



# バーチャルリアリティの最新技術 (3)

岩田洋夫 (筑波大学)

## 【概要】

岩田研究室では、体性感覚に対する感覚情報表示を主たるテーマとして、以下のような研究を行ってきた。

### 1. フォースディスプレイ

- (1) エグゾスケルトン (外骨格) 型：3本の指先に独立に反力を呈示し、脱着の容易なものを製作した。
- (2) 道具媒介型：ボールやペン等に应用した。
- (3) 対象志向型：直動アクチュエータによって変形する弾性体スクリーンを製作し、映像に直に触れて反力を感じるインタフェースを開発した。

### 2. フォースディスプレイのためのソフトウェアツール

フォースディスプレイのデバイスドライバ、力覚レンダリング、仮想物体の形状、属性、挙動等の記述部をモジュール化したものを開発した。通信機能を持たせることによって力覚を交換する協調作業を実現した。

### 3. 移動感覚の合成

#### (1) 仮想歩行装置

足にスライディングデバイスを付け体をフレームで保持することによって仮想空間における歩行感覚を合成する装置を開発した。

#### (2) 虫の眼シミュレータ

蟻などの小動物の動きを疑似体験する装置を、6自由度のモーションプラットフォームを用いて開発し、科学技術館に常設展示した。

## 【講演口述記録】

バーチャルリアリティの最新技術という事で、私が主にやっております触覚とか力覚のフィードバック技術を中心に、最近の技術動向や、私が最近考えていることについてお話ししたいと思います。まず、力覚のフィードバックなんですけれども、要点だけ申しますと次の3つのやり方があります。エグゾスケルトン型、道具媒介型と、それと対象志向型の3つに集約されつつあります。まだこの技術

は、揺籃期にありまして、今後どうなるかは予想しにくく、おそらく本命は来ないと思うんですけども、ごく大雑把に整理すると大体このような分け方ができます。エグゾスケルトンというのはグローブの様な物で手を覆って、それで指の関節に関して回転力を与えるという物です。それから道具媒介型というのはペンとかボール等の道具を媒介にして、それを通じて力覚を感じるというものです。そして、3番目の対象志向型というのは、これが一番分かりにくいんですけども、操作端末自体が変形したり移動したりしてそれで仮想の触覚を生成するという物です。

2番目の道具媒介型という物が技術的には一番簡単に実現できます。最も簡単な例がジョイスティックです。つまり、2軸のジョイスティックの根本の所にモータを仕込めば、それだけで力覚フィードバックが可能です。最近ではそういったものを実現する製品も出ています。ところが、この方式は装置自体が簡単で、脱着の必要もないというメリットがあるんですけども、残念ながら指と指との間に力を返す事が出来ません。つまり仮想のボールを持って堅い柔らかいという事を感じる事はこの装置で出来ないわけです。そのような事が出来るのはこのエグゾスケルトン型なのですが、この方式は歴史的にはロボット工学の遠隔操作の分野でこれまでに研究されてきて、様々な物ができています。けれども、一般には装置が大きくてコストも高く、普通のヒューマンコンピューターインタラクションの場面では使いにくいというのが現状です。もちろんパフォーマンスは非常に高く出来るんですけども、装置が大きい事と、脱着が非常に煩雑であることが問題です。一個一個指の関節にリンクを止めていくのですが、そういったことがたいへん面倒で、マウスの様に簡単にパッと使うわけにはいかないというのが実用上の問題です。

そして対象志向型の場合ですが、これは非常に新しい考え方として、今ホットな話題を呼んでるのですが、これは入力デバイス自体が変形したり移動したりする事で、手には何も着けなくてもあたかもそこに物があるかの如く感じる事ができる訳です。さらに手の平全部で触るといった面の提示も可能です。こういったことが完全にできれば

理想的なのですが、装置の実現方法は極めて難しいものです。残念ながら再現できる物体には限りがあります。先程、佐藤先生のお話の中キューピーさんの人形が出てきたのを御覧になった方は、お気づきになったと思いますけれども、この対象志向型の入力デバイスの初歩的なものとして、全然変形しないただの人形で代用するというアイデアもあります。つまり、そういう実物を操作端末として、その当たった感じとか大きさの感じとかいうものを掴むという考え方があるんですけども、当然これが変形とか移動をする方がより高い機能があるわけです。

私の研究室では今まで色々なことを試行錯誤してきて、この3通りを一応やってみております。歴史的には1988年ぐらいにこのエグゾスケルトン型の欠点を解消すべく、装置が小さくて脱着もそんなに難しくないと、いう物を作りました。それから、最近ではアプリケーションのことを考えると、この道具媒介型が非常に適していることがわかってきました。つまり6自由度のジョイスティックの様な物を作ると、2自由度の物に比べて格段にいろんな用途が増えます。それで、最近はそのようなデバイスを日商エレクトロニクスに生産を依頼してハプティックマスターという製品にしています。これが手の把持部分に3軸の並進力と、それから3軸の回転力すなわちトルクを呈示するフォースディスプレイであります。それで、これは点接触、つまり把持する点の真ん中に並進力と回転力を与えるという物で、原理は比較的簡単でソフトウェアも他の方式に比べると簡単に出来ます。

そういうわけで、このような一点接触をする道具媒介型というものは、最近では少しずつ物になりつつあります。90年代に入ってからフォースフィードバックの領域は徐々に注目を浴びるようになり、段々製品も出来てきています。アメリカのMITにサリスベリという、ロボット工学の方では非常に有名な先生がいるんですけども、1992年に私が彼に最初に会った時に聞いたことなのですが、彼は、私が1990年のSIGGRAPHに発表した“デスクトップフォースディスプレイ”の論文を読んで「私もこういう事やろうと考えている」という風に話をしていました。ちょうどそのころサリスベリの研究室にいたトーマス・マッシュイという修士の学生がフォースディスプレイの研究をやっていて、卒業後すぐにSensAbleという会社を作りました。そしてPHANTOMというフォースフィードバックのデバイス売り始めたのですが、最近それが非常に人気があります。多分ご存じの方も多と思います。

さて、次にエグゾスケルトン型についてですが、複数の指で仮想物体を掴んだ感じというものが欲しい場合もあ

り、そのような時には指と指の間の反力が必要になります。そうはいつでも「鎧のような物を付けたくない」ということは前から考えておりましたので、このようなものを作りました。実は、この下側の部分というものは、さっきお見せしたハプティックマスターと全く同じです。つまり、三軸のパンタグラフを三組使っています。ハプティックマスターのトッププレートをはずして、そこに三軸のジンバル機構すなわち自由に角度が回転できる機構をくっつけると、指3本に対してそれぞれ別々の力ベクトルを与えることが出来ます。ですから、例えば仮想のボールを掴んでその堅さを感じるとか、重さを感じるというのは、この装置を使って出来るわけです。この上側の写真はハプティックマスターの先端部に3本の指を別々に突っ込んで、仮想の玉を掴んでいるというところです。この装置は後ほどビデオでお目にかけます。

以上がエグゾスケルトンで、それから3番目の「対象指向型」に関して最近どうしているかと申しますと、こんな物を作っております。これはハプティックスクリーンという名前を付けたのですが、スクリーン自体が変形して、なおかつそれを押すと力が返ってくるという物です。数年前からゴムの弾性力を使ってそれに力センサを貼り付けて、それを入力デバイスに使うという研究をやってきたのですが、去年あたりから、さらにアクチュエーターを付けて能動的に変形させる、というような物を作りました。この弾性体はゴム膜にナイロンの伸縮性のある生地を貼り付けたちょっと特殊なスクリーンを作っています。その上からプロジェクターで映像を映し出しますと、弾性体膜の表面に絵が映るわけです。で、単眼式のものを使いますと焦点がかなり深くとれますので、多少表面に凹凸が付いてもちゃんとまともな絵が写ります。ですから、普通立体映像という、平面のスクリーンに視差を付けた三次元の映像を出すということをやるとは、この場合は映像が平面で、スクリーンの方を三次元にしてしまうという発想です。スクリーンの方を三次元にすれば、それに直接触れて凹凸面を感じることができ、さらに力センサーがありますから、弾塑性変形を模擬することが出来ます。

これまでのところをビデオでお目にかけますが、その前にちょっとつけ加えておくと、最近フォースフィードバックの分野が段々注目を集めているのは、やはりアプリケーションが出てきた、というところがあります。どういうアプリケーションで一番ニーズが高いかということ、医療なんです。医療については井関先生からいろいろお話がありましたけど、手術のシミュレーターなんかを作るという時に

は、フォースフィードバックがなかったら基本的に成立しません。というわけで、先程お話ししたPHANTOMも、アメリカでは医療応用に使うというという研究がかなり多くなっています。そういうニーズに支えられて、これからも段々アプリケーションが出ていくと思います。これがまず最初に出てきた「ハプティックマスター」の最近のバージョンです。多少ユニバーサルジョイントなんか改良しまして、可動範囲が広がっています。それで、これがアプリケーションなんですけど、ここに「ハプティックウェブ」と書いてあります。後でちょっとソフトウェアの話をしていきますけど、VRMLフォーマットのデータに対して、見るだけじゃなくて触れるようにするというソフトウェアを開発中です。あれは、インターネットに公開されているレンジファインダで作られた絵なんですけども、それに対してハプティックマスターを使って、その表面の凹凸感というものを触れるようにする、というソフトウェアを作っています。

それから、これは医療応用の例なんですけれども、昨年度からオリンパスと共同で、手術のシュミレーターを作っておます。これは、ラパロスコープすなわち、腹腔鏡の手術のシュミレーターです。そこに映像がありますけども、テクスチャーマッピングした「臓器」に、二本の鉗子の様な物で触れて変形させるというところまで出来ています。これはこの応用のために、若干可動範囲を小さくて精度を上げたフォースディスプレイを作っています。これは「ハプティックマスター」を改造したものです。これが、「ラパロスコープ（腹腔鏡）」を想定したシュミレーションの映像で、本物の臓器の写真を自由曲面にテクスチャーマッピングして、なおかつ、触れた感じの弾力を感じるようになっていきます。

これがエグゾスケルトン型で、三本指に別々に力を介するようなものです。下半分のところはハプティックマスターと同じなんですけど、上にこのように三軸のジンバルを取り付けて、それぞれの指が別個の姿勢をとれるようになっています。可動範囲をは大体30センチ立方ぐらいだと思ってください、今、仮想のボールを掴み上げているところです。画面に小さい点が3つありますが、あれが仮想の手の指先でして、あれで挟み込んで、物を掴んで、堅さとか重さを知ることが出来ます。

これが先ほど申し上げた「ハプティックスクリーン」です。これは三次元の映像を出しているのではなくて、二次元の絵に対して、スクリーン自体が変形しているのです。こうやって凹凸面が出てきて、なおかつ手で触ると、触って変形させたり、その変形させる時の反力を感じる事が出来ます。これは力センサーが付いておりますので、完全な

弾性体から粘土のような塑性体まで自由に変形させることができます。それで、これが種明かしで、スクリーンを取りますと、下に直動アクチュエーター、今回の場合ですと五本使っていますけども、それが見えてきます。その直動アクチュエーターの先端にひずみゲージを使った力センサが付いています。先程は弾性変形の例でしたけれども、こういった塑性変形もできます。粘土みたいに押していくとめり込んでいく様な変形をさせることも出来ます。そして、こんな風に掴み上げても、スクリーンの方がくっついてくるといような制御をかけることも出来ます。

ではビデオ止めて下さい。

これまではハードウェアの話をしてきたのですが、ソフトウェアの問題についてもお話ししたいと思います。フォースフィードバックの技術は、そのデバイス自体が揺籃期にあるということで、そのソフトウェアまで手が回らないというのが現状なんですけども、それではこれから段々アプリケーションを蓄積していくのに問題になるということで、どういったらそういったソフトウェアの開発環境が出来るのかという問題を数年間考えてきました。重要なのは、このカーネルを中心にして、視覚系のレンダリングと、力覚系のレンダリングと、それからアプリケーションをそれぞれモジュール化していることです。従来フォースフィードバックの研究といいますと、この力覚レンダリングやデバイスドライバに密着した形でアプリケーションが付いているというのが多かったわけです。アプリケーション自体があまり複雑でない場合はそれでもいいんですけども、例えば手術のシュミレーションなんかをしようというときに、非常に複雑な臓器のモデルなんかを持たせると、これはとてもローカルに全部閉じる様な問題ではないわけです。モデルが別にあるに対して力覚のフィードバックをかけるということになりますから、これを当然分離する必要があるわけです。

モジュール化を行いますと、例えばフォースフィードバックのデバイスドライバを差し替えると、ここがエグゾスケルトンであってもいいし、ジョイスティック型の様なものであってもいいというわけです。それから、力覚のレンダリングに関しては、ごく簡単な、例えば堅い表面とか、ある弾性値を持った柔らかい面とかいう物は、そういう物理定数を持ってくれば、ここにレンダラーが完成するというわけです。

そして、アプリケーションというのは、その仮想物体の形状とか特性とか挙動とかいうものを書いておくプログラムであるわけです。カーネルというのは、こういった各モジュールの間のデータの交換をするような共有メモリをハ

ンドリングする部分です。プロセス自体は、主に視覚系とそれから力覚系を分けるということをやります。つまり、視覚系のレンダリングってというのは毎秒 10回とか、20回とかいう、それぐらいのアップデートレートでもそれらしく見えるのですが、力覚系の場合は40Hzを切ったら破綻します。我々の所では 50Hzで回すようにしてるんですけども、それぐらいのアップデートレートで回すと、なんとかそれらしい感触は出ます。この部分だけを特化して計算機の中で実装すれば1kHzというアップデートも出るので、そこまで速いことをやる時には、モデル自体を非常に簡略化する必要があります。ですから、複雑なモデルを持つてくるということが出来なくなります。

今、医療分野なんかで問題となっているのは、例えば血管だとか、そういう臓器の複雑なモデルを持ってきてそれに対して力覚フィードバックをかけるという時に、例えば、ここが200Hz、300Hzという様なローカルなフィードバックでまわってても、モデルのハンドリングが毎秒2回とか3回とかしかできないと、結局非常にバンピーな感触になってしまいます。それをどうするか、というのは多分これから問題になるはずで。

視覚系のレンダリングに関しては、私のところではOpenGL以外の物は使わないようにしています。これが入れ替わると非常に煩雑ですから、この部分に関しては既存のものしか使っていません。それから、通信に関する機能もあって、これは他のサイトと色々なデータの交換が出来るんですけども、今までやっているのはインターネットを通じて力覚の交換をして二人羽織のようなものやるとか、それから先程ビデオでやりました「ハプティックウェブ」があります。アプリケーションの中のモデルの部分で、自分で書くのではなくて別の所にあるものを持ってきて、それに対してこちらで触れるようにするというようなことをやる、というソフトを作っております。

それでは後半は、移動感覚の合成についてのお話に移りたいと思います。仮想空間の中で移動する感覚をどうやって作るかということをやったことを8年ばかりやってきて、最近では段々使い物になる物が出来てきました。ここの左上にありますのが、1989年に作った一番最初の物ですけど、パラシュートみたいな安全ベルトで体をつりさげて、それで足をジタバタさせるというものに始まりました。これが昨年作った最も新しい物ですけども、足に特殊な滑走装置を付けて、体の周りにこのような円形の輪を置いて、その円形のフレームの中を自由に歩き回ります。その時の足の動きを計測して、足の動きに合わせてHMDの映像を出すと、自分が動いているという感覚をつくる、すな

わち体性感覚から自分の移動を作っていく、ということが出来ます。これは後ほどビデオで紹介するということにします。

それと、もう一つ、これも昨年からはじめた移動感覚のものなんですけども、モーションベースを使って体全体で慣性力を受けるといったものがあります。傾くことによって前庭感覚を刺激したり、それから体全体が加速度を得ることによって慣性力を感じるというものです。これがどういう物が今出来ているかと申しますと、6軸のモーションベースを使っています。この装置は蟻とか魚とか非常に小さな動物の生活する空間を疑似体験するという目的で使っています。なぜこういうことを始めたかということ、このアプリケーション自体は、北の丸の科学技術館にこの4月からオープンした新しい展示としてつくったものです。この学会の発起人の1人でもある下條先生が総合プロデューサーをやっておられて、そこで「イリュージョン」という新しい展示のスペースができています。その中の一つとしてこれを作ったわけです。この新展示は従来の科学技術館・科学館とかそういうものは、基本的には予算の消化という様な意味合いしかなくて、本当に表現したい人の主張が展示物にこめられていないという問題意識が根底にあります。

それでは、どうやって虫の動きを再現するかと言いますと、この小型のビデオカメラ、これは工業用の内視鏡なんですけれども、この先にポヒマス(Polhemus)センサを付けて、映像を取りながらなおかつ位置も取るということをやります。さらに、撮った映像に対して、その虫のいる場所を画像処理で検出してカメラから見た虫の位置を割り出すということをやります。ポリマスセンサの値と、画像処理の結果の座標変換を重ね合わせると、地面から見た虫の動きというものが取れます。そして、地面から見た虫の動きに対応するようにこのモーションベースの加速度を体に与えると、あたかも自分がこの内視鏡の先の辺りにいて、この虫と同じ様な動き方をするというような感覚が得られるわけです。

あまり時間がないんですけども、少しつけ加えておきますと、先程広瀬先生から大画面についてのお話をいろいろ頂きましたけれども、私も個人的には球面スクリーンというのが非常に好きで、以前からいろんな事をやりたいと思っていました。けれども、球面スクリーンが非常に難しいのは、プラネタリウムの様な物を連想して頂けると分かるんですけども、映像の映る半球の外側から見えないといけません。つまり、半球の中に入って「さあ立体映像に手を伸ばそう」なんていう事をやると、自分の頭がその

ドームの中に影となって出てきてしまいます。原理的には立体角でいうと $2\pi$ 、つまり、その球の半分以上には映像は表示出来ません。というわけで、インタラクティブな環境を作るためには、どうしても背面から投影しなくては行けないんです。ところが、そういう丸いスクリーンに背面から投影するという製品は世の中には存在しません。おそらく特殊なレンズを作れば不可能ではないんでしょうけども、残念ながらそういう製品がないわけです。そこで、既存のプロジェクターを使ってだましだまし背面投射の背面スクリーンを作るという事を最近検討しています。ちょうど去年の今頃ぐらいからいろいろ考え始めて、たまたま文部省の補正予算が付いたという事もありまして、その球面投射の球面スクリーンを設計しております。それから、そういった問題からどうしても完全な球にするというのが難しいところがありまして、例えば多面体で近似したらどうなるかなという事も最近考えております。それでは、以上のロコモーションに関する事をビデオで紹介したいと思います。

これが仮想歩行装置の全景です。左隅の映像がHMDに出ているものです。これが滑走装置のアップです。ポヒマス(Polhemus)センサをつま先にくっつけて、それでつま先の三次元的な位置を取っています。足元を見れば仮想の自分の足も見えます。最近ではこれを使って、仮想の階段を登ったり降りたりするというものを作っています。この装置は昨年のSIGGRAPHに丸ごと持って行きましてデモを行いました。こういったものは不特定多数の被験者を使って実験をやらなければいけないわけで、被験者は向こうからいくらかでも来るSIGGRAPHの会場でデータを取りました。合計235人のデータが取れたんですけども、95%の人がこれを使って自由に歩くことが出来るという結果を得ています。

これが標準的な人の歩く風景です。最初はぎこちなく足をバタバタしてるんですけど、だんだん自由に方向を変えたり、走ったりという事が出来るようになってきます。

これは割と上手い人の例で、こうやって自由に走り回ることが出来ます。このような丸いフレームを使ったのは、方向変換をいかにスムーズにやるかという問題を解決するためです。最初はベルトで固定していたんですけど、やはり本当に自分で回転するという動作をしないと回った感じがしないので、こういう様な輪を使った方法にしています。

これが最年少の被験者でして、確か6歳の女の子だったと思います。これぐらい小さな子でも体験することが出来ます。

これが虫の目のシュミレーターで、先ほど一瞬写ったのが背面投射の球面スクリーンです。これが6軸のモーションベースで、これは電動モータを使っています。これが球面スクリーンに映し出されたアリが動いているところですが、アリが動いているの見えるか？ 液晶プロジェクターの映像をそのまま撮っているので少し見にくいのですが。このアリの動きと加速度を取ってこの下のいすを動かしているわけです。これが金魚でして、水槽の中に内視鏡を突っ込みまして金魚を一生懸命追っかけ回したのがこの映像です。金魚ってのは結構こう動きが速くて、一瞬でシューッといなくなってしまうんです。それを一生懸命追っかけたという映像です。

この展示自体は4月21日から、科学技術館の方で常設で展示が始まっております。常設ですからいつ行ってもごらん頂けますので、近くにお寄りの際は是非ごらん頂きたいと思っております。

そろそろ時間ですので最後にまとめますと、主に触覚とか力覚を使ったメディアというものは残念ながら今はまだ存在しないわけです。それで、電子メディアにはいろんなものがありますけれども、これまで日本に入ってきた物は、例えば映画にしても電話にしてもラジオにしてもほぼ技術的には解決されて、その利用の仕方もおおむね明らかになっているという状態で日本に来たというのが実状です。最近のインターネットに関してはどうなるのかわからない状態で、日本は遅れているといいながらも現在進行形でトライされているわけです。ようやく追いついたかなという感じがします。それで、触覚のメディアに関してはまだメディアとして存在しないわけで、もしかしたら全然メディアとしては使われないで終わってしまうかも知れないし、これが盛大に花開いて世の中の多くの人が使うようになるかも知れないですけども、いずれにしてもこれから、おそらく5年とか10年とかは時間はかかると思います。本日ちょうどバーチャルリアリティ学会が出来ましたが、このVR学会の進歩とともに、この触覚のメディアという物が一緒に成長してくれたら非常に嬉しいと思っています。

以上でございます。

(News Letter No. 5より転載)