

報告日 2016年(平成28年) 6月6日

報告者 香川大学 工学部 講師

佐々木 大輔

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名 (日本語)

空気式パワーアシストロボットに使用する
携帯型空気圧供給システムのエネルギー最適化に関する研究

(2) 研究者氏名

佐々木 大輔 香川大学 講師

(3) 研究概要 (日本文)

近年、種々のウェアラブル型ロボットの駆動に利用されている人工筋には携帯性に優れた空気圧源が必要である。報告者らはこれまで携帯型小型空気圧供給システムに関する研究開発を行ってきた。本研究では、ゴム弾性理論に基づきタンク容積の力学モデルを構築した。また、そのモデルに基づき空気圧エネルギー蓄積特性のシミュレーションを行った。シリコーンゴムを成型した種々の寸法の中空ゴム球殻を製作し構築したモデルの検証を行った。

(4) キーワード

パワーアシストロボット, 空気圧ゴム人工筋, 空圧源, 省エネルギー

(英文)

(1) Research title

Energy Optimization of Portable Air Supply System
for Pneumatic Power Assist Robot

(2) Name of researcher with title of position

Daisuke Sasaki, Lecturer, Kagawa University

(3) Summary

Air source for a wearable pneumatic device is required to have high portability in order to install it in a wearable device. The portable air supply system for wearable device had been developed in previous works. In this project, the model for variable volume tank is proposed to verify deformation and energy characteristics before manufacturing it. Mooney-Rivlin function is introduced in the proposed model to calculate the deformation of rubber material. The energy characteristic can be simulated based on this calculated deformation characteristic.

(4) Key Words

Wearable robot, Pneumatic artificial rubber muscle, Air source, Energy saving

2. 本研究の意義・特色

報告者らは、これまで空気式パワーアシストロボットに使用する携帯型小型空気圧供給システムに関する研究開発を行ってきた。開発したシステムは、駆動対象へ圧縮空気を供給する供給機構に加え駆動対象から排気される圧縮空気の回収、再圧縮を行う回生機構から成っている。供給、回収機構側それぞれに圧力によって容積の変化するゴム製の容積可変タンクを取り付けている。圧力緩和特性を持つ容積可変タンクを供給、回生機構それぞれに使用することによって、コンプレッサの消費エネルギーを約 30%低減できることを確認している。

しかし、本システムにより消費エネルギーを削減するためには、駆動対象の要求圧力、コンプレッサの負荷の観点から定める回収圧力において圧力変化緩和特性を有する容積可変タンクを使用しなくてはならない。そこで、本研究課題では、容積可変タンクの空気圧エネルギー特性のモデル化手法を構築した。また、そのモデルに基づき空気圧エネルギー蓄積特性のシミュレーションを行った。シリコーンゴムを成型した種々の寸法の中空ゴム球殻を製作し構築したモデルの検証を行った。モデルに基づくエネルギー蓄積特性の最適化により、種々の駆動対象に対応可能となるため、本システムの利用範囲の拡大が期待できる。

3. 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

本研究において設計する容積可変タンクは、ゴムなどの弾性体で構成される中空球殻として取り扱う。理想気体と仮定した圧縮空気が流入するときの球殻内の状態変化を考えると状態方程式に基づき、流入する体積流量 Q_{vb} [m³/s] を球殻の内径 r_i により次式で近似する。

$$Q_{vb} = \frac{V_{b0}}{\kappa \rho R T_{b0}} \frac{dP_b}{dt} + \frac{P_{b0} A_{b0}}{\rho R T_{b0}} \frac{dr_i}{dt} \quad (1)$$

ここで、式中的変数を表 1 に示す。また、平衡状態における圧力、体積、絶対温度をそれぞれ P_{b0} , V_{b0} , T_{b0} とおく。弾性体で構成される中空球殻における圧力 P_b と内径 r_i の関係が明らかではない。ゴム弾性理論のひとつである Mooney-Rivlin ひずみエネルギー関数、厚肉球殻における応力のつりあい式を用いると、ゲージ圧での球殻の内圧 P_b は以

表 1 主要変数

P_b	球殻の内圧	[Pa]
A_b	球殻内面の表面積	[m ²]
R	ガス定数	288.69 [J/kg·K]
ρ	密度	1.1838 [kg/m ³]
κ	比熱比	1.403
T_b	球殻内の絶対温度	298.15[K]

下となる。 C_1 および C_2 は Mooney-Rivlin ひずみエネルギー関数使用時の物性値に相当する定数である。

$$P_b = C_1 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{r_{o0}}{\sqrt[3]{r_i^3 + (r_{o0}^3 - r_{i0}^3)}} \right)^4 - \frac{1}{2} \left(\frac{r_{i0}}{r_i} \right)^4 + 2 \left(\frac{r_{o0}}{\sqrt[3]{r_i^3 + (r_{o0}^3 - r_{i0}^3)}} \right) - 2 \left(\frac{r_{i0}}{r_i} \right) \right\} \\ + C_2 \left\{ \left(\frac{r_{o0}}{\sqrt[3]{r_i^3 + (r_{o0}^3 - r_{i0}^3)}} \right)^2 - \left(\frac{r_{i0}}{r_i} \right)^2 + 2 \left(\frac{\sqrt[3]{r_i^3 + (r_{o0}^3 - r_{i0}^3)}}{r_{o0}} \right) - 2 \left(\frac{r_i}{r_{i0}} \right) \right\} \quad (2)$$

体積流量は、(1)、(2)式ならびにゴム材料の非圧縮特性より次式となる。 r_o は球殻の外径を表している、

$$Q_{vb} = \frac{V_{b0} f(r_o) (r_o^3 - (r_{o0}^3 - r_{i0}^3))^{\frac{2}{3}} + \kappa P_{b0} A_{b0} r_o^2}{\kappa \rho R T_{b0} (r_o^3 - (r_{o0}^3 - r_{i0}^3))^{\frac{2}{3}}} \frac{dr_o}{dt} = k_{vr}(r_o) \frac{dr_o}{dt} \quad (3)$$

$$f(r_o) = \frac{dP_b}{dr_o} = 2C_1 \left\{ -\frac{r_{o0}^4}{r_o^5} + \frac{r_{i0}^4 r_o^2}{(r_o^3 - (r_{o0}^3 - r_{i0}^3))^{\frac{7}{3}}} - \frac{r_{o0}}{r_o^2} + \frac{r_{i0} r_o^2}{(r_o^3 - (r_{o0}^3 - r_{i0}^3))^{\frac{4}{3}}} \right\} \\ + 2C_2 \left\{ -\frac{r_{o0}^2}{r_o^3} + \frac{r_{i0}^2 r_o^2}{(r_o^3 - (r_{o0}^3 - r_{i0}^3))^{\frac{5}{3}}} - \frac{1}{r_{o0}} + \frac{r_o^2}{r_{i0} (r_o^3 - (r_{o0}^3 - r_{i0}^3))^{\frac{2}{3}}} \right\} \quad (4)$$

したがって、流入する体積流量 Q_{vb} が一定($=q_{vb}$)の状態において、現時刻の外径を $r_o(t)$ とし既知とすると、微小時間 Δt 経過後の外径 $r_o(t + \Delta t)$ は(3)式より

$$r_o(t + \Delta t) = \frac{q_{vb}}{k_{vb}(r_{b0})} \Delta t + r_o(t) \quad (5)$$

となる。(5)式で得られた外径を(2)式に代入することで Δt 経過後の内圧 P_b を得ることができる。中空球殻のエネルギー特性を評価するためにエアパワーから求める空気圧エネルギーについて述べる。エアパワー W_{ap} は圧力と流量から次式によって求められる。

$$W_{ap} = P_a Q_{vb} \ln \frac{P_{abs}}{P_a} \quad (6)$$

P_{abs} は通過した圧縮空気の絶対圧力、 P_a は大気圧である。本研究では、制御 PC 上において次式からエアパワーから空気圧エネルギー E_{air} を毎サンプリングごとに計算する。

$$E_{air}[k] = t_s \sum_{i=1}^k W_{ap}[i] \quad (7)$$

t_s はサンプリングタイム(1[ms])、 k は測定対象へ圧縮空気を流入開始した時点をもととした場合における現時点のサンプリング数である。エネルギー特性のシミュレーションは、まず大気圧を(6)式中の P_{abs} として計算する。次に、流入する体積流量が 0.6[l/min] で一定の状態における 1[ms]経過後の外径を、(5)式中の $r_o(t)$ を無加圧状態の球殻の外径

として計算する。(5)式から得られた外径 r_o を使用し、1[ms] 経過後の球殻の内圧を(2)式から求め、(6)式中の P_{abs} に代入することでエアパワーを求める。その後、(5)式中の $r_o(t)$ に先の外径 r_o を代入し次の外径を求める。以上の計算を繰り返し、エアパワーを(7)式に基づき積算することでシミュレーションを行う。(5)式において、体積流量は一定としているため、実験においても体積流量が0.6[l/min]となるように流量制御を行った。内、外径50, 63[mm] および30, 42[mm] の中空球殻のエネルギー特性の測定結果ならびに計算値を図1, 2に示す。図の縦軸はタンク内圧、横軸は蓄積される空気圧エネルギーの値である。30, 50[kPa] 近傍で緩和されるよう設計した計算値と比較すると、個体差はあるが提案手法がエネルギー特性のシミュレーションに有効であることがわかった。

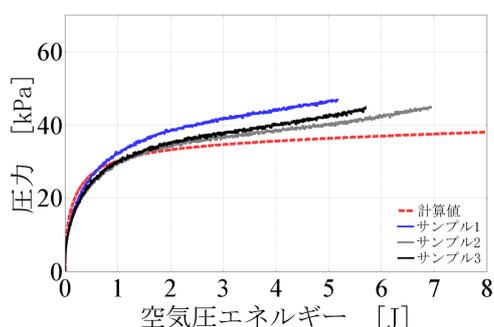


図1 空気圧エネルギー特性
(内径 50[mm], 外径 63[mm])

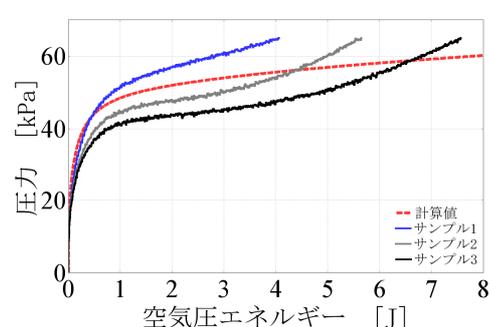


図2 空気圧エネルギー特性
(内径 30[mm], 外径 42[mm])

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

佐々木 大輔 香川大学 講師

5. 研究実施時期

2015年(平成27年) 4月 1日から2016年(平成28年) 3月31日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

佐々木大輔, 萱原多久実, 高岩昌弘: “小型空気圧供給システムのための容積可変タンク
のモデル化” 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2015

7. 内外における関連研究の状況

携帯空圧源に関する研究は数多く行われているが、タンクという周辺機器に着目し性能向上に取り組む研究は少ない。

8. 今後の発展に対する希望

エネルギー蓄積特性に関する知見は得られたものの、蓄積時のエネルギー損失のモデル化が今後の課題である。