

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	空圧人工筋肉を用いた能動布に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	平光立拓
Author(English)	Tatsuhiko Hiramitsu
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11124号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:鈴木 康一,松永 三郎,塚越 秀行,中西 洋喜,遠藤 玄
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11124号, Conferred date:2019/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成 30 年度 学位論文

空圧人工筋肉を用いた能動布に関する研究

東京工業大学 工学院機械系 機械コース

平光 立拓

目次

目次	i
第 1 章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 システム構造における画一化	1
1.1.2 モジュラーシステム	2
1.1.3 設定可能な格子構造	4
1.1.4 繰り返し動作による製造技術	4
1.1.5 セル構造体技術の整理	8
1.2 本研究の目的と問題意識	9
1.2.1 従来の能動布の研究	9
1.2.2 能動布の展開と課題	14
1.2.3 本研究の目的	16
1.3 本論文の構成	18
第 2 章 空圧人工筋肉を用いた平面状能動布の変形解析	19
2.1 本研究で扱う索体	19
2.1.1 本研究で扱う紐の概要	19
2.1.2 空圧人工筋肉	20
2.2 本研究で扱う布	25
2.2.1 布の種別	25
2.2.2 織布構造の一般化表現	27
2.3 能動布の試作	27
2.3.1 形態確認試験のための能動布	27
2.3.2 駆動特性評価実験のための能動布	30
2.4 能動布の変形原理	30
2.4.1 人工筋肉の収縮による変形	30
2.4.2 人工筋肉の膨張による変形	34
2.5 形態確認試験	37
2.5.1 形状の計測方法	37

2.5.2	計測結果：能動布の形状	37
2.5.3	能動布の形態分類	39
2.6	駆動特性評価実験	42
2.6.1	収縮特性	42
2.7	議論	45
2.8	まとめ	47
第3章	空圧人工筋肉の螺旋走行からなる円筒状能動布への展開	49
3.1	立体構造への展開	49
3.1.1	ソフトメカニズムにおける立体構造の形態	49
3.1.2	立体的な繊維集合体の形態	50
3.2	人工筋肉の三次元螺旋状走行からなる円筒構造	52
3.3	筋走行角度を用いた形状変換モデル	52
3.3.1	主な記号	52
3.3.2	変換モデル	53
3.4	試作機を用いた変形検証	57
3.4.1	編織された人工筋肉の駆動特性	57
3.4.2	円筒構造の駆動実験	59
3.5	まとめ	61
第4章	配管を必要としない柔軟空圧人工筋肉の実現	65
4.1	空圧システムの単純化・小型化	65
4.1.1	多自由度空圧システムの課題	65
4.1.2	空圧システムの単純化・小型化への取り組み	66
4.1.3	人工筋肉へ適合する駆動方式	71
4.1.4	気液変換駆動の動作原理	71
4.1.5	気液変換駆動を能動布へ適用するうえでの課題	73
4.2	気液変換駆動を適用した柔軟空圧人工筋肉	74
4.2.1	気液変換駆動と柔軟性確保の両立した構造の提示	74
4.2.2	気液変換駆動バッグスアクチュエータの構造	74
4.2.3	製作方法	75
4.3	駆動実験	76
4.3.1	実験システム	76
4.3.2	実験結果	76
4.4	応用についての議論	79
4.5	まとめ	81
第5章	結論	85
5.1	結論	85

目次	iii
5.2 今後の課題	86
5.3 今後の展望	87
参考文献	89
業績	94
謝辞	97

目次

1.1	Variety of modular structure of a manipulator.	3
1.2	GIK, Popescue et al.(2006) [12].	6
1.3	The principle of a digital manufacturing process using spherical voxels, Hiller et al.(2009) [14].	7
1.4	Dynablock, Suzuki et al.(2018) [17].	7
1.5	Manufacturing machines for fabric.	8
1.6	Active textile using shape memory alloy, Stylios et al.(2017) [23].	10
1.7	Kinetic garment, Berzowska et al.(2005) [24].	10
1.8	Active textile using electroactive polymers, Maziz et al.(2017) [25].	11
1.9	Active textile using super coiled polymers, Simeonov et al.(2018) [26].	11
1.10	Active textile using thin McKibben muscles, Funabora(2018) [28].	12
1.11	Active textile using thin McKibben muscles, Ohno et al.(2015) [29].	12
1.12	Categorization of active textiles made of multi filaments of artificial muscles. .	13
1.13	Pneumatic system for a fabric actuator, Funabora(2018) [28].	16
2.1	The four types of strings used as wefts of active textiles.	21
2.2	PouchMotor,Niiyama et al. [43].	22
2.3	Bags-actuator, Hiramitsu et al. [46].	22
2.4	Construction of a thin McKibben muscle.	23
2.5	Actuation characteristics of a thin McKibben muscle.	24
2.6	Examples of weave diagram of three foundation weave.	26
2.7	Weave diagram of generalized three foundation weave.	27
2.8	The fabrication process of an active textile.	28
2.9	All of active textiles.	29
2.10	Appearance of active textiles.	31
2.11	Generally deformed shape of active textiles.	31
2.12	Schematic image of deformation in the warp section by contraction of McKibben muscles	32
2.13	Schematic diagram of an unit structure of a warp in cross section.	33

2.14	Parts of an unit structure of a warp in cross section.	33
2.15	Schematic image of deformation in the weft section by expansion of McKibben muscles	35
2.16	Schematic diagram of an unit structure of a weft in cross section.	35
2.17	Parts of an unit structure of a weft in cross section.	36
2.18	3D-scanning of an active textile. The 3D-scanner is RexcanIII from Solutionix.	38
2.19	Contraction ratio.	40
2.20	Comparison curvature between experiment value and model. Matched data.	41
2.21	Comparison curvature between experiment value and model. Mismatched data	42
2.22	Bending shapes of active cloths.	43
2.23	Schematic diagram of wefts curve shape in cross section.	44
2.24	Experiment equipment.	45
2.25	Relationship between the applied pressure and contraction force in the weft direction by the expansion of muscles.	46
2.26	Relationship between contraction ratio and contraction force in the weft direction due to expansion of muscles.	47
3.1	Peano Skin type twist actuator [63].	50
3.2	Variety of fabric structures [65].	51
3.3	Structures of braided bundle [64].	51
3.4	Muscle layout of cylindrical mechanism is helical. A red string is a thin McKibben muscle.	54
3.5	Production flow of cylindrical structure with helical muscles.	55
3.6	Transformed model of cylindrical structure with helical muscle running.	56
3.7	Driving characteristics of a thin McKibben muscle. The diameter is 3 mm.	58
3.8	Two examples of cylindrical mechanisms.	60
3.9	Schematic diagram pneumatic system	61
3.10	Deformation of prototypes.	62
3.11	The model mimiced heart's muscle running.	63
3.12	An example in techno art: Lamp shade with cyrindrical structure.	63
4.1	General pneumatic system.	66
4.2	The principle of Band Pass Valve, Ikuta et al.(2003) [67].	67
4.3	Pneumatic valve operated by multiplex pneumatic transmission, Nishioka et al.(2010) [68].	67
4.4	Gas source using decomposition reaction of H ₂ O ₂ , Michael Wehner et al.(2016) [62].	68
4.5	Gas source using phase chage reaction of CO ₂ , Kitagawa et al.(2005) [72].	69

4.6	Phase-change actuator, Nakahara et al.(2017) [73].	70
4.7	Hose-Free FMA, Wada et al.(2016) [74].	70
4.8	The McKibben muscle applied gas/liquid conversion drive [78]	71
4.9	Type of fuel cell [81].	72
4.10	Schematic image of structure of polymer electrolyte fuel cell [83].	73
4.11	Driving principle of electrolysis/synthesis of water with PEFC	73
4.12	The idea of flexible artificial muscles including polymer electrolyte fuel cell.	75
4.13	Fabrication process of a gas/liquid conversion drive bags-muscle.	77
4.14	Structure of the prototype gas/liquid conversion drive bags-muscle.	78
4.15	Schematic figure of two chamber styles.	79
4.16	Experimental system for gas/liquid conversion drive	80
4.17	Result of driving experiment of gas/liquid conversion drive bags-muscles with sequence control.	82
4.18	Secons of experiment of bags-actuator with gas/liquid conversion driving.	83

表目次

2.1	Parameters of rubber tube of thin McKibben muscles that are used in this thesis.	23
2.2	Parameters of active textiles.	30
3.2	Physical properties of air at atmospheric pressure.	59
3.3	Ratio of root mean squared errors between calculation values and experimental values to initial values.	61

第1章

序論

一般的に機械システムは、多種多様な固有の部品から構成されている。それら部品ならびに構造の設計・製造は、技術者の知識や製造技術の差異によって変化し、部品はより多様さを増す。機械を構成する部品の多様性は、製造コストに関わる大きな要因であり、機械システムを社会で普及させるうえで考慮すべき課題である。

本研究では、空圧人工筋肉を編織した布状の機構を提案し、その基礎原理を明らかにすることを目的とする。多様な運動・形状を有する機構を、単純な素材を用いた画一的な構造によって実現することで、固有の部品製造を必要としない機械の一形態を提案する。

この章では、初めに、機械構造の画一化の意義と課題について先行研究を挙げて議論する。次に、提案する布状の機構の実現について、現状と問題点を指摘し、遂行すべき課題について議論する。その後、本研究で具体的に達成を目指す研究項目を述べる。

1.1 本研究の背景

1.1.1 システム構造における画一化

従来機械システムは、人の行っていた作業を代替することを目的とし、性能的な無駄を省き、高出力・高速・高精度で動くことを志向して設計・製作される。一般的に、その構造は設計時点で確定され、多種多様な部品はその機械固有のものが設計・製作される。各種部品の形態は、設計・製作を実施する技術者の技術・知識や利用できる製造技術に強く依存しており、同様の機構であっても同じものが製作されることは稀である。また、同じ製作環境・製作者であっても、新規の機械システムを製造する際には、その都度、専用の部品が設計され、異なる部品が製作される。このようにして、機械構造ならびに部品が多種多様であることが、機械製造の金銭的・時間的コストの大きさの要因であり、機械システムを普及させることへの障害となっている。

一方で、システムを画一的な基本要素である素子(セル)の集積体として形成することにより、製造過程を単純化することを志向した技術がある。本研究では、この技術を総括してセル構造体技術と呼称する。セル構造体技術は、素子を物理的に再配置するものと素子を整列させたまま性質を設定するものに大別できる。

1.1.2 モジュラーシステム

素子の物理的な切り離しを想定した技術では、一つのシステムを構成部品に分割することによって、製造工程を単純化する。特に、まとまりのある機能を持つ構成部品はモジュールと呼ばれ、モジュールを用いるシステムはモジュラーシステムと呼称される。モジュールの入出力を標準化することによって、細かな原理を理解する必要なく、システムの構築をモジュールの組み合わせによって行えるようになる。機械システムを、モジュール化の程度・構成部品間の依存度によって、以下のような四つの形態に分類する。例として、工業利用で多く普及しているロボットであるマニピュレータ (図 1.1) を挙げて説明する。

一体式 (非モジュラーシステム)

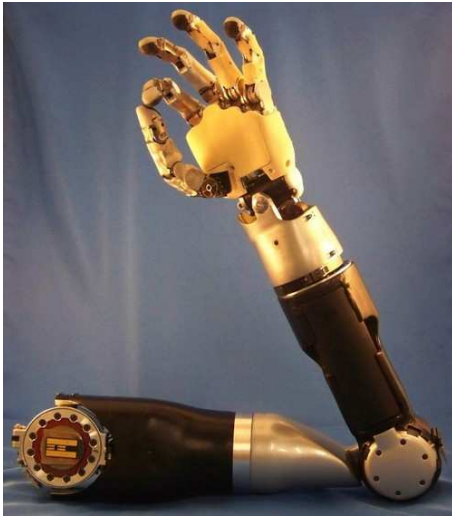
一つのシステム全体を設計し、一体のものとした形態。図 1.1(a) に示す Modular Prosthetic Limb (Johns Hopkins University) は四肢切断者を対象にした動力義手であり、マニピュレータ全体は人の腕を模倣した一体のものとして設計・製造されている [1]。特定の仕様を満たすことを目的としており、要求の性能を発揮するうえで無駄が少ない構成といえる。

エンドエフェクタ

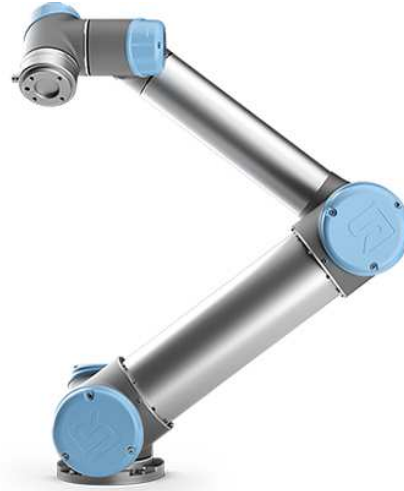
システムの基本的な部分、ほとんどの部分 (本体) は一体式で製造し、細かな変更ができるように一部のみモジュールを取り換える形態。モジュールは単体で機能することではなく、本体に組付けることを前提に作られる。大まかな機能を本体が担い、末端部の詳細な機能をモジュールの変更で対応する。図 1.1(b) に示す UR5 (Universal Robot A/S) では、マニピュレータがアームとエンドエフェクタに分割されている。これにより、エンドエフェクタの変更によって、大まかな機能は変更することなく、作業に多様性を持たせることができる。ただし、アームとハンドには本体部と従属部という関係性があるため、本体部の影響が大きく、基本的に変更できない。

コンフィギュラブルシステム

一つのシステムを形成するための機能を全て分割し、モジュールとした形態。それぞれのモジュール間の規格は統一され、モジュール単体の機能はほとんど独立しており、接続する相手を指定しない。モジュールの組み合わせによって全体形状が変更されるため、特定の部位がなくともシステム全体で機能が失われることはない。図 1.1(c) に示す協働用ロボットアーム MARA (Acutronic Robotics) は、マニピュレータを関節と節で分割しており、同様の動きをする箇所と同じ部品を使えるようにすることで、必要となる部品の種類を削減している。研究方面では、図 1.1(d) に示す Molecubes (Festo AG & Co. KG) のように、特定の用途を定めておらず、より単純な形状のほぼ単一種類のモジュールから構築される形態も多く検討されている [2] [3] [4] [5]。



(a) Modular Prosthetic Limb, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory LLC. [1].



(b) UR5, Universal Robot A/S [7].



(c) MARA, Acutronic Robotics [8].



(d) Molecubes, Festo AG & Co. KG citefestoPDFmolecubes [9].

Figure 1.1 Variety of modular structure of a manipulator.

群体システム

細かな単位ロボットを集積し協調させることで、群体としての機能を獲得する形態。それぞれの単位は完全に独立しており、複数の単位モジュールが協働することで総体としての機能を発現する。必ずしも単位モジュール間で物理的に接続する必要はなく、協働するための仕組みが内蔵されていればよい。群体システムの研究は何らかの形状を形作る方法の検討に留まっており [6]、マニピュレータなどの複雑な機能を実現したものは見られない。

1.1.4.2 積層式付加造形技術

三次元形状データをもとに、断面形状毎に材料を付加加工し積層させていく造形技術である [11]. 主な手法を以下に列記する.

- **光造形法**

光硬化する液体樹脂を溜めた槽内で選択的に硬化させて積層させていく造形方法.

- **粉末固着法**

粉末の樹脂へ接着剤を吹き付ける造形方法.

- **粉末床熔融結合**

粉末の素材を薄く積層させた後に、レーザー光などによって特定箇所を選択的に熔融させて結合させる造形法. 粉末の積層と、熔融のプロセスを交互に行っていく.

- **熱溶解積層法**

熱可塑性の素材を高温で溶解させ、ノズルなどの開口部から押し出し、選択的に堆積させていく造形方法.

- **シート積層法**

カットなどで製作されたシートを積層することで形状を造形する方法. 各シート間を接着するプロセスとシート積層するプロセスを交互に行う.

- **マテリアルジェット法**

液化した材料を噴射し、選択的に堆積させる造形法.

基本として、計算機にて形状を断面に分割したスライスデータを作成し、各層を順次積層させて組み立てるという手順を踏むため、閉じた内部構造を含む複雑な形状を容易に造形することができる. 層間は連続して造形されず、接着する手順が含まれるため、切削や成型といった従来手法と比較して、強度が低いとされる. 昨今では、導電体・弾性材・化学繊維など、複数の異なる材質を組み合わせて造形することができるものも開発されており、一括で機械を製造することが検討されている. 液体・固体の素材を随時加工するプロセス型製造の一種であり、連続的に素材を配置していくという画一的な手法ながら、形状的に自由度の高い造形が可能である. 一方で、扱える素材が限定的であり、また、造形物の大きさに対して加工に時間がかかるという短所がある.

1.1.4.3 デジタルコンポジット法

接続部を持つ離散的な素子を配置し、接続していくことで造形される立体構造をデジタルコンポジットという. また、その構成素子はデジタルマテリアルと呼称される. デジタルマテリアルの接続の方法には、噛み合う形状にすることで素子間の摩擦を利用したもの [12] [13], 素子の配置後に接着剤を用いるもの [14] [15] [16], そして磁力を用いるものがある [17] [18]. Popescu らの提案する GIK は、様々な材質を正方形板の四辺に切れ込みのある形状とした素子を組み合わせて、様々な形状を造形しようとするものである (図 1.2) [12]. 切れ込み部分を互いに合わせ、摩擦によって接合するものであり、曲げ方向に関しては比較的大きな力を受けることができる. 一方で、切れ込みの向きに合わせて素子を動かす必要があるため、組み立てプロセスは複雑であり、引張り

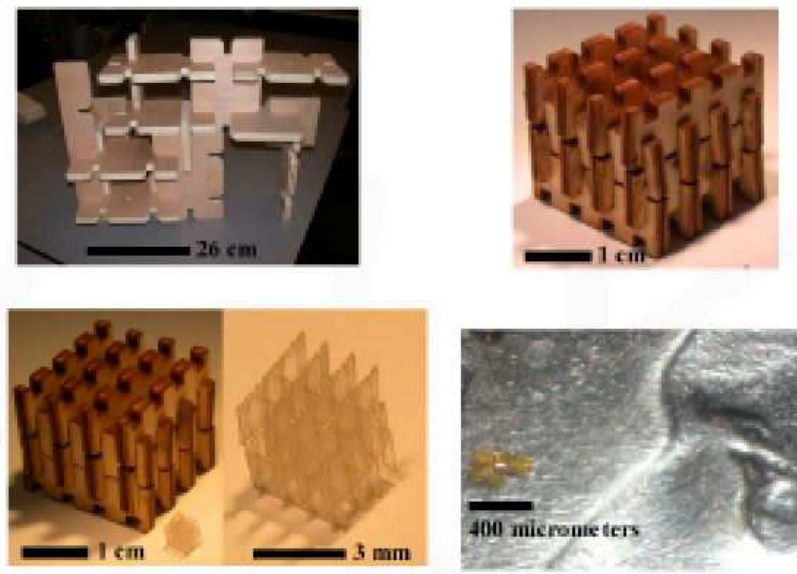


Figure 1.2 GIK, Popescue et al.(2006) [12].

に対して弱い向きが存在する。Hiller らは球体を配列させつつ、接着剤で接合させていくことで立体形状を造形する方法を提案している (図 1.3) [14]。Suzuki らの提案する Dynablock は、永久磁石を組み込んだブロックを多量に用意し、ステージ内部から選択的にせり上げ、接合させていくことによって望みの形状を造形しようとするものである (図 1.4) [17]。永久磁石を用いているため、結合・切り離しを選択的に行うことは難しい。

前述の付加製造技術が素材を随時加工するプロセス型製造であるのに対して、デジタルコンポジット法は事前に製作された素子を配置していくディスクリート型製造である。素子は造形以前に量産されるものであるため、付加製造では加工が難しい素材やより複雑な形状のものを扱うことができ、造形を素早く行うことが可能である。

1.1.4.4 製布機械

細かな繊維を集積して、絡ませることで製造される繊維集合体の製造においても、単純な繰り返し処理からなる連続的な製造が行われている。布の製造方法には、織り・組み・編み・圧縮成形などがあり、それぞれ編布・織布・組紐・不織布といった異なる形態の繊維集合製品が製造される。

織布を製造するための器械が、織機である。これに動力を付け、自動化したものを力織機という。並行に整列して設置した経糸を浮沈させてできた隙間に緯糸を直角に通すことにより、織布を形成する。経糸の浮沈パターンのプログラムを変更することで、多様な組織の織布を一つの機械で製造することができる。

組機では、隣り合う紐の位置を互いに入れ替える処理を繰り返すことによって連続した中空構造を形成する。適当な張力をかけることで中空部分が狭まるため、芯材を中空部分に通すことで、芯材を組まれた繊維で包むことができる。工業的には、信号用電線のシールドや部材の繊維強化などで使われている。芯材の形状は比較的自由に選択でき、組紐処理後に樹脂を塗布することによって織

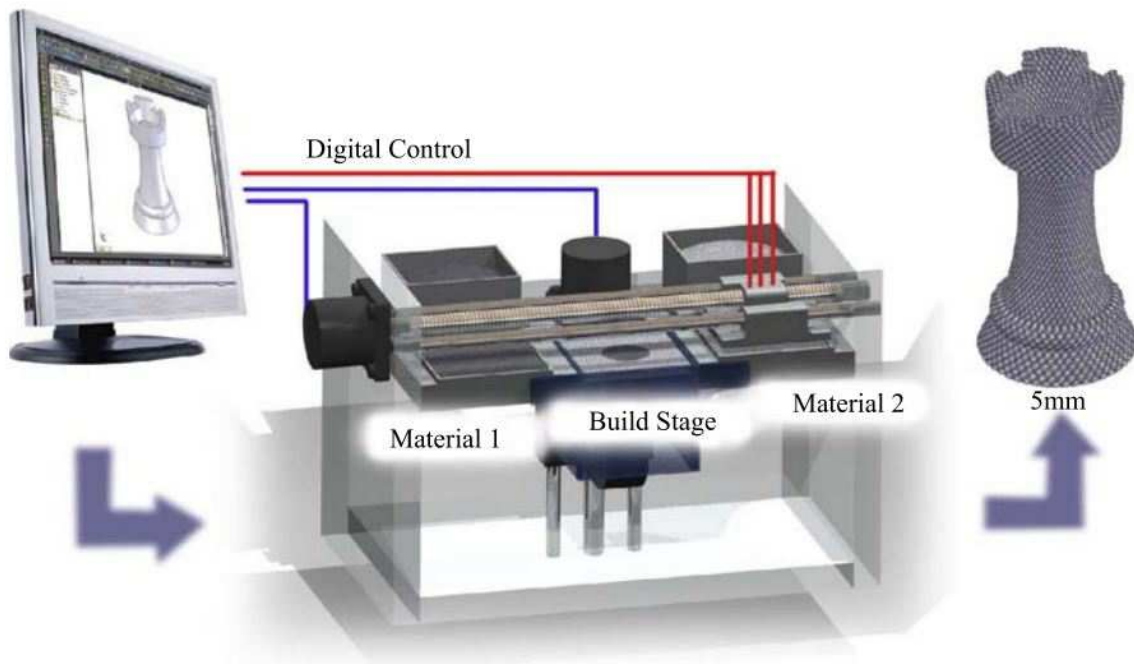


Figure 1.3 The principle of a digital manufacturing process using spherical voxels, Hiller et al.(2009) [14].



Figure 1.4 Dynablock, Suzuki et al.(2018) [17].

維強化された部材の製造がされる。

編機は、用いられる針の種類，そして編目が連続する向きによって分類される．編み構造における，最小単位は編目であり，この編目によって編み構造の向きが決定される．糸が縦方向に供給されるものをたて編機，横方向に供給されるものをよこ編み機という．編み構造では素材の糸が緩くループしながら絡まっており，隙間が大きいことが特徴であり，基本的には衣料製品として利用される．

多くの場合，素材は紐などの長く連続した柔軟な索体であり，加工プロセスの前後ではロール等に巻き付けて管理されるため，広義にはロール・ツー・ロール式製造の一種である．どの製造方法についても，素材となる繊維を絡ませて結合させており，繊維の種類や絡ませ方を変更することによって性質を調整できる．既成の連続した素材から，形状・特徴の異なる製品を大量かつ高速で製造可能である．衣料の製造の他，近年では，工業用の繊維強化材料の製造として利用されている．

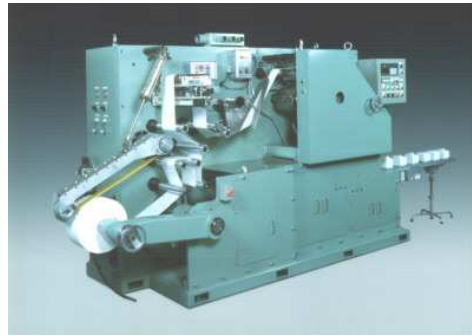


(a) looming machine. JAT810, Toyota industries corporation [19].

(b) braiding machine. Kokubun LTD. [20].



(c) knitting machine. SHIMA SEIKI MFG., LTD [21].



(d) Non-woven fabric molding machine. Iyokikai Seisakusho [22].

Figure 1.5 Manufacturing machines for fabric.

1.1.5 セル構造体技術の整理

本節では、システムを同様の単位構造が集積したものにするすることで製造を簡略化するセル構造体技術について概観してきた。セル構造体は、計算理論やロジック回路、製造手法や群ロボットまで非常に広い領域で適用可能な概念であり、素子の単純さや素子の結合規則によって様々な形態が存在する。ここで、セル構造体技術を整理する。

セル構造体技術は、離散的な素子を随時配置する素子配置型と整列された素子ならびに素子間の関係を設定する組織設定型に大別される。モジュラーシステムやデジタルコンポジットなどの素子配置型は、既成の素子を追加・除去することによって、システム全体の規模・形状が変更可能であるという特徴を有する。すなわち、素子配置型では、システムの規模・形状が定まっておらず、状況に応じて変更することを想定している。このために、素子配置型の個々の素子は比較的独立しているとともに、素子間の結合のための機能が必要である。一方、システム総体としての規模・形状が変化しないのであれば、素子が可動・可変である必要はない。PLDなどの組織設定型では、素子の配置は構築時点で確定され、隣接する素子の関係性によって挙動が確定する。このため、素子自体に何らかの機能を内蔵する必要性はなく、より簡素な構造とすることが可能である。特に、格

子状の構造を採用すれば、繰り返し動作による製作が期待できる。

1.2 本研究の目的と問題意識

前節では、種々のセル構造体技術を素子の接続形態によって大きく二つの系統に分類するとともに、繰り返し処理による製造技術について概観した。本研究では、柔軟な人工筋肉を多数集積し、編織によって布とした構造体を能動布と呼称し、組織設定型のセル構造体機構の一形態として着目する。布などの繊維を組み合わせた構造は、少ない種類の単純な素材を用いつつも、多様な柔軟構造を製作することに適している。組織によって特性が変化するという布の特徴を活かし、能動的に駆動させることで新たな組織設定型のセル構造体機構として利用することが狙いである。人工筋肉とは、シリンダやリニアモータと同様の軸方向駆動型アクチュエータであると同時に、非駆動方向へ受動的に変形する柔軟性を有する紐状アクチュエータの総称である。特に、駆動方向・非駆動方向のどちらの場合においても確認される高いコンプライアンスは、機構を構成する際に非常に有用な特徴である。アクチュエータ自体が柔軟に変形することで、機械要素の取り付け位置を厳密に設計する必要性が低減される。また、複数の人工筋肉が冗長的に配置される場合も、互いの駆動を完全に妨げることがないため、多自由度の機構を構成することが容易になる。本節では、セル構造体技術の一つとして、人工筋肉を編織した布状の機構：能動布を取り上げ、先行研究を概観しつつ検討すべき課題を明らかにする。

1.2.1 従来の能動布の研究

これまでも、様々な人工筋肉を用いた、布状の機構がいくつか提案されている。Styliosらは、形状記憶合金 (SMA : Shape Memory Alloy) あるいは形状記憶ポリマー (SMP:Shape Memory Polymers) といった形状記憶材料 (SMM:Shape Memory Materials) を用いた Intelligent textiles を提案している (図 1.6) [23]。収縮状態で形状記憶処理を行った SMM 製の糸を伸展した状態で既存の布に縫い込むことで製作されており、SMM が元の形状に戻ることによって、布が収縮する。温度による形状記憶効果を利用しており、原子の結晶構造の変化が駆動原理であるため、応答が遅いことが課題である。Berzowskaらは、フェルト生地の中に Ni-Ti 合金線を組み込んだ能動布を用いて、能動的に動く衣服を試作している (図 1.7) [24]。通電による抵抗加熱によって温度を上昇させ、先に記憶させた形状へ戻る働きを利用している。Mazizらは、電場応答性高分子 (EAP : Electroactive Polymer) を用いた能動布を提案している (図 1.8) [25]。ポリピロールなどの導電性ポリマーや導電塗料でコーティングした再生セルロースなどの導電性の高い糸を織るあるいは編むことによって布構造を形成しており、電解質溶液に浸した状態で電位を与えることでカチオンが吐出・吸収され、繊維の形状が変化する。電解質溶液が必要であること、変形量が小さいことが課題である。Simeonovらは、SCP(Super Coiled Polymer) 人工筋肉を用いた能動布を提案している (図 1.9) [26]。このアクチュエータは、ナイロンファイバーを捻転させるのみで製作できることから、安価で量産が容易である。加熱することで SCP を収縮させるため、SMM 製の人工筋肉と同様に制御が難しい一方で、30 ms 程度の応答性があることが知られている [27]。

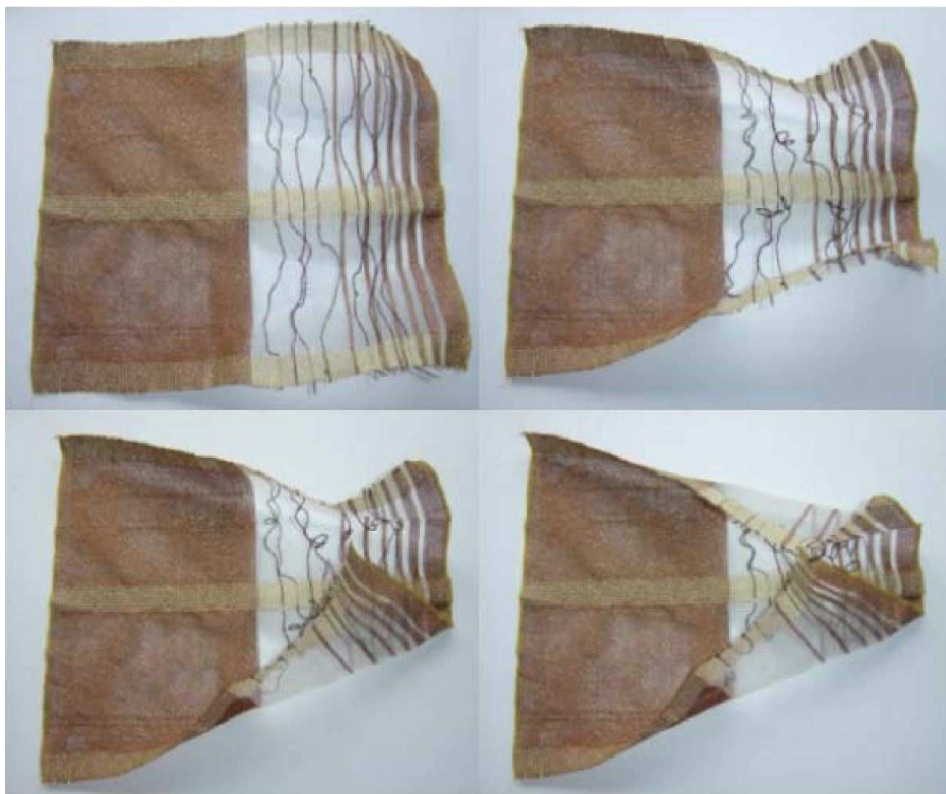


Figure 1.6 Active textile using shape memory alloy, Stylios et al.(2017) [23].



Figure 1.7 Kinetic garment, Berzowska et al.(2005) [24].

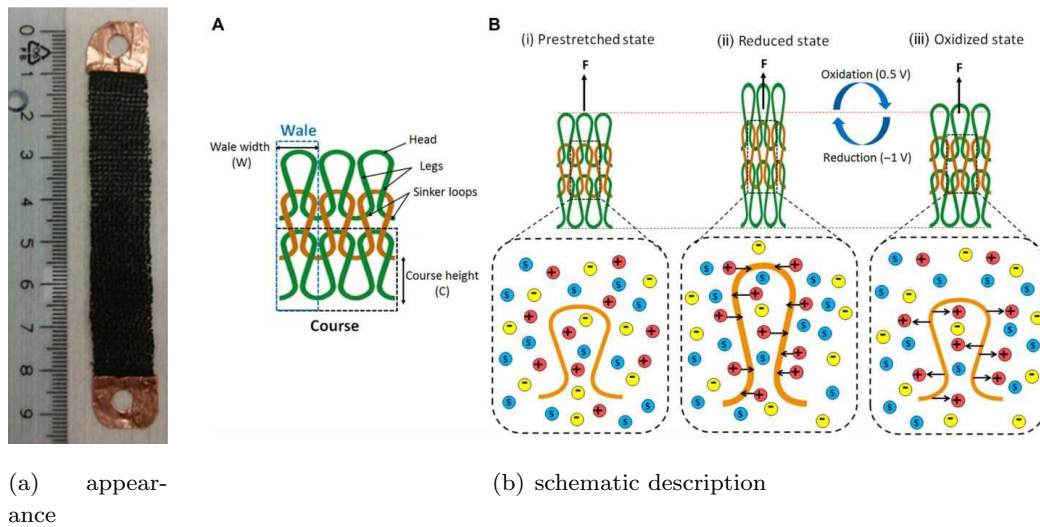


Figure 1.8 Active textile using electroactive polymers, Maziz et al.(2017) [25].



Figure 1.9 Active textile using super coiled polymers, Simeonov et al.(2018) [26].

Funabora らは、織布の組織に細径の McKibben 型アクチュエータを差し込んだ形態の、能動布を提案している (図 1.10) [28]. アクチュエータを二つの系統に分け、それぞれを収縮させることによって、曲げと捻じれの変形を達成しており、人の体の動きに適応したアシストスーツへ応用を検討している. Ohno らは、細径 McKibben 型人工筋肉そのものを用いて布を織る形態を提案・試作し、外骨格を削減したパワーアシストスーツへの応用を検討している (図 1.11) [29]. 並行させた人工筋肉を縦糸として、平織りとなるように緯糸を絡ませることで織布としている. Ohno らは、人工筋肉と交錯させる緯糸の密度の影響を実験的に評価しており、収縮を極端に阻害しないような密度の設計が重要であることを明らかにしている. 以上のもののほか、細径の McKibben 型人工筋肉のみで形成された布状メカニズムも検討されている. サディチらは、ニット状の能動布や経糸・緯糸共に人工筋肉で編織された織布を検討している [30]. 車谷らは、三つ編みを発展させた特殊な構造の能動布を提案している [31].



Figure 1.10 Active textile using thin McKibben muscles, Funabora(2018) [28].

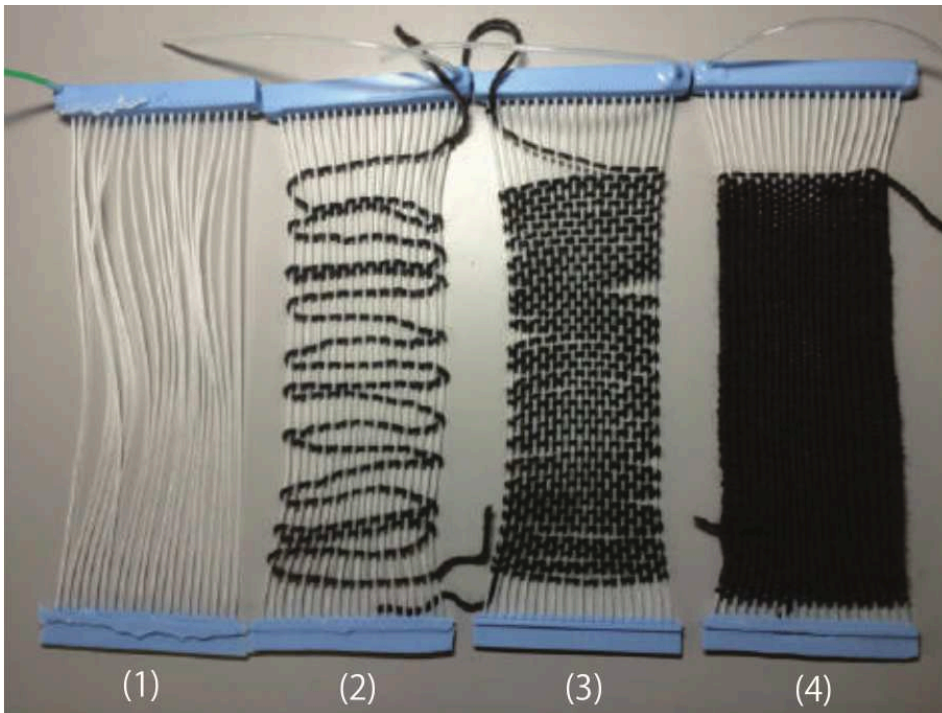
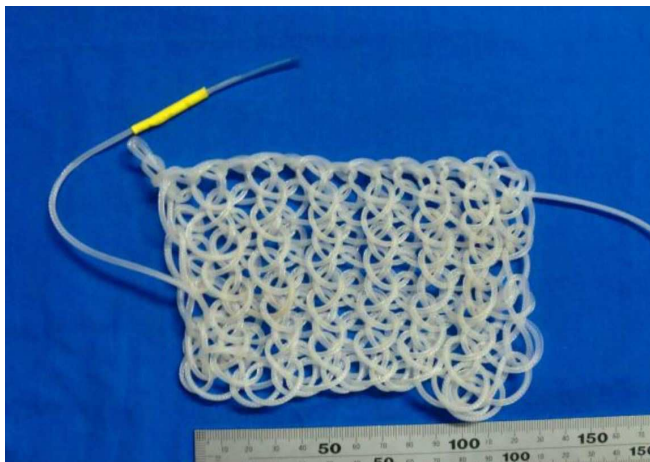
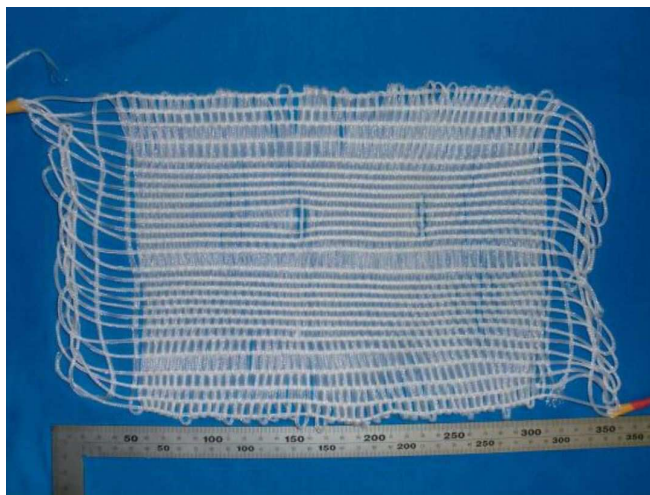


Figure 1.11 Active textile using thin McKibben muscles, Ohno et al.(2015) [29].

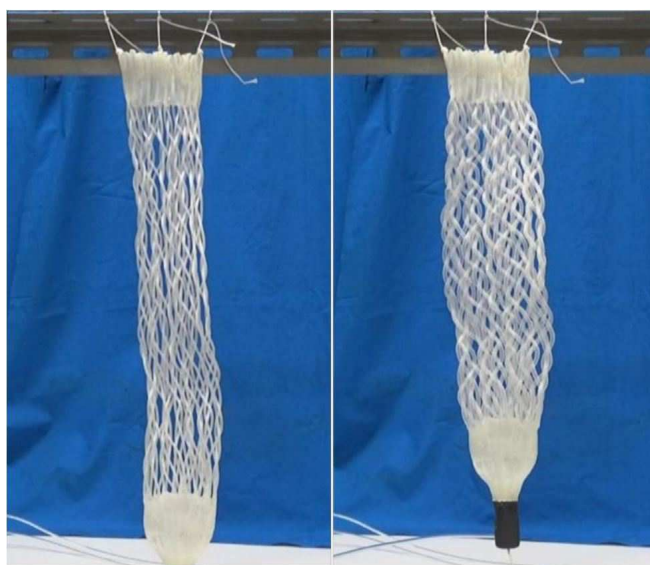
各種の能動布について考察する。上述の能動布では、いずれも人工筋肉を他の繊維と絡ませることによって布の形態をとっており、接着剤などを用いることなく柔軟な機構構造を形成することに成功している。使用しているアクチュエータに着目すると、SMMやEAP、あるいはSCPを用いた能動布では、化学的反応を利用しており、非常に細かな形状を形成できる一方で、変形量が小さく、人スケールの動きを取り出すことは難しい。対して、McKibben型人工筋肉などの空圧人工筋肉は、化学的反応を利用した人工筋肉と比較して、極端な小型化は難しいものの、大きな変形量が得られるという特徴がある。この変形のスケールの観点から、前者と後者の人工筋肉は利用される用途に



(a) Knit type, Sadic et al.(2015) [30]



(b) Textile type, Sadic et al.(2015) [30]



(c) Three Strands type, Kurumaya et al.(2017) [31]

Figure 1.12 Categorization of active textiles made of multi filaments of artificial muscles.

よって使い分けるものであり、空圧人工筋肉の利用によって能動布の運用範囲は大きなロボットへ拡大できることがわかる。

細径の McKibben 型人工筋肉を用いた能動布の中で、Funabora と他のものとは異なる視点であることがうかがえる。すなわち、布形態を形成するためには人工筋肉を用いておらず、一般的な布などの柔軟物を骨格構造として、アクチュエータである人工筋肉を組付けるという形態をとっている。一方で、Ohno ら、サディチら、車谷らの能動布は細径 McKibben 自体によって構造が形成されている。これにより、アクチュエータである人工筋肉が、また一方で構造を保つ骨格的機能を担っているといえる。機構を構成するためには、能動的に動く部位と動かさず形状を保つ部位の双方が重要である。この点において、Funabora のようにそれぞれの役割を部品で分けることは、変形を設計しやすくし、機構の形態として有効である。しかし、複数の部品を用意し、要求する駆動の形態に合わせてアクチュエータを組付ける必要があるため、製造プロセスを単純化することは難しい。

布構造の種類に着目すると、(a) 布構造に人工筋肉を組付けたもの (Stylios ら、Funabora)、(b) 人工筋肉を平編み紐状にしたもの (Simeonov ら、Kurumaya ら)、(c) 人工筋肉をニット状にしたもの (Maziz ら、サディチら)、(d) 人工筋肉を織布状にしたもの (Ohno ら、サディチら)、(e) 不織布に人工筋肉を内蔵したもの (Berzowska ら) に分類できる。前述の通り、(a) 布構造に人工筋肉を組み付けたものでは、機構の設計はしやすいものの、複数の部品を用意し、組み付ける必要があるため、製造プロセスが複雑であることが懸念される。(b) 人工筋肉を平編み紐状にしたものや (c) 人工筋肉をニット状にしたものでは、人工筋肉間の拘束が緩いため、変形量は大きい一方で力は小さい。(d) 人工筋肉を織布状にしたものは、経糸と緯糸の隙間を詰めることで他の布構造よりも固い部位を作りやすい反面、人工筋肉の動きを阻害しやすい。

駆動形態に着目すると、(a) 人工筋肉を組付けたもののみが曲げやねじりといった変形をしており、他の能動布は布面方向、特に長手方向への収縮をしていることに気が付く。屈曲変形をするためには、動く部位と形状を保つ部位を用意し、偏りをもって動かす必要がある。収縮する能動布の取り組みでは、能動布自体を面状の人工筋肉として運用することが意図されており、上述の偏りを持たせていない。曲げ変形を実現する方法に着目すると、Stylios らの能動布では母材である布に蛇腹状の癖をつけておくことで、動きの方向づけを行っている。また、Funabora の能動布では、母材の布の各面で異なる流路系統の空圧人工筋肉を組付けており、動かすアクチュエータを選択することで動きの方向づけを行っている。

1.2.2 能動布の展開と課題

能動布は人工筋肉を含む索体を絡ませて製作されるソフトメカニズムであり、少ない種類の素材から繰り返し動作によって製作できるため、量産性に優れると期待される。製布の条件を変更することで異なる挙動をする能動布が製作可能であることから、様々な応用が考えられる。しかしながら、先行研究では用途が限定的であり、様々な機械へ応用しようとするものではなかった。

本研究では、ロボットの機構として能動布を応用することを目指し、そのための課題について検討していく。想定されるロボットの形態としては、身体の運動を補助するサポートスーツなどの

ウェアラブルデバイスが挙げられる。一般生活空間で運用する人スケールのロボットを想定する場合、対象とする能動布の形態として、絶対的な変形量が大きく、安全性を確保しやすい空圧人工筋肉の利用が望ましい。また、他の構造を用いることなく能動布自体で形状を保つだけの剛性を確保する必要性が考えられることから、大野らと同様の織布構造を採用する。

これまでの能動布研究における取組みは、布製品を能動的に動作する機能を与えるために人工筋肉を内蔵したものと、向きを安定させやすくするため布状の人工筋肉を作ろうとするものに大別できる。どちらにおいても、布に内蔵された人工筋肉の走行方向への収縮動作が主として検討されており、他の方向への動作を扱うものは少ない。能動布をロボットへの応用することを志向する場合、動作を変換する機構・部品を別に用意することは冗長であり、能動布単体によって他の動作を実現することが好ましい。人の腕のようなロボットアームを想定した場合、肘関節のような一自由度の回転関節、前腕部のような捻転関節などが求められる。例として Funabora は、能動布による湾曲・捻転を実現しているものの、動きに合わせて人工筋肉の配置を設定しており、量産には向く構造ではない。すなわち、繰り返し動作で製作される一般的な布構造でありつつ、湾曲や捻転といった動作が可能なものの実現が必要である。

これまでに、被服や繊維複合材料などの繊維分野では、布の風合いや剛性といった性質を分析するために、様々な布構造の解析手法が検討されている [32] [33] [34] [35] [36]。しかし、これらの分野において、対象とする布構造の受動的な挙動を考慮するのみであった [37] [38]。本研究で提案する能動布では、これらの繊維が能動的に変形するため、従来の繊維集合体の設計手法をそのまま適用することはできない。また、McKibben 型人工筋肉を集積させて応用した例では、単体の場合とは異なった挙動を示すことが確認されている。例として土井らは、束ねられた細径人工筋肉において、膨張によって人工筋肉が外側へ押し出されることによって、単体のものよりも収縮率が増加することを確認している [39]。織布状の能動布において繊維の変形によってどのような変形が生じるかを検証した例はなく、設計手法の構築に先立って変形原理を明らかにすることが求められる。また、繊維を絡ませることで形成される布の構造では、組織内で繊維が自在に移動する点と繊維自体が弾性的に変形する点を考慮しなければならないことから、その変形を捉えることは極めて難しい。人工筋肉が多数走行する構造の変形を捉えるための、簡略な手法が望まれる。

また、今後想定される能動布の運用形態として、能動布を形成している人工筋肉のうち、一部のみを動かすというものが考えられる。多数の人工筋肉の一部を独立させて駆動させることによって、自由度が増加し、能動布の応用方法を拡大できるであろう。しかし、多数の空圧人工筋肉を駆動・制御するためには、人工筋肉と同数以上のバルブや配管・配線が必要であり、システムが大型化・複雑化することが懸念される。図 1.13 は、Funabora らが能動布を多自由度で駆動させるために用いた、空圧システムの構成であり、多数の配管・電磁バルブおよび大きな空圧源を必要としている様子が判る。このような多数・大型の周辺機器からのびる空気配管に接続されているために、能動布の柔軟さ・可搬性といった特色が損なわれていることが現状である。能動布を多自由度化しつつ、システム全体をコンパクトにして可搬性を高めるためには、人工筋肉を動かすための周辺機器を削減、あるいは小型化することが求められる。

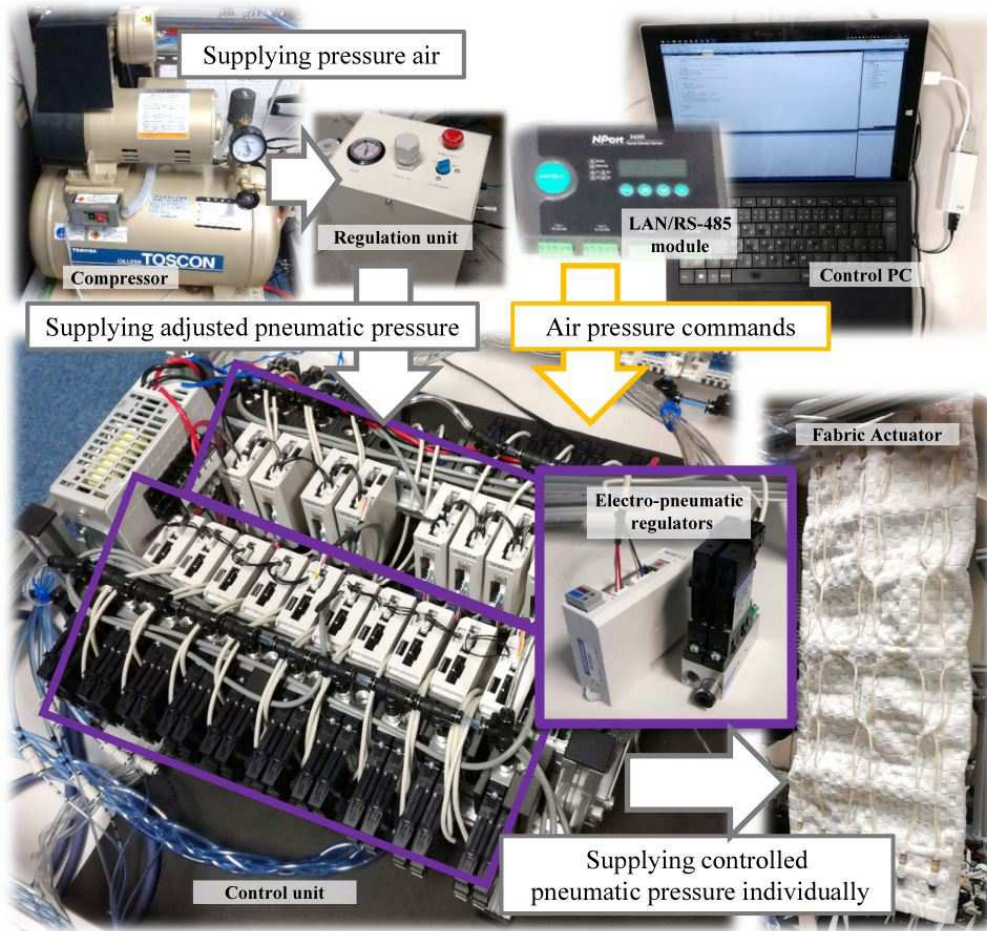


Figure 1.13 Pneumatic system for a fabric actuator, Funabora(2018) [28].

1.2.3 本研究の目的

本研究では、人工筋肉を含む布状の構造体を「能動布」と呼称し、能動布を機構構造として利用するための基礎的な検討を行うことを目的とする。この基礎的検討では、能動布自体の変形原理の解明と能動布を多自由度で運用するための人工筋肉の実現の二つの側面から以下の三つの事項を検討する。

A 能動布の変形原理

B 能動布での運用に適合する人工筋肉

1. 人工筋肉を含む織布組織の変形原理の解明
2. 立体的な筋走行を含む能動布の変形解析手法
3. 空気配管を必要としない柔軟人工筋肉の実現

1.2.3.1 人工筋肉を含む織布組織の変形原理の解明

まず、平坦な能動布を対象として、人工筋肉と紐の交錯組織によって引き起こされる能動布の変形原理を明らかにする。特に、従来研究でほとんど検討されていなかった、人工筋肉の走行方向への収縮以外の動作を実現する仕組みについて検討する。対象とする組織を基本的な織布組織である三原組織とし、紐の走行状態が布の表裏で非対称な組織における、人工筋肉の径方向への変形が能動布の動作に及ぼす影響を明らかにする。ここでは特に、次の項目について議論する。

- 緯糸種類ならびに組織種類と能動布の変形形状の関係
- 緯糸種類が能動布の緯糸方向の収縮特性に与える影響

1.2.3.2 立体的な筋走行を含む能動布の変形解析手法

これまでに検討されてきた能動布は、平坦な布が平坦なまま変形する運用に限定されていた。しかし、布はその柔軟性を活かし曲がった形状をとれることが特長であり、立体的な形状での運用も多く存在する。特に服飾の分野では、人体形状に合わせる、あるいは装飾の観点から平坦な形状をとることは少ない。近年、研究が進められているアシストスーツなどのウェアラブルデバイスにおいては、柔軟で人体に適合する形状の機構が望まれている。

本研究では、能動布を用いて立体的な形状とする方法を示し、その変形を捉える方法について提案する。ここでは特に、次の項目について議論する。

- 人工筋肉の三次元螺旋状走行からなる円筒構造の形成
- 立体的な繊維走行を含む能動布の変形と人工筋肉の走行方向の関係

1.2.3.3 空気配管を必要としない柔軟人工筋肉の実現

能動布は、索体を絡ませることで製作される機構であり、基本的に複数の人工筋肉を含む構造である。ここから、今後、何らかのアプリケーション応用を進めるうえで、能動布を複数の自由度で動かすことが期待される。しかし実態として、空圧人工筋肉を用いた能動布を多自由度で動かすためには、多数の配管ならびに電磁バルブを用いているため、空圧システムが大型化・複雑化しており、能動布の運用形態が限定的になっていた。能動布を多自由度で運用するためには人工筋肉の駆動方法の見直しが必要であり、本研究ではこれについて検討する。空圧人工筋肉を動かすためのシステムの小型・単純化に関する先行研究のなかでも、水の電気分解を利用した小型の空圧源を人工筋肉に内蔵する方法に着目し、この駆動方式と布の形態をとるために欠かせない柔軟性確保の両立を図る。

ここでは特に次の項目について検討する。

- 水の分解/合成反応を可能とするチャンバ構造
- 燃料電池セルを内蔵しつつ、柔軟性を確保する人工筋肉の実現

1.3 本論文の構成

本論文は、全五章の構成となっている。

第一章「序論」では、構造の画一化を目指す技術として、少ない種類の部材の組み合わせからなる機械システムの先行研究を概観することによって、画一構造の有効性と課題について分析した。量産性に優れた新たな機構として、人工筋肉と索状弾性体から構成され能動的に変形する布状の構造物を「能動布」と呼称し、その課題を整理するとともに本研究の目的について述べた。

第二章「空圧人工筋肉を用いた平面状能動布の変形解析」では、空圧人工筋肉と索状弾性体が格子状に織られた平面状の能動布を対象とし、能動布の構成方法を整理し、その変形原理を明らかにする。能動布の経糸方向と緯糸方向の二つの方向における、索体の幾何学的変形モデルを構築し、人工筋肉の挙動が布の変形に及ぼす影響を説明する。実際に製作した能動布を用いた実験によって、織布組織と紐の特性が布の挙動に及ぼす影響を明らかにし、作成した幾何学モデルとの差異を考察する。また、交錯した繊維の駆動による能動布の変形について、人工筋肉の膨張駆動がもたらす能動布の力学特性を実験を通して明らかにする。

第三章「空圧人工筋肉の螺旋走行からなる円筒状能動布への展開」では、より複雑な能動布の形態として、人工筋肉を三次元螺旋状に走行させた円筒状能動布を取りあげ、人工筋肉の駆動と円筒構造の変形の関係性を幾何学的に検討した事項について述べる。円筒状能動布の側面における繊維の走行方向に着目した、変形を表す変換モデルを提案するとともに、円筒構造の変形を計測した実験結果と比較することでその妥当性を検討する。

第四章「配管を必要としない柔軟空圧人工筋肉の実現」では、能動布の可搬性を高め駆動自由度を向上させるために求められる、無配管人工筋肉の実現可能性について言及する。システムの多自由度化に伴う空圧システムの複雑化・大型化に対応するため、水の電気分解を利用した空圧人工筋肉の駆動方式を取り上げ、人工筋肉の柔軟性を損なうことなく無配管化するための構造について提案・試作する。特に、能動布で運用するために必要な柔軟性の確保と駆動方式の適用を両立した人工筋肉の実現方法について議論する。

第五章「結論」では、各章で得られた結果を総括し、今後の課題について述べる。

第 2 章

空圧人工筋肉を用いた平面状能動布の変形解析

本章では、McKibben 型人工筋肉を編織した布状の機構「能動布」の構造を説明し、その基本的な変形原理を説明する。まず、布組織を形成する素材である索体を整理し、任意の一重織物組織を一般化して表す方法を示す。また、布の編織組織が引き起こす変形を説明した後に、三次元形状の測定実験によって、編織組織と顕れる変形形態の関係性を明らかにする。最後に、人工筋肉の駆動による能動布の力学的特性を計測した実験について述べる。

2.1 本研究で扱う索体

布や組紐などの繊維集合体は紐や糸などの索体が集積し交錯した構造体であり、素材である索体の種類やその絡ませ方によって分類される。本研究では、受動的に変形する従来通りの紐に加えて、入力に応じて能動的に変形する人工筋肉を用いることで、能動的に駆動する布状のメカニズム：能動布を実現する。

2.1.1 本研究で扱う紐の概要

受動的に変形する、従来通りの紐・糸といった索体について説明する。関連する名称として、「糸」「紐」「縄」「綱」が存在し、一般的に用いられている。これらの用語の使い分けには厳密な定義はなく、索体の太さによる感覚的な分別がされているのみである [40]。本論文では、簡単のため、索体のうち能動的に変形しないものを統一して「紐」と呼称することとする。

本論文では、図 2.1 に示す、四種類の異なる紐を能動布の素材として用いた。それぞれの紐は、断面形状並びに柔軟性が異なる特徴的なものとして用意した。図 2.1(a) に示す細組紐 (型番：T-20T, ハヤミ工産株式会社) は、芯糸・側糸共にポリエステル繊維を 8 打ちで製紐することで製造されており、直径 1.95 mm の円形断面、破断強度は 970 N である [41]。図 2.1(b) に示すショックコード (型番：017030W, Teufelberger 社) は、五本の丸ゴム紐を芯糸、8 打ちのポリエステル繊維を側糸として直径 3 mm で製紐されたものである。図 2.1(c) に示す平織紐は、ポリプロピレ

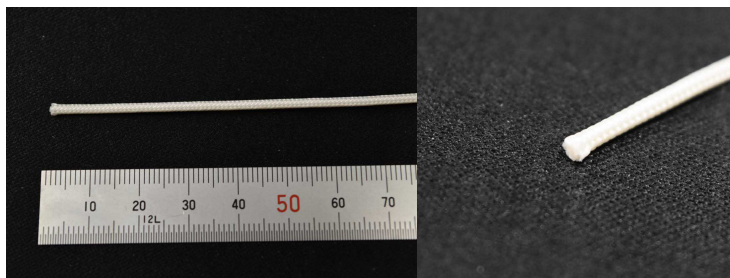
ン繊維束を間隔 0.1 mm の経糸として平織で織ることで製作されていたもので、幅 10 mm、厚さ 1 mm の矩形断面である。図 2.1(d) に示す PP バンドは、ポリプロピレン樹脂を幅 15 mm、厚さ 0.5 mm で成形したものであり、引張強度は 980 N である。細組紐とショックコードは共に円形の断面を持つが、後者は弾性的に伸長し、前者は非伸縮である。また、平織紐と PP バンドはどちらも薄い矩形断面であるが、後者は前者と比べて固く曲がりにくいものとなっている。本論文では便宜上、それぞれの紐を「thin」「elastic」「whitebelt」「yellowbelt」とし、後述の能動布の名称で用いるものとする。

2.1.2 空圧人工筋肉

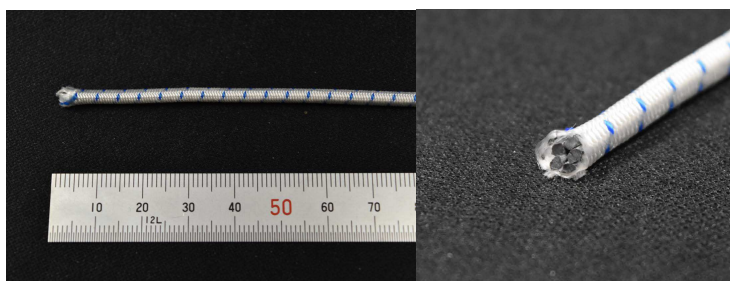
人工筋肉には、駆動原理や構造によって異なる、様々な形態のものが存在する。なかでも、McKibben 型人工筋肉に代表される空圧人工筋肉は、様々な研究・開発の部品として多く取り上げられている [42]。高い発生力/自重比、駆動流体の圧縮性による高いコンプライアンス、そして構造が単純であり安価に製造できることが特長として挙げられる。また、他の人工筋肉である、形状記憶材料を用いたものや電場応答性高分子を用いたものと比較すると、絶対的な変形量が大きく、人スケールの機械システムでの使用に適している。しかし、従来研究では高硬度のゴム材料からなる直径数十 mm の太さの McKibben 型人工筋肉が用いられることが多く、空圧を印加した際には棒状に固く伸びた形状になることから、その要素配置は非常に嵩張るものであった。上述の通り、人工筋肉の最大の特徴は曲げコンプライアンスであり、本研究で提案する人工筋肉を編織した能動布の実現においても、自在に曲げられる人工筋肉が必要である。本研究では、自在に曲げられることを追求した、以下の二種類の空圧人工筋肉に着目する。

2.1.2.1 バッグスアクチュエータ

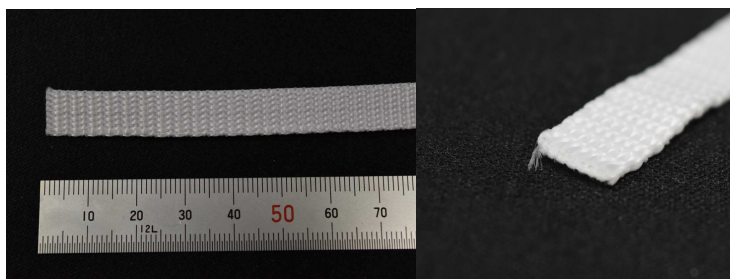
多くの空圧人工筋肉が円筒形状であるのに対して、バッグ状要素が接続した構造にすることで形状を薄くし、柔軟性を向上した人工筋肉が提案されている [43] [44] [45]。Niiyama らは、プラスチックフィルム製のバッグ状要素が連節した構造の人工筋肉：Pouch Motor を提案している (図 2.2) [43]。著者もまた、同様の形態の人工筋肉：バッグスアクチュエータを提案している (図 2.3) [46]。これらのアクチュエータは、二枚のプラスチックフィルムを升目状に熱溶着することで製作され、非常に安価かつ容易に製造することができる。バッグ状要素は厚さ 1 mm 程度の厚さの関節部で接続しており、鎖状に連なった構造であるため、非常に柔軟に曲折した状態をとることができる人工筋肉である。ゴムの材料変形ではなく、薄膜構造の構造変形を利用しており、5 kPa から 50 kPa の低い圧力域で McKibben 型人工筋肉と同程度の収縮力を発揮することができる。このため、低出力・低流量の小型空圧源でも駆動することが可能であると期待できる。Niiyama らは、CNC 熱溶着機を開発し、任意の空気室形状を自動で作成することで、簡易な空圧ロボットを製造する方法を提示している [47]。量産されたプラスチックフィルムを簡単な加工によって、多様な形状に成形しており、簡略に製作可能な機械の一形態として非常に興味深い。



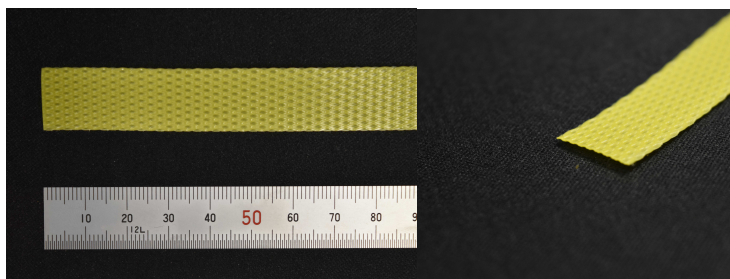
(a) Thin braided string. The cross-sectional shape is circle with a diameter 2 mm.



(b) Shock cord. The cross-sectional shape is circle with a diameter 3 mm.



(c) Plain weave string. The strings have a rectangular cross-sectional with dimensions of W 10 mm x H 1 mm.



(d) PP-belt. The strings have a rectangular cross-sectional with dimensions of W 15 mm x H 0.5 mm.

Figure 2.1 The four types of strings used as wefts of active textiles.

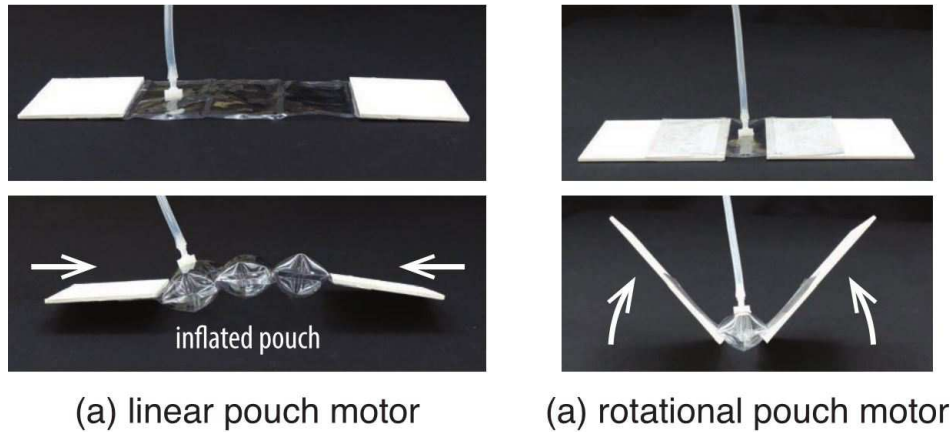


Figure 2.2 PouchMotor, Niiyama et al. [43].

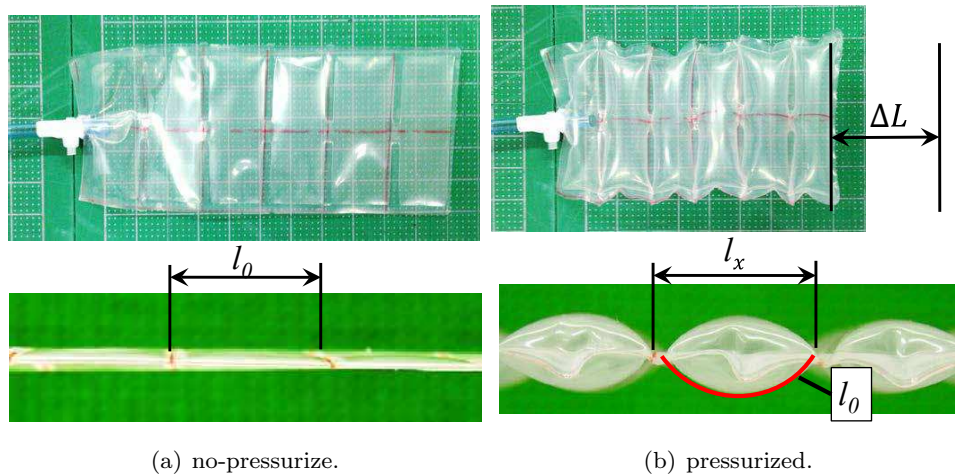


Figure 2.3 Bags-actuator, Hiramitsu et al. [46].

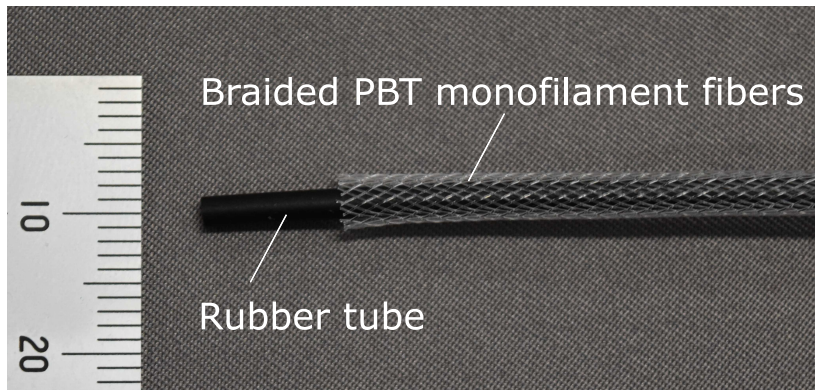
2.1.2.2 細径 McKibben 型人工筋肉

これまでに直径 4 mm 以下の細い McKibben 型人工筋肉が開発・量産されている [48] [49]. 細径化によって、従来の McKibben 型人工筋肉よりも高い曲率での配置・動作が可能となり、これまでは実現が難しかった柔軟・多自由度の新しいメカニズムの構築が可能となった. 先行研究では、局所に人工筋肉を集積して配置することによって、メカニズムの構造および挙動に柔軟さを取り入れることが検討されてきた. これらのメカニズムは、何らかの構造物に細径 McKibben 型人工筋肉を取り付けることで製作されている (:骨格標本 [50] [51], 人体 [52] [53], 柔軟構造 [54] [55]). 人工筋肉が細く柔軟であるため、対象の構造に多数のアクチュエータを取り付けても、構造の形状にフィットし、構造の動きを阻害しにくい点が特徴として挙げられる.

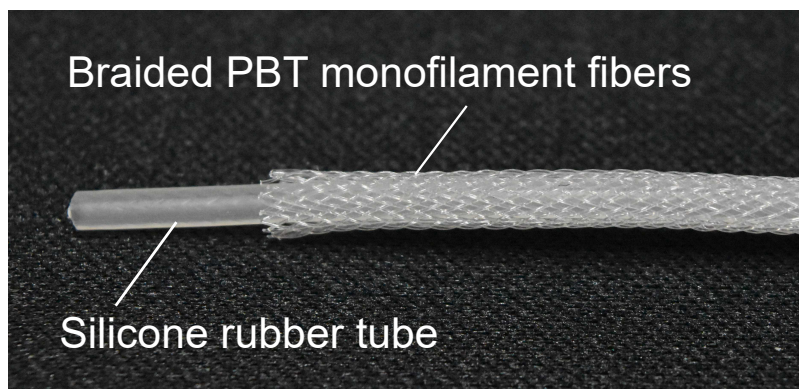
本研究で用いる細径 McKibben 型人工筋肉 (以後、細径人工筋肉) について説明する. 細径人工筋肉の外観を図 2.4 に示す. 都合上、材質が異なる二種の細径人工筋肉を使用した. 異なる点は、

Table 2.1 Parameters of rubber tube of thin McKibben muscles that are used in this thesis.

	<i>outerdiameter</i> [mm]	<i>innerdiameter</i> [mm]	<i>material</i> [-]	<i>shorehardness</i>
K1801	2.2	1.8	synthetic rubber	60
1602	2	1.7	silicon rubber	40



(a) K1801

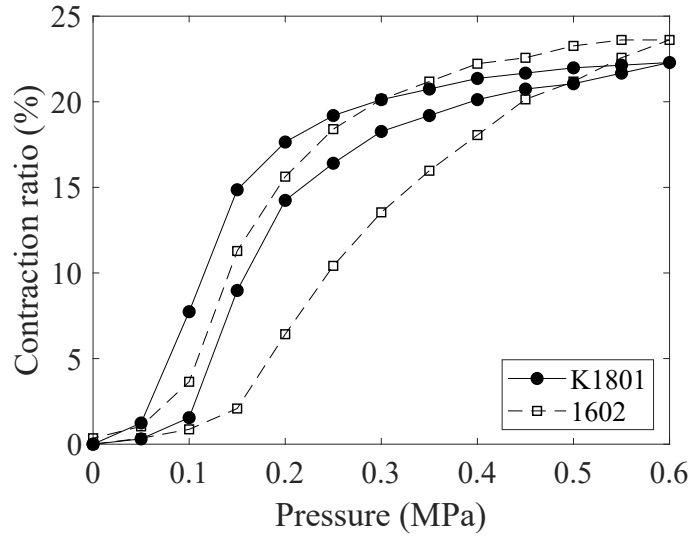


(b) 1602

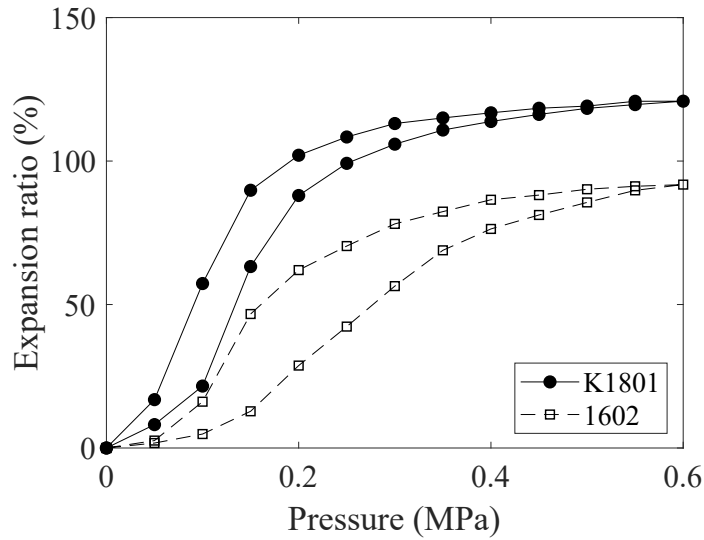
Figure 2.4 Construction of a thin McKibben muscle. A muscle consists of two layers: a rubber tube and a sleeve made of braided fibers.

内側のゴムチューブの素材ならびに寸法である。型番 K1801 の細径人工筋肉ではエチレンプロピレンジエンゴム製，型番 1602 の細径人工筋肉ではシリコンゴム製のチューブが使われており，1 m あたりの質量はそれぞれ 2.4 g，3.4 g と非常に軽量である。用いられているゴムチューブの諸量を表 2.1 にまとめる。基本的な構造は，従来 McKibben 型人工筋肉と同様であり，ゴムチューブを繊維が組まれたスリーブで覆ったものになっている。どちらも，繊維スリーブは同様のものを用いており，直径 0.16 mm の PBT モノフィラメントが編み角 19°，打ち数 32 打ちで組まれている。

細径人工筋肉の無負荷時の膨張特性・膨張特性を図 2.5 に示す。ただし，それぞれのグラフの縦軸は，変形量の絶対値の初期長に対する比率を示しており，それぞれ収縮率・膨張率と呼称する(式 2.1, 式 2.2)。ここで， l_0 ， d_0 は人工筋肉の軸方向長さ l および径方向直径 d の初期値であり， ε はそれぞれの添え字方向への駆動率を表している。



(a) Contraction ratio.



(b) Expansion ratio.

Figure 2.5 Actuation characteristics of a thin McKibben muscle. (a) Contraction and (b) Expansion ratios are the ratios of absolute value of amount of deformation to initial length.

$$l = l_0(1 - \varepsilon_l) \quad (2.1)$$

$$d = d_0(1 + \varepsilon_d) \quad (2.2)$$

収縮率・膨張率は、圧力が増加するにつれて一定の値へ漸近するように増加する。McKibben型人工筋肉の駆動特性には、スリーブとゴムチューブの摩擦を主な要因としたヒステリシスがあり、これを設計するためのモデルも検討されている [56]。本研究では、人工筋肉の変形時の形状と能動

布の形状の関係を明らかにすることを目的としており、大気圧から任意の圧力を印加する方法をとる。

2.2 本研究で扱う布

本節では、繊維を集積・交錯することで製作される布の概要を説明する。まず、基本的な布の種別を説明する。続いて、本稿で主として扱う一重織布組織を取り上げ、その構造を一般化して表現する手法を提案する。

2.2.1 布の種別

布や組紐などの繊維集合体は、それ自体が繊維を集積したものであり、それぞれの繊維の挙動が複合された組織として振る舞う。布は、様々な繊維を絡ませることによって製作される繊維集合体のうち、平坦な面形状を形成したものである。JIS 繊維用語によれば、「布」は「シート状の繊維製品で、織物、ニット、不織布などの総称。」(JIS L 0206 の 1283) と定義される [57]。すなわち、布とは繊維が一体となることでシート形状を形成した構造体であり、かつ縦横においてある程度の強度を有するものを指す。必ずしも平坦である必要はなく、平坦な布の縫製、あるいは専用の機械で製布により立体的な形状に製作される場合も布に区分される。布は、組織の構造、用いられる繊維の種類といった様々な要素で分類され、それぞれに異なる性質を示す [58]。特に、同じ素材を用いながらも、繊維の絡まりかたの構造によって布の特徴が変化することは非常に興味深い点であり、本研究ではこれに着目している。特徴的な布として、縦横に走行する糸を交錯することで製作される「織布」、ループさせた糸をくぐらせて引っかけることで製作される「ニット(編物)」、細かな繊維を無秩序に絡ませることで成型する「不織布」が挙げられる。また、主に紐を製造する際に行われる「組み」と呼ばれる製造形態も存在し、紐製品や繊維複合材料といった一軸方向に長い物の製造に用いられている。

繊維を縦横を基本とした複数の系統に分けて交差させ、規則的に交錯することで形成した布を織物という。この縦横に走る糸を、それぞれ経糸、緯糸が呼称される。織布における経糸・緯糸とは、製作時の糸の張り方、通し方によって定まるものである [40]。基本的に、並べて張ることで配置した糸が経糸であり、経糸の隙間を通した糸を緯糸という。このため、経糸は直線状に走り、緯糸は経糸に倣うように波打った状態になる。本稿においても、織布の製作時において、比較的まっすぐ張った状態で配置された糸を経糸とし、経糸と交差するように挿入された糸を緯糸として扱う。これらの糸の素材や通し方によって、織布の性格は変化する。

織物は繊維の走行によってさらに分類される。本研究では、糸の並びが変化せず、糸の交錯が一つの面上に並ぶ「一重織物」に限定して取り扱う。この他、糸の並びが変化する「絡み組織」や、経糸・緯糸が複数の系統からなり糸の交錯が布の厚さ方向に分散した「多ね組織」などが存在する。一重織物の組織は、縦横に整列する交錯点の状態を表す組織図によって模式的に表すことができる。例として、三原組織の組織図を図 2.6 に示す。ただし、三原組織とは平織・綾織・朱子織と呼ばれる基本的な一重織物組織をまとめた名称であり、多くの布製品で採用されている組織である。

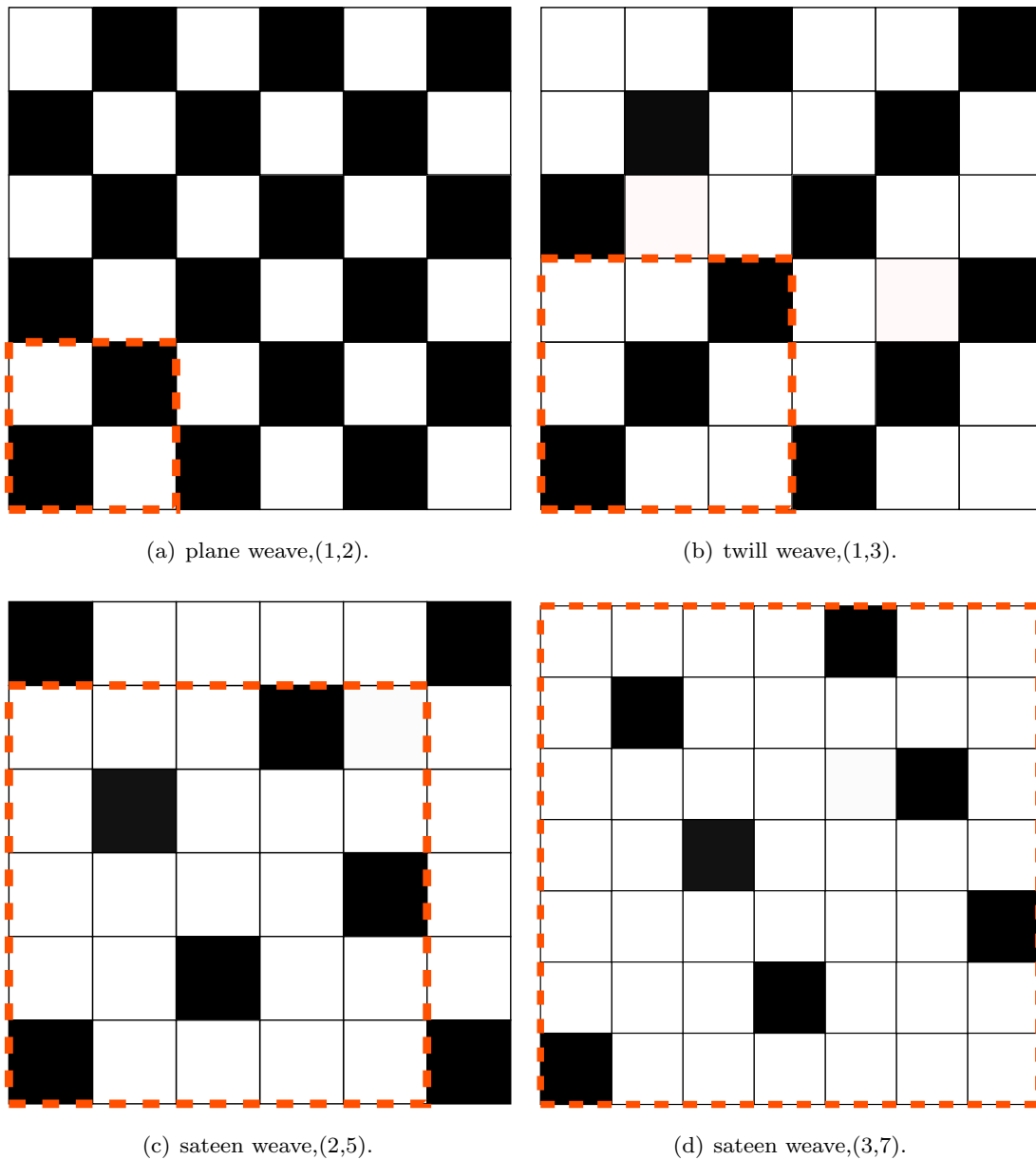


Figure 2.6 Examples of weave diagram of three foundation weave. The dotted frame shows weave repeat.

図中、黒色のマス目は経糸が緯糸の上を通り、布の表面にある状態を示す。これを浮きという。織布組織が周期的なものである場合、布全体の組織図は不要であり、図中破線で示すような単位区間の組織情報があれば充分である。これを完全組織という [59]。

先行研究において、大野らが扱った平織は最も基本的な織布組織であり、縦横二系統の紐からなる織布の中では最も交錯回数が多いため頑丈であること、布の表裏で紐の走行状態に偏りが無いことが特徴である。一方、綾織・朱子織は、紐の交錯が少なく柔軟な組織であること、また布の表裏で偏りがあることという特徴を有している。大野らの先行研究によって、組織の密度が高い能動布の動作が芳しくないことが判っており、より交錯密度が低く、繊維が直線的に走行する綾織・朱子

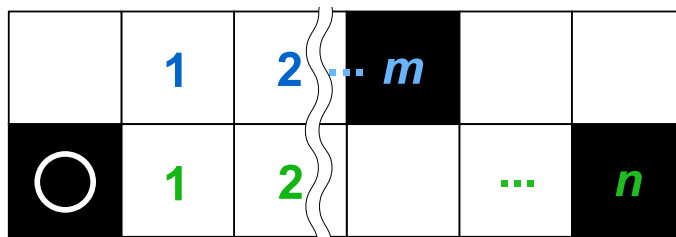


Figure 2.7 Weave diagram of generalized three foundation weave.

織を用いることでより動作しやすくなることが期待できる。また、本研究では能動布を長手方向の収縮動作だけではなく、湾曲する変形を実現する狙いがある。この点からも、布の表裏で人工筋肉の走行の量が異なる綾織・朱子織を採用することで、曲げ変形が生じることを確認する。

2.2.2 織布構造の一般化表現

簡単のため、正則かつ交錯が各糸方向に連続しない三原組織を扱うものとする。正則とは完全組織において経糸・緯糸の本数が同じものを指す。組織を二つのパラメータ (m, n) によって表すことを考える (図 2.7)。以下、浮きが連続しない面を表面とする。この面における任意の経糸の浮きを特徴点 (図 2.7, 丸印) としたとき、一つ隣の糸における特徴点の相対的な位置を m とする。また、特徴点と同じ糸における次の特徴点までの交錯点の数を n とする。 $(1, 2)$ を平織, $m = 1$ または $(n - 1)$ かつ n が 3 以上のものを綾織, m が 2 以上かつ $(n - 2)$ 以下で n が 5 以上のものを朱子織という。ただし、朱子織は正則であるために、 n を公約数のない二つの数に分け、これを m とする必要がある。

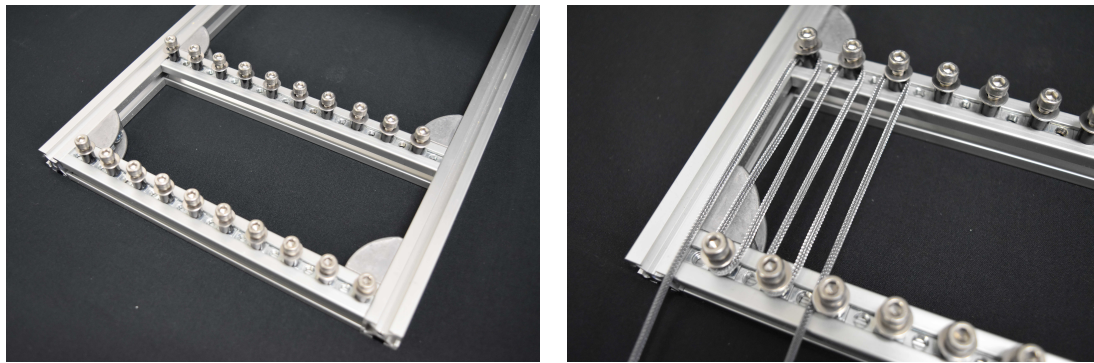
また編織では、平織 $(1, 2)$ 、三枚綾 $(1, 3)$ 、横二飛び五枚朱子 $(2, 5)$ 、横三飛び七枚朱子 $(3, 7)$ の四種類の組織で製作した。以後、本稿では各能動布を緯糸種類 (thin, whitebelt, elastic, yellowbelt) と組織パラメータ (m, n) を用いて、 $[WeftType]mn$ というように表す。

2.3 能動布の試作

本章では、実際に製作した能動布を用いて、実験的に能動布の変形の様子を観察する。行う実験は形態確認試験と駆動特性評価実験の二種であり、それぞれ異なる大きさの能動布を製作する。

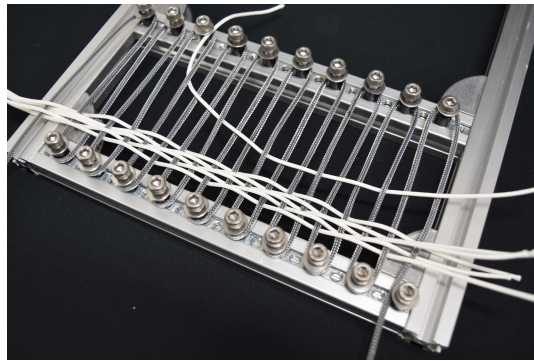
2.3.1 形態確認試験のための能動布

後述する能動布の変形形態を確認する試験では、経糸方向・緯糸方向の湾曲を観察するために、両方向に十分に大きな布を用意する必要がある。能動布の製作工程を図 2.8 に、形態確認試験で用いる能動布を図 2.9 に示す。10 mm の間隔で 21 本平行走行させた人工筋肉を経糸とし、これに緯糸を交錯させることで能動布を製作した。すなわち、能動布の緯糸方向の長さは、端部を除いた機構部の長さで 210 mm である。製作では、経糸間隔となるように人工筋肉をかけられるピンを



(a) The jig for woven .

(b) Run an artificial muscle as warp.



(c) Through yarns as wefts.

Figure 2.8 The fabrication process of an active textile.

立てた治具を用意し，人工筋肉を交互にかけていく．十分に張った状態とした後，その合間に緯糸用の紐を通すことで能動布を製作する．人工筋肉は約 4 m の長いものを一本用意して，布から十分にはみ出た箇所で折り返して配置しており，圧力はほぼ同時に布全体へ印加される．緯糸は，経糸方向長さが 150 mm となるように互いに接触した状態で編織した．全ての緯糸を通した後は，織布の端部をシリコーンゴム (TSE392-C, Momentive Performance Materials Inc.) で塗り固めることで緯糸を固定する．

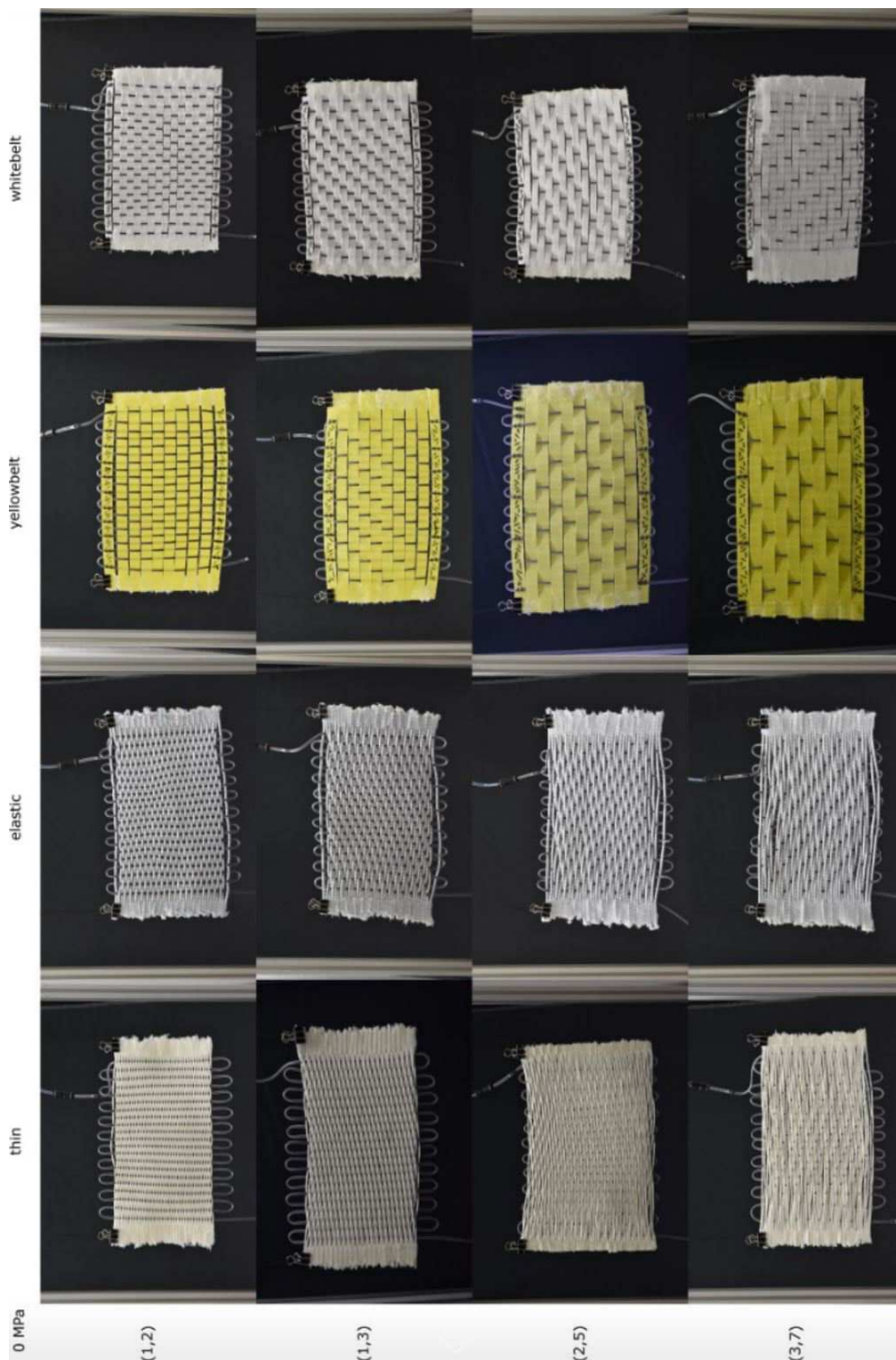


Figure 2.9 All of active textiles.

Table 2.2 Parameters of active textiles.

Textile		Weft		Warp (McKibben muscle)		
<i>name</i>	<i>mass</i>	<i>cross-sectional shape</i>	<i>number</i>	<i>diameter</i>	<i>interval</i>	<i>number</i>
thin	50.3 g	circle with a diameter 1.95 mm	40	2	10 mm	21
belt	23.9 g	rectangle with W 10 mm x H 1 mm	8			
elastic	65.9 g	circle with a diameter 3 mm	20			

2.3.2 駆動特性評価実験のための能動布

後述する能動布の緯糸方向への収縮特性を評価する実験では、緯糸方向の変形を観察するために、経糸方向が狭い形状であることが望ましい。駆動特性評価実験のために製作した能動布の例を図 2.10 に、実験用の三つの能動布のパラメータを Table 2.2 に示す。10 mm の間隔で 21 本平行走行させた人工筋肉を経糸とし、これに緯糸を交錯させることで能動布を製作した。能動布の緯糸方向の長さは、端部を除いて 210 mm である。人工筋肉は 2.5 m の長いものを一本用意して、布から十分にはみ出た箇所で折り返して配置しており、圧力はほぼ同時に布全体へ印加される。緯糸を固定するために、織布の端部をシリコーンゴム (TSE392-C, Momentive Performance Materials Inc.) で塗り固めた。

2.4 能動布の変形原理

本節では、索体を織ることで構築される組織構造が人工筋肉の駆動により変形する原理を説明する。対象とする能動布は、大野らと同様の、織布の経糸を人工筋肉としたものとする (図 2.11)。先行研究において大野らは、能動布をあくまでも面状の人工筋肉として運用することを想定しており、素材とする人工筋肉の軸方向の収縮量にのみ着目していた。しかし人工筋肉を交錯させる構造において、その変形を捉えるためには、素材である人工筋肉の径方向への変形も考慮する必要がある。特に、布の緯糸方向の変形についての議論はされていなかった。また、布の表裏で偏りのある綾織や朱子織とした場合の検討はこれまでなされていない。

能動布は索体の集合体であり、その変形は複雑である。ここでは、平坦な織布の大まかな曲面形状を捉えることを重視し、四つの変形に着目する。すなわち、経糸軸方向の収縮、緯糸軸方向の収縮、緯糸と平行な軸を持つ曲げ、経糸と平行な軸を持つ曲げである。これらの変形は、人工筋肉の軸方向の収縮に起因するものと径方向の膨張に起因するものに分類できる。

2.4.1 人工筋肉の収縮による変形

2.4.1.1 変形原理の概要

織布の経糸方向の断面における変形について述べる。任意の人工筋肉の軸を通り、布と直交する断面における、糸形状を表した模式図を図 2.12 に示す。今回製作する能動布において、経糸は人

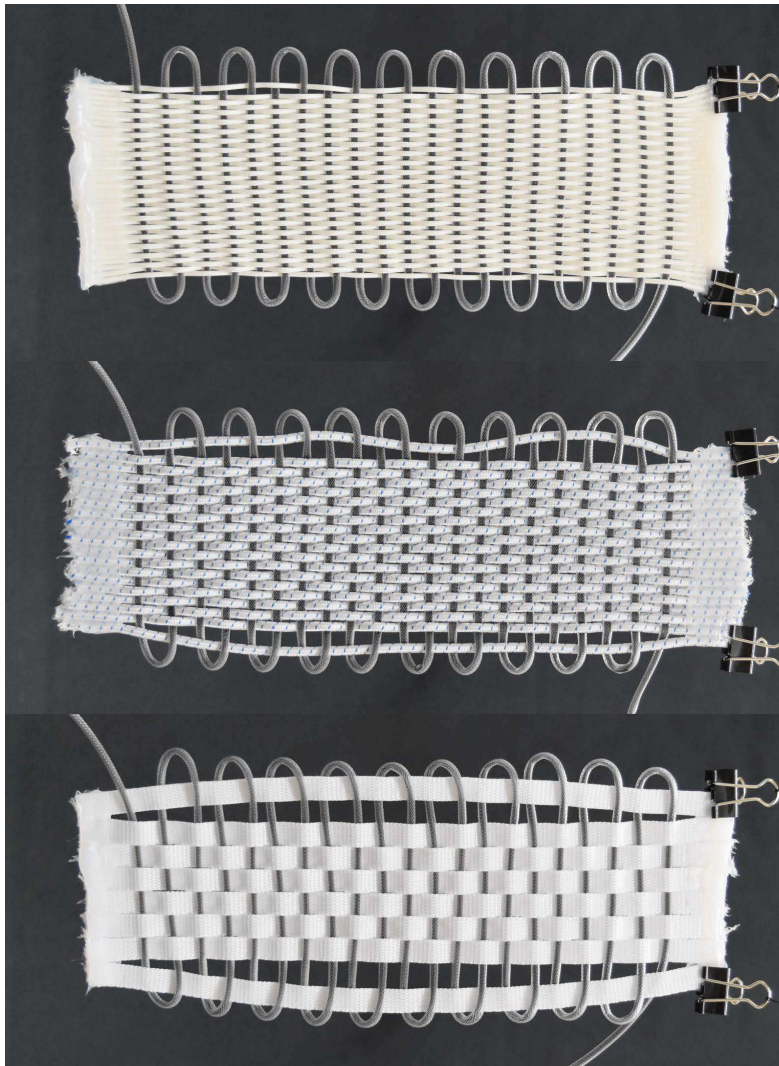


Figure 2.10 Appearance of active textiles. Thin-type, elastic-type, and belt-type active textiles, from top to bottom. Warps consist of a 2.5 m-thin McKibben muscle. A total of 21 warps arranged at intervals of 10 mm. The length in the weft direction of the active textiles is 210 mm. The ends of the wefts are coated using adhesive silicone.

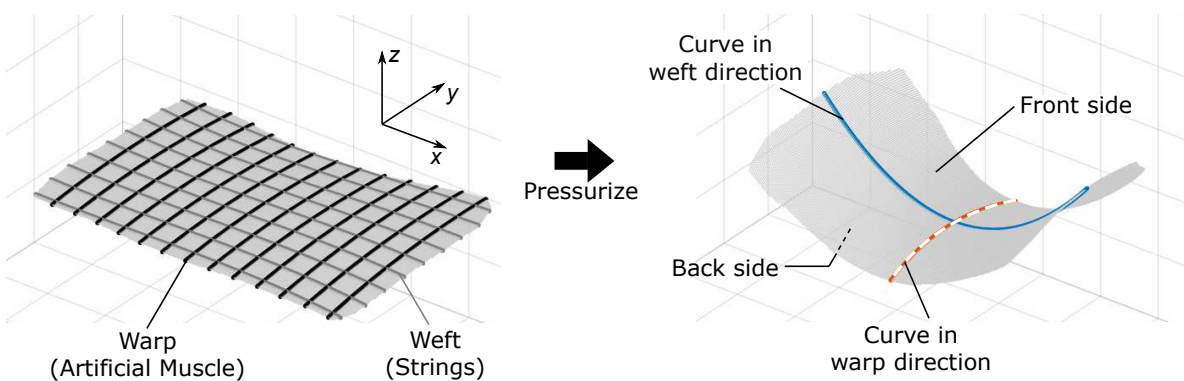


Figure 2.11 Generally deformed shape of active textiles. Warps are artificial muscles.

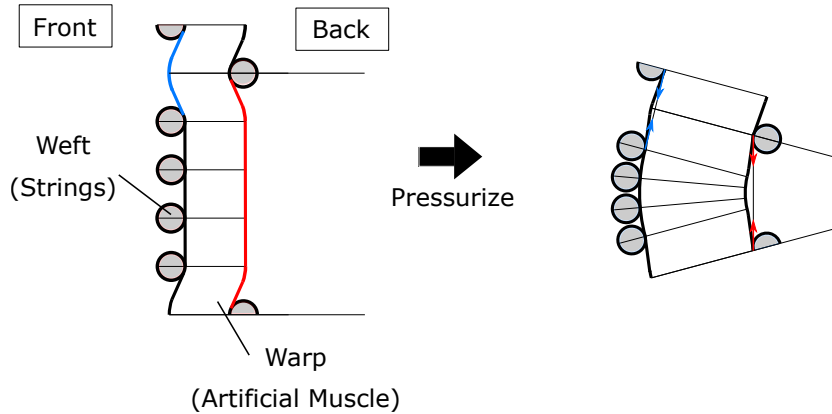


Figure 2.12 Schematic image of deformation in the warp section by contraction of McKibben muscles

工筋肉であり、緯糸と比較して真っすぐな状態で走行している。組織周期が n であるとき、経糸の表側 (図中、左側) と裏側 (図中、右側) では、緯糸の数が $(n-1):1$ の割合で異なっており、表側では $(n-1)$ 本の紐が連続して交錯している。人工筋肉が軸方向に収縮するにつれて、隣り合う緯糸の間隔は狭まる。緯糸の間隔が狭いとき、隣接する緯糸が互いに接触し、更なる収縮を妨げるため、緯糸が疎である側を凹として経糸に沿った曲げが生じる。この、疎である割合が裏面のほうが多いため、全体として能動布は布の裏面を凹として湾曲変形する。

2.4.1.2 経糸方向における走行する紐の幾何学的変形モデル：

模式的に表した織布組織の経糸方向断面を図 2.13 に示す。経糸は緯糸と比較して直線的に走行しており、経糸に沿う位置に緯糸が互いに接触した状態で整列する。ただし、緯糸は組織の周期 n 毎に布の裏側 (図中右側) を走行する。この交錯点を特徴点という。表側の緯糸および特徴点の緯糸はそれぞれ半径 R_{warp} , R'_{warp} の円弧上にあり、それぞれの緯糸は θ_{warp} をなすものとする。このとき、経糸の直径を d , 緯糸の直径を w とすると、

$$R_{\text{warp}} \cdot \cos \frac{(n-2)\theta_{\text{warp}}}{2} = R'_{\text{warp}} \cdot \cos \frac{n\theta_{\text{warp}}}{2} + d + w \quad (2.3)$$

の関係式が得られる。

経糸は図 2.13 中の青色部で示すような、単位構造で分割することができる。これを単位経糸と呼称する。単位経糸は断面 A から断面 D までを繋いだ滑らかな曲線である。部位 AB は特徴点の緯糸に沿って角度 $\phi_{b,\text{warp}}$ で曲がり、部位 BC・部位 CD はそれぞれ長さ $l_{a,\text{warp}}$, $l_{b,\text{warp}}$ の直線状とする。経糸 (人工筋肉) が駆動するとき、布の表側に並ぶ緯糸は互いに接触しており、部位 CD が収縮した際には円弧状に湾曲することから、

$$R_{\text{warp}} = \frac{w}{2 \sin \frac{\theta_{\text{warp}}}{2}} \quad (2.4)$$

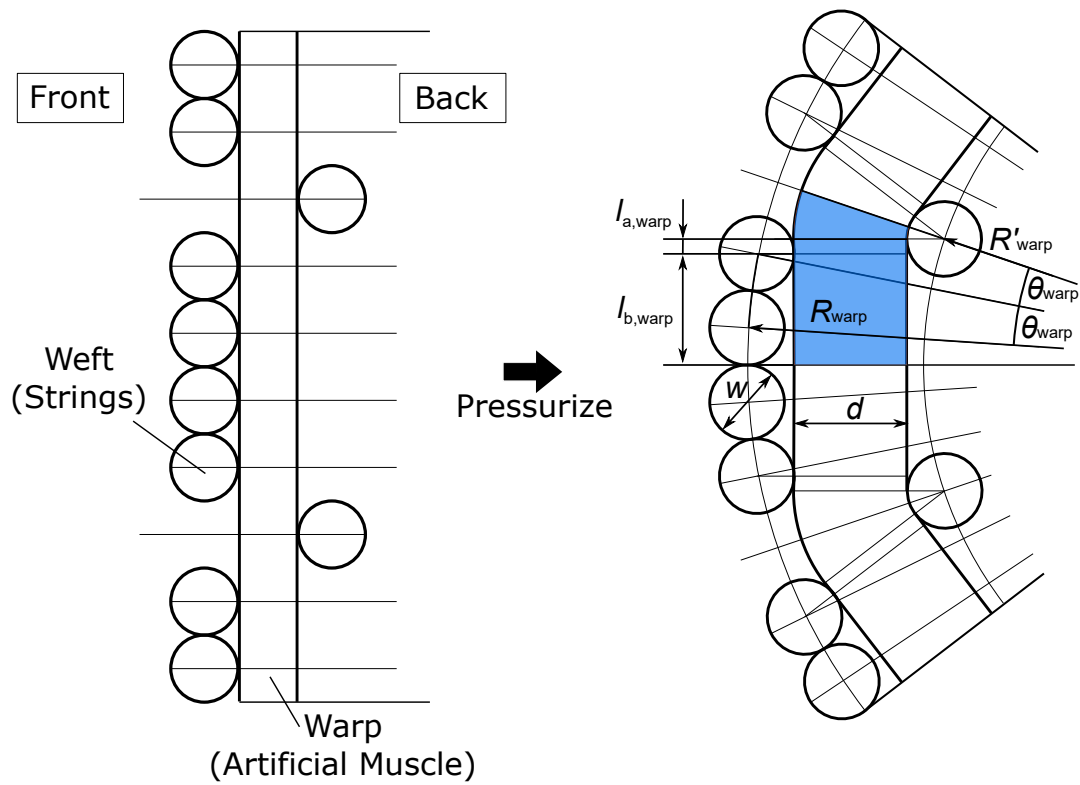


Figure 2.13 Schematic diagram of a unit structure of a warp in cross section.

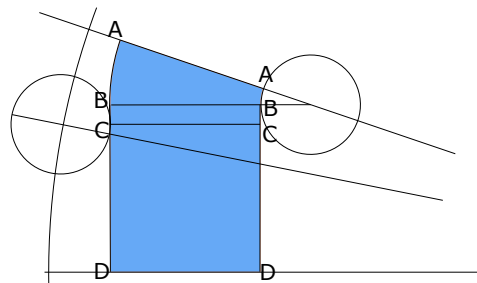


Figure 2.14 Parts of a unit structure of a warp in cross section.

の関係式が得られる。また、特徴点における屈曲角度 $\phi_{b,warp}$ および長さ $l_{a,warp}$, $l_{b,warp}$ は、

$$\phi_{b,warp} = \frac{n\theta_{warp}}{2} \quad (2.5)$$

$$l_{a,warp} = R_{warp} \cdot \sin \frac{n\theta_{warp}}{2} - l_{b,warp} \quad (2.6)$$

$$l_{b,warp} = R'_{warp} \cdot \sin \frac{(n-2)\theta_{warp}}{2} \quad (2.7)$$

で示されることから、単位経糸の長さ l_{warp} は、

$$\begin{aligned} l_{\text{warp}} &= \frac{(d+w)\phi_{\text{b,warp},0}}{2} + l_{\text{a,warp}} + l_{\text{b,warp}} \\ &= \frac{n(d+w)\theta_{\text{warp}}}{4} + R'_{\text{warp}} \cdot \sin \frac{n\theta_{\text{warp}}}{2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

で表される。

ここで、単位経糸の初期長さ $l_{\text{warp},0}$ を用いて、 $l_{\text{warp}} = (1 + \varepsilon_l)l_{\text{warp},0}$ であることから、式 2.8 より、

$$\begin{aligned} \frac{n(d+w)\theta_{\text{warp}}}{4} + R'_{\text{warp}} \cdot \sin \frac{n\theta_{\text{warp}}}{2} &= (1 - \varepsilon_l)l_{\text{warp},0} \\ &= (1 - \varepsilon_l)\frac{nw}{2} \end{aligned} \quad (2.9)$$

の関係式が得られる。

式 2.3, 式 2.9, 式 2.9 の連立式を解くことで、能動布の経糸方向の湾曲半径 R_{warp} , 湾曲半径 θ_{warp} , ならびに特徴点の緯糸の湾曲半径 R'_{warp} が得られる。

2.4.2 人工筋肉の膨張による変形

2.4.2.1 変形原理の概要

織布の緯糸方向の断面における紐の走行形状に着目する。まず、図 2.15 に示すような、織布における全ての緯糸を経糸方向に重ね合わせた、織布の平均的な組織を考える。緯糸は、組織周期 n ごとに経糸の裏側 (図中, 下側) を通り、その他の経糸の表側 (図中, 上側) を通る。このため、組織周期 n が 3 以上の時、布の表側を連続して緯糸が走る。それぞれの経糸は、表側二本、裏側一本の緯糸に支えられており、人工筋肉が膨張すると、特に裏側の緯糸を布の厚さ方向に押し出すように変形する。この時、任意の緯糸において表側から裏側へ紐が引き込まれ、裏側を走行する長さが長くなる。緯糸の長さが変化しないとき、表側を短絡して走行する部分の長さは短くなることで、表側を凹面とした形状に湾曲する。

2.4.2.2 緯糸方向における走行する紐の幾何学的変形モデル：

織布組織は、図 2.16 中の赤色部で示すような、単位構造で分割することができる。正則かつ交錯が各糸方向に連続しない三原組織であるとき、この単位構造は全ての隣り合う経糸のペア毎に二つずつ接触して存在する。組織が湾曲するとき、全ての経糸が一つの円弧状に整列していると仮定し、隣り合う二つの経糸の角度を θ_{weft} , 中心からの距離を R_{weft} とする。このとき、隣り合う経糸の間隔 L は、

$$L = 2R_{\text{weft}} \cdot \sin \frac{\theta_{\text{weft}}}{2} \quad (2.10)$$

で示される。隣り合う経糸の中心を結ぶ線分と経糸中心で直交する平行線を考えるとき、この平行線と断面 B のなす角度 ϕ を用いて、隣り合う経糸の間隔 L は、

$$L = \frac{d+t}{\sin \phi} \quad (2.11)$$

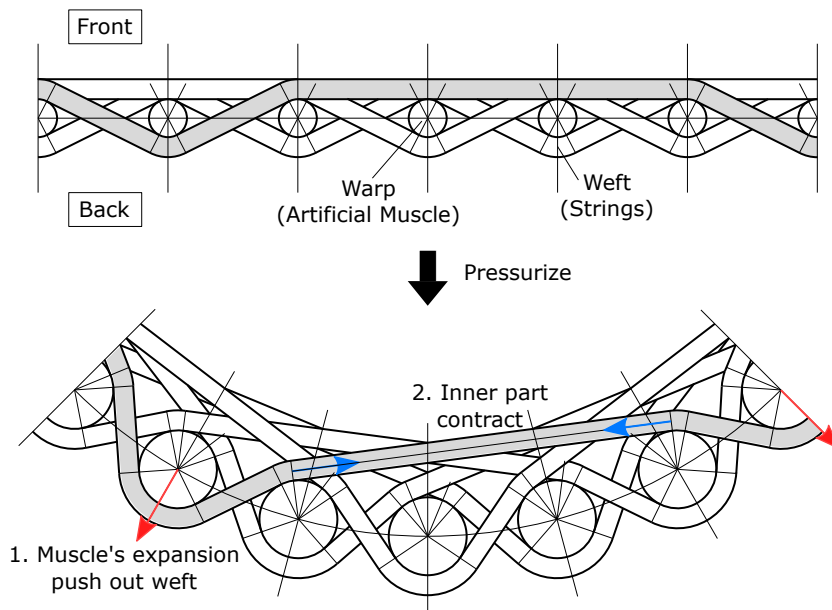


Figure 2.15 Schematic image of deformation in the weft section by expansion of McKibben muscles

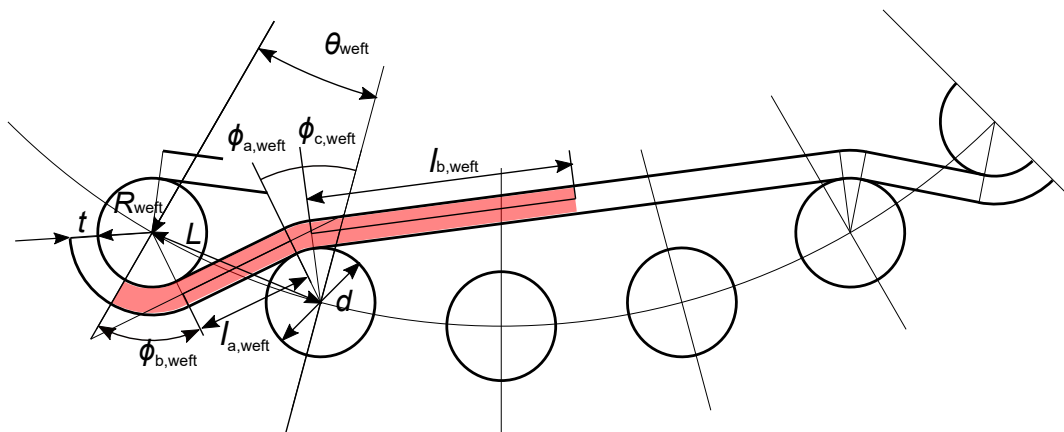


Figure 2.16 Schematic diagram of a unit structure of a weft in cross section.

と表すことができる。よって式 2.10, 式 2.11 より,

$$2R_{\text{weft}} \cdot \sin \frac{\theta_{\text{weft}}}{2} = \frac{d+t}{\sin \phi} \tag{2.12}$$

の関係式が得られる。

単位構造は、断面 A から断面 E までを結ぶ、厚さ t 、長さ l_{weft} の滑らかな曲線であり、四つの部位からなる (図 2.17)。断面 A および断面 E は、同じ緯糸をなす隣接した単位構造との断面である。均一な組織を考えると、隣接の単位構造はこの断面において面对称であり、この断面において力が釣り合う。単位構造は、経糸と緯糸が交錯している部位 ABCD と紐が布の表側を連続して走る部位 DE に分けられ、それぞれを「交錯部」「短絡部」と呼称する。平織などの周期 n が 2 で

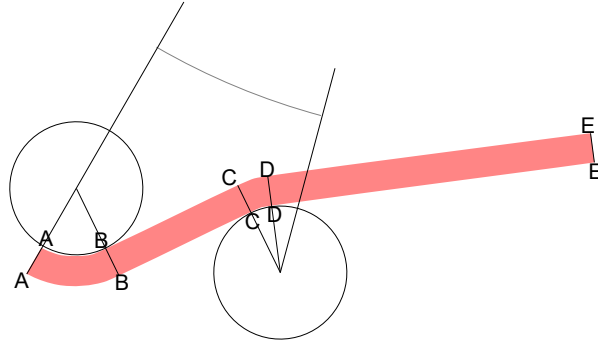


Figure 2.17 Parts of a unit structure of a weft in cross section.

ある組織は、交錯部のみで形成される。一方、綾織や朱子織などの周期 n が 3 以上の組織では、短絡部が存在する。短絡部は織布組織の一周期隣の特徴点までの間を直線状に繋ぐ部位であり、特徴点の隣の経糸と次の特徴点の隣の経糸に接する。よって、短絡部の長さ $l_{b,\text{weft}}$ は湾曲半径 R_{weft} を用いて、

$$l_{b,\text{weft}} = R_{\text{weft}} \cdot \sin \frac{(n-2)\theta_{\text{weft}}}{2} \quad (2.13)$$

で示される。布が湾曲していないとき、布の法線方向と短絡部は直交する。一方で布が湾曲するとき、短絡部は布の接線方向から角度 ϕ_c で傾いて走行する。この短絡部の走行角度 $\phi_{c,\text{weft}}$ は、湾曲角度 θ_{weft} と織布組織の周期 n を用いて、

$$\phi_{c,\text{weft}} = \frac{(n-2)\theta_{\text{weft}}}{2} \quad (2.14)$$

と表される。交錯部における部位 AB および部位 CD の二箇所は、経糸に沿って円弧状に曲がっており、その屈曲角度をそれぞれ $\phi_{a,\text{weft}}$ 、 $\phi_{b,\text{weft}}$ とする。このとき、湾曲角度 θ_{weft} と各部位の角度は、次式の関係にある。

$$\phi_{a,\text{weft}} = \phi - \frac{\theta_{\text{weft}}}{2} - \phi_{c,\text{weft}} \quad (2.15)$$

$$\phi_{b,\text{weft}} = \phi + \frac{\theta_{\text{weft}}}{2} \quad (2.16)$$

また、経糸の直径に対して隣り合う経糸間の距離が十分に大きいとき、二つの屈曲部間には長さ $l_{a,\text{weft}}$ の直線状の部位 BC が存在する。部位 BC の長さ $l_{a,\text{weft}}$ は角度 ϕ を用いて、

$$l_{a,\text{weft}} = \frac{d+t}{\tan \phi} \quad (2.17)$$

で示される。単位構造の長さ l_{weft} を、交錯部 ABCD と短絡部 DE の長さから、

$$l_{\text{weft}} = \frac{1}{2}(d+t)(\phi_{a,\text{weft}} + \phi_{b,\text{weft}}) + l_{a,\text{weft}} + l_{b,\text{weft}} \quad (2.18)$$

で定義する。よって、式 2.13~ 式 2.18 より、 l_{weft} は

$$l_{\text{weft}} = (d+t) \left(\phi - \frac{(n-2)\theta_{\text{weft}}}{4} + \frac{1}{\tan \phi} \right) + R_{\text{weft}} \cdot \sin \frac{(n-2)\theta_{\text{weft}}}{2} \quad (2.19)$$

で示される.

経糸が膨張しておらず, 布が平坦な状態を初期状態とする. この時の経糸直径を d_0 , 緯糸高さを t_0 , 隣り合う経糸の間隔を L_0 とすると, 部位 BC の布の接線方向からの角度を ϕ_0 は,

$$\phi_0 = \arcsin \frac{d_0 + t_0}{L_0} \quad (2.20)$$

である. また初期状態において, $\phi_{a,\text{weft}} = \phi_{b,\text{weft}} = \phi_0$, $\phi_{c,\text{weft}} = 0$ であることから, 単位構造の初期長さ $l_{\text{weft},0}$ は,

$$l_{\text{weft},0} = (d_0 + t_0)\phi_0 + L_0\left(\cos \phi_0 + \frac{n-2}{2}\right) \quad (2.21)$$

で得られる. ここで, $l_{\text{weft}} = l_{\text{weft},0}$ であることから, 式 2.19, 式 2.21 より,

$$(d+t) \left(\phi - \frac{(n-2)\theta_{\text{weft}}}{4} + \frac{1}{\tan \phi} \right) + R_{\text{weft}} \cdot \sin \frac{(n-2)\theta_{\text{weft}}}{2} = l_{\text{weft},0} \quad (2.22)$$

の関係式が得られる.

ここで, 隣り合う経糸間の円弧長さ $R_{\text{weft}}\theta_{\text{weft}}$ は湾曲の前後で変化しないとする.

$$R_{\text{weft}}\theta_{\text{weft}} = L_0 \quad (2.23)$$

以上から, 式 2.12, 式 2.22, 式 2.23 の連立式を解くことで, 湾曲半径 R_{weft} , 湾曲角度 θ_{weft} , ならびに紐の交錯角度 ϕ が得られる.

2.5 形態確認試験

能動布は経糸方向と緯糸方向の変形の重ね合わせによって複雑な曲面形状に変形する. 試作した能動布の形状を分類するために, 光学式 3D スキャナを用いて形状を計測する実験を行い, 現れる変形形態を分類する.

2.5.1 形状の計測方法

能動布の上端部二か所に糸を取り付け, 垂下した状態で設置し, 空圧を印加した際の形状を 3D スキャンによって計測した (図 2.18). このとき, 大気圧から 0.5 MPa までの 0.1 MPa ごとに印加する圧力を変化させて計測を行った. 使用した 3D スキャナ (RexcanIII, Solutionix) はプロジェクタで投影されるパターンの歪みを光学式ステレオカメラによって撮影する, 位相光学式三角測量によって形状データを取得する. 計測した焦点距離において, 計測点の最小間隔は 0.21 mm であり, 能動布の大まかな曲面形状を計測するのに十分な性能である.

2.5.2 計測結果: 能動布の形状

取得した点群データをもとに, 曲面近似を行い, 得られた近似曲面から布形状の特徴量を算出した. 曲面重心を通る経糸・緯糸方向の断面と曲面の交差曲線に着目することで, 能動布の形状を観

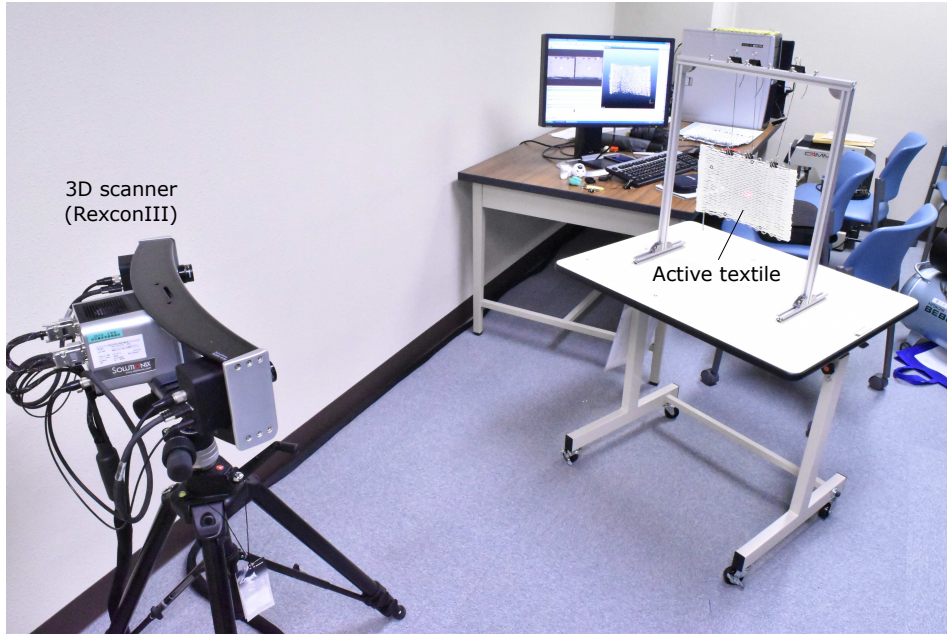


Figure 2.18 3D-scanning of an active textile. The 3D-scanner is RexcanIII from Solutionix.

察する。ただし、能動布の布形状を x , y それぞれについて 3 次までの項を有する多項式曲面で近似した (式 2.24)。

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 p_{ij} x^i y^j \quad (2.24)$$

ここでは初期状態における、緯糸が走行する向きを x 、経糸が走行する向きを y 、布の表面における法線方向を z としている。

算出した能動布の形状特徴量として収縮率を図 2.19 に示す。圧力に比例して収縮しており、ほとんどの能動布では大きな差は見られない事が判る。経糸方向において最大の収縮を示したのは、固い材質からなる幅広の紐である yellowbelt を用いた能動布であり、0.6 MPa 印加時に 22.6% を確認した。緯糸方向では反対に柔軟な緯糸を用いた能動布ほど大きく収縮した。最大収縮率を示したのは、弾力的な紐である elastic を用いたものであり、0.6 MPa 印加時に 10.3% を確認した。

能動布の湾曲形状の曲率のうち、モデルと測定結果が一致するものを図 2.20、一致していないものを図 2.21 にまとめる。ただし、3D スキャンした曲面形状から算出したものを各マークで示し、幾何学モデルから算出された値を各線で示している。経糸方向・緯糸方向どちらにおいても、特定の値に漸近しており、大まかな傾向は一致する。実際に計測した結果とモデルを比較すると、いくつかの条件において、一致する結果を得た。経糸方向では、固く幅広の紐である yellowbelt を用いた能動布の結果が一致している。これには緯糸の固さが関与していると考えられる。経糸方向のモデルにおける湾曲の発生原理は、布の表側で整列した緯糸が互いに接触し長さが一定であるのに対して、布の裏側で人工筋肉が収縮するものである。このため緯糸が柔らかく径方向につぶれる、あるいは緯糸がゆがみ、布の厚さ方向にずれることによって、モデルと計測値が一致しなくなると

考察する。一方緯糸方向では、紐の種類に依らず平織 (1, 2) および七枚朱子織 (3, 7) を採用した能動布の結果がモデルと一致した。一致しなかった三枚綾織 (1, 3) および五枚朱子織 (2, 5) では、モデルと比べて計測値が低い傾向にあり、モデルでは考慮していない要因が人工筋肉の駆動を妨げていると考えられる。緯糸方向において、能動布が湾曲する際には緯糸は強く湾曲変形することになる。この際、緯糸の張力が増加するため、経糸を押す作用が強くなり、人工筋肉の膨張が抑制されたと思われる。

2.5.3 能動布の形態分類

能動布の湾曲の曲率をもとに、布の形状を図 2.22 のように整理する。ただし、0.5 MPa 印加時の経糸・緯糸方向それぞれの湾曲形状の曲率でまとめた。織布組織と能動布の湾曲形状の関係として以下のような傾向が読み取れる。

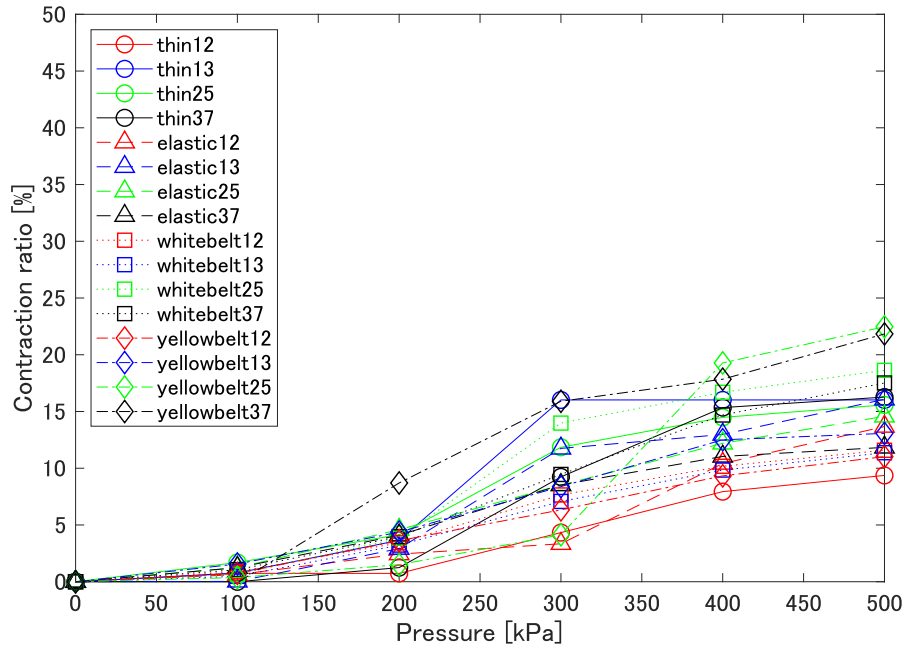
1. 平織組織を採用することで能動布は湾曲しない平坦な形状となり、また、綾織・朱子織組織を採用することにより鞍のような曲面形状へ変形した。このことから、織布組織の周期 n が 3 以上で、布の表裏における紐の走行が非対称とすることで、湾曲変形が生じることが判った。
2. 大きな湾曲変形は、経糸・緯糸方向のうちどちらか一方で発生していることから、経糸・緯糸方向の湾曲変形には互いに負の相関があり、緯糸の曲げ剛性の高いほど経糸方向の湾曲が支配的となり、曲げ剛性が低いほど緯糸方向の湾曲が支配的となる。
3. 朱子織と比較して、綾織は緯糸方向の湾曲が大きい。一方で、五枚朱子 (2, 5) と七枚朱子 (3, 7) では、結果に大きな差異が見られない。このことから、組織の偏りの大きさ以上に、交錯の密度の高さの影響が大きい。

ここで確認される能動布の特徴的な形状タイプを、平型 (Flat type)・山型 (Warp-curve type)・鞍型 (Saddle)・谷型 (Weft-curve type) の四つに分類する。

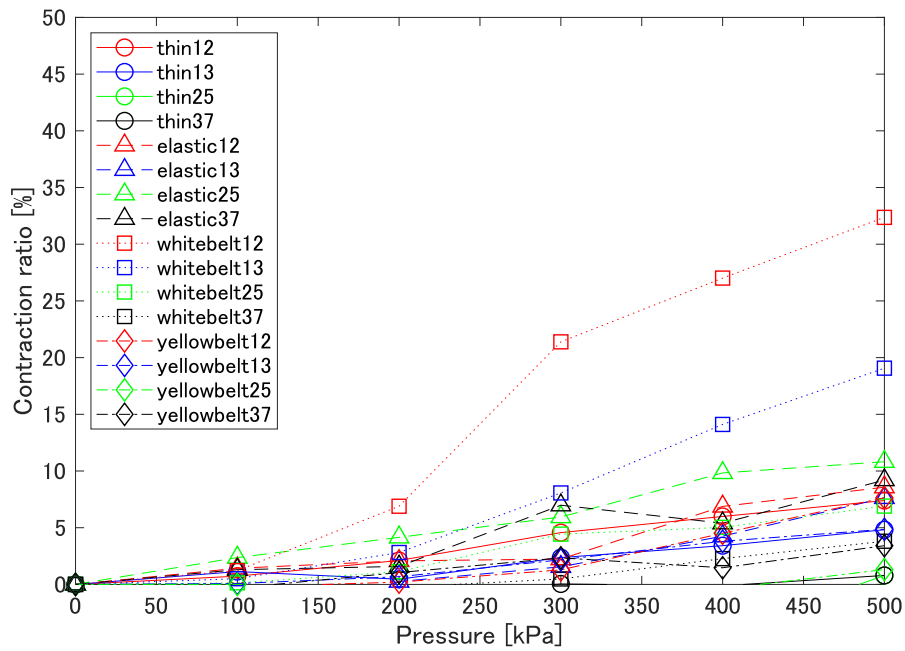
平型 : 経糸・緯糸方向の収縮のみが生じ、平坦な形状を呈する。経糸・緯糸双方の隙間が非常に小さくなり、初期の状態よりも固く詰まった状態となる。表裏に偏りのない、平織の織布で発生する。

山型 : 緯糸と平行な軸を持つ曲げによって、表を凸とした山型の形状を呈する。人工筋肉の収縮による曲げが支配的であり、膨張による曲げはほとんど見られない。固い素材の緯糸を用いた織布で発生する。表裏の偏りが大きなものほど大きく曲がる。

鞍型 : 凹凸および軸の異なる曲げが重ね合わさった、鞍型の形状を呈する。経糸・緯糸方向双方の曲げが含まれる、能動布の基本的な変形形態である。緯糸の曲げ固さによって、どちらの曲げが支配的になるかが定まり、固い素材を用いれば山型に近づき、柔軟な素材を用いると

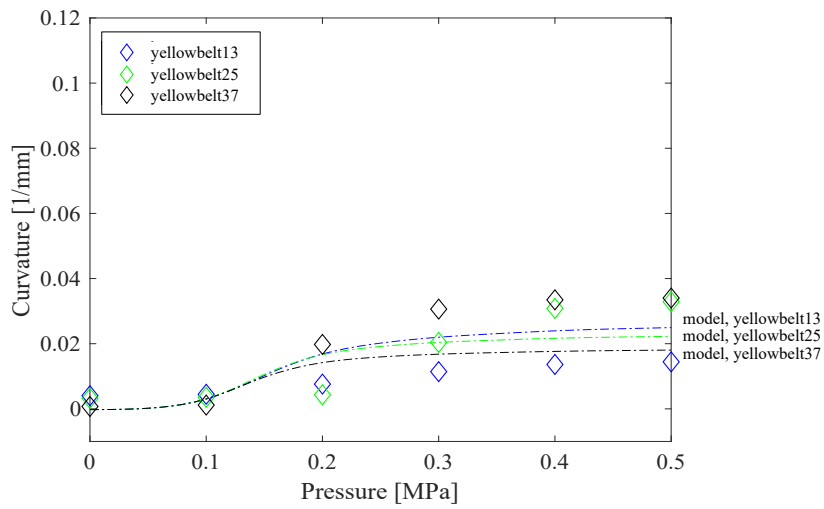


(a) warp direction.

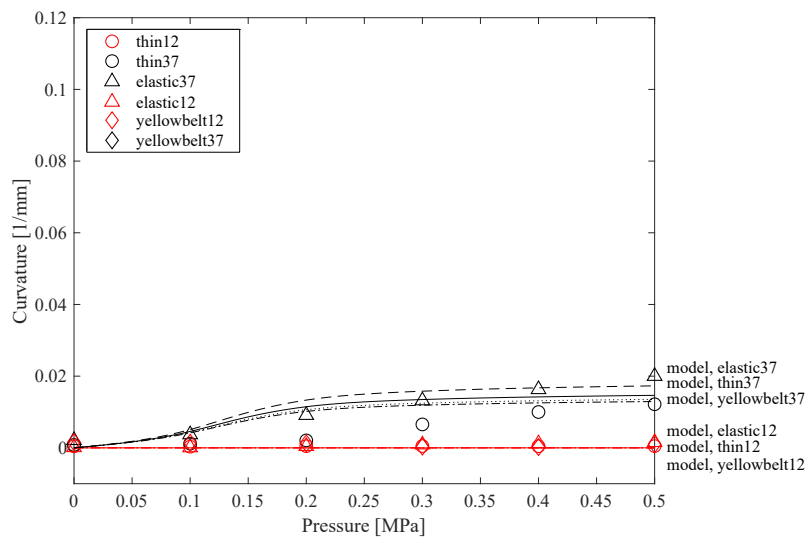


(b) weft direction.

Figure 2.19 Contraction ratio.



(a) warp direction.

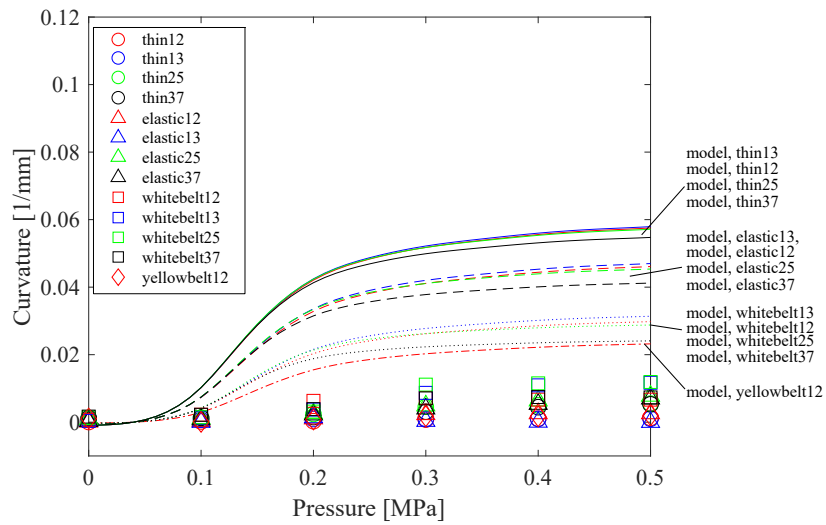


(b) weft direction.

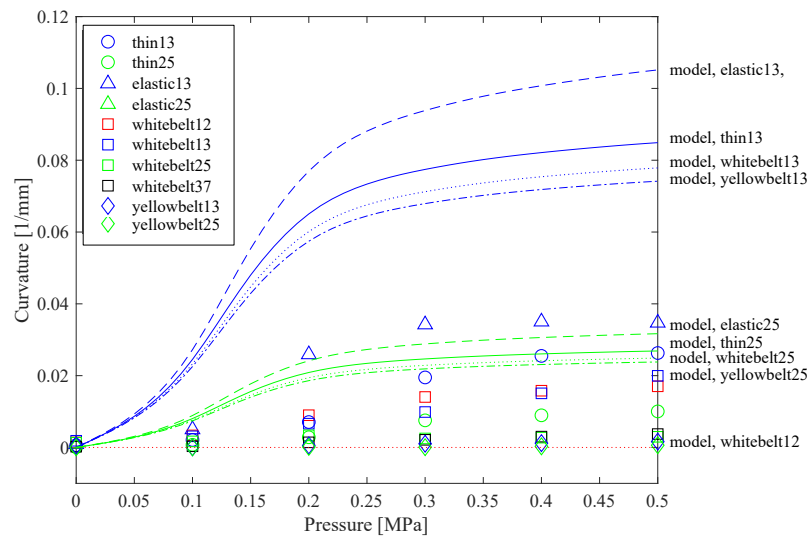
Figure 2.20 Comparison curvature between experiment value and model. Matched data.

谷型に近づく。また、表裏の偏りの小さな布で大きな変形が確認されたことから、糸の交錯度による、最適な条件があると考えられる。

谷型：経糸と平行な軸を持つ曲げによって、裏を凸とした谷型の形状を呈する。人工筋肉の膨張による曲げが支配的である。柔軟な緯糸を用いた織布で発生する。特に、交錯度の高い綾織の織布で生じており、浮きが多く連続する朱子織では、緯糸の座屈によって曲げが発生しにくくなると考えられる。



(a) warp direction.



(b) weft direction.

Figure 2.21 Comparison curvature between experiment value and model. Mismatched data

2.6 駆動特性評価実験

2.6.1 収縮特性

前述の通り，人工筋肉を編織した能動布において，人工筋肉の径方向の膨張の影響は多大である．ここでは，人工筋肉の膨張によって布の緯糸方向へ収縮について述べる

能動布の緯糸方向断面の模式図を図 2.23 に示す．平織（組織周期 $n = 2$ ）の緯糸の長さが増加し

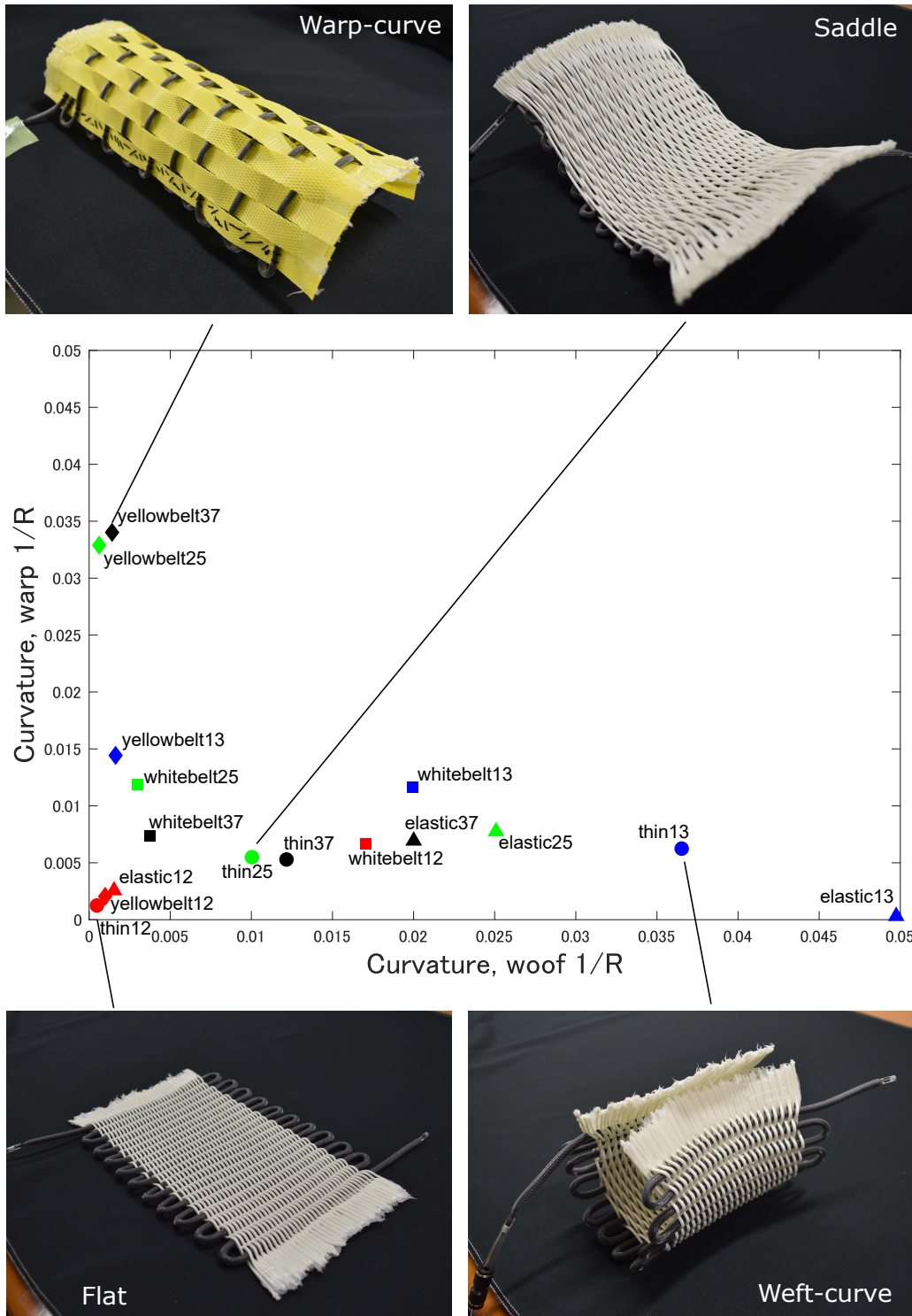


Figure 2.22 Bending shapes of active cloths. All of active textiles are pressured with air at gauge pressure of 0.5 MPa.

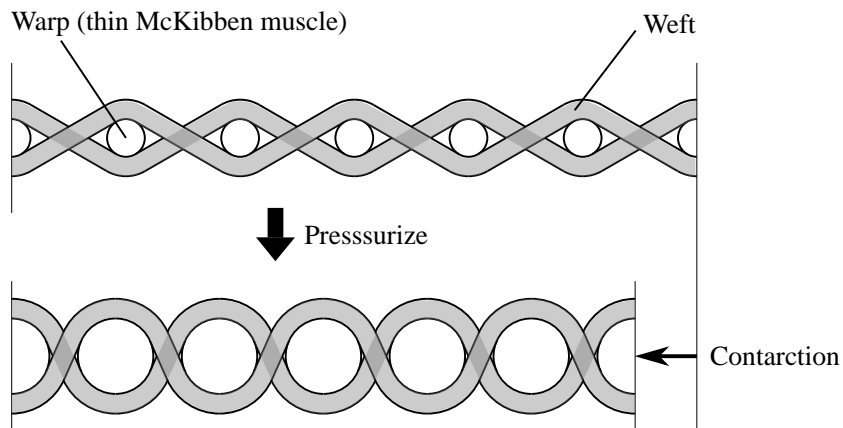


Figure 2.23 Schematic diagram of wefts curve shape in cross section. Contraction of active textiles occurs due to expansion of warps.

ないとき、その波うち形状は経糸の径の大きさによって定まる。経糸である人工筋肉に圧力が印加され、径が増加するとき、緯糸の波うち形状の振幅は大きくなり、波長は短くなる。これは布の厚さが増加し、緯糸方向には収縮することを意味する。

2.6.1.1 実験装置

実験に用いた装置を図 2.24 に示す。能動布の緯糸方向の両端を治具でクランプし、ダイニーマ糸によってリニアステージまたはフォースゲージと接続する。リニアステージはコムス株式会社 (COMS Co., Ltd.) の PM80B-50X を、フォースゲージは日本電産シンポ (NIDEC-SHIMPO Co.) の FGP-50 を使用した。ゲージ圧ゼロの状態のリニアステージを移動させ、プリテンション 5 N が負荷された状態を力および長さの初期状態とする。

実験は、収縮率を一定にするものと、印加圧力を一定とするものの二通り行う。まず収縮率を一定とする場合では、初期状態のまま長さを固定し、圧力を 0 MPa から 0.6 MPa まで 0.05 MPa ずつ増加させていき、各印加圧における収縮力を記録する。0.6 MPa まで印加したら、0.05 MPa ずつ減圧していき、また各印加圧における収縮力を記録する。次に印加圧力を一定とする場合では、初期状態にて任意の圧力を印加した後、0.5 mm ずつ能動布の伸展を緩める向きにステージを移動させ、各長さにおける収縮力を記録する。観測された収縮力が、0 となった状態を最大収縮状態として、そこからはステージを人工筋肉が伸長する向きに移動させて計測する。計測は、0 MPa から 0.6 MPa まで 0.1 MPa ごとの圧力において行った。

2.6.1.2 実験結果

緯糸方向の収縮力の変化を図 2.25 に示す。印加圧力が増加するにつれて収縮力は単調増加する。用意したそれぞれの布でその増加傾向は異なった。三種の能動布の名称をそれぞれ、thin 型、belt 型、elastic 型と呼称する。まず、細く非弾性的な紐からなる thin 型は、三つの布の中で最も大きな収縮力を発揮し、圧力 0.6 MPa 印加時には 131 N を確認した。thin 型では、ヒステリシスが

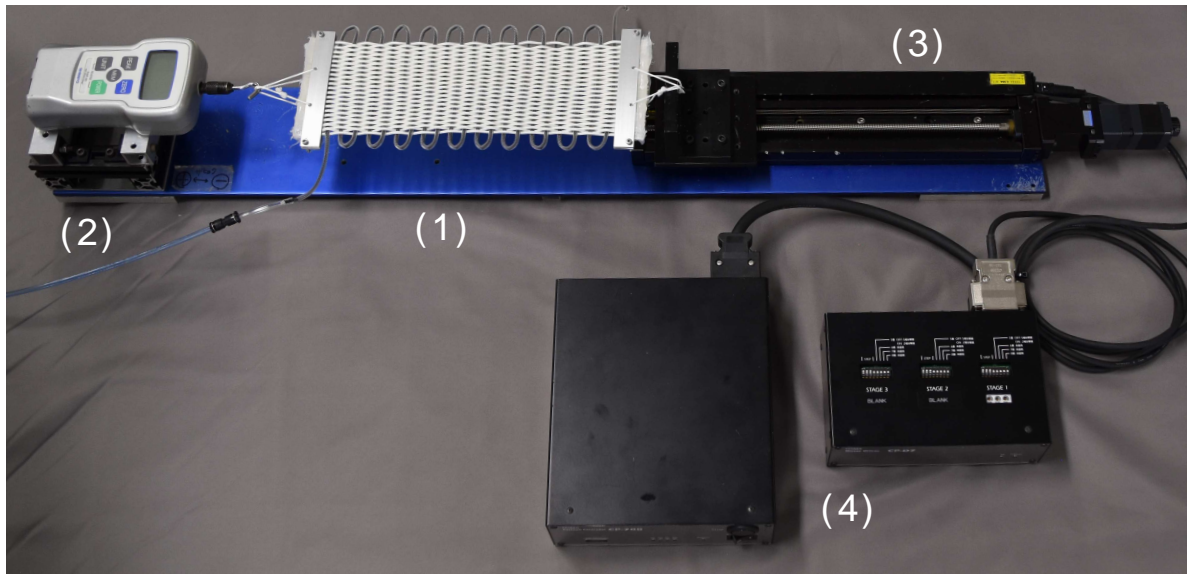


Figure 2.24 Experiment equipment. (1)An active textile are connected to the linear stage or force gauge with Dyneema thread. (2) the force gauge is FGP-50 from NIDEC-SHIMPO Co., (3)The linear stage is PM80B-50X from COMS Co., Ltd., (4) Contrilleris CP-700D from COMS Co., Ltd..

確認され、圧力減少の際には増加時よりも高い収縮力となった。その差の最大値は、0.2 MPa 印加時の 14.2 N であった。次に、非弾性でベルト状の紐を用いた belt 型では、ほぼ線形に収縮力の増加がみられた。圧力 0.6 MPa 印加時の収縮力は、45.5 N である。これは、thin 型と比較して、35% ほどの大きさである。最後に、太い弾性の紐を用いた elastic 型では、ある値で飽和する様子が確認された。0.4 MPa 付近で、収縮力は約 30 N に漸近していった。計測した最大値である 0.6 MPa 印加時の収縮力は、細径タイプの 22% であった。

圧力 0.6 MPa 印加時の収縮率と収縮力の関係を図 2.26 に示す。収縮率を繰り返し増加させるにつれて、収縮力はゼロに漸近していった。その変化の様子は三枚の能動布で大きく異なる結果となった。thin 型では、他の布と比べて急峻に収縮力が低下した。その最大収縮率は 6.7% であった。belt 型では、細径のものより収縮力の低下は穏やかであった。最大収縮率は 5.2% であり、今回計測した三種の布の中で最も小さな収縮率であった。最後に、elastic 型では、収縮力の低下は最も穏やかであった。最大収縮率は 6.9% であった。

2.7 議論

実験結果は、能動布における、経糸である人工筋肉の膨張が布の形状を変化させることを示した。その変形特性は、人工筋肉と交錯する緯糸の形状・特性によって変化し、同様の人工筋肉の配置であっても収縮力・収縮量が大きく異なることを示した。しかしながら、緯糸の特徴と能動布の変形の詳細な関係性はまだ明らかになっていない。

三種の紐において、大きく異なる点は、厚さ・幅・曲げ剛性・弾性である。人工筋肉の状態が同

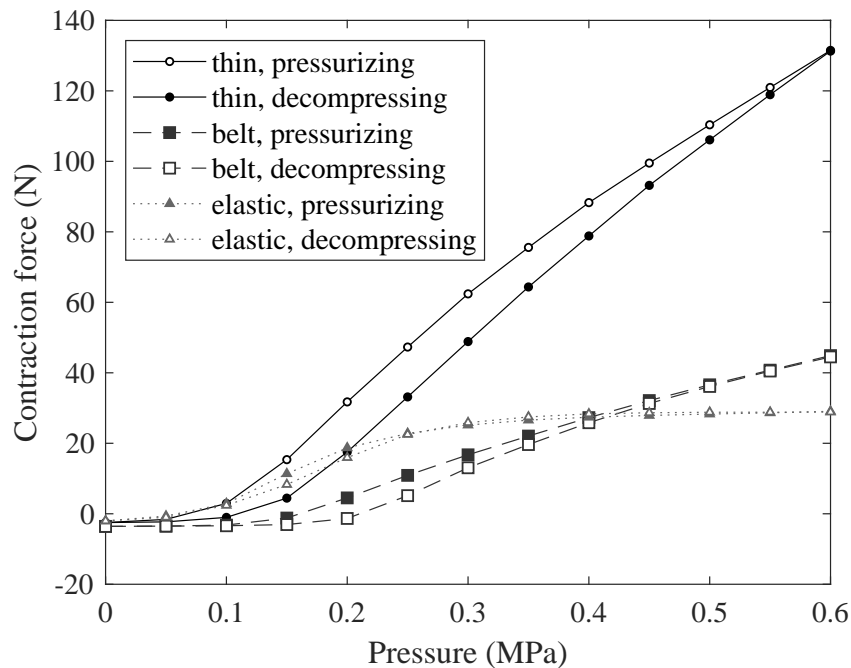


Figure 2.25 Relationship between the applied pressure and contraction force in the weft direction by the expansion of muscles. Hysteresis is exhibited only by the thin-type active textile. The active textile is fixed at the initial length.

じであるにも関わらず、三種類の能動布の収縮力の大きさに差がある。これには、経糸と緯糸の接触面積が関わっていると考えられる。緯糸方向の外力と経糸（人工筋肉）の膨張力が緯糸を介して対抗している。人工筋肉に印加されている圧力が同じであるとき、膨張によって緯糸が押される力はその接触面積に依存する。これに加えて、緯糸の波うち方が大きくなるほど緯糸方向への影響が小さくなる。この観点から考えられる、大きな収縮力を発揮することに適した緯糸の条件は、よりフラットな形状でかつ、より曲がりにくいことである。曲げ剛性が人工筋肉よりも非常に大きな紐を用いると、人工筋肉と交錯する紐の張力関係が逆転してしまうだろう。このため、大きな収縮力を発揮する最適な条件が存在すると思われる。

図 2.25 において、一つ注目したいのはヒステリシスである。ソフトアクチュエータ・ソフトメカニズムにおいては、その素材・構造の柔軟性から、大きなヒステリシスが存在することが多い。しかし、今回の実験では thin 型の能動布でのみヒステリシスが確認され、他の二つの能動布ではヒステリシスはほとんど確認されなかった。この能動布において、ヒステリシスの大きな要因となるのは隣接する糸の間の摩擦である。経糸と緯糸の間では、緯糸が経糸に巻き付くように接触するだけである。このため、緯糸は経糸の上を摺動することはなく、大きな摩擦は存在しない。着目すべきなのは、互いに交差する緯糸と緯糸の摺動摩擦である。thin 型では緯糸の幅が小さいため、同じ長さの織布において摺動箇所が特に多くなり、他の織布ではほとんど見られないヒステリシスが

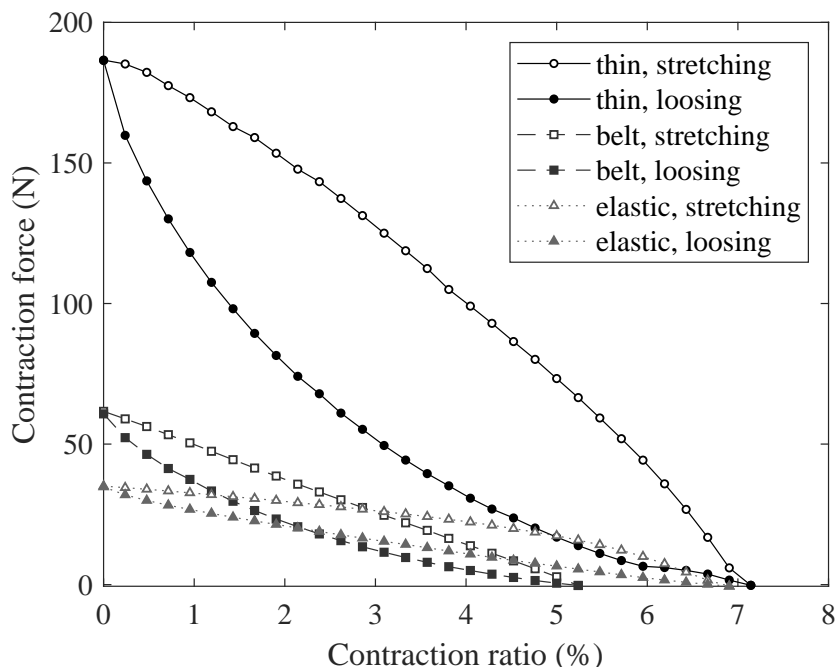


Figure 2.26 Relationship between contraction ratio and contraction force in the weft direction due to expansion of muscles. The applied pressure is 0.6 MPa.

現れたと考えられる。

図 2.25 において、注目したいのは elastic 型の挙動である。他の二つと比較すると、elastic 型は、その収縮力の低さに対して、大きな収縮率を示している。elastic 型では、能動布が任意の長さで拘束された状態でも、緯糸が布の厚さ方向に弾性的に変形することができる。これによって、各節点における緯糸の角度が大きくなることで、収縮力が小さくなる。結果として、elastic 型は一定の収縮力を得ることに向いており、thin 型は安定して大きな力を発生することに向いているといえる。

2.8 まとめ

本章では、空圧人工筋肉を素材とした織布状の機構：能動布の構造を整理し、その変形に関する基礎特性の解明について述べた。提案する能動布は、人工筋肉と紐が交錯した格子状構造であり、素早く容易に製作可能であると期待される。

細径 McKibben 型人工筋肉を経糸とし、三原組織を採用することによって平坦な能動布を製作し、湾曲を含む複数の方向へ変形する機構を実現した。経糸方向と緯糸方向の紐の走行形状に着目した幾何学モデルを作成し、人工筋肉の駆動から能動布の湾曲形状を算出する方法を示した。能動布の形状を 3D スキャンによって計測し、モデルと比較することでその妥当性を検証した。モデル

と計測値の比較から、一部の条件において、幾何学モデルが適用可能であることを確認した。この能動布の変形は、経糸方向の曲げと緯糸方向の曲げが重なり合った鞍型の形態を基本とし、編織組織ならびに用いる緯糸の種類を変更することで異なる形態に変化する。

また、交錯させる糸が異なる三種類の平型の能動布を用意し、人工筋肉の径方向駆動が能動布を収縮変形させる様子を実験的に評価した。この実験から、アクチュエータである人工筋肉の配置が同じであっても、異なる種類の緯糸を用いることにより、能動布の緯糸方向の収縮力特性が大きく変化することを確認した。最大収縮力を示したものは、直径 2 mm の細径組紐からなる能動布であり、圧力 0.6 MPa 印加時には最大収縮力 131 N を確認した。幅広な緯糸を用いた織布では、ヒステリシスが見られなかった一方で、緯糸の幅が小さいタイプでは、ヒステリシスが確認された。このことから、能動布において、ヒステリシスの要因となるのは隣接する緯糸間の摺動摩擦であると考えられる。収縮率と収縮力の関係から、最大収縮率も緯糸によって変化することが判った。最も大きな最大収縮率を示したのは thin 型の緯糸を使用した織布であり、その最大収縮率は約 7.1% であった。収縮率の増加に対する、収縮力の減少の傾向はそれぞれの能動布で異なり、elastic 型は収縮率の変動に対して、収縮力の変化が小さいことを確認した。

第3章

空圧人工筋肉の螺旋走行からなる円筒状能動布への展開

第2章では、最も基本的な織布組織である一重織物組織の交錯組織に着目し、面状の能動布の変形原理を検討した。その中で、薄く平坦な形状でありながらも、大きく曲折する、変形量の大きな能動機構が製作可能であることを示した。本章では次の段階として、立体的な形状の能動布について考える。立体形状への展開の一つとして、人工筋肉を三次元螺旋状に走行させた構造にすることで、中空円筒状の能動布を形成する。この円筒状能動布の側面上における、人工筋肉の走行方向をもとに、円筒状能動布の変形を表す非常に単純な形状モデルを提案する。また、実験により得られた結果とモデルの比較することで、提案したモデルの妥当性を検証する。

3.1 立体構造への展開

3.1.1 ソフトメカニズムにおける立体構造の形態

ソフトロボティクスにおいて、最も一般的な立体的構造の形態は二液型シリコーン・ゴムなどの柔軟材料を型成型することで製作されるインフレーターブル構造である。同じ形状を量産するのに向いている一方で、一つの形状を製作するために一つの型を製作する必要があることから、多様な形状を製作するのには向かない。これに対して、より早く硬化する弾性材料を用いて3Dプリントするものも検討されている [60] [61] [62]。複雑な中空形状であっても自由に造形でき、製造プロセスを変えることなく多種多様な構造を造形できる。懸念されるのは、液相の素材を用いる場合、素材の硬化まで時間がかかるため、素早く大量に生産するのには向かない点である。量産された既成の材料を加工することで製作される立体ソフト構造がある。Sanan らは、非弾性材フィルムからなるインフレーターブルロボットアーム PneuArm を提案している [63]。Niiyama らは、プラスチックシートを熱溶着によってプリントすることで製作されるロボットを開発した [43]。既成の材料を用いるため、造形可能な形状に得手不得手が存在するが、適した形状であれば素早く造形されるため、量産にも耐える。

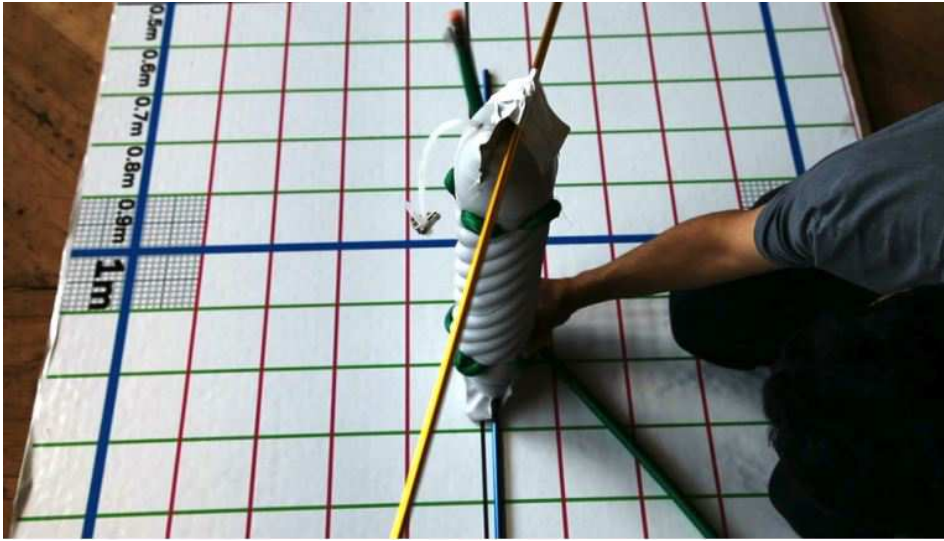


Figure 3.1 Peano Skin type twist actuator [63].

3.1.2 立体的な繊維集合体の形態

人工筋肉を含む索体を素材として、製作することができる立体形状にはどのような形態があるかを検討する。図 3.2 で示されるように、布を含む繊維集合体は、構造の展開方向と基材の展開する方向によって分類することができる。

まず、索体が複数の方向に走りながら絡む三次元多軸織組織 (図 3.3 中、3D-3 軸織に該当) が考えられる。これは空間を索体によって充填するような、非常に密度の高い繊維集合体を形成する。剛性の高い構造にすることに向いており、複合材料の分野ではよくみられる。あくまでもメカニズムとして動作させるにあたり、三次元三軸組織のような人工筋肉が極端に密集した組織では、人工筋肉が干渉し動きが阻害される条件が複雑になり、基礎的な特性を得ることが難しい。

次に、面状組織を面の法線方向に多層化した、重ね織りからなる構造 (図 3.3 中、積層型に該当) が考えられる。重ね織りは、積層された面状組織が互いに接続された組織であり、糸の交錯が布の厚さ方向に複数存在する。織布組織をもととすることで、面方向には詰まり、面の間には空隙のあるような組織を形成できる。見た目としての風合いを変えることや、断熱性・クッション性を向上させるために使われる。

次に、挙げられるのは繊維を円筒状に組むことで製造されるものである (図 3.3)。繊維の本数・太さによっては、側面内で繊維が充填され、中空の円筒が形成される。織りと組みは非常に似通った製造手法であり、紐の絡まり方は平織の向きを変化させたものとして捉えることができる。大きな相違点は、織りが平面を形成する物であるのに対して、組みは面の両端を接続した円筒状の形態をとる点にある。このため、織り組織では縦横の一方の糸に偏って荷重が加わるのに対して、組み組織ではどちらの系統の糸もおおむね均一に荷重がかかる [64]。平織組織の知見を直接的に利用でき、また中空構造を形成しやすいことから、繊維集合体の基本的立体として適当であると考えら

次元		0軸	1軸	2軸	3軸	多軸
一次元 (1D)			(ローピング, 糸)			
二次元 (2D)		(チョップドストランドマット)	(プリプレグシート)	(面状織物)	(三軸織物)	(四軸織物)
三次元 (3D)	一次元成分	(一次元成分)	(組紐)	(ベルト織)	(3D-3軸織)	4軸, 5軸, ...11軸織
	二次元成分	(マイカー)	(積層型)	(H型)	(ハニカム型)	

Figure 3.2 Variety of fabric structures [65].

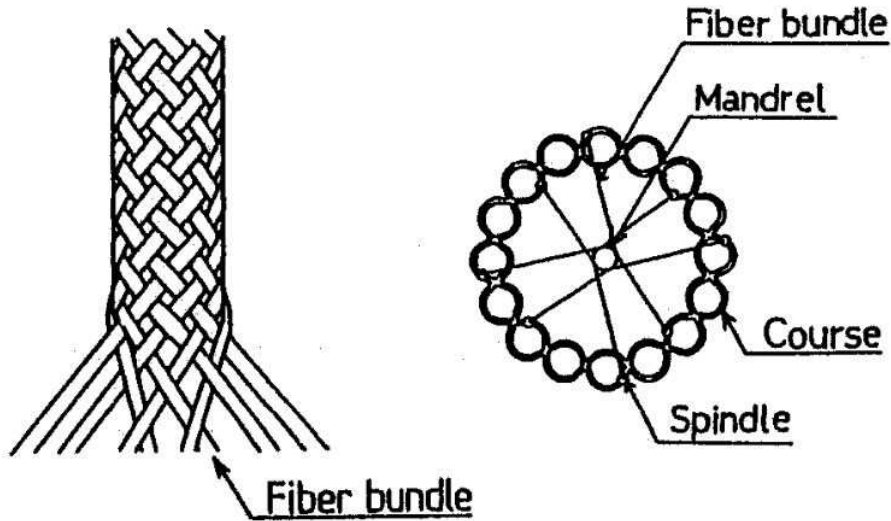


Figure 3.3 Structures of braided bundle [64].

れる.

3.2 人工筋肉の三次元螺旋状走行からなる円筒構造

本研究では、索体を組むことで製作する円筒形状の構造に着目する。前述の通り、組み組織は互いに逆の向きの三次元螺旋状に索体を走行させ、交互に交錯した構造である。人工筋肉を極端に曲げることなく、一様に走行させることで形成できるため、複雑に曲げることによる人工筋肉の耐久性劣化を避けられる。また、製紐機をはじめとした組み組織を自動で製造する機械は既に普及しており、製造が容易であると期待できる。

検討する円筒構造における、人工筋肉の走行を表したものを図 3.4 に示す。三次元螺旋状の細径人工筋肉を複数並列に並べて配置することで、円筒構造を形成する。人工筋肉の間を縫うように、細く柔軟なナイロンワイヤが平織の形で織りこまれており、これによって人工筋肉間は接続されている。すなわち、この円筒構造は能動布の一種であり、二章で扱った平織の能動布を巻いたものと同様の構造である。

円筒構造の製作方法について述べる。円筒構造は、細径 McKibben 型人工筋肉とナイロンワイヤの二種の繊維を互いに逆巻きの三次元螺旋状にし、平織の要領で人工筋肉とナイロンワイヤを交互に交錯することで製作する。細く滑らかなナイロンワイヤ (ϕ 0.37 mm) を用いることによって、細径人工筋肉を密集させつつも、ワイヤの長手方向を除いてほとんど拘束することなく円筒形状を保たせる。 m 本の細径人工筋肉を三次元螺旋状にした (図 3.5(a)) 後、径を調整しながらナイロンワイヤを編むように交錯させる (図 3.5(b)) ことで製作する。この際、ナイロンワイヤの間隔を 30 mm とした。ナイロンワイヤの端部は、人工筋肉に結束することで固定した。

3.3 筋走行角度を用いた形状変換モデル

三次元螺旋状に人工筋肉を編織した円筒構造の変形をあらわす変換モデルについて述べる。ここでは、円筒構造の大まかな変形傾向を捉えることを目指し、人工筋肉の走行方向に合わせた変換を行う、非常に簡単なモデルについて述べる。このモデルでは、人工筋肉の走行角度に基づいて、円筒構造の初期形状から変形後の形状を求める。

3.3.1 主な記号

以下に、本章で使用する主要な記号を以下に示す。ただし、各変数の添え字 0 はその変数の初期値を意味する。

l	:	人工筋肉軸方向の長さ
d	:	人工筋肉の直径
p	:	印加圧力
$\varepsilon_{\text{warp}}$:	人工筋肉の走行方向の変形率
$\varepsilon_{\text{weft}}$:	人工筋肉の走行と直交する方向の変形率
ε_l	:	人工筋肉の収縮率

ε_d	:	人工筋肉の膨張率
ϕ	:	人工筋肉の走行角度 (リード角)
$\bar{\phi}$:	ワイヤの走行角度 (リード角)
m	:	人工筋肉の本数
R	:	螺旋の半径
Z	:	螺旋の軸方向長さ
ψ	:	円筒構造の捻れ角

3.3.2 変換モデル

提案する形状モデルの流れを表した模式図を図 3.6 に示す。まず、円筒構造の側面を展開し、円筒の周長方向 (\mathbf{c}) と高さ方向 (\mathbf{z}) の二つの座標軸上のベクトルで表すことを考える。この座標系を $\mathbf{S}_1(\mathbf{c}, \mathbf{z})$ とする。初期状態において、側面形状は図 3.6(a) に示すような幅 $2\pi R_0$ 、高さ Z_0 の矩形であり、表面を走行角度 ϕ で人工筋肉が平行に走行する (図中, 赤線)。ただし、人工筋肉は右巻きとし、走行角度 ϕ は周長方向 (\mathbf{c}) からのなす角とする。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\zeta} &= \begin{bmatrix} \zeta_c \\ \zeta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\pi R \\ 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\xi} &= \begin{bmatrix} \xi_c \\ \xi_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R\psi \\ Z \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3.1)$$

二つのベクトル $\boldsymbol{\zeta}$, $\boldsymbol{\xi}$ が始点を同じくするとき、円筒構造側面の形状を表す行列 \mathbf{A} をそれぞれのベクトル $\boldsymbol{\zeta}$, $\boldsymbol{\xi}$ を列要素とする 2×2 のマトリクスで定義する。

$$\mathbf{A} = [\boldsymbol{\zeta} \quad , \quad \boldsymbol{\xi}] \quad (3.2)$$

特に、初期形状 \mathbf{A}_0 は、次式で示される。

$$\mathbf{A}_0 = [\boldsymbol{\zeta}_0 \quad , \quad \boldsymbol{\xi}_0] = \begin{bmatrix} 2\pi R_0 & 0 \\ 0 & Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

人工筋肉の駆動にあたり、人工筋肉の走行角度 ϕ が変化しないとすると、円筒側面の変形は人工筋肉の径方向 (\mathbf{d}) ならびにそれと直交する軸方向 (\mathbf{l}) のみを考慮すればよい。すなわち、人工筋肉の径方向・軸方向の軸を持つ座標系 $\mathbf{S}_2(\mathbf{d}, \mathbf{l})$ 上における拡大・縮小変換 \mathbf{S} によって、側面形状の変形を表すことができる。ただし、座標系 \mathbf{S}_2 は、座標系 \mathbf{S}_1 を回転角 $(\frac{\pi}{2} - \phi)$ で回転させたものである。つまり、人工筋肉が変形した際の形状行列 \mathbf{B} は次式で表される。

$$\mathbf{B} = \mathbf{S}\mathbf{R} \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) \mathbf{A}_0 \quad (3.4)$$

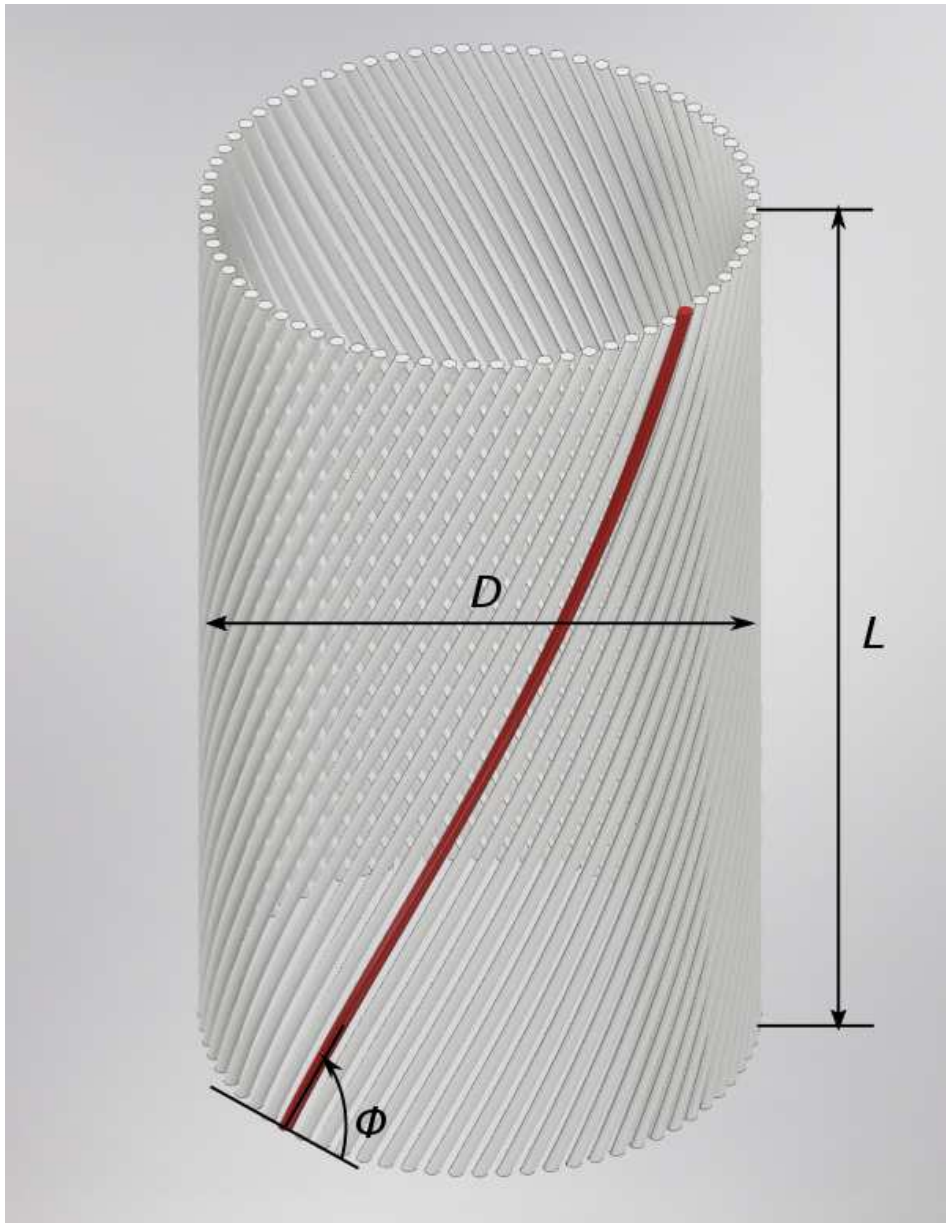
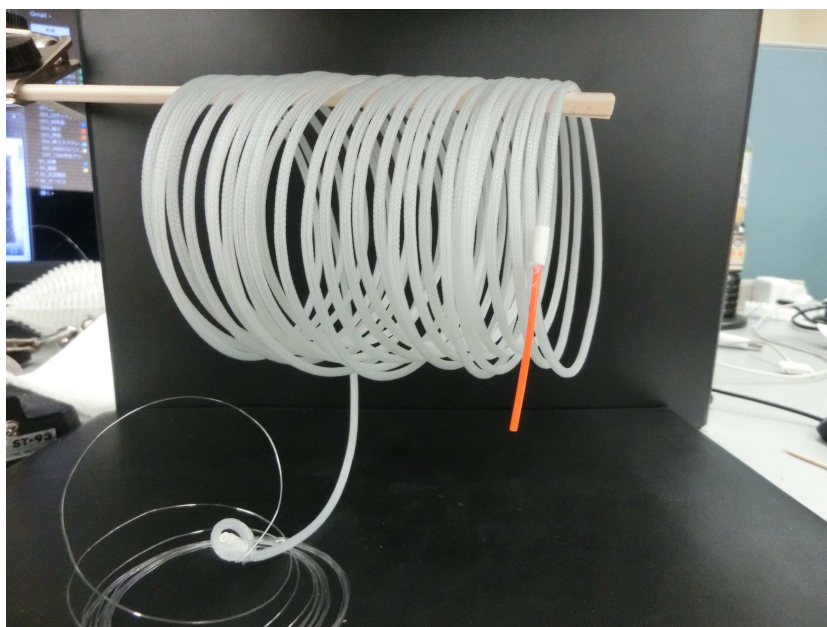


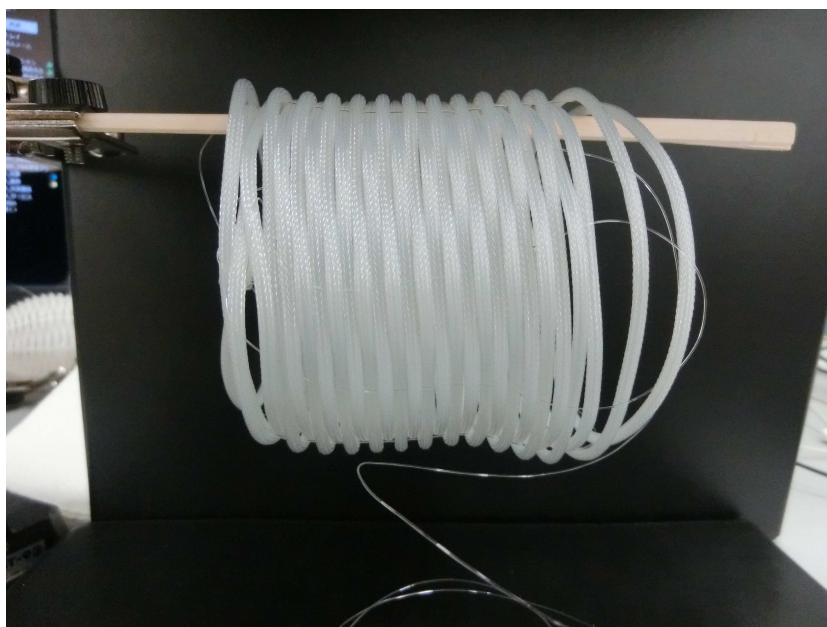
Figure 3.4 Muscle layout of cylindrical mechanism is helical. A red string is a thin McKibben muscle.

また、能動布の組織は印加圧力に応じて経糸方向と緯糸方向に駆動することから、拡大・縮小変換 \mathbf{S} は、能動布組織の駆動率 ε により、次式で定義される。ここで、添え字 0 は初期値を示し、駆動率 ε の添え字 warp, weft はそれぞれ人工筋肉の走行方向、直交する方向を表している。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 - \varepsilon_{\text{warp}} & 0 \\ 0 & 1 + \varepsilon_{\text{weft}} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$



(a) Step 1: Disposing muscles helically



(b) Step 2: Braiding muscles and wires

Figure 3.5 Production flow of cylindrical structure with helical muscles.

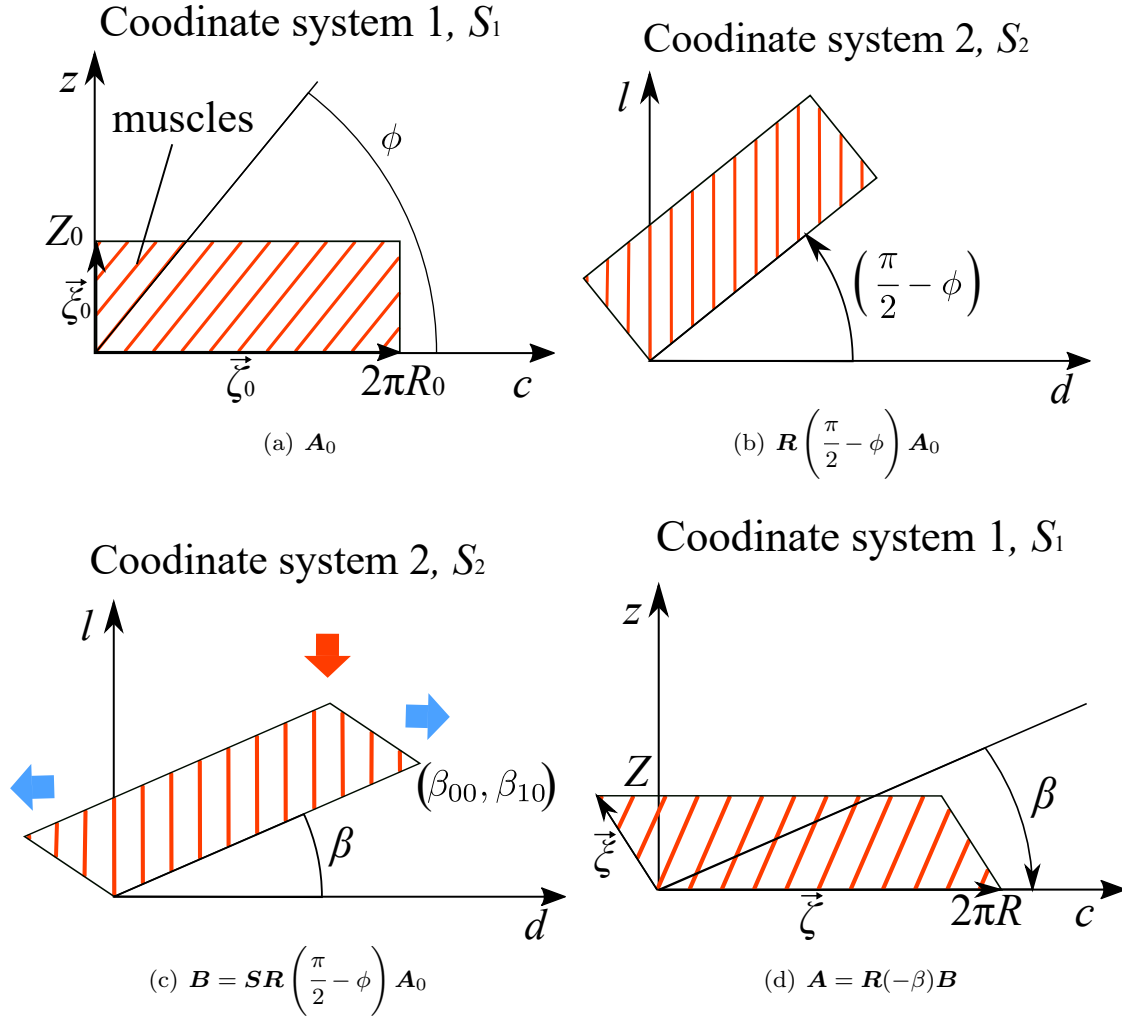


Figure 3.6 Transformed model of cylindrical structure with helical muscle running.

最後に、角度 β で時計回りに回転することで、座標系 S_2 における形状行列 B を座標系 S_1 における形状行列 A へ変換する。

$$\mathbf{A} = \mathbf{R}(-\beta)\mathbf{B} \quad (3.6)$$

ただし、行列 B の i 行 j 列の要素を B_{ij} として表すとき、角度 β は次式で算出される。

$$\beta = \arctan \frac{B_{21}}{B_{11}} \quad (3.7)$$

以上の変換によって、円筒構造の初期半径、初期高さおよび人工筋肉の走行角度をもとに、変形後の円筒構造の側面の形状が得られた。行列 A の i 行 j 列の要素を A_{ij} として表すとき、円筒構

造の半径 R ，高さ Z ，捻れ角 ψ は以下の式で示される．

$$R = \frac{A_{11}}{2\pi} \quad (3.8)$$

$$Z = A_{22} \quad (3.9)$$

$$\psi = \frac{A_{12}}{(-R)} = -2\pi \frac{A_{12}}{A_{11}} \quad (3.10)$$

3.4 試作機を用いた変形検証

実際に製作した円筒構造を駆動させる実験を行う．計測結果と前述の数理モデルを比較することで，モデルの妥当性を検証する．

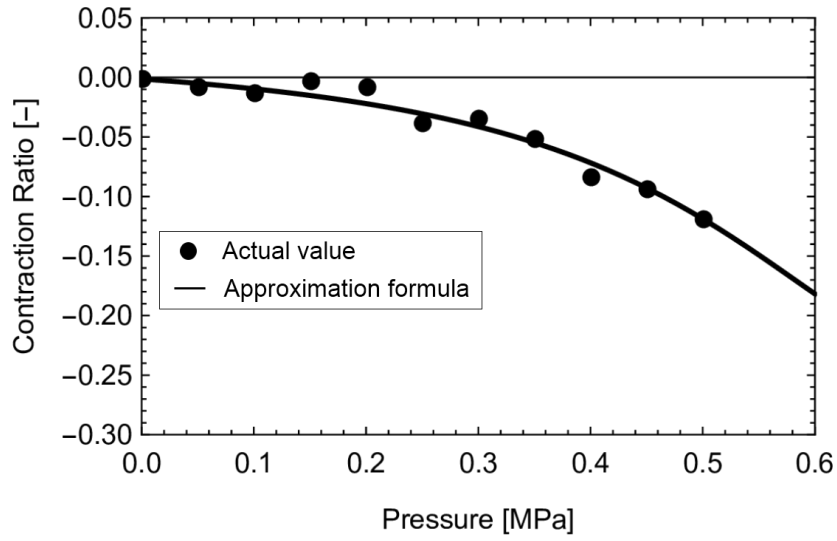
3.4.1 編織された人工筋肉の駆動特性

円筒構造の駆動実験に先立ち，編織された人工筋肉の駆動特性を実験的に取得する．編織された人工筋肉は編織の密度に応じて駆動が抑制され，動きにくくなる．この抑制された人工筋肉の駆動特性を，編織組織から厳密に推測することは難しい．そこで，試作機の表面の人工筋肉の駆動の様子を撮影・画像解析することにより駆動特性を取得した．得られた編織状態の人工筋肉の駆動特性を図 3.7 に示す．ただし，円筒構造には外力が加わらない条件としており，人工筋肉の力学的特性は考慮していない．得られたデータをもとに有理関数近似することで，編織状態における人工筋肉の駆動率の実験式を得た．得られた実験式について，収縮率，膨張率を以下に示す．

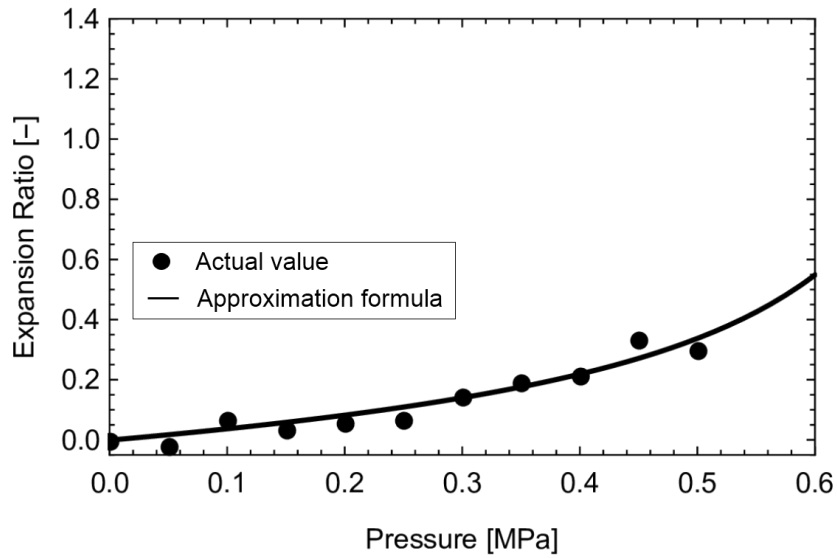
$$\varepsilon_l = \frac{\sum_{k=1}^3 A_k p^k}{100 \sum_{k=1}^3 B_k p^k} \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_d = \frac{\sum_{k=1}^3 C_k p^k}{100 \sum_{k=1}^3 D_k p^k} \quad (3.12)$$

ただし，信頼限界を 95% とし得られた近似式の各係数 A_k ， B_k ， C_k ， D_k [MPa^{-k}] は以下の通りである．



(a) Contraction ratio in axial direction.



(b) Expansion ratio in radial direction.

Figure 3.7 Driving characteristics of a thin McKibben muscle. The diameter is 3 mm.

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 = 33.74 \\ A_1 = 2.966 \\ A_2 = -41.14 \\ A_3 = 165.9 \\ B_0 = 269.7 \\ B_1 = -648.8 \\ B_2 = 445.4 \\ B_3 = 1 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} C_0 = -307.7 \\ C_1 = 112000 \\ C_2 = -50590 \\ C_3 = 0 \\ D_0 = 3219 \\ D_1 = -3886 \\ D_2 = 1 \\ D_3 = 0 \end{array} \right.$$

Table 3.2 Physical properties of air at atmospheric pressure.

	$m[-]$	$R_0[\text{mm}]$	$Z_0[\text{mm}]$	$\phi_0[^\circ]$	$\bar{\phi}_0[^\circ]$
model I	1	37.9	83.5	0.56	90
model II	72	36.0	128.5	60	60

3.4.2 円筒構造の駆動実験

3.4.2.1 実験方法

筋走行角度 ϕ が異なる二種類の円筒構造を製作し、駆動実験ならびに形状モデルとの比較を行った。製作した円筒構造 model I, model II について、外観ならびにパラメータをそれぞれ図 3.8, 表 3.2 に示す。円筒構造を上端部に取り付けたワイヤによって吊り下げ、印加圧力 0.05 MPa 毎の円筒構造の半径ならびに高さを画像解析により計測した。実験に用いた空圧システムの模式図を図 3.9 に示す。任意の圧力まで減圧した空気を電磁方向切換弁 (025E1-PSL, Koganei) によって印加した。

3.4.2.2 実験結果

円筒構造 model I および model II について、半径 R および高さ Z の実験値と計算値を比較したものを図 3.10 に示す。ただし、交錯されているナイロンワイヤが細く柔らかなものであり、人工筋肉の動きにほとんど作用しないことから、拡大収縮変換を人工筋肉の収縮率 ε_l ・膨張率 ε_d を用いて算出した。

$$\varepsilon_{\text{muscle}} = \varepsilon_l \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_{\text{fiber}} = \varepsilon_d \quad (3.14)$$

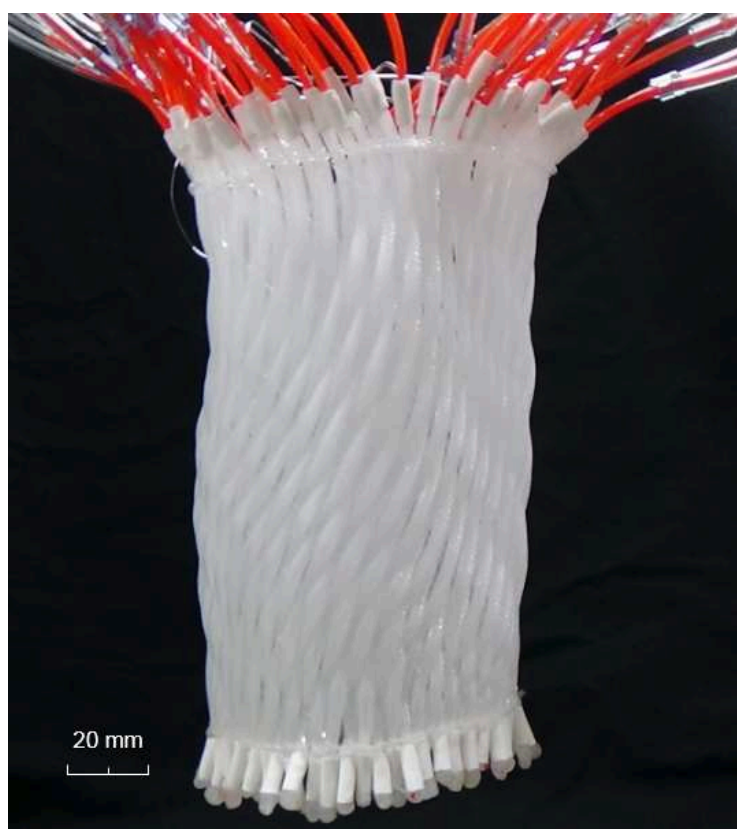
三次元螺旋状に編織された人工筋肉の走行角度によって、円筒の径方向ならびに高さ方向の変形の向きが変化する様子が提案したモデルにおいても表されていることが判る。すなわち、人工筋肉の走行角度が小さな model I では駆動時に半径が減少し、高さは増加するが、人工筋肉の走行が高さ方向になっている model II では反対に半径が増加し、高さが減少する。この増減傾向は実測値と計算値の全ての範囲において合致した。

3.4.2.3 評価

実験値と計算値の平均二乗誤差の各初期値 R_0 , Z_0 に対する割合を表 3.3 にまとめる。実験値と計算値は 7% 以内の誤差範囲で一致した。半径 R と比較して高さ Z の誤差の割合は大きく、図 3.10 から計算値から下方に外れていることが判る。これは、提案した形状モデルでは人工筋肉の変形を円筒側面上で起きるものとしているのに対して、試作機では織布状に編織された繊維が織布構造の厚さ方向にずれ動くことが影響している。繊維が織布構造の中で変形し動くことで、人工筋肉が高さ方向に整列していない状態となり、高さの変形量が積層している人工筋肉の膨張変形



(a) model I($\phi=0.56^\circ$)



(b) model II($\phi=60^\circ$)

Figure 3.8 Two examples of cylindrical mechanisms.

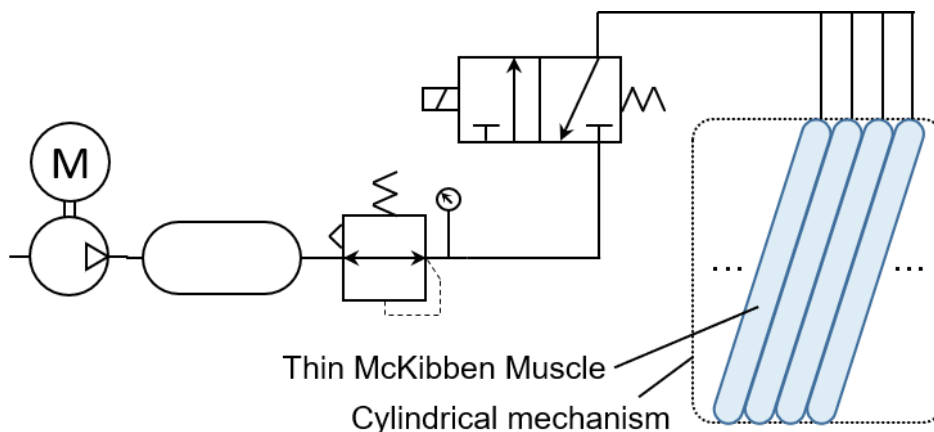


Figure 3.9 Schematic diagram pneumatic system

Table 3.3 Ratio of root mean squared errors between calculation values and experimental values to initial values.

	Radius in radical direction[%]	Height in axial direction[%]
model I	2.0	6.8
model II	2.2	4.8

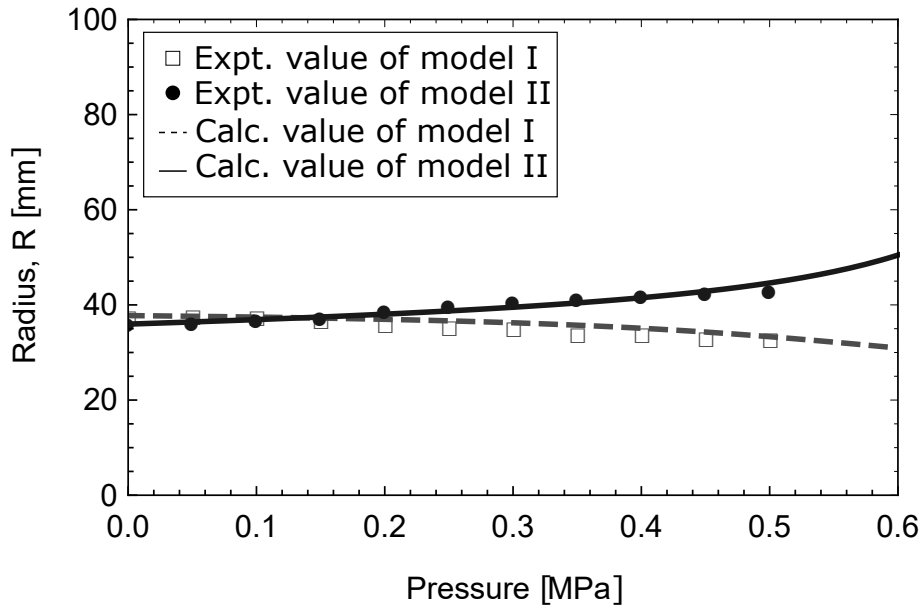
の総和よりも小さな値となる。

3.5 まとめ

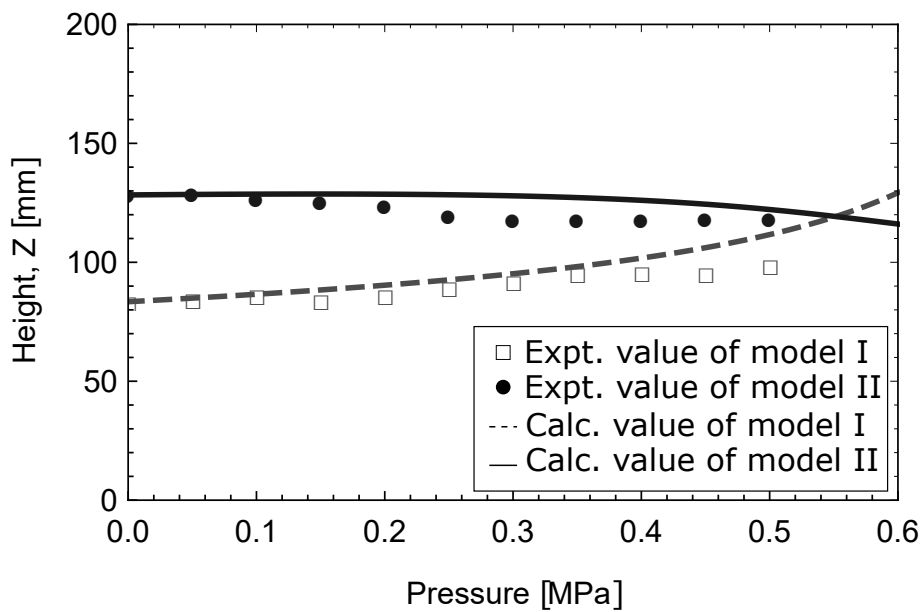
本章では、能動布の立体形状への展開の一つとして、中空の円筒構造を取り上げ、簡易な形状モデルを提案し、実機を用いた駆動実験の結果と比較することでその妥当性の検証した。これにより、人工筋肉を絡ませることで製作する、能動的かつ立体的なソフトメカニズムの実現技術に関する基礎を確立した。提案した円筒構造は細径 McKibben 型人工筋肉を三次元螺旋状に走行させ、ナイロンワイヤを平織り状に交錯させることで製作した。提案した形状モデルは、円筒構造を単純な円筒状のシェルとして考え、この側面形状が人工筋肉の径ならびに軸方向に変形することのみを考慮する非常に単純化されたものである。

人工筋肉の走行角度によって円筒構造の変形が変化することを試作機で確認し、形状モデルにおいても合致する結果を得た。人工筋肉走行角度が 0.56° の円筒構造は印加圧力を増加するに応じて、径は減少、高さは増加した。人工筋肉走行角度が 60° の円筒構造は印加圧力を増加するに応じて、径は増加、高さは減少した。平均二乗誤差を算出し、実験値と計算値の合致度を確認した。円筒半径方向では非常に高い合致度を示した一方で、円筒高さ方向では全領域で計算値より実験値が低い結果となった。これは、人工筋肉の変形が円筒側面上のみで起きるものとするモデルに対して、試作機では織布状に編織された繊維が織布構造の厚さ方向にずれ動くことが影響している。

以上の結果から、非常に簡素なモデルを用いて多数の人工筋肉からなる円筒状能動布の動作を再



(a) Radius



(b) Height

Figure 3.10 Deformation of prototypes.

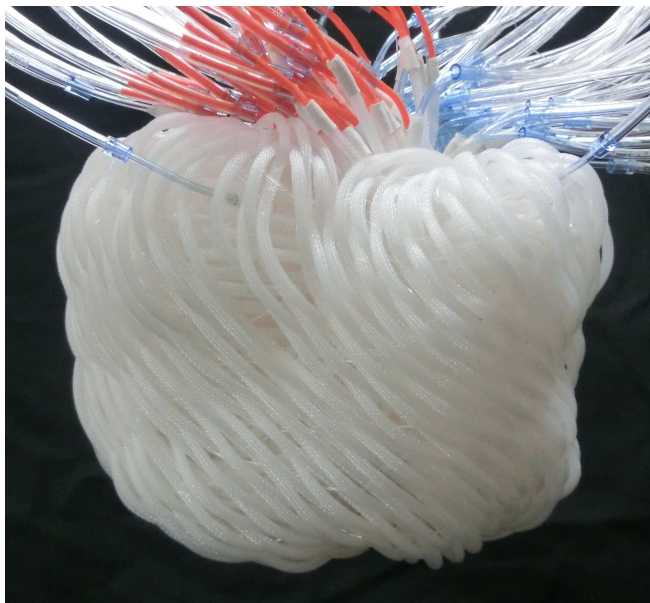


Figure 3.11 The model mimiced heart's muscle running.



Figure 3.12 An example in techno art: Lamp shade with cylindrical structure.

現することができることを明らかにした。また一方で、詳細な織布構造の動作を無視したことにより生じる、実際の能動布の駆動との差異を実験的に確認した。

能動的に動作する立体的なソフトメカニズムを実現したことにより、機械システムの利用は工業・産業分野に留まらず、新たな領域でのメカトロニクスの利用が活発化すると期待できる。柔軟に変形するランプシェード (図 3.12) など、テクノアートの分野が例として挙げられる。芸術や福祉の分野では、感性を通じた人とのインタラクションが期待されており、精確さや高出力といった性能ではなく、安全性の高さや容易に製造できることが求められている。

第4章

配管を必要としない柔軟空圧人工筋肉の実現

今後、能動布を何らかのアプリケーションへ応用するにあたり、能動布を多自由度で動かすことが想定される。この際、能動布は多くの配管を含む空圧コンポーネントを必要とするため、可搬性が損なわれ、応用方法が限定されることが懸念される。

本章では、空圧アクチュエータ内部で水の電気分解/合成反応を起こす駆動方式：「気液変換駆動」を用いつつ、柔軟な人工筋肉を実現する構造を提案する。能動布を含むソフトメカニズムでは、人工筋肉の柔軟性を確保する必要がある、本研究ではこれを構造的に解決することを図る。固い部位を分割し、連節させた構造の人工筋肉を提案・試作し、実験によってその有用性を示す。

4.1 空圧システムの単純化・小型化

4.1.1 多自由度空圧システムの課題

2章、3章では、駆動原理を検証するための実験において、空圧人工筋肉を全て同時に駆動させた。一方、今後何らかのアプリケーションへ応用するにあたって、能動布を形成する空圧人工筋肉のうちの一部のみを動かすなど、駆動自由度を増加させることが考えられる。人工筋肉は、非駆動方向への柔軟性を有しており、それぞれの人工筋肉の駆動方向が異なっても柔らかく変形し他方向への動きを許容する。このため、要素同士の干渉を厳密に考慮することなく機構を構築でき、多自由度での利用がしやすいことが利点の一つである。考えられる応用例として、アシストスーツなどのウェアラブルデバイスが挙げられる。しかし、能動布には構造を形成するために多数の空圧人工筋肉が集積されており、これらを独立して駆動させる場合、多くの空気配管を含む空圧システムの大型化・複雑化が懸念される。これは、柔軟・軽量で汎用性の高い機構である能動布の可搬性を劣化させており、その応用形態を狭める要因である。

一般的な空圧システムの構成を模式的に表したものを図 4.1 に示す [66]。一般的な空圧システムでは、コンプレッサ等空圧源から取り出した圧縮空気を減圧弁で要求圧力まで減圧し、方向切換弁によって圧力を印加する配管を選択し、速度調節弁で流速を調節した空気によってアクチュエータ

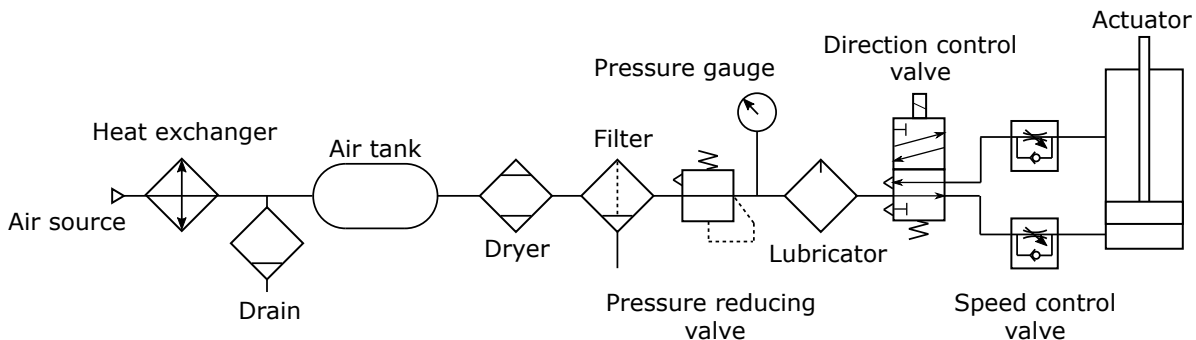


Figure 4.1 General pneumatic system.

を作動させる。これらの制御用コンポーネントの他、フィルタ・ドライヤ・ルブリケータ等の空気の質を調整するコンポーネントや、センサなどの制御用コンポーネントが用いられる。空圧システムの多自由度化に伴い、十分な流量を確保するための大型コンプレッサや、駆動自由度と同数以上の制御バルブ・空気配管が必要となり、システム全体が大型化・複雑化することが懸念される。空圧システムの中でも、特にかさ張るコンポーネントはエアタンクを含む空圧源である。一般的に空圧源は、モータやエンジンなどの原動機に圧縮機構を取り付けたコンプレッサであり、圧縮した空気を安定して供給するために頑丈なエアタンクに圧縮空気を一時貯蔵する。圧縮機構では、レシプロ・スクリュウ・スクロール・クローといった機械的に容積圧縮させる形態のものが主流であり、機構が複雑で容積圧縮を行うため小型・軽量化が難しい。また、空圧システムでは容器が破損した場合、圧縮されたガスが急激に膨張し爆発する危険性があるため、極端な高圧化は避けるべきである。高い応答性の確保し圧力損失を低減するためには、高い流量を確保し圧力損失の小さな、大口径の空気配管が必須である。このため、多自由度化に伴い増加する空気配管は非常に体積が大きく取り回しが難しいものであり、空圧システムがかさ張る大きな原因となっている。

4.1.2 空圧システムの単純化・小型化への取り組み

これまでに、空圧システムを単純化・小型化するための、様々な取り組みがなされている。これらの取り組みを「空圧コンポーネントの統合」に関するもの、「機械的圧縮を用いない小型空圧源」に関するもの、そしてこの双方を含むものに分類し、概観する。

4.1.2.1 空圧コンポーネントの統合

流路や信号線を統合することによって、空圧回路を単純化する試みがある。Ikutaらは、高い圧力で開通するハイパス弁と低い圧力で開通するローパス弁を直列で組み合わせ、特定の圧力範囲のときのみ開くバンドパスバルブを提案している(図 4.2) [67]。このバンドパスバルブの利用によって、バルブの一次圧側配管を共通化しつつ、圧力を調整することで複数のアクチュエータのうち、特定のアクチュエータを選択的に作動させる水圧システムを実現している。Nishiokaらは、振動することで開閉するバルブを開発し、空気供給配管と制御線を一本化する空気疎密波重畳駆動システムを提案した(図 4.3) [68]。この駆動方式では、空圧疎密波を一次圧配管内で発生さ

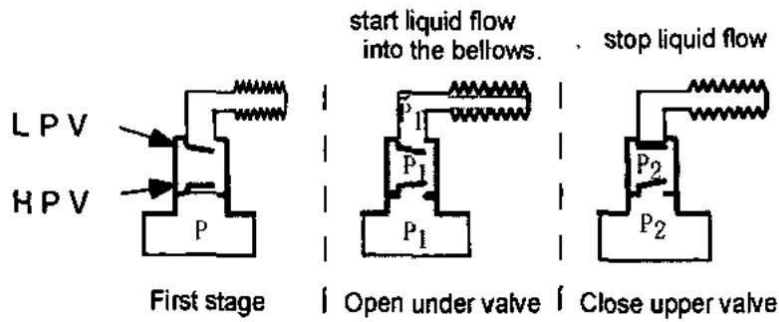
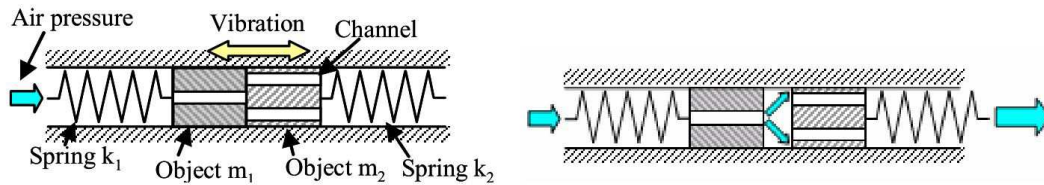
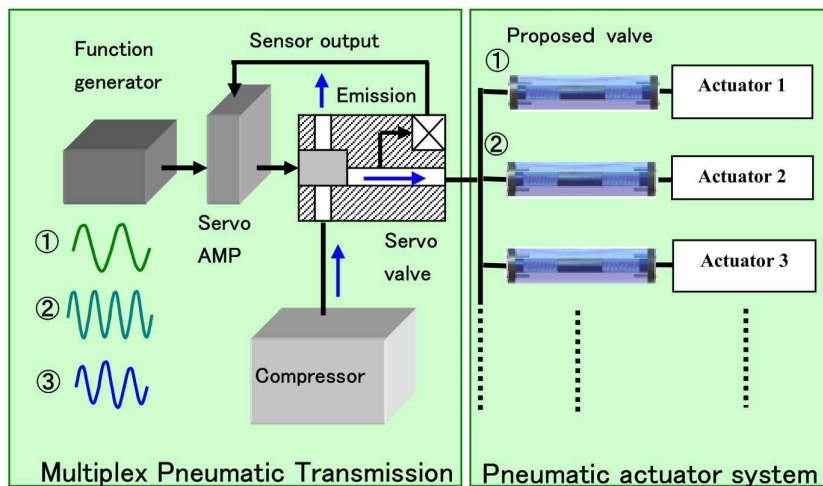


Figure 4.2 The principle of Band Pass Valve, Ikuta et al.(2003) [67].



(a) principle of the valve



(b) pneumatic system using the valves

Figure 4.3 Pneumatic valve operated by multiplex pneumatic transmission, Nishioka et al.(2010) [68].

せ、共振させることで弁の開閉を選択的に行うことを実現した。空圧疎密波の振動周波数を重畳させることで、最大四つの弁体を選択的に作動させることに成功している。敬ら、Suzumoriらは、空気配管内に音信号をのせる形態のパイロット弁、ならびに信号システムについて取り組んでいる [69] [70] [71]。敬らは、固有振動数の異なる二つの音響切替弁の作動に成功している。

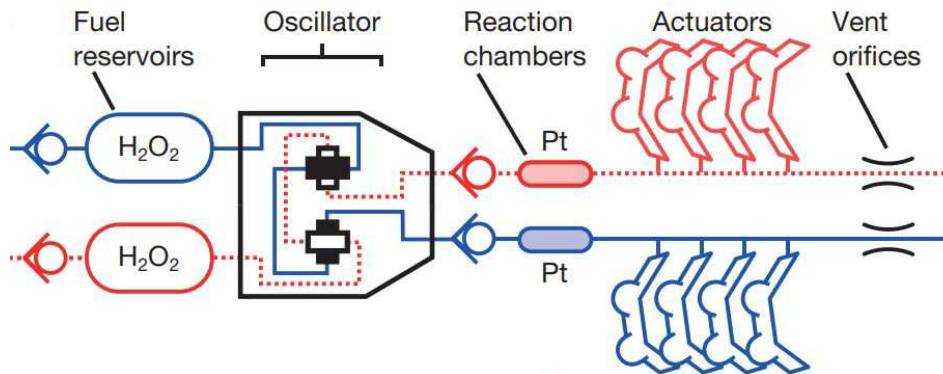


Figure 4.4 Gas source using decomposition reaction of H₂O₂, Michael Wehner et al.(2016) [62].

4.1.2.2 機械的圧縮を用いない小型空圧源

空圧源を小型化するために容積の機械的な圧縮を行わず、化学反応や相変化を利用してガスを発生させる形態の空圧源が検討されている。従来のコンプレッサを用いる場合と比較して、静粛性に優れ、コンパクトなシステムでアクチュエータを制御することが容易になると期待される。Wehnerらは、過酸化水素水の分解反応を利用した空圧源を提案している(図4.4) [62]。白金を触媒とし、液相である過酸化水素水から気相の酸素が発生することにより、体積が変化し、チャンバ内の圧力が上昇する。これらの反応をマイクロ流体回路内で実現しており、小型なソフトロボットの駆動に成功している。しかし、不可逆的の反応であるため、継続的な運用をするためには燃料の再充填が必要となる。このため、アクチュエータを往復させて動かすためには、用いている化学的反応のほかに燃料の操作を行う機能を必要がある。燃料を定期的に再充填する場合、燃料を貯蓄したタンクを伴う必要があるため、概念的には圧縮ガスを充填したポンペを用いる場合とシステム構成は同じであり、システムの複雑さにおける根源的な問題は解消されていない。また、一般生活空間での運用を想定する場合、発生したガスの取り扱いを考慮する必要がある。

北川らは、昇華性物質である二酸化炭素の相変化を利用した空圧源：Dry-ice Power Cellを提案している(図4.5) [72]。昇華性物質を入れた密閉容器の温度を操作することで、固相から気相へ昇華させ、大きな容積変化を起こす仕組みである。全質量1030 g(本体600 g, ドライアイス430 g)のものでは、最大流量110 L/minを約40秒間吐出することを達成している。しかし、温度操作による相変化を利用するため、加熱・冷却に時間がかかるとともに、エネルギー効率が低いことが課題である。またドライアイスは、常温常圧の環境下において、継続して昇華してしてガスを発生させてしまう。これを再度液相の状態に復帰させるためには大きな冷却機が必要であるため、システムに液相へ復帰させる機能を搭載することは難しい。

4.1.2.3 小型空圧源のアクチュエータへの内蔵

前述の通り、化学反応や相変化を利用することによって機械的圧縮を用いない小型空圧源は実現可能であり、更にこれをアクチュエータに内蔵することで、配管やバルブ自体を削減しようとする

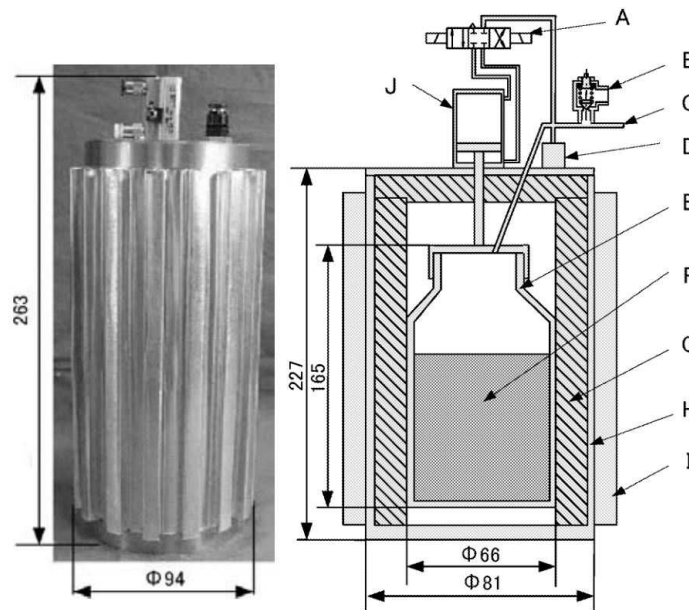


Figure 4.5 Gas source using phase change reaction of CO_2 , Kitagawa et al.(2005) [72].

取り組みがある。Nakahara らは、アクチュエータ内部で液体を沸騰させ、相変化させることで空圧アクチュエータを駆動させる方法を提案している (図 4.6) [73]。プラスチックフィルム製のインフレーター構造内にフッ素溶剤やアセトンなどの低沸点の液体を封入しており、電熱線ヒータによって沸騰させることで液相から気相へ相変化させ、圧力を変化させる。応答が遅く、大型化が難しいこと、大気中に放熱されるためエネルギー損失が大ききことが課題として挙げられる。Wada らは、アクチュエータ内部で水を電気分解することで駆動させる、気液変換駆動を提案している (図 4.7) [74]。固体高分子形燃料電池を空圧源として空圧ソフトアクチュエータに内蔵し、電気分解によって、液相の水から気相の酸素・水素ガスを発生させ、アクチュエータを駆動させることに成功している。

また、和田は内蔵する燃料電池セルの形態を変えることによって、膨張・湾曲・収縮といった動作をする様々な形態のアクチュエータでの気液変換駆動の適用に成功している [75] [74] [76]。和田が試作した、気液変換駆動を適用した McKibben 型人工筋肉を図 4.8 に示す。シリコンラバー (KE-1603, 信越化学工業株式会社) を成型した、全長 65 mm, 膜厚 0.5 mm の円筒構造が編み角 20° の繊維スリーブで覆われた構造であり、その内部に長さ 25 mm の円筒状 PEFC (FCSU-010, Horizon Fuel Cell Japan [77]) が挿入されている。また、円筒状 PEFC に同径のシリコンラバー製チューブが接続されており、発生した水素・酸素ガスの混合を避けている。和田は、純水をチャンバ内に充填した状態で電極間に電圧 2.9 V を印加することで駆動し、軸方向に 2 mm (収縮率 3%) の収縮駆動が確認している。

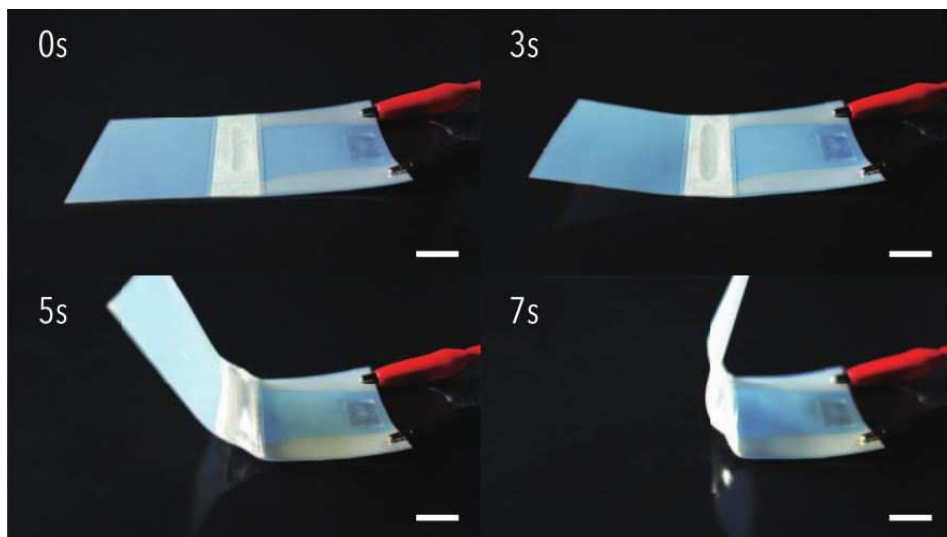


Figure 4.6 Phase-change actuator, Nakahara et al.(2017) [73].

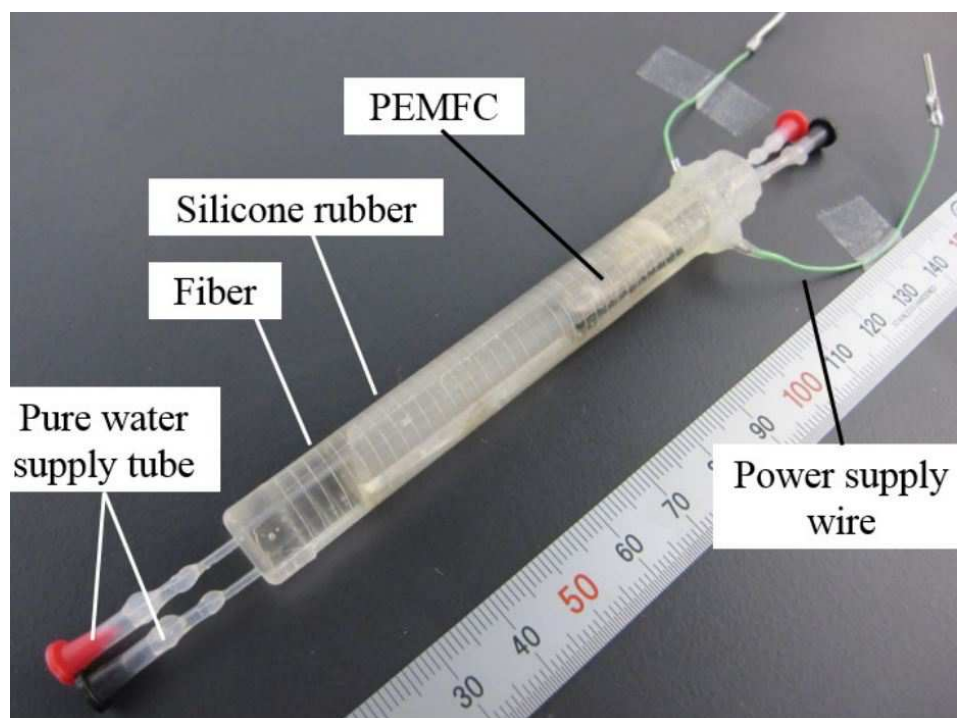


Figure 4.7 Hose-Free FMA, Wada et al.(2016) [74].

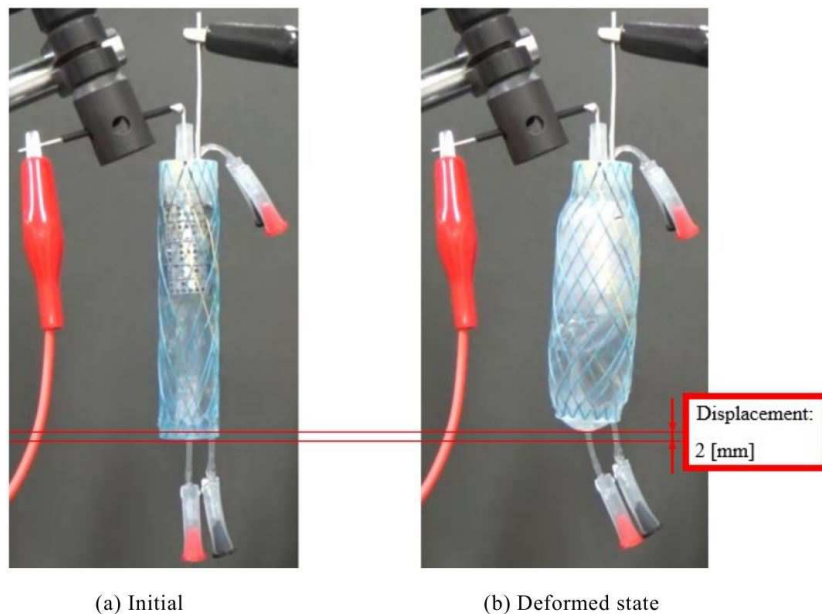


Figure 4.8 The McKibben muscle applied gas/liquid conversion drive [78]

4.1.3 人工筋肉へ適合する駆動方式

4.1.2 節で紹介した先行研究においては、「空圧コンポーネントの統合」「化学的反応を利用した空圧源」という二つの側面から空圧システムの小型化が検討されていた。特に Nakahara ら, Wada らは、機械的圧縮を用いない小型空圧源をアクチュエータに内蔵することで、空圧システムの単純化・小型化を同時に達成している。その取り組みは、相変化あるいは可逆化学反応を応用することで、物質的に閉じたチャンバ内での可逆的な仕組みを実現しており、再充填やタンクを用意する必要がないことなど、他の取り組みと比較して運用の問題が少ない。しかし、Nakahara らの取り組みでは、低沸点の液体を加熱によって沸騰させる方式をとっているため、空間中への放熱によるエネルギーの損失が大きい。一方 Wada らは、電気分解により生じた水素・酸素ガスを使用した、水の合成反応時の電力を外部充電器に回収することが可能であることを確認している [79]。以上から、Wada らの提案する水の電気分解/合成反応を利用した駆動方式は、実運用を目指すうえで非常に有望な形態であると考えられる。

4.1.4 気液変換駆動の動作原理

Wada らが提案した、水の可逆化学反応を利用した駆動方式: 気液変換駆動は、空圧アクチュエータ内部に内蔵した固体高分子形燃料電池 (PEFC) を用いて、チャンバー内で水の電気分解/合成反応を行い、ガス圧を変化させ、アクチュエータを駆動するものである。なお、「固体高分子形燃料電池」を指す英語名称は Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC) と Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) の二つが存在し、関連研究ではこれら名称が混在して使われている [80]。本

	PAFC	MCFC	SOFC	PEFC
電解質	リン酸水溶液	熔融アルカリ金属塩	酸化物イオン導電体	イオン交換膜
作動温度 (°C)	200 °C	650 °C	1,000 °C	120 °C
燃料	水素	水素	水素, 一酸化炭素	水素, 一酸化炭素
発電効率 (%)	40 %	45 %	50 %	50 %
原燃料	天然ガス, LPG, ナフサ, 灯油, メタノール	天然ガス, LPG, ナフサ, 灯油, 石炭, メタノール	天然ガス, LPG, ナフサ, 灯油, 石炭, メタノール	天然ガス, メタノール

Figure 4.9 Type of fuel cell [81].

論文では前者の Polymer Electrolyte Fuel Cell(PEFC) を用いるものとする。

気液変換駆動では、水の電気分解/合成によるガスの発生/吸収によって、空圧アクチュエータのチャンバ内圧力を操作する。この水の電気分解/合成反応は室温環境で作動可能であり、可逆的の反応であるため閉じたチャンバ内で動作させることができる。閉じたチャンバ内において、水と水素/酸素ガスの変換による体積変化が生じることで、チャンバ内のガス圧が変化し、空圧アクチュエータを駆動させる仕組みである。



水に通電させるためには硫酸や水酸化ナトリウムなどの電解液を加える方法が考えられるが、これらの物質は漏出した場合に大変危険であり、壊れやすいソフトアクチュエータでの利用は好ましくない。これに対し Wada らは、電解液を使用せず電解質膜を利用した電気分解を採用した。本研究においても、電解質膜をりようするものとする。燃料電池を反応系によって分類したものを図 4.9 に示す [81]。他の反応と比較すると、PEFC による反応は作動温度が低く、室温でも作動可能であるため運用がしやすく、幅広い応用が期待できる [82]。

PEFC の構造を模式的に示したものを図 4.10 に示す。PEFC は燃料層、電解質層、空気層の三つの層を重ねて接合した構造を基本構造とする。燃料層・空気層はそれぞれ、ガス拡散層と触媒層から成る。従来燃料電池として用いるためには、この基本構造を更に水を排出しガスを供給するためのセパレータで挟む配置となる。電極には白金が、電解質にはナフィオン (Nafion®), DuPont™) が多く採用されている。

PEFC の駆動の様子を模式的に表したものを図 4.11 に示す。PEFC に電源を接続し、燃料極触媒層を負極、空気極触媒層を正極として電位を与えることで、空気極触媒層で水が還元され水が分解される。発生した水素イオンは電解質膜を通過し、燃料極触媒層で結合し水素ガスとなる。このようにして、水素ガスおよび酸素ガスは PEFC の各表面 (水素は正電極、酸素は負電極) にて発生する (図 4.11(a))。



反対に、各電極雰囲気として水素ガス・酸素ガスがある状態で電極間を負荷抵抗で接続することで、水素イオンが電解質膜を通過し空気極触媒層で酸化され、水合成反応が起きる (図 4.11(b))。



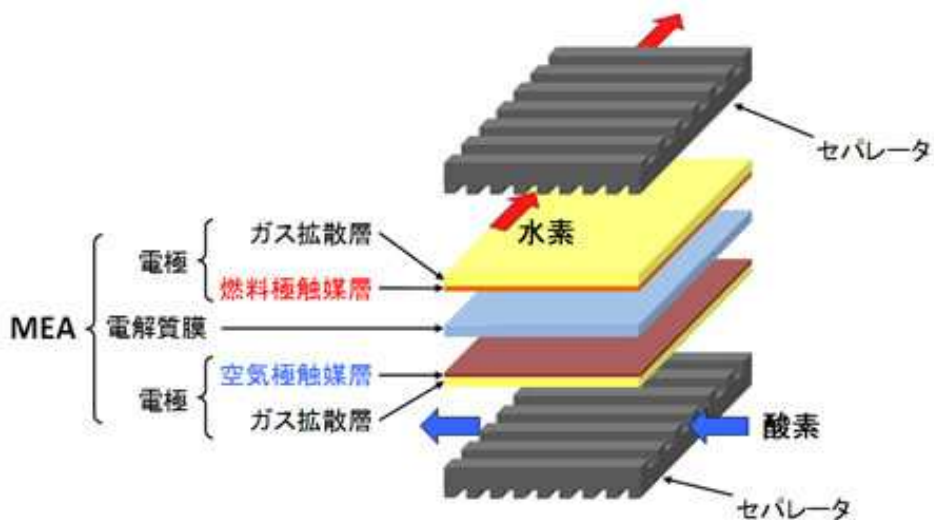


Figure 4.10 Schematic image of structure of polymer electrolyte fuel cell [83].

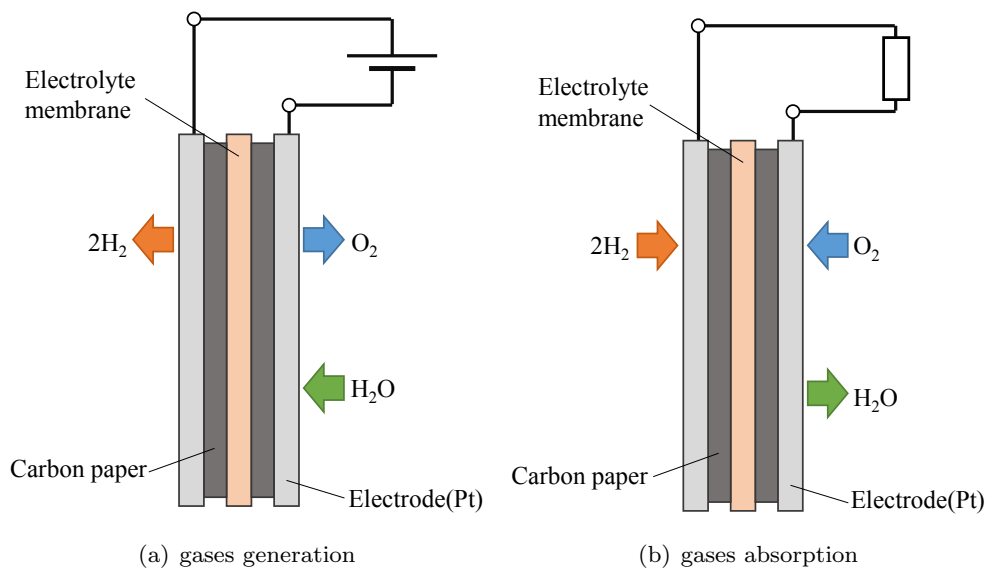


Figure 4.11 Driving principle of electrolysis/synthesis of water with PEFC

4.1.5 気液変換駆動を能動布へ適用するうえでの課題

本研究では、能動布を構成する人工筋肉に気液変換駆動を適用することを検討する。能動布で用いる場合、人工筋肉は単純に動作するだけではなく、布の形態をとるために柔軟性を確保することが不可欠である。和田が試作した McKibben 型人工筋肉では、柔軟性を確保するために、内蔵する PEFC の長さを人工筋肉全長の半分ほどの長さとしている。使用している PEFC セルがカーボン触媒層と白金電極を含む固いものであるためである。この全長の一部のみに燃料電池セルを内蔵する構造では、アクチュエータ容積に対して燃料電池セルが小さく、発生するガスの流量が少ない

ため、応答性が低いことが問題である。和田の実験では、McKibben 型人工筋肉を動かすためには高い圧力が必要であったため、2 mm ほどの変位 (収縮率 3%) を得るまでに 100 秒ほどの時間を必要としていた。また、これに対して、人工筋肉全体に PEFC を内蔵した場合、PEFC の固さによって人工筋肉の柔軟性が損なわれ、布の形態をとることができなくなる。以上から、気液変換駆動を能動布で運用するためには、柔軟性の確保が重要であり、気液変換駆動との両立する人工筋肉の形態を明らかにする必要がある。

4.2 気液変換駆動を適用した柔軟空圧人工筋肉

本節では、提案する無配管人工筋肉の構造を述べた後、実際に製造するプロセスを説明する。

4.2.1 気液変換駆動と柔軟性確保の両立した構造の提示

前述の通り、PEFC はイオン交換膜をカーボン触媒層および白金電極によって挟み込んだ形状となっており、固い平板状のものである。気液変換駆動を人工筋肉に適用するにあたり、人工筋肉の柔軟性を損なうことは避けるべきであり、柔軟さを確保するための構造が求められる。一つの対案として Wada らは、燃料電池セル自体の材料・構造を見直し、柔軟な燃料電池セルの開発を進めている [84] が、製作された燃料電池セルの反応効率は低く、アクチュエータの駆動性能の劣化が生じた。

本研究では、燃料電池セルの材料的な柔軟性を高めるのではなく、構造的に柔軟にすることを検討する。すなわち、人工筋肉全体を柔軟にする必要はなく、固い部位が柔軟な部位で接続されていればよいと考える。図 4.12 に示すように、従来燃料電池セルを分割して人工筋肉に内蔵することによって、面積あたりの反応効率を下げることなく、柔軟な構造を構築することができる。2.1.2.1 で述べたように、筆者はプラスチックフィルム製の曲折自在な人工筋肉バッグスアクチュエータを提案している [46]。この人工筋肉もまた、構造的な柔軟性について同様の着想を基にしたものであり、バッグ状の収縮要素を連節した構造になっている。薄膜の構造変形を利用しているため、McKibben 型人工筋肉などのラバー製人工筋肉と比較して、低い圧力域で駆動可能であり、より少ない流量で駆動させることが可能である。本章では、気液変換駆動をバッグスアクチュエータへ適用することで、柔軟性を確保しつつ配管を削減した人工筋肉を実現可能であることを示す。これにより、大型の空圧システムを伴うことなく能動布を多自由度化するための基礎技術を構築する。

4.2.2 気液変換駆動バッグスアクチュエータの構造

試作した気液変換駆動バッグスアクチュエータを図 4.14(a) に、セルを内蔵したバッグ要素単体の構造を図 4.14(b) に示す。このバッグスアクチュエータは、ポリエチレンフィルムを升目状に熱溶着することによって製作されている。長方形の要素が四つ連なった構造となっており、チャンバは導線部分で繋がっている。これまでの知見から、セルを挟み込むように加圧することで電流量が増加し反応速度が向上することがわかっており、ここではプラスチック製のクリップで挟む方法を採用した。ガス吸収時は、PEFC セルを燃料電池として機能させるために、正極・負極の各電

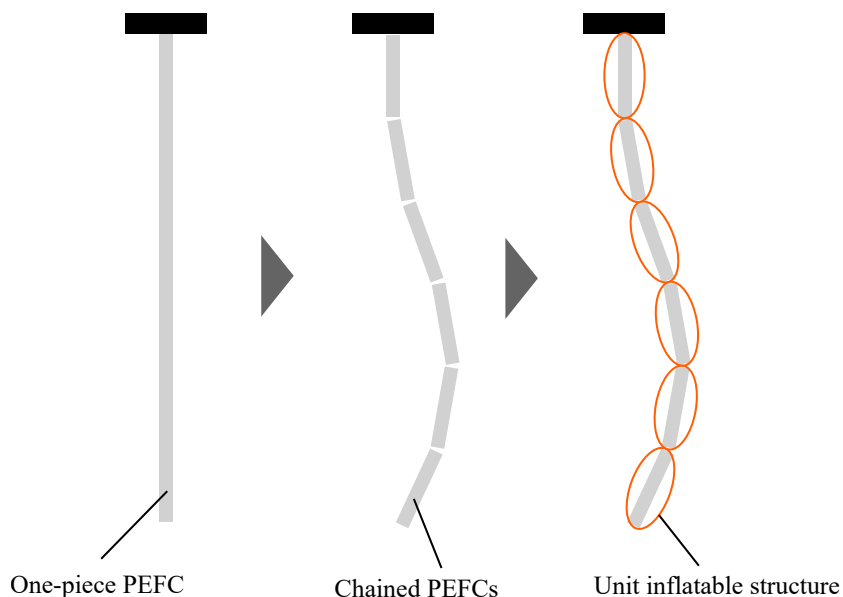


Figure 4.12 The idea of flexible artificial muscles including polymer electrolyte fuel cell.

極雰囲気はそれぞれ水素ガス・酸素ガスである必要がある。水素/酸素ガスの混合を避けるために、ポリエチレンフィルムの隔壁を PAMs の構造に挟み込んで溶着し、水素/酸素チャンバを分けるように配置した。隔壁には長形状の切抜きがあり、ここにセルをはめ込む形で設置し、隙間をホットメルト型接着剤などでシールする。最後に、製作したバッグスアクチュエータのチャンバを、純水で満たす。

4.2.3 製作方法

気液変換駆動を適用したバッグスアクチュエータの製作工程を図 4.13 に、製作した人工筋肉を図 4.14 に示す。(a)PEFC 単体は、既成の燃料電池セル (FCSU-010, Horizon Fuel Cell Japan) からセパレータを取り除き、プロトン交換膜、多孔質触媒層、白金電極メッシュの三種が積層したものを、幅 25 mm、長さ 12.5 mm に加工して使用した。加工後のセル単体の質量は 10g である。(c) 導線とセルの白金電極との接触を固定させるためにスズメッキ線をクリップに挟み込む。(d) 幅 35 mm、長さ 100 mm のポリエチレンフィルム (L100, 株式会社アイセロ) を、セルが填まるようにカットする。(e) 導線は銅箔を重ねたものを幅 5 mm でカットしたものを用意し、隔壁用のフィルム・導線・セルを組み立てる。(f) 隔壁用フィルムとセルの隙間を、ホットメルト型接着剤でシールする。(g) 幅 35 mm、長さ 100 mm のポリエチレンフィルム二枚を用いて、先ほどの複合部品を挟み、四辺とセルの間を幅 5 mm で熱溶着する。

ユニットのチャンバ断面の構造を表した模式図を図 4.15 に示す。この構造は一つのユニットが二つのチャンバから構成されており、水素と酸素が混合しないようにしている。この形態をデュアルチャンバ型と呼称する。式 4.2 から、発生するガスの体積比は水素・酸素が 2:1 であるが、製作を単純化するためにチャンバ容積は均等とした。この場合も、セルを固定する中間フィルムが変形

するため、発生するガスの量に応じてチャンバ容積は適合する。また、ガスが混合する場合との比較用として、隔壁用フィルムを除いたシングルチャンバ型も用意する。シングルチャンバ型では、図 4.13 の製作工程のうち、工程 (d)(f) を省略して製作する。

4.3 駆動実験

空圧人工筋肉へ気液変換駆動を適用し、空気配管を必要としない空圧人工筋肉の動作を実験的に確認する。本節では、実験システムを説明した後に、収縮・維持・初期状態への復帰の様子を観察した結果について述べる。

4.3.1 実験システム

実験システムを模式的に表したものを図 4.15 に示す。上部を固定して垂下させた状態で人工筋肉を設置し、下端部に質量 30 g の錘を取り付けて荷重を負荷した。ただし、シングルチャンバ型では最大変位量を取得するため、無負荷の状態でも駆動させる。アクチュエータの端子と回路をスイッチングし、以下の三つの動作フェイズを切り替えるなかで、画像解析によって収縮量を、端子間の電圧および下流側端子点の電流を測定した。

Phase A: gases generation

電源を用いて PEFC に電力を供給し、水を水素および酸素に電気分解することで、PAMs 内部のガス圧を上昇させる。

Phase B: suspension

端子間を絶縁し、動作を停止する。

Phase C: gases absorption

充電用回路などの抵抗に接続し、PEFC で発生する電力を使用することで、水素/酸素ガスの合成を進め、PAMs 内部のガス圧を下降させる。

4.3.2 実験結果

実験時のバックスアクチュエータの駆動の様子を図 4.18 に示す。また、端子間の電圧値、上流側端子点の電流値および画像解析によって取得した収縮量をシングルチャンバ型については図 4.17(a) に、デュアルチャンバ型については図 4.17(b) にまとめる。Phase A:gas generation を 60 s、Phase B: suspension を 30 s、Phase C:gas absorption を 120 s として実験を実施した。収縮量のグラフから、PAMs 内部でのガス圧発生によって、シングルチャンバ型では約 20 mm、デュアルチャンバ型では約 4 mm の収縮を確認できる。シングルチャンバ型の収縮率 20% ほどであり、従来のバックスアクチュエータと同程度である。一方、デュアルチャンバ型はその二割程度に留まった。これは、チャンバを分けるための隔壁が人工筋肉の動きを妨げていることが原因として考えられる。また、93.6 s 以降に着目すると、どちらの場合においても、負の向きの電流値が観測でき、ガスから水を合成する反応が起きていることが判る。従来研究 [74] に比べて応答が遅いの

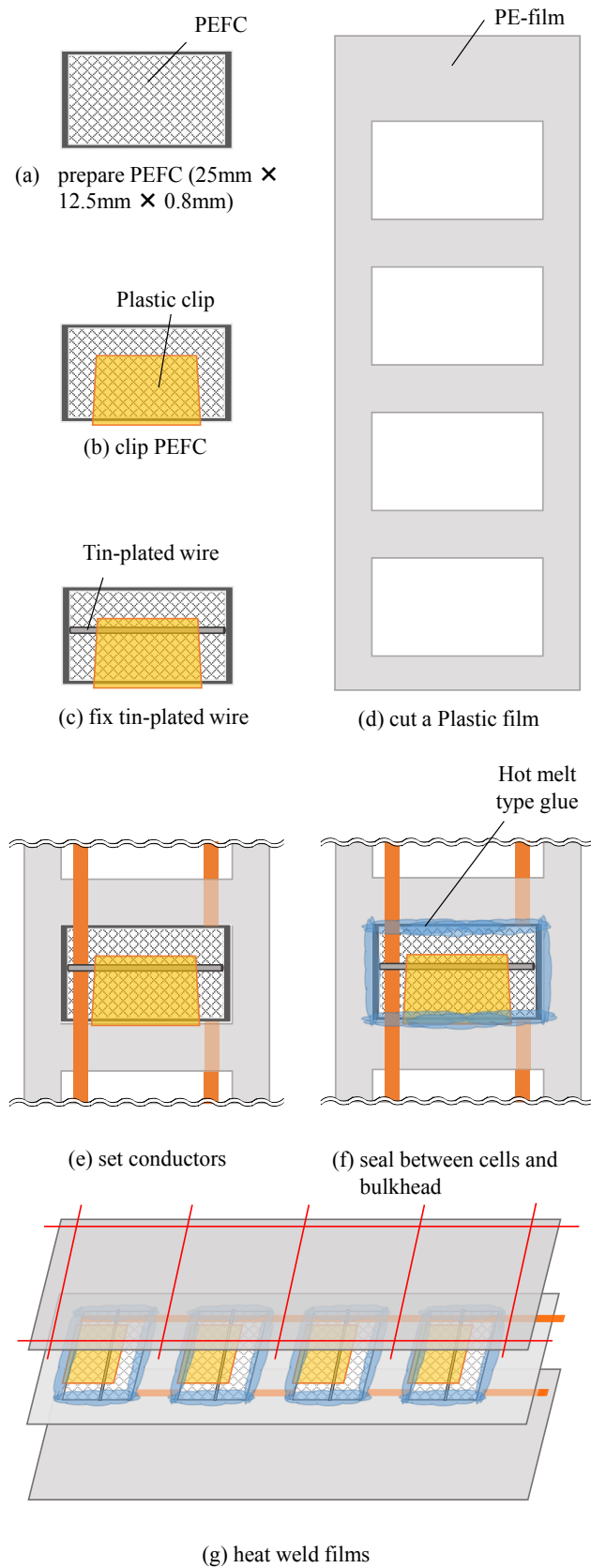
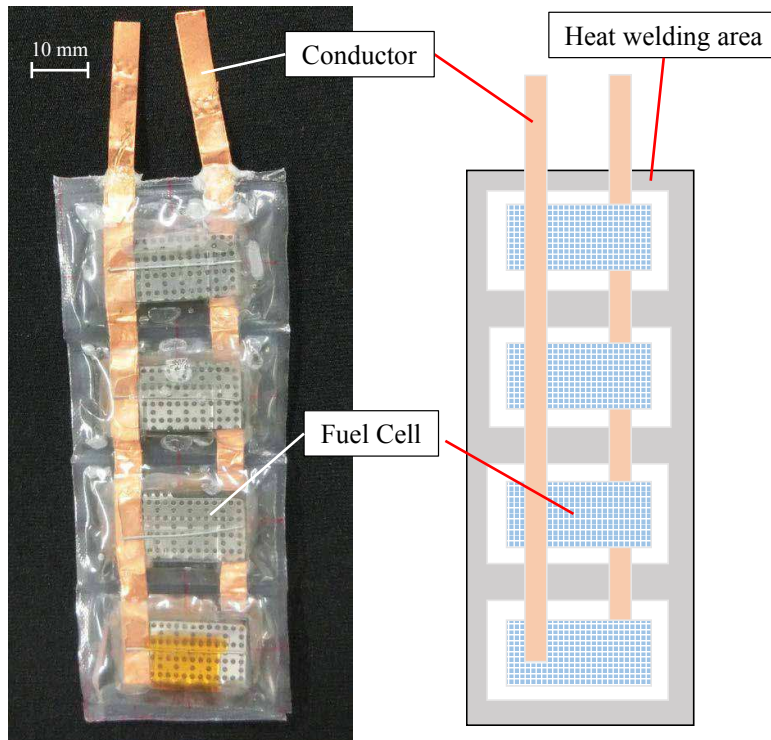
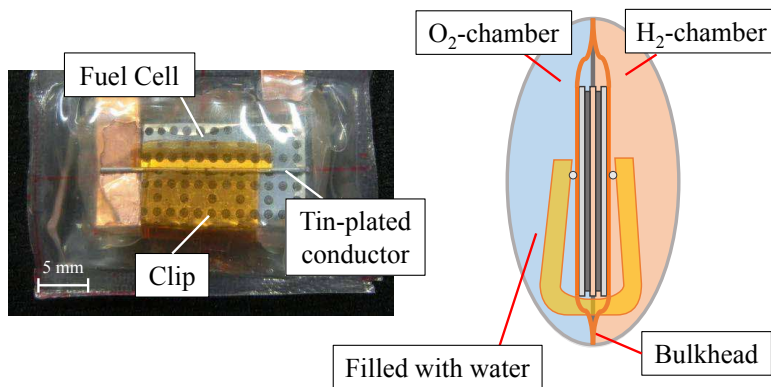


Figure 4.13 Fabrication process of a gas/liquid conversion drive bags-muscle.



(a) gas/liquid exchanging bags-muscle



(b) structure of unit

Figure 4.14 Structure of the prototype gas/liquid conversion drive bags-muscle. PEFCs are built into each of contractile units.

は、PEFCセル構造の固定方法、チャンバ容積の違いに起因すると考えられる。電極の単位面積当たり電流について着目したところ、先行研究 [74] の膨張型アクチュエータは 474 A/m^2 、シングルチャンバ型は 896 A/m^2 、デュアルチャンバ型は 652 A/m^2 であった。この電流値の違いは、セルの構造によって生じると考えられる。従来の燃料電池セルでは、セパレータと呼ばれる板状の部品で挟みこむことでセルを加圧しており、より大型である。今回はアクチュエータへ内蔵しやすくするためにプラスチッククリップによってセルを加圧したが、プラスチックのねじによって強く締め付けることで、より多くのガスが発生することを確認している。また、セパレータの機能である、

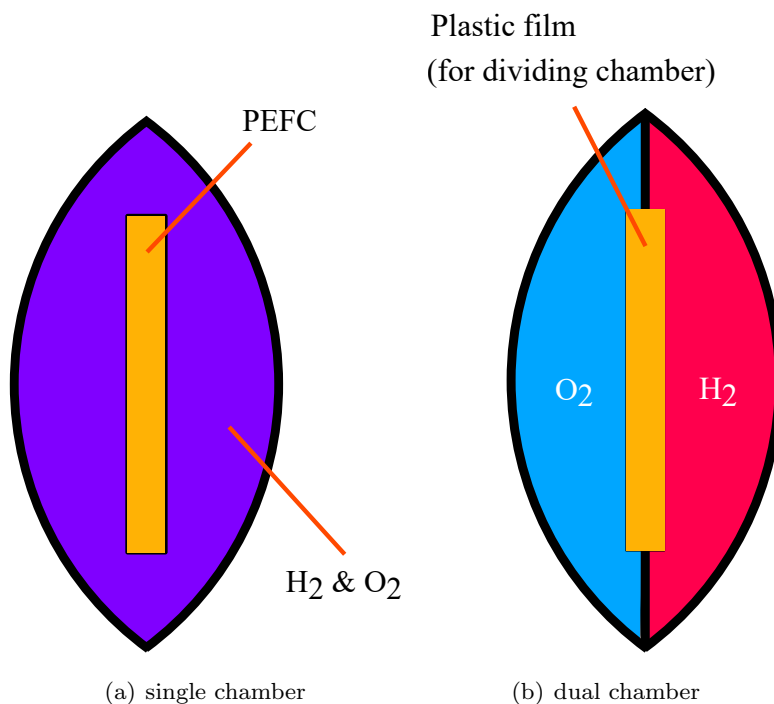


Figure 4.15 Schematic figure of two chamber styles.

気相と液相の付着の調整が行われていないことから、PEFC 表面がガスで覆われ、反応が低下してことが考えられる。

4.4 応用についての議論

実験により、PEFC を含む収縮単位が直鎖状に連節した構造にすることによって、柔軟性を損なうことなく空圧人工筋肉に気液変換駆動を適用し、空気配管を用いることなく駆動可能であることを確認した。多数の人工筋肉が集積した能動布を形成するためには、この柔軟さを損なうことなく細径化することが求められる。

一つの展開として、気液変換駆動を適用したバッグスアクチュエータをそのまま細径化し、これを編織することによって、能動布を構築することが考えられる。本人工筋肉の柔軟さは連節構造からなるものであり、相似的に小型化することは可能である。前章までで扱った McKibben 型人工筋肉と比較した相違点として、人工筋肉の径方向断面における変形形状の異方性が挙げられる。McKibben 型人工筋肉が円形断面のまま均一に膨張するのに対して、バッグスアクチュエータは矩形断面であり、ほとんど厚さ方向に膨張する構造となっている。第 2.4 節で提示した能動布の変形の幾何学モデルでは、織布組織の経糸方向と緯糸方向の各断面における、紐の幅・厚さを用いており、これにそれぞれの値を代入することで近似値を得ることは可能である。しかし、人工筋肉断面が非円形であること、人工筋肉の軸方向について均一に曲がらないことなど、現在想定されていない特徴を加味することが求められる。

また、本章で提案したバッグスアクチュエータを細径化しつつ、更に McKibben 型人工筋肉に

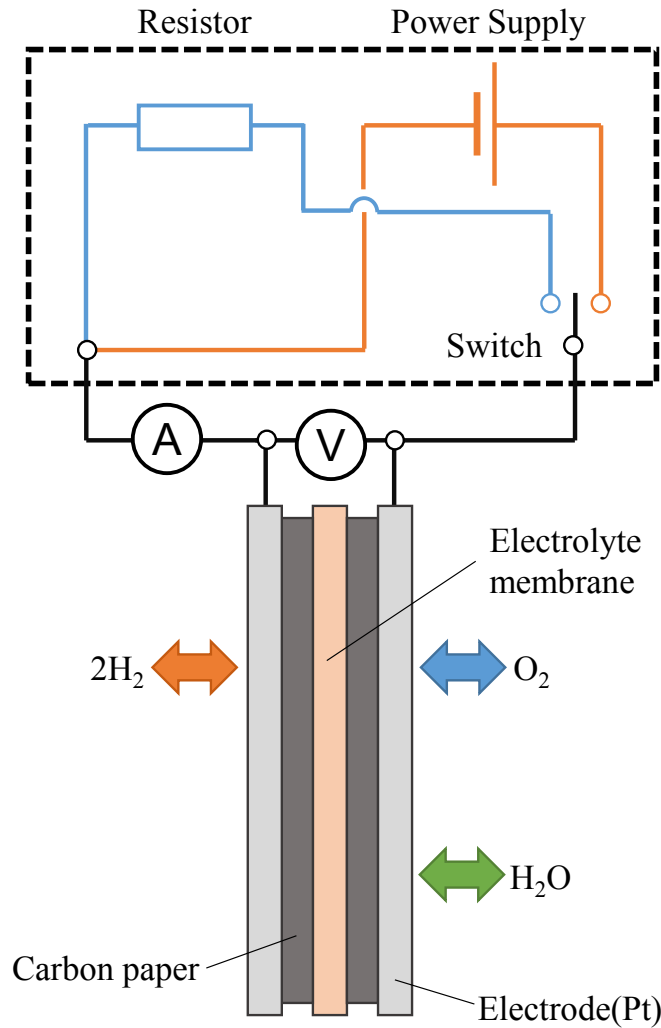
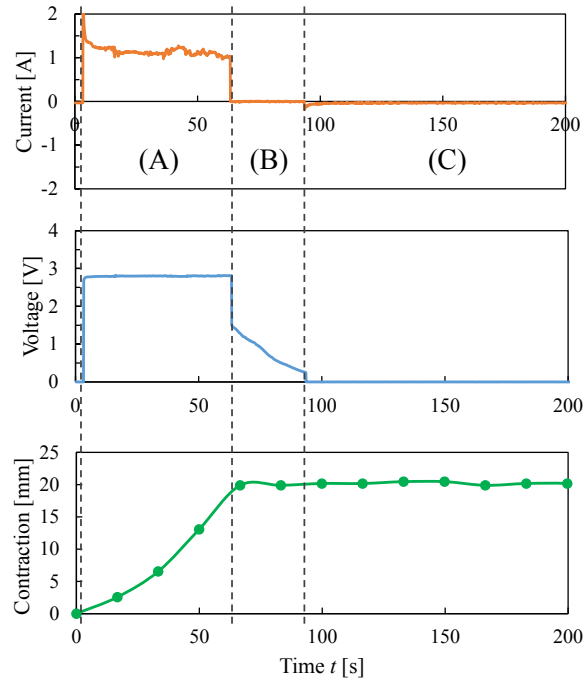


Figure 4.16 Experimental system for gas/liquid conversion drive

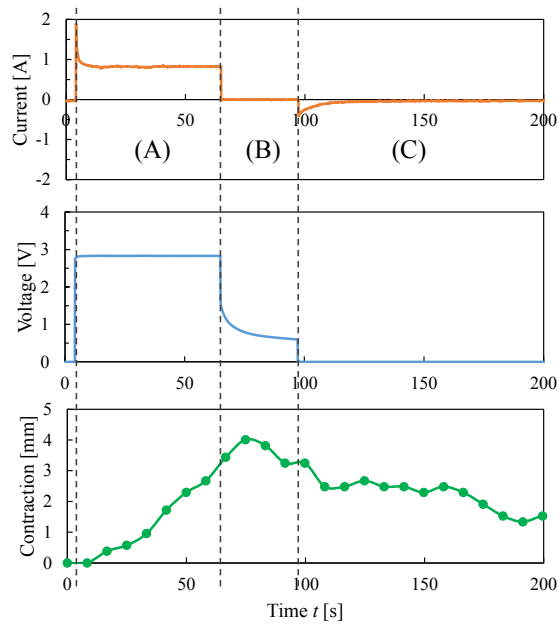
内蔵した構造が考えられる。Wada らは全ての箇所が大きく変形する McKibben 型人工筋肉内部に、柔軟性を確保しつつ、水素/酸素チャンバを分けた状態で PEFC を配置することの必要性を述べている。本章で提案した気液変換駆動を適用したバッグスアクチュエータは、電気入力によって体積が増加するコンポーネントとして捉えられ、Wada らが課題とした「柔軟性の確保」ならびに「各ガスチャンバの分離」を両立した構造を満たしている。この気液変換駆動バッグスアクチュエータを他の空圧人工筋肉に内蔵することによって、人工筋肉の柔軟性を損なうことなく気液変換を適用することが可能となると思われる。容積が大きな人工筋肉に内蔵する場合も、複数のバッグスアクチュエータを並列に内蔵することで対処可能である。

4.5 まとめ

本章では、能動布を多自由度化するうえで求められる、空圧システムの小型・単純化を人工筋肉の開発の側面から進めた。先行研究で提案された空気配管を必要としない駆動方式：「気液変換駆動」をバッグスアクチュエータに適用することにより、外部空圧源ならびに空気配管を必要とせず柔軟な空圧人工筋肉を実現した。特に、能動布に用いることを想定する場合、人工筋肉は柔軟なものである必要がある。燃料電池セルを分割し、連節した形態でアクチュエータに内蔵するため、人工筋肉の柔軟性を損なうことなく、気液変換駆動による動作を可能とした。この無配管の空圧人工筋肉は、低出力・低流量の空圧源でも駆動することができるプラスチックフィルム製人工筋肉：バッグスアクチュエータの内部に燃料電池 (PEFC) を内蔵することによって製作されている。実機を用いた実験において、水素/酸素チャンバを分離しないシングルチャンバ型では約 20 mm の収縮、水素/酸素チャンバを分けたデュエルチャンバ型では、30 g の錘を垂下した状態で約 4 mm の収縮に成功した。復帰フェイズでは、負の電流が観測されており、水の合成反応が正常に起きていることが確認された。動作速度の向上が望まれるものの、常温環境下・電気配線のみでシステムで空圧人工筋肉を動作可能であることを実証したとともに、能動布を形成するための柔軟性も確保することに成功した。駆動するために空気配管を必要としないため、能動布の可搬性が高まり、能動布の応用を拡大した。

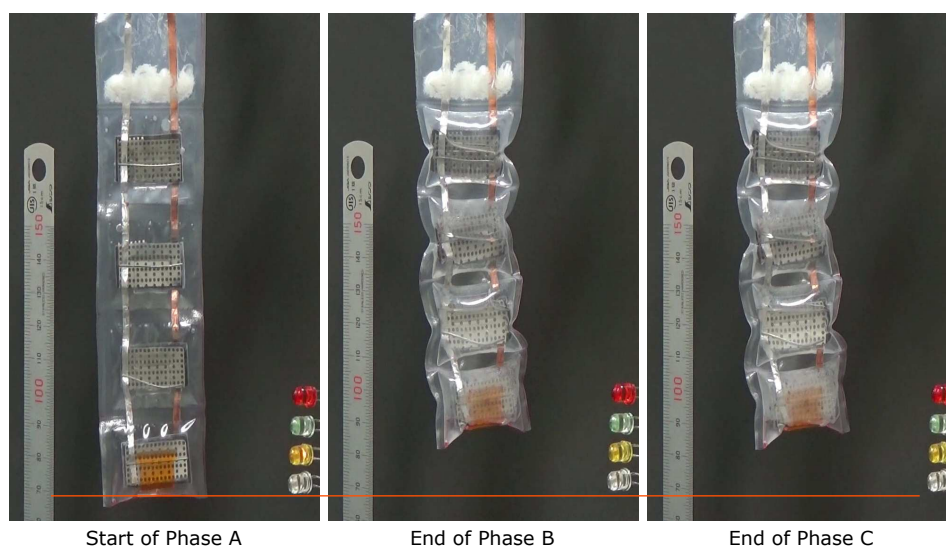


(a) single chamber with no-loaded



(b) dual chamber with 30 g loaded

Figure 4.17 Result of driving experiment of gas/liquid conversion drive bags-muscles with sequence control (applied voltage for gas generation: 2.9 V). Measured displacement, current, and voltage

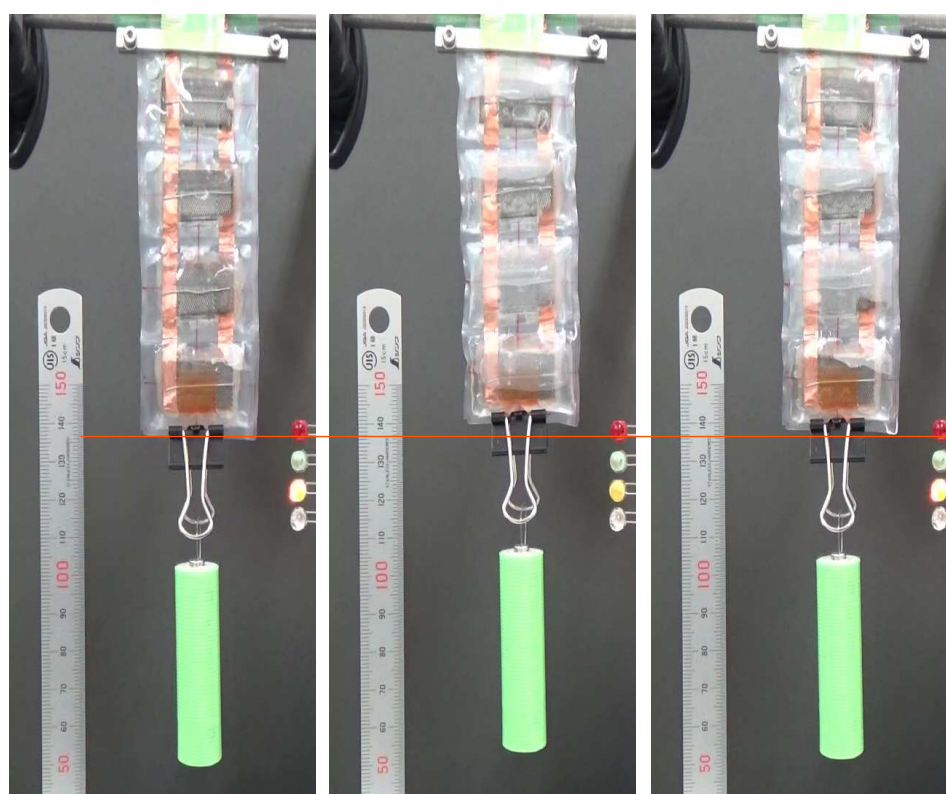


Start of Phase A

End of Phase B

End of Phase C

(a) single chamber with no-loaded



Start of Phase A

End of Phase B

End of Phase C

(b) dual chamber with 30 g loaded

Figure 4.18 Result of driving experiment of gas/liquid conversion drive bags-muscles with sequence control (applied voltage for gas generation: 2.9 V). Measured displacement, current, and voltage

第5章

結論

5.1 結論

本論文では、細径の空圧人工筋肉を編織した布状の能動機構を提案し、その基礎的原理の解明と、より複雑な形態への応用技術の検討を行った。結果として、人工筋肉と紐のみという少ない種類の素材を用いて、編織組織という画一的な構造でありながら、交錯させる糸の種類や編織のパラメータを変更することによって、様々な形状・駆動の機構が実現可能であることを実証した。部品の種類を削減し、繰り返し動作による製作が可能な機構の基礎を推進したことによって、機械システムを一般社会へ普及させる一助となると期待する。

第1章「序論」では、本研究が懸念する機械部品の多様さ・複雑さについて言及し、これを解消する種々のセル構造体技術について概観した。また、少ない素材から構築可能な格子型セル構造体の一形態として、空圧人工筋肉からなる能動布を取り上げ、その課題・展望について言及し、研究の目的を設定した。

第2章「空圧人工筋肉を用いた平面状能動布の変形解析」では、能動布の構造を整理し、変形原理を明らかにするとともに、実際に製作した能動布を用いた特性評価実験について述べた。能動布は、人工筋肉を含めた索体が縦横に走った状態で交錯した格子状構造であり、その構造を簡略に表すための手法ならびに能動布の変形原理を述べた。作成した幾何学モデルでは、能動布がもつ織布組織のうち、経糸の方向と緯糸の方向における繊維の変形に着目することで、布の表裏で偏りのある能動布で生じる湾曲変形の発生原理を示した。経糸の細径 McKibben 型人工筋肉とした平坦な織布を対象として、四種類の編織組織ならびに四種類の緯糸を適用した能動布を実際に製作し、経糸方向・緯糸方向の収縮率ならびに曲率をもとに現れる変形形態を分類した。光学式 3D スキャナを用いて得られた形状情報をもとに、能動布の曲面形状を取得し、曲面重心を通る縦糸・緯糸方向の断面と曲面の交差曲線に着目することで、能動布の形状を観察した。計測の結果、能動布は基本的に平坦な長方形から鞍型の形状へ変形することを明らかにした。この鞍型形状は、編織組織ならびに交錯させる緯糸の種類によって変化し、経糸方向に沿った曲げが支配的な「山型」、横糸方向に沿った曲げが支配的な「谷型」、曲げの生じない平坦な「平型」で細分化できる。作成した幾何学モデルと比較すると、モデルで支配的であった織布組織の偏りではなく、組織の交錯密度が大きいものほど大きな湾曲変形が確認された。また、交錯させる糸が異なる三種類の平型の能動布を対象

として、人工筋肉の駆動が能動布の収縮変形に及ぼす影響、特に人工筋肉の膨張による能動布の横糸方向の収縮に関する特性を、実験的に明らかにした。この実験から、異なる種類の緯糸を用いることにより、能動布の緯糸方向の収縮力特性が大きく変化することを確認した。最大収縮力を示したものは、非弾性の細い紐からなる能動布であり、圧力 0.6 MPa 印加時には 131 N を確認した。

第 3 章「空圧人工筋肉の螺旋走行からなる円筒状能動布への展開」では、立体的な繊維走行を含む能動布の形態として、人工筋肉を三次元螺旋状に走行させて製作する円筒状の能動布を取り上げ、人工筋肉の駆動と円筒構造の変形の関係性を明らかにした。実験に先立ち、円筒構造の側面上における人工筋肉および織布組織の走行方向に着目した、人工筋肉の駆動と円筒構造の変形を関連付ける変換モデルを示した。このモデルでは、立体的な走行からなる構造でも、その筋走行に応じた拡大収縮変換を行うことで立体構造の変形を捉えることに成功した。実験結果をモデルを比較し、円筒構造の径方向・軸方向の駆動傾向が、平均二乗誤差 7% 以内で一致することを確認した。

第 4 章「配管を必要としない柔軟空圧人工筋肉の実現」では、能動布を多自由度で運用する際に想定される、空圧システムの複雑化・大型化に対応するための新型無配管人工筋肉の実現を進めた。気液変換駆動は、燃料電池セルを空圧人工筋肉に内蔵し、水の電気分解/合成反応を行うことで水素/酸素ガスの発生・吸収を閉じたチャンバ内で起こすものである。燃料電池セルを分割・小型化し、低圧域で駆動可能な人工筋肉へ内蔵することにより、外部ガス圧源・制御用バルブ・空気配管といった空圧コンポーネントを削減し、構造的な柔軟性を有する無配管人工筋肉を実現した。水素/酸素チャンバを分けない構造のものでは、気液変換駆動を適用していない通常のものと同程度の 20% の収縮に成功したものの、チャンバを分けた構造のものでは 4% の収縮に留まる結果となった。一方で、チャンバを分けない場合、合成反応が起きないため、伸長した状態までの復帰がなされないが、分けたものでは復帰動作を確認した。本成果により、能動布を構成する人工筋肉へ空気配管を配する必要がなくなり、能動布の可搬性、応用可能性が高まった。

5.2 今後の課題

本研究では、能動布をロボットの機構構造として運用するための基礎的検討を、「平坦な布」「立体的な筋走行を含む構造」「多自由度化のための駆動方式」の三つの段階それぞれにおいて取り組んだ。

平坦な布における取り組みでは、織布を「正則かつ交錯が各糸方向に連続しない三原組織」という基本的な組織に限定し、紐の幾何学的な走行形状を検討するに留まっている。この検討の中では、経糸と緯糸を厳密に区別し、経糸は真直であるとし、緯糸が経糸に沿って湾曲すると仮定した幾何学的なモデルを立てている。しかし実際には、経糸と緯糸は互いに押し合い、それぞれの曲げ剛性に応じた形状に屈折するため、より正確な変形解析のために経糸と緯糸の力学的関係を明らかにすることが望ましい。その過程で、端部の拘束や外力などの境界条件の作用を含めることによって、能動布の力学的設計を行うための手法を開発することが求められる。特に、紐の間の摩擦による影響は大きく、損失の低減、剛性の向上といった複数の観点から評価すべき主要な課題である。

本研究では、能動布の緯糸方向端部は柔軟なシリコンラバーによる端末処理を行っており、経糸方向端部は人工筋肉を大きく張り出し、折り返したものを製作している。このため、端部におけ

る拘束はほとんどないものとし、初期形状における内部応力が生じないと考えられた。しかし、実際に能動布を運用する場合、能動布を何らかの構造に取り付けることになるため、端部における境界条件が変化すると考えられる。例として、能動布を人工筋肉のように収縮するアクチュエータとして用いる場合、能動布には引張の反力が作用する。この際、この引っ張り力が作用する向きの紐の張力が増加するため、より直線的な走行形状をとるようになり、交錯する他の紐を強く押す力が発生する。これらの織布組織内部における力学的関係を含めた検討が必要である。

能動布の立体形状への発展では、二次元で表現可能な立体である三次元螺旋を採用することで、索体である人工筋肉で容易に立体構造を形成した。その変形を捉えるための変換モデルでは、人工筋肉が円筒側面上に整列するとして近似しており、より大きく人工筋肉が駆動する場合、紐が複雑に変形して動く実態から乖離していくことが考えられる。人工筋肉が大きく湾曲した条件においても、適用可能なモデルの構築が必要である。特に、人工筋肉が円筒構造内側を短絡するような場合に対しては、上端から下端まで直線的に結ばれた一葉双曲面として近似することで、より精確に解析できると考えられる。また、円筒形状以外のより複雑な立体形状、特に中実の構造についても検討すべきである。今後、索体からなる機構技術を推進するうえで、より大きく空間に張り出すような形状の要求が高まると考えられる。このために、任意の方向への荷重に耐えるような剛性を有する中実の立体構造として、索体を充填するように編織する、多層織組織に関する検討が有効であると期待する。

今後、能動布をロボットなどへ応用していくうえで、自由度の増加に伴う空圧システムの大型化は考慮すべき課題である。本研究では、その一つの対案として、空圧人工筋肉内で水の電気分解/合成反応を行う「気液変換駆動を取り上げ、構造を分割し連節させた構造にすることで柔軟な無配管人工筋肉を実現した。しかし、ガスの発生流量が少なく、十分な収縮率に達するまでに数十秒の反応時間を要しており、応答性の向上が求められる。反応流量を増加させるために燃料電池セルを大型化することは、柔軟性の確保、人工筋肉の細径化の観点から好ましくない。セルをさらに分割するなど、人工筋肉の構造的な柔軟性を損なわずに大型燃料電池セルを内蔵する工夫が求められる。

5.3 今後の展望

能動布は人工筋肉を含む索体を絡ませることによって形成されるソフトメカニズムであり、樹脂や金属からなる固い部品を含まない構造体である。薄い形状でありながら、大きな湾曲変形を達成しており、これまでアクチュエータを組み付けることが難しい狭い箇所にも機構を取り付けることを可能とした。一つの応用先として、骨格構造を持たない衣服のようなウェアラブルデバイスが考えられる。近年研究開発が進められているパワーアシストスーツでは、アクチュエータの出力を人体へ十分に作用させるために高剛性のフレームが用いた機構を使用されている。これらのアクチュエータ・機構は大きく、固い部品からなるため、人体に装着できる箇所は限定される。能動布はあくまでも布の形態の機構であるため、衣服と同様に人体を覆うように装着することが可能である。また、この機構を形成する素材は紐と人工筋肉のみであり、単純な繰り返し動作による製造が期待できる。これは機構製造のハードルを下げ、ロボットの更なる普及に貢献するものであると考える。

参考文献

- [1] Matthew Johannes, John D. Bigelow, James M. Burck, Stuart D. Harshbarger, Matthew Kozlowski, and Thomas Van Doren. An overview of the developmental process for the modular prosthetic limb. *Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics Laboratory)*, Vol. 30, pp. 207–216, 01 2011.
- [2] Molecubes Festo AG & Co. KG. https://www.festo.com/rep/en_corp/assets/pdf/Molecubes_en.pdf. accessed 19 Dec. 2018.
- [3] John W. Romanishin, Kyle Gilpin, Sebastian Claiici, and Daniela Rus. 3D M-Blocks: Self-reconfiguring robots capable of locomotion via pivoting in three dimensions. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1925–1932. IEEE, may 2015.
- [4] David Brandt, David Johan Christensen, and Henrik Hautop Lund. ATRON Robots: Versatility from Self-Reconfigurable Modules. In *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 26–32. IEEE, aug 2007.
- [5] A Sproewitz, P Laprade, Stephane Bonardi, Mikael Mayer, R Moeckel, Pierre-Andre Mudry, and A J Ijspeert. Roombots—Towards decentralized reconfiguration with self-reconfiguring modular robotic metamodules. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1126–1132. IEEE, oct 2010.
- [6] Michael Rubenstein, Christian Ahler, and Radhika Nagpal. Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3293–3298. IEEE, may 2012.
- [7] UR5 Universal Robots A/S. <https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/>. accessed 19 Dec. 2018.
- [8] MARA Actronic Robotics. <https://acutronicrobotics.com/docs/products/mara>. accessed 19 Dec. 2018.
- [9] Molecubes FestoHQ. <https://www.youtube.com/watch?v=wUJkX8fn1jY>. updated 17 April 2009, accessed 19 Dec. 2018.
- [10] 上田和宏. 注文に応じて設計する lsi. *電気學會雑誌*, Vol. 107, No. 4, pp. 321–324, 1987.
- [11] 新野俊樹. 積層造形技術-ラピッドプロトタイピングからラピッドマニュファクチャリングへ-. *精密工学会誌*, Vol. 76, No. 12, pp. 1340–1344, 2010.

- [12] Popescu George A., Mahale Tushar, Gershenfeld Neil. Digital materials for digital printing. In *2006 International Conference on Digital Fabrication Technologies*, 2006.
- [13] Kenneth C. Cheung and Neil Gershenfeld. Reversibly assembled cellular composite materials. *Science*, Vol. 341, No. 6151, pp. 1219–1221, 2013.
- [14] Jonathan Hiller and Hod Lipson. Design and analysis of digital materials for physical 3d voxel printing. *Rapid Prototyping Journal - RAPID PROTOTYPING J*, Vol. 15, pp. 137–149, 03 2009.
- [15] Jonathan D. Hiller and Hod Lipson. Fully recyclable multi-material printing, 2009.
- [16] Joris Laarman. Digital matter. <https://www.jorislaarman.com/work/digital-matter/>, 2011. 2018-12-18 閲覧.
- [17] Ryo Suzuki, Junichi Yamaoka, Daniel Leithinger, Tom Yeh, Mark D. Gross, Yoshihiro Kawahara, and Yasuaki Kakehi. Dynablock: Dynamic 3D Printing for Instant and Reconstructable Shape Formation. In *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '18*, pp. 99–111, New York, New York, USA, 2018. ACM Press.
- [18] 関島慶太, 増田恒夫, 田中浩也. デジタル・マテリアルを用いた分解組立可能な立体形状試作システム. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 20, No. 2, pp. 97–105, 2015.
- [19] 豊田自動織機. 織機. <https://www.toyota-shokki.co.jp/products/textile/shokki/index.html>. 2018-12-19 閲覧.
- [20] コクブンリミテッド. 標準型ブレード. <http://www.kokubun.jp/products/standard.php>. accessed 2018-12-19.
- [21] 島精機. コンピュータ横編み機. <http://www.shimaseiki.co.jp/product/knit/sir122/>. accessed 2018-12-19.
- [22] 伊予機械製作所. 不織布加工機. <http://iyokikai.com/publics/index/28/>. accessed 2018-12-19.
- [23] Taoyu Wan and George K. Stylios. Shape memory training for smart fabrics. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 29, No. 3-4, pp. 321–336, 2007.
- [24] J. Berzowska and M. Coelho. Kukkia and vilkas: kinetic electronic garments. In *Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05)*, pp. 82–85, Oct 2005.
- [25] Ali Maziz, Alessandro Concas, Alexandre Khaldi, Jonas Stålhand, Nils-Krister Persson, and Edwin W. H. Jager. Knitting and weaving artificial muscles. *Science Advances*, Vol. 3, No. 1, 2017.
- [26] A. Simeonov, T. Henderson, Z. Lan, G. Sundar, A. Factor, J. Zhang, and M. Yip. Bundled super-coiled polymer artificial muscles: Design, characterization, and modeling. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 3, pp. 1671–1678, July 2018.
- [27] M. C. Yip and G. Niemeyer. High-performance robotic muscles from conductive nylon sewing thread. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2313–2318, May 2015.

- [28] Yuki Funabora. Flexible Fabric Actuator Realizing 3D Movements Like Human Body Surface for Wearable Devices. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 6992–6997. IEEE, oct 2018.
- [29] Akihiro Ohno, Yota Yamamoto, Megumi Oguro, and Koichi Suzumori. Comparison in characteristics of textile woven by thin pneumatic artificial muscle. *The Abstracts of the international conference on advanced mechatronics : toward evolutionary fusion of IT and mechatronics : ICAM*, Vol. 2015.6, pp. 43–44, 2015.
- [30] サディチアイバク, 大野晃寛, 鈴森康一. Development of a human trunk exoskeleton with pneumatic artificial muscles. *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, Vol. 2015, pp. _1A1-P01_1–_1A1-P01_3, 2015.
- [31] 車谷駿一, 鈴森康一, 難波江裕之. 三つ編み構造に基づく細径マッキベン人工筋の織布化. 第16回システムインテグレーション部門講演会講演概要集, Vol. 2015, pp. 620–622, 2015.
- [32] 小森尚志. 織物の力学と計測法の進歩. *繊維機械学会誌*, Vol. 51, No. 9, pp. P487–P492, 1998.
- [33] Guodong Fang and Jun Liang. A review of numerical modeling of three-dimensional braided textile composites. *Journal of Composite Materials*, Vol. 45, No. 23, pp. 2415–2436, 2011.
- [34] 大輔池上, 祐樹島上. 平織組織の織物強伸度予測. *愛知県産業技術研究所研究報告*, Vol. 7, pp. 132–135, dec 2008.
- [35] 榊原一泰, 横山敦士. 織物構造体の二軸荷重下における変形挙動シミュレーション. *Journal of Textile Engineering*, Vol. 53, No. 2, pp. 79–86, 2007.
- [36] 平井恒夫, 仙波卓弥, 茨木信彦. 織布設計への応用について. *繊維機械学会誌*, Vol. 35, No. 6, pp. T87–T96, 1982.
- [37] 井上真理. 繊維集合体としての布の特性について. *繊維学会誌*, Vol. 64, No. 8, pp. P246–P251, 2008.
- [38] 篠原昭. 繊維集合体の物性. *繊維学会誌*, Vol. 50, No. 6, pp. P225–P228, 1994.
- [39] 土井俊幸, 脇元修一, 鈴森康一, 神田岳文. 1p1-b03 細径 mckibben 型人工筋の集積化に関する研究 : 第1報:収縮率と収縮力の静特性の測定. *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, Vol. 2015, pp. _1P1-B03_1–_1P1-B03_4, 2015.
- [40] 本宮達也. *繊維の百科事典*. 丸善, 2002.
- [41] ハヤミ工産 Co.Ltd. http://www.hayami.co.jp/hamilon/products/super_cord.html. accessed 19 Dec. 2018.
- [42] G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, and S. Manesis. A survey on applications of pneumatic artificial muscles. In *2011 19th Mediterranean Conference on Control Automation (MED)*, pp. 1439–1446, June 2011.
- [43] R. Niiyama, D. Rus, and S. Kim. Pouch motors: Printable/inflatable soft actuators for robotics. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6332–6337, May 2014.

- [44] Allan Joshua Veale, Sheng Quan Xie, and Iain Alexander Anderson. Modeling the peano fluidic muscle and the effects of its material properties on its static and dynamic behavior. *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 6, p. 065014, 2016.
- [45] Shane Q. Xie Allan Joshua Veale, Iain A. Anderson. The smart peano fluidic muscle: a low profile flexible orthosis actuator that feels pain, 2015.
- [46] 平光立拓, 西岡靖貴, 安田寿彦. 低圧駆動可能かつ極軽量なシート状ソフトアクチュエータの開発. 第32回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1M1-01, 2014.
- [47] Ryuma Niiyama, Xu Sun, Cynthia Sung, Byoungkwon An, Daniela Rus, and Sangbae Kim. Pouch motors: Printable soft actuators integrated with computational design. *Soft Robotics*, Vol. 2, No. 2, pp. 59-70, 2015.
- [48] Masayuki Takaoka, Koichi Suzumori, Shuuichi Wakimoto, Kazuo Iijima, and Takahiro Tokumiya. Fabrication of thin McKibben artificial muscles with various design parameters and their experimental evaluations. *The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2013)*, pp. 82-82, 2013.
- [49] s-muscle Co. Ltd. <https://www.s-muscle.com/>. accessed 19 Dec. 2018.
- [50] A. Garriga-Casanovas, A. M. Faudzi, T. Hiramitsu, F. Rodriguez y Baena, and K. Suzumori. Multifilament pneumatic artificial muscles to mimic the human neck. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 809-816, Dec 2017.
- [51] A. A. Mohd Faudzi, J. Ooga, T. Goto, M. Takeichi, and K. Suzumori. Index finger of a human-like robotic hand using thin soft muscles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 1, pp. 92-99, Jan 2018.
- [52] T. Abe, S. Koizumi, H. Nabae, G. Endo, and K. Suzumori. Muscle textile to implement soft suit to shift balancing posture of the body. In *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, pp. 572-578, April 2018.
- [53] 宣裕, 高橋勇人, 鈴森康一, 小池英樹. 指屈筋と指伸筋の構造を模倣したソフトロボットグローブ. 第36回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1B3-01, Sep 2018.
- [54] Y. Funabara. Prototype of a fabric actuator with multiple thin artificial muscles for wearable assistive devices. In *2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 356-361, Dec 2017.
- [55] 裕太, 遠藤信綱, 釜道紀浩. 舌機構のための柔軟空気圧湾曲アクチュエータ-応答特性の基礎検証-. 第36回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 3K3-03, Sep 2018.
- [56] T. Vo-Minh, T. Tjahjowidodo, H. Ramon, and H. Van Brussel. A new approach to modeling hysteresis in a pneumatic artificial muscle using the Maxwell-slip model. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 16, No. 1, pp. 177-186, Feb 2011.
- [57] 経済産業省. Jis 1 0206 : 繊維用語 (織物部門). <http://www.jisc.go.jp/>, Nov. 1999.
- [58] 下村寿. 繊維製品の分類. 繊維製品消費科学会誌, Vol. 8, No. 5, pp. 279-285, 1967.
- [59] 繊維学会. 繊維便覧 第三版. 丸善, 2014.
- [60] R. Adam Bilodeau, E. L. White, and R. K. Kramer. Monolithic fabrication of sensors

- and actuators in a soft robotic gripper. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2324–2329, Sept 2015.
- [61] Bryan N Peele, Thomas J Wallin, Huichan Zhao, and Robert F Shepherd. 3d printing antagonistic systems of artificial muscle using projection stereolithography. *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 10, No. 5, p. 055003, 2015.
- [62] M. Wehner, R. L. Truby, D. J. Fitzgerald, B. Mosadegh, G. M. Whitesides, J. A. Lewis, and R. J. Wood. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots. *Nature*, Vol. 536, pp. 451–466, 2016.
- [63] Siddharth Sanan, Peter S. Lynn, and Saul T. Griffith. Pneumatic torsional actuators for inflatable robots. *J. Mechanisms Robotics*, Vol. 6, No. JMR-13-1081, pp. 137–149, 04 2014.
- [64] 横山敦士, 前川善一郎, 濱田泰以, 山木薫, 岩崎康彦. 三次元複合材料の強化材の組織り創成に関する研究: 第1報, 平打および丸打組物構造の場合. 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 54, No. 502, pp. 1181–1186, 1988.
- [65] 内田盛也. 先端複合材料の設計と加工. 工業調査会, 1988.
- [66] 経済産業省. 油圧・空気圧システムおよび機器-図記号及び回路図-第1部: 図記号. <http://www.jisc.go.jp/>, Nov. 2007. 2018-12-19 閲覧.
- [67] K. Ikuta, H. Ichikawa, K. Suzuki, and T. Yamamoto. Micro hydrodynamic actuated multi segments catheter for safety minimally invasive therapy. In *International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2640–2645, 2003.
- [68] Y. Nishioka, K. Suzumori, T. Kanda, and S. Wakimoto. Multix pneumatic control method for multi-drive system. Vol. 164, pp. 88–94, 2010.
- [69] 敬淑義, 北川能, 留滄海, 塚越秀行. ウェアラブル空圧システムのための音響で作動する制御弁に関する研究. 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 39, No. 3, pp. 54–60, 2008.
- [70] 敬淑義, 北川能, 留滄海, 塚越秀行. ウェアラブル空圧システムのための音響で作動する制御弁に関する研究. 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 39, No. 5, pp. 81–87, 2008.
- [71] K. Suzumori, N. Osaki, J. Misumi, A. Yamamoto, and T. Kanda. A multiplex pneumatic actuator drive method based on acoustic communication in air supply line. pp. 2795–2800, 2014.
- [72] 北川能, 呉海帆, 塚越秀行, 朴聖煥. 三重点における相変化を利用した携帯空圧源の開発. 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 36, No. 6, pp. 158–164, 2005.
- [73] K. Nakahara, K. Narumi, R. Niiyama, and Y. Kawahara. Electric phase-change actuator with inkjet printed flexible circuit for printable and integrated robot prototyping. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1856–1863, May 2017.
- [74] Akira Wada, Hidehiro Kametani, Koichi Suzumori, and Shuichi Wakimoto. Development of a hose-free fma driven by a built-in gas/liquid chemical reactor. *International Journal of Automation Technology*, Vol. 10, No. 4, pp. 511–516, 2016.

- [75] A. Wada, K. Suzumori, and H. Kametani. New gas rubber actuator driven with electrolysis/synthesis of water. In *Proceeding of the 6th Int. Conf. on Manufacturing, Machine Design and Tribology*, p. J114021, 2015.
- [76] 和田晃, 鈴森康一, 遠藤玄, 難波江裕之. 気液可逆反応を利用したガス圧アクチュエータ. 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–B03, 2017.
- [77] Horizon Fuel Cell Japan. <http://www.horizonfuelcell.co.jp>. 2018-12-19 閲覧.
- [78] 和田晃. 水分解/合成制御による自立ソフトラバーアクチュエータ. PhD thesis, 東京工業大学 大学院 理工学研究科 機械宇宙システム専攻, 2016.
- [79] 和田晃, 鈴森康一, 脇元修一. 可逆化学反応現象を利用したガス圧制御システムの開発 (第 3 報: エネルギー回生の実現). 日本機械学会 2013 年度年次大会, p. J114021, 2013.
- [80] JIS C 8800:2008. 燃料電池発電用語. <http://kikakurui.com>. 2018-12-19 閲覧.
- [81] 山田一郎. 燃料電池システムの研究開発動向. *NTT R&D*, Vol. 46, No. 4, p. 295, 1997.
- [82] 高田洋吾, 荒木良介, 野々垣元博, 海老田一章, 石井利長, 脇坂知行. 小型・超軽量自立型固体高分子形燃料電池の開発と小型魚ロボットへの応用 (熱工学, 内燃機関, 動力など). 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 76, No. 764, pp. 650–659, 2010.
- [83] 東北大学徳増研究室. 固体高分子形燃料電池 (pefc) とは? <http://www.ifs.tohoku.ac.jp/nanoint/jpn/about/page4.html>. 2018-12-19 閲覧.
- [84] 和田晃, 安積欣志, 堀内哲也, 鈴森康一, 遠藤玄, 難波江裕之. 気液可逆反応を利用したガス圧アクチュエータ. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2017, pp. 2P1–D03, 2017.

業績一覧

印刷論文

- [1] 平光立拓, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄. 人工筋肉の三次元螺旋走行からなる円筒状多繊維筋構造メカニズムの試作. 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 862, 18-00083, Jun. 2018.
- [2] 平光立拓, 鈴森康一, 難波江裕之, 遠藤玄. 細径人工筋肉からなる織布状ソフトメカニズムの試作と評価. 設計工学, Nov. 2018.

査読付国際会議

- [1] Tatsuhiro Hiramitsu, Akira Wada, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, Gen Endo. Hose-Free Pneumatic Bags-Muscle Driven by Gas/Liquid Conversion. Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), WeP1B.2, Nov. 2016.
- [2] Tatsuhiro Hiramitsu, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, Gen Endo. Experimental Evaluation of Textile Mechanisms Made of Artificial Muscles. 2019 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft).(accepted)

口頭発表

- [1] 平光立拓, 鈴森康一, 難波江裕之, 遠藤玄. 細径人工筋肉群による心臓状ソフトメカニズムの試作. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集, 1A1-I07, May 2017.
- [2] 平光立拓, 和田晃, 鈴森康一, 難波江裕之, 遠藤玄. 気液変換式ガス圧源を内蔵したバッグズ人工筋肉の試作. 第 34 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, RSJ2016AC1X1-04, Sep. 2016.

本論文に関係しない業績

査読付国際会議

- [1] Arnau Garriga-Casanovas, Ahmad 'Athif Mohd Faudzi, Tatsuhiro Hiramitsu, Ferdinando Rodriguez y Baena, Koichi Suzumori. Multifilament Pneumatic Artificial Muscles to Mimic the Human Neck. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 809-816, Dec. 2017.

口頭発表

- [1] 平光立拓, 西岡靖貴, 安田寿彦. 曲折自在な人工筋肉を利用した巻き付き式回転機構の開発. 第33回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, RSJ2015AC3A3-03, Sep. 2015.
- [2] 平光立拓, 西岡靖貴, 安田寿彦. プリーツ/バッグ複合構造による屈曲型ソフトアクチュエータの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 1A1-A04, May 2015.
- [3] 平光立拓, 西岡靖貴, 安田寿彦. 低圧駆動可能かつ極軽量なシート状収縮型ソフトアクチュエータの開発. 第32回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, RSJ2014AC1M1-01, Sep. 2014.
- [4] 平光立拓, 西岡靖貴, 安田寿彦. 屈曲型インフレーターブルフレキシブルアクチュエータの剛性強化構造の提案. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 2A2-N01, May 2014.
- [5] 西岡靖貴, 天瀬英之, 平光立拓, 安田寿彦. 折り込み角度の設計による収縮型・巻き付き型極軽量ソフトアクチュエータの試作. 第31回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, RSJ2013AC3D2-01, Sep. 2013.

謝辞

本学位論文の執筆とこれに関わる研究を行うにあたり、ご指導ご鞭撻を頂きました鈴木康一教授に謹んで感謝の意を表します。博士課程への進学を受け入れていただき、研究活動を導いていただいたことを心より感謝いたしております。また、様々な視点から有益なご指摘を頂きました遠藤玄准教授に謹んで感謝の意を表します。明確なご助言を頂いたことで、幾度となく問題点を整理することが出来ました。難波江裕之助教には、日頃より、多くのご意見・ご指導をいただき、心より感謝致します。進路や研究生活といった私的な事柄についても、親身に相談に乗っていただきました。そして、本論文の審査をご担当いただき、論文をまとめるに際しご討論下さいました、松永三郎教授、塚越秀行准教授、中西洋喜准教授に心より感謝の意を申し上げます。

北野智士氏(現 Hibot)、和田晃氏(現 立命館大学)、堀米篤史氏(現 FANUC)、古村博隆氏(現 トヨタ自動車)には、研究室の先輩として常に熱心な姿勢でご討論、ご助言をいただきましたことを心より感謝いたします。長らく居室を同じくした Jose Antonio Silva Rico 氏、浮田貴宏氏、車谷駿一氏をはじめとして、鈴木・遠藤研究室の諸氏と共に研究を行うことができたことに深く感謝致します。日頃の研究室の和気藹々とした雰囲気や、様々な視点からの意見・討論の場から受けた多くの刺激によって、倦むことなく研究に取り組むことができました。また、日々の研究を円滑に進められるよう、事務作業を円滑に処理していただいた鈴木直美様をはじめとするスタッフの皆様に感謝申し上げます。

最後に、関心事について探求することを否定することなく、長い間支えてくれた家族に感謝の念を表し、謝辞といたします。

平光 立拓