

断面変形ばねを用いた劣駆動型指機構の動作設計

Design of underactuated finger mechanism using Cross-sectional deformation spring

○石垣 光暁, 齋藤 直樹

○Mitsuaki Ishigaki, Naoki Saito

秋田県立大学

Akita Prefectural University

キーワード：劣駆動，ロボットハンド，断面変形ばね

連絡先：〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口 84-4 秋田県立大学大学院 システム科学技術学研究所
機械知能システム学専攻 石垣光暁, Tel.:0184-27-2217, Fax.:0184-27-2188, E-mail:m12a002@akita-pu.ac.jp

1. 緒言

人間と同じような作業性を実現させるために、器用なロボットハンドに関する研究が盛んに行われている。こうしたロボットハンドは、器用さと同時にデバイスの配置や軽量化も重要であり、指先端リンクに取りつけた 1 本のワイヤを引くことで屈曲する、ワイヤ屈曲型劣駆動機構を採用しているものもある^{[1][2][3]}。

このワイヤ屈曲型劣駆動機構の指関節に、ばねのような受動要素を伸展のために組み込むことで、伸展側のアクチュエータが不要となり、更なる軽量化が期待できる。しかしながらこのような受動要素を利用し、物体把持に適した指動作を実現するためには、受動要素による伸展トルクとワイヤ屈曲型劣駆動機構による屈曲トルクとの関係を明らかにしたうえで、受動要素の選定を適切に行って目標動作が実現できるように動作設計をする必要がある。

このことから本研究では、ロボット指の伸展のための受動要素として、現在開発中の断面変形ばね(Cross-sectional deformation spring, CSDS)を利用することとし、物体への適応的把持動作

の実現を目的とした動作設計についてまとめる。

2. 断面変形ばね

2-1. 断面変形ばね概要

今回の指機構に使用する断面変形ばねについて説明する。断面変形ばねの外観とトルクを発生させる仕組みを図 1 に示す。また、各部の名称を図 2 に示す。

圧縮流体の配管に利用されるポリウレタン等のチューブに切欠きを入れただけのシンプルな構造であり、弾性変形領域で曲げ変形が発生するとそれに伴い曲げ中心の断面が変形する。断面二次モーメントの変化とチューブの弾性によりトルクを発生させることができる。

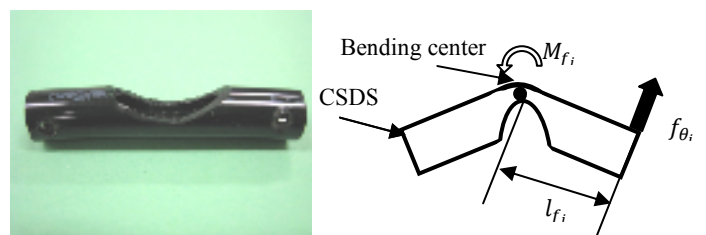


Fig.1 Cross-sectional deformation spring (CSDS)

2-2. 断面変形ばねの特性評価

断面変形ばねは特に切込深さによって、曲げ角度による発生トルクの傾向が変わる。図3は、切込深さの違いによる発生トルクの傾向を実験的に求めた結果である。この時、チューブ径は8×5(外径×内径)、材質はポリウレタンとした。この結果から、切込深さが外径に対し60%でほぼ定トルク特性が得られていることが分かる。

また、チューブ径の違いによるトルクの変化について図4に示す。素材はポリウレタン、切込深さは50%である。このことから、チューブ径はトルク変化の傾向を変えず、全体的なトルクの大小を決めることができる。これら2つの特性を組み合わせることで、発生トルクの大きさを変えた定トルク特性が実現できる。

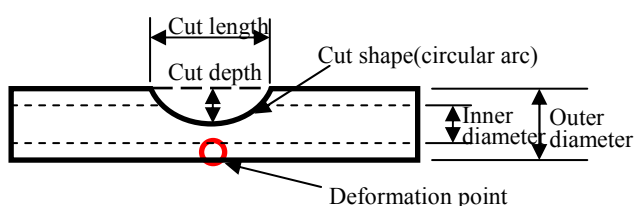


Fig.2 Each part name of CSDS

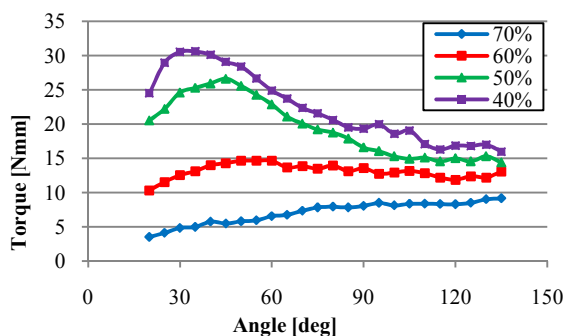


Fig.3 Relationship between diameter of the tube and generated force.

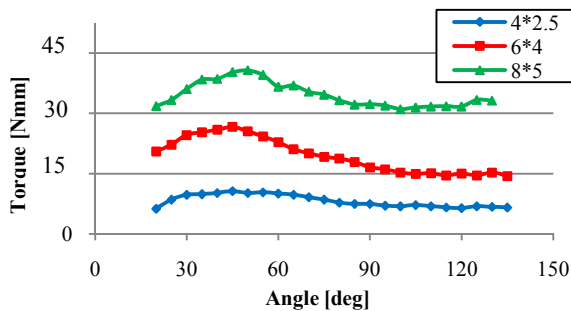


Fig.4 Relationship between diameter of the tube and generated force.

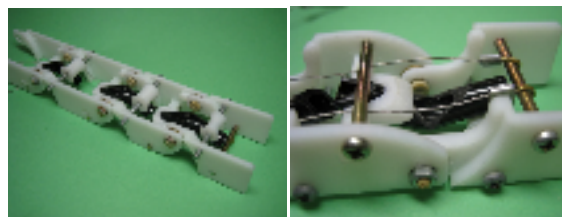


Fig.4 Appearance of the finger part of a robot hand

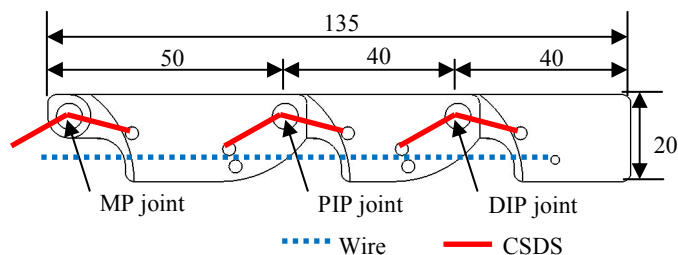


Fig.5 Schematic of a structure of the finger part

3. ロボットハンドへの応用

先に述べた断面変形ばねをロボットハンドへ適用することを考え、試作したロボットハンド指部の外観を図4に、簡単な構造のモデルを図5に示す。3関節3自由度の指をワイヤ1本で屈曲させる劣駆動機構のため、アクチュエータが指1本につき1つで済み、軽量化が見込める。また断面変形ばねを伸展側に配して対向させる構造としている。線形特性でなく、定トルク特性であるが故に、指の曲げ角度による把持力の損失を軽減することが期待できる。

4. 適応的把持

適応的把持とは、ここでは図6に示すように指全体で物体にアプローチし馴染むように把持する動作のことを指す。物体との接触面積を増すことができ、安定した把持が可能と考えられる。

この動作は、MP関節、PIP関節、DIP関節の順に関節を屈曲させることで達成できる。しかしながら劣駆動機構はその特性上、各関節をアクティブに動作させることができない。よってここでは、各関節に生じるワイヤ張力による屈曲トルクと、断面変形ばねによる伸展トルク、また、重力の影響も考慮し、ロボットハンドの

姿勢によらずに動作を達成させる条件について考える。

図7に簡略モデルを示す。指が伸展している状態を表わしており、これを初期状態とする。図7より、関節にかかる重さを m_i 、重心から関節までの距離を L_{m_i} とすると、重力により関節に発生するモーメント M_{m_i} は、

$$M_{m_i} = m_i \cdot L_{m_i} \quad (1)$$

と表わされる。

図1に示した断面変形ばねのモデルより、関節に発生するモーメントを M_{f_i} 、チューブの復元力を f_{θ_i} 、中心点から作用点までの距離を l_{f_i} とすると、

$$M_{f_i} = f_{\theta_i} \cdot l_{f_i} \quad (2)$$

腱の引張により各関節に発生する屈曲モーメントを図8に示す。腱張力を T とし、関節角度 θ に依存する関節と腱との距離を $l_{w(\theta)_i}$ とすれば、

$$M_{T_i} = l_{w(\theta)_i} T \quad (3)$$

で表わされる。

ここからは初期状態から下向き(重力方向)へ屈曲する姿勢の場合を考える。初期状態では断面変形ばねの力によって指を完全に伸展できなければならない。よって前提として、

$$\begin{cases} |M_{f_M}| > |M_{m_M}| \\ |M_{f_P}| > |M_{m_P}| \\ |M_{f_D}| > |M_{m_D}| \end{cases} \quad (4)$$

である。

また、各関節まわりのモーメントは、 $M_{m_i} + M_{T_i} = M_{f_i}$ で釣りあうため、次のように書き表すことができる。

$$\begin{cases} M_{T_M}(\theta_M) = M_{f_M}(\theta_M) - M_{m_M} \\ M_{T_P}(\theta_P) = M_{f_P}(\theta_P) - M_{m_P} \\ M_{T_D}(\theta_D) = M_{f_D}(\theta_D) - M_{m_D} \end{cases} \quad (5)$$

MP, PIP, DIP 関節の順に屈曲させるには、

$$\begin{cases} M_{f_P}(\theta_P=0) - M_{m_P} > M_{f_M}(\theta_M=\pi/2) - M_{m_M} \\ M_{f_D}(\theta_D=0) - M_{m_D} > M_{f_P}(\theta_P=\pi/2) - M_{m_P} \end{cases} \quad (6)$$

となる必要がある。ここで、断面変形ばねが定荷重ばね特性であるとする、

$$\begin{cases} M_{f_M}(\theta_M=0) = M_{f_M}(\theta_M=\pi/2) = M_{f_M} \\ M_{f_P}(\theta_P=0) = M_{f_P}(\theta_P=\pi/2) = M_{f_P} \\ M_{f_D}(\theta_D=0) = M_{f_D}(\theta_D=\pi/2) = M_{f_D} \end{cases} \quad (7)$$

とすることができるので、

$$M_{f_D} - M_{m_D} > M_{f_P} - M_{m_P} > M_{f_M} - M_{m_M} \quad (8)$$

であれば良いことがわかる。

同様の手順により、上向き(反重力方向)へ屈曲させる場合の条件も求めると、

$$M_{f_D} + M_{m_D} > M_{f_P} + M_{m_P} > M_{f_M} + M_{m_M} \quad (9)$$

また、向きにかかわらず、

$$M_{f_D} > M_{f_P} > M_{f_M} > M_{m_M} > M_{m_P} > M_{m_D} \quad (10)$$

を満足している必要がある。

(8), (9), (10)式を満たすよう断面変形ばねを選択することで、適応的把持動作の実現が可能となる。

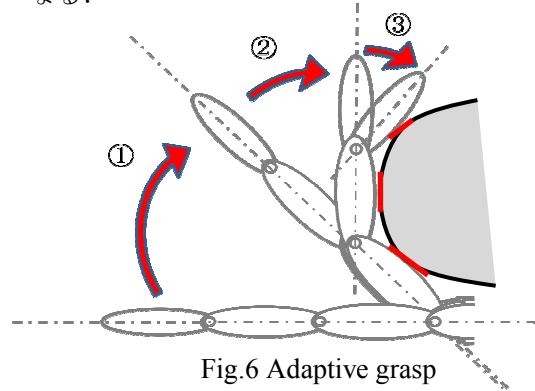


Fig.6 Adaptive grasp

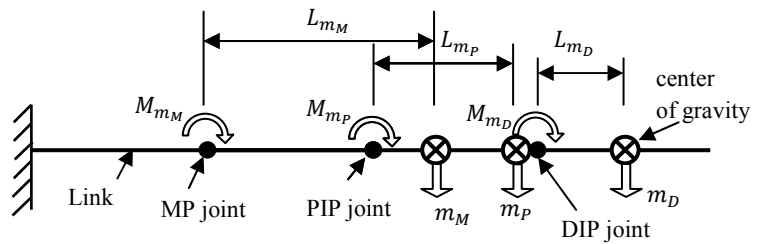


Fig.7 The simple model of three links

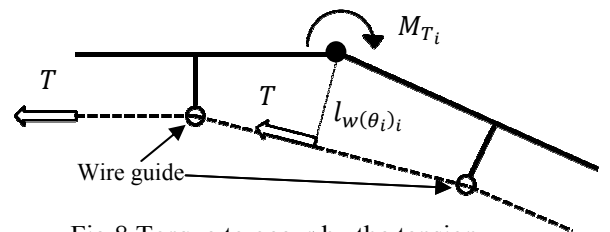


Fig.8 Torque to occur by the tension

5. 断面変形ばねの選定

試作した指のパラメータを表 1 に示す. 表 1 のパラメータと, (8-10)式の条件により, 断面変形ばねを選定する. 手順は以下の通りである.

- ① $M_{f_M} > M_{m_M}$ となる M_{f_M} の決定.
- ② $M_{f_P} > M_{f_M} - M_{m_M} + M_{m_P}$ となる M_{f_P} を決定.
- ③ $M_{f_D} > M_{f_P} - M_{m_P} + M_{m_D}$ となる M_{f_P} を決定.
- ④ $M_{f_i} = f_{\theta_i} \cdot l_{f_i}$ より, チューブの復元力 f_{θ_i} を求める.

以上より求めた断面変形ばねのパラメータを表 2 に, 表 2 のパラメータを元に実際に選定した断面変形ばねの特性グラフを図 9 に示す.

MP 関節については, 初期状態である屈曲角度 45deg 時の値で選択すると, 指を屈曲させた後に再び指を伸展させる力が足りなくなる恐れがあるため, 指を 90deg 屈曲させた場合の座屈角度(135deg)の復元力をもって選択する. PIP, DIP 関節に関しては, 重力によるモーメントを明らかに上回るため, 45deg 時の値で選択している. また, 関節部で生じる摩擦等の影響が考えられるため, マージンを取った値を用いて条件を満たすか再計算をしている.

Tab.1 Design parameter of the finger prototyped

	MP joint (For 3 links)	PIP joint (For 2 links)	DIP joint (For 1 link)
m_i	31.2	19.1	8
L_{m_i}	60	35	15
M_{m_i}	18.36	6.56	1.18

Tab. 2 The parameter of required CSDS

	MP joint	PIP joint	DIP joint
M_{f_i}	21 [Nmm]	36[Nmm]	45 [Nmm]
l_{f_i}	15 [mm]	15 [mm]	15 [mm]
f_{θ_i} (Selection angle)	1.4 [N] (135[deg])	2.4 [N] (45[deg])	3[N] (45[deg])

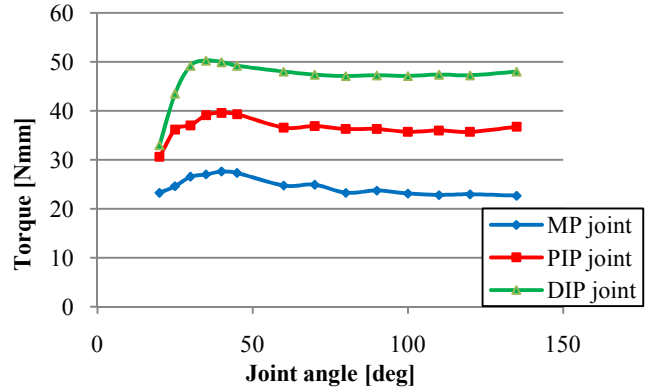


Fig.9 The characteristic of selected CSDS

6. 適応的把持の実現

試作した指について, 重力方向, 反重力方向, 水平方向へ屈曲動作させ, MP, PIP, DIP 関節の順に屈曲し, 適応的把持動作を達成するか確認する.

指をクランプによって垂直に配置し, ワイヤを引くことにより屈曲させる. 指が伸展した状態から屈曲するまでの様子を屈曲方向に対し垂直な位置からカメラで撮影した.

指の屈曲の様子を図 10-12 に示す. 全ての場合において MP, PIP, DIP 関節の順に屈曲しており, 目標とする適応的な把持の動作を再現できることが確認された.

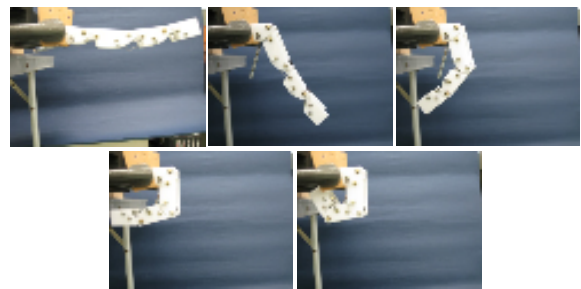


Fig.10 Flexing to the gravity direction



Fig.11 Flexing to the antigravity direction

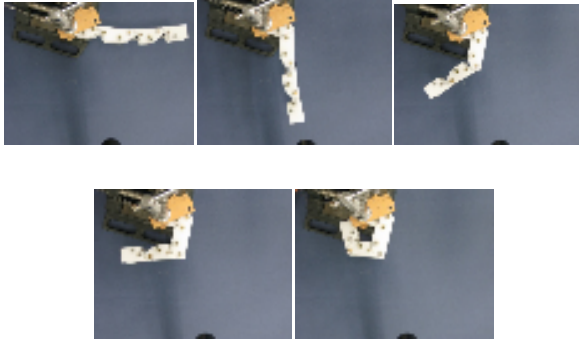


Fig.12 Flexing to the horizontal direction

7. 結言

本論文では断面変形ばねを利用した劣駆動型指機構の動作設計を行った。そしてこの設計により得られた条件を満たす断面変形ばねを選択し、動作実験を行った。提案する適応的把持動作が重力の影響に関わらず実現され、このことにより今回の動作設計が妥当なものであることが確認された。

参考文献

- [1] 山野直哉, 高椋慎也, 正細田耕 “馴染み把持を実現する劣駆動人間型ロボットハンドの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’08 予稿集, Vol. CD-ROM, No. IA1-A11, 2008.
- [2] Alejandro HERNANDEZ ARIETA, Wenwei YU, Masaharu MARUISHI, Hiroshi YOKOI, Yushinori KAKAZU “Integration of a Multi-D.O.F. Individual Adaptable with Tactile Feedback for an EMG Prosthetic System”, Intelligent Autonomous Systems 8, pp.1013-1021, 2004
- [3] 広瀬茂雄: 生物機械工学, 工業調査回(1987)