



顔面への空中超音波照射による触覚および骨導音知覚

Tactile and Bone-Conduction Perception by Midair Ultrasound Irradiation to the Face

水谷沙耶, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之

Saya MIZUTANI, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO and Hiroyuki SHINODA

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, mizutani@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

概要 : 接触型振動子による骨導超音波の知覚特性に関しては, 補聴器開発などを目的として以前から研究されている. 空中超音波により非接触に骨導音を知覚させることができれば, 人ごみで特定の人物のみに情報を伝達できるが, 遠隔からの空中超音波でそれらを知覚させる技術の研究は未だ進んでおらず, これは応用上重要な課題である. 本稿では, 非接触空中超音波の顔面提示による骨導音および触覚閾値を実験により検証した.

キーワード : 非接触, 顔面刺激, 骨導超音波, 知覚特性

1. はじめに

現代の日本では, 電車が通勤手段の要となっており, 転落防止は大変重要な課題である. 国土交通省の報告によると, 駅のプラットフォームからの転落件数は例年, 電車に接触する事故に発展しなかったものだけでも約 3200 件にのぼる. 各鉄道会社は転落による事故防止の対策として, ホームドアの設置や危険領域に立ち入ったことに対するセンシングおよび歩行者や運転手への警告などを行っている. この対策により, プラットホームから誤って転落することを防止することは可能である. しかしながら, ホームドアの設置は維持コストも含めて高価であること, 車両の扉の配置位置を自由に決められなくなることなど, 問題が大きい. そこで, 本研究ではプラットフォームの端を歩いていて誤って線路に転落する可能性のある人に, 危険な領域を歩行していることを警告することを目的とする.

最も効果的な警告は, 大音量の警告音等をホームに流すことで, 気導音によって人々に危険を知らせることである. しかしながら, イヤホンやヘッドフォンを耳に装着して音楽等を聴いている人は多く, 警告音に気が付きにくい可能性がある. 空中超音波を顔面に照射し, 骨導超音波や触覚を知覚させることができれば, このような人にも問題なく警告できる. また, 人ごみのなかで特定の人物のみに警告することができるという利点もある. さらに触覚により, どちらの方向に戻れば転落しないかという情報も警告に加えて伝達することができる.

これまでに, 接触型デバイスを用いて超音波を顔面に照射して骨導音を知覚させた例[1]はあった. しかし, デ

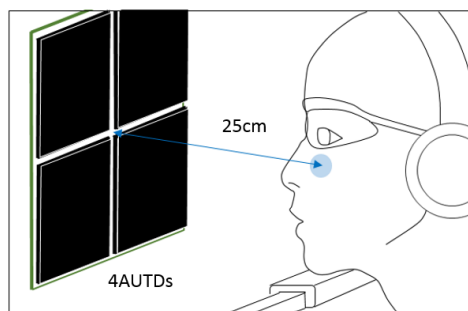


図 1: Experimental setup

バイスを装着することなく, 空中超音波を用いて非接触に骨導音や触覚を知覚させた例は, 私の知る限りではない. 本稿では, 空中超音波触覚ディスプレイ (AUTD) [2][3]によって生成した集束空中超音波焦点を顔面に照射した際の知覚特性を明らかにする. 超音波知覚の経路としては, 皮膚受容器による触覚と, 骨導音知覚の両方が考えられる. 本研究ではこれらの両方の経路の閾値を, 顔面の複数の部位において比較することを試みる.

2. 実験

実験構成を図 1 に示す. 格子状に配置された超音波振動子を搭載した「超音波フェーズドアレイ[4]」(当研究室開発) 4 台を並列配置したものを用いた. 被験者は, 顔の左側が装置の正面を向くように顎を顎台に置き, 実験中は顔を静止させたままにした. AUTDユニットと顔面上の焦点との間の距離は 25cm となるように設計された. 実験中, 被験者には超音波照射による健康被害を防ぐため

に保護眼鏡，耳栓，ヘッドフォンを着用してもらった。実験は東京大学の倫理委員会によって承認された。

2.1 閾値測定

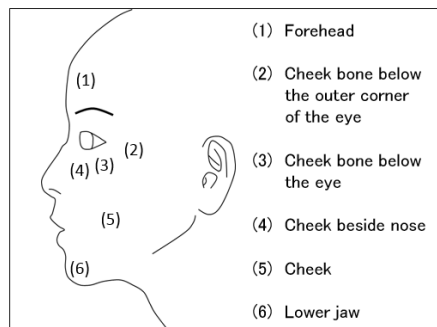


図 2: Ultrasound irradiation points

実験 2.1 は 20 代の女性 4 人と男性 4 人の計 8 人を対象として行われた。超音波を顔面に照射した際の，触覚刺激と骨導音の知覚閾値を求めることを目的とした。

予備実験で，本実験で閾値を測定すべき触覚には，音響流によるかすかな触覚と振動触覚の 2 種類が存在することが分かった。そのため，本実験では“かすかな触覚”，“振動触覚”および“骨導音”の 3 種類の閾値を測定することとした。

実験手順は以下の通りである。刺激は 1 秒間提示される。被験者は刺激を感じたらキーボードのキーを押して，何の刺激を感じたかを答えるように指示された。被験者が 1 秒間キーを押さなかった場合，刺激の強度は次のレベルに増加する。刺激と刺激の間には超音波を照射しない時間を 1 s 設けた。被験者の顔面に提示される放射圧の強度は 52 段階で変化する。全ての試行において，最初に提示される刺激は最小強度とする。4 台の AUTD で理論上提示可能な最大放射圧は，およそ 652 Pa (6.6 gf/cm²) である。被験者に刺激を提示した際に，特に合図などはしなかった。試行は，全ての閾値が求まった時点で終了した。予備実験の際に極限法にて閾値を求めようとしたところ，下降方向の試行において残効が強く正確な閾値を求めることが困難であった。そこで，本実験においては，それぞれの感覚閾値の傾向を検証することとした。超音波の照射部位は図 2 に示す顔面の 6 か所とした。無変調，AM 変調，および LM 変調 [5] をかけた 3 種類の超音波それぞれが 1 回ずつそれぞれの部位に照射された。

2.2 システムへの反応時間測定

実験 2.2 は，スマートフォンを見ながら歩くなど，何かに集中している人々に本システムで警告する際に，人が警告に対してどれだけ早く反応できるか検証することを目的とした。実験 2.1 に参加した全ての被験者が実験 2.2 に参加した。本実験では，被験者は集中するタスクとして，N バックテストを行うように指示された[6] (N=2)。

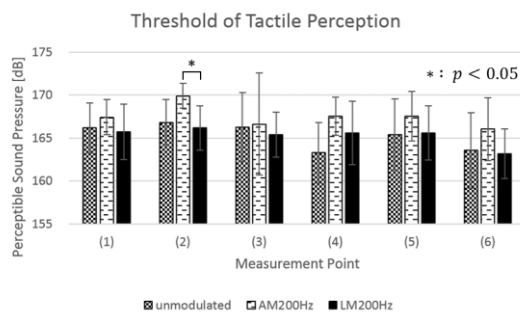


図 3: Threshold and standard deviation of tactile perception (comparison for each stimulus at each facial point)

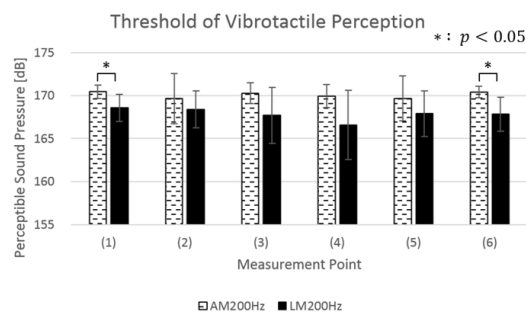


図 4: Threshold and standard deviation of vibrotactile perception (comparison for each stimulus at each facial point)

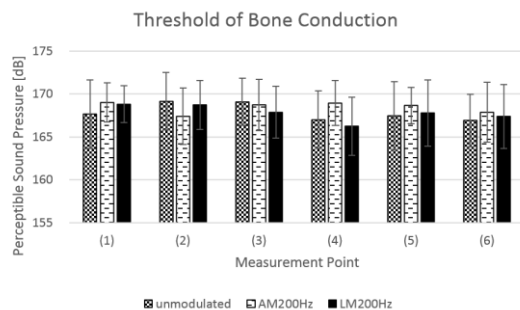


図 5: Threshold and standard deviation of bone conduction (comparison for each stimulus at each facial point)

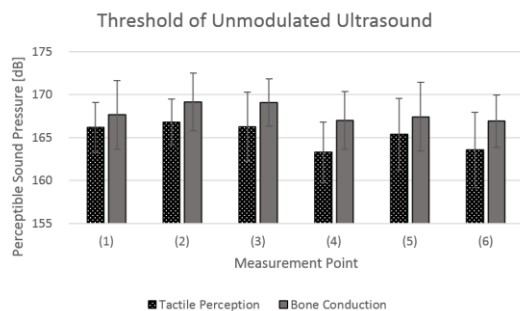


図 6: Threshold and standard deviation of unmodulated midair ultrasound (comparison of each perception at each facial point)

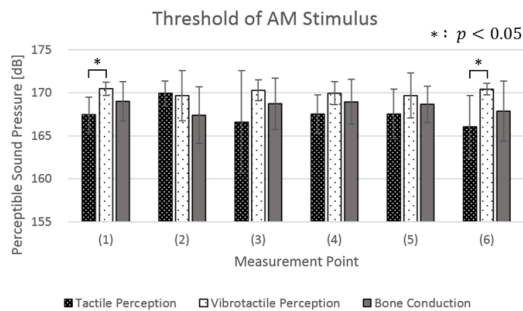


図 7: Threshold and standard deviation of AM stimulus (comparison of each perception at each facial point)

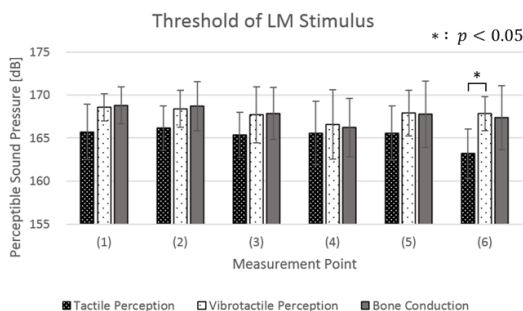


図 8: Threshold and standard deviation of LM stimulus (comparison of each perception at each facial point)

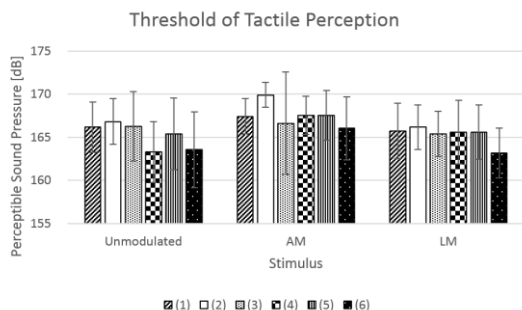


図 9: Threshold and standard deviation of tactile perception (comparison at each facial point for each stimulus)

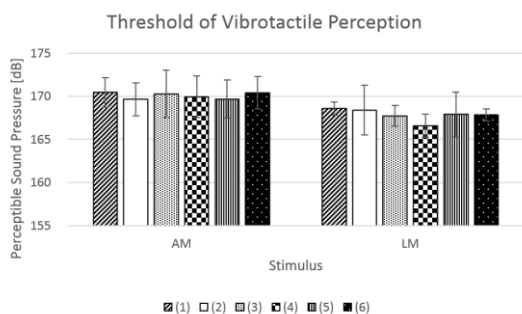


図 10: Threshold and standard deviation of vibrotactile perception (comparison of each facial point for each stimulus)

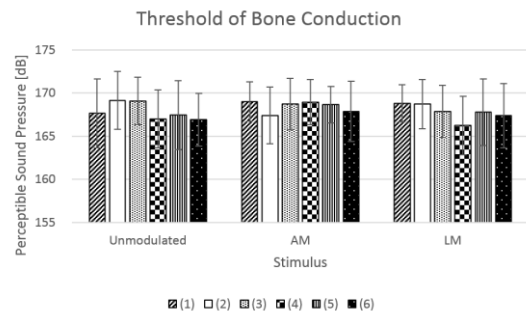


図 11: Threshold and standard deviation of bone conduction perception (comparison of each facial point for each stimulus)

3. 結果

3.1 閾値測定

全被験者の平均閾値を図 3～11 に示す。図中のエラーバーは標準偏差を表している。閾値は dB SPL で表されており、ここで 0 dB SPL は最小可聴値である $20 \times 10^{-6} Pa$ にあたる。AUTD 4 台で理論上提示可能な最大音圧は 171 dB SPL である。得られた結果は Welch の t 検定と Bonferroni の補正を利用して解析された。

図 3～5 は顔面刺激部位 6 か所における 3 種類の刺激の閾値の比較を示しており、それぞれかすかな触覚 (図 3)、振動触覚 (図 4)、骨導音 (図 5) の閾値を示している。同じ顔面部位で 3 種類の刺激を比べると、有意差 ($p < 0.05$) は図 3 の (2) 目尻の下の頬骨に AM 刺激と LM 刺激を提示した際に生じるかすかな触覚の閾値間 ($p = 0.019$) および図 4 の (1) 額や (6) 下顎に AM 刺激と LM 刺激を提示した際に生じる振動触覚の閾値間 ($p = 0.017$, $p = 0.010$) に生じた。つまり、(2) 目尻の下におけるかすかな触覚や (1) 額や (6) 下顎における振動触覚は、AM 刺激よりも LM 刺激によって有意に知覚されやすいという結果となった。一方で図 5 の骨導音閾値に関しては、いずれの刺激、照射部位においても、有意差はなかった。

図 6～8 は顔面刺激部位 6 か所における 3 種類の感覚閾値の比較を示しており、それぞれ無変調 (図 6)、AM (図 7)、LM (図 8) 超音波刺激の閾値を示している。同じ顔面部位で 3 種類の感覚を比べると、有意差 ($p < 0.05$) は図 7 の (1) 額や (6) 下顎に AM 刺激を提示した場合と図 8 の (6) 下顎に LM 刺激を提示した場合に生じるかすかな触覚と振動触覚の閾値間 ($p = 0.015$, $p = 0.042$, $p = 0.013$) に表れた。つまり、(1) 額や (6) 下顎に AM 刺激を提示した場合や (6) 下顎に LM 刺激を提示した場合にはかすかな触覚のほうが振動触覚よりも知覚されやすいという結果となった。図より、ほとんどの顔面刺激部位において、かすかな触覚が最も閾値が低く、一方で振動触覚の知覚閾値が最も高くなるという傾向が見られた。また、骨導音の閾値は振動触覚の閾値よりも低く、かすかな触覚の閾値よりも高くなる傾向にあることが分かった。LM 刺激に関して、振動触覚と骨導音は同じくらい知覚しやすかった。

図 9～11 は顔面刺激部位 6 か所における閾値の比較を示

している。たとえ同じ種類の刺激を提示したとしても、いずれの部位に関しても、閾値に有意な差は見られなかった。したがって、刺激の知覚しやすさは、刺激を提示する顔面部位によらないといえる。

3.2 システムへの反応時間測定

本実験では、刺激提示から被験者が刺激を知覚するまでの反応時間を計測した。実験の結果、全被験者の平均反応時間はタスクを課さない場合 0.475 s、タスクを課した場合 0.735 s となった。いずれの場合も、全被験者の超音波刺激の検出率は 100%であったが、そのうちタスクとして課した 2 バックテストの正答率が 90%を下回った被験者のデータは、被験者が十分タスクに集中できていなかったと判断し、8人中3人のデータを結果から除いた。この場合タスクの正答率は 100%であったため、被験者は十分にタスクに集中できていたといえる。

タスクありの場合の反応時間とタスクなしの場合の反応時間の差である 0.260 s は、2 バックテストを課されたことにより生じたと考えられる。

4. 考察

実験 2.1 より、超音波を顔面に照射した際に生じる 3 種類の刺激の知覚しやすさの傾向が、音響流による触覚刺激、振動刺激、骨導音の順であることが分かった。本警告システムを風が吹いている屋外で使用する場合、音響流による触覚を知覚することは困難であると考えられる。しかし、骨導音や振動触覚は風の影響を受けることはないため、これらの感覚を警告に用いることができると考えられる。さらに、実際に使用する際には最大放射圧を用いることを想定すると、自然風が吹いている屋外であっても音響流による触覚をより簡単に知覚できると期待される。

実験 2.2 で得られた結果によると、人々の本システムの警告への反応時間は約 0.735 s である。人が 2 歩歩行するために要する時間は約 1 s であるから、本システムを用いて歩行者が線路に転落するのを防ぐためには、歩行者が危険領域に入る少なくとも 1 歩前に警告する必要がある。先行研究では、堀内ら[7]が 0.5 s 後のジャンプや歩行の動きを予測する行動予測システムを提案している。この予測システムを本警告システムと組み合わせることによって、より実用的かつ効果的な警告システムを作ることができると考えられる。

実験 2.1 において何人かの被験者は、超音波刺激が顔面に照射された際に、無変調超音波であったとしても振動触覚を感じると報告した。人間は顔面皮膚で 40kHz の振動を感じることができる可能性がある。この結果を理解するためには、空中無変調超音波刺激による振動触覚特性を解明する必要がある。

実験を開始する前に、被験者がかすかな触覚、振動触覚および骨導音を区別できることを確認した。実験 2.1 の結果より、閾値を測定したい各感覚を知覚するタイミングが異なったことより、被験者はそれぞれの感覚の違いを理解していたと考えられる。ただし、本実験において音響流に

よるかすかな触覚と振動触覚の差異に関しては、被験者の主観的判断によっている。

5. まとめ

本研究では、被験者実験を通して無変調、AM 変調、LM 変調をかけた 3 種類の空中超音波刺激の閾値を測定した。これらの刺激は、顔面の 6 か所 ((1) 額, (2) 目尻の下の頬骨, (3) 目の下の頬骨, (4) 鼻の横の頬, (5) 頬, (6) 下顎) に照射され、各部位でのかすかな触覚、振動触覚、骨導音の 3 種類の閾値が測定された。

実験の結果は、かすかな触覚が 3 種類の感覚の中で最も知覚しやすいことを示していた。また、いずれの顔面部位においても、刺激の感じやすさに有意差はなかった。

実験 2.2 では、何かに集中している人が、どれだけ早く本システムの警告に気付くことができるかを検証した。閾値測定実験の結果より、各被験者について最も知覚されやすい顔面部位および刺激を選択し、最大放射圧で警告した際の被験者の刺激に対する反応時間は平均 0.735 s であった。本警告システムの一つの実用化例としては、駅のプラットフォームの危険領域を歩いていて、線路に転落しそうな歩行者に警告をして、事故を防ぐというものが考えられる。

参考文献

- [1] J. F. Corso, "Bone-conduction thresholds for sonic and ultrasonic frequencies," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 35, pp. 1738–1743, 1963.
- [2] T. Iwamoto, M. Tatezono, and H. Shinoda, "Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound," *EuroHaptics 2008*, LNCS 5024, pp. 504–513, 2008.
- [3] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, "Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound," *IEEE Trans. on Haptics*, vol. 3, no. 3, pp. 155–165, 2010.
- [4] S. Inoue, Y. Makino, and H. Shinoda, "Scalable architecture for airborne ultrasound tactile display," *Asia Haptics 2016*, Kashiwanoha, Nov. 29–Dec. 1, 2016.
- [5] R. Takahashi, K. Hasegawa, and H. Shinoda, "Lateral modulation of midair ultrasound focus for intensified vibrotactile stimuli," *EuroHaptics 2018: Haptics: Science, Technology, and Applications*, pp. 276–288, 2018.
- [6] J. D. Cohen, W. M. Perlstein, T. S. Braver, L. E. Nystrom, D. C. Noll, J. Jonides, and E. E. Smith, "Temporal dynamics of brain activation during a working memory task," *Nature*, vol. 386, pp. 604–608, 10 April 1997.
- [7] Y. Horiuchi, Y. Makino, and H. Shinoda, "Computational foresight: Forecasting human body motion in real-time for reducing delays in interactive system," *ISS '17 Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, pp. 312–317, 2017.