Virtual realityの健康リスク評価技術の開発とリハビリテーションへの応用

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2023-05-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 章, 斯楠 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/00023161

２０２２年2月１０日

「博士学位請求論文」審査報告書

審査委員　（主査）　理工学部　専任教授

氏名　　小　野　　弓　絵

（副査）　理工学部　専任教授

氏名　　田　中　　幹　也

（副査）　理工学部　専任教授

氏名　　嶋　田　　総太郎

１　論文提出者　　章　斯楠

２　論文題名　　Virtual reality の健康リスク評価技術の開発とリハビリテーションへの応用

（英文題）　Objective health-risk evaluation and medical application of virtual reality technology

３　論文の構成

本論文は次の 5 章から構成されている．

第 1 章　緒論
第 2 章　VR 視聴時の主観的不快感に関連する自律神経指標の検討
第 3 章　脳波・心臓自律神経活動を指標とした VR sickness の定量的検出手法の検討
第 4 章　脳卒中患者の歩行速度向上を目的とした VR リハビリテーション手法の開発
第 5 章　総括

４　論文の概要

仮想現実（Virtual Reality: VR）技術は計算機や映像技術の進歩と共に近年著しく発展し，映画やゲーム，教育などさまざまな分野への応用が進んでいる．このうち，特に社会的意義の大きな VR の応用分野として，医療従事者の技術習得や麻痺患者のリハビリテーションなど，医療における活用があげられる．しかし，VR 産業がその市場規模を拡大するにつれ，VR の運用に伴う健康問題が散見されるようになってきた．特に，VR の体験中に吐き気，眼精疲労，方向感覚の喪失などの不快症状が生じる VR sickness（VR 酔い）は，特に患者を対象とする VR のリハビリテーション医学への応用のために解決すべき喫緊の課題

である．これらの背景から，VR sickness の有害症状を評価・検出する方法についての研究が進められている．しかし従来の質問法による主観的不快感の評価は，VR 体験中の限られた時点や体験終了時点での取得といった時間分解能の低い方法に留まり，映像コンテンツ視聴中の不快感の変動を捉えることには適していない．また不快感を引き起こす視覚刺激の原因として映像内要素や解像度の観点から検討が行われてきたが，不快症状を引き起こす刺激強度の閾値には大きな個人差が存在するため，コンテンツの物理的特性のみから VR sickness の発生の有無を判定することには限界が生じていた．VR sickness の発生に関わる使用者の感覚受容状態を詳細に検討するには，高い時間分解能をもつ主観的不快感の評価と，不快感の発生を客観的に評価可能な生体指標の解明が必要である．以上のことから，本研究では VR sickness の発生に関わる生体指標の解明と VR sickness の自動検出システムの開発，ならびに安全性を考慮した VR リハビリテーションシステムの開発とその臨床効果の検証を目的とした．

本論文を構成する全 5 章の概要は以下の通りである．

第 1 章では，VR の概念や発展史，VR sickness による健康被害と評価手法の先行研究について概説し，本研究の目的を説明している．従来の VR sickness 研究における不快感評価手法の技術的限界を提起し，新たな主観的不快感評価法と不快感の客観的評価法の必要性について述べた．また VR の医療応用の現状を述べ，VR の活用法の一つとして，視覚刺激による歩行運動の促進効果を応用した VR 歩行リハビリテーションシステムについて提案した．

第 2 章では，VR sickness を引き起こしやすいジェットコースターCG の視聴時に発生する主観的な不快感を連続的に評価する心理物理実験を行い，VR sickness の程度と相関する自律神経活動の要素を調査した結果について述べている．スライダー式の不快感評価装置を新たに取り入れて不快感のリアルタイム測定を行うことで，ヘッドマウントディスプレイを用いた VR コンテンツ視聴時の VR sickness の発生と心臓自律神経活動との関係性について詳細に調査した．健康な若年成人 16 名を対象とした実験を行い，VR コンテンツ視聴中に主観的不快感が増大した時間帯では，安静時と比較して心拍数と交感神経活動が有意に増加し，副交感神経活動が有意に減少するという結果を得た．自律神経活動が主観的不快感の発生と関連し，VR sickness を客観的に評価する有用な生体指標となりうることを示した一方で，VR コンテンツの内容によって興奮状態が惹起されると心臓自律神経の応答も変化し，情動由来の生体指標の変化に VR sickness の有無の判定結果が左右される可能性も明らかになった．

第 3 章では，前章の研究で得られた知見を元に自律神経指標に加えて脳波指標を導入した追加実験を行い，一般的な機械学習手法を用いた 2 クラス判別と深層学習を用いた異常検知のアルゴリズムを用いて VR sickness 検出システムを構築し，その検出精度を検討した結果について述べている．本章では健康な若年成人 28 名に対して心電図と脳波の同時計測を行い，心臓自律神経活動および脳活動を特徴量とした識別器を作成することで VR sickness 検出に有用なバイオマーカーの探索を網羅的に行った．解析ではスライダー式の不快感評価装置を用いて同時に取得した主観的不快感の指標をもとに VR sickness 発生を定義する閾値を定め，生体機能データを平常状態（VR sickness なし）と異常状態（VR sickness

あり）に分類して学習データとした．Support vector machine を用いた 2 クラス判別の結果では, 異常状態の検出精度（再現率）が最も高くても 80%程度であり, 正答率や精度・F1 score は 10~77%未満の値に留まった．一方、深層学習の Autoencoder では、VR sickness 発生とみなす不快感閾値を 50~60（最小 0，最大 100）と定義した場合、異常状態を良好に検出することができた．特に左頭頂部のシータ波活動と後頭葉、左側頭葉のアルファ波活動を用いた場合、正答率・再現率・精度・F1 score の全てが 100%となった．異常検出手法である Autoencoder は、単一の脳波電極・周波数帯の平常状態のデータから VR sickness 発生の有無を十分な精度で検出可能であることを示した．

第 4 章では，第 3 章までの研究結果を踏まえ，安心安全な環境で効果の高いリハビリテーションを提供する VR 歩行訓練システムの構築を行った．運動視を引き起こすオプティックフロー（OF）映像刺激を視聴しながらの歩行運動は，提示される視覚的運動速度に応じて実際の歩行速度が適応的に変化することが知られ，脳卒中患者の歩行様態を改善するリハビリテーション手法として期待されている．しかし，歩行機能の促進に最適な OF 刺激の性質や，刺激後の歩行機能に与える影響は未解明であった．本研究では任意の OF 速度条件を提供可能な VR コンテンツを作成し，複数の視覚速度条件における VR トレッドミル歩行訓練がその後の歩容を変調させる効果について，健常者と脳卒中患者を対象に検討した．VR で再現する歩行路は VR sickness の発生率が最も低い直線運動とした．健常成人被験者 12 名と脳卒中患者 10 人に対して行った検証実験の結果，実際の快適歩行速度より 25%速い視覚的移動速度の OF 刺激を受容しながら VR トレッドミル歩行訓練を行うと、脳卒中患者・健常者の訓練後の 10 m 歩行試験における地上歩行速度が有意に増加し，さらにその歩行促進効果は訓練後 10 分間にわたって維持された. 脳卒中患者に対して現実速度より速い OF 刺激を提示することで，患者に特段の努力を要求することなく健常状態に近い速い速度の歩行パターンを誘起できるという，リハビリテーション科学における重要な知見が得られた．

第 5 章では本研究で得られた検証結果を総括した．深層学習による生体信号の不快感判別では，機械学習で必要な VR sickness の誘発を必要とせず，平常状態における脳波の単一チャンネル活動のみを学習するだけで異常状態の識別器を作成可能であることを示した．また，異なる OF 刺激を行いた脳卒中患者と健常者の歩行訓練の効果を詳細に検討することで，これまで知られていなかった OF 刺激による歩容変化の持続効果を明らかにし，長期的な OF 刺激下歩行訓練における歩行機能改善効果の解明に貢献した．これらの研究成果は，VR の安全利用と医療分野への応用に大きく寄与するものである．

５　論文の特質

本論文の特質として 2 点挙げられる. まず前半の VR sickness の評価技術の開発研究では，これまで質問紙等の主観的評価にとどまっていた VR sickness の評価を生体信号計測と Autoencoder 法を用いた異常検出により客観的に評価するための新技術を構築し，VR の視聴中に発生する不快感を高い時間分解能と精度で検出可能であることを証明した点である．後半の VR リハビリテーションシステムの開発では，移動速度と異なる移動感覚を誘発可能な OF 刺激を提示するという VR の特性を活かしたリハビリテーションの方法を提案し，

理学療法士との協働によりその臨床的な有効性を示した点である. VR 空間における人の感覚受容の状態を様々な生体計測技術を駆使して定量的に評価し，実社会の問題解決に応用可能な技術として提案した本研究は，今後さらに発展が予想される高度情報化社会における, VR の安全な利用とその医療応用へ貢献するという点で大きな社会的意義を持っている.

6　論文の評価

VR 技術をリハビリテーションなどの医療福祉の分野で活用するにあたっては，その安全な利用方法の策定や不快症状の早期発見が重要となる．VR sickness はその誘発されやすさに個人差があり，視点移動量などの映像中のパラメータのみではその発生を明確に予測できないことが問題点となっていた．第 2 章，第 3 章で述べられた一連の研究では，VR 映像の物理的特性ではなくそれを受容するユーザーの状態変化に着目し，Autoencoder による異常検知手法を脳波や心電図の生体信号へ適用することで、VR 映像視聴に伴う不快感の発生の高精度な検出に世界で初めて成功した点に新規性と有用性がある．本研究において開発された VR sickness の検出アルゴリズムを近年発達が著しいウェアラブルデバイス等に搭載し，実社会環境での検証実験を今後推進していくことにより，VR の産業界ならびに医療分野における安全な活用の実現に大きく貢献するものと考えられる.

また，第 4 章に相当する歩行リハビリテーションシステム開発の論文は，現実環境と異なる仮想環境刺激を可能とする VR の特性を活かし，ユーザーにとって安全な歩行速度でのトレッドミル訓練を行いながらも、訓練中の視覚的移動感覚を高速化することにより訓練後の歩行速度を促進できるという画期的な歩行機能の促進手法を提案したという点で社会的価値の高い研究となっている．超高齢化社会を迎えた我が国において，持続可能なリハビリテーション・ヘルスケア産業の構築や健康寿命の延伸は喫緊の課題である．本研究をきっかけとして，VR の特性を活用した多くのリハビリテーションプログラムの発展が今後期待できる.

以上に述べたように，本論文は先進的な生体計測技術を駆使した VR sickness の検出技術の確立と VR を活用したリハビリテーションの有効性の実証に挑んだ挑戦的な研究である．先進的な方法論が活用されているとともに，臨床的にも意義の高い結果が得られており，今後のリハビリテーション科学，生体医工学の複合分野の発展に大きく寄与する優れた論文として評価できる.

7　論文の判定

本学位請求論文は，理工学研究科において必要な研究指導を受けたうえ提出されたものであり，本学学位規程の手続きに従い，審査委員全員による所定の審査及び最終試験に合格したので，博士（工学）の学位を授与するに値するものと判定する.

以　上

主査氏名（自署）