

報道機関 各位

熊本大学

## 回転の幾何で捉える葉の三次元運動

### (ポイント)

- 葉の運動を「回転の軌跡」として解析する幾何学的枠組みを提案しました。この枠組みにより運動の経路の定量解析が可能になります。
- 解析の結果、葉が最短経路から逸脱した経路上を動く場合があることや、最短経路のスイング寄与率との関連が示唆されました。
- 3D Gaussian Splatting 点群データを用い、「祈りの植物」として知られるマランタを材料として実証しました。

### (概要説明)

熊本大学大学院先端科学研究部の中田未友希准教授（熊本大学生物環境農学国際研究センター兼任）、同 高原正裕研究員、同 安藤直也教授らは、葉の三次元的な運動を「回転の軌跡」として解析する幾何学的枠組みを提案しました。

植物の葉は、昼夜のリズムに合わせた開閉や、太陽を追いかける運動など、向きの変化を伴うさまざまな動きを示します。こうした葉の運動はこれまで仰角や方位角などの角度の時系列変化として記述されてきましたが、角度を個別に捉えるだけでは葉がどのような経路をたどって動いたかを把握することができず、運動のメカニズムと結びつけて理解することが難しいという課題がありました。

本研究では、葉の三次元形状から、葉の発生軸に沿った正規直交基底 (ONB) <sup>\*1</sup>を復元し、葉の姿勢を三次元回転の数学的構造であるリー群  $SO(3)$  <sup>\*2</sup> の元として表現しました。これにより、葉の運動を  $SO(3)$  上の回転軌跡として記述・可視化することが可能となります。昼夜に葉を動かす就眠運動の様子から「祈りの植物」として知られるマランタ・レウコネウラ (*Maranta leuconeura*) を材料に、重力方向を変化させた後の葉の再定位過程を解析した結果、葉が最短経路から逸脱し、迂回した軌跡をとる場合があること、また、その迂回の程度とスイング寄与率の関連が示唆されました。本研究ではスマートフォンアプリによる3D Gaussian Splattingを用いて三次元データを取得しましたが、この枠組みは他の植物種やさまざまな計測手法にも原理的に適用可能です。

本研究成果は令和8年5月4日(月)に、学術誌「Plant and Cell Physiology」

に掲載されました。

## (説明)

### [背景]

植物の葉は、昼夜のリズムに合わせて開閉する就眠運動、太陽の方角を追いかける運動、強光を避ける運動など、向きの変化を伴うさまざまな運動を示します。これらの葉の運動は、光合成効率の調整や環境への適応において重要な役割を果たしており、植物の環境応答を理解するうえで基本的な研究対象となっています。

従来、葉の三次元的な向きは、仰角や方位角などのスカラー値、あるいは葉面法線ベクトルなどの単一ベクトルで表されてきました。こうした指標は計測が容易で研究実績も豊富ですが、いずれも葉の向きを一部の情報に圧縮したものであり、葉がどのような経路を経てどのように動いたかという、運動の軌跡としての情報を十分に保持していません。

剛体の向きと運動を記述する分野では、三次元空間における回転を一体として扱う「回転表現」と呼ばれる数学的な枠組みが用いられており、ロボティクスや航空宇宙工学などで広く活用されています。しかし植物の葉の運動研究では、角度などのスカラー値による記述が中心であり、回転表現を葉の向きの解析に適用した研究はこれまで報告されていませんでした。

### [研究の内容]

本研究では、葉の三次元形状から「回転表現」を直接取り出し、葉の運動を「回転の軌跡」として解析する幾何学的枠組みを提案しました。

葉の発生過程では、先端基部軸 (PD軸)、中央側方軸 (ML軸)、表裏軸 (AdAb軸) という三つの体軸に沿って形態形成が制御されます。成熟した葉においてこれらの三軸が互いに直交していると仮定すると、それぞれの軸方向の単位ベクトルは「正規直交基底 (ONB)」を構成します。本研究はこのONBを「葉の姿勢」の表現として定義しました。

ONBは数学的には、三次元回転を表すリー群  $SO(3)$  の元 (回転行列) に対応します。この対応により、葉の姿勢の時系列変化を  $SO(3)$  上の回転軌跡として記述・可視化することが可能となります。また、連続する二時点間の回転をリー代数  $so(3)^{*3}$  の回転ベクトルとして表すことで、葉枕の変形様式を反映したスイング (PD軸の向きを変える回転) とツイスト (PD軸まわりの回転) に分解することができます。

三次元データの取得には、スマートフォンアプリによる3D Gaussian Splattingを用いました。複数の写真から三次元点群を再構成するこの手法により、専用の高価な機器を必要とせず三次元形状データを取得できます。取得した点群から、主成分分析 (PCA) を用いてPD軸を推定し、葉の形状的特徴から表裏方向を決定することでONBを構築しました。

研究材料には、葉の就眠運動が顕著で「祈りの植物」とも呼ばれるマランタ・レウコネウラ (*Maranta leuconeura* var. *kerchoviana*) を用いました。

### [成果]

人工植物を用いた繰り返し計測により、ONBから算出した角度の標準偏差

は  $0.2^{\circ} \sim 0.9^{\circ}$  と高い再現性が確認されました。また、就眠運動の解析では14個体407葉を対象に、夕方にかけてPD仰角が増加しAdAb仰角が低下するという既報と一致した日周変化が捉えられ、本枠組みの妥当性が確認されました。

続いて、葉に対する相対的な重力方向を人為的に変化させた後の葉の再定位過程を対象に回転軌跡の解析を行いました。観察の結果、約2時間の観察期間内に元の向きへ回復した例（成功群）と回復が不完全であった例（不完全群）が観察され、初期姿勢が再定位の成否に関わる要因の一つである可能性が示唆されました。

両群を対象にスイングとツイストの累積回転量を比較したところ、理論的な最短経路と比べて実際の軌跡ではスイングとツイストのバランスが均等化される傾向が見られました。また、成功群の軌跡を詳細に解析した結果、観察された軌跡は最短経路から大きく逸脱し、迂回する場合がありますことが明らかになりました。最短経路におけるスイング寄与が小さいほど迂回比率が大きくなる傾向も見られ、スイング・ツイストのバランスが実際の軌跡の形状を規定する要因の一つである可能性が示唆されました。

#### [展開]

今後は、「仮説から予測される軌跡」を実測軌跡と定量的に比較することで、葉枕の変形メカニズムや重力・光などの環境刺激の相対的寄与を明らかにする研究が期待されます。こうした軌跡の比較によるアプローチは、角度の時系列解析では立てることのできなかつた問いに答える手段となります。

本枠組みは、傾斜計（インクリノメーター）、三次元デジタイザー、慣性計測装置（IMU）など、さまざまな計測手法から得られるデータにも原理的に適用可能であり、多様な葉の運動現象の種間比較や進化的多様性の解明への展開が期待されます。また、 $S0(3)$  上の軌跡解析には植物科学の枠を超えた数学的な問いが生まれ、数理科学との協働による理論的深化も視野に入ります。

#### [用語解説]

**\*1 正規直交基底 (ONB: Orthonormal Basis)** : 三次元空間において、互いに直交し、それぞれの長さが1である三つのベクトルの組のことです。本研究では、葉の先端基部軸（PD軸）、中央側方軸（ML軸）、表裏軸（AdAb軸）の方向の単位ベクトルを右手系 ONB として定義し、これを「葉の姿勢」の表現として用います。ONB は  $3 \times 3$  の回転行列の列ベクトルに対応しており、葉の姿勢を三次元回転の数学的構造の中に自然に位置づけることができます。

**\*2 リー群  $S0(3)$**  : 三次元空間における「回転全体の集合」に、滑らかな構造と群の演算（回転の合成）を備えた数学的対象です。 $S0(3)$  の各元は一つの回転を表し、葉の姿勢（ONB）は回転行列として  $S0(3)$  の元に対応します。 $S0(3)$  上では「二つの姿勢の間の最短経路（測地線）」や「回転の距離」といった概念が厳密に定義され、葉の運動軌跡をこれらと比較・定量することが可能になります。

**\*3 リー代数  $so(3)$**  : リー群  $S0(3)$  に対応する線形空間で、「瞬間的な回

転運動」を表すベクトルの集合です。連続する二時点間の回転を  $so(3)$  の元（回転ベクトル）として表すことで、その回転の軸と角度が得られます。本研究では、この回転ベクトルをスイング（PD 軸の向きを変える成分）とツイスト（PD 軸まわりの成分）に分解することで、葉枕の「曲げ」と「ねじり」という異なる変形様式を定量的に区別しました。

### （論文情報）

論文名：A Geometric Framework for 3D Leaf Movement by Orthonormal Bases: A Demonstration in *Maranta leuconeura*

著者：Miyuki T. Nakata, Shotaro Sakita, Jion Shimoyama, Naoya Ando, Masahiro Takahara

掲載誌：Plant and Cell Physiology

doi：10.1093/pcp/pcag034

URL：https://academic.oup.com/pcp/article-lookup/doi/10.1093/pcp/pcag034

#### 【お問い合わせ先】

（研究に関するお問い合わせ）

熊本大学大学院先端科学研究部

担当：中田未友希

電話：096-342-3270

e-mail：mtnakata@kumamoto-u.ac.jp

（報道に関するお問い合わせ）

熊本大学総務部総務課広報戦略室

電話：096-342-3271

e-mail：sos-koho@jimu.kumamoto-u.ac.jp

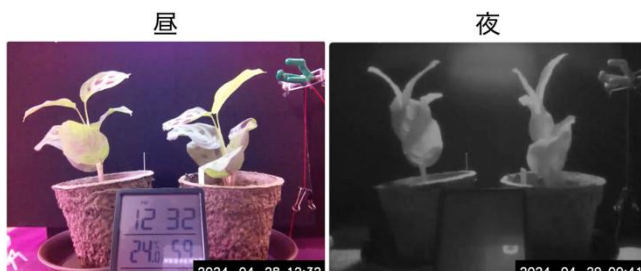


図1. 「祈りの植物」マランタ・レウコネウラの就眠運動の様子

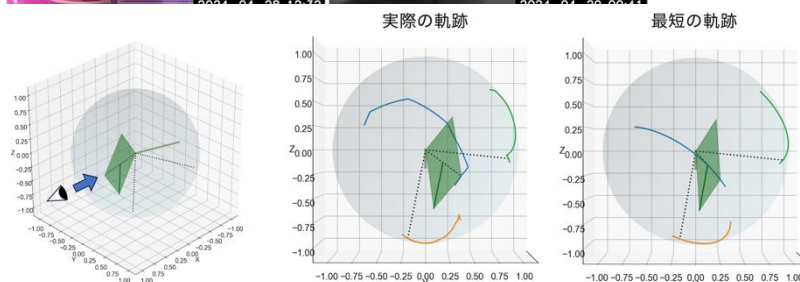


図2. 葉の再定位過程を対象とした回転軌跡の解析結果