

# 伸縮機構を持つ柔軟マニピュレータの開発－試作機を用いた先端位置の制御－

## Development of flexible manipulator with expansion / contraction mechanism

### -Control of tip position using prototype-

知能機械工学コース

機械・航空システム制御研究室

1245016 仲西 正紀

#### 1. 諸言

昨今の日本においては少子高齢化が進み、近年では労働人口こそ増加しているものの、高齢者の割合が多く若年層は減少傾向にある<sup>(1)</sup>。特に一次産業においてその現象は顕著であり、従事者の高齢化が深刻である<sup>(2)</sup>。そのため様々な分野において自動化に移行していくことが予想される。

工場などを中心にロボットを用いるケースが増えてきたが、現状では人間の作業する部分とロボットが作業する部分が独立しており、別々の場所で作業している。

以上より、ロボットと人間が同じ空間で協力して作業するための柔軟なマニピュレータの需要が高まると考えた。人間と同じ空間で作業するためには、もし人体と接触したとしてもけがをさせない、剛性が低い柔軟なマニピュレータが必要である。本研究は以上の条件を満たし、なおかつマニピュレータ自体の自由度を上げるために伸縮機構に着目し、それを搭載した柔軟なマニピュレータを開発することが目的である。

本研究は工場等での使用を想定しているが、応用として農業分野（自動収穫ロボットのマニピュレータ等）や介護分野（介護ロボット等）での使用も可能であると考えられる。

#### 2. 柔軟マニピュレータの構造

本研究では基本構造として連続体マニピュレータを採用する。連続体マニピュレータの概略図と製作するマニピュレータの概形を図1に示す。本研究の最大の特徴として中心軸にコイルバネを使用する。コイルバネの間にディスクを配置し、120° 間隔で3本のワイヤーを通す。このワイヤーをそれぞれ巻き取ることでマニピュレータ全体を屈曲させることができる。また、中心軸にコイルバネを用いることでマニピュレータを屈曲だけでなく伸縮させることができる。

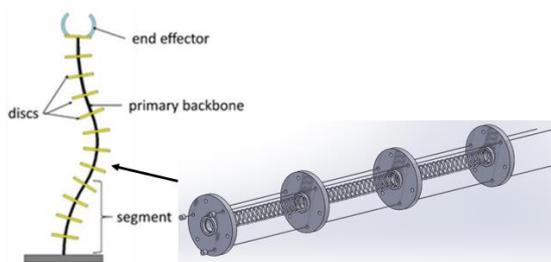


Fig. 1 Outline of continuous manipulator<sup>(3)</sup> and manipulator to be manufactured.

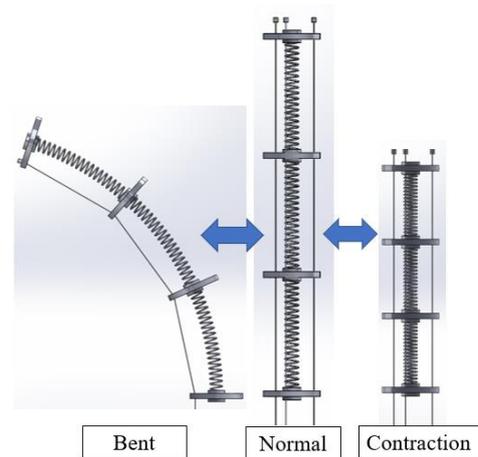


Fig. 2 Contraction and bending of continuous manipulator.

#### 3. コイルバネの違いによる基礎実験

中心軸に使用するコイルバネとモーターの選定の選定を行った。連続体マニピュレータは中心軸の曲率が一定であれば制御が容易なので、コイルバネの曲率を調べる実験を行った。実験用マニピュレータを下向きに設置し中心軸から40mm離れた位置にワイヤーを通し、20mm引張った状態で固定することで目視による比較を行った。おもり無しではどのコイルバネも曲率が一定であるが100.2gのおもりを持たせた場合ではバネ定数や外径の大きいUR20-80、UF20-80の2つのコイルバネ以外は曲率が一定ではなくなった。この結果より本研究ではUF20-80を用いる。

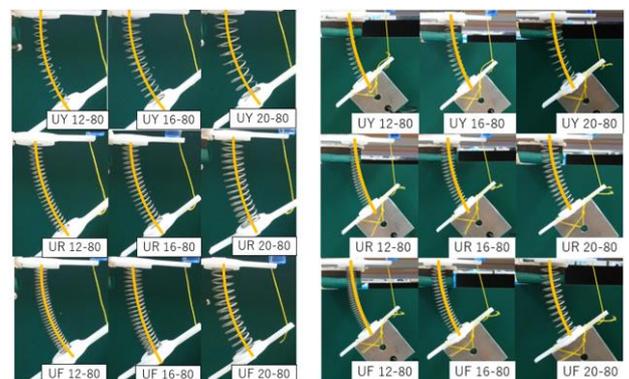


Fig.3 Basic experiment of coil spring with and without weight.

#### 4. 試作機

本研究で用いる試作機を図4に示す。下向きにマニピュレータを設置し上部に各ワイヤーを巻き取る DC モーターを配置する。モーターはモータードライバに接続し、マイコンを用いて制御する。

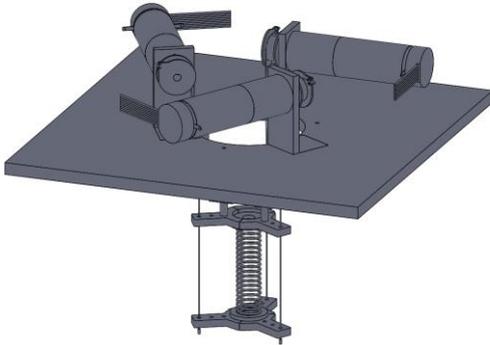


Fig. 4 Outline of prototype manipulator.

### 5. 屈曲・伸縮動作

#### 5.1 屈曲動作

屈曲時のマニピュレータのディスク間のモデル図を図5に示す。

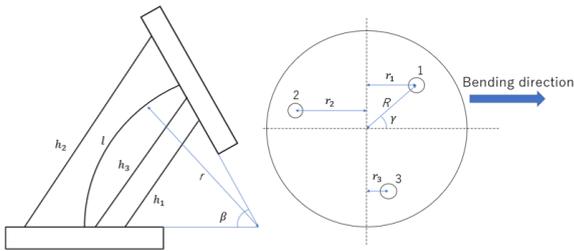


Fig. 5 Model of continuous manipulator during bending.

屈曲動作を行うためには各ワイヤーの巻き取り量がわからなければならないので、各ワイヤーの巻き取り量を求める。コイルバネの長さを  $l$ 、ワイヤーまでの長さを  $R$ 、屈曲時のコイルバネまでの半径を  $r$ 、各ワイヤーのたおれ方向成分長さを  $r_n$ 、各ワイヤーの屈曲時の弦長を  $h_n$ 、たおれ角を  $\beta$ 、たおれ方向とワイヤー1の角度を  $\gamma$  とする。各ワイヤーのたおれ方向成分長さ  $r_n$  と各ワイヤーの屈曲時の弦長  $h_n$  は円弧と弦長を求める式を適用し求める。

$$r_n = R \cos \left\{ \gamma + \frac{2\pi}{3} (n-1) \right\} \quad (1)$$

$$h_n = 2(r - r_n) \sin \frac{\beta}{2} \quad (2)$$

ワイヤー  $n$  の巻き取り量を  $q_n$  とすると、本マニピュレータではコイルバネを3つ使用するのでマニピュレータ全体での巻き取り量は式(3)となる。

$$q_n = 3(l - h_n) \quad (3)$$

式(3)に式(1)、式(2)を代入すると、式(4)となり各ワイヤーの巻き取り量を求めることができる。これより、

屈曲制御はコイルバネの長さ  $l$ 、たおれ角  $\beta$ 、たおれ方向とワイヤー1との角度  $\gamma$  を決定することでマニピュレータの屈曲制御が可能である。

$$\begin{aligned} q_1 &= 3 \left\{ l - 2(r - R \cos \gamma) \sin \frac{\beta}{2} \right\} \\ q_2 &= 3 \left[ l - 2 \left\{ r - R \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right\} \sin \frac{\beta}{2} \right] \\ q_3 &= 3 \left[ l - 2 \left\{ r - R \cos \left( \gamma + \frac{4\pi}{3} \right) \right\} \sin \frac{\beta}{2} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

#### 5.2 伸縮動作

伸縮時のマニピュレータのモデル図を図6に示す。

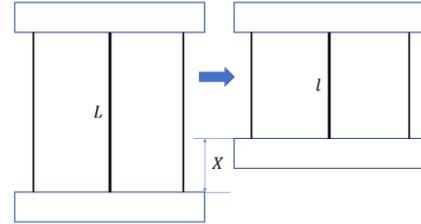


Fig. 6 Model of continuous manipulator at contraction.

伸縮動作は各ワイヤーを全て同じ長さ分巻き取ることで制御する。コイルバネの長さ(伸縮後のディスク間距離)を  $l$ 、コイルバネの自然長を  $L$ 、コイルバネの縮み量を  $X$  とすると、式(5)となりワイヤーの巻き取り量のみで制御することができる。

$$l = L - X \quad (5)$$

#### 5.3 屈曲動作の結果

マニピュレータを縮めずにたおれ方向とワイヤー1との角度を  $0^\circ$ 、たおれ角を  $30^\circ$  から  $120^\circ$  まで  $30^\circ$  刻みで曲げる実験を行った。実験結果を図7に示す。その際にモーションキャプチャーを用いて取得したデータのグラフを図8に示す。この結果からコイルバネの曲率が一定であれば先端位置と角度を制御できることがわかる。

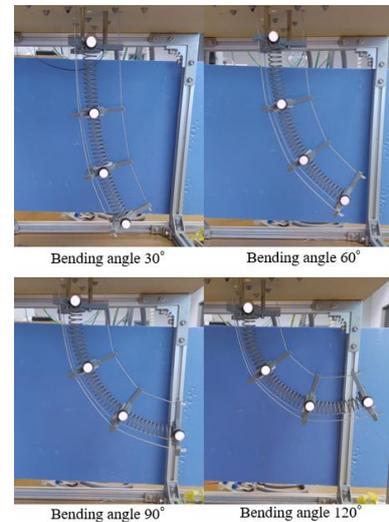


Fig. 7 Experimental results when bending at each angle.

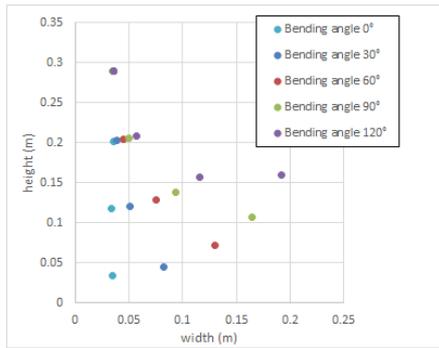


Fig.8 Data using motion capture when bending at each angle.

#### 5.4 伸縮動作の結果

マニピュレータを 20mm, 30mm 縮める実験を行った。すると、どちらの条件でも座屈が発生しマニピュレータの先端と根元が鉛直直線上に並ばなかった。縮み量 20mm 結果を図 9 に示す。この結果から座屈を防止するための機構を考案する必要がある。

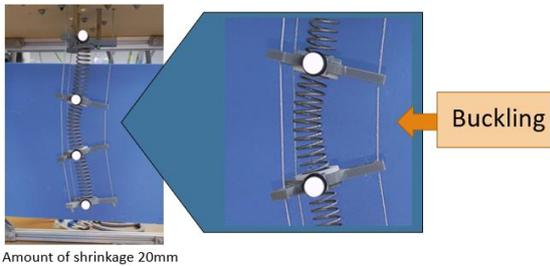


Fig.9 Model of continuous manipulator at contraction.

### 6. 座屈防止機構

#### 6.1 座屈防止機構の考案

座屈防止機構として 3 つの案を考案した。図 10 にそれぞれの機構案を示す。それぞれを機構案 1, 2, 3 とし、機構案 1 にはねじりバネをディスク間に 3 つ各ワイヤー間に配置する。機構案 2 には自然長が中心軸のコイルバネより小さい引張コイルバネを 3 つ各ワイヤーと中心軸の間に配置し、機構案 3 は自然長が中心軸のコイルバネと同じ圧縮コイルバネを各ワイヤーが中心になるように配置する。これによりディスク間にかかる力が均等になり座屈を防止できると考えている。

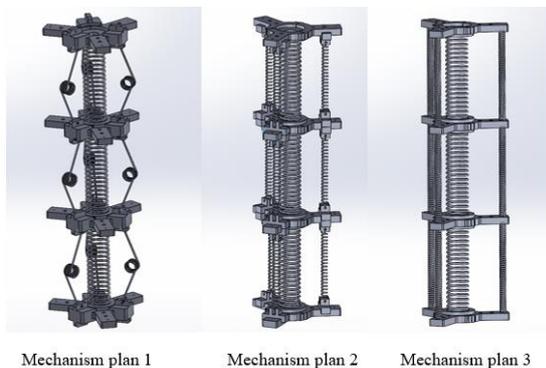


Fig.10 Model of continuous manipulator at contraction.

#### 6.2 動作結果

それぞれの機構案を実際にマニピュレータに搭載し伸縮動作を行った。マニピュレータを 30mm 縮める動作をさせた。機構案 1 と機構案 3 の結果を図 11 に機構案 2 の結果を図 12 に示す。伸縮動作においては機構案 1, 3 では座屈が発生することなく先端と根元が鉛直直線上に並んだが、機構案 2 では座屈は発生しなかったが、使用した引張コイルバネのバネ定数が大きかったため定常状態で縮みきってしまい、これ以上縮めることが出来なかった。

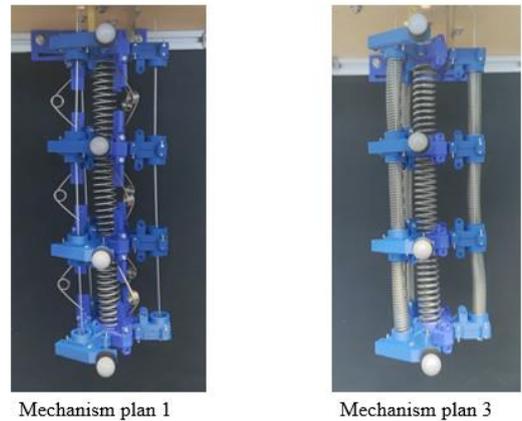


Fig.11 Results of bending motion of mechanism plans 1 and 3



Fig.12 Steady state of mechanism plan 2

また、機構案 1, 3 を搭載した状態で屈曲動作も行った。たおれ方向とワイヤー 1 との角度を  $0^\circ$  , たおれ角を  $90^\circ$  の条件で動作させた。結果を図 13 に示す。結果としてどちらの機構案でも目標値を追従させることが出来なかった。原因としては、前述の動作方式では中心軸の曲率が一定であるため、曲げる内側のワイヤーを巻き取り外側のワイヤーを伸ばすことで制御しているが、バネを取り付けたことで外側のディスク間の距離が広がらず中心軸の曲率が一定にならなかった点が考えられる。

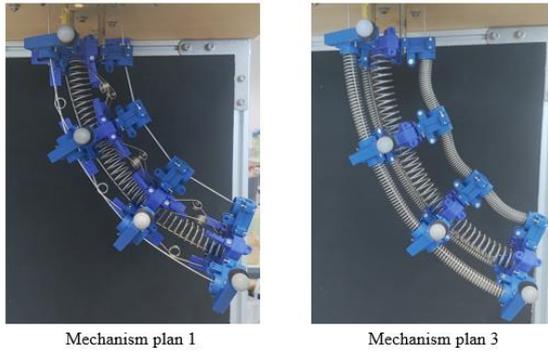


Fig.13 Bending angle 90° for mechanism plans 1 and 3

### 6.3 動作方式の見直し

前項で示した通り屈曲動作において目標値を追従させることが出来なかった。そのため前述した動作方式以外の方法を考案する必要がある。前述の動作方式を元に、バネの取り付け位置のディスク間距離の最大値を取り付けたバネの自然長として計算を行う。図14に機構案1を搭載したときのマニピュレータの屈曲時のモデル図を、図15に機構案3を搭載したときのマニピュレータの屈曲時のモデル図を示す。

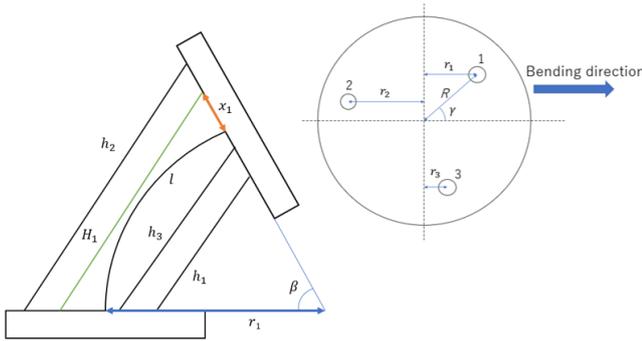


Fig.14 Model of continuous manipulator in during bending of mechanism plan 1

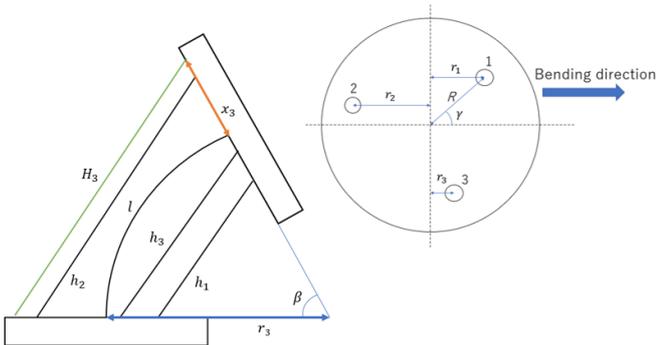


Fig.15 Model of continuous manipulator in during bending of mechanism plan 3

新たに中心軸とディスク間距離が最大になる部分との距離をそれぞれ  $x_1, x_3$ 、ディスク間距離の最大値をそれぞれ  $H_1, H_3$ 、屈曲中心から中心軸までの距離をそれぞれ  $r_1, r_3$  とおく。弦長を求める式を変形し  $r_1, r_3$  を求め、(4)式を参考に各ワイヤーの巻き取り量を求める。

$$\begin{aligned} H_1 &= 2(r_1 + x_1) \sin \frac{\beta}{2} \\ H_3 &= 2(r_3 + x_3) \sin \frac{\beta}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{H_1}{2 \sin \frac{\beta}{2}} - x_1 \\ r_3 &= \frac{H_3}{2 \sin \frac{\beta}{2}} - x_3 \end{aligned} \quad (7)$$

機構案1搭載時の屈曲動作における各ワイヤーの巻き取り量は(8)式、機構案3搭載時の屈曲動作における各ワイヤーの巻き取り量は(9)式の通りとなる。

$$\begin{aligned} q_1 &= 3 \left\{ l - 2 \left( \frac{H_1}{2 \sin \frac{\beta}{2}} - x_1 - R \cos \gamma \right) \sin \frac{\beta}{2} \right\} \\ q_2 &= 3 \left[ l - 2 \left\{ \frac{H_1}{2 \sin \frac{\beta}{2}} - x_1 - R \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right\} \sin \frac{\beta}{2} \right] \\ q_3 &= 3 \left[ l - 2 \left\{ \frac{H_1}{2 \sin \frac{\beta}{2}} - x_1 - R \cos \left( \gamma + \frac{4\pi}{3} \right) \right\} \sin \frac{\beta}{2} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} q_1 &= 3 \left\{ l - 2 \left( \frac{H_3}{2 \sin \frac{\beta}{2}} - x_3 - R \cos \gamma \right) \sin \frac{\beta}{2} \right\} \\ q_2 &= 3 \left[ l - 2 \left\{ \frac{H_3}{2 \sin \frac{\beta}{2}} - x_3 - R \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right\} \sin \frac{\beta}{2} \right] \\ q_3 &= 3 \left[ l - 2 \left\{ \frac{H_3}{2 \sin \frac{\beta}{2}} - x_3 - R \cos \left( \gamma + \frac{4\pi}{3} \right) \right\} \sin \frac{\beta}{2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

本機構では、 $x_1 = 27.15[\text{mm}]$ ,  $x_3 = 40[\text{mm}]$ ,  $H_1 = H_3 = 80[\text{mm}]$ ,  $R = 40[\text{mm}]$ となる。

### 6.4 前項の動作方式を用いた動作結果

上記の動作方式を用いて機構案1, 3を用いて、マニピュレータを縮めずにたおれ方向とワイヤー1との角度を0°, たおれ角を30°から90°まで30°刻みで曲げる実験を行った。それぞれの結果を図16, 17に示す。

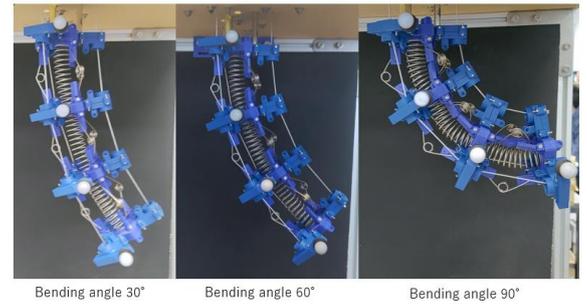


Fig.16 Result of each bending angle of mechanism plan 1

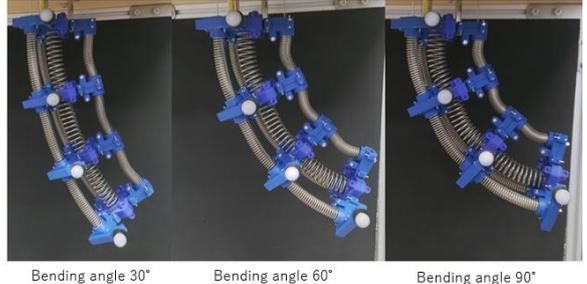


Fig.17 Result of each bending angle of mechanism plan 3

また、モーションキャプチャーを用いて取得したデータのグラフをそれぞれ図 18, 19 に示す。

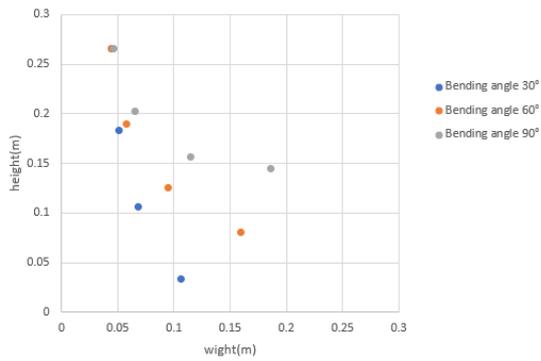


Fig.18 Data using motion capture when bending at each angle of mechanism plan 1.

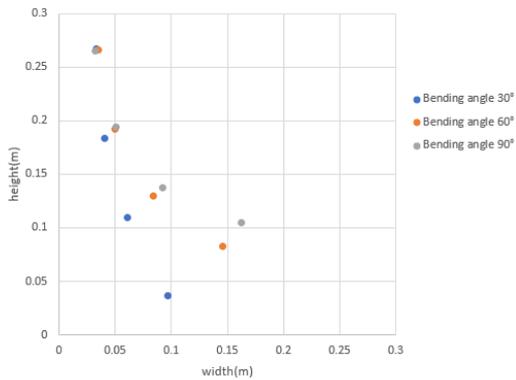


Fig.19 Data using motion capture when bending at each angle of mechanism plan 3.

元の動作方式に比べて目標値追従が可能になったが、座屈防止機構を搭載する前に比べて精度が悪くなった。また、ディスク間にコイルバネを設置したため、可動範囲が狭くなり最大屈曲角度が 90° 程度となった。

## 7. まとめ

試作機を用いた制御実験と制御のためのパラメータの決定、モーションキャプチャーを用いたデータ取得を行った。また、座屈防止機構の考案と動作実験、機構の搭載時の新たな動作方式の考案とこの動作方式での動作実験を行った。

今後の課題として、屈曲動作の精度向上とおもりを載せた際の挙動の確認と検証が挙げられる。

## 謝辞

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

## 文献

- (1) 統計局ホームページ/労働力調査(基本集計)2021年(令和3年)12月分結果, 第11表 年齢階級別労働人口 <https://www.stat.go.jp/data/roudou/sokuhou/tsuki/index.html>
- (2) 統計局ホームページ/労働力調査(基本集計)2021年(令和3年)12月分結果, 第4表 主な産業別就業者数 <https://www.stat.go.jp/data/roudou/sokuhou/tsuki/index.html>
- (3) 徳永貴昭, 岡宏一, 原田明德, ツイスト運動を回避する機構を用いた連続体マニピュレータの開発と曲げ剛性に着目したモデル化の検討, 日本機械学会論文集, Vol184, No860(2018), 17-00528