

柔軟関節を持つ弾性腱駆動ロボットアーム姿勢 制御の重力補償法

A gravity compensation method for posture control of elastic tendon-driven robot arm with flexible joints

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

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

*山形大学

*Yamagata University

キーワード：柔軟関節 (flexible joint), 弾性腱駆動 (elastic tendon-driven),
重力補償 (gravity compensation)

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

人間と世界の既存の産業用ロボットアームとの最大の違いは、関節の構造とされている[安全のため引用する].¹⁾ 産業用ロボットアームの関節は、主に一般的なベアリング構造で構成されている。各関節には、ただ1つの回転自由度を持つ。駆動トルクに関しては、シャフトの中心軸方向のベクトル成分のみが許される。しかし、人間はそれほど単純ではない。特殊な筋骨格構造により、関節そのものは駆動トルクを発生しない。筋肉の牽引力が、関節の姿勢変化に関与する。^{2) 3)}

関節の構造も産業用ロボットとは大

きく異なり、2つのリンク(上腕と下腕)の間に柔軟な器官ある。この器官は、軟骨、筋肉、腱などの柔らかい材料で構成されている。関節弾性範囲内のわずかな変位と変形は、主要な回転自由度に加えて、寄生的な自由度として機械的に表すことができる。言い換えれば、人間の関節の回転軸は固定軸ではない。このタイプの関節を弾性関節/柔軟関節と呼ぶ。

このような柔軟関節を備えたロボットの研究では、関節角度を唯一に定義できないので、ロボットの関節変数の使用が難しいか、使用できない。関節変数の使用は、このタイプのロボットにとって不利になり、制御が大幅に困難になる。このようなロボットアームのリンク間

の比較的独立した関係を考慮して、ロボットアームの姿勢の表現は、リンクの各点を観察することによって、すなわち、リンク姿勢とリンクによって形成される平面法線ベクトルとの間の関係を観察することによって決定される。

弾性関節と弾性腱をもつロボットアームの制御において、重力の影響がロボットの位置と姿勢に対して大きく現れる。アームの重力の一部は駆動腱によって支えられ、他の部分は特殊な関節構造によって支えられる。重力の影響を弾性腱のみで補償するためには、関節の動きが重力によって引き起こされないように、関節の自由度の方向の重力の影響要因を補償することが必要である。

本研究では、関節角度変数を用いない弾性腱駆動される柔軟関節ロボットアームの重力下での運動制御方法について説明する。精度の問題を目指して、柔軟関節構造が重力に耐える場合の弾性腱の重力補償法を検討する。

2. 腱駆動ロボットアームの概要

本研究で取り扱うロボットアームは Fig. 1 に示すような、巻取り装置 8 個から弾性腱で吊るされた構造になっていて、3次元空間内で動作するものである。このアームのシステムを巻取り装置、腱、アーム本体の3つの部分に分けモデル化した。

このロボットは柔軟関節なので、腱の張力により重力を補償する場合、関節の機構による拘束が無い場合は腱が重力を全て負担する必要がある。関節の構造が重力の一部を負担する場合、それを考慮しながら腱が負担すべき重力を決定する必要がある。

ここでは、本研究で問題としているアーム構造において肩関節をモーメントが作用しない3自由度を持つ自由関節と見なし、ここからの第1リンクにモーメントは作用しないと考える。肘関節は1自由度の回転関節と見なして重力補

償のための腱張力を決定する。

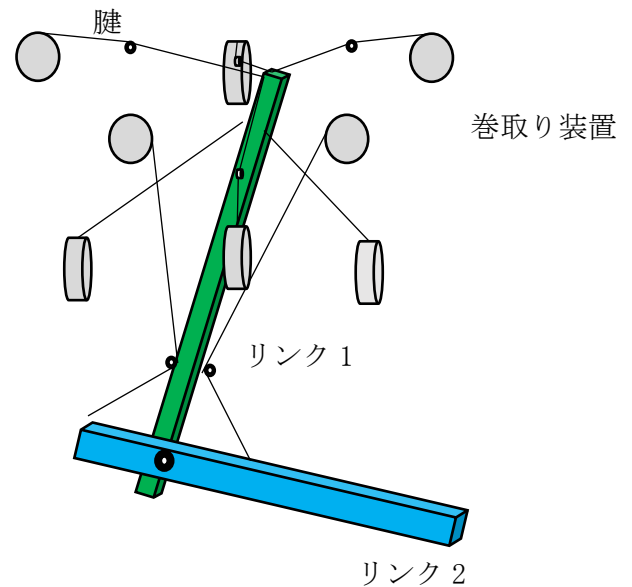


Fig. 1 柔軟素材を用いた関節

3. 重力の補償

リンクに作用する重力を補償するために必要な腱の張力を求める。ロボットアームが目標位置・姿勢で静止状態にある場合の腱張力として求める。

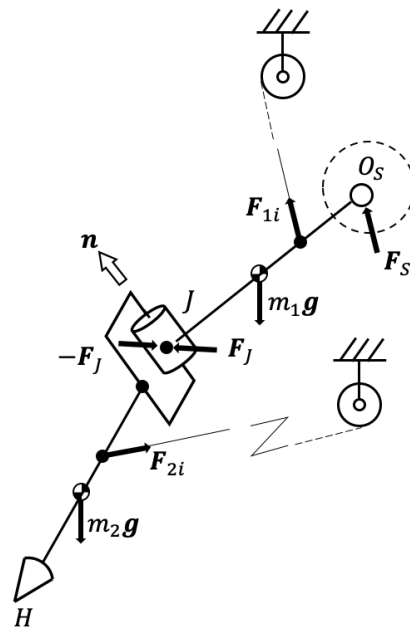


Fig. 2 アーム部の受力

3.1 アーム部が腱から受ける力

第1リンク、第2リンクへの重力を m_1g および m_2g 、第1リンク、第2リン

クに作用する腱からの力を \mathbf{F}_{1i} および \mathbf{F}_{2i} とする. 全体の受力を Fig. 2 に示す. 後述の実験装置においては第 1 リンクに 6 本 ($\mathbf{F}_{11} \sim \mathbf{F}_{16}$), 第 2 リンクに 2 本 ($\mathbf{F}_{21} \sim \mathbf{F}_{22}$), の腱からの力が作用する. 第 1 リンクの 6 本の中に 2 本が肘関節の回転方向のモーメントに関与する.

肩の関節がベースから受ける力を \mathbf{F}_S , 第 2 リンクが肘関節から受ける力を \mathbf{F}_J , 第 1 リンクは反力 $-\mathbf{F}_J$ を肘関節から受ける. 肩関節は 3 自由度を持つ自由関節と考え, ここからの第 1 リンクにモーメントは作用しないと考える. 肘関節は 1 自由度の回転関節としてモデル化する. 肘関節の回転軸と直行する方向のモーメントおよび反モーメントとして, 肘関節から各リンクにモーメントが作用する. 肘関節の回転軸方向の単位ベクトルを \mathbf{n} とする.

3.2 第 2 リンクの腱の張力

はじめに第 2 リンクの関節 J のまわりのモーメントの釣り合いから第 2 関節に取り付けた腱張力を決定する. シリアルリンクを腱で駆動する場合に関節の構造に応じて機械的に作用するモーメントを考慮する必要がある. 肘関節の回転軸方向 \mathbf{n} に直行し, 関節の構造から作用するモーメントを \mathbf{N}_J とする. 肘関節は摩擦のない受動的な関節とし, \mathbf{N}_J には回転軸 \mathbf{n} 方向の成分は含まれないと考える.

$$\sum_i \mathbf{r}_{2i} \times \mathbf{F}_{2i} + \mathbf{r}_{2G} \times m_2 \mathbf{g} + \mathbf{N}_J = \mathbf{0} \quad (3.1)$$

ここで, \mathbf{r}_{2i} および \mathbf{r}_{2G} は J から腱の取り付け点へのベクトルおよび J から第 2 リンク重心へのベクトルである.

肘関節の回転軸まわりでのモーメントの釣り合いのみ考えるために, ベクトル \mathbf{n} 方向への正射影行列 $P = \mathbf{n}\mathbf{n}^T$ を作用させる. $P\mathbf{N}_J = \mathbf{0}$ なので,

$$P(\sum_i \mathbf{r}_{2i} \times \mathbf{F}_{2i} + \mathbf{r}_{2G} \times m_2 \mathbf{g}) = \mathbf{0} \quad (3.2)$$

腱の張力を t_{2i} で表し,

$$\mathbf{F}_{2i} = \frac{\mathbf{F}_{2i}}{|\mathbf{F}_{2i}|} t_{2i}$$

と書けば, (3.2)は

$$\sum_i P(\mathbf{r}_{2i} \times \frac{\mathbf{F}_{2i}}{|\mathbf{F}_{2i}|}) t_{2i} + P(\mathbf{r}_{2G} \times m_2 \mathbf{g}) = \mathbf{0}$$

(3.3)

(3.3)の各項は \mathbf{n} の方向のベクトルなので,

$$P\left(\mathbf{r}_{2i} \times \frac{\mathbf{F}_{2i}}{|\mathbf{F}_{2i}|}\right) = a_i \mathbf{n},$$

$$P(\mathbf{r}_{2G} \times m_2 \mathbf{g}) = a_{2G} \mathbf{n}$$

$$(a_i = \left|P\left(\mathbf{r}_{2i} \times \frac{\mathbf{F}_{2i}}{|\mathbf{F}_{2i}|}\right)\right|),$$

$$a_{2G} = |P(\mathbf{r}_{2G} \times m_2 \mathbf{g})|)$$

とおけば,

$$\sum_i a_i t_{2i} \mathbf{n} + a_{2G} \mathbf{n} = \mathbf{0}$$

$$\sum_i a_i t_{2i} + a_{2G} = 0 \quad (3.4)$$

(3.4) を満足する張力が第 2 リンクの釣り合いを与える.

第 2 リンクの腱の張力が決定されると, (3.1)式より肘関節モーメント \mathbf{N}_J を求めることができ, 第 2 リンクへの力の釣り合いより肘関節を経由して第 1 リンクと第 2 リンクがやり取りする力 \mathbf{F}_J を求めることができる.

3.3 第 1 リンクに作用する腱の張力

第 1 リンクの肩関節まわりのモーメントの釣り合いより第 1 リンクに作用する腱の張力を決定する.

$$\sum_i \mathbf{r}_{1i} \times \mathbf{F}_{1i} + \mathbf{r}_{1G} \times m_1 \mathbf{g} - \mathbf{r}_J \times \mathbf{F}_J - \mathbf{N}_J = \mathbf{0} \quad (3.5)$$

ここで, \mathbf{r}_{1i} は肩関節点 O_S から各腱の取り付け点へのベクトル, \mathbf{r}_{1G} は O_S から第 1 リンク重心へのベクトル, \mathbf{r}_J は O_S から肘関節 J へのベクトルである.

腱の力を向きと張力に分けて書き,

$$\mathbf{F}_{1i} = \frac{\mathbf{F}_{1i}}{|\mathbf{F}_{1i}|} t_{1i}$$

(3.5)の第 1 項は幾何学的に決定するモーメントと張力に分けて書くことができ,

$$\sum_i \mathbf{r}_{1i} \times \frac{\mathbf{F}_{1i}}{|\mathbf{F}_{1i}|} t_{1i} + \mathbf{r}_{1G} \times m_1 \mathbf{g} - \mathbf{r}_j$$

$$\times \mathbf{F}_j - \mathbf{N}_j = \mathbf{0}$$

$$\sum_i \mathbf{r}_{1i} \times \frac{\mathbf{F}_{1i}}{|\mathbf{F}_{1i}|} t_{1i} + \mathbf{r}_{1G} \times m_1 \mathbf{g} - \mathbf{r}_j$$

$$\times \mathbf{F}_j - \mathbf{N}_j = \mathbf{0}$$

$$\left(\mathbf{r}_{11} \times \frac{\mathbf{F}_{11}}{|\mathbf{F}_{11}|} \quad \mathbf{r}_{12} \times \frac{\mathbf{F}_{12}}{|\mathbf{F}_{12}|} \quad \dots \right) \begin{pmatrix} t_{11} \\ t_{12} \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$+ \tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{0} \quad (3.6)$$

第1項の行列はアームの目標位置および姿勢より決定する行列である。 $\tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{r}_{1G} \times m_1 \mathbf{g} - \mathbf{r}_j \times \mathbf{F}_j - \mathbf{N}_j$ は、 \mathbf{F}_j および \mathbf{N}_j が前節の計算よりすでに既知と考えれば、第2リンクから受ける力とモーメント、ロボットアームの目標位置および姿勢より計算できるモーメントである。(3.6)を満足する張力 $(t_{11} \ t_{12} \ \dots)^T$ が平衡状態を与える張力と考えられる。

3.4 実験内容と結果

第2リンク先端位置を手先位置と考える。Fig. 3のように4つの目標手先位置 H_1, H_2, H_3, H_4 を設定し、初期位置 H_0 からそれぞれの目標位置へ手先を到達させる実験をした。さらに、肘関節の回転軸 \mathbf{n} の目標値をそれぞれの目標手先に対して4とおりつつ設定した。 \mathbf{n} の目標値は、肩関節と手先を結ぶ線の回りに基準位置から5度、10度、15度、20度と回転させて与えた。

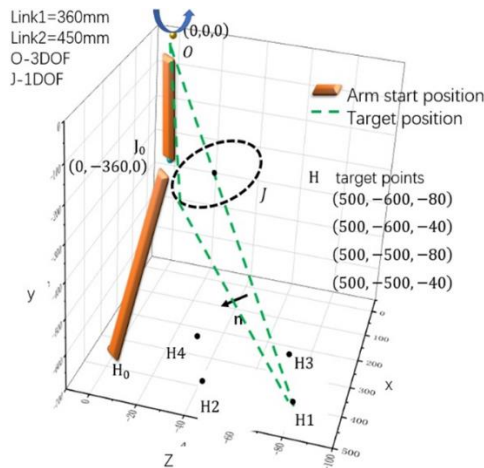


Fig. 3 目標点の設定

実験結果を Table 1 に示す。実験で得られた肘関節の回転軸 \mathbf{n} と目標値の角度誤差[deg.]を表している。同じ手先位置よって、回転角度が大きいほど誤差が大きい。また、z 軸の回転量が大きいほど誤差が大きい。

Table.1

	5°	10°	15°	20°
H1	2.9	1.5	2.2	2.4
H2	5.7	3.5	5.2	5.9
H3	8.5	7.2	9.8	7.9
H4	3.2	2.2	4.8	9.9

4. 結言

柔軟関節のロボットアームを弾性腱の巻き取り制御するための重力補償法を使って、手先位置は目標点に近く制御ができたが、姿勢制御にはまだ大きな誤差が存在している。肘関節の回転軸ベクトルの誤差がアームの回転角度と同時に大きくなったことが分かった。これは、巻き取り装置の配置位置によって引き起こされている可能性があると考えられる。今後の研究では、巻き取り装置の配置の改良を行い、回転によって生じる張力を取り除く。また、作業範囲を拡大するための改良を行う。

参考文献

- 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, Vol.17, No. 6, pp. 782~785, (1999)
- 井上貴浩, 加藤亮佑, 平井慎一, “バックドライバビリティを有する拮抗腱駆動冗長関節ロボットの重力下での振り上げ到達運動”, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 1, pp. 83~88, (2013)
- 朴賛逸, 小林博明, “腱駆動ロボットの作業に適した関節剛性の GA による学習”, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 4, pp. 428~488, (2006)