

## 多数の直動型振動子を用いた手全体への触覚提示が可能なグローブの開発 (第 3 報) -強度提示と姿勢センサ改善による触覚フィードバックの高品位化-

田辺 健太<sup>†1</sup> 武井 聖也<sup>†1</sup> 梶本 裕之<sup>†1</sup>

我々は VR 環境における臨場感向上のために、低遅延の直動型振動子を手掌部全体に分布させたグローブを開発している。本稿ではより高品位な触覚提示のため、直動型振動子に与えるパルス制御による振動子の振動強度の制御と新たな手掌部姿勢取得システムについて述べる。

## The Whole Hand Haptic Glove Using Numerous Linear Resonant Actuators (III) -Improvement of haptic feedback-

KENTA TANABE<sup>†1</sup> SEIYA TAKEI<sup>†1</sup> HIROYUKI KAJIMOTO<sup>†1</sup>

We have been developed a whole-hand, low latency haptic glove with numerous linear resonant actuators (LRAs) for VR environment. In this paper, we developed new tracking system and suggest vibration intensity control by PWM control for higher quality feedback.

### 1. はじめに

ヴァーチャルリアリティ (VR) コンテンツの動作環境／制作環境は低価格化, 高機能化が進み, VR に没入し能動動作を伴う VR コンテンツが普及しつつある。しかし, 现阶段で入手可能な VR デバイスは主に映像提示や音響提示による感覚提示を行っており, 能動的な動作に対する結果である触覚を提示することができず, VR 環境への没入感や操作性を損なうと考えられる。

この VR 環境や遠隔操縦に対する触覚を補うため, 例えばユーザの手の姿勢を入力とするマスタハンドに触覚提示機能を備えたものが研究・開発されている[1][2][3][4]。しかしこれらの多くは触覚の提示部位が指先に限定されているものが多く, 巨大なセットアップを必要とするものもある。

これに対し, これまで我々は応答速度の早い直動型振動子を手掌部全体に配置したシンプルなグローブ型の触覚ディスプレイを開発し, 本グローブによる広範囲・低遅延フィードバックにより, VR 空間内の触覚体験を向上させることができることを報告した[5]。

本稿では次の 2 つの改善による触覚フィードバックの高品位化をはかる。第一にこれまで刺激の ON/OFF の単一の刺激で行っていた触覚フィードバックに対し, 振動子の駆動方法を見直し, 振動強度を制御する。第二に従来用いていた外部モーションキャプチャシステムの代わりに, 手掌部に取り付けた 9 軸センサと曲げセンサにより手掌部姿勢取得のロバスト化を実現する。

### 2. 刺激強度の変調

これまで研究されてきた振動子を用いた触覚グローブの多くは振動の単純な ON/OFF の制御のみにとどまり, 振動により主にヴァーチャル物体との「接触」のみを表現するものであり, 質感等を伝えるものではなかった。我々の作成してきたデバイスでも同様に, 直動型振動子を駆動するために, オープンドレイン型のシフトレジスタ (TPIC6a595ne, TEXAS Instruments 社製) を用いて矩形波を生成することで刺激の ON/OFF のみを表現していた。この単純な制御方法により単純な回路でシステムを制御することができたが, 振動子の振動強度を制御することはできなかった。

本章では, 触覚刺激の ON/OFF にとどまらず, より高品位な触覚表現が可能になると考えられるパルス制御による直動型振動子の振動強度制御について述べる。

#### 2.1 先行研究

振動強度を制御している触覚グローブの 1 例として, 矢野らの流れ場表現がある[6]。彼らは触覚グローブに搭載した各振動子の振動強度のパターンを制御することで, 空間的な流れ場, ベクトルの表現を行っている。また, Hachisu らは, 振動刺激の振幅と周波数を制御し, 減衰正弦波を提示することで, 時間的な表現により物体を叩く早さに応じた触覚提示や, 叩いた物体の材質感の表現を行っている[7]。これらを組み合わせ空間的, 時間的な触覚表現を行うことでより表現力の高い高品位な触覚提示をことができると考

<sup>†1</sup> 電気通信大学  
University of Electro-Communications

えられる。

しかしこれまでの主な振動を用いた触覚提示デバイスは刺激点数が少なく空間解像度が不足している場合や、偏心モータ型振動子を用いている場合が多かった。偏心モータの場合振動子の機械的構造から、振動発生までの遅延時間に加えて振動強度と振動周波数を独立に制御することが難しく、時間的な表現を行うことは難しかった。

一方、我々の提案しているグローブは手掌部全体に振動強度と周波数を独立に制御できる直動形振動子を用いている。このことから、これまで提案してきた空間的な表現に加えて振動強度を制御する事ができれば、時間的な表現が可能となり、動作速度に応じた刺激や触れたものの材質感の表現など、より高品位な触覚提示を行うことができるようになると思われる。

## 2.2 直動型振動子の振動強度制御

理想的には、振動強度と周波数を同時に制御する必要がある。しかし、現在入手可能な小型の直動型振動子は、共振によって振動強度を確保しているため、周波数を変更することが難しい。よって今回周波数は共振周波数に固定し、振動強度のみの制御に着眼する。

この振動強度制御には、主に2つの方法でアプローチを行う。第一は絶対的な振動強度の増強である。従来はオープンドレインのシフトレジスタによるユニポーラ PWM 駆動を行っていたが、モータドライバを用いてバイポーラ PWM 駆動を行う。これにより、従来の駆動方法と比較して最大2倍程度の振動を発生させ、広いダイナミックレンジの確保が出来ることが期待される(図1)。もう一つは矩形波の Duty 比による強度制御である。従来の制御では、直動型振動子の共振周波数と同じ基礎周波数の矩形波を生成していたため単一の刺激のみの提示にとどまっていた。今回は、振動子に与える矩形波の Duty 比を制御することにより振動強度の制御を試みる。

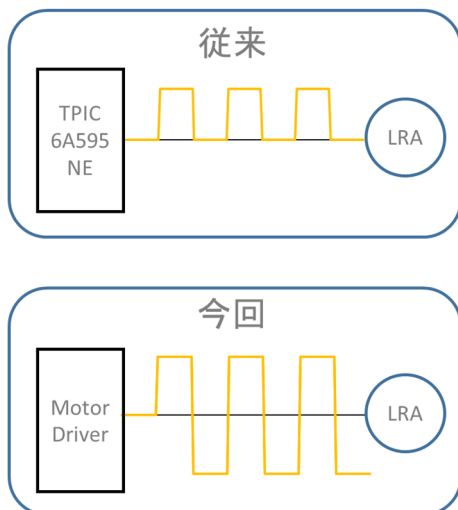


図 1. LRA の駆動方式

## 2.3 振動強度の制御実験

加速度センサ (ADXL337, Analog Devices 社製) を振動子に貼り付けた振動子を提案した制御方法により駆動させ、振動強度の計測を行った。振動子には従来のグローブに用いている振動子 (C10-100, Precision Microdrives 社製) と、同様に小型の直動型振動子 (LD14-00, 日本電産コパル社製) を用いた。

## 2.4 振動強度の計測結果

まず、ユニポーラ駆動とバイポーラ駆動の振動強度の比較を行った。すると、バイポーラ駆動を用いても絶対的な振動強度の弱さから C10-100 では十分な振動強度の違いを表現できないことが判明したため、以下の計測には LD14-002 のみを用いた。

振動子に加える矩形波の Duty 比ごとの振動強度計測の結果を図 2 に示す。

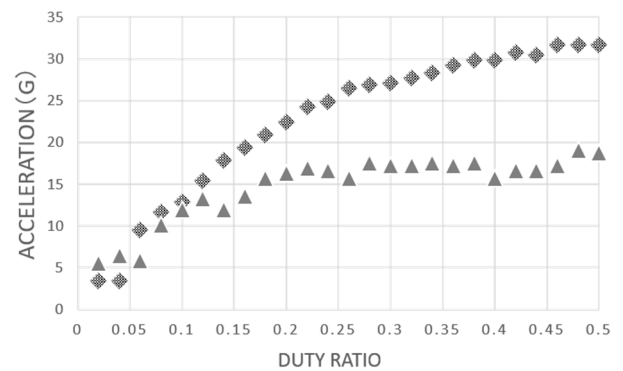


図 2. 加速度計測結果

図中の◆はバイポーラ駆動時の加速度振幅を示し、▲はモノポーラ駆動時の加速度振幅を示す。計測時に印加した電圧は±5Vであった。

計測結果より、直動型振動子 LD14-002 はバイポーラ駆動の矩形波の Duty 比制御により振動強度を 33G 程度以下の範囲の広い範囲で制御可能であることがわかった (±5V 時)。

また、モノポーラ駆動とバイポーラ駆動の比較では、Duty 比が低い時はモノポーラ駆動もバイポーラ駆動と同程度の振動強度で駆動することが出来たが、Duty 比 0.25 程度で振動強度の変化がほとんど無くなった。バイポーラ駆動は Duty 比に応じてそのまま振動強度が増加した。結果として仮説通りバイポーラ駆動により振動のダイナミックレンジをほぼ2倍まで高めることが出来ることがわかった。

今後はこのダイナミックレンジの中でユーザが知覚出来る振動強度の段階評価などを検討していく。

### 3. 手掌部姿勢取得システムの再考

従来の我々のシステムでは、VR 環境へユーザの手掌部の位置及び姿勢を入力するために光学式のキャプチャシステムである Leap motion コントローラを用いていた。本コントローラは2つの赤外カメラで取得した画像を元にユーザの手の位置及び姿勢を高精度に認識する事ができる。しかし、操作時には素手であることを想定されているため、振動子を搭載したグローブの装着によって肥大したユーザの手が認識されにくく、また手をコントローラに対して垂直にした場合など、カメラに映りにくい姿勢をとった場合には認識されず、ユーザの動きを制限していた。

こうした問題に対し、9 軸センサを各指先に装着することによるセンシングが提案され[8]、また商用化も行われており[9]、精度の高い手法であるといえる。しかし、9 軸センサの中の地磁気センサは微弱な地磁気を検出することから、手掌部全体に振動子を配置する我々の状況では大きなノイズが乗ることが予想される。

このため、今回は、指の曲げは曲げセンサ (FLEXSENSOR Spectrasymbol 社製) で捉え、手の傾きや向き等の動きは9 軸 (加速度, ジャイロ, 地磁気) センサ (MPU-9150 Strawberry Linux 社製) を振動子と隣接しない手の甲部に搭載することによって捉える[図 3]。指の曲げしか取得していないため、指同士の開き具合を反映できない点については今後必要性を検討する予定である。

現段階の試作により、このシステムを使用することで従来ではしばしば認識率の悪いセンサに対して慎重な動作を強いられていたユーザはより自然な動作を行うことが可能となった。

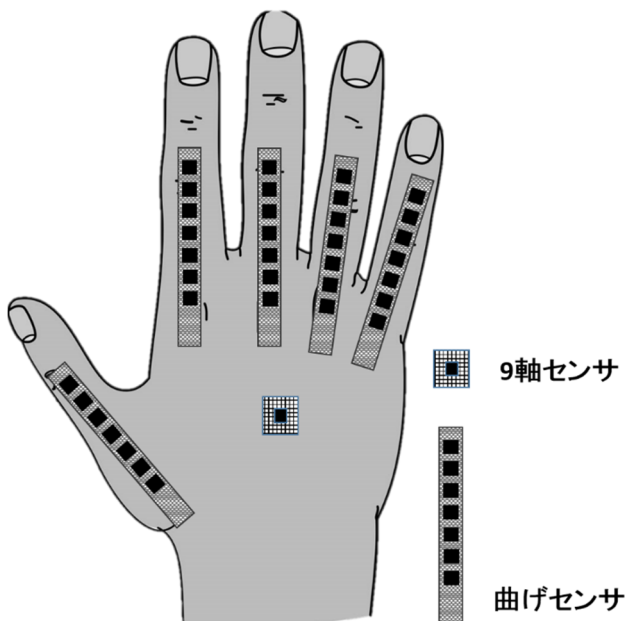


図 3. 曲げセンサと9 軸センサの配置

### 4. まとめと今後の展望

本稿では、直動型振動子の PWM 制御による振動強度の制御と、我々の開発したグローブの手掌部姿勢計測システムの曲げセンサ、9 軸センサによる改良について述べた。この振動強度制御を触覚グローブの振動子全てに適用することで、ヴァーチャル物体との接触などの際の動作速度に応じた刺激や、材質感の表現などのより高品位な触覚提示を手掌部全体にフィードバックすることが可能になると考えられる。今後は触覚グローブへの実装を行い、被験者実験による評価などを予定している。

#### 参考文献

- 1) Tzafestas, C. S. Whole-Hand Kinesthetic Feedback and Haptic Perception in Dextrous Virtual Manipulation. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans. Vol.33, pp.100-113 2003
- 2) Nakagawara, S., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S., & Kawabuchi, I. An encounter-type multi-fingered master hand using circuitous joints. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005
- 3) Pabon, S., Sotgiu, E., Leonardi, R., Brancolini, C., Portillo-rodriguez, O. & Bergamasco, M. A data-glove with vibro-tactile stimulators for virtual social interaction and rehabilitation. Presence 2007, pp.345-348, 2007.
- 4) Jonatandsiulmes, J. M., García, A., & Oliver, M. Identifying 3D Geometric Shapes with a Vibrotactile Glove, IEEE, 2014
- 5) Tanabe, K., Takei, S., Kajimoto, H., The Whole Hand Haptic Glove Using Numerous Linear Resonant Actuators, IEEE World Haptics Conference 2015, 2015
- 6) 矢野 博明, 広瀬 通考, 小木 哲郎, 田村 善昭, 触覚グローブを用いた流れ場表現, 情報処理学会論文誌 Vol.40, No2, 1999, pp414-421.
- 7) Hachisu, T., Sato, M., Fukushima, S., Kajimoto, H., Augmentation of Material Property by Modulating Vibration Resulting from Tapping, EuroHaptics2012, Vol.1, pp173-180,201
- 8) Tommaso.L.B, Mostaga.M, Stefano.S, Domenico.P, Using inertial and magnetic sensors for hand tracking and rendering in wearable haptics, IEEE World Haptics Conference 2015, 2015
- 9) Synertial | Products : <http://synertial.com/products/>