

## [研究助成 (A)]

Mixed Reality と慣性センサを用いた空間認知と  
運動機能の定量化システム

2241019



研究代表者

東北大学 大学院工学研究科

教授

林 部 充 宏

## [研究の目的]

近年、医療技術の進歩とグローバルな経済成長により、世界的に急速な高齢化が進んでいる。加齢に伴い、運動機能と認知機能の両方が低下し、転倒などのリスクが高まることが広く知られている。その結果、これらのリスクを軽減するためのリハビリテーションサービスの需要は、高齢者人口の増加に伴って増加すると予想されている。リハビリテーションは、要介護状態の予防、症状の緩和、移動能力の維持に不可欠である。しかし、現在の運動機能評価は目視や主観に頼るのことが多い。療法士の経験や知識に依存するため、療法士によって判断が分かれる可能性や正確な情報共有が難しい場合がある。またリハビリテーションは単調な動作を繰り返す行うため、患者のモチベーション維持が難しいという課題が存在する。こうした背景から、患者の意欲を保ちつつ自動的かつ定量的評価が可能なりハビリテーション手法が求められている。

本研究の目的は、一般的なデバイスを使用したトレーニングゲームを通じて、シナジーの観点から歩行や指の運動機能を評価することである。また我々は Mixed Reality (MR) という技術に着目した。MR とは現実世界と仮想世界を融合させる技術として表現される。また認知機能と関わりがある手指機能の定量的評価を目的とするタスクと運動予測の評価を目的としたタスクをそれぞれ MR を用いて開発を目指した。MR 仮想物体操作ゲームを開発し、環

境の現実感を保ちながらトレーニング効果を高める効果を狙った。

## [研究の内容、成果]

## [実験 1: 手指運動評価のための物体把持タスク]

手指機能の評価にはシナジー解析を用いる。運動に潜在する関節や筋肉の協調運動のことをシナジーと呼ぶ。手指運動には多数の関節・筋肉が関わっており、冗長性が高いことから運動の時系列データから解析を行うことは難しい。そこでシナジーを用いることでデータの低次元化を行って協調運動を抽出することとした。本研究では空間的運動を表す Spatial Synergy を用いた。

仮想空間上のオブジェクトを指定された 10 種類の把持方法で操作することが求められる(図 1)。MR 物体把持タスクでは、この仮想オブジェクト操作を MR 環境上で行う。MR 物体把持タスクの様子については図 2 に示す。画面右側に把持対象のオブジェクトが出現する。このオブジェクトを指定された把持方法でつかみ左側のゴールまで運ぶタスクである。オブジェクトをつかみ損ねて落とした場合には失敗

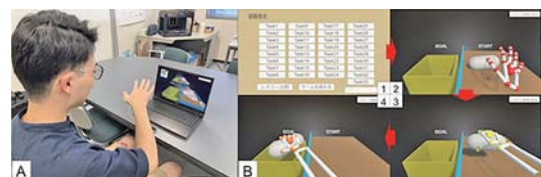


図 1 VR 空間を用いた把持タスクとシナジー解析

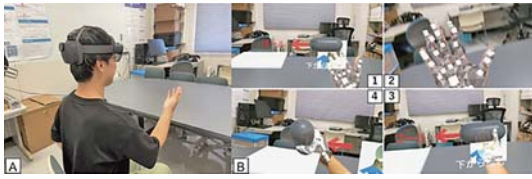


図2 Mixed Reality を用いた物体把持操作の様子

となる。10種類の把持方法でそれぞれ3回成功するまでタスクを行う。MRを用いることでPC画面に投影する場合よりも空間的な配置を認識しやすくなる上に、仮想手と自身の手の位置が一致するためタスクに取り組みやすくなることが期待される。図1の物体把持タスクではオブジェクトの上方から把持することを求められた。一方、MRタスクではハンドトラッキング精度を向上させるためにオブジェクトを下方から把持することを求められる。HoloLens 2では頭部のセンサでハンドトラッキングを行う。そのため下方からの把持にすることで手のひら側からトラッキングを行い、自身の手で指関節が隠れることを防ぐことで精度向上が期待できる。

MR物体把持タスクを健常者8名に対して行った。得られた8人の把持動作中の関節角度データに対してPCAとVarimax回転を適用してMR物体把持タスクにおける標準シナジーを抽出した。こうして得られたシナジーと赤井田らの通常VR空間でのLeap Motion Controller (LMC) 物体把持タスクで得られたシナジーを比較した。シナジーの比較には類似度を用いた。類似度の計算は以下の式で求められるコサイン類似度を用いた。

図3にLMCとMRの物体把持タスクで得られた把持動作データから抽出された標準シナジーを示す。W1, W2, W3では類似度が高くMRであってもLMCの場合と同様のシナジーが得られた。一方でW4は類似度が低くなる結果となった。

LMCでは親指の協調運動を表すシナジーが現れていたが、MRでは親指の協調を表すシナジーは現れなかった。表1にLMCとMRでの

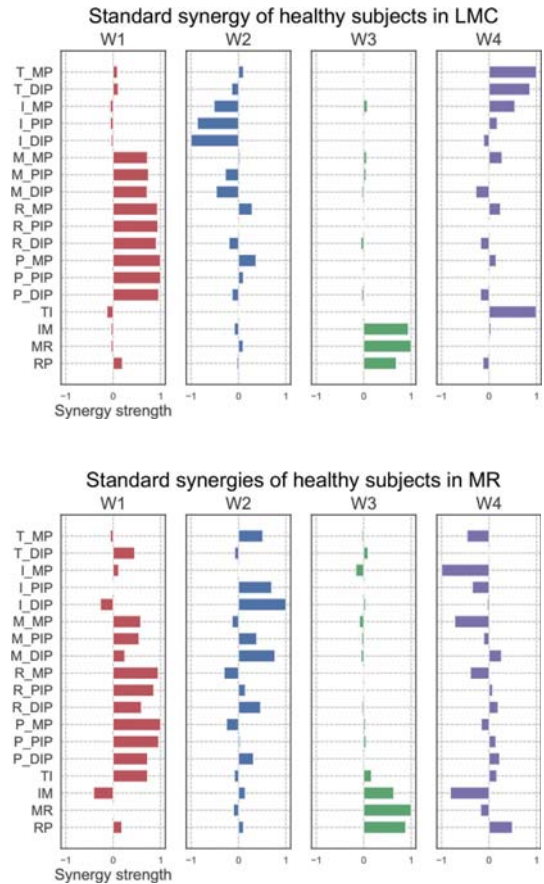


図3 物体把持タスクから抽出された標準シナジー

表1 タスクにかかった時間の平均とミス回数の平均

|     | 平均時間 [s]   | ミス回数     |
|-----|------------|----------|
| LMC | 220.9±67.7 | 12.4±6.3 |
| MR  | 216.1±67.4 | 6.7±3.7  |

タスク完了にかかった時間の平均とミス回数の平均を示す。完了時間にはほとんど差は現れなかった。ゆえにMR物体把持タスクではLMC物体把持タスクと同等の時間効率でタスクが行えることが示された。一方でミス回数はMRの方が5.7回少ない結果となった。このことからMRタスクの方がミスしにくく、取り組みやすいタスクになったことが示された。

異なるシナジーが現れた要因としては大きく二つの可能性が考えられる。一つ目はタスクを変更したことで手の動きが変化した可能性である。オブジェクトをつかむ方向を下方からに変更したことと、MR空間でのタスクに置き換えたことで被験者の手の使い方が変化した可能性がある。二つ目はHoloLens 2のハンドトラッ

キング精度の問題である。MR 物体把持タスクでは親指の協調運動を表すシナジーが現れなかった。ゆえに親指の関節位置を上手く認識できていなかった可能性が考えられる。MR 物体把持タスクでは LMC 物体把持タスクと比較してミス回数が 5.7 回減少した。この要因としては MR 空間にオブジェクトを配置することでオブジェクトとの距離感をつかみやすくなったことと、仮想手が被験者の手に重ねて表示されることが考えられる。MR を用いて空間上にオブジェクトが存在するかのように見せることで、二次元の PC 画面に仮想空間を投影するときと比べて日常に近い環境でタスクに取り組むことができたと考えられる。また LMC では自身の手から離れて表示される仮想手を MR で重ねて表示することでより直感的にタスクに取り組むことができたと考えられる。これらのことから MR を用いることでより取り組みやすいタスクを実現できたと考えられる。

#### [実験 2：運動予測能力評価タスク]

運動予測タスクでは、複数の物体の動きを見ながら適切な判断を下すことができるかについての運動認知能力評価することを目的とした。本タスクでは複数の異なる速度で移動するオブジェクトを適切なジェスチャーでタッチすることが求められる。ゲームの様子を図 4 に示す。

図 4 のように前方に 6 つの赤色と青色の仮想オブジェクトが表示される。その中からいくつかのオブジェクトが異なるタイミング、異なる速度で被験者へ向かって動き出す。オブジェク

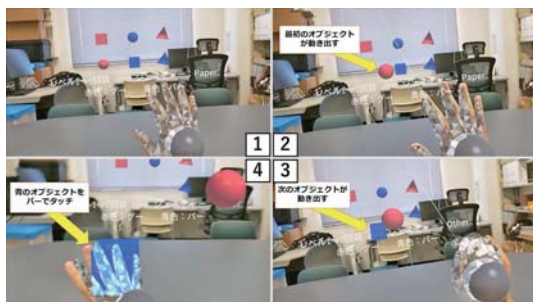


図 4 Mixed Reality を用いた運動予測能力評価

トの動き出すタイミング、速度はランダムに決定されるが、後半に動き出すオブジェクトほど速いスピードで移動する。被験者はそのオブジェクトに対して赤色のオブジェクトにはグー、青色のオブジェクトにはパーのジェスチャーでタッチすることが求められる。ジェスチャーを間違えた場合、タッチできずに通過した場合は失敗となる。動くオブジェクトの数は Task1 では 2 つ、Task2 では 3 つ、Task3 では 4 つとなる。オブジェクトの速度、位置を正しく認識してどのオブジェクトが先に自身のもとへ到達するかを予測する能力が求められる。これによる運動の認知と予測能力を評価する。

MR 運動予測タスクを健常者 3 名に対して行った。3 つのタスクをそれぞれ 5 回ずつ行い、被験者、タスク別の成功率を測定した。成功率は (正しいジェスチャーでオブジェクトをタッチした回数) / (動いたオブジェクトの総数) で計算される。またオブジェクトが動き出した順番通りに被験者へ到達した場合と、後から動き出したオブジェクトが先に動き出したオブジェクトを追い越した場合での成功率についても比較を行った。図 5 に被験者 3 名の MR 運動予測タスクのタスク別の成功率を示す。動き出すオブジェクトの数の違いによる成功率の傾向はみられなかった。この結果から健常者において動き出すオブジェクトの数はタスク難易度には影響しないことが示唆される。次に、タスク中にオブジェクトの追い越しがあった場合となかった場合での成功率を比較したグラフを図 6 に示す。追い越しが発生した場合にはすべての被験者において成功率が低下した。

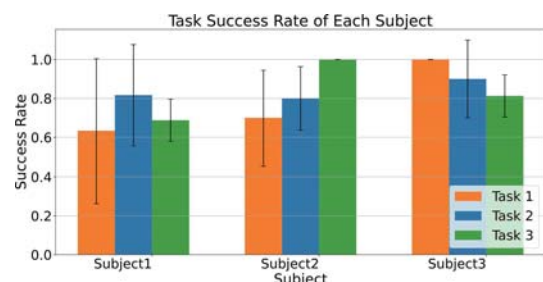


図 5 MR 運動予測タスクのタスク別の成功率

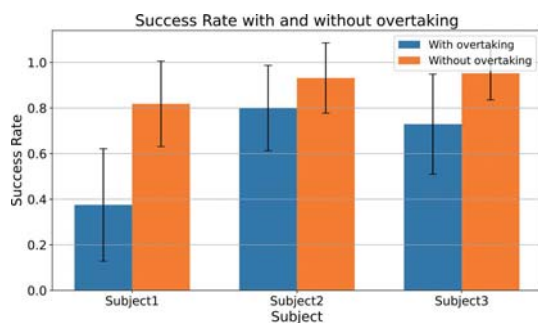


図6 タスク中にオブジェクトの追い越しがあった場合となかった場合での成功率

運動予測タスクでは、被験者間でタスク別の成功率に一定の傾向はみられなかった。このことから動き出すオブジェクトの数はタスクの難易度に大きな影響を与えないことが示唆される。一方で、オブジェクトの追い越しがあった場合となかった場合での成功率を比較するとすべての被験者で追い越しありの方が成功率が低くなった。追い越しありの場合はそれぞれのオブジェクトの位置・速度を正確に認識して、どちらのオブジェクトを先にタッチするか判断する必要がある。そのため、単純に動き出した順番でタッチする場合よりも難易度が上がったと考えられる。この結果から追い抜きの回数、タイミングを調整することでタスクの難易度を設定し、運動予測、空間認知、判断能力などの認知機能を評価できる可能性が考えられる。

### [実験3：慣性センサを用いた運動評価タスク]

手指評価と運動予測評価と共に、日常動作で重要となる歩行評価についてのシステム開発も行った。

2つのIMUセンサのみを使用した下肢運動学予測のための物理情報を取り入れた学習フレームワークを提案した。IMU測定値と人間の歩行バイオメカニカルモデルから導出された幾何学的物理制約を、ディープラーニングネットワークの複合損失関数に組み込むことで、データ駆動型計算を支援する。

システム開発の過程でロボットを活用した歩行評価によりシステムの動作性、実現可能性を

検証しながら開発を行った。またシステム開発後は健常者と慢性期脳卒中患者を対象とした下肢関節角度予測のための2つの異なるグループでの広範な実験により、物理法則埋め込みフレームワークの実現可能性を確認した。提案フレームワークは、学習データ一部しか利用できない場合でも一定の精度を維持できるのに対し、純粋な学習アプローチでは精度を保つために大量のデータサイズが必要であった。この部分の研究結果については現在 Journal 論文に投稿中である。

### [まとめ]

本研究では、Mixed Reality を用いて手指機能評価を目的とした物体把持タスクと認知機能評価を目的とした運動予測タスクを開発した。物体把持タスクでは先行研究と比較して一部異なるシナジーが抽出された。タスクを変更した点とデバイスのハンドトラッキング精度が要因である可能性が挙げられる。一方で、被験者のミス回数は先行研究と比較して減少した。現実世界と仮想世界を融合し、オブジェクトを空間的に配置されているように見せるというMRの特徴を活かすことで運動タスクへの取り組みやすさを向上させることができた。運動予測タスクでは、オブジェクトの数ではなく、オブジェクトの追い越しの有無が難易度に影響を与えることが示唆された。追い越しに着目した難易度設定を行うことで、被験者ごとの運動認知能力をタスクを通して評価できる可能性がある。

今後の課題として、物体把持タスクではデバイスのトラッキング精度の検証が挙げられる。デバイスのトラッキング精度を明らかにすることで、得られたシナジーがMRタスク特有のものであるか、認識精度の影響であるかを明確にする必要がある。運動予測タスクでは新たな難易度設定、評価指標を導入することで被験者の認知機能を定量的に評価することに取り組むことを考えている。

[成果の発表, 論文など]

1. Y. Sorimachi, H. Akaida, K. Kutsuzawa, D. Owaki, M. Hayashibe, Synergy-Based Evaluation of Hand Motor Function in Object Handling Using Virtual and Mixed Realities, *Sensors*, 25(7), 2080, 2025.
2. 反町優平, 沓澤京, 大脇大, 林部充宏, “Mixed Reality を用いた物体把持操作におけるシナジー抽出を介した手指運動機能評価”, 第 25 回計測自動制御学会 SI 部門講演会, Dec 2024
3. 鈴木俊輔, 反町優平, 沓澤京, 大脇大, 林部充宏, “リハビリテーション応用に向けた複数人のインタラクションが可能な Mixed Reality ゲームの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2025), June 2025