

1. 担当 PM

田中 邦裕（さくらインターネット株式会社 代表取締役社長）

2. クリエータ氏名

杉本 隆平（電気通信大学 情報理工学域 4 年）

3. 委託金支払額

2,880,000 円

4. テーマ名

超小型ピンアレイによるポータブルな形状提示装置

5. 関連 Web サイト

なし

6. テーマ概要

本プロジェクトは、ピンの上下動によって形状を提示するピンアレイ型装置を対象とし、高密度化と可搬性を両立した形状提示装置の実現を目的としたものである。

形状提示デバイスは、視覚情報を触覚として提示する技術として、点字ディスプレイや触覚インタフェースなどの分野で研究されてきたが、既存の装置ではピン数や解像度に制約があり、十分な表現力を持つ高密度な形状提示は困難であった。

その主な要因は、ピン数の増加に伴う構造的な制約にある。ピンを増やすためには、それぞれを駆動するアクチュエータが必要となるが、従来の方式ではモータごとに配線および制御回路が必要となるため、ピン数の増加に比例して回路規模および配線が増大する。この結果、装置は大型化し、消費電力やコストも増加し、可搬性を確保することが困難となる。

本プロジェクトは、このような課題に対して、高密度なピン配置とそれを支える駆動方式の両方を対象として設計を行うものであり、機構設計と回路設計を一体として検討する点に特徴がある。

最終的には、多数のピンを高密度に配置した構造と、それを効率的に制御する

回路構成を組み合わせ、実際に動作する形状提示装置として試作機を構築することを旨としたプロジェクトである。

7. 採択理由

本提案は、4mm ピッチの高密度ピンアレイをスマートフォンサイズの筐体に収めることで、携帯可能な触覚提示装置を実現しようとするものである。従来の卓上型装置と比べて分解能・携帯性ともに大きな改善が見込まれ、VR/ARや遠隔触覚の分野における新しいインタフェース表現の可能性を拓く提案である。

形状提示という領域においては、用途の確立やコスト面での課題は残るものの、提案者はそれらを補って余りある実装力と構想力を有している。制御回路、モータ制御、筐体設計まで一貫して手を動かし続けており、提案者のこれまでの開発実績や継続的な取り組みからも、確実に進展が期待できる。

未踏事業では、アイデアの完成度だけでなく、技術的に困難な課題に自ら挑む姿勢と、それを形にする実装力を重視しており、本提案はまさにそうした挑戦にあたる。用途については未知の部分も多いが、新たな体験を熱量によって作り上げる意義が大きいと判断し、採択した。

8. 開発目標

本プロジェクトの開発目標は、多数のピンを高密度に配置し、それぞれを独立に制御可能とする形状提示装置を実現することである。

形状提示においては、提示できる形状の解像度はピンの数および配置密度に依存するため、高密度化は性能向上に直結する。一方で、ピン数の増加はそのままアクチュエータ数の増加を意味し、従来の個別駆動方式では配線および制御回路の規模が増大し、実装が困難になるという問題がある。

このため、本プロジェクトでは単にピンを増やすのではなく、「多数のピンをどのような構造で成立させるか」という観点から開発目標が設定されている。具体的には、以下の3つの要素が開発目標として位置づけられる。

第一に、高密度なピン配置を実現するための機構設計である。限られた体積の中で多数のピンを配置し、それぞれが干渉せずに動作する構造を設計する必要がある。

第二に、多数のモータを効率的に制御するための回路構成の確立である。従来の個別配線方式に代わる新しい駆動方式を検討し、配線数および回路規模の増大を抑えることが求められる。

第三に、これらを統合した試作機の構築である。設計した機構および回路を実際に実装し、形状提示装置として動作することを確認する必要がある。

以上のように、本プロジェクトの開発目標は、単なるデバイスの試作ではなく、高密度化に伴って顕在化する構造的な制約を解決しながら、実際に成立するシ

ステムとして形状提示装置を構築することにある。

9. 進捗概要

本プロジェクトは当初、高密度ピンアレイを実現するための機構設計およびその実装を中心として開始された。限られた体積の中に多数のピンを配置し、それぞれを独立に上下動させることで任意形状を提示するという構想に基づき、ピン配置、駆動機構、力の伝達方法、ガイド構造、部材選定といった機械設計の検討が進められている。この段階では、ピン同士の干渉を回避しつつ高密度に配置する方法や、回転運動を直線運動に変換する構造の成立性などが主な論点であった。

しかし試作と検討を進める中で、機構設計以上に支配的な制約として顕在化したのが、モータ数の増加に伴う配線および回路規模の増大である。従来のように各モータを個別に駆動する構成では、モータごとに配線とドライバ回路が必要となるため、ピン数に比例して配線本数と回路規模が増大する。この結果、基板面積の拡大、配線取り回しの困難化、電源容量の増大、発熱の増加、信頼性の低下といった問題が同時に発生し、一定規模以上では物理的に成立しないことが明らかとなった。

この段階で、私は本プロジェクトの焦点が明確に変化したと捉えている。すなわち、「ピンを高密度に配置する方法」から、「多数のアクチュエータをいかにスケラブルに扱うか」という構造的課題へと問題設定が転換された。この課題の再定義は、本プロジェクトの進行における最も重要な転換点の一つである。

この問題に対する仮説として導入されたのが、モータのマトリクス駆動である。モータを行列状に配置し、行と列の組み合わせによって個別のモータを選択的に駆動する構成とすることで、配線数を大幅に削減することを目指したものである。この発想自体はディスプレイなどで広く用いられているが、モータのような双方向駆動かつ電流要求の大きいアクチュエータに適用することには新たな難しさが伴う。

実際に試作を行った結果、単純なマトリクス構成ではゴーストパスと呼ばれる問題が発生することが確認された。複数の電流経路が存在するため、選択していないモータにも電流が流れ、意図しない動作が発生する現象である。この問題は理論的にも予想されるものであるが、実装においてはその影響が顕著に現れ、マトリクス駆動を成立させる上での最大の障害となった。

この問題に対して、本プロジェクトでは図 1 で示すように、ダイオードネットワークを用いた回路構成が採用されている。各モータ経路にダイオードを配置することで電流の流れを制御し、不要な経路を遮断することで、選択したモータのみが駆動されるようにしている。また、モータの回転方向を切り替える必要があるため、単なる一方向制御ではなく、双方向駆動を成立させるための回路設計も行われている。この部分は単なる部品選定ではなく、回路構造そのものの設

計が求められる領域であり、本プロジェクトの中でも重要な技術的要素である。

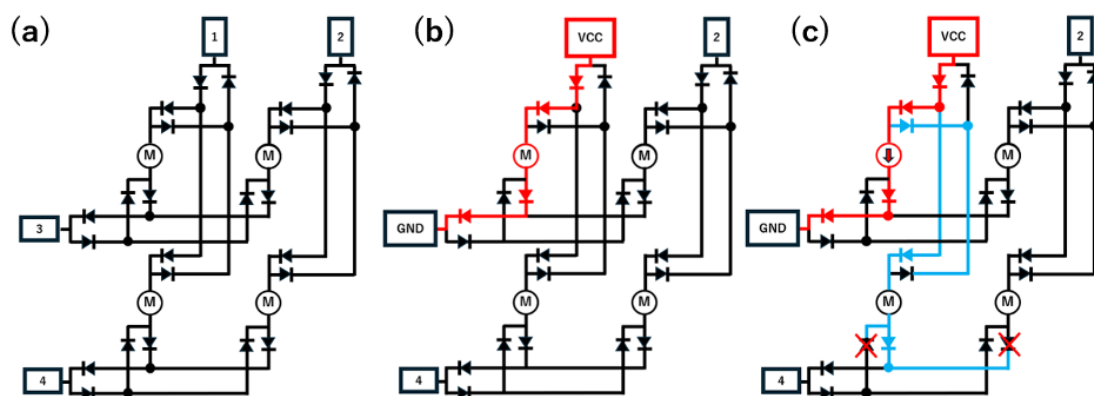


図 1 : (a) 二層ダイオードネットワークの概念図、(b) 正転時の電流経路例、(c) 逆転時の電流経路例

ここで特筆すべき点は、杉本氏がモータドライバに強いこだわりを持ち、市販のモジュールをそのまま使用するのではなく、自ら回路設計を行い、基板を設計・製作している点である。モータ駆動回路は電流制御、スイッチング、発熱、ノイズといった複数の要素が絡むため、設計難易度が高い領域であるが、これを自ら設計し実装している点は、本プロジェクトの実装力を示す重要な要素である。

回路構成の成立性が確認された後は、小規模構成による検証が進められた。まず 4×4 構成の試作機を用いて、マトリクス駆動の基本動作、ダイオードネットワークによるゴーストパス抑制、電流制御の安定性といった基礎的要素の確認が行われた。この段階では、選択したモータのみが確実に動作するか、隣接モータへの影響が抑えられているか、電圧降下や電流分布が許容範囲内に収まっているかといった点が詳細に検証されている。

次に 8×8 構成へと拡張し、スケールアップに伴う問題の洗い出しが行われた。配線長の増加による電圧降下、電源ラインの安定性、同時駆動時の電流分配、制御信号の遅延、ノイズの影響などが顕在化し、それぞれに対して対策が講じられている。具体的には、電源ラインの強化、配線レイアウトの見直し、制御タイミングの調整などが行われており、単に構成を拡張するのではなく、スケールに応じて設計を最適化するプロセスが取られている。

同時に、機構面においても課題が明らかになった。ピンの直線運動を安定させるためのガイド構造や、ねじ・シャフトの精度が動作に大きく影響することが確認され、特に偏心による振動が動作品質に影響を与えることが観測された。高密度化が進むほど、わずかな誤差が全体に影響するため、機械的精度の確保が重要な課題となっている。

これらの検証と改良を経て、最終的に 16×16、256 ピンの試作機が構築された。図 2 に示すこの試作機は、回路設計、基板設計、機構設計、制御ソフトウ

エアを統合したものであり、実際に複数ピンを組み合わせた形状提示が可能であることが確認されている。ここで重要な点は、単なる回路検証や部分試作ではなく、形状提示装置としての統合が実現されていることである。

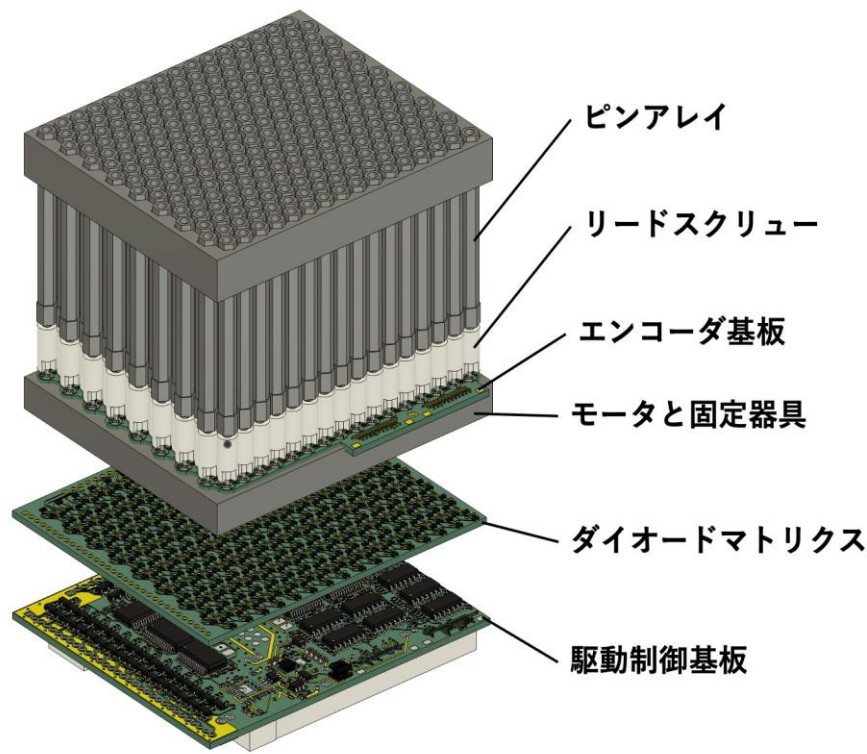


図 2：装置全体の構造

制御ソフトウェアにおいては、行列選択、駆動順序、タイミング制御などが実装されており、複数ピンの協調動作が可能となっている。一方で、現状はオープンループ制御であり、位置フィードバックは導入されていない。そのため、動作精度や再現性にはばらつきが残っている。フォトリフレクタを用いたエンコーダの検討も行われているが、システム全体への統合には至っていない。

以上のように、本プロジェクトは機構設計から出発しながらも、開発の過程で回路アーキテクチャの問題に到達し、マトリクス駆動およびダイオードネットワークという構造を確立し、さらに自ら回路設計および基板設計を行うことで実装として成立させている。段階的な試作と検証を通じてスケールを拡張し、最終的に 256 ピン規模の形状提示装置として統合された点に、本プロジェクトの進捗の本質がある。

10. プロジェクト評価

本プロジェクトの評価において重要な点は、個別の装置の完成度ではなく、開発の過程で到達した問題設定と構造にある。

当初は高密度ピンアレイの実現という機構中心の課題であったが、開発を進

める中で問題の本質が回路および配線のスケーラビリティにあることに到達している。この課題の再定義は、本プロジェクトの最も重要な成果である。

従来の構成では、ピン数の増加はそのまま配線および回路規模の増大を意味し、一定規模以上では成立しない構造であった。本プロジェクトでは、モータマトリクス駆動という構造を導入することで、この制約に対して一つの解を提示している点を評価している。

また、ダイオードネットワークを用いた回路設計により、ゴーストパスの問題を実装レベルで解決していること、さらにモータドライバおよび基板設計を自ら行い、実際に256ピン規模の試作機として統合している点も重要である。これは単なる概念提案ではなく、技術として成立させた成果である。

一方で、制御精度や機構安定性の面では課題が残っており、完成度という観点では発展途上である。しかし、本プロジェクトの価値は完成度ではなく、「スケールしなかった問題に対してスケール可能な構造を提示した」点にある。

以上より、本プロジェクトは問題設定の転換、構造の提示、実装による成立性の確認という点において、未踏プロジェクトとして高く評価できる成果である。

11. 今後の課題

本プロジェクトは構造的な解決の方向性を提示した段階にあり、今後はそれを実用的な技術として成立させるための課題が残されている。

第一に、制御に関する課題である。現状はオープンループ制御であり、各ピンの位置精度および再現性にばらつきが見られる。形状提示装置としての性能を高めるためには、エンコーダなどによる位置検出を統合し、閉ループ制御を実現することが必要である。

第二に、機構および精度の課題である。高密度化に伴い、ねじやシャフトの偏心、部品精度のばらつき、振動といった問題が顕在化しており、これらは動作の安定性に直接影響する。回路構造のスケーラビリティに対して、機械的精度が追いついていない状態であり、両者のバランスを取る必要がある。

第三に、システムとしての課題である。電源設計、発熱、長時間動作時の信頼性といった観点については十分な検証が行われておらず、試作機から実用システムへ移行するためには、これらを含めた設計が求められる。

第四に、応用および利用方法に関する課題である。本技術は触覚提示インタフェースとしての応用可能性を持つが、具体的なユースケースに基づいた設計や評価はまだ十分ではない。用途を明確にし、それに応じた設計最適化を行うことで、技術の価値をより明確にする必要がある。

以上より、本プロジェクトは構造を提示した段階から、技術として完成させる段階へと進む必要があり、制御・機構・システム・応用の各側面において発展が求められる。