

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2報）

-振動フィードバックによる物体の3次元形状判別実験-

Development of the Whole Hand Haptic Feedback Glove

Using Numerous Linear Resonant Actuators (II)

- 3D shape discrimination with vibration feedback-

○田辺健太（電通大） 武井聖也（電通大）

梶本裕之（電通大，科学技術振興機構さきがけ）

Kenta TANABE, University of Electro-Communications, k.tanabe@kaji-lab.jp

Seiya TAKEI, University of Electro-Communications, takei@kaji-lab.jp

Hiroyuki KAJIMOTO, University of Electro-Communications, JST PRESTO, kajimoto@kaji-lab.jp

Haptic feedback is crucial for enriching the experience of virtual reality contents. While most haptic devices focused on the fingertip, or some required huge setups, we have developed a simple glove-type master hand that has two features. One is that it uses numerous actuators to cover the whole hand (52 vibrators). The other is that we employed linear resonant actuators to achieve high-speed response. We also developed VR environment that users can touch and feel VR object with the glove. In this paper, we conducted an experiment to verify the significance of the whole hand tactile stimulation and high-speed feedback for the identification of contact shape.

Key Words: haptic glove, high-speed feedback, whole hand feedback

1. はじめに

近年，Oculus Riftをはじめとした高機能な頭部搭載型ディスプレイ（HMD）や，KinectやLeap Motionなど，ユーザの身体姿勢を計測する機器が安価に入手可能になった。さらに，無料で簡単にクオリティの高いVRコンテンツを作成することのできるUnity，Unreal Engineなどのゲームエンジンも普及したことによって，誰でもVRコンテンツを作成できるようになった。こうした動作環境／制作環境の低価格化，高機能化は，VR環境に没入し能動的に動いて楽しむVRコンテンツが今後非常に身近になることを意味するといえる。

しかし現段階で普及しつつある低価格なVR用デバイスは，感覚提示の面では主に映像提示や音響提示であり，現実であれば物体に触れた際に返ってくるはずの触覚を提示することができない。能動的な動きを伴ってコンテンツを楽しむ際，この触覚情報の欠落はVR環境への没入感や操作性を大きく損なってしまう。

触覚はVR環境に限らず遠隔操縦などのタスクにおける操作性にも影響を与えるとされ，たとえばユーザの手の姿勢を入力とする装置であ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。マスタハンドは主に外骨格型[1][2]，グローブ型[3][4]の物などがあるが，外骨格型では複雑な機構を持つことや価格の高さから一般家庭への普及には時間がかかるとされる。また，日常のインタラクションの中で指先だけで行える動作約46%と半数に満たない[5]にもかかわらず，触覚の提示範囲が指先に限定されているものが多い。一方，グローブ型のは刺激の提示に主に振動子を用いており，多数の振動子を搭載することで手全体に触覚を提示できるが，これらに多く用いられている振動モータの応答速度の遅さから，ユーザの動作に対する触覚提示までの遅延が大きくなり，ユーザはそれに合わせて低速な動作を強いられるしまう。

そこで我々は使用用途をVRゲームのように厳密な作業性は必要としないながらも主観的な現実感が必要と考えられるものに絞り，このための要件として「入手性：誰でも合理的な価格で入手，使用することができること」，「高速性：ユーザの

自然な動きに対応できること」，「機能性：ユーザはVR空間を触覚で把握できること」の3条件を満たす触覚提示装置の開発を目標とし，応答の早い直動型振動子を手掌部全体に多数搭載した触覚グローブを作成した[6]。

本稿では主にこの触覚グローブを用いたVR環境の構築と，それらを用いた手掌部全体への広範囲，高速触覚フィードバックの有意性を検証する実験について述べる。

2. 提案手法

作成した触覚グローブを図1に示す。



Fig. 1 The haptic glove with 52 linear resonant actuators

入手性に関しては，振動子を用いたグローブ型の触覚提示装置にすることで比較的安価に実現できるようにした。

高速性に関しては，構造的に一般に多く用いられる振動モータよりも応答速度の早い直動型振動子を採用することで実現した。この直動型振動子は振動モータの約1/6の遅延時間で駆動できることを確認している[6]。

機能性に関しては，時間応答性の良い刺激を広範囲に提示することにより実世界で触れる状況に近づき，ユーザがVR空間をより容易に把握することができるようになると仮説を立てた。この仮説に従い，手全体の各部位を覆うよう，計52個の直動型振動子を搭載したグローブを作成し，時間応答性の

高い広範囲フィードバックを実現した。

本グローブを用いて、バーチャルなオブジェクトに触れ、その接触部位に応じた触覚を提示する VR 環境を構築した(図 2)。描画にはゲームエンジン Unity を用い、手掌部位置姿勢の計測には Leap Motion を用いた。

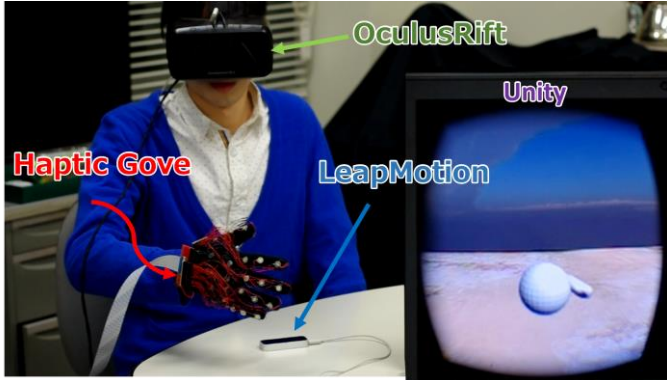


Fig. 2 Overview of the VR environment

3. 実験

「刺激の提示範囲を広くすることがユーザの VR 環境の把握に効果がある」という仮説を検証するため、VR 環境内に設置したオブジェクトの3次元形状を判別させる実験を行った。刺激提示範囲を 4 種類用意し、触覚情報のみを頼りに判別させる。振動モータを用いた触覚グローブの評価を行っている先行研究[7]を元に実験を設定した。

3.1 実験手順

実験は 23-30 歳の男性 5 人と女性 2 人の計 7 人の被験者で行った。被験者には実験中、作成したグローブと HMD を装着させ、Leap Motion で読み取られた 3D モデルの手などが描画された VR 環境を提示した。また実験は各刺激提示範囲においてオブジェクトの形を学習する学習フェイズと、形を判別する判別フェイズの 2 フェイズに分けて行った。

学習フェイズでは、オブジェクトが VR 空間中に描画された。被験者はこの状態でオブジェクトに自由に触れることで、オブジェクトごとの形の特徴を学習した。判別フェイズではオブジェクトの描画を行わず、不可視な接触判定のみが存在する状態でオブジェクトに触れ、デバイスから提示される触覚情報を頼りにこれらの形状を判別した。この際被験者には可能な限り早くかつ正確に、形状がわかった時点で回答するように伝え、回答時間と回答を記録した。

実験に用いる 3 次元形状は先行研究と同様に立方体、円柱、球、円錐の 4 種類とした。判別フェイズにおいて、各条件で 4 種のオブジェクトはそれぞれ 5 回ずつ、計 20 回ランダムに提示した。HMD 画面上には被験者の手の 3D モデルと、オブジェクトを描画しない状態でも見失わない様にするため、オブジェクトの中心を表す赤い球及び背景のみが描画された。各オブジェクトはほぼ同じ大きさになるよう各辺約 20cm に調整し、VR 環境内では固定した状態で実験を行った。

実験時に刺激の提示範囲になる振動子の駆動範囲は図 3 に示す通り、

- 指先のみ：5 個駆動
- 指各節（基節、中節、末節）：14 個駆動

- 手の平全体：27 個駆動
 - 手の甲側も含めた手掌部全体：48 個駆動
- の 4 条件とした。



Fig. 3 Feedback areas

3.2 結果・考察

刺激の提示範囲ごとの平均回答時間を図 4、平均正答率を図 5 に示す。なお被験者の内 1 名は実験を中断したため結果には含めていない。回答時間の結果に関して分散分析及び多重比較 (Tukey 法) を行った所、指先と手の平、指先と手全体、各指節と手の平、各指節と手全体の間のそれぞれに有意差 ($p < 0.01$) が見られた。つまり、広範囲の 2 つの条件が、範囲の狭い 2 つの条件に対して有意に早くなるという結果が得られた。これは仮説通り手の平全体の広範囲に触覚のフィードバックがあることにより実世界で触れる状況に近づき形の判別がしやすくなったためだと考えられる。一方、今回のシステムでは手の甲側も駆動させた場合の回答時間の短縮は見られなかった。これは刺激範囲の手の甲に対する増加がかえってノイズとして影響してしまった可能性が考えられる。今回用いたシステムにおいて、手の 3D モデルはオブジェクトを貫通し、手の平側からオブジェクトに触れた場合においても手の甲側の接触判定まで発生した。このため、現実では発生し得ない手の甲側の触覚フィードバックが行われてしまい、形の判別に効果をなさないばかりか、逆に形の判別が困難になってしまった可能性が考えられる。

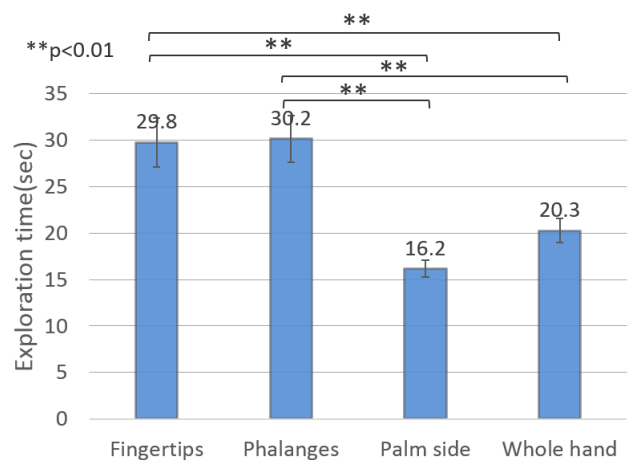


Fig. 4 Exploration time

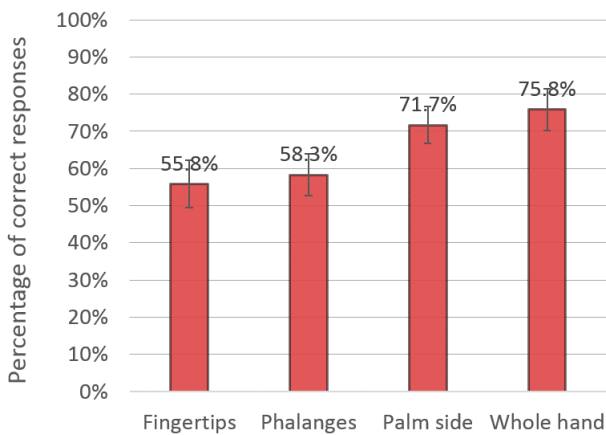


Fig. 5 Percentage of correct responses

正答率に関しては、刺激の提示範囲が広範囲であるほど正答率は上昇している傾向が観察されたものの、提示範囲による有意差は見られなかった。

振動モータを用いた先行研究の回答時間は平均 38.8 秒[7]であったのに対して、本システムでは 20 秒程度とおよそ半分まで短縮されている。正答率に関しても今回の実験の方が改善されていることから、間接的に直動型振動子を用いた応答の良い刺激がより効果的なものであることを示していると考えられる。

4. 結論

本稿では、広く普及するような VR ゲーム用途の触覚提示デバイスの条件として入手性、高速性、機能性の 3 つの条件を挙げ、それらを満たすため応答の早い直動型振動子を計 52 個、手全体に搭載した触覚グローブを作成した。その応用アプリケーションとして、Leap Motion と Oculus Rift を用いた VR 環境を構築した。

開発したグローブが機能性の条件を満たすことを確認するため、構築した VR 環境を用いて触覚提示範囲を変えて 3 次元形状の判別実験を行った。結果としてフィードバック範囲を手の平を含む広範囲に広げることで回答時間が有意に減少することが確認された。この結果を応答の遅い振動モータを用いた触覚グローブで同様の実験を行っている先行研究と比較したところ、正答率・回答時間ともに改善されており、振動子の応答の早さも結果に影響をおよぼすのではないかと考えられる。本実験の結果より、作成した触覚グローブは機能性を満たしていると考えられ、本研究の目的である入手性、高速性、機能性をすべて満たす VR ゲーム用の触覚インターフェース

を実現したと考えられる。

本研究においてこれから取り組むべき課題は主に次の三点である。

一点目は安定した手の位置姿勢計測手法の検討である。現在は Leap Motion によってユーザの手を認識し VR 環境に反映しているが実験中に認識が不安定になることがあったため、より正確、高速に手の位置及び姿勢を入力できるよう、グローブ自身に曲げセンサなどを搭載することを検討している。

二点目は触覚の錯覚現象等を利用した新たな触覚表現の調査である。本グローブでは振動刺激のみの提示に限定され、現実でものに触れた時のような力覚を提示することができない。その力覚を補うため、Kokubun らの ARAtouch[8]のように Pseudo-Haptics などの錯覚現象を用いて擬似力覚などを利用することを検討している。

三点目は応用アプリケーションの開発である。本グローブを用いて VR 空間上のキャラクタとインタラクションができるようなアプリケーションを開発し、そのユーザスタディを行うことを検討している。

参考文献

- [1] Tzafestas, C. S. Whole-Hand Kinesthetic Feedback and Haptic Perception in Dexterous 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] Sadihov, D., Migge, B., Gassert, R., & Kim, Y. Prototype of a VR upper-limb rehabilitation system enhanced with motion-based tactile feedback. *2013 World Haptics Conference*, 2013.
- [5] Gonzalez, F., Gosselin, F., & Bachta, W. A framework for the classification of dexterous haptic interfaces based on the identification of the most frequently used hand contact areas. *2013 World Haptics Conference*, 2013.
- [6] 田辺健太,武井聖也,梶本裕之.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 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2014, 2014
- [7] Jonatandsiuelmes, J. M., García, A., & Oliver, M. Identifying 3D Geometric Shapes with a Vibrotactile Glove, *IEEE*, 2014
- [8] A. Kokubun, Y. Ban, T. Narumi, T. Tanigawa, M. Hirose:ARAtouch: Visuo-haptic Interaction with Mobile Rear Touch Interface, *ACM SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies*, 2013.