

## 博士論文要旨

# 論文題名：有限ひずみ膜理論と梁理論に基づく空気圧ソフトグリッパの解析的モデリング

立命館大学大学院理工学研究科

機械システム専攻博士課程後期課程

サチン

SACHIN

ソフトアクチュエータは、一般的にエラストマーで構成されており、大変形を発生させるコンプライアント構造を持つ。エラストマーで構成された空気圧ソフトアクチュエータの主な動作は有限の変形である。このようなソフトアクチュエータの設計において、目標とする変形動作を実現することが重要である。これらの構造の動作は、幾何学的な非線形性と材料特性の非線形性の両方が含まれるため複雑になる。そのため、ソフトロボティクス分野の研究において、これらのソフトアクチュエータの変形形状を予測し、目標とする形状に近づける設計方法が必要とされている。本論文では、二つのソフトアクチュエータに着目し、平面シェルアクチュエータと pneu-net アクチュエータの動作を研究する。アクチュエータの解析モデルは様々な状態を想定して構築する。

平面シェルグリッパにおいては、シェルの変形形状を最適化し、さらに円筒形の物体の把持状態における相互作用を検証することを目的として解析モデルを構築する。グリッパと円筒形の把持物体は一部分のみが接触するため、特に膨張式グリッパの場合、物体の形状を十分に考慮する必要がある。ここで、把持動作はアクチュエータの変形状態に左右され、また把持物体の形状に大きく依存する。解析モデルは、有限ひずみ膜理論と neo-Hookean material 理論に基づき構築する。提案した解析モデルでは、ソフトアクチュエータの平面と剛体との接触による相互作用を考慮している。また、このモデルはアクチュエータにおける三種類の状態である、接触物がない状態、平面との接触状態、円筒との接触状態について解析する。さらに応用例として、このモデルを用いて、2 指の平面シェルグリッパにおいて円筒形状の物体の把持に必要な相対的位置と印加圧力について解析した。

Pneu-net アクチュエータにおいては、オイラーベルヌーイの仮定と超弾性体の薄板片持ち梁の有限ひずみ理論に基づき解析モデルを構築する。アクチュエータのチャンバの変形は、有限ひずみ膜理論に基づきモデル化する。このモデルではアクチュエータの二つの状態である、接触物がない状態と、アクチュエータの先端が接触している状態について解析する。開発されたモデルの理論式は、アクチュエータの軸方向の伸縮と加わる力を考慮しているため、既存研究で用いられている微小ひずみに基づくモデルとは異なる。さらに、同様な構造のアクチュエータを用いた様々な応用例においてもこの理論を適用できる。

開発された解析モデルは、アクチュエータの変形と力の特性を予測できる。このモデルは、非線形代数方程式と微分方程式を解くことを加味しても計算効率が良い。また、pneu-net アクチュエータの変形と力の特性の予測結果について、提案した解析モデルと FEM の計算結果を比較

した。検証結果は、提案した解析モデルが FEM と同程度の精度でアクチュエータの変形と力の特性を予測できることを示し、また、提案したモデルによる計算時間は FEM の 1%未満であることを確認した。

提案したモデルにより予測されたアクチュエータの変形動作について、実際のアクチュエータの自由変形、力測定、および把持動作によって実験的に検証された。アクチュエータの摩擦特性は、把持状態と同様の接触状態で計測した。応用として、提案されたモデルを用いてソフトグリップの把持に必要な印加圧力について予測した。2 指の平面シェルグリップと 3 指のニューネットグリップについて必要な圧力を予測し、これらの計算結果についてその妥当性を実験的に検証した。

## **Abstract of Doctoral Dissertation**

### **Title: Analytical Modeling of Pneumatic Soft Grippers Based on Finite-Strain Membrane and Beam Theories**

Doctoral Program in Advanced Mechanical Engineering and Robotics

Graduate School of Science and Engineering

Ritsumeikan University

サチン

SACHIN

Soft actuators are compliant structures that are generally made of elastomers and generate large deformations. Finite deformation is the principal actuation basis of elastomer-based pneumatic soft actuators. Desired deformation behavior is the key design requirement for such actuators. The behavior of these structures is complex due to the presence of both geometric and material nonlinearities. The objective of soft robotics applications is the controlled large deformation of these structures. This dissertation is focused on studying the behavior of two soft actuators: 1) flat shell actuator and 2) pneu-net actuator. Analytical models of the actuators are developed for various states.

The objective of flat shell actuator model is to optimize its design and investigate its interaction with a cylindrical object. The cylindrical object grasp is a case of partial contact, and such interactions need special consideration on object geometry, especially in case of inflatable actuators. Here, the grasping operation is governed by deformed shape of the actuator and is highly dependent on object geometry. The model is based on finite-strain membrane theory and neo-Hookean material. The presented model considers the contact interaction of the actuator with both flat and cylindrical rigid substrates. The model is developed for three different states of the actuator: 1) free-space; 2) contact with a flat substrate; and 3) contact with a cylindrical substrate. In application, the model is used to predict the relative position and air pressure required to grasp a cylindrical object using a parallel two-finger shell gripper.

The pneu-net actuator model is based on the Euler–Bernoulli finite-strain hyperelastic thin cantilever beam theory. The deformation of actuator air chambers is modeled using finite-strain membrane theory. The analytical model is developed for two different states of the actuator: 1) free space and 2) when the actuator is subjected to tip contact. The theoretical formulation of the developed model is different from previously developed infinitesimal-strain models of the actuator since it considers axial stretch and forces applied to the actuator. In addition, it can be theoretically implemented on similar structured actuators for various applications.

The developed analytical models predict deformation and force characteristics of the actuators. The models involve solving nonlinear algebraic and differential equations and are computationally efficient. The analytical model predicted deformation and force characteristics of the pneu-net actuator are compared with the finite element (FE) model. The results suggest that the developed model can predict deformation and force characteristics of the actuator as accurately as the FE model, but the computation time of the developed model is less than 1% that of the FE model.

The analytical model predicted deformation behavior of the actuators is validated experimentally via free-space deformation, force measurement, and grasping tests. The frictional properties of the actuators are investigated for contact scenarios similar to the grasping state. In application, the developed models are used to predict the air pressure required to attain a successful grasp. The predicted pressure is validated experimentally on two-finger flat shell and three-finger pneu-net grippers for grasping different objects.