

空気圧駆動ロボットのためのインフレータブル構造 膨張数値シミュレーション開発

○江頭 飛鳥 (九州大学), 河村 晃宏 (九州大学), 金 度演 (東京大学)
金 慧鍾 (立命館大学), 川村 貞夫 (立命館大学), 倉爪 亮 (九州大学)

Development of Simulation Model of Inflatable Robot Arm

○ Asuka EGASHIRA (Kyushu Univ.), Akihiro KAWAMURA (Kyushu Univ.),
Doyon KIM (Tokyo Univ.), Hyejong KIM (Ritsumeikan Univ.),
Sadao KAWAMURA (Ritsumeikan Univ.) and Ryo KURAZUME (Kyushu Univ.)

Abstract : This paper presents a method to simulate the behavior of inflatable robot arms. Inflatable robot arms we have developed are constructed of inflatable links, pneumatic bag actuators. The arms have softness and lightness in comparison with general robotic arms which are made of metal. However, it is difficult to estimate the shape of inflatable links and pneumatic bag actuators in a short time. Therefore, a model to estimate the behavior of inflatable structure for reduction of the calculation time is shown.

1. 緒言

近年, ロボット技術は産業分野のみならず, 宇宙, 福祉, 医療等の新たな分野での利用が期待されている. これらの分野では, 軽量性と柔軟性を併せ持つロボットが求められている. これに対し Kim らは, プラスチック材料を用いた, 軽量で柔軟な多自由度インフレータブルロボットアームを開発している [1]. 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ブル構造となっており, 各関節に拮抗的に配置したアクチュエータの差圧によって駆動する. 本ロボットの概観を Fig. 1 に示す. しかし, インフレータブル構造は, 膨張によって3次元的な形状を形成するため, 製作時に膨張後の正確な形状, 特性を予測することは困難であり, 試行錯誤により各部のインフレータブル構造の形状は決定される. これには多大な時間と大きな労力を要する.

そこで, 数値シミュレーションによってインフレータブル構造の形状, 特性を再現し, 人の手による試行錯誤実験を代替することのできる高速なシステムの開発を行う.

2. シミュレーションモデル

現在, 構造解析シミュレーションとして最も一般的な手法は, 有限要素法である [2]. 本手法では, 対象物体を, 細かな要素の集合体として近似し, その特性を連立方程式を用いて表現することによって, 全体の挙動の予測を行う. しかし, 本研究対象のような大変形を伴うシミュレーションでは, 膨大な計算時間を必要とする.

これに対し, 対象物体を均一な質点の集合として構成し, 質点間に作用する力をバネとダンパによって表現した質点



Fig. 1: Inflatable robot arm

バネモデルがある. 本モデルは, 計算量が比較的少なく, また大変形を伴う柔軟物体との相性が良い [3]. 本研究では, 質点バネモデルを用いた高速なインフレータブル構造の膨張数値シミュレーションの開発を目指す.

3. 計算モデル

前節で示したモデルの挙動を決める数理モデルを以下に示す. 各バッグ毎の時刻 t における, 質点 N_i の座標位置を $\mathbf{x}_i(t)$, 速度を $\mathbf{v}_i(t)$, 加速度を $\mathbf{a}_i(t)$ とし, バッグの内圧は $P(t)$ とおく. 時刻 t における, 質点 N_i と質点 N_j を結ぶ辺 (N_i, N_j) の長さを $l_{ij}(t)$ とおき, 正の定数 c_0 を用いて質点 N_i に働く弾性力 $\mathbf{F}_i(t)$ を以下のように定義する.

$$l_{ij}(t) = |\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)| \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_{si}(t) = - \sum_{N_j \in V_i} c_0 (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)) \frac{l_{ij}(t) - l_{ij}(0)}{l_{ij}(t)} \quad (2)$$

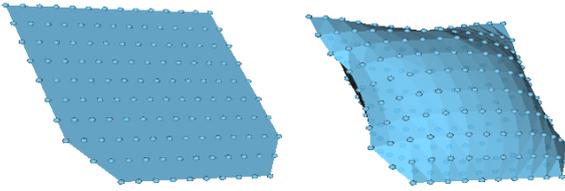


Fig. 2: Actuator part

ただし、 V_i は質点 N_i が接続している別の質点の集合とする。また、ダンパモデルを以下のように定義する。

$$\mathbf{F}_{di}(t) = - \sum_{N_j \in V_i} c_1 (\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_j(t)) \quad (3)$$

空気圧による質点 N_i に加わる膨張力 $\mathbf{F}_{pi}(t)$ は、質点 N_i の含まれるメッシュ m_i の面積 S_{m_i} とその法線ベクトル \mathbf{n}_{m_i} を用いて以下のように定義する。

$$\mathbf{F}_{pi}(t) = \sum_{m_i \in M_i} \frac{1}{3} P(t) S_{m_i}(t) \mathbf{n}_{m_i}(t) \quad (4)$$

ただし、 M_i は質点 N_i を含むメッシュの集合を示す。

これらの計算に加え、本シミュレーションではバッグ間の接触が起こるため、接触力計算を行う必要がある。

接触の起きた2つのバッグをそれぞれバッグ1、バッグ2とし、バッグ1の質点について考える。バッグ間に接触の起きた場合に、バッグ1のめり込み質点 N_i にバッグ2から加えられる力を以下のように計算する。これから、めり込み質点 N_i に加えられる力 \mathbf{F}_{2i} を定数 c_4 を用いて以下のように定義する。

$$\mathbf{F}_{ci}(t) = \sum_{k=1}^{c_2} c_3 d_k(t)^2 \mathbf{n}_{m'_k}(t) \quad (5)$$

ただし、 c_2 は、質点 N_i 近傍のバッグ2のメッシュの数であり、任意に設定できる。また d_k は、各メッシュと質点間の距離を示す。

最終的に質点 N_i に加えられる力 $\mathbf{F}_i(t)$ は

$$\mathbf{F}_i(t) = \mathbf{F}_{si}(t) + \mathbf{F}_{di}(t) + \mathbf{F}_{pi}(t) + \mathbf{F}_{ci}(t) \quad (6)$$

となる。

4. 数値シミュレーション

上述したモデルを用いてシミュレーションを行う。シミュレーション上のアクチュエータは、Fig. 2に示すバッグを複数個用いて表現される。これは、実機のアクチュエータ部を再現したものである。また、リンクはFig. 3に示すバッグにより表現される。Fig. 2のバッグを3個組み合わせたものを1つのアクチュエータとし、Fig. 4に示す状態を初期状態とする。これらのバッグをすべて同時

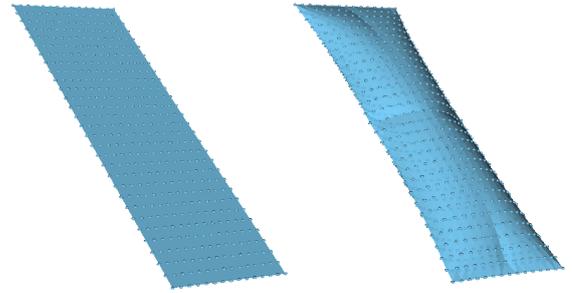


Fig. 3: Link part

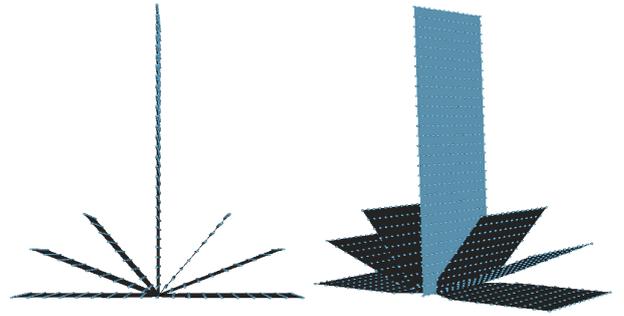


Fig. 4: Initial state of the experiment

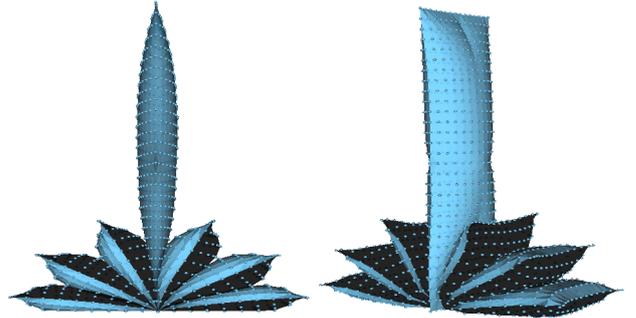


Fig. 5: Result of the experiment

に膨張させ、システム全体の運動が収束するまでの様子を確認した。このとき、アクチュエータ部の内圧は10kPa、リンク部の内圧は6kPaとした。運動が収束した際のシステム全体の様子をFig. 5に示す。本シミュレーション結果より、左右の拮抗するアクチュエータによってリンクが直立する様子が確認でき、いずれのバッグも潰れたり、発散することなく運動が収束することが確認できた。

5. 結言

本稿では、インフレーターブルロボットアームの挙動の再現が可能な数値シミュレータを開発した。また、シミュレーション結果により、時間経過による運動の収束を確認した。今後は、実機と同条件でシミュレーションを行い、アクチュエータのトルク特性などシステムの動特性や実機に対する近似精度の確認及び向上を図る。

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] H. Kim, Y. Tanaka, A. Kawamura, S. Kawamura, Y. Nishioka, “Development of an Inflatable Robotic Arm System Controlled by a Joystick”, *Proc. of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2015)*, pp.767–772, 2015.
- [2] G. Bianchi, B. Solenthaler, G. Székely, M. Harders, “Simultaneous Topology and Stiffness Identification for Mass-Spring Models based on FEM Reference Deformations”, *Proc. 7th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2004*, pp.293–301, 2004.
- [3] W. Mollemans, F. Schutyser, J. Cleynenbreugel, P. Suentens, “Tetrahedral Mass Spring Model of Fast Soft Tissue Deformation”, *Proc. of the 2003 International conference on Surgery Simulation and Soft Tissue Modeling*, pp.145–154, 2003.