

京都大学	博士（文学）	氏名	藤本 花音
論文題目	バーチャルリアリティ環境における空間認識と姿勢制御メカニズムの検討		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>序論</p> <p>近年、バーチャルリアリティ（Virtual Reality: VR）は我々の社会で身近な存在となってきた。VRにおける最重要課題の一つには臨場感の向上が挙げられる。心理学の観点からは、臨場感が生じる視覚環境の検討や、その心理メカニズムの解明が進められてきた。</p> <p>臨場感を構成する要素の一つに「自己運動感覚」がある。自己運動感覚とは、歩行時や乗車時に感じる自己身体の移動の感覚であり、視覚や体性感覚などから生起する。特に視覚から得られる自己運動感覚は強力であり、実際の自己移動が伴わなくとも大画面に映像を表示することで自己運動感覚が生起することが報告されている。こうした自己運動の錯覚は「ベクシオン」と呼ばれ、多くのVRのアトラクションやゲームで活用されている。学術研究においては、効果的にベクシオンを誘発する条件が検討されてきた。</p> <p>ベクシオン研究の課題の一つに、主観評定による測定が挙げられる。主観報告は評価基準が曖昧になりやすいため、課題に熟達する必要がある上に、実験者の教示などの意図しないバイアスを受けやすい。ベクシオンを正確に測定し、VRの臨場感を適切に評価するためには、主観評定以外の評価尺度を導入し、総合的に評価する必要がある。映像観察時に生じる身体姿勢応答は、ベクシオンの主観評価を補完する指標になり得る。人間は身体のバランスを保つために、視覚から得る自己運動の情報を活用している。姿勢制御機構は自己運動感覚と感覚情報を共有していると考えられており、姿勢応答は評価指標として有効であると考えられる。また、明示的にベクシオンを報告する必要がないため、より自然な参加者の反応が取得できる。しかしながら、姿勢応答と主観的なベクシオンの処理過程がどの程度共有されているかは十分理解されておらず、多面的な実験的検討が必要である。</p> <p>ベクシオンは動的な視覚情報によって誘発されるが、自己身体に関する静的な空間認識も、動的な感覚と併せて空間認識を構成する。自己身体の傾きの感覚（自己傾斜感覚）は、そうした静的な空間認識の一つである。臨場感の評価には、動的な自己運動感覚と共に静的な自己傾斜感覚も考慮すべきである。視覚的な傾きから生じる姿勢応答は、より客観的な身体傾斜感覚の指標となることが期待されるが、視覚的な傾きと姿勢応答の詳細な関係性については十分な検討がなされていない。</p>			

本論文では、VR映像から生じる姿勢応答とベクシヨンの性質を検討するため、ヘッドマウントディスプレイを用いて実施した一連の心理学実験について議論する。ベクシオンを誘発するような一人称視点の映像は「オプティックフロー」と呼ばれる。研究1では、オプティックフローの上下視野の効果を検討した。この研究は、人間の下視野に自己運動知覚に有用な情報が多く含まれることから着想を得たものである。研究2では、静止した風景の傾きに対して生じる自己傾斜感覚と姿勢応答を測定し、モデル化を行った。更に研究3では、実生活での使用環境を想定し、座位におけるオプティックフローへの姿勢応答を検討した。

研究1 姿勢応答における上下視野の影響

日常的な状況では、風にたなびく雲や川の流れなど、自分自身の動き以外からもオプティックフローに似た動きが発生する場合がある。一方で下視野に映る地面はほぼ常に静止しているため、下視野のオプティックフローは自己運動の手がかりとして上視野より信頼性が高い可能性があるが、実験的証拠は乏しい。本研究ではこうした仮説の下で、オプティックフローを上下視野に呈示し、姿勢応答の違いを検討する実験を行った。

実験には大学生9名が参加した。参加者はヘッドマウントディスプレイを装着し、直立姿勢で実験課題に取り組んだ。各試行につき10秒間、拡大または縮小するオプティックフローを上視野、下視野、上下全視野のいずれかの範囲に呈示し、参加者の頭部運動を測定した。拡大運動は一人称視点での前進移動、縮小運動は後退移動に対応する。呈示後、参加者は主観的なベクシヨンの強さを0から100の範囲で報告した。オプティックフローの方向（拡大または縮小）と視野条件（上視野・下視野・全視野）を組み合わせた計6条件が無作為な順番で実施され、各条件につき6試行繰り返された。前後方向への頭部位置の変化を姿勢応答の指標とした。

結果として、縮小条件において、全視野条件と下視野条件では上視野条件に比べて大きな姿勢応答が認められ、仮説が支持された。しかしながら、全体的な姿勢応答が小さい拡大条件では視野条件の効果が明確に見られず、また呈示時間の後半では前半に比べて応答のばらつきが大きかった。一方で、ベクシオンは拡大・縮小条件のいずれにおいても全視野、下視野、上視野条件の順で強かった。これらの分析から、概ね、下視野条件は上視野条件に比べて姿勢応答とベクシオンのどちらにおいても反応が大きいことが示された。下視野の優位性から、地面を想起するようなオプティックフローは、自己運動の手がかりとして生態学的に信頼性が高いことが示唆される。研究1では、呈示視野の違いを除いては、オプティックフローの速度や密度といった物理的な条件は同一であったことから、物理的な映像の強度が同一であっても、心理的にベクシオンを誘発しやすい映像は姿勢応答も強く誘発すると考えられる。

研究2 風景の傾きに対する姿勢調整

視覚に基づく姿勢制御は、動的な視覚情報だけでなく静的な視覚情報によっても行われる。特に、風景の傾きから推定された重力方向に体軸を合わせることは姿勢の安定化に寄与すると考えられるが、傾きと姿勢応答の詳細な関係性については十分な検討がなされていない。日常的なシーンにおける傾きは多義的であり、複数種類の傾き手がかりが存在する。そこで、研究2では、日常的なシーンにおける姿勢応答と主観的視覚垂直 (subjective visual vertical: SVV) を測定し、シーンの傾きに対する姿勢応答の特性を検討した。

実験には大学生16名が参加した。参加者はヘッドマウントディスプレイを装着し、頭部運動測定実験では立位、SVV測定実験では座位にて課題に取り組んだ。視覚刺激として、家具を配置した部屋のシーンを呈示した。シーンは -165° から 180° の範囲でロール軸に傾いて呈示され、24水準の傾き条件を設定した。頭部運動測定では各試行につき10秒間、いずれかの傾き条件で刺激呈示を行い、参加者の頭部位置を測定した。SVV測定では、参加者はシーン中央に配置された線分の角度を垂直に調整する課題を行った。頭部運動データは試行ごとにロール軸の回転角度を平均し、頭部回転の指標とした。また、SVV測定で調整された線分角度の誤差をSVVへの影響の指標とした。これらの指標をMittelstaedt (1986)のベクトル合成モデルに当てはめ、 90° 周期、 180° 周期、 360° 周期成分の寄与をそれぞれ推定した。

実験の結果、頭部回転とSVV誤差の両方において各周期の実質的な寄与が認められた。SVV誤差では 90° 周期の相対的寄与が最も高く、 360° 周期の相対的寄与は最も小さかった。頭部回転でもSVV誤差と類似の応答パターンが見られたが、周期間の相対的寄与に有意差は認められなかった。各周期の傾きはそれぞれ線分によるフレーム (90°)、水平線 (180°)、オブジェクトやシーンから得られる極性 (360°) の手がかりに対応すると考えられる。この結果から、姿勢制御において、線分の知覚や物体/シーンの認知などの複合的な視覚処理過程の関与が示唆された。また、姿勢応答とSVVにおける周期成分の相対的寄与が完全には一致しなかったことから、姿勢制御と垂直知覚の間で共有される座標系は限定的であることが示唆される。

研究3 座位・立位における姿勢応答の違い

オプティックフローから誘発される姿勢応答は、主観報告を補完する指標として有用である可能性があるが、姿勢応答の知見のほとんどは立位で得られており、座位での利用が多い市販のVRコンテンツに対しても有効であるかは不明である。そこで本研究は、座位・立位での姿勢応答とベクションを検討した。

実験には大学生19名が参加した。参加者はヘッドマウントディスプレイを装着し、座位または立位で課題に取り組んだ。各試行につき30秒間、拡大・縮小・右移動・左

移動の4方向いずれかのオプティックフローを呈示し、参加者の頭部位置を測定した。毎試行、参加者はベクションの強さおよびベクションの方向（前進・後退・左・右）を報告した。オプティックフローの方向（拡大・縮小・右・左）と姿勢条件（座位・立位）を組み合わせた計8条件が実施された。頭部位置データに対しては、クラスター並べ替え分析（cluster-based permutation analysis）を行った。この分析は、不規則に揺れ動く時系列データを条件間で比較する際に、検出力と統計的妥当性に優れる手法である。本研究ではこの分析を適用し、実験条件によって頭部運動の大きさや方向が異なるかどうかを検討した。

実験の結果、立位の姿勢応答はベクションとは反対方向に生じ、過去の報告と一致した。一方、座位の姿勢応答はベクションと同方向に生じ、立位に対して反転することが明らかになった。ベクションの強さや方向は座位・立位に影響されず一定であった。立位の姿勢応答は、オプティックフローから想起される自己運動、その先の転倒を防ぐ意義があると考えられてきた。立位の姿勢応答のように、知覚された自己運動と反対に身体を傾ける補償応答により転倒を防止できる。座位ではベクションと同方向に姿勢の傾きが生じたことから、安定性が高い座位の姿勢応答は立位時の姿勢制御システムとは異なる機序を持つ可能性が考えられる。一方で、座位においても姿勢応答が誘発されたことから、市販のVRコンテンツを評価する際に姿勢応答の指標が有効であることが示された。

総合考察

研究1、2から、自己身体に関する空間認識に強い影響を与える視覚刺激は自動的な姿勢制御にも大きく影響することが示唆された。本研究の結果は、オプティックフローのサイズ、密度や速度に対するベクションと姿勢応答の変化パターンの一致を報告した過去の研究と一貫する。過去の研究では物理的な刺激強度との関係性を検討したのに対し、研究1では物理的な刺激強度が統制された条件で上下視野の効果を検討し、条件間のベクションの違いが姿勢応答と一致することが示された。また研究2では視覚的な傾きに対する頭部回転とSVVにおいて、各周期成分の相対的寄与が一貫していることが示された。本研究で示された相対的寄与は文字認識課題を用いて検討された過去の研究結果とは異なる結果となった。類似したシーンを用いた場合でも課題内容に応じて相対的寄与が変化し得ることから、物理的な刺激強度そのものではなく、SVVに強い影響を与える特定の視覚要素が姿勢応答にも強く影響することが示唆された。研究1、2と併せて、空間認識に強い影響を与える視覚刺激は、物理的な刺激強度に関わらず、姿勢応答に与える影響が大きいことが示唆される。

更に、研究3から、姿勢応答は立位時に限らず座位でも生じることが示された。この結果から、座位で使用する市販のVRコンテンツにおいても姿勢応答指標が有効である

ことが示唆された。

以上の知見から、VR体験の評価指標としての姿勢応答の有効性が示された。ただし、姿勢応答を用いる際には、本研究で明らかになった数点の制約に注意する必要がある。まず研究1で報告されたように、刺激呈示から時間経過に伴い、姿勢応答はばらつきが大きくなる。そのため、刺激強度は短い時間窓で検討することが望ましい。また研究3で報告されたように、測定時の身体姿勢によって姿勢応答の方向が異なる場合がある。こうした違いはベクシヨンの変化に起因するというより、座位・立位間の姿勢制御方略の違いを反映していると考えられる。こうしたメカニズムを仮定すると、座位・立位における姿勢応答の違いはオプティックフロー呈示下だけでなく、視覚傾斜に対する反応においても同様に生じることが予想される。姿勢応答方向からベクシヨンや自己傾斜感覚の方向を推定する場合、身体姿勢によって応答方向が異なる点に留意する必要がある。更に、研究1から3のいずれにおいても、主観指標と姿勢応答の間に有意な個人間の相関は認められなかった。姿勢応答は刺激強度の評価には有効であると考えられるが、知覚された刺激強度の個人差を直接的には反映しないことに留意する必要がある。

(論文審査の結果の要旨)

バーチャルリアリティ (VR) は仮想現実感とも訳され、コンピュータを用いて仮想的な世界を構築し、人がその中に入り込むような体験を与えるものである。前世紀後半から開発が進み、たびたび小説や映画の題材とされてきた。現状のVR機器は視覚中心ですべての感覚の再現は難しいものの、近年、頭部位置センサを備えたヘッドマウントディスプレイ (HMD) の性能向上により、比較的安価な市販品でも精緻な視覚世界への没入感が得られるようになってきた。心理学においてもHMDを用いた研究の可能性が広がりつつあり、中でも基礎的な知覚認知研究においては、広視野の視覚刺激を身体の動きと同期して呈示できることの意義はきわめて大きい。本論文は、そのような市販のHMDを用いて視知覚と身体制御の基礎過程を探究しようとした、論者の意欲的な試みを集約したものである。その成果は心理学の基礎的問題の理解に寄与するとともに、効果的なVR応用のためにも示唆に富むものとなっている。

本論文は5章からなっている。序論となる1章では、VR技術とHMD機器の開発と現状や臨場感の問題について論じられ、多くの先行研究を紹介しながら本論文の主題である自己運動と自己傾斜の知覚および姿勢制御の問題へと導かれる。自己運動と関連し広視野の視覚的な動きを示すオプティックフロー、視覚による自己運動感覚を意味するベクシオンなどの用語も本章で説明される。ベクシオンは本質的に主観的な現象であり、客観的な測定が難しいことが研究の上で問題となってきた。これまでに、無意識的な姿勢制御による身体移動を客観的に測定することで補完しうるものが論じられてきたが、まだ実証的研究は少ない。続く2章から4章で紹介される、論者による一連の実験研究は、そうした知見の蓄積をめざしたものと言える。実験ではHMD機器の特性を活用し、心理応答と頭部運動による身体応答のデータを比較しやすい形で取得している。

2章で報告される研究1では、オプティックフローに対する上下視野の働きの違いが検討された。屋外を歩く時、主に上視野で見える空などの情景は比較的遠く、動きに乏しい一方、下視野で見えるのは変化が大きく障害物もある地面が中心となる。そのため、身体制御には下視野の情報が重視されることを生態心理学の祖であるギブソンが既に指摘しているが、実験的に検証した研究はほとんどない。知覚的なベクシオンの下視野優位性を示した先行研究があるが、無意識的な姿勢制御との関係は不明であった。そこで両者を比較する実験を行った結果、ベクシオンは先行研究のとおり下視野の優位性を示し、姿勢応答 (頭部移動) も概ね一貫するものであった。ただし、前進運動を示す視覚刺激への姿勢応答は弱く、上下視野の差も明確でなかった。これらの結果は単に姿勢応答の不明瞭さを示すだけではなく、身体の物理的な制約に従う姿勢制御のために意識的知覚とは部分的に異なる情報処理がなされている可能性を示す、たいへん興味深いものである。また、本研究を補強するために行われた、ベクシオン知覚における上下には網膜座標だけではなく重力座標が影響するという実験結果も簡単に紹介されている。

3章で報告される研究2は、静止した光景の傾きが垂直方向の知覚と姿勢制御に与える影響を調べたものである。重力下での生活に必要な上下方向の知覚には身体感覚とともに視覚が大きく影響するため、部屋全体が視覚的に傾くと、その影響を受けて主観的な垂直方向が偏位し、頭部が無意識的に移動する反応が見られる。本研究では、HMDを利用して傾いた部屋を観察した際の知覚応答と姿勢応答を測定し、先行研究で文字の傾き判断実験と共に提案された数理モデルをもとに、要因を分析している。測定結果はそれぞれ90°、180°、360°の周期を持つフレーム、地平線、(上下)極性という3つの手がかり効果の複合で表現でき、知覚応答にはフレームの影響が強いことと、姿勢応答は知覚応答に類似するが3つの手がかりの影響差が少ないことが明らかになった。

4章で紹介される実験では、2章と同様のオプティックフローに対する姿勢応答の方向が、立位と座位の場合で逆転することが明らかになった。ベクシオンには全く違いが見られず、意識的知覚と無意識的な身体応答が必ずしも一致しないことを示す点で興味深い。この結果は立位と座位による安定性の違いが無意識に反映されたものと考えられ、身体力学や生態学的妥当性の面からも理解しうるが、原因の説明やモデル化は今後の課題となる。実際、家庭などでHMD機器を利用する場合、安全のためにも座って使うことが多いだろう。姿勢応答を臨場感など何らかの指標として使うことも提案されているが、立位と座位の違いを考慮に入れる必要があるだろう。

最後に、5章の総合考察では、VR評価のための姿勢応答測定の意義や今後の展望が論じられている。

オプティックフローを用いた実験やベクシオンについては、研究室で過去の研究の知見があったものの、HMD機器の制御は論者自身が技術を習得して実現したものである。また、データ分析のため、基本的な心理統計手法にとどまらず先端的な分析法に果敢に挑戦し、実際に役立てている。本論文に記された成果は論者の高い研究意欲の集大成と言えるもので、国際的にも評価を得つつある。もちろん、本論文には問題も残っている。実験心理学的研究として精緻な測定と分析は十分評価できるものの、表題にあげられたメカニズムについての考察は不十分と言わざるを得ない。しかしながら、計画していた脳機能測定研究が世情により完遂できていないなど、本人の責とはいえない面もあり、また、メカニズムの包括的な理解は研究分野全体の課題であろう。そのような問題は本論文に記された内容の意義を減じるものではなく、長期的課題として今後の論者の研究に期待したい。

以上、審査したところにより、本論文は博士(文学)の学位論文として価値あるものと認められる。2022年1月28日、調査委員3名が論文内容とそれに関連した事柄について口頭試問を行った結果、合格と認めた。