

心動: 音響に同期した耳介への触刺激による情動の増幅

福島 政期^{*2} 栗生 馨奈子^{*1} 中田 明日香^{*1} 梶本 裕之^{*1*3}

Emotional Vibration: Enhancement of emotion using a Combination of Sound and Skin Sensation to the Pinna

Shogo Fukushima^{*2}, Kanako Aou^{*1}, Asuka Nakata^{*1} and Hiroyuki Kajimoto^{*1*3}

Abstract --- Most people often experience music with accompanying emotion in every day of their lives, and the emotion sometimes become critical in determining the quality of the music experience. The goal of this paper is to enrich quality of the music experience with directly facilitating the emotion. To facilitate emotion in music, this paper presents a method that simultaneously presents sound and skin sensation to the pinna. The emotion enhancement effect of the method is evaluated in user studies, and the effect was compared between the other body parts (back, arms, fingers). The findings show that the method can enhance emotion that induces sympathetic nerve activity, and pinna is one of the most effective parts to enhance the sympathetic emotion.

Keywords: Affection, crossmodal displays, earlobe, emotion, emotional amplification, emotional enhancement, haptic display, music, pinna, skin sensation, tactile display

1 はじめに

音響機器は、医療・警報・エンターテインメントなどの多岐に渡る場面で利用されている。特に音楽・音声鑑賞などの音響エンターテインメントにおいては、音響機器の品質がコンテンツの印象に直接影響するため、音の再現性という観点でこれまで盛んに研究されてきた。例えば要素技術に関しては、マイクロホンやスピーカの高品位化、記録メディアの大容量化、オーディオアンプの低雑音化などが挙げられる。これらの要素技術の進歩により、様々な音響機器において高忠実な音響の再現が可能となった。またマルチチャンネル音響技術や波面合成技術によって、音の方向や広がりを高忠実に再現できる環境が整いつつある[24]。これら音響技術の確立により娯楽施設やホームシアターなどの幅広い場面で高い臨場感を手軽に構築できるようになった。

かつて音響機器の研究開発の中心であったこのような高臨場感音響技術はいまや極めて手軽に入手・体験できるようになりつつある。よって、音楽・音声鑑賞などの音響エンターテインメントにおいて、鑑賞者が抱く楽曲や音声に対する印象や、鑑賞体験そのものに対する印象をさらに向上させるためには、既存技術に対して差異

化を図る新たな方向性の技術が重要な課題である。本論文はこの新たな方向性として音響コンテンツによって喚起される情動に着目し、これを直接的に増幅することを目指すものである。

情動は、特に音楽鑑賞において、その重要性が認識されている。例えば、楽曲の印象を記述する際に、従来では、美的因子・空間因子・明るさ因子などの印象語が用いられてきたが[23]、近年では、これらの因子では総合的な印象の評価として不十分であると指摘されており、新たに感情価や感動価と呼ばれる尺度が利用され始めている[11][12][13]。また、自身の情動状態に適した楽曲を配信する web サービス[1]や音楽療法[14]など、音楽は特定の情動に浸るための手段として用いられることがある。さらに、音楽以外にも、ドラマ CD・サンプリング CD・ラジオなどの音声を主体としたコンテンツも存在し、情動に働きかける内容が多い。よって、情動を直接的に増幅する手法は、楽曲や音声に対する印象評価を向上させる効果や、音楽や音声コンテンツ鑑賞中の情動変化を強調することで鑑賞経験そのものに対する印象を向上させる効果が期待でき、高臨場感音響技術とは異なる新たな方向性の 1 つとして考えられる。

本論文では、情動を増幅するために、音響に合わせて触刺激を重畳する事を提案する。そのための実装として、音響コンテンツに合わせて耳介に装着した振動子から触刺激を加えることで音によって喚起される情動を増幅する手法、“心動(英語名: Emotional Vibration)”を

*1 電気通信大学

*2 東京大学

*3 科学技術振興機構

*1 The University of Electro-Communications

*2 The University of Tokyo

*3 Japan Science and Technology Agency

実装した。耳介は情動を喚起しやすい部位であると考えられる。例えば我々は、他者に耳介を触られる、あるいは耳介に息を吹きかけられると、人は紅潮や背筋のゾクゾク感など様々な興奮性の情動を表出するが、これを裏付けるように耳介には心地よさや痒みを伝える神経繊維が密集していることが報告されている[2]。

本論文では、音楽や音声などの音響コンテンツへの応用を見据えた基礎検討として、音響に同期させて耳介に振動刺激を付与した際に主観的に生じる情動の強度を定量化した結果、および耳介以外の身体部位に触刺激を提示した場合と比較した結果を報告する。

2 関連研究

本章では関連研究として、音響に合わせて触刺激を提示する事例、情動喚起を目的とした触覚提示の事例を述べた後、刺激の重畳によって情動を増幅する事例について述べる。

2.1 音響に合わせて触刺激を提示する事例

音響に合わせて触刺激を提示する事例は多数報告されており、特に遊園地や映画館などのエンターテインメント施設において広く実用化されている。これらは提示する触刺激の種類から、皮膚感覚提示型と力覚提示型に分けられる。皮膚感覚提示型は、皮膚表面にある数種類の機械受容器を刺激することで触感覚を生起させるものであり、力覚提示型は、椅子やステージの下に設置された直動アクチュエータにより、全身に物理的な揺れを再現し、固有感覚や前庭感覚を生起させるものである。我々は耳介に振動刺激を提示するため、前者の皮膚感覚提示型に分類される。

前者の皮膚感覚提示型は、視聴覚コンテンツに含まれる衝撃音や環境音等を皮膚振動刺激として提示する。刺激提示部位としては、指[15]、背中[16]、臀部[17]などが利用されており、またヘッドホンやイヤホンに振動装置を内蔵したシステム[18][19]も提案されている。しかし、音響に同期した耳への振動刺激がどのような種類の情動に対して有効であるかの検討や、他の身体部位と比較した検討は行われていない。

本論文は、耳介とそれ以外の身体部位に音響に合わせて振動刺激を提示し、その際の情動変化の程度を比較するものである。また、耳介は将来的な応用形態としてイヤホン・ヘッドホンとの共存が容易であり、椅子やベストを必要としない装置として期待できる。

2.2 情動喚起を目的とした触覚提示の事例

本手法と同様に情動喚起を目的とした触覚提示の事例がいくつか報告されている。例えば、締め付け機や T. Jacket は自閉症の患者の為に開発された触覚提示装置であり、身体を挟み込んで圧迫刺激を加えることで患者に安心感を与えるものである[22][29]。また古川らは

スマートフォンに振動子を貼り付け、遠隔地間で掌をくすぐり合うことを可能とする装置、“KUSUGURI”を提案している[7]。これはスマートフォンに掌の画像を表示し、その画像をくすぐると遠隔地のスマートフォンが振動するものであり、情動誘発を目的とした装置であると言える。ただし、締め付け器や KUSUGURI は、音楽やラジオなどの既存の音響コンテンツと組み合わせた利用を想定しておらず、音響コンテンツと組み合わせた際の効果を検証していない。本論文はこの情動喚起を目的とした触刺激を音響刺激と組み合わせた際の情動増幅効果を定量化するものであるため、これらの事例とは異なる。

一方で、映像・音響コンテンツに合わせて、心臓の脈動などの様々な内受容感覚を模擬した触刺激を人に提示する事で、情動に働きかける試みがある[8][9][30]。これらは、心臓の脈動や背筋のゾクゾク感などを模擬した触刺激を人に提示し、それを自己の脈動と誤認させることによって、情動に働きかける試みである。情動に働きかけるという目的は共通であるが、そのための手法は異なると考えられる。これらの手法は内受容感覚を誤認させるものであり、我々の手法は情動を喚起しやすい身体部位を刺激するものである。

2.3 刺激の重畳による情動増幅事例

刺激の種類は異なるが、喚起される情動としては同一の場合がある。例えば笑いは、くすぐりとユーモアの両方で喚起される。また不快の情動は、腹痛や映像コンテンツによっても喚起させることがある。

これらの情動性の刺激はお互い影響し合うことが報告されている。例えば、吊り橋の上で異性と話すとその異性に好意を抱きやすくなるという現象がある[20]。これは揺れる吊り橋によって生じる生理的な興奮が異性への好意によるものであると誤認されることで、異性への好意が増幅される現象である。異性への好意によって生じる生理的な興奮と恐怖により生じる生理的な興奮は同種の反応であることが知られている[21]。つまりこの場合は異性に話しかけるという行為がコンテンツであり、吊り橋が同種の生理反応を重ね合わせる情動増幅器として機能していたと考えられる。また内臓感覚刺激として食道拡張刺激を提示しながら悲哀の情動を喚起する音楽を聴取すると悲哀の情動が高まることも報告されている[25]。さらに我々は人の前腕部体毛を静電気で立毛させることで鳥肌を擬似的に再現し、音響によって生じる驚きが増幅されることを示してきた[26][27]。

これらの事例はいずれも生理反応を外部から提示し、生理状態を誤認させることによって情動を増幅させること例である。これに対して心動は、音響信号から生成した触刺激パターンを情動的に敏感な部位に提示し、情動を増幅させるものであり、情動増幅のアプローチが異なると考えられる。

3 音声コンテンツを用いた情動増幅効果の検証

音響に合わせて耳介に触刺激を提示した際の情動の変化を観察するために実験を行った。文献[3]において音声刺激を用いて情動を喚起させる取り組みがある。よって、ここでは情動を喚起しやすいと考えられる人の声を音響コンテンツとして利用し、音響のみを提示した場合の情動を基準として音響に触刺激を加えた際の情動の変化を評価した。

3.1 実験装置

実験装置の概観を図 1 に示す。耳介に触刺激を提示するために扁平型振動モータ(FM34F, T.P.C 社製)を利用した。これを耳介に両面テープで貼り付けることで触刺激を提示した。音響はイヤホンから提示する。イヤホンを装着した状態で耳介に振動を加えると外耳閉鎖効果によって振動が音として外耳道の中で反響してしまう[10]。そこでこの効果を減衰させるためにオープン型のイヤホンを使用した。

実験装置の構成を図 2 に示す。オーディオプレイヤーから音響と触刺激を生成する。オーディオプレイヤーの出力信号をステレオ分岐で 2 分し、一方をイヤホンに入力し、もう一方をアンプにより増幅した後に整流し振動モータに入力する。このように振幅情報のみ残された直流に変換することで振動子の DC モータを駆動することができる(図 3)。

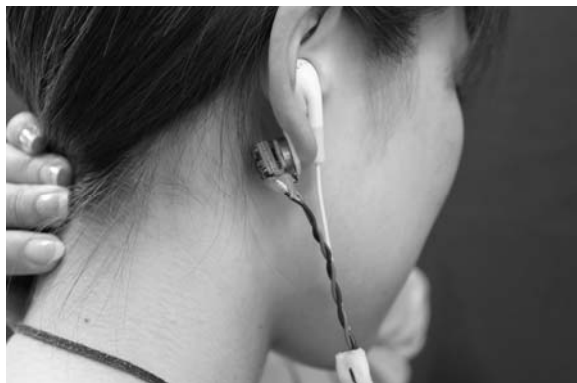


図 1 実験装置の概観

Fig. 1 Appearance of the experimental device

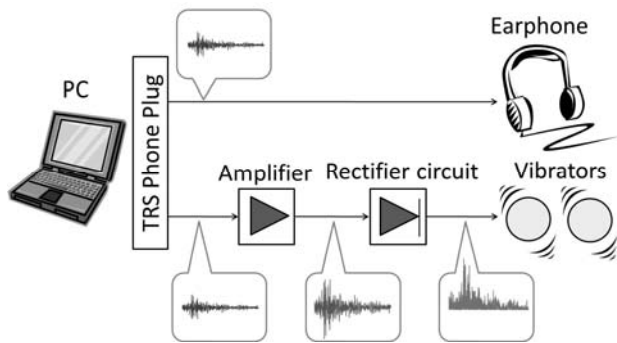


図 2 実験装置の構成

Fig. 2 System Configuration of the experimental device

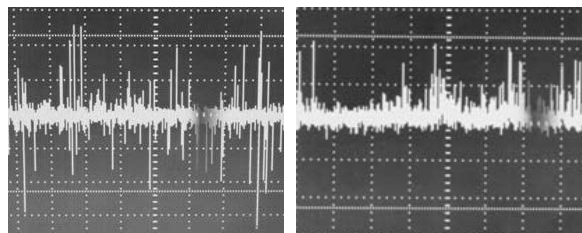


図3 左：整流前の電圧波形，右：整流後の電圧波形（縦軸の目盛り：5.00V，横軸の目盛り：500ms）

Fig. 3 Left: a voltage profile before a rectifier circuit, right: a voltage profile after a rectifier circuit.

3.2 実験条件および手続き

被験者は 20 代の健常な男女 10 名(女性 5 名, 男性 5 名)である。すべての被験者はこの実験で初めて実験装置を体験し、実験目的について一切知らせていない。なお実験中には音声に集中するようアイマスクにより視覚情報を遮断した。

情動喚起のための音響コンテンツとして 6 人の声優の音声(honeybee, 羊でおやすみシリーズ)を用いた[4]。このコンテンツを選定した理由は、この楽曲はシリーズで展開しており、同一のセリフの様々な男女の声優を素材として利用できるため、音声そのものへの個人的な好みにも左右されない結果が得られると考えたためである。6 種類の音声はすべて睡眠を促すような羊を数える音声で、長さは 15 秒である。被験者には 1 種類の音声に対して、音声のみの場合と音声に耳介への触刺激を加えた場合の 2 パターンを体験させ、その際に喚起した情動の強さを比較させた。ここでは前者の音声のみを「A」条件、後者の音声に触刺激を加えたものを「AH」条件と定義する。この 2 パターンを 1 試行とし、それぞれの音声に対して「A」条件から「AH」条件の順で体験する群とその逆順で体験する群を用意した。これは同一の音声刺激を 2 回聴かせた場合に、順序によって回答の傾向に差が出る可能性への対処である。

1 試行の時間内訳は、音声刺激(「A」か「AH」条件) 15 秒・インターバル 10 秒・音声刺激(「AH」か「A」条件) 15 秒・アンケート回答時間 40 秒となっている。これを 6 種類の音声コンテンツ分繰り返す。

喚起した情動の主観的強度を測定するために 7 段階のリッカート尺度のアンケートを使用した。測定する情動の尺度は「不快-快」、「沈静-興奮」、「弛緩-緊張」の項目である。この 3 項目はヴェントの情動の 3 方向説に基づいており、人の情動はこの 3 項目の合成で表せるという仮説である[4]。被験者にはそれぞれの項目に対して音声のみの場合を基準としてどう変化したかを-3:極めて不快、-2:不快、-1:やや不快、0:何も感じない、1:やや快、2:快、3:極めて快といった尺度で回答させた。また、この手続終了後に「デバイスを使用した感想」、「このデバイスを再度使いたいかどうか」などの自由回答形式のアン

ケートを行った。

3.3 実験結果および考察

表 1 に被験者 10 名のアンケート結果の度数分布を示す。図の横軸がアンケートの尺度で、縦軸はその尺度で回答した数を表している。回答総数は被験者 10 名 × 6 種類の音声パターンを用いたので 60 回答である。

表 1 より、「不快-快」の項目に関しては、「2:快」の回答数が最も多く、「沈静-興奮」に関しては、「1:やや興奮」の回答数が最も多く、「弛緩-緊張」に関しては、「0:何も感じない」の回答数が最も多かった。よって耳介に振動刺激を提示することで快や興奮の情動が増幅される傾向はあるが、弛緩-緊張の軸の情動はあまり増幅されないことが示唆された。

自由回答のアンケートにて、デバイスを再度利用したいかどうか回答させたところ、10 名中 9 名の被験者が再度利用したいと回答した。

この実験では情動を喚起させる音響コンテンツとして声優の音声を利用し、その結果、快と興奮の情動が増幅されることが示唆された。ただしこの結果は音響コンテンツ自体の特徴が快の情動を誘発するものであり、その情動が増幅された為の結果であると考えられる。そのため本実験装置の情動増幅効果を明らかにしたとはいえない。

表 1 アンケート結果の度数分布。最頻値を色付けした

Table 1 Distribution of questionnaire score.

Questionnaire score	-3	-2	-1	0	1	2	3
Pleasant(3) - Unpleasant(-3)	1	3	8	8	14	19	6
Excited(3) - Depressed(-3)	0	5	11	17	18	8	1
Tense(3) - Relaxed(-3)	1	4	17	26	8	4	0

4 情動喚起コンテンツの選定実験

前章の実験で実験装置が情動を変化させることを示唆したが、音響コンテンツの情動的特長が一様であったため、実験装置がどの情動に対して有効であるかは検証できていない。そこで本章では、これを実証するための準備としてヴントの情動 3 方向説のそれぞれの軸の情動を喚起しうる音響コンテンツを選定する実験を行った。

4.1 実験条件および手続き

被験者は健康な 20 代男女 6 名(男性 3 名, 女性 3 名)である。被験者には実験目的について一切知らせていない。実験装置は前実験と同一であるが、触刺激を提

示しないため実験装置はイヤホンのみである。

この実験では IADAS という音響素材集からあらかじめ情動を喚起しうると考えられる人の悲鳴、動物の泣き声、機械音、クラシック音楽、歓声などの音を 30 種類選び、被験者に提示した[6]。被験者は自ら音響コンテンツを再生し、1 種類聴くたびに音の評価を行った。この際、音響コンテンツは何度でも再生して良いものとした。被験者にはアナログスケールで 0 を中央として左右に振れるほど喚起した情動が大きくなるように回答させた。スケールの項目は予備実験 1 と同じくヴントの情動 3 方向説に基づいている。

この実験では快・不快・興奮・沈静・緊張・弛緩の 6 種類の情動を喚起しうる音響コンテンツを選定するために、各アナログスケールの中央を 0 とし、左端と右端のどちらも 1 として正規化した。これにより各情動の強さを正の値で算出できる。各音響コンテンツに対して 6 種類の情動ごとに被験者 6 名の回答を平均し、そのコンテンツの情動的性質とした。全 30 種類の音響コンテンツの中から 6 種類に対して最も平均の高かったものを 2 つずつ選定した。

表 2 選定した音響コンテンツ一覧 (選定曲を色付け)

Table 2 Selected sound list

	Emotion	Unpleasant	Pleasant	Depressed	Excited	Relaxed	Tense
Description of sound stimuli	Vomit	0.76	0.00	0.00	0.13	0.00	0.58
	Belch	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54
	RockNRoll	0.00	0.65	0.00	0.51	0.58	0.13
	Crowd2	0.09	0.59	0.39	0.58	0.62	0.64
	Laughing	0.31	0.54	0.77	0.13	0.56	0.42
	Clock	0.00	0.50	0.69	0.00	0.48	0.08
	Buzzer	0.50	0.00	0.00	0.63	0.00	0.57
	Choir	0.00	0.31	0.50	0.56	0.45	0.11
	Bongos	0.00	0.58	0.00	0.49	0.71	0.00
	Robin	0.14	0.58	0.66	0.21	0.66	0.35
	Crowd3	0.54	0.00	0.00	0.37	0.00	0.75
	Victim	0.69	0.09	0.00	0.47	0.00	0.69

4.2 実験結果

選定したコンテンツの情動評価の結果を表 2 に示す。表の行は選定された音響コンテンツの種類を、列は 6 つの情動の種類を、セルの値は被験者の回答の平均値である。選定した上位 2 種類の音響コンテンツに色付けした。

5 情動喚起コンテンツを用いた情動変化の評価

前章にて選定した 6 つ情動を喚起しうる音響コンテンツを用いて心動がどの情動に対して有効であるかを検証するための実験を行った。なお実験装置は 3 章と同一である。

5.1 実験条件および手続き

被験者は 20 代の健常な男女 8 名(女性 5 名, 男性 3 名)である. 音声に集中してもらうためにパーテーションで区切った空間で実験を行った. 音響コンテンツは予備実験で選定した 12 種類の音響コンテンツである.

12 種類の音響コンテンツそれぞれに対して, 音響コンテンツのみを提示する条件(「A」)・音響コンテンツに振動を加えた条件(「AH」)・振動のみの条件(「H」)の 3 つを用意し, 合計 36 試行の刺激をランダムに提示した. これは順序効果の影響を排除するためである. また振動のみの条件は被験者が実験の条件設定の意図を察知しにくくするためである.

音響コンテンツを「A」「AH」「H」のいずれかの条件で 3 回提示した後に, その際に喚起した情動を 15 秒のアンケート回答時間内で回答させた. 1 試行の時間内訳は, 音響コンテンツ 6 秒×3 回・アンケート回答時間 15 秒である. 喚起した情動の測定には予備実験と同じアナログスケールを使用した. 被験者には 0 を中心として左右に振れるほど喚起した情動体験が大きくなるように回答させ, 情動が喚起されなかった軸には何も書き込まないようにさせた.

5.2 実験結果

音響により喚起される情動の特長は, 被験者ごとの個人差が大きいことが報告されている[12]. よって本実験では「AH」条件と「A」条件の情動を被験者内で比較した. 具体的には下記の処理をした.

1. 全回答に対して 5.1 の手順で 6 つの情動の強度を 0 から 1 の正の値で算出した.
2. 「AH」条件から「A」条件を減算することで, 6 つの情動それぞれの強度差を算出した. ただし「A」と「AH」の両方で情動を喚起しなかった回答(強度が 0)は除いた.
3. 2 で算出した情動の強度差の分布が正規分布に従うかどうかをシャピロウィルク検定で調べたところ, すべての情動の強度差が正規分布に従うことがわかった(不快の情動($p = .461$), 快の情動($p = .649$), 沈静の情動($p = 0.663$), 興奮の情動($p = 0.56$), 弛緩の情動($p = 0.891$), 緊張の情動($p = 0.223$)). 6 つの情動の強度差の平均値と標準誤差の結果を図 4 に示す. 左から不快, 快, 沈静, 興奮, 弛緩, 緊張の結果である.
4. 各情動について触刺激のある・なし(「A」条件と「AH」条件)を被験者内要因とする対応のある t 検定を行った. 検定の結果, 不快・快・興奮の情動においては触刺激ありの条件で情動が増加し($p < .001$), 逆に弛緩においては触刺激ありの条件で情動が減少することが分かった($p < .005$).

5.3 考察

快・不快・興奮のいずれの情動も身体への生理反応としては興奮性のものであり, 交感神経系の活動によってもたらされる情動である. その一方で, 弛緩は副交感神経系の活動によってもたらされるものである. 本手法は前者に対して有意な増幅作用が認められ, 後者に対しては有意な減衰作用が認められた. よって, 本手法が交感神経系の活動によってもたらされる情動喚起に対して有効な手法であることが考えられる.

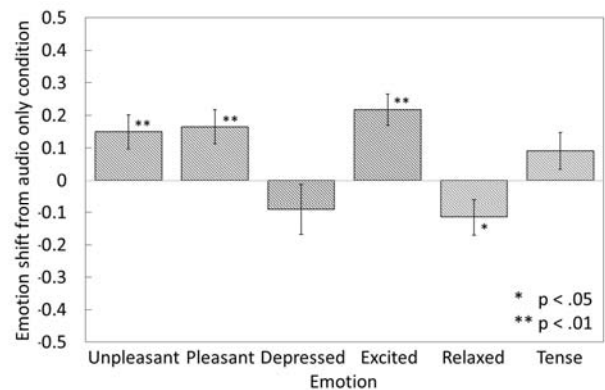


図4 「A」条件を基準とする「AH」条件の情動の強度差の平均値と標準誤差

Fig. 4 Means and Standard error (SE) of emotion change compared to the audio only condition.

6 他の体部位との情動変化の比較

6.1 実験概要

前章の実験にて, 音響に同期して耳介に振動刺激を加えることで交感神経系の情動表出を伴う情動が増幅されることが分かった. 本章では, この情動増幅効果が耳介に特異的であることを検証することを目的とする. そのために耳介以外の体部位とその情動の強度を比較した.

6.2 実験装置

前章の実験までは触覚提示の為に振動モータを利用した. 振動モータは小型かつ強力な振動を生じさせられるが, 電圧印加から振動の発生までに 100ms の遅延が生じることが知られている[28]. そこでこの実験では小型なボイスコイル型の振動子 (Haptuator Mark II, Tactile Labs Inc) を利用した.

実験装置の構成を図 5 に示す. 3 章と同様にオーディオプレイヤーからの出力信号 2 分し, 一方をイヤホンに, もう一方をアンプにより増幅した後にボイスコイル型の振動子に印加する. 後に説明するが本実験では耳介との比較部位として背中・前腕・指腹にも振動を提示する. そのため全ての部位に振動子を貼付した状態で, 出力切替器によって振動させる部位を選択した. なお振動子・イヤホンに印加する電圧の値は全ての部位で

同一にし、被験者には振動が音に合わせて十分に知覚できる電圧に調整させた上で実験を行った。

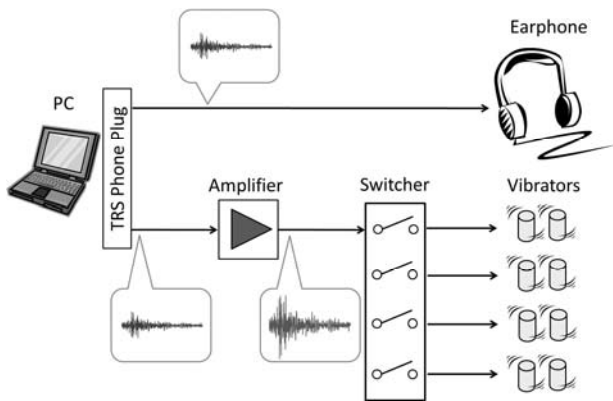


図5 実験装置の構成

Fig. 5 System Configuration of the experimental device

6.3 実験条件および手続き

被験者は20代の健全な男女11名(女性2名, 男性9名)である。すべての被験者はこの実験で初めて実験装置を体験し、実験目的について一切知らせていない。実験中は音声に集中してもらうためにパーティションで区切った空間で実験を行った。

耳介と比較する振動提示部位として、背中・前腕・指腹を選択した。背中は椅子型の体感音響装置で利用される刺激部位であり、指腹は人の2点弁別閾が狭く、振動刺激提示部位として頻りに利用される部位であり、前腕部は2点弁別閾が広く、振動提示部位として利用されることが多く、耳介と同様の有毛部である。

本実験で使用する振動子はボイスコイル型であるためにオーディオ機器からの信号を整流せずに印加できるが、触覚受容器の知覚周波数特性において1KHz以上の振動成分は触覚として知覚されにくいことが考えられる[32]。前章の実験で使用した12種類の音響コンテンツの内の5種類は1KHz以上の音響成分を多分に含むものであったため、本実験では別の音響コンテンツで置き換えた。置き換えたコンテンツは予備実験にて同様の情動を喚起したものである。

これら12種類の音響コンテンツそれぞれに、音響コンテンツのみと音響コンテンツに振動を加えた2条件、触刺激提示部位として耳介・背中・前腕部・指腹の4条件を用意し、合計96試行の刺激をランダムに提示した。被験者は各試行後にアンケートに回答した。

アンケートは前実験と同一のアナログスケールを使用した。被験者には0を中心として左右に振れるほど喚起した情動体験が大きくなるように回答させ、情動が喚起されなかった軸には何も書き込まないようにさせた。

6.4 実験結果

前章と同様に、全回答に対して、6つの情動の強度を0から1の正の値で算出した。6つ情動それぞれに対し

て、触刺激条件(触刺激なし・耳介への触刺激・背中への触刺激・前腕部への触刺激・指腹への触刺激)を被験者内要因とし、Mauchlyの球面性の検定と反復測定1要因分散分析を行った。ただしすべての触刺激条件で情動を喚起しなかった回答(強度が0)は除いた。

不快の情動に関しては、Mauchlyの球面性の検定の結果、球面性が仮定されなかったため、Greenhouse-Geisserによる自由度の修正をし、分散分析を行った。分析の結果、全体的に相違が認められた($F(3.37, 303.14)=5.23, p<.01$)。多重比較(Holm)の結果、耳介に触刺激を付与した条件と背中に触刺激を付与した条件は触刺激なしの条件より情動が有意に大きいことが分かった($p<.05$) (図6左)。

快の情動に関しては、Mauchlyの球面性の検定の結果、球面性が仮定されなかったため、Greenhouse-Geisserによる自由度の修正をし、分散分析を行った。分析の結果、全体的に相違が認められた($F(3.64, 330.9)=4.70, p<.01$)。多重比較(Holm)の結果、耳介に触刺激を付与した条件と背中に触刺激を付与した条件は触刺激なしの条件より情動が有意に大きいことが分かった($p<.05$) (図6右)。

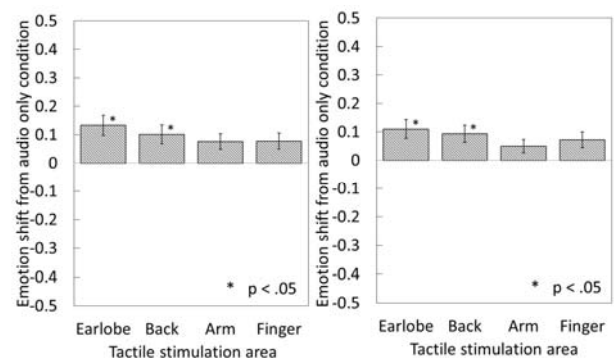


図6 不快(左)と快(右)の、触刺激なしを基準とする触刺激あり条件の情動の強度差の平均値と標準誤差

Fig. 6 Means and Standard error (SE) of emotion change compared to the audio only condition (left: “unpleasant”, right: “pleasant”).

沈静の情動に関しては、Mauchlyの球面性の検定の結果、球面性が仮定されなかったため、Greenhouse-Geisserによる自由度の修正をし、分散分析を行った。分析の結果、全体的に相違は認められなかった($F(3.37, 236.12)=1.41, ns$) (図7左)。

興奮の情動に関しては、Mauchlyの球面性の検定の結果、球面性が仮定されなかったため、Greenhouse-Geisserによる自由度の修正をし、分散分析を行った。分析の結果、全体的に相違が認められた($F(3.51, 414)=12.88, p<.01$)。多重比較(Holm)の結果、触刺激ありのすべての条件(耳介・背中・前腕・指腹)は触刺激なしの条件より情動が有意に大きいことが分かった

($p < .05$). また耳介への触刺激ありの条件は、前腕に触刺激がある条件と背中に触刺激がある条件のどちらよりも有意に情動の強度が大きいことが分かった ($p < .05$) (図 7 右).

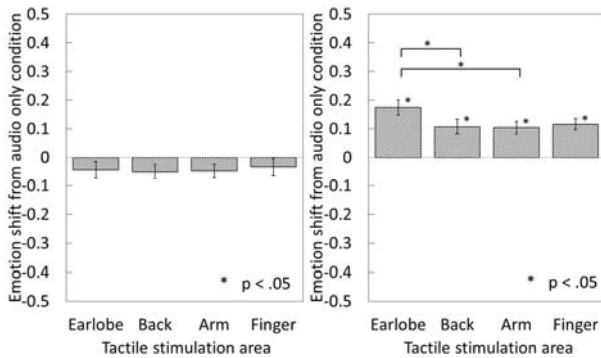


図7 沈静 (左) と興奮 (右) の、触刺激なしを基準とする触刺激あり条件の情動の強度差の平均値と標準誤差

Fig. 7 Means and Standard error (SE) of emotion change compared to the audio only condition (left: “depressed”, right: “excited”).

弛緩の情動に関しては、Mauchly の球面性の検定の結果、球面性が仮定されなかったため、Greenhouse-Geisser による自由度の修正をし、分散分析を行った。分析の結果、全体的に相違は認められなかった ($F(3.63, 279.57)=1.63, ns$) (図 8 左).

緊張の情動に関しては、Mauchly の球面性の検定の結果、球面性が仮定されなかったため、Greenhouse-Geisser による自由度の修正をし、分散分析を行った。分析の結果、全体的に相違が認められた ($F(3.48, 375.83)=15.19, p < .01$). 多重比較(Holm)の結果、触刺激ありのすべての条件(耳介・背中・前腕・指腹)は触刺激なしの条件より情動が有意に大きいことが分かった ($p < .05$) (図 8 右).

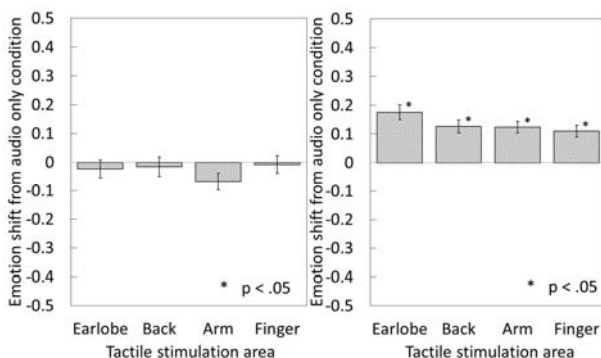


図8 弛緩 (左) と緊張 (右) の、触刺激なしを基準とする触刺激あり条件の情動の強度差の平均値と標準誤差

Fig. 8 Means and Standard error (SE) of emotion change compared to the audio only condition (left: “relaxed”, right: “tense”).

6.5 考察

触刺激を付与した全ての条件で前章と同様の傾向が観察された。具体的には、「不快」「快」「興奮」「緊張」の交感神経系の情動表出を伴う情動に対しては増幅する傾向がみられ、副交感神経系の情動表出を伴う情動に関しては、情動は特に変化しない傾向がみられた。ただし「快」「不快」の情動に関して有意な増幅効果が認められたのは耳介と背中のみであった。

2点弁別閾の細かさとしては指腹が最も敏感であるが、情動の増加量とは特に相関はみられなかった。よって識別感覚としての触覚の敏感さとは異なる要素が情動増幅に関わっていると考えられる。

耳介・背中・前腕部は有毛部であり、耳介と背中では「不快」「快」「興奮」「緊張」の4つの情動において有意な増幅効果が認められたが、前腕部では「興奮」「緊張」の2つの情動においてのみ有意な増幅が認められた。この傾向は無毛部である指腹と同一であり、有毛部と無毛部の違いは情動増幅の要因ではないと考えられる。

「不快」「快」「興奮」「緊張」などの情動を喚起させる音響コンテンツの情動を増幅させる場合は、耳介と背中が有効であると考えられる。これら4つの情動においては、耳介が背中より情動の増幅効果が高い(ただし有意差が認められたのは「興奮」のみである)。また耳介の場合は振動子をヘッドホンに組み込めるため実装が簡便である。よって、ポータブルな体感音響装置を作る場合は耳介への触刺激が有用であると考えられる。

音響コンテンツによって、耳介には適するが、耳介以外の部位には適さないことが考えられる。そこで、コンテンツごとにアンケートのスコアを平均したところ、大きく2つの傾向が観察された。第1に、すべての部位で一般的な情動変化が生じたコンテンツであり、第2に、部位ごとに異なる情動変化が生じたコンテンツである。

第1のすべての部位で同様であったコンテンツは、RockNRoll と Choir という2つの音楽と、川の流水音(Brook)である。RockNRollの結果を表3に示す。RockNRollは、全ての部位で快が有意に上昇し、Choirは、全ての部位で興奮が有意に上昇した。川の流水音は、全ての部位で興奮と緊張が有意に上昇した。

第2の部位ごとに情動変化が異なったコンテンツは、周囲で物が割れる音(Crash)、周囲を蜂が飛び回る音(Bees)、あくびの音声(Vomit)、ゲップの音声(Belch)である。前者2つは環境から発する音であり、後者は人体から発する音である。前者(Bees)と後者(Vomit)の結果をそれぞれ表3に示した。身の回りで物が割れる音では、前腕と指腹で興奮・緊張が有意に上昇し、周囲で蜂が飛び回る音では、指腹のみで快が有意に上昇した。一方で、あくびの声やゲップする音では、耳介と背中で興奮や緊張が有意に上昇した。よって、指腹と前腕は環境音の際に情動変化を生じやすく、耳介と背中は音

声の際に情動変化を生じやすいと考えられる。

表 3 コンテンツごとの集計結果 (* p<.05, ** p<.01)

Table 3 Questionnaire result for each sound

Emotion	Pleasant	Unpleasant	Excited	Depressed	Tense	Relaxed	
RockNRoll	Ear lobe	0.16*	-0.08	0.33**	-0.15	0.17*	-0.02
	Back	0.08	0.09	0.31**	-0.11	0.17	-0.10
	Arm	0.01	-0.02	0.24*	-0.14	0.25**	-0.19**
	Finger	0.01	0.08	0.30**	-0.12	0.19	-0.13
Bees	Ear lobe	-0.03	0.09	0.35**	-0.14	0.27*	-0.09
	Back	-0.11	0.14	0.18*	-0.08	-0.21	0.15
	Arm	-0.12	0.16	0.11	-0.08	0.08	-0.17
	Finger	0.17**	-0.07	0.16	-0.00	-0.07	0.14
Beach	Ear lobe	-0.10	0.32	0.28**	-0.14	0.43**	-0.37*
	Back	-0.07	0.25	0.18**	-0.10*	0.47**	-0.42**
	Arm	-0.02	0.16	0.16	-0.09	0.26	-0.23
	Finger	0.01	0.08	0.05	0.00	0.11	-0.07

7 交感神経性発汗反応におよぼす影響の評価

7.1 実験概要

前章までの実験で、交感神経の情動表出を伴う情動であれば、振動刺激の付与により情動の主観的強度を有意に増加できることを示唆した。ただし、この動かされた情動の量がどの程度効果を持っているかが不明確であった。工学的観点においては、自律神経の変化が生じるほどの大きな効果であるか、一方で、自律神経の変化は生じないが、主観的強度が変化する程度の効果であるかを明らかにする必要がある。そこで自律神経指標を用いて効果の程度を明らかにするために実験を行った。ここでは、精神的興奮度の客観的指標である交感神経性発汗反応を計測するために、皮膚コンダクタンス反応(SCR)の計測器を利用した。

7.2 実験装置

前章の実験装置に皮膚コンダクタンス(SCR)反応の測定器(DA-3b, VEGA SYSTEMS)、フィルタ・増幅回路、マイクロプロセッサ(mbed LPC1768, NXP Semiconductors)、SDカードを加えた(図5)。計測器からの出力電圧は直流成分を含んでいるために、フィルタ回路のコンデンサと抵抗で直流成分をカットし、その後、オペアンプ(LM358N, National Semiconductor)で増幅し、AD変換端子に入力した。マイクロプロセッサは入力されたデータをSDカードに記録する。また、音響刺激と測定器のデータを同期させるために、PCから音響刺激を再生すると同時に、シリアル通信でマイクロプロセッサに音響刺激の開始時刻を送信した、なおSCRの記録時間は音響開始時刻から10秒間であり(音響コンテンツは6秒間)、AD変換のサンプリング周波数は100Hzである。

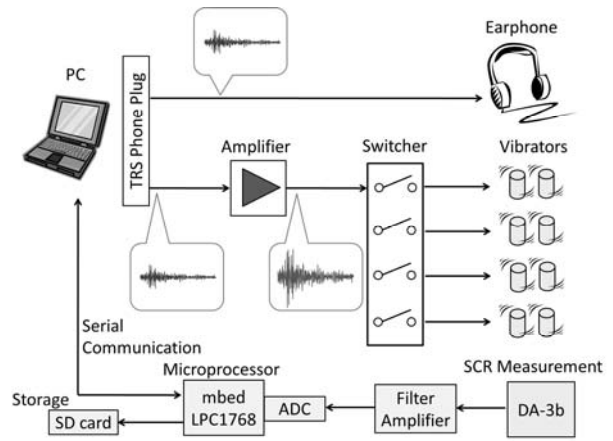


図9 実験装置の構成

Fig. 9 System Configuration of the experimental device

7.3 実験条件および手続き

被験者は20代の健全な男女7名(女性2名, 男性5名)である。すべての被験者はこの実験で初めて実験装置を体験し、実験目的について一切知らせていない。実験中は音声に集中してもらうためにパーテーションで区切った空間で実験を行った。なお、振動提示部位とアンケートは6章の実験と同一である。

ここでは、6章で利用した音響コンテンツの中から、情動変化が明確であった6種類の音響コンテンツを利用した。音響のみの条件と音響に振動を加えた4条件(耳介・背中・前腕部・指腹)の計5つの触刺激条件を用意し、合計30試行の刺激をランダムに提示した。被験者は各試行後にアンケートに回答した。

なお、皮膚コンダクタンス反応計測器の出力電圧は人によって異なるため、実験前に計測器を装着し、深呼吸時の振幅電圧が2~3.3Vの範囲に収まるように増幅回路の増幅率を調整した上で実験を行った。

7.4 実験結果と考察

情動の主観評価に関しては、前章と同一の流れで分析した。有意差も前章と同様の傾向が認められたが、快の情動は耳介と背中で有意に増加しなかった。実験に利用する音響コンテンツを選定する際に快の情動変化が少ないものを選定してしまった可能性がある。

交感神経性発汗反応の指標である皮膚コンダクタンス反応(SCR)に関しては、SCRの振幅を指標として利用した。触刺激条件(触刺激なし・耳介への触刺激・背中への触刺激・前腕部への触刺激・指腹への触刺激)を被験者内要因とし、Mauchlyの球面性の検定と反復測定1要因分散分析を行った。

Mauchlyの球面性の検定の結果、球面性が仮定された。反復測定1要因分散分析の結果、全体的に相違が認められた(F(4, 156)=10.1, p<.01)。多重比較(Holm)の結果、全ての部位において触刺激を加えることで有意に皮膚コンダクタンス反応が増加することが分

かった($p < .05$) (図 10).

以上の結果より, 耳介や背中に音響に合わせて振動刺激を提示すると, 「不快」「興奮」「緊張」の3つの情動が有意に増加し, 前腕部や指腹に振動刺激を提示すると「興奮」「緊張」の2つの情動が有意に増幅する. さらに, その情動変化の効果は, 交感神経性発汗反応が有意に増加する程度であることが分かった.

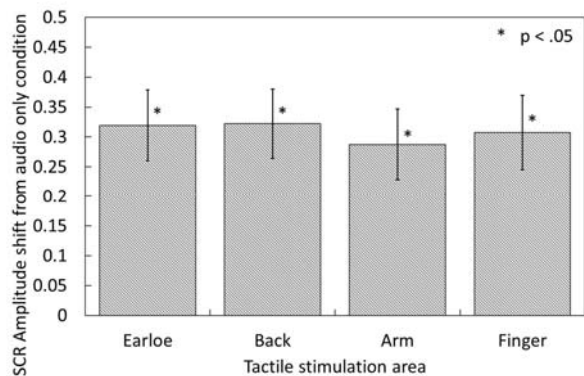


図 10 触刺激なし条件を基準とする触刺激あり条件の皮膚コンダクタンス反応の振幅の変化の平均値と標準誤差

Fig. 10 Means and Standard error (SE) of SCR amplitude change compared to the audio only condition.

8 総合考察

5, 6 章より, 耳介への触刺激は, 交感神経の情動表出を伴う情動(「不快」「快」「興奮」「緊張」)を有意に増加させたが, 副交感神経系の情動表出を伴う情動(「沈静」「弛緩」)に対しては有意な増幅効果は認められなかった. 7 章より, 同様のコンテンツで自律神経反応を計測したところ, この増幅効果は, 交感神経性発汗反応が有意に増加する程の効果であることが分かった(ただし 7 章の主観評価では「快」の有意な増加は認められなかった).

6, 7 章より, 耳介以外の身体部位においても同様の情動増幅効果が認められたが, 「不快」「快」「興奮」「緊張」の4つすべての情動に対して増幅効果が認められた部位は耳介と背中のみであり, 前腕部と指腹は「興奮」「緊張」の2つの情動に対してのみ有意な増幅効果が認められた.

著者らは, 音響に合わせた振動刺激で「快-不快」の情動を増幅させるためには, 2つの要素が重要であると考えている. 第1に音響刺激と振動刺激の空間的な一貫性である. 例えば, 表3に示したように, 周囲から音が発せられるコンテンツ(Bees)の場合は, 音響コンテンツと空間的に整合した指腹に振動刺激を提示することで「快」が有意に増加したが, その他の部位では有意な増加は認められなかった. 第2に, 触刺激を提示した際に「快-不快」の情動を喚起しやすい身体部位を利用することである. Essick らは, 同一の触刺激を腕や顔に提示した際に, 腕よりも顔のほうが有意に快の情動が高

いことを示唆しており[36], 普段触れられる機会が少ない部位は「快-不快」の情動を喚起しやすい部位であると考えられる. 耳介や背中では前腕や指腹に比べて普段触れられる機会が少なく, 「快-不快」の有意な増加が認められたのはこのためであると考えられる.

6, 7 章の振動装置を耳掛け型のイヤホンに取り付けた装置を製作し, 一般の体験者の反応を集めた. 使用したコンテンツは実験1で利用した男女の声優の音声[4], スローテンポなポップ音楽(Sleep Away)[33], ハイテンポなポップ音楽(Kalimba)[34], ゲームのプレイ動画[35]である. ハイテンポなポップ音楽とゲームのプレイ動画が特に好まれることが多かった. また男性の体験者の場合は女性の声優の音声の場合に, 女性の体験者の場合は男性の声優の音声の場合に本装置が効果的であるという意見が多かった. 交感神経系の情動表出を伴う情動を喚起する音響コンテンツにおいて有効であるという点で 5 章や 6 章と一致する観察結果であると考えられる.

実験の条件に関して, 6 章では体部位間の電圧を揃えることで実験条件を統制したが, 有毛部と無毛部で触覚の振動知覚周波数特性が異なることが指摘されている[37]. よって今後は部位ごとの振動知覚周波数特性に応じて振幅を調整した上で比較実験を行う必要がある. 本研究ではオープン型のイヤホンを使用することで外耳道遮蔽効果を少なくしていたが完全に消せてはいない. そのため耳介への振動付与の条件では聴覚成分が混在しており, それが情動増幅に寄与していたとも考えられる. 今後どちらの成分が情動増幅に寄与しているのか検証していく必要がある. また, 本論文の実験ではこの装置を繰り返し利用した際の効果の持続に関しては検討できていない. もし繰り返し利用した場合に情動増幅効果が減衰するならば, それを緩和するための設計を検討する必要がある.

本論文では背景として音楽鑑賞に用いることを述べたが, 音楽コンテンツをおける有効性はまだ検証していない. 今後は実際の音楽コンテンツに適用した際の情動変化を観察していく必要がある.



図 11 装置の概観と声優の音声を再生した際の様子
Fig. 11 Left: Appearance of the integrated device, Right: Participants reactions when voice content was presented

謝辞

本研究は JSPS 科研費 11J10524 の助成を受けた.

参考文献

- [1] Stereomood: <http://www.stereomood.com/>
- [2] 東山ら. 触覚と痛み, プレーン出版, 2000.
- [3] 濱ら. 感情心理学への招待: 感情・情緒へのアプローチ, サイエンス社, 2001.
- [4] Reisenzein, R., A structuralist reconstructi..., The structuralist program in psychology, pp. 141-189, 1992.
- [5] Honeybee 羊でおやすみシリーズ: http://www.honeybee-cd.com/hituji_top.html
- [6] Bradley Margaret M., et al. IASS-2. ..., NIMH Center for the Study of Emotion and Attention, 2007.
- [7] Furukawa Masahiro, et al. KUSUGURI: a shared tactile interface..., In Proceedings of the AH'12, 2012.
- [8] Nishimura, N., et al. Facilitation of affection by tactile feedback of..., CHI EA '12. pp. 2321-2326. 2012.
- [9] マチャトリア.
http://mendora.com/works/matcha/matcha_JP.htm
- [10] 村井ら. イヤホン..., 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響, Vol. 103, No. 397, pp. 31-36, 2003.
- [11] 谷口 高士, 音楽..., 心理學研究 00215236 学術雑誌目次速報データベース由来, pp. 463-470, 1995.
- [12] 大出ら. 音楽聴取における"感動"の..., 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 3, pp. 1111-1121, 2009.
- [13] Zentner Marcel, et al. Emotions evoked by the sound of music:.... Emotion, Vol. 8, No.4, pp. 494-521, 2008.
- [14] 高橋ら. 音楽聴取が情動に与える変化について..., 心身医学, Vol. 39, No.2, pp. 167-175, 1999.
- [15] Ryuta Okazaki, et al. Judged In Proceedings of the Word Haptics'13, pp. 663-666, 2013.
- [16] Ali Israr, et al. Exploring surround haptics displays. In CHI '10 Extended Abstracts, pp. 4171-4176, 2010.
- [17] Heilig Morton L.. Sensorama simulator. U. S. Patent No. 3, 050, 870. 28, 1962.
- [18] HQ1 vibration headphones, Koss Corporation: <http://www.koss.com/>
- [19] ゴールデンダンス株式会社, 骨伝導スピーカ, 特開 2007-74693, 2007. 3. 22.
- [20] Dutton Donald G., et al. Some evidence for heightened.... JPSP, Vol. 30, No. 4, pp. 510-517, 1974.
- [21] Mark F. Bear, et al. 神経科学~脳の探究~ 15章, 西村書店, 2007.
- [22] Temple Grandin, et al. 我、自閉症に生まれて. 学習研究社, 1994.
- [23] 曾根ら. 音の評価に使われることばの分析, 日本音響学会誌, Vol. 18, No.6, pp. 320-326, 1962.
- [24] 安藤 彰男. 高臨場感音響技術とその理論 IEICE Fundamentals Review, Vol. 3, No. 4, pp. 33-46, 2009.
- [25] Steven J. Coen, et al. Negative..., Gastroenterology, Vol. 137, No. 1, pp. 253-261, 2009.
- [26] Shogo Fukushima, et al. Facilitating a surprised feeling by artificial.... In Proceedings of the AH'12, 2012.
- [27] Shogo Fukushima, et al. Chilly chair:.... In ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies, 2012.
- [28] Masataka Niwa, et al. Vibrotactile apparen... In Proceedings of the ICAT'04, pp. 126-131, 2004.
- [29] T. Jacket. <http://www.mytjacket.com/>
- [30] Lemmens, P., et al. A body-conforming... In Proceedings of the World Haptics'09, pp. 7-12, 2009.
- [31] LeDoux, Joseph. The emotional brain: The mysterious underpinnings of.... Simon and Schuster, 1998.
- [32] 大山ら. 知覚ハンドブック, 誠信書房, 1994.
- [33] Sleep Away, Blujazz Records, 2004.
- [34] Ninja Tuna, NINJA TUNE, 2008.
- [35] ARMORED CORE V, フロム・ソフトウェア, 2012.
- [36] Essick, Greg K., et al. Psychophysical assessment of the affective.... Neuroreport 10.10, pp.2083-2087, 1999.
- [37] Tetsu Miyaoka, et al. REMENTS OF ..., International Society for Psychophysics, Vol.22, pp.229-232, 2006.

(2014年6月15日受付)

[著者紹介]

福嶋 政期 (正会員)



2011年, 日本学術振興会特別研究員(DC2). 博士課程在学中に米国 MIT へ留学. 2013年, 電気通信大学大学院博士課程修了. 博士(工学). 2013年, 東京大学大学院情報理工学系研究科特任研究員. タンジブル・触覚・情動インタフェースの研究に従事.

粟生 馨奈子(非会員)



2010年, 電気通信大学電気通信学部修了. 現在, 株式会社ソノリテ.

中田 明日香 (非会員)



2011年, 電気通信大学大学院電気通信学研究科修了. 現在, 株式会社 Lunaworks.

梶本 裕之 (正会員)



2003年, 東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程退学. 博士(情報理工学). 2001年, 日本学術振興会特別研究員(DC1). 2003年, 東京大学助手. 2006年, 電気通信大学助教授. 2007年, 同准教授. 触覚ディスプレイ, 触覚センサ, バーチャルリアリティシステムなどの研究開発に従事. 日本バーチャルリアリティ学会, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会各会員.