

解説

人工現実感の技術動向

廣瀬 通孝

東京大学工学部機械情報工学科 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

(1992年5月6日受理)

Trend of Virtual Reality Technology

Michitaka HIROSE

Department of Mechano-Informatics, Faculty of Engineering, University of Tokyo,
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

1. はじめに

バーチャルとは、「実際には存在しないが、本質において存在していると同等の効果を有する」という意味であり、リアリティとは、「実際の出来事、実在、現在感」という意味である。したがって、バーチャル・リアリティとは、「実際には存在しないが、本質において存在しているような事実や実際の出来事」という意味である。この語法は矛盾的である。なぜならば、リアリティとは実際でなければならぬはずであり、バーチャルとは、実際でないことを意味するからである。

それはともかくとして、バーチャル・リアリティは、多くの新規性を有する技術である。たとえば、現実を臨場感一杯に人々に見せる技術であるという意味においては、先端的ヒューマン・インタフェースの技術である。事実、頭部搭載型のディスプレイや手袋型の入力装置を代表格とする、さまざまな装着型デバイスは、この技術の新規性をきわだたせている。

また、電子的手段によって生成された映像空間の内部に観察者自らが没入し、第一人称的な体験を行えるということも、これまではなかった特色であるし、人間の五感すべてがインタフェース・チャンネルとして利用することも新しい試みである。

さらに、もっと根源的レベルにおいても、新しい概念が含まれている。従来のインタフェースにおいては、人間がインタフェースの制御権を100%有するのが普通だが、バーチャル・リアリティの場合、システム側もかなりの制御権を有する。システム内部に構築された仮想

世界は自律性を持ち、人間側のコントロールのみならず、自らのシミュレーションプログラムに従って、動き続けることができるからである。

このように、バーチャル・リアリティの技術が多様な新規の側面を有するのは、現実が多く要件を有しているからに他ならない。現実がそこにあるとわれわれが納得するための条件を考えてみると、(1)本物そっくりの感覚器入力合成されていること、(2)単に感覚器で感ずるだけでなく、現実に対して、上肢などの効果器によって積極的に働きかけられること、(3)働きかけに対して、現実が首尾一貫した反応を行うこと、などを挙げることができる。

人工的にリアリティを生成するためには、何らかの手段で(1)~(3)の条件を満足させてやる必要がある。図1に、具体的なインプリメントを記す。すなわち、(1)を満足するために、全感覚にわたるいろいろなディスプレイ・システムが必要である。そして、(2)を満足するために、人間側のコントロールをシステムに伝える入力システムが必要である。(3)の条件のためには、システムへの入力と、ディスプレイへの出力を結合するためのシミュレーション・システムを必要とする。ディスプレイ・システムや入力システムは、基本的には、システムと人間とのインタフェースの問題であり、ある意味で、「浅い」リアリティの生成に関係するのに対し、シミュレーション・システムが関係するのは、「深い」リアリティである。本稿では、このうち「浅い」リアリティの生成について述べる。

2. 入力システム

まず最初に、入力システムについて述べよう。このシステムには、人間の身体動作を計算機に直接入力することが求められている。人間と現実との相互作用を考えた場合、ほとんどの場合、体動を介してそれは行われるからである。

基本的な技術として、3次元空間内の位置と姿勢を測定するためのセンサーが必要である。よく利用されるのが、磁気を利用した3次元の空間位置センサーである。これはソースと呼ばれる発振側のコイルにより発生した微弱磁界を、センサーと呼ばれる受信コイルで受け、磁界の方向や強度などから演算を行い、自らの位置を知るといったものである。

さらに、バーチャル・リアリティの技術の特徴づけるのが、データ・グローブに代表されるような装着型のデバイスである。体表面にいろいろなセンサーを取り付けることにより、その変形量を測定しようというものである。データ・グローブを図2に示す。その測定原理は、指にそって装着された光ファイバの光透過率が、指の曲げに応じて変化することを利用している。このデバイスを用いることによって、計算機内部の仮想物体を直観的に操作することが可能である¹⁾。

大きなスケールの身体運動を入力するシステムとして、データ・グローブの測定原理を体全体に拡大し、より大きな身振りの入力を可能にしたデータ・スーツと呼ばれるデバイスも開発されている。

また、さらに大きな動作、たとえば歩行などによる空間内移動をサポートするために、トレッドミルの上で人間を運動させ、それを入力として、広大な仮想空間内の移動を可能にするようなシステムが考案されている。

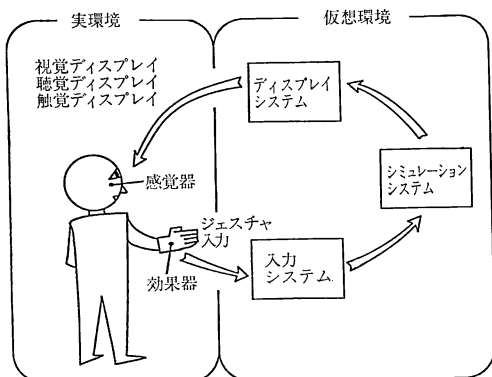


図1 バーチャル・リアリティを生成するためのシステム構成

以上のような、何らかの装着型デバイスを使用するシステム以外にも、たとえばビデオカメラによって身体を撮影し、画像処理によって身体各部位の運動を測定するなどの非装着型のシステムもいろいろ考えられている。特に、最近ではリアルタイムの画像処理技術が進歩してきたため、この分野は、大きく発展する可能性がある。

体動の入力の目的は、大きく分けて、自らの姿勢や視点を設定するためのもの（碎いていえば頭部位置の測定）と、仮想空間内の事物を操作するためのもの（たとえばデータ・グローブによる操作）の二つがある。このうち、後者は、多少の時間遅れや誤差が存在しても、現実感はいくらでも劣化しないが、前者の入力精度についてはかなり神経質になる必要がある。誤差が大きいと、空間失調などの面白くない現象がおこることが知られている。自らの視点を正確に測定するという事は、現実認識において、きわめて大きな意味を持つのである。

3. ディスプレイ・システム

次に、ディスプレイ・システムとしてどのようなものが

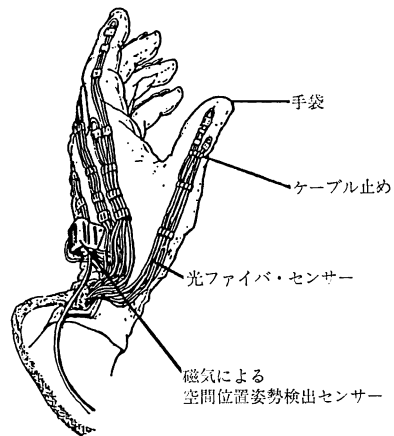


図2 データ・グローブの構成

- 特殊感覚
 - 視覚, 聴覚, 味覚, 嗅覚
 - 前庭感覚(平衡感覚)
 - 皮膚感覚
 - 触圧覚, 温覚, 冷覚, 痛覚
 - 深部感覚
 - 運動覚, 位置覚, 深部圧覚, 深部痛覚
 - 内臓感覚
 - 有機感覚(空腹感, はきけ等), 内臓痛
- } 体性感覚

図3 人間の感覚の分類

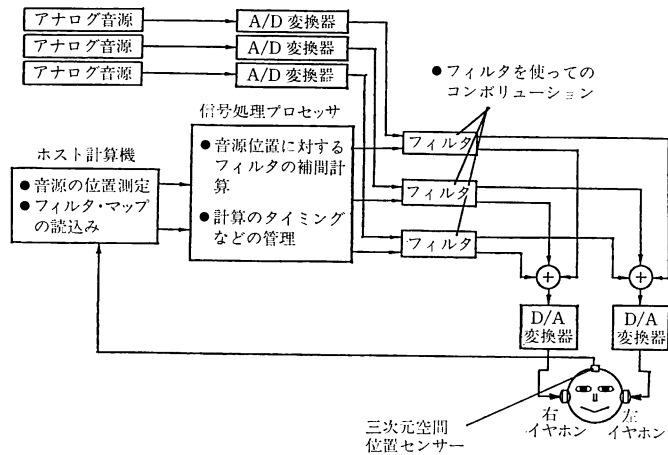


図 4 3次元空間内に音源を定位するシステム (Crystal River 社: Convolvotron)

考えられているかを紹介したい。図3は、人間の感覚を分類したものであるが、このように多岐にわたる感覚チャンネルに対する情報提示がディスプレイの役割である。

ディスプレイのシステムに要求されるのは、いわゆる臨場感である。つまり、それぞれの感覚のレンジの大部分がクオリティの高い合成された情報によって置換されなければならない。

視覚情報は、外界認識において圧倒的であり、われわれが外界から受け取る情報のうち80~90%までが視覚であるときえ言われている。しかしながら、聴覚や触覚などの視覚外情報の役割も少なくない。むしろ現在の情報表示技術が、あまりに視覚偏重であるときえ言えるだろう。

たとえば聴覚は全周囲的な大域的な情報提示を行うことができ、高い指向性をもつ視覚を補完することができる。触覚は、能動的動作によってはじめて得られる情報認識の手段として重要である。嗅覚や味覚はこれまで全く使用されて来なかった情報提示チャンネルである。とくに嗅覚は発生的にみて最も古い感覚であり、視覚のような高い精度や大きな容量は持たない代りに、きわめて安定な情報チャンネルである。

視覚系のディスプレイとしては、超広視野の立体的な映像情報を供給するためにものがいろいろと考えられている。本稿では、これらについて、特に一章を設けて解説する。

聴覚ディスプレイとして注目を集めているのが、音源から鼓膜までの音波型のひずみを、計算機でリアルタイムシミュレーションによって再現し、3次元的に音源の位置を合成できるシステムである。図4に示すのは、三つのモノラル音源を3次元空間内の任意位置におく(定

位させる)ことができるシステムである。頭部位置も計測しているので、頭を傾けたり、移動したとしても、音源の絶対位置は不変である。適切な演算を追加することによって、室内の残響音効果や、壁面による遮音効果なども表現することが可能である²⁾。

聴覚の使用は、先述のような指向性の改善のほかに、不完全な視覚情報を補完するという意味においても重要である。たとえば現在、コンピュータ・グラフィクスによって、リアルタイムで描ける映像の品質は、あまり高いものではない。このとき、ごく簡単な聴覚情報をつけ加えてやることはきわめて有効である。また、その逆の例としては、音像の定位精度がそれほど高くなくとも、視覚的に音源を表示してやることによって、多少の誤差があっても、その位置に引き込まれて感じるということもある。

さて、映像と音に加えて、触覚を合成することも今や可能である。触覚の存在によって、仮想現実の存在への確信は、きわめて高いものになるであろう³⁾。

たとえば、図5は、微小な面提示用小片を指先とともに移動させ、現実には存在しない表面を表現するという、モック・サーフェスの手法を採用したものである。これは十分高速に動作する直角座標マニピュレータにより、指が物体表面に接近したとき、その近傍に微小な接平面を提示することが可能である⁴⁾。

4. 視覚ディスプレイと HMD

視覚ディスプレイの役割は、視覚的臨場感の生成である。視覚的臨場感を生成する要因としては、(1)広い視界の広がり、(2)立体的な映像表示、(3)高い精細度、などを挙げることができる。特に重要視されているのが

(1)の要因であって、自己投射の感覚あるいは没入感の生成のためには不可欠である。

いま、ブラウン管に、ローリングするカメラによって撮影された海の水平線が表示されているとする。通常のブラウン管を見ているだけならば、水平線の映像がゆれているとだけしか感じない。しかしながら、その映像が非常に大きなスクリーンに投影されており、視野角が数十度以上であれば、見ている人間の体が動揺をはじめることがわかっている。すなわち、映像世界への没入が始まるのである。

広い視野を与えるためには、オムニマックスのような全天周型のスクリーンが良く使用されるが、この場合、装置が大袈裟になる、あるいは映像との密接なインタラクションが図れないなど、多くの問題が存在する。

そこで提案されているのが図6に示すようなヘッド・マウント・ディスプレイ(HMD)である。この装置は、眼前に小型のディスプレイ装置を置いたもので、頭部の位置や向きを計測し、視線方向の映像を与えてやれば、それをかぶった人間は、広大な映像空間を見回すことができる。HMDは、特に頭部の移動にともなう視線変化による立体感、すなわち動眼視差をもサポートするため、3次元世界の提示能力はきわめて高い⁵⁾。

HMDの技術的課題のひとつは、頭部の運動に映像表示を遅延なく追従させることである。たとえば、HMDの向きを急に変えた場合、頭部センサーからの出力は図7のように数百ms程度遅れているのが現状である。この時間遅れの内容は、(1)センサー出力それ自身の遅れ、(2)グラフィクス描画の遅れ、(3)計算機間の通信遅れなどからなる。どれが支配的かは場合によって異なり、単純に比較はできないが、著者の研究室のシステムの実測結果をみるかぎり、どの要素もほぼ同様の寄与をしている。

どの程度の時間遅れまで許されるかについてであるが、予備的な研究の結果では、1000msすなわち、1秒の時間遅れがあると、空間認識力が大きく阻害されることがわかっている。たとえば、図8は、HMDをかぶった人間の前方に、周期的な運動を行う立方体を表示し、どの程度の動きまで見直し追従できるかを調べたものである。センサーからの信号に人為的な遅れを付加するにつれて、追従エラーは増大し、1000ms以上の遅れでは、空間失調とまではいかないまでも、かなり深刻な影響が認められる。

1000msという数字は、たとえばHMDをテレロボティクスや臨場感通信の分野で使用しようとする場合問題になる。この程度の通信時間遅れは容易に生じてしまうからである。たとえば、低軌道上の衛星と交信する場



図6 Head mounted display (HMD) の一例 (VPL社 Eyephone)

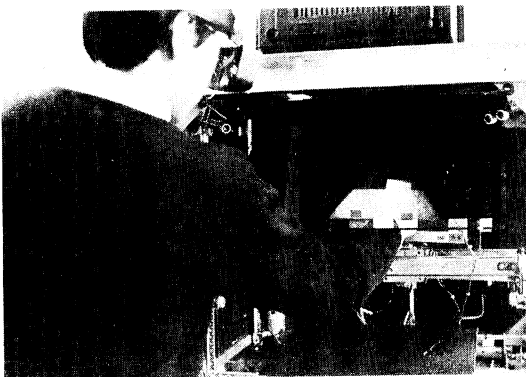


図5 触覚ディスプレイ

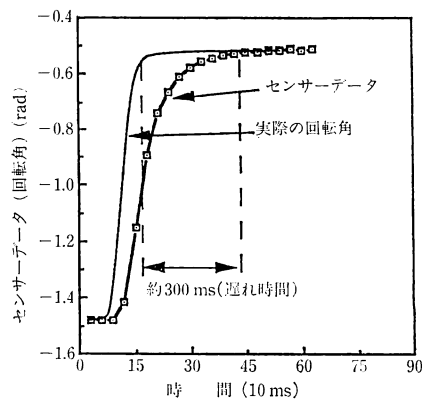


図7 頭部センサーのデータの時間遅れ

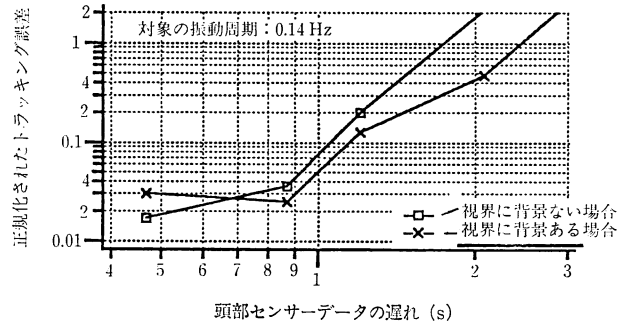


図 8 頭部センサーの時間遅れが対象のトラッキングにおよぼす影響

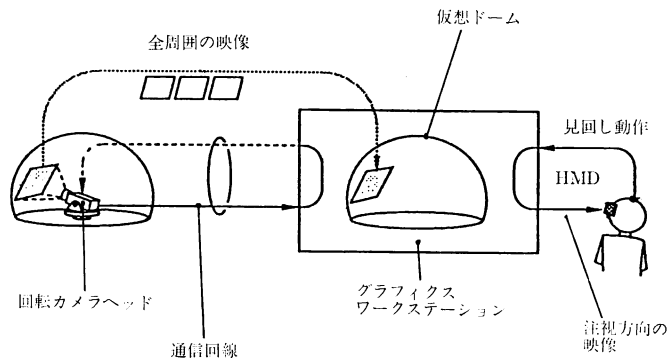


図 9 バーチャル・ドームによる臨場感の伝達

合、いくつかの中継局を通過するだけで、1～2秒の遅れが発生するといわれている。たとえば、火星上にロボットが存在する場合、この遅れは数分以上のオーダーになる。

こういう状況に対応して、著者の研究室では、図9に示すようなバーチャル・ドームと呼ばれるシステムを提案している。これは、遠方の状況を全周囲にわたって取り込むための回転カメラヘッドと、その情報を受け取り、内部の仮想のドーム形スクリーンにテキスト・マップするグラフィクス・ワークステーションからなる。観察者はHMDによって、この仮想ドームを眺めまわすことが可能である。これによって、遠方の状況そのものの時間遅れは克服できないが、3次元状況の認識に必要な見回し動作にかかわる時間遅れを除外することができる⁶⁾。

この遅れの問題は、HMDがシースルーの場合、さらに深刻である。図10は著者の研究室で開発中のシースルー型HMD (STHMD) である。STHMDを用いれば、仮想空間を実空間にスーパーインポーズすることができる。STHMDは、外界情報を積極的に利用できるため、視界すべての映像を合成しなくともすむこと、仮

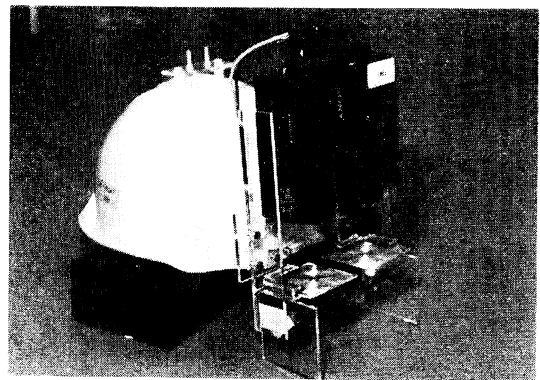


図 10 シースルー型の HMD (STHMD)

想でも現実でもない新しい空間を造出でき、新しいアプリケーションの可能性が広がることなど、いくつかの利点を有する⁷⁾。

もちろん、外界というレファレンスが存在するだけに生成される仮想空間の精度は高い必要があり、先述のように新たな問題が生じるわけで、時間遅れの克服については、予測手段を用いてセンサー出力を補償することなどの工夫が必要である。しかし、空間失調に関しては外界が見えている分だけ影響は小さくなる。

また、透視変換についても、完全なキャリブレーションが必要である。しかしながら、外界とのキャリブレーション自身は、むしろ、やりやすくなっているはずで、体性感覚にぴったり合成した表示を行うという面については、むしろ、これらの方が容易であるという考え方もできる。

HMDの開発におけるもうひとつの技術的課題は、高精細かつ軽量の小型ディスプレイの入手である。図11は、1980年ごろ、米空軍ライト・パターン基地で試作されたVCASSと呼ばれる、新しい航空機コックピットのプロトタイプにおいて使用されたHMDであり、この内部にはかなり大きなCRTが搭載されている。

昨今のHMDはCRTではなく、軽量のLCD(液晶ディスプレイ)を使用している。この場合の最大の問題点は、満足な解像度とコントラストが得られないという点である。先に図6に示したアイフォンでは、その解像度は 360×240 であり、この程度では、仮想空間内に文字を表示することすら不可能である。満足できる映像の供給のためには、少なくとも $1,000 \times 1,000$ 程度の解像度は欲しいところである。現在、 500×600 程度のものが商品としては販売されているが、価格的にかなり高いものとなっている。

もしも現在の技術で高い解像度を得ようとすると、CRTを使用せざるを得ない。たとえば、NASAの仮想風洞プロジェクトで使われているBOOMというデバイスは、ステレオ視が可能なCRTを6自由度のリンク機



図11 VCASSシステムに使用されたHMD。未来の航空計器のあり方を研究するためのシステムである。

構によって懸架したものである(図12)。若干の拘束はあるものの、カウンタウイトによりリンクが重力補償されており、任意位置に自由にビューアを移動させることが可能である。この場合、リンクの姿勢をエンコーダで測定すれば良いため、先述の空間位置センサーの精度の問題も同時に解決されている⁸⁾。

また、厳密な意味ではHMDではないが、頭部に搭載できる小型の表示器として、図13に示すようなprivate eyeなるデバイスも開発されている。これは、1次元の発光ダイオードアレーの発光パターンを振動ミラーを用いて振動させ、目の残像現象を利用して2次元パターンを得ようというものである(ミラー位置に応じて、アレーの発光パターンが動的に変化することは言うまでもな



図12 NASA“仮想風洞”に使用のBOOM

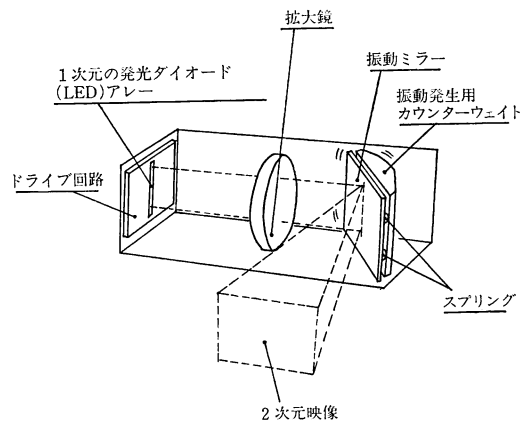


図13 Private eyeの表示原理

い). このデバイスは2値表示しかできないが, きわめて軽量かつ高精細度 (280×720) であるため, LCD とは別の可能性を有していると言える⁹⁾.

もっとも LCD の開発に関しては, 今後よりいっそうの改善が進展するはずであり, 早晚, 高性能かつ安価な HMD が入手できるものと期待している. 特に, 小型化に関しては, VTR カメラのビューファインダ用にいるような製品開発が行われている. たとえば, 図 14 は, セイコーエプソン社製 0.7 インチの LCD パネルを利用して, 解像度は, 200×300 程度ではあるものの, 大幅な軽量化に成功した例である. この HMD の総重量はケーブルを含めて約 200 g であり, もう少しで通常の眼鏡に近づくことができる¹⁰⁾.

HMD の最後の問題点が, 視野角の問題点である. 先述のように, 没入感を生成するために必要な 100 度近い視野角をもって映像を表示する光学系を構成するためには, かなりの工夫が必要であり, HMD の重量においてレンズ系の占める割合は決して少なくない. 現在の HMD には, かなり重量のある分厚いレンズが使用されているが, 最近では, フレネル・レンズ等を活用して軽量化を試みている製品も発表されている.

より広視野を追及することも試みられている. 図 15 は, Concept Vision 社の ARVIS というシステムで, このシステムには片目 180°, 両眼で 240° という超広視野の表示が可能である. このシステムの特徴は光学系にあって, 図 16 に示すような特殊なレンズが使用されている. このレンズは, 光ファイバーを一方向に並べて固化したもので, 一方の平面に結像した画像を他方の曲面にいわばテキスチャ・マップすることが可能である. ARVIS では, 特殊な高解像度ディスプレイを使用して, その平面に像を結ばせるようになっている. この曲

面は, 眼球近傍に置かれ, 小型の球状スクリーンとして機能する. ユーザーは, この近傍のスクリーンをコンタクトレンズをはめて眺めるというわけである. 映像は, 魚眼に近いレンズを装着した TV カメラからのものが使用されており, 多少の歪みはあるものの, 今までにない臨場感を味わうことができる¹¹⁾.

5. 応用と将来展望

人工現実感の技術は, いま始まったばかりの技術であって, それが将来, どのような使われ方をされるようになるかを予測することはきわめて難しい. 技術全体にいえることであるが, それが設計者の企てと全く異なった使われ方をしてこそ, 技術が本格的に一般的になったといえることができるのである. したがって, 今, ここで述

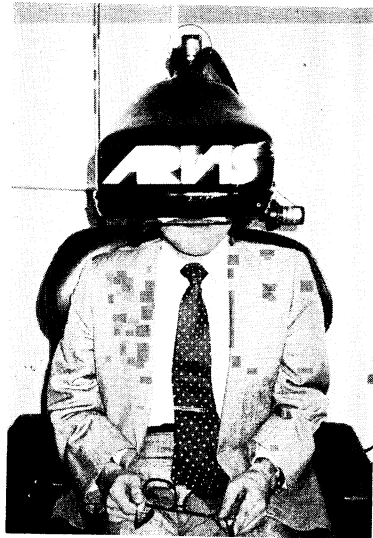


図 15 超広視野角 (240°) の HMD (Concept Vision 社: ARVIS)



図 14 超軽量の HMD (EPSON 0.7 インチ液晶パネル使用)

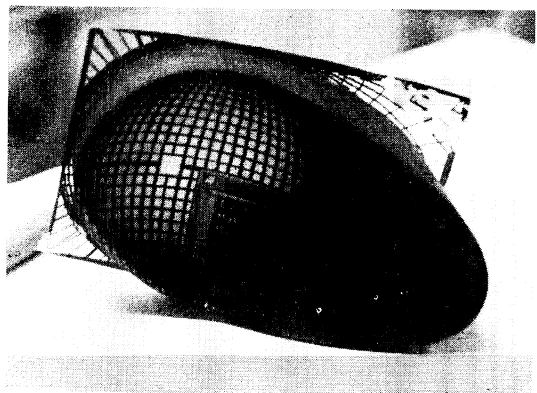


図 16 ARVIS 用特殊レンズ表面に映った裏面のパターン

べることは、設計者の考えた「常識的な」将来でしかない。

この技術の特質の第一は、情報をわれわれの直観に訴えて可視化することができるという点である。計算機内部の無味乾燥なビット列も、人工現実感の技術によって、生きた情報として役立つというわけである。たとえば、NASA、JPL(ジェット推進研究所)では、惑星探査機からの複雑にコード化された情報にもとづいて、未知の惑星表面を映像化し、だれもが体験することを可能としている。また、東京大学と東京電力は、ネットワークを介して結合された計算機網のプログラムを、仮想空間内に可視化する研究を行っている。もともと形の無いソフトウェアに、形を与えることによって、より直観的管理が可能になるというわけである¹²⁾。

可視化の能力は、人間のいろいろなアイデアを、具体化する上で、きわめて重要である。機械設計や建築設計などの分野において、設計案を実際に試作することなしに、ソフトウェアレベルでいろいろに試行錯誤が可能になることは大きな意味を持つ。

さて、もうひとつの重要な応用分野がコミュニケーションの技術との融合領域に存在する。すなわち、遠方の世界を臨場感そのままに体験することが可能になるというわけである。遠方に投入されたロボットの制御や、地域的に分散した人々の共同作業の支援などに、この技術は威力を発揮する。

ところで、人工現実感の技術が、これまでの計算機技術と性格を異にする点は、以上の応用分野からもわかるように、人間要素を抜きにしては語れないという点である。1980年代前半までは、計算機それ自体の能力向上を目的とした研究開発努力が重点的に推進されてきたといえる。しかしながら、人工現実感の技術が示唆する計算機の使い方、あるいは技術開発の方向は、かなり違う方向である。すなわち、計算機によって、人間の作業のす

べてを代替してしまうのではなく、むしろ計算機は脇役に回り、人間の能力をより大きく開花させるために役立つよというわけである。こうした計算機の未来像はここしばらくの間、色あせることなく、われわれを魅了して止まないであろう。

文 献

- 1) T. G. Zimmerman, *et al.*: "A hand lecture interface device," Proc. CHI+GI 1987 Conf. (1987) pp. 189-192.
- 2) E. Wenzel, *et al.*: "The convolvotron: Realtime synthesis of out of head localization," Joint Meeting of the Acoustic Soc. of America and Japan (1988).
- 3) F. P. Brooks: "Project GROPE—Haptic displays for scientific visualization," ACM SIGGRAPH '90, **24**, 4 (1990) 177-185.
- 4) 広田光一, 廣瀬通孝, 石井威望: "仮想空間操作における触覚の役割に関する研究", 日本機械学会第68期通常総会講演論文集, No. 910-17, Vol. C (1991) pp. 404-406.
- 5) I. Sutherland: "A head mounted three dimensional display," Fall Joint Computer Conf., **3** (1968) pp. 757-764.
- 6) M. Hirose: "A study on synthetic visual sensation through artificial reality," Proc. 7th Symp. on Human Interface (1991) pp. 675-682.
- 7) 廣瀬通孝: "透過型頭部搭載型ディスプレイ(STHMD)の開発", 第6回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集 (1990) pp. 1-8.
- 8) S. Bryson: "A virtual environment for the exploration of three dimensional steady flows," Proc. Int. Symp. on Artificial Reality and Tele-existence (1991) pp. 15-24.
- 9) A. Becker: "Design case study: Private eye," Inform. Display, No. 3 (1990) 8-11.
- 10) M. Hirose: "Visualization tool applications of artificial reality," Proc. Int. Symp. on Artificial Reality and Tele-existence (1991) pp. 95-102.
- 11) J. A. Webster: "Extreme wide field-of-view displays and the enclosed cockpit," Proc. IEEE Digital Avionic Conf. (1991).
- 12) M. Hirose: "Development of visual 3D virtual environment for control software," Proc. Engineering Conf. on Human Interfaces for Teleoperators and Virtual Environments (1990).