

# 複数セグメントを有する連続体マニピュレータの制御

## Multi-segment control of a continuum manipulator

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 1225051 松本 明浩

### 1. 緒言

日本の生産年齢人口は、少子高齢化の進行によって 1995 年をピークに減少しており、総人口も 2008 年をピークに減少に転じている<sup>(1)</sup>。また、将来推計によると、総人口は 2030 年には 1 億 1,913 万人、2053 年に 1 億人を割り、2060 年には 9,284 万人にまで減少すると見込まれている。同様に、生産年齢人口は 2030 年には 6,875 万人、2060 年には 4,793 万人にまで減少するとされている<sup>(2)</sup>。現在、農業における自動化・省人化が進んでおり、今後の生産年齢人口の減少に伴い、人間からロボットを隔離することが難しい分野でも自動化・省人化を進める必要があり、ロボットが人間と協力して作業する機会が増加すると考えられる。

産業用ロボットに多く使用される多関節マニピュレータは剛性が高く、高精度で高速な動作が可能であるが、剛性の高さ故に侵襲性が高く、周囲の物や人間と接触したときに及ぼす危険性が高いことから人間と協力して作業することは困難である。それに対して柔軟な素材そのものをマニピュレータとして用いる連続体マニピュレータ<sup>(3)</sup>と呼ばれるものが存在する。多関節マニピュレータに比べて柔軟・軽量に設計することができ、侵襲性が低くなる。周囲の物や人間と接触しても及ぼす危険性が低くなり、人間と協力した作業が可能となると考えられる。

本研究では複数セグメントの連続体マニピュレータを用いた侵襲性が低く、周囲の物や人間と接触しても危険の少ない、農業における収穫作業のように人間からロボットを隔離することが難しい分野でも使用できるロボットの開発を目的とする。連続体マニピュレータの高負荷条件や複数セグメントでの運用に関する研究は少ないため、本論文では動作方向を限定した 2 セグメントの連続体マニピュレータの実験機を製作し高負荷条件での動作について検証する。

### 2. 動作方向を限定した実験機について

本研究での連続体マニピュレータを図 1、連続体マニピュレータの座標系を図 2 に示す。製作した実験機を図 3 に示す。連続体マニピュレータは明確な関節が存在しないため、代わりにセグメントと呼ばれる動作単位で構成される。図 1 のように曲率が一定の部分をもつ 1 つのセグメントとし、1 セグメントあたり 2 自由度となる<sup>(3)</sup>。製作した動作方向を限定した実験機は 1 セグメント目をワイヤ 1 とワイヤ 3、2 セグメント目をワイヤ 2 とワイヤ 4 の巻き取り・繰り出し操作によって動作させる。座標軸の変換で同次座標系を求め、先端の位置を求めることができる。同次座標系は以下の手順で求めた。

- ① z 軸周りに  $\gamma_i$  だけ回転する。(回転行列  $Rot(z, \gamma_i)$ )
  - ② 手順①後の座標系から見た先端の座標  $(x_i, 0, z_i)$  へ平行移動する。(平行移動行列  $Trans(x_i, 0, z_i)$ )
  - ③ y 軸周りに  $\beta_i$  だけ回転する。(回転行列  $Rot(y, \beta_i)$ )
- 各手順の変換行列は以下のようになる。

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

$$Trans(x_i, 0, z_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

同次変換行列  $T_i$  は

$$T_i = Rot(z, \gamma_i) Trans(x_i, 0, z_i) Rot(y, \beta_i) \quad (4)$$

となる。手順①後の座標系から見た先端の座標  $(x_i, 0, z_i)$  を求める。連続体マニピュレータの 1 セグメント分の長さを  $l[\text{mm}]$ 、 $i$  セグメント目の先端の角度  $\beta_i[\text{rad}]$  とする。動作時の曲率を一定として曲率半径を  $r_i[\text{mm}]$  とすると図 4 より

$$l = r_i \beta_i \quad (5)$$

$$x_i = r_i (1 - \cos \beta_i) \quad (6)$$

$$z_i = r_i \sin \beta_i \quad (7)$$

式(5)から式(7)より

$$x_i = \frac{l}{\beta_i} (1 - \cos \beta_i) \quad (8)$$

$$z_i = \frac{l}{\beta_i} \sin \beta_i \quad (9)$$

となる。 $(i+1)$  セグメント目の先端の角度を  $\beta_{i+1} = 0[\text{rad}]$  としたとき図 4 より

$$x_{i+1} = l \sin \beta_i \quad (10)$$

$$z_{i+1} = l \cos \beta_i \quad (11)$$

となる。

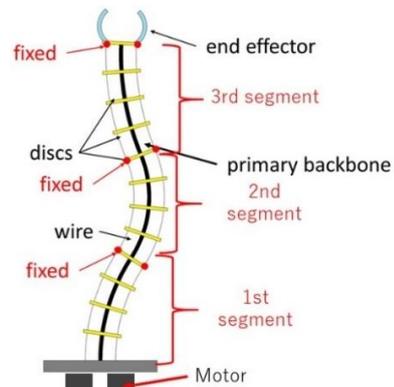


Fig. 1 Continuum manipulator

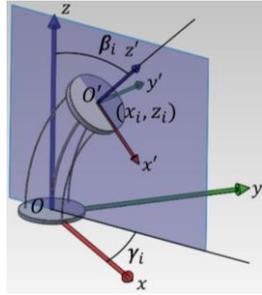


Fig. 2 Coordinate system

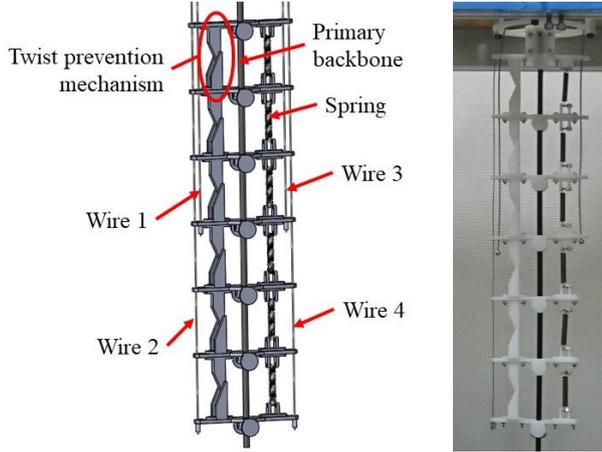


Fig. 3 Experimental machine

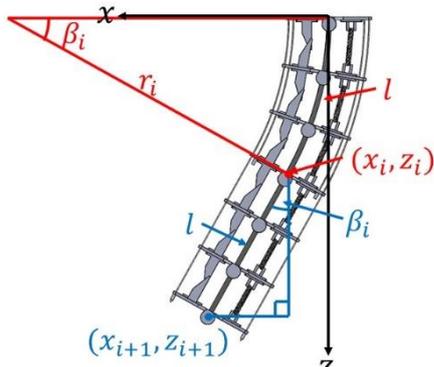


Fig. 4 Wire operation

同次変換行列 $T_i$ および式(8)から式(11)より各セグメントの先端位置を求めることができる. 各ワイヤの操作量 $q_n$ [mm]について求める.  $i$ セグメント目の先端の角度 $\beta_i$ のとき各ワイヤの曲率半径を $R_n$ [mm]とするとワイヤが描く円弧の長さは

$$l - q_n = R_n \beta_i \quad (12)$$

となる. 中心軸から各ワイヤの距離を $R_0$ とすると $R_n$ は

$$R_n = r_i \pm R_0 \quad (13)$$

となり, 式(5)および式(12), 式(13)よりワイヤの操作量 $q_n$ は

$$q_n = \pm R_0 \beta_i \quad (14)$$

となる. 実験機の構造上 $(i+1)$ セグメント目のワイヤ操作量には $i$ セグメント目の操作量を含める必要がある. よって

$$q_n = \pm R_0 \beta_{i+1} \pm R_0 \beta_i \quad (15)$$

となる.

### 3. 製作した実験機の動作確認

#### 3.1 実験方法

製作した実験機を以下の表 1 に示す条件の場合についてワイヤを操作し動作させた. 図 5 から図 7 に動作のイメージを示す.

Table 1 Operating condition

		Weight[g]			
		0	120	0	120
Angle [deg]	$\beta_1$	45	0	45	120
	$\beta_2$	0	45	45	120

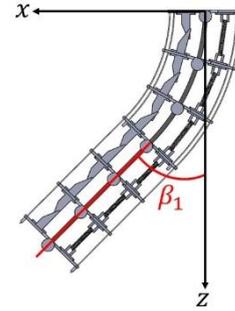


Fig. 5 Operation image of manipulator ( $\beta_1 = 45[\text{deg}]$ ,  $\beta_2 = 0[\text{deg}]$ )

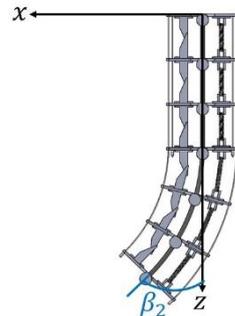


Fig. 6 Operation image of manipulator ( $\beta_1 = 0[\text{deg}]$ ,  $\beta_2 = 45[\text{deg}]$ )

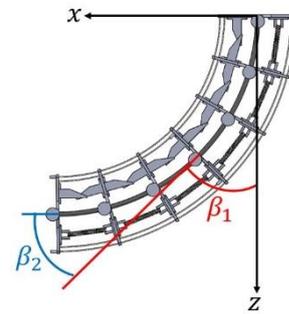


Fig. 7 Operation image of manipulator ( $\beta_1 = 45[\text{deg}]$ ,  $\beta_2 = 45[\text{deg}]$ )

#### 3.2 動作結果

おもりによる負荷がない場合での動作を図 8 から図 10 に示す. 負荷がない場合では動作のイメージと比較すると各動作条件を満たしている. 式より求めたワイヤ操作量で 1 セグメント目のみでの動作や 2 セグメント目のみの動作を行えることが確認できた.

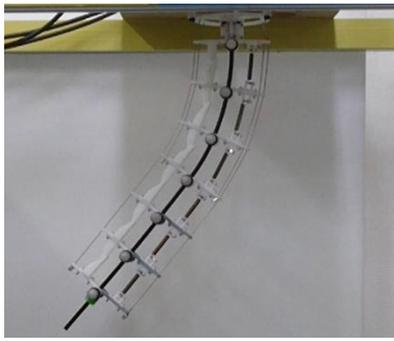


Fig. 8 Manipulator operation  
(Weight 0g,  $\beta_1 = 45[\text{deg}]$ ,  $\beta_2 = 0[\text{deg}]$ )

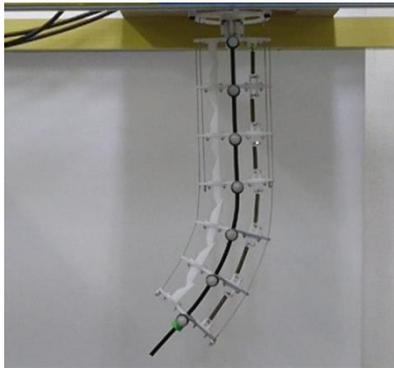


Fig. 9 Manipulator operation  
(Weight 0g,  $\beta_1 = 0[\text{deg}]$ ,  $\beta_2 = 45[\text{deg}]$ )

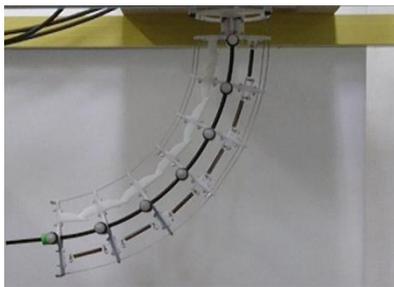


Fig. 10 Manipulator operation  
(Weight 0g,  $\beta_1 = 45[\text{deg}]$ ,  $\beta_2 = 45[\text{deg}]$ )

おもりによる負荷がある場合での動作を図 11 から図 13 に示す。動作のイメージと比較すると動作条件を満たせていない。1 セグメント目の動作を行う場合での誤差は大きく、1 セグメント目の動作を行わない場合での誤差は小さい。モーションキャプチャを用いて、正確な形状データを取得し比較する必要がある。

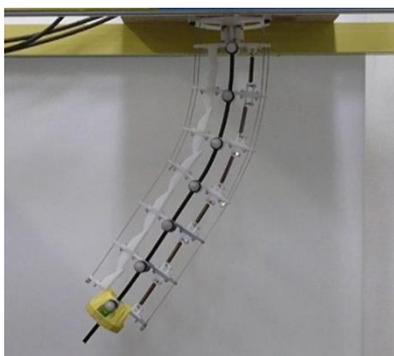


Fig. 11 Manipulator operation  
(Weight 120g,  $\beta_1 = 45[\text{deg}]$ ,  $\beta_2 = 0[\text{deg}]$ )

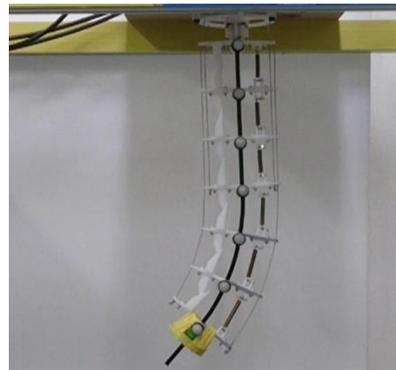


Fig. 12 Manipulator operation  
(Weight 120g,  $\beta_1 = 0[\text{deg}]$ ,  $\beta_2 = 45[\text{deg}]$ )

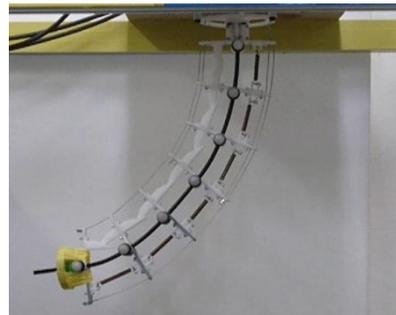


Fig. 14 Manipulator operation  
(Weight 120g,  $\beta_1 = 45[\text{deg}]$ ,  $\beta_2 = 45[\text{deg}]$ )

#### 4. 結言

2セグメントの連続体マニピュレータの動作方向を限定した実験機を製作した。ワイヤ操作量を求め、手動によりワイヤ操作を行い、おもりによる負荷がない場合は曲率一定の動作が可能であることを確認した。今後の課題としてモータによりワイヤを操作し、自動で動作を行うことやモーションキャプチャを用いて、マニピュレータへの負荷による形状の変化について考察する必要がある。また、形状の変化を考慮したモデル化を行う必要がある。

#### 謝辞

本研究は、高知県プロジェクト「IoP (Internet of Plants) が導く Next 次世代型施設園芸農業への進化プロジェクト」の助成により行っています。

#### 文献

- (1) 総務省, “平成 29 年度版 情報通信白書 人口減少社会の課題と将来推計”, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/html/nc141110.html> (参照日 2019 年 1 月 17 日)
- (2) 国立社会保障・人口問題研究所, “日本の将来推計人口 (平成 29 年推計)”, [http://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp\\_zenkoku2017.asp](http://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp_zenkoku2017.asp) (参照日 2019 年 1 月 17 日)
- (3) Ian D. Walker, “Continuous Backbone “Continuum” Robot Manipulators”, Hindawi Publishing Corporation, ISRN Robotics Volume 2013, Article ID 726506, 19 pages
- (4) 徳永貴昭, “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”, 高知工科大学修士論文, (2018)
- (5) 内山勝, “ソフトロボティクス”, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.6(1999), pp.756-757