

令和 6 年 9 月 30 日現在

機関番号：22101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11391

研究課題名（和文）複合現実(MR)とHAL単関節を用いた上肢機能改善効果とその神経基盤の解明

研究課題名（英文）Effects of Mixed Reality (MR) and HAL Single Joint on Upper Limb Function Improvement and Its Neural Basis

研究代表者

松下 明 (Matsushita, Akira)

茨城県立医療大学・保健医療学部・講師

研究者番号：80532481

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：脳卒中後遺症などによる上肢麻痺患者を対象として、運動指示を画面上に表示するとともに、上肢運動を計測、評価するアプリケーションを開発し、それを用いたリハビリテーションプログラムの開発を行ってきた。本研究以前にはタッチディスプレイを用いた開発を行ったが、タッチの検出の不安定さを解消できなかった。今回、MR（複合現実）デバイスを用いて同様のアプリケーション開発を行った。上肢の認識は向上し、追従も良好となった。計測の精度や安定性について評価を行い、アプリケーションによる運動の評価方法について検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

リハビリテーションにおけるMR（複合現実）デバイスの利用可能性について、基礎的なデータを収集した。それにより、MRデバイスの特徴（利点や欠点など）を明らかにした。その結果に基づき、リハビリテーションプログラム（アプリケーション）の開発を行った。本アプリケーションは、運動を提示しつつ、同時に運動の計測を行い、評価を行うことを特徴としている。そのことから、パーソナルなりハビリテーションの提案など、新しいリハビリテーション手法の可能性を提示した。

研究成果の概要（英文）：An application has been developed for patients with upper limb paralysis due to stroke or other causes, which displays motion instructions on a screen as well as measures and evaluates upper limb movements, and a rehabilitation program has been developed using this application. Prior to this study, a touch display was used in the development, however, the instability of touch detection could not be resolved. In this study, we developed a similar application using the MR (Mixed Reality) devices. Recognition of the upper limb was improved and tracking was improved. The accuracy and stability of the measurement were evaluated, and the method of evaluating the motion by the application was discussed.

研究分野：リハビリテーション

キーワード：MR（複合現実） 上肢運動 リハビリテーション

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

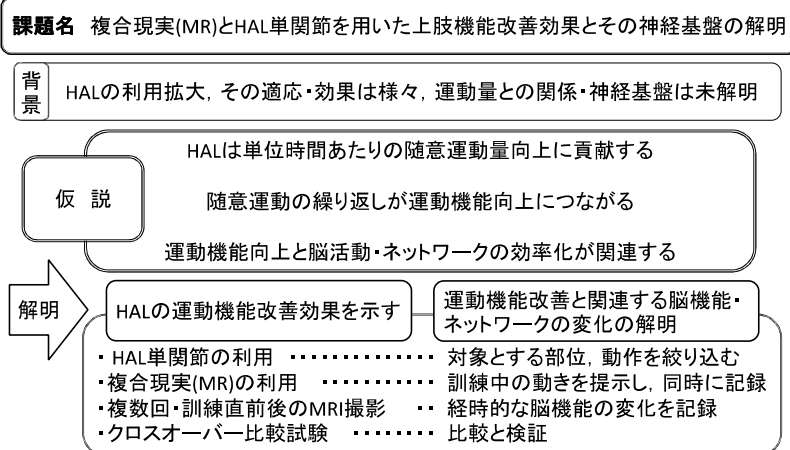
1. 研究開始当初の背景

随意運動に呼応した運動の補助は、機能回復訓練として行われており、その効果も示されている。ロボットスーツ HAL は、筋電図等の生体信号に基づく運動意思推定により、随意運動の補助を行うロボットであり、その効果については既存の研究報告が複数ある。しかし、適応疾患、使用方法・期間に関しての一定した見解は得られていない。まだ症例の蓄積が十分でなく、厳密な症例比較研究が少なく、また、HAL による効果の神経基盤が不明確であることが一因と考えられる。

学術的問い

以上の背景に基づき、右図のような仮説と実証のプロセスを提案する。より限定した動き（右上肢のリーチング運動）を対象とし、訓練と同時に運動機能と運動量を同時計測する手法により、運動量と回復効果の関係を明らかにする。また、HAL の効果とその神経基盤の解明のため、MRI を複数回、頻回に撮影することとした。

MRI の複数回撮影は、非常に微細な MRI の変化に基づき計算される fMRI の信頼性向上に寄与するだけでなく、運動学習のダイナミクス（即時効果と持ち越し効果）という点から、HAL の効果の解明に寄与すると考えている。



2. 研究の目的

脳卒中に伴う片麻痺により随意運動が困難になった患者において、随意運動を繰り返し行う訓練により筋力や随意性の向上が期待されている。ロボットスーツ HAL (Hybrid Assistive Limbs) は、装着者の随意運動に呼応して運動を補助する装置で、HAL を用いた運動機能改善の報告はあるが、その効果のメカニズムは未だ明確ではなく、その解明が求められている。

今回、HAL を用いた機能回復訓練を通して、運動量と脳機能ネットワークに着目し、HAL による上肢機能改善効果を明らかにすると共に、その背景にある脳機能ネットワークの解明を目的とする。

対象は脳卒中後の片麻痺患者とする。HAL 単関節を肘関節に、複合現実(MR)デバイスを頭部に装着し、MR デバイスで表示される指示に従い、対象物を目指してリーチング運動を行う課題を用いる。課題は、徐々に難易度を上げるなどして上肢運動の困難感をコントロールしながら、範囲、速さ、精度などに基づき得点を加算し、モチベーションを保つようなプログラムとする。評価は、運動機能評価・機能的 MRI、訓練中の運動量、精度などを用いて行う。初年度は健常者も含め実現可能性を評価する。この結果に基づき、次年度以降にクロスオーバー比較試験を行い、上肢機能改善効果と脳機能ネットワークの関連を解析し、HAL の効果ならびに関連する脳機能ネットワークを実証する。

3. 研究の方法

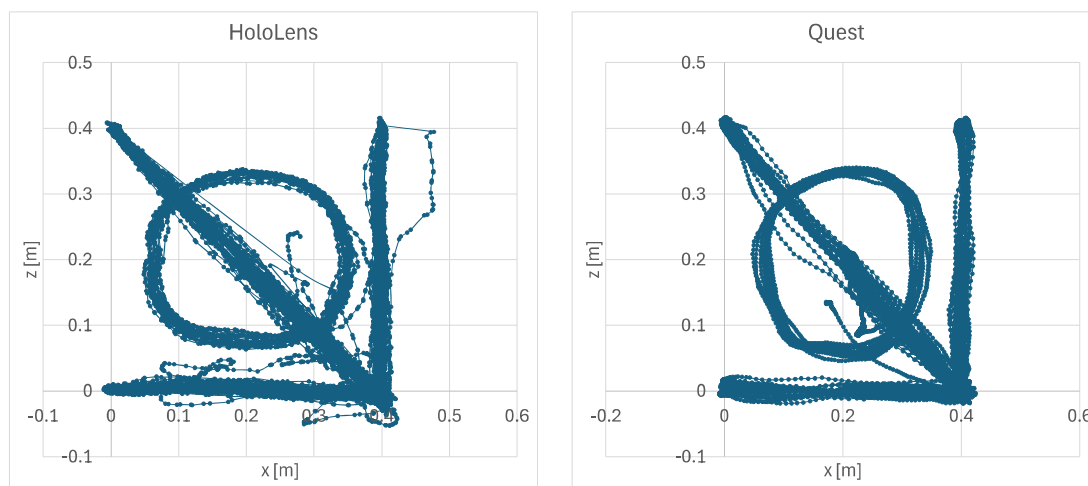
研究は、使用するデバイスの選定、アプリケーションの開発、評価指標の選定、臨床試験の順に進めることとした。研修開始当時は、Microsoft HoloLens(第1世代)の利用を想定していたが、HoloLens2(以下、HoloLens)が販売され、より高性能であったため、このデバイスを利用することとした。また、フレームワークは、Mixed Reality Tool Kit(以下、MRTK)を利用し、Unity上での開発を開始した。前段の研究で課題であった、利用者の手の認識精度は向上しており、その点で当初の課題はクリアできた。しかし、動きが加わると、特に動きが速い場合に遅延が観察された。検出された手に連動するマーカーの位置をデバイスで計測させたところ、直線的な運動であっても、不安定な軌跡を描くことが判明した。そのため、アプリケーションの改良を加えつつ、実行時の計測遅延の改善を試みた。これら補正により、直線的な動きを実現できるようになった。一方、不安定なサンプリング間隔に起因すると考えられる遅延については、使用するグラフィックの削減などの対策を行ったが、十分な解消には至らなかった。代替手段として、記録された画像情報をオフラインで解析するなど試みたが、効果的な対応が困難であった。その結果、動きの計測には大きな誤差が残ることとなった。研究の目的から、高度な正確性を求めていなかったが、この時点では運動障害の評価の点からは、実用性に乏しいと判断した。

その後、新しいデバイスである Meta Quest3 (以下、Quest) が発売され、利用する機会を得た。課題であったサンプリング速度が向上し、手の動きに対する追従性能もよいように感じられた。そのため、Quest の利用を検討することとした。Quest 用のアプリケーション開発のため、フレームワークに Unity AR Foundation を利用するように変更した。それにより、あらためて新しいアプリケーションの開発を行うことになったが、それにより、ほぼ同じプログラムコードで HoloLens でも稼働するアプリケーションの作成が可能となった。

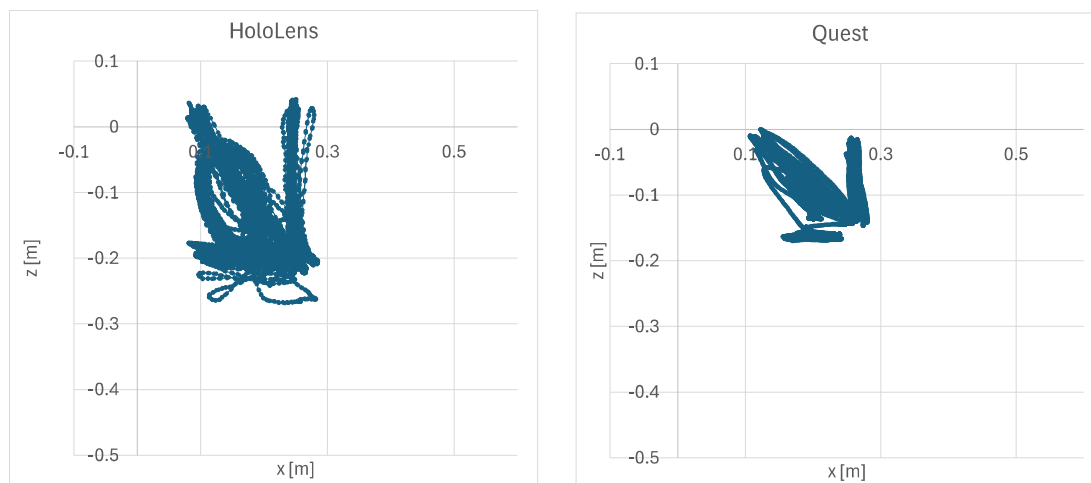
そこで、手の動きのサンプリングに関する実現可能性について、以下の検討を行った。

上記二種類のデバイスを利用して手の位置の計測を行い、その比較を行った。MR 空間上で検出した机の上に、20cm 間隔の 3 x 3 のグリッド (x: 横方向, z: 前後方向) を表示した。その右手前のグリッドの交点を基準にして、グリッド交点間を左右、前後、斜めの動きを行い、位置のサンプリングを行った。また、中心点から半径 10cm の円を描く運動を実施した。その結果から、サンプリング周波数、右手の軌跡、頭部 (カメラ) の軌跡、速度変化を得た。

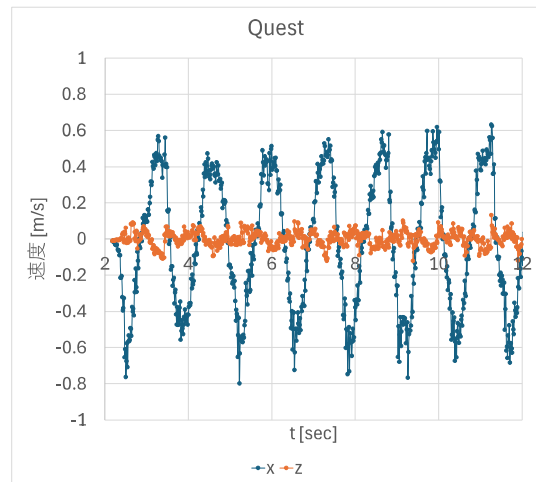
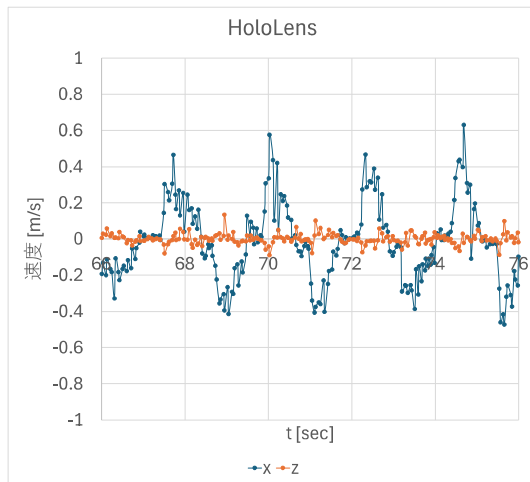
机面に投影された手の動きを下図に示す。



HoloLens では、計測用のマーカーの動きは不安定で、明らかな遅延が観察された。時には、マーカーの動きが跳躍しているようでもあった。それぞれのサンプリング間隔は、以下のものであった。HoloLens は平均 46.9 msec (21.3Hz)、標準偏差 23.7msec、Quest は平均 13.9msec (72.0Hz)、標準偏差 1.0msec であった。明らかに Quest は HoloLens に比べ、サンプリング速度が速く、測定間隔もより安定していることが分かった。今回の目的では最低でも 30Hz 程度の安定した計測周波数を目標としていたため、計測速度は要件をクリアしたと考えられた。表示される画像の上でも、Quest ではマーカーの動きは HoloLens よりもスムーズであり、マーカーの跳躍なども観察されなかった。しかし、より詳細に検討すると、速度変化に不自然な動きみられた。



上図は、手の運動時の頭部の動きを示している。手の動き (マーカーの動き) に応じた動きが観察されている。特に HoloLens では大きな動きとなっている。これは、視野角が狭いなどの理由で、手の動きを目だけでなく、頭を動かして追う必要があったためと推測された。



上図は、マーカーの速度変化の一部を示したものである。Quest においても、速度の変動が散見される。一方、HoloLens ではさらにその変化量は大きく、加えて、動きの速度も遅くなっていることが分かる。これは、表示の遅延に対応するため、HoloLens と同様の速度で手を動かすこと困難であったためと考えられた。

4 . 研究成果

当初の予定では、アプリケーションの開発から臨床試験までを予定していたが、デバイスの精度、特に手の運動の実行可能性の点で大きな問題の存在が明らかとなり、その開発、改良等に時間を要した。しかし、より汎用的なプログラムの開発ができ、今後発売される、より高度化されたデバイスに対応できるような基盤を構築できた。また、その実現を目指す上でも、貴重なデータ、経験を得られ、今後に向けて大きな足掛かりとなった。動きの不自然な速度変化については、障害に応じた手の動きが示す動きの変化、速度変化に対して対応できる範囲であるかの検証を行うなど、今後も開発を継続し、簡易的で、運動と評価を同時に行えるリハビリテーション機器の可能性について、引き続き、開発、検証を継続していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Saotome Kousaku, Matsushita Akira, Eto Fumihiko, Shimizu Yukiyo, Kubota Shigeki, Kadone Hideki, Ikumi Akira, Marushima Aiki, Masumoto Tomohiko, Koda Masao, Takahashi Hiroshi, Miura Kosei, Matsumura Akira, Sankai Yoshiyuki, Yamazaki Masashi	4. 巻 99
2. 論文標題 Functional magnetic resonance imaging of brain activity during hybrid assistive limb intervention in a chronic spinal cord injury patient with C4 quadriplegia	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Clinical Neuroscience	6. 最初と最後の頁 17～21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jocn.2022.02.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishiyama Sumire, Shibata Yasushi, Ayuzawa Satoshi, Matsushita Akira, Matsumura Akira, Ishikawa Eiichi	4. 巻 -
2. 論文標題 The Modifying of Functional Connectivity Induced by Peripheral Nerve Field Stimulation?using Electroacupuncture for Migraine: A Prospective Clinical Study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Pain Medicine	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pm/pnac048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yozu Arito, Kaminishi Kohei, Ishii Daisuke, Omura Yuichiro, Matsushita Akira, Kohno Yutaka, Chiba Ryosuke, Ota Jun	4. 巻 35
2. 論文標題 Effects of medication and dual tasking on postural sway in Parkinson's disease: A pilot case study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 889～897
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2021.1948353	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石山 すみれ、柴田 靖、鮎澤 聡、松下 明、松村 明、石川 栄一	4. 巻 48
2. 論文標題 片頭痛に対する鍼治療の作用機序を機能的MRI で解析する	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本頭痛学会誌	6. 最初と最後の頁 155～158
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.50860/jjho.48.1_155	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 YAMAMOTO Satoshi, ISHII Daisuke, KANAE Kyoko, ENDO Yusuke, YOSHIKAWA Kenichi, KOSEKI Kazunori, NAKAZAWA Ryo, TAKANO Hanako, MONMA Masahiko, YOZU Arito, MATSUSHITA Akira, KOHNO Yutaka	4. 巻 -
2. 論文標題 The Progress of the Gait Impairment and Brain Activation in a Patient with Post-stroke Hemidystonia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Therapy Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1298/ptr.E10032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Shimpei, Yonghi Lee, Matsumura Umi, Tsurusaki Toshiya	4. 巻 32
2. 論文標題 Diversity and regularity in infant crawling with typical development	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physical Therapy Science	6. 最初と最後の頁 483 ~ 488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1589/jpts.32.483	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 仲澤諒、吉川憲一、古関一則、松田智行、四津有人、松下明、富田和秀、河野豊	4. 巻 59(5)
2. 論文標題 神経・筋疾患患者に対するHybrid Assistive Limb(R)を用いた歩行運動処置を取り入れた入院リハビリテーションの効果	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 全国自治体病院協議会雑誌	6. 最初と最後の頁 833-837
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山本哲、吉川憲一、小関一則、石井大典、仲澤諒、高野華子、遠藤悠介、四津有人、松下明、河野豊	4. 巻 30(1)
2. 論文標題 パーキンソン病患者におけるHonda歩行アシストを用いた歩行訓練の即時的な効果	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 運動障害	6. 最初と最後の頁 23-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Oga K, Yozu A, Kume Y, Seki H, Tsuchiya N, Nakai K, Matsushita A, Mutsuzaki H, Kohno Y	4. 巻 32
2. 論文標題 Robotic rehabilitation of the paralyzed upper limb for a stroke patient using the single-joint hybrid assistive limb: a case study assessed by accelerometer on the wrist	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Ther. Sci.	6. 最初と最後の頁 192-196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 仲澤諒, 吉川憲一, 古関一則, 松田智行, 四津有人, 松下明, 富田和秀, 河野豊	4. 巻 59(5)
2. 論文標題 神経・筋疾患患者に対するHybrid Assistive Limbを用いた歩行運動処置を取り入れた入院リハビリテーションの効果	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 全国自治体病院協議会雑誌	6. 最初と最後の頁 833-837
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------