

低剛性の腱駆動による筋骨格ロボットアームの研究

A Musculoskeletal Robot Arm driven by low stiffness wires.

○富樫淳輝* , 水戸部和久* , 小野寺健斗* , 富沢健児* ,

○Junki Togashi* , Kazuhisa Mitobe* , Kento Onodera* , Kenzi Tomisawa

*山形大学大学

*Yamagata University

キーワード: 親和性 (Human friendly robot) , 筋骨格(Musculoskeleta robot) ,
腱駆動(Tendon driven robot) , 低剛性(Low stiffness 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 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

農業や福祉分野における作業のロボット化は、高齢化に向かう社会で生活の質を維持するために必要である。しかし、これらの分野での作業は製造業分野と異なり、高精度位置決め制御の応用で自動化することは難しい。その理由として、工業用ロボットの様に位置のみ指定した運動計画では十分作業を達成できないという点が挙げられる。例えば剛性の高いロボットアームの稼働範囲内に人間がいた場合、接触によって危険が生じる可能性がある。そこでロボットに高い柔軟性をもたせかつ、その場合でも必要な制御を維持できるようなロボットの開発が人間社会への親和性を高めることになると思われる。

腱駆動型ロボットアームは、モーターをベースに集中することにより、アーム本体をスリム化・軽量化できる。またプーリー巻取装置とアームの設計が独立に行えるメリットがある。限られた分野で応用されてきた。本研究は剛性が大幅に低い腱をプーリーで巻き取る方式のロボットアームを開発する。腱が柔らかいことは環境への親和性のみでなく、アームを構成する機械部品の加工精度が低くてよい点などの潜在的なメリットを与える。また腱のみならず各関節にも柔軟性の高い素材を使い、簡素な構造にすることによって壊れにくく、ユーザーによるメンテナンスが容易な装置とすることができ、農業や福祉分野への応用性が上がる。さらに、現場で作業者が作業に最

適な材質や形状のアームを手作りすることが容易となる。このような観点から、低剛性腱の巻き取り装置および木材と柔軟材質によるアームロボットを試作する。

2. ロボットアームの制作

試作したロボットアームを Fig.1 に示す。縦横の長さ 1[m]、高さ 1.3[m]の枠を鉄製フレームで作成し、その中に木製アームを吊り下げる。ロボットアームは肩関節から肘関節までが 300[mm]、肘部から手先部までが 350[mm]である。アクチュエーターとして dsPIC で制御された DC モーターを 4 台用いる。アクチュエーターは Fig.1 に示す通りに配置し、少ないアクチュエーターで駆動するために動作の一部に重力を利用する非完全拘束型とした。

このロボットアームの特徴は、関節に回転軸、モーター、減速機がなく、Fig.2 及び Fig.3 に示すようにゴムの軸を通しただけの構造となっていることである。機械的なはめ合いがないため、簡単に取り外しでき、手作りの部品で構成できる。アームを駆動する腱は、意図的にやわらかい材質としている。手先位置制御の観点からは伸びのない腱が好ましいが、精度の高い位置決め制御を経ないで作業を達成することを目的とする。腱の伸びの平衡点をアームの動特性に対して十分に速く操作するために、プリーの直径を大きなものとし、一回転で完全に腱を巻き取れるものとした。また、巻き取り中に腱の伸びが一様になるように、大プリーの周囲に小プリーを配してプリーと腱との摩擦が小さくなるようにしている。これにより、腱の伸びとバネ特性を運動制御や力制御に利用する。巻き取り

装置を Fig.4 に示す。腱はロボットアームの各リンクに Fig.5 のように取り付けられている。

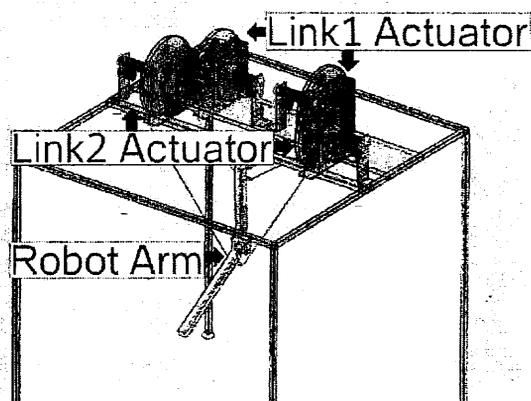


Fig.1 General drawing of prototype robot



Fig.2 Shoulder joint Fig.3 Elbow joint

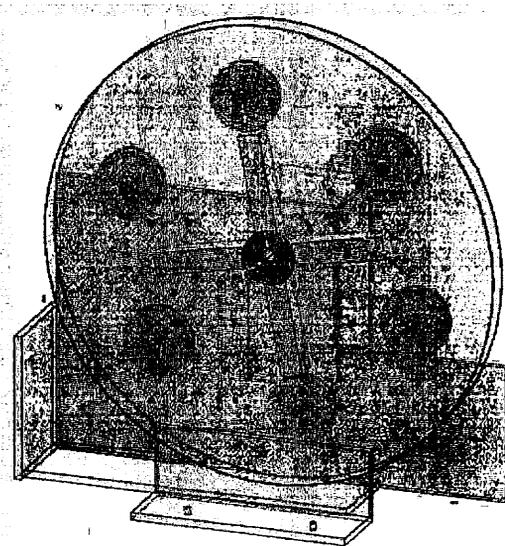


Fig.4 Pulley mechanics

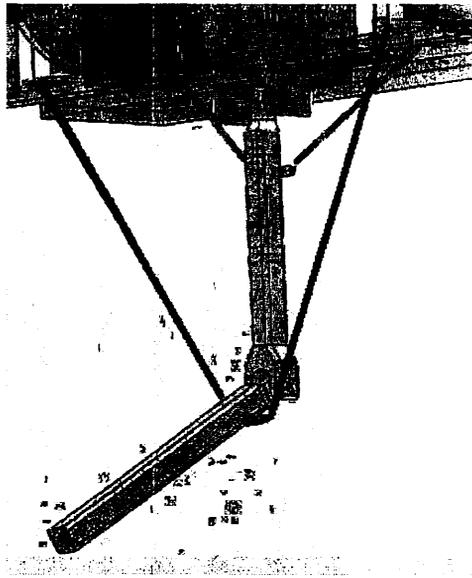


Fig.5 Low stiffness wires

3. ロボットアームの力学的特性

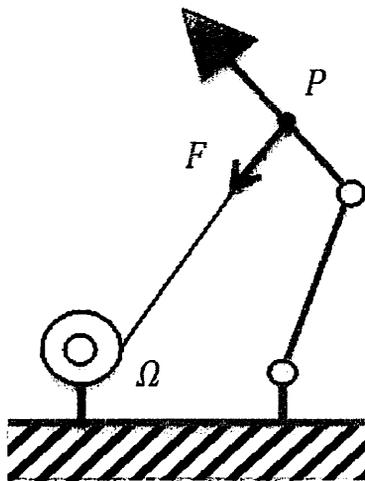


Fig.6 Pattern diagram

腱の柔軟性を利用した制御のために、有用と考えられる力学特性について以下にまとめる。

簡単のため、1本の腱により駆動されるロボットモデル Fig.6 を考える。

まず腱張力からアーム運動への受動性を考える。このロボットアームの運動方程式は次式で与えられる。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = J^T(\theta)F \quad (1)$$

ここで、左辺は慣性項および非線形項、右辺の $J \in R^2$ は腱の取付点 P の座標と関節変数 $\theta \in R^2$ の間のヤコビ行列であり、 P 点の座標を $p \in R^2$ とすれば、 $J = \frac{\partial p}{\partial \theta}$ と表される。(1)式において、腱の張力 F と P 点速度 \dot{p} の間に次式のとおり受動性が成り立つ。

$$\int_0^t \dot{p}^T F d\tau \geq -\gamma, \quad \gamma > 0 \quad (2)$$

(2) は運動エネルギー

$$E_k = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M \dot{\theta} \quad (3)$$

の変化率を考えることで確認できる。運動エネルギーを(1)の解に沿って微分すれば、

$$\begin{aligned} \dot{E}_k &= \dot{\theta}^T M \ddot{\theta} + \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{M} \dot{\theta} \\ &= \dot{\theta}^T J^T F + \frac{1}{2} \dot{\theta}^T (\dot{M} \dot{\theta} - 2h) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、ロボットダイナミクスの受動性に関する多くの研究で右辺第二項が0であることが知られている。したがって、

$$\dot{E}_k = \dot{\theta}^T J^T F = \dot{p}^T F \quad (5)$$

(5)を時間で積分すれば、

$$E_k(t) = E_k(0) + \int_0^t \dot{p}^T F d\tau \quad (6)$$

運動エネルギーが正であることから、(2)式を確認できる。この性質は、腱からアームへの力学エネルギーの出入り、力学的エネルギーの保存則を表す。腱の低い弾性を利用してアームを目標姿勢へ制御する際の動的ふるまいや安定性の解析に有用と考えられる。

次に弾性を含めたエネルギー保存を考える。運動中のアームが持つ運動エネルギーは腱を経由して出入りする力積によるエネルギーにより変化する。作業に伴う手先力がなく、腱の弾性特性がバネとみなせる場合には、バネに蓄えられるポテンシャルエネルギーとアームの運動エネルギーの間に保存則が成り立つ。前節で示した受動性を考慮してこのことを示す。腱の自然長を l_0 、腱の弾性によるひずみ量を ε とすれば、

$$\varepsilon = |\overline{P\Omega}| - l_0 \quad (7)$$

腱張力 F が $F = k\varepsilon \frac{\overline{P\Omega}}{|\overline{P\Omega}|}$ で表されるものとする。 k は弾性の係数である。

弾性エネルギー E_p は $E_p = \frac{1}{2} k\varepsilon^2$ と表され、その変化率は $\dot{E}_p = k\varepsilon\dot{\varepsilon}$ である。ここで、

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= \frac{d}{dt} |\overline{P\Omega}| = \frac{d}{dt} \left\{ (\overline{P\Omega})^T (\overline{P\Omega}) \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{(\overline{P\Omega})^T (\overline{P\Omega})}} \cdot \frac{d}{dt} (\overline{P\Omega})^T (\overline{P\Omega}) \\ &= \frac{\overline{P\Omega}^T}{|\overline{P\Omega}|} \cdot \frac{d}{dt} (\overline{P\Omega}) \\ &= -\frac{\overline{P\Omega}^T}{|\overline{P\Omega}|} \cdot \dot{\mathbf{p}} \end{aligned} \quad (8)$$

と表されることを考えれば、

$$\dot{E}_p = -k\varepsilon \frac{\overline{P\Omega}^T}{|\overline{P\Omega}|} \cdot \dot{\mathbf{p}} = -F^T \dot{\mathbf{p}} \quad (9)$$

(5)および(9)より、 $\frac{d}{dt} (E_K + E_p) = 0$ となり、力学エネルギーの保存が確認できる。

次に腱の弾性による PD 制御による安定化について考える。手先が対象物に対して仕事をする場合や、関節に摩擦がある場合、腱の収縮に粘性摩擦がある場合には、運動エネルギーが減少し、アームは漸近安定な平衡点を持つ。このことは

力学エネルギーをリアプノフ関数として説明できる。腱張力に粘性的な摩擦力が含まれ、腱の張力が次式で与えられるとする。

$$F = (k\varepsilon + \mu\dot{\varepsilon}) \frac{\overline{P\Omega}}{|\overline{P\Omega}|} \quad (10)$$

ここで、 μ は粘性の係数である。 $\frac{\overline{P\Omega}}{|\overline{P\Omega}|}$ は腱方向の単位ベクトルである。ポテンシャルエネルギーの変化率は(9)式の途中の式、 $\dot{E}_p = -k\varepsilon \frac{\overline{P\Omega}^T}{|\overline{P\Omega}|} \cdot \dot{\mathbf{p}}$ に、(10)式から得られる $k\varepsilon \frac{\overline{P\Omega}}{|\overline{P\Omega}|} = F - \mu\dot{\varepsilon} \frac{\overline{P\Omega}}{|\overline{P\Omega}|}$ を代入して、

$$\dot{E}_p = -F^T \cdot \dot{\mathbf{p}} + \mu\dot{\varepsilon} \frac{\overline{P\Omega}^T}{|\overline{P\Omega}|} \dot{\mathbf{p}} \quad (11)$$

この場合も(7)式は成立することに注意し、 $\dot{\varepsilon} = -\dot{\mathbf{p}}^T \frac{\overline{P\Omega}}{|\overline{P\Omega}|}$ を代入すれば、

$$\dot{E}_p = -F^T \cdot \dot{\mathbf{p}} - \mu\dot{\mathbf{p}}^T \frac{\overline{P\Omega}}{|\overline{P\Omega}|} \frac{\overline{P\Omega}^T}{|\overline{P\Omega}|} \dot{\mathbf{p}} \quad (12)$$

したがって、力学的エネルギー $V = E_K + E_p$ の変化率は

$$\dot{V} = -\mu\dot{\mathbf{p}}^T \frac{\overline{P\Omega}}{|\overline{P\Omega}|} \frac{\overline{P\Omega}^T}{|\overline{P\Omega}|} \dot{\mathbf{p}} \leq 0 \quad (13)$$

である。

V は単調に減少するが、エネルギーであり正関数なので一定値に収束する。 \dot{V} は一様連続であれば0に収束する。すなわち、腱の取り付け点が静止状態となる。 $\dot{V} = 0$ を満足する状態はアームに作用する腱張力が釣り合った状態と考えられる。

最後に静力学の関係についても考える。手先に作業のために必要な力を発生させるために、腱に与えるべき張力を制御する必要がある。力制御において有用な性質について静力学の範囲で整理する。Fig.7に示したロボットアームについて考えると、手先に作用する力 F_h と腱張力 F_1 および F_2 の静力学の関係について考える。これらの力による仮想仕事釣り合う場合、

$$\delta \mathbf{x}_h^T F_h + \delta \mathbf{p}_1^T F_1 + \delta \mathbf{p}_2^T F_2 = 0 \quad (14)$$

ここで、 \mathbf{p}_1 、 \mathbf{p}_2 は腱取り付け位置 P_1 、 P_2 点の座標である。関節変数を $\boldsymbol{\theta}$ とすれば、各仮想変位と関節角の仮想変位は、 $\delta \mathbf{x}_h = J_h \delta \boldsymbol{\theta}$ 、 $\delta \mathbf{p}_1 = J_1 \delta \boldsymbol{\theta}$ 、 $\delta \mathbf{p}_2 = J_2 \delta \boldsymbol{\theta}$ と関係付けられる。 J_h 、 J_1 、 J_2 は各点の変位と関節変数の間のヤコビ行列である。これを定式に代入すれば、

$$\delta \boldsymbol{\theta}^T (J_h^T F_h + J_1^T F_1 + J_2^T F_2) = 0 \quad (15)$$

任意の $\boldsymbol{\theta}$ で成立すると考えれば、 $J_h^T F_h + J_1^T F_1 + J_2^T F_2 = 0$ が成り立つ。張力の向きはアームの姿勢により決定され、プーリーによる巻取でその大きさのみが操作される。

$$F_1 = t_1 v_1, \quad v_1 = \frac{P_1 \Omega_1}{|P_1 \Omega_1|} \quad (16)$$

以上を整理すれば,

$$\begin{aligned} J_h^T F_h &= -t_1 J_1^T v_1 - t_2 J_2^T v_2 \\ &= -(J_1^T v_1, J_2^T v_2) \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

$(J_1^T v_1, J_2^T v_2)$ が正則であれば, 所望の手先力に対応する張力の大きさは,

$$\begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} = -(J_1^T v_1, J_2^T v_2)^{-1} J_h^T F_h \quad (17)$$

と定めることができる.

Fig.8 のようにリンク間を直接つなぐ腱の場合も, 静力学の関係は同様な形式で表される. P_1 点と P_2 点の間に腱が付加され, 張力が作用している場合には, 各点への張力は大きさが等しく向きが逆方向なので,

$$\begin{aligned} J_h^T F_h + J_1^T F_1 + J_2^T F_2 + J_1^T T - J_2^T T &= 0 \\ J_h^T F_h + J_1^T F_1 + J_2^T F_2 + J_2^T T &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

ここで, $J_{12} = J_1 - J_2$ である.

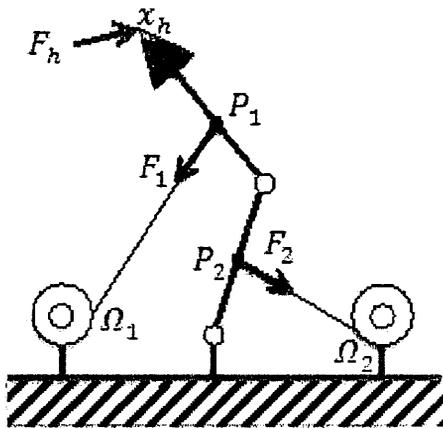


Fig.7 Equilibrium of forces

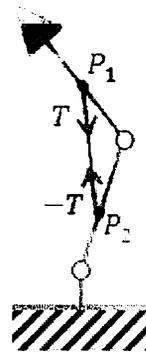


Fig.8 Tendon connecting over a single joint

4. 結言

やわらかい腱により駆動するロボットアームの試作及び力学的特性の考察を行った. このアームは腱および関節の柔軟性から得られる利点として, 低精度な部品により構成することを目的の一つとしている. 関節にも柔軟な材質を利用しているため, 内界センサーを付加していない. ロボットアームの姿勢を制御するために, 今後ビジョンセンサーやジャイロセンサーの利用を検討する. また, アームの幾何学パラメータや逆運動学に依存しない制御方法が必要である. これらの検討をしながら, 具体的な作業への応用を試みる. 文字の描写, 傷つきやすい部材表面の拭き掃除等人間が日常行う動作を再現し, ロボット人間との親和性を高める研究を行ってゆく.