

筑波大におけるバーチャルリアリティに関する研究

岩田洋夫

筑波大学構造工学系

筑波大学岩田研究室ではバーチャルリアリティにおける力感覚のフィードバックを中心に研究を行っている。バーチャルリアリティが従来の情報メディアと最も異なる点は、人間の能動的な行動が直接反映される点にある。人間が仮想世界の中で様々な操作ができるようになると、触覚のフィードバックが重要な役割を果たすことが広く認識されるようになった。触覚の情報は対象物との接触によって得られるため、この感覚を外界から与えるフォースディスプレイの実現は問題が多くまだ模索の段階にある。本研究室ではこのフォースディスプレイに関して機構面を中心にしたハードウェアの開発と、その応用分野の開拓に取り組んできた。本稿では以下に挙げる最近の3つの研究成果を紹介する：(1)ペン型フォースディスプレイ、(2)ボリューム・ハプタイゼーション、(3)仮想環境における人工生命

Virtual Reality Research in the University of Tsukuba

Hiroo IWATA

Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba
Tsukuba, 305 JAPAN

Force feedback in virtual environment is the major research objective of Iwata Lab. in the University of Tsukuba. Virtual reality is based on active human behavior, which is distinct from other information media. Operation by human hand in virtual environment requires force feedback from virtual objects. Force feedback is only realized by physical interaction with the outer world. Construction of force feedback device contains hard problems and research of this area is at an early stage. Our laboratory has been dealing with development of mechanical configuration of force feedback devices and its applications. This paper introduces following three current results: (1)Pen -based force display, (2)volume haptization, and (3)artificial life in haptic virtual environment.

1. はじめに

計算機のつくりだした合成情報を人間の感覚器官に直接提示することにより、人間が仮想世界の中で行動することを可能にする人工現実感の技術は、90年代のキーテクノロジーとして注目を集めている。人工現実感が従来の情報メディアと最も異なる点は、人間の能動的な行動が直接反映される点にある。人間が仮想世界の中で様々な操作ができるようになると、触覚のフィードバックが重要な役割を果たすことが広く認識されるようになった。視覚と聴覚が受動的な呈示方式でも受け入れることができるのに対して、触覚は能動的な運動によって得られる。

これまでの情報メディアはオーディオ・ビジュアルという言葉に代表されるように、視覚と聴覚しか利用されていなかった。これらの感覚情報は光や音という非接触の媒体によって伝達されるため、電子技術だけで装置を構成することが可能である。そして、オーディオ・ビジュアルとコンピュータを合わせて一般に電子メディアと呼ばれている。バーチャルリアリティにおいても、歴史的には頭部搭載型ディスプレイに代表されるように視覚情報の呈示技術が中心であった。しかし、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、触覚のフィードバックが重要であることが認識されフォースディスプレイの研究が活発に行われるようになった。フォースディスプレイを実現するためには電子技術だけでなく機械技術が必要である。触覚チャンネルが視聴覚チャンネルと大きく異なるのは、体の運動と不可分であることと感覚受容器が体全体に分散していることである。それゆえ、フォースディスプレイの実現は難しく、いまだにこの技術に関する決定的な方法は見いだされていない。著者の研究室ではこのフォースディスプレイに関して機構面を中心にしたハードウェアの開発と、その応用分野の開拓に取り組んできた。本稿では最近の3つの研究成果を紹介する。

2. ペン型フォースディスプレイ

人工現実感の生成技術をハードウェア面から見た場合、大きく分けて2つの方向性があると考えられる。一つは、HMDのようなディスプレイ・デバイスを身につけることにより仮想世界の合成情報以外の感覚情報を遮断する「没入型」である。もう一つは、特殊なデバイスを身につけることをせず、日常生活において違和感の無いことを目指す「開放型」である。没入型は多くのデバイスを装着することにより、帯域の広い感覚情報を提示することができる。開放型は表現力では当然没入型より劣るが、日常生活と仮想空間を容易に行き来できるという実用面での利点がある。また、没入型では問題になる仮想空間における「酔い」が開放型では起こりにくい。

現在普及している人工現実感のシステムではグローブ状の入力デバイスを用いるのが一般的であるが、これらの装置は脱着が煩雑である点が実用上の深刻な問題になっている。理想的には何も身につけずにすむというのがよいが、フォースフィードバックを実現するためには何らかの物理的な接触が不可欠である。この場合の一つの解決策として、日常生活で頻繁に体に触れるものを媒介にするという方法が考えられる。人が日常生活の中で知的作業を行うときに最も慣れ親しんでいるものはペン等の筆記用具であろう。また、工作を行うような時にはカッターナイフやへら等の道具を用いるのが一般的である。これらの物はいずれも棒状の把持部を持っており、作業時にはこの把持部を介して反力を感じる。したがって、ペンのような棒状の物に何らかのアクチュエータを付けて地面と手との間に力を生成すれば、脱着の必要のないフォースディスプレイをつくることができる。

著者は開放型のフォースディスプレイの例として、前述のような観点からペン状の把持部を持つ6自由度のマニピュレータを開発している[1]。この装置は仮想空間の中で造形作業を行う

際に反力を呈示することを主たる目的としている。実世界における工業デザイン等の造形作業は、粘土や木を切ったり削ったりして行うことが多い。この場合カッター等の道具を用いるが、それらの道具のほとんどは棒状の把持部をもっている。すなわち、ペンのように持って作業を行うわけである。本システムは仮想空間でこのような造形作業を行うことを想定し、ペンのような把持部をもつマスターマニピュレータを開発している。

このフォースディスプレイの操作者はコンピュータ・グラフィックスで描かれた仮想世界の映像を見ながら、仮想の材料に対してペン状の道具を用いて作業を行う。このとき道具が材料にあたる抵抗感覚が手に与えられる。

人間の手は並進の動き方が3つと回転の動き方が3つあり、合計6つの自由度をもっている。これだけの自由度を関節が直列的につながった通常のマニピュレータで実現すると手先の方の関節の重量を根元よりの関節が支えなければならないため、全体としては大がかりなハードウェアになる。そこで本装置では前述の平行メカニズムを採用することにより、マニピュレータ全体の大きさと重量を小さくしている。具体的には図1に示すようなペン型の把持部の両端をそれぞれ3自由度のマニピュレータで支えるという機構を採用している。合計の自由度は6になるため、把持部に3軸の力と3軸のトルクを生成することができる。基本的な構成としては、ペンの両端のA点とB点を2つのマニピュレータが支える形になっている。A点はペン先の位置に対応し、B点はペンの姿勢を決定する。ペンの軸回りの回転運動はA点とB点の距離によって決定される。そのため、軸回りの回転運動をA B間の距離の変化に変換する機構がつけられている。このメカニズムにより、3次元空間におけるA B両点の位置が分かれば、ペンの位置と姿勢を知ることができる。A点の位置は関節MA1、MA2、MA3につけられた角度センサによって測定され、B点の位置は関節MB1、MB2、MB3につけられた角度センサによって測定される。アクチュエータも角度センサと同様にMA1、MA2、MA3、そして、MB1、MB2、MB3の各関節に配置される。これらのアクチュエータによって発生されるA点とB点における力ベクトルを適宜制御することにより、ペン部に6自由度の力とトルクを生成することができる。MA3とMB3は

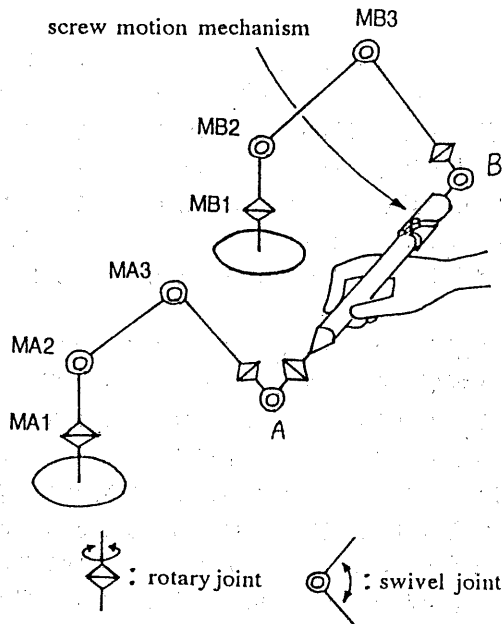


図1 ペン型フォースディスプレイの機構

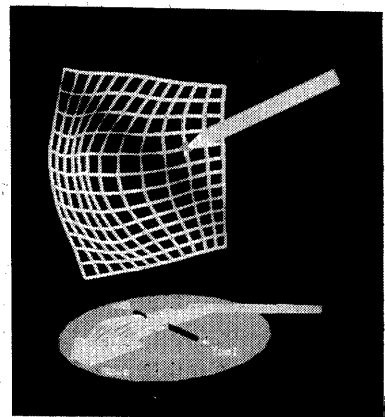


図2 自由曲面の直接変形

パンタグラフ機構を用いることによりアクチュエータを根元にもってくることができる。そうした場合、マニピュレータ全体としては空中を動くのはリンクとピンジョイントだけになり、アクチュエータの重量が一切操作者の手にかからないというメリットができる。材料を選べば把持部以外のリンクをすべて糸のように細くすることも可能である。空中の運動部分の重量が軽いことはマスターマニピュレータの操作性面においてきわめて重要な意味をもつ。

現在この装置を用いて自由曲面の直接変形を行うソフトウェアを開発中である(図2)。

3. ボリューム・ハプタイゼーション

近年、コンピュータ・グラフィックス技術の著しい進歩に伴い、科学技術データの可視化を行うサイエンティフィック・ビジュアリゼーションが注目を集めるようになった。人工現実感の技術をこの領域に導入すると、可視化情報をリアルタイムで表示してインタラクティブに探索することが可能になる。

一般的な科学技術データは3次元空間に分布するスカラーやベクトル、もしくはテンソルで表される。このようなデータは多くの次元を持つため、可視化を行うことは困難である。最近ではこのような空間的な多次元データの可視化をめざすボリューム・ビジュアリゼーションが研究されるようになった。人間の目は3次元の物体を網膜という2次元の平面に投影して認識するため、中身のつまったボリュームデータをそのまま把握することは一般に難しい。ボリューム・ビジュアリゼーションでは半透明表示という手法を用いられるが、この場合奥の方にあるものが前のものに重なって見えにくいという問題がある。もう一つの表現手法として等値面を用いて特徴抽出を行うものがあるが、等値面のとりかたが難しく、場合によっては誤解を招きやすいという問題がある。各ボクセルのデータがベクトルやテンソルといった多次元量になると、そのまま可視化することは不可能で、アイコンフィケーションと呼ばれる記号化が行われるのが一般的である。流体力学の世界では流線というアイコンが歴史的に用いられてきたが、ボクセルデータの次元の数が増えるとアイコンの作り方は非常に難しくなり、直感的にデータを把握することは困難になる。

以上のような問題に対して、著者は視覚情報に加えて力覚情報を導入することを提案しており、ボリュームデータの力覚表現のことをボリューム・ハプタイゼーションと呼んでいる[2]。「ハプタイゼーション」とは皮膚感覚と筋肉や関節で感じる深部感覚を統合することを意味する「ハプティクス」からとった造語である。人間の力覚は力に関して3自由度、トルクに対して3自由度の情報を検知する機能があり、本質的には合計6次元の情報を認識している。したがって、力覚情報を用いればより高い次元の情報を表現することが可能になると考えられる。ボリューム・ハプタイゼーションの基本的な考えは多次元のボクセルデータを力とトルクにマッピングすることである(図3)。

著者の研究室ではデスクトップでを使用することを想定した6自由度のフォースディスプレイを開発している。この装置はパラレルメカニズムと呼ばれる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機構をもちいている。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持ち、フライトシミュレータ等に利用されている。しかし、可動範囲が狭いという欠点があるため、本装置では直動アクチュエータをパンタグラフリンクと駆動用の遊星歯車機構で置き換える方法を取り、可動範囲を拡大している。図4にこの機構の概略図を示す。このフォースディスプレイが操作者の手先に与えられることができる力は最大で2.3Kgである。また、頂部三角形の可動範囲は直径30cmの球状の空間である。このフォースディスプレイは機構が対称形をしているため、ボリュームデータの表示範囲内で均一な性能が出せるというメリットを持つ。

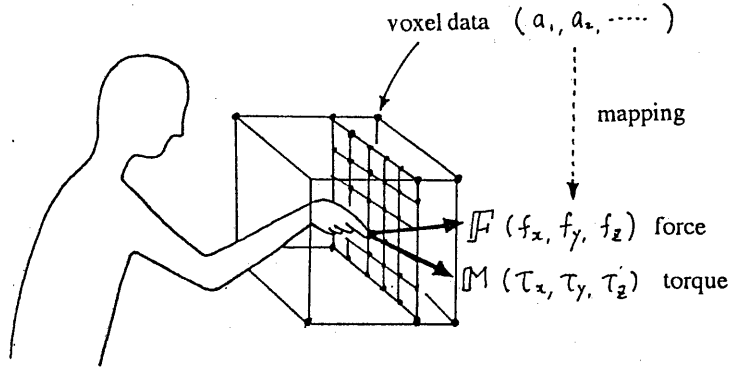


図3 ボリューム・ハプタイゼーションの概念

ボリュームデータの力とトルクへのマッピングの仕方は以下のようなものが考えられる。

(1) ボクセルデータがスカラーの場合

スカラーデータを力とトルクにマッピングする方法には2通りのものが考えられる。一つはスカラー値を軸が一定方向のトルクで表すものであり、この時操作者の手は各ボクセルの位置でねじられるような感覚を受ける。もう一つの方法はスカラー場の勾配 (gradient) をとるもので、これはスカラー場をポテンシャル場に変換するものである。この時操作者の手はポテンシャルの高い方から低い方へ引き寄せられるような感覚を得る。医療画像等においては濃度値が大きく変わるところで領域を選別するという分析が行われるが、そのような場合には勾配を力で表す方法は有効であろう。

(2) ボクセルデータがベクトルやテンソルの場合

ベクトルデータは3次元であるためそのまま力ベクトルに対応させることが可能である。テンソルは2階の場合9つの要素を持つ行列になるため、それらのデータを一度に表すことは不

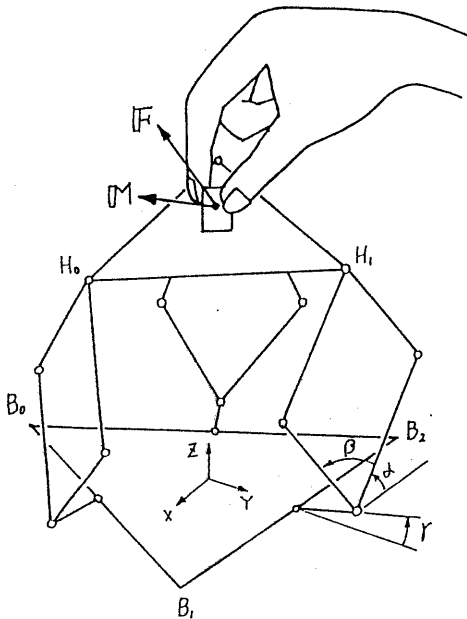
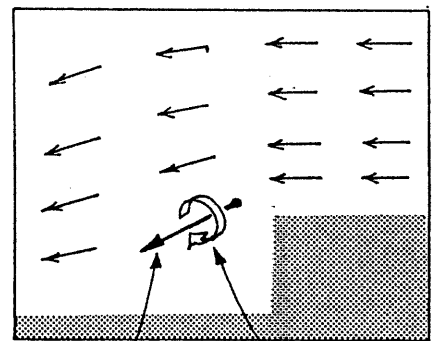


図4 デスクトップ・フォースディスプレイ



force (velocity) torque (vorticity)

図5 流れ場の力覚表現

可能である。したがって、解析を行う際に必要な要素をいくつか選んで力やトルクにマッピングする必要がある。流体力学の可視化の場合には流線を曲線で、渦度の一部を色で表現することが行われるが、フォースディスプレイを用いれば、速度を力ベクトルで、渦度をトルクで同時に表現することが可能になる(図5)。

(3) ボクセルデータが複数のスカラーやベクトルで表される場合

科学技術データは異種のデータを同時に見る必要があることがあり、例えば速度というベクトルと温度というスカラーを重ねあわせることがありうる。このような場合、前者を力ベクトルに、後者をトルクにマッピングすることが可能である。異種のデータの場合はマッピングの仕方が問題であり、例えば、温度と濃度をトルクの2つの軸に対応させた場合は混乱を招くかもしれない。そのような場合にはどちらか一方を聴覚等のまったく異なる感覚チャネルに対応させるのが有効であろう。

著者は以上のようなボリューム・ハプタイゼーションを行うための試作システムを開発しており、半透明のボリューム・ビジュアリゼーションを実時間で表示しつつ、前述のフォースディスプレイを同時に動作させることを実現している。この装置を用いてスカラー場とベクトル場の認識実験を行い、視覚だけの場合に比べて、力覚を加えた場合に認識精度が向上することを確認している。

4. 仮想環境における人工生命

生物の持つ創発的なメカニズムをコンピュータの上で実現しようとする人工生命の研究は近年急速に注目を集めるようになった。人工現実感においても、仮想空間に創発的に成長する物体をおくことは興味深い問題である。3次元立体の造形は人工現実感の重要な応用分野であるが、形状をすべてユーザが決めるのではなく、仮想物体が成長するという事は造形作業に何らかの刺激をあたえることになる。デザイナーや芸術家が生物の形にヒントを得るといことはよく聞く話である。

著者の研究室では仮想環境を構築するためのソフトウェアツールの開発を行っており、このツールを用いて人工生命とのインタラクションを行う研究を進めている[3]。この仮想環境構築ツールはV E C S (Virtual Environment Construstion System)と呼んでおり、物理法則を管理するカーネルに対して、各種のフォースディスプレイとアプリケーションプログラムが接続できるようになっている(図6)。人工生命の例として、木のように枝分かれをして成長してゆく仮想物体をV E C Sの上にインプリメントしている。枝分かれのルールとしては、分岐する位置と方向が確率的に選択されるようなモデルを設定している。図7に成長パターンの例を

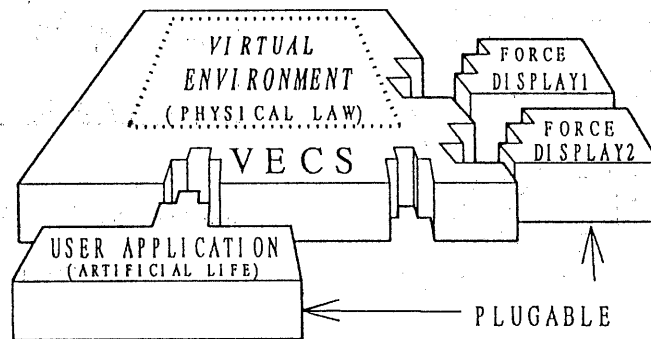


図6 V E C S の基本構造

示す。

仮想環境における人工生命とインタラクトする場合にユーザが操作するパラメータとしては、時間、先天的要素、後天的要素の3つが考えられる。本研究ではこれらの各パラメータを以下のように直接操作している。

(1)時間

VECSのカーネルは仮想世界の諸現象を進行させるための「時計」をもっている。ユーザはこの時計を自由に操作することができる。図7の左端に見えるようなビデオデッキのようなボタンを押すことにより、時間の進む速さや方向を選ぶことができる。

(2)先天的要素

生物は遺伝子の中に形態生成の情報を持っているが、この人工生命では前述の枝分かれルールがそれに相当する。枝分かれの頻度は図8の右端に見えるようなスライダーによって自由に変えることができる。

(3)後天的要素

生物は成長の過程で外界からの影響を受けて変化するが、この人工生命ではユーザの仮想の手によって任意の分岐点で枝を切り落とすことができる。

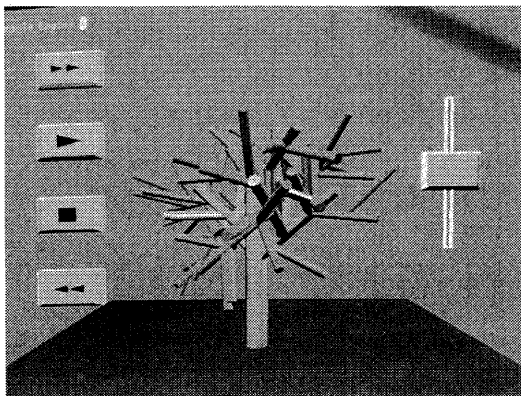


図7 人工生命の成長

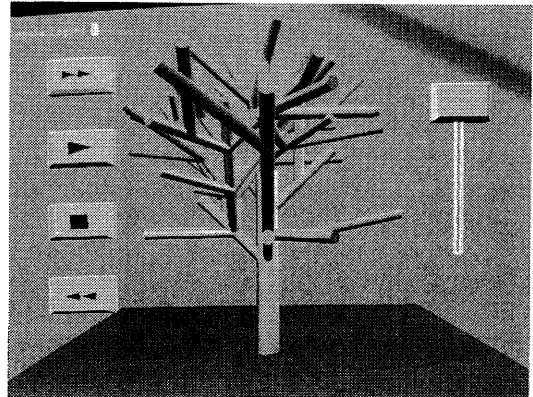


図8 枝分かれ頻度の操作

以上の操作はすべてリアルタイムで行うことができる。仮想環境の中で人工生命を育てる場合に最も特徴的なのは成長の過程で人間が介在することである。それにより、自然発生的な造形と意図的な造形が混在したものをつくることができる。実世界においては、このような造形行為は盆栽に見ることができる。仮想世界では生物自体を任意に定義できるので、新しい造形手法が生まれることが期待できる。

文献

[1]岩田：非装着型力覚帰還環境、第8回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集(1992)

[2]H. Iwata and H. Noma: "Volume Haptization", Proc. of IEEE Visualization'93 (1993)

[3]H. Iwata and H. Yana: "Artificial Life in Haptic Virtual Environment", Proc. of ICAT '93 (1993)