

バーチャル空間技術の課題と提言*

舘 暲**

Future Prospect of Virtual Space Technology / Susumu TACHI

Key words: virtual reality, telexistence, augmented reality, ubiquitous computing, wearable computer, head-mounted projector

1. はじめに

バーチャルとは、「見かけは異なるが、本質的には実物そのものであること」であり、一部巷間で旧来の慣習から誤って使用されている仮想（仮に想定した）という訳語とは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会社であったならば、そのようなところは、取引ができない。従来の会社の体裁はなしに、恐らくとも実際の会社と同じ機能を有するものでなければ、恐らくそこを利用できないのである。明治以来このかた、バーチャルを虚や仮想と過って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の訳として大変な誤解を招く仮想現実を使わずに、バーチャルリアリティとそのまま表記するか、あるいは意訳ではあるが、人工現実感を用いる気運が高まっている¹⁾。

さてバーチャルリアリティの進展は、古くはイメージーションの世界で語られ、ごく最近になって初めて創られた、まさに人間の英知が生み出した人工空間であるバーチャル空間を生み出した。この空間は現前しないにもかかわらず、現前するのと同じ効果をもたらす。従って、物理

的には存在しないが、人間にとっては存在するという、今までにはなかった全く新しい種類の活動空間が出現したと言える。

人間はコンピュータが生成した環境をリアルに認識し、その中で現実のように行動できるのである。もちろんそれを逆に物理的なものとして実在化したり、そこで得た経験や訓練に基づいて現実のシステムを操作することも可能となる。

一方、トレイグジスタンスは、人間の時間と空間の制約を解いて自由な空間で自在に行動することを可能とする概念であり技術である。自分の分身であるロボットのいる場所に自分が実際に存在するような臨場感を得ながら、その自分自身であるロボットを操る。また、実空間にトレイグジスタンスするだけでなく、コンピュータの生成したバーチャル空間にトレイグジスタンスすることや、そのような空間を介して実空間に働きかけることもできる。最近トレイグジスタンスをインターネットを使うような手軽さで、だれでもどこへでもという要望にこたえる研究開発構想が生まれている。それがアールキューブである。

一方、バーチャル空間は実空間と混在し始めている。最近話題になっているオーグメンティドリアリティでは、実世界にコンピュータで得られた情報を加えて実世界を増強する。眼下の現実世界にコンピュータの情報を三次元的に付加してバーチャル空間を重ね、人間の様々な行動や所作を助けるわけである。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。例えば、目の前の風景に地図や等高線を3次元的に書き込んだり、建物が何という名前などのような建物であるかを示したり、作業中であれば、作業手順をコンピュータシミュレーションでスーパーインポーズして示し



* 原稿受付 平成11年11月25日

** 東京大学工学部（東京都文京区本郷7-3-1）
1973年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、工学博士。1994年東京大学工学部教授。
1995年同大学院工学系研究科計数工学専攻教授、現在に至る。国際計測連合学会ロボティクス会議議長、重点領域「人工現実感」領域代表、日本バーチャルリアリティ学会会長

たり、壁の中の見えない配管を可視化してみせたりできる。コンピュータトモグラフィ(CT)やマグネティックレゾナンスイメージリ(MRI)や超音波像などを立体的に重ねて診断や治療に役立てたりもできるのである。

本解説では、このようなコンピュータの生成したバーチャル空間やロボットなどによってもたらされた遠隔の空間をネットワークを介して共有し、あたかも現前する空間のように利用しあうバーチャル空間技術の現状を紹介し、課題を整理して将来に向けての提言を試みる。

2. バーチャルリアリティ

今までは人工物というと各種の製品、人工環境というと建物などの建造物が一般的であった。しかし、バーチャルリアリティは製品でない人工物や、建物や都市ではない新しい人工環境を生み出した。バーチャルリアリティは、実物と本質的に等価な代替人工物や人工環境を意味する。このようにバーチャルリアリティは人工物や人工環境をコンピュータの世界として作り出し始めている。バーチャルプロトタイピングを行えば、最終製品を造る前にバーチャルな製品を造り、それにより評価することにより無駄な中間製品を生み出さずに済む。これは、限りあるエネルギーや資源の節約につながる。それだけではなく、バーチャルリアリティを利用すれば、多品種少量生産の極致ともいべき一人一人に合わせてテーラーリングした製品が、大量生産品と変わらない値段で手に入るようになることを意味している。それは、個人個人の好みへの対応という意味に加えて、従来特殊であるが故に、ややもすれば製造コストからなおざりにされがちであった障害を持った人のための製品も、全く同等に製造する可能性を示唆しているのである。これらは製品にとどまらず、さらに大きな空間、住居や、都市のような大規模空間についても成り立つ。

このような、バーチャル空間の生成法とし視聴覚については、頭部搭載型ディスプレイ(HMD)とCAVEで代表される全天周型ディスプレイが提案されており順調に進展しているが、設計などの応用を考えた時には、触覚ディスプレイが緊要となるが、この研究はまだその途上にあり今後の進展が待たれる。

触覚のうち固有受容感覚の提示については、遭遇型の触覚ディスプレイが有望視されている。これは、実際に何か実物が模型を置いておくのが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汎用性がないので、バーチャルな模型を置く仕組みになっている。つまり考えられる限りあらゆる物体の形状の要素を備えた、模型的物体を「素片」と呼び、その素片が、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ものである。

視覚を提供するには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が、その物体モデルに手を触れようとしたとき、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、円筒の側面の丸い部分に触り、次に両端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感触を実際に提供する。このシステムは現在のところ、指先を模した器具を手を持って物体に触るようになっていて、というのは、指先に皮膚感覚が生じると、素片が動いているのが人間に分かってしまい、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固有受容感覚で得たものと矛盾してしまうからである。また、現在は指1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。今後、多くの指で触ることのできるシステムへの進展が課題となる。

一方皮膚感覚については、振動子で振動を起こし、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に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、電気パルスを皮膚電極を介して人に提示して、振動感覚に似た感覚を伝えることも可能である。

触覚研究は実際の応用を考えた時、極めて重要な要素でありながら研究が遅れており、今後の研究成果が期待されている。固有受容感覚と皮膚感覚の統合などが今後の重要な研究テーマであろう。

3. アールキューブ²⁾

コンピュータネットワークの進展は、世界を大きく変えようとしている。ネットワーク環境も新しい人工環境で人工世界であり、バーチャル空間と言え。しかもそれは、今までの国境を越えたバーチャル空間になっている。しかし、現在のネットワークで構築されたバーチャル空間のみでは、情報は自由に行き交いが行為や行動は伝わらない。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が必要である。この技術はトレイグジスタンスと呼ばれている。

トレイグジスタンスに基づく次世代ロボット構想は、通産省や大学の研究者により、1995年に「アールキューブ」構想としてまとめられた。アールキューブとは「リアルタイム・リモート・ロボティクス(実時間遠隔制御ロボット技術)」という言葉の頭文字=RRRをRの3乗と表記し、それを「アールの立方体」という意味のアールキューブと読ませたものである。これはネットワークを介してだれでもリアルタイムにロボットや各種の機器を自在に動かすこ

とを意味している。実時間遠隔制御によって、現在インターネットを用いて、いろいろな情報を自由に世界中でやり取りしているように、人間の行動というものが自由に伝わっていく仕組みを実現することがアールキューブ構想の目的である。

例えばエベレストに置いたアールキューブタイプのロボットがあるとしよう。そのロボットにネットワークを介してアクセスし、空いていたらそのロボットに“入り込んで”，山に登らせるとエベレスト登山という体験ができるという構想である。体の不自由な人とか長く入院している人が、ときに外へ出たいけれどもなかなか出られない、出られても登山のような肉体的に厳しいことまではできないという場合などに有効に利用できる。今は映像とかコンピュータでつくった環境の中で疑似的な体験をすることもできるが、実体験とは違う。実際に体験したいし、しかも自分のよく知った仲間と一緒に体験できればなお嬉しいわけで、このアールキューブロボットなら、そういう機会を提供できるのである。

アールキューブのロボットはもちろん、災害救助とか実際に人間がやるには危険な作業も代行させることができる。そうした作業では特に人間の判断力というものが必要になり、今ある自動機械にはまかせられないわけであるが、人間がその場所にいるような感覚で制御できるロボットであれば、人間の代わりをさせることが可能である。

このように、ネットワーク技術とロボット技術を結合することで遠くにあるロボットを自由に、自分の家からでもオフィスからでも使えるようにするというアールキューブ構想は、実に大きな社会的インパクトを持つ。

そこで、国家プロジェクトとして「人間協調共存型ロボット」の開発が開始されている。このプロジェクトは、1998年から5年計画で人間型ロボットを作り、それを別に作ったトレイグスタンス用のコクピットから自分の分身のように動かし、さらにネットワークを介して利用できるようにしようという計画で、略称を「HRP：ヒューマノイド・ロボティクス・プロジェクト」と言う。2000年3月までにロボットとコクピットのプラットフォームを試作し、次の3年間で様々な応用実験をしながら改良していくというスケジュールであり、いわばアールキューブの始まりであるにとらえることができよう。

ただし、これが人間の身近なものになるには、重要な技術的課題が残されている。それは「アールキューブはネットワークを走るビークルである」という言葉が象徴するように、ネットワークロボットというものを自動車のアナロジーとして考えるとき、すぐに思い浮かぶことである。

ある人間が運転する自動車を考えてみよう。その自動車が、運転者のミスやバス自体の設計・製造ミス、土砂崩れなど道路の問題で事故が起きた場合、だれが運転していたのか、その自動車のメーカーはどこか、道路の管理責任者は

だれかといったことが問題となる。全く同じことが、アールキューブのロボットでも言える。ロボットがもし万一実際に人を傷つけたり物を壊したりしたら、基本的にはネットワークを介してそのロボットを操作していた人の責任になる。もちろん、通信網やシステムの混乱の結果として何らかの事故が起きたときは、自動車で道路にあたるネットワークの管理責任者や、自動車の製造者にあたるロボットメーカーやシステム提供者の責任になる。アールキューブでは「ロボットが人を傷つけた」などといった極めて曖昧な状況は生じない。基本的には、使っている人の顔がしっかりと見えており、これがアールキューブの特徴である。

従ってここで重要なのは、ネットワークの管理責任とか製造物責任（PL）というすでに今の社会で制度化されていることではなく、「ロボットを操作する人間」の責任である。ロボット操作者は操作するにあたって、自分がだれかということをはっきりと明らかにし、さらに安全に操作できるだけの技量を持っていて、様々な安全性に配慮しつつ操作しなければならない、ということから考えると、自動車と同じようにロボットでも、要求される技量に応じた免許制度などを考えていく必要があると思われる。

それは例えば、災害救助ロボットの操作は、必要な知識を習得しトレーニングを受けて初めて得られる免許を持った人だけができるとか、ネットワーク的にも高速大容量の回線を使うことができるといったことである。後半は救急車や消防自動車などの緊急車両が来たら、一般の車両は路肩に停止して道を開けてやらなければならないという、道路交通法の規定などと対応するものと言えよう。しかし一方、ショッピングなどでの簡単なロボット操作は、自転車の運転などと同じに考えて特に免許がなくてもできるようになるであろうし、もう少し難易度が高いオフィスなどから工場内のロボットを操作するような場合には、自動車の普通免許ぐらいの訓練だとか、そういうことに関しても考えていかないといけない時期がきている。

安全ということに関しては、純技術的にもクリアすべき課題がある。そもそもアールキューブでは操作されるロボット自体が非常に賢く、知的である必要があるのだが、そのときには「知能」というものが従来の枠組みでのものとまた少し変わってくるのではないと思われる。

従来ロボットの知能とは、どちらかという人間と同じようなものをイメージしていたと言える。人間ができることをすべて機械にやらせるという立場から、いわば人間の知能を複製する研究をしてきた。ところが、アールキューブで考えるロボットの使い方では、むしろそういう人間的な能力は必要としない。それは人間が自らやるからである。それに代わって必要なものは「安全知能」である。

アールキューブにおけるロボットは、ともかく人間に危害を及ぼさないものでなければならない。それは例えば、人間が間違えて、ロボットの周囲の人間に危害を及ぼす結果になるような操作をしても、そういう操作を受け付けない

いというようなロボットである。かつて盲導犬ロボットの研究で「賢い不服従」の機能と名付けられた、そのような知能を、アールキューブでは「安全知能」と名付け追求され始めている。この知能は、そこに人間がいることを認識し、自分が命令された動きをする結果、空間的にどう動き、そこにいる人間にどういう結果を及ぼすかを予測し、それが人間にとって危険だと判断したら操作を受け付けなという、非常に高度な知能であり今後の重要な課題となっている。

4. RCML (アールキューブ・エムエル)³⁾

アールキューブのハイエンドは、今までに述べたような人間型ロボットや動物型ロボット、その他の各種ロボット機器を、ネットワークを介してテレグジスタンスにより高い臨場感を有して制御するものであった。一方、インターネットを利用するような気楽さで、世界中の公共施設、公園、博物館、ショッピングセンター、ブティック、オフィス、工場、あるいは家庭とを結んで、そこにあるロボットやロボット機器を自由に操作することも、アールキューブの目標の一つである。さきほどの、自動車のアナロジーで言えば自転車にあたるものといえよう。だれでもがさして練習もいらず、まして免許などもなく、自由にネットワークをいききして行動できるのである。

そのためには、ロボットをネットワークを介して人間が利用するためのロボット制御およびロボット感覚情報提示に関する環境記述、運動制御、情報提示のための標準言語が必要となる。

このような背景のもと「アールキューブ・エムエル (RCML: R-Cubed Manipulation Language)」の開発が通産省の国際標準創世型研究開発の一環として計画され、1997年に開発された。すなわち、ワールド・ワイド・ウェブ (WWW) ブラウザの利用を念頭に置き、インターネットでデファクト標準である HTML (Hyper Text Markup Language) およびインターネット上の三次元空間記述言語の VRML (Virtual Reality Modeling Language) をベースとし、それをロボットのネットワーク通信制御と情報提示にまで拡張したものである。研究開発を進め日本発のデファクト標準のみならず ISO (国際標準化機構) 等の国際標準を目指すという計画であり、現在、日本と EU (欧州連合) との共同研究にまで発展している。

すでに、ネットワーク上に配置された移動ロボットやロボットカメラなどの動作機構を、WWW ブラウザ上からホームページをアクセスすると同様にアクセスするソフトウェアが開発されている。すなわち、動作機構側においては、ロボットをコンピュータにインタフェースを介して接続し、開発する RCML で動作を記述し、そのサイトのホームページに登録する。ネットワーク上の使用者は、そ

のホームページに登録されたアイコンを指示することで RCML ブラウザを起動させ、遠隔地にあるロボットを操作することができるというわけである。例えば、使用者はデータグローブやマウス等の入力デバイスを用いて動きを指示し、遠隔地にあるロボットや移動カメラを操作して、見たい遠隔環境の映像を臨場的に得ることができる。また RCML ブラウザを介して、移動、物体操作等の作業指示を行うことによりロボットを操作し、遠隔の実環境内を自由に移動し、様々な作業を的確に行わせることができると期待されている。

パソコンの周辺機器に、RCML のファイルが添付されており、それをパソコンにインストールすれば、すぐにその機器をインターネットを介してどこからでも操作できるという日がもうすぐそこに来ていると言えよう。

5. ヘッドマウンティドプロジェクト (HMP)⁴⁾⁵⁾

オーグメンティドリアリティの普及には、技術的な課題がある。表示装置、ディスプレイの問題である。

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るが、しかしその二つとも、オーグメンティ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、実はあまり適していない方法なのである。

というのは、HMD では、それで目を覆ってしまうので実空間が見えない。「シースルー HMD」を利用すれば実空間も VR 空間も両方見えるのであるが、オクルージョンの問題が解決されていない。すなわち、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、HMD では提示位置が計算されて決まった場所に投影されているので、どうしても透けて見えてしまう。実環境もカメラでとらえ、物体までの距離を計測して、VR 環境と遮蔽の矛盾なく重ねるといって「ビデオシースルー」という方法も考えられるが、距離の高速で正確な計測が必要となりシステムが複雑で、しかも視野が狭くなってしまい決め手にはなっていない。

この「遮蔽問題」は CAVE の環境でも同じである。CAVE は VR 空間提示には良いシステムであるが、VR 物体で自分の手を隠せない。遮蔽問題に加えてもう一つ「焦点」の問題もある。通常 VR 空間を見ているとき、人間の目の焦点は常に 1 m ぐらいのところであり、主に両眼視の輻輳機能によって眼から 20 cm 以上の距離にある場所であれば、あまり違和感がなく観測できる。ところが、オーグメンティドリアリティでは同時に実空間にある物も見られるわけで、その時目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。すると、オーグ

メンティドリアリティで現実の物とVR物体を両方見ていると、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いという状況が生じる。

それを解決する方法の一つに「ヘッドマウンティドプロジェクタ (HMP)」と「再帰性反射材」を用いる方法が提案されている。

HMPは、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投影するのはHMDと同じであるが、投影する場所が異なる。まず、ちょうど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、間に配置した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、その光が来たのと全く同じ方向に反射し返す物質が塗ってある。眼の位置からスクリーンに投射された光は、そのまま両眼の位置に戻り、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、眼鏡なしのそのままで両眼立体視が可能なのである。

このような再帰性反射剤を塗ったHMP用のスクリーンは、「オブジェクトオリエンティドディスプレイ」と呼ばれ、スクリーンとなり得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る。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といことができる。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、透けて見えるということがないので、HMPは、オーグメンティドリアリティを応用する際の有望な装置として期待されている。

6. 相互トレイグジスタンス⁴⁾⁵⁾

トレイグジスタンスでは、操作者の自分はトレイグジストとして遠隔の環境を現実の空間と感じ、現実空間と変わらないように見ることができ、そこに居る人も実際の人として何の違和感もなく相対することができる。しかし、トレイグジスタンスされた方の空間にいる人はそうではない。何かロボットがいて動いており、そのロボットが人間のよう動きをして、そこから人間の声が聞こえてくるということではしかないわけである。それでは人と人が対話する場面や共同で作業をする場面としては好ましくない。だれがその空間にトレイグジスタンスしてきているのか、映像的にも示されているということが大切になる。しかも、それがロボットの頭や胴体にはめ込まれたテレビに写っているのでは、コミカルではあっても、決して臨場感

がわくものではない。現在HMPを利用することで、相互にトレイグジスタンスをしている感覚を生じさせる相互トレイグジスタンスが可能になろうとしている。

例えば、トレイグジスタンスシステムで介護しているという状況を考えてみよう。その場合でも介護は自動ロボットがやっているわけではなくだれか人間が実際にこうしているわけであるが、しかし、介護を受けている人にはロボットしか見えないので、そういう感覚はわからない。その場合、介護を受けている人がHMPを使えば、だれか人間そのものに介護を受けていると実感してもらうことができる。つまり介護を受ける人がHMPのバイザをつけ、ロボットには再帰性反射剤を塗っておく。そしてロボットの操作者の三次元映像をロボットに投影してやれば、そのロボットはすでに機械装置ではなく、操作者本人に見えるわけである。

こうしたアイデアはまさに新しい次世代のトレイグジスタンスであり、すでに試作装置も作られており、その進展が期待されている。

7. おわりに

バーチャル空間は現前にはしていないが、現前するのと本質的には等価な空間を意味する。それは、コンピュータにより生成された空間であったり、伝送された遠隔の空間であったり、実空間にスーパーインポーズされた空間だったりする。しかしその空間は、自然な3次元の空間性、実時間の相互作用、自己投射性という現実空間の3要素を有しているが故に人間に自然な行動空間を提供している。従って、バーチャル空間は、人間の古来の夢を実現する人工空間であるだけでなく、人間とは何か、自然とは何かを常に問い掛け、人間に知的な成長を要求する、人間と人工物との関係を問い掛け続ける人工環境と言えらるであろう。バーチャル空間を設計し利用するに際し、常に人間を見据えなおし、人間にとって本当の意味で有益な人工物を創造して行きたいものである。

参考文献

- 1) 第13回「大学と科学」公開シンポジウム組織委員会編：バーチャルリアリティ；人工現実感と人間のかかわりを考える、クバプロ、(1999)。
- 2) 通産省アールキューブ研究会編：アールキューブ、日刊工業新聞社、(1996)。
- 3) 館 暁：バーチャルリアリティとロボティクス、日本ロボット学会誌、15, 4 (1997) 512。
- 4) S. Tachi: Augmented Telexistence, Mixed Reality; Merging Real and Virtual Worlds, Ohmsha, Ltd., (1999) 251。
- 5) 館 暁：ロボットから人間を読み解く；バーチャルリアリティの現在、NHK人間講座、日本放送出版協会、(1999)。