

形状記憶合金アクチュエータの収縮タイミング制御で 這行運動を生成するシンプルな折紙型ロボット

李東池[†] 齊藤一哉[†] 梅舘拓也[†] 川原圭博[†]

東京大学 大学院情報理工学系研究科[†]

1 はじめに

体軸に沿って特定の方向へ順番に伸縮する筋肉と地面との摩擦を推進力として、体を筋肉伸縮波の伝播方向と同じ（または逆）向きに前進させる運動は這行運動と呼ばれ、貝殻を持つ腹足類動物やイモムシのような完全変態昆虫にとって最も基本的なロコモーション戦略の1つである。這行運動は不整地など複雑な環境下で安定して移動できるなどの利点がある。さらに筋肉伸縮波の伝播向きや接地摩擦を変更して前進・後退を切り替える運動モードスイッチングも可能である [1]。這行運動のこれらの優れた特徴は数百年前から注目され、近年には効果的な運動制御方式の1つとしてロボットの分野に広く応用されている。但し、これまでの這行ロボットは柔軟素材を扱える特殊な3Dプリンタを使う必要があったり、機構が複雑で重く、値段も高くなったりするため応用が限られていた。かつ脚部によって摩擦が異なる材料を使うことで進行方向を生成するため、動的に運動モードスイッチングを実現するのは難しい。

本研究では、折紙のように1枚のシートからの折り曲げのみで構成される3次元の体躯に、アクチュエータとしての形状記憶合金 (Shape Memory Alloy: SMA) を付け、そのSMAが生じる力で体躯の各ユニットを順番に伸縮させることにより、這行運動をするロボットを実装した [3]。このロボットは機械的に簡潔で、極めて安

価に作製可能であり、伸縮の波の伝播方向を変えるだけでロボットの進行方向を制御することも可能である。本稿では、この折紙ロボットの体節伸縮の波伝播運動に着目し、SMAに流す電流のタイミングと電流値がロコモーションに及ぼす影響を分析することで、効率的かつ運動モードスイッチングが可能な這行運動を生成する通電パターンを見つけ出す。

2 折線の設計と数理関係

図1に、我々が提案する折紙型ロボットのユニットの構造及びその各パラメータを示す。このユニットは、折紙で作る手術用鉗子として提案された Oriceps [2] に基づき、つまみ部の開閉がグリッパ (脚) の開閉と連動する特徴を持つ。この特徴を利用し、つまみ部にSMAをつけたユニットを2つ連結し、各ユニットのSMAを適切なタイミングで伸縮させて脚を順番に動かすことで這行運動を行う折紙型ロボットを実装する。

図1に示すように、 a は折紙ロボットの脚の長さ、 L はボディの長さ、 b はつまみの長さ、 α はつまみ部の台形角の角度である。脚の幅 W はロボットが転ばない範囲で任意に選ぶ。また、 A は4個頂点 (折線が4つ集まる頂点) であるため、折り畳みの自由度は1であり、ある折線の角度を決めると残りの3つの角度も決まる。脚の角度 θ とつまみの角度 φ の関係は以下の式で表される。

$$\sin \varphi = \frac{(1 + \cos \theta)}{\tan \alpha \sin \theta} \quad (1)$$

このロボットは頂点 B, C の距離 d を SMA で伸縮させることで歩行を実現する。ここで、 d と θ の関係は以下の式で表される。

$$d = W + 2b \sqrt{1 - \frac{(1 + \cos \theta)^2}{\tan^2 \alpha \sin^2 \theta}} \quad (\theta > 90^\circ) \quad (2)$$

3 実験

3.1 実験方法

本章では、前章で示したロボットについて、SMAに流す電流の制御によりSMAの伸縮力とタイミングを変えることで這行運動を発現するパラメータを実験的に求めた。折紙型ロボットは、厚さ $135 \mu\text{m}$ のPETシート (三菱製紙 NB-WF-3GF100) をレーザーカッタ (UNIVERSAL

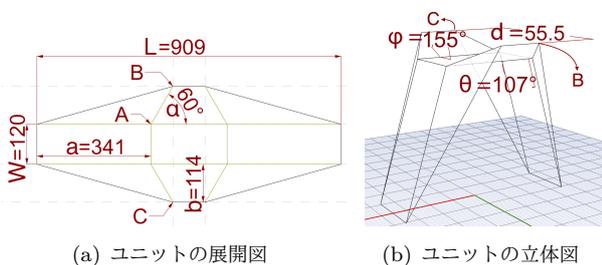


図1 折紙型ロボットの概形と実装時の各パラメータの値 (長さの単位: mm)

A Simple Origami Robot Creating a Creep Motion by Contraction Timing Control of Shape Memory Alloys
Dongchi Lee[†], Kazuya Saito[†], Takuya Umedachi[†] and Yoshihiro Kawahara[†]
[†]Graduate School of Information Science and Technology
{leedongchi, ksaito, umedachi, kawahara}@akg.t.u-tokyo.ac.jp

PLS6.150D)の切り抜きで作製した。折線はレーザーの出力とパルス頻度を下げることで調整した。SMAは長さ10mmのマイクロコイル (biometal helix 100 sma, トキ・コーポレーション) を用い、つまみ部に入れた微小な切り込みにコイルの端を差し込んで固定した。コイルの制御にはArduinoのシリアル通信を用い、SMAに流す電流の通電時間と電流値を設定する。

3.2 実験結果

まず、SMAが許容する範囲内、SMAへの通電時間・電流値とユニットの伸縮速度と開閉距離との関係を調べ、以下の3つの結論を得た：

1. 電流値を大きくするとユニットの収縮速度が大きくなる。
2. 通電時間を大きくすると開閉距離は大きくなるが、収縮速度は変わらない。
3. 収縮速度は伸長速度より小さい。

次に、2つのユニットの通電時間差 $timeLag$ を変化させながら、1回ずつ通電しロボットの進行距離を計測した。各ロボットの通電時間と電流値に関しては、ユニットの脚の角度 $\theta > 90^\circ$ かつ収縮速度と距離がユニット間で等しくなるような値を設定する。

図2から分かるように、 $timeLag$ を0から増加させると這行運動が発生する。その後 $timeLag = 600\text{ ms} \sim 1000\text{ ms}$ 付近で進行距離はピークに達し、その後減少する。なお、進行方向は常に最初に収縮させるユニットの反対方向となる。

3.3 考察：折紙ロボットの効率的なロコモーション

実験結果より $timeLag$ を調整することで収縮波の伝播方向と同じ向きに這行できることが分かった。進行の様子を観察すると、イモムシの歩脚の動きと同様に後の脚、真ん中の脚、前の脚の順で1脚ずつ動かして這行を実現している。しかしながら、真ん中の脚が動く際、前

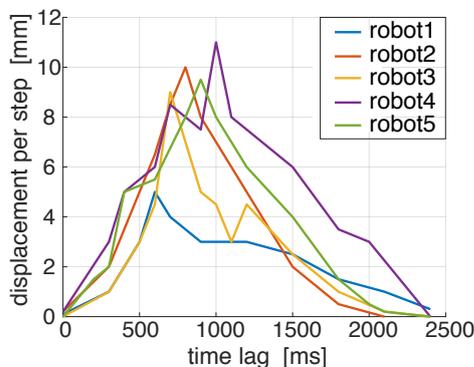


図2 2つのユニットの通電時間差とロボットの進行距離との関係。進行方向と収縮波の伝播方向が同じ向きの際に、進行距離の値を+とした。なお、5つのロボットの形状は同じであり、ユニットの通電時間は1.2s、電流値は117～130mAの範囲で設定した。

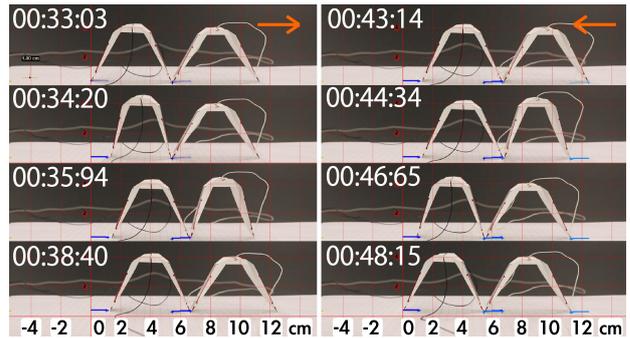


図3 調整後のロボットのロコモーション。左図のロボットは左右の順でユニットに通電し、進行方向は右である；右図に示すように、その通電順序を逆にするとロボットの進行方向も逆となった。

後のユニットの開閉速度がそろっていないため、すでに進行した脚をまた後ろに戻す動きが生じて進行距離が減少している問題が存在する。これを解決するため、真ん中の脚が動く際にすでに進行した後の脚が動かないように前後のユニットの伸縮速度と距離が揃うように通電パラメータの調整を行なった。結論1～3と実験結果に基づき、後の脚の電流値を元の107%に上げ、通電時間を75%に下げた結果、進行距離が1.4倍以上に向上することを確認した。図3の左に調整後のロコモーションの様子を示す。通電順序を逆にした際、ロボットが逆方向に進行するロコモーションは図3の右から確認できる。

4 おわりに

本研究では、シンプルな折紙構造と熱収縮するSMAを組み合わせることで這行型ロボットを実装した。このロボットは折紙構造であるため輸送や組み立てなどが容易にできる上、機械的に単純で身軽く、スケールするため、今後は様々な用途が期待できる。

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た。

参考文献

- [1] Brackenbury, J. Caterpillar kinematics. *Nature* 390, 4 (Dec. 1997), 453.
- [2] Edmondson, B. J., et al. Oriceps: Origami-inspired forceps. *ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems 1* (Sept. 2013).
- [3] Umedachi, T., et al. Autonomous decentralized control of soft-bodied caterpillar-like robot exploiting large and continuum deformation. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (Oct. 2016).