

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：52301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11594

研究課題名（和文）感覚相互作用を用いた脳卒中患者のリハビリ向けのVR学習支援システムの開発

研究課題名（英文）Development of VR learning support system for rehabilitation of stroke patients using sensory interaction

研究代表者

崔 雄（CHOI, WOONG）

群馬工業高等専門学校・電子情報工学科・准教授

研究者番号：30411242

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、視覚、触覚、聴覚の刺激のフィードバックを提供するVRシステムを構築した。VRシステムは、被験者がVR環境で木琴を演奏したときに、視覚、触覚、聴覚の同期刺激を提供した。さらに、さまざまな感覚刺激条件下での仮想手の視覚的存在の影響も評価した。本実験は（1）自由な動きがさまざまなアクティブな動きの条件で最も強い錯覚をもたらし（2）触覚刺激がVHIに対する聴覚刺激よりも重要な影響を及ぼし（3）視覚、触覚、および聴覚の多感覚統合が最も強く誘発されることを示した。多感覚フィードバックによる自由なアクティブな動きはVR空間で幻想的な所有権を誘発するための最も効果的な方法であると結論できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

上肢の片麻痺を伴う脳卒中患者に対するリハビリテーションの方法として感覚相互作用を用いたVHIを提示する手法はあまりない。本研究の学術的意義や社会的意義はVHIにより視覚・聴覚・触覚刺激を同時に提示することで身体イメージの回復を促す点である。VHIを用いた脳卒中患者に対するリハビリテーションの効果的な治療方法にとどまらず、VR技術を用いた「身体全体の感覚運動機能の適正化のための新しい介入法の開発」の方向性を示すことに結果と意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we constructed a VR system that provides feedback on visual, tactile, and auditory stimuli. The VR system provided synchronous visual, tactile, and auditory stimuli when the subject played the xylophone in a VR environment. We also evaluated the effect of the visual presence of the virtual hand under various sensory stimulus conditions. In this experiment, (1) free movement gave the strongest illusion under various active movement conditions, (2) tactile stimuli had a more important effect than auditory stimuli for VHI, and (3) multisensory integration of visual, tactile, and auditory stimuli induced strongest illusion. We can conclude that free active movement with multisensory feedback is the most effective way to induce the ownership in VR space.

研究分野：仮想現実

キーワード：VR学習支援システム 感覚相互作用 リハビリ

## 1. 研究開始当初の背景

百数十万人の脳卒中患者の治療・リハビリが地図もコンパスもなく密林をさまよう様な試行錯誤に委ねられている。Nudoらは麻痺を伴う脳卒中患者の手をリハビリすることで、手の支配領域は機能的に再構築されることを報告した。神経系への入力を変えることで脳の可塑的变化が誘導され、その効果が慢性期の脳卒中患者においても機能回復をもたらすことが臨床的に示されてきている。また、感覚をバーチャルハンドに再現し、視覚と触覚の刺激を与えることにより身体イメージの拡張に効果的である報告もある。従って、本研究では、手を動かす運動が脳の可塑的变化に効果的であることに着目し、上肢の片麻痺を伴う脳卒中患者に対する定量的な視覚・聴覚・触覚刺激を提示するバーチャルハンドを使うリハビリテーションの方法と VR 学習支援システムを提案した。

## 2. 研究の目的

本研究では、上肢の片麻痺を伴う脳卒中患者に対するリハビリテーションの方法として VR 空間内の感覚相互作用を用いた脳卒中患者のリハビリ向けの学習支援システムの開発を目指す。

脳卒中患者に視覚・聴覚・触覚刺激を同時に与えるために力覚提示装置を用い、バーチャル木琴を叩く負荷運動ができる学習支援システムを開発する。健康な手で 3 次元力覚デバイスのグリップを握り、被験者の麻痺した側の手がバーチャルハンドにより動くことでミラーセラピーを再現する。そのフィードバックによりミラーセラピーのリハビリ効果を高める。脳卒中患者は運動機能の回復後も身体所有感に問題を残す場合がある。被験者の手をバーチャルハンドにより提示することで身体所有感の回復を促す。上肢の片麻痺患者の感覚と運動の相互作用を計測及び評価することにより、効率的な運動の学習支援ができる。

## 3. 研究の方法

脳卒中患者のリハビリテーションのために力覚提示装置を用い、バーチャル木琴を叩く負荷運動を行うことにより、3D 立体視・聴覚・触覚刺激を同時に与える VR 学習支援システムを構築した。具体的には、視覚刺激をリフレッシュレート 120Hz に対応した液晶ディスプレイ (VG248QE、ASUS 社) により提示した (図 1)。また、触覚刺激の提示および空間位置座標の取得は、3 次元力覚インターフェイスデバイス (ファントム オムニ、ジオマジック社) によって行った。このデバイスは、最大 3.3 N、最大連続 0.88 N の力を提示することができた。本研究で用いるものは把持型のデバイスであり、ペン型のデバイスの先端部分の座標を取得することができた。聴覚刺激の提示にはステレオスピーカーを用いてバーチャル木琴を叩くときの音を再現した。

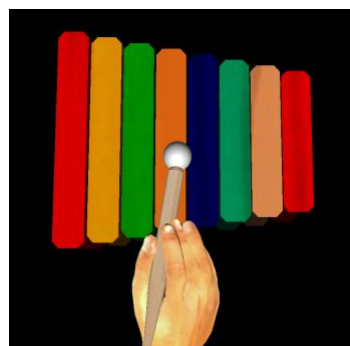
滑らかな随意運動を可能にする上肢リハビリのために感覚と運動の相互作用の正しい評価と適切な感覚刺激と運動ガイドが必要である。本研究では感覚と運動の相互作用の計測及び評価を行うために到達運動とトラッキング運動のシステムを構築した (図 2)。動的变化を伴う物体に対して運動制御を行なうため、到達運動とは異なり、ターゲットの速度知覚に基づく視覚運動制御と予測制御が必要になる。脳内の上肢運動機能と運動制御のモデルを定量的に評価することができる。本研究では VR 空間上で上肢を使用して、一定の速度で円運動をする VR ターゲットを被験者がトレーサーを用いてトラッキング運動を行う。VR ターゲットとトレーサーの誤差を分析することで、被験者の脳内の運動モデルを定量的に評価できる。トラッキング運動システムにおいても HTC 社の VIVE Pro HMD システムを利用することで、15 cm の運動半径を持つ VR ターゲットの速度と軌道方向を、それぞれ、0.01~2 Hz、0°~180°へ変更できる。

## 4. 研究成果

### (1) 3D 立体視・聴覚・触覚刺激を同時に与える VR 学習支援システム



(a)



(b)

図 1. (a) 構築したシステム (b) バーチャル木琴

人は単一の感覚情報だけではなく、複数の感覚情報を統合して世界を認識している。五感のうち、複数の感覚情報をユーザの動作に応じて実時間で統合・提示することにより、臨場感が高まる。視覚と触覚の相互作用を示す研究で「Rubber Hand Illusion (RHI)」が知られている。これは、

身体保持感覚を自身の身体以外の物体に転移させるものである。本研究では、ゴム手の RH1 を 3DCG、3次元音源、3D力学提示装置を用いてVR木琴システムにより実装した。このシステムでは、能動的な動きを可能にし、リアルタイムで同期した視覚、触覚および聴覚の刺激を双方向に提示できる。また、自分の手の大きさと一致する3D仮想手が特定の実験条件で表示される。被験者は、3D力学提示装置のペンの部分をにぎり、仮想の手を操作してVR木琴を演奏できる。被験者がVR木琴を打つとき、弾力性のある力学フィードバックを生成する。ステレオスピーカーでは、同期されたサウンドが再生される。本研究では、能動的にVR空間で身体感覚の延長を実現するためにVirtual Hand Illusion (VHI)を用いた。さらに、本研究のVHIを使用して、ユーザが、VR空間で現実感と没入感を向上させることが確認できた。私たちは、VR空間での体の所有権の強い没入感を誘導するために視覚的な刺激だけでなく、能動的な動きと同期する複数の感覚統合が重要であると結論付けた。また、VR空間での作業前の自由移動操作を実行すると、より強い没入感を生成することが分かった。

## (2) VR空間における感覚と運動のインタラクションを定量的に評価できるシステムの開発

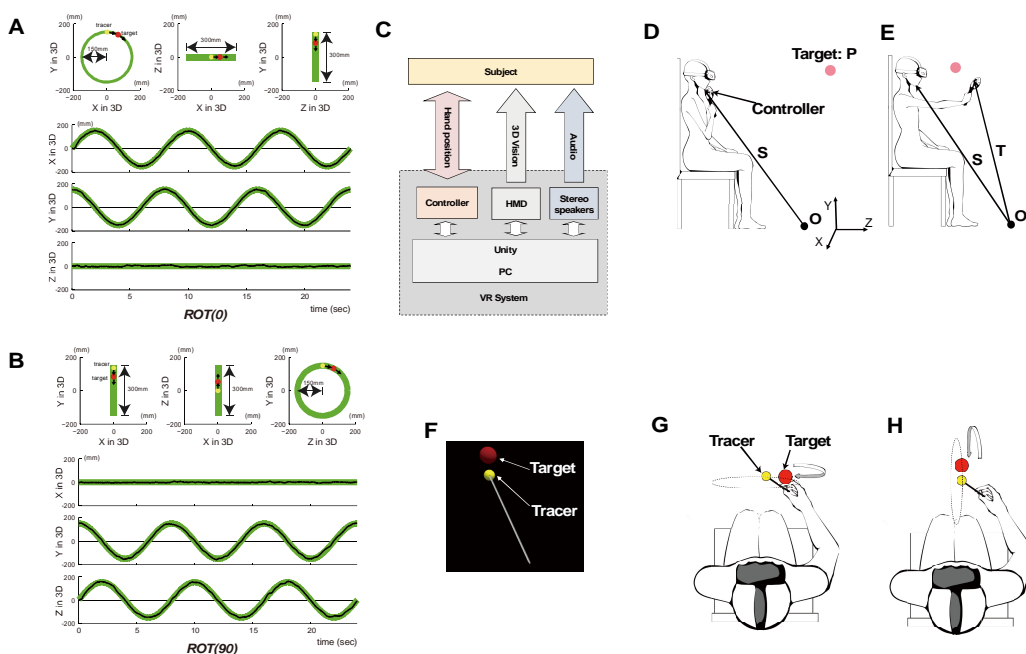


図2. 感覚と3次元円追跡運動をインタラクションに評価できるシステム

脳卒中と片麻痺患者の上肢運動中の感覚と運動のインタラクションを定量的に分析し、患者の機能低下状態とリハビリの効果を検証するために、VRシステムと人工知能などを利用したリハビリ分析システムの開発が必要である。本研究で構築したVRシステムは、(1)没入型VR環境、(2)上肢運動をリアルタイムで追跡し、記録、(3)VR環境での動きの同期と3DCGトレーサのリアルタイムレンダリング機能を構築する。本研究では、連続周期に動く3DターゲットをVR空間上に実装して、ユーザがVR空間で3DCGのターゲットをインタラクティブに追跡する運動を計測、分析する。また、構築されたシステムでは、VR空間での円形追跡の運動をミリメートルレベルの精度で計測し、分析することができた。特に、単眼視と両眼視の条件下での円形追跡運動を比較した。その結果は、円形追跡運動の精度が、前頭面と矢状面での両眼視の精度よりも単眼視の方が約4.5倍低下することを示した。また、単眼視と両眼視の両方でX軸の精度についてのみ、前頭面と矢状面の間に有意差が見られることも分かった。今後、本研究のVRシステムは、片麻痺上肢患者の症度の把握とリハビリ効果を評価するために使用できる。また、3D空間を認識できない人のための研究にも適用できる。

## (3) HMDとVRシステムを用いた視覚的なガイドが感覚と運動のインタラクションに与える影響を定量的に評価した研究

視覚的にガイドされる追跡運動の分析は、人間の視覚運動制御システムを使用して実行されている模倣運動および動作を理解するために重要な役割を果たし、模倣運動を利用したリハビリシステムの構築に使用することができる。本研究では、3DVR空間で実装されたターゲットとターゲットの軌道を視覚的に制御することができるシステムを構築して、3次元追跡運動の性能評価を介して、視覚的運動制御の特性を分析した(図3)。本研究を通じて、目に見えない軌道を

追跡する運動よりも視覚的にガイドされた運動が 3D VR 空間で約 1.25 倍精密に追跡運動ができることを発見した。また、本研究の結果から 0.5Hz 以上の速度で視覚的ガイドがあれば、速度に対応するフィードフォワード (FF) 制御が遅れて、模倣運動とリハビリ運動を実行するとき運動学習を妨げることも発見した。

病気や事故により視覚運動システムに障害をもつ人は追跡運動を行ったり、模倣運動をするのに困難がある場合がある。本研究での提案システムは、視覚的に提示された軌道を使用してターゲットを追跡するための時空間環境設定ができる。特に、断続的な動きの提示を介して小脳に関連する視覚的運動の制御レベルを定量的に分析することができた。

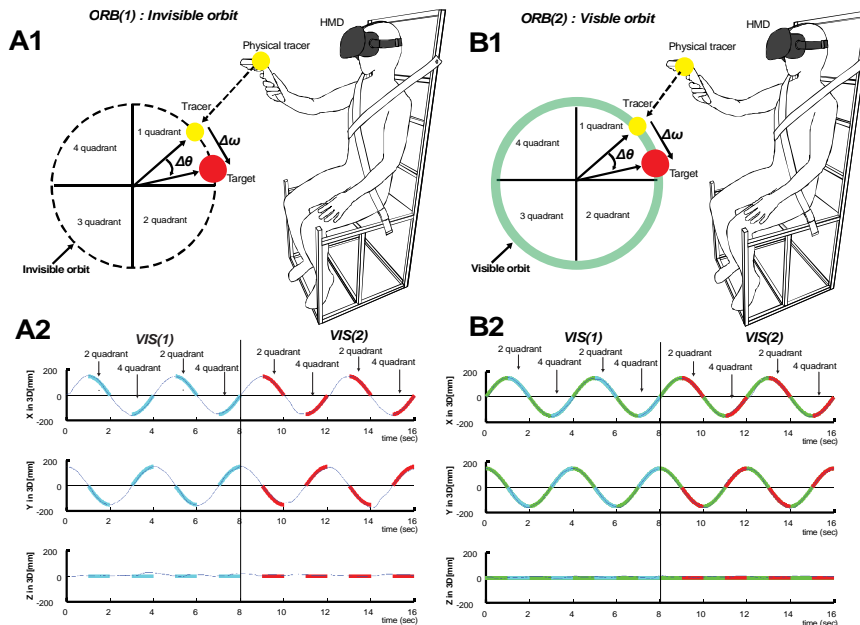


図 3 . 視覚的なガイドが感覚と運動のインタラクションに与える影響を定量的に評価するシステム

#### (4) 没入型 3 次元 VR 環境での追跡運動のインタラクションにおける極座標系の時空間パラメータの利用および適用に関する研究

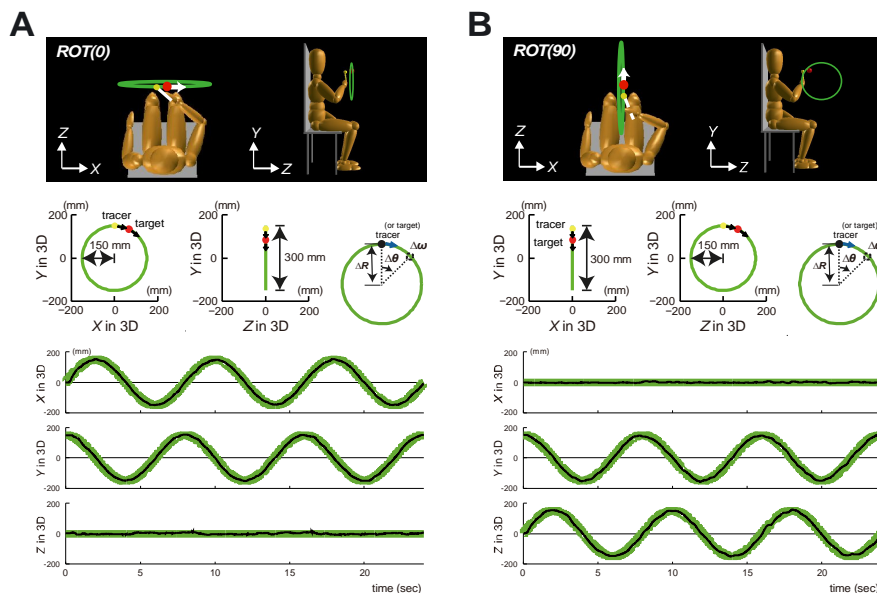


図 4 . 3 次元 VR 環境での追跡運動のインタラクションにおける極座標系の時空間パラメータの利用したシステム

本研究では、極座標の 3 つの時空間パラメータ (原点からの距離 : R、角度 : Theta、角速度 : Omega) をベースにして、運動制御の観点から 3D VR 空間での円形の追跡運動を分析した (図 4)。

16 人の健康な被験者が研究に参加し、3 次元空間での前頭面と矢状面で 0.125、0.25、0.5、および 0.75 Hz で回転する円形のターゲット追跡運動を行った。実験結果は、各平面において 2 つの時間パラメータ (Theta, Omega) の誤差が目標にした速度の変化に比例することを確認した。また、空間パラメータ (R) を利用して、深度がない前頭面からの円形追跡誤差は深度がある矢状面での追跡の誤差よりも低いことが分かった。実験プロトコルとデータ分析を通して、我々は、3D VR 空間で様々な深度と速度の条件において時空間的な運動制御特性を分析することができた。今後の研究では、提案された方法とパラメータ (つまり、極座標系の時空間パラメータ) を利用して、上肢片麻痺患者の状態の分析とリハビリの効果を評価するために使用されることが期待できる。

## 5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Park Wookhyun, Choi Woong, Jo Hanjin, Lee Geonhui, Kim Jaehyo	4. 巻 20
2. 論文標題 Analysis of Control Characteristics between Dominant and Non-Dominant Hands by Transient Responses of Circular Tracking Movements in 3D Virtual Reality Space	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3477 ~ 3477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20123477	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 該当する
1. 著者名 Li Liang, Yamada Tatsuro, Choi Woong	4. 巻 10
2. 論文標題 The Effect of Depth Information on Visual Complexity Perception in Three-Dimensional Textures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 5347 ~ 5347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10155347	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 該当する
1. 著者名 Jo Hanjin, Choi Woong, Lee Geonhui, Park Wookhyun, Kim Jaehyo	4. 巻 20
2. 論文標題 Analysis of Visuo Motor Control between Dominant Hand and Non-Dominant Hand for Effective Human-Robot Collaboration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6368 ~ 6368
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20216368	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 該当する
1. 著者名 Lee Geonhui, Choi Woong, Jo Hanjin, Park Wookhyun, Kim Jaehyo	4. 巻 15
2. 論文標題 Analysis of motor control strategy for frontal and sagittal planes of circular tracking movements using visual feedback noise from velocity change and depth information	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0241138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0241138	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 該当する

1. 著者名 Choi Woong, Li Liang, Lee Jongho	4. 巻 2019
2. 論文標題 Characteristic of Motor Control in Three-Dimensional Circular Tracking Movements during Monocular Vision	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 BioMed Research International	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2019/3867138	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 該当する

1. 著者名 Choi Woong, Lee Jongho, Li Liang	4. 巻 10
2. 論文標題 Analysis of Three-Dimensional Circular Tracking Movements Based on Temporo-Spatial Parameters in Polar Coordinates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 621~621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10020621	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 該当する

1. 著者名 Choi Woong, Lee Jongho, Yanagihara Naoki, Li Liang, Kim Jaehyo	4. 巻 8
2. 論文標題 Development of a quantitative evaluation system for visuo-motor control in three-dimensional virtual reality space	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-31758-y	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 該当する

1. 著者名 Choi Woong, Yanagihara Naoki, Li Liang, Kim Jaehyo, Lee Jongho	4. 巻 16
2. 論文標題 Visuomotor control of intermittent circular tracking movements with visually guided orbits in 3D VR environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0251371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0251371	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 該当する

〔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
研究分担者	李 亮  (Li Liang)  (00609836)	立命館大学・情報理工学部・准教授   (34315)	
研究分担者	李 鍾昊  (Lee Jongho)  (40425682)	公立小松大学・保健医療学部・教授   (23304)	
研究分担者	市村 智康 (大谷智康)  (Ichimura Tomoyasu)  (60360327)	群馬工業高等専門学校・電子情報工学科・教授   (52301)	
研究分担者	平社 信人  (Hirakoso Nobuto)  (60540458)	群馬工業高等専門学校・機械工学科・教授   (52301)	
研究分担者	八村 広三郎  (Hachimura Kozaburo)  (70124229)	立命館大学・情報理工学部・授業担当講師   (34315)	

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
---------	---------