

電動義手の外見と把持動作が Sense of Agency に及ぼす影響

古橋龍一^{†1} 杉原太郎^{†2} 三宅貫太郎^{†1} 佐藤健治^{†3} 五福明夫^{†2}

概要: 幻肢痛患者のリハビリテーションとして電動義手を用いることで疼痛が緩和する可能性がある。これは、視覚フィードバックによって電動義手を操作したという感覚を発生させ、それにより破綻していた知覚-運動ループが修正できるからだと考える。Sense of Agency (SoA)は、電動義手が患者の意図通りに動作することで発生し、有効なリハビリテーションのためには重要である。しかしながら、電動義手の外見や把持動作が SoA にどのように影響しているのかは明らかではない。本研究では、健常者 60 人に対し、外見や把持動作が異なる電動義手の操作実験を行い SoA の評価を行った。その結果、把持動作の違いによる SoA の評価に有意差は見られなかったが、外見の違いによる SoA の評価に有意差が見られた。

キーワード: Sense of Agency, 電動義手, 幻肢痛

1. はじめに

難治性疼痛とも呼ばれる複合性局所疼痛症候群 (Complex Regional Pain Syndrome: CRPS) や幻肢痛は、有効な治療法が確立されていない。この患者は健常者と比較して、痛みや痛みに付随する不快な情動や不安などの脳内処理が異なることが知られている[1]。また脳の可塑性により、障害部位が治癒した後も痛みが慢性的に続くことが示唆されている[2]。鏡画像を用いた視覚的な四肢疑似運動により、幻肢痛患者の一次体性感覚野が可塑的变化を起こして健常状態に復帰し疼痛が軽減すると考えられる[3]。この特性を活かした治療法は Ramachandran らによって提案され、鏡療法と呼ばれる[4]。鏡療法では、幻肢痛患者が症状を有する腕あるいは足 (患肢) と反対側の健常肢を鏡に映しこむことにより、反転表示された健常肢が患肢を健常であるように錯覚させるようになる。この錯覚により視覚から患肢の運動感覚を再構築することができるため、幻肢痛が改善されると報告されている。例えば、McCabe らは、CRPS 患者においても痛みが改善されたと報告している[5]。

Weiss らは幻肢痛患者が能動義手を用いた際の鎮痛効果を報告している。この時使用された能動義手の外見は人の手に似せておらず、単調な動作を行うものであったが、良好な鎮痛効果が見られている[6]。鏡療法や能動義手の使用において鎮痛効果がみられる主因として、Sense of Agency (SoA) が考えられる。SoA とは、“ある目的に沿った動作が主体的に行われたという感覚” [7]である。SoA を感じる義手を利用すると、怪我によってズレが生じた知覚と運動感覚[3]の再構築が期待でき、痛みの原因となりうる感覚のズレを訂正できると考えられる。また、近年の脳機能画像法の発達により、幻肢の運動の改善によって幻肢痛の低減が期待できることが分かってきた[8]。従来の鏡療法に加え、VR を用いた鏡療法[9]や、Brain-Machine Interface (BMI) を利用した義手においても良好な鎮痛効果が得られることが

報告されている[10]。これらのことから、従来の鏡療法を拡張した、疑似的な手を用いる治療法の発展が予想される。しかしながら、これらの研究において入力から動作までの遅延時間はあまり考慮できていない。特に筋電義手や BMI 義手においては、電位の発現までの時間や、制御処理時間などは避けて通れないため、操作者の運動指令から動作までの遅延をいかに処理するかは重要な課題となる。この遅延は単なる制御技術上の問題ではない。遅延は SoA の低下を招く可能性が高く[11]、遅延時間によってはリハビリの効果が期待できない恐れがある。

そこで本研究では、リハビリに使用する電動義手の設計要件を探るため、視覚フィードバックから動作および外見、遅延時間に着目して SoA への影響を明らかにする。義手の外見は、機能または技術上の問題で制限が多く存在し、完全に人の手を再現することは困難である。VR 上の仮想手の外見の違いが SoA に影響を及ぼさないことが報告される[12]、[13]一方で、SoA に影響を与えることが示唆されており[14]、外見が SoA にどのように影響を与えているかは分かっていないことが多い。義手の動作についても同様に、人間の手の動作を完全に再現することは現実的ではなく、数種類の目的を達成するための特定の動作のみを想定した設計となる。SoA は運動に直接的に関わる感覚であるため、想定した動作ができないことや、動作の不完全さなどで減少する可能性がある。本稿では、外見と把持動作の異なる電動義手を用い、動作入力から実際の動作に遅延時間を設けて SoA の評価実験を行った結果を示す。

2. 研究背景

2.1 複合性局所疼痛症候群

複合性局所疼痛症候群 (Complex Regional Pain Syndrome: CRPS) は骨折、捻挫、打撲などの外傷をきっかけに生じる慢性的な痛みである。CRPS 患者の多くは誘引となる外傷などよりも不釣り合いな、強く焼け付くような持続痛と発

^{†1} 岡山大学大学院 自然科学研究科
Okayama University, Graduate School of Science and Technology.

^{†2} 岡山大学大学院 ヘルスシステム統合科学研究科

Okayama University, Graduate School of Interdisciplinary Science and Engineering in Health System

^{†3} 川崎医科大学病院
Kawasaki Medical School Hospital

作痛を訴えることが多い。痛みにより体を動かすことが困難となり、日常生活に支障をきたす場合がある。また、痛みのほかに知覚の低下や認知機能の異常が見られる場合もある。CRPS は 1994 年に国際疼痛学会によって反射性交感神経性ジストロフィー (Reflex sympathetic dystrophies: RSD) やカウザルギーなどと呼ばれていた症候群が統一された名称である。また、主要な末梢神経に損傷がない RSD は type I, 主要な末梢神経に損傷のあるカウザルギーは type II としてまとめられた。また、CRPS の判断基準の見直しは Bruchl らや Harden らによって行われた[15]。日本でも 2010 年に厚生労働省の CRPS 研究班によって新たな CRPS の判定指標が提示された[3]。

2.2 幻肢痛

四肢を切断した患者の多くは、切断後もその切断した部位に感覚が残っており、しびれや温冷感といった感覚を知覚する。この感覚経験は幻肢と総称される。そして多くの場合、幻肢を以前の感覚通り動かすことも可能である。この幻肢の運動は切断後時間が経つにつれその能力を失っていき[16]、患者の意図しない姿勢をとることがある[17]。これらの幻肢に強い痛みを知覚することがあり、その痛みは幻肢痛と呼ばれる。幻肢痛には多種多様な症状があり、持続的な痛みが生じる患者もいれば、発作的に痛みを知覚する患者もいる。また、薬への耐性ができてしまうなどの理由から継続的な投薬による治療は困難である場合が多い[18]。

2.3 治療法

鏡療法は、Ramachandran らが幻肢痛に対する治療として提案した。患者は鏡を用いた箱 (Mirror Box) を使用し、患肢と対応する健常肢を鏡に映すことで、健常肢の動作を患肢のものと錯覚させる。視覚から患肢の運動感覚を構築することができるため、幻肢痛の改善ができると報告されている[4]。また、McCabe らによって CRPS 患者においても鎮痛効果みられたという報告がされている[5]。

2.4 知覚

人間の感覚は、感覚を受容するための特殊な器官を持つ特殊感覚と、受容器が身体全体に広がっている体性感覚に分けられる。特殊感覚には視覚、聴覚、嗅覚、平衡感覚が分類され、体性感覚は、皮膚感覚と自己受容感覚が分類される。身体的位置や運動に関する感覚は自己受容感覚に分類される[19]。自己受容感覚 (Proprioception) とは、筋や腱などの収縮、緊張などにより、自己の身体的位置を知覚できる感覚である[20], [21]。この感覚は四肢や頭部の姿勢や動作を意識の上で認識可能にし、動作に正確さやスムーズさをもたらすという点で、人間の行動を司る重要なものである。

幻肢痛患者や CRPS 患者において、知覚情報の不一致が慢性的な痛みをもたらすことが示唆されており[22]、これは、存在すべきと捉えた身体部位が存在しないことによる

知覚情報の不一致が原因と考えられる[3]。自己受容感覚からもたらされる自己の身体の主観的位置は、視覚フィードバックにより変調することが示されている[23]。この自己受容感覚や視覚、触覚などの様々な感覚情報を統合することで自己の身体を認識していると考えられている[7]。

この統合された情報からなる自己の身体を認識する感覚として、後述する Sense of Agency (SoA) や Sense of Ownership (SoO) がある。感覚的なフィードバックをもたらす自己受容感覚と、それらの運動情報を統合して知覚する SoA は密接に結びついている[24]。Sauerbruch 義手[6]において鎮痛効果が見られた要因としては、SoA が自己受容感覚に影響を及ぼし、統合感覚に整合性をもたらされていたことが考えられる。同様に鏡療法で考えると、視覚フィードバックが SoA や自己受容感覚に影響を与え、それらの整合性がとれたことによって、幻肢の随意運動が可能になると考えられる。また、視覚フィードバックは SoA に大きく影響を及ぼすことが明らかにされており[25]、電動義手を用いたリハビリテーションには視覚フィードバックによる影響を考慮する必要がある。

2.5 Sense of Agency

CRPS 患者にとってより効果的なリハビリテーションを行うにあたって、脳内の運動指令と知覚を一致させる必要があるが、そのためには患肢を主体的に動かしたという感覚が重要となる。Gallagher は自らの身体を認識するために必要な感覚には SoA と SoO があると述べている[7]。SoA とは、ある目的に沿った動作が主体的に行われたという感覚であり、SoO は運動の有無とは無関係に身体が自己に帰属されるという感覚である。また、SoA は運動に対する視覚や体性感覚からのフィードバックが、運動イメージと時間的に一致していることも成立条件となると述べられている[7]。SoA の有無は運動操作能力と必ずしも一致しないことが知られており[24]、例えば、視覚性運動失調患者においては SoA を有しながら自らの身体を操作することは可能であるが、目に見えている物体を上手く掴むことができないことが報告されている[26]。

また、SoA と SoO が密接な関係にあることが実験的に示される一方で[27]、近年の神経画像研究などによって、それぞれが独立した神経基盤を有することが示唆されているなど[28]、SoA と SoO の関係は分かっていないことが多い。本研究では幻肢痛や CRPS といった運動能力に支障をきたすことが多い患者を対象としているため、主に SoA に焦点を当てて議論を行う。

3. 関連研究

自己受容感覚が視覚フィードバックにより変調することが明らかにされているが、その順応は親しみやすさ (Familiarity) が増加した結果であることが報告されている[23]。この親しみやすさとロボットの外見の関連性について

ては”不気味の谷”現象が広く知られている。森は、ロボットの外見や動作が人間らしくなるにつれて、親しみやすさなどの正の感情が増加するが、ある点を境に急転して負の感情が増大し、その後さらに人間らしさが増加するにつれ親しみやすさが回復することを予想した。それらの感情をグラフ化した時に負の感情に落ち込むラインが谷のように見えることから、不気味の谷現象と呼ばれる。この感情の起伏はロボットに動作が加わることで急峻になると考えられている[29]。しばらくの間仮説の域を出なかった不気味の谷現象であったが、瀬山らは実験によりこの現象が実際に起こることを報告しており、特に、異常な特徴をもつ場合に現れることを示した[30]。また Poliakoff らは、顔だけでなく手だけを対象とした時も同様のことが生じることを実験の結果から示している[31]。

Farrer らは入力から動作までの遅延時間が長くなるにつれ SoA が減少していくことを明らかにしている[11]。Farrer らの実験における遅延時間の設定は、入力から動作までに 0~1100ms の 14 段階の遅延時間を設定し、300ms 付近から SoA が曖昧になり、700ms 付近から SoA は感じられなくなると述べている[11]。

樋田らは遅延聴覚フィードバックがどのように SoA に影響を与えているかを調査している[32]。遅延時間[ms]の各設定範囲(19~253, 119~353, 186~419, 19~119, 286~519)に実験参加者を割り当て、その結果、“遅れている”と判断した割合が遅延時間 300ms で飽和したことが報告している[32]。

4. 実験方法

関連研究から、SoA はおよそ 300ms の遅延時間が発生すると低下していくことが推測される。しかしながら、自己受容感覚が視覚フィードバックによる影響を受けることから、義手の外見によっては遅延時間が 300ms を超えた場合でも SoA の低下を防ぐことができる可能性がある。義手における視覚フィードバックが SoA にどのような影響を与えているかを明らかにするため、本研究では、外見と把持動作に着目し、実験を行う。

4.1 電動義手

験に使用する電動義手は株式会社イクシーがオープンソースとして公開している電動義手 HACKberry[33]の 3D モデルから stl ファイルをダウンロードし 3D プリンタで作成したものである。電動義手は右手を作成した。作成した電動義手はサーボモータから直接ギアやシャフトを介し、指部の屈曲や伸展を行う。作成した電動義手を Fig.1 に示す。動作は内部に設置したサーボモータ 2 つによって行われ、示指はサーボモータ SG5010、小指・薬指・中指はサーボモータ SG90 がそれぞれ回転することにより屈曲および伸展を行う。各サーボモータの制御はマイコン Arduino UNO によって行い、SG5010 は Arduino からの電源供給、SG90 は

外部からの電源供給により動作する。

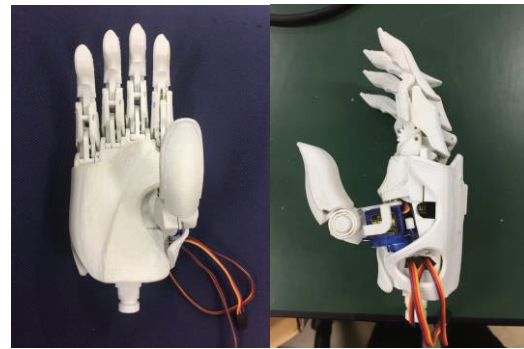


Fig. 1 作成した電動義手

4.2 条件設定

本実験における電動義手では、人の手に近い度合いである外見再現度と操作者の意図した把持動作を再現する度合いである把持動作再現度の 2 つの再現度を設定し、2 要因 4 水準とした。

4.2.1 外見再現度

外見再現度は電動義手にグローブを着脱させて再現度の高低を表す。装飾用義手に用いられるグローブを使用することができれば外見の類似性を高めることが可能であるが、それらのグローブは着用したまま動作することは想定されていない。電動義手が動作することを考えると、着用には向いていないと考えられる。電動義手へ着用させるグローブは屈曲や伸展といった動作が可能である伸縮可能な素材かつ、人間の手と類似性を感じられるために一般的によく使用されるグローブである必要がある。着用機会の多い手袋であれば、着用した状態で自身の手を見る機会も多くなり、自身の手と類似していると感じやすくなると考える。そこで日常生活でもよく使用される伸縮可能な素材の手袋として白色の作業用編手袋の着脱をさせる。外見再現度の高低は 2 段階で、白色の作業用編手袋を着用させたものを外見再現度高 (High Appearance: HA)、着用させていないものを外見再現度低 (Low Appearance: LA) と設定した (Fig. 2)。



Fig. 2 外見再現度の高低 (左: LA 右: HA)

4.2.2 把持動作再現度

SoA を感じられるためには操作者の意図する動作を再現する必要があると推測する。しかしながら、人間の手は高い自由度を持っており多様な動作を可能とするが、それらの動き全てを再現することは難しい。また、SoA を感じられるためには自身のイメージ通りに電動義手が動くことが重要であり、複雑な自由度の高い動作を行うよりも、ある特定の動作を再現する方がイメージの構築が容易で、動作再現度に対する主観的な評価もしやすいと考えた。そこで本研究では日常生活で行う自然な動作のうち、実際に頻繁に使われる動作である把持動作に着目した。また、電動義手の掌の上にボールを設置した。ボールを握るというタスクによる操作者のイメージ構築の単一化が期待でき、指の開閉角度によって把持動作再現度の高低を表すことができると考えた。把持動作再現度の高低はボールから指先までの距離で表す。ボールから指先までの距離を2段階で設定し、距離が小さい方を把持動作再現度高 (High Gripping action: HG)、距離が大きい方を把持動作再現度低 (Low Gripping action: LG) とした。Fig. 4 に各実験条件で使用した電動義手を示す。

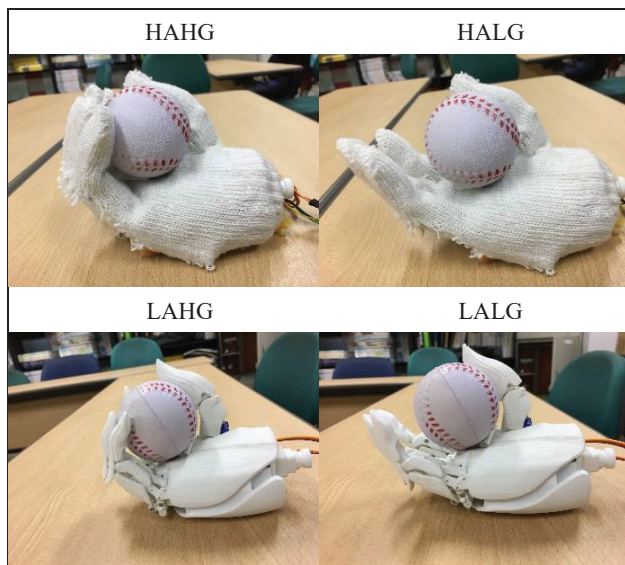


Fig. 4 実験条件ごとの電動義手

4.3 実験概要

4.3.1 倫理的配慮

本実験は正式な手続きを経て臨床研究審査専門委員会の審査に基づく岡山大学病院長および岡山大学大学院医歯薬学総合研究科長の許可を受けて実施した (整理番号: 臨1701-006)

4.3.2 実験参加者

実験参加対象者は健康かつ同意取得時の年齢が20歳以上の岡山大学 (大学院) 在学中の男子学生である。参加者は20歳から26歳 ($M = 22.4$, $SD = 1.27$) の60人である。サンプルサイズは廣田らの実験結果[34]を元に算出した。

また、実験は参加者に書面および口頭で内容を説明し、同意を得て行われた。

4.3.3 実験環境および方法

実験は一人ずつ行った。Fig. 5 に示すように、参加者は机に置かれた右手側電動義手の手前に自分の右手を置き、左手でスイッチを押下する姿勢をとる。参加者が電動義手に対しなるべく自分の手であるように認識してもらうため、自身の手も同様の姿勢をとってもらい掌が上向きとなるよう配置し、自身の右手は動かさないように指示した。また、電動義手の動作を集中して見られるよう参加者の腕部を布で覆い、電動義手のみが見える状態で操作を行った。

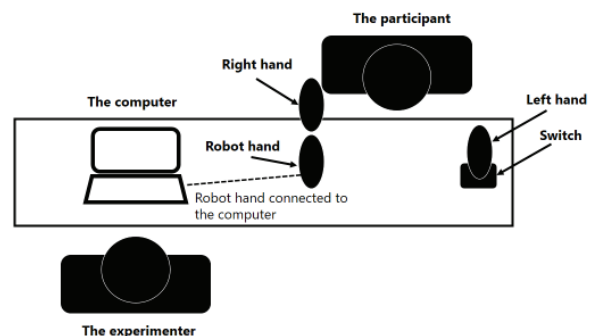


Fig. 5 実験中の配置

本実験参加者60名を1グループ15名としてFig. 4に示した4つの電動義手のグループに割り当てを行った。参加者の身長の高さによって手の大きさが異なり、電動義手に対するSoAの発生に違いが生じる可能性があるため、グループ分けは層別無作為化による割付を行う。層別因子は身長であり、170cm未満、170cm以上175cm未満、176cm以上180cm未満、180cm以上の4ブロックに分けた。身長は参加者の自己申告によるものであり、この自己申告に基づいて割り付ける。なお、各グループで操作する電動義手は1種類のみであり、グループ間での重複はない。

実験参加者に口頭で実験内容を説明し同意取得を行い、電動義手の操作説明を行った。この際に参加者に電動義手が自分の身体の一部だと思い込んでもらい、また自身がボールを把持するという動作をイメージするよう教示した。なお、外見再現度の高い電動義手を操作するグループの参加者には電動義手に装着したものと同じ手袋を着用してもらい、その状態で把持動作をイメージするよう教示した。その後、参加者に動作練習のため実際に操作を行ってもらった。この時、電動義手に遅延時間は設けておらず、練習以外にも電動義手の動作に対する動作遅延が0msでの運動イメージを形成してもらうことを目的としている。練習終了後、1回目のアンケート(Q1)を行った。この時点ではまだ参加者の腕部を隠しておらず、自身で質問票に評価を記入してもらった。Q1における質問票は「外見が人の手に似ていると感じられたか」(外見再現度)および「ものを握れていたと思うかどうか」(把持動作再現度)の2項目につ

いて 1 を最低, 7 を最高として 7 段階評価で記入してもらったものである。

続いて, 参加者の腕部を布で覆い, 操作をしてもらった。各操作において遅延時間を設けることは参加者へは告知せず, スイッチの押下から電動義手の動作までの遅延を 0ms から 900ms まで 100ms ごとに変化させ, 各遅延時間において操作は 5 回を目安に行ってもらった。操作回数を 5 回に制限しなかったのは参加者が操作回数を数えることによる集中力の低下を避けるためである。各遅延時間における操作終了後, Q1 の回答項目に追加して「自分自身で動作を行った感覚があったか」(SoA), 「まるで自分の手であるかのように感じるがあったか」(SoO) についても, 同様に 1 から 7 までの 7 段階で評価してもらった (Q2)。Q2 のアンケートは Gallagher らが述べた SoA, SoO の定義[7]を基に作成した。参加者には実験中, 右手を動かさないよう伝えてあるため, Q2 におけるアンケートでは質問項目を読み上げ, 口頭で数字を答えてもらい評価を行った。なお, 電動義手への入力から動作までの遅延時間は順序効果を考慮してグループ内でランダム化し, カウンターバランスをとった。

5. 実験結果

収集した評価は統計分析フリーソフト R (Ver.3.3.2) を用いて分析した。外見再現度および把持動作再現度の評価については, それぞれ 2 元配置分散分析を行い, 外見再現度および把持動作再現度の高低に関する評価に有意差が見られるか確認する。これは電動義手の操作を行うことで, 外見再現度と把持動作再現度間で交互作用が発生することが考えられるためである。加えて, 外見再現度および把持動作再現度の高低, 遅延時間の 3 要因による 3 元配置分散分析を行い, SoA のスコアを比較する。

5.1 外見再現度の評価

まず, 実験前の評価に対して, 等分散かどうかを確認するために F 検定を行った。HA ($M=3.7, SD=1.73$), LH ($M=4.2, SD=1.9$), $F=0.53, p=0.40$ であり, 等分散であることが確認された。また, 対応のある t 検定を行ったところ有意差は見られなかった, $t(58) = -1.53, p > .1$ 。続いて遅延時間と外見の 2 元配置分散分析を行ったが, 外見による主効果 ($F(1, 580)=2.26$), 遅延時間による主効果 ($F(9, 580)=0.6513$) はどちらも有意差が認められなかった ($p > .05$)。分散分析表を Table 1 に示す。

Table 1 外見と遅延時間を要因とする分散分析表

要因	平方和	自由度	F値
外見	2.94	1	2.2645
遅延時間	7.26	9	0.6513
外見*遅延時間	0.79	9	0.0679
残差	753	580	

5.2 把持動作再現度の評価

外見再現度の評価と同様に, 実験前の評価に対して F 検定を行った。HG ($M=3.9, SD=2.1$), LG ($M=2.9, SD=2.6$), $F=0.53, p=0.42$ であり, 等分散であることが確認された。また, 対応のある t 検定を行ったところ HG が LG より有意に高い評価を得ていることが認められた, $t(58) = 2.88, p < .01$ 。続いて, 二元配置分散分析を行った結果, 把持動作による主効果 ($F(1, 580)=59.3, p < .001$) が認められ, 遅延時間による主効果 ($F(9, 580)=1.49$) および交互作用 ($F(9, 580)=0.29$) はどちらも認められなかった ($p > .05$)。分散分析表を Table 2 に示す。

Table 2 把持動作と遅延時間を要因とする分散分析表

要因	平方和	自由度	F値
把持動作	112.31	1	59.306 ***
遅延時間	25.43	9	1.4918
把持動作*遅延時間	4.88	9	0.28866
残差	1096.51	580	

*** $p < .001$

5.3 SoA の評価

外見, 把持動作, 遅延時間の各要因に対する SoA の評価について, Bartlett の等分散の検定を行ったところ, 全ての遅延時間の評価において等分散であることが確認された ($p > .05$)。各遅延時間における SoA の評価を Fig. 5 に示す。外見, 把持動作, 遅延時間を要因とする三元配置分散分析を行った結果を Table 3 に示す。外見による主効果 ($F(1, 560)=61.95, p < .001$), 把持動作による主効果 ($F(1, 560)=8.566, p < .01$), 遅延時間による主効果 ($F(9, 560)=9.42, p < .001$) が全て認められ, 交互作用は全ての要因間で認められなかった ($p > .05$)。

加えて, 下位検定として Bonferroni の多重比較検定を行ったところ, 遅延時間 500ms において, HAHG-LAHG 間で有意差が見られ ($p < .05$), 遅延時間 300ms から 800ms の間において, LAHG-HALG 間で有意差が見られた ($p < .05$)。

Table 3 SoA の評価の分散分析表

要因	平方和	自由度	F値
外見	127.9	1	61.95 ***
把持動作	17.68	1	8.566 **
遅延時間	175	9	9.42 ***
外見*把持動作	3.1	1	1.493
外見*遅延時間	14.7	9	0.79
把持動作*遅延時間	8.7	9	0.467
外見*把持動作*遅延時間	4	9	0.215
残差	1156	560	

*** $p < .001$, ** $p < .01$

5.4 SoO の評価

外見, 把持動作, 遅延時間の各要因に対する SoA の評価について, Bartlett の等分散の検定を行ったところ, 全ての遅延時間の評価において等分散であることが確認された ($p > .05$)。外見, 把持動作, 遅延時間を要因とする三元配置分散分析を行った結果を Table 4 に示す。外見による主効果

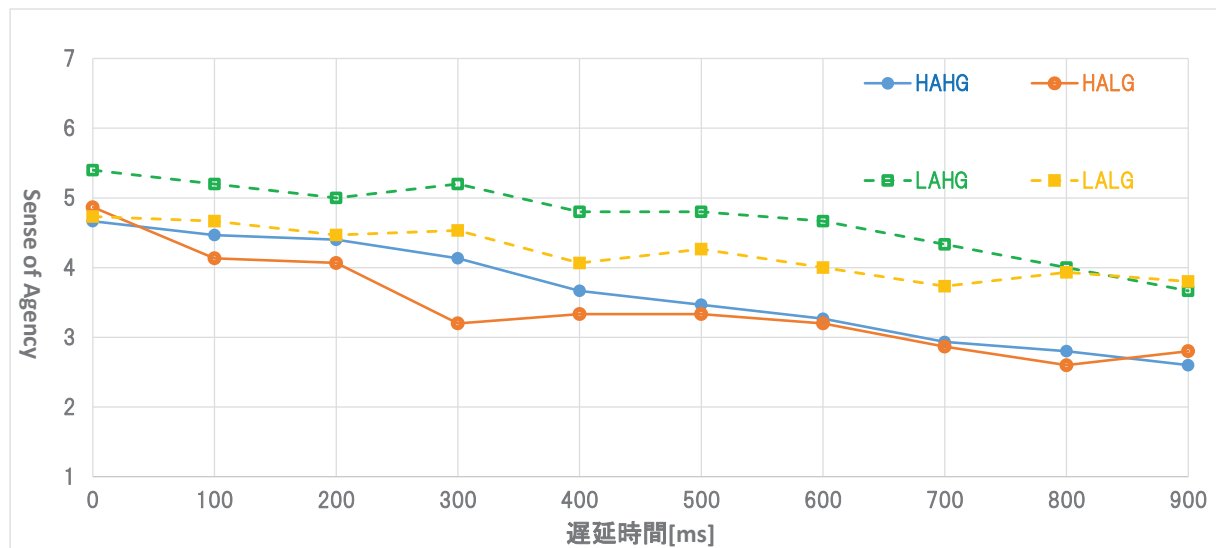


Fig. 5 各遅延時間における SoA の評価

($F(1, 560) = 27.7, p < .001$), 遅延時間による主効果 ($F(9, 560) = 5.911, p < .01$) が認められ, 把持動作による主効果 ($F(1, 560) = 2.2, p > .05$) は認められなかった. また, 交互作用は外見*把持動作でのみ見られ ($F(1, 560) = 21.1, p < .001$), その他の要因間では見られなかった ($p > .05$). 単純主効果の検定を行ったところ, HA における把持動作の効果, LA における把持動作の効果が有意であった, $F(1, 298) = 16.3, p < .001$, $F(1, 298) = 5.04, p < .05$. また, HG における外見の主効果が有意であったが ($F(1, 298) = 52.6, p < .001$), LG における外見の主効果は見られなかった. また, Bonferroni の多重比較検定を行ったが, 各遅延時間における 4 群の差は全て見られなかった ($p > .05$). SoA と SoO の評価に対して, ピアソンの積率相関係数を求めたところ, 正の相関がみられた ($r(600) = .587, p < .001$).

Table 4 SoO の評価の分散分析表

要因	平方和	自由度	F値
外見	49.3	1	27.678 ***
把持動作	3.8	1	2.156
遅延時間	94.8	9	5.911 ***
外見*把持動作	37.5	1	21.051 ***
外見*遅延時間	3.9	9	0.245
把持動作*遅延時間	6.9	9	0.428
外見*把持動作*遅延時間	6.7	9	0.416
残差	997.6	560	

*** $p < .001$

5.5 考察

電動義手の外見再現度の評価に有意差が見られず, 把持動作再現度の評価に有意差がみられた. また, SoA の評価は外見, 把持動作, 遅延時間の各要因に主効果が見られ, 特に遅延時間 300ms~800ms で LAHG-HALG 間で有意差が認められた. SoO の評価は外見と遅延時間による主効果が確認され, 外見と把持動作による交互作用も確認されたが, 各遅延時間における群間では差が見られなかった.

外見再現度の評価に差があらわれなかったにも関わら

ず, HA グループの方が LA グループよりも SoA の評価が低くなる傾向がある. これはグローブを着用することによって“不気味の谷”効果[29]が反映された可能性がある. Poliakoff らは人間の手の評価項目として, 人間らしさではなく, 不気味さ (eeriness) を採用しており, 手の外見の不気味さと親しみやすさのそれぞれの評価が描く曲線が“不気味の谷”と同様になることを明らかにしている[31]. HA グループで使用したグローブは生活の中で目にする機会が多く, 実験参加者にとっても見慣れたものであると考える. 通常であれば不気味さを感じないはずの外見である. しかし, グローブを着用している手, あるいは物体がどのように動くのかを想像することが容易いために, 脳内で想像した期待する動作とのずれを感じやすく, そのずれが不気味さに繋がっていた可能性がある.

逆に, LA グループでは外見がもたらす動作に対する期待がないため, 不気味さを感じにくかったと考える. Gray らは, ロボットへの期待する動作と実際の動作の不一致が親しみやすさを低下させる結果を示しており[35], 本実験での HA グループにおける親しみやすさの低下は動作への期待の高さに起因していた可能性を示唆している. 親しみやすさの増減が直接 SoA の増減に結びついているかは明らかではないが, 自己受容感覚が親しみやすさに影響を受けることや[23], SoA が自己受容感覚や視覚フィードバックに影響を受けること[7], [24], [36]を考えると, 本実験では電動義手の親しみやすさによって SoA が影響を受けている可能性が高い. 加えて, SoO の評価に外見の主効果が確認されたことから, 外見の違いによる自己受容感覚が変調をきたしていたと考えられる. しかしながら, 本実験では電動義手の外見評価を“人間らしさ”のみとしたため, 親しみやすさが変化していたかどうかは明らかにできていない. これは質問項目の不足が原因であり, 今後の実験では外見を評価する項目を検討する必要がある.

把持動作再現度の評価には有意差がみられ、SoA への主効果も確認された。これは、期待した動作が実際に達成される方が SoA を得られやすいことを示しており、仮説を支持する結果となった。しかしながら、LA グループ内で比較すると、把持動作再現度による差があまりない。これは、グローブを着用したことによる不気味さが先行し、把持動作への注目が妨げられた結果であると考えられる。また、SoA の評価は高い方から順に、LAHG, LALG, HAHG, HALG と外見ごとに層化しており、動作よりも外見の方が SoA に影響を及ぼしている。本実験における SoO の評価を考えてみると、把持動作再現度による主効果は確認されなかった。SoO は動作とは無関係に発生する感覚である[7]ため、把持動作再現度による自己受容感覚が変調しなかったと考えられる。以上のことから、自己受容感覚の変調が起こらず視覚フィードバックのみが SoA へ影響を及ぼしてことは、把持動作が外見よりも SoA へ及ぼす影響が少ない理由と考えられる。

遅延時間による SoA への主効果も確認されている。遅延時間が SoA に影響を及ぼしていることは先行研究[11]と一致している。遅延時間 300ms から LAHG-HALG 間で有意差がみられていることから、300ms が動作遅延の弁別閾であることは先行研究と変わらない。HALG グループでは外見が親しみにくい上に、把持動作の達成度の低さから、遅延を感じやすく SoA が減少しやすかったことが考えられる。しかしながら、LA グループにおいては SoA の大きな低下はみられない。これは外見によっては遅延時間を感じつつも SoA を感じられる可能性を示唆している。例えば、LALG グループでは SoA の最高値と最低値の差が最も小さく、本実験では行っていない遅延時間 900ms 以降でも SoA が大きく低下しにくいことが推察される。LAHG グループでは概ね高い SoA の評価を得ているが、遅延時間 700ms から減少傾向にある。この 700ms は SoA が完全になくなり始める遅延時間であると報告されており[11]、900ms 以降も減少を続けることが予測される。これらのことから、SoA を感じられるためには、動作や外見を人間に近づけるよりも、ある程度ロボットらしさや不完全さを残していた方が適切となる可能性がある。

本実験では、外見と把持動作が SoA に影響を及ぼしていることを明らかにしたが、外見再現度の評価に差が表れなかったことで、外見のどのような要因が SoA に影響を及ぼしているのかは明らかではない。加えて、入力方法がスイッチの押下であったことから、触覚による SoA への影響も除外することはできない。そのため、今後の研究では質問項目の検討および動作入力方法の検討を行う必要がある。

6. おわりに

鏡療法を拡張したリハビリテーションは、今後更なる発展が期待される。その中で、リハビリの効果を損なわない

義手を作成するための要件はあまり多く明らかではない。本研究では、電動義手の外見や遅延時間といった視覚フィードバックによって SoA が変化すること明らかにした。本研究における結果は、必ずしも人間に似せることが SoA の増加に繋がるわけではなく、ロボットとしての外見を保持している方が、SoA を得られやすい可能性を示唆している。しかしながら、具体的にどのような要因が SoA に寄与しているかは未だ明らかではない。今後の研究として、不気味さやカッコよさといったロボットが人間に与える感情に着目した評価項目を設定し、電動義手の外見のコントロールする範囲を吟味することで、より具体的な設計への要件が明らかになることが期待される。

謝辞 本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（課題番号 26462382, 17K11109）の支援によるものである。ここに記し、謝意を表す。また、多忙な中実験にご協力いただいた参加者の諸氏に深く感謝する

参考文献

- [1] K. Juottonen, M. Gockel, T. Silén, H. Hurri, R. Hari, and N. Forss, “Altered central sensorimotor processing in patients with complex regional pain syndrome,” *Pain*, vol. 98, no. 3, pp. 315–323, Aug. 2002.
- [2] I. Tracey and P. W. Mantyh, “The cerebral signature for pain perception and its modulation,” *Neuron*, vol. 55, no. 3, pp. 377–391, Aug. 2007.
- [3] 住谷昌彦, 柴田政彦, 眞下節, 山田芳嗣, “CRPS の診断と治療,” *Anesth. 21 Century* 32, vol. 10, no. 3, pp. 1935–1940, 2008.
- [4] V. S. Ramachandran and W. Hirstein, “The perception of phantom limbs. The D. O. Hebb lecture,” *Brain J. Neurol.*, vol. 121 (Pt 9), pp. 1603–1630, Sep. 1998.
- [5] C. S. McCabe, R. C. Haigh, E. F. J. Ring, P. W. Halligan, P. D. Wall, and D. R. Blake, “A controlled pilot study of the utility of mirror visual feedback in the treatment of complex regional pain syndrome (type 1),” *Rheumatol. Oxf. Engl.*, vol. 42, no. 1, pp. 97–101, Jan. 2003.
- [6] T. Weiss, W. H. Miltner, T. Adler, L. Brückner, and E. Taub, “Decrease in phantom limb pain associated with prosthesis-induced increased use of an amputation stump in humans,” *Neurosci. Lett.*, vol. 272, no. 2, pp. 131–134, Sep. 1999.
- [7] S. Gallagher, “Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science,” *Trends Cogn. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 14–21, Jan. 2000.
- [8] M. Osumi *et al.*, “Structured movement representations of a phantom limb associated with phantom limb pain,” *Neurosci. Lett.*, vol. 605, pp. 7–11, Sep. 2015.
- [9] K. Sato *et al.*, “Nonimmersive Virtual Reality Mirror Visual Feedback Therapy and Its Application for the Treatment of Complex Regional Pain Syndrome: An Open-Label Pilot Study,” *Pain*

- Med.*, vol. 11, no. 4, pp. 622–629, Apr. 2010.
- [10] T. Yanagisawa *et al.*, “Induced sensorimotor brain plasticity controls pain in phantom limb patients,” *Nat. Commun.*, vol. 7, p. 13209, Oct. 2016.
- [11] C. Farrer, G. Valentin, and J. M. Hupé, “The time windows of the sense of agency,” *Conscious. Cogn.*, vol. 22, no. 4, pp. 1431–1441, Dec. 2013.
- [12] L. Lin and S. Jörg, “Need a Hand?: How Appearance Affects the Virtual Hand Illusion,” in *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, New York, NY, USA, 2016, pp. 69–76.
- [13] V. Schwind, L. Lin, M. Di Luca, S. Jörg, and J. Hillis, “Touch with Foreign Hands: The Effect of Virtual Hand Appearance on Visual-haptic Integration,” in *Proceedings of the 15th ACM Symposium on Applied Perception*, New York, NY, USA, 2018, pp. 9:1–9:8.
- [14] V. Schwind, P. Knierim, L. Chuang, and N. Henze, “‘Where’s Pinky?’: The Effects of a Reduced Number of Fingers in Virtual Reality,” in *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, New York, NY, USA, 2017, pp. 507–515.
- [15] 菅原正秋, 吉川恵士, 林田真和, 有田英子, and 花岡一雄, “慢性疼痛の評価と治療,” 全日本鍼灸学会雑誌, vol. 54, no. 2, pp. 120–136, May 2004.
- [16] V. S. Ramachandran, “Behavioral and magneto-encephalographic correlates of plasticity in the adult human brain,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 90, no. 22, pp. 10413–10420, Nov. 1993.
- [17] A. Karakin-Tais, “13-year study of pain in phantom limbs of amputees-victims of war in Sarajevo (period 1992-2005),” *Proc. Pain Eur. V 2006*, 2006.
- [18] 眞下節, 複合性局所疼痛症候群 CRPS(complex regional pain syndrome). 真興交易(株)医書出版, 2009.
- [19] Kandel E. R. *et al.*, カンデル神経科学. メディカル・サイエンス・インターナショナル, 2014.
- [20] C. S. Sherrington, “On Plastic Tonus and Proprioceptive Reflexes,” *Q. J. Exp. Physiol.*, vol. 2, no. 2, pp. 109–156, Jan. 1909.
- [21] 吉村浩一, “自己受容感覚は非視覚的か: 変換視研究からの提言,” 基礎心理学研究, vol. 9, no. 2, pp. 105–113, 1991.
- [22] G. R. Fink *et al.*, “The neural consequences of conflict between intention and the senses,” *Brain*, vol. 122, no. 3, pp. 497–512, Mar. 1999.
- [23] C. S. Harris, “Perceptual adaptation to inverted, reversed, and displaced vision,” *Psychol. Rev.*, vol. 72, no. 6, pp. 419–444, 1965.
- [24] 宮崎美智子, 高橋英之, 岡田浩之, 開一夫, “自己認識における運動主体感の役割と発達メカニズム,” 認知科学 *Cogn. Stud. Bull. Jpn. Cogn. Sci. Soc.*, vol. 18, no. 1, pp. 9–28, Mar. 2011.
- [25] M. P. M. Kammers, F. de Vignemont, L. Verhagen, and H. C. Dijkerman, “The rubber hand illusion in action,” *Neuropsychologia*, vol. 47, no. 1, pp. 204–211, Jan. 2009.
- [26] S.-J. Blakemore, D. M. Wolpert, and C. D. Frith, “Abnormalities in the awareness of action,” *Trends Cogn. Sci.*, vol. 6, no. 6, pp. 237–242, Jun. 2002.
- [27] M. Tsakiris, G. Prabhu, and P. Haggard, “Having a body versus moving your body: How agency structures body-ownership,” *Conscious. Cogn.*, vol. 15, no. 2, pp. 423–432, Jun. 2006.
- [28] M. Tsakiris, M. R. Longo, and P. Haggard, “Having a body versus moving your body: neural signatures of agency and body-ownership,” *Neuropsychologia*, vol. 48, no. 9, pp. 2740–2749, Jul. 2010.
- [29] M. Mori, K. F. MacDorman, and N. Kageki, “The Uncanny Valley [From the Field],” *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 19, no. 2, pp. 98–100, Jun. 2012.
- [30] J. Seyama and R. S. Nagayama, “The Uncanny Valley: Effect of Realism on the Impression of Artificial Human Faces,” *PRES-ENCE Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 16, pp. 337–351, 2007.
- [31] E. Poliakoff, N. Beach, R. Best, T. Howard, and E. Gowen, “Can Looking at a Hand Make Your Skin Crawl? Peering into the Uncanny Valley for Hands,” *Perception*, vol. 42, no. 9, pp. 998–1000, Sep. 2013.
- [32] 樋田浩一, 上野佳奈子, 嶋田総太郎, “身体運動に伴う遅延聴覚フィードバックの知覚順応,” 認知科学, vol. 20, no. 4, pp. 493–497, 2013.
- [33] “Home,” *exiii | Haptic Wearable Technology for XR*. [Online]. Available: <https://exiii.jp/>. [Accessed: 18-Jan-2019].
- [34] 廣田遼平, 五福明夫, 杉原太郎, 佐藤健治, 三宅貫太郎, 北原亮宏, “電動義手の外見再現度が運動主体感に及ぼす影響の検討,” presented at the 日本機械学会 中国四国支部第 54 期総会・講演会, 2016.
- [35] K. Gray and D. M. Wegner, “Feeling robots and human zombies: Mind perception and the uncanny valley,” *Cognition*, vol. 125, no. 1, pp. 125–130, Oct. 2012.
- [36] M. Synofzik, G. Vosgerau, and A. Newen, “I move, therefore I am: a new theoretical framework to investigate agency and ownership,” *Conscious. Cogn.*, vol. 17, no. 2, pp. 411–424, Jun. 2008.