

水中での電気刺激による触覚提示手法

Tactile Presentation Method using Underwater Electrical Stimulation

○中村たいら（電通大） 加藤愛実（電通大） 岡崎龍太（電通大）
蜂須拓（電通大，日本学術振興会） 佐藤未知（電通大，日本学術振興会）
梶本裕之（電通大，科学技術振興機構）

Taira NAKAMURA, The University of Electro-Communications, n.taira@kaji-lab.jp
Manami KATOH, The University of Electro-Communications, kato@kaji-lab.jp
Michi SATO, The University of Electro-Communications, michi@kaji-lab.jp
Taku HACHISU, The University of Electro-Communications, hachisu@kaji-lab.jp
Ryuta OKAZAKI, The University of Electro-Communications, okazaki@kaji-lab.jp
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp

This paper presents tactile presentation method using underwater electrical stimulation, primary for the purpose of in-a-bath entertainment. As a first step for underwater electrical stimulation, we investigated localization and effect of polarity of the stimulation. We found that in contrast to previous studies, anodic stimulation elicited stronger sensation than cathodic stimulation in underwater electrical stimulation to the forearm. Furthermore, we found that the direction and rotation can be presented by underwater electrical stimulation.

Key Words: Electrical stimulation, Haptic device, Human interface, Subaqueous stimulation

1. 諸言

我々の多くにとって入浴は日常的な習慣である。入浴時間は多くの場合精神的ストレスから解放される時間でもあり、本を読んだり音楽を聴いたりする人もいる。耐水性のタブレット、埋め込み型のディスプレイ等も開発され、入浴時映画等を見ることも可能である。エンタテインメントに関する研究分野では、風呂でDJのスクラッチ演奏をする[1]、ビデオゲームをする[2]等の風呂場エンタテインメントが提案されている。

こうした従来の風呂場エンタテインメントは全て視聴覚に対するアプローチである。これに対して我々は風呂場エンタテインメントに触覚を付与することで、新たな体験を創出しようと考えた。

従来研究においては臨場感向上のため全身に触覚提示するという試みはあるものの、これらは水中での利用については考えられていない[3][4]。Iwamotoらの超音波を用いた触覚提示手法[5]は水中で触覚提示を行うものであるが、体内に超音波が透過することを防ぐために体表を布等で覆う必要があり、風呂という状況に適したものとはいえない。

我々は電気刺激を用いた水中での触覚提示手法を提案する。電気刺激は、小型、安価、エネルギー変換効率がよいといった理由から様々な部位への触覚提示装置に用いられている[6][7][8]。また水中での電気刺激は、マッサージ効果を狙った電気風呂[9]等で用いられており、ビリビリとした触覚が生起することは知られている。我々はこの水中電気刺激を風呂場エンタテインメントに利用することを考えた。

本稿では風呂場エンタテインメントのための水中電気刺激の第一歩として、刺激の局在性と極性による影響について報告する。

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(Fig 1)。装置は水を入れるための容器、制御回路、8枚の電極で構成される。電極はそれぞれ独立に電流制御されてい

る。電極には8枚のステンレス板（高さ150mm，幅30mm）を用い、直径100mmの円周上に等間隔に配置した。

提案したシステムのシステム構成をFig 2に示す。マイクロコントローラ（mbed, NCP PC 1768, NXP Semiconductors）とオフセット回路によって電圧波形を出力する。この電圧波形を電圧電流変換回路によって $\pm 50\text{mA}$ の範囲の電流波形に変換し、水中の電極から出力した。電圧電流変換回路には高電圧オペアンプ（OPA552, Texas Instruments）を用いた。

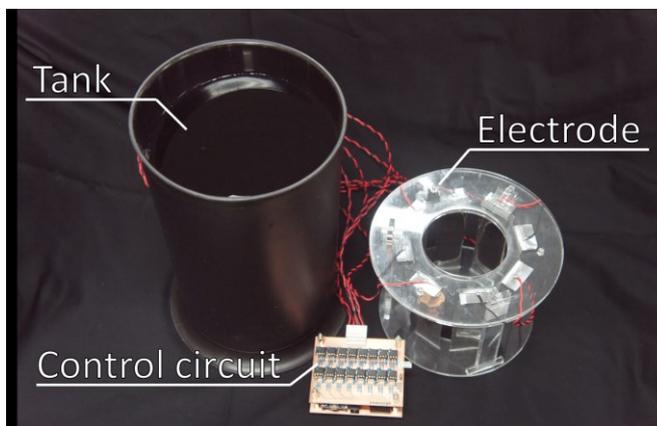


Fig 1 Prototype system

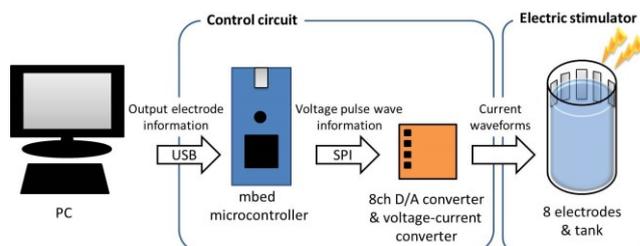


Fig 2 System configuration

3. 実験

水中電気刺激による触覚の局在性、刺激の極性による違いを調べるため実験を行った。

3.1. 実験環境

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 Fig 3)。パルス幅は 2ms, パルス周期は 35ms とした。バースト波は 700ms の出力と 1000ms の休みを繰り返し、電気刺激への順応を防止した。電流量は 50mA に固定した。

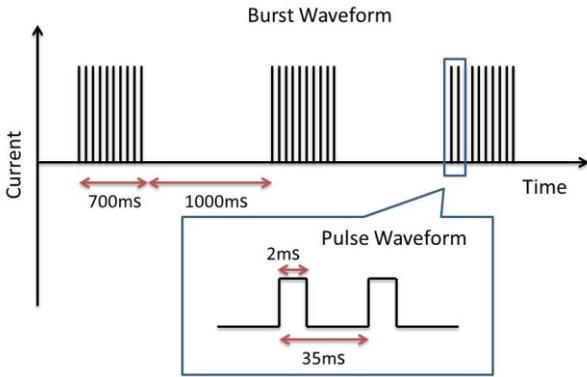


Fig 3 Output waveform (anodic stimulation case)

刺激電極は 1 つとし、残りの 7 つの電極で電流を分散して回収した。電気刺激の極性による影響を調べるため、刺激電流は 50mA のパルス (陽極刺激) と -50mA のパルス (陰極刺激) を用意した。この時残りの 7 つの電極は -7.14mA または 7.14mA を出力とし、電流の合計が常に 0 となるようにした ($50/7=7.14$) (図 Fig 4)。

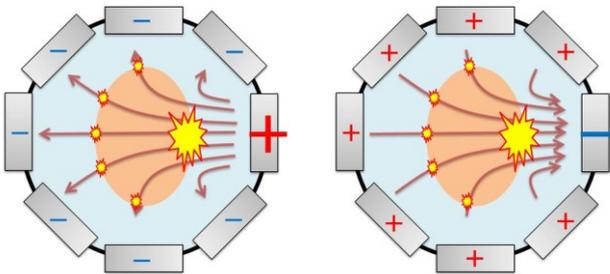


Fig 4 Left: Anodic stimulation

Right: Cathodic stimulation

3.2. 実験手続き

実験は方向識別実験と回転方向識別実験の 2 つを行った。まず被験者には左前腕を水中電気刺激装置の中に入れ、ハンドルを握った状態で静止させた。この時、前腕腹側部が電極 C、前腕背側部が電極 G の方を向くよう統一した (図 Fig 5)。

方向識別実験では、被験者に刺激を感じた方向を、電極のある 8 方向と「何も感じない」の 9 択から回答させた。方向提示は 1 方向あたり 5 回の計 40 回を 1 セットとし、「陽極刺激」、「陰極刺激」の 2 セットを行った。

回転方向識別実験では、刺激電極を順番に切り替えることで回転を提示した。この時のバースト幅は 177ms, 休止時間は 353ms である。被験者には回転方向を、右、左、「何も感じな

い」の 3 択から回答させた。方向提示は 1 方向あたり 5 回の計 10 回を 1 セットとし、「陽極刺激」、「陰極刺激」の 2 セットを行った。刺激の提示順は全てランダムである。被験者は 6 名 (男性, 21-29 歳) であった。



Fig 5 Overview of experiment

3.3. 実験結果

陽極刺激の提示方向に対する全被験者の回答を表 Table 1 に、陰極刺激の回答結果を表 Table 2 に示す。また、陽極刺激、陰極刺激に対する回転方向の回答結果を表 Table 3 に示す。

実験結果より、陽極刺激の方が陰極刺激と比べ正答率が高いことがわかった。陰極刺激の場合「何も感じない」という回答が大部分であったことから、電気刺激の極性によって触覚の知覚閾値が異なることが示唆された。陽極刺激の場合 8 方向識別実験の平均正答率は 47.9% だった。提示電極の両脇の電極も正解とした場合の平均正答率は 81.3% だった。回転方向識別の正答率は 68.3% だった。

内観報告として、「振動を感じた」、「トントンと叩かれている感じがした」、「筋肉が動いた」、「手の部分で感じていた」などの意見があった。

Table 1 Confusion matrix between the participants' answers and actually displayed directions rate (anodic stimulation)

Answered \ Displayed	A	B	C	D	E	F	G	H	nothing
A	40.0%	10.0%	0.0%	3.3%	6.7%	0.0%	0.0%	20.0%	20.0%
B	6.7%	70.0%	16.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.7%
C	6.7%	26.7%	26.7%	16.7%	0.0%	3.3%	10.0%	0.0%	10.0%
D	0.0%	3.3%	6.7%	40.0%	23.3%	0.0%	0.0%	0.0%	26.7%
E	3.3%	0.0%	3.3%	13.3%	53.3%	13.3%	6.7%	0.0%	6.7%
F	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	33.3%	60.0%	3.3%	0.0%	3.3%
G	0.0%	16.7%	0.0%	0.0%	3.3%	20.0%	50.0%	10.0%	0.0%
H	23.3%	3.3%	0.0%	3.3%	0.0%	0.0%	23.3%	43.3%	3.3%

Table 2 Confusion matrix between the participants' answers and actually displayed directions rate (cathodic stimulation)

Answered \ Displayed	A	B	C	D	E	F	G	H	nothing
A	20.0%	6.7%	3.3%	0.0%	0.0%	3.3%	0.0%	0.0%	66.7%
B	0.0%	16.7%	3.3%	3.3%	6.7%	0.0%	6.7%	3.3%	60.0%
C	6.7%	6.7%	3.3%	3.3%	0.0%	6.7%	0.0%	0.0%	73.3%
D	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.7%	0.0%	6.7%	6.7%	80.0%
E	0.0%	0.0%	6.7%	3.3%	3.3%	13.3%	3.3%	0.0%	70.0%
F	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.3%	23.3%	0.0%	0.0%	73.3%
G	0.0%	0.0%	3.3%	3.3%	3.3%	0.0%	3.3%	3.3%	83.3%
H	3.3%	3.3%	6.7%	0.0%	0.0%	6.7%	13.3%	3.3%	63.3%

Table 3 Confusion matrix between the participants' answers and actually displayed rotate directions rate (anodic and cathodic stimulation)

		Answered			
		Right	Left	nothing	
Displayed	Right	70.0%	10.0%	20.0%	
	Left	16.7%	66.7%	16.7%	
		Anodic	70.0%	10.0%	20.0%
		Cathodic	10.0%	6.7%	83.3%
		Anodic	16.7%	66.7%	16.7%
		Cathodic	10.0%	13.3%	76.7%

4. 考察

多くの電気触覚刺激では、イオン化の問題を防ぐため正負のパルス(biphasic pulse)を用いており、その場合刺激の極性と刺激閾値の関係は不明であるが、刺激の極性と感覚閾値との関係を議論した先行研究も数多く存在する。

Higashiyamaらは腹部、前腕等において電気刺激を行い、陰極刺激は陽極刺激と比べ触覚の閾値が低いことを発見した[10]。一方でKaczmarekらは指先への電気触覚刺激においては陽極刺激の方が閾値が低いことを発見した[11]。この知見はサルの指先への電気刺激においても確認されている[12]。また、Kajimotoらは陽極刺激が触覚受容器の一種であるマイスナー小体を刺激し、陰極刺激がメルケル細胞を刺激するという、極性によって異なる感覚受容器を刺激している可能性を示唆している[13]。つまりこれまでの研究では、指先以外のほとんどの部位で陰極刺激の方が陽極刺激よりも閾値が低いこと、および指先では例外的に陽極刺激の方が閾値が低くなることが確認されてきたと言える。

しかし今回の結果はこれまでの研究とは対照的に、前腕に対する水中電気刺激では陽極刺激の方が陰極刺激よりも閾値が低いことを示している。陰極刺激における回答の大半が「何も感じない」だったことから、感覚の質ではなく感覚の閾値による結果だと考えられる。指先は他の身体の部位に比べ皮膚、特に角質層が特異的に厚いことが知られている。もしこの厚い角質層が刺激極性に対する閾値変化を生み出すと仮定すれば、今回の水中電気刺激では、水が厚い皮膚と同様の役割を果たしたと想像できる。皮膚の厚みあるいは水の層の具体的な役割については今後解明する必要がある。

陽極刺激においては、多くの被験者が刺激方向と回転方向について回答できていた。しかし平均正答率はそれほど高くはない結果となった。これは前腕の部位によっても感覚閾値が異なるためだと考えられる。今回は電流量を固定したが、将来的には電極ごとに刺激強度を調整する必要があると考える。

5. 結言

本稿では風呂場エンタテインメントの拡張として触覚提示を行うことを提案し、その手法として水中電気刺激を用いることを検討した。その第一歩として、水中電気刺激の局在性と極性による影響を調査した結果、水中での電気刺激では陽極刺激の方が陰極刺激よりも知覚しやすいことが示唆された。また、陽極刺激においてはその触覚刺激の方向、回転方向を識別できることが示された。

今後はリアルタイム位置センシングに応じた電気刺激の強度調節を目指す。また、映像や音と組み合わせることでお風呂場エンタテインメントのアプリケーション開発を目指す。

文 献

- [1] Hirai, S., Sakakibara, Y., Hayakawa, S. "Bathcratch: touch and sound-based DJ controller implemented on a bathtub." *Advances in Computer Entertainment*, pp. 44-56. Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [2] Koike, H., Matoba, Y., Takahashi, Y. "AquaTop display: interactive water surface for viewing and manipulating information in a bathroom." *Proceedings of the 2013 ACM international conference on Interactive tabletops and surfaces*, pp. 155-164., ACM, 2013
- [3] Lemmens, P., Crompvoets, F., Brokken, D., van den Eerenbeemd, J., DeVries, G. J. "A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing." *EuroHaptics conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2009*. Third Joint pp. 7-12. IEEE, 2009
- [4] Karam, M., Branje, C., Nespoli, G., Thompson, N., Russo, F. A., Fels, D. I. "The emoti-chair: an interactive tactile music exhibit." *CHI'10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.3069-3074. ACM, 2010
- [5] Iwamoto, T., Tatzono, M., Shinoda, H. "Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound." *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, pp.504-513. Springer Berlin Heidelberg, 2008
- [6] Bach-y-Rita, P., Kaczmarek, K. A., Tyler, M. E., Garcia-Lara, J. "From perception with a 49-point electro-tactile stimulus array on the tongue." *A technical note. Journal of reha-bilitation research and development*, 35, 427-430, 1998
- [7] Kajimoto, H. "Skeletouch: transparent electro-tactile display for mobile surfaces." *SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, p.21. ACM, 2012
- [8] Collins, C. C. "Tactile television-mechanical and electrical image projection." *Man-Machine Systems, IEEE Transactions on*, 11.1, pp.65-71, 1970
- [9] Howard, M. "Electric bath." *US1193018A*. (1916. 08. 01)
- [10] Higashiyama, A., Rollman, G. B. "Perceived locus and intensity of electrocutaneous stimulation." *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 679-686, 1991
- [11] Kaczmarek, K. A., Tyler, M. E., Bach-y-Rita, P. "Electrotactile haptic display on the fingertips: Preliminary results." *Engineering in Medicine and Biology Society, 1994. Engineering Advances: New Opportunities for Biomedical Engineers. Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE*, p. 940-941, 1994
- [12] Kaczmarek, K. A., Tyler, M. E., Brisben, A. J., Johnson, K. O. "The afferent neural response to electro-tactile stimuli: preliminary results." *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8.2, pp. 268-270, 2000
- [13] Kajimoto, H., Kawakami, N., Maeda, T., Tachi, S. "Tactile feeling display using functional electrical stimulation." *Proc. 1999 ICAT*, p. 133, 1999