

Mixed Reality デバイスを用いた上肢の運動機能と認知機能の 定量化に関する研究

Quantification of Upper Limb Motor Function and Cognitive Function Using Mixed Reality Device

○多田憲矢*, 沓澤京*, 大脇大*, 林部充宏*

○Kenya Tada*, Kyo Kutsuzawa*, Dai Owaki*, and Mitsuhiro Hayashibe*

*東北大学

*Tohoku University

キーワード : 複合現実 (Mixed Reality), リハビリテーション (Rehabilitation), 作業療法 (Occupational Therapy), 運動機能 (Motor Function), 認知機能 (Cognitive Function)

連絡先 : 〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 機械知能共同棟 (A15) 5F 503
多田憲矢, Tel.: 022-795-5682, E-mail: tada.kenya.p3@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

平均寿命の延伸と出生率の低下により世界的に高齢化が進行している。特に日本は高齢化率が世界の中でトップであり総人口に占める高齢者の割合が2019年10月時点で28.4%となっている^{1) 2)}。同時に少子化の流れも進んでおり将来様々な分野での働き手不足が懸念される。医療・福祉の分野でも治療やリハビリテーションを必要とする人の増加に対して医者や療法士の数の不足が予想される。現在、作業療法や理学療法は患者と療法士が1対1で行われるのが主流であるが、この方法では効率が悪いためリハビリテーションの自動化が求められている。それに加えてCOVID-19の世界的な広がりに伴い遠隔医療や在宅でのリハビリテーションの必要性が高まっている。

リハビリテーションの分野では自動で作業療

法や理学療法を行い療法士のサポートをするシステムの研究が数多くされている。ウェアラブルセンサや深度カメラからのデータに基づいて患者の動きをリモートで評価できる運動の自動評価システム^{3) 4)}に関する研究や、リハビリテーションにVR技術と呼ばれる仮想現実技術を用いた研究などが行われている。VR(Virtual Reality)技術を用いた例ではHeiyanthuduwaらが高齢者の全身機能のリハビリを目的としたVRベースの在宅医療理学療法システムを開発した⁵⁾。WangらはVRヘッドセットとフォースフィードバックグローブを組み合わせた身体的および精神的リハビリテーションのシステムを開発した⁶⁾。またVRデバイスを使用するリハビリテーションにはゲーミフィケーションという考え方が用いられることが多い。ゲーミフィケーションは「ゲーム以外のコンテキストでのゲームデザイン要素の使用」と定義され⁷⁾、さまざまな

状況でモチベーションを高めるための手法として使用されてきた。従来のリハビリテーションでは単調な動作を繰り返すため患者のモチベーションの維持が難しいという課題がある。しかしリハビリテーションにゲーミフィケーションを導入しゲーム要素を追加することで患者は遊んで楽しんでいる間にリハビリテーションを行い、同時に治療へのモチベーションも維持することができる。Pereiraらは手のリハビリテーションのためのVRシリアスゲームを開発し⁸⁾、Wuらは上肢リハビリテーションのためのVRトレーニングシステムを開発した⁹⁾。VRは高い臨場感や没入感、楽しさを提供することが可能であり、様々な分野で利用が進められている。しかしながらVRは視界を完全に遮断して映像を投影するため、歩行時や身体の動作時に周囲の環境との接触や転倒の危険性を伴う。またVR酔いの懸念も存在する。

そこで我々は、現実の視覚情報を維持した上で対話可能なデジタルオブジェクトを表示させる技術であるMR(Mixed Reality, 複合現実)技術をリハビリテーションに用いようと試みた。本研究の目的はMR-HMD(Head Mounted Display)のみを用いて予測能力、認知能力、反射能力および運動機能などの複数の機能を測定し定量的に評価を行うシステムの開発である。今回、上肢の運動機能と認知機能に着目し、MR-HMDを使用したリーチングタスクにおける視線情報、指先の軌道、頭の軌道を測定するゲーム環境を開発し測定を行った。またMRデバイスを用いた作業療法向けのタスクとしてハノイの塔とジェンガを試作したのでその結果も示す。

2. Mixed Reality

MRとは現実世界と仮想世界を融合させた技術で、AR(Augmented Reality, 拡張現実)技術を発展させた技術である。MRは現実世界を3次元空間としてデジタル情報化し、現実の視覚

情報を維持した上で対話可能なデジタルオブジェクトを表示させる。ARとの大きな相違点は現実世界にオーバーレイされた仮想オブジェクトを自由に操作できる点である。つまりMRの世界では実物体と仮想物体が共存し、相互作用する。現実環境に生きる我々にとってこの特徴はリハビリテーションの観点ではVRよりも有用であると考えられる。VRの場合、治療時に見える環境と実生活で過ごす環境に差がある。一方でMR-HMDは実世界を見ることができる透明なレンズにホログラムを投影するため、実際の物理的な空間を意識しつつ自由にアクティブな動きをすることができる。また普段治療を行う病院のリハビリテーションエリアや自宅のリビングなど見慣れた環境のもとでトレーニングを行える。

MR-HMDを用いた研究事例としてバランスボードおよびKinectとHoloLens(Microsoft社製)を併用した、姿勢リハビリテーションのサポートを行うアプリケーションの開発に関する研究¹⁰⁾や認知障害を持つ人のためのMR技術を利用した学習に関する研究¹¹⁾がある。前者はMR-HMDに加え複数の外部機器を使用したシステムであり、計測を行うために広いスペースが必要である。後者は認知機能の改善に着目した研究である。現在MR-HMDのみを用いた予測能力、認知能力、反射能力および運動機能など複数の観点について測定および評価を行った研究はまだない。今後のリハビリテーション分野では複数機能の測定・評価やその自動化システムの需要は増えていくと考える。

3. 手法

3.1 ハードウェア

MR-HMDにはMicrosoft社のHoloLens2¹²⁾を使用した。Fig. 1参照。HoloLens2は眼鏡のレンズ越しに仮想環境を投影し直接現実世界を見ることができる光学シースルー型のHMDで



Fig. 1: HoloLens2 を用いたタスクの様子. Play scene using HoloLens2

あり, PC やスマートフォン, バッテリーなどの外部機器との接続が不要で, 完全コードレス下で使用できる. HoloLens2 は 9 軸 IMU センサや深度カメラ, 赤外線カメラを搭載しており両手の手指の関節トラッキングやアイトラッキングに対応している.

3.2 ソフトウェア

HoloLens2 へ実装するアプリケーションの開発には, Unity3D を使用した¹³⁾. Unity3D はゲーム・アプリ開発環境であり, PC, ゲーム機, モバイルデバイス, Web サイトなどのアプリケーションの制作が可能である. プログラミング言語には C# を用い, PC 上でアプリケーションを開発した後, HoloLens2 に実装した. また MR 向けのさまざまな UI やインタラクションを備えたクロスプラットフォーム開発ツールキットである MRTK (Mixed Reality Toolkit) を使用した. なお Unity3D は左手座標系であり, 座標軸はユーザの正面方向を Z 軸の正方向, 右手方向を X 軸の正方向, 鉛直上向きを Y 軸の正方向とする. X 軸および Z 軸は地面に対して水平である.

3.3 リーチングタスクの概要

リーチングタスクは Fig. 2 に示すように机の上に表示された仮想オブジェクトを人差し指でタッチしていくものである. 仮想オブジェクト

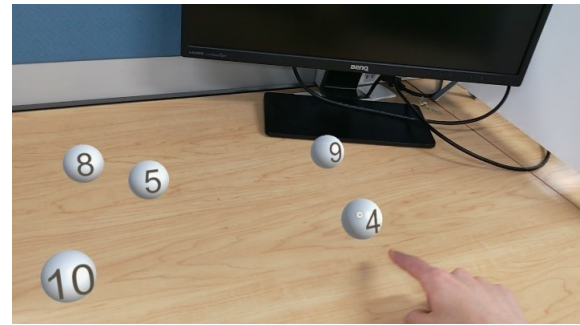


Fig. 2: リーチングタスク中の視界. Reaching task (<https://youtu.be/TFPM-7vdXIk>)

は全部で 10 個あり, それぞれ 1 から 10 までの数字が書かれている. 数字通りにタッチすることでオブジェクトは消えていき, 順番の異なるオブジェクトをタッチするとオブジェクトは消えない. 被験者は仮想オブジェクトを順番通りに全て消していくタスクを各手 5 回ずつの計 10 回行った. オブジェクトの配置位置は左右の手で共通にした. 実験は運動機能および認知機能に障害のない健康な 7 名の被験者 (23. 1 ± 1.5 歳, 男性 7 名 右利き 5 名, 左利き 2 名) に対して行った. 被験者にはできるだけ早くオブジェクトに触れるように指示を行い, リーチングタスク中の視線や指先, 頭の軌道に加え各オブジェクトを消すのに要した時間を HoloLens2 で測定した. 被験者の正面方向には現在のタスクが何回目であるかに加え, 間違っってオブジェクトに触れた回数および経過時間が表示されており, 被験者はタスク中に確認することが可能である.

4. 結果

4.1 リーチングタスクの測定結果

被験者 7 名の内 6 名は MR-HMD の使用経験がほとんどないまたは初めての経験であった. リーチングタスクの仮想オブジェクトは横幅 0.8 [m], 奥行き 0.5 [m] の長方形範囲内で表示させていたが, オブジェクトが配置された場所によってはオブジェクトがなかなかうまく消えないことがあった. Fig. 3 に示す指先の軌跡にあるよう

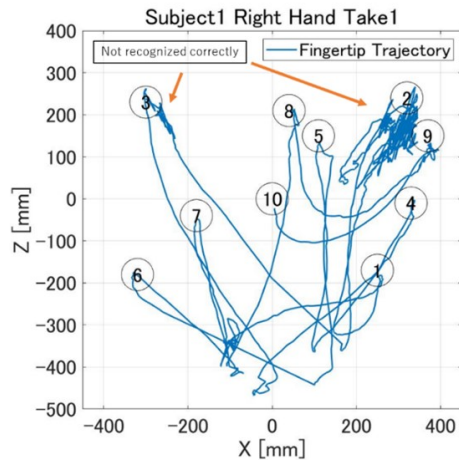


Fig. 3: オブジェクトの配置位置による認識精度。
The back side of the left and right sides are not Hand-Tracked properly

に左右の奥側に表示されたオブジェクトが顕著であり、被験者によっては1つのオブジェクトを消すのに20秒以上要していた。これは人差し指の先端がHoloLens2のカメラから自身の手で隠れてしまい正しい位置を認識できなかったことが原因と考えられる。そのため被験者によっては特定位置のオブジェクトがなかなか消えず、リーチングタスクのプレイ時間が長くなった。

プレイ時間の評価において上記の影響を減らすため、各タスクに要した時間ではなく各オブジェクトを消すのに要した時間で評価を行った。1つのオブジェクトを消すのに10秒以上要したものを除き、各オブジェクト間の平均移動時間を求めた。その結果をTable 1とFig. 4に示す。利き手と非利き手で比較を行うと多くの被験者(7名中5名)で利き手の方がわずかに短い時間でオブジェクト間を移動していた結果が得られた。

被験者間で指先の軌跡を比較するとFig. 5に示すように、ある被験者はオブジェクトを消すごとに一度指先を体の方に近づけており、ある被験者は次のオブジェクトの方向に指先を移動し始めていた。この結果から、前者は1オブジェクト毎に次のオブジェクトの位置を探している傾向があるのに対して後者は全体のオブジェクトの位置を見ながら次の行動を考えている傾向

Table 1: 各オブジェクト間の平均移動時間。Average reaching time between each object

Subject		1	2	3	4	5	6	7	Average
Dominant hand (second)	Take1	2.64	2.26	1.87	3.30	2.12	1.06	2.16	2.20
	Take2	2.19	1.62	1.66	1.84	1.39	1.14	1.61	1.64
	Take3	1.42	1.36	1.24	1.75	1.31	0.96	2.71	1.53
	Take4	2.83	2.23	1.99	2.26	2.07	1.07	1.69	2.02
	Take5	2.19	2.52	1.17	1.96	1.31	1.27	1.20	1.66
	Average	2.26	2.00	1.59	2.22	1.64	1.10	1.87	1.81
non-Dominant hand (second)	Take1	3.58	2.26	3.91	2.74	1.51	1.57	1.56	2.45
	Take2	2.83	2.65	3.16	1.67	1.49	1.19	1.91	2.13
	Take3	2.88	2.27	2.82	1.49	1.24	1.07	2.50	2.04
	Take4	2.36	1.78	2.26	1.49	1.68	1.22	1.89	1.81
	Take5	2.48	1.31	1.51	1.60	1.38	1.35	1.71	1.62
	Average	2.83	2.06	2.73	1.80	1.46	1.28	1.91	2.01

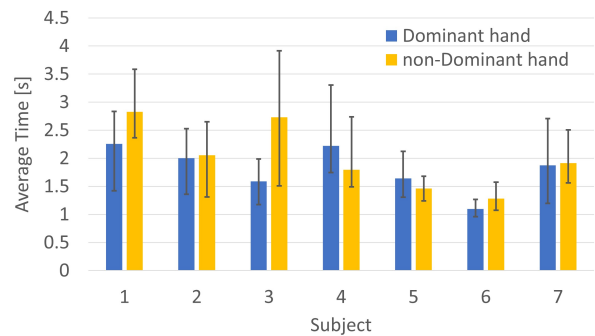


Fig. 4: 利き手と非利き手の比較。Comparison of dominant and nondominant hands

があることが読み取れる。従って前者よりも後の方がより最短経路に近い経路を通っており、各オブジェクト間の移動時間が短く、指先の移動距離も短かった。

次にアイトラッキングの結果をFig. 6に示す。HoloLens2のアイトラッキングでは2台の赤外線カメラにより左右の視線が観測され、1つの合成された視線が記録される。視線の原点と視線の方向からオブジェクトが表示される机との交点を求め軌跡を描いた。図よりオブジェクトに触れた瞬間はオブジェクト付近に視線があることがわかる。視線の変動の傾向として各タスクの前半は表示されているオブジェクトの数が多く、次のオブジェクトの位置を把握し切れていないため視線を前後左右に動かすことが多かった。一方で各タスクの後半はオブジェクトの数が少なくなっているため、次のオブジェクトの方へ視線をまっすぐ動かすことが多かった。

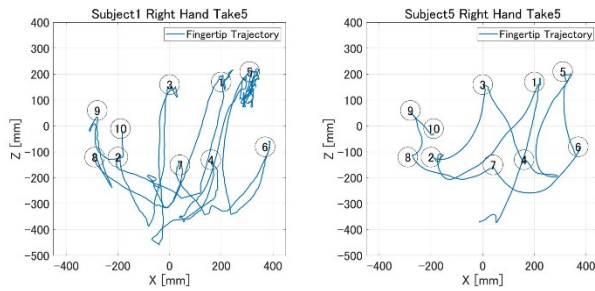


Fig. 5: 被験者間の指先の軌跡の比較. Differences in trajectories between subjects

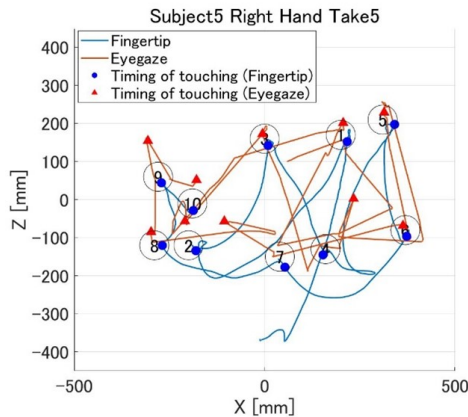
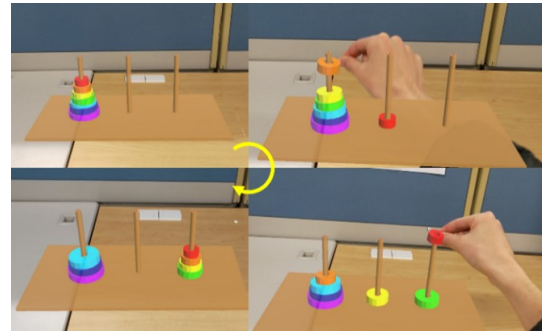


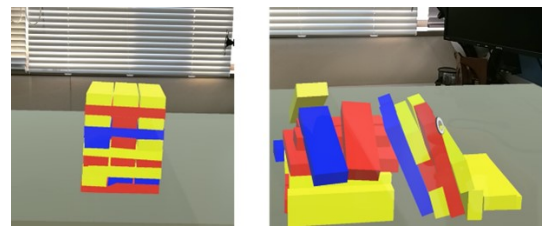
Fig. 6: 指先と視線の軌跡. Fingertip trajectory and Eye gaze

4.2 作業療法タスク

Fig. 7にMR環境下での作業療法向けのタスクとして試作したハノイの塔とジェンガを示す. MR環境下で作業療法を行うことにより, 療法士はトレーニングごとに必要な作業療法用のアイテムを準備する必要がなくなりアプリケーションを起動するだけで治療を行えるようになる. さらに実際の作業療法では, 被験者ごとにレベルを調整することが難しいが, MRデバイスを用いれば, ゲームのレベルを被験者の身体状況や治療の進行度合いに合わせて自由にカスタマイズできる. また, HoloLens2は被験者のプレイ状況を記録・数値化できるため, 訪問リハビリテーションへの利用に加え, 療法士一人で複数の患者を同時に治療することも可能となる.



(a) ハノイの塔. Tower of Hanoi
(https://youtu.be/xkTDweg_lMY)



(b) ジェンガ. Jenga
(<https://youtu.be/fGdDEuIL9kg>)

Fig. 7: MR 作業療法タスクの例. Tasks for occupational therapy in the MR environment

5. 結言

本研究では Mixed Reality デバイスを用いたリーチングタスクの開発・測定と作業療法向けタスクの試作を行った. リーチングタスクでは HoloLens2 に搭載された各種トラッキング機能により被験者の手指および視線の変動を測定し, 左右の手指間や被験者間でタスク遂行の違いを確認することができた. しかしハンドトラッキングにおいては指先がカメラに隠れる位置にある場合, 指先の位置が正しくトラッキングできず, オブジェクトとの接触判定がされないことも確認された. これは仮想オブジェクトが地面に水平な面である机の上に配置されており, 腕を伸ばした際に指先が手で隠れるような位置関係となったことが原因である. 地面に垂直な面, つまり壁にオブジェクトを配置するようなタスクに変更することにより手指全体がカメラから認識され, 正しくオブジェクトとの接触判定が行われると考える. また MR 環境下における作業療法向けタスクは今後, 被験者の運動情報を測

定, 記録する機能を組み込んでいくことによりリハビリテーションにおけるMRデバイスの可能性や有用性, 活用の場がさらに広がると思われる。

今後は実際の作業療法の現場で使用される検査手法やタスクを模倣したアプリケーションの開発を行い, MR環境下での検査や治療に効果が見られるかを検証する予定である。

参考文献

- 1) W. He, D. Goodkind, P. Kowal: An Aging World: 2015 International Population Reports, (2016)
- 2) Statistics Bureau, Ministry of Internal Affairs and Communication, Chapter 2: Population and Households, Japan Statistical Yearbook 2022, [Retrieved 6 January 2022], <https://www.stat.go.jp/data/nenkan/71nenkan/zenbun/jp71/book/html5.html>
- 3) R. de Souza Baptista, A. P. L. B? and M. Hayashibe: Automatic Human Movement Assessment With Switching Linear Dynamic System: Motion Segmentation and Motor Performance, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 25, no. 6, pp. 628-640, (2017)
- 4) A. González, P. Fraise and M. Hayashibe: A personalized balance measurement for home-based rehabilitation, 2015 7th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER), pp. 711-714, (2015)
- 5) T. A. Heiyanthuduwa, K. W. Nikini Umasha Amarapala, K. D. Vinura Budara Gunathilaka, K. S. Ravindu, J. Wickramaratne and D. Kasthurirathna: VirtualPT: Virtual Reality based Home Care Physiotherapy Rehabilitation for Elderly, 2020 2nd International Conference on Advancements in Computing (ICAC), pp. 311-316, (2020)
- 6) Q. Wang, B. Kang and P. O. Kristensson: Supporting Physical and Mental Health Rehabilitation at Home with Virtual Reality Headsets and Force Feedback Gloves, 2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), pp. 685-686, (2021)
- 7) Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., Nacke, L.: From game design elements to gamefulness: defining ‘gamification’, Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments, (MindTrek ’11), ACM pp. 9-15, (2011)
- 8) M. F. Pereira, C. Prahm, J. Kolbenschlager, E. Oliveira and N. F. Rodrigues: A Virtual Reality Serious Game for Hand Rehabilitation Therapy, 2020 IEEE 8th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH), pp. 1-7, (2020)
- 9) X. Wu, H. Liu, J. Zhang, W. Chen: Virtual reality training system for upper limb rehabilitation, 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 1969-1973, (2019)
- 10) M. Pezzera, E. Chitti and N. A. Borghese: MIRARTS: A mixed reality application to support postural rehabilitation, 2020 IEEE 8th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH), pp. 1-7, (2020)
- 11) F. Garzotto, E. Torelli, F. Vona and B. Arunanno: HoloLearn: Learning through Mixed Reality for People with Cognitive Disability, 2018 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR), pp. 189-190, (2018)
- 12) “HoloLens2”, Microsoft, [Retrieved 6 January 2022], <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/hardware>
- 13) “Unity”, Unity Technologies, [Retrieved 6 January 2022], <https://unity.com/ja>