

仮想環境を利用した空間知覚研究における HMD の特性

櫻井 研三

本論では、バーチャルリアリティ (VR) で利用されているヘッドマウントディスプレイ (HMD) の特徴を明確にし、それらの視覚研究との関連性を考える。第1に HMD の2つの源流とそれらの共通点から仮想視覚環境の3要素を明らかにする。第2に3要素の詳細と HMD の特性との関係を考察する。第3に3要素を結びつける視知覚研究に言及する。第4に3要素を含む2つの知覚実験例を紹介する。第5に HMD 型 VR の利点は、視覚と他の感覚の情報の整合性・一貫性の操作可能性にあると結論づける。HMD にはいくつかの種類があるが、ここでは2眼式でディスプレイ面に表示された画像以外はみえない密閉・非透過型を指す。

1. HMD の2つの源流の共通点

広く知られている視覚の実験装置に「逆さ眼鏡」がある。これは鏡やプリズムを利用して、両眼への入力を光学的に上下あるいは左右で反転させるものである。左右反転眼鏡の場合、装着した状態で右手を前に出すと視覚的には左手が前に出たようにみえて驚かされる。しかし、この違和感も眼鏡を約1週間装着し続けると次第に消えてしまう。反転視野の環境に観察者が順応してしまうのである¹⁾。

VR の元祖といわれるのが、ダモクレスの剣と呼ばれる頭部位置検出装置を備えた Sutherland のディスプレイである²⁾。VR とは、コンピューター内部に作り出された仮想の世界にあなたも観察者が入り込んだように感

じる体験であり、それを実現する技術でもある。VR システムは視覚や聴覚、触覚などの感覚情報を観察者に呈示し、同時に位置検出装置で取り込んだ観察者の運動系の情報に従い感覚情報を更新して、仮想世界を作り上げている。

これらの装置は共に観察者が視覚的な仮想環境を体験できるという意味で、現在の HMD の源流とみなすことができる。逆さ眼鏡は軽量で頭部に装着したまま観察者が自由に動き回れる上に、上下や左右の空間軸が現実世界とは反転した仮想世界を体験できる。Sutherland のディスプレイはコンピューター画面の表示装置を観察者の頭部に搭載することで、コンピューターグラフィックス (CG) による3次元の仮想世界を頭を動かしながら体験できる。

仮想視覚環境の体験には以下の3要素が特徴として存在する。まず観察者が周囲を仮想環境に360度囲まれてその世界に入り込む没入性 (immersion)、仮想の対象の背後に回り込んで観察したり仮想の建物の中に入り込めるといのように観察者の自由な動きに対応して画像が変化する相互作用性 (interaction)、立体感のある対象を含む空間が3次元的な奥行や遠近感をもつ遠近法的3次元性 (perspective)、である。

2. 仮想視覚環境3要素の実現と HMD の関係

2.1 HMD と VR

HMD 単体では VR は実現できない。HMD 自体は、ディスプレイ表示以外の周辺視情報を遮断する、ディスプレイ自体が頭と一緒に動く、実体鏡視が可能、という特徴しかもたず、3要素の中で実現できるのは没入性のみである。HMD と位置検出装置を組み合わせる上に3

Aspects of head mounted display on space perception in virtual environments (1995年11月21日受理)
Kenzo SAKURAI 東北学院大学教養学部心理学研究室
(〒981-31 仙台市泉区天神沢 2-1-1)

次元CGをステレオ呈示することで、相互作用性と遠近法的3次元性も満たすVRという仮想視覚環境が実現できたのである。

2.2 没入性

没入性には視野角の大きさと周辺視情報の遮断という2つの要因があり、それらは表裏一体の関係にある。画像の視野角が80度以上であれば、仮想世界に没入した感覚が得られ高い臨場感を体験できるという³⁾。この事実から周辺視情報が観察者の体験する臨場感に大きな影響を与えていることがわかる。同時にこの周辺視情報は観察者を仮想世界から現実世界へと引き戻してしまうこともある。例えば、視野角を大きく取る試みとして全天周型スクリーンがあるが、足許や隣席の様子がみえたと観察者は仮想環境から現実へとすぐに引き戻されてしまう。ディスプレイ外の周辺視野から様々な実世界の視覚情報が観察者に入り込み、仮想世界への没入感を損なってしまうのである。それゆえ観察者の周辺視情報を何らかの形で遮断する必要がある。その点、HMDは周辺視野を遮蔽しているため、没入感が損なわれにくいディスプレイであるといえよう。

2.3 相互作用性

コンピューターの性能向上に伴い、CGによる3次元空間内を自分で動き回れるウォークスルーと呼ばれるリアルタイムアニメーション・ソフトがコンピューター上で走るようになった。その仮想空間内での視点移動を観察者の実際の動きに同期させることにより、相互作用性が実現できる。しかし、先に述べたようにHMD単体では相互作用性は実現できず、位置検出の機能をHMDに付加する必要がある。

2.4 遠近法的3次元性

遠近法的3次元性を支えているのは、3次元CGの対象が3次元のデータ構造を有している点である。通常の2次元平面のグラフィックスは (x, y) のデータしかもたないが、3次元CGの対象は (x, y, z) のデータを有している。そのため、対象の x 軸や y 軸を中心とした奥行方向の回転が可能になり、対象の背後も観察できる。また、同じ対象を両眼と同じ間隔を保つ2つの視点から描くことにより、簡単に両眼立体視のための2枚のステレオ画像が得られる。もちろん、2眼式のHMDはステレオ画像を表示できるだけで、表示される対象が3次元のデータ構造をもつかどうかには無関係である。

3. 仮想環境3要素を結ぶ視覚研究

上記の3要素は視覚研究の中で個々に実現されてい

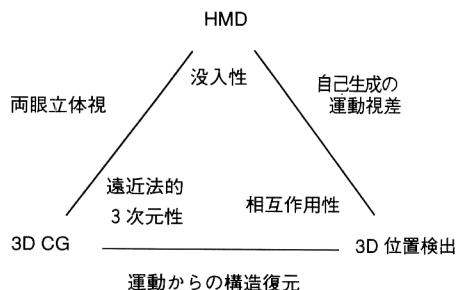


図1 仮想視覚環境3要素（三角形の内側）とVR技術（頂点）と視覚研究の関係（三角形の外側）。

た。図1に示すようにそれは、1対1の関係ではなく1つの視覚研究が複数の要素にまたがる形で位置づけられる。

両眼立体視の原理により立体映像を体験できる実体鏡は前世紀に開発され、言うまでもなく遠近法的3次元性を実現した。特にBrewster型の実体鏡は周辺視野を遮蔽しており、没入性の要素をも満たしていた。

自己生成の運動視差の実験装置では、相互作用性が実現されている。Rogers & Graham⁴⁾は観察者の頭部運動に伴う運動視差から明確な奥行知覚が生じ、しかもそれは両眼立体視で得られる奥行知覚と同等に頑健であることを明らかにした。彼らの装置は、対象は静止していて観察者が動いた場合に生じる運動視差を再現したものである。その基本原理は、移動可能な顎台のアームの支点に取りつけたポテンシオメーターの出力変化から頭部の位置を検出し、観察者の頭部の左右方向の運動と位置を検出するものであった。この装置では観察者が移動しても仮想世界が破綻しないところから、画面に対する観察方向が一定の実体鏡とは異なる3次元映像で没入性を実現したといえる。

遠近法的3次元性は、心的回転の実験⁵⁾に用いられた刺激にみることができる。これらの刺激は3次元のデータ構造をもちコンピューター上でその対象を回転させて様々な方向からのみえを得ることができる。このような3次元データから描かれた画像をリアルタイムにアニメーション化すると、運動からの構造復元により奥行感が得られる。さらに位置検出装置からの情報に従って対象を運動させれば、前述の運動視差実験と同様に、相互作用性を満たすことになる。

それでは、これらの3要素を同時に満たしているHMD型VRを利用して、どのような知覚実験が可能になるであろう。次にその具体例を紹介する。

4. 3要素を満たすHMD型VRを利用した知覚実験

4.1 具体例 A: 空間把握における能動的観察の優位性⁶⁾

ここで紹介する実験は、視覚の情報を基本として筋運動感覚と前庭感覚の利用を統制した、複数の異なる仮想環境に被験者を置くことにより、対象の位置関係に関する空間認知の内容を検討したものである。

外界と自己との空間的関係を獲得する観察条件として、第1に歩行時のように空間内を能動的に移動しながらの能動的観察、第2に乗物に乗っている場合のように空間内を受動的に移動しながらの受動的観察、第3に映画を観ているときのように移動時に得られる視覚像のみを観察者自身は静止した状態で受け取る静止観察、の3条件が考えられる。それぞれの条件において被験者が利用可能な感覚を考えると、能動的観察条件では視覚・前庭感覚・筋運動感覚のすべてが、受動的観察条件では視覚・前庭感覚が、静止観察条件では視覚のみが利用可能である。

4.1.1 目的

この実験の目的は、自己と対象との空間的位置関係の把握において観察条件の違いから生じる差異を調べること、その差異と各観察条件で利用可能な感覚情報との関連を検討することである。

4.1.2 方法

被験者: 正常または矯正による正常視力を有する大学生18名。男女同数で各観察条件に6名ずつを割り当てた。

装置: VPL Research社のRB2仮想現実感システム。取り外し可能な足台付きの回転椅子。仮想空間は実験条件に合わせて他の仮想空間に切り替えられた。HMDには磁気センサーが取り付けられており、頭部の位置と方向が検出された。

刺激: 観察空間および課題空間。観察空間は白色の等質な仮想空間で、基準点を示すマーカーと、色および形状が異なる5つの対象を含んでいた。マーカーと対象物はすべて視点の高さで観察者の周囲にあり、正面のマーカーから左へ順に30、90、150、240、300度の位置に配置された。観察者と5つの対象との関係は図2の通り。課題空間は、観察空間から5つの対象を取り除き、正面のマーカーのみが呈示される白色の等質な空間であった。

手続: 被験者は椅子に座った状態で、HMDとインナーイヤー型ヘッドフォンを装着し、観察空間を後述の3種類の観察条件の内のいずれかの条件下で1分間観察し

た。その後、方向評定課題として課題空間(白色等質空間。対象はない)が呈示され、観察空間に置かれていた対象が1つずつ口頭で指示された(例、「赤い円錐」等々)。被験者は身体や頭を回したり足で椅子を回転させて、できるだけ正確にその対象が視野の中央にくると想定される方向に顔を向けることにより、観察空間において各々の対象が存在した方向を評定した。被験者が顔を向けた方向はHMDの磁気センサーにより頭部の回転角として検出され、記録された。以上のような観察と評定を1試行として4回繰り返した。実験中はヘッドフォンを通して被験者への指示が伝えられ、それ以外はホワイトノイズが流されて、他の聴覚の手掛りを取り除いた。観察の際は、以下の3種類の観察条件を設定した。

1) 能動的観察条件

被験者は回転椅子に座った状態で、基準点から左右180度ずつ交互に、椅子ごと身体を回転させながら観察空間を観察した。その際、首の回転も自由にした。

2) 受動的観察条件

被験者は椅子に座り、両足を足台に乗せた状態で、実験者によって基準点から左右180度ずつ交互に椅子ごと身体を回転させられながら観察空間を観察した。その間、首を動かさないよう教示された。

3) 静止観察条件

被験者は正面を向いて身体および首を動かさずに、基準点から左右180度ずつ交互に身体を回転させたときに観察されるものと等価な空間の運動映像を観察した。

4.1.3 結果

誤差として示された実際の方向と評定された方向とのずれの絶対値を、観察条件ごと、試行ごとに平均したのが図3である。能動的観察条件では全試行において他2条件よりも5%水準で有意に誤差が小さく、2試行目からほぼ最小の値に落ちついている。受動的観察条件は1試行目で静止観察条件よりも誤差が小さい傾向が認めら

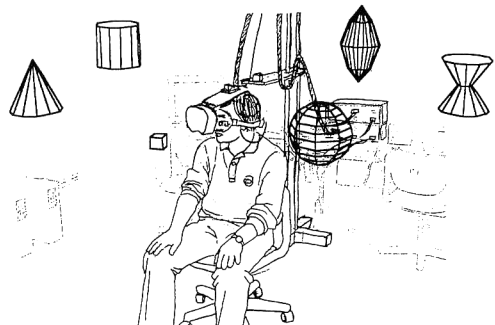


図2 観察空間での観察者と5つの対象の関係。

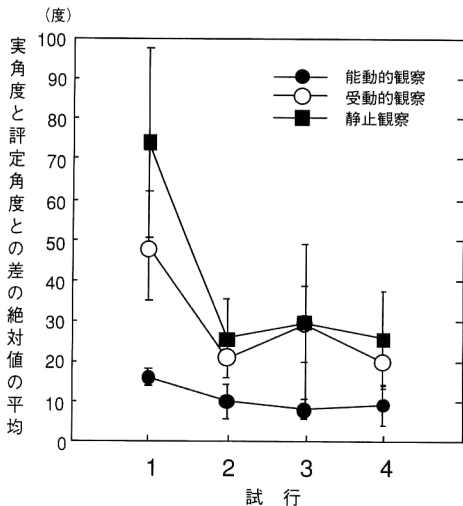


図3 各観察条件での試行ごとの誤差の絶対値の平均。

れるが、2試行目以降で両者共に誤差が大きく減少し、差はみられない。ただし、両条件とも4試行目でも20度以上の誤差があった。

4.1.4 考 察

結果より、能動的観察が他の観察条件より正確な空間把握を可能にすることが明らかにされた。能動的観察条件の被験者は対象の位置をほぼ1試行目から実際に近いものとして把握しているのに対し、静止観察条件の被験者は4試行目でも対象の位置を安定して把握できていない。さらに内省報告によれば、前者が『実感をもって』位置を把握しているのに対し、後者は『対象が周囲にあるという実感が伴わない』としている。今回の観察空間のように対象の位置を特定する手掛りが極端に少ない環境では、前庭感覚や筋運動感覚の情報を与えずに回転時の映像のみを視覚情報として呈示された静止観察条件の被験者には、その空間的配置を自己との関係において実感を伴って把握するのは困難であったといえよう。そのため静止観察条件の被験者には、記憶した対象間の間隔という距離情報をもとに対象同士の位置関係や自分からの方向について推測、構成するといったプロセスが必要であったと思われる。

受動的観察条件の被験者は、4試行目あたりでほぼ一貫した位置関係を把握してはいるが、それは必ずしも実際の関係に近くはなかった。この点を各観察条件で利用可能な情報と比較して考えると、前庭感覚の情報は、自己の回転方向および回転の概然の大きさに関して有効だが、対象のあった正確な方向を特定するには不十分であるといえる。能動的観察条件でのみ筋運動感覚の情報を

利用できたこととその成績からみて、対象のあった方向の正確な特定に筋運動感覚の情報が大きな役割を果たしていたと考えられる。

4.2 具体例 B: 仮想環境を利用した触覚と視覚による面の傾き知覚⁷⁾

この研究は、触覚の情報を基本として、それに視覚情報が一致する観察条件では面の傾き判断の成績が正確であり、一致しない場合には知覚される面の傾きは両方の感覚の影響を受けて、基本となる触覚情報からずれることを仮想空間と実空間の2重性を利用して示したものである。

我々は壁に触れたり、壁の表面を撫でることで、壁がもついくつかの属性を同時に知覚する。それらは壁の表面の肌理、形状、面の方向などであり、そこから壁面と自己を含む3次元空間をも認知することができる。例えば、夜中に停電すると周囲は暗黒の世界となり、その瞬間に自分の位置や周囲の状況を見失うが、周囲にある机や壁に触れた瞬間に自分が部屋のどこにいてどちらの方向を向いているのかを確認できる。このような経験から、我々が空間認識をする際に視覚はもとより、触覚も重要な役割を果たしていることがわかる。

そこで壁に触っただけでその壁面の角度をどの程度正確に把握できるのか、また、触覚と視覚それぞれに異なる角度の壁面が与えられた場合、どのように感じられるのかを調べる実験を行った。

前者については、重力方向を軸とした垂直面の傾き角度を、面を「撫でる」ことによってどの程度正確に知覚し評定できるかを先行実験で調べた。同時に、頭部の回転による評定と言語による評定との間に差異がみられるかどうかを検討した。その結果、触覚のみによる壁面の角度判断はどちらの評定法を用いてもかなり正確であること、言語による評定より頭部回転による評定のほうが5度程度の過小評価が全体的にみられるにせよ実際の触表面の角度に正確に対応していること、の2点が明らかにされた。

4.2.1 目 的

頭部を固定しない条件で触覚の情報と一致しない視覚情報を与えた場合、視覚情報が触覚による面の傾きという空間知覚にどのように影響を与えるかを検討した。

4.2.2 方 法

刺激: 触表面は被験者の正面に50 cm離れた位置におかれた120 cm×90 cmの大きさの横長の固い平面。中央部を軸として左右に回転する。角度表示の基準と符号は、被験者の前額平行面に対して平行におかれた場合を

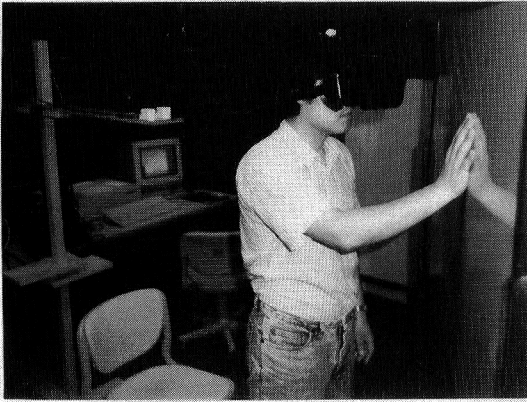


図4 視表面と異なる角度の触表面に触れる被験者。

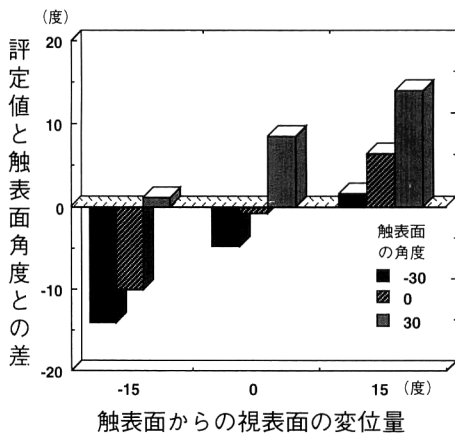


図5 知覚された面の触表面角度からの変移量。

0度とし、上からみて反時計回りの回転をプラス、時計回りの回転をマイナスとする。視表面は仮想空間内の被験者の正面に50cm離れた位置に作成されたチェッカーボード。触表面の角度は-30度、0度、+30度の3条件。触表面の角度と視表面の角度のずれは-15度、0度、+15度の3条件とした。したがって、視表面と触表面の角度の組合せは9条件となる。

装置: 触表面としてキャスト付衝立を用いた。視表面の呈示と頭部回転角の検出には、3次元位置検出の機能をもつVPL Research社のRB2仮想現実システムを用いた。実験は防音の電磁シールド室で行われた。

手続: 被験者は衝立から50cm離れた指定位置に立ち、磁気センサー付HMDを装着して仮想空間に入り込み、実空間の衝立と同じ位置にある視表面を観察する。その際、両足は肩幅程度に開いて固定した。実験者の合図で仮想空間の視表面を観察しながら実空間の触表面を10秒間右手の掌で撫でた(図4)。観察後、仮想空

間の視表面が消えた状態で、知覚された表面の自分に対する角度を、面に対して顔が正対するよう頭部を回転させる方法で評定した。この場合も、上からみて反時計回りの回転をプラス、時計回りの回転をマイナスとして評定してもらった。触表面と視表面のそれぞれの角度の組合せ9条件について3回繰り返して、計27試行を行った。被験者: 成人男子4名。

4.2.3 結果

この結果、被験者4名の頭部回転による評定値と触表面の実際の角度との差を、知覚された面の触表面からの変移量として求め、グラフに表したのが図5である。グラフの棒の種類は触表面の角度条件を、横軸は触表面角度からの視表面角度のずれを、縦軸は触覚と視覚により統合的に知覚された面の角度(評定値)の触表面角度からのずれを示している。

4.2.4 考察

この結果を5度程度の過小評価が全体的にみられた先行実験の結果と比較すると、触表面と視表面が一致しない場合には面の角度は視覚情報の影響を受けて視表面角度のずれの方向にそれぞれ過大評価されていたことがわかる。

視覚的捕獲の現象にみられるように、視覚と聴覚、あるいは視覚と触覚の情報が一致しない条件下では、視覚情報に基づいた判断がなされるという「視覚優位」の傾向が現れることはよく知られている。今回の結果も触覚により知覚された角度を前提に考えると視覚優位の傾向ありとみなせよう。しかし、視覚により知覚された面の角度を前提にすると総合的に知覚された面の角度は触覚の影響を受けたとみることもできる。いずれにせよ触表面と異なる角度の視表面を同時に与えた場合、知覚される面の角度は触覚と視覚の両方の影響を受けたものであることは間違いない。

5. 具体例からみたHMD型VRの利点

前述の3要素はそれぞれ具体例の中で生かされている。具体例Aは、観察者が360度周囲を仮想世界に囲まれていることで没入性が、観察者が能動的に周囲を見回せる点で相互作用性の要素が生かされた実験である。具体例Bは、HMDにより触表面の視覚情報を遮断している点で没入性が、両眼立体視で視表面の傾きを捉えられることで3次元性の要素が生かされた実験である。

また、これらの具体例から導出されるHMD型VRの利点は次のようになる。第1は、具体例Aのように視覚と他の感覚が整合性と一貫性をもち、観察者が自由

に動き回れる仮想環境を呈示できることである。第2は、それと逆に、具体例Bのように感覚情報間に整合性と一貫性のない仮想環境も呈示できることである。すなわち、HMD型VRの利点とは視覚と他の感覚の整合性と一貫性を操作できることである。

文 献

- 1) R. B. Welch: "Adaptation of space perception," *Handbook of Perception and Human Performance*, eds. K. R. Boff, L. Kaufman, J. P. Thomas (John Wiley and Sons, New York, 1986) pp. 24-1-24-45.
- 2) 服部 桂: 人工現実感の世界 (工業調査会, 1991) pp. 36-46.
- 3) 廣瀬通孝: バーチャル・リアリティ (産業図書, 1993) pp. 10-15.
- 4) B. Rogers and M. Graham: "Motion parallax as an independent cue for depth perception," *Perception*, 8 (1979) 125-134.
- 5) R. N. Shepard and J. Metzler: "Mental rotation of three-dimensional objects," *Science*, 171 (1971) 701-703.
- 6) 櫻井研三, 加藤健二: "仮想環境での空間学習における能動的観察の優位性", *Vision*, 7 (1995) 137-142.
- 7) 櫻井研三, 加藤健二: "仮想環境を利用した触覚と視覚による面の傾き知覚の検討", 東北学院大学論集 (人間・言語・情報), 107 (1994) 59-75.