

腱駆動型マニピュレータのダイナミクスベースド制御について

Dynamics Based Control of Tendon-Driven Robot Manipulator

○藤野 英之*, 高橋 満*, 水戸部 和久*

○ Hideyuki Fujino*, Mitsuru Takahashi*, Kazuhisa Mitobe*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード：腱駆動型マニピュレータ (Tendon-Driven Robot Manipulator), バイオミメティックロボット (Biomimetic Robot)

連絡先：〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学 工学部 機械システム工学科水戸部研究室 藤野英之

1. はじめに

本研究は、筋に駆動される関節を簡単に模した構造のワイヤ駆動アクチュエータを用いたマニピュレータの運動制御について、制御の容易さ(制御系の複雑さ)、制御目的(タスク)の記述法および設計製作の方法の観点から考察する。このようなロボットアームの研究は以前から行われているが、これまでの多くの研究では、その目的はモータを根元に集中させアームを小型化・軽量化することが主目的であり、その制御においては手先位置の制御精度を向上することが主目的となっているようである。また、ゴムや形状記憶合金などの人工筋型アクチュエータを用いたロボットアームを構成し、やわらかい関節駆動を目的としたロボットが報告されているが、具体的な研究目的としては位置制御を安定化し、精度良く制御することが検討されてきた。特に、アクチュエータの非線形特性や特

性変動が大きくなる場合には、それらの特性補償が研究目的となる。本研究では、人間の腕の自然でやわらかい動きのメカニズムを力学的に解明しロボットで実現することを最終目的とし、腱駆動型のロボットの制御目的について検討する。

産業用マニピュレータの制御において、多くの場合、タスクの記述は手先位置の目的位置や目的軌道として与えられる。その際、制御系の特性は、高速性・高精度性を目指したものとなる。しかし、筋を模して駆動するロボットアームにおいては高速・高精度を目指すことには不向きであるように思われる。機械的な構造の面からも産業用マニピュレータの関節駆動機構は高速・高精度での追従制御を行うために有利に構成されている。一方で動物的な行動をロボットにより実現する場合に、同様の構造が適しているのか、興味深い問題である。たとえば、歩行運動を行うロボットの場合、現在成功を収めている多く

の研究においてロボットが転倒せずに安定に歩行し得る運動パターンを事前に計画し、制御の実行にあたっては精度よく追従制御を行う方法がとられている。しかしながら、それにより得られた歩行は柔軟性に欠け、エネルギー効率の悪いものであるとの指摘がなされている。

本報告では筋を模してワイヤ駆動されたロボットアームに産業用マニピュレータに用いられている制御方法を適用する場合の問題点を考察する。さらにどのような制御方法が適するかについて、制御タスク、制御系の構造および期待できる性能の観点から考察する。さらに実際のアームを設計製作し、ハードウェアとして実装する際の問題点についても考察する。

2. ワイヤ駆動によるロボットアーム

図1のように各関節が一对のワイヤにより駆動され、角ワイヤが独立のモータおよびプーリにより牽引され、駆動されるロボットアームを考える。

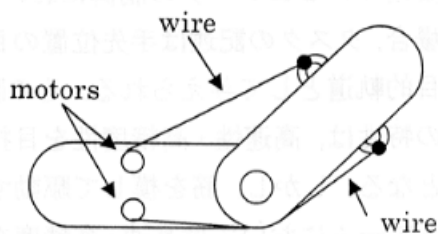


図1 ワイヤで駆動されるジョイント

図2のように各関節が同様にワイヤ駆動されるロボットアームを考えるとその運動方程式は、以下のとおり表すことができる。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = N(q)F \quad (1)$$

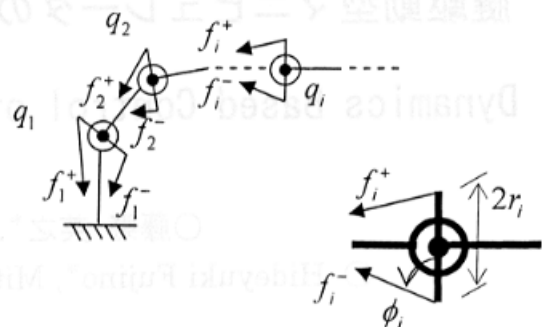


図2 マニピュレータの駆動

ここで、 $q = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$ はジョイント変数、左辺第1, 2項は慣性力、非線形項をそれぞれ表す。Fは関節を駆動するワイヤ張力を要素に持つベクトルとし、張力の方向により正負方向は切り替わるものとする。たとえば、 $F = (f_1^+, f_2^-, \dots, f_n^+)^T$ のように表す。

$N(q)$ はワイヤの張力方向とリンクのなす角度 ϕ_i により各関節トルクに生じる非線形性を表す行列であり、以下のように与えられる。

$$N(q) = \text{diag}(r_1 \cos \phi_1, r_2 \cos \phi_2, \dots, r_n \cos \phi_n)$$

ここで、 r_i は各ジョイントから張力の作用する点までの距離である。行列 $N(q)$ は正行列と仮定する。このことは各要素に含まれる ϕ_i が $[-1/2\pi, +1/2\pi]$ の範囲に入ること仮定していることを意味する。

3. ジョイントサーボ系、計算トルク法による制御系

通常産業用マニピュレータの制御に多

用されているジョイント毎の位置決めサーボ系および非線形項のフィードフォワード補償を含む軌道追従制御方法として知られている計算トルク法を問題のロボットアームに適用する場合の制御系の構成のしやすさについて考察する。それらの制御則は以下のように書ける。

ジョイントサーボ：

$$F = N^{-1}\{-\dot{q} + (q_d - q)\}$$

計算トルク法：

$$F = N^{-1}[M\{\ddot{q}_d + (\dot{q}_d - \dot{q}) + (q_d - q)\} + C\dot{q}]$$

ここで、 q_d は目標ジョイント角度である。各入力の生成において、ワイヤとリンクとの角度による非線形性を補償した入力として、各制御系のタスクおよび必要なマニピュレータの物理パラメータは表 1 のとおりとなっている。

これらの制御系においては、ワイヤ駆動により生ずる非線形性に関する補償を制御系に組み込む必要がある他、計算トルク法においては、運動方程式に含まれる物理パラメータの値が必要である。また、関節サーボ制御においては、目標位置周辺で関節角度のオーバーシュートが生じた場合に、張力を発生するワイヤの切り替えが必要となる。これはチャタリングの問題を引き起こすおそれがある。制御系の複雑さをも考えると、このアームを位置レベルで制御することは、期待でき

る制御効果に対してコスト高である。その原因のひとつは制御目的そのものにあるものと考えられる。

4. 最も簡便な制御方法に関する考察

問題とするロボットアームへはどのような制御タスクを与えることが適当か考察する。そのために、問題とするアームをいかにロボットの物理パラメータを用いずに制御するかについて考察する。最も簡単な制御方法の一つは以下と思われる。

①アームを静止するための制御。

制御タスクをアームの静止とする。角速度を 0 に整定させることのみを制御目的とする。制御則は以下の条件のみを満足すればよいものとする。式 (1) の右辺の要素はジョイントにおけるトルクを表すので、その要素を $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ とおき、 $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T$ とおいて表す。

- i) $\tau(\cdot)$ および $\dot{q}(\cdot)$ が有界である。
- ii) 各ジョイントに対して

$$\dot{q}_i(t)\tau_i(t) \leq 0, \quad 0 \leq t.$$
- iii) 以下の正数 $K > 0$ が存在する。

$$|\dot{q}^T(t)\tau(t)| \leq K \|\tau(t)\|, \quad 0 \leq t.$$

このような制御入力には各ジョイントの速度の方向のみが検出されれば構成することができる。

	タスクの記述	制御系を構成するために必要な物理パラメータ等
関節サーボ系	目標位置への整定	・ワイヤ駆動による非線形性
計算トルク法	目標軌道への追従	・ワイヤ駆動による非線形性 ・慣性行列、非線形項などに含まれる物理パラメータ

表 1 制御系のタスクおよび必要な物理パラメータ

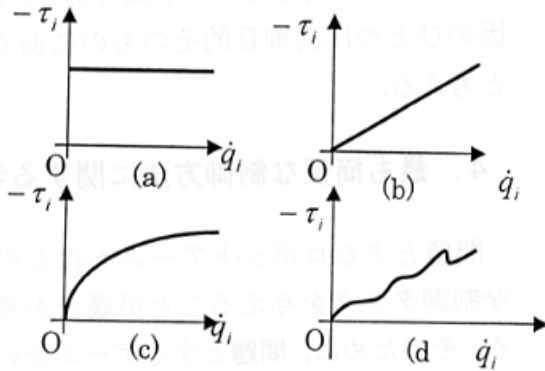


図3 制御入力の場合

たとえば、図3のように図示されるものであればいずれも条件を満足する。

このとき、ロボットの関節に入力されるトルクから、角速度までの間の受動性[1]を仮定すれば、関節角速度が0に収束することを示すことができる。

受動性より、次式を満足する正数 $\gamma > 0$ が存在する。

$$\int_0^T \dot{q}^T(t) \tau(t) dt \geq -\gamma, \quad T \geq 0.$$

したがって、トルク入力の要素 τ_i が制御則の ii) の性質を満足すれば、

$$\int_0^T \dot{q}^T(t) \tau(t) dt \text{ は単調に減少し,}$$

$$\int_0^{\infty} \dot{q}^T(t) \tau(t) dt = C$$

となる定数 C が存在する。条件 i) より $\dot{q}^T \tau(\cdot)$ は連続なので、この関数は0に収束する (Barbarat の補題[2])。さらに条件 iii) がつねに満足されれば、

$|\dot{q}^T(t) \tau(t)| \leq K \|\tau(t)\|$ を満足する正数 K が存在するので、

$$\frac{1}{K} \|\dot{q}(t)\| \leq |\dot{q}^T(t) \tau(t)|, \quad 0 \leq t.$$

したがって、 $\dot{q}(t)$ は $t \rightarrow \infty$ で0に収束する。本制御則はアームを静止させるのみの制御なので、単独で用いてもあまり有用とは考えられないが、静止位置を何らかの方法で制御できれば、位置制御ループなしでマニピュレータ手先の位置決めなどのタスクを実現することが可能と思われる。たとえば、各ジョイントを駆動するモータに一定入力のみを与えるモードから、本制御則へ適当なタイミングで切り替えることにより目標位置付近でマニピュレータ手先を静止する方法などが考えられる。

次に、上述の制御則と組み合わせて用いれば有用と思われる簡単な速度制御則について考察する。ここでも制御則は可能な限り簡便なものを考える。

②低速での角速度制御

角速度に一定目標値を与え追従させるための制御系を考える。制御入力をワイヤの引っ張り力として以下のとおり与える。

$$F = -(\dot{q} - v_d).$$

ここで、 v_d は目標の一定関節角速度である。このとき、十分に小さい目標角速度に対して角速度を小さな誤差で追従させることが可能と考えられる。制御系の制御特性は以下のとおり解析できる。

角速度信号の有界性を示すために正関数

$$V_1 = \dot{q}^T M \dot{q}$$

を考える。 V_1 をシステムの解に沿って微分すれば、

$$\dot{V}_1 = 2\dot{q}^T N v_d - 2\dot{q}^T N \dot{q}$$

となる。ここで、ロボットの運動方程式に

受動性を仮定し，行列 $M - 2C$ が歪対称行列であること [1] を利用している．行列 N が正であることを考えれば， $\|\dot{q}\|$ がある値より大きくなれば $\dot{V}_1 \leq 0$ となる．したがって， $\dot{q}(\cdot)$ は有界である．目標速度への追従性を考えるために正関数

$$V_2 = (\dot{q} - v_d)^T M (\dot{q} - v_d)$$

を考え，解に沿って微分すれば，

$$\dot{V}_2 = -2(\dot{q} - v_d)^T N (\dot{q} - v_d) + 2(\dot{q} - v_d)^T C v_d$$

となる．ここで， $\dot{q}(\cdot)$ が有界なので行列 C の各要素も有界であり，十分大きな $\|\dot{q} - v_d\|$ に対しては $\dot{V}_2 \leq 0$ となる．したがって追従誤差 $\dot{q} - v_d$ も有界である．さらに，目標値の大きさ $\|v_d\|$ が小さいほど追従性能は良いものと考えられる．

生理学的には小型の運動ニューロンほど筋伸張にたいする発火の閾値が小さく，小刻みな筋力調整により精度の良い制御が可能である「サイズの原理」 [3] が知られているが，アームの力学的性質からも類似の結果が成り立つように思われる．

5. 制御方法に関する考察

問題とするアームは位置や軌道の高精度な制御目的とする制御系を構成するためには精密な運動方程式が必要となり，制御系も複雑化する．また，位置のフィードバックループを用いればワイヤの引っ張り方向の切り替えにともなうチャタリングの発生が懸念される．むしろ，位置制御ループを用いない容易な制御方法を適用することが有効な制御目的ではないかと考えられる．粘性的な

速度ダンピングに基づく角速度の整定制御や，低速の一定角速度への追従制御は容易に実現可能と考えられる．

6. 腱駆動アームの製作

本研究で作製した実験装置の説明を行う．装置図を図 4 に示す．

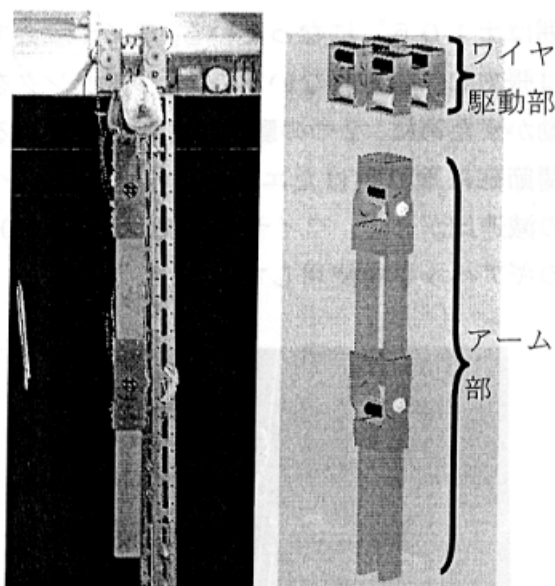


図 4 実験装置図

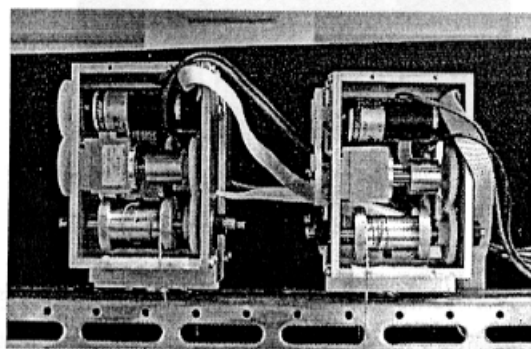


図 5 ワイヤ駆動部図

ワイヤ操作を行う構造の質量が大きく，またジョイントにかかる自重によるトルクを小さくするために，アーム部とワイヤ駆動部

に分けている。全長 1150[mm]、全幅 120[mm]、重量 4.4[kg]、各部材はアルミニウム合金を使用している。軽量化のため木材を使用、アーム部に自由度を 2 配置している。腱駆動を行うため図 6 のようにワイヤを用い、途中で弾性体（バネ）を使用している。エンコーダと一体型の DC サーボモータ（定格出力 20[W]）を使用、アーム部に 2 個、ワイヤ駆動部に 4 個配置している。アーム部の稼動範囲は $\pm 105^\circ$ になっている。ワイヤ駆動では張力しか得られないため、1 つのリンクを動かすために、2 つの駆動部を配置している。関節部に取り付けたエンコーダから関節への減速比が 2 で、ワイヤ駆動部は減速比 100 のギアヘッドを使用している。

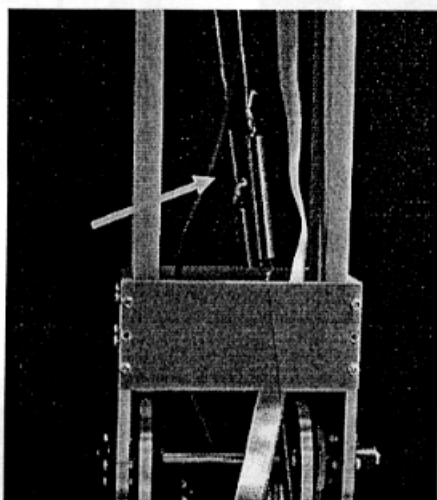


図 6 ワイヤとバネの図

リンクは前後からワイヤによって駆動され、関節部のモータはジョイントに粘性を持たせる働きをする。また、関節部のエンコーダとワイヤ駆動部のエンコーダからバネの伸びを検出することができる。

モータおよびエンコーダは D/A ボード、カウンターボードを介し、DOS/V パソコ

ンで制御している。

7. 動作実験および今後の課題

完成した装置を用いての簡単な動作実験を行った。低い剛性での位置決め制御によりやわらかい運動制御の感触を得ている。動作の様子を観察すると関節の剛性は低く、停止したときに大きく振動し、今後関節粘性の調整により振動は抑制されるものと考えている。

今後の課題として以下の点があげられる。
○人間のような自然でやわらかい動きという本研究の最終的な目的を目指すために、当面目的とする具体的なタスクを設定する。
○設定したタスクを実現するにあたり、可能な限りロボットの固有な動特性を利用し、制御しすぎない制御方法を検討する。
○各種のタスクにおける動作を解析する。そして、それらに普遍的な制御手法を確立する。

参考文献

- 1) 有本卓, 新版ロボットの力学と制御, 朝倉書店, 2002
- 2) V. M. Popov. Hyperstability of Control Systems. Springer, Berlin, 1973.
- 3) 標準生理学第 5 版, 医学書院 P. 305
- 4) 則次, 和田, " 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 Vol.9, No. 4, pp.502-506, 1991
- 5) 小澤, 小林, 非線形弾性腱を持つ腱駆動ロボット機構の定力制御, 日本ロボット学会誌 Vol.19, NO.3, pp. 372-379, 2001