

## バーチャルリアリティにおける触覚の役割

館 暲 (東京大学)

## Roles of Tactile Display in Virtual Reality

Susumu Tachi (The University of Tokyo)

“Virtual” means, “existing in essence or effect though not in actual fact or form.” In order to give the essential effect of the real environment to humans, a realistic display of tactile sensation is inevitable, especially in case of the interactive environment. Recent advances in tactile displays of both proprioception and cutaneous sensation are reviewed and future trends are prospected.

キーワード: バーチャルリアリティ、人工現実感、触覚ディスプレイ、固有受容感覚、皮膚感覚、選択刺激、触原色  
**Keywords:** virtual reality, tactile display, haptic display, proprioception, cutaneous sensation, selective stimulation, tactile “primary colors”

## 1. まえがき

バーチャルとは、「Existing in essence or effect though not in actual fact or form: みかけは実物そのものではなく実際の形をなしてはいないが、本質的あるいはその効果として実体そのものであること」であり<sup>(1)</sup>、一部巷間で旧来の慣習から使用されている仮想（仮に想定した）という訳語は、訳として適当でないだけでなく、実は全く正反対の意味を有しているのである。例えばバーチャルマネーは電子貨幣やカードのように貨幣の形はしていないが、貨幣と同じ役割を果たすものをいうのであって、決して偽金ではない。バーチャルカンパニーが仮に想定した仮想の会社であったならば、そのようなところは、危なくて取引ができない。従来の会社の体裁はなしてはなくても実際の会社と同じ機能を有するものがバーチャルカンパニーであり、従って安心して利用できるのである。

明治以来このかた、バーチャルを虚や仮想と訳し続けてきたのは実はバーチャルという概念が我が国には全く存在しなかったためである。従って最近、学界を中心として、バーチャルリアリティ (virtual reality: VR) の訳として国際的に誤解を招く恐れのある仮想現実を使わずに、バーチャルリアリティとかVRとそのままと表記するか、あるいは意識ではあるが、人工現実感を用いる気運が高まっている<sup>(2)</sup>。

バーチャルリアリティの最も特徴的な点は、コンピュータの生成する人工環境が(1)人間にとって自然な三次元空間を構成しており、(2)人間がそのなかで、環境との実時間の相互作用をしながら自由に行動でき、(3)その環境と使用している人間とがシームレスになっていて環境に入り込んだ

状態がつくられているということである<sup>(2)</sup>。これらをそれぞれ、「三次元の空間性」、「実時間の相互作用性」、「自己投射性」と呼び、バーチャルリアリティの三要素をなす。つまり、この三要素すべてを兼ね備えたものが理想的なバーチャルリアリティシステムである。

「三次元の空間性」とは、コンピュータが生成した立体的な視覚空間、立体的な聴覚空間が人間の周りに広がることである。アミューズメントパークなどでみる三次元の映画などは、この要素を備えている。しかし、別の角度から見ようとしたり、物体の後ろに回り込もうとしたりしてもできない。まして、見ている物体を触ったり別の場所に動かしたりすることなどできない。

つまり「実時間の相互作用性」が欠けているからである。一方、通常のコンピュータゲームでは、物体との実時間の相互作用はあるが、目の前のディスプレイをみているだけで、自分が包まれるような三次元空間は利用できない。勿論、自分とコンピュータの生成した環境とが深さ方向においても矛盾なくシームレスにつながって、自分が環境に入りこんだ状態を実現する「自己投射性」もない。

この「自己投射性」を別の言い方で説明すると、人間は眼をつぶっていても自分の身体がどのような形をしているかが分かる。これは、身体マップとも呼ばれる機能で、体性感覚の固有受容感覚つまり自己感覚によっている。通常我々が経験している実空間ではこの自己感覚と眼や耳で観察する空間の情報とが一致している。例えば、眼をつぶった状態で自分の手があると思った位置に自分の手が見えている。この現実空間の特徴である人間の異なる感覚モダリティ間に矛盾のない状態を、コンピュータが生成した人工環境のなかでも

矛盾なく実現するのが「自己投射性」である。

バーチャルリアリティは、これらの三要素を有したシステムを構成して、人間が実際の環境を利用しているのと本質的に同等な状態でコンピュータの生成した人工環境を利用することを狙った技術なのである。

## 2. 触覚の仕組み

HMD(Head Mounted Display: 頭部搭載型ディスプレイ)やCAVE(Cave Automatic Virtual Environment)などの視覚再現装置、それに音場制御やバイノーラル式の音響再現装置の開発によって、人工的な空間で、現実空間と同じように見たり聞いたりすることができるようになってきている。しかし現実とは、見たり聞いたりできるだけのものではない。英語で、「実体的な」とか「明確な」「現実の」という意味を持つに至った「タンジブル (tangible)」という言葉がある。このラテン語由来の言葉の元々の意味は、「触ることができる」である。これは古くから、「触ることができるものこそ現実的なもの」という感じ方があったことを示唆している。このように、人工現実とかVRというものをつくらうと思ったとき、「触れることができる」という要素を避けては通れない。

触覚のもう一つの大きな特徴は、触覚を得ている人間の腕や手や指は、仕事もするということである。物を触りながら対象物を操るのである。視覚、聴覚は主に外界を認識するためのものであるのに対して、触覚は、認識すると同時に外界に対して働きかける、つまり行動システムにもなっているのが他の感覚モダリティにはない大きな特徴なのである。

人間には視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚の五感があると言われるが、これは一般的な分類で、専門的に分類するならば、人間の感覚は「特殊感覚」と「体性感覚」とに分けられる。

特殊感覚 (specific sensation) とは、視覚であれば眼球、聴覚であれば耳などのように対応した特別な感覚器が存在する感覚のことを指している。加速度を知る前庭感覚も、いわゆる五感のうちには数えられていないが、耳（その中の前庭：三半規管と卵形嚢・球形嚢）という感覚器が対応しているという意味で特殊感覚に分類される。

一方、体性感覚 (somatic sensation) とは、体分節性の感覚という意味で、大きく分けると皮膚に由来する皮膚感覚 (cutaneous sensation) と、内部の筋とか腱に由来する姿勢や運動の感覚である固有受容感覚 (proprioception) とに分かれる。固有受容感覚は自己受容感覚とも訳される。そして実は、この皮膚感覚と固有受容感覚という体性感覚の全体こそ、広い意味での触覚と呼ばれているものなのである。

因みに、狭い意味で触覚といった場合には、本来的には、温・冷・痛などの感覚も含まれる皮膚感覚の中の、接触覚とか圧覚を意味している。この接触覚や圧覚は皮膚の中にあるマーケル触盤、マイスナー小体、パチニ小体やルフィニ小体などのセンサに対応している。皮膚全体がへこんだり引っ張られたりした場合にその変形や振動がセンサに伝わり感覚が生じる。

さて、人間が広義の触覚によって、ある物体、例えば鉄の玉を認識するプロセスを考えてみよう。まず触れることで人間は形状を知るわけであるが、直に指で触らず、指に厚手の手袋をはめて、それを介して鉄の玉に触れても、腕、手、指の関節がどう動いてどんな形になったということから「球」と推測できる。このことから明らかなように、大まかな形状の認識は皮膚感覚ではなく、筋紡錘やゴルジ受容器などの固有受容感覚によっている。また大まかな形状に加え、硬さとか、バネのような反撥力を感じたり、水の中で腕を動かしたりするときの抵抗感などの感覚なども、固有受容感覚に由来する。

皮膚感覚はもっと細かい、「テクスチャー」と呼ばれる表面の細かい形状パターンを認識するものである。この感覚は、厚い手袋をした状態では生じず、直に触ることが必要である。

皮膚感覚においては感覚点に対応する種々の感覚受容器があるのであるが、マーケル触盤が基本的に変位に感じ、マイスナー小体が速度に対応した情報を得て、さらにパチニ小体が加速度に関連した情報を感知することにより、皮膚内部の三次元構造の位置、速度、加速度のパターンとして捉え、それらの情報を総合して、皮膚表面で触れた物体の細かいパターンを推定し認識していると考えられている。

この感覚は能動的触覚によってさらに認識精度が向上する。この固有受容と皮膚感覚が一体となった運動をとまなう能動的触覚のことを特に、ハプティクス (触運動知覚: haptic perception, haptics) と呼ぶことがある。

なお、持って触れることだけでは鉄とまでは判別できない。それが金属であると認識できるのは、テクスチャーに加え温冷を感じる皮膚感覚によっているのであるが、本解説では、その問題には触れない。

## 3. 触覚ディスプレイ

従って触覚再現装置は、理想的には今見てきたような感覚を全て再現するものでないといけないのであるが、残念ながらそれはまだ実現されていない。1995年ごろまでの研究成果をまとめた著書が出版されており<sup>(9)</sup>、この分野の必読書となっているので参考にされたい。以下、固有受容感覚と皮膚感覚に分けて、それ以降を中心に最近の動向を概観する。

### 3. 1. 固有受容感覚提示

VR空間内の物体に触ると、見えているその形通りに触れることができる、すなわち形状を感じることができる固有受容感覚の提示法には、大別して次の三つのタイプがある。

一つは装着型で、人間の腕や手指に服を着るように装着する方式である。装置には、アクチュエータが仕込まれており、そのアクチュエータで動かそうとする人間の運動を拘束することによって、そこに物体があるという感覚をつくり出す。このタイプで非常に有名な「ファントム(Phantom)」という製品の初期のものでは、例えば指をさした状態で腕を動かしてVR物体にたどり着くと、指先にあたる部分を硬く変え、さらに腕の動きを止める力をモーターなどで作り出して、指

先が物体にあたった(触れた)感覚をつくり出している。もちろんシステム全体としては、検出された人間の運動と物体のモデルから、いつどこで硬さを変え、どのぐらいの力をどの方向でかけるかを計算しているわけであり、その点は視覚や聴覚の装置と原理は変わらない。ハプティック・レンダリングなどと呼ばれる所以である。また、東京工業大学では、スパイダー(SPIDAR)と呼ばれる、四つの支点からプリーを経由して直線的に張られた四本の糸が取り付けられたリングを指にはめる装置を研究開発している<sup>(4)</sup>。糸が抵抗して反力が伝わる仕組みである。

これらの装着型の問題点は、常に装置を体につけているので、その装置の重量や、その装置自体のダイナミクスが人間に感じられるため、何にも触れていない状態で空中を運動しても、常になにかに触れている抵抗感覚があるため、何にも触れていないという感覚をつくり出すことが難しいことである。加えて、力をかけるモーターの応答に限界があるため、瞬時には動きを止めにくく、従って衝突感というものが出しにくいとか、装置が急激に角度を大きく変えて運動しにくいとか、鋭い角の形状などの感じを出しにくいという欠点もある。

第二の方式は、人間が作業する場合、必ずしも素手で行わず、例えば、字を書く時に鉛筆を持ったり<sup>(5)</sup>、手術にはメスを使ったりするというように、様々な道具や器具を利用する場合が多々あることに着目した方式である。すなわち、器具を手にしたときの、その器具による触感だけをつくり出すという、把持型というタイプである。例えば航空機のシミュレーターであれば操縦桿などの、手術のシミュレーターであればメスとか鉗子などの形をした物を実際に持って、それにどんな力がかかるかを計算し、その力を物を介して人間にフィードバックすれば、メスで切っているとか鉗子で引っ張っているという感じをつくり出すことができる。把持型のいい点は、ふだんはその物から手を離して、必要なときだけ持って動かせばよく、物を介して力を返すので制御系としても設計が容易になることである。逆に問題点としては、メスとか鉗子とか専用のシステムにはいいが、その物がメスにでも鉗子にでもなるというような汎用的なシステムにするのが難しいということである。

最近注目を集めているのが、遭遇型という第三のタイプである。これは、東京大学<sup>(6)</sup>や米国ボーイング社<sup>(7)</sup>で開発している方式であるが、触れる物体がそこにあるという感じを出したかったら、実際に何か実物が模型を置いておくのが本来いちばん良いというアイデアから実現されたものである。ただ、本物や模型を置いてはVRではないし、汎用性もないことから、バーチャルな模型を置く。考えられる限りあらゆる物体の形状の要素を備えた、模型的物体である。その要素を「素片(そへん)」と呼んでおり、その素片を集めたものをSAD(Shape approximation Device: 形状近似デバイス)と称している。そのSADをロボット機構の先端に配置して、素片が、人間の動く手の先に待ち構えていて、手と素片が実際に接触することで触れたという感覚を提供する。それで、遭遇

型と呼ぶのである。

視覚情報を提供するのにHMDを用い、人間の運動を計測して、物体のモデルと人間がどういう位置関係にあるか、物体や自分の手がどう見えるかを計算して三次元のCGで映像化していることは、他のVRシステムと同様である。しかし、その物体モデルに手を触れようとしたとき、形状近似デバイスの適当な素片がその場所に待ち構えていて、それに触れることができる点が他のシステムと異なっている。そしてHMDで例えば円筒状の物体が見えているとして、円筒の側面の湾曲している部分に触り、次に底の平らな部分に指を滑らせるとすると、システムがそうした指の動きを検知して素片を動かし、丸い触れ心地や平らな触感を実際に提供する<sup>(8)</sup>。

従って、人間の動きに対応してリアルタイムに形状近似デバイスの素片を動かす機構が心臓部となる。この装置は、なるべく多くの形状の感覚でも近似して提供することができるように設計されている。丸い面から平らな面に連続的に指を滑らせる場合、稜線があるが、形状近似デバイスSADはその稜線の感覚も、実際に稜線を素片として有しているので、提供することができる。また、凹から凸へ、凸から凹へという動きなどにも充分対応できるように設計されている。さらに、素片は実物体であるので、衝突感をつくり出すこともできる。

ただし、このシステムは今のところ、把持型ではないのに、指先に模した器具を手を持って物体に触るようになってい。というも、指先の皮膚感覚が生じると、形状近似デバイスが動いているのが人間にわかってしまい、それがこのシステムで触覚を提供する根拠となっている先述の固有受容感覚で得たものと矛盾してしまうからである。後述の皮膚感覚提示装置との統合が待たれる。また、今はいわば指一本で物に触れるシステムであり、手の平全体や両手で触れた感触が得られるものではない。そこで現在、「触る指」を更に増やす研究も進められている。

### 3. 2. 皮膚感覚提示

テクスチャーの感覚については、いわゆる皮膚感覚により生じる。振動子で振動を起し、振動の周波数やインパルス成分の頻度などを変えることで、例えばサンドペーパーを触っているような感覚を生じさせる装置なども開発されている。また、振動子を多数平面上に並べる本格的なシステムもつくられており評価研究もなされている<sup>(9)</sup>。

指の表面に、実際の物体と全く同じような形状を提示しなければならぬのであれば、バーチャルリアリティとしてはもの足りない。視覚の場合、例えば物体の色は実際のスペクトルと異なっているが、人間のRGBのそれぞれを担う錐体細胞が同一の発火をすれば同じ色に見え、この原理こそが、テレビやカラー写真やカラーの印刷物を可能としているといっても良い。それが、色の三原色というものである。同じことが触覚でもいえないだろうか。つまり、触原色というものが存在するのかということである。これに対する明確な解答はまだないが、それを目指して研究が現在、精力的に始められている<sup>(9)(10)(11)</sup>。

その根拠は、触覚において明確に異なる種類のセンサが存在していることである。マーケル触盤、マイスナー小体、パチニ小体やルフィニ小体がそれにあたる。物体を触ると皮膚表面に振動が生じ、それが伝わって、これらのセンサが反応して触覚が生じる。そうであれば、皮膚表面の形状や振動パターンがどうであれ、これらのセンサが同一に反応すれば同じ触覚が生じるはずである。

センサに同一の発火を引き起こすには大別して二つの方法がある。一つは、表面の振動は違っても、離散的にしかセンサがないので、そのセンサのところだけは同じ振動になるような振動を作る方法である<sup>(9)(10)</sup>。これは、実現できれば同じ振動なので自然な感覚を生じさせる。しかし、センサ部分のみに任意の振動を生じさせるような、一般的な表面刺激のアルゴリズムが見つかっていない。

第二の方法は、電気刺激でセンサそのものを直接的に発火させるという方法である。電極をすべてのセンサのところに埋め込んで刺激するという事は不可能に近く実用的でもないことから、皮膚表面からの経皮電気刺激で、しかも選択的にセンサを刺激する。この方法については最近、陽極刺激によってマイスナー小体のみを選択刺激可能であることが示され注目を集めている<sup>(11)(12)</sup>。

因みに、従来と同じ陰極性の電気パルスで皮膚電極を介して人に提示して、圧覚に似た感覚を伝えることも可能である。この陰極刺激の方式は、既に盲導犬ロボット(MELDOG)の研究に於いて基礎研究が行われており<sup>(13)</sup>、実際のシステムに於いてもロボットから人間への情報伝達手段として利用されている。

#### 4. あとがき

触三原色の追求に加え、固有受容感覚と皮膚感覚との統合、すなわちハプティクスの研究が今後の重要な研究テーマである。また、触覚は実際のVR応用を考えた時、極めて重要な要素であり、実用に供する緊要性は実は高い。すべての触覚情報を完全に装置で再現するのは技術的にもまだまだ難しく、またシステムが非常に大がかりになると考えられることから、省略できる部分は省略しながら、重要な要素だけ再現し、実用的なコンパクトなシステムを指向することも合わせ行っただけだと思われる。いずれにせよ、触覚によってVRの未来が拓かれると言っても決して過言ではないだけに基礎研究のますますの進展が期待される。

(平成 14 年 8 月 26 日受付)

#### 文 献

(1) The American Heritage Dictionary, 3<sup>rd</sup> Edition, 1994.  
 (2) 舘 障 監修・編：“人工現実感の基礎”，培風館，2000。  
 (3) G.C.Burdea: Force and Touch Feedback for Virtual Reality, John Wiley & Sons, Inc. 1995.  
 (4) M.Sato: “Virtual Work Space for 3-Dimensional Modeling.” Proceedings of the 1st International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT'91), pp.103-110, Tokyo, July 1991.

(5) H.Iwata: “Pen-based Haptic Virtual Environment,” Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS 93), Seattle, pp.287-292, September 1993.  
 (6) S.Tachi, T.Maeda, R.Hirata and H.Hoshino: “A Construction Method of Virtual Haptic Space,” Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT'94), pp.131-138, Tokyo, July 1994.  
 (7) W.A.McNeely: “Robot Graphics: A New Approach to Force Feedback for Virtual Reality, Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS 93), Seattle, pp.336-341, September 1993.  
 (8) Y.Ikei, K.Wakamatsu and S.Fukuda: “Texture Presentation by Vibratory Tactile Display,” Proceedings of IEEE 1997 Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS 97), pp.199-205, Albuquerque, March 1997.  
 (9) N.Asamura, N.Yokoyama and H.Shinoda: “Selectively Stimulating Skin Receptors for Tactile Display,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 18, No. 6, pp. 32-37, 1998.  
 (10) T. Nara, M.Takasaki, T.Maeda, T.Higuchi, S.Ando and S.Tachi: “Surface Acoustic Wave Tactile Display,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No. 6, pp. 56-63, 2001.  
 (11) H.Kajimoto, N.Kawakami, T.Maeda and S.Tachi: “Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation,” Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT'99), pp.107-114, Tokyo, December 1999.  
 (12) H.Kajimoto, N.Kawakami and S.Tachi: “Optimal Design Method for Nerve Stimulation and Its Application to Electrocutaneous Display,” Proceedings of 10<sup>th</sup> International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.303-310, Orlando, March 2002.  
 (13) S.Tachi, K.Tanie, K.Komoriya and M.Abe: “Electrocutaneous Communication in a Guide Dog Robot (MELDOG),” IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.BME-32, No.7, pp.461-469, 1985.

舘 障 (非会員) 1968 年、東京大学工学部計数工学科卒業。1973 年、同大学院工学系研究科博士課程修了 (工学博士)。東京大学助手、通産省機械技術研究所パイオロボティクス課長、マサチューセッツ工科大学(MIT)客員研究員、東京大学先端科学技術研究センター教授などを経て、1994 年、東京大学工学部教授。現在、同大学院情報理工学系研究科教授。ロボット工学、バーチャルリアリティ、システム情報学が専門



分野。バイスペクトル、盲導犬ロボット、トレイグジスタンス、人工現実感、アールキューブなどの研究を行う。

日本バーチャルリアリティ学会初代会長、重点領域「人工現実感」領域代表、国際計測連合学会(I ME KO)ロボティクス会議議長、CREST「トレイグジスタンス」研究代表者などを務める。