空気圧シリコン外殻型発泡ゴムアクチュエータの開発*

早川 恭弘^{*1}, 森下 賢祐^{*2}
相地 美奈^{*2}, 津田 竜二^{*2}

Development of a Pneumatic Silicon Outer Fence Mold Actuator

Yasuhiro HAYAKAWA^{*3}, Kensuke MORISHITA,
Mina AICHI and Ryuuji THUDA^{*3} Nara National College of Technology,
22 Yata-cho, Yamato-Koriyama, Nara, 639-1080 Japan

In order to develop a human friendly support machine for elderly people, improvement of the interface between human and mechanical system has been becoming very important. Especially, soft mechanical interfaces are strongly required in motion assist machines for handicapped people or elderly people. Therefore, an actuator that has both active elements and passive elements attracts attention to design the soft mechanical interface. To realize these elements, we propose a new type of pneumatic soft actuator that a sponge rubber is covered with silicon rubber (Silicon Outer Fence Mold Actuator). In this paper, the structure of the actuator is explained. Furthermore, it is clarified that the characteristics of the actuator are influenced by the number of sponge layer and sponge material. Moreover, we clear position control performance of the actuator. That is to say, the effectiveness of the proposed actuator is cleared through some experimental results.

Key Words: Pneumatic Actuator, Silicon Rubber, Sponge Rubber, Soft Mechanism, Position Control

1. 緒 論

近年, 日本では少子高齢化社会となり高齢者が高齢者を介護する老老介護が増加している。そこで, 従来の人的介護では高齢介護者の負担増加と人手不足がますます深刻化することが考えられ, 高齢者の介護をサポートするパワーアシスト装具或いは高齢被介護者の自立を目的とした自立支援機器の開発が望まれている。これらの介護機器は人間との接触を伴うことから, 使用する人間に対し安全性が要求される。安全性を確保するための方法としては, ハードである機械的側面(物理的)とソフトである知的(情動的), 心理的(情緒的)側面に分類される。しかしながら, トラブル発生時における被害を最小限に抑えるためには, 機械的側面であるハードによる保障が重要であると思われる。すなわち, 機器のコントロールプログラムが暴走し, 操作に支障をきたしたり, 誤動作を生じた場合においても, ハード面において安全性が確保されていれば, 最小限の被害に抑えることができる。

そこで, ハード面における安全性を確保するためのアクチュエータとして, 空気圧を用いた要素の開発が行われている。例えば, 山本らは蛇腹形状の空気圧アクチュエータをパワーアシスト装具に応用している^①。また, ウエアラブルシステムとして, 塚越らは Wound Tube Actuator を提案している^②。さらに, 満田らは粒子内蔵型機械拘束要素を用いて粘性を付加している^③。これらの要素は, 小型・軽量化が容易であり, 使用者の動きに合わせて柔軟に駆動することができる。

しかしながら, 小型・軽量化を図るためにゴム系の空気圧アクチュエータを福祉介護機器に応用する場合, 破裂などによる危険性が問題となると考えられる。すなわち, 破裂により急激な形状変形が生じるることにより, 使用者に対し精神的肉体的負担を与えることとなることから, 形状変形を抑制する構造が必要になる。

そこで, ゴム系空気圧アクチュエータの問題点を解決するための一つの方法として, 発泡ゴムにシリコンをコーティングしたシリコン外殻型発泡ゴムアクチュエータ^{④⑤}を提案する。本論文では, 第2章において, シリコン外殻型発泡ゴムアクチュエータの構造を説明する。また, 第3章においては, 発泡ゴム積層数の違いによる基礎特性を明らかにする。さらに, 第4章でアクチュエータの位置制御性能を示す。

* 原稿受付 2003 年 4 月 1 日。

^{*1} 正員, 奈良工業高等専門学校 (〒639-1080 大和郡山市矢田町 22)。^{*2} 奈良工業高等専門学校機械制御工学専攻。
E-mail: hayakawa@ctrl.nara-k.ac.jp

2. シリコン外殻型発泡ゴムアクチュエータ⁽¹⁾⁽²⁾

シリコン外殻型発泡ゴムアクチュエータ(Silicon Outer Fence Mold Actuator: 以後 SOFMA)は、図1に示すように発泡ゴムをシリコンゴムでコーティングすることにより、空気を発泡ゴム多孔部に充填することが可能な構造である。発泡ゴム多孔部体積は発泡ゴムの密度に関係していることから、密度が大きくなるほど多孔部が減少し発泡ゴムの固有剛性が増大する。すなわち、無加圧時におけるアクチュエータの弾力性は、発泡ゴムの密度に左右される。さらに、発泡ゴム内に空気を充填することによりアクチュエータの剛性を調整できる。また、アクチュエータ破裂時における急激な形状変形に対する衝撃力をアクチュエータ内部の発泡ゴムの弾性力により吸収することができると考えられる。このことから、SOFMAを介護機器などのサポータ部に応用する場合、安全性の観点から有効であると考えられる。

Fig.1 Schematic View of Pneumatic Foaming Rubber Actuator

SOFMA は、アクチュエータ内部における発泡ゴムの積層数により、以下のように分類される。すなわち、一層型(図1)と二層型(図2)である。ここで、(b-1)は無加圧時、(b-2)は加圧時の状態を示す。図1及び図2から明らかなように、一層型は加圧時における形状変形が殆どないことが分かる。これは、シリコンが発泡ゴムの外側に僅かに浸透していることから、シリコンの変形が発泡ゴムにより拘束されることによるものである。それに対し、発泡ゴムが二層型の場合、空気は

発泡ゴムの多孔部及び積層間にも充填されることにより、膨張変形する。

Fig.2 Schematic View of Pneumatic Foaming Rubber Actuator

Fig.3 Experimental Setup

3. 基礎特性

3.1 実験装置

SOFMA の基礎特性を明らかにするため、図3に示す装置を用いる。すなわち、アクチュエータ内の圧力は、半導体圧力変換器により測定し、変位量はレーザー変位計を使用する。また、発泡ゴムチャンバ内圧力調整には、電空流量比例弁を用いている。

本研究で使用する一層型及び二層型アクチュエータの形状寸法は、(79×44×25mm)である。また、アクチュエータ内発泡ゴムの材質は ECZ(密度: $16 \pm 1.5 \text{ kg/m}^3$) 或いは EMM(密度: $52 \pm 3 \text{ kg/m}^3$) を使用する。

3.2 剛性特性

一層型或いは二層型構造を有する SOFMA の発泡ゴム部に圧力を充填する場合における剛性特性について

明らかにする。そのため、アクチュエータ内に一定の圧力を印加・密閉し外力をアクチュエータ表面に作用させたときのアクチュエータ変位量を測定する。ここで、発泡ゴム材質は、ECZを使用している。

発泡ゴムが一層型および二層型構造を有するアクチュエータに関する実験結果を図4に示す。実験結果より、一層型構造の場合、単層構造による形状変化の抑制からアクチュエータの内圧が高いほど剛性が増大することがわかる。それに対し、二層型構造の場合(図4(b))、内圧増大により形状が膨張するため内圧を増加させても剛性変化は見られない。

以上の結果より、一層型は剛性型であり、腰痛ベルトやサポータ等の福祉要素に応用できると考えられる。それに対し、二層型は膨張型となり、床ずれ防止用マット等への応用が考えられる。

(b) Two Layers Type

(a) One Layer Type

(x: Pressure, y: Force)

Fig.4 Experimental Results on Stiffness of Actuator

3.3 ヒステリシス

発泡ゴムの外側をシリコンゴムでコーティングされている二層型 SOFMA のアクチュエータ内圧と変位量に関するヒステリシスを明らかにする。発泡ゴムの材質は ECZ および EMM を用い、内圧を 1[kPa]間隔で 0[kPa]から 12[kPa]、そして、0[kPa]と変化させた時の変位量を測定する。実験結果を図5に示す。ここで、図中(C), (D)は加圧時及び減圧時の特性を示す。

実験結果より、ヒステリシスの最大値は、ECZ が 2.66 mm, EMM が 1.22 mm, 加圧前と減圧後の無加圧状態におけるヒステリシスは、ECZ が 2.66 mm, EMM の時が 0.32 mm となっている。すなわち、ECZ の場合は、無加圧状態でのヒステリシスが最大となり、EMM のヒステリシスは逆に小さい結果となった。これは、密度の大きい EMM は変形前の形状に戻ろうとするバネ力が強いためであると考えられる。

Fig.5 Experimental Results on Hysteresis

(b) Sponge Material: EMM

(a) Sponge Material: ECZ

Fig.6 Experimental Results on Step Response

3.4 加圧時挙動

二層型 SOFMA 内圧力を圧力レギュレータにより 10 kPa まで加圧した場合における発泡ゴムの材質の違いによる応答の変化を図6に示す。ここで、SOFMA の形状寸法は 3.1 節で示したサイズと同じである。図6(a)は、発泡ゴム ECZ を用いた場合、図6(b)は EMM を

使用した時の内圧及び変位量である。実験結果より、密度の低い ECZ の変位量は約 21.7 mm、密度の高い EMM は約 12.1 mm 変位している。すなわち、発泡ゴムの密度が小さくなるほど、バネ力が小さくなり、変位量が増大することがわかる。

Fig.7 Experimental Results on Frequency Response

Fig.8 Bode Diagram of [x/p]

3.5 周波数応答

SOFMA の周波数特性を明らかにするために、発泡ゴムチャンバ内圧力を正弦波状に変化させた時の変位量を測定する。実験では、内圧変化に対し膨張する二層型構造のアクチュエータを使用する。また、発泡ゴ

ムは密度の異なる ECZ と EMM を用いる。周波数を 0.25~5 Hz の範囲で変化させた時の実験結果の一例を図 7 に示す。但し、図 7 は、 $f=0.25\text{Hz}$ の時の結果である。また、発泡ゴム内圧力変動に対するアクチュエータの変位量の比 [変位/圧力] に関するボード線図を図 8 に示す。ここで、圧力波形は、サンプリング時間 (10ms) に対し一定の間隔ごとのデータについて示している。また、変位波形は、SOFMA 単体が拮抗構造でないことから、SOFMA 内部を加圧し膨張させる場合と減圧し収縮させる場合で応答が異なる結果となる。さらに、図 8 に示す Bode 線図は膨張させる側について示している。

発泡ゴムの材質が ECZ の場合、ゲインの減衰は EMM よりも大きくなっていることが分かる。また、低周波域 (0.1Hz 以下) では、ECZ の方が圧力変化に対する変位量は EMM よりも増大する結果となることが分かる。さらに、発泡ゴムの密度が大きくなるほどバネ力は増大し、固有振動数が増加することが明らかとなった。また、位相に関しては 1Hz 以下において材質による差が殆どないことがわかる。

今後、SOFMA のモデル化を行い、固有振動数の比較を含めた周波数特性の理論的な解析を行っていく。

3.6 破裂時挙動

ゴム系アクチュエータを使用する場合、内圧レベルにより破裂などの問題が生じる危険性がある。特に、人間と接触する機器に応用する場合、破裂に伴うアクチュエータの急激な形状変形が心理的・肉体的負担に与えると考えられる。そこで、二層型アクチュエータに空気を充填加圧し破裂させた時の応答について検討する。また、参考までに一層型アクチュエータについても結果を示し特性の比較を行う。

破裂時における挙動を調べるために、レーザ変位計を用いてアクチュエータが破裂するまで連続的に内圧を上昇させた時の変位量を測定する。

アクチュエータ内の発泡ゴムの材質が、ECZ (密度 $16 \pm 1.5\text{ kg/m}^3$)、EMM (密度 $52 \pm 3\text{ kg/m}^3$) の時の破裂の違いを示す。ここで、二層型アクチュエータの内圧に対する破裂挙動と共に、一層型についての挙動も明らかにする。まず、一層型における実験結果を図 9 に示す。また、図 9 の ECZ、EMM に関して、破裂までの圧力と変位の関係を示したものを図 10 に示す。図 9(a)において、密度の低い ECZ を使用した SOFMA は、測定開始から約 102 秒後に破裂し、圧力が急激に減少している。それに対し、密度の高い EMM を用いた SOFMA では、測定開始から約 11.5 秒で破裂している

が圧力、変位とも徐々に減少している。また、図 10 の結果より、一層型の場合、初期加圧状態において、圧力上昇に伴う変位の変化量は僅かに増大することがわかる。最大耐圧力は、ECZ は約 44 kPa、EMM は約 54 kPa となっている。このことから、発泡ゴムの密度が高いほどアクチュエータが破裂しにくくなることが明らかとなった。破裂のパターンはシリコン肉厚の均一さ及び発泡ゴム多孔部の変形状態などに影響されることから、今後詳細に検討する必要がある。

次に、二層型アクチュエータの場合における実験結果を図 11 及び図 12 に示す。ここで、図 11 は、各密度の発泡ゴムを使用した時の破裂時における圧力と変位に関する応答波形である。また、図 12 は圧力変動に対する変位の関係を示している。二層型構造の場合、発泡ゴム部の加圧により形状変形が生じ、ECZ では約 15.4 秒後に、密度の高い EMM は約 12.2 秒後に破裂が起こっている。また、EMM の場合、破裂後の挙動は、一層型と同様に圧力変動が抑制されていることがわかる。この理由の一つとしては、発泡ゴム多孔部が破裂時絞りの役目を果たしていることによるものと考えられる。また、破裂箇所による影響もあることから、密度の違いと破裂状態に関する問題について、今後詳細に検討しなければならない。次に、圧力変化に対する変位変化の傾向は、図 12 の結果より、低圧域での変位増大率が一層型と比較して大きいことが分かる。

Fig.9 Experimental Result of SOFMA (One Layer Type)

Fig.10 Relation Between Pressure and Displacement

Fig.11 Experimental Result of SOFMA (Two layers Type)

Fig.12 Relation Between Pressure and Displacement

図9及び図11の波形を比較すると破裂時の挙動が大きく異なっている。この理由の一つとして、SOFMAは発泡ゴムの外側にシリコンがしみ込んでいることから、一層型の場合、シリコンの動きを発泡ゴムが拘束していることになり、破裂時の挙動が発泡ゴムの材質により大きく異なる。それに対し、二層型の

場合は、発泡ゴム多孔部への空気流入による影響よりも、積層間での膨張による影響が大きくなることから、破裂時の挙動が同じ傾向になるものと考えられる。

(c) Control Performance for One Minute

(b) EMM ($K_P=1.1, K_I=1.0$)

(a) ECZ ($K_P=1.2, K_I=1.0$)

Fig.13 Position Control Performance

4. 位置制御性能

SOFMA を床ずれ防止マットや姿勢調整サポートなどに応用する場合、アクチュエータにより使用者を一定長さ持ち上げることが必要となる。そこで、本章では、SOFMA 単体での位置制御性能を明らかにする。

SOFMA の位置制御を行うために、階層フィードバック制御を適用する⁶⁾。階層フィードバック制御は、

位置誤差から目標圧力 P_r を設定する(1)式と、圧力制御式の(2)式により構成される。

$$P_r = K_P(X_r - X) + K_I \int (X_r - X) dt \quad (1)$$

ここで、 X は現在変位、 X_r は目標変位、 K_P は比例ゲイン、 K_I は積分ゲインである。

また、比例弁に印加する電圧 V は次式で表される。

$$V = V_0 + K(P_r - P) \quad (2)$$

ただし、 P は現在圧力、 V_0 は比例弁の中立点電圧、 K は比例ゲインである。

目標位置を 10mm とした時の実験結果の一例を図 13 に示す。ここで、(1),(2)式におけるゲインは最適値に設定している。(a)は、発泡ゴムに ECZ を用いた時の結果であり、(b)は EMM を用いた時の結果である。また、(a)と(b)において 1 秒までの応答波形を拡大した結果を(c)に示す。

実験結果より、密度の低い ECZ を使用した SOFMA の場合、定常状態に達するまでの時間は、約 0.90 秒であり、密度の高い EMM の時は、約 0.47 秒となっていることがわかる。さらに、定常偏差は、ECZ 及び EMM において約 0.04 mm となっている。以上のことから、SOFMA に使用する発泡ゴムの密度の違いが安定時間に大きく影響することが分かった。

5. 結言

本論文では、高齢者の自立をサポートする機器の要素として、シリコン外殻型発泡ゴムアクチュエータを提案した。そして、試作したアクチュエータの基礎特性を実験的に明らかにした。その結果、発泡ゴムの材質により特性が異なることを示した。今後は、理論的な解析を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 C(2)(No.14550252)により行われている。また、実験機器の一部を提供していただいた SMC 株式会社に感謝致します。

参考文献

- (1) 吉満, 山本他: “パワーアシストスーツ用ロータリアクチュエータの開発”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(2002)

- (2)塚越, 鎌田, 北川: “チューブ形アクチュエータを用いた動作支援に関する提案”, 流体計測制御シンポジウム(2002)
- (3)満田, 川村: “可変粘弾性要素を用いた柔軟ロボットアームの開発”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(2002)
- (4)早川, 森, 津田, 相地, 濱崎他: “人間親和性を有するサポータを開発するための生体計測”, システムインテグレーション部門学術講演論文集(2001)
- (5)早川, 森, 津田, 相地, 濱崎他: “シリコン外殻型発泡ゴムアクチュエータに関する基礎研究”, 春季フルードパワーシステム講演会 (2002)
- (6)川村, 宮田他: “空気圧駆動システムのための階層フィードバック制御則”, 計測自動制御学会論文集, 26-2, 204/210 (1990)
-