

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K18851

研究課題名（和文）ヤブガラシの把持パターン分岐メカニズムの解明と機械工学への応用

研究課題名（英文）Clarification of the mechanisms of gripping pattern changing in the tendrils of *Cayratia japonica* and its application in engineering

研究代表者

斉藤 一哉（Kazuya, Saito）

九州大学・芸術工学研究院・講師

研究者番号：40628723

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：つる物の1種であるヤブガラシは、“脳”も“目”も持っていないのに、自分が巻きつく対象に合わせて最適な形に巻きひげを変形させて把持している。本研究では、様々な径のサポートを巻き付かせて把持の成功率を調べる実験を行い、さらにマーキングした巻きひげの3次元モーショントラッキングを行い、この分岐メカニズムを解析した。得られた結果によってヤブガラシはサポートに接触した際に決められた最小の径までとりあえずコイルする、という戦略をとっており、身体を支えるために不適当な太いサポートを避ける機能を持っていることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動物が感覚器官で得た情報を脳で集約して意思決定し、手足を動かす中央集権的な制御システムを使う一方で、植物は自律分散的な制御システムで複雑なタスクを実現している。ここから学ぶことで、複雑な情報処理系を必要としない植物型スマート構造を創出できると期待される。「物をつかむ」機能は一見シンプルだが、製造や物流の自動化の核となる技術である。本研究で用いた手法を更に発展させることで、つる植物の「物をつかむ」機能をベースにした革新的な生物模倣把持機構が開発できると期待される。

研究成果の概要（英文）：*Cayratia japonica* (Thunb.) Gagnep. which belongs to the Vitaceae family can select proper tendril shapes according to support shapes despite the fact that it has neither "brain" nor "eyes". In this study, we conducted an experiment to investigate the success rate of gripping by contacted supports of various diameters. We also developed the 3D motion tracking system of the tendril to investigate the 3D shape of coiling process. Our results showed that the tendrils of *C. japonica* tend to coil at a fixed diameter until contact occurs regardless of the shape and size of the object.

研究分野：生物模倣工学，機械工学

キーワード：生物模倣工学 ヤブガラシ スマート構造

1. 研究開始当初の背景

スマート構造とは人工物に生体と同じ様な知覚・判断・応答の機能を持たせることで様々な課題を解決する総合技術であり、近年は研究領域が拡大され飛行体の形状可変翼や手術用カテーテルなどの医療用デバイスまで様々なスケール・用途で研究されている。研究代表者は機械工学、航空宇宙工学を中心にスマート構造の研究を行う中で以下の2つの課題に直面した。まずこれまで提案されてきたスマート構造はセンサから得た情報を集約して情報処理し、アクチュエータ等の応答デバイスを駆動させる動物型のシステムとして検討されており、複雑なメカトロニクスに頼る必要がありシステムが複雑で製造が難しい(課題1)。また、形状変化が必要な微小デバイスにおいては、剛体パーツをジョイントで結合した機械的メカニズムをマイクロレベルで組み立てることは困難であり(課題2)、単純な機構で様々な形状変化を実現する新しい駆動機構の開発が必要である。応募者は、つる植物の中でも非常に巧妙に巻きひげを使うヤブガラシの巻きひげに上記の課題を解決するヒントが隠されていると考え、今回の研究構想に至った。ヤブガラシは情報処理系を持たずに自律的に最適な把持を実現しており、ここに学ぶことで複雑なメカトロニクスに頼らずに様々な運動・機能を実現する機械が設計できる(課題1の解決)。また、巻きひげは繊維の局所的な収縮や成長の非対称性だけで様々な形態に変形しており、これを応用することで形状記憶合金ワイヤなどの単純なアクチュエータのみで複雑な形状に変化する新しい駆動機構と形状可変デバイスを設計できる(課題2の解決)。「物を適切につかむ」技術は極めて単純であるものの産業用ロボットを初め様々な工業機械の基礎となる重要な技術であり、ヤブガラシの把持メカニズムを機械的に再現できれば非常に広範な応用が期待される。

2. 研究の目的

つる植物の1種であるヤブガラシは、「脳」も「目」も持っていないのに、自分が巻きつく対象に合わせて最適な形に巻きひげを変形させて把持している(図1)。工学的観点からこのシステムの最大の謎は、「ヤブガラシ自身は掴むものの全体形状を知らないはずなのに、何故対象に最適な把持パターンを選択できるのか」と言う点に集約される。複雑な情報処理システム(脳)を持たないヤブガラシは、単純な知覚(接触判定)と応答(曲率の生成)の繰り返しだけで、最適な把持パターンを自己組織的に選択しているはずである。本研究課題は、巻きひげの高度な自律最適把持メカニズムを明らかにすることで、ロボティクスや医療デバイス等に应用可能な新しいスマート構造デバイスの創製を目指すものである。まず様々な条件でヤブガラシの巻きひげの動きを精査し、把持パターンの分岐条件を明らかにする。次に立体計測技術や運動解析技術を応用して、植物の成長や動きを3Dデータ化する手法を確立する。最後に得られた知見を基に巻きひげの把持パターン分岐を説明する理論モデルを構築する。



図1. 現在判明している把持パターン。“目”も“脳”もなく何故こんな複雑な動きが？

3. 研究の方法

【試料について】

ヤブガラシ (*Cayratia japonica* (Thunb.) Gagnep.) はブドウ科に属す多年生の草で、日本で広く分布している。東京大学生態調和農学機構 (ISAS) から 40 の *C.japonica* 三倍体根茎を収集した。根茎を 30~40 cm の長さに切り分け、市販のパーミキュライト製品 (「ゴールドデン」パーミキュライト、アイリスオーヤマ株式会社、仙台、日本) を含むポットに個別に移植した。これらの個体は加温された温室条件下で育てられた。実験に使用した植物は、高さが 20 cm 以上で、少なくとも 1 本の巻きひげを有していた。各巻きひげは 1 回だけ使用されました。すべての実験は、室温が 20~30°C のときに実行された。

【実験解析】

ヤブガラシの巻きひげの把持パターンと最終的な把持成功に対するサポート直径の影響を調べるため、さまざまな直径 ($\phi = 10, 12, 15\text{mm}$) のサポートに巻きひげを接触させ、コイリング反応と把持パターンの時間的変化を観察した。巻きひげの長さは 18, 20, 24, 30, 32, および 35 mm である。1 つの巻きひげに対し、さまざまな直径のサポートの 1 つを接触させた。接点は巻きひげの中央付近であり、巻きひげの伸長方向に対して直角にサポートが配置された。巻きひげの形状の時間的変化、実験開始後 3 時間までの最終的な把持成功、および分離する時間を記録した。実験のサンプル数は 87 であり、一般化線形モデル分析を使用して、巻きひげの長ささとサポート直径が把持成功とパターン分岐に及ぼす影響を調べた。

【3次元運動解析】

巻きひげに 5 mm 間隔でマーキングを行い、1 分毎に 3 方向から同期撮影を行った。画像解析ソフト (DIPP-Motion V/3D、ディテクト) を用いてマーカーの 3 次元座標を導出し、巻き付き過程の 3 次元形状を解析した。

【モデル化】

観察フェーズで得られた結果を基に、サポートの径に応じて巻きひげのパターンが変化するメカニズムを説明するモデルを提案した。

4. 研究成果

把持パターンの分岐

実験解析の結果を図 2 に示す。接触から 3 時間後にコイル状になる確率は、支持体の直径が大きくなると低くなり、巻きひげの長さが長くなるにつれて大きくなることが明らかになった。これらの結果と巻きひげ変形過程の観察から、3 つのステップで把持パターンの分岐を説明するモデルを提案した (図 2)。最初のステップでは、サポートと接触した巻きひげに、2 つの異なる応答が見られた (変形開始後 5 分以内)。初期の応答の 1 つは、「連続コイリング」として定義される (図 3 の「Continuous coiling」)。この場合、巻きひげは、サポートと継続的に接触し、初期接触点を離れることなく、連続的に巻き付く。初期の応答のもう一つの形式は、接触点が中央部から巻きひげの先端に移動することによって巻きひげがコイル状になる「移動接触点」である (図 3 の「Moving Contact Point」)。「連続コイリング」を示したすべての巻きひげは実験終了後までサポートに巻き付いたままであった。一方「移動接触点」を示した巻きひげは、2 番目のステップで 2 つの形状に分岐した (図 3 中央)。形状の 1 つは、巻きひげの接触点が先端に到達し、巻きひげが先端でのみサポートと接触する「先端接触」として定義された (図 3 の「Tip contact」)。「先端接触」を示したすべての巻きひげは、実験が終了するまでサポートから離れた。別の形状は、巻きひげが巻き取りの途中でカールしてクリップの形状になっている「クリップ形状コイリング」である (図 3 の「クリップ形状の巻き取り」)。3 番目のステップでは、「クリップ形状コイリング」の巻きひげの一部が把持に成功し、他の巻きひげはサポートから離れた。この時、離れるのにかかった時間は、「先端接触」で 18 ± 12.20 分 (平均 \pm SD)、「クリップ形状コイリング」で 63 ± 28.31 分 (平均 \pm SD) であった。

提案モデル

実験結果及び観察、3 次元運動解析を基に、上記の 3 つのステップにおいて巻きひげ形状が変化するメカニズムを説明するモデルを提案した。このモデルは、①巻きひげは接触刺激を受けた際、接触点の周りに巻き始める。②巻きひげが変形を始めたら、ある一定の径まで必ずコイルする。という 2 つの仮定で成り立っている。この仮定の下、巻きひげの応答は、接触したサポートの直径に応じて変形パターンが変化するメカニズムを説明できる。

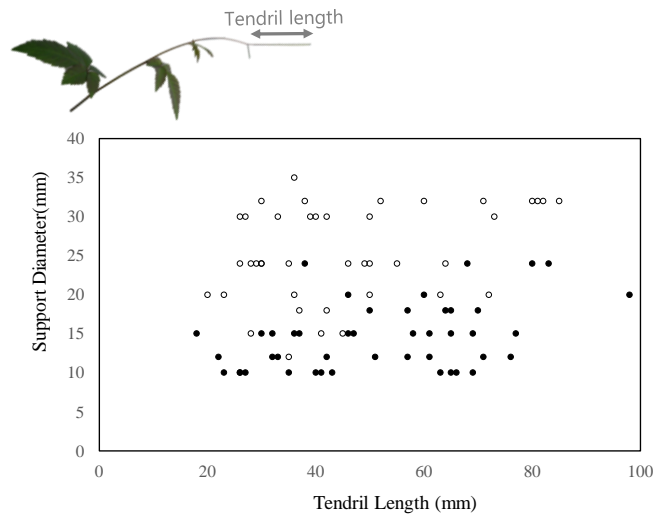


Fig. 2. Phase pattern of coiling response.[1] Temporal change in coiling response with three steps was obtained from direct observation. The illustrations and pictures in the frame represent typical examples of the coiling form in each step. For the illustration, green line represents the shape of the tendrils and yellow triangles represents the contact points between the tendrils and the supports. Three scatter plots represent the effects of tendril length and support diameter on the results of the phase pattern. The left, centre, and right plots represent the results of first, second, and third phases, respectively.

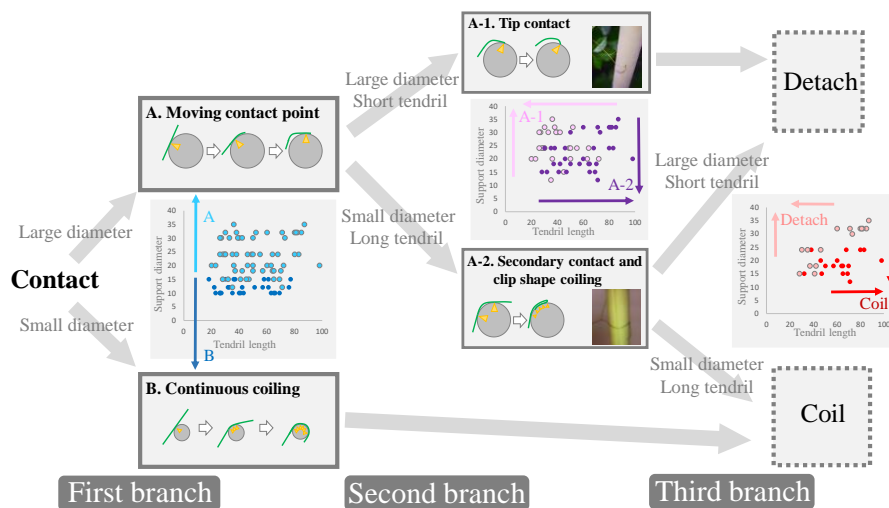


Fig. 3. Model that causes the initial phase of coiling response. [1]

Two illustrations on the left represents the rules of coiling movement assumed in the model. The green line represents the shape of the tendrils and the yellow triangles represents the contact points between the tendrils and the supports. The purple triangle means the minimum coiling angle of the tendrils. Top and bottom right figures illustrate the expected coiling response when the tendrils are in contact with a support of small and large diameter, respectively.

- 巻きひげが、②の最小のコイル径よりも小さいサポートに接触した場合は、サポートの周りに巻き付く「連続コイルング」となる。
- 巻きひげが最小コイル径より大きいサポートに接触すると、巻きひげは最初の接触点から離れて最小コイル径を達成し、その過程で接触点が先端側に移動するため、「移動接触点」となる。

3次元モーショントラッキングの結果は、この仮説を裏付けています。図4と図5は、それぞれ直径1mmと40mmのロッドと接触したときの巻きひげの巻き運動を示している。各線は巻きひげ上のマーカーの位置を示しており、グラフの縦軸は前後の点の位置から計算された曲げ角度である(たとえば、点P₄の曲げ角度は $\angle P_3P_4P_5$ として計算)。どちらのグラフにも、接触後に角度が急激に変化する領域(Rapid coiling)と、角度がほとんど変化しない領域(Stop)がある。マーカーの3D座標から計算された停止領域のコイル径は、約20.4mmと16.1mmであり、これが最小コイル径を表している。

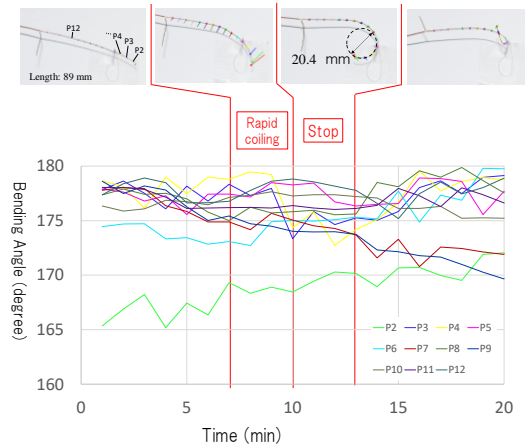


Fig. 4. 3D motion tracking of the tendril coiling on thin support. Tendril of 89 mm length was placed in contact with 1 mm diameter rod. The vertical axis of the graph is the bending angle at each marked position. After the region where the angle changes rapidly (transform stage), the region with almost no change (stop stage) appears. The representative shape in each stage is shown in the upper figures. The coiling diameter in stop stage that was calculated from the 3D coordinates of the markers was about 20.4 mm.

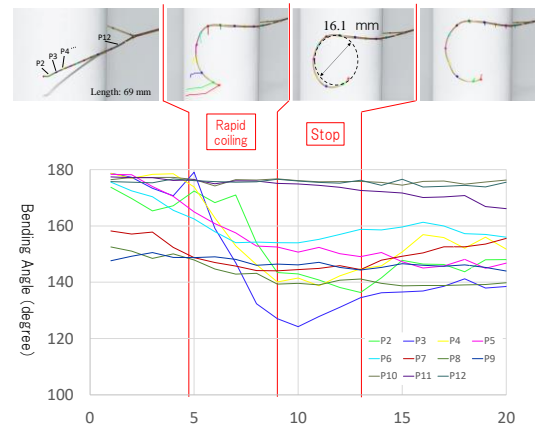


Fig. 5. 3D motion tracking of the tendril coiling on thick support. Tendril of 69 mm length was placed in contact with 40 mm diameter rod. As in Fig. 5, after the region where the angle changes rapidly (transform stage), the region with almost no change (stop stage) appears. The coiling diameter in stop stage that was calculated from the 3D coordinates of the markers was about 16.1 mm.

考察と結論

本研究から、ヤブガラシの巻きひげは、物体の形状やサイズに関係なく、接触が発生した際に一定の直径まで“とりあえず巻く”という戦略を取っていることが明らかになった。この戦略のメリットは3つ考えられる。第1に、径の小さいサポートに迅速に巻き付き確実につかむことである。接触したサポートの直径が15mm以下の場合、巻きひげは高い確率でグリップできる。コイリングの最中も茎の旋回は止まらないため、つかむのに時間がかかるとサポートが離れてしまう。第2の効果は、巻き付けない太いサポートを回避することである。サポートの直径に応じて応答を変化させる能力は、ヤブガラシの宿主植物の選択において重要な役割を果たしている。特に、巻きひげが短く、支持体の直径が大きい場合は「先端接触」が誘発され、これがサポートからの迅速な分離が可能である。これによって、直径がはるかに大きい不適切な木や茎に巻き付けようとするために費やされる時間とエネルギーの浪費を減らすことができる。第3の効果は、クリップ型の把持パターンへの移行する準備である。クリップ状コイリングの利点を議論するには、自然下のサポートは実験で使用された滑らかな円筒とは異なり、通常、表面に多くの突起があることを考慮する必要がある。この場合、最初のコイリング（クリップの先端）によって生成された小さな円がフックのように機能し、構造の突起に引っ掛かることは容易に想像できる。結論として、巻きひげには、サポートの直径を直接検出する機能はないが、把持パターンの分岐より、大きな直径のサポートを自動的に回避することが可能である。

神経系のある生物の場合、接触した物体の直径を評価して対応するには、複雑な情報処理システムが必要である。一方、本研究は巻きひげのサポート直径に対応した応答の変化が、単純な局所反応によって達成されている可能性があることを示唆した。これらの結果は、自律分散型ユニットを使用して、さまざまな形状の物体をつかむことができる新しい植物型ロボットアームを作成できる可能性を示している。センサやプロセッサを使用せずにさまざまな形状を把持できるアームは、製造およびロジスティクス業界のピックアップシステムを簡素化する大きな工学的応用可能性を秘めている。

<文献>

1. Kazuya Saito (2022) A study on diameter-dependent support selection of the tendrils of *Cayratia japonica*, *Scientific Reports* **12**, 4461.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Taigo Yukisawa, Ryuma Niyama, Satoshi Nishikawa, Yoshihiro Kawahara, Yasuo Kuniyoshi	4. 巻 NA
2. 論文標題 Ceiling Continuum Arm with Extensible Pneumatic Actuators for Desktop Workspace	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)	6. 最初と最後の頁 196, 201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 斉藤一哉	4. 巻 6
2. 論文標題 折紙の数理と生物模倣に基づく先進構造材料の開発に関する研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 折り紙の科学	6. 最初と最後の頁 32-35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saito Kazuya	4. 巻 12
2. 論文標題 A study on diameter-dependent support selection of the tendrils of Cayratia japonica	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4461
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-08314-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kazuya Saito
2. 発表標題 Origami- and Bio-inspired Deployable Structures
3. 学会等名 Beyond Industry 4.0: Digital Fabrication and Local Craft（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 斉藤一哉
2. 発表標題 折紙の幾何学と自然の中の折りたたみ構造
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会(2019年)(招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	新山 龍馬 (Niiyama Ryuma) (00734592)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------