博士論文

ジャイロイド構造を用いた 柔軟構造と硬質構造の結合のための液体充填法 (Liquid Infill Method for Joining Soft and Hard Structures Using Gyroid Structures)

2025年3月

立命館大学大学院理工学研究科 機械システム専攻博士課程後期課程

三森 友貴

立命館大学審查博士論文

ジャイロイド構造を用いた 柔軟構造と硬質構造の結合のための液体充填法 (Liquid Infill Method for Joining Soft and Hard Structures Using Gyroid Structures)

2025年3月

March 2025

立命館大学大学院理工学研究科

機械システム専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Advanced Mechanical Engineering and Robotics Graduate School of Science and Engineering Ritsumeikan University

三森 友貴

MIMORI Yuki

研究指導教員:平井 慎一教授 Supervisor: Professor HIRAI Shinichi

論文要旨

安全に環境と接触し、環境に対して適応的に動作する柔軟な材料からなるソフトロボッ トが開発されてきた.柔軟な材料で構成されたソフトロボットとして、食品などの壊れや すい物体を優しく把持することの可能なソフトグリッパや、生物の柔軟な身体を模倣した ロボット機構が挙げられる.一方で、柔軟材料と硬質材料を組み合わせる設計、製作手法 は、筋骨格動物などの生物身体のように柔軟性と硬さを兼ね備えたロボット機構の開発へ の貢献が期待できる.このような機構の製作手法は、反復的な試作を行う研究開発におい て重要な要素技術である.また、柔軟構造と硬質構造を組み合わせた機構のモデリング技 術は、コンピュテーショナル・デザインへの活用や設計対象の動作確認において重要であ る.本稿は、柔軟材料と硬質材料を結合した機構の製作技術とモデリング技術について論 じる.

最初に,第2章で柔軟構造と硬質構造の結合の分類と定義を行う.柔軟構造および硬質 構造を1次元的構造,2次元的構造,3次元的構造にそれぞれ分類し,各構造同士の組み 合わせを9パターンに分類する.また,柔軟構造と硬質構造の結合に関して,一方の構造 が他方の構造の中に含まれる組込み結合と,これを満たさない非組込み結合を定義する.

ソフトロボットの製作ではシリコーンゴムが頻繁に用いられる.シリコーンゴムは接着 が難しい場合が多く,他の硬質材料との結合が課題である.多孔質構造とシリコーンゴム の射出成型を利用した結合手法が提案されているが,結合を主題として議論されておらず 結合強度が調べられていない.また,三次元プリンタのみを用いて実現できる簡易な結合 手法に応用する余地がある.このような多孔質構造に液体材料を充填し硬化させることで 結合を実現する手法を,本稿では液体充填法と呼称する.本研究は,広く利用されている 熱溶融積層方式の三次元プリンタで印刷可能な多孔質構造を用いた結合方法について述べ る.本稿では,多孔質構造として三次元プリンタで印刷可能なジャイロイド構造を用いる ことを提案する.第3章と第4章では、ジャイロイド構造を応用した液体充填法について 述べる.まず,硬化済みのシリコーンゴム部品を逐次的に polylactic acid (PLA)の部品 に結合する付加型液体充填法を提案する.また,靭帯模倣構造でリンク同士を結合した球 関節や,多層的に靭帯の張り巡らされた背骨などの比較的複雑な構造の製作例を示す.次 に、射出成型機を用いずに液体シリコーンゴムを狭い流路の型に充填する押込み成形について説明する.最後に、押込み成形を利用してジャイロイド構造内に液体シリコーンゴムを充填する押込み液体充填法を提案する.押込み液体充填法の結合強度を評価するために引張試験を行った.複数の条件で約140から200N程度の最大引張力が得られた.さらに、押込み液体充填法で背骨機構と指機構を製作した.

第5章では,弾性膜の中に非伸縮性の糸を組み込んだ fiber-reinforced 膜のモデリング 手法を提案する.糸を等長な折れ線でモデル化し,弾性膜のメッシュエッジとして組み込 む.また,糸経路をメッシュエッジで表現するために,メッシュの自動編集を行う.提案 手法により,メッシュの自動編集とエッジの等長拘束を組み合わせることで,糸のモデリ ング工程および,糸,弾性膜モデルの統合の工程を減らすことができた.有限要素法でモ デル化した弾性膜にメッシュの編集と等長拘束を適用し,シミュレーションを行った.シ ミュレーションを通じて,非伸縮性の糸による非一様な変形が生じることを定性的に確か めた.

Abstract

Soft robots with safe contact and adaptive behavior for environments leveraging their soft bodies have been developed. The soft robot mechanisms consisting of soft materials can achieve a gentle grasp of fragile objects such as foods or imitate softbodied animals. In contrast, the design and fabrication methods that join soft and hard materials into one mechanism possibly contribute to the development of robot mechanisms like musculoskeletal animals that combine softness and hardness. Fabrication techniques for these mechanisms are very important for repetitive prototyping in research and development. The modeling technique for these mechanisms is also important for using models in computational design or estimation of behaviors. In this thesis, we describe the fabrication and modeling techniques of the mechanisms that joins soft and hard materials.

Firstly, chapter 2 describes the classification of the joining pattern of soft and hard structures. We classify both soft and hard structures into three classes, 1-, 2-, and 3-dimensional structures, and we also classify the combination of each structure into nine patterns. Furthermore, we define embedding joining and non-embedding joining, whether one structure is completely included in another structure or not.

Silicone rubber is frequently used for the fabrication of soft robots. Silicone rubber is difficult to adhere to, and the joining between silicone rubber and other materials is the issue. Previously, the joining method using a porous structure and silicone rubber injection molding was proposed; however, joining is not the main theme of the study, and the joining strength was not validated. Also, there is room to augment this method to the joining method using only a 3D printer. We call the joining method, which is filling liquid materials into the porous structure and curing after filling, the liquid infill method (LIF) in this thesis. We describe the joining method using porous structures, which can be printed by fused deposition manufacturing type 3D printer widely used. We propose using a gyroid structure that can be printed by a 3D printer. In Chapters 3 and 4, we describe the LIF using gyroid structures. Firstly, we propose an additive liquid infill method that can join the priorly cured silicone rubber part on the polylactic acid part sequentially. Also, we demonstrate the fabrication example with relatively complex structures such as a spherical joint whose links are fixed by silicone-rubber-made ligament-inspired structure and the spine mechanism with complexly spanned ligaments. Secondly, we describe push-in molding, which can fill the liquid silicone rubber into a narrow mold without using the injection molding machine. Lastly, we propose the push-in liquid infill method (PLIF), which uses pushin molding to fill the liquid silicone rubber into the gyroid structure. We validated the joining strength of PLIF by tensile test. A max tensile force of approximately 140 to 200 N was obtained in many conditions. Furthermore, we fabricated the spine mechanism and the finger mechanism using PLIF.

In chapter 5, we propose the modeling technique of the fiber-reinforced membrane that are elastic membranes with embedded non-stretching fiber (string). The fiber is modeled as the constant length poly line and embedded the poly line as mesh edges of the elastic membrane model. Also, to represent the fiber path using mesh edges, the algorithm automatically modifies the mesh. To combine the constant edgelength constraint and the auto modification of the mesh, we succeeded in reducing the modeling process of the fiber, also, reduce the integrating process of fiber and membrane. We applied the auto mesh modification and the constant edge length constraint on the finite element model of the elastic membrane, and demonstrated the simulation. We confirmed qualitatively that the non-uniform deformation of the fiber-reinforced membrane on the simulation results.

用語・記号

第2章

\mathcal{A}	柔軟もしくは硬質な機構要素.
${\mathcal B}$	柔軟もしくは硬質な機構要素.
A	Aの体積が占める領域の閉集合.
В	βの体積が占める領域の閉集合.
∂A	A の境界点集合.
∂B	Bの境界点集合.
$\operatorname{Int}(\cdot)$	内点集合.
$\operatorname{Cnt}(\cdot, \cdot)$	二つの機構要素の接触領域.

第5章

Ω	弾性膜の領域.
s	非伸縮糸の弧長パラメータ.
$\boldsymbol{p}^{\mathrm{N}}(s)$	糸の中立線形状.
$oldsymbol{p}_0^{\mathrm{N}}(s)$	非変形状態の糸の中立線形状.
x(s), y(s)	$oldsymbol{p}^{\mathrm{N}}(s)$ の座標成分.
g	折れ線近似した糸の中立線.
\mathbf{Q}_i	g の <i>i</i> 番目の節点.
$oldsymbol{q}_i$	点 \mathbf{Q}_i の位置ベクトル.
M	gの節点個数.
$l_{i,i+1}$	g の辺 $\operatorname{Q}_i\operatorname{Q}_{i+1}$ の長さ.
$l^0_{i,i+1}$	g の辺 $\operatorname{Q}_i\operatorname{Q}_{i+1}$ の自然長.
c_i	辺 Q _i Q _{i+1} の等長拘束.

ε	任意の弾性体メッシュエッジ.
N_i	辺 Q _i Q _{i+1} の法線方向全体の領域.
Γ_i	点 Q_i を頂点として N_i と N_{i+1} に挟まれた領域.
\triangle^c	g と交差している三角形メッシュ.
$oldsymbol{p}_{j}^{c}$	$ riangle^c$ の j 番目の節点位置.
$oldsymbol{r}_j^c$	$oldsymbol{p}_j^c$ に対応する参照点位置.
$ heta_i$	$oldsymbol{p}_j^c - oldsymbol{q}_i$ と $oldsymbol{q}_{i+1} - oldsymbol{q}_i$ のなす角.
$oldsymbol{e}_{i,i+1}$	$oldsymbol{q}_{i+1} - oldsymbol{q}_i$ の向きの単位ベクトル.
$oldsymbol{u}_k$	弾性体メッシュの k 番目の節点の変位.
\triangle_e	弾性体メッシュの e 番目のメッシュ領域.
U_e	Δ_e のひずみエネルギ.
U	弾性膜全体のひずみエネルギ.
$u_{ m N}$	弾性体メッシュの節点変位 $oldsymbol{u}_k$ を並べたベクトル.
n	メッシュの節点数.
m	拘束条件を用いて位置固定する節点の数.
A_{C}	位置拘束する節点を指定する行列.
0	零ベクトル.
L	弾性膜の一辺の長さ.
d	弾性膜の厚み.
E	弾性膜材料のヤング率.
ν	弾性膜材料のポアソン比.

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	関連する研究および技術...........................	5
	1.2.1 柔軟なロボット機構	5
	1.2.2 柔剛ハイブリッド機構	6
	1.2.3 機構要素の結合	8
	1.2.4 シミュレーションとモデリング	9
1.3	目的と貢献	11
1.4	論文構成	12
第2章	柔剛ハイブリッド機構の分類	13
21		13
2.1	クラスごとの特徴	14
2.2	 991 タクラスの特徴と開発例 	1/
	2.2.1 ロノノハの内国と開発に行 9.99 組込み結合と非組込み結合	14
	2.2.2 組化の和日C2F組入の和日	10
	2.2.9 表IF/J仏C/ ノハノ規 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	19
• • •	2.2.4 こ リンソ こ ジ ノ ヘ 刀 頬	19
2.0		20
第3章	ジャイロイドを応用した柔軟材料の硬質材料への結合	23
3.1	ジャイロイドを用いた液体充填法	23
3.2	付加型液体充填法	24
3.3	球関節機構	25
3.4	背骨機構	27
3.5	課題と展望	33
第4章	押込み成形を用いた柔軟材料と硬質材料の結合	37

4.1	押込み	成型	37
4.2	押込み	液体充填法	39
4.3	引張試	験による結合強度評価.........................	40
	4.3.1	引張試験サンプルの製作......................	40
	4.3.2	ジャイロイド構造の密度を変えた場合............	42
	4.3.3	材料の硬さを変えた場合.......................	46
	4.3.4	接着とアンカーによる結合サンプルとの比較	47
	4.3.5	CT スキャンによる破断試験片内部の観察	49
4.4	機構製	作への応用	50
	4.4.1	背骨機構	50
	4.4.2	指機構	50
4.5	課題と	展望	53
第5章	メッシ	ュエッジの等長拘束による fiber-reinforced 弾性膜のモデリング	55
5.1	Consta	ant Edge-length Constraint	55
	5.1.1	連続な非伸縮糸の幾何モデル.....................	55
	5.1.2	糸モデルの離散化	57
5.2	有限要	素モデル	57
5.3	CECs	による膜モデルへの非伸縮糸モデルの組込み.........	58
	5.3.1	メッシュ編集の手順	58
	5.3.2	エッジの交差検出	59
	5.3.3	節点の移動先の決定	59
	5.3.4	メッシュの不正な移動の検出	61
	5.3.5	CECs を課した弾性膜モデル	61
5.4	シミュ	レーション	62
	5.4.1	モデルの設定............................	62
	5.4.2	結果	62
	5.4.3	考察	63
5.5	課題と	展望	66
	0+= ∆		~~
弗り草	結論 チャン		09
0.1	まとめ		69 71
6.2	展≌.		(1
参考文献			75

		ix
付録 A	ジャイロイド構造の三次元プリンタによる印刷	83
付録 B	背骨機構に用いたシリコーンゴム部品の成形	85
付録 C	接着およびアンカーで結合した試験サンプル	87

図目次

2.1	Classification of soft and hard mechanism components based on ma-	
	terial hardness and shape of mechanisms	14
2.2	Classification of soft-hard hybrid mechanism components	15
2.3	Classification of joining patterns.	17
2.4	Examples of mechanical components joined soft and hard structures	
	by non-embedding joining in $(3, 1), (3, 2)$ classes	18
2.5	Soft-hard hybrid membrane with anisotropic bending rigidity. Corre-	
	sponding classes are, from left, $(2, 1)$, $(1, 2)$, and $(2, 2)$ classes, respec-	
	tively. Red and blue arrows depict bending directions with low and	
	high bending rigidity, respectively	19
2.6	The example of planar inflatable soft-hard hybrid membranes of $(2,2)$	
	class	20
3.1	Loop flow path on a gyroid structure. The blue surface in the left	
	figure is a gyroid, and red dotted arrows indicate the loop flow path.	
	The yellow part of the right figure indicates the hard part with a	
	handle. The liquid soft material can flow into the hole of the handle,	
	and hard and soft structures are joined after curing the soft material.	24
3.2	A gyroid structure fabricated by a 3D printer with PLA filament, (a)	
	bird's eye view, and (b) top view. \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	25
3.3	Process of ALIF.	26
3.4	The joining hole which has a gyroid structure inside wall of the hole	
	on the hard part	26
3.5	Structure of the spherical joint mechanism	27
3.6	Spherical joint mechanism with two links which is joined by flexible	
	ligaments made by silicone rubber.	28

3.7	Manual bending and twisting of the spherical joint. \ldots \ldots \ldots	29
3.8	The spherical joint mechanism that is fixed in a cantilevered state	
	under gravity with two weights on the link 1. \ldots \ldots \ldots	30
3.9	Structure of the vertebra-inspired link. The red parts indicate the	
	gyroid structure of the joining hole	30
3.10	Joining process of posterior and anterior longitudinal ligaments on	
	the series of vertebra-inspired links	31
3.11	Cross-section of the spine-inspired mechanism. The red parts are	
	glued by liquid silicone rubber.	31
3.12	Joining process of the facet joint ligament parts between series of	
	spinal links.	32
3.13	Fabrication result of the spine-inspired mechanism made using ALIF.	33
3.14	Manual deformation of the spine-inspired mechanism	34
3.15	Unexpected dripping of the liquid silicone rubber in the ALIF process.	35
4.1	Process of push-in casting. The red part is the outer mold, the orange	
	is the inner mold, and the blue is silicone rubber. \ldots	38
4.2	Classification of push-in casting molds	39
4.3	Concept of the additive liquid infill method	39
4.4	Dimensions of the tensile test sample of PLIF	41
4.5	Insertion of the gyroid cubes and assembly of the casting mold. \ldots	41
4.6	Tensile test samples of PLIF. (a) Dragon Skin 20, infill 10% , (b)	
	Dragon Skin 20, infill 15 %, (c) Dragon Skin 20, infill 20 %, (d) Dragon	
	Skin 20, infill 25 %, (e) Dragon Skin 20, infill 30 %, (f) Ecoflex 20, infill	
	15%, (g) Smooth-Sil 950, infill $15%$.	42
4.7	Experimental setup for the tensile test of PLIF samples. \ldots .	43
4.8	Tensile test results for PLIF samples at five different gyroid density	
	settings, 10% , 15% , 20% , 25% , and 30% .	43
4.9	Snapshots of the tensile test of the Dragon Skin 20, infill 15% sample.	44
4.10	Fractured surface of tensile test samples of PLIF, (a) Dragon Skin 20,	
	infill 10 %, (b) Dragon Skin 20, infill 15 %, (c) Dragon Skin 20, infill	
	20%, (d) Dragon Skin 20, infill $25%,$ and (e) Dragon Skin 20, infill	
	30%.	45
4.11	Tensile test results of PLIF samples varying materials	46

4.12	Fractured surface of tensile test samples fabricated using PLIF with	
	two different materials, (a) Ecoflex 20, Infill 15 %, (b) Smooth-Sil 950,	17
4.13	Diagram of a tensile test sample whose soft and hard parts are joined	41
1.10	by anchors.	48
4.14	Tensile test results of the samples changing joining methods bonding,	10
	anchor, and PLIF.	48
4.15	CT scan of Dragon Skin 20, infill 15% tensile test samples (a) Sample	
	1, part 1, (b) Sample 1, part 2, (c) Sample 2, part 1, (d) Sample 2,	
	part 2, (e) Sample 3, part 1, and (f) Sample 3, part 2	49
4.16	Casting mold of spine-inspired mechanism, (a) Outer mold, and (b)	
	Inner mold.	51
4.17	Deformation of spine-inspired mechanisms whose one ends are fixed	
	under gravity. (a) Dragon Skin 20, undeformed, (b) Dragon Skin 20,	
	deformed, (c) Ecoflex 20, undeformed, and (d) Ecoflex 20, deformed.	52
4.18	Inner mold of the finger mechanism	53
4.19	Fabrication result of the finger mechanism	53
4.20	Finger mechanism. (a) Extension and (b) Bending	54
5.1	The process of implementing CECs on a 2D finite element membrane	
	model	56
5.2	Mesh modification. Red polyline is the desired fiber path and gray	
	triangle is the mesh of the membrane	59
5.3	Distance calculation between the polyline g and the arbitrary nodal	
	point \mathbf{P}_{j}^{c} . Red parts indicate the distance $\mathbf{d}(g, \mathbf{p}_{j}^{c})$ between the points	
	\mathbf{P}_{j}^{c} and \mathbf{R}_{j}^{c}	60
5.4	Degeneration and flip of the mesh element	61
5.5	Simulation results of the fiber-reinforced membrane model with elastic	
	membrane models that CECs are imposed. ($\bigcirc 2024$ IEEE)	64
5.6	The simulation results of the horizontal stretching of the elastic mem-	
	brane model with CECs. ($\textcircled{O}2024$ IEEE) \ldots \ldots \ldots \ldots	65
5.7	Stretching of the membrane with an embedded fiber in a transverse	
	direction from the stretching direction.	65
B.1	Push-in casting mold for intervertebral discs	85

B.2	Push-in casting mold for facet joint ligaments	86
C.1	Tensile test sample joned by (a) bonding and (b) anchor	87

表目次

4.1	Max tensile force of tensile test results of samples made using PLIF		
	with five different density settings of gyroid structures	44	
4.2	Max tensile force of tensile test results of PLIF samples of varying		
	materials	46	
4.3	Max tensile force with the samples changing to joining methods bond-		
	ing and anchor.	48	
5.1	Parameters of the membrane model for simulations	62	

第1章

序論

1.1 研究背景

産業用ロボットアームは反復的な動作を得意とし、自動車工場の溶接作業などに応用さ れ、産業に普及してきた、産業用ロボットアームの硬いリンクと高剛性の関節は高速で高 精度な位置,姿勢制御を行う上で有利である.一方で,関節やリンクなどが柔軟なロボッ トは、環境に合わせて受動的に変形する機構が多く、環境との安全な接触などが特徴であ る. 伝達系の設計により、対象物形状に沿った受動的な指の屈曲を少数のアクチュエータ で実現できる [1, 2]. また、リンク全体やリンク表面をシリコーンゴムなどの柔軟材料で 構成した柔軟ロボットは、柔軟ロボットグリッパ、移動ロボットなどに応用されている [3]. こうした柔軟なロボット機構にはいくつかの利点が挙げられる. まず, リンク全体や リンクの表面を柔軟材料で構成することにより、安全に環境と接触できる. この特徴を有 する機構として、ビニールシートで構成されたインフレータブルロボット [4] や、空気圧 駆動のシリコーンゴム製ロボット [5] などが挙げられる.また,安全に接触できるため, 環境との接触を積極的に利用できる. リモートコンプライアンスセンタ (RCC) デバイス は、穴との接触とコンプライアンスを利用してピン挿入などの作業を実現する機構である [6]. Nate らが提案した機構はグリッパ内部にアクチュエータを搭載しておらず、ロボッ トアーム先端に取り付けたグリッパを床面に押し付けることで受動的にグリッパをロック する機能を持つ [7]. さらに, 接触を利用することで, 環境に対して即時的, 受動的に動作 する機構はロコモーションにも応用されてきた.多足類を模倣した i-CentiPot P は、環 境に対する受動的な体幹の変形を利用して障害物を乗り越えたり避けたりすることができ る [8].

柔軟な材料を積極的に活用するロボット機構はソフトロボットと呼称されている.ソフ トロボットの研究では、シリコーンゴムなどの柔軟材料を用いたロボット機構が多数提案 されている.特に、機構の大半が柔軟材料で構成されたロボット機構の研究例は非常に多 く、物体形状に合わせて屈曲するソフトグリッパなどが開発されている [5]. 一方で、柔 軟材料で構成されたソフトロボット機構の変形しやすさは、必ずしも利点のみをもたらす わけではない.飯田らは、柔軟構造の力の伝達性の低さを指摘し、柔軟構造と硬質構造を 組み合わせた柔剛ハイブリッドシステムの重要性を指摘した [9].本稿では機構のみに着 目するため、柔軟構造と硬質構造を併せ持つ機構を、文献 [9] にならい柔剛ハイブリッド 機構と呼称する.Park らは、空気圧駆動ソフトフィンガーの指先力と屈曲速度を改善す るために、硬質構造を組み合わせた機構を提案した [10].生物の中でも筋骨格動物の身体 は、異なる硬さの材料が組み合わさった構造である.たとえば、生物の身体には骨や筋肉、 靭帯、腱、脂肪などの異種材料が混在している.Niikura らが開発したキリンの首を模倣 したロボットには、骨部分に硬い樹脂材料が用いられ、椎骨間にはシリコーンゴム製の椎 間板が使用された [11].こうした柔軟材料と硬質材料の混在したロボット機構の設計、製 作方法は、新しいロボット機構を生み出す研究開発にとって重要な要素技術である.

ロボット機構の開発では試作を繰り返し試行錯誤的に機構を改良する設計工程が想定さ れる.この場合,試作の作業工程はなるべく簡単なほうが効率よく開発を進められる.柔 軟構造を含む機構の製作手法としてマルチマテリアル三次元プリンタによる一体成型が挙 げられる [12, 13].しかし,マルチマテリアル三次元プリンタは,プリンタ自体や材料が 高価な場合がある.また,プリンタに用いることができる材料は印刷方式に適合した材料 に限られるが,型取り成型は液体から硬化する様々な材料に応用できる.さらに,マルチ マテリアル三次元プリンタで印刷された柔軟材料の強度面の課題が指摘されている [14]. これらの点で,シリコーンゴムを型取り成型する手法にも一定の優位性があると考えてい る.手作業を主とするシリコーンゴムの成型工程を簡単にする手法は,ロボット機構の研 究開発において重要な要素技術である.また,専用の製造装置などを用いない製作手法 は,より多くの研究者,技術者が利用できる.たとえば,熱溶融積層(fused deposition manufacturing: FDM)方式などの比較的入手性の高い三次元プリンタを用いてシリコー ンゴムの成型のための型を製作できる場合,高価なマルチマテリアルプリンタを用いる必 要はない.このように,すでに利用例の多い加工機を活用した製作手法は利用しやすく, 試作を繰り返すロボットの研究開発において重要な技術と考えている.

特に,柔剛ハイブリッド機構の製作では,柔軟構造と硬質構造の結合が課題である.従 来の硬質部品同士を組み合わせた機構では,ネジや圧入,木工継手を応用した方法 [15] な ど硬い部品に有効な組立て手法を用いることができる.一方で,シリコーンゴムやゲル材 料などの柔軟な材料の場合,これらの結合方法を利用することが難しい場合がある.この 場合,接着による構造同士の結合が選択肢の一つである.実際に,シリコーンゴム製の ソフトロボットは,製作に接着工程が必要となることがある [16].一方で,シリコーンゴ ムの接着は難しい場合があり,異種材料との結合は柔剛ハイブリッドな構造の製作にお ける課題になりうる.そこで,シリコーンゴムを硬質材料と結合する手法が提案されて

 $\mathbf{2}$

いる. Maらは, 三次元プリンタによる積層造形と, 硬質部品の凹凸(アンカー)にパズ ルのようにシリコーンゴム部品を嵌めた状態で硬化させる結合手法を組合わせた hybrid deposition manufacturing (HDM) を提案し, 製作例を示した [17]. 三次元プリンタで硬 質部品を製作可能であり、試作に向いた結合手法である. Bell らは、提案するシリコーン ゴムの射出成型装置の応用例として、多孔質構造の樹脂部品にシリコーンゴムを充填した 後に硬化させることで,多孔質構造とシリコーンゴムを結合する製作手法を示した [18]. 多孔質構造に輪を通すようにシリコーンゴムを充填した状態で硬化するため、シリコーン ゴムが破断しない限りは結合部が破断しない. そのため, 高強度な結合力が期待できる. 一方で,三次元プリンタとは別に射出成型装置を用意する必要がある.多孔質構造を利用 した結合手法のように高強度の結合が期待でき、三次元プリンタなどの入手性が高くすで に広く利用されているプロトタイピングツールのみを利用する結合手法が望ましい.ま た、射出成型を利用する結合手法であるため、ワンショットで成型可能な型構造を用いる ことが想定される.しかし,硬質構造とシリコーンゴムが複雑に結合した構造の場合,型 構造が複雑化する可能性がある.複雑な柔剛ハイブリッド機構の製作においてワンショッ ト成型だけではなく、部分部分の結合を分けて作業できる逐次的な結合手法を使い分けら れることが望ましい. さらに, 文献 [18] は結合を主題とした論文ではないため, 結合強度 が評価されていない.柔剛ハイブリッド機構の開発者の参考となる結合強度の評価が必要 である.

そこで,本研究では,FDM 方式の三次元プリンタを主に用いた,柔軟構造と硬質構造 の結合手法について述べる.提案手法は、文献 [18] で示された多孔質構造を有する硬質 構造内部に柔軟材料を充填し硬化させることで結合を実現する手法に基づいている.本稿 では、このような結合手法を液体充填法と呼称する.本研究は、多孔質構造としてジャイ ロイド構造を採用する.ジャイロイド構造はFDM 方式の三次元プリンタで簡易に印刷で きる構造であり、試作に利用しやすい. また、ジャイロイド構造内部に液体を充填可能 である [19]. 本研究は、シリコーンゴムと三次元プリントした樹脂材料部品の結合に焦点 を当てる.ジャイロイド構造を活用した結合手法として,付加型液体充填法 (additional liquid infill method: ALIF)と押込み液体充填法(push-in liquid infill method: PLIF) を提案する.まず ALIF は、硬化後のシリコーンゴム部品を硬質な樹脂部品に結合する 手法である.逐次的に部品を結合できるため、靭帯が複雑に張り巡らされた背骨を模倣し た柔剛ハイブリッド機構の製作などに応用できる. ALIF の応用例として, 球関節機構と 背骨機構を製作した. また, 射出成型を用いずに材料に圧力をかけて型に充填を行う押込 み成形について述べる. PLIF は、押込み成形を活用してジャイロイド構造内部に液体シ リコーンゴムを充填する手法である.射出成型を用いて多孔質構造に材料を充填する場合 は、射出成型機を用いて液体を押し込むが、PLIF ではジャイロイド構造を含む型をシリ コーンゴムに向かって押し込む.引張試験で結合強度を評価し,高強度の結合を実現でき

ることを示した.また、PLIF を利用して背骨機構と指機構を製作した.

本稿では柔剛ハイブリッド機構のモデリング手法についても述べる.複数の材料からな る柔剛ハイブリッド機構は、材料の選定や各部の寸法、材料分布など膨大な設計パターン が存在する.これを効率的に設計するために、反復的なシミュレーションを活用したコン ピュテーショナルデザイン手法を機構設計に用いる場合がある.このとき、コンピュテー ショナルデザインに用いるシミュレーションモデルのモデリングの工程はできる限り簡単 であることが望ましいと考えられる.設計者の目的は、設計目的を満たす設計パラメータ を知ることであり、モデリングそのものが目的ではないためである.正確なシミュレー ション結果を得るためには、正確な物理パラメータの計測やシミュレーションモデルの選 定など、一定の手間が生じる.一方で、手作業で製作されたソフトメカニズムは個体差が 生じやすい.製作の段階でばらつきが生じる場合、この製作物の個体差を超えるシミュ レーション精度を得るために費やしたコストは無駄になる可能性がある.また、特にソフ トロボットでは高精度の動作の再現性よりも環境に適応的な動作が期待されることが多 い.モデルの精緻化に注力することも一定重要であるが、特にソフトロボットの設計にお いては、簡易なモデリング手法を考えることも重要と考えている.そこで、簡易な作業工 程を特徴とする柔剛ハイブリッド機構のモデリング手法について研究を行った.

柔軟構造は弾性体でモデル化されることが多く,弾性体のモデルは科学計算を目的とし たものや,コンピュータグラフィックスを目的としたものが存在する.特にコンピュータ グラフィックスを目的としたモデルは計算速度やシミュレーション結果の見た目などが主 に重視される一方で,科学計算を目的としたモデルは主に精度を重視する [20]. 柔剛ハイ ブリッド機構の設計では,柔軟構造の材料パラメータなどの物理量を扱うため,ある程度 の物理的な正確性が求められる.一方で,簡易なモデリング手法は,モデリングの手戻り が生じる設計工程を効率化できる可能性がある.モデリング対象の特徴を考慮して部分的 にモデルを簡略化することで,モデリング作業が簡易になり,反復的なモデリング作業の 効率化が期待できる.

本研究では、シリコーンゴム膜の中に非伸縮性の糸を配向した fiber-reinforced 膜の簡 易なモデリング手法を提案する.従来のモデリング手法の例として、糸と膜をそれぞれ 物理モデルとして作成した後に、拘束条件で一つのモデルにまとめる方法が挙げられる [21].一方で、提案手法は膜モデルのメッシュエッジとして非伸縮の糸モデルをあらかじ め組み込む.このとき、メッシュエッジを用いて糸経路を表現するためのメッシュの編集 はスクリプトで自動化できる.また、糸の非伸縮性は対応するメッシュエッジの等長拘束 で表せる.所望の糸経路を与えれば膜モデルへの糸モデルの組み込みは自動化できるた め、結合作業が不要になる.また、糸の曲げ剛性が小さいことなどを仮定すると糸を単な る折れ線としてモデル化し、膜に組み込むことができる.そのため糸のモデリング作業も 不要である. 研究目的を以下にまとめる.

- 多孔質構造を用いた柔軟、硬質部品の結合手法に、FDM 方式の三次元プリンタで 印刷可能なジャイロイド構造を用いることを提案する。
- ジャイロイド構造の壁面を有する結合穴に液体シリコーンゴムを充填した状態で硬 化後のシリコーンゴム部品を挿入することで、シリコーンゴム部品と硬質構造を逐 次的に結合する付加型液体充填法を提案し、応用例を示す。
- 射出成型機を用いずに、三次元プリンタで製作した部品のみを用いて細い流路に液体シリコーンゴムを充填可能な押込み成形について述べる.また、押込み成形を応用してジャイロイド構造内部に液体シリコーンゴムを充填し、強固な結合を実現する押込み液体充填法を提案する.さらに、強度評価の結果と応用例を示す.
- 弾性膜に組み込まれた糸のモデルを幾何モデルで表現し、弾性膜の有限要素モデルのメッシュエッジとして組み込む fiber-reinforced 弾性膜のモデリング手法を提案する.

1.2 関連する研究および技術

1.2.1 柔軟なロボット機構

ロボット機構に柔軟性を加える場合、多関節機構の関節や伝達系に弾性を加える方法、 機構の表面を柔軟材料で被覆する方法,金属や樹脂材料を細く,もしくは薄く成形するこ とで連続的に変形する構造を製作する方法、リンク自体を柔軟材料で構成する方法などが 挙げられる. Ozawa らは、伝達系に弾性を加えることで接触に合わせて受動的に屈曲す る劣駆動指機構の伝達系の設計手法を提案した [22]. 高木らは, 指への負荷に感応して変 速するリンク式の無段変速機を用いて、無負荷時の高速な動作と負荷下の大きな指先力を 両立する指機構を開発した [23]. このように、接触を活用して動作する機構は環境に合わ せた動作を実現できる場合がある.また,機構の表面を被覆することで,環境との柔軟な 接触が期待できる.Shimoga らは、指腹の柔軟性が果たす役割を指摘し、6 種類の材料に ついて衝撃吸収,形状へのなじみ,ひずみエネルギの散逸の特性を調べて比較を行った [24]. 関節部分を柔軟材料で構成した多指ハンド機構 [25] や, リンク全体を柔軟材料で構 成した空気圧駆動のソフトグリッパ [5] が開発されている.特に指全体が柔軟材料で構成 されたソフトグリッパは, 食品ハンドリングなどへの応用が試みられている [26, 27]. ま た,商業用のソフトグリッパも実現されている [28].硬い材料であっても,細い構造や薄 い構造は板バネのように大変形可能な場合がある.たとえば、板バネを利用した跳躍機構 が挙げられる [29, 30]. 本研究では,異なる材料的柔軟性を有した構造を組み合わせた柔 剛ハイブリッド機構に焦点を当てる.

ソフトロボットの製作では,柔軟材料としてシリコーンゴムを利用する例が多い [5,31]. そのため、シリコーンゴムの成形方法は重要な技術である.シリコーンゴム製のソフトロ ボットの製作では、三次元プリンタで製作した型に液体シリコーンゴムを流し込み硬化さ せる成形手法がよく用いられる.流体で駆動するソフトアクチュエータを製作する場合, 機構内部に空気を留める空隙を設ける必要がある.この場合、複数のシリコーンゴム部品 を後から接着する手法や、空気室を作るための中子を後から除去できる材料で製作し、シ リコーンゴムが硬化した後に取り除く方法などが用いられる [32].

また,柔軟材料を印刷可能な三次元プリンタが柔軟機構の製作に応用されている [33, 34]. Kako らは,シリコーンゴムを印刷可能な三次元プリンタを利用して折り紙に基 づくアクチュエータを設計し,ソフトグリッパに応用した [33].また,マルチマテリアル 三次元プリンタを利用することで,柔軟空気圧アクチュエータが製作できる [26].三次元 プリンタは曲面等を多く含む立体構造を製作しやすい.比較的複雑な構造を有するソフト ロボット機構の開発において,三次元プリンタは重要な役割を果たしていると考えられ る.硬さの異なる材料を同時に印刷可能なマルチマテリアル三次元プリンタは,複雑な構 造を有する柔剛ハイブリッド構造を一体成型できる.一方で,シリコーンゴムを型取りで 成形した場合と比較して,印刷で用いられる柔軟材料の強度面の課題が指摘されている [14].

生物の柔軟な身体を模倣したロボット機構が開発されてきた. Laschi らはタコの柔軟 な腕を模倣したロボット機構を開発した [35]. Bell らは, 棘皮動物の表面に存在する管足 を模倣した柔軟構造を開発した [36]. Katzschmann らは, 信号線などでつながれていな い, 水中を自律的に移動可能な, 流体駆動ソフトアクチュエータを利用して泳ぐ魚型のロ ボットを開発した [37]. また, 柔軟構造と硬質構造を組み合わせた, 筋骨格動物の構造を 模倣した機構が研究されている. Tebyani らは, マルチマテリアル三次元プリンタを利用 して, 人体の骨と靭帯, 腱を模倣した指機構の製作方法を提案した [12]. Hughes らはマ ルチマテリアル三次元プリンタで製作した人間の手の骨格を模倣した柔軟機構をロボット アームの先端に取り付け, 指の受動的な変形を利用したピアノの演奏を実現した [13]. 生 物の複雑な身体の模倣を行う上で, 柔剛ハイブリッドな機構の製作手法は重要な技術の一 つである.

1.2.2 柔剛ハイブリッド機構

新山は,硬さと柔らかさの利点を兼ね備えた機構をハイブリッド身体と呼称し,自然界 におけるハイブリッド身体として筋骨格系を挙げた [38].また,飯田らは硬い構造と柔軟 な構造を併せ持つ身体のシステムを柔剛ハイブリッドシステムと呼称し,重要性を主張し ている [9]. 文献 [9] にならい,本稿では,柔軟材料と硬質材料を併せ持つ機構を柔剛ハイ ブリッド機構と呼称する.

硬質材料からなる硬いリンクの多関節ロボット機構であっても,外界と接触する部分に 柔軟な材料や構造を使用する場合がある.井上らは半球状の柔軟な指腹を有する柔軟指を モデル化し,実験的に検証を行った [39]. Kim らは,柔軟材料膜で密閉された空気室を手 先に有するグリッパ機構と,空気室の圧力のフィードバックにより安全な接触を可能にす るロボットシステムを開発した [40]. Iwamasa らは,硬い指の間に張った弾性糸の側部 で把持対象物を保持することで,弁当の総菜の小分けに用いられる紙カップを柔軟に保持 することの可能なバインディングハンドを開発した [41].

柔軟機構と硬質材料をあわせることで,機構の剛性に異方性を持たせることができる [13]. また,変形挙動を調整することが期待できる. Park らは,ソフトグリッパの指とし てよく用いられる柔軟空気圧駆動アクチュエータの駆動速度と指先力を同時に改善するこ とを目的として,柔軟材料と硬質材料を組み合わせた機構を開発した [10]. Jin らは,シ リコーンゴム膜の中に切り紙状にカットしたプラスチックシートを組込んだ構造を提案 し,切り紙パターンにより,提案するシリコーンゴム膜からなるインフレータブル構造の 膨張形状を調整できることを示した [42]. 最適化設計を適用することで所望の形状に近い 形状で膨らむ設計が実現されている. また,伸縮性の低い糸や布を付加することでシリ コーンゴムの変形を部分的に拘束するソフトアクチュエータの製作手法が用いられること がある [43, 44].

生物の身体は柔軟構造と硬質構造の組み合わせからなることが多い. 筋骨格動物は硬質 な骨と、柔軟な脂肪や筋などの組み合わせからなる. 生物の柔剛ハイブリッドな構造を模 倣したロボット機構が開発されてきた. Niiyama らは, 空気圧人工筋を搭載した 2 脚の跳 躍ロボットを開発した [45].また,シリコーンゴムを硬いリンクと組み合わせることで, 背骨を模倣した機構が製作されている [46]. ほかにも,人間の手の骨格などに基づく機構 の開発例がみられる [47, 48]. 人間や動物の関節は単純な回転関節とは異なり、靭帯、筋 が曲面状の骨の間に複雑に配置されている.こうした複雑な構造を回転関節などで置き換 えることにより、多関節構造として単純化することができる.一方で、ソフトロボットの 研究では、生物身体の複雑な構造の再現に取り組む例がみられる. Hughes らは、複雑な 柔剛ハイブリッド機構がもたらす剛性異方性を利用することで、環境との相互作用を活用 する conditional model を提案した [13]. マルチマテリアル三次元プリンタを用いて製作 された人間の骨格と靭帯を模倣したハンド構造を実験に用いている.Niikura らは,キリ ンの身体の力強さと柔軟性に着目し、筋骨格を再現したキリンの首を模倣したロボット機 構を作成した [11]. 設計は解剖学に基づいており、キリンが持つ身体の複雑さを有してい ると考えられる. また Hosoda らは、人間の指腹を模倣し、シリコーンゴム製の柔軟指腹 にセンサを埋め込んだシステムを開発した [49]. こうした柔軟構造と硬質構造を併せ持つ

複雑な構造の製作手法は,生物に基づく柔剛ハイブリッド機構の研究開発や,生物身体の 構成的解析手法を用いた研究等において重要な技術と考えられる.

1.2.3 機構要素の結合

硬い部品同士を組み合わせた機構の組み立てでは、ネジやリベットを用いる方法、圧入 など硬い構造同士の摩擦や噛み合いを利用した方法などを用いることができる.また、薄 い構造は硬い材料でも弾性を示す場合があり、スナップフィットなどの摩擦や弾性を利用 した組立て手法を利用することができる.古くから利用されてきた木工継手も硬い構造を 前提とした組み立て手法であり、コンピュータを活用した結合部構造の設計手法が提案さ れている [50].一方で、十分に柔軟な材料からなる構造を結合する場合、硬い部品同士の 組み立てに用いられてきた手法の適用が難しくなる場合がある.柔軟構造と硬質構造をど のように結合するか設計段階から考慮しなくてはならず、柔剛ハイブリッド機構の製作だ けでなく設計にも影響を与えうる.柔軟な材料からなる部品の結合手法は、柔剛ハイブ リッド機構の開発において重要な要素技術である.

異種材料を接着する際には接着面の微細な表面処理が必要になることがある [51]. 一方 で、微細な表面処理を必要とする接着手法を用いる場合、微細加工の可能な設備が必要に なる.新山は、跳躍ロボットの開発に用いるバルブや空気圧筋の入手性の問題に直面した 経験を挙げ、研究のための材料や設備の入手性の重要性を指摘した [52]. 柔剛ハイブリッ ド機構の研究開発においては、なるべく扱いが簡易で、入手性の高い加工機を用い、試作 に向く結合手法が望ましい.特に FDM 方式の三次元プリンタはすでに広く利用されてお り、比較的低価格で入手できるため、研究開発で利用しやすい.

ロボット機構の試作において、シリコーンゴムと三次元プリントした部品を結合する 手法が提案されている [17, 53, 54]. Ma らは、三次元プリンタによる硬質部品の製作と 液体シリコーンゴムなどの型取りを組み合わせた硬質部品に柔軟材料を結合する hyblid deposition manufacturing (HDM)を提案し、ハンド機構の製作などに応用した [17]. 三 次元プリンタを活用した結合手法であり、専用の設備を用いないため利用しやすい結合手 法である.射出成型を応用した異種材料の結合手法としてインサート成形が挙げられる [55]. 金型の中に金属部品をあらかじめ挿入した状態で樹脂材料を射出することで、金属 材料が樹脂材料に埋め込まれた状態で強固に結合する製作手法である. Bell らは、提案 するシリコーンゴムの射出成型手法の応用例の一つとして、三次元プリントした硬質材料 の多孔質構造にシリコーンゴムを射出することで、硬化後にシリコーンゴムが硬質部品と 結合する手法を示した [18]. 多孔質構造を用いた結合は HDM と結合の原理に共通点があ る. 一方で、多孔質構造内部のループ状の流路にシリコーンゴムを充填することで、シリ コーンゴム自体が破断するまで結合部は完全な破断が発生しない. そのため高強度な結合 が期待できる.しかし,多孔質構造内部の細い流路に材料を充填するために射出成型を利 用する方法であり,射出成型用の型構造が複雑になる可能性がある.射出成型の場合,結 合したいシリコーンゴムの形状に合わせた型が必要である.もし両端のみが硬質構造に結 合した靭帯のような構造の場合,結合部以外を結合させないような複雑な型を設計する必 要がある.このように,結合部と非結合部を分けるために型が複雑になりやすいと考えら れる.また,射出成型機を必要とする結合手法であり,三次元プリンタとシリコーンゴム の成型に用いる道具のみでは結合を実現できない.多孔質構造を用いた手法のように高強 度での結合が期待できながら,HDM のように射出成型機を必要としない結合手法が求め られる.

1.2.4 シミュレーションとモデリング

柔軟機構の形状や材料分布などの設計パラメータは、機構中に連続的かつ無数に分布し ているとみなすことができ、その組み合わせが膨大である. そのため、試行錯誤的な設計 が困難な場合がある.柔軟機構の膨大な設計空間から設計目的を満たす設計パラメータの 組み合わせを探索するために、最適化設計が利用されている [56, 57, 58, 59, 60]. Wang らは、商用 FE ソフトを利用して PneuNet 型ソフトフィンガーの寸法の最適化設計を 行った [56]. Skouras らは、所望の形状に膨張する風船の型形状を最適化設計した [57]. Skouras らは、所望の形状に変形可能な柔軟なキャラクターフィギュアの材料分布とアク チュエータ配置を最適化設計する手法を提案した [58]. Ma らは, 所望の形状に変形する 空気圧駆動の柔軟機構の材料分布を最適化設計する手法を提案した [59].Zhang らは,空 気圧で駆動するマルチマテリアルな柔軟指の屈曲量を最大化するために、部品の形状をト ポロジー最適化設計した [60]. 最適化設計にシミュレーションを利用する場合, 柔軟機構 のモデリングが重要である.シンプルな構造であれば、解析モデルを定式化できる場合が ある. Sachin らは、空気圧で膨張する平坦膜の変形挙動を予測する解析モデルを定式化 した [61]. Bishop-Moser らは、円筒状の弾性膜に 2本の糸が配向されたアクチュエータ の運動学などに基づき,糸の配置パターンに対する変形挙動などをまとめた [62].より一 般的な柔軟構造のモデリングでは,弾性体をメッシュ分割するモデルを用いられる.中で も、連続体力学に基づいた物理的なモデルとして有限要素モデルが挙げられる [63]. 科学 計算で用いられるシミュレーションモデルでは精度が重視される一方で,コンピュータグ ラフィックスでは,シミュレーションの速度や視覚的な妥当性が重視される [20].たとえ ば、シミュレーション中に直接モデルを操作可能などリアルタイムなシミュレーションに 向いた特徴を有する position based dynamics (PBD) が提案されている [64]. 機械設計 にシミュレーションを活用する場合、機械の変形挙動の見た目だけでなく、物理的な設計 パラメータと変形挙動の対応を予測することが必要であり、シミュレーション結果には一

定の物理的な妥当性が求められる.一方で,多くの設計パターンをシミュレーションで検 証する場合,モデリングの簡易さやシミュレーションの速さも重要である.モデルの選択 では,シミュレーションに求められる物理的な正確性とモデリングの簡易さやシミュレー ション速度等のトレードオフを考慮する必要があると考える.ソフトロボットのシミュ レーションを想定したソフトウェアが開発されている.線形弾性モデル,非線形材料モ デルなど複数種類のシミュレーションモデルを含むシミュレーションフレームワークの SOFA が開発された [65].ソフトロボットの制御を目的とした高速なシミュレーションが SOFA によって実現されている [66].また,ボクセルベースのマルチマテリアルソフトロ ボットの運動のシミュレーションを想定した VoXCAD が開発された [67].

細い弾性体や薄い弾性体の有限要素モデリングでは、立体メッシュで離散化されたモ デルの代わりに、曲線や曲面を離散化したモデルを利用する場合がある.細い弾性ロッ ドの形状を曲線で記述することで一次元的な弾性体モデルを定式化できる [68, 69, 70]. Gazzola らは伸びやせん断変形を考慮したソフトフィラメントの数値計算モデルを定式 化し、ねじり変形等のシミュレーションに適用した [70]. また、Mochiyama らは非伸縮 の弾性ロッドモデルに基づく実時間での弾性ロッドの変形推定を行った [71]. さらに, 薄い膜状の弾性体のモデリングでは,面状のメッシュを組み合わせた曲面状のモデルが 利用されている [57]. 柔軟膜の内部に非伸縮性の糸を組み込んだ fiber-reinforced 機構 はソフトアクチュエータとして用いられている. Xavier らは商用ソフトウェアを用いた fiber-reinforced 機構のモデリング手法をまとめており、糸を quadratic beam element としてモデル化し、柔軟マテリアル部分と拘束条件をもちいて結合する手法や、幾何拘 束条件を活用して特定形状のアクチュエータをモデル化する手法を説明している [21]. 文 献 [21] では,円周方向への膜の膨張を幾何拘束で制約する手法が説明されているが,適用 できる機構形状が限定される.提案手法も幾何拘束を利用したモデリング手法であるが, メッシュの自動編集とメッシュエッジの等長拘束を組み合わせる方法を提案しており、原 理的には糸経路と膜形状の制約が少ないと考えられる. 文献 [69] は、離散ロッドモデル の各辺の長さを一定に保つ inextensibility constraints を非伸縮ロッドのモデルに用いて いる.提案手法では、メッシュエッジとして組み込まれた糸モデルに対して、各辺の長さ を一定に保つ幾何拘束を課すことで、糸が組み込まれた膜をモデリングする. このとき糸 は、曲げ剛性を考慮しない等長な折れ線としてモデル化する.この等長な折れ線単体は物 理的なモデルではなく,弾性膜のメッシュエッジに拘束条件として組み込まれたときに初 めて fiber-reinforced 弾性膜における糸による変形の拘束を表現することができる.提案 手法でメッシュエッジに対して課す拘束条件を Constant edge-length constraint と呼称 し、ロッドモデルに課す inextensibility constraints[69] と区別する.

1.3 目的と貢献

本研究は,柔軟材料と硬質材料の簡易な結合手法および,簡易な作業工程を特徴とする モデリング手法の提案と検証を目的とする.本稿では,多孔質構造に液体状の材料を充填 し,硬化させることで柔軟構造と硬質構造を結合する手法を液体充填法と呼称する.最初 に,液体充填法に用いる構造として,ジャイロイド構造を利用することを提案する.ジャ イロイド構造を活用した結合手法は,高強度な結合が期待できる.また,ソフトロボット 機構のプロトタイピング設備として一般的な FDM 方式の三次元プリンタとシリコーンゴ ムの成形のための道具のみで実現できるため利用しやすい.ジャイロイド構造を多孔質構 造として利用した液体充填法を柔剛ハイブリッド機構の製作に活用することを念頭に,二 つのタイプの結合手法を提案する.

まず,ジャイロイド構造を活用し,硬化済みのシリコーンゴム部品を硬質部品に逐次的 に結合する付加型液体充填法を提案する.また,靭帯で結合された球関節構造や背骨構造 を ALIF で製作する.次に,ジャイロイド構造を型に押し込み液体シリコーンゴムを充填 する,押込み液体充填法を提案する.押込み液体充填法は,射出成型機などの専用の設備 を用いずに,粘り気のある液体シリコーンゴムを細い流路に充填する押込み成型を利用す る.結合強度を引張試験を通して評価し,背骨機構と指機構の製作を通して手法の有用性 と特徴を示す.

非伸縮性の糸を等長拘束を課した折れ線でモデル化し、メッシュ編集により糸経路に合わせたメッシュを生成した弾性膜モデルに糸モデルを組み込むモデリング手法を提案する.まず、メッシュの自動編集の方法を説明する.また、編集されたメッシュエッジに等 長拘束を課した fiber-reinforced 膜のモデルを定式化する.2次元 FE モデルに糸を組み 込んだモデルのシミュレーションを通して、糸が膜の変形を拘束することによる非一様な 変形を確かめる.

貢献を以下にまとめる.

- 柔軟構造と硬質構造の結合の分類と定義を行った.
- 多孔質構造を用いた結合手法に、FDM 方式の三次元プリンタで印刷可能なジャイロイド構造を利用することを提案した。
- ・ 靭帯一骨格構造のように入り組んだ構造において硬質材料と柔軟材料を逐次的に 結合する付加型液体充填法を提案した.また、球関節機構と背骨機構の製作を通 じて、骨格上に複雑に張られた靭帯で結合された関節構造を再現できることを示 した.
- 押込み成形を活用し、高強度に柔軟構造と硬質構造を結合する押込み液体充填法を

提案し,強度評価を行った.また,押込み液体充填法を用いて背骨機構と指機構を 製作した.

 非伸縮性の糸の等長拘束と弾性膜メッシュの自動編集を組み合わせた fiberreinforced 膜のモデリング手法を提案し、二次元の有限要素 fiber-reinforced 弾 性膜の実装例を示した.

1.4 論文構成

第2章は,柔軟構造と硬質構造の結合の定義と分類を行う.第3章は,液体充填法のコ ンセプトを説明する.また,ジャイロイド構造を活用し,硬化後のシリコーンゴム部品を 硬質部品に逐次的に結合する付加型液体充填法を説明する.さらに,柔剛ハイブリッド機 構の製作例を示す.第4章ではまず,液体シリコーンゴムの射出装置を用いずに狭い型に 充填を行う押込み成型を説明する.また,押込み成形を応用しジャイロイド構造の中に液 体シリコーンゴムを充填する押込み液体充填法を提案し,強度評価実験と柔剛ハイブリッ ド機構の製作例を報告する.第5章は,fiber-reinforced 弾性膜の糸経路をメッシュ編集 を用いて表現し,幾何拘束条件として糸を弾性膜メッシュに組込むモデリング手法を説明 する.また,提案手法を用いて二次元のfiber-reinforced 膜をモデリングし,シミュレー ション結果を示す.第7章は,論文のまとめと今後の展望について述べる.

第2章

柔剛ハイブリッド機構の分類

柔剛ハイブリッド機構は、多くの柔軟構造と硬質構造の結合パターンが想定される.た とえば、人間の身体は骨や脂肪などを併せ持つ、身近な柔剛ハイブリッド構造と捉えるこ とができる.その構造は、細長い腱や靭帯、薄い皮膚、骨などが組み合わさり複雑に構成 されている.同様に、柔剛ハイブリッドなロボット機構の構成も複雑になりうる.本章で は、結合部の構造をクラス分けし、各クラスの特徴について考察する.また、組込み結合 と非組込み結合を定義し、これらの特徴について考察する.

2.1 分類方法

柔軟材料と硬質材料からなる機構要素を,材料の硬さと機構形状の組み合わせで分類する.本節では,材料の硬さと機構形状に着目し,基本的な機構要素を分類する.

最初に,柔らかい機構要素と硬い機構要素を分類する.機構要素の柔軟性は,材料と構造の両方に依存する.外力に対して変形する点は同じであっても,構造に由来する柔軟性と材料に由来する柔軟性は性質が異なる.細い構造や薄い構造の場合,硬い材質であっても容易に曲げることができる場合がある.このような構造は,フレキシブルである.塊では硬く変形しにくい金属なども,薄い場合には板バネのように大変形が可能な場合がある.一方で,材料自体が十分に柔軟な場合,構造の曲げに加えて伸びなどの変形が許容される.また,厚みのある構造であっても,材料自体の柔軟性があれば,外力に対して変形が可能である.本稿では,ほとんど変形しない構造に加えて,硬い材料からなるフレキシブルな構造も硬質構造に分類する.すなわち,非伸縮性の糸やプラスチックシート,板バネなどは硬質構造とする.一方で,柔軟な材料からなり,伸縮性を有する構造を柔軟構造に分類する.たとえば、シリコーンゴムやゲル材料からなる構造が挙げられる.

次に,材料の硬さと機構形状に基づく機構要素の分類を行う.機構要素の構造を考慮 した分類を Fig. 2.1 にまとめる.各行は材料の硬さで分かれており,各列は機構形状で分

	Linear	Planar	Solid
Soft	Expansion / Contraction Bending Twisting	Expansion / Contraction Bending	Deformation
Hard	Bending Twisting	Bending	Rigid

Fig. 2.1: Classification of soft and hard mechanism components based on material hardness and shape of mechanisms.

かれている.機構形状は,線状,面状,立体の三通りに分ける.柔軟-線状構造は,シリ コーンゴムひものように,伸び,曲げ,ねじりの変形が可能な細長い構造を指す.柔軟-面状構造は,シリコーンゴム膜のように,曲げだけでなく伸ばすことが可能な薄い構造を 指す.柔軟-立体構造は,シリコーンゴムの四角柱のように,外力に対して変形する柔軟 構造を指す.硬質-線状構造は,糸のように,容易に曲げ,ねじり変形が可能であるが, ほとんど伸縮しない構造を指す.硬質-面状構造は,プラスチックフィルムや紙のよう に,曲げ変形可能であるがほとんど伸縮しない構造を指す.硬質-立体構造は,樹脂や金 属などでできたほとんど変形しない構造を指す.

次に,材料の硬さと機構形状の組み合わせによる分類を Fig. 2.2 に示す.線状構造(1 次元的構造),面状構造(2 次元的構造),立体構造(3 次元的構造)をそれぞれ構造の次 元に合わせて 1,2,3 の指標で表記する.柔軟部の構造と硬質部の構造を *i*,*j* ∈ {1,2,3} と 置くとき,機構要素のクラスを指標の組(*i*,*j*)で表す.Fig. 2.2 の最左列の指標は柔軟構 造,最上行の指標は硬質構造の機構形状を表し,機構要素の例を対応する各行列要素に図 示している.

2.2 クラスごとの特徴

2.2.1 各クラスの特徴と開発例

本節では各クラスの特徴を説明する.また,各クラスに属する構造に関連した研究開発 例を紹介する.

(1,1) クラスの例として,柔軟材料と硬質材料の線状構造が連結した構造が挙げられる. 結合面が小さく材料間の結合が難しいと考えられる.また,(1,2) クラスの例として,伸 縮性の糸を非伸縮性のプラスチックシートに結合した構造が挙げられる.(1,1),(1,2) ク



Fig. 2.2: Classification of soft-hard hybrid mechanism components.

ラスのロボット機構への実用的な応用例を挙げることはできないが,機構的に存在しうる 組合わせである.

(1,3) クラスの例として,硬質な立体構造に柔軟な線状構造が結合した機構が挙げられる. Tebyani らは,腱,靭帯,骨が結合した靭帯の指の構造を模倣した機構を,マルチマテリアル三次元プリンタで一体成型する手法を提案した [12]. 立体的な骨に柔軟材料で印刷された腱が接続された構造であり,腱を細い柔軟構造とみなすことで (1,3) クラスに分類できる.

(2,1) クラスの例として, 柔軟な膜に非伸縮な糸を組み込んだ構造が挙げられる. Fiberreinforced 機構が代表的であり,空気圧駆動の柔軟なアクチュエータに応用されている [72, 73]. Deimel らは,シリコーンゴム製の指機構の周囲に糸を配置し変形を拘束するこ とで,空気圧の印加で屈曲する PneuFlex を指に用いた 5 指ハンド機構を開発した [72]. Stalin らは, fiber-reinforced 機構に自動で fiber を配置する手法を提案した [73].

(2,2) クラスの例として,伸縮可能な柔軟膜に非伸縮な膜構造が結合された機構が挙 げられる. Jin らは,プラスチック製の切り紙シートを薄いエラストマー膜に組込んだ Kirigami-inspired inflatable の変形を設計する方法を示した [42]. Pikul らは,平坦なエ ラストマー膜に不織布をパターン状に組込んだ構造を作成する手法を提案し,作成した平 坦膜が複雑な膨張形状を再現可能なことを実験的に示した [74]. (2,3) クラスの例として, 硬い立体構造に柔軟膜を結合した機構が挙げられる. Aoyama らは, 樹脂製の薄く硬質な構造の表面に, 離型の工程なしでシリコーンゴム膜を結合する 製法を提案した [54].

(3,1) クラスは、立体の柔軟構造と非伸縮の線状構造が結合した機構である. Skouras らは糸で牽引することで動作する柔軟なキャラクタの最適化設計手法を提案した [58]. 文 献 [58] 中では、シリコーンゴム製の身体に数本の糸が固定し、糸の引張によりキャラクタ を変形させる機構の設計について述べられている. 自然界における類似構造として皮膚に 生えた毛が挙げられる.

(3,2) クラスの例として、立体的な柔軟構造に非伸縮な膜が結合された構造が挙げられる. Zhang らは、ソフトロボットグリッパの製作において、グリッパの指腹側に布を付加している [44]. 非伸縮な布が変形を拘束することで、空気圧を印加した際にグリッパの指が屈曲する.

(3,3) クラスは立体の柔軟,硬質構造が結合した機構である. Zhu らは,マルチマテリ アル三次元プリンタを用いて,空気圧駆動柔軟指機構を開発した [75].開発された指機構 では,コネクタと空気圧チューブに硬質材料,指と真空チャンバに柔軟材料が用いられて いる.

2.2.2 組込み結合と非組込み結合

柔軟構造と硬質構造を結合した機構要素のパターンとして,硬質(柔軟)構造中に柔軟 (硬質)構造が埋め込まれた機構要素と,硬質(柔軟)構造から柔軟(硬質)構造が露出し た機構要素が挙げられる.各機構要素の結合状態を幾何学的に定義し,それぞれの特徴を 考察する.

結合を定義する準備として、まず線状構造及び面状構造を定義する. 円筒状の構造を考 える. 円筒構造の径を h とおく. また、円筒構造の軸方向の寸法を l_t と置く. 比率 h/l_t が十分に小さい場合、円筒構造は線状構造である. 物理的には、目視できる程度の屈曲な どの大変形を生じる細径構造を線状構造とみなす. h/l_t がどの程度小さい場合に線状構 造とみなせるかは、構造を構成する材料などにも依存すると考えられる. 膜構造も、膜の 厚みと厚み以外の方向の寸法の比率に関して同様に定義する. 以上の定義により、線状構 造および膜構造は体積を持った立体構造とみなせる. したがって以降の議論では、線状 構造と膜構造を立体構造と共通の枠組みで扱う. このとき、線状構造、面状構造、立体構 造から選んだ 2 個の任意の構造を A, B と置く. A, B の結合、非結合状態のパターンを 考える. A, B の体積が占める領域を、それぞれ閉集合 A, B とあらわす. また、空集合 を \emptyset と表記する. さらに、閉集合 X の内点集合を Int(X)、境界点の集合を ∂X と定義 する. まず、A, B の組み合わせを物理的に実現可能なものとそうでないものに分類する.



Fig. 2.3: Classification of joining patterns.

 $Int(A \cap B) \neq \emptyset$ の場合, $A \cap B$ の領域は $A \ge B$ が同時に存在することになる. しかし, これは物理的に実現できない. したがって, $Int(A \cap B) = \emptyset$ の場合を実現可能 (feasible) な機構と定義する. さらに,実現可能な機構は, A, Bが互いに接触する機構要素とそう でない機構要素に分類できる.

定義 2.2.1. $A \cap B \neq \emptyset$ かつ $Int(A \cap B) = \emptyset$ を満たすとき, $A \ge B$ は接触(contact)し ている.このとき, $\partial A \cap \partial B$ は接触領域を表す. $A \cap B = \emptyset$ のとき,A, B は非接触であ る.A, Bの接触領域を Cnt(A, B) と表記する.

接触領域 $\partial A \cap \partial B$ は \mathcal{A}, \mathcal{B} の境界の重なり部分を意味しており物理的に実現できないが、 本モデルでは接触領域と解釈する. さらに、構造の結合を、Fig. 2.3 に図示するように、 組込み結合 (embeded joining) と非組込み結合 (non-embeded joining) に分類する. 定 義 2.2.1 に基づき、各結合状態を以下のように定義する.

定義 2.2.2. $\operatorname{Cnt}(\mathcal{A},\mathcal{B}) \neq \emptyset$ かつ $\partial A \supset \partial B$ を満たすとき, \mathcal{B} は \mathcal{A} に組込み結合して いる. $\operatorname{Cnt}(\mathcal{A},\mathcal{B}) \neq \emptyset$ かつ $\partial B \supset \partial A$ を満たすとき, \mathcal{A} は \mathcal{B} に組込み結合している. $\operatorname{Cnt}(\mathcal{A},\mathcal{B}) \neq \emptyset$ であるが組込み結合の条件を満たさない場合, \mathcal{B} は \mathcal{A} に非組込み結合し ている.

組込み結合および非組込み結合した機構要素について考察する.考察のために、柔軟構



Fig. 2.4: Examples of mechanical components joined soft and hard structures by nonembedding joining in (3, 1), (3, 2) classes.

造の指標を $I_s = 1, 2, 3$,硬質構造の指標を $I_h = 1, 2, 3$ とおく.まず,組込み結合の機構 要素を考える.線状構造を線状構造に組込み結合する場合((1,1)クラス),線状構造を面 状構造に組込み結合する場合((1,2),(2,1)クラス),面状構造を面状構造に組込み結合す る場合((2,2)クラス),立体構造を立体構造に組込み結合する場合((3,3)クラス)につ いてそれぞれ組込み結合の可否を判別するとき,結合する二つの構造の寸法の大小関係を 考慮する必要がある.以下では,各構造の具体的な寸法を考慮せず,組込み結合可能な寸 法の組み合わせが存在する場合には,組込み結合可能とする.

 $I_s \leq I_h$ のとき,柔軟構造は硬質構造に組込み結合できる.逆に, $I_h \leq I_s$ のとき,硬 質構造は柔軟構造に組込み結合できる.線状構造の中に面状構造を組み込めないように, 残りの構造は組込み結合できない.また,Fig.2.2の3列目のクラスの場合,硬質構造に 柔軟構造を組込み結合しても機構として動作を生み出さない.したがって,硬質構造に柔 軟構造を組込み結合した構造は,柔軟構造の変形を利用して動作する機構を考えるうえで 考慮する必要がないと考えられる.

次に,非組込み結合の機構要素を考える.非組込み結合を実現不可能なクラスは原理的 には存在しない. Fig. 2.2 の 3 列目に示す機構要素例は硬質構造と柔軟構造を非組込み結 合した機構である.また,(3,1),(3,2) クラスにおける硬質構造と柔軟構造を非組込み結 合した機構例を Fig. 2.4 に示す.

さらに,(1,2),(2,1),(2,2) クラスのなかでも特徴的な構造をいくつか例示する. (1,2),(2,1),(2,2) クラスの場合,Fig.2.5 のように硬質膜に柔軟糸や細長い柔軟膜を 並列に配置した機構等を考えることができる.硬質膜が柔軟膜よりも大きな曲げ剛性を 有する場合,膜は異方性の曲げ剛性を持つと考えられる.Fig.2.5 の場合,青い矢印方向 の曲げ剛性は赤い矢印方向の曲げ剛性よりも高くなると考えられる.また,(2,2) クラ スでは,柔軟膜に硬質膜を結合した機構が想定できる.(2,2) クラスの機構要素の例を Fig.2.6 にまとめる.膜を膨らませた形状を定性的な推測に基づいてまとめた模式図であ



Fig. 2.5: Soft-hard hybrid membrane with anisotropic bending rigidity. Corresponding classes are, from left, (2, 1), (1, 2), and (2, 2) classes, respectively. Red and blue arrows depict bending directions with low and high bending rigidity, respectively.

る. Fig. 2.6 の 1 行目は柔軟材料のみからなる. 均一に変形することで左右対称に山なり な膨張形状が得られると考えられる. Fig. 2.6 の 2 行目から 4 行目は,硬質な膜で膜を拘 束した場合の膨張形状である. 円状に穴が開いた硬質膜が柔軟膜に結合している場合,硬 質膜部分は非伸縮なため,穴の内側の柔軟膜のみが大きく膨張すると考えられる. また, 膜境界をまたぐように硬質膜が結合している場合,膜の片側のみが膨張したり,二つの 山に分かれるように膨張したりすると考えられる. また,文献 [73, 74] にみられるよう に,同心円状や渦巻状に膜を拘束した場合,膨張により急峻な凸形状に変形すると考えら れる.

2.2.3 製作方法とクラス分類

製作手法の観点で Fig. 2.2 を考察する. Fig. 2.2 の 1 列目は硬質部品に糸を用いた機構が多い [58, 72, 73]. Fig. 2.2 の 2 列目は,硬質部品に布を用いた機構が多い [74, 44]. Fig. 2.2 の 3 列目は,硬質部品に柔軟部品をかみ合わせたり,硬質部品を柔軟部品に埋め 込む手法が良く用いられる [54, 17]. このように,具体的な結合部の構造や各構造に用い られる材料はクラスによって異なっていると考えられる.したがって,製作手法もクラス ごとに異なる.複数のクラスの結合を含む機構の場合,異なる種類の結合手法を組み合わ せなければならない可能性がある.設計者は結合の作業工程を意識しながら機構形状を設 計することが求められる.

2.2.4 モデリングとクラス分類

モデリングの観点から Fig. 2.2 の分類を考察する. 柔剛ハイブリッド構造をモデリング する場合,機構形状と材料の特性ごとにモデルを使い分け,後から拘束条件を用いて結合


Fig. 2.6: The example of planar inflatable soft-hard hybrid membranes of (2, 2) class.

する手法が考えられる.例えば,細い構造や薄い構造は線状モデルや面状モデルを用いる 場合がある.これらのモデルには,立体メッシュを用いてモデリングする場合と比べて節 点数を減らせる等の利点がある.立体構造のモデリングでは,四面体メッシュ等を用いた 離散化を用いることが多い.ひずみが小さい場合,線型な幾何学モデル,材料モデルを採 用できる場合がある.一方でひずみが大きい場合,非線形な幾何学モデル,材料モデルを 用いなければならない可能性がある.このように,機構形状と材料の特性によって用いら れるモデルが異なる.Fig.2.2では,柔軟構造と硬質構造の結合を機構形状と材料の組み 合わせに関して9つのクラスに分類した.モデルの選択においても構造の形状や材料の 柔軟性などを考慮しなければならない.柔軟構造と硬質構造を結合した構造のモデルのパ ターンも,同様に9つのクラスに分類できると考えられる.

2.3 課題と展望

本章では柔軟構造と硬質構造の結合を定式化した.また,柔剛ハイブリッド構造の結合 を分類し,分類全体の考察を行った.本章で定義する組込み,非組込み結合は,一方の構 造が他方の構造に完全に組込まれているか否かを区別することができる.しかし,一方の 構造に結合している他方の構造が,外部の環境と接触可能であるかは区別できない.たと えば, *A*が*B*を囲うような構造の場合, *B*は結合状態に関わらず外部環境と接触すること ができない.多くのロボット機構は環境と接触することで力を発揮しタスクを実行する. そのため,結合された構造が環境と接触できるかどうかや,環境と接触することができる のは柔軟,硬質構造どちらになるかを区別できることは重要と考えている.

第3章

ジャイロイドを応用した柔軟材料の 硬質材料への結合

液体シリコーンゴムを多孔質構造に充填した状態で硬化させることにより,硬質な多孔 質構造とシリコーンゴムを結合することができる [18]. 文献 [18] では機械による液体シリ コーンゴムの射出を用いて充填しており,一度の射出でシリコーンゴム部分を成形する手 法が用いられている.一方で,材料の射出による一体成型では型形状が複雑になる可能性 がある.たとえば,筋骨格動物の身体にみられる,骨格が靭帯で結合された構造を模倣す る場合,靭帯は両端のみが骨に固定された構造が多く,固定箇所と非固定箇所を分けるた めに複雑な流路を設計しなければならない.これを緩和するために,先にシリコーンゴム 部品のみを型成形した後に,逐次的に硬質構造に結合する製作手法を提案する.液体充填 法に基づく結合手法を提案し,多孔質構造としてジャイロイド構造を用いる.本章のはじ めに,液体シリコーンゴムを多孔質構造に充填することで結合を行う液体充填法(liquid infill method: LIF)のコンセプトを説明する.次に,硬質構造にシリコーンゴム部品を 逐次的に結合する付加型液体充填法(additive liquid infill method:ALIF)を説明する. そして,ALIFを用いて製作した柔剛ハイブリッドな球関節機構と背骨機構を報告する.

3.1 ジャイロイドを用いた液体充填法

本稿では,シリコーンゴムの部品と三次元プリントした PLA の部品の結合に焦点を当 てる.シリコーンゴムは PLA 等の硬質なプラスチック材料と比べて材料的に柔軟であ る.本研究では,LIF に用いる多孔質構造としてジャイロイド構造を提案する.

ジャイロイド構造に存在するループ状の流路に液体シリコーンゴムを充填した後に硬化 させることで、ジャイロイド構造を有する硬質構造とシリコーンゴムの柔軟構造を結合 できる. Fig. 3.1 はジャイロイド構造のループ流路を示している. Fig. 3.1 左の図は、文



Fig. 3.1: Loop flow path on a gyroid structure. The blue surface in the left figure is a gyroid, and red dotted arrows indicate the loop flow path. The yellow part of the right figure indicates the hard part with a handle. The liquid soft material can flow into the hole of the handle, and hard and soft structures are joined after curing the soft material.

献 [76] 記載のジャイロイド曲面の式を基に作成した.赤の点線はループ流路(loop flow path)を示している.ループ流路内でシリコーンゴムが硬化することにより,シリコーン ゴムがジャイロイド構造に輪を通した状態で結合する.Fig.3.1 右図は,黄色い硬質構造 の側面にハンドル状の構造が付いている.ハンドル状の構造の孔部分がループ流路とな り,柔軟構造と硬質構造が構造的に結合している.このように,ループ流路を利用した方 法は,トポロジ的に材料同士が輪を通した構造であり,柔軟もしくは硬質構造が破損しな い限りは結合部が破断しない.そのため,高強度な結合が期待できる.

ジャイロイド構造は Fig.3.2 に示すような三次元的な網目構造である.スライサソフト (PrusaSlicer, Prusa Research)上で充填構造(インフィル)のパターンとしてジャイロ イド構造を指定することで,自動生成可能である [77].また,PrusaSlicer で生成される ジャイロイド構造はサポート材なしで印刷可能である.ロボットの研究開発に用いられる ことが多い三次元プリンタを活用することができ,ジャイロイド構造の生成も簡易である ため,研究開発に利用しやすい構造である.PrusaSlicer で生成されたジャイロイド構造 の特徴については付録 A で述べる.

3.2 付加型液体充填法

ジャイロイド構造を壁面に有する結合穴にシリコーンゴムを充填し,硬化後のシリコー ンゴム部品を結合穴に挿入することで接着を行う.硬化後のシリコーンゴム部品を付加的 に結合するため,付加型液体充填法(additive liquid Infill method: ALIF)と呼称する. ジャイロイド構造内部に充填されたシリコーンゴムと硬化後のシリコーンゴム部品が結合



(a) Bird's eye view



Fig. 3.2: A gyroid structure fabricated by a 3D printer with PLA filament, (a) bird's eye view, and (b) top view.

し、ジャイロイド構造の内部に根を張った状態になるため、一定の結合強度が期待できる.

ALIF の作業手順を Fig. 3.3 にまとめる.まず,シリコーンゴム部品を型取り成形する. 次に,穴の内側の壁面に多孔質構造(本稿ではジャイロイド構造を使用する)を有する硬 質構造を三次元プリンタで製作する.このとき,穴の内側に多孔質構造を有する穴を,結 合穴(joining hole)と呼称する.Fig. 3.4 は結合穴の外観である.結合穴に液体シリコー ンゴムを注湯する.液体シリコーンゴムが充填された結合穴に硬化後のシリコーンゴム部 品を挿入する.注湯したシリコーンゴムが硬化することで,シリコーンゴム部品と硬質部 品が結合する.

3.3 球関節機構

本節では, 靭帯で結合された関節構造を模倣した球関節機構の製作について述べる. 製作した球関節機構は靭帯を模倣したシリコーンゴム部品によってリンク同士が結合されている. 射出成型を利用して, 両端のみが骨に結合した靭帯のような構造を製作する場合, 結合部以外の箇所が硬質構造と結合しないように液体シリコーンゴムの流路を工夫する必要がある. その場合, 射出成型に用いる型が複雑になることが想定される. 靭帯の端部のみが結合した球関節構造を ALIF で製作できることを示す.

製作する球関節機構の模式図を Fig. 3.5 に示す. Fig. 3.5a は球関節機構の主要な寸法 である. Fig. 3.5b は水平, 垂直方向の切断面図である.水平方向の切断面はリンク1の 結合穴の位置で切断した図である.円周方向に 120°間隔で結合穴を配置している.垂直 方向の切断面は結合穴の中心を通る.オレンジ色の靭帯の各端部に設けた突起を,リンク



Fig. 3.3: Process of ALIF.





1 およびリンク 2 の結合穴に挿入することで ALIF を行う. 円周方向に 120°間隔で並ん だ各結合穴に対して靭帯の結合を行う.製作後の球関節機構を Fig.3.6 に示す. 靭帯に相 当する帯状のシリコーンゴム部品の材料は Smooth-Sil 950 (Smooth-On, Inc.) である. リンク1の球体上の端部はリンク2の皿状の構造にはまった状態であり、シリコーンゴム 部品によって関節が離れないように緩く結合されている.

球関節機構を手を用いて動作させた. Fig. 3.7a, 3.7b は前方および後方への屈曲であ る. 前後の靭帯の配置は非対称なため, 前方よりも後方に大きく屈曲させることができ た. Fig. 3.7c は側方への屈曲である. 球関節は屈曲方向が制約されていないため, 側方へ の屈曲も可能である. Fig. 3.7d はリンク1をねじった時の変形である. 関節は靭帯を模 倣したシリコーンゴム部品によってゆるく結合されており、ねじり動作も可能であった.



Fig. 3.5: Structure of the spherical joint mechanism.

Fig. 3.8 は、リンク1に重りをつけて、基部リンクを片持ち支持した図である. 靭帯に よって球関節が固定されており、重力によって球関節は小さく屈曲している. 上部の靭帯 がリンク1を引っ張ることで屈曲が制限され、屈曲量が小さくなったと考えられる.

3.4 背骨機構

本節では,椎骨間の柔軟かつ複雑な結合を ALIF で再現した背骨機構の製作を報告す る.人体の背骨は靭帯が多層的に張り巡らされた構造からなり,これを模倣した背骨機構 の製作を射出成型で実現するためには,複雑な形状の型が必要になる.ALIF を用いるこ とで,多層的に張り巡らされた人体模倣の柔軟部品を逐次的に背骨の硬質リンクに結合 する.

Fig. 3.9 に椎骨を模倣した硬質部品の模式図を示す.椎骨の形状は文献 [78] を参考に し、単純化している.赤で示した部分はジャイロイド構造であり、靭帯を結合する箇所で ある. Hole 1 は棘間靭帯を模倣したシリコーンゴムを結合する. Hole 2, 3 は横突間靭帯 を模倣したシリコーンゴムを結合する. Hole 4, 5 は椎間関節に当たる部分である. 椎間 関節を結合する靭帯を簡略化し、シリコーンゴムで関節部を結合する.

Fig. 3.10 は,椎骨と椎間板を模倣した部品を連接した状態を,Fig. 3.9 に点線 A で図示 した切断面で表示した図である.Fig. 3.9 の椎骨下部の切断面をピンク色,椎間板部分を 水色で示している.背骨機構は,椎間板を模倣したシリコーンゴム部品を椎骨の凹部で挟 み込んだ構造である.椎間板は,シリコーンゴムの型取りで成形する.用いた型の構造に



Fig. 3.6: Spherical joint mechanism with two links which is joined by flexible ligaments made by silicone rubber.

ついては付録 B に記載する. 前縦靭帯および後縦靭帯は両端の椎骨および各椎間板と結 合している. ただし, Fig. 3.10 に示すように, 両端以外の椎骨には結合穴がなく, 前縦靭 帯および後縦靭帯と直接結合しない. また, 椎間板と椎骨は直接結合していない. すなわ ち, 前縦靭帯および後縦靭帯に結合した椎間板に挟まれる形で中間の椎骨リンクが固定さ れている. Fig. 3.11 は Fig. 3.10 を拡大した図である. 赤色で示された部分をシリコーン ゴムを用いて結合する. 椎間板の側部に非貫通の穴が開いており, 靭帯部品に設けた突起 部分をこの穴に挿入する. このとき, 穴にシリコーンゴムを流し入れた後に突起を挿入す ることで, 椎間板と靭帯を接着する.

椎骨の結合手順を, Fig. 3.9 点線 B の切断面図 Fig. 3.12 で説明する. 切断面をピンク 色,シリコーンゴム部品を水色で示す. まず,椎骨同士を,Hole 4,5 の位置が一致する ように並べる. このあと,ALIF のために割りばしを用いて Hole 4,5 に液体シリコーン ゴムを付ける. 硬化済みのシリコーンゴム部品を Hole 4,5 に挿入し,液体シリコーンゴ ムが硬化することで椎間関節部を結合できる. 椎間関節を結合する靭帯を模倣した部品は 単純な円筒形状であり,シリコーンゴムの型取りで製作する. この円筒状のシリコーンゴ ムの部品の製作に用いた型は付録 B に記載する.



(a) Forward bending.



(c) Lateral bending.



(b) Backward bending.



(d) Twisting.

Fig. 3.7: Manual bending and twisting of the spherical joint.



Fig. 3.8: The spherical joint mechanism that is fixed in a cantilevered state under gravity with two weights on the link 1.



Fig. 3.9: Structure of the vertebra-inspired link. The red parts indicate the gyroid structure of the joining hole.



Fig. 3.10: Joining process of posterior and anterior longitudinal ligaments on the series of vertebra-inspired links.



Fig. 3.11: Cross-section of the spine-inspired mechanism. The red parts are glued by liquid silicone rubber.

背骨機構の製作結果を Fig. 3.13 にまとめる. Fig. 3.13a, Fig. 3.13b は背骨機構の側面,上面図である.各シリコーンゴム部品が結合している様子を観察することができた. Fig. 3.14 は,背骨機構の変形の様子である.Fig. 3.14a, Fig. 3.14b は上下方向への屈曲である.上方向よりも下方向に大きく屈曲した.Fig. 3.14c は背骨構造の側方への屈曲である.側方にも柔軟に屈曲できることを確かめた.Fig. 3.14d は背骨機構のねじり変形である.椎間板と背骨機構は直接結合していないため,ゆるく結合された構造全体がねじれ



Fig. 3.12: Joining process of the facet joint ligament parts between series of spinal links.

るように変形可能であることを確かめた.

背骨機構では異なるクラスの結合が実現されている.棘間靭帯や横突間靭帯,前縦靭 帯,後縦靭帯は柔軟な膜状の構造であり,(2,3)クラスに分類される結合と捉えられる. さらに,椎間関節の部分は円筒状のシリコーンゴム部品によって結合されており,(3,3) クラスと捉えることができる.また,椎間関節と同様の結合手法を用いれば,さらに長い 円筒状のシリコーンゴム部品も結合可能であり,(1,3)クラスの結合も可能と考えられる. そのため,ALIF は(*,3)クラス(*は任意の指標)の結合を実現できる統一的な手法の 可能性がある.

ALIF の工程では、割りばしを用いてシリコーンゴムを結合穴に付着させる操作を行っ



(a) Side view.



(b) Top view.

Fig. 3.13: Fabrication result of the spine-inspired mechanism made using ALIF.

た.割りばしを用いてシリコーンゴムを付着させる作業は接着剤を塗る作業と類似してお り単純な作業である.一方で,シリコーンゴム部品の流動性により,液体シリコーンが予 期せぬ位置に付着したり,垂れたりする問題が生じた.Fig.3.15 は球関節および背骨機構 の製作で生じた予期せぬシリコーンゴムの付着をとらえた図である.Fig.3.15a に示すよ うに,垂れた液体シリコーンゴムにより,靭帯の内側が球関節の球体部分に引っ付いてい る.Fig.3.15b では,棘間関節など上部の部品から垂れた液体シリコーンゴムが後縦靭帯 付近に垂れた状態で硬化している様子が観察できる.今回の製作では動作に支障がなかっ たが,より複雑な構造に ALIF を適用する場合においては,垂れたシリコーンゴムの除去 方法などを考慮する必要があると考えられる.

3.5 課題と展望

手作業でジャイロイド構造に液体シリコーンゴムを付加する作業の途中で,意図しない 場所にシリコーンゴムを付着させたり,液体シリコーンゴムが垂れた状態で硬化したりす るなど問題が生じた. ALIF は手作業で結合が実現でき手軽な一方で,手作業に由来する



(a) Upward bending.



(b) Downward bending.



(c) Lateral bending.



(d) Twisting.

Fig. 3.14: Manual deformation of the spine-inspired mechanism.



(a) The case of the spherical joint.



(b) The case of the Spine-inspired mechanism. The liquid silicone rubber dripped inside of the mechanism.

Fig. 3.15: Unexpected dripping of the liquid silicone rubber in the ALIF process.

製作物のばらつきを避けることが難しい.結合作業の簡易さを保ちながら,安定して結合 可能な液体シリコーンゴムの充填方法の考案が課題である.

また,ALIF は結合穴を利用した結合方法であるため,結合部には結合穴を設けるだけ の体積が必要である.たとえば,人間の手指は多数の小さな骨が靭帯で結合されている が,これを ALIF で再現しようとすると,小さな骨部品に結合穴を設ける必要がある.こ のように,結合穴を設ける箇所にはある程度の体積が必要と考えられる.一方で,機構サ イズが大きくなるほど機構全体の重量が大きくなり,結合箇所にかかる負荷は大きくなる ことが予想される.ALIF を利用した機構の設計では,結合部体積と求められる結合力の トレードオフを考慮する必要があると考えられる.

第4章

押込み成形を用いた柔軟材料と硬質 材料の結合

硬化前の液体シリコーンゴムは粘り気があり,型の狭い流路に充填するのに時間がかか る.一方で,二液混合型のシリコーンゴムは混合後に一定時間が経過すると硬化が始まっ てしまう.そのため,狭い流路に材料を迅速に充填する手法が求められる.本章の最初 に,狭い流路に材料を迅速に充填する押込み成型について述べる.材料の射出装置を用い ずに液体シリコーンゴムを型に充填する手法である.また,押込み成形とLIFを利用し て柔軟材料と硬質材料を結合する手法を提案する.まず,4.1節で押込み成型について述 べる.次に,4.2節で結合手法を説明する.また,4.3節で引張試験の結果を報告し,結合 強度を評価する.さらに,4.4節で提案手法を応用し背骨機構と指機構を作成した結果を 報告する.

4.1 押込み成型

ソフトロボットの製作環境として,FDM 方式の三次元プリンタとシリコーンゴムの型 取り設備が広く用いられている.一方で射出成型を用いる場合は液体シリコーンゴムを射 出する装置が必要である.文献 [18] が例示した手法やインサート成形 [55] は材料を射出 する装置を必要とする.ジャイロイド構造は狭い流路を有するため,粘り気のある液体シ リコーンゴムを狭い流路に充填する手法は,ジャイロイド構造を利用した結合手法におい ても重要である.本節では,液体シリコーンゴムの射出装置を用いずに,液体シリコーン ゴムに圧力を加えて狭い流路の型に充填する押込み成型について説明する.また,押込み 成型の方法と型形状の分類について述べる.

押込み成型の手順を Fig. 4.1 にまとめる.押込み成型では、オレンジ色で示した内型 (inner mold) と赤色で示した外型 (outer mold) に分かれた型を用いる.まず、外型に



Fig. 4.1: Process of push-in casting. The red part is the outer mold, the orange is the inner mold, and the blue is silicone rubber.

液体シリコーンゴムを注湯する.次に,内型を外型内部に押し込む.押込みにより液体シ リコーンゴムが内型の内部に押し出される.内型および外型を離型し,不要な部分を切除 することで,目的の形状のシリコーンゴム部品を成形する.

押込み成型を行う型の設計では以下の点を考慮する必要がある.

- 内型を外型に押し込むことができる型形状を有すること.
- 型の下部から上部に向かって液体シリコーンゴムを流すことができる流路が存在すること.
- 型は離型のために分割可能であり、ネジなどで組立てが可能なこと.
- 外型に材料を貯めることができる構造を有すること.

また、型の組み立てのために用いるネジが押込みに干渉しない設計が求められる.

さらに、押込み成型は型形状によって分類できる. Fig. 4.2 に押し込み成形に用いる型 の分類をまとめる. Fig. 4.2 左は、内型内部にシリコーンゴムを通す流路が存在しない. 内型を押し込むことで、内型と外型の間にシリコーンゴムを充填する. そのため、成型物 の形状は、内型と外型の側部の形状で決まる. 内型は、外型に押し込むことのできる形 状に制限されるため、比較的単純な形状の部品の製作に向くと考えられる. Fig. 4.2 中央 の型は、内型をシリコーンゴム部品形状に合わせて製作し、内型の内部にシリコーンゴ ムを充填する. 内型の内部形状を変えることで、比較的自由な形状の部品を製作できる. Fig. 4.2 右の型は、中子が存在し、中子と他の部品の隙間にシリコーンゴムを充填する. 腹構造の製作などへの応用が想定される. この種類の場合、中子を取り出すことが難しい 可能性がある. 水溶性材料で中子を製作することで、風船のような中空構造を作成できる と考えられる. また、流路が複雑であったり狭かったりすることで、気泡が残りやすくな



Fig. 4.2: Classification of push-in casting molds.



Fig. 4.3: Concept of the additive liquid infill method.

る可能性がある.

4.2 押込み液体充填法

ジャイロイド構造の細い流路に液体シリコーンゴムを充填するために押込み成形を利用 する.本節では,未硬化の液体シリコーンゴムを貯めた型の中にジャイロイド構造を押 し込むことで,圧力をかけて液体シリコーンゴムを充填する押込み液体充填法 (push-in liquid infill method: PLIF) について説明する. Fig. 4.3 は,ジャイロイド構造を押し込 むことで構造内部の細い流路にシリコーンゴムを充填する手順を示している. Fig. 4.3 の 緑の部分は外型である.外型に液体シリコーンゴムを注湯した後にジャイロイド構造を押 し込む.また,ジャイロイド構造を押し込んだ後にシリコーンゴムを硬化させる.シリ コーンゴムが硬化した後に型からはみ出た余分なシリコーンゴムをカッターナイフなどで 除去し,型から成型物を離型する.以上の手順により,ジャイロイド構造にシリコーンゴ ムを結合した柔剛ハイブリッドな構造を製作できる.

4.3 引張試験による結合強度評価

PLIF の結合強度を評価するために,試験サンプルを製作し引張試験を行う.引張試験 サンプルは,ジャイロイド構造の密度と材料の硬さの条件を変えて製作する.また,接着 及びアンカーを利用した結合手法(文献 [17] を参考)で製作した試験サンプルと結合強度 を比較する.さらに,引張試験により破断した試験サンプルの観察を行う.

4.3.1 引張試験サンプルの製作

両端に硬質構造を有し,中間部をシリコーンゴムで結合した試験サンプルを製作する. Fig. 4.4 は試験サンプルの模式図である.一辺が 18 mm のジャイロイド構造の立方体を 硬質部 (hard part),シリコーンゴムからなる部分を柔軟部 (soft part)とする.硬質部 間は 3 mm の間隔が空いており,柔軟部の幅は前面から見て左右方向に 14 mm である.

試験サンプルを製作するために、Fig. 4.5 の型を用いる. PLIF を行う上で、ジャイロイ ド構造を適切な位置に保持することと、ジャイロイド構造内部の細い流路に材料を確実に 充填することが重要である.型は外型(outer mold)と内型(inner mold)に分かれてい る.外型は液体シリコーンゴムを貯める役割を持つ.内型には、ジャイロイド構造を適切 な位置に保持するための凸部がある.この凸部により、ジャイロイド構造間の3mmの間 隔を保つ.そして、内型を液体シリコーンゴムを貯めた外型に押し込むことで、ジャイロ イド構造内部の細い流路に圧力をかけて液体シリコーンゴムを充填する.ジャイロイド構 造を FDM 方式の三次元プリンタ(Prusa MK3S+, Prusa Research)で印刷する.また、 柔軟材料として硬さの異なる三種類のシリコーンゴムを使用する.ジャイロイド構造が浮 き上がってくる場合は、割りばしでジャイロイド構造を抑えながら内型の押込みを行う.

上述の手法を用いて製作した試験サンプルを Fig. 4.6 にまとめる.まず,ジャイロ イドの密度を変えたサンプルを 5 種類製作した.ジャイロイド密度はスライサソフト (PrusaSlicer, Prusa Research)上でインフィル (充填構造)の密度として設定できる. 三次元プリントには PLA のフィラメントを使用した.まず,ジャイロイド構造のイン フィルの充填密度を変えたサンプルを作製した.各サンプルの柔軟材料としてショア硬度 20A の Dragon Skin 20 (Smooth On, Inc.)を使用し,ジャイロイドの充填密度を 10%, 15%, 20%, 25%, 30% と変えた.また,材料を変えたサンプルを 3 種類作成した.ジャ イロイドの充填密度は 15% に設定した.材料は,Dragon Skin 20 に加えて,ショア硬度 00-20 の Ecoflex 20,ショア硬度 50A の Smooth-Sil 950 (Smooth On, Inc.)を使用し た.また各充填密度および材料の条件のサンプルを 3 つずつ製作した.

引張試験は Fig. 4.7 の実験設備を使用した. まず, 電動スタンド (EMX-1000N-FA, 株



Fig. 4.4: Dimensions of the tensile test sample of PLIF.



Fig. 4.5: Insertion of the gyroid cubes and assembly of the casting mold.



(a) Dragon Skin (b) Dragon Skin (c) Dragon Skin (d) Dragon Skin (e) Dragon Skin 20, Infill 10 %.
 20, Infill 15 %.
 20, Infill 20 %.
 20, Infill 25 %.
 20, Infill 30 %.



(f) Ecoflex 20, Infill 15 %. (g) Smooth-Sil 950, Infill 15 %.

Fig. 4.6: Tensile test samples of PLIF. (a) Dragon Skin 20, infill 10%, (b) Dragon Skin 20, infill 15%, (c) Dragon Skin 20, infill 20%, (d) Dragon Skin 20, infill 25%, (e) Dragon Skin 20, infill 30%, (f) Ecoflex 20, infill 15%, (g) Smooth-Sil 950, infill 15%.

式会社イマダ)の可動部にフォースゲージ(ZTA-500N,株式会社イマダ)を固定した. フォースゲージ先端と電動スタンドの台座部分にクランプを固定し,各クランプに試験サ ンプルの上下硬質部を挟んで固定した.電動スライダの昇降速度は一定かつ低速に設定 し、サンプルの引張変位とフォースゲージの引張力の計測値を記録した.

4.3.2 ジャイロイド構造の密度を変えた場合

ジャイロイド構造の充填密度を変えて引張試験を行った.引張試験結果を Fig.4.8 にま とめる.充填密度を変えることで,最大引っ張り力発生時の引張変位量が変化した.充填 密度が高いほど,引張変位が小さくなる傾向がみられた.一方で,充填密度を変えても最 大引っ張り力の大きさは大きく変化しなかった.TABLE 4.1 に各試験の最大引っ張り力 をまとめる.およそ,140 N から 200 N 程度の最大引っ張り力が得られた.

引張初めからしばらくは,引張力はほぼ単調増加していたが,途中から断続的に引張力 が減少した. Fig. 4.9 は Dragon Skin 20, ジャイロイドの充填密度 15% のサンプルの変



Fig. 4.7: Experimental setup for the tensile test of PLIF samples.



Fig. 4.8: Tensile test results for PLIF samples at five different gyroid density settings, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30%.

TABLE 4.1: Max tensile force of tensile test results of samples made using PLIF with five different density settings of gyroid structures.

Material	Gyroid density	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Dragon Skin 20	10%	196.8	158.7	199
Dragon Skin 20	15%	180.6	187.3	202.1
Dragon Skin 20	20%	188.2	182.7	189.2
Dragon Skin 20	25%	167.7	179.8	160.9
Dragon Skin 20	30%	145.6	179.9	152.1



Fig. 4.9: Snapshots of the tensile test of the Dragon Skin 20, infill 15% sample.

位一力の計測データの抜粋である. 図中点 A までは引張力がほぼ単調増加なことが確認 できる. 一方で,点 A から点 B にかけては,断続的な引張力の減少がみられる. 各点の スナップショットを Fig. 4.9 の右に示す. 点 A の地点ではほとんど柔軟部の破壊が生じ ていない. 一方で点 B では破断したシリコーンゴムが柔軟部側部に飛び出しギザギザの 形状になっている様子が確認できる. このように,点 A から点 B にかけて試験サンプル の破壊が進行している. すなわち,点 B において最大の引張力が発揮されるものの,点 A から点 B の間の時点で部分的な破断が生じている. シリコーンゴムはジャイロイド構 造の中に繊維状に侵入し硬化する. 引張によってジャイロイド構造に侵入していた繊維状 のシリコーンゴムが引き延ばされ,一本ずつ順番に破断することで断続的な破断が生じて いると考えられる.



(a) Dragon Skin 20, Infill 10%.



(c) Dragon Skin 20, Infill 20%.



(b) Dragon Skin 20, Infill 15%.



(d) Dragon Skin 20, Infill 25%.



(e) Dragon Skin 20, Infill 30%.

Fig. 4.10: Fractured surface of tensile test samples of PLIF, (a) Dragon Skin 20, infill 10%, (b) Dragon Skin 20, infill 15%, (c) Dragon Skin 20, infill 20%, (d) Dragon Skin 20, infill 25%, and (e) Dragon Skin 20, infill 30%.

Fig. 4.10 にまとめた試験サンプルの破断面から、繊維状のシリコーンゴムの構造が確認できた.ジャイロイド構造の充填密度が小さいほど繊維は太くなり、破断面が粗くなった.特に,Fig. 4.10e の充填密度 30% の場合は、硬質部と柔軟部の境界で真っすぐに近い破断面を生じた.



Fig. 4.11: Tensile test results of PLIF samples varying materials.

TABLE 4.2: Max tensile force of tensile test results of PLIF samples of varying materials.

Material	Gyroid density	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Ecoflex 20	15%	36	38.4	38.2
Smooth-Sil 950	15%	183	189.3	192.4

4.3.3 材料の硬さを変えた場合

硬さの異なる材料で製作した試験サンプルの引張試験を行った. Dragon Skin 20 の データとして 4.3.2 節の充填率 15% のサンプルの試験結果を利用する. 結果を Fig. 4.11 にまとめる. 材料は,柔らかい材料から順に Ecoflex 20, Dragon Skin 20, Smooth-Sil 950 である. 材料が硬くなるほど,最大引っ張り力発生時の引張変位量が小さくなること が分かった. また, Smooth-Sil 950 と Dragon Skin 20 の場合は最大引っ張り力の大き さは大きく変化しなかったが, Ecoflex 20 の場合に最大引っ張り力が著しく小さくなっ た. TABLE 4.2 に各試験の引張力をまとめる. 最大引っ張り力の大きさは, Smooth-Sil 950 と Dragon Skin 20 の場合はおおよそ 180-200 N であった. 一方で, Ecoflex 20 の場 合はおおよそ 30-40 N であった.

Fig. 4.12 は Ecoflex 20 と Smooth-Sil 950 のサンプルの破断面の写真である.外から 見た破断面は材料によって大きく変化しなかった.硬質部と柔軟部の境界で,ほぼまっす



(a) Ecoflex 20, Infill 15%.



(b) Smooth-Sil 950, Infill 15%.

- Fig. 4.12: Fractured surface of tensile test samples fabricated using PLIF with two different materials, (a) Ecoflex 20, Infill 15 %, (b) Smooth-Sil 950, Infill 15 %.
- ぐな破断面を生じた.

4.3.4 接着とアンカーによる結合サンプルとの比較

他の結合手法で製作した引張試験サンプルの結合強度を調べ,PLIF で製作した試験サ ンプルの強度と比較する.二種類の結合手法で引張試験サンプルを製作する.一つは接 着である.シリコーンゴムと PLA を接着したい面に,シリコーンゴムに対応した接着剤 (Sil-poxy, Smooth-on, Inc.)を塗布して接着を行う.もう一つは,PLA 部品の凹み(ア ンカー)にシリコーンゴムを構造的に嵌め込む方法である([17]を参考にした).Fig.4.13 に示す寸法でアンカーを設計し,アンカー部分でシリコーンゴムを硬化させることで結 合を行う.製作したサンプルについて付録 C にまとめる.比較対象には,Dragon Skin 20,ジャイロイド構造の充填密度 15%の条件の PLIF の試験サンプルの引張試験結果を 用いる.

各手法で製作したサンプルの引張試験の結果を Fig. 4.14 にまとめる. PLIF で製作し た引張試験サンプルでは,他の二つの手法で製作した試験サンプルと比べて著しく大きな 最大引張力と最大引張力時の変位が得られた.各サンプルの最大引張力を TABLE 4.3 に まとめる.接着のサンプルは最大引っ張り力が約 25-40 N で,アンカーのサンプルは最大 引っ張り力が約 15-20 N であった.異なる結合手法間で条件をそろえることは難しいた め,単純に手法同士を比較することはできないが,今回試験した接着剤,接合面積,アン カー形状の条件において PLIF が高い結合強度を示した.



Fig. 4.13: Diagram of a tensile test sample whose soft and hard parts are joined by anchors.



Fig. 4.14: Tensile test results of the samples changing joining methods bonding, anchor, and PLIF.

TABLE 4.3: Max tensile force with the samples changing to joining methods bonding and anchor.

Joining method	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Bonding	41.9	26	36.2
Anchor	15.1	18.3	14.9



Fig. 4.15: CT scan of Dragon Skin 20, infill 15% tensile test samples (a) Sample 1, part 1, (b) Sample 1, part 2, (c) Sample 2, part 1, (d) Sample 2, part 2, (e) Sample 3, part 1, and (f) Sample 3, part 2.

4.3.5 CT スキャンによる破断試験片内部の観察

ジャイロイド構造内部へのシリコーンゴムの充填状態を確かめるため、マイクロ CT ス キャナ (TOSCANNER-32300 µFD, 東芝 IT コントロールシステム株式会社)を使用し て切断面画像を生成した. Fig. 4.15 は, Dragon Skin 20, ジャイロイド構造の充填密度 15% のサンプルの切断面の CT スキャン画像である. 破断後の三つの試験サンプルの上 下部それぞれを撮影した. CT スキャン画像の黒い部分が材料の存在しない部分である. 薄い灰色の部分はシリコーンゴムで,線状の濃い灰色の部分は PLA である. 切断面画像 から大きな気泡のようなものは確認されなかった. ジャイロイド構造内部に隅までシリ コーンゴムを充填できていることが確認できた. 破断面付近には, PLA とシリコーンゴ ムの間に小さな間隙が存在した. 引張によりシリコーンゴムと PLA の間に隙間が生じた まま元に戻らなかったと考えられる.

4.4 機構製作への応用

PLIF を用いた結合を, PLA とシリコーンゴムを組み合わせた柔剛ハイブリッド機構 の製作に応用する.まず,硬質な骨と柔軟な椎間板が順に並んだ,背骨を模倣した機構を 製作する.また,文献 [17] の指機構を参考に,柔軟なシリコーンゴムの関節と柔軟な指腹 を有する指機構を製作する.PLIF による一体成型の方法と,製作後の機構の動作を報告 する.

4.4.1 背骨機構

人体における背骨は、硬質な骨と椎間板などの柔軟な組織が結合した、柔軟性と硬さを 両立した構造である.この構造を可能な限り簡略化することで、一体成型が可能になる. Fig. 4.16 は背骨機構の型である.引張試験サンプルと類似の構造であるが、内型の内部 にジャイロイド構造を多数並べて保持することができる.複数のジャイロイド構造を嵌め 込むことの可能な大きなサイズの内型、外型を印刷するために、大きな部品を印刷可能な 熱溶融積層方式の三次元プリンタ(Raise 3D Pro3 Plus, Raise 3D Technologies, Inc.) を使用した.ジャイロイド構造は、試験サンプルと同様に小型の三次元プリンタ(Prusa MK3S+, Prusa Research)で印刷した.引張試験サンプルと同様に PLIF により一体成 型を行った.

製作した背骨機構を Fig. 4.17 に示す. Dragon Skin 20 と Ecoflex 20 で製作を行った. 背骨機構の端部を片持ちはりのように固定することで,重力下での変形を確かめた. Dragon Skin 20 の場合は大きな変形が生じなかった. 一方で, Ecoflex 20 の場合は比較的大きな曲げ変形が生じた. このように、構造の剛性を材料によって調整することが可能である. 一方で,ジャイロイド構造の間隔が狭く,結合面積が比較的広いため,大きく屈曲させると結合部に負荷が生じやすいと考えられる.

4.4.2 指機構

本節では、ジャイロイド構造を有する硬質リンクの間を、屈曲しやすい柔軟なシリコー ンゴム部品で結合した指機構の製作について述べる.シリコーンゴムのみからなる柔軟部 を連続変形する柔軟関節として利用する.引張試験サンプルの製作時と同様に、二つの硬 質構造を内型に嵌めて固定することで、二つのリンクの相対位置を保持した.Fig.4.18 は 指機構の内型である.赤い部分がジャイロイド構造で、黄色、灰色の部分は壁面が存在す る.文献 [25] を参考に、指腹や関節部分が柔軟材料で構成された指機構として設計した. 黄色部分は隣接するジャイロイド構造と結合した構造として印刷した.印刷データの作成



Fig. 4.16: Casting mold of spine-inspired mechanism, (a) Outer mold, and (b) Inner mold.

では文献 [77] を参考にした.指機構には,爪を模倣した構造や糸を通すための穴を設けた.ネジを通した状態で型成形を行うことで,製作後に穴を残すことができる.Fig.4.18 点線矢印はネジを挿入する箇所を示している.Fig.4.18 側部から挿入するネジは,下部の ジャイロイド構造を貫通する.外型への押込み時にネジ頭やリンク形状が干渉しないよう に型設計を行った.さらに,外型の底部に指腹形状の凹みを設けることで,リンク1の指 腹を成形した.

Fig. 4.19 は製作後の指機構である.指機構はリンク1とリンク2からなる.まず,リ ンク1とリンク2はシリコーンゴムで結合されている.柔軟部の両端はジャイロイド構 造で各リンクと結合している.背骨機構の場合は,硬質構造が広い面積かつ狭い間隔で結 合しており,大きく屈曲させることが難しかった.一方で指機構では,関節の中央を細く することで,屈曲時にシリコーンゴムとリンクの結合界面に応力が集中しにくくなってい る.リンク1の指先には柔軟な指腹が存在する.指の背側には爪を模倣したジャイロイド 構造が存在し,指腹は爪と結合している.このように,比較的複雑な構造も,PLIFによ り一体成型できることを確かめた.リンク1に空いた穴にネジを通し,ネジで糸の端部 を止めた.さらに,糸をリンク2に通し,糸を引っ張ることで指機構を屈曲させた.動作 結果を Fig. 4.20 にまとめる.糸を手で引っ張ることで指が屈曲し,糸を離すことでシリ コーンゴムの弾性により伸展することを確認した.



(a) Dragon Skin 20, undeformed.



(b) Dragon Skin 20, deformed.



(c) Ecoflex 20, undeformed.



(d) Ecoflex 20, deformed.

Fig. 4.17: Deformation of spine-inspired mechanisms whose one ends are fixed under gravity.(a) Dragon Skin 20, undeformed, (b) Dragon Skin 20, deformed, (c) Ecoflex 20, undeformed, and (d) Ecoflex 20, deformed.



Fig. 4.18: Inner mold of the finger mechanism.



Fig. 4.19: Fabrication result of the finger mechanism.

4.5 課題と展望

PLIF は押込み成型により液体シリコーンゴムをジャイロイド構造にしっかりと充填す ることができ,結合強度も高い.そのため,比較的高い負荷の生じる大型の機構にも応用 できる可能性がある.一方で,結合サンプルの引張試験から,破断するまでに断続的に小 さい破断が生じていることを確認した.製作したい機構が小さな破断も許容できない場 合,可逆な変形の範囲で使用する必要がある.

また、押込み成型を利用するため、複雑な構造を製作しようとすると型が複雑になりや



(a) Extension.

(b) Bending.



すいと考えられる. PLIF を用いる箇所はある程度機構を簡素化することが望ましい. 第 3章で提案した ALIF と併用することで,複雑な構造の製作に応用しやすくなると考えて いる.

第5章

メッシュエッジの等長拘束による fiber-reinforced 弾性膜のモデリング

本節は (2,1) クラスに分類される fiber-reinforced 弾性膜をモデル化する手法を提案する. 幾何拘束を活用することで,糸モデルを弾性膜モデルに組込む. このとき,メッシュ 編集を組み合わせることで,少ない工程で fiber-reinforced 膜をモデリングする手法を提 案する.

5.1 Constant Edge-length Constraint

5.1.1 連続な非伸縮糸の幾何モデル

Fiber-reinforced 弾性膜は,弾性膜の中に非伸縮の糸(fiber)を組み込んだ機構である. 非伸縮の糸によって弾性膜の変形が部分的に拘束されることで,外力やアクチュエーショ ンによる力に対して異方性の変形を生じる.提案手法では,糸の非伸縮性に着目しモデル を構成する.

Fiber-reinforced 弾性膜において,糸は膜の伸縮を拘束する.Bishop-Morser らは,二本の糸を配向した円筒膜の運動学モデルに糸の非伸縮性の仮定を用いた [62].糸のモデルを可能な限り簡素化するために,糸の非伸縮性のみを考慮したモデルを考える.提案モデルでは以下の仮定を置く.

- 糸は膜と比べて非常に大きい伸縮剛性を有する.
- 糸は非常に小さい曲げ剛性を有し, 膜の変形に糸の曲げ剛性はほとんど影響しない.
- 糸は膜の内部に結合されており、膜と糸の界面で滑りが生じない.

まず,一つ目の仮定は糸の非伸縮性を表している.二つ目の仮定は,糸の曲げ剛性を考慮
$\mathbf{56}$



Fig. 5.1: The process of implementing CECs on a 2D finite element membrane model.

する必要がない状況を表している.これは,fiber-reinforce 弾性膜の糸の部分を,各節点 で自由に屈曲する単なる折れ線として単純化するために必要な仮定である.三つ目の仮定 は,糸を弾性膜メッシュにメッシュエッジとして組み込むために必要な仮定である.も し,糸が弾性膜から剥がれるように変形する場合,糸と弾性膜のそれぞれが相互接触しな がら変形する状況をモデル化しなければならない.膜と糸の間に滑りが生じない仮定に基 づき,糸と膜を完全に結合したモデルを考える.以上の仮定に基づき,Fig.5.1に示すよ うに,弾性膜メッシュのエッジを用いて糸経路を近似し,糸による膜変形の拘束をメッ シュエッジの等長拘束としてモデル化する.

糸は高い形状アスペクト比を有する細長い構造体である.たとえば,円形断面の細長い 構造の径方向の寸法が軸方向の寸法に対して著しく小さい場合,ロッドとしてモデル化で きる [68].線状の構造体の中心線を中立線と呼称する.ロッドモデルでは中立線を曲線で 表現し,形状を表す方法が用いられる.空間内の曲線は,微分幾何的な記述が利用できる [79].本稿では平坦な膜に配置された平面上の糸経路のみを扱うため,糸のねじれを含ま ない二次元平面上の曲線に基づいたモデルを用いる.

弾性膜の領域を $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ と置く. 領域 Ω 上に定義された滑らかな連続曲線を用い て糸の中立線形状を表現する. 糸の中立線形状を記述するための曲線パラメータを *s* とおく. 糸の中立線上の点を曲線パラメータ *s* を用いて P^N(*s*) と表記する. P^N(*s*) は 変形後も *s* に対応した中立線上の同一点を表す. また,点 P^N(*s*) の位置ベクトルを $p^{N}(s) = [x(s), y(s)]^{T}, s \in [0, L],$ 初期形状を $p_{0}^{N}(s)$ と定義する. ただし,*L* は中立線の 長さを表し、 $p^{N}(s)$, $p^{N}_{0}(s)$ は空間座標系における位置ベクトルである.また、

$$\left\|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}_0^{\mathrm{N}}}{\mathrm{d}s}\right\| = 1\tag{5.1}$$

である.このとき,*s*は初期形状において弧長パラメータであり,中立線に沿った*s* = 0 点からの曲線の長さを表している.中立線が非伸縮のとき,*p*^Nの曲線パラメータによる 微分のノルムは

$$\left\|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}^{\mathrm{N}}}{\mathrm{d}s}\right\| = \sqrt{\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}s}\right)^{2} + \left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}s}\right)^{2}} = 1$$
(5.2)

となる. すなわち, 糸が非伸縮ならば, 式 (5.2) を常に満たす.

5.1.2 糸モデルの離散化

本節では,数値計算のために連続な糸の形状モデルを離散化する.糸単体の変形をシ ミュレーションする場合,曲げ剛性や伸縮剛性を考慮して力学的なモデルを構成する必要 がある.一方で,提案手法では,糸を単なる等長な折れ線としてモデル化し,膜メッシュ エッジとして組み込む.すなわち,糸モデル単体では単なる折れ線であり力学的なモデル ではない.しかし,膜に組み込むことで,糸が膜の変形を拘束する状態を表現することが できる.

連続な糸経路 $p^{N}(s)$ の折れ線近似を g とおく.g は M 個の節点 Q_i を順に直線でつな いだ折れ線である.点 Q_i の位置ベクトルを q_i と置く.このとき,線分 Q_iQ_{i+1} の長さは

$$l_{i,i+1} = \|\boldsymbol{q}_{i+1} - \boldsymbol{q}_i\| \tag{5.3}$$

である. 線分 $Q_i Q_{i+1}$ の伸縮量は初期長さ $l^0_{i,i+1}$ を用いて $l_{i,i+1} - l^0_{i,i+1}$ と表せる. した がって, g の各辺 $Q_i Q_{i+1}$ を等長に保つ拘束条件を

$$c_i \equiv l_{i,i+1} - l_{i,i+1}^0 = 0, \quad i = 0, 1, 2, \dots M - 1$$
(5.4)

と定義する.すなわち,各辺の伸縮量を0に保つ拘束条件である. 膜メッシュに糸モデル を組み込む際に,メッシュエッジの長さを一定に保つ拘束条件として用いるため,(5.4) を Constant Edge-length constraint (CEC) と呼称する.糸をモデリングする場合,同 時に複数の辺に CEC を課す.複数の辺に CEC を適用している場合,CECs と表記する.

5.2 有限要素モデル

弾性膜の有限要素モデルの定式化を行う. Ω 上の弾性膜メッシュの節点に順に指標を割りあてる. k 番目の節点の変位ベクトルを u_k とおく. また, 節点変位 u_k を並べたベク

トルを u_N とおく. さらに、メッシュ要素にも順に指標を割りあてる. e 番目のメッシュ 領域を \triangle_e とおく. このとき、 \triangle_e のひずみエネルギを U_e とおく. 弾性膜全体のひずみ エネルギは節点変位 u_N によって決まる各メッシュのひずみエネルギ U_e の総和として

$$U = \sum_{e} U_e \tag{5.5}$$

で計算できる [80].

5.3 CECs による膜モデルへの非伸縮糸モデルの組込み

第 5.1.2 節で定式化した糸のモデルは、単体では単なる等長な折れ線である. 有限要素 弾性膜モデルに非伸縮糸モデルを CECs として組込むことで fiber-reinforced 膜をモデリ ングする.まず、弾性膜のメッシュの編集方法を説明する.次に、編集されたメッシュに 対して CECs を適用した fiber-reinforced 膜モデルを定式化する.

5.3.1 メッシュ編集の手順

提案手法では,糸経路に合わせて編集されたメッシュエッジに対して CECs を課すこ とにより,fiber-reinforced 膜の変形が糸によって拘束されている状態をモデリングする. したがって,弾性体メッシュのエッジを用いて目標の糸経路を近似する必要がある.メッ シュの編集を行うことで,なるべく目標糸経路をメッシュエッジで表現できるように節点 位置を移動させる.Fig.5.2 は節点の移動によるメッシュ編集の例である.メッシュ編集 では,弾性体メッシュの節点のうち,糸経路に近いものを糸経路のエッジ上,もしくは節 点上に移動させることで,弾性体のメッシュエッジと目標糸経路の折れ線を近づける.大 まかな手順は以下である.

- 領域Ωを分割しメッシュを生成する.
- 糸経路 g を Ω 上に配置し, g と弾性体メッシュエッジの交差を検出する.
- 交差のあった弾性体メッシュエッジの節点を、糸経路上に移動させる.
- メッシュの反転やつぶれを検出する.

まず,MATLAB (MathWorks, Inc.)の Partial Differential Equation Toolbox を用い て三角形メッシュを自動生成する. つぎに,製作した MATLAB スクリプトにより自動 的にエッジ交差検出,節点の移動,不正なメッシュ編集の検出を行う. 目標糸経路を折れ 線近似した場合の節点列を作成したスクリプトに与えることで,自動でメッシュを編集 する.



Fig. 5.2: Mesh modification. Red polyline is the desired fiber path and gray triangle is the mesh of the membrane.

5.3.2 エッジの交差検出

線分同士の位置関係の分類に基づき,エッジの交差を検出する.任意の弾性体メッシュ エッジを \mathcal{E} とおく.このとき,g上の辺 Q_iQ_{i+1} と \mathcal{E} の位置関係を以下のように場合分け した.

- 1. すべての節点が同一直線上に存在する.
- 2. 節点 Q_i, Q_{i+1} の片方のみが *E* 上に存在する.
- 3. \mathcal{E} の端点のうち片方のみが、 $Q_i Q_{i+1}$ 上の節点以外の箇所に存在する.
- 4. \mathcal{E} の端点のうち片方のみが、節点 Q_i 、 Q_{i+1} どちらかの上に存在する.
- 5. \mathcal{E} と $Q_i Q_{i+1}$ が両端点以外の箇所で交差している.
- 6. 交差なし.

実装したスクリプトでは、1,2,3,4,5番目の場合を交差とみなした.このとき、1番 目はエッジ E と Q_iQ_{i+1}が同一直線上に存在する条件である.ただし、厳密にはエッジ E 上に Q_iQ_{i+1}が存在するときにのみ g とメッシュエッジは接している状態となる.しか し、すべての節点が同一直線上に乗る状態はめったに生じないため、本稿で検証するシ ミュレーション例では問題になりにくいと考えられる.整列された節点位置を有する構造 メッシュを用い、糸経路にも直線が含まれる場合は上記について考慮すべきと考えられ る.以上の分類に従って、条件分岐によってエッジの交差を検出する.交差している線分 は、糸経路 g にまたがるメッシュエッジである.g にまたがるメッシュの節点を g 上に移 動させることで、メッシュエッジを用いて g を折れ線近似する.

5.3.3 節点の移動先の決定

メッシュ編集の目的は, g の節点列 Q_i を折れ線近似できるように弾性体メッシュエッジを移動させることである. 5.3.2 節の方法を用いて g と弾性体メッシュエッジの交差を検出することで,移動させるべき節点の候補を検出することができる. 提案手法では,折れ線 g の中で交差メッシュエッジの節点から最も近い位置に節点を移動させる. 以下では



Fig. 5.3: Distance calculation between the polyline g and the arbitrary nodal point P_j^c . Red parts indicate the distance $d(g, p_j^c)$ between the points P_j^c and R_j^c .

具体的な節点の移動位置の計算方法を説明する.

一辺以上が*g*と交差している任意の三角形メッシュを \triangle^c とおく.また、 \triangle^c の*j*番目 の節点と、これに対応する参照点をそれぞれ \mathbf{P}_j^c と \mathbf{R}_j^c 、(*j* = 1,2,3)とおく.さらに、 節点と参照点の位置ベクトルをそれぞれ p_j^c 、 r_j^c とおく. Fig. 5.3 は糸経路 *g* とメッシュ 節点 \mathbf{P}_j^c の二つの位置関係のパターンを示している.Fig. 5.3 に青で示す、辺 $\mathbf{Q}_i\mathbf{Q}_{i+1}$ の 法線方向全体の領域を N_i と置く.また、曲がった *g* の経路の場合に凸側に生じる N_i と N_{i+1} の間の領域を Γ_i と置く. Γ_i の指標は領域の頂点に存在する節点 \mathbf{Q}_i の指標に対応 する.さらに、ベクトル $p_j^c - q_i$ と $q_{i+1} - q_i$ のなす角を θ_i と置く.そして、単位ベクト ル $e_{i,i+1} = (q_{i+1} - q_i)/||q_{i+1} - q_i||$ を置く.このとき、参照点の位置 r_j^c は、

$$\boldsymbol{r}_{j}^{c} = \begin{cases} \left\| \boldsymbol{p}_{j}^{c} - \boldsymbol{q}_{i} \right\| \cos \theta \boldsymbol{e}_{i,i+1} + \boldsymbol{q}_{i} & \text{if } \boldsymbol{p}_{j}^{c} \in N_{i} \\ \boldsymbol{q}_{i} & \text{if } \boldsymbol{p}_{j}^{c} \in \Gamma_{i} \\ \boldsymbol{q}_{i+1} & \text{if } \boldsymbol{p}_{j}^{c} \in \Gamma_{i+1} \end{cases}$$
(5.6)

とする. したがって、参照点 \mathbf{R}_{i}^{c} と移動前の節点 \mathbf{P}_{i}^{c} の距離は

$$d(g, \boldsymbol{p}_{j}^{c}) = \begin{cases} \left\|\boldsymbol{r}_{j}^{c} - \boldsymbol{p}_{j}^{c}\right\| & \text{if } \boldsymbol{p}_{j}^{c} \in N_{i} \\ \left\|\boldsymbol{p}_{j}^{e} - \boldsymbol{q}_{i}\right\| & \text{if } \boldsymbol{p}_{j}^{c} \in \Gamma_{i} \\ \left\|\boldsymbol{p}_{j}^{c} - \boldsymbol{q}_{i+1}\right\| & \text{if } \boldsymbol{p}_{j}^{c} \in \Gamma_{i+1} \end{cases}$$
(5.7)

となる. N_i に \mathbf{P}_j^c が存在する場合, \mathbf{P}_j^c から g に垂線を下した位置に参照点が存在する. また, Γ_i に \mathbf{P}_j^c が存在する場合,線分上に垂線を下すことができないため,近くの節点 \mathbf{Q}_i を参照点とする.



Fig. 5.4: Degeneration and flip of the mesh element.

5.3.4 メッシュの不正な移動の検出

有限要素モデルに CECs を適用するためにメッシュの移動が必要になる一方で,メッシュ編集がモデルの外形状を変えてしまったり,数値計算上の問題を引き起こしたりする可能性がある.これらの問題を検出することで,モデリングを行う作業者によるメッシュ 編集結果の確認を補助する.

以下の条件を確認することで不正なメッシュの移動を確認する.

- 移動前の節点 P^c_i が Ω の境界上に存在しない.
- 移動前の節点 P^c_i が g 上に存在しない.
- P_i^c を移動させた後の \triangle^c の面積がゼロにならない.
- P^c_i移動後に △^c が反転しない.

一つ目の条件は,Ωの境界上のメッシュが編集されることで,弾性体の外形状を変えてし まうことを防ぐために課されている.二つ目の条件は,最初からg上に存在する節点は 移動する必要がないため,条件に加えている.三つ目と四つ目の条件は,数値計算上の問 題を回避するために課している.Fig.5.4 はそれぞれメッシュ面積がゼロになる例とメッ シュが反転する例を図示している.

5.3.5 CECs を課した弾性膜モデル

編集された弾性膜メッシュエッジを糸経路とみなし CECs を適用した, fiber-reinforced 弾性膜モデルを定式化する.メッシュの節点数を n, 空間上の特定の位置に固定された 節点の数を m とおく.このとき,弾性膜メッシュの節点を空間上に固定する拘束条件 は $A_{\rm C} u_{\rm N} = o, A_{\rm C} \in \mathbb{R}^{2m \times 2n}$ の形式で記述できる.ただし, $A_{\rm C}$ は拘束する節点の座標 成分に対応した行列要素が 1,それ以外が 0 の行列であり,o は零ベクトルである.ま た,CECs を拘束条件として加える.節点位置拘束と CECs の課された弾性膜の静力学

Symbol	Description	Quantity	Unit
L	Boundary edge length	10	cm
d	Thickness	3	mm
E	Young's modulus	100	kPa
ν	Poisson's ratio	0.48	_

TABLE 5.1: Parameters of the membrane model for simulations.

シミュレーションは、以下の拘束条件付き最小化問題として

$$\min_{\boldsymbol{u}_{N}} U(\boldsymbol{u}_{N}) \quad \text{subject to}$$

$$A_{C}\boldsymbol{u}_{N} = \boldsymbol{o}$$

$$c_{i} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \cdots, M - 1$$

$$(5.8)$$

のように定式化できる.

5.4 シミュレーション

5.4.1 モデルの設定

一辺の長さが L の正方形の領域 Ω を平坦な弾性膜の領域とする.シミュレーションでは TABLE 5.1 のパラメータを用いた.膜の境界に存在する節点位置を固定することで膜を引っ張った状態をシミュレーションした.膜を構成する材料のヤング率をE = 100 kPa,ポアソン比を $\nu = 0.48$ とした.また,膜の厚みをd = 3 mm に設定した. 拘束条件付きの非線型最小化問題を解くことのできる MATLAB (MathWorks, Inc.)の 関数 fmincon を用いて (5.8) を解いた.

5.4.2 結果

CECs を適用した正方形弾性膜を 4 辺固定, 4 頂点固定, 左右 2 辺固定の 3 パターンの 固定拘束条件で膜を引っ張った際の変形をシミュレーションした.また,円,ハート,ア ルファベット (P),渦巻,波線の糸経路についてそれぞれシミュレーションを行った.4 辺固定の場合は,正方形膜の各辺の長さを 1.2 倍に伸ばす位置で境界の節点を固定する拘 束条件を与えた.4 頂点固定の場合は,4 辺固定の場合の拘束条件から 4 頂点以外の拘束 条件を取り除き,4 頂点のみを固定した.左右 2 辺固定の場合,左右方向に膜を 1.1 倍に 伸張する位置で辺を固定する拘束条件を与えた.シミュレーション結果を Fig. 5.5 にまと める. 円状の糸経路では,4辺固定で膜を伸ばすと糸経路は均一に全方向から引っ張られるた め,糸経路の形状があまり変化しなかった.一方で,2辺固定では,左右に膜が引っ張ら れることで糸経路も左右に変形し楕円に近い形状になった.ハート状の糸経路でも円状の 糸経路の場合と似た結果が得られた.ハート形状の場合は,糸経路上部に谷形状の凹部が 存在する.4辺固定で上下方向の引張力が生じることで,谷の凹部が浅く見えるように変 形した.アルファベット(P)形状の糸経路の場合,4辺固定のシミュレーション結果に より,糸経路左上の角が丸くなった.また,左右2辺固定の場合,縦方向の膜の収縮が縦 の糸経路によって抑制された.渦巻状の糸経路の場合,円状の糸経路と似たようなシミュ レーション結果が得られた.一方で,糸経路が境界と近い膜下端辺の形状が,円状の糸経 路の結果と異なっていた.特に,左右2辺固定の場合に,縦方向の膜の収縮が押し返され てまっすぐに近い膜の境界形状であった.波線状の糸経路の場合,左右に糸経路が強く 引っ張られる4辺固定と左右2辺固定の場合に糸経路がまっすぐに近づく様子が観察で きた.

5.4.3 考察

シミュレーション結果の中で特徴的だったのはアルファベット(P)形状の糸経路で見 られた縦方向の収縮が抑制された例である. CECs はメッシュエッジの圧縮も拘束するた め、糸経路によっては変形が抑制される場合があることが分かった.特に,Pの形は縦に 長い糸経路を有するため、変形の抑制が顕著だったと考えられる.糸経路の非収縮の拘束 条件がシミュレーションに及ぼす影響を調べるために、膜に縦方向の糸を配置して横に 引っ張るシミュレーションを行った.Fig.5.6 は縦方向の糸経路を配置した際に,1.3 倍 に引き延ばすことでメッシュが壊れた例を示している.

実際に糸を配置した弾性膜がどのように変形するのかを確かめるために,縦方向に糸を 組み込んだ弾性膜を作成し,水平方向への引張を行った.膜の厚みは3mmで,弾性膜の 構成材料として Ecoflex 00-50 (Smooth-On, Inc.)を用いた.また,非伸縮性の糸とし てケブラー糸を使用した.実際の弾性膜で同様の状況を再現した際の変形を Fig.5.7 に示 す.糸を配向した箇所が波打つように変形した.膜を水平方向に伸ばすことで膜の中央部 は縦方向に収縮する.このとき,膜の収縮する方向に配向された糸は圧縮力を受けること により,座屈して波打っていると考えられる.膜を曲げるエネルギは,伸ばすエネルギよ り小さく,糸を平面内で座屈させるエネルギよりも,膜を面外方向に座屈させるほうが内 部エネルギが小さくなるためと考えられる.膜を面外方向に屈曲させる変形は二次元 FE モデルで表現できないため,糸を面内で座屈させるために局所的かつ極端なひずみを生じ させる必要があり,メッシュの崩壊が生じたと予想される.Fig.5.6 にみられるメッシュ 反転は二次元 FE モデルに CECs を適用した際に特有の現象と考えられる.この考察か



Fig. 5.5: Simulation results of the fiber-reinforced membrane model with elastic membrane models that CECs are imposed. (©2024 IEEE)



Fig. 5.6: The simulation results of the horizontal stretching of the elastic membrane model with CECs. (©2024 IEEE)



Fig. 5.7: Stretching of the membrane with an embedded fiber in a transverse direction from the stretching direction.

ら,三次元 FE に CECs を適用することで面外方向への屈曲が可能になり,メッシュの崩壊を回避できることが示唆される.

メッシュ編集の結果に着目する. 膜の外形状を変えないために, 膜の境界上に存在する 節点位置を移動させない制約条件を課していた. そのため, 波線形状の糸経路の場合, 糸 経路の端部において目標経路と近似経路のずれが生じた. これを緩和する方法として二つ の方法が考えられる. 一つ目は, メッシュを細かく分割することである. シミュレーショ ン結果や計算時間に影響を与えるが, 糸経路をより精度高く近似できる可能性がある. 領 域全体を細かく分割する代わりに, 糸経路の周りを集中的に細かくメッシュ分割する手法 も考えられる. 二つ目は, 領域に沿って節点を動かすように節点の移動方向を制約する方 法である. 正方形など, 領域の境界が単純な形状の場合は実装が比較的容易と考えられ る. この方法の場合, メッシュの分割数を変える必要がない.

5.5 課題と展望

提案したメッシュ編集手法は、糸経路に近いメッシュのみを編集することで、メッシュ エッジを糸経路に合わせている.一方で、メッシュの形状アスペクト比やメッシュサイズ を考慮していない.メッシュ形状は数値計算に影響を及ぼす可能性があるため、メッシュ 形状やメッシュサイズを均一に保つメッシュ編集が重要と考えられる.この場合、領域全 体のメッシュを調整する手法が必要になる.また、メッシュ生成のスクリプトを実装でき る場合は、あらかじめ糸経路を領域に与えておき、糸経路に合わせてメッシュ生成する手 法も考えられる.

本章では二次元有限要素モデルに提案手法を適用した.一方で,初期形状が曲面状の膜 や,立体構造内部への糸の組込み((3,1)クラス)などが実際の機構としてありうる.し かし,非平面な構造ではメッシュ編集が課題となる.まず,曲面状の弾性膜メッシュを糸 経路に合わせて編集する場合,膜メッシュ節点を弾性膜の曲面上に拘束し,曲面上をすべ るように節点を移動させる必要がある.また,立体構造に糸を組み込む場合,四面体メッ シュなどで構成された立体的なメッシュのエッジを糸経路に合わせる手法が求められる. fiber-reinforced 膜を利用するソフトロボット機構は円筒形状など立体的な構造を有する ことが多いため,これらは実用上重要な課題である.

本章では Fig. 2.2 における (2,1) クラスのモデリングを行った.一方で, CECs は (1,1) クラスや (3,1) クラスの機構要素をモデリングできる可能性がある. (1,1) クラスの場合, ロッドモデルのエッジを部分的に等長拘束することで CECs を適用できる. 文献 [69] で は,離散ロッドモデルの各エッジの長さを一定に保つ inextensibility constraints を非伸 縮ロッドのシミュレーションに用いる方法が既に提案されている. (3,1) クラスの場合, 四面体メッシュなどで近似された立体柔軟要素のメッシュを編集することで, CECs を適 用できる可能性がある.

物理実験を通したシミュレーション結果の検証も必要になる.実際の fiber-reinforced 膜は三次元的に変形することが明らかになったので,三次元膜モデルに CECs を適用し たモデルを作成する必要がある.膜の立体形状の計測を行いシミュレーション結果と比較 することで,提案手法の性能を定量的に評価できる.このために,膜の立体形状を計測す る実験システムを構築する必要がある.

これまでに多くの種類のシミュレーションモデルが提案されてきた.また商用の有限要 素シミュレーションソフトは幅広いモデルをカバーしており,ソフトロボットのシミュ レーションにも利用される場合がある.一方で,ソフトロボットは設計パラメータが連続 的に分布しており,設計パターンが膨大である.また,ソフトロボットの動作には正確な 動作の再現性よりも,環境に適応的な動作が期待されることが多い.こうした点から,ソ フトロボットの設計にシミュレーションを適用する際には、シミュレーション精度も重要 であるが、できる限り多くの設計パターンをシミュレーション可能なモデルが実用的では ないかと考えている.本章で提案したモデリング手法は、有限要素モデルに基づいてい る一方で、糸の非伸縮性や低い曲げ剛性に着目し、糸のモデリングを簡略化した.また、 メッシュの編集を組み合わせることで、糸経路を与えた後はほとんど自動でモデリングが 完了する.このように、モデリング工程を簡易にする工夫は、効率的に設計パターンを試 行するうえで重要と考えている.

第6章

結論

6.1 **まとめ**

本稿は柔剛ハイブリッド機構における柔軟構造と硬質構造の結合について述べた. 柔剛 ハイブリッド機構の研究開発では設計, 製作, モデリングなどが課題と考えられる. 本稿 は製作とモデリングに焦点を当てた.

第2章の柔軟構造と硬質構造の結合の分類では,柔軟構造と硬質構造についてそれぞれ 1次元,2次元,3次元的な構造に分類し,各機構要素の組み合わせパターンを9個のク ラスに分けた.また,各構造の占める領域を閉集合と考え,閉集合の内点集合と境界を用 いて組込み結合と非組込み結合を定義した.

また,第3章と第4章では,シリコーンゴムとPLAのそれぞれからなる機構要素の結 合手法および,液体シリコーンゴムの充填方法について述べた.提案する結合手法は,文 献 [18] が提案するシリコーンゴムの射出成型システムの応用例として示した,硬質な多孔 質構造に液体シリコーンゴムを充填する結合手法に基づいている.液体シリコーンゴムを 多孔質構造に充填する製作手法であることから,液体充填法(LIF)と命名した.本稿で は、多孔質構造として,FDM方式の三次元プリンタで製作可能なジャイロイド構造を利 用することを提案した.本研究はシリコーンゴム部品とPLA部品の結合に焦点を当て, 付加型液体充填法(ALIF)と押込み液体充填法(PLIF)を提案した.ALIFおよびPLIF は液体シリコーンゴムの射出装置を用いず,シリコーンゴムを成型する道具とFDM方式 の三次元プリンタのみで実現できるため試作に向いた手法である.

第3章では ALIF について述べた. ALIF は,硬化した後のシリコーンゴム部品を硬質 構造に逐次的に結合できる.そのため,靭帯が複雑に張り巡らされた骨格構造などの模倣 を可能とする.筋骨格生物にみられる球関節や背骨を模倣した機構を ALIF で製作した. このとき,靭帯をシリコーンゴムで製作し,ALIF で PLA の部品に結合した.機構を手 で動かすことにより変形挙動を確認し,ALIF による結合を確認した.ALIF による逐 次的な結合は,背骨機構のように複雑な機構の製作に向いていると考えられる.一方で, ALIF の材料を結合穴に充填する工程は,製作物にばらつきを生じさせやすいと考えてい る.液体シリコーンゴムは粘り気があるため,ジャイロイド構造の細かな流路に充填する ために時間がかかると予想される.充填中にシリコーンゴムの硬化が始まった場合,シリ コーンゴムがジャイロイド構造全体に充填できない可能性がある.また,液体シリコーン ゴムが結合穴から垂れて予期せぬ場所に付着する状況も見られた.こうした理由から,結 合穴に液体シリコーンゴムを迅速かつ確実に充填する手法の考案が課題である.また,生 物の複雑な骨格形状や靭帯配置を再現することで,高度に筋骨格構造を模倣した機構を製 作できる可能性がある.ただし,結合穴にジャイロイド構造を設けるためには,一定の体 積が必要になる.指機構など,寸法の小さい機構に結合穴を製作することは難しい.サイ ズの小さい機構を製作する場合は,小さい体積の機構でALIFを実現する結合穴や高密度 なジャイロイド構造が必要になると考えられる.

第4章では PLIF について述べた.はじめに,狭い流路に液体シリコーンゴムを充填す る押込み成型について述べた.押込み成型のコンセプトを示し,型構造の分類を行った. 次に、押込み成型に基づく PLIF について述べた. PLIF は、ジャイロイド構造を含む部 品を固定した内型を、材料を注湯した外型に押し込むことで、ジャイロイド構造内部に液 体シリコーンゴムを充填する手法である.型はすべて FDM 方式の三次元プリンタで印刷 可能であり,型の押込みは手作業で行うことができる.まず引張試験を行い, PLIF で結 合された試験サンプルの結合強度を評価した.ジャイロイドの充填密度と材料の硬さを変 え比較を行った. 充填密度を高くすることで最大引っ張り力時の引張変位量が小さくなっ た.一方で,充填密度を変えても最大引っ張り力の大きさは大きく変化しなかった.充填 密度を変えた条件では,140 N から 200 N 程度の最大引っ張り力が得られた.シリコーン ゴムの材料を硬くするほど,最大引っ張り力時の引張変位量が小さくなった.また,材料 候補の中で最も柔軟な Ecoflex 20 の場合に著しく最大引っ張り力が小さくなった.ALIF とは異なり、一度の押込みで機構全体を結合する手法であるため、複雑な構造の成形では 型が複雑化する可能性がある.一方で,PLIF は液体シリコーンゴムをジャイロイド構造 に確実かつ迅速に充填できる.そのため,ジャイロイド構造の内部に気泡などが残りにく い可能性がある.大きな負荷がかかる箇所には PLIF を使用し液体シリコーンゴムを確実 に充填し、構造が複雑な箇所には ALIF を使用する使い分けが有効と考えている.

ALIF および PLIF は原理的に (1,3), (2,3), (3,3) クラスの結合を実現できる. ジャイ ロイド構造にある程度厚みが必要と考えられるため,硬質構造は指標 3 のクラスに属して いることが望ましい.一方で,型形状や結合穴形状により結合する柔軟構造の形状は変更 可能である.たとえば ALIF の応用例として製作した背骨機構は, (2,3), (3,3) クラスの 結合を利用した柔剛ハイブリッド機構と考えられる.

最後に、柔軟膜の中に非伸縮性の糸を埋め込んだ fiber-reinforced 膜のモデリングを

行った.糸を単なる等長拘束を課した折れ線でモデル化することにより,柔軟膜の有限要 素モデルのメッシュエッジに組み込むモデリング手法を提案した.これまでにも等長拘束 を利用したモデル化手法は見られた.一方で,メッシュ編集を組み合わせることで,比較 的自由な糸経路をモデリングでき,糸モデルの組み込みを自動で行うことができる.等長 拘束を Constant Edge-length Constraint (CEC)と呼称し,メッシュ編集と CEC を用 いた弾性膜モデルの実装方法を説明した.提案モデルのシミュレーションにおいて,糸の 組込みによる非一様な膜の変形が確認できた.一方で,水平方向への引張を課した際に, 引張方向と垂直な方向に糸を配向した fiber-reinforced 膜モデルにメッシュエッジの反転 が生じた.この現象について考察するために,上記モデルと同じ状況を再現した膜を実際 に作成し観察を行った.その結果,糸の周辺で膜に面外方向の変形(しわ)が生じている ことを確認した.二次元有限要素モデルは変形が面内に拘束されているため,面外方向へ の変形を含むしわを再現できない.CECsを適用した糸モデルのエッジが面内変形により 大きく歪むことで,メッシュエッジの反転が生じたと考えられる.

6.2 展望

第2章では、領域の内点集合と境界に着目した分類を行うことで、組込み結合と非組込 み結合を定義した.組込み、非組込み結合の定義は、一方の構造が他方の構造に完全に組 み込まれているか否かを表している.ロボット機構は基本的に接触を通じてタスクを実行 するが、孔の内部に非組込み結合された構造は、直接環境と接触できない.構造の環境と の接触可能性を区別するために、構造の外側、内側を区別した結合の定義が求められる.

本稿で提案した ALIF および PLIF は, 簡易な製作手順と設備で実現できる. これは, 反復的な試作を前提とするような柔剛ハイブリッド機構の製作に有用な特徴である. 一方 で,ネジで組み立てされた機構とは異なり,分解,再結合は容易でなく,部品の入れ替え による部分的な修理も難しい. ALIF, PLIF は三次元プリンタを利用するため,硬質構造 のオンデマンドな製作に向いている. そのため,硬質部品の修理は容易である. 一方で, 特に PLIF で製作した機構は一か所が破損した場合に全体を取り替えなければならない. 破損個所ごとに修理できる設計上の工夫が重要と考えられる. また,何度も修理する場合 は,製造にかかる時間的,金銭的コストも考慮するべきである.

PrusaSlicer で自動生成されるジャイロイド構造はサポート材なしで印刷できる格子構 造であり,FDM 方式のプリンタでの製作に向いている.一方で,三次元的な格子構造は ジャイロイド構造以外にも存在し,それぞれを LIF に応用した場合の特徴について議論 されていない.また,本稿では PLIF におけるジャイロイド構造の密度と材料の硬さに対 する引張方向の結合強度を評価したが,結合部に用いるジャイロイド構造の厚みや非一様 なジャイロイド密度など,まだ評価できていない設計要素が存在する.また,せん断など 引張以外の負荷に対する強度の評価も行われていない.

本稿では、PLA 材料を用いてジャイロイド構造を印刷した.一方で、熱可塑性ポリウ レタンやシリコーンゴムなど柔軟な材料を印刷可能な三次元プリンタも見られる.必ずし も安価な三次元プリンタで印刷できるわけではないが、硬さの異なる柔軟材料同士の結合 に LIF を応用できる可能性がある.また、食品や生物の身体などにも多孔質な構造がみら れる.たとえば、クッキーやパンは多孔質であり、人間の骨も多孔質である.また近年で は、食品を三次元プリントする技術も存在する [81].食品を含む構造の結合にも、ALIF、 PLIF と同様の工程が応用できる可能性がある.近年みられる可食ロボット [82] などへの 応用が期待される.

ALIF では結合穴に液体シリコーンゴムを手作業で充填していた.充填を確実にするための手法が望まれる.この際,ALIF の逐次的な結合の性質を損なわない形で,液体シリコーンゴムを充填可能な結合手法が求められる.

PLIF は一体成型を特徴とする. そのため,複雑な構造の成形には型の複雑化を伴う. 前節で指摘したように,ALIF と PLIF を組み合わせた製作工程が実用的と考える. PLIF は,ジャイロイド構造内部に存在するループ状の流路に液体シリコーンゴムを充填し硬化 させることで,トポロジー的に外れない構造を成型できる. また,型の押込みにより,充 填したい材料に圧力をかけることが可能なため,ある程度粘り気のある材料にも適用可能 と考えられる. これらの特徴のため,硬質材料と柔軟材料の接着しやすさ等をあまり考慮 せずに,結合する材料を選定できる可能性がある. 特に,柔軟材料自体がアクチュエータ やセンサとして機能する機能性材料を硬質構造に結合した,新しい柔剛ハイブリッドシス テムの開発が期待される.

本稿でモデル化した fiber-reinforced 膜は (2,1) クラスに分類される.一方で,等長拘 束は一次元,三次元的な弾性体のモデルにも適用可能と考えられる.特に,メッシュ編集 を三次元に拡張することで,三次元的な弾性体に応用できる可能性がある.また,本稿で は平坦な弾性膜に限定して提案手法を適用した.一方で,曲面状の弾性膜に提案手法を適 用する場合,曲面形状を保つメッシュ編集の手法を考える必要がある.もし,三次元空間 上で何の制約もなくメッシュ編集を行った場合,曲面形状を変えてしまう可能性があるた めである.また,本稿で提案したモデリング手法では,あらかじめ生成したメッシュを糸 経路に合わせて編集した.先に糸経路を指定し,糸経路に合わせたメッシュ生成を行うア ルゴリズムを実装することで,メッシュ編集によって生じる課題の解決につながる可能性 がある.多くのソフトロボットは複雑な面や立体の組み合わせからなる.応用できる形状 パターンを増やすことは重要な技術課題である.

謝辞

指導教員の平井慎一教授には修士課程より長らくご指導を賜りました. 長い目で見守っ てくださり,多くのことを学び経験できました. 深謝の意を表します. 立命館大学クラウ ドロボティクス研究室の王忠奎准教授にも修士課程よりご指導いただきました. 研究室を 持たれた後も継続してご指導いただき,ミーティング等で何度もご助言をいただきまし た. 深謝の意を表します. 立命館大学ソフトロボティクス研究室の佐竹祐紀助教には合同 ゼミや研究に関する議論などお世話になりました. 感謝の意を表します. 近畿大学講師の 松野孝博先生には立命館大学に在籍されていた際に大変お世話になりました. 感謝の意を 表します. ソフトロボティクス研究室,クラウドロボティクス研究室をはじめとする学生 の方々には,技術的なサポートや議論などお世話になりました. ここに謝意を表します. 試験サンプル内部の解析に滋賀県東北部工業技術センター彦根庁舎のマイクロ CT スキャ ナを使用いたしました. 設備利用時には設備の利用方法のご指導などいただき,大変お世 話になりました. ここに謝意を表します. 第1回ソフトロボットシンポジウムでは,本研 究に関わる議論などでお世話になりました. ここに謝意を表します. 最後に,私の博士課 程での生活を支えて下さった家族に感謝の意を表します.

参考文献

- [1] 石塚康孝, 小金澤鋼一. 複合遊星ギアを用いたロボットフィンガの新機構. 日本ロ ボット学会誌, Vol. 26, No. 6, pp. 699–710, 2008.
- [2] Yasuyuki Hirano, Kensaku Akiyama, and Ryuta Ozawa. Design of low-cost and easy-assemblable robotic hands with stiff and elastic gear trains. In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 864–870, 2016.
- [3] Daniela Rus and Michael T. Tolley. Design, fabrication and control of soft robots. Nature, Vol. 521, pp. 467–475, 2015.
- [4] Ronghuai Qi, Tin Lun Lam, and Yangsheng Xu. Mechanical design and implementation of a soft inflatable robot arm for safe human-robot interaction. In 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3490–3495, 2014.
- [5] Bobak Mosadegh, Panagiotis Polygerinos, Christoph Keplinger, Sophia Wennstedt, Robert F. Shepherd, Unmukt Gupta, Jongmin Shim, Katia Bertoldi, Conor J. Walsh, and George M. Whitesides. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly. *Advanced Functional Materials*, Vol. 24, No. 15, pp. 2163– 2170, 2014.
- [6] 松下正,高木哲夫. Rcc デバイス. 日本ゴム協会誌, Vol. 60, No. 12, pp. 696-701, 1987.
- [7] Issei Nate, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai. Passive robotic gripper using a contact-based locking mechanism. In 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 10303–10309, 2023.
- [8] Tetsuya Kinugasa, Koichi Osuka, Ryota Hayashi, Naoki Miyamoto, and Koji Yoshida. Development of a small and lightweight myriapod robot using passive dynamics. Artificial Life and Robotics, Vol. 22, pp. 429–434, 2017.
- [9] 飯田史也, 新山龍馬, 國吉康夫. 身体性知能の実現に向けたソフトロボティクスの設

計原理. 計測と制御, Vol. 58, No. 10, pp. 791–797, 2019.

- [10] Wookeun Park, Seongmin Seo, and Joonbum Bae. A hybrid gripper with soft material and rigid structures. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 4, No. 1, pp. 65–72, 2019.
- [11] Atsuhiko Niikura, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Megu Gunji, Kent Mori, Ryuma Niiyama, and Koichi Suzumori. Giraffe neck robot: First step toward a powerful and flexible robot prototyping based on giraffe anatomy. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 3539–3546, 2022.
- [12] Maryam Tebyani, Ash Robbins, William Asper, Sri Kurniawan, Mircea Teodorescu, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai. 3d printing an assembled biomimetic robotic finger. In 2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), pp. 526–532, 2020.
- [13] J. A. E. Hughes, P. Maiolino, and F. Iida. An anthropomorphic soft skeleton hand exploiting conditional models for piano playing. *Science Robotics*, Vol. 3, No. 25, p. eaau3098, 2018.
- [14] Masahiro Ikeda, Ryuma Niiyama, and Yasuo Kuniyoshi. Proposal of manufacturing method for new passive elastic joint and prototype of human phantom. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 34, No. 2, pp. 402–412, 2022.
- [15] Akihiro Katsumaru and Ryuta Ozawa. Design of 3d-printed assembly mechanisms based on special wooden joinery techniques and its application to a robotic hand. In 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 9981–9987, 2020.
- [16] Filip Ilievski, Aaron D. Mazzeo, Robert F. Shepherd, Xin Chen, and George M. Whitesides. Soft robotics for chemists. Angewandte Chemie International Edition, Vol. 50, No. 8, pp. 1890–1895, 2011.
- [17] Raymond R. Ma, Joseph T. Belter, and Aaron M. Dollar. Hybrid Deposition Manufacturing: Design Strategies for Multimaterial Mechanisms Via Three-Dimensional Printing and Material Deposition. *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 7, No. 2, p. 021002, 05 2015.
- [18] Michael A. Bell, Kaitlyn P. Becker, and Robert J. Wood. Injection molding of soft robots. Advanced Materials Technologies, Vol. 7, No. 1, p. 2100605, 2022.
- [19] Prusa Research. Infill patterns. https://help.prusa3d.com/article/ infill-patterns_177130, 閲覧時の最終更新 2024 年. 2024 年 12 月 9 日閲覧.
- [20] Jan Bender, Matthias Müller, Miguel A. Otaduy, and Matthias Teschner. Position-based Methods for the Simulation of Solid Objects in Computer Graph-

ics. In M. Sbert and L. Szirmay-Kalos, editors, *Eurographics 2013 - State of the Art Reports*. The Eurographics Association, 2013.

- [21] Matheus S. Xavier, Andrew J. Fleming, and Yuen K. Yong. Finite element modeling of soft fluidic actuators: Overview and recent developments. Advanced Intelligent Systems, Vol. 3, No. 2, p. 2000187, 2021.
- [22] Ryuta Ozawa, Yuuki Mishima, and Yasuyuki Hirano. Design of a transmission with gear trains for underactuated mechanisms. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 32, No. 6, pp. 1399–1407, 2016.
- [23] 高木健, 小俣透. 負荷感応無段変速機を用いた 100 [g] ・100 [n] 指の開発. 日本ロ ボット学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 263–269, 2006.
- [24] K.B. Shimoga and A.A. Goldenberg. Soft materials for robotic fingers. In Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1300–1305 vol.2, 1992.
- [25] Aaron M. Dollar and Robert D. Howe. The highly adaptive sdm hand: Design and performance evaluation. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 29, No. 5, pp. 585–597, 2010.
- [26] Zhongkui Wang, Mingzhu Zhu, Sadao Kawamura, and Shinichi Hirai. Comparison of different soft grippers for lunch box packaging. *Robotics Biomim.*, Vol. 4, No. 10, 2017.
- [27] Yoshiyuki Kuriyama, Yuusuke Okino, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai. A wrapping gripper for packaging chopped and granular food materials. In 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), pp. 114–119, 2019.
- [28] NITTA Corporation. ソフトハンドリング用ロボットハンド softmatics[™](ソフマ ティックス[™]). https://www.nitta.co.jp/product/robothand/. 2024 年 10 月 2 日閲覧.
- [29] Naofumi Fukamachi and Hiromi Mochiyama. Palm-top jumping and crawling robot using snap-through buckling of arched elastica supported by Ω-shaped frame. In 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp. 1102–1107, 2015.
- [30] 杉山勇太, 平井慎一. 柔軟ロボットの変形を用いた移動と跳躍. 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 3, pp. 378–387, 2006.
- [31] Robert F. Shepherd, Filip Ilievski, Wonjae Choi, Stephen A. Morin, Adam A. Stokes, Aaron D. Mazzeo, Xin Chen, Michael Wang, and George M. Whitesides. Multigait soft robot. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 108,

No. 51, pp. 20400–20403, 2011.

- [32] Andrew D. Marchese, Robert K. Katzschmann, and Daniela Rus. A recipe for soft fluidic elastomer robots. *Soft Robotics*, Vol. 2, No. 1, pp. 7–25, 2015. PMID: 27625913.
- [33] Tatsuya Kako, Zheng Wang, Yoshiki Mori, Hongying Zhang, and Zhongkui Wang. 3d printable origami-inspired pneumatic soft actuator with modularized design. In 2023 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), pp. 1–5, 2023.
- [34] Yui Makiyama, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai. A pneumatic needle gripper for handling shredded food products. In 2020 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), pp. 183–187, 2020.
- [35] Laschi Cecilia, Cianchetti Matteo, Mazzolai Barbara, Margheri Laura, Follador Maurizi, and Dario Paolo. Soft robot arm inspired by the octopus. Advanced Robotics, Vol. 26, No. 7, pp. 709–727, 2012.
- [36] Michael A. Bell, Isabella Pestovski, William Scott, Kitty Kumar, Mohammad K. Jawed, Derek A. Paley, Carmel Majidi, James C. Weaver, and Robert J. Wood. Echinoderm-inspired tube feet for robust robot locomotion and adhesion. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 3, pp. 2222–2228, 2018.
- [37] Robert K. Katzschmann, Joseph DelPreto, Robert MacCurdy, and Daniela Rus. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish. *Science Robotics*, Vol. 3, No. 16, p. eaar3449, 2018.
- [38] 新山龍馬. ソフトロボティクスはどこから来てどこへ行くのか. 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 1, pp. 16–21, 2019.
- [39] 井上貴浩, 平井慎一. 柔軟指による物体把持と操作における力学の実験的解明. 日本 ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6, pp. 951–959, 2007.
- [40] Joohyung Kim, Alexander Alspach, and Katsu Yamane. 3d printed soft skin for safe human-robot interaction. In 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 2419–2425, 2015.
- [41] Hisashi Iwamasa and Shinichi Hirai. Binding of food materials with a tensionsensitive elastic thread. In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 4298–4303, 2015.
- [42] Lishuai Jin, Antonio Elia Forte, Bolei Deng, Ahmad Rafsanjani, and Katia Bertoldi. Kirigami-inspired inflatables with programmable shapes. Advanced Materials, Vol. 32, No. 33, p. 2001863, 2020.
- [43] Yasunori Toshimitsu, Ki Wan Wong, Thomas Buchner, and Robert

Katzschmann. Sopra: Fabrication & dynamical modeling of a scalable soft continuum robotic arm with integrated proprioceptive sensing. In 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 653–660, 2021.

- [44] Jiawei Zhang, Andrew Jackson, Nathan Mentzer, and Rebecca Kramer. A modular, reconfigurable mold for a soft robotic gripper design activity. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 4, , 2017.
- [45] Ryuma Niiyama, Akihiko Nagakubo, and Yasuo Kuniyoshi. Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system. In Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2546–2551, 2007.
- [46] Takashi Takuma, Masahiro Ikeda, and Tatsuya Masuda. Facilitating multi-modal locomotion in a quadruped robot utilizing passive oscillation of the spine structure. In 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4940–4945, 2010.
- [47] Zhe Xu and Emanuel Todorov. Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration. In 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3485–3492, 2016.
- [48] Hugo Gravato Marques, Michael Jäntsch, Steffen Wittmeier, Owen Holland, Cristiano Alessandro, Alan Diamond, Max Lungarella, and Rob Knight. ECCE1: The first of a series of anthropomimetic musculoskeletal upper torsos. In 2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 391–396, 2010.
- [49] Koh Hosoda, Yasunori Tada, and Minoru Asada. Anthropomorphic robotic soft fingertip with randomly distributed receptors. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 54, No. 2, pp. 104–109, 2006. Intelligent Autonomous Systems.
- [50] Maria Larsson, Hironori Yoshida, Nobuyuki Umetani, and Takeo Igarashi. Tsugite: Interactive design and fabrication of wood joints. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, p. 317–327, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [51] 板橋雅巳. 金属と樹脂の直接接合を可能にした ナノモールディングテクノロジー (NMT).表面技術, Vol. 66, No. 8, pp. 359–362, 2015.
- [52] 新山龍馬. ソフトロボットの身体性. 計測と制御, Vol. 59, No. 11, pp. 796–799, 2020.
- [53] Ryo Kanegae, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai. Easily fabricatable shell grip-

per for packaging multiple cucumbers simultaneously. In 2020 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), pp. 188–192, 2020.

- [54] Hiroki Aoyama, Zhongkui Wang, and Shinichi Hirai. Shell gripper inspired by human finger structure for automatically packaging agricultural product. In 2022 IEEE-RAS 21st International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp. 90–95, 2022.
- [55] 一般社団法人日本機械学会.機械工学事典,インサート成形.https://www.jsme. or.jp/jsme-medwiki/doku.php?id=04:1000658, 2017. 2024 年 9 月 24 日閲覧.
- [56] Zhongkui Wang and Shinichi Hirai. Chamber dimension optimization of a bellowtype soft actuator for food material handling. In 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), pp. 382–387, 2018.
- [57] Mélina Skouras, Bernhard Thomaszewski, Bernd Bickel, and Markus Gross. Computational design of rubber balloons. *Computer Graphics Forum*, Vol. 31, No. 2pt4, pp. 835–844, 2012.
- [58] Mélina Skouras, Bernhard Thomaszewski, Stelian Coros, Bernd Bickel, and Markus Gross. Computational design of actuated deformable characters. ACM Trans. Graph., Vol. 32, No. 4, jul 2013.
- [59] Li-Ke Ma, Yizhonc Zhang, Yang Liu, Kun Zhou, and Xin Tong. Computational design and fabrication of soft pneumatic objects with desired deformations. ACM Trans. Graph., Vol. 36, No. 6, nov 2017.
- [60] Hongying Zhang, A. Senthil Kumar, Jerry Y. H. Fuh, and Michael Yu Wang. Topology optimized design, fabrication and evaluation of a multimaterial soft gripper. In 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), pp. 424–430, 2018.
- [61] Sachin, Zhongkui Wang, Takahiro Matsuno, and Shinichi Hirai. Analytical modeling of a membrane-based pneumatic soft gripper. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 4, pp. 10359–10366, 2022.
- [62] Joshua Bishop-Moser and Sridhar Kota. Design and modeling of generalized fiber-reinforced pneumatic soft actuators. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 31, No. 3, pp. 536–545, 2015.
- [63] 一般社団法人日本機械学会.機械工学事典,有限要素法.https://www.jsme.or. jp/jsme-medwiki/doku.php?id=01:1012905, 2017. 2024年9月2日閲覧.
- [64] Matthias Müller, Bruno Heidelberger, Marcus Hennix, and John Ratcliff. Position based dynamics. Journal of Visual Communication and Image Representation, Vol. 18, No. 2, pp. 109–118, 2007.

- [65] Inria. Sofa simulation open framework architecture features. https://www. sofa-framework.org/about/features/. SOFA 公式ホームページの Features の ページ. 2024 年 12 月 20 日閲覧.
- [66] Christian Duriez. Control of elastic soft robots based on real-time finite element method. In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3982–3987, 2013.
- [67] Jonathan Hiller and Hod Lipson. Dynamic simulation of soft multimaterial 3dprinted objects. Soft Robotics, Vol. 1, No. 1, pp. 88–101, 2014.
- [68] Basile Audoly and Yves Pomeau. Elasticity and Geometry From hair curls to the non-linear response of shells, Chapter 3, Equations for elastic rods, pp. 59–104. Oxford university press, 2010.
- [69] Miklós Bergou, Max Wardetzky, Stephen Robinson, Basile Audoly, and Eitan Grinspun. Discrete elastic rods. In ACM SIGGRAPH 2008 Papers, SIGGRAPH '08, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.
- [70] M. Gazzola, L. H. Dudte, A. G. McCormick, and L. Mahadevan. Forward and inverse problems in the mechanics of soft filaments. *Royal Society Open Science*, Vol. 5, No. 6, p. 171628, 2018.
- [71] Hiromi Mochiyama. The elastic rod approach toward system theory for soft robotics. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 53, No. 2, pp. 9175–9180, 2020. 21st IFAC World Congress.
- [72] Raphael Deimel and Oliver Brock. A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 35, No. 1-3, pp. 161–185, 2016.
- [73] T. Stalin, S. Jain, N. K. Thanigaivel, J. E. M. Teoh, P. M. Aby Raj, and P. Valdivia Y Alvarado. Automated fiber embedding for soft mechatronic components. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6, No. 2, pp. 4071–4078, 2021.
- [74] J. H. Pikul, S. Li, H. Bai, R. T. Hanlon, I. Cohen, and R. F. Shepherd. Stretchable surfaces with programmable 3d texture morphing for synthetic camouflaging skins. *Science*, Vol. 358, No. 6360, pp. 210–214, 2017.
- [75] Mingzhu Zhu, Yoshiki Mori, Mengying Xie, Akira Wada, and Sadao Kawamura. A 3d printed two dof soft robotic finger with variable stiffness. In 2018 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics, pp. 387–391, 2018.
- [76] 今井正幸. ソフトマターの秩序形成, 第3章 両親媒性ソフトマターにおける秩序-秩 序転移, pp. 113-236. シュプリンガー・ジャパン株式会社, 2007.

- [77] Matt's Hub. Designing a gyroid vase. https://www.youtube.com/watch?v= Y5i8zhM_jAo, 2018. 2024 年 10 月 28 日閲覧.
- [78] Donald A. Neumann. カラー版 筋骨格系のキネシオロジー,第9章 体軸骨格:骨 と関節構造, pp. 341–418. 医歯薬出版株式会社,エルゼビアジャパン株式会社,原著 第2版, 2005. (嶋田智明,有馬慶美 監訳).
- [79] 小林昭七. 曲線と曲面の微分幾何,第1章 平面上の曲線,空間内の曲線,セクション4 空間曲線, pp. 23–30. 裳華房,第36版, 1977.
- [80] Koichi Suzumori, Kenjiro Fukuda, Ryuma Niiyama, and Kohei Nakajima Editors. The Science of Soft Robots, Section 13.1.2, Describing Motion and Deformation, pp. 281–284. Natural Computing Series. Springer Singapore, 2023.
- [81] 川上勝, 古川英光. 近年の食品 3d プリンタの発展. 日本画像学会誌, Vol. 58, No. 4, pp. 434–440, 2019.
- [82] 多田隈建二郎,小松洋音,藤田政宏,野村陽人,高根英里,昆陽雅司,田所諭.可食ロボット用全周開張式トーラス機構.ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2017, pp. 2A1–A09, 2017.

第3章の内容は、日本ロボット学会誌掲載予定の論文に基づいている.

第5章の内容は, [Y. Mimori, Z. Wang and S. Hirai, "Fiber-Reinforced Membrane Modeling Based on Constant Edge-Length Constraints," 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Ha Long, Vietnam, 2024, pp. 573-578] に基づいている.

Chapter 5 is written based on the confference paper [Y. Mimori, Z. Wang and S. Hirai, "Fiber-Reinforced Membrane Modeling Based on Constant Edge-Length Constraints," 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Ha Long, Vietnam, 2024, pp. 573-578].

付録 A

ジャイロイド構造の三次元プリンタ による印刷

本稿では LIF に用いる多孔質構造としてジャイロイド構造を提案した.スライサソフ トの PrusaSlicer (Prusa Research) で生成されるジャイロイド構造は,数学的な曲面と してのジャイロイドと形状が少し異なり,水平に近い面の部分がくりぬかれている.これ は,FDM 方式のプリンタで印刷する際に面が水平に近いと積層が難しくなるためと考え られる. 穴の数が増えることで流路が増えるため,LIF においては利点になりうる.ま た,サポート材を利用せずに印刷できるため,硬質部品を印刷した後のサポート材の取り 外し作業が不要である.

ジャイロイド構造は孔同士がつながった構造である.多孔質構造であっても,孔同士が 壁により完全に区切られた構造では液体を内部まで充填できない.そのため,LIF に利用 する多孔質構造は,孔同士が結合した開いた構造である必要がある.

このように,LIF に応用する場合は,積層造形時にサポート材を必要としない多孔質構 造や開いた多孔質構造が望ましい.これらは単材料の FDM 方式の三次元プリンタを利用 することを前提とした考察であるが,より一般には三次元プリンタの特性に合わせた構造 の選定が重要になると考えられる.

付録 B

背骨機構に用いたシリコーンゴム部 品の成形

第3章では背骨機構の椎間板や靭帯を模倣した部品をシリコーンゴムで製作した.この シリコーンゴム部品の製作には押込み成形を用いた.Fig.B.1 は椎間板を成形する型であ る. 左が成形後の椎間板で,中央が内型,右が外型である.内型の半分を半透明で表示し ている.内型に中子はなく,中実な椎間板を模倣したシリコーンゴム部品を成形できる. 型は離型のために分解可能であり,ネジを用いて組み立てる.

また, Fig. B.2 は椎間関節を固定するシリコーンゴム部品の型である. 黄色い内型と赤 い外型はそれぞれ離形のために分解可能な構造であり,ネジを用いて型を組み立てる. 内 型を押し込むことで円筒形のシリコーンゴム部品を同時に 8 本製作できる.



Fig. B.1: Push-in casting mold for intervertebral discs.



Fig. B.2: Push-in casting mold for facet joint ligaments.

付録 C

接着およびアンカーで結合した試験 サンプル

第4章では PLIF で製作した試験サンプルの結合強度との比較として,シリコーンゴム 部品と PLA 部品を結合した試験サンプルを製作し,引張試験を行った. Fig. C.1 は接着 およびアンカーを用いて製作した試験サンプルである.







(b) Sample joined by anchor.

Fig. C.1: Tensile test sample joned by (a) bonding and (b) anchor.