



空中超音波触覚提示による快感覚の誘起

Induction of Pleasant Feeling by Airborne Ultrasound Tactile Display

津本海¹⁾, 松本大知¹⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

Kai TSUMOTO, Daichi MATSUMOTO, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, tsumoto@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 本研究では空中超音波を用いて前腕部に非接触な移動刺激を提示することで、快感覚の誘起を試みた。ヒトの前腕部に存在する C 触覚線維は快感覚の伝達に深く関与する。また移動する接触刺激に対する C 触覚線維の反応特性はすでに明らかにされており、比較的遅くて弱い移動刺激に最も反応することがわかっている。この事実をもとに、非接触な触覚提示を用いて被験者実験を行ったところ、C 触覚線維の反応特性に類似した傾向が得られた。

キーワード: C 触覚線維, 快感覚, 空中超音波, 非接触

1. はじめに

触覚は一般に物体の材質や温度といった物理的な特性に加え、情動的な感覚を伝達する側面を持ち合わせている。特に心地よさや共感といった親密な感情の表現には表情やジェスチャーのような視覚情報よりも肌の接触により生じる触覚刺激の方が重要な役割を担っている[1][2]。この情動の中でも快感覚を触覚提示により人工的に誘起できれば、VR 分野において広範な応用が考えられる。

快感覚の誘起に強く関連する皮膚機械受容器として、有毛部に存在する C 触覚線維が知られている[3]。C 触覚線維は皮膚表面上を特定の速度で移動する刺激に対しよく発火し、その発火により快感覚が生じることが活動電位計測により判明している。また、その刺激閾は 2.5 mN 程度と低く、筆等を軽く皮膚に当ててストロークするような刺激に対し生じる快感覚であるという主観的評価が得られている。以上のことから、C 触覚線維を選択的に刺激することにより、特定の快感覚を誘起できる可能性がある。

C 触覚線維を刺激することにより快感覚を誘起するシステムとして接触式のデバイスが提案されており、前腕部に複数配置された振動子の駆動タイミングによる感覚の強さを評価している[4]。このとき振動子間では刺激点の仮現運動が生じていると考えられるが、より直接的に移動刺激を提示可能なデバイスとして AUTD (Airborne ultrasound tactile display) がある[5]。AUTD は集束空中超音波を用いて非接触で遠隔から皮膚表面をスポット刺激することが可能である。また、AUTD を用いた刺激では 1 kHz 程度までの広帯域な振動刺激を印加可能であり、刺

激の自由度が高いという特徴がある。

本稿では、AUTD により前腕部を刺激することで快感覚を人工的に誘起する可能性を、複数の要因に対し検討する。AUTD を使用することにより、非接触かつ高い自由度で皮膚表面をスポット刺激でき、また接触力や接触子の温度による影響を排除することができる。本研究では移動刺激により生じる快感覚の、刺激移動速度、振動周波数、刺激範囲に対する依存性を調査する。AUTD による発生力は 16 mN 程度であるが C 触覚線維線維の刺激閾は 2.5 mN であることから十分な提示力であるといえる。ただし、集束超音波による刺激では皮膚表面に接線力を提示できず、したがって物体でなぞるような摩擦力を伴う刺激提示は困難である。本稿ではそのような接線力の欠如に対しても快感覚を誘起できる可能性についても検討する。

2. 実験

2.1 実験システム

本実験では AUTD を用いて非接触な移動刺激を提示する。AUTD は、縦 14 個、横 18 個、計 249 個の超音波振動子からなるフェーズドアレイである[5]。AUTD は、アレイ状に配置された各超音波振動子から放出される超音波の位相及び振幅を制御し空中に超音波の焦点を形成することで、焦点位置を 1ms 以下の時定数で自在に変えることができ、また振動刺激を提示することが可能である。実験システムの外観を図 1 に示す。本実験では 4 台の AUTD を机から高さ 20 cm ほどの位置に設置した。実験のあいだ、被験者は前腕部が AUTD の直下にくるように腕

を机上に置いた。本実験で提示する移動刺激は、AUTDで前腕部の高さに超音波の焦点を形成し、焦点径(約1 cm)よりも十分に小さい1 mm 間隔で焦点位置を更新することにより実装された。移動速度は、刺激位置の更新時間を調節することで制御した。AUTD が生成する超音波は、想定した焦点位置以外にもグレーティングローブとして他の点にも集束するため、意図しない部位への刺激を防ぐために掌の位置にアクリル板を設置した。

2.2 被験者実験

実験は7人の健康な被験者(23~26歳, 全員男性)を対象として行なった。被験者に対し移動刺激を複数の速度、振動周波数、提示範囲で提示した。提示刺激パターンは焦点の移動速度を0.1 cm/s, 3.0 cm/s, 30.0 cm/sの3種類、振動周波数を0 Hz(静圧), 50 Hz, 200 Hzの3種類、提示範囲は前腕全域(20 cm), 前腕ひじ付近(5 cm)の2種類とした(図2)。上記移動速度、振動周波数、提示範囲を組み合わせた全18種類の刺激をランダムな順番で前前腕部(前腕の掌側)、後前腕部(前腕の手の甲の側)(図2)にそれぞれ1回ずつ提示した。実験時間が長く被験者への負担が結果に影響を及ぼさないよう、1つの刺激パターンでの刺激提示時間は5-10s程度になるように往復回数を設定した。焦点移動速度が遅いパターンに対してでも最低で1往復するように設定した。それぞれの刺激に対し、被験者には、「特に快(2)」、「快(1)」、「どちらでもない(0)」、「不快(-1)」、「特に不快(-2)」の5段階で回答してもらい、その得点によって主観量として評価した。刺激を感じなかった場合も「どちらでもない(0)」と回答してもらった。

3. 実験結果

被験者毎の各得点における回答数を表1に示す。刺激に対し被験者は「どちらでもない(0)」と回答するものが最も多く、次いで、「快(1)」という回答が多かった。「不快(-1)」または「特に不快(-2)」という回答は非常に少なく、「特に不快(-2)」にいたっては一度も回答を得られなかった。また、被験者の回答を提示刺激の振動周波数、焦点の移動速度、および提示範囲別に集計したものをそれぞれ表2、表3、表4に示す。振動周波数別の回答を見ると、「快(1)」の回答は静圧の場合に最も多く、また、「特に快(2)」の回答は静圧の場合にのみ得られた。提示範囲による差として、ほとんどの被験者において、前前腕部の方が後前腕部より「快(1)」または「特に快(2)」と答える割合が高かった。また、前腕全域と前腕肘付近の場合を比較すると、明らかに前腕全域の方が「快(1)」または「特に快(2)」の回答数が多い。また、前腕肘付近においてはあまり刺激を感じないというコメントもあった。そこで、前腕全域に対して触覚を提示した場合の被験者の快感の得点平均にのみ着目し図示したグラフを図3に示す。なお、各点は見やすさのために左右にずらしてプロットしている。焦点移動の速さによらず共通して静圧の場合

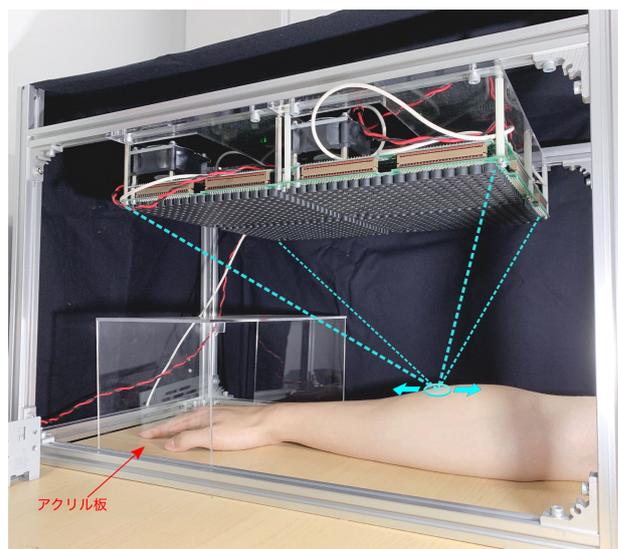


図1：使用したAUTDと実験の様子

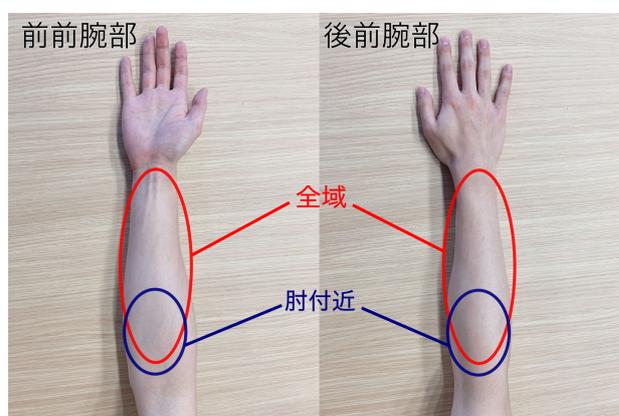


図2：刺激提示範囲

表1：被験者別の得点の回答回数

得点	-2	-1	0	1	2	
被験者A	0	0	23	9	4	36
被験者B	0	9	17	8	2	36
被験者C	0	0	19	15	2	36
被験者D	0	0	22	14	0	36
被験者E	0	1	21	14	0	36
被験者F	0	2	24	9	1	36
被験者G	0	1	16	17	2	36
合計	0	13	142	86	11	252

表2：振動周波数別の得点回答回数

得点	-2	-1	0	1	2	合計
静圧	0	4	34	35	11	84
50[Hz]	0	3	52	29	0	84
200[Hz]	0	6	56	22	0	84

表 3：焦点移動速度別の得点回答回数

得点	-2	-1	0	1	2	合計
0.1[cm/s]	0	4	57	23	0	84
3.0[cm/s]	0	4	45	29	6	84
30.0[cm/s]	0	5	40	34	5	84

表 4：提示範囲別の得点回答回数

得点	-2	-1	0	1	2	合計
前前腕部全域	0	1	24	34	4	63
前前腕部肘付近	0	1	55	7	0	63
後前腕部全域	0	5	15	36	7	63
後前腕部肘付近	0	6	48	9	0	63

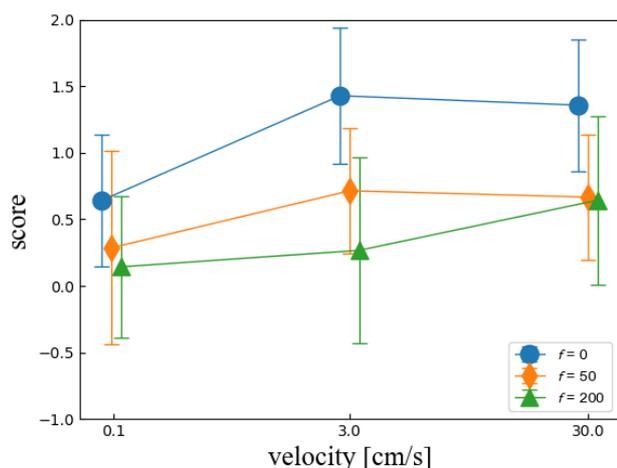


図 3：焦点移動速度に対する得点

が、もっとも多く「快 (1)」または「特に快 (2)」という回答が得られた。一方で変調をかけた振動刺激の場合では得られた得点が静圧の場合に比べて小さくなった。特に振動周波数を 200 Hz とした場合には刺激を知覚できない被験者も少なくなかった。刺激の焦点移動速度に対する得点平均は、振動周波数 0 Hz (静圧)、50 Hz の場合には 3.0 cm/s の場合が快感の程度は最大で、筆で前腕部をストロークする実験を行なった先行研究[4]と同様の結果が得られた。一方で、振動周波数 200Hz の刺激を与えた場合には焦点移動速度が速いほど得点が高くなっていった。静圧で焦点移動速度が 3.0 cm/s、30.0 cm/s の刺激に対しては、全ての被験者が「快 (1)」、「特に快 (2)」と回答している。また、焦点移動速度 30.0 cm/s で振動周波数 200 Hz の刺激を肘付近に提示した場合には全ての被験者が「どちらでもない (0)」または「不快 (-1)」と回答している。

4. 考察

刺激に対する得点分布について、変調をかけた場合とそうでない場合とでは明らかに得点に差が現れ、その得点は振動周波数が大きいほど小さくなる傾向にあった。また、全ての被験者が、静圧 ($f=0$ Hz) の場合が最も刺激をはっきり感じたとコメントし、主観的ではあるが、筆でストロークするような刺激によく似ていた。

後前腕部に比べ、前前腕部ではほとんど全ての被験者で刺激を認知できない割合が増加し、得点が小さくなる様子が見られた。おそらく腕の裏側には表側に比べ体毛の量が少なく、体毛の動きによる刺激の知覚強度が小さくなったことが要因になったと考えられる。

焦点の移動速度は図 3 からわかるように、静圧および、振動周波数 50 Hz の場合では焦点の移動速度が 3.0 cm/s で得点最大となった。この結果は筆で前腕をストロークした場合の C 触覚線維の反応特性によく似た傾向である。

本研究で用いた空中超音波触覚ディスプレイは接線力を提示できないため、摩擦や筆が与えるような複雑な刺激を提示できないにも関わらずこのような結果を得られたことから、接線力なしでも快感を誘起できるといえる。

また、本研究では振動周波数が 50 Hz、200 Hz の刺激は、静圧の刺激に比べ感度がかなり低くなった。有毛部に対して振動子で垂直な振動を加えた場合の閾値は[6]、周波数 200 Hz に対しても十分感度はあるが、これに一致する結果は得られなかった。今回のように小さい提示力で非接触な刺激提示の場合については、今後調べる必要がある。

5. 終わりに

本研究では、空中超音波触覚ディスプレイを用いてヒトの前腕部に移動刺激を提示することにより、快感の誘起を試みた。被験者実験により複数の速度や振動周波数に対する被験者の快感の変化を調べ、空中超音波による快感の誘起の妥当性を調べた。その結果、空中超音波による非接触な触覚提示でも、十分に刺激を感じる強度で超音波焦点を提示すれば、筆で撫でる場合と同じような快感を誘起できることがわかった。

今回得られたデータに対して統計的処理による評価はしていないため、今後データ数を増やし有意差検定などの統計的処理をすることでより正確に妥当性を評価できると考えられる。

また、この快感は定義が曖昧な上に被験者の主観に強く依存するため、その定量評価の方法は未だ確立されていない。自律神経指標などに代表される快感の指数になりうる数値との相関を調べることでその定量評価や触覚刺激の提示によるストレス緩和などへの応用を今後の課題としたい。

参考文献

- [1] Betsy App, Brittany A. Bulleit, and Ariane R. Jaskolka. "Touch Communicates Distinct Emotions" the American Psychological Association 2006, Vol. 6, No. 3, 528-533
- [2] Gijs Huisman. "Social Touch Technology: A Survey of Haptic Technology for Social Touch" IEEE Trans. On Haptics, Vol. 10, NO. 3, 2017
- [3] Line S Lo'ken, Johan Wessberg, India Morrison, Francis McGlone, and Ha'kan Olausson. "Coding of pleasant touch

by unmyelinated afferents in human” Nature Neuroscience, 2009 Vol. 12, No. 5, pp. 547–548, 2009.

- [4] Heather Culbertson, Cara M. Nunez, Ali Israr, Frances Lau, Freddy Abnoui, and Allison M. Okamura. “A Social Haptic Device to Create Continuous Lateral Motion Using Sequential Normal Indentation ” IEEE Trans. on Haptics, pp. 32–3 2018
- [5] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda. “Noncontact Tactile DisplayBased on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound,” IEEE Trans. on Haptics, Vol. 3, No. 3, pp.155-165, 2010.
- [6] Tetsu Miyaoka, and Toshio Nakamura. "Measurements of Detection Thresholds Presenting Normal and Tangential Vibrations on Human Hairy Skin " Proceedings of the 22nd Annual Meeting of the International Society for Psychophysics, Vol. 22, 2006.