

# 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

知能機械システム工学コース

機械・航空システム制御研究室 1205047 徳永 貴昭

### 1. 緒言

近年、柔軟なマニピュレータが注目されている<sup>(1)(2)</sup>。人間とロボットの共同作業を考えた場合、従来の多関節マニピュレータはトラブルを招きやすい。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<sup>(1)</sup>。また、宇宙開発分野では、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<sup>(2)</sup>。これらの要望に答えるために、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と呼ばれ<sup>(3)</sup>、その柔軟性ゆえに、制御する上で困難を伴うことが多く、特に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<sup>(2)(3)(4)</sup>。これらのフレキシブルマニピュレータは、従来の多自由度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。

これに対し、近年新たに研究が進められているのが図1に示すような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である<sup>(5)</sup>。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える長所がある。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、モデル化や制御側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多自由度鉗子マニピュレータ<sup>(6)</sup>や経鼻手術用の遠隔操作システム<sup>(7)</sup>などにおいて利用されている。しかし、大きな負荷に対するモデル化の例やマニピュレータの硬さについての検討を行った例はない。図1からもわかるように連続体マニピュレータは関節が無いいため、曲率を制御する単位をセグメントとして表している。本研究では1セグメントについての検討を行う。

連続体マニピュレータはその柔軟性に利点を有するが、柔軟すぎる場合には重量物を持った際に新たな問題が発生する。その問題について実機を用いた動作検証から示す。一方、柔軟さを維持するために、かかる負荷などの設計仕様から適度な硬さの素材を選ぶ必要がある。その設計指標を得るために、本研究では連続体マニピュレータについて中心軸の硬さと先端にかかる外力の大きさを考慮に入れた平面駆動時のモデル化を行う。そして、そのモデルの有用性を示すために実験機を用いて動作検証を行い、モデルとの比較を行う。

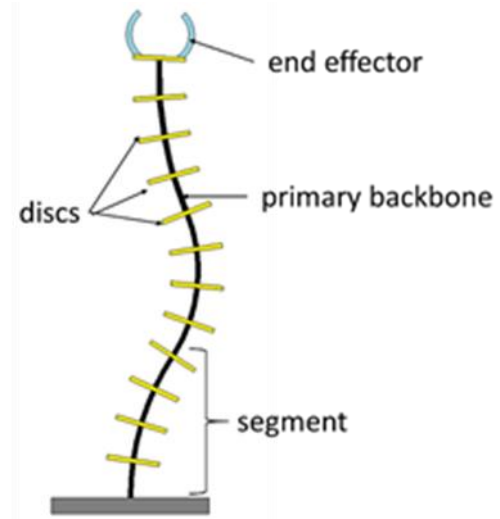


図1 連続体マニピュレータ

### 2. 試作機の開発

従来の1セグメントの連続体マニピュレータの先端におもりをのせたときの動作の様子を図2に示す。ワイヤーは一方方向のみを操作したにも関わらず、図からもわかるように初期の動作は先端付近のみが曲がり、途中から奥側にねじれていることがわかる。このことから、動作のモデル化が必要であることがわかる。本研究では図3に示すマニピュレータを用いてモデルの検証を行った。モデルはマニピュレータの硬さに注目するため、図3(a)に示すようにバネを取り付け、硬さを変更し、モーションキャプチャで動作を検証する。図3(b)に示すような機構を搭載し、ねじれを防止することで、2次元の動作について解析するものとする。図3(b)に示すねじれを防止する機構は回転軸を加えることで3次元的に動作させることも可能となる。新しい試作機の動作の様子を図4に示す。先端に質量をのせた場合でもねじれを起こさずに動作していることがわかる。

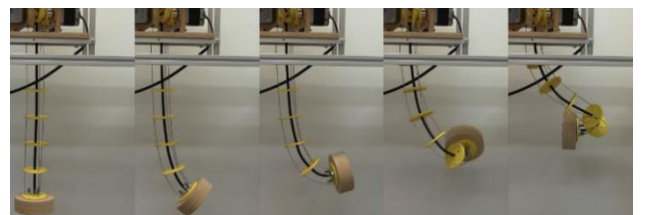


図2 先端におもりをのせた試作機の動作の様子

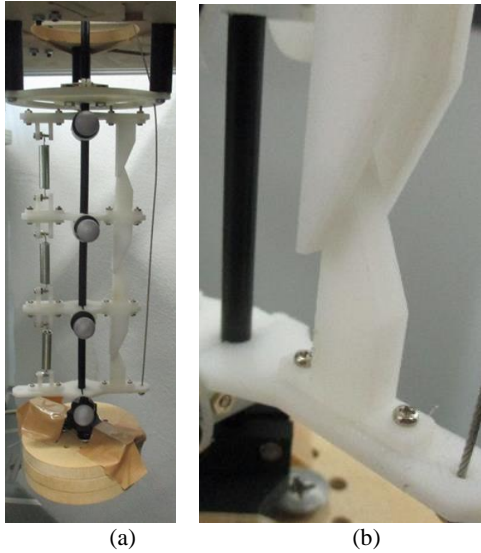


図3 新しく開発した試作機

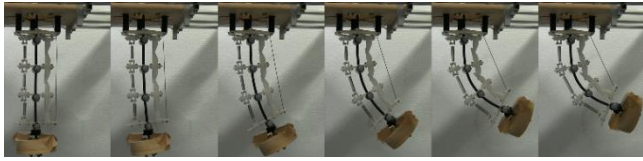


図4 新しい試作機の動作の様子

### 3. モデル化

本研究で取り扱う連続体マニピュレータの解析条件を図5に示す。図5の例はワイヤー駆動の連続体マニピュレータのワイヤー制御量に対する形状の変化の解析を表し、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ーの長さを $Q$ とする。最小ポテンシャルエネルギーの原理によると、弾性体にかかる変位は幾何学的な境界条件を満たすものなかで、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。マニピュレータの形状を $x$ の関数 $y(x)$ として表し、関数 $y(x)$ によって、全体のポテンシャルエネルギーが求まるという、汎関数の形で表される。その汎関数から変分法を用いて関数 $y(x)$ が求まる。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できない、非常に大きい変化を取り扱うため、変数 $x, y$ を用いると非常に計算が煩雑となる。そこで、図6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 $\theta$ で形状を表すこととする。すなわち、角度 $\theta$ 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 $\Pi$ は $\theta(s)$ が決まることで求まる汎関数となる。

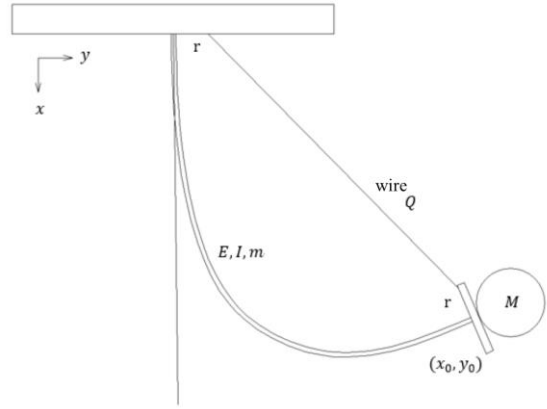


図5 解析条件

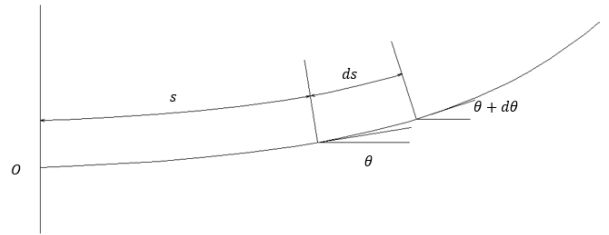


図6 変数変換

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 $\theta, s$ で表すと、以下のようなになる。

$$U_E = \int_0^l \frac{EI}{2} \left( \frac{d\theta}{ds} \right)^2 ds \quad (1)$$

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

よって、ポテンシャルエネルギーの総和 $\Pi$ は式(1),(2)を用いて

$$\Pi = U_E + U_G = \int_0^l \left\{ \frac{EI}{2} \left( \frac{d\theta}{ds} \right)^2 + Mg \cos \theta + \int_0^s \left( \frac{m}{l} \right) \cos \theta(\tau) d\tau \right\} ds \quad (3)$$

となる。ここで、式(3)の積分項の中に着目して

$$F(s, \theta, \dot{\theta}) = \frac{EI}{2} (\dot{\theta})^2 + Mg \cos \theta + \int_0^s \left( \frac{m}{l} \right) \cos \theta(\tau) d\tau \quad (4)$$

と表す。ただし、

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{ds} \quad (5)$$

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

$$F(s, \theta, \dot{\theta}) = \frac{EI}{2} (\dot{\theta})^2 + Mg \cos \theta \quad (6)$$

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(7)を満たすことがポテンシャルエネルギー $\Pi$ を最小にする条件となる。

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} - \frac{d}{ds} \left( \frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}} \right) = 0 \quad (7)$$

式(7)を計算することで、求める式は以下の式(8)となる事がわかる。

$$\ddot{\theta} = \frac{Mg}{EI} \sin \theta \quad (8)$$

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、

$$s = 0 \text{ で } \theta = 0 \quad (9)$$

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、ワイヤーの長さの条件となる。ワイヤーの長さは幾何学的に以下ようになる。

$$Q = \sqrt{(x_0 - r \sin \theta)^2 + (y_0 + r \cos \theta - r)^2} \quad (10)$$

この条件は  $s = l$  での条件である。ただし、

$$x_0 = \int_0^l \cos \theta \, ds \quad (11)$$

$$y_0 = \int_0^l \sin \theta \, ds \quad (12)$$

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(8)に示す二階微分方程式を、境界条件(9),(10)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。

本研究で行った解析の結果を図7に示す。解析の条件はマニピュレータの長さ  $l$  を 185.5mm、ワイヤーの固定位置  $r$  を中心から 40mm の位置とした。先端の重りの質量  $M$  は実際に実験で用いる 112.4g とし、ワイヤーを引っ張る長さは 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 について解析を行った。縦軸横軸は平面の  $xy$  軸を  $m$  表記で表している。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も調節している。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。図7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。

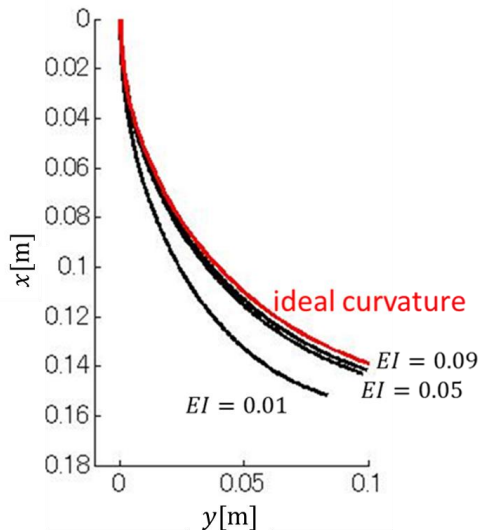


図7 先端におもりをのせた試作機の動作の様子

#### 4. 試作機を用いたモデルの検証

図8に試作機を用いたモデルの有用性の検証を行った様子を示した。図の縦軸横軸は  $xy$  座標を  $m$  表記で記載した。黒い曲線はモデルを用いて描いた曲線を示しており、緑の点はモーションキャプチャから得られたデータを示している。また、図8の(1)~(48)について表1にデータを取った際の条件

を示している。モデルは試作機の形状と似た挙動を示していることがわかる。しかしワイヤーの駆動の長さが大きくなると誤差が広がっていることがわかる。

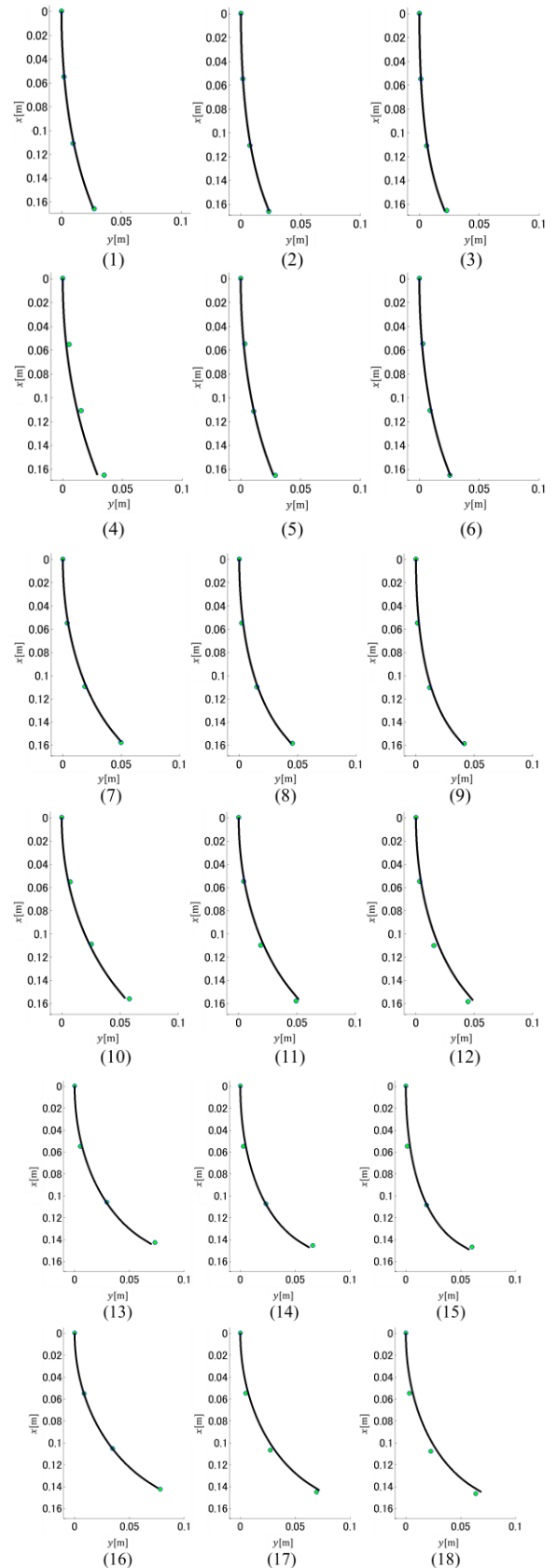


図8-1 モデルと試作機からのデータの比較

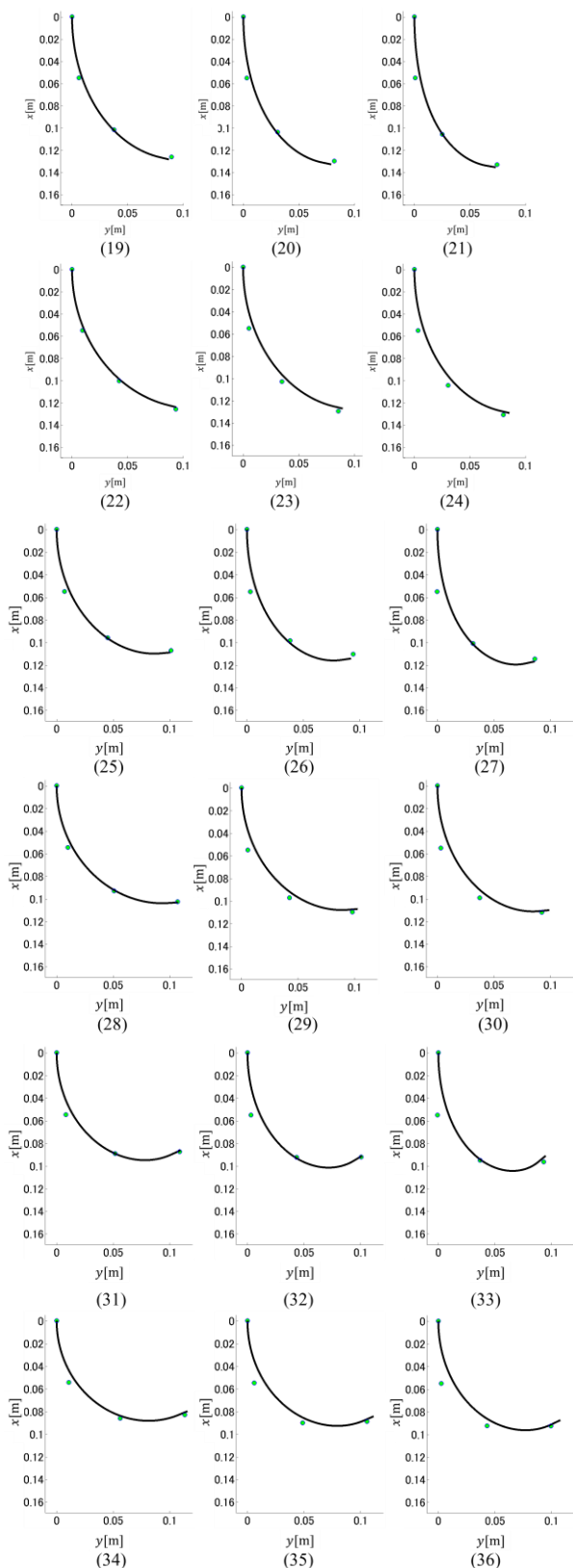


図 8-2 モデルと試作機からのデータの比較

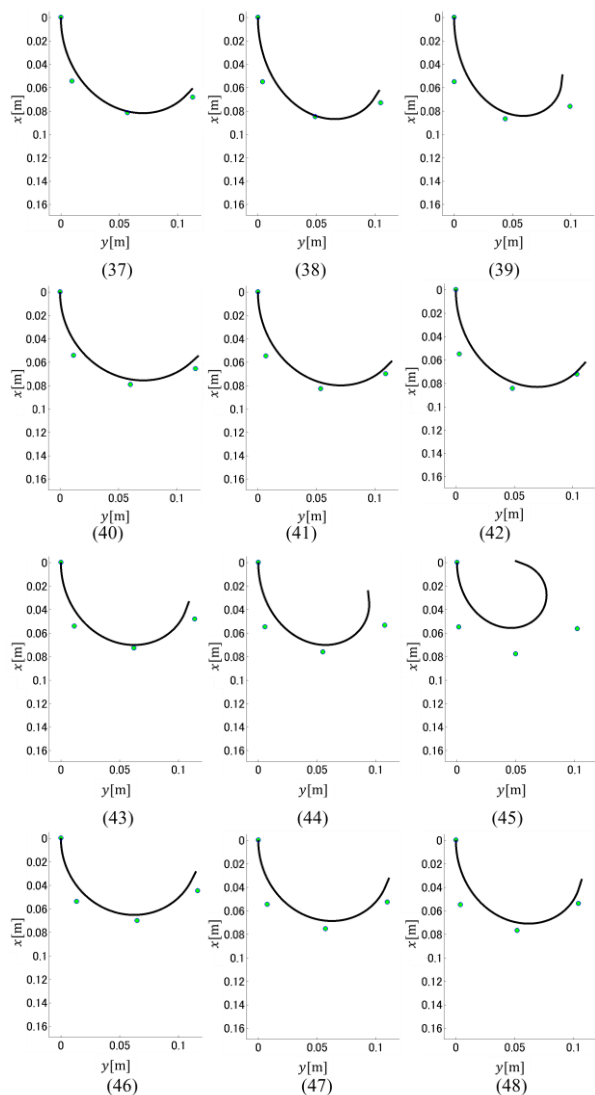


図 8-3 モデルと試作機からのデータの比較

表 1 図 8 の実験における条件

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
wire length(mm)	15	15	15	15	15	15	30	30	30	30	30	30
EI(N・m <sup>2</sup> )	0.01	0.01	0.01	0.025	0.025	0.025	0.01	0.01	0.01	0.01	0.025	0.025
M(g)	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8
	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)
wire length(mm)	45	45	45	45	45	45	60	60	60	60	60	60
EI(N・m <sup>2</sup> )	0.01	0.01	0.01	0.025	0.025	0.025	0.01	0.01	0.01	0.025	0.025	0.025
M(g)	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8
	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)	(33)	(34)	(35)	(36)
wire length(mm)	75	75	75	75	75	75	90	90	90	90	90	90
EI(N・m <sup>2</sup> )	0.01	0.01	0.01	0.025	0.025	0.025	0.01	0.01	0.01	0.025	0.025	0.025
M(g)	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8
	(37)	(38)	(39)	(40)	(41)	(42)	(43)	(44)	(45)	(46)	(47)	(48)
wire length(mm)	105	105	105	105	105	105	120	120	120	120	120	120
EI(N・m <sup>2</sup> )	0.01	0.01	0.01	0.025	0.025	0.025	0.01	0.01	0.01	0.025	0.025	0.025
M(g)	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8	104.0	203.7	301.8

## 5. 結言

本研究では、連続体マニピュレータの先端にかける負荷と中心軸の硬さの関係性についてモデル化を行った。また、試作機ねじれを防止する機構の開発も行った。今後の課題として、モデルの検証をより全般に対して行い、より精度の高いモデルを目指すとともに3次元、多セグメントへの対応などについて研究を行う必要がある。

## 文献

- (1) 岡崎安直, 山本正樹, 小松真弓, 津坂優子, 足達勇治, “福祉の現場からメンタルローテーション能力を再現する創発的医療支援ロボットシステムの構築”, 日本ロボット学会誌 Vol.28 No. 3, pp.302-310 2010
- (2) 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 57 巻 539 号 1991
- (3) 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 Vol.19 No.1 pp.109~115 2001
- (4) 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 Vol.12 No.6 pp.899~904 1994
- (5) Ian D. Walker, “Continuum Backbone “Continuum” Robot Manipulators”, ISRN Robotics Article ID 786506 19 pages 2013
- (6) 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 第 44 巻 第 6 号 pp8~15 2013
- (7) Burgner, J., Rucker, C., Gilbert, H., Swaney, P., Russell, P., Weaver, K., and Webster, R., “A Telerobotic System for Transnasal Surgery”, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS 1083-4435 2013