

A-11

## 振動の再現と伝達を行う小型デバイスの設計と実装

## Design and Implementation of a Device that Reproduces and Conveys Vibration Data

久保 建太  
Kenta Kubo竹川 佳成†  
Yoshinari Takegawa寺田 努†  
Tsutomu Terada塚本 昌彦†  
Masahiko Tsukamoto

## 1. はじめに

近年の半導体部品の小型化により、ウェアラブルコンピューティングやユビキタスコンピューティングへの関心が高まっている。これらの研究分野では、これまで振動を利用したさまざまなアプリケーションが提案されているが、このようなアプリケーションを容易に実現するための、柔軟に振動の入出力を制御できる小型のデバイスは存在していなかった。

そこで筆者らはこれまで、振動モータと3軸加速度センサを用いた、振動を入出力とする小型デバイスである振動チップに関する研究を進めてきた<sup>1)</sup>。振動チップは、振動の記録、再生、他デバイスとの振動情報の送受信が行える。しかし、これまでの振動チップでは振動の記録および再生を単純に行っているだけで、振動の再現性や振動データの管理については考えていなかった。そこで本研究では、振動チップにおいて振動の再現と伝達を行えるように機能拡張を行うことを目的とする。まず、振動の認識に関する評価実験を行い、人が振動パターンを再現できていると認識するために必要な振動強度の粒度を明らかにする。さらに、その結果を用いて効率的に振動を再現するためのデータ管理手法およびデータ蓄積アルゴリズムを提案する。提案手法を用いることで、振動チップにおいて振動の再現や伝達が行えるようになる。

## 2. 振動チップ

ウェアラブルコンピューティング環境において情報提示を行う場合、従来研究としては視覚や聴覚を用いたものがあるが、これらは周囲の影響を受けやすいといった欠点がある。一方、触覚を用いた情報提示は周囲の影響を受けにくく、他の感覚器と比較的独立して使用できることから、状況によっては有効な提示方式であるといえる。また、振動は自分にしか認識されず、第三者に情報提示内容が漏洩しにくいという秘匿性ももっており、携帯電話の振動機能がユーザに好んで用いられていることから、振動はユーザへの情報提示手法として有用であるといえる。

このような特徴から、これまでに振動を用いて情報を提示するさまざまなアプリケーションが提案されてきた。振動を用いたアプリケーションについては、人との接触情報を記録できるインターフェース<sup>2)</sup>やマウスに装着した触覚提示装置で視覚情報を補うシステム<sup>3)</sup>など多くの先行研究があるが、それぞれ用途が限定されているという問題があった。汎用的な振動入出力デバイスがあれば、これらのよ

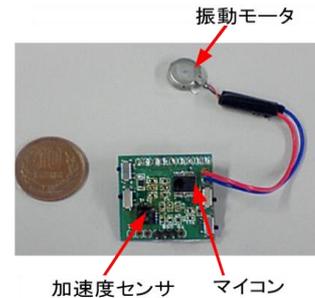


図1: 振動チップのプロトタイプ

うな触覚利用が一般的になると考えられる。さらに、振動の再現や伝達を行うことで、振動をより高度に利用できる。

したがって、我々は先行研究<sup>1)</sup>において、振動を入出力とする小型デバイスである振動チップを開発した。振動チップのプロトタイプの外観を図1に示す。

## システム構成

振動チップのシステムは振動認識センサ、振動を制御するマイコン、振動モータ、通信デバイスおよびバッテリーから構成される。センシングした振動をマイコン内のEEPROMや外部機器に送信することで、振動の再現や伝達が可能になる。振動チップの機能を以下に列挙する。

## (1) 入力制御

振動認識センサには、小型かつ安価な3軸加速度センサを用いる。静止状態における重力加速度をあらかじめ測定し、その値との差を計算することで物体にかかる振動を正確に測定する。振動のサンプリング周波数は100Hzに設定した。

## (2) 出力制御

パルス幅変調 (PWM: Pulse Width Modulation) 制御を用いて、振動モータの強弱を変更する。さらに、制御のための関数を組み合わせ、パラメータの調整を行うことでさまざまな振動パターンを生成できる。

## (3) 振動コマンドによる動作切替え

ユーザが振動チップあるいは周囲を叩くなどして振動パターンを入力することで、記録や再生といった機能を切り替える方式を提案する。振動強度の閾値を設定し、コマンド受付時間内に閾値を超えた振動が検出されたかどうかでON/OFFの判別を行う。ONとOFFの組み合わせにより複数のコマンドを定義できる。

## (4) 誤認識の防止機能

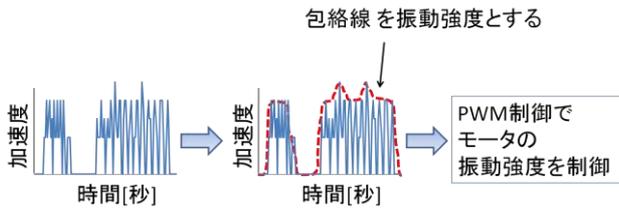


図 2: 振動再現手法

振動チップが振動の入出力を同時に行う際に、出力振動による振動の誤認識が生じる可能性がある。本研究では解決手法として、振動を記録する際に出力を停止させる手法を提案する。例えば 50Hz で振動の記録・再生を同時に行う場合、100Hz 毎に記録・再生を切り替えることで入出力のタイミングがずらせ、誤認識を防止できる。

図 1 に示すプロトタイプでは、入力と出力を同時に行う際に出力がセンサに影響を及ぼす可能性を考え、振動モータ以外の部品をすべて 1 枚の基板上に実装した。プロトタイプの外形寸法は 30mm×33mm×10mm である。

### 3. 振動再現の性能評価実験

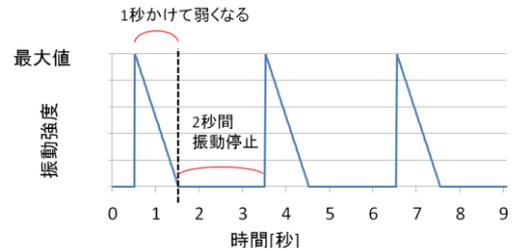
振動チップは、振動の記録・再生機能をもつ。しかし、従来の振動チップではデータの管理方法については考慮されておらず、認識した加速度センサの値をそのまま出力の強度として利用していた。また、振動の再現性に対する評価も行っていなかった。そこで本研究では、振動データの再現性についての実験を行い、振動データの管理方法を考察する。振動データの蓄積に関して、不必要に詳細なデータを記録しないようにすれば、より長時間の振動データを EEPROM 内に記録できる。また、振動チップが無線通信を用いて振動伝達を行う際には、データ量の削減により低消費電力化が図れる。

#### 3.1 振動の再現方法

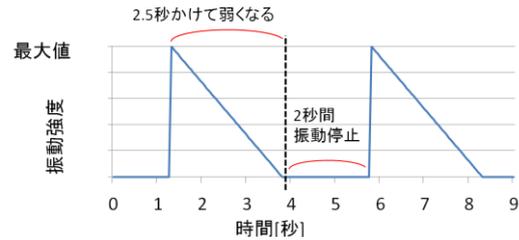
振動チップの振動センサで検出した波形を、振動モータを使ってそのまま再現することは難しい。従来デバイスではセンサの値をそのまま出力値として用いていたが、この方法で出力した振動を調べたところ入力と大きく異なる振動であった。そこでいくつかの方式を試した結果、次に示す方式を採用した。振動再現の概念図を図 2 に示す。振動チップは加速度センサにより振動を認識し、PWM 制御を用いて振動モータの出力強度を制御することで振動再現を行う。提案手法では、センサとマイコンの間に包絡線検波回路を挿入することで加速度データの包絡線を求める手法をとる。包絡線を出力強度として扱うことで振動を再現する。

#### 3.2 特徴的な振動パターンの再現

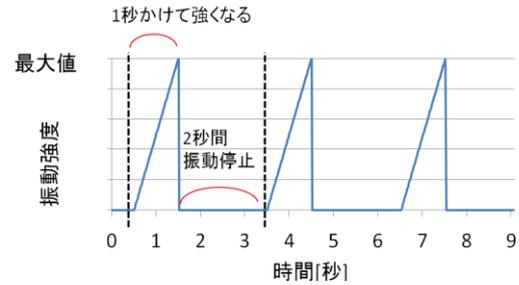
前節に示した手法を用いて、振動チップに特徴的な振動パターンを出力させ、振動強度の分解能を変化させたときに振動パターンをどの程度正確に認識できるかを調べた。



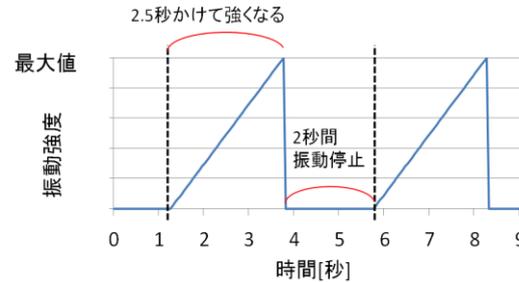
(a)強くなる(周期 3 秒)



(b)強くなる(周期 4.5 秒)



(c)弱くなる(周期 3 秒)



(d)弱くなる(周期 4.5 秒)

図 3: 特徴的な振動パターン

用意したサンプル振動パターンを図 3 に示す。振動パターンは振動強度がだんだん強くなるパターンとだんだん弱くなるパターンの 2 種類で、各パターンにつき振動パターンの周期が 3 秒のものと 4.5 秒のものを用意した。図中の振動強度の最大値は振動モータの出力を最大にしたときの振動強度である。あらかじめ振動強度を 50000 段階で記録したサンプル振動パターンに対して、分解能を 2 段階、4 段階、6 段階、8 段階、10 段階、12 段階、14 段階、16 段階で表現した振動がサンプルと同じ振動パターンに感じられるかどうかを被験者に判断させた。被験者には人差し指と親指で振動モータをつまんでもらい、元の振動パターンは被

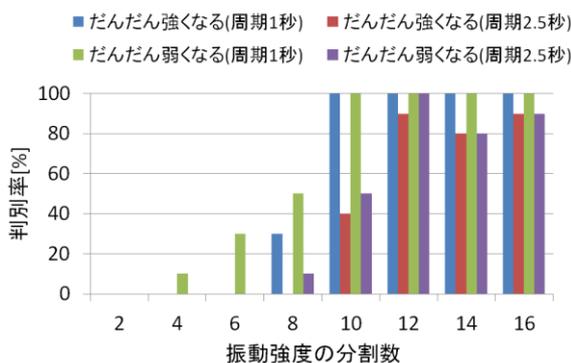


図 4: 特徴的な振動パターンの判別率

験者の要求に応じて何度でも出力した。振動パターンは各分解能につき 5 回ずつ、合計 45 パターンをランダムに出力した。実験より算出した振動の判別率と記録分解能との関係を図 4 に示す。図 4 に示す判別率は、3 人の被験者の判別率の平均を表している。図 4 より、周期が 3 秒の場合、どちらの振動パターンも振動強度が 10 段階以上で判別率が 100% に達した。周期が 4.5 秒の場合は、周期が 3 秒の場合に比べて全体的に判別率は減少し、強度が 16 段階の振動でも判別率は 90% であった。このことから、振動強度がゆるやかに変化する振動に比べて、急峻に変化する振動のほうが低分解能で出力してもよいことがわかる。

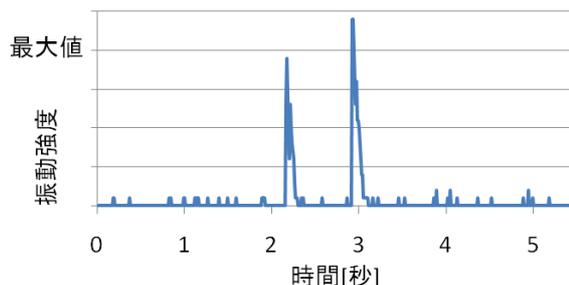
### 3.3 実際の振動パターンの再現

次に、振動チップに振動を記録させ、前節と同様の実験を行った。具体的には、振動チップを段ボール箱上に設置し、段ボールの上に金属を落とした際の振動データ(振動データ 1)と、振動チップを指ではじいて振動させた振動データ(振動データ 2)を用意した。出力した振動データを図 5 に示す。実験の手順は前項の実験と同じであるが、被験者には振動の再現度に対する評価を 1 から 5 の 5 段階で行わせた。この評価値は、最も再現度が高く、元の振動と同じ振動であると感じた場合に 5 とするように説明した。また、元の振動もランダムに 5 回出力した。3 人の被験者の評価結果の平均値を図 6 に示す。

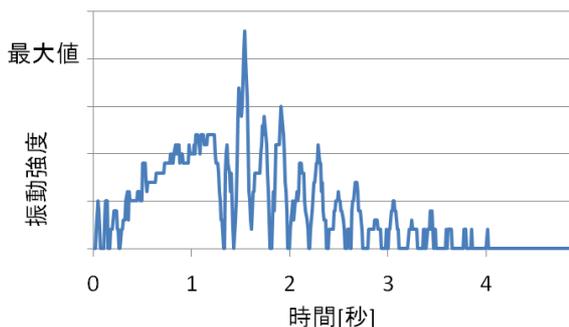
図 6 より、前節の特徴的な振動パターンの場合と異なり、分解能を 6 段階以上に設定しても振動の再現度が高くなったと感じられていないことがわかる。また、元の振動についても再現度が高くないと感じた被験者もいるが、これは振動の絶対的な記憶が難しく、相対的な判別しか行えていないという結果を示している。

## 4. 振動強度の変化量を考慮した表現手法

前章の実験から、振動パターンにより、再現に必要とされる分解能は異なることがわかった。そこで本研究では、振動強度の変化量から振動の表現方法を切り替える方式を提案する。

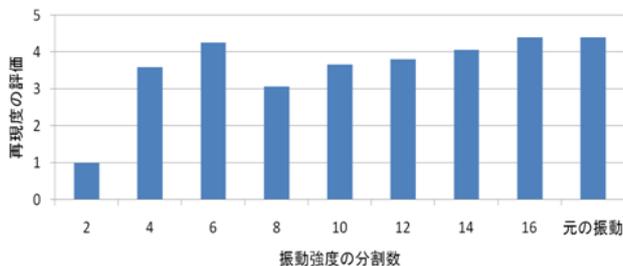


(a) 振動データ 1

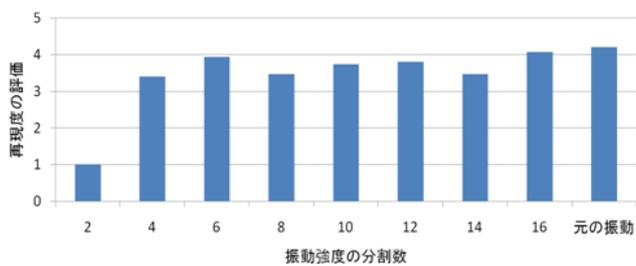


(b) 振動データ 2

図 5: 実際の振動パターン



(a) 振動データ 1



(b) 振動データ 2

図 6: 振動パターンの再現度の評価

### 4.1 アルゴリズム

本手法では、分解能 16 段階での記録(高品質記録)と分解能 4 段階での記録(低品質記録)を選択的に利用する。急峻な振動に対して低品質記録を行い、緩やかに強度が変化する

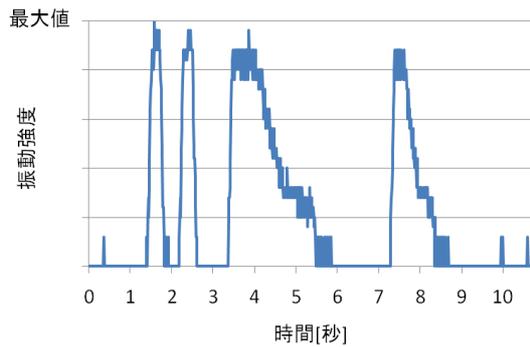


図 7: 評価実験に用いた振動パターン

64個の加速度データを、8個ごとのサブブロックに分割する。



各ブロックの分散値から記録方式を選択し、1ビットデータで表す。ヘッダには8ブロック分の記録方式が格納される。

図 8: データフォーマット

る振動には高品質記録を用いる。記録方式の切替えは、振動強度の分散値を利用して行う。処理手順を以下に示す。

- (1) 64 個分の加速度データをバッファリングする。
- (2) 8 個ごとのサブブロックに分割し、ブロックごとの分散値を算出する。
- (3) 各ブロックにおいて、分散値が閾値より大きければ急峻な振動であるとみなし、低品質記録を選ぶ。また、分散値や平均値が 0 のブロックも低品質記録を選ぶ。それらに当てはまらなければ高品質記録を選択する。
- (4) 8 個のブロックの品質を 0/1 のビットで表した 8 ビットのヘッダをつけて振動データを記録する。

#### 4.2 評価実験

提案手法について、データ量と振動の再現度の観点から評価実験を行った。比較対象は分解能を 16 段階と 4 段階に固定して記録した振動データである。実験には振動チップから出力される急峻な振動と緩やかに変化する振動を組み合わせた振動パターンを用いた。振動パターンの振動強度のグラフを図 7 に示す。各手法により図 7 の振動パターンを記録した際のデータ量を表 1 に示す。また、記録した振動データを振動チップに出力させ、3 人の被験者に図 4 の振動データが再現できているか評価させた。各手法により再現された振動パターンをランダムで 10 回ずつ出力させ、再現度を 1 から 5 の 5 段階で評価させた。3 人の被験者における再現度の評価の平均値を表 2 に示す。

提案手法による振動の表現方法では、分解能を 16 段階に固定して記録する方式より 26.7%データ量が削減できた。さらに、振動の再現度については、分解能 16 段階で記録する方式に対して有意差が見られなかった。これらの結果から、提案手法による振動の表現方式は、振動の再現度を高く保ちつつデータ量の大幅な削減に成功したといえる。

表 1: 各手法によるデータ量

表現方式	再現度
提案手法	3.7
4 段階に固定	2.5
16 段階に固定	3.77

表 2: 各手法による再現度の評価

表現方式	データ量 [bits]
提案手法	2640
4 段階に固定	1800
16 段階に固定	3600

## 5. まとめ

本研究では、振動チップにおいて振動の再現と伝達が行えるように機能拡張を行った。まず、振動チップを用いて振動認識の実験を行い、振動再現のための振動強度の粒度を調べた。振動再現の評価実験の結果、振動表現における強弱の分解能と再現度との関係は、振動パターンにより異なることがわかった。さらに、データ蓄積時に振動パターンにより振動の表現手法を切り替える方式を提案し、提案手法における振動の再現度とデータ量に関して比較実験を行った。提案したデータ蓄積方法を用いることで、振動再現の精度を落とさずにデータ量を削減できる。

今後の課題として、複数の振動チップの連携が挙げられる。複数個の振動チップにより振動の再現や伝達を行うことで、振動による表現力が向上し、さまざまな例に応用できる。

## 6. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤基盤(A)(20240007)および特定領域研究(21013034)の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 久保建太, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦, 細見心一, 西尾章治郎: 振動の入出力を行う汎用的な小型デバイスの設計と実装, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム(DICOM02008), Vol. 2008, pp. 1211-1218, 2008.
- 2) L. Bonanni, J. Lieberman, C. Vaucelle, and O. Zuckerman: TapTap: A Haptic Wearable for Asynchronous Distributed Touch Therapy, Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI2006), pp. 580-585, 2006.
- 3) 沖野将司, 寺田 努, 塚本昌彦, 義久智樹: ユーザの状況を考慮した触覚情報によるウェアラブル入出力支援システム, 情報処理学会研究報告(2008-UBI-17), Vol. 2008, No. 18, pp. 17-24, 2008.