

# ラバーハンド錯覚を利用した身体への映像と触覚の 同時提示に関する検討

泉 健太<sup>\*1</sup> 鈴木 蒼生<sup>\*2</sup> 市川 将太郎<sup>\*2</sup> 高嶋 和毅<sup>\*2</sup>  
藤田 和之<sup>\*2</sup> 北村喜文<sup>\*2</sup>

## A Study on Simultaneous Presentation of Visual and Tactile Stimulus to the Human Body Using Rubber Hand Illusion

Kenta Izumi<sup>\*1</sup>, Aoi Suzuki<sup>\*2</sup>, Shotaro Ichikawa<sup>\*2</sup>, Kazuki Takashima<sup>\*2</sup>,  
Kazuyuki Fujita<sup>\*2</sup> and Yoshifumi Kitamura<sup>\*2</sup>

**Abstract** - Presentation of tactile sensation to the human body can lead user's more immersive experience. However, it is difficult to realize a method that simultaneously presents tactile stimulus to the human skin while projecting visual information because conventional on-body haptics devices would cover the skin. In this study, we use rubber hand illusion to tackle this challenge. We use a regular setup established in prior rubber hand illusion experiment. A participant's own hand and a rubber hand are placed side by side across a partition wall where he/she cannot see own hand. When an experimenter touches the rubber hand and the real hand simultaneously, she/he would feel as if the rubber hand is own hand. After such illusion is induced, our method enables to simultaneously provide haptic stimulus onto his/her real hand using on-body devices and visual stimulus onto the rubber hand that he/she feels it is own. We conduct a preliminary user study through our example applications and find high potential of our method to make user experience more realistic and immerse.

**Keywords** : Projection mapping, haptics device, body ownership

### 1. はじめに

近年、コンピュータグラフィックスを、プロジェクタ等の映写機器を用いて立体物や平面に投影するプロジェクションマッピングの技術を利用した演出が盛んになされている。映写の対象はモノだけではなく、タトゥーが施された人の皮膚の上にプロジェクションマッピングを行い、タトゥーの色を変化させたりアニメーションを追加したりする Ink Mapping [1]等もある。一般に、タトゥーのような身体装飾は不可逆的なものであるが、プロジェクションマッピング技術を利用することで手軽にさまざまな装飾パターンを試すことができる。一方で、従来の人間の体へのプロジェクションマッピングは対象者と視聴者が別であるものが主であり、[1]のような、視聴者自身の見た目や体験拡張を対象としたものは少ない。

本研究では、体験者自身の身体に対してプロジェクションマッピングを適用し、体験者が自身の身体を装飾したり、その機能を拡張したり、さらにはそれらの体験に深く没入できるような新たな演出手法を検討する。それにあたり、体験をより豊かなものにする要素として、プロジェクションによる映像投影だけではなく、コンテン

ツに応じた触覚提示を併用することを考える。体験者の皮膚に直接触覚を提示するデバイスとしてはウェアラブルな触覚提示デバイスが多数提案されている(例えば[2])。しかしながら、これら装着型のデバイスは体験者の皮膚を遮蔽してしまうため、同じ領域への映像投影が難しい。空中超音波放射圧を利用した非接触型の触覚提示手法[3]を用いれば皮膚は遮蔽されないために同一領域に映像投影と触覚提示が実現できる可能性はあるが、この手法は実装コストが高く、提示できる触覚刺激に限りがある。

そこで我々は、同一領域の皮膚に対して、プロジェクションマッピングと接触型の触覚提示を同時に提供するために、ラバーハンド錯覚 (RHI) に着目した。これは、ラバーハンドと自身の本物の手 (リアルハンド) を並べて配置して同期的に触刺激すると、ラバーハンドが自身の手のように感じる錯覚である[4]。RHI 生起時には、ラバーハンドへ危害が加えられそうになると恐怖を感じるという報告もあり、ラバーハンドに対する刺激がリアルハンドと同等に知覚される可能性が示されている[5,6,7]。本研究では、RHI を利用し、ラバーハンドに対して映像コンテンツをプロジェクションマッピングにより投影しながら、リアルハンドに対して映像と同期的に触覚提示する手法を提案する。このように体験者に映像と触覚刺激の同時提示を試みる。このアイデアを検証するため

\*1: 東北大学 工学部

\*2: 東北大学 電気通信研究所

\*1: School of Engineering, Tohoku University.

\*2: Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

に、映像として炎のアニメーションを皮膚に投影し、リアルハンドの同一箇所に対してペルチェ素子による温覚提示を行うアプリケーションを実装し、視覚と触覚情報が統合的に知覚されるか、および体験への没入感が高まるかどうかを予備実験により調査した。また、その結果を基に、提案手法を活用したアプリケーションの実装例を示す。

## 2. 提案手法

提案システムでは、関連研究にない、図1に示すようにユーザの指先から前腕部分を対象とする。本研究は、身体所有感を本物の手（リアルハンド）と偽物の手（ラバーハンド）の両方に持たせることが肝であるため、確実にRHIを生起させる仕組みが必要である。以下、提案手法におけるラバーハンドへの映像投影の方法とリアルハンドに対する力触覚提示装置について概要を説明する。

### 2.1 ラバーハンドへの映像投影

視覚刺激を利用したRHIの生起に関する報告として、Phantom Omni (SensAble Technologies 社製) を用いて平面ディスプレイにラバーハンドの映像を表示したもの[7]や、平面上に配置されたラバーハンドに対してレーザー光照射による刺激を与えるものが報告されている[8]。本研究では、テーブル上に配置したラバーハンドに対してプロジェクションマッピングを行い、触覚を同時に提示することで、生起したRHIの効果がより持続、または強化されることを期待する。なお、本研究では立体のラバーハンドに対してプロジェクションマッピングを行った場合について主に扱うものとするが、ディスプレイやコンピュータグラフィックスなどを駆使してラバーハンドを二次元的に表示した場合にもRHIが生じることが報告されていることから[7,9]、図1に示すような形態だけではなく、ラバーハンドも映像コンテンツに含めて投影したり、または一つのディスプレイでまとめて表示するような形態もあり得ると考えられる。

人体へのプロジェクションマッピングを行っている例としては、InkMapping[1]やMIDAS Projection[10]などの例が報告されている。これらは対象となる人の正面からプロジェクタ等による投影を行っている。一方で提案手法では体験者と対象者が同一であるため、図1のようにプロジェクタを体験者の視点よりも高い位置に、プロジェクタが机上面方向に映像を投影する方向で設置する。また、ラバーハンドの位置、太さ、向き等は既知とすることでプロジェクションマッピングにおける計測を今回は省略している。

### 2.2 リアルハンドへの力触覚提示

RHIが生起状態を維持した上で、視覚と触覚刺激を提示するためには、リアルハンドとラバーハンドの位置関係の保持、映像コンテンツと提示される触覚の同期が必要となる。ここでは図1（緑枠）に示すように、ユーザが前

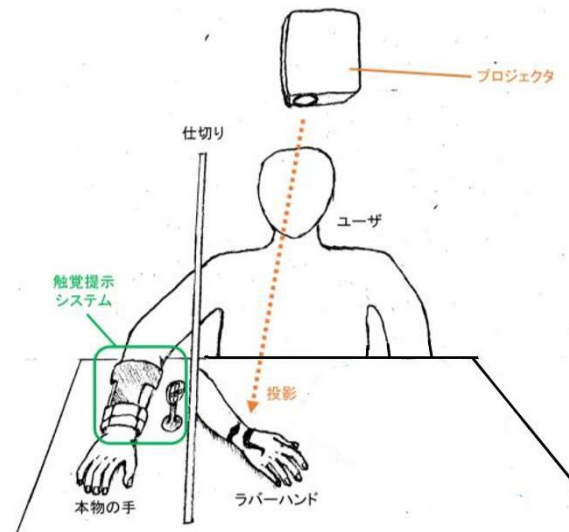


図1 システム構成

Fig.1 System configuration

腕部を置く場所を固定し、その上に触覚提示デバイスを配置する。触覚提示デバイスは後に述べるように扱うアプリやコンテンツに応じて入れ替えることを想定している。なお、このような机上セットアップに限定している点は実際のアプリケーション開発の妨げとなるが、錯覚生起の有無などを検証する初期段階においては妥当なものと考えられる。

### 2.3 錯覚生起

RHI生起のための学習フェーズおよび映像コンテンツの投影時には、図1に示すように、ラバーハンドの前腕部の端から体験者の肩にかけて布で覆い、ラバーハンドとリアルハンドの間に仕切りを置く。この時、体験者にはラバーハンドの形状と同じ形状になるように前腕部を置いてもらい、ラバーハンドに注目してもらう。学習フェーズでは、過去のRHIの研究と同様に、オペレータがラバーハンド及びリアルハンドの同一箇所同期的に刺激を与える。なお、この学習フェーズ中のラバーハンドへの刺激については、刺激する様を映像コンテンツとして提示することもでき、ラバーハンド自体を二次元的映像コンテンツの一部として表示することも可能である。また、リアルハンドに対する刺激はPhantom Omni等を利用することで、より正確な同期刺激を生み出すことが可能である。このように、形態については様々な可能性があるが、本提案では、伝統的なRHIの手順を踏む。

## 3. テストアプリケーションによる予備実験

先に述べたシステムを用いて、ラバーハンドに炎のアニメーションを投影し、それと同時にペルチェ素子による熱刺激をリアルハンドに提示（押し当てる）テストアプリケーションを開発した。このアプリケーションを用いて、映像刺激と触覚刺激の同時提示ができていかどうか、両者が統合的に知覚されているかどうかを予備的

に検証した。実験参加者は健康な 2 名の男性大学院生とし、実験は東北大学電気通信研究所内で行われた。

手順について説明する。実験参加者は、RHI を生起させるための学習フェーズの後に、提案手法を用いた映像と触覚の同時提示を体験し、その後アンケートへ回答した。学習フェーズでは、実験参加者自身の腕を隠し、リアルハンドが見えない状態でラバーハンドを観察させ、実験者がリアルハンドとラバーバンドの両方に対して視覚情報と触覚情報が一致するように、筆を用いて 10 分間刺激を与えた。学習フェーズ終了後、図 2 のように、ラバーバンドに炎が出現する映像を投影し、リアルハンドに対して炎が投影された箇所と同じ箇所にペルチェ素子を押し当てた。また、今回の実験では正確なタイミングで触覚を提示するために、触覚デバイス(ペルチェ素子)は実験者が手動で動かした。映像の投影と触覚提示の終了後、本手法の効果を評価するアンケートに回答してもらい、表 1 に示す各質問項目について 7 段階で評価してもらった。なお、段階 1 が「全く感じなかった」、段階 7 は「とても感じた」とした。アンケートへの回答の終了をもってユーザスタディを終了した。



図 2 ラバーハンドに対する炎の映像投影とリアルハンドに対するペルチェ素子による温覚提示

Fig.2 Visual projection of a flame on a rubber hand and warmth presentation by Peltier element on a real hand

表 1 質問項目

Table 1 List of questions

|      |   |
|------|---|
| 質問 1 | 学習フェーズ終了後、ラバーハンドが自身の腕であるかのように感じましたか？      |
| 質問 2 | 自身の腕に対して映像と触覚が同時に提示されているように感じましたか？        |
| 質問 3 | 提示された触覚が映像に起因するものであると感じましたか？              |
| 質問 4 | 非現実的な表現を含む映像コンテンツが、あたかも現実の出来事かのように感じましたか？ |
| 質問 5 | 映像と触覚を同時に提示することが、没入感の向上につながったと思いますか？      |

#### 4. 結果と考察

評価結果全体を見渡すと、予備実験ということもありまだ改善の余地はあるものの、提案手法により身体への映像投影と触覚提示の実現可能性が示唆された。以下に、

アンケートの各質問項目について考察する。

質問 1 では、学習フェーズの効果について質問しており、2 名とも段階 5 と評価しており、RHI が中程度生起していたと考えられる。本実験では、学習フェーズにおいて、実験者が筆を動かすことにより触覚刺激を与えた。しかし、RHI の生起にはリアルハンドとラバーハンドに与えられる触覚刺激が時間的に同期している必要があり、時間的にずれがあると、錯覚が生起しない [4,11]。手動で同期した刺激を 10 分間与え続けることは難しいため、刺激を与える筆をサーボモーターで制御したり、Phantom Omni を用いたりするなどして、学習フェーズの間、確実に同期刺激を与えることができれば、より強く RHI を生起させることができるのではないかと考えられる。

質問 2 では、触覚と映像を同時に提示した際、実際に同時に提示されたように感じたかを質問し、結果は段階 3 と段階 5 に分かれた。今回の予備実験では、映像と触覚の同時提示に際して、ラバーハンドに映像を投影すると同時にリアルハンドにペルチェ素子を押し当てた。この際、炎が変化を伴うアニメーションであったのに対し、ペルチェ素子が与える触覚自体に変化はなく、ペルチェ素子を押し当てた瞬間にしか触覚の変化は起こらない。したがって、ペルチェ素子が押し当てられた後は、実験参加者はアニメーションによる視覚刺激と触覚刺激を同時に提示されている一体的なコンテンツとして十分に知覚することができなかつたものとする。アニメーションに応じて提示される触覚を変化させることで、体験者は視覚情報と、それに一致した触覚情報を同時に得ることができ、ラバーハンドが自身の腕であるというように身体所有感の再構成を行い続けるとともに、コンテンツを統合的に認知することができるようになるのではないかと予想する。また、そもそも現実の炎によって圧力は与えられないため、前述の触覚の変化のことを考えても、ペルチェ素子ではなく、温風などを用いて炎の触覚を表現する方法の方が有効かもしれない。

質問 3 では、提示された触覚が映像に起因するものであると感じたかどうかを質問した。結果は 2 名とも段階 3 と評価しており、総じて触覚が映像に起因するものとは感じられていなかったことがわかる。これは、先にも述べたように、そもそも現実の炎が圧力を与えるものではないこと、アニメーションに応じて触覚が変化していないことから、視覚情報から想起される触覚のイメージと、実際に与えられた触覚にずれが生じたことによるものと推察する。提示した映像に対して、体験者が想定する触覚のイメージに近い触覚を提示することができれば、より効果が高まるのではないかと予想する。

質問 4 では、前腕上に突如として炎が出現するという非現実的な表現を含む映像コンテンツが、あたかも現実のものであるかのように感じるかを質問し、段階 3 と段階 4 という評価を得た。この予備実験では、炎という通



常前腕部に現れることがないであろう映像コンテンツを用いているが、例えば 5.2 節で紹介するアプリケーションで蛇を用いているように、前腕部に乗る可能性のあるコンテンツを用いたほうが、非現実的表現であっても現実のものとして受け入れやすいのかもしれない。ただし、非現実的な表現という言葉の解釈は様々であり、腕に炎などが現れる描写を含む漫画、アニメ、映画などの映像作品は多数あり、それらとの関連についてコメントを求めればまた違った回答や解釈になる可能性もある。質問項目も含め再度検討の余地があると考え。

質問 5 では、触覚と映像の同時提示が、コンテンツへの没入感の向上につながったかどうかを質問し、両者とも段階 5 と評価した。これは、映像と触覚の同時提示により没入感を向上させる可能性を示している。この項目は、これまでに挙げた改善を加え、ラバーハンド上の映像によって触覚が生じていると自然に認知されるようになれば、より向上するものと予想する。

以上より、本提案手法に基づいてコンテンツを作成する際、学習フェーズにおいてリアルハンドとラバーハンドへの触刺激の時間差を小さくすること、動きのある映像に対して連動して動く触覚提示を行うこと、被験者が映像から想起する触覚のイメージと一致するような触覚を提示すること、現実に前腕部に出現する可能性のあるコンテンツを用いること、という 4 つの点を改善することで、より効果的な映像と触覚の同時提示が可能であると推察する。なお、ラバーハンドを二次元的に表示した場合、同じ映像コンテンツと触覚の組み合わせであっても、ユーザスタディの結果に違いが出る可能性もあり、さらに本手法に基づいたアプリケーションには認知科学的側面からも考察や調査の余地がある。

## 5. アプリケーション例

提案手法を利用して実装したアプリケーション例を 2 つ紹介する。

### 5.1 熱映像コンテンツに応じた温冷感覚提示

まず、予備実験で扱った温覚提示を触覚提示デバイスと映像が自動的に連動するよう実装した。RHI 生起時、視覚的温度処理が温度感覚に影響を与えることが報告されている[7,12]。本アプリケーションでは、触覚提示デバイスを用いることで映像と触覚の同期、および温冷感覚の動的な制御が可能となっている、予備実験時よりも多様な視覚的温度情報を表現でき、視覚的温度処理と触覚的温度処理及び温度感覚の関係性について新たな観点から調査することが可能になる。本アプリケーションの全体像を図 3 に、システム構成を図 4 に示す。サーボモータによって制御するアームの先端に取り付けたペルチェ素子がユーザの前腕部に接触することで皮膚への触覚提示を行い、温冷感覚の提示はペルチェ素子にかかる電圧制御によって行う。

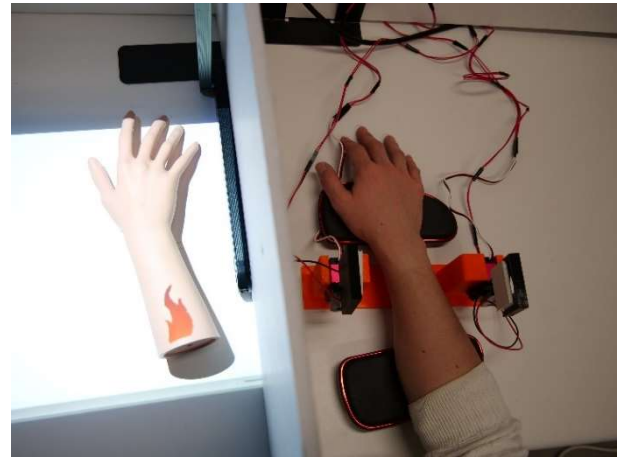


図 3 温冷覚提示システムの全体像

Fig.3 Overview of the thermal sensation presentation system

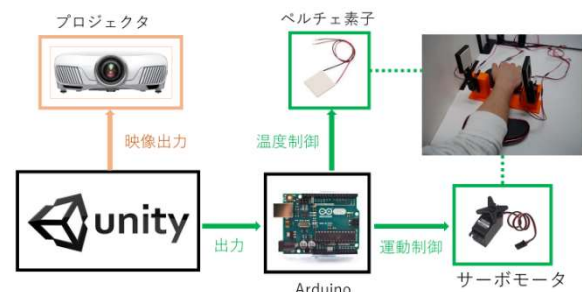


図 4 温冷覚提示システムの構成

Fig.4 Configuration of the thermal sensation presentation system

### 5.2 蠱刺青(しゅんしせい): 身体上を蠢く映像とのインタラクション

プロジェクションマッピングの対象と触覚提示の対象位置が異なることを利用し、体験者がラバーハンド上またはその周辺に対して働きかけることで何らかの入力操作を行い、入力に応じて映像コンテンツや触覚を変化させられる。このようなインタラクティブ性をもったコンテンツの例として、「蠱刺青」というエンタテインメント性を重視したシナリオベースのアプリケーションを作成した。蠱刺青の全体像を図 5 に、そのシステム図を図 6 に示す。蠱刺青では、先の温冷感覚に加えて、圧覚と風覚を提示するデバイスを追加した。また、ユーザからの入力を検知する外部センサとして、加速度センサ・ジャイロセンサなどのセンサを組み合わせた。入力されたセンサ値は USB 接続された Unity 上へ送信され、入力に応じた映像コンテンツとそれに対応した制御信号を出力する。

一般に RHI の学習段階においては単純な刺激をラバーハンドおよび自身の腕に同期的に行うが、本アプリケーションではオペレータが行う学習のための操作をシナリオ冒頭のコンテンツとして表現し、シナリオの進行に応じて体験者がラバーハンドに向けて行った操作を入力として、触覚提示が変化するような仕様とした。

アプリケーションの手順とシナリオを紹介する。オペレータは学習フェーズの最後に手の甲にぐるりと円を描くように刺激を与えていく。すると、円に沿って蛇が出現し、蛇が手首を締め上げていく。この時、ゴムチューブにより蛇の動きに合わせてリアルハンドの手首も締められていく。次に、体験者はオペレータの指示に従い、蛇を追い払うためにライター型入力デバイスでラバーハンド上の蛇に対して火をつける動作を行う。入力に応じて火の映像が出現し、リアルハンドにはペルチェ素子による温覚提示がされる。しかし、蛇は逃げないため、ふいご型デバイスを用いて風を吹き火を大きくしていくと、手首に巻き付いていた蛇が腕から逃げ出し、リアルハンドが締め付けから解放される。この時、ふいご型デバイスに呼気を注入すると、リアルハンドに対してファンで風が送られる。だがこの時点では、腕に火がついたままであり、温覚も提示され続けている。ここで、オペレータの指示に従い体験者がコップ型デバイスを傾けて火に向かって水をかける動作をすると、水のアニメーションとともに火が小さくなっていく。この時、水のアニメーションに合わせてリアルハンドにもう一つのペルチェ素子が冷覚を提示する。火が消えたと同時に温覚を提示していたペルチェ素子が腕から離れる。火が消えたアニメーションの後、逃げていた蛇が再度登場して再び手首を締め上げていく。ここで、オペレータがおもちゃのナイフを取り出し、ラバーハンドの手の甲に勢いよく突き立て、蛇を退治して体験は終了する。最後のナイフで蛇を退治する演出では、これまでのインタラクションを通じて十分に RHI が生起しており、体験者があたかもナイフが自分の手に突き立てられているかのように感じて驚くことを期待している。

本アプリケーションは、第 27 回国際学生対抗バーチャルリアリティーコンテストにて展示を行った。多くの来場者に体験していただいたが、学習フェーズに十分な時間をかけることができなかったこともあり、全体を通して RHI の生起にかなり個人差が見受けられた。蛇の締め付けシーンでは、締め付けられるという感覚の再現に好評をいただいた一方で、鱗や体温、蠢くような感覚まで再現して欲しかったというコメントもあった。圧覚のみの提示でも体験に没入することは可能だが、クオリティの高いコンテンツには質感、温度などの細部に至る再現が必要である。炎と水の映像シーンでは、体験としてあまり良い評価は得られなかった。4 章での考察に加えて、非現実的な炎のシーンだけでなく水のシーンも同様の評価であったことから、温冷感覚の再現のみでは質の高い体験の提供は難しいと考えられる。また、風が吹くシーンでは、センサで呼気を検知してからファンで風を送るまで時間差を指摘するコメントをいただいた。RHI を利用したインタラクティブな体験では、センシングとアクチュエーションの時間差も注意してコンテンツを作成し

なければならない。本アプリケーションに限らず、本提案手法を用いたアプリケーションの開発においては、提示したアニメーションに常に連動し、常に違和感なく一致する触覚を提示できるかどうか、没入感向上の重要な要素であるように思える。



図 5 蠢刺青のシステム全体像

Fig.5 System overview of Shunshisei

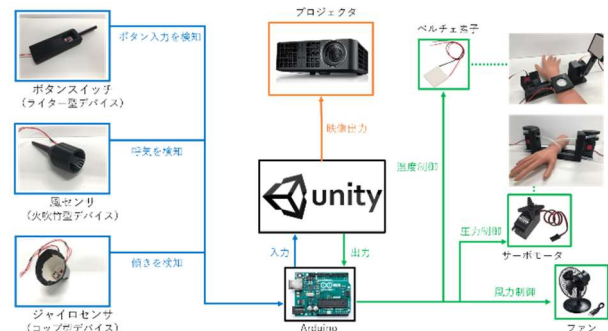


図 6 蠢刺青のシステム構成

Fig.6 System configuration of Shunshisei

## 6. 終わりに

本研究では、ラバーハンド錯覚(RHI)に着目し体験者の同一領域の皮膚に対して、プロジェクションマッピングと装置による触覚提示を同時に提供する方法を提案した。体験者に RHI を生起させた後、ラバーハンドに対して映像コンテンツをプロジェクションマッピングにより投影し、リアルハンドに対して映像と同期的に触覚提示を行う。このアイデアを検証するために、映像として炎のアニメーションを投影し、リアルハンドに対してペルチェ素子による温覚提示を行うアプリケーションを実装し、その効果を予備実験により確認した。その結果、同時提示には多数の改良が必要であるものの、没入感の向上などの有用性が示唆された。また、複数の触覚提示を切り替えながら提示することを可能とするアプリケーション開発について述べ、展示会での体験者のフィードバックをまとめた。今後はシステムの改良と本実験を実施したい。

## 7. 参考文献

- [1] Osker, and Gasper: Ink Mapping: videomapping on tattoos; (2015), <https://www.youtube.com/watch?v=hNvqyc3mKPY>
- [2] Delazio, A., Nakagaki, K., et al.: Force Jacket: Pneumatically-Actuated Jacket for Embodied Haptic Experiences; *CHI '18: Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, No. 320, pp.1-12 (2018).
- [3] Makino, Y., Furuyama, Y., et al.: HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback; *CHI '16: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1980–1990 (2016).
- [4] Botvinick, M. and Cohen, J.: Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see; *Nature*, **Vol. 391**, No.6669, p. 756 (1998).
- [5] Ehrsson, H. H., Wiech, K., et al.: Threatening a rubber hand that you feel is yours elicits a cortical anxiety response, **Vol. 104**, No.23, pp. 9828–9833 (2007).
- [6] Armel, K. C. and Ramachandran, V. S.: Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response; *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **Vol. 270**, No. 1523, pp. 1499-1506 (2003).
- [7] 金谷, 横澤 : 手の身体所有感覚とラバーハンド錯覚; バイオメカニズム学会誌, **Vol. 39**, No. 2, pp. 69-74 (2015).
- [8] Durgin, F. H., Evans, L., et al.: Rubber Hands Feel the Touch of Light; *Psychological Science*, **Vol.18**, No.2, pp.152–157 (2007).
- [9] Slater, M., Pérez, M. D., et al.: Inducing illusory ownership of a virtual body; *Frontiers in Neuroscience*, **Vol. 3**, No. 2, pp. 214-220 (2009).
- [10] Miyashita, L., Watanabe, Y. and Ishikawa, M.: MIDAS projection: Markerless and Modelless Dynamic Projection Mapping for Material Representation; *ACM Transactions on Graphics*, **Vol. 37**, No. 6, Article. 196, pp. 1-12 (2018)
- [11] Tsakiris, M. and Haggard, P.: The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution; *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **Vol. 31**, No. 1, pp. 80–91 (2005).
- [12] 横澤 : 統合的認知; 認知科学, **Vol. 21**, No. 3, pp. 295-303 (2014).
- [13] 本間 : ラバーハンドイリュージョン: その現象と広がり; 認知科学, **Vol. 17**, No. 4, pp. 761–770 (2010).
- [14] Gallagher, S.: Philosophical Conceptions of the Self: Implications for Cognitive Science; *Trends in Cognitive Sciences*, **Vol. 4**, No. 1, pp. 14–21 (2000).