

TENTORQUE:テントウムシの負の重力走性による重心移動で動く機構および人と昆虫の相利共生に向けた展開

喜納恵理佳^{†1} 橋田朋子^{†1}

概要：近年、昆虫の優れた能力に着目した研究が盛んに行われている。一方で、その存在の小ささなどから蔑ろにする人や無関心な人が多い。そこで、我々は人の昆虫への印象や関わり方を変える事を目的とし、そのためには人にはない昆虫の優れた能力が人工物に作用する様子を見せたり、その能力を増幅したりする仕組みが必要であると考える。本研究では昆虫の優れた能力の中でもテントウムシの負の重力走性に着目し、テントウムシの自重により左右どちらか一方へ傾くことで動く箱型天秤機構および回転しながら一方向に進むことが可能な円筒型直転機構を実現する。さらに、これらの機構の応用例として人およびテントウムシの双方に利となる仕組みを示す。本稿では、箱型天秤機構においてテントウムシごとに傾く角度を計測し動作確認を行った。また、円筒型直転機構に関してランダムな4匹のテントウムシに対し、円筒の幅を変えて動く頻度を計測した。

1. はじめに

昆虫には変化する環境に適応するための人にはない優れた能力がある。近年、その昆虫の特異な能力に着目し、昆虫の飛翔能力や移動能力を利用してドローンやロボットのように操作する研究や、優れた感覚機能や走性などの能力を評価するためのデバイスの開発などが行われている [1]。一方で、昆虫は動物実験などでも保護の対象とならず、倫理的な議論があまりなされていないことが多い。また、一般的には昆虫はあまり身近ではなく小さな存在であることからも、蔑ろにする人や無関心な人が多い。そこで、筆者らはこのような人の昆虫への印象や関わり方を変える事を目的とし、そのためには人にはない昆虫の優れた能力が人工物に作用する様子を見せたり、その能力を増幅したりする仕組みが必要であると考える。

本研究では、まず昆虫の中でも人にとって比較的親しみのあるテントウムシおよびテントウムシの優れた能力の一つ、負の重力走性に着目する。負の重力走性とは、重力方向とは逆向きの方向に進む性質である[5]。筆者らは予備的な検討の中でこの特性を利用し、簡易的に作成したシーソー型と円筒型の機構をテントウムシに与えることで、重心移動により機構を動かし、アクチュエーションを行うことが可能であることに気がついた。そこで、本研究ではテントウムシの重力走性による重心移動で動くことが可能な機構を TENTORQUE と呼び、本稿では特にシーソーのようにテントウムシの自重により左右どちらか一方へ傾くことで動く機構や、車輪のように回転しながら一方向に進むことが可能な機構（図 1 参照）を実現する。さらにその機構を応用して人およびテントウムシの双方に利となる仕組みを提案し、人と昆虫の相利共生な関係構築の可能性を示す。

本稿では、この 2 種類の機構の詳細および動作確認につ

いて報告した上で、各機構の応用例について述べ、今後の展望についてまとめる。



図 1 TENTORQUE

2. 関連研究・事例

2.1 テントウムシの特性に着目した研究

バイオミメティクスの分野では昆虫の特性に関する研究や、その特性に着目し人工物へ応用する研究が盛んに行われている。中でも斎藤ら[6]はテントウムシに透明な鞘翅をつけることで後翅の収納プロセスを可視化し、解明した。この収納のメカニズムを人工物へ応用することで、形状変化の機能を必要とする製品の新しいアイデアが生まれると期待されている。これに対し、本研究ではテントウムシの身体のメカニズムではなくテントウムシそのものをアクチュエータとして用いる。また、テントウムシの優れた能力の中でも重力方向をセンシングして行動する特性に着目する。

2.2 昆虫そのものを制御する事例および研究

昆虫の環境に適応するための特殊な能力として飛翔能力

^{†1} 早稲田大学

や移動能力に着目し、昆虫自身を動かすことで機械やロボットとして用いる事例として、Cyborg Insect[1]やCalmbot[2]などが挙げられる。これらの研究では昆虫を電気刺激によって制御することで昆虫をロボットのように操作することが可能である。本研究では昆虫に対して電気刺激を行わず、テントウムシの本来の動きを利用したアクチュエータを実現する。

2.3 昆虫に人工物を操作させる研究

安藤ら[3]はカイコガの動きに合わせて移動する昆虫操縦型ロボットを用いて雄カイコガの、雌の性フェロモンの匂いを追跡する能力を評価している。また、永谷ら[4]はアリの環境に対する適応能力を調査するため、ロボット内のアリの座標位置をカメラで検出しそれに合わせて移動するアリ搭乗型移動ロボット（ANTAM）を開発している。本研究では機構に対して電気的な制御を行わず、テントウムシの負の重力走性をそのまま利用することで電気を必要としないアクチュエータを実現する。

3. 提案手法

今回提案するテントウムシの負の重力走性による重心移動で動くことが可能な機構は二つある。一つはテントウムシの自重により左右どちらか一方へ傾く機構であり、これを箱型天秤機構と呼ぶ。もう一つは車輪のように回転しながら一方に向むことが可能な機構であり、これを円筒型直転機構と呼ぶ。

なお、本研究では実験の効率化のため購入可能かつ飛翔能力がないナミテントウを使用した。このナミテントウは元々自然界に生息している飛翔能力の低いナミテントウを掛け合わせることで作られた種であり、主に天敵製剤として農業の分野で用いられる。このような飛翔能力がないナミテントウに関しても、負の重力走性は確認されている[7]。

3.1 箱型天秤機構

3.1.1 設計と実装

箱型天秤機構の要件として下記を挙げる。

- (1) テントウムシが機構から逃げ出さず、継続して負の重力走性を確認できる
- (2) テントウムシの体重（およそ 40mg 前後）ほどの軽さでも動かすことができる

要件(1)を満たすため本稿では箱型の天秤機構を考える。閉じた形状にすることで、テントウムシの行動は左右の行き来のみとなり、アクチュエーションを持続させることを可能にする。また、要件(2)を満たすため、箱型の容器の中でも最もサイズが小さい製菓用のラッピングケースを選定し使用する。

図 2 に実装した箱型天秤機構を示す。箱の形状は幅 120mm、直径 45mm の円筒型で、重さは 8.9g であった。ラッピングケースに穴を開けてテグスを通し、それを図 3 に示す 3D プリンタで印刷した土台に引っ掛けることで天秤

の形状にした。実装した機構にテントウムシを入れたところ、テントウムシが移動すると移動した方が下に傾き、機構内の上方向が随時変化するため、テントウムシは連続して左右を行き来し動くことが確認できた。

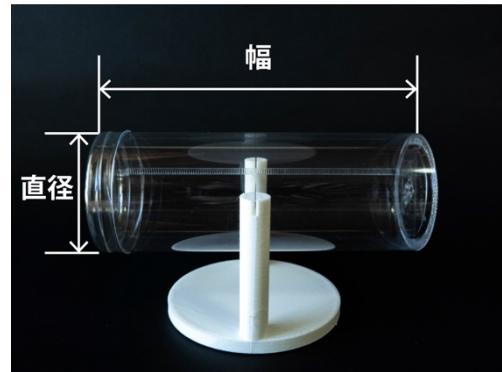


図 2 箱型天秤機構



図 3 箱型天秤機構の土台

3.1.2 テントウムシの体重と機構の動作実験および結果

テントウムシの個体により、動作の大きさに差が生じるか確認するため、テントウムシの体重と箱型天秤機構の傾きの関係を検証する実験を行った。

テントウムシを機構の内部へ入れ、箱型天秤機構を往復した後に機構内のどちらか一端にテントウムシが来た時の箱型天秤機構の傾き θ ($^{\circ}$) をテントウムシ 13 匹に対して計測した。図 4 に示すように、平常時と傾いた時の箱型天秤機構の差を傾き θ ($^{\circ}$) とする。この時のテントウムシの個々の体重と傾きの関係を図 5 に示す。体重と傾き θ ($^{\circ}$) の相関係数は 0.718 となり、強い正の相関があることが示された。以上の結果より、箱型天秤機構において、体重が重いテントウムシほど大きく動くことが明らかになった。一方で、体重が最も軽いテントウムシでも動作することが確認できた。

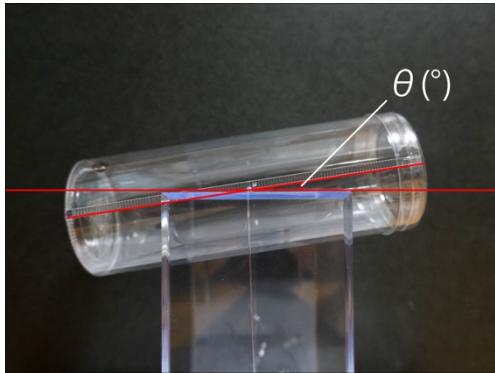


図 4 箱型天秤機構の傾き θ (°)

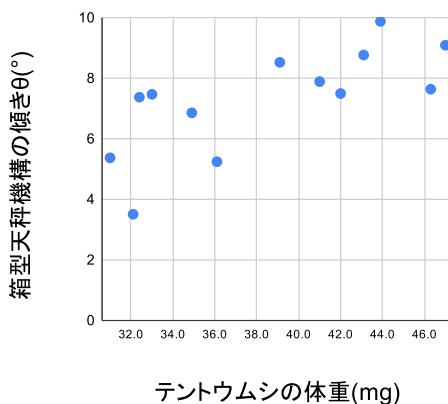


図 5 テントウムシの個々の体重と傾きの関係

3.2 円筒型直転機構

3.2.1 設計

円筒型直転機構の要件を下記に挙げる。

- (1) テントウムシが機構から逃げ出さず、継続して負の重力走性を行える
- (2) テントウムシが機構内を動くことができる大きさ、かつテントウムシの体重の軽さでも動かすことができ、移動することができる

要件 (1) を満たすため、機構は蓋部分および胴体部分により構成される閉じた形状のものが望ましい。また、要件 (2) を満たす形として、回転することで移動可能な円筒型を採用する。

3.2.2 円筒型直転機構の設計指針実験と実装

本機構の実装あたり、テントウムシの体重の軽さでも動くことが可能なサイズを明らかにする。さらにテントウムシは走光性があり、光の透過度によってアクチュエーションに変化があるかを検討するため、不透明の ABS 樹脂および半透明のアクリル系硬質樹脂 (FullCure720) の 2 種類のフィラメントによる動作の違いも明らかにする。

まず、円筒の直径が 35mm、幅 (図 6 参照) がそれぞれ 11, 12, 13, 14, 15mm の計 5 種類の円筒を ABS 樹脂および FullCure720 に関してそれぞれ用意する。実験に参加するテ

ントウムシはランダムな 4 匹であり、体重はそれぞれ 33.0, 47.0, 46.3, 43.9mg である。テントウムシを機構の中に入れ、動き始めてから止まるまでを 1 回とし、3 分間の中で動いた回数を計測した。また、図 7 のようなアクリル板を機構の下に敷き、過度な摩擦がかからないよう実験を行った。

それぞれの機構の質量を表 1 に示す。表 1 からわかる通り、FullCure720 よりも ABS 樹脂の方がいずれも軽量であった。また、それぞれの実験の結果を表 2 に示す。いずれの円筒幅の場合においても平均して FullCure720 よりも ABS 樹脂の方が動いた回数は多い結果となった。また、ABS 樹脂の場合において、円筒幅が 12mm の時平均して最も動いた回数が多かった。

以上の結果を踏まえ、ABS 樹脂の 12mm 幅の円筒型直転機構を実装した。その外観を図 8 に示す。図 (a) が機構を閉じた状態で、図 (b) が機構を開いた状態である。また、図 (b) 右が胴体、図 (b) 左が蓋である。

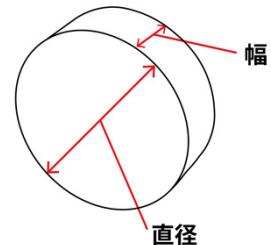


図 6 円筒型直転機構外観図

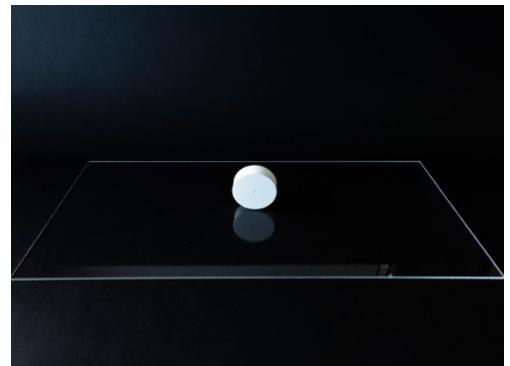


図 7 円筒型直転機構実験時の様子



(a)機構を閉じた状態 (b)機構を開いた状態

図 8 円筒型直転機構

表 1 機構の質量

幅(mm)	11	12	13	14	15
ABS 樹脂(g)	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8
FullCure720(g)	2.0	2.0	2.0	2.1	2.5

表 2 円筒型直転機構が動いた回数の 4 回の平均

円筒幅(mm)	11	12	13	14	15
ABS	3	7.25	4.25	3.5	2.5
	(1.87)	(4.97)	(2.49)	(2.29)	(1.5)
FullCure720	0	0.25	1.25	0.75	0.5
	(0)	(0.43)	(1.30)	(0.83)	(0.87)

※小数点第三位を四捨五入

※()内は標準偏差

4. 各機構の応用例

各機構に関し、人と昆虫との相利共生へ向けた展開のファーストプロトタイプとして、人およびテントウムシの双方の利となる応用例を考えた。人にとっての利として機械への応用例、具体的には機械の最も単純な構成単位として回路への組み込み、およびテントウムシにとっての利としてテントウムシの能力を増幅する応用例をそれぞれ示す。

4.1 箱型天秤機構の応用例

箱型天秤機構に関し、回路への組み込み例としてスイッチの応用例、またテントウムシの能力を増幅する例として鹿威しの応用例を示す。

4.1.1 回路への活用事例：スイッチ

箱型天秤機構は負の重力走性が見られた際に、テントウムシの自重により左右どちらか一方へ傾く。この特性を利用することで、箱型天秤機構はスイッチのように機能することができる。具体的には、機構の左右どちらか一端の真下に CdS セルを設置し、箱型天秤機構の CdS セルとの接地面を黒いテープで覆い CdS セルに反応するように設計し、動作する事を確認した（図 9）。このスイッチを利用する事で、例えば人が自身で意思決定をできない際に、テントウムシに決定権を委ねてスイッチを押してもらうことが可能になる。

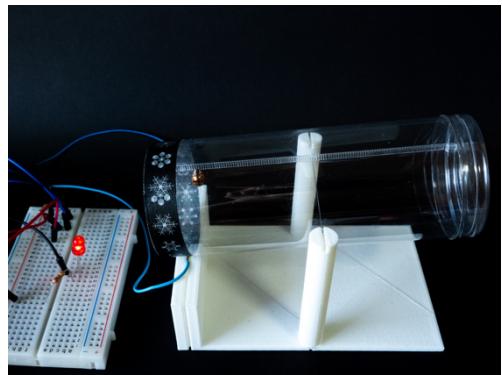


図 9 スイッチとしての応用例

4.1.2 存在を聴覚的に明示化させるための鹿威し

箱型天秤機構におけるテントウムシの能力を增幅させる応用例として、鹿威しを考えた。鹿威しとは、従来は水の重さにより傾くことで音を鳴らし、人が害獣などから農作物を守るために使用されていた。この鹿威しの特性を箱型天秤機構に適用する。図 10 に実装した鹿威しの外観を示す。機構の左右の両端の下に鈴を取り付けることで音を鳴らすことを可能にする。動作の結果、テントウムシの負の重力走性が見られた際に音が鳴ることが確認できた。これにより、人工物の中でテントウムシが存在を聴覚的に人に明示化させることができる。



図 10 鹿威しとしての応用例

4.2 円筒型直転機構の応用例

円筒型直転機構に関し、回路への組み込み例として可変抵抗の応用例、またテントウムシの能力を増幅する例としてテントウムシ拡張機構としての応用例を示す。

4.2.1 回路への活用事例：可変抵抗

円筒型直転機構の回路に組み込む事例として、可変抵抗としての応用を考えた。円筒型直転機構は回転し、一方向に進むことが可能であり、その長さは可変であるため、可変抵抗として機能することが可能である。具体的には、電子部品の可変抵抗の中の抵抗部分を取り出し、円筒型直転機構をアルミ箔で覆い、テントウムシに円筒型直転機構で可変抵抗の抵抗部分を滑らせることで、可変抵抗を実現し

た。実装した可変抵抗を図 11 に示す。動作の結果、図 11 の (a)～(c) に示すように、回路に組み込んだ LED を段階的に光らせることができた。これにより、テントウムシに段階的に入力を行わせることが可能となる。

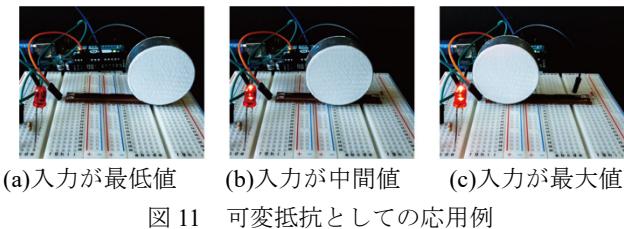


図 11 可変抵抗としての応用例

4.2.2 存在を視覚的に明示化させるためのテントウムシ拡張機構

円筒型直転機構におけるテントウムシの能力を増幅させる応用例として、テントウムシ拡張機構を挙げる。テントウムシ拡張機構によりテントウムシの存在を視覚的に周囲に明示化させることができる。テントウムシ拡張機構の外観を図 12 に示す。テントウムシの負の重力走性はテントウムシが餌を探すときの行動としてよく見られる。そのため、この機構を用いることで、テントウムシに餌を与えるタイミングをテントウムシ自ら知らせてくれることが可能となる。



図 12 テントウムシ拡張機構としての応用例

5. おわりに

本研究ではテントウムシの負の重力走性により重心移動で動くことを利用した機構を提案し、その機構により人と昆虫の相利共生に向けた展開のための応用例を示した。テントウムシの自重によりシーソーのように傾くことで動く箱型天秤機構と、車輪のように回転しながら一方向に進むことが可能な円筒型直転機構の 2 種類を提案し、それぞれ動作確認を行なった。またそれについて、人の利として回路へ組み込む応用例、およびテントウムシの利としてテントウムシの能力を増幅させる応用例について述べた。

今後の課題としては、機構の素材についての言及が挙げ

られる。より軽い素材にすることでテントウムシが動きやすい機構にすることができると考えられる。また、球形の機構の提案も考えられる。円筒型直転機構が一軸方向にしか進めないのでに対し、球状にすることで自由度が上がり、移動可能な範囲を広げることができると考えられる。

参考文献

- [1] Vo Doan Tat Thang, Svetoslav Kolev, Huynh Ngoc Anh, Zhang Chao, Travis L. Massey, Pieter Abbeel, Michel M. Maharbiz, and Hirotaka Sato. Cyborg Insect: Insect Machine Hybrid System for Locomotion Control. ICIET'2013, 2014, p. 142-145.
- [2] Yuga Tsukuda. Calmbots. October 2020.
<https://digitalnature.slis.tsukuba.ac.jp/2020/10/calmbots/>(参照 2020-12-9).
- [3] N Ando, S Emoto, R Kanzaki, Odour-tracking capability of a silkmoth driving a mobile robot with turning bias and time delay. Bioinspir. Biomim., vol.8, no.1, 016008, 2013.
- [4] 永谷直久, 清藤守, 木村飛鳥, 藤澤隆介. アリ搭乗型移動ロボット ANTAM の開発 第3報 : アリ計測システムの改良および評価. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2014.
- [5] Michael Majerus, Peter Kearns. Ladybirds (Naturalists' Handbook Series). Richmond Publishing Co. Ltd., 1989, 103p.
- [6] Kazuya Saito, Shuhei Nomura, Shuhei Yamamoto, Ryuma Niiyama, and Yoji Okabe. Investigation of hindwing folding in ladybird beetles by artificial elytron transplantation and microcomputed tomography. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America(PNAS), 2017, vol. 144, no. 27, p. 5624-5628.
- [7] R. Tourniaire, A. Ferran, J. Gambier, L. Giuge & F. Bouffault, Locomotor Behavior of Flightless *Harmonia axyridis* Pallas (Col., Coccinellidae), Journal of Insect Behavior, 1999, vol.12, issue4, p. 545-558.