湾曲型空気圧ソフトアクチュエータの開発と応用*

篠原 隆^{*1}, 堂田 周治郎^{*2}, 松下 尚史^{*2}

Development of a Pneumatic Bending Soft-Actuator and its Application

Takashi SHINOHARA, Shujiro DOHTA^{*3} and Hisashi MATSUSHITA^{**}Department of Intelligent Mechanical Engineering, Okayama University of Science,
1-1 Ridai-cho, Okayama-shi, Okayama, 700-0005 Japan

Recently, we need a human friendly robot which can provide human several services. When such a human friendly robot interacts directly with human, it requires flexibility, safety and so on. In order to realize such a flexibility, there is a way to utilize a flexible material and air compressibility. Therefore, it is considered that the pneumatic soft actuator with passive compliance is useful. The purpose of our study is to develop the pneumatic soft actuator in order to realize the robot with flexibility. We have developed a pneumatic bending soft actuator which is made of silicone rubber. We call it soft gripper. The soft gripper can be applied to a finger of robot hand, artificial hand and so on. In this paper, first, the structure, operation, principle and fundamental characteristics of soft gripper are shown. Next, the proposed analytical model of soft gripper is described and it is confirmed that the proposed model is useful for designing the gripper by comparing the calculated results with the experimental results. Finally, as an application of the soft actuator, a rubber robot hand with grippers is introduced.

Key Words: Soft Actuator, Soft Gripper, Rubber Finger, Pneumatic Robot Hand, Human Friendly Robot

1. 緒 言

近年, 日本の高齢化社会に伴い, 医療・福祉の分野では人の支援・介護が行えるロボットやロボットハンドの開発導入が望まれている. このような人間共存型ロボット^①は, 人間と直接触れ合う環境において使用されるので, 柔軟性や安全性といった人間親和性が要求される^②. 柔らかいロボットの実現には, 硬いメカニズムに各種センサを取り付けてコンプライアンス制御^③などを行う方法がある. 一方, 連続的な変形が可能であることやシステムが簡単になることから柔らかい材料を用いる方法^④がある. これには, 繊維強化ゴム製のフレキシブルマイクロアクチュエータ (FMA) ^⑤, マッキベン型ゴム人工筋, シリコンゴムボールを関節部に設置した揺動型アクチュエータなど, 駆動源が空気圧であり受動的柔軟性を備えた空気圧ソフトアクチュエータ^{⑥-⑧}がある.

著者らは, ロボットハンドの指や義手などに応用できる構造が簡単な湾曲型空気圧ソフトアクチュエータ

を開発した. これをソフトグリッパと呼ぶことにする. 本論文では, ソフトグリッパの構造, 特性, そして解析モデルについて述べる. 本論文の構成は以下の通りである. 第2章でソフトグリッパの構造と動作原理, 基本特性について述べる. 第3章で用途別グリッパについて述べ, 第4章でソフトグリッパの設計に役立てるための解析モデルを提案し, 実験結果との比較を行いモデルの妥当性を示す. 第5章でソフトグリッパの応用例として, 試作した人間型五指ハンドについて述べ, 最後に第6章で本論文の結論を述べる.

2. 基本ソフトグリッパ

2.1 構造と動作原理 基本的なソフトグリッパの構造を図1に示す. ソフトグリッパはシリコンゴム (ダウコーニング社製: シラスコン RTV-4168) 製であり, 空気圧により駆動される. 寸法は長さ 70mm, 幅 12mm の中空薄針型になっており, 圧力室断面形状は円形になっている. グリッパ内圧力室内壁には中心軸に対して垂直に純綿水糸 (たくみ本舗社製: 綿 100%, 直径 0.8mm, 測量やタコあげ用) で 3mm 間隔の繊維拘束が施されている. 純綿水糸を用いる理由は, グリッパ形成時にシリコンゴムをよく

* 原稿受付 2005 年 1 月 19 日.

^{*1} 正員, 岡山理科大学大学院工学研究科 (〒700-0005 岡山市理大町 1-1).^{*2} 正員, 岡山理科大学工学部.

E-mail: dohta@are.ous.ac.jp

Fig. 1 Structure of soft gripper

含み、硬化後にズレや食い込みが少ないためである。また、グリップ湾曲部内側には長さ 70mm、幅 7mm、厚さ 0.5mm の薄いプラスチックシートが埋め込まれており、シリコンゴムとズレが生じないように直径 3mm の穴を複数個設けるとともに、プラスチックシートの表面をサンドペーパーで粗くする処理を施している。このプラスチックシートは、グリップの曲がりやすさに影響を与えないように十分に薄く、伸びが発生しないものを選ばれている。動作原理は以下の通りである。グリップの圧力室を加圧すると発生する膨張力は、繊維拘束により半径方向の伸びは抑えられ、軸方向の伸びになる。また、グリップ下側の軸方向の繊維拘束と埋め込まれたプラスチックシートにより内側の伸びは抑えられるため、グリップは内側に湾曲する。さらに、圧力室を大気へ開放すると、ゴムの弾性力によりグリップは元の形状に戻る。このソフトグリップは三つの圧力室を有する FMA と原理的にはよく似ているが圧力室が一つである点や片側軸方向を拘束している点異なる。

2.2 基本特性 繊維拘束の間隔が 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm の五種類のグリップを製作し、繊維拘束の間隔による発生力への影響を調べた。図 2 にソフトグリップの供給圧力と発生力の関係を示す。こ

Fig. 2 Relation between supply pressure and generated force

れは、グリップ根元を水平に固定し、デジタルフォースゲージに指先が水平に当たるように設置した。そして、グリップの圧力室を加圧した際、グリップ指先がデジタルフォースゲージを押し付ける力を発生力として測定した。図より、各グリップの発生力はほぼ直線的に増加していることがわかる。また、繊維拘束間隔の影響を見ると間隔 5mm のグリップが最も発生力が高いことがわかる。図 3 に供給圧力と湾曲変位の関係を示す。ここで湾曲変位とは、グリップ外側（図 1 では上側）表面に沿う変位量である。測定はグリップをデジタルカメラで撮影しパソコンに取り込み変位量を測定した。図を見ると、供給圧力と湾曲変位の関係が、拘束間隔 2mm, 3mm 場合はほぼ線形であるが、間隔 4mm 以上の場合、やや非線形になることがわかる。拘束間隔で比較すると、低い供給圧力では、間隔 3mm がよく湾曲しているが、高い供給圧力では、間隔が大きい方がよく湾曲していることがわかる。間隔 2mm では繊維拘束の間隔が密なため、柔軟な湾曲部分が少なくなったり、拘束繊維同士の干渉により湾曲しにくくなったものと考えられる。また、拘束間隔 4mm 以上では、低い供給圧力においては、間隔が大きすぎるために半径方向の伸びが大きくなり、軸方向への湾曲外側の伸びが減少するため湾曲量が減少すると考えられる。一方、高い供給圧力においては、半径方向への膨張力によっても、グリップが湾曲するために湾曲量が増加したと考えられる。なお、拘束間隔 4mm 以上のグリップは、繊維強化が弱くなり、300kPa 以上の空気を加圧するとグリップが破裂しやすくなる。したがって、グリップの繊維拘束間隔は 3mm が最適であると判断した。

なお、試作したソフトグリップの湾曲変位や発生力にはゴムの遅延弾性などによるヒステリシスは見られなかった。

Fig. 3 Relation between supply pressure and bending displacement

Fig. 4 Structure of flat-type gripper

Fig. 5 Comparison of flat-type and normal-type grippers

3. 用途別ソフトグリップ

3-1 平型グリップ ソフトグリップの発生力を増すために、次章で述べるグリップの解析モデルに基づき、グリップの圧力室断面形状を楕円形にした平型グリップを試作した。このグリップの構造を図4に示す。式(17)から、発生力を大きくするには、グリップ圧力室断面積 A と断面二次モーメント I を大きくし、グリップ半径 D_g とグリップ自然長 L_0 を小さくすれば良いことがわかる。断面積 A や断面二次モーメント I を大きくする方法は、グリップ自体が大きくなるので、グリップ圧力室断面積 A をほとんど変えずにグリップ半径 D_g を減少させる。すなわち圧力室断面形状を楕円形にすることを考えた。この変更により、 D_g は 6.5mm から 4.25mm になる。図5に平型グリップと基本グリップの発生力の比較を示す。平型グリップの発生力は、供給圧力 400kPa において基本グリップに比べ、12倍程度増加している。 D_g だけ考えると発生力は15倍の増加が見込めるが、弾性係数 K や断面二次モーメント I の減少と圧力室断面積の若干の減少により発生力が12倍の増加に留まっていると考えられる。

3-2 二室型グリップ 指の動作範囲を広げるために、圧力室を二つにした二室型グリップを試作した。このグリップの構造を図6に示す。図のように圧力室を二つ備えており、それぞれの圧力室は別々に加圧することができる。寸法は長さ 115mm、幅 12mm

Fig. 6 Structure of 2-chamber-type gripper

Fig. 7 Bending motions of 2-chamber-type gripper

で、人間型ハンドを構成した場合、右側の部分（第一圧力室，根元側）は長さ 30mm で人間の中指節関節⁹に相当する。左側の部分（第二圧力室，指先側）は長さ 55mm で中節骨と末節骨に相当する。これは人間の指は三関節であるが、人間の近位指節間関節と遠位指節間関節は連動して動く⁹ので一對と考えているからである。また、中間部分は基節骨に相当する。図7に2室型ソフトグリップの湾曲状態を示す。このグリップはさまざまな湾曲動作が可能であることが確認できる。

4. 解析モデル

4-1 仮定と定式化 グリップの発生力を計算し、設計に役立てるために、二室型グリップを例として、ソフトグリップの解析モデルを提案する。以下に用いる記号をまとめて記す。

- A : 圧力室断面積 m^2
- D_g : グリップ半径 (グリップ底面から圧力室の中心軸までの距離) m
- D_R : 湾曲時の曲率半径 m
- E : 縦弾性係数 N/m^2
- H : 指先水平方向変位 m
- I : 断面二次モーメント m^4
- K : 弾性係数 N/m
- L_C : 中心軸湾曲変位 (圧力室中心軸に沿う変位量) m
- L_0 : 圧力室自然長 m
- P : 供給圧力 Pa

Q : 発生力 N

α : 湾曲角 rad

各記号の添字 1, 2, m , は要素を示し, それぞれ第一圧力室, 第二圧力室, 中間部分を示す.

図 8 に解析モデルを示す. 定式化に際し以下の仮定を設ける. (1) 加圧時のグリッパ湾曲角 α は小さい. (2) 一定の曲率で湾曲する. (3) 湾曲内側軸方向は伸びない. (4) 中間部分 L_m は剛体とする.

図における中心軸湾曲変位 L_C と供給圧力 P の関係は以下の式で与えられる.

$$L_{C1} = AP_1 / K_1 \quad (1)$$

$$L_{C2} = AP_2 / K_2 \quad (2)$$

圧力室が加圧されたとき中心軸は一定の曲率で湾曲すると仮定しているので, 幾何学的関係から第一圧力室と第二圧力室側の自然長 L_0 はそれぞれ,

$$L_{01} = (D_{R1} - D_g) \alpha_1 \quad (3)$$

$$L_{02} = (D_{R2} - D_g) \alpha_2 \quad (4)$$

で与えられ, 湾曲時の曲率半径は

$$D_{R1} = (L_{01} + L_{C1}) / \alpha_1 \quad (5)$$

$$D_{R2} = (L_{02} + L_{C2}) / \alpha_2 \quad (6)$$

で与えられる. また, 指先水平方向変位は, 以下の式で与えられ,

Fig. 8 Analytical model of 2-chamber-type gripper

Fig. 9 Cantilever beam with 3 concentrated loads

$$H = D_{R1} (1 - \cos \alpha_1) + L_m \sin \alpha_1 + D_{R2} \{ \cos \alpha_1 - \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \} \quad (7)$$

湾曲角 α は十分小さいとして, $\cos \alpha \approx 1 - \alpha^2/2$, $\sin \alpha \approx \alpha$ で近似すると, 以下の式を得る.

$$H = \frac{D_{R1} \alpha_1^2}{2} + L_m \alpha_1 + \frac{D_{R2} (2\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2^2)}{2} \quad (8)$$

また, 図 9 で示すように, 異なる材料で構成される片持ち梁において, 3 個の集中荷重 F_1 , F_2 , F_3 を受ける場合について材料力学の重ね合せ法¹⁰⁾を適用すると, 指先水平方向変位 H は次式で表すことができる.

$$\begin{aligned} H = & \frac{L_{01}^2 (2L_{01} + 3L_m + 3L_{02})}{6E_1 I_1} F_1 \\ & + \frac{E_m I_m L_{01} \{ 6L_m (L_{01} + L_m + L_{02}) + L_{01} (2L_{01} + 3L_{02}) \} + E_1 I_1 L_m^2 (2L_m + 3L_{02})}{6E_1 I_1 E_m I_m} F_2 \\ & + \frac{E_m I_m E_2 I_2 L_{01} \{ L_{01}^2 + 3(L_{01} + L_m + L_{02})(L_m + L_{02}) \} + E_1 I_1 E_2 I_2 L_m \{ L_m^2 + 3L_{02}(L_m + L_{02}) \} + E_1 I_1 E_m I_m L_{02}^3}{3E_1 I_1 E_m I_m E_2 I_2} F_3 \end{aligned} \quad (9)$$

さらに, $F_1 = 0$, $F_2 = 0$, $F_3 = Q$ とおき, 中間部は剛体とみなし E_m を無限大とすると発生力 Q は次式で

与えられる.

$$Q = \frac{3E_1 I_1 E_2 I_2}{E_1 I_1 L_{02}^3 + E_2 I_2 L_{01} \{L_{01}^2 + 3(L_{01} + L_m + L_{02})(L_m + L_{02})\}} H \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(1), 式(3), 式(5)より第一圧力室側の湾曲角 α_1 と曲率半径 D_{R1} はそれぞれ,

$$\alpha_1 = AP_1 / D_g K_1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$D_{R1} = (L_{01} K_1 + AP_1) D_g / AP_1 \quad \dots\dots\dots (12)$$

で与えられ, 式(2), 式(4), 式(6)より第二圧力室側の湾曲角 α_2 と曲率半径 D_{R2} はそれぞれ,

$$\alpha_2 = AP_2 / D_g K_2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$D_{R2} = (L_{02} K_2 + AP_2) D_g / AP_2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

で与えられる. 式(8), 式(11)~式(14)より指先水平方向変位 H は次式で与えられる. ただし, $L_{01} \gg L_{C1}$, $L_{02} \gg L_{C2}$ と近似している.

$$H = \frac{AP_1 L_{01}}{2D_g K_1} + \frac{AP_1 L_m}{D_g K_1} + \frac{AP_1 L_{02}}{D_g K_1} + \frac{AP_2 L_{02}}{2D_g K_2} \quad (15)$$

式(10)と式(15)をまとめると, 発生力 Q は次式で与えられる.

$$Q = \frac{3 \frac{E_1 I_1}{K_1} \frac{E_2 I_2}{K_2} A \left\{ (L_{01} + 2L_m + 2L_{02}) P_1 + \left(\frac{K_1}{K_2} \right) L_{02} P_2 \right\}}{2D_g \left[\frac{E_1 I_1}{K_1} \left(\frac{K_1}{K_2} \right) L_{02}^3 + \frac{E_2 I_2}{K_2} L_{01} \{L_{01}^2 + 3(L_{01} + L_m + L_{02})(L_m + L_{02})\} \right]} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで, 一室型である基本グリップと平型グリップは, 式(16)において $L_m = 0$, $L_{02} = 0$ と置いた形, すなわち次式で与えられる.

$$Q_1 = \frac{3E_1 I_1 A}{2D_g K_1 L_{01}^2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

指の根元から x の位置における発生力 Q_x は次式で与えられる.

$$Q_x = \begin{cases} \frac{3E_1 I_1 A}{2D_g K_1 x^2} P_1 & (x \leq L_{01}) \\ \frac{3E_1 I_1 A(2x - L_{01})}{2D_g K_1 L_{01} \{L_{01}^2 + 3L_m x\}} P_1 & (L_{01} < x \leq L_{01} + L_m) \\ \frac{3 \frac{E_1 I_1}{K_1} \frac{E_2 I_2}{K_2} A \left\{ (2x - L_{01}) P_1 + \left(\frac{K_1}{K_2} \right) (x - L_{01} + L_m) P_2 \right\}}{2D_g \left[\frac{E_1 I_1}{K_1} \left(\frac{K_1}{K_2} \right) \{x - (L_{01} + L_m)\}^3 + \frac{E_2 I_2}{K_2} L_{01} \{L_{01}^2 + 3x(x - L_{01})\} \right]} & (x > L_{01} + L_m) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (18)$$

Fig. 10 Relation between supply pressure and generated force of 2-chamber type

4.2 実験結果との比較

図 10 に 400kPa まで加圧した際の二室型グリッパの供給圧力と発生力の関係を示す。図中の●と■は第一圧力室と第二圧力室を同時に加圧した際の、それぞれ指の先端部分と中間部分の発生力を示し、◆と▲は第一圧力室のみを加圧した際の指の先端部分と中間部分の発生力を示している。いずれの場合においても供給圧力の増加とともに発生力は直線的に増加している。図中の実線は、式(16)を用いて、 $E_1/JK_1 = 10.14 \times 10^7 \text{m}^3$, $E_2/JK_2 = 8.22 \times 10^7 \text{m}^3$, $K_1/K_2 \approx 1.0$ として計算した結果である。図 11 は発生力の測定位置 x と発生力 Q_x の関係を示している。発生力は、測定位置を固定して 2 つの圧力室を同時に 100kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa と加圧し、測定した。測定位置がグリッパ根元に近い方が発生力が大きくなるがわかる。図中の実線は、式(18)を用いて、 $E_1/JK_1 = 10.14 \times 10^7 \text{m}^3$, $E_2/JK_2 = 8.22 \times 10^7 \text{m}^3$, $K_1/K_2 \approx 1.0$ として計算した結果である。図 10 と図 11 において、計算結果と実験結果はほぼ一致しており、解析モデルの妥当性が確認できる。

5. 人間型ハンドへの応用

図 12 にソフトグリッパを用いて試作した人間型五指ハンドの構造を示す。このハンドは基本型、平型、二室型の三種類のグリッパを用いている。ハンドの寸法は、長さ 185mm、質量は 250g である。親指用として平型グリッパ、小指用として基本グリッパ、その他の指には二室型グリッパを使用している。また、親指は内転方向にも動くようになっており、他の指と触れ合うことができる。すなわち、人間の把握動作に近い動作が行える構造となっている。また、包み込み把握を行う際に、五本の指と掌での把握が可能となり、安定した把握を行える。図 13 に把握動作時の様子を

Fig. 11 Relation between measured position and generated force

Fig. 12 Structure of 5-finger hand

(a). Enveloping grasping

(b). Finger tip grasping

Fig. 13 Grasping operation

示す。図 13 の (a) はそれぞれ高さ 130mm、直径 90mm、質量 30g の円柱（プラスチックコップ）と直径 80mm、質量 5g の球体（発泡スチロール）の包み込み把握を、図 13 の (b) はそれぞれ高さ 70mm、幅 40mm、厚さ 20mm、質量 15g の直方体（プラスチックケース）と直径 80mm、質量 5g の球体（発泡スチロール）の指先把握を示している。これらの写真から、比較的様々な対象物を上手に把握できることがわかる。なお、図 13 (a) の球体の包み込み把握において、球体に紐を付けて把持力（引張り力）を測定したところ最大把持力は 19N であった。

6. 結 言

シリコーンゴムを用いた三種類の湾曲型空気圧ソフトアクチュエータを試作し、その特性を調べ、解析モデルの有効性を検討した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 発生力を増やすためにグリッパの断面形状を変更した平型ソフトグリッパを試作した。その特性を調べた結果、基本グリッパに比べ発生力が約 1.2 倍増加した。また、ソフトグリッパの自由度を増やし、器用な動作を実現させるための二室型ソフトグリッパを試作した。このグリッパは圧力室を別々に加圧することができ、さまざまな動作が可能であることを確認した。さらに、これらのソフトグリッパを人間型ハンドに応用し、平型グリッパはハンドの親指部分に、二室型グリッパはその他の指に適用できる可能性を示した。

(2) グリッパの設計に役立てるためにグリッパの発生力を計算するための解析モデルを提案した。計算結果と実験結果を比較した結果、解析モデルの妥当性を確認した。

ソフトグリッパを細かく制御するためには、グリッパの湾曲変位量を検出し、その情報をフィードバックする必要がある。湾曲変位量を検出するセンサとして、グリッパの特性に影響を与えることなく、グリッ

パに内蔵できる薄くて柔らかいソフトセンサが要求される。現在、そのような柔軟変位センサを開発中であり、センサー一体型のソフトアクチュエータを開発する予定である。

文 献

- (1) 井上博充・比留川博久, 人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト, 日本ロボット学会誌, **19-1**, (2001), 2-7.
- (2) 森田寿郎・鈴木雄一郎・川崎毅彦・菅野重樹, 人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計, 日本ロボット学会誌, **16-1**, (1998), 102-109.
- (3) 則次俊郎・角垣一志・堂田周治郎, 空気圧ロボットのコンプライアンスとその制御, 日本ロボット学会誌, **11-2**, (1993), 291-298.
- (4) 鈴森康一, やわらかい機械のための材料技術, 計測と制御, **3-4**, (1995), 281-286.
- (5) 鈴森康一, フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究(第 1 報, 3 自由度アクチュエータの静特性), 機論, **55-518**, C(1989), 2547-2552.
- (6) 高森年, アクチュエータ革命, (1987), 99, 工業調査会.
- (7) Sasaki, D., Noritsugu, T., Takaiwa, M., Development of Pneumatic Soft Hand for Human Friendly, Robot Journal of Robotics and Mechatronics, **15-2**, (2003), 164-171.
- (8) 長田義仁, ソフトアクチュエータ開発の最前線, (2004), 291, エヌ・ティー・エス.
- (9) 荻島秀雄, カバンディ 関節の生理学 I, (1986), 166, 医歯薬出版.
- (10) 奥村敦史, 材料力学, (1985), 264, コロナ社.
- (11) 金子真, 包み込み把握, 日本ロボット学会誌, **18-6**, (2000), 24-27.