

単一アクチュエータで直線状の物体上を進行する 円筒折の内径の変化を用いたロボット

奥谷文徳[†] 梅舘拓也[†] 齊藤一哉[†] 川原圭博[†]
 東京大学大学院情報理工学系研究科 電子情報学専攻[†]

1 はじめに

電線のメンテナンスロボットや配管内を進むロボットなど、直線状の物体上を移動するロボットが存在する。我々は、そのようなロボットを折り紙で実現する手法を提案する。我々が提案するロボットは円筒折を直線上の物体を包み込むように配置し、その展開と収縮の繰り返しにより進行するものであり、伸縮を制御する1つのアクチュエータのみで進行可能である。円筒折は収縮すると内径が小さくなる構造であるため、円筒折が収縮すると内側の物体を締め付けるように把持する。これにより、長さ方向の伸縮と同時に、物体の把持を行う。また、剛性の異なる円筒折を組み合わせることで、収縮時には剛性の小さい円筒折から順に折れ、展開時には剛性の小さい円筒折から展開される。これにより、ロボットを伸縮させるだけで、非対称な反作用（踏ん張り）が生まれ、剛性が小さい円筒折の方向に進む。

モータを用いるロボットと比べると、バネと形状記憶合金の組合せや、内部への気体の封入で駆動することで駆動部の軽量化が可能であるだけでなく、高圧電線付近での電磁場の影響を受けにくい、小型化が容易であるというメリットを持つ。

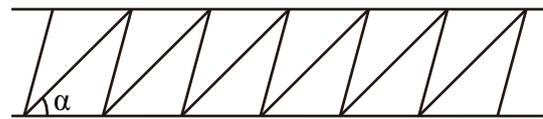
2 円筒折

円筒折は、図1に示すような、ねじりと伸縮が同時に生じる構造である。展開状態と収縮状態の2つの状態で安定するバイステーブル構造であり、伸縮の力もしくは左右のねじりのモーメントによって状態が入れ替わる。本稿では、この2つの状態が入れ替わるために必要な、伸縮力を「遷移に必要な力」と表現する。図1のように、円筒折の展開・収縮によって軸方向に伸縮するだけでなく、内周が大小する。本稿では、ねじり

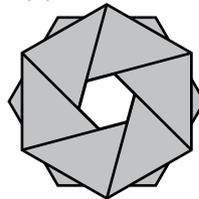
[†]Fuminori Okuya, Takuya Umedachi, Kazuya Saito, and Yoshihiro Kawahara

[†]Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

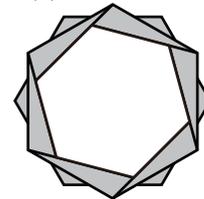
(a)



(b)



(c)



(d)

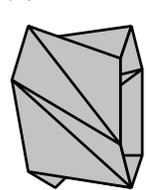


図1: (a) 円筒折の展開図 (b) 軸方向から見た収縮状態の円筒折 (c) 展開状態での円筒折 (d) 横から見た展開状態の円筒折 ($\alpha = 45^\circ$). 収縮状態と展開状態の2状態で安定であり、円筒折の内径は収縮時に小さくなる。

の向きのみが異なる2つの円筒折を直列に接続したものを「円筒折対」と呼ぶ。円筒折対はその両端でねじりを生じないまま、長さが変化する。

円筒折を用いた移動ロボットは既に存在する [1]。このロボットは、伸縮する構造の中に2本の円筒折を備え、それぞれの円筒折の長さを個別に制御することで長さだけでなく左右への方向転換も制御した。2本の円筒折は、左右への方向転換を可能とただけでなく、ねじりの向きを逆にすることでモーメントを打ち消し合い、それぞれの伸長力のみを利用している。

2.1 円筒折の剛性

我々は、同じ展開図の円筒折の材料や折り目の加工を変更により折り目の剛性を変え、遷移に必要な力を調整した。折り目の剛性を変化させることで、遷移に際して生じる歪みや展開状態の長さなどを変えることなく、遷移に必要な力を変化させられる。

ここで、剛性の異なる円筒折対を剛性順に直列に接

続し、その両端に伸縮力のみを与えた場合、図2のように遷移する。図2に示すように、圧縮時は左の円筒折か

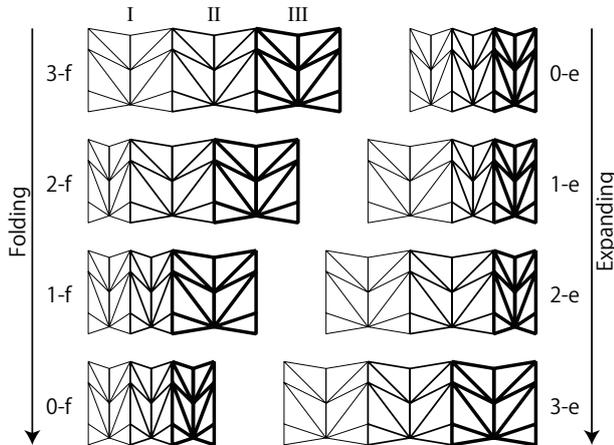


図 2: 剛性の異なる円筒折対を直列に接続し、伸縮力のみを与えた場合の遷移。3-fなどの状態名は展開している円筒折対の数と、収縮中(f)・展開中(e)を示す。剛性が弱い順に左から I, II, III と接続し、線の太さで剛性を表している。

ら収縮し、伸長時は左の円筒折から展開する。そのため、剛性の異なる円筒折対を直列に接続すると、例えば状態 2-f と 2-e のように、収縮中と展開中では長さも同じ状態でも展開状態の円筒折対は異なる。この非対称性を把持力と連動させることで、収縮中と展開中でそれぞれロボットの前後で把持する機構を実現し、伸縮のみによって進行する構造を提案する。

3 提案手法の構成

我々が提案するロボットは、その両端に伸長力と圧縮力を交互に与えるだけで進行するロボットである。Andrew らは、ポアソン比が正の物質と負の物質を前後に配置したロボットにより、伸長力と圧縮力を交互に与えるだけでパイプの中を進行するロボットを提案した [2]。我々は、パイプの中でなく棒を包み込みながら進行するロボットを提案する。Andrew らのロボットのように、後ろ足が基質を固定して伸長し、前足が基質を固定して収縮する動作を繰り返せば、伸縮の両方で前へ進む力がかかる。収縮によって内径が小さくなり、円筒形のものを締め付けるように把持することで「基質を把持」する場合、伸長する場合には前の円筒折が先に展開し、圧縮する場合には前の円筒折が先に収縮すれば良い。したがって、図2に示す円筒折の組み合わせが棒を包み込んでいれば、ロボットは剛性

の小さい円筒折が存在する左に進む。つまり、提案する構造は図2に示すような剛性の異なる円筒折を直列接続した構造であり、図2では3つの円筒折対であるが、2つもしくは4つ以上の円筒折対を剛性の順に並べた構造も同様の性質を持つ。

4 おわりに

本稿では、伸縮の繰り返しのみで進行する、直線状の物体の外を移動する円筒形のロボットを提案した。これにより、アクチュエータを減らし、形状記憶合金や空気圧などの非常に軽い実装を可能とした。また、電線のメンテナンスをするロボットは、その電線から強力な電磁場をモータが受けるため、コイルを用いない実装により影響の軽減が可能である。また、モータのインダクタンス成分を維持した小型化は難しいが、形状記憶合金の抵抗成分を維持した小型化は比較的容易である。そして、[2]のロボットのように、円筒折対の間に球体関節のような性質を持つ折りを入れることで、曲がっている場所も移動可能になると考える。

本稿では円筒折を折り紙、つまり面の組み合わせによって実装するかのように書いているが、実際には辺のみでの実装も可能である。構成要素を面とすれば内部に異物を混入させない密閉性を持つが、一方で内部の空気などが外に逃げない場合にはその圧力が伸縮の妨げとなるため、辺のみのロボットと面を持つロボットの使い分けも可能である。

また、本稿では [2] と同様に、ねじりをあまり有効活用していない。今後の課題として、円筒折の向きは個別に設定し、ねじりの向きの異なる複数の円筒折を組み合わせることで、選択的に伸縮する機構を考案する(ちょっと話がずれている気がする)。

謝辞

本研究は JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の一環として実施されました。

参考文献

- [1] Alexander P., Tongxi Y., Brian C., A W., and S T.: A crawling robot driven by multi-stable origami, *Smart Materials and Structures*, Vol.26, No.9(2017).
- [2] Andrew G M., Stefano P., Tian Q., and Peer F.: Auxetic Metamaterial Simplifies Soft Robot Design, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.4951-4956(2016).