物体把持機能向上を目指した腱駆動機構の提案

Tendon-driven Mechanism for Improvement of Grasping Capability

○正 長谷川泰久（筑波大） 上野泰平（筑波大）

Yasuhisa HASEGAWA, University of Tsukuba, hase@esys.tsukuba.ac.jp

Taihei UENO, University of Tsukuba

This paper proposes a tendon-driven mechanism with a spring in order to improve a grasping stability of a robotic hand. The properties of the tendon drive system with a spring are investigated from the viewpoint of grasping stability in numerical simulations. For example transitions of a grasping force and a finger posture are examined when a grasping object is displaced by an external force. The grasping stability decreases, however the stability decrement of the tendon-driven mechanism becomes less than that of the conventional joint drive system, because the joint drive system allows a fingertip to rotate following to the external force. As a result, the fingertip tends to slip at grasping point. On the other hand, a fingertip of the tendon-driven mechanism rotates in the opposite direction in the same case. Besides the tendon-driven system mechanically and simultaneously responds to the disturbance without a time delay.

Key words: Robot hand, Tendon-driven mechanism, Mechanical compliance, Stability, Passive dynamics

1 はじめに

人の手は押しやり引いたり、把持するなど様々な状態にある物体と物理的な相互作用を巧みにを行っているが、未だこの「巧みさ」を実現するしくみは工学的に再現できるまでには解明されていない。もし、この「巧みさ」を工学的に再現することができればロボットハンドの実用化に向けて大きく近づくことになると思われる。これまでに、人の手に近い自由度を有する多指ロボットハンドが多くの研究者によって開発されているが [2], [3], [4], [1], これらはモータと減速ギアからなる1つの駆動システムは対応する1つの関節を独立して駆動している。この駆動機構を有するロボットハンドは、モータによって各関節における関節角と関節トルクを別々に制御することで把持物体の静的な力のバランスを正確に制御することが可能であるが、その一方、動的な把持物体の安定性については現在、保障されていない。つまり、把持物体の操作も静的な制御となり、実際に人の手に見られる「巧みさ」とはいまだ大きな隔りがある。

把持物体のダイナミクスも考慮した把持動作の実現が必要となる動作の1つとして、物体の組み付け作業が考えられる。この組み付け作業では部品同士が衝突し、この衝突で生じる部品への反力はその衝突状態に大きく依存し、また、わずかな位置・姿勢誤差においてもその力は変化する。このような予測し難い外力（衝突力）が把持物体に作用した際の物体の安定性の向上が重要な課題の1つである。この衝突によって生じる物体の位置・姿勢変化は、一般的なセンサ・アクチュエータからなるフィードバック制御系の応答と比較して速いため、力センサを用いた状態フィードバックを用いて安定性を確保することは困難である。よって、この解決策として、状態フィードバックを用いることなくダイナミクスを考慮した制御系を実現する方法を確立するか、または、制御ループに頼ることなく機構的に安定性を確保する方法の2つが考えられる。前者の安定把持方法については、有本らによってある程度実現されつつある [5] が、この方法ではシステム側の状態フィードバックは必要としており、把持物体に予期されない外力が作用した場合にはやはり不安定となってしまう。

そこで、本研究では、機構的に把持物体の安定性を向上させるために、人間の腱駆動機構を模倣したハンド駆動機

Fig. 1: Finger posture and force direction.

構を提案し、その駆動機構によって実現される指先の特性をシミュレーションによって確認する。この駆動機構によって、一旦物体を安定に把持すれば、把持物体に外力が作用すると同時に指先位置・姿勢が把持を安定させる方向へ受動的に変化することで、状態フィードバックすることなく把持物体の安定性を確保することが可能となる。

2 指先力に応じた指先姿勢の変化

現在開発されている多くのロボットハンドの駆動方法は、関節に減速ギアを介したモータが1対1の関係になっている。この方法は、指先位置・指先力共に制御精度が高く、さらにそれぞれをほぼ独立に制御することができる。しかし、これは望ましい指先力を物体へ作用させるためには、その指先力だけでなく指先姿勢を予め制御しなければならない。また、力覚センサを用いたフィードバック制御ではその周波数応答が低く、衝突などによって生じる急激な外力が作用した際には把持物体の安定性が崩れてしまう状態が生じる。

一方、人の手は物体を把持している際には、脳は発生させたい把持力を制御しており、指先姿勢は把持物体との物理的な相互関係に応じて変化し、直接的には制御されていないと考えられる。例えば、物体に接した際の初期姿勢が同じであっても、指先力の方向や大きさによって指先姿勢は自然と変化している。指先で物をテーブル等に上から押

し付けるとき（例えば紙の束から最上部の1枚を抜き取る時）大半の人はFig.1(a)に示すように指先の腹部（指紋のある比較的平らな部分）を使っているが、その姿勢は意図的に制御されたものではなく、指を下に押し付けようとする力によって自然と伸展方向に折れ曲がる。一方、小さなものを指先で摘むときや、指先で何かを引き寄せたりするとき、指はFig.1(b)のような姿勢になる。このように、物体把持後の指先姿勢は特に意識をせずとも、指先が発生する力の向きや大きさ、接触状態などにより自然と決定される。これにより人の指は効果的に物体に作用させることができる位置・姿勢へ自然と変化する機構を有しており、もしこのような望ましいコンプライアンスを機構的に指先位置・姿勢に持たせることができれば、一旦物体を把持した後、指先力のみで制御で、指先位置・姿勢は適切な状態へ変化することが期待できる。実際、人の指は、予期せぬ外力が作用した場合、瞬時に指の位置・姿勢が変化することで不安定となるレベルを最小限に抑えた後、感覚フィードバックに安定性をより向上するように調整していると考えられる。そこで、状態フィードバック制御を行わず機構的にコンプライアンスを実現するものを本研究では「メカニカルコンプライアンス」と定義し、指先に適切なメカニカルコンプライアンスを与えるため弾性要素を有する腱駆動機構を提案する。

3 弾性要素を有する腱駆動機構

人の指の駆動方法の特徴は、指を駆動するための腱と関節の対応が1対1ではなく、各関節が連動して駆動されるという点で各関節が独立して動く従来のロボットハンドと大きく異なる[6]。各関節をそれぞれ独立に動かす駆動方法は制御精度が高く正確であるが、指の関節角がそれぞれ独立して決まるため、指の位置・姿勢と指先力を独立して制御する必要がある。また、通常、関節駆動には減速比の大きなギアを用いるため、外力に対して自然な指の姿勢の変化が起こらない。そこで本研究では、外力に対して指が適切な姿勢に変化するように、バネ要素を持つ腱を用い、適切なメカニカルコンプライアンスを実現するように各関節が互いに連動して動く腱構造を用いる。また、物体の把持における指先位置・姿勢変化をシミュレーションにて確認するために、指先が発生する力は常に指を内側（掌の方向）に曲げる際に必要となる腱のみを考慮する。そこで、指を伸ばすための不必要な腱は省き、モデル化する腱は、Fig.2に示してある L_1, L_2, L_3 の3本となる。これらの腱は、それぞれ、リンク l_1, l_2, l_3 に腱先端が取り付けられており、腱 L_2 と L_3 は第1関節付近にてリンク l_0 に取り付けられたワイヤガイドを通っており、更に腱 L_3 は、第2関節付近でリンク l_1 に取り付けられたワイヤガイドを通っている。

指先のグローバル座標における座標 $\mathbf{X}$ と各関節角 Θ は、式(2)~(5)で表される。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \end{bmatrix}, \Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$x = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2)$$

$$y = l_0 + l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3)$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (4)$$

Fig. 2: Coordinates and Variables

また、3本の腱の長さは式(5)~(7)で求めることができる。

$$L_1 = l_0 + r \cos \theta_1 \quad (5)$$

$$L_2 = l_0 + l_1 - r(\sin \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (6)$$

$$L_3 = l_0 + l_1 + l_2 - r(\sin \theta_1 + \sin \theta_2 - \cos \theta_3) \quad (7)$$

ただし、回転中心とワイヤガイドまでの距離はどの関節も同じ r とする。また、腱がバネ定数を k_i の線形バネ特性を有するとすると、腱 i にかかる張力 t_i は、

$$\mathbf{T} = \mathbf{K} \Delta \mathbf{L} \quad (8)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

と表せる。ただし、 ΔL は腱の伸びを表す。また、指先に発生する指先力 $\mathbf{F}$ は指先座標と腱の長さのヤコビアン $\mathbf{J}$ を用いて

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^t \mathbf{T} \quad (10)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_r \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial L_1} & \frac{\partial x}{\partial L_2} & \frac{\partial x}{\partial L_3} \\ \frac{\partial y}{\partial L_1} & \frac{\partial y}{\partial L_2} & \frac{\partial y}{\partial L_3} \\ \frac{\partial \phi}{\partial L_1} & \frac{\partial \phi}{\partial L_2} & \frac{\partial \phi}{\partial L_3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

となる。ただし f_r 指先における回転力を表す。ヤコビアン $\mathbf{J}$ は指先の座標と各関節角のヤコビアン $\mathbf{J}_\theta$ と腱の長さ各関節のヤコビアン $\mathbf{J}_1$ から求めることができ、

$$d\mathbf{X} = \mathbf{J}_\theta d\Theta \quad (12)$$

$$\mathbf{J}_\theta = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \phi}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \phi}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$d\Theta = \mathbf{J}_1^{-1} d\mathbf{L} \quad (14)$$

$$\mathbf{J}_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial L_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial L_1}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial L_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial L_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial L_2}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial L_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial L_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial L_3}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Fig. 3: Displacement Direction and Endeffector Coordinate

であり、更に、式 (12) に式 (14) を代入して

$$d\mathbf{X} = \mathbf{J}_\theta \mathbf{J}_1^{-1} d\mathbf{L} \quad (16)$$

$$= \mathbf{J} d\mathbf{L} \quad (17)$$

となる。

4 把持物体に外力が作用した際の把持力・姿勢変化

物体を 2 本の指でつまんだ姿勢において、把持物体が把持平面内において手から逃げる方向 (Fig.3) に外力が作用し、物体が変位した場合の把持力変化と指姿勢変化を腱駆動モデルと関節駆動モデルの 2 つの場合においてシミュレーションにより比較する。

物体を把持した際、把持内力の方向は把持している指と指の接点をつなぐ直線方向となる (Fig.3 中 x_E 正方向)。実際に物体に作用する把持内力の垂直成分はこの直線上の力となるため、この方向を y 軸とする指先座標を $\mathbf{X}_E$ として、さらにこの座標からみた指先力を $\mathbf{F}_E$ とする。指先座標系の値は元のワールド座標系 $\mathbf{X}$ と回転行列 $\mathbf{R}$ から求まる。

$$\mathbf{X}_E = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{X} \quad (18)$$

$$\mathbf{X}_E = \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \\ r_E \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

また、指先力 $\mathbf{F}_E$ は $\mathbf{F}$ を用いて

$$\mathbf{F}_E = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F} \quad (20)$$

$$\mathbf{F}_E = \begin{bmatrix} f_{Ex} \\ f_{Ey} \\ f_{Er} \end{bmatrix} \quad (21)$$

と求めることができる。シミュレーションでは把持初期状態での把持内力を

$$\mathbf{F}_E = \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [N] \quad (22)$$

とし、把持物体が移動した際の指先座標から見た把持内力と指姿勢の変化を求める。

4.1 腱駆動型ロボットハンド

バネ要素を含む腱駆動モデルの場合、腱の張力は腱の伸び量に比例する。把持物体に外向きの力が作用すると、把持物体は力の方向に移動する。この時、指先に滑りがないと仮定すると指先も把持物体に従って移動するため腱が伸び、3本の腱の張力のバランスが釣り合う移動量で静止する。この時、指先の回転力 f_{Er} はゼロであり、把持物体の内力は指先から与えられる力 F_E と外力との和となるため、指先からは復元力として外乱と同じ力を発生していることになる。

外力を増加していった際の復元力と把持内力の変化のグラフを Fig.4 に、各関節角の変化を Fig.5 に示す。Fig.4 から分かるように、把持内力は復元力の増大に従って減少するが、Fig.5 から姿勢は指先が閉じていくように変化していくことがわかる (Fig.6)。これは、指が引っ張られるにつれて指先が把持物体にひっかかるように指先姿勢が回転することで、先に述べたように物を引っ張るときや、手の内側に物があるとき、把持物体を落とさないよう指先の姿勢が鉤型に変形していると言える。

4.2 関節駆動型ロボットハンド

比較の為、従来の関節駆動によるロボットハンドの場合を考える。関節駆動の場合、通常は高い減速比を持つギアがモータについているため、外力による位置・姿勢変化は通常起こりにくい。このことは従来のロボットハンドでは、把持物体が固定された環境と接触をした際に容易に安定性が崩れてしまう要因となっている。

一方、関節駆動のモータもバネ的特性を持っていると仮定し、 i 番目のモータのトルク τ_i はバネ定数を k'_i として

$$\tau = \mathbf{K}' \Delta \Theta \quad (23)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}, \mathbf{K}' = \begin{bmatrix} k'_1 \\ k'_2 \\ k'_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

と表現された場合の安定性を考える。ただし、 $\Delta \Theta$ はモータの変位角度である。また、バネ定数 $\mathbf{K}'$ については任意に設定が可能であるが、おおよそ腱駆動の場合と同様の把持物体の変位に対する復元力が発生するように設定した。

物体の復元力と把持内力の変化を Fig.7 に、また物体の変位と各関節の角度の変化を Fig.8 に示してある。Fig.7 から分かるように、腱駆動の場合と同様に関節駆動についても復元力の増加にともない把持力が減少していることが確認できる。しかし、指先姿勢に関しては腱駆動の場合と異なり、初期把持座標から遠ざかるにつれて θ_3 が減少していることが分かる。これは、指が手の内側から外側に向けての力に対して把持物体を逃がしてしまうように開いてしまうことになり (Fig.9)、指先にすべりが生じやすくなる。

4.3 腱駆動と関節駆動のシミュレーション結果

適切なメカニカルコンプライアンスを持たない関節駆動型ロボットハンドは、外力が外側に作用した際、指先に滑りが生じやすい方向に指先姿勢が変化してしまうことが明らかになった。物体の変位に対する把持力は、腱駆動型の方が若干大きく減少するが、Fig.6 に示すように、指先姿勢が把持物体のすべりを抑制する方向に変化することで、安定性の減少を少なくすることが可能となっている。また、外力による変位に対する反力の発生の仕方が、変位が小さい状態ではほぼ同じ程度であるが、変位が大きい (5mm 以上) 状態では、腱駆動の場合、急激に反力が発生している。

Fig. 4: Reaction Force and Grasping Force

Fig. 7: Reaction Force and Grasping Force

Fig. 5: Each Joint Angle

Fig. 8: Each Joint Angle

Fig. 6: Posture Change in Tendon-Driven Finger

Fig. 9: Posture Change in Joint-Driven Finger

5 まとめ

本研究では衝突などの予測が困難な外力に対して把持物体の安定性を損なわないバネ要素を有する腱駆動機構を提案した。従来の関節駆動機構を有する指と比較して、人に似たバネ要素を有する腱駆動機構を用いることによって、適切なメカニカルコンプライアンスを指先に持たせることが可能であることをシミュレーションにて確認した。

文献

- [1] Manson, M.T. and Salisbury, J.K., "Robot hands and mechanics of manipulation", The M.I.T Press
- [2] 日本ロボット学会編, "ロボット工学ハンドブック", 日本ロボット学会, 2005.
- [3] S.C.Jacobsen et al. "Design of the Utah/M.I.T. Dexterous Hand", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1986.
- [4] J.Butterfass, M.Grebenstein, H.Liu and G.Hirzinger, "DLR-Hand", Next Generation of a Dexterous Robot Hand, Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2001.
- [5] 有本卓, "手の巧みさと解析力学: ベルンシュタイン問題 (身体運動の謎) への挑戦", 物性研究, Vol.82, No.4, pp.625-654, 2004-7.
- [6] 廣川節男, "コメディカルの解剖学", 廣川書店, 2000.