触覚－聴覚間における周波数的協和性

Frequency Consonance between Tactile and Auditory

○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)
福嶋 政期(電通大，日本学術振興会)　Hayward Vincent(パリ第六大)　梶本 裕之(電通大，科学技術振興機構)

Ryuta OKAZAKI, The University of Electro-Communications, okazaki@kaji-lab.jp
Taku HACHISU, The University of Electro-Communications, hachisu@kaji-lab.jp
Michi SATO, The University of Electro-Communications, michi@kaji-lab.jp
Shogo FUKUSHIMA, The University of Electro-Communications, shogo@kaji-lab.jp
Vincent HAYWARD, University of Paris 6, The Institute for Intelligent Systems and Robotics
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp

With the aim of augmenting auditory sensation by tactile stimuli, we investigated cross-modal relationships between the two modalities, focusing on frequency. The results showed that frequency consonance between tactile and audio stimuli may depend on the relationship between harmonics, in manner similar to auditory waves, but with broader peaks.

***Key Words*:** Vibrational stimulus, Tactile display, Cross-modal

1. はじめに

昨今スマートフォンやタッチパッドの普及・高機能化，また Retina ディスプレイ(Apple,USA)に代表される超高品位ディスプレイ技術によって，視覚を使った「モバイル環境下での高品位なコンテンツ鑑賞」が一つの流れとして確立しつつある．

一方，従来聴覚的に高品位なコンテンツ鑑賞を支えていたのが多チャンネル・高性能スピーカに代表される高臨場体感音響技術である．これらの技術では重低音の補強・多スピーカによる音場の再現・身体広範囲への振動提示等によって臨場感を高めている．しかしながら，モバイル端末は大きさの制約上大型の装置や高性能なスピーカを搭載することが難しく，たとえ実装したとしても生活雑音にあふれたモバイル環境下ではその性能を発揮することは難しい．そこで著者らは従来とは異なる手法を用いてモバイル環境においても臨場感を確保することができないかと考え，本研究の着想に至った．

2. 本研究の目的

本研究ではモバイル環境における聴覚の臨場感を増幅することを目的とし，聴覚刺激の一部を触覚刺激で補強，代替し，「触覚を聴く」ことを実現する．聴覚－触覚変換は難聴者への福祉用途で古くから提案されているが（触知ボコーダ[1][2][3]等)，本提案では触覚と聴覚のクロスモーダル現象に着目し，あくまで「聴覚知覚が触覚によってうける変化」を利用する．モバイル端末は聴覚刺激の品質が制限されるが，常に端末を把持しているため触覚刺激にとっては大変都合の良い状況であることを利用し，貧しい聴覚刺激が触覚刺激によってあたかも豊かになったかのように感じさせることを目標とする．

先行研究より，触覚刺激に無関係な聴覚刺激を付加することで，触覚の粗さ知覚に影響をおよぼすこと[4]や，触聴覚間の強度・周波数に関する相互作用[5][6]，聴覚単体では知覚できない微小な音が触覚を付加することで知覚可能になること[7]などが知られている．また，生理学的にも触覚と聴覚が同じ神経メカニズムを共有していることが知られている[8]．さらに，視聴覚間など，触聴覚以外の感覚間で従来知られていたクロスモーダル現象が，触聴覚間でも生起することが報告されている[9][10]．これらの知見は，触覚－聴覚間にクロスモーダル関係が成立することを示唆している．

著者らはこれまでに触聴覚間クロスモーダルの基礎的検討として，まず触覚・聴覚知覚の基本要素である強度に着目し，振動刺激が聴覚の主観的強度に与える影響について調査を行なっている[11][12]．

そこで本稿では，強度と同じく触覚と聴覚の基礎的要素である周波数知覚に着目し，触聴覚間クロスモーダルによる感覚の変化が生起する周波数条件について検討を行った．

3. 実験１ 正弦波刺激による触聴覚周波数マッチング

まず，ヒトが触聴覚間で”同じ”と感じる周波数の組み合わせが存在するかどうかを検討した．この実験では，被験者にある周波数の聴覚刺激と，周波数を調整可能な触覚刺激を提示し，２つの周波数を主観的に一致させるタスクを行った．

3.1 実験装置

PC，アクティブノイズキャンセリングヘッドホン(QuietComfort, Bose Inc. USA)，振動子(Haptuator MARK Ⅱ, Tactile Labs, CANADA)，オーディオアンプ(RSDA202, 株式会社ラステーム・システムズ)から成る実験装置を作製し，実験に使用した．PC から出力された信号はそれぞれヘッドホンとアンプを介した振動子へと送られる．

3.2 実験条件

触聴覚間で主観的に同じと感じる周波数のペアを見つけるため，4 つの異なる周波数の正弦波(100, 200, 400, 800 Hz, 約 55dB)の聴覚刺激を基準刺激として用意し，比較刺激として 1-800Hz で被験者が任意に周波数を変更可能な正弦波を触覚刺激として用いた．

3.3 実験手続き

実験には 28 名の被験者が参加した(17-32 歳，触聴覚共に健常)．被験者は椅子に座り，ヘッドホンを装着し，左手人差し指に振動子を装着した．

実験開始と同時に聴覚刺激のうち 1 つ(基準刺激)と触覚刺激(比較刺激)が提示された．触覚刺激の初期提示周波数によ

る影響を防ぐため，触覚刺激の初期周波数は 50，250，450Hz のうちいずれかがランダムに提示された．被験者は聴覚刺激の周波数と触覚刺激の周波数が“同じ”と感じられるように触覚刺激の周波数を任意に調節し，被験者が調節を終了したところで実験終了とした．触聴覚以外の刺激(刺激調節目盛りなど)から被験者が周波数を推定できないよう，調整はボタンクリックによって周波数を上下させる GUI を用いた．調節に時間制限は用いなかったが，最大でも 30 秒位内に調節は終了した．試行の繰り返しによって刺激周波数の範囲を理解するおそれがあるため，被験者 1 名につき 1 試行のみで実験を行った．

3.4 実験結果・考察

実験 1 の結果を図 1 に示す．グラフの縦軸は刺激の周波数を，横軸は被験者番号を示す．グラフ中の青点は各被験者に提示された聴覚刺激(基準刺激)の周波数を表し，赤い棒グラフはそれぞれの被験者が基準刺激と同じ周波数になるように調節した触覚刺激(比較刺激)の周波数を表す．

実験結果より，提示された聴覚基準刺激の周波数と，被験者が調節した触覚比較刺激の周波数のペアは個人差が大きく，被験者間で相関は見られなかった．触覚的に周波数が弁別可能であることが知られている 50-300Hz の周波数領域[13]においてすら，被験者間で相関は見られなかった．このことから，ヒトは触聴覚間で定量的な周波数マッチングを行うことがそもそも困難であることが考えられる．

一方で，その後の予備実験を通して次のような興味深い内観報告を得た．触覚刺激の周波数が聴覚刺激の周波数に対して N 倍あるいは 1/N 倍の関係にあるとき(i.e.聴覚：100Hz 触覚：50，100，200，300Hz)，両者の刺激が“同じ”と感じるというものである．実験 1 の結果の一部もこの内観報告を支持している．例えば，被験者 2 と 6 は 100Hz の聴覚刺激に対して約 300Hz の触覚刺激を同じであると回答し，被験者 9,22,25 はそれぞれ 200，400，800Hz の聴覚刺激に対して約 100Hz の触覚刺激を同じであると回答，被験者 5 は 100Hz の聴覚刺激に対して約 50Hz の触覚刺激を同じと回答している．

このことから，ヒトの触聴覚間の周波数的マッチングは周波数そのものによって比較されるのではなく，両者の刺激が同一の倍音構造に属しているかどうかという基準が用いられているのではないかと推測される．

周波数の倍音構造は物理的な共鳴として広く自然界に存在しており，それゆえヒトは倍音構造を日常生活を通して“自然な状態である”と学習していることが考えられ，例えばヒトは倍音構造を聴覚における 2 和音の協和性判断などに利用している[14]．この共鳴による刺激の倍音構造は，振動している物体に触れることで触聴覚間にも提示されるため，被験者は振動と音が倍音構造をなしている時，両者を”同じ”と判断したと考えられる．

この考察に基づき，触聴覚間で周波数的に協和性を判断することが可能かを検証する実験 2 を行った．

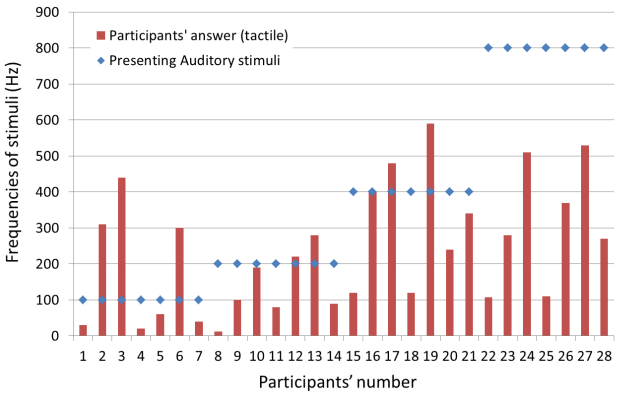

Fig. 1 Results of Experiment 1

4. 実験 2 触聴覚間の周波数協和性検証実験

本実験では，触覚刺激と聴覚刺激が周波数的に倍音構造を構成している時に，聴覚における 2 和音の協和と同じような協和性が生じるかどうかを検証した．本実験は 2 つの実験 A と B から構成される．実験 A では被験者の触覚と聴覚に刺激を提示して両者の周波数的な協和性を判断させた．実験 A で生じる協和性が聴覚における 2 和音の協和性判断と関連があるかを調べるために，2 つの刺激を聴覚のみに提示して協和性判断させる実験 B を同時に行った．

4.1 実験装置

実験 1 で用いた実験構成と同様のものを使用した．ただし，実験 2B では振動子は使用せず，2 つの刺激は聴覚提示された．

4.2 提示刺激

様々な周波数をもつ聴覚刺激と触覚刺激の組み合わせを提示刺激として用いた．聴覚刺激には 58.2，65.4，73.4，82.4，92.4，103.5，116.5，130.8，146.8，164.8，184.9，207.6，233.0，261.6，293.6 Hz の基底周波数を持つ 15 通りのノコギリ波を用意し，触覚刺激には 130.8Hz の基底周波数をもつノコギリ波を用いた．これらの刺激の組み合わせは 130.8Hz(音階表現では C)を中心周波数として和音，すなわち倍音構造を形成している．例えば 65.4Hz と 130.8Hz，130.8Hz と 130.8Hz，261.6Hz と 130.8Hz の組み合わせは完全協和音を形成している．他の組み合わせについても不完全協和音もしくは不協和音を構成している(表 1)．

提示刺激として実験 1 で用いた正弦波ではなくノコギリ波を用いた理由は，ノコギリ波は基底周波数の整数倍の倍音群を持つため，正弦波より自然音に近く，2 つの刺激の間の倍音構造を知覚しやすくなると考えたためである．

実験 2B においては，刺激の周波数や組み合わせは実験 2A と同じであるが，2 つの刺激は共に聴覚刺激として提示された．

Table 1 Presented stimuli. Consonance between 130.8 Hz stimulus is represented by marks. ○:Perfect consonance, △:Imperfect consonance, ×:Dissonance

Stimuli No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequency (Hz)	58.2	65.4	73.4	82.4	92.4	103.5	116.5	130.8
Musical scale	A#	C	D	E	F#	G#	A#	C
Consonance	×	○	×	△	×	△	×	○
Stimuli No.	9	10	11	12	13	14	15	
Frequency (Hz)	146.8	164.8	184.9	207.6	233.0	261.6	293.6	
Musical scale	D	E	F#	G#	A#	C	D	
Consonance	×	△	×	△	×	○	×	

4.3 実験手続き

9 名の被験者(22-28 歳，触聴覚共に健常)が実験 AB を通じて参加した．被験者は椅子に座り，ヘッドホンを装着し，左手人差し指に振動子を装着した．被験者は 2 つの刺激の協和性を判定するよう指示された．実験開始とともに，15 組の提示刺激の内 1 組(聴覚：58.2Hz-293.6Hz のいずれか 触覚：130.8Hz)が被験者に提示され，被験者は両者の協和度を VAS(Visual Analogue Scale)で評価した．左端を 0(不協和)、右端を 10(完全協和)とした．評価には時間制限を設けなかったが，最大でも 30 秒以内で評価は終了した．評価終了をもって刺激提示をやめ，これを 1 試行とした．すべての 15 組の提示刺激はランダムに 3 回ずつ計 45 試行提示された．

実験 2B においては 2 つの刺激はともに聴覚刺激として提示され，被験者は 2 音の協和性を判定するよう指示された．こちらもすべての組はランダムに 3 回ずつ提示され，実験 AB を通じて 1 被験者あたりの合計試行数は 90 試行であった．

4.4 実験結果・考察

実験 2A(触聴覚間の協和度評価・青)と実験 2B(聴覚の 2 和音の協和度評価・赤)の平均結果を以下に示す(図 2)．グラフの縦軸は被験者によって評価された 2 刺激の協和度を表し，横軸は提示された刺激の周波数をあらわす．2 つのグラフを見比べると，聴覚の協和度判断(2B)に比べて触聴覚間の協和度判断(2A)の推移は平坦であり，一見すると触聴覚刺激の倍音構造は協和度判断に寄与していないように思われる．

しかしながら，実験 2B の結果の詳細な観察によって，実験 3 に参加した被験者を 2 つの群に分けられることが判明した．表 1 のとおり，15 組の提示刺激は協和音(完全・不完全)と不協和音の組が交互に配置されており，2B の平均結果も綺麗なジグザグ型をしているが，2B の被験者ごとの結果を見てみると，提示刺激の協和度を正しく判断できている被験者と，そうでない被験者がいることが判明した(図 3)．例えば被験者 4 は 82.4Hz と 130.8Hz の組の協和度を近接する 2 組とくらべて高いと判定している．この組み合わせは不完全協和音，近接する 2 組は不協和音を構成するためこの判定は正しいといえる．一方で被験者 8 はこの組の協和度を低く判定している．

この違いに基づき，実験 AB の結果をグループ a(4 名，協和度を正しく判定)とグループ b(5 名,協和度を一部誤って判定)の 2 群に場合分けした．図 4 と図 5 はそれぞれ実験 2AB の結果をグループ a とグループ b に群分けした結果を示す．

グループ分けされた結果より，実験 2B(聴覚の協和度判断)で生じた違いは実験 2A(触聴覚の協和度判断)にも反映されていることが判明した．すなわち，グループ b では実験 2A と 2B の協和度判断が相関していないのに対して，グループ a では両者の協和度判断は中心周波数に近い 92.4Hz から 184.9Hz の間で相関していることが判明した．この周波数帯域における触覚－聴覚の協和度と，聴覚－聴覚の協和度の相関関係を図 6(グループ a)及び図 7（グループ b）に示す．

この 2 つの相関が有意であるかを判定するため，スピアマンの順位相関係数の有意性検定(The Spearman rank correlation coefficient test)を行った．その結果，92.4Hz から 184.9Hz におけるグループ a の相関関係は有意であり(r_s=0.82, $p<0.05$)，グループ b の相関関係は有意でないことが明らかになった(r_s=0.21, $p>0.05$)．

このことから，聴覚で 2 和音の協和度を正しく判定できる被験者は，知覚構造が異なる触聴覚間においてもその協和度を中心周波数付近で正しく判定できたと言える．

被験者間で協和度の判断に違いが生じた理由を調査するため，実験後にアンケートを実施したところ，興味深い相違点を見出した．それは，グループ a(聴覚間・触聴覚間共に協和度を正しく判定できた被験者群)の被験者はみな，フルートやサックスなどの管楽器の演奏経験があったということである．先行研究より触覚刺激は聴覚パフォーマンスのフィードバックとして利用されることが示唆されており[15][16]，グループ a の被験者は演奏経験を通じて聴覚間の協和度判断(実験 2B)が鋭くなっただけでなく，おそらく楽器演奏時の振動と音の組み合わせの学習が触聴覚間の協和度判断に寄与したと考えられる．

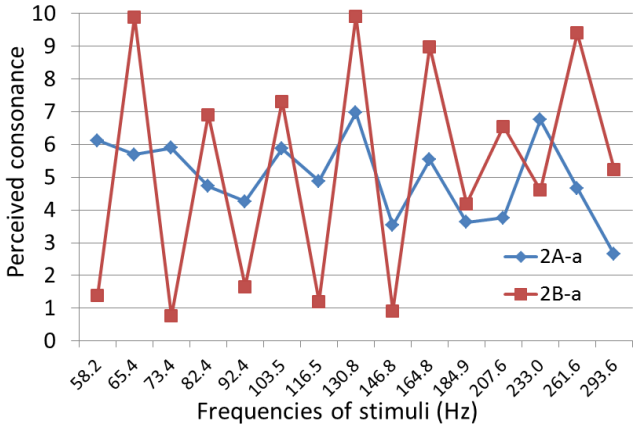

Fig. 2 Average results of experiment 2A and 2B

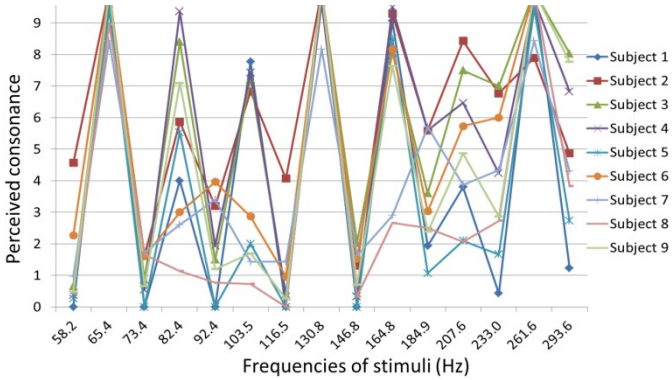

Fig. 3 Result of experiment 2B by subjects

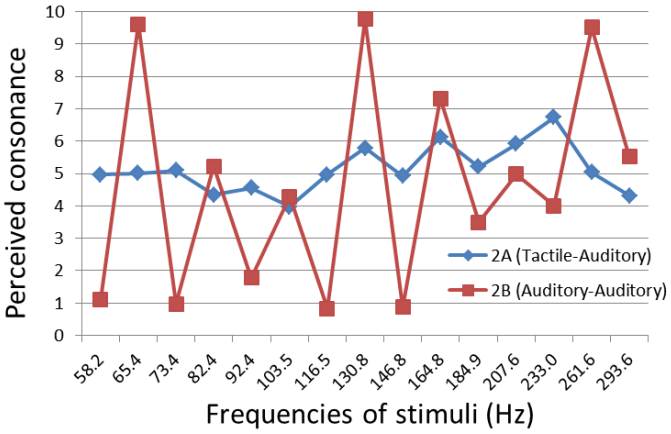

Fig. 4 Average results of experiment 2AB in group a

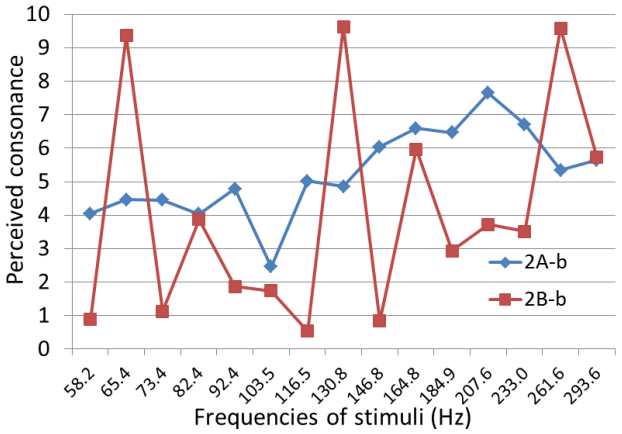

Fig. 5 Average results of experiment 2AB in group b

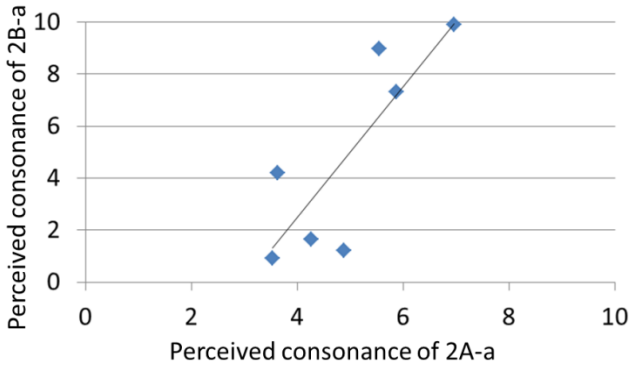

Fig. 6 The correlation of perceived consonance between tactile-audio(2A) and audio-audio(2B) in frequency range from 92.4Hz to 184.9Hz (group a)

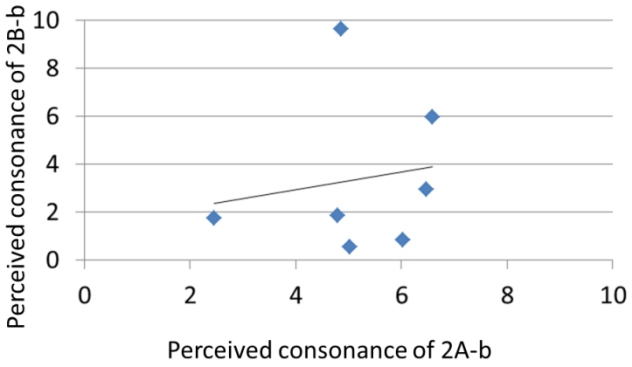

Fig. 7 The correlation of perceived consonance between tactile-audio(2A) and audio-audio(2B) in frequency range from 92.4Hz to 184.9Hz (group b)

5. おわりに

触聴覚クロスモーダルの基礎的検討として，触覚刺激が聴覚の強度知覚に与える影響について調査した．本稿では，触聴覚間で知覚可能な周波数について検討し，触聴覚間で“同じ”と感じる周波数の組み合わせが存在するかどうかを調査した．実験結果より，触聴覚間の周波数的なマッチングメカニズムは 2 つの周波数の組み合わせによって生じるのではなく，2 つの周波数が倍音構造をなしているかどうかに依存することが示唆された．

この知見をもとに実験 2 を行い，触聴覚間の周波数的な協和度は両者が倍音構造をなしているか否かで判断され，知覚構造のことなる触聴覚間においても，聴覚で感じる和音の協和度が知覚可能であることが示された．また触聴覚間の協和度の判定能力は，聴覚間の協和度判定の能力に依存し，音楽経験の有無がこの能力に寄与していることが示唆された．

文　献

[1] 伊福部 進，湊 博，吉本 千禎．"心理物理実験によるタクタイル・ボコーダーの基礎的研究，" 日本音響学会誌，Vol.31, pp.170-178, 1975.

[2] O, Ozcan, E. Rebecca, and O. D. Kimbrough. Tactile Vocoders for the Deaf. Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE, 6(3):37-42, September 1987.

[3] P. L. Brooks, B. J. Frost, J. L. Mason, and D. M. Gibson. Word and Feature Identification by Profoundly Deaf Teenagers Using the Queen's University Tactile Vocoder. Journal of Speech and Hearing Research, 30:137-141, March 1987.

[4] Y. Suzuki, J. Gyoba, and S. Sakamoto. Selective effects of auditory stimuli on tactile roughness perception. Brain Research, 1242:87-94, November 2008.

[5] J. M. Yau, A. I. Weber, and S. J. Bensmaia. Separate Mechanisms for Audio-Tactile Pitch and Loudness Interactions. Frontiers in Psychology, 1:160, October, 2010.

[6] J. M. Yau, J. B. Olenczak, J. F. Dammann, and S. J. Bensmaia1. Temporal frequency channels are linked across audition and touch. Current Biology, 19:561-566, April, 2009.

[7] H.Gillmeister and M.Eimer. Tactile enhancement of auditory detection and perceived loudness, Brain Research, 1160:58-68, March, 2010.

[8] C. Kayser, C. I. Petkov, M. Augath, and N. K. Logothetis. Integration of touch and sound in auditory cortex. Neuron, 48(2):373–384, October 2005.

[9] B. Gick and D. Derrick. Aero-tactile integration in speech perception. Nature, 462:502-504, November, 2009.

[10] D. Derrick and B. Gick. Full body aero-tactile integration in speech perception. Proceedings of INTERSPEECH 2010, 122-125, (Chiba, Japan, September 26-30, 2010).

[11] R. Okazaki, H. Kajimoto, and V. Hayward. Vibrotactile Stimulation Can Affect Auditory Loudness: A Pilot Study. Proceedings of EuroHaptics2012 (Tampere, Finland, June 12-15, 2012), Lecture Notes in Computer Science, 7283:103-108, Springer, June 2012

[12] 岡崎 龍太，蜂須 拓，佐藤 未知，福嶋 政期，梶本 裕之，Hayward Vincent. 触覚刺激による聴覚強度知覚への影響．SICE-SI2012 予稿，(博多，日本，12 月 18-20 日，2012).

[13] S. J. Bolanowski, Jr., G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and C. M. Checkosky. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. Journal of the Acoustical Society of America, 84(5):1680-1694, November 1988.

[14] R. Plomp and W. J. M. LEVELT. Tonal Consonance and Critical Bandwidth. Journal of the Acoustical Society of America, 38(4):548-560, April 1965.

[15] C. Chafe, S. O'Modhrain. Musical muscle memory and the haptic display of performance nuance. In Proceedings of the 1996 International Computer Music Conference (Hong-Kong, China, August 1996), 1996.

[16] J. Sundberg. Chest wall vibrations in singers. Journal of Speech and Hearing Research, 26(3):329–340, September 1983.