

## 《小特集》

## 人工現実感とシミュレータ

岩田 洋夫\*

**ABSTRACT** Artificial reality is a configuration of human interface presenting computer-generated virtual world to sense organs such as eyes, ears, skins, and so on. The major objective of artificial reality is to amplify human intelligence by natural communication between computer and human being. This paper presents brief history of artificial reality and current topics: force display and virtual space walking system. Force display is a virtual space operation system, combining real-time computer graphics and force feedback device. This paper describes issues of artificial reality technology and examples of currently developed systems. Expected application areas and future direction are discussed.

## 1. はじめに

近年、急速な計算機の性能向上に伴い、従来オフラインでしか描けなかったようなリアルなコンピュータ・グラフィックスが実時間で表示できるようになってきている。そして、操作入力に対応して即座に画を動かすといったインタラクティブな用途が拡大しつつある。このような技術動向の延長上に、人間の動作をセンサーで検出して映像を同期させるという「人工現実感」が提唱されるようになった。人工現実感という術語に定義を与えるとすれば、人間が現実を認識するための五感、すなわち視覚、聴覚、触覚、臭覚、味覚といった感覚チャネルに対して、メディア機器を挿入することにより、全く仮空の世界を人間の周囲に再現するものということができる。

情報技術を用いて人間に仮空の世界を提示する技術は、航空機や自動車の訓練用シミュレータにおいてすでに存在していた。事実、後述する米国空軍が進める次世代コックピット技術開発計画においては、訓練用シミュレータと共通のインタフェースが利用される。しかしながら、人工現実感研究のめざすものは計算機のもつ情報世界と人間との間に円滑なコミュニケーションを実現しようとするものである。すなわち、計算機が潜在的にもっている人間の思考を拡張する機能を、最大限生かそうとする試みが人工現実感であるといえる。この点が、特定の対象に関する訓練を目的としたシミュレータとの根本的な違いである。むしろ、後に

紹介する分子グラフィックスのような数値シミュレーションとその可視化技術といった研究領域が人工現実感と関連をもってくることが予想される。

本稿では、このような観点から人工現実感研究の現状を概観するとともに将来的な課題について考察を加えてみたい。

## 2. 人工現実感に関するこれまでの研究の推移

人工現実感に相当する概念が初めて提唱されたのは、1965年にCGの草分けとして著名なSutherlandが「究極のディスプレイ」という題の講演において行っていたといわれている。この講演の中で、Sutherlandは当時のCG技術者に対して、仮想の立体があたかも実物のように見えたり触れたりするようなことが可能であろうか、という挑戦を投げかけた。Sutherland自身このテーマに対し、1968年当時ハーバード大学在籍中に頭部搭載型ディスプレイを開発している。頭部搭載型ディスプレイとは小型の映像表示デバイスを頭に固定し、光学系を介して映像を目に投影するものである。最初に開発されたものは、ゴニオメータ（人間の動作を機械的に検出する装置）によって頭部の位置と姿勢を測定し、映像を連動させていた。この方法を用いることにより、非常に広範囲の三次元空間を擬似体験することが可能になる。

同様の研究は、1960年代の終わり頃から米国空軍の「スーパーコックピット」という名前の開発計画において行われるようになった。航空機の性能が向上するにつれて、パイロットに提示すべき情報量は飛躍的に増大し、パイロットがこれを消化しきれないために任務

Artificial Reality and Simulator. By Hiroo Iwata (Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba).

\*筑波大学 構造工学系

が遂行できなかつたり、場合によっては生命の危険が生じる可能性もでてきた。この問題に対して、人間の知覚能力に適合した情報表示が行えるようなコックピットの開発が提案されるようになった。このようなスーパーコックピットのプロトタイプとして、ヘルメットに2個のCRTを内蔵しパイロットの両眼に立体映像を投影するものが開発されている<sup>1)</sup>。図1にシステム構成を示す。2個のCRTの画像はハーフミラーを通して、実際の視野像に重畳されてパイロットの両眼に投影される。画面には飛行データ、自機の状態、標的情報等が立体映像として表示される。ヘルメットには頭の位置を検出するセンサがとりつけられており、自然像と計算機によってつくられた擬似画像が矛盾なく重畳されるようになってい

る。頭部搭載型ディスプレイの装着者が表示画像を認識する際の特性に関する研究は、1980年代に入ってUCBにおいてMcGreevyらによって進められた。その後McGreevyはNASAのAmes研究所に移り、MITからよばれたFisherとともに頭部搭載型ディスプレイによって仮想空間を表示し、それに操作を加えることを可能にする装置を開発している。この装置は、仮想環境表示システム(Virtual Environment Display system)と呼ばれ、人工現実感をコンピュータと人間のインタフェースに応用しようとする先行的な研究として注目を集めている<sup>2)</sup>。この研究ではヘルメットに左右両眼用の液晶ディスプレイを装着し、オペレータに立体映像を供給するものが開発されている。液晶ディスプレイの画面は光学系によって、遠方に大きなスクリーンがあるような視覚効果が得られるように設計されている。さらに、ヘルメットの頂部には空間位置センサがとりつけられており、頭部の位置と姿勢に関する6自由度を磁氣的に検出する。このセンサからの信号を基に、表示画像の視点を動かしてゆけば、仮想空間の中に存在しているという錯覚をオペ

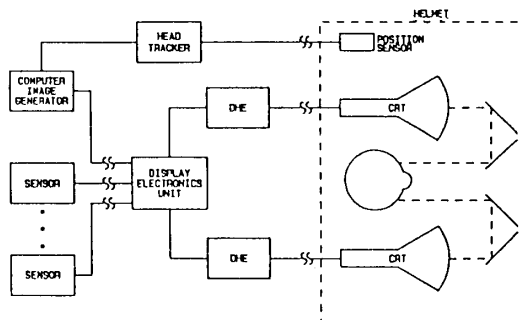


図1 擬似パノラマディスプレイ<sup>1)</sup>

レータに与えることができる。

また、この研究ではデータグローブと呼ばれる手袋の形をした空間操作デバイスが用いられている。指の曲げ角は手袋に沿った光ファイバーの透過効率の変化によって検出される。さらに、手の甲の部分にとりつけられた空間位置センサによって、手の位置と姿勢が計測される。この装置と頭部搭載型ディスプレイを組み合わせると、仮想空間内に自分の手を疑似的に表示することができる。すなわち、実空間における自身の手と同じ位置に計算機によって描かれた手の立体画像を表示するわけである。この方法によって人が仮想空間に対して操作を加えることが可能になる。頭部搭載型ディスプレイは実空間における自身の手が見えないため、仮想空間の中に自分が存在しているという感覚を与えるのに効果的である。図2は仮想環境の概念を示している。オペレータは物理的のターミナルではなく仮想コントロールパネルに対して操作を行う。ウィンドウやパネルは任意の位置に置くことができ、作業形態や習熟の度合に応じて最適な配置をとることが可能になる。このようなシステムによって、宇宙ステーションのような限られた空間内に、多くのターミナルを擬似的に備えることができる。

この研究で用いられた装置はVPL社から商品化されている。頭部搭載型ディスプレイはアイフォンと呼ばれ、ヘルメットに装備されたものより小型軽量化されている。また、データグローブに用いられた光ファイバーによる動きの計測方法を、体全体に拡張したデータスーツと呼ばれるものもすでに商品化されている。

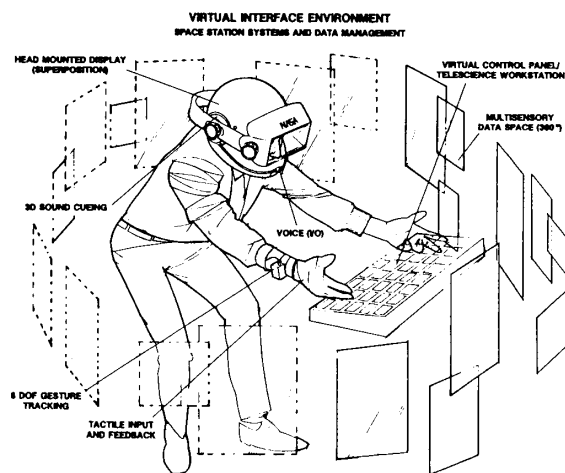


図2 仮想ターミナル<sup>2)</sup>

### 3. 人工現実感とハプティクス

仮想世界の視覚情報に加えて手を使った操作が可能になってからは人工現実感研究は、計算機のユーザインタフェースやロボットを初めとして様々な分野で行われるようになった。それらの研究を通じて仮想立体を操作する場合には、触覚のフィードバックが重要であることが認識されるようになった。

人間が外界を認識する場合、感覚受容器から取得される受動的な情報だけでは不十分で、自らの能動的な体の動きが必要である。視覚に関しては、頭の動きに伴う見えの変化が認識の過程で不可欠であり、この性質を人工現実感の分野に導入したのが頭部搭載型ディスプレイである。触覚についても同様の議論が成り立ち、皮膚の触覚センサと手を動かすという運動の情報が合わさることによって触覚の情報処理が成されるといわれている。このように運動系と感覚系の兼ね合いの中で認識が行われるという観点に立つ研究分野はハプティクス (Haptics) とよばれる。人工現実感の研究においても手の動きに伴う触覚情報表示の必要性が認識されつつあり、実時間のコンピュータ・グラフィックスに力覚表示用デバイスを組み合わせる研究が行なわれるようになった。このような装置はフォースディスプレイ (Force Display) と呼ばれる。

フォースディスプレイは計算機と人間がインタラクションを行う多くの場面で有効に機能することが期待される。現状では、後述するようにハードウェアが未熟なため、実際的な応用にはいたっていない。しかし、現在の基礎的研究段階においても実現性が予想される応用分野は少なくない。以下にその例を挙げてゆく。

#### 1 CAD/CAM, CAE

CADの分野においては3次元データを取り扱うための入出力デバイスが、従来よりボトルネックとなっていた。通常のマウスやタブレットでは形状データの操作を行うには限界がある。そのため、入力デバイスにより多くの自由度をもちこむ試みが行われるようになった。6自由度の磁気センサを用いた「フライングマウス」や、6自由度の力センサを用いた「スペースボール」にその例を見ることができる。しかし、冒頭にも述べたように手の動作とその結果として得られる触覚情報は不可分な関係にあるため、これらのデバイスはやがてフォースディスプレイにとって替わられるであろう。

製品が複雑化するにつれ、部品形状の確認や組み立

時の干渉チェックは重要性を増してきている。既存のCADシステムでレンダリングした画を表示しても設計者に感覚的な情報を与えるには限界があり、いきおいモックアップや試作品をつくることになる。しかし、時間やコストの問題から必ずしもこれらのものを十分に用意することはできない。このような場面にフォースディスプレイを適用し、仮想空間の中で試作品を操作することができれば、設計の初期段階から指向錯誤を繰り返すことが可能になり、より高度な設計作業が期待できる。また、自動車のボディといった本来感覚的性質の強い曲面を設計する場合には、やすりで削るといった触覚情報をたよりに設計を行うこともあり、このような状況にもフォースディスプレイは応用が期待されるであろう。

#### 2 サイエнтиフィック・ビジュアルイゼーション

コンピュータ・グラフィックスの応用分野の1つに、分子構造を可視化する分子グラフィックスがある。分子の空間的な構造を映像化することは比較的容易にできるが、分子間引力やポテンシャルといった属性を映像だけで表現するには限界がある。したがって、このような場面においては、視覚情報の限界を触覚情報で補うフォースディスプレイが有効性に機能することが予想できる。巨大で複雑な構造をもった分子の結合を行う場合には、ポテンシャルの低い場所を探さなければならず、それを効率良く行うには人の触覚情報を利用することが望ましい。分子設計は広い応用分野が期待され、薬品やタンパク合成等において現在フォースディスプレイの応用が検討されている。

#### 3 教育

教育の場において、教わる側の能動性が重要なことは論を待たない。現状では実験という科目によって、体験的学習を導入しているが、設備等の制約から十分な実験を行うことは極めて困難が伴う。人工現実感の技術をこの分野に導入すれば、容易に様々な現象を疑似体験することができる。また、数学のように本来抽象的なものも感覚的に表現することができるかもしれない。しかし、教育分野で普及するためにはコストが最大の問題になるであろう。

#### 4 アミューズメント

最近のアミューズメント設備では、体感型のもものと参加型のものが主流になりつつある。人工現実感はこの流れの延長上に位置付けられるため、90年代に最も成長するフォースディスプレイの応用分野はエンタテインメントであると予想することもできる。

#### 4. フォースディスプレイ研究の現況

フォースディスプレイを実際に製作する場合に、最も困難な技術的課題としては、仮想空間で発生する現象を実時間でシミュレートすることと、反力を手に与えるためのデバイスの2点に集約することができる。人間が触覚情報を連続的に知覚するためには数10 Hzから100 Hz程度のアップデートが必要であるため、計算機は長くても数10 msecの間でモデルの更新やフォースフィードバック・デバイスの制御を行わなければならない。近年の計算機の進歩に伴い、計算時間の問題は少しずつ解決しつつある。しかしながら、一方の反力生成方式はまだ模索の段階にある。手の動きを測定するといったセンシングに限れば非接触で行うことも可能であるが、反力を与えるというアクチュエーションを行うためにはなんらかの物理的な作用を地面と手の間に及ぼすことが不可欠である。このアクチュエーションを行うためにどのような手段をとるかというところが当面の最大の問題といえるだろう。

人工現実感に力覚フィードバックを導入しようとする試みは、前述のように主にハードウェア上の困難から具体的研究例がきわめて少ない。以下に、現在研究が進められている、フォースディスプレイの事例を紹介する。

##### 1 プロジェクト GROPE

長期にわたって行われた唯一ともいえる研究例は、ノースカロライナ大学の Brooks らによって進められているプロジェクト GROPE に見ることができる。Grope とは「手探り」を意味する語である。前述の Sutherland の講演「究極のディスプレイ」に触発された Brooks は、分子グラフィックスにハプティックなインタフェースを接続する研究を1967年に発足させている。これがプロジェクト GROPE である。以下にその経過を簡単に紹介する<sup>3)</sup>。

最初に開発されたのは、1971年に発表された GROPE 1 である。このシステムは、x-y 平面を移動するプローブにサーボモータで反力を与えるものである(図3)。プローブの位置はポテンシオメータで計測され、CRT 上のカーソルがプローブに位置に合わせて動く。フォースフィードバックの計算とカーソルの描画は12 Hz のスピードで行われる。この装置を用いて、34名の学生を被験者にして、ポテンシャル場にカーソルが置かれた場合に受ける力をプローブに還えず実験が行われた。対照実験として、カーソルが受ける力を CRT 上のベクトルで表示した場合と比較した

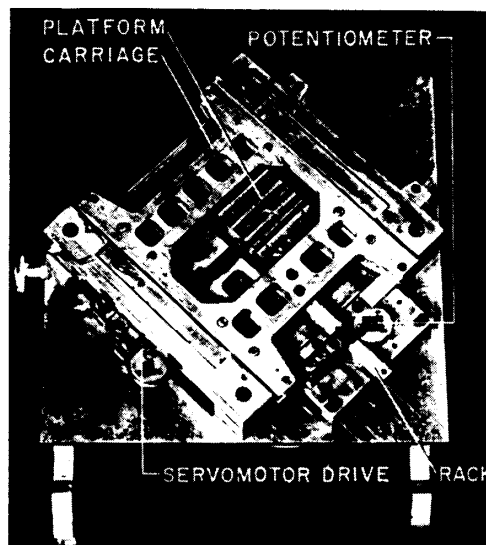
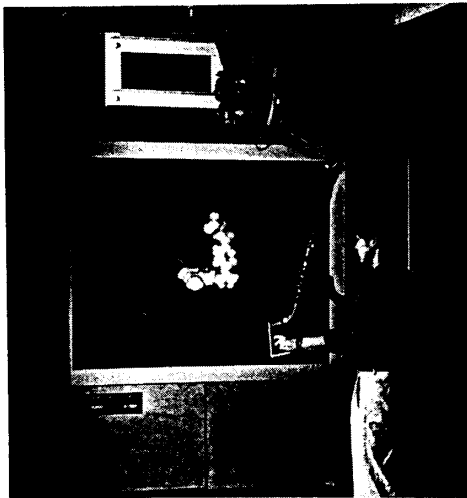


図3 GROPE<sup>3)</sup>

結果、実際に力を与えた方がよりポテンシャル場を把握しやすいことが確認されている。

1976年には、遠隔操作の研究で著名なアルゴンヌ研究所から譲り受けた6自由度のマスターマニピュレータ(アルゴンヌ・リモートマニピュレータと呼ばれている)を用いた GROPE 2 が発表されている。このシステムでは、マニピュレータは IBM360 に接続され、E & S 製のグラフィックスディスプレイによりステレオ式の立体画像が表示された。ディスプレイには、ワイヤフレームで描かれたテーブルと立方体と手先が表示された。このシステムが生成できる反力は並進の3自由度のみであり、分子グラフィックスを実時間でシミュレートするためには100倍の計算力が必要であることが判明した。この要求が満たされるようになったのは、1986年に彼らが VAX を導入したときであり、これ以降分子グラフィックスの応用を指向した GROPE 3 の開発が進められる。

GROPE 3 はこの一連のプロジェクトにおける、最新のシステムである。フォースフィードバック・デバイスとしては GROPE 2 で用いられたアルゴンヌ・リモートマニピュレータを流用している。このシステムはフォースディスプレイの応用として分子グラフィックスというサイエンティフィック・ビジュアルイゼーションを設定している点に特徴がある。彼らはデューク大学の化学者と共同で、抗癌剤に酵素を結合させるシミュレーションをこのシステムを使って行っている。図4に GROPE 3 の概観を示す。

図4 GROPE III<sup>3)</sup>

## 2 9 自由度マスタマニピュレータを用いたデスクトップ仮想空間

著者は、人工現実感に力感覚のフィードバックを導入するために、デスクトップに限定した仮想空間を操作するための小型マスタ・マニピュレータを新たに開発している。以下に開発されたシステムの内容を紹介する<sup>4)</sup>。

このシステムは大別して2つのサブシステム、すなわち視覚情報提示サブシステム、空間操作サブシステムから成る。前者にはスターデント社のグラフィックス・スーパーコンピュータ“TITAN”を使用しており、後者では9自由度のマニピュレータをパーソナルコンピュータ“PC-9801”で制御している。TITANとPC-9801はRS-232Cを介して通信を行っている。

図5にこのシステムの概観を示す。

仮想空間の映像を生成するTITANは、数値計算と

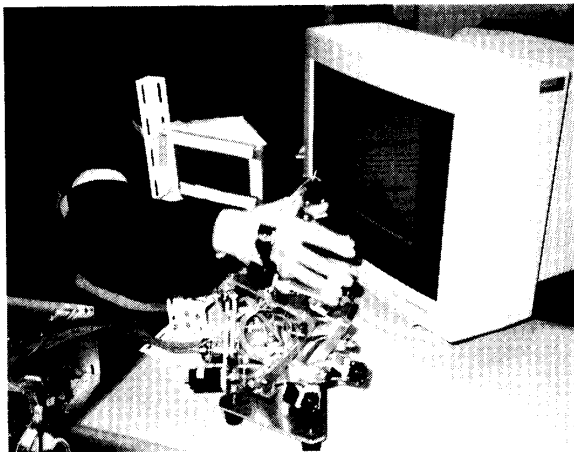


図5 デスクトップ仮想空間操作システム

その結果の可視化を高速に行うことを目的として設計されたコンピュータであり、高速のベクトル・プロセッサにより、浮動小数点演算と3次元グラフィックスの描画を行う。今回使用したTITANは2つのCPUを持ち、並列処理を行うことによりピーク性能で32MIPS、32MFLOPSの演算能力を有する。グラフィックスのプログラム開発は“Dore”と呼ばれるツールキットを使用して行う。Doreはレンダリングを自動的に行うもので、フラット・シェーディング、Gouraudシェーディング、レイトレーシングをサポートしている。表示する図形は、プリミティブとその属性を組み合わせた「オブジェクト」として定義され、それを「カメラ」で撮ることにより画がつけられる。

本システムでは仮想空間は図6のように設定されている。操作者の目の前には45度の角度をつけた鏡が置かれ、40 cmの距離にあるCRTが映る。このとき操作者は前方のマニピュレータに固定された自分の手を見ることはできない。操作者の手の動きは、マニピュレータの内界センサーで計測され、PC-9801からTITANに転送される。手の位置と姿勢はマニピュレータの基部に固定された座標系で記述された後、仮想空間の基準座標系に変換され、手を表現したグラフィックスが描かれる。Doreの「カメラ」に備えられているズーム機能を調節することにより、グラフィックスで表示された手が、操作者自身の手の「見え」と一致するように設定されている。このシステムでは鏡を使用しているため、CRTには鏡像が表示される。

操作者の手の動きを検出し反力を与えるマスタ・マ

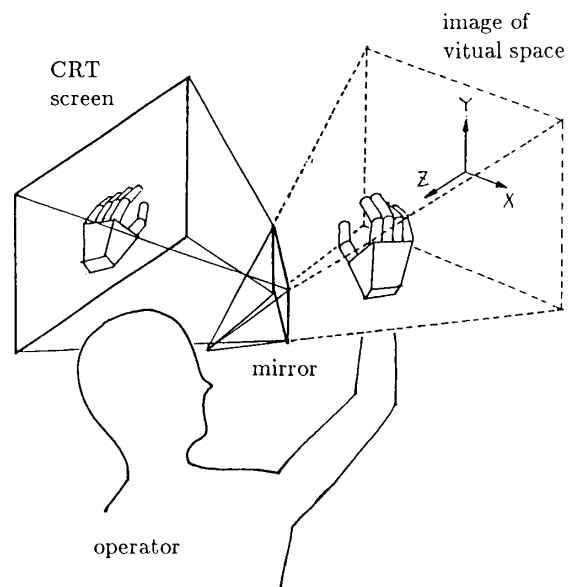


図6 仮想空間の構成

ニピューレータには、手に追従する6自由度のマニピューレータの上に、指の動きに追従する3つのアクチュエータを搭載したものを製作している。図7にこのマニピューレータの概観を示す。操作者の手は、平と甲にフィットするようなステーによってマニピューレータの頂部に固定され、手と指を独立に動かすことができる。アクチュエータの軸は、各指の第一関節の回転軸と一致するようになっている。

手の動きに追従するマニピューレータには6自由度の平行マニピューレータを使用している。平行マニピューレータとは各自由度を制御するための駆動ジョイントがすべて並列に配置されているマニピューレータである。この方法は、コンパクトなハードウェアで6つの自由度が実現でき、可搬重量が大きいというメリットをもっている。このマニピューレータによって手の平に任意の力ベクトルとモーメントベクトルを与えることができる。

仮想物体を操作した場合に発生する反力は、ソリッドモデルと手の相互作用によって決定される。手と対象物の接触の判定は、手の平と指に合計16個の制御点を設け、対象物の表面からの距離を計算することにより行われる。マニピューレータが手に与える反力は、対象物体の弾塑性的な属性と、手との位置関係により決定される。この試作システムではインダストリアル・

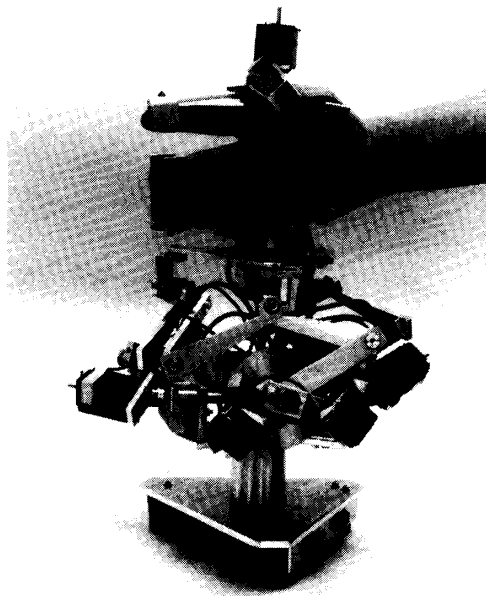


図7 小型マスタ・コンピュータ

デザインで用いられるような一眼レフ・カメラの1/1モデルを、仮想空間において手にとれるようなプログラムを開発している。

### 3 その他の研究例

MIT Media Lab. のマーガレット・ミンスキーによって開発されたSANDPAPERは、ポインティングデバイスとしてよく用いられるジョイスティックにDCモータによって反力を生成することにより、仮想物体表面のテクスチャを表現する<sup>5)</sup>。グラフィックスディスプレイには図8に示すような凹凸のある面が表示される。カーソルがこの領域にさしかかると反力が発生され、あたかも粗さのある物体表面を手で撫でているような感触が与えられる。この原理は、図9に表されるように上下方向の凹凸をXY方向の力に変換することによるものである。

東京工業大学精密工学研究所の佐藤らによって開発されたSPIDARは糸の張力により指に操作反力をあたえる<sup>6)</sup>。このシステムは、指先を4本の糸によって支え、仮想立体に触れた場合に糸の動きをリレーで止めることにより圧覚を与えるものである。糸の長さは

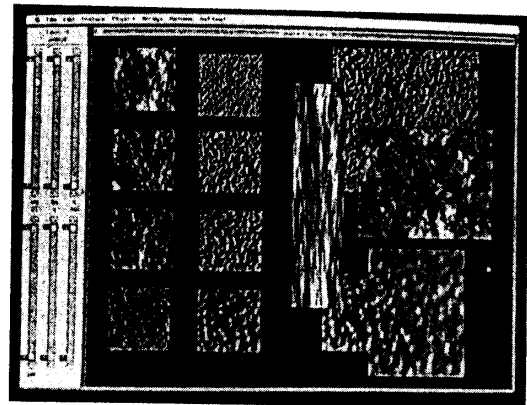


図8 SANDPAPERの画面<sup>5)</sup>

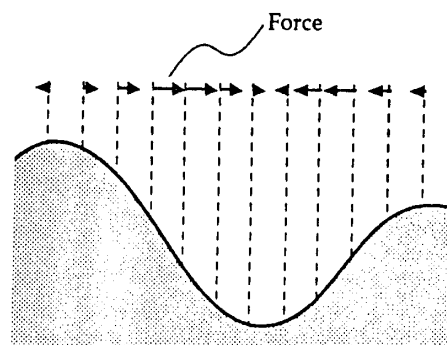


図9 力による凹凸の表現方法<sup>5)</sup>

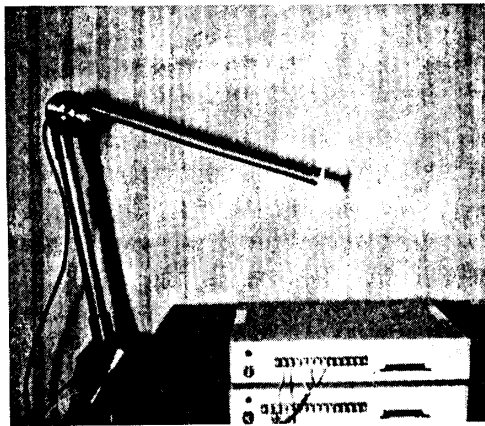


図10 超音波モータを用いた3軸入力デバイス<sup>7)</sup>

ロータリエンコーダによって計測され、指先の位置が計算される。仮想立体はアナグリフ式の立体映像で表示される。回転する円筒をろくろのように指で押して加工するプログラムが開発されている。

臨場感通信の研究を進めるATR通信システム研究所では、大型スクリーンに立体映像を表示し、仮想立体に手で操作を加えるシステムを開発している<sup>7)</sup>。この研究の中で、力感覚のフィードバック機構として、アクチュエータに超音波モータを使った3軸のマニピュレータが製作されている(図10)。超音波モータには圧電素子が使われており、磁界を発生することがない。この性質は手の位置の計測に磁気センサを用いる場合に有利である。

工業技術院製品科学研究所では、操作反力を与えるマウスの開発が行われている<sup>8)</sup>。このシステムは、XYレコーダをポインティングデバイスとして用い、画面上で形状操作を行う場合の抵抗感を与えるものである(センシング・マウスと名付けられている)。ロードセルの中央に指を挿入することにより、指から加えられる力が検出される。形状データを生成するワークステーションは力ベクトルを変位ベクトルに変換し、操作対象の剛性に応じて反力を与える。この装置によって形状境界面のなぞり動作が実現されている。

## 5. 仮想空間内の歩行

### 5.1 仮想歩行の概念

近年、コンピュータ・グラフィックスの分野では、都市空間や建築物の設計を行う際に、設計データを基にリアルな完成予想図を製作する景観シミュレーションの研究が進められている。この技術は人工現実感の応用分野の1つにも挙げられている。ディスプレイを

頭部に搭載し、頭の動きに合わせて映像の表示を行う能動型ディスプレイは、実空間が見えないため、自分が仮想空間の中に存在しているという錯覚を与えるのに効果的である。しかし、コンピュータの表示する仮想空間が都市や建物といった大きな面積を持つものになると、その中に入って歩き回るということを擬似体験するためには、ディスプレイ装着者が歩き回るために必要な広大なスペースを用意する必要が生じる。これは、実世界の空間資源の制約上好ましいことではなく、また、センサ類のワイヤハーネスといったハードウェアの問題も考慮しなければならない。さらに、前述のようなフォースフィードバック用のマニピュレータを装着した場合、このような装置を付けたまま歩くのは大きな負担になる。したがって、実空間における歩行者の位置を固定したままで歩行感覚が得られるような装置が必要になる。

位置を変えずに歩行動作を行う器具としては、健康歩行機等で用いられるムービングベルトが存在する。前項でも紹介したBrooksらのグループではHMDを装着して健康歩行機の上を歩く装置を試作している。しかし、ムービングベルトは直進のみを対象とするものであり、方向を変えて歩くことはできない。任意の方向に歩けるようにするには、床に対して任意の方向に足を滑らせる器具が必要になる。著者は、この機能を充足するためにキャスタを裏面に取り付け付けたローラースケート状の靴を歩行者に履かせ、上体をハーネスでフレームに固定する方式を採用している<sup>9)</sup>。このハーネスによって歩行者の位置は実空間において一定に保たれ、また転倒時の危険を防いでいる。図11にこのような装置の概念図を示す。歩行者の頭部と両足の動きをセンサを用いて追跡し、仮想空間内における視点の位置と方向に合致した映像をHMDに表示すれば、仮想空間を歩いているような錯覚をあたえることができる。

しかしながら、この方法は歩行する床が平面であることを仮定するものであるため、実際の建物には必ず存在する階段等の凹凸面を歩行する際の感覚を与えることができない。著者はこの問題に対する1つの回答として、糸の張力によって床から足に及ぼされる抗力を発生させる装置を試作している。以下にこの装置の内容を紹介する<sup>10)</sup>。

### 5.2 仮想歩行装置のシステム構成

本装置は、前述の歩行装置で取り入れた、上体をハーネスで固定し、床に対して任意の方向に足を滑らせる器具を歩行者の足に履かせる方法を踏襲している。

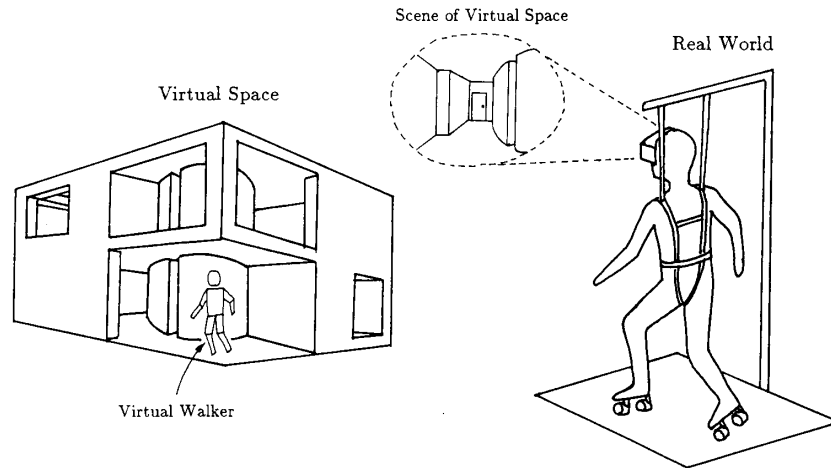


図11 仮想歩行の概念図

しかし、前システムではキャストを裏面に取り付けられたローラースケート状の靴を歩行者に履かせ、上体をパラシュートに用いられるようなハーネスで固定する方式を採用したが、この方式は実用上の欠点であった。まず、キャストの接地点と回転軸がずれているため足が滑る際の方向安定が悪く、転倒をさけるために歩行者の体重の大半をハーネスで支えなければならなかった。そのためハーネスによる拘束感が強く、またその脱着も煩雑であった。今回のシステムでは、キャストの代わりに鉄のボールを用いたスライダを利用することにより、接地点と回転軸を一致させ、方向安定を改善している。その結果、ハーネスで体重を支える必要性が低下したため、パラシュートのように体全体を支える方式を廃止し、肩の部分で上体を固定するフレームに換装している。これは、ジェットコースタ等で用いられる安全装置と同様のものである。

このハーネスによって、歩行者の体の位置が実空間において固定されるため、歩行動作に合わせて映像を生成すれば、無限に広い仮想空間を歩くことが可能になる。また、階段等の段差を昇降する場合も実空間においては歩行者の体は上下しないため、任意の長さの階段を仮想空間に設定することができる。図12にこの装置を装着した歩行者の様子を示す。歩行者はHMDを装着し、仮想空間の映像を見る。このとき、両足の動きは超音波センサによって3次元位置計測される。このセンサは超音波が発信部をでてから受信部に到達するまでの時間を測ることにより、発信部と受信部の距離を求めるものである。本システムでは、発信部を両足に付け、受信部を3つ用意することにより、両足の位置を計測している。3つの受信部で計測

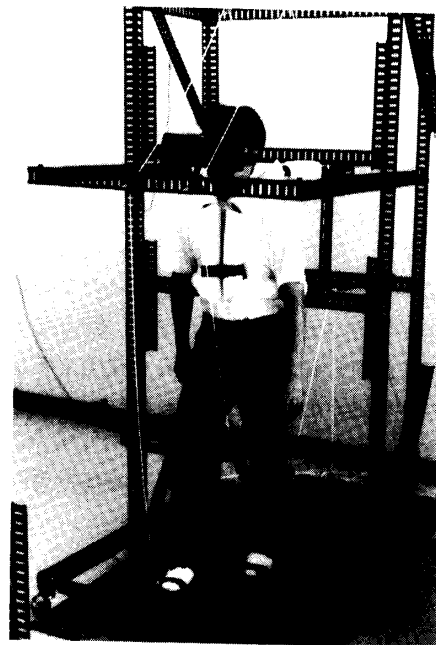


図12 仮想歩行装置

された距離データが得られると、足の部分の頂点の位置を求めることができる。左右の足に付けられた発信部は交互にタイムシェアリングすることにより、それぞれの足の位置が測定される。各超音波センサのサンプリングレートは40 Hzであるため、左右の足の計測結果は20 Hzで得られる。

頭部の動きはイメージセンサを用いて追跡される。HMDに付けられた2つの白色マークの位置を追跡することにより、頭の左右方向と上下方向の動きを知ることができる。これらの、計測結果に従って、仮想空間内における視点の位置と方向に合致した映像を生成

する。

図13にこれらの処理を行うシステムの全体構成を示す。足の位置を計測するための超音波距離センサからの情報はPIOからよみ込まれる。頭の動きを追跡するために、ビデオカメラとイメージフレームメモリが用意される。フレームメモリに固定されたデジタル画像はPC9801によって処理される。これらの、追跡結果をもとに仮想空間内の歩行者の位置と頭の方向が計算され、その情報は仮想空間の映像を生成するもう1台のPC9801にRS-232Cを介して転送される。歩行者に見せる仮想空間の風景は、PC9801に接続されたトランスペアレントを用いたグラフィック・アクセラレータ（神戸製鋼 Personal HOOPS）で描かれる。この映像はNTSCビデオ信号に変換され、HMDの液晶ディスプレイに表示される。HMDには、2つの液晶ディスプレイにそれぞれ鏡とフレネルレンズを組合せ、左右の目に別々の画面が見えるものを製作している。

階段等の段差の昇降時に足にかかる抗力は糸の張力を用いて提示される。仮想立体に接触した時に発生する反力の提示方法としては、前述のマスターマニピュレータを用いるものはすでに開発されている。しかし、歩行の場合は発生すべき反力は、最も大きい時は人間の体重に相当するため、これだけの力をマニピュレータを用いて発生するためには大規模なハードウェアを必要とする。その場合、平坦な場所を歩く際にはこの装置は歩行の妨げになる。したがって、このシステムでは足にかかる抗力を糸の張力によって与えている。図14に糸の駆動系を示す。これは、DCモータで

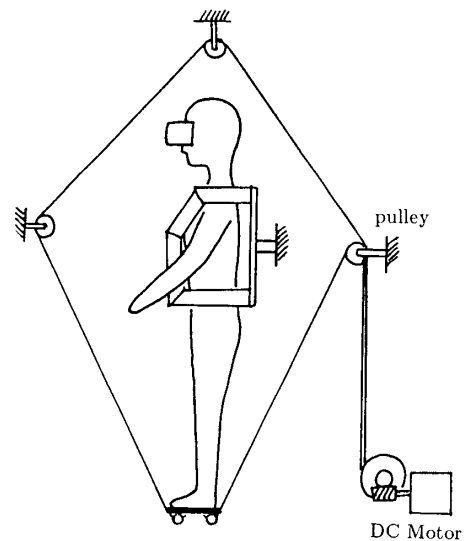


図14 糸の駆動系

駆動されるプーリーで糸を引くことにより、疑似的に足の裏の床を昇降させるものである。この装置が左右の足にそれぞれ1セット用意される。糸には木綿のものを用いているため、張力がかかっていない時にはほとんど抵抗がない。この性質は歩行者の自然な動作を実現する上で不可欠なものである。

糸に張力を与えるDCモータは、PWMによって駆動される。PWM回路へのトルクデータはPIOから出力される（図13参照）。モータの定格トルクは2.8 kgcmで、これがギア比40:1のウォームギアを介して直径10 cmのプーリーを回転させる。したがって、発生される糸の張力は22 kgである。

段差の昇降時に発生すべき抗力の決定方法は以下の

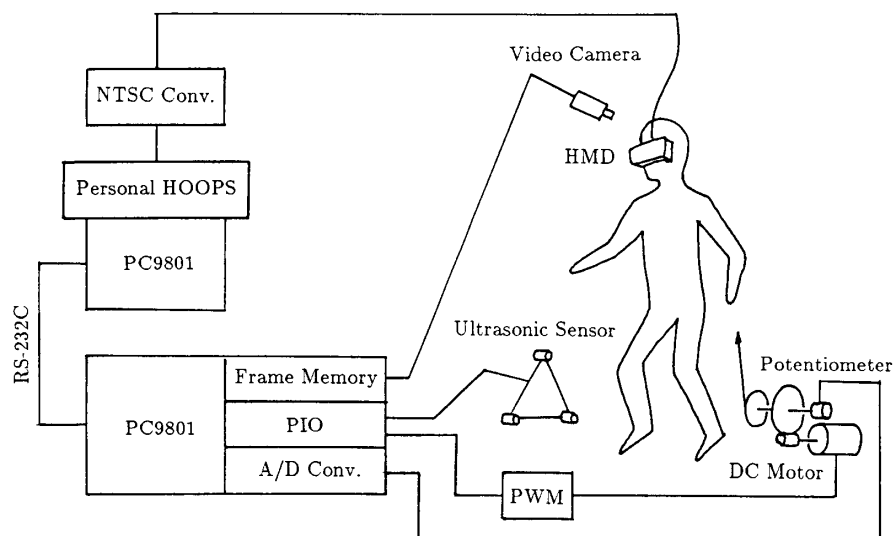


図13 仮想歩行装置のハードウェア構成

ようになる。

(1) 昇る時

実際に段差を昇る場合は、踏み出した足に抗力を受けながら上体が上昇する(図15左)。しかし、仮想歩行を行う場合には、上体がハーネスで固定されているため、踏み出した足が抗力を受けながら下降するように糸の長さを制御する(図15右)。この場合、グラフィックスで描かれた仮想空間の映像を体の上昇分だけ上に移動すれば、歩行者に段差を昇ったような錯覚を与えることができる。

(2) 下る時

実際に段差を下る場合は、後方に残った足に抗力を受けながら上体が下降する(図16左)。しかし、仮想歩行を行う場合には、上体がハーネスで固定されているため、後方に残った足が抗力を受けながら上昇するように糸の長さを制御する(図16右)。この場合、グラフィックスで描かれた仮想空間の映像を体の下降分だけ下に移動すれば、歩行者に段差を降ったような錯覚を与えることができる。しかしながら、現行のシステムではモータの発生する糸の張力が22 kgに限られているため、体重を支えている後ろ足を持ち上げることはできない。したがって、下降時の力感覚を正確に提示することはできていない。モータのパワーを上げて全体重を支えられるようにすれば、上記の下降シーケンスが実行できるが、この場合、両足が地面を離れることになるため、安全面を含めてセンサ系の精度や信頼性を再検討する必要があるだろう。

### 5.3 仮想歩行装置の応用分野

これまでに紹介してきたような仮想空間内の歩行システムは様々な分野への応用が期待されるが、現在のところは、以下に述べる2項目が考えられる。

(1) 建築および都市計画

個人住宅の居住環境を施工前に確かめようとする

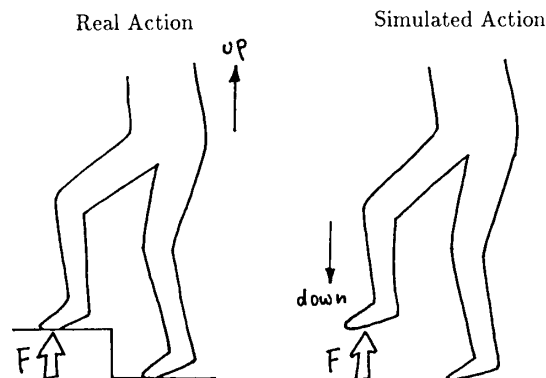


図15 段差を昇る時の反力発生方法

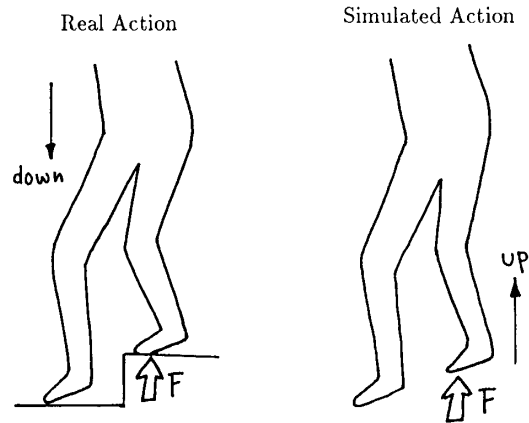


図16 段差を降りる時の反力発生方法

と、現状では住宅展示場などのモデル住宅を見るという方法しかない。この場合、実際に建てる住宅は、モデルとは間取りや内装、周囲の状況が異なるため、完成時の状況を確認することは困難が伴う。この問題に対して、住環境のシミュレーションを行い映像と音を用いて表現するソフトウェアの開発を行う試みが始められている。このようなシステムのインターフェースとして先に提案したような人工現実感を用いれば、施工主が注文段階で自分の家を疑似体験することが可能になる。

また、大型構造物の建設や、都市再開発の計画には、景観アセスメントを実施するのが一般的になりつつあり、さらに、より積極的に新しい景観の構築を目指した景観設計を行うことの有効性も認められるようになってきている。こういった景観予測を行う際に、コンピュータ・グラフィックスを利用する試みが検討されているが、実時間で映像が生成されるようになれば、人工現実感によって歩行者の立場から疑似体験することができるとであろう。

(2) アミューズメント

東京ディズニーランドに見られるような現代のアミューズメント施設には、ハイテクノロジーを駆使して五感に訴える演出が行われるようになってきている。それらの多くは、乗り物に乗って連れて行かれる受動的なものであるが、その一方で、光線銃等を自分で使うといった参加性の高いシミュレーション・ゲームも人気を集めている。これらの要素を総合すると、前述のような全身で仮想空間を体験できる人工現実感が高度なアミューズメントを提供することは想像に難くない。

また、自転車をこぐといったような健康機においては、使用者がいかにも楽しく運動ができるかということ

が要請されているが、このような問題に対しても人工現実感が1つの解決法を与えることができる。仮想歩行装置をブラッシュアップすれば仮想空間の中を走りながら、風景やゲームを楽しむといったことも可能になる。このような状況において適切なルールを定めれば、新しいスポーツを定義することができるかもしれない。

## 6. ま と め

本稿では人工現実感研究の持つ今日の問題点について、事例を交えながら論じてきた。冒頭にも述べたように、人工現実感が従来のフライト・シミュレータやドライビング・シミュレータと最も異なる点は、シミュレートする対象が計算機内に構築しうるものなら何でも可能であるということである。人工現実感の応用例として今回紹介したものは、おもにCADの分野に相当し、これは現実に存在するものを操作対象にするものである。しかし、人工現実感の再現する世界は必ずしも実世界で形を持つものである必要はない。仮想空間の作り方によっては、実体をもたないもの、例えば計算機内のデータといった抽象的なものを目で見て手で触れられるように表現することもできるはずである。例えば、大規模データベースの複雑なデータ構造を、重さや硬さをもった仮想立体の組合せで表現することができれば、システムの開発者やユーザにとって

直感的理解の助けになるはずである。このようなことが実現すれば人間が計算機を使う形態は根本的に変化するであろう。

## 参 考 文 献

- 1) I. Sattler, "High-performance CRT Display Electronics Package for an Airborn Virtual Panoramic Display", SID88 Digest (1988)
- 2) S. S. Fisher, et al. "Virtual Environment Display System", ACM Interactive 3D Graphics (1986)
- 3) Brooks, F. P. et. al, "Project GROPE-Haptic Displays for Scientific Visualization", Computer Graphics Vol. 24, No4, ACM SIGGRAPH (1990).
- 4) Iwata, H. "Artificial Reality with Forcefeedback", Computer Graphics Vol. 24, No4, ACM SIGGRAPH (1990)
- 5) Minsky, M., et. al., "Feeling and seeing: Issues in force display", Computer Graphics Vol. 24, No4. ACM SIGGRAPH (1990)
- 6) 佐藤他, "仮想作業空間のためのインタフェースデバイス SPIDAR" 信学技報 PRU89-89 (1989)
- 7) 竹村他, "ステレオグラフィックスを用いた仮想操作環境について" グラフィックスとCAD43-6 (1990)
- 8) 福井他, "接触感覚をともなう形状操作手法" 第5回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集 (1989)
- 9) 岩田, 大規模仮想空間を歩行するための人工現実感, Human Interface N & R, Vol. 5 No.1 (1990)
- 10) 岩田, 松田, 凹凸面を有する仮想空間を歩行するための人工現実感, 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)