

空気圧駆動ベローズアクチュエータ発生力の定式化

An Empirical Model of Bellows Actuator for Characterizing Generated Force

○学 張昇揚 (立命館大) 正 王忠奎 (立命館大)
正 平井慎一 (立命館大)

Shengyang ZHANG, Ritsumeikan University, gr0572sh@ed.ritsumei.ac.jp
Zhongkui WANG, Ritsumeikan University, wangzk@fc.ritsumei.ac.jp
Shinichi HIRAI, Ritsumeikan University, hirai@se.ritsumei.ac.jp

Soft actuators are used for automation in the food industry and medical applications because of their compliance and flexibility. However, modeling such actuators has been a challenging task due to its large deformation. In this study, we focus on developing a simple empirical model to describe the generated force of soft bellows actuator. The model includes the parameters of geometry, material, and rigidity, and can be used to facilitate the actuator design and control. We fabricated bellows actuators using 3D printer with flexible filament and experiments were conducted to validate the proposed model.

Key Words: Actuators, Modeling, Soft robots

1. 緒言

ソフトアクチュエータは、コンプライアンスと柔軟性の特徴があるため、食品と医療などの分野で応用されている。ソフトアクチュエータの研究が進むにつれ、効率的に、高速なイテレーションが可能な 3D プリンティングを用いたソフトアクチュエータの製造方法が多く適用されている。例として、全方位型ソフト空気圧アクチュエータ[1]、ヘリカル空気圧アクチュエータなどが挙げられる。また、皿の取り出し作業を行うために、ベローズアクチュエータで駆動するエンドエフェクタが開発されている[2]。これらの研究で、ベローズアクチュエータの発生力を予測するモデルを提案されているが、圧縮されたアクチュエータの発生力が予測できないこと[1]と予測精度が低い[2]課題がまだ残っている。そのため、本研究では圧縮された場合でもベローズアクチュエータの発生力を精度よく予測できるモデルを提案することを目指す。本稿では、空気圧駆動ベローズアクチュエータの構造を紹介し、アクチュエータの幾何構造、材料特性、剛性を考慮した定式化モデルを述べる。最後、3D プリンタで製作したベローズアクチュエータを用いた計測実験の結果を通して、定式化したモデルの有効性を示す。

2. ベローズアクチュエータの構造

提案するベローズアクチュエータは、NinjaFlex 材料 (NinjaTek, Fenner Drives, PA) を用いて 3D プリンタ (Prusa I3 MK3, Prusa Research, Prague) で製作されている。アクチュエータは、連結部とベローズ部 2 つの部分から構成されている (図 1)。接続部は、ロボットアームとエンドエフェクタの 2 つのパーツを接続し、さらにエアチューブの接続を可能とする部分である。ベローズ部は、負圧による伸縮できる部分である。ベローズ部の寸法は図 2 に示す。変数 DI , h , α , s はそれぞれベローズの内径、半分の高さ、角度、肉厚を表している。

3. ベローズアクチュエータの定式化

ロボットグリッパの応用例として、ベローズに負圧を印加してアクチュエータを圧縮させ、その途中でものを把持した場合、グリッパの把持力となるベローズアクチュエータの発生力 F_{out} は下記のように定式化できる。

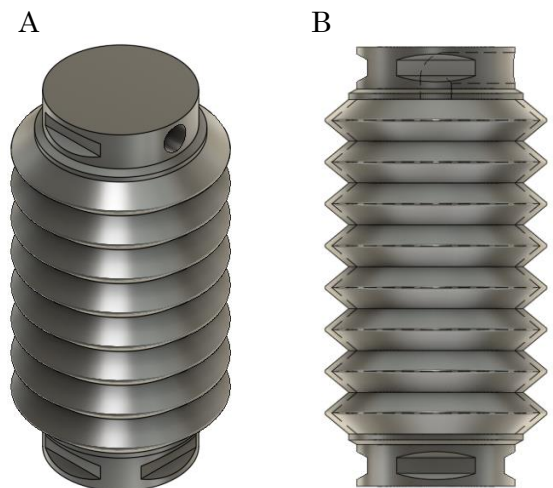


Fig. 1 Oblique view (A) and front view (B) of bellows actuator

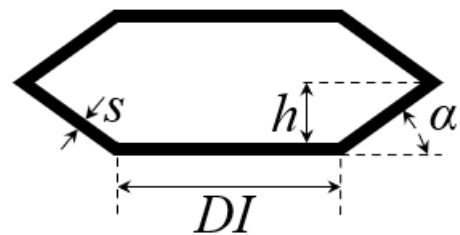


Fig. 2 Structural dimensions of bellows actuators

$$F_{out} = PA_{eff} - K_{ax}d \quad (1)$$

ここで、 $K_{ax}d$ は圧縮により発生する弾性力を表し、 d は圧縮量、弾性係数 K_{ax} の式は以下の式で近似できる[3]。

$$K_{ax} \approx \frac{E}{2(1-\nu^2)} \cdot \frac{\pi(DI + W_c)s^3}{W_c^3} \cdot \frac{n_L}{n_W} \cdot \frac{1}{C_f} \quad (2)$$

ここで、 E と ν は材料のヤング率とポアソン比、 n_L はベローズの層数、 n_W はベローズの数、 C_f は補正係数である。 W_c は圧縮量 d によって変化する係数で、ベローズの壁を水平方

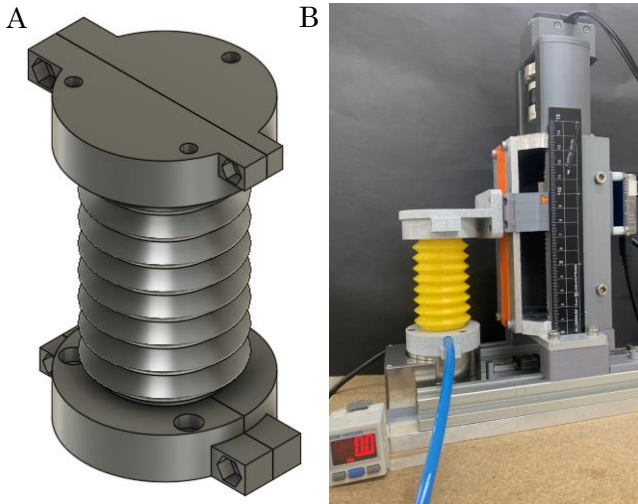


Fig. 3 Mounting parts for bellows actuators (A) and experimental setup for force measurements (B)

向に投影した長さで表し、 W_c は以下の式で計算する。

$$W_c = \sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \alpha^2} + \frac{hd}{n_W} - \frac{d^2}{4n_W^2}} \quad (3)$$

PA_{eff} は負圧により発生する力である。有効面積 A_{eff} は以下の式で計算できる。

$$A_{eff} = \frac{\pi}{4}(DI + W_c)^2 \quad (4)$$

4. 実験と結果

モデルを検証するため、アクチュエータ発生力の計測実験を行った。実験の計測装置(図3)は主にモーター(XM430-W210, ROBOTIS社)で駆動するボールねじ機構で構成される。アクチュエータの発生力は六軸力覚センサ(PFS055YA251U6, Leptrino社)を用いて計測する。モーターの制御モードは、拡張位置制御を用いて、ベローズアクチュエータを指定された圧縮量までに正しく圧縮する。真空発生器(VUH07-66A, PISCO社)を用いて正圧を負圧に変換して負圧を出力する。実際に出力した負圧は負圧センサ(ZSE30A-C6L-N-G, SMC社)を用いて、計測している。

実際運用を想定し、実験は圧縮と負圧の二つのステップに分けて行った。モーターを駆動して、ベローズアクチュエータを一定の圧縮量(0~40 mm, 10 mm刻み)まで圧縮して一定の負圧(-40~0 kPa, -10 kPa刻み)を印加する。図4は実験の様子を示している。

発生力の計測結果は図5(赤線)に示す。モデルで計算する際に用いた材料特性であるヤング率は文献[4]の実験結果を参考し、四つの異なる数値を選んで、実験結果と比較した。十分近い結果となり、モデルの有効性を検証できた。

5. 結言

本論文では、3Dプリンタで製造した空気圧駆動ベローズアクチュエータの発生力を定式化した。提案したモデルはアクチュエータの幾何構造、材料特性、剛性のパラメータを用いてアクチュエータの発生力を計算できる。計測実験を通してモデルの有効性を検証した。

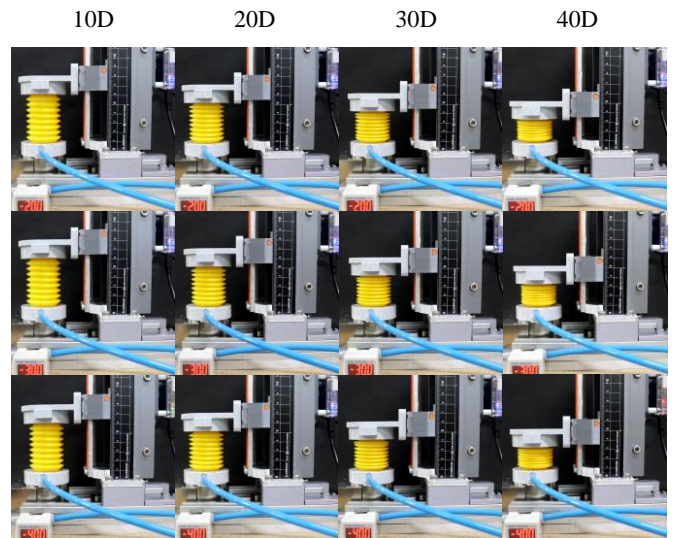


Fig. 4 Bellows actuator experiments

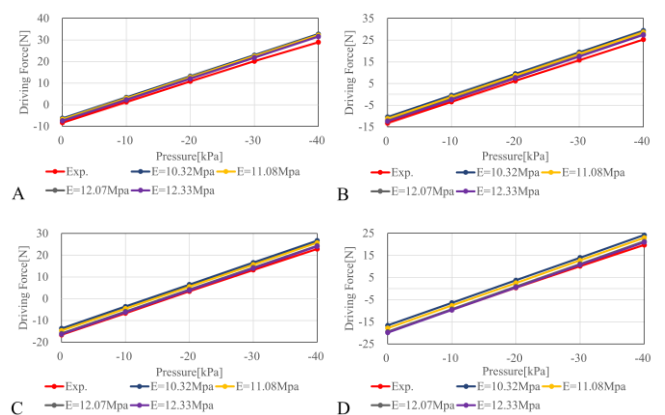


Fig. 5 Results comparisons of the generated forces at the pre-compression conditions of 10 mm (A), 20 mm (B), 30 mm (C), and 40 mm (D), respectively

今後の予定として、異なる構造と材料のベローズアクチュエータを製造し、同様の計測実験を行って、モデルの有効性をさらに検証する。また、ベローズアクチュエータの有限要素モデルを構築し、定式化モデルと比較する。

謝辞

本研究は、内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期/フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人:NEDO)とJSPS科研費JP20K04406の助成によって実施されています。

参考文献

- [1] M. S. Xavier, C. D. Tawk, Y. K. Yong, A. J. Fleming, "3D-printed omnidirectional soft pneumatic actuators: Design, modeling and characterization," *Sensors, and Actuators A: Physical*, Vol. 332, 2021
- [2] Z. Wang, T. Hirata, T. Sato, T. Mori, M. Kawakami, H. Furukawa, S. Kawamura, "A Soft Robotic Hand Based on Bellows Actuators for Dishwashing Automation," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2): 2139-2146, 2021.
- [3] Witzmann GmbH, "Metal Bellows Manual," pp. 73-74, (Access: Mar. 21, 2023). <https://www.witzenmann.com/mediapool/documents/metal-bellows-manual.pdf>
- [4] T. Reppel, K. Weinberg, "Experimental Determination of Elastic and Rupture Properties of Printed Ninjaflex," *Technische Mechanik-European Journal of Engineering Mechanics*, 38(1): 104-112, 2019.