

2017（平成 29）年度 修士学位論文

複数セグメントの連続体マニピュレータの三次元解析と
試作機での検証

Three-dimensional analysis of Multiple segments continuum
manipulator and Verification by the prototype

2018 年 2 月 14 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械システム工学コース

1205047 徳永 貴昭

指導教員 岡 宏一

目次

第1章 序論.....	3
1.1 近年のロボット活用.....	3
1.2 フレキシブルマニピュレータ.....	3
1.3 ワイヤ駆動マニピュレータ.....	4
1.4 連続体マニピュレータ(continuum manipulator).....	4
第2章 先行研究.....	6
2.1 はじめに.....	6
2.2 1セグメント連続体マニピュレータの試作機の開発.....	6
2.3 試作機の駆動回路.....	7
2.4 1セグメント 連続体マニピュレータの試作機に適応した動作モデル.....	9
2.5 1セグメント連続体マニピュレータの試作機の動作の様子.....	14
2.6 負荷に関する検証.....	20
2.7 終わりに.....	21
第3章 簡易モデルの構想.....	22
3.1 はじめに.....	22
3.2 最小ポテンシャルエネルギーの原理について.....	22
3.3 連続体マニピュレータの硬さと質量のエネルギーに着目した簡易モデルの構想.....	22
3.3 おわりに.....	24
第4章 ねじれ防止機構の開発.....	25
4.1 はじめに.....	25
4.2 ねじれ防止機構の開発.....	25
4.3 ねじれ防止機構の有無による動作の比較.....	28
4.4 おわりに.....	29
第5章 ポテンシャルエネルギーの原理を用いた1セグメント連続体マニピュレータの平面内挙動に関するモデル.....	30
5.1 はじめに.....	30
5.2 モデル化の条件.....	30
5.3 モデルの解析結果.....	33
5.4 モデルの検証.....	34
5.5 おわりに.....	38
第6章 2セグメントマニピュレータの開発.....	39
6.1 はじめに.....	39
6.2 駆動部の設計.....	39
6.3 製作した機体の動作の様子.....	40
第7章 結言.....	42

第1章 序論

本章ではまず近年のロボットの活用について述べたあと、特にその中でもフレキシブルマニピュレータ，ワイヤ駆動マニピュレータについて解説する．そして，フレキシブルマニピュレータの一種として本稿で取り扱う，連続体マニピュレータについての紹介を行い，連続体マニピュレータの現状の研究課題を取り上げる．

1.1 近年のロボット活用

近年，医療分野でのロボットの活用が多く見られる．たとえば，車椅子を車輪型ロボットに置き換え段差乗り越えの補助に役立てるもの [1]や，パワーアシスト機能を持った下肢装具装着型片麻痺歩行訓練装置 [2]，アザラシ型ロボットによる神経学的セラピー [3] など，具体例は枚挙に暇がない．

上記のような医療ロボットにおいて重要なのは低侵襲性である．低侵襲性とは，ロボットが作業中にその他のオブジェクト（ロボットや人間も含まれる）に触れた場合に，そのオブジェクトへの影響が少ないということである．特に医療分野では人間との共同作業が多いため，安全性への配慮が必要となる．

また，宇宙開発分野でのロボット利用を見てみると，ロボットの部品点数をできるだけ減らし，軽量かつ信頼度の高い機構が要求されている [4]．ロボットの部品点数は多くなればなるほどその信頼性は下がり，質量が大きくなる傾向にある．産業用ロボットにおいても，ロボットの軽量化，低侵襲化はコストやリスクの低減に役立つことが期待できる．

1.2 フレキシブルマニピュレータ

これらの要望に応えるために，アーム剛性を低下させたマニピュレータの開発が進められている．アーム剛性を低下させたマニピュレータは，フレキシブルマニピュレータまたは柔軟マニピュレータと呼ばれ [5]，その柔軟性ゆえに，制御する上で困難を伴うことが多く，軌道制御や振動抑制制御について扱った研究が数多く見られる [4] [5] [6]．これらのフレキシブルマニピュレータは，従来の多関節マニピュレータの関節の剛性が低いという特徴を有している．従来の多関節マニピュレータの一般的な例を次ページ Fig.1-1 に示す．

一般的な多関節マニピュレータはFig.1-1からもわかるようにリンク(link)と関節(joint)，そして，先端のエンドエフェクタ(end effector)から構成されている．リンクは高剛性のものを使用し，関節をモータによって駆動する．エンドエフェクタもモータで駆動するものが多い．このような多関節マニピュレータは先端で扱う作業の負荷にかかわらず，途中関節のモータの質量が大きくなる傾向にあり，どうしても根本が大型化してしまう．ロボットの大型化は質量の増大とともに侵襲性の増加にも影響し，人間との共同作業において非常に危険である．頑強なマニピュレータであれば接触した人間を傷つけたり，人間を転倒させたりといったトラブルを招きやすい．

上述のフレキシブルマニピュレータのように，マニピュレータが柔軟な構造を有していれば，人間に及ぼす被害が少なくなることが予想される．実際に，空気圧を用いた人に

対して安全な多自由度ロボットアーム技術の開発も行われている [7]. またフレキシブルマニピュレータの振動抑制, 姿勢制御に関する研究も行われている [4].

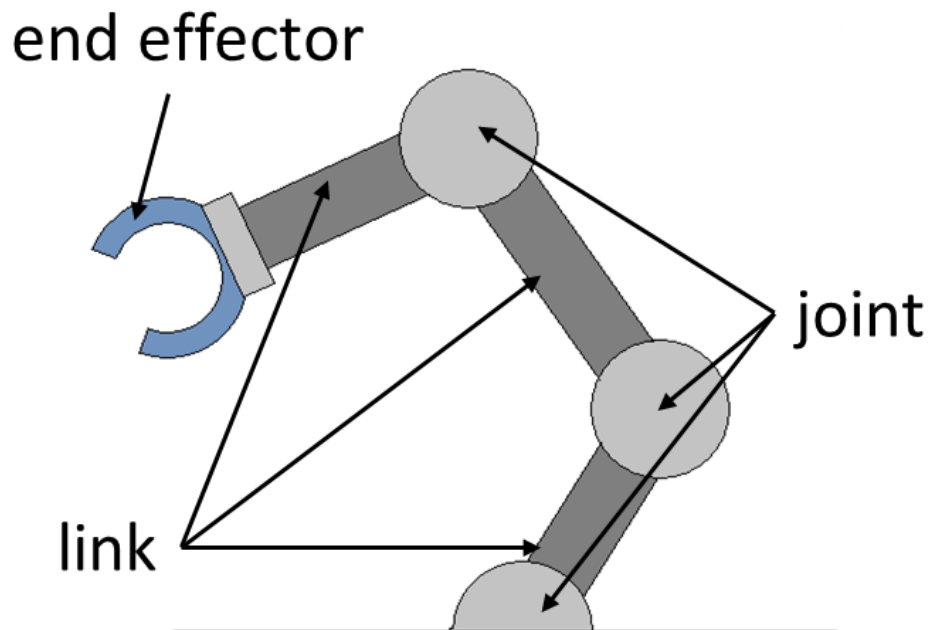


Fig.1-1 一般的な多関節マニピュレータ

1.3 ワイヤ駆動マニピュレータ

上記のフレキシブルマニピュレータの一種と言えるマニピュレータの例としてワイヤ駆動マニピュレータが存在する. ワイヤ駆動マニピュレータの特徴は, Fig.1-1 に示した従来の多関節マニピュレータの形状を残しつつ, 関節部の駆動をワイヤによるモータの駆動力伝導によって行っていることである. ワイヤ駆動を用いる利点として, 質量が大きく原因であるモータを根本部分に集中させることで, マニピュレータの質量を抑えることができ, それを支えるリンクも軽量化できる点である. ワイヤ駆動のマニピュレータの開発は軽量化に非常に有用だとして開発が行われている [8].

1.4 連続体マニピュレータ(continuum manipulator)

上述のフレキシブルマニピュレータの一種で, 近年新たに柔軟な素材そのものをマニピュレータとして用いるものが研究, 提案されている [9]. これは, フレキシブルマニピュレータに比べ, 部品点数が少なく, さらなる軽量化が見込めるといいう長所がある. しかし, マニピュレータの構造そのものが従来の多関節マニピュレータと異なるため, モデル化や制御則の構築が従来と大きく異なる. 本稿ではこのようなマニピュレータを連続体マニピュレータ(continuum manipulator)と呼ぶ. 連続体マニピュレータは空気圧を用いて駆動する柔軟関節構造を持つ多自由度鉗子マニピュレータ [10]や経鼻手術用の遠隔操作システム [11]などにおいて利用されている.

連続体マニピュレータの特徴を表した図を Fig.1-2 に示す.

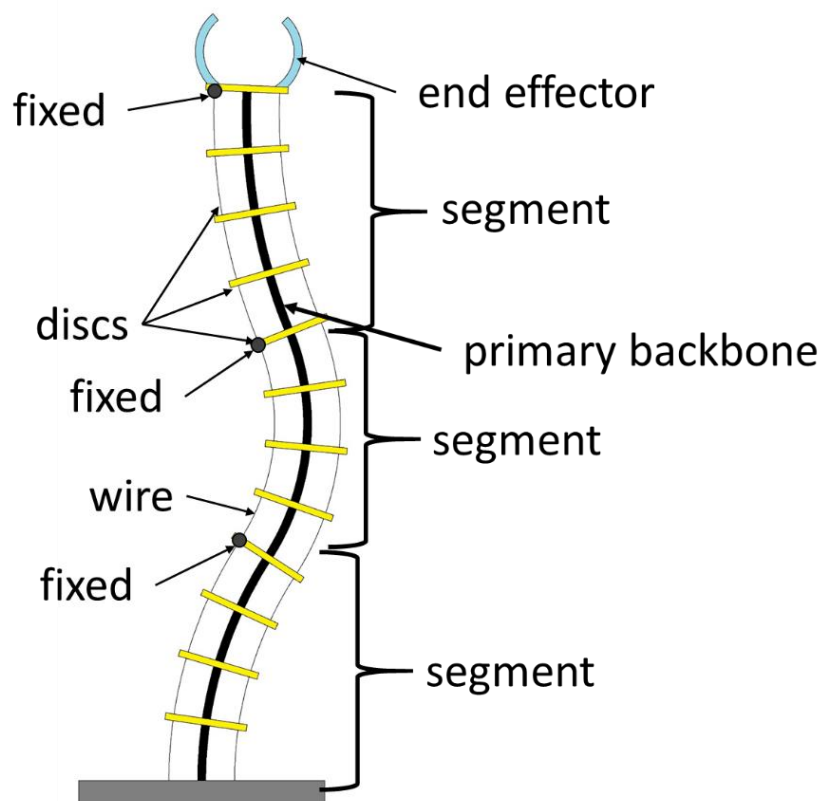


Fig.1-2 連続体マニピュレータのモデル

Fig.1-2 に示すように連続体マニピュレータは中心軸(primary backbone)と円盤(disk)で構成されたマニピュレータをワイヤ(wire)で駆動することで動作させる。中心軸は柔軟な素材を用いているため、円盤に固定したワイヤを引っ張ると、円盤とともに中心軸がまがるようになっている。従来の多関節マニピュレータと異なり、明確な関節が存在しない。そのかわりに、連続体マニピュレータはセグメント(segment)と呼ばれる動作単位で構成される。1セグメントはワイヤ固定円盤間としており、1セグメントは2自由度となっている。

第2章 先行研究

2.1 はじめに

本章では、先行研究で開発した1セグメントマニピュレータの試作機について述べる。2.2節で開発した試作機について示し、2.3節で試作機を駆動するために用いた回路を示している。2.4節では1セグメント連続体マニピュレータを曲率一定のもとでモデル化し、先端の運動学を求めた。2.5節ではそのモデルを用いて試作機を動作検証した。2.5節で見つかった課題について掘り下げを行うために2.6節では負荷と動作の関係について更に詳細に比較を行い、2.7節でまとめる。

2.2 1セグメント連続体マニピュレータの試作機の開発

先行研究で開発した1セグメント連続体マニピュレータの試作機をFig.2-1に示す。本稿で示すその他の試作機もこの試作機の駆動部(drive part)を流用したものである。そのため本節で試作機について概要を示す。中心軸に、自転車のブレーキなどの外側に用いられるアウターケーブルを用いて、稼動範囲の拡大を図り、3Dプリンタを用いて製作したプーリーを用いてワイヤをステッピングモータが巻き取ることで制御している。駆動部を上部から示したものをFig.2-2に示す。駆動部は、ワイヤを巻き取るためのステッピングモータを等間隔に配置している。

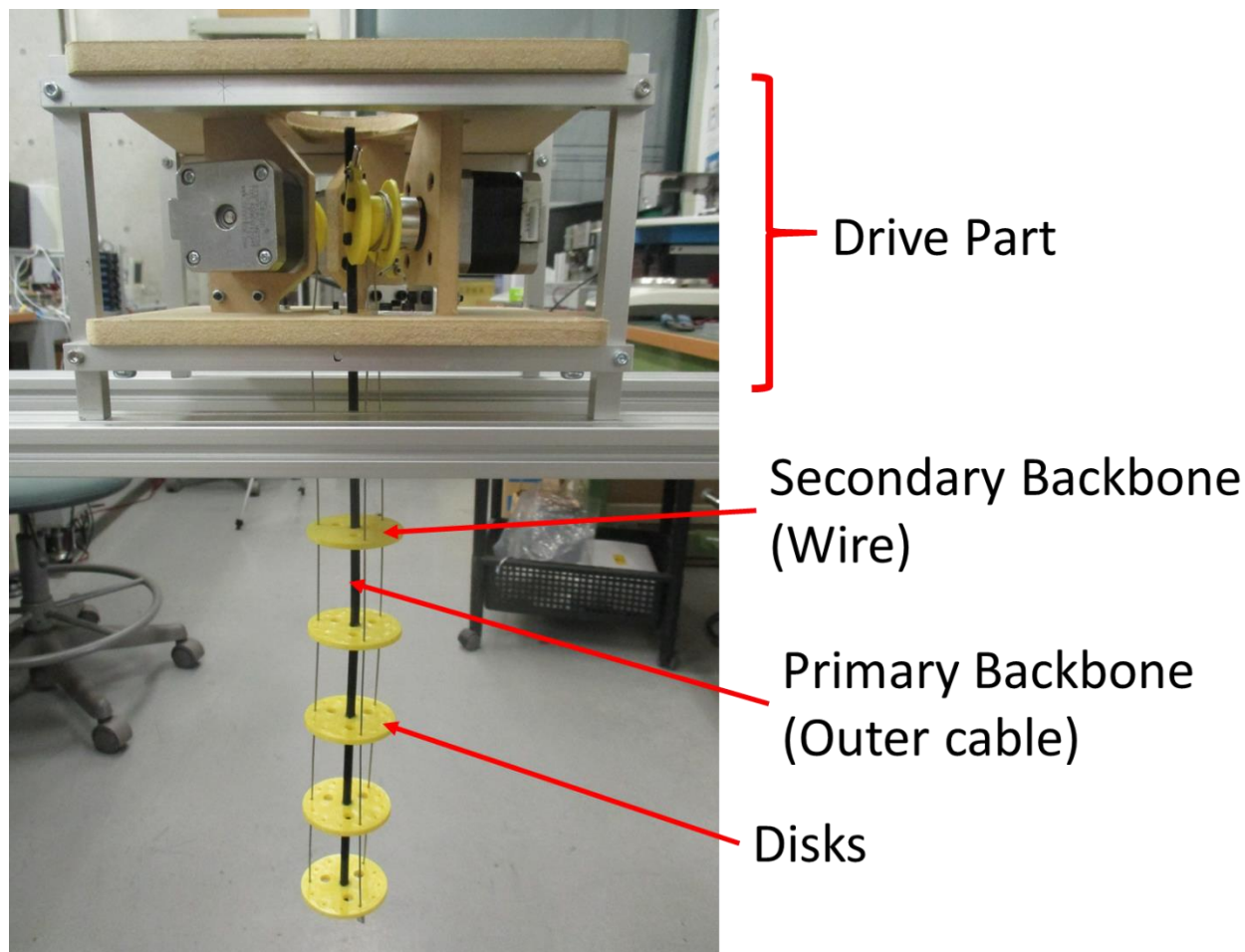


Fig.2-1 1セグメント連続体マニピュレータ試作機

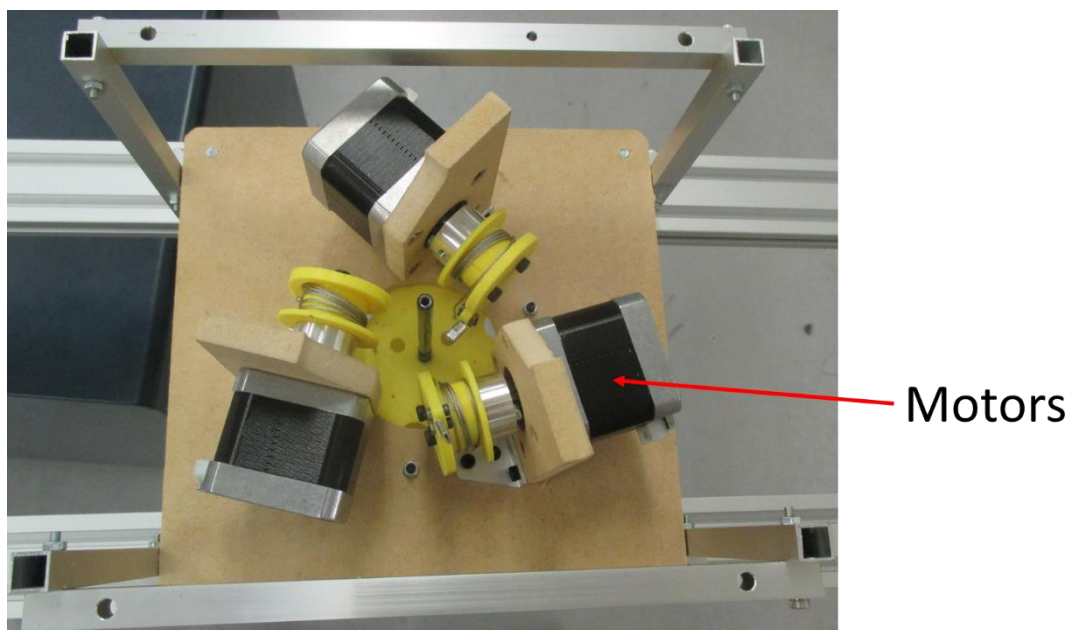


Fig.2-2 駆動部を上から見た様子

2.3 試作機の駆動回路

先行研究の駆動回路は本稿で述べるその他の試作機でも用いている駆動回路であるため、本節で解説する。

Fig.2-3 に実験装置動作回路の模式図を示す。先行研究、本稿で述べる試作機どちらもステッピングモータを用いるため、一般的に用いられる制御装置と異なり、フィードフォワード制御を行う。演算装置として、Fig.2-4 に示す mbed npx lpc1768 ボードを用いる。与えられた、位置情報から、演算を行い、ステッピングモータに与える変位に合わせたパルス波を Fig.2-5 に示すステッピングモータドライバに送る。パルス波によって与えられた角度だけ、ステッピングモータは回転するため、位置制御、速度制御が可能となる。

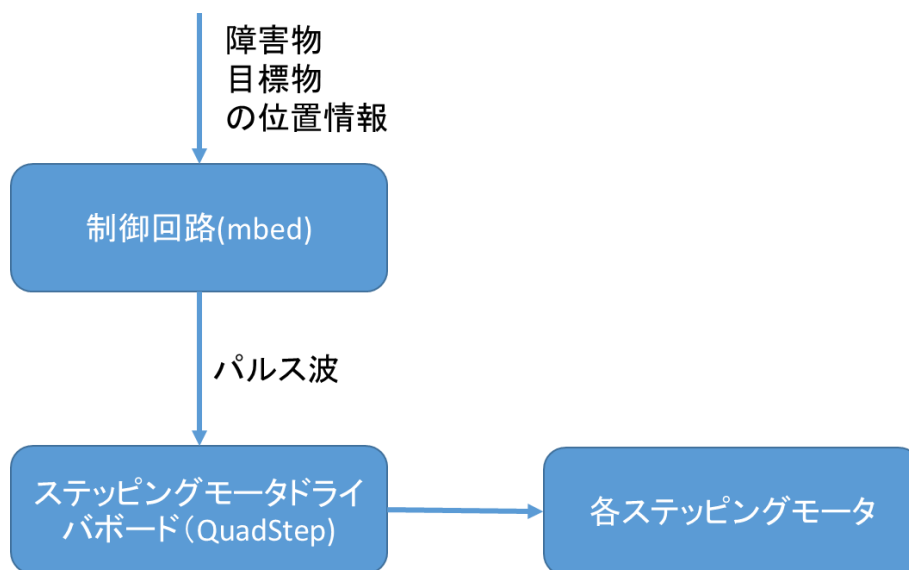


Fig.2-3 モータ駆動回路のブロック線図

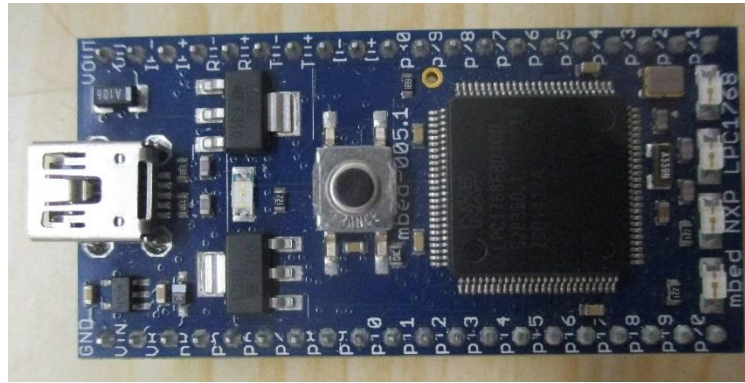


Fig.2-4 試作機制御に用いた mbed の nxp lpc 1768 board

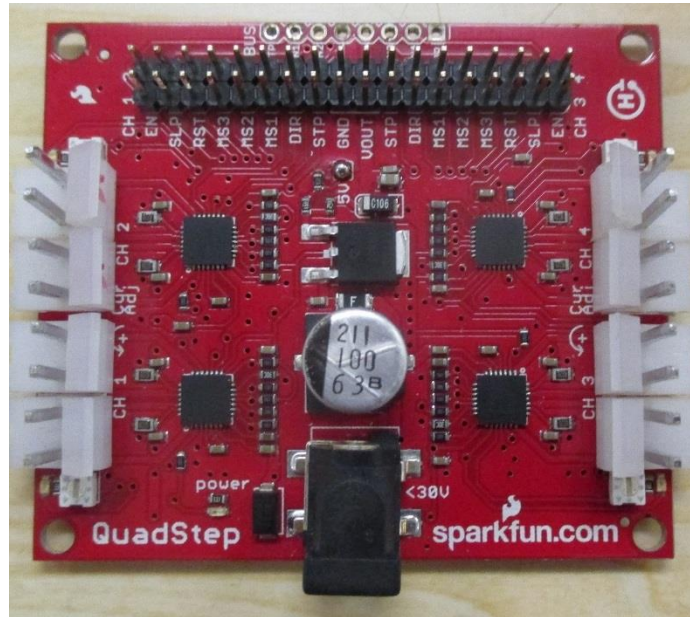


Fig.2-5 ステッピングモータの sparkfun 社の QuadStep

Fig.2-5 に示す，ステッピングモータドライバボードの Sparkfun 社の QuadStep を用いる．QuadStep には，モータドライバ IC が 4 つのっており，一枚で 4 個のステッピングモータを動作させることができる．Fig.2-6 に，IC1 つあたりの I/O ピンを示す．QuadStep では，6 本の I/O ピンと，STP ピン，DIR ピンの 8 種類の入力によってステッピングモータを制御できる．また，3 本の MS ピンへの入力によって，ステッピングモータをマイクロステッピングで動作させることができることも特長の一つである．マイクロステッピングとは，ステッピングモータへの入力電流の強さを変化させることで，ステップ数を増やす制御方法のことである．マイクロステッピングを用いると，ステップ数が増えるため，分解能が向上するが，代わりに，1 回転当たりのステップ数が増えることで，回転時の角速度が遅くなるという特徴がある．本研究では，ステッピングモータの高速運用が目的ではないため，マイクロステッピングは，このボードでの常に最大ステップ数である 1/16 になるように基板を制作した．今回の使用では，RST，DIR，STP の 3 ピンのみを用いることで制御を簡素化した．RST ピンは，H/L でステッピングモータに電流を流すか流さないかを制御することができる．実際に回転する際に用いるのは DIR ピンと STP ピンであり，DIR の H/L でステッピングモータの回転方向を制御し，STP ピンにパルス波を入力することで，回転角度を制御できる．



Fig.2-6 QuadStep の入力ピン

本研究で用いたステッピングモータを Fig.2-7 に示す. NEWA17 ステッピングモータと呼ばれるもので, 分解能は1ステップ当たり, 1.8度となっている. 今回は, 1/16のマイクロステップを用いるため, 分解能は, $1.8/16=0.1125$ 度となる.

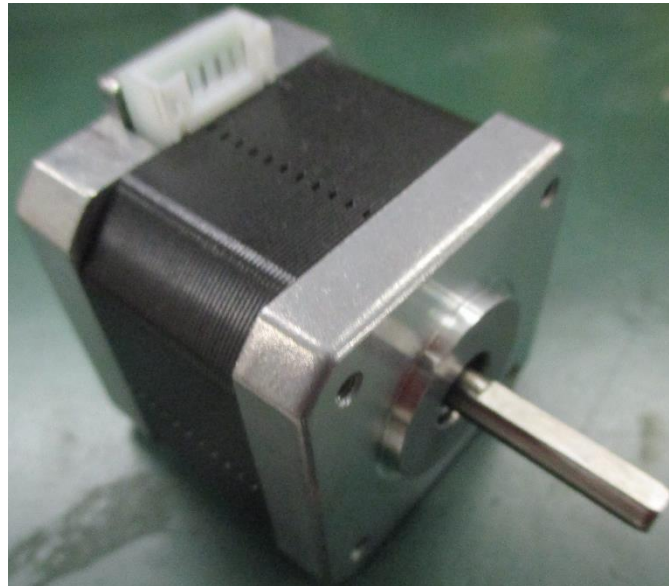


Fig.2-7 本稿で使用するステッピングモータ

2.4 1 セグメント 連続体マニピュレータの試作機に適応した動作モデル

本節では, 1セグメント連続体マニピュレータを曲率一定と仮定して動作解析を行った. Fig.2-8 に, 連続体マニピュレータの3次元モデルを示す. 座標軸変換を用いることで同次座標系を求め, 1セグメントの先端の姿勢を表すことを考える. 根元の円盤の中心を原点とし, 3本出ているワイヤのうちの一つの方向をx軸, 円盤から見て, 垂直上方向をz軸として, 右手系として, y軸を定め, 基準座標系とする. 先端部のxz平面からの角度を γ , 先端のz軸からの角度を β とする. まず, 先端円盤と座標軸の向きをそろえるために, z軸を基準に, γ だけ回転する. その回転行列は, 式(1)で表される.

$$Rot(z, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

回転した座標系から見た, 先端の円盤の中心の座標を, $(x_1, 0, z_1)$ とする. 先端の座標に直線移動する行列は式(2)で表すことが出来る.

$$Trans(x_1, 0, z_1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

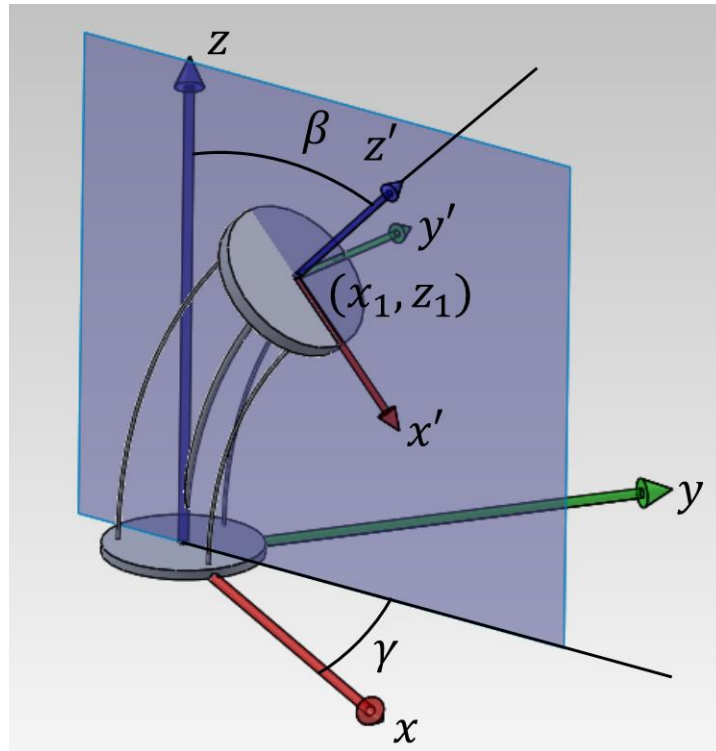


Fig.2-8 1 セグメント連続体マニピュレータの3次元モデル

そして、 y 軸で β 回転することで、先端の座標軸と一致させることが出来る。その回転は式(3)で表される。

$$Rot(y, \beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式(1)~(3)を用いて、先端の同次座標系を表す行列 A_i は式(4)から求められる。

$$A_i = Rot(z, \gamma) Trans(x_1, 0, z_1) Rot(y, \beta) \quad (4)$$

ここから、 x_1, z_1 を求める。Fig.2-9に1セグメント分の連続体を示す。1セグメントの長さを l 、曲率を r_0 で一定とする。円弧の長さが l であることから、明らかに

$$l = r_0 \beta \quad (5)$$

である。曲率一定であるから、 (x_1, z_1) は以下の式(6), (7)から求めることが出来る。

$$x_1 = r_0 (1 - \cos \beta) \quad (6)$$

$$z_1 = r_0 \sin \beta \quad (7)$$

式(5)~(7)より、式(8), (9)を導くことができ、先端の角度 β とマニピュレータの長さ l より、先端の座標、 (x_1, z_1) を求めることが出来る。

$$x_1 = \frac{l}{\beta} (1 - \cos \beta) \quad (8)$$

$$z_1 = \frac{l}{\beta} \sin \beta \quad (9)$$

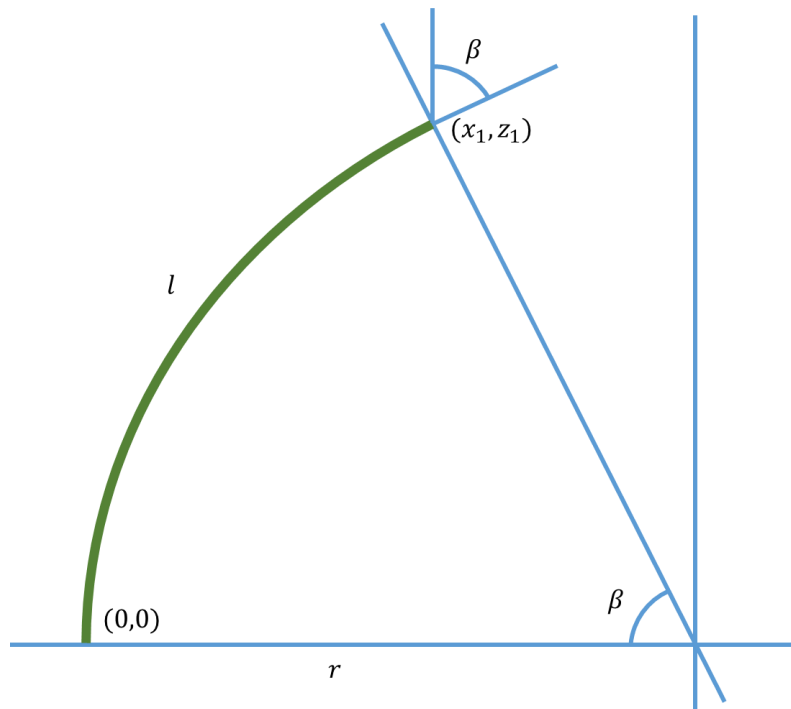


Fig.2-9 1 セグメント連続体マニピュレータの2次元モデル

式(4), (8), (9)より, 式(10)のように, 具体的に先端の同次座標 A_i を求めることが出来る.

$$A_i = \begin{pmatrix} \cos \gamma \cos \beta & -\sin \gamma & \cos \gamma \sin \beta & \frac{l}{\beta}(1 - \cos \beta) \cos \gamma \\ \sin \gamma \cos \beta & \cos \gamma & \sin \gamma \sin \beta & \frac{l}{\beta}(1 - \cos \beta) \sin \gamma \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & \frac{l}{\beta} \sin \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

式(10)より, 1 セグメントの先端角度 β, γ から, 先端の位置を求めることが出来る. また, 制御を行うときは, ワイヤを引っ張る長さを求める必要がある. Fig.2-10 に根元の円盤をz軸方向から見た図を示す. 図に示すように, x軸方向のワイヤを引っ張る長さを q_1 とし, 図のように, ワイヤを引っ張る長さを q_2, q_3 とする.

ここで次ページの Fig.2-11 に連続体マニピュレータを, 曲がった方向から, 垂直方向から見た図を示す. この図より, $q_i (i = 1 \sim 3)$ について, 式(11)が成り立つことが分かる.

$$l - q_i = r_i \beta \quad (11)$$

また r_i は次ページの Fig.2-12 に示した図より, それぞれ, 式(12)~(14)のように表すことが出来る.

$$r_1 = r_0 - r \cos \gamma \quad (12)$$

$$r_2 = r_0 - r \cos \left(-\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (13)$$

$$r_3 = r_0 - r \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (14)$$

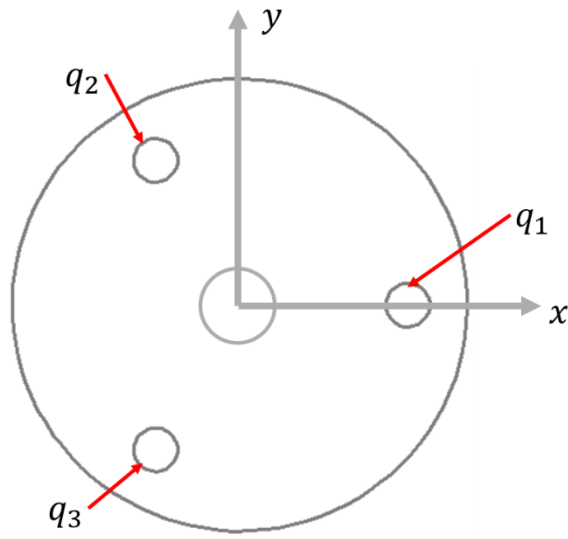


Fig.2-10 円盤の表面

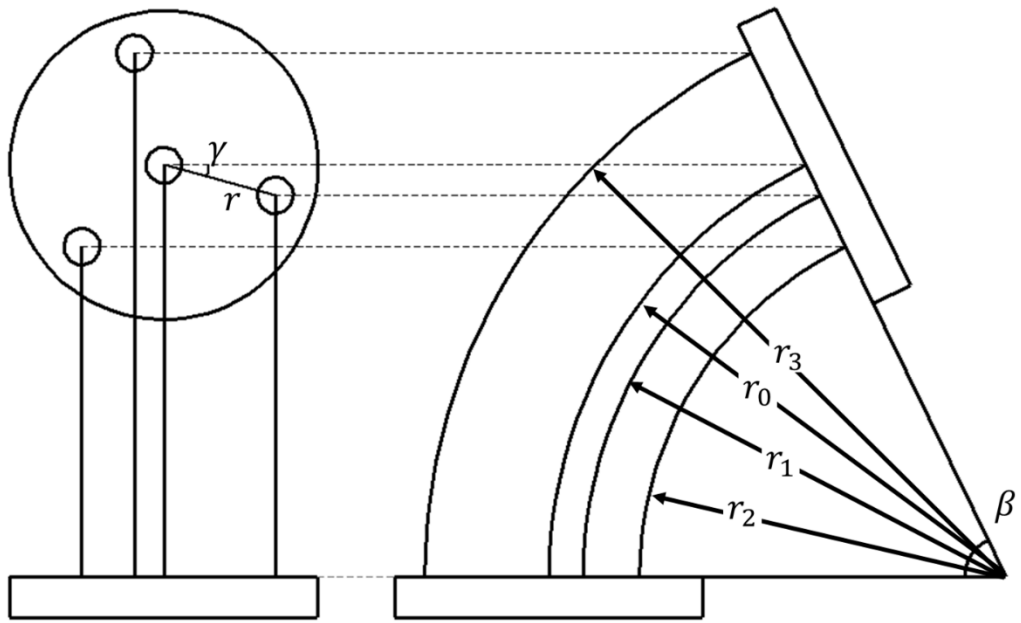


Fig.2-11 横から見た連続体マニピュレータ

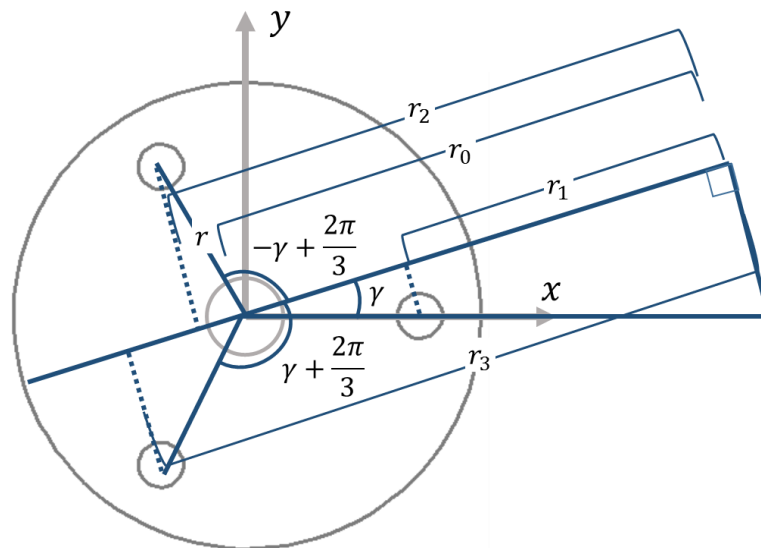


Fig.2-12 $r_1 \sim r_3$ の計算

式(5)と式(11)~(14)より、式(15)~(17)が導かれる。これらの式を用いることで、 β, γ を用いて、ワイヤを引っ張る長さ $q_1 \sim q_3$ を求めることが出来る。

$$q_1 = r\beta \cos \gamma \quad (15)$$

$$q_2 = r\beta \cos \left(-\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (16)$$

$$q_3 = r\beta \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (17)$$

また、式(15)~(17)より明らかに

$$q_1 + q_2 + q_3 = 0 \quad (18)$$

となる。

これらの式から、 β, γ から、ステッピングモータの操作量を求めることが出来ることがわかる。しかし、実用性を考えた場合、直線運動なども重要であるため、動作させたい x, y, z からの速度から β, γ の速度を求める必要がある。 x, y, z の速度は、 β, γ の速度を用いて、以下のように表すことが出来る。

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \frac{dz}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \beta} & \frac{\partial x}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial y}{\partial \beta} & \frac{\partial y}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial z}{\partial \beta} & \frac{\partial z}{\partial \gamma} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{d\beta}{dt} \\ \frac{d\gamma}{dt} \end{pmatrix} \quad (19)$$

ここで

$$J_{xyz} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \beta} & \frac{\partial x}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial y}{\partial \beta} & \frac{\partial y}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial z}{\partial \beta} & \frac{\partial z}{\partial \gamma} \end{pmatrix} \quad (20)$$

と置く。ここで、式(10)の行列 A_i より、 x, y, z を β, γ で表されているため、 J_{xyz} は以下の式(21)のようにして表すことが出来る。

$$J_{xyz} = \begin{pmatrix} l \cos \gamma \left(-\frac{l}{\beta^2} (1 - \cos \beta) + \frac{\sin \beta}{\beta} \right) & -\frac{l}{\beta} (1 - \cos \beta) \sin \gamma \\ l \sin \gamma \left(-\frac{l}{\beta^2} (1 - \cos \beta) + \frac{\sin \beta}{\beta} \right) & \frac{l}{\beta} (1 - \cos \beta) \cos \gamma \\ -\frac{l}{\beta^2} \sin \beta + \frac{l}{\beta} \cos \beta & 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

式(21)より、 $\frac{\partial z}{\partial \gamma} = 0$ となっているが、これは、Fig.2-8 などを見ると、 β を変化させないとマニピュレータ先端の高さが変わらないことを表している。式(21)より、 β, γ の速度を与えることで、 x, y, z の速度を求めることが出来る。しかし、 x, y, z の速度を与えた場合に

β, γ の速度を求めるほうが都合がよい. 1 セグメントでの制御の場合, 2 自由度のみの制御となるため, 式(21)から制御するパラメータを x, y, z のうちから選び, それについての行列を求め, その逆行列から, 速度制御をすることとなる.

2.5 1 セグメント連続体マニピュレータの試作機の動作の様子

先行研究では 2.2 節で制作した試作機について幾つかの条件で動作検証を行っている.

2.5.1 可動域

Fig.2-13~Fig.2-15 に, β に 60° , 120° , 180° を入力した際の様子を示した. ステッピングモータの回転速度を $56.25^\circ/\text{s}$ として動作させた. 中心軸の素材を柔軟な素材にしているため, 可動域が非常に広く取れており, Fig.2-16 に示すような動作も可能であった. 機構的な制限により, 可動域は $0 < \beta < 150^\circ$ での使用が理想だと考えられる. Fig.2-13~Fig.2-15 より, 終端の先端の方向が傾向として入力値と同じ方向を向いていることがわかる. しかし, 中心軸の様子を見ると, β の値が大きくなると曲率一定の傾向を示していない. 原因として, 先端の自重の影響が大きくなるためだと考えられる.

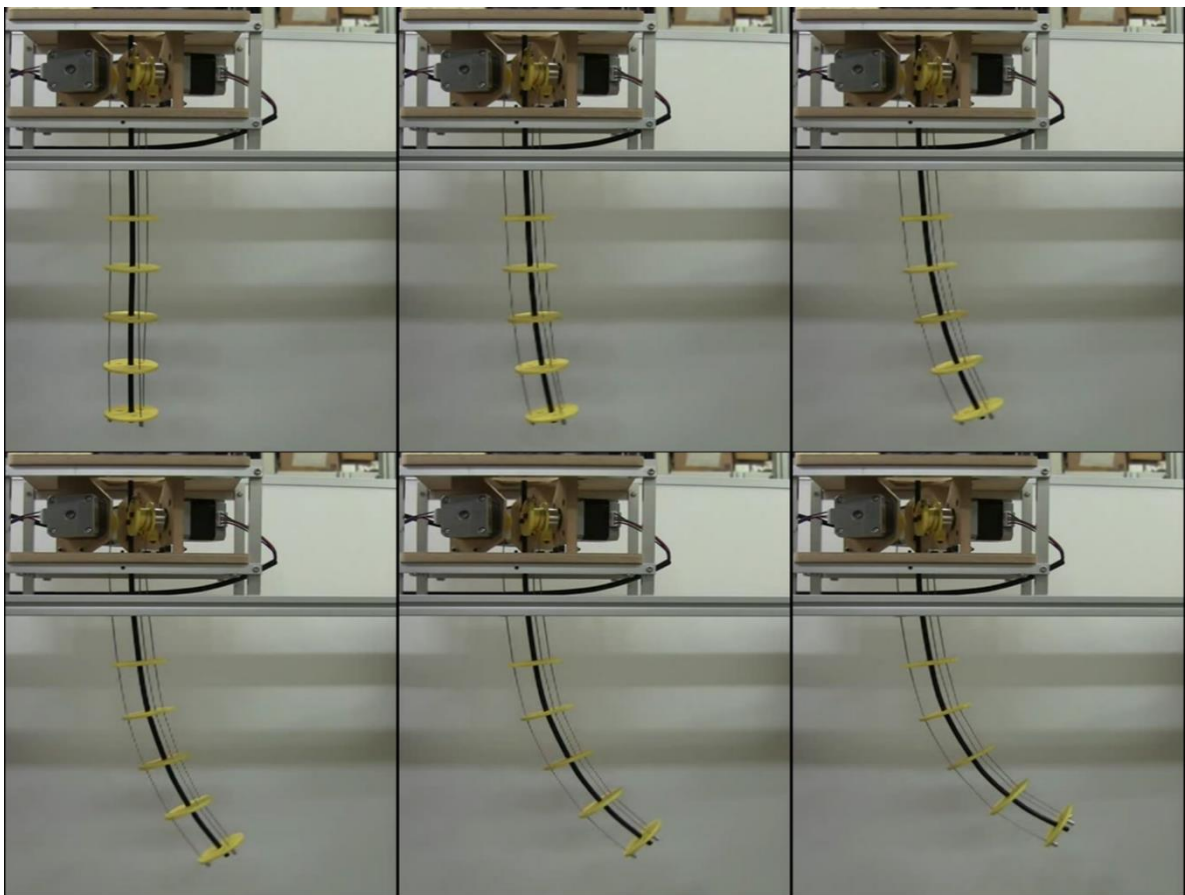


Fig.2-13 $\beta = 60^\circ$ の入力に対しての試作機の動作

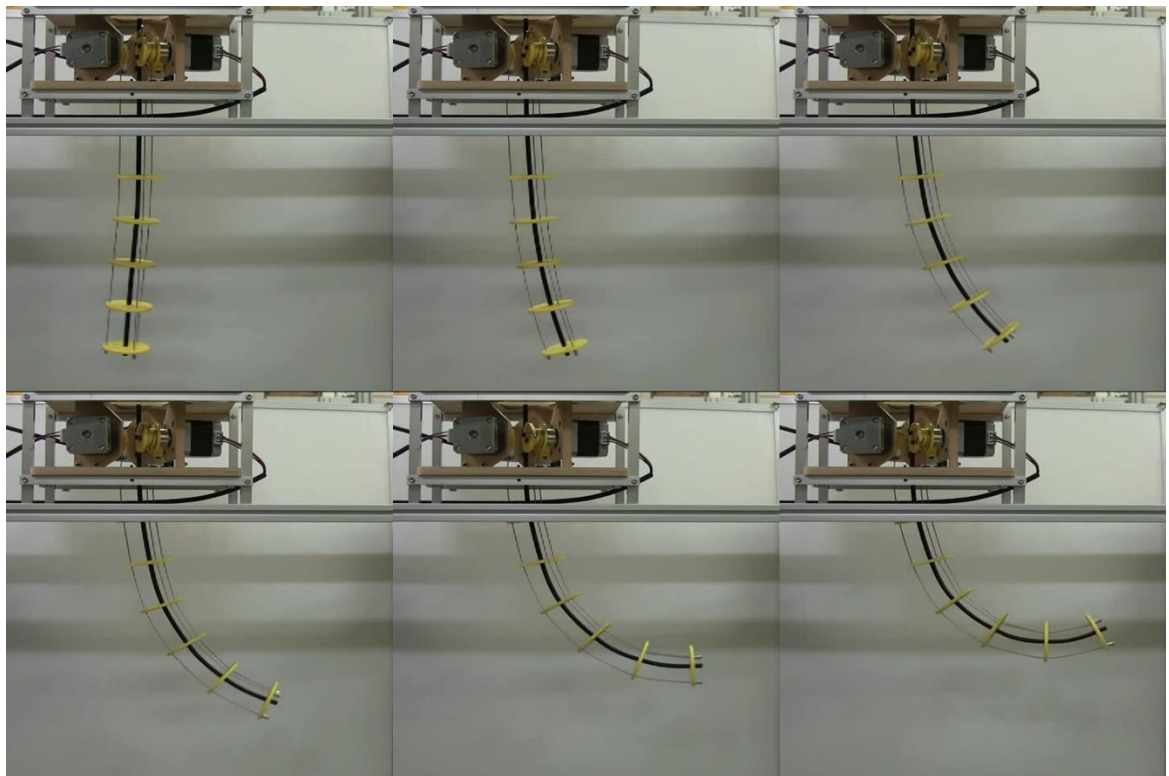


Fig.2-14 $\beta = 120^\circ$ の入力に対して試作機の動作

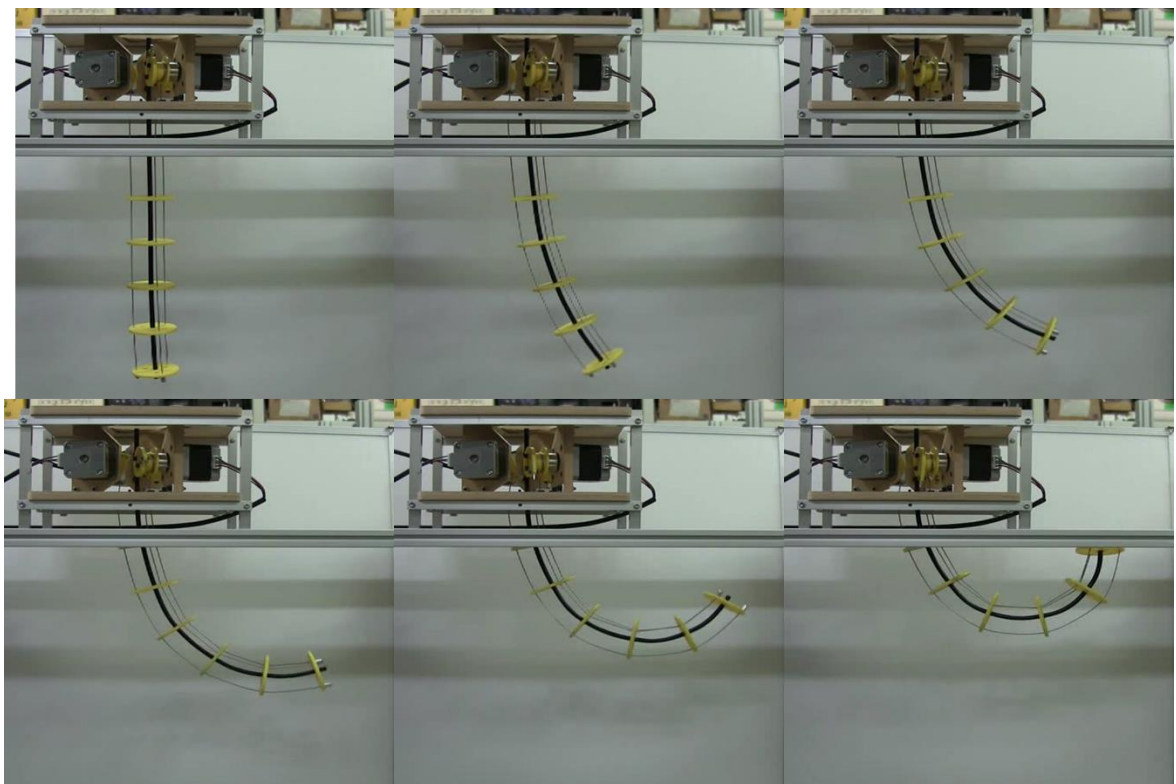


Fig.2-15 $\beta = 180^\circ$ の入力に対して試作機の動作

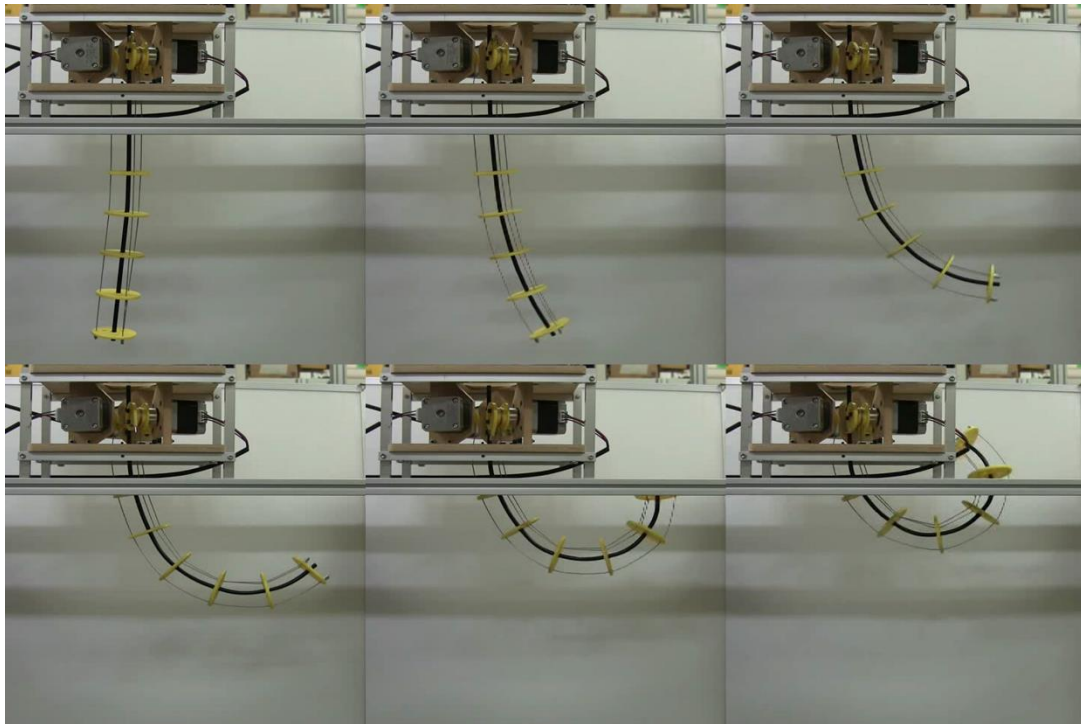


Fig.2-16 試作マニピュレータの可動域

2.5.2 負荷による可動域の変化

続いて、同じ角度の入力に対し、外力が加わっている場合と加わっていない場合とを比較した。本稿で取り扱う、先端質量とマニピュレータの硬さについての研究はここでの質量を乗せた場合の動作の違いに焦点を合わせたものである。次段落から当時の実験条件について記述する。

おもりの質量は 103.78g で、先端に取り付けやすいように加工したものを使用した。実際に動作の比較をしたものを Fig.2-17 に示す。Fig.2-17 には、上におもりのない状態、下におもりを入力は同じく、 $\beta = 50^\circ$ としている。動作の終点から明らかに、負荷による影響が大きいことがわかる。原因として、負荷による影響で曲率一定の仮定を満たすことができていないことが考えられる。

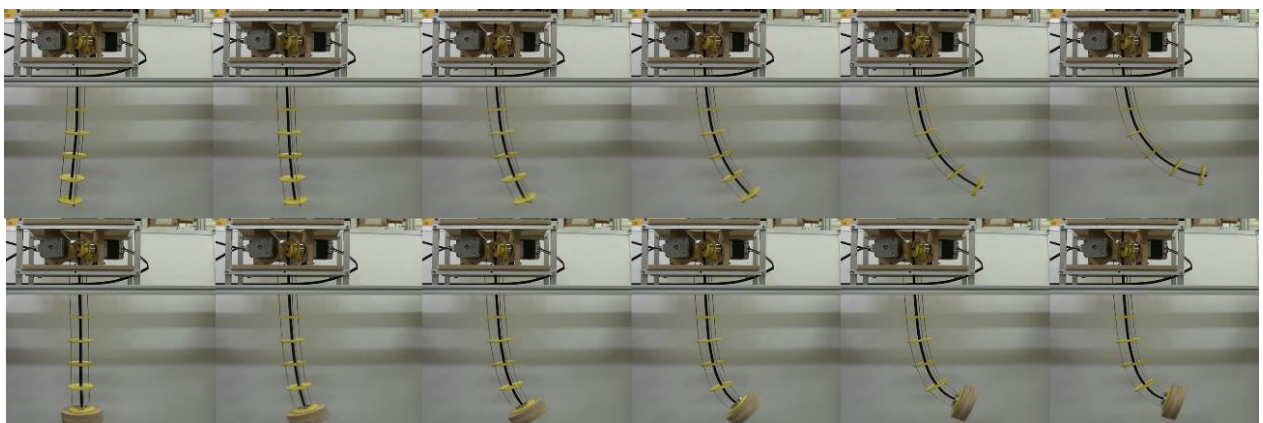


Fig.2-17 103.7g のおもりをのせた場合とのせていない場合の試作機の動作の比較

2.5.3 回転運動

1セグメントでの、回転運動の様子を Fig.2-18 に示す。今回は撮影の関係上、ぶら下げる方法ではなく、床に試作機を設置し、真上からの撮影となっている。円運動時の制御チャートを Fig.2- 19 に示す。センサを用いない、フィードフォワード制御で行っている。

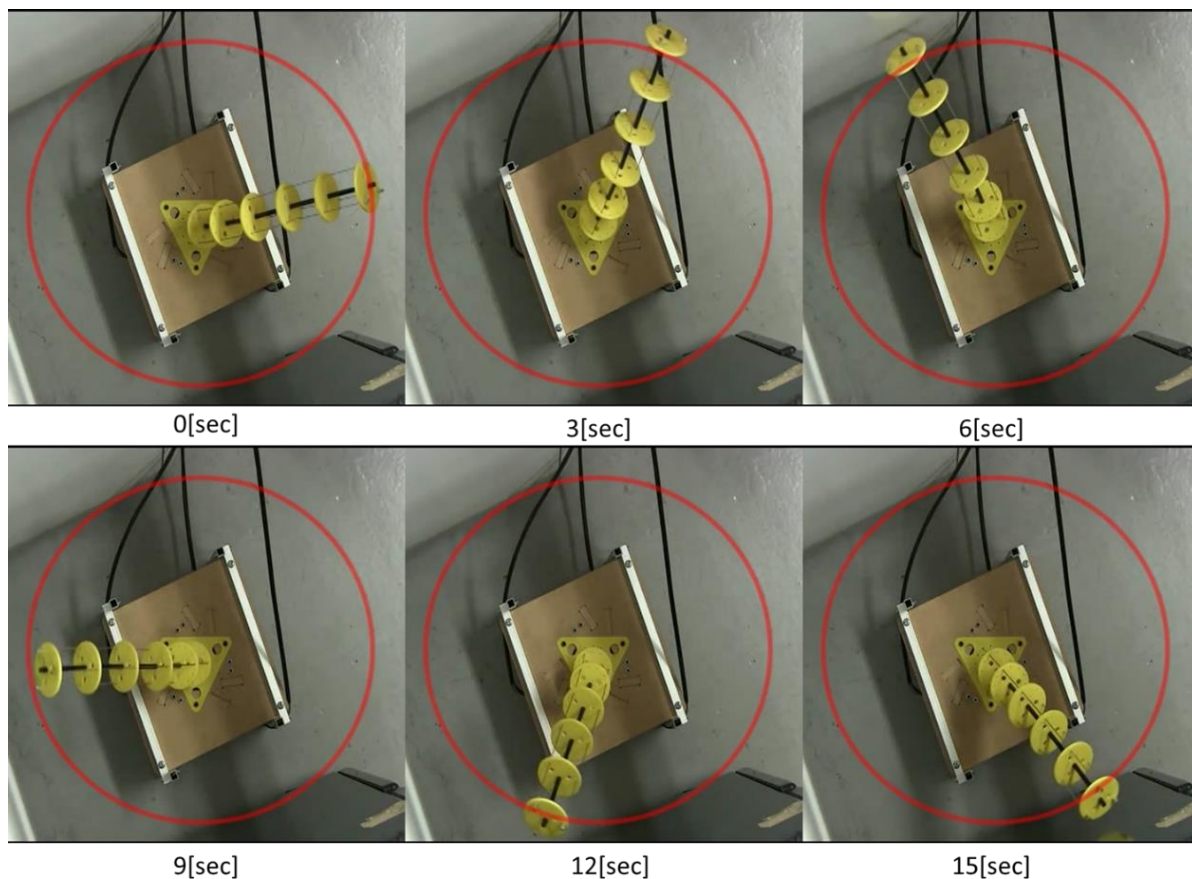


Fig.2-18 プロトタイプ先端の円運動

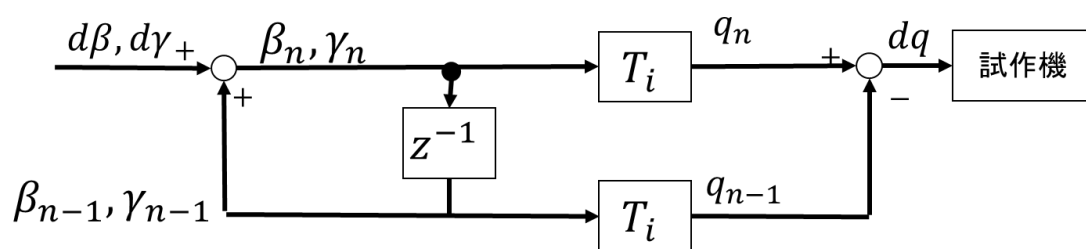


Fig.2- 19 円運動の制御チャート

今回は、 $d\beta = 0.1^\circ, d\gamma = 0^\circ$ として入力を $5ms$ 毎に入力している。角度は初期値 β_0, γ_0 から、随時計算可能なため、そこから現在の角度 β_n, γ_n を計算し、実際にワイヤ駆動量 dq を決定し、制御基板へと入力し動作を決定している。式(15)~(17)は $T_i(\beta, \gamma) = q_i$ として制御チャート内に記入している。Fig.2-18の赤い円の起動を先端が描くのが理想だが、ずれていることがわかる。原因として、2.5.2と同様に、曲率一定の過程を満たしていないことや、ワイヤーテンションが不均一であることが考えられる。

2.5.4 直線運動

1 セグメントでの直線運動の様子を Fig.2-20 に示す. 第3章で示した, ヤコビ行列を用い, xy のみの直線運動をしている. 制御チャートを Fig.2-21 に示す. $dx = -0.1mm, dy = 0.1mm$ として, $5ms$ ごとに入力を行った. ヤコビ行列 J_{xy} の逆行列を用いて, 速度 dx, dy を角速度 $d\beta, d\gamma$ へと変換し, 円運動時の制御と同様にワイヤの駆動を行っている. Fig.2-20の赤い直線上を試作機の先端が通過するのが理想の軌道だが, 少しそれている. 原因として, 直線運動を角速度制御へと変換しているため, 円運動時と同様のものが考えられる.

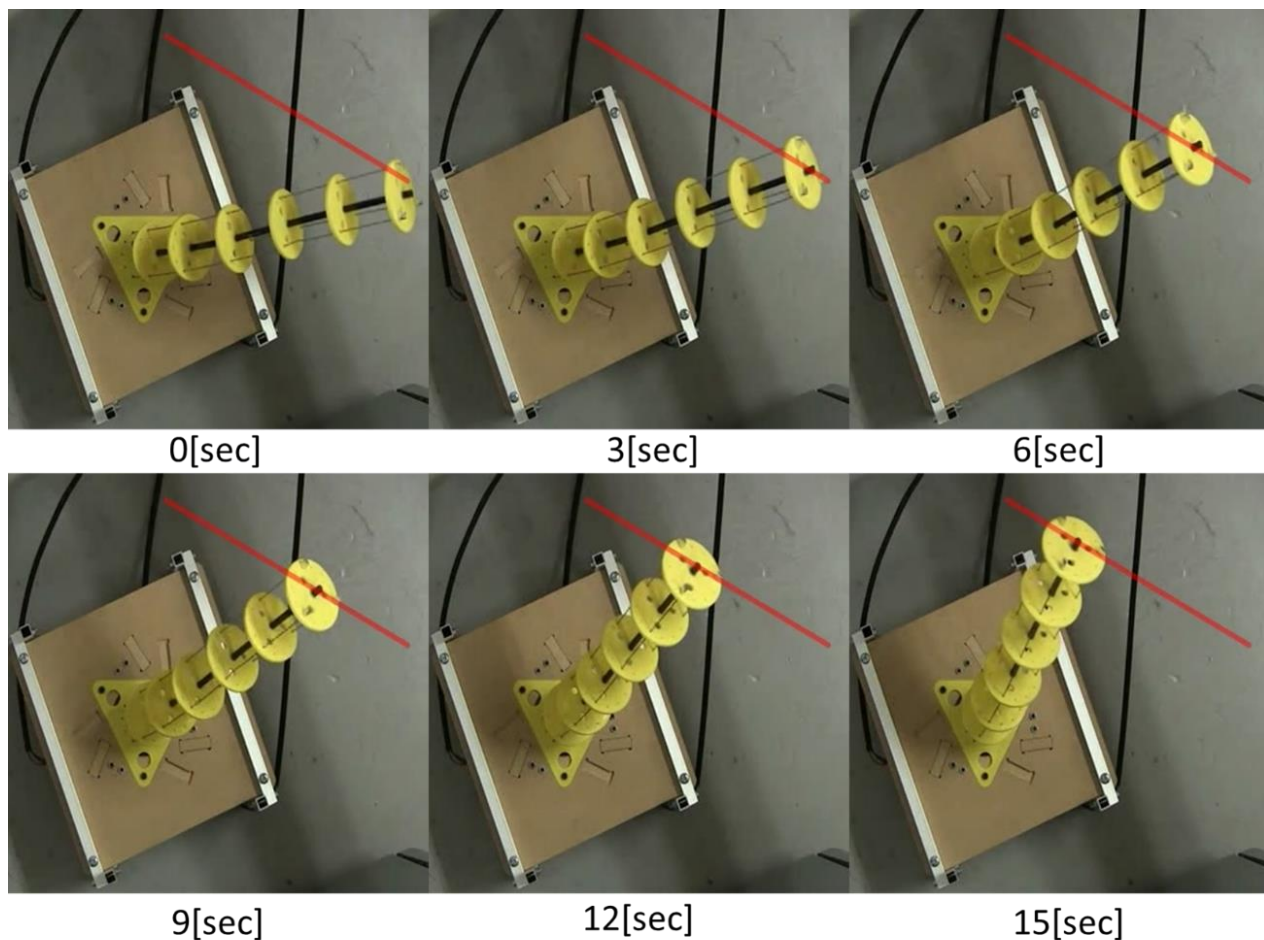


Fig.2-20 試作機先端の直線運動

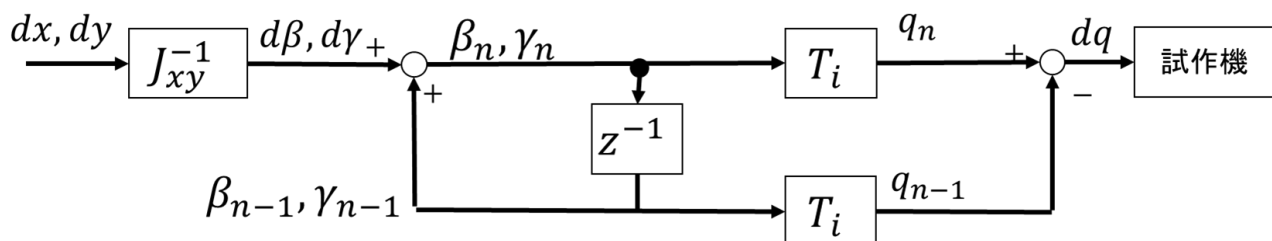


Fig.2-21 直線運動の制御チャート

2.5.5 特異点付近での動作

直線運動の制御を行う際、ヤコビ行列 J_{xy} の逆行列を求めている。この時、行列式 $\det(J_{xy})$ を考えると式(22)のようになる。

$$\det(J_{xy}) = \frac{l^2}{\beta^3} (1 - \cos \beta)(\beta \sin \beta - l(1 - \cos \beta)) \quad (22)$$

この式を考えると、 $\beta = 0$ の時、値の計算が発散することがわかる。これは、倒れが0のとき、直線運動の入力があっても、 γ の変位量を求めることができないためであると考えられる。実際に $\beta = 0$ 付近での挙動を Fig.2-22 に示す。0sec の矢印で示す方向への入力を行ったが、 $\beta = 0$ の時には挙動が不安定となり、実際の動作方向と合っていないことがわかる。

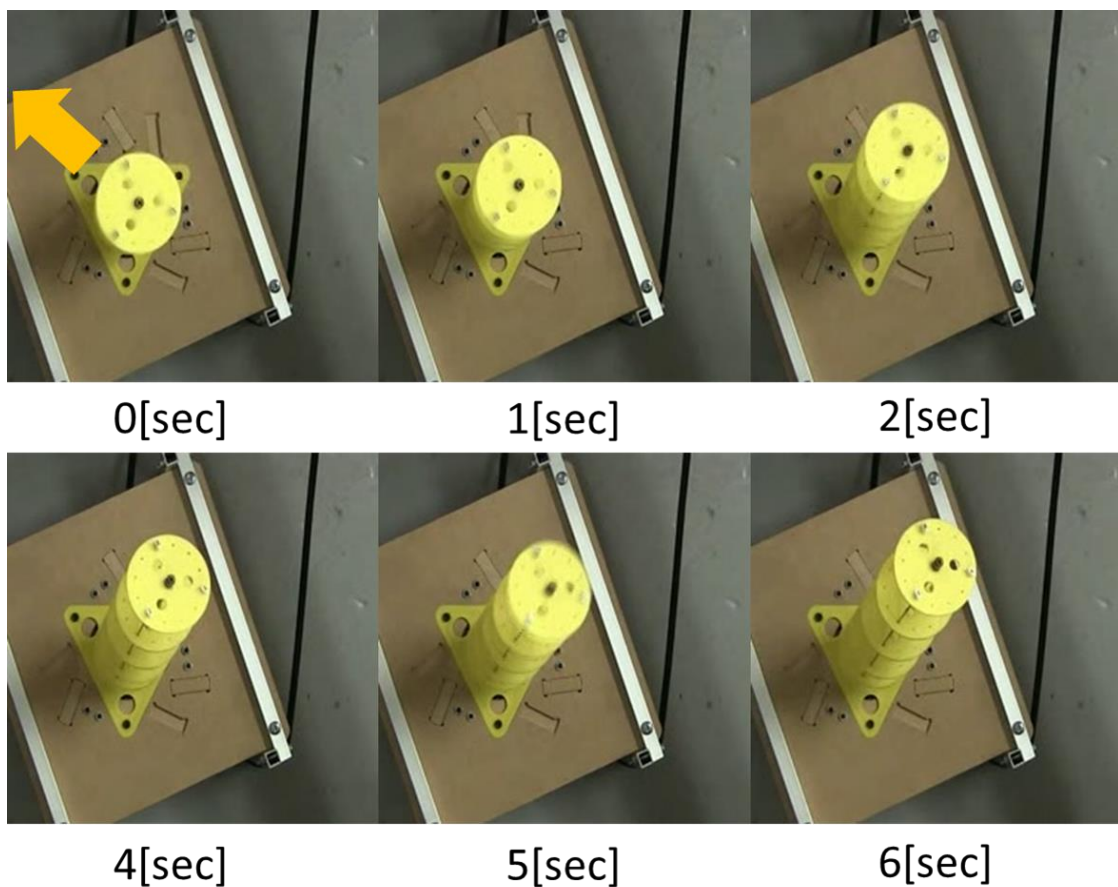


Fig.2- 22 特異点付近の挙動

2.6 負荷に関する検証

2.5.2 節で行った負荷に関する検証において、負荷が先端に係る状態でのマニピュレータの動作は曲率一定ではないことがわかる。その他の動作においても曲率が一定ではないことが原因で理想的な動作ができていないという検証を行っているが、マニピュレータ自体の質量による負荷も影響している可能性を考えると、負荷に関する検証をより詳細に行うことで、マニピュレータの動作則についてより深い理解が可能だと予想し、より詳細に負荷と動作の関係について検証を行った。Fig.2-23 に先端に負荷をかけたマニピュレータの動作を重さについて検証したものを示す。図の左から 50g ずつ質量が大きくなるようにおもりを先端に取り付け、同じ入力を与えた場合の動作である。50g と 200g を比較すると、マニピュレータの曲がっている大きさが少なくなっていることがわかる。すなわち、同じだけワイヤを操作しても、負荷の影響によってマニピュレータの先端の位置が変わることがわかる。Fig.2-24 にワイヤ操作量に対するマニピュレータの動作の変化を示す。先端に質量約 100g の同様のおもりを取り付けて、ワイヤ操作量のみを変更している。図の左から右へワイヤ操作量が大きくなるようになっている。図からも明らかなように、マシンのねじれが見られる。またワイヤ操作量に対応して、ねじれが大きくなっていることがわかる。この検証から、以下の2つのことがわかる。

- 1) マニピュレータの先端の質量が大きくなると先端の位置が下がる
- 2) 先端におもりを載せた状態で大きくワイヤを操作するとねじれが発生する。

おもり

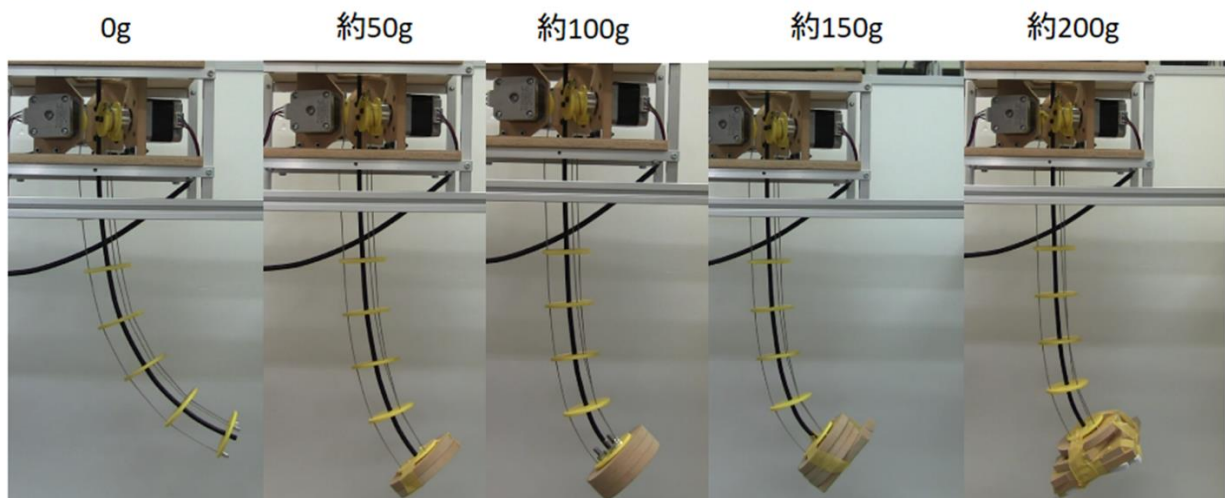


Fig.2-23 先端負荷の大きさによる動作の比較

入力(ワイヤを引く長さ)

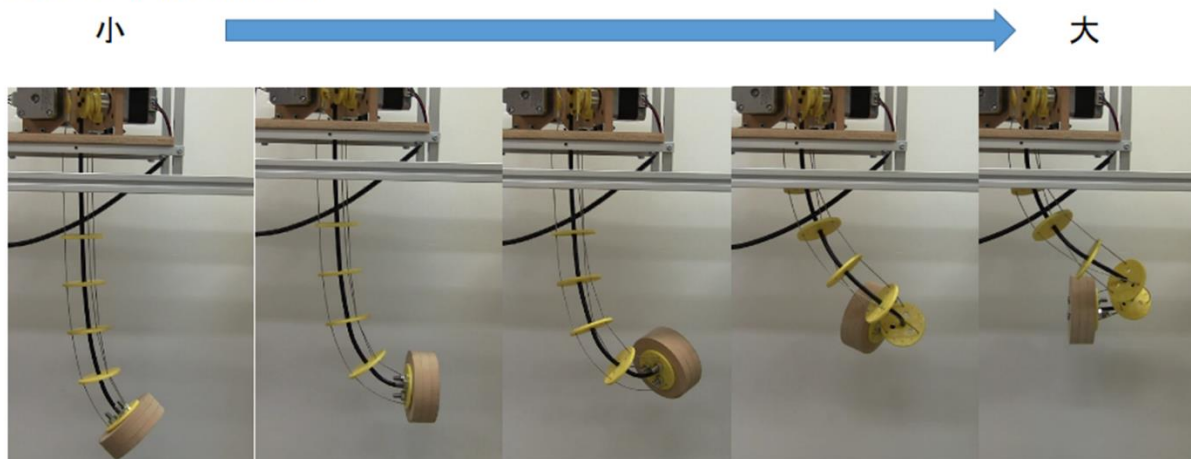


Fig.2-24 ワイヤ操作量に対する変化

2.7 終わりに

本章では、マニピュレータの試作機の製作、動作検証について述べた。本章で明らかになったのは、マニピュレータの曲率一定の条件であれば先端についての運動学を立てることができるため制御が可能であるということ。そして、先端に何らかの負荷がかかっている状態では、曲率が一定ではなくなる。更にワイヤを引っ張るとねじれが発生するということである。これらの課題についての解決案を3章以降で示す。

第3章 簡易モデルの構想

3.1 はじめに

本章では、2章で明らかになった課題の1つである質量が先端に負荷をかけているときに曲率が一定にならない問題について1つの簡易モデルを用いて検証を行ったことについて記述する。3.2節では本章で扱う簡易モデルを考える上で基礎となる最小ポテンシャルエネルギーの原理について解説する。3.3節では最小ポテンシャルエネルギーの原理から考えた簡易的なモデルについて述べ、そのモデルを使って質量、マニピュレータの硬さを変更してマニピュレータの動作について検証を行ったときの様子を示す。3.4節で得られた結果についてまとめる。

3.2 最小ポテンシャルエネルギーの原理について

本節では、最小ポテンシャルエネルギーの原理について記述する。最小ポテンシャルエネルギーの原理とは弾性体に起こる変位は幾何学的な境界条件を満たすもののなかで、ポテンシャルエネルギーが最小となる変位になるというものである。最もわかりやすい例は両端を持った糸である。両端を持った糸は重力とその柔軟性からたわみによって特定の形状を表す。この形状が最もポテンシャルエネルギーが小さくなる形状である。これはすべての弾性体について言えることである。シリコンのような柔らかい素材を指で押しかけたときの形状や、片側だけを持った釣り竿の形状などはすべて最小ポテンシャルエネルギーの原理に沿っている。本研究ではこの原理を用いた連続体マニピュレータのモデル化を行った。

3.3 連続体マニピュレータの硬さと質量のエネルギーに着目した簡易モデルの構想

3.2節で取り上げた最小ポテンシャルエネルギーの原理から考えた場合の、連続体マニピュレータの動作について検証すると、曲げによるひずみエネルギーと先端質量の重力による位置エネルギーの2つについてポテンシャルエネルギーが最小となる形状が連続体マニピュレータの動作後の形状と一致すると予想できる。本節では上記の2つの関係性を簡易的に調べるために、簡単な仮定のもとモデルを構築した。

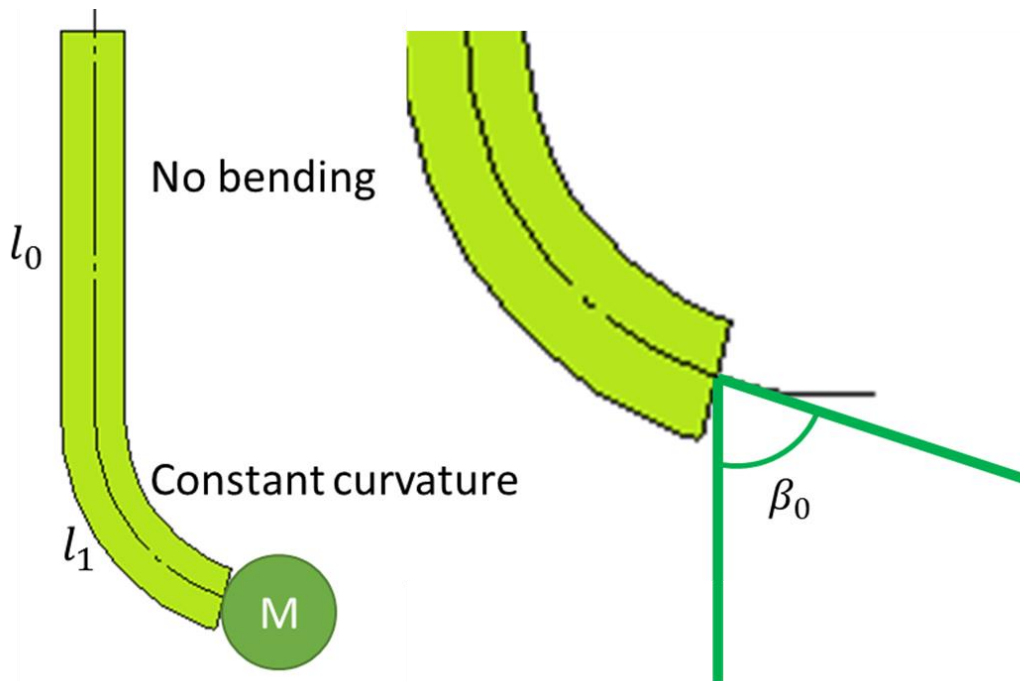


Fig.3-1 簡易モデルの条件

モデルの条件は Fig.3-1 に示す. 簡易モデルでは, 質量を先端に乗せたマニピュレータの動作から, マニピュレータが全く曲がらない区間 (図中 No bending) と曲率一定で曲がる区間(図中 Constant curvature)の 2 つで構成されていると仮定している. 全く曲がらない区間の長さを l_0 とし, 曲率一定の区間の長さを l_1 とした. 先端の垂直からの角度を β_0 とし, 先端に取り付ける質量の大きさを M として計算を行っている. この時の系のポテンシャルエネルギー E_n を計算すると式(23)のようになる.

$$E_n = \left\{ \frac{2EI\beta_0}{l_1} \int_0^{\beta_0} \frac{(1 - \cos \beta)^2}{\beta^4} d\beta + Mgl_1 \left(1 - \frac{\sin \beta_0}{\beta_0} \right) \right\} \quad (23)$$

式(23)に示す E_n を最小にするように計算することで, 簡易的にマニピュレータの動作の様子を知ることができると考えた. 式(23)において, E はヤング率, I は断面 2 次モーメントである. 式(23)は 2 つの項からなっている. EI に関する曲げによるひずみエネルギーの項と, Mg に関する先端質量に関する重力による位置エネルギーの項である. 式全体を最小にすることをかんがえると, 質量 M が大きい場合, 重力による位置エネルギーの項の影響が大きくなり, l_1 が小さくなるようになる. 逆に, EI のほうが大きいとひずみエネルギーの項の影響により, l_1 が大きくなる. つまり本式からは連続体マニピュレータの硬さに関する EI を Mg に対して大きくすれば曲率一定に近づくことを示唆している. 実際に計算し, 形状を描いたものを Fig.3-2, Fig.3-3 に示す. 図中の x, y を横軸縦軸とし, 直感的に連続体マニピュレータの形状がわかるように図を配置している. 図中の連続体マニピュレータは上側に駆動部がある. Fig.3-2 では質量 M の値を 100g で固定し, ヤング率 E を 0.1GPa から 1.1GPa まで 0.1 ずつ大きくしたときの様子を示している. 上述の考察と同様に, ヤング率が上昇するにつれて, 曲率一定の範囲が大きくなっていることがわかる. $E = 1.1\text{GPa}$ ではほぼ全体が曲率一定になっていることがわかる. Fig.3-3 ではヤング率 E の値を 1GPa で固定し, 質量 M を 100g(0.1kg) から 1000g(1.0kg) まで 100g(0.1kg) ずつ大きくしたときの様子を示している. こちらも, 質量が大きくなるにつれ, 曲率一定の範囲が狭くなり,

先端が下の方へと下がっていることがわかる。

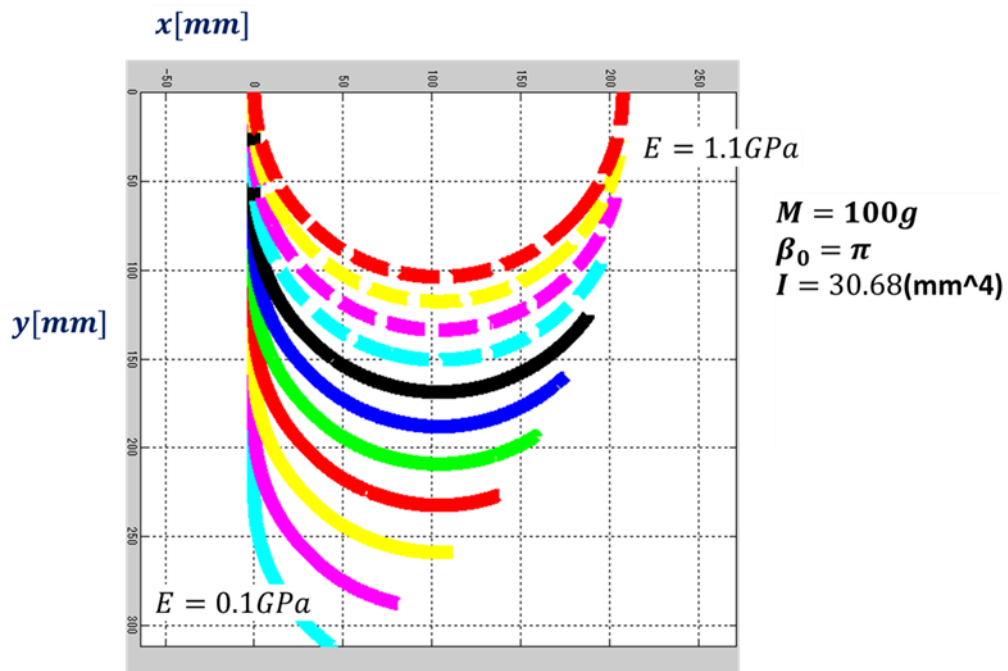


Fig.3-2 式(23)について、先端質量 M を固定とし、ヤング率 E を変更したときの様子

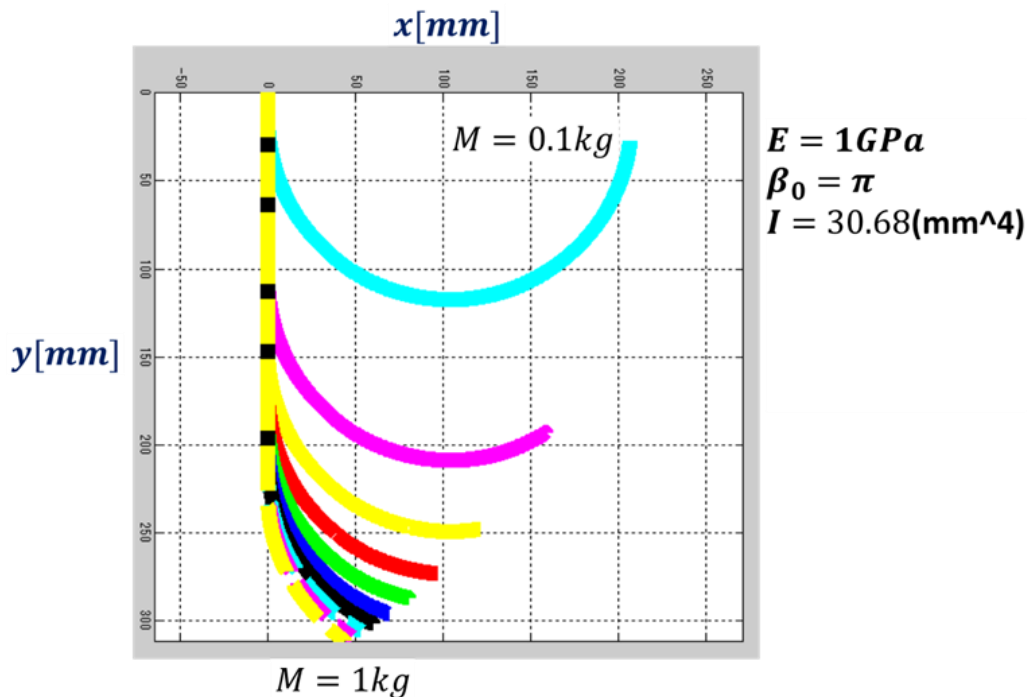


Fig.3-3 式(23)について、ヤング率 E を固定とし、先端質量 M を変更したときの様子

3.3 おわりに

本章では、最小ポテンシャルエネルギーの原理について解説し、それを考慮した硬さと先端にかかる負荷に関する簡易的なモデルを考案した。本モデルの考察から、マニピュレータの硬さが大きくなれば、先端にかかる負荷が大きくても曲率一定で制御できる可能性を示している。しかし、本モデルは簡易的であり、実際のマニピュレータの動作の様子を的確に表しているとは思えない。第 5 章でより詳細なモデルを示し、より詳細に試作機の動作との検証を行う。

第4章 ねじれ防止機構の開発

4.1 はじめに

本章では第2章で明らかとなったねじれの問題を解決するために新しい防止機構を開発について述べる。4.2節ではねじれ防止機構の開発にあたってどのような過程で行ったかやねじれ防止機構案について紹介する。そのうち採用したねじれ防止機構を取り付けた新たな試作機とその動作の様子を4.3節に示した。4.4節でねじれ防止機構についてまとめる。

4.2 ねじれ防止機構の開発

本節ではねじれ防止機構の開発について言及する。本稿で取り扱うねじれ防止機構の開発は3Dプリンタを用いて行った。ねじれ防止機構の開発の様子をFig.4-1に示す。ねじれ防止機構の開発はFig.4-1に示すように新しい機構を思いつく、製作して手で曲げたときにねじれを起こすとどのように動作するかを検証するということを繰り返すことで行った。連続体マニピュレータの円盤(disk)2枚間についての検証のみを行った後、ねじれを防止し、連続体マニピュレータに求められる動作を満たしたものについて1セグメントの長さだけその機構の取り付けられた連続体マニピュレータを製作し最後に検証を行った。



Fig.4-1 ねじれ防止機構の開発

次ページから、連続体マニピュレータのねじれ防止機構を開発するにあたって製作、検証した機構案についてSolidWorksで製作した図面を示す。

4.2.1 ねじれ防止機構案①

ねじれ防止機構案の1つを Fig.4-2 に示す. 図中青色で示したものが従来のマニピュレータの円盤(disc)に対応し, 赤色で表したものが中心軸となっている. 黄色で示した部分は回転リンクとなっておりねじれを防止しつつ曲げには対応したものとなるという構想だったが, 実際に作ってみた所回転軸の数が少なく黄色いリンクも曲げる形で曲がっていたためねじれぼうし機構としては不十分と判断した.

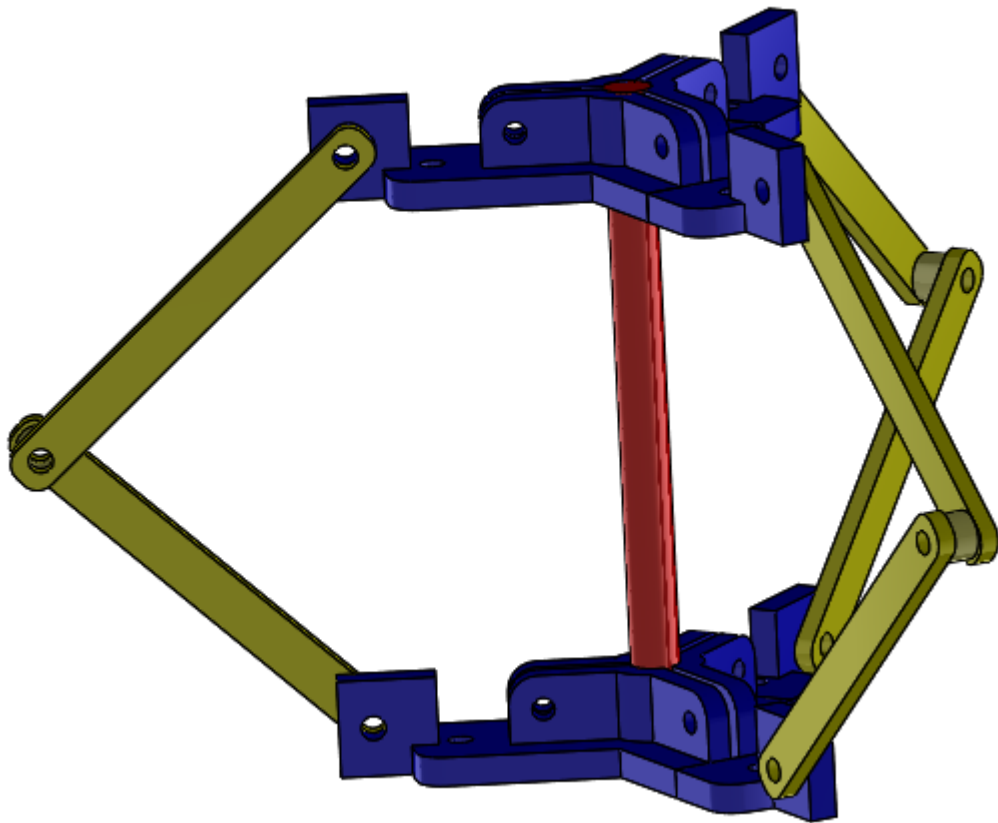


Fig.4-2 ねじれ防止機構案①

4.2.2 ねじれ防止機構案②

ねじれ防止機構案の1つを Fig.4-3 に示す. 図中青色で示したものが従来のマニピュレータの円盤(disc)に対応し, 赤色で表したものが中心軸となっている. ねじれ防止機構案①との違いはリンクが1つ増えていることである. このようにリンクを増やすことでマニピュレータ自体が曲がる時にリンクが曲がることを防ぐようにしたが, このリンクを増やしたことでねじれの防止にも影響がでたため本機構を使うことはなかった. 追加した機構が独特な形状になっているのは曲げのジャマにはならずねじれを防止するための形状として設計したがうまく機能しなかった.

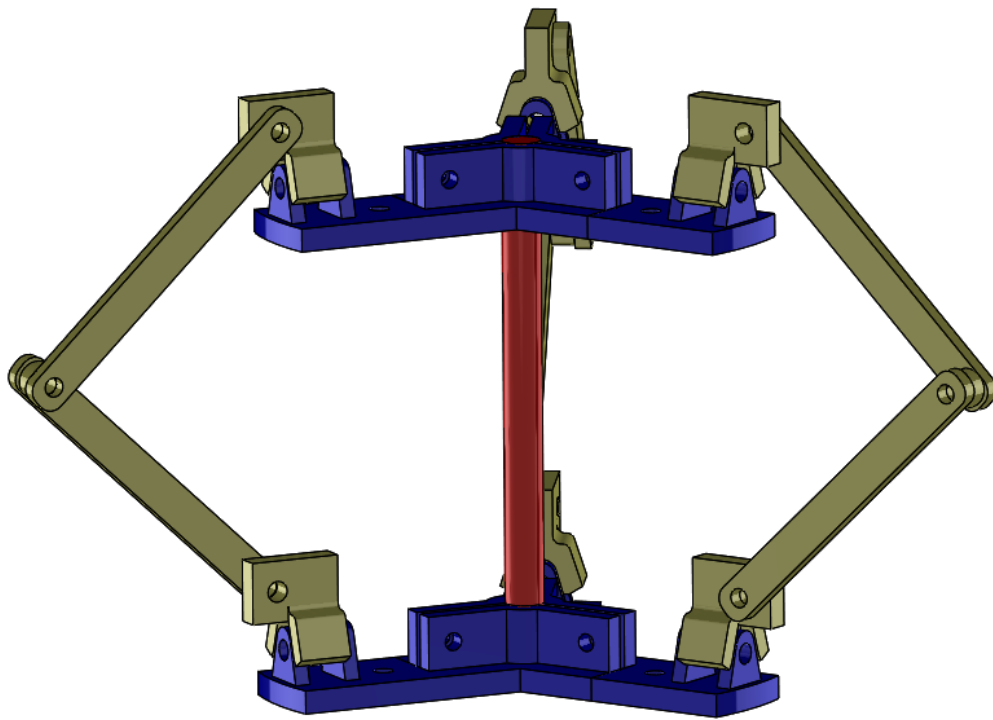


Fig.4-3 ねじれ防止機構案②

4.2.2 ねじれ防止機構案③

ねじれ防止機構案の1つを Fig.4-4 に示す. 図中青色で示したものが従来のマニピュレータの円盤(disc)に対応し, 赤色で表したものが中心軸となっている. ねじれ防止機構案②と異なるのはリンクの種類である. 平行固定するリンクとなっており, これと回転軸を組み合わせることでねじれを防止しながら曲げを邪魔しないようになった. 本機構案を元に全体を設計し直すこととなった.

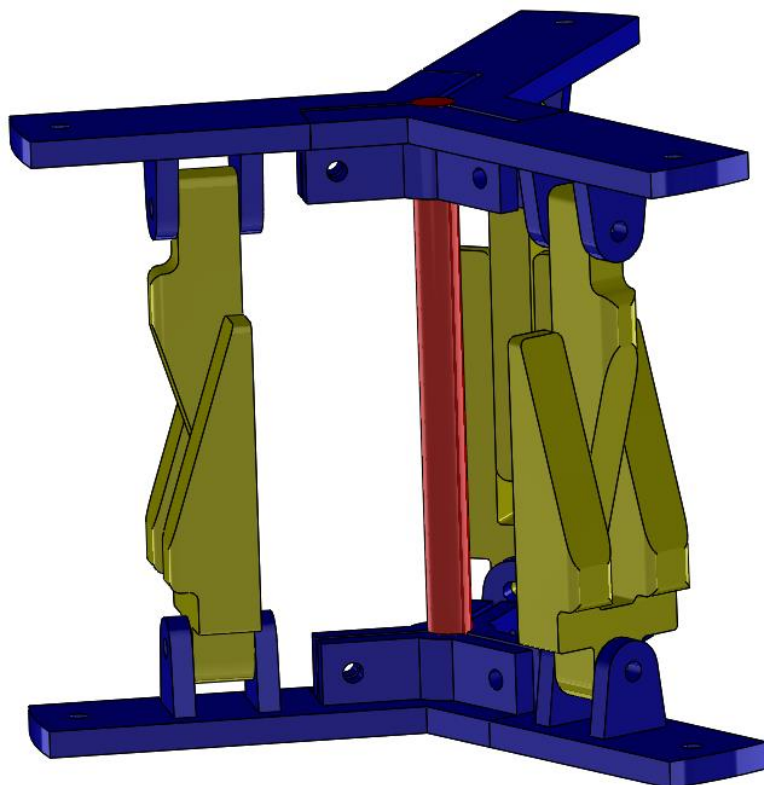


Fig.4-4 ねじれ防止機構案③

4.3 ねじれ防止機構の有無による動作の比較

本節では 4.2 節で示したねじれ防止機構を有する連続体マニピュレータの試作機の動作を 2 章で製作したものと比較，検証した動作について示した．Fig.4-5 に改良の様子を示す．改良機にはねじれ防止機構と硬さを擬似的に変更するためのバネが取り付けられている．長さは 2 章で製作した試作機と同様にしてある．

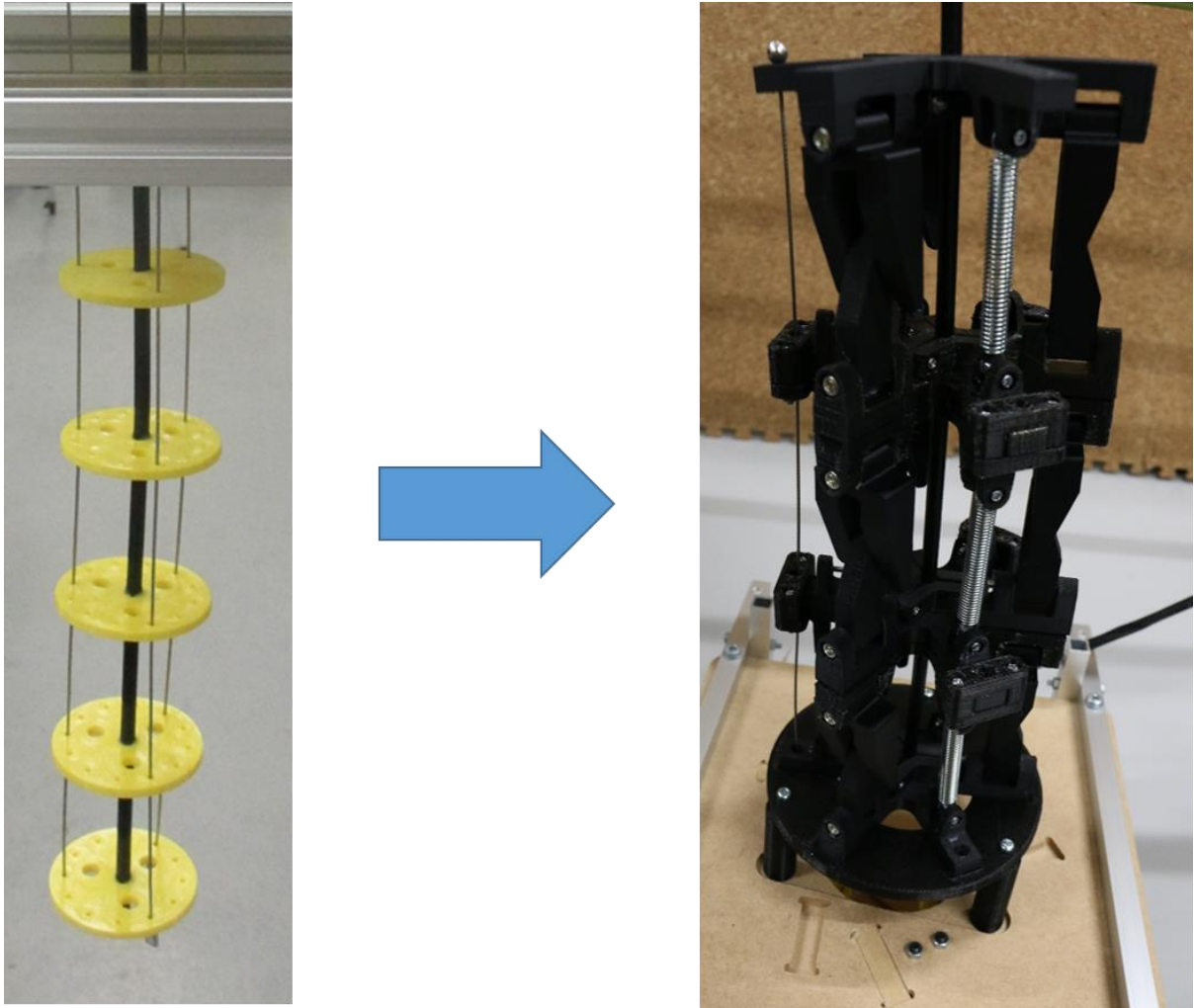


Fig.4-5 連続体マニピュレータの改良

章で製作したものと比較，検証した動作について示した．Fig.4-5 に改良の様子を示す．改良機にはねじれ防止機構とバネが取り付けられている．長さは 2 章で製作した試作機と同様にしてある．Fig.4-6 にねじれ防止機構を取り付けた連続体マニピュレータと取り付けていないマニピュレータとの動作の比較の様子を示した．ワイヤの操作量，先端の質量の重さは同様としている．画像からも明らかにねじれないで先端が持ち上がっていることがわかる．また，Fig.4-7 に，バネの有無についての比較を示している．先端部の高さの比較が行いやすいように赤線で先端の位置を示している．どちらも同じ重り，同じワイヤ操作量であるが，バネを取り付けたほうの先端が高く持ち上がっていることがわかる．3 章での仮定した，マニピュレータが硬さを擬似的にあげることがばねによって可能になり，曲率一定に近づいたのではないかと考えることができる．より詳細なモデルを用いた検証は 5 章で行う．

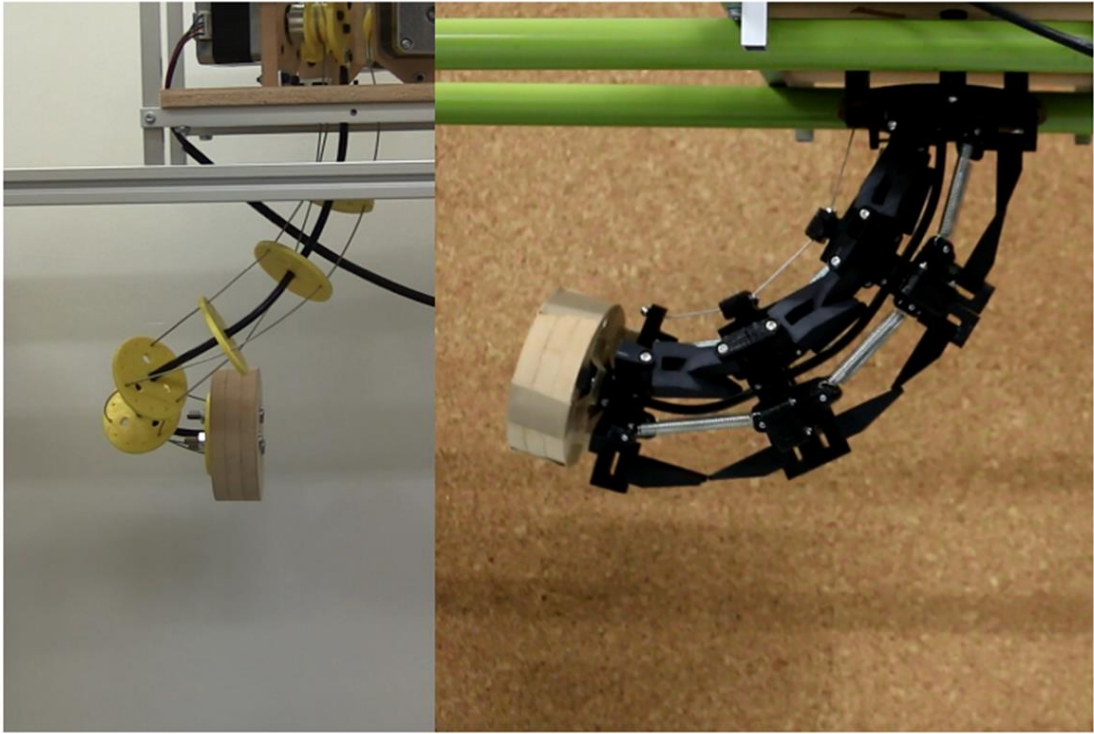


Fig.4-6 ねじれ防止機構の有無に関する

バネなし

バネあり

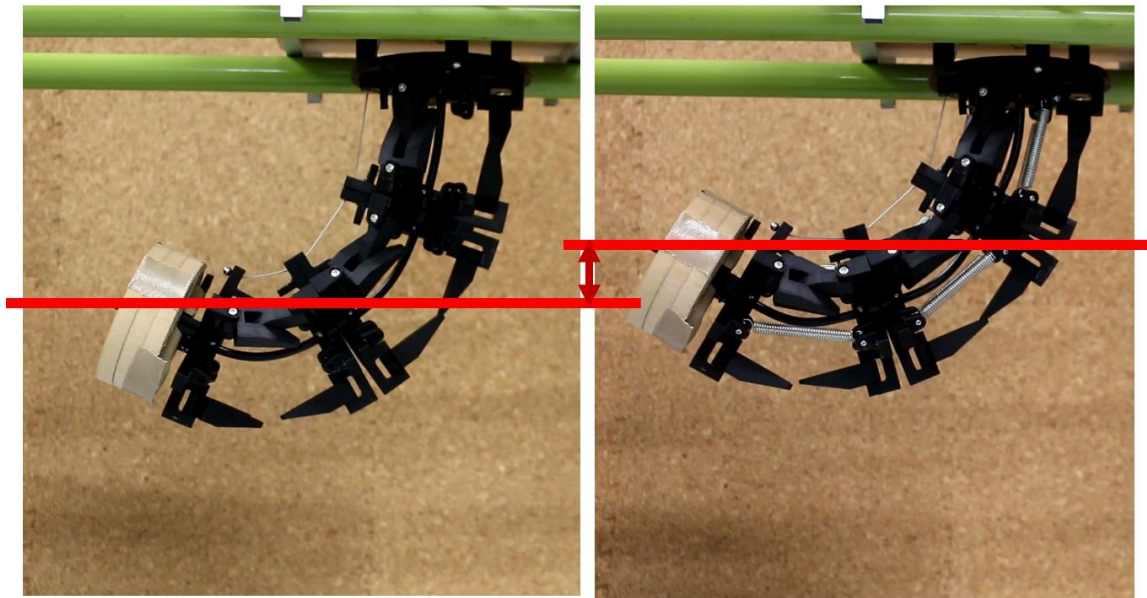


Fig.4-7 バネの有無による先端位置の比較

4.4 おわりに

本章ではねじれ防止機構についてとりあげた。ねじれ防止機構は実際に設計製作するなかで検証を重ねて製作を行った。その後動作の検証を行った時にばねによって動作が改善する兆しが見られた。5章ではねじれ防止機構を取り入れたモデルの検証をおこなっている。

第5章 ポテンシャルエネルギーの原理を用いた1セグメント連続体マニピュレータの平面内挙動に関するモデル

5.1 はじめに

本章では3章で取り扱ったモデルのより詳細なモデルについて解説する。5.2節ではモデル化の条件を示し、5.3節でその解析結果を示す。5.4節でモデルの検証のための試作機を製作したこととその試作機を用いての検証を示した。5.5節で本章についてまとめる。

5.2 モデル化の条件

本節では3.2節で紹介した最小ポテンシャルエネルギーの原理を用いたより詳細なモデルについて解説する。

連続体マニピュレータの解析条件を Fig.5-1 に示す。Fig.5-1 はワイヤ駆動連続体マニピュレータのワイヤ長さに対する形状の変化を解析することを表している。これは、本研究で取り扱うマニピュレータをモデル化したものになる。マニピュレータの自体の重さを m 、マニピュレータの長さを l 、マニピュレータのヤング率を E 、断面二次モーメントを I とする。先端に取り付けるおもりの重さを M とし、引っ張った後のワイヤの長さを Q とする。根本のワイヤが天井を通過する位置を中心から r とする。先端のワイヤの固定位置も中心から r の位置とした。

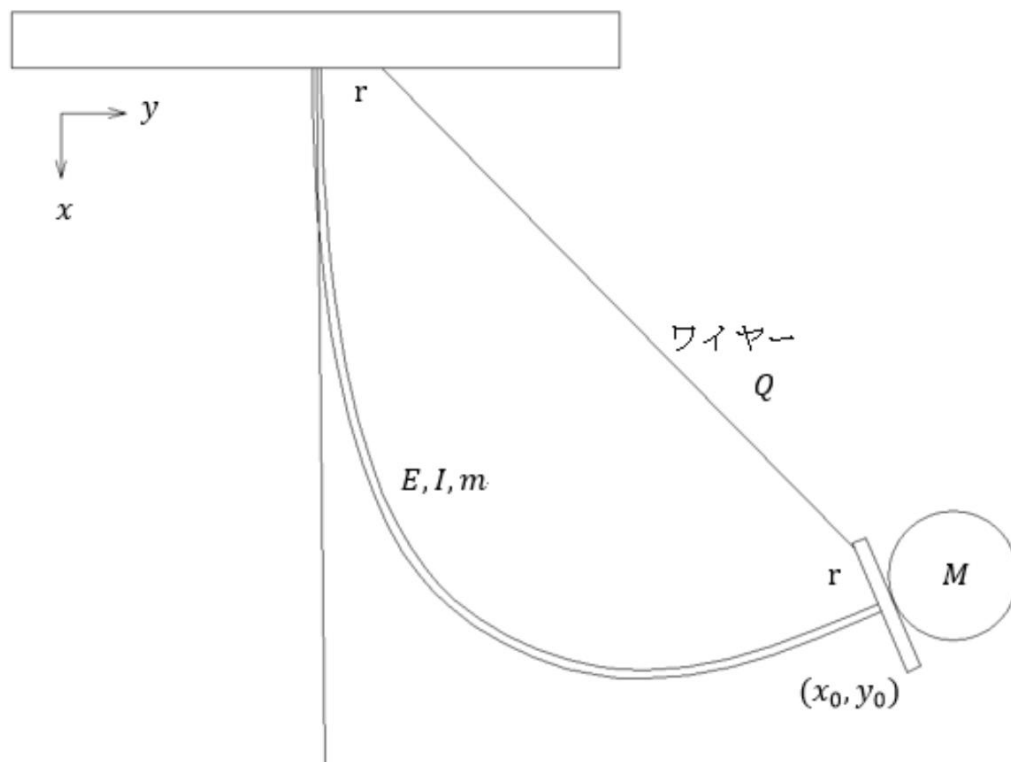


Fig.5-1 最小ポテンシャルエネルギーを用いたモデル化の条件

最小ポテンシャルエネルギーの原理によると、弾性体に起こる変位は幾何学的な境界条件を満たすもののなかで、ポテンシャルエネルギーが最小となる変位になる。マニピュ

レータの形状を x の関数 $y(x)$ とすると、全体のポテンシャルエネルギーは $y(x)$ から求まるという汎関数の形で表される。その汎関数から変分法を用いることにより関数 $y(x)$ を求めることができる。しかし、本研究で取り扱うマニピュレータはたわみ角の影響を無視することができない大変位状態を取り扱うため、変数 x, y を用いると非常に計算が煩雑となる。そこで、Fig.5-2に示すようにマニピュレータの長さ s と、そこでのマニピュレータの角度 θ で形状を表すこととする。すなわち、角度 θ は長さ s の関数となり、マニピュレータのポテンシャルエネルギー Π は $\theta(s)$ が決まることで求まる汎関数となる。

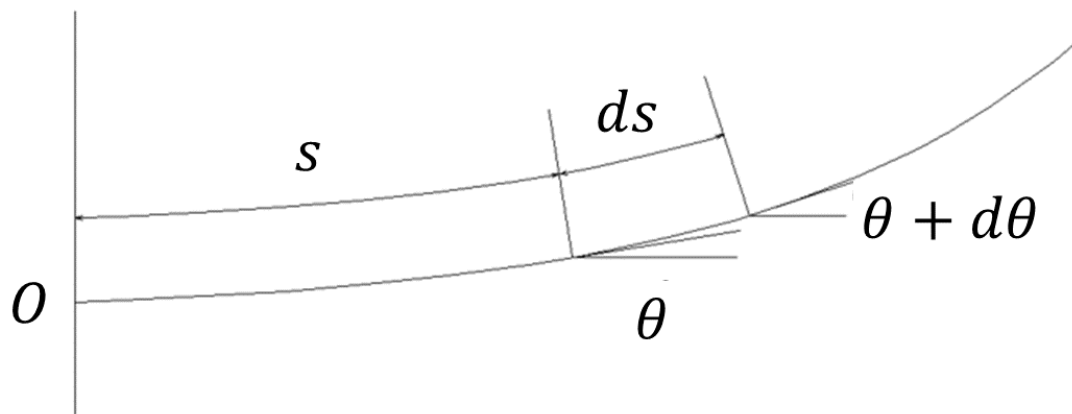


Fig.5-2 モデル化においての変数変換

本解析の対象の形状を決定するポテンシャルエネルギーは下記に示すものとなる。

- ・ 曲げによるひずみエネルギー U_E
- ・ 重力によるポテンシャルエネルギー U_G

それぞれのポテンシャルエネルギーを θ, s で表すと、以下のようになる。

$$U_E = \int_0^l \frac{EI}{2} \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 ds \quad (24)$$

$$U_G = \int_0^l \left\{ Mg \cos \theta + \int_0^s \left(\frac{m}{l} \right) g \cos \theta(\tau) d\tau \right\} ds \quad (25)$$

よって、ポテンシャルエネルギーの総和 Π は式(24),(25)を用いて

$$\Pi = U_E + U_G = \int_0^l \left\{ \frac{EI}{2} \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 + Mg \cos \theta + \int_0^s \left(\frac{m}{l} \right) g \cos \theta(\tau) d\tau \right\} ds \quad (26)$$

となる。ここで、式(26)の積分項の中に着目して

$$F(s, \theta, \dot{\theta}) = \frac{EI}{2} (\dot{\theta})^2 + Mg \cos \theta + \int_0^s \left(\frac{m}{l} \right) g \cos \theta(\tau) d\tau \quad (27)$$

と表す。ただし、

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{ds} \quad (28)$$

とした. ここで, 簡単化のためにマニピュレータ自体の重さは先端の重りより小さいすなわち

$$F(s, \theta, \dot{\theta}) = \frac{EI}{2} (\dot{\theta})^2 + Mg \cos \theta \quad (29)$$

として計算を行った.

変分原理をもちいて, 停留条件を考えた場合, 以下の式(30)を満たすことがポテンシャルエネルギー Π を最小にする条件となる.

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} - \frac{d}{ds} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}} \right) = 0 \quad (30)$$

それぞれの項は計算すると以下のようになる

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} = -Mg \sin \theta \quad (31)$$

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}} \right) = EI \ddot{\theta} \quad (32)$$

ただし,

$$\ddot{\theta} = \frac{d}{ds} (\dot{\theta}) \quad (33)$$

とした. 式(30)~(32)をまとめると, 式(34)に示す二階微分方程式となる.

$$\ddot{\theta} = -\frac{Mg}{EI} \sin \theta \quad (34)$$

次に, 微分方程式を解くための境界条件を求める. 条件のひとつは, 原点が完全固定であるので,

$$s = 0 \text{ で } \theta = 0 \quad (35)$$

二階微分方程式なので, 境界条件は 2 つ必要である. もう一つは, $s = l$ の条件のときのワイヤの長さの条件となる. ワイヤの長さは幾何学的に以下のようになる.

$$Q = \sqrt{(x_0 - r \sin \theta)^2 + (y_0 + r \cos \theta - r)^2} \Big|_{s=l} \quad (36)$$

ただし,

$$x_0 = \int_0^l \cos \theta ds \quad (37)$$

$$y_0 = \int_0^l \sin \theta ds \quad (38)$$

であり, x_0, y_0 はそれぞれマニピュレータの先端の x 座標, y 座標を表す.

よって本モデルは式(34)に示す二階微分方程式を, 境界条件(35),(36)のもとで解くことでマニピュレータの形状を求めることができる. $s = 0$ での θ を仮定し根本 $s = 0$ から式(34)からオイラー法を用いて形状を求めている. 仮定した θ は境界条件(36)と二分法を用いることで決定し, 2つの境界条件と式(34)を満たすマニピュレータ形状を描いている.

5.3 モデルの解析結果

5.2節で紹介した条件での解析の結果について本節で述べる. 数値シミュレーションの結果を Fig.5-3 に示す. 解析の条件はマニピュレータの長さ l を 185.5mm, ワイヤの固定位置 r を中心から 40mm の位置とした. 先端の重りの質量 M は実際に 5.4 節で試作機の動作実験で用いる 112.4g とし, ワイヤを引っ張る長さは 60mm とした. 中心のヤング率と断面 2 次モーメントをかけた値 EI を 0.01, 0.05, 0.09 についてシミュレーションを行った. 縦軸に Fig.5-1 に示す y 軸の長さを, 横軸には x 軸の長さを示している. 解析条件と同様に質量を取り付けた先端が下向きになるように図を変更している. また, 黒い線はそれぞれの硬さについてのマニピュレータの形状を表し, 赤い線で曲率一定の曲線を示した. Fig.5-3 より硬さを示す EI が大きい値を取るほどマニピュレータの形状を示す曲線が曲率一定の曲線に近づくことがわかる. 2章で取り上げた通り曲率一定でマニピュレータが駆動する場合の運動学は計算できるため, 本モデルの有用性が示されれば, 先端にかかる負荷から連続体マニピュレータの有用性を失わない範囲の剛性で設計することができるようになる.

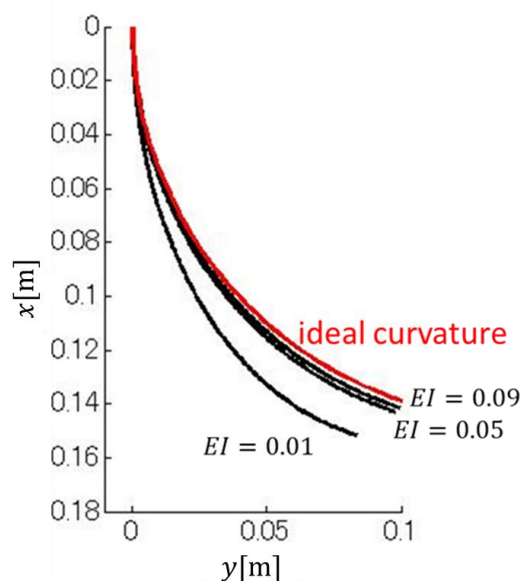


Fig.5-3 1セグメント連続体マニピュレータのシミュレーション結果

5.4 モデルの検証

本節では 5.2 節で紹介したモデルの検証を行った。検証には 4 章で開発したねじれ防止機構を用いて制作した新たな試作機を紹介する。そしてその試作機を用いての検証とその考察を示す。

5.4.1 検証用の試作機

Fig.5-4 にシミュレータの検証のために制作した試作機を示す。解析結果と比較するために平面内だけで動作するものとした。Fig.5-4 に示す写真手前に見える灰色の球体はモーションキャプチャのマーカータンとしており、動作検証の際にマニピュレータの形状を測定するために使用する。また左に見えるバネを変更することで硬さの調節が可能である。Fig.5-4 の右部の機構を拡大したものを Fig.5-5, Fig.5-6 に示す。本機構はマニピュレータが曲がる際に Fig.5-6 のように爪が食い込み合い、ねじれを防止する機構となっている。本機構を取り付けることにより連続体マニピュレータの 2 次元動作の測定が可能となる。

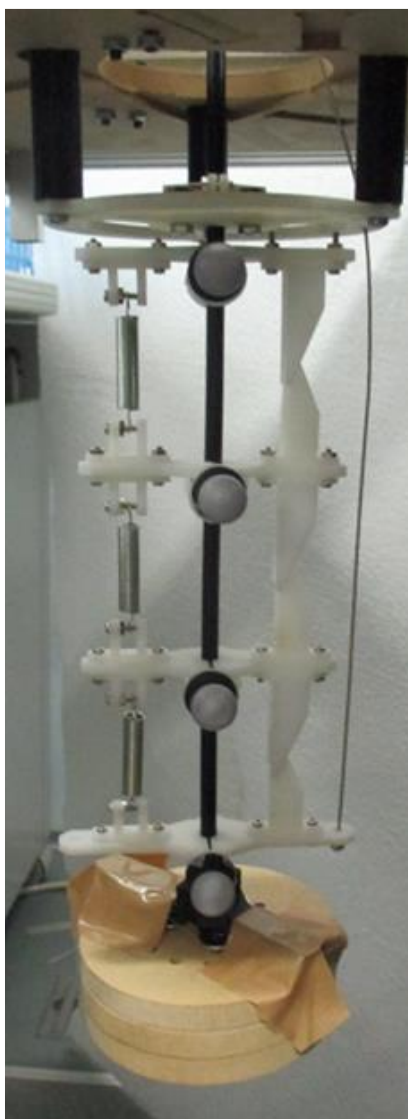


Fig.5-4 シミュレータの検証のための試作機



Fig.5-5 試作機のねじれ防止機構

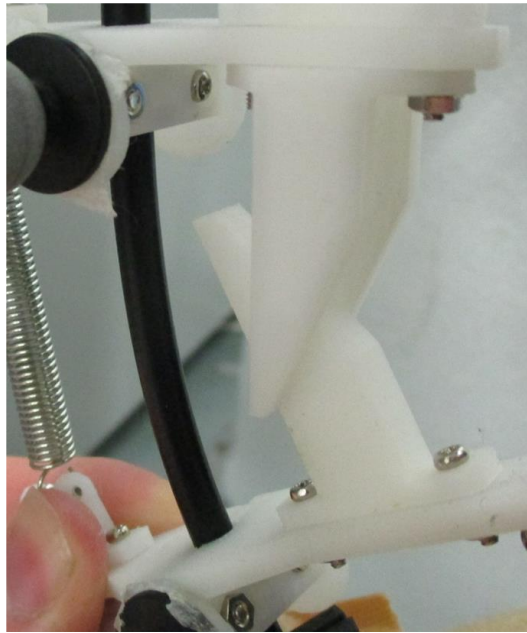


Fig.5-6 試作機のねじれ防止機構の曲げたときの様子

本試作機の動作の様子を Fig.5-7 に示す。駆動部でワイヤを 60mm ひっぱり、先端には 112.4g のおもりをのせている。Fig.5-5, Fig.5-6 に示した機構によって、Fig.2-24 で見られたようなねじれをおこさずに先端を持ち上げることができるようになり、解析結果と比較することが可能である。

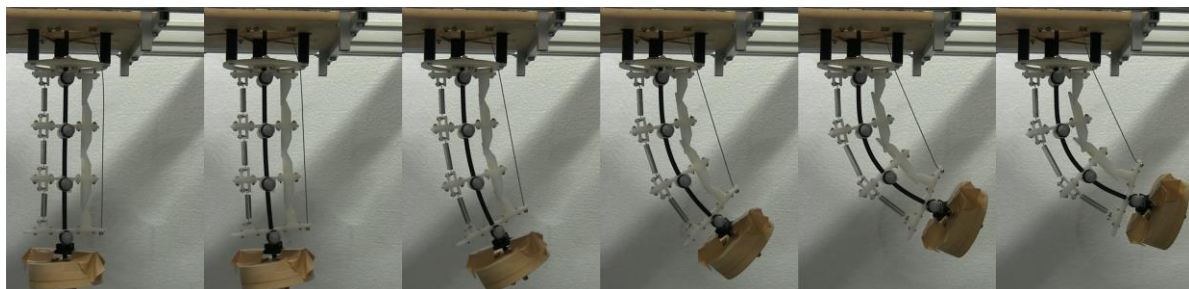
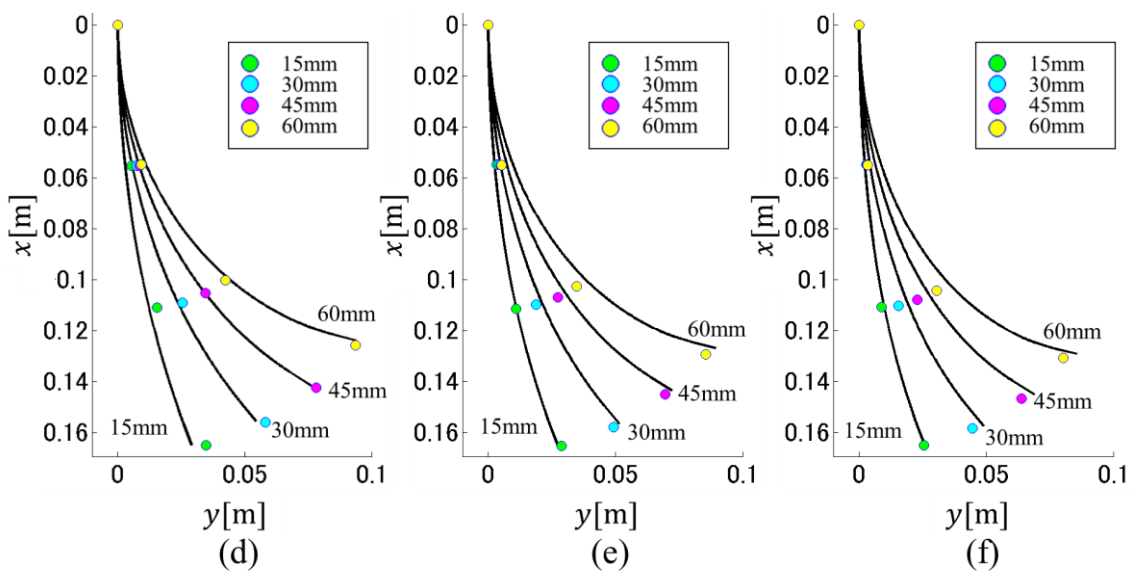
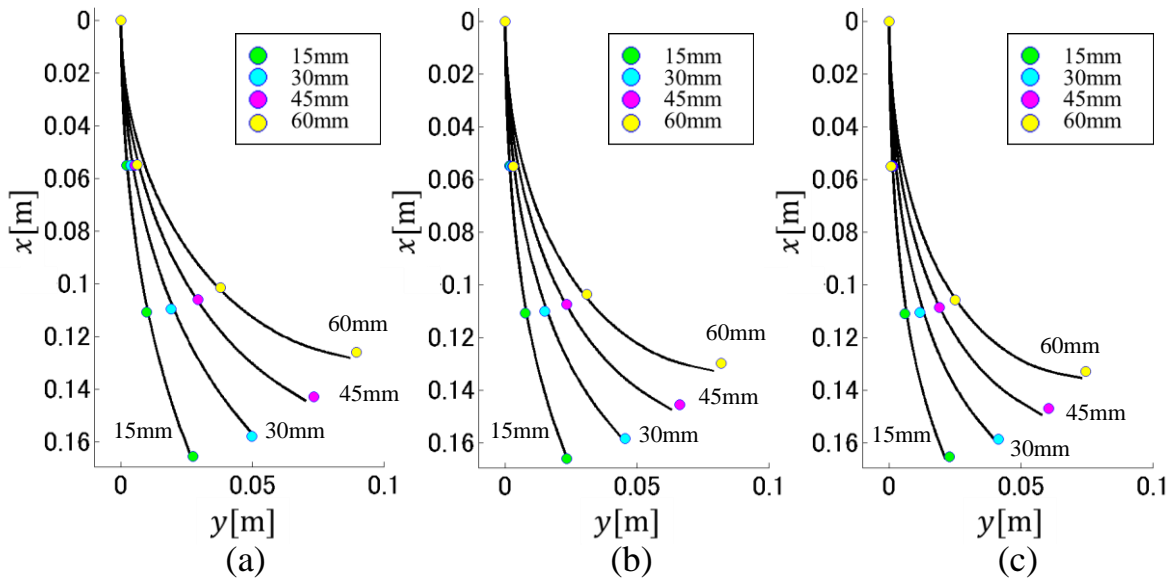
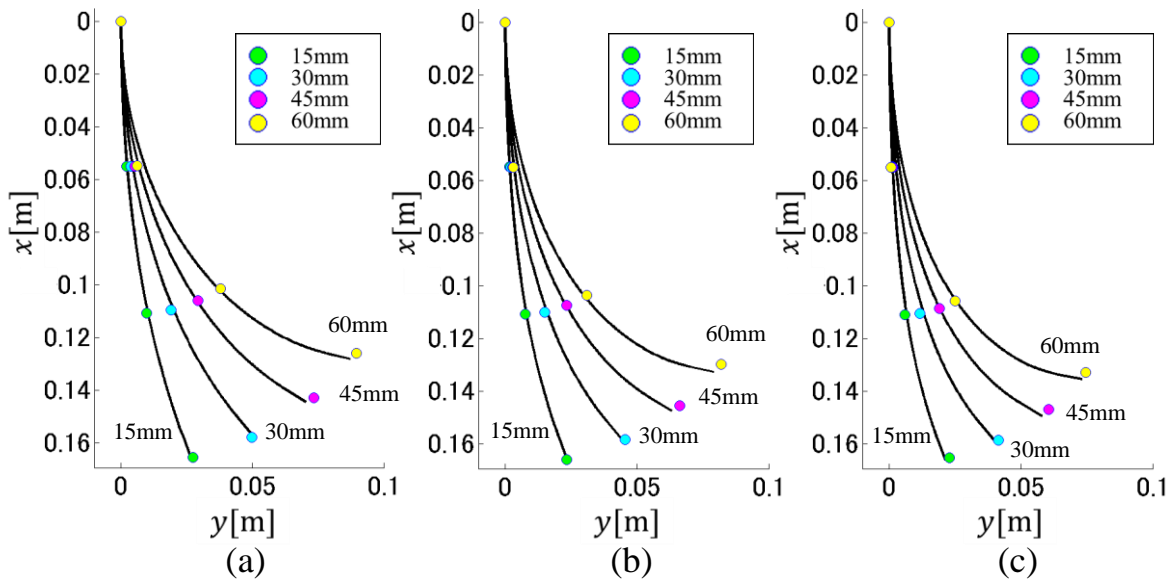


Fig.5-7 検証用試作機の動作の様子

5.4.2 検証の様子

前章で取り扱ったモデルの検証を、実験装置を用いて行った。先端のおもり、引っ張るワイヤの長さ、マニピュレータの硬さの3つの項目について検証を行った。先端のおもりは 104.0g, 203.7g, 301.8g のものを用意した。引っ張るワイヤの長さは 15mm から 120mm まで 15mm 間隔で検証を行った。マニピュレータの硬さは Fig.5-4 で示したバネを取り付ける場合と取り付けない場合で硬さの調整を行った。Fig.5-4 に見えるマーカーの位置座標をモーションキャプチャによって取り込み、前章で示した解析ソフトの描画とともに表示した。実際に描画したものを Fig.5-8 に示した。Fig.5-8 の(a)~(l)の条件を表 1 にまとめて示した。図の黒く描かれている曲線が 3 章で示したモデルによるシミュレーション結果を表し、各図の中にみられる緑、青、マゼンタ、黄の点が実験機に取り付けたマーカーから得られたデータである。1つの図には先端おもりの質量と硬さの条件を揃え、1ワイヤの引張量の条件を変更したものを4つ並べて表示した。(a)~(f)には 15mm から 60mm まで、(g)~(l)には 75mm から 120mm までを 15mm 間隔で表示した。前章のデータの表示と同じように軸は設定しており、 x 軸, y 軸ともに m 単位で表示している。

Fig.5-8 の(a)~(f), すなわちワイヤ引張量が 15mm から 60mm までの範囲ではマニピュレータの形状をモデルがよく表していることがわかる。ワイヤを引っ張った長さによって誤差が大きくなることが考えられる。ワイヤ引張量が小さい範囲では、硬さや先端の重りを変更した場合はあまり誤差に影響しないことが図からわかる。(g)~(l)をみるとキャプチャした点の形状がモデルで描いた形状と異なる点から、マニピュレータ自体の重量を考慮に入れていないことが誤差の要因と考えられる。またバネを用いた中心軸の硬さを擬似的に上げる構造がモデルにあまり影響しないこともわかった。



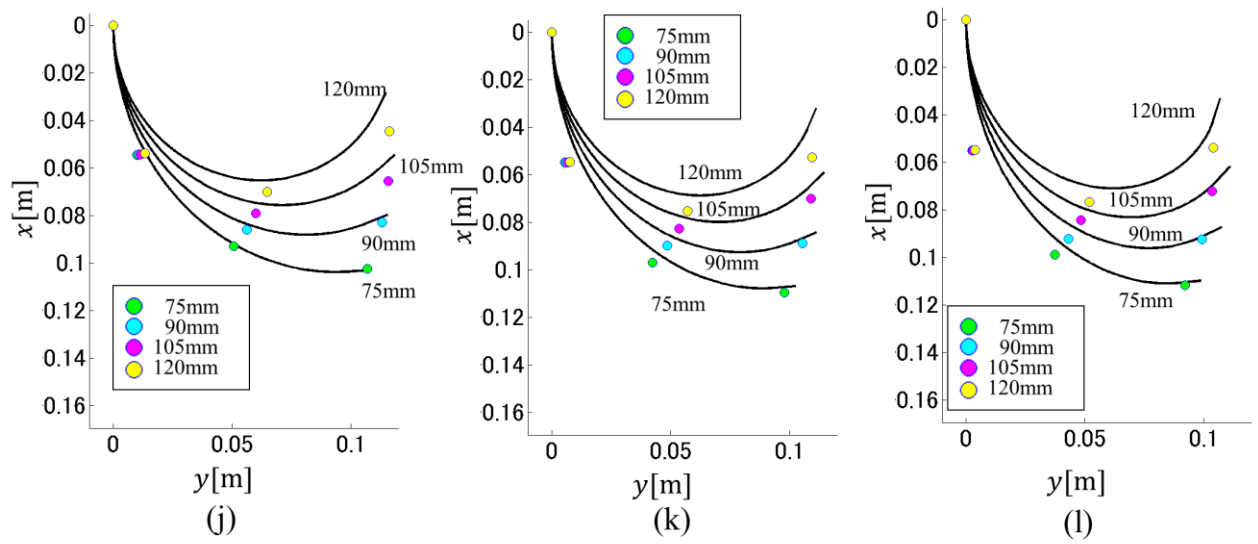


Fig.5-8 連続体マニピュレータの1セグメントのシミュレーション結果と試作機の動作の比較

5.5 おわりに

本章では最小ポテンシャルエネルギーの原理を用いた3章の簡易モデルよりも詳細なモデルを提案し検証した。試作機を用いた検証を通して概ね形状を推論するのに問題ないことが分かった。次章では今後の検証のための2セグメントのマニピュレータを製作したためそれについて紹介する。

第6章 2セグメントマニピュレータの開発

6.1 はじめに

本章では今後の連続体マニピュレータの研究のための2セグメントマニピュレータについて設計製作を行ったためその試作機について紹介する。6.2節では設計した駆動部について示し複数セグメントに対応できる仕様であることを示す。6.3節では実際の動作の様子を示し、今後の課題について示す。

6.2 駆動部の設計

本節では2セグメントマニピュレータの駆動部の設計について説明する。複数セグメントのために設計した駆動部の3DCADをFig.6-1に示す。下面に連続体マニピュレータが取り付けられる。上部の駆動部には1段毎にステッピングモータが3つずつ入っており、1段が1セグメントに対応している。本設計では4セグメントに対応する構造となっている。設計では4セグメントまでであれば駆動部の段数を変更することで対応することができる。本章では2セグメントでの設計だったため2段で製作した。

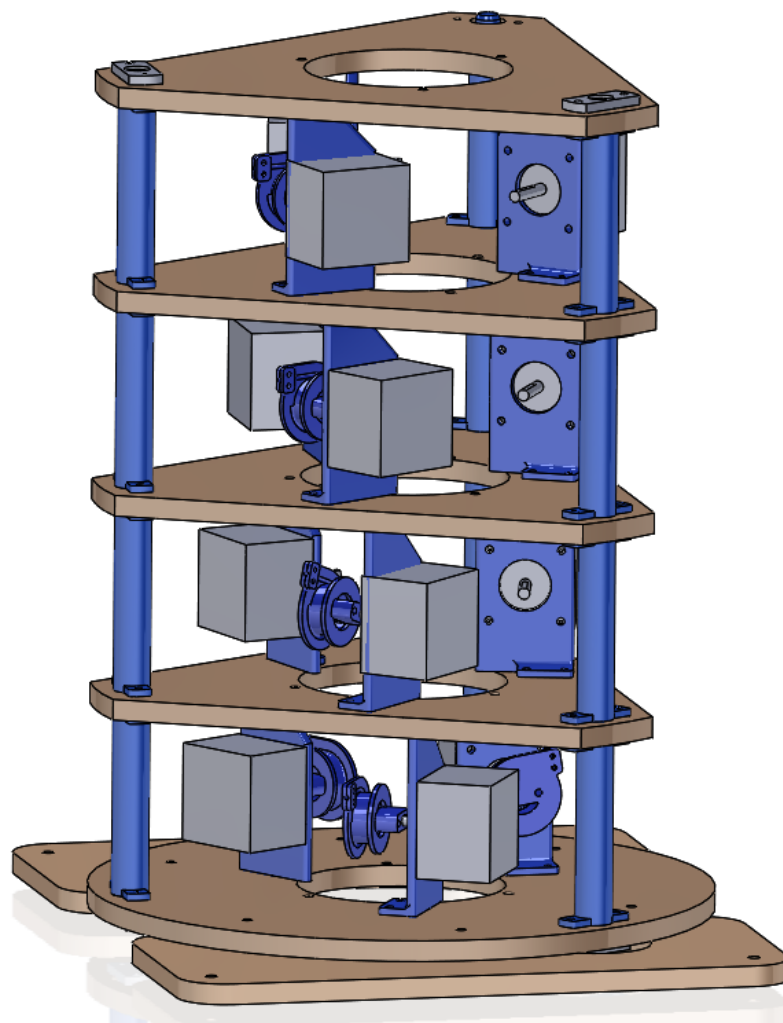


Fig.6-1 複数セグメントのために設計した駆動部

6.3 製作した機体の動作の様子

製作した2セグメント試作機を Fig.6-2 に示す. Fig.6-1 に示した駆動部のうち2段を製作した. 1セグメントの試作機と比べマニピュレータの長さが長くなっている. 1セグメント辺りの長さがおなじになるようになっている. またすべてのステッピングモータが動作するようにしているため 2セグメント同時に動作させることができるようになっている.

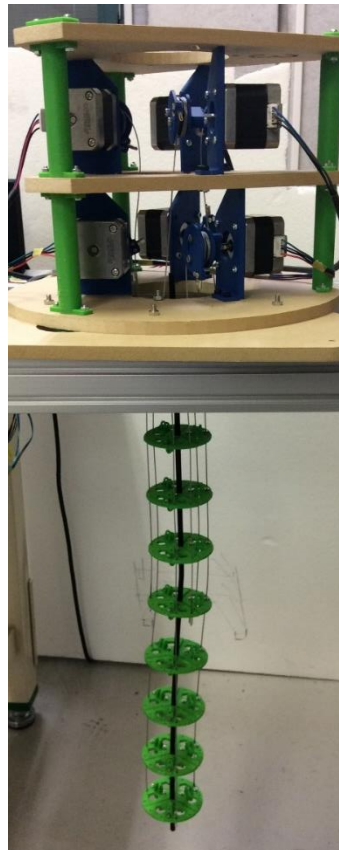


Fig.6-2 2セグメントマニピュレータの試作機

2セグメントマニピュレータの動作の様子を Fig.6-3 を示す. 動作は1セグメント分のワイヤだけ動作させ2セグメント目のワイヤは補正しているが補正がうまくいっていないことがわかる. 2セグメント目のワイヤの補正は2章で取り上げた曲率一定の条件での補正だったため補正の方法がうまくいっていない. また2セグメント目の重さの影響があるため1セグメント目の動作も2章での検証どおりとなっている. 駆動部が動作の動作していることは確認できたがワイヤ巻取り量が正常か否かなどの判別は出来ない. 今後そうした検証を行い2セグメントに対応したモデルの構築, 改良が必要である.

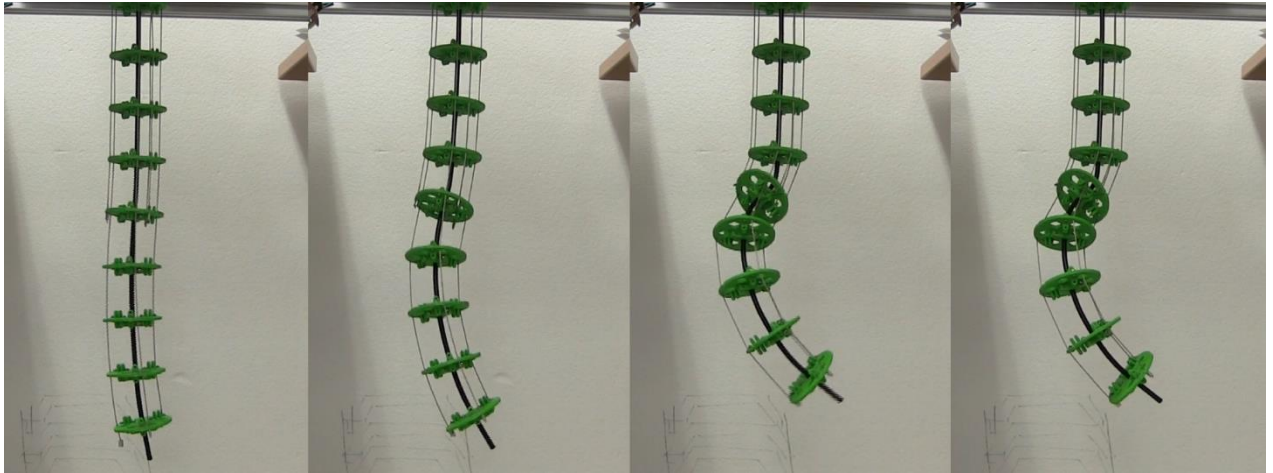


Fig.6-3 2 セグメントマニピュレータの動作の様子

第7章 結言

本章で本論文についてまとめる。連続体マニピュレータの硬さと負荷にかかわるモデルについて取り扱った研究を行っている。先行研究では1セグメント連続体マニピュレータの試作機を設計製作し様々な動作について検証を行った。その中で負荷に関する検証でねじれの対応と負荷による先端部分がさがる現象についてまとめた。下がる現象について解明するために3章, 5章でモデル化について扱っている。3章で行ったモデル化で硬さをあげることが動作の改善につながるのではないかと予想を立てることができた。この予想をもとに4章での改良にばねを取り付けている。4章の改良はねじれ防止についても行っている。5章では3章よりも詳細なモデルを構築し、実機を用いた検証も行った。

6章では今後の研究のための2セグメントマニピュレータの製作を行い動作の検証を行った。2セグメントマニピュレータの試作機についてはまだ改良の余地がある。また5章のモデルも2次元の1セグメントマニピュレータのみという限られた条件についてのものである。モデルもさらなる改良が必要である。

今後の課題として上記に上げたもの以外にもねじれ防止機構が非常に複雑な形状となっているため連続体マニピュレータシンプルな構造や部品点数が少ないという利点が失われているためねじれ防止機構も改良が必要である。

謝辞

本研究は、様々な方のご支援、ご指導によって進めることができました。始終丁寧にご指導くださった岡宏一教授、原田明德講師に心から感謝申し上げます。

また設計製作の際の助言や加工の場、制御に関する助言を下された高知工科大学ロボット倶楽部の皆様にも感謝します。また後輩という立場からの意見を述べてくれた多田君、松本君に感謝します。

研究室の同期である和賀山智晃君、江崎亨君、田中雅子さん、合田和輝君は忌憚ない意見で私を導いてくださりましたし、研究室全体の環境改善にも人力してくださいました。感謝しています。

参考文献

- [1] 池田英俊, 山中法文, 黒瀬拓朗, 永井志朗, 土場拓明, 春田章吾, 佐藤圭祐, 中野栄二, “マニピュレータの受動制御を利用した車輪型ロボットによる車椅子の段差移動,” 日本ロボット学会誌, 2010.
- [2] 余永, 遠山達也, 下堂蘭恵, 川平和美, 林良太, “促進的振動刺激・筋力補助機能を有する下肢装具装着型片麻痺歩行訓練装置の開発,” 日本ロボット学会誌, 2015.
- [3] 柴田崇徳, “アザラシ型ロボットによる神経学的セラピー,” 精密機械学会誌.
- [4] 室津義定, 辻尾昇三, 泉田啓, 林正人, “柔軟マニピュレータを持つ宇宙ロボットのダイナミクス位置決め制御,” 日本機械学会論文集, 1991.
- [5] 吉岡恒夫, 金岡克弥, “柔軟マクロ／剛体マイクロマニピュレータの振動抑制を考慮した準静的起動制御,” 日本ロボット学会誌, 2001.
- [6] 泉田啓, 室津義定, 三ツ矢明, 布原達也, 山根敬祐, “柔軟マニピュレータを持つ宇宙作業ロボットの地上模擬制御実験,” 日本ロボット学会誌, 1994.
- [7] 岡崎安直, 山本正樹, 小松真弓, 津坂優子, 足達勇治, “空気圧人工筋による人に対して安全な多自由度ロボットアーム技術の開発,” 日本ロボット学会誌, 2010.
- [8] 広瀬茂男, 馬書根, “ワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータの開発,” 計測自動制御学会論文集, 1990.
- [9] D. Ian, “Continuum backbone “continuum” robot manipulators,” ISRN Robotics Article, 2013.
- [10] 原口大輔, 只野耕太郎, 川嶋健嗣, “柔軟関節を用いた空気圧駆動鉗子マニピュレータの開発(関節構造及び理論モデルの改善による性能向上),” 日本フルードパワーシステム学会論文集, 2013.
- [11] J. Burgner, D. C. Rucker, H. B. Gilbert, P. J. Swaney, P. T. Russel, K. D. Weaver and R. J. Webster, "A telerobotic system for transnasal," IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, 2013.