

バーチャルリアリティ

舘 暲

東京大学 教授

1. はじめに

バーチャルリアリティ(VR: Virtual Reality)の台頭した1989年以来、VR用3次元映像ディスプレイの中心は、頭部搭載型ディスプレイ(HMD: Head Mounted Display)とケープ(CAVE: CAVE Automatic Virtual Environment)であった。一方、VRは現在、コンピュータの生成したCG世界にとどまらず、ロボットとネットワークと統合され実世界を指向する展開をみせている。コンピュータで生成された情報世界を実世界に重疊的に加えることで、実世界を増強するオーグメンテッド・リアリティ(AR: Augmented Reality)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、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。また、ネットワークを介して空間の制約を開放しコミュニケーションや各種作業など様々な行動を臨場感を有して行うテレイグジスタンス(telexistence)も模索されている。それらにともない、HMDやCAVEに加え、実世界応用に適した3次元視覚ディスプレイが研究開発されるようになってきている。本講演では、このようなVRにおける3次元映像の次世代表現法を探る。

2. バーチャルリアリティとは何か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。しかしそれらの訳は、実は原語の意味を正しく伝えていない。

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もつとさえ言える。

従って、日本バーチャルリアリティ学会では、仮想とは訳さず、カタカナでそのまま表記したりVRと表記したりするか、日本語に訳す場合は、「人工現実感」という用語の使用を薦めている。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識を用いる方法が推奨されている。

さて、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体感しながら自由に行動でき、(3)その環境に人間が身体性を有して没入している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、「三次元の空間性」、「実時間の相互作用性」、「自己投射性」と呼び、VRの三要素をなす。即ち、この三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、バーチャルリアリティとは、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。

3. 再帰性投影技術²⁾

オーグメンテッド・リアリティの普及には、その表示装置である視覚ディスプレイの問題がある。すなわち、VRを実現する方法としては、HMDとCAVEという二つの装置が代表的であり優れたシステムである。しかしその二つとも、オーグメンテッド・リアリティのように「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のである。

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みながら、半分はLCD(液晶ディスプレイ)の画面を反射させてみることにより、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はあるが、それでも以下のような遮蔽矛盾の問題が残る。

本来、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物体のほうが遠方であって、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ふ「ビデオシースルー」という方法もある。これを用いれば、遮蔽関係の正しいオーグメンテッド・リアリティが実現される。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ふ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。オーグメンテッド・リアリティの実用化に於いて、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」調節の問題もある。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1m近傍に常にあり、水晶体の調節はそのままの状態、主に両眼視の輻輳機能によって眼から20cm以上の距離から無限遠まで、違和感がなく観測できる。

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ったりという状況が生じてしまうのである。この問題も、解決しなければならぬ重要な問題であった。

それらの問題を解決すべく考案された方式が、「頭部搭載型プロジェクタ(HMP: Head Mounted Projector)」と「再帰性反射材」を用いる再帰性投影技術(RPT: Retro-reflective Projection Technology)と呼ぶ第三の方法である。HMPに於いても、人間の運動を計測して対応する両眼用の画像をつくり、それらの画像を別々に提示するのはHMDと同じであるが、HMDのように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、キャッ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配されている(図3、図4)。

従って、両眼の位置からスクリーンに投射された光は、それぞれそのまま両眼の位置に戻ってくる。右眼の位置から出た光は右眼に、左眼の位置から出た光は左眼に戻ってくるので、偏光フィルタ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く、眼鏡なしで両眼立体視が可能となる。

再帰性反射材で作ったHMPのスクリーンは、「オブジェクト・オリエンテッド・ディスプレイ」とも言われて、スクリーンとなり得る実物体があるところだけで映像が映るというディスプレイの一種である^{3,4)}。もう一つの特徴として、RPTでは、投影するスクリーンは平面である必要はない。理想的には、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構わない。実際、RPTシステムでは、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深く絞ることができる。

RPT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装置を利用したりすると、内視鏡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三次元で見え、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、布のほうは非常に安いものですむので使い捨てにできる。また、VR触覚再現装置とこのRPTを組み合わせると、VRの物体に実際に触れるということもできる。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と衣服に纏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5と図

6にRPTを利用したARの例を示す。

4. 可動パララクスバリア方式⁵⁾

古くから、様々な方式の立体ディスプレイが開発されてきたが、専用のメガネが必要であるか、メガネが必要ない場合でも限られた視野の映像しか提示することができなかった。一方、VRでは、行動しつつ没入感をうることへの要請から、全周囲立体ディスプレイが必要であり、研究開発されてきている。

その代表的な技術がCAVEで代表される、専用メガネとプロジェクタを用いて全周囲の映像を提示する装置を用いるIPT(Immersive Projection Technology)である。IPTは、比較的高品位かつ広視野の立体映像を提示することを可能とする優れた方式であるが、映像を投影するための非常に大きなスペースが必要であった。また、将来立体テレビ電話等への応用を検討する場合、立体映像の提示と同時に話者を撮影するための設備が必要となるわけであるが、従来方式ではディスプレイの輝度が低いため、暗い場所で映像を観察する必要があり、人の撮影のために十分な明るさを確保することが困難であった。

さらに専用の立体メガネにより話者の表情が隠れてしまうという問題点もあった。すなわち、従来の提示方式であるCAVEを利用して臨場感のある通信をしようとする、CAVEでは本質的にシャッター方式あるいは偏光方式の特殊な眼鏡が必要となるため、特殊な眼鏡をした顔の相手あるいは合成した人工顔の相手とコミュニケーションすることになってしまう。これが臨場感通信の大きな障害となっていた。

以上の問題点を解決するために「可動パララクスバリア方式」が考案された。可動パララクス方式の原理は、図7に示すように左右眼用の光源列がそれぞれ一方の眼にしか入らないように、光源列より少し手前にバリアを設け、これを一つのユニットとして観察者の周りを回転走査させることでメガネ無しの立体視を実現させるものである。

ディスプレイとしては左右眼用の多数のフルカラーLEDを短冊状の基板にそれぞれ縦に密に並べて、その短冊とパララクスバリアを円筒に沿って複数個配置し、その円筒をモーターで回転させる。回転円筒状のLEDを、提示したい映像がその位置に来た時に、みせたいパターンで点灯する。それが人間の感覚で統合されることにより360度でのフルカラー立体映像が再生可能となる。テレビジョンでも走査線が走っているが、人間には平面の映像として見えるのと似ているが、本装置では立体的にしかも全周の映像の視聴ができる(図8、図9)。

利用者は円筒の中央部に入り透明アクリル製の防護壁を介して立体映像を観察することができる。本手法により、従来のパララクスバリア方式の立体ディスプレイで問題となっていたバリアや提示面の精度、視点移動範囲、クロストーク、視野角等の問題を可動型とすることで解決できたわけで、世界で初めての全周型のメガネ無しフルカラー立体映像提示方式が日本から生まれたといえる。本原理を用いることにより将来、省スペースで臨場感あふれる立体映像シアターや、新型ゲーム機、立体テレビ電話等への応用が期待できる。

また、カメラも同時に回転システムに組み込むことにより、自由な視点からの映像が得られる。従って、このようなブースを街角におくことにより、いわゆるレイグジスタンス電話が実現する。

この装置は TWISTER と呼ばれている。TWISTER は、Telexistence Wide-angle STEReoscope の略で「ツイスター」と読む。1995 年の秋から研究を進められてきたが、2002 年に、専用のメガネを用いることなく全周囲の立体映像を観察することができる新原理のディスプレイシステムとして開発に成功し、その成果が米国テキサス州サン・アントニオ市で開催された SIGGRAPH2002 で展示され、世界中から集まった約 3000 の人に体験され好評を博した。現在、TWISTER の 5 号機が日本科学未来館に設置されており、東京大学にある TWISTER の 4 号機とを結んだ共同研究が行われている。

5. おわりに

近年バーチャルリアリティは実世界を指向した展開をみせている。実世界にコンピュータで得られた情報世界を重疊的に加えることで、実世界を増強するオーグメンテッド・リアリティはこの好例である。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、ユビキタスコンピューティングをも可能とする。

一方、コンピュータ・ネットワークの進展によって、世界が大きく変わりつつある。現在のネットワークで構築された人工環境では、情報は自由に行き交うものの、生身の人間の行為や行動を伝えることは不可能である。それを可能にするのが、テレイグジスタンスである。テレイグジスタンスは、ネットワークを介して自分自身を遠隔の地に瞬時に運び、そこで、あたかもそこに存在するような臨場感をもって行動すること可能とする技術で、バーチャルリアリティとロボティクスとネットワークが統合されて初めて実現される。つまり、自分自身の存在を、時間と空間を超えて拡張させるのである。テレイグジスタンスは、既にアイデアの段階から踏み出し、実際のシステムとして、その技術的可能性が理論的にも実験的にも実証されており実用化を指向しており⁶⁾、今後の発展が期待される。本講演では、このような実世界指向のバーチャルリアリティに於ける、3次元映像の次世代表現法を概観した。

参考文献

- 1) 舘暉：バーチャルリアリティ入門、筑摩書房、ISBN4-480-05969-5, 2001.
- 2) S. Tachi: Augmented Telexistence, in *Mixed Reality* (Y.Ohta and H.Tamura ed.), pp. 251-260, Ohmsha/Springer-Verlag, ISBN4-274-90283-8 (Ohmsha) ISBN3-540-65623-5 (Springer-Verlag), 1999.
- 3) 川上直樹, 稲見昌彦, 柳田康幸, 前田太郎, 舘暉: 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*, Vol.40, No.6, pp.2725-2733, 1999.
- 4) M.Inami, N.Kawakami, D.Sekiguchi, Y.Yanagida, T.Maeda and S.Tachi: Visuo-Haptic Display using Head-Mounted Projector, *Proceedings of IEEE Virtual Reality 2000*, pp. 233-240, New Brunswick, NJ, March 2000.
- 5) S.Tachi ed.: *Telecommunication, Teleimmersion and Telexistence*, Ohmsha/IOS Press, ISBN 4-274-90586-1(Ohmsha) ISBN 1-58603-338-7(IOS Press), 2003.
- 6) S.Tachi ed.: *Telecommunication, Teleimmersion and Telexistence II*, Ohmsha/ IOS Press, ISBN 4-274-90638-8(Ohmsha) ISBN 1-58603-519-3(IOS Press), 2005.

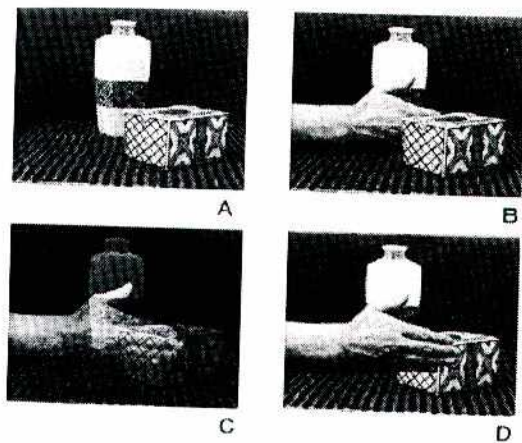


図1 HMD、CAVEにおける遮蔽矛盾。(A)VRテーブル上のVR花瓶とVR灰皿。(B)実物体である手を遮蔽矛盾なく提示する理想的なAR提示装置。(C)HMDでは、手でVR花瓶を遮蔽できず、またVR灰皿で手を遮蔽することもできない。(D)CAVEでは、手が常に一番手前にみえてしまう。

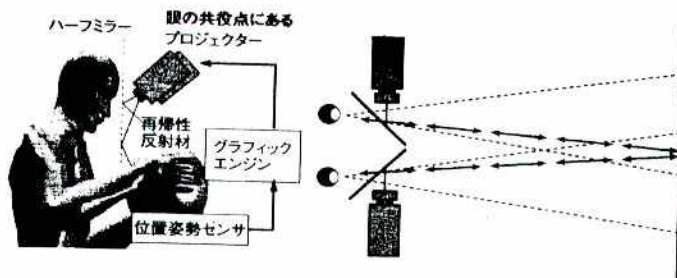


図2 再帰性投影技術の原理。ステレオ視が可能である。

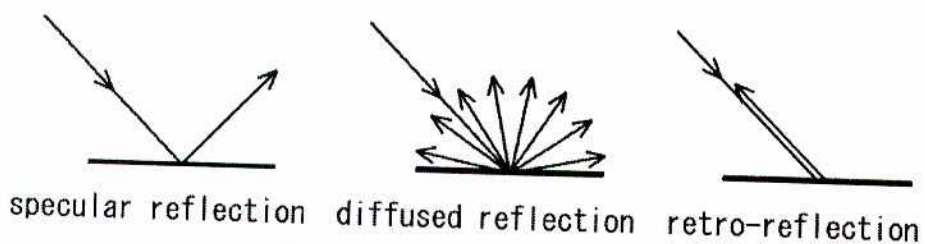


図3 代表的な表面反射。左から、鏡面反射、乱反射、再帰性反射。

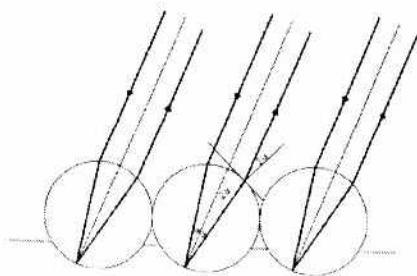


図4 屈折率が2である直径50ミクロン程度の透明球を布に埋め込んだり、表面に塗料とまぜて塗布したりすることにより再帰性反射素材が作れる。任意形状の表面に塗布可能である。

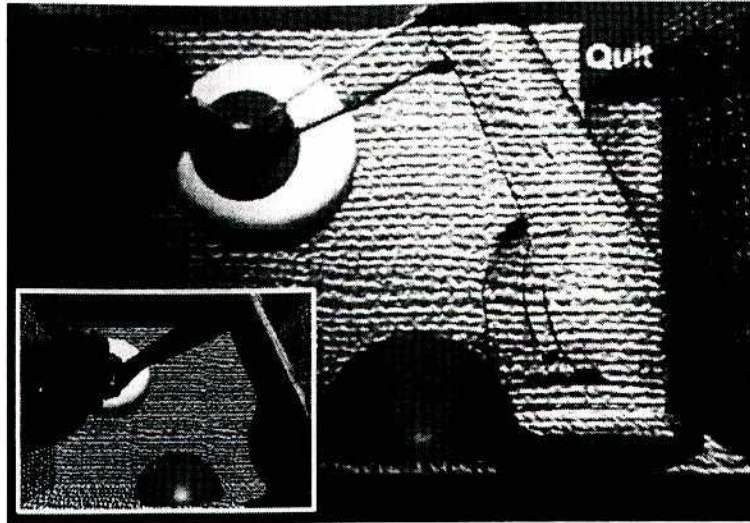


図5 オプティカル・カモフラージュ。左下のように器具が視野を隠す状態を、器具に再帰性反射剤を塗布して、PRTによりパーチャルに透明化して視野を確保できる。

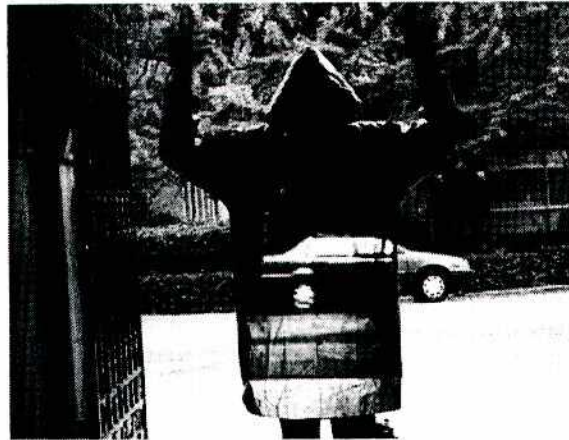


図6 物体の後ろに配置したビデオカメラの映像をイメージ・ペースト・レンダリングの手法で観測者視点の映像に変換し、RPTを用いて投影することであたかも人間が透明であるかのように提示できる。

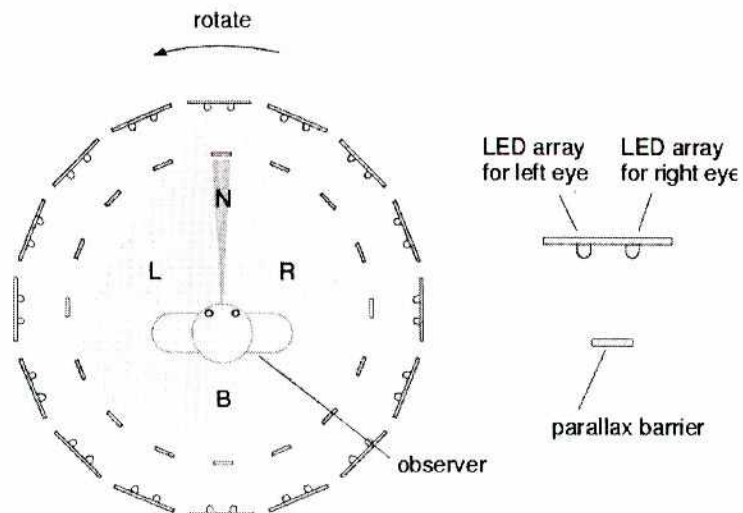


図7 可動パララクスバリア方式の原理。

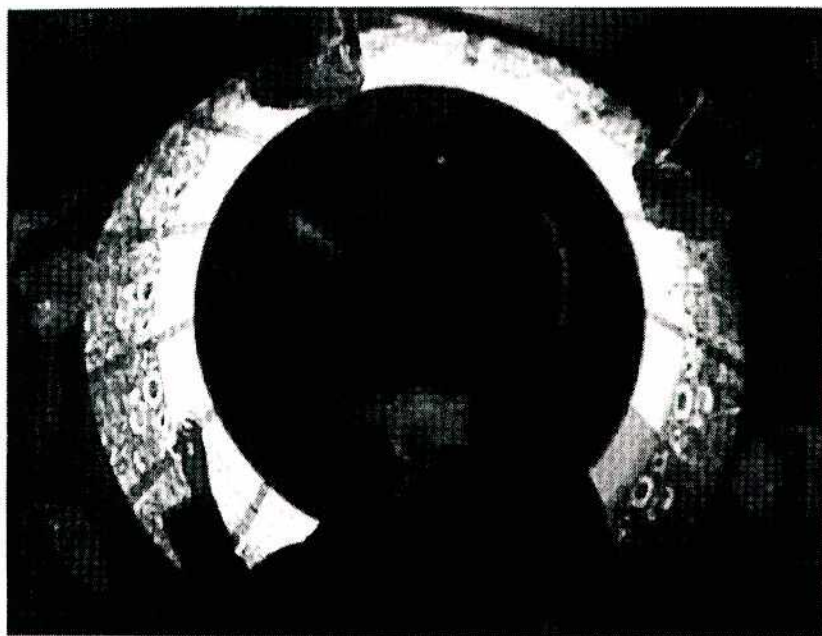


図8 TWISTERによる全周フルカラー裸眼立体ディスプレイの実現



図9 TWISTERの概観(右)と提示画面の一部(左)