

ワイヤ駆動型連続体マニピュレータの
モデル化と機構に関する研究

2018年 3月

蕭 凱文

ワイヤ駆動型連続体マニピュレータの
モデル化と機構に関する研究

蕭 凱文

システム情報工学研究科

筑波大学

2018年 3月

概要

本論文は、連続体マニピュレータの中でも最も典型的な、ワイヤ駆動型の連続体マニピュレータを対象として、そのモデルと機構について考察し、それぞれについて新たな提案をする。

まず、スリムさと高い湾曲特性を兼ね備えた可伸縮ワイヤ拘束手段とその実現法を提案する。従来の連続体マニピュレータの機構では、ワイヤを拘束するためのフランジが、スリムさと高い湾曲特性の両立を妨げていた。提案する可伸縮ワイヤ拘束手段では、拘束手段が、連続体マニピュレータの湾曲に伴い適切に伸縮することで、マニピュレータの湾曲を妨げない巧みな機構となっている。これにより、スリムでありながら大曲率の湾曲を実現することが可能である。

つぎに、従来広く使われていた連続体マニピュレータの一定曲率モデル (Constant Curvature Model) を拡張したより一般的なモデルを提案する。このモデルは、一定曲率モデルの有する、ワイヤ長からマニピュレータの手先姿勢を容易に計算できるという利点を保持したまま、一定曲率でないケースにも適用することができる。さらに、ワイヤ周りに働く分布力を仮定することにより、手先位置さらには全体の形状も容易に計算することができる。一定曲率モデルを拡張する、ソフトロボティクスの重要な知見である。

謝辞

本研究を行うにあたり，指導教員の望山洋先生から熱心かつ丁寧なご指導を頂きました．ここに感謝の意を表します．

本研究に多くの貴重なご助言を下さいました，筑波大学知能機能システム専攻星野聖教授，筑波大学知能機能システム専攻矢野博明教授，筑波大学知能機能システム専攻の伊達央准教授，首都大学東京の武居直行准教授に感謝を致します．

本研究についてたくさんの示唆に富む意見や新しいアイデアを下さいました，弘前大学の竹岡年延助教に感謝いたします．

そして，この研究のプロトタイプに関する製作において，ご助言と材料のご提供をいただきました，ハナキゴム(株) 小川清様と篠塚英様にも感謝をいたします．

また，ゴムディッピングに関する製作方法や実験機材の使い方などを丁寧に教えて下さいました，柔軟ロボット学研究室 OB の林秀俊先輩に感謝をいたします．

最後に，本研究についてたくさんのご意見を下さいました柔軟ロボット学研究室の先輩，同期，後輩に感謝をいたします．

目次

第1章	はじめに	7
1.1	研究背景と目的	7
1.2	関連研究と問題点	11
1.3	本研究の提案	23
1.4	本稿の構成	24
第2章	連続体マニピュレータの機構	25
2.1	典型的なワイヤ駆動型連続体マニピュレータの機構	26
2.2	可伸縮ワイヤ拘束手段を有する連続体マニピュレータ	30
2.2.1	提案機構	30
2.2.2	動作原理	33
2.3	製作方法	35
2.4	大湾曲特性の検証	37
2.4.1	実験プロトタイプ	37
2.4.2	湾曲の基本特性	39
2.4.3	湾曲角とワイヤ引張力との関係	43

2.4.4	湾曲角とワイヤ引張量との関係	47
2.4.5	湾曲特性のばらつき	50
2.5	まとめ	52
第3章	連続体マニピュレータのモデル	53
3.1	一定曲率モデル	54
3.2	一定曲率を仮定しないモデル	55
3.2.1	運動学	56
3.2.2	静力学	63
3.3	モデル検証	67
3.3.1	実験装置	68
3.3.2	実験手法	70
3.3.3	湾曲方向の検証結果	73
3.3.4	湾曲角度の検証結果	75
3.3.5	湾曲形状の比較実験	77
3.4	まとめ	80
第4章	連続体マニピュレータの設計例	81
4.1	機構の設計例	82
4.2	動きの設計例	88
4.3	まとめ	91

第5章 おわりに	94
5.1 研究成果のまとめ	94
5.2 今後の展望	95

目 次

1.1	Elastic rod pulled by parallel wires	12
1.2	Parallel flexible pushing rods	14
1.3	Parallel extensible balloons	16
1.4	Elastic precurved tube	18
1.5	Sheathed closed elastica	20
2.1	Bending property for 1-wire pulling	28
2.2	Shape of 1-wire pulling continuum manipulators with different spacing of flanges	29
2.3	Proposed Mechanism	32
2.4	Driving mechanism for bending	34
2.5	Fabrication process	36
2.6	Large Bending	41
2.7	Bendings in different directions in 3D space	42
2.8	Experimental setup	45
2.9	Relationship between Pulling-force and Tip Bending Angle	46

2.10	Relationship between Pulling Length and Tip Bending Angle	49
2.11	Relationship between Pulling Length and Tip Bending Angle	51
3.1	The schema of the continuum manipulator with rubber skin layer including pulling-wire mechanism.	57
3.2	The experimental setup for model validation	69
3.3	The parameter of the bending direction ϕ_0	71
3.4	The parameter of the bending angle α	72
3.5	The result of the bending direction ϕ_0 experiment	74
3.6	The result of the bending angle α experiment	76
3.7	The shape of constant curvature model	78
3.8	The shape of non-constant curvature model with uniform distribution friction force	79
4.1	Specification of inspection task in a narrow space	86
4.2	Elastic rod with a desirable elasticity	87
4.3	Side view of the constant α motion ($\alpha = 90$ degree)	92
4.4	Top view of the constant α motion ($\alpha = 90$ degree)	93

第1章 はじめに

1.1 研究背景と目的

連続体ロボットは，機構の主要部に無限自由度の連続体を利用したソフトロボットである．連続体ロボットは，Springer の Handbook of Robotics[1] の中にも節が設けられ，ロボティクス研究の確固たる一フィールドとして認知されている

連続体ロボットの元となっている Continuum Robots という術語は，Robinson と Davies の IEEE ICRA99 でのサーベイ論文 [2] を契機として，積極的に用いられるようになった．この論文の中で，Continuum Robots は，次のように述べられている：

Continuum robots do not contain rigid links and identifiable rotational joints. Instead the structure bend continuously along their length via elastic deformation and produce motion through the generation of smooth curves, similar to the tentacles or tongues of the animal kingdom.

また，日本ロボット学会の欧文誌である Advanced Robotics において近年企画された Continuum Robots and Manipulation 特集号の Call For Paper では，連続体口

ロボットについて，次のように述べられている [3]：

Continuum robots are usually defined to be those featuring continuous backbone structures, i.e. structures without the skeletal design of traditional rigid-link robot manipulators. In this sense continuum robots are invertebrate-like, as opposed to the vertebrate-like nature of traditional robots. The main feature of continuum structures is their inherent smoothness. Instead of bending at discrete points (joints, or elbows) along the backbone, they can in theory smoothly bend anywhere along their structure. Almost all continuum robot designs exhibit significant compliance, i.e. they inherently present a compliant rather than stiff interface to the environment. As such, two functions in particular define the potential advantages of continuum robots: safe operation in congested environments and whole arm manipulation under imprecise and uncertain conditions.

これらの記述によれば，連続体ロボットは，その形状が1次元幾何物体である滑らかな連続曲線によって表現されるクラスに限定される．この定義を2次元や3次元の幾何物体まで拡張することも考えられるが，現存する連続体ロボットはほとんど細長い形状の1次元のクラスであり，長くスリムなボディを活かして，通常のロボットではアプローチしにくい狭所に進入し，有益な作業を行うことが期待されている．

一方，ヨーロッパでは，最近 RoboSoft と呼ばれる Soft Robotics に関する研究ネットワークが組織された [4]．ここでは，Soft Robotics は次のように規定されている：

Soft robotics, intended as the use of soft materials in robotics, is a young research field, going to overcome the basic assumptions of conventional rigid robotics and its solid theories and techniques, developed over the last 50 years. Using soft materials to apply forces on the environment, as expected in a soft robot able to locomote, grasp, and perform other tasks, poses new problems at the level of the different components as well as at the whole system level. The technologies for actuating the soft materials have not yet been demonstrated to exist in a general form, although specific effective examples exist. The same is true for sensors embedded in the soft materials and for soft robotic energy suppliers.

すなわち，連続体ロボットよりも広いクラスのロボットを対象としているが，近年注目されているソフトロボティクスの核となっている伝統あるクラスが，連続体ロボットであると言ってよいであろう．

連続体ロボットは，連続体マニピュレータと連続体ロコモータ（推進機構）[5]の2つに大きく分類することができるが，本論文では前者の連続体マニピュレータを対象に，その機構とモデルについて考察する．

連続体マニピュレータは，マニピュレータの全体または一部が，無限自由度の連続体で構成されるソフトロボットアームである．柔軟かつスリムなボディを活かして，通常的手段ではアプローチしにくい狭所に進出した上で，さらに先端を動かして何らかの作業を行うことが期待されている．例えば，ヒトや生物の口腔から進入して低侵襲検査や手術を行うためのロボットアームにおいて，連続体マニピュレー

タを活用することが考えられる．切開手術に比べて，生物の組織をできるだけ損傷を与えることなく，問題の部位にアプローチし，検査・処理することを可能とする．また，瓦礫など不規則で予測・計測の困難な狭い隙間に進入するレスキュー用途の連続体マニピュレータもある．災害現場におけるレスキュー探索を行い，遭難者の位置や状況を把握し，救援活動を支援する．さらに，複雑な構造の精密機械内部のメンテナンスを行う連続体マニピュレータも考えられる．狭い作業空間内で機械部品の状態確認，および保守点検・補修における作業を行う．一方，連続体マニピュレータは，象の鼻，タコの触手などに見られるよう，生物に見られる機構であることから，高い湾曲特性を有する動物の触手を模倣したエンタテイメントロボットへの応用も期待される [6] ．

このように，多彩な応用例が期待される連続体マニピュレータであるが，周辺環境になじむことができる一方で，超多自由度であるがゆえに，その身体の制御が困難になるという側面がある．連続体マニピュレータの制御のためには，その身体力学の適切なモデル化と，そのモデルを活用できる巧みな機構が必要である．本研究の目的は，スリムさと柔軟性を兼ね備えて，狭所進入性能を有しつつ，その身体の制御性に優れた連続体マニピュレータを実現することである．このためには，連続体マニピュレータのモデル化と機構のソフトロボティクス理論を構築することが本質であると考えられる．

1.2 関連研究と問題点

連続体マニピュレータの機構は、以下の通り、大きく5つに分類される。

弾性ロッドのワイヤ引張駆動機構

弾性体のロッドの先端をワイヤにより引っ張ることで屈曲を実現する機構は非常にポピュラーであり、様々なところで用いられている。例えば、市販の医療用 Steerable (あるいは Active) Catheter では、通常ワイヤ駆動メカニズムが採用されている [7]。

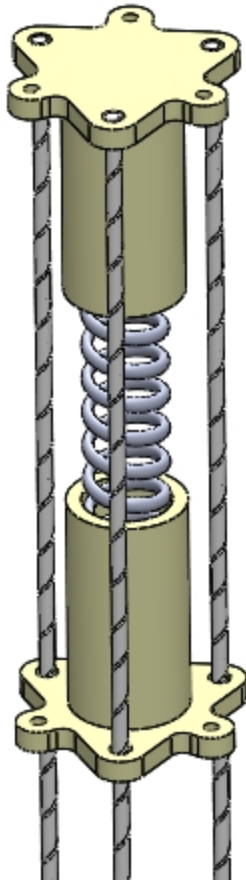
2自由度の曲げを実現する弾性ロッドのワイヤ引張駆動機構 (Fig. 1.1) は、Tensor Actuated Elastic Manipulator という名称で広瀬らにより提案されている [8]。

この機構を1セクションとして、複数のセクションを直列につなぎ合わせた多段化も可能である。ワイヤ張力により剛性を保つことができるため、比較的大きめのメートル級の超多自由度ロボットにも利用できる。

この機構の場合、弾性ロッドの連続体力学に加えて、ワイヤ干渉が問題となるが、それらを考慮した機構のモデルが数多く検討されている [9, 10]。

Stilli らが提案した、弾性ロッドの代わりにバルーンを利用して、剛性可変のワイヤ駆動型連続体マニピュレータ [11]、連続体ロボット発展の功労者である Walker らのグループが開発した、ワイヤ駆動セクションを入れ子状に多段化した連続体マニピュレータ [12]、など、ワイヤ駆動型機構の新たな発展形が出現している。

また、体幹となる柔軟部材が弾性ロッドではないが、柔らかい外骨格を用いたワイヤ駆動型ウェアラブルロボットハンド [13][14] も、この機構と関連が深い。



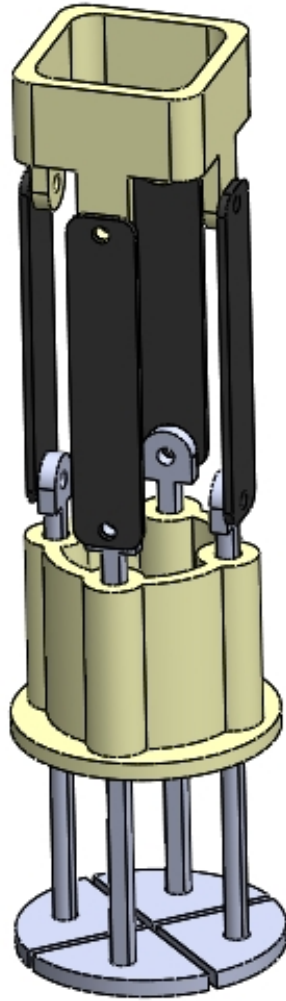
☒ 1.1: Elastic rod pulled by parallel wires

可撓弾性板並列押し出機構

可撓性を有する複数の弾性板を手先剛体に並列に取り付けた上で、弾性板の拮抗するペアを前後させることで、曲げ動作を実現することができる (Fig. 1.2) .

荒田らは、この機構を利用した脳外科手術用のコンパクトな2自由度屈曲マニピュレータを開発している [15] . また、同じく荒田らが考案した、手指運動を支援する3層の連結スライドばね機構は、2自由度屈曲ではないが、弾性板押し出し機構を利用した有用なデバイスとして特筆に値する [16] .

この機構は、今のところ多段化には不向きであり、腹腔鏡手術のような、穴越し空間にアクセスするためのマニピュレータの先端に自由度を付与する場合に有用であると考えられる .



☒ 1.2: Parallel flexible pushing rods

並列伸長バルーン機構

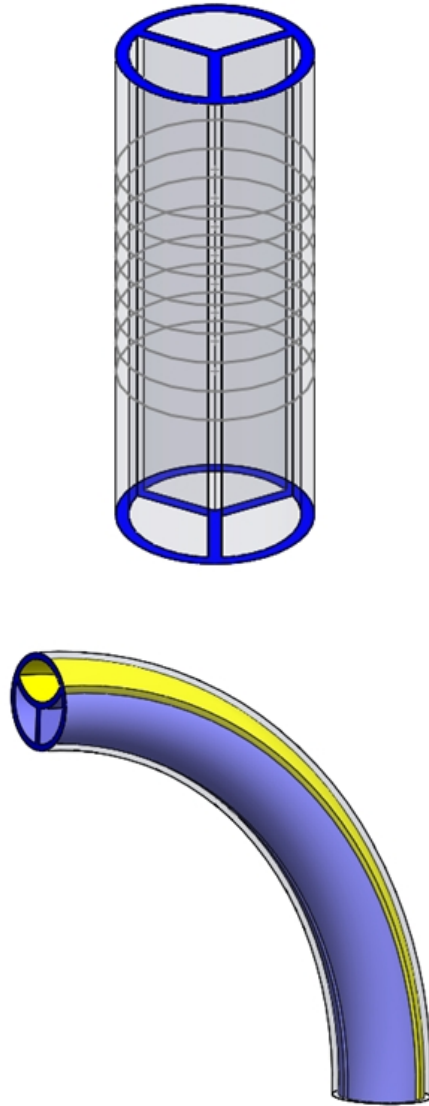
マニピュレータの長手方向に伸長可能なバルーンを並列に配置し、一部のバルーンを伸長させることにより、曲げ動作を実現できる (Fig. 1.3) .

空気圧式の連続体ロボットは、かなり古くから考案されていたが、多自由度屈曲を行う機構は 1980 年代後半に開発されている .

鈴森は、内部に 3 つの圧力室を有する繊維強化ゴムからなり、湾曲と軸方向への伸縮が可能であるゴム構造体フレキシブルマイクロアクチュエータ (FMA) を開発している [17, 18] . このアクチュエータは、小型化が容易であることが特徴であり、外形がミリメートルサイズのアクチュエータが作られている .

この機構でも、セクションを多段化しメートル級の超多自由度マニピュレータが開発されている [20] .

なお、Davies は、3 つのベローズを体幹に沿って配置した空気圧式の連続体ロボットを提案している [21, 2] . その後、水圧式となって水中ロボットの指部に利用されているが [22] , 狭所進入への利用例は報告されていない . 欧州のオートメーション企業が開発した、まるで象の鼻のような連続体ロボット The Bionic Handling Assistant は、並列ベローズ駆動の連続体ロボットと位置づけられる [23, 24] .



☒ 1.3: Parallel extensible balloons

Elastic Precurved Tube

予めなだらかに曲げてある弾性針を軟固体に刺入する際に、根元を回転させながら刺入していくと、複雑な 3 次元形状を形成することができる。Precurve Tube は、予めなだらかに曲げてある弾性管であるが、径方向に入れ子構造とすることで、さらに複雑な形状を形成することができる (Fig. 1.4)。近年、医療応用を目的として多段の Precurved Tube が開発され、そのモデルが詳細に検討されている [25, 26]。

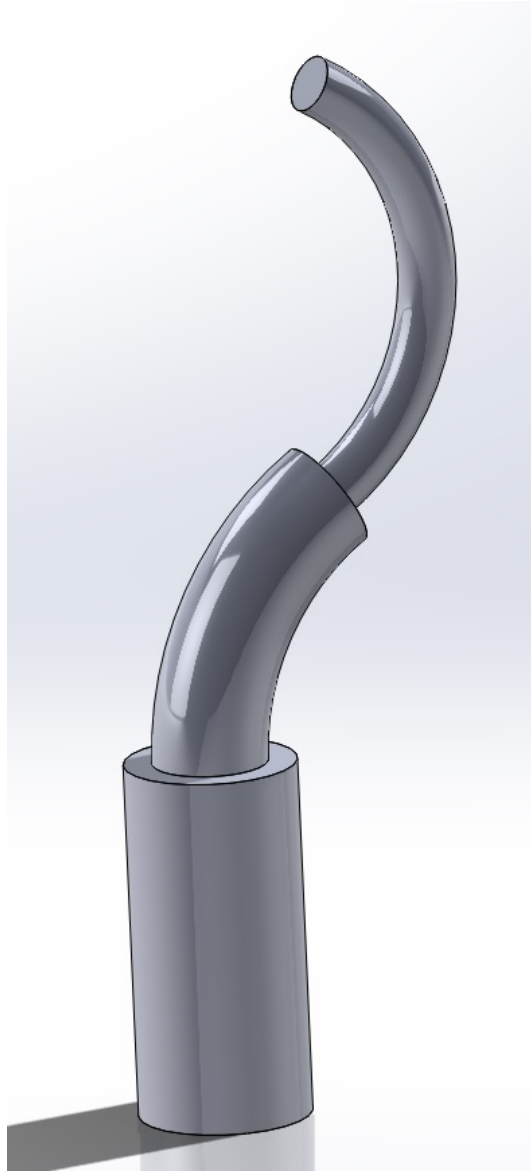
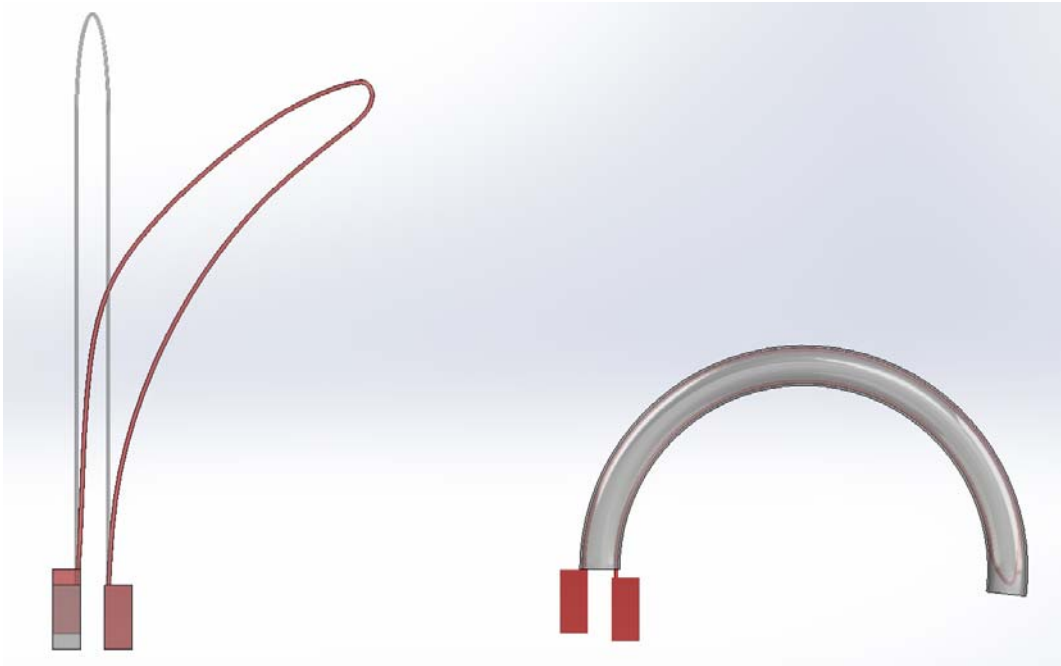


图 1.4: Elastic precurved tube

Sheathed Closed Elastica

両端を拘束された細長いV字型の閉ループ構造弾性体の固定端点をスライドさせると、ループが広がりながら屈曲するが、弾性体のスライドを抑制しないようにしながら、ループの広がりを鞘構造等により拘束することにより、大きな屈曲を得ることができる (Fig. 1.5)。さらに、捻りを加えた閉ループ弾性体を用いると、空間的な形状変形をすることもできる。この閉ループ弾性体の力学を利用した新しい連続体ロボット機構の画期的アイデアは、低侵襲手術を実現する医療器具のために、山田らによって考案された [27]。なお、Sekar らによって開発された類似の機構は、鞘構造を用いずに、弾性体の間に異方性変形を許容する物質を用いて、同様の動作を実現している [28] が、2次元平面内での変形しか考慮しておらず、水中移動ロボットの Flapping 動作への利用を目的としている。



☒ 1.5: Sheathed closed elastica

以上示した通り，様々な連続体マニピュレータの機構が提案されているが，機構のシンプルさや，発生力の大きさなどの観点から，最も利用されているのは，弾性ロッドのワイヤ引張駆動機構，すなわち，ワイヤ駆動型連続体マニピュレータである．本論文でも，この最も有用なクラスの連続体マニピュレータにフォーカスして議論を進める．

ここで注目すべきは，このワイヤ駆動型連続体マニピュレータの制御において，実際利用されているモデルが，Constant Curvature Model（一定曲率モデル）[29][30]であること，すなわち，弾性ロッドの変形を円弧に制限したモデルが使われているという点である．一定曲率モデルは，以下の2つの強力な利点を有する．

- ワイヤ引張量から，連続体マニピュレータの手先の位置・姿勢を即座に計算できる．
- 与えられた手先の位置・姿勢を実現するワイヤ引張量を即座に計算できる．

すなわち，無限次元の連続体マニピュレータの順運動学と逆運動学を極めて容易に扱うことを可能にする．しかし，実際の連続体マニピュレータの形状を円弧で近似することが極めて不適切な場合も多い．したがって，一定曲率モデルに代わる有用なモデルが求められている．

一方，ワイヤ駆動型連続体マニピュレータの運動学モデルとして、事実上，一定曲率モデルが利用されていることから，変形形状がなるべく円弧となるような機構の設計が暗に求められていることにも留意が必要である．逆に，一定曲率モデルの条件を緩和できれば，ワイヤ駆動マニピュレータに対する新しい機構のアイデアが

生まれる可能性がある，と見ることもできる．例えば，一定曲率モデルは，駆動ワイヤ周辺の摩擦がゼロであることを要求するため，機構設計においても，そのような配慮が必要であった．一定曲率モデルの拡張は，ワイヤ駆動型マニピュレータの機構設計の自由度の拡大にも繋がる．

1.3 本研究の提案

本論文では、2つの内容で構成されている。第1に、スリムさと高い湾曲特性を兼ね備えた、可伸縮ワイヤ拘束手段とその実現法を提案する。従来の連続体マニピュレータの機構では、ワイヤを拘束するためのフランジが、スリムさと高い湾曲特性の両立を妨げていた。提案する可伸縮ワイヤ拘束手段では、拘束手段が、連続体マニピュレータの湾曲に伴い適切に伸縮することで、マニピュレータの湾曲を妨げない巧みな機構となっている。これにより、スリムでありながら大曲率の湾曲を実現することが可能である。

第2に、従来広く使われていた連続体マニピュレータの一定曲率モデル (Constant Curvature Model) の拡張を提案する。このモデルは、一定曲率モデルの有する、ワイヤ長から手先姿勢を容易に計算できるという利点を保持したまま、一定曲率でないケースにも適用することができる。さらに、ワイヤ周りの分布力を仮定することにより、手先位置の計算も可能となる。例えば、ワイヤ周りに一様な分布力が生ずると仮定することにより、手先位置さらには全体の形状も容易に計算することができる。一定曲率モデルを拡張する、ソフトロボティクスにおける重要な知見である。

1.4 本稿の構成

本論文の構成は、以下の通りである。第2章において、提案する連続体マニピュレータ機構について説明する。第3章では、提案する連続体マニピュレータ運動学モデルについて説明する。第4章では、提案する機構とモデルから得られた知見に基づき、連続体マニピュレータの設計例を示す。最後に第5章で、本研究の成果をまとめ、今後の展望を示す。

第2章 連続体マニピュレータの機構

本章では，ワイヤ駆動型連続体マニピュレータに対し，スリムさと高い湾曲特性を兼ね備えた機構を提案する．まず，典型的なワイヤ駆動型連続体マニピュレータの機構について解説し，その問題点を明らかにする．その上で，可伸縮ワイヤ拘束手段を有する新たなワイヤ駆動型連続体マニピュレータの機構を提案する．また，可伸縮ワイヤ拘束手段を実現する，ゴム層にワイヤ駆動機構を埋め込んだ連続体マニピュレータの製作方法を示す．さらに，提案する連続体マニピュレータの大湾曲特性を実験的に確認する．

2.1 典型的なワイヤ駆動型連続体マニピュレータの機構

ワイヤ駆動型連続体マニピュレータは、下記の3つの基本要素から構成される。

(Fig. 2.1)

1. 体幹となる柔軟部材（通常は弾性のロッド）
2. 体幹を屈曲させるためのワイヤ（通常、複数本）
3. ワイヤを体幹に沿わせるための拘束手段（ワイヤが通る穴の開いたフランジや、蛇管など）

例えば、1.2節の関連研究で説明した、広瀬らの tensor arm[8] は、空間変形が可能な最初の連続体マニピュレータであるが、上記3つの部分で構成されている。

ワイヤ駆動機構では、ワイヤを引っ張ることしかできないため、通常、初期形状に戻るために、体幹となる柔軟部材に弾性部材を用いる。弾性特性の範囲が広い材料が望ましいが、材料疲労が生じにくい素材の選択の必要がある。

ワイヤの役割は、マニピュレータの湾曲のために必要な力を、アクチュエータから伝達することである。ワイヤに張力をかけたとき、ワイヤが張力方向に変形しない材料が望ましい。遠藤らは、ワイヤ駆動機構に適した材料について、比較実験を行っている [31]。

ワイヤを体幹に沿わせるための拘束手段として最も典型的な形態は、Fig. 2.1 に示したように、体幹に沿って複数のフランジを配置することである。フランジは、体幹中心を通る背骨曲線とワイヤとの間の相対位置を拘束する役割をもつため、通常

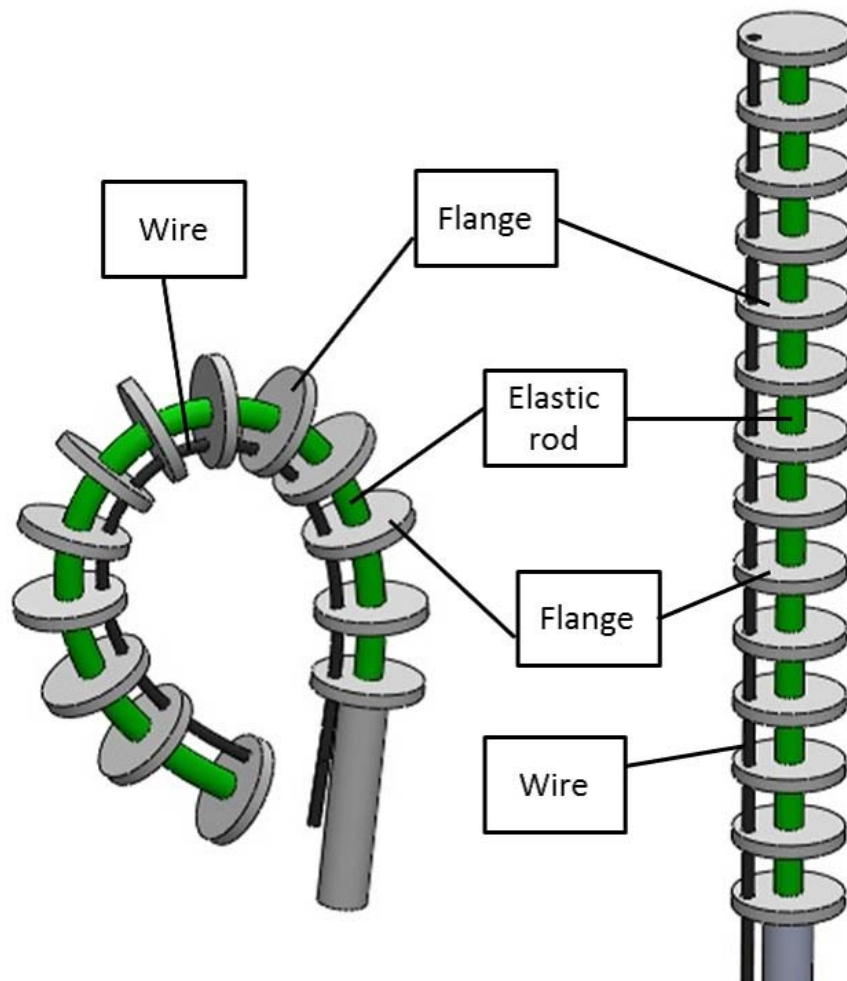
は十分な強度を持った硬い材料で作られる。フランジの配置条件に応じて、湾曲の状況が変化する。Fig 2.2 は、フランジの数を 1, 8, 23 としたときの、連続体マニピュレータの湾曲の状況を示した写真である。

左図の a では、ワイヤのショートカットが生じ、連続体マニピュレータのスリムさが損なわれている。また、通常、ワイヤと環境との接触は双方の破損を招く可能性があるため好ましくなく、ワイヤ部は露出しないことが望ましい。

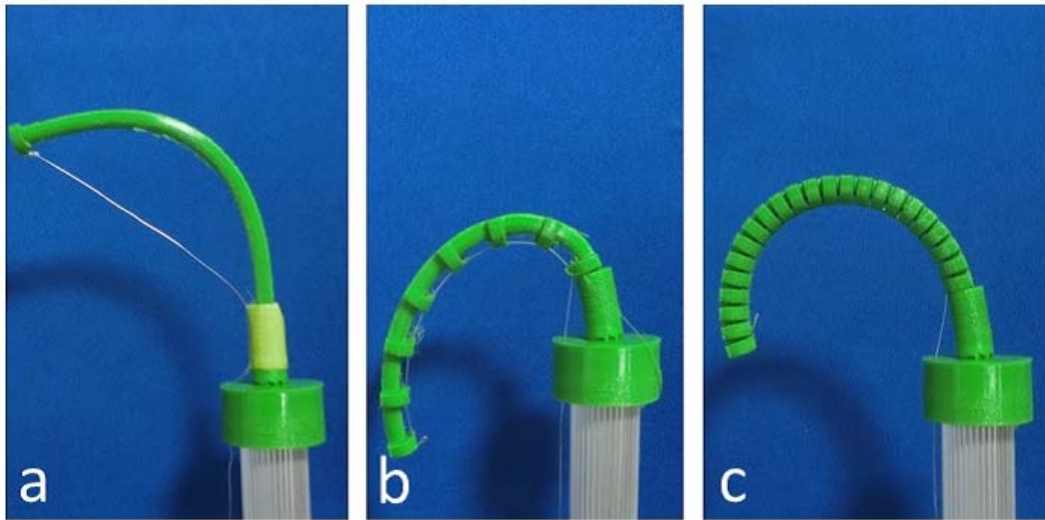
中央の b のケースでは、a のケースよりはベターであるが、依然としてワイヤ部は露出しており、好ましい状況ではない。ワイヤの保護部を設けた場合には、その部分がマニピュレータの湾曲を妨げる可能性が高い。

右の c のケースでは、ワイヤ部が多数のフランジに隠されており、環境との接触の危険性は少ない。しかしながら、フランジ間の干渉が起こるため、これ以上大きくマニピュレータを湾曲させることができない。

すなわち、これまでのワイヤ駆動型連続体マニピュレータの問題点は、ワイヤの露出なしに、スリムさと大湾曲の両立が困難であることである。



☒ 2.1: Bending property for 1-wire pulling



☒ 2.2: Shape of 1-wire pulling continuum manipulators with different spacing of flanges

2.2 可伸縮ワイヤ拘束手段を有する連続体マニピュレータ

本節では，ワイヤ駆動型連続体マニピュレータに対し，ワイヤを露出させずにスリムさと大湾曲特性を両立するために，可伸縮ワイヤ拘束手段を有する連続体マニピュレータを提案する．

2.2.1 提案機構

提案するワイヤ駆動型連続体マニピュレータは，弾性ロッドを薄いゴム層で覆い，そのゴム層の中にワイヤ駆動機構が含まれる機構となっている．ワイヤを拘束するために，体幹に沿って伸縮可能な蛇管が複数個配置されている点が特徴である．(Fig 2.3)

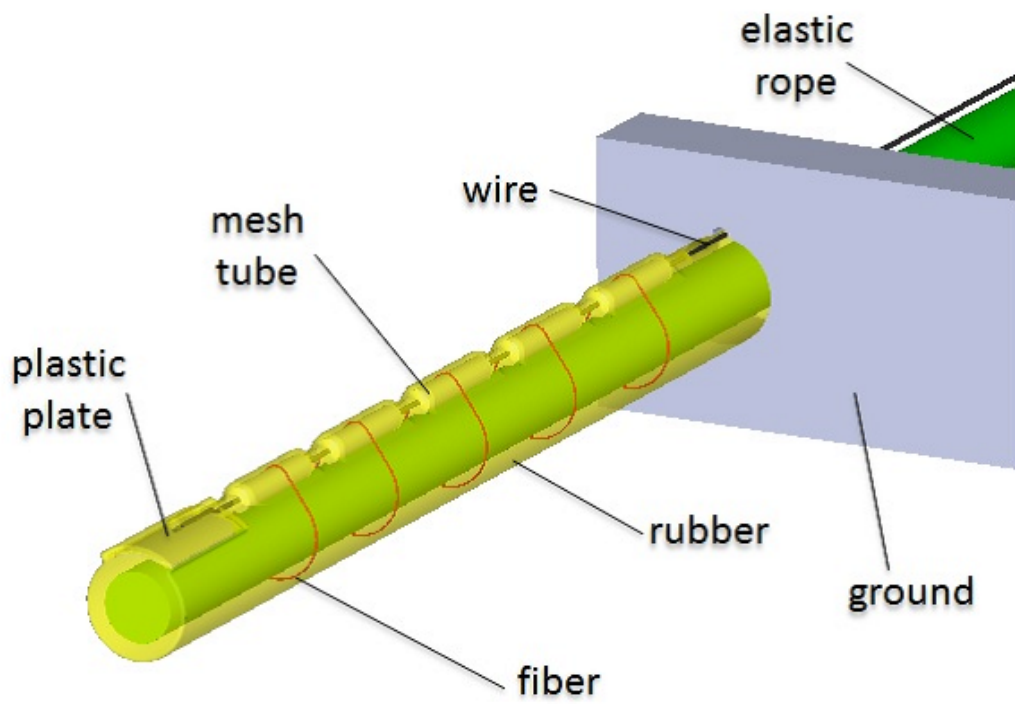
体幹となる柔軟部材には，ワイヤ駆動により容易に屈曲するしなやかさと，除荷の際には復元力を生成するのに十分なバネ特性の両方を具えていることが望ましく，適度な弾性を有する弾性体ロッドを用いる．

ゴム層は，連続体マニピュレータ全体を覆いつつ，湾曲を妨げないように，薄く形成する必要がある．通常，その厚みは約 $0.5 \sim 1$ [mm] 程度である．

ワイヤ駆動部は，ワイヤ，薄板，長手方向に伸縮可能な複数のチューブで構成され，すべて薄いゴム層内に組み込まれる．ワイヤの一端は直動アクチュエータに繋がりを，もう一端は，複数のチューブを通して，マニピュレータ先端部に埋め込まれた

薄板に固定される。可伸縮チューブはワイヤの経路を固定する機能があって、ワイヤ駆動機構の中で使われているフランジと同じ役割を果たしているが、湾曲の際には適切に伸縮し、マニピュレータの湾曲を妨げないようになっている。薄板とチューブは、ゴム層と十分な接触面積があるため、ゴム層内に固定される。一方、ワイヤは径が小さい上に複数のチューブ内を通り、ゴム層との接触面積が小さいため、ゴム層に対して可動となる。なお、チューブは、ワイヤが動く際に、ゴム層との摩擦を低減させる効果もある。なお、拘束手段としての可伸縮チューブは、体幹中心から離れる方向に力を受けるため、これを拘束するために、プラスチック系で弾性ロッドに固定する。

なお、皮膚層は、駆動の際に薄板を介して強く引っ張られることとなるが、ゴムで形成しているため、十分な強度を有する。

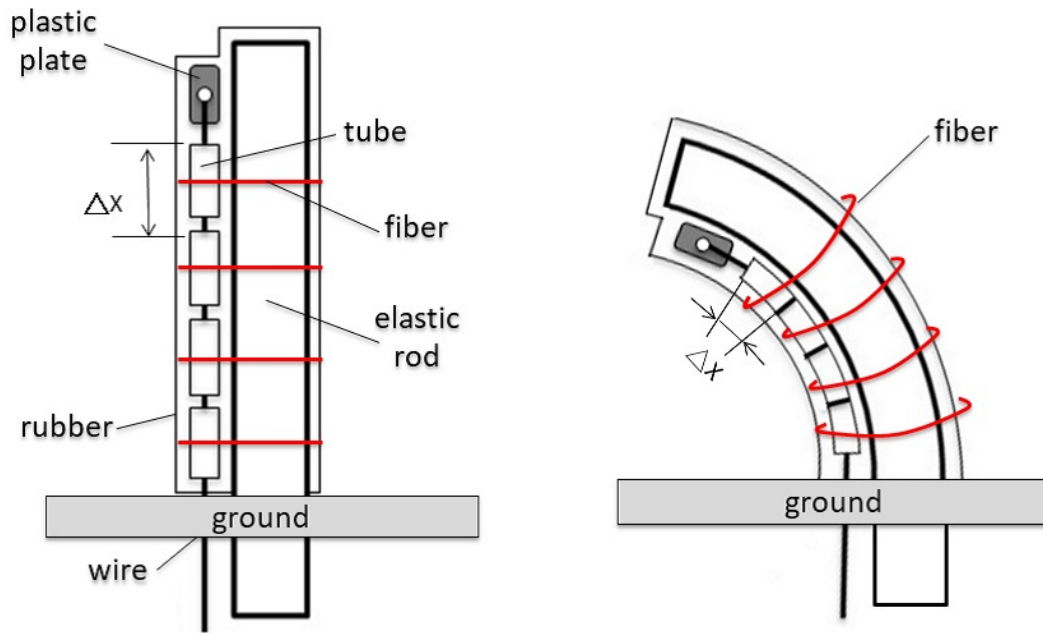


☒ 2.3: Proposed Mechanism

2.2.2 動作原理

ワイヤの駆動端を引っ張ると、その力はマニピュレータ先端部に配置された薄板に伝達される。薄板はゴム層内にしっかりと固定されているため、ワイヤ張力はゴム層を介して弾性体ロッドに伝達される。力が作用する薄板の位置は、基材としての弾性体ロッドの中心軸から距離があるため、モーメントが生じる。張力を加え続けると、ワイヤ周辺のゴムが縮んで、チューブとチューブの全体距離 ΔX が短くなる。これによって、構造体全体の湾曲が生ずる。なお、大湾曲の際には、チューブ間の干渉が起こるが、メッシュにゴムがしみ込んだチューブは長手方向に可伸縮であるため、チューブが適切に縮み、マニピュレータの大湾曲を妨げない仕組みとなっている。このため、スリムでありながら、非常に大きな湾曲曲率を実現できる (Fig. 2.4)。なお、マニピュレータが逆方向に屈曲した場合は、ワイヤ周辺のゴムとワイヤを拘束するチューブは伸長し、やはり大湾曲を妨げないようになっている。

湾曲の際にチューブはワイヤから外側へ向けて力を受けるが、チューブは体幹に巻いた繊維により拘束されるため、体幹から剥がれない。この機構では、ワイヤはゴム層内に埋め込まれているため、ワイヤが環境と接触することはない。



☒ 2.4: Driving mechanism for bending

2.3 製作方法

ロボットの製作方法は、ゴムディッピングを基礎とする下記の3工程からなる (Fig. 2.5) .

1. ゴム層の形成

ゴム層の形成まず、弾性体ロッドを液体ゴムに浸し、乾燥させることにより、弾性体ロッドの周りに薄いゴム層を形成する。必要があればこのディッピング過程を複数回行い、ゴム層の厚さを調整する。

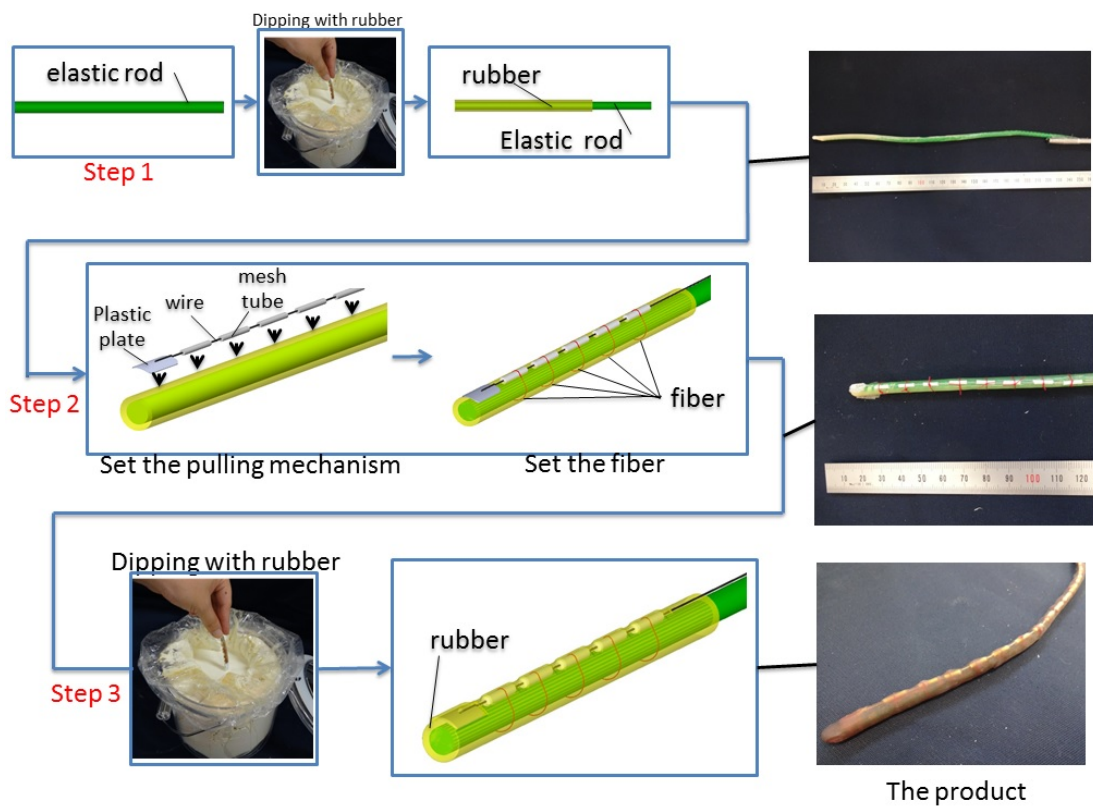
2. ワイヤ駆動部の固定

成形した直後のゴム層表面は粘着性があり、薄板とチューブを表面に押し付けることで、仮固定することができる。必要があれば、接着剤を用いて固定する。各チューブはポリエステル繊維のような丈夫な糸でボディに結び付ける。一端が薄板に固定されたワイヤをチューブの穴に通す。

3. ゴム層の積層

ワイヤ駆動部が表面に実装されたゴム層被覆弾性体ロッドを、再度液体ゴムに浸し、乾燥させる。ここでも必要があれば、ディッピング過程を複数回行う。

なお、上記の方法によって、チューブ外にあるワイヤの一部はゴム層に固定されることになるが、ワイヤ径は小さく、接触面積が小さいため、一度ある程度の引張力を与えるとゴム層から剥離し可動となり、駆動機構として機能する。



☒ 2.5: Fabrication process

2.4 大湾曲特性の検証

本節では，提案する連続体マニピュレータの大湾曲特性を実験検証する．

2.4.1 実験プロトタイプ

提案機構のプロトタイプについて説明する．使用した弾性ロッドは大きな湾曲特性を有する，外径 $\phi_r=4$ [mm] のステンレス製フレキシブルチューブ（ハギテック製，KS-3N）である．使用した液体ゴムは天然ゴムラテックスの一般的な硫黄配合物である．物性は Table 2.1 に示す．ゴム層に埋めたチューブは，外径 1.4[mm] のメッシュ状チューブ（HiQParts 製，MTS）である．チューブを結び付けるポリエステル繊維の直径は，1[mm] である．

ゴム層のディッピングに使われる素材は，液体ゴムである．増粘剤を加えることで粘度を調整し，1回のディッピングで形成される層の厚さを調整することができるが，今回のプロトタイプでは増粘剤は使用していない．弾性体ロッドの先端から 200[mm] のところまで成形してある．ワイヤは，直径 0.3[mm] で，ステンレス製である．2自由度の曲げを実現するために，3本のワイヤを中心軸回りに 120度の間隔で配置してある．各ワイヤの一端に取り付ける薄板は，長さが L_p ，広さが W_p として，4[mm]×2[mm] の長方形，厚さが 0.2[mm] のプラスチック板であり，ワイヤを結びつけるために小さな穴があけてある．各ワイヤに対するチューブは，外径 $\phi_t=1.4$ [mm]，内径 0.5[mm]，長さ $L_t=7$ [mm] のメッシュ状のガラス繊維であり，マニピュレータの長さ方向に沿って， $\Delta X=3$ [mm] の間隔を設けて配置してある．各ワイヤに 12個

のチューブを用いている．マニピュレータの全体長さ L が 200[mm] である．なお，マニピュレータ全体の重さは約 10[g] である．

表 2.1: Specifications of natural rubber

Specific gravity of raw rubber	0.93
Range of the JIS hardness (JIS K 6253 type A)	30
Tensile strength [MPa]	23.4
Elongation at break [%]	875
Young's modulus [GPa]	0.02

2.4.2 湾曲の基本特性

提案機構の基本的な湾曲特性について説明する。Fig. 2.6 は、1本のワイヤを引っ張ったときに、平面内でマニピュレータの形状が変形する様子を示した連続写真である。図内の左の写真は、ワイヤに張力を加えていないときの様子であり、鉛直下向き（ x 方向）にほぼ直線形状となっている。この写真の右上に示されている断面図において、張力を加えるワイヤを黒丸で表現しており、この場合では、 z 軸正方向側にあるワイヤ一本を引っ張ることを意味する。中央上の写真では、張力を加えた結果、マニピュレータが湾曲した様子を示しており、その先端が90度回転した方向（ z 方向）に向くことが確認できる。さらに力を加えると、右上の写真のようになり、マニピュレータの先端は180度回転し鉛直上向きを指す。さらに、中央下写真のようになり、マニピュレータの先端は270度回転する。最後の右下の写真では、先端は360度回って元の鉛直下向き方向となっている。このように、先端の向きを360度回転させるほど大きな湾曲が可能な点が、提案機構の特徴である。なお、右下の写真のように、強い引張により、マニピュレータが一回転してループができるが、その半径は約10[mm]である。非常に大きな曲率の湾曲が実現されていることが確認できる。

マニピュレータの根元部に捩りを加えることで、あらゆる平面上で上記の広い湾曲範囲を実現できるが、根元を捩らなくても、3本のワイヤ張力を適切に調整することにより、あらゆる平面上に湾曲させることが可能である。Fig. 2.7 は、マニピュレータを正面から撮影した9枚の写真を重ねた図である。この実験では、マニピュ

レータが x 座標軸を含む 4 つの平面 (すなわち, $y = 0$; $z = 0$; $y-z = 0$; $y + z = 0$) 内で両方向に湾曲するよう 3 つのワイヤ張力を手動で調整したときの形状変形の様子である。マニピュレータは初期形状では, ほぼ x 軸上で直線形状をとっているが, $y-z$ 平面への射影図となっているこの図では, 中央の点に対応する。マニピュレータの像は, ほぼ 45 度間隔で中央から延びる 8 本の放射状の線に見える。このことから, 提案するマニピュレータが, 3 本のワイヤに対する適切な張力の調整によって, 3 次元空間内のあらゆる方向に湾曲が可能であることを確認できる。

Fig. 2.6 に示されるマニピュレータの形状は, 手先側にいくほど曲率が小さい曲線となっている。連続体マニピュレータで良く使われる一定曲率形状の仮定 [30] が成り立たないことを確認できる。

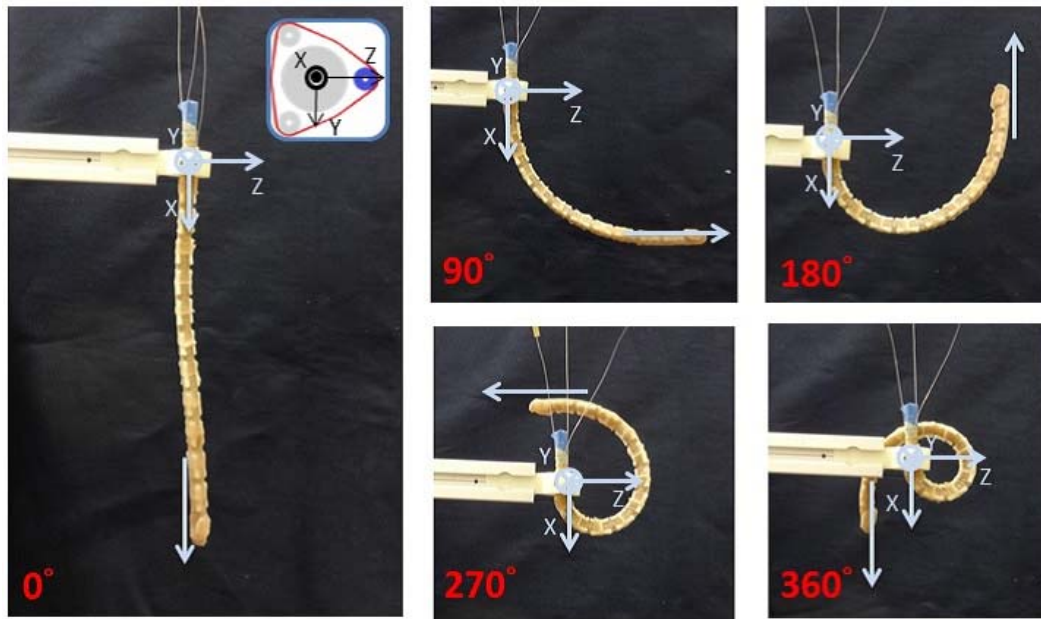
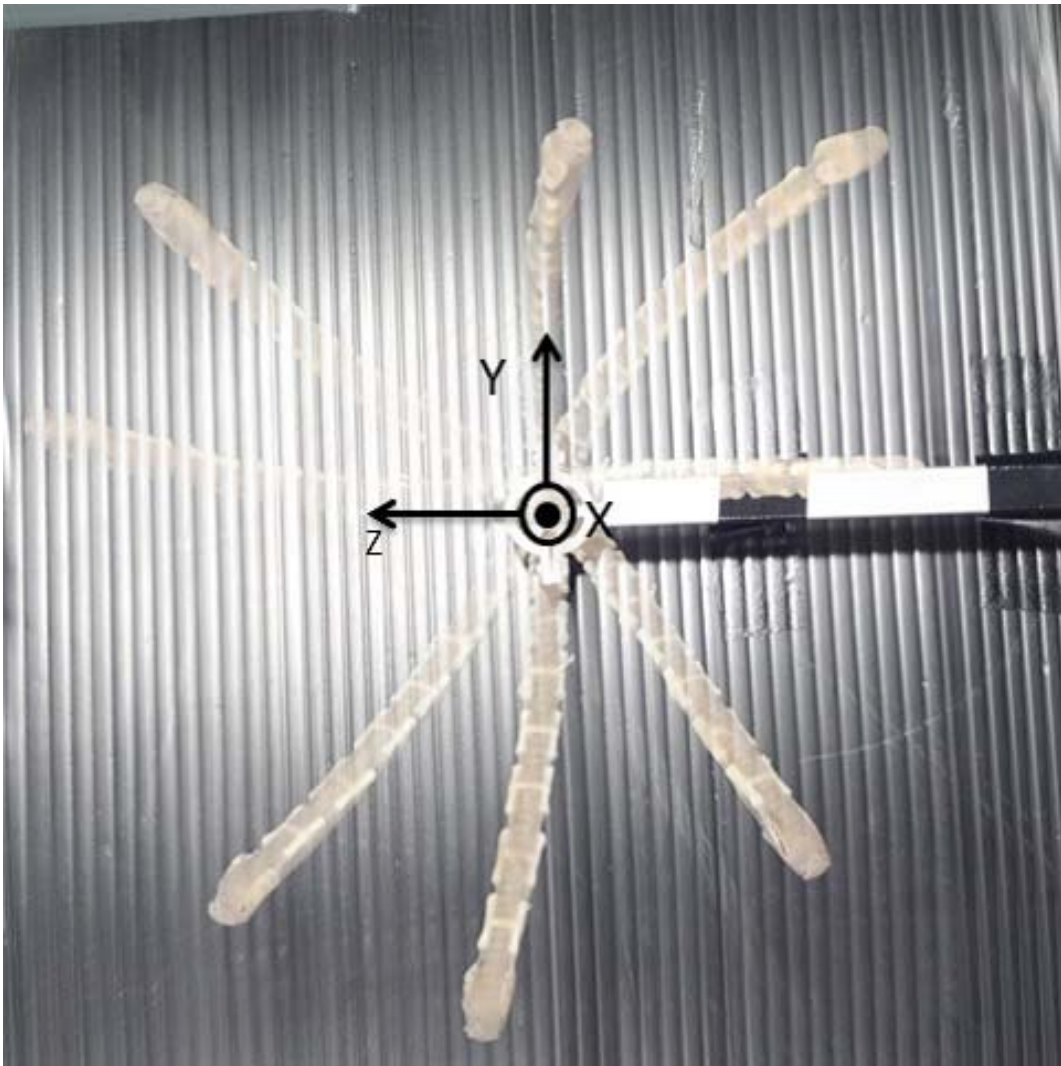


图 2.6: Large Bending



☒ 2.7: Bendings in different directions in 3D space

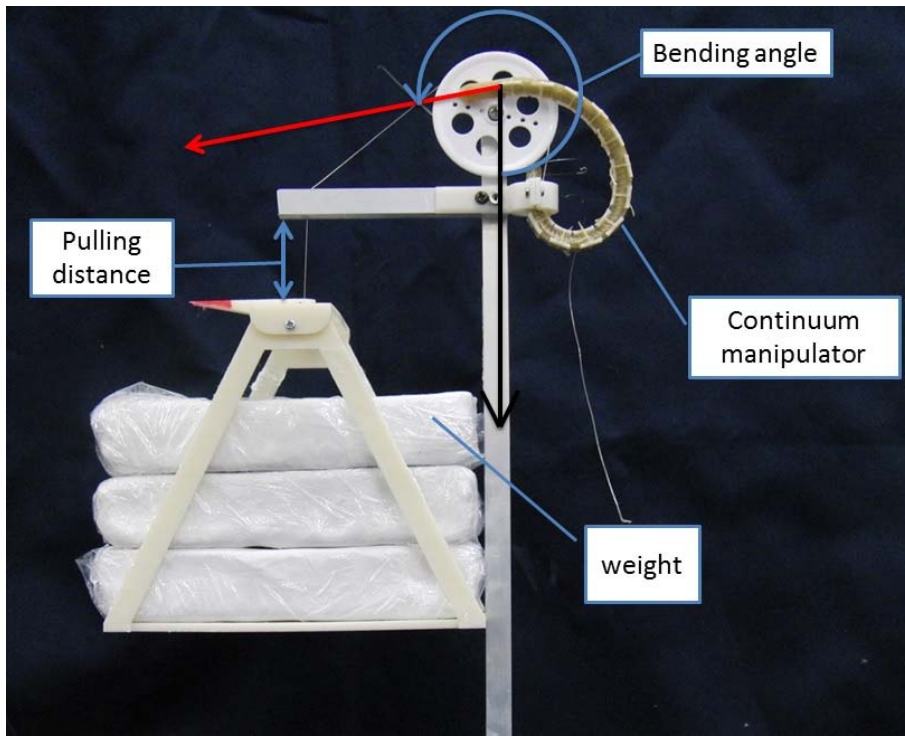
2.4.3 湾曲角とワイヤ引張力との関係

提案する連続体マニピュレータの湾曲角とワイヤ引張力との静力学的関係を調査する。

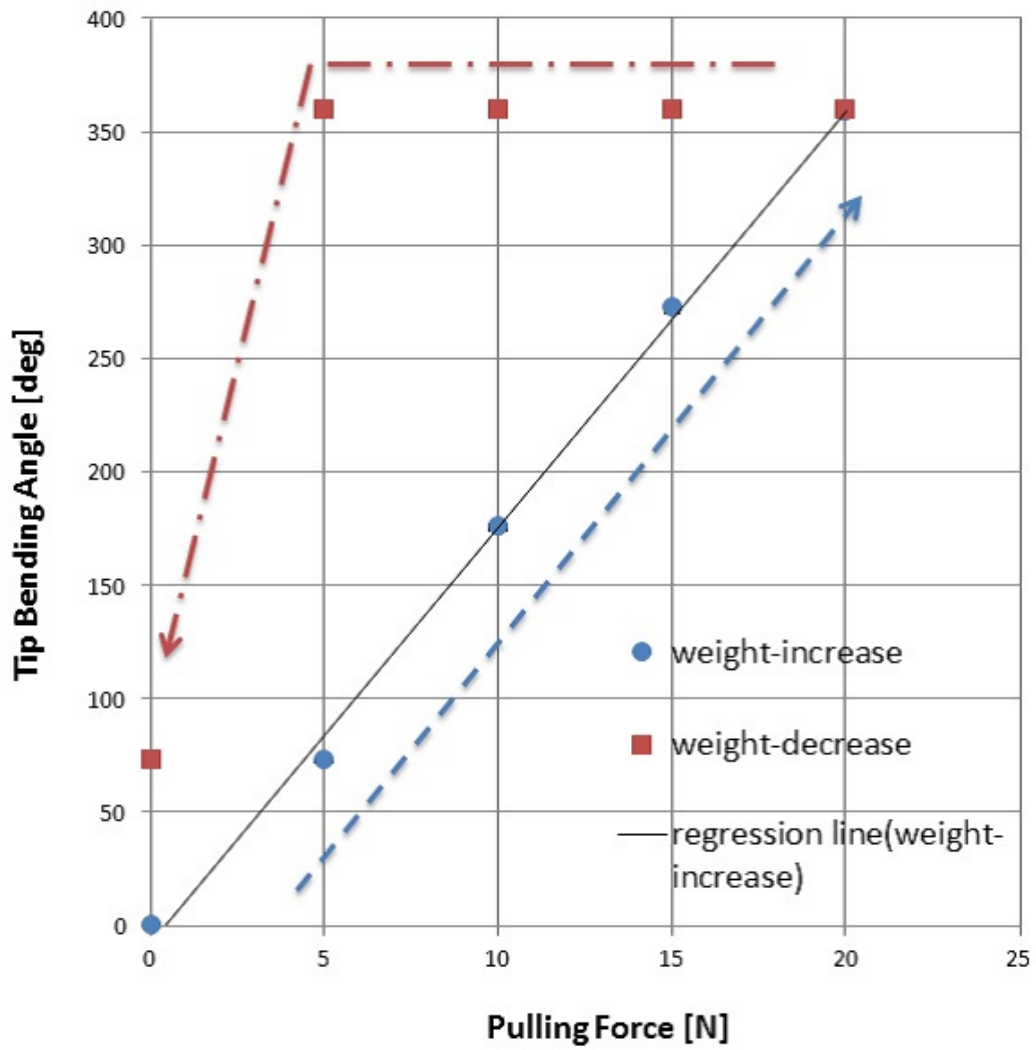
マニピュレータの根本部分を土台に固定した上で、滑車を利用して、ワイヤ1本に加える張力を、おもり（粘土）による重力によって生成する（Fig. 2.8）。おもりは0～2[kg]まで0.5[kg]ずつ増加させ、その後、0.5[kg]ずつ減少させる。おもりを載せる台の重さは0.052[kg]である。各おもりの条件において、マニピュレータの先端方向が静止するまで待ち、静力学的平衡状態における形状をカメラで撮影する。カメラ画像から、湾曲角を読み取る。

Fig. 2.9は、ワイヤ引張力と湾曲角の関係を示すグラフである。横軸はワイヤ引張力 [N]、縦軸は湾曲角 [deg] である。各プロットは、各おもりの条件における計測結果であるが、青丸のプロットはおもりを増加させたときの計測結果、赤四角のプロットはおもりを減少させたときの計測結果に対応する。おもりの増加を青点線の矢印で、おもりの減少を赤一点鎖線の矢印で示している。青丸プロットはほぼ右肩上がり一直線上に並んでおり、近似直線を黒実線で示してある。このことは、ワイヤ引張力の増加に比例して湾曲角が増加する、線形関係を表している。一方、赤四角のプロットは、0.5[kg]以上のおもりではほぼ横一線の同じ湾曲角を示し、完全に除荷したときのみ、湾曲角が小さい値を示すが、それでも0までは戻らない。このことは、ワイヤ引張力と湾曲角の間のヒステリシス特性を示している。このヒステリシス特性は、弾性ロッドの復元力に比べて非常に大きい、ワイヤとゴム層・チュー

ブとの間の摩擦に起因すると考えられる。



☒ 2.8: Experimental setup



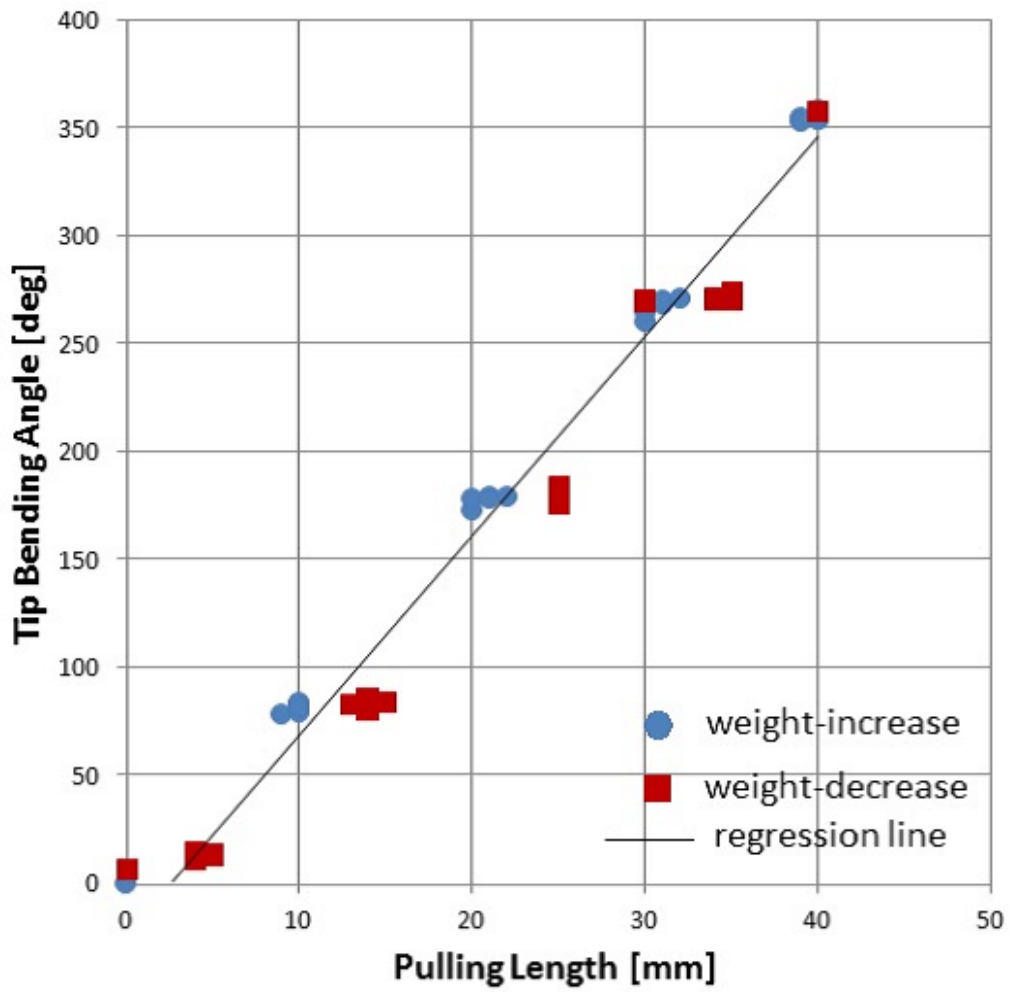
☒ 2.9: Relationship between Pulling-force and Tip Bending Angle

2.4.4 湾曲角とワイヤ引張量との関係

提案する連続体マニピュレータの湾曲角とワイヤ引張量との静力学的関係を調査する．前節と同じ装置を用いて，おもりによる重力を用いてワイヤに引張力を加えるが，おもりの土台の高さを計測することにより，ワイヤの引張量を測定する．おもりは，0 から 2[kg] まで 0.5[kg] ずつ増加させ，その後，0.5[kg] ずつ減少させるが，除荷の際は，マニピュレータに対して適当に外力を加えて，ワイヤの引張量がほぼ等間隔となるような条件を選び計測する．なお，マニピュレータに外力を加える際には，おもりによる引張力を一時的に解除しておく．湾曲角は，先程と同様に，横から撮影したカメラ画像から読み取る．おもりの増加・減少の一連のプロセスを 5 回行い，各おもりの条件において，静力学的平衡状態における湾曲角とワイヤ引張量を計測する．

Fig. 2.10 は，ワイヤ引張量と湾曲角の関係を示すグラフである．横軸はワイヤ引張量 [mm]，縦軸は湾曲角 [deg] である．各プロットは，各おもりの条件 5 回ずつの計測結果である．プロットはほぼ右肩上がりの一直線上に並んでいることがわかる．360[deg] の湾曲角における引張量は，約 40[mm] である．近似直線を黒実線で示す．プロット点の相関係数は 0.98 である．ワイヤ引張量と湾曲角との間に比例関係が成り立つことを確認できる．おもりを除荷する際に，マニピュレータに外力を加えているが，これと同様のプロセスは，残りの 2 本のワイヤに適切に引張力を加えることによって実現できると考えられる．つまり，提案するマニピュレータでは，3 本のワイヤに適切な引張力を加えることにより，ワイヤの引張量を調整して，湾曲角を

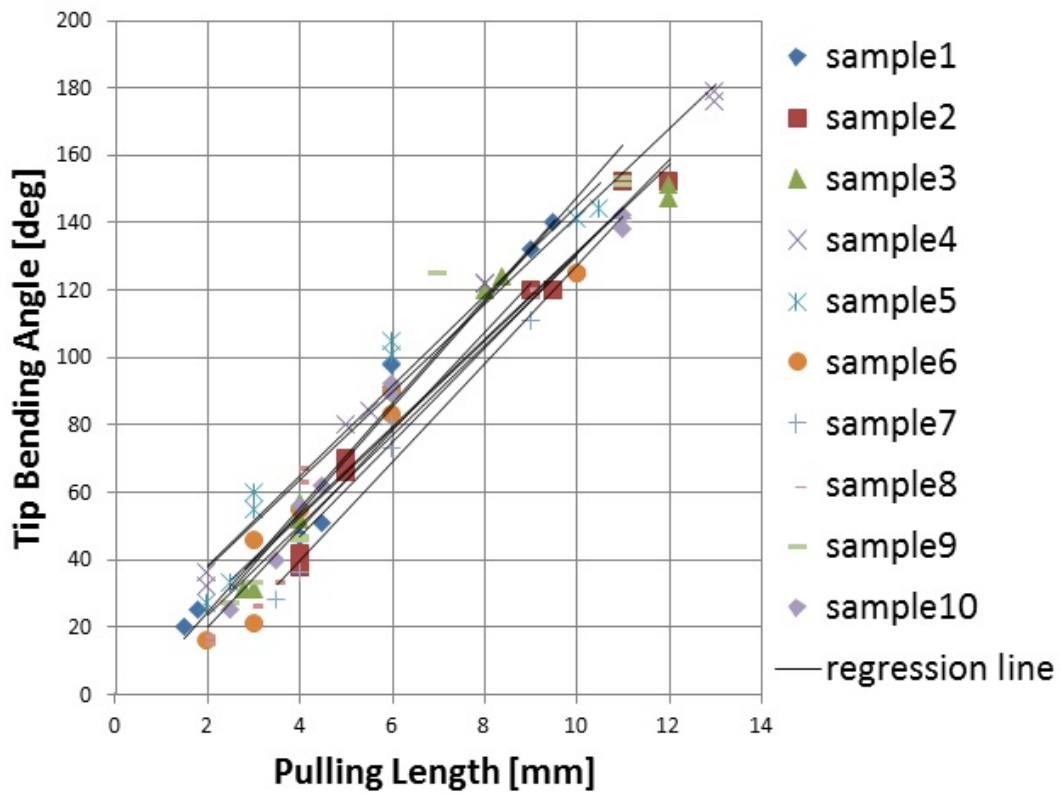
制御することが可能であると考えられる。



☒ 2.10: Relationship between Pulling Length and Tip Bending Angle

2.4.5 湾曲特性のばらつき

個体さによる湾曲特性のばらつきを明らかにするために、10本のマニピュレータを製作し、ワイヤ引張量に対するマニピュレータ先端の湾曲角を計測した。Fig. 2.11は、ワイヤ引張量と湾曲角の関係を示すグラフである。横軸はワイヤ引張量 [mm]、縦軸は湾曲角 [deg] である。全プロット点の相関係数は0.97である。また、各マニピュレータに対する回帰直線の手先角度誤差の標準偏差は0.27度である。なお、液体ゴムの温度、粘度や、浸潤時間の厳密な管理によって、ゴム層のばらつきを低減させることは可能であり、よってワイヤ引張量に対する湾曲角のばらつきも抑制できると考えられる。



☒ 2.11: Relationship between Pulling Length and Tip Bending Angle

2.5 まとめ

この章では，ワイヤ駆動型連続体マニピュレータのスリムさと大湾曲を両立させる，可伸縮ワイヤ拘束手段を有するワイヤ駆動型連続体マニピュレータを提案した．提案する連続体マニピュレータでは，大湾曲の際も，ワイヤ拘束手段が可伸縮するため，マニピュレータの大湾曲を妨げない構造となっている．また，ワイヤ駆動機構は，体幹周りに形成された薄いゴム層の内部に埋め込まれているため，ワイヤの露出も全くなく，スリムなボディを実現できる．

ワイヤはゴム層に埋め込まれているため，ワイヤ周りの摩擦の影響を無視できず，マニピュレータの形状は一定曲率の円弧とはならない．次章では，一定曲率を仮定しない連続体マニピュレータのモデルについて議論する．

第3章 連続体マニピュレータのモデル

本章では，ワイヤ駆動型連続体マニピュレータのモデルについて議論する．まず，広く用いられている一定曲率モデルについて説明し，その問題点を明らかにする．その上で，一定曲率モデルを仮定しないモデルを提案する．提案するモデルの妥当性を，3本ワイヤ駆動の連続体マニピュレータの実機により検証する．

3.1 一定曲率モデル

連続体マニピュレータのモデルとして、一定曲率モデルが最も広く利用されている [29][30]。連続体マニピュレータの背骨曲線の形状が一定曲率、すなわち円弧であることを仮定しているため、ワイヤ引張量（一般の連続体マニピュレータではアクチュエータ長さ）から、連続体マニピュレータの手先位置・姿勢を簡単に計算することができる。手先位置・姿勢が、アクチュエータ長さの閉形式で与えられていることから、冗長性を考慮すれば、逆運動学、すなわち、所望の手先位置・姿勢に対するアクチュエータ長さを求めることも容易である。

しかしながら、ワイヤを引っ張る際に、ワイヤと周囲の部材との間の摩擦が生じ、この影響が無視できないほど大きい場合には、連続体マニピュレータの形状は円弧から大きく乖離してしまい、もはや一定曲率モデルの適用は妥当ではない。一定曲率モデルを適用するためには、ワイヤ周りの摩擦を低減させなければならないが、連続体マニピュレータの機構の設計に大きな制限を与えることとなる。

3.2 一定曲率を仮定しないモデル

一定曲率モデルが対応できない状況を改善するため、様々なモデルが提案されている。JungらおよびGuruらは、ワイヤと構造物との間の摩擦を考慮した連続体マニピュレータの形状は一定曲率モデルの形状にならないことを示した。彼らは摩擦力の効果を考慮した連続体マニピュレータの形状モデルを提案したが、複雑な摩擦モデルのために一定曲率モデルよりもモデルを利用することは容易ではない[32][33]。Camarilloらは、ワイヤ駆動機構の内部荷重をモデル化することにより、線形梁の構成におけるモデルを示した[34][35]。さらに、RuckerとWebsterはワイヤ駆動の分散荷重を考慮したモデルを提案した[36]。しかしながら、提案モデルと広く利用されている一定曲率モデルとの明確な関係はまだ提供されていない。Roneらは、引張られているワイヤとそのワイヤの周辺の摩擦力を扱うことが可能な運動学モデルについて議論をした[37]。しかしながら、このタイプの運動学モデルでは、モデルの正確さと精度を議論することが困難である。

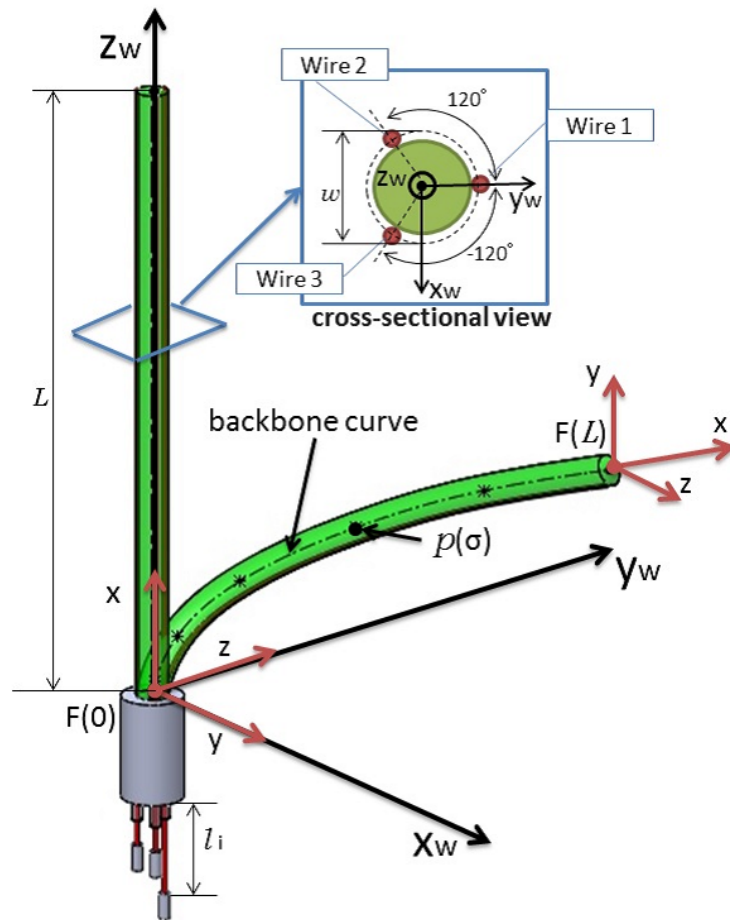
3.2.1 運動学

弾性ロッド

まず、長さ L の弾性ロッドをワイヤで引っ張る状況を考える。(Fig.3.1) ロッド断面の幾何中心を結んで得られる曲線を背骨曲線とする。以下の条件を仮定する：

- 弾性ロッドは外力がない時は真っ直ぐである。
- 弾性ロッドの各部分の断面形状は同一である。
- ロッドを曲げるための3本のワイヤは、ロッドの背骨曲線と平行に対称に $w/2$ の距離で配置される。

ロッドの一端をベース、もう一端を手先と呼ぶ。弾性ロッドのベース側の端点を地面に固定する。連続体マニピュレータの背骨曲線の弧長パラメータを $\sigma \in [0, L]$ とする。



⊗ 3.1: The schema of the continuum manipulator with rubber skin layer including pulling-wire mechanism.

$p(\sigma) \in \mathfrak{R}^3$ を σ における背骨曲線上の点の位置ベクトルとする．背骨曲線上の各点にフレームを付ける．フレームの x 軸を背骨曲線の接線方向に揃える．マニピュレータに外力が働かないとき（すなわち，背骨曲線が直線になるとき），背骨曲線上の全てのフレームは同じ姿勢をとるようにする．マニピュレータが湾曲したとき，それに伴い各フレームの姿勢も変化する．フレームの変化を追跡することにより，各点でのねじれや曲げ具体を知ることができる． $F(\sigma) \in SO(3)$ を σ におけるフレームの姿勢行列とする．一般性を失わず， $p(0) = 0$ としておく．なお，弾性ロッドのベースが地面に固定されているため，ここは $F_b \in SO(3)$ が定数行列であり， $F(0) = F_b$ としておく．以下では， $F_b = [e_z \ e_x \ e_y]^T$ としておく． e_x, e_y および e_z は x, y および z 方向におけるそれぞれの単位ベクトルである．これらの位置ベクトルと姿勢行列は，次式の微分方程式を満たす．

$$\frac{dF}{d\sigma}(\sigma) = F(\sigma) [\theta(\sigma) \times] \quad (3.1)$$

$$\frac{dp}{d\sigma}(\sigma) = F(\sigma) e_x \quad (3.2)$$

ここで， $\theta(\sigma) := [\theta_t(\sigma) \ \theta_n(\sigma) \ \theta_b(\sigma)]^T \in \mathfrak{R}^3$ は各フレームに対する微小回転ベクトルであり，この中の $\theta_t(\sigma), \theta_n(\sigma)$ および $\theta_b(\sigma) \in \mathfrak{R}$ は， σ の上の各軸に対する微小回転量である． $[\cdot \times]$ は， \mathfrak{R}^3 空間中のベクトルを 3 次の歪対称行列に写像するための演算子である．ベクトル $\theta(\sigma)$ は，弾性ロッドの変形の幾何を表す重要なベクトルのため，この論文では， $\theta(\sigma)$ を「変形ベクトル」と呼ぶことにする．

微小部分変形

各ワイヤの引張量をそれぞれ l_1, l_2 および $l_3 \in \mathfrak{R}$ とする . $\varepsilon_1(\sigma), \varepsilon_2(\sigma)$ と $\varepsilon_3(\sigma) \in \mathfrak{R}$ を連続体マニピュレータの σ におけるひずみとする . ワイヤの引張量 l_i とひずみ $\varepsilon_i(s)$ は以下の式で表される .

$$l_i = - \int_0^L \varepsilon_i(s) ds , \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.3)$$

ここで注意すべきは , ワイヤは引張ることしかできないことである . したがって , l_i は連続体マニピュレータの圧縮につながり , $l_i \geq 0$ になる . すなわち , $\varepsilon_i(\sigma) \leq 0$ である . 上式を以下のようにベクトル表現にまとめておく .

$$l = - \int_0^L \varepsilon(s) ds \quad (3.4)$$

ここで , $l := [l_1 \ l_2 \ l_3]^T$ および $\varepsilon(s) := [\varepsilon_1(s) \ \varepsilon_2(s) \ \varepsilon_3(s)]^T$ である .

幾何ベクトル $\theta(\sigma)$ とひずみとの関係は , 次式で表される .

$$\theta(\sigma) = - \frac{1}{w} \mathbf{W} \varepsilon(\sigma) \quad (3.5)$$

ここで $\mathbf{W} \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ は , ワイヤ引張によるひずみの局所的湾曲への貢献を表す定数行

列であり，次式で表される．

$$\mathbf{W} := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

\mathbf{W} の第1行は0ベクトルであるが，これは，ワイヤを引っ張ることにより，連続体マニピュレータをねじることができないことを示している．

手先姿勢

連続体マニピュレータの背骨曲線上の点 s におけるフレーム姿勢の指数座標を $\phi(s) \in \mathfrak{R}^3$ とする [38] . ここで注目すべきことは , 手先姿勢の指数座標 $\phi(L)$ が , 下記のようなシンプルな式で表されることである .

$$\phi(L) = \int_0^L \boldsymbol{\theta}(s) ds \quad (3.7)$$

$$= \int_0^L \left\{ -\frac{1}{w} \mathbf{W} \boldsymbol{\varepsilon}(s) \right\} ds \quad (3.8)$$

$$= \frac{1}{w} \mathbf{W} \left(-\int_0^L \boldsymbol{\varepsilon}(s) ds \right) \quad (3.9)$$

$$= \frac{1}{w} \mathbf{W} \mathbf{l} \quad (3.10)$$

$$= \frac{1}{w} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2}(l_3 - l_2) \\ l_1 - \frac{l_2 + l_3}{2} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$= \alpha \mathbf{R}(\mathbf{e}_x, \phi_0) \mathbf{e}_z \quad (3.12)$$

ここで α と ϕ_0 はワイヤの引張量により , 以下の式で定められる .

$$\alpha := \frac{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 - l_1 l_2 - l_2 l_3 - l_3 l_1}}{w} \quad (3.13)$$

$$\phi_0 := \text{atan2} \left(\frac{\sqrt{3}}{2}(l_2 - l_3), l_1 - \frac{l_2 + l_3}{2} \right) \quad (3.14)$$

したがって，連続体マニピュレータの手先姿勢 $F(L)$ は以下の式で示すことが可能である．

$$\begin{aligned} F(L) &= F_b e^{[\phi(L) \times]} \\ &= F_b R(R(e_x, \phi_0) e_z, \alpha) \end{aligned} \quad (3.15)$$

ここで， $R(a, \theta) \in SO(3)$ は θ の量だけ単位方向ベクトル a まわりに回転させる作用を表す行列である．

ここで注目すべきことが2点ある．1つは，マニピュレータ全体の形状にかかわらず，連続体マニピュレータの手先姿勢が，ワイヤ引張量 l_1, l_2 および l_3 だけで計算可能であることを，式 (3.13) と式 (3.14) と合せて，式 (2.15) が表していることである．もう1つは，曲率が一定であることを仮定していないにもかかわらず，重要な幾何学量 α と ϕ_0 は，一定曲率モデルで現れる量と本質的に同じ形式で表現されていることである．以下では，連続体マニピュレータの変形において重要な幾何学量 α と ϕ_0 を，手先湾曲角 (tip bending angle) およびマニピュレータ湾曲方向 (manipulator bending direction) と呼ぶことにする．

3.2.2 静力学

一定曲率モデルでは，連続体マニピュレータの背骨曲線は一定曲率の円弧であると仮定されているため，手先の位置を次式で求めることができる．

$$\mathbf{p}(L) = \begin{bmatrix} \frac{L}{\alpha}(1 - \cos \alpha) \cos \phi_0 \\ \frac{L}{\alpha}(1 - \cos \alpha) \sin \phi_0 \\ \frac{L}{\alpha} \sin \alpha \end{bmatrix} . \quad (3.16)$$

しかしながら，曲率が一定とは限らない場合は，連続体マニピュレータの手先位置を知るために，静力学を考慮する必要がある．

もしワイヤ周辺の摩擦力が無視できない場合，ワイヤ周りの分布力が連続体マニピュレータに加わると考えるのが妥当である．ここでは，ワイヤ i を引張力 f_i で引っ張ったとき，大きさが $\eta_i(s)ds$ である力が，背骨曲線の接線方向と逆方向に（すなわち $-\frac{d\mathbf{p}}{ds}(s)$ の向きに）ワイヤ i の各点 $\mathbf{p}(s) + \mathbf{F}(s)\mathbf{r}_i$ に働くと仮定する．ここで $\mathbf{r}_i (i = 1, 2, 3)$ は，ワイヤのオフセット定数ベクトルであり，次式で表される．

$$\mathbf{r}_i = \frac{w}{2} \mathbf{R} \left(\mathbf{e}_x, \frac{2\pi}{3}(i-1) \right) \mathbf{e}_y \quad (3.17)$$

ここで，引張力ベクトルを $\mathbf{f} := [f_1 \ f_2 \ f_3]^T$ で定義しておく．引張力ベクトルは，ワ

イヤに沿った分布力の大きさと次式の関係を持たなければならない。

$$\mathbf{f} = \int_0^L \boldsymbol{\eta}(s) ds \quad (3.18)$$

ここで， $\boldsymbol{\eta} := [\eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3]^T$ である。

背骨曲線の弧長 s におけるモーメントバランスは，次式で表される。

$$\mathbf{F}(s)\mathbf{K}\boldsymbol{\theta}(s)ds = \int_s^L \sum_{i=1}^3 \{\mathbf{p}(\xi) + \mathbf{F}(\xi)\mathbf{r}_i - \mathbf{p}(s)\} \times \left\{ -\eta_i(\xi) ds \frac{d\mathbf{p}}{ds}(\xi) \right\} d\xi \quad (3.19)$$

この式において， $\mathbf{K} := \text{diag}\{k_t, k_n, k_b\}$ は 3×3 の対角行列であり，その対角の構成要素は，フレームの軸の周りの回転バネ定数に対応する。上式の両辺を s に関して微分すると，次式を得る。

$$\mathbf{K} \frac{d\boldsymbol{\theta}}{ds}(s) = \frac{w}{2} \mathbf{W} \boldsymbol{\eta}(s) \quad (3.20)$$

上式の両辺を σ から L まで積分することにより，次式を得る。

$$\boldsymbol{\theta}(L) - \boldsymbol{\theta}(\sigma) = \frac{w}{2} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{W} \int_{\sigma}^L \boldsymbol{\eta}(s) ds \quad (3.21)$$

ここで，連続マニピュレータの先端に曲がりがないため， $\boldsymbol{\theta}(L)$ はゼロとなることに

注意すると，次式を得る．

$$\boldsymbol{\theta}(\sigma) = -\frac{w}{2}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{W} \int_{\sigma}^L \boldsymbol{\eta}(s)ds \quad (3.22)$$

この式は，式 (3.18) に満足するワイヤに沿った分布力 $\boldsymbol{\eta}(s)$ が，ワイヤ駆動型連続体マニピュレータの形状を決定することを示している．

$\sigma = 0$ を式 (3.22) に代入すると，ワイヤ引張力で決まる変形ベクトルの初期値を得ることができる．

$$\boldsymbol{\theta}(0) = -\frac{w}{2}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{W}f \quad (3.23)$$

ここで注目すべきことは，背骨曲線に沿った分布力がなく，引張力が先端にのみ作用した場合，すなわち， $\boldsymbol{\eta}(\sigma) = \delta(\sigma - L)f$ を式 (3.22) に代入したとき，マニピュレータ形状が一定曲率となることが導かれることである．ここで， $\delta(\cdot)$ は Dirac の delta 関数である．このときの一定曲率の値は，式 (3.23) の右辺の値である．さらに，式 (3.12) を用いて，ワイヤ引張力 f を用いる代わりに，マニピュレータ形状に依存しない幾何学パラメータ α と ϕ_0 を用いて，一定曲率の状況を次式で表すことができる．

$$\boldsymbol{\theta}(s) \equiv \frac{\alpha}{L}\mathbf{R}(e_x, \phi_0)e_z \quad (3.24)$$

この式は，先に示した一定曲率における手先位置の式 (3.16) と整合がとれているこ

とに注意されたい．すなわち，一定曲率モデルは，本論文で考慮している一定曲率を仮定しないモデルの特殊ケースとして扱うことができ，その間の関係が明らかとなっている．

つぎに，別の簡単なケースとしてワイヤに沿った力分布が一様である場合，すなわち， $\eta(\sigma) = \frac{f}{L}$ である状況を考える．この場合，次式を得ることができる．

$$\theta(s) = -\frac{w}{2} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{W} f \left(1 - \frac{s}{L}\right) . \quad (3.25)$$

この $\theta(s)$ を用いて，ワイヤ引張力 f に関する連続体マニピュレータ手先姿勢の指数座標を導出することが可能であり，次式で表される．

$$\phi(L) = -\frac{wL}{4} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{W} f \quad (3.26)$$

上式は，式 (3.12) と等しくなければならないことから，次式を得ることができる．

$$\theta(s) = \frac{2\alpha}{L} \left(1 - \frac{s}{L}\right) \mathbf{R}(e_x, \phi_0) e_z \quad (3.27)$$

Kirchhoff 弾性ロッドモデルの離散版 [39] を用いることにより，上式よりワイヤ駆動型連続マニピュレータの全体形状を数値的に計算することができ，さらには，手先位置も得ることができる．この数値計算の結果は，後のモデル検証の際に用いる．

3.3 モデル検証

この節では、提案する一定曲率を仮定しないワイヤ駆動連続マニピュレータのモデルの妥当性を検証する実験の結果を示す。

3.3.1 実験装置

この検証実験では、引張りワイヤの周りの摩擦によって、湾曲形状は一定曲率ではない湾曲特性を持ち、ゴム層にワイヤ駆動機構を埋め込んでいる連続マニピュレータを使用している。

実験装置は Fig. 3.2 で示す。連続体の弾性ロッドをゴムにディッピングされており、3本のワイヤがゴム層に埋込んでいる。そして3本のワイヤがそれぞれで独立なりニアアクチュエータで引張られる。そして、湾曲した連続体マニピュレータの形状を取るためのカメラで構成されている。連続体の弾性ロッドでは、実際に直径5[mm]、長さ100[mm]であり、湾曲に対して非常に高い可撓性のステンレスチューブ(KS-5N, Hagitec Inc.)である。ゴム層はラテックス天然ゴムである。ゴム層内における3本のワイヤでは、中心にある弾性ロッドの円周方向に120度の間隔で連続体ロッドの中心骨格と平行に固定されている。(Fig. 2.1の右上のマニピュレータの断面の概略図を参照)

リニアアクチュエータ(PCS9RD, THK)では、駆動部分はロータリエンコーダ付きのロータリーステッピングモータを使用している。そして、リニアアクチュエータの直線ストロークが100[mm]、最大推力が3[kgf]、最小送り距離は1.25[μm]である。ゴム層に埋め込んでいるワイヤはステンレス製の金属ワイヤであり、直径は0.3[mm]である。また、連続体マニピュレータとリニアアクチュエータの間はケブラーファイバーで結ばれている。ケブラーファイバーの特性も[31]で議論されている。

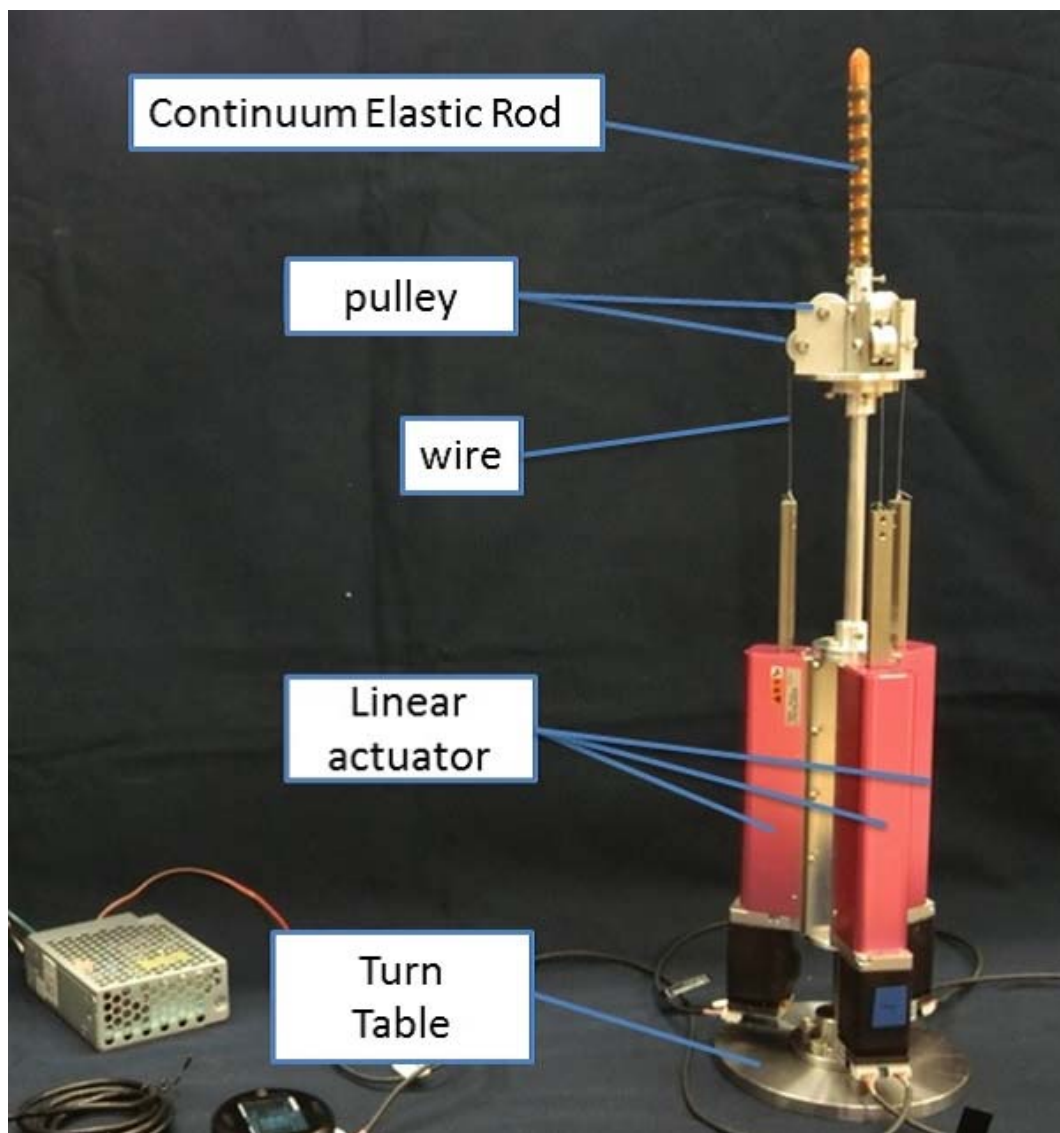


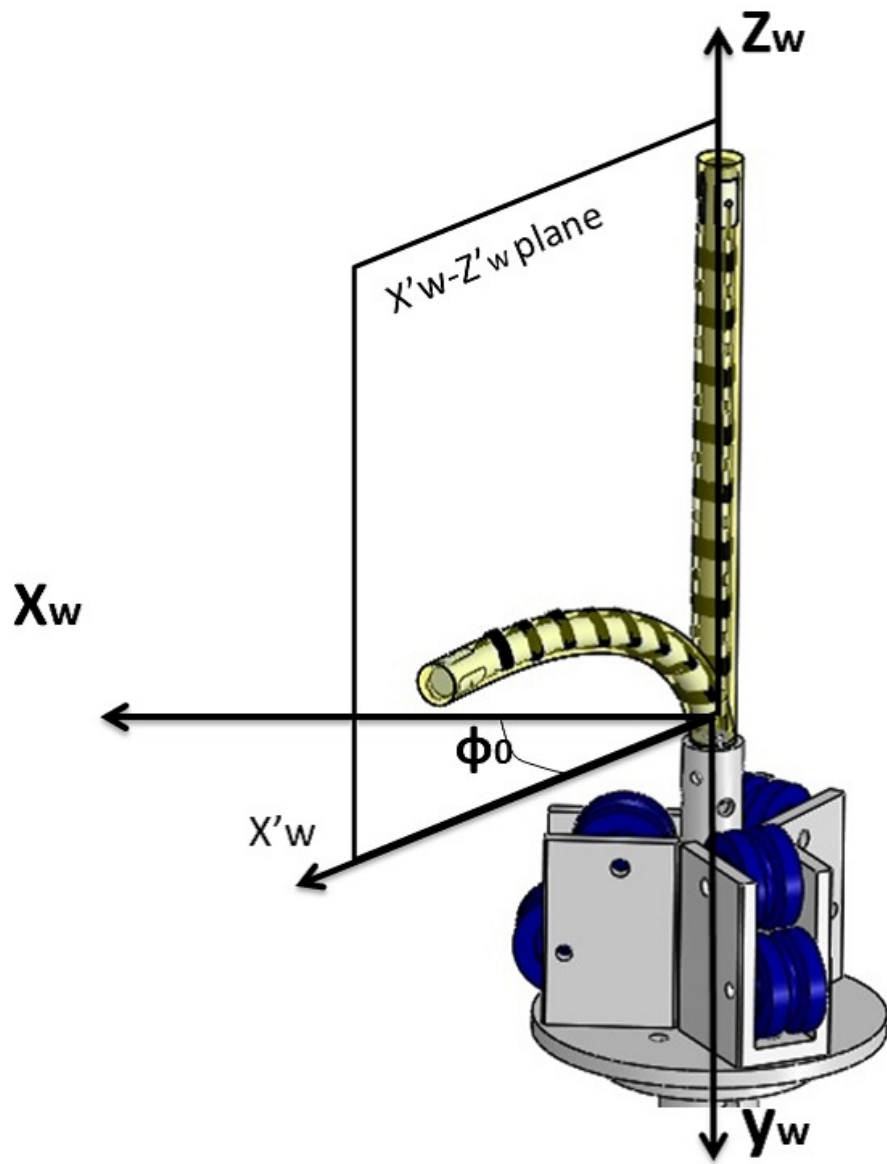
图 3.2: The experimental setup for model validation

3.3.2 実験手法

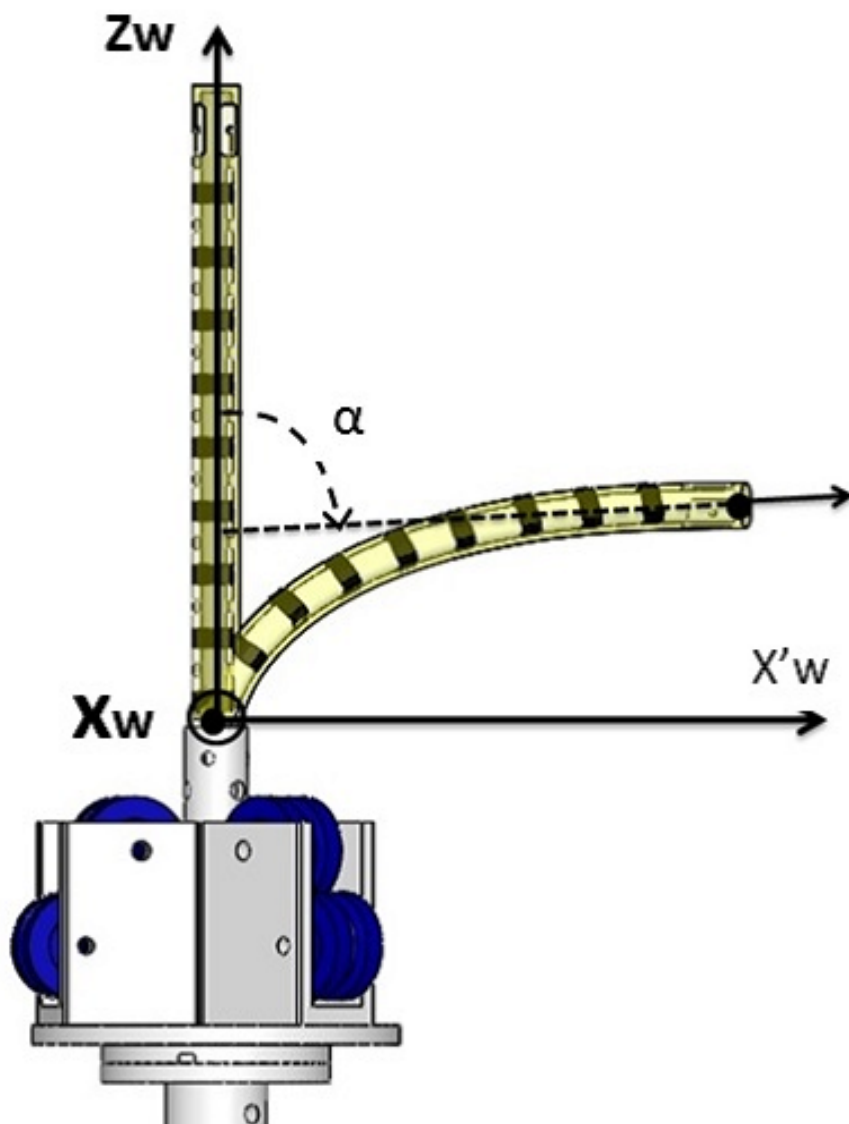
ここで検証実験の手順について説明する．実験では，連続体マニピュレータの上と側面からマニピュレータの湾曲形状をカメラで撮る．

湾曲方向を 8 種類 ϕ_0 (Fig. 3.3) (i.e., 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 [deg]) と湾曲角度 5 種類 α (Fig. 3.4) (i.e., 30, 60, 90, 120, 150 [deg]) の組合せである．そして最初位置の位置 ($\phi_0 = \alpha = 0$) である．

各 ϕ_0 と α の組合せを逆運動学に計算して，各ワイヤの引張量 l_1, l_2, l_3 でリニアアクチュエータで制御し，ワイヤを引張って連続体マニピュレータを動かす．マニピュレータの湾曲方向 ϕ_0 ($X_w - Y_w$ 平面から撮った写真から量測する) と湾曲角度 α ($X_w - Z_w$ 平面から撮った写真を量測する)．そして各量測されたの ϕ_0 と α をモデルで計算された理想の数値に比較する．



☒ 3.3: The parameter of the bending direction ϕ_0

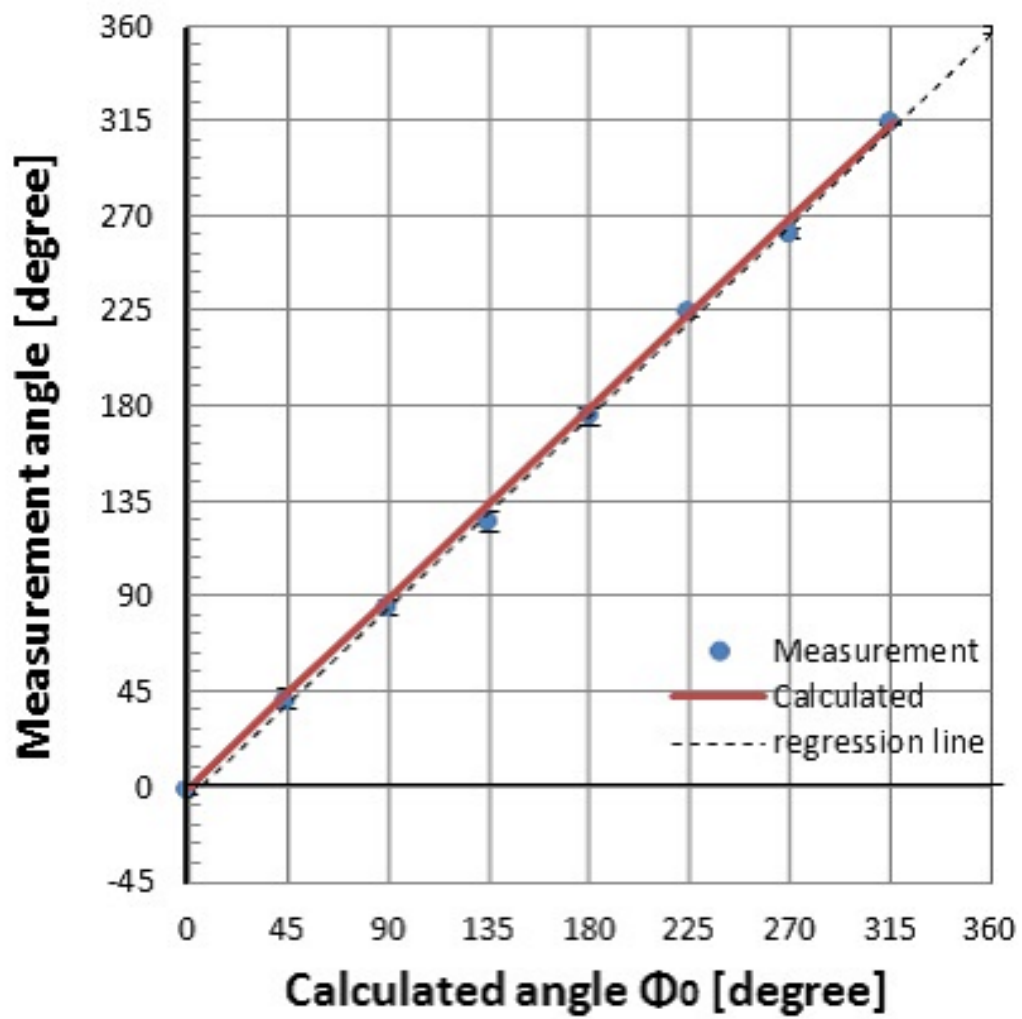


☒ 3.4: The parameter of the bending angle α

3.3.3 湾曲方向の検証結果

Fig. 3.5 は、目標の ϕ_0 (横軸) に対する測定した ϕ_0 (縦軸) の図である。各青い円点は、各目標値 ϕ_0 に対する 5 つの異なる曲げ角度 (すなわち, $\alpha = 30, 60, 90, 120, 150$) の間の測定値の平均のプロットである。また、各プロットに付随する誤差バーは標準偏差である。図の中の点線では、測定された ϕ_0 の 5 つの平均値に対応する 8 つのプロットによって決められたの回帰直線である。また、赤実線は理想の目標値である。

この図から、目標値と測定値との間に強い正の相関が見られる。また、これらの値の間の相関係数は 0.99 である。

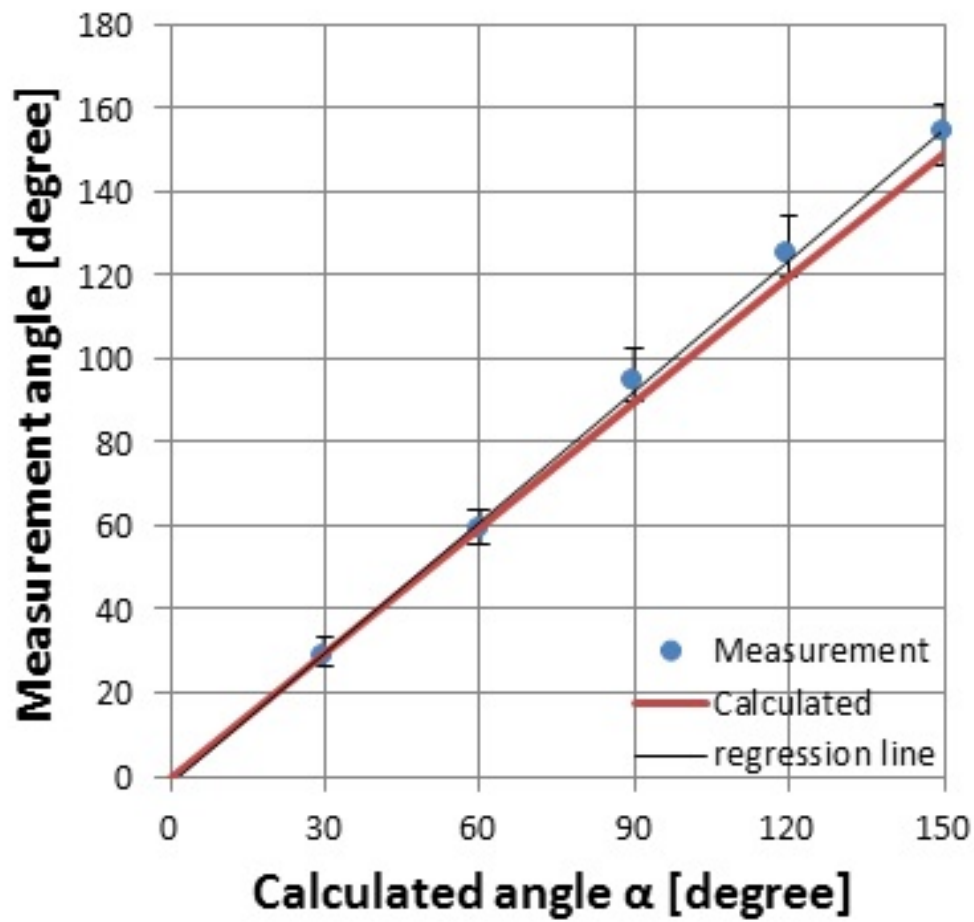


☒ 3.5: The result of the bending direction ϕ_0 experiment

3.3.4 湾曲角度の検証結果

Fig. 3.6 は、目標の α (横軸) に対する測定した α (縦軸) の図である。各青い円点は、各目標値 α に対する 8 つの異なる曲げ角度 ($\phi_0 = 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315$) の間の測定値の平均のプロットである。また、各プロットに付随する誤差バーは標準偏差である。図の中の点線では、測定された ϕ_0 の 8 つの平均値に対応する 5 つのプロットによって決められたの回帰直線である。また、赤実線は理想の目標値である。

この図から、目標値と測定値との間に強い正の相関が見られる。また、これらの値の間の相関係数は 0.99 である。



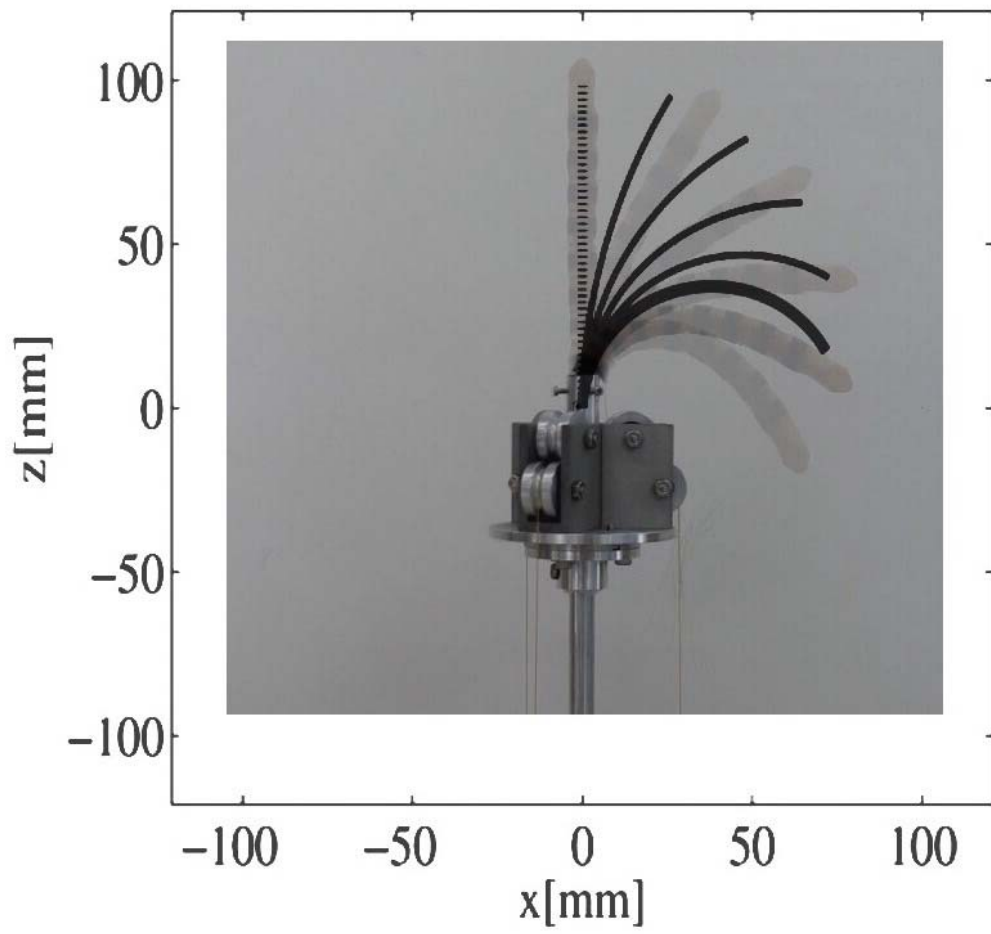
☒ 3.6: The result of the bending angle α experiment

3.3.5 湾曲形状の比較実験

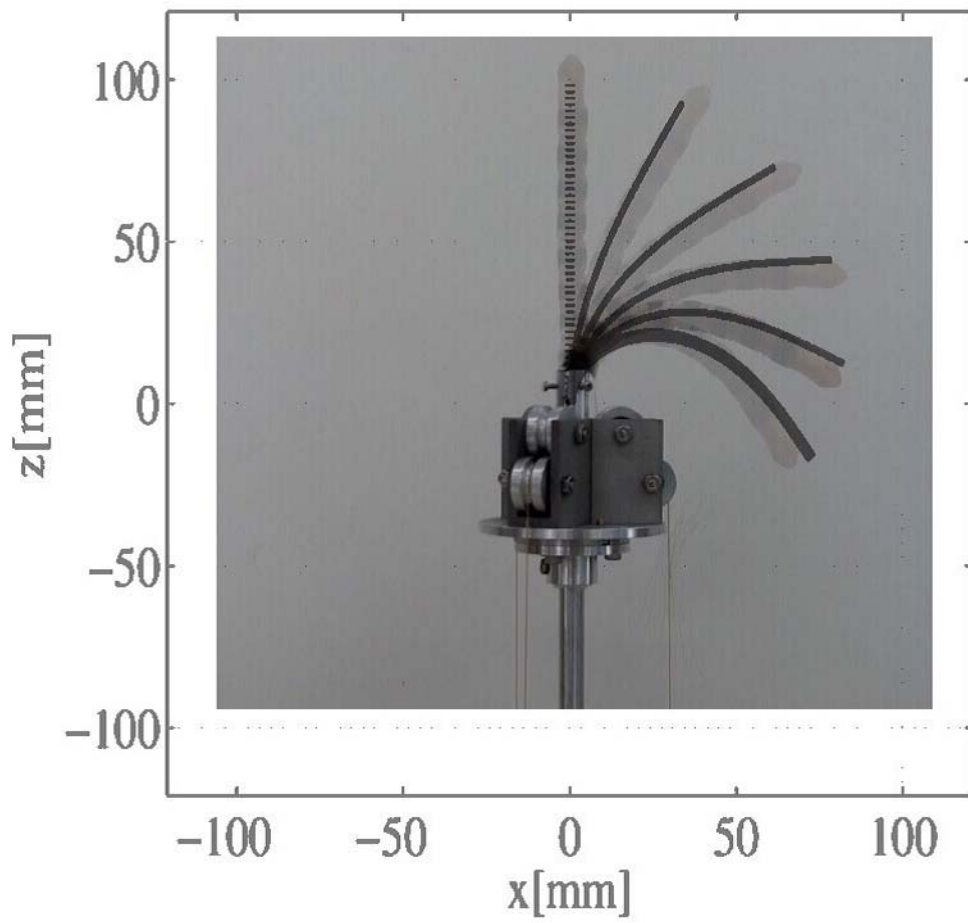
Fig. 3.7 は、 $\phi_0 = 0$ における 6 つの異なる曲げ角度 ($\alpha = 0, 30, 60, 90, 120, 150$) の側面写真を重ね合わせた写真である。一連の黒い曲線が連続マニピュレータの一定の曲率形状。水平軸と垂直軸はそれぞれ世界座標の X_w と Z_w である。

この図から、実際のマニピュレータ形状は一定の曲率形状と大きく異なることが判明できる。

一方、Fig. 3.8 は、Fig. 3.7 と同様の側面図を重ね合わせた写真であるが、ここでは、黒い曲線は一様な摩擦力が分布する仮定を入れたモデルの形状である。この図から、一定曲率の場合よりも実形状と推定形状の形状対応が優れていることが判明できる。



☒ 3.7: The shape of constant curvature model



☒ 3.8: The shape of non-constant curvature model with uniform distribution friction force

3.4 まとめ

本章では，ワイヤ駆動型連続体マニピュレータのモデルについて議論した．ワイヤ駆動機構のワイヤ周辺の摩擦力が無視できないほど大きい場合は，一定曲率モデルの適用は不適切である．そこで，一定曲率を仮定しないモデルを提案した．提案する運動学に関するモデルによれば，一定曲率モデルのときとほぼ同様の簡単な計算式で，ワイヤ引張量から手先湾曲角と手先湾曲方向を決定することができ，よって手先姿勢を定めることができる．また，提案する静力学に関するモデルによれば，摩擦分布一様などの適切な摩擦分布に対する仮定の下で，ワイヤ引張量から形状を定めることができ，よって手先位置を計算することができる．3本ワイヤ駆動の連続体マニピュレータによる実験により，提案する一定曲率を仮定しないモデルの妥当性を示した．

第4章 連続体マニピュレータの設計例

本章では，提案する連続体マニピュレータの機構とモデルの知見に基づいて，連続体マニピュレータの機構と動きを設計する方法について例示する．

4.1 機構の設計例

ここでは、Fig. 4.1 に示すような狭いスペースに進入して、検査作業を行うワイヤ駆動型連続体マニピュレータの機構設計の問題を考える。

このタスクに対して、連続体マニピュレータの機構に関する仕様は、下記の通りであるとする。

1. 狭所の高さは H である。
2. 狭所の円形入口の直径は D である。
3. 連続体マニピュレータの最大湾曲角は α_{\max} である。
4. 連続体マニピュレータを駆動するワイヤは可能な限り露出しないこと。
5. 無負荷時は、連続体マニピュレータは直線形状であること。

従来のフランジを有するワイヤ駆動型連続体マニピュレータでは、マニピュレータ長さ L 、フランジの個数 N_F 、フランジのサイズ（外径 D_{FO} 、内径 D_{FI} 、高さ h_F ）、フランジに開ける穴の大きさ ϕ_F などが設計パラメータとなるが、下記の点に注意しなければならない。

- 仕様 1 に合わせてマニピュレータ長さ L を定めること。
- 仕様 2 に合わせてフランジの外径 D_{FO} を定めること。
- 仕様 3 を満たす湾曲時に、フランジ同士が干渉しないように、フランジの個数 N_F および高さ h_F を定めること。

- 仕様 4 に対して，フランジの個数 N_F および高さ h_F を定めること．
- 仕様 5 に応じて，体幹となる弾性ロッドの部分が十分な剛性を保つように，フランジの内径 D_{FI} を定めること．
- ワイヤの引っ張りに対して，フランジが破断しない十分な強度を有するように，フランジの外径 D_{FO} ，内径 D_{FI} ，高さ h_F ，フランジに開ける穴の大きさ ϕ_F を定めること．

これらの条件を満たす設計パラメータを見つけることは容易ではない．

これに対して，本研究で提案する機構では，以下の手順により，基材となる望ましい弾性ロッドを選択し，その後ワイヤ駆動機構が埋め込まれたゴム層を形成して“能動化”することで，仕様を満たす機構を決めることができる．

1. 仕様 1 に合わせて，弾性ロッドの長さ L_R は，狭所高さ H よりも余裕をもって小さい値とする．
2. 仕様 2 に合わせて，弾性ロッドの径 ϕ_R を， $\phi_R + 2t_r < D$ とする．ここで， t_r は，提案機構のゴム層の厚みである．
3. 仕様 3 に対応して， α_{\max} まで十分に湾曲させることができる可撓性を有する弾性ロッドを選択する．
4. 仕様 5 に対応して， α_{\max} まで湾曲させたのちに，自然に元に戻ることができる十分な剛性を有する弾性ロッドを選択する．

なお，提案機構では，ワイヤ駆動部は弾性ロッドの周りに形成されるゴム層に埋め込まれるため，仕様4は自動的に満たされる．すなわち，提案機構は，連続体マニピュレータの機構設計の難易度が低い．

例えば， $H = 20\text{mm}$ ， $D = 7\text{mm}$ ， $\alpha_{\max} = \frac{7\pi}{6}\text{rad}$ であったとする．なお，提案機構のゴム層の厚み $t_r = 1\text{mm}$ としておく．長さ $15\text{mm} = L_R < H = 20\text{mm}$ ，径 $4\text{mm} = \phi_R < D - 2t_r = 7 - 2 = 5\text{mm}$ の可撓性と剛性の高い弾性ロッドを探して行く．例えば，可撓性と剛性の高い材料として，タングステンロッドや，ハギテック製のステンレス製フレキシブルチューブ KS が知られている．ここでは外径 4mm の KS-3N を長さ 15mm に切断して用いることにする．選択した弾性ロッドを Fig. 4.2 上図に示す．この弾性ロッドの先端をもって湾曲させると， $\alpha_{\max} = \frac{7\pi}{6}\text{rad}$ 以上の湾曲角度が得られることがわかる（中図）．湾曲させた状態から手を放すと，元の直線形状に戻ることがわかる（下図）．この簡単な確認により，弾性ロッドが望ましい特性を備えていることがわかる．これを提案する製作方法によって“能動化”することにより，仕様を満たす連続体マニピュレータを得ることができる．

さらに，提案モデルを利用すれば，連続体マニピュレータを設計する上で重要な設計パラメータの1つであるワイヤの最大引張量を簡単に見積もることが可能である．ワイヤの最大引張量は，ワイヤを引っ張るための直動アクチュエータを選定する際に有益な情報となる．

再び，連続体マニピュレータの最大湾曲角度の仕様が， α_{\max} rad であったとする．

このとき，式 (3.13) より，ワイヤの引張量の最大値 l_{\max} は，次式で与えられる．

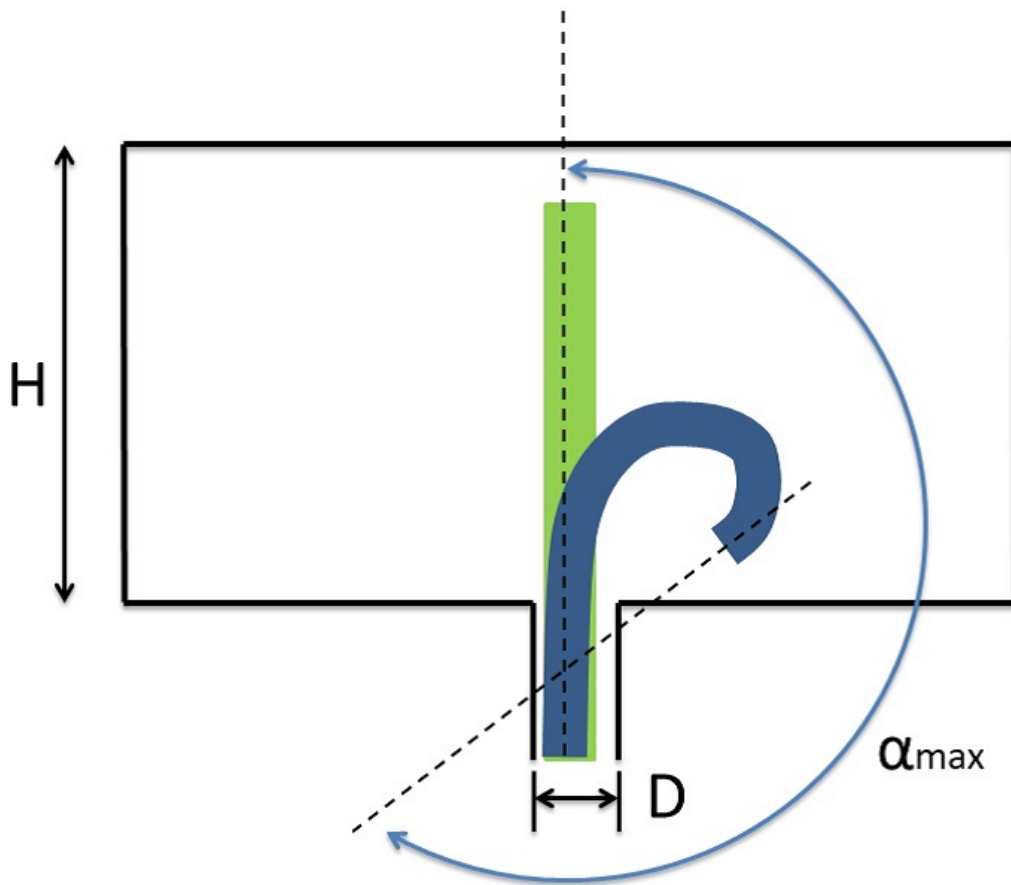
$$l_{\max} = w\alpha_{\max} \quad (4.1)$$

ここで， $w/2$ は背骨中心からワイヤまでの距離であった．

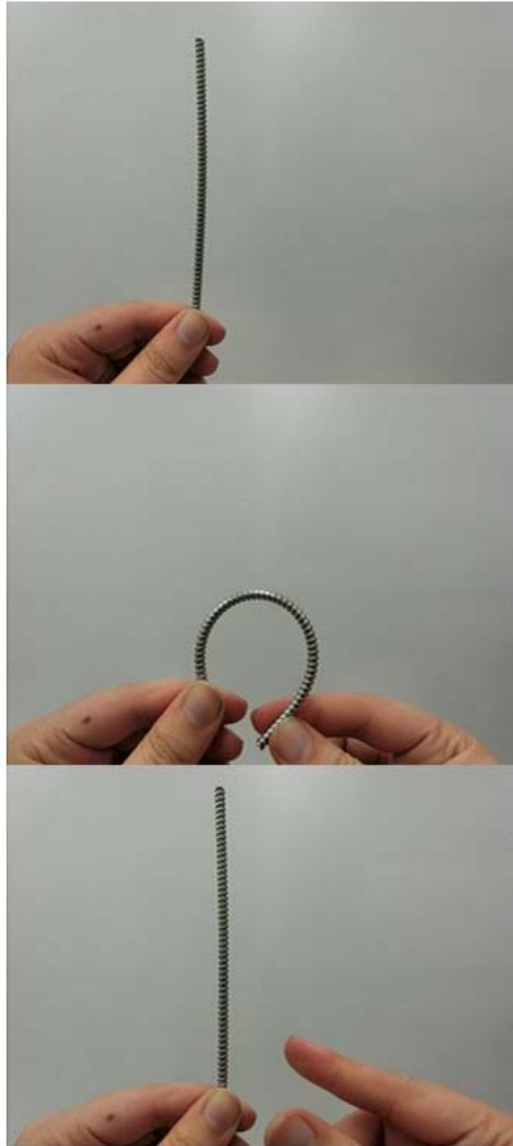
例えば， $w = 6\text{mm}$ で，連続体マニピュレータの最大湾曲角度を 210° としたい場合は，

$$l_{\max} = 6 \text{ mm} \times \frac{7\pi}{6} = 7\pi \text{ mm} \approx 21.99 \text{ mm} \quad (4.2)$$

であるので，ストロークが 22 mm 以上の直動アクチュエータを選定すれば良い．このように，提案モデルに基づいて，アクチュエータの選定に役立つ設計パラメータを得ることができる．



☒ 4.1: Specification of inspection task in a narrow space



☒ 4.2: Elastic rod with a desirable elasticity

4.2 動きの設計例

連続体マニピュレータの手先姿勢を，与えられた時間軌道に動作させるために，ワイヤ引張量を適切に制御することを考える．

いま，目標とする連続体マニピュレータの手先姿勢の時間プロフィール $F(L, t)$ が次式で与えられたとする．

$$F(L, t) = \mathbf{R}(\mathbf{R}(e_x, \phi_0(t))e_z, \alpha(t)) \quad (4.3)$$

ここで， $\alpha(t), \phi_0(t)$ は，それぞれ目標とする手先湾曲角および手先湾曲方向の時間プロフィールである．この手先姿勢軌道を実現するための，ワイヤ引張量は，一意に決まらず無数に解が存在する．すなわち，手先姿勢からワイヤ引張量までの逆運動学の関係は冗長である．もし3本のワイヤのうち的一本を緩めることにすれば，手先湾曲角および手先湾曲方向に対するワイヤ引張量の逆運動学は，式 (3.13) および式 (3.14) より，つぎのように簡単に求めることができる．

l_3 のワイヤが張ってない場合， $l_3 = 0$ より， $0 \leq \phi_0 \leq 2\pi/3$ の範囲で次式を得る．

$$l_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}w\alpha \sin \phi_0 \quad (4.4)$$

$$l_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}w\alpha \sin \left(\phi_0 + \frac{\pi}{3} \right) \quad (4.5)$$

同様に， l_1 のワイヤが張ってない場合， $2\pi/3 \leq \phi_0 \leq 4\pi/3$ の範囲で以下の関係式を

導出することができる

$$l_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}w\alpha \sin\left(\phi_0 - \frac{\pi}{3}\right) \quad (4.6)$$

$$l_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}w\alpha \sin\left(\phi_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.7)$$

l_2 のワイヤが張っていない場合, $4\pi/3 \leq \phi_0 \leq 2\pi$ の範囲で次式が成立する .

$$l_3 = -\frac{2}{\sqrt{3}}w\alpha \sin \phi_0 \quad (4.8)$$

$$l_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}w\alpha \sin\left(\phi_0 + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.9)$$

よって, これら関係式に目標となる手先湾曲角および手先湾曲方向の時間プロフィール $\alpha(t)$ および $\phi_0(t)$ を代入することにより, 目標手先姿勢を実現するワイヤ引張量の時間プロフィール $l_1(t), l_2(t), l_3(t)$ を得ることができる .

例えば, 手先姿勢が水平になるように維持しつつ, 手先湾曲方向 ϕ_0 を 0 度から 360 度まで, 毎秒 10 度で増加する動作を行うことを考える . 手先姿勢が水平となるためには, 手先湾曲角度 α を直角にする必要があるため, 目標となる手先湾曲角度と手先湾曲方向は次式となる .

$$\alpha(t) = \frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad (4.10)$$

$$\phi_0(t) = \frac{\pi}{36}t \text{ rad} \quad (4.11)$$

これを逆運動学の式に代入して得られたワイヤ引張量を実現するように直動アクチュエータを制御することにより，所望の手先姿勢の運動が得られる．

Fig. 4.3 および Fig. 4.4 は，求めたワイヤ引張量でマニピュレータを駆動したときの 1 秒おきの側面および上からの連続写真である．これらの図より，マニピュレータの手先姿勢を水平に保ちながら，手先湾曲方向を 10 度ずつ変化させて旋回する所望の動作が実現できていることが確認できる．

4.3 まとめ

本章では、提案する連続体マニピュレータの機構とモデルに基づき、連続体マニピュレータの機構と動きの設計例を示した。まず、従来のフランジ型連続体マニピュレータでは設計が困難な仕様に対して、提案機構により、仕様を満たす条件を見つける設計例を示した。また、手先姿勢からワイヤ引張量を定める逆運動学モデルに基づいて所望の手先姿勢の動きを実現する動きの設計例を示した。

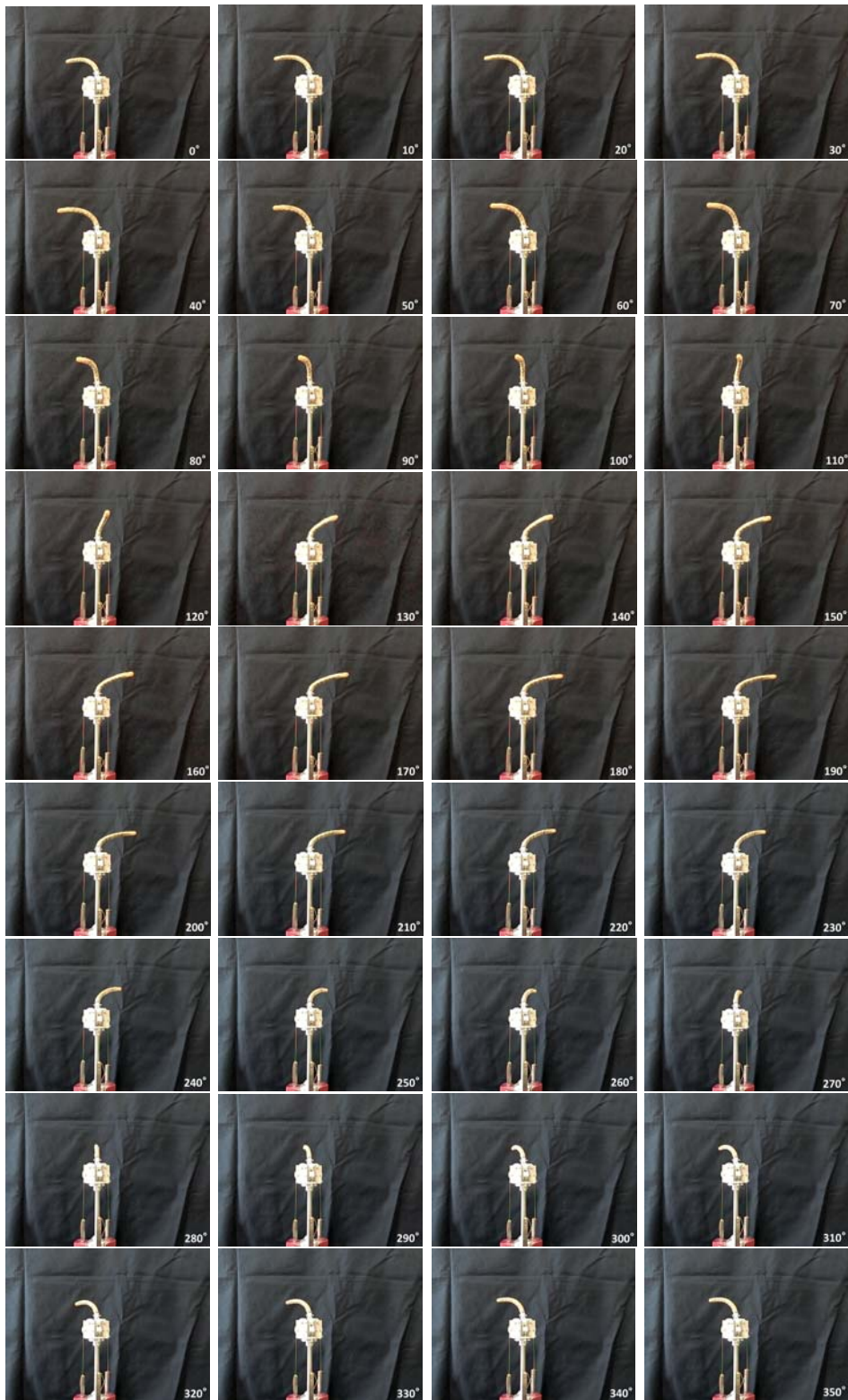


图 4.3: Side view of the constant α motion ($\alpha = 90$ degree)



⊗ 4.4: Top view of the constant α motion ($\alpha = 90$ degree)

第5章 おわりに

本章では，本研究の成果をまとめ，今後の展望を示す．

5.1 研究成果のまとめ

本論文では，連続体マニピュレータの中でも最も典型的な，ワイヤ駆動型の連続体マニピュレータを対象として，そのモデルと機構について論じ，機構とモデルに関してそれぞれ新たな提案を行った．

機構に関しては，ワイヤを露出させずに，スリムさと高い湾曲特性を兼ね備えた可伸縮ワイヤ拘束手段を有する新しいワイヤ駆動型連続体マニピュレータの機構と，その製作方法を提案した．従来の連続体マニピュレータの機構では，ワイヤを拘束するためのフランジが，スリムさと高い湾曲特性の両立を妨げていた．提案する可伸縮ワイヤ拘束手段では，拘束手段が，連続体マニピュレータの湾曲に伴い適切に伸縮することで，マニピュレータの湾曲を妨げない巧みな機構となっている．これにより，スリムでありながら大曲率の湾曲を実現することが可能となった．

モデルに関しては，従来広く使われていた連続体マニピュレータの一定曲率モデル（Constant Curvature Model）を拡張したより一般的なモデルを提案した．この

モデルは、一定曲率モデルの有する、ワイヤ長からマニピュレータの手先姿勢を容易に計算できるという利点を保持したまま、一定曲率でないケースにも適用することができる。さらに、ワイヤ周りに働く分布力を仮定することにより、手先位置さらには全体の形状も容易に計算することができる。

本論文の、主な貢献は次の通りと考えられる。

- 連続体マニピュレータの機構に関して、ワイヤ駆動型連続体マニピュレータに対する、設計自由度の高い、機構の一オプションを提示したこと。本論文で提案する機構に基づけば、ワイヤを露出することなしに、スリムさと大湾曲特性を兼ね備えたワイヤ駆動型連続体マニピュレータを実現することができる。
- 連続体マニピュレータのモデルに関して、最も利用されていた一定曲率モデルに対して一定曲率を仮定しない拡張モデルを提案したこと。本論文で提案するモデルに基づけば、ワイヤ周りの摩擦を無視できないようなケースに対しても、ワイヤ引張量から、手先姿勢、さらには、適切なワイヤ周りの分布力に対する仮定の下で、手先位置を容易に計算することが可能である。

5.2 今後の展望

今後、下記に示す課題を推進することが重要であると考えられる。

- 機構に関しては、よりシンプルな製作方法の開発が求められる。例えば、ゴムディッピングを含む工程のロボットによる自動化が考えられる。

- モデルに関しては，より精度の高い手先位置・姿勢さらには形状の推定のために，ワイヤ周り分布力特性の同定方法の開発が必要である．
- 設計に関しては，提案モデルに基づくシミュレータを開発し，これに基づく設計支援システムを構築することで，より良い機構・動作設計が実現されると考えられる．

関連図書

- [1] Siciliano, B. and O. Khatib (Eds.): Handbook of Robotics, Springer, 2008.
- [2] Robinson, G. and J.B.C. Davies: Continuum Robots - A State of the Art, Proc. of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2849/2854, 1999.
- [3] Advanced Robotics Special Issue on Continuum Robots and Manipulation, Call for Paper, http://www.rsj.or.jp/databox/advanced/CFP/CFP_29_13.pdf
- [4] <http://www.robosoftca.eu/>
- [5] 望山洋: 狭所進入機能を発揮する連続体ロボットの機構知, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014), 2H1-6(1/5), 2014.
- [6] 望山洋: 連続体ロボットの機構知, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2013), 3E1-4(1/4), 2013 .
- [7] Ganji, Y. and F. Janabi-Sharifi: Catheter Kinematics for Intracardiac Navigation, IEEE Trans. on Biomedical Engineering, 56-3, 621/632, 2009.
- [8] Hirose, S., T.Kado, Y. Umeyani : Tensor Actuated Elastic Manipulator, Proc. of the Sixth World Congress on Theory of Mechanisms , 978/981 , 1983 .
- [9] Camarillo, D.B., C.F. Milne, C.R. Carlson, M.R. Zinn, J.K. Salisbury: Mechanics Modeling of Tendon-Driven Continuum Manipulators, IEEE Trans. on Robotics, 24-6, 1262/1273, 2008.
- [10] Camarillo, D.B., C.R. Carlson, J.K. Salisbury: Configuration Tracking for Continuum Manipulators with Coupled Tendon Drive, IEEE Trans. on Robotics, 25-4, 798/808, 2009.
- [11] Stilli, A., H. Wurdemann and K. Althoefer: Shrinkable, stiffness-controllable soft manipulator based on a bio-inspired antagonistic actuation principle, Proc. of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2014), 2476/2481, 2014.

- [12] Tonapi M.M., I.S. Godage, and I.D. Walker: Design, Modeling and Performance Evaluation of a Long and Slim Continuum Robotic Cable, Proc. of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2014), 2852/2859, 2014.
- [13] B. B. Kang, H. Lee, H. In, U. Jeong, J. Chung, K. Cho: "Development of a Polymer-Based Tendon-Driven Wearable Robotic Hand", 2016 IEEE ICRA, Stockholm, Sweden, pp. 3750-3755, May 16-21 2016.
- [14] H. In, U. Jeong, H. Lee, K. Cho: "A novel slack enabling tendon drive that improves efficiency, size, and safety in soft wearable robots", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Volume: PP, Issue 99, September 2016.
- [15] 荒田純平, 斉藤善崇, 藤本英雄: ばねーリング機構を用いた外殻型2自由度座屈マニピュレータの開発, 29-6, 523/531, 2011.
- [16] 荒田純平, 三矢駿, 迎伸孝, 森恩, 坂口正道, 橋爪誠: 3層の連結スライドばね機構における各関節の曲げモーメント均一化に基づく設計手法の検討第32回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2014AC2C1-02(1/3), 2014.
- [17] 鈴森康一: フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究(第1報, 3自由度アクチュエータの静特性), 日本機械学会論文集(C編), 55/518, 2574/2552, 1989.
- [18] K. Suzumori, S. Iikura and H. Tanaka: Applying a Flexible Microactuator to Robotic Mechanisms, IEEE Control System Magazine, 12-1, 21/27, 1992.
- [19] Zhongkui Wang, Yuuki Torigoe, Shinichi Hirai: "A Prestressed Soft Gripper: Design, Modeling, Fabrication, and Tests for Food Handling", 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, TuAT14.1, 2017.
- [20] Jones, B.A. and I.D. Walker: Practical Kinematics for Real-time Implementation of Continuum Robots, IEEE Trans. on Robotics, 22-6, 1087/1099, 2006.
- [21] Davies, J.B.C.: An Alternative Robotic Proboscis, Proc. NATO Advanced Research Workshop on Traditional and Non-traditional robots, 49/55, 1989.
- [22] Lane, D.M., J.B.C. Davies, G. Robinson, D.J. O'Brien, J. Sneddon, E. Seaton, and A. Elfstrom: The AMADEUS Dextrous Subsea Hand: Design, Modeling, and Sensor Processing, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 24-1, 96/111, 1999.
- [23] http://www.festo.com/cms/en_corp/9655.htm

- [24] Falkenhahn, V., T. Mahl, A. Hildebrandt, R. Neumann, and O. Sawodny: Dynamic modeling of constant curvature continuum robots using the Euler-Lagrange formalism, Proc. of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2014), 2428/2433, 2014.
- [25] Webster, R.J., J.M. Romano and N.J. Cowan: Mechanics of Precurved-Tube Continuum Robots, IEEE Trans. Robotics, 25-1, 67/78, 2009.
- [26] Dupont, P.E. et al.: Design and Control of Concentric-Tube Robots, IEEE Trans. Robotics, 26-2, 209/225, 2010.
- [27] Yamada, A., S. Naka, S. Morikawa and T. Tani: MR Compatible Continuum Robot Based on Closed Elastica with Bending and Twisting, Proc. of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2014), 3187/3192, 2014.
- [28] Sekar, K.S., M. Triantafyllou and P.V. y Alvarado: Flapping Actuator Inspired by Lepidotrichia of Ray-Finned Fishes, Proc. of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2014), 1120/1126, 2014.
- [29] B. A. Jones, I. D. Walker: "Kinematics for Multisection Continuum Robots", IEEE Transactions on Robotics, Volume 22, Issue 1, pp. 43 - 57, February 2006.
- [30] Robert J. Webster III, Bryan A. Jones : Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots : A Review, The International Journal of Robotics Research 29(13) , 1661-1683, 2010 .
- [31] A. Horigome, G. Endo: "Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope - investigation of strength reduction by bending and terminal fixation method", Advanced Robotics, Volume 30, Issue 3, pp. 206-217, 2016.
- [32] J. Jung, R. S. Penning, N. J. Ferrier, and M. R. Zinn: "A Modeling Approach for Continuum Robotic Manipulators: Effects of Nonlinear Internal Device Friction", 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5139-5146, San Francisco, September, 2011.
- [33] G. Subramani, M. R. Zinn: "Tackling friction-an analytical modeling approach to understanding friction in single tendon driven continuum manipulators", Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 610- 617, 2015.
- [34] D. B. Camarillo, C. F. Milne, C. R. Carlson, M. R. Zinn, J. K. Salisbury: "Mechanics Modeling of Tendon-Driven Continuum Manipulators" IEEE Transactions on Robotics, Volume 24, Issue 6, pp. 1262 - 1273, Dec 2008.

- [35] D. B. Camarillo, C. R. Carlson, J. K. Salisbury: "Configuration Tracking for Continuum Manipulators With Coupled Tendon Drive" IEEE Transactions on Robotics, Volume 25, Issue 4, pp. 798 - 808, Aug 2009.
- [36] D. C. Rucker, R. J. Webster III: "Statics and Dynamics of Continuum Robots With General Tendon Routing and External Loading", IEEE Transactions on Robotics, Volume 27, Issue 6, pp. 1033 - 1044, Dec 2011.
- [37] W. S. Rone, B. Pinhas : "Continuum Robot Dynamics Utilizing the Principle of Virtual Power" IEEE Transactions on Robotics, Volume 30, Issue 1, pp. 275 - 287, Feb 2014.
- [38] Murray, R.M., Z. Li, S.S. Sastry: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press, 1994.
- [39] H. Mochiyama: Model Validation of Discretized Spatial Closed Elastica, Proc. of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 5216/5223, 2016.

論文リスト

【査読付き雑誌論文】

- 蕭 凱文, 望山 洋, 竹田 年延, 篠塚 英, 小川 清 “ ゴム皮膚層にワイヤ駆動機構を内蔵する連続体マニピュレータ ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 35, No. 3, p.221-229, 2017.

【査読付き国際会議論文】

- Hsiao Kai-Wen, Mochiyama Hiromi “ A Wire-Driven Continuum Manipulator Model without Assuming Shape Curvature Constancy ”, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p.436-443, 2017.
- Hsiao Kaiwen, Hiromi Mochiyama, Toshinobu Takei ”A Study on Planar Non-constant Curvature Model for Continuum Manipulator with Rubber Skin Layer including Pulling-wire Mechanism ”, The 6th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2015), 1A1-30, 2015.

【国内会議論文】

- 蕭 凱文, 望山 洋, 竹田 年延 ”ゴム皮膚層にワイヤ駆動機構を内蔵する 連続体マニピュレータの運動学 ”, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集 (RSJ2015), RSJ2015AC3A1-08, 2015.
- 蕭 凱文, 望山 洋 ”ゴム皮膚層に 3 本のワイヤ駆動機構を内蔵する空間型連続体マニピュレータ ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama ,2P1-13b7, 2016.
- 蕭 凱文, 望山 洋 “ Robot Tail のためのコンパクトなワイヤ駆動機構 ”, 第 35 回 日本ロボット学会学術講演会 RSJ2017,2017AC3F3-05, 2017.