

小特集

8

バーチャルリアリティと生体

舘 障

舘 障：東京大学工学部計数工学科

Virtual Reality and Human Factors. By Susumu TACHI, Nonmember (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo, 113-8656 Japan).

ABSTRACT

バーチャルリアリティ (VR) が成立するのは、人間がもともと有する感覚器と認知メカニズムのもつアприオリな時間と空間の制約のもと現実世界の写像を脳内に構成する仕組みをそのまま利用しているからである。そうであればこそ、臨場感、現実感、存在感は、いかなる認知機構により引き起されるのか、そもそも人間にとって臨場感とは何なのかといった基本課題の解決が緊要となる。そのための解明研究が、脳生理学、心理学、工学の分野の研究者により始められている。また、VRの生理的・心理的効果の定量化のための研究もその緒についている。

キーワード：バーチャルリアリティ、人工現実感、トレイグジスタンス、臨場感、生理的・心理的効果

1. バーチャルリアリティとは

筆者は古来からの定義に従って、知覚などによって意識にもたらされる外界などの対象の心像を表象とよび、表象をもたらし人間の精神作用を感性と規定している。また、感性による表象ないしは観念から概念を構成し、判断および推論を行う精神活動を悟性とよんでいる。感性により生じる表象には対象が現前する知覚表象、記憶により想起される記憶表象および想像による想像表象が知られている。バーチャルリアリティ (VR⁽¹⁾⁽²⁾) : Virtual Reality : 人工現実感) は、「現前しないが現前するのと効果としては同等の表象を生じさせたり想像表象を具現化し、行動空間を構成して、そこでの行動を可能とすること」である。また、その表象から概念や最高概念としての理念をもたらしばかりでなく、行動空間をインタラクティブに利用できる。

それでは、なぜ現前しないにもかかわらず同一の表象を生じさせられるのであろうか。それは、人間が現前している対象を認識している際

にも人間は物自体 (Ding an sich : noumenon) を認識しているわけではなくカントが悟性のアприオリな形式とよんだ人間の認識機構の仕組みにより、物自体が時間・空間的に制約されている感性的世界に現れた姿、すなわち現象を認識しているにすぎないことに関係している。そもそも人間がとらえている世界は人間の感覚器を介し、かつ人間の認識機構のアприオリな仕組みにより認識され、脳に投影された物自体の写像であるという見方にたつならば、人間の認識する世界はこれも人間の感覚器による一種のバーチャルな世界であると極論することさえできよう^{(1),(2)}。例えば、人間の視覚が電磁波のうち光とよばれる $0.40 \sim 0.75 \mu\text{m}$ という極めて限られた領域を検出するにすぎず、聴覚も空気の振動のうちのわずか 20 Hz から 20 kHz というこれまた限られた部分を感じているにすぎない。触覚、味覚、嗅覚においては更に分解能の低い感覚器によりこの世界をとらえているわけである。色を例にとっても RGB を担うそれぞれの錐体細胞に同一の発火を起させれば自然の色とスペクトルが異なる光でも全く同じ色に

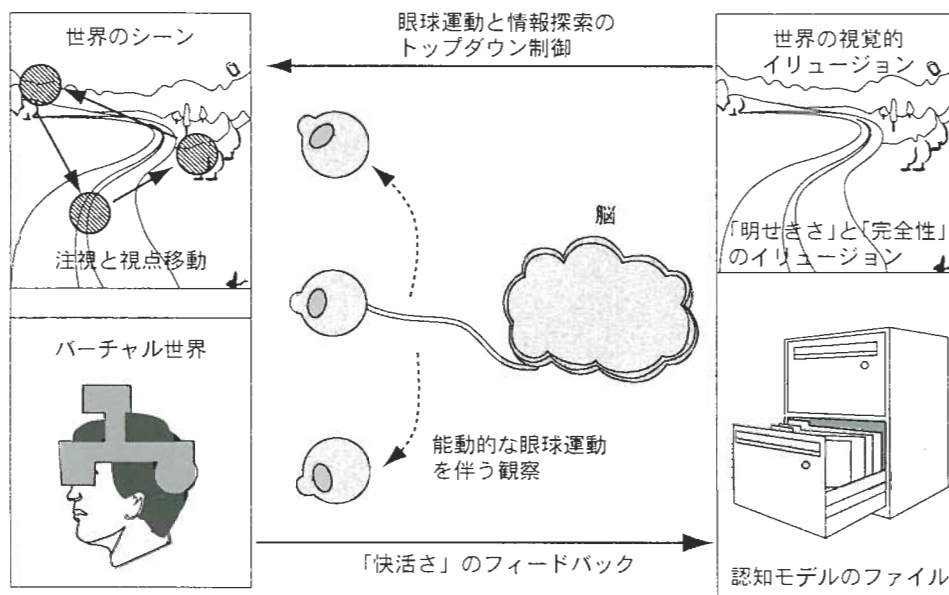


図1 視覚における現実空間とバーチャル空間の対比 Starkの研究によれば人間の視覚では脳内の認知モデルにより眼球運動が生じ空間内の特徴点がスキャンされる。それにより、脳内のモデルに快活さが加わる。バーチャルリアリティも三次元を視覚のメカニズムに合わせ構成し人間側の能動的な探索を可能にすることにより全く同一の原理により可能となる⁽²⁾。

見えるわけであり、我々の身の周りには印刷物やテレビなどバーチャルな色があふれている。

人間が現前する現実空間から現象空間を得る同一のメカニズムを利用して、現前しない空間

の情報の本質部分を人間に与えることにより現前する場合に生じると等価な現象空間を人間に認識させることがVRにほかならない(図1)。その際、現前しない空間は遠隔の現実空間でもよいし、コンピュータの生成した仮想空間であってもよい。また、人間が現前するのは別の空間に存在すると考えるとき、これをテレグジスタンス⁽¹⁾⁽⁴⁾とよんでいる。つまり、VRでは人間の周りに別の空間が出来上がると考え、テレグジスタンスでは、別の空間に移動したと考えるが、本質的には両者は同一の概念であるといえる。

さて、VRにおいては、

- ① 三次元空間の忠実再現、
- ② 三次元的な観測点の自由な変更、
- ③ 空間構造の実時間インタラクティブな改変、
- ④ 異種感覚情報のコヒーレントな統合

の4点が最大の特徴である。人間は実際の物理空間からの何らかの物理量を感覚器を介して受け取り、効果器によって物理空間の物理量を変化させ行動している。そのとき、人間の体内においてそれら物理量によって心理効果が生じている。同一の心理効果を実環境と全く同一の物

用語解説

VR (Virtual Reality: バーチャルリアリティ)
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、あるいは人間がそのように感じることを人工現実感。

テレグジスタンス (tele-existence) 離れた場所やコンピュータが生成した人工現実感環境にあたかも自分が存在するような臨場感を有して自分の分身を制御し行動すること。

HMD (Head Mounted Display: 頭部搭載型ディスプレイ) 眼鏡のようにディスプレイを身に付け頭部運動に追従して4πステラジアン⁽⁵⁾の三次元視聴覚情報を提示可能な提示装置。

AR (Augmented Reality: 増強現実) 現実空間にコンピュータで生成した空間情報を三次元的に重畳させて増強すること。

CAVE (ケープ) 人間の周りを人間が入れるほどの大きなディスプレイで囲むことによりバーチャルな空間を構成する仕組みを全天周ディスプレイとよび、そのうち特に、立方体形状で実現するタイプのものをケープという。

理量ではなくその物理量の一部あるいは全く別の物理量を用いて発生させるのには、どのような物理量を人間に提示し、どのような物理量を操作すればよいのであろうか。これを明らかにすることが、まさにVRの追求している最重要課題なのである。

以下、視覚を中心にして現在の研究を概観する。

2. 三次元視空間の忠実再現

忠実な三次元視空間を確保するためには、提示するVR視空間を人間が観測した際に、人間の目に生じる輻輳（ふくそう）、網膜像の大きさ（視角）、水晶体調節の三つのパラメータが、直接視の場合における人間の目に生じる輻輳、網膜像の大きさ（視角）、水晶体調節の対応するパラメータとそれぞれ同一に保たれることが最も重要である。ここでは、眼球運動は生じるが、頭部運動や体幹の運動は生じないという条件下で考える。

2.1 ホロプタを用いる評価法

上記の条件下で三次元空間の状態が直接視の場合と同一に保たれていることを調べる方法の一つにヘルムホルツのホロプタとヒレブランドの並行アレーを用いる方法がある。これは、暗中の小光点など視角による手がかりを限定した環境下では、人間の視空間が非ユークリッド性を示す現象であり、そのユークリッド空間からのずれの傾向は万人共通であり、そのずれ量は人により異なるものの特定の人に対しては定まった値となる。この事実を利用し、直接視空間における人間のホロプタとアレーの特性が構成されたVR空間においても保たれているか否かによりその空間の忠実度の定量的な目安とするのである⁽³⁾。作業評価といった別の項目を持ち込まず純粋に視覚の実験だけで評価できる点が優れている。

2.2 調節と輻輳との齟齬（そご）の影響

一般に使用されているHMD^(頭着) (Head Mounted Display) では、視差と輻輳は適切に与えているが、焦点調節は一定距離に固定される。こ

のことが両眼立体視に与える影響を知ることは、HMDの改良方針を得る上で重要である。そこで、パナムの融合領域およびヘルムホルツのホロプタを直接視、没入型HMD、シースルー型HMD (ST-HMD: See-Through HMD) で比較したところ、融合領域には大きな違いはみられなかった。一方、ホロプタでは、直接視と没入型には有意差が認められなかったが、シースルー型では統計的に有意な差が生じ、焦点距離可変シースルー型は直接視に近い傾向を示した。これらの結果から、シースルーの条件下では、焦点調節の効果も考慮する必要があることが明らかになった⁽¹⁾。

2.3 遮へいと輻輳との齟齬（そご）の影響

視差情報と遮へい関係が矛盾しているような図形を提示した場合、人間はその矛盾を解消するような解釈を試みようとする。その結果透明視解釈が行われて、場合によっては視差どおりの前後関係にもものがあるという解釈がなされる。しかしながら物体の数が多くなるほど、透明視解釈をしても矛盾が残り続けることが多くなる。こうした場合には矛盾が起っている情報を切り捨てたりして不安定な解釈を行うことがわかっている。人間は空間知覚の際にこうした処理を行うので、AR^(増強) (Augmented Reality) においてシースルー型HMDを適用すると、空間解釈が不安定になる。このことはHMD装着時の人間の疲労を増す大きな要因になるものと予想される。そのためARにおいてST-HMDを用いる場合、実空間と仮想空間との間での遮へい関係を正しく表現することが必要となる⁽⁵⁾。

3. 三次元視点の自由な変更

VRを従来からの立体視から区別する大きな特徴の一つは、頭部運動や体幹の運動により生ずる視点移動に対する的確な観測対象の視覚像の変化である。運動視差が正確に生じる視覚ディスプレイということもできる。前庭動眼反射などを引き起す前庭感覚や体性感覚が重要な役割を占めており、これを考慮していないシス

テムでは、いわゆるシミュレーションシックネスを起しやすい。

3.1 トラッキング実験

トレイグジスタンスの頭部追従機構を用いて、トラッキングの実験が行われている。提示視野角の拡大によってゲインの増加と等価時間遅れの減少がみられる。背景の存在によるゲインと等価時間遅れの増大は、視野角の拡大と共にいずれも増える傾向にある。この関係を用いれば、作業環境を設計する際に背景の有無によって、動的操作性についてゲインと等価時間遅れのトレードオフを行うことができる⁽⁶⁾。

3.2 視野角と首振り速度の整合

HMDの視野角が制限されている条件を想定し、その提示パラメータと運動パラメータの組合せによる作業効率の変化について評価実験を行った。実験は、次の4とおりの条件について行った。すなわち、

- (a) 仮想人間の頭部回転運動を実被験者のものと一致させ、提示画像の視野角も実際のHMDの提示条件と一致させた場合、
- (b) 仮想人間の頭部回転運動だけを実被験者の2倍にした場合、
- (c) 仮想人間の頭部回転運動は実被験者のものと一致させておいて、提示画像の視野角のみを2倍にした場合、
- (d) 仮想人間の頭部回転運動と提示画像の視野角を共に2倍にした場合

の4とおりである。その結果(a)と比較して、(b)は作業効率の低下がみられた。これは、被験者の頭部回転運動と提示画像の対応が崩れ、運動感覚と視覚との間に不整合が起っていることを意味している。(c)の場合は実際のHMDの視野角より大きな範囲の画像を提示しているので、空間全体がひずんで見え、被験者の運動に対して世界がくっついて動くような不自然な感覚がある。(d)は空間がひずんで見えることは(c)と同様であるが、仮想人間の頭部運動を視野角の倍率と等しくすることにより、被験者の運動による提示画像の変化がより

自然に感じられる。作業時間も、ターゲットを常に視界に収められることの効果により、むしろ(a)よりも短くなった。

4. 空間構造の実時間インタラクティブな 変更と異種感覚のコヒーレントな統合

空間内での行動と行為が可能となる点でバーチャルリアリティの重要な要件となる。作業と歩行に分けて解明が進められている。

4.1 視覚情報と体性感覚情報との一致

トレイグジスタンスのマスタスレーブマニピュレーション実験装置を利用した作業実験が行われている。その結果、両眼立体視の単眼視に対する優位性、首を振れることの効果、自らが動いて運動視差があれば単眼でも両眼とほぼ同程度の作業ができることなどの事実が明らかになったほか、自分の実際の手や腕があると体性感覚が教える場所にVR環境下で作業中の自分の腕が見えることの重要性が定量的に確かめられた⁽⁷⁾。これは、VRにおける自己投射性の役割を明確に示す実験となっている。

4.2 視覚情報と体性感覚情報

人間は暗中の小光点の位置を視空間で知覚すると共に、その位置に上肢の先端を位置決めすることができる。視覚ターゲットである小光点と自分の手先を見ることができる条件ではその位置は一致するが、自分の手先が見えない条件下では、数cm程度の位置決め誤差が生じる。しかも小光点をターゲットとする視覚性上肢先端位置決めでは手先の位置が小光点に対してアンダーシュートし、一方、手先の位置をターゲットとし、小光点をその位置に位置決めする固有受容性注視点位置決め実験では逆に、手先に対して小光点がアンダーシュートする。

この現象はヘルムホルツのホロプタや平行アレー、距離アレー等と同様、人間の神経回路網の制約によりもたらされた物理空間と知覚空間の対応機構の特徴に起因するものであると考えられる。この現象がホロプタ等で用いた神経回路網の生理学的構造的制約を導入したモデルを知覚運動制御系に対して適用することにより再

現され構成的に解明されている^{(8),(9)}。

4.3 見た場所を触ることの効果

従来の力情報のみならず物体の形状情報をも提示する装置が作られている(図2)。物体の素片を形状近似デバイスとして用意し、それを物体モデル情報と人間の指の運動計測による接触点の予測結果から組み合わせて提示し、人間の運動に追従することにより人間には実際の物体がその場にあり、人間にとってはそれを触っているのと同じ効果があるようにする。その装置とHMDを用いることにより、見たところを、見たとおりに触ることができるようになっている⁽¹⁰⁾。その装置や、条件を更に簡素化した実験装置を用いて、見たところを触れることの臨場感に与える効果が調べ始められている。

4.4 歩行空間

目をつむっていても歩いていることはわかる。逆に、視覚刺激のみ与えても視覚誘導自己



図2 視触覚形状提示システム 見たところを触れることがバーチャルリアリティの特徴の一つである。写真の装置はメカニカルインピーダンスを制御できる6自由度のパンタグラフ機構の先に様々な形状を近似できる形状近似デバイスを搭載したハプティクスグラフィックスシステムで、質量や弾性あるいは粘性を感じつつ物体の形状を綾や頂点も含めて触覚と視覚で体験できる⁽¹⁰⁾。

運動感覚(ベクション)が生じる。この前庭感覚や体性感覚に由来する歩行の感覚と視覚で誘導される歩行感覚をどこまで合致させる必要があるのか。それらの齟齬(そご)がどのような影響を及ぼすのか。視覚、聴覚、体性感覚、前庭感覚に総合的に関係する、この研究はいままさにその緒についたばかりである。

5. 生体機能解明ツールとしてのVR

人間がその場にいるような臨場感をもつとはどのようなことか。臨場感、現実感、存在感は、いかなる認知機構により引き起こされるのか。そもそも人間にとって臨場感とは何なのか。このような問いにVRを用いて答えることが可能になろうとしている。

すなわち人間が自然な状態で、しかも拘束されずに行動できる人工的に構成されながら現実と極めて類似したVR環境を構成し、繰り返し正確に再現可能な条件下で人間の行動を観察する⁽¹¹⁾。人間が現実感を感じつつ作業を行う際にい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、作業に必要な感覚情報を確定すると共に、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制御のメカニズムを解明するのである(図3)。現在、この研究が文部省の重点領域研究「人工現実感の基礎的研究」において行われている。

6. 生体への生理学的・心理学的効果

HMDやCAVE^{(11),(12)}が市販されVRが実際に利用される段階を迎えつつある。実際の製品が世に出るとそれを利用する使用者への生理的・心理的効果を定量的に明らかにして、望ましい効果を最大限に与え、好ましくない効果を最小限にとどめる必要がある。現在そもそもどのような効果があり得て、どのような条件のもとにそれが発揮されるのかについてのデータがほとんど得られていない状況であり、通産省などを中心としてデータの集積とそれに基づくガイドライン作りへの取組みが開始されている。

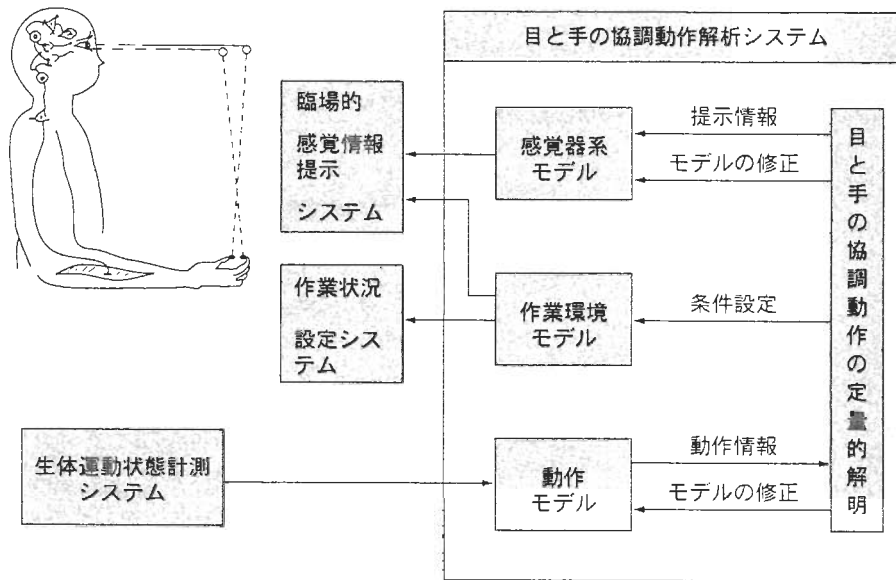


図3 VRを用いた人間の認知行動メカニズムの解明 コンピュータにより制御された現実環境に極めて近い構成環境で行動する人間の行動を計測し評価し、一方、同一環境下でのモデルの行動とを比較しつつモデルを改変する。この過程を繰り返す、人間の認知行動モデルを構成する。

7. おわりに

バーチャルリアリティの研究は実は人間の認知行動制御機構の研究と密接に関連している。というよりは、その研究そのものともいえる。バーチャルリアリティが人間の脳の生み出す人工現実感であるからこそ、また、VRが将来の産業のみならず社会や人間の生活を大きく変えるジェネリックテクノロジーであればなお更のこと、人間の臨場感や存在感の本質を究め、真に人間にとって自然でかつ有用なバーチャルリアリティを模索し実現していかなければならない。

文 献

- (1) 舘 暲, 人工現実感, 日刊工業新聞社, 1992.
- (2) L. W. Stark, "Why virtual reality works! Top down vision in humans and robots," Proceedings of the 4th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT '94), pp.7-24, Tokyo, Japan 1994.
- (3) 舘 暲, 荒井裕彦, "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.4, pp.314-332, 1989.
- (4) 舘 暲, 感覚統合と認知に関する研究, 重点領域研究「人工現実感」平成7年度研究成果報告書,

pp.7-8, 1996.

- (5) 鈴木伸介, 前田太郎, 舘 暲, "人工現実感における遮蔽矛盾問題の知覚への影響," 日本バーチャルリアリティ学会論文集, vol.2, no.3, pp.1-8, 1997.
- (6) 前田太郎, 荒井裕彦, 舘 暲, "頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価," 日本ロボット学会誌, vol.10, no.5, pp.99-109, 1992.
- (7) 舘 暲, 安田賢一, "トレイグジスタンス・マニピュレーション・システムの設計と評価," 電学論(C), vol.115-C, no.2, pp.172-181, 1995.
- (8) 前田太郎, 舘 暲, "視覚性到達運動における両眼視と上肢位置感覚の統合," 計測自動制御学会論文集, vol.29, no.2, pp.201-210, 1993.
- (9) 前田太郎, 舘 暲, "体性感覚性注視運動における両眼視と上肢位置感覚の統合," 信学論(D-II), vol.J76-D-II, no.3, pp.717-728, March 1993.
- (10) 平田亮吉, 星野 洋, 前田太郎, 舘 暲, "人工現実感システムにおける物体形状を提示する力触覚ディスプレイ," 日本バーチャルリアリティ学会論文集, vol.1, no.1, pp.23-32, 1996.
- (11) 舘 暲, "トレイグジスタンスの認知的制御," バイオメカニズム学会誌, vol.14, no.1, pp.3-9, 1990.



たか ずし
舘 暲

昭43東大・工・計数卒, 昭48同大学院博士課程了, 機械技術研究所バイオリボティクス課長, MIT客員研究員, 先端科学技術研究センター教授などを経て, 現在, 東大・工・計数・教授, 工博, トレイグジスタンス, 人工現実感の研究を行う。通産大臣賞などを受賞。