

McKibben 型人工筋肉による可変な機体構造を持つ飛行ロボットの設計と制御に関する研究

○菅 啓一朗（東京大学），杉原 和輝（東京大学），宮道 彩乃（東京大学），
杉原 悠一朗（東京大学），小塚 陽希（東京大学），趙 漢居（東京大学）

Design and Control of Deformable Quadrotor by McKibben Pneumatic Actuators.

○ Keiichiro KAN (The University of Tokyo), Kazuki SUGIHARA (The University of Tokyo),
Ayano MIYAMICHI (The University of Tokyo), Junichiro SUGIHARA (The University of Tokyo),
Haruki KOZUKA (The University of Tokyo), Moju ZHAO (The University of Tokyo)

Abstract : In recent years, there has been growing interest in aerial robots with articulated structures that allow them to perform complex tasks with a greater Degrees-of-Freedom in the air. On the other hand, these deformable robots mainly use mechanical actuators, which increase their weight and make them vulnerable to impacts. We focused on McKibben Pneumatic Actuator, which are lightweight, flexible, and resistant to large impacts. We aimed to realize advanced flight capabilities and maneuverability using deformable aerial robots with McKibben Pneumatic Actuator. In this study, we proposed a method for constructing and controlling the movement of aerial robot using McKibben Pneumatic Actuator, and conducted experiments with the robot. From the experiments, we confirmed the free deformation and stable flight of the aerial robot with McKibben Pneumatic Actuator.

1. 緒言

近年、空中での高い自由度を利用して、複雑なタスクを遂行可能とする飛行ロボットへの関心が集まっている。特に、高度な飛行能力と高度なマニュピレーションを実現するための関節構造を有した飛行ロボットや形状変化が可能である変形飛行ロボットが注目されている [1]。これまでに、狭小な空間の移動など特定の任務に対応するための変形飛行ロボットが多数提案されてきた [2, 3]。これらの変形飛行ロボットは、主に機械的アクチュエータを用いることで形状変化を実現している。しかし、機械的アクチュエータの利用は、高自由度を実現しようとしたとき、重量の増加を引き起こし、飛行性能に影響を及ぼす可能性が高い。また、構造が複雑化することによって、衝撃に対する脆弱性が高まり、外環境との物理的接触において破損につながるという課題も存在する。

このような課題に対して、近年柔軟性を持つアクチュエータの利用が期待されている [4]。柔軟性を持つソフトアクチュエータとして McKibben 型人工筋肉 (McKibben Pneumatic Actuator 以下 MPA) が検討されてきた。MPA は空気圧を印加することによって収縮し、長軸方向に張力を発揮するアクチュエータであり、軽量かつ柔軟、高出力といった特徴がある [5]。また、MPA は外部からの衝撃に対しても高い耐久性を発揮するため、飛行ロボットの構造材料として適していると考えられる。先に述べた変形飛行ロボットにおいて、MPA は制御の自由度が高く、様々な形態変化を迅速に行うことが期待される。例

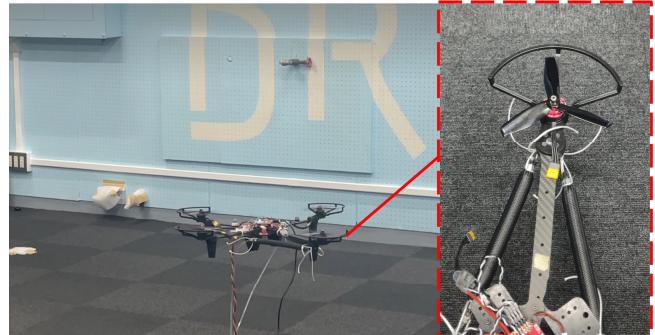


Fig. 1: Aerial robot with MPA actuated in the air.

えば、飛行中に機体の形状を変化させることで、把持運搬などのタスクに応じた飛行モードの選択が可能になると考えられる。

本研究の目的は、飛行ロボットの高度な飛行能力と高度なマニュピレーションを実現するための MPA を用いた飛行ロボットの設計と制御法の確立である。本研究では、Fig. 1 に示すような MPA を用いた飛行ロボットの基本的な機体構成法と動作制御法を新たに提案し、実機実験を通じて提案手法の有効性を評価した。

2. MPA

2.1 MPA 単一ユニットの構成

MPA は空気圧に限らず、様々な流体が駆動源として用いられているソフトアクチュエータの一種であり、現在ま

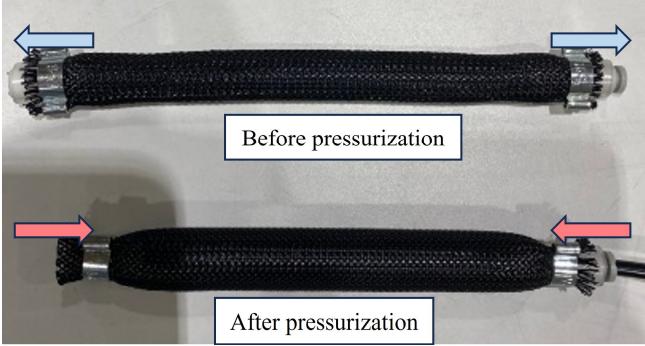


Fig. 2: McKibben Pneumatic Actuator.

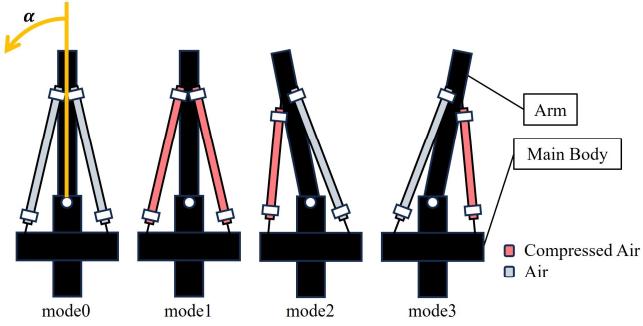


Fig. 3: MPA antagonistic drive system.

でに、多くの製作法が開発されてきた [6, 7]. MPA は主にシリコンチューブと周囲を覆うスリーブによって構成される。この MPA に外部のコンプレッサから内部へ圧縮空気を送り込むことにより、長軸方向へ収縮し、同時に張力を発揮する。圧力印加時、スリーブにおける纖維間の角度が拡大変化する。この角度変化により、MPA が収縮し、長軸方向へ張力を発生させる。MPA は柔軟なアクチュエータとして、様々な装置への活用が試みられており [8]、また制御性能向上の為、MPA の入出力特性における様々なモデル化が提案されている [5, 9]。また、纖維の編組の形状と構造をより柔軟に制御することを目的とした先行研究もある [10, 11]。本研究は Fig. 2 に示すように、先行研究 [6] で提案されている、軽量かつ比較的容易に作成可能な MPA を製作した。Fig. 2 上部の MPA は圧力を印加されておらず、下部の MPA は圧力を印加されている。本研究で用いた MPA はシリコンチューブ、NFL メッシュチューブ、ホースクランプ、ストレート継手、空気栓から構成される。NFL メッシュに使用されている纖維が柔軟かつ長軸方向の引張強度が大きいという特性を持っていることにより、MPA は可変的な剛性と物理的柔軟性、そしてアクチュエータとしての軽さを実現している。

2.2 拮抗駆動機構

本研究で用いた MPA は重量出力比が高い一方、直動であるため、拮抗駆動システムに用いられてきた [12]。Fig. 3

に、本研究で用いた拮抗駆動システムを示す。2 本の MPA の端部をそれぞれ、機体の本体部と腕部に接続し、各 MPA の圧力は、電空レギュレータによって制御する。本拮抗駆動においては 4 種類の加圧方法があり、それぞれ Fig. 3 に示すようにモード 0, モード 1, モード 2, モード 3 と呼ぶこととする。また、腕部の初期位置からの回転角度を α とする。モード 0 は加圧をされておらず、機体における腕部は変形しない。一方、モード 1 においては、両方加圧されているため、力が釣り合い形状が変化しない。モード 2, モード 3 においては一方に加圧することで、加圧した側に形状が変化する。この拮抗駆動によって、飛行ロボットの形状の変化を実現させる。

3. 飛行ロボットへの導入

3.1 飛行ロボットの可変モデル

本研究における機体モデルを Fig. 4 に示す。機体は腕部と本体部から構成され、1 自由度の関節を介して接続されている。腕部には 2 本の MPA が取り付けられ、MPA によって腕部の回転角度 α を変化させる。本研究では、Zhao ら [13] の開発した、飛行制御法を用いた。この時、本研究で扱うクワッドコプターは腕部が回転するため、機体に働く反トルク τ は、腕部の長さを l とすると、式 (1)、および式 (2) によって表される。

$$\tau_i = \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i + \sigma \mathbf{F}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{r}_1 = (l \cos \alpha, l \sin \alpha, 0) \quad (2)$$

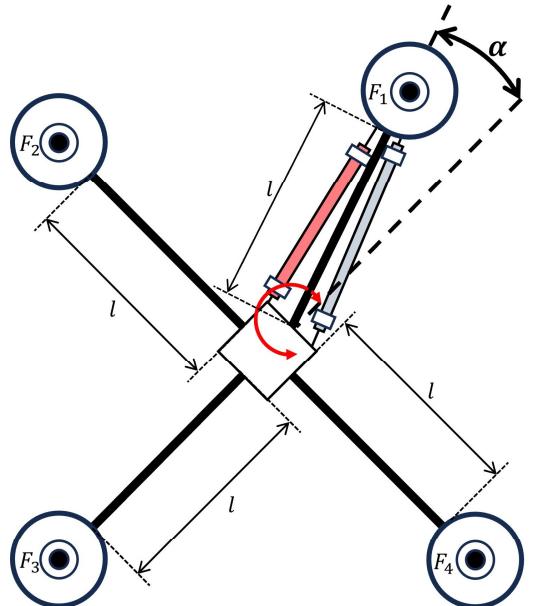


Fig. 4: Deformable Quadrotor Model.

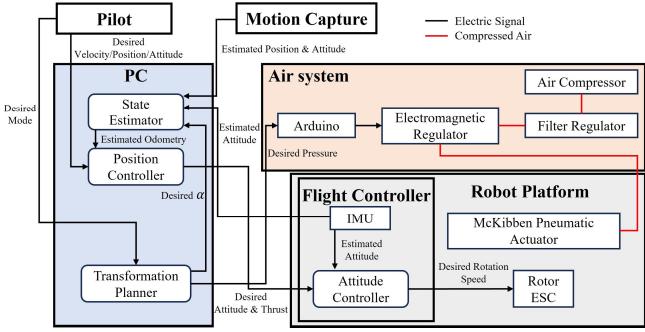


Fig. 5: System architecture of the aerial robot.

3.2 飛行ロボットのシステム構成

本研究におけるハードウェアとソフトウェアにおけるシステム構成の概要図を Fig. 5 に示す。機体は飛行のための通信系統と空気圧系統の 2 系統から成り立つ。操縦者から、機体に対しての通信系統は、PC からの有線ケーブルを通して、指令値を送信している。また、MPA に空気圧を加圧するための空気圧系統は、コンプレッサから送られる空気圧を電空レギュレータによって制御し、MPA に加圧する。

4. 実機による実証実験

4.1 飛行ロボットの機体構成

本研究では、MPA を用いた飛行ロボットの空中での形状変形を目指す。MPA を用いた飛行ロボットの機体構成を Fig. 6 に示す。機体は本体部と、4 本の腕部によって構成され、それぞれの腕の先端にプロペラが取り付けられる。プロペラを回転させるためのロータ、及び、ロータを駆動するための制御基板である ESC(Electric Speed Controller) が搭載されている。また変形機構として Fig. 6(b)

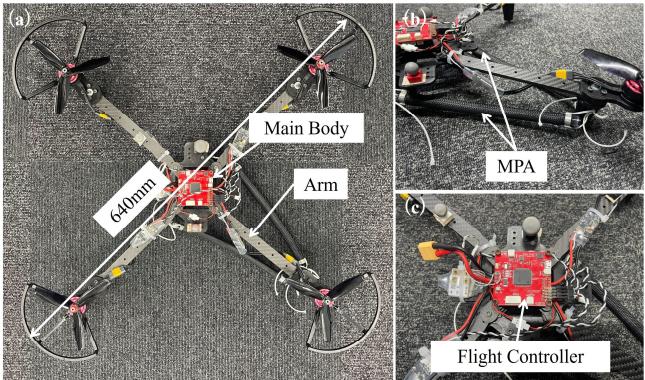


Fig. 6: (a)Robot prototype platform with Main body and Arm connected by single joint.(b)Main body and Arm connected by MPA.(c)Main body with flight controller attached.

のように、1 本の腕に 2 本の MPA を取り付けた。またセンサとして、Fig. 6(c) に示すように、本体部に Flight Controller が搭載されている。本研究における実機検証に関しては、1 本の腕に MPA を 2 本取り付け、電空レギュレータ (ITV1050-212BS) によって制御することにより、形状変化の動作検証を行う。

4.2 腕部の回転角度 α の測定

本機体において、モード 0, モード 1, モード 2, モード 3 における MPA に加える圧力と腕部の回転角度 α の関係を明らかにする必要がある。制御に用いる飛行モデルに回転角度 α の状態を反映させて、飛行中の姿勢を安定化することで、自由な形状変化が可能になると考えられる。そこで、まず飛行させずに実験を行い、MPA に加える圧力と腕部の回転角度 α の関係を取得した。

実験では、モーションキャプチャーを用いて、本体部と腕部のそれぞれの位置を測定し、その差分から回転角度 α を算出した。実験時、腕部の右側、左側に取り付けた MPA を R-MPA, L-MPA と定義し、それぞれの無加圧時の MPA の長さは 195mm とした。測定結果を Fig. 7 に示す。回転角度 α は、加えてきた圧力の順番に依存するため、片方の MPA の圧力を固定し、もう片方の MPA に対する圧力を変化させた。Fig. 7(a) では L-MPA に加える圧力を一定とし、R-MPA に加える圧力 0.0MPa から 0.6MPa まで 0.1MPa ずつ増加させた際の回転角度 α の変化を示している。Fig. 7(b) では、R-MPA の圧力を一定とし、L-MPA に加える圧力 0.0MPa から 0.6MPa まで 0.1MPa ずつ増加させた際の回転角度 α の変化を示している。これらの結果より、モード遷移時の角度変化を検証することができる。

上記の 2 つの実験結果から、腕部の回転角度 α は、MPA に加える圧力によって最大角度 19° から最小角度 -15° まで変化することが確認された。一方で、回転角度 α は、圧力の制御によって、最大値と最小値に差異が見られ、線形な関係ではないことが確認できる。最大値と最小値に差

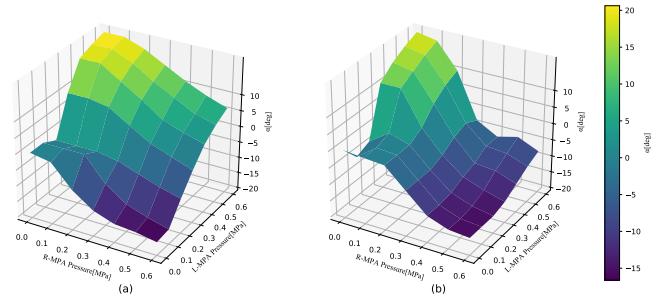


Fig. 7: (a)Relationship between arm rotation angle α and R-MPA pressure when pressure to L-MPA is fixed.(b)Relationship between arm rotation angle α and L-MPA pressure when pressure to R-MPA is fixed.

Table. 1: Standard deviation of rotation angle α in each modes.

	モード 2	モード 3
Standard deviation	0.55	0.21

Table. 2: Pressure and rotation angle α in each mode.

	R-MPA[MPa]	L-MPA[MPa]	α [degree]
モード 1	0.30	0.30	0.00
モード 2	0.10	0.50	19
モード 3	0.50	0.10	-15

Table. 3: RMSE which aerial robot keeps while hovering without α control.

	x[m]	y[m]	z[m]	yaw[rad]
RMSE	0.059	0.066	0.011	0.019

Table. 4: RMSE which aerial robot keeps while hovering with α control.

	x[m]	y[m]	z[m]	yaw[rad]
RMSE	0.047	0.043	0.0084	0.024

異が生じるということは、変形が対称でないことを示しており、その主な原因は MPA に対して接続した糸の誤差であると考えられる。糸は機体において、筋肉に対する腱としての役割を果たしており、腱の長さの誤差が変形の非対称性を引き起こしたと考えられる。また線形な関係が見られなかった理由については、先行研究 [14] にあるように、MPA の収縮量と圧力が非線形な関係が存在するためであると考えられる。

また本研究では、第 4.3 節で定義する変形のモードの繰り返し誤差を評価する必要がある。モード 2, モード 3 における変形をそれぞれ 10 回繰り返した際の標準偏差を Table. 1 に示す。結果として、本実験における繰り返し誤差は比較的小さいことから、MPA に付加した圧力と回転角度 α との間の有効な写像関係は成立するものと考えられる。

4.3 空中変形動作

前節で得られた結果を基に、本機体をホバリングさせた状態で MPA を加圧し、機体形状を変形させ、提案手法の有効性を評価する。前章で得た圧力と回転角度 α の関係を基に、モード 1, モード 2, モード 3 の状態に遷移するための 2 本の MPA の圧力と、回転角度 α を Table. 2 のように定義した。

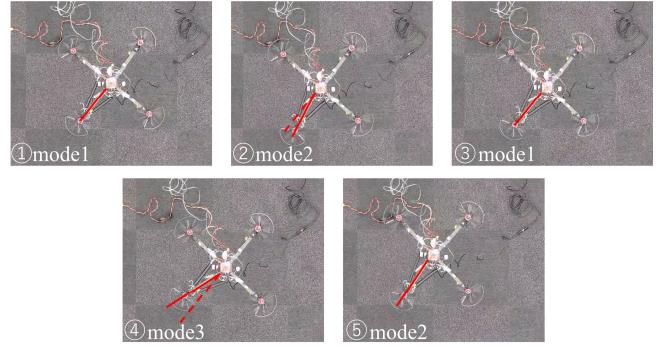


Fig. 8: MPA-actuated deformation of aerial robot.

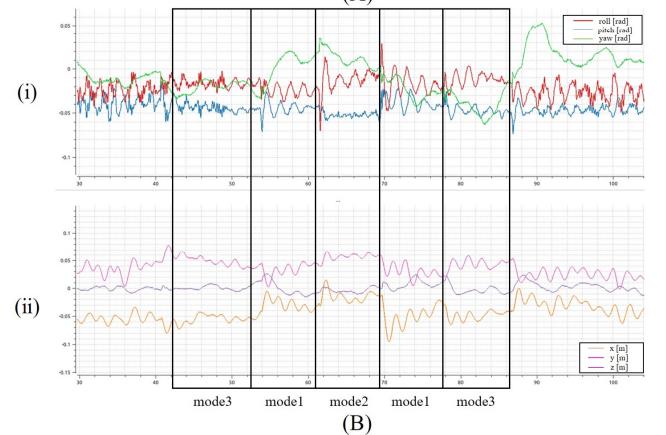
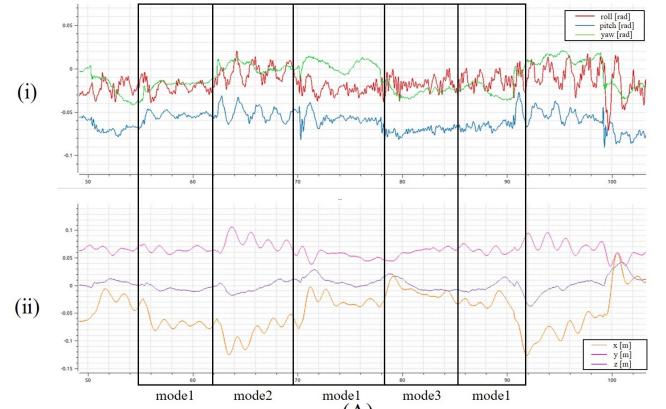


Fig. 9: (A-i,B-i) The change of the errors between the current and target 3dimension of the attitude while transforming on the air. (A-ii,B-ii)The change of the errors between the current 3d position and the target 3d point while transforming on the air.(A:Without α Control, B:With α Control)

それぞれのモードにおける変形の様子を Fig. 8 に示す。空中において、各モード間を遷移させた際に、機体は安定してホバリングを維持できることが確認された。次に、Fig. 5 で示したシステム構成に基づき、回転角度 α を制御モデルに反映させた場合と反映させていない場合の飛行性能への影響を検証するための実験を行った。回転角度 α を制御モデルに反映させることにより、飛行中の変形を安定

化することができると考えられる。Fig. 9(A) は α の値を制御モデルに反映させていない状態で変形を行った際の、飛行ロボットの姿勢角と位置の誤差の変化を示している。また、Fig. 9(B) は α の値を制御モデルに反映させた状態での結果を示している。また Table. 3 と Table. 4 には、それぞれの変形時の RMSE 値を示している。

これらの結果から、変形中においても姿勢角および位置は概ね目標値を追従しているが、変形時の衝撃により誤差が増加していることが確認された。先述の通り、回転角度 α を制御モデルに反映させることで、飛行中の変形における安定性を向上することができると考えられる。しかし、本研究では、回転角度 α の値を制御モデルに反映することにより、位置および姿勢の追従性が低下した。圧力を急激に増加させ、回転角度 α の値を離散的に変化させていたため、制御モデル内の回転角度 α と機体の回転角度 α に差分が生じていたと考えられる。そのため、制御モデルに回転角度 α を反映させることにより、位置および姿勢の追従性が低下したと考えられる。

5. 結言

本研究では、MPA を用いた飛行ロボットの空中での形状変化を目指し、その基本的な機体構成法、および動作制御法を提案した。提案した機体構成によって、飛行ロボットの空中での形状変化が可能であることが確認できた。また、提案した動作制御法によって、MPA に加える圧力と腕部の回転角度 α の写像関係を明らかにし、MPA に加える圧力を変化させることで、機体の変形を操作できることが確認できた。一方、提案したシステム構成による飛行の安定性に差異が見られなかったが、今後の回転角度 α の軌道を検討した変形実験を通して、手法の有効性を確認する。本研究では、回転角度 α の値を実験値から制御モデルに反映させているが、今後、センサーからの計測値、推測値によって制御を行うことにより、飛行の安定性の改善に取り組む必要がある。そして将来的には、MPA を用いた飛行ロボットの空中での形状変形を実現し、高度な飛行能力と高度なマニュピレーション能力を実現することを目指す。

参考文献

- [1] Anibal Ollero, Marco Tognon, Alejandro Suarez, Dongjun Lee, and Antonio Franchi. Past, present, and future of aerial robotic manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 38, No. 1, pp. 626–645, 2022.
- [2] Na Zhao, Yudong Luo, Hongbin Deng, and Yantao Shen. The deformable quad-rotor: Design, kinematics and dynamics characterization, and flight performance validation. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2391–2396, 2017.
- [3] Moju Zhao, Koji Kawasaki, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Transformable multirotor with two-dimensional multilinks: modeling, control, and motion planning for aerial transformation. *Advanced Robotics*, Vol. 30, No. 13, pp. 825–845, 2016.
- [4] A. E. Gomez-Tamm, P. Ramon-Soria, B.C. Arreue, and A. Ollero. Current state and trends on bioinspired actuators for aerial manipulation. In *2019 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS)*, pp. 352–361, 2019.
- [5] B. Tondu and P. Lopez. Modeling and control of mckibben artificial muscle robot actuators. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 20, No. 2, pp. 15–38, 2000.
- [6] 増田容一, 浪花啓右, 中西大輔, 浦大介, 杉本靖博. 自律分散型ロボットのためのマッキベン型人工筋肉とその固定法の開発. 第34回自律分散システムシンポジウム(DAS2022), p. 122, 2022.
- [7] 田熊隆史. 空気圧人工筋により駆動する柔軟な脚ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 2, pp. 144–149, 2019.
- [8] Mohd Azuwan Mat Dzahir and Shin ichiroh Yamamoto. Recent trends in lower-limb robotic rehabilitation orthosis: Control scheme and strategy for pneumatic muscle actuated gait trainers. *Robotics*, 2014, Vol. 3, No. 120, 2014.
- [9] Ching-Ping Chou and B. Hannaford. Measurement and modeling of mckibben pneumatic artificial muscles. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 1, pp. 90–102, 1996.
- [10] Kazuto Takashima, Jonathan Rossiter, and Toshiharu Mukai. Mckibben artificial muscle using shape-memory polymer. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 164, No. 1, pp. 116–124, 2010.
- [11] Danial Sangian, Ali Jeiranikhaheneh, Sina Naficy, Stephen Beirne, and Geoffrey Spinks. Three-dimensional printed braided sleeves for manufacturing mckibben artificial muscles. *3D Printing and Additive Manufacturing*, Vol. 6, , 2018.
- [12] Bong-Soo Kang, Curt S. Kothena, Benjamin K. S. Woods, and Norman M. Wereley. Dynamic modeling of mckibben pneumatic artificial muscles for antagonistic actuation. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 182–187, 2009.
- [13] Moju Zhao, Tomoki Anzai, Fan Shi, Toshiya Maki, Takuzumi Nishio, Keita Ito, Naoki Kuromiya, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Versatile multilinked aerial robot with tilted propellers: Design, modeling, control, and state estimation for autonomous flight and manipulation. *Journal of Field Robotics*, Vol. 38, No. 7, pp. 933–966, 2021.
- [14] Van Anh Ho and Shinichi Hirai. Measuring mckibben actuator shrinkage using fiber sensor. In *2015 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp. 628–633, 2015.