

非対称に膨張するマルチマテリアル柔軟膜の計算論的設計

○三森友貴（立命館大学） 平井慎一（立命館大学）

1. 緒言

接触の安全性を材料と構造の柔軟性で確保するロボット機構の研究が行われてきた。たとえば、変形しやすく壊れやすい物体のハンドリングが可能な空気圧駆動のソフトグリッパが挙げられる [1]。エラストマ製の空気圧駆動ソフトグリッパは膨張に伴う変形を利用して駆動するため、膨張部の膜を詳細に設計できることが望ましい。

設計が複雑になりうる膜構造の例として、複雑な運動を少ないアクチュエータ数で実現するために、面の法線方向だけでなく接線方向にも力を発生させることが可能な、2種類の材料からなる面アクチュエータ機構が挙げられる [2]。一方で、このような非対称な膨張を生じる複雑な機構の設計を試行錯誤的に行おうとすると、設計パラメータが機構全体に分布状に存在しているためパラメータ数が膨大になる。またこれに伴い、適切な設計パラメータを見つけるのに多大な時間がかかる。設計問題を数値的に解くことで設計にかかる時間コストの緩和を図る必要がある。

マルチマテリアルな空気圧駆動柔軟指機構の設計では、所与の形状への変形や曲げの最大化などを目的として計算論的設計手法が適用された例がある [3, 4]。一方で、面アクチュエータ単体の設計は空気圧駆動柔軟機構の基本的な構造と考えられ、この基本要素の組み合わせや応用として空気圧駆動柔軟機構一般の設計に適用できると考えられる。本研究では、分割された弾性膜の各領域で、膜上の参照点が目標位置に近づくように変形することで、非対称に膨張する面アクチュエータの膜の材料パラメータを設計する方法を提案する。

2. 柔軟膜の計算論的設計

柔軟膜をいくつかの領域に分割し、各領域の材料パラメータを決定する設計問題を考える。本稿で設計の対象とするのは図1の厚さ3mm、100mm四方の膜である。膜の形状モデルを基に四面体メッシュを生成し、[2]の弾性体のアレイ配置を参考に図1のように膜を9つの領域に分割する。各領域の材料特性をヤング率 $E_i, i \in \mathbb{N}$ に関する設計問題を解くことで決定する。

柔軟膜材料を線形で等方的な弾性体としてモデル化し、ポアソン比を $\nu = 0.48$ と置く。また、応力テンソルを σ_{ij} 、ひずみテンソルを ε_{ij} と置き、 δ_{ij} をクロネッカーのデルタとする。このとき、

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

のように構成方程式が記述できる [5]。ポアソン比 ν を固定しているため、材料の弾性パラメータであるラメ

の定数 λ, μ はヤング率のみから決まる。よって、設計変数は分割された各材料領域のヤング率とする。

各材料領域のヤング率を領域に割り当てた番号に対応した添え字を用いて $E_i (i = 1, 2, \dots, n \in \mathbb{N})$ と表記する。有限要素計算ライブラリ MFEM [6] を用いて構成方程式を解くことで、膜変位を計算する。このとき、図1の膜端部を位置固定する拘束条件を与え、膜底面の各メッシュ面に法線方向の力 $f = 2.0 \times 10^4 \text{mN}$ を印加する。変形前の圧力印加面は100mm四方の正方形であり面は840分割されているため、面への印加圧力は $1.68 \times 10^2 \text{MPa}$ となる。ただし、単純化のため変形中の膜面の面積変化を考慮していない。また、柔軟性の高いエラストマは一般に大変形を生じるため正確な変形を計算する際にグリーンひずみを用いる場合があるが、本稿では計算を簡単にするためにコーシーひずみを用いる。

膜上のメッシュの節点から数点を参照点として選択し、膨張後の参照点の目標位置を設計目標として設定する。参照点を $j = 1, 2, \dots, m \in \mathbb{N}$ で番号付けし、番号ごとに対応付けられた参照点と目標点間の各距離を Δ_j と置く (図2)。このとき、スカラ関数

$$V = \sum_{j=1}^m \Delta_j \quad (3)$$

を定義する。構成方程式を解くことで Δ_j を計算できるため、 V の値は E_i により決定する。よってヤング率をまとめたベクトル \mathbf{a} を用いて、設計問題を

$$\min_{\mathbf{a}} V(\mathbf{a}), \quad \mathbf{a} = [E_1, E_2, \dots, E_n]^T \quad (4)$$

と表す。

設計問題を解くアルゴリズムでは図3のように、最適化計算のループごとに構成方程式を有限要素法で解く。最適化には数値計算ライブラリ NLopt [7] を用いる。ここでは、NLopt が提供している拡張ラグランジュ法

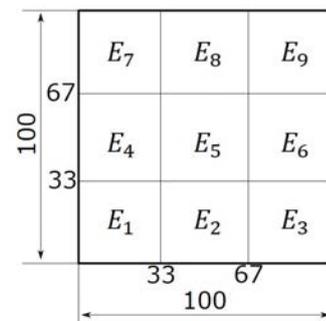


図1 厚み3mmの正方形の柔軟膜の領域分割 (図中数値の単位はmm)。

表1 プログラムの実行環境 (オペレーティングシステム (OS), ランダムアクセスメモリ (RAM)).

OS	Windows 10 Pro(64bit)
プロセッサ	Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU @ 1.80GHz 2.30GHz
メモリ (RAM)	16GB 2666MHz DDR4

[8, 9] のソルバを用いて最適化計算を行う。また、ヤング率の値には $1.0 \times 10^{-1} \leq E_i \leq 1.0 \times 10^3 \text{MPa}$ の範囲制約を課す。

3. 設計結果

膜を9つの領域に分割し、各領域のヤング率を最適化設計した。目標点および参照点の個数が、それぞれ1点、9点の場合を検証した。このとき参照点位置はメッシュの節点から選択し、目標点位置はなるべく参照点位置のz軸方向上部になるように配置した。プログラムの実行環境を表1に示す。

3.1 目標点が1点の場合

最適化設計問題の条件を表2に示す。図4(a), 4(b), 4(c)に示すように非対称な膨張が得られた。解は図4(a)の示す解と4(b)の示す解でほとんど一致した。一方、4(c)では異なる解が得られた。各初期値で参照点と目標点間の距離は4mmから5mm程度まで近づいている。ただし、参照点の頂点が目標点に到達するようなならかな面の膨張ではなく、急激な膨張箇所が存在した。

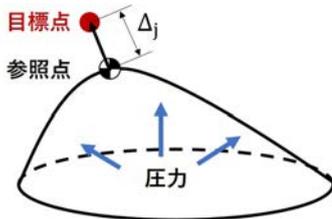


図2 膜の参照点と目標点および対応する点の間の距離 Δ_j .

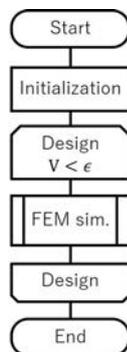


図3 材料パラメータを変えながら有限要素シミュレーション (FEM sim.) を V の値が十分に小さくなるまで反復計算することで膜の材料分布を最適化設計するアルゴリズム。

表2 目標点が1点の場合の設計条件.

目標点位置	x [mm]	y [mm]	z [mm]
	70	50	15

表3 目標点が9点の場合の設計条件.

目標点位置	x [mm]	y [mm]	z [mm]
	17.2474	13.2944	1
	52.8243	14.4112	1
	82.9256	13.1836	1
	19.3063	50	5
	48.1001	49.5172	10
	85.5888	47.1757	5
	17.2485	86.6888	10
	52.8243	85.5888	15
	86.7817	82.8674	10

表4 目標点が4点の場合の設計条件.

目標点位置	x [mm]	y [mm]	z [mm]
	33.9588	29.3747	5
	66.1907	29.4678	10
	33.8078	70.5329	10
	70.4644	66.2883	15

3.2 目標点が9点の場合

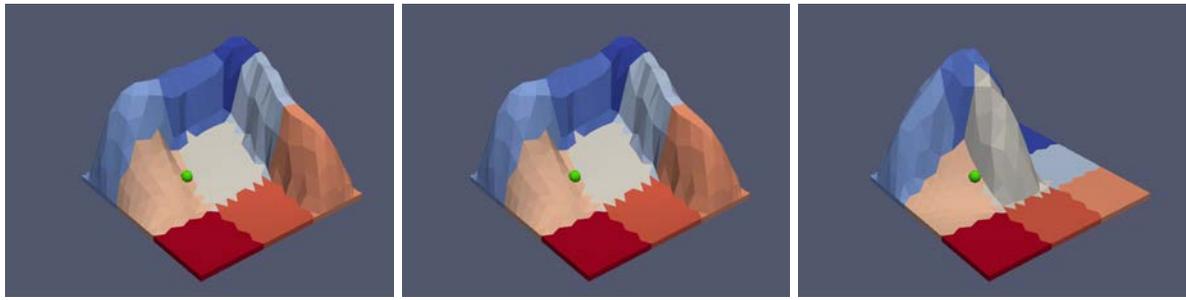
最適化設計問題の条件を表3に示す。三つの異なる初期値から計算を行った。図5(b)の場合に非対称かつ、ならかなに膨張する結果が得られた。一方で、異なる初期値では局所的で急激な膨張 (図5(a)) や、一部の参照点が目標点に十分に近づかない解 (図5(c)) が見られた。各例で、ほとんどの参照点は目標点の2, 3mm以内まで近づいた。しかし、図5(a)では参照点が目標点から最大約16mm弱離れている箇所が存在した。他にも図5(a), 5(c)では参照点と目標点間の距離が6mmを超える箇所が存在し、3つの例の中では図5(b)の場合に目的関数 V の値が最も小さくなった。

3.3 目標点が4点の場合

目標点が9点の場合では、初期値によっては急激な膨張箇所が発生した。目標点の個数が過剰である可能性を考慮し、目標点個数を減らした4点の場合を検証した。最適化設計問題の条件を表4に示す。参照点の位置は領域の境界線が交差する境界部分に配置した。図6(a), 6(b), 6(c)いずれの場合も目標点で囲まれた中央部は目標を満足する平坦な形状となった。参照点と目標点の距離は全て1mm以内であった。ただし、周囲に急激な膨張が見られた。

4. 設計条件と結果の考察

実際の機構では急激な膨張箇所は破損リスクがあり、ならかな変形の得られる解が望ましい。本稿で比較したパターンの中では、9個の目標点を与える場合に比較的ならかな変形の解が得られた。一方で、目標点が4点の場合には、他の2条件に見られたような目標

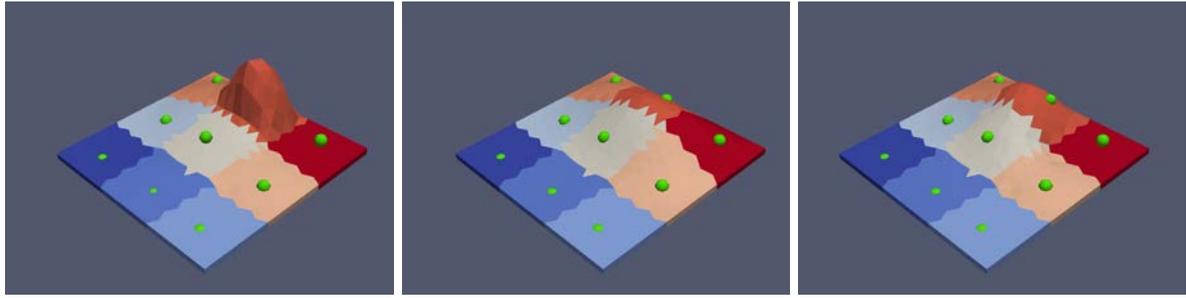


(a) 初期値 1.0×10^{-1} [MPa]

(b) 初期値 1.0×10^1 [MPa]

(c) 初期値 1.0×10^3 [MPa]

図4 参照点および目標点を1点設定した場合の設計解. 緑の点は目標点位置, 膜の表面の色は領域の色分け. (a) は全領域の初期のヤング率が 1.0×10^{-1} [MPa], (b) は 1.0×10^1 [MPa], (c) は 1.0×10^3 [MPa].



(a) 初期値 1.0×10^{-1} [MPa]

(b) 初期値 1.0×10^1 [MPa]

(c) 初期値 1.0×10^3 [MPa]

図5 参照点および目標点を各領域の中央に9点設定した場合の設計解. 緑の点は目標点位置, 膜の表面の色は領域の色分け. (a) は全領域の初期のヤング率が 1.0×10^{-1} [MPa], (b) は 1.0×10^1 [MPa], (c) は 1.0×10^3 [MPa].

点から離れた位置に参照点が留まるような解が探索されなかった. 参照点が目標点に近づく精度を比較すると, 4点の場合は初期値によらず高い精度が得られた.

また, いずれの例においても初期値に依存して変形後の面のなだらかさが変化した. 局所最適解が得られたと考えられ, 目標関数の多峰性が示唆される. なだらかな変形など, 目的に合わせた解を得たい場合, 十分な参照点数を与えたうえで大域的最適化計算を行うか, 設計目的を適切に表現する目的関数を用いることが有効と考える. 一方で, 複数の局所最適解から異なる解が得られた結果から, 提案手法を用いることで設計者が想定しにくいような解が得られる可能性がある.

5. 結言

本稿では膜を9つの領域に分割し, 膨張時に膜上の参照点が目標位置に近づくように各領域のヤング率を決定する最適化設計法を提案した. また, 初期値に依存して異なる解が得られることを示し, 本設計例では9個の参照点, 目標点を与えた場合にただただ非対称な変形の解が得られた.

謝辞 本研究はJSPS 科研費 21H00333 の助成を受けた.

参考文献

[1] Ilievski Filip, Mazzeo Aaron, Shepherd Robert, Chen Xin, Whitesides George, "Soft Robotics for Chemists", *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, Vol.50, pp.1890-1895, 2011.

[2] 和田晃, 高橋舜, 塚本陽亮, 森佳樹, 川村貞夫, "粘弾性値の分布設定によるソフトメカニズム 第5報 弾性体アレイ配置による面アクチュエータの有限要素法解析と実験的検証", 第20回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 (SI2019), pp.2905-2906, 2019.

[3] Longwei Ding, Ning Dai, Xiaoming Mu, Shaohui Xie, Xu Fan, Dawei Li, Xiaosheng Cheng, "Design of soft multi-material pneumatic actuators based on principal strain field", *Materials & Design*, Volume 182, 2019

[4] H. Zhang, A. S. Kumar, J. Y. H. Fuh and M. Y. Wang, "Topology optimized design, fabrication and evaluation of a multimaterial soft gripper," 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), pp. 424-430, 2018

[5] B. Audoly, Y. Pomeau, "Elasticity and Geometry From hair curls to the non-linear response of shells", Oxford University Press, 2010.

[6] Kolev, Tzanio, and Dobrev, Veselin, "Modular Finite Element Methods (MFEM)", *Computer Software*, <https://github.com/mfem/mfem>

[7] Steven G. Johnson, "The NLOpt nonlinear-optimization package", *computer software*, <http://github.com/stevenj/nlopt>

[8] Andrew R. Conn, Nicholas I. M. Gould, and Philippe L. Toint, "A globally convergent augmented Lagrangian algorithm for optimization with general constraints and simple bounds", *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol.28, No.2, pp.545-572, 1991.

[9] E. G. Birgin and J. M. Martínez, "Improving ultimate convergence of an augmented Lagrangian method", *Optimization Methods and Software* vol.23, No.2, pp.177-195, 2008.

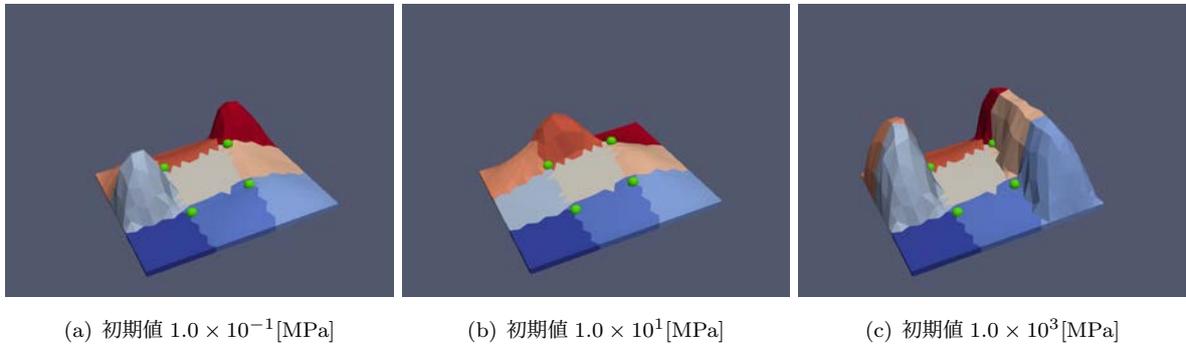


図 6 参照点および目標点を各領域の境界の交差部分に 4 点設定した場合の設計解. 緑の点は目標点位置, 膜の表面の色は領域の色分け. (a) は全領域の初期のヤング率が 1.0×10^{-1} [MPa], (b) は 1.0×10^1 [MPa], (c) は 1.0×10^3 [MPa].