



● ME 関係

バーチャルリアリティ(VR)と医学

東京大学大学院情報理工学系研究科 教授

館 暉

||要 旨||

センサーから得てコンピュータで処理し生成した情報世界を、実世界に重畠的に加えることで、実世界を増強するいわゆるオーグメンティド・リアリティ（AR）は、例えば、CT や MRI、超音波エコーなどの映像を人体に直接重ねて立体化し、病気の診断や手術などの治療に役立てることができる。近年、再帰性投影技術（RPT）という新しい AR のディスプレイ技術が開発されてきている。本解説では、AR を中心として VR を紹介し、最新医学への応用の可能性を探る。

は じ め に

近年バーチャルリアリティ（VR）にロボットとネットワークが統合され実世界を指向する展開を見せている。実世界にセンサーで得られコンピュータで処理され生成された情報世界を重畠的に加えることで、実世界を増強するオーグメンティド・リアリティ（AR）はこの好例である。ウェアラブル・コンピュータと、眼鏡のような大きさの提示装置を組み合わせ、GPS で人間の位置を確認して、携帯電話で情報を得たり、IC を含有するユビキタスな機器と交信したりして、

キーワード：バーチャルリアリティ、人工現実感、

オーグメンティド・リアリティ、再帰性投影技術、

頭部搭載型プロジェクター

その情報を現実世界に書き込むのである。例えば、CT や MRI や超音波エコーなどの映像を人体に直接 3 次元的に重ねて可視化し、病気の診断や手術などの治療に役立てることもできる。本論文では、AR を中心として VR の現在を紹介し、医学への応用の今後を探る。

バーチャルリアリティ（VR）とは何か¹⁾

バーチャルリアリティの「バーチャル（virtual）」は、しばしば「仮想」とか「虚構」あるいは「擬似」と訳さる。しかしそれらは実は正しくない。アメリカ英語の信頼できる辞書である『継承米語辞典（The American Heritage Dictionary）』の記述によれば、バーチャルとは、「existing in essence or effect though not in actual fact or form」と定義されている。つまり、「みかけや形は原物そのものではないが、本質的あるいは効果としては現実であり原物であること」であり、これはそのままバーチャルリアリティの定義を与えているのである。あえて簡単に一言でいえば「現実のエッセンス」がバーチャルリアリティであって、虚や仮想とは似ても似つかない、むしろ正反対の意味を持つとさえ言える。

したがって仮想と訳すよりは、カタカナでそのまま表記したり VR と表記したりするのが良いし、どうしても日本語に訳したければ、「人工現実感」という言葉の方が、誤訳するよりは良いであろう。ほかのバーチャル～という言葉も、バーチャル物体、バーチャル環境あるいは、VR 物体、VR 環境など、バーチャルを無理に訳さず表現する方法、あるいは、人工現実物体、人工現実環境などの意訳を用いる方法を推奨する。

* さて、VR 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 人間にとて自然な 3 次元空間を構成しており、② 人がその中で、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環境とがシームレスになっていて環境に入り込んだ状態が作られているということである。これらをそれぞれ、「3 次元の空間性」、「実時間の相互作用性」、「自己投射性」と呼び、VR の 3 要素をなす。つまり、この 3 要素すべてを兼ね備えたものが理想的な VR システムである。つまり、VR とは、これらの 3 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ねらった技術なのである。

バーチャルリアリティ（VR）の医学応用

VR という言葉は、1998 年に VPL というベンチャーがデータグローブという指示装置やアイフォンという頭部搭載型ディスプレイ（HMD）を市販し広く利用されてからであり、それが学問領域とみなされたのが、MIT が呼びかけ世界中の研究者を一堂に集めた 1990 年のサンタバーバラ会議からである¹⁾。医学への応用は、Richard M. Satava 教授²⁾が、Medicine Meets Virtual Reality (MMVR) という国際会議を開催した 1992 年であることからも、VR の黎明期から VR と医学とは切っても切れない関係にあったと言える (http://www.nextmed.com/mmvr_virtual_reality.html)。

我が国でも、1991 年から、人工現実感とテレイグジスタンスの国際会議 ICAT (<http://www.ic-at.org/>) を開催し、1996 年には、本格的な学術団体である日本バーチャルリアリティ学会が設立された (<http://www.vrsj.org/>)。医学領域においては、日本コンピュータ外科学会 (<http://www.atl.b.dendai.ac.jp/jscas/>) および日本コンピュータ支援外科学会 (<http://www.jscas.gr.jp/>) という二つの学会が中心となって、VR の外科領域への応用の先鞭をつけてきたが、2001 年 11 月には、すべての医学領域における VR を対象とした、「日本 VR 医学会」が設立されるに至った (<http://www.kuhp.kyoto-u.ac.jp/~jsmvr/>)。

VR 一般の医療応用の現状については、極めて多岐にわたり、この解説では到底尽くしえない。したがって、VR 医学の現状については上記の WEB サイトから最新情報を入手されることをお勧めすることとし、この解説では、AR の最新情報を主に紹介する。

オーグメンティド・リアリティ（AR）と医学

すでに実現されている AR の実施例として、医療における脳外科手術などへの応用が挙げられる。これは手術をする際に、MRI や

CTでスキャンしたり血管造影などをしたりして作成したデータから構築した患者の脳の3次元像を、患者の実際の頭に重ね合わせて投影し、医師がその両者を見ながら手術を進めるというものである。例えば、東京女子医科大学などですでに行われているシステムがある³⁾。患者の頭と医師の視線の間に、3次元映像を見せる透明な板（レンチキュラパネル）を置き、そこにコンピュータで作成した脳内血管構造などの3次元像を映します。

コンピュータで生成した3次元の脳の地図を、固定した頭部に重ねれば、小開頭部位であっても、大開頭と同じ範囲のバーチャル術野を設定でき、脳溝や病変の同定に有効である。また、腫瘍や手術中に触れてはならない運動領域などの位置を的確に示すことができる。さらに、手術で取り去るべき部位までどうアプローチするかを決めたり、実際にナビゲーションしたりするのに、血管構造や脳全体の構造を示す3次元映像を投影することが役立つ。

また低侵襲手術の代表的な技法として、いわゆる「内視鏡術」が普及してきている。しかし患部を露出し、目で直視しながらできる手術ではないので、熟練を必要とする技法であることも事実である。そのとき AR でその患部が透けて見えるようにすることによりさらなる進展が期待できる。

AR の医学での応用は、ほかにも多様に考えられている。切断した指の再接合のため非常に細い血管や神経を一本一本つないでいくマイクロサージェリーは、現在は顕微鏡下などでその部分を拡大して見ているが、やがては、どんな細い血管もまるでゴムホースのような太さに見ながら、そのゴムホースに対してメスや鉗子を動かすと、実際に^{*}は微細な動きに変換されて動いていくといった、動きの拡大も可能とする拡張型テレイグジスタンス⁴⁾の手法も実現されていくであろう。

再帰性投影技術

AR の普及には、ただし、一つ技術的な課題があった。すなわち、その表示装置である視覚ディスプレイの問題である。VR を実現する方法としては、頭部搭載型ディスプレイ（HMD）と CAVE (CAVE automatic virtual environment：ケーブ) という二つの装置が代表的

である。しかしその二つとも、AR のように「実空間と VR 空間を重ね合わせて見る」という目的には、あまり適していない。

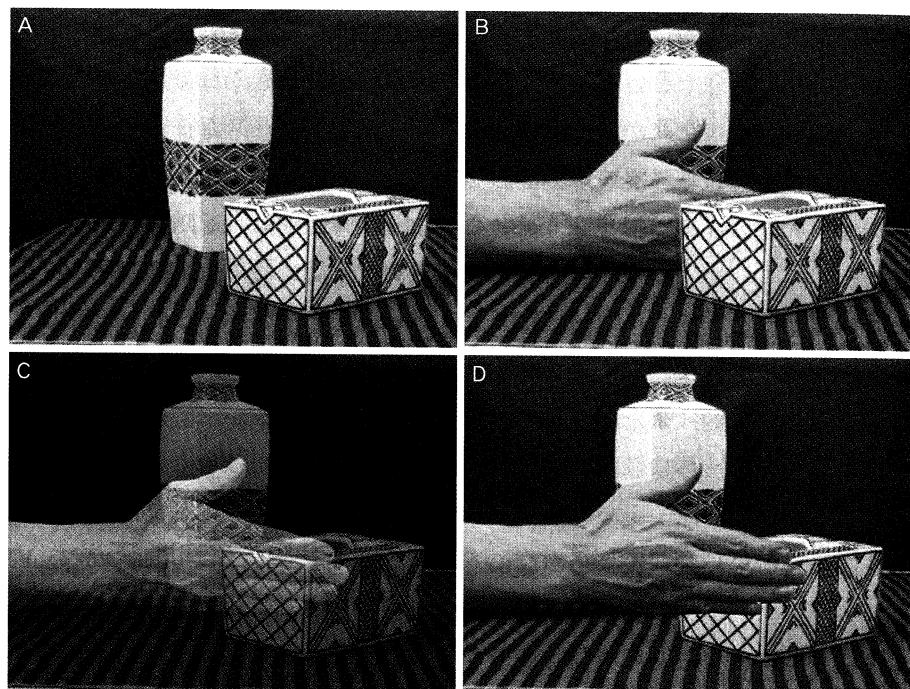
というのは、HMD では、そもそもそれで目を覆ってしまうので実空間が見えない。そこで「光学式シースルー HMD」という装置が作られている。ハーフミラーを用いて、半分は実空間を透かしてシースルーで見ながら、半分は液晶の画面 (LCD) を反射させて見ることにより、実空間に情報空間を重畳するのである。それを用いれば実空間も VR 空間も両方ともが見えるのであるが、それでも一つだけうまくいかないことがある。本当は、例えば自分の手が VR 物体の前に来たら VR 物体が隠れて見えなくなったり、あるいは逆に VR 物体に隠れて自分の手が見えなくなったりしなければいけないのであるが、シースルー HMD では VR 空間の提示位置が眼の近くの場所に必ず投影されているので、外部の実物体や人間の手で VR 物体を隠すことができない。そこで、本来なら VR 物体の方が遠方にあって、近くの実物体や人間の手で遮蔽されるべき状況でも、VR 物体が見えてしまい人間は手が透けているような解釈をしてしまう。

HMD に小型のカメラをつけて、そのカメラで実環境を撮影し、物体までの距離を計測して、VR 環境と遮蔽矛盾なく重ねるという「ビデオシースル」という方法もある。これを用いれば、遮蔽関係の正しい AR が実現される。これは優れた方式ではあるが、距離の高速で正確な計測が必要となり、かつシステムが複雑で、しかも視野が狭くなってしまうという欠点を有している。

この「遮蔽問題」は CAVE の環境でも同じである。CAVE は基本的には優れたシステムであるが、光学式シースルーの場合と逆で、VR と投影面が壁という自分よりもいつも遠方にあるため、VR 物体で自分の手を隠すことができないのである。しかし、AR で完璧を期そうと思うと、この遮蔽問題は避けては通れず、何らかの方法で解決しなければならない。図 1 にこの遮蔽問題をまとめて図示する。

遮蔽問題に加えてもう一つ「焦点」の問題もあった。VR 空間を見ているとき、人間の眼の焦点は、等価提示面のある 1 m 近傍に常にあり、水晶体の調節はそのままの状態で、主に両眼視の輻輳機能によって眼から 20 cm 以上の距離から無限遠まで、違和感がなく観測

図1 HMD, CAVE における遮蔽矛盾



A : VR テーブル上の VR 花瓶と VR 灰皿。B : 実物体である手を遮蔽矛盾なく提示する理想的な AR 提示装置。C : HMD では、手で VR 花瓶を遮蔽できず、また VR 灰皿で手を遮蔽することもできない。D : CAVE では、手が常に一番手前に見えてしまう。

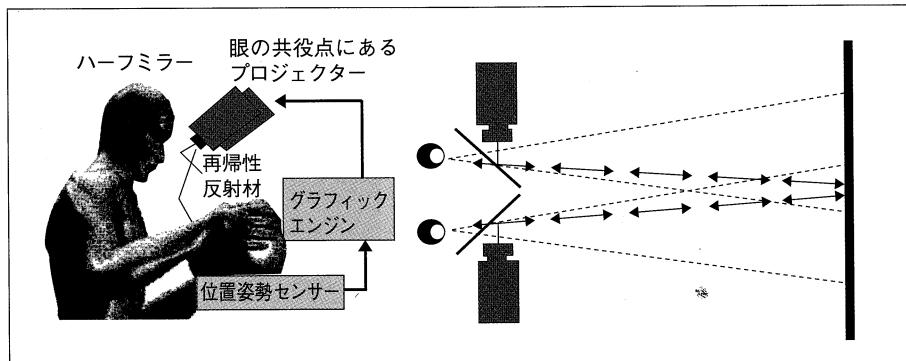
略語：卷末の「今号の略語」参照

できる。

しかし、AR では状況が異なる。というのは、VR 物体と同時に実空間にある実物体も見るわけで、そのとき眼の焦点はどうしても実際にその物がある距離に合わせられることになるからである。すると、AR では、水晶体が等価提示面にあると VR 物体はよく見えるが、VR 物体が重なっているべき実物体に調節した瞬間に、等価提示面から調節がはずれ VR 物体がかすんでしまうのである。つまり、現実の物と VR 物体の両方見ていると、急にどちらかの像がぼけてしまったり、実際の物と VR 物体を重ねたはずなのにそうは見えなかつたりという状況が生じてしまうのである。この問題も、何とか解決しなければならない重要な問題であった。

そこで我々の研究室で考案した方式が、「頭部搭載型プロジェクター (HMP)」と「再帰性反射材」を用いる再帰性投影技術 (RPT)

図 2 再帰性投影技術の原理



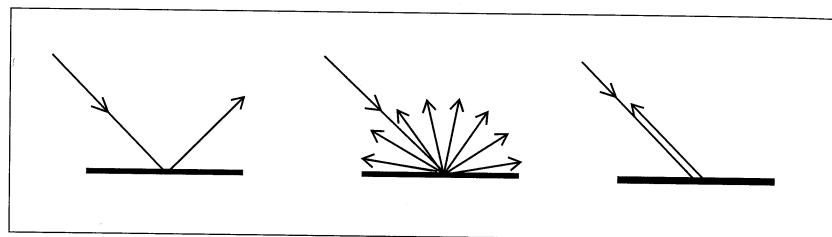
ステレオ視が可能である

と呼ぶ第三の方法である。HMP では、人間の運動を計測して対応する両目用の画像を作り、それらの画像を別々に提示するのは HMD と同じであるが、直接提示せず外部の再帰性反射スクリーンを介して提示する（図 2）。まず、眼の共役点の位置にプロジェクターを置いて画像を投影すると、図 2 のようなハーフミラーの仕組みにより、人間の眼の位置からスクリーン面に向けてその画像が投影されることになる。このスクリーン面には再帰性反射材という、光を受けると、キャツツアイや直角プリズムのように、その光が来たの全く同じ方向に反射し返す物質が塗ってある（図 3, 4）。

再帰性反射材とは、よく道路工事現場で使われている、自動車のヘッドライトがあたると光るものと同一である。自動車の運転者に注意を喚起するという同じ目的で、自転車とか靴、ヘルメット、鞄などにも塗られたりしているが、その再帰性反射材の非常に精度の高いものを塗った面を、RPT ではスクリーンにしているのである。すると、眼の位置からスクリーンに投射された光は、そのまま両目の位置に戻ってくる。右目の位置から出た光は右目に、左目の位置から出た光は左目に帰ってくるので、偏光フィルターやシャッター眼鏡などで左右の眼用の光を分離する必要はない。眼鏡なしのそのままで両眼立体視が可能となるのである。

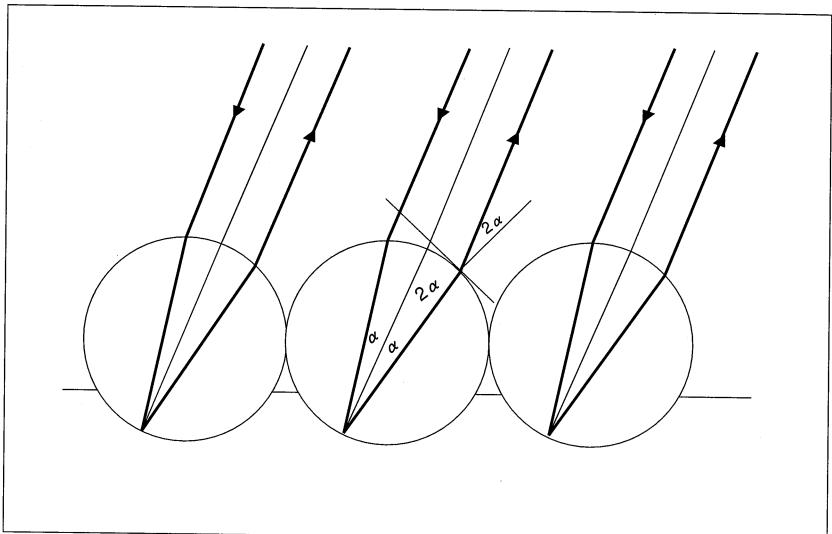
再帰性反射剤を塗った HMP のスクリーンは、「オブジェクト・オリエンティッド・ディスプレイ」とも言って、スクリーンとなりうる実体物があるところでだけ映像が映るというディスプレイの一種であ

図3 代表的な表面反射



左から、鏡面反射、乱反射、再帰性反射。

図4 再帰性反射の実現法



屈折率が2である直径50ミクロン程度の透明球を布に埋め込んだり、表面に塗料と混ぜて塗布したりすることにより再帰性反射素材が作れる。任意形状の表面に塗布可能である。

る^{5,6)}。HMPシステムの構成例を図5に示す。対象物を投影するスクリーンは球や平面である必要はない。再帰性反射材はどんな角度で光を受けても常に入射してきたその方向に光を返すので、HMPに焦点深度を深くする工夫を凝らしておけば、表面が凸凹になっていても良い。実際、RPTシステムのもう一つの特徴は、ピンホールを利用して焦点深度を高めるところにある。再帰性反射を利用するので光の利用効率が高いため深度を深く絞ることができるのである。

HMPの実際の使い方としては、例えば腹部の内視鏡手術などのとき、患者の腹部に再帰性反射材で作った布を置き、医師はHMPのバイザーを装着したり、自動追尾型のRPT装置を利用すると、内視鏡

図5 頭部搭載型プロジェクター（HMP）を用いた
再帰性投影技術（PRT）

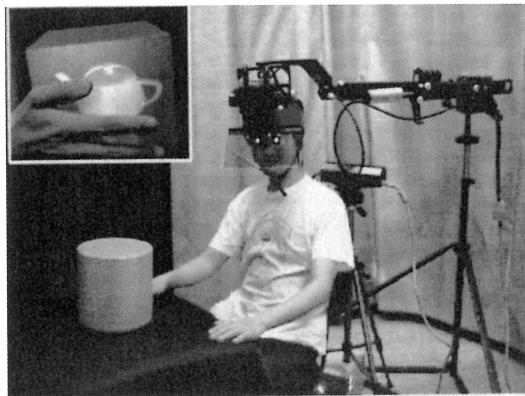
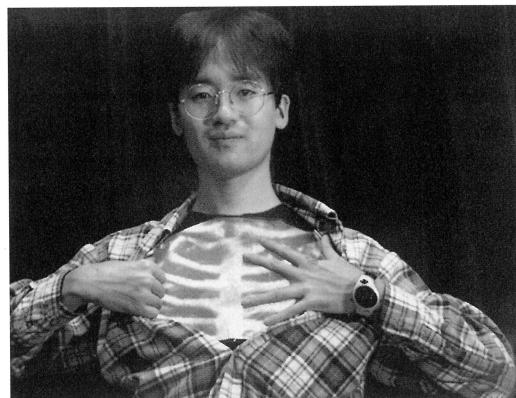


図6 X線像の投影例



遮蔽矛盾のない AR が得られる。

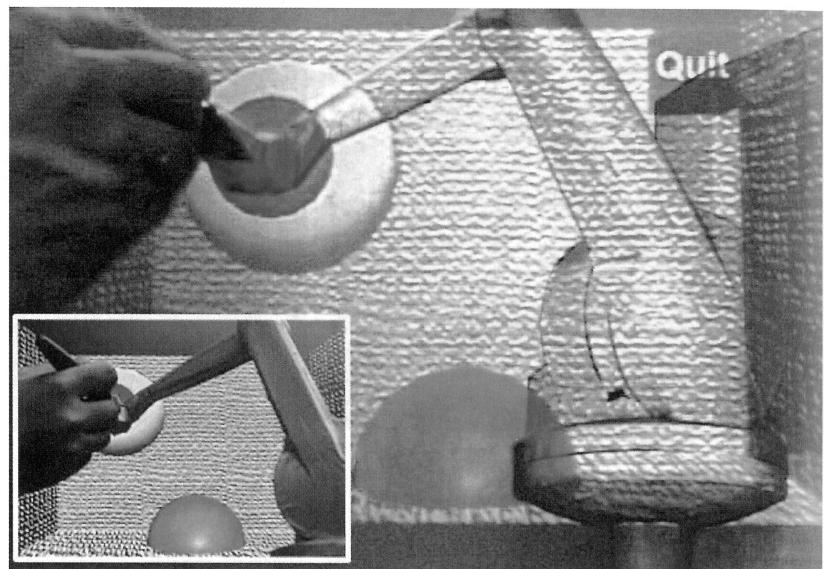
の画像や検査データから、再構成された患者の体内の様子が布のスクリーン面に 3 次元で見え、その画像を見ながら手術を進めるという形などが考えられる。バイザーや追尾型 RPT 装置あるいはコンピュータシステムは別にして、布の方は非常に安いもので済むので使い捨てができる。また VR 触覚再現装置と、この HMP を組み合わせると、VR の物体に実際に触ることができる。そのときもちろん VR 物体は、伸ばした人間の手にしっかり隠れるのである。透けて見えるということなどはない。将来、再帰性反射材スクリーンと、眼鏡ぐらい小型にした HMP と衣服にまとったコンピュータを使えば、どこでもコンピュータの世界が容易に実現すると期待されている。図 6 から図 8 に RPT を利用した AR の例を示す。

触覚のオーディエンティド・リアリティ（AR）

視覚の AR が盛んになっているが、触覚についても AR がありうる。医学の例をとるならば、あらかじめ触れてはいけない部位を決めておき、術者がメスをその領域に動かそうとしても、メスの方でそれを拒んで動かないというようなシステムがそれにあたる。さらに、あらかじめ設定しなくとも、システム自体がセンサーで状況を検出して、そのような部位に近づかないようにすることも可能である。

著者の研究室では、6 軸の機構の先端にセンサーを持った器具を取

図7 オプティカル・カモフラージュ（1）



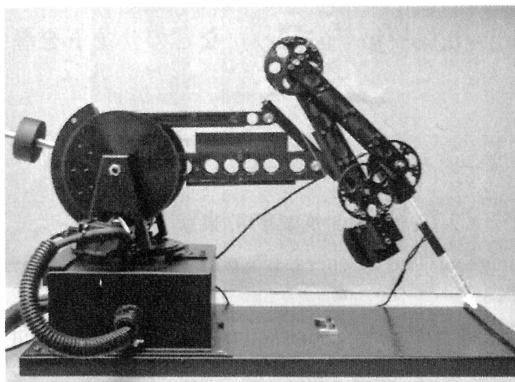
左下のように器具が視野を隠す状態を、器具に再帰性反射剤を塗布して、再帰性投影技術（PRT）によりバーチャルに透明化して視野を確保できる。

図8 オプティカル・カモフラージュ（2）



物体の後に配置したビデオカメラの映像をイメージ・ベースト・レンダリングの手法で観測者視点の映像に変換し、再帰性投影技術（RPT）を用いて投影することで、あたかも人間が透明であるかのように提示できる。

図9 觸覚の AR のための SmartTool



AR：オーグメンティド・リアリティ

図10 把持型 SmartTool への再帰性投影技術 (RPT)による投影



りつけ、センサーの情報に従って、機構のインピーダンスを制御できるスマート・ツールの研究を介して、この触覚の AR の問題に取り組んでいる。

本システムは並進 3 自由度、回転 3 自由度の計 6 自由度を有する機構となっており、並進の各軸にアクチュエータが搭載されている。搭載する道具は目的とする作業に応じて容易に交換可能となっている。また、平行リンクの利用により、人間が実際に持って作業する道具の周囲に大きな作業スペースを確保している（図9）⁷⁾⁸⁾。

VR 物体を手に持ち触れることが実現する、保持型力覚提示デバイスに関する研究開発も進められている（図10）。保持型力覚提示デバイスは、デバイス自体を机のうえなどに固定せずに、両手で持ちながら操作する。両手を用いることで一体感のある操作が可能になり、全体の系が閉じた状態となるため内力と外力を分ける必要がないという利点を有する。RPT をこれに適用すれば、物体をハンドリングしている感覚を視覚と触覚が融合した状態で人間に伝えうる。

おわりに

VR の医学応用は着実に進んでいる。本解説では、VR の新技術の中でも最近話題になっている RPT を中心に解説したが、このほかにも、非常に多くの進展がなされている。詳しくは、著者のホームページ

ジ (<http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/>) あるいは、日本バーチャルリアリティ学会 (<http://www.vrsj.org/>)、日本VR医学会 (<http://www.kuhp.kyoto-u.ac.jp/~jsmvr/>) などのサイトを尋ねられたい。

文 献

- 1) 館 嘉: バーチャルリアリティ入門, p14-40, 筑摩書房, 東京, 2001.
- 2) Satava R M: The Virtual Surgeon, The Sciences, November/December, 35-39, 1998.
- 3) 高倉公明: 外科治療とバーチャルリアリティ, in Conference Proceedings of Industrial Virtual Reality Show & Conference (IVR'97), p186-190, Tokyo Big Sight, June 1997.
- 4) Tachi S: Augmented Telexistence, Mixed Reality. p251-260, Springer-Verlag, New York, 1999.
- 5) 川上直樹, 他: オブジェクト指向型ディスプレイの研究. 情報処理学会論文誌 40 (6): 2725-2733, 1999.
- 6) Inami M, et al: Visuo-Haptic Display using Head-Mounted Projector, Proceedings of IEEE Virtual Reality 2000. p233-240, New Brunswick, N.J., 2000.
- 7) 野嶋琢也, 他: 力覚提示を利用した実時間実環境作業支援システムの提案. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 7 (2): 193-199, 2002.
- 8) 野嶋琢也, 他: 力覚のオーグメンテドリアリティを用いた手術支援システムの研究. 日本VR医学会論文誌 1 (1): 78-82, 2002.

Virtual Reality and Medicine

Susumu Tachi

School of Information Science and Technology

The University of Tokyo