

# 遠隔操作型アンドロイドを用いた 身体感覚の転移と視点による影響の検証

Effect of perspective change in body ownership transfer to teleoperated android robot

田浦 康一<sup>1,2</sup> 西尾 修一<sup>2</sup> 小川 浩平<sup>2</sup> 石黒 浩<sup>1,2</sup>  
Koichi Taura<sup>1,2</sup>, Shuichi Nishio<sup>2</sup>, Kohei Ogawa<sup>2</sup>, and Hiroshi Ishiguro<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学

<sup>1</sup> Osaka University

<sup>2</sup> 国際電気通信基礎技術研究所

<sup>2</sup> Advanced Telecommunications Research Institute International (ATR)

**Abstract:** Previously we have investigated the body ownership transfer to a teleoperated android body caused by motion synchronization between robot and operator. Although visual feedback is the only information provided from robot, due to body ownership transfer some operators feel as if they were touched when the robot's body was touched. This illusion can help operators to transfer their presence to robotic body during teleoperation. By enhancing this phenomenon, we can improve our communication interface and the quality of interaction between operator and interlocutor. This can eventually contribute to a novel treatment method for autistic patients.

In this paper, we examined how the change in operator's perspective affects the body ownership transfer during teleoperation. Based on past studies on rubber hand illusion, it is hypothesized that perspective change will suppress the body owner transfer. The results, however, showed that in any perspective condition, the participants felt body ownership transfer. This shows that body ownership transfer to teleoperated androids and the rubber hand illusion differs in their generation process.

## 1. はじめに

近年、我々は遠隔操作型アンドロイドロボット(以下「アンドロイド」と表記)であるジェミノイドを開発した。ジェミノイドは特定の人物に酷似した外見を持つアンドロイドであり、心理学、認知科学、脳科学などの分野で人間を科学的に理解するための検証道具となることが期待されている。ジェミノイドを用いた対話は、従来のビデオ会議システムよりも、密接なコミュニケーションができる新しい通信メディアとなる可能性を秘めている事が分かっている[1]。対面して会話をを行う人は、数分対話すると本人と相対している時と同様に振る舞い、あたかも本人と対面しているように自然に会話をを行う。対話相手が遠隔地にいても近くにいるように感じるの、ジェミノイドにより存在が伝達されたからであると考えられる。

一方、操作には、モーションキャプチャや画像認識、音声認識を用いたインタフェースを使用する。

センサ情報をもとにジェミノイドを動かす、ジェミノイドを操作する人(以降、操作者と呼称する)は、通常会話を行うのと同様に首を動かし発話することでジェミノイドを操作できる。数分の間、会話を行い操作に慣れてくると、自身がその場に居るような臨場感を感じることがある。その際、例えばジェミノイドの頬をつつかれると、自分自身の頬をつつかれたように感じる[1]。すなわち、ジェミノイドを遠隔操作して、自身の動きに同期して動く様子を観察する事で、ジェミノイドを自らの身体の一部のように感じるということである。この現象が本当に生じているかを確かめるため、渡辺らはジェミノイド操作時における身体感覚の転移を検証した[2]。その結果、ジェミノイドの動きと操作者の動きの同期性が高い時、身体感覚の転移が生じることが主観的、客観的指標により示された。

類似の錯覚として、Rubber Hand Illusion (以下、RHIと略称)が知られている[3]。机の上に置かれた義手のみが見える状況下で、実験参加者の腕と義手を同時

になでる試行を繰り返す(以下、RHI 手順と呼称)と、義手に触るだけで実験参加者は自身に触られていると錯覚するようになる。この錯覚が RHI である。RHI は、視覚刺激(義手がなでられている様子)と触覚刺激(腕がなでられている感覚)の受容が同期することで生じるといわれる。

一方、ジェミノイドの遠隔操作では、操作を行う際の運動感覚(腕を動かしている感覚)と視覚フィードバックの同調によって、身体感覚の転移が生じる。しかし、ジェミノイドの操作時に生じる身体感覚の転移に必要な条件は十分に解明されていない。そこで、本研究では操作を行う際の視点に注目し、身体感覚の転移との関係を探った。渡辺らの研究や RHI の研究では、一人称視点を用いている。ここで、一人称視点とは、自分自身の目から見たような視点である。しかし、通常のジェミノイドの遠隔操作には、一人称視点だけでなく、ジェミノイドの顔が見える視点(二人称視点)や、ジェミノイドと対話する相手の双方が見える視点(三人称視点)を用いている。これは、経験的に遠隔操作の際にジェミノイドの動きが見える方が操作しやすいためである。遠隔操作の視点が身体感覚の転移にどのように影響するかを見ることで、より操作しやすく、存在感を伝達しやすい操作インタフェースの開発の手助けとなると考えられる。また、身体感覚の転移を自在に引き起こすことができれば、体の一部のように違和感なく扱える義手や義体の開発など、幅広い分野への応用も考えられる。本研究では、アンドロイドの遠隔操作時に、ロボットの身体を自身の一部と錯覚する現象(身体感覚転移)の発生条件を探り、客観的な指標で検証することである。

## 2. 関連研究

Botvinick らは自身の身体位置の推定により、身体感覚の同調を検証している[3]。RHI 手順の際、義手と実験参加者の腕の位置をずらしておき、手順後、実験参加者は目を閉じた状態で自身の右手人差し指の位置を推定する。RHI 手順が同期して行われた場合と、遅延がある場合とで推定位置を比較し、主観評価で RHI 発生を確認した同期条件では、義手の方向に推定位置がずれることを確認した。

Armel らは皮膚コンダクタンス反応 (SCR)により身体感覚の転移を検証している[4]。SCR は自律神経系が喚起されたとき、例えば痛みを感じたときに反応する。Armel らは身体感覚の転移が生じているならば、転移対象に痛みを伴うような刺激が与えられると SCR が生じるのではないかと考え、次のような実験を行った。RHI 手順(同期・遅延)の後、義手の指を強く折り曲げる様子を観察させたところ、同

期条件において SCR 値が高いことを確認した。SCR を用いると客観的な指標を用いて身体感覚の転移の発生を検証出来るのではないかと考えられる。

Slater らは Immersive Virtual Reality (IVR)を用いて、エージェントに対する身体の外からの視点における身体感覚の転移を検証している[5]。IVR とは没入感の大きい仮想現実である。実験参加者は非常に広角なヘッドマウントディスプレイ(以降、HMD とする)を装着し、VR 空間上の映像を見る。実験参加者は一定時間、VR 空間上で操作を行い、その後、エージェントの上部のカメラ視点でエージェントをみる。エージェントの頬が叩かれた際に自分自身が叩かれたように感じたかの主観評価をとり、操作の際の視点条件と触覚の同期性が重要であると結論づけた。ここから、視点条件は身体感覚の転移に大きく影響する要素であると考えられる。

また、転移対象との姿勢の齟齬が小さい方が身体感覚の転移が生じやすいことがわかっている。Panvani らは転移対象の姿勢による影響を検証している[6]。義手を実験参加者の手と同じ向きに配置した場合と、90 度回転させて配置した場合とを比較し、身体と向きが合致しない場合は転移の度合いが小さくなることを確認した。すなわち、転移対象との姿勢の齟齬が小さい方が身体感覚の転移が生じやすいということである。ここから、映像と姿勢の整合性が身体感覚の転移に重要であると考えられる。

渡辺らは、動きの同期による操作とその視覚フィードバックの同期、すなわち、自身と同様に動いている対象を観察することにより、身体感覚の転移が生じるのではないかと考え、ジェミノイド HI-1 を用いて、次のような実験を行った。実験参加者は HMD を通して、上から見たジェミノイドの様子を観察する。この際、実験参加者は、自身の体とジェミノイドの体が重なるよう下を向く。この状態で、動きが同期して動くシステムを用いて、腕を一定時間操作し、実験者がジェミノイドの腕に注射をする。この時の主観評価とスキコンダクタンス (SCR) を測定した。ジェミノイドと実験参加者の動きが同期する場合とジェミノイドが全く動かない場合を比較した結果、主観評価、SCR 共に静止条件に比べて、同期条件の方が、有意に高い値が得られることがわかった。すなわち、ジェミノイドが操作者の動きに同期するとき、身体感覚の転移が生じることがわかった。

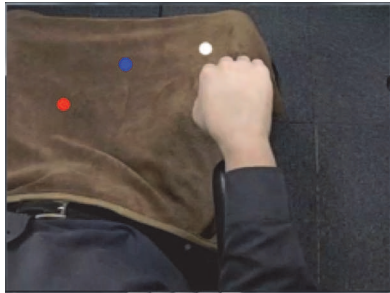


図 1 1PP条件の映像

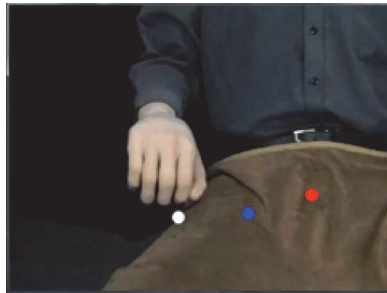


図 2 2PP条件の映像



図 3 Mirror条件の映像

### 3. 実験

本実験の目的は、ジェミノイドの遠隔操作による身体感覚の転移と遠隔操作時の視点との関係を明らかにする事である。そこで、操作をさまざまな視点で行い、身体感覚の転移との関係を調べる。今回は以下の三つの視点条件で実験を行った。

**1PP：ジェミノイドの目から見た視点（図1）**

**2PP：対面からジェミノイドを見た視点（図2）**

**Mirror：鏡の様にジェミノイドを見た視点（図3）**

一人称視点（1PP 条件）は先行研究でも行われており、身体感覚の転移が発生する事が期待される。先行研究[5]では三人称視点という視点を用いられている。この視点は自分が操作するエージェントとエージェントが行動する環境との関係を見る事が出来る視点である。しかし、今回の実験の試行はジェミノイドの腕を動かすというもので、他者とインタラクション行うわけではないため、不自然になる。故に、本実験では対面する他者の視点である“二人称視点”という条件（2PP 条件）で実験を行った。二人称視点は対面から見てジェミノイドの様子を観察するために用いる視点であり、ジェミノイドの遠隔操作の際にも用いられている。この二人称視点では、右手を動かした時に画面の向かって左側の腕が動くことになり、日常的に体験できる視点ではない。

そこで、より日常的な、鏡の前に立った際の視点（Mirror 条件）を追加した。これは二人称視点の左右を反転させたものである。

それぞれの視点で身体感覚の転移が生じているかどうかを検証するため、動作の同期性の違いによる転移の差を観察する。一人の実験参加者は、同一の視点条件で同期性の異なる三つの条件を経験する。動作の同期性の条件は遅延なく動く条件(sync 条件)、500ms の遅延で動く条件 (delay 条件)、動かない条件 (still 条件) である。それぞれの試行が終了してから刺激映像を与え、その反応を観察する。ここで、刺激映像としてはジェミノイドの腕を注射で指す映像を呈示する。この際、実験参加者が注射器が出てきただけで反応する可能性があるため、注射器は画面上に現れて3秒程度静止し、その後ジェミノイドの腕を刺すものとした。刺しているところを見逃さないよう、3秒間刺し続け、ゆっくりと画面から消える。

#### 3.1 仮説と予測

本実験では以下の仮説のもと実験を行った。

**仮説：一人称視点でのみ身体感覚転移が生じる**

この仮説に対する予想としては、1PP 条件の同期性の高い条件においてのみ、Q1 と Q2 と SCR の反応が有為に高くなると考えられる。

#### 3.2 実験手続き

実験参加者は18歳から25歳までの43人（男性25人、女性18人）、平均年齢は21.0歳（標準偏差2.11）で全員右利きである。実験参加者にはあらかじめジェミノイドと対面してもらい、ジェミノイドがロボットであることを確認してもらった。実験参加者はまず、実験についての説明を受け、同意書に署名した。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 11-506-1）。実験参加者は、モーションキャプチャのマーカおよびSCRの電極を装着する。映像にはHMD（Vuzix iWear VR920）を用いて、実験参加者はHMDを通じて映

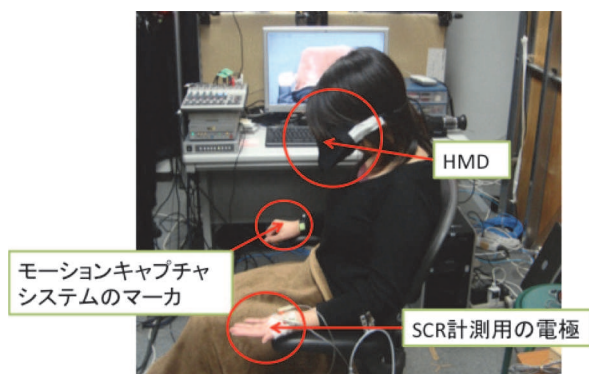


図 4 実験の様子

像を観察する。その後、刺激映像を繰り返し観察してもらい、ただ刺激を見ただけで痛みを感じないように慣れてもらった。そして、実際の映像を見ながら腕の運動の練習を行い、本試行を行った。最後に、実験参加者は実験終了後、アンケートに答え実験に関するインタビューを実施した。

### 3.2 実験システム

本実験では、ジェミノイドを遅延を精緻に制御して動かす必要があるが、ジェミノイドのハードウェアの性能上困難である。ジェミノイドはエアークチュエータを動力源としており、自在に遅延を操作する事はできない。そこで、我々はあらかじめ撮影した映像を分割した静止画を使用した。モーションキャプチャで連続的に取得した腕の位置情報をもとに表示するという手法を用いて、一定の遅延で動作しているようにみせた。腕の動きは300fpsで撮影可能なハイスピードカメラで撮影して、1000枚程度の静止画を用意し、遅延なしの動作および500ms遅れて動く動作を滑らかに再現した。

腕の位置情報は二カ所のモーションキャプチャ用のマーカで計測した。モーションキャプチャ用のマーカは実験参加者の身体の大きさに関わらず同等に操作できるよう、肘から19cmの位置に一つ固定し、もう一つを実験参加者が座る椅子の肘掛け部分に固定した。HMDは、実験室の周囲環境や実験参加者自身の体が視野に入ると妨害要因になると可能性があるため、周囲を布で覆い、画面以外が見えないようにした。

### 3.3 本試行

本試行では、以下の手順を計3回繰り返した。実験参加者は図5~7のような視点からジェミノイドの様子を観察する。画面にはジェミノイドの映像に重ね合わせて3つの色のついた丸印が表示されている。音声により色が3秒間隔で指示されるので、実験参加者は指示された色の位置に腕を動かす操作する。ここで、実験参加者はHMDを通じて、操作に伴うジェミノイドの腕の動きを観察する。この際、HMD映像と実験参加者の姿勢が整合するよう、1PP条件の時は実験参加者に下を向いて、自らの腕を真上から見下ろすような体勢を取り、2PPとMirror条件の時は正面を向き対面している相手を見るような体勢をとるように指示した。更に、実験参加者とジェミノイドの下半身の着衣の違いによる影響を避けるため、実験参加者とジェミノイドの双方に同一のひざかけをかけている。本試行での実験参加者の様子を図4に示す。

1分間の操作の後、終了の合図を行い、実験参加

者のSCRが平常状態に復帰するまで休止する。その後、実験参加者に刺激映像を呈示する。

### 3.4 評価方法

身体感覚の転移の度合いの評価方法として、アンケートによる主観評価と、SCRを測定した。主観評価では、以下の質問を刺激に応じて行うことで身体感覚の転移の度合いを評価した。

**Q1:** ロボットの手がまるで自分の手のように感じましたか?

**Q2:** 自分の手に注射された感じはしましたか?

実験参加者は試行中、HMDを装着しており、質問紙への記入はできないため、口頭で回答した。ここで回答は、-3(全く感じなかった)から3(とても強く感じた)までの7件法により行われた。

SCRの測定には、デジテックス社製生体信号収集装置(polymate II AP-216)と同社製の皮膚電気活動計測ユニット(AP-U030)を用いて測定した。電極は実験参加者の母子球と小指球にそれぞれ固定した。

## 4. 結果

### 4.1 主観評価

#### 操作の同期性による比較

視点条件内での同期性の違いによるQ1とQ2に対する回答の平均を比較した。Q1「ロボットの手がまるで自分の手のように感じましたか」について分散分析を行った結果、それぞれの視点条件において有意差が確認された(1PP条件: $F(2, 26) = 12.36, p < 0.001$ 、2PP: $F(2, 26) = 24.79, p < 0.001$ 、Mirror条件: $F(2, 24) = 24.22, p < 0.001$ )。Sidak法による多重比較を行ったところ、視点に関わらずsync条件>still条件(1PP: $p < 0.001$ , 2PP: $p < 0.005$ , Mirror: $p < 0.005$ )で有意差が確認された。1PP、2PP条件ではsync条件>delay条件(1PP: $p < 0.01$ , 2PP: $p < 0.01$ )も有意差が確認された。また、2PPではdelay条件>still条件( $p < 0.05$ )も有意差が確認された。

Q2「自分自身に注射されたように感じたか」について分散分析を行った結果、有意差が確認された(1PP: $F(2, 26) = 2.33, p = 0.12$ , 2PP: $F(2, 26) = 6.37, p < 0.01$ , Mirror: $F(2, 24) = 1.87, p = 0.18$ )。Sidak法による多重比較の結果、2PPにおいてのみsync条件>delay条件( $p < 0.005$ )という結果が出た。他の視点条件において、同期性の条件間に有意差は確認されなかった。

#### 視点条件による比較

視点条件間での比較は、一元配置分散分析を用い

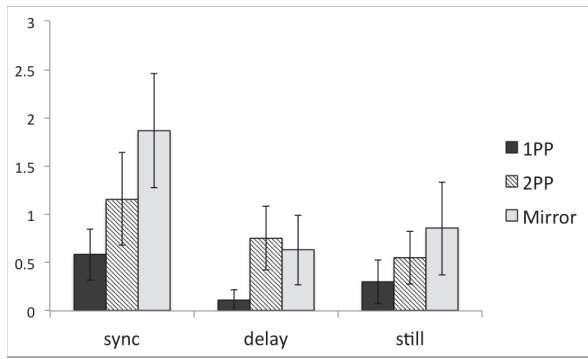


図 5 SCRの反応

て分散分析を行ったところ、Q1とQ2で共に有為さは確認されなかった ( $Q1:F(2,38)=3.15, p=0.05$ ,  $Q2:F(2,38)=0.54, p=0.59$ )。Tukey HSDによる多重比較を行ったところ、sync条件の1PP条件>2PP条件で有為差 ( $p<0.05$ )、delay条件の1PP条件>2PP条件で有為差 ( $p<0.05$ )、still条件の1PP条件>2PP条件および1PP条件>Mirror条件で有為差 ( $p<0.05$ )が確認された。平均と標準誤差、Tukey HSDによる多重比較の結果について、図6にまとめた。ここで、有意水準5%以下を\*で表す。

#### 4.2 SCR

実験参加者43名の内、SCRの数値に全く反応がみられない9名を除外した34名のデータを用いて分析を行った。SCRは刺激に対して1~2秒程度遅れて生じると言われ[7]、その時点から刺激に対するSCRが終息するまでの範囲内での最大値を用いる方法が一般的である。したがって、刺激に対する反応を検証するためには、反応値を求めるための範囲は刺激が加えられる瞬間の1秒後からとするべきである。しかし、本実験では刺激以前より反応するケースが多々見られた。実験後のインタビューで、注射器が近づいたとき、本当に自身の手に触られるような感じがし、嫌な感じがしたと答える実験参加者が

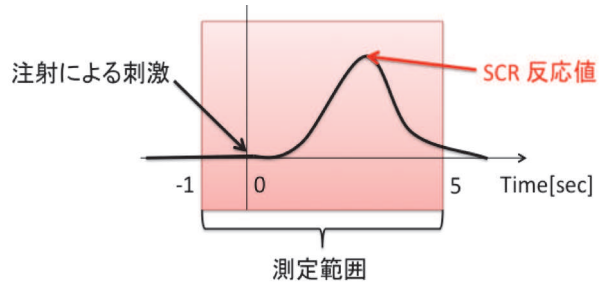


図 6 SCRの測定範囲

いたことから、刺激前の反応も身体感覚の転移により生じた反応と考えられる。今回の刺激映像では、映像中に実験者の手が出てきてから刺激が加えられるまでに要する時間は約3秒である。そこで、SCRの最大値を求める範囲の開始時刻を刺激映像の呈示後2秒(刺激を加える瞬間の1秒前に設定した。また終了時刻はArmellら[4]に倣い、刺激を加えた5秒後とした。すなわち、ある刺激が与えられたとき、刺激が与えられる1秒前から、刺激が与えられて5秒後の最大値をSCRの値として採用した。<刺激シーケンスとSCRデータを採用した範囲を表す図を付けて>平均と標準誤差をグラフにまとめた。視点条件においてサンプル数はそれぞれ1PP:10人、2PP:9人、Mirror:11人である。分散分析において、それぞれの視点条件内で分析したところ、有為差は確認されなかった ( $1PP:F(2,20)=1.01, p=0.384$ ,  $2PP:F(2,20)=1.45, p=0.264$ ,  $Mirror$ 条件: $F(2,18)=1.07, p=0.362$ )。Sidak法による多重比較を行った結果有為差は確認されなかった。

また、視点条件に関わらず全ての実験参加者のデータで同期性の条件間での比較を行った。一元配置分散分析(対応あり)で検定を行い、有為差が確認された ( $F(2,72)=6.135, p<0.01$ )。また、Sidak法による多重比較で検定したところ、sync条件とdelay条件間で有為差 ( $p<0.05$ )、sync条件とstill条件で有為差 ( $p<0.05$ )が確認された。

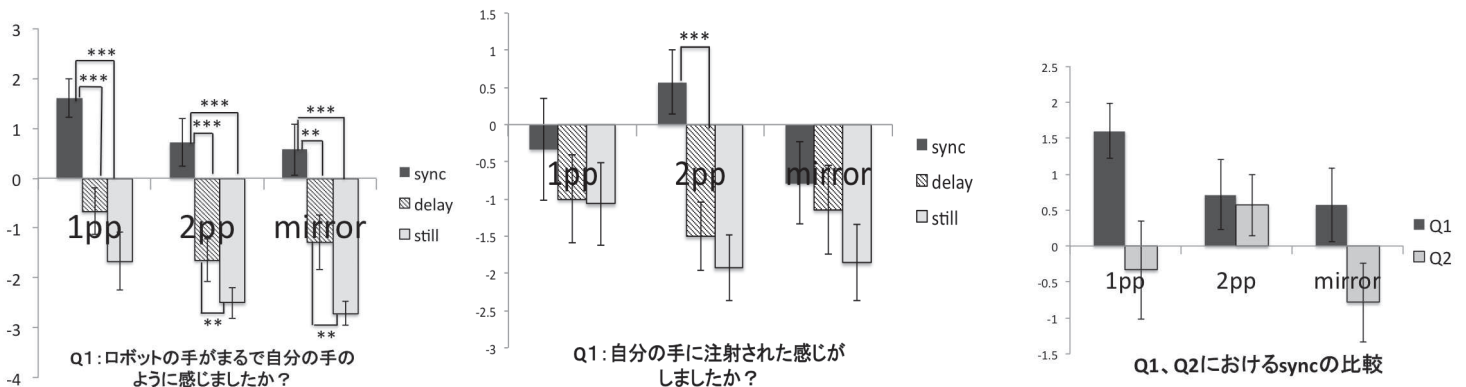


図 7 主観評価の結果

## 5. 考察

実験の仮説をもとに、結果を考察する。今回の実験ではアンドロイドを遠隔操作する際の視点と身体感覚の転移の関係について検証を試みた。一人称視点のみで身体感覚の転移を大きく生じると予測したが、Q1の結果から十分に検証するにいたらなかった。Q1において、視点を変更すると身体感覚の転移に影響があると言えるが、Q2やSCRでは十分な結果が得られなかった。理由として、注射針が十分に見えなかった可能性がある。一方で、2PPやMirror条件で大きなSCR反応がみられた。これは、鏡は普段見て自分自身を見るように、Mirror条件の視点は身体感覚の転移を生じる視点でないかと考えることができる。Gonzalezらは鏡に映るエージェントに対する身体感覚の転移を示しており[8]、今回のSCRの結果に関連する可能性がある。

2PPやMirror条件の結果から、一人称視点のみで身体感覚の転移を生じると考えるとともに、一人称視点以外での身体感覚の転移についても検討すべきであると考えられる。

## 6. おわりに

今回の実験では、身体感覚の転移と視点の関係を探る実験を行った。その結果、従来行われていた一人称視点以外での視覚フィードバックでも、身体感覚の転移が生じる可能性を示された。視点間の比較では、二人称や鏡の視点において高いSCR反応が生じていることから、身体から離れた視点において身体感覚の転移が生じる可能性を示唆された。今後、身体感覚の転移と視点の関係を調べるため、更に実験をすすめる。

## 謝辞

本研究は科研費基盤研究 (S)(20220002) の助成により行われたものである。また、開発や研究について手厚くサポートしていただいた石黒研究室 OB の渡辺哲也氏に感謝します。

## 参考文献

- [1] 西尾修一, 石黒浩: “人として人とつながるロボット研究”, 信学誌, Vol. 91, No. 5, pp. 411-416, (2008)
- [2] 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”, 電子情報通信学術論文誌, Vol. 94, no. 1, pp. 86-93, (2011)
- [3] Botvinick M., and Cohen J.: “Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see,” *Nature*, Vol. 391, No. 2, pp. 756, (1998)

- [4] Armel, K.C., and Ramachandran, V.S.: “Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response,” *Proc. Royal Society of London*, B(2003)270, pp.1499–1506, (2003)
- [5] Slater M., Spanlang B., Sanchez-Vives M.V., and Blanke O.: “First Person Experience of Body Transfer in Virtual Reality,” *PLoS ONE*, Vol. 94, (2010)
- [6] F. Pavani :“**Visual capture of touch : Out-of-the-body experiences with rubber gloves,**” *Psychological Science*, vol.11, no.5, pp.353-359, (2000)
- [7] 堀忠雄, 新美良純: “皮膚電気活動,” 生理心理学, 宮田洋, 藤澤清, 柿木昇治(編), pp.98-110, 朝倉書店, 東京, (1985)
- [8] Gonzalez-Franco M., Perez-Marcos D., Spanlang B., Slater M.; The contribution of real-time mirror reflections of motor actions on virtual body ownership in an immersive virtual environment , *Virtual Reality Conference(VR)*, (2010)