

# 腹部運動で操作可能な仮想肢への身体感覚の拡張

大久保 正隆<sup>\*1\*2</sup> 西尾 修一<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup>大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻

<sup>\*2</sup>国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) 石黒浩特別研究所

Acquiring extra limbs can open new possibilities for human beings. However, to realize such addition, number of issues need to be resolved including not just engineering challenges but also in extending human abilities for controlling and recognizing them as part of ourselves. Here we examined if people can feel ownership to an extra arm by controlling it with abdominal motion. As a result we found that better control of the additional part leads to finer feeling of its ownership.

## 1. 序論

本研究の最終的な目的は、人が拡張肢を操作することを可能にすることである。拡張肢とは、既存の部位と協力したり、単独で動けたりできる新たな部位のことを指す。例えば両手で荷物を保持しながら鍵をとりたいとき、その拡張肢で鍵を取るといった用途が考えられる。

操作者の意図通りに拡張肢が動くことで、操作者は拡張肢を自分の一部と感じるようになって考えられる。拡張肢を自分の一部と感じるようになれば、拡張肢を生来の四肢と同じようによりうまく操作したくなる。そのうえで拡張肢をうまく操作できるようになれば、もっと拡張肢を自分の一部と感じるのではないだろうか。このように、拡張肢を自分の一部と感ずることと、拡張肢の操作性との間に相互のフィードバックループが生じる可能性がある。しかし、このようなフィードバックを生じさせるためには、そもそも拡張肢を自らの一部と感ずたり、あるいは拡張肢の適切な操作方法を見出す必要がある。本稿ではこの後者、拡張肢の操作の検討と実験を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 関連研究

渡辺らは、操作者が人によく酷似した外観を持つアンドロイド・ロボット（以下アンドロイドと略）を操作する際に生じる錯覚（身体感覚転移）を検証している [渡辺 11]。自分の動きにつれてロボットの腕が動く、という遠隔操作の際に、操作者の動きにあわせてアンドロイドの腕が動く様子を見ると、操作者はアンドロイドを自分の一部と錯覚するようになることが分かった。また大久保らは、操作対象の見え目や実体の有無がこの錯覚にどのような影響をあたえるかを検証した [大久保 14]。その結果、実体のある操作対象（ロボット）の方が、実体がない操作対象（CG）よりも錯覚は強く、また人に似た見え目のほうが、ロボットや木の棒よりも錯覚が強いことがわかった。

これら研究では、操作者が自らの腕を動かした際に、アンドロイドの腕が動く様子を見ることで、アンドロイド腕を自分の一部と感ずている。しかし拡張肢は人には無い部位であるため、拡張肢をどのように操作するといったのかを考える必要がある。つまり拡張肢を自分の一部と感ずるために、拡張肢の操作方法を検討する必要がある。

拡張肢の操作方法として、ブレイン・マシン・インタフェー

ス (BMI) を用いた方法と「筋肉の置き換え」を用いた方法とが考えられる。BMI、特に脳波による BMI によりロボットや義手を操作する研究は近年数多くなされている。また脳波 BMI を用いて身体感覚転移を検証した研究としては、Alimardani らの研究が挙げられる [Alimardani 13]。この研究では、運動想起によりロボットの腕を操作した際に、触覚や固有感覚（身体姿勢、位置、重さなどの感覚）がなくても、動かす意思（運動意思）と動かした結果を見る（視覚）の同期によって、操作者はロボットの手を自分の一部と感ずることを示している。しかし、一般的には脳波よりも筋肉のほうが、恣意的に制御しやすいと考えられる。

そのため本論文では「筋肉の置き換え」によって拡張肢を操作した。ここで筋肉の置き換えとは、既存の身体部位に対応した筋肉を、拡張肢を動かすために筋肉に変える方法を指す。この置き換えを用いて、拡張肢を操作した研究もなされている。Steptoe らは尾を臀部につけた人型のアバターを操作した際に、そのアバターを自分と感ずるのかを調べている [Steptoe 13]。ここで操作者は、臀部を左右に振ることによって尾を操作しており、アバターの尾を自分の一部と感ずることが分かった。しかし手や臀部といった日常的によく動かす部位で筋肉の置き換えをやってしまうと、タスク毎に操作方法を変える必要が出てきたり、操作に用いる身体部位と同時に動いてしまい、拡張肢単独で動くことができなかつたりするので適さない。

そこで、本研究では意図的に動かす機会が少なく、かつ意識して動かすことができる部位として腹部を用いて、拡張肢の操作を行うこととした。腹部の動きによって拡張肢を操作した際に、その拡張肢を操作者が自分の一部と感ずるのかを検証した。

## 3. 実験方法

### 3.1 目的

本実験では、腹部による操作で、拡張肢を自分の一部と感ずるかを以下の仮説によって検証した。

- H1** 実体のあるものに影響を与えることで自分の身体の一部と感ずやすくなる
- H2** 操作者の意図通りに操作できると、自分の一部と感ずやすくなる
- H3** 回数を重ねることで、自分の一部と感ずやすくなる

運動意思と運動結果の一致によって、触覚や固有感覚（身体姿勢、位置、重さなどの感覚）がなくても、ロボットを操作者

連絡先: 大久保正隆, 大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻/国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) 石黒浩特別研究所, okubo.masataka@irl.sys.es.osaka-u.ac.jp

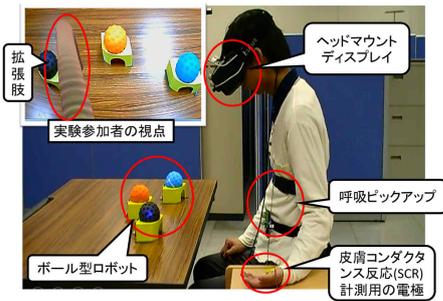


図 1: 実験環境：ヘッドマウントディスプレイ，カメラ，呼吸ピックアップ，ボール型ロボットによって構築した。ヘッドマウントディスプレイを通して，参加者は拡張肢を見ることができる。

に自分の一部と感じさせ，触覚や固有感覚を疑似的に発生させることができるため [Alimardani 13]，拡張肢は CG モデルを用いた。しかし CG(実体のない物体)はロボット(実体のある物体)よりも自分の一部と感じる度合いが低いことが分かっている [大久保 14]。そのため CG モデルに対して自分の一部と感じる度合いを向上させる必要がある。CG モデル自体を改善しても，操作者は画面を通して拡張肢を見ることから，自分の一部と感じる度合いがあまり向上しにくい。そこで CG モデルが，操作者が画面を通さなくても見ることができる実体のある物体に，影響を与えることで，拡張肢を操作者が自分の一部と感じやすくなると考え，仮説 H1 を検証した。

更に参加者は拡張肢を腹部の伸縮運動によって操作した。拡張肢を自分の一部と感じるためには，動かす意思(運動意思)と動かした結果を見る(視覚)が大事である [渡辺 11]。そのため拡張肢を腹部でうまく操作できたかどうか，拡張肢を操作者が自分の一部と感じる度合いに影響を与えると考え，仮説 H2 を検証した。また回数を重ねることで，拡張肢を操作しやすくなることによって，拡張肢を操作者が自分の一部と感じやすくなるとも考え，仮説 H3 を検証した。

### 3.2 実験環境

実験環境は，図 1 のように構築した。モーションキャプチャシステム (V120 Trio, OpTiTrack 社製) を用いた高精度な 3 次元位置の取得によって拡張肢の位置や姿勢を決め，拡張肢を操作するために，腹部の伸縮運動を呼吸ピックアップ (PVDF Effort Belts, ダイメディックス社製) と生態信号収録機器 (Polymate II AP216, ティアック社製) を用いて計測した。実験参加者はヘッドマウントディスプレイ (Oculus Rift DK2, Oculus 社製) とカメラ (Ovrvision, しのびや.com 社製) を用いて，拡張肢が動く様子を観察できる。さらに CG による拡張肢がボール型ロボット (Sphero 2, Sphero 社製) の上を通過した際に，ボールが回転する。

### 3.3 条件

仮説 H1「実体のあるものに影響を与えることで自分の身体の一部と感じやすくなる」を検証するために，ボールに拡張肢が当たったときに動く条件(ボール可動)と動かない条件(ボール不動)を比較した。仮説 H2「操作者の意図通りに操作できると，自分の一部と感じやすくなる」を検証するために，100%動作する条件(操作良)と 75%動作する条件(操作悪)を比較した。さらに仮説 H3「回数を重ねることで，自分の一部と感じやすくなる」を検証するために，日を変えて実験を 2 回行い，1 回目と 2 回目を比較した。

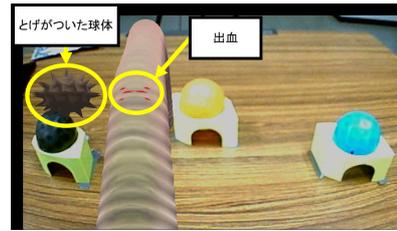


図 2: 刺激画面：タスクを行った直後に，拡張肢の上からとげがついた球体を拡張肢に落とした。とげが拡張肢に衝突したとき，拡張肢が出血するようにしている。

### 3.4 実験参加者

本実験は，合計で 15 名(男性 11 名，女性 4 名)，平均年齢 25.7 歳(標準偏差 7.1)で行った

### 3.5 手続き

実験参加者は，実験の説明を受けた上で実験に同意し，参加した。本実験は，国際電気通信基礎技術研究所倫理委員会の承認を受けている(倫 15-606)。最初に実験参加者は腹部の伸縮運動を計測するために，呼吸ピックアップを装着した。呼吸ピックアップは，ゴム製のベルトとともに装着することで，ゴムが伸び縮みした際の電位を計測することができる。まず拡張肢と，ボールの代わりに青・オレンジ・黒の正方形マークを表示したディスプレイ画面を見ながら参加者は拡張肢の操作練習を行った。参加者が腹部を膨らまし(へこまし)胸をへこませる(膨らませる)ことによって，拡張肢を右(左)に操作した。次に残りの機器(ヘッドマウントディスプレイ，皮膚コンダクタンス反応(SCR)を計測するための電極)を参加者は装着した。ヘッドマウントディスプレイは，頭部に装着するディスプレイ装置である。図 1 で練習をもう一度行った。次に本試行を行った。本試行では，タスクとアンケートを条件ごとに計 4 回行った。タスクでは，実験者側から参加者に，黒・オレンジ・青と音声で指示した。ヘッドマウントディスプレイを通してみた際に，光源の影響を受けても，参加者が識別できる色として黒，オレンジ，青を選択した。参加者は音声指示に従って，拡張肢を指定された色のある位置まで動かす。タスクを行った直後に，拡張肢の上からとげがついた球体を拡張肢に落とした(図 2)。SCR は，痛みを感じたときに反応することが分かっている [Armel 03]。そのため参加者が拡張肢を自分の一部と感じている場合，とげが拡張肢に衝突することによって，参加者が拡張肢の痛みを感じ，SCR が反応すると考えられる。

その後，7段階評価(1:全く感じなかった-7:とても感じた)により，「Q1: 拡張肢を自分の身体の一部と感じましたか」，「Q2: 拡張肢を思い通りに動かせましたか」，「Q3: 拡張肢がボールを動かしていましたが」，「Q4: 拡張肢に物体がぶつかったとき，自分にぶつかった感じがしましたか」の質問を参加者に行った。その後機器を外して，腹部運動による操作には慣れたか，拡張肢に慣れたか，拡張肢をどんなところで使いたいかなどのインタビューを参加者に対して行った。

### 3.6 評価方法

評価方法にはアンケートによる主観評価と，拡張肢に物体がぶつかることによって反応する皮膚コンダクタンス反応(SCR)を用いた。SCR とは自律神経が喚起されたとき，例えば痛みを感じたときに反応する。Armel らは，自分の腕と感じているラバーハンドに痛みが伴うような刺激を与えると，SCR が生じることを確認した [Armel 03]。つまり SCR によって，客

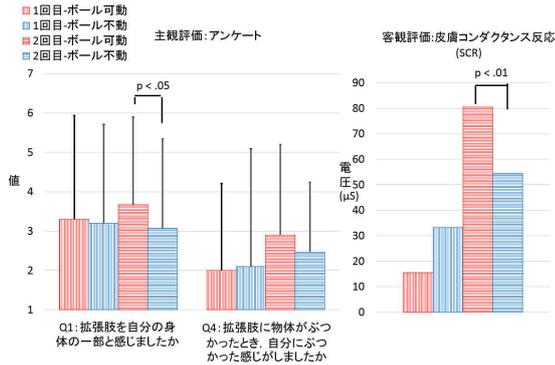


図 3: ボール条件の分析結果: Q1「拡張肢を自分の身体の一部と感じましたか」、Q4「拡張肢に物体がぶつかったとき、自分にぶつかった感じがしましたか」の主観評価は平均値で示す。縦軸はアンケートの値。客観評価は皮膚コンダクタンス反応 (SCR) の平均値で示す。横軸は電圧 ( $\mu\text{s}$ )

観的指標を用いて自分の身体の一部と感じているかどうかを検証できると考えられる。

## 4. 結果

Shapiro-Wilk 検定により正規性が棄却されたため、主観評価値を Friedman 検定により 2 要因 (操作性、ボールの可動性) について検定した。その結果、有意差が認められた場合、Wilcoxon の符号順位検定により下位検定を行い、Steel-Dwass 法により補正をかけた。

### 4.1 条件: ボール

主観評価であるアンケート、客観評価である SCR において、以下の結果が得られた (図 3)。主観評価アンケートでは、ボールが動く方が動かない方よりも拡張肢を自分の一部と感じやすい (1 回目:  $p=0.31$ ,  $Z=0.47$ ,  $r=0.10$ , 2 回目:  $p<.05$ ,  $Z=2.24$ ,  $r=0.52$ )。ボールが動く方が動かない方よりも拡張肢を思い通りに動かさせた (1 回目:  $p=0.73$ ,  $Z=-0.61$ ,  $r=-0.14$ , 2 回目:  $p<.001$ ,  $Z=4.83$ ,  $r=0.89$ )。ボールが動く方が動かない方よりも拡張肢でボールを動かしたと感じた (1 回目:  $p<.001$ ,  $Z=3.30$ ,  $r=0.67$ , 2 回目:  $p<.0011$ ,  $Z=5.29$ ,  $r=1.08$ )。ボールが動く方が動かない方よりも、拡張肢に物体がぶつかったとき、自分にぶつかった感じがした (1 回目:  $p=0.65$ ,  $Z=-0.40$ ,  $r=-0.12$ , 2 回目:  $p<.051$ ,  $Z=2.07$ ,  $r=0.53$ )。客観評価 SCR では、ボールが動いた方が動かない方よりも拡張肢を自分の一部と感じている (1 回目:  $p=0.53$ ,  $Z=-0.09$ ,  $r=-0.01$ , 2 回目:  $p<.01$ ,  $Z=2.33$ ,  $r=0.44$ )。

### 4.2 条件: 操作

主観評価であるアンケート、客観評価である SCR において、以下の結果が得られた (図 4)。主観評価アンケートでは、操作性が良い方が悪い方よりも拡張肢を自分の一部と感じやすい (1 回目:  $p<.01$ ,  $Z=2.77$ ,  $r=0.65$ , 2 回目:  $p<.05$ ,  $Z=2.01$ ,  $r=0.43$ )。操作性が良い方が悪い方よりも拡張肢を思い通りに動かさせた (1 回目:  $p<.001$ ,  $Z=4.83$ ,  $r=0.89$ , 2 回目:  $p<.001$ ,  $Z=5.78$ ,  $r=1.09$ )。操作性が良い方が悪い方よりも拡張肢でボールを動かしたと感じた (1 回目:  $p<.05$ ,  $Z=2.13$ ,  $r=0.44$ , 2 回目:  $p<.01$ ,  $Z=2.58$ ,  $r=0.64$ )。客観評価 SCR では、有意差は生じなかった (1 回目:  $p=0.86$ ,  $Z=-1.08$ ,  $r=-0.19$ , 2 回目:  $p=0.40$ ,  $Z=0.22$ ,  $r=0.04$ )。

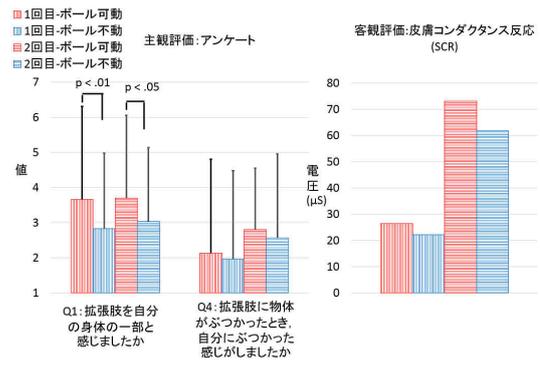


図 4: 操作条件の結果: Q1「拡張肢を自分の身体の一部と感じましたか」、Q4「拡張肢に物体がぶつかったとき、自分にぶつかった感じがしましたか」の主観評価は平均値で示す。縦軸はアンケートの値。客観評価は皮膚コンダクタンス反応 (SCR) の平均値で示す。横軸は電圧 ( $\mu\text{s}$ )

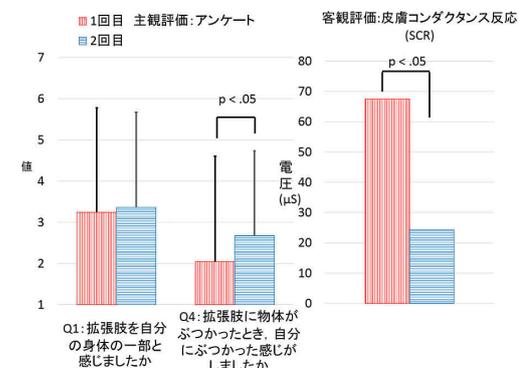


図 5: 回数条件の結果: Q1「拡張肢を自分の身体の一部と感じましたか」、Q4「拡張肢に物体がぶつかったとき、自分にぶつかった感じがしましたか」の主観評価は平均値で示す。縦軸はアンケートの値。客観評価は皮膚コンダクタンス反応 (SCR) の平均値で示す。横軸は電圧 ( $\mu\text{s}$ )

### 4.3 条件: 回数

主観評価であるアンケート、客観評価である SCR において、以下の結果が得られた (図 5)。主観評価アンケートでは、2 回目の方が 1 回目の方よりも拡張肢を思い通りに動かさせた ( $p<.05$ ,  $Z=2.09$ ,  $r=0.34$ )。2 回目の方が 1 回目の方よりも、拡張肢に物体がぶつかったとき、自分にぶつかった感じがした ( $p<.05$ )。客観評価 SCR では、1 回目の方が 2 回目の方よりも拡張肢を自分の一部と感じている ( $p<.05$ ,  $Z=2.31$ ,  $r=0.31$ )。

## 5. 考察

ボール条件において、ボールが動く方が動かない方よりも拡張肢を操作者は自分の一部と感じやすく (Q1: 2 回目:  $p<.05$ )、拡張肢に物体がぶつかったときに自分にもぶつかった感じがした (Q4: 2 回目:  $p<.05$ )。さらに客観評価である SCR でも、ボールが動いた方が動かない方よりも拡張肢を自分の一部と感じていることが分かった (2 回目:  $p<.01$ )。つまり拡張肢が現実に影響を与えることで操作者は拡張肢を自分の一部と感じる度合いが強まる (H1)。

操作条件において、操作性が良い方が悪い方よりも拡張肢を操作者が自分の一部と感じやすいことが分かった (Q1: 1 回目:  $p < .05$ , 2 回目:  $p < .01$ ). しかし客観評価である SCR では有意差が生じなかった. このことから、操作性の良し悪しが拡張肢を自分の一部と感じる度合いに影響を与える可能性がある. さらに操作性が良い方が悪い方よりも拡張肢を思い通りに動かさせた (Q2: 1 回目:  $p < .001$ , 2 回目:  $p < .001$ ). つまり操作者の意図通りに操作できると操作者は拡張肢を自分の一部と感じる度合いが強くなる傾向がある (H2).

またボール条件において、ボールが動く方が動かない方よりも操作者は拡張肢でボールを動かしたと感じ (1 回目:  $p < .001$ , 2 回目:  $p < .001$ ), 拡張肢を思い通りに動かさせた (Q2: 2 回目:  $p < .001$ ). ボールを操作することで、操作者は操作がうまくいっているように感じるといえる. さらに操作条件において、操作性が良い方が悪い方よりも拡張肢でボールを動かしたと操作者は感じた (Q3: 1 回目:  $p < .05$ , 2 回目:  $p < .01$ ). このことから CG の拡張肢の操作によって、ボールを操作しているように錯覚している可能性があるといえる. つまり拡張肢をうまく操作できることで、実際の動作にかかわらず、現実の物体に影響を与えているような錯覚を引き起こす可能性がある. このことから拡張肢が実体のあるものに影響を与えることと拡張肢をうまく操作できることとの間には相互補間の関係があると考えられる. この結果から、実体のあるものに影響を与え、うまく操作することは、操作者が拡張肢を自分の一部と感じる度合いに影響を与える大事な要因であると考えられる.

回数条件において、2 回目の方が 1 回目の方よりも、拡張肢に物体がぶつかったとき操作者は自分にぶつかった感じがした (Q4:  $p < .05$ ). このことから拡張肢を 1 回目よりも 2 回目のほうが自分の一部と感じていることがわかる. しかし客観評価である SCR では、1 回目の方が 2 回目の方よりも拡張肢を自分の一部と感じていることが分かった ( $p < .05$ ). 主観評価だと 2 回目のほうが自分の一部と感じ、客観評価だと 1 回目のほうが自分の一部と感じた. 拡張肢に物体がぶつかるといった刺激を繰り返し見たために、刺激自体の効果が弱くなった. そのため SCR の結果が 1 回目よりも 2 回目のほうが低下したと考えている. インタビューにおいて、拡張肢の印象を参加者に尋ねている. 1 回目では拡張肢に対して違和感を感じ抵抗があったと答えている人が多くいたが、2 回目になると拡張肢に対して抵抗が少なくなったまたはなくなったと答える人のほうが多くなった. 以上のことから回数を重ねることで、操作者は拡張肢を自分の一部と感じやすくなる傾向がある (H3).

また 2 回目の方が 1 回目の方よりも操作者は拡張肢を思い通りに動かさせた (Q2:  $p < .05$ ). トレーニングをすることによって、操作性が向上したように感じたといえる. さらに実験時に青・オレンジ・黒といった音声指示を行って、実験参加者に拡張肢を支持された色がある位置まで動かしてもらうという操作させている. そのため練習時も実験者側から音声指示をし、参加者に拡張肢を操作させている. 練習時に本試行と同じタスクを行う理由は、本試行での操作の仕方を参加者に教える目的と、参加者が拡張肢をどのくらい操作できるのかを計測する目的がある. 計測結果が 70% 以下は、腹部で拡張肢をうまく操作できていないと判断し、比較してもあまり効果が得られないと考えている. 練習は 2 回あり、2 回とも音声指示を行っている. そのためどちらも 70% 以下なら解析データからのぞいた. 参加者による拡張肢の動きと音声指示による拡張肢の動きを比べた. 例えば青といった音声指示を行っている間に、拡張肢を動かして青を動かしたかどうかの判定した. 全体で指示が y 回あったうち何回操作できたのかの割合で判別した. 真ん中のオ

レンジについては、オレンジのボールがある範囲に拡張肢を止めることによって、指示に従ったと判断した. 練習時のタスクの正答率を 1 回目の実験, 2 回目の実験と比較を行った. その結果, 2 回目の実験のほうが 1 回目の実験よりも向上したのは全体の 40% であった. 1 回目の実験と 2 回目の実験とが同じ正答率だったのは 33% であった. 以上より回数を重ねることで、操作者の操作性が向上につながる傾向があるといえる.

しかし操作者は拡張肢を自分の一部と感じる度合いが低かった. 腹部は意識して動かせる部位であるため、操作者にとって拡張肢を動かしている意識よりも、腹部を動かしている意識のほうが強くなってしまったためだと考えられる.

## 6. 結論

本論文では、腹部による操作で、拡張肢を自分の一部と感じるかを検証した. その結果、実体のあるものに拡張肢が影響を与えることで、自分の身体の一部と感じやすくなる、操作者の意図通りに操作できると、回数を重ねることで、自分の一部と感じやすくなる傾向がある. 更に実体のあるものに影響を与え、うまく操作することは、拡張肢を自分の一部と感じる度合いに影響を与える大事な要因である、回数を重ねることで、操作性が向上につながる傾向があることがわかった.

しかし拡張肢を自分の一部と感じる度合いが低かった. それは、腹部はもともと動かさせた部位であるため、拡張肢を動かしている意識よりも、腹部を動かしている意識のほうが強くなってしまったためだと考えられる. そのため次の実験ではほとんどの人が動かせない部位である筋肉を使えるようにし、その筋肉を用いて拡張肢の操作を行う.

## 謝辞

本研究は、科研費挑戦的萌芽研究 (26540109), および総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により科学技術振興機構を通して委託されたものである.

## 参考文献

- [渡辺 11] 渡辺哲矢, 西尾修一, 小川浩平, 石黒浩: 遠隔操作によるアンドロイドへの身体感覚の転移, 電子情報通信学会論文誌, Vol. 94, No. 1, pp. 86-93 (2011)
- [大久保 14] 大久保正隆, 西尾修一, 石黒浩: 遠隔操作ロボットへの身体感覚転移における実体の有無と見かけの影響, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, pp. RSJ2014AC1B2-02 (2014)
- [Alimardani 13] Alimardani, M., and Nishio, S., and Ishiguro, H.: Humanlike robot hands controlled by brain activity arouse illusion of ownership in operators, Scientific Reports, Vol. 3, No. 2396 (2013)
- [Stephoe 13] Steptoe, W., and Steed, A., and Slater, M.: Human tails: Ownership and control of extended humanoid avatars, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 19, No. 4, pp. 583-590 (2013)
- [Armel 03] Armel, C., and Ramachandran, V. S.: Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response, Proceedings of the Royal Society B (2003).