

[研究助成 (A)]

VR と非侵襲センサを用いた在宅リハビリテーションのための
人体ウェルビーイング

Human body well-being using Virtual Reality and non-invasive sensors for motor rehabilitation at home

2231026



研究代表者 (助成金受領者) 東京農工大学 大学院工学研究科 客員准教授 Hernandez Vincent
共同研究者 東京大学 大学院工学研究科 教授 Venture Gentiane

[研究の目的]

脳卒中などの疾患や自然な時の経過による加齢は、その人の身体能力を変化させ、生活の質に大きな影響を与える。この影響を軽減することを目的としたリハビリテーションの必要性は、こうした病状の進行に伴ってより増加する。これまで、リハビリテーションは、医師の監督のもと、臨床の現場で行われることが主流であった。しかし、限られたリハビリテーション時間や地理的な距離、経済的な制限といった課題から、こうした従来のリハビリテーションセンターによる治療を受けられず、リハビリテーションの多大な恩恵を受けられない患者が多く存在している。その結果、多くの患者の治療が遅れたり、治療の中断を余儀なくされたりして、健康状態が悪化したり、回復が妨げられたりしている。さらに、リハビリテーションの効果は、例えば訪問リハビリテーションといった、リハビリテーションセンター以外で実施された場合でも維持される必要がある。

在宅リハビリテーションは、従来のリハビリテーションにおける限界に対処できる多くのメリットを提供する。まず、例として、自宅に居ながらにしてリハビリテーションサービスを受けることができるため、アクセス性、利便性、柔軟性が向上することが挙げられる。そして、在宅リハビリテーションと AI 技術の統合により、患者一人ひとりのニーズや好みに合わせて

カスタマイズされた治療を提供することが可能になり、治療への参加やコンプライアンスが向上することが考えられる。

パーソナライズ化された治療を行う上で、患者の経過を監視することは、リハビリテーションを柔軟に調整し、治療効果を高めるのに欠かせない。しかし、遠隔での監視には、リアルタイムで監視することが技術的に困難であったり、定期的に直接評価が行えなかったりと、患者の状態の変化を正しく把握することに課題がある。

こうした課題を解決するためには、在宅リハビリテーションで使用する低コストのセンサ技術を活用することが重要となる。こうしたソリューションは、アクセシビリティや利便性を高めるだけでなく、患者の治療の結果の改善や、治療への積極的な参加を促す可能性があるなど、多くの利点をもたらす。慣性計測ユニット (Inertial Measurement Units, IMU) や力覚センサ、RGB カメラなどのセンサをバーチャルリアリティ (Virtual Reality, VR) 環境のゲームと組み合わせることで、患者に没入感のある魅力的なリハビリ体験を提供することができる。これにより、患者のモチベーションを高めることができる楽しいゲームの要素を取り入れた、リアルタイムでのパフォーマンスの監視が可能となる。また、リハビリテーションの難易度を自動的に適応させるアプローチとして、動的難易度調整 (Dynamics Difficulty Adjustment, DDA) を統合することも可能である。

本研究において、DDA は、患者がリハビリテーションのためにプレイするシリアスゲームの属性を変更するために使用される技術として提案されている。これにより、プレイヤーである患者の能力に応じて難易度が調整され、適切なバランスを保ったりリハビリテーションを実現することを目指している。このため、患者のゲームセッションの成果が前回のものから大きく変化した場合、それが患者のパフォーマンスの向上であれ低下であれ、本システムはこうしたいかなる変化にも迅速に適応する必要がある。こうして、本システムは、簡単すぎず、かつ難しすぎないリハビリテーションを提案することができ、プレイヤーである患者のモチベーションと集中力を維持させることが期待される。シリアスゲームにおいて、DDA は、敵の行動やシナリオなど、ゲームのあらゆる要素を調整することができ、これによって難易度のカスタマイズを実現できる。特に、DDA はリハビリテーションにおいて、様々なセンサを用いて得られるプレイヤーの運動制御能力を継続的に監視・活用し、難易度を変更することを目指している。

安価なモーションセンサは、リハビリテーション中のエクササイズにおけるバイオメカニクス的な知見を提供する。特に、こうしたセンサから関節の角度や力、加速度を正確に測定することができれば、臨床医は患者の運動パターンやタスクダイナミクスを詳細に分析することができる。この包括的なバイオメカニクスによる分析は、個々の患者のニーズに応じた科学的根拠に基づいたリハビリテーションを計画し、治療の効果を最大化することに役立つ。

リハビリテーションにおいて収集される膨大なバイオメカニクスに基づいたデータは、その解釈が難しく時間がかかるため、臨床医にとって大きな課題となる。この問題を克服するためには、オートエンコーダのようなデータ次元削減モデルを使用することが効果的である。これらのモデルは、複雑な時系列データをより低次

元の表現に単純化させ、臨床医がデータをより簡単に解釈できるようになる。さらに、次元削減から得られる単純化された測定基準は、強化学習アルゴリズムに使用することができ、患者のパフォーマンスに基づいてゲームの難易度を動的に調整することができる。

私たちの現在の目標は、Wii バランスボード (Wii Balance Board, WiiBB)、IMU、あるいはWiiBB と IMU データの組み合わせ、または筋骨格系モデルからの関節角度など、あらゆるデータに対してオートエンコーダを使用したバイオメカニクス解析の様々なアプローチを探索し、各アプローチの利点と限界を評価することである。

[研究の内容, 成果]

この研究では、15 人の被験者を募り、彼らに 24 種類の上半身と下半身のエクササイズを 10 回ずつ実施してもらった。データ収集には、Wii バランスボード (任天堂株式会社, 京都, 日本)、17 個の慣性計測ユニット (Movella 社, ヘンダーソン, ネバダ州)、および 5 個の RGB カメラを使用し、これら全てを同期させて行った。

WiiBB は力と圧力中心 (Center of Pressure, CoP) の情報を提供し、IMU は加速度と角速度を記録し、RGB カメラは Mediapipe のようなコンピュータビジョンモデルにて三次元の関節位置による姿勢推定を行うために使用される。さらに、拡張カルマンフィルタ (Extended Kalman Filter, EKF) を用いて空間上の IMU の回転を推定することで、身体のセグメントの回転に関する情報が得られる。最後に、OpenSense ソフトウェアを利用した筋骨格系による逆運動学 (Inverse Kinematics, IK) を用いて、IMU データに基づく関節角度の計算を可能にした。

本研究では、色々なセンサの組み合わせによって様々なモデルを訓練し、それらの条件に

対する分類性能を比較する。現在、次の6つの条件が検討されている：

- ・ DB0: WiiBB
- ・ DB1: IMU (腰)
- ・ DB2: IMU (左右の前腕)
- ・ DB3: IMU (腰, および左右の前腕)
- ・ DB4: WiiBB+IMU (腰)
- ・ DB5: WiiBB+IMU (左右の前腕)
- ・ DB6: WiiBB+IMU (腰, および左右の前腕)

このプロセスでは、さまざまな条件でシステムの性能を評価し、実際の環境（例えば、腰や前腕に取り付けたIMUでスマートフォンやスマートウォッチを使用）を想定したテストを行って、実用性、使いやすさ、精度、信頼性を理解する。この評価プロセスは、リハビリテーションの現場でこのようなシステムを広く採用するために、システムの全体的な適合性と準備態勢を判断するために重要となる。これにより、臨床医は、バイオメカニクスのデータを効果的に活用して、患者の治療と成果を改善するための適応的なソリューションを提案することが可能になる。

本研究では、敵対的オートエンコーダ (Adversarial Autoencoder, AAE) と呼ばれる深層学習モデルを使用した。AAEはデータの次元削減における最先端の手法である。AAEは、高次元データを低次元空間上（ここでは2次元）に圧縮するために使用されるだけでなく、半教師付きクラスタリングを実行する際にも使用され、1つのエクササイズを表す各クラス内の異なる運動パターンや戦略の識別を可能にする。これらの可視化は、活動パターンの理解に役立ち、身体活動のより効果的な監視と分析手法の開発に貢献する。

結果の例を Fig.1 に示すが、これは敵対的オートエンコーダによって得られた潜在空間を表している。

左上の (1) は、Wii バランスボードと上半身のエクササイズに対する潜在空間表現を示し、

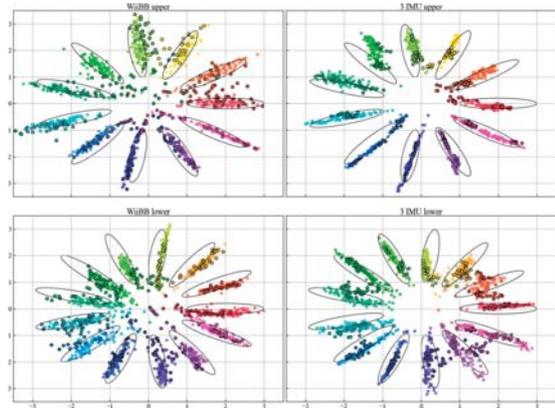


Fig.1 AutoEncoder

右上の (2) は、上半身のエクササイズに対する慣性計測ユニットのデータから得られた結果を示している。左下の (3) は、Wii バランスボードと下半身のエクササイズに対する潜在空間表現を示し、右下の (4) は、下半身のエクササイズに対する慣性計測ユニットのデータから得られた結果を示している。

Fig.1 に示された潜在空間に基づいて、我々のモデルを3人の新しい被験者のデータ（モデルの訓練中に使用されたことのないデータ）でテストした。潜在空間表現の精度結果は以下の通りである：

- (1) 85.1 (0.6) %%, (2) 94.7 (1.7),
- (3) 72.7 (1.8) %%, (2) 96.7 (1.0) の精度

[考 察]

私たちの研究は、RGB カメラ、慣性計測ユニット、力覚センサ（例：Wii バランスボード）、Kinect、およびその他の類似デバイスを含む、在宅リハビリテーションのための費用対効果の高いセンサの使用に焦点を当てています。具体的には、Wii バランスボードを上半身のエクササイズに使用する利点と、下半身のエクササイズに使用する利点を評価したり、また、IMU を単独で、あるいは WiiBB と組み合わせて、動きのダイナミクスを理解する上での IMU の適合性を調べたりする。これらの費用対効果の高いセンサと敵対的オートエンコーダ

を組み合わせ、データの次元削減と分類を行い、臨床医のための効率的な分析ツールを作成する。

私たちの研究結果は、WiiBBのような力覚センサが下半身の運動において顕著な利点をもたらすことを示している。このセンサが力とCoPを検出する機能は、下半身の動きを分析するための貴重な情報を提供し、WiiBBが下肢のバイオメカニクスを評価する適切なツールであることを証明している。しかし、今回の結果は、WiiBBが上半身の運動にはそれほど有効ではないことを示唆している。腕や胴体を使った運動は、WiiBBのデータから大きな恩恵を受けることができず、このセンサが上半身のバイオメカニクスの分析における限界を浮き彫りにした。今後の研究では、WiiBBを座位での上半身も運動の分析に使用できる可能性を探り、WiiBBの能力をさらに評価することが考えられる。

一方で、IMUは、動きのダイナミクスを理解するための総合的に優れた選択肢として浮上している。加速度や角速度を含むIMUによる詳細な情報は、運動パターンとバイオメカニクスのダイナミクスの包括的な分析を可能にした。しかし、その利点にもかかわらず、IMUは磁気の歪みの影響を受けやすく、特に磁気干渉が強い環境では測定精度に影響を与えることがある。さらに、IMUは身体に取り付ける必要があり、在宅リハビリテーションにおいてこれはあまり現実的ではない。これは、患者自身がセンサを正確な位置に取り付けることが難しいためにデータ収集が不安定になり、結果に悪影響を与える可能性があるためである。

オートエンコーダを使用して潜在空間の変動性を分析することで、運動の質をリアルタイムで評価することが可能となり、個々のパフォーマンスに応じて運動の難易度を動的に調整することができる。最適な運動パターンからの逸脱を検出することで、システムは運動パラメータを適切に調整し、患者に適切な指導を提供できる。バイオメカニクスのデータの潜在空間表現

を分析することで、従来の分析方法では明らかにならなかった運動パターンの微妙な変化を特定することができる。このアプローチは、リハビリテーションの文脈における動的な難易度の調整にいくつかの利点をもたらす。

私たちの研究は、リハビリテーション研究におけるバイオメカニクス分析に適したセンサ選択の重要性を強調している。WiiBBは下半身の運動には有利であるが、上半身の運動に対する有用性は限定的かもしれない。IMUは動きのダイナミクスに関する貴重な情報を提供し、AIアルゴリズムとの統合の可能性がある。しかし、精度と効率を最大化するためのセンサの構成とデータ処理技術の最適化においては課題が残っている。

[結 論]

結論として、私たちの研究は、リハビリテーション、特に自宅でのVRリハビリテーションの文脈における、様々なセンサが動的な動きに与える影響を理解することに焦点を当てている。VR技術を低コストのセンサと先進的なデータ分析技術を組み合わせることで、アクセスしやすく、魅力的で、個々のニーズにカスタマイズされた在宅リハビリテーションの実践を改善することを目標としている。没入型体験とリアルタイムでのモニタリングを統合することで、個人は自宅からリハビリテーションに参加でき、従来の治療アプローチの限界を克服することができる。さらに、オートエンコーダ分析によって促進される、動作パターンに対する疲労とトレーニングの効果を探求する私たちの取り組みは、遠隔モニタリングと疲労や過剰なトレーニングの検出に対する有望であり、臨床医がモニタリング分析に新たな解釈を提供するための、簡単に視覚化できるツールを提供する。

[今後の研究の方向, 課題]

私たちの研究では、さらなる改善のための分野も特定し、現在この研究にも取り組んでいる。具体的には、制約のある筋骨格モデルを用いた逆運動学アルゴリズムに焦点を当てている。実際、VRコントローラを最小限のIMUセットと共に使用し、FABRIK (Forward And Backward Reaching IK) アルゴリズムを実装する可能性を探ることは、設定手順を簡略化し、リハビリテーション環境での没入感を向上させることができる。VRヘッドセットと統合されたハンドコントローラまたは手検出アルゴリズムを使用することで、わずか4つのIMUセンサーだけで完全な上半身のIKを提供できることを確認した。しかし、これらのアプローチは依然として、被験者または患者がIMUを体に装着する必要がある。

今回の研究に加えて、現在、疲労とトレーニングが運動中のバイオメカニクスパラメータに及ぼす影響を調査する実験を行っている。疲労が運動パターンとパフォーマンスにどのように影響を与えるかを理解することは、リハビリテーションのプロトコルを最適化し、患者の進捗を効果的に監視する上で極めて重要となる。トレーニングの効果を検討することで、時間の経過に伴うスキルの習得と向上に関連するバイオメカニクス的な変化を明らかにすることが目標となる。そして、時間の経過に伴う潜在空間表現の変化を監視することで、臨床医は、過剰なトレーニングや疲労、またはポジティブなトレーニングの効果の兆候を特定することができ

る。この情報により、個別でリハビリテーションプログラムを調整することが可能となり、最適な進行を保証され、さらに重要なこととして、怪我につながる疲労のリスクを最小限に抑えることができる。

今後の研究では、RGBカメラを使用したコンピュータビジョンによるポーズ推定を統合し、運動分析を強化することに焦点を当てる。手間のかかるセンサの装着を排除するこのアプローチは、様々な分野での動きのダイナミクスについての包括的な洞察を約束し、よりアクセスしやすい堅牢な方法を提供する可能性がある。しかし、遮蔽や精度などの課題は、その実装において依然として重要な考慮事項である。これらの課題に対処することで、バイオメカニクスによるリハビリテーションの分野を前進させ、自宅でのリハビリテーションプログラムのアクセシビリティを向上させることができる。

[成果の発表, 論文など]

Kamikokuryo K., Venture G., Hernandez V. - 2024 - Human activity recognition: application to a low-cost commercial force plate and inertial measurement units - Journal of Biomechanics - (In review)

Kamikokuryo K., Venture G., Hernandez V. - 2024 - Sensors Selection in the context of Human Activity Recognition: Application with AutoEncoder and Genetic Algorithm - Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering - Sensors (In Writing)

Rousseau T., Venture G., Hernandez V. - 2024 - Decoding Fatigue Effects in Human Activity Recognition: AutoEncoder Analysis of Latent Space Variability - Journal to be decided (In Writing)