



# 高品位な触覚提示のための電気刺激と機械刺激の併用

ヤェムヴィボル, 岡崎龍太, 梶本裕之

電気通信大学

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {yem, okazaki, kajimoto}@kaji-lab.jp)

**概要** : 我々の触覚は, 圧覚, 低周波振動覚, 高周波振動覚および皮膚せん断変形覚に応答する 4 種類の受容器の活動の結果として生じていることが知られている. もしこれらの受容器を選択的に刺激できれば, これらを組み合わせる様々な触覚を提示可能となると考えられる. こうした受容器選択的な刺激に基づく触覚の合成に関してはこれまでも研究されているものの, 4 種類の刺激すべてを必要十分な時空間解像度で実現する簡便な手法は知られていなかった. 本研究で提案する FinGAR (Finger Glove for Augmented Reality)は, 電気刺激と機械刺激を併用することで上記の 4 種類の刺激を実現する. 高密度電極による電気刺激は高い空間解像度で圧覚と低周波振動覚を生成し, 機械刺激は単一の DC モータを用いることで, 高周波振動覚と皮膚のせん断変形覚を提示する.

**キーワード** : FinGAR, 電気刺激, 機械刺激, 選択刺激

## 1. はじめに

低コストな頭部搭載型ディスプレイ (HMD) の普及により, バーチャルリアリティ (VR) の用途は高価な訓練装置から一般向けのエンタテインメント, コミュニケーションツールへと急速に広がっている. こうした用途において, ゲーム中のキャラクタないしオブジェクトに触れた感覚を直接的に表現できる触覚フィードバックの重要性もこれまで以上に高まっている.

触覚提示手法の研究はこれまで数多くなされており, 指先全体に振動を与えるもの, 機械刺激のピンマトリクスを用いるもの, 静電気力などにより皮膚せん断変形を与えるものなどが報告されている. しかしこれらはそれぞれ表現しうる感覚の種類が限定されており, VR という「あらゆる触覚を提示したい」状況に向いているとは言いがたかった.

あらゆる触覚を提示するには, 原理的には皮膚を十分な空間解像度 (指先の場合 1.5 mm 以下) と十分な時間解像度 (0 から 1 KHz) で駆動すればよい. しかしこの条件を満たす触覚ディスプレイの構築は, 現在の MEMS 技術を持ってしても難しい. 一方で我々の触覚は, 4 つの機械受容器の活動の結果生じていることが知られている. もしこれらの受容器活動を選択的に生じさせることができれば, これらの 4 つの感覚提示手段を組み合わせることであらゆる触覚を提示できると考えられる.

本研究はこのアイデアに基づき, 電気刺激と機械刺激の

併用を提案する. 圧覚, 低周波振動覚, 高周波振動覚及び皮膚せん断変形覚を提示できる FinGAR を開発する.

## 2. 関連研究

指先などの無毛部皮膚には機械的変形に反応する 4 種類の機械受容器が存在することが知られている[1]. これらは, それぞれ圧覚, 低周波振動覚, 高周波振動覚, 皮膚せん断変形覚に反応するメルケル細胞 (Merkel cell), マイスナー小体 (Meissner corpuscle), パチニ小体 (Pacian corpuscle), ルフィニ終末 (Ruffini ending)である. これらは空間解像度 (受容野サイズ) も異なっており, 後者 2 つは著しく大きな受容野サイズを持つ (図 1). 視覚において網膜に存在する 3 種類の錐体細胞によってあらゆる色情報感知が知覚され, またこの事実を元に「原色」が定義されるように, 触覚においても各機械受容器の活動を再現できれば様々な触覚を再現できるようになるとかんがえられる (触原色原理).

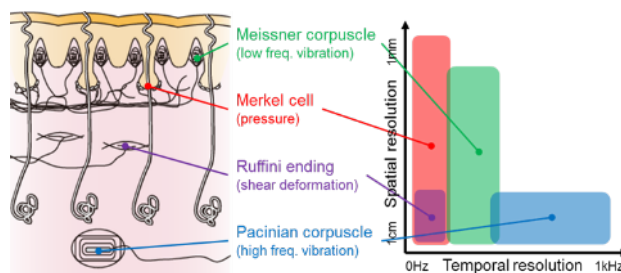


図 1 4 つ種類の機械受容器とそれらの時間・空間特性

こうした受容器選択的な刺激手法についてはこれまで数多く提案されている。Asamura ら[2]は、減衰振動の深さを制御することでマイスナー小体とパチニ小体を選択的に刺激している。Kajimoto ら[3]は、電気刺激の電流極性を変更することで、圧覚と低周波振動覚を選択的に提示できると報告しており、これをメルケル細胞とマイスナー小体の活動比率の違いによるものと推測している。しかし従来の研究では、4種類の刺激すべてを必要十分な時空間解像度で実現する簡便な手法は知られていなかった。

### 3. FinGAR

提案するシステム FinGAR(Finger Glove for Augmented Reality)の構造および外観を図2に示す。指の装着部はABS製で、指を両側から挟む。重さは13gである。小型DCモータ(118386, Maxon)は装着部の爪側に搭載される。DCモータの出力軸にはアームが取り付けられ、このアームは指腹に接触する。アームの指腹接触部には2mm間隔の電極が4×5個配置されており、その外周にはグラウンド電極が配置されている。

本システムにおいて、4つの刺激モードは次のように実現される。

第一に、DCモータによってアームを回転させることで指に皮膚せん断変形が与えられる。Minamizawa ら[4]はDCモータを用いて皮膚に垂直およびせん断方向の変形を与える装置を開発しており、これを援用していると言える。

第二に、同じDCモータに交流を印加することにより振動を提示する。この手法は我々が以前検証しており[5]、一般的なリニアアクチュエータ方式の振動子と同程度の振動提示能力を有することが明らかとなっている。以上2つの手法により、DCモーター一つによって皮膚のせん断変形覚(ルフィニ小体)と高周波振動覚(パチニ小体)の情報を再現できると考えられる。

第三および第四の刺激モードは、アームの先端に取り付けたフィルム電極から電気刺激を与えることによって実現する。従来研究に基づき、電気刺激の極性を変え、陽極刺激を行うことで、低周波振動覚(マイスナー小体)を、陰極刺激を行うことで圧覚(メルケル細胞)を再現する[3]。

以上により、機械刺激と電気刺激を併用することで、4つの刺激モードを実現できる(図3)。

特に重要なのは、この4つのモードが、各受容器に必要な空間解像度を満たしている点である。第一および第二の刺激モードはDCモータを用いているため指先に対して単一の刺激しか行うことができないが、パチニ小体およびルフィニ終末の空間解像度は極めて低いために問題とされないと考えられる。一方で第三および第四の刺激モードはマトリクス電極を用いているために高密度な触覚提示が可能である。つまり提案手法は、受容器の種類ごとに活動させる手法というだけでなく、各受容器の時空間特性に沿った手法になっているといえる。さらにFinGARは、軽量で機構が単純であり、指に装着しやすく、また指の自然

な動きを邪魔しないという実用上の利点を持つ。

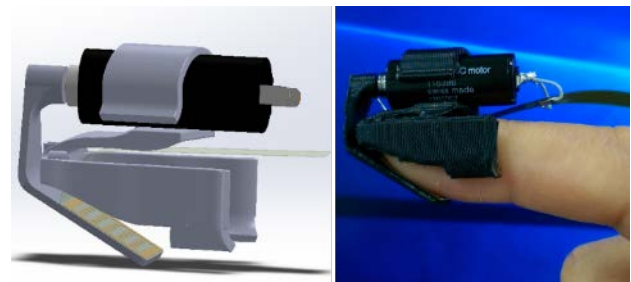


図2 FinGARの設計(左)と指への装着の様子(右)

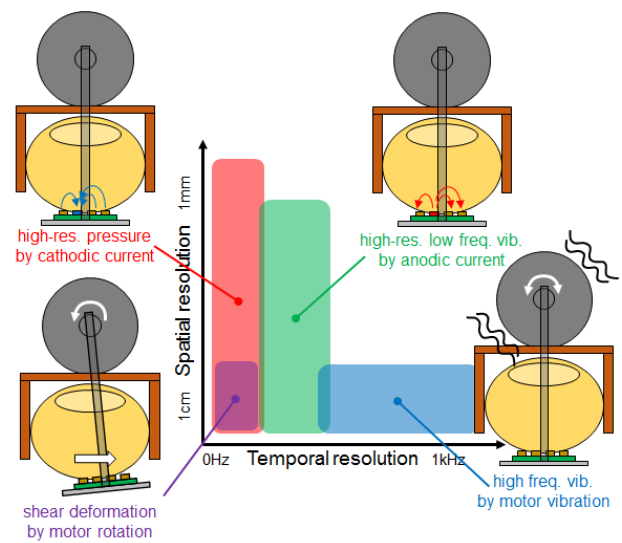


図3 各刺激モードとその役割

### 4. システム・アプリケーションの例

図4はFinGARを用いたVRアプリケーション用のシステムである。親指と人差し指の位置情報をモーションキャプチャ(LeapMotion)により取得する。PC画面上には手先の位置を示すマーカーおよびVR環境が表示される。PC中では、VR世界を更新するUnity、DCモータの信号を生成するPureData、および電気刺激パターンを生成するProcessingの3つのプログラムが共同してVR環境中の触覚をレンダリングする。

触覚のレンダリング手法は例えば次のようなものである。指が物体上に静止している場合、圧覚情報を提示するため陰極の電気刺激を行う。指が微小に動き始めた際には指の皮膚は横ずれを生じると考えられるためDCモータによってこの皮膚ずれを表現する。指の動きが大きくなると、陽極の電気刺激およびDCモータへの交流の印加によって振動覚を提示し、テクスチャーの感覚を生じさせる。



図4 親指と人差し指に（バーチャル空間の中に赤ボールで示す）FinGARを装着し、機械刺激と電気刺激でバーチャルの石を触る感覚を提示する。

## 5. おわりに

本研究では、指に高品位な触覚を提示するために、機械刺激と電気刺激の併用を提案し、FinGARを開発した。機械刺激がせん断変形覚と高周波振動覚、電気刺激が低周波振動覚と圧覚を担当することで、各機械受容器に対応する刺激モードを実現した。

## 謝辞

本研究はJST-ACCEL「身体性メディア」プロジェクトの一環として行われた。

## 参考文献

- [1] Jones, L. A. and Lederman, S. J.: "Human Hand Function." 1st ed. USA: Oxford University Press, 2006
- [2] Asamura, N., Tomori, N. and Shinoda, H.: "A Tactile Feeling Display Based on Selective Stimulation to Skin Receptors." Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, 36-42, 1998
- [3] Kajimoto, H., Kawakami, N., Maeda, T., and Tachi, S.: "Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation." Proc. ICAT'99, 1999
- [4] Minamizawa, K., Fukamachi, S., Kakimoto, H., et al.: "Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation" Proc. SIGGRAPH E-Tech, 2007.
- [5] Yem, V., Okazaki, R., and Kajimoto, H.: "Vibrotactile and Pseudo Force Presentation using Motor Rotational Acceleration." Proc. IEEE Haptics Symposium, 47-51, 2016