論 文 の 内 容 の 要 旨

論文題目　　折り紙の変形を起こす軽薄な機構と回路に関する研究

氏　　名　　奥谷　文徳

折り紙は古くから親しまれてきた文化であり芸術であった。時代が進むにつれ折り紙は工学に取り込まれ、折り紙構造を用いることで強固な構造を実現した。更に折り紙構造は軽く薄いため、保存のための場所や輸送のためのエネルギー、さらには材料を節約できる。計算機の能力が上がった今、複雑な折り線パターンや折り紙の変形の様子などが細かく解析できるようになり、折り紙の幅は一気に広がった。折り紙の連続的な変形の解析ができるようになった今、動きの不思議さと工学的に有用な性質から変形する折り紙が着目されている。しかし折り紙の変形には、軽さも薄さも重視されていなかった機構から変形のための機構を援用している状態である。そのため折り紙の軽さ・薄さを重視しない変形のための機構が、折り紙の利点である軽薄さを損なっていた。本論文では変形のための機構と回路さえ軽薄に実現し、折り紙の利点を最大限に活かした変形する折り紙を実現する。

まず取り組んだ研究は、紙に導電性インクを印刷して構成面全てを電気的に接続する研究である。折り紙の至る所で変形を起こすためには、折り紙の至る所へエネルギーを供給する必要がある。多くのアクチュエータで用いる電気エネルギーを折り紙全体に行き渡らせるため、紙全体に広がる導線が必要である。紙に導電性インクを印刷し軽薄かつ安価に導線を実現する実装方法の研究は今まで行われてきたが、本研究ではその配線パターンに踏み込み、折り紙が有する数学的・幾何学的な性質を活用して印刷のみで全ての構成面への配線を実現した。このアルゴリズムには配線の可否判別や、不可能であった場合に配線を可能とする折り紙への設計変更も含む。そして全体への配線の応用例として、導電性インクを印刷した構成面を電極として扱う、紙全体を

アクチュエータとするスピーカを可能とした。この手法により折り紙の全体に電気エネルギーを到達させられ、折り紙の変形を至る所で実現できる。

電気的に接続しただけでは折り紙の変形は同時に生じ、時間的な制御が不可能である。そのため配線だけでなく、折り紙の変形同士の時間的な順序を制御する回路が必要である。折り紙全体に電気エネルギーを到達させる配線を、折り紙の形状によって選択的に接続される回路に改良することで、折り紙の形状によって選択的にアクチュエータへの供給を実現する。まず折り紙の形状を入力とするために、それぞれの折れ線の角度によって導通と断線を切り替える構造を考える。そしてこの構造を直列・並列接続することで、折れ線の角度の組み合わせによって導通・断線を切り替える回路を実現する。この回路を、電源とアクチュエータを接続する導線に挿入することで、折り紙の形状によって、アクチュエータへの電源の供給を制御する。この回路を論理式と対応させることで、所望のタイミングで所望のアクチュエータを駆動する回路を実現し、変形の順序を制御した。本提案は任意の論理式に対応でき、各アクチュエータを任意の条件で駆動できる。この手法により選択的にアクチュエータに電源を供給し、折り紙の変形の順序を制御できる。

折り紙の変形は、もちろんアクチュエータで力を与えることによっても生じるが、力そのものが機械的に伝わることでも生じる。そこで、機構のみでの変形の相互作用に着目し、機械的な変形の伝搬について研究した。折り紙の変形には、剛体折と呼ばれる折り目の角度のみが変化する変形とは別に、構成面の弾性変形を含む変形が存在する。このような変形では折り紙内部に弾性エネルギーが蓄えられ、それゆえそのエネルギーを活用できれば、次の変形を実現できる。弾性変形を伴う折り紙を機械的に接続することで、変形を伝搬させる機構を実現した。本論文では円筒折と呼ばれる複数の安定な状態を持つ折り紙を用い、異なる安定状態へと遷移する変形が次々と生じる機構を実現した。そしてその応用として、折り紙の弾性変形とバネの弾性変形を組み合わせることで非対称なポテンシャルエネルギーを持つ不減衰伝送路を構築した。この手法により、折り紙の所望の場所まで変形を機械的に伝搬させ、折り紙の変形を所望の範囲で実現できる。

機械的に変形を伝搬させる手法を用いて力学的に接続しただけでは折り紙の変形は同時に生じ、配線と同様に時間的な制御が不可能である。そのため、折り紙の変形同士の時間的な順序を制御する機構も必要である。一般的には、複数の折り目を制御する場合にはその折り目にそれぞれ対応するアクチュエータを必要とする。しかしアクチュエータの増加は軽薄さを失う要因の一つであり、折り紙機構のみで順序動作を実現できれば大幅な軽薄化が可能となる。機械的な変形の伝搬は、全て同じ形状の折り紙によって実現したが、円筒折のパラメータをそれぞれ調節し、円筒折の弾性エネルギーを変化させることで、円筒折ごとに変形が生じるタイミングに差異が生じる。このように折り目パターンの差によって物理特性が異なる円筒折は、変形が異なるだけでなく、弾性変形による離散的な安定な状態を持つ性質により、段階的に変形する。したがって、1アクチュエータでの制御にもかかわらず段階的に円筒折が変形する構造が可能である。そして折り紙の遷移の順番に存在するヒステリシス特性等もまとめ、折り紙の変形の順序を制御できる機構を実現した。この手法により、折り線の工夫のみで折り紙の変形の順序を制御でき、また所望の折り目のみを折った状態も1アクチュエータで実現できる。

そして最後に、電気的な制御と機械的な制御を統合した移動ロボットを実装することで変形する折り紙のまとめとする。円筒折は展開状態と収縮状態で安定であり、その2状態には長さ以外にも様々な形状パラメータを変化させる。これらの変化を用いて地面との摩擦を制御するなど、環境との相互作用を制御し移動を実現する。移動には円筒折を順に伸縮させる必要があり、この順序を円筒折の折り線パターンの工夫によって実現することで、1アクチュエータでの移動を実現する。そしてさらに、このアクチュエータを折り紙の形状を入力とした論理回路で電気的に制御する。本論文で提案する円筒折と論理回路は軽薄な機構と回路であり、軽薄な機構によって折り紙の変形を起こすことに成功している。本論文は以上の流れで軽薄な制御回路と軽薄な機械要素で移動ロボットを実現した。