

センサーとアクチュエータの連携による薄膜触覚転送システムの開発

太田原 佑哉^{†1} ZHENG JUNYUN^{†2} SU ZEHUI^{†1} 曾根 順治^{†1†2}

概要：本研究では、センサーとアクチュエータの連携による薄膜触覚転送システムを開発することを目的とする。触覚センサーが感知した接触情報を電気信号に変換し、その信号をリアルタイムでアクチュエータに伝達することで、触覚の再現を可能とするシステムを構築した。本システムは、薄膜技術を活用して高精度かつ柔軟な触覚提示を実現しており、ユーザーに自然な触覚体験を提供することを目指している。この技術は、触覚通信やリモート操作分野における新たな可能性を開くものである。

1. はじめに

近年、触覚技術は急速に発展し、VR、AR、医療、ロボティクスなど幅広い分野で重要性を増している。触覚提示デバイスは、視覚や聴覚に加え「触覚」を取り入れ、より没入感のある体験を提供する役割を果たしている[1]。特に、複数の接触点を同時に制御できる多点触覚デバイスは、精密な触覚フィードバックを求める応用で期待されている[2]。触覚技術は遠隔操作や医療分野でも応用が進み、新たなインターフェースとしての可能性が広がっている[3][4]。

本研究では、薄膜型の触覚提示システムを提案し、センサーとアクチュエータを連携させることで、接触情報をリアルタイムで伝達し、高精度な触覚体験を提供することを目的とする。このシステムは、触覚センサーによる情報収集とアクチュエータによる触覚刺激の提示を連携することで、薄膜型で柔軟な触覚転送システムの開発を目指している。

2. 多点触覚デバイスの概要

多点触覚デバイスの開発において、まずデバイス自体の材料選定と構造設計が重要なステップである。本研究で開発された触覚デバイスの断面図を図1に示す。シリコンゴムとフッ素化エチレンプロピレン (FEP) 膜を主要な構造材料として使用し[5]、FEP フィルムで、柔軟なシリコンゴムを挟み込むように接着して、柔軟かつ耐久性のある構造を実現している[6]。FEP フィルム上に正電極として Ti 膜を蒸着することで、電極パターンを形成する。さらに、配線には、Au もしくは Cu を蒸着により成膜して、デバイスの耐久性と信頼性が向上させている。下面全体には金属膜の負電極を形成する。FEP フィルムの厚さは 25 μ m、シリコンゴムの厚さは 0.25mm で、全体の厚さは 0.3mm となる。上部の電極は駆動回路の正極に接続し、下部の電極は駆動回路の負極に接続する。

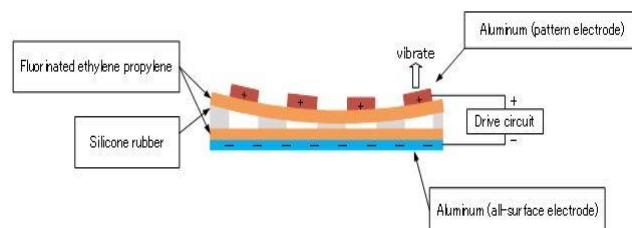


図1. デバイスの断面構造

Figure 1. Cross-sectional structure of the device

デバイスの構造は、2.5cm x 2.5cm のエリアに 25 点の振動生成ポイントを持ち、ほぼ 2 点弁別閾で、触覚を生成することが可能である。各触覚生成点は独立して制御され、異なる種類の触覚パターンの生成を可能とする。図2に触覚デバイスの表面と裏面を示す。このデバイスは、センサーとアクチュエータの両方の機能を持つ。



図2. 触覚デバイスの表面と裏面

Figure 2. Front and back of the haptic device

3. 触覚デバイスの制御システム

触覚デバイスの制御ハードウェア構成には、主に HV513[7]シリアルーパラレル変換機能を持つ高電圧プッシュプル出力ドライバーと Arduino を使用する。Arduino は PC から受け取った触覚生成データは SPI 通信を使って HV513 に転送する。HV513 は、シリアルデータをパラレルデータに変換し、最大 8 つの出力チャネルを持つ高電圧プッシュプル出力ドライバーであり、この機能を用いてデバイスの圧電制御を行うことで、触覚デバイスを駆動し、触覚を生成する。図3にハードウェア構成の回路図を示す。

^{†1} 東京工芸大学 工学部

^{†2} 東京工芸大学 大学院工学研究科

MHV12-300S10P という 2 つの DC-DC コンバーターを用いて、12V から 200V の駆動圧を HV513 に供給する。

この駆動回路の詳細は One board microcomputer の Arduino Mega 2560 を使用して HV513 を制御するためのシステムを開発した。制御プログラムは Bit-Banging 制御方式を用いており、SPI 通信を模擬して実行している。Arduino は、シリアル通信によって 4 個の HV513 を制御することにより、32 点まで制御可能である。Arduino の GPIO ピンから HV513 に対してクロック (CLK)、データ(DATA)、ラッチ(LE)信号が送られ、その後、シリアルデータが転送される。データはクロックの立ち上がりエッジに同期して、1 ビットずつシフトレジスタに入力される。すべてのデータが転送されると、Arduino はラッチ信号を設定して (LE ピンに信号を送ることで)、HV513 の内部レジスタにデータを転送し、高電圧信号の出力を更新する。これにより、複数の触覚生成点に対する同時制御が可能となる。Arduino で正確なクロック信号を生成してデータ転送の时序を確保するとともに、振動パターンの周波数を制御している。HV513 の高電圧出力チャネルは、触覚デバイスの動作に必要な 200V、200Hz の方形波信号を生成する。これにより、人の皮膚の感度が高い、振動パターンを提示することが可能となり、ユーザーに触覚フィードバックを提供する。

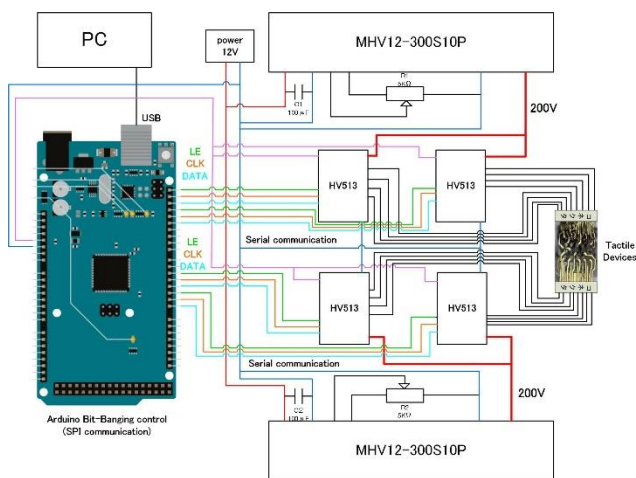


図 3.触覚デバイスのハードウェア構成の回路図

Figure 3. Hardware schematic of the haptic device

4. センサーとアクチュエータの連携システムの開発

触覚センサーと触覚提示の連携ストレージョンは、センサーデータの取得および触覚フィードバックの生成を連携させるためのデバイスとシステムで構成される。この連携システムでは、触覚センサー、6 チャンネルの A/D コンバーター[8]、信号処理、触覚提示デバイス、制御ソフトウェアから構成される。

触覚センサーモジュールは接触面の力を検出し、センシ

ング刺激をリアルタイムで電気信号に変換する機能を有している。これにより、微細な触覚変化を正確に捉えることが可能である。センサーから得られたアナログ電圧信号は、A/D コンバーターを通じてデジタル信号に変換される。A/D コンバーターを経由して得られたデジタル信号は、USB を介して、PC に転送する。変換し、触覚提示デバイスへ適切な制御データを送信する。PC では、3 節で述べた触覚生成システムが動作して、触覚アクチュエータの各点に電圧を供給して、触覚を生成する。図 4 は触覚センサーと触覚提示の連携ストレージョンの構成図を示し、A/D コンバーターによるセンサーデータの収集、信号処理、触覚提示の同期を実現する。

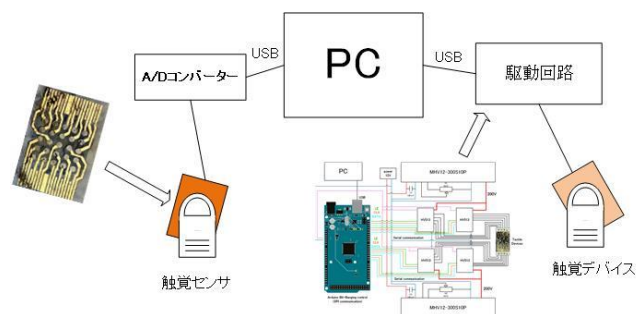


図 4. 触覚センサーと触覚デバイスの連携ストレージョン構成図

Figure 4. Tactile sensor and tactile device demonstration configuration diagram

5. 連携デモンストレーション結果

被験者の左手が触覚センサーに触れることで圧覚をセンサーに誘起する。その圧覚信号をセンサーで検出し、右手により、触覚提示デバイスからの振動により、その圧覚を感知するという一連の連携プロセスを評価した。

実験において、触覚センサーからの信号は A/D コンバーターを通じて各チャネルの電圧データとして取得され、システム内でデジタル信号に変換された。このとき、各チャネルの電圧が 0.1V を超えるかどうかを判定基準とした。その結果、電圧が 0.1V を超えた場合、対応する触覚提示デバイスの提示点が振動を発生することが確認された。

また、被験者の左手が触覚センサーの異なる位置に触れた際、右手で触覚提示デバイスの対応する提示点の振動を感知できることが実験により実証された。これにより、本システムは触覚センサーと触覚提示デバイス間のリアルタイムな連携を実現していることが確認できた。

6. おわりに

本研究では、触覚センサーと触覚提示デバイスを連携させたシステムの開発を行い、触覚フィードバックを効率的

に提供するための触覚通信システムを構築した。触覚センサーからのデータ取得、A/D コンバーターによる信号変換、そして触覚提示デバイスによるフィードバック生成まで、一連のプロセスを高精度かつ効率的に実現するシステムを開発できた。実験結果から、このシステムが圧覚を正確に捉え、触覚アクチュエータを介して触覚フィードバックを提供できることが確認された。

謝辞

本研究は、科学研究助成事業(JSPS KAKENHI 17K00285, 21K12002)の助成を受けて実行している。また、文科省のマテリアル先端リサーチインフラ事業 (ARIM)、東北大学ナノテク融合技術支援センター (CINTS)、MEMS 試作コインランドリーの支援を受けて、デバイス開発を実行している。デバイスの開発は、UC Berkeley の Prof. Liwei Lin 教授、電通大の梶本教授にもご支援を頂きました。

参考文献

- [1] Tachi S., Yasuda K., Evaluation Experiments of a Telexistence Manipulation System, Presence, Vol.3, No.1, 1994, 35-44.
- [2] Y. Ikei, K. Wakamatsu, and S. Fukuda, “Vibratory tactile display of image-based textures,” IEEE Comput. Graph. Appl., vol. 17, no. 6, pp. 53–61, Nov./Dec. 1997.
- [3] Oyama E., Tsunemoto N., Tachi S. and Inoue Y., Experimental Study on Remote Manipulation Using Virtual Reality, Presence, Vol.2, No.2, 1993, 112-124.
- [4] Kajimoto, H. Electro-tactile display with real-time impedance feedback using pulse width modulation. IEEE Trans. Haptics 2012, 5(2), 184–188
- [5] Zhong, J.; Ma, Y.; Song, Y.; Zhong, Q.; Chu, Y.; Karakurt, I.; Bogy, D. B.; Lin, L., A Flexible Piezoelectret Actuator/Sensor Patch for Mechanical Human–Machine Interfaces. ACS Nano, 2019, 13, 7107-7116.
- [6] Sone J., Sato T., Yanagawa S., Yamada K., Lin L. Study of Thin Polymer pre-charge Multi point Tactile device, Workshop on Emerging Novel Input Devices and Interaction Techniques, IEEE VR 2022, 1-3.
- [7] HVCMOS, 8-Channel S-P Converter, w/Push-Pull Outputs, 250V, <https://www.microchip.com/en-us/product/hv513>
- [8] TUSB-ADAPIO, <https://www.turtle-ind.co.jp/products/ad-converters/>