

モータマトリクス駆動回路に基づく高密度形状提示装置

2210337 杉本隆平 成見研究室

1 はじめに

私たちが日常的に触れる多くの物体は、その三次元形状を通して機能や操作方法を自然に示唆している。HCI では、情報を物理的形状として提示し、触れながら操作するインタフェースとして タンジブルユーザーインタフェースや形状変化ディスプレイが研究されてきた。その代表例であるピンアレイディスプレイは、多数の可動ピンの高さを独立に制御することで、高い空間分解能で動的な表面形状を提示できる [1]。一方で、ピン数の増加に伴い配線・駆動回路規模が増大し、高密度化の大きな制約となる。

本研究では、大変位と形状保持を得やすい DC モータによるピンアレイを対象とする。しかし DC モータは正転・逆転制御を必要とするため、モータ数の増加が回路規模の増大として直ちに現れる。配線削減の手法として行列駆動が知られているが、双方向に導通する DC モータでは、非選択交点を介した意図しない電流経路（ゴーストパス）が形成され、安定した駆動が困難であった。

本研究はこの課題に対し、正転・逆転の電流経路を二層のダイオードネットワークとして分離・整流するモータマトリクス駆動回路を提案する。提案方式を 16×16 (256 自由度) の高密度ピンアレイ試作機へ適用し、行列駆動によって多数モータを選択的に駆動可能であることを確認した。

2 関連研究

高密度ピンアレイ型触覚／形状提示装置では、アクチュエータ数の増加に伴う配線・駆動回路規模の増大がボトルネックとなる。この問題に対し、LED ディスプレイ等で用いられる行列駆動は、行・列を時分割で走査して多数素子を少数線で制御する枠組みとして広く知られている。

触覚提示分野においても行列駆動の応用が報告されている。例えば Nakatani らは SMA を用いた 16×16 ピンアレイに対し、ダイオード整流を併用した行列駆動により誤動作を抑制した [2]。また Koo らは DEA を用いた小規模ピンアレイにおいて、同様の考え方で制御回路数の削減を実現している [3]。さらに、流体圧を行列的にアドレスする枠組み [4] や、油圧セルを用いた段階的更新による大規模化 [5]、電気刺激ディスプレイにおける行列的駆動 [6] など、多様な配線削減手法が提案されてきた。

ただし、これら既存研究の多くは一方に扱える素子を対象としており、整流によってゴーストパスを比較的単純に抑制できる。一方、本研究が対象とする DC モータは双

方向導通かつ正転・逆転を必要とするため、従来の一方向素子向け行列回路をそのまま適用できない。本研究の二層ダイオードネットワーク方式は、正転・逆転の電流経路を回路構造として分離しつつ、 $2N$ 本のラインで N^2 台のモータをアドレス可能とする点に特徴があり、モータ型ピンアレイの高密度化に向けた新たな設計空間を提示する。

3 モータマトリクス駆動回路の設計理論

行列駆動は、素子を行列表に接続し、行・列の選択と高速走査によって多数素子を少数線で制御する手法である。この手法をモータへ適用すると、図 1 左、中央のように特定の行・列の組合せに電位差を与えることで任意のモータを選択駆動できるように見える。しかし DC モータは双方向に導通するため、単純な行列配線では非選択モータを介した意図しない閉回路（ゴーストパス）が形成され、誤駆動や干渉が生じる。

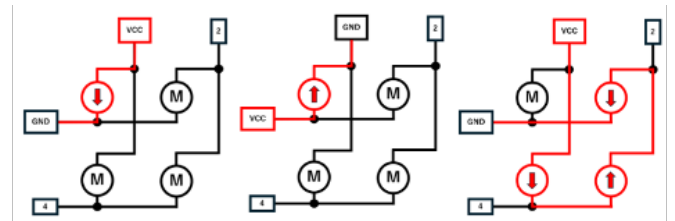


図 1 2x2 マトリクス回路, 理想的な経路, ゴーストパスの経路例

この問題を回路構造によって抑制するため、図 2 のように各モータ端子に整流素子を挿入し、行列配線上の逆流・回り込みを遮断するダイオードマトリクス方式を提案する。正転用経路と逆転用経路をダイオードによって整流することで、正逆の整流経路が回路上で交差しないように設計した。これにより、非選択交点で閉回路が形成されず、ゴーストパスを完全に抑制できる。

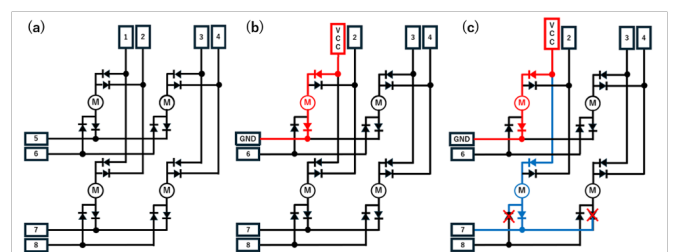


図 2 (a) 提案するダイオードマトリクス方式の回路,(b) 正転経路, (c) ゴーストパスをブロックしている様子

4 モータマトリクス駆動回路の実装

提案方式の成立性を検証するため、ダイオードマトリクスを試作し、選択交点のみで電流経路が成立することを実機観察により確認した。さらに、行・列ラインへ VCC または GND を選択的に割り当てるため、Pch/Nch MOSFET によるハーフブリッジ回路を用いた駆動基盤を設計した (図 3)。

制御系には ESP32-S3 と GPIO 拡張 IC (MCP23S17) を用い、SPI 通信により多数のゲート信号を生成する構成とした。これにより、ソフトウェアから走査パターンを柔軟に変更可能な駆動基盤を構築し、正転・逆転の切替においても安定した選択駆動が得られることを確認した。

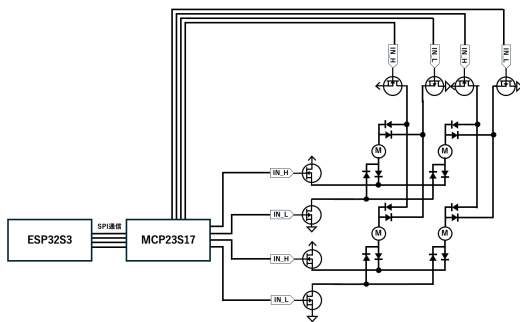


図 3 モータマトリクス駆動回路の概略図

5 高密度形状提示ディスプレイとしての応用

提案回路を高密度形状提示装置として成立させるため、 16×16 (256 自由度) の DC モータアレイを用いたピンアレイ試作機を設計・統合した (図 4)。各モータの回転運動はリードスクリュー機構により直動へ変換され、多点の高さを独立に制御可能な形状提示面を構成する。

高密度実装に伴う配線と保守性の課題に対し、中間基板と FPC 配線を用いたモジュール構成を採用し、提示部、行列配線基板、駆動・制御基板、電源系を分離した。提案回路を用いた走査駆動により、試作機において任意のピンを選択的に駆動可能であることを確認した。現時点では形状提示の定量評価や閉ループ制御は未実施であるものの、多数モータを用いた高密度ピンアレイを行列駆動方式によって装置として統合できることを示した点に意義がある。

6 結論と今後の展望

本研究では、高密度ピンアレイ型形状提示ディスプレイにおける配線・駆動回路規模の増大という課題に対し、DC モータを対象としたモータマトリクス駆動回路を提案した。二層ダイオードネットワークによりゴーストパスを抑制し、行列駆動の利点と双方向駆動の成立性を両立する回路構造を示した。さらに、 16×16 高密度ピンアレイ試作機へ統合

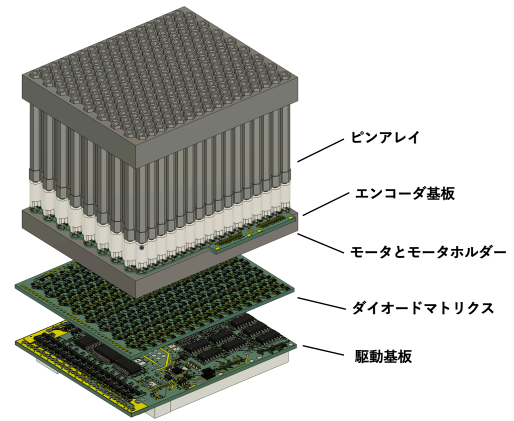


図 4 統合した高密度ピンアレイ試作機の外観

し、装置としての成立性を確認した。

今後は、位置計測に基づく閉ループ制御の導入と、走査条件と提示性能の関係の定量評価を行うことで、提案方式を高密度形状提示ディスプレイとして完成させることが課題である。

参考文献

- [1] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. Inform: Dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 417–426, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [2] M. Nakatani, H. Kajimoto, K. Vlack, D. Sekiguchi, N. Kawakami, and S. Tachi. Control method for a 3d form display with coil-type shape memory alloy. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1332–1337. IEEE, 2005.
- [3] Ig Mo Koo, Kwangmok Jung, Ja Choon Koo, Jae-Do Nam, Young Kwan Lee, and Hyouk Ryeol Choi. Development of Soft-Actuator-Based Wearable Tactile Display. *Trans. Rob.*, Vol. 24, No. 3, pp. 549–558, June 2008.
- [4] Saurabh Jadhav, Paul E. Glick, Michael Ishida, Christian Chan, Iman Adibnazari, Jurgen P. Schulze, Nick Gravish, and Michael T. Tolley. Scalable Fluidic Matrix Circuits for Controlling Large Arrays of Individually Addressable Actuators. *Advanced Intelligent Systems*, Vol. 5, No. 8, p. 2300011, 2023.
- [5] Haihong Zhu and Wayne J. Book. *Practical Structure Design and Control for Digital Clay*, Vol. Dynamic Systems and Control, Parts A and B of *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. November 2004.
- [6] De-Ru Tsai and Wensyang Hsu. A new type of a large-area multi-touch tactile device operated by electro-tactile stimulation. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 313–318, July 2019.