

### Abstract

我々は、感覚器を通してのみ世界を知覚することができる。しかしながら、感覚器や感覚器からの情報を処理する脳には限界やひずみがあり、世界を正確に知覚しているわけではない。そのため、感覚器に異常がないにもかかわらず実際と異なる知覚を得てしまう現象である“錯覚”が生じる。錯覚は実生活において様々な問題を引き起こす一方、上手に利用することで、効果的・効率的な情報提示や、物理的に実現不可能な事象を体験可能にすることが期待されている。本稿では、筆者が主に研究している錯覚を活用した“触覚”インタフェースの事例について紹介する。

キーワード：錯覚、感覚器、触覚、インタフェース

#### 1. 我々は錯覚した世界を感じている

我々は普段、世界をありのままに感じていると思いがちながら生活している。しかしながら世界の知覚は、身体に備わっている五感それぞれの受容器からの情報のみから生じる。当然ながら、それぞれの感覚受容器には制約があり、外界の情報全てを取り入れているわけではない。更に、情報を処理する脳にも限界がある。このため、情報の取捨選択や前提条件の設定、処理遅延等が起こり、最終的に我々が感じている世界は実際と微妙に異なる。この微妙な違いこそが、錯覚を生む要因である。

そのため錯覚は、実生活において様々な勘違い・間違いの原因にしばしばなる。一方で、錯覚を上手に利用すると有用な情報提示手段となり得る。例えば、車等のシミュレータで運動感覚（機体の加速、傾き等）を出したとき、実機を傾けるには巨大な駆動装置が必要だが、ベクションと呼ばれる視覚誘導性自己運動感覚<sup>(1)</sup>を用いると映像の動きのみで各方向への移動感を感じさせることができる。この例は、既にアミューズメント施設のアトラクションで数多く活用されている。このように、効果的・効率的な情報提示により、従来必要だったコストを下げ、これまで不可能だった体験を可能にする

大きな可能性を秘めているのが錯覚なのである。

ここで錯覚の基礎知識を少し解説する。錯覚とは「感覚器に異常がないにもかかわらず実際とは異なる知覚を得てしまう現象」のことを指し、大きく四つに分類される。第1には不注意性錯覚<sup>(用語)</sup>であり、対象物への注意が不十分のために起こる錯覚で、見間違い、聞き間違いなどが該当する。第2には感動錯覚<sup>(用語)</sup>であり、恐怖や期待などの心理状態が影響を与える錯覚で、物影が人影に見える、何でも無い物音に人の気配を感じるなどが該当する。第3にはパレイドリア<sup>(用語)</sup>であり、不定形の対象物が違ったものに見える現象で、雲が顔に見える、染みが虫に見えることなどが該当する。第4には生理的錯覚<sup>(用語)</sup>であり、対象がある一定の配置や状態にあると起こる錯覚で、数多く存在する幾何学的錯視や、音階が無限に上昇・下降を続けるように聞こえるシェパードトンなどが該当する。

これらの中で最も活発に研究されているのは、誰にでもほぼ等しく起こる生理的錯覚であり、視覚に関するものが圧倒的に多い。実際、世界一の錯覚を決めるコンテスト<sup>(2)</sup>が毎年開催され、多くの錯視現象が発表され続けている。それに対して他の感覚の錯覚報告例は少ない。その中で触覚分野について述べると、近年産業界の中で新たな価値を提供するものとして期待されている。一方、触覚は直接皮膚に触れなければ感じ得ない感覚であるため、装置の特殊性などがあり提示コストが視覚・聴覚と比較して高い。よって、触覚分野では錯覚の利用価値が高いことから、新たな錯覚の報告やインタフェース

橋本悠希 筑波大学システム情報系知能機能工学科  
E-mail hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp  
Yuki HASHIMOTO, Nonmember (Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba, Tsukuba-shi, 305-0006 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.104 No.2 pp.156-161 2021年2月  
©電子情報通信学会 2021

への応用研究が増加傾向にある。

本稿では、筆者がこれまで取り組んできた触覚の錯覚研究の中から「吸飲感覚<sup>(用語)</sup>」「体内触運動感覚<sup>(用語)</sup>」「足底錯覚<sup>(用語)</sup>」の3例をそれぞれ解説する。また、錯覚を利用したインタフェースの可能性と課題について述べる。

## 2. 錯覚の例①：吸飲感覚の提示

ストローでタピオカドリンクを飲む際、誰もが吸飲時に抵抗感を感じるだろう。また、飲むゼリーなどはポコポコとした感触を受ける。このような、食品をストローで吸い込む際に口内や口唇へ伝わる触感覚を筆者らは吸飲感覚と呼んでいる。普段の食事では味や香りが強く感じられ、吸飲感覚を意識することはほとんどない。しかし、この感覚のみを抽出・再現することで、我々は様々な食品を飲み込んでいるかのような感覚を味わうことができる。本研究は、それを実証したものである。

ストローで食品を吸飲する際に吸飲感覚を感じる要素は、大きく分けて以下の2要素が挙げられる。

- ・ 食品が詰まる際に発生する口内の圧力変化
- ・ 食品の衝突や摩擦により発生するストローの振動

口内の圧力変化を振動の低周波成分、ストローに伝わ

### 用語解説

**視覚誘導性自己運動感覚** 一定方向に運動する視覚情報を観察すると、観察者がその逆方向に運動しているような感覚が引き起こされてしまう錯覚現象。

**不注意性錯覚** 対象物への注意が不十分のために起こる錯覚。見間違い、聞き間違いなど、日常的によく経験する間違いが含まれる。

**感動錯覚** 物音を人の気配に感じる、木の幹が人の姿に見えるなど、恐怖や期待などの心理状態が影響を与える錯覚。

**パレイドリア** 雲の形が顔に見えるなど、不定形の対象物が違ったものに見える現象。2014年にこの効果を理解するための研究がイグノーベル賞神経科学賞を受賞している。

**生理的錯覚** 対象がある一定の配置や状態にあると起こる錯覚。条件がそろえば再現性高く生じるため、数多くの錯覚が発表されている。特に多いのは幾何学的錯視。

**吸飲感覚** 食品を吸う・飲む際に口内や口唇へ伝わる触感覚。本稿ではストローで飲むというシチュエーションに焦点を当てて吸飲感覚を提示し、バーチャルな食体験を実現している。

**体内触運動感覚** 身体内部に知覚する触覚像が運動する感覚。本稿では、二つの錯覚現象を組み合わせることでこの感覚の提示を試みている。

**足底錯覚** 足底を直接刺激していないにもかかわらず足底側に触覚を知覚してしまう錯覚現象。本稿では足爪からの刺激を用いている。

る振動を高周波成分と考えると、振動の記録・再生のみによってリアリティの高い吸飲感覚が提示できると考えられる。本研究では、上記の考えに基づき、ストローで様々な食品を吸飲し、その際に生じる振動を記録し、デバイスで再現することを行った。

記録では、低周波成分を圧力センサ、高周波成分をマイクロホンで記録することとし、各センサをストローに取り付けて食品の吸飲データを収集した(図1)。中には、飲み物ではない食品も含まれたが、ストローに通るサイズに食品を加工した上で、できるだけ多くの食品について収集した。その結果、これまでに収集した食品数は、約60種類となった。

再生では、吸飲感覚再生のためのデバイスであるStraw-like User Interface(以下SUI)を開発した(図2)。SUIの外観は「ストローで飲む」というアフォーダンスを持つような形となっており、体験時には使い捨て



図1 吸飲感覚を記録している様子。ストローにセンサを取り付け、吸飲時に生じる触覚情報を記録した。

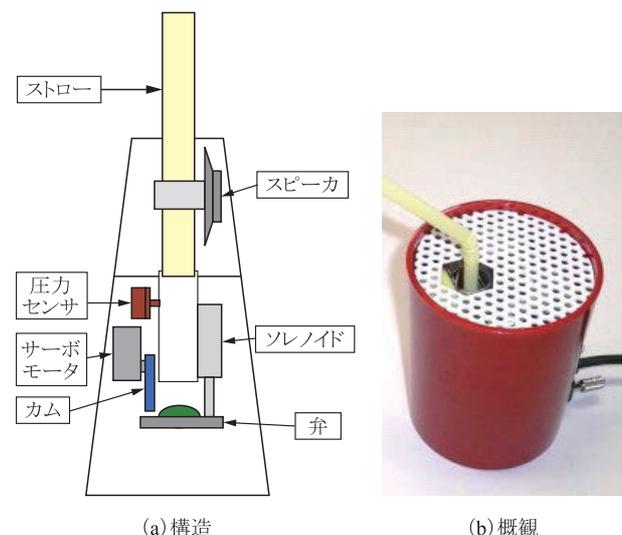


図2 Straw-like User Interfaceの構造と外観。先端の弁の制御で生じる圧力変化を口腔内に提示し、小形スピーカで振動を口唇部に伝達する。

ストローを挿入して行い、体験者ごとに交換できる構造とした。

低周波成分である口内の圧力変化は、ストロー先端に取り付けられた弁の開閉を制御することで再現している。吸飲する際に弁を閉じるとストロー管内の圧力が下がり、弁を開くと圧力が上がる。このことを利用し、弁を自在に制御することで吸飲時の空気の流量を調節し、様々な圧力変化を生み出すことができる。弁の制御は、ソレノイドとサーボモータをそれぞれ用いている。ソレノイドは弁の開閉を担当している。サーボモータは、弁を閉じる際の僅かな隙間を作り、最大圧力の調整をしている。

高周波成分であるストローに伝わる振動は、ストローに密着させたボイスコイルアクチュエータ（本装置では小形スピーカ）で出力している。これにより、振動はストローを通じて口唇に直接伝達される。また、本振動は吸飲音の再生という副次的役割も担っている。

SUIは、国内外で数多くの展示を行い、多くの体験者が、空気のみを吸い込んでいるにもかかわらず物体が体内に入ったかのような新鮮な感覚を楽しんでいた（図3）。また、普段はストローで食すことのない食品につい



図3 吸飲感覚を体験している様子 デモ展示では30種類程度の食品を選択し、それぞれの吸飲感覚を楽しめるようにした。

ても納得感を得られることが分かった。これは、食品の記憶が触覚的情報を多分に含んでいるため、異なる形式であったとしても、記憶と吸飲感覚が結び付いたものだと考えられる。実際、吸飲感覚による食品判別実験では、チャンスレベルを大きく超える正答率となった。

本研究は今後、一つの調味料のように触覚情報を用いる、アレルギー食材をバーチャルに楽しむ、流動食のような食感に乏しい食事の改善など、食分野での応用が期待される。

### 3. 錯覚の例②：体内への触運動感覚提示

触覚の有名な錯覚として、2点を同時に刺激するとその中心に刺激を知覚する「ファントムセンセーション（以下 PhS）」（図4）、複数点を適切な時間差で刺激すると刺激が移動したように知覚する「触仮現運動」（図5）が存在する。

両者はどちらも皮膚上における錯覚であるが、本研究ではこれらの錯覚を組み合わせることで、実刺激が不可能な身体内部に対する触運動感覚を提示する試みを行った。錯覚像を錯覚で動かす、つまり錯覚の2重掛けを行う本研究は非常に挑戦的なものであるが、PhSが体内で生起することは、過去の知見から示唆されている<sup>(3)</sup>。また、複数点の時間的に連続な刺激で PhS 像が皮膚表面を移動することも知られている<sup>(4)</sup>。そこで、体内に PhS 像を生起できれば、その像を移動させることは十分可能だと考えられる。

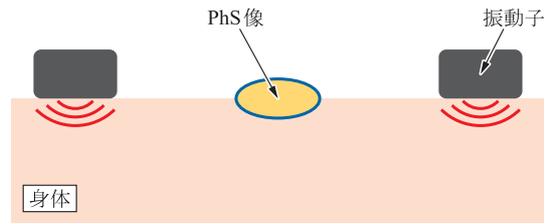


図4 ファントムセンセーション 2点の振動子を同時に駆動すると、振動子間に別の刺激像を知覚する。

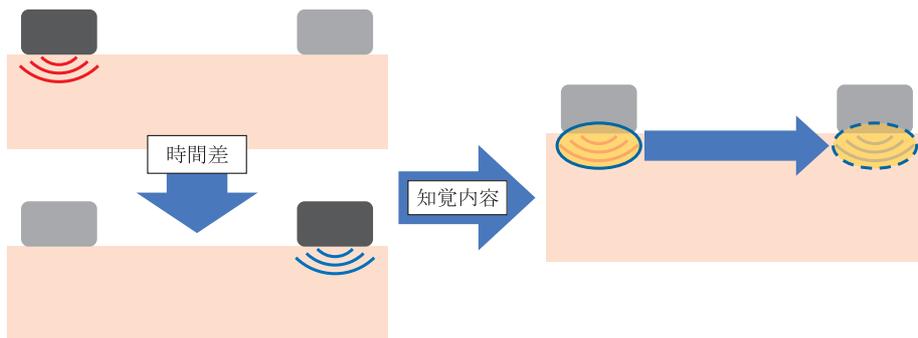


図5 触仮現運動 複数の振動子を順番に駆動することで、刺激像の移動感覚が得られる。

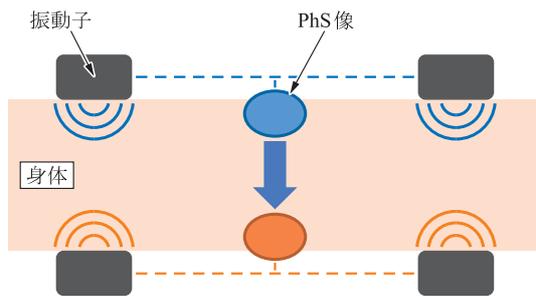


図6 「体内⇔表皮」の触運動感覚 上部の振動子セットと下部の振動子セットを順番に駆動することで、PhS像が表皮から体内に侵入し、表皮に抜ける感覚となる。

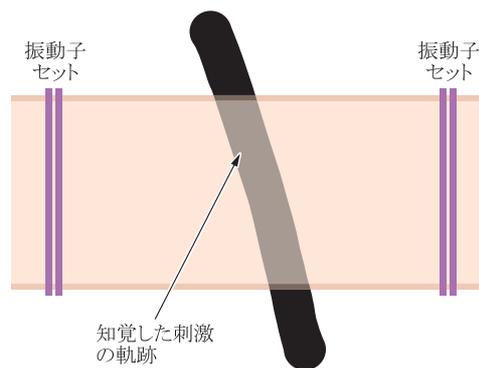


図8 回答例 タブレット上を指でなぞった軌跡が黒く塗られる。

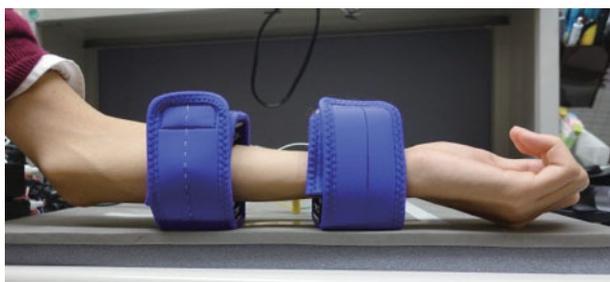


図7 実験環境 上腕部に振動子が4個取り付けられている。回答はタブレットを用いて行う。

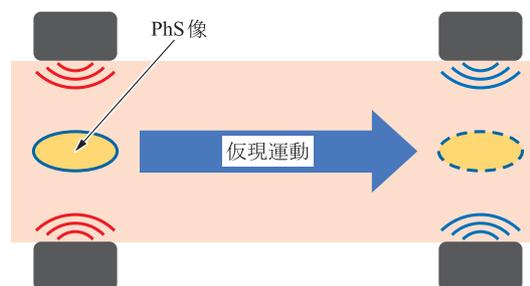


図9 「体内⇔体内」の触運動感覚 左右の振動子セットを順番に駆動することで、体内に知覚したPhS像が平行に移動する感覚となる。

本研究では、体内触運動感覚の軸を「体内⇔表皮」「体内⇔体内」の二つに分け、それぞれについて運動感覚の生起に関する検証を行った。

### 3.1 「体内⇔表皮」の触運動感覚

本検証では図6に示すとおり、表皮から体内にPhS像が侵入し、反対側の表皮まで貫通するような感覚について、その生起可能性を求めた。

具体的には、前腕部に振動子を4個装着し(図7)、振動提示後にタブレットPC上でどのようにPhS像が移動したかを一筆書きで描いてもらった。回答例を図8に示す。本検証の振動設定は、振動周波数を240 Hz、振動提示時間を50 ms、仮現運動を生起させるための振動時間差を75 msとした。

検証の結果、今回の振動設定では全被験者のうち半数が十分な意図した触運動感覚を知覚し、残り半数も僅かながら同様の知覚があった。また、PhS像、仮現運動のどちらかで生起確率が低い被験者は触運動感覚を生起することが難しいことが判明した。したがって、基本となる錯触覚が確実に知覚されるよう、被験者ごとに振動時間や振動間隔を最適化する必要があることが分かった。

### 3.2 「体内⇔体内」の触運動感覚

本検証では図9に示すとおり、体内に生起されたPhS像が腕の中を直進するような感覚について、その生起可

能性や生起条件を求めた。

具体的には、3.1と同様の実験環境、回答方法を用いた上で、振動周波数を240 Hz、振動提示時間を75 msと設定した。予備実験で調査した結果、仮現運動を知覚するための振動時間差は個人差が特に大きいパラメータだったため、各被験者について仮現運動が生じるしきい値を求め、使用した。検証の結果、3.1より生起確率が下がったが、全被験者の中で約半数が意図した運動感覚を知覚することができた。生起確率が下がった要因は、体内触覚像の運動感覚が未知の体験であり、「体内⇔表皮」よりもイメージすることが難しかったことが大きい。これは、ある程度体験に慣れてもらうか、内臓の痛みなど、体内での異変を知覚した経験がある部位での提示を試みる等で改善できると考えられる。

本研究は現在、新たな錯触覚現象を探求する基礎的な内容にとどまっているが、ゲームや映画などの世界で起こる非現実的な現象を実感を持って楽しむことができる技術展開を目指して本錯触覚手法の確立を目指す。

## 4. 錯触覚の例③：足底への錯触覚提示

手の指腹に触覚提示する場合、ほとんどは直接指腹に振動子を配置し、刺激する。これに対して安藤らは、爪

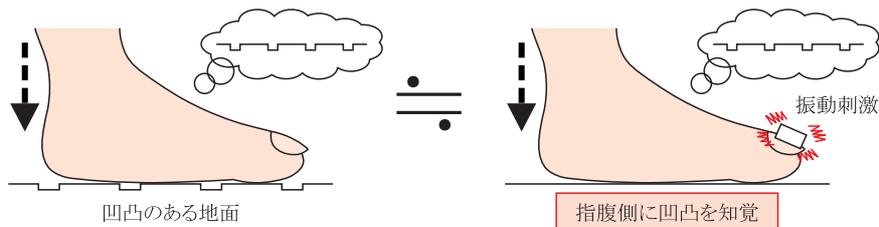


図 10 足底錯触覚提示手法 凹凸のある地面の振動情報を爪上から提示することで、足底からの振動だと錯覚し、凹凸のある地面を歩いていると認識する。

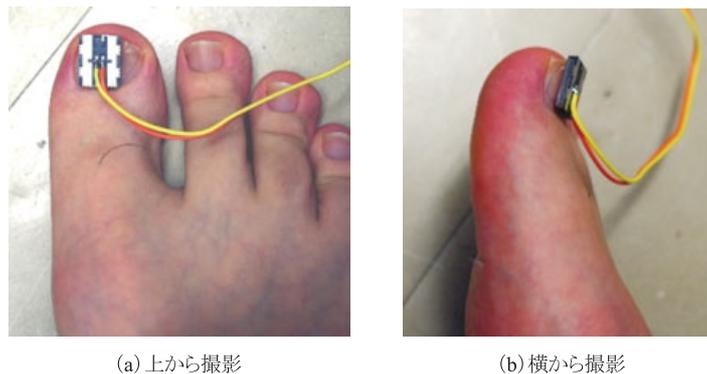


図 11 母趾爪への振動子取り付け 足の中で最も触覚受容器の密度が高い母趾に対して小形振動子を取り付けた。

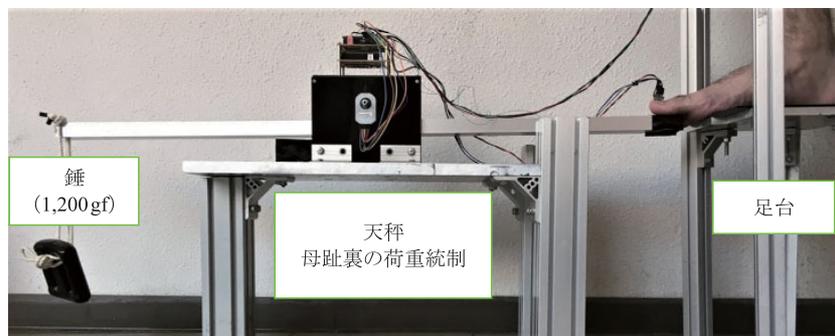


図 12 荷重統制のための天秤装置 右側に母趾を載せ、左側に重り載せてバランスを取らせる。平行状態かどうかは軸に取り付けた符号器で検出している。

上からの振動刺激によって指腹側に触覚を提示するという斬新な錯触覚提示手法を提案した<sup>(5)</sup>。この手法の原理は、爪側と指腹側の触覚受容器の密度差によるマスク効果だと考えられる。触覚情報を知覚する受容器の密度は、爪側よりも指腹側の方が圧倒的に高く、それゆえ感度も指腹側の方が高い。そのため、爪側から振動を提示した際、多少減衰したとしても指腹側の受容器の方が強く振動を検出し、爪側の知覚が打ち消されてしまう。この結果、指腹側に触覚を感じるという錯触覚現象が生じるのである。

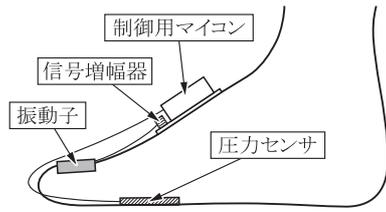
本研究では、上述した手法を足に適用することで足底に対しても同様の錯触覚現象が生じることを発見した

(図 10)。また、錯触覚が生じる条件やインタフェースへの応用を行った。

#### 4.1 足底錯触覚現象の生起条件

足底に図 10 のような錯触覚を生起させるには、ある程度の強さの振動と対象指腹への荷重が必要である。そのため、振動強度と荷重を条件として、それぞれ錯触覚の生起確率を検証した。

具体的には、振動子を右足の母趾爪に取り付け (図 11)、荷重を統制するために天秤装置 (図 12) に母趾を置いた。この状態で複数の振動強度条件と荷重条件をランダムに変えて提示し、試行ごとに「刺激を感じない」、



(a)構成



(b)外観

図 13 スリッパに取り付けた足底錯触覚提示デバイス 母指球付近に圧力センサが配置されており、地面との設置を検出する。振動子はユーザーの母趾爪部に配置できるような位置の調整が可能。

「足爪のみに振動を感じる」、「足指裏のみに刺激を感じる」、「両側に刺激を感じる」のいずれかを回答させた。

検証の結果、振動強度 1.5 G 付近で最も錯触覚を知覚しやすく、また荷重 330 gf 付近が錯触覚を知覚する下限のしきい値であることが分かった。上記条件を満たすことでほぼ全ての人が本錯触覚知覚可能である。また、歩行時における足底荷重の推移と比較したところ、求めた錯触覚生起条件は一般的な速度での歩行時に足がついている時間の半分以上をカバーしており、歩行時に利用可能な錯触覚であることが確認できた。

#### 4.2 デバイスによる歩行時の足底錯触覚提示

4.1 の検証結果に基づき、足底錯触覚提示デバイスを試作した (図 13)。試作機は、圧力センサ、マイクロコントローラ、増幅器、バッテリー、小形振動子から構成され、スリッパに組み込まれスタンドアロンで動作する。足が地面と接地したかどうかは足底に配置した圧力センサで検出し、接地時のみ振動子を駆動する。その際、あらかじめ設定された複数の波形を提示することができる。振動子の設置部位は、4.1 で対象とした母趾爪上である。重量はバッテリーを含めて約 30 g と軽量で、靴の上等に設置しても負担にならず、地面からの衝撃が装置に直接伝わらないので耐久性も高い。これは、直接足底を刺激する従来手法に対する大きな利点である。

本デバイスによる足底錯触覚のデモを国内外で行ったところ、ほぼ全ての体験者が足底に振動を感じるこ

うことができた。また、振動の波形を変えることで地面の踏み心地も変化したとの回答が多く寄せられた。この要因は、錯触覚による触覚情報が足底に重畳された結果であると考えられる。また、本手法の副産物として、歩行時の身体バランスが安定するということが実験により分かった。元々、足底への触覚フィードバックは身体バランスを整える役割があるが、足底への錯触覚提示によっても同様のフィードバックが生じたと考えられる。

本研究は今後、ウェアラブルな装置が実現できることを生かして、日常歩行における楽しさ拡張、転倒予防、障がい者向けの歩行支援、運動拡張など、健康的な生活を送るための支援技術としての展開が期待される。

### 5. 錯覚インタフェースの可能性と課題

錯覚例①及び錯覚例③のとおり、直接的な方法では実現困難なもの、コストが合わないものに対する絡め手のような解決方法として、錯覚の利用はとても有用である。しかし一方で、錯覚例②のように条件が十分に整わなければ錯覚を生じないという難しさも同時に存在する。また、個人差に大きく影響を受けることも課題の一つである。しかしながら最近、複数感覚への刺激により錯覚の増強を行う新たな試みも発表されており、錯覚の実用性が向上してきた。このような状況から、錯覚インタフェースは今後大きく飛躍することが予想される。

本稿により錯覚に興味を持ってもらい、インタフェース開発に役立てて頂ければ幸いです。

#### 文 献

- (1) S. Palmisano, R.S. Allison, M.M. Schira, and R.J. Barry, "Future challenges for vection research: definitions, functional significance, measures, and neural bases," *Front Psychol*, vol. 6, 193, Feb. 2015.
- (2) Neural Correlate Society, "Best illusion of the year," Contest <http://illusionoftheyear.com/>
- (3) 石井明日香, 佐藤未知, 福嶋政期, 古川正紘, 梶本裕之, "手部触覚による奥行き情報の提示," 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 310-313, 函館市, 2011.
- (4) J.V. Salazar Lucesj, K. Okabe, Y. Murao, and Y. Hirata, "A phantom-sensation based paradigm for continuous vibrotactile wrist guidance in two-dimensional space," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 163-170, Jan. 2018.
- (5) H. Ando, T. Miki, M. Inami, and T. Maeda, "SmartFinger: nail-mounted tactile display," *ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications*, p. 78 (Emerging Technologies), USA, Aug. 2002.

(2020 年 8 月 18 日受付 2020 年 9 月 8 日最終受付)



橋本 悠希

2010 電通大大学院博士後期課程了。同年阪大大学院特任研究員。2013 筑波大システム情報系助教。2017 科学技術振興機構さきがけ研究員 (兼務)。触覚インタフェース、インタラクティブ技術、バーチャルリアリティに関する研究に従事。博士 (工学)。