T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	薄膜状対象物の曲面貼付を目的とした形状適応機構の開発
Title(English)	Development of Shape Adaptable Mechanism for Pasting Film Objects on Curved Surfaces
著者(和文)	安東零司, 齊藤滋規, 田岡祐樹, 菅原雄介, 武田行生
Authors(English)	Reiji ANDO, Shigeki SAITO, Yuki TAOKA, Yusuke SUGAHARA, Yukio TAKEDA
出典(和文)	日本機械学会 2021年度年次大会 予稿集, , , S114-05
Citation(English)	, , , S114-05
発行日 / Pub. date	2021, 9

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

薄膜状対象物の曲面貼付を目的とした形状適応機構の開発

Development of Shape Adaptable Mechanism for Pasting Film Objects on Curved Surfaces

○学　安東 零司[*1]，齊藤 滋規[*1]
田岡 祐樹[*1]，菅原 雄介[*1]，武田 行生[*1]
Reiji ANDO[*1], Shigeki SAITO[*1],
Yuki TAOKA[*1], Yusuke SUGAHARA[*1] and Yukio TAKEDA[*1]
[*1] 東京工業大学　Tokyo Institute of Technology

As a device for pasting film objects on curved surfaces, this paper proposed a device, composed of a shape adaptable mechanism and an elastic electrostatic chuck, which is operated by two robot arms. As the shape adaptable mechanism generating a wide range of variable curvature radii, a single-DOF scissor mechanism with an elastic element was presented. It was shown through a numerical analysis and prototyping that the proposed scissor mechanism without an elastic element can generate pure circular curves of curvature from zero to a certain value. Forward kineto-static analysis has been conducted for the proposed elastic scissor mechanism to clarify the effect of the location and characteristics of the elastic element in the mechanism on its generated shape. The results showed that the proposed mechanism can generate a wide range of multiple curvature radii.

Key Words : Design, Kinetostatics, Underactuated mechanism, Shape adaptable mechanism, Elastic mechanism

1. 緒　　言

近年，ウェアラブルデバイスの普及や電化製品の小型化に伴い，フレキシブル基板等の薄膜状電子デバイスを曲面等の様々な形状に貼り付けることを可能とするハンドリング技術への需要が高まっている．集合梁構造を有する双極型静電吸着デバイスは吸着表面に柔軟性を持つため，薄膜状対象物にストレスを与えないハンドリングデバイスとして研究されており，平面や曲率の小さい曲面を対象として薄膜状対象物の把持・貼付が可能であることが示されている(1)．一方，吸着デバイスの弾性のみによって曲率の差を補償する形状適応は限界があるため，薄膜状対象物の曲率の大きい曲面への貼付は困難であった(1)．

そこで著者らは，薄膜状対象物を曲率の大きい曲面へ貼付可能とするため，大曲率を出力可能な形状適応機構に静電吸着デバイスを搭載した装置を考え，これの両端を 2 本のロボットアームにより操作することを考える(図 1)．本装置は，図 2 に示すように薄膜状対象物を静電吸着デバイスにより把持した後，目標曲面の大局的な形状を形状適応機構により創成し，残った形状間の小さな差を静電吸着デバイスの弾性により補償することで，薄膜状対象物の貼付を達成する．本報告では本装置を構成する要素のうち，形状適応機構に着目する．また，問題の単純化のために 2 次元における形状適応を考えることとし，適応対象を曲線とする．

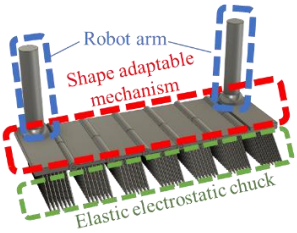
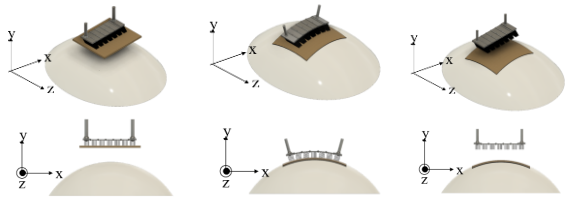


Fig.1 Proposed device composed of robot arm, shape adaptable mechanism, and elastic electrostatic chuck



(a) Approach　(b) Paste　(c) Detach

Fig.2 Proposed pasting method

本研究で対象とする形状適応機構はその両端をロボットアームによって把持しその相対位置関係によって形状が決定されることを想定しているため，少自由度機構である必要がある．また，薄膜状対象物の把持のために出力形状に直線形状を含むこと，幅広い対象物への適応のために大きな曲率の出力も可能であること，さらに，曲率が変化する曲線への適応も可能であることが求められる．多様な曲率の形状出力のために，多数のアクチュエータを利用することも提案されている[(2)]が，入力の多さは重量化や制御系の複雑化を招くため避けたい．ブレーキや外力の利用も考えられる[(3)(4)]が，形状適応の再現性に乏しいと考えられる．以上の考察に基づき，本研究では出力可能な曲率の範囲が大きい少自由度機構を基礎とし，これに弾性要素を追加することで多様な形状への適応を行う装置を構成することを考える．弾性要素が追加された機構は，力のつり合い条件を満足するように弾性要素の長さおよび出力形状が定まるため，所与の入力に対する機構の形状は弾性要素の配置と特性によって決定される．本研究では，曲線への形状適応を行う機構として，出力形状に直線を含む一定曲率の曲線(円弧)を出力する少自由度機構に弾性要素を追加した弾性機構を取り上げ，追加する弾性要素の特性・配置も考慮して，曲率が変化する様々な曲線を出力可能な機構の開発を目指す．

本報告では，まず直線から大曲率までの広範囲な一定曲率曲線を出力可能な 1 自由度機構を提案し，試作・実験によりその妥当性を確認する．そして，その提案機構に弾性要素を追加した弾性機構を対象とし，弾性要素の特性や配置を種々に変更して運動力学解析を行って出力される曲線を求めて検討を加え，提案機構により入力の数が少ないながらも一定曲率ではない曲線が出力可能であることを示す．

2. 出力可能な曲率の範囲が大きい一定曲率曲線を出力する少自由度機構

2・1 機構の提案

本報告では，自由度が少なく，多様な曲率をもつ曲線を出力できる機構として，2 つのリンクを 1 つの回転対偶で接続した構造を構成要素とするシザー機構に着目する．シザー機構は 1 自由度機構であり，図 3 に示すリンクの長さ$a, b(a \leq b)$と角度α, βが設計変数である．機構が直線形状を出力可能であるためには，図 3 のように鏡面対称である必要があり，これは次式で表される．

$$b\cos\beta = a\cos\alpha \tag{1}$$

式(1)において所与のa, b, βに対するαは，絶対値は同じだが符号が異なる 2 つの値が存在する．また，図 4 に示す DE とx軸のなす角θを機構の出力形状を表す変数としたとき，直線形状となる$\theta(=\beta)$を閾値として異なる運動方向を持つ．つまり，このシザー機構はαの符号と，θとβの大小関係の組み合わせによって計 4 種類の運動・出力形状が存在する．そこで 2 つのリンクを 1 つの回転対偶で接続した構造を 1 セグメントとして，図 4 に示す 2 セグメントにおけるリンク 2 とリンク 4 の相対運動に注目し，このシザー機構の運動・出力形状をスクリュー理論を用いて導出する．なお，リンク 2 とリンク 4 の参照点をそれぞれ点 A，点 E とする．2 セグメントは，リンク 2 上の点 A からリンク 4 上の点 E まで，図 4 に示すそれぞれ 2 つの回転対偶を含む 2 つの連鎖を持つため，各連鎖において 4 つの拘束条件が存在する．ここから得られる計 8 つの拘束条件の内，6 つは機構がxy平面内で運動することを表す拘束条件であり，残りの 2 つがxy平面内における拘束である．この内，xy平面内における 2 つの拘束は式(2)，(3)の$\boldsymbol{s}_{R,1}, \boldsymbol{s}_{R,2}$となる．

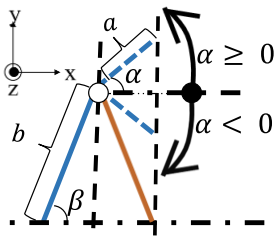


Fig.3 Designed length and angle. a and b are link lengths.

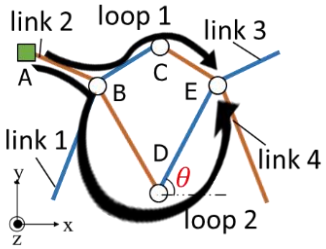


Fig.4 Kinematic loops in two segments. θ is configuration parameter.

$$\boldsymbol{s}_{R,1} = \begin{cases} \left(-\frac{1}{2\sqrt{a^2-b^2\cos^2\theta}} \quad \frac{1}{2b\cos\theta} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1\right)^T & (\alpha \geq 0) \\ \left(\frac{1}{2\sqrt{a^2-b^2\cos^2\theta}} \quad \frac{1}{2b\cos\theta} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1\right)^T & (\alpha < 0) \end{cases} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{s}_{R,2} = \left(-\cos\theta \quad \sin\theta \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\right)^T \tag{3}$$

なお，拘束$\boldsymbol{s}_{R,1}, \boldsymbol{s}_{R,2}$の第1-3成分は力，第4-6成分はモーメントの各軸(x, y, z)方向の成分をそれぞれ順に表す．また，リンク1に対するリンク4の各軸の相対角速度・速度をまとめた$\boldsymbol{V} = \left(\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z \quad v_x \quad v_y \quad v_z\right)^T$は相反積$\boldsymbol{V} \circ \boldsymbol{s}_{R,i} = 0\ (i = 1, 2)$を満たすため，これに式(2)，式(3)を代入することで式(4)，(5)が得られる．

$$\omega_z = \begin{cases} \frac{b\sin\theta - \sqrt{a^2-b^2\cos^2\theta}}{b\sin\theta\sqrt{a^2-b^2\cos^2\theta}} v_x & (\alpha \geq 0) \\ \frac{-b\sin\theta - \sqrt{a^2-b^2\cos^2\theta}}{b\sin\theta\sqrt{a^2-b^2\cos^2\theta}} v_x & (\alpha < 0) \end{cases} \tag{4}$$

$$v_y = \frac{v_x}{\tan\theta} \tag{5}$$

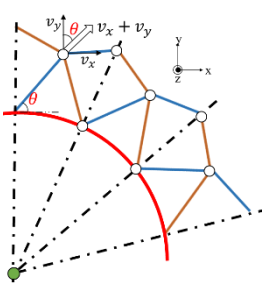
式(4)において，$a \neq b$であれば常に$\omega_z \neq 0$であり，この条件によりリンク4はリンク2に対して相対回転を行うことがわかる．また，式(5)の速度の方向は図5のように表すことができ，機構を鏡面対称に接続すれば，αの符号，θとβの大小関係によらず出力形状は一定曲率の曲線，すなわち円弧となる．なお，図5(a)，(b)は各々$\alpha \geq 0, \theta \leq \beta$の組と$\alpha \geq 0, \theta > \beta$の組の出力形状を示している．

以上を踏まえて，出力可能な曲率半径の範囲が最も大きい方の組を形状適応機構に適しているとして選択する．ここで形状適応にあたっては，目標形状との接触点の数，つまりセグメント数は多いほうが望ましい．セグメント数によらず，曲率半径の最大値は出力が直線の時でその値は∞である．よって，出力可能な曲率半径の範囲はその最小値によって決定される．そこで，各組におけるセグメント数と出力可能な曲率半径の最小値の関係を導出し図6に示した．なお，図6は$(a, b, \beta) = (30\ \mathrm{mm}, 40\ \mathrm{mm}, \pi/4)$における値である．図6から，$\alpha \geq 0, \theta \leq \beta$の組の方がセグメント数を増やした場合にも出力可能な曲率半径の範囲が大きい組である．以上から，以降は形状適応機構には$\alpha \geq 0, \theta \leq \beta$の組からなるシザー機構を考えることとして，その設計値には$(a, b, \beta) = (30\ \mathrm{mm}, 40\ \mathrm{mm}, \pi/4)$を用いる．

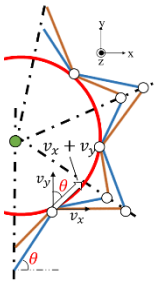
2・2　静電吸着デバイスの接続部分を含む機構のプロトタイプ製作

図1で示した形状適応機構には静電吸着デバイスの接続面が必要である．そのため，静電吸着デバイスの接続部分として，2・1節で導出された機構に，接続面を含む板状リンクを直進対偶とともに追加した．これにより得られた形状適応機構を図7に示す．この機構は1自由度機構であり，かつ2・1節で得た機構と同様に出力曲線は円弧となる．そこで，図7に示す機構をもとに16セグメントからなるプロトタイプを製作した．

製作したプロトタイプは，図8に示すように出力形状が円弧になること，図9に示すように直線を出力可能であることが確認できた．以上から，検討した機構の条件・寸法によって，直線から大曲率までの広範囲な一定曲



(a) $\alpha \geq 0$ and $\theta \leq \beta$



(b) $\alpha \geq 0$ and $\theta > \beta$

Fig.5 Examples of scissor mechanisms' output shapes

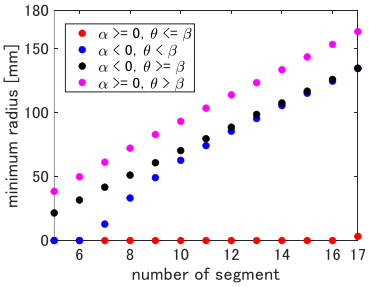


Fig.6 Minimum radius of curvature of different modes

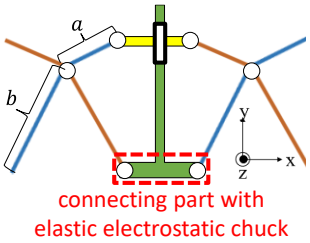


Fig.7 Revised design with connecting part

率曲線を出力可能な 1 自由度機構が実現可能であることを実験的に確認できた．

3. 曲率半径が一定ではない曲線が出力可能な少自由度の弾性機構

3・1 ロボットアームにより駆動される弾性機構のモデル化

第 2 章で導出された機構は出力可能な曲率半径の範囲が大きい少自由度機構であるが，単一の曲率半径を持つ曲線しか出力できない．そこで，機構内に弾性要素を追加することで，少自由度機構でありながら，曲率半径が一定ではない曲線の出力が可能な弾性機構を設計することを考える．なお，2・2 節で導出された機構に弾性要素を追加するにあたり，静電吸着デバイスの接続部分ではなく 2・1 節で導出された機構への追加を検討する．また，本章では 2・1 節で導出された 16 セグメントからなる機構に 1 個の弾性要素が追加された弾性機構を考える．この両端の相対位置関係がロボットアームによって駆動されるモデルを図 10 に示す．

図 10 では，機構の両端の位置を駆動するロボットアームによる入力を 1 つの能動直進対偶変位によってモデル化し，弾性要素は 2 つの受動回転対偶と 1 つの受動直進対偶によってモデル化した．以上の検討から得られた図 10 の弾性機構は 3 自由度機構であるが，入力変位はL_{in}のみであるため，自由度に対して入力の数が少ない劣駆動機構である．そのため，本機構の出力形状を導出するために，力のつり合いの条件を考慮した運動力学解析を行う．なお以降の解析にあたって，追加する弾性要素が 1 個の場合，機構が出力する曲率半径は 2 種類でありそれらをr_1，r_2で表す．また，弾性要素の配置場所は，静止節から弾性要素までに含まれるセグメント数n_1で表す．例えば，図 10 ではn_1は 8 である．

3・2 弾性機構の順運動力学解析

順運動力学解析では，ロボットアームによる所与の入力変位に対する弾性機構の出力形状を導出するが，両端の相対位置関係ではなく機構内の他のパラメータを用いることで，その導出はより容易になる．そこで，図 11 に示すθ_1, θ_2, lの 3 個のパラメータを用いて，ロボットアームから与えられる力の入力f_{in}に対する出力形状とL_{in}を導出する．なお，f_{in}は図 10 に示すように，常に能動直進対偶の軸方向に加わるものとした．以上を踏まえて，Iwatsuki らの手法[5]と同様に入力の不足数と同じ 2 つのパラメータf_v, τ_v(図 11)を新たに設定し，これらが 0 となる力のつり合い条件を満足する形状を導出する．θ_1を入力角度として，具体的な解析の流れを図 12 に示し，その内容を次に述べる．

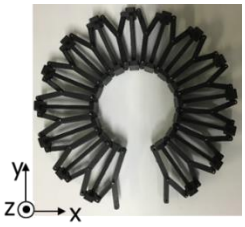


Fig.8 Contracted arc shape

Fig.9 Straight-line shape achieved by mechanism shown in Fig.7

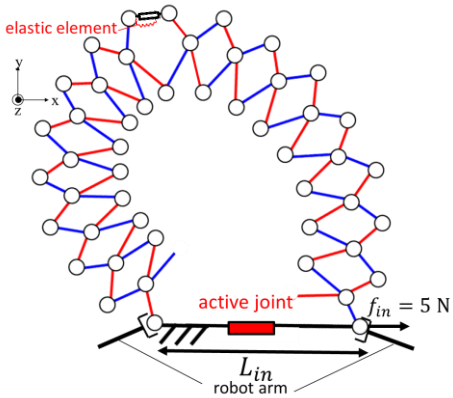


Fig.10 Kineto-static model of elastic scissor mechanism (Case 1 shown in Table 1)

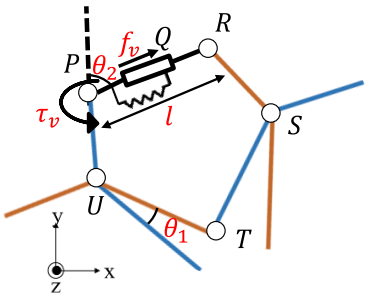


Fig. 11 Definition of symbols used in kineto-static analysis

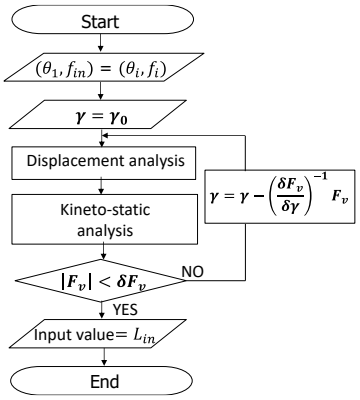


Fig. 12 Flowchart of kineto-static analysis

Table 1 Output curvature radii by elastic scissor mechanism

	Given values					Input value	Output curvature radii	
	k [N / mm]	l_n [mm]	θ_1 [deg]	n_1	f_{in} [N]	L_{in} [mm]	r_1 [mm]	r_2 [mm]
Case 1	6	30	0.5	8	5	141	67.6	111.9
Case 2	0.6	25	0.5	8	5	113.0	67.6	61.2
Case 3	6	30	0.5	4	5	509.8	67.6	277.4
Case 4	6	30	0.7	8	-20	148.3	107.2	60.3

1. f_{in}, θ_1の値をそれぞれf_i, θ_iとする．その時の$\boldsymbol{\gamma} = (\theta_2, l)$の初期値として$\boldsymbol{\gamma_0} = (\theta_{2,0}, l_0)$を与えて，変位解析を行う．
2. 求まった形状における静力学解析を行い，回転対偶Pに作用するトルクτ_v，直進対偶Qに作用する力f_vからなる$\boldsymbol{F_v} = (\tau_v, f_v)$を求める．
3. $\boldsymbol{F_v}$の各成分の絶対値が閾値$\boldsymbol{\delta F_v}$より小さくなるまで$\boldsymbol{\gamma}$を変化させて収束計算を行い，最終的に求まった形状に対するL_{in}を解とする．

以上の順運動力学解析にしたがって，弾性要素の自然長l_n，剛性kを 4 通りに変えて解析を行った結果を表 1 に示す．表 1 から，弾性機構は曲率半径が一定ではない曲線の出力が可能であり，追加する弾性要素の特性・配置場所によって出力曲率半径が変化することも確認できた．以上から元の少自由度機構に弾性要素を追加することで，弾性要素の特性や追加場所に応じて出力曲率半径を変化させることが可能であり，曲率が一定ではない曲線の出力が可能であることが確認できる．

4. 結　　言

本報告では，薄膜状対象物の曲面への貼り付けを可能にする形状適応機構の開発のため，直線から大曲率までの広範囲な一定曲率形状を出力可能な 1 自由度機構としてシザー機構に着目し，出力可能な曲率半径の範囲が大きな機構の条件を示し，試作・実験により妥当性を確認した．また，導出されたシザー機構に弾性要素を追加した弾性機構の順運動力学解析を行うことで，少自由度機構でありながら弾性要素の特性や配置場所に応じて曲率が一定ではない曲線が様々に出力可能であることを示した．

今後，目標形状の出力に必要な入力を導出する逆運動力学解析を行い，その結果をもとに弾性要素を含む機構の製作，それを用いた薄膜状対象物の曲面への貼り付け実験を行う予定である．

謝　　辞

本研究の一部は，日本学術振興会・基盤研究 B（20H02112）により行われたことを付記し，謝意を表する．

文　　献

(1) 林輝道，田岡祐樹，齋藤滋規，”集合梁構造を有する双極型静電吸着デバイスを用いた曲面形状への薄膜対象物貼り付け手法の開発”，2021 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp. 531-532.

(2) Inoue, F., Kwon, S., Nakamura, S., and Yanagihara, Y., “Shape Adaptation of the Inspection Guide Frame in Tunnels to Avoid Obstacles Detected by a Laser Range Finder”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 31.6 (2019), pp. 752-761.

(3) Christoforou, E.G., Phocas, M.C., Matheou, M., and Müller, A., “Experimental implementation of the ‘effective 4-bar method’ on a reconfigurable articulated structure”, *Structures*, Vol. 20 (2019), pp. 157-165.

(4) D. L. Bakker, D. Matsuura, Y. Takeda, and J. L. Herder, “Design of an environmentally interactive continuum manipulator,” *Proc. 14th IFToMM World Congress in Mechanism and Machine Science* (2015), pp. 327-336, 2015.

(5) Iwatsuki, N., Kotte, T., and Morikawa, K., “Simultaneous control of the motion and stiffness of redundant closed-loop link mechanisms with elastic elements”, *Journal of mechanical science and technology*, 24. 1 (2010), pp. 285-288.