頭部の位置・姿勢の計測には 3 次元ディジタイザーを用いた。位置信号のサンプリングレートは 60 Hz である。提示系のシステム構成

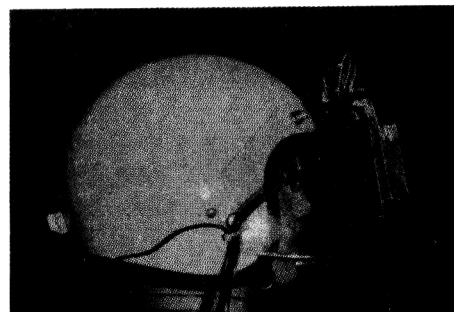


図 1 頭部装着型 HMD 試作 1 号機。

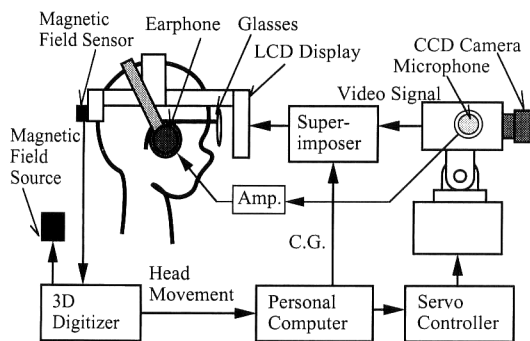


図2 HMD システム構成概念図。

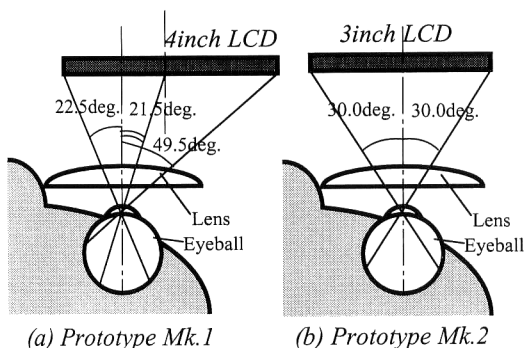


図3 接眼光学系（右眼側上面図）。

を図2に示す。接眼レンズは軽量化のため眼鏡フレームに取めて着用する。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インチのものを用いたために左右のLCDパネル間の距離が眼間距離に取らず、図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も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CG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、次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な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*¹しかないためである。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。図3(a)に示すように、この系は鼻側視野角が22.5°であるため約45°の両眼像の融合可能領域をもつ。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、残りの融像領域外にある両眼で非対応な領域が起す視野闘争が目立つのだと考えられる。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。

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もたせているために融合視野内の対象はレンズの端に近い所でも捉えることになる。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。

以上の問題点を考慮して2号機を試作した。図4にこれを示す。総重量は600g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(H372×V240 dot)の素子を用い、駆動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すむようになった。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°(図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。視覚提示系のいっそう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°

*¹ 換算視力=1/(1画素あたりの視野角 [min])

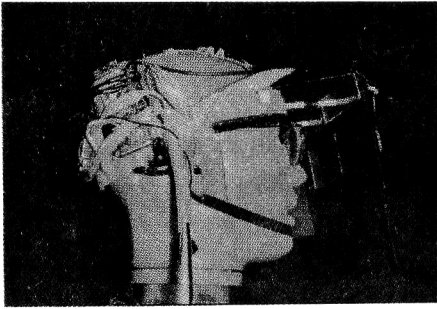


図4 頭部装着型 HMD 試作 2 号機.

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，レイグジスタンス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ろう。ただし，頭部装着型HMDにおいては主に重量上の問題から，現行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。

3. 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リンク機構で支持するため，重量的な制約が頭部装着型に比して少ないこと，リンク機構を利用したオペレーター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，拘束感の排除のため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ーを用いた作業用ロボットのマスタ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ーの位置決め精度が先端で1mm，視点からの先端到達半径が1m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ー作業時には把持対象の視認のためにマスタアームを装着した状態の上腕を顔前方にもってくる動作が不可欠であり，ディスプレイはこのために顔前方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(図5)は6自由度

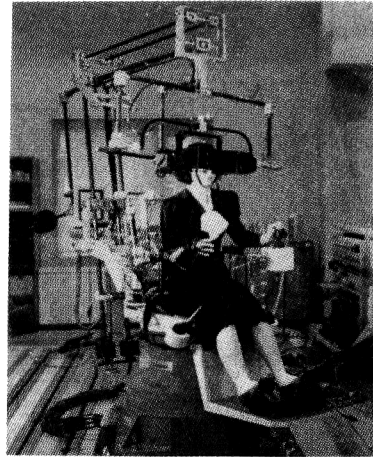


図5 HMD 支持用 6 自由度重力補償リンク機構.

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つのエンコーダー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⁹⁾。

リンク支持型の試作1号機を図6に示す。総重量5.5kg，ディスプレイとして4インチCRT(cathode-ray tube)を2台用いている。2枚のミラーによって光路を折り返し，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(図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スペース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1mになるように設定した。眼間距離は65mm，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。

この提示系を用いてマスタスレーブ系を構成し作業実験を行った結果，次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早い頭部運動が困難
- 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

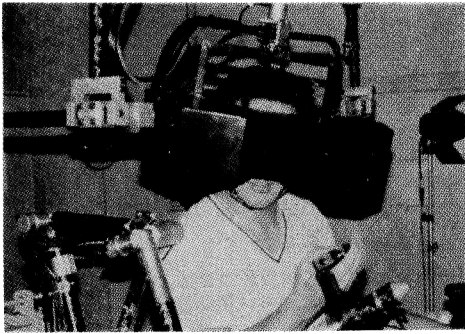


図6 リンク支持型HMD試作1号機.

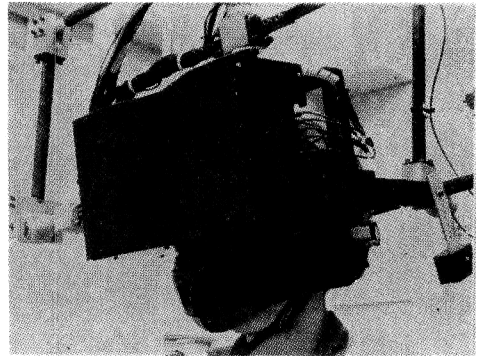


図8 リンク支持型HMD試作2号機.

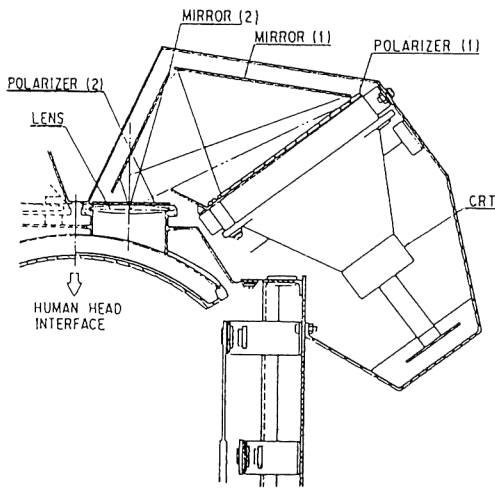


図7 リンク支持型HMD試作1号機接眼光学系(右眼側上面図).

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)をしばしば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頭部への追従性に優れた提示系を設計することが必要である。

以上の問題点を考慮して2号機を試作した。図8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を用い、手による補助なしでも素早い動きが可能な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。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抑えている。

LCDにはRGB信号入力の6 inch(H 720×V 240 dot)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(図9)。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1 m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65 mm、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ために送風ファンを内蔵させた。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なくなった。

4. 追従実験

トレイ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、高度な臨場感を有する立体視覚が達成されることは、ホロプターを用いた定量的実験によりすでに実証されている⁷⁾。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な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ー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、追従実験シミュレーターを用いた追従実験により各HMDの

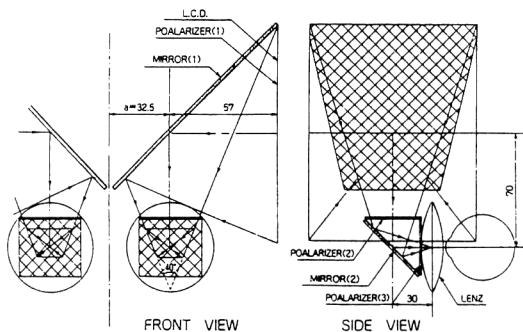


図9 リンク支持型HMD試作2号機接眼光学系。

動的な操作特性を計測した¹⁰⁾。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図10に示す。これはパン・ティルトの2自由度をもつカメラ系を頭部運動に追従するスレーブ系として、これに直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のほかに格子状の背景も表示される。背景がない場合、オペレーター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ーに対し視標Bおよ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。このため、背景の有無はオペレーターを含む実験系の制御構造に図11のような違いをもたらす。追従特性を変化させることが筆者らが行った実験において確認されている¹⁰⁾。なお実際の実験は、頭部運動を計測する計算機上でこの環境（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た。開ループ特性 $G(f)$ の評価としてはヒューマンオペレーターの特性モデルであるMcRuerのクロスオーバーモデル

$$G'(f) = f_c \exp(-j2\pi f t_d) / jf \quad (1)$$

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）および頭部装着型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号機についてはほかの装置との提示条件の違いが多いため実験対象としては用いない。

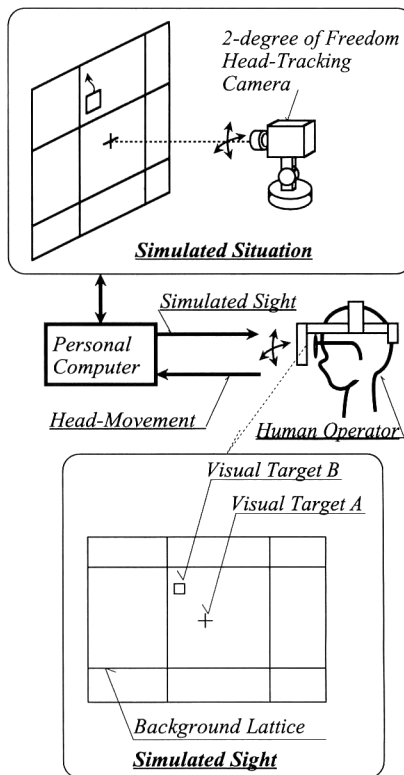


図10 追従実験系概念図。

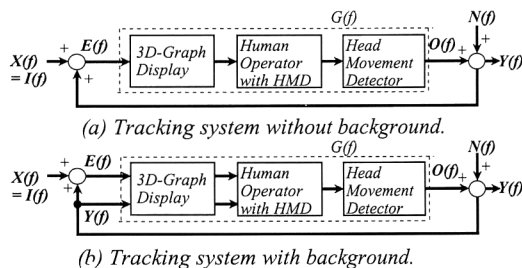


図11 追従制御時における情報の流れ。

5. 実験結果

実験の結果得られた $G(f)$ の周波数特性に対してクロスオーバーモデルへのあてはめを最小二乗法によって行った。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。結果を図12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みとれる。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

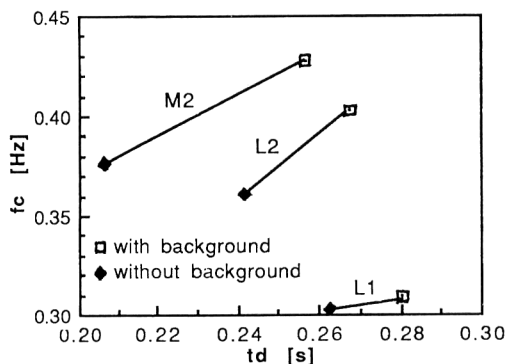


図12 各デバイスの特性。

上させている要因となっていることがわかる。ことに装置重量的には差のな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11)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。

以上の結果から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は以下のような指針を得ることができる。重量配置の観点からは、L1に対してL2のゲイン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は重要である。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現象がみられるため、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、背景の有無によって動的操作性の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ことになる。この場合は広視野角の方が大きな変化が得られている。

HMDは今後、人工現実感技術やテレイ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イスとして広く用いられてゆくことになると考えられるデバイスである。その提示系については、今後の表示デバイスの高性能化に伴っていっそうの軽量化・高解像度化・広視野化を図ることが必要と考えられる。またその発展形として、頭部運動ばかりでなく眼球運動にも追従するタイプのHMD¹²⁾や、焦点調節の奥行き手がかりにも対応した提示系などの開発も進められているが、本稿で示したような設計要素および評価基準はこうしたヒューマンインターフェイ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られる。

文 献

- 1) J. D. Foley: "Interfaces for advanced computing," Sci. Am., **257** (1987) 83-90.
- 2) S. Tachi, K. Komoriya and M. Kaneko: "Tele-existence (1)—Design and evaluation of a visual display with sensation of presence—," Proceedings of 5th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (Italy, 1984) pp. 245-254.
- 3) 館 暉, ほか: "マニピュレータの操縦方式", 特願 56-4135.
- 4) 渡辺 徹, ほか: 視覚の科学 (写真工業出版, 1975).
- 5) 前田太郎, 荒井裕彦, 館 暉: "頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価", 日本ロボット学会誌, **10** (1992) 655-665.
- 6) 畑田豊彦: "両眼視機能と眼鏡", 眼鏡の科学, **1** (1977) 27-65.
- 7) 館 暉, 荒井裕彦: "テレイ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, **7** (1989) 314-326.
- 8) S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: "Tele-existence simulator with artificial reality (1)—Design and evaluation of a binocular visual display using solid models—," Proceedings IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (Tokyo, 1988) pp. 719-724.
- 9) 館 暉, ほか: "テレイグジスタンスの研究 第18報—テレイ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 (1989) pp. 433-434.
- 10) 荒井裕彦, ほか: "テレイ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 (1987) pp. 97-98.
- 11) S. Tachi, R. W. Mann and D. Rowell: "Quantitative comparison of alternative sensory displays for mobility aids for the blind," IEEE Trans. Biomed. Eng., **BME-30** (1983) 571-577.
- 12) 岩本和世, ほか: "視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第2報)", 日本ロボット学会第11回学術講演会予稿集 (1993) pp. 361-362.