

手部触覚による奥行き情報の提示

Phantom Sensation inside the Hand for Haptization of Depth Cue in the hand

石井明日香¹⁾, 佐藤未知¹⁾³⁾, 福嶋政期¹⁾³⁾, 古川正紘²⁾, 梶本裕之¹⁾⁴⁾

Asuka ISHI, Michi SATO, Shogo FUKUSHIMA, Masahiro FURUKAWA and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学大学院

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {asuka, michi, shogo, kajimoto}@kaji-lab.jp)

2) 慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

(〒223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 1-4-1, m.furukawa@kmd.keio.ac.jp)

3) 日本学術振興会特別研究員

4) 科学技術振興機構さきがけ

Abstract: Our aim is the haptization of 3D visual images, In order to achieve this goal, we put an eye on a feeling that passes through the body, and proposed to present the depth haptic sensation "inside" of the hand so as to match the depth of a 3D visual image. To provide haptic sensation insight of the body, we utilized Phantom Sensation (PhS). In this paper we attached two vibrators on the palm and the dorsal part of the hand, and investigated if PhS arise inside of the hand by simultaneous stimulation. We also summarized frequency and temporal characteristics of PhS inside of the hand.

Key Words: Phantom Sensation, Funneling Illusion, Palm, Haptics.

1. はじめに

触覚提示に関する研究は近年、特にリアルな触感の再現を中心に行われている。例えば、テクスチャ感覚[1][2]や柔らかさ感[3]、凹凸感覚[4]など様々である。このような触覚提示は、リアルな世界の再構成を目指すバーチャルリアリティ技術の一種であるが、通常触覚は皮膚表面にとっては 2 次元の刺激パターンに過ぎないので、そのままでは 3 次元の実世界を提示することは出来ない。通常、3 次元の触覚世界を再現する方法としては、PHANToM[5]やSPIDAR[6]などの力覚提示装置を用いる。ユーザの動きに伴う空間座標の変化に応じた力覚提示を行い、さらには力覚提示装置に触覚提示装置を搭載すれば、3 次元の触覚世界がユーザの脳内で再構成される。つまり一般的に立体的な触覚世界を把握するためには、ユーザの能動的な運動が必要不可欠であるといえる。

これに対し我々は、ユーザの運動を必要とすることなく、3 次元の触覚情報を提示するための手法を提案する。具体的には、図 1 のようにオブジェクトが手の中を上下に貫通する感覚を提示することで、触覚的な奥行き感提示を実現する。体の内部への触覚像の生起について、大島らは触覚の仮現運動を利用することで腹部を貫通する感覚の提示を行っている[7][8]。しかしながら、触覚の仮現運動を利用した大島らの手法では、貫通感覚を体の内部に定位させることはできない。

仮現運動が瞬間的な移動感覚であるのに対して、ファントムセンセーション(以下、PhS)という錯覚が知られている。PhS は Bekesy によって発見された錯触現象であり、同側皮膚上の 2 点を同時に刺激することで、その間に触覚像を知覚する[9]。また、PhS の生起位置は 2 つの振動刺激の強度の強い側に寄るという特性があり、この強度比を変化させることで触覚像の位置を変えることができる。またこれによって、触覚像の移動を提示することも可能である[10][11]。



図 1 奥行き感の可触化イメージ

久米らは画面の奥行き位置を人指し指上の PhS によって提示した結果、3次元空間での作業効率が向上したことを報告している[12]。したがって、PhS によって奥行き情報を提示することは有効な方法であると考えられる。しかしながら、今までに体内で PhS が生起するという報告例はなかった。

そこで我々は PhS が体の内部に生起するか実験により確認した。本稿では手部内に触覚像が生起することを確認する実験を行い、予備実験において手の内部に PhS のような現象が起きることを確認した。この現象が PhS と同様の特性を持つかどうかを、振動周波数と振動提示時間を変えた実験によって確認した。

2. 実験

実験は手部以外に、従来の PhS 研究でよく用いられていた前腕部での刺激も行った。従来の PhS の実験と今回提案する手部内における PhS を比較することにより、これらの現象が同様の機序で生起しているのか確認するためである。被験者は手部と前腕部の実験を共に行い、それぞれ別の日に行った。また、図 2 のように手部での実験を先に行うグループと、前腕部で先に実験を行うグループの 2 つに分けた。実験条件は、振動周波数と振動提示時間を変えたものを用意した。実験前に被験者は 2 つの振動子から受ける刺激の主観的強度が同じになるように調整した。

PhS を最も明確に知覚させる振動周波数は今まで明確に調べられていないが、従来の PhS の実験では 200Hz や 300Hz の振動を用いていることが多く、PhS の明確さが振動周波数に依存することも考えられる。そこで、PhS の明確さと振動周波数の関係を調べた。また、振動提示時間については加藤らが矩形波を用いた実験で 100ms 以下の短時間において PhS を明確に知覚出来ると報告している[13]。従って、振動継続時間と PhS の明確さの関係も同時に調べた。

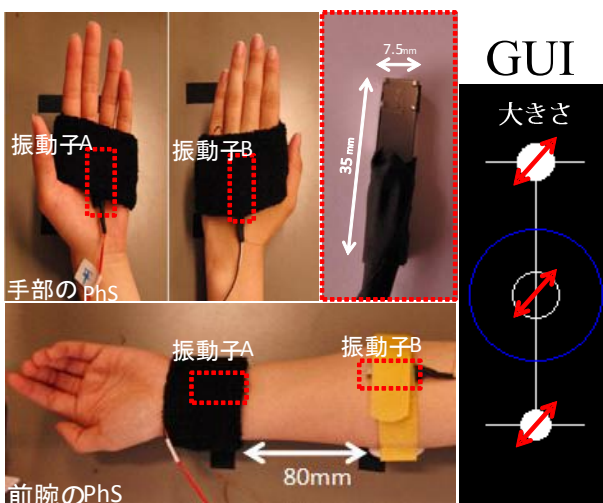


図 2 実験装置(左)と実験で用いた GUI(右)

2.1 実験装置

作成した装置を図 2 に、システム構成を図 3 に示す。パソコンのスピーカ出力からオーディオアンプ(Rasteme Systems, RSDA202, 20W)に接続した。振動子はアルプス社製の Force Reactor AF series を使用した。また、パソコンから出力する信号は Puredata[14] で作成した。

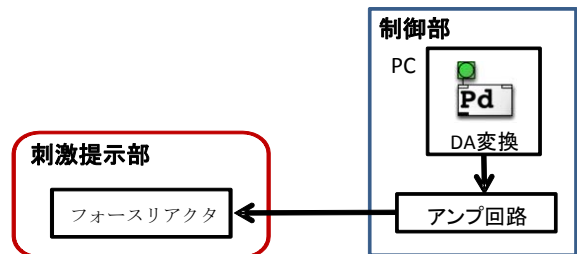


図 3 システム構成

2.2 実験条件

振動周波数は振動を知覚する受容器(マイスナー小体、パチニ小体)の共振特性に合わせ、またその受容器が共に活動する周波数として、30Hz、90Hz、240Hz の 3 条件を用意した。また、振動提示時間は最も短い時間として 30Hz が一度だけ入る 33ms を用い、その 3 倍の 100ms、さらに 3 倍の 300ms の 3 条件を用意した。実験で用いる刺激パターンは表 1 に示す 9 パタンとなる。図 4 に刺激パターンを提示する際の信号の例を示す。

表 1 実験で用いた刺激パターン

#	周波数[Hz]	継続時間[ms]
1	30	33
2	30	100
3	30	300
4	90	33
5	90	100
6	90	300
7	240	33
8	240	100
9	240	300

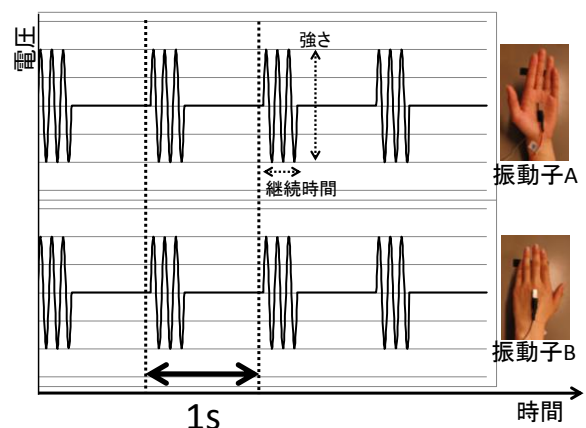


図 4 2 つの振動子の駆動電圧の例

2.3 手順

被験者は健康な 20 代の男女 8 名(男性 5 名, 女性 3 名)で行った。実験は前腕で PhS の実験を先に行うグループ(被験者 A~D)と, 手部で PhS の実験を先に行うグループ(被験者 E~H)の 2 つに分けた。いずれの実験でも, 被験者はまず 2 つの振動刺激の感覚強度を調整した。

感覚強度は表 1 の #1 の刺激を手の平に 4V で提示した場合を基準刺激として, それ以外のすべての刺激(手の平に #2~#9, 手の甲に #1~#9)の感覚強度が同じになるように調整させた。刺激は各 2 回ずつ調整させ, この平均値を実験で使用した。前腕で実験を行う場合は手首側に #1 の刺激を 4V で提示した場合を基準刺激とし同様に調整させた。

次にこの状態で, PhS の位置や感覚の明確さを回答させる本実験を行った。PhS の感覚は図 2 の右側に示した GUI を用いて回答させた。図の白丸は実刺激の大きさで, 黒丸は PhS とし, それぞれについて刺激の大きさを回答させた。また, PhS については位置も回答させた。また, PhS の明確さは感じない(0), わずかに感じる(1), 弱く感じる(2), 感じる(3), やや強く感じる(4), 強く感じる(5)の 6 段階で評価させた。

3. 結果

結果を解析したところ, 被験者 B と G は前腕部での PhS をほとんど知覚出来なかったため, 結果から除外した。また, 先に行った実験が結果に影響を及ぼすとして, 2 つのグループに分けたが, このグループ間で結果の差はなかった。

触覚像の振動周波数/時間による明確さ得点の平均値を表 2 に示す。前腕部における PhS で最も触覚像を知覚したのは, 240Hz で 33ms のときであった。これに対し, 手部における PhS は 90Hz 以下の場合に触覚像が明確となり, 時間による差は見られなかった。

表 2 PhS の明確さ得点

前腕のPhS			
継続時間 [ms]	周波数[Hz]		
	30	90	240
33	1.78	2.00	2.28
100	1.83	1.44	1.44
300	1.72	1.67	1.00
手部のPhS			
継続時間 [ms]	周波数[Hz]		
	30	90	240
33	1.39	1.39	0.67
100	1.33	1.50	0.89
300	1.44	1.22	0.78

次に手部内に PhS を知覚した位置を図 5 に示す。横軸は刺激パターンを示し, 縦軸は 0 が手の甲側を 1 が手の平側を表す。この結果から, PhS は手の平と手の甲のほぼ中心に生じたことがわかった。

図 6 に被験者毎の前腕部と手部の明確さの相関を示す。ここでは被験者ごとの全試行の明確さの平均をプロットした。このふたつには明確な相関が観察され ($R^2=0.76$), 前腕部で PhS を明確に知覚した被験者ほど手部で PhS を明確に知覚したと言える。

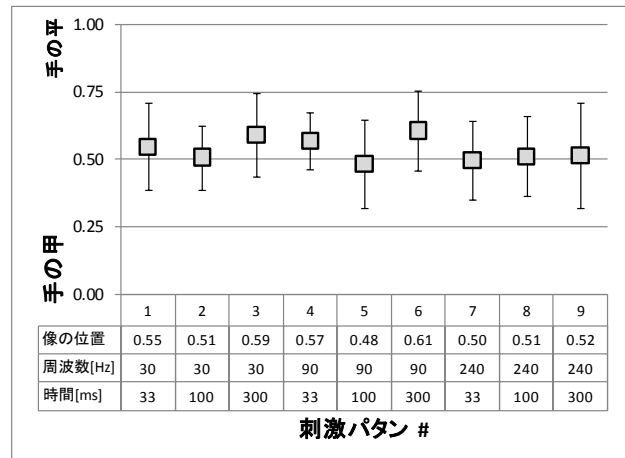


図 5 触覚像が生じた位置

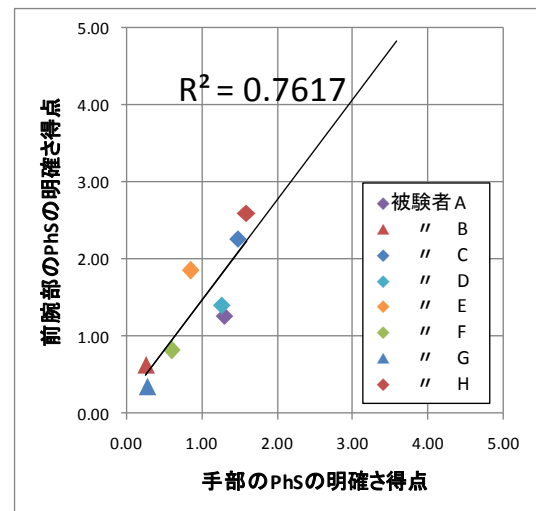


図 6 被験者毎の PhS の明確さ得点の平均

4. 考察

前腕の PhS 実験の結果は, 従来の報告どおり, 高い周波数, また短い振動提示時間の場合に明確となった[9][13]。したがって, 本装置で前腕に提示した PhS は確かに従来から知られていた錯覚現象であり, 被験者は実験中に「正しい PhS」を認識できていたと言える。

一方で, 手部での結果と前腕部での PhS の結果を比較すると同じ傾向と異なった傾向とがあることがわかった。まず同じ傾向となったのは, PhS の生起する位置と被験者間の傾向である。2 つの刺激の感覚強度が同じ時, 通常の PhS は中心に生起することが知られている。今回の手部内の PhS は図 5 より中心付近に生起していたことがわかる。また, 図 6 より, 前腕の PhS と手部の PhS は被験者間による触覚像の明確さに知覚において, 強い相関があった。

以上の類似性は, 前腕(通常)の PhS と今回提案する手部内の PhS が同様の機序に基づいている可能性を示唆し

ている。

次に異なった傾向となったのは、触覚像を明確に感じる条件である。前腕の PhS が振動周波数 240Hz で最も明確に感じられ、刺激時間の影響も受けたのに対し、手部内の PhS は振動周波数が 90Hz 以下の場合に明確に知覚され、時間の差による影響は見られなかった。

PhS の明確さが異なった理由として振動に応答した受容器の違いが考えられる。前腕部で触覚像を明確に感じた高周波はパチニ小体が特に関与していると考えられるが、一方でパチニ小体は受容野が広いことでも知られている [15]。受容野が広いと言うことは、脳にとって刺激部位を同定しにくいことも意味しているため、PhS のような錯覚を生じる余地が生まれやすいと推測できる。

これに対して、手の平と手の甲に振動を提示した場合、物理的に振動が皮膚に伝わってしまい、パチニ小体のように受容野が広い場合にはそもそも 2 つの振動を分けて知覚するのが困難だったと考えられる。2 点の刺激を感じられなければ、PhS が生じなかったと考えられ、また、我々の実験では被験者は実刺激と PhS を分離して回答することは 240Hz では難しく、回答することが出来なかった可能性がある。これに対して、90Hz 以下で応答するマイスナー小体は受容野が狭いため、手の甲、手の平の振動をそれぞれ感じることができ、このためにこれらの実刺激とは異なる触覚像として PhS も知覚出来たという可能性が考えられる。

5. おわりに

本稿では 3 次元的な皮膚感覚の提示という新たな触覚提示技術を確認するために、手の平、手の甲への刺激によって手部内に PhS を生じさせるという手法を提案した。提案手法で生じた手部内の PhS について、振動周波数と振動時間の関係を調べた。

実験は前腕部と手部内の PhS の実験を行い、次の 3 つの知見を得た。(1) 手部内で PhS ないしそれに類する錯覚像が確かに生起すること、(2) それを知覚する位置と、被験者間の傾向は従来の PhS で知られている性質に近いこと(3) ただし、振動周波数と振動時間に対する PhS の周波数/刺激時間依存性は従来の前腕部で知られていた PhS の性質とは違い低周波で知覚される傾向があること、である。これらは奥行き感のある触覚という新たな応用にとって基礎的な知見である。

今後はこれらの知見を基に、視覚情報と合わせたエンタテインメントシステムなどを作成していく。

参考文献

[1] Winfield, L., Glassmire, J., Colgate, J. E., Peshkin, M., “TPaD: Tactile Pattern Display Through Variable Friction Reduction,” Proc. World Haptics Conf., pp.421-426, 2007.
[2] Bau, B. O., Poupyrev, I., Israr, A., Harrison, C.,

“Tesla-Touch: Electro-vibration for Touch Surfaces,” Proc. UIST '10, 2010.

- [3] 池田義明, 藤田欣也, “指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示,” Vol.9, No.2, pp.187-194, 2004.
[4] 山本晃生, 石井利樹, 樋口俊郎, “摩擦力制御を用いた静電皮膚感覚ディスプレイ視覚情報との融合,” SICE SI 講演論文集, 2, pp. 401-402, 2002.
[5] Massie T. H., Salisbury J. K., “The PHANTOM Haptic Interface, A Device for Probing Virtual Objects,” Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 1994.
[6] Murayama, J., Luo, Y., Akahane, K., Hasegawa, S., Sato, M., “A haptic interface for two-handed 6DOF manipulation: SPIDAR - G&G system,” IEICE Trans, on Information and Systems, Vol.E87-D, No.6, pp.1415-1421, 2004.
[7] 渡邊淳司, 福沢恭, 梶本裕之, 安藤英由樹, “腹部を通過する仮現運動を利用した貫通感覚提示,” 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.10, pp.3542-3545, 2008.
[8] Ooshima, S., Fukuzawa, Y., Hashimoto, Y., Ando, H., Watanabe, J., Kajimoto, H., “/ed (slashed) - Gut Feelings when Being Cut and Pierced,” Proc. ACM SIGGRAPH, '08.
[9] von Békésy, G., “Neural Funneling Along the Skin and Between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea,” J. Acoust, Soc, Am. 31, 1236-1249, 1959.
[10] Barghout, A. Jongeun Cha, El Saddik, A. Kammerl, J., Steinbach, E., “Spatial Resolution of Vibrotactile Perception on the Human Forearm when exploiting Funneling Illusion Haptic,” Audio visual Environments and Games, 2009.
[11] J. Cha, L. Rahal and A. El Saddik, “A Pilot Study on Simulating Continuous Sensation with Two Vibrating Motors,” Proc. IEEE Int. Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games, pp. 143-147, 2008.
[12] 久米祐一郎, 山本慶一, 山田貴幸, 磯部正利, 津田元久, 畑田豊彦, “3 次元仮想空間内作業におけるファントムセンセーションを用いた奥行き情報提示効果,” 映像情報メディア学会誌, 53 巻, 9 号, pp.1308-1314, 1999.
[13] Kato, H., Hashimoto, Y., Kajimoto, H., “Basic Properties of Phantom Sensation for Practical Haptic Applications,” EuroHaptics, 2010.
[14] Puckette, M. S., “Pure data,” Proc. of the International Computer Music Conf., pp.224-227, 1997.
[15] Johansson, R.S & Vallbo, A. B., “Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand,” Trends in Neuro-science, 6, 27-32, 1983.