

令和元年6月8日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03210

研究課題名(和文) 錯覚を利用した感覚運動統合リハビリテーションシステムの開発

研究課題名(英文) Development of sensory-motor integrated rehabilitation system using illusion

研究代表者

坂口 正道 (SAKAGUCHI, Masamichi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60283727

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、映像を用いた複合現実感技術や力触覚提示技術を応用し、身体所有感の転移などの錯覚を想起させ脳の可塑性を誘発する効果的な感覚運動統合リハビリテーションシステムの開発を目的とし、視触覚ボール回しシステムおよび運動触覚ミラーセラピーシステムを開発した。ボール回しシステムは、運動錯覚の生起条件と非生起条件について脳波による錯覚の評価を行い、運動錯覚によって運動野の活動が活発になり運動野と視覚野が関連して活動したことを評価した。ミラーセラピーシステムは、上肢運動と指先への触覚を組み合わせたシステムや手関節の外転/内転動作を対象としたシステムを開発し、研究室や病院にて効果の検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、脳の可塑性を誘発する方法として、映像を用いた複合現実感技術と、接触感覚や運動感覚などの力触覚提示技術を用いることで、被験者に錯覚を誘発する点にある。本研究では、身体所有感の転移などの錯覚を想起させるため、運動の意図と同期した映像の提示や動作に起因する触覚フィードバックを与えることで、より強い錯覚を想起させることに成功した。本研究により、VR技術を利用しリハビリテーションに適した映像提示や触覚提示技術の一手法が確立された。高齢化が進み脳卒中等の疾患が増加する中、機能回復によるQOLの改善やADLの向上に直接的に応えるものであり、医療福祉の発展に対する社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to develop an effective sensorimotor integrated rehabilitation system that evokes an illusion such as transfer of body ownership and induces brain plasticity by applying mixed reality technology using video and force tactile display technology. We developed a visual and tactile ball-rotation system and a motion tactile mirror therapy system. The ball-rotation system evaluated the illusion by EEG on the occurrence condition and non-occurrence condition of the motion illusion, and it was evaluated that the activity of the motor area became active by the motion illusion and that the motor area and the visual cortex were related. The mirror therapy system has developed a system that combines upper-limb movement and touch to the fingertip, and a system for abduction/adduction motion of the wrist joint, and has verified the effect in the laboratory or hospital.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：リハビリテーション 運動錯覚 力触覚提示

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

脳卒中を発症してから2~3週までが急性期、その後3~6ヶ月までが回復期、それ以降が維持期と呼ばれ、これまで急性期から回復期にかけては、機能回復を目指して専門的な機能回復訓練が実施されてきたのに対し、維持期にさしかかると機能的にはプラトーと考えられ、獲得した機能を維持する機能維持訓練が行われてきた。ところが、近年脳科学の進歩により、神経細胞が破壊されても損傷を免れ生き残った神経細胞が役割を代行する能力、いわゆる可塑性があることが明らかにされてきた。この脳の可塑性を利用して、神経路に新たな役割を分担させたり強化を行ったりすることができれば、維持期に至ったとしても麻痺した手足の機能を少しでも改善できる。この方法を用いて機能回復を図るには、患者が麻痺した手足を動かそうと運動を意図し、実際の運動あるいは運動したことと同じように神経系に刺激を与えることが必要となる。

そこで本研究は、特にバーチャルリアリティ（Virtual Reality, 以下VR）技術に着目し、錯覚を誘発する手法の開発と評価、およびそれを応用した感覚運動統合リハビリテーションシステムの開発を目的とした。近年、視覚・聴覚に続き触覚の計測や提示に関する研究がVR分野で盛んに行われているが、そのリハビリテーションへの応用例は多くない。本研究を実施し、運動錯覚の影響を定量的にとらえ、映像と共に運動感覚や触刺激を与えることで錯覚を起こさせる手法が確立できれば、脳の可塑性を利用した新しい感覚運動統合リハビリテーションシステムの開発が実現される。

### 2. 研究の目的

本研究では、VR技術を応用し、映像を用いた複合現実感技術や、対象物との接触感覚や反力等の力触覚提示技術を応用し、身体所有感の転移などの錯覚を想起させることで脳に刺激を与え、脳の可塑性を誘発する効果的な感覚運動統合リハビリテーションシステムを開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 手指動作を対象とした視触覚同時提示ボール回しシステムの開発

本システムは、上部の映像提示部と下部の触覚提示部で構成される。上部のモニタに健常者がボールを回している動画を提示すると共に、下部に実際にボールを配置し、動画と同期させてモータ制御によりボールを回転させる。被験者は、モニタの下に手を挿入し、下部のボールを軽く握ることで、他動的に指を動かされているのにもかかわらず、自分でボールを回している様な錯覚を感じる。MRI対応システムを開発して運動錯覚誘発時の脳機能の解明を行うと共に、健常者に対するボール回し技能の訓練効果の検証と、脳卒中片麻痺患者への本システムを用いたリハビリテーション効果の検証も実施する。

#### (2) 上肢協調運動を対象とした運動触覚ミラーセラピーシステムの開発

本システムは、鏡、運動提示部、および触覚提示部で構成される。鏡は、正面中央部に設置される。運動提示部は、車輪で前後に移動可能かつベルト-プーリー機構とスライダを用いることで左右鏡像運動を可能とする。また、運動提示部の下には表面に様々な凹凸を有する触覚提示部が設置される。被験者は、運動提示部のスライダの上にそれぞれ左右の手を乗せることで、平面内で左右鏡像運動を行う。これを鏡越しにのぞき込むことで、健常肢が鏡に映りちょうど麻痺肢の位置に見える。本システムは、非設置型でアクチュエータやセンサは用いておらず大変シンプルに実現できる。被験者の手の動き等は非接触式モーションキャプチャ等により計測し、定量的な分析を行う。リハビリテーション効果の検証には、2週間程度の介入試験を行い、試験前後の手指や上肢の運動機能を比較する。

#### (3) 下肢運動を対象とした追従訓練システムの開発

本システムは、動作計測部、動作提示部、および映像提示部で構成される。まず、被験者の健常肢の動作を非接触式のモーションキャプチャで計測する。次に計測した位置情報に基づきモータ駆動される動作提示部を用いて被験者の麻痺肢を動作させる。また、被験者には外部モニタや頭部装着型のディスプレイ（HAD）を用いて、自分の下肢や外部環境の視覚情報を提示する。このとき、健常肢の動作と麻痺肢の動作に位相差を設けることで、麻痺肢を健常肢に追従させて動作させる訓練が可能となる。映像提示部の映像で動作提示部のモータや機構を見えなくすること、また左右の足をタイミング良く動作させることで、まるで自分の足が正しく動いていてリズムカルに歩行動作が実現できている錯覚を発生させる。

#### (4) 姿勢制御を対象とした安全な訓練システムの開発

姿勢制御、つまりバランスの訓練には、バランスボールなど不安定な器具等が用いられることが多いため、危険を伴う。人は体の傾きを三半規管により検知しているが、視覚からも情報を得ており、特に高齢になると視覚の影響が大きくなる傾向がある。このため、頭部装着型ディスプレイ（HMD）により立体映像を提示することで、座位や立位における姿勢制御の訓練が可能となれば、従来は姿勢制御の訓練が困難であった早期から安全に訓練が可能となる。本研究では、不安定な椅子とHMDを組み合わせた装置により、視覚情報と姿勢制御の関係を明らかにし、安全で効果的な姿勢制御のための映像コンテンツを開発する。

### 4. 研究成果

#### (1) 手指動作を対象とした視触覚同時提示ボール回しシステム

開発した視触覚同時提示ボール回しシステムを図1に示す。本システムのボールはDCサーボモータを用いて回転させている。ボールの回転には、ハイトルクタイミングベルトおよびハイトルクタイミングプーリ使用している。ボールは35mmの穴あきの木球を用いた。ボールとボールの回転中心の距離は38mmである。ボールの穴に高ナットを圧入し、その穴に六角穴付半ネジを差し込み固定した。ボルトと支持部の穴には0.1mmのゆとりを持たせ、自由に回転できるようにした。高さ方向にもゆとりを持たせ、上下に約10mm移動できるようにした。これにより、本システムによるボールの回転を、実際のボール回し運動に近づけた。ボルトの支持部はアクリルにより製作し、安全装置とした。映像は、30秒ボール回しの映像を撮影し、ボール回しの半周分に映像の時間の長さをトリミングし、1フレーム毎に角度を測定した。再生する際には、半周分の動画を3分間分につなげ、一つの動画とした。



図1



図2

ボール回しシステムを用いた運動錯覚の生起について、システム使用時の脳波を計測し、評価を行った。その結果、運動錯覚に関する先行研究と同様の解析結果が得られており、脳波から運動錯覚の生起を確認し、また錯覚生起時には運動野と視覚野が関連して活動していることを確認した。



図3



図4

また、楽器演奏を題材とした手指リハビリテーションシステムの開発を行った。開発したトランペット型デバイスの写真を図2に示す。可動部分にアクチュエータを組み込むことで指に対して介入を行うことができる。動作のガイドの手法として筋レベルのガイド手法を提案した。筋レベルのガイド手法の運動学習効果を評価する実験を行い、運動学習効果を確認した。



図5



図6

#### (2) 上肢協調運動を対象とした運動触覚ミラーセラピーシステム

開発した、上肢運動を対象とした触覚運動ミラーセラピーシステムの写真を図3に示す。前後運動は器具に取り付けた6つの車輪で、左右の鏡像運動はリニアガイドとタイミングベルトにより実現することで実現した。さらに、触覚情報を与えられる素材を張り付けたアクリル板を鏡像運動支援器具の下に設置することで触覚提示機能を付与した。これらを使用し、運動錯覚実験を行った。また、大学病院のリハビリテーション部において試験運用した。被験者は、脳出血による片麻痺の症状を有する患者で、発症後3週間目から約2週間本システムによるミラーセラピーを実施した。本システム特有の効果とは言い切れないが、開始前には見られなかった麻痺肢の指の握り動作などが改善されており、リハビリテーションへの効果が期待できる結果を得た。

さらに、手関節の外転/内転動作に対して触覚提示を行うミラーシステムを開発した。開発したシステムの写真を図4に示す。このシステムは、クロス掛けの丸ベルトとプーリにより左右の手関節の外転/内転動作を鏡像運動にする。また、触覚材を左右対称に配置することにより、手関節動作に対しての触覚提示を可能とした。開発したシステムを用いて、健常者に対し評価実験を行った。その結果、被験者ごとに個人差はあるが、触覚の提示が運動主体感の評価を高める結果を得た。

#### (3) 下肢運動を対象とした追従訓練システム

下肢に対して自ら足を動かしていると感じさせる運動主体感の生起を目指した足踏み運動システムを開発した。開発したシステムを図5に示す。本システムは、被験者が行うタスクを座位状態での足踏み運動とした。片足は能動運動とし、片足は足踏みシステムのアシストによる受動運動とした。足踏みタイミングを音により提示し、HMDを用いてVR空間や身体を提示した。受動運動側は、足踏み機構により動作をアシストしたり、音により足踏みのタイミングを提示したりすることで運動意図を誘導した。HMDにより動いている足のみをVR空間上に提示した。これによりシステムにより動かされている感覚を低減させ、自ら足を動かしている運動主体感の誘発を目指した。健常者に対し、アンケートによる評価実験を行った。両足を受動的に動かされる場合に比べ、片足を能動的に動かした場合の方が運動主体感の評価が高くなる結果を得た。

#### (4) 姿勢制御を対象とした安全な訓練システム

姿勢制御を対象とした安全な訓練システムを開発した。開発したシステムを図6に示す。被験者は、重心動揺を計測可能なロードセルを装備した椅子に座る。頭部にHMDを装着し、前方から接近してくる障害物の映像を見ながら回避動作を行う。障害物の運動は、物理演算による振り子運動とした。視覚情報に加え、聴覚による接近や通過、衝突の効果を追加した。実環境での回避動作とVR環境での回避動作を比較したところ、再現性や被験者毎の個人差が再現された。本システムを用いることで、衝突等の危険を回避しながら、バランス能力や回避能力の計測や訓練を可能とした。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Hirokazu Minowa, Kentaro Baba, Masamichi Sakaguchi, Prototype Kinesthetic Illusory Device Using Combination of Active and Passive Motion, Haptic Interaction, Lecture Note in Electrical Engineering, 査読有, Vol. 432, pp.253-255, 2018.  
DOI: 10.1007/978-981-10-4157-0\_43
- ② Takuya Makishima, Masaki Orimoto, Masamichi Sakaguchi, Basic Study on Motor Ability Evaluation and Training System Using Virtual Collision Avoidance, Haptic Interaction, Lecture Note in Electrical Engineering, 査読有, Vol.432, pp.341-343, 2018.  
DOI: 10.1007/978-981-10-4157-0\_58

[学会発表] (計10件)

- ① 石原智生, 坂口正道, 手関節動作に対する触覚提示ミラーシステムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2019.
- ② 西出圭佑, 坂口正道, 和坂俊昭, ボール回しシステムによって生じる運動錯覚の脳波を用いた評価, 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2018.
- ③ 近藤寛之, 坂口正道, 運動主体感の生起を目指した足踏み運動システムの試作, 第36回日本ロボット学会学術講演会, 2018.
- ④ 蓑輪洋一, 近藤寛之, 坂口正道, 伸張反射により筋活動を誘発する楽器型リハビリテーションシステムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2018.
- ⑤ 蓑輪洋一, 坂口正道, ガイドとタイミングを組み合わせた手指リハビリテーションシステムの開発, 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2017.
- ⑥ 蓑輪洋一, 坂口正道, ガイドとタイミングを組み合わせた手指リハビリテーションシステムの検証実験報告, 日本バーチャルリアリティ学会第19回力触覚の提示と計算研究会, 2017.
- ⑦ 坂口正道, 西出圭佑, 視覚と触覚を同時に提示するボール回しシステムの運動錯覚の検証, 第22回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2017.
- ⑧ 馬場健太郎, 坂口正道, 視覚と触覚を同時に提示するボール回しシステムの技能修得効果, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017.
- ⑨ 馬場健太郎, 蓑輪洋一, 坂口正道, 鏡を用いた運動錯覚を誘発する両手ボール回しシステムの開発, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016.
- ⑩ 坂口正道, 西和田昌恭, 蓑輪洋一, 視覚, 触覚および聴覚フィードバックにより運動主体感を生成する手指運動リハビリテーションシステムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2016.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：和田 郁雄

ローマ字氏名：(WADA, Ikuo)

所属研究機関名：名古屋市立大学

部局名：大学院医学研究科

職名：教授

研究者番号 (8桁)：70182970

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：堀場 充哉

ローマ字氏名：(HORIBA, Mitsuya)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。