仮想手操作における非操作手への触覚呈示手法の検討

田辺 育暉 1,a) 浅井 唯貴 1,b) 榎本 龍 $^{-1,c}$) 松倉 悠 1,d) 岩井 大輔 1,e) 佐藤 宏介 1,f)

概要:手の届かない対象へ手の投影像を介して働きかけるインタフェースがある。このインタフェースにおいて接触の感知を向上させるため、触覚フィードバックを付加することを考える。先行研究では、投影像を操作しない方の手である非操作手への1本の指に触覚フィードバックを返しても効果があることが確認された。接触の感知を向上させるには、1本の指でなく複数の指に触覚フィードバックを返すことが考えられる。本研究では、非操作手の複数の指に触覚フィードバックを返しても効果が得られるのか実験した。

An Investigation on Haptic Feedback to Non-Manipulating Hand in Manipulating Virtual Hand

Tanabe Naruki $^{1,a)}$ Asai Yuki $^{1,b)}$ Enomoto Ryuichi $^{1,c)}$ Matsukura Haruka $^{1,d)}$ Iwai Daisuke $^{1,e)}$ Sato Kosuke $^{1,f)}$

Abstract: Projection interface enables us to interact with unreachable objects by overlaid graphical objects. In the method, a projection of augmented user's body has been studied recently. This paper considers to involve a haptic feedback to this type of projection interface. In our previous research, there is psychological effect when stimulating the haptic feedback to one finger of the non-manipulating hand; the hand which does not manipulate the virtual hand. In this paper, we investigate whether haptic feedbak to the fingers of the non-manipulating hand has psychological effect or not.

1. はじめに

我々は自分の手を介して実環境に触れ、働きかける.対象が自分の手の届く範囲内にある場合は、不便なくその対象に触れ、働きかけることができる.しかし、対象が自分の手の届く範囲外にある場合は、その対象に手が届く位置まで自身が移動する必要がある.本研究では、こうした制約を解消するインタフェースとして、投影バーチャルハンドを介して遠隔対象に働きかけることのできるExtendedHand[1]を使用する.ここでは、投影バーチャルハンドの操作に普及の進んだ小型タッチパッドデバイス(スマートフォン)を用いた上田らのシステム[2]を想定

する.

本研究では、ExtendedHand において投影バーチャルハンドを操作する際も自分の手で実環境に作用しているかのようにすることを目指す. 現行の ExtendedHand には触覚情報がなく、一方で自分の手で実環境に作用する際は触覚情報があるため、ExtendedHand で得られる感覚と自分の手で得られる感覚には差が生じる. この差の解消策として、バーチャルハンドを操作する実手(操作手)にそのまま単純に触覚フィードバックを返す研究は行われている [3][4].

1.1 先行研究のフィードバックシステムと提案するフィー ドバックシステム

先行研究における機構は操作部とフィードバック部が統合されることになり,以下の問題点がある.

- フィードバック機構が入力機構に依存しており、他の 既存の入力機構に組み込めない.
- 機構が複雑である.
- 入力システムによっては装着の手間がある.

上 大阪大学

Osaka University

a) tanabe@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp

b) asai@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp

 $^{^{\}mathrm{c})}$ enomoto@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp

 $^{^{\}mathrm{d})}$ haruka.matsu@sys.es.osaka-u.ac.jp

e) daisuke.iwai@sys.es.osaka-u.ac.jp

f) sato@sys.es.osaka-u.ac.jp

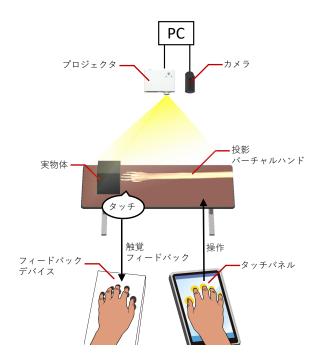


図 1 想定する触覚フィードバックシステムのイメージ図

また、操作部とフィードバック部を分離すると、既存の入力機構とは別にフィードバック機構を製作することができ、インタフェースにおける触覚フィードバックシステムとしての設計の幅が拡がる.

Ramachandran らは、交通事故などで片腕を切断し、幻肢を有する患者に対して、正常な手の横に鏡を置き、失った手の位置に正常な手の鏡像が見えるようにした実験を行った [5]. この時、両手で同一運動を行わさせ、失った手があたかも正常な手のように動く様子が患者に見えるようにした。その結果、患者に失った手が意思通りに動く感覚が出現した。この知見を手掛かりにして、本研究では操作部とフィードバック部の分離に着目し、上記の問題の解決を考える。バーチャルハンドを操作するシステムにおいて、操作部と分離した実手として非操作手に触覚フィードバックを返す。想定する触覚フィードバックシステムのイメージ図を図 1 に示す。

1.2 本稿での調査

自分の手で実物体に作用する際は働きかけにいく手に 触覚フィードバックが返ってくる.しかし、想定する触覚 フィードバックシステムでは働きかけにいく手とは別の手 に触覚フィードバックを返すこととなり、ユーザが実物体 に触れた感覚が得られるのかどうかは未解明である.その ため、著者らはユーザが ExtendedHand を使用して実物体 に作用した際に、非操作手に触覚フィードバックを返して も実物体に作用した感覚が得られるかを調査した.その結 果、実験で用意したフィードバック機構に関しては、操作 手で投影バーチャルハンドを操作しているのに対し、非操 作手に触覚フィードバックを返しても実物体に触れた感覚 は向上することが判明した [6]. この調査における実験では、非操作手の人差し指のみに触覚フィードバックを返していた. 今後、ExtendedHand で得られる感覚と自分の手で得られる感覚の差をより解消していくには、より複雑な触覚情報をユーザに呈示する必要がある. この際、複数の指に触覚フィードバックを返す、ということは考えられる. しかし、非操作手に触覚フィードバックを返すため、複数の指に触覚フィードバックを返した際に実物体に触れた感覚が向上するかどうかは未解明である. そのため、本稿では、非操作手の複数の指に触覚フィードバックを返した際に、実物体に触れた感覚は向上するのかどうかを調査した.

2. 試作システム

2.1 想定する実環境

本稿における調査では,実環境として,投影バーチャル ハンドの投影範囲内に表面形状が異なる領域がある場合を 想定した.

2.2 システムの使用手順

表面形状が異なる領域として,表面形状が平坦な領域 (以下,平坦領域)と凹凸のある領域(以下,凹凸領域)を 考える.システムの使用手順を以下に示す.

- (1) タッチパネルを用いて、操作手により、投影バーチャルハンドを操作する.
- (2) 投影バーチャルハンドの指先が凹凸領域にある場合, 投影バーチャルハンドの速さに応じた周波数で,非操 作手の対応する指の指先に振動を与える.

2.3 触覚フィードバック

2.3.1 振動の呈示

試作システムでは、触覚フィードバックとして、振動を考える、パルス波を入力することで、パルス波の周波数と同じ周波数で上下に振動する、振動アクチュエータ ADTEDS (ビット・トレード・ワン社)を用いる.

2.3.2 振動の周波数

皮膚感覚受容器の中に、機械受容器という受容器がある.機械受容器とは、外部との接触等によって生じる、皮膚の変化を検出する細胞である.機械受容器は、皮膚変形刺激に対する応答の時間変化の違いと受容器の広さの違いから、次のように分類されている.まず、ステップ上に皮膚を押し込むと受容器は刺激に応じて発火し、パルスを出力する.この時、皮膚変形刺激に対する応答時間変化の違いとして、

- 刺激の強度に応じて発火する遅順応型 (Slowly Adapting: SA)
- 刺激の時間変化に応じて発火する速順応型(Fast Adapting: FA)

に大別される. また, 受容器の広さの違いとして,

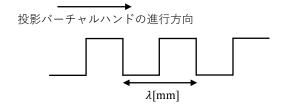


図 2 凹凸領域の幅

- 受容器が狭く境界が明瞭なⅠ型
- 受容器が広く境界が不明瞭なⅡ型

に大別される. 以上の組み合わせから、機械受容器は、SA II、SA II、FA II の4種類に分けられる. 下条によると、FA I は速度の検出と空間パターンの検出の機能を持つ [7]. また、Johansson らによると、手掌、指の基節部、指の中節部、指先のうち、空間分解能は指先が最も高く、指先に存在する機械受容器の中で最も分布密度が高いのは FA I である [8].

以上より、試作システムでは、触覚フィードバックを指先に返し、また、機械受容器として FA I に着目することとした。Bolanowski らによると、FA I の周波数レンジは $10\sim200[\text{Hz}]$ である [9]。そのため、試作システムにおいても、触覚フィードバックとして呈示する振動の周波数は $10\sim200[\text{Hz}]$ とする。

2.4 投影バーチャルハンドの速さと周波数の対応付け

投影バーチャルハンドの指先が凹凸領域にある場合,投影バーチャルハンドの速さに応じて,触覚フィードバックとして与える振動の周波数を変えることを考える.投影バーチャルハンドの速さをv[mm/s]とする.凹凸領域の波長を $\lambda[\text{mm}]$ とすると(図 2), $\lambda[\text{mm/s}]$ とする.凹凸領域の波長を $\lambda[\text{mm}]$ とすると(図 2), $\lambda[\text{mm/s}]$ とする.凹凸領域の波長を $\lambda[\text{mm}]$ とすると(図 2), $\lambda[\text{mm/s}]$ とする.凹凸領域の波長を $\lambda[\text{mm/s}]$ とする.で,触覚フィードバックとして与える振動の周波数を $\lambda[\text{mm/s}]$ にすることを考える.バーチャル空間における単位長さを $\lambda[\text{mit]}]$ と定義する.バーチャル空間における単位長さを $\lambda[\text{mit]}]$ と定義する.バーチャル空間内でのバーチャルハンドの進行方向に関する軸は $\lambda[\text{mm/s}]$ 1 目でのバーチャルハンドの中指の指先座標を $\lambda[\text{mit]}]$ 2 にすることも表すこととする.

また, バーチャルハンドのバーチャル空間内における速さを u[unit/frame] とし, $u=|z_n-z_{n-1}|$ とした. 計測した結果, 1[s] あたりの frame 数は, およそ 55[frame/s] であった. また, バーチャルハンドを投影した結果, 今回の使用環境においては, 1[unit]=600[mm] であった. 故に,

$$v = 55 \cdot 600 \cdot u$$
$$= 33000u \tag{1}$$

とした. 式(1)より,触覚フィードバックとして与える振

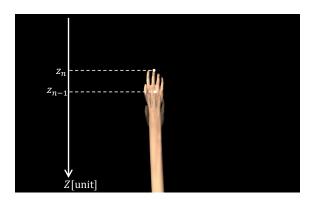


図 3 バーチャル空間における Z 軸

動の周波数 f[Hz] は,

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

$$= \frac{33000u}{\lambda}$$
(2)

となる. 2.3 節より,f[Hz] を $10\sim200[\text{Hz}]$ に収める. Bolanowski らによると,SA I は $20\sim30[\text{Hz}]$ において,最も感度が高い [9] ため,低周波部分の精度を高めることとした.そこで,バーチャルハンドを実際に操作し,0[unit/frame] を除く,u[unit/frame] の最小値の平均値を計測したところ, $\overline{u_{min}}[\text{unit/frame}] = 0.00195[\text{unit/frame}]$ であった.よって, $33000\overline{u_{min}}[\text{mm/s}] = 64.35[\text{mm/s}]$ より, $\lambda[\text{mm}] = 6.4[\text{mm}]$ とすると,バーチャルハンドがおよそ最小の速さで動いている際,振動アクチュエータの周波数は,f = 10[Hz] となる.よって,試作システムでは, $\lambda[\text{mm}] = 6.4[\text{mm}]$ とすることとした.故に,式 (2) より,

$$f = \frac{33000u}{6.4}$$
= 5156.25u
$$= 5200u$$
(3)

とする. バーチャルハンドが速い場合, つまり, u[unit/frame] が大きい場合, 式(3) より, f[Hz] > 200[Hz] となる. この場合は, f[Hz] = 200[Hz] とすることとした. 以上より, 試作システムにおける f[Hz] は,

$$f = \begin{cases} 5200u & (f \le 200) \\ 200 & (f > 200) \end{cases}$$

とした.

3. 被験者実験

以前の調査で、非操作手の1本の指に触覚フィードバックを返す場合の方が、触覚フィードバックがない場合に比して、実物体に触れた感覚が向上することが判明した[6].しかし、その調査では、対象とした実環境が、表面形状の異なる領域がある場合でなく、投影バーチャルハンドの進行方向に対して、物体が存在する場合であった。そのため、以前の調査と今回の調査での環境は異なり、以前の調査の

結果を利用することができない.故に,今回の調査では,非操作手の1本の指に触覚フィードバックを返す場合と複数の指に触覚フィードバックを返す場合を比較する前に,本試作システムにおいて,非操作手に触覚フィードバックを返さない場合と1本の指に触覚フィードバックを返す場合を比較する必要がある.この調査を予備実験とし,触覚フィードバックの有無調査実験と以下呼ぶ.

1章で述べた通り、本研究では、ExtendedHandにおいて、投影バーチャルハンドを操作する際も、自分の手で実環境に作用しているかのようにすることを目指す。ユーザに実物体に触れた感覚を向上させるには、ユーザに複雑な触覚フィードバックを返すことが考えられ、複数の指に触覚フィードバックを返すことが考えられる。本研究では、非操作手に触覚フィードバックを返すため、複数の指に触覚フィードバックを返した際に実物体に触れた感覚が向上するのかどうかが未解明であり、調査する必要がある。この調査を、1本対複数本での触れた感覚の調査実験と以下呼ぶ。

一方、投影バーチャルハンドに対する身体所有感が向上することで、ExtendedHandにおいて、投影バーチャルハンドを操作する際も、自分の手で実環境に作用しているかのような感覚が得られるのではないかと考えた。そこで、非操作手に触覚フィードバックを返す指の本数が増えると、身体所有感は向上するのかどうかを調査する。この調査を、指の本数と身体所有感の関係の調査実験と以下呼ぶ、以下、

- 条件 zero: 非操作手に触覚フィードバックを返さない
- 条件 one: 非操作手の1本の指(中指) に触覚フィー ドバックを返す
- 条件 multi: 非操作手の複数の指(全ての指) に触覚 フィードバックを返す

と表記する.

3.1 触覚フィードバックの有無調査実験

3.1.1 目的

片手で投影バーチャルハンドを操作し、投影バーチャルハンドの指先が凹凸領域上に存在する場合に、条件 one は条件 zero に比して、凹凸領域に触れた感覚は向上するのかを調査する.

3.1.2 実験システム

2章で製作したシステムを用いて実験を行った.実験で使用したシステムの外観を図 4に示す.また,フィードバックデバイスに非操作手を載せた状態の図を図 5に示す.2領域を横から見た図を図 6に示す.凹凸領域,平坦領域は MDF から成る.凹凸領域の凹凸 1 回の繰り返し分の幅は, 2.4 節より, 6.4[mm] として製作した.凹凸の厚さは 1[mm] である.

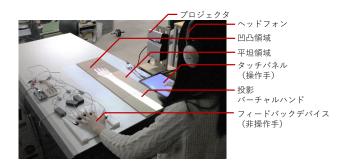


図 4 実験システム



図 5 フィードバックデバイスに非操作手を載せた状態



図 6 凹凸領域を横から見た図 (上図), 平坦領域を横から見た図 (下図)

3.1.3 実験手順

被験者に操作手をタッチパネルにあてた状態で投影バーチャルハンドが平坦領域と凹凸領域を往復するようにして操作させる。非操作手は、図5の状態でフィードバックデバイスに設置し、触覚フィードバックを受けさせる。条件 zero と条件 one で、凹凸領域に触れた感覚に差があるのか、ないのかの判断がつくまで被験者には自由に条件を切り替えることができる。判断がついたら条件 zero と条件 one について、凹凸領域に触れた感覚を5段階で一対比較させる。凹凸領域に触れた感覚が,条件 zero:とてもある,条件 zero:ややある,同程度,条件 one:ややある,条件 one:とてもある。の5段階である。

3.1.4 実験条件

被験者は 10 名で,利き手が右手の 20 代~30 代の男女(男性 6 名,女性 2 名)である.実験中は,室内の電気を消し,被験者には実験中は操作手,非操作手は見ず,投影バーチャルハンドのみを見るよう指示した.操作手は,投影バーチャルハンドと同じ姿勢,具体的には,手を開いてはいるが力は入っていない姿勢で,5 本指すべてをタッチパネルにタッチした状態で投影バーチャルハンドを操作させた.被験者の座る位置に関しては,投影バーチャルハンド

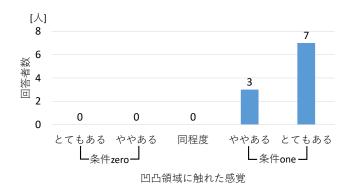


図 7 条件 zero と条件 one の凹凸領域に触れた感覚を比較した アンケート結果

と被験者の身体に接続性を持たせるよう、投影バーチャルハンドの根元の位置と被験者の操作手側の肩の位置(投影面において、投影バーチャルハンドの伸びる方向と垂直の方向に関する位置)を合わせた。また、振動アクチュエータの駆動した音による知覚を遮断するためのヘッドフォンを被験者に装着させた。

3.1.5 結果·考察

条件 zero と条件 one の凹凸領域に触れた感覚を比較した 結果を図 7 に示す。図 7 の結果より、今回用意したフィードバックデバイスにおいては、非操作手の 1 本の指に触覚 フィードバックを返すと、実物体に触れた感覚は増す傾向 があることが分かった。

図7より、実環境において、表面形状が異なる領域がある場合、振動を触覚フィードバックとして呈示することで、触覚フィードバックを返す先が非操作手の1本の指であっても、触覚フィードバックがない場合に比して、実物体に触れた感覚は向上すると考えられる。そのため、本試作システムを用いて、1本対複数本での触れた感覚の調査実験を行う。

3.2 1本対複数本での触れた感覚の調査実験

3.2.1 目的

片手で投影バーチャルハンドを操作し、投影バーチャルハンドの指先が凹凸領域上に存在する場合に、条件 multi は条件 one に比して、凹凸領域に触れた感覚は向上するのかを調査する。

3.2.2 実験システム

実験システムは 3.1.2 項と同様である.

3.2.3 実験手順

被験者に操作手をタッチパネルにあてた状態で投影バーチャルハンドが平坦領域と凹凸領域を往復するようにして操作させる。非操作手は、図 5 の状態でフィードバックデバイスに設置し、触覚フィードバックを受けさせる。条件 one と条件 multi で、凹凸領域に触れた感覚に差があるのか、ないのかの判断がつくまで被験者には自由に条件を

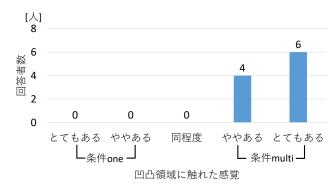


図 8 条件 one と条件 multi の凹凸領域に触れた感覚を比較した アンケート結果

切り替えることができる。判断がついたら条件 one と条件 multi について,凹凸領域に触れた感覚を 5 段階で一対比較させる。凹凸領域に触れた感覚が,条件 one:とてもある,条件 one:ややある,同程度,条件 multi:ややある,条件 multi:とてもある,の 5 段階である.

3.2.4 実験条件

実験条件は 3.1.4 項と同様である.

3.2.5 結果

条件 one と条件 multi の凹凸領域に触れた感覚を比較した結果を図 8 に示す。図 8 の結果より、今回用意したフィードバックデバイスにおいては、非操作手の複数の指に触覚フィードバックを返すと、非操作手の1 本の指に触覚フィードバックを返す場合に比して、実物体に触れた感覚は増す傾向があることが分かった。

3.2.6 考察

図8より、実環境において、表面形状が異なる領域がある場合、振動を触覚フィードバックとして呈示することで、触覚フィードバックを非操作手の複数の指に返すと、触覚フィードバックを非操作手の1本の指に返す場合よりも、実物体に触れた感覚は向上すると考えられる。実験後の被験者への聞き取りから、触覚フィードバックを返す指の本数が増えたことによる、違和感はなかったが、触覚フィードバックを返す指の対応付けや、非操作手側の投影バーチャルハンドの存在がないことに違和感を覚えた、といった意見が得られた。この違和感が、実物体に触れた感覚のさらなる向上を妨げているのではないか、と考察した。非操作手に触覚フィードバックを返す際は、実物体に触れた感覚をより向上させるためには、こうした左右の不整合を考慮する必要があると考えられる。

3.3 指の本数と身体所有感の関係の調査実験

3.3.1 目的

片手で投影バーチャルハンドを操作し,非操作手に触覚フィードバックを返す指の本数によって,投影バーチャルハンドに対する身体所有感が向上するのかを調査する.

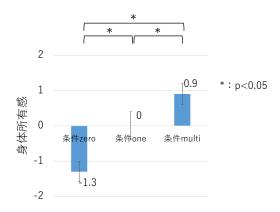


図 9 非操作手に触覚フィードバックを返す指の本数ごとの身体所 有感の平均値と標準誤差

3.3.2 実験システム

実験システムは 3.1.2 項と同様である.

3.3.3 実験手順

被験者に操作手をタッチパネルにあてた状態で投影バーチャルハンドが平坦領域と凹凸領域を往復するようにして操作させる。非操作手は、図 5 の状態でフィードバックデバイスに設置し、触覚フィードバックを受けさせる。条件zero、条件one、条件 multi において、投影バーチャルハンドをどの程度身体の一部のように感じたかの判断がつくまで被験者には自由に条件を切り替えることができる。判断がついたら各条件について、投影バーチャルハンドに対する身体所有感を $-2\sim+2$ の 5 段階のリッカート尺度で評価させる。

3.3.4 実験条件

実験条件 3.1.4 項と同様である.

3.3.5 結果

非操作手に触覚フィードバックを返す指の本数の 1 要因に関する一元配置分散分析の結果,主効果が有意であった (F(2,18)=19.09,p<0.01). Holm の方法を用いて多重比較を行った結果,非操作手の触覚フィードバックを返す指の本数に関して,それぞれ次の組み合わせにおいて有意差が見られた(図 $\mathbf{9}$). 条件 one > 条件 zero,条件 multi > 条件 zero,条件 multi > 条件 one.

3.3.6 考察

図9より、非操作手に触覚フィードバックを返す指の本数を増やすと、投影バーチャルハンドを自分の身体の一部として感じる傾向があると考えられる.

4. まとめ

操作手で投影バーチャルハンドを操作しているのに対し、表面形状が異なる領域がある場合に、非操作手の1本の指に触覚フィードバックを返しても、実物体に触れた感覚は向上するといった結果が得られた.以前の調査[6]での結果も踏まえると、投影バーチャルハンドの進行方向に対して、物体が存在する場合や表面形状が異なる領域があ

る場合には、操作手で投影バーチャルハンドを操作しているのに対し、非操作手の1本の指に触覚フィードバックを返しても、実物体に触れた感覚は向上すると考えられる.

また、表面形状が異なる領域がある場合については、非操作手に触覚フィードバックを返す指の本数を増やすことで、ユーザにより実物体に触れた感覚や投影バーチャルハンドに対する身体所有感をより向上させることができると考えられる.

3.2.6 節で述べた通り、視覚情報と触覚情報の左右の不整合が実物体に触れた感覚のさらなる向上を妨げていると考えられる。今後、投影バーチャルハンドの左右の表示形式や非操作手の複数の指に触覚フィードバックを返す際の投影バーチャルハンドの指先との左右の対応付けによって実物体に触れた感覚は変化するのかを調査する予定である。

参考文献

- [1] 岡原浩平, 小川修平, 新明拓也, 岩井大輔, 佐藤宏介. 身体拡張型インタフェースのための前腕の投影表現に関する基礎検討. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19, No.3, pp.349-355, 2014.
- [2] 上田雄太, 岩井大輔, 佐藤宏介. バーチャルハンド操作の ための携帯タッチ端末を使用した手指状態推定. 第 59 回 システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 343-4(4 pages), 2015.
- [3] 上田祐介, 前野隆司. マウス型多指ハプティックデバイスの開発(ハプティックインタフェース1). 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, No.1A1-H-8, 2004.
- [4] Stefano Scheggi, Leonardo Meli, Claudio Pacchierotti, and Domenico Prattichizzo. Touch the virtual reality: using the leap motion controller for hand tracking and wearable tactile devices for immersive haptic rendering. In ACM SIGGRAPH 2015 Posters, p.31. ACM, 2015.
- [5] Ramachandran, Vilayanur S. and Rogers-Ramachandran, Diane. Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Science, 263, pp.377-386, 1996.
- [6] 田辺育暉, 浅井唯貴, 榎本龍一, 上田雄太, 岩井大輔, 佐藤宏介. 身体拡張インタフェースにおける非操作手への触覚呈示機構に関する研究. 第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 142-5 (6 pages), 2017.
- [7] 下条誠. 皮膚感覚の情報処理. 計測と制御, Vol.41, No.10, pp.723-727, 2002.
- [8] Roland S Johansson and Ake B Vallbo. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. Trends in neurosciences, Vol.6, pp.27-32, 1983.
- [9] Stanley J Bolanowski Jr, George A Gescheider, Ronald T Verrillo, and Christin M Checkosky. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. The Journal of the Acoustical society of America, Vol.84, No.5, pp.1680-1694, 1988.