

空気圧駆動インフレーターブルアクチュエータの 特性解析と数値シミュレーション

○野間口 直樹 (九州大学), 河村 晃宏 (九州大学), 江頭 飛鳥 (九州大学)
倉爪 亮 (九州大学), 川村 貞夫 (立命館大学)

Development of a Numerical Simulator for Inflatable Pneumatic Actuators

○Naoki NOMAGUCHI (Kyushu Univ.), Akihiro KAWAMURA (Kyushu Univ.), Asuka
EGASHIRA (Kyushu Univ.), Ryo KURAZUME (Kyushu Univ.) and Sadao
KAWAMURA (Ritsumeikan Univ.)

Abstract : This paper proposes a new numerical simulator for an inflatable pneumatic actuator. The inflatable pneumatic actuator consists of several inflatable bags which have a nonlinear torque characteristic, and thus, it is impossible to apply conventional simulators to the actuator. The new simulator adopts a mass-spring-damper model and enables to simulate the nonlinear torque characteristic of the inflatable pneumatic actuator. The usefulness of the developed simulator is verified by comparing the results of simulation and experiment.

1. 緒言

インフレーターブル構造とは、空気などを注入することにより膨らむ袋状の構造のことである。この構造を用いたロボットは従来の高剛性・高重量なロボットとは異なり、軽量性と柔軟性を併せ持つロボットとなる。この特性からインフレーターブルロボットは宇宙、福祉、医療等の新しい分野での利用が期待されている。これに対し、我々はこれまでにインフレーターブル構造を用いた軽量で柔軟な空気圧駆動ロボットアームの開発を行っている。しかし本ロボットは、リンク部、アクチュエータ部の全てがインフレーターブル構造になっており、膨張・収縮によって変形し運動する。このため、ロボットパーツが高剛性で変形しない既存のロボットシミュレータでは、挙動の正確な再現が困難である。

そこで、本研究では、質点バネモデルを用いた数値シミュレータの開発を行う。本稿では特に、複数のインフレーターブル構造からなるアクチュエータ部に関して、シミュレータと実機の出力特性の比較および解析を行い、本シミュレータで用いている質点バネモデルの有効性の確認を行う。



Inflatable robot arm

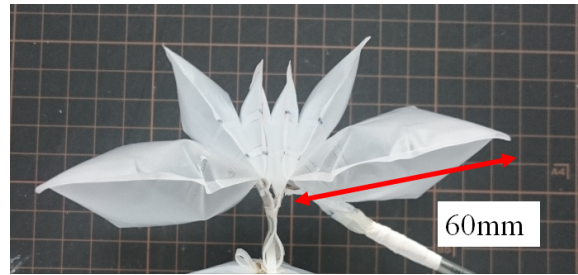


Fig. 1: Inflatable actuator

2. シミュレーションモデル

本シミュレータでは、Fig. 1 に示すアクチュエータの挙動の再現を目指す。対象物を均一な質点の集合で構成し、その質点間をバネとダンパで接続した、質点バネモデルを用いる。対象物の任意の質点 i に生じる力を以下に示す。質点 j に接続された質点 i に生じるバネによる弾性力 \mathbf{F}_{sp} は、質点 i の 3 次元位置を \mathbf{x}_i 、 L を初期配置における質点 i と質点 j の距離 (自然長) とすると、バネ定数 k_{sp} 、 $\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$ として、

$$\mathbf{F}_{sp} = -k_{sp}(|\mathbf{x}_{ij}| - L) \frac{\mathbf{x}_{ij}}{|\mathbf{x}_{ij}|}, \quad (1)$$

となる。

また、質点 i, j 間に生じるダンパの力 \mathbf{F}_{dp} を、質点 i の速度 \mathbf{v}_i 、 k_d を正の定数として、以下のように定める。

$$\mathbf{F}_{dp} = -k_d(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j). \quad (2)$$

質点 i に働く膨張力 F_e は、インフレータブル構造の内圧を P 、質点 i の属するメッシュの面積 S 、そのメッシュの法線ベクトル \mathbf{n} とすると、以下の式になる。

$$F_e = \frac{1}{3}PSn. \quad (3)$$

質点 i の属するインフレータブル構造のバッグをバッグ 1 として、バッグ 1 とバッグ 2 が接触しバッグ 1 の質点 i がバッグ 2 にめり込んだ場合に質点 i に生じる接触力 F_{ct} は、質点 i の近傍のバッグ 2 のメッシュと質点 i の距離 l 、そのメッシュの法線ベクトル \mathbf{n} 、 k_c を正の定数として、

$$F_{ct} = k_c l^2 \mathbf{n}, \quad (4)$$

と表現できる。ただし、バッグ 2 の質点 i 近傍のメッシュの数は任意に設定できる。本稿ではメッシュ数は 6 に設定した。

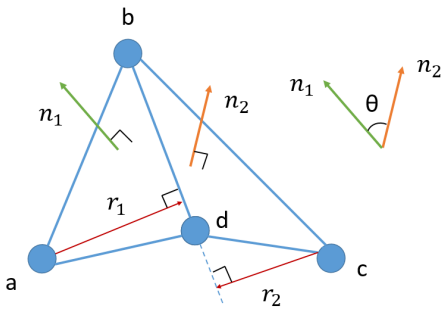


Fig. 2: Bending stress

曲げ応力の計算は Fig. 2 のように接続されている a, b, c, d の 4 つの質点から計算する。質点 a, b, c, d にかかる力をそれぞれ F_a, F_b, F_c, F_d とする。質点 a, c から質点 b と d を結ぶ辺に降ろした垂線をそれぞれ r_1, r_2 とし、三角メッシュ abd, bcd の法線をそれぞれ $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ とし、 \mathbf{n}_1 と \mathbf{n}_2 のなす角を θ とし、 k_1, k_2 を正の定数として、 F_a, F_b, F_c, F_d を、以下のように設定する。

$$F_a = \frac{k_1 \theta}{|r_1|} \mathbf{n}_1 \quad (5)$$

$$F_c = \frac{k_1 \theta}{|r_2|} \mathbf{n}_2 \quad (6)$$

$$F_b = F_d = -\frac{1}{2}(F_a + F_c). \quad (7)$$

また、端の場合 (bd がアクチュエータの溶着している部分となる場合)

$$F_a = \frac{k_2(\pi - \theta)}{|r_1|} (-\mathbf{n}_1) \quad (8)$$

$$F_c = \frac{k_2(\pi - \theta)}{|r_2|} (-\mathbf{n}_2) \quad (9)$$

$$F_b = F_d = -\frac{1}{2}(F_a + F_c), \quad (10)$$

とする。質点 i には、質点 i を含む Fig. 2 のように接続されている 4 質点に関して式 5 から式 10 を満たすように力 F_{bs} を加える。

以上から対象物の任意の質点 i に加える力 F_i は以下のようになる。

$$F_i = F_{sp} + F_{dp} + F_e + F_{ct} + F_{bs}. \quad (11)$$

3. トルク特性解析

複数のインフレータブル構造からなるアクチュエータ部のトルク特性についてシミュレータと実機の比較及び解析を行う。

実機において、アームの関節角度 θ [deg] が 45, 60, 90, 120, 150, 180, 210 の場合について、インフレータブル構造の内圧を 10[kPa] から 80[kPa] まで 10[kPa] ずつ増加させていったときのトルク値を Fig. 3 に示す。

次にシミュレータにおいても実機と同様の状態で実験を行った。実機実験と同様に角度 θ [deg] が 45, 60, 90, 120, 150, 180, 210 の場合について、インフレータブル構造の内圧を 10[kPa] から 80[kPa] まで 10[kPa] ずつ増大させていったときのトルク値を Fig. 4 に示す。

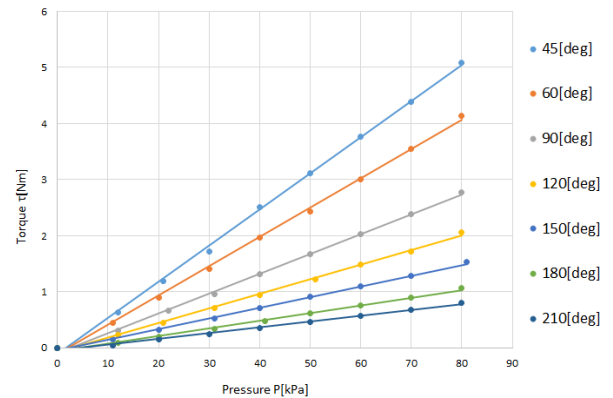


Fig. 3: Torque characteristics of real machine

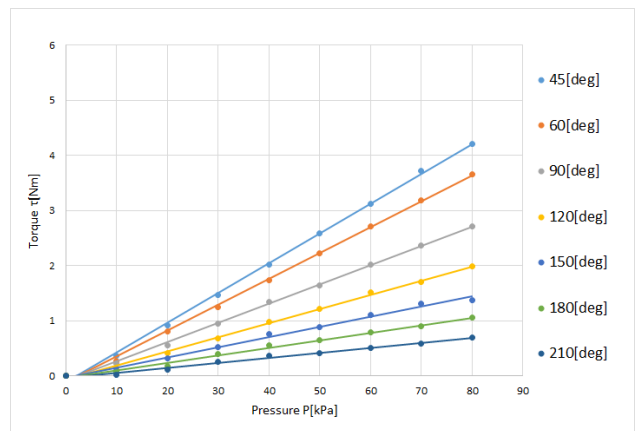


Fig. 4: Torque characteristics obtained by the simulator

Fig. 3 と Fig. 4 のグラフの傾きを横軸を角度 [deg] として Fig. 5 に示す. これより, 実機では傾きが角度に対して非線形に変化しているが, シミュレーション結果も同様の傾向が再現できていることが分かる.

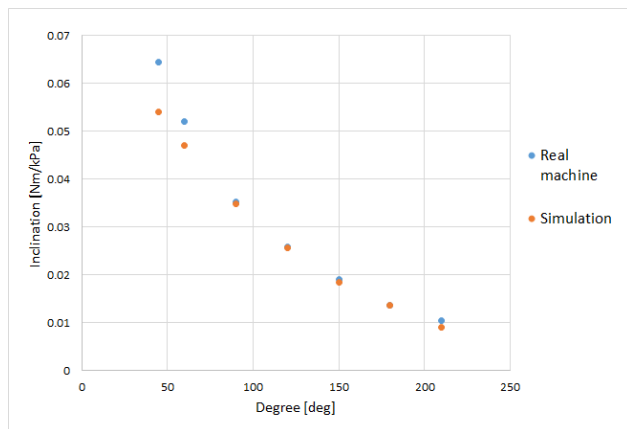


Fig. 5: Inclination of real machine and simulation

4. 結言

本稿では, インフレーターロボットアームのアクチュエータ部に関するシミュレータの開発を行った. シミュレータ上で再現したアクチュエータは実機と同様の内部圧力に対して線形であるトルク特性を持つことを確認した. これにより本シミュレータで用いている質点モデルの有効性を確認した. 今後はインフレーターロボットアームをシミュレータ上で再現し, ロボットの動作を再現できるシミュレータの作成を目指す.

5. 謝辞

本研究は, 日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究 (B) (課題研究 15H03952) の交付により行われたものである.

参考文献

- [1] 江頭 飛鳥, 河村 晃宏, 金 度演, 金 慧鍾, 川村 貞夫, 倉爪 亮, “空気圧駆動ロボットのためのインフレーター構造膨張シミュレーション開発”, 計測自動制御学会 SI 部門講演会 *SICE-SI2016* 予稿集, pp.901-903, 2016.
- [2] 金 慧鍾, 堀池幸祐, 西岡靖貴, 河村晃宏, 川村 貞夫, “軽量柔軟インフレーターロボットアームのセンサフィードバック制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 *2014 in 富山 (ROBOMECH2014)* 講演論文集, 3P1-W02, 2014.