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年度　理工学研究科

博士学位請求論文（要旨）

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

電気工学専攻
章　斯楠

１　問題意識と目的

近年、仮想現実（Virtual Reality: VR）技術は計算機と映像の技術の進歩と共に大きく発展し、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て、VR の運用に伴う健康問題が散見されるようになってきている。そのうちの一番重大な問題は、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）である 。これらの不快症状はユーザーの将来の VR 体験を阻害する可能性があるため、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とされている。これらの背景から、VR sickness の有害症状を評価・検出する方法がさかんに研究されるようになった。Simulator sickness questionnaire（SSQ）、Fast Motion sickness Scale (FMS)や misery scale (MISC)などは、これまでに提案された主観的不快感の評価指標である。しかしこうした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とどまっている。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、本論文では主に 2 つの目標を立てた。1 つ目は、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である。2 つ目は、1 つ目の研究で明らかとなった安全な刺激範囲を踏まえた VR の医療応用であり、脳卒中患者の歩行機能改善を目的とした 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行った。

２　構成及び各章の要約

本論文は全 5 章から構成され、以下に各章の概要を述べる。

第 1 章では、VR の概念、VR の発展史、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。従来の研究における VR sickness 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の有用性について提案した。

本研究では、VR の体験中にリアルタイムで主観的不快感の程度を連続的に報告可能なスライダー入力装置を導入することで、アンケートを用いた従来の主観的不快感評価法における低時間分解能の欠点を打開した。また、個人差が大きい VR sickness の発生を精度良く検出するために、脳波と心臓自律神経活動の二つの生体信号を用いて客観的に VR sickness を自動検出するアルゴリズムを提案した。VR sickness の自動検出においては、深層学習の Autoencoder による異常検知法を用いて正常状態（VR sickness を呈さない状態）のみ

の特徴量分布推定から通常のパターンと異なる状態（VR sickness 状態）を検出する定量的判別手法を提案した。さらに VR 技術の医療応用研究として、VR sickness を誘発する視覚的要素を排除した安全性の高い VR アプリケーションの開発にも取り組んだ。歩行障害を持つ脳卒中患者のトレッドミル歩行中に実際の移動速度と異なる視覚的移動速度を提供することで歩行機能を促進する VR リハビリテーションシステムを開発し、その臨床的有効性を検証することとした。

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。安全な VR の使用のために、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が必要であると考えた。本研究ではスライダー型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、HMD 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、直進・回転・往復運動を含む 5 分間のジェットコースターVR コンテンツを視聴させた際の主観的不快感と心電図を連続的に計測した。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した。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が示唆された。しかし自律神経活動のみでは、VR コンテンツの内容によって惹起された興奮状態など、情動由来の生体指標の変化に判定結果が左右される可能性も示唆された。

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。本章で行った生体計測実験では、思考に関連する前頭野、距離の認知に関連する中側頭葉と motion sickness に関連する左右の運動野、頭頂葉、後頭葉脳領域の脳波も同時に計測を行い、心臓自律神経活動および脳活動を特徴量とした VR sickness 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うこととした。健康な若年成人 28 名を対象とし、心電図と脳波の同時計測下で第 2 章と同様のジェットコースターCG の視聴実験を行った。主観的不快感の程度を利用し、平常状態（VR sickness なし）と異常状態（VR sickness）のデータを分類した。Support vector machine を用いた 2 クラス判別の結果では、平常状態の判別精度は良いものの、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 70%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 2 章と第 3 章の結果を踏まえ、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。提案した VR リハビリテーションシステムについて健常者と脳卒中患者を対象とした歩行訓練実験を実施し、歩行機能の変容効果について調査した結果を述べた。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。本研究では健常者と脳卒中患者に対して複数の OF 速度条件を提供する VR コンテンツを作成し、各条件における 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検討した。健康成人被験者 12 名と脳卒中患者 10 人に対し、OF 刺激なし、各自の快適歩行速度と同速度の OF 刺激、快適歩行速度から 25%増加した OF 刺激、快適歩行速度から 25%低下した OF 刺激の 4 つの視覚的刺激を与えながら、それぞれ快適歩行速度に設定したトレッドミル上で 5 分間の歩行訓練を行わせた。歩行様態の評価として、訓練前、訓練の直後、5、10、20 分後に 10 メートル歩行試験を行い、歩行時間、歩数、歩行率（時間あたり歩数）の変化を検討した。歩容の変化が顕著に現れたのはトレッドミル速度から 25%

増加した速度の OF 刺激条件であった。脳卒中患者において、歩行時間は OF 刺激直後から 10 分間まで、歩行前より有意に減少した。歩数は変化せず、歩行率は OF 刺激 10 分後に有意な増大を認めた。健常者において、歩行時間は OF 刺激直後から 10 分後まで、歩行前よりも有意に減少した。歩数は OF 刺激直後のみ有意に減少し、歩行率は変化しなかった。現実速度より速い OF 刺激は脳卒中患者・健常者の歩行速度を 10 分間程度上昇させる効果が確認された。脳卒中患者においては歩行速度と歩行率の増加が見られたことから、現実速度より速い OF 刺激は歩幅よりも歩行率を増加させることで健常に近い歩行パターンが誘起されることが明らかとなった。

第 5 章では本研究で得られた検証結果を総括した。異常検出法による生体信号の不快感判別では、2 クラス判別法で必要な VR sickness 状態の学習データの取得を必要とせず、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し、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と考えている。