体性感覚呈示技術

岩 田 洋 夫^{1†}

¹ 筑波大学 システム情報工学研究科

要旨 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（皮膚感覚）と、筋肉や関節にかかる力の感覚（深部感覚）が複雑に合わさったものである。これらの感覚に合成的な情報を提示するためには、機械的な装置が必要であり、実装には多くの困難が伴う。本稿では、手による物体操作と足による歩行に着目し、体性感覚呈示技術の現状と課題を紹介する。

キーワード：体性感覚、ハプティックス、バーチャルリアリティ、触覚、力覚

1. はじめに

今日、電子メディアといえば、それに相当するものは視聴覚メディアである。視聴覚メディアの持つ最大の特徴を挙げるとすれば、それは身体性の喪失という点であるといえる。電話やテレビは人間の目と耳の届く範囲を飛躍的に広げた。最近ではインターネットによって、オンデマンドで映像が見られる時代になっている。これらの映像技術は人間の知的活動を身体から分離する結果を生んだ。座ったままボタンを押すだけですべての用が足りる生活すら現実のものとなりつつある。

しかしながら、映像を通じた体験が高度にインタラクティブになると、話は変わってくる。自分の動作が映像の中にダイレクトに反映されるようになると、動作に対する体感的なリアクションが欲しくなる。実世界では人間が行動すれば必ず物理的な抵抗が発生する。水中に浮遊すると別世界のような感覚が生まれるのは、人間が日常無意識に様々な外力を受けている証拠である。映像の世界と密にインタラクションを交わすようになると、ふだん、あたりまえのように感じている様々な抵抗力の欠如が不自然に思えるようになる。かくして、最近ではバーチャルリアリティの研究領域において、合成的な触覚を呈示することに関する研究が活発に行われるようになった。

バーチャルリアリティが他のメディア技術と最も異なる点は、人間の様々な感覚器官に対して合成的情報を呈示することにある。そのため、この研究領域では多種多様なインタフェースデバイスが開発されてきた。人間は豊かな感覚受容能力を有しているため、これを活用するようなメディア技術を開発することは非常に重要である。従来コンピュータと人間の接する場はキーボードやマウスといった極めて狭い感覚チャンネルを通じて

行われていた。現在標準となっているこれらのインタフェースデバイスは人間の知的活動を制限しているとみなすことができる。つまり、インタラクションを行う環境が、記号的には複雑だが物理的には単純という歪を包含している。自然界で人間が活動する場は物理的な複雑性をもっており、それが人間に智慧をもたらしてきた。メディア技術を用いた知的活動も同様に物理的複雑さが必要である。したがって、物理的複雑さを人間に知覚させる複合的な感覚をいかに表現していくかという課題が、体性感覚呈示技術の本質である。本稿では、以上のような視座に立って、体性感覚呈示技術の諸課題を解説する。

2. ハプティックス

人間の感覚は日常的には五感と呼ばれるが、学術的には、従来より以下のように分類されている。

- 1) 特殊感覚 視覚・聴覚・味覚・嗅覚・前庭感覚（平衡感覚）
- 2) 皮膚感覚 触圧覚・温覚・冷覚・痛覚
- 3) 深部感覚 運動覚・位置覚・深部圧覚・深部痛覚
- 4) 内臓感覚 有機感覚（空腹感、はきけ等）・内臓痛

特殊感覚とは、特化した感覚器官が存在する感覚であり、日常会話でいう五感の内4つまでが特殊感覚に対応している。一方、皮膚感覚と深部感覚を合わせたものが体性感覚である。これは、皮膚に分布した感覚受容器の検出する情報（皮膚感覚）と、筋肉や関節にかかる力の感覚（深部感覚）が複雑に合わさったものである。

体性感覚呈示技術を議論する際に、最も重要なキーワードが「ハプティックス」である。この言葉は「結合」を意味するギリシャ語を起源にするが、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、ハプティックスはより本質を捉えた言葉であるといえる。この感覚についての基礎研究は必ずしも多いわけではないが、文献(1)、(2)のような知見が得られている。また、工学の立場からハプティックスについてまとめられたものとしては、Burdeaによる文献(3)がよく知られている。

2007年2月6日受付

[†] 〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1

筑波大学 システム情報工学研究科

岩田 洋夫

Tel: 029-853-5362

E-mail: iwata@kz.tsukuba.ac.jp

体性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。デカルトが「現実」という言葉に与えた哲学的な定義は、「触れた際に抵抗があるもの」であり、見えるけれども手を差し延べると突き抜けてしまうものは「幻」とであると言った。視聴覚チャネルでは幻が作り易いのに対して、体性感覚チャネルで幻を作るのは容易ではない。これが、体性感覚呈示技術がいまだに世の中に普及していない最大の原因である。

したがって、体性感覚呈示技術を開発するためには、対象を絞る必要がある。筆者は手指で物体に触れる行為と、足で歩いて移動する行為に着目して、1980年代の終盤から研究を続けてきた。次章以下に、その過程で得た知見を整理して解説する。

3. 手指によるハプティックス

人間が外界と相互作用を持つ時に、最もよく用いるのは手に他ならない。物体を操作する時には手と指の機能をフルに活用する。そして、操作の過程で物体からの反力を受け、それが「手応え」として知覚される。バーチャルな世界においてこのような手応えをどうつくり出すかという問題に対する研究が、近年急速に活発化している。

バーチャルリアリティの研究領域において触覚呈示という場合は、前述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ちらをさす。一方、深部感覚に刺激を与えるものは力覚ディスプレイと呼ばれる。力覚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く、本稿の表題も主に深部感覚に刺激を与えるデバイスを意味している。

歴史的には、手指に力覚を呈示する装置は、ロボットの遠隔操作に用いられるマスターアームが存在していた。遠隔のロボットの力センサーが検出した信号を、操作者の手に感覚呈示する

のがこの装置の役割である。このマスターアームをコンピュータに接続すれば、バーチャルな物体を操作した際の手応えを呈示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アームをハプティックインタフェースとして用いようとする試みが行われてきた。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、メディア技術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、試作機の改良を続けてきた。図1はデスクトップ・フォースディスプレイの第一号機である。これはマウスの動く領域を立体的にしたような動作範囲を持つ。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並列に配置されている機構を用いている。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。ハプティックインタフェースとして用いることを前提に開発された多関節機構は、この装置が世界初であろう。

1990年代の中盤からは製品化されたハプティックインタフェースが増えてきたが、そのほとんどがデスクトップの使用を想定した小型のものである。筆者は、前述のデスクトップ・フォースディスプレイに改良を加え、HapticMasterという名前で製品化を試みた。しかし、残念ながら市場で成功したのは、筆者のデスクトップ・フォースディスプレイにヒントを得たMITの学生が起こしたベンチャー企業であるSensAble社のPHANTOMという製品である。

力覚フィードバックに対するニーズが高まってきた背景は、バーチャルリアリティの医療応用が1990年後半になってから急速に進展してきたことがある。リアルタイムのコンピュータグラフィックスを用いて手術の操作をシミュレーションする試みが行われているが、そのようなシステムを実現するには力覚のフィードバックがないと役に立たないということが認識されるようになってきた。

力覚ディスプレイの実現方式はまだ模索の段階にあるが、現在までに開発が行われているものは、以下の3つに分類することができる。

(1) エグゾスケルトン型

エグゾスケルトンとは外骨格を意味し、アクチュエータ付きのリンク機構を鎧のように身に付ける。この方式は各指に独立に力を呈示できるもので、バーチャル物体を掴んだ感触をつくることができる。従来ロボットの遠隔操作の研究ではエグゾスケルトンがよく使われていたが、この方式の大きな問題は装置が大掛かりになることと、脱着が煩雑なことである。前述のデスクトップ・フォースディスプレイは装置の小型化に対する一つの解答である。最近のエグゾスケルトンの例としては1997年に米国Virtual Technologies社(現在はimmersion社に吸収されている)から発売されたCyber Graspという製品がある。これはワイヤー

図1 デスクトップ・フォースディスプレイ

駆動を用いることによって手に装着する部分を軽量小型にしている。しかし、脱着に手間がかかることはこの方式の宿命である。

(2) 道具媒介型

道具媒介型とはペンやボール等の把持部を媒介にして力覚呈示を行う方式である。人間が行う知的作業は道具を用いることが多く、それらの道具は何らかの把持部がある。ペンはその代表例である。したがって、このような道具の先端にプログラムされた反力を生成すれば、バーチャル世界からの力覚フィードバックを得ることができる。筆者はこの概念を実証するプロトタイプとして「ペン型フォースディスプレイ」を1993年に発表した(図2)。この方式は、ハードウェアの実現が比較的容易であり、エグゾスケルトンに比べて脱着の手間がかからないという実用的なメリットがある。また、把持部を取り替えることによって様々な用途に使えることも大きな利点であり、手術のシミュレータにも、把持部に本物の術具を取り付けたこの方式がよく用いられる。

図2 ペン型フォースディスプレイ

図4 Volflex

図3 FEELEX

(3) 対象指向型

上記の2方式のハプティックインタフェースのもつ根本的な限界として、反力が呈示される部分の一つまたは複数の「点」に限定されるということである。これまでに開発されたアプリケーションでは指先やペン先を使うだけで十分であったが、人間にとっては手の平という「面」で触れるのが自然である。著者がこれまでに数多くの人に対してデスクトップ・フォースディスプレイのデモを行ってきた結果わかったことは、点でバーチャル物体とインタラクションする行為を通じては、触覚イメージが形成できない人が少なからず存在することである。

筆者は、この問題点を克服するために、FEELEXと名づけた新しいハプティックインタフェースの方式の研究を進めてきた。FEELEXとは、“Feel”と“Flex”をつなぎ合わせた造語である。この装置は、手がバーチャル物体に接触する面をゴム膜のような弾性体で作成し、その下に力センサーの付いたアクチュエータを配置するものである。各アクチュエータの動きを制御することによって、接触面に様々な形を与えることができる。この接触面に映像を投影すれば、映像に素手で直接触れることが可能になる。通常の立体映像は平らなスクリーンに両眼視差のついた映像を映すが、FEELEXではスクリーン自体を立体的にする。そして、人の手がスクリーンに加えた力に合わせてアクチュエータの動きを制御することにより、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3は初期のプロトタイプの概観である。

この装置は、柔らかいものの中に硬いものが埋め込まれている状態を表現するのに適している。したがって、これを用いて、触診のシミュレータを作ることができる。研修医のトレーニングや遠隔医療に応用が期待される。

FEELEXは体験する際に約束事がいらず、自由な触覚体験ができるので、教育分野への応用も期待できる。図3とは別の試作機は、両手の平で触れる領域を持っているが、この装置を用いて、アノマロカリスという絶滅した古代生物に触れられるようなコンテンツを作成した。このコンテンツはオーストリアの科学館で長期展示を行ったり、小学校の理科の時間に展示を行ったりして、好評を得ている。

FEELEXの限界は、直動アクチュエータによる凹凸の高低差に制限があることである。提示されている物体を上から触る分にはよいが、横や裏側に触れることはできない。この問題を解決するために、筆者は小さな空気圧バルーンの集合体で対象物を表現する装置Volflexを開発した。図4はその概観である。25個の空気圧バルーンが、モーターで制御されるシリンダーに接続され、体積を変化させる。各シリンダーには圧力センサーが付いており、操作者が加えた力を検出し、インタラクションを行う。この機能により、粘土細工のように変形するバーチャル物体を模擬することができる。実物の粘土と異なり、容易に元の形にもどしたり、複数の形を合成したりして編集することが可能である。

4. 歩行移動によるハプティックス

従来ハプティックインタフェースが力覚を呈示するのは手や

図 5 GaitMaster

図 6 CirculaFloor

指先であることが一般的であったが、この技術の新しい発展形態として足や体全体に対する力覚呈示が考えられる。足に対する力覚呈示は歩行移動の現実感を生成する上で不可欠である。人間にとって最も生得的な移動手段は足で歩くことである。人間が自分の周囲の空間を認識する場合に、歩いて移動するという行為は極めて重要な意味を持つ。観光地に行った時に、バスに乗って見せられたものと自分の足で見つけたものの印象が大きく異なるのは、誰もが持つ経験であろう。歩いたり走ったりすれば地面から抗力や衝撃を受ける。また、自身の歩行運動に伴って視野全体の見えが変化する。この現象は人間の生活シーンでは当たり前で発生するが、通常のバーチャルリアリティシステムにおいてはほとんど実現されていないのが実状である。

ロコモーションインタフェースとは物理的には存在しない空間を歩行する際に、脚の運動感覚を与える装置のことを意味する。そのような装置を実現するためには、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備えなければならない。さらに、ロコモーションインタフェースのもう一つの重要な機能として、方向の変換がある。好きな方向に行けるのであればインタフェースとしての意味はない。移動の打ち消しと方向の変換をどうやって同時に実現するかという問題がこの研究の出発点である。

筆者はこの問題に対して、様々な方式を試みてきたが、その中の 1 例が、“GaitMaster”と名づけたものである(図 5)。人間の足の運動を打ち消す操作を与えるためには、原理的には両足の下に小さな動く床を作り、足の位置をセンサーで測定して足がバーチャル空間の床に着地したときだけ床が存在するようにすればよい。そのような床が実現できれば、平面だけでなく凹凸面の呈示も容易である。これらの床を適切に制御すれば、歩行者の移動を打ち消すことができる。そして、方向変換に追従するためには、装置全体をターンテーブルに載せ、それを人の体の回転に合わせて回すことである。

筆者が開発中の最新のものは、“CirculaFloor”である。これは全方向に動くタイルを組み合わせて、それらが循環動作をすることによって、位置を変えることなく任意の方向に無限に歩く行動を可能にする(図 6)。

ロコモーションインタフェースは歩行移動が必要なアプリケーションには今後不可欠になる技術である。現在のところ歩行移動が本質的意味を持つものとして、災害時の避難シミュレータの研究が進められているが、その他の様々なトレーニングシミュレータで応用が進むであろう。

また、GaitMaster のように左右の足に個別に力を加えることの出来るものは、リハビリテーションや高齢者支援への応用が有効である。障害の程度に応じて床の方が歩行を助ける力を貸すことができるからである。21 世紀は高齢化社会

の時代とも言われるが、このような福祉応用がハプティックインタフェースの重要な応用分野になっていくであろう。

5. 体性感覚呈示技術の将来

筆者がハプティックインタフェースの研究を始めてから 20 年近くが経とうとしている。その間、この分野の研究者数は拡大し、World Haptics と呼ばれる世界大会も始まった。さらに、IEEE を受け皿にした研究者の国際的な組織作りも進んでおり、学術的には軌道に載ったように見受けられる。一方で、この技術が世の中に広まったかという点、残念ながらそれは端緒にもついていない。当分の間は、様々な可能性を追求しつつ、普及の道を模索する努力が必要であろう。

ハプティックインタフェースの重要な特徴として、機械技術が根幹をなすことが挙げられる。20 世紀におけるわが国の経済成長は、自動車に代表される機械技術が支えてきたといっても過言ではない。もし、ハプティックインタフェースが広く普及する時代が来れば、その経済効果は計り知れないものがあるだろう。

参考文献

- 1) 岩村吉晃, 神経心理学コレクション タッチ, 医学書院, (2001).
- 2) 伊藤文雄, 筋感覚の科学, 名古屋大学出版会, (1985).
- 3) Burdea, G., Force and Touch Feedback for Virtual Reality, Wiley Interscience, (1996).

岩田 洋夫 (いわた やすお)

1981 年東京大学工学部機械工学科卒業, 1986 年東京大学大学院工学系研究科修士(工学博士), 同年筑波大学構造工学系助手。現在筑波大学システム情報工学研究科教授。バーチャルリアリティ, 特にハプティックインタフェース, ロコモーションインタフェース, 没入ディスプレイの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会理事。1998 年 東京テクノフォーラム 21 ゴールドメダル受賞。2001 年文化庁メディア芸術祭優秀賞受賞。