

氏名	齋藤 芳明
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	総博甲第147号
学位授与年月日	令和3年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
文部科学省報告番号	甲第717号
専攻名	総合理工学専攻

学位論文題目 VR空間におけるユーザの回避行動から見た身体認識に関する研究
—障害物回避行動時のユーザの振る舞い調査からユーザインタフェ
ースの提案まで—
(Study on body recognition through user's avoidance behavior in
VR space—Ranging from cognitive obstacle avoidance behavior to
user-interface design principles—)

論文審査委員	主査	島根大学教授	平川 正人
		島根大学教授	縄手 雅彦
		島根大学教授	神谷 年洋

論文内容の要旨

近年、モノ作りにおいてシミュレーション技術は必要不可欠なものであり、そのシミュレーション世界に製品利用者である人間を組み入れることで、シミュレーションをより有効なものとすることができる。そこではVR技術が有効な手段の1つと捉えられており、現実に近い感覚を再現することは達成されつつあるが、人間の認知面での振る舞いは未だ十分に解明されていない。我々はVRの更なる活用の一端を担うことを期待し、VR空間でのユーザの認知特性をユーザの振る舞いを通して明らかにすることで、VRのさらなる活用、延いては産業の発展に貢献することである。

本研究ではその一端として、VR空間での身体を伴ったユーザの空間認識を明らかにすることを目的とする。特に、障害物回避行動時のユーザの振る舞いに焦点を当てて調査を行った。まず、自身が保持する身体の大きさがVR世界にあってはどのように認識されるのかといった点に着目した。これは街中を歩いているときに、障害物と自身との距離を目視確認しなくとも回避することができるということに対応する実験である。次に、自動車運転という応用の下でのユーザ（ドライバ）の障害物回避行動に影響を及ぼす要素について検討した。加えて自動車運転における左右移動制御のための頭部動作の利用可能性について調査を行った。

本論文は6つの章より構成されており、本研究の背景、目的および本論文の構成について述べた第1章に続く各章の内容は以下の通りである。

第2章では本研究に関連する研究を紹介した。本研究全体に関わる空間認知や知覚に関する先行研究として、バーチャルな身体認識と錯覚、身体知覚を伴うアプリケーション指向の研究、身体の拡張とテレプレゼンス、空間と動きの知覚について紹介し、さらに第4章以降で関係する

ドライビングシミュレータについての研究のほか、第 5 章に關係する頭部動作インタフェースおよび VR 酔いについての研究についても紹介した。

第 3 章では、VR 空間で見えない身体の大きさ認識について人間がどのように把握するかを調査するために、大きく 2 つの実験を行った。最初に行った実験 1 より、仮想身体の大きさの判断は現実世界での参加者自身の身体幅に影響（参照）されていること、受動的な場面と能動的な場面とでは衝突回避に際しての身体幅認識に差がある、もしくは衝突回避のための安全マージンを取ることがわかった。また、衝突回避の精度は試行を重ねるとともに改善することもわかった。さらに、ユーザは物体が近づくまで回避行動を延期する傾向があることがわかった。続く実験 2 の結果からは、VR 空間において仮想身体の大きさによらず 10 回程度の試行錯誤を繰り返すことによって自身の大きさを把握することができることがわかった。この結果は実験 1 の結果とも概ね一致している。VR 空間での自身の大きさ把握は探索する身体幅が大きいものと小さいものとの探索過程が異なっており、身体幅が小さい場合には探索の初期段階で大きく身体を動かして障害物を回避し、その後の探索過程で徐々に回避距離を縮めていった過程を鑑みると、VR 空間における未知かつ不可視の仮想身体の大きさ探索は現実世界の BIBS をベースに行われる可能性があることがわかった。また、幅の小さい仮想身体の場合、探索行動において障害物の至近を自身が通過するため、障害物に近づくことに消極的になってユーザは慎重な探索行動を取ることがわかった。これは第 4 章の映像参照の影響に通じる結果とも言える。さらに男性と女性とでは、女性は慎重かつ安定的な回避行動を取り、男性は状況に応じて大胆に回避行動を取る傾向があることも明らかになった。

第 4 章では自動車運転シミュレーションを題材として、VR 空間でのドライバの振る舞いに影響する要素について調査を行った。障害物回避時にドライバが行う車両ポジションの決定は、自身が運転する車両の車幅やハンドルのポジション（右ハンドル/左ハンドル）、車線境界線という参照要素が影響していることを明らかにした。

第 5 章では、VR 空間における車両の操舵制御のインタフェースとしての頭部動作の有効性について調査した。通常のハンドルインタフェースでの運転実験から、x 方向、ヨー回転、およびロール回転の 3 つの頭部動作が横方向移動用インタフェースとしての有力な候補であることがわかり、3 候補それぞれをインタフェースとして車両を操縦できるドライビングシミュレータを実装し、操作の難易度、車両動作との親和性、VR 酔いの観点から有効性を検証した。頭部の水平方向（x 方向）に沿った動きは、VR 酔いを軽減すると同時に、操作の難易度が低く、動きとの親和性が高いことが確認され、最も有望なインタフェースであることがわかった。最後に第 6 章では本論文の調査結果の総括を述べる。

論文審査結果の要旨

シミュレーション技術を取り入れて高品質の製品作り及びサービス達成を図るための手法としてモデルベース開発がある。加えて、社会からの高い要求水準に応えるべく、機器を操作する人間を対象モデルに組み入れる Human-in-the-loop というアプローチも提唱されている。一方、シミュレーションの有効性をより一層高めるための技術として仮想現実（Virtual Reality : VR）がある。VR を用いることで高い臨場感をユーザに提示することもできるようになってきているが、VR 空間での人間の振る舞いの解明は未だ不十分である。

本研究では、その一端として VR 空間でのユーザの身体認識特性について調査している。特に、障害物回避行動時のユーザの振る舞いに焦点を当てた研究を行っている。論文は 6 つの章より構成されており、本研究の背景ならびに目的を述べた第 1 章と論文のまとめを行っている第 6 章に挟まれる本体部分の第 2 章から第 5 章の内容は以下の通りである。

第 2 章では既存の関連研究を整理・分類している。具体的には、仮想的な身体認識と錯覚、身体知覚を伴う応用指向のシステム、身体の拡張、奥行運動知覚、ドライビングシミュレータ、頭部動作インタフェースおよび VR 酔いについての既存研究を紹介している。

第 3 章では、自身では目視できない仮想的な身体の幅をユーザはどのように把握できるかといった点について基礎的な調査を行っている。被験者実験の結果から、仮想身体の幅の判断は現実世界での自身の身体幅に影響されること、受動的な回避行動と能動的な回避行動とでは幅認識結果に差があること、男女の別によっても回避距離や回避タイミングに差があることなどを明らかにしている。また、十数回程度の試行錯誤を繰り返すことによって、例えば目視することが叶わない場合でも、自らの仮想身体の幅を把握することができるという事実は産業応用の観点からも価値がある。

第 4 章では、自動車運転 VR シミュレーションにおけるユーザ（ドライバ）の振る舞いに注目している。車体はある意味でドライバの仮想（拡張）身体であり、さまざまな刺激設定の下、障害物を回避する行動の繰り返しによって、ドライバが車体を掌握し操舵する振る舞いがどのように変化するかを観察している。ドライバに提示した刺激要素には車速、車幅、車線変更方向、ハンドル位置、車線境界線が含まれており、ドライバの車線上での車両位置決定に影響を及ぼす刺激要素の組み合わせを明らかにしている。

第 5 章では、車体という拡張身体と素の身体との関わりについての探究の一端として、VR 空間における車両操舵制御のユーザインタフェースとしての頭部動作の有効性について調査している。通常のハンドルインタフェースを用いた実験から、水平左右方向、ヨー回転、ロール回転の 3 つの頭部動作が車両の横方向操舵手段として有力な候補であることが判明し、3 つのそれぞれの手段で車両を操ることのできるドライビングシミュレータの実装を行っている。そして操作の難易度、車両動作との親和性、VR 酔いの観点から有効性を検証したところ、水平左右方向の頭部動作が最も適切であることを明らかにしている。

本論文はヒューマン・コンピュータ・インタラクションをはじめとする分野の研究の裾野を広げる意欲的な研究内容となっており、博士（工学）の学位授与にふさわしいと審査委員全員一致で判断した。