

## 水中での電気刺激による触覚提示

中村たいら<sup>†1</sup> 加藤愛実<sup>†1</sup> 岡崎龍太<sup>†1</sup> 梶本裕之<sup>†1†2</sup>

電気刺激を用いて触覚や力覚を提示する技術は数多く開発されているが、電気刺激は汗などの皮膚状態や電極との接触状態の影響を受けやすく、安定した感覚提示が難しい。そこで我々は、水中で電気刺激による触覚提示を行うことを提案する。水中では電極を皮膚に接触させる必要がなく、また皮膚表面の汗が水で希釈されて状態の変化が少ないため、安定した感覚提示を実現できると考えられる。本稿では水中での電極の配置や電流経路が触覚にもたらす影響を検証する。

## Tactile Presentation using Underwater Electrical Stimulation

TAIRA NAKAMURA<sup>†1</sup> MANAMI KATOH<sup>†1</sup>  
RYUTA OKAZAKI<sup>†1</sup> HIROYUKI KAJIMOTO<sup>†1†2</sup>

**Abstract** – Electrical stimulation is been used for tactile and force presentation. However, there is a common issue of difficulty to present stabilized sensation, which is due to the fact that electrical stimulation is easily effected by skin condition and contact condition with electrodes. In this paper, we propose a method to stabilize tactile presentation using electrical stimulation underwater.

### 1. はじめに

触覚提示はエンタテインメントシステムにおいて操作性、臨場感、リアリティ等を向上させる重要な要素である。その一方で、触覚は視聴覚と比べて大掛かりなハードウェアを必要とするという課題がある。この課題に対して近年数多くの研究が、電気刺激を用いて触覚を提示することを提案している[1][2][3][4][5]。電気刺激は機械刺激と比べ、感覚提示部の機構が単純であり、かつ電極のみで実現できるという利点がある。

その一方、電気刺激は汗などの皮膚状態や電極との接触状態の影響を受けやすく、安定した感覚提示が難しいという問題がある。一般に普及している電気刺激による筋肉トレーニング器や低周波治療器は、ジェルやゲル状パッドを用いて電極と皮膚の接触状態を安定化させている[6]。また電気触覚ディスプレイにおいては、皮膚インピーダンス情報をリアルタイムにフィードバックすることで感覚の安定化を図る方法が提案されている[7]。つまり従来の安定化手法は、電極と皮膚の接触状態をいかに安定させるかという観点で研究が進められてきたと言える。

これに対して本研究では、図 1 に示す水中電気刺激装置を用いて、水中で電気刺激を与えることで、触覚提示を行うことを提案する。電気風呂における体験から分かるように水中での電気刺激で触覚を生成することは可能である。我々は水中で電気刺激を与えることによって次のような利

点が生じると考えた。

- 電極を直接皮膚に接触させる必要が無いため、電極との接触状態(接触面積の変化)による影響を受けない。
- 皮膚表面の汗や汚れが周囲の水で希釈されるため、時間とともに変化する皮膚表面の状態に影響を受けにくい。

すなわち水中での電気刺激は、空間的にも時間的にも安定な電気刺激を実現しうる可能性があると考えられる。一方で電極と皮膚との距離が離れることから局所的な触覚提示が可能かどうかという懸念がある。

本稿では、提案手法を前腕部に適用し、電気刺激による触覚提示によって局所的な触覚を提示可能であることを検証する。

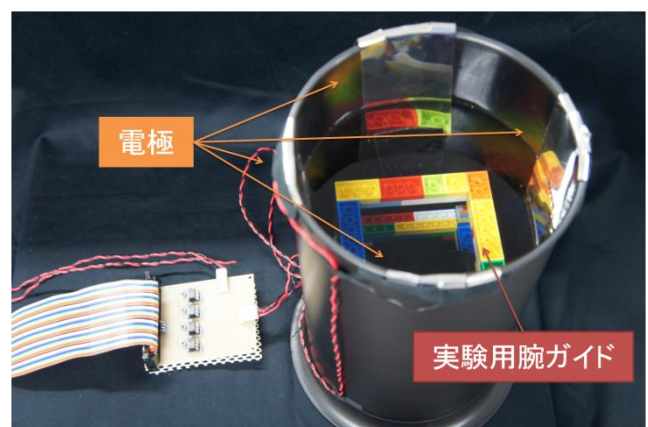


図 1 水中電気刺激装置

Figure 1 Underwater electrical stimulation device

<sup>†1</sup> 電気通信大学

{n.taira, katoh, okazaki, kajimoto}@kaji-lab.jp

<sup>†2</sup> 科学技術振興機構

<sup>†1</sup> The University of Electro-Communications

<sup>†2</sup> Japan Science and Technology Agency (JST)

## 2. システム構成

提案したシステムのシステム構成を図 2 に示す。キーボードによって刺激強度を調節し、PC から  $\pm 10V$  の範囲で設定されたパルス波を出力する。この電圧波形を電圧・電流変換回路によって  $\pm 50mA$  の電流波形とし、触覚提示を行う。

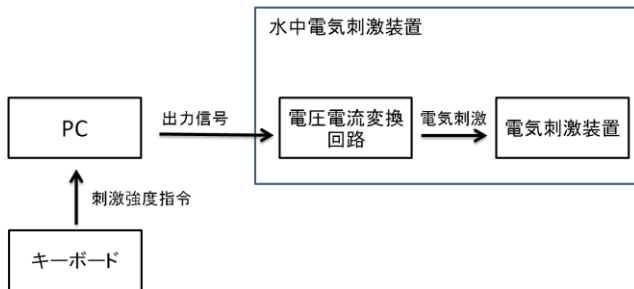


図 2 システム構成  
Figure 2 System configuration

### 2.1 電圧電流変換回路

電圧電流変換回路の回路図を図 3 に示す。オペアンプは新日本無線株式会社製 NJM4580DD を用いた。電流制御された刺激を行うことで電気刺激の安全性を確保している。複数電極を用いる場合、電流の合計値が 0 となるように各電極を電流制御する。

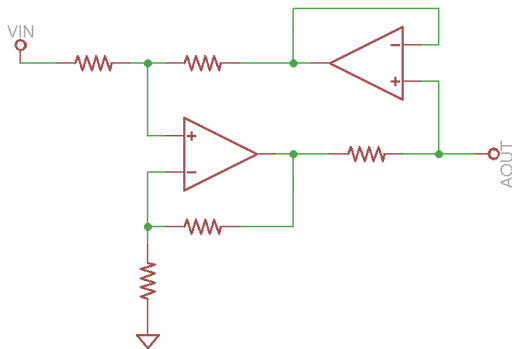


図 3 電圧電流変換回路  
Figure 3 V-I Converter circuit

### 2.2 水中電気刺激装置

水中で電気刺激を行うために水中電気刺激装置を製作した (図 1)。電極はステンレス板 (縦 150mm, 横 60mm) を用い、被験者の腕が沈むことによって縦 60mm 以上が水に浸かっている状態とした。また、腕の位置を制限するためガイドとなる枠を製作し、各電極との距離が一定となるようにした。今回の実験では電極を 4 枚用いた。ユーザの前の電極を A とし、左、後、右の電極をそれぞれ電極 B, C, D と定義する。水中電気刺激装置の基本仕様を表 1 に示す。

表 1 基本仕様

Table 1 Basic specification

電源電圧	$\pm 30V$
出力電圧値	$-30\sim+30V$
出力電流値	$-50\sim+50mA$ 刻み幅 5mA
パルス幅	0~10ms 刻み幅 0.1ms
電極数	4
制御方式	電流制御

## 3. 実験

### 3.1 実験環境

#### 3.1.1 出力波形

水中電気刺激の出力信号として、パルス波を基本波形とするバースト波を用いた (図 4)。パルス波の周期は 15ms, バースト波は 150ms の出力と 350ms の休みを繰り返し、電気刺激への順応を防止した。パルス幅は 0 から 0.1ms 刻みで 10ms まで調節可能とした。

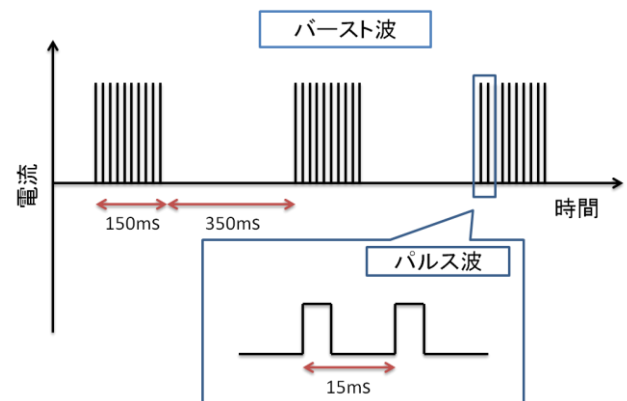


図 4 出力波形

Figure 4 Output waveform

#### 3.1.2 極性および電流経路に関する予備実験

水中電気刺激によって触覚提示を行うのに適した刺激極性を調べるため予備実験を行った。

実験では刺激電極として陽極、陰極の 2 パターンを用意し、それぞれどのような感覚が生じるのかを確かめた。その結果陰極刺激の方が陽極刺激よりも知覚されやすいが、電気刺激提示部位と触覚知覚部位のずれが大きいという、先行研究[8][9][10]と同様の傾向が見られた。また陰極刺激の場合では触覚受容器ではなく筋神経を刺激し、その結果筋肉が駆動してしまうという現象も頻繁に確認された。

この予備実験の結果より、本稿ではより狭い範囲に触覚提示可能と考えられる陽極刺激を刺激電極として用いることとした。また刺激電極ではない陰極刺激を知覚してしまうことを防ぐため、複数電極を用いて陰極刺激を分散し、陽極刺激のみを知覚しやすいようにした (図 5)。これによ

り、任意方向に触覚を提示できるのではないかとこの仮説をたてた。

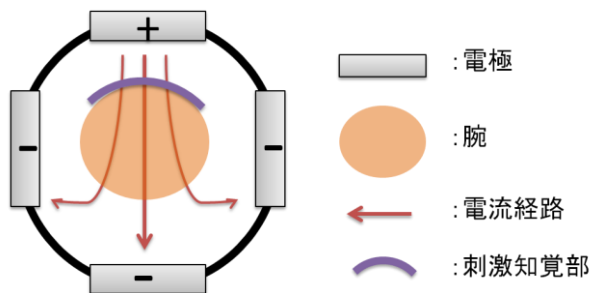


図 5 水中電気刺激による触覚提示 (真上図)

Figure 5 Tactile presentation using underwater electrical stimulation (above chart)

### 3.1.3 出力パターン

本実験では、複数の電極を用いて陰極刺激を分散することにより、任意方向に触覚提示が可能という仮説のもと各電極の電流値を設定した。今回は触覚を提示したい方向の電極から電流を 40mA、その他の電極からの電流を-15mA、-10mA、-15mA とし、出力電流値の合計が 0 となるようにした。この出力パターンは、予備実験で触覚を最も局所的に感じられたパターンである。電極 A から触覚提示する際の各電極の出力波形を図 6 に示す。

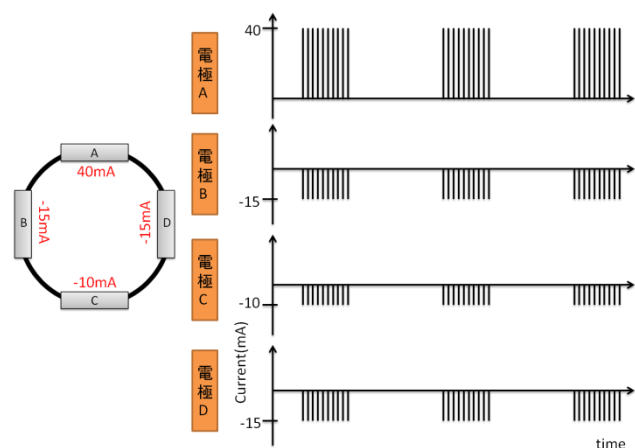


図 6 各電極の出力パターン例

Figure 6 Electrical stimulation pattern

### 3.2 実験手続き

まず被験者には水中電気刺激装置の中に力を抜いた状態で左前腕を入れ静止させた (図 7)。この時、前腕腹側部が電極 D、前腕背側部が電極 B の方を向くよう統一した。その後、電気刺激を提示し、触覚を感じた方向として 4 つのいずれかの電極を回答させた。なお、電気刺激のパルス幅は刺激を提示するごとに、触覚を感じられるまで 0.1ms から 10.0ms の範囲で被験者に調整させた。電気刺激による方

向提示は 1 方向当たり 3 回の計 12 回をランダムに提示した。被験者は 5 名 (男 4 名, 女 1 名, 21-25 歳) であった。

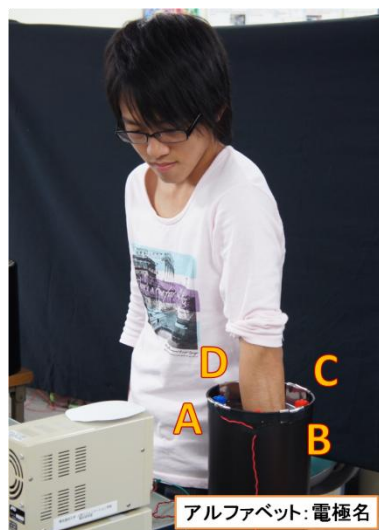


図 7 実験風景

Figure 7 Experimental condition

### 3.3 実験結果

それぞれの陽極刺激の提示方向に対する全被験者の回答結果の割合を表 2 に示す。なお、「刺激を感じない」、「全方向から刺激を感じて方向がわからない」という回答が全回答 60 件中 6 件あったが解析からは除外した。

実験結果より、水中電気刺激を用いて触覚を提示した際に、平均 60% 程度の割合でその方向を識別できることが示された。

内観報告として、「腕の外側で触覚を感じやすかった」、「手の先と腕とで触覚を感じるがあった」、「強くすると筋肉が動いた」、「全体的に刺激を感じた」、「叩かれている感じがした」、「水が振動している感じがした」などの意見があった。

表 2 触覚の提示方向と知覚方向  
Table 2 Direction of tactile presentation and reply

		陽極刺激提示方向			
		A	B	C	D
回答	A	53.3%	0.0%	13.3%	0.0%
	B	6.7%	66.7%	13.3%	6.7%
	C	13.3%	6.7%	66.7%	0.0%
	D	26.7%	20.0%	6.7%	60.0%
計		100.0%	93.3%	100.0%	66.7%

### 4. 考察

どの方向からも 50% 以上の割合で方向を定位できている

ことから、水中電気刺激によってある程度局所的な触覚提示が可能であることが示唆された。

また個人差が大きいものの、前腕腹側面への電気刺激は方向定位しづらい傾向が見られた。これは、前腕腹側面には指を曲げる筋が集中しており、電気刺激で筋の受容器を刺激してしまったためだと考えられる。これにより手全体に触覚を感じてしまい方向定位できなかったのだと考えられる。

一部に見られた触覚刺激を全方向から感じたという内観報告に関しては、触覚提示に用いた陽極刺激だけでなく、陰極刺激による触覚も知覚していたと考えられる。これについては電極数を増やし、陰極刺激をさらに分配することで解決できると考えられる。また、電極数を増やすことで触覚提示する範囲を狭めることができるとも考えられる。

## 5. おわりに

本稿では水中電気刺激による触覚提示の可能性を検証した。従来の電気刺激装置は電極を直接皮膚に接触させることで刺激提示を行っていた。しかし電極と皮膚との接触面の影響を受けやすいという問題があり、安定した触覚提示が困難であった。

そこで本稿では、水中で電気刺激を行うことで電極を直接皮膚に接触させずに触覚提示する方法を提案した。その結果、水中電気刺激によって触覚提示を行い、その触覚刺激の方向を知覚できることが示された。

今後は電極数を増やし、提示する触覚の空間分解能の向上やさらなる安定化を目指す。また、水中で魚に触られる感覚の再現など、水中でのエンタテインメントへの応用を検討する。

## 参考文献

- 1) Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S., Inami, M.: Smarttouch: Electric skin to touch the untouchable. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(1), 36-43 (2004).
- 2) Tamaki, E., & Rekimoto, J.: PossessedHand. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH Emerging Technologies Session*, page16 (2012).
- 3) Eto, H., Matoba, Y., Sato, T., Fukuchi, K., Koike, H.: Biri-biri: pressure-sensitive touch interface with electrical stimulation. In *Proceedings of ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 1-1 (2011).
- 4) 中村裕美, & 宮下芳明. 電気味覚を活用した味覚の増幅と拡張. *インタラクシオン*, 461-464 (2011).
- 5) 藤田. 電気刺激による筋収縮を利用した力覚提示法の検討. 第11回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, 329-334 (1995).
- 6) <http://www.healthcare.omron.co.jp/product/basic/82>
- 7) Kajimoto, H.: Electro-tactile Display with Real-time Impedance Feedback using Pulse Width Modulation. *IEEE Trans. on Haptics*, 5(2) 184-188 (2012).
- 8) Kaczmarek, K. A., Tyler, M. E.: Electrotactile haptic display on the fingertips: Preliminary results. In *Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 940-941 (1994).
- 9) Higashiyama, A., Rollman, G. B.: Perceived locus and intensity of electrocutaneous stimulation. *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, 38(7), 679-686 (1991).
- 10) Yoshimoto, S., Matsuzaki, N., Kuroda, Y., Imura, M., Oshiro, O.: STELET Display: Tactile Augmentation with Handheld Tool. In *Proceedings of the 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, page.168, Toyonaka (2011).