

解 説

ハプティックインタフェース

Haptic Interface

岩 田 洋 夫* *筑波大学機能工学系

Hiroo Iwata* *Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

1. は じ め に

近年バーチャルリアリティの研究領域では触覚呈示に関する研究が活発に行われている。実世界においては人間は体全身で情報を享受するのに対して、仮想世界ではほとんどの情報が視聴覚で提供されているのが現状である。技術的に見れば、視聴覚以外の感覚情報を人工的に合成することには多くの困難が伴う。音や光を電気的な手段で作出す技術は19世紀から進められてきて、現代では非常に高度なものが普及している。一方、触覚を人工的に合成する技術は少なくとも情報メディアとしてはほとんど普及していない。この感覚は人体と外界との物理的な相互作用があって初めて発生するものであり、自身の運動と不可分であることが視聴覚と著しく異なる。さらに、体全身の任意の場所で発生するため、この感覚を人工的に合成することは極めて難しい。逆に言うとそれだけだまされにくい感覚であるといえる。

本稿のタイトルであるハプティックインタフェースとは、人間が仮想世界に触れた際に発生するであろう感触を呈示する装置のことを意味する。ハプティクスとは「結合」を意味するギリシャ語を起源にする言葉であるが、今日では皮膚や筋肉の感覚受容器が相互に結合して発生する感覚という意味合いで使われる。日常的に使われる「触覚」という言葉に比べると、ハプティクスはより本質を捉えた言葉であるといえる。生理学などの専門領域ではハプティクスに対応する感覚は体性感覚と呼ばれる。体性感覚とは、皮膚に分布した感覚受容器の検出する情報と、筋肉や関節にかかる力の感覚が複雑に合わさったものである。

バーチャルリアリティにおいて触覚呈示という場合は、上記の皮膚感覚と深部感覚に対する刺激を合成することを意味する。皮膚感覚と深部感覚の刺激はその方式が大きく異なる。皮膚感覚のみの刺激を与えるものはタクトイル・ディスプレイと分類され、狭義の触覚ディスプレイはこ

らをさす。一方、深部感覚に刺激を与えるものはフォースディスプレイと呼ばれ、これは力覚ディスプレイとも呼ばれる。フォースディスプレイとハプティックインタフェースはほぼ同義語として用いられることが多い。深部感覚に刺激を与えるためには機械的な外力を人体に与えることが必要である。この外力が大きなものになると安全面での問題が深刻になる。本稿では以上のような背景をふまえ、ハプティックインタフェースに関して主に安全性の観点から技術課題を概観しようと思う。

2. ハプティックインタフェースの構成法

ハプティックインタフェースの主たる役目は、前述の深部圧覚に訴えるような外力を人体に加えることである。人間の手や、場合によっては体全体の発生する力に拮抗する外力を生成しなければならないため、フォースディスプレイの実現には機構面、制御面での課題が多い。そのため、この技術は未だに模索の段階にある。

従来よりロボットの遠隔操作の研究に用いられたマスターマニピュレータは、計算機に接続することによりハプティックインタフェースとして使用することが可能である。実際、1980年代までは遠隔操作用のマスターマニピュレータをフォースディスプレイとして用いようとする試みが行われてきた[1]。しかし、これらの装置は部屋を占拠する大型のものであり、ヒューマンインタフェースという観点からすると使用に耐えないものであった。筆者は1989年に、この問題に対する解決法としてデスクトップ・フォースディスプレイという概念を提案し[2]、試作機の改良を続けてきた。これはマウスの動く領域を立体的にしたような可動範囲を持ち、様々なデスクワークとの共存が可能であることを特徴としている。図1は1994年にHapticMasterという名前で日商エレクトロニクスを通じて製品化を行ったデスクトップ・フォースディスプレイである。この装置では、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並列に配置されている機構を用いている。この機構は、コンパクトなハードウェアで六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つ。力とトルクを両方呈示するためには6自由度の機構が

原稿受付 1999年5月12日

キーワード: Virtual Reality, Force Feedback, Haptics, Locomotion Interface

*〒305-8573 つくば市天王台1-1

*Tsukuba-shi, Ibaraki

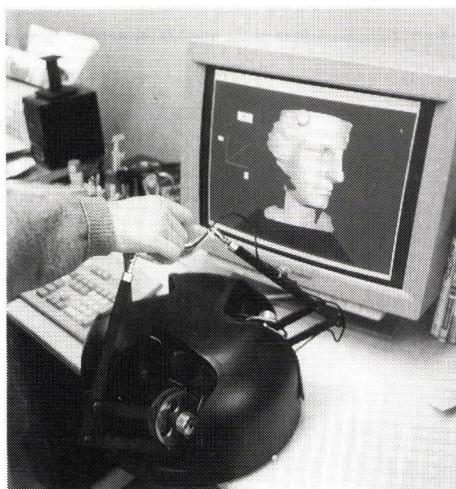


図1 ハプティック・マスター

必要であるが、これをデスクトップにのるような小型のものにするためにはパラレルメカニズムが大きな利点を持っている。また、別な利点として可動範囲が球形で機構的特性が等方的であるため、限られた可動範囲が有効に使えることである。一般にパラレルメカニズムは特異点を多く含むが、この装置はアクチュエータを9個用いることによってそれを除去している。

近年ハプティックインタフェースの製品が少しずつ世の中に出回るようになってきたが、それらのほとんどが、2ないし3の自由度をもつデスクトップ型のものである。デスクトップにのるということは、機構自体が軽量小型でなければならない。そのため、重力や慣性の補償をする必要がなく、モーターも小さくできる。装置が小型軽量であることは、安全面において有利であることは言うまでもない。万が一暴走しても、それが動く範囲と力が知れていれば心理的にも安心である。

フォースディスプレイの駆動機構は一般にロボットアームのような多関節機構が用いられるが、装置の自重が大きくなるのが問題である。その対策として糸の張力を用いる方法がとられてきた。1980年代にNIHで試作されたJoy Stringと呼ばれる装置は9本の糸を使って6自由度の力覚フィードバックを実現していた。おもしろい機構ではあるが、これがアプリケーションに供されたという報告はない。実物を見た人も少ないのであるが、特異点が多いため実用上の問題が多かったという話を筆者は聞いたことがある。バーチャルリアリティに応用された例として代表的なものは佐藤らの開発したSPIDARがよく知られている[3]。糸を用いた方式の最大の長所は手に接する部分が極めて軽量にできるということであり、これは安全性という観点からも好ましい特徴である。一方欠点としては、糸は推力が発生できないため装置全体の大きさに対して力を

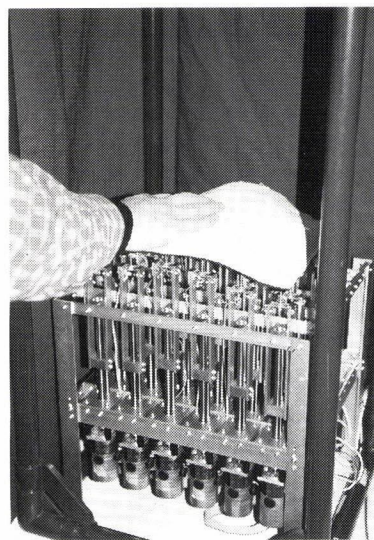


図2 ハプティック・スクリーン

呈示できる領域が小さいことと、複数の作用点を設けた場合に糸が相互に干渉してしまうことが挙げられる。

ハプティックインタフェースの新しい構成方法として、筆者が対象指向型という名前で分類するものがある。対象指向型とはインタフェースデバイス自体が変形したり移動したりして仮想物体の形状を模擬するものである。この方式に相当するものとしては、直動アクチュエータアレイを手の動きに合わせて伸縮させるもの[4]、面や稜線などの形状要素を模擬する立体を手が接触する位置に遭遇させるもの[5]等が提案されている。

この方式は原理的には手に何も付けなくても仮想の触覚が得られるというメリットがある反面、インタフェースデバイスの実現が極めて難しく、再現できる形状に限界がある。筆者は自由曲面の操作という応用に絞ってHaptic Screenというものを開発している[6]。これは映像を投影するスクリーンの下に力センサーの付いた直動アクチュエータをアレイ状に備えており、スクリーン自体に任意の硬さや粘さを与えることができる(図2)。映像に直接触れる感覚が得られるのがこの装置の特徴である。原理的にこの装置は力制御で駆動されるが、ユーザーが仮想物体に触れているときしか動かないため、他の方式に比べて安全性は高いといえる。

3. ロコモーション・インタフェース

ハプティックインタフェースは通常手に反力を与える装置を意味することが多いが、人間が外力を受ける場所は手に限ったことではない。特に足は移動感覚を得る上で重要な役割を果たす。乗り物に乗っているときよりも、歩いているときの方が距離感や方向感覚が優れていることはだれでも体験することであろう。仮想世界の中を移動するとき

の歩行感覚を与える装置はロコモーション・インタフェースと呼ばれる。足に床からの反力を与えるという意味において、ロコモーション・インタフェースもハプティックインタフェースの一種である。この装置は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機能を有する。このような機能を実現するためには、歩行者が床を蹴って歩くときに、前に進む動きを打ち消す仕掛けが必要になる。最も簡単な実現方法は健康器などで使われるトレッドミルやステップマシンに方向変換用のジョイスティックなどを組み合わせたものであるが、これらの方法は、方向変換が本来の歩行動作と異なっている。方向変換を含めて人間の歩行動作に対応した仮想歩行装置の方式としては、歩行者が自ら滑り運動を行う「パッシブ式」と、外部からの動力で打ち消し運動を加える「アクティブ式」に大別することができる。前者は装置が簡単に実現でき、アクチュエータを用いないために安全性が高い。しかし、歩行者が自分で滑り運動をしなければならないところに実際の歩行運動との差異がある。後者の場合は、原理的には歩行者は自然な歩行動作が可能になるが、装置の実現とその制御が非常に複雑になるため、現実問題としては多くの制約がある。

筆者らの研究室ではパッシブ式の仮想歩行装置を従来より開発してきた [7]。この方式の最終的な形態は、バーチャル・ベランビュレータと呼んでいるもので、滑り運動をしやすくする加工を施した特殊なサンダルを履いた人が円形フレームの中を歩くものである [8]。歩行者は図 3 に示すような円形フレームの中で自由に方向を変えることができ、仮想空間内を進むときはフレームを手で掴むか体を押し当てて、足の滑り運動を起こす。パッシブ式の最大の利点は前述のように、アクチュエータを使わないため制御面での問題が発生しないことである。滑走装置を適切に設計すれば安全性の問題はほぼ解決する。一方、この方式の限界は歩行者が自分で足を引き戻す動作をしなければならないため、それをスムーズに行うために慣れが必要なことである。

「アクティブ式」の具体例としては、米国 SARCOS 社の開発した BIPORT というものが挙げられる。これは油圧で駆動される大型マニピュレータの上に両足をそれぞれのせるものである。任意の凹凸面や泥濘地の歩行感覚が模擬できるが、体を反転させるような方向変換はできない。「アクティブ式」のもう一つの例として、米国 Virtual Space Device 社の作った Omni-Directional Treadmill というものがある [9]。これは、直行する二つのベルトを用いるものである。それぞれのベルトには進行方向と直角に回転する小さなコロがベルト全体に編み込まれており、下のベルトの運動によって上のベルトのコロが回転させられる。そのため、下のベルトの運動が上のベルトを通過して歩行者に与えられることになり、結果として任意の方向の並進運動が実現できる。この装置によって、平面に関してはすべて

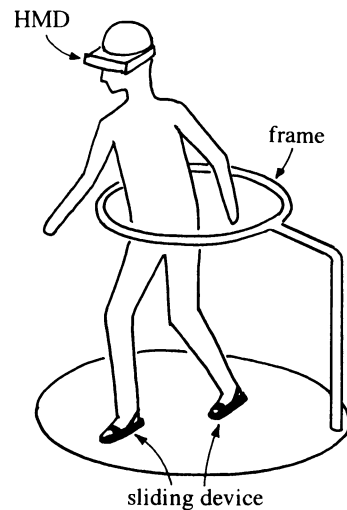


図 3 バーチャル・ベランビュレータ

の動きを打ち消すことが可能であるが、コロの発生する騒音が激しく摩耗が早いことや、手をベルト面についたときにコロに噛みこまれる危険性があるといった実用面の問題が多い。

アクティブ方式の理想的な方法は、無限に広がる平面を作りそれを人間の歩行に合わせて逆方向に動かすことである。理想的な無限平面は歩行者の乗る部分が平面になっている閉曲面である。そのような閉曲面を歩行者の運動に合わせて駆動すれば、実空間では体が動くことなしに歩行運動をすることができる。この場合どのような閉曲面を用いればよいかということが、設計の出発点になる。位相幾何学的には閉曲面は n 個の穴を持つドーナツとして定義される。閉曲面を駆動することを考えると、現実的に意味を持つのは穴が 0 個か 1 個のものである。0 個のものは球であり、1 個のものはトーラスと呼ばれるドーナツ状の閉曲面である。まず球の場合を考えると、最大の問題は歩行者が載る部分が平面にしにくいことである。閉曲面の表面は伸縮させることはできないので、平面に近づけるためには直径を非常に大きなものにしなければならない。一方、トーラスはベルトの集合で作ることができるので、歩行者が立つ部分は完全に平面にすることができる。したがって、仮想歩行装置として必要十分な閉曲面はトーラスであるという結論を得ることができる。トーラス状の閉曲面は各ベルトにモータを付けて左右方向の運動を打ち消し、ベルト全体をレールに載せて回転させ前後方向の動きを打ち消すことができる。図 4 はトーラストレッドミルと名づけたこの方式の試作機である [10]。

アクティブ方式は歩行者の運動を打消すために床の制御を適切に行うことが不可欠である。床の動きが不適切だと転倒等の危険に直結する。この問題を解決するために、



図4 トーラス・トレッドミル

バーチャル・ペランビュレータで採用した円形フレームの概念を導入した。すなわち、可動床の中央に円形の不感領域を設け、歩行者がこの中にいるときは床を動かさず、そこから出たときは中心からの変移量に比例した速度で床を逆方向に動かす。中央で体を回転させる動作に対しては床が動かないため、チャタリングを除去することができる。この制御アルゴリズムは、初めてこの装置を体験する人に対しても有効に機能している。これまでに80名を超える来客が体験したが、床の動きによって不安定になる危険は発生しなかった。他のアクティブ式のものは歩行者の体をハーネスで吊るすことが一般的であるが、トーラストレッドミルではそのようなハーネスは使っていない。

4. お わ り に

本稿で述べてきたようなハプティックインタフェースの技術はまだ緒についたばかりであり、多くの課題を抱えている。実際問題として安全性を云々する以前に解決しなければならないことが少なくない。ジョイスティックなどの道具を媒介にした間接的な方式では表現できるものに限界があることは否定できない。フォースディスプレイの提供する呈示力から対象物のイメージを形成することができない人は一定の割合で存在する。実世界では目や耳の盲に比べて触覚の盲は極めてわずかであるが、筆者の経験では仮

想世界においては無視できない触覚盲が存在する。

ポケモン事件が起こって以来、電子メディアが人体に与える影響についての関心が高まっている。バーチャルリアリティシステムの生理、心理的影響に関する調査研究は、この事件が起こる前から行われていた。筆者は影響要因の一覧表を作成する作業を担当したが、体性感覚に関する要因がほとんど研究されていないことを発見した。そのような実験をするツールがこれまでになかったのだから当然かもしれない。今後は、装置の方式を開発することと並行して、影響評価を考えていく必要があるだろう。

参 考 文 献

- [1] Brooks, et al: "Project GROUPE Haptic Displays for Scientific Visualization," Proc. of SIGGRAPH'90 ACM Computer Graphics, vol.24, no.4, pp.177-185, 1990.
- [2] 岩田: "力感覚に対応した人工現実感", 計測自動制御学会第5回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.1-4, 1989.
- [3] 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, PRU89-88, 1989.
- [4] Hirota and Hirose: "Simulation and Presentation of Curved Surface in Virtual Reality Environment Through Surface Display," Proc. IEEE VRAIS'95, pp.211-216, 1995.
- [5] 平田, 星野, 前田, 館: "人工現実感システムにおける物体形状を提示する力触覚ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会論文集, vol.1, no.1, pp.23-32, 1996.
- [6] 岩田, 市ヶ谷: "Haptic Screen," 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, vol.1, pp.7-10, 1996.
- [7] 岩田: "大規模仮想空間を歩行するための人工現実感", Human Interface News and Report, vol.5, no.1, pp.49-52, 1990.
- [8] H. Iwata and T. Fujii: "Virtual Perambulator: A Novel Interface Device for Locomotion in Virtual Environment," Proceedings of IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium, pp.60-65, 1996.
- [9] R. Darken, W. Cockayne and D. Carmein: "The Omnidirectional Treadmill: A Locomotion Device for Virtual Worlds," Proceedings of UIST'97, pp.213-221, 1997.
- [10] 岩田, 吉田: "無限平面を用いた仮想歩行装置", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, vol.2, pp.254-257, 1997.



岩田洋夫 (Hiroo Iwata)

1957年7月11日生。1981年東京大学工学部機械工学科卒業, 1986年同大学院工学系研究科修了(工学博士)。筑波大学助手を経て, 1993年より同大学助教授。主にバーチャルリアリティの研究に従事しており, 特に力覚フィードバック技術の実現とその情報メディアとしての活用に関する活動を行っている。日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマン・インターフェイス学会, 日本機械学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)