

人工現実感技術の周辺

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

1. はじめに

人工現実感の技術とは、コンピュータによりつくり出された人工の世界を人間の周囲に発生させ、あたかもその内部に没入したかのごとき感覚を得ようという技術である(図1)。

この技術の直接のルーツはI. Sutherlandによる“究極のディスプレイ”¹⁾であると言われている。これは、1968年、彼が従来の2次元であるCRT上のコンピュータ・グラフィクスにあきたらず、さわったり、見回したりできる3次元の合成画像の合成を目標として作り上げたプロトタイプである。この研究は以降、多くの研究者の創造力を触発し、大きく発展することとなる。

また一方、「人工現実感」という言葉を初めて使ったのは、Myron Kruegerである。著書“Artificial reality”²⁾の中で、彼は、人間の動

作にリアルタイムで反応する環境, responsive environment を提案している。これは、人間の動作を検出する多数のセンサと、動作に対する反応をビジュアルに表示するための大スクリーンを有する実験的空間である。

この技術の新規性については、以下に述べる3つに分けて考えることが出来るであろう。すなわちまず、(1)仮想空間を発生させるために使用されるHMDや、データ・グローブなどのような「奇妙な」インタフェースデバイスとしての新規性、(2)コンピュータによる人工空間に「没入する」という概念それ自体の新規性、さらに(3)コンピュータの内部に現実世界における物体と相似な存在を作り上げることが出来る、つまり究極のシミュレータとしての新規性を考えることが出来る。

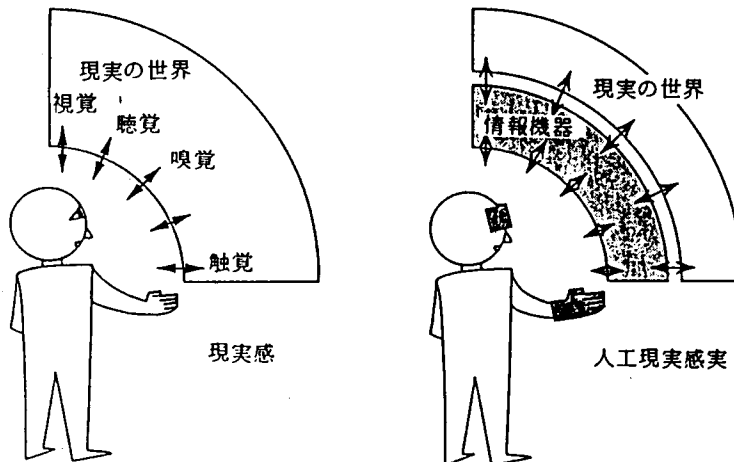


図1 “現実感”と“人工現実感”

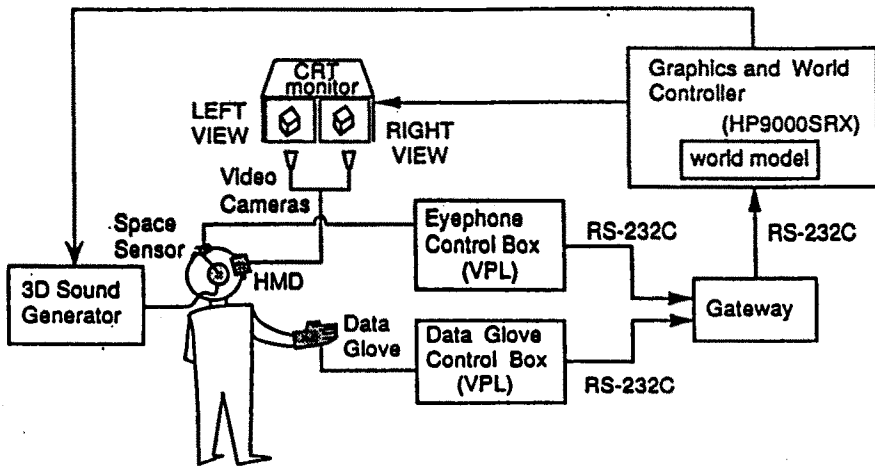


図2 外見型システムの基本構成

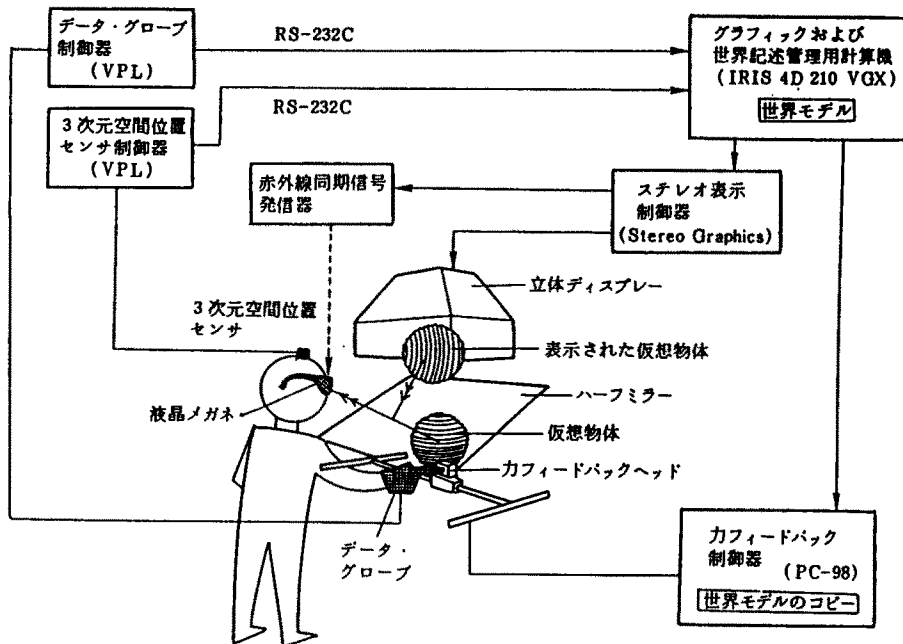


図3 内見型システムの基本構成

2. 仮想環境とのインタフェース・デバイス

まず第一の側面である、インタフェース・デバイスについて、紹介することとしよう。著者の研究室におけるシステムの代表的構成例を図2および図3に示す。この2つのタイプは、いわば外界システムと内界システムと区別して呼ばれている。前者は、ユーザの全周囲にわたって仮想環境をはりめぐらせることが可能なシ

テムである。つまり、非常に大きな操作空間を生成しうる。このシステムは、操作の自由度が大きいこと、などの点では理想的であるが、小型ディスプレイを使用するためにどうしても高解像度の画面を供給し得ないこと、大空間におけるカフィードバックが現状では不可能なこと、ヘルメットに対する利用者側のアレルギーが予想外に大きいこと、などなどきめ細かなインタ

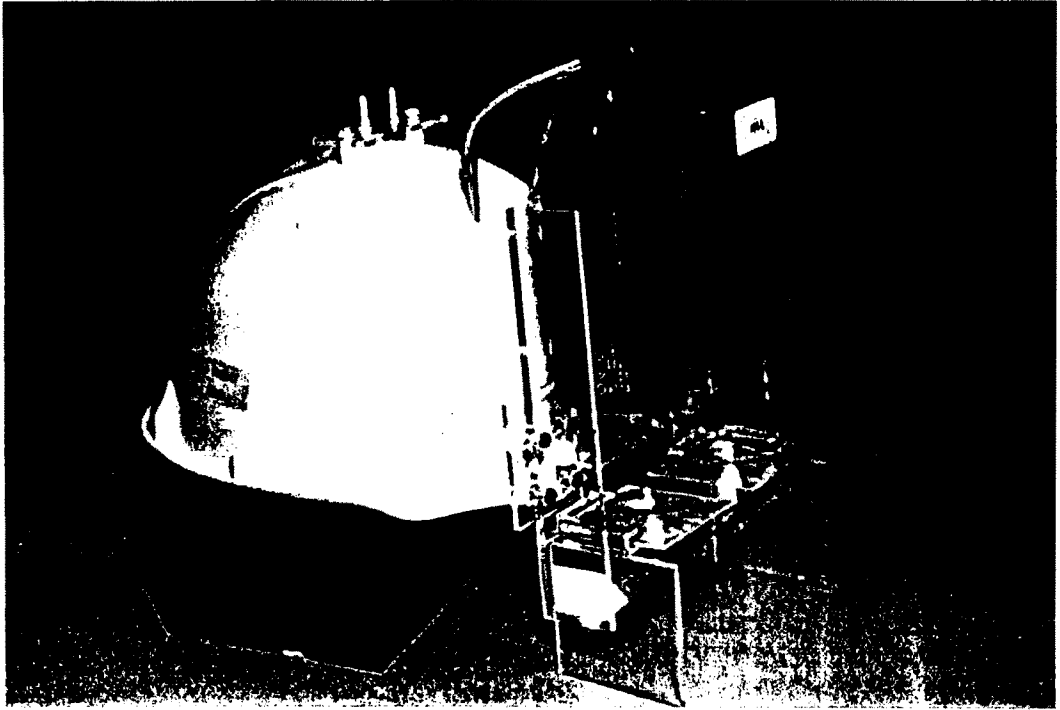


図4 SHMD

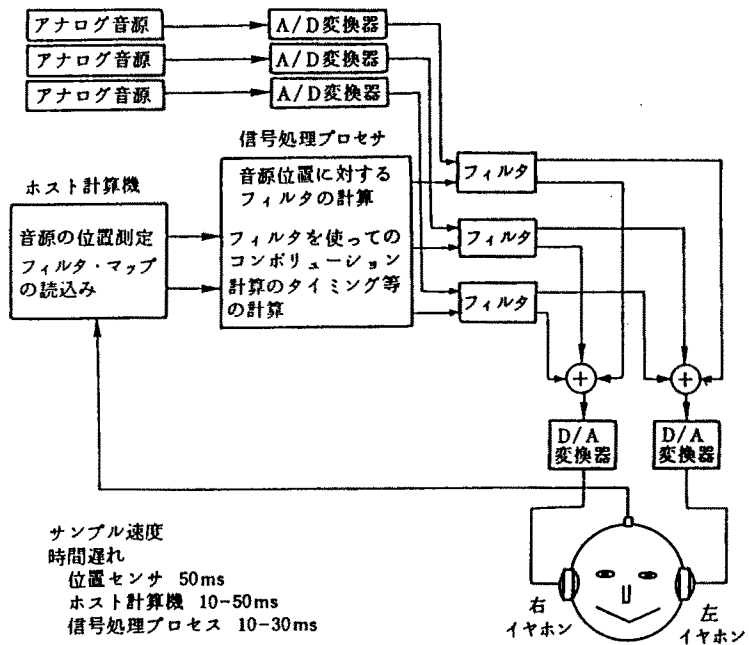


図5 3D音場システム

フェースにはむいていない。建築CAD，テロロボティクスなどが代表的なアプリケーションである。

それに対して，後者は目の前のごく限られた空間に構築された仮想環境である。空間の広がりには限定されるが，力覚・触覚などを使うことも出来るし，解像度の高いきめ細かい仮想環境の提示が可能である。機械CAD，その他の視覚化ツールとして有効である。

以下，システムの構成要素について，やや細かい説明を記す。

2.1 外界型システム

先述のように外界型システムは，視覚系ディスプレイとして，HMD (Helmet Mounted Display) を使用する。HMDには，常に視線方向（厳密には頭部の方向）の画像を供給するため，頭部位置センサと併せて用いられている。HMDは全体として，非常に大きな視野（全立体角）を有するが，HMDに使用する小型CRTの画素数の制約から，一度に見える画面の情報量は必ずしも多くない。

また，最近，著者が特に興味を持って開発を進めているのが，いわゆるシースルー型のHMD (STHMD) である（図4）。通常のHMDでは実空間を完全に遮断してしまうのに対し，STHMDを使えば仮想空間と実空間を同時に眺めることができる。つまり両者の共存が可能であり，それによって，アプリケーションの幅も大きく広がることが期待される。ただし，視野内部に実空間というレファレンスが存在するため，表示の空間的・時間的精度はかなり高いものが要求される。

聴覚系として，最も進歩したシステムは，音源から鼓膜への伝達関数を計算して，イヤホンを使用して，高い精度で3D空間内の任意位置に音源を置くことのできるシステムである。（詳細は図5）これは，耳たぶなどによって，鼓膜への伝達係数が，音源と頭との相対的位置関係によって異なることを利用している。すなわち，まず，音源の各位置に対応する伝達係数を各周波数ごとにあらかじめ計測して概略のMAPを作成しておく。そのうえで，頭部の空間位置セ

ンサからの信号から，音源の相対位置を計算し，それに基づいて，正確な伝達係数を補間計算によって求める。求められた伝達係数と音源から，convolution 計算により，左右両用の音源信号を発生するというのが基本原理である。

センシングシステムとしてはVPL社開発のデータ・グローブ（図6）を使用している。これは，光ファイバの透過率が曲げによって変化することを利用して，指にそってはわせた光ファイバの透過率を測定して，指の曲がりを計測し，手のジェスチャを計算機に入力しようというものである。データ・グローブは，指1本あたり2，合計10自由度の入力を持つ（位置姿勢まで入れれば16自由度）。同様の原理で体全体の動作を測定するデータスーツも発表されている。データグローブは力覚フィードバックが困難であるという欠点を有するが，これだけ大量の同時入力チャンネルをもつデバイスは他に類を見ない。

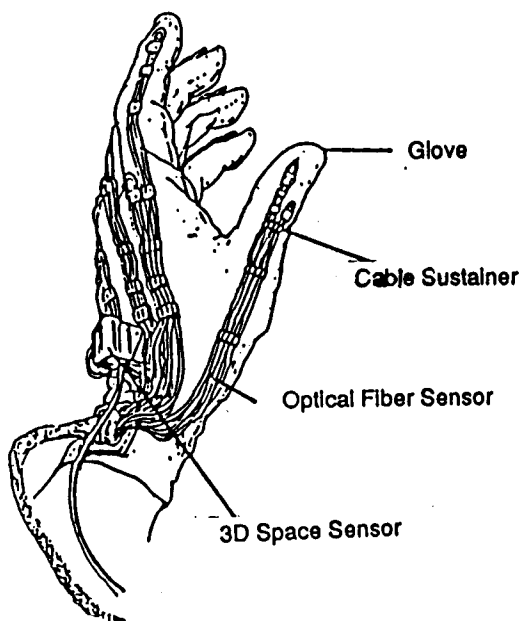


図6 データ・グローブ

2.2 内界型システム

内界型のシステムは、視覚ディスプレイとして、HMDの代わりに、液晶シャッター式のステレオCRTを利用したものである。先述のように、通常のCRTを使用するため、外界型システムと比較してこのシステムは、有効表示範囲が利用者前面のデスクトップ近傍に限定されるため、造出される仮想空間の大きさは比較的小さい。

両眼視差によって、立体像があたかもそこにあるかのごとく再生されるためには、利用者の頭部位置と、CRT管面との位置関係を厳密に管理する必要がある。本システムでは超音波センサ4個を使用して、利用者の液晶メガネに取り付けられた超音波発信子の位置を計測し、視線方向に応じた描画をおこなっている。さらにディスプレイ自体も回転するようになっており、それに応じて描画も制御される。これによって、ほとんど實際上、ホログラフィと同様な効果を得ることができる。(内界型システムは、通称バーチャルホログラフィと呼ばれている。)

また、このシステムに特徴的なのが、触覚フィードバック装置である。これは、基本的には直交座標型のマニプレータであり、この装置を使用して力を発生させたり、指先を拘束させたりすることが出来る。力帰還部の拡大図を図

7に示す。まず、利用者は永久磁石のリングをはめた指を力帰還ヘッドの穴に挿入する。力帰還ヘッドは通常センサからの情報により、常に指のリングから一定の距離を保つように制御されている。指先と仮想物体が干渉する位置に来た場合、ヘッドはその位置でロックされ、その結果指はそれ以上、物体の中に入って進むことが出来ず、物体面をなぞることになる。

3. 技術的諸問題

さて、以上に述べたようなプロトタイプシステムを使用した結果、より洗練されたシステムを構築するためには、以下に述べるような問題点の克服が必要であることがわかって来た。

3.1 インタフェース・ハードウェアについて

3.1.1 高能力HMDの開発

外界型システムにおけるネックのひとつがHMDの画素数である。現在の商品では200×200ドット程度でしかないが、現在すでに20万画素程度のLCDデバイスは、試験的には開発されている。また、ハイビジョン対応のLCDも、現在やや大きいものの、小型と呼べるものが開発されている。つまり、1000×1000ドットの表示が可能になりつつある。従って、著者は、この問題については、長期的には解決されて行く

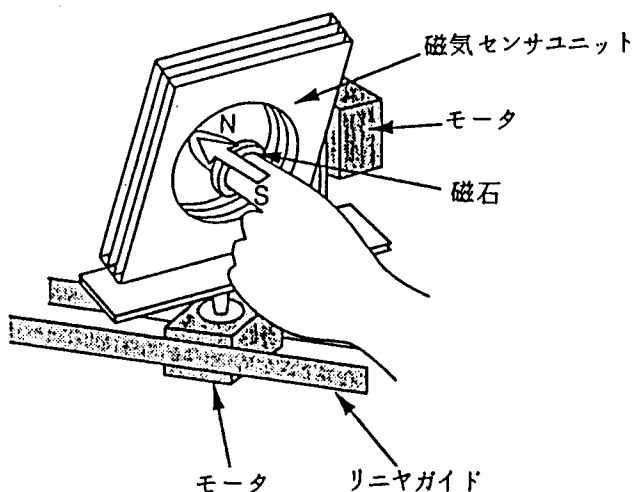


図7 力帰還ヘッド部拡大図

ものと考えており、楽観的である。

3.1.2 空間位置センサ

人工現実感のシステムでは、三次元空間内の位置と姿勢を検出するためのセンサが多用される。現在最も良く使用されているのが、磁気によるもの（3D Space Isotrac; 通称 Polhemus センサ）で、source と呼ばれる互いに直交する3個のコイルから時分割で発生する磁場を、同様の3個のコイル（sensor）で計測し、その3×3個の情報から sensor の空間位置と姿勢を算出するという原理である。このセンサは、コンパクトさ、使用の容易さという点では理想的であるが、数100msec の時間遅れを有しており、とくにHMD用の画面駆動に使用する場合、急激な頭部移動に対応できない場合がある。人間の頭部移動や眼球運動により、網膜上の画像は常に変化しているが、その動きが随意的なものである限り、周囲の運動・静止の状況は正しく認識できるが、外部力によって強制的に加えられた運動を補償することはできない。このとき、視覚系と、姿勢感覚に違和感を生じ、いわゆる乗物酔いの現象が生じる。センサの誤差は、これと同様の現象をひきおこし、いわゆるAR酔いの原因となることがある。

著者の研究室では、予測を行ったり、ジャイロや加速度計のように、微分成分に高速に反応するセンサとの併用を考えている。すなわち、いわゆるセンサ・フュージョンによるセンサの応答性改善の試みがさかんに行われている。

センサのもうひとつの問題点は、センシングのレンジレベルである。現在のシステムで、人間が動きまわられるのは、約2m立方である。より広いアプリケーションのためには、10m、100m、1000mと、それぞれのレンジに合わせたシステムの開発が不可欠である。たとえば、磁気とは別の方法論としては、光学的方法（例えば2台のカメラの画像から、三角測量の原理で三次元座標を求める方法）超音波による方法（超音波発信器からの信号が受信器に到達するまでの時間をいくつかの発信器あるいは受信器の組合せについて計測し、それから現在位置を算出する方法）等を挙げることができる。ノー

スカロライナ大のF. Brooksらは光学的方法を用いて約10m立方の仮想環境を実現している³⁾。

3.2 ソフトウェアについて

完全なハードウェアが出来たとしても、その上に記述されるソフトウェアによって、感じる現実感の優劣は大きく左右される。

3.2.1 視覚的3D Cue

洗練された仮想環境を作り上げるためには、仮想の三次元空間を臨場感を持って視覚表示できなければならない。仮想空間内の作業において、最も重要なファクタのひとつは両眼視差による立体視である。とくに、作業対象物に対する知識が全くない場合、立体視があるとないのでは作業誤差において約2倍の差が認められる。対象物の大きさなどの先見的知識がある場合、大きさによる3D Cueが使用可能であり、これは立体視の効果をある程度代替する。

その他の視覚的3D Cueとしては、影、明度、彩度等が考えられこれらの総合的使用が極めて有効であることはいうまでもない。しかしながら、3D Cueの豊富な使用は一方で大きな計算負荷となるため、画面の表示速度が低下する。画面の表示速度は、最低15Hzは必要であると言われているため、計算機能力に応じたトレードオフが必要である。

3.2.2 入力システムと出力システムの座標的整合

上記の視覚をはじめとする出力系単体としての臨場感に加えて重要なのが、視覚と動作の統合関係である。入力情報すなわちユーザの体の動き（手の動き、頭の動き）が、正しく視覚表示に反映されなければならない。つまり、計算機内部の座標表現と現実の座標表現との関係が正確である必要がある。前者は、仮想物体を出力サブシステムにより提示する場合に必要であり、感覚器が感ずる座標系である。入力サブシステムからの入力、後者で表現される。

座標系の整合は、空間的意味と時間的意味の2つを考慮する必要がある。空間的意味とは深部知覚の問題である。人間はある種の内界センサを持ち、深部知覚と呼ばれる内的な座標系を有している。したがって、空間センサの非線形

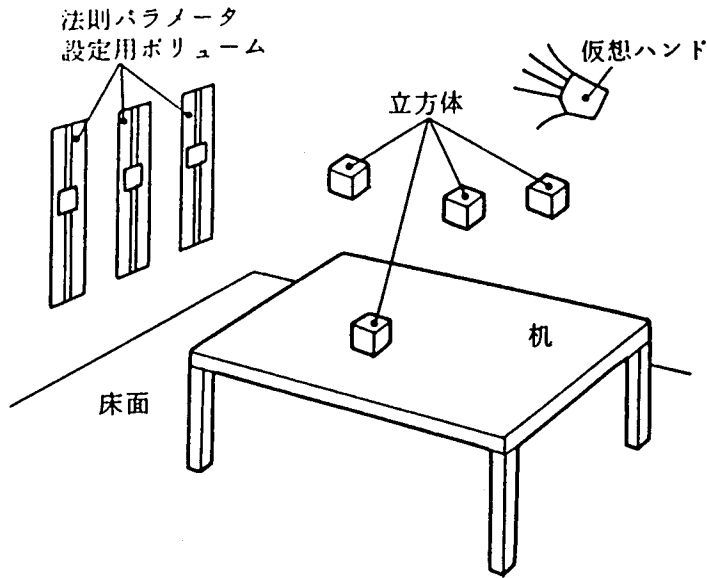


図8 単純な物理的世界のシミュレーション

性等によって、出力システムの座標系がそれと大きく異なった場合、少なからざる違和感を生じる。STHMDを用いる場合、現実空間がレファレンスとして存在するため、座標的整合に関する要求水準はさらに高くなる。

3.2.3 世界の記述手法

もともと、計算機の中にある種の世界が感じられるためには、入力と出力の因果関係がはっきりと定義されていることが必要である。たとえば、仮想物体を押した場合の結果について、プログラムで規定してやる必要がある。それによって作られる仮想空間内の因果関係の連鎖がいわゆる世界法則である。

本格的な仮想環境においては、このために膨大な計算量が必要となる。たとえば、1000個の物体が相互干渉する世界の計算には、1,000,000 MFlopsの演算速度が必要であると言われている。従って、何等かの単純化、演算の高速化の方法論が必要であり、これがこの分野における基礎理論の一つとなる。

このような世界記述の手法について考えることは、いわば計算機システムであれば、OS（オペレーティング・システム）について考えるこ

とに他ならない。著者の研究室では、この問題について具体的に考えるために、いくつかの仮想世界の記述を試みている。代表的なのが、図8に示すような、物理的世界のシミュレータである。この世界は、図に示すように、床面、テーブル、運動する4つの立方体から成っている。立方体は、データ・グローブによって駆動される「仮想の手」によって、把んだり、はなしたりすることが可能である。また、さらに3つのボリュームがついており、

- (1) 世界の空気抵抗の大きさ
- (2) 世界の重力
- (3) 物体相互間の反発係数

の3つの世界を支配する力学法則のパラメータを操作することが出来るようになっている。

たとえば、重力=1G、空気抵抗=0、反発係数=1として、シミュレーションを開始すると、立方体は、机上で無限の反射、落下を繰り返す。ここで、空気抵抗のパラメータを大きくしていくと、抵抗力によるブレーキがかかり、立方体は机上に静止する。さらに、重力=0Gとすれば、持ち上げられた立方体は空中に静止する。もっとも、このシミュレータには、表面の裏表がイ

ンプリメントされていないために、テーブルの裏面から表面の立方体をつかめたりする。

4. 想定されるアプリケーションと技術的意義

人工現実感の技術のアプリケーションとして考えられている分野のうち、代表的なものは以下のものである。

- [1] テレロボティクス
- [2] プレゼンテーション
- [3] CAD/CAM
- [4] ビジュアライゼーション
- [5] 臨場間通信
- [6] 医療
- [7] 教育
- [8] エンターテイメント

このように、人工現実感の技術が影響を与えると予想される分野は極めて広い。

1990年代には、技術体系を人間中心に組み替えるという、大規模なパラダイムシフトが進展するであろう。そのなかにあつて、人工現実感技術の役割は、きわめて大きいものがあると考えられる。

なお、詳細については文献⁴⁻⁹⁾を参照していただきたい。

文 献

- 1) I. Sutherland: A head-mounted three dimensional display. *FJCC*, **33**, 1968.
- 2) M. Krueger: Artificial reality. Addison-Wesley, 1982.
- 3) F. Brooks: Grasping reality through illusion. *ACMSIGCHI*, 1988.
- 4) 廣瀬通孝: 3次元立体視におけるマン・マシン・インターフェイス. 第1回ヒューマン・インターフェイス・シンポジウム論文集, 105-108, 1985.
- 5) 廣瀬通孝: 人工現実感の生成. システム/制御/情報, **33**, 590-597, 1989.
- 6) M. Hirose: Development of visual 3D virtual environment for control software. *Proceeding of Engineering conference on Human Interfaces*

for Teleoperators and Virtual Environments, 120-124, 1990.

- 7) 廣瀬通孝: 透過型頭部搭載ディスプレイ (STHMD) の開発. 第6回ヒューマン・インターフェイス・シンポジウム論文集, 1-8, 1990.
- 8) 廣瀬通孝: 人工現実感はどこまで実現するか. 日本機械学会誌, **93**, 874-880, 1990.
- 9) 廣瀬通孝: 人工現実感とコラボレーション. 計測と制御, **30**, 457-464, 1991.