

基礎論文

安定した振動提示のための フィードバック制御による振動子の振動状態制御

丹羽 真隆^{*1*2} 野間 春生^{*1} 柳田康幸^{*3*1} 保坂憲一^{*1} Robert W. Lindeman^{*4*1}

Controlling the Perceived Vibrational Status of the Tactor by Vibrotactile Feedback

Masataka Niwa^{*1*2} Haruo Noma^{*1} Yasuyuki Yanagida^{*3*1} Kenichi Hosaka^{*1} Robert W. Lindeman^{*4*1}

Abstract – Vibrotactile displays are expected to be effective tools for presenting personal information. When designing a vibrotactile information display, it is important to present correct, stable stimulation. However, the mechanical stability of the vibration is affected by many conditions such as how the vibrators are attached to the person, where they are attached, as well as other factors. In order to maintain the target frequency and amplitude of the vibration independent of the affective factors, we propose a feedback method for vibrotactile displays. Then, we did a subjective experiment by using this feedback system. We found that the feedback gave some change to the sensation of most of the subjects.

Keywords : Vibrator, Vibrotactile, Haptic Sensation, Vibrotactile Feedback

1. はじめに

振動触覚を用いた情報提示は、視聴覚情報に情報を付加して提示する手段として、また、視聴覚による情報提示が不得手とする場面において使用できる。特に、ビジュアルディスプレイのようにユーザの視線方向に影響されることはなく、なおかつ本人だけに情報を提示したい場合、振動触覚による情報提示は有用である。振動触覚提示は、古くは感覚代行などの領域で盛んに研究がおこなわれていたが、それらの装置は TVSS[1]のように大がかりであった。しかし、近年、携帯電話やゲームのコントローラなどに使われているような、軽量かつ安価で取り扱いの容易な偏心モータ型振動子が入手可能になったため、振動触覚を用いた研究が再びよくおこなわれるようになった。

振動触覚は、視覚や聴覚のような特殊感覚とは違い、体全体にセンサが存在する。その特徴を利用し、体の広範囲をつかかって情報提示をおこなうことができる。例えば、Rupert らは、振動子が縫い込まれたベストをパイロットに着用させ、空中でどちらが重力方向かを

認識する手助けをする装置の研究をおこなっていた[2]。また、矢野らは、全身に計 12 個の振動子を取りつけ、没入型ディスプレイの中で、障害物にぶつかったことをユーザに知らせることによって、バーチャル空間をより歩きやすくする研究[3]や、前腕部に振動子を分布配置し、面状の情報提示を試みている[4]。最近の研究では、van Erp が振動子を胴回りに配置し、触覚における仮現運動を用いて情報を提示しようと試みている[5]。これらの例では、携帯電話やゲームのコントローラ同様に、振動のオン・オフの制御のみで情報を提示している。オン・オフのみの制御ではなく、振動強度などの振動状態を変化させれば、より提示できる情報の幅が広がると考えられる。

しかし、偏心モータ型振動子などの小型の振動子は同じ電気信号を加えたとしても装着位置や装着状態などの要因により、振動周波数や振動の振幅などが変化する。よって、ある装着状態での対応関係に依存して別の装着状態、例えば、重力に対する向きや装着時の圧迫などが異なる状況にこれを反映させると、同じ指令値でも感覚が異なる可能性が高い。Lindeman らは、振動子への電氣的指令値と、その結果生じる偏心モータ型振動子の振動周波数とを、あらかじめキャリブレーションしておき、対応づけようとしている[6]。また、Jones らも、同様に振動子の駆動電圧と周波数を対応させたグラフをかいている[7]。しかし、実際にはそれが装着状態によって変化するのでキャリブレーションデータとしては不十分である。

^{*1}ATR メディア情報科学研究所

^{*2}大阪工業大学 大学院 情報科学研究科

^{*3}名城大学 理工学部

^{*4}Department of Computer Science, Worcester Polytechnic Institute

^{*1}ATR Media Information Science Laboratories

^{*2}Graduate School of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology

^{*3}Faculty of Science and Technology, Meiji University

^{*4}Department of Computer Science, Worcester Polytechnic Institute

キャリブレーションデータを用いて期待した振動が提示できないことによって、問題が起こるケースとして、ファントムセンセーションにおける、刺激点の強度変化が挙げられる[8]. ファントムセンセーションは、皮膚上に2つの刺激点を置いた場合、それらの刺激点と同じ強度で時間差がない場合、その2点の中間位置に刺激点が融合して知覚され、2つの刺激点に強度差があった場合には、その融合された刺激点が刺激の強い方に偏って知覚される現象である。しかし、先に述べたように、振動子の振動強度の関係は、その装着状態の変化によって必ずしも電氣的指令値と一対一に対応していないため、期待した振動強度を提示することは困難である。久米らは、この問題を軽減するために装着にゴム膜を用いて、振動子が皮膚を押し力の変化を和らげようと試みている[9]-[11]. また、橋田らは、振動子を弾性樹脂の中に埋め込むことによって、振動子の振動状態の変化を和らげている[12].

我々は、この問題を解決するために、単に装着条件の変化に伴う振動状態の変化を抑えるだけではなく、振動子の振動状態である周波数や振幅を常に計測して積極的にフィードバック操作することによって、振動状態を安定させることを考えた。つまり、装着条件をノイズして考え、伝えるべき振動感覚を信号と見なし、振動触覚ディスプレイのS/N比をフィードバック制御によって高めることを目的としている。

振動状態の制御が可能になれば、先に述べたファントムセンセーションの提示における振動子の振動強度の制御や、その制御性を利用し、刺激強度の変化によって、指先など感度が高い場所へ向けた新たなディスプレイへの応用が考えられる。

本稿では、まず、広く使われており、安価で駆動が容易な偏心モータ型振動子の振動周波数制御を目指し、振動センサを用い振動周波数をリアルタイムに計測し、フィードバック制御をおこなった。次に、より高い振動状態の再現性を目指し、振動周波数に加え、振動の振幅も制御するために、応答性がよく、振動周波数と振幅の独立制御が可能なボイスコイル型振動子を用いてフィードバック制御をおこなった。そして、これらの有効性を示すために、フィードバックによって振動状態が保証される環境下で、装着状態の変化が振動感覚に与える影響を被験者実験によって検証した。

2. 振動子と振動センサ

本章では、本研究で用いる偏心モータ型振動子とボイスコイル型振動子、ならびに、人体に装着した状態で振動状態を計測するためのフィルム型の振動センサについて述べる。

2.1 偏心モータ型振動子

偏心モータ型振動子(図1)は、小型化が容易で、通電するだけで動作するため扱いが容易であり、消費電力も少ないなどの利点を持つ。そのため、携帯電話やゲームのコントローラなどにも使われ、また、多くの振動子を用いた実験にも使われている。

偏心モータ型振動子は、モータの回転軸に分銅を偏らせて取り付け、それを回転させることによって振動を発生している。今回用いた図1のような薄型の偏心モータ型振動子は、軸方向空隙型コアレス振動モータで複数個の空心コイルを重畳しないように偏らせ、回転時に発生する遠心力を利用して振動を発生させている。偏心モータ型振動子の振動周波数は、内蔵するモータの回転数に等しく、通常のモータと同様に、その回転数は、PWM制御や印加する電圧値、回転軸の摩擦などによって決まる。共振を用いて振動するため、振動強度に対する消費電力が少ないが、電気信号が入力されてから機械的な振動が開始するまで、約100ms程度かかってしまい、応答性が良いとは言えない[13].



図1 偏心モータ型振動子
Fig. 1 DC-motor-type vibrators

2.2 ボイスコイル型振動子

ボイスコイル型振動子は、装着面に対して垂直方向上下に往復運動するスピーカと同じ構造の振動子である。図2左断面図のように片方が、バネによって可動な永久磁石、もう片方が電磁石になっており、電流の制御により、可動部が引き寄せられたり、反発したりするということにより振動を発生する。そのため、偏心モータ型振動子のように、通電するだけでは駆動せず、振動させるためには、入力波形を生成する必要がある。偏心モータ型振動子に比べると駆動回路が複雑になり、消費電力も多くなる。しかし、ボイスコイル型振動子は、入力する信号波形の周波数と振幅により、

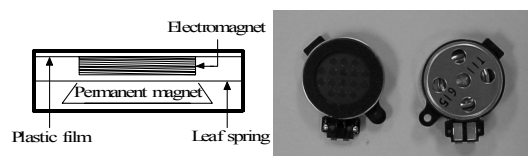


図2 ボイスコイル型振動子 (左: 断面図 右: 写真)
Fig. 2 Voice-coil-type vibrator
(Left: Cross-section diagram Right: Photograph)

振動の周波数と振幅を独立に操作することができる。また、偏心モータ型振動子に比べ入力信号に対する機械的な動作の応答性がよく、電気信号が入力されると同時に機械的な振動を開始し、10~20ms程度で最大振幅に達する[13]。

2.3 振動センサによる振動状態の検出

2.3.1 振動センサ

人体に装着した状態でのフィードバック制御を可能にするためには、装着した状態で振動周波数や振幅といった振動状態を計測する必要がある。ここでは、図3左図に示すフィルム状の振動センサ(東京センサSDT1-028,以降、振動センサと呼ぶ)によってこれを計測している。フィルム状であるため、図3右図のように皮膚と振動子の間に挟むことにより、人体に装着した状態で振動状態を計測することができる。

この振動センサは、 piezofilm素子を応用したフィルム状の感知素子で、与えられたひずみの量に比例する電荷を発生する。したがって、振動子の振動面に接合させることによって、測定対象物のバルク波がセンサによって観測できる。ここでは、振動子の底面と振動センサを接合して振動を計測する。

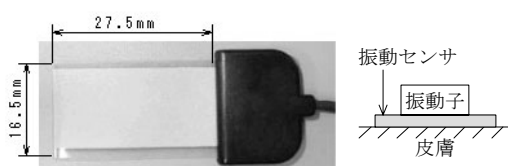


図3 振動センサ

Fig. 3 Vibration sensor

振動子は電源ケーブルや装着方法などの制約により、振動センサ表面にどのような変位を与えているのかわからない。しかし、振動子の振動状態を振動センサで計測したところ、振動状態に相関の高い振動が計測できた。以降では、この計測値と他のセンサを用いて計測した振動状態との相関を検証する。

2.3.2 振動センサの周波数計測に関する動作検証

振動センサの出力が、偏心モータ型振動子の振動周波数を正確に計測できているかどうかを検証するために、レーザ変位センサ(KEYENCE LK-030/LK-2000)を用いて、人体を模したスポンジの上に置いた振動子の振動周波数を、振動子の縁の部分から直接読み取り、振動センサが読み取った振動周波数と比較した。

検証の結果を図4に示す。横軸がレーザ変位センサで読み取った確かな振動子の周波数、縦軸が振動セン

サで読み取った周波数の値である。また、図中の点線上は、レーザ変位センサの示す周波数と振動センサが示す周波数が等しくなることを示している。図中のプロットが点線付近に分布していることから、レーザ変位センサと振動センサの値は、ほぼ一致していることがわかる。

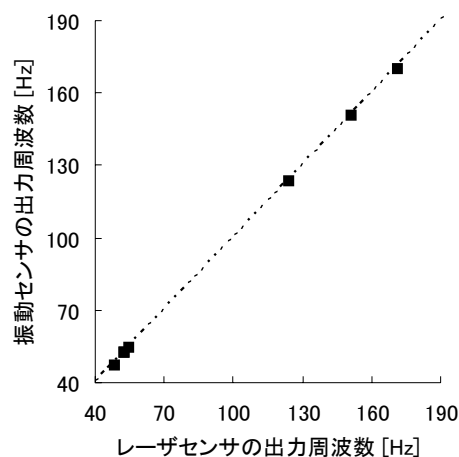


図4 振動センサの周波数出力の動作検証

Fig. 4 Verification of output of the vibration sensor frequency

また、ハイスピードカメラを用いてスポンジの上に置かれた偏心モータ型振動子と振動センサの様子を、水平方向から観察した。ハイスピードカメラの映像で振動子が 50Hz、55Hz で振動していると確認できたとき、振動センサの出力もそれと一致した。

以上のことより、振動センサによる振動周波数の計測は十分に信用できると言える。

2.3.3 振動センサの振幅計測に関する動作検証

ボイスコイル型振動子においては、周波数だけでなく振幅の値も計測する。そこで、振動センサに外圧がかかった状態でも正常に振幅が計測できるかを検証するために、レーザ変位センサを用いて、加圧時と非加圧時のレーザ変位センサの値と、センサの出力を比較した。検証は、人の肌を模したシリコンの上に振動センサ、その上に振動子を置き、さらに加圧するために薄いプラスチックの板を乗せた。そして、加圧条件では、プラスチックの板におもりを吊すことによって、振動子に圧力がかかるようにした。

検証の結果を図5に示す。横軸が振動センサの出力波形の振幅、縦軸がレーザ変位センサの出力波形の振幅を距離に変換したものである。図中黒三角のプロットは加圧をおこなっていない場合の結果、白丸のプロットは加圧をおこなった場合の結果である。

振動センサの出力とレーザセンサの値は、ほぼ比例

関係にあることがわかる。また、加圧時でも非加圧時と同様の関係にあるため、振動センサの出力値は加圧時でも十分に信用できると言える。

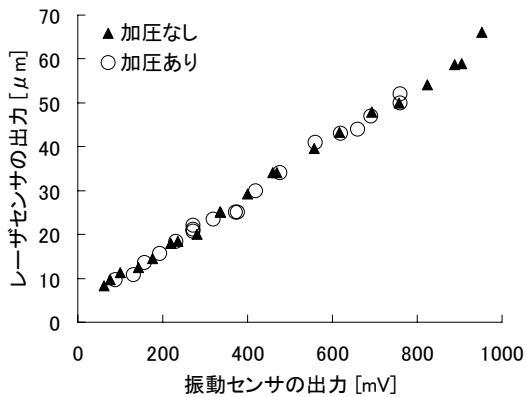


図5 振動センサの振幅出力の動作検証

Fig. 5 Verification of output of the vibration sensor amplitude

3. 偏心モータ型振動子の周波数フィードバック制御

本章では、振動を用いた情報提示にもっともよく用いられている偏心モータ型振動子を用いた、振動周波数のフィードバック制御について述べる。

3.1 システムの構成

図6に制御システムの全体構成を示す。まず、目標となる振動周波数をPCからマイクロコンピュータ(Microchip PIC16F873)に送信する。マイクロコンピュータはPWM信号を生成し、増幅器を通して振動子(Fuzikura FMIU-004)を駆動する。振動子には振動センサが取り付けられており、振動子が振動することによって、振動センサがその振動を読み取る。偏心モータ型振動子においては、その振動周波数の制御が目的であるため、振動センサの出力を増幅器で増幅し、コンパレータを用いてアナログ波形をデジタル化する。その波形を用いてマイクロコンピュータは振動周波数を計測し、目標となる振動周波数と現在の振動周波数を比較し、PWM波形のデューティ比に対しフィードバック制御を行う。フィードバックは約5Hzでおこなわれ、デューティ比は0-100%を0-1023の値に対応させ、10bitの分解能で調節する。調節は、受信した振動子の周波数と目標となる周波数を比較し、振動子の周波数の値の方が大きければデューティ比の値に-1を、目標となる周波数の値の方が大きければデューティ比の値に1を加算という方法でおこなった。

マイクロコンピュータは、センサが読み取った振動周波数、現在のPWM信号のデューティ比をPCへ送信することで、PC上でこれらの値をモニタリングすることができる。

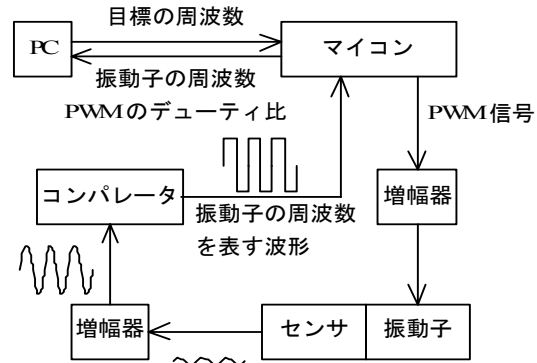


図6 偏心モータ型振動子のフィードバックシステム

Fig. 6 System design for DC-motor-type vibrator

3.2 フィードバックの検証

フィードバック機能の検証のために、人間の腕に装着している状態で振動子を上から急に押された状態を模したモデルを用いて、振動子に外的要因を与え振動周波数の変化を計測した。このモデルは、地面に対して水平な状態で振動子を設置し、その上からおもりを載せることにより周波数を変化させるものである。実験は、フィードバックのあり・なしについておこなった。

その実験結果を図7に示す。横軸が経過時間、縦軸が振動周波数である。図中の経過時間が約6sの時点でおもりを乗せている。フィードバックなしの場合は、おもりをのせると周波数が約110Hzから約150Hzに変化しているが、フィードバックありの場合にはスタート後に約110Hzから、目標周波数である91Hzにむかって収束していき、おもりを乗せ周波数の変化が起こった際も、フィードバックがかかり、目標周波数に向かって収束している様子がわかる。

よって、ここで試作した装置を用いて偏心モータ型振動子の周波数を制御できることがわかる。

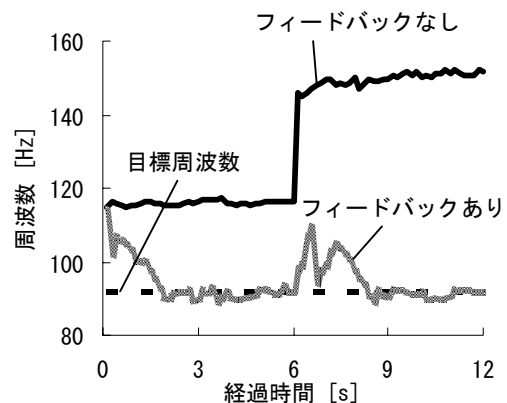


図7 加圧による偏心モータ型振動子の周波数の変化

Fig. 7 Frequency of DC-motor-type vibrator

4. ボイスコイル型振動子のフィードバック制御

前章で、偏心モータ型振動子を用いて、振動周波数を制御することができることを述べた。しかし、偏心モータ型振動子はその構造上、振動周波数と振幅を独立に制御することが困難であった。そこで、次に、より高い振動状態の再現性を目指し、振動周波数と振幅が独立に制御することが比較的容易であるボイスコイル型振動子を用いて、振動周波数に加え振動の振幅も制御することにした。

4.1 システムの構成

ボイスコイル型振動子を駆動するためには、偏心モータ型振動子の様に電圧を印加するだけでは動作せず、スピーカを駆動するように、適当な周波数とゲインの信号を印加する必要がある。以下では、ボイスコイル型振動子の駆動波形の生成、生成された信号の電流を増幅し、振動子を駆動する回路を振動子駆動装置と表現する。

制御システムの構成を図8に示す。まず、PCより振動子駆動装置に対して、振動子(NEC トーキョー MMA-33)の振動周波数と振動子への入力電圧を指示し、そして、偏心モータ型振動子の時と同様の方法で、振動提示面と振動子の間に取り付けられた振動センサが、振動子の振動状態を読み取り、増幅装置を用いて、その波形を増幅する。増幅された信号は、振幅を電圧に変換する回路(以下AVC (Amplitude to Voltage Converter)), 周波数を電圧に変換する回路(以下 FVC (Frequency to Voltage Converter))によって、直流電圧にアナログ的に変換される。変換された信号は、PCの12bitのA/Dコンバータによって読み取られ、PCは、周波数と振幅の値をリアルタイムに受け取り、その値を用いて振動駆動回路への指令値にフィードバックをおこなう。振幅のフィードバックは、200HzのPI制御でおこなわれ、

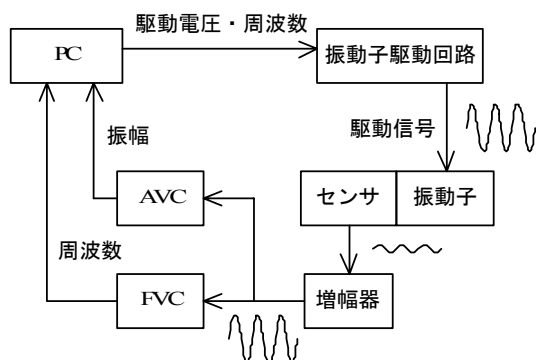


図8 ボイスコイル型振動子のフィードバックシステム
Fig. 8 System design for Voice-coil-type vibrator

振動子の駆動電圧である0-6.2Vを用いて、振動子の駆動信号を調節した。PI制御のパラメータは、比例ゲインを0.0001、積分ゲインを0.1とした。周波数のフィードバックも、同様におこなうことが可能である。しかし、ボイスコイル型振動子の振動周波数は、駆動信号の周波数で決まることや、後述の検証においても振動周波数が変化しなかったことから、本稿の実験ではフィードバックはおこなわず、周波数の監視のみをおこなっている。

4.2 フィードバックの動作検証

フィードバックが有効に機能していることを検証するために、振動子に加圧した際の振動子の様子を計測した。加圧による外乱とは、例えばベルト等で腕に振動子を装着する際に、装着の度にベルトの固定圧が異なるような状況を想定している。計測方法は、被験者の上腕にボイスコイル型振動子と振動センサを置き、伸縮性のある布で巻き付けることにより固定する。さらにその上に血圧計測用のカフ(図9)を巻付ける。カフには手動の加圧ポンプと圧力計が取り付けられており、振動子への圧迫力を任意に調整できる。



図9 血圧測定用カフ
Fig. 9 Blood pressure cuff

ここでは、まず圧力をかけない状態から、約5秒後にカフの圧力を0 Paから 5.3×10^3 Pa(血圧換算で40mmHgに相当)に上げ、その圧力を維持する。また、本実験で用いる振動周波数は、このボイスコイル型振動子において振動を感じやすい周波数帯を検討した先行研究[3],[4]の結果を受けて148Hzとした。この作業を、フィードバックありとなしの場合についておこなった。まず、図10に振動振幅の結果を示す。図中の上のグラフは、フィードバックなしの場合、下のグラフはフィードバックありのときのものである。横軸は振動子を駆動してからの経過時間であり、縦軸はAVCの出力となる。図中の加圧操作の区間は、カフの圧力を変化させている。カフを膨らませる際はポンプによって段階的に膨らませているが、フィードバックあり条件

でのAVC出力値は、その段階的な加圧に対してフィードバックにより直ちに目標値に収束していることがわかる。一方で、フィードバックなしのケース、つまり従来の振動子の使い方では、加圧することによって振幅が変化していることがわかる。

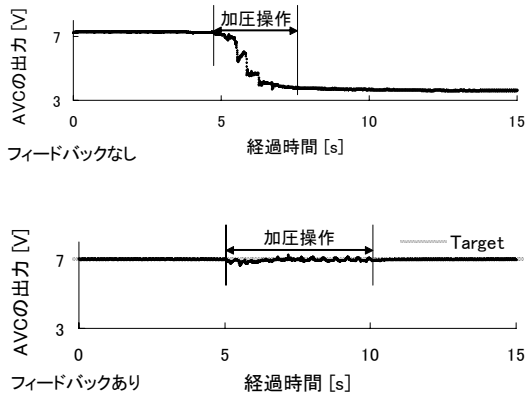


図10 加圧によるボイスコイル型振動子の振幅変化
Fig. 10 Amplitude of Voice-coil-type vibrator

次に、振動周波数の結果について述べる。ボイスコイル型振動子の振動周波数は、振動子へ入力される信号波形の周波数によって決まるため、加圧によって周中にボイスコイル型振動子の振動周波数は、カフの圧力を変化させても変化はなく、ボイスコイル型振動子を用いる場合、周波数のフィードバック制御が必要でないことを確認した。

以上のことより、これらの装置を用いてボイスコイル型振動子の振動周波数と振幅を制御することができたといえる。

5. 振動感覚実験

前々章および前章で、振動子の機械的な振動状態である周波数や振幅の制御ができた。本章では、本手法の有効性を示すために、外乱による振動子の振動状態が、装着者の振動感覚がフィードバックの有無によってどのように変化するかを比較した。

5.1 偏心モータ型振動子を用いた実験

偏心モータ型振動子の周波数フィードバックの有効性を示すために、偏心モータ型振動子の振動状態が補償される環境下で装着状態の変化が振動感覚に与える影響を検証した。

まず、被験者の上腕内側、肘関節から約10cmの位置に振動子と振動センサをとりつけ、カフを巻付ける。次に、非加圧状態(0 Pa)で5秒間振動を提示し、振動さ

せたまま、加圧をおこなう、そして加圧状態(5.3×10^3 Pa)で5秒間振動の提示をおこない、被験者に加圧時と非加圧時どちらの方が振動を強く感じたかを二択で強制選択させた。また、周波数フィードバックあり条件では、100Hzを目標に設定し、なし条件では非加圧状態で、ある被験者が装着した状態で100Hzとなったときの電氣的指令値を用い、その信号を与え続けた。実験は、20歳~30歳の男性13名、女性3名、計16名の被験者にそれぞれ、周波数フィードバックのあり・なしの2条件について、それぞれ16試行、計32試行おこなった。

実験の結果を図11に示す。図は、全被験者の回答の総和について、「フィードバックあり・なし」のときに、加圧時の方が振動を強く感じた割合と非加圧時の方が振動を強く感じた割合を示す。

従来での利用方式に相当する周波数フィードバック制御なし条件では、加圧時の方が振動刺激を強いと感じる回答が多いのに対して、周波数フィードバックあり条件では、逆に非加圧時の方が振動刺激を強いと感じる回答が多かった。実験中の計測により、周波数のフィードバックなし条件では50Hz程度周波数が高くなっていった。この影響により被験者は振動刺激の知覚強度が高まったと回答したと考えられる。一方、周波数のフィードバックあり条件では周波数は一定であり、圧迫することで知覚強度は低下することを意味する。

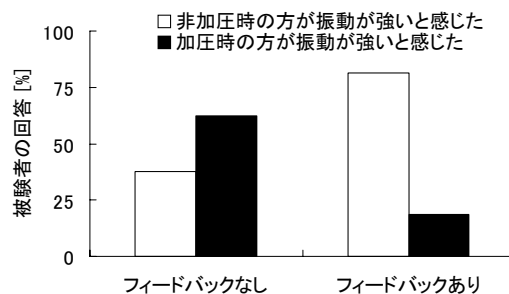


図11 偏心モータ型振動子の結果

Fig. 11 Rate of answer of DC-motor-type vibrator

また、 χ 自乗検定によって、フィードバックあり条件と、フィードバックなし条件での回答の間に有意差が認められた。つまり、偏心モータ型振動子において、周波数のフィードバックをおこなうことによって、周波数のフィードバックをおこなわなかった状態から被験者の感じ方を変えることができたことがわかる。

この結果は、例えば圧迫力などの変動に対して知覚強度を一定にするには、フィードバックをおこない周波数を安定化した状態で、偏心モータ型振動子の振動周波数を人間の特性に合わせて操作することによって可能となることを示唆している。

5.2 ボイスコイル型振動子を用いた実験

次に、周波数に加え振動の振幅を制御することが可能なボイスコイル型振動子を用いて、振動状態の再現性を高めた状態で振動感覚に与える影響を検証した。

まず、ボイスコイル型振動子と振動センサのセットを、上腕二頭筋の中央付近、力こぶをつくったとき膨らんで最も高くなる位置にとりつけた。次に、偏心モータ型振動子のときと同様に、非加圧状態(0 Pa)と加圧状態(5.3×10^3 Pa)でそれぞれ5秒間振動の提示をおこなうが、偏心モータ型振動子のときと異なり、非加圧から加圧の順で8試行、加圧から非加圧の順で8試行をおこない、加圧動作中は振動子を停止した。また、ボイスコイル型振動子の駆動周波数は148Hzとし、フィードバックあり条件では、振幅の目標値をAVCの値で7V(図5に従い振動センサの出力と実際の振幅の関係が完全に比例関係であると仮定した場合約50 μ m)に設定した。フィードバックなし条件では、ある被験者が装着した状態で振幅がAVCの値で7Vとなったときの電氣的指令値を用い、その信号を与え続けた。振動周波数のフィードバック制御については、前章で加圧によって振動周波数が増加しないことが確認されたため、おこなわなかった。実験は、20歳付近の男子大学生8名の被験者各々に対して、フィードバックのあり・なしの2条件について、それぞれ20試行(10試行×加圧の順2通り)、計40試行おこなった。

実験の結果を図12に示す。図は、全被験者の回答の平均であり、“フィードバックあり・なし”のときに、非加圧時の方が振動を強く感じたという回答した回数(白抜き部)と加圧時の方が振動を強く感じたという回答した回数(斜線部)を示す。

ボイスコイル型振動子では周波数が加圧によって変化しないため、本実験における『フィードバックなし条件』は、偏心モータ型振動子を用いた実験において周波数をフィードバックした条件に相当する。ボイスコイル型振動子の『フィードバックなし条件』では、非加圧時の方が振動刺激を強いと感じる回答が多いが、

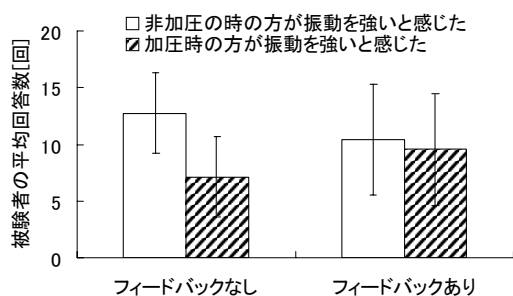


図12 ボイスコイル型振動子の結果

Fig. 12 Rate of answer of Voice-coil-type vibrator

これは偏心モータ型振動子の『フィードバックあり条件』の結果と符合する。それに対して、フィードバックあり条件では、加圧時の方が振動刺激を強いと感じる回答と、非加圧時の方が振動刺激を強いと感じる回答にあまり差がなかった。

実験中の計測により、フィードバックなし条件では、振幅の減少が観察された。振動周波数が変化していないことから、振幅が減った影響で、被験者の知覚強度が弱まったと考えられる。一方、フィードバックあり条件では、振動周波数と振幅が一定であることにより、加圧による振動刺激の知覚強度の差が少なくなったと考えられる。

また、 χ 自乗検定によって、フィードバックあり条件と、フィードバックなし条件での回答の間に有意差が認められた。つまり、ボイスコイル型振動子において、フィードバックをおこなっていない場合には、非加圧時と加圧時の振動強度の感じ方に大きな違いがあったにもかかわらず、フィードバックをおこなうことによって、それらの差異が見られなくなった。ただし、これは被験者全体での傾向であり、個々の被験者の結果を見ると、フィードバックの有無により回答の変化は全ての被験者で現れたが、その現れ方には個人差が見られた。

6. 考察

本研究の位置づけを明らかにするために、振動子によって人間に振動触覚を感じさせるまでをモデル化したものを図13に示す。1章で述べたように、多くの先行研究では、図13(a)のように、ひとつの伝達関数 J を想定し、振動子への駆動命令 t とその出力である振動感覚 s が常に一対一に対応することを期待している。そのため、データシートに書かれた、入力に対する出力の値を鵜呑みにしたり、ある入力 t において出力 s となる対応関係をあらかじめ記録しておき、この関係が常に再現することを期待したりしている。

しかし、伝達関数 G に相当する振動子自身の振動は、装着状態や向きなどの要素で振動状態が変化してしまう。つまり、装着者ごとに振動状態が異なることはもちろん、装着者が装着部位の姿勢を変化させただけでも、振動状態が変化してしまう。

また、ひとつの伝達関数 J として扱うことは、ある入力信号 t に対して、人間の感覚である出力 s の状態を記録したとすると、その複数存在する出力結果の違いが、振動子の振動状態によるものなのか、装着者によるものなのかが特定することが困難である。例えば、携帯電話をバイブレータ着信モードでズボンのポケットに入れておくと、直立した状態では着信の振動に気

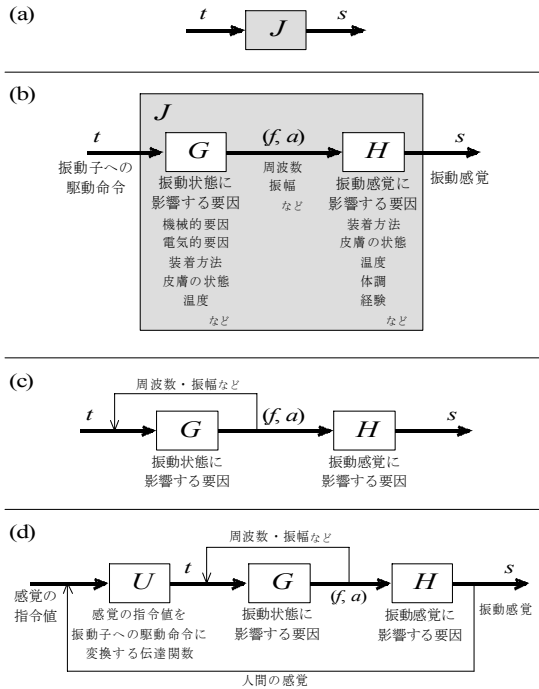


図 13 振動感覚への伝達関数
Fig. 13 Transfer functions for vibrotactile stimuli

付いても、座ったことによって携帯電話が押しつけられている状態では着信の振動に気づかないといったことがある。これは本モデルにおいて押しつけたことで着信の振動状態が機械的に変化したのか、あるいは、押しつけることで我々の振動感覚の特性が変化したことによるものかは、明確に区別はできない。

そこで、図 13(b) のように伝達関数 J を、伝達関数 G と伝達関数 H にわけることによって、振動子自身の要因と装着者自身の要因にわけることができ、その原因をしぼることが可能になる。

伝達関数 G は、振動子に与える電気的信号入力 t を受けた振動子が装着方法、皮膚の機械的要因等を経て状態変数である周波数 f と振幅 a といった振動状態を出力する。つまり、振動子への入力信号、装着方法、装着位置の硬さなどによって、振動子自身がどのように振動するかが決まる。伝達関数 H は、その振動を入力とし、装着者の皮膚の機械的・生理的要因や、各受容器の要因を経て、ある主観的な振動感覚 s を出力する。つまり、振動している振動子がどのように装着されているか、どの場所に装着されたか、その部分の受容器の数や、装着者の体調や慣れなどによってユーザが感じる振動強度が影響を受けることになる。

5 章でおこなった 2 つ実験の結果から、フィードバックをおこなうことによってフィードバックをおこなわなかった場合から被験者の振動感覚が変化した。し

かし、フィードバックをおこなっていても実際には、被験者の回答の変化に個人差があった。これは、単に機械的な振動を一定に保つだけのフィードバック処理は図 13(b)の伝達関数 G の出力までのみの制御をおこなっているだけであり、人間の感覚レベルまでのコントロールには至っていないためであると考えられる。

本手法により、振幅が完全に制御できていると仮定すると、被験者による個人差は、装着位置の状態や、装着方法など、伝達関数 H の部分の要因である可能性がある。この結果は例えばファントムセンセーションのような感覚強度を重要なパラメータとする手法では、装着状態の影響、つまり伝達関数 H の部分を十分に考慮する必要があることを意味する。

また、フィードバック制御によって振動感覚がかわったことから、感覚値の制御が可能であることが期待できる。図 13(d)に示すように、伝達関数 G だけでなく、伝達関数 H の出力から人間の感覚を電気的指令値に変換する伝達関数 U の入力へのフィードバックを可能にすれば、人間の感覚強度を一定にすることが可能となることを示唆している。もちろん、現状では感覚の度合いを客観的に測ることは困難であり、実現は困難である。現実的には、1 章で取り上げた外乱を和らげる方法と組み合わせることによって、人間の感覚の変化を減らすか、もしくは、各振動を感知する受容器からの信号を、振動感覚の推定値として代行する方法などが考えられる。

7. おわりに

ここで述べたフィードバック系によって振動状態をコントロールする技術は、例えば映像ディスプレイのキャリブレーションに相当する。環境や装置自体の影響によって正確な色の再現がされていないディスプレイを用いて映像を表示しても、映像が視聴者に与える影響は正確に評価できない。ディスプレイが設置環境の外乱によって影響を受けて表示される色が正確でない場合には、キャリブレーションを使えば、少なくともディスプレイから発せられる色の周波数は確実に校正できる。

前章の実験結果が示すように、振動提示においても同様にユーザに装着された振動子がキャリブレーションされた状態でなければ、振動がユーザに与える影響を評価することができないと言える。この実験では単に圧迫による外乱を与えただけであったが、振動状態は振動子の向きや装着状態の変化を外乱として影響を大きく受ける。そのためファントムセンセーションの提示のように振動強度を量的に制御する必要がある場合には、フィードバックによる振動子の振動状態の補償の技術は不可欠である。これによって、従来の

フィードバック制御をおこなっていなかった振動子による感覚評価実験の結果を振動子自体に起因する物理的影響と人間の感覚の影響を区別する目的にも、本手法は有効である。また、振動状態が制御できるようになったことにより、従来振動のオン・オフのみで制御していた装置に強度変化を加えることや、例えば指先などの知覚感度が高い部位において振動強度の微妙な変化による違いを感じることができれば、振動子をなぞることによって任意の物体を触っているような感覚を提示することができるようになる可能性がある。

謝辞

本研究は情報通信研究機構の研究委託“超高速知能ネットワーク社会に向けた新しいインタラクション・メディアの研究開発”により実施したものである。

参考文献

- [1] P. Bach-y-Rita, C. C. Collins, F. A. Saunders, B. W. White, L. Scadden : Vision substitution by tactile image projection, *Nature* 221, pp. 963-964 (1969)
- [2] A. Rupert : An instrumentation solution for reducing spatial disorientation mishaps, *IEEE Eng. in Med. and Bio.* 2000, pp. 71-80 (2000)
- [3] 矢野博明, 小木哲朗, 廣瀬通孝 : 振動子を用いた全身触覚提示デバイスの開発, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 3, No. 3, pp. 141-148 (1998)
- [4] 村田隆幸, 矢野博明, 岩田洋夫 : 振動子アレイを用いたウェアラブル触覚インタフェース, *日本バーチャルリアリティ学会第7回大会論文集*, pp. 137-140 (2002)
- [5] Jan B.F. van Erp : Vibrotactile spatial acuity on the torso: effects of location and timing parameters, *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* pp. 80-85 (2005)
- [6] Robert W. Lindeman, Yasuyuki Yanagida : Empirical Studies For Effective Near-Field Haptics in Virtual Environments, *Proceeding of IEEE Virtual Reality 2003*, pp. 287-288 (2003)
- [7] Lynette A. Jones, Mealani Nakamura, Brett Lockyer : Development of a Tactile Vest, *Proceedings of 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 82-89 (2004)
- [8] 久米祐一郎, 山本慶一, 山田貴之, 磯部正利, 津田元久, 畑田幸彦: 3次元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*, Vol. 53, No. 9, pp. 1308-1314 (1999)
- [9] 久米祐一郎, 白井暁彦, 津田元之, 畑田豊彦 : 足裏への皮膚振動刺激による情報伝達, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 3, No. 3, pp. 83-88 (1998)
- [10] 白井暁彦, 佐藤勝, 草原真知子, 久米祐一郎 : 足インターフェイスによる複合現実感アミューズメントシステム: ファンタスティックファントムスリッパ, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 4, No. 4, pp. 691-698 (1999)
- [11] 濱野毅, 久米祐一郎, 曾根順治 : 触覚ディスプレイによるゲームの検討, *映像情報メディア学会技術報告*, No. 23, pp. 17-20 (2003)
- [12] 橋田康皇, 野間春生, 柳田康幸, 須佐見憲史, 保坂憲一, 久米祐一郎 : 弾性樹脂を用いた振動子の装着方法の研究, *日本バーチャルリアリティ学会第10回大会論文集*, pp. 545-548 (2005)
- [13] Masataka Niwa, Yasuyuki Yanagida, Haruo Noma, Kenichi Hosaka, Yuichiro Kume : Vibrotactile Apparent Movement by DC Motors and Voice-coil Tactors, *Proceedings of ICAT 2004*, pp. 126-131 (2004)

(2005年9月27日受付)

[著者紹介]

丹羽 真隆 (学生会員)



2002年大阪工業大学情報科学部卒業。現在、大阪工業大学大学院情報科学研究科情報科学専攻博士前期課程、ATRメディア情報科学研究所学外実習生。VRインタフェース等の研究に従事。

野間 春生 (正会員)



1994年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。同年ATR通信システム研究所入所。現在、メディア情報科学研究科主任研究員。ウェアラブルインターフェース、VRインタフェース等の研究に従事。博士(工学)。

柳田 康幸 (正会員)



1988年東京大学工学部計数工学科卒業、1990年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年東京大学先端科学技術研究センター助手、1997年同大学院工学系研究科助手。2001年ATR研究員、2003年同主任研究員。2005年名城大学理工学部情報工学科教授(ATR客員研究員兼務)、現在に至る。博士(工学)。テレグジスタンスとVRのシステム技術、五感メディアなどの研究に従事。

保坂 憲一 (正会員)



1978 年早稲田大学理工学部電子通信学科卒, 1983 年同大学大学院理工学研究科博士課程後期修了, 工学博士. 同年日本電信電話公社(現 NTT)入社. 画質評価法の検討, 設備画面 DB 構築システムの実用化, マルチメディアオンデマンド方式の研究開発などに従事. 2004 年 ATR メディア情報科学研究所五感メディア研究室長.

Robert William Lindeman



Robert W. Lindeman earned a Doctor of Science (Sc.D.) degree in Computer Science from The George Washington University in 1999. From 1999-2005, He was an Assistant Professor in the Department of Computer Science at The George Washington University. In 2005, he joined the Department of Computer Science at the Worcester Polytechnic Institute as an Assistant Professor. Dr. Lindeman's research interests include virtual reality interaction techniques, multisensory feedback, and wearable computing.