

博士論文（要約）

折り紙の変形を起こす
軽薄な機構と回路に関する研究

東京大学大学院 情報理工学系研究科

48-177404
奥谷文徳

内容梗概

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。

第 1 章 はじめに	2
1.1 本研究	2
第 2 章 折り紙の構成面の電気的接続	8
2.1 小面電極への連続配線の必要性	8
2.2 第 2 章の関連研究・前提知識	8
2.3 連続配線可否判別	10
2.4 連続配線手法	12
2.5 第 2 章のまとめ	15
第 3 章 折り紙の順序動作のための論理回路	16
3.1 折り紙ロボットの制御の問題点	16
3.2 第 3 章の関連研究	18
3.3 提案する銅テープ論理回路	33
3.4 第 3 章のまとめ	37
第 4 章 円筒折における変形の機械的伝搬	38
4.1 折り紙と弾性エネルギー	39
4.2 関連研究	40
4.3 円筒折を用いた変形の伝搬現象	50
4.4 シミュレーション	57
4.5 不減衰伝送路の実装	60
4.6 センサノードのトリガへの応用	64
4.7 第 4 部のまとめ	65
第 5 章 円筒折による順序動作の実現	67
5.1 折り紙ロボットと重くてかさばるアクチュエータ	68
5.2 円筒折タワーの選択的変形とヒステリシス特性	69
第 6 章 円筒折と折り紙回路を利用した移動ロボット	72
6.1 本章の関連研究	73
6.2 移動を実現する円筒折の配置	82
6.3 実装した円筒折ロボットの移動	86
6.4 本部のまとめ	91
第 7 章 おわりに	92
7.1 達成項目	92
7.2 展望・限界	93
付録	96
謝辞	97
外部発表文献	99
参考文献	102

■ 第1章

はじめに

1.1 本研究

本研究では、折り紙の変形を起こす軽薄な機構と回路を提案する。主な成果は

- 折り線パターンが一筆書き可能であれば印刷のみで連続した電極パターンを実現できる性質の発見
- 直流電源と銅テープ回路のみでの形状記憶合金の制御による、折り紙の繰り返し変形動作の実現
- 非対称なポテンシャルエネルギーによる、折り紙の変形を次々と起こす電気を用いない構造の実現
- 複数の双安定構造を組み合わせによる、1アクチュエータでの複数の折り目を順に折る制御の実現

であり、これらを全て軽くて薄い構造で実現した。これらにより折り紙を軽薄な機構と回路で変形・制御させられる。

1.1.1 折り紙・折り紙工学・計算折り紙・そして本研究の目的

折り紙

折り紙とは、遅くとも江戸時代には日本で楽しめていた文化であり芸術であり、紙を折る行為と折られた紙の双方を折り紙と呼ぶ。紙を折ることで平面形状の模様を産みだすだけでなく、立体形状を作り上げられ、その形状の芸術的な美しさのみならず、1枚の紙から折る制約も楽しめる。有名な折り紙には図1.1のような折り鶴が存在する。「紙」を折る行為に制限すれば、人間が行う行為となるが、平面上の物体を折りながら収納する能力



図1.1: 筆者が制作した折り鶴。芸術的には優れているかもしれないが、工学的には特に価値はない。

は植物や動物の体躯にも見られる[1]。進化を繰り返した結果、特に昆虫の翅は、飛行時に面積だけでなく翅脈の位置や展開時間なども考慮した美しく合理的な折り畳みパターンを実現している[2]。また意思を持たない物体でさえ、強制的に押しつぶせば自然が備える最小作用の原理の結果として物体を平坦に折り畳む折り線パターンを生成する。これらのパターンは見て楽しく美しさを感じられるだけでなく、工学的に有用な性質も持つ。

折り紙工学

折り紙はその見た目や数学的な美しさを持つだけではなく、工学の分野に進出している。例えば、人工衛星に搭載された折りたたみ構造は有名であり、ミウラ折りと呼ばれる折り紙はその代表である[3]。折り紙が工学の分野に進出した理由・性質はいくつあるが、ここでは主要な3点を特に紹介する。

1点目は、ペイロードフェアリングのような限られた空間に大きな構造を詰め込むために必要な「コンパクトに折り畳める性質」である[4, 5]。折り紙はその名の通り元の形状は平面であり、平面は薄くて場所を取りにくい。また折り紙と言われる事はなくとも、折り畳み椅子や折り畳み傘などの「折り畳み」がつく構造物は多く、必要な時以外にはコンパクトに収納できる性質は生活にも根付いている。逆に日常生活から離れているが折り紙構造が必要な分野に宇宙工学があり、ロケットのような積載量が厳しく制限される場所でも折り畳み構造が活用されてきた。太陽光発電パネルは宇宙空間では広い面積で太陽光を受け取る必要があるが、ロケットはそのような大きな面積をそのまま打ち上げることはできないため、折り紙構造を折りたたんで打ち上げている。また、打ち上げた後に太陽光パネルと人工衛星の主要部との接続部付近の制御での展開が望ましいため、ミウラ折りなどの1自由度の折り紙構造が用いられる等、分野による独特的の制約もある[3]。また体内に入る折り紙についてもコンパクトさは重要である。胃の中を調べるためのロボットはその飲み込みやすさのためにコンパクトな状態での飲用が望ましく、折り紙技術を用いた飲み込むロボットが提案されている[6]。このように、体積を小さくできる性質は折り紙の真髄の一つであり、折り紙構造を使うにあたっては最大限活かすべき性質である。

2点目は「軽い性質」である。1点目で述べた折り紙を小さくたためる性質は、同時に小さな形状が大きく展開できる性質も意味する。小さな形状を実現できることはその小ささに対する質量を持つことを意味し、大きく展開する際に質量は変わらないため見た目に対して軽い構造となる。そして見た目が展開して大きくなるだけではなく、展開した紙が互いに接し固定しあうことで強い構造を実現できる。例えば折り紙構造は軽さと強さを活かし、ダンボールやハニカム構造を挟んだサンドイッチパネルが航空機の床などに用いられている[7, 8]。単なる平面の材料と比べると、段ボールやサンドイッチパネルは重さをほとんど変えることなく剛性と曲げ強さを得られる[8]。段ボールやサンドイッチパネルは紙の量つまり重さは3倍程度であるにもかかわらず、紙の角度の工夫によって3倍以上の強度を実現している[9]。厚さは材料となる紙ほどではないが、紙状の段ボールやパネルは薄く軽くそしてその優れた衝撃吸収性能により、段ボールは特に物流で非常に一般的に使用されている。またハニカムサンドイッチパネルは、製造コストが比較的高いので、航空機やロケットなどのより重量の限られた分野で使用されている。他にもPaper Bridge Design Challengeと呼ばれるコンテストでは、薄くて曲がりやすい紙でも、3次元に折ることによって非常に強い構造を実現している。いい加減に折った折り紙でもトラス構造が自然と生まれるなどでそれなりの強度を生む一方で、良く計算された折り紙は驚くべき強度を実現する[10]。このように、輸送のために軽くする性質も折り紙の真髄の一つであり、折り紙構造を使うにあたっては最大限活かすべき性質である。

3点目は「簡単に作れること」である。コンパクトである性質と軽い性質に比べると折り紙の工学的応用への貢献は劣るが、簡単に作れることは折り紙人口を増やし、折り紙文化を醸成するにあたり重要な要素であったであろう。特にともとの折り紙は「不切正方形一枚折」と呼ぶ1枚の紙から作る折り紙を最も美しい折り紙としており、これは製造上の利点としても扱える。1枚の平面の材料から折りたたむことで製造する手法は、少量生産にも大量生産にも適している。先ほど紹介したハニカムコアは、平面の材料から直接・連続的に3次元形状を形成できるというメリットを持つ[7]。更に、自己折の技術を用いることで、自動的に組み上がる折り紙構造も提案されており、ネジ留めや接着を含まない製造過程は自己折と呼ばれる自発的に折れる折り紙によって平面から折り上がる分野を創った[11, 12]。

他にも平坦な構造を折り紙と捉える折り紙工学は存在し、折り目のない紙であれど座屈しながら折れる様子は折り紙と捉えられる[13, 14]。これらの潰れるパターンや潰れる際の衝撃吸収力は自動車の前面の構造に有用である。また紙から折りパターンを考える手法とは異なり、円筒や円錐の形状を元としてどう折り畳むかを考える思想も潰すパターンから得られる[15]。得られたパターンを解析してモデル化し円筒や円錐の負荷の小さい折り畳み方を実現している。このような解析により数学的には折り畳めない形状を折り畳むための数理が整ってきた。

以上のように、軽薄である性質を中心として折り紙の折りたためる強い構造が活かされてきた。折り線を設計して所望の形状・剛性を実現する技術は生活に徐々に根ざし、楽しむだけの構造から工学的に価値のある折り紙が増加してきた。

計算折り紙

そして幾何学の観察と高速な電子計算機を兼備する 21 世紀には折り紙を数学的に扱うことが増え、計算折り紙と呼ばれる分野が隆盛を極めている。折り紙の展開図専用エディタである ORIPA[17] は単に展開図を編集するだけでなく、折りたたみ形状推定までを実現し、紙の重なり順まで考慮した折り畳み後の形の列挙を可能としている。他にも平織りのためのツールなどが提案され、計算機を活かした折り紙が増加している。しかし折り紙の幾何学は一筋縄ではいかず、計算機を持ってしても難しい問題は多く存在する。例えば折り紙を折る上で当然必要となる 3 次元単頂点の折りの条件 [20] や凸多面体の展開図の有無 [21] さえ未解決であり、折り紙の連続的な変化を捉えることは難しい。単純な折り線パターンの組み合わせであっても、剛体折りの可否判別 [18] や飛び出る絵本の可否判別 [19] など、計算量の爆発が証明されている構造が多い。特に 2000 年台の研究はこのように数学的な論文が多く、これらは折り紙の形状によってはその折り畳みが可能であるかさえ判別が難しくなることを示している。

一方で折り紙の計算において有用な性質も得られてきている。四色定理や自動証明のように新たな定理を計算機が得出わけではないが、人間の手で行うには膨大な手間や能力を必要とする手法が計算機で実現されている。例えば任意の多面体を折り畳むアルゴリズム [22] や、折り線パターンと折った後の形状の同時編集 [23] は一般的な人間の手で行うには膨大な手間や能力が必要となる例である。複数の直方体が折れる展開図は、元々は人間の手によって（コンピュータを使わずに）発見された物であるが [24]、計算機の登場により多くの例が発見されるようになった [25]。複数の正多面体の共通する展開図を見つける（未解決）問題は正多面体に近い立体に共通する展開図の発見につながり、28 枝の数を用いた連分数展開により非常に高精度な展開図をも実現するなど、計算機ならではの展開図も発見された。そして多くの折り紙の折り線パターンが直線のみで構成されていたが、曲線の折り目を用いた折り紙さえ可能となり、折り紙の幅が計算能力によっても急速に広がっている [26]。

このような数学的な思想による研究においても実際の折り紙を考慮した研究が始まり、単純折りと thick 折り紙がその代表である。単純折りとは平坦な状態の紙を直線で折る操作であり、外側から連続するいくつかの紙を同時に折る操作のみを許す折りである [27]。単純折りは全ての折り紙を実現する操作ではないが、単純な機械でも可能なような操作であるために実用に近い。折り線パターンと最終的な形状だけでなく、その操作が実用的であるかまで考えた手法であり、操作において現実的な要素が詰め込まれている。thick 折り紙はその名の通り厚さを持つ材料での折り紙であり、材料において現実的な要素が詰め込まれている [28]。これらのような折り紙の「理想的ではない性質」に着目することで、計算折り紙の結果を折り紙工学へ応用しやすくなってきた。

このような背景があり、折り紙の科学国際会議ではいまだ数学的な研究は多いものの 2010 年台には学術的にも工学的応用が増加し、1 枚の紙から作るポップアップ構造 [29] や列車の空気抵抗の削減 [30] など、実物を伴う研究が増加している。そして最新の折り紙の科学国際会議である 7OSME ではロボティクスのセッションが創設されるなど、折り紙の「動き」を扱う研究が活発である。例えばロボットの脚に折り紙構造を取り入れることで適度な柔らかさと復元力を用いて安定した歩行を実現したり [31]、必要な時だけ長い腕を伸ばして物をつかむ機構 [32] を実現したりしている。二足歩行ロボットの脚やドローンに搭載する機構は重さが重要な因子であり、文献 [31] や文献 [32] は折り紙構造へと置き換える部分の選択には理にかなっている。しかしこれらは折り紙構造をロボットのごく一部に取り入れたものであり、折り紙特有の性質を用いた研究に比べ、折り紙構造の軽薄さは生かし切れているとは言えない。例えば二足歩行ロボット全体がより軽薄であれば二足歩行ロボットの脚はより簡素な構造で実現可能であり、ドローンのペイロードも更に増加できるだろう。このように折り紙構造を更に軽薄な構造にする利点は多い。受動的に変形する折り紙（例えば文献 [31]）はその変形のためのアクチュエータなどを必要としないためロボットの軽量化にも寄与するが、文献 [32] はコンパクトさのみが実現されており、ドローンに致命的な重さは解決できていない。つまり折り紙構造とは対照的に折り紙構造を変形させるための機構や回路は重くかさばっており、真に折り紙構造の利点を活かすためには折り紙構造を変形させるための機構や回路の軽薄化も重要である。

現状行われている一部のみを折り紙構造で置き換える手法であればそれぞれの折り紙の変形は単純でありアクチュエータなども少なく済む。しかし折り紙構造をより全体に取り入れた折り紙の変形を考えると、アクチュエータなども増加し、変形を起こすための機構と回路の軽薄化が今以上に重要な要素となるであろう。

本研究の目的と範囲

そこで本論文は軽くて薄い折り紙の変形の実現を目標とした。そして本研究の目的は、軽薄な機構による変形の実現と、それによる折り紙の利点である軽薄な折り紙ロボットの実現である。

折り紙の変形が1カ所でしか生じない場合にはその変形のみを軽薄な機構で実現すれば良く、軽薄な機構・アクチュエータと軽薄な回路を選択して実装するのみであり、本論文では深く述べない。しかし全体を折り紙とするようなこれから折り紙の変形を考えると、折り紙の変形を複数箇所で起こす必要が生じる。

まず折り紙の変形を折り紙の至る所で起こすためには、折り紙の至る所に変形のためのエネルギーを供給する必要がある。折り紙を変形させる多くの場合、電気を用いたアクチュエータによって変形させるため、まず電気エネルギーを折り紙の至る所に供給する「配線」を扱う。

本論文では折り紙の表面に導電性インクを印刷し、全ての構成面を電気的に接続することによって折り紙の変形を所望の場所で実現できる素地をつくる。導電性インクは非常に軽薄であり、ジャンパ線などを必要としない配線とすることで軽薄な構造のみで折り紙全体へ電気エネルギーを供給できる。しかし折り紙の変形には変形同士に存在する時間的な依存関係も存在する。単に電気エネルギーを行き渡らせる配線だけでは、全ての変形がほぼ同時に生じてしまうため、空間的なエネルギーの供給に加え、時間的な供給の制御も必要である。そこで時間的な制御として折り紙の状態（形状）を入力として、折り紙に搭載されたアクチュエータの駆動状態を制御するシステムを構築する。折り紙のそれぞれの折れ目に対して、折れ角に応じて出力を変える素子を搭載し、その素子の出力を論理回路で処理することでアクチュエータの動作条件とすれば、折り紙の状態によって駆動状態を切り替えるシステムを構築できる。本研究ではこのシステムを軽薄に実現するために軽薄なセンサを開発しただけでなく、折れ角に応じて変化する出力を電圧の高低とするのではなく、導通と断線とすることで論理回路を素子同士の接続関係のみで実現し、軽薄なアクチュエータの制御を実現する。論理回路を軽薄な金属板で実装することで軽薄な構造のみで論理回路を構築するだけでなく、折り紙の形状を既存の手法に比べ高精度に把握できる手法を構築した。以上のように変形のために必要な電気的な回路・制御を軽薄に実現した。

そして次に変形のために必要な機械的な機構を考える。折り紙はリンク機構のように剛体の組み合わせとして遠くまで変形を引き起こすことができる。しかしそれ以外にも、構成面の弾性変形と弹性変形に伴うエネルギーによる変形の伝搬が可能である。変形を引き起こす機構としてこの弾性変形を用いた円筒折と呼ばれる折り紙の解析を行い、折り紙の離れたところまで変形を伝搬させる機構を実現する。

そして回路同様、機械的にも折り紙の変形の時間的な制御を行うため、回路を用いずに段階的な変形を引き起こす機構も必要である。本論文では円筒折の形状を調節することで各円筒折が変形するタイミングを調整し、順序動作を構造だけで実現した。また更に変形の順序が変形の向きによって異なる性質についても解析し、折り紙の変形の順序の制御をまとめた。

そして最後に回路と機構を融合した移動ロボットを実装する。このロボットの制御は折り紙の状態を入力とした論理回路によってアクチュエータを制御する。アクチュエータは折り紙全体に力を与えるが、移動ロボットはそれぞれの折り目を順番に動かすことで移動を実現する。移動ロボットは複数のモジュールから構成されており、それぞれのモジュールを別々に動作しなければならない。この段階的・逐次的な動作を円筒折を用いた順序動作により実現し、ロボットに搭載されているアクチュエータは1個に削減した。これにより、目的であった軽薄な変形する折り紙の研究の締めくくりとする。

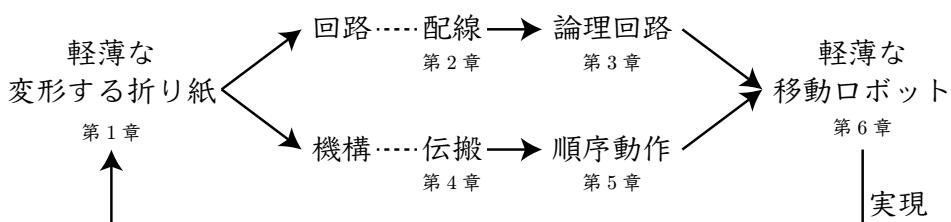


図 1.2: 各章の成果と本文の流れ

1.1.2 各章について

図1.2に示した流れで本論文は構成される。第2章で電気的配線を、第3章でその配線を形状によって変化させ選択的に通電する論理回路を、第4章で機械的な変形の伝搬を、第5章でその変形の伝搬を順に起こす機構を、そして第6章では第3章と第5章の成果を組み合わせることで目的であった軽薄なロボットを実現した内容を述べる。以降、各章が扱う範囲について述べる。

第2章 折り紙の構成面の電気的接続

第2章では、紙に導電性インクを塗布し、電圧をかけることで電極として用いる応用に必要な電極パターンの生成について述べる。小面对1組にのみ電源を接続するだけで、他の小面には導電性インクの印刷パターンによって電圧を印加する手法である。小面への導電性インクの塗布は、物を付着させる手法としては最も軽薄な手法であり、折り紙の軽薄さを失わずに電気的な接続を実現できる。本論文では、印刷のみで配線が可能であるかの判別手法と印刷パターンの導出アルゴリズムを提案し、導電性インクによる折り紙全体への電気エネルギーの供給を実現する。また、配線が不可能であるパターンに対しても、折り紙の最終的な形状を変えないまま折り線パターンを修正し、配線を可能にする手法も提案した。第2章の成果により、折り紙の全体へと電気エネルギーを供給することで、折り紙の変形をアクチュエータを付けるだけでどこでも生じさせられる回路を実現する。また、折り紙全体に供給された電気エネルギーを用いる代表的な例として、構成面の導電パターンをコンデンサスピーカとして用いる応用に向けて議論を展開する。

第3章 折り紙の順序動作のための論理回路

第2章は導線によって電圧を折り紙全体に行き渡らせ、所望の場所にアクチュエータを搭載すれば折り紙の変形を実現できるようになった。しかし、常に全体に電圧を行き渡らせる導線は、常に全てのアクチュエータを駆動してしまう。しかし折り紙の変形には順序が重要であるため、第3章では折り紙の形状によってアクチュエータまでの配線を切り替えることで、折り紙の形状によって駆動するアクチュエータを切り替える論理回路を実現する。折り紙の形状によって電気エネルギーの供給を切り替えるために、折り目が折れているときのみ導通する回路と、折り目が折れていないときのみ導通する回路をまず提案する。これにより折り目の状態によってアクチュエータの動作を制御できる。複数の折り目の状態を用いる場合にはそれぞれの折り目に導通/断線を切り替える回路を搭載し、その回路を直列・並列に接続することで折り目の状態の論理積・論理和でアクチュエータを駆動できる。この論理回路を複数のアクチュエータに搭載し、動作のタイミングをずらすことで繰り返し動作を実現し、ICを必要としない制御を実現する。本提案を軽薄に実現するために銅テープで導線と折り角によって導通を変化させるセンサを実装し、直流電源のみで繰り返し動作を実現する折り紙を作成する。

第4章 円筒折における変形の機械的伝搬

第4章では、力学的に変形を起こす手法について述べる。第2章や第3章で扱った折り紙に付着させた物体による変形とは異なり、折り紙自身の形状や弾性変形による変形である。折り紙の変形には剛体折と呼ばれる構成面を全く変化させない変形以外に、構成面を変形させ、弾性エネルギーを伴って生じる変形がある。剛体折は数学的に非常に厳しい制約の下でのみ変形できる折であり、複数の折り目を接続すればするほどその制約が厳しくなるのに対し、構成面の変形を許容することで制約は大幅に緩和され、折り紙の変形の幅は一気に広がる。そして折り紙の変形に伴う弾性エネルギーを用いることで、変形にエネルギーを付随させられる。このエネルギーを用いて変形を伝搬させる手法を第4章では扱う。構成面の弾性変形を伴う折り紙に「円筒折」と呼ばれる折り紙があり、その特徴的な弾性変形は伸長状態と収縮状態の2種類の安定状態を持つ。円筒折の変形する部分を機械的に接続することで、異なる安定状態へ遷移した円筒折の変形を次々と伝搬させ、複数の円筒折の遷移を一度に実現できる。この機構により離れた場所へと変形を伝搬させられる。変形の伝搬の代表的な応用として、バネなどによってエネルギーを補償することで減衰しない変形の遷移を実現し、不減衰伝送路まで議論を展開する。

第5章 円筒折による順序動作の実現

第6部は折り紙の折り線パターンの工夫だけで、順に変形する機構を実現する。異なる折り線パターンは変形に必要な力・エネルギーも異なるため、適切な設計により同じ力が加わったときにさえ所望の順序で変形を生じさせられる。さらに、ヒステリシス効果を有する折り紙構造を用いることで、1アクチュエータの制御にもかかわらず複数の折り目の状態を所望のパターンに変化できる。以上の折り線パターンの工夫のみで行った変形の制御により1アクチュエータで移動するロボットを実装し、その移動や遷移を観察する。折り線パターンに逐次的な制

御を入れ込むことで、アクチュエータを削減し軽薄な折り紙につなげる。

第6章 そして最後に第3部で扱った銅テープ回路で第6部のアクチュエータを制御するロボットを実現し、本論文の集大成とする。このロボットは直流電圧が印加されるだけで動作を開始し円筒折を伸縮させる。伸縮により銅テープがモータに印加する電圧の向きを切り替えるため、ICを必要としない1アクチュエータで動く折り紙である。

折り紙の構成面の電気的接続

第2章の内容は、折り紙の変形を起こす軽薄な機構であり回路である。折り紙ロボットの主な利点は軽さと薄さであり、これらの利点を損なわないために軽薄なアクチュエータを用いて折り紙を変形させる手法が提案されてきた。その中でも本第2章では軽薄なアクチュエータとして働く要素として折り紙に貼付する金属箔や塗布する導電性インクを用いる場合に着目する。例えばカット基板の銅箔（カット基板・銅張積層板、サンハヤト）の銅箔厚35μmや導電性インクの0.3μm等、金属箔や導電性インクはモータと比べて非常に薄いどころか、一般的なコピー用紙の厚さ90μmと比べても遜色ない。金属箔や導電性インクを小面に電極を配置し、電極に電圧を印加することで折り紙の変形を起こす機構として使われてきた。

各小面にエネルギーを与える駆動は単純であるが、全ての小面に電圧を印加すると手間が増加するだけでなく配線が重く厚くなり得る。従来はこの配線も金属箔や導電性インクで実現しようとしていたが、配線可能な折り紙と配線不可能な折り紙が存在し、その判別や導出は人力であり精神的な苦痛と時間と手間を要する作業を必要としていた。本第2章では折り線パターンから配線の可否判別を行い、配線可能であればその具体的な配線を導出するアルゴリズムを提案する。また配線が不可能である場合には、最終的な折り紙の形状をほとんど変えずに配線が可能なパターンへと変形させる手法も提案した。

本成果により、折り線パターンや折り紙形状から全電極に配線する連続配線パターンを導出でき、1小面（一部）に外部からエネルギーを与えるだけで全体の同時変形を可能とする。

第2章の成果は、

[C4] 奥谷文徳、齊藤一哉、加藤邦拓、川原圭博，“折り紙スピーカーのための電極の連続配線可否判別，“情報処理学会全国大会講演論文集, no.6B-06, March 2019.

で発表された内容の再利用を含む。

2.1 小面電極への連続配線の必要性

5年以内に出版予定

2.2 第2章の関連研究・前提知識

2.2.1 2色塗り分け

第2章で扱う2色塗り分けとは、グラフ理論における面彩色の1分野であり、辺を共有する領域同士を異なる2色で塗り分ける問題や、その解である2色で塗り分けたパターンを指す。そして2色での塗り分けは「外周を除き、全ての頂点の次数が偶数である」パターンに対して可能である[39, 40]。歴史的に有名な四色問題（四色定理）のような3色以上での塗り分けとは異なり、2色での塗り分けはある1つの領域に色を塗った場合に、隣接する面全ての色を一意に決定する。そのため塗り分けの組み合わせの探索において組み合わせ爆発も起きず、小面の数に比例した時間で2色塗り分けの可否判別が可能である[41]。頂点を中心に考えると、ある小面から順¹に色を交互に塗り分けると自分自身の色が矛盾しない場合は、その頂点を端点として持つ辺の数が偶数である場合のみである。つまり、ある頂点の次数が偶数であればその頂点近傍に対して可能な塗り分けが存在し、ある頂点の次数が奇数であればその頂点周辺に対してさえ可能な塗り分けが存在しない。また、その頂点付近に対して可能

脚注¹例えば正の回転方向

な塗り分けは、1つの解とその色を反転した解の合計2通りしか存在しない。ある頂点近傍で矛盾しない塗り分けはその頂点に接続している辺のもう片方の頂点での塗り分けを矛盾させないため、「外周を除き、全ての頂点の次数が偶数である」場合には折り線パターンに対して小面を2色で塗り分けられることが大局的にも成立する。折り紙の塗り分けに関して、折り紙の外には電極は存在しないため外周は色を持たない、つまりどの色が隣接していても問題ないとして扱ってよく、外周における頂点の次数に制約はない。

2.2.2 平坦折と2色塗り分け

第2章の大部分では、電極の種類は2種類に制限する。これは実在する応用例であるキャパシタ・スピーカ・アクチュエータが2種類の電極からなる例であったため、そして平坦折の展開図が2色に塗り分けられる性質が知られているためである。平坦折の展開図は折られた状態で表向きの小面と裏向きの小面との2種類の領域に分けられる。そして、辺で隣接する小面は常に折り目を介した小面であるため、表向きの小面に辺で隣接する小面は全て裏向きの小面であり、裏向きの小面に辺で隣接する小面は表向きの小面となる。その向きに対して2色を対応させれば、平坦折の小面の2色塗り分けを得られる。折り紙の応用には「薄く折りたためる性質」に着目する応用が多いため、平坦折の性質は非常に有用である。

隣り合う領域が異なる色になる2色での塗り分けの一例が、図2.1の図に示す2色への塗り分けである^{脚注2}。図

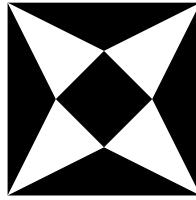


図 2.1: 2色塗り分けの例

2.1の小面に対応する折り線パターンにおいて、折り紙内部の頂点の次数は全て4であり、それゆえ2色塗り分けが可能である。

平坦折が可能であれば2色塗り分けが可能であるが、2色塗り分けが可能であれば平坦折が可能とは限らない。事実、図2.1は2色塗り分けが可能であるが平坦折が不可能な图形である。本第2章の内容はより広い2色塗り分け可能な图形に対する手法であり、平坦折より広い範囲に適用可能な手法である。しかし本第2章で説明した2色塗り分けの応用では、表を向いている面と裏を向いている面は隣接するように重なることで効果的に電極が力を発揮する。しかし、2色塗り分けならば常に隣接するように重なる面が異なる色であることまでは保証しない。平坦折が可能であるかの判別はNP困難と証明されているため本論文では扱わず、平坦折の可否にかかわらず2色塗り分けが可能であるパターン全体を扱う[42]。

例えば、3小面の平坦折には、図2.2(a)のように交互に折る平坦折と、図2.2(b)のように巻き取るように折る平坦折の2種類が存在する。しかし2色塗り分けで禁じられている「辺を介して隣接する小面が同じ色であって



図 2.2: 2種類の平坦折。表を向いている小面を実線で、裏を向いている小面を破線で表している。(a) 交互に折る場合。(b) 同じ向きに巻き取るように折る場合。交互に折る場合には表を向いているコメント裏を向いている小面は交互に重なり合うが、同じ向きに折る場合には交互に重なり合わない。

はいけない」という性質は、折り紙の応用に直接必要な性質ではない。そのため図2.2(b)のような場合は辺で接している部分で連続配線すれば良い。また、本第2章で述べる手法は折り線にとらわれず2色で塗り分けられた領域に対する問題に対する手法として差し支えない^{脚注3}。

脚注2 平坦折可能ではないが2色での塗り分けが可能である。

脚注3 この折り方に因って重なり合いが異なる議論は付録??で行う

5年以内に出版予定

2.3 連続配線可否判別

5年以内に出版予定

2.3.1 外周に辺で隣接した領域の色を用いた連続配線可否判別

ここでは、折り線パターンから生成された2色での塗り分けを行った後、折り紙の外周に注目することで、連続配線の可否を判別する手法を紹介する。図??(a)は、左右の黒の領域が連続配線不可能であった図??(a)の外部の領域により連続配線が可能な例を示した。本手法「外周に辺で隣接した領域の色を用いた連続配線可否判別」は「外部の領域によって連続配線の可否が変化するのであれば、最も外側の領域に着目してはどうか」を考えた結果、導出された判別手法である。

判別手法は

定理 1. 単連結な平面上の、連結な折り線パターンに対する連続配線可否判別手法

外周と辺を共有する小面に注目し、その2色塗り分けの色の切り替わりが一周する間に2回以下であれば、連続配線が可能、そうでなければ不可能。

である。ほぼ自明に同値な判別手法として、

定理 2. 単連結な平面上の、連結な折り線パターンに対する連続配線可否判別手法 2

外周の黒色の部分と白色の部分が^aそれぞれ連続であるならば連続配線が可能、そうでなければ不可能。

^a存在するならば

が存在する。

定理2は、定理1と外周の色は一周すると元の領域に到達し元の色になるため、切り替わりが2回以下ならば、外周の色は全て同じ色である^{脚注4}か、切り替わりの間のみ始点の次の領域とは異なる色が連続する^{脚注5}性質から導かれる。また、黒色の領域が不連続な場合、黒色の部分を隔てる部分は白色であるため、白色の領域も不連続になるので、「それぞれ連続」でなく、「少なくともどちらか」が連続であるだけで良いとも言える^{脚注6}。

具体例の図??(a)と図??(b)では外周の色の切り替わりはそれぞれ4回であるため、連続配線が不可能であると正しく判別される。そして図??(a')と図??(b')では外周の色の切り替わりはそれぞれ2回であるため、連続配線が可能であると正しく判別される。外周の色の切り替わりが0回である例として図2.3のような図形があるが、2色で塗り分け可能であり、連続配線も可能である。

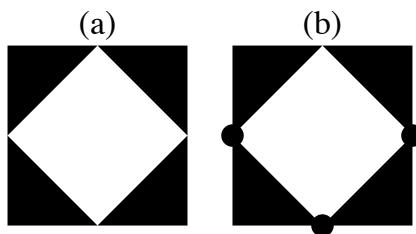


図 2.3: 外周の色の切り替わりが0回である図形の例。(a)2色で塗り分け可能であり、(b)連続配線も可能である。

脚注 4色の切り替わりが0回である場合

脚注 5色の切り替わりが2回である場合

脚注 6これについては2色でのみ成立性質である

色の切り替わりが3回以上である場合^{脚注7}、図??(b)の様に、向かい合う黒色の領域を連続にすると白色が連続ではなくなり、向かい合う白色の領域を連続にすると黒色が連続ではなくなる。そのため黒色と白色のどちらかが不連続になってしまう。図??の(b)はどちらかが不連続になってしまった最も簡単な例である。

図2.4のように、色の切り替わりが4回である場合、どちらの色も周辺で連続ではない。そのため片方の色（図2.4中では黒）を連結させると、その経路によりもう片方の色（図2.4中では白）はどこかで分断される。また、

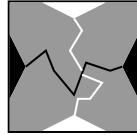


図2.4: 外周の色の切り替わりが3回以上であると、片方の色を連結させることにより、もう片方の色が分断される様子。図中では黒色を連続配線させた結果、白色の連続配線は黒色の配線によって分断されている。具体的にどの部分で不連続となるかを示すことなく、不連続であることを証明できる。

色の切り替わりが6回以上である場合にも、図2.4のパターンが含まれる。そのため色の切り替わりが4回以上であれば、少なくとも片方の色に対して連続配線が成り立たない。したがって定理1は必要条件である。定理1が十分条件である証明は第2.4.2章の具体的な連続配線パターンの導出において行う。

定理1では、「外周と辺を共有する小面に注目し、その2色塗り分けの色の切り替わりが一周する間に2回以下であれば、連続配線が可能」と述べた。しかし定理の名前にある通り「単連結な平面上」と「連結な折り線パターン」の2個の制約がある。「単連結な平面上」については紙の形状の制約であるため、第??節で述べることとし、ここでは折り線に着目する。「連結な折り線パターン」ではない折り線パターンは「連結ではない折り線パターン」であり、図2.5のような、連続配線が不可能な例が判別できる範囲から除かれている。これらの不可能な例は、具

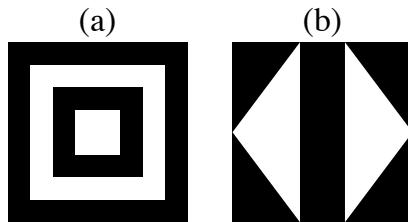


図2.5: 外周の色の切り替わりが0であるにもかかわらず、連続配線が不可能な例。(a) 平坦折不可能な折り線パターン。(b) 平坦折可能なパターン。

体的な連続配線の導出に必要である「全ての同じ色の小面が、同じ色の小面もしくはその頂点のみを経由して接し合っている（全域である）」特徴を持たない折り線パターンである。図2.5(a)は平坦折不可能な折り線パターンであり、図2.5(b)は平坦折可能な折り線パターンである。そのため平坦折の可否判別とは関係なく生じる折り線パターンであり、制約として必要となる。

図2.5は共に外周の色の切り替わりの数が0回であったが、図2.6のように外周の色の切り替わりが2回であっても、同様に連続配線が不可能な例も存在する。

図2.5(a)のような、折り目同士が外周を介してさえ接続していないパターンは、そもそも折ることが不可能な折り線パターンである。今回の配線の趣旨は2色塗り分けに対する配線ではなく、（平面ではなくとも）折りたたみが生じる折り紙に対する配線である。そのため図2.5(b)のような少なくとも頂点では外周に隣接している折り線パターンについてのみ考えれば良い。

図2.5と図2.6とを見比べると、右上の明るい灰色の小面^{脚注8}を追加することで、連続配線が可能な状態を連続配線が不可能な状態へと変化させている。

脚注7一周するため色の切り替わりは偶数で有り、色の切り替わりの回数は実際には4回以上である

脚注8白色の小面の領域に分類される

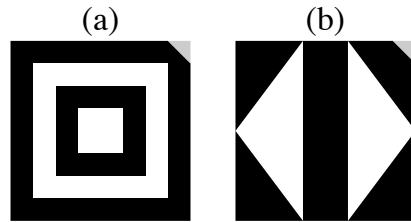


図 2.6: 外周の色の切り替わりが 2 であるにもかかわらず、連続配線が不可能な例。(a) 平坦折不可能な折り線パターン。(b) 平坦折可能なパターン。図 2.5 の右上に新たな領域（灰色）を生成することで色の切り替わりを 2 増加させている。

この変化は外周付近を用いた微小な変化で可能である。現在のところ必要ではないが、平坦折に限らなければ、連続配線可能な折り線パターンから、折り目を追加することで連続配線不可能な小面を発生させることは可能である。

図 2.5 には、同じ色の小面とその頂点のみを経由して到達できない同じ色の小面が存在する。図 2.5(a) では黒い小面と白い小面が、図 2.5(b) では白い小面がそのような状態である。このような、「同じ色の小面とその頂点を経由して到達できない同じ色の小面が存在する状態」^{脚注 9}を「(その色の領域が) 分断 (されている)」と表現する。さらに、ある 1 つの小面もしくはそこから同じ色の小面とその頂点のみを経由して到達可能の同じ色の小面集合に対し、その色が「分断」されている場合には、その小面（集合）を「(同じ色の小面とその頂点を経由して到達できない小面集合から) 孤立している」と表現する^{脚注 10}。

1 つでも孤立した小面が存在すれば、その孤立した小面には連続配線が不可能であるため、その折り紙全体に対しても連続配線が不可能である。そして、この判別手法では外周の色にのみ注目しており、内部に存在する孤立した小面の存在は外周だけでは判断できない。特に、図 2.5 に示すのパターンは黒一色のパターンと外周の色は同じであり、それゆえに全ての頂点において次数は偶数であるため、外周に影響を与えないパターンである。そのため本手法「外周と辺を共有する小面に注目し、その色の切り替わりが一周する間に 2 回以下であれば、そしてそのときに限り連続配線が可能である」では「孤立した小面が存在しないこと」を事前に知った上でのみ適用できる連続配線可否判別手法である。小面集合ではなく 1 個の小面を扱う場合には「小面が孤立している」は「外周と共に共有している辺を除き、その小面の頂点の次数が全て 2 である」と同値である。そして、「小面集合が孤立している」は「外周と共に共有している辺を除き、その小面集合の内部の辺を取り除くと頂点の次数が全て 2 である」と同値である。小面もしくは小面集合が孤立しているかの判定は、それぞれの色に対して独立して行えるため、計算量はそれほど問題にならない。

また、小面の接続関係をグラフで表せば効率的に小面集合の孤立を判定できる。小面を頂点として、頂点を共有する同じ色の小面を辺で接続したグラフを考えると、小面が孤立している場合には、小面の接続関係を表すグラフは全域ではないグラフとなる。グラフが全域であるかの判別は、接続関係のグラフをどう格納するかによって多少影響はあるものの、幅優先探索を用いることで $O(\text{辺の数})$ ^{脚注 11} で可能である。

2.4 連続配線手法

2.4.1 連続配線手法の必要性

上記の定理 1、定理??を用いた判別法で連続配線の可否は判定できる。しかし連続配線可能であるならば常に配線を無作為に行っても連続配線可能とは限らない。例えば図 2.7(a) は図 2.7(b) の様に 2 色塗り分け可能である。そして、小面の色の切り替わりが 0 回であり、同様に折り線の一筆書きは可能であるため、どちらの判別手法によっても連続配線が可能であると判別される。もちろん、実際に図 2.7(c) のように連続配線可能である。

脚注 9 つまり、「全ての同じ色の小面が、同じ色の小面もしくはその頂点のみを経由して接し合っている（全域である）」を満たさない状態

脚注 10 図 2.3 のように、同じ色の小面が 1 つしか存在しない場合には、他の同じ色の小面が存在しないため、他の同じ色の小面に到達することは不可能である。しかし、0 個全ての小面に接続できていると解釈するなどで、全ての同じ色の小面が同じ色の小面もしくはその頂点を経由して接し合っていると捉え、孤立しているとは表現しない。

脚注 11 小面同士の接続の数

しかし、図 2.7(d) のように中心の黒い小面から放射状に接続すると、4 個の白い小面は連続配線不可能になってしまう。このように、配線可能である電極パターンに対して連続配線が容易に脚注¹²得られるとは限らない。

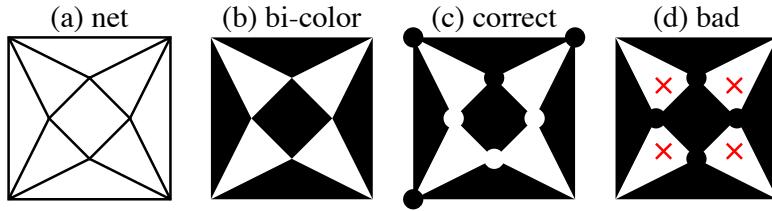


図 2.7: 連続配線がうまくいく配線例とうまくいかない配線例。無作為に接続して連続配線がうまくいくとは限らない。(a) 塗り分け可能な折り紙の展開図。(b)2色塗り分け。折り線パターンは連続配線が可能であり (c) のように連続配線可能だが (d) では連続配線が不可能になる。

頂点の接続パターンを全通り試す手法はもちろん電極パターンを導出できるが、図 2.8 のように、次数が大きい頂点に対しては多くの接続パターンが存在する。この頂点での接続のパターンの数は、接続関係が交差しないよ

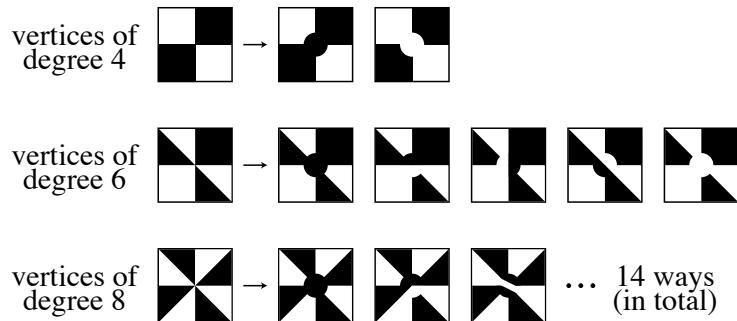


図 2.8: 頂点の次数と接続パターン例。次数の増加に対して接続パターン数も増加する。

うな領域の分割に相当する。すると、「非交差分割数」とも呼ばれるカタラン数がその数に対応し、次数が $2n$ もしくは $2n+1$ の頂点に対して $C_n = \frac{(2n)!}{(n+1)n!} \approx \frac{4^n}{n^{\frac{3}{2}}\sqrt{\pi}}$ 通りの接続パターンが存在することとなり、指数関数的に増加する [44]。さらに、このパターン数が頂点ごとに存在し、それぞれを独立に考える総当たりでは、頂点それぞれのパターンの数を掛け合わせた数の連続配線を考える必要がある脚注¹³。このような総当たりのパターン数は二重指数関数的に増加するため、総当たりは現実的ではない。そこで、具体的な例を用いて効率的な連続配線生成アルゴリズムを紹介する。

脚注 12 つなげられる場所を見つけ次第つなげる貪欲法

脚注 13 例えば図 2.7 は 16 通りであるが、一般的な折り鶴の折り線パターンは次数が 4 の頂点が 37 個、次数が 6 の頂点が 1 個、次数が 9 の頂点が 2 個有るため、 $C_2^{37}C_3C_4^2 \approx 1.35 \times 10^{14}$ 通りの接続パターンを試すこととなり、それぞれに対して連続配線を実現しているかを確認することはほぼ不可能である

2.4.2 全域木を用いた連続配線導出

本手法は、外周に辺で隣接した領域の色を用いた連続配線可否判別に対応する手法である。しかし外周の頂点での接続パターンを先に決定する程度の対応であり、強い関連はない。

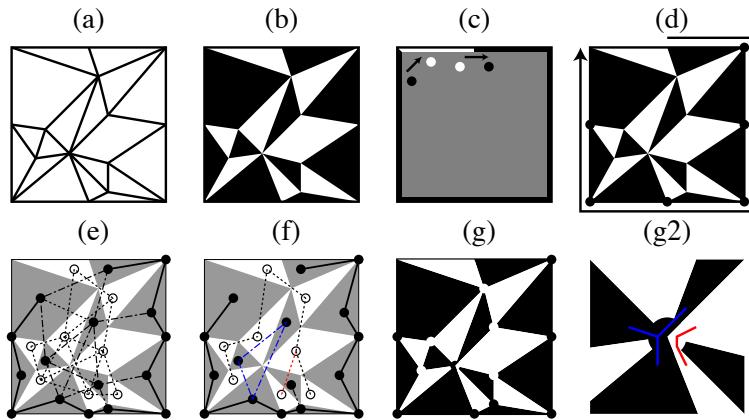


図 2.9: 塗り分け可否の判別と全域木を用いた配線導出。小面の隣接関係を表すグラフの全域木の接続と対応する配線により連続配線が可能である。(a) 折り線パターン。(b)2色塗り分けパターン。(c) 外周と辺を共有する小面に注目し、その色の切り替わりが一周する間に2回以下である判定。(d) 外周と辺を共有する小面を連結させる。(e) 頂点での隣接関係を辺で表した図。白い領域に対しては点線で、黒い領域に対しては一点鎖線でそのグラフを表す。実線は、(d)の段階で連結された関係である。(f) 白色の領域（点線のグラフ）に対して全域木を構築した例。(g) 導出された連続配線パターン。(g2) 次数が8の頂点付近の(g)の拡大図。[45]

まず、図 2.9(a) のパターンが与えられたとする [45]。平坦折可能な折り線パターンであり、2色塗り分けが可能である。折り線パターンの任意の小面を選び辺で隣接する小面を順に異なる色に塗る操作により、図 2.9(b) の2色塗り分けが一意に得られる^{脚注 14}。次に図 2.9(c) のように外周の色のみに注目し色の入れ替わりが2回以下、つまり連続配線可能である性質を確認する。本手法は連続配線が可能である図形にのみ対応するため、図 2.9(c) の段階で色の入れ替わりが4回以上であれば、折り線パターンを考え直す。ただし、全ての同じ色の小面は頂点では全域であるとする^{脚注 15}。

図 2.9(d) のように外周で色が連続する場所に関しては、その色で外周の小面同士を接続する。^{脚注 16} 次に、各色に対して小面を頂点とした頂点での隣接を辺とするグラフを求める。白色の小面に対する隣接グラフを図 2.9(e) の点線に示す。また、参考のために黒についての小面を頂点とし頂点での隣接を辺とするグラフも図 2.9(e) に一点鎖線で示す。

このグラフ内で、全域木を構築すると、木は閉路を持たないため黒色の領域を孤立させず、全域性は全ての白色の小面を連続配線させる。隣接グラフから全域木が一意に決まるとは限らないが、図 2.9(f) のようにいずれかの全域木を導出すれば上記の性質は満たされる。特に制約を設けない全域木の構築は閉路が生じないように順に接続するだけで可能であるため、計算量も $O(|F|)$ である^{脚注 17}。

そして、図 2.9(g) のようにこの全域木の連結に対応するように頂点に配線パターンを付加する処理で連続配線が実現する。その頂点で生じている連結が、全て同色である場合にはその頂点付近を円状に塗りつぶすことで配線が可能である。その頂点で生じている連結が、全て同色でない場合には、図 2.9(g) の次数が8の頂点のように、扇形を組み合わせた塗り分けが必要となる。次数が8の頂点の拡大図は図 2.9(g2) のようになり、図 2.9(f) の青い一点鎖線と赤い点線がそれぞれ青色と赤色の実線のように連結されることで連続配線が実現する。

脚注 14 色を反転したパターンは同一の塗り分けパターンとする

脚注 15 この処理については内部の折り線パターンを見る必要がある。

脚注 16 今回扱う図 2.9(d) では全ての外周の頂点の次数が4以下であるが、6以上である場合は外周に隣接していない領域を接続しないように注意する。

脚注 17 制約を設ける場合については第??小節で述べる。

2.5 第2章のまとめ

第2章では、折り線パターンに対する連続配線の可否判別手法と、可能な場合の具体的な配線導出アルゴリズムを紹介した。

本手法が提案される前は、配線が可能かわからないまま、人間が手作業で連続配線を探していた。しかし、判別手法と具体的な配線パターンの導出アルゴリズムができた今、存在しない配線パターンを模索する無駄はなくなり、配線が存在すれば自動的にパターンを生成できる。ユーザが作成した様々な形状の折り紙などを、そのままスピーカとして使用する配線設計を大幅に簡単にする。

第2章は、折り紙の変形を起こすための軽薄な回路として導電性インクに着目し、その印刷パターンのアルゴリズムを構築することで印刷のみで実現するアクチュエータ・配線を実現した。これにより配線されている部分全体を同時に変形させる回路を実現した。

■ 第3章

折り紙の順序動作のための論理回路

本第3章が述べる内容は折り紙の変形を順に起こす軽薄な回路である。

本第3章では変形を起こすアクチュエータとして形状記憶合金を用いる。形状記憶合金は出力のわりに軽薄であるため、既に形状記憶合金は折り紙の変形に用いられてきた。本第3章のテーマ「順に変形を起こす」の実現のため、全ての形状記憶合金に電圧が印加しうる回路が順に形状記憶合金の駆動を実現するシステムを構築する。

従来形状記憶合金を用いた折り紙の変形には、温度で駆動するため環境の温度や風速によって変位が容易に変化するためモータ等と比べると制御が難しい問題があった。そして、形状記憶合金の駆動には折り角を観測する高性能なセンサやその周辺回路も必要であった。

本第3章では、折り紙ロボットの多くが必要とする折り角の情報が、折り角自体の情報ではなく折り角としきい値の大小関係であることに着目した。そして高精度かつ連続的な折り角の変化の取得を諦める代わりに、しきい値との大小関係のみを高精度で求めるセンサを銅テープで薄く実装した。

従来のセンサの多くは抵抗値の変化や電圧の高低で連続的に角度を出力したが、本第3章で提案する薄いセンサは導通と断線によって大小関係を出力する。そのため、センサと直列に電源と形状記憶合金を接続すれば折り角が直接形状記憶合金の駆動、ひいては折り紙の変形を起こせる。この性質と出力の不連続性から、提案する銅テープによるセンサを銅テープスイッチと呼ぶ。この銅テープスイッチがある折れ角から断線に切り替わるように設計し、ある折れ角までは形状記憶合金が駆動するがその折れ角以上では形状記憶合金が停止し、目的の折れ角付近で安定するような動作が可能とする。

そしてさらに銅テープスイッチを直列や並列に接続し、より複雑な条件による形状記憶合金の駆動も実現した。本提案により全体に電圧を印加するだけで折り紙の形状によって銅テープの導通関係が変化し形状記憶合金を制御することで、順に変形する制御が可能となる。本成果により、形状記憶合金で駆動する、ICを搭載しない薄くて軽い折り紙ロボットが実現できる。

本第3章の成果は、

[C1] 奥谷文徳, 川原圭博, “銅テープ回路の排他的論理和の円筒折を用いた実装,” 電子情報通信学会技術研究報告 (CAS), vol.119, no.313, CAS2019-52, pp.59–64, Nov. 2019.

[C2] 奥谷文徳, 川原圭博, “出力を入力にフィードバックすることで繰り返し遷移を構成する組み合わせ回路の簡素化によるロバスト性,” 電子情報通信学会技術研究報告 (COMP), vol.119, no.249, COMP2019-21, pp.27–34, Oct. 2019.

[C3] 奥谷文徳, 川原圭博, “折り紙ロボットの制御回路の自律分散制御を用いた簡単化,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, no.N-1-1, Sept. 2019.

で発表された内容の再利用を含む。

3.1 折り紙ロボットの制御の問題点

折り紙ロボットは、ロボットを薄い状態で輸送できるため、大量のロボットを輸送したい場合や、限られた空間の中で薄い状態で輸送する場合に非常に便利である。さらに、折り紙ロボットは搭載されたバッテリとアクチュエータを用いて外部からの操作を必要とせず折り上がり、設計された形状へと変形する自己折と呼ばれる分野の研究が活発になった。そのため、小さく折りたためる性質、組み立ての手間がいらない性質が有用な、宇宙に打ち上げるロボットや生体内で動くロボットなどとして着目してきた。

そして、折り紙ロボットの輸送面における利点は、折り紙ロボットの軽さ・薄さ（小ささ）にあり、その利点を

損なわないために薄い（小さい）形状記憶合金をアクチュエータとして用いられている。形状記憶合金は、熱を与えると元の形状に戻ろうとする力が働く合金であり、外部から熱を与えるか、電流を流してジュール熱を用いて駆動される。しかし、形状記憶合金は外部から与えた熱量や電流量ではなく、形状記憶合金の温度で駆動するため、制御が難しい問題を有する。

従来はこの問題を、折り角センサを搭載してフィードバック制御を行って解決していた。しかし折り角を取得するためのセンサは折り紙ロボットの厚さを増加させる要因であり、高精度かつ薄いセンサが登場することはなかった。高精度かつ薄いセンサが実現すれば、形状記憶合金のような不安定なアクチュエータを折り紙ロボットに用いられるようになる。

折り紙ロボットのほとんどの制御は高精度かつ連続的な折り角の変化を取得するにもかかわらず、実際に用いている情報は目的の角度まで変化したかの判断のみであった。そのため、ある折れ角まで折れたかどうかを高精度に取得できれば、他の角度における高精度な角度は不要である。本第3章ではこの性質に着目し、角度の大小関係のみの判定のみの能力しか持たないが軽薄な折れ角センサを実現した。センサは銅テープで構成され、折れ角の大小関係を導通と断線によって出力するため、このセンサを銅テープスイッチと呼ぶ。

本第3章では、提案する銅テープスイッチの有用性を確かめるために、折り紙構造にセンサを搭載し、折り紙ロボットの状態を把握し、所望の順番で折る制御を行う。従来の制御では、自己折と呼ばれる研究であり、所望の順番で折る制御を行っている。その自己折は内外の制御を必要とし、ロボットの内部に制御がある場合にはICなどの厚みのある素子を必要としていた。そして、外部の制御では折り紙の駆動システム全体の重量が増加してしまい、前述した宇宙に打ち上げるロボットなどには適さない。本提案は、外部の制御器も要らず、内部では薄い回路と制御システムを実現したため、この厚みによる問題を解決できる手法であり、高精度な形状記憶合金の制御も可能とする。

3.2 第3章の関連研究

本章では、従来の折り紙ロボットの制御・従来の折り紙ロボットの状態の把握・薄い回路の3分野に分けて関連研究を紹介する。従来の折り紙ロボットの制御をアクチュエータとともに紹介し、折り紙ロボットがどのようなアクチュエータを用いてきたか・どのような制御により所望の動きを実現してきたかを述べる。

まず、折り紙ロボットにセンサを明示的にはつけていない制御を紹介する。つまり、マイコンなどの計測機器を用いたフィードバック制御以外の制御である。

次に、折り紙ロボットの状態を把握する機構を紹介する。折り紙ロボットの利点を損なわないような、状態の把握に取り組んでいる研究が多い。また折り紙ロボットの状態を把握するためではなくても、本第3章でセンサとして用いる機構によく似た機構を持つ折り紙構造を紹介する。

最後に、薄い回路を紹介する。提案手法は集積回路を搭載しない機構を用いるが、導線を必要としないわけではない。そこで、提案する構造に参考にした薄い回路とそれぞれの特性を紹介する。

3.2.1 従来の折り紙ロボットの制御

折り紙構造は特定のアクチュエータに縛られた構造ではないため、様々なアクチュエータを用いた制御が行われている。特に形状記憶合金・マイクロリニアサーボ・直流モータを用いて制御する折り紙ロボットが提案されており、直流モータ・マイクロリニアサーボ・形状記憶合金の順で高速に移動することが可能である[33]。文献[33]で紹介されているロボットは人間が手作業で折って作るロボットであり、2時間から3時間かけて100mm程度の大きさのロボットを製作している。このロボットは、1枚の材料に回路類を搭載し、所望の形状へと折りたたむことでロボットとして完成するものであり、1枚の平面材料から制作できる利点も持つ。

このようにアクチュエータを搭載する場合、建築物のような大型の構造[46]であれば、いわゆる「紙」である小面の厚さも増加するため、アクチュエータに求める薄さなどの制限は少なくなる。しかし、「折り紙ロボット」として提案されているものは、そのほとんどが軽量である性質や薄型である性質を活かすために折り紙構造を用いている。そして、その折り紙構造の利点を損なわないために、軽量で小型なアクチュエータを用いることが多い。

アクチュエータに注目すると、折り紙構造で特に用いられるアクチュエータには形状記憶合金があげられる。形状記憶合金とは、形状回復温度と呼ばれる温度まで加熱すると記憶された形状に戻る材料である。形状記憶合金はその名の通り金属であるため、電気を通し、その電流による発熱で駆動することもできる。一般的に、アクチュエータは複数の部品の相互作用によって力・運動を発生させるが、形状記憶合金はその素材自体が形状を変化させる。複数の部品の相互作用はモーメントや距離によって力を発生させるため、大きな力を生むためには大きな形状も必要となってしまう。一方で形状記憶合金は素材自体が変形を司るため、小さい形状や薄い形状など、他のアクチュエータでは困難な形状で特に便利である[47, 48]。

特に折り紙では、細い形状記憶合金を折り紙ロボットの利点を損なわないアクチュエータとして利用できる。また形状記憶合金の形状をバネ型や平面などに工夫することでより大きな変形も可能としている。

形状記憶合金単体では元の形状に戻ろうとする力が働くだけであり、逆方向に力を与えられないだけでなく同じ方向に力をかけつけられるアクチュエータでもない。それゆえ、形状記憶合金は同じ変位に対してはじめて常に同じ方向の力を与えるアクチュエータとして働く。そのため、往復運動などの繰り返し運動を実現する際には、バネのような他の要素で力を発生させるか、拮抗筋のように複数の形状記憶合金を搭載した機構が必要である[49, 50]。また形状記憶合金の形状回復温度が室温よりも高い場合、形状記憶合金は冷めることで再度の変形を実現できるようになるため、例外[51]もあるが加熱だけにより制御するシステムが多い。形状記憶合金は折り紙ロボットだけに使われているわけではないが、比較的高価なためソフトロボットなどの限られた（特殊な）用途において使われることが多い[50]。また重量あたりの力も強いため、軽さを求められるロボットにも使われている[52]。文献[52]のロボットは制御部分・バッテリがロボットの外にあるが、150mm × 15mm のロボットを0.03gの形状記憶合金で駆動させており、全体の重量1.2gに比べると1/400の重量である。

モータなどの制御に関しては、折り紙ロボットに限らずよく研究されているため本第3章では述べず、折り紙

に使われる形状記憶合金に絞って制御をモータなどと比較しながら性能をまとめる。形状記憶合金は軽く・薄く・柔らかいために折り紙ロボットとは非常に相性が良いが、一方で形状の制御が難しい [49]。モータなどは電流を流すとその時間だけ力を発生するが、形状記憶合金は形状回復温度に達してからのみ力を発揮する。そして、金属であるため温度はすぐ伝わり、形状記憶合金の一部のみの駆動も難しい。

形状記憶合金の制御を行う研究はあるが、角度制御にエンコーダや角度センサを用いてフィードバック制御を行っているものが多く、時間幅や電流量だけの制御では中途半端な形状（形状を回復させかけた状態）を維持することは難しい [49, 53]。折り紙ロボットにおいては、やはり角度制御にエンコーダや角度センサを用いると、その部分は折り紙構造ではなくなり、厚い構造となってしまう。

そこで、形状記憶合金の状態を詳細に制御するのではなく、一定時間形状記憶合金にエネルギーを与える単純な制御が従来の折り紙構造で行われてきた [54]。形状記憶合金が変形するのに十分な時間形状記憶合金を加熱して駆動し、加熱を止めた後に変形してから再度加熱を行う繰り返しにより繰り返し運動を実現していた [54]。

また折り紙構造が互いにぶつかることで物理的に変形を停止させる制御も存在する [55]。この構造は折り紙構造の厚さを活用して、特定の角度をまでしか曲がらないように物理的な拘束を与えるものであり、構造全体をオーブンに入れ、同時に熱することで設計された形状への変形を実現した。この構造は、加熱後の形状を事前に設計することで設計された角度まで折れ曲がる関節を有している。しかし、アクチュエータで様々な角度を実現しているわけではなく、アクチュエータを制御しているとは言いがたい。またこの折り紙構造も一度だけの形状変化であり、繰り返し動作を行う折り紙ロボットの制御は不可能である。

形状記憶合金と同じく、ある形状へと遷移しようとする力を発生させるアクチュエータに、光が照射されると変形するポリマーがある [56]。このポリマーは光を照射されると関節を曲げるよう配置されており、光を照射することで折り畳まれる折り紙が実現できる。さらに、特定の波長の光が照射されたときに変形するポリマーを用意することで、それぞれのポリマーに対応する色の光が照射されるとそれぞれのポリマーが変形する構造が実現できる。その構造に異なる色の光を順に当てることで、所望の順番で折り曲げられる [57]。ただしこの分野の研究は、形状記憶合金の自己折と同様、自己折 (self-folding) と名付けられている構造はほとんど一度変形するのみである^{脚注 1}。

このように、折り紙ロボットの制御には、細かい制御が難しいと言う問題があった。実際に、形状記憶合金に電流を流す時間だけで制御したところ形状記憶合金が熱されすぎる問題も生じた。熱しすぎると形状回復温度で元の形状に戻らなくなる性質は、形状記憶合金の不安定性の1つであり、電流を長時間流すことで生じてしまう [58]。また形状記憶合金を熱しすぎることによって周辺の部品が解けたり焦げたりする危険性も生じた。

しかし、形状記憶合金の冷却の多くは自然冷却であり周囲の温度や風速に影響されるため、常に同じ時間の通電での制御では所望の形状を実現できない。そのため、温度や風速が異なる環境で動作させるためには、温度や風速を測定し、それに対応するモデルが必要となる。さらに風について述べると、折り紙のような軽くて表面積の大きな構造は風が力としてもはたらくため、掛かる力も変化してしまう。

このように、形状記憶合金で折り紙ロボットを駆動する場合には、実際に折れているかを把握するためのセンサを搭載しない制御は非常に難しい。そこで、次節では折り紙ロボットの状態を把握するために行われてきた工夫を紹介する。

脚注 1 本論文では繰り返し動作まで扱うため、汎用性は本手法が上である。

3.2.2 従来の折り紙ロボットの状態の把握

前述したとおり、折り紙ロボットの状態を把握するために、使うアクチュエータにかかわらずそれぞれの関節にエンコーダや角度センサを用いたフィードバック制御がある [49, 53]。しかし、そのような要素は折り紙の利点である軽さや薄さを損ねる要素となってしまう。折り紙ロボットの状態を把握するために、折り紙の利点を損ねてしまってはそもそも折り紙を用いる意味が半減してしまうため、本節では折り紙の利点である軽さと薄さを損ねない、軽薄なセンサを紹介する。

折り紙の状態の代表的なものに、折れ線の折れ角がある。折り紙の小面が変形しないのであれば、折れ線パターンと折れ角だけで折り紙構造の状態は一意に特定できる。そこで、その折れ線付近に曲率センサを搭載することで、その折れ線の状態を把握する研究が行われた [59]。薄膜に印刷された導電インクパターンの抵抗値が曲率によって変化することを用い、その折れ線の折れ角を推定する手法であるが、誤差が大きい問題がある [59]。

しかしこのような導電インクパターンの抵抗値を用いる手法は、導電インクを印刷するだけで可能であり、製造が容易である利点を持ち、導電インクも非常に薄いため折り紙との相性は良い。実際、民生品のインクジェットプリンタを用いて導電インクを印刷することで折り角度以外にも様々なセンサが実現できる [60]。銀インクを用いた手法については、銀インクで回路を作る手法として提案されているため 3.2.3 節で詳しく述べる。しかしこのセンサは非常に搭載が容易であるなどの利点の一方で、標準偏差が 10° を超える精度の悪さが目立つ。

曲率センサを多層構造で作り、その特性を述べるとともにロボットの制御に用いた研究がある。曲率センサにはヒステリシス特性があり、同じ角度で曲がっていてもそれが折れ曲がる途中であるか、それとも開く途中であるかで出力が異なる性質を有する [61]。このセンサを用いた角度の取得には分圧回路を用いているため、出力が電圧になっているが、抵抗の変化を用いた曲率センサと原理は同じである。導電インクパターンの抵抗値を測定した研究 [60] と比べると、アクチュエータとほぼ同じ場所に設置されているだけでなく、ロボットを構成する小面に挟まれている構造上の工夫もあり、標準偏差が 4° 未満と精度が改善されている。

曲率センサ以外にも、抵抗変化を用いて圧力センサも薄く実装することが可能である [62]。細い流路に導電流体(eGaIn)を流し込み、その抵抗値を測定することで表面の圧力を測定する手法である。この手法は、点対称ではなく線対称の渦巻き型の流路による単なる圧力測定以外に、流路方向にかかる力に対しても抵抗が変化するパターンなども可能である。圧力に抵抗が比例して変化するのではなく、指數関数的に変化するため、小さな圧力変化を求めるのは難しいセンサである。

折り線部分以外にセンサを取り付ける方法に赤外線 LED^{脚注 2}とフォトトランジスタを用いて、多層構造で折り角をセンシングする手法がある [63]。この手法は薄い材料を貼り付けるだけではないが、図 3.1 のように薄い 4 節の平行リンクを折り目付近に構築し、そのリンクに LED とフォトトランジスタを取り付けた比較的薄い構造である。4 節リンクは平行四辺形形状であり、平行四辺形の 1 つの角が観測したい折り目であり、その向かい合う角が LED とフォトトランジスタに挟まれた構造である。平行四辺形の向かい合う角は等しいため、LED とフォトトランジスタのなす角は折り目の角度と一致する。LED の光がフォトトランジスタに当たると、その光の強さに応じてフォトトランジスタは応答を変化させる。フォトトランジスタに当たる光が強くなればなるほどフォトトランジスタを流れる電流は多くなり、フォトトランジスタのエミッタ-コレクタ間の電圧は低下する。そのため、折れ曲がるにつれて LED の光が強くフォトトランジスタに当たるようになれば、フォトトランジスタの端子間電圧が低下し、その電圧を A/D 変換器によって取得することで折れ角が取得できる。この手法は今まで紹介した、物体の変形に伴う抵抗の変化に比べると精度がよく、同じセンサであれば標準偏差が 0.2° と非常に小さい誤差での測定が可能である [63]。10 セットのセンサを実装し、その個体差を含めた誤差でも標準偏差が 3° となっており、角度の変化に対して電圧がほとんど変わらない領域でも高い精度を実現している [63]。

この折り紙構造は形状記憶ポリマー^{脚注 3}を用いて制御されており、形状記憶ポリマーは形状記憶合金と同様に一方向にのみ動くアクチュエータであるため、入力電流が非常に短時間の電流を何度も繰り返し流すような形状となっている [63]（文献中の Fig. 10 を参照）。最短時間で目的の角度に制御できているわけではないが、オーバーシュートの存在しない制御が可能となっている一方で、制御の後半で再度長時間の電流を流すことになっているなど、目的角度に近づいてからの追従が遅く、誤差が寄与していると思われる挙動も存在する [63]（文献中の

脚注 2 発光ダイオード。Light Emitting Diode

脚注 3 形状記憶ポリマーは形状記憶合金と同様に特定の温度以上になると元の形状に戻る性質を持つ素材である。

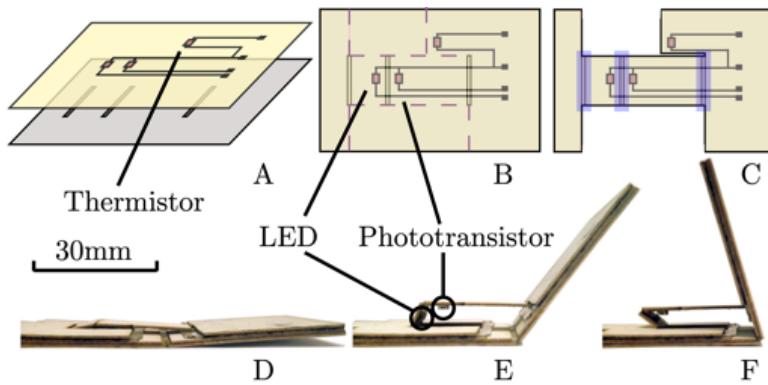


図 3.1: LED トフォトトランジスタを用いた折り角センサ。

Fig. 10(a) 90 s 付近を参考)脚注⁴。

また小面に電極を搭載して、キャパシタンスを測定することで外部の状態を把握する手法もある [64]。この手法は小面の電極と人体の間に生じるキャパシタンスを測定することで人体の近接・接触を検知する手法である。平行平板電極間のキャパシタンスは、電極間の距離に反比例するため、電極が近づくほどキャパシタンスは大きくなる。この性質をもちいて、極板の距離を測定するものである。折り目に存在する場合は、極板が平行とは限らないため、反比例するわけではないが、折り角が増加するにつれてキャパシタンスも増加する。

キャパシタンスは極板間の距離によって変化するため、スポンジのような柔らかい素材を挟んだ平行平板間に掛かる力も測定できる [64]。ただし、厚さの変化を用いる手法であるため、その場合には柔らかい素材の厚さが必要になってしまい上、厚さに反比例するキャパシタンスによる測定であるため厚さの変化に対して力の測定が難しくなる領域が存在する。

また同論文 [64] で、バイステーブルスイッチ構造が提案されており、キャパシタンスではなく電極が直接接触することにより電極が導通し、電気的に接続されることによる状態の把握も可能とされた [64]。この手法は、接触している状態と接触していない状態の 2 種類の状態を区別することのみが可能であり、どの程度の折れ角であるかまでは把握できない。このような電極の直接的な接触は 13 層の構造で実現された例がある [64]。本質的には紙に導電性の物質が付随する、もしくは、小面が導電性の物質である設計で可能であるため、2 層もしくは 1 層での実装が可能であり、薄い構造への応用は可能である。

ここまででは、小面は紙などのセンサの性能をそれほど損なわない程度の厚さで作られた構造であった。ロボット自体がセンサとなりロボットの形状の変化がキャパシタンスの変化につながることを応用した、ロボットの状態の把握手法が提案されている [65]。4 カ所の折り目それぞれに、折れると抵抗値が小さくなるパターンを印刷することで、ロボット自体の抵抗値を測定してどの程度折れているのかを把握することが可能である。同様に、キャパシタンスが変化する電極配置・インダクタンスが変化する電極配置も可能である [65]。

この折り紙構造は、加熱すると収縮するポリ塩化ビニル (Poly-Vinyl Chloride, PVC) の両面に収縮しない材料の層を設けることで加熱を運動に変換している。ポリ塩化ビニルは 65 °C～75 °C で収縮する素材である [65]。しかし、加熱による温度上昇が続いた場合、100 °C で解け始めてしまう [66]。このように、ポリ塩化ビニルを用いた手法も過加熱に注意する必要があるため、角度の取得が必要とされた。

以上のように、折り紙ロボットの状態を把握するために、

- エンコーダや角度センサを用いた角度取得
- 導電インクの抵抗値の変化を用いた曲率センサ
- 導電流体の抵抗値の変化を用いた圧力センサ
- 赤外線 LED とフォトトランジスタによるフォトトランジスタの電圧の変化を用いた角度センサ
- 小面の電極パターンによる、抵抗・キャパシタンス・インダクタンスの変化を用いた角度センサ

脚注⁴PD 制御でバンバン制御を行っているため、オーバーシュートしないような調整の結果追従が遅いとも考えられる。

が提案されている。折り紙構造の軽さ・薄さという利点を損なわないという目的では、構造上に薄いセンサのみが存在しても問題ない。そしてこの条件では、エンコーダや角度センサを用いた角度取得と赤外線LEDとフォトトランジスタによる手法は適さない。また導電インクの抵抗値の変化を用いた曲率センサ・導電流体の抵抗値の変化を用いた圧力センサ・小面の電極パターンによる、抵抗・キャパシタンス・インダクタンスの変化を用いた角度センサは、それぞれの抵抗値などを他の計測機器で測定する必要がある。内外の状態を把握しながら動作する折り紙ロボットの設計には、この計測機器をロボットに搭載する必要がある。そしてそのような計測機器を含めた折り紙ロボットシステム全体を軽くて薄いシステムにすることを考えると、抵抗値の計測を行う集積回路の厚さが折り紙構造の利点を損ねてしまう。そこで、本研究では集積回路の昨日を含めた薄いセンサによる形状記憶合金・折り目の角度の制御を目指す。

3.2.3 薄い回路

カメラなどで遠隔監視をしない限り、折り目にセンサを搭載して折り紙ロボットの折り角を把握するシステムになる。そして、その折り角からアクチュエータまで信号・力を伝達するために導線が必要である。そのような回路を折り紙に搭載することを鑑み、薄いセンサだけでなく薄くて曲げられる回路も必要である。

薄い折り曲げられる回路は様々な材料で実現され、大量生産される製品内では珍しくない。そのため、本節では民生品で安価かつ容易に実装できる薄い回路についてまとめる。つまり、スマフォなどに搭載されている一般的なフレキシブル回路などの、一般人がすぐに作ることのできない回路は除いて紹介する。

Instant inkjet circuits

Instant inkjet circuits は、導電性インクを紙に印刷することで、その印刷された部分が導線として振る舞う性質を用いている [60]。任意の紙に印刷して導線として振る舞うわけではないが、Mitsubishi glossy paper や Kodak Premium Photo Paper に印刷することで、市販されているプリンタで導電パターンを高速かつ安価に製造できる [60]。折り紙と言う名の通り「紙」に導線を印刷できる技術であり、銀インクは印刷後数秒以内に導線として振る舞う。またインクジェット印刷以外にも、導電性インクをインクとして備えるペンを用いて手で線を引くことによって、導線を書くことも可能である。素子自体は後から乗せる必要があるが、面に対して垂直にのみ導通する導電性両面テープ (3M Electrically Conductive Adhesive Transfer Tape 9703) を用いて素子を搭載できる。この銀の薄膜は厚さ 300 nm であり、紙のコーティングが導通を促すことである程度の曲げ耐性を維持できる。

しかし導電性インクによる導線は抵抗は比較的大きく、印刷する紙の種類によって異なるが、印刷直後で $0.21 \Omega/\square \sim 1.3 \Omega/\square$ 、印刷の 10 時間後には $0.19 \Omega/\square \sim 0.28 \Omega/\square$ の抵抗が存在する^{脚注 5} [60]。抵抗がある導線では電圧降下が生じるため、導線としての性能は落ちる。しかし、細長い導電性インクパターンにより、抵抗を印刷できると捉えることで、この抵抗を活かすことも可能であり、線の太さを有効活用した手法はいくつもある [67, b2]。本研究でも抵抗付き自動折の手法でこの寄生抵抗を用いており、薄い抵抗を実現できる技術として有用であった。

銅テープによる回路

銅テープとは、薄い銅箔と（導電性の）粘着剤から構成されるテープである。銅の電気伝導度は非常に高く、 $1.68 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ である。 $5 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ に切り出したテープで実測した電気抵抗はマルチテスタの接触抵抗なども含めて 0.002Ω であった。銅の厚さは 0.035 mm であることから、銅単体での電気抵抗は $1.68 \times 10^{-8} \times \frac{0.15}{0.035 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-3}} = 144 \mu\Omega$ である。このように、銅テープの抵抗は非常に小さいため、導電性インクパターンでは生じた電圧降下をほぼ無視することができる。

また銅テープは市販品のハサミでも所望の形状に切断できる。導電性インクとは異なり、形状の変化によって抵抗を生じさせることは非常に細い銅テープを必要とし、手先の器用さを求めるなど困難であるが、導電性インクと同様に簡単に導線を作ることができる。銀インクは特殊なコーティングを施した紙に書くことによって導線が実現するが、銅テープは導電性の粘着剤で所望の材料に貼付できる。そのため、導電性インクによる導線に比べ、銅テープは基材の選択がより自由となり、プラスチックや木などにも回路を貼り付けられる。

銅テープを使った回路の例として、銅テープを紙に貼り、その上に銅テープと接続する素子を貼り付けることで回路を作成する技術がある [68]。この技術は、LED・センサ・マイコン・コネクタを銅テープに直接貼り付け可能な部品というモジュールにすることで、銅テープとこれらのモジュールで回路を作成できるようにしたツールキットである。また更に多くの素子などが用意されてきた [69]。

銅テープ自体を導線や抵抗として用いることが広く使われていることから、更にコイルを銅テープで作成する例がある一方、キャパシタとして用いる例は少ない [70, 71]。またコイルやキャパシタは厚さを持つ構造となって

^{脚注 5}ここで、 Ω/\square はシート抵抗であり、正方形形状の一辺と向かい合う辺の間の抵抗を表し、導電パターンの抵抗は、このシート抵抗のアスペクト比倍となる。

しまっている。そのような理由でコイルやキャパシタを銅テープで構築することはすくなく、単に導通関係のみを実装することが多い。

3.2.4 薄いアクチュエータ

薄いアクチュエータを用いることで、多数のアクチュエータが搭載されても薄さを損ねずに折り紙ロボットが実現できる。そして、薄いアクチュエータは軽い傾向にあるため、折り紙の軽い性質も損なわない。そこで、軽くて薄いアクチュエータを紹介する。

回転運動を行うためには、回転する軸と、その周りでトルクを生むための部品が必要である。そして、そのトルクは回転軸からの距離を乗じるパラメータであるため、ある程度の太さが必要となってしまう。そのため、このメカニズムで力を発生させるモータには円筒形状をしたものが多く、折り紙ロボットに搭載すると厚さを生じてしまう。さらに、磁力を用いているため、永久磁石や電磁石を搭載する必要があり、重量も増してしまった。

そこで、そのような回転運動ではなく、直進運動を行うようなアクチュエータを紹介する。直進運動を行うアクチュエータも、折り紙の折れ目付近に装着することで折り目を中心とした回転運動となる。このような装着は、薄さが問題となる完全に展開された状態や収縮された状態において薄く折り畳まれるため、厚さの問題は生じない。折り紙ロボットに搭載されている例としては、熱を用いたり、流体を注入したりすることによる体積変化による変形と、電流を流し、熱を発生させて形状記憶合金を変形させる変形の2手法が存在する。その2手法をここでは紹介する。

体積変化による変形

風船のような薄い膜の内側に空気を注入することで変形する構造により、薄いアクチュエータが可能である。空気を注入するための機械は必要であるが、空気の圧縮性を用いて形状変化に柔らかさを持たせる物が多い。また他に、空気を注入する必要のない、相転移を用いたアクチュエータも存在する。

場所により厚さ・剛性の異なる風船構造を用意し、その内部に空気を注入することで変形を生じさせるようなアクチュエータがある[72]。アクチュエータというよりも、骨格自体を変形させている手法であるが、アクチュエータとして利用可能である。厚い部材はあまり伸びず薄い部材は大きく伸びるため、圧力が均等にかかった場合に所望の形状となるように設計することで、空気の注入という1アクチュエータにより、複雑な動作が可能である。更に、この風船を折り紙構造のようにすることで、空気を注入する前の構造をより薄く実現している。文献[72]では、吉村パターンと呼ばれる折り紙構造が用いられており、円筒に似たな構造を平らに折り畳み、コンパクトな収納を可能としている。

このように折り紙構造を用いることで、全方向に等しく膨らむ単なる風船に比べて「一方向にのみ」大きく伸長するような構造が可能となる。文献[72]では、単に折り紙構造を使うだけではなく、外部に糊付けと紐付けを行うことにより更に変形を制限し、複雑な変形を実現している。糊付けは単にその部分の伸長を不可能とするが、紐付けによる拘束はある一定の距離までの伸長は自由であるが、その長さ以降は伸長を制約する動作を実現する。そのため、図3.2c)のように、途中までは円筒形状として伸長するが、紐が伸び切ってからは湾曲するようなアクチュエータも実現できる。糊・紐も軽い素材で実現できるため、糊・紐による重さの増加は無視できる。そして糊や紐は薄く実現できるため、これらの制約は厚さもほとんど増加させない。

しかしこのようなアクチュエータを動作させるために気体を外部から注入するには、ポンプのような比較的重くかさばるアクチュエータが外部に必要となる。そこで、薄膜に流体を包み、その薄膜の形状を変化させることでその密閉空間の長さを変化させるアクチュエータが開発された[73]。文献[73]で紹介されている、文献[74]以外のアクチュエータの動作は小さいが、軽さと薄さに比して強力な力を実現できるアクチュエータである。電極に電圧を印加することでそれらの電極が引き合い、引き合う力が働く狭い空間に流体が押し込まれる。すると、その薄膜はできるだけ長さを変えないまま、大きな体積を包もうとするため、球や円筒形状に近づく変形が生じる^{脚注6}。球や円筒形状となると長さが短くなる方向に動かしたい部品を装着することで直進運動を実現する

脚注6 球や円筒は表面積あたりの体積が大きな形状である。

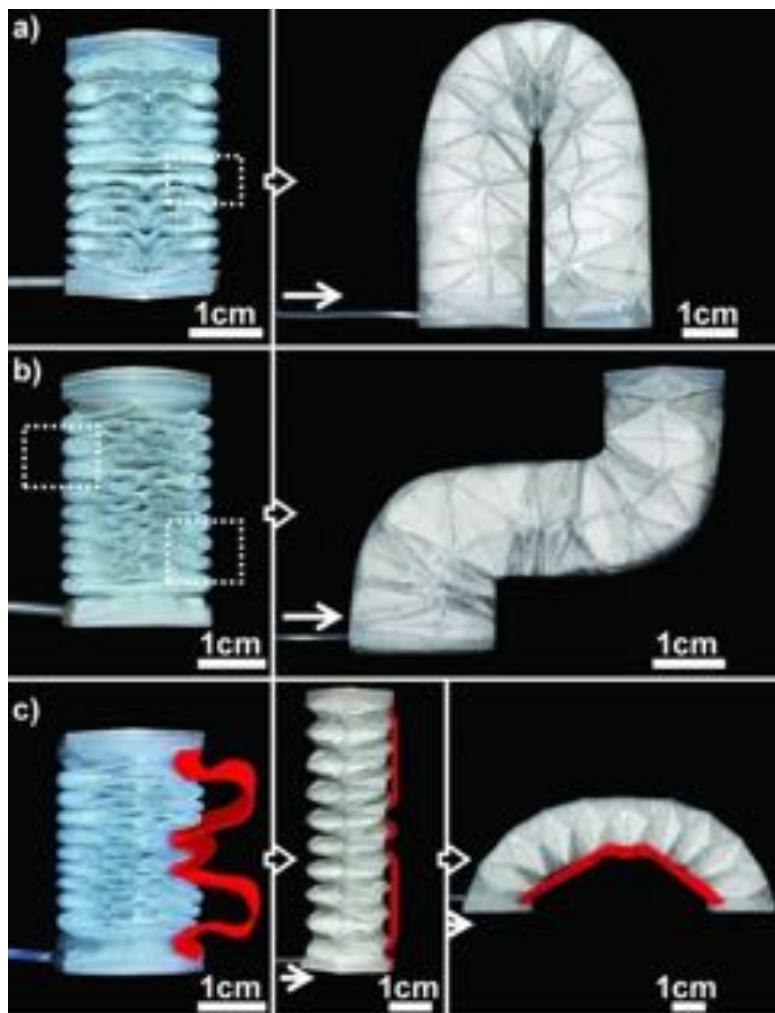


図 3.2: 折り紙構造に空気を注入することで膨張するアクチュエータ [72]。白い点線枠で示される部分には糊付けがされている。赤いひもは最大長さを制約する。

アクチュエータである。

しかしこれらの液体を包んだアクチュエータは、アクチュエータを動作させるために液体が必要である。そして、球や円筒形状の内部に液体が密閉される状態が動作範囲に存在するため、相当する量を密閉する必要がある。すると、重さも厚さも増加してしまい、軽いアクチュエータからも薄いアクチュエータからも離れてしまう。上記のようなアクチュエータは絶縁のために液体を用いているが、気体を用いることも可能であろう。しかし軽いアクチュエータは実現できるが薄いアクチュエータの実現は難しい。このような問題を解決したのがリキッドパウチモータと呼ばれる、低沸点液体を利用した相転移アクチュエータである [75, 76]。

リキッドパウチモータと呼ばれるアクチュエータは、薄膜に包まれた液体が気化することで動作するアクチュエータである。低い温度で気化する液体を入れたプラスチックフィルムの袋を加熱することで液体を気化させ、その体積変化によって球や円筒形状に近づく変形が生じる。そして文献 [74] と同様に直進運動が実現できる。そのため、電極に電圧を印加させることによる、液体を液体のまま用いるアクチュエータより軽くて薄い構造で、同じ変化を実現できる。このアクチュエータに関しても、片側のプラスチックフィルムを厚くすることで片側に力がかかるようにすることができる。

Felton らの折り紙ロボットは、動作後に焦げ目がついているため、このような熱で動くアクチュエータを用いていると推測できる。加熱には、電熱線を用いる手法が多いが、渦電流を利用した駆動なども可能である。

形状記憶合金を用いたアクチュエータ

形状記憶合金とは、加熱すると記憶した形状に戻る性質を持った合金である。熱を加えることによって形状が変化する性質を用いて、アクチュエータとして用いることができる。

他のアクチュエータは多数の部品が組み合わさってアクチュエータとしてはたらくが、形状記憶合金は、材料そのものが変形するため、微小なアクチュエータを実現できる。しかし形状記憶合金は大変形ができないため、アクチュエータとして用いる場合にはバネ状の形状記憶合金を用い、バネとしての伸び縮みによって直進運動を実現する例が多い^{脚注7}。ただし、形状記憶合金は「記憶された形状に戻る」という性質であるため、一度記憶された形状に戻ってしまうと、そこから他の力を与えなければ、その他の形状には変化できない。そこで何度も動かす場所では、形状記憶合金を拮抗筋のように配線することで形状記憶合金を変形させるなどの工夫が必要である。

形状記憶合金での変形は微小であるが、折り紙構造と組み合わせ、てこの原理を用いて変形を増幅できる。また形状記憶合金の記憶した形状の長さと異なる自然長をもつバネを同一力所に付けることで、形状記憶合金が駆動している場合には形状記憶合金の記憶した形状の長さに変化し、形状記憶合金が駆動していない場合にはバネの自然長に変化するアクチュエータが実現できる。このように形状記憶合金をバネと組み合わせることで形状変化の繰り返しも実現し、小型なアクチュエータとして用いられている[77]。また折り角度も、記憶された角度に戻るため、紐状ではなく板状の形状記憶合金を用いる手法もある[78]。

次に形状記憶合金の駆動手法について述べる。形状記憶合金を熱するためには、環境の温度を上げる自明な手法もあるが、内部から加熱する手法もある。その中でも、形状記憶合金を導線として用いることで、導線（形状記憶合金）に電流が流れた際に導線が収縮するというアクチュエータが多い。形状記憶合金がコイル状になっている場合、材料の変形に比べて長さの変化が大きいため、変位の大きい駆動を実現する形状記憶合金はコイル状になっていることが多く、形状を復元できる長さの変形を3倍程度まで稼ぐことが可能である。

特に導線を形状記憶合金で作成した場合には、形状記憶合金の加熱は高速に行える。そのため、形状記憶合金を搭載した空中に飛び上がるロボットさえ存在する[79]。ただし多くの場合形状記憶合金の冷却は自然冷却に頼り、形状記憶合金の周辺は空気であることが多いために形状記憶合金の冷却には時間がかかる。そのため、特に高速な動作が必要な場合には形状記憶合金を拮抗筋のように配線することが望まれる。更に、自然空冷は外気温や風速によって冷却速度が変わり、温度制御が難しいため、形状の精密な制御も難しくする。形状記憶合金はその形状変化によって電気抵抗をほとんど変化させず、また変化量と与えた電圧との関係は非常に急峻な部分を持ち、電圧によって変化量を制御することも難しい。形状変化と電気抵抗の関係については付録??で実験とその結果を用いて詳しく説明する。印加電圧と形状変化の関係については付録??で実験とその結果を用いて詳しく説明する。

形状記憶合金の状態を形状記憶合金の電気的状態から把握することが難しいため、外部に何らかのセンサを必要とする。しかし外部のセンサは第3.2.2節で述べたように厚さの増加につながる。そこで、平らな回路である銅テープを用い、導線を構築するとともに形状記憶合金の角度の制御を行った。

また形状記憶合金を冷やしすぎたり熱しすぎたりすることで形状記憶合金が形状記憶効果を失うため、温度制御も必要である。本研究においても熱しすぎることで煙が出て復元しなくなった実験がいくつか存在する。

脚注7 この伸び縮みは全体の変形量に比べて材料自体の変形が少ない。

3.2.5 論理式の簡単化と物理的な実装

本第3章では銅テープをセンサとして用いるだけではなく論理回路としても用いるため、論理式についても紹介する。一般的な論理式については省略し、今回の銅テープ構造に必要な論理式の簡単化と、論理回路を物理的に実装してきた例に重点を置く。

今回扱う論理式の簡単化にはカルノー図を用いた簡単化を用いた[80]。カルノー図を用いた簡単化は、人間が紙面上で行う論理式の簡単化に用いられる最も一般的な簡単化である。この簡単化は、それぞれの状態を格子状に並べ、それぞれのマスに出力状態を書くことで行う簡単化である。論理回路はある入力変数の状態が異なっていても同じ状態を出力する場合、その異なる変数を無視した論理回路を出力できる。カルノー図は隣り合うマスは変数の状態が1つだけ異なる状態同士である性質を持つため、このような変数の除去を視覚的かつ効率的に行える。カルノー図を用いた簡単化には、出力が1である状態に着目して積和標準形を構築する手法と、出力が0である状態に着目して和積標準形を構築する手法がある。しかしあともとはカルノー図は積和標準形で構築する手法を紹介しており、個人的にも積和標準形を用いる手法が直感的な手法であると感じる。

そしてカルノー図を用いる簡単化のみが本論と関係するわけではない。文献[80]の図12や図15で述べられているように、この手法では簡単化した論理式を導通関係で表すことに重点を置いている。文献[80]の図15は4入力5出力の回路であり、それぞれを簡略化するだけでなく異なる出力に対しても使い回せる部分を最大限使い回しているために非常に見づらくなっている脚注⁸が、積和標準形をカルノー図を用いて導出した後、MAKEとBREAKで示されるリテラルと配線とを用いて所望の論理回路を構築している。論理式の構成を最小にすることに重点を置いていないため、本論文では文献[80]の図9で述べられている井形の手法は用いていない。

この配線は、カルノー図を用いた簡単化が「導通」に使われた例であり、カルノー図を用いた簡単化は「導通」関係に特化している例でもある。また積和標準形において、リテラルではない論理式の否定は現れないために、「導通」を信号・状態として用いる回路においてはこの簡単化が望ましい。カルノー図は隣り合うマスは変数の状態が1つだけ異なる状態同士である事により、Veitch(ベイチ)図[81]を用いる手法に比べて積和標準形を簡単化しやすく、リテラルの削減に効果的であるためにもカルノー図を用いた簡単化を本論文では採用した。

これらの簡単化は、単に設計した状態での出力を効率的に簡単化するだけでなく、出力が設計されていない状態をうまく使うことによって簡単化を行っている。特にこれらの図を用いた簡単化ではd^{脚注⁹や×で表されるドントケアを簡単化に都合が良いように0もしくは1をそれぞれの状態に割り当てる。この適宜行われる0もしくは1の割り当てが、付録??で着目する設計外の動きを決定することになる。}

本稿で扱う論理回路はリテラル（入力変数とその否定）と論理積と論理和のみへと制限したが、NANDゲートのみで論理回路の完備性を持つことから、論理回路を最小のNAND素子のみに限って実現すること[82]や、自動論理合成システムにおいてNANDのみでの実装[83]が行われており、一部の素子のみでの実装は珍しくない。

リレーとスイッチによる論理回路

本稿で行ったリテラルと論理積と論理和への制限はリレーとスイッチで構成できる回路と等価である。論理回路をリレーとスイッチで物理的に実現できることは古くから知られており、現代の高速な論理演算器を実現するために必要不可欠な技術であった[84]。そしてその文献[84]内では、closed circuit(導通)が0に対応し、open circuit(断線)が1に対応している。そして、並列接続が論理積に対応し、直列接続が論理和に対応している。本論文では導通状態を1に対応させ、断線状態を0に対応させているが、この対応では論理和を並列接続に、論理積を直列接続に対応させることでブール代数と対応する。

例えば論文[84]では1と0の論理和がopen circuitとclosed circuitの直列接続はopen circuitとなるため $1+0=1$ が成立するとしているが、本論文ではその回路を $0 \cdot 1 = 0$ として解釈する。これらはそれぞれnegative logic polarityとpositive logic polarityと呼ばれる対応であり、値と演算の両方を反転するだけで得られる対応である。これがブール代数の双対性であり、文献[84]の公理を本論文に対応する形で書くと表3.1となる。ここで、

脚注⁸電流が逆走しないような工夫が重要であり、本論文で紹介する回路でも同様の工夫が必要である。

脚注⁹don't careの頭文字

表 3.1: 銅テープ回路の公理

- | | | |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| 1. | a. $0 \cdot 0 = 0$ | 断線状態と断線状態の直列接続は断線状態である。 |
| b. $1 + 1 = 1$ | 導通状態と導通状態の並列接続は導通状態である。 | |
| 2. | a. $1 + 0 = 0 + 1 = 1$ | 導通状態と断線状態の並列接続は導通状態である。 |
| b. $0 \cdot 1 = 1 \cdot 0 = 0$ | 断線状態と導通状態の直列接続は断線状態である。 | |
| 3. | a. $0 + 0 = 0$ | 断線状態と断線状態の並列接続は断線状態である。 |
| b. $1 \cdot 1 = 1$ | 導通状態と導通状態の直列接続は導通状態である。 | |
| 4. | | 任意の時刻において各変数 X は 0 または 1 の状態である。 |

その双対性が a. と b. となるような対応が行われている。このような正論理の回路もすでに広く用いられており、並列接続と直列接続の対応は本論文と一致している [85]。

今回提案する銅テープ回路は、本節のほとんどにおいて論理式の否定ができない物として扱われる。このような NOT ゲートがないブール回路は単調回路 (monotone circuit) と呼ばれており、回路計算量の分野で研究されている。特に、クリークの分野 [86, 87] や、単調回路に限らない回路と単調回路に制限した回路は指數関数的な差があることを示す論文で用いられた [88]。これらの研究により、単調回路は n 変数クリーク関数^{脚注 10}を計算するために必要な論理ゲートが $O(e^n)$ となることが示されてきた。また NOT ゲートの数を 0 に制限するのではなく、有限個に限定した回路についての研究も存在する [89]。例えば、NOT ゲート 2 個のみで、3 個の変数のそれぞれの否定が図 3.3 のように実現可能である。この論理回路は、3 変数の否定であるために「1」の数が 0 個の場合と

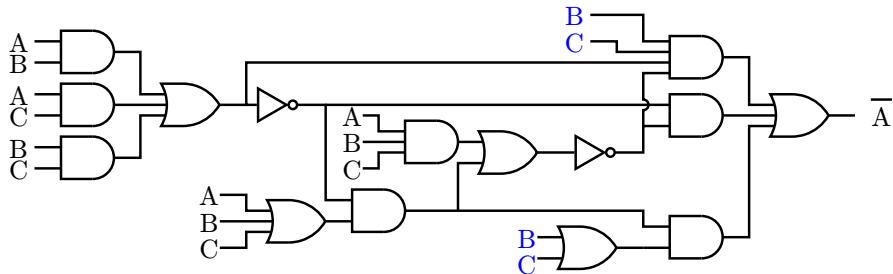


図 3.3: NOT ゲート 2 個のみで $\neg A$ と $\neg B$ と $\neg C$ を実現する回路の一部。黒色の部分は $\neg A$ と $\neg B$ と $\neg C$ で共通であり、青文字で示した部分を A と C にすれば $\neg B$ が、青文字で示した部分を A と B にすれば $\neg C$ が実現する。

1 個の場合と 2 個の場合と 3 個の場合の 4 集合に分割して実現している。同様に、このような手法を用いることで、それぞれの変数の否定を出力する論理回路を実現することができ、NOT ゲートの数は確かに削減できる。この手法を用いることで n 変数のそれぞれの否定を $\log_2(n+1)$ 個の NOT ゲートで実現できる利点がある一方で、論理回路の直列接続の数は $O(\log(n))$ 、全体の論理演算数は $O(n \log(n))$ と増加する [90]。更に複雑な回路を考えることで、NOT ゲートの数を $\log^{1+o(1)} n$ 、深さ $\log^{1+o(1)} n$ 、論理演算数 $O(n)$ の回路も可能である事さえ知られている [91]。本第 3 章で紹介する銅テープ回路はこのような変数の否定さえできない分野とは厳密には異なるが、NOT ゲートの削減にはこれらの結果は有用である。

この単調回路はデジタル回路の非常に制限された回路モデルである一方で、論理式も非常に制限された回路モデルである。例えば回路モデルとしてみた場合には論理式はファンアウト数を 1 に制限されており、その制限により回路図に比べて非常に長い式となる場合もある。単調回路の回路計算量は、下界が指數関数的であることが知られている一方で、論理式の回路計算量の下界は $\Omega(n^{3-o(1)})$ であり、下界であるとは言え非常に小さく見積もられている [92]。

従来の研究で今回の銅テープ回路と似た実装である物に、ラダーロジック [93] などが存在する。ラダーロジックはリレーの接点とコイルで論理回路を記述する手法である。ラダーロジックのコイルは 2 本の母線が電源線とグラウンド線に対応し、リレー接点が導通を制御することでコイルの動作を変化させる。そして本論文との対応

脚注 10 クリーク関数とは、そのグラフの中にクリークが含まれているならば 0 を、含まれていないならば 1 を取る関数である。

は、ラダーロジックのリレーが折れているかを判定するスイッチに、コイルが形状記憶合金の動作に対応する。本来のラダーロジックは論理回路を実際にリレーで動作させていたが、実際にラダーが動く回路としてだけでなく、プログラマブルロジックコントローラのプログラム言語でもある。本論文で扱う銅テープ回路と同じく、ラダーロジックも論理式の否定を1素子で実現できない性質を持つ。

ただし銅テープ回路と異なる性質も持つ。例えば、ラダーロジックは特にプログラム言語として見なす場合そのリレー接点とコイルの動作は上から下へ、左から右へと順序だって更新されることで処理が行われる仕様であり、実際のリレーやコイルの動作とは異なる性質を持つ。一方銅テープ回路は非同期回路であり、全てのセンサと全てのアクチュエータが同時に状態を更新する場合も考える必要がある。

このような物体の移動を用いた回路には、流体を用いた手法[94]もある。導電性流体を管中に注入し、空気の流入によって管内の導電性流体の位置を制御する。導電性流体が電極間にある場合にのみ電流が流れため、環状の管内に導電性流体を流し続けるだけで繰り返し制御が可能となる。本論文に対応させるならば、導通パターンを実装した銅テープを1個のアクチュエータで回転させることで繰り返し制御が可能となるだろう。本第3章では銅テープ回路の薄さを追求しており、そのアクチュエータの搭載さえ許さない物であるため行わない。

またより明示的に物理的な移動などが対応する物には、ビリヤードボールコンピュータなどがある[95, 96]。ビリヤードボールコンピュータは、ボールの存在と非存在が1と0を表す論理回路であり、理想的なボールが摩擦のない空間を完全弾性衝突するモデルで論理回路を構成する。ビリヤードボールAとビリヤードボールBを（もしビリヤードボールが両方共に存在すれば）衝突するように運動させることで、それぞれの経路上にビリヤードボールが流れるかが $\neg A \cdot B$ と $A \cdot \neg B$ に対応する。ビリヤードボールコンピュータではAND回路とNOT回路を構成でき、チューリング完全性を有する。

実世界に論理回路が存在する以上、論理回路は物理的に構成可能である。現在ではトランジスタで構成される論理回路が多いが、歴史的にはこれらのような物理的な接触を用いた論理回路が存在していた。本第3章で紹介する銅テープ回路はこれらのような物理的な接触を用いる物であり、そして電圧の高低ではなく導通と断線を用いる論理であるため、これらの時代に行われた様々な工夫を参考することで構築が効率的であった。

組み合わせ回路とハザード

本論文における銅テープ回路は、センサであると共に駆動回路である。これは、銅テープ回路が入力でもあり出力でもあることに対応する。そこで、本3.2.5節では組み合わせ回路の出力を自分自身の入力とする話について説明する。組み合わせ回路の出力の一部を自分自身の入力とする回路は存在した。それらの多くは、従来の組み合わせ回路において出力を入力に戻すこと自体を目的とした物ではなく、回路の計算量つまり回路の規模を小さくしたままで複雑な計算を行おうとしたために生まれた回路である。

例えば、1ビットの全加算機を n 個組み合わせることで n ビットの全加算機を構成できる性質は元から知られており、そのような構成を可能にするために全加算機は繰り上がりのビットを持つだけでなく、入力を3個有する。しかし、この構成は計算するビット数が増加する度に回路が複雑になり、線形な増加ではあるが回路設計の段階で計算できるビット数が制限されてしまう欠点を持つ。

しかし、もし全加算機の出力の1個である繰り上がりのビットを、次の時刻の入力の1個とすることができるばこの問題を解決できる。全加算機を組み合わせた n ビットの加算では2個の数字の加算を扱い、問題を分割すると各桁とそれぞれの繰り上がりのみの計算である。ここで、上位ビットの計算結果は下位ビットの計算結果に影響を与えないため、下位ビットから順に1ビットずつ全加算機を用いて計算すればよく、その計算には同じ全加算機を使い回す設計が可能である。この構成での加算機を直列加算機(Serial binary adder)と呼び、全加算機を1個しか用いなくとも n ビットの加算を実現する[97]。この手法では同じ加算機を何度も使い回すことになるためかだかビット数に比例する時間だけ計算に時間がかかるが、そもそも n 回の繰り上がりを待つ時間がこれに相当するため問題ない。

このような回路を同期回路で設計すると、出力がいつ入力に返ってくるかがわからなくなるために不安定な出力となってしまう。そのため、一般的にこのような回路は同期回路であり、出力を入力へ戻す際にはメモリ等の働きを示すラッチ回路などに一度状態を記憶させる。しかし本論文で紹介する同テープ回路はこのようなメモリを

実装しないため、非同期回路として出力を入力へと返す状態で考えることとなる。

非同期回路でも、図 3.4 のように出力の一部を入力の一部とする回路が存在していた [98]。そしてこのよう

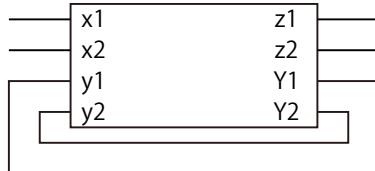


図 3.4: 一般の順序回路。外部からの入力を x 、内部からの入力を y 、内部への出力を Y 、外部への出力を z としている [98]。

な回路では、ハザードと呼ばれる欠陥を考える必要がある。ハザードには入力が 1 個しか変化していない場合 (single-unput-change) に論理ゲートの遅延によって引き起こされる論理ハザードと呼ばれるハザードと、入力が複数個同時に変化する場合 (multiple-input-change) に生じる機能ハザードと呼ばれるハザードが存在する。このようなハザードが存在する場合には、意図しない出力が短時間出力される場合があるため、意図しない出力を解消する工夫がいくつも考案されているため、これらを紹介する。

論理ハザードの解消には、冗長な項を追加する手法が存在する [99]。一般的なカルノー図を用いた簡単化の際には、長方形で出力が 1 である領域を囲むことで簡単化を行い、その長方形の領域の数は少ないほど良いとされる。そのため、一般的には図 3.5 の左図のような簡単化が行われ、ハザードが生じる可能性が残る。図 3.5 の左図では、2 個の長方形の領域が存在し、それぞれが $A\bar{C}$ と BC を意味する。

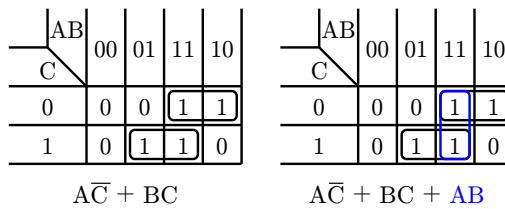


図 3.5: 冗長な長方形の領域の追加による論理ハザードの解消 [99]。左図のような長方形の領域の数が最小となる簡単化ではなく、右図のようにあえて長方形の領域 AB を追加することで、ハザードを解消する。

図 3.5 の左図のような簡単化を行った場合に、 $A = 1$ 、 $B = 1$ 、 $C = 0$ の状態から、 C の状態のみが $C = 1$ へと遷移する場合を考える。この遷移において、瞬間に C の出力と \bar{C} の出力がともに 0 であれば、その瞬間 $A\bar{C}$ と BC が共に 0 となってしまう。そのため、論理式 $A\bar{C} + BC = 0 + 0 = 0$ となり、出力が 0 となってしまう。しかしこの遷移は、1 を出力する状態から 1 を出力する状態への遷移であるため、途中で 0 を瞬間に出力してしまうことは望ましくない。これがハザードであり、ハザードの解消はこの遷移を 0 の出力なしに安全に行う設計である。

ハザードの解消のために、あえて冗長な長方形の領域である AB を図 3.5 の右図の青い長方形のように追加する。 $A\bar{C}$ と BC が共に 0 を出力したとしても AB は問題なく 1 を出力するため、 C の遷移によって出力が 0 となることはない。先ほど 0 を出力してしまった瞬間の状態を論理式で表すと、 $A\bar{C} + BC + AB = 0 + 0 + 1 = 1$ である。このような遷移中に通りうる状態を囲む長方形の集合を用いた設計によって、ハザードの解消が実現できる。特に、今回扱う銅テープ回路のような物理的な実装においては、そもそも AB は C の状態を観測しているわけではないため、 C の遷移によって出力が変わることがない。そのため、以上のような解決は流用可能である。

本第3章で扱う制御は形状記憶合金の制御に用いる制御が多く、形状記憶合金の動作は非常に遅いため、デジタル回路では一瞬であるような間違った出力が長時間保持されやすい。そのため、形状記憶合金の動作に合わせ、このような動作が生じないようにする必要が強まる。本節では、形状記憶合金の動作の遅さを問題にして、付録 ?? 節で長時間間違った出力をしないような折り紙構造によるハザードの解消を紹介する。このハザードについては、入力が 1 個しか変化していない場合のみを考えているため、ポテンシャルエネルギーを用いた設計による論理ハザードの解消といえよう。

次に、機能ハザードも解消する。機能ハザードは入力が複数個同時に変化する場合のハザードであるが、より広く考え、外乱などにより設計外の状態へと遷移してしまった場合についても考える。機能ハザードについても論理ハザードの解消と同様にカルノー図を用いた簡単化において、図 3.6 のような長方形とそれに対応する回路の追加により実現できる。

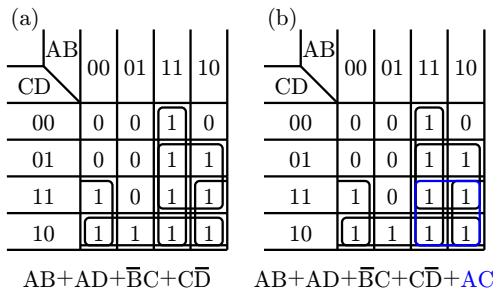


図 3.6: 冗長な長方形の領域の追加による機能ハザードの解消 [85]。(a) に示す長方形の領域の数が最小となる簡単化ではなく、(b) のようにあえて青色の長方形の領域を追加することで、ハザードを解消する。

図 3.6 の (a) は全ての 1 である状態を含む。そして、1 を出力する状態 1010 から 1 を出力する状態 1111 への遷移では状態 1011 を経由した遷移でも状態 1110 を経由した遷移でも 1 を出力し続けるような論理ハザードの解消も行われている。しかし、状態 1010 から状態 1111 への遷移において遷移する、B と D の状態が「共に」不安定になった場合の出力が保証されていない。このような場合には、同時に B と D が遷移することにより出力が不安定にならないように、AC の項を追加することで状態 1010 から状態 1111 への遷移や、状態 1110 から状態 1011 への遷移において 1 を出力し続ける保証が得られる。

このような複数個の入力が同時に変わりうる場合のハザードに対して、常に簡単化での長方形の領域をできるだけ大きくすることで解決できるわけではない^{脚注 11}。そのため非常に難しい計算が必要となるため、任意の状態遷移を行ってしまった場合についての考察を付録??で行う。本第 3 章の多くは繰り返し動作を扱うため、繰り返し動作の経路に復帰するか否かについて述べる。

これは、繰り返し動作に限らないならば、レース (race) と呼ばれる問題である。レースとは、複数の出力を変化させなければいけない場合に、どちらかの状態を先に変化させてしまうことにより複数の出力を変化させた状態以外で安定する状態である。このようなレースは内部状態だけでなく、図 3.4 のような外部の状態をもつ論理回路にも存在し、繰り返し動作に限らない論理回路について知られている問題である。複数の出力をどのような順序で変化させても目的の変化を遂行できる場合にはそのレースを noncritical race (致命的でないレース) と呼び重要視しない。しかし、あり得る順序の一部または全部が変化の途中で目的の状態以外で安定してしまう場合は、そのレースを critical race と呼び重要視する。そしてさらに、目的の状態以外で安定するのではなく、変化に安定状態を持たない物さえ存在しうる。ハザードやレースとしてこの問題を見る場合にはこのような不安定な状態を遷移し続ける状態は避けるべき経路である。

不安定な状態を遷移し続ける状態は、繰り返し動作である。そして、折り紙ロボットを繰り返し動作のように動かしたい際にはこの動作を有効活用できる。今回はこの不安定な状態を遷移し続ける状態を用いて、論理回路と折り紙ロボットの繰り返し動作を実現する。入力は折り紙の状態とし、出力はアクチュエータのスイッチングとして用いる銅テープの不安定な状態の遷移によって、アクチュエータの繰り返し動作を実現する。

脚注 11 詳細は文献 [85] の図 11.5 を参照

3.2.6 排他的論理和の物理的な実装

本第3章で中心的に扱う銅テープ回路は積和標準形で構成した回路である。しかし、積和標準形では表現が長くなり、銅テープ回路の構造が複雑かつ巨大となってしまう排他的論理和を含む回路については特別に排他的論理和ユニットを用いた設計についても本論文で述べる。そのため、排他的論理和を物理的な実装により実現した従来の構造についても紹介する。

排他的論理和は「どれか1個の入力を反転した場合に、出力も反転する」性質を用いることがある。この性質はしばしば3路スイッチによる配線で実装され、2カ所のスイッチで1個^{脚注12}の出力を反転させる電灯のスイッチングを実現している。例えば、長い廊下ではその両端に電灯のスイッチを設置することで、どちらから廊下を通過する人も廊下に入った際に電灯を点け、廊下を通り終わったときに電灯を消すことができる。また同様なスイッチ構造は階段にもしばしば用いられる。

このような3路スイッチでは、スイッチ自体をバイステーブル構造にすることで、どちらのスイッチを押しても出力が切り替わる状態を維持している。逆に、バイステーブル構造でないとすれば、片方のスイッチが図3.5のCのようにCも \bar{C} も0であるような状態になってしまい、もう片方のスイッチの状態に依らず0を出力する。このような0を固定してしまうような状態を避ける1つの手法として、スイッチがどちらか片側に倒れている状態が安定状態であり、スイッチを中間状態で維持することが難しい機構とする手法がある。

そして、3路スイッチを2個組み合わせたような4路スイッチも存在する。4路スイッチとは、2入力2出力の端子を持つスイッチであり、スイッチを切り替える度に入力側の端子とつながる出力側の端子が入れ替わるスイッチである。図3.7のように{I1とO1が接続、I2とO2が接続}されているような状態が、{I1とO2が接続、I2とO1が接続}されている状態に切り替わるスイッチである。

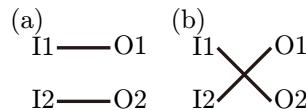


図3.7: 4路スイッチの2状態。(a)では内部で平行になるような接続が行われ、スイッチを押す/切り替えることで(b)の状態へと切り替わる。(b)の状態では内部で交わるような接続が行われ、スイッチを押す/切り替えることで(a)の状態へと切り替わる。

4路スイッチを用いることで、3カ所以上のスイッチがどのスイッチを押しても状態を切り替えるスイッチとして働く回路が構成できる。また他の手法にも、スイッチを押す度に内部の状態が切り替わるオルタネイト動作のスイッチを応用した手法がある。オルタネイト動作とは、一度ボタンを押すとオン状態を保持し、もう一度ボタンを押すことでオフ状態を保持するスイッチである。ボタンを押している間だけオン状態を保持するモーメンタリ動作と異なる。

またスイッチの接触形式としては、「c接点」と呼ばれる形式に対応する[100]。スイッチのc接点は、スイッチのa接点とb接点の両者を持つ構造である。スイッチのa接点は、共通端子のCOM、ノーマリーオープンのNOの2端子を持つスイッチであり、スイッチを押している間だけ導通する構造である。そして、スイッチのb接点はCOM、ノーマリークローズのNCの2端子を持つスイッチであり、スイッチを押している間だけ導通しない構造である。そしてc接点はCOM、NO、NCからなり、ボタンが押されている間はCOMとNOが、ボタンが押されていない間はCOMとNCが導通する構成である^{脚注13}。3路スイッチとc接点スイッチに共通する構造は、2個の状態を安定状態とし、遷移する短い時間以外はどちらかの状態を取る構造である。

厳密には片方の導通が生じた場合にはもう片方が導通しておらず、片方が導通していない場合にはもう片方が導通している状態が望ましい。そのようなAと $\neg A$ に対応するスイッチは、接点構成のc接点よりむしろ1a1b接点に相当する^{脚注14}。本節では、1a1b接点のように、同時に状態を切り替える銅テープ構造が望ましいと考える。

脚注12複数の同期する出力でも良い

脚注13リレーとして見る場合、コイルが励磁している間である。

脚注141a1bと違ってcは両方導通しない状態を持つ。

3.3 提案する銅テープ論理回路

本第3章で提案するのは、折り紙ロボットの状態を入力とし、導通状態を出力とする、軽くて薄い（平坦な）銅テープ構造で実現する論理回路である。電源の形状記憶合金とその論理回路を正極と負極の間に直列接続することで、折り紙ロボットが特定の状態である場合にのみ、論理回路が形状記憶合金に対して導通の形で1を出力し、その形状記憶合金を駆動することができる。論理回路は銅テープの接触・非接触で状態を入れ替えるため非線形・不連続な制御が可能となる。

銅テープ自体が論理回路となっており、その論理回路の出力が導通・断線であり、その出力は直接形状記憶合金にかかる電圧とする回路を提案する。つまり、センサの値をマイコンなどの集積回路で読み出す必要がなく、直接形状記憶合金の駆動につなげる。この回路により、厚みを持つ集積回路を必要としない、軽くて薄い折り紙ロボットが実現できる。

3.3.1 基礎構造

銅テープは電気を流す。銅テープで論理回路を実装するため、折れ線の状態に対応する変数と、その変数に対する

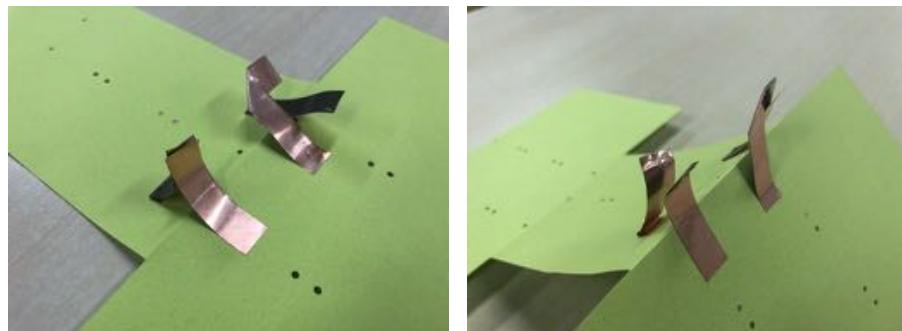


図 3.8: 段ボールの貼付された電気を流す銅テープ。電気を流す銅テープを紙に貼ることで、導線として用いることができる。また、5 m で 6.79 g であった。脚注 15

る二項演算構造を提案することで論理回路の提案とする。それぞれの折れ線に対して、折れていない状態で0（絶縁）であり、折れている状態で1（導通）である変数を考え、その変数をAとする。具体的には、A, $\neg A$ (not A), AND, OR の4つの構造を基礎構造として提案する。

リテラル

まず、折れ線の状態を導通・絶縁に対応させる構造である、Aと $\neg A$ を図3.9に示す。図3.9(a)が、折れ線が



(a) expanded state

(b) folded state

図 3.9: 折れ線の状態を導通・絶縁に対応させる構造。奥の構造がA、手前の構造が $\neg A$ である。折れ目が折れていない状態では手前の銅テープのみが接触して導通状態になり、折れ目が折れている状態では奥野銅テープのみが接触して導通状態になる。

折れていない状態での、図3.9(b)が折れ線が折れている状態での銅テープ構造の状態である。奥に実装された銅テープ構造は折れていない状態で互いに接触していないため0(絶縁)の状態であり、折れている状態では互いに接触しているため1(導通)の状態である。逆に、手前に実装された銅テープ構造は折れていない状態で互いに接触しているため1(導通)の状態であり、折れている状態では互いに接触していないため0(絶縁)の状態である。このような構造により、折れている状態でのみ導通するスイッチであるAと折れていない状態でのみ導通するスイッチである $\neg A$ が実装できる。

本第3章は、薄くて軽いロボットを目指した研究である。それは、薄くて軽い材料で作られたロボットではなく、完成された形状が薄くて軽い状態であることも必要である。そこで、折り紙ロボットを折りたたんだ場合でも、銅テープの構造が破壊されないこと、つまり、折りたたんだ後に展開することで銅テープの構造は必要な形状に戻る性質が必要である。また折り紙ロボットよりも外側に飛び出してしまうと、仮令その構造が平坦であっても、飛び出す量などを鑑みて折り紙構造を設計する必要が生じる。そこで、折りたたんだ際にも内側にたたまれる構造、少なくとも平坦に押しつぶされても銅テープ回路としての機能を失わない構造が必要である。そこで、図3.9のような、内側に折りたたまれることで飛びなさない構造で折り目の状態を把握する構造も提案する。図

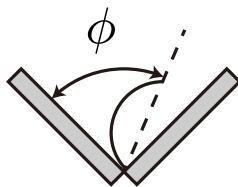


図3.10: 内側に折り込まれることで飛び出さないスイッチの例。灰色の四角は基材(紙)を表し、黒色の弧が銅テープ構造である。角度が ϕ 以下になると黒色の弧で表される構造が右の紙に張られた銅テープと接触し、導通する。

3.9の構造は、角度が ϕ 以下になると黒色の弧で表される構造が紙に張られた銅テープと接触し、導通する。角度が ϕ より大きくなると黒色の弧で表される構造が紙に張られた銅テープと離れ、導通状態が終わる。そしてこの構造は押しつぶされた際に全体的に負荷を分散させる。その結果、押しつぶされた際にも元に戻りやすい。この構造は右側の紙に対して銅テープを一面に貼ることで実現可能であり、角度が ϕ 以下になると接触により導通する構造である^{脚注16}。

この構造は、右側の紙に貼付された銅テープと接触する位置が変化しながら折れ角が小さくなっていた^{脚注17}。そのため、折れ角が小さい場合に接触している場所では導通しないような構造を設計すれば、折れている状態で断線する $\neg A$ に対応する構造が実現できる。図3.11がその例である。黒色の弧で示した銅テープ部分は図3.10と同様の構造であるが、右側の紙に貼付された銅テープのパターンが異なる。このような構造では、図3.11(a)のよ

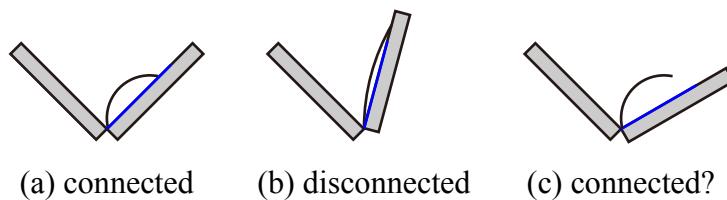


図3.11: 内側に折り込まれることで飛び出さない、展開時に導通する構造。青色の線の部分にのみ銅テープが貼ってあれば、折れていない状態では(a)のように接触し、折れている状態では(b)のように接触が解除される。ただし、十分折れ角が大きくなった場合には(c)のように再度接触が解除される可能性もある。

うな折れていない状態で導通する性質と、図3.11(b)のような折れている状態で導通しない性質を持つ。しかし図3.11(c)のように十分展開された状態では、導通状態が維持されない問題がある。ちなみに図3.12のように、折れ

脚注16 折れてゆくにつれて接触場所が変わる。

脚注17 折れ角が小さい状態が折れている状態である。

ている場合に導通する構造では、十分展開している状態では断線している状態が望ましい状態であるため、このような問題はない。これらの構造は、右側の紙に貼られた銅テープのパターンを複雑にすることで、しきい値を

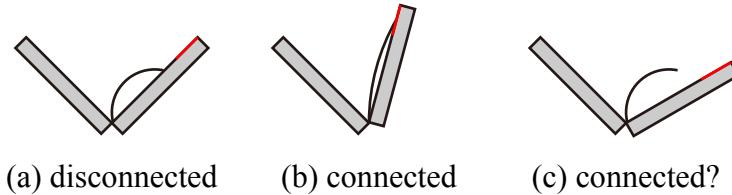


図 3.12: 内側に折り込まれることで飛び出さない、図 3.11 と同じ考え方による、折れている状態で導通する構造。赤色の部分と接触することで導通する。

複数設定できる利点を持つ。

そこで提案している構造が図 3.13 である。今までの構造とは異なり、図 3.9 のように銅テープが異なる奥行き

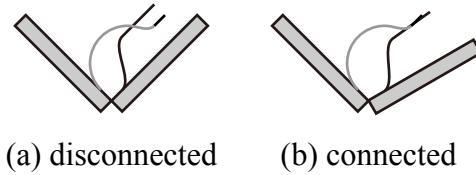


図 3.13: 内側に折り込まれることで飛び出さない、折れていない状態で導通する構造。灰色の部分は手前若しくは奥に銅テープがあり灰色の線で表された銅テープと黒色の線で表された銅テープ同士は接触しない。黒色の線で表された銅テープ同士は同じ奥行き上にあるため接触する。

に存在している構造である。灰色の部分は手前若しくは奥に銅テープがあり灰色の線で表された銅テープと黒色の線で表された銅テープ同士は接触しない。そして黒色の線で表された銅テープ同士は同じ奥行き上にあるため接触する。

これらの構造は紙を展開した状態での平坦な状態で上に飛び出る構造でもある。しかし、折りたたむ場合に銅テープに力がかかっているように、上から押さえつけた場合には平坦な構造となる。また今回の実装では銅テープが見やすいように、カメラから見て手前側や山折り側に同様の銅テープ構造を実装する場合が多い。

論理積・論理和

リテラルの構造が実装できたため、次に、論理積と論理和の実装について説明する。論理積の構造について説明する。論理積の構造を、図 3.14(a) に示す。AND ゲートとは、Switch1 と Switch2 の両方が ON になったときの

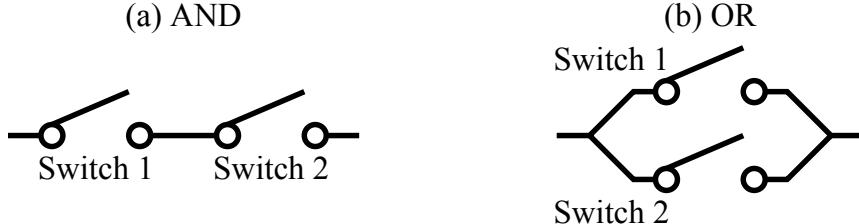


図 3.14: AND ゲートと OR ゲートの模式図。(a)AND ゲート。Switch1 と Switch2 の両方が ON になったときのみ、全体が導通する。(b)OR ゲート。Switch1 と Switch2 のどちらかが ON になったときに、全体が導通する。

み全体が導通するように、ある論理式と他の論理式の両方が成立した場合のみその論理式が成立するようなゲート（演算子）である。そのため、図3.14(a)のように、直列に2つの変数・論理式を接続することでANDゲートの働きを備える。図3.14(a)はそれぞれSwitchと書かれているため、1変数（リテラル）同士のANDに見えるが、それぞれのSwitchを論理式に対応した論理回路に対応させれば、[論理式] AND [論理式]が可能となる。

そしてOR構造を、図3.14(b)に示す。ORゲートとは、Switch1とSwitch2の少なくともどちらか片方がONになったときのみ全体が導通するように、ある論理式と他の論理式の少なくともどちらか片方が成立した場合のみ、その論理式が成立するようなゲート（演算子）である。そのため、図3.14(b)のように、並列に2つの変数・論理式を接続することでORゲートの働きを備える。図3.14(b)はそれぞれSwitchであるため、1変数（リテラル）同士のORに見えるが、それぞれのSwitchを論理式に対応した論理回路に対応させれば、[論理式] OR [論理式]が可能となる。

図3.14では、ANDゲートとORゲートは2変数のゲートで図示したが、 $A \cdot B \cdot C = (A \cdot B) \cdot C$ であり、 $A + B + C = (A + B) + C$ であることからも、3変数以上にも容易に拡張可能である。そして、これらの構造は多変数を含めて銅テープで簡単に実装可能であり、紙に貼ることでほとんど厚さを持たない構造で実現可能である。また単純な構造であるため、ANDゲートやORゲートは面積的にもほとんど場所を取らない構造である。

3.4 第3章のまとめ

第3章では、薄くて軽い折り紙ロボットの制御を薄くて軽い回路で行うための研究を行った。また制御の難しい薄くて軽いアクチュエータである形状記憶合金を制御するための回路もある。まず、薄くて軽い銅テープで実現し、薄さを損ねない形状のみを用いて折り目の状態を観測することでセンサを用いた。そして、直列接続と並列接続を用いることで論理積と論理和を銅テープのみで実装し、ICさえ要らない制御を実現した。また自己折り扱われる2段階の折りや、外部の状態の把握についても設計・実装・実験をおこなった。そのほかにも、論理式の否定が不可能なことなどの銅テープ回路特有の問題を解決した^{脚注18}。

本第3章は特に形状記憶合金を用いた駆動に着目した。もちろん形状記憶合金は薄くて軽いため折り紙ロボットとの相性が良いからであるが、銅テープ回路は他のアクチュエータの制御にも用いられる。例えば、モータとかでも、ぶつかったら止まることができ、単なるリミットスイッチのような挙動を示す。

また今回は回路に銅テープを用いたが、手に入りやすく安価なために選んだだけである。例えば銅テープは空気中の酸素と結合することによって接触部での抵抗が増加するため、長期間使う回路には銅テープは向かない。そして、形状についてもいくつかの設計を述べて実装した物の最適な形状からはまだ遠いだろう。

そして今回提案している薄い回路よりも薄い回路は存在する。例えば、厚さ 2 μm の高性能有機トランジスタ集積回路という、一般的な A4 用紙の 1/50 程度の厚さの回路も存在する [105]。導電性インクを用いた回路も、銅テープ回路に比べると薄いだろう。作りやすさを無視すれば、さらなる薄さを実現できる。そして紙の一部を更に切り折りすることで銅テープスイッチのような飛び出す部品を構築でき、紙の薄さそのもののみで実装できる回路も実現できると思われる。

第3章は、折り紙の変形を起こすための軽薄な機構として形状記憶合金に着目し、その制御に必要な回路も軽薄な回路で実現した。第3章の技術により、形状記憶合金のフィードバック制御と折り紙の状態によって次の状態へ遷移する軽薄な制御が可能とした。

脚注18 これについては付録で述べる

■ 第4章

第4部では、

円筒折における変形の機械的伝搬

一部に与えられた力から折り紙の全体の変形を起こす軽薄な機構である。第2部と前第3部では電気的な接続による変形、つまり回路として実現した変形である。本第4部からは電気エネルギーの代わりに力学的エネルギーを用いる。第2部が電気的に接続して全体の変形を起こし、本第4部は同様に力学的に接続して全体の変形を起こす。折り紙の変形には力学的エネルギーを伴う変形があり、紙の質量を無視しても折り紙内に弾性変形が生じることで弾性エネルギーが蓄積される。弾性エネルギーを伴う変形は滑らかにそして少し遅れて力学的な接続により次の変形を起こし、この連鎖により最初の1ユニットのみを変形させることで多くのユニットの変形を起こす。この性質をシミュレーションと実装した伝送路で確かめ、本構造が実現可能な構造であることまでを確かめる。そして更に、遷移前に蓄積したエネルギーを解放しながら遷移する折り紙ユニットは変形後にエネルギーを余らせるため、その余剰なエネルギーを次のユニットの変形に用いられ、不減衰な伝送を実現する。

特に、本2部では薄く折りたためる折り紙である円筒折を用いた機構で連鎖的な変形を実現する。運動エネルギーや弾性エネルギーは円筒折の小面内部に蓄えられ、変形の後半で勢いを付けることで隣り合うの折り紙の変形を連鎖的に引き起こす機構を実現した。次々と変形が起こる様子を、情報を伝達する伝送路とみなし、弾性エネルギーの非対称性を用いることで信号の減衰も補填した。本成果により、電気の流れる回路を持たない折り紙の連鎖的な変形を、一部に与えられた力から折り紙の全体の変形を起こす軽薄な機構で実現できる。

第2部の成果は、

[A1] Fuminori Okuya, Kazuya Saito, Yoshihiro Kawahara, “Numerical Simulation of Stable Propagation of Mechanical Signals by Cylindrical Origami,” IEICE Communications Express, (ComEX), vol.X8-B, Issue 12, pp.518–523, Dec. 2019. doi: <https://doi.org/10.1587/comex.2019GCL0031>

[C6] 奥谷文徳, 斎藤一哉, 川原圭博, “円筒折とその弾性エネルギーの差を用いた機械的信号の不減衰伝送,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, no.A-1-5, Sept. 2018.

で発表された内容の再利用を含む。

4.1 折り紙と弾性エネルギー

第4部では、折り紙の変形に伴う弾性エネルギーを活用し、折り紙の変形の機械的伝搬を扱う。剛体折と呼ばれる折り紙は構成面の形状を変化させない折り紙であり、ただ折り目の折れ角を変化させる変形であるため折る際に大きな力は必要ない。そのため人工衛星の太陽光パネルなどの折り畳みなど、硬い材料の折り紙には、剛体折が使われてきた。しかし剛体折の条件を緩和することで構成面の形状が変化する折り紙は折り紙の幅を広げ、折る際に構成面を変形させる力が必要な折り紙は、非直感的な挙動を示す。本部ではそのような剛体折ではない折り紙を扱い、弾性エネルギーを用いた折り紙の挙動を考える。

折り紙は構成面に蓄えられる弾性エネルギーが小さくなる状態で安定し、折り紙の変形や折り線パターンによっては複数の状態で安定する。そして、折り紙は弾性エネルギーが小さくなる変形を起こすとき、外部に力を与えることができる。この力によって新たな折り紙を変形させることで、折り紙の変形を伝搬させられる。こうして変形を伝搬させられれば、遠く離れた場所に力学的に変形を伝えられ、折り紙の変形を所望の範囲で実現できる。

弾性エネルギーをうまく用いた機械要素にコンプライアントメカニズムがある。コンプライアントメカニズムは、従来は剛体の関節を用いていた場所にバネのような柔軟な構造を用い、動力を変換・伝達する機構である。コンプライアントメカニズムは構造がシンプルであり、軽量で小型である利点も有する。コンプライアントメカニズムは従来の剛体の間に柔軟な構造を用いるため剛体と柔軟な構造の融合であったが、折り紙は紙から構成されているためにその全体が柔軟な構造であり全体が変形しうる。そのためコンプライアントメカニズムの利点を活かしつつ、複雑な接続を軽薄な紙のみで実現し、軽くて薄い機構で複雑な動きを実現する。

本部では円筒折と呼ばれるバイステーブル構造に着目し、変形の伝搬を実現した。円筒折は円筒を軸方向に折り畳むような折り紙であり、伸長状態と収縮状態で安定（構成面に弾性変形が生じていない状態）である。

この円筒を接続することで、円筒折の伸長・収縮の縦波を伝搬させられる。そのため円筒折の特性を解析し、複数の円筒折を同時に変形させる手法などをまとめた。また、円筒折の外部にバネを有することで、空気抵抗などで散逸するエネルギーを補償できる。この性質を用い、変形の伝搬の代表的な応用として、減衰しない変形の遷移を実現し、不減衰伝送路まで議論を展開する。

4.2 関連研究

4.2.1 円筒折 (Triangular Cylindrical Origami、TCO)

円筒折は折り紙構造の一つであり、円筒構造をねじりながら軸方向に押しつぶすような折り紙である。円筒折の例を図 4.1 に示す。円筒折は、円筒構造を平坦に折りたたむことが可能であるため、例えば人工衛星のアンテナの折りたたみに用いられている [124]。円筒折は、図 4.1 (a) に示す折り線パターンを円筒状に巻くように折ること

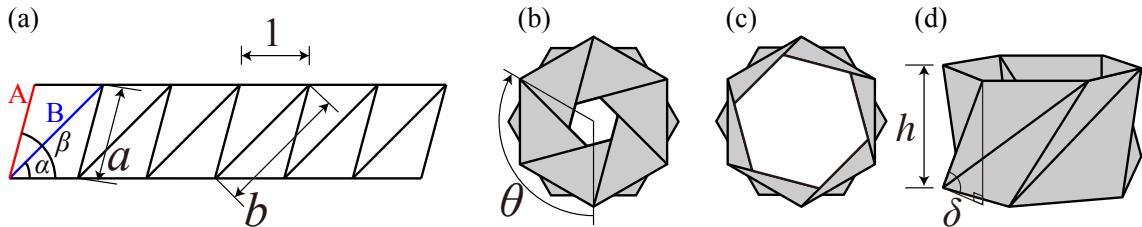


図 4.1: (a) 円筒折の折り線パターン ($\alpha = 45^\circ$)。(b) 収縮状態の円筒折の上面図。(c) 展開状態の円筒折の上面図。(d) 展開状態の円筒折の側面図。 a と b は辺 A と B の長さであり、 h は円筒折の長さ^{脚注 1} であり、 θ は円筒折のねじれ角であり、円筒折のねじれ角は、側面の三角形の頂点が、底辺からどの程度回転した位置にあるかで定義する。 δ は $\arcsin\left(\frac{a}{h}\right)$ であり、どの程度円筒折が展開しているかを示すパラメータである。

で実現する。この折り線を上下につなげることで長い円筒折が実現でき、上下につなげて折られた円筒折は図 4.2 のようになる。図 4.2 に示す 2 状態でこの円筒折タワーは安定状態である^{脚注 2}。厳密には、4 ユニットがそれぞれ

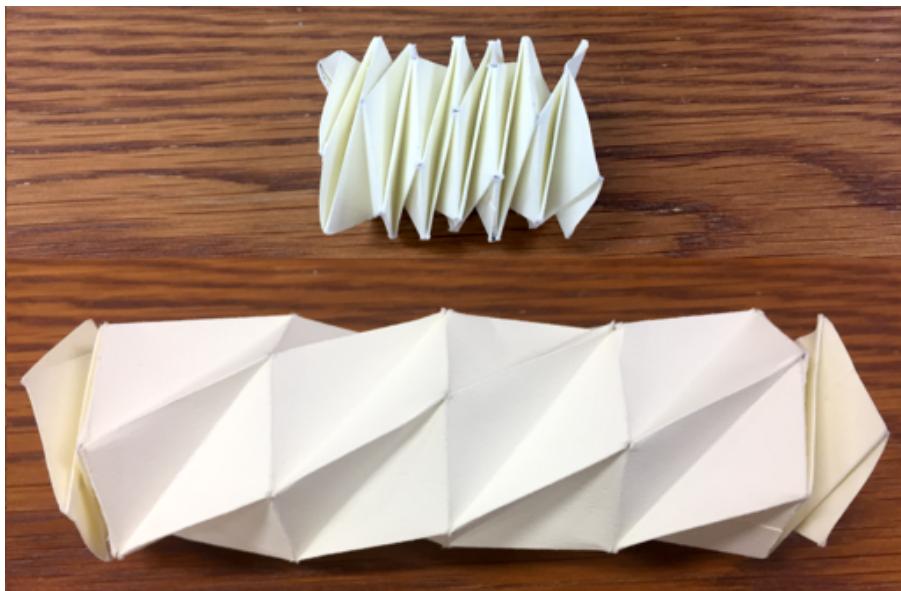


図 4.2: 実際に折られた円筒折（4 ユニット）上：収縮状態の円筒折。下：展開状態の円筒折。それぞれ、4 ユニットの円筒折が接続された形状であるが、1 枚の紙から折られている。

収縮状態と展開状態の 2 状態で安定であるため、異なる $2^4 = 16$ 状態で安定である。

円筒折は、展開・収縮することで 4 つの観点で変化しているといえる。1 つ目の観点は、長さ a である。図 4.2 に示すとおり、収縮状態の円筒折は長さがほぼ 0 となり、展開状態の円筒折は展開図程度の長さを持つ。2 つ目の観点はねじれ角 θ である。円筒折はねじれながら折り畳まれ、収縮状態のねじれ角は大きく、展開状態のねじれ角は小さい。また、図 4.1(a) の三角形の向きを逆転させることで、ねじれ角は逆になる。3 つ目の観点は内径である。収縮状態の内径は図 4.1(b) のように小さくなり、展開状態の内径は図 4.1(c) のように大きくなる。4 つ目の

^{脚注 2}そのため、手を離した状態で安定して写真が撮影できている。

観点は体積である。収縮状態の円筒折は長さがほぼ0であることからも体積がほぼ0であり、展開状態の円筒折は内径が大きい上、長さも大きいため体積が大きくなる。

これら4つの観点以外にも、円筒折の状態の変化によってパラメータは変化するが、本章ではこの4つの観点に着目する。これらのパラメータは全て単調に変化する。そのため、円筒折の状態を変化させることでこれら4つのパラメータを制御する事ができるだけではなく、これら4つのパラメータを制御することで円筒折の状態を変化させることも可能である。

円筒折は収縮状態で安定である構造であるが、 α を調節することで、展開状態でも安定な構造を図4.2に示したように実現できる。つまり、収縮状態と展開状態の2状態で安定であり、力が加わることによってその2状態を遷移するような構造が可能である。リンク機構の際に「本章で扱う折り紙はそれぞれの平面を剛体として扱わない。」と述べたが、円筒折は紙を剛体として扱う「剛体折」ではない。むしろ、円筒折はそれぞれの小面が変形することではじめて折ることが可能になる構造である。そして、その変形に弾性エネルギーが蓄えられることによって、安定な状態・不安定な状態が生じる。

角度 α を調節することでバイステーブル構造になるだけでなく、その遷移に必要な力は、角度 α によって変化する[125, 126, 127]。図4.1に示した円筒折は断面が六角形になるような円筒折であるが、円筒折は底面の数を6に限定するものではない。円筒折の断面の多角形の辺の数 n を増加させることで円筒折の遷移に必要な力は減少する[127]。トラスモデル[118, 128]を用いることで、辺の長さ a, b, B の自然長³ b_n が以下のように計算できる。

$$a = \frac{\sin(\pi - \alpha - \frac{\pi}{n})}{\sin(\frac{\pi}{n})}, \quad (4.1)$$

$$b_n = 2 \sin\left(\frac{\pi}{n} + \arcsin\left(\frac{a}{2}\right)\right), \quad (4.2)$$

$$b = \sqrt{\left(2 \sin\left(\frac{\pi}{n} + \arcsin\left(\frac{a}{2} \cos \delta\right)\right)\right)^2 + (a \sin \delta)^2}. \quad (4.3)$$

更に、(4.2)と(4.3)より、変形率⁴ d を以下のように計算できる。

$$d = \frac{b - b_n}{b_n}. \quad (4.4)$$

そしてその変形率から円筒折のポテンシャルエネルギーを計算すると、図4.3のようになる。図4.3のピークは、

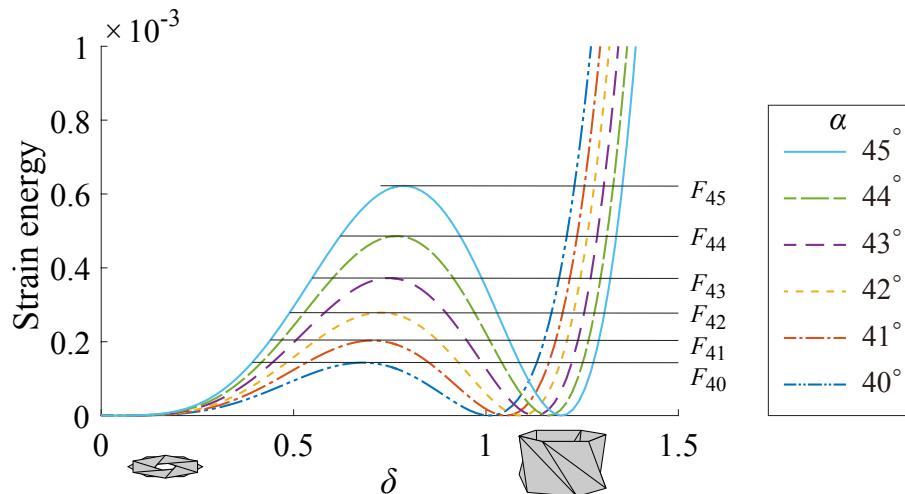


図4.3: δ を変化させたときの円筒折のポテンシャルエネルギー。 α を 40° から 45° まで変化させた[125]。

円筒折を遷移するために必要なエネルギーを表している。また、図4.3の最大の傾きは円筒折を遷移するために必要な力を表している。まず、 δ が0付近でポテンシャルエネルギーは0であるため、安定である。そして、 δ が1

脚注³natural length

脚注⁴deformation ratio

を超えたあたりで再度ポテンシャルエネルギーは0となり、2個目の安定な状態が存在することがわかる。この2個の状態がそれぞれ収縮状態と展開状態に対応している。

角度 α を増加させることで、ポテンシャルエネルギーのピークが大きくなることがわかる。このピークの高さが高いほど円筒折は遷移しにくいことを表しているため、 α が大きい円筒折ほど「強い」円筒折であると言える。また、安定な展開状態における δ も変化し、 α が大きくなるほど安定な展開状態の δ も増加する。実際の折り紙ロボットは、厳密な角度を折ることができないために製造段階で誤差が生じ、摩擦が厳密には一定ではないなどの環境の誤差が生じる。それらの誤差を考慮して、本章では、 40° と 45° の2種類のみを用いた。また、円筒折の断面の多角形の辺の数 n も6に固定した。

円筒折は円筒形状の折りたたみとして使われているだけでなく、このポテンシャルエネルギーを用いた利用例が多い。円筒折のポテンシャルエネルギーと、バネのポテンシャルエネルギーを組み合わせることで、ほぼ0の力で変形する構造を実現し、免震機構として利用することが提案されている[129]。また、円筒折の2個の状態がそれぞれ安定である性質を、メモリの不揮発性として利用した機械的メモリも提案されている[116]。この機械的メモリは円筒折を2個以上直列に接続することで構成されている[116]。情報は、展開状態の円筒折の位置によって保存される。そして、この機械的メモリは円筒折構造のヒステリシス特性を用いている。機械的メモリに用いられているヒステリシス特性は、接続された円筒折の「現在の」ねじれ角のみによって円筒折の状態が決まるのではなく、「過去の」ねじれ角にも現在の円筒折の状態が影響される性質である。この性質を用いて、機械的メモリは1アクチュエータで2個以上の任意の円筒折ビットを保存することを可能とした。

円筒折は直列に接続するとヒステリシス特性を持ち、異なる円筒折⁵を接続すると特にその挙動は興味深い。この性質は1アクチュエータを用いて移動する折り紙ロボットの重要な要素であり、本提案の一部でもあるため後述する。

円筒折の凡例

本章では、円筒折を Triangulated Cylindrical Origami にちなんで TCO とも呼ぶ。そして、1個の円筒折をそれ単体として扱う場合には円筒折ユニット (TCO unit)、円筒折を直列に接続したものを円筒折タワー (TCO tower)、ねじれの向きのみが反対であり、材料・角度 α などの他の性質が同じ円筒折を1個ずつ接続した円筒折タワーを円筒折対 (TCO pair) と呼ぶ。

円筒折の俯瞰図を正確に描画することは難しいため、特に小さな図においては円筒折を単純化した図で表す。円筒折は、まずねじれの向きによって2種類に分けられる。そして、円筒折の状態は展開状態と収縮状態の2種類に分けられる。更に、円筒折を遷移させるために必要な力でわけられる。そこで、図4.4のように円筒折のねじれの向き・状態・遷移に必要な力を表す。図4.4の左は円筒折のねじれの向きの表記であり、四角の内部の線によって

<i>Direction of the unit</i>	<i>State of the unit</i>	<i>Strength of the unit</i>
 <i>Left-handed</i> TCO	 <i>Expanded</i> TCO	 <i>Weak</i> TCO
 <i>Right-handed</i> TCO	 <i>Folded</i> TCO	 <i>Strong</i> TCO

図4.4: 円筒折の凡例。左: ねじれ方向の差の表記。中: 伸縮の状態の表記。右: 遷移に必要な力の差の表記。

表記する。図4.4の中央は円筒折の状態の表記であり、長さと外形によって表記する。図4.4の右は円筒折の強さの表記であり、線の太さによって表記する。また、円筒折の状態は展開状態と収縮状態をそれぞれ“0”と“1”によって表す。

脚注5 例えば異なる α からなる円筒折

4.2.2 円筒折の振動の伝搬

また本研究で用いる円筒折を用いた信号の伝送について、円筒折自体の振動についての解析も存在する。円筒折は軸方向と回転方向の運動の折り畳み挙動を示し、この組み合わせによって特殊な周波数応答を示す[115]。文献[115]では軸方向の力と回転方向のトルクを同時に与えて振動の挙動を計算している。軸方向に押し込むと円筒折はねじれながら収縮するが、収縮に伴うねじれの方向と同じねじれのトルクをかけると円筒折のポテンシャルエネルギーのなだらかな断面を用いた振動が生じ、逆方向のトルクをかけると円筒折のポテンシャルエネルギーの急峻な断面を用いた振動が生じる。この2種類のトルクを用いることで、円筒折の振動を2モードに分類し、その振動の伝搬の速度についてまとめている。そして円筒折のパラメータを変化させることでバンドギャップを調節できる柱を実現している（文献[115]中の図5(c)）。

我々は小さな弾性変形で大きな形状変化が可能な折紙工学を活用することで、破壊を伴わない伝送路・論理回路を構築する。弾性エネルギーを解放しながら伝送する不減衰伝送路の多くは、弾性変形を予め付与しておく双安定（バイステーブル）構造を用いている。そこで、そのような双安定構造の一つである円筒折を用いて不減衰伝送路を構築する。円筒折は弾性エネルギーを有効活用できる折り紙であり、ねじれを伴って軸方向に円筒形状を畳み込む折り紙パターンであるとともに、平坦に折り畳むことができる。この円筒折は直進運動と回転運動を併せ持つ遷移を行う構造であるが、本論文では直進運動で情報を伝送する。

円筒折は1ユニットでもバイステーブルであるが、2個の同じ円筒折を直列に連結し、合計の長さのみを制約した「円筒折対」を考える。この円筒折対は円筒折の接続面の、位置 h_1 や角度によって状態を保存できることが知られている[116]。この接続面の位置によって信号の伝送を行うため、本論文ではこの接続面を信号面と呼ぶ。

円筒折の展開図を構成する小面の三角形の底辺の長さを1としたときに、円筒折対の長さを1.6に固定すると、弾性エネルギーは図4.5のようになる。小面の三角形は、底辺からの角度が45°と75°となるような三角形として双安定性を持たせている。制約した円筒折対の長さは、伸長状態の円筒折の長さと収縮状態の円筒折の長さ

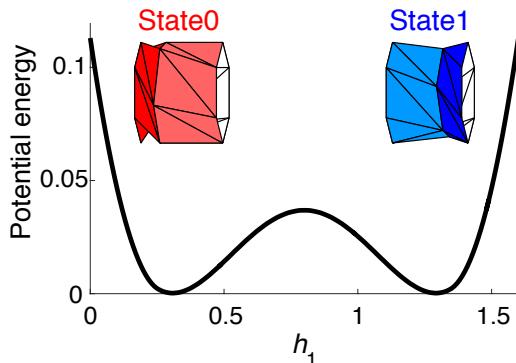


図4.5: 円筒折対の弾性エネルギー。左の円筒折が収縮している状態を State0、右の円筒折が収縮している状態を State1 とする。断面の正六角形の一辺の長さが1の円筒折（45°、75°）を直列に2つ連結し、合計の長さが1.6になるよう制約を課した。

の和程度に調整することで、左右の円筒折のどちらかのみが収縮している状態でポテンシャルエネルギーが0であるような安定状態を持つ系になる。この円筒折対は State0 と State1 が対称的な構造であり、State0 と State1 で同じ弾性エネルギーを持つため、State0 から State1 へと遷移する場合にエネルギーは補給されない。そのためこのままでは不減衰伝送路に用いることはできないが、それぞれの状態で安定である性質を活用し不揮発性メモリとして提案された[116]。

本研究では、この構造に非対称なバネを追加することでポテンシャルエネルギーの非対称性を産み、その非対称性からエネルギーを補給しながら伝送する不減衰伝送路を構築する。円筒折内を伝搬する振動では、伸長している円筒折を収縮させる力がかった波に比べ、更に伸長させる波が先行して伝搬する性質が知られている[117]。この性質は図4.5に示すポテンシャルエネルギーの急峻な場所を使うことで小さな変位で強い力を生み出せる性質から生まれる。しかし本研究では、エネルギーを補給しながら伝送するために、収縮状態へと遷移することが重要であるため、伸長している円筒折を収縮させる方向の力を主に用いて不減衰伝送路を構築する。

4.2.3 弹性変形の伝搬についての関連研究

直線運動的な弹性変形の伝搬

離れた場所まで弹性変形を伝搬させるためには、できるだけ減衰のない機械的な伝搬を必要とする。そこでまず不減衰と呼ばれる伝送を中心に紹介する。

一方、今回扱う信号は物理的な運動エネルギーや力、位置そのものである。そして、その運動エネルギーなどを測定して量子化することなく^{脚注6}、次のユニットの入力として直接用いる。その点で、本提案は入力された波形をそのまま次のユニットへと出力できるかまでは求めていない。一方で、不減衰であることを数学的に証明する場合には、入力と出力が数学的に完全一致していることを証明するのが簡単である。そのため、そのような波形を構築することで不減衰伝送路は Stable propagation と呼ばれることもある。また信号を伝送するという観点で扱うため、波の形は定常波ではなく孤立波や波束と呼ばれる時間的にも空間的にも集中している波を送る場合に着目される。

不減衰伝送路についてわかりやすい例にドミノ倒しがある。ドミノ倒しは一度ドミノが倒れはじめれば次々とドミノが倒れる。それぞれのドミノは立っている状態で安定であるが、一度倒れはじめると倒れきるまで倒れようとする力が働く。そしてその最中に次のドミノを巻き込むために、次々とドミノは倒れ、その倒れる勢いは減衰しない。

弹性を活かした構造物では、変位や振動などの機械的な信号は伝送の中途で減衰し、目的の場所まで信号を伝送することは難しい。そこで、伝送前に弹性エネルギーを伝送路に蓄えておき、そのエネルギーを解放しながら伝送することで、信号の減衰を補いながら信号を伝送する伝送路が構築された [106]。例えば、図 4.6(a) のように、質点を上下からバネで固定すると、それぞれのバネは自然長で最もエネルギーが低くなるため、固定点から等距離の場所で安定する。固定点から等距離の図 4.6(a) の灰色の線で示す球殻上に質点の安定点が存在し、2 個のバネからこの安定点が制約され、他の構造により伝送路の伝送方向にのみ質点が移動するように制約される。その結果、質点が安定な位置が図 4.6(a) に示す 2 点となる。質点の位置によってバネに蓄えられる弹性エネルギーは図

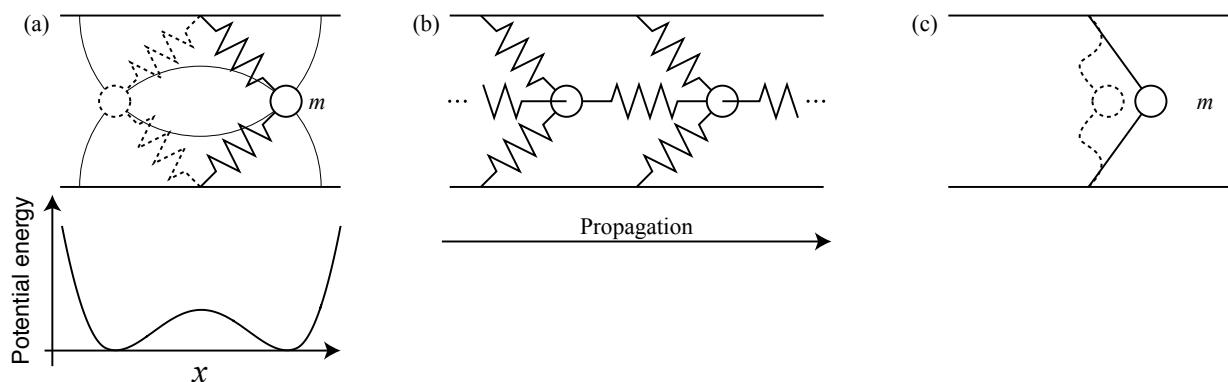


図 4.6: 不減衰伝送路の構築例。(a) バネで制約されている質点 ([106] を参考に作図)。実線で表した状態と点線で表した状態の 2 状態でポテンシャルエネルギーが 0 となり、安定である。(b) 伝送路として用いるために前後の質点とバネで接続された質点 ([106] を参考に作図)。(c) 柔らかい板状の材料を用いた変形例 ([108] を参考に作図)。

4.6(a) の下図のようになる。質点は左右どちらかの安定点（ポテンシャルエネルギーが低い点）で安定しており、左の状態から右の状態へ遷移するためには中央のポテンシャル以上のエネルギーを加える必要がある。右から左の状態への遷移も同様である。さらに、図 4.6(b) 質点同士をバネで左右につなぐことによって、左右の質点の動きによって質点が安定する位置が更に変化する。例えば左の質点が右に移動することでバネが右の質点を右に押す力を生み出す。図 4.6(b) のように遷移方向を右であるとすると、図 4.6(a) の点線状態が信号を伝送する前の状態であり、実線の状態が信号を伝送した後の状態である。

図 4.6(a) は完全に対称な構造であるために伝送前の左の状態と伝送後の右の状態ではポテンシャルエネルギー

^{脚注6}量子論について述べている話ではなく、巨視的な話である

は等しいが、非対称な構造とすることで、伝送前のポテンシャルエネルギーに比べて伝送後のポテンシャルエネルギーは小さく設定できる。そのため、このポテンシャルエネルギーの差が、質点の運動エネルギーの増加を引き起こし、減衰した運動エネルギーを補填する。

図4.6(a)のように、不減衰伝送路は基本的に「信号を伝送していない」「既に信号を伝送した」の2状態しか持たない^{脚注7}。そのため、不減衰伝送路の状態が伝送後である場合に示している状態は「今信号を伝送しようとしている状態である」ではなく「今までに一度でも信号を伝送した」である。これは、不減衰伝送路のポテンシャルエネルギーの差により $0 \rightarrow 1$ の遷移しか伝送できないため、伝送後に元の状態に戻すことができないからである^{脚注8}。

このような非対称なポテンシャルエネルギーを生むために、図4.6(c)のように、安定な2状態が存在する構造を用いた不減衰伝送路も存在する[108]。柔らかい材料の弾性変形でポテンシャルエネルギーを生み出しており、点線の状態から実線の状態へ遷移することで伝送を行う。非対称なポテンシャルエネルギーの中でも、小さなエネルギーで遷移が開始して遷移後の状態から遷移前の状態に戻りにくい形状となっている。そのため、次の質点を押す力の反作用に対しても強い構造である。

このように、不減衰伝送路はユニットを直列に接続することで構成される不均一な構造である。左から力が加えられ、図4.6(a)のようなユニットの1個目が遷移すると2個目が遷移するように、 n 個目のユニットの遷移が $n+1$ 個目のユニットの遷移を引き起こす構造となっている。

ここまで紹介した不減衰伝送路は片方向にのみ伝送できる伝送路であったが、双方向の不減衰伝送路も実装された[109]。不減衰伝送路は遷移前のポテンシャルエネルギーは遷移後のポテンシャルエネルギーよりも大きいため、遷移後の状態から遷移前の状態への伝送は減衰以外にもエネルギーが必要となってしまう。文献[109]は、2種類のバイステーブル構造を内包するユニットによって実現しているため、実質的には2本の伝送路を同一軸上に実装したとも言える。

また単なる不減衰伝送路ではなく、あえて片方向にのみ伝播する伝送路を搭載した研究も存在する[107]。この研究では片方向にのみ伝播する伝送路としてダイオードのような構造以外にも、論理積ゲート・論理和ゲートを実装している。それぞれは弾性材料で構成されているが、その構造を変えることで前後の質点との接続の性質を変化させている。例えば、左右の質点を結ぶ要素に柔らかいバネと硬いバネが実装されている。柔らかいバネで質点同士が接続されている場合、前後の質点の結びつきは弱いため、結びつきが減衰し、その周辺の質点の移動にのみ影響する。一方で硬いバネで質点同士が接続されている場合、前後の質点の結びつきが強くなりより広い範囲の質点の移動に影響する。同時にその質点の移動（状態の遷移）に必要な力も異なり、柔らかいバネで接続されている場合に比べて強いバネで接続されている場合には強い力が必要である。論理ゲートは、単純な例で述べたドミノ倒しについても考えられている[110]。

図4.7Aの1段目のように柔らかいバネで接続されている伝送路と強いバネで接続されている伝送路によりダイオードが実現する。柔らかいバネで構成される伝送路である左の伝送路から信号が伝わろうとした場合には、図4.7Aの2段目のように、強いバネでの接続部分を遷移させる力が足りず、柔らかいバネの変形が残った状態で遷移が止まってしまう。しかし逆に右から信号が伝わろうとした場合には、図4.7Aの3段目のように、全ての状態が遷移後に切り替わる。このように、伝送に付随するエネルギーが小さい伝送路から、伝送に必要なエネルギーが大きい伝送路への伝送を阻害することができる。柔らかいバネのばね定数は 80 N/m であり硬いバネのばね定数は 2100 N/m である。また柔らかいバネと硬いバネの結びつきの強さが異なるため、特に図4.7Cで遷移の速度の差が見受けられる。柔らかいバネで接続された伝送路に比べると硬いバネで接続された伝送路での伝送は高速である。

また図4.7Bから、最初の伝送に勢いがなくても伝送が安定して行われている。縦軸が時間であるため、傾きが緩やかであるほど伝送が高速である様子を表す。0.12sから1番目のユニットの変形が開始し、徐々にユニット番号が増える方向に $\frac{20}{0.03} \sim 660[\text{unit/sec}]$ 程度の速度で遷移しているが、0.16s、 $i = 22$ 付近で伝送が停止している（図中では縦方向に伸びる緑線）。伝送前の状態が青色、伝送後の状態が赤色であり、中途半端な状態である緑色で

^{脚注7} 以上の安定点を持つかもしれないが、その場合も何回伝送したかのみの情報である。

^{脚注8} 両方不減衰でできているならば、分散エネルギーと散逸エネルギーが0であり、双方向通信可能な伝送路であり、超電導などでのみ可能である。

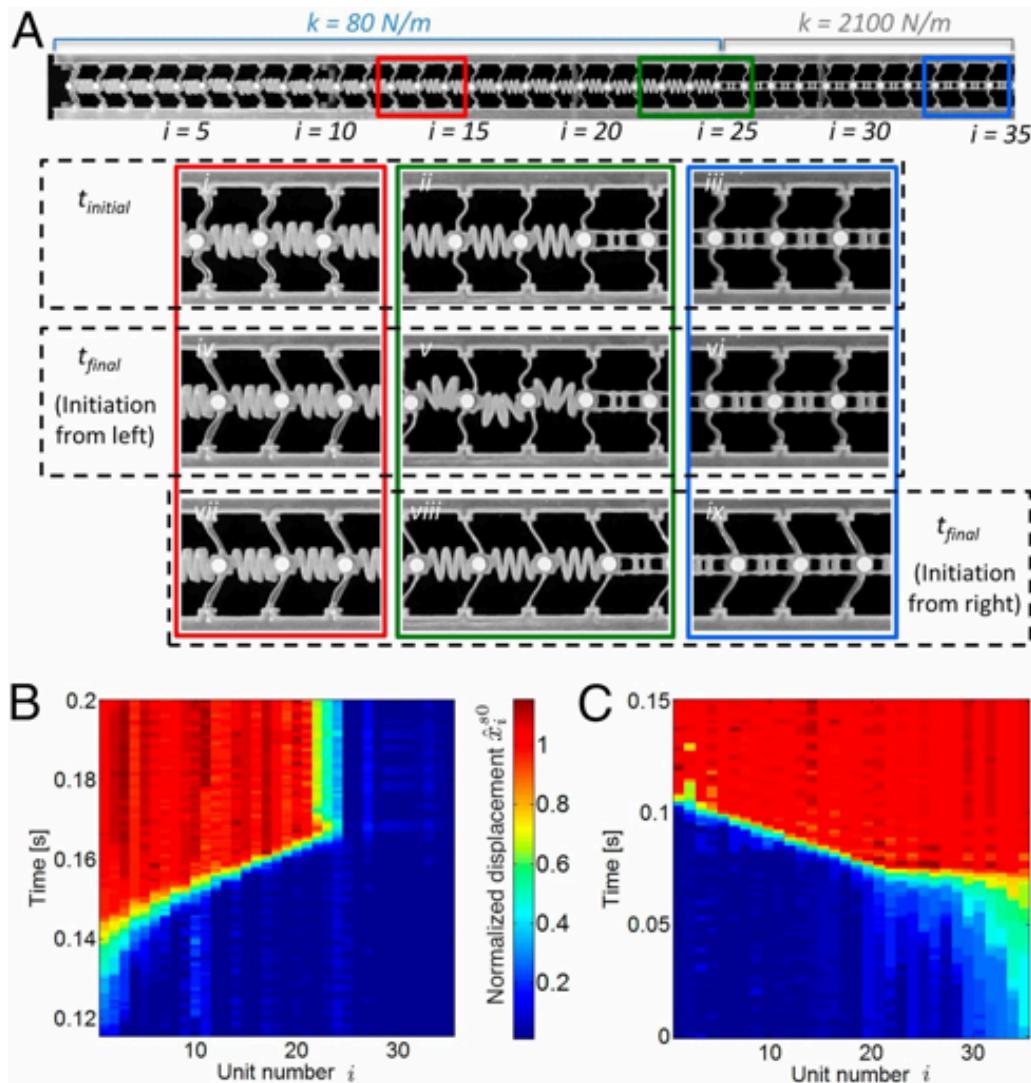


図 4.7: 不減衰伝送路でのダイオードの実装 [107]。A: 赤枠は柔らかいバネで接続されている部分を、緑枠は柔らかいバネと硬いバネの境界付近を、青枠は硬いバネで接続されている部分である。上から順に遷移前、左からの力による遷移後、右からの力による遷移後の状態。B: 左からの遷移の時系列データ。青が遷移前、赤が遷移後。C: 右からの遷移の時系列データ。青が遷移前、赤が遷移後。

あるため、1番目のユニットの状態が緑である時間が長く、ユニット番号の増加につれて⁹緑色の時間が短くなっている。ユニットの不安定な状態を通過する時間がユニット番号が増加するにつれて短縮されていることから、低速な運動エネルギーの少ない伝送から、高速な運動エネルギーを伴う伝送へと変化し、より安定した伝送へと $25 < i$ であるユニットも少し色が変わっているため、変位の振動が少し伝わっているが、状態が遷移するほどのエネルギーは足りていない。

また図 4.7C では、ユニット番号が大きい $i = 35$ から伝送を開始する。柔らかいユニットの遷移開始には 0.12 s から 0.14 s の 0.02 s 程度の時間であったが、硬いユニットの遷移開始には 0 s から 0.07 s の 0.07 s と短い時間しかからない¹⁰。そしてユニット番号 $i = 20$ まではほぼ同時に遷移しており、高速で遷移している。その後柔らかいユニットの伝送速度は $\frac{20}{0.03} \simeq 660 [\text{unit/s}]$ であり、図 4.7B の伝送速度とほぼ一致する。情報の伝送の向きは異なるが、遷移前の状態と遷移後の状態は等しい。

図 4.7 では、異なる構造のユニットを連結することでダイオードを実現した。ダイオードとして働くのは、あるユニットの遷移の力が次のユニットの遷移を引き起こすのに不十分であるからであった。ここで、2 個のユニットを入力とするユニットを考える。片方の入力のみが遷移してきても遷移が伝播しない伝送路とし、両方の入力が

脚注 9 $i < 22$ 程度まで

脚注 10 時間軸が異なるため比較が難しいが、引用した文献の図がそうになっているため仕方がない

遷移して初めて遷移が伝播する伝送路を構築すると、論理積ゲートとして働く。どちらか片方の入力のみの遷移が次の遷移を引き起こすのであれば、少なくとも片方の入力により遷移が伝播するため、論理和ゲートとして働く。このようにして、論理和ゲートが実装された [107]。そして、特にその材料の変形が大きな論理ゲートの動作には図 4.8 のような破壊を伴うため、再び信号を伝送するには新しい伝送路を必要としていた。文献 [107] の手法

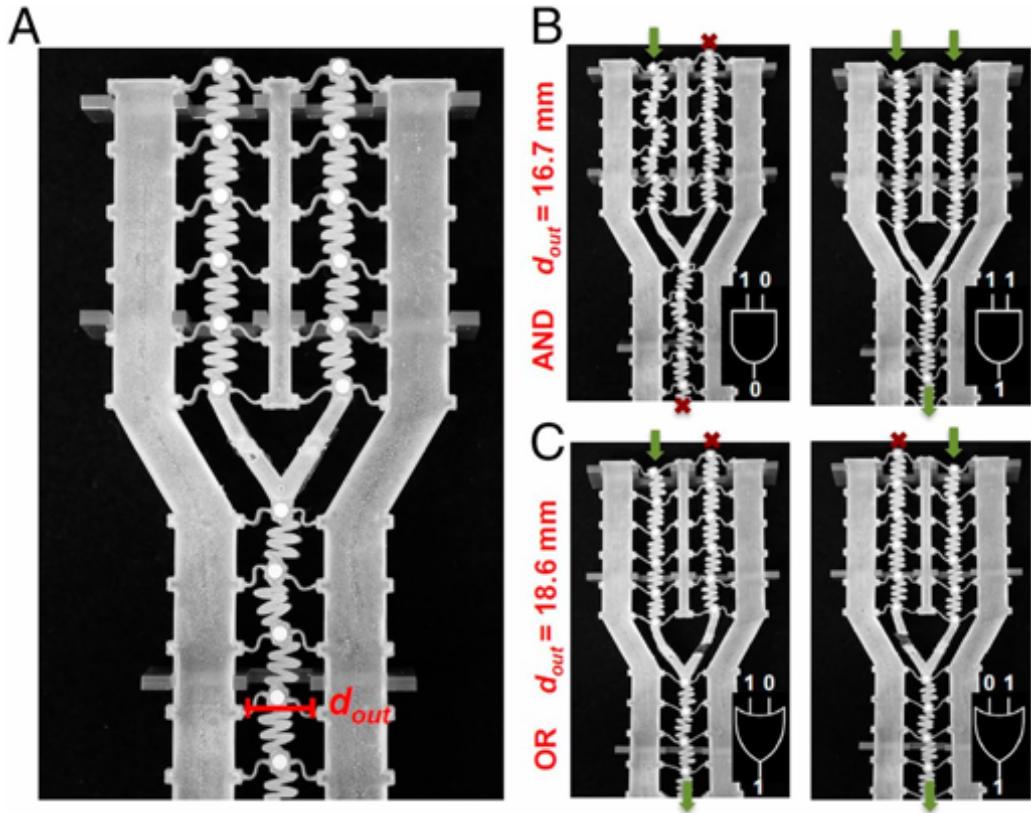


図 4.8: 不減衰伝送路で提案されている論理ゲート [107]。A 上から入力される 2 入力によって、下への出力を制御することで論理ゲートとなる。B 入力の両方から伝送されたときのみ出力も伝送する論理積のゲート。C 入力の少なくとも片方から伝送されたときのみ出力も電送する論理和のゲート。伝送されていない伝送路側の接続部分が破壊される。

ばね定数ではなく伝送路の幅 d_{out} を変更するだけで論理ゲートを実現している。

このゲートの破壊は、ゲートでの接続がバネではないからであると考えた。本論文では、入力と出力の接続も明示的なバネとしていることで、ゲートに力が集中することなく出力の状態を制御できる論理ゲートを実現する。ただし、文献 [107] でバネ接続する代わりに、破壊される利点も存在する。例えば、破壊されることによって逆方向の伝送を防いでおり、入力状態を切り替えていない。そのため、本論文で提案する構造も、ある入力の値によって他の入力の状態を切り替えないようにする必要がある。特に論理和の構造では片方の入力が存在する場合に出力も変化してしまうため、もう片方の入力の変化につながらないようなばね定数などの工夫が必要となる。

4.2.4 回転を用いた変形の機械的伝搬

ここまで紹介した不減衰伝送路は全て直線運動を用いて次のユニットへのエネルギーを伝送していたが、円柱などの回転角度・回転モーメントを用いて次のユニットへのエネルギーを伝達する不減衰伝送路も存在する [111]。文献 [111] は、不減衰伝送路の構築ではなく、アレン=カーンの法則と呼ばれる反応拡散についての論文である。しかし、図 4.9b) で述べられているモデルは不減衰伝送路で用いたバネの接続手法であり、図 4.9d) のポテンシャルはバネによるポテンシャルである。そしてバネによるポテンシャルエネルギーに対して非対称な要素を加えることによって、青い破線のような遷移前と遷移後では異なるポテンシャルエネルギーを持つ状態も実現している。さらに図 4.9f) の構成は直線運動から回転運動に応用した 2 状態を実現しており、図 4.9e) のユニット同士の連結は、

不減衰伝送路のそれぞれと対応する。直線運動で伝送を行うシステムでは、1ユニットが直接与える力はその直線

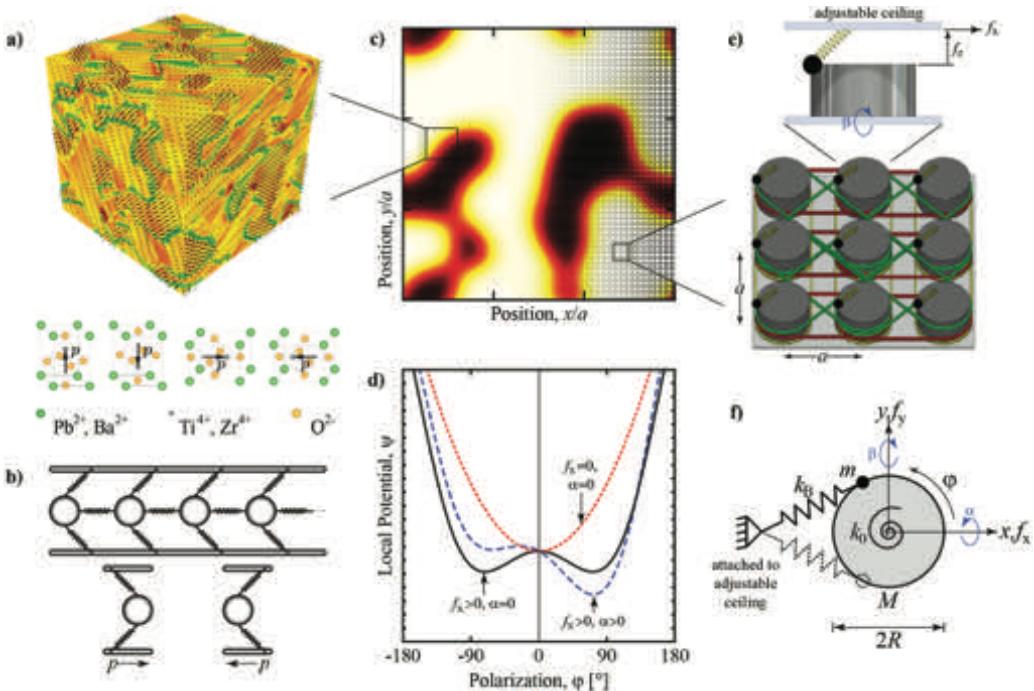


図 4.9: 不減衰伝送路に応用可能なモデル。b) のような質点を連結したモデルと、そのポテンシャルである d) は従来の研究とほとんど変わらないが、f) のような円筒の角度を用いた回転を伝播させるモデルも提案している。e) のように互いを連結することで 2 次元上に広がった伝送を可能とするだけでなく、8 近傍のユニットに対して力を与える構造の考案も行っている。[111] の Figure 1 である。

方向の前後の 2 ユニットに制限されていた。後述する手法では分岐を作る事によって 2 ユニット以上に力を与えることができるが、運動の方向が変化してしまうために損失が発生する。しかし、図 4.9e) のユニット同士の連結は 2 次元上に広がっており、少なくとも 8 ユニットに影響を与えていた。このように、回転運動を伝送するシステムにすることで、複数のユニットへ少ない損失で力を伝えることや、複数のユニットから力を受ける事が可能となる。

また 1 次元上にしかつながっていないユニットでも、格子欠陥のように、あるユニットだけ特性を変えるとそこにエネルギーが集中する研究は行われた [112]。異なる特性のユニットは 1 ユニットとは限らないが、異なる特性のユニットの境界付近でエネルギーの集中が生じる。このように、ユニット間に個体差が存在しても、比較的安定して信号の伝送が行われる。異なる特性のユニットが連結している部分以外にも、伝送路の両端も異なる特性のユニット^{脚注 11}が連結していると考えられる。バネのように連続的に力を受け取るユニットが存在しないならば運動エネルギーを衝撃力のように用いられる。また上記のような弾性構造は温度によって特性が変わる事も知られている [113]。この研究を用いることで、特定の温度に達したら伝送を開始する不減衰伝送路を実現できる。

4.2.5 折り紙ダイオードと論理ゲート

第 4.2.3 節ではばね定数の異なる伝送路を紹介した。しかし、構造自体を非対称にすることでもダイオード的な動作が可能となる。本章では、非対称な折り紙構造を用いることでダイオード的な片方向のみの伝送に限定する手法を紹介する。

折り紙工学の分野には圧縮できるにもかかわらず、引っ張れない構造が存在する [114]。この構造はメカニカルダイオードと呼ばれ、2 状態を安定した状態^{脚注 12}として持つ。図 4.10 に折り紙ダイオードに与えられた力に対する

脚注 11 受ける力が 0 であるようなユニット

脚注 12 但しここではポテンシャルエネルギーの一回微分が 0 であり、二階微分が正であることを安定と表現した。ここまで述べた安定はポテンシャルエネルギーが 0 である状態であったが、ポテンシャルエネルギーが極小となる状態は局所的に安定であると表現する。

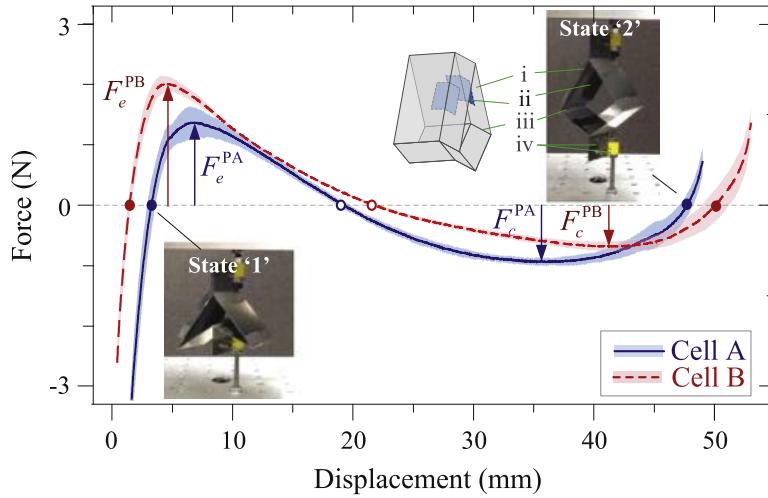


図 4.10: 2種類の折り紙ダイオード構造の荷重 - たわみ曲線 [114]。5回の実験を行い、平均値を曲線で、標準偏差を網掛けで表す。2種類のCell A（青実線）とCell B（赤破線）について実験を行っており、それぞれは中実丸の点で安定であり、中抜き点で不安定である。非凸な状態であるState'1'から凸な状態のState'2'に遷移するために必要な力（伸長方向）は、それぞれ F_e^{PA} と F_e^{PB} である。一方で、凸な状態である'2'から非凸な状態の'1'に遷移するために必要な力（圧縮方向）は、それぞれ F_c^{PA} と F_c^{PB} である。[114]のFig. 3である。

る長さの変化を示している。非凸な状態であるState'1'から凸な状態のState'2'に遷移するために必要な力（伸長方向）は、それぞれ F_e^{PA} と F_e^{PB} である。一方で、凸な状態であるState'2'から非凸な状態のState'1'に遷移するために必要な力（圧縮方向）は、それぞれ F_c^{PA} と F_c^{PB} である。ここで、 $|F_c^{PA}| < |F_e^{PA}|$ であるため、State'2'からState'1'への遷移には小さな力で遷移が生じるが、State'1'からState'2'への遷移には大きな力が必要である。更に、State'1'付近の傾きはState'2'付近の傾きよりも大きいため、衝撃の吸収具合も異なり、State'1'付近では大きな力が加わってあまり変形しないが、State'2'の付近では大きな変形が生じる。つまり、同じ方向の力となるような構成で接続してもState'1'の遷移の前にState'2'の遷移を引き起こすなども可能である。また折り紙はバネ的な変形ではなく折り角の変化による変形であるため、弾性変形のみを用いた変形に比べるとユニットの大きさあたりの変形量が大きい。そのため、運動エネルギーを産むための加速に長いストロークを用いることができる。

4.3 円筒折を用いた変形の伝搬現象

本章では、円筒折を用いた不減衰伝送路の具体的な構成と、動作の原理を説明する。円筒折は展開状態と収縮状態の2つの状態で安定な構造であるが、これを単純に遷移前と遷移後に対応させるわけではない。遷移前と遷移後の伝送路の長さが大きく変わると、伝送路の長さが変わってしまうためにどこかに負荷がかかり、その負荷の変形のためにさらなるエネルギーが必要となる。また長さを変える再利用のための動作が大きな動作となってしまうため、再利用に多くの手間が必要となってしまう。そこで、不揮発性メモリの研究を参考に、ユニットの外形を変えないまま、内部の信号面の位置のみが変化することで信号を伝送する不減衰伝送路を考案する。

4.3.1 円筒折対とポテンシャルエネルギー

前述したとおり、円筒折を直列に連結させただけでは対称な構造であるため、安定な2状態にポテンシャルエネルギーの差は生じない。そのため、遷移前と遷移後のポテンシャルエネルギーの差を散逸したエネルギーの補給に用いることができない。そこで、図4.11のように円筒折の信号面に伝送方向もしくはねじりの力を加えて、ポテンシャルエネルギーの差を生み出す。

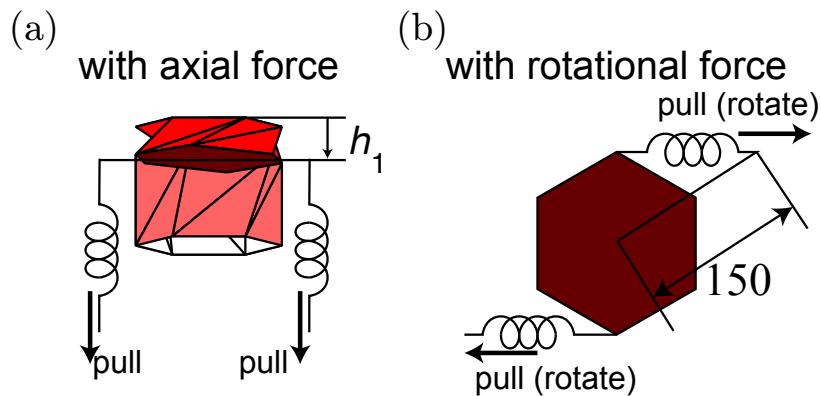


図4.11: 円筒折による伝送路に搭載されるバネの搭載例。(a) 伝送方向にバネで引っ張る場合の搭載例。(b) ねじり方向にバネで引っ張る場合の搭載例。回路図に用いられるコイルのような記号は円筒折のポテンシャルエネルギーを非対称にするためのバネである。

伝送方向に力を加えた場合のポテンシャルエネルギーを図4.12に示す。伝送方向に加えた力はバネによって与

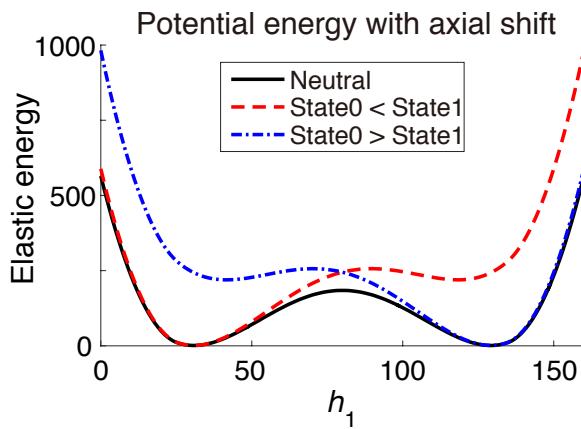


図4.12: 伝送方向の力を加えられた円筒折の非対称なポテンシャルエネルギー。(赤破線) 右から左に向けて、伝送方向と逆方向の力を与えた場合のポテンシャルエネルギー。(青一点鎖線) 左から右に向けて、伝送方向の力を与えた場合のポテンシャルエネルギー。

えたと仮定した。バネが自然長であるときに信号面がState1の位置に来るよう、伝送方向にバネを搭載した。

ばね定数 k は 0.05 とし、バネに蓄えられるエネルギーは $\frac{1}{2}kx^2$ である。バネによるポテンシャルエネルギーは信号面の位置 h_1 が 130 付近で 0 となるようにバネを搭載すると、青色一点鎖線のポテンシャルエネルギーのように、約 130 を中心として変位の 2 乗に比例したポテンシャルエネルギーとなる。またバネによるポテンシャルエネルギーは、信号面の位置 h_0 が 30 付近で 0 となるようにバネを搭載すると、赤色の破線のポテンシャルエネルギーのように、30 を中心として変位の 2 乗に比例したポテンシャルエネルギーとなる。このように、バネの弾性エネルギーを円筒折対のポテンシャルエネルギーと組み合わせることで、双安定構造であり安定状態によってポテンシャルエネルギーが異なる構造を実現できる。

同様にねじりの力を加えた場合のポテンシャルエネルギーを図 4.13 に示す。ここでは、バネにねじりの力を与

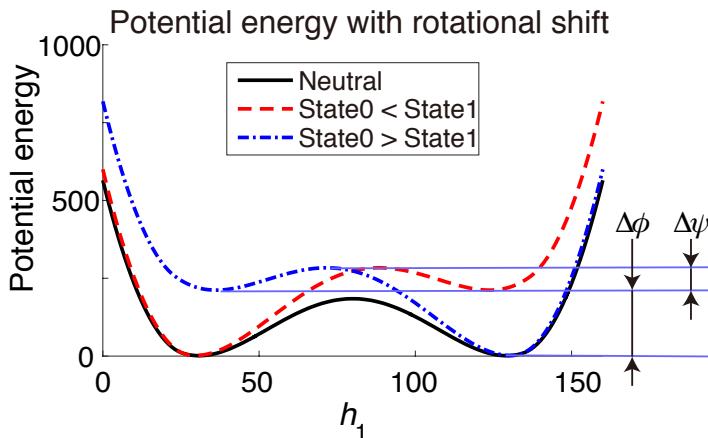


図 4.13: ねじりの力を加えられた円筒折の非対称なポテンシャルエネルギー。赤破線：左から右に向かって、時計回りのねじりを与えた場合のポテンシャルエネルギー。青一点鎖線：左から右に向かって、反時計回りのねじりを与えた場合のポテンシャルエネルギー。 $\Delta\phi$ は遷移前後のポテンシャルエネルギーの差。 $\Delta\psi$ は遷移に必要なエネルギー。

えるために、伝送路の外側にバネを設置した。バネの位置は伝送路の中心から 150 とし、遷移後の状態の角度でバネが伝送路の中心を通り、自然長となるように搭載する。バネの片側は信号面であるが、もう片方の伝送方向の固定位置は $h_1 = 80$ となる位置とする。これにより、伝送方向の動きに対する対称性を維持したままねじりの力のみを与える。遷移前の引っ張りの方向は 40.89° となる。信号面に対して時計回りのねじりを与えることで、図 4.5 の State 0 がより安定となる。これは、State 0 と State 1 では State 0 の信号面のほうが時計回りにねじれた後の状態であるからである。同様に、信号面に対して反時計回りのねじりを与えることで、図 4.5 の State 1 がより安定となる。ここで与えているねじりの力は一定のねじりの力であり、図 4.9f) のような渦巻きバネを用いた力とは少し異なるが、2 状態で安定となるポテンシャルエネルギーの形状が存在することと、その状態の間でポテンシャルエネルギーの差が生じることが重要である。

伝送方向の力を加えた場合にも、図 4.14 のようにねじりの力を加えた場合にもポテンシャルエネルギーはほとんど同じ形状となる。他にも信号面に質量があり、重力を受けることで下方向への伝送を可能とするような非対称なポテンシャルエネルギーも実現できる。この場合には円筒折対のポテンシャルエネルギーに線形なポテンシャルエネルギーを足し合わせた形状となる。またこれらのバネや重力を足し合わせることも可能である。バネによるポテンシャルエネルギーは 2 乗の項になり、重力によるポテンシャルエネルギーは 1 乗の項であるため、この 2 要素を組み合わせることで任意の二次関数で表されるポテンシャルエネルギーを足し合わせることが可能となる。

ここで、前のユニットから $\Delta\psi$ 以上のエネルギーを得られるならば、円筒折対は状態を遷移できる。そして状態の遷移の前後にはポテンシャルエネルギーの差が $\Delta\phi$ だけある。遷移前後のポテンシャルエネルギーの差 $\Delta\phi$ が、遷移に必要なエネルギー $\Delta\psi$ より大きいならば、遷移前後のエネルギーの差 $\Delta\phi$ を用いて次の遷移を引き起こす。 $\Delta\phi < \Delta\psi$ であるため、 $\Delta\psi - \Delta\phi$ だけの摩擦等による散逸エネルギーを補給しながら信号を伝送できる。

より正確には、 $\Delta\phi < \Delta\psi$ であるだけでは次の遷移を引き起こすとは限らず、ポテンシャルエネルギーの形状をより正確に議論する必要がある。図 4.15 のように、左右の円筒折のポテンシャルエネルギーを $P_1(x)$ と $P_2(x)$ とし、バネの変位を x とした場合、停滯しない条件を考える必要がある。信号面の質量や信号面の空気抵抗などを

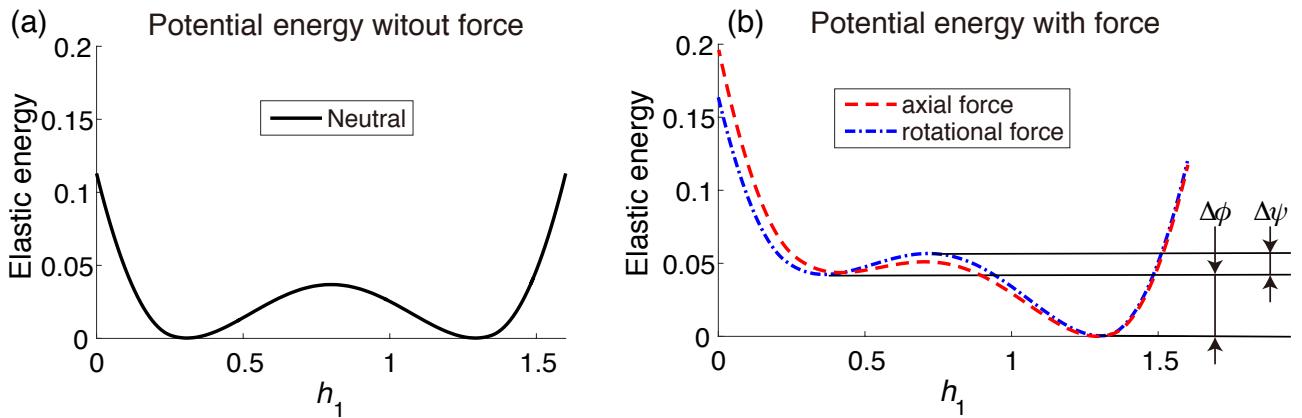


図 4.14: (a) バネを搭載する前の円筒折対のポテンシャルエネルギー。(b) 伝送方向にバネを搭載した場合（赤破線）とねじりの方向にバネを搭載した場合（青一点鎖線）のポテンシャルエネルギーの比較。 $\Delta\phi$ は遷移前後のポテンシャルエネルギーの差。 $\Delta\psi$ は遷移に必要なエネルギー。

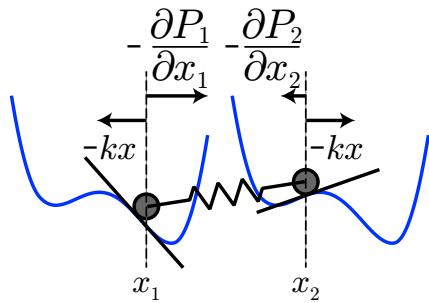


図 4.15: ねじれを加えた円筒折のポテンシャルエネルギー（青線）と、信号面（灰色円、●）に掛かる力（矢印）。回路図で使われていた抵抗器の記号のようなバネは、信号面同士の接続を行うバネである。ポテンシャルエネルギーからは（接線の）傾きによる力を受ける。バネの両端に高低差が生まれているが、これはそれぞれの信号面のポテンシャルエネルギーの高低差であるため、バネによる力は左右の距離のみで決定する。

無視し、慣性を用いない場合には、 $-\frac{\partial}{\partial x}P_1 = \frac{\partial}{\partial x}P_2$ の釣り合いが生じるとバネで接続された質点の平均速度は変化しない。またそれぞれの質点は $\frac{\partial}{\partial x}P_1 + kx = 0$ と $\frac{\partial}{\partial x}P_2 - kx = 0$ で停止する。そのため、

$$\frac{\partial}{\partial x}P_1 + \frac{\partial}{\partial x}P_2 = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}P_1 + kx = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}P_2 - kx = 0 \quad (4.7)$$

の 3 式が釣り合う、

$$-\frac{\partial}{\partial x}P_1 = \frac{\partial}{\partial x}P_2 = kx \quad (4.8)$$

が停止の必要条件である。この式が成立しない場合その力の和が信号面の動きに寄与し目的とする不減衰伝送路を構築できる。停止しないようなポテンシャルエネルギーとばね定数を選定するか、十分な慣性を持たせることでこの問題を解決できる。また論理ゲートの構築では入力の組み合わせによって動作を切り替えるポテンシャルエネルギーとばね定数を選定する必要がある。実際の信号面には質量が存在するため、後述するシミュレーションでも質量を持つ信号面で実装した。

このようなユニットを次々と接続することで、図 4.16 のような伝送路が構築できる。接続されたバネによって円筒折対の遷移は次（右）の円筒折対の遷移を引き起こし、連鎖的に状態が遷移することで半永久的に信号を伝

送できる。図4.16のように信号が左から右へと伝送される様子を考える。青色で示された遷移後の円筒折対の信

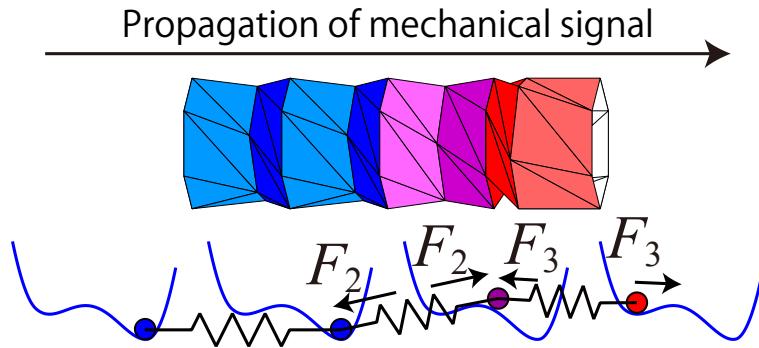


図4.16: 円筒折対を直接に接続した伝送路。青色は遷移後の円筒折ユニット。紫色は遷移中の円筒折ユニット。赤色は遷移前の円筒折ユニット。左から順に信号が伝送されていく。

号面は、右の遷移前の円筒折対の信号面をバネを介して押す。赤色で示された遷移前の状態は、遷移後の状態へは移動しやすい状態である。左から順に遷移が行われると、青色で示された遷移後の状態は遷移前の状態へと戻りにくいポテンシャルカーブを持つため、慣性を必要とすることもなく次の遷移を引き起こす。以上のメカニズムによって、不減衰伝送路を実現した。

4.3.2 伝送方向の切り替え

これから、不減衰伝送路の伝送方向について述べる。円筒折対は対称的な構造であり、外側に付随するバネによって非対称なポテンシャルエネルギーを実現していた。そのため、外側の付随するバネの向きさえ切り替えることができれば、伝送の方向を反転できる。例えば、ねじりの力においてモーメントの向きを逆転させると図4.13の赤線と青線が切り替わり、State0がより安定である状態（図4.5中の赤破線）とState1がより安定である状態（図4.5中の青一点鎖線）が切り替わる。そのため、モーメントの向きの逆転により双方向の再利用可能な通信路を構築できる。

そのようなモーメントを生じさせる外部機構を制御筒と呼ぶと、図4.17のように制御筒を回転させることで、全ての信号面にかかるモーメントを切り替えることが可能である。図4.17で青色に示すように制御筒を左側に回

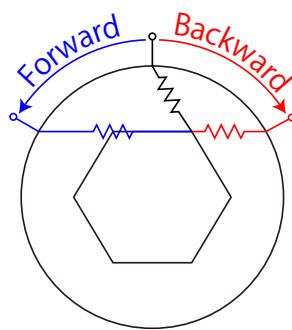


図4.17: 制御筒の回転によるポテンシャルエネルギーの制御。六角形が信号面を、その外の円が制御筒を示す。青色に示すように制御筒を左側に回転することで円筒折を左側に回転させる力が働く。赤色に示すように制御筒を右側に回転することで円筒折を右側に回転させる力が働く。

転することで円筒折を左側に回転させる力が働く。図4.17で赤色に示すように制御筒を右側に回転することで円筒折を右側に回転させる力が働く。そしてこの筒は全ての円筒折の信号面に同時に力を与えることができるため、伝送方向の切り替えの手間が少なくすむ。

制御筒を回転させるためには全てのユニットに含まれる信号面のポテンシャルエネルギーを引き上げるエネルギーが必要であり、長い伝送路に対しては大きなエネルギーが必要となる。ただし、従来の不減衰伝送路はそれぞ

れのユニットを再利用する際には、信号面のポテンシャルエネルギーを引き上げるだけでなく、信号面を元の位置に戻すような操作も必要であった。本論文で紹介する制御筒は、伝送路の状態を変えるのではなく、ポテンシャルエネルギーの形状を変える手法であるため、連続かつ単調な力で行える。エネルギーを必要とする物の信号面の位置を変化させる必要はなく、またバネでのみ接続されている点で既存の手法とは異なるため、この性能を得た。

また制御筒の回転は、伝送方向を切り替えるためだけでなく、再利用のためにも有用である。伝送済みの伝送路の伝送方向を変更すると、State0とState1の意味が変わり、伝送後の位置であった場所が伝送前の位置となる。そのため、同じ方向に複数回送りたい場合には、一度伝送した後に伝送方向を変更し、一度信号を送り返すことで信号面の位置が元の位置に戻る^{脚注13}。そして制御筒の回転により、伝送前の状態へと戻る。ここで、一度信号を送り返す行為やタイミングは特に意味がなくてよいが、信号が送り返されることによって「伝送前の状態である」つまり「再度伝送可能である」という情報を伝送している事にもなる。

散逸したエネルギーを再度蓄えるだけのエネルギーが必要であるが、エネルギー保存の法則より避けられない問題である^{脚注14}。本小節で述べた内容は伝送方向にバネの力を与える手法でも同様に行え、ねじれの力と同様にバネの位置を信号面に対して対称的な場所に移動すれば良い。そのため、伝送路の伝送したい方向へと制御筒を移動させることで伝送方向を切り替えることができる。信号面に働く重力を用いる手法では、状態の向きを反転することで再利用が可能となる。

また不揮発性メモリ[116]と同様に、ねじりの向きが異なる円筒折を接続すれば、より大きな遷移力を身につけられるだけでなく、片方の伝送路端をねじり続けることで伝送路の初期化が可能である。それぞれのユニットの長さを固定しなければいけない性質と、ユニット内のねじりが一定ではないことからより複雑な機構になってしまいが、このように伝送路端からの初期化は可能である。ここまで設計により、「コンパクトに輸送可能な不減衰伝送路」と「双方向通信可能な不減衰伝送路」と「再利用可能な不減衰伝送路」が実現する。次に、再利用可能な不減衰伝送路・論理ゲートを説明する。

脚注13 厳密にはポテンシャルエネルギーの形状が異なるが、制御筒の回転により信号面の位置が元に戻るという意味で、元の位置に十分近い。

脚注14 この制御筒の回転は全ての信号面へのモーメントを制御しなければいけないため、制御筒自体を通信に使うことで伝送路とすることも可能であるが、後述する電源を必要としない待機というアプリケーションではこの性質は有用である。

4.3.3 円筒折伝送路のダイオード・論理回路

本章では、円筒折伝送路におけるダイオードと論理回路を説明する。基本的な考え方は文献 [107] と同じである。

円筒折伝送路のダイオード

まず、円筒折の伝送路の信号面を接続するバネのばね定数を変更することで、文献 [107] と同じく、ばね定数の低い円筒折伝送路からばね定数の高い円筒折伝送路へと信号は伝送されないが、ばね定数の高い円筒折伝送路からばね定数の低い円筒折伝送路へは信号が伝送されるダイオード的な片方向への制限が可能である。

またそのような手法とは別に、円筒折の折り線パターンを変更することで遷移に必要な力を変えられる。そのため、円筒折の折り線パターンの角度を変えてポテンシャルエネルギーを調整し、 n 段目のエネルギー差 $\Delta\phi_n$ と $n+1$ 段目の遷移に必要なエネルギー $\Delta\psi_{n+1}$ を $\Delta\phi_n < \Delta\psi_{n+1}$ とすることで降順にのみ遷移が伝わり、ダイオードとしてはたらく。図 4.18 のようなポテンシャルエネルギーを用意することで、左から右への遷移が不可能になる。

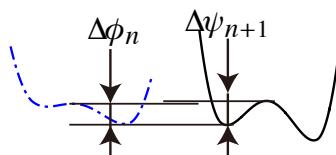


図 4.18: 円筒折の折り線パターンを変更することによる伝送路のダイオードの概略図。左から右には伝送しないが右から左には伝送する。

一般的にダイオードの素子は常にダイオードの素子として機能するため、一般的な回路としては申し分ないダイオードとして働く。しかし、ここではねじりの力がかかっているため、例えばねじりの力によってダイオードの素子として機能するかを変化させられれば、より高機能な伝送路として振る舞える。そして、 $\Delta\psi_{n+1}$ の高さはねじりの力によって調整可能である。そのため、その信号面へのモーメントを調整するだけで、ダイオードとして機能するかを切り替えることも可能である。もちろん伝送路全てに対するねじりの力を変化させた場合にダイオードとして機能するバネでも良い。

円筒折伝送路の論理回路

本節では、円筒折伝送路での論理ゲートを説明する。論理ゲートを考える際には、基本的にすべての組み合わせを実装すること、もしくは論理の完全性^{脚注 15}を持つ組み合わせを実装することが基礎となる。しかし、そのような論理の完全性を実装するのは、このような不減衰伝送路においては本質的に不可能である。不減衰伝送はその弾性エネルギーの非対称性により、 $0 \rightarrow 1$ 若しくは $1 \rightarrow 0$ の遷移のみを観察する伝送路となる。そのため、片方の情報しか伝送できず、NOT ゲートは本質的に不可能である。そこで、本論文では AND ゲートと OR ゲートの実装を紹介する。

不減衰伝送の運動を回転運動とし、2 次元上に並べて角度を伝達するモデル [111] を参考にし、信号面のねじり角度によって伝播させるモデルを考案した。これにより、論理和ゲートの動作による破壊 [107] を生じさせず、あくまで伝送の一段階として論理ゲートを動作させる。

具体的には、図 4.19 のようにばね定数 k_{logic} のバネで信号面を接続して論理回路を構築することで、AND ゲートもしくは OR ゲートが実現できる。 k_{logic} のバネのモーメントによる力を τ_k とすると、 $\tau_k < \Delta\psi < 2\tau_k$ ならば両方のバネが引き伸ばされた場合にのみ出力伝送路に信号が伝送される AND 回路となる。

本手法は $\Delta\psi$ と τ_k の調節により多入力回路にも容易に拡張可能である。3 入力の AND 回路は $2\tau_k < \Delta\psi < 3\tau_k$ で、3 入力の OR 回路は $\Delta\psi < \tau_k$ 構築できる。 $n = 4$ 以上の入力に対しても、AND 回路は $(n-1)\tau_k < \Delta\psi < n\tau_k$

^{脚注 15} 例えば、NAND ゲートのみで論理の完全性が保たれるが、これは NAND ゲートのみで 2 入力に対する 16 通りの出力を実装できるという性質を表現する。

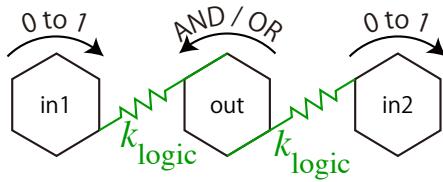


図 4.19: 円筒折伝送路での論理回路の構築例。論理回路は、 $\tau_k < \Delta\psi < 2\tau_k$ で AND、 $\Delta\psi < \tau_k$ で OR 回路となる。

で、OR 回路は $\Delta\psi < \tau_k$ 構築できる。それだけでなく、 m 入力のうち n 以上の入力があった場合に信号を伝送する論理は $(n-1)\tau_k < \Delta\psi < n\tau_k$ で構築できる。さらに、それぞれ異なるばね定数の k_{logic} とし、円筒折伝送路 3 本からそれぞれ τ_{k1} 、 τ_{k2} 、 τ_{k3} の力を受けるとし、

$$\tau_{k2} < \Delta\psi \quad (4.9)$$

$$\tau_{k3} < \Delta\psi \quad (4.10)$$

$$\Delta\psi < \tau_{k1} = \tau_{k2} + \tau_{k3} \quad (4.11)$$

とすれば、伝送路 1 + 伝送路 2 · 伝送路 3 を条件とする論理回路も可能である^{脚注 16}。

上述したとおり、不減衰伝送路は $0 \rightarrow 1$ 若しくは $1 \rightarrow 0$ の遷移のみを観察する伝送路となる。そのため NOT 回路は実装できないが、伝送路の 0 と 1 の位置関係を逆転させることで似た挙動を実現できる。例えば、今まで説明した伝送路は左に信号面がある状態を 0（信号なし）、右に信号面がある状態を 1 として伝送し、論理回路も構築していた。そして論理回路では、信号面のねじれ角度を用いて実装されている。

例えば入力の片方の伝送路の設計を変更し、ねじれの向きを逆にして伝送路として図 4.20 のように実装する。図 4.20 は、ほとんど図 4.19 であるが、論理ゲートの入力の片方である in2 のねじれの向きが逆転している。ここ

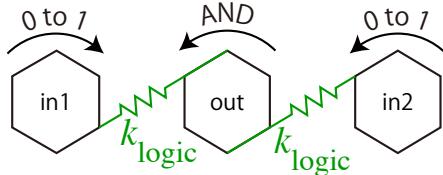


図 4.20: NOT を含む論理回路の構築例。AND ゲートの実装であるため、 $\tau_k < \Delta\psi < 2\tau_k$ となるよう設計する。片方の入力である in1 は、遷移することで出力の円筒折に力を加えるが、もう片方の入力である in2 は遷移することで出力の円筒折に力を加えなくなる。

で、円筒折伝送路 in2 は円筒折伝送路 in1 より先に入力される制約を与える。ここで円筒折伝送路 in2 に信号が伝送されないまま円筒折伝送路 in1 に信号が伝送されると、 $\Delta\psi < 2\tau_k$ より円筒折伝送路 out は信号を伝送する。一方、円筒折伝送路 in2 に信号が伝送されると、in2 から与えられる力 τ_k が消える。そのため、その後円筒折伝送路 in1 に信号が伝送しても円筒折伝送路 out にかかる力は τ_k であり、 $\tau_k < \Delta\psi$ より円筒折伝送路 out は信号を伝送しない。

以上のようにねじれの向きを逆転した円筒折伝送路を入力とする論理ゲートは、その入力を反転したものと解釈して出力するゲートとなる。入力を反転した物として解釈する円筒折伝送路の状態が先に変化しているという入力のタイミングの制約が存在するが、円筒折伝送路の伝送時間は長さや信号面を接続するバネのばね定数によって変化させられるため、入力のタイミングを制御することは可能である。

脚注 16 この手法のみでどの程度複雑な論理回路ができるかは筆者は知らないが、本結果の主要部分ではないため別文献に譲る

4.4 シミュレーション

本章では、設計した円筒折伝送路の物理シミュレーションを行う。シミュレーションを行う円筒折伝送路は、マスバネダンパ系であるとし、マスが信号面の質量^{脚注 17}を、バネがその信号面を接続するバネと非対称なポテンシャルエネルギーを実現するためのバネを、ダンパが散逸するエネルギーを表す要素とした。外部にバネを持たない減衰する円筒折伝送路（外部バネなし、normal）・伝送方向に引っ張るバネを搭載した円筒折不減衰伝送路（伝送方向バネあり、axial）・ねじれ方向に引っ張るバネを搭載した円筒折不減衰伝送路（ねじれ方向バネあり、rotational）の3手法をシミュレートし、それぞれの伝送路における信号面の位置を計算した。

信号面の質量を0.5^{脚注 18}とし、信号面を接続するバネはばね定数が0.05^{脚注 19}である。散逸するエネルギーは1単位時間^{脚注 20}に40%とし、時間が1単位時間経過する度に60%しか残らない厳しい条件でのシミュレーションとした。ステップ時間は0.01であり、散逸後のエネルギーは各ステップで $0.6^{0.01}$ である。底辺の長さが100である円筒折を2個組み合わせた円筒折対は長さ160で固定され、ポテンシャルエネルギーはトラスモデルを用いて計算した[118]。そしてポテンシャルエネルギーによる力はポテンシャルエネルギーの微分から求めた。

図4.21に、3種類の円筒折伝送路のシミュレーション結果を示す。10ユニットの伝送路で実験をした。

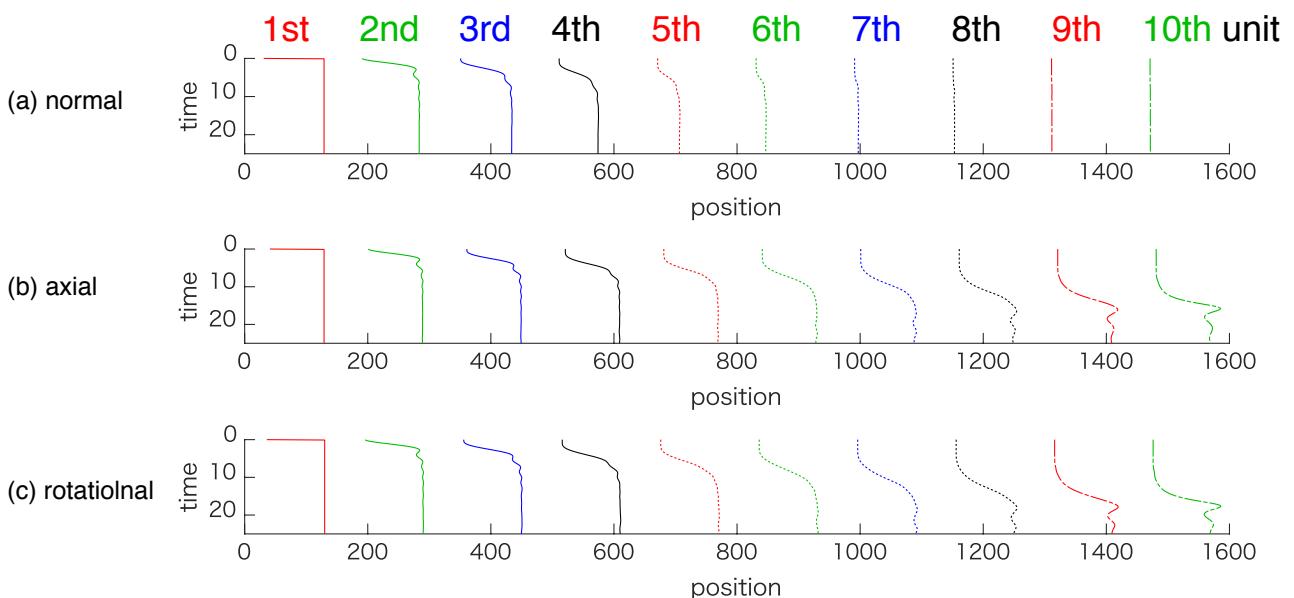


図4.21: 円筒折伝送路のシミュレーションの結果（信号面の位置）。(a) 外部バネなし伝送路の信号面の位置。(b) 伝送方向バネあり伝送路の信号面の位置。(c) ねじれ方向バネあり伝送路の信号面の位置。

信号の传送は1番目のユニットの信号面の位置のみを時間0.01においてState1に移動させることで開始される。その後は1番目のユニットの信号面を固定したまま、マスバネダンパ系の挙動を観察するのみである。ここで、それぞれの伝送路はポテンシャルエネルギーが異なるため、State0とState1の位置が異なる。それぞれの伝送路のState0とState1の位置を表4.1に示す。伝送方向バネあり伝送路は厳密にState1の位置は外部バネなし

表4.1: それぞれの伝送路のState0とState1の位置

	State0	State1
外部バネなし伝送路	31	129
伝送方向バネあり伝送路	41	129
ねじれ方向バネあり伝送路	36	130

脚注 17 シミュレーション上設定したが、軽薄な機構のためには小さくして良い。

脚注 18 無次元

脚注 19 無次元

脚注 20 無次元

伝送路と等しいが、ねじれ方向バネあり伝送路は State1 の位置が 1 ずれている。これはバネ方向伝送路ではそれぞれの円筒折の安定状態からねじれ角を求めているからであり、より大きくねじろうとするからである^{脚注 21}。

時間 0においては、 i 番目のユニットの信号面はそれぞれの State0 である $i \times 160 + \{31, 41, 36\}$ （それぞれ {外部バネなし伝送路、伝送方向バネあり伝送路、ねじれ方向バネあり伝送路}）に位置する。

外部バネなし伝送路は、ユニット番号が増加するにつれて信号の伝送が減衰してしまうため、途中までは信号面の運動が伝播していくが、10 番目のユニットではほとんど信号面は動いていない。一方で、伝送方向バネあり伝送路とねじれ方向バネあり伝送路では 10 番目のユニットまで信号面の運動が伝わっている。図に示したシミュレーション結果は 10 ユニットだけを接続した伝送路であるが、少なくとも 100 ユニットを接続したシミュレーションにおいても全てのユニットの信号面が State1 へと遷移した。

1 番目のユニットに入力した信号の波形は完全なステップであるがその形はバネやダンパーの要素によって徐々に崩れる。文献 [117] では圧縮方向の変位を入力しても円筒折が引っ張られる力へと形状が変化したが、本構造は収縮状態へと変化するために用いているポテンシャルエネルギーの領域が異なるためそのような変化が生じていない。不減衰伝送路では、4 番目のユニット付近では緩やかな二次遅れ系のような波形となり、十分長い伝送路ではこの形状で安定して信号が伝送される。そして最後のユニットの信号面に振り戻しが生じ、その信号が伝送方向とは逆方向に伝播している。最後のユニットの信号のオーバーシュートを防げばこの現象は消えるだろう。

また信号の伝送が最初のユニットの遷移の勢いによる物ではないことを確認するために、1 番目のユニットの信号面をゆっくり動かすことで信号の伝送を開始させる実験もおこなった。この実験では信号の伝送は 1 番目のユニットの信号面の位置のみを時間 10 まで線形に State1 に移動させることで開始する。その開始方法でのシミュレーション結果を図 4.22 に示す。

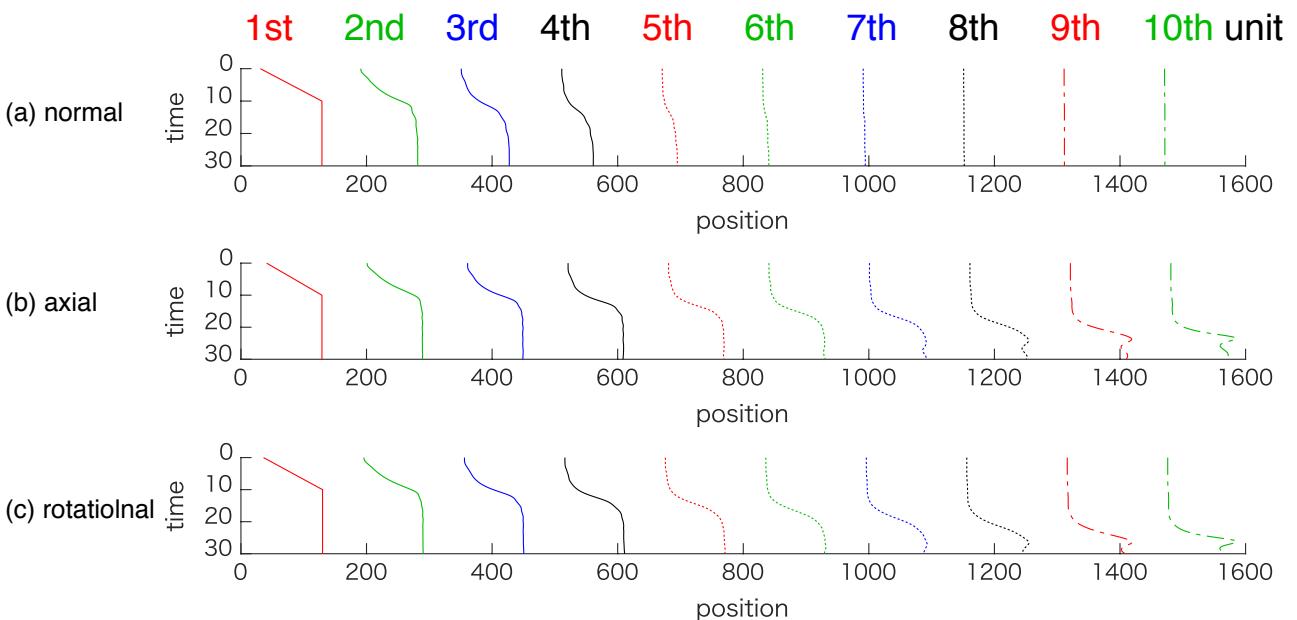


図 4.22: 開始トリガが低速である円筒折伝送路のシミュレーションの結果（信号面の位置）。(a) 外部バネなし伝送路の信号面の位置。(b) 伝送方向バネあり伝送路の信号面の位置。(c) ねじれ方向バネあり伝送路の信号面の位置。

外部バネなし伝送路のみの実験では、図 4.23 に示すとおり 6 ユニットであれば最後のユニットまで遷移した。この結果より、バネなしでも変形を連鎖させる性質を有することがわかる。

1 番目のユニットの遷移がゆっくりであっても、外部バネなし伝送路では信号は減衰して信号の伝送は途中で止まる。一方、伝送方向バネあり伝送路とねじれ方向バネあり伝送路は 1 番目のユニットの遷移の速度の低下にかかわらず図 4.21 と同じような形状の遷移を実現している。したがって、本円筒折伝送路は 1 番目のユニットの遷

^{脚注 21} いちいちねじれ角を計算してバネを設定することは非常に面倒である一方、それぞれの円筒折の安定状態のねじれ角は簡単に計算できる上、ほとんどその挙動が変わらない。

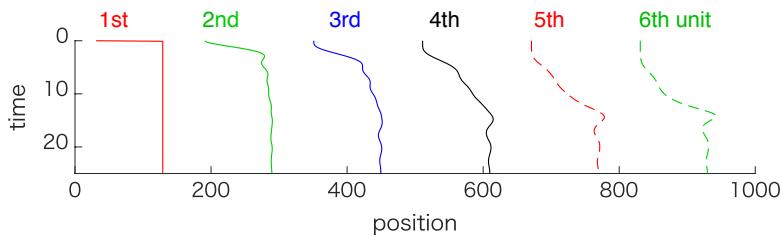


図 4.23: 外部バネなし伝送路での遷移が最後まで伝わるシミュレーションの結果（信号面の位置）。

移の勢いがゆっくりであっても伝送を実現できる。むしろ、1番目のユニットはこの開始のための遷移において、State1に遷移しようとしている力が働いているにもかかわらず遷移の速度を上げないような遷移である。そしてこのシミュレーションにおいても、図に示した結果は10ユニットだけを接続した伝送路であるが、少なくとも100ユニットを接続したシミュレーションにおいても全てのユニットの信号面がState1へと遷移した。

以上のように、1番目のユニットの遷移が高速に生じた場合にも低速に生じた場合にも十分後のユニットでは波形が似通っている。そして、最後のユニットではオーバーシュートが存在する。

同様に、論理ゲートの動作についてもシミュレーションを行った。論理ゲートの動作については、図4.20の k_{logic} がどのような値においてANDゲートやORゲートとなるかを測定した。入力の伝送路と出力の伝送路はともに長さを3ユニットとしている。本シミュレーションでは入力の位置を固定しており、入力がin1とin2が共に0の場合には伝送が行われないことを確認し、片方のみが1である場合に伝送が行われたゲートをORゲート、入力がともに1である場合にのみ伝送が行われたゲートをANDゲートとした。その結果、表4.2に示す k_{logic} を用いてANDゲートとORゲートを実現できた。

表 4.2: 論理ゲートの種類とそれを構築するための k_{logic}

論理ゲート	k_{logic}	
	伝送方向バネあり伝送路	ねじれ方向バネあり伝送路
AND	0.05–0.14	0.07–0.25
OR	0.15–	0.26–

設計段階では、 $\tau_k < \Delta\psi < 2\tau_k$ の範囲でAND回路が実現し、 $\Delta\psi < \tau_k$ の範囲でOR回路が実現すると述べた。そして、シミュレーションで変化させているのはばね定数 k_{logic} であり、 τ_k に比例しそうなパラメータである。しかし、ばね定数を上昇させることによってin1やin2の信号面の動きは抑制され、outの信号面の動きは大きくなる。そのため、厳密には $\tau_k < \Delta\psi < 2\tau_k$ と $\Delta\psi < \tau_k$ がそのまま用いることはできない。

伝送方向バネあり伝送路のAND回路を実現するばね定数を考えると、表4.2では0.05–0.14である。ばね定数と τ_k に対して $a k_{\text{logic}} = \tau_k$ とすると、下限の0.05を考えると、 $\tau_k < \Delta\psi < 2\tau_k$ において $\tau_k < \Delta\psi = 2\tau_k$ より $\Delta\psi = 0.1a$ となる。一方、上限の0.14を考えると $\tau_k < \Delta\psi < 2\tau_k$ において $\tau_k = \Delta\psi < 2\tau_k$ であるため $\Delta\psi = 0.14a$ である。実際に入力した値は0.01刻みである事を考慮すると、更に $\Delta\psi$ の幅は広くなる。このため、設計思想としては $\tau_k < \Delta\psi < 2\tau_k$ を用いるが、実際の値は表4.2のように値を変えなければならない。

ねじれ方向バネあり伝送路はこの差がより激しい。ねじれ方向バネあり伝送路は、伝送方向バネあり伝送路に比べて $\Delta\psi$ や $\frac{\Delta\psi}{\Delta\phi}$ が大きいため、より後続のユニットからの力を受けることも影響している。ORゲートは十分大きなばね定数とすれば問題ないが、軽微な問題があるため付録??にて述べる。

以上の結果より、円筒折と外部のバネを用いることで、ダイオードや論理ゲートが可能であると結論づける。1番目のユニットの遷移には速度はそれほど必要ではないことと、ばね定数の調節だけで論理回路が構築できることが判明した。

4.5 不減衰伝送路の実装

本節では提案する不減衰伝送路を製作し、撮影により遷移を測定する。実装した不減衰伝送路を図 4.24 に示す。左から順にユニット 1、ユニット 2、ユニット 3、ユニット 4 と呼ぶ。上記で説明してきた不減衰伝送路と基礎構

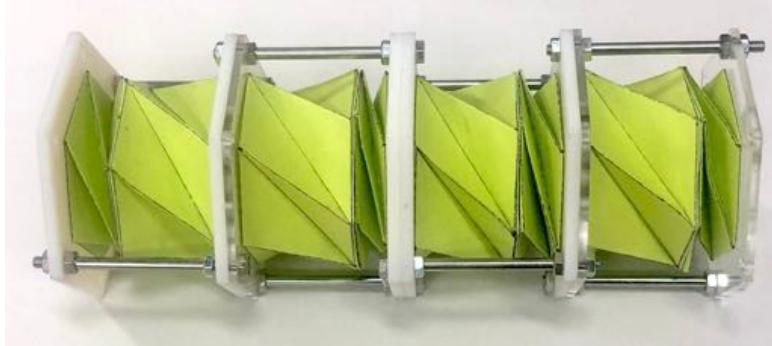


図 4.24: 実装した 4 ユニットの不減衰伝送路。重さは 114g（うち固定のための器具が 106.4g）。厚さは 28 mm（うち固定のための器具が 16 mm）。

造は同じであり、円筒折 8 段からなる。それぞれのユニットは円筒折を 2 個有しており、どちらか片方の円筒折のみが伸長状態であり、もう片方の円筒折は収縮している状態で安定である。例えば、図 4.24 の左端のユニット 1 の中の円筒折は、左側が収縮し、右側が伸長している。そして、ユニット 2 以降の中の円筒折は、左側が伸長し、右側が収縮している。

紙で円筒折を実装する際に、紙は厚紙（タント紙 N-61、 0.1 kg/m^2 、株式会社竹尾）を用い、その紙をテープのり（ドットライナー、タ-DM400-08、コクヨ株式会社）を用いて接着した。しかし一辺 25 mm、 $\alpha = 45^\circ$ の円筒折をこの材料で実装したところ、円筒折が行う伸縮よりも先に、テープのりの接着が剥がれることによる崩壊が生じた²²。接着する小面を増加させることによってこの接着自体を強化できるかもしれないが、接着する小面を増加させることによって折り目に 2 枚以上の紙が重なると、不均等な力がかかるために接着する小面を 1 面に制限している。そのため、円筒折の意図した遷移である伸縮が接着を維持したまま生じる円筒折を用意するためには円筒折の角度を $\alpha = 40^\circ$ へ変化させた²³。

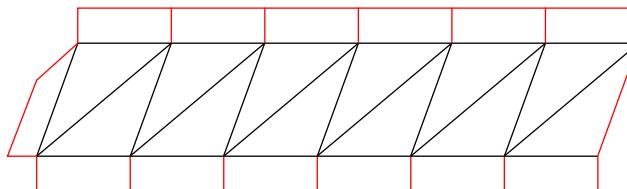


図 4.25: 円筒折伝送路に用いた円筒折の展開図（1 段分）。黒線が折り目を、赤線が切り取り線を示す。

用いた円筒折の 1 個分を図 4.25 に示す。黒線が折り目を表し、赤線が切り取り線を表す。まず黒線の部分をカッティングプロッタ (CFL-605RT、ミマキエンジニアリング) のペン機能でなぞることで折り目を付ける。その後赤線の部分を CFL-605RT のカッター機能で切る。

赤線と黒線で囲まれた領域は、最も右にある三角形の部分以外のりしろである。そして、左のりしろは最も右にある三角形の部分に接着される。上下にある長方形の領域は信号面または長さを固定するための面に接着される。このときそれぞれの面は六角形の内側に来るよう折り畳まれて接着される²⁴。

それぞれのユニットは一辺 25 mm、 $\alpha = 40^\circ$ の円筒折とした。ユニット内の円筒折同士はボール紙とテープのりで接着されており、ボール紙は一辺 25 mm の六角形に切断されている。このボール紙は信号面であり、ボール紙同士にバネが接続され、ユニット同士の相互作用が生まれる。ボール紙で接続された 2 個の円筒折は、更にその外側から長さを制約される。その長さの制約のために図 4.26 と図 4.27 に示す穴の空いた六角形状の板を用いた。

脚注 22 のり付けが剥がれたり、紙が破れたりする遷移は、正しい遷移ではないとは言いづらいが、意図しない遷移である。

脚注 23 接着手法を考え直しても良い。

脚注 24 外側でも良いが、実験は内側に折り込んで製作した。

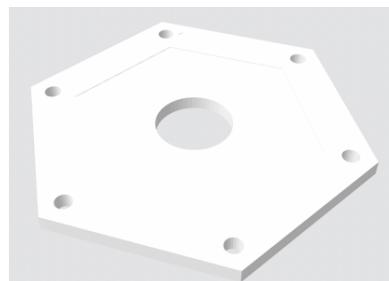


図 4.26: 不減衰伝送路に用いる、長さを固定するための円筒折の固定板。画像は STL ファイルのプレビューである。

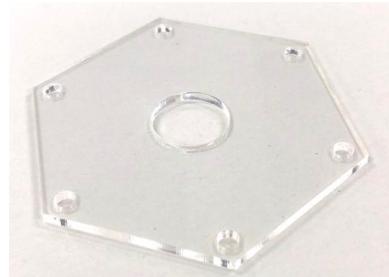


図 4.27: 不減衰伝送路に用いる、長さを固定するための円筒折の固定板。アクリル製で厚みは 2 mm である。

この六角形の一辺は 35 mm であり、円筒折の断面よりも更に 5 mm ずつ外に余裕を持つ。中央にはバネが通るための直径 15 mm の穴が空けられており、外周付近には 6 力所にネジで固定するための直径 3.3 mm の穴が空けられている。この六角形の固定板同士はネジロッド（レインボープロダクツ、直径 3 mm 長さ 51 mm）で固定される。このネジロッドは全長 51 mm であり、両側に 10.5 mm ずつネジが切ってあるため、30 mm の幅を固定することができる。ネジロッドの両側にナットを 2 個ずつ用い、そのナットの間に固定板を固定するため、更にナットの厚さを足し合わせた長さが固定板で固定された円筒折の長さとなる。今回用いたナットは厚さ 2 mm であるため、30 mm から更に 2 mm ずつ外側がナットの面となり、2 個の円筒折は長さ 34 mm で固定されている。固定を行わず、力が加わらないように置いた状態では、円筒折ユニットの長さは前の状態・個体差・頂点の差^{脚注 25}を含めて 33 mm から 37 mm であった。

固定板には六角形の 6 個の頂点付近に穴が空いているため、正三角形を形成する 3 個の頂点でユニットの長さを制限しつつ、互い違いにネジ止めする正三角形を配置することで隣のユニットとの穴をずらして構築できる。そうして固定された円筒折ユニットが図 4.24 に示される円筒折である。この円筒折は 4 ユニットであるが、同じユニットをネジロッドにより同様に接続し続けることにより、円筒折の伝送路をどこまでも伸ばせる。図 4.24 は、ネジロッドの挿入とナットによる固定する手間が存在する。しかしこの手法で組み立てることは長距離の伝送を行う場合にはユニット数が増え、手間も増加するためにあまり好ましくない。そのため、より長い機構を手間なく実現するためには自己ロックを持つ折り畳み機構などで、折り畳んだ状態から伸長するだけで自動的に長さをユニットごとに固定する機構が望ましい。

^{脚注 25}円筒折は理論上鉛直に伸びるが、製造過程における誤差などによって少し斜めになる場合がある。そのため、6 力所の高さが全く同じとは限らない

4.5.1 挙動

この円筒折で実装した不減衰伝送路のユニット1を外部からの力によって遷移させ、ユニット2以降の遷移を観察する。今回の実験ではユニット1の遷移は手動で行った。ユニット1の信号面の中心付近を棒で伝送路の伝送方向へと押すことによって遷移させた。動画のフレームレートは60fpsである。

まず、遷移が途中で止まってしまうタイプの挙動を示す。それぞれの信号面の位置の推移を図4.28に示す。図

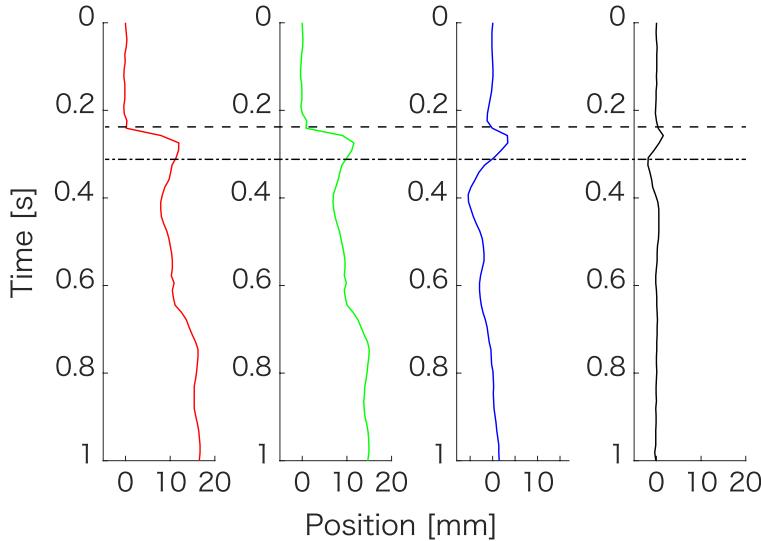


図4.28: 遷移が途中で止まってしまうパラメータでの信号面の位置のグラフ。左から赤色・緑色・青色・黒色のグラフであり、それぞれユニット1・ユニット2・ユニット3・ユニット4の位置を示す。破線は0.25sであり、1枚目の遷移が開始した時刻である。一点鎖線は4枚目の信号面が遷移できずに生じた振り戻しのピークである。

4.28では、信号面の位置を、撮影側にある信号面の頂点の位置としてグラフ化している。目で見た範囲では、どの信号面も伝送方向に垂直な平面であり続ける遷移を行ったため、信号面の頂点の位置は信号面の位置とほぼ一致しているはずである。

手で押した力によりユニット1が遷移するとほぼ同時にユニット2は遷移している。そしてその動きはユニット3へと伝わろうとするが、ユニット3の遷移は途中で止まってしまい、バネの力等によって押し戻されている。またユニット4はほとんど遷移することなく、振り戻しも生じている。ユニット1はほぼ完全に遷移しきっているため18mm程度まで遷移しているが、ユニット2は15mm程度までの遷移である。この差は、ユニット2とユニット3の間にあるバネの力による物と考えられる。そしてユニット4は全く遷移していないが、ユニット3は1mm程度遷移しており、上記の力が働いている結果だと考えられる。

ユニット1に加えた力はユニット1が遷移した後もしばらくは続けて与えられるが、与える力が0となった状態でもユニット1は遷移した状態を保った。図??BとCのような2段階の遷移が起きている。ただし図4.28の2段階の遷移は図??の2段階の遷移とは異なる。図??Bは遷移開始の波が伝わった物であり、図??Cは遷移が確定して全ての遷移が流れ始めた波である。そして図4.28の1つ目のピークは遷移開始の波が伝わった物であるが、図4.28の2つ目のピークはユニット1とユニット2が同時に生じており信号面付近で折り目が図4.29(a)のようになっていた。

図4.29(a)は、理想的な折り目の状態である図4.29(b)とは乖離しており、図4.29(c)のような折り目が生じてしまっている。図4.29(b)は円筒折の理想的な折り目を実現するが、図4.29(c)の折り目は増加した折り目がバネのような振る舞いを示す。そのバネのような振る舞いが図4.28の2段階の遷移につながっていると考えた。

そして振り戻しも逆方向に伝わっている。振り戻しの力がユニット1まで伝播していることも同じく図4.28に現れている。流れ戻しが安定するまでの動きについても0.4s~0.8sあたりであり、比較的長い時間続いており、遷移しようとしている力と遷移させまいとしている力のせめぎ合いが感じられる。遷移が行われない場合には文献[117]に見られる円筒折が引っ張られる力も生じるため、このように長い時間波が留まるともいえる。

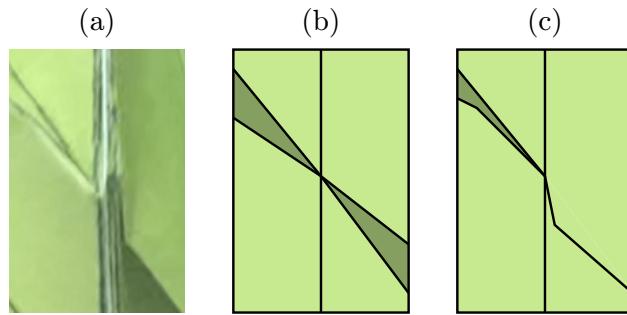


図 4.29: 理論上の円筒折の折り線と実物の差。(a) 実際の折り目の写真。(b) 理想的な折り目の概念図。(c) 実際に生じている折り目。不要な折り目によって理想的な形状から乖離する。

次に、遷移が最後まで伝送されるタイプの挙動を示す。遷移が途中で止まってしまう実験と同様に、それぞれの信号面の位置の推移を図 4.30 に示す。図 4.30 でも、信号面の位置を、撮影側にある信号面の頂点の位置として

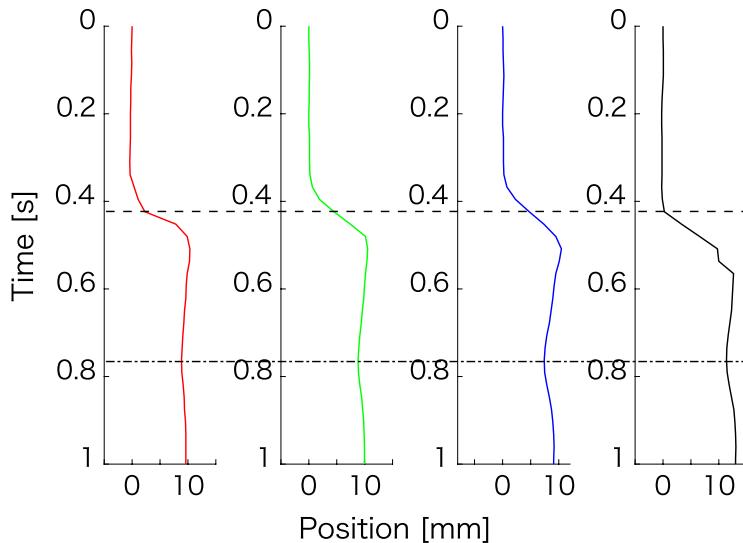


図 4.30: 遷移が最後まで伝送されるパラメータでの信号面の位置のグラフ。左から赤色・緑色・青色・黒色のグラフであり、それぞれユニット 1・ユニット 2・ユニット 3・ユニット 4 破線は 0.42s 付近であり、1 枚目の遷移が開始した時刻である。一点鎖線は 4 枚目の信号面が遷移できたにも関わらず生じる振り戻しのピーカーである。

グラフ化している。図 4.28 と同様にユニット 1 が遷移するとほぼ同時にユニット 2 は遷移している。そしてその動きはユニット 3 へと伝わり、ユニット 4 まで遷移が完了している。ユニット 4 からの振り戻しも小さく、ユニット 1 ではほとんど観測されていない。

ユニット 4 の最初の遷移に時間がかかっているように見えるのは、他と比べて遷移が大きい性質に由来している。他のユニットは、後続するユニットを動かすというエネルギーを必要としている上、次のユニットに与える力が必要であるため、それらの影響により信号面は減速する。一方でユニット 4 は信号面がユニット 3 とのみ接続されており、ユニット 5 は存在しない。そのため、他のユニットに比べて大きく信号面が移動できる。この、最後のユニットだけ大きく信号面を移動させる様子は、シミュレーションの結果である図 4.21 と一致している。その後の振り戻しの小ささは図 4.21 と一致するが、その速度は少し異なり、実際の折り紙が遅い傾向がある^{脚注 26}。

脚注 26 遷移しない場合の振り戻しも同様である。

4.5.2 シミュレーションとの差異

まず、シミュレーションにはなかった要素として、現実の紙には厚さや質量が存在する。またこの厚さがあることにより、折り目は完全なヒンジではなく、ある角度に戻ろうとするヒンジとなる。そのため、実際の円筒折は、厚さ0の完全に収縮した状態にはならない。今回用いているユニットは片方の円筒折が伸長し、もう片方の円筒折が収縮した状態を安定状態として扱っているが、この中間の角度が戻ろうとする「ある角度」となっていなければ対称的なポテンシャルにはならない^{脚注27}。そのため、100回ほど遷移を繰り返したあとに実験をおこなった。そして信号面以外にも質量が存在する。

また今回行った円筒折は、信号面に穴が空いておらず、ユニット1とユニット2の信号面の間などは信号面と円筒折によって密閉されている。そのため、単に円筒折の紙の変形によるポテンシャル以外にも、その空気の圧縮・膨張のエネルギーも発生してしまう。実際には厳密に密閉したわけではないため空気が漏れることによって時間が経過することで解消する問題はあるが、空気が抜ける音などが遷移に付随したため、力が働いていたことは確かである。この問題は信号面に穴を開けることによって容易に解決できる。今回はボール紙を信号面に用いたが、信号面もアクリル板を用いて製作することでより強度が増し、穴を開けても十分な強度が得られるはずである。この風圧に関しては、信号面同士をバネで接続しない場合にも隣り合う信号面に信号面の動きが影響することから確認できる^{脚注28}。信号面は変形しないため硬いアクリル板を使っても問題ないが、円筒折部分は小面の変形を伴うため紙での製作が適している。文献[116]のように、トラスモデルに対応するバネとアクリル板などの設計も可能であり、この場合はアクリル板などの剛体に近い材料でも可能である。しかし一方でこのような設計は材料により軽薄さが損なわれやすい。

そしてトラスモデルのモデル化による誤差が存在する。トラスモデルは円筒折1ユニットでの安定状態を精度良く求めることができるとあるが、1ユニットでの $\alpha = 40^\circ$ の円筒折と、同じ円筒折を組み合わせた長さを固定した円筒折対のポテンシャルエネルギーの差はモデルに比べて実物で増大しているように体感された。そのポテンシャルエネルギーの増大は伝送速度の高速化につながり、図4.30では順に伝送されることが見て取れる一方で目視できない速度で信号が伝送された。

そして、入力の形状の差が生じている。入力の形状の差によって伝送に影響があまりないことをシミュレーションで示したが、ボール紙やアクリル板などは剛体ではないため、撃力によっては歪みが生じる。最後に、現実での実装ではバネが伝送方向以外にも力を働かせる要因が存在する。バネが完全に一直線上に存在し続けることは難しく、圧縮されたバネが一度どちらかにずれてしまった場合にはそのズレが増加する。

4.6 センサノードのトリガへの応用

本章では単に機械的信号が減衰することなく伝送されるだけではなく、センサノードのトリガとして用いる円筒折伝送路を紹介する。モニタリングを行う機器がセンサ値によって起動・動作する必要がある場合、センサ値を監視するために何度もセンシングを行う必要がある。そのセンシングに処理装置の起動が必要である場合など、センサは電池を激しく消費し、特に無線センサノードによって電池の消費は電池の交換の手間の増加や稼働時間の減少につながるため問題となる。離れた様々な位置のセンサ値によって発動する場合などには、その場所ごとにセンサ・処理装置を設置する事も可能であるが、伝送路を用いるという手法も可能である。

本章では、本部で提案した円筒折伝送路を用いることで、処理装置が1個でありモニタリングを消費電力なしで行う手法を提案する(図4.31)。例えば、温度によってばね定数が変わるバネで外部のバネを構築したり、剛性の変わら板材で円筒折を折ったりすれば、温度によって伝送が開始する円筒折伝送路が可能となる[119]。他にも、湿度が高くなると紙が柔らかくなることで伝送が開始する円筒折伝送路や、振動によって伝送が開始する円筒折伝送路も考えられる。このような物理的な特性を用いていれば、センサ自体を物理的なトリガとして使うことが可能である。そして、図4.21等に示された最後の信号面がオーバーシュートしている信号面を、圧電素子へ衝突させることで電圧を生むことができる。外部のピンの電圧を高くすれば、マイクロコンピュータの

脚注27より厳密には、ある角度に戻ろうとするポテンシャルとの和が対称であれば良い。

脚注28遷移が生じるほどではないが、多少位置がずれる。

Ultra Low-Power Wake-Up (ULPWU) 機能を用いて超低電力で待機できる [120]。またアンテナなどに直結されることである周波数の電波を一瞬出すことも可能であろう。

多くのこのような物理的な特性を用いるセンサは微弱な電流や抵抗の変化しか示さず、ゆっくりとした変化の観測結果を無電力で遠くの処理装置まで伝えることは難しかった。本論文では、円筒折伝送路の1番目のユニットはゆっくりとした動作でも伝送を開始し、数ユニット後では安定した波に変わることを示している。そこで、無電力で待機しつつ、微弱な環境の変化を遠くまで伝送できる伝送路として円筒折伝送路を用いた不減衰伝送路が実現できる。

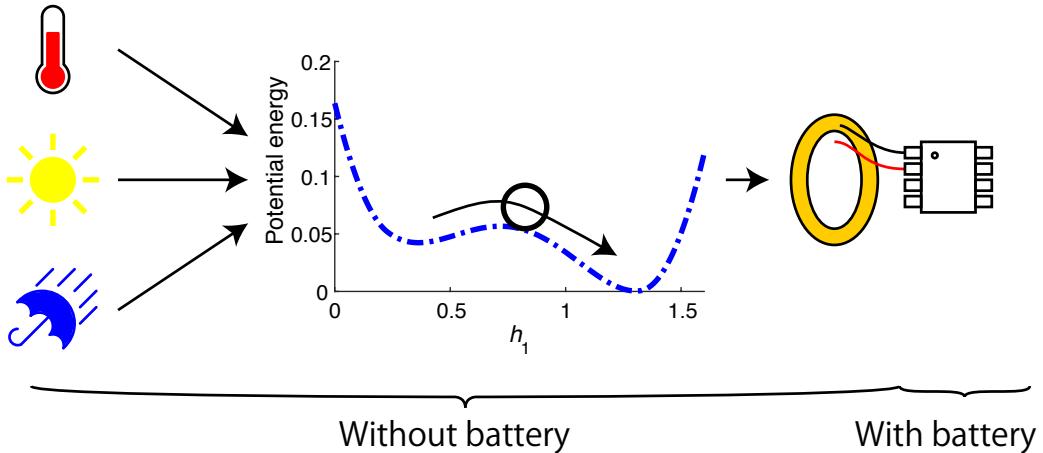


図 4.31: センサノードへの応用例。温度や日光や水分によって変形が開始するような円筒折を用意し、その力学的エネルギーを圧電素子へ与えることでマイクロコンピュータへの入力とする。この手法によりマイクロコンピュータのみが電力を必要とするセンサノードが実現する。

4.7 第4部のまとめ

第4部では、変形に伴う運動エネルギーをそのまま次の変形の引き金とするニュートン力学的な手法を提案した。変形がニュートン力学的に次の変形を引き起こす機構を並べることで、次々と引き起こされる運動の例を双安定構造からなる機械的信号の不減衰伝送路で示した。そして、その不減衰伝送路のポテンシャルエネルギーを調整することで、ダイオード・論理回路を構築し、単なる順序だった変形以外にも話を展開した。また伝送路・ダイオード・論理回路を破壊を伴わない構造とし、再利用を可能とすることで実用性も向上させた。この構造は、弾性構造内の安定した信号の伝送や、無電力で待機できるセンサトリガとして応用できる。

また伝送方向の変更と伝送路の再利用を、制御筒と呼んだ外部の1部品の移動によって実現した。軸方向の力もねじりの力も制御筒とそれを動かす1アクチュエータで全てのユニットに与えられるため、単純な構造で実現できる。永久機関ではないため、双方向通信や伝送路の再利用には与える力の方向を変えるためにエネルギーが必要であるが、伝送路の状態を変えるのではなく、ポテンシャルエネルギーの形状を変える手法であるため、連續かつ単調な力で行える。

そして、センサノードのトリガとしての応用では電力を必要としないセンサと伝送路を実現し、マイクロコンピュータも超低電力で待機できるシステムの可能性も述べた。振動によって信号の伝送が始まるセンサの応用を述べたが、振動による信号の誤った伝送を考えると、ねじれの差を用いることで、並列移動に比べて振動等による外乱に強い再利用可能な不減衰伝送路が可能である^{脚注 29}。

本研究では円筒折の信号面の伝送方向の位置として、伝送方向への変位だけを用いていた。円筒折のポテンシャルエネルギーは長さとねじれの2変数によって決まる。本論文で主に扱うポテンシャルエネルギーは長さのみを制約した際にポテンシャルエネルギーが最も小さくなるようなねじれにおけるポテンシャルエネルギーである。ねじれについて制約しない場合、ポテンシャルエネルギーが最小になるようにねじれが自動的に生じるため、ねじ

脚注 29 外部からねじれの力が加えられることは、伝送方向への擊力に比べて低確率である

れを制約しないことでこの状態を用いている。一方、文献 [115] ではその両方を制約しているため、円筒折のポテンシャルエネルギーは制約に対応する局面の断面を見ることとなる。変位とねじれを制御できるような送信機器を用意すれば、複数の周波数の信号を同時に円筒折伝送路に流すことや、伝送速度の調整も可能となるだろう。

第4部では、折り紙の変形を起こすための軽薄な機構として折り紙自身の弾性エネルギーに着目し、変形が次々と変形を生じさせる折り紙構造を円筒折で実現した。第4部の技術により、回路などの電気的な制御を用いない、折り紙の次の変形を引き起こす機構を可能とした。

■ 第5章

円筒折による順序動作の実現

第5章の内容は、折り紙の変形の順を制御する軽薄な「機構」である。第3章で順に変形を生じさせる「回路」を提案したが、本第5章では全体に力がかかるにもかかわらず、折り線パターンだけで折れる順を制御する「機構」の設計について述べる。

従来の多段階の変形を行う折り紙はそれぞれの段階とそれぞれの折り目に対してアクチュエータを有し、適切なタイミングで駆動することで変形の順を制御していた。しかしアクチュエータの増加は、アクチュエータ自身と配線による重さと厚さが折り紙の軽薄さを損なってしまう。もし等しい力にもかかわらず多段階に折れる折り紙が実現すれば、全体を制御するアクチュエータのみで多段階の変形が可能であり、アクチュエータの削減により折り紙を軽薄な構造へと復活させられる。

本第5章ではこの「多段階に折れる折り紙構造」を設計し、いくつかの設計を実装することでアクチュエータの削減による軽薄な構造を実証した。多段階に折れる構造はバイステーブル構造である円筒折を用いて実現した。円筒折は折り線パターンの角度を変えることでそのポテンシャルエネルギーを調節でき、強い（硬い）円筒折や弱い（柔らかい）円筒折を実装できる。そしてこれらの円筒折を直列に接続することで、常に弱い円筒折から順に段階的に収縮する性質を示す。そして展開時にも弱い円筒折から順に段階的に収縮する性質を持ち、円筒折を接続した構造はヒステリシス効果も持つ。これらの内容について本章で述べる。

本第5章の成果は、

[B1] Fuminori Okuya, Takuya Umedachi, Kazuya Saito, and Yoshihiro Kawahara, “Crawling Cylindrical Origami Robot Driven by Single Actuator,” The 7th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education (7OSME), vol.3, pp.949–963, Sept. 2018.

[C7] 奥谷文徳, 梅館拓也, 斎藤一哉, 川原圭博, “円筒折を用いた單一アクチュエータで直線上の物体上を進行するロボット,” 情報処理学会全国大会講演論文集, no.6B-01, March 2018.

で発表された内容の再利用を含む。

5.1 折り紙ロボットと重くてかさばるアクチュエータ

ロボットの重量や大きさに制限がなければ、構造に制約は少ないが、宇宙・体内・狭所などの環境では特に、重量や大きさは重要な制約になる。一方で、折り紙は大きな展開構造をコンパクトに・薄く折りたたむことができ、軽い素材で強い構造を実現できるため、そのような制約を満たす構造の実現を容易にする。このような利点を活かし、折り紙構造は人工衛星のソーラーパネルの折りたたみ [121]・頑丈な建築構造 [122]・ステントグラフトのステント [78] などに応用されてきた。このような例では展開もしくは折りたたみは一度しか行われず、大きな最終形状を実現する構造を、小さく運搬することを目的として折り紙構造を採用している。一方で、折り畳めるライオットシールド [123] や図 5.1 に示す折り紙ロボット [11] は、展開と折りたたみを繰り返して用いる。

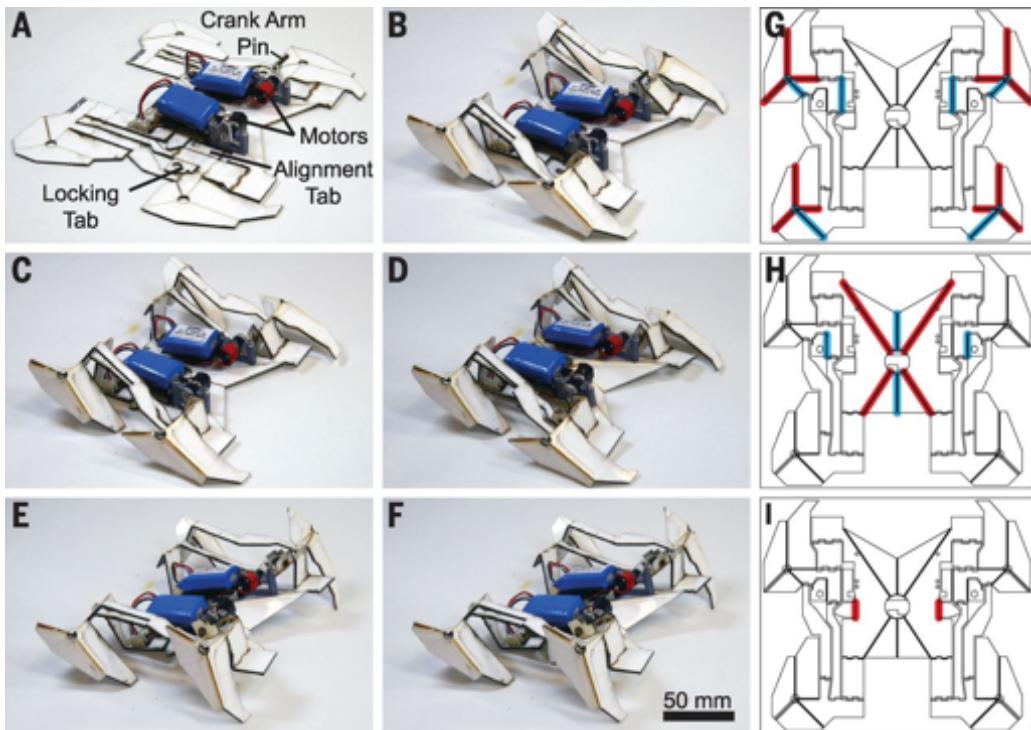


図 5.1: 従来の折り紙ロボットの例 [11]。折り紙構造である白い板部分は平坦であるが、モータやバッテリの部分は平坦でない。

折り畳めるライオットシールドは折りたたみ状態での運搬と、展開状態での防弾面積の拡大を目的としており、折り紙ロボット [11] は折り紙構造をリンクのようにして用いている。しかし、主として用いているのは折りたたみ状態（平坦な状態）での運搬と展開状態でのリンク機構である。このような展開と折りたたみを更に応用する、展開から折りたたみ構造への遷移途中の変化を用いるシステムを考えられる。

このように折り紙構造は展開・折りによって折り紙構造の応用は広がる一方、多くのアクチュエータは無視できない重さと厚さを持つ。折り紙構造を軽薄るために採用したにもかかわらず、アクチュエータが軽く薄くないならば利点が生かせない。また多くのアクチュエータを搭載するためにはアクチュエータの固定などの多くの処理が必要である。このような理由によりアクチュエータの増加は一般的なロボット以上に折り紙ロボットには致命的な問題である。

本 5 章では、折り紙構造の利点を活かしつつ折り紙ロボットを実現するために、最小限のアクチュエータで選択的に折り紙の変形を実現できる構造を提案する。展開と折りたたみの繰り返しにアクチュエータを用いるため、そのアクチュエータの動作により選択的な変形を実現できる構造を考案した。

5.2 円筒折タワーの選択的変形とヒステリシス特性

5年以内に出版予定

本章では、異なる性質の円筒折を接続した円筒折タワーで実現できる選択的変形と円筒折タワーが有するヒステリシス特性について説明する。また、そのような円筒折タワーの状態を、ヒステリシス特性を活用することで制御できることを示す。

これから説明する円筒折タワーの選択的変形とヒステリシス特性は、異なる円筒折ユニットを接続することで生じる。折り線パターンの角度 α を調節することで、円筒折ユニットが遷移するために必要な力 F_{trans} は調節できる。そこで、ここでは折り線パターンの角度 α が異なる円筒折ユニットが接続されている状態を想定する。

長さ・ねじれ角度など、制御することで円筒折を遷移させられるパラメータは複数あるが、ここでは長さの制御による円筒折の特性を説明する^{脚注1}。図4.3に示す通り、収縮しきった円筒折はそれ以上収縮せず、展開しきった円筒折はそれ以上伸長するために非常に大きな力がかかる。大きな歪は円筒折の材料の破壊に通ながるため、展開した円筒折には他の円筒折を展開するための力以上に引張力をかけないものとする。つまり、全ての円筒折が収縮している状態からは更に収縮させることはなく、全ての円筒折が伸長している状態からは更に伸長させる力をかけない物とする。

これまで長さを制御することによって遷移させていたが、伸長力を発生させる場合にも同様の遷移が可能である。強い円筒折はその名の通り、状態の遷移により強い力 (F_{strong}) を必要とし、弱い円筒折は状態の遷移はより弱い力 $F_{\text{weak}} (< F_{\text{strong}})$ で生じる。そのため、円筒折に圧縮・引張力を与えた場合、図5.2のような遷移を生じる。

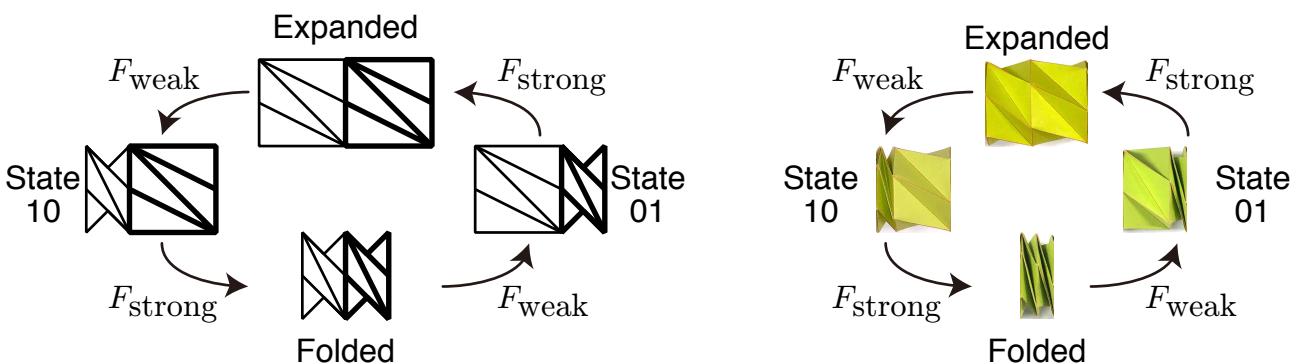


図 5.2: 異なる円筒折ユニットを接続した円筒折タワーのヒステリシス特性。左：弱い円筒折と強い円筒折を接続し、圧縮・引張力を与えた場合の遷移。右：実際に作成した円筒折による説明。

全ての円筒折が展開状態である円筒折タワーに圧縮力を加えると、弱い円筒折りと強い円筒折の両方に同じ圧縮力が加わる。圧縮力が F_{weak} に達すると、弱い円筒折の状態が遷移し、弱い円筒折のみが収縮状態となる（図5.2中の“Expanded” state → State 10）。更に圧縮力が強くなり圧縮力が F_{strong} に達すると、強い円筒折も収縮状態へと遷移する（図5.2中のState 10 to “Folded” state）。このように、圧縮力を加えた場合には、円筒折は“10”的状態を経由して遷移する。厳密には、図??と図??が異なるとおり、収縮時の (F_{strong}) と展開時の (F_{strong}) は異なり、(F_{weak}) も同様である。

逆に、全ての円筒折が収縮状態である円筒折タワーに引張力を加えても、弱い円筒折りと強い円筒折の両方に同じ引張力が加わる。引張力が F_{weak} に達すると、弱い円筒折は展開状態へと推移し、弱い円筒折のみが展開状態となる（図5.2中の“Folded” state to State 01）。そして更に引張力が強くなり、引張力が F_{strong} に達すると、強い円筒折も展開状態へと遷移する（図5.2中のState 01 to “Expanded” state）。このように、引張力を加えた場合には、円筒折は“01”的状態を経由して遷移する。

収縮過程では“01”的状態を経由して遷移するが、展開過程では“10”的状態を経由して遷移する。このような、長さが1ユニット分となるように制御した際に、展開状態から遷移したら状態10になり、収縮状態から遷移したら状態01になるという、現在の制御パラメータだけでなく直前の状態が現在の状態に影響する性質をヒステリシ

^{脚注1}Yasudaらが行っていたように、ねじれ角度を制御することで円筒折の状態を遷移させることも可能である [116]。

ス特性と呼ぶ。このヒステリシス特性はねじれ角度による制御でも、体積による制御でも同様の性質が生まれる。

より多くの円筒折が、遷移するための力が強い順に接続されている場合には、図 5.3 のような遷移が生じる。図

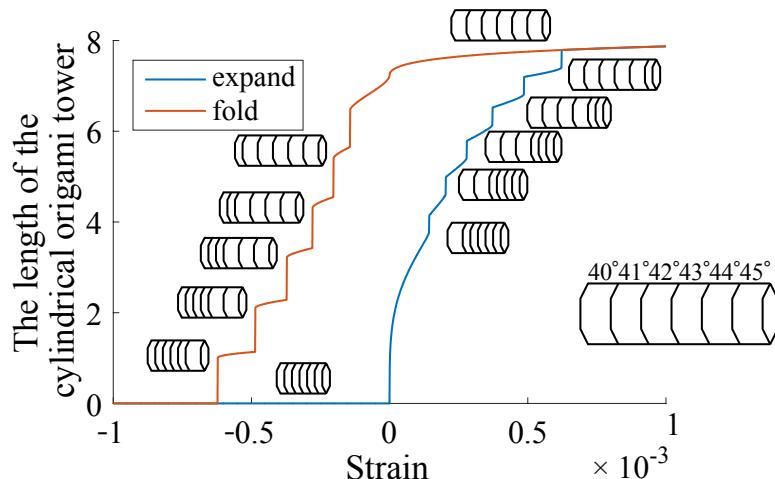


図 5.3: 5 個の異なる円筒折が強い順に接続された円筒折タワーのヒステリシス特性。左から順に展開し、左から順に収縮する。青線が展開過程を、赤線が収縮過程の円筒折タワーの長さを表している。同じ力を与えていても、**展開過程**と**収縮過程**では円筒折タワーの長さは異なる [B1]。

5.3 中の青線の力が 0 の部分から説明する。収縮状態の円筒折タワーに力を与えていない場合、円筒折の長さは 0 のまま維持される。円筒折に引張力を与えると、円筒折タワーは伸長する。そして、引張張力が変化せずに円筒折タワーの長さが変化する場所が現れる。ここが、 $\alpha = 40^\circ$ の円筒折が展開状態へと遷移したことを表している。同様に、円筒折は順に展開し、全ての円筒折が展開することで収縮過程の赤線と一致する。ここで引張力を 0 としても、円筒折の長さは 7 度となる。これは、全ての円筒折が展開状態で安定したため、収縮状態へと戻らず、長さを持った状態を維持する現象である^{脚注 2}。

次に、圧縮力を与えると、逆に円筒折は順に収縮状態へと遷移する。円筒折のポテンシャルエネルギーは、展開状態と収縮状態の間で非対称な形をしているため、ヒステリシス曲線は線対称でも点対称でもない。また、円筒折へ与える圧縮力が十分強くなると全ての円筒折が収縮状態へと遷移するため、最初の状態へと戻る。そしてこの状態で圧縮力を 0 にしても長さは 0 のままである。

ここまででは全ての円筒折が伸長するまで伸長を続け、全ての円筒折が収縮するまで収縮を続けていたが、遷移の途中で制御の方向を変えることで、図 5.4 のような多様な遷移が可能である。図 5.2 のような 1 個のループのような単純なヒステリシス特性ではなく、図 5.4 には複雑なヒステリシス特性が存在し、1 パラメータの制御により、任意の状態から任意の状態への遷移が可能である。図 5.4 では 5 個の円筒折がそれぞれ 2 個の状態で安定である。

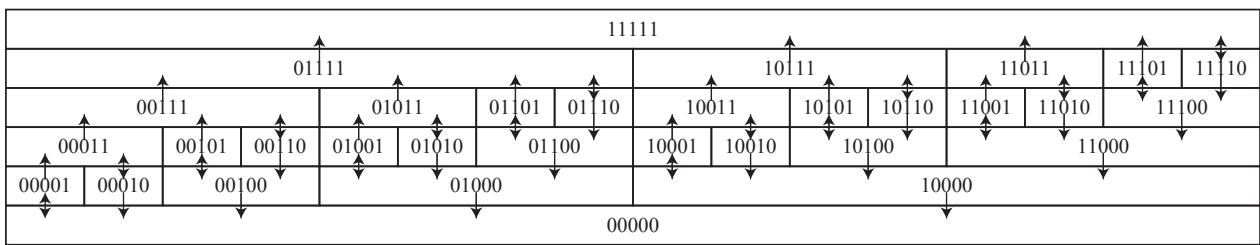


図 5.4: 5 個の異なる円筒折が強い順に接続された円筒折タワーのヒステリシス遷移関係。各長方形とその内部の数字が各安定状態を表し、上への矢印が圧縮による遷移先を、下への矢印が引張による遷移先を示している [B1]。

るため、この円筒折タワーは合計で $2^5 = 32$ 種類の状態で安定である。各長方形とその内部の数字が各安定状態

^{脚注 2}厳密にはここで一瞬負の力がかかるが、今回は Strain に示した力を与えた場合の伸びた結果を示している。

を表し、上への矢印が圧縮による遷移先を、下への矢印が引っ張りによる遷移先を示している。圧縮操作は「展開状態の最も弱い円筒折を収縮状態へと遷移させる」操作であるため、「0である最下位ビットを1とする」という操作に相当する。逆に、引張操作は「収縮状態の最も弱い円筒折を展開状態へと遷移させる」操作であるため、「1である最下位ビットを1とする」という操作に相当する。図5.4では、上向きの矢印は上辺の左端の状態に遷移し、下向きの矢印は下辺の右端の状態に遷移する。また、図5.4は各段に1の数が等しい状態を配置し、各段の内部では左右の状態に対して左の状態 < 右の状態が成立するように並べ、上下の状態には下の状態 < 上の状態となるように並べることで得られる。

上記のような操作を行うことで、最も強い円筒折から順に、つまり上位ビットから順に所望の状態へと遷移させる操作により、任意の状態から任意の状態に遷移できることがわかる。しかし、所望の状態へと遷移するためには、非常に多くの状態を経由する必要がある場合もある。例えば00000状態から10101状態へは、最短でも $00000 \rightarrow 00001 \rightarrow 00011 \rightarrow 00111 \rightarrow 01111 \rightarrow 11111 \rightarrow 11110 \rightarrow 11100 \rightarrow 11000 \rightarrow 10000 \rightarrow 10001 \rightarrow 10011 \rightarrow 10111 \rightarrow 10110 \rightarrow 10100 \rightarrow 10101$ と15回の操作が必要である。この遷移はこの円筒折タワーの2状態間の遷移としては最長の経路である。 n 個の円筒折が接続されている場合には、 $\frac{n(n+1)}{2}$ 回の遷移が必要な場合が存在するため、高速に移動する用途には向かない。

また、所望の状態へと向かうためにはある状態を経由する必要が存在しうる。例えば00000の状態は00001・00010・00100・01000・10000の5種類の状態から遷移が可能であるが、10101の状態へは10100からのみ遷移が可能である。10100の状態を避けて10101の状態へと遷移することはできないため、所望のサイクルを描こうとする場合には、経路に望ましくない状態を含まないように設計する必要がある。これらは1アクチュエータに制限した事による自由度の現象で生じた問題であるが、これらの問題が生じない範囲で機構を提案することで1アクチュエータで移動するロボットは実現できる。そしてこれらの問題は非常に複雑な円筒折タワーとその状態を実現するためには生じるが、図6.6程度の動きであれば、円筒折の接続順の工夫で解決できる。問題が生じない範囲での機構を次章から説明する。

■ 第6章

円筒折と折り紙回路を利用した移動 ロボット

このバイステーブル構造とヒステリシス効果を用いることで、アクチュエータが1個しか搭載されていなくとも、あたかも複数個のアクチュエータで制御されているような多段階の折り動作を実現した。そしてその折り紙ロボットを作成し、動作を測定して実現可能性と有用性を検証した。

またその遷移の順と、円筒折の遷移に伴う長さの変化・ねじれ角度の変化・体積の変化・内径の変化を組み合わせることで、移動を実現した。本成果により、アクチュエータを削減し、軽くて薄い動く折り紙ロボットが実現できる。

本第6章の成果は、

[B1] **Fuminori Okuya**, Takuya Umedachi, Kazuya Saito, and Yoshihiro Kawahara, “Crawling Cylindrical Origami Robot Driven by Single Actuator,” The 7th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education (7OSME), vol.3, pp.949–963, Sept. 2018.

[C7] 奥谷文徳, 梅館拓也, 齊藤一哉, 川原圭博, “円筒折を用いた單一アクチュエータで直線上の物体上を進行するロボット,” 情報処理学会全国大会講演論文集, no.6B-01, March 2018.

で発表された内容の再利用を含む。

6.1 本章の関連研究

本章では、従来の折り紙ロボット・1アクチュエータで動くロボットの分野に分けて関連研究を紹介する。本研究は、従来の折り紙ロボットが持つ、折り紙の利点であるコンパクトに薄く収納できる性質が重量・厚さを持つアクチュエータにより活かせていない問題を、1アクチュエータで動く従来のロボットを参考に解決する。

6.1.1 折り紙ロボット

折り紙ロボットとは、ロボットの体が折り紙からできているようなロボットであり、曖昧な定義ではあるが、本研究で扱う物はロボットの大部分が折り紙構造であるロボットとする。Felton らは、折り紙構造を用いて1枚の平坦な状態の紙から折り上がるロボットを実装した[11]。そのロボットの平坦に折り畳める部分は、いわゆる骨格部分のみであり、アクチュエータ（特にモータ）・バッテリ・IC とそれらの固定部は平坦ではない。自己折の技術を使っているため、人の手で組み上げる必要はないが、自己折のための28カ所の熱を用いたアクチュエータ・移動のための2個のモータを搭載している。熱による折りは、第3.2.4章で述べるパウチモータなどを使うことで実現が可能だが、モータは非常に分厚い。また、図5.1のAに示すように、2つのバッテリーも大きく、折り上がった状態を見てもバッテリーにより最大の厚さはそれほど変わっていない。

折り紙ロボットのもう一つの特徴として、折り紙ロボット自体が薄くても、その制御のための外部装置が巨大であるという問題がある。例えば、Miyashita らは磁石が1つ載っているが、それ以外はほぼ平坦になるロボットを実現した[6]。このロボットはロボット自体が軽く・ほぼ平坦になるという面で、輸送効率がいいと言える。このような小型なロボットは折りたたんだ状態で輸送して体内で動作させるなどの応用がある[6]。ただし、折り紙ロボット側にアクチュエータが1つも載っていないことから分かる通り、このロボットは動作に外部装置が必要である。Miyashita らの研究では、図6.1のような大規模な外部装置が必要であり、折り紙ロボットを動かすシステムを輸送することを考えると、重く・厚い物体を輸送する必要が出てきてしまう。Miyashita らの折り紙ロボットと外部

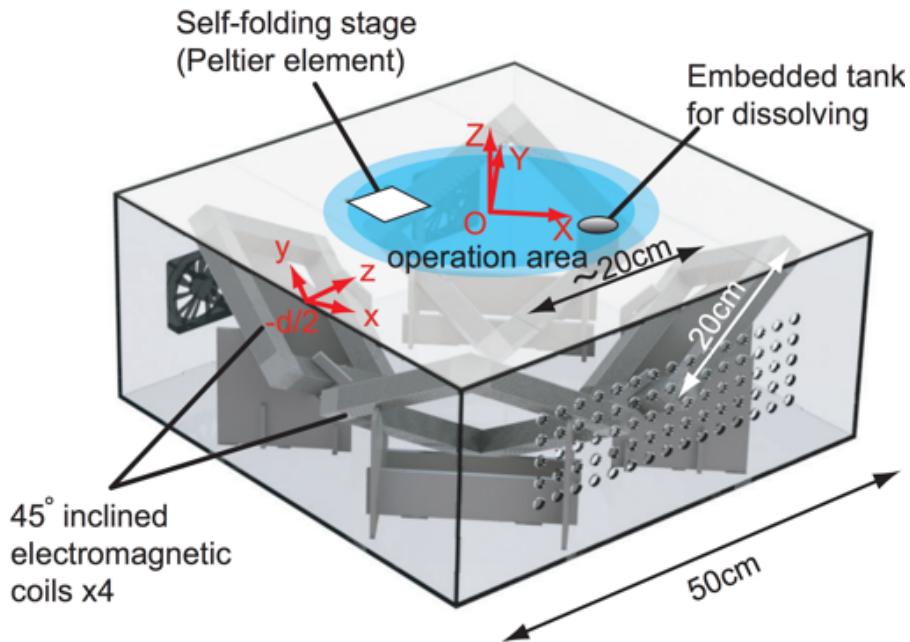


図6.1: 磁石を搭載した折り紙ロボットを制御するための外部装置[6]。折り紙ロボットが白い正方形の場所で自己折した後、**青いエリア**で移動を実現する。折り紙ロボットのサイズは一辺が1.7 cm であっても、一辺が20 cm のコイルが4個搭載された一辺が50 cm の装置が必要である。

装置を見ると、のサイズは一辺が1.7 cm であっても、一辺が20 cm のコイルが4個搭載された一辺が50 cm の装置が必要であり、折り紙ロボットの移動システム全体を考えると軽薄であるとも到底輸送が優しいともいえない。

これら[11, 130]の研究は比較的単純な動作が可能なロボットを、平坦な紙から実現したものである。複雑な動作を可能とする折り紙ロボットには、モジュールロボットを折り紙と呼ぶ研究があるが、それぞれのモジュールが複数のアクチュエータ（モータ）を持つため非常に重く・高価になってしまっている[131]。

このように、折り紙ロボットは単に折り紙構造を用いたロボットであることが多く、展開・収縮により大きさ・形状を変えるという意味でのみ折り紙の利点を生かしていると言える。本研究が提案する折り紙ロボットはシステム全体でのアクチュエータの数を最小限まで削減することで折り紙の厚さ・軽さを損なわない構成をもつものである。

円筒折を用いたロボット

本6章で扱うような円筒折を用いたロボットも、本研究が初出ではない。円筒折を用いたロボットはいくつかあるが、最初に円筒折の長さの変化を用いたロボットを紹介する[132]。文献[132]のロボットは、円筒折の長さの変化のみを用いている。円筒折は長さを変化させるアクチュエータとして用いられ、足（地面との接触部）についている剛毛により非対称な応力を生むことで移動を実現している。円筒折のねじれ角度を制御することで円筒折の長さを制御しているロボットであり、円筒折は全て同じ性質を持つため、角度と長さがほぼ比例関係にある^{脚注1}。

同様に、円筒折を長さの変化する折り紙として用いたロボットとして、左右に曲がることができるロボットも提案された[133]。文献[133]のロボットは円筒折を2本使ったロボットであり、単なる前進だけでなく、より長く伸長した円筒折と逆側へと曲がることができるロボットである。剛毛を用いた非対称性ではないが、このロボットも足の構造の工夫により非対称な摩擦を生じて移動するロボットである。

これらのロボットは円筒折をねじりを使って伸縮させることでロボットの伸長を実現し、前後非対称な足によって移動を実現している。つまり円筒折は単に伸縮比が非常に大きいアクチュエータの一部として円筒折は用いられてきた。

従来の直動アクチュエータはアクチュエータの長さに比べて大きな長さの変化ができないものが多かったため、円筒折を用いることで、伸縮比を大きく稼ぐことが可能となっている。しかし、本質的には足の応力の非対称性が移動を生じているだけであるため、円筒折である必要はほとんど無い。

そして円筒折の伸縮に付随する他の性質を用いた、円筒折自体を外骨格として利用するロボットも提案されている[126]。このロボットは円筒折の変形が移動を生じているものであり、提案内容が本章の内容と非常に似通っている^{脚注2}。伸縮につれて変化する折り紙の角度の変化を用いることで、円筒折の外形（外径）を変化させて移動を実現するロボットである。

本研究と文献[126]の研究の主な相違点を挙げると、

- 本6章の内容は3種類の環境内での移動について説明していたが、文献[126]の研究は1個の環境内（パイプの中）でしか移動できること。
- 本6章の内容は円筒折にほとんどアタッチメントを必要としない^{脚注3}が、文献[126]の研究はアタッチメントが必要不可欠であること。
- 本6章の内容は理論の説明だけでなく実際のロボットを制作して評価しているが、文献[126]の研究は理論的な言及のみにとどまっていること。

が挙げられる。

文献[126]の研究以外は、単に円筒折を直動アクチュエータにする程度であり、円筒折の多くの性質のほとんどを使っていない。本章では、3種類の環境を移動する円筒折を外骨格としたロボットを提案・実装する。このロボットは、円筒折を単なる直動アクチュエータとしてみなすだけではなく、どのロボットも長さの変化・ねじれ角度の変化・体積の変化・内径の変化・折れ線パターンの角度 α の変化による円筒折の遷移に必要な力の変化の内、少なくとも3要素を活かしたロボットである。外部のアタッチメントなどの非対称な構造を新たに付けることなく実現できる1枚の紙から作れる手法・ロボットである。

脚注1円筒折は段階的に折れるなどの非線形性は存在する

脚注2この研究が発表されたのは2018年8月26日～2018年8月29日の学会であり、筆者が本章の内容を初めて発表したのは2018年9月3日～2018年9月5日の学会である。

脚注3摩擦を変化させるために搭載した摩擦板と、効率の向上のために述べたフィンのみ

6.1.2 1 アクチュエータで動くロボット

1 アクチュエータというと、1 個のモータとタイヤさえついていれば移動可能であるが、折り紙では正確な円筒を有限回の折りたたみで平坦にすることは不可能であるため、タイヤでの移動は少ない。タイヤであっても、径が多少変化するものが存在する程度である [134, 135, 136, 137]。文献 [134] に比べて文献 [135] は駆動について詳細であり、文献 [136] は高速と高トルクを切り替える手法を述べている。また、文献 [137] は径だけでなく幅の変化も用いている。ただし、折り紙を用いて、展開と同じアクチュエータで移動を実現することを考慮して、「往復運動を用いた」1 アクチュエータで動くロボットをまとめることとする。

折り紙ロボットに限らず、アクチュエータの増加は重量の増加・価格の増大・組立作業の手間の増加につながるため、好ましい性質ではない。特に小さなロボットでは、1 アクチュエータで動くロボットがいくつか開発されている。また、基本的に 1 つのアクチュエータで往復運動を行うと、同じ経路を何度も往復するだけであり、対称的な運動であればそれは同じ場所で繰り返し運動を行うだけになるため、様々な工夫により非対称性を産み、移動を実現している。

トゲを用いた移動

例えば、ミミズが行っている剛毛 (setae) を用いた移動を模したロボットがある [138]。このロボットは図 6.2 のようにして移動する。ロボットの前後にはトゲがついたブロックがあり、それぞれのトゲは前に移動するときに

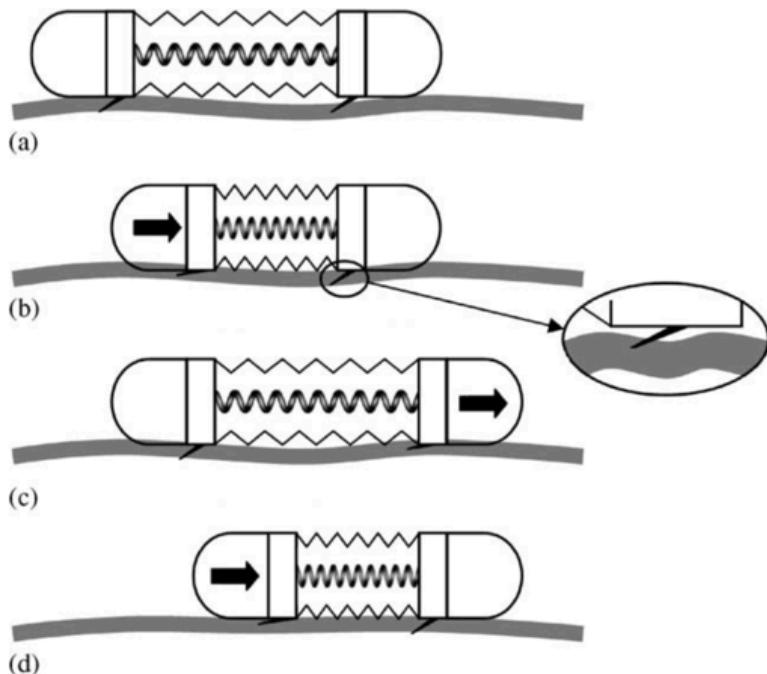


図 6.2: ミミズの動きを参考にした、1 アクチュエータで移動するロボットの動作原理 [138]。それぞれのトゲは前に移動するときには抜けるが、後ろに移動するときには刺さって体節を固定する。

は抜けるが、後ろに移動するときには刺さって体節を固定する役割を果たす。このトゲは、前後方向に非対称な摩擦を与えていたるような働きをしているともいえる。ロボットが収縮する際には図 6.2(b) のように前の体節のトゲが前の体節を固定するため、後の体節が前に移動する。そしてロボットが伸長する際には、図 6.2(c) のように後の体節のトゲが後の体節を固定するため、前の体節が前に移動する。このため、このロボットは体調の伸縮の繰り返しを行うことで前に移動することができる。

このロボットはトゲの方向を変えられないため、常に右にしか移動できない。このように 1 アクチュエータで動くロボットの多くは片方向にのみ移動できるロボットが多い。また、トゲなどによる移動は外部を傷つけるため、より環境に傷をつけない動作が求められる。

流体の粘性を用いた移動

環境を傷つけにくいロボットとして空気圧を用いた1アクチュエータで動くロボット[139]がある。このロボットは図6.3のように3つの部屋を持ち、1つの空気穴から空気を出し入れするだけで移動するロボットである。空

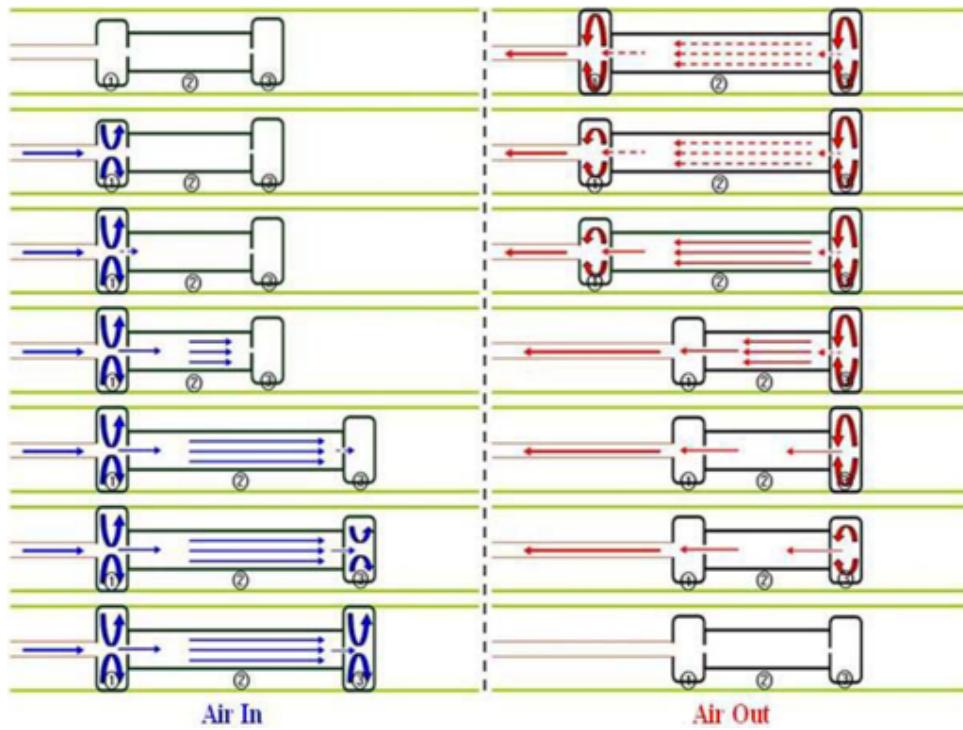


図6.3: パイプ中を移動する空気圧を用いた1アクチュエータで移動するロボットの動作原理[139]。左は空気を注入している状態を表し、右は空気を排出している状態である。元の図はより縦長であったが、文字の視認性などを理由に、横に広げた図である。

気の管は左側についており、その管からロボット内に空気を出し入れする。理想的には流体の圧力は接続されている全ての場所に同じ圧力がかかるようにはたらくなが、実際の物質には空気であっても粘性も存在する。特に、このロボットでは部屋は小さな穴でしか接続されておらず、左から空気を注入すると、左から順に空気が溜まっていく構造となっている。そのため、図6.3の左のように、管から近い場所から空気がたまる。

左から順に、幅が伸びる部屋・長さが伸びる部屋・幅が伸びる部屋という順に接続されており、空気の注入によりまず左の部屋が膨張する。すると、その膨張により左の体節が環境に固定される。次に、中央の部屋に空気がたまることでロボットは伸長する。このとき左の体節のみが環境に固定されているため、右へとロボットは伸びることとなる。そして最後に、右の部屋に空気が注入されることで両方の体節で環境に固定されている状態となる。

逆に空気を排出している状態では、まず左の部屋から順に空気が排出される。そのため、まず左の体節が環境への固定を止め、ロボットは収縮する。そして最後に、全ての部屋から空気が排出され、最初の状態へと戻る。

このようにして、空気の注入と排出を繰り返すだけで、このロボットは右へと移動できる。先程のトゲを持ったロボットと同様に、管がついているのは常に左の部屋であるため、右にしか移動できない。また、トゲのあるロボットと比較すると環境を傷つける要素は減ったといえるが、環境への固定が膨張によるものであるため、平面上ではなく管の中での移動のみに対応できる。また、空気の移動を待つ必要があるため、この移動手法は比較的低速にしか行えず、また空気のパイプが必要であるため、システムの大きさは増加しているともいえる。

ただし、空気圧での動作はロボットだけの重さを見ると非常に軽く実現できるという利点がある。折り紙構造を密閉構造にするか、折り紙構造に風船を入れるなどにより空気圧で動作させることは可能であり、そのような技術によって折り紙ロボットの軽量化はより効果的になる。十分長い移動を考えると、空気を注入する管の長さに比例した重量が生じ、空気圧を制御するシステムは電流のON/OFFの制御に比べ重く大きなシステムが必要になりがちである。

メタマテリアルを用いた移動

速度の問題を解決したロボットとして、メタマテリアルを用いた1アクチュエータで動くロボット[140]がある。一般的な物質の多くはポアソン比が正であり、押しつぶされたときにはその方向と垂直な方向に伸びる性質を有する。しかし、ポアソン比 ν が負の物質・構造は実現可能である。この、「ポアソン比 ν が負の物質」のような、自然界の物質はほとんど持たない振る舞いをする材料・構造をメタマテリアルと呼ぶ^{脚注4}。ロボットの構成は図6.4aに示すとおりである。

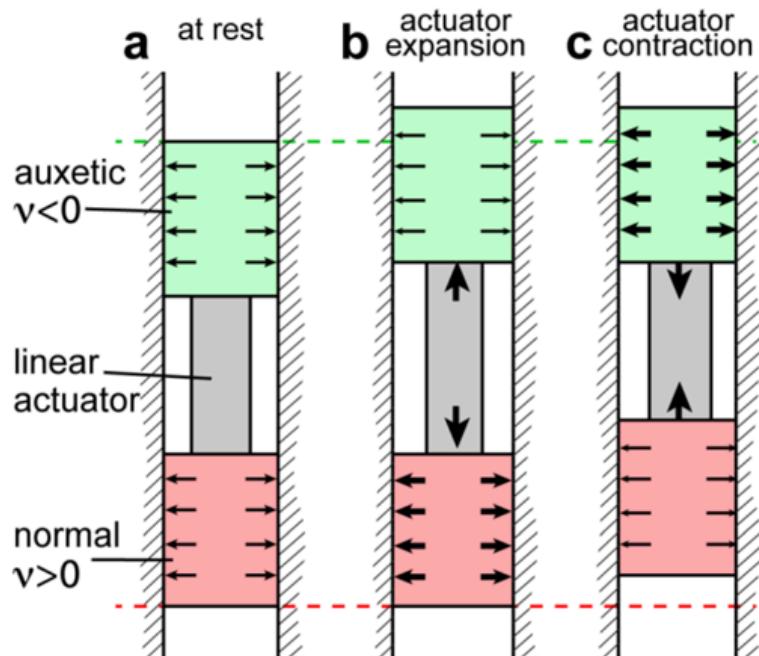


図6.4: パイプ中を移動するメタマテリアルを用いた1アクチュエータで移動するロボットの動作原理[140]。赤色の部分はポアソン比 ν が正であるため押しつぶされたときにはその方向と垂直な方向に伸びる物質である。一方、緑色で示したポアソン比 ν が負であるため押しつぶされたときにその方向と垂直な方向にも潰れるメタマテリアルで構成される。

図6.4において、伸長時（図6.4b）には、両方の材料が押しつぶされるような力を受ける。そのため、後方にある赤色で示したポアソン比が正の物質は横に伸びようとするため、パイプに突っ張るような力を生じる。逆に、前方にある緑色で示したポアソン比が負の物質は横にも縮もうとするため、パイプから離れるような力を生じる。そのため、図6.4bのように、下側の体節がパイプに固定されてロボットは伸長し、ロボットは上に移動する。

逆に収縮時（図6.4c）には、両方の材料が引き伸ばされるような力を受ける。ポアソン比による力も逆転するため、後方にある赤色で示したポアソン比が正の物質は横には縮もうとするため、パイプから離れるような力を生じる。逆に、前方にある緑色で示したポアソン比が負の物質は横に伸びようとするため、パイプに突っ張るような力を生じる。そのため、図6.4cのように、上側の体節がパイプに固定されてロボットは収縮し、ロボットは上に移動する。

また、ポアソン比が正の構造はもちろん、ポアソン比が負の構造は折り紙で作ることが可能である[141]。さらに、そのポアソン比が負のチューブ構造は平坦に折り畳める構造である[141]ため、メタマテリアル部分を含めて平坦に折り畳めるロボットの設計は困難ではない。

このようにして、2種類の材料の間にリニアアクチュエータの伸長と収縮を繰り返すだけで、ロボットは移動することができる。トゲを持ったロボットに比べて環境を傷つけにくく、空気圧を用いたロボットに比べると高速に移動ができる利点を有する。ただしやはり、このロボットも常にポアソン比が負である材料を前側に持つため、常に同じ方向にしか移動できない。

^{脚注4}電磁波に対しての性質のみを指す場合もある

慣性を用いた移動

1 アクチュエータで前後両方に動けるロボットには、慣性を用いたロボットがある [142]。摩擦係数には大きく分けて動摩擦係数と静摩擦係数の2個の係数が存在し、小さな力は長い時間かかっていても移動しないが、大きな力が短時間かかれば移動するという性質がある。そのため、ロボット内のおもりを片方には高速に動かし、低速で元の位置まで戻すことを繰り返せば、その摩擦係数の切り替わりを用いて移動できる。ロボットのほとんどが重量がおもりに存在するような構成である。そのメカニズムが図 6.5 である。図 6.5 の Static Friction と書かれ

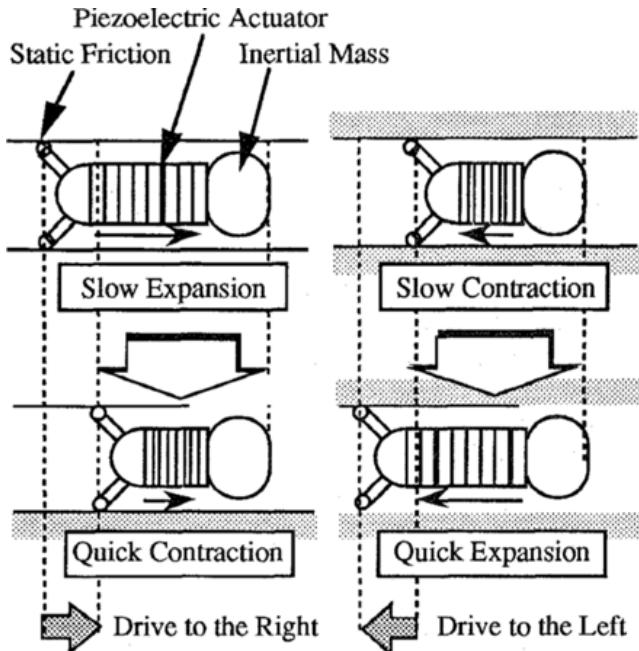


図 6.5: 慣性を用いた 1 アクチュエータで移動するロボットの動作原理 [142]。左は右に移動する図を、右は左に移動する図を表している。

た場所は、おもりを低速で移動した場合の反作用では滑らず、おもりを高速で移動した場合の反作用では滑るような部品である。右に移動したい場合には図 6.5 の左に示すように、おもりを低速で右に動かし（伸長し）た後、おもりを高速で左に動かす（収縮する）。すると、低速での移動時には Static Friction は固定されているが、高速での移動時には Static Friction は滑るため、ロボットは右に動くことができる。

逆に、左に移動したい場合には図 6.5 の右に示すように、おもりを低速で左に動かし（収縮し）た後、おもりを高速で右に動かす（伸長する）。すると、低速での移動時には Static Friction は固定されているが、高速での移動時には Static Friction は滑るため、ロボットは左に動くことができる。

このロボットは、先程までのような非対称な構造に起因した移動ではなく、非対称な運動に起因した移動である。そのため、左右の両方に 1 アクチュエータで動くことが可能である。

しかし、このロボットは、折り紙構造を用いたとしても、大部分の質量を占めるおもりが必要となる。そのため、折り紙構造の軽量であるという性質を損なうため、このような慣性を用いた移動は難しい。

我々が目指すのは、1 アクチュエータしか持たないながらも、折り紙構造で生じる非対称性を用い、単なる往復運動ではない動作による移動である。またそれは、高速に移動可能である性質や、追加でおもりを必要としない性質が望ましい。そして更に、折りたたんだ状態ではほとんど平坦である性質も兼ね合わせることで、コンパクトに・薄く収納可能であり、軽量である折り紙ロボットが実現できる。

本6章では、従来は多数のアクチュエータを必要としていたロボットに折り紙構造を組み入れることで、1アクチュエータで同様な動きを実現し、折り紙構造によるアクチュエータの数の削減を示す。複数のアクチュエータが「完全に」独立に動くような動きを1アクチュエータで実現するのは不可能である。一方で、複数のアクチュエータが同じ動きをしているようなロボットを1アクチュエータで行なうことは単に冗長なアクチュエータを削減する問題となってしまう。そこで、複数のアクチュエータが搭載されているロボットであり、その中でもできるだけそれらのアクチュエータが異なる動きをしているロボットに対して折り紙構造を組み入れる。

前に移動する際には、主に3要素・6状態の変化が必要である。慣性を用いたロボット[142]は例外ではあるが、紹介したロボットは基本的に図6.6の動きを必要とする。前部を環境から離し、伸長し、前部を環境に固定し、後

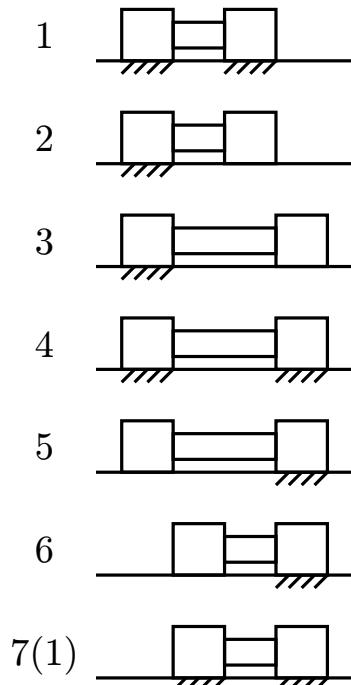


図6.6: 移動のための基本動作。前部を環境から離し、伸長し、前部を環境に固定し、後部を環境から離し、収縮し、後部を環境に固定するサイクルで前進が実現する。

部を環境から離し、収縮し、後部を環境に固定するサイクルで前進が実現するため、折り紙構造もこの動作が必要である。また、この動作には前部・後部・伸縮の3要素の状態変化が必要である。つまり、単純に実現すると、このためには3個のアクチュエータが必要である。この3個のアクチュエータが必要だと思われる動作を、1アクチュエータで実現する折り紙構造を考える。この移動様式は第??節で示した3セグメントからなる繰り返し動作を行う機構の動きと一致している。

リンク機構との関係

逆に、多数のアクチュエータを必要としていたロボットの例としてヘビ型ロボットを挙げる。多くのヘビ型ロボットは図6.7のように、「体節」と呼ばれるモジュールが直列に連結されることで構成される[143]。そしてそのアクチュエータを、タイミングをずらして動かすことにより、ロボットの移動を実現している。



図6.7: 狹所を移動するヘビ型ロボットの例 [143]。モジュールの間にはサーボモータが搭載されている。

ヘビ型ロボットは、関節を体に沿って「順に」動かすことでロボットは移動する。モジュール同士は位相をずらして動くため、それぞれのアクチュエータは異なる動きをするが、基本的に常に同じだけの位相をずらして動くため、それぞれのアクチュエータの動きの関係は独立ではない。このような「異なる場所が異なる動きをするが、その関係が一意である」というような動きを実現する際には、リンク機構を用いることもある。1自由度のリンク機構は、あるリンクの状態を決定すると残りのリンクの状態も決定されるため、1アクチュエータで複雑な動作が可能である。

折り紙構造とリンク機構を比較すると、リンク機構は、剛体が関節でつながっている機構全体を指すが、折り紙構造と比較すると、リンク⁵が棒状である事が多い。折り紙構造はリンクが平面である点で異なるが、折り紙もリンク機構の一部として捉えられるため、折り紙は複数平面を持つ立体である多面体と同様に、リンク（リンク）と一緒に語られることがある[144]。

リンク機構はリンクそれぞれを剛体とする。一方で、本章で扱う折り紙はそれぞれの平面を剛体としては扱わない。むしろ、それぞれの平面の変形と、それによって生じる弾性エネルギーを用いることで、アクチュエータの数の削減を実現する。そのため、本章で述べる折り紙構造は、リンク機構とは異なるものである。

本研究が直接的に述べるのは、円筒形状のロボットの移動である。しかし、本質的には前部・後部・伸縮の3要素の状態変化を1アクチュエータで実現した点が主たる発想である。1アクチュエータの動きを、段階的な・順序だった動作に変換するという面で捉えれば、複数の異なる行動を1アクチュエータで実現することが可能であるため、移動以外の応用も可能である。その実装には非常に複雑な機構が必要になるかもしれないが、ここでヘビ型ロボットに取り組んだことは、ヘビ型ロボットの這行にのみ適用可能であると述べる意図ではない。

⁵脚注5 基本要素となる剛体

6.2 移動を実現する円筒折の配置

本章では、円筒折を用いて移動するロボットの、円筒折の配置について述べる。適切に円筒折を配置することで、図 6.6 の動作を実現し、円筒折のヒステリシス特性から移動を実現する。本章では移動するロボットとして、ワイヤ上を移動するロボット・水中を移動するロボット・平面状を移動するロボットの 3 種類を紹介する。それぞれの円筒折の配置は異なるため、それぞれがどのように環境に干渉し、円筒折の変形を移動へと寄与させていくかを説明する。

6.2.1 ワイヤ上を移動するロボットのメカニズム

ワイヤ上を移動するロボットのメカニズムを説明する。このロボットは内径を変化させながら進むロボットであり、外径を変化させながらパイプの中を移動するロボット [126] と円筒折の配置は酷似している。円筒折の構成・実物・移動のメカニズムを図 6.8 に示す。このロボットは、長さを制御することで移動を実現するロボットである。

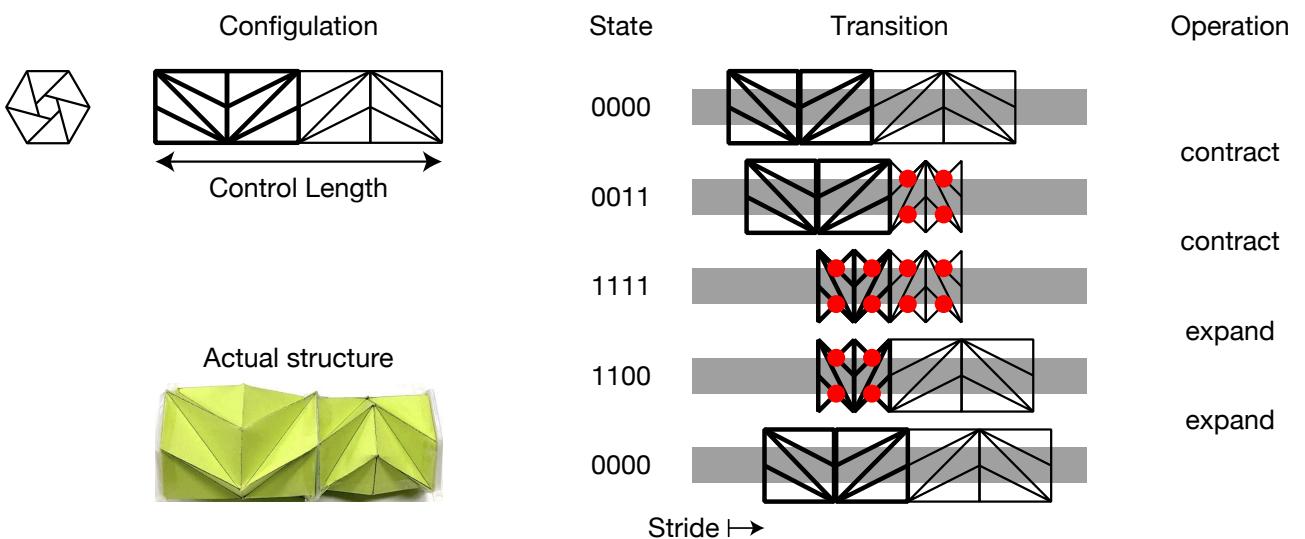


図 6.8: ワイヤ上を移動するロボットの構成・実物・移動のメカニズム。左上：円筒折の配置。このロボットは長さを制御することで移動を実現する。左下：実装した円筒折ロボットの円筒折部分。中央：移動に伴う円筒折の状態。右：円筒折に対して行う直接的な制御。赤い丸●はワイヤを掴んでいる場所を示す。

前述したとおり、円筒折は収縮状態で内径が小さくなる折り紙であるため、ワイヤ上を移動しているロボットは、収縮状態でそのワイヤを掴み、円筒折をワイヤに固定する力がかかる^{脚注 6}。

図 6.8 に示すとおり、弱い円筒折を前方に配置し、強い円筒折を後方に配置する。まず、展開状態から説明すると、圧縮力によって弱い円筒折が収縮する。そしてその収縮した円筒折は、円筒折の内径の変化によってワイヤを赤い丸●の部分で掴む。次に、圧縮力を更に加えることで、強い円筒折も収縮する。弱い円筒折と同様に、強い円筒折もワイヤを赤い丸●の部分で掴み、円筒折ロボットはワイヤ上に固定された状態となる。円筒折は収縮状態へと遷移するときに長さも変化するため、前の円筒折から順に掴み、前の円筒折から順に収縮する動作により、円筒折ロボットは体を前に進ませる。

収縮状態から引張力を与えると、まず弱い円筒折が展開する^{脚注 7}。そしてその展開した円筒折は、円筒折の内径の変化によってワイヤを離す。次に、引張力を更に加えることで、強い円筒折も展開する。同様に、強い円筒折もワイヤを離し、円筒折ロボットはワイヤ上で開放された状態になる。円筒折は展開状態へと遷移するとき、長さも変化するため、前の円筒折から順に離し、前の円筒折から順に伸長する動作により、円筒折ロボットは体を前に進ませる。

脚注 6 収縮状態でワイヤをつかむような設計が必要である。

脚注 7 この状態が展開時と異なるために移動が実現する。

このように、この円筒折ロボットは収縮過程でも展開過程でも前に移動する。ヒステリシス特性を持たないロボットであれば、収縮過程で前に移動する場合には、その逆の動作の展開過程では後ろに移動してしまい、その場で前後するだけであるが、ヒステリシス特性を有するこのロボットは対称的な繰り返しの制御によって前に移動する。

このロボットは長さのみの制御ではなく、ねじれ角度が一定であるように変化させるという制御である。実装上は長さの制御にはねじれ角度の制約も付随するが多く、むしろねじれ角度を自由にしたまま長さを変化させることには工夫が必要である。体積の制御によっても同様の制御ができるが、まずは一般的なロボットによく用いられるアクチュエータでの制御を試すために、実際のロボットはねじれ角度が一定であるように変化させる、長さの制御によって動作させた。実装した円筒折の状態は左半分と右半分でねじれの向きが逆転しているが、逆転していないてもよい。それぞれの円筒折対の伸縮によって生じるねじれは円筒折の外に影響しない。

またそのため長さのみの制約であれば合計2ユニットの円筒折で同じ動きが実現できる。図6.8でワイヤに固定する赤い点●は最悪の場合であるとして円筒折の位置を描画している。合計2ユニットの円筒折での動きが図6.8のStrideに対応するため、全ての赤い丸●が等しい力を発生するならば、合計4ユニットの図6.8のロボットは2倍のStrideを実現する。

同様のメカニズムであると説明した、パイプの中を移動するロボット[126]も円筒折ユニットの配置はこの円筒折ロボットと同じである。円筒折の外側に、収縮状態で半径方向に膨らむアタッチメントを付けることで収縮した円筒折が突っ張るようにしてパイプに体を固定するようなメカニズムである。本ロボットも、収縮状態で半径方向に膨らむアタッチメントを付けることで収縮した円筒折が突っ張るようにしてパイプに体を固定しながら移動できる。

この円筒折の配置には、収縮状態で折り紙がワイヤをつかむ利点も存在する。円筒折ロボットを無理やり前進させようと後ろから力を掛ける場合、円筒折ロボットが収縮するような力がかかる。そのため、よりワイヤを掴む力が増加するため、円筒折ロボットは外部からの力に対して安定である。そして、逆に展開状態では折り紙がワイヤをつかまない利点が存在する。手前に引っ張る動作ではつかみこむ力が働くため、負荷なく引っ張れる。

5年以内に出版予定

6.2.2 平面上を移動するロボットのメカニズム

最後に、平面上を移動するロボットのメカニズムを説明する。円筒折の構成・実物・移動のメカニズムを図6.9に示す。このロボットは、体積または長さを制御して移動することができる。図6.9に示すとおり、ロボットの摩

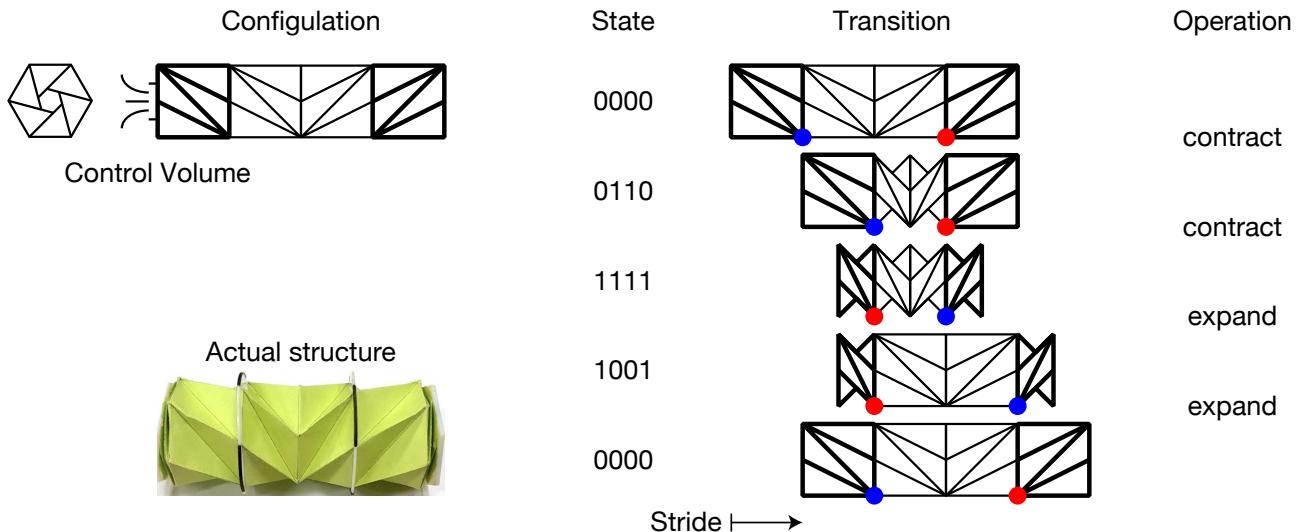


図6.9: 平面状を移動するロボットのメカニズム左上: 円筒折の配置。このロボットはねじれ角度を制御することで移動を実現する。左下: 実装した円筒折ロボットの円筒折部分。中央: 移動に伴う円筒折の状態。右: 円筒折に対して行う直接的な制御。赤色の丸●は平面と大きな摩擦で接している場所を、青色の丸●は平面と小さな摩擦で接している場所を示す。

擦を調節しながら、伸長・収縮を繰り返すことで移動する。中央の円筒折は伸縮を、前後の端の円筒折は摩擦の変化に寄与している。

図6.9に示すとおり、弱い円筒折を内側に配置し、強い円筒折を前後に配置する。このロボットは、ワイヤ上を移動するロボットと同様に、ねじれ角度が一定になるように制御しながら円筒折を動作させる。また、両端の円筒折の位相が平面に対して固定されている状態を維持する。

まず、展開状態から説明すると、空気の排出^{脚注8}により、円筒折ロボットの内部の体積は減少する。すると、全体に円筒折を収縮させる力が働くため、弱い円筒折が最初に収縮する。次に更に空気を排出させると、更に円筒折ロボットの内部の体積は減少するため、強い円筒折も収縮する。

ワイヤ上を移動するロボットのメカニズムと図6.6の6状態を用いて移動するという意味では非常に似ている。ただし、このロボットは摩擦を変えるための板（摩擦板・Friction disk）を必要とする。図6.10に示すような板を円筒折に搭載することで、円筒折のねじれながら生じる運動を接地部の摩擦の変化に繋げられる。円筒折の断

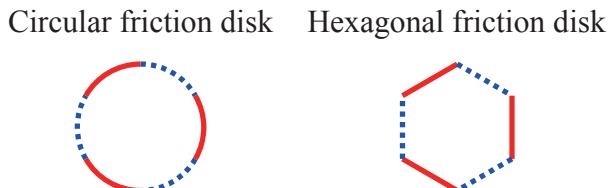


図6.10: 円筒折に搭載する摩擦板。赤い実線部分が摩擦が大きい場所で、青色の点線部分が摩擦が少ない場所を表している [B1]。

脚注8 外部装置が吸引すること

面は六角形として設計したが、外周が六角形である必要はない。むしろ、外周を円とすることで、平面との接触を常にロボットの真下で行うことが可能になる。また、六角形の摩擦板はほとんど常に頂点で平面と接することになるが、円は連続的に平面と接する位置が変わるために、図 6.10 のように一周を六等分するように摩擦を入れ替える以外にも自由に摩擦を変化させることができるとなる。そして、位相によって摩擦が変わるように摩擦板を搭載することで、円筒折のねじれ角度が、円筒折ロボットの接地面の摩擦の変化に寄与する構造を実現できる。

前の摩擦板は、収縮過程で摩擦が大きくなるように、後ろの摩擦板は展開過程で摩擦が大きくなるように位相を調節して搭載する。すると、図 6.9 のように展開状態で前足がロボットを平面に強く固定する状態となる。この状態で空気を排出すると、弱い円筒折から順に収縮するため、内側の円筒折が収縮し、前の摩擦板を固定点としてロボットは収縮する。この段階での円筒折の収縮は摩擦板の回転に寄与しないため、摩擦板の位相は変わらない。更に空気を排出すると、強い円筒折も収縮し、外側の円筒折も収縮する。このとき、円筒折ロボットの両端の位相が固定されているため、強い円筒折の収縮を同時に遷移させており、その性質により弱い円筒折と強い円筒折に挟まれた部分が回転する。この回転する部分に摩擦板が搭載されているため、摩擦板は回転する。すると、摩擦板が平面と接する部分が変わり、前の摩擦板は平面との摩擦が小さくなり、後ろの摩擦板は平面との摩擦が大きくなる。

そして、この状態から空気を流入させると、円筒折ロボット全体に引張力がはたらき、弱い円筒折が展開する。ここで、先ほどとは異なり後ろの摩擦板を固定点として円筒折ロボットが伸長するためロボットは前に移動する。そして、さらに空気を流入させることによって強い円筒折も展開状態になるため、摩擦板を回転させながら新調して最初の状態へと遷移する。

このロボットは、今まで紹介したロボットとは異なり摩擦を制御する摩擦板を必要とする欠点がある。摩擦板は非常に薄くて問題ないため、平坦な構造を損ねるものではないが、一枚の平面の材料から作られていない性質や、折りたたみ意外での製造過程が必要などの欠点を有する。

しかし、このロボットには図 6.11 のように円筒折を更に外側に追加することで移動方向を逆転できる利点を有する。この移動方向の逆転は従来の 1 アクチュエータで移動するロボットにほぼ見られない性質である^{脚注 9}。

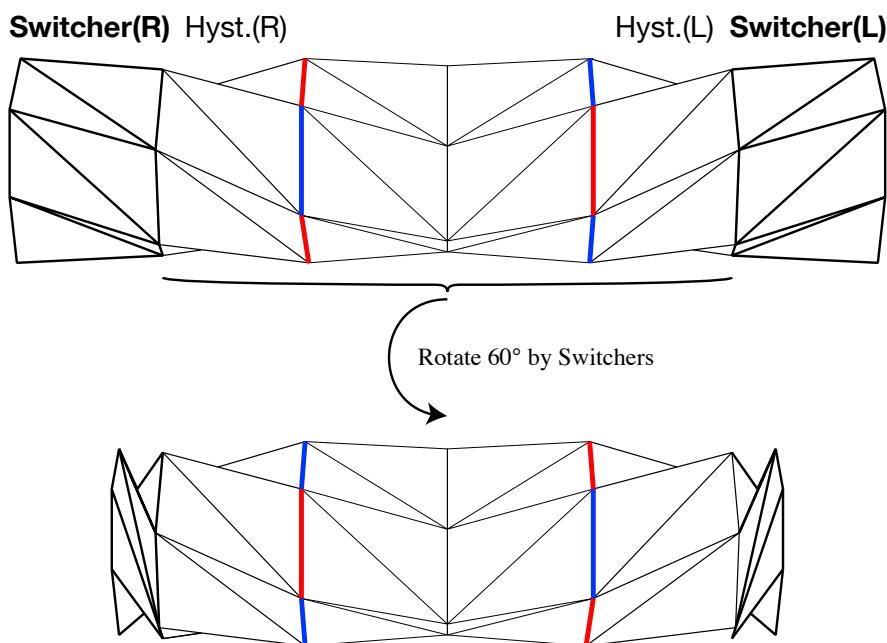


図 6.11: 進行方向を変えるスイッチャーを搭載した円筒折ロボット ([B1] を改変)。新たに搭載したスイッチャーと呼ばれる円筒折は今まで説明したロボット全体を回転させる。

この、円筒折ロボットの進行方向を切り替える円筒折をスイッチャーと呼ぶ。この円筒折は、内側の円筒折よりも更に強い円筒折とすることで、上記の移動においては状態を遷移させない円筒折で実現できる。そして、より

^{脚注 9}モータを載せたロボットは大抵可能である

長い/強い空気の排出・流入によって状態を変化させる円筒折となる。

そして、このスイッチャーの状態が遷移すると、スイッチャーの内側にある摩擦板は回転する。図 6.10 に示すように、摩擦板の摩擦は交互になるように設定しておけば、スイッチャーの状態の遷移によっても摩擦は切り替わる。摩擦の大小が入れ替わるため、前の摩擦板は、収縮過程で摩擦が小さくなるように、後ろの摩擦板は展開過程で摩擦が小さくなるように調節される。そのため、スイッチャーの状態の変化によって進行方向が逆転する。円筒折の数は 4 から 6 へと増加したが、このような円筒折はやはり 1 枚の紙から折り上げることは可能である。

図 5.3 に対応する図で考えると、このロボットは図 6.12 のような遷移を行っている。右へと移動しているサイ

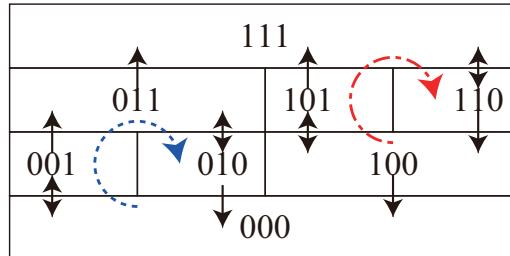


図 6.12: 平面状を移動するロボットのメカニズムが対応する遷移。下位ビットが弱い円筒折、つまり内側の円筒折の状態を示している。青色の破線は右への移動で行われるサイクルを示し、赤色の一点鎖線は左への移動で行われるサイクルを示す。そして、スイッチャーの遷移は 000 または 111 への移動を意味する。

クル（青色の破線）ではスイッチャーの状態（最上位ビット）は変化せず、左へと移動しているサイクル（赤色の一点鎖線）でもスイッチャーの状態は変化していない。そのため、移動の継続はサイクルで実現し、そのサイクルから抜ける動作がロボットの進行方向の切り替えに対応する^{脚注 10}。

今まで紹介した、ワイヤ上を移動するロボットのメカニズムと水中を移動するロボットのメカニズムは摩擦板のように交互に摩擦を設定するなどの工夫が困難である。そのため、円筒折の数を増やしても移動方向の逆転は難しいが、摩擦板を使うことで交互に生じる性質を用いることが可能となり、移動方向の逆転も可能となった。そして、これらの動作はすべて円筒折ロボットの空気の排出・流入のみによって行えるため、アクチュエータが 1 個であるにもかかわらず、移動と進行方向の切り替えが可能になる。

このように、強さの異なる円筒折を直列に接続することで、1 アクチュエータによる制御が、弱い円筒折の遷移 → 強い円筒折の遷移という順番に生じる運動へと変化させることが可能である。ワイヤ上を移動するロボットと水中を移動するロボットのメカニズムでは円筒折の展開・収縮と環境への固定を同時に、その動作が前から順に生じるように調整することで這行を実現した。平面上を移動するロボットは、弱い円筒折の遷移をロボットの伸縮とし、強い円筒折の遷移をロボットが環境に体を固定する場所の切り替えとすることで、図 6.6 のような移動の基本動作を順に生じるように調整することで移動を実現した^{脚注 11}。

6.3 実装した円筒折ロボットの移動

本節では、第 6.2 節で説明したロボットの基本要素を実装し、その移動が実現できることを示す。弱い円筒折と強い円筒折は、それぞれ $\alpha = 40^\circ$ と $\alpha = 45^\circ$ の円筒折で実装した。そして、実装したロボットの移動距離を撮影によって求めた。水中を移動するロボットは、実際の移動距離の代わりに、ポンプとして利用した場合にどれだけの体積の水を移動させたかによって計測した。特に示さない限り、円筒折の底辺が 25 mm となるように、タント紙 (N-61, 0.1 kg/m², 株式会社 竹尾) で折ったものを用いた^{脚注 12}。折り線パターンはカッティングプロッタ (FC2250-120VC, GRAPHTEC Corporation) もしくはカッティングプロッタ (CFL-605RT, ミマキエンジニア

脚注 10 本構造は $2^3 = 8$ 通りの状態を持ち、それぞれが背反する 4 状態を持つため美しい。

脚注 11 そのため、厳密には内側の円筒折は円筒折である必要がなく、バイステーブル構造である必要さえない。しかしこれが定理 [146] と呼ばれる、剛体折で体積の変化する折り紙は不可能であるため、このような小面の変形が伴い、また円筒折と連続な紙で実現できる折り紙の一つとして円筒折で実装した。

脚注 12 不減衰伝送路と同じ型番の紙である

リング) を用いてボールペンでなぞるように跡をつけた後に手作業で折り上げ、テープのりによる糊付けで円筒形状を実現した^{脚注 13}。

6.3.1 ワイヤ上を移動するロボット

このロボットは、長さを制御して動くロボットであり、長さはサーボモータ (RB90、ミニスタジオ有限会社) を用いて伸縮させた。このロボットは、同じワイヤを掴む必要がある。したがって、収縮状態での全ての円筒折の内径は一致する必要がある。用いたワイヤの直径は 16 mm である^{脚注 14}。円筒折の底辺の長さ a に対して、円筒折の内径^{脚注 15}はそれぞれ $a|_{\alpha=40^\circ} \sin 20^\circ$ と $a|_{\alpha=45^\circ} \sin 15^\circ$ となる。円筒折の平均の底辺が他の円筒折と一致する 25 mm となるように、それぞれの底辺は $a_{TCO1} = 22 \text{ mm}$, $a_{TCO2} = 28 \text{ mm}$ と設定した。本ロボットは同じワイヤを掴むため内径が等しくなるように計算したが、パイプの中を進むロボット [126] は、同じパイプを進むために外形が等しくなるように計算する必要がある。ここで収縮時の内径は

$$22 \text{ mm} \sin(20^\circ) = 7.524 \cdots \text{ mm} \quad (6.1)$$

$$28 \text{ mm} \sin(15^\circ) = 7.247 \cdots \text{ mm} \quad (6.2)$$

である。これらの値はつかむ力を測定しながら調節した値であり、内径が 8 mm より少し小さくなっていることとそのズレによる力を鑑みて非対称な値を用いることとした。

実装したロボットを図 6.13 に示す。また、実装したロボットのそれぞれの状態を図 6.14 に示す。

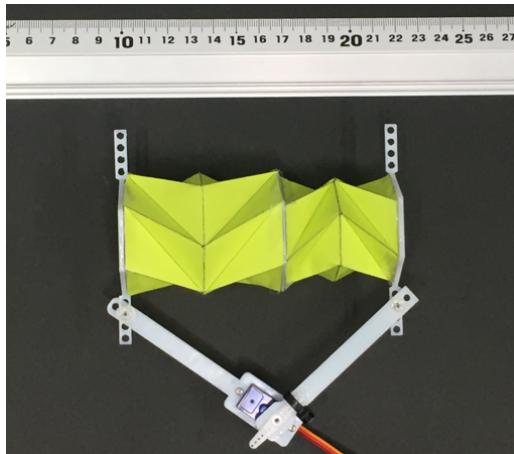


図 6.13: 実装したワイヤ上を移動するロボット。重さは制御部が 38.5 g、アクチュエータ部が 15.4 g、紙と固定具が 8.9 g。厚さは制御部が 18.4 mm、アクチュエータ部が 18.1 mm、紙と固定具が 9.7 mm。

ロボットの前部 (図 6.13 中の右部) に搭載された弱い円筒折が展開状態であり、その長さは

$$22\sqrt{2\sqrt{3}\sin 20^\circ} \text{ mm} = 28.95 \text{ mm} \quad (6.3)$$

となり、ワイヤを掴んでいる状態では、その長さは内径が 8 mm である時の長さである

$$\sqrt{(2 \cdot 22 \sin 50^\circ)^2 - \left(22 \frac{\sin(60^\circ - \arcsin(8/22))}{\sin 30^\circ} \right)^2} \text{ mm} = 6.62 \text{ mm} \quad (6.4)$$

となる。したがって、ロボットの前部の円筒折の長さの変化はこの差から求められ、22.33 mm である。

同様に、ロボットの後部に搭載された強い円筒折が展開状態であるとき、その長さは

$$28\sqrt{2\sqrt{3}\sin 30^\circ} \text{ mm} = 36.85 \text{ mm} \quad (6.5)$$

^{脚注 13}異なるカッティングプロッタが用いられているのはその時期に使用可能であった物を使っただけである。どちらかのカッティングプロッタでなければできない物ではなく、手作業での折りに精度さえ保障できるのであれば跡を付ける必要もない。

^{脚注 14}半径 r は 8 mm である

^{脚注 15}六角形の内接円

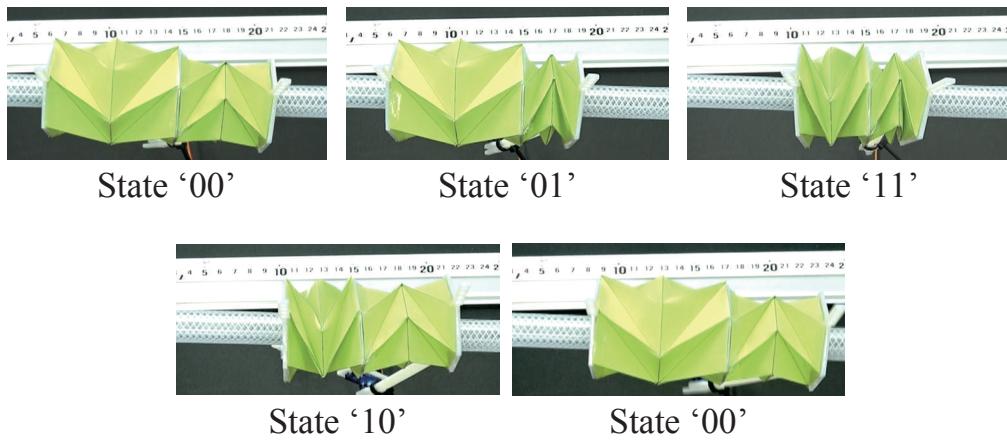


図 6.14: 実装したワイヤ上を移動するロボットのそれぞれの状態。収縮と伸長の操作により State ‘00’ から順に、State ‘01’、State ‘11’、State ‘10’ と変形し、State ‘00’ へと戻る。1度目の State ‘00’ と 2 度目の State ‘00’ では位置が異なっており、これが実現した移動である。

となり、ワイヤを掴んでいる状態ではその長さは

$$\sqrt{(2 \cdot 28 \sin 45^\circ)^2 - \left(28 \frac{\sin(60^\circ) - \arcsin(8/28)}{\sin 30^\circ} \right)^2} \text{ mm} = 9.4 \text{ mm} \quad (6.6)$$

となる。したがって、ロボットの後部の長さの変化はこの差から求められ、27.45 mm である。したがって、ロボット全体の長さの変化は前部と後部の長さの変化の和である $22.33 + 27.45 = 49.78 \text{ mm}$ である。

完全に収縮状態に近い状態でワイヤを掴むことによって、長さの変化を大きくすることができます。そして、大きな長さの変化は 1 サイクルでの移動距離も大きくする。しかしながら、収縮状態にあるにもかかわらず長さが 0 とならない遷移を用いているのは、厳密に長さが 0 の状態の円筒折は掴む力も 0 となってしまうためである。収縮状態から少し離れた状態でワイヤを掴むことで、安定な収縮状態へと遷移しようとする力を掴む力として利用することができる。

実装したロボットが実際に動いた軌跡を、図 6.15 に示す。この図より、ロボットは安定して移動できることがわかる。まず、前端と後端は、円筒折の伸縮によって大きく振れるが、弱い円筒折と強い円筒折の接合部は安定し

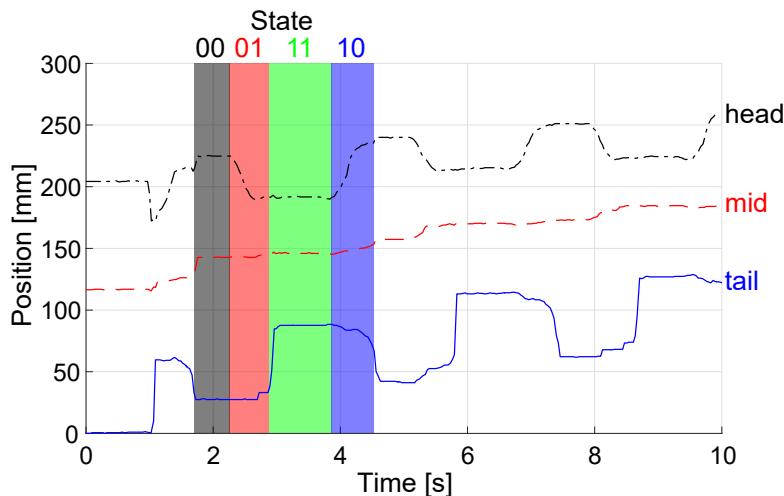


図 6.15: ワイヤ上を移動するロボットの軌跡。黒い一点鎖線はロボットの前端 (head)、赤い破線は弱い円筒折と強い円筒折の接合部 (mid)、青い実線はロボットの後端 (tail) を示している。1 サイクル分のそれぞれ 00・01・11・10 の状態である時間を 灰色・赤色・緑色・青色 の網掛けで示す。図中に約 3 サイクル分のデータが含まれる [B1]。

て前へと進んでいることがわかる。この振れはロボットの前端と後端で振幅が異なる。この差の原因は後ろの円

筒折の長さの変化が大きいためである。また、前端と後端は方形波のように動いていることから、それぞれの円筒折の状態の遷移が非常に安定して生じていることもわかる。円筒折の遷移が、弱い円筒折の遷移が終わってから強い円筒折の遷移が終わる、はっきりとした順序だった遷移である。前の先端に比べて後ろの先端が急激に位置を変えている性質は、強い円筒折は安定な状態へとより早く遷移しようとするためである。

実際に進んだ距離は1サイクルあたり約25mmであった。この測定はフォーム分析ソフトKinovea[147]を用いて行った。

1サイクルで生じるロボット全体の長さの変化に比べて、1サイクルで進む量が短いのは、ロボットの前の端でワイヤを掴んでいないこと、1アクチュエータに削減したとはいえ、サーボモータの重量がロボットとワイヤの摩擦を無視できないものとしたことが挙げられる。十分軽いアクチュエータとすれば端の摩擦に比べて内径による固定が十分強くなるため、この問題は解決するだろう^{脚注16}。ただし、図6.8の赤丸に示された位置が同僚の掴む力を生じた場合、進行する距離は円筒折ロボット全体の長さの変化の約半分になる。そのため、同じ円筒折が同時に収縮し、同じ摩擦を生じていると仮定すると、ほぼ理論的・理想的な移動が実現できているといえる。

収縮しながら掴むと述べており、実際に長さの収縮と内径の収縮は同時に起きているが、内径の収縮に比例して掴む力が生まれるのではなく、収縮しきった状態に近い状態で掴む力が生じる。更に、掴んだことによりそれ以上内径が収縮できなくなるため、長さの収縮も同時に止まることとなる。そのため、収縮後に掴んでいるといえる。

ワイヤを離す過程も同様であり、伸長が開始するとともに内径はワイヤの径より太くなるため、即座に掴む力を止める。そのため、離してから伸長していると言える。この点に注目すると、図6.6の6状態を繰り返すことでこの円筒折ロボットが移動していることがわかる^{脚注17}。

(5年以内に出版予定)

6.3.2 平面上を移動するロボット

平面上を移動するロボットは、体積の変化を用いて制御するため、円筒折ロボットの両端を密閉し、空気孔を搭載する。摩擦板は3Dプリンタ（Objet 260, Stratasys, Ltd.）を用いて作成した。摩擦板の半径は、27.5mmとし、円筒折の断面の孔を開けることで円筒折ロボットに搭載できる形状とした^{脚注18}。摩擦が大きい部分と摩擦が小さい部分は、それぞれTango Black PlusとVero Whiteで実現した。Tango Blackはゴム状の材料であり、Vero Whiteはプラスチック状の材料である。密閉するための板と折り紙、空気孔を持つ板と折り紙はそれぞれ接着剤（セメダインスーパーX Gold）で接着し、シリコンチューブを接続した^{脚注19}。

空気の注入と排出を繰り返すことでロボットは移動する。内側の円筒折の長さの変化が、1サイクルで前進する距離に相当し、ワイヤを掴むための力を必要としないため、完全に収縮させることが可能である^{脚注20}。そのため理論的な1サイクルで前進する距離は、2つの弱い円筒折の展開状態の長さであるため、 $2 \cdot 25\sqrt{2\sqrt{3}\sin 20^\circ} \text{ mm} = 54.42 \text{ mm}$ となる。

実装したロボットを図6.16に示す。また、実装したロボットのそれぞれの状態を図6.17に示す。

移動した軌跡は図6.18のようになった。このロボットは、1サイクルあたり約38.2mm移動した。**後ろの摩擦板**は後退しておらず、しっかりと摩擦をはたらかせて踏ん張っていることがわかる一方で、**前の摩擦板**が微小ではあるが後退している。これは、チューブの重さがチューブが接続された後ろにかかっていることで、後ろの摩擦板により大きな摩擦が発生したために生じた現象だと思われる。また、ロボットの伸長時にはチューブは動かないが、ロボットの収縮時にはチューブを前に引っ張る必要があり、その負荷に摩擦力が耐えられなかつたから生じたとも考えられる。これは、折り紙構造が軽すぎる問題でもある。チューブに比べても非常に軽い折り紙は、その重力によって働く摩擦力も小さくなってしまう。そのため、空気を通すチューブも十分軽くする必要がある。また、円筒折の長さは厳密には0にならなかった。図6.18の摩擦板の間の距離が0とならない結果がわかり、逆

脚注16 このような問題もアクチュエータの軽薄化のモチベーションとなる

脚注17 遷移中の状態の解釈による

脚注18 六角形の一辺は25mmであるため、さらに外側に2.5mmの太さを持つ

脚注19 3Dプリンター造形物の接着ガイドCEMEDINEより、Objet 260の造形物にはセメダインスーパーX Goldが適している

脚注20 紙には厚さがあり、ヒンジの力などからも厳密には0ではないが、外部の要因による阻害は生じない。

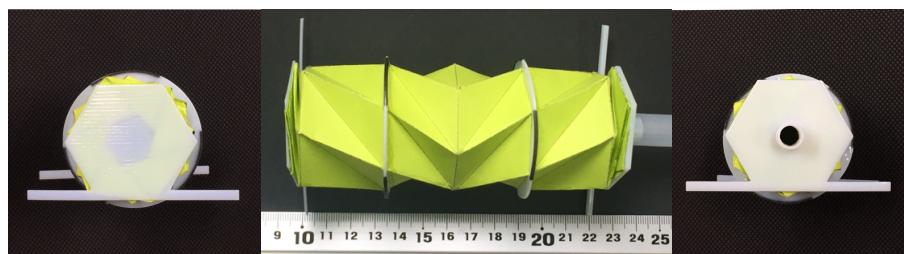


図 6.16: 実装した平面上を移動するロボット。左から順に背面図・側面図・正面図であり、正面にのみ空気孔がある。重さは 14.1g。厚さは空気孔を含めて 23.45 mm、空気孔以外は 13.0 mm。

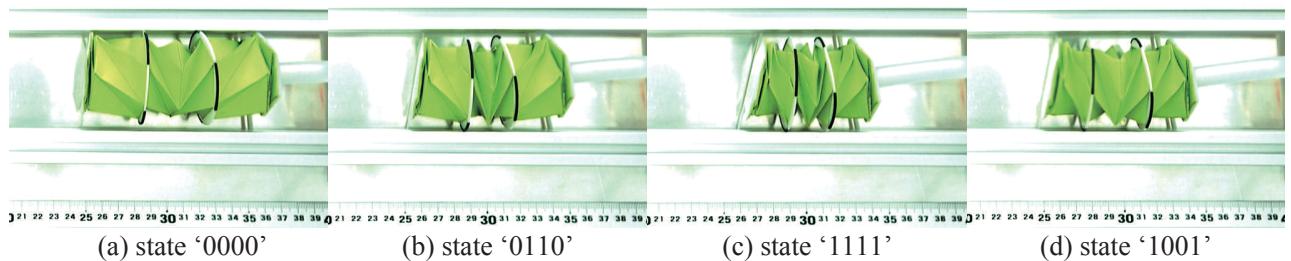


図 6.17: 実装したワイヤ上を移動するロボットのそれぞれの状態。空気の排出・流入により state ‘0000’ から state ‘0110’、state ‘1111’、state ‘1001’ と変形し、state ‘0110’ へと戻る。

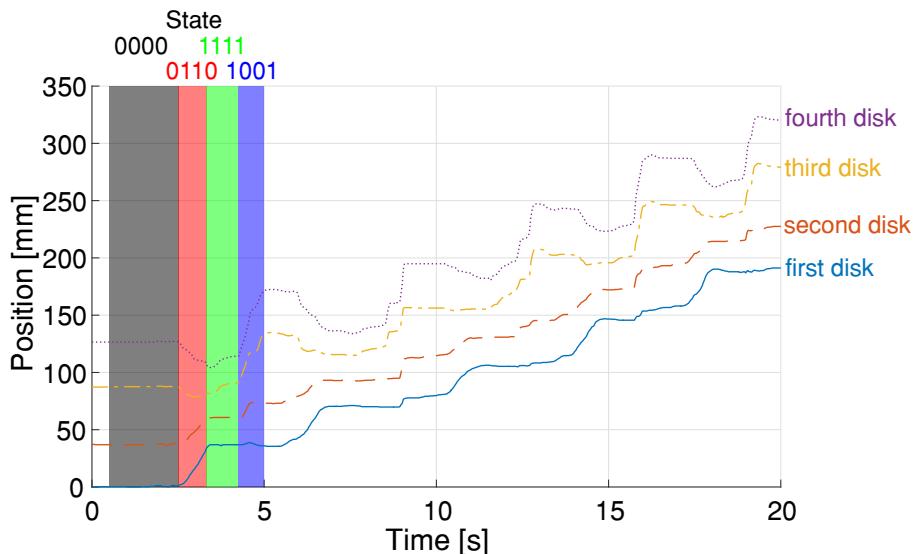


図 6.18: 円筒折の状態とそれぞれの摩擦板の位置。上から順に、ロボットの先頭・前の摩擦板・後ろの摩擦板・ロボットの後端であり、密閉するための板も 3D プリンタで印刷したため、便宜上 disk と表記した。灰色・赤色・緑色・青色の網掛けはそれぞれ 0000・0110・1111・1001 の状態である時間を示す。図中に 5 サイクル分のデータが含まれる [B1]。

に 54.42 mm を超えている場所^{脚注 21}も観測されている。このような要因により、理想的な 1 サイクルでの移動距離に比べて実際の移動距離が劣ったと考えられる。

ワイヤ上を移動する円筒折に比べると、本ロボットは重力による摩擦のみで平面に対してロボットを固定している。つかむ力は厚さなどの材料にも影響するが、折り紙の薄さによるつかむ力の減少に比べて折り紙の軽さによる摩擦力の減少は顕著である。そのため平面への固定がワイヤをつかむ機構ほどは強く行われなかったため、ワイヤ上を移動する円筒折に比べて移動を示すグラフの方形波からの乖離が激しい。円筒折の遷移には運動エネルギーが生じるために円筒折の遷移によって生じたエネルギーがロボット全体を振動させ平面から浮かせる力も働

脚注 21 展開状態で更に空気が流入された場合に生じる

いた可能性がある。特に空気は圧縮されるため、円筒折の遷移の速度は速く、また円筒折のポテンシャルエネルギーが伸長しきった状態から急に上昇する性質も擊力のように働いたであろう。

5年以内に出版予定

6.4 本部のまとめ

第6章では、折り紙の変形の順を制御する軽薄な「機構」を提案した。具体的にが、円筒折の状態のポテンシャルエネルギー・ポテンシャルエネルギーを用いた遷移・展開収縮で生じる物理的な運動を利用して、1アクチュエータで移動するロボットを実現した。特に、体を順番に動かして移動するロボットを1アクチュエータで実現し、折り紙構造によりアクチュエータの大幅な削減を示した。

目的に応じて円筒折を並び替えることで、環境に応じた移動を実現できる。本章では、3種類の環境での移動を提案し、実装により移動が可能であることを示した。実際の紙と実験環境には理想的な折り紙とは異なる性質のため、実際の移動距離は理論的な移動距離の $\frac{1}{2}$ 程度であるものもあった。

本章では、一次元方向にのみ長いヘビ型ロボットの動作を実現したが、本質はヒステリシス特性にある。そして、1アクチュエータの単調な運動を段階的な運動へと変換する構造の提案である。そのため、異なる場所で行う様々な遷移を順番に行う、一見複数のアクチュエータが必要な運動を1アクチュエータで実現できる手法の開発と言える。

第6章では、折り紙の変形を起こすための軽薄な機構として折り紙自身の弾性エネルギーに着目し、全体にかかる力に対して順序だった変形を生じさせる折り紙構造を円筒折で実現した。第6章の技術により、1アクチュエータの動作を多アクチュエータで制御された動きに変換し、少ないアクチュエータで、折り紙の変形を制御する機構を可能とした。

おわりに

7.1 達成項目

本論文は、折り紙の変形を起こす軽薄な機構と回路を提案し、2個の観点によって分類した。1個目の観点は外部からエネルギーを一部のみに与え変形を連鎖的に起こす設計とエネルギーを全体に与え一部に集中させて変形を順に起こす設計である。2個目の観点は機構と回路の分類であり、力学的エネルギーを主に制御する機構と電気エネルギーを主に制御する回路である。紙に新たな要素を付け加える回路に比べ機構は折り紙の折り線パターンの工夫によって実現するため、より折り紙の真髓に近いとして後半に配置した。

第2部では外部からエネルギーを一部のみに与え変形を連鎖的に起こす回路を提案した。小面を電極として扱うと小面同士がキャパシタを成し、交流電源により変形「小面の振動」が生じる。そこで折り紙全体へ電気エネルギーを行き渡らせる軽薄な回路について研究し、導電性インクを印刷した紙での回路パターンの生成を行った。導電性インクを用いた印刷によるアクチュエータや回路は既に存在していたが、軽さと薄さのためには全配線を印刷パターンのみで実現する数学的問題があった。本論文では与えられた電極に対して全ての電極を交差なく連続に接続できるパターンの有無の判別手法を与え、更に存在する場合は交差を含まない印刷パターンの導出アルゴリズムを与えた。またパターンが存在しない場合にも最終的な折り紙の形状をほとんど変えない、配線が可能な折り線パターンへの変形手法も提案した。第2部の成果により、交流電源を1小面ずつに接続するだけで全ての小面に電圧を印加でき、折り紙全体での小面の振動が可能となる。導電性インクは非常に軽く薄いため、電気エネルギーを一部のみに与え折り紙全体の変形を起こす軽薄な回路を実現した。

第3部では外部からエネルギーを全体に与え変形を順に起こす回路を提案した。折り角を制御できる軽くて薄いアクチュエータとして形状記憶合金に着目し、形状記憶合金を順に駆動することで折り紙の変形を順に起こす回路を実現した。形状記憶合金を用いた折り紙の変形は既に存在していたが、形状記憶合金の制御の難しさからセンサや制御素子が搭載されるため軽さと薄さが損なわれていた。本論文では形状記憶合金のセンサを薄く軽い銅テープのみで実現し、またそのセンサを直接電源とアクチュエータの配線に挿入することで折り紙の形状によって駆動状態を切り替える制御も実現した。第3部の成果により、直流電源を折り紙の両端に接続するだけで全てのアクチュエータに所望の順に電圧を印加でき、折り角の変化による変形が可能となる。銅テープは非常に軽く薄い上、弾性を用いて平坦に潰せる構造を用いるため、電気エネルギーを全体に与え折り紙の変形を順に起こす軽薄な回路を実現した。

第4部では、外部からエネルギーを一部のみに与え変形を連鎖的に起こす機構を提案した。折り紙の変形には小面の形状が変化し弹性エネルギーが生じる変形が存在し、弹性エネルギーを生じる折り紙を力学的に接続することで連鎖的な変形を実現した。また外部の弹性エネルギーを用いることで弹性エネルギーの散逸を補充することで連鎖を延長し、不減衰伝送路としてのシミュレーションを行った。そして数個の折り目が1カ所に与えた力のみで遷移する様子をシミュレーションだけでなく実装した折り紙構造でも実証した。第4部の成果により、アクチュエータから離れた場所へ変形を連鎖でき、また一部にのみ力を与えることでの全体の折り目の変形が可能となる。本論文では用いた折り紙は円筒折と呼ばれ、平坦に折りたためる折り紙であり平坦な状態で安定である。折り紙の弹性エネルギーは小面自体の変形で生じるため紙のみで実現可能であり、力学的エネルギーを一部のみに与え変形を連鎖的に起こす軽薄な機構を実現した。

第6部では、外部からエネルギーを全体に与え変形を順に起こす機構を提案した。同じ力が同時に加えられた場合にはより弱い(=柔らかい)部分が変形するため、変形に必要な力が異なる折り紙を組み合わせることで変形の順を制御した。またその応用として折れ角と長さとねじれ角と体積と内径が連動する折り紙を用いて1アクチュエータで動くロボットを設計した。そして提案する構造のアクチュエータの種別に依らない汎用性を実証するために体積の変化・ねじれ角の変化・長さの変化を用いた3種類のロボットを実装した。第6部の成果により、全体に力を与える1アクチュエータのみで変形を順に起こし、まるで複数のアクチュエータが搭載されたかのよ

うなロボットを実現した。折り紙構造は第4部と同様平坦に折りたためる折り紙で実現した、アクチュエータを削減する軽薄な構造であり、力学的エネルギーを全体に与えて変形を順に起こす軽薄な機構を実現した。

7.2 展望・限界

7.2.1 各部の展望・限界

第2部の展望・限界

導電性インクを印刷した紙が非常に軽く薄い一方、本研究で述べた導電性インクを印刷した紙が可能とする変形は非常に限定された変形である。高電圧をかけることで電極間の距離が変化スピーカや振動体として機能するが、折り紙の変形全てに有用な手法にはなり得ない。本論文では導電性インクの電気抵抗と静電容量のみに着目したため、導電性インクの近傍でしか力を発揮できないからであろう。そのため、導電性インクでコイルを実現すれば導電性インクから離れた場所へと力を発揮できる可能性が残る。導電性インクの薄さはその電気抵抗が無視できないほどであり、二次元状に広がるキャパシタと比べるとコイルは導電性インクとの相性が悪い。しかし導電性インクの改良や電極の種類の増加は新たな変形を可能としうる。

また、配線パターンを無視して設計できるため折り紙スピーカの設計が非常に楽になるだろう。折り紙スピーカの印刷パターンの要求はグラフ理論の数学やコンピュータグラフィックスを専門とする人からだけではない。そこで折りパターンをパソコンに入力する必要もなく、紙の上でなぞりながら考えられるような簡単な手法で実現した本手法は、多くの人が利用できる手法であろう。折り紙には軽薄である利点以外に、手に入りやすい材料である紙から道具を使わずに作れる利点も存在する。そのため、パターンを手計算して導電性インクを手で塗る事や、折ってみた折り紙を一度開いてスピーカとする事さえ可能となる。例えば、折りたたまれた部分の面積にしたがってスピーカの音量やキャパシタの容量は変化する。既存手法で音量や容量の変化が提案されているが、折りパターンから自動的に配線パターンを得られるようになれば、より複雑で有用な音量や容量の変化を提案しやすくなるだろう。折り紙スピーカの指向性から見た目まで、電極パターンについて考えることなくまず設計する事が可能となり、より自由な設計につながるだろう。

振動を発生させられると述べているが、この振動には高電圧が必要である。例えば折り紙スピーカには600Vの交流電圧を用いており、文献[37]では7kVの電圧を用いて移動を実現している。高電圧の交流電源は入手が難しいだけでなく危険であり、このような高電圧で初めて音が聞こえたり移動が実現したりするため、機構や回路の実現は軽薄かつ手軽に行えるが、運用に問題が残る。

第3部の展望・限界

薄いアクチュエータとして形状記憶合金を用いたが、パウチモータ[75]などを用いれば空気圧での駆動が可能である。形状記憶合金の50mg/mには及ばないまでも軽薄な機構として有用であり、形状記憶合金が引張力のみを実現する一方でパウチモータは圧縮力も実現できる。パウチモータも形状記憶合金同様温度で駆動するアクチュエータであり、導電性インクを用いたヒータとの組み合わせは軽薄な機構で実現でき、銅テープでの制御も可能だろう。また軽薄なアクチュエータに限らない本論文の内容は、高精度かつ軽薄な折り角センサとしても用いられ、片側だけで支持しなければいけない構造物などの重いセンサを搭載できない構造物にも有用だろう。また今回は銅テープでの実現を行ったが、導電性インクを印刷した紙を立体的に折ることでも実現できるだろう。折ることで変形しない立体的構造物を接触に用いる手法と、折り角が変化するにつれて立体的に飛び出て接触する手法が可能である。入手や加工が容易するために銅テープを用いたが、長時間保管すると銅の表面は酸化して接触による導通は見られなくなる^{脚注1}。

脚注¹酸化銅 Cu₂O の電気抵抗率は $10 \times 10^5 \Omega\text{m}$ を超える

また、第??節で述べた破壊も問題である。銅テープは摩擦や粘着剤によって張り付いてしまうなどで導通していないはずの角度でも導通を維持してしまう事故が生じた。そのため破壊につながる動きの前にはリミットスイッチ的構造を用意するとよりよく、そのためにも構造が複雑になってしまう。

第4部の展望・限界

本論文で実装した不減衰伝送路では内外にバネを搭載しているが、折り紙の接続やポテンシャルエネルギーの調節にも円筒折などの平坦に折りたためる構造を用いればより平坦な構造が得られるだろう。今回は折り紙部分とその周辺で切り分けるためにバネなどの力を用いたが、全てを折り紙で実装すれば折り紙をバッテリのように用いることが可能である。一般的なバッテリがエネルギーの量によらない重さと厚さを持つのに対して折り紙は軽く、いずれかの状態においては薄さも両立する設計が可能である。そのため必要な時に空間を用いてエネルギーを充填するような軽薄なバッテリの実現とも言える。自己ロック機構と組み合わせることで、引張ながら展開するだけで弾性エネルギーを蓄えながら伝送路を構築するなどの設計の工夫もこれから行える。また、今回は位置的にも隣接しているユニット同士でのみ相互作用を考えているが、それぞれの力を伝える要素を別に用意することで離れたユニットの変形も引き起こせる。その力を伝える要素を全て平面上に用意するか、折りたためる構造で力を伝える要素を実現すれば軽薄な性質を維持したままより多様な動きの連鎖を生むことができるだろう。

第6部の展望・限界

本論文では変形によって変化するパラメータが多い円筒折を用いることで様々な移動様式を実現したが、円筒折のポテンシャルエネルギーの形状は高さに対して連続的でなめらかな曲線を描いている。そのため最も弱い円筒折のみが遷移する場合に最も弱い円筒折以外にも変形は生じてしまい、特に伸長時に顕著である。円筒折以外のポテンシャルについても考えれば、より急峻に変化するポテンシャルエネルギーが得られ、より段階的な変形を実現できるだろう。

更にこのポテンシャルエネルギーの非対称性を用いることで伸縮時の速度の差を生み、慣性を用いた関連研究[142]のような移動も実現できる。慣性を用いるとその慣性のために重量が増し軽薄な構造ではなくなるが、帆のような軽薄な構造と空気や水の抵抗を用いれば、高速な動きに対しては液体に対して帆が固定され低速な動きに対しては平面に摩擦で固定される動きが可能となるだろう。ポテンシャルエネルギーの曲線の左右を入れ替えることは不可能であるが、1アクチュエータの制御する範囲を変化させることは可能である。そこで図6.11のように複数の円筒折を搭載し、図6.12のように複数の遷移サイクルを用意すれば1アクチュエータで両方向に移動できるだろう。

本論文で行った移動はロボットが非常に軽いために大きな力を必要としないため、円筒折のポテンシャルエネルギーのみの計算がほぼそのまま実現している。しかし例えばワイヤをつかむ場合には、ワイヤと接触している部分が摩擦を生むなどして外部からの力も考えなければいけない。そして大きな力が外部からかかるればその力によって異なる変形が生じる可能性がある。序機のような急峻に変化するポテンシャルエネルギーはこの問題についても影響されにくい構造を実現する。

7.2.2 全体についての展望・限界

今回は材料の選定についてはほとんど述べていない。例えば円筒折については紙を用いることが重要であり、紙の一度折れたところで折れやすくなる性質と折り目のついていないところに新たに折り目を生じにくい性質が円筒折の遷移の耐久性を上げている。例えばクリアファイルや金属で同様に円筒折を作成したが、円筒折の変形に伴って余分な折り目を生じて異なる挙動を示した。トラスマodelではなく小面の変形を用いた円筒折構造は筆者の知る限りそのほとんどが紙で作られており、他の円筒折については布などを用いている。布の場合は直立しないためバイステーブル構造である性質を用いている物ではなく、単に円筒の折り畳みを実現している物であるた

め本論文の第4部と第6部の内容は再現できない。他の材料を用いて円筒折を構築することでさらなる応用を発見できる可能性を残している。

そして環境の温度によって変化する材料を用いることで本研究を更に軽薄にする可能性も残す。形状記憶合金を温度によって長さを変化するアクチュエータとして取り上げているが、環境の変化ではなく通電により駆動した。例えばパウチモータは室温で生じる範囲で相変化を行う高機能性液体 Novec 7000 (3M) を用いており、沸点は 34°C である。この液体を入れた円筒折は人や動物が触れた際、日光などで外気温が上がった場合に駆動するため、バッテリも不要な変形を実現する。他にも例えば湿度の変化のみで移動することができる紙状のアクチュエータ [150] を用いれば湿度に対して駆動可能である。

周波数応答を用いて 1 アクチュエータで状態を変える研究がある [151]。この研究も 1 アクチュエータで複数の折り目を制御しているが、周波数応答を用いているために外部に力を与えにくい^{脚注 2}。また文献 [151] が金属板を用いた研究である理由の一つにその質量の大きさがあるだろう。軽くないが薄い材料であれば質量を用いたこのような工夫が可能である。軽さと薄さの両方が必要であれば本論文の内容が適しているが、どちらか片方だけを必要とする場面ではより自由な設計が可能であるだろう。

また変形時には軽薄でなくとも良いが、軽薄な状態を長時間維持したい折り紙には折り紙を折るために紙を移動するロボットが可能であろう。1 次元の多関節の腕を、腕の上を動く 1 アクチュエータと各関節の角度を決める 1 アクチュエータの合計 2 アクチュエータで制御する手法がある [152]。折り紙では平面を動かなければいけないため紙の上を動く 2 アクチュエータと各折り角を決める 1 アクチュエータの 3 アクチュエータで制御できる。

脚注 2 外部からの力が異なる系についての設計が非常に難しいだろう

■ 付録

謝辞

本論文は東京大学大学院 情報理工学系研究科 電子情報学専攻 博士課程での研究成果をまとめた論文である。本研究は JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) と JSPS 特別研究員奨励費 (JP19J14472) の助成を受けたものである。

本章では、本論文もしくは博士課程での生活へ貢献した者に対して礼を述べるとともに、本研究の研究成果に貢献した主要な協力者を本人の望む呼称で記載する。

主な研究的貢献者

- 川原圭博教授

博士課程において指導教官として本研究の実施の機会を与えていただき、その遂行にあたって終始ご指導をいただいた。また、本研究の内容だけでなく、学術界や産業界での風儀についてもご教示を賜り、薰陶を受けた。そして研究室の主催者として、空間面・設備面・資金面で素晴らしい研究環境を整えていただいた。ここに万謝の意を表する。

- 斎藤一哉講師

私に折り紙の数学的な美や工学的応用を布教し研究の着想の根幹となる機構を紹介した。研究の視点は昆虫から航空機までに及び、数多の存在を折り紙として捕らえる感性は私を感化させた。また、多くの図形的な数学的问题を与えていただいた。ここに深謝の意を表する。

- 苗村健教授

特に、情報理工学的な観点での折り紙・折り紙ロボットについての意見をいただいた。ここに拝謝の意を表する。

- 豊田正史教授

折り紙の軽さと薄さを折り紙ロボットに対する明確な要請として扱う展開の端緒となる意見をいただいた。ここに拝謝の意を表する。

- 新山龍馬講師

本研究において、各研究の統合について議論を行い、結果の表現や展開についての助言をいただいた。ここに拝謝の意を表する。

- 浅見徹名誉教授

特に数学的議論において有益な討論・助言を戴いた。修士課程までの指導教官であり、選択的圧縮センシングの研究 [a2] を通じて川原圭博教授と共に、課題発見から論文誌に至るまでの過程を通じて善く正しい研究についてご指南をいただいた。

- 館知宏准教授

折り紙の研究者であり、特に折り紙構造の数学的知見を用いて本研究に数多くの意見をいただいた。また指導している安達瑛翔さん、須藤海さんとの議論にもつながった。

- 梅館拓也准教授

イモムシの歩容や体の構成など、生物物理学の研究においてご指導をいただいた。また、対象に愛着を持ち突き詰めることで生まれる多様な話題と、楽しそうに研究する様子は研究室に活気を与えた。

- 加藤邦拓特任研究员

折り紙スピーカの研究において共に研究し、多くの数学的問題を与えていただいた。

- Ta Duc Tung さん、鳴海紘也さん、野間裕太さん

各位とは同じ研究課題に取り組み、本研究に資した。また、Ta Duc Tung さん、鳴海紘也さんには、6年間にわたる研究室生活でお世話になった。

- Qi Jie 特任助教、笹谷拓也さん、池内尚史さん、石毛真修さん、池田夏輝さん、高木健さん
これまでに述べた方々と共に、各位は研究遂行にあたり日頃より研究環境を整え、円滑な研究活動に貢献していただいた。
- 藤田メイコさん、水野典子さん、対尾健二さん、Amir 偉さん、金井英之さん、道面美紀さん、赤羽彩子さん
度重なる例外処理を含む様々な事務処理などにより、円滑な研究活動に貢献していただいた。

生活的貢献者

- 両親、妹
旅行を計画したり家事をこなすなど、長期休暇を休暇たらしめ、大学院生活に減り張りを与えた。特に両親には幼少の頃から数学関連の書籍を中心に、私の興味の赴くままに物品を与えては知的好奇心を涵養させた。
- おおきどゆきなりさん（ニート社）
寝具や大量の食料を寄贈し、生活に大いなる潤いを与えました。
- 後藤健太郎さん
食料やシャンプーを寄贈し、生活と髪に潤いを与えました。
- 小宮山遼太さん
枕や珪藻土マット、カップスープ、アイスクリーム等を寄贈し、生活に潤いを与えました。
- 青山昂平さん、上原涼さん、陛下ちゃんさん
食料や嗜好品を寄贈し、生活に潤いを与えました。
他にも、大学受験・博士課程への進学の決心の一助となった小木曾里樹さんや春見光揮さんをはじめとする岐阜工業高等専門学校の方々、鈴木孝男さんや橋詰新さんをはじめとする共に大学生活を送った方々に感謝致します。

■ 外部発表文献

本論文の成果と直結する発表文献

論文誌

- [A1] **Fuminori Okuya**, Kazuya Saito, Yoshihiro Kawahara, “Numerical Simulation of Stable Propagation of Mechanical Signals by Cylindrical Origami,” IEICE Communications Express, (ComEX), vol.X8-B, Issue 12, pp.518–523, Dec. 2019. (in press). doi: <https://doi.org/10.1587/comex.2019GCL0031>

国際論文

- [B1] **Fuminori Okuya**, Takuya Umedachi, Kazuya Saito, and Yoshihiro Kawahara, “Crawling Cylindrical Origami Robot Driven by Single Actuator,” The 7th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education (7OSME), vol.3, pp.949–963, Sept. 2018.

国内学会

- [C1] 奥谷文徳, 川原圭博, “銅テープ回路の排他的論理和の円筒折を用いた実装,” 電子情報通信学会技術研究報告 (CAS) , vol.119, no.313, CAS2019-52, pp.59–64, Nov. 2019.
- [C2] 奥谷文徳, 川原圭博, “出力を入力にフィードバックすることで繰り返し遷移を構成する組み合わせ回路の簡単化によるロバスト性,” 電子情報通信学会技術研究報告 (COMP) , vol.119, no.249, COMP2019-21, pp.27–34, Oct. 2019.
- [C3] 奥谷文徳, 川原圭博, “折り紙ロボットの制御回路の自律分散制御を用いた簡単化,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, no.N-1-1, Sept. 2019.
- [C4] 野間裕太, 鳴海紘也, 奥谷文徳, 川原圭博, “折り畳み 3D 印刷の提案と形状に対する双安定性の評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, no.B-15-7, Sept. 2019.
- [C5] 奥谷文徳, 斎藤一哉, 加藤邦拓, 川原圭博, “折り紙スピーカーのための電極の連続配線可否判別,” 情報処理学会全国大会講演論文集, no.6B-06, March 2019.
- [C6] 奥谷文徳, 斎藤一哉, 川原圭博, “円筒折とその弾性エネルギーの差を用いた機械的信号の不減衰伝送,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, no.A-1-5, Sept. 2018.
- [C7] 奥谷文徳, 梅館拓也, 斎藤一哉, 川原圭博, “円筒折を用いた単一アクチュエータで直線上の物体上を進行するロボット,” 情報処理学会全国大会講演論文集, no.6B-01, March 2018.
- [C8] **Fuminori Okuya**, Takuya Umedachi, Yoshihiro Kawahara, “Robustness of locomotion speed by decentralized controlled anchoring timing,” 日本比較生理生化学会, no.P-071, Nov. 2017.
- [C9] 奥谷文徳, 梅館拓也, 川原圭博, “イモムシ型ロボットの振動子モデルへ体長の制約の付加による影響の考察,” 日本数理生物学会年会, no.O-13, Oct. 2017.

本論文の成果と関連が弱い発表文献

論文誌

- [a1] Tung D. Ta, **Fuminori Okuya**, Yoshihiro Kawahara, “Traveling Salesman Problem Based Auto-router for Designing LEDs Applications with Conductive Inkjet Printing,” The SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Special Issue on Principles and Applications of Smart Sensing, vol.11, Issue 4, pp.292–301, Jul. 2018. doi: <https://doi.org/10.9746/jcmsi.11.292>
- [a2] 奥谷文徳, 川原圭博, 浅見徹, “選択的圧縮センシングによる無線センシングデバイスの省エネルギーデータ送信,” 情報処理学会論文誌, vol.58, no.10, pp.1566–1577, Oct. 2017.
- [a3] Ryo Shigeta, Kouta Suzuki, **Fuminori Okuya**, and Yoshihiro Kawahara, “Trilateration-Inspired Sensor Node Position Estimation for UAV-Assisted Microwave Wireless Power Transfer,” SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol.10, no.5, pp.350–359, Sept. 2017. doi: <http://doi.org/10.9746/jcmsi.10.350>

国際学会

- [b1] Ryo Takahashi, Takuya Sasatani, **Fuminori Okuya**, Yoshiaki Narusue, and Yoshihiro Kawahara, “A Cuttable Wireless Power Transfer Sheet,” Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, vol.2, no.4, p.190, Dec. 2018. doi: <http://doi.org/10.1145/3287068>
- [b2] Tung D. Ta, **Fuminori Okuya**, and Yoshihiro Kawahara, “LightTrace: auto-router for designing LED based applications with conductive inkjet printing,” Proceedings of the 1st Annual ACM Symposium on Computational Fabrication (SCF ’17), Article 3, pp.3:1–3:10, New York, NY, USA, Jun. 2017. doi: <https://doi.org/10.1145/3083157.3083160>
- [b3] **Fuminori Okuya**, Yoshihiro Kawahara, and Tohru Asami, “Selective Compressed Sensing: Another Compressed Sensing Approach for Frequency-Domain Analysis,” Proceeding of IEEE International Conference on Communications, pp.1–6, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016. doi: <http://doi.org/10.1109/ICC.2016.7510938>

国内学会

- [c1] Shiqi Gao, **Fuminori Okuya**, Yoshihiro Kawahara, Yoshimasa Tsuruoka, “Supervised Learning of Imperfect Information Data in the Game of Mahjong via Deep Convolutional Neural Networks,” ゲームプログラミングワークショップ 2018 論文集, pp.43–50, Nov. 2018.
- [c2] 高橋亮, 笹谷拓也, 奥谷文徳, 成末義哲, 川原圭博, “切断により形状の変更が可能な無線電力伝送シートの設計の一検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, no.B-21-19, March 2018.
- [c3] Shiqi Gao, **Fuminori Okuya**, Naoki Mizukami, Yoshihiro Kawahara, and Yoshimasa Tsuruoka, “Improved data structure and deep convolutional network design for haifu data learning in the game of mahjong,” 情報処理学会全国大会講演論文集, no.6B-01, March 2018.
- [c4] Tung D. Ta, **Fuminori Okuya**, Yoshihiro Kawahara, “Traveling Salesman Problem Based Conductive Pattern Generation for Multiple Color LEDs Brightness Balance,” IEICE Society Conference 2017, BS-7-24, Sept. 2017.
- [c5] デウックトウンタ, 奥谷文徳, 川原圭博, 浅見徹, “多数のLEDの光量均等化のための巡回セールスマン問題を用いた導電性インクパターン生成手法,” 情報処理学会全国大会講演論文集, no.1E-03, March 2017.

- [c6] 奥谷文徳, 川原圭博, 浅見徹, “線形・2次関数で学習した Convolutional Neural Network による 3次関数の相関,” 情報処理学会全国大会講演論文集, no.4M-02, March 2017.
- [c7] 奥谷文徳, 川原圭博, 浅見徹, “最小全域木の辺長の総和を用いた二変数間に存在する関係性評価手法,” 第 19 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2016) , no.D2-1, Nov. 2016.
- [c8] 奥谷文徳, 川原圭博, 浅見徹, “ビッグデータの変数間の関係性概評を目指した無作為抽出データに基づく最小全域木の辺長総和法,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, no.A-10-4, Sept. 2016.
- [c9] 奥谷文徳, 川原圭博, 浅見徹, “データの逐次の追加による周波数分解能向上可能な Walsh-Hadamard 変換,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, no.A-8-13, p.124, Mar. 2016.
- [c10] 奥谷文徳, 川原圭博, 浅見徹, “最小全域木の辺長の平均と標準偏差による二変数間の関係性評価手法,” 電子情報通信学会技術研究報告 (CAS), vol.115, no.460, pp.45–50, Feb. 2016.
- [c11] 奥谷文徳, 川原圭博, 浅見徹, “最小全域木の枝長の総和による複数変数間の関係性の評価手法,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, no.A-12-4, p.125, Aug. 2015.
- [c12] 奥谷文徳, 白浜妥知, 川原圭博, 木代雅巳, 工藤高裕, 仲村慎吾, 浅見徹, “選択的圧縮センシングを用いた回転機の健全性診断装置の消費電力削減,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, no.B-17-88, p.624, Feb. 2015.
- [c13] 奥谷文徳, 鳴海紘也, 川原圭博, 浅見徹, “圧縮センシングを用いた心拍の計測手法における復元精度の評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会公演論文集, no.B-18-10, Sept. 2014.
- [c14] 倉地正也, 奥谷文徳, 森貴彦, “モデル予測制御を用いた天井クレーンの遠隔操縦システムに関する研究,” 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演論文集, 3C1-2, 京都, Dec. 2011.

参考文献

- [1] Biruta Kresling, "Origami-structures in nature: lessons in designing "smart" materials," MRS Proceedings, vol.1420, p.mrsf11-1420-oo02-01, Mar. 2012, doi: <https://doi.org/10.1557/opl.2012.536> (植物に見られる折り紙構造)
- [2] Fabian Haas and Robin J. Wootton, "Two basic mechanisms in insect wing folding," proceedings of the royal society B, vol.263, Issue 1377, Dec. 1996. doi: <https://doi.org/10.1098/rspb.1996.0241> (昆虫に見られる折り紙構造)
- [3] K. Miura, "The science of Miura-ori: A review," 4th International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education, pp.87–100, Aug. 2009.
- [4] Satoru Ozawa, Kyoji Shintate, and Akio Tsujihata, "30m class lightweight large deployable reflector," Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp.3354–3358, Apr. 2011.
- [5] Mark Schenk, Andrew D. Viquerat, Keith A. Seffen, and Simon D. Guest, "Review of inflatable booms for deployable space structures: packing and rigidization," Journal of Spacecraft and Rockets, vol.51, no.3, pp.762–778, Apr. 2014. doi: <http://doi.org/10.2514/1.A32598> (宇宙で用いる特に円筒形状の折り畳み構造)
- [6] Shuhei Miyashita, Steven Guitron, Kazuhiro Yoshida, Shuguang Li, Dana D. Damian, and Daniela Rus, "Ingestible, controllable, and degradable origami robot for patching stomach wounds," IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.909–916, May. 2016. doi: <http://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487222>
- [7] Kazuya Saito, Sergio Pellegrino, and Taketoshi Nojima, "Manufacture of arbitrary cross-section composite honeycomb cores based on origami techniques," Journal of Mechanical Design, ASME, vol.136, no.5, p.051011, Mar. 2014. doi: <http://doi.org/10.1115/1.4026824> (高さが連続的に変わるハニカム構造を一枚の板から連続的に折る手法)
- [8] Yves Klett, and Klaus Drechsler, "Designing Technical Tessellations," The 5th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education, pp.305–322, 2011. doi: <https://doi.org/10.1201/b10971>
- [9] Joseph M. Gattas and Zong You, "QUASI-STATIC IMPACT RESPONSE OF ALTERNATIVE ORIGAMI-CORE SANDWICH PANELS," Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Aug. 2013. doi: <https://doi.org/10.1115/DETC2013-12681>
- [10] Evgueni T. Filipov, Tomohiro Tachi, and Glauco H. Paulino, "Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol.112 no.40, pp.12321–12326, Oct. 2015. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1509465112>
- [11] Samuel Felton, Michael Tolley, Erik Demaine, Daniela Rus, and Robert Wood, "A method for building self-folding machines," Science, vol.345, no.6197, pp.644–646, Aug. 2014. doi: <http://doi.org/10.1126/science.1252610> (自己折により折り上がるロボット)
- [12] Ying Liu, Julie K. Boyles, Jan Genzer, and Michael D. Dickey, "Self-folding of polymer sheets using local light absorption," Soft Matter, no.8, pp.1764–1769, Nov. 2011. doi: <http://doi.org/10.1039/C1SM06564E> (温度変化による自己折)

- [13] Prescilla Christy Albert, Amir Radzi Ab Ghani, Mohd Zaid Othman, and Ahmad Mujahid Ahmad Zaidi, "Axial Crushing Behavior of Aluminum Square Tube with Origami Pattern ,," Modern Applied Science, vol.10, no.2, pp.90–108, Jul. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v10n2p90>
- [14] 野島武敏, “折紙の数理化とその学術的応用,” 応用数理, vol.18, no.4, 2008. doi: https://doi.org/10.11540/bjsiam.18.4_271
- [15] 野島武敏, 杉山文子, 森継修一, 上原隆平, 三谷純, 館知宏, 小林秀敏, 北岡裕子, 斎藤一哉, 戸倉直, 萩原一郎, 日本応用数理学会(監修), “折り紙の数理とその応用,” 共立出版, 2012.
- [16] Masayuki Endo, Yangyang Yang, and Hiroshi Sugiyama, “DNA origami technology for biomaterials applications,” Biomaterials Science, Issue 4, pp.347–360, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1039/C2BM00154C>
- [17] 三谷純, “折紙の展開図専用エディタ(ORIPA)の開発および展開図からの折りたたみ形状推定,” 情報処理学会論文誌, vol.48, no.9, pp.3309–3317, 2007.
- [18] Naohiko Watanabe, “Extension of the method for judging rigid foldability,” 5th International Conference on Origami in Science, Mathematics and Education and Folding Convention, Jul. 2010. (剛体折りの可否判別について)
- [19] Ryuhei Uehara, Sachio Teramoto, “Computational Complexity of a Pop-up Book,” 4th International Conference on Origami in Science, Mathematics, and Education, 2006. (飛び出す折り紙の複雑性)
- [20] sarah-marie belcastro and Thomas C. Hull, “Modelling the folding of paper into three dimensions using affine transformations,” Linear Algebra and its Applications, vol.348, Issues 1-3, pp.273–282, June. 2002. doi: [https://doi.org/10.1016/S0024-3795\(01\)00608-5](https://doi.org/10.1016/S0024-3795(01)00608-5)
- [21] Durer Albrecht, “The Painter’s Manual,” 1525.
- [22] Erik D. Demaine and Tomohiro Tachi, “Origamizer: A Practical Algorithm for Folding Any Polyhedron,” 33rd International Symposium on Computational Geometry (SoCG 2017), vol.77, pp.34:1–34:16, 2017. doi: <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.SoCG.2017.34>
- [23] Tomohiro Tachi, “Freeform Variations of Origami,” Journal for Geometry and Graphics, vol.14, no.2, pp.203–215, 2010.
- [24] T. Biedl, T. Chan, Erik. Demaine, M. Demaine, A. Lubiw, J. I. Munro, and J. Shallit, “Notes from the University of Waterloo Algorithmic Problem Session,” Sept. 1999.
- [25] 上原隆平, “計算折り紙入門 ーあたらしい計算幾何学の世界,” 近代科学社, 2018.
- [26] Martin Kilian, Simon Flory, Zhonggui Chen. Niloy J. Mitra, Alla Sheffer, and Helmut Pottmann, “Curved folding,” ACM Transactions on Graphics, vol.27, no.3, Article 75, Aug. 2008. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1360612.1360674>
- [27] Esther M.Arkin, Michael A.Bender, Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, Joseph S. B. Mitchell, Saurabh Sethia, and Steven S.Skiiena, “When can you fold a map?,” Computational Geometry, vol.29, Issue 1, pp.23–46, Sept. 2004. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comgeo.2004.03.012>
- [28] Yan Chen, Rui Peng, and Zhong You, “Origami of thick panels,” Science, vol.349, no.6246, pp.396–400, Jul. 2015. doi: <http://doi.org/10.1126/science.aab2870>
- [29] Yoshinobu Miyamoto, “Rotational Erection System (RES): Origami Extended with Cuts,” 6th International Conference on Origami in Science, Mathematics, and Education (6OSME), Part 2, pp.537–544, 2014. doi: <http://doi.org/10.13140/2.1.1445.6322> (バイステーブル構造の一つ)

- [30] Kyler A. Tolman, Erica Brunson Crapton, "Design of an Origami-Inspired Deployable Aerodynamic Locomotive Fairing," 7th International Conference on Origami in Science, Mathematics and Education, vol.3, pp.669–684, Sept. 2018. (ワンタッチで可能な列車のフェアリング)
- [31] Xinwei Deng, Cheng-Chung Sung, "Leveraging compliance in origami robot legs for robust and natural locomotion," 7th International Conference on Origami in Science, Mathematics and Education, vol.3, pp.965–980, Sept. 2018. (折り紙構造を取り入れたロボットの脚)
- [32] Suk-Jun Kim Dae-Young Lee, Gwang-Pil Jung, and Kyu-Jin Cho, "An origami-inspired, self-locking robotic arm that can be folded flat," Science Robotics vol.3, Issue 16, p.eaar2915, Mar. 2018. doi: <http://doi.org/10.1126/scirobotics.aar2915> (自己ロック付きドローン用折り紙アーム)
- [33] Cagdas D. Onal, Michael T. Tolley, Robert J. Wood, and Daniela Rus, "Origami-Inspired Printed Robots," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.20, no.5, pp.2214–2221, Oct. 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2369854> (折り紙要素を含む印刷されるロボット)
- [34] 加藤 邦拓, 斎藤 一哉, 川原 圭博, "Inkjet Printed Speaker: 導電性インクの印刷だけで作る折り紙スピーカー," 第26回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショッピング論文集 (WISS 2018), (2018).
- [35] 布施 知子, "MANIFOLD," no.05, pp.3–5, 2002. (ねじれ多重塔を紹介)
- [36] 野島 武敏, "折りたたみ可能な円錐殻の創製," 日本機械学会論文集. C 編 66(647), pp.2463–2469, 2000.
- [37] Jisen Li, Hareesh Godaba, Zhiqian Zhang, Choon Chiang Foo, and Jian Zhu, "A soft active origami robot," Extreme Mechanics Letters, vol.24, pp.30–37, Oct. 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eml.2018.08.004> (7kV の電圧を 10Hz 程度で印加することで振動を起こし、移動するロボット)
- [38] Shuhei Miyashita, Laura Meeker, Maurice Goldi, Yoshihiro Kawahara, and Daniela Rus, "Self-folding printable elastic electric devices: Resistor, capacitor, and inductor," IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) pp.1446–1453, May 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907042> (折り紙可変キャパシタ)
- [39] Thomas L. Saaty, Paul C. Kainen, "The four-color problem (Assaults and Conquest)," McGraw-Hill, 1977. (四色定理についての文献だが 2 色での塗り分けについて言及)
- [40] Gordon Simons, and Yi.-Ching Yao, "A THREE COLOR PROBLEM," Department of Statistics, 1991. (3 色での塗り分けについての文献だが 2 色での塗り分けについて言及)
- [41] Richard Steinberg, "The State of the Three Color Problem," Annals of Discrete Mathematics, vol.55, pp.211–248, 1993. doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-5060\(08\)70391-1](https://doi.org/10.1016/S0167-5060(08)70391-1) (3 色塗り分けの困難性)
- [42] Marshall Bern, Barry Hayes, "The complexity of flat origami," In Proc. 7th Annual ACM-SIAM Symposium Discrete Algorithms, Chapter 21, pp.175–183, 1996.
- [43] Leonhard Euler, "Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis," Comment. Academiae Sci. I. Petropolitanae, vol.8, pp.128–140, 1736. (ケーニヒスベルクの橋)
- [44] Cayley, "On the Partitions of a Polygon," Proceedings of the London Mathematical Society, vol.s1-22, Issue 1, pp.237–264, Nov. 1890. doi: <https://doi.org/10.1112/plms/s1-22.1.237> (カタラン数と多角形の分割)
- [45] Jun Mitani, "A Method for Designing Crease Patterns for Flat-Foldable Origami with Numerical Optimization," J. Geom. Graphics, vol.15, no.2, pp.195–201, 2011. (平坦折パターン)
- [46] Pedro M. Reis, Francisco López Jiménez, and Joel Marthelot, "Transforming architectures inspired by origami," Proceedings of the National Academy of Sciences vol.112 no.40 pp.12234–12235, Oct. 2015. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1516974112> (折り紙建造物)

- [47] Yoichi Haga, Yoshikatsu Tanahashi, and Masayoshi Esashi, "Small diameter active catheter using shape memory alloy," Proceedings MEMS 98. IEEE. Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems, pp.419–424, Jan. 1998. doi: <https://doi.org/10.1109/MEMSYS.1998.659793> (形状記憶合金アクチュエータ)
- [48] Shinji Aramaki, Shinji Kaneko, Kazuhiro Arai, Yuichiro Takahashi, Hideyuki Adachi, and Kazuhisa Yanagisawa, "Tube type micro manipulator using shape memory alloy (SMA)," MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp.115–120, Oct. 1995. doi: <https://doi.org/10.1109/MHS.1995.494227> (形状記憶合金アクチュエータ)
- [49] Hashem Ashrafiouon, Mojtaba Eshraghi, and Mohammad H. Elahinia, "Position Control of a Three-link Shape Memory Alloy Actuated Robot," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol.17, no.5, pp.381–392, May 2006. doi: <https://doi.org/10.1177/1045389X06056780> (形状記憶合金3本で動くロボット)
- [50] Zhenlong Wang, Guanrong Hang, Jian Li, Yangwei Wang, and Kai Xiao, "A micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin," Sensors and Actuators A: Physical, vol.144, Issue.2, pp.354–360, Jun. 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.02.013> (形状記憶合金で動く柔らかいヒレ)
- [51] Savas Dilibal, Ertan Guner, and Nizami Akturk, "Three-finger SMA robot hand and its practical analysis," Robotica vol.20, Issue.2, pp.175–180, Apr. 2002. doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574701003757> (ファンによる冷却も行う形状記憶合金の制御)
- [52] Je-Sung Koh, and Kyu-Jin Cho, "Omega-Shaped Inchworm-Inspired Crawling Robot With Large-Index-and-Pitch (LIP) SMA Spring Actuators," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.18, no.2, pp.419–429, April 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2012.2211033> (軽いために形状記憶合金を用いたイモムシロボット)
- [53] Alireza Hadi, Aaghil Yousefi-Koma, Majid M. Moghaddam, Mohammad Elahinia, and Asadollah Ghazavi, "Developing a novel SMA-actuated robotic module," Sensors and Actuators A: Physical, vol.162, Issue.1, pp.72–81, Jul. 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.06.014> (形状記憶合金で駆動し、誤差が大きい動作)
- [54] Cadgas D. Onal, Robert J. Wood, and Daniela Rus, "An Origami-Inspired Approach to Worm Robots," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.18, no.2, pp.430–438, April 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2012.2210239> (通電時間による形状記憶合金の制御を行った例)
- [55] Michael T. Tolley, Samuel M. Felton, Shuhei Miyashita, Daniel Aukes, Daniela Rus, and Robert J. Wood, "Self-folding origami: shape memory composites activated by uniform heating," Smart Materials and Structures, vol.23, no.9, p.094006, Aug. 2014. doi: <http://doi.org/10.1088/0964-1726/23/9/094006> (折り角の制御を物理的な衝突で実現した例)
- [56] Hongyan Jiang, Steffen Kelch, and Andreas Lendlein, "Polymers Move in Response to Light," Advanced Material, vol.18, no.11, pp.1471–1475, Jun. 2006. doi:<https://doi.org/10.1002/adma.200502266> (光が照射されると変形するポリマー)
- [57] Ying Liu, Brandi Shaw, Michael D. Dickey, and Jan Genzer, "Sequential self-folding of polymer sheets," Science Advances, vol.3, no.3, p.e1602417, Mar. 2017. doi: <http://doi.org/10.1126/sciadv.1602417> (熱されすぎた形状記憶合金に言及)
- [58] T. W. Duerig, K. N. Melton, and D. Stöckel, "Engineering Aspects of Shape Memory Alloys," Elsevier, 1990. doi: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-04566-5> (折り線の状態の把握。誤差は大きい)

- [59] Jamie K. Paik, Rebecca K. Kramer, and Robert J. Wood, "Stretchable circuits and sensors for robotic origami," 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, pp.414–420, Sept. 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094746> (導電インクを用いた多種のセンサ)
- [60] Yoshihiro Kawahara, Steve Hodges, Benjamin S. Cook, Cheng Zhang, and Gregory. D. Abowd, "Instant inkjet circuits: lab-based inkjet printing to support rapid prototyping of UbiComp devices," In Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing (UbiComp '13), pp.363–372, Sept. 2013. doi: <https://doi.org/10.1145/2493432.2493486> (印刷できる導電性インク)
- [61] Amir Firouzeh, Yi Sun, Hhynchul Lee, and Jamie Paik, "Sensor and actuator integrated low-profile robotic origami," 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4937–4944, Tokyo, Nov. 2013. doi: <http://doi.org/10.1109/IROS.2013.6697069> (多層構造の抵抗変化による折り角センサ)
- [62] Yong-Lae Park, Carmel Majidi, Rebecca Kramer, Phillippe Bérard, and Robert J. Wood, "Hyperelastic pressure sensing with a liquid-embedded elastomer," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol.20, no.12, p.125029, Nov. 2010. doi: <http://doi.org/10.1088/0960-1317/20/12/125029> (柔らかい流路内の導電流体による圧力センサ)
- [63] Martin E. W. Nisser, Samuel M. Felton, Michael T. Tolley, Michael Rubenstein, and Robert J. Wood, "Feedback-controlled self-folding of autonomous robot collectives," 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, pp.1254–1261, 2016. doi: <http://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759208> (LED を用いた高精度折り角センサ。厚い。)
- [64] ByungHyun Shin, Samuel M. Felton, Michael T. Tolley, and Robert J. Wood, "Self-assembling sensors for printable machines," 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, pp.4417–4422, Sept. 2014. doi: <http://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907503> (小面とのキャバシタンスでセンシング)
- [65] Shuhei Miyashita, Laura Meeker, Michael T. Tolley, Robert J. Wood, and Daniela Rus, "Self-folding miniature elastic electric devices," Smart Materials and Structures, vol.23, no.9, p.094005, Aug. 2014. doi: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/9/094005> (折れる電子回路素子とそれによる折れ角センサ)
- [66] C. E. Wilkes, J. W. Summers, C. A. Daniels, and M. T. Berard, "PVC Handbook, ". Hanser Verlag. p. 414. 2005. (ポリ塩化ビニルについて)
- [67] Koya Narumi, Steve Hodges, and Yoshihiro Kawahara, "ConductAR: an augmented reality based tool for iterative design of conductive ink circuits," Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, pp.791–800, Osaka, Japan, Sep. 2015. doi: <https://doi.org/10.1145/2750858.2804267> (導電性インクの太さによる)
- [68] Jie Qi, Andrew "bunnie" Huang, and Joseph Paradiso, "Crafting Technology with Circuit Stickers," Proceedings of the 14th International Conference on Interaction Design and Children, pp.438–441, Boston, June 2015. doi: <http://doi.org/10.1145/2771839.2771873> (導電性インクに貼りつける素子シール)
- [69] Jie Qi, Leah Buechley, Andrew "bunnie" Huang, Patricia Ng, Sean Cross, and Joseph A. Paradiso, "Chibitronics in the Wild: Engaging New Communities in Creating Technology with Paper Electronics," Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, no.252, pp.252:1–252:11, Apr. 2018 doi: <http://doi.org/10.1145/3173574.3173826> (導電性インクに貼りつける素子シール)

- [70] Tae Sung Lee, Young Jin Hwang, Jiho Lee, Woo Seung Lee, Linsub Kim, Seung Hyun Song, Min Cheol Ahn, and Tae Kuk Ko, "The effects of co-wound Kapton, stainless steel and copper, in comparison with no insulation, on the time constant and stability of GdBCO pancake coils," *Superconductor Science and Technology*, vol.27, no.6, May 2014. doi: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/6/065018> (銅テープを用いたコイル)
- [71] Joaquín. Bernal, Manuel J. Freire, and Sebastian Ramiro, "Simple and Cost-Effective Method for Improving the High Frequency Performance of Surface-Mount Shunt Capacitors Filters," *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, pp.372–377, Aug. 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256189> (銅テープを用いたキャパシタ)
- [72] Ramses V. Martinez, Carina R. Fish, Xin Chen, and George M. Whitesides, "Elastomeric Origami: Programmable Paper-Elastomer Composites as Pneumatic Actuators," *Advanced Functional Materials*, vol.22, no.7, pp.1376–1384, Feb. 2012. doi: <http://doi.org/10.1002/adfm.201102978> (体積変化で動く折り紙)
- [73] Giacomo Moretti, Mattia Duranti, Michele Righi, Rocco Vertechy, and Marco Fontana, "Analysis of dielectric fluid transducers," *Proceedings of Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, vol.10594, pp.10594–10594-13, Mar. 2018. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2297082> (液体を封入したアクチュエータ)
- [74] Nicholas Kellaris, Vidyacharan Gopaluni Venkata, Garrett M. Smith, Shane K. Mitchell, and Christoph Keplinger, "Peano-HASEL actuators: Muscle-mimetic, electrohydraulic transducers that linearly contract on activation," *Sience Robotics*, vol.3, Issue.14, Jan. 2018. doi: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar3276> (比較的大きく動く液体を封入したアクチュエータ)
- [75] Ryuma Niiyama, Daniela Rus, and Sangbae Kim, "Pouch motors: Printable/inflatable soft actuators for robotics," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.6332–6337, Hong Kong, China, June 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907793> (軽薄な袋型アクチュエータ)
- [76] Kenichi Nakahara, Koya Narumi, Ryuma Niiyama, and Yoshihiro Kawahara, "Electric phase-change actuator with inkjet printed flexible circuit for printable and integrated robot prototyping," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.1856–1863, Singapore, June 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989217> (相変化を用い少量の液体で実現した軽薄なアクチュエータ)
- [77] Marco Salerno, Ketao Zhang, Arianna Menciassi, and Jian S. Dai, "A novel 4-DOFs origami enabled, SMA actuated, robotic end-effector for minimally invasive surgery," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.2844–2849, Jun. 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907267> (小型故体内で用いられる形状記憶合金)
- [78] Kaori Kurabayashi, Koichi Tsuchiya, Zhong You, Dacian Tomus, Minoru Umemoto, Takahiro Ito, and Masahiro Sasaki, "Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil," *Materials Science and Engineering: A*, vol.419, Issues 1-2, no.15, pp.131–137, March 2006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.12.016> (板状の形状記憶合金の活用例)
- [79] Zhenishbek Zhakypov, Mohsen Falahi, Manan Shah, and Jamie Paik, "The design and control of the multi-modal locomotion origami robot, Tribot," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.4349–4355, Sept. 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353994> (形状記憶合金の高速な駆動の応用)
- [80] Maurice Karnaugh, "The map method for synthesis of combinational logic circuits," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, vol.72, Issue 5, pp.593–599, Nov. 1953. doi: <https://doi.org/10.1109/TCE.1953.6371932> (カルノー図)

- [81] Edward W. Veitch, “A chart method for simplifying truth functions,” Proceeding of the 1952 ACM national meeting (Pittsburgh), pp.127–133, May 1952. doi: <https://doi.org/10.1145/609784.609801> (ヴェイチ図)
- [82] 橋本秀雄, 黒田英夫, “ディジタルテレビジョンの基礎 (第3回) 論理演算回路の構成,” テレビジョン学会誌, vol.39, no.2, pp.178–185, 1985. doi: <http://doi.org/10.3169/itej1978.39.178> (NAND 限定の回路最小化)
- [83] 藤田昌宏, “トランスタクション法に基づく多段論理回路簡単化機能をもつ論理合成システムとその評価,” 情報処理学会論文誌, vol.30, no.5, pp.613–623, Mar. 1989. (NAND のみの実装例)
- [84] Claude E. Shannon, “A symbolic analysis of relay and switching circuits,” Electrical Engineering, vol.57, Issue 12, pp.713–723, Dec. 1938. doi: <https://doi.org/10.1109/EE.1938.6431064> (導通関係の直列・並列接続によって論理式を回路へ落とし込む手法。シャノンの修論)
- [85] Zvi Kohavi, Niraj K. Jha, “Switching and finite automata theory,” Cambridge University Press, 2009. (論理回路に詳しい教科書)
- [86] Alexander Aleksandrovich Razborov, “Lower bounds for the monotone complexity of some Boolean functions,” Ak. Nauk. SSSR, vol.281, pp.798–801, 1985 (in Russian). (English translation in: Sov. Math. Dokl., vol.31, pp.354–357, 1985.) (モノトーン回路への制限による回路計算量の指数関数的爆発)
- [87] Noga Alon, and Ravi B. Boppana, “The monotone circuit complexity of boolean functions,” Combinatorica, vol.7, Issue 1, pp.1–22, Mar. 1987. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02579196> (モノトーン回路への制限による回路計算量の指数関数的爆発)
- [88] Éva Tardos, “The gap between monotone and non-monotone circuit complexity is exponential,” Combinatorica, vol.8, Issue 1, pp.141–142, Mar. 1988. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02122563> (モノトーン回路と制限のない回路の指数関数的差)
- [89] Robert Beals, Tetsuro Nishino, and Keisuke Tanaka, “More on the complexity of negation-limited circuits,” Proceedings of the twenty-seventh annual ACM symposium on Theory of computing (STOC ’95), pp.585–595. Las Vegas, Nevada, USA, May 1995. doi: <https://doi.org/10.1145/225058.225276> (否定論理素子の数を制限した場合の回路計算量)
- [90] Robert Beals, Tetsuro Nishino, and Keisuke Tanaka, “On the Complexity of Negation-Limited Boolean Networks,” SIAM Journal on Computing, vol.27, Issue 5, pp.1334–1347, Jul. 2006. doi: <https://doi.org/10.1137/S0097539794275136> (否定論理素子の数を制限した場合の回路計算量)
- [91] Hiroki Morizumi, Genki Suzuki, “Negation-Limited Inverters of Linear Size,” IEICE Transactions on Information and Systems, vol.E93.D, no.2, pp.257–262, 2010. doi: <https://doi.org/10.1587/transinf.E93.D.257> (否定素子の数が限定された回路)
- [92] Ravi Boppana and Michael Sipser, “The complexity of finite functions,” Handbook of Theoretical Computer Science, vol.A: Algorithms and Complexity, pp.757–804, Elsevier Science Publishers, 1990. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88071-0.50019-9> (論理式の回路計算量)
- [93] Albert E. Smith, and Charles V.L. Smith, “DIGITAL COMPUTERS AND THEIR APPLICATIONS,” Journal of the American Society for Naval Engineers, vol.61, Issue 1, pp.137–168, Feb. 1949. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1949.tb05325.x> (ラダーロジック・ラダー図)
- [94] Martin Garrad, Gabor Soter, Andrew T. Conn, Helmut Hauser, and Jonathan Rossiter, “A soft matter computer for soft robots,” Science Robotics, vol.4, Issue 33, Aug. 2019. doi: <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aaw6060> (導電性流体による論理回路)

- [95] Edward Fredkin and Tommaso Toffoli, “Conservative logic,” International Journal of Theoretical Physics, vol.21 Issue.3-4, pp.219–253, Apr. 1982. doi: <http://doi.org/10.1007/BF01857727> (ビリヤードコンピュータ)
- [96] Tommaso Toffoli, “Reversible computing,” International Colloquium on Automata, Languages, and Programming, vol.85, pp.632–644, May 2005. doi: https://doi.org/10.1007/3-540-10003-2_104 (ビリヤードコンピュータ)
- [97] James R. Harris, “A Transistor Shift Register and Serial Adder,” Proceedings of the IRE, vol.40, Issue 11, pp.1597–1602, Nov. 1952. doi: <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1952.274001> (シリアルアダーの実装について)
- [98] Edwerd B. Eichelberger, “Hazard Detection in Combinational and Sequential Switching Circuits,” IBM Journal of Research and Development, vol.9, Issue 2, pp.90–99, Mar. 1965, doi: <https://doi.org/10.1147/rd.92.0090> (出力を入力とする回路)
- [99] David A. Huffman, “The Design and Use of Hazard-Free Switching Networks,” Journal of the ACM, vol.4, Issue 1, pp.47–61, Jan. 1957. doi: <https://doi.org/10.1145/320856.320866> (冗長項の追加による論理ハザードの解消)
- [100] MonotaRO, “スイッチの動作方式と接点の構成,” <https://www.monotaro.com/s/pages/productinfo/switch/> (2019年10月17日閲覧)
- [101] 有限会社こだま製作所, “平らにしても戻る“板バネ”,” <https://www.kodama-tec.com/case/use/itabane/003599.html> (2019年10月28日閲覧)
- [102] 東海バネ工業株式会社, “板ばねの塑性変形について - ばね専門家が回答！ばねっと君のなんでも相談室,” <https://www.tokaibane.com/topic/760> (2019年10月28日閲覧)
- [103] トキ・コーポレーション【バイオメタル・ヘリックス BMX】<https://www.toki.co.jp/biometal/products/bmx/bmx.php>
- [104] Tung D. Ta, Fuminori Okuya, and Yoshihiro Kawahara, “Traveling Salesman Problem Based Auto-Router for Designing LEDs Applications with Conductive Inkjet Printing,” SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol.11, no.4, pp.292–301, July 2018. doi: <http://doi.org/10.9746/jcmsi.11.292>
- [105] Kaltenbrunner Martin Kaltenbrunner, Tsuyoshi Sekitani, Jonathan Reeder, Tomoyuki Yokota, Kazunori Kuribara, Takeyoshi Tokuhara, Michael Drack, Reinhard Schwödiauer, Ingrid Graz, Simona Bauer-Gogonea, Siegfried Bauer, and Takao Someya, “An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics”, Nature, vol.499, no.7459, pp.458–463, July 2013. doi: <http://doi.org/10.1038/nature12314>. (薄膜回路)
- [106] Neel Nadkarni, Chiara Daraio, and Dennis M. Kochmann, “Dynamics of periodic mechanical structures containing bistable elastic elements: From elastic to solitary wave propagation,” Physical Review E, vol.90, Issue 2, p.023204. Aug. 2014. doi: <http://doi.org/10.1103/PhysRevE.90.023204> (不減衰伝送路の基本的な形をマスバネダンパ系でモデル化)
- [107] Jordan R. Raney, Nadkarni Nadkarni, Chiara Daraio, Dennis M. Kochmann, Jennifer A. Lewis, and Katia Bertoldi, “Stable propagation of mechanical signals in soft media using stored elastic energy,” Proceedings of the National Academy of Sciences, vol.113, no.35, pp.9722–9727, Aug. 2016. doi: <http://doi.org/10.1073/pnas.1604838113> (不減衰伝送路)

- [108] Myungwon Hwang, Aandres F. Arrieta, "Response invariance in a lattice of bistable elements with elastic interactions," Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems XII, vol. 10595, pp.10595–10595-8, Mar. 2018. doi: <http://doi.org/10.1117/12.2303422> (バネではなく、柔らかい平板で双安定構造（文献内 Figure. 1）を構成)
- [109] Zhen Wu, Yihao Zheng, and Kon W. Wang, "Metastable modular metastructures for on-demand reconfiguration of band structures and nonreciprocal wave propagation," Physical Review E, vol.97, Issue.2 p.022209, Feb. 2018. doi: <http://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.022209> (双方向伝送路)
- [110] THINK MATHS, "Domino Computer," http://think-maths.co.uk/sites/default/files/2018-01/Think%20Maths%20-%20Domino%20Computer%20Worksheets_0.pdf (2019年11月19日閲覧) (ドミノゲートにおける論理ゲートの構造)
- [111] Michael J. Frazier, and Dennis M. Kochmann, "Atomimetic Mechanical Structures with Nonlinear Topological Domain Evolution Kinetics," Advanced Materials, vol.29, no.19, p.1605800, Mar. 2017. doi: <http://doi.org/10.1002/adma.201605800> (ねじれを用いた伝送)
- [112] Myungwon Hwang and Andres F. Arrieta, "Input-Independent Energy Harvesting in Bistable Lattices from Transition Waves," Scientific Reports vol.8, no.3630, Feb. 2018. doi: <http://doi.org/10.1038/s41598-018-22003-7> (伝送路の一部の特性を変化させてエネルギーを集中させる研究)
- [113] Kaikai Che, Chao Yuan, H. Jerry Qi, and Julien Meaud, "Viscoelastic multistable architected materials with temperature-dependent snapping sequence," Soft Matter, vol.14, Issue.13, pp.2492–2499, Mar. 2018. doi: <http://doi.org/10.1039/C8SM00217G> (温度によって性質が変わる素材を用いた温度によって遷移が変わる構造)
- [114] Hongbin Fang, Kon W. Wang, and Suyi Li, "Asymmetric energy barrier and mechanical diode effect from folding multi-stable stacked-origami," Extreme Mechanics Letters, vol.17, pp.7–15, Nov. 2017. doi: <http://doi.org/10.1016/j.eml.2017.09.008> (折り紙構造で力の伝わり方を非対称にした構造。折り紙ダイオード。)
- [115] Hiromi Yasuda and Jinkyu Yang, "Tunable Frequency Band Structure of Origami-Based Mechanical Metamaterials," Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, vol.58, no.4, pp.287–294, Dec. 2017. doi: <https://doi.org/10.20898/j.iass.2017.194.905> (円筒折の周波数特性)
- [116] Hiromi Yasuda, Tomohiro Tachi, Mia Lee, and Jinkyu Yang, "Origami-based tunable truss structures for non-volatile mechanical memory operation," Nature Communications, vol.8, no.962, Oct. 2016. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00670-w> (円筒折対をメモリとして用いる提案。保存するだけでなく読み取りの手法も提案。)
- [117] Hiromi Yasuda, Yasuhiro Miyazawa, Efstrathios G. Charalampidis, Christopher Chong, Panayotis G. Kevrekidis, and Jinkyu Yang, "Origami-based impact mitigation via rarefaction solitary wave creation," Science Advances vol.5, no.5, May 2019 doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2835> (変位を与えた円筒折タワーの振動応答)
- [118] Cai Jianguo, Deng Xiaowei, Zhou Ya, Feng Jian, and Tu Yongming, "Bistable behavior of the cylindrical origami structure with Kresling pattern," Journal of Mechanical Design, vol.137, no.6, pp.061406-1–061406-8, 2015. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4030158> (円筒折を辺だけで構築した場合の双安定性。)
- [119] Hisaaki Tobushi and Kikuaki Tanaka, "Deformation of a Shape Memory Alloy Helical Spring : Analysis Based on Stress-Strain-Temperature Relation," JSME international journal. Series 1, Solid mechanics, strength of materials, vol.34, no.1, pp.83–89, 1991. doi: https://doi.org/10.1299/jsmea1988.34.1_83
- [120] Rajeev Piyare, Amy L. Murphy, Csaba Kiraly, Pietro Tosato, and Davide Brunelli, "Ultra Low Power Wake-Up Radios: A Hardware and Networking Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials

- vol.19, Issue 4, pp.2117–2157, Jul. 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2728092> (マイクロコンピュータの超低電力待機機能)
- [121] Shannon A. Zirbel, Robert J. Lang, Mark W. Thomson, Deborah A. Sigel, Phillip E. Walkemeyer, Brian P. Trease, Spencer P. Magleby, and Larry L. Howell, “Accommodating thickness in origami-based deployable arrays,” Journal of Mechanical Design, vol.135, no.11, p.111005, Oct. 2013. doi: <http://doi.org/10.1115/1.4025372> (厚みを無視しない折り紙について、厚さを無視した紙から厚さを増加させる複数の手法。また太陽光パネル。)
- [122] Buri Hani and Weinand Yves, “ORIGAMI-Folded plate structures, architecture,” 10th World Conference on Timber Engineering, pp.2–5, Jan. 2008. (折り紙構造による頑丈な建築)
- [123] Todd Hollingshead, “BYU engineers built a bulletproof origami shield to protect law enforcement,” Feb. 2015. URL: <https://news.byu.edu/news/byu-engineers-built-bulletproof-origami-shield-protect-law-enforcement> (携帯折り畳み防弾壁)
- [124] Xueli Liu, Stavros V. Georgakopoulos, and Manos Tentzeris, “A novel mode and frequency reconfigurable origami quadrifilar helical antenna,” IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference, pp.1–3, Apr. 2015. doi: <http://doi.org/10.1109/WAMICON.2015.7120416>
- [125] Fuminori Okuya, Takuya Umedachi, Kazuya Saito, and Yoshihiro Kawahara, “Crawling Cylindrical Origami Robot Driven by Single Actuator,” The 7th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education, vol.3, pp.949–963, Sept. 2018.
- [126] Priyanka Bhovad, and Suyi Li, “Using Multi-Stable Origami Mechanism for Peristaltic Gait Generation: A Case Study,” International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, vol.5B, no.DETC2018-85932, Aug. 2018. doi: <http://doi.org/10.1115/DETC2018-85932> (本論文で提案する円筒折ロボットと似たロボット。ほぼ同時に発表された。)
- [127] Austin Reid, Frederic Lechenault, Sergio Rica, and Mokhtar Adda-Bedia, “Geometry and design of origami bellows with tunable response,” Physical Review E, vol.95, no.1, p.013002, Jan. 2017. doi: <http://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.013002> (円筒折の折り線パターンの角度と安定状態の数の関係)
- [128] Giles W. Hunt, and Ichiro Ario, “Twist buckling and the foldable cylinder: an exercise in origami,” International Journal of Non-Linear Mechanics, vol.40, no.6, pp.833–843, 2005. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2004.08.011>
- [129] Sachiko Ishida, Hiroshi Uchida, Haruo Shimosaka, and Ichiro Hagiwara, “Design and Numerical Analysis of Vibration Isolators With Quasi-Zero-Stiffness Characteristics Using Bistable Foldable Structures,” Journal of Vibration and Acoustics, vol.139, Issue 3, p.031015 Apr. 2017. doi: <http://doi.org/10.1115/1.4036096> (円筒折のポテンシャルエネルギーとバネのポテンシャルエネルギーを組み合わせた吸振構造)
- [130] Shuhei Miyashita, Steven Guitron, Marvin Ludersdorfer, Cynthia R. Sung, and Daniela Rus, “An untethered miniature origami robot that self-folds, walks, swims, and degrades,” IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.1490–1496, May 2015. doi: <http://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139386>
- [131] Christoph H. Belke and Jamie Paik, “Mori: A Modular Origami Robot,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.22 Issue 5, pp.2153–2164, Oct. 2017. doi: <http://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2697310>
- [132] Alexander Pagano, Brian Chien, Tongxi Yan, Aimy Wissa, and Sameh Tawfick, “Multi-Stable Origami Structure for Crawling Locomotion,” Proceedings of the ASME 2016 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, vol.2 Sept. 2016. doi: <http://doi.org/10.1115/SMASIS2016-9071>

- [133] Alexander Pagano, Brandon Leung, Brian Chien, Tongxi Yan, Aimy Wissa, and Sameh Tawfick, “A crawling robot driven by multi-stable origami,” Smart Materials and Structures, vol.26, no.9, p.094007, 2017.
- [134] Dae-Young Lee, Ji-Suk Kim, Sa-Reum Kim, Jae-Jun Park, and Kyu-Jin Cho, “Design of deformable-wheeled robot based on origami structure with shape memory alloy coil spring,” 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), pp.120–120, Oct. 2013. doi: <http://doi.org/10.1109/URAI.2013.6677486>
- [135] Dae-Young Lee, Ji-Suk Kim, Jae-Jun Park, Sa-Reum Kim, and Kyu-Jin Cho, “Fabrication of origami wheel using pattern embedded fabric and its application to a deformable mobile robot,” IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.2565–2565, May 2014. doi: <http://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907222>
- [136] Samuel M. Felton, Dae-Young Lee, Kyu-Jin Cho, and Robert J. Wood, “A passive, origami-inspired, continuously variable transmission,” 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.2913–2918, May 2014. doi: <http://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907278> (巻き取るようにして折り畳むタイヤ。負荷がかかることで径が小さくなりトルクを有効活用できる。)
- [137] Rajan R. Gowtham, N. Rajanish, “Adaptive Morphing Origami Wheel Robot,” International Journal of Electronics, Electrical and Computational Systemm vol.6, issue.6, pp.–467–470, Jun. 2017.
- [138] Byungkyu Kim, Moon Gu Lee, Young Pyo Lee, Yongln Kim, and GeunHo Lee, “An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator,” Sensors and Actuator A: Physical, vol.125, Issue 2, pp.429–437, Jan. 2006. doi: <http://doi.org/10.1016/j.sna.2005.05.004>
- [139] Jinwan Lim, Hyunjun Park, Sunmoo Moon, and Byungkyu Kim, “Pneumatic robot based on inchworm motion for small diameter pipe inspection,” IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp.330–335, Dec. 2007. doi: <http://doi.org/10.1109/ROBIO.2007.4522183>
- [140] Andrew. G. Mark, Stefano Palagi, Tian Qiu, and Peer Fischer, “Auxetic metamaterial simplifies soft robot design,” pp.4951–4956, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 2016. doi: <http://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487701>
- [141] Hiromi Yasuda, Jinkyu Yang, “Reentrant Origami-Based Metamaterials with Negative Poisson’s Ratio and Bistability,” Physical Review Letters, vol.114, Issue 18, p.185502, May 2015. doi: <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.185502>
- [142] Takaharu Idogaki, Hitoshi Kanayama, Nobuyuki Ohya, Harumi Suzuki, and Tadashi Hattori, “Characteristics of piezoelectric locomotive mechanism for an in-pipe micro inspection machine,” MHS’95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp.193–198, Oct. 1995. doi: <http://doi.org/10.1109/MHS.1995.494237>
- [143] Cornell Wright, Aaron Johnson, Aaron Peck, Zachary McCord, Allison Naaktgeboren, Philip Gianfortoni, Manuel Gonzalez-Rivero, Ross Hatton, and Howie Choset, “Design of a modular snake robot,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2609–2614, Oct. 2007. doi: <http://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399617>
- [144] Erik D. Demaine, Joseph O’Rourke, and Ryuhei Uehara, “幾何的な折りアルゴリズム リンケージ・折り紙・多面体,” 近代科学社, 2009. (計算折り紙についての巨編)
- [145] Kazuyuki Suzuki, Taro Nakamura, “Development of a peristaltic pump based on bowel peristalsis using for artificial rubber muscle,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3085–3090, Oct. 2010. doi: <http://doi.org/10.1109/IROS.2010.5653006>

- [146] Robert Connelly, Idjad Kh. Sabitov, and Anke Walz, “The Bellows Conjecture,” Beitrage zur Algebra und Geometrie, vol.38, no.1, Jun. 1997.
- [147] Kinovea, <https://www.kinovea.org/>
- [148] Yoshiaki Narusue, Yoshihiro Kawahara, and Tohru Asami, “Impedance matching method for any-hop straight wireless power transmission using magnetic resonance,” 2013 IEEE Radio and Wireless Symposium, pp.193–195, Jan. 2013. doi: <http://doi.org/10.1109/RWS.2013.6486685>
- [149] Yuki Nishizawa, Yoshiaki Narusue, and Yoshihiro Kawahara, “Enhancing the quality factor of thin film printed coils for efficient wireless power transfer,” 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), pp.25–27, Jan. 2018. doi: <http://doi.org/10.1109/RWS.2018.8304936>
- [150] Hiroki Arazoe, Daigo Miyajima, Kouki Akaike, Fumito Araoka, Emiko Sato, Takaaki Hikima, Masaaki Kawamoto and Takuzo Aida, “An autonomous actuator driven by fluctuations in ambient humidity,” Nature Materials, vol.15, pp.1084–1089, Jul. 2016. doi: <http://doi.org/10.1038/nmat4693>
- [151] Fabio Zuliani, Chang Lie, Jamie Paik, and Samuel M. Felton, “Minimally Actuated Transformation of Origami Machines,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol.3, Issue.3, pp.1426–1433, Jul. 2018. doi: <http://doi.org/10.1109/LRA.2018.2800126>
- [152] Moshe P. Mann, Lior Damti, Gideon Tirosh, and David Zarrouk, “Minimally Actuated Serial Robot,” Robotica, vol.36, Issue 3, pp.408–426, Mar. 2018. doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574717000479>
- [153] David P. Dailey, “Uniqueness of colorability and colorability of planar 4-regular graphs are NP-complete,” Discrete Mathematics, vol.30, no.3, pp.289–293, 1980. doi: [https://doi.org/10.1016/0012-365X\(80\)90236-8](https://doi.org/10.1016/0012-365X(80)90236-8)
- [154] “More Puzzles from Cliff Pickover,” <http://sprott.physics.wisc.edu/pickover/puzzle.html> (2019年10月7日閲覧)
- [155] ED Pegg Jr, “BEYOND SUDOKU,” Mathematica Journal, vol.10, no.3, pp.469–473, 2007.
- [156] Aaron Adcock, Erik D. Demaine, Martin L. Demaine, Michael P. O’Brien, Felix Reidl, Fernando Sánchez Villaamil, and Blair D. Sullivan, “Zig-zag numberlink is NP-complete,” Journal of Information Processing, vol.23, no.3, pp.239–245, 2015. doi: <https://doi.org/10.2197/ipsjjip.23.239>.
- [157] 東芝デバイス&ストレージ株式会社, “TC74HC00AP データシート/日本語,” Mar. 2014.
- [158] 野島武敏, “平板と円筒の折りたたみ法の折紙によるモデル化,” 日本機械学会論文集C編, vol.66, no.643, pp.1050–1056, Apl. 2004. doi: <http://doi.org/10.1299/kikaic.66.1050>
- [159] 奥谷文徳, 川原圭博, “折り紙ロボットの制御回路の自律分散制御を用いた簡単化,” 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, Sept. 2019.
- [160] James GRAY, “Studies in animal locomotion,” Journal of Experimental Biology, vol.10, no.1, pp.88–104, 1933. url: <http://jeb.biologists.org/content/10/1/88>
- [161] Milan R. Dimitrijevic, Yuri Gerasimenko, and Michaela M. Pinter, “Evidence for a spinal central pattern generator in humans,” Annals of the New York Academy of Sciences, vol.860, no.1, pp.360–376, 1998. doi: <http://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1998.tb09062.x>
- [162] Barry A. Trimmer and Huai-ti Lin, “Bone-free: Soft mechanics for adaptive locomotion,” Integrative and Comparative Biology, vol.54, no.6, pp.1122–1135, 2014. doi: <http://doi.org/10.1093/icb/icu076>
- [163] Hideo Yuasa, Masami Ito, “An Autonomous Decentralized System with Application to a Gait Pattern Generator,” Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, vol.25, Issue 2, pp.180–187, 1989. doi: <https://doi.org/10.9746/sicetr1965.25.180>

- [164] Takuya Umedachi, Takeshi Kano, Akio Ishiguro, and Barry A. Trimmer, “Gait control in a soft robot by sensing inter- actions with the environment using self-deformation,” Royal Society Open Science, vol.3, no.12, 2016. <http://rsos.royalsocietypublishing.org/content/3/12/160766>
- [165] Omer Orki, Offer Shai, Amir Ayali, and Uri Ben-Hanan, “A model of caterpillar locomotion based on assur tensegrity structures,” ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, vol.6. pp.739–745. Aug. 2011. doi: <https://doi.org/10.1115/DETC2011-47708>
- [166] Guoyuan Li, Wei Li, Jianwei Zhang, and Houxiang Zhang, “Analysis and design of asymmetric oscillation for caterpillar-like locomotion,” Journal of Bionic Engineering vol.12 Issue 2 pp.190–203, Apr. 2015. doi: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(14\)60112-8](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(14)60112-8)
- [167] Paolo Paoletti and Lakshminarayanan Mahadevan, “A proprioceptive neuromechanical theory of crawling,” Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, vol.281, no.1790, p.20141092, Sep. 2014. doi: <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1092>.
- [168] Ellie S. Heckscher, Shawn R. Lockery, and Chris Q. Doe, “Characterization of drosophila larval crawling at the level of organism, segment, and somatic body wall musculature,” Journal of Neuroscience vol.32, no.36, pp.12460–12471, 2012. doi: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0222-12.2012>
- [169] Cengiz Pehlevan, Paolo Paoletti, and Lakshminarayanan Mahadevan, “Integrative neuromechanics of crawling in *d. melanogaster* larvae,” eLife, vol.5, p.e11031, 2016. doi: <https://doi.org/10.7554/eLife.11031>
- [170] J. Brackenbury, “Caterpillar kinematics,” Nature, vol.390 no.6659, p.453, 1997. doi: <https://doi.org/10.1038/37253>
- [171] Stephen A. Wainwright, “Axis and circumference (The Cylindrical Shape of Plants and Animals),” Harvard University Press, 1988.
- [172] Barry A. Trimmer, Ann E. Takesian, Brian M. Sweet, Chris B. Rogers, Daniel C. Hake, and Daniel J. Rogers, “Caterpillar locomotion: a new model for soft-bodied climbing and burrowing robots,” in 7th International Symposium on Technology and the Mine Problem, vol.1, pp.1–10, Monterey, CA: Mine Warfare Association, 2006.
- [173] Huai Ti Lin and Barry A. Trimmer, “The substrate as a skeleton: ground reaction forces from a soft-bodied legged animal,” Journal of Experimental Biology, vol.213, no.7, pp.1133–1142, 2010. doi: <https://doi.org/10.1242/jeb.037796>
- [174] Huai-Ti Lin and Barry A. Trimmer, “Caterpillars use the substrate as their external skeleton,” Communicative & Integrative Biology, vol.3, no.5, pp.471–474, 2010. doi: <https://doi.org/10.4161/cib.3.5.12560>
- [175] David Zarrouk, Inna Sharf, and Moshe Shoham, “Conditions for Worm-Robot Locomotion in a Flexible Environment: Theory and Experiments,” IEEE transactions on bio-medical engineering, vol.59, Issue 4, pp.1057–1067, Jan. 2012. doi: <http://doi.org/10.1109/TBME.2011.2182612>
- [176] 平野 慎也, 羅 志偉, 加藤 厚生, “イモムシ型探索ロボットの開発,” 日本ロボット学会誌, vol.24, no.7, pp.838–844, 2006. doi: <https://doi.org/10.7210/jrsj.24.838>
- [177] Mayuko Iwamoto, Daishin Ueyama, and Ryo. Kobayashi, “Mechanism of crawling locomotion with mucus in gastropods (theory of biomathematics and its applications ix),” RIMS Kokyuroku, vol.1853, pp.217–224, Oct. 2013. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009631544/en/>

- [178] Mayuko Iwamoto, Daishin Ueyama, and Ryo Kobayashi, “The advantage of mucus for adhesive locomotion in gastropods,” *Journal of theoretical biology*, vol.353, no. Supplement C, pp.133–141, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2014.02.024>
- [179] Yoshimi Tanaka, Kentaro Ito, Toshiyuki Nakagaki, and Ryo Kobayashi, “Mechanics of peristaltic locomotion and role of anchoring,” *Journal of The Royal Society Interface*, vol.9, Issue 67, Jun. 2011. doi: <https://doi.org/10.1098/rsif.2011.0339>
- [180] Arianna Menciassi, Samuele Gorini, Giuseppe Pernorio, and Paolo Dario, “A SMA actuated artificial earthworm,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA ’04)*, vol.4, pp.3282–3287, Apr. 2004. doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1308760>
- [181] Kinji Mori, “Autonomous decentralized systems: Concept, data field architecture and future trends,” *Proceedings ISAD 93: International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*, pp.28–34, Mar. 1993. doi: <https://doi.org/10.1109/ISADS.1993.262725>
- [182] 丸一 威雄, 市川 正紀, 所 真理雄, “自律的エージェントからなる組織の計算モデルと分散協調問題解決への応用 (An Organizational Model of Computation and Its Application) , ” *情報処理学会論文誌*, vol.31, no.12, pp.1768–1779, Dec. 1990. <https://ci.nii.ac.jp/naid/110002764629>
- [183] Nobuo Sannomiya, Akira Shimada, Hiroshi Nakamine, “Modeling of Autonomous Decentralized Mechanism in Fish Behavior,” *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol.29, Issue 2, pp.211–219, Feb. 1993. doi: <https://doi.org/10.9746/sicetr1965.29.211>
- [184] Jim H. Belanger, Kevin J. Bender, and Barry A. Trimmer, “Context dependency of a limb withdrawal reflex in the caterpillar *Manduca sexta*,” *Journal of Comparative Physiology A*, vol.186, no.11, pp.1041–1048, Nov. 2000. doi: <https://doi.org/10.1007/s003590000161>
- [185] Linnea I. van Griethuijsen and Barry A. Trimmer, “Locomotion in caterpillars,” *Biological Reviews*, vol.89, no.3, pp.656–670, 2014 doi: <http://doi.org/10.1111;brv.12073>
- [186] Barry A. Trimmer, “New challenges in biorobotics: Incorporating soft tissue into control systems,” *Applied Bionics and Biomechanics*, vol.5, Issue 3, pp.119–126, 2008. doi: <http://doi.org/10.1080/11762320802617255>