

バーチャルリアリティの最近の進歩

館 障*

1. はじめに

バーチャルリアリティ (Virtual Reality : VR) とは、「みかけは現実ないしは現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現物であること、あるいは人間がそのように認識すること」である。したがって、バーチャルリアリティを用いて人工的な環境を構築するならば、全く新しい人工環境であっても、自然環境や人間が古くから慣れ親しんできた人工的な環境の良さを本質的に反映させ利用しやすいものとする事ができる。また人間が創造する極めて抽象的な概念を、具象化ないしは現物化することが可能となる。事象の解明を助け人間の創造活動を高め、人間の経験を豊かにし時間と空間の制約を越えての制御と通信を可能とする、このいわば人間のための究極の道具ともいべきバーチャルリアリティは 21 世紀のジェネリックテクノロジーとして期待されている。

バーチャルリアリティに関する解説はすでに多く上梓されている^{1), 2)}。したがって、本解説では歴史的な経緯やすでに紹介されている概念や具体的な事例は最小限触れるにとどめ、バーチャルリアリティに関する学界・産業界の最近の動向をトピックスを中心として概観し、将来を探る。なお最近の研究の詳しい内容については、電気学会からバーチャルリアリティの優れた最新の論文を集めた論文特集号³⁾が出版されるので、是非それを参照されたい。

2. VR 小史

そもそもバーチャルリアリティという言葉が使われ始めたのは、米国の VPL 社がデータグローブやアイフォンなどの製品を市販しはじめた 1989 年からであり、ゲームへの応用とあいまって一般に知られるようになった。しかし、バーチャルリアリティの考えの起源は 1968 年のサザランドの頭部搭載型ディスプレイの研究にまで遡り⁴⁾、

コンピュータグラフィクスに源流を持つジェネリックテクノロジーの一つである。その後わが国からは 1982 年にテレグジスタンス^{5)~8)} (tele-existence)、米国からは 1983 年にテレプレゼンス^{9)~11)} (telepresence) の概念が提唱され、それぞれ通産省の大型プロジェクト「極限作業ロボット」と NASA の宇宙開発プロジェクトに関連して発展した。一方、芸術の分野においても 1983 年にアーティフィシャルリアリティ¹²⁾ (artificial reality) の考え方が提唱されている。これらは、一言でいうならば、従来人間が機械に自らを合わせるという人間側の負担を前提にして成り立っていたマンマシンインターフェイスの形態を脱却して、逆に機械の方から人間へ無限に歩み寄るいわゆるサイバネティックインターフェイスの究極としてバーチャルリアリティが模索されていると解釈できる。

実用的見地からみると、近年コンピュータやセンサなどの技術が急速に進展し、また人間科学の進展による人間感覚などの知見の蓄積が進み、いままでは非現実的な夢と思われていたバーチャルリアリティの方法論が急速に現実味を増してきている点が挙げられる。そこでいままでは、独立に発祥し進展してきた多くの分野がバーチャルリアリティに注目し、これを 21 世紀へのキーテクノロジーとして認識し始め、それにともない、各分野に関連する企業においてもバーチャルリアリティの研究開発が精力的に繰り広げられるようになったのである。

しかも、単にこれらの分野で共通の概念が育ってきただけではなく、バーチャルリアリティはそもそも共通となりうる基礎技術を内包しており、一つの分野で開発された技術が他の分野でもそのまま利用できるのも、それらをまとめて一つの技術体系として研究開発することが重要かつ緊要となっている。したがって、内外の学界でもこの人工現実感を重要な研究分野として認識し、盛んに研究が進められ始めている。

3. バーチャルリアリティの特徴

バーチャルリアリティの最も特徴的な点は、人間が仮存在する仮想環境が (1) 人間にとって自然な 4 次元空

* 東京大学 工学部

Key Words : virtual reality, tele-existence, telepresence, human centered media, networked reality.

間を構成しており、(2)人間がそのなかで自由に行動でき、しかもその仮想環境との相互作用が自然な形で実時間に生じ、(3)その環境への自己投射性がある事である。これらはバーチャルリアリティの3要素(臨場感、実時間インタラクション、自己投射性)と呼ばれる。

このような特徴を持つバーチャルリアリティを用いることにより以下に示す効果が生じてくる。

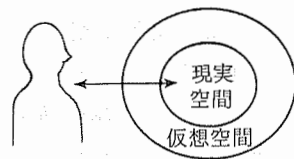
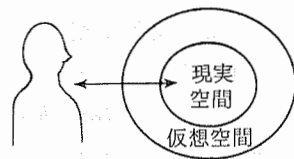
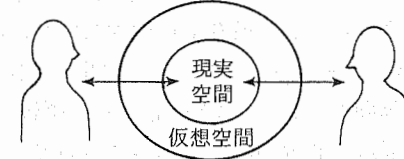
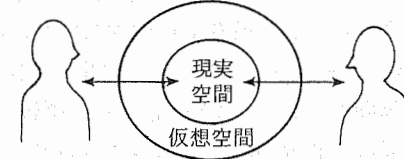
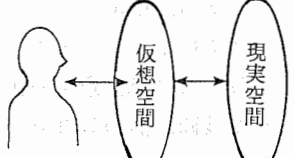
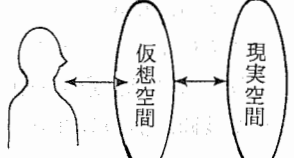
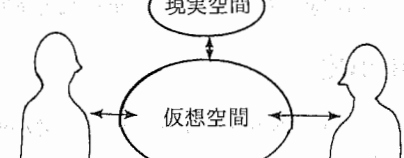
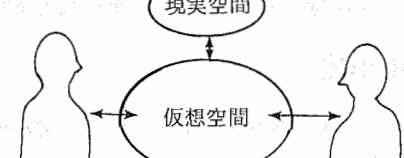
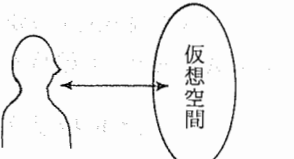
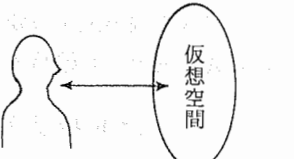


- ①大規模な4次元空間(実時間で変化する3次元空間)が利用できる。すなわち、等身大の表現が可能で、体験的、模型実験的であり、従って人間の空間認知能力に訴え、直感が働きやすい。(創造性)
- ②空間が感覚統合(センサフュージョン)される。つまり、視覚、聴覚、触覚などが整合性を保って統合されており、それにより実体験に近い臨場感や現実感が生じる。(体験性)
- ③インタラクティブな空間が実現され、仮想空間が人間の行動に対して実時間で応答する。したがって、仮想空間を直接ロボットやセンサなどの配された実空間と結ぶことも可能である。(行動性)
- ④共有空間が生じる。すなわち、多数の人が離れた場所から共有参加でき、その意味で一種の社会が生まれる。(社会性)

従来の人間と機械の関係においては、人間はあくまで現在実際に存在する環境の中において、その一部に仮想環境を持ち込んでそれを利用するのみであった。たとえば、

コンピュータの表示画面は仮想環境であるし、遠隔のカメラからの映像はやはり仮想環境であるが、それらは自分の回りの実環境の一部を仮想環境に置き換えているにすぎない。しかも、決して自然な3次元ではない。その仮想環境に対しての働きかけは、キーボードや操作装置により行われるが、自分自身が行動しているような働きかけではない。もちろん、自分自身がそこに投射されている感覚も生じない。

バーチャルリアリティを介した人間と機械のシステムでは、人間が実際に存在する環境はもはや人間には感じられない。人間の回り 4π ステラジアン空間にひろがるのはロボットの存在する遠隔実空間の仮想空間であったり、コンピュータの創製した虚空間の仮想空間である。人間はその仮想空間のなかで自由に行動し、仮想空間に働きかけることができる。また、自分自身の投射がその空間に対して生じ、ロボットや仮想自己と一体化した自己を体感することができる。

このバーチャルリアリティを大別すると、ロボットを媒体として、人間が現在存在しているのとは別に存在する実世界の仮想環境が伝達され生じる現実感と、コンピュータなどの創製した実際に存在しない、しかし極めて現実味の溢れる虚空間により構成された現実感とに分かれる。さらに構成された仮想世界が実世界のモデルとなっている場合と実世界とは全く掛け離れた虚世界の場合がある。第1図にそれらを分類して示している。

人間との関連 仮想空間の性格		個人		複数	
		個人	個人	複数	複数
伝達された現実 [仮想空間の重畳 仮想空間を介した伝達を含む]		 例) ロボットのテレグジスタンス制御	 例) ロボットのテレグジスタンス制御	 例) テレグジスタンス共同作業・臨場感通信会議	 例) テレグジスタンス共同作業・臨場感通信会議
構成された現実	現実立脚 虚空間	 例) VRによる設計・評価・教育・訓練	 例) VRによる設計・評価・教育・訓練	 例) 共同設計・共同訓練	 例) 共同設計・共同訓練
	超現実 虚空間	 例) アミューズメント・アート	 例) アミューズメント・アート	 例) 仮想現実共同体	 例) 仮想現実共同体

第1図 バーチャルリアリティの分類

伝達された現実とはオンラインで実空間との係わりが生じている場合を意味している。仮想空間が実空間そのものの3次元像や3次元映像により構成されるシンプルな形から、実空間の情報からコンピュータにより生成して仮想空間を構成する複雑なシステムまで、あるいは両者の重ねあわせなどのバリエーションがあるが、どの場合でもオンラインで実空間が繋がっており、仮想空間での行動が直接実空間に効果を及ぼす。また、仮想空間に実際の可視情報以外の付加情報を加えることも可能である。なお、シースルー型のHMD(頭部搭載型ディスプレイ)で実環境を見ながら仮想環境情報やコンピュータからの有益な付加情報を重畳させた場合もこれにあたる。縮退して距離が0になった状態と考えればよい。ちなみに、この直接視にコンピュータによる構成環境情報を付加したシステムをオーグメンティド・リアリティ(augmented reality)と呼ぶ場合もある。

構成された現実では、仮想環境がすべてコンピュータにより合成される、いわば虚環境である。しかし、その仮想環境での設計・訓練・教育・評価などの行為が現実環境においても役立つためには、コンピュータにより構成された仮想環境が現実環境を反映している必要がある。これが、バーチャルリアリティのバーチャルの意味である。すなわちバーチャルとは「みかけや名称は現物そのものではないが、本質あるいは効果においては現物である」という意味であり、仮想環境が現実環境そのものではないが、設計や訓練などに役立つという本質的な部分において効果として現実環境と等価になっているということである。

さて、この仮想環境に入り込む人が一人の場合と、複

数の場合で状況が異なる。後者は社会性のあるVRとも呼ばれる。図のなかでは伝達された現実と構成された現実それぞれについて応用例を挙げてある。

4. 創造のための道具(3C & 3E)

コンピュータが「思考のための道具(tools for thoughts)」であると看破したのはRheingold¹³⁾であるが、バーチャルリアリティはその意味では「創造のための道具(tools for creation)」であるといえよう。さらに言えば、創造だけには止まらず、tools for 3C's and 3E'sとも言うべき人間の様々な活動のための有用な道具となる可能性を秘めている。

ここでいう三つのCとは、control, communication, and creationであり、三つのEとは、experience, elucidation and entertainmentである。

それぞれの道具の役割は、前述の行動性、社会性、創造性、体験性に結び付けて捉えることができる。第2図に道具としての役割とVR空間の性格とをマトリクスで表わして、それぞれの交点に代表的な用途を示している。

4.1 行動性

・制御(control)

ロボットの遠隔制御の分野では、第2次世界大戦後の原子力技術の進展、および義手などの身障者用補装具と関連して生じたテレオペレーション技術が、70年代になってロボット技術を加味して管理制御に進展した。しかし直接的な操作の良さが捨てられず、外骨格型の装置を鎧のように着こみ危険な環境から遮蔽しつつ人間の力を増強するエグズスケルトン型人力増幅機の開発も進め

人間のための道具としての役割 空間の性格		行動性	社会性	創造性		体験性	
		制御 control	通信 communication	創造 creation	解明 elucidation	経験 experience	娯楽 entertainment
伝達された現実 [仮想空間の重畳 仮想空間を介した伝達を含む]		テレラグ ジスタンス ロボット制御 臨場感通信会議			テレラグ ジスタンス 実地体験 テレラグ ジスタンス 探険旅行		
構成された現実	現実立脚 虚空間	設計 VRシミュレーション VR模型 概念の具象化 ビジュアライゼーション 体験型シミュレータ					
	超現実 虚空間	仮想現実共同体				芸術	

第2図 人間のための道具としてのバーチャルリアリティとその応用分野

られた。それらが、いわば止揚されたかたちで出現した概念が、テレグジスタンスであり、80年代以降急速に発展してきた。

離れたところにいるオペレータが、遠隔で働くロボットの存在する場所で直接作業しているような感覚を有して、ロボットを自在に制御するテレグジスタンスを宇宙で利用するための拡張技術の研究も行われている。惑星探査など通信に要する時間遅れが無視出来ない環境下で、人工現実感を有する仮想環境を構成し、それを介在させることにより、時間遅れのある系におけるテレグジスタンスを可能とするための基礎研究である。

また、マイクロマシンのような微小な機械に対して、オペレータが小さくなったような、ないしは、対象物が大きくなったような状況を作りつつ、かつ臨場的にオペレーションを行うための研究も始められている。血管などの小さな対象でもあたかもゴムホースなどの大きさの対象を操作しているような人工操作感覚をもって作業を行えるインピーダンス制御型マスタスレーブテレオペレーション技術の研究開発および微小な世界においてオペレータ自身が小さくなって存在しているような人工現実感を与えるためのマイクロスコピック感覚提示技術の研究などが挙げられる。

眼球手術への適用が試み始められており、プロトタイプの遠隔制御マイクロ手術ロボット(MSR-1)が試作されている¹⁴⁾。

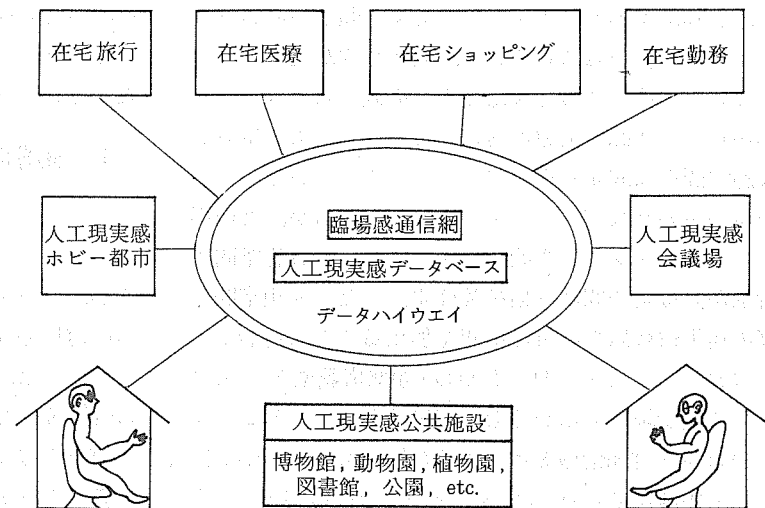
このように制御分野のVRは、時空を超えた制御のための道具を目指している。

4.2 社会性

・通信 (communication)

電話やテレビ会議を大幅に進展させ臨場感を増した臨場感通信が、将来の情報ハイウェイ時代を睨んで真剣に研究されている¹⁵⁾。コンピュータ通信によるネットワーク・リアリティ (networked reality) とも呼ばれる(第3図)¹⁾。

伝達された現実においては臨場感通信会議などが好例であり、構成された現実のうちの虚空間では仮想都市などの仮想空間共同体がこれにあたるが、いずれにせよこの分野は、マルチメディアやインターネットなどとも極めて密接な関連を有している。また、データハイウェイなどのネットワークのインフラストラクチャ整備が発展の決め手の一つとなる。しかし、ここで留意すべきことは、VRを早い時点からターゲットとすることにより、



第3図 ネットワーク・リアリティ

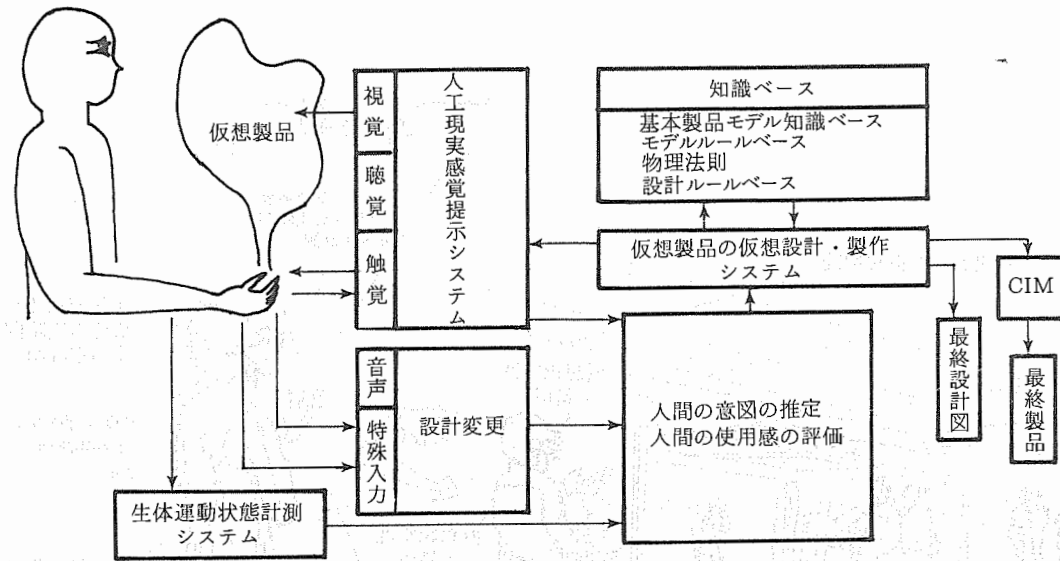
いままででは不可能であったことが可能になることであり、それが高速大容量のネットワークを各家庭にまで配することの強いインセンティブとなることである。中途半端なサービス向上や量的な変化だけでは従来のメディアを大きく変える波には発展しにくいのであって、質的な変革をもたらしたり、テレグジスタンスのようにいままででは不可能であったことを可能とするような技術の導入が求められている。そのあたりに、ネットワーク・リアリティの狙いがあるといえよう。

4.3 創造性

・創造 (creation)

設計・生産の分野においてもバーチャルリアリティにむけた進展が見られる¹⁶⁾。将来の生産システムの一つの重要な方向として、利用者一人一人のニーズや個性に適合した製品を互換性、拡張性、透明性を保ちながら供給することがあげられる。しかし、個人に最適化した製品を求めて何度も設計し試作し直すことは、コストの面からも時間的制約からも、また不要品の廃棄の観点からも好ましいことではない。コンピュータの生成した仮想製品 (virtual product) でありながら、人間に対して、実際の製品と同等の視覚、聴覚、触覚等の感覚を想起させる、いわゆるバーチャルリアリティ技術を確立し、それをを用いた知的設計・生産支援システムを開発し、上記ニーズに答えようとする研究が進められている。もちろんこの技術は、極めて独創的な製品などを人間が設計する際の有力なツールをも提供する(第4図)¹⁾。これらは、構成された現実の内の現実世界を反映した仮想空間にあたる。

もっとも上記の目標達成に不可欠の要素として触覚の提示技術の確立がある。しかし視空間や聴空間に比べ、触空間の提示技術は遅れている。これは、視覚や聴覚が



第4図 人工現実感応用設計支援システム

光や音という波動現象により生じているのに対し、触覚では力学的な作用を必要とするためである。力学的な作用を人間に伝えるために従来から取られてきた方法は、人間の体になんらかの形で力を発生する装置を取り付け、人の運動を実時間計測しつつ適切な力を発生させることにより運動を拘束する力提示であった。しかしこの方法では自由空間内での運動が実現できず、逆に物体への衝突感も与えにくい。また、従来の力提示装置では、物体の形状情報を的確に伝えることはできなかった²⁾。ある意味で理想的な形状提示の方法は実物と同一の模型をその都度即座に作ることであり、しかし実際と同一の模型を全空間にわたって作ることは費用の面からも技術的にも困難である。

人間と仮想触空間との接点を、例えば人間の指先の一点に限定すると、すべての仮想触空間を同時に提示する必要はなく、指先の存在する場所の近傍の仮想触空間のみが対象となる。最近、人間の指先の運動を計測し仮想触空間のうちの関連する部分空間のみをコンピュータの制御下で構成し提示する方法が提案され試作装置が開発され始めている。例えば5自由度のプロトタイプ機構を構成し空間内の任意の位置に任意の傾きをもった平面が実現され¹⁷⁾、さらにインピーダンス制御された6自由度の能動的環境提示装置と空間内の複雑な形状を近似する複数の面を有する形状表現デバイスが開発され、微分可能な滑らかな面のみならず、稜や頂点などの表現に成功する¹⁸⁾など大きな進展が見られる。

さて、コンピュータのヒューマンインターフェイスの分野においても従来のキーボードと文字による表示から、アイコンなどのグラフィクスによる表示とマウスによる入力へと進展し、さらに、マルチメディアディスプレイ

とオブジェクト指向や3Dマウスやダイレクトマニピュレーションをへて、仮想ディスプレイによる出力や仮想コンソール¹¹⁾による入力などが提唱され始めている。このように、コンピュータの人間とのインターフェイスもバーチャルリアリティを一つのターゲットとして進展している。

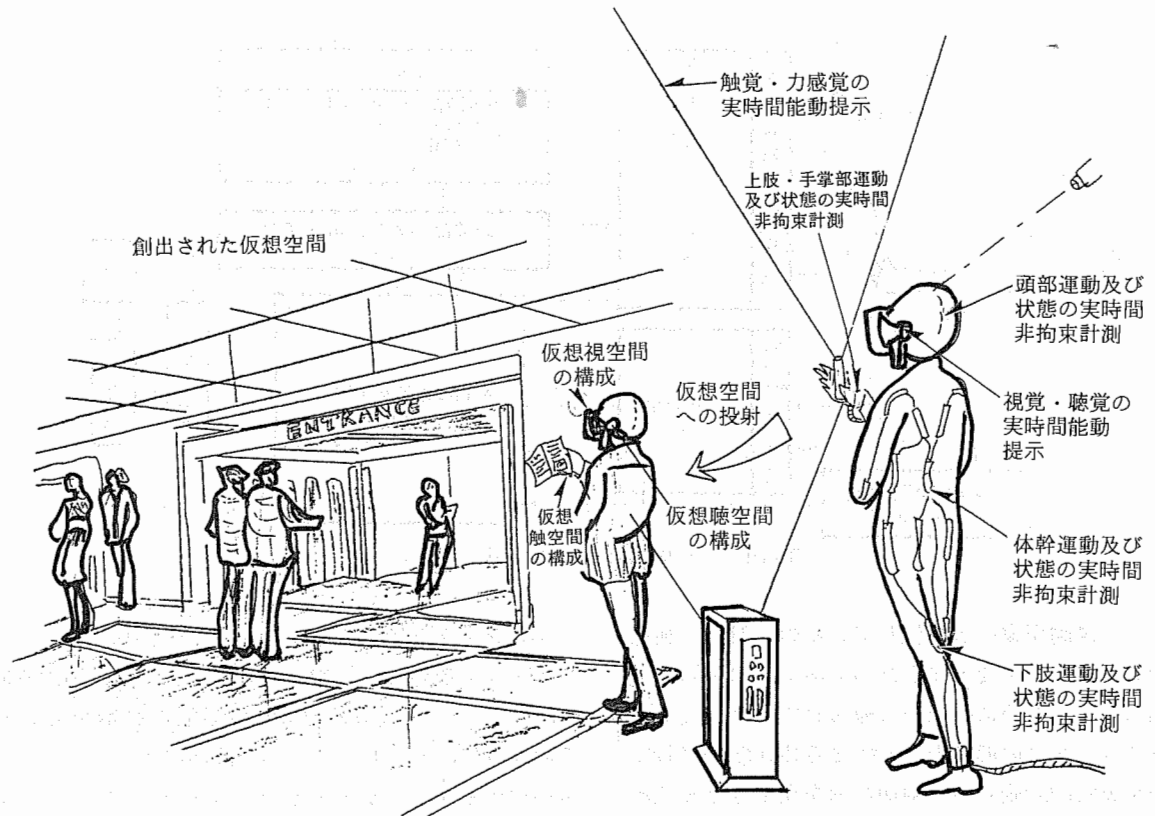
芸術の分野でも、いままでの芸術表現を越えた新しい芸術のメディアとしての人工現実感が盛んになっている。これは構成された現実の内の虚空間にあたり、もちろん現実空間を反映させる必然性は芸術においては無い。

この創造の分野はこのように、あらゆる意味での人間の様々な創造活動を支援する道具の役割を果たすことを目的としている。次に示す説明も広い意味での創造性とみなせよう。

・解明 (elucidation)

自然現象の解明の手段としてシミュレーションがあり、シミュレーションの結果のビジュアライゼーションの方法としてバーチャルリアリティが注目されており、仮想風洞¹⁹⁾などを好例とする人工現実感型シミュレーションが盛んになってきている。

人間の認知行動の解明の道具としての役割も重要である。人間が現実感を感じつつ作業を行う際にかなる感覚情報を取り込み、それに基づいて作業を行うかを定量的に解明し、作業に必要な十分な感覚情報を確定するとともに、情報制御モデルを構築し仮想空間認知とそれに基づく臨場の感覚運動制御のメカニズムの解明が図られつつある。そのために、人工的に構成されながら極めて臨場感の高い三次元空間状態を被験者に特殊な提示装置により提示し、被験者に提示する感覚情報の量と質とをコントロールしつつ、その環境下での行動を正確かつ定量



第5図 人間の機能の解明の道具としての人工現実感

的に捉えるという方法論が用いられる²⁰⁾ (第5図)。

解明においては、現実が仮想世界に十分反映しなければならず、必然的に現実を反映した構成世界となる。

4.4 体験性

・経験 (experience)

高齢者やハンディキャップのある人にとって、遠方の地へ旅行することは多くの困難を伴う。しかし人間が様々な場所に移動し、そこで種々の経験を積むことは人間の基本的な要望であり、生きがいでもある。これは加齢やハンディキャップによって失われるものではない。人間が現在いる場所にいながらにして他の別の場所に存在しているかのごとき実時間の臨場感を有しつつ、その環境とのインタラクションをも可能とする、いわゆるテレプレゼンス技術を用いて高齢者やハンディキャップのある人が、自由に自分の好きな場所に旅行することを可能とすることを目的とした研究が行われている。この技術が完成すれば、使用者は遠隔の地に配したロボットと広帯域 ISDN や情報ハイウェイなどの通信網を介して一体化した感覚を有して、そのロボットの存在する場所を旅したり、あるいはコンピュータの創製する仮想空間内を旅行することが、3次元の実時間臨場感を有して可能となる。これは経験としての VR の好例といえよう。

シミュレーションの分野でも、実時間かつ実体験に近

い実時間インタラクティブな3Dのコンピュータシミュレーションが急速に進展している²¹⁾。具体的には、仮想コックピットで代表される体験型シミュレータなどが挙げられる。

また医学教育における仮想人体なども模索され始めている。

この分野は伝達された現実と創造された現実の内の現実を反映した構成の両者に関係する。また、次に示す娯楽のための道具も一種の体験性であるとも言えよう。

・娯楽 (entertainment)

この分野は明らかに現実を反映する必要は全くなく超現実の虚世界の構成が可能であり、むしろ望ましい。

個人用のゲーム用 VR に加え、社会性を有するハビタットなどが進展したかたちの仮想都市の住人ともなり、そこで様々な社会的な活動を試みることも可能であり、まもなく、現実のものとなってこよう。

この分野は新聞・テレビなどでもよく取り上げられており、詳しい解説の必要はないであろう。もっとも VR の倫理が問われるのも特にこの分野と報道などのメディアの分野であって、マーケットが大きく、かつ社会的な影響も甚大なだけに今から真剣に取り組んでおく必要がある。

5. プロジェクト

最近種々様々な分野でバーチャルリアリティの本格的な応用が模索され始め、米国やわが国では本格的な国家プロジェクトも計画されている。たとえば、文部省では科学研究の重点領域研究として「人工現実感」を来年度から発足することを決定し、1994年秋にこの領域での公募研究を募る。また通産省は、1994年から先導研究「ヒューマンメディア」を開始した。2年間の先導研究の後、産官学による国の大規模プロジェクトへと移行する計画である。米国では国立科学アカデミー(NAS)と国立科学財団(NSF)が1992年から特別調査研究委員会を発足させ国家規模のプロジェクトを計画するなど新しい発展への展開をみせつつある。

学術分野での進展も目覚ましい。この分野における世界最大かつ最高の権威を有するIEEE(米国電気電子工学会)は1993年9月にシアトル市でバーチャルリアリティの年次国際学術講演会(VRAIS)を開始するとともに、全会員に配付する学会誌(スペクトラム)の10月号にバーチャルリアリティを特集して大々的に扱うなどアカデミズムの世界でもバーチャルリアリティが認知され大いに注目されるに至った。

わが国では、1991年から「ICAT(人工現実感とトレイグジスタンス国際会議)」が開催されており、1995年には第5回を迎える。産業応用を目指した展示会も1993年から「インダストリアルバーチャルリアリティ展」と命名して毎年、幕張メッセで開催されており、バーチャルリアリティの今後の期待される。

6. おわりに

バーチャルリアリティは、コンピュータやロボットを用いて現実を踏まえたインタラクティブな等身大のメディア空間を生成する技術であり、21世紀にむけて幅広い応用可能性を有するジェネリックテクノロジーである。

本技術がいわば人間中心主義に基づく人間と機械のインターフェイス技術であることから、その適用範囲はコミュニケーション、制御、コンピュータ、設計(CAD)、製造(CIM)、共同作業(CSCW)、シミュレーション、芸術、メディア、アミューズメントなど極めて多岐にわたり、新しい産業需要を喚起し、壮大な市場を形成するとともに、われわれの日常生活のレベルを向上させ、さらには文化の新しい形態さえ生むのではないかと期待されている。

しかし、現実のバーチャルリアリティ技術を鑑みるに、現実世界を反映しているとはいいがたい仮想世界が生成されているに過ぎず、人間の自由な運動もままならず、

インタラクションを行おうにも時間遅れや空間の歪みのため思ったような行動ができないのが現状である。しかも、現在市販されている機器やソフトウェアはゲームなどアミューズメントを主目的として開発されたものがほとんどであり、産業応用にそのまま適用しようとしてもコンセプトを確かめるのがせいぜいであり、実のあがる成果は得られない。またゲーム用技術の単なる延長であれば、将来においても産業用には適合しないことは明らかである。

このような状況のもと、産業応用に結び付き我々の生活レベルや文化を飛躍的に向上させ、明日の日本を根底から支える新しい基幹技術としてのバーチャルリアリティを重点領域研究「人工現実感」や先導研究「ヒューマンメディア」などを通じて、産官学の英知を結集して研究開発してゆくことが緊要である。

(1994年8月29日受付)

参 考 文 献

- 1) 館：人工現実感，日刊工業新聞社(1992)
- 2) 館，広瀬(編)：バーチャル・テック・ラボ，工業調査会(1992)
- 3) 論文特集：バーチャルリアリティ；電気学会論文誌C(電子・情報・システム部門誌)，Vol.115C，No.2(1995)，(掲載予定)
- 4) I. E. Sutherland：A Head-Mounted Three Dimensional Display；Proc. of the Fall Joint Computer Conference，pp. 757~764(1968)
- 5) 館，阿部：トレイグジスタンスの研究第1報一視覚ディスプレイの設計；第21回計測自動制御学会学術講演会予稿集，pp. 167~168(1982)
- 6) S. Tachi et al.：Tele-Existence (I) - Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence；Proc. of 5th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (RoManSy 84)，pp. 245~254(1984)
- 7) 館，荒井：トレイグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価；日本ロボット学会誌，Vol. 7，No. 8，pp. 314~326(1989)
- 8) S. Tachi and K. Yasuda：Evaluation Experiments of a Teleexistence Manipulation System；Presence，Vol. 3，No. 1，pp. 35~44(1994)
- 9) D. L. Akin, M. L. Minsky et al.：Space Application of Automation：Robotics and Machine Intelligence Systems (ARAMIS) - Phase II，NASA Contract Report，No. 3734(1983)
- 10) J. D. Hightower, E. H. Spain and R. W. Bowles：Telepresence：A Hybrid Approach to High Performance Robots；Proc. of the 3rd International Conference on Advanced Robotics (ICAR '87)，pp. 563~573(1987)
- 11) S. S. Fisher, M. McGreevy, J. Humphries and W. Robinett：Virtual Environment Display System；ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics，pp. 1~11(1986)
- 12) M. W. Krueger：Artificial Reality，Addison-Wesley(1983)
- 13) H. Rheingold：Tools for Thoughts，Jhon Brockman Associates Inc.(1985)
- 14) I. W. Hunter et al.：A Teleoperated Microsurgical Robots and Associated Virtual Environment for Eye Sur-

- gery ; Presence, Vol. 2, No. 4, pp. 265~280 (1993)
- 15) 竹村, 岸野 : 人工現実感によるヒューマンインタフェース ; テレビジョン学会誌, Vol. 44, No. 8, pp. 981~985 (1990)
 - 16) 岩田 : 大規模仮想空間を歩行するための人工現実感 ; Human Interface, Vol. 5, pp. 49~52 (1990)
 - 17) K. Hirota and M. Hirose : Development of Surface Display ; Proc. of the 1993 IEEE Annual Virtual Reality International Symposium, pp. 256~262 (1993)
 - 18) S. Tachi, T. Maeda, R. Hirata and H. Hoshino : A Construction Method of Virtual Haptic Space ; Proc. of the Fourth International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT '94), pp. 131~138 (1994)
 - 19) S. Bryson and C. Levit : A Virtual Environment for the Exploration of Three Dimensional Steady Flows ; Proc. of the Fourth International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT '91), pp. 15~23 (1991)
 - 20) S. Tachi, R. W. Mann and D. Rowell : Quantitative Comparison of Alternative Sensory Displays for Mobility Aids for the Blind ; IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. BME-30, No. 9, pp. 571~577 (1983)
 - 21) F. P. Brooks : Walkthrough-A Dynamic Graphics Systems for Simulating Virtual Buildings ; Proc. of ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics (1986)