

えくす手: 変調バーチャルハンドへの 即応的な身体所有感の生起による身体拡張システム

小川 奈美^{†1} 伴 祐樹^{†1} 櫻井 翔^{†1, †2}
鳴海 拓志^{†1} 谷川 智洋^{†1} 廣瀬 通孝^{†1}

概要: 我々の身体像は、外界の対象をも取り込み柔軟に変容することが知られている。さらに、身体像が変化することにより、特定の感情の喚起や行動の変容が生じることがある。我々は、自己と外界とのインタフェースとしての身体に着目し、一般的な手とは異なる形状や運動の対応があるバーチャルハンドを用いたピアノの擬似的演奏ができるアプリケーションシステム“えくす手”を構築した。本研究では、実際の手とリアルタイムに連動して動くバーチャルハンドの形状や動き方が現実の手とは大幅に異なるものに変容した場合にも、対象が自分の身体に属するものであるという感覚である身体所有感が即応的に生起することを確かめた。さらに、変容した身体像への身体所有感の生起が、ピアノの演奏という行為に及ぼす影響について、システム体験者からのフィードバックを通じて考察した。

Metamorphosis Hand: Augmented Body System of Illusory Body Ownership over Dynamically Transforming Virtual Hands

NAMI OGAWA^{†1} YUKI BAN^{†1} SHO SAKIRAI^{†1, †2}
TAKUJI NARUMI^{†1} TOMOHIRO TANIKAWA^{†1} MICHITAKA HIROSE^{†1}

Abstract: Our body image is flexible enough to incorporate external objects into. Moreover, change in body image sometimes evokes the particular feelings and alternates the behavior. We focused on the body as an interface between internal self and external world, and then constructed an application system that provides users with experiences of playing a virtual piano with a dynamically transforming virtual hand which appearance or movement is far different from our own. In this study, we demonstrate that even though an appearance or a movement of a virtual hand differs considerably from the real hand, we feel strong body ownership. We discuss the possibility of effects of body ownership over a peculiar body image on the performance of the piano.

1. はじめに

身体は、自己と外界とのインタフェースである。我々は、自分の身体がただひとつここに存在しているという感覚を抱いており、さらに自分の身体がどのような形をしているかという身体像を無意識に知ることができる。自分の身体がまさに自分に属するものだという感覚は、身体所有感と呼ばれている。一般に、我々は自己の身体に対してのみ身体所有感を感じ、自己と外界とを明確に区別することができる。

しかしながら、外界の対象に対してであっても身体所有感が生起し、身体像が変容することが知られている。身体所有感の拡張を示す簡単な実験として、ゴムの手(ラバーハンド)を用いたラバーハンド錯覚がよく知られている[1]。仕切り板などを用いて自分の手を視界から隠す代わりに、目の前にラバーハンドを置き、自分の手とラバーハンドを同時に筆でなぞられていると、ラバーハンドがあた

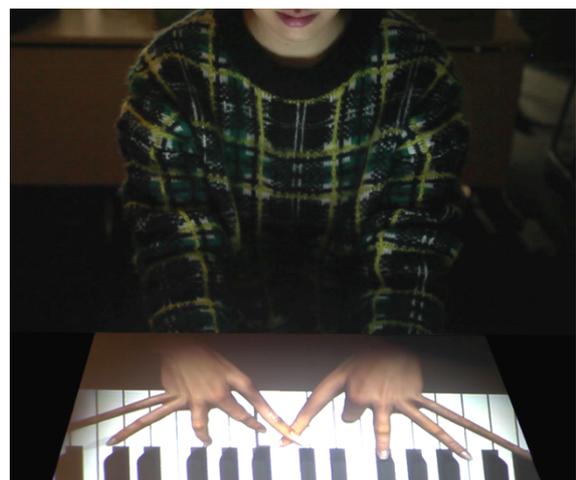


図1 えくす手:
変形された手でバーチャルなピアノを弾く様子
Fig.1 Metamorphosis Hand: Playing the virtual piano
with projected transformed hands

^{†1} 東京大学
The University of Tokyo

^{†2} 首都大学東京
Tokyo Metropolitan University

かも自分自身の手であるかのように感じられるという現象である。

古典的なラバーハンド錯覚は、筆でなぞることによる視触覚間の感覚同期に起因するものである。一方で、画面内で自己の運動に同期して動くアバターハンドに対しても、視覚運動間の同期によって身体所有感が生起することが知られている[2]。このため、バーチャル空間内において、現実空間とは異なる身体像を獲得することができる。たとえば、現実よりも長さが3倍程度長い腕に対しても、身体所有感が生起する[3]。また、自己の動きに連動して大きさが変わる風船や色が変わる長方形に対してでさえも、実際の身体とバーチャルな対象が連続している限り、身体所有感が生起する[4]。

我々の身体像がこれほどまでの柔軟性を見せる理由の一つが、道具の利用である[5]。道具の利用時には、道具が身体像の中に取り込まれ、身体が拡張する[6]。こうして、あたかも自分自身の生まれつきの身体と同じであるかのように、器用に道具を扱うことが可能となる。脳にとって道具とは、身体像の中に取り込まれた、身体というインタフェースの一部であることが分かる。

また、上記のような手法を用いて、外界の対象に身体所有感が生起すると、自身の感情や認識、行動にも影響があると考えられている。櫻井らの *Interactonia Balloon* は、自身の身体反応（呼吸）に同期する外界の対象（風船）を動かすことにより、風船が拡張身体であると認識され、呼吸と風船との対応関係を変化させると特有の感情が誘発されるという作品である[7]。また、行動の変容としては、カジュアルな格好の褐色肌のバーチャルアバターに対する全身の身体所有感の生起により、西アフリカの手太鼓であるジャンベの叩き方が変化することが示されている[8]。このように、現実の身体像とは異なる境界を持つ拡張身体や、意味合いの異なる見た目を持つ身体像の獲得により、身体認識を通じて感情喚起や行動変容を生み出す新しいインタフェースの実現が可能となる。

我々は、身体を通じて楽器を演奏する行為に着目し、現実の身体とは異なる身体像を通じてバーチャルなピアノを演奏することのできるアプリケーションシステム“えくす手”を構築した。ピアノの演奏には、手全体の移動と指それぞれの巧妙な操作が必要となり、高度な身体感覚が求められる。この身体感覚は、視覚運動感覚とともに、鍵盤を叩いた際の力覚フィードバックと聴覚フィードバックによっても形成される。このため、身体感覚が密接に関連するピアノを用いたアプリケーションシステムを設計することにより、単に宙でバーチャルハンドを動かすだけでなく、身体像の変容がより強烈な感覚として体験されると考えた。また、ジャンベを用いた研究[8]では、現実にある身体像を持ったアバターに対する身体所有感の錯覚

により、行動の変容が引き起こされていたが、本研究では、実際の手とリアルタイムに連動して動くバーチャルハンドの形状や動き方が、現実の手とはまったく異なるものに変容した場合にも身体所有感が生じるかを検討した。さらに、変容した身体への身体所有感の生起による、ピアノの演奏という行為に及ぼす影響について、体験者からのフィードバックをもとに考察した。

2. 関連研究

2.1 身体所有感の心理学的検討

我々の身体像が柔軟であることが示され、技術的な身体拡張の可能性が示された一方で、身体所有感の生起する対象には限界があるとされている。たとえば、手の形状に似せた木の枝や、通常の手の向きから90度回転させて置いたラバーハンドに対しては、身体所有感が生起しないことが示されている[9]。また、先のバーチャル空間内での伸びた腕への身体所有感[3]についても、4倍の長さの腕に対しては強い身体所有感は生起していない。これまでの研究により、空間的連続性、肌のテクスチャ、形状、視触覚間同期、視覚運動間同期の5つの要因が身体所有感の生起に主に影響することが明らかにされてきた。しかし、複数の要因同士の交互作用や優位性に関しては議論が続いており、身体像がどこまで拡張可能か、制御可能かについて具体的には明らかにされていない。

2.2 メディアアート

技術的な身体拡張の可能性の探求というテーマは、メディアアーティストからの関心が高い。パフォーマンスアーティストの *Stelarc* は、細胞培養した耳を手術により腕に埋め込むほか、筋電によって動くロボットアームを第3の腕として取り付けるなど、物理的に身体を拡張している[10]。

G. Levin らによる“*Augmented Hand Series*”は、ウェブカメラによって取得した手の画像をリアルタイムに変形して投影することで、バーチャルな身体拡張の体験を可能としている[11]。“*Augmented Hand Series*”では、手の表示にカメラからの画像を用いているのに対し、我々のシステムはCGモデルを使っているという点が大きく異なる。そのため、体験者それぞれの手のテクスチャを再現しない一方で、あらゆる角度からの手を表示できるほか、形状やテクスチャの変更が容易に可能である。また、画像ではなく三次元的な手形状を認識しているため、バーチャル空間内でインタラクティブに手と対象（ピアノ）が干渉することが可能である。

2.3 3D ユーザーインタフェース

手を用いたインタフェースの操作性を向上させるために、バーチャル空間での手や腕の形状を現実世界とは異なるものに変化させる研究も行われている。Go-Go は、バー

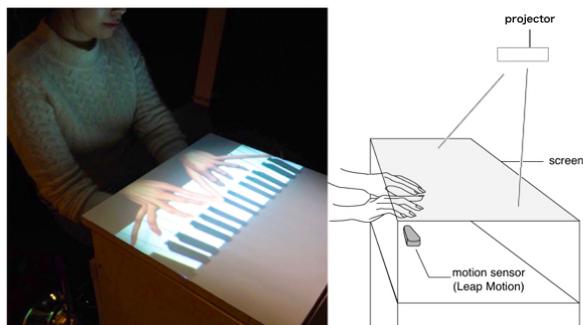


図2 箱内部の Leap Motion コントローラーが手の動きを検出し、上方のプロジェクタで箱上部に投影する。

Fig.2. Leap Motion Controller inside the box detects hand movements and display is projected from above.

チャルな腕を伸縮させることで、近くの対象と同様の操作感が遠くの対象を操作する際にも得られるという技術である[12]。手を用いたインタフェースは直観的な操作が可能であることが利点だとされている。しかし、身体の形状を変形させた場合には、通常の身体制御とは異なる感覚間の対応が生じるため、直観性を欠く可能性がある。どのような変形が直観性を損ねずに操作性を向上できるかについて、身体所有感の増減の程度が1つの指標となると考えられる。

2.4 ロボットによる身体拡張

作業支援のため、第3の腕[13]や、第6,7の指[14]となるロボットを身体に取り付け、身体能力を拡張する試みもなされている。取り付けた身体部位が、身体としての効果を発揮するためには、取り付けた身体部位が利用者の意図を反映した動作をしながらも、他の身体部位とは独立した動作をする必要がある。しかし、これらの研究では、取り付けた身体部位が独立した身体部位として運動計画を形成できるかという問題は検討されていない。この問題に対し、松井らは身体形状の認識を変容させて第一次体性感覚野に対応する領域を作り出すことで、拡張身体部位を用いた作業技能が比較的早く習得されると考えている[15]。ロボットにより物理的な身体拡張を試みる場合にも、本研究で焦点を当てている、現実の身体とは異なる形状や動きをする対象への身体所有感の生起というアプローチが有効であると考えられる。実際に、複数のラバーハンドに対してラバーハンド錯覚を生起させることで、3本目の腕を保持しているという身体形状の認識の変容が起こる[16]。

3. えくす手

我々は、現実の身体とは異なる身体像を通じてバーチャルなピアノを演奏することを可能とする“えくす手”というアプリケーションシステムを構築した。

このシステムでは、ユーザが箱の中に両手を挿入すると、箱の下部に配置された Leap Motion コントローラーがユーザの手の位置と動きを検出し、実際の手の位置に重なる

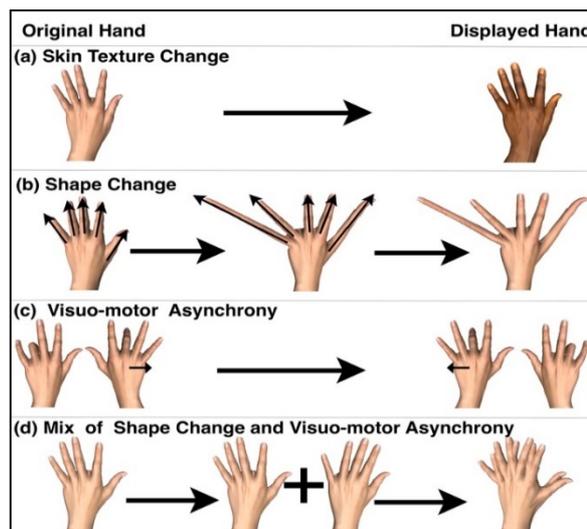


図3 手の変形パターンと変形の過程

Fig.3. Hand transformation patterns and processes

ように箱の上面のスクリーンに変形されたバーチャルハンドが投影される(図2)。ここでは、筆でなぞるなどの直接の視触覚同期手法を用いない代わりに、バーチャルなピアノを弾く設定にすることで、運動と同期する視聴覚フィードバックにより擬似的な触力覚を生起させた。これにより、ユーザはあたかも自分自身の手が変形したかのような体験を得ることができる。

CGモデルの変形パターンは図3に示す4種類に基本パターンを加えた5種類であり、両手ともに同じ変形を施した。基本となるモデルには、Leap Motion Unity Assetsのうち、日本人の標準的な手の色と形状に近い SaltLightFullHand を使用した。プログラムのフレームレートは、約 110fps であった。

3.1 肌のテクスチャ変化

自身の肌の色とは異なる色のラバーハンドに対しては錯覚が生じにくいという先行研究[17]や、褐色肌のアバターへの身体所有感によりジャンベの叩き方が変わるという研究[8]から、肌の色は身体所有感や行動に影響を与えられられる。よって、褐色肌で男性らしい肉付きのモデルである SaltLightFullHand に変更した(図3a)。

3.2 手の形状変形

手の形状は身体所有感の生起への重要なファクターとなると考えられているものの、どの程度影響するかについては議論が続いている。たとえば、肌のテクスチャをしたニュートラルな対象に対してよりも、ニュートラルなテクスチャの手形状の対象に対しての方が強い身体所有感が生起するとされる[18]。一方で、Tsakirisらは、木で作った手形状の対象には身体所有感は生起しないと結論づけている[19]。また、バーチャルハンドが自己の動きにより制御される程度(運動主体感)が高ければ、バーチャルハ



図4 前面のスクリーンを観察し、バーチャルハンドと実際の身体の連続性を欠く状態

Fig.4. Hands are displayed in front of a user. It lacks continuity between a user's real body and virtual hands.

ンドと実際の手との類似性によらず、単なる長方形に対してでも身体所有感が生起するという報告もある[20].そこで、見た目には明らかに現実にはありえないような手の形状を作り出すため、自然に手を開いた状態で、一直線上に指の長さが揃って見えるよう、各指の伸びる方向と関節の長さを操作した。さらに、第三関節から指が伸びる方向に調整を加えた(図3b)。

3.3 視覚運動間の対応不一致

身体所有感は、「自分で行為を行っている」という感覚である運動主体感と密接に関連している。我々が操作する身体は、ふつう常に身体所有感と運動主体感が同時に生じている。しかし、自分の行為と紐付いた結果であっても、ロボットアームなどを介した運動によって非直接的なものに変換され、遅延などが挿入されると、あたかも他人が行った行為かのように感じられる[21]。また、自分の行為の結果が、ロボットハンドを介した運動結果として出力される場合には、ロボットハンドが介入するだけでは運動主体感減らないが、指の対応が変わると運動主体感が減るということが分かっている[22]。運動主体感と身体所有感の関係性については確立された理論が存在していないが、体部位に関して部分的に生起した身体所有感が、運動主体感が生じることによって統一されたひとつの身体として認知されるとする理論がある[23]。先行研究から、自分の行う運動の意図と、出力としての運動の結果の対応が一致していない場合には運動主体感が減少し、結果として身体所有感も減ることが予想される。そこで、行為の意図と出力結果の対応づけが比較的明確である、左右の手の動きが入れ替わるという変換を行った。身体の正中面を対称面として、両手を鏡像反転させることで、右手と左手との動きの対応を交換した(図3c)。すなわち、ユーザが右手の中指

を曲げて右方向に動かすと、スクリーン上には左手の中指が曲がった状態で左方向に動く様子が投影される。

3.4 手の形状変形+視覚運動間の対応不一致

3.3の変形に比べ、より運動主体感が減少すると予想される、10本指の手を用意した。このパターンでは、ある1本の指を動かすと、同じ手の別の指も同時に動く変形となっている。基本モデルの上に、自然な状態での指の向きを基本から少しずつずらした変形モデルを重ねて表示することで、指が倍増して見える手を表示した(図3d)。このとき、基本モデルと変形モデルの人差し指と小指、中指と薬指が同時に動くように対応しており、手の重心からそれぞれの第三関節に伸びる軸を対称軸とし、第三関節から指が伸びる向きを反転させた。すなわち、実際に人差し指を右に動かすと、基本モデルの人差し指が右に、変形モデルの小指が左に動き、視覚的には10本ある指のうちの2本が動く状態になっている。

4. 体験者の反応

2015年11月に東京大学で開催されたメディアアートの展覧会である「第17回東京大学制作展」において、5日間「えくす手」の展示を行った。来場者の多くは東京大学の学生であり、他大学の学生、研究者、一般客など700人以上が来場し、約400人の来場者が本システムを体験した。展示では、各変形パターンが15秒ごとに自動で順に切り替わる設定とした。また、通常の箱上面スクリーンに加えて体験者の前面にもスクリーンを用意し(図4)、バーチャルハンドと体験者の実際の腕との空間的連続性の有無が身体所有感に与える影響も検討した[24]。

全体として、ほとんどの体験者が「気持ち悪い」、「奇妙な感覚」という感想を2つの観点について得ていた。1点目は、実際には空中で手を動かしているだけで一切の触力覚の手がかりがないにも関わらず実際にピアノを弾いているかのような感覚がするという点である。もう1つは、細部が実際の手とは一致しないCGモデルであり、また現実にはあり得ないような手であるにも関わらず、強い身体所有感が生起される点である。

4.1 身体所有感の生起

各変形パターンのうち、図3bに示す手の形状変形が最も強烈な感覚を生起すると答える体験者が多く見られた。図3cの左右の手の運動の対応が逆転する変形では、画面内で自分の思い通りに手が動かないことにフラストレーションを感じる体験者が多く、4種の変形パターンのうちで、「あまり自分の手のように感じられない」という報告がもっとも多かった。

また、図4のように、前面に配置されたスクリーンを観察している場合には、箱上面のスクリーンを観察している場合と比べ、身体所有感が減るという報告が多かった。先

行研究 ([4][24])と同様、身体との連続性が身体所有感の生起には重要であることが分かった。

今回、バーチャルハンドの表示には、カメラからの実際の手の画像ではなくCGモデルを利用していたにもかかわらず、実際の手が表示されていると勘違いをする人も多かった。また、CGモデルだと分かっているながらも、他人が体験している際のモデルと自分の体験しているモデルが異なるものだと感じていた人もいた。ラバーハンドと自分の手の類似性(肌の輝度、手の形状、第三者による評価)は、ラバーハンド錯覚の程度に影響を与えないが、視触覚同期刺激によりラバーハンド錯覚が起こっている場合には、ラバーハンドと自分の手が似ているように感じられるという先行研究を支持する反応であった[25]。肌のテクスチャは重要な要素であると考えられおり、今回はCGモデルを用いたことにより、実画像よりも身体所有感が減る可能性が考えられたが、実際にはテクスチャの違いよりも、爪の形により自分自身の手がどうかを判断する人が多く見られた。また、バーチャルハンドが原寸大で現れることと、遅延が短いことにリアルさを感じるという反応があった。実際に、200ms程度以上動作に遅延が生じると、身体所有感が消失するとされており、遅延時間も身体所有感に影響する重要な要因である[26]。

4.2 バーチャルピアノの演奏

実際にはないピアノが弾けているという不思議な体験を楽しむ観客が多かった一方で、実際の力覚フィードバックがあると、より実際のピアノに近くてよいのではないかとコメントする来場者もいた。また、基本変形パターンであっても、ピアノの演奏には違和感があり、難しいと答える体験者が多かった。ピアノに熟練している人たちは、他の体験者よりもシステムへの違和感が特に大きいようであった。あるピアノの熟練者は、「普段は鍵盤を叩いたときの感覚や、体性感覚を頼りにしているので、実際の鍵盤がなかったり、手の幅が変わったりすると混乱して非常に弾きづらく感じた。しかし、ピアノを弾いていると指の幅が届かなくてもどかしい思いをすることが多い。手の幅が上手さを決めてしまっていることもある。なので、もしこの拡張された身体を完全に獲得して、自在にピアノを弾くことができるようになれば嬉しい。新しい曲も作曲されそうだ。」というコメントをした。

4.3 身体拡張

新しい身体像の獲得という側面からは、Strattonの逆さメガネの順応実験[27]を思い出したという声があつた。「はじめは慣れず、気持ち悪さが強かったが思ったよりも早く馴染んだ。どの程度訓練すると完全に慣れるのか確かめてみたい。」「反応が即応的なのが奇妙で面白い。身体の拡張がどこで途切れるのか、限界が気になる。」というコメントがあつた。また、「身体が動的に変化する存在と

なることが面白かった。」というコメントからは、技術により身体という概念自体が変化する可能性を示唆している。さらに、10本指の手のパターンに対しては、「これでは冗長な指が増えているだけでうまく制御ができないが、人間に余剰な指や腕を足した際の制御可能性をこのシステムで模索してみたい。マウスとカーソルのような対応関係でない、新たな制御系が欲しい。」という、ロボットの制御に身体像の獲得を利用するアプローチを示唆する声があつた。

5. 考察

体験者の主観報告から、視覚運動間の同期が不整合である場合には、見た目上の大幅な変化が起こっている場合に比べて身体所有感が生起しづらいことが示唆された。もっとも多く報告された「気持ち悪い」という不快感について、ラバーハンド錯覚一般に「明らかに自分ではない」と認識している外界の対象に対して身体所有感が生じることに對し、奇妙な感覚が生起するとされている。よって、「自分ではない」程度と、身体所有感の生起強度とがこの気持ち悪さに影響していることが推察される。どのような変形に「気持ち悪さ」が生じやすいかを検討することは、バーチャルアバタの設計指針に有用となるであろう。また、不快感とともに、ピアノの弾き方などの行動に与える影響も定量的に評価していくことが求められる。今後、手のみでなく、各要因が全身の身体所有感に与える影響と、行動への影響についても検討していく。

運動主体感との関連性についても、質問紙を用いるなどして定量的に評価していくことが求められる。運動主体感の程度は、行為と出力結果との遅延時間を操作することで、連続的に変化させられることができると考えられる。

実際にはないバーチャルなピアノが弾けることに対して、基本変形パターンであっても不思議な感覚を得る体験者が多かったことから、ピアノというアプリケーションに関しては、実際の力覚がないことに起因する感覚と、現実とは異なる形状や動きをする対象への身体所有感の生起に起因する感覚とが複合した体験となってしまうと考えられる。現実のピアノを弾く感覚とは異なるという感想が多かったものの、バーチャルな鍵盤に触れ、音が鳴るという擬似力覚と聴覚による多感覚フィードバックの効果により、本システムでのピアノ演奏体験は一定範囲のリアルさをもって受け入れられた。今後は、演奏支援などのアプリケーションシステムとしての発展も期待される。たとえば、身体所有感や運動主体感を保ったままで手の形と動きが変容していくことにより、体験者に違和感のない自動演奏が可能となると考えられる。さらに、身体性が変化したことにより、日常生活で身体の果たす役割とその制約に関して、体験者に改めて思い起こさせることができた。

身体の変化が創造性に与える影響についてはこれまで検討されてこなかったが、今回のアプリケーションの範囲内では、身体像の変容が創造性を刺激している可能性が十分に考えられる。今後の検討の課題とする。

通常のインタフェース設計では道具そのもののデザインを変更するが、本研究では、身体というインタフェースの設計指針を模索するというまったく新しいアプローチを提案した。今後、特定のシーンによらないより日常的な場面で、AR技術などを用いて実際の外界とインタラクティブに作用し合う身体像を獲得する手法の模索が期待される。

6. おわりに

本研究では、自己と外界とのインタフェースとしての身体に着目し、一般的な手とは異なる形状や運動の対応がある手の身体像を通じ、バーチャルなピアノを演奏することのできるアプリケーションシステムを構築することで、身体設計という、インタフェース設計における革新的なアプローチを提案した。今後、身体所有感と運動主体感に着目した演奏支援システムとしての発展が期待される。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費助成事業挑戦的萌芽(15K12077)の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) Botvinick, M. and Cohen, J.: Rubber hands 'feel' touch that eyes see, *Nature*, Vol.391, No.6669, p.756 (1998).
- 2) Sanchez-Vives, Maria V., et al.: Virtual hand illusion induced by visuomotor correlations, *PloS one*, Vol.5, No.4, e10381 (2010).
- 3) Tsakiris, Manos, et al.: Hands only illusion: multisensory integration elicits sense of ownership for body parts but not for non-corporeal objects, *Experimental Brain Research*, Vol.204, No.3, pp.343-352 (2010).
- 4) Ma, Ke, and Bernhard Hommel.: Body-ownership for actively operated non-corporeal objects, *Consciousness and cognition*, Vol.36, pp. 75-86 (2015).
- 5) Iriki, Atsushi, Michio Tanaka, and Yoshiaki Iwamura.: Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons, *Neuroreport*, Vol.7, No.14, pp.2325-2330 (1996).
- 6) Berti, A., & Frassinetti, F. When far becomes near: remapping of space by tool use, *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol.12, pp.415-420 (2000).
- 7) 櫻井翔, 鳴海拓志, 勝村富貴, 谷川智洋, 廣瀬通孝: Interactonia Balloon: 風船を用いた能動的呼吸の誘発による緊張感の喚起・増幅, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.18 No.3, pp.361-370, (2013).
- 8) Kilteni, K., Bergstrom, I. and Slater, M.: Drumming in immersive virtual reality: the body shapes the way we play, In *Proceedings of Virtual Reality (VR)*, pp.597-605 (2013).
- 9) Tsakiris, M., & Haggard, P.: The rubber hand illusion revisited: Visuotactile integration and self-attribution, *J. of Exper. Psych.* Vol.31, No.1, pp.80-91 (2005).
- 10) Zylinska, J.: *The cyborg experiments: The extensions of the body in the media age*, Continuum Press, London and New York (2002).
- 11) Levin, G., McDonald, K. and Sugrue, C.: *Augmented Hand Series*, (2014), Retrieved December 13, 2015, from <http://www.flong.com/projects/augmented-hand-series/>
- 12) Poupyrev, I. et al.: The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in VR, In *Proc. of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp.79-80 (1996).
- 13) Parietti, F. and Asada, H.: Dynamic analysis and state estimation for wearable robotic limbs subject to human-induced disturbances, In *Proc. of the Robotics and Automation, 2013 IEEE Intl. Conf. on*, pp.3880-3887(2013).
- 14) Wu, F. Y. and Asada, H. *Bio-Artificial Synergies for Grasp Posture Control of Supernumerary Robotic Fingers*, MIT Press, (2014).
- 15) 松井和輝, 古川正紘, 安藤英由樹, 前田太郎: 生得的でない身体部位追加のための身体像の伸展, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.20, No.3, pp.243-252 (2015).
- 16) Guterstam, Arvid, Valeria I. Petkova, and H. Henrik Ehrsson.: The illusion of owning a third arm, *PloS one*, Vol.6, No.2, e17208 (2011).
- 17) Haans, A. et al.: The effect of similarities in skin texture and hand shape on perceived ownership of a fake limb, *Body Image*, Vol.5, No.4, pp. 389-394 (2008).
- 18) Farmer, H. et al.: Beyond the colour of my skin: How skin colour affects the sense of body-ownership, *Conscious. Cogn.*, Vol.21, No.3, pp.1242-1256 (2012).
- 19) Tsakiris, Manos, et al.: Hands only illusion: multisensory integration elicits sense of ownership for body parts but not for non-corporeal objects, *Experimental Brain Research*, Vol.204, No.3, pp. 343-352 (2010).
- 20) Ma, K. and Hommel, B.: The role of agency for perceived ownership in the virtual hand illusion, *Conscious. Cogn.*, Vol.36, pp. 277-288 (2015).
- 21) Blakemore, Sarah-J., Chris D. Frith, and Daniel M. Wolpert.: Spatio-temporal prediction modulates the perception of self-produced stimuli, *Journal of cognitive neuroscience*, Vol.11, No.5, pp. 551-559 (1999).
- 22) Caspar, Emilie A., Axel Cleeremans, and Patrick Haggard.: The relationship between human agency and embodiment, *Consciousness and cognition*, Vol.33, pp. 226-236 (2015).
- 23) Tsakiris, M., Prabhu, G. and Haggard, P.: Having a body versus moving your body: How agency structures body-ownership, *Conscious. Cogn.* Vol.15, No.2, pp.423-432 (2006).
- 24) Perez-Marcos, Daniel, Maria V. Sanchez-Vives, and Mel Slater.: Is my hand connected to my body? The impact of body continuity and arm alignment on the virtual hand illusion, *Cognitive neurodynamics*, Vol.6, No.4, pp. 295-305 (2012).
- 25) Longo, Matthew R., et al.: Self awareness and the body image, *Acta psychological*, Vol.132, No.2, pp.166-172 (2009).
- 26) Shimada, S. et al.: The parietal role in the sense of self-ownership with temporal discrepancy between visual and proprioceptive feedbacks, *Neuroimage*, Vol.24, No.4, pp.1225-1232 (2005).
- 27) Stratton, G. M.: Some preliminary experiments on vision without inversion of the retinal image, *Psychol. Rev.*, Vol.3, No.6, p.611 (1896).