

## 柔軟関節を持つ腱駆動ロボットアームの力制御

### A force control method of tendon-driven robot arm with flexible joint

○佐藤翼\*, 邵超\*, 段会龍\*, 楊歩君\*, 小宮僚太郎\*, 水戸部和久\*

○Tsubasa Sato\*, Chao Shao\*, Huilong Duan\*,  
Bujun Yang\*, Ryotaro Komiya\*, Kazuhisa Mitobe\*

\*山形大学

\*Yamagata University

キーワード：柔軟関節(flexible joint), 腱駆動ロボット(tendon-driven robot),  
弾性腱(elastic tendon)

連絡先：〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16

山形大学大学院理工学研究科 機械システム工学専攻 6-501 水戸部研究室  
水戸部和久, Tel.:0238-26-3230, Fax.:0238-26-3205, E-mail:mitobe@yz.yamagata-u.ac.jp

#### 1. 緒言

工場などの生産現場で使われている産業用ロボットアームは剛性を高くし、事前にアームの運動計画をプログラミングすることによって高い精度と作業効率を実現している。しかし、アームの剛性が高いことによる接触時の安全性の問題や事前に運動計画のプログラミングが必要なことから人の動きが事前に把握できない現場での作業には適していない。人の近くでの作業を行うためにはロボットの安全性や周りの環境への適応が必要になる。<sup>1)</sup>これらの問題を解決するた

めに人工筋や腱を用いた、剛性が低く柔軟性の高いロボットの開発が進められている。<sup>2)3)</sup>

その中でも腱駆動方式のロボットアームはアーム上にアクチュエータを置く必要がないためアーム本体の質量を軽くすることができ、腱の剛性や関節の機械的拘束を小さくすることで従来のロボットより柔らかい制御が可能となる。

一般的にロボットアームの力制御を行う際には関節角を座標変数としたヤコビ行列を用いる。しかし、関節軸を固定しない柔軟関節を用いた場合、関節角を明確に定義する

ことが難しい. 本研究では柔軟関節を持つ腱駆動ロボットアームにおける力制御を力, モーメントのつり合いの関係から行う.

## 2. 弾性腱駆動ロボットアーム

Fig.1 に本研究で使用しているロボットアームを示す. 2リンクのロボットアームに取り付けられた8本の弾性要素を含む腱を, 上部にある巻取り装置で巻き取ることによってアームを駆動させている. リンク1上部に6本, リンク1を経由しリンク2に2本の腱が取り付けられている. 腱はステンレスワイヤと引きばね (ばね定数  $0.235\text{N/mm}$ ) を直列に連結したものを使用しており, 巻取り装置では腱のワイヤ部分のみを巻き取っている. 巻取り装置は腱巻取り部, DC モータ, ポテンショメータで構成されており巻取り角度をフィードバックして巻取り量を制御している.

肩関節には3, 肘関節には1の主要な自由度に加え, 関節部に柔軟な素材を用いることで寄生的な自由度を持つ柔軟な関節になっている.

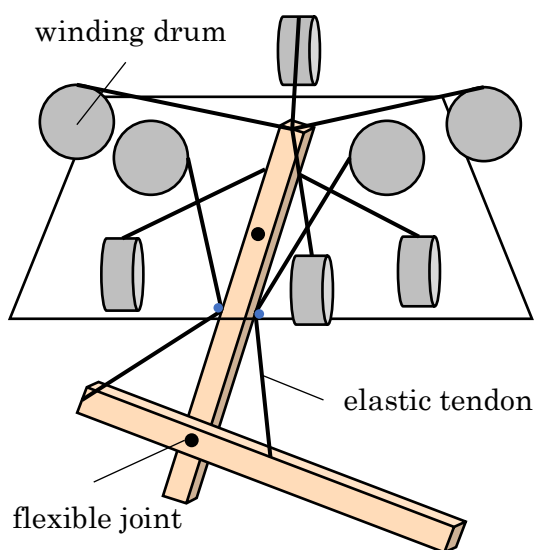


Fig. 1 Tendon-driven robot arm

## 3. 手先力と腱張力の関係

ロボットアームの姿勢が固定されている場合にかかる力, モーメントのつり合いを考える. Fig.2, Fig.3 に示すようにアームの肩関節 O, 肘関節 J, 手先 H の各位置とアームに作用する力, モーメント, 力の作用点への位置ベクトルを定義する. このとき, 各腱による力  $F_T$  は力の方向を表す単位ベクトル  $v_T$  と腱張力  $t$  を用いて以下のようにあらわせる.

$$F_T = v_T t \quad (1)$$

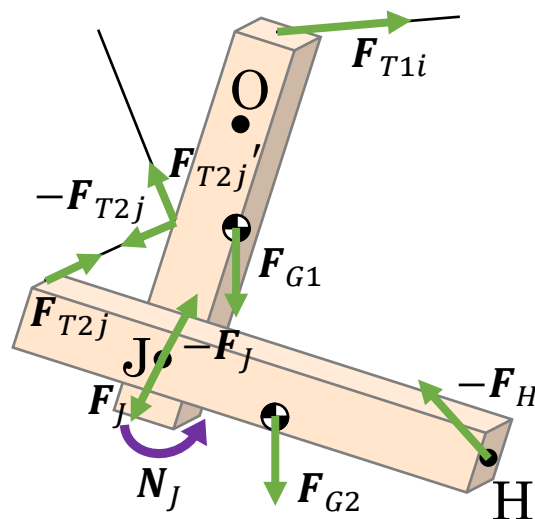


Fig. 2 Moment and forces acting on each link

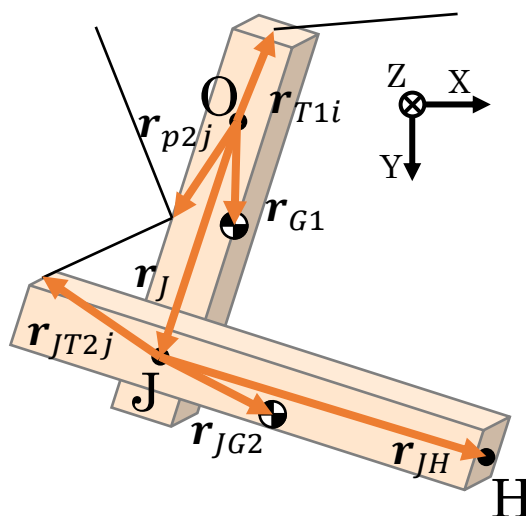


Fig. 3 Definitions of position vectors

まず、リンク 2 の J 点周りのモーメントのつり合いについて考える。

$$\sum \mathbf{r}_{JT2j} \times \mathbf{v}_{T2j} t_{2j} + \mathbf{r}_{JG2} \times \mathbf{F}_{G2} + \mathbf{r}_{JH} \times (-\mathbf{F}_H) + \mathbf{N}_J = \mathbf{0} \quad (2)$$

Fig.4 に示すように肘関節はアームを含む平面 OJH の法線ベクトル  $\mathbf{n}$  と同じ方向に主要な回転自由度を持つ。よって式(2)を法線ベクトル  $\mathbf{n}$  上に射影することで関節部にかかるモーメント  $\mathbf{N}_J$  を消去することができる。

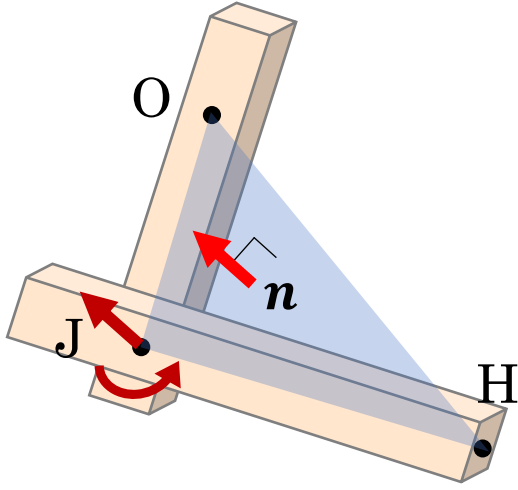


Fig. 4 Normal vector and axis of revolution

したがって式(2)は以下のようにあらわせる。

$$P \left\{ \sum \mathbf{r}_{JT2j} \times \mathbf{v}_{T2j} t_{2j} + \mathbf{r}_{JG2} \times \mathbf{F}_{G2} + \mathbf{r}_{JH} \times (-\mathbf{F}_H) \right\} = \mathbf{0} \quad (3)$$

ここで、 $P$  は  $\mathbf{n}$  上に射影するための射影行列であり以下のようにあらわせる。

$$P = \mathbf{n}\mathbf{n}^T \quad (4)$$

また、式(3)の各項は  $\mathbf{n}$  上に射影しているのでそのベクトル部分は  $\mathbf{n}$  の実数倍となる。そのため式(3)は以下のようにあらわせる。

$$\left( \sum a_{2j} t_{2j} + a_{G2} + a_H \right) \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (5)$$

さらに  $\mathbf{n} \neq \mathbf{0}$  とすると以下のようにあらわせる。

$$\sum a_{2j} t_{2j} + a_{G2} + a_H = 0 \quad (6)$$

本研究で使用しているロボットアームではリンク 2 に作用する腱は 2 本のため  $j = 2$  となり、式(6)の解は無限に存在する。そこで 2 つの腱張力のうち一方を適当な値に設定することでもう一方の値を算出することができる。これによってリンク 2 に作用する張力を決定する。次にリンク 1 の O 点周りのモーメントのつり合いを考える。

$$\sum \mathbf{r}_{T1i} \times \mathbf{v}_{T1i} t_{1i} + \sum \mathbf{r}_{p2j} \times (-\mathbf{v}_{T2j} + \mathbf{v}_{T2j}') t_{2j} \quad (7)$$

$$+ \mathbf{r}_{G1} \times \mathbf{F}_{G1} + \mathbf{r}_J \times (-\mathbf{F}_J) - \mathbf{N}_J = \mathbf{0}$$

式(7)中には張力以外の未知量として関節に作用するモーメント  $\mathbf{N}_J$ 、関節に作用する力  $\mathbf{F}_J$  が存在する。これらはリンク 2 に作用する腱張力が判明していれば式(2)および以下に示すリンク 2 に作用する力のつり合いからそれぞれ求めることができる。

$$\sum \mathbf{v}_{T2j} t_{2j} + \mathbf{F}_{G2} + \mathbf{F}_J - \mathbf{F}_H = \mathbf{0} \quad (8)$$

こうして  $\mathbf{N}_J$ ,  $\mathbf{F}_J$  を式中から消去すると次のような式が得られる。

$$\sum \mathbf{r}_{T1i} \times \mathbf{v}_{T1i} t_{1i} + \sum \mathbf{r}_{p2j} \times \mathbf{v}_{T2j}' t_{2j} + \mathbf{r}_{G1} \times \mathbf{F}_{G1} \quad (9)$$

$$+ \mathbf{r}_{G2} \times \mathbf{F}_{G2} - \mathbf{r}_H \times \mathbf{F}_H = \mathbf{0}$$

式(9)からは 3 つの解しか求めることができない。よってリンク 2 の腱張力の場合と同じようにリンク 1 の 6 本の腱のうち 3 本の腱張力を適当な値に設定し、残り 3 本の腱張

力を式(9)から算出する。

こうすることでアームに接続されている8本のうち4本を適当に設定した腱張力, 残りの4本を算出した腱張力とし, 任意の手先力の発生に必要な腱張力を求めることができる. このとき各腱張力 $t_{1i}$ ,  $t_{2j}$ は以下を満たす必要がある.

$$\begin{aligned} t_{1i} &\geq 0, i = 1\sim 6 \\ t_{2j} &\geq 0, j = 1, 2 \end{aligned} \quad (10)$$

そのため適当に設定する腱と, 算出する腱の組み合わせのうち負の解が出ない組み合わせを選択する必要がある.

## 4. 手先力の制御実験

### 4.1 実験概要

アームの手先をロードセルに固定し, X-Y-Z各方向に発生する手先力を測定する. 手先位置を固定した場合アームの主要な自由度が肩関節の3, 肘関節の1の合計4のため関節位置が一意に定まらない. 今回は重力下で最も安定する状態である関節位置JのY座標が最大となる位置とした.

各手先力の発生に必要な張力を求め, 巻取り装置で腱を巻き取り, 腱のバネ部分が伸びることによって腱張力を発生させる. このときアームの姿勢が変化しないとするとバネの伸び量は腱の巻き取り量と一致するため, 腱の巻き取り量から腱張力を求めることができる.

目標とする手先力は X 成分のみ, X-Y 辺面内, X-Y-Z 空間内の 3 方向とし, 大きさは 3N とした. また, 必要となる腱張力を求める際に選択可能な 4 本の腱をゆるめて張力を 0N とした場合および, 1N とし一定の負荷をかけすべての腱で張力を発生させた場合の 2 通りの実験を行った.

## 4.2 実験結果

実験で得られた各実験値と目標値を Fig.5 に示す.

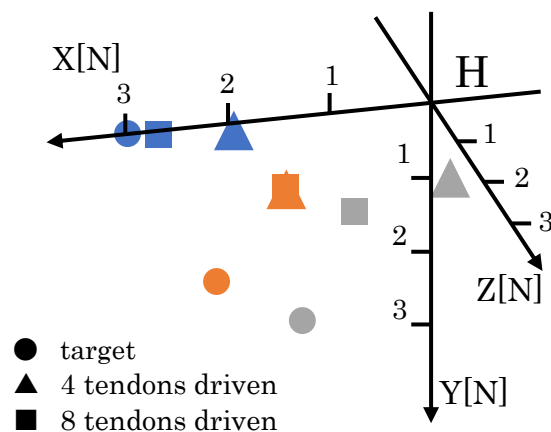


Fig. 5 Experimental result of force control

全体的に, 力の方向は目標によく一致したが, 力の大きさが目標より小さくなった. また, 腱4本のみで張力を発生させた場合とすべての腱で張力を発生させた場合ではすべての腱で張力を発生させた場合の方がより目標に近い値となっている.

## 5. 考察

目標となる手先力に対して必要となる腱張力を 2 通り算出し, 実験を行った.

力の大きさが目標値と比べ小さい値となった. これは実験時にはアーム姿勢は固定せず, 腱張力が作用していない状態で安定した姿勢としているため腱張力が作用したことにより各リンクでのつり合いが崩れ, 関節位置が移動してしまったと考えられる.

すべての腱で張力を発生させた場合の方が目標値に近くなった. アームに作用する力が多くなったことによって姿勢の変化が抑えられたためだと考えられる.

## 6. 結言

弾性腱駆動ロボットアームにおける手先力制御を力やモーメントのつり合いに基づいて行った. この手法を用いることで柔軟で関節角が明確でない関節を持ったロボットアームで力制御を行うことができる.

ロボットアームの冗長性により腱巻き取り時にアーム姿勢が変化してしまうなどの問題が見られた. 関節位置の同時制御を行うことによってこの影響を小さくできると考えられる.

また, 今回の実験条件においては必要となる腱張力が大きく, 実験が難しい場合があった. アームの姿勢を変化させることによって手先力の発生に必要な腱張力も変化するため任意の手先力を発生させるのに適したアーム姿勢の検討などを行う必要がある.

## 参考文献

- 1) 岡田昌史: 人間らしい柔らかな動きと駆動機構, 日本ロボット学会誌, 17-6, 782/785 (1999)
- 2) 則次俊郎, 和田力: ゴム人工筋のロボット制御への応用, 日本ロボット学会誌, 9-4, 502/506 (1991)
- 3) 小澤隆太, 小林博明: 腱に非線形弾性を持つ腱駆動システムの制御, 日本ロボット学会誌, 17-2, 275/281 (1999)