



Title	Multi-scale Morphology of the Venus Flytrap for Its Snapping Mechanism
Author(s)	Zeng, Xiangli
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/103214
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名 (ZENG XIANGLI)	
論文題名	Multi-scale Morphology of the Venus Flytrap for Its Snapping Mechanism (ハエトリグサのスナップ運動機構におけるマルチスケール形態構造)
論文内容の要旨	
<p>Plants respond to environmental stimuli through their structurally embedded functions. By harnessing hydraulic pressure, plants can be considered multi-source programmable actuators, capable of regulating internal pressure across discrete units to generate complex morphologies. Asymmetry is a prerequisite for movement, which can be achieved through complex cellulose alignment, uneven cell distribution, localized lignification, and directional auxin transport. Meanwhile, mechanical strategies such as fracture and buckling are employed to accelerate motion. Despite lacking muscles, the actuation mechanisms of plants offer valuable insights for the design of soft robotics.</p> <p>The Venus flytrap (<i>Dionaea muscipula</i>) is a representative example of such plants, demonstrating the ability to sense, decide, and actuate. Upon sensing such stimulation, the plant initiates a fast closing movement that has been widely attributed to a snap-through instability mechanism. While this snap-through behavior has been experimentally verified as a key contributor to the rapid closure of the leaf lobes, it remains challenging to elucidate how the Venus flytrap leverages group behaviors at the cellular level to form morphologies that are inherently mechanically unstable.</p> <p>This thesis employs both invasive sectioning and noninvasive scanning techniques to investigate cellular distribution and tissue morphology. At the cellular scale, a computational model and a hydrogel actuator mimicking the Venus flytrap's cellular pattern are utilized to verify the role of cellular topology in motion generation. The uneven distribution of cells is shown to drive the bending of the lobes. At the tissue scale, both static geometry and the dynamic processes of closure and re-opening are recorded, with a detailed analysis of the leaf's doubly-curved shape. The curvature of the leaf varies along both the directions parallel and perpendicular to the midrib, which is significant for the snap-through motion. Even though the extensive data analysis results indicate that closure time is not significantly influenced by individual geometric parameters, the correlated proportional relationships exist among these parameters, offering valuable insights into the design principles of artificial flytrap systems. Finally, the displacement during the closing process is statistically evaluated through a mathematical model, and a model incorporating an asymmetric bifurcation path is proposed to describe the snapping behavior of the Venus flytrap.</p> <p>The study bridges cellular topology and macroscopic tissue morphology to elucidate how structural features enable motion. The key contributions of this work include: (1) the integration of a multi-scale approach spanning from the cellular to the tissue level; (2) the investigation of the role of cellular topology and the introduction of a biomimetic actuator inspired by the uneven distribution of cells; (3) a detailed analysis of the doubly curved shape, accompanied by the development of a quantitative framework that correlates geometric parameters with snapping speed and duration; and (4) the proposal of an asymmetric bifurcation model to interpret the snapping behavior. These findings not only deepen our understanding of plant biomechanics but also provide valuable insights for the design of soft and responsive robotic systems.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (ZENG XIANGLI)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主査 教授	森島 圭祐
	副査 教授	東森 充
	副査 教授	中村 暢伴
	副査 准教授	矢地 謙太郎

論文審査の結果の要旨

植物は、その構造に組み込まれた機能を通じて環境刺激に応答する。個々のユニット間の水による内圧制御により植物は制御可能なアクチュエーターとして機能し、複雑な形態を生み出すことができる。運動には非対称性が不可欠であり、植物では複雑なセルロース配列、不均一な細胞分布、局所的なリグニン化、そしてオーキシンの能動輸送によって実現している。また、破断や座屈といった純粋な力学現象も運動の高速化に利用されている。筋組織を有さない植物に見られる駆動メカニズムは、ソフトロボティクス設計に対して有益な示唆を与えると考えられる。

本論文ではハエトリグサ (*Dionaea muscipula*) に着目している。ハエトリグサは、感知・判断・動作という一連のプロセスを通じて、外界からの刺激に対して迅速に閉鎖運動を開始する。この運動メカニズムはスナップスルーと呼ばれる構造的不安定性に基づいた力学的現象によって実現されると広く考えられている。しかしながら、スナップスルーが捕虫葉の急速な閉鎖に重要な役割を果たしていることが実験的に確認されているものの、どのようなメカニズムで細胞レベルの集団的挙動が構造的に不安定な形態を形成するのかは解明されていない。

本論文では、まず、細胞分布と組織形態を調べるために、侵襲的な捕虫切片法と非侵襲的なスキャン技術の両方を用いた解析をおこなっている。細胞スケールでは、ハエトリグサの細胞構造を模倣した計算モデルとハイドロゲルアクチュエーターを用いて細胞のトポロジーが運動に果たす役割を検証した結果、細胞分布の不均一性が葉の屈曲挙動に寄与することを明らかにしている。組織スケールでは、静的な葉の幾何形状および閉鎖運動と再び捕虫葉が開く際の動的過程を記録し、二重曲率を有する葉の構造的特性を詳細に解析した。葉の曲率は中脈に平行・垂直な方向の双方で変化しており、この特性がスナップスルーにおいて重要な機能的意義を持つことが示唆されている。さらに、大規模データセットを用いた統計解析により、閉鎖時間は単一の幾何学的パラメータに強く依存しないが、複数の幾何パラメータ間には相関的な比例関係が存在することを明らかにし、人工的なハエトリグサ型アクチュエーションシステムの設計に対する指針を示している。最後に、ハエトリグサが葉を閉じる際の変位を数学モデルにより統計的に評価し、非対称分岐モデルによって、ハエトリグサのスナップ動作の力学的挙動を再現し、説明可能であることを示している。

本研究の主な貢献として、細胞レベルから組織レベルにまたがるマルチスケールアプローチの統合、不均一な細胞分布に着想を得たバイオミメティックアクチュエーターの導入、二重曲率形状の詳細な解析と幾何パラメータとスナップ速度・持続時間との定量的な関係付け、さらにスナップ動作を説明するための非対称分岐モデルの提案の4つが挙げられる。以上のように、本論文は、植物のバイオメカニクスの理解を深めるだけでなく、柔軟で応答性に優れたロボティクス設計にも貴重な知見を提供しており、動的システム、生物と機械の融合システムの設計論として、学術的に意義あるものである。

よって、博士論文として価値あるものと認める。