



高密度な形状提示装置に向けたモータマトリクス駆動回路

Matrix motor drive circuit for high-density shape display

杉本隆平¹⁾, 梶本裕之²⁾

Ryuhei SUGIMOTO and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 情報理工学域 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘, s2210337@gl.cc.uec.ac.jp)

2) 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘, kajimoto@kaji-lab.jp)

概要: 本稿では, 高密度形状提示装置の第一報として, その基盤となる駆動回路構造を提案する. 従来のピンアレイディスプレイは個別駆動方式のため, 大規模化で回路が複雑化する課題がある. そこで本論文では, 正逆転経路を二層ダイオードネットワークにより分離・整流することで, モータをマトリクス駆動できるドライバ回路を提案する. 本稿では, モータマトリクスの設計と実装を詳述し, その有効性と限界について論じる.

キーワード: 形状提示, 触覚提示, バーチャルリアリティ

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. たとえば, 球体の滑らかな曲面は「転がす」や「握る」といった動作を直感的に誘発し, 棒状のハンドルは「掴む」という使用方法を提供する. こうした特性は, ユーザが物体を触覚的に把握しながら操作する上で欠かせない要素である.

こうした観点から, 情報を物理的な形状として提示し, ユーザが手で触れながら情報を認識・操作する手法が近年注目を集めている. その中でもピンアレイディスプレイ[1][2]は, 無数の独立ピンの高さをプログラム制御することで, 凹凸や曲面の再現, さらに動的な形状変化をユーザに触覚的に提供できることが大きな特徴である. VR/AR, テレグジスタンス, 遠隔触覚といった応用領域では, 仮想オブジェクトや遠隔地の物体形状を物理的に再現し, 形状を通じた直感的なインタラクションを可能にする技術として期待されている.

しかしながら, 従来のピンアレイディスプレイは各アクチュエータに専用のモータドライバを割り当てる個別駆動方式が主流であり, ピン数増加に伴い回路規模と制御の複雑度が急激に増大する課題がある. 装置を大規模化・高解像度化する上で, この回路複雑化は開発コストや消費電力, 実装面積の制約として大きな障壁となっている.

従来の個別駆動方式に比べ, マトリクス駆動方式は回路規模を大幅に削減できるという利点がある. 例えば, 個別駆動方式では N^2 個のモータに対し N^2 個のモータドライバが必要となるが, マトリクス駆動を用いればこれを $2N$ 個まで削減可能となり, 例えば 900 個のモータの場合, 900 個必要なドライバを 60 個に抑えることが可能である. ま

た, 列ごとに高速で駆動を切り替える時分割方式を採用することで, 実質的な同時駆動を実現できる.

しかし, モータをマトリクス駆動する際には, モータを正転・逆転させる必要があるため, ダイオードのような逆流防止機構を設けることが難しい. このために, ゴーストパスという意図しない電流経路が生じるという重大な課題が存在する. ゴーストパスが存在すると, 対象となるモータ以外のモータが駆動されてしまい, 狙ったモータに負荷がかかると他のモータが予期せず動作するなど, 安定性や性能が著しく低下することが我々の予備実験で確認されている. このような問題のため, モータにおけるマトリクス駆動の実現は極めて困難とされてきた.

本研究では, 回路規模の肥大化を解決するため, モータのマトリクス駆動を可能にする回路を提案する. 提案回路は, 正転・逆転経路を二層のダイオードネットワークで分離・整流し, 従来必要であった N^2 個のドライバを $2N$ 個に削減可能とする. これにより, 回路構成の簡素化と消費電力低減を両立しつつ, 高速応答と高解像度の触覚提示を実現する. 本稿では, まず提案回路の設計原理と実装構成を示し, 次に本回路の制限を検討する.

2. 関連研究

高密度ピンアレイ型触覚提示装置において, アクチュエータの数が増加すると, それに伴う回路や駆動システムの複雑化が深刻な問題となる. この種の問題を緩和するため, 例えば LED ディスプレイにおいてはマトリクス駆動方式が応用されてきた. マトリクス駆動方式では, 行と列に配置された制御ラインを時分割で高速に走査することで, 多数の素子を少数の駆動回路で制御可能にする.

ピンアレイ型触覚提示装置におけるマトリクス駆動方式としては、特に SMA（形状記憶合金）アクチュエータを用いた研究が挙げられる。例えば、Nakatani らの提案した手法[3][4]では、 16×16 ピンのアレイに対して 32 本のラインを用いたマトリクス駆動を実現し、ダイオードを用いてゴーストパスによる誤動作を抑制している。また、Koo らは指先サイズの DEA（誘電エラストマー）を用いた触覚提示装置を 4×5 ピンで開発し、同様のマトリクス駆動を採用することで制御回路数を大幅に削減している [5]。

一方、流体圧や機械伝達を用いて 1 モータ／バルブで多数ピンを駆動する手法も提案されている。Zhu らは、油圧セルを“ $N^2 \rightarrow 2N$ ”制御に拡張できる手法を提案[6]し、段階的リフレッシュ手法で表示滑らかさを確保している。また、Jadhav らは Fluidic Matrix Circuit (FMC) を導入し、 5×5 アクチュエータを $2N$ 本の電磁弁で個別制御しつつ、高速な圧力更新を実現した[7]。

さらに、電気刺激による触覚提示装置でも配線削減のためのマトリクス駆動が採用されている。多くの電気触覚ディスプレイは個々の電極に対して上側、下側スイッチを配置するため電極の個数分の駆動回路が必要であるが、縦列、横列をそれぞれ駆動することで一種のマトリクス駆動を実現し、回路数を低減している例がある[8][9]。

なお、ここで挙げた既存研究が対象とするアクチュエータは、いずれも単方向で駆動できる素子であるため、ダイオードを併用した行列整流で比較的容易にゴーストパスを抑制できる。一方、本研究が扱う DC モータは正逆転が必須であり、従来の一方向素子向けマトリクス回路をそのまま適用できない。したがって、二層ダイオードネットワークで正・逆経路を完全に分離しながら $2N$ 本のラインで N^2 台のモータを駆動する本提案は、既存手法とは異なる位置づけとなる独自の貢献である。

3. システム構成

本研究が想定する高密度形状提示ディスプレイは、多数のピンを独立に上下駆動させることで物理的形状を動的に再現するピンアレイディスプレイである。特にピン密度の観点から、各ピンは直径 4mm の円柱を最密充填するように配置されている。そのため、高解像度化のためには、小型で高トルクを出力可能な DC モータを多数駆動する必要がある。

通常、1 台の DC モータを駆動するためには正逆回転に対応した 2 つの H ブリッジ回路が必要であり、単純にこれを個別配線すると、駆動回路および配線面積が極端に増大するため、現実的ではない。そこで、配線・駆動回路を大幅に削減するマトリクス駆動を採用する。

3.1 従来のマトリクス駆動の課題

LED ディスプレイなどの素子ではマトリクス駆動方式が広く用いられており、各素子を行列配置して高速でスキャンすることで素子数に対して大幅に少ない駆動回路で制御可能である。このような実装は図 1(a)のようにモータを配列することで、モータにも適応でき、図 1(b), (c)のよ

うに正転と逆転を少数の素子で実現可能であると考えられる。しかし、DC モータは LED やダイオードと異なり、逆方向への電流の流入（逆流）を許すため、そのままマトリクス駆動を適用すると、図 1(d)のようなゴーストパスという意図しない電流経路が形成されてしまう。これにより、狙ったモータ以外が予期せず駆動されるなど、回路が不安定化し性能が大きく低下する。

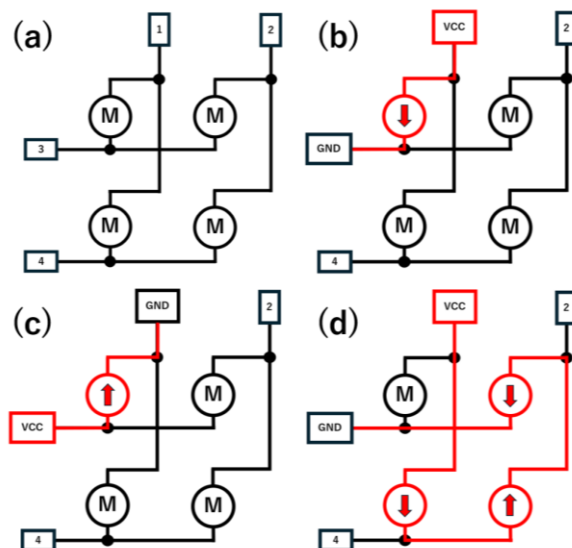


図 1: (a) 4×4 のモータマトリクス回路, (b) 理想的な正転経路, (c) 理想的な逆転経路, (d) ゴーストパスの経路例

3.2 ダイオードマトリクス方式および回路実装

前節で述べたゴーストパス問題を受け、本評価ではダイオード（型番：1N4148）を用いて、図 2 に示すような回路を制作した。本実装では図 3(a)に示すように、各モータの正転用経路と逆転用経路を別々のダイオードアレイに割り当てている。この構造によって、二つの整流経路が回路上で交差しない設計とした。モータ端子にはそれぞれ順方向にのみ導通するダイオードを直列に挿入し、行ラインからの電流が逆側ラインへ漏れないよう物理的に分離する。

また、図 3(b)(c)に示すように、正転用の整流素子としてダイオードを配置し、その下流に小型 DC モータを接続する構成としている。例えば、1 行目・1 列目のモータが回る際には図 3(b)のような経路で電流が流れる。



図 2: 試作機の実装写真

二つ目の解決策は、図 4(b) のように駆動回路そのもの

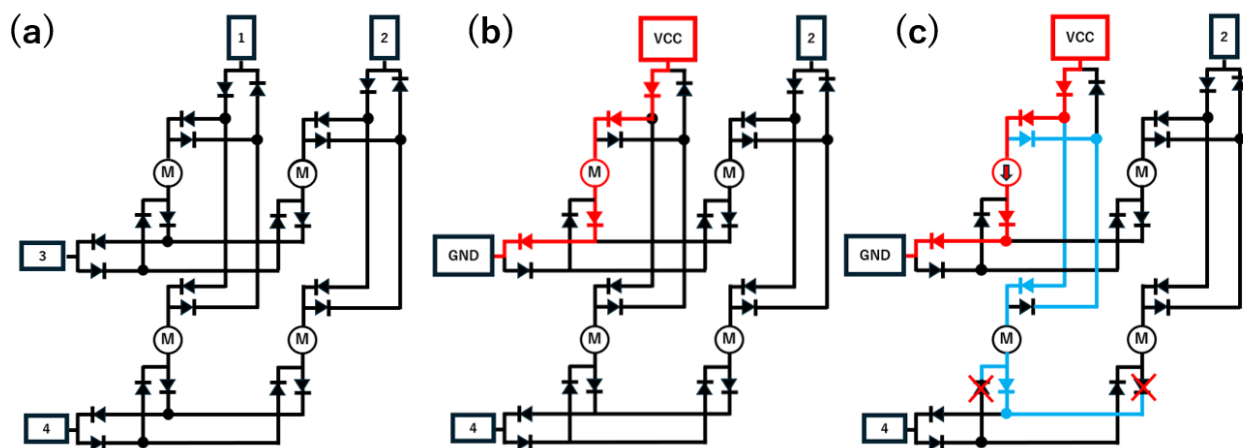


図 3 : (a) 提案するダイオードマトリクス方式の回路, (b) 正転経路の例
(c) ダイオードによってゴーストパスを遮断している様子

製作した回路に対し評価を行ったところ、逆流防止が確認できた。ダイオードは各モータ入力に正負両経路にそれぞれ挿入し、マトリクス駆動の際に意図しない電流パスが形成されないことを示すため、マルチメータで電圧を計測しながら動作確認を行った。動作試験では、行ラインを 5 V に、列ラインを GND に設定し、ダイオードが順方向に導通するモータのみが駆動されることを確認した。また、逆方向切り替え時にも別層のダイオード経路のみが ON 状態となり、期待通りにゴーストパスが遮断されることをマルチメータと想定経路上のモータの駆動から明確に捉えられた。

4. 議論

本方式はいくつかの課題が存在する。

まずマトリクス回路の構造上、最小で 12 個のダイオードを経由するために電圧降下が比較的大きい、またゴーストパスの遮断は完全ではなく、図 4(a) のようなゴーストパスが理論的に存在する。このためある行・列の組み合わせで非選択モータが誤動作しないように、意図しない経路を遮断しなければならない。後者の課題に対しては大きく二つの解決策が考えられる。

一つ目の解決策は、ゴーストパス経路に挿入された 12 個のダイオードによる順方向降下電圧の総和が、モータを駆動するには不十分な大きさとなる点を利用するものである。今回の試作では、各ダイオードの順方向降下電圧を約 0.4 V とするダイオードを使用しており、このゴーストパスでは最低でも約 4.8 V の電圧降下が生じる。このため、実際に行・列が選択されていないモータには駆動に必要な電圧が印加されず、誤駆動が物理的に抑制されることになる。すなわち、マトリクス駆動時の印加電圧を 4.8V より低い値に設定すれば、ターゲットモータのみが駆動され、ゴーストパス経路上のモータが動作することはない。実機評価においても、この方式によって 12 個のダイオード分の降下電圧を適切に確保できることを確認し、ゴースト駆動のない安定動作を実現した。

をゴーストパスが一切存在しない構成に再設計し、正転用経路と逆転用経路を完全に切り分ける方法である。この場合、正転用・逆転用それぞれに 2N 本の行ラインと 2N 本の列ラインを用意するため、必要な制御ラインは合計で 4N 本となる。こうすることで、行／列どちらのスキャン操作においても他経路が一切共有されず、ハードウェア的にゴーストパスを完全に排除できる。しかしながら、 N^2 本のドライバを 2N 本に削減するという当初の目的には近いものの、制御ライン数は従来のマトリクス (2N 本) に比べ倍増し、配線の数やドライバ IC の数が増加してしまうというトレードオフがある。

本研究では、まずは実装の容易さと最小部品数という点を重視して一つ目の電圧降下方式を採用し、ダイオードによる 4.8 V の電圧降下を利用したゴースト抑制を実験的に検証した。より高い駆動電圧や大電流を要求する応用では、電圧降下を用いた方式だけでは不十分となる可能性もあるため、二つ目の完全切り分け方式への拡張を視野に入れておく必要がある。

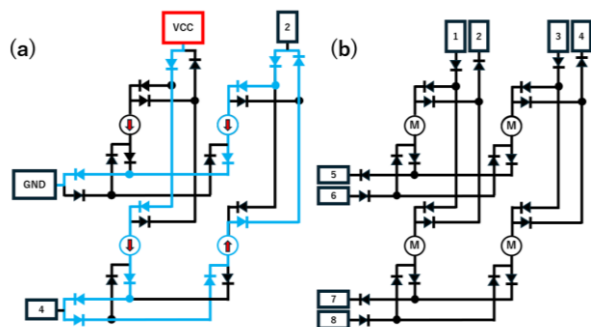


図 4 : (a) ダイオードを 12 個通過するゴーストパス, (b) 完全にゴーストパスを削除した回路

5. 結論および今後の展望

本研究では、DC モータを用いた高密度ピンアレイ型形状提示ディスプレイの駆動回路として、従来の N^2 個のドライバを 2N 本のラインで代替可能な二層ダイオードマトリクス方式を提案した。正転用・逆転用の経路を独立した

ダイオードで完全に分離することにより、マトリクス駆動におけるゴーストパス問題を解消しつつ、回路の大幅な簡素化を実現した。4×4（16個）モータの試作機における動作検証からは、本実験ではゴースト駆動が発生せず、高速かつ安定した動作が得られることが確認できた。

今後の展望としては、まず評価機で用いた試験的なシグナルダイオードから、順方向降下電圧の低いショットキーバリアダイオードへの置き換えを進め、駆動電力効率をさらに向上させる必要がある。また、スキャン制御の最適化により行・列の切り替え時間を短縮し、さらなる同時駆動性の向上やピン応答性の強化を考えている。さらに、高解像度化への対応として 16×16 以上の大規模マトリクスへのスケールアップ実験を行い、回路特性に影響を与えるかを解析する予定である。

参考文献

- [1] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. 2013. 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)*.
- [2] Alexa F. Siu, Eric J. Gonzalez, Shenli Yuan, Jason B. Ginsberg, and Sean Follmer. 2018. ShapeShift: 2D Spatial Manipulation and Self-Actuation of Tabletop Shape Displays for Tangible and Haptic Interaction. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*.
- [3] Masashi Nakatani, Hiroyuki Kajimoto, Dairokou Sekiguchi, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. 2004. Pop Up! a novel technology of shape display of 3D objects. In *ACM SIGGRAPH 2004 Emerging technologies (SIGGRAPH '04)*.
- [4] Masashi Nakatani, Hiroyuki Kajimoto, Kevin Vlack, Dairokou Sekiguchi, Naoki Kawakami, Susumu Tachi: "Control Method for a 3D Form Display with Coil-type Shape Memory Alloy," *Proc. IEEE ICRA 2005*, pp. 1332-1337, 2005.
- [5] I. M. Koo, K. Jung, J. C. Koo, J. -D. Nam, Y. K. Lee and H. R. Choi, "Development of Soft-Actuator-Based Wearable Tactile Display," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 3, pp. 549-558, June 2008
- [6] H. Zhu and W. J. Book, "Practical Structure Design and Control for Digital Clay," in *Proc. 2004 International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo (IMECE)*, Anaheim, CA, USA, Nov. 2004, Paper IMECE2004-59743.
- [7] Jadhav, S., Glick, P.E., Ishida, M., Chan, C., Adibnazari, I., Schulze, J.P., Gravish, N. and Tolley, M.T. (2023), Scalable Fluidic Matrix Circuits for Controlling Large Arrays of Individually Addressable Actuators. *Adv. Intell. Syst.*, 5: 2300011.
- [8] D. -R. Tsai and W. Hsu, "A new type of a large-area multi-touch tactile device operated by electrotactile stimulation," *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, Tokyo, Japan, 2019, pp. 313-318
- [9] Hongnan Lin, Xuanyou Liu, Shengsheng Jiang, Qi Wang, Ye Tao, Guanyun Wang, Wei Sun, Teng Han, and Feng Tian. 2024. TacTex: A Textile Interface with Seamlessly-Integrated Electrodes for High-Resolution Electrotactile Stimulation. In *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '24)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 427, 1–16.