

日本バーチャルリアリティ学会研究報告

The 4th Workshop on Telexistence

第4回テレイグジスタンス研究会

2014年6月20日

日本バーチャルリアリティ学会

日本バーチャルリアリティ学会研究報告

VR 学研報 Vol.19, No. TX01

第 4 回テレイグジスタンス研究会

©2014 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)

発行者 日本バーチャルリアリティ学会

〒113-0033 東京都文京区本郷 2-28-3 山越ビル 301

TEL 03-5840-8777 / FAX 03-5840-8766

e-mail office@vrsj.org

The Virtual Reality Society of Japan

Yamakoshi Bld. #301, 2-28-3 Hongo, Bunkyo-ku,

Tokyo, 113-0033 Japan

禁無断転写・転載

日本バーチャルリアリティ学会研究報告目次

CONTENTS

第4回テレイグジスタンス研究会／The 4th Workshop on Telexistence

〔主催：テレイグジスタンス研究委員会〕
〔Organized by Special Interest Group on Telexistence〕

2014年6月20日（金）14:00 - 17:30（日本科学未来館）

TX01-1	皮膚へのせん断力提示による手の運動制御の研究 ヤエム ヴィボル, 大槻麻衣, 葛岡英明, 矢野博明(筑波大学) … 1
TX01-2	生体の触感覚センシング機構の解明とその工学的応用 仲谷正史, 前野隆司(慶應義塾大学)..... 5
TX01-3	アロマシューターを用いたデジタルサイネージ 金東煜／Dong Wook Kim (株式会社アロマジョイン) 7
TX01-4	前庭電気刺激における刺激電流パターンが及ぼす加速 度感覚知覚と身体反射への影響 青山一真, 飯塚博幸, 古川正紘, 安藤英由樹, 前田太郎(大阪大学) 11
TX01-5	学生のものづくり活動を相互扶助する取り組みとロボ ット技術の現在 田所祐一(東京工業大学)..... 15

皮膚へのせん断力提示による手の動作制御の研究

A Study of Hand Motion Control by Presenting Shear Force on Skin

ヤェムヴィボル¹⁾, 大槻麻衣²⁾, 葛岡英明¹⁾, 矢野博明¹⁾

Vibol YEM, Mai OTSUKI, Hideaki KUZUOKA, and Hiroaki YANO

1) 筑波大学大学院 システム情報工学研究科

(〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, {s1230202@u, kuzuoka@iit, yano@iit}.tsukuba.ac.jp)

2) 立命館大学 総合理工学研究機構

(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1, otsuki@rm.is.ritsume.ac.jp)

Abstract: A system that assists hand skill training for using a tool should be able to control a learner's hand motion with precision. It is especially difficult for Outer Covering Haptic Display because it does not directly control the tool's motion but simply applies shear force to the back side of a user's hand. In this study, we conducted an experiment to figure out the characteristic between the way shear force is applied to the learner's hand and the hand's motion that the learner is induced. The result shows the maximum value and duration of presenting shear force affects the learner's hand motion. Based on the results, we proposed an implication for hand motion control strategy for OCHD.

Key Words: Hand motion control, Hand skill training, Shear Force

1. はじめに

書道のような道具の使い方に関する技能教育の研究ではアクチュエータを用いて道具を直接駆動することによって、道具を握る学習者の掌側に力を知覚させ、正しい動作に誘導する手法が一般的であった[1].

しかし筆者らの研究によれば、強い力で道具を握らなければならない作業の場合、そのような手法は、道具を介して伝えられる誘導力を感じにくくなるという問題がある[2]. この問題に対して筆者らは、道具を直接駆動するのではなく、外力が加わらない手の甲にせん断力を提示して動作を誘導することを提案した. そして、そのような力覚提示を実現する外装型触力覚提示装置 (Outer Covering Haptic Display, OCHD) を開発し、これを用いた実験によって、比較的小さな力でも学習者は提示した力の方向を知覚可能になることを示した.

このように、筆者らのこれまでの研究によって OCHD の基本的な有効性は明らかになったが、この方式によって効果的な冒頭に述べたような技能教育を実現するためには、学習者の手の動きを正確に誘導できなければならない. 道具を直接アクチュエータで制御する方式であれば、道具の位置を正確に制御することによってこれを実現することができるが、OCHD 方式の場合はそう容易ではない. すなわち、手の甲に対してせん断力をどのように提示すると、それを知覚した学習者が手をどのように運動させるかという、せん断力刺激とそれに対する学習者の手の反応の特

性を明らかにしなければならない.

そこで本研究では、せん断力刺激によって生ずる被験者の手の移動距離との関係を明らかにし、手の動作を制御可能かどうかについて検討することを目的とする.

2. 皮膚へのせん断力による手の動作制御

2.1 先行研究

皮膚へのせん断変形の感覚を用いて、運動方向を誘導する関連研究において、Bark らは、固定軸の周りに回転する2つのエフェクタを利用し、それらのエフェクタによって皮膚のねじれる感覚を与え腕の曲がる角度を誘導するウェアラブル装置を開発している[3]. また Kuniyasu らは、あるユーザの前後左右方向の腕の運動を他のユーザに伝達するため、腕に接着するエフェクタにより皮膚を変形させる方法を提案している[4]. 彼らの研究では、皮膚変形により、提示方向を知覚させることができ、また、皮膚せん断変形を利用することにより、腕の動作を伝達することができることを明らかにしたが、腕や手の移動距離の制御方法については検討されていない.

2.2 せん断力知覚特性による手の動作制御

物理的な量に対する知覚特性の研究により、一定刺激を提示し続けると、刺激に対する感度が低下することが知られている[5]. Zigler ら、および Nafer らによると、腕、手、およびひじの上に錘を置いたとき、その重さ感覚が消失す

るまでの時間(圧の順応時間)は錘の重さに比例する[6][7].すなわち, 刺激が強くなるほど, 圧の順応時間が長くなる. また, ウェーバーフェヒナーの法則によると, 人の感覚量は, 刺激の強度ではなく, その対数に比例して知覚される.

しかしながら, 手の移動量と刺激量の関係は明らかにされていない. 本研究では, 刺激量に対する運動特性を調査し, 基礎的な制御手法を提案する.

3. 実験

本実験では, 人の手の甲に対するせん断力と, 人が手を移動させる距離との関係を明らかにする.

ここで, 提示するせん断力は, 図 1 に示すようなステップ状にした. 提示時間が経過した後は, 提示するせん断力は 0 gf に戻した.

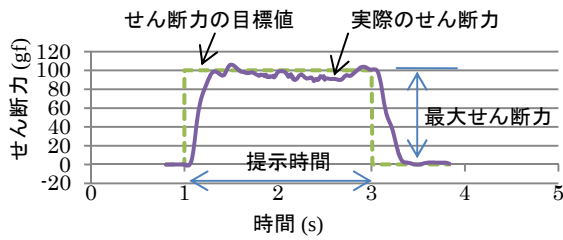


図 1 せん断力の提示例

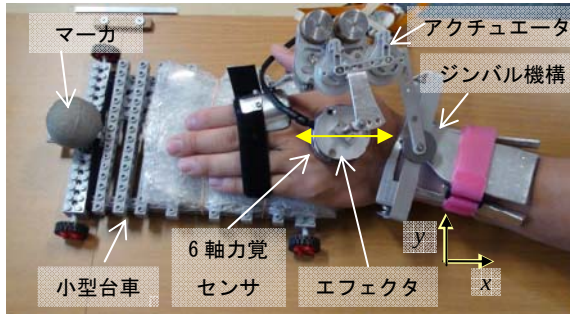


図 2 ウェアラブルな実験装置を装着した様子

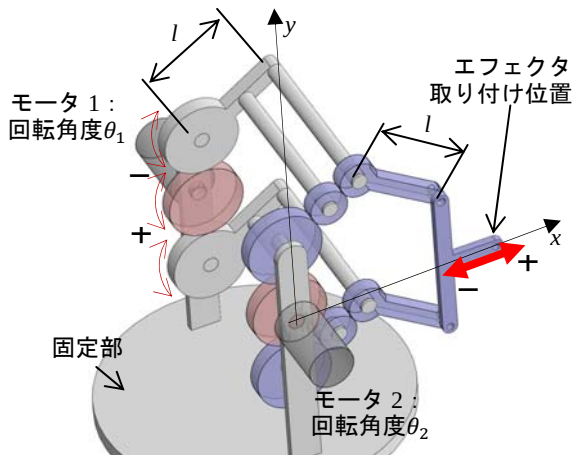


図 3 アクチュエータの概略図



図 4 エフェクタ

3.1 装置

本実験において, せん断力提示装置(図 2)を設計し製作した. 図 2 に, 作成した装置の外観を示す. 本装置は, エフェクタを手の甲の上で 2 次元的に動かすことで, せん断力を提示する. また, 手が動作しても安定してせん断力を提示できるようにするために, ウェアラブル型とした.

装置は, ジンバル機構, ジンバル機構に取り付けられる 2 自由度アクチュエータ(図 3), エフェクタ(図 4)から構成される. ジンバル機構は, アクチュエータを取り付けるための機構であり, 機構の中心点と手首の中心点を一致させることによって, 被験者が手首を自由に動かすことができる.

図 3 はアクチュエータ機構の概略図である. θ_1 , θ_2 と l をそれぞれモータ 1, モータ 2 の回転角とリンク長さとするれば, アクチュエータの先端に取り付けたエフェクタの位置 (x, y) は,

$$x = 2l\cos(\theta_1 - \theta_2) \times \cos \theta_2$$

$$y = 2l\cos(\theta_1 - \theta_2) \times \sin \theta_2$$

で表される.

また, 皮膚の変形量 r および変形方向 φ は, 以下の式によって算出される.

$$r = 2l\cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\varphi = \theta_2$$

本実験では, 簡単化のために, 図 5 に示すように, x 軸の方向のみせん断力を提示する. これはモータ 1 のみ回転させることで, $\theta_2 = 0$, $x = 2l\cos\theta_1$, $y=0$ になり, エフェクタが x 軸上を動く(図 3 の赤矢印).

エフェクタは手の甲の皮膚に接触し, せん断力を与えるためのシリコンシートを貼り付けた, 直径 40 mm の円盤である. エフェクタの背面には 6 軸力覚センサ(ATI-Mini40FT08735)を取り付け(図 2), せん断力を計測できるようにした.

皮膚にせん断力を与えるために, エフェクタの移動速度(皮膚変形速度)を入力とした速度型 PID 制御を用いた.

$$\dot{r}_n = \dot{r}_{n-1} + \Delta \dot{r}$$

$$\Delta \dot{r} = K_p \Delta e_n + K_i e_n + K_d \Delta(\Delta e_n)$$

$$e_n = f_d - f_n$$

$$\Delta e_n = e_n - e_{n-1}$$

$$\Delta(\Delta e_n) = \Delta e_n - \Delta e_{n-1}$$

ここで, $\dot{r}_n$, f_n , f_d はそれぞれエフェクタの移動速度,

せん断力の現在値とせん断力の目標値である。 K_p , K_i , K_d は PID 制御の係数である。

本装置の重さは約 290g である。本実験では、このせん断力提示装置以外に、手の動きを計測するためにレゴブロックを利用して小型台車を製作した (図 4, 図 5)。被験者はこの台車に手を乗せて、手の甲に提示されたせん断力に応じて小型台車を動かした。小型車が動いた距離を計測するために、モーションキャプチャ (サイヴァース社, ステレオラベリングカメラ) を用いた。

3.2 手順

被験者は 22 歳～33 歳の 10 名 (男性 7 名, 女性 3 名) であった。被験者は、2 人が左ききであった。被験者は椅子に座り、装置を左手に装着した (図 5)。実験を行う前に被験者には、「装置 (エフェクタ) は台車を前 (負方向) か後ろ (正方向) に動かすように誘導します。装置の誘導に従って、台車を前か後ろに動かして下さい。誘導を感じなくなったら手を止めてください。誘導方向がはっきり分かれなければ動かさなくても結構です。」と説明した。せん断力の強度が、移動距離にどのような影響を与えるかを検討するために、その強度と移動距離との関係については被験者に伝えず、被験者自身自身の判断で、自由な速度で小型台車を動かすようにした。

装置が動く様子や動作音による影響を最小限にするために、ホワイトノイズを流したヘッドフォンを被らせ、装置を見ないように指示した。練習では、正負各方向にせん断力を提示し、手を動作させた。この練習は被験者が満足するまで行った。このときのせん断力と提示時間はそれぞれ 100 gf と 2 s にした。この練習の後、実験タスクをおこなわせた。実験タスクでは、各試行でせん断力を提示する前に、必ず台車をあらかじめ決められた初期位置に戻すようにした。

提示条件は、提示方向を 2 条件 (正負方向)、せん断力 f を 3 条件 (50 gf, 100 gf, 150 gf)、および提示時間 t を 3 条件 (1 s, 2 s, 3 s) の計 18 条件とした。実験では、各条件の試行を 4 回おこなわせたため、各被験者は合計 72 回の試行をおこなった。各条件における手の移動距離は、その 4 回の試行の平均値とした。刺激提示条件の順番はラテン方格法によってカウンタバランスをとった。

エフェクタが手の甲に加える垂直方向の圧力は 0.16 gf/mm² とした。これは、せん断力が 300 gf に達するまで、ほぼすべりが生じない圧力を、予備実験から求めたものである。エフェクタが手の甲に提示するせん断力は 6 軸力覚センサによって検出し、エフェクタが多少滑った場合でも常にほぼ目標のせん断力を提示できるようにフィードバック制御をおこなった。

実験結果に対する統計的検定は、各提示方向において、3x3 の反復測定 2 元配置分散分析で行った。独立変数は、最大せん断力 f (50 gf, 100 gf, 150 gf) および提示時間 t (1 s, 2 s, 3 s) である。



図 5 実験の様子

4. 実験結果

図 6 と図 7 は、提示時間 t とせん断力 f により、被験者が動かした距離を比較した結果である。

Kolmogorov-Smirnov の検定により、正規性の仮定が成り立っていることが分かった (各群において $p > .1$)。次に、 f と t を要因とした反復測定二元配置分散分析の結果、両要因に主効果がみられた (正方向においてそれぞれ、 f : $F(1.25, 11.3)=23.4$, $p<.01$, t : $F(1.25, 11.25)=17.45$, $p<.01$, 負方向においてそれぞれ、 f : $F(1.21, 10.9)=12.7$, $p<.01$, t : $F(1.28, 11.6)=10.51$, $p<.01$)。また、 f の要因と t の要因の交互作用について、正方向においては有意傾向がみられたが ($F(3.29, 29.62)=2.4$, $p<0.1$)、負方向においては有意差が認められた ($F(3.44, 30.95)=4.8$, $p<0.01$)。

そこで、要因ごとに Dunnett の多重比較をおこなった。提示時間については (図 6)、3 つのせん断力条件全てにおいて、方向によらず提示時間 1 s と 3 s の間に有意差がみられた (50 gf: $p<.05$, 100 gf: $p<.01$, 150 gf: $p<.01$)。2 s と 3 s の間では、負方向の 50 gf においてのみ有意傾向がみられたが ($p<.1$)、他のせん断力条件においては有意な差はみられなかった。1 s と 2 s の間では、50 gf においては正負両方向とも有意な差がみられなかったが、100 gf および 150 gf においては、それぞれ有意傾向 (正方向: $p=.05$, 負方向: $p=.06$)、および有意差 (正方向: $p<.05$, 負方向: $p<.05$) がみられた。

せん断力については (図 7)、50 gf と 100 gf の間 (すべての方向、提示時間において $p<.01$)、および 50 gf と 150 gf の間に (すべての方向、提示時間において $p<.01$) 有意差が認められた。100 gf と 150 gf の間では、正方向の 2 s においては有意傾向がみられたが ($p<.01$)、他の提示時間においてはみられなかった。

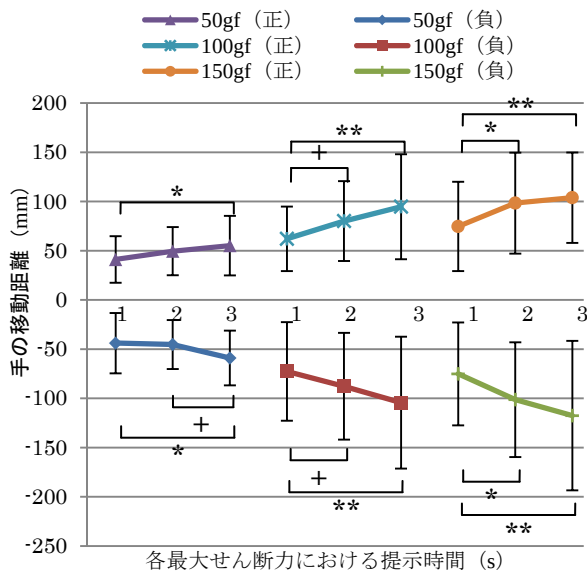


図 6 提示時間と、手の移動距離の関係

(** : $p < .01$; * : $p < .05$; + : $p < .1$)

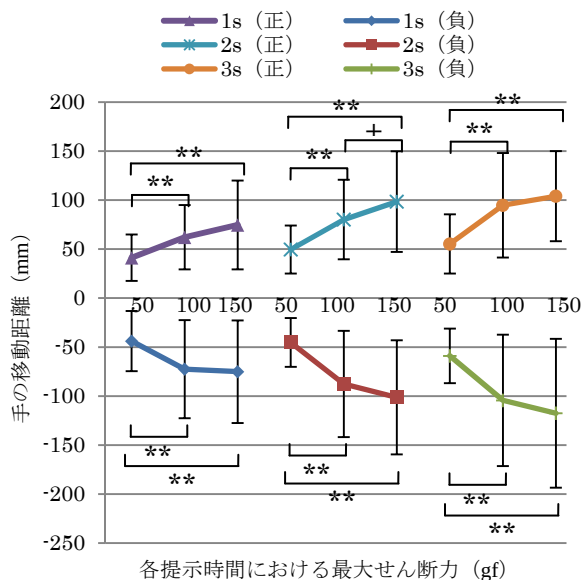


図 7 最大せん断力と、手の移動距離の関係

(** : $p < .01$; * : $p < .05$; + : $p < .1$)

5. 考察

本実験結果から、最大せん断力、および提示時間を変えることによって、学習者の手の移動距離を制御できる可能性が明らかになった。

提示時間による移動距離の特性について、1 s と 2 s の間の差に注目すると、50 gf において有意差がみられなかったが、100 gf および 150 gf において、それぞれ有意傾向および有意差がみられた (図 6)。これは 2 章で述べたように、一定刺激を提示し続けると、刺激に対する感度が低下するが[5]、その一定刺激の強さが大きくなるほど、刺激の強さが消失するまでの時間が長くなる[6][7]ことが原因である

と考えられる。すなわち、提示する最大せん断力を強くすれば、より長い時間学習者の手を移動させることができる。しかしそれでも、今回の実験結果からは、いずれの最大せん断力に対しても、2 秒以上のせん断力提示が移動距離に与える効果は小さいことがわかった。

最大せん断力による移動距離の特性について、50 gf と 100 gf の間には移動距離に有意差がみられたが、100 gf と 150 gf の間には、ほとんど有意差が見られなかった。このことから、いずれの提示時間についても、100 gf 以上のせん断力提示が移動距離に与える影響は小さいと言える。

以上の結果、せん断力の強度や提示時間を様々に変化させることで、手の運動を制御できると考えられる。

6. おわりに

本研究では、皮膚へのせん断力の提示が、手の移動距離に与える影響について実験をおこない、触覚刺激に対する手の運動特性を分析した。

今後は、この知見に基づいた手の運動制御アルゴリズムを検討し、定められた時間に目標の位置まで動かせるようにする。

参考文献

- [1] C. L. Teo, E. Burdet, and H. P. Lim: A Robotic Teacher of Chinese Handwriting; Proc. 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 335-341, 2002.
- [2] ヤムヴィボル, 葛岡英明, 矢野博明, 渋沢良太, 山下淳, 太田祥一, 竹内保男: 気管挿管教育のための外装型力覚提示装置の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.4, pp. 597-605, 2011.
- [3] K. Bark, J. Wheeler, G. Lee, and, J. Savall: A Wearable Skin Stretch Device for Haptic Feedback, Proc. World Haptics Conf., pp. 464-469, 2009.
- [4] Y. Kuniyasu, M. Sato, S. Fukushima, and H. Kajimoto: Transmission of Forearm Motion by Tangential Deformation of the Skin; Augmented Human, CDROM, France, 2012.
- [5] 大山正, 今井省吾, 和気典二: 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房出版, 東京都文京区大塚, pp. 3-20-6, 1994.
- [6] M. J. Zigler: Pressure Adaptation Time: A function of Intensity and Extensity; American Journal of Psychology, Vol.44, pp. 709-720, 1932.
- [7] J. P. Nafer and K. S. Wagoner: The Nature of Pressure Adaptation; Journal of General Psychology, Vol. 25, pp. 323-351, 1941.

生体の触感覚センシング機構の解明とその工学的応用

Biological basis of tactile sensing and its engineering applications

仲谷正史, 前野隆司

Masashi NAKATANI and Takashi MAENO

1) 慶應義塾大学大学院 システムデザイン・マネジメント研究科

(〒223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1, {masashi.nakatani, maeno}@sdm.keio.ac.jp)

Abstract: The biology of touch has been remarkably progressed in recent years. For engineering researchers, physiological functions of mechanoreceptors are intriguing because such knowledge is useful for designing tactile sensors. As a representative mechanoreceptor in the skin, Merkel cell has been supposed to be a touch receptor; however, the direct evidence for this hypothesis is not reported. Author's latest study reported that Merkel cell does contribute to Slowly adapting type I (SAI) responses as a mechanoreceptor. This article briefly describes the recent findings of mechanoreceptors. Moreover, we discuss the perspective how we can relate biological research with touch engineering.

Key Words: *Mechanoreceptors, tactile sensing, Merkel cell-neurite complex, touch engineering*

1. はじめに

触覚は五感のなかでもっとも基礎的な感覚であるにもかかわらず、もっとも科学的な解明が遅れている。この理由の1つは、感覚器である機械受容器が皮膚の中に埋まっ
ていて、それらを傷つけずに外部からアクセスするのが容易でないことが挙げられる。特に視覚や聴覚は、受容器を取り出す方法も確立されており、外部刺激も与えやすい。触覚研究を遂行するためには、外部刺激を与える適切なアクチュエータを開発することが必要でもあった。しかし、1990年代以降のめざましい技術開発のおかげで、2000年代後半より触覚の基礎科学が大きく進展し始めている。

身体の外側から与えられる触覚を求心性神経で中枢に伝えているのは、機械受容器と呼ばれる、皮膚に存在する器官である。触覚工学者が好んで研究対象としてきたのは、機械受容器の中でも神経の終末において特異な形態を持ち、他の表皮細胞や真皮細胞と区別される構造体である。メルケル細胞、マイスナー小体、パチニ小体がよく知られている。楕円体型をしているパチニ小体は長軸の長さが200 μm と他の機械受容器構造体と比較して光学顕微鏡でも容易に見ることができる。一方で、1875年にドイツ人解剖学者によって報告され、発見者の名前を冠するメルケル細胞は直径10 μm 程度の小さな構造体である。皮膚内で末梢神経の先端部に頻出して存在することから機械受容器と予測されていた。しかしながら、実はそれがメルケル博士の卓越した推論であり直接的な証拠が報告されていなかったことはあまり知られていない。

電子顕微鏡を利用した観察により、メルケル細胞は神経終末とシナプス様の接続をしていることが確認され、メル

ケル細胞-神経複合体と呼ばれる。触盤という、メルケル細胞-神経複合体が密集する有毛部の皮膚を機械刺激すると、接続する求心性神経から遅順応性の応答(Slowly adapting type I afferent (SAI) responses)が得られる。一方で、無毛部である手指腹部を刺激したときに得られるSAIは、接触している物体のエッジや粗いテクスチャの情報をエンコーディングしていると考えられている。指先における高い空間解像度を達成する能力を鑑みると、メルケル細胞がSAI応答にどう寄与しているのかを理解することは触覚を解明したいという科学的な興味にとってもだけでなく、工学による人工触覚センサの開発や、SAIを介する触覚提示手法の開発にも有意義と思われる。

本稿では、生体の触感覚センシング機構の代表例として、SAI応答の一端を担うメルケル細胞の機械受容特性について最新の知見を概説する。また、それらの知見をいかにして工学の触覚研究に活用するかの道筋について述べる。

2. 機械受容器としての機能の定義

皮膚内部に存在する構造体を機械受容器と呼ぶためには、(1)機械刺激に対して応答する(2)機械刺激を神経に伝達する、の2つの機能を持つことを示さなければならない。メルケル細胞は、皮膚から単離し、求心性神経から引き離しても数日間培養可能である。単離したメルケル細胞を直接、適切なアクチュエータを用いて機械刺激すると、確かに刺激の強度に応じた応答を示す[1][2][3]。また、単離培養されたメルケル細胞は、1.6 μm 程度で機械受容応答が飽和することが明らかになっている。

一方、メルケル細胞が神経に情報をエンコードしていることを示すためには、メルケル細胞-神経複合体において、

メルケル細胞のみを刺激して、末梢神経に情報が伝達されるかを知る必要がある。この実験は一般に困難である。その理由は、末梢神経それ自体も機械受容器として機能しており、機械刺激を利用した実験では必然的に末梢神経の応答も引き起こしてしまうからである。この問題を解決するために、Maksimovicらは遺伝工学の手法を用いて、メルケル細胞にチャンネルロドプシン2という、光刺激によって開閉を制御できるイオンチャンネルを発現させた[1]。これにより、光刺激によってメルケル細胞を応答させることに成功した。チャンネルロドプシン2を発現したメルケル細胞を単離培養して光刺激すると、機械刺激を与えたときと同様な応答を示した。また、皮膚-神経標本と呼ばれる、新鮮皮膚と求心性神経が接続したままで体外に取り出した実験パラダイムにおいて、光刺激をメルケル細胞に与えると、SAI特性を持つ求心性神経から応答が観測された。以上より、メルケル細胞は確かに機械受容器の2条件を満たす。

その他の機械受容器であるマイスナー小体、パチニ小体についてはどうだろうか。これらの機械受容器構造体は、末梢神経から切り離して培養することができないため、上述したような方法は適用できない。これまでに、これらの機械受容器を作ることに関与しているc-MAFという転写因子が同定されており、この因子を欠損したマウスは、マイスナー・パチニ小体ともに数が減少する[4]。また、この遺伝子を欠損したヒト家系が存在しており、そのような人間は振動刺激の知覚閾値が上がる。しかしながら、マイスナー小体、パチニ小体が機械刺激を神経にエンコーディングしているかについては明らかではない。

3. 触覚生理学知見から触覚工学への示唆

これらの触覚生理学の知見はどうやって工学的な触覚センサや触覚ディスプレイ開発に役立ててゆけばよいだろうか。そのためには少なくとも次の3つの関係を理解する必要がある。(A)皮膚への外部刺激と、皮膚や機械受容器変形との関係(B)皮膚・機械受容器変形と求心性神経応答との関係(C)求心性神経応答と触感覚の関係、である。

特に(1)について、工学者は有限要素法モデルを利用した検討を通し、その理解に努めてきている。ごく最近では、新見らが、指腹部皮膚の2次元有限要素モデルを利用して、凹凸形状触刺激による皮膚変形について検討を行っている[5]。また、皮膚変形と神経発火の関係についての先行研究結果もふまえて、凹凸形状触刺激とヒト触知覚の関係を調べている。この検討は、上述の(A)(B)(C)の関係をつなぎ、凹凸触知覚を皮膚機械変形の視点から包括的に理解する試みである。また、(B)(C)をつなぐ際には、機械変形によって生じる物理量(ひずみエネルギー密度)の皮膚内部パターンから刺激形状を予測するアルゴリズムを提案している。このような包括的な触感覚を検討する試みは、新規の触覚センサハードウェアの開発を促すだけでなく、そのセンサで得られた計測データを解析する道筋も与える。

また、主に(B)に関し、Lesniakらは、皮膚変形の有限要素モデルとSAI応答との関係を数理モデル提案によって理

解を試みている[6]。メルケル細胞-神経複合体の興味深い点は、1本の求心性神経が複数個のメルケル細胞からの入力を受け取っていることである。中枢に情報を伝達するよりも先に、末梢神経の枝分かれから中心へ情報が集まるにつれて、何らかの情報集約が行われている可能性を予期させる。生理学の知見を数理モデリングすることで、基礎科学的な触覚情報処理の機構を理解するとともに、工学的な触覚センサ・ディスプレイの開発、または触覚情報処理アルゴリズムの開発にも活かせる知見を構築できる。

触覚センシング工学が発展することで、近い将来、触覚情報はもっと簡便に取得できるようになり、大量にデータ化することが可能になるだろう。その際には、データマイニングで使われるように、集められた触覚データを網羅的に解析して有意な情報を取り出す必要が生じる。その際、触覚生理学の知見を積極的に取り入れることで、生体に学んだ賢い触覚情報処理アルゴリズムの開発が期待できる。冒頭にて、触覚の基礎科学研究が工学の発展によって可能になったと述べたが、それら科学的な知見が再び工学に還元されることで、お互いの研究分野が発展する、筆者らはそのような好循環の醸成に寄与したいと考えている。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員(24-7585)の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] S. Maksimovic, M. Nakatani, Y. Baba, A.M. Nelson, K.L. Marshall, S.A. Wellnitz, P. Firozi, S.H. Woo, S. Ranade, A. Patapoutian, E. A. Lumpkin: Epidermal Merkel cells are mechanosensory cells that tune mammalian touch receptors, *Nature*, Vol. 509, pp. 617-621, 2014.
- [2] S.H. Woo, S. Ranade, A.D. Weyer, A. E. Dubin, Y. Baba, Z. Qiu, M. Petrus, T. Miyamoto, K. Reddy, E.A. Lumpkin, C.L. Stucky, A. Patapoutian: Piezo2 is required for Merkel-cell mechanotransduction, *Nature*, Vol. 509, pp. 622-626, 2014.
- [3] R. Ikeda, M. Cha, J. Ling, Z. Jia, D. Coyle, J.G. Gu: Merkel cells transduce and encode tactile stimuli to drive A β -afferent impulses, *Cell*, Vol. 157, pp. 664-675, 2014.
- [4] H. Wende, S.G. Lechner, C. Cheret, S. Bourane, M.E. Kolanczyk, A. Pattyn, K. Reuter, F.L. Munier, P. Carroll, G.R. Lewin, C. Birchmeier: The Transcription Factor c-Maf Controls Touch Receptor Development and Function, *Science*, Vol. 335, No. 6074, pp. 1373-76, 2012.
- [5] 新見孝之, 仲谷正史, 牧野泰才, 前野隆司: 指腹部変形の有限要素シミュレーションを用いたヒト凹凸触認識メカニズムの研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 3, pp. 427-434, 2011.
- [6] D.R. Lesniak, K.L. Marshall, S.A. Wellnitz, B.A. Jenkins, Y. Baba, M.N. Rasband, G.J. Gerling, E.A. Lumpkin: Computation identifies structural features that govern neuronal firing properties in slowly adapting touch receptors, *eLife*, 3, e01488, 2014.

アロマシューターを用いたデジタルサイネージ

Digital Signage Using Aroma Shooter

金 東煜¹⁾, 安井愛子¹⁾

Dong Wook KIM and Aiko YASUI

1) 株式会社アロマジョイン

(〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台 1-7 けいはんなプラザ・ラボ棟 6F, {dongwook, ai}@aromajoin.com)

Abstract: Recently, a new sales promotion service attempts to combine a scent diffuser with digital signage terminals. However, at present the scent diffusing apparatus using liquid-type aroma mist have not shown significant promotion effect. The temporal and spatial controls are crucial technologies in order to diffuse a scent in accordance with the content of the digital signage. In this paper, we give an overview of digital signage market and introduce the features of our Aroma Shooter. We also present the performance evaluation of a roof-mounted Aroma Shooter simulating the situation when it is applied to a digital signage.

Key Words: Aroma Shooter, Aroma Diffuser, Olfactory Display, Digital Signage, KIOSK Terminal.

1. はじめに

従来の紙印刷を中心としたポップやポスターのようなアナログ広告媒体は、タッチパネルや電子ペーパーなどを用いたデジタル端末の普及に伴い、デジタルサイネージ(電子看板)へとシフトしつつある[1]。ここで、デジタルサイネージとは、デジタルサイネージコンソーシアムの定義によると、「屋外・店頭・公共空間・交通機関など、あらゆる場所で、ネットワークに接続したディスプレイなどの電子的な表示機器を使って情報を発信するシステム」とされる[2]。なお、「デバイス、ネットワーク、コンテンツの3要素からなるこの新しいメディアが一大産業となる」と期待されている。しかしながら、店頭における事例からデジタルサイネージが必ずしも成功しているとは言えないのも現状である[3]。

そこで、映像や音響に合わせて香りを提示する手法で五感に訴える「香るデジタルサイネージ」が登場、ますますデジタルサイネージ市場の可能性が高まりつつある。

一方、デジタルサイネージ端末と連動する嗅覚ビジネスの展開は実証実験に留まっており[4]、今のところ市場に普及されているのは香りサンプルが入った容器を該当する商品の前に並べるといったアナログ式とも言える「香りサンプル展示手法」が運用されている。消費者はシャンプーや柔軟剤などの香りサンプルが入った容器の蓋を開け閉めしながら該当する商品の香りを確かめている。このため、映像や音響と同期して香りを提示する手法は、今なお、

商用化には至っていないのが現状である。

そこで本稿では、既存の香りサンプル展示手法の問題について述べるとともに、デジタルサイネージ端末と連動するための嗅覚ディスプレイの必要条件について述べる。また、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)で開発された「指向性嗅覚ディスプレイ」をベースに商品開発された「アロマシューター(Aroma Shooter)」について紹介するとともに、アロマシューターの性能評価及びデジタルサイネージとの親和性について概観する。

2. デジタルサイネージ

2.1 事業背景

昨今のセールスプロモーションとして脚光を浴びているのが「香り」を活用した五感(視覚, 聴覚, 嗅覚, 触覚, 味覚)マーケティングである。五感プロデュース研究所の荒木行彦氏によると、千葉県内にあるスーパーでは、ジャガイモ売り場でカレーの匂いを発生させ、ジャガイモの販売を伸ばしたという実例[5]から、「香り」は、従来の空間演出による集客に留まらず、購買意欲までも刺激するといった効果的な販売促進のツールとして活用されつつある。

このような現状から、最近のデジタルサイネージの傾向として、小型のデジタルサイネージ端末(電子POP)と香りサンプルを揃えて、該当する商品棚に陳列することで売上拡大を狙った試みが多く見られている(図1)。



図1 香りサンプルと電子POP

2.2 従来の香り展示方式の問題点

前述における図1のように、既存の電子POPと香りサンプルをただ寄せ集めるだけでは、効果的なセールスプロモーションに繋がりにくいのが現状である。一方的に流れる視聴覚情報は、訴求効果のない情報として無視されやすい。

また、香りサンプルが入った容器の蓋を毎回開け閉めしながら香りを確かめている内に、どの香りがどの商品に該当するのかわからなくなる可能性もある。つまり、該当する商品と香りが結びつかなくなる可能性がある。それに、多くの顧客が試していると、必ずしも特定の香りサンプルが該当する商品の前に置かれるとは限らない。場合によっては、サンプル容器の蓋までも変えられる可能性さえある。

さらに、現行の香りサンプルは、最長で2ヶ月程度しか保存できない問題をも抱えている。

一方、図2に示す「拡散方式の香り発生装置」を用い、スーパーの生鮮売り場や食品売り場において販売促進を行った例では、特定の香りが該当しない食品エリアまで拡散してしまい不特定多数に不快感を与えたため、逆効果だったという報告もある。香りが効果的なセールスプロモーションのツールとして成り立つためには、闇雲に香りを発生させるのではなく、様々な「環境や状況に合わせた香り」提示する必要がある。



図2 従来の拡散方式の香り発生装置

3. アロマシューター

3.1 アロマシューターの特徴

アロマシューター (Aroma Shooter) は、独立行政法人

情報通信研究機構における香りの時空間制御技術[6]をもとに、製品開発された香り噴射装置である [7].

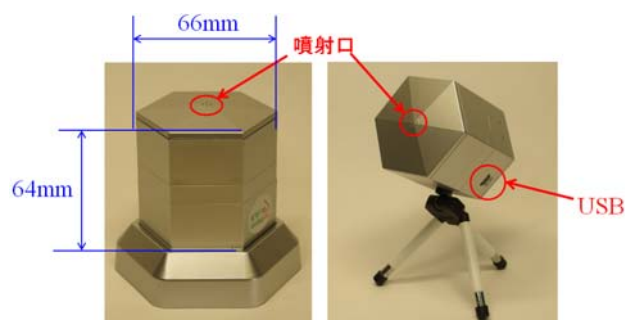


図3 アロマシューター

アロマシューターは、以下の特徴を有する (図3 参照)。

- 香りの瞬間切り替え (最短 100 mm秒) を実現。
- 気体噴射方式であるため、残り香が少ない。
- 指向性のある香りを顔の周囲にめがけてピンポイントで提示できる (拡散範囲: 噴射距離 300 mm時点で、約 50 mmΦ)。
- 6 種類の香りの組み合わせ提示が可能。
- 徐放性香源 (固体香料) により、香りカートリッジの長期使用期間 (香料の分子量により異なるが 1 回 3 秒噴射時、約 45, 000 回) を実現、1 日 250 回使用した場合、6 ヶ月使用可能。
- 固体香料を用いるため、液体香料が漏れることはない。
- 電源コード不要で、USB 接続で使用できるコンパクト設計 (直径 66 mm×高さ 64 mm)。
- 非加熱方式であるため、香りの質の変化が少ない。

なお、専用のソフトウェアを使えば、映像コンテンツに合わせて香りの提示タイミングが編集可能であるため、好みの香りを好みの時刻に合わせて提示できる (図4)。



図4 香り同期アプリケーション (Android 用)

3.2 デジタルサイネージへの応用展開に向けて

アロマシューターは本来、視覚情報や聴覚情報とともに嗅覚情報を提示するために開発された嗅覚ディスプレイ

であることから、映像と音響でセールスプロモーションを行っているデジタルサイネージ端末とは、親和性が高い。

特に、店舗の入り口やレジ周りなどで多く使用されている小型のキオスク端末（KIOSK Terminal）[8]とは、非常に親和性が高い。

しかし、生鮮食品や野菜など売り場の環境によっては、デジタルサイネージ端末とアロマシューターを並べて設置できないケースも考えられる（図5）。



図5 生鮮売り場での展開イメージ

そこで、店舗のレイアウト及び顧客動線を考慮、アロマシューターを天井に設置したほうが効果的であることから、天井設置による性能評価を試みた。

3.3 性能評価

実証実験に向けての性能評価実験は、空調設備が整い、換気が容易にできる空間（温度 25℃、湿度 46%）において、被験者が立った時と、座った時に対して、2 種類（レモンガラス、桜）の香りをを用い、単発噴射時の香り認知時間及び連続噴射時の実験空間の充満度を官能評価で行った。実験の様子を図6に示す。

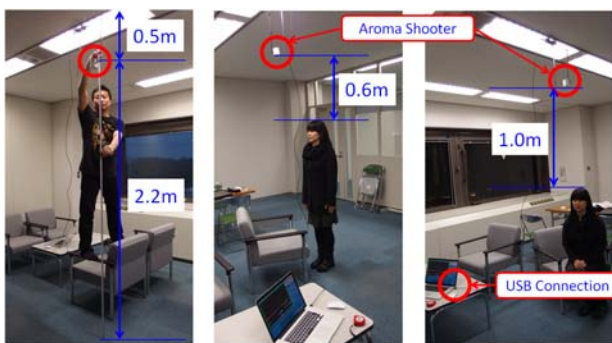


図6 天井設置による性能評価実験

実験の結果、以下のことが明らかになった。

- 被験者が立った時（噴射口から鼻まで約 70cm）：単発 5 秒噴射時に香りを認知するまで平均 2 秒
- 被験者が座った時（噴射口から鼻まで約 110 cm）：単発 5 秒噴射時に香りを感知するまで平均 4.5 秒
- 単発 5 秒噴射時の拡散範囲：半径 50 cm
- 連続 5 分噴射時の拡散範囲：90 cm³

一方、下記のような問題点も明らかになった。

- アロマシューターを USB 接続で制御を行う場合、設置する台数分の USB ケーブルの配線工事が必要となる。
- USB の最大伝送距離が 5m（USB3.0 の場合、3m）であるため、設置する場所に制約が伴う。
- 近年普及が進んでいるタブレット端末での制御を行う場合、USB 接続で制御可能なアロマシューターの数、1 台のみに限定される。

4. 考察

一般的に揮発性の化学物質である香り分子は、空気の流れに依存して空間中に漂うことになる。故に、デバイスから放出された香りは、何らかの方法で気流を生成しない限り、特定の空間上に留めることができないのが現状である。

特に、香りを情報（または、記号）として、デジタルサイネージ端末上の映像コンテンツに合わせて提示するためには、気流生成及び空間制御が前提となる。

従来の香り発生装置は、液体香料を霧状にして噴霧する拡散方式を採用しているため、特定の空間上に香りを留めることができず、該当する商品以外にも香りが広がってしまうのが現状である。また液体噴霧方式の場合、噴霧口を下向きにすると液体香料が漏れる恐れがあるため、設置可能な条件も限られている。

上記に対して、アロマシューターは固体香料を用いるため、デバイスを逆様に設置しても香料が漏れる恐れはない。また、デバイス内部にベンチュリ管（Venturi tube）構造を設けているため、空気の流れを絞ることにより、香気成分の流れに指向性をもたしている。また、多数のユーザが使用するデジタルサイネージ端末と融合するためには、カートリッジの使用期間も重要な要素となる。アロマシューターに用いるカートリッジは、固体香料であるため、1 日 250 回使用したとしても半年使えるといった長期試用期間を実現していることから、デジタルサイネージ用途には最適であると言える。

5. 今後の課題

天井設置における性能評価の結果、デジタルサイネージ端末からの制御信号は、無線通信で行われることが環境適応性及び制御の利便性が高いことが明確となった。

従って、今後の課題としては、現状のアロマシューターにおける USB 制御基板に近距離無線通信規格の一つである Bluetooth 回路を付け加えることで、無線制御を可能にする必要がある。また、アロマシューターと一体化できる形状のパッケージ型のリチウムイオン電池を設けることで、電源が確保できない環境においても駆動できるように小型・軽量・ワイヤレス化の実現が望ましい。

上記の課題解決に向けて、さらなる製品開発を進めていきたいところである。

6. まとめ

本稿では、香りを販売促進のツールとして、拡大しつつ

あるデジタルサイネージ領域での応用事例を紹介するとともに、従来方式の問題点について論じた。また、アロマシューターの特性を活かしたビジネス展開として、デジタルサイネージ端末との親和性について概観するとともに、現行の技術課題についても論じた。

今後、アロマシューターとデジタルサイネージ端末が融合する形で、本来香りがしないパッケージ化された商品（食品や洗剤など）であっても、消費者に対して商品のイメージがわかるように香りでサポートするといった新たなサービスを提供する香りビジネスとして展開して行く予定である。

謝辞 アロマシューターは、独立行政法人情報通信研究機構（NICT）における「香りの時空間制御」に関する多数の特許技術によって製品開発されたものである。

付録 ターゲット市場規模

アロマシューターをセールスプロモーションのツールとして、事業展開可能なマーケットは、食品を主に扱っている食品スーパーマーケット、日常生活に必要な物を総合的に扱っている総合スーパーマーケット（GMS: General Merchandise Store）、コンビニエンスストア、百貨店、ホームセンター、ドラッグストアなど幅広い。

また、無線制御型のアロマシューターとデジタルサイネージ端末とを、セールスプロモーションのツールとして B to B ビジネスを展開して行く上で、ターゲットとなるマーケットの市場規模は、次の通りである。

- i. 衣食住関連の商品 Daiei（ダイエー）、イトーヨーカドー、APITA（アピタ）、ユニーなどの 52 社が運営している GMS の店舗数は、1,620 店舗。
- ii. 1,054 社が運営している食品スーパーの店舗数は、18,549 店舗。
- iii. セブンイレブンをはじめ、ローソン、ファミリーマートなどのコンビニは、51,873 店舗が全国に点在し、店舗増加率は 22% を示している。
- iv. 全国の百貨店店舗数は、253 店舗。
- V. ホームセンターは、4,540 店舗が運営されている。
- vi. ドラッグストア総店舗数は、17,144 店舗で、急成長が続いている。

表 1 ターゲット市場規模

マーケット	店舗数	売上規模 (兆円)	調査年度	出所
GMS	1,620	20	2013. 11	AJS*1
食品 スーパー	18,549		2013. 11	AJS*1
コンビニ	51,873	6	2014. 3	todo-ran*2
百貨店	253	7.4	2012. 2	JDSA*3
ホーム センター	4,540	4	2014. 3	DIY*4
ドラッグス ストア	17,144	4.6	2014. 3	JACDS*5
合計	93,979	42	2014. 5	-

- *1: オール日本スーパーマーケット協会
- *2: 都道府県別統計とランキングで見る県民性
- *3: 日本百貨店協会、全国百貨店売上高概況データ
- *4: 日本ドゥ・イット・ユアセルフ協会
- *5: 日本チェーンドラッグストア協会

以上をまとめると、本事業がターゲットとしている売り場を持つ店舗数を合算すると 93,979 店舗、それらの売上総額は 42 兆円希望である（表 1 参照）。これらの店舗にアロマシューター 1 セットずつ設置されると想定しても 9 万 4 千セット、大型の店舗には複数置かれるとすれば数十万セットの潜在需要がある。

一方、ディスプレイ、ネットワーク、コンテンツの 3 要素から成り立つと言われているデジタルサイネージ領域の市場規模は、2012 年 11 月現在、878 億円として野村総合研究所は推定している。特に、一般社団法人電子情報技術産業協会（JEITA）における情報・産業社会システム部会が行った 2012 年度の調査結果によると、情報 KIOSK 端末の販売台数は、全体で 21,006 台として市場規模は 52 億円であると公表している。しかし、近年、タブレット端末の普及に伴い、従来の電子 POP 端末とは異なるタッチパネル操作が加わった新たなデジタルサイネージ領域が拡大しつつあることが窺える。

参考文献

- [1] デジタルサイネージコンソーシアム（編）：デジタルサイネージ白書 2013, 2013.
- [2] 中村伊知哉：注目メディア「デジタルサイネージ」, AD STUDIES, Vol27, pp. 22-26, 2007.
- [3] 神谷 渉：店頭におけるデジタルサイネージの課題と展望, 流通情報, No.483, pp. 50-56, 2010.
- [4] 境野 哲：五感に訴え完成を伝える「香り通信」の取り組みと成果：「香るデジタルサイネージ」効果測定実験結果, 映像メディア学会技術報告, Vol. 32, No. 49, pp. 53-57, 2008.
- [5] 荒木行彦：香りの活用でビジネスの可能性, 五感プロデュース研究所, 2013.
URL: <http://ameblo.jp/senses/archive-201310.html>
- [6] D.W. Kim and H. Ando : Development of Directional Olfactory Display, Proceedings of the 9th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry, pp.143-144, 2010.
- [7] 安藤広志：「香り」を瞬時に切り替えられる「香り噴射装置」の開発, ITU ジャーナル, Vol. 43, No.7, pp22-55, 2013.
- [8] 中谷文伸, 亀田教夫, 釣見誠亮, 多田勝利, 蛸島洋明：小型情報 KIOSK 端末 SmartPOT シリーズ, PFU Tech. Rev., 19, 1, pp.45-51, 2008.

前庭電気刺激における刺激電流パターンが及ぼす 加速度感覚知覚と身体反射への影響

Effect of stimulation current patterns on the
perception of acceleration sensation and the body reflex in galvanic vestibular stimulation

青山一真^{1), 2)}, 飯塚博幸³⁾, 古川正紘^{1), 4)}, 安藤英由樹^{1), 4)}, 前田太郎^{1), 4)}

Kazuma AOYAMA, Masahiro FURUKAWA, Hideyuki ANDO, Taro MAEDA

1) 大阪大学大学院情報科学研究科

(〒565-087 大阪府吹田市山田丘 1-4 3A1, {aoyama.kazuma, iizuka, m.furukawa, hide, t.maeda}@ist.osaka-u.ac.jp)

2) 日本学術振興会特別研究員

(〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1 麹町ビジネスセンター)

3) 北海道大学大学院情報科学研究科

(〒060-0814 札幌市北区北 14 条西 9 丁目北海道大学大学院情報科学研究科)

4) 独立行政法人情報通信研究機構脳情報通信融合研究センター(CiNet)

(〒565-087 大阪府吹田市山田丘 1-4)

Abstract: This study reports that the effect of galvanic vestibular stimulation (GVS) can be enhanced by giving a countercurrent before the normal current stimulation in the forward direction. In order to investigate the effect of the countercurrent on GVS, we conducted the two experiments. For the first experiment, we compared the rate of correct perception in countercurrent and constant current. In the result, the rate of correct directional perception in countercurrent is significant higher than that of constant current in the dead current value. For the second experiment, we applied various kinds of amplitudes and durations of the countercurrent before the normal stimulation. The strength of the effect was measured by body sway. As a result, the enhancing effect by the countercurrent does not only appear in the objective response but also in the subjective reports and we found that the effect of the countercurrent was enhanced in response to the amount of charges of the countercurrent before normal stimulations.

Key Words: Galvanic Vestibular Stimulation, countercurrent, acceleration sensation

1. はじめに

VRにおける加速度感覚の提示手法として、機械的に動かすモーションプラットフォームではなく、頭部に微弱な電流を印加する事により、バーチャルに加速度感覚を提示する事のできる前庭電気刺激(GVS: Galvanic Vestibular Stimulation)を利用したインタフェースが提案されている[1]。このGVSを利用したインタフェースは、軽量かつ安価に加速度感覚を提示できることから歩行の誘導やゲームやシミュレーションにおけるリアリティ向上への効果が期待されている。また前庭器官を直接刺激するため反射的に陽極方向に体を傾ける姿勢反射や眼球が動く前庭動眼反射[2], [3]などが起こることから、前庭半器官や耳石器の異常を検知する医療検査ツールとして利用されている。さらに、これらの反射は知覚を伴わないで体を傾ける反射応答を誘発する事が可能であるため無意識的な歩行の誘導などへの応用も期待されている(図1)。

GVSの刺激電流と人が知覚する加速度感覚や誘発される身体動揺には正の相関がある[1]。しかしながら、GVSは人の頭部に電流を印加するため、安全性の観点から刺激電流の電流値は小さい方が望ましい。我々は、GVSのガイドラインを専門の医師との相談し、以下の様に設定した。

- 刺激電流の電流値は 3mA
- 1回の刺激電流の持続時間は 5秒間
- 1日の合計刺激時間は 60秒間
- 刺激と刺激の間には 3分間の休憩をとる

しかしながら、この上限は強い加速度感覚を与えるためには不十分である。

Fitzpatrickら(2010)は被験者にGVS提示を行い、その刺激電流印加を終了すると、被験者はそれまで感じていた加速度感覚の方向とは逆方向に加速度感覚を知覚する事を示している[5]。この事から、我々は、あらかじめ加速度感覚を提示したい方向(順方向)とは逆方向に刺激電流

を印加しておき、その方向への刺激が終了した時に生起する加速度感覚と順方向への刺激電流が生起する加速度感覚を同時に被験者に提示する事で、順方向前庭感覚刺激を増強する事ができるのではないかと考えた。

2. 逆電流印加が主観的な加速度感覚方向知覚に及ぼす影響

2.1 背景

刺激持続時間が 500ms の直流電流 GVS において、被験者の加速度感覚の方向知覚が可能となる電流閾値は 0.4mA である。よって、0.3mA の電流値では加速度感覚を知覚する事は出来ない。そこで、閾値以下の電流をあらかじめ加速度感覚を提示したい方向とは逆方向に印加しておく事で、その刺激終了時に順方向への加速度感覚が発生すると考えられる。Fitzpatrick らの先行研究[5]において、定電流刺激を 2 分間印加し、その刺激を終了した時に、逆方向への加速度感覚を知覚する事が示されている。また、永谷らによる先行研究[4]において、1~2Hz 程度の交流刺激を用いる事でそれ以外の周波数帯の刺激よりも小さい電流値で眼振が起こる事が示されている。これらの事から、逆方向に予め印加しておく電流は 250ms (2Hz の半周期) よりは長い方が望ましいと考えられる。そこで、我々の設定したガイドラインにおける最長の刺激印加時間である 5 秒間のうち 9 割にあたる 4500ms 間逆方向へ予め印加しおき、その刺激が終了すると同時に 500ms の順方向への電流を印加する往復電流刺激と 500ms 間逆方向に電流を印加しておき、4500ms 間順方向への電流を印加する往復電流刺激を提案し、その加速度感覚増強効果について検証した。

2.2 実験方法

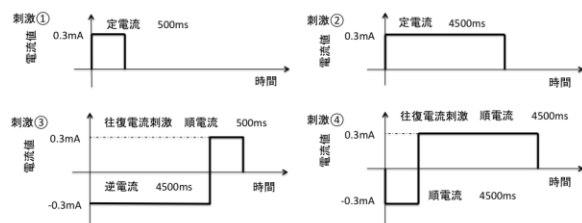


図 1: 刺激電流波形

被験者は前庭に病歴のない健康な成人男性 5 名であった。全ての被験者からのインフォームドコンセントを得た上で参加してもらった。

実験は静かな実験室で行った。被験者にアルコールで拭いた左右の乳様突起上にイヤーマフラーを用いてゲル電極を設置し、水平な床の上に裸足で閉眼ロンベルグ立位をとらせた。その後実験者の合図で電流の印加を開始し、刺激が終了してから 1 秒後に知覚した加速度感覚により感じた方向を左か右の強制二択で回答させた。

刺激電流の条件は図 1 に示す様に、定電流刺激のコントロール条件として、0.3mA の電流を 500ms 印加する定電流刺激 (刺激①) と 0.3mA の電流を 4500ms 印加する定電流刺激 (刺激②) を設定し、逆電流の長い往復電流刺激とし

て、4500ms の逆方向への刺激電流に続いて 500ms の順方向への電流を連続して印加する刺激 (刺激③) を設定し、逆電流の短い往復電流刺激として、500ms の逆方向の刺激電流に続いて 4500ms の順方向への刺激を印加する刺激を設定した。刺激③、刺激④において、後から印加した刺激が提示する方向を正解の方向とした。各電流値の刺激電流を左右方向に 4 回ずつ提示し、左右方向への刺激がランダムに提示されるように、各刺激パターンあたり 8 回の合計 24 回刺激を行った。

3.3 実験結果

図 2 は被験者が加速度感覚を知覚する事が困難である 0.3mA の電流値を刺激電流の電流値として用いた時の各条件における刺激電流が誘発する加速度感覚の方向知覚の正答率を示している。エラーバーは標準誤差を表している。

この図から、あらかじめ 0.3mA の逆電流を 4500ms 間印加した往復電流刺激条件の加速度感覚の方向知覚の正答の割合は逆電流がない場合の正答の割合よりも有意に高い事が分かる ($p < 0.05$, ANOVA)。また、4500ms の逆電流を印加する刺激③における正答の割合と 500ms の逆電流を印加する刺激④の正答の割合の間に有意傾向が見られた ($p < 0.10$, ANOVA)。刺激①、刺激②、刺激④の刺激条件における正答の割合の間に有意な差は見られなかった。

2.3 実験結果

これらの実験結果は、人が加速度感覚を知覚出来る電流閾値は 0.4mA 程度であるにもかかわらず、本稿で提案している往復電流刺激を用いる事により、閾値以下の強度である 0.3mA の刺激電流により加速度感覚を知覚する事ができる事を示している。0.3mA の定電流刺激における方向知覚の正答率はその長さによらず chance level 程度であったが、逆電流の長い往復電流刺激である刺激③を用いた時の加速度感覚方向知覚の正答の割合は 7 割程度まで上昇する。つまり、通常は加速度感覚の知覚が困難な電流強度でも、加速度感覚を知覚する事が可能となる。また、同じ往復電流刺激でも逆電流印加時間が短いと正答割合が低い事があった。よって、逆極性の電流をあらかじめ十分に長い時間印加しておく事により、GVS によって生起される加速度感覚を増強することが出来ると考えられる。

本実験において、刺激電流の電流値は知覚閾値以下の 0.3mA を利用したが、被験者から刺激③の条件において加速度感覚を知覚する事ができたという報告があった。よって、本刺激は被験者がどちらに加速度を感じているのか判然としないが、結果として正答するような意識下の増強効果ではないと考えられる。

従来は GVS の刺激電流とその刺激電流によって誘発される加速度感覚の時間的な応答特性について議論されてこなかった。しかしながら、本稿で示した様に先行する刺激が十分に長ければ、閾値以下の電流値でも、後続する刺激によって提示される加速度感覚に影響を与える。よって、GVS 提示においては刺激に対する時間遅れ以外にも、刺激の時間的な応答特性や周波数的な応答特性があり、これら

を考慮する事でより強力なGVS提示をより安全に運用可能となると考えられる。

以上より、本研究で提案した不感電流を逆電流として用いた往復電流刺激の加速度感覚の増強効果により、小さい電流値でも刺激電流を知覚する事が可能になる事が示された。また、その増強効果は逆電流印加時間がある程度の長さが必要である事が示された。この往復電流刺激を用いる事で、より安全にGVSを利用したインタフェースを運用する事ができると考えられる。

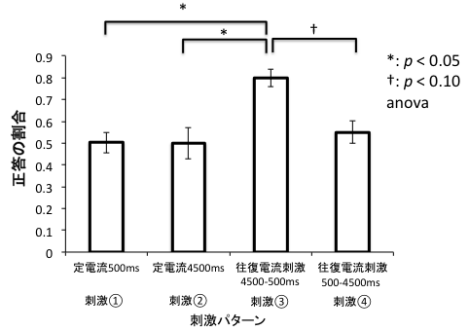


図2 刺激波形と実験設定

3. 先行刺激としての逆電流印加が身体反射応答に及ぼす影響

3.1 背景

GVSは主観的な加速度感覚の提示が可能であると同時に、身体動揺を誘発する。この身体動揺はGVSの刺激電流の電流値と正の相関がある。また、本稿の2章で述べたように先行する逆電流は後続する順電流の惹起する主観的な加速度感覚を増強する。しかし、先行逆電流がGVSによって誘発される身体応答を増強するかどうかは分かっていない。また、この加速度感覚の増強効果が逆電流のどのパラメータ(逆電流の印加時間、逆電流の電流値、逆電流値と順電流の差、逆電流の電荷移動量)に依存するものであるのかはわかっておらず、提示できる加速度感覚の増強効果を任意にコントロールできていない。提示できる加速度感覚の増強効果を任意にコントロールできなければ、ゲームなどに加速度感覚を付加した時に強すぎる加速度感覚を提示してしまう事によって不快感を与える事や、反射的な身体動揺を利用した意識下の歩行誘導時に利用できない可能性や、利用できたとしてもユーザが左右に大きく曲がりすぎる事、などが考えられる。そこで、逆電流による加速度感覚の増強効果が身体応答にも現れるのかを確認し、その増強効果を定量的に評価するために、順方向の電流値と印加時間を固定し、逆電流の印加時間と電流値を変化させた時の被験者の身体動揺を計測した。

3.2 実験方法

被験者は前庭に病歴の無い被験者5名であった。全ての被験者に対して十分にインフォームドコンセントを得た。刺激電流は図3-Aに示すように逆電流部と順電流部からなる波形であった。逆電流部は印加時間250, 500, 750ms、電流値0, -1.0, -2.0, -3.0 mAとし、順電流部は印加時間

2000ms、電流値1.0 mAとした。実験は各条件の組み合わせの総当たり(3X3+1)の各極性(左/右が陽極)あたり2試行の合計20試行とした。身体動揺の計測は図3-Bに示すように頭頂部に設置した三次元位置センサ(Liberty, Polhemus社製)により頭部のRoll方向の傾き角度を計測した。被験者には前章と同様の姿勢をとらせ、0mA以外の条件では2回刺激が印加されることを説明し、1回目の刺激では身体が傾かないように我慢し、2回目の刺激の時は身体の反射に任せて体を楽にするように指示した。その後、被験者の合図で試行を開始し、1000ms後に刺激が開始された。頭部の傾き角度の計測は刺激開始前1000ms前から8000ms間、200Hzのサンプリング周波数で行った。

計測したデータは被験者ごとにその被験者の逆電流値0mAの条件のピーク値で割ることによって標準化された。

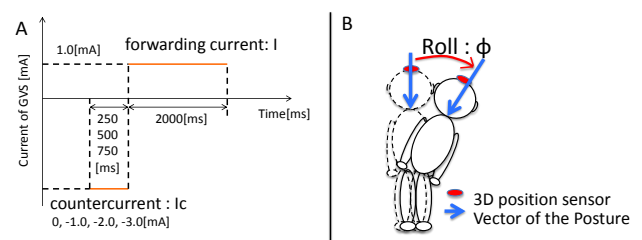


図3 刺激波形と実験設定

3.3 実験結果

図4は逆電流印加時間500ms、逆電流値0, 1.0, 2.0, 3.0 mAの各条件における被験者の身体動揺の時間変化を示している。この図から、逆電流値が大きい方が頭部の傾き角度は増大する事がわかる。

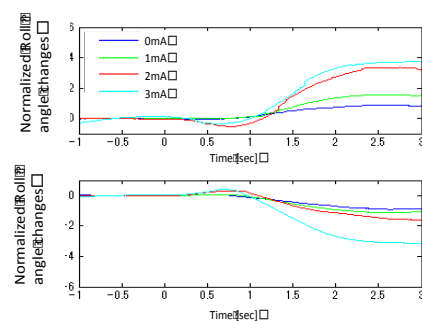


図4 逆電流印加時間500msの各条件に置ける身体動揺の時間変化(正:左方向への傾き, 上:左陽極, 下:右陽極)

図5は各条件における標準化された身体動揺のピーク値を示している。図中の*は有意差を示している($p > 0.05$, ANOVA)。図から逆電流印加時間、逆電流値ともに誘発される頭部の傾き角度と正の相関がある事わかる。

図6~図8はそれぞれ逆電流値と順電流値の差、逆電流印加時間、逆電流部における電荷の移動量に対する頭部の傾き角度のピーク値を示している。

図6~図8より、GVSにより誘発される頭部の傾き角度の変化は逆電流値と順電流値の差、逆電流印加時間、逆電流部における電荷の移動量のそれぞれと正の相関があることがわかる。

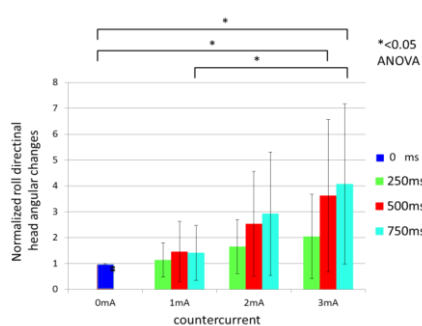


図 5 各条件における頭部の傾き角のピーク値

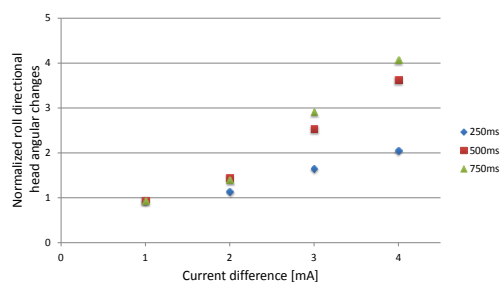


図 6 逆電流値と順電流値の差に対する頭部傾き角のピーク

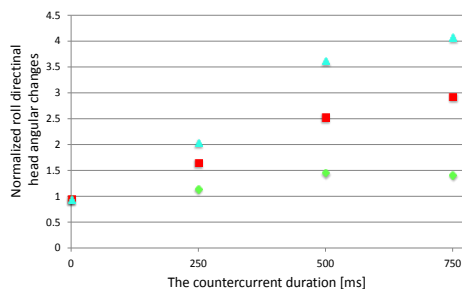


図 7 逆電流印加時間に対する頭部傾き角のピーク

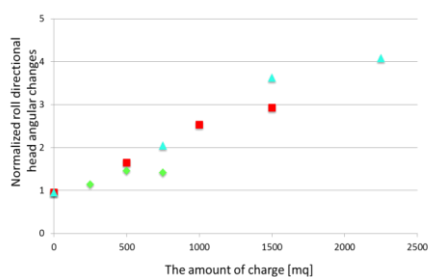


図 8 逆電流部の電荷移動量に対する頭部傾き角のピーク

3.4 考察

本章で行った実験から、先行逆電流は後続する順電流により誘発される身体応答としての頭部の傾き角度を増大させる事が示された。GVS により誘発される身体動揺は前庭によって知覚される加速度感覚に対して、被験者が姿勢反射を起こすことによって現れる。よって、先行逆電流によって後続する順電流によって誘発される頭部の傾き角度が増大するという事は、先行逆電流により前庭の受け取る加速度感覚の知覚量が増大したと考えられる。

順方向電流によって誘発される頭部の傾き角度の変化は、逆電流と順電流の差、逆電流印加時間、逆電流部の電荷移動量のそれぞれと正の相関があることが示された。し

かし、どのパラメータが先行逆電流の増強効果を支配的に決定するのかわかっていない。そこで、図 6～図 8 に対して計算した相関係数と決定係数を表 1 に示す。この表から、逆電流部の電荷移動量と頭部の傾き角度の変化の間の決定係数が 0.930 と最も高かった。よって、先行逆電流による順方向電流が誘発する頭部傾き角度変化の増大効果は逆電流部の電荷移動量によって決まると考えられる。

表 1 各グラフの相関係数と決定係数

	Current difference	Counter current duration	The amount of charge
Correlation	0.855	0.605	0.964
Determination Coefficient	0.731	0.366	0.930

4. 結論

本稿では、前庭電気刺激における先行逆電流刺激が後続する順方向刺激電流が誘発する主観的な加速度感覚知覚と、身体の反射応答を増強する可能性を検証し、先行する逆電流印加の増強効果を決定するパラメータを同定した。

本稿で明らかになった事は以下の通りである。

- 先行逆電流印加は後続する順電流の惹起する主観的な加速度感覚を増強する。
- 先行逆電流の印加は後続する順電流の誘発する頭部の傾き角度の変化を増大させる。
- 先行逆電流における電荷の移動量(逆電流値 X 逆電流印加時間)がその増大効果を決定する。

5. 謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費と戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1]前田太郎, 安藤英由樹, 渡辺淳司, 杉本麻樹: 前庭電気刺激を用いた感覚の提示; バイオメカニズム学会誌, Vol. 31, No 2, 82-89 (2007)
- [2]橋本悠希, 杉崎有, 米村朋子, 飯塚博幸, 安藤英由樹, 前田太郎: 前庭電気刺激を用いた眼球運動誘導手法の基礎的検討; 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 17, No 1, 23-32 (2012)
- [3]安藤英由樹, 渡辺淳司, 杉本麻樹, 前田太郎: 前庭インタフェース技術の理論と応用; 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No 3, 1326-1335 (2007)
- [4]永谷直久, 杉本麻樹, 新居英明, 前田太郎, 北崎充晃, 稲見昌彦: 前庭電気刺激による視界への影響; 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 10, No 4, 475-484 (2005)
- [5]Rebecca J. St George, Brian L. Day, Richard C. Fitzpatrick, “Adaptation of vestibular signals for self-motion perception”, The Journal of Physiology, Vol. 584, issue 4, 843-853 (2010)

学生のものでつくり活動を相互扶助する 取り組みとロボット技術の現在

Reciprocal Help Activities for Students' Personal Fabrication and Robotics Engineering

田所祐一¹⁾

Yuichi TADOKORO

1) 東京工業大学 工学部 制御システム工学科

(〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, tadokoro@sc.ctrl.titech.ac.jp)

Abstract : Recently, personal fabrication became so complex and diverse that more sophisticated tools such as NC milling machines or 3D printers are needed to make hobby items. Tokyo Tech SSR, a robot circle in Tokyo Institute of Technology, was founded in 1981 in order to cooperate each other for making robots. This paper will introduce the activities of Tokyo Tech SSR and its reciprocal help system, and robotics engineering these days showing some examples of recent works.

Key Words: *Personal Fabrication, Robotics*

1. はじめに

ものづくりのツールが多様化する昨今、個人での制作活動においても、NC工作機器や3Dプリンタ等の、かつてプロ向けツールであった工作機械を活用する事例が増加している。

このような機器は導入と維持にコストがかかる上、騒音や振動に関する対策も必要であり、個人での運用は現実的ではない。特に経済面で制約のある学生にとっては、こういった作業環境の面で問題を抱えることがあり、趣味やビジネスチャンスとしてのものづくりに参入するにあたっての障壁となっている。

それに対する取り組みとして、工作機械や作業スペースを提供する施設があり、多くの場合簡単なインストラクションを受けると、基本的に自由に利用することができる。また、専門知識をもったスタッフが常駐しており、機械の使用方法についてアドバイスを受けられることが多い。

本稿では、著者の所属する東京工業大学ロボット技術研究会における、学生による学生のためのものづくり活動相互扶助システムについて解説し、そこでの過去の成果物等を紹介しながら、昨今のロボット技術の動向について述べる。

2. ロボット技術研究会における相互扶助システム

東京工業大学ロボット技術研究会(以下、ロボット技術研究会)は、創立30年を超える歴史を持つ東京工業大学の公認サークルであり、2014年6月現在約220名の部員を擁する、学内において最大規模の技術系の学生集団である。

ロボット技術研究会の主な活動としては、ABU大学ロボ

コン、かわさきロボット競技大会、全日本マイクロマウス大会、ROBO-ONE等のロボット競技大会への出場をはじめとして、個人による電子工作、ゲーム制作、ロボット製作や物理実験など、非常に多岐にわたる活動を多数の小さなグループないし個人で行っている。

ロボット技術研究会の活動目的は個人やグループの制作活動の相互扶助であり、さまざまな工作機械を備えた共用の作業スペースや、電子部品や機械要素部品の共有在庫のほか、有志が開催する各種技術講習会やセミナー形式での発表会等も充実している。

年に2回、研究報告会という全体での発表会が行われ、普段からの活動の成果をグループや個人が発表し、議論を深める場となっている。

2.1 経済・設備面

ロボット技術研究会では構成員から会費を集金し、それによって活動をまかなっている。これによって、高価な機材を団体として導入したり、書籍を共有したり、少量で購入した場合に一般的に単価が高くなる電子部品類を共同で購入したりできる。工作機械等は共用できるため、各自で準備する必要がない。

2.2 人材面

様々なものづくりについて関心のある人々が共同の環境で作業をするため、技術交流が日常的に盛んに行われる。また、3DCAD、電子回路、マイコンプログラミングなどについての講習会が有志によって開催されるため、初心者に対する技術的支援も充実している。

3. 成果物例

本章では、最近の活動による製作物を紹介する。

図 1 に示したのは、著者が 2013 年に製作した 2 輪の車輪を有する小型の車両ロボットで、迷路を記憶させながら走らせ最速走行タイムを競うマイクロマウス競技大会用の機体である。このような独立 2 輪車両は、制御理論的には非ホロノミック拘束を有する非線形システムとして広く知られている [1]。また、迷路探索には Dijkstra 法や A* Algorithm などのグラフ理論を用いた最短経路探索アルゴリズムが用いられることが多く、この機体においても採用している。

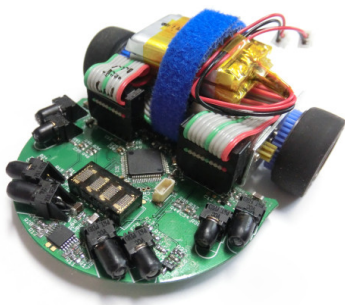


図 1: マイクロマウス競技用ロボット

図 2 に示したのは、熊谷ら [2] や遠藤ら [3] による、全方向移動車輪を用いた玉乗りロボットを再現する機体である。駆動輪にオムニホイールを使用しており、機体を乗せたボールの速度ベクトルを任意に制御できる。搭載された加速度計・レートジャイロの値から相補フィルタを用いて姿勢を推定し、直立状態を目標値としてフィードバック制御することによって、倒れることなくボール上にとどまり続けることができる。

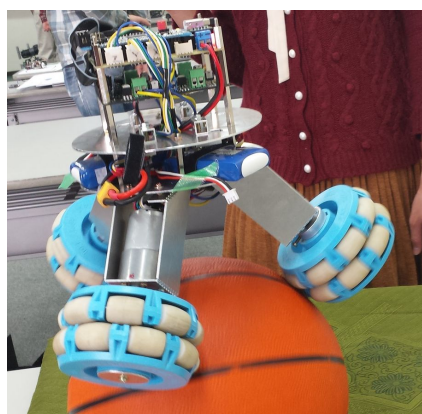


図 2: オムニホイールを用いた玉乗りロボット

図 3 に示したのは、複合 4 節リンク機構 [4] を用いて複雑な指の動作を実現するロボットハンドである。リンク同士が逐次的に接触、機械的に拘束されることによって、1 自由度のアクチュエータのみで対象物の形状に馴染む形での把持が可能になっている。

その他の作品に関する情報は、東京工業大学ロボット技術研究会のウェブサイト [5] や、動画サイト [6] などにおいて閲覧できる。



図 3: 複合 4 節リンク機構を用いたロボットハンド

4. 現在のロボット技術の傾向と取り組み

近年のロボット技術は、半導体技術の発達によって、主にソフトウェアの面で高度化かつ複雑化している。製作物例でも見たように、趣味のロボット製作においても制御理論やソフトウェアの比重が最近高くなっており、純粋な機械工作においても 3DCAD を使用したり、プログラミングによる数値計算を用いてパラメータ設計を行うことも少なくなってきた。

東京工業大学ロボット技術研究会は、日々変化するロボット技術および科学に広く関心を向けて活動しており、紹介したものの他にも人工知能や数値シミュレーション、画像処理など、多岐にわたる科学・技術の最新の成果を実践応用した活動を行っている。これからのロボット技術を、科学的・実践的側面の双方から発展させていくことが期待される。

謝辞 本稿を執筆するにあたって、製作物の写真の提供にご快諾いただいた井土拓海君、福田雅文君に感謝します。

参考文献

- [1] C. Samson : "Control of Chained Systems Application to Path Following and Time-Varying Point-Stabilization of Mobile Robots", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 40, no. 1, pp. 64-77, 1995.
- [2] M. Kumagai, T. Ochiai : "Development of a Robot Balancing on a Ball", *Intl. Conf. on Control, Automation and Systems*, pp. 433-438, 2008.
- [3] T. Endo, Y. Nakamura : "An Omnidirectional Vehicle on a Basketball", *Proc. ICAR'05*, pp. 573-578, 2005.
- [4] ダブル技研株式会社 : 不特定形状のワークを把持可能なフレキシブル構造を有する低コストなエンドエフェクタの開発, 平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業研究開発成果報告書, 2012.
- [5] 東京工業大学ロボット技術研究会,
<http://rogiken.org/>
- [6] 東京工業大学ロボット技術研究会 (ニコニコ動画),
<http://www.nicovideo.jp/tag/東工大ロボット技術研究会>

第4回テレイグジスタンス研究会

日本バーチャルリアリティ学会