

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 27 日現在

機関番号：82404

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650361

研究課題名(和文)身体化する義手

研究課題名(英文)Embodiment of the prosthetic hand

研究代表者

河島 則天(KAWASHIMA, Noritaka)

国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)・研究所 運動機能系障害研究部・室長

研究者番号：30392195

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：これまでの幻肢・幻肢痛の発現機序に関する知見、道具の身体化や身体性の拡張に関する知見を科学的基盤として、高いリアリティと自然な手指のふるまいを実現する義手の製作と幻肢痛緩和のためのリハビリテーションアプローチ開発を行った。健常者へのリアルな義指装着による道具の身体化実験の結果、義指のリアリティが身体認識や身体周辺座標の拡張に加え知覚転移をもたらすことが明らかにされた。切断者を対象としてリアルな義手の長期使用効果を観察したところ、身体としての義手の認識(身体所有感)が増加し、幻肢の痺れが緩和されるとの興味深い内観を得た。本研究を通して義手の身体化を促す要因としてのリアリティの重要性が確認された。

研究成果の概要(英文)：Based on the recent progress of knowledge regarding neural mechanisms underlying phantom limb and the phenomenon of tool embodiment, we aimed to develop a novel forearm prosthesis which involves high reality and natural behavior. In order to elucidate the mechanisms of prosthetic embodiment of the tool by observing adaptive process to attached realistic prosthetic finger, we attempted two types of experiment; one is to observe short-term adaptation to the experimental finger extension for healthy subjects, another is to observe long-term adaptive process (tool embodiment) if a forearm amputee wear newly developed realistic hand. We observed an enhancement of the sensory perception in response to noxious stimulation onto not only the realistic artificial finger in healthy subjects, but also the realistic hand prosthesis in amputee. These results imply that reality is necessary element for facilitating the process of tool embodiment.

研究分野：リハビリテーション科学・福祉工学

科研費の分科・細目：ヒューマンインターフェイス

キーワード：身体性 義手 切断 幻肢 幻肢痛

1. 研究開始当初の背景

幻肢、幻肢痛は、体肢切断後の大脳皮質再組織化の結果として起こる生理学的基盤を持った現象であることが、近年の脳機能イメージング研究の成果によって明らかにされつつある。大脳皮質再組織化は脳の可塑性を示す有力な根拠であり、Flor たちは、幻肢痛の程度と大脳皮質再組織化の範囲が関連すること、さらには上肢切断患者に対して筋電義手を使用したケースでは幻肢痛を訴えるものが有意に少ないことを報告している。これらの研究成果は、体肢切断後も損失肢への運動指令が適切に保たれ、失われた感覚情報を何らかの形で補完するようリハビリテーションが行われれば、幻肢痛等の負の適応を生じることなく大脳皮質再組織化が成立することを示唆している。従来、幻肢痛に関しては薬理的手法、神経ブロック、心理的手法など、様々な方策が講じられているが、上記のような大脳皮質再組織化のプロセスに沿った幻肢・幻肢痛の発現機序を勘案すれば、従来の方法に捉われない新たなアプローチが可能になるものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの幻肢・幻肢痛の発現機序に関する知見、道具の身体化や身体性の拡張に関する知見を科学的基盤として、新しいコンセプトに基づく義手の製作と幻肢痛緩和のためのリハビリテーションアプローチを開発することを目的とした。具体的には、リアリティのある外観を備えた装飾義手を製作し、外観やふるまいの自然さが義手の身体化を促すとの仮説を健常者を対象とした実験的検証、切断患者を対象とした仮説実験検証の両面から捉えることを目的とした。本研究の最終目的は「身体化する義手」の開発である。

3. 研究の方法

(1) 健常者実験

図1に示すように、実際に指欠損/切断患者への義指として用いられる、外観のリアリティを備えた人工の指(道具)を健常者の示指に装着する実験的介入を行い、長さや質量は等しいが指としての外観を兼ね備えないコントロール条件との比較の観点から、道具使用による身体化プロセスを、①身体の拡張、②知覚の転移に分けて検討した。身体拡張現象(道具の身体座標への取り込み)は双方の道具で生じる一方で、知覚の転移はリアリティを伴った義指にのみ生じるという仮説を実験的に検証した。

三次元動作解析システムにより計測された反射マーカの座標データをもとに、課題中の運動軌跡と到達点を解析した。Fig. 3に典型的な運動軌跡と到達点の定量方法を示す。本実験では、運動の目標点と到達点の差を前後方向、左右方向のエラーに着目して解析を行った。

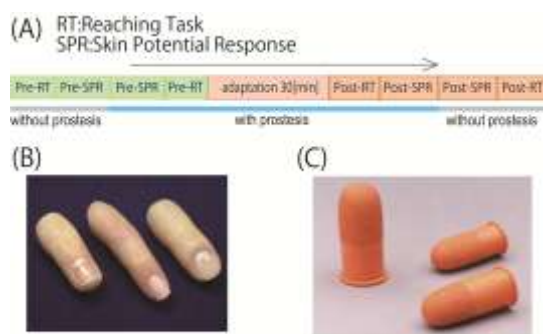


図1 健常者を対象とした義指装着実験のプロトコルおよび用いたツール

発汗反応のうち、刺激に対する瞬時の応答として記録される skin potential response (SPR)のピーク値により、触覚刺激への反応性を評価した。発汗反応は、刺激の繰り返しによって徐々に減衰(habituation)することが良く知られている。そこで、約3秒の感覚を開けて5回連続で実施した際の反応を記録し、その変化を計測することとした。本研究で得る SPR は、刺激に対する応答そのものに加えて、刺激されるという文脈に対して予測する刺激と実際の刺激の違和感も含むものと考えられる。

(2) 切断患者実験

心理物理実験：前腕切断患者の幻肢の運動感覚、アウェアネスに関する実験を実施した。先行研究では、損失肢に関する視覚的フィードバックを鏡像視認によって与えると、幻肢のアウェアネスが増加すること、幻肢痛の軽減効果があることなどが報告されている。一方で、鏡像視認がなんら幻肢の状態に影響を与えない場合があることも報告されており、義手処方の指針を考える上で、損失肢に対する認識に影響を及ぼす要因を整理することが重要だと考えた。そこで本研究では、鏡像視認による幻肢のアウェアネス変化の個人差に焦点をあてた検証実験を実施した。

高いリアリティの義手製作：リアリティのある外観と指の自然な動きが可能なパッシブ骨格を備えた装飾義手を製作した。上肢切断者を対象とした評価実験を想定し、異なる断端長をもつ対象者でも簡易的な装着が可能なソケットを製作し、切断側(左 or 右)、手のサイズ(大 or 小)を想定して4タイプの義手を製作、2名の切断患者をモニタとして試用評価を行った。初年度後半より、製作した義手を用いて義手の身体化を促すための以下のアプローチの有用性を検証する実験を行った。①切断端に存在する損失肢の body representation を利用した義手への感覚情報転移、②self-touch がもたらす多重身体表象を利用した感覚励起。上記手法の効果について、被験者の内省記録や質問法、心理物理的手法、切断端の筋活

動計測や発汗反応などの生理学的計測、脳機能計測などの観点から、幻肢感覚と幻肢痛について包括的に検証した。

4. 研究成果

(1) 健常者実験

指伸長によって生じる動作エラーに、両人工指条件間での差異および装着前後の差異は認められなかった一方で、侵害受容刺激付加時の発汗反応は、リアルな義指装着時で増大する結果が得られた。動作エラーの程度と知覚転位の程度の関連性を検討した結果、指サック条件では両者に関連性が認められなかった一方で、リアル義指条件では有意な関連性、すなわち動作エラーが大きいほど知覚転移が大きいことが明らかにされた(図2)。身体拡張計測の結果より、fake条件では確認されなかった身体の拡張現象が、control条件では確認された(図3)。また、指サック装着条件よりリアルな義指装着条件で適応後に大きな皮膚発汗反応が認められたことを含めて考えると、リアルな義指装着条件では、指の位置と運動のキャリブレーション(運動エラーの修正)に加えて、知覚の転移が生じた可能性がある。先行研究では、身体拡張現象は道具を介して伝わる触覚情報に視覚情報を統合すると、より鮮明な運動錯覚(運動実効感)が生じることが明らかにされている。本研究の発汗反応計測で道具装着時に行った刺激は、閉眼状態ではほとんど認知できないほどの刺激であるにも関わらず、義指装着条件で発汗反応が確認された。したがって、道具の身体化現象が単に道具の習熟(継続的な運動指令や触覚刺激)に依存するのではなく、リアリティのある外観により道具を身体の一部として認識する情報を与えることでも、身体化が促進される可能性が示された。

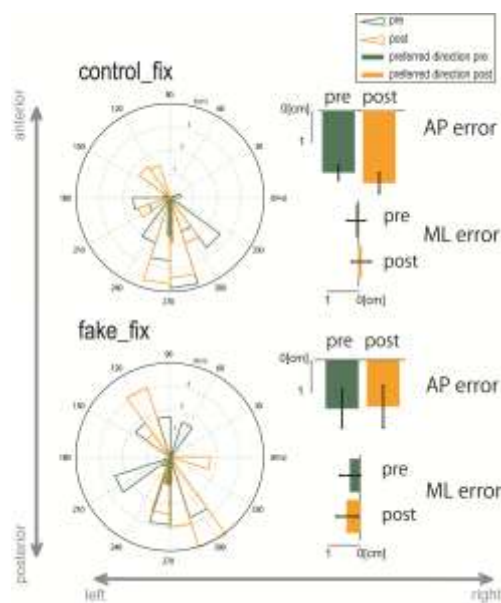


図2 指拡張による運動誤差の検証結果

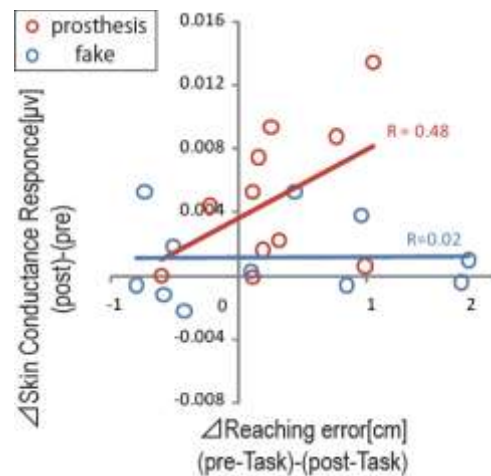


図3 指拡張の程度と知覚転位の程度の関係性

(2) 切断患者実験

幻肢の特性に関する研究では、胸像視認による幻肢のアウェアネスについての実験データが計14名より得られた。従来の研究報告では、鏡像を用いた損失肢に関する視覚情報提示によって幻肢の認識が高まるという記述が多いが、患者によっては鏡像視認によって幻肢のアウェアネスに停滞が生じる者も認められた。つまり、鏡像視認の影響は、幻肢の状態によって変化し、鏡像なしでも幻肢の動作が可能である場合には実際の動作と視覚情報の不一致が生じることによって運動の鮮明さや幻肢そのもののアウェアネスの減少を引き越すものと考えられる(図4)。一方、鏡なしの状態では幻肢の動作に困難が伴う症例では、複数例で鏡像視認による顕著な幻肢のアウェアネスおよび動作範囲の増加が確認され、さらに幻肢痛の減少が生じる症例を複数観察した。

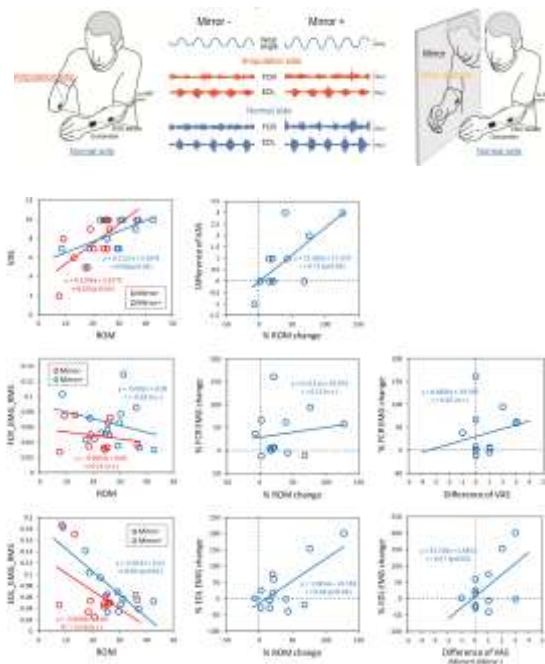


図4 鏡像視認が前腕切断患者の幻肢アウェアネス、運動実行感に及ぼす影響



図5 ソフトソケットと指関節のバネ機構によって実現される義手の自然な動作

また、リアリティの高い義手の製作を行うことができ、義手の身体化を促す要素としてのリアリティについて興味深い知見を得ることができた。2名の切断者をモニタとして日常生活での長期的な義手による効果を検証した結果、両名とも身体としての所有感が増加するとの内観を得た。幻肢に痺れのある1名においては、義手装着時の指関節ストレッチングによって痺れが減少するとの内観を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1) Kawashima N, Mita T, and Yoshikawa M. Inter-individual difference in the effect of mirror reflection-induced visual feedback on phantom limb awareness in forelimb amputees. PLoS One 8(7) e69324, 2013 (査読あり)

〔学会発表〕(計1件)

1) 高橋智大、河島則天 リアルな義指装着への適応によって生じる身体拡張と知覚転移 LIFE2012 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (名古屋) 2012年11月2-4日

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河島則天 (KAWASHIMA Noritaka)

研究者番号: 30392195