

[研究助成 (A)]

光を利用した超多チャンネル触覚刺激の制御に関する研究

A Study on Multi Channel Tactile Stimulus Control by Optical Communication

2191035



研究代表者

東京大学大学院
新領域創成科学研究科

講師

吉元 俊 輔

[研究の目的]

振動刺激などを利用した触覚提示技術は、次世代の情報メディアのみならず、人の身体機能を拡張し運動を支援するための技術として期待されている。高臨場感な触覚再現や多様な運動支援を実現するためには、刺激素子の多チャンネル化とウェアラブル化が重要な課題である。しかし、四肢の広範囲への触覚刺激分布の再現を想定すると1000を超える刺激チャンネル数が必要であり、配線や実装上の問題が生じることから、既存の刺激要素と制御・通信手法の組み合わせでは多チャンネル化とウェアラブル化を両立させることは難しく、その課題解決が不可欠であった。

本研究では超多チャンネルのウェアラブル触覚インタフェースの実現を目標設定とし、新しい刺激要素と制御手法の開発に取り組む。具体的には、光通信により駆動可能な小型で効率的なアクチュエータモジュールを開発し、プロジェクタ光による広帯域な振動の制御手法の確立によりデバイスの簡素化と高機能化を実現し、課題解決を図る。これにより、身体に装着した多チャンネル触覚インタフェースによる多自由度な運動誘導などが実現できると考えられる。

[研究の内容, 成果]

研究の実施期間では、(1) 光駆動アクチュ

エータモジュールの開発、(2) プロジェクタ光による振動制御手法の開発、(3) 皮膚感覚の拡張システムへの応用の三つの内容に分けて超多チャンネルなウェアラブル触覚インタフェースの実現に向けた基礎的な検討を行った。

(1) 光駆動アクチュエータモジュールの開発

刺激素子の多チャンネル化が容易な方法として、プロジェクタ光により振動刺激の制御を行う。光駆動アクチュエータモジュールでは、図1に示すように、プロジェクタ光を検出して人が知覚可能な振動を生成する。光の検出にはフォトレジスタを利用し、光の輝度信号を電圧信号に変換する。また、アクチュエータを駆動するためにドライバ回路では電流増幅を行う。

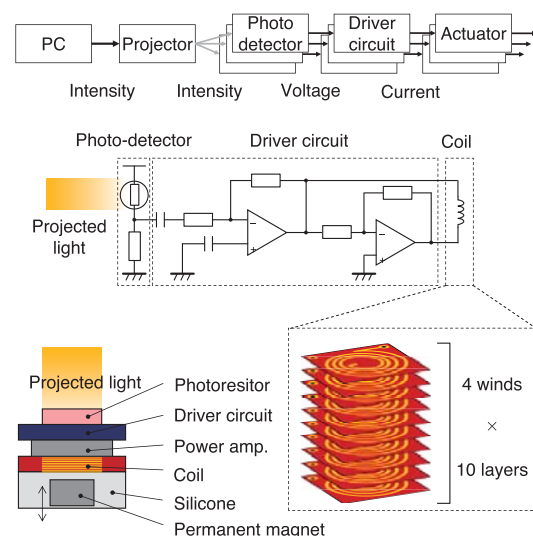


図1 光駆動アクチュエータモジュールの概要

一方、振動を生成するアクチュエータについては、形状記憶合金、圧電素子などいくつかの方式に対する調査を行ったが、既存の素子では周波数帯域、サイズ、並列化可能性が不十分であったことから、新しい電磁式アクチュエータを開発した。図1に示すように、開発した電磁式アクチュエータでは、従来のボイスコイルモータのようにコイルと永久磁石の間に働く磁気力により振動を生成するが、積層基板でコイルを構成するとともに、シリコンゴムによって支えられた磁石を重ねることで並列化を容易にしている。

電磁アクチュエータの振動特性を評価するために実装を行った。コイルは5.4 mm×5.4 mm 四方の基板を10層積層して40巻の構造とした。永久磁石の直径は3 mm、高さは3 mmとした。シリコンゴムについては透明シリコン（造形材）を使用し、磁石を固定するための構造を型取りして形成した。なお、磁石の高さやシリコンゴムの硬度についてはそれぞれ2種類の条件に対して出力特性を調べ、効率の高い設計を選出した。

振動特性の評価では、皮膚に対して刺激を与えることを想定して振動面に2 gの重りを載せ、駆動信号が10-180 Hzの正弦波に対する重りの振幅をレーザ変位計（LK-G85, KEYENCE）で計測し、周波数特性を調べた。駆動電流はパワーアンプ（PBX40-2.5, KIKUSUI）を用いて振幅が0.5 Aとなるよう調整した。実験により取得された周波数特性を図2に示す。実験結果より、高さ3 mmの永久磁石と硬いシリコンを用いた場合、80 Hzにおいて振幅の極大値が確認され、10-125 Hzにおいては5 μm よりも大きな振幅が得られることがわかった。100 Hzの周波数において、人の振動知覚閾値は0.1 μm よりも小さいことから、知覚可能な振動が得られると考えられる。

さらに、コイル基板により生成される磁束密度を調べるため、シミュレーションによる電磁解析を行った。解析には Autodesk Inventor の

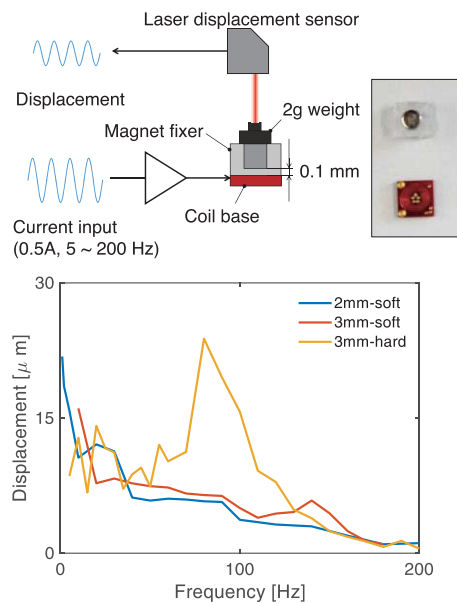


図2 振動振幅の周波数特性

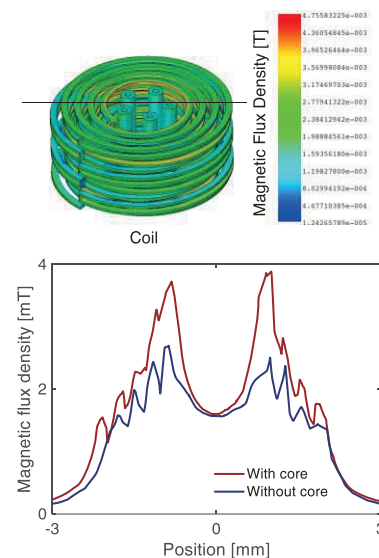


図3 電磁界解析の結果

拡張プラグイン EMS (ElectroMagnetic Simulation) を使用し、磁束密度の分布について調べた。結果を図3に示す。結果より、磁束密度の最大値はコイルの内径領域に存在することが分かった。コイルの直径は3 mmであることから、磁束密度の値が大きい範囲に配置できおり、設計の妥当性を確認することができた。

以上より、光駆動アクチュエータモジュールの設計を確立することができた。特に、5.4 mm 四方で配列化が容易な設計を得られた点は

従来からの大きな進歩である。また、シリコンゴムで永久磁石を固定する設計により、装着性と多チャンネル化の両立が可能になった。一方で、アクチュエータを駆動することにより熱が生じることも確認され、長時間の使用においては対策が必要であることがわかった。

(2) プロジェクタ光による振動制御手法の開発

受光駆動回路では、プロジェクタ光の輝度に応じた駆動信号を生成する。生成可能な振動の周波数は、主にプロジェクタのフレームレートに依存すると考えられる。一般的な液晶プロジェクタでは、60 Hz のフレームレートであることから、理論上、提示可能な最大の周波数は 30 Hz となる。ただし、一般的にフォトレジスタの応答は遅いため、伝達特性に影響を与える可能性があるため検証を行った。

実験では、プロジェクタ光通信および光駆動アクチュエータの伝達特性を調べることを目的とし、輝度－電圧特性および受光回路の出力電圧・振動振幅の周波数特性の測定を行った。プロジェクタ光については液晶プロジェクタ EB-W41 (EPSON) を使用して輝度値が 0-255 の白色光の照射を可能とした。なお、受光駆動回路はプロジェクタから 700 mm の位置に配置し、AD 変換器 Analog Discovery (Digilent) を用いて受光回路の出力電圧、駆動回路の電流を計測した。

まず、プロジェクタの輝度値と光検出回路の出力電圧の関係を調べた結果を図 4 に示す。結果より、輝度と出力電圧の関係は非線形であり、輝度が高くなるにつれて出力が飽和していることがわかる。本特性はプロジェクタの輝度－照度特性、フォトレジスタの照度－抵抗特性、分圧回路の抵抗－電圧特性の影響を含んでおり、いずれかの特性を調整することにより触覚刺激において効果的な特性を表現することができると考えられる。

次に、1-30 Hz の投影光に対し、光検出回路の出力電圧およびアクチュエータの振動振幅の

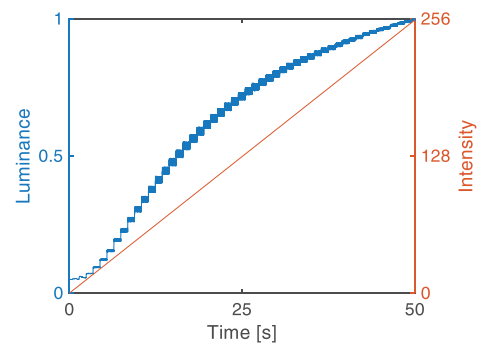


図 4 プロジェクタ輝度特性

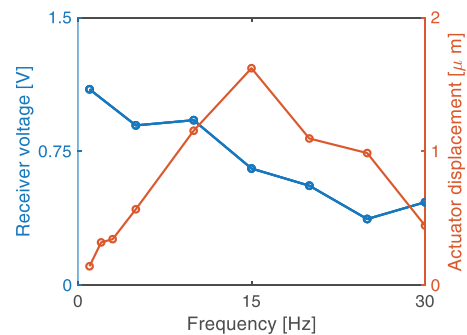


図 5 光駆動アクチュエータの周波数特性

周波数特性を調べた結果を図 5 に示す。結果より、周波数が高くなるにつれて光検出回路の電圧振幅が徐々に減少しているが、使用したプロジェクタの限界である 30 Hz まで利用可能であることが確認できた。また、アクチュエータの振動振幅については駆動回路において直流成分を遮断しているため 15 Hz 付近で最大値を示しているが、1-30 Hz においては知覚可能な振幅が得られることが確認できた。

(3) 皮膚感覚の拡張システムへの応用

前述の光駆動アクチュエータモジュールにより、従来の 1/3 程度の大きさの刺激デバイスを実現できた。さらに素子を配列し、図 6(a) に示すように前腕に装着することを想定した 120 チャンネルのウェアラブル触覚インタフェースへの拡張可能性を確認した。個々の刺激素子はシリコンゴムによって連結されているため柔軟で、前腕に限らず身体上の様々な部位に装着して使用することができる。ただし、刺激強度を統制するためには、接触状態を均一に保つ必要

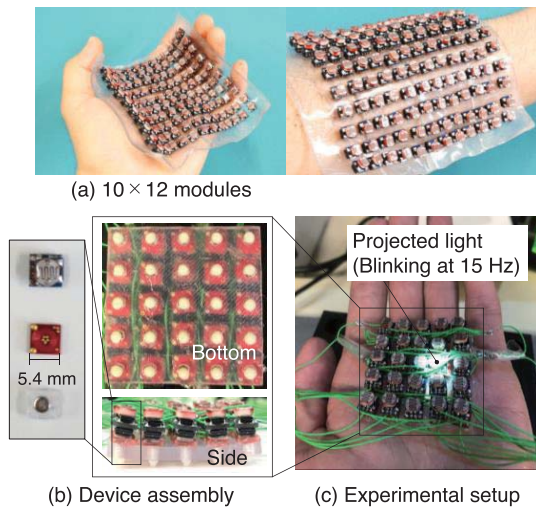


図6 光駆動アクチュエータの実装と実験環境

がある。また、プロジェクタからの距離に応じた刺激の補正も必要である。そこで掌への刺激提示に焦点をあて、25チャンネルの触覚インタフェースを実装し、皮膚上を移動する振動刺激の方向を知覚可能であるか調査を行った。実験では図6(b)(c)に示すように、デバイスに対して縦横4方向の移動方向に対して知覚した移動方向について回答を取得し、正答率を算出した。なお、振動刺激の周波数は15 Hz、刺激の移動速度は20 mm/sとし、閉眼状態で回答を得た。

3名の実験参加者からの回答の結果、92%の正答率で移動方向を知覚可能であり、開発した触覚提示システムによって刺激の移動方向を表現可能であることが示唆された。また、デバイ

スに対して斜め方向の移動や円状の動きについては知覚が難しく、装着状態の統制と刺激強度の増加が必要であることが明らかとなった。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では、超多チャンネルなウェアラブル触覚インタフェースの実現を目指し、新しい電磁式アクチュエータの開発を行った。期間内にはアクチュエータの特性および信号伝達特性に関する基礎評価が得られたほか、多チャンネル化したデバイスを用いて身体上を移動する触覚刺激を提示したところ、その移動方向を知覚可能であることが示唆された。

今後は、電磁式アクチュエータにおける空間分解能に関する改善方法およびプロジェクタ光通信における時間分解能に関する改善を行うとともに、皮膚感覚拡張システムとして身体運動の教示を行うシステムを構築し、知覚特性の評価を目指す。また、装着状態や身体の動作に対する刺激の統制に関する課題が抽出されたため、その改善方法を探求する。

[成果の発表、論文等]

北川湧麻, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城 理: プロジェクタ光通信による触覚伝送システム. システム制御情報学会研究発表講演会論文集, TS07-1, 大阪, 2019.