

超小型ピンアレイによるポータブルな形状提示装置

— スケーラブルなモータドライバアーキテクチャの発明 —

1. 背景

形状は、人が対象を理解し、操作し、身体的に関わるうえで重要な情報媒体である。Human-Computer Interaction の分野では、物理形状を情報提示やインタラクションの媒体として活用する研究が進められており、中でも形状変化インタフェースは、視覚に加えて触覚を通じた情報提示を可能にするものとして注目されてきた。

ピンアレイディスプレイは、その代表的な実装形式の一つであり、多数のピンを高密度に並べて高さを個別制御することで、凹凸や曲面などの形状を提示できる。一方で、多数のピンを独立に駆動する必要があるため、ピン数の増加に応じて駆動回路や配線が急増し、高密度化や可搬化が難しいという課題があった。とくにモータ型ピンアレイでは、各モータを個別に駆動する構成が一般的であり、これが装置全体の大型化を招く要因となっていた。

2. 目的

本プロジェクトでは、当初、4mm の小型 DC モータを用いて各ピンを駆動し、高密度かつ可搬な形状提示装置を実現することを目標としていた。小型モータとリードスクリュー機構を組み合わせることで、大きなストロークと形状保持性を両立しつつ、従来より高精細なピンアレイディスプレイを構成することを構想していた。

しかし開発を進める中で、この種の装置の本質的な難しさは、単にピン機構を小型化することではなく、多数のモータをどのように高密度に駆動・計測するかという回路・配線構造そのものにあることが明らかになった。従来のモータ型ピンアレイでは、各モータを個別に駆動するための回路規模が大きくなり、その結果として駆動基板や計測基板を縦方向に積層する構造になりやすい。こうした基板の縦積みは、装置全体の高さや厚みを増大させ、高密度化や可搬化を妨げる要因となっていた。

そこで本プロジェクトでは、当初の装置開発目標をさらに掘り下げ、高密度モータ型ピンアレイを成立させるための基盤技術の確立を主目的として設定した。具体的には、多数のモータを行列的に選択駆動できるモータマトリクス駆動回路を設計・実装することで、従来のような基板の縦積み依存せず、駆動基板および計測基板をより平面的に構成できるアーキテクチャを目指した(図 1)。これにより、高密度なピン機構と基板の横方向への集約を両立し、将来的な大規模化・可搬化へつながるスケーラブルな技術基盤を示すことを目的とした。

3. 開発の内容

本プロジェクトでは、高密度な形状提示を実現するために、ピンアレイ機構、モータマトリクス駆動回路、制御ファームウェア、PC 用 GUI を一体として開発した。最終的には、4.5mm ピッチで 16×16 に配置した 256 ピンの試作機を構築し、多数の小型 DC モータを選択的に駆動して形状を提示できるシステムを実現した(図 2)。

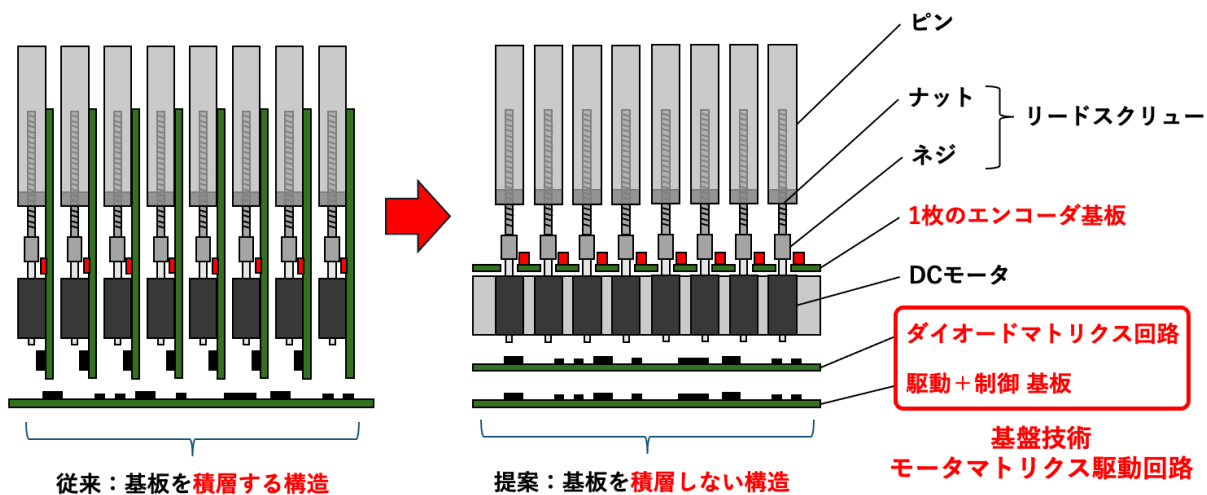


図 1: 提案する駆動アーキテクチャ

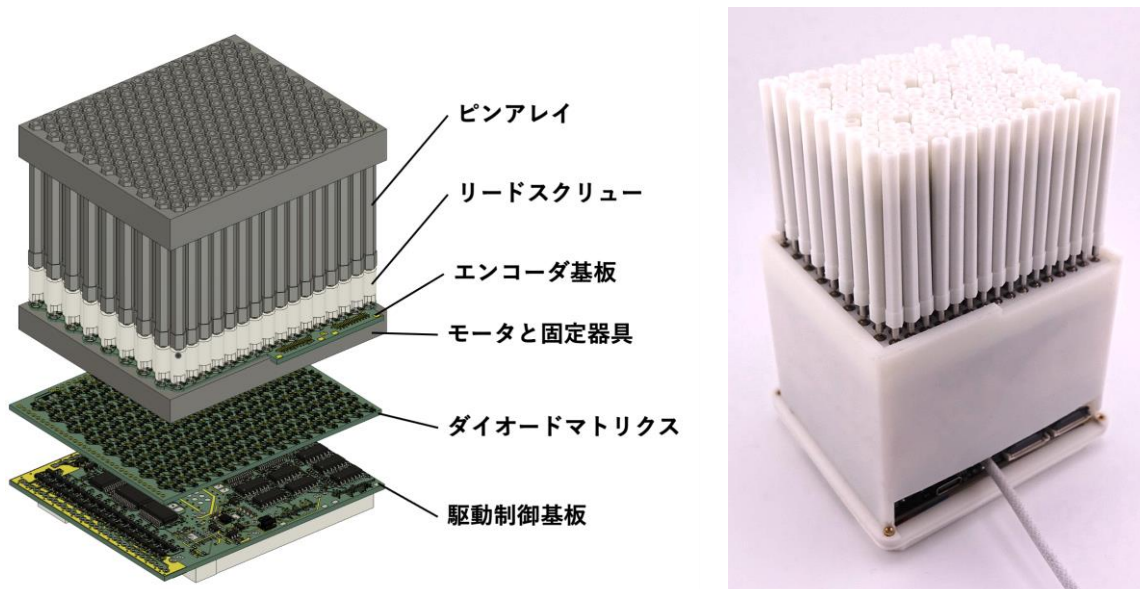


図 2: 制作したピンアレイディスプレイ

3.1. 全体構成

開発したシステムは図 2 に示すように、提示面を構成するピンアレイ部、ピンを上下動させるリードスクリュー機構と 4mm の DC モータ、モータを行列的に駆動するダイオードマトリクス基板、それを制御する駆動・制御基板、PC から操作する GUI、ならびに位置計測のために検討したフォトリフレクタ式エンコーダ機構から構成される。従来のモータ型ピンアレイでは、モータドライバ基板やエンコーダ基板を縦方向に多数積層する構造が必要になりやすかったが、本プロジェクトでは、モータマトリクス駆動回路を用いることで、より平面的でスケラブルな構成を採用した。

各ピンは、DC モータの回転をリードスクリュー機構によって直線運動へ変換することで上下動する。これにより、小型モータを用いながらも、形状提示に必要なストロークと保持性を両立した。最終試作機では、この機構を 256 個高密度に並べることで、高精細な形状提示面を構成した。

3.2. モータマトリクス駆動回路

本システムの中核は、本プロジェクトで新たに考案したモータマトリクス駆動回路である。通常、DC モータを正転・逆転させるにはモータごとに H ブリッジ回路が必要であり、これを各モータへ個別に割り当てると、ピン数の増加に応じて必要な素子数と配線本数も急増する。高密度アレイでは、この増加が基板面積や配線混雑を急速に悪化させ、スケーラビリティの観点から大きな制約となる。

これに対して本プロジェクトでは、多数のモータを行列状に扱い、行・列の組合せを切り替えることで所望のモータだけに電流経路を形成する方針を取った。図 3 に示すダイオードを用いた整流ネットワークによって、非選択モータへの電流の回り込み、すなわちゴーストパスを抑制し、双方向駆動と選択駆動を両立した。

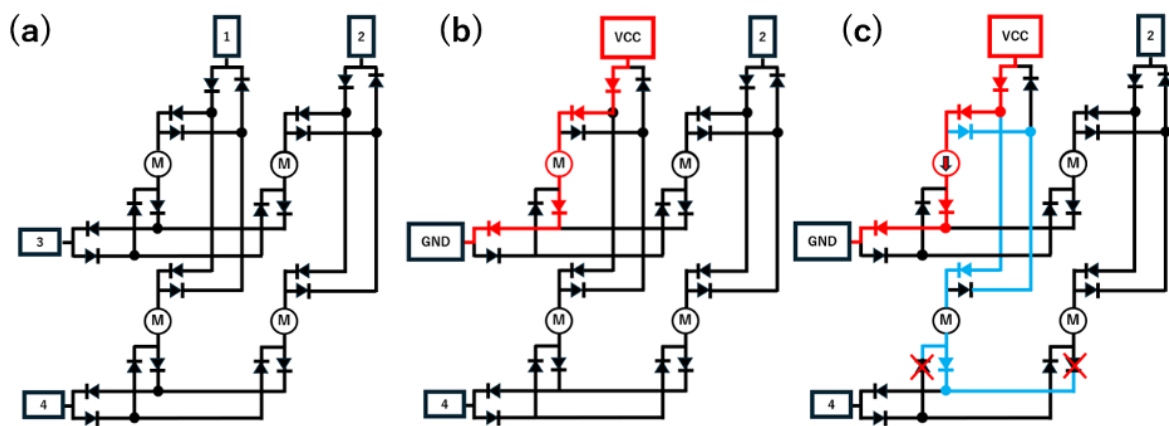


図 3:モータマトリクス駆動回路

駆動・制御基板では、ESP32-S3 XIAO をメインコントローラとし、GPIO エキスパンダ MCP23S17 を SPI 通信で制御することで、多数の MOSFET を切り替える構成を採用した。P チャネル MOSFET と N チャネル MOSFET によるハーフブリッジ回路を行・列ラインへ割り当てることで、256 個のモータをマトリクス駆動できるようにした(図 4)。

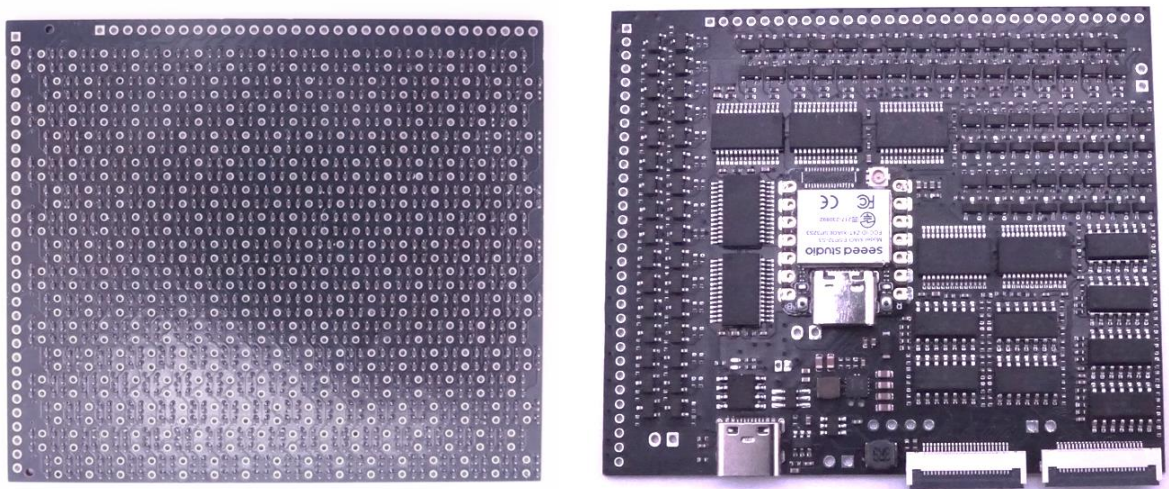


図 4:モータマトリクス駆動回路の実機

3.3. フォトリフレクタ式エンコーダ

位置計測のために、図 5 に示すフォトリフレクタを用いた小型のエンコーダも併せて検討した。これは、モータ軸に取り付けた二枚羽根の回転部材と 2 個のフォトリフレクタを組み合わせ、位相差のある 2 相信号を取得することで、回転量と回転方向を求める方式である。また、多数のセンサ信号を高密度に扱うため、マトリクス入力方式やデジタル信号化回路も設計した。

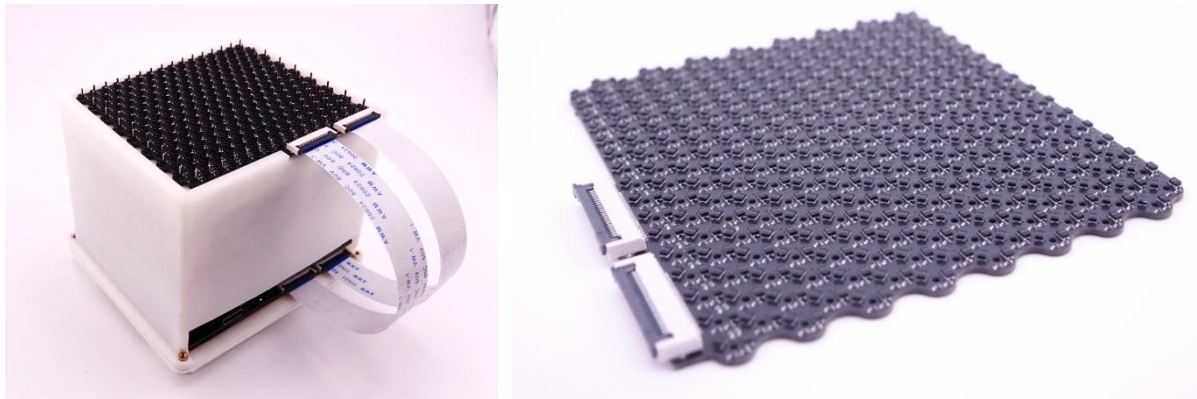


図 5: フォトリフレクタ式エンコーダ

ただし、エンコーダについては要素試作と信号取得までは確認できたものの、最終試作機への完全統合と閉ループ制御の実現には至っていない。そのため、本成果ではまずモータマトリクス駆動回路による高密度ピンアレイの成立を示し、位置計測の本格統合は今後の課題としている。

4. 従来の技術(または機能)との相違

従来のモータ型ピンアレイディスプレイでは、各ピンに対応して DC モータを個別に駆動する構成が一般的であり、ピン数の増加に応じてモータドライバ、配線、制御線も増大していた。そのため、高密度化するほど駆動基板や計測基板を縦方向に積層する必要が生じ、装置全体が大型化しやすかった。

これに対し、本開発では、多数の DC モータを行列的に選択駆動するモータマトリクス駆動回路を提案し、従来のようにモータごとに個別のドライバを配置する構成から転換した。さらに、ダイオードによる整流ネットワークを導入することで、行列駆動時に問題となるゴーストパスを抑制し、必要なモータのみを双方向に駆動できるようにした。

これにより、従来の基板の縦積みに依存せず、より平面的でスケラブルなピンアレイ構造を実現できる点が本開発の新規性である。また、本成果は 4.5mm ピッチ・16×16 の 256 ピン試作機として実装し、高密度なモータ型ピンアレイの成立性を実機で示した点にも特徴がある。

5. 期待される効果

本開発成果により、従来は駆動回路と配線の肥大化によって高密度化・大規模化が難しかったモータ型アクチュエータアレイに対して、よりスケラブルな構成を与えられるようになることが期待される。特に、ピンアレイディスプレイ、触覚提示デバイス、点字ディスプレイ、

形状変化インタフェースなど、多数の素子を高密度に並べて個別制御する必要のある分野において、高密度化、小型化、可搬化を前進させる効果がある。

6. 普及(または活用)の見通し

本開発成果は、完成製品として直ちに普及するものというよりも、高密度かつ大規模なアクチュエータアレイを実現するための基盤技術として活用が見込まれる。特に、点字ディスプレイをはじめとする触覚ディスプレイでは、多数の素子を高密度に並べて個別に制御する必要があるため、駆動回路と配線の肥大化が大きなボトルネックとなってきた。本成果は、その課題に対してモータを行列的に選択駆動する新しい構成を示したものであり、こうした分野における高密度化・小型化・可搬化を支える技術として活用されることが期待される。

7. クリエータ名(所属)

杉本 隆平(電気通信大学 情報理工学域 4年)