

断面変形ばねを用いた劣駆動型指機構の開発とロボットハンドへの応用

Development of underactuated finger mechanism using Cross-sectional deformation spring and application to robot hand

○金 大輔, 石垣 光暁, 齋藤 直樹, 佐藤 俊之
○Daisuke Kon, Mitsuaki Ishigaki, Naoki Saito, Toshiyuki Sato

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科
機械知能システム学専攻 金大輔, Tel.:0184-27-2217, Fax.:0184-27-2188, E-mail:M14A007@akita-pu.ac.jp

1. 緒言

近年, より人間に近い環境で働くロボットの活躍が期待され, その中で, ハンドというデバイスは, 非常に重要な要素である.

次世代産業用ロボットのマニピュレーションには軽量のデバイスであることが求められており^[1], そこで我々は軽量のロボットハンドを実現する手段として劣駆動機構に着目した. 劣駆動機構とは, システムの自由度に対して入力が少ないシステムのことをいい, ロボットハンドの軽量化に特に有効なアプローチであると考えられる^{[2][3]}.

劣駆動機構において, ロボットハンドの動作を最小のアクチュエータ数で実現する構成は弾性要素とアクチュエータの出力を拮抗させる方式が考えられる^[2]が, 線形特性の弾性要素では屈曲するごとにバネは伸び, 伸展力は強くなってしまふ. つまり指の屈曲に伴い, アクチュエータで発生させる力が大きくなるということである. さらにこれを複数関節で連動させる場合, 駆動するアクチュエータの出力はさらに大きなものとなる可能性がある.

そこで本研究では高分子素材のチューブに切込を入れた構造で, 特徴的な角度 - トルク特性をもつ断面変形ばね^[4]を指の伸展動作に適用したロボットフィンガを開発した. 本報告では劣駆動機構のもつ受動性を生かして適応的把持を達成する動作設計の有用性を, 実験を通して確認し, ロボットハンドへの応用に関して考察する.

2. 断面変形ばね

断面変形ばね (CSDS) の外観とトルクを発生させる仕組みを図 1 に示す.

断面変形ばねとは, ポリウレタン等の高分子素材のチューブに切込を入れた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, 図 2 のように曲げ中心の断面が半円筒から板状に変形する. この時の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. この断面変形ばねのトルク特性は図 3 に示すような素材, 切込深さ,

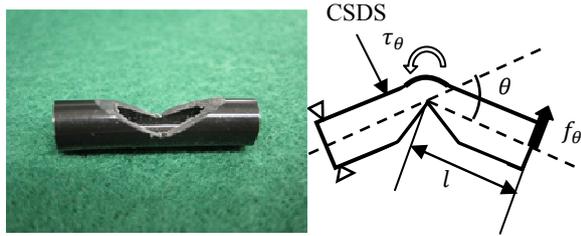


Fig.1 Cross-sectional deformation spring (CSDS)



Fig.2 State of the transformation

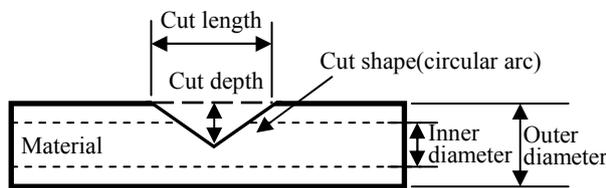


Fig.3 Parameter of CSDS

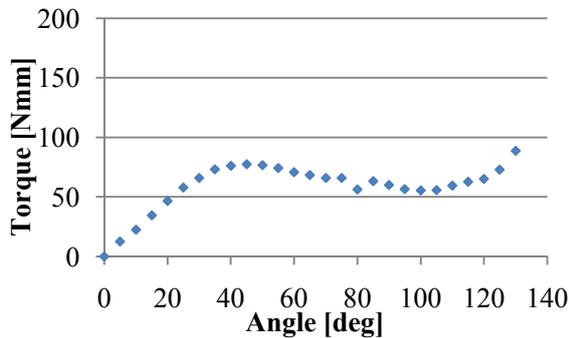


Fig.4 The torque characteristic of CSDS

切込形状、外径といったパラメータによって変化する。例として、図4に外径6mmのポリウレタンで切込深さ50%、切込形状が三角形に加工した断面変形ばねのトルク特性を示す。このように発生トルクは曲げ角度の増加とともに増加し、ピークを迎え、その後減少するという特性を示す^[4]。

3. 指関節機構の設計

断面変形ばねの特性を利用したロボットハンドの指関節機構の動作設計について示す。

劣駆動型ロボットハンドは各関節をそれぞれ

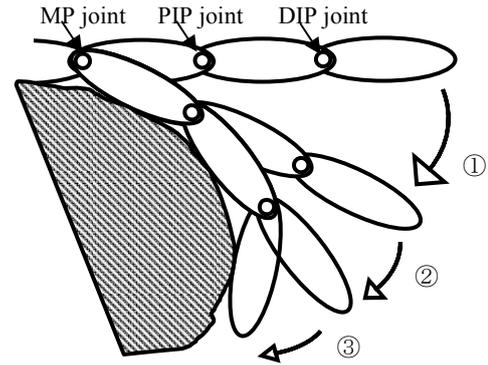


Fig.5 Adapted grip operation

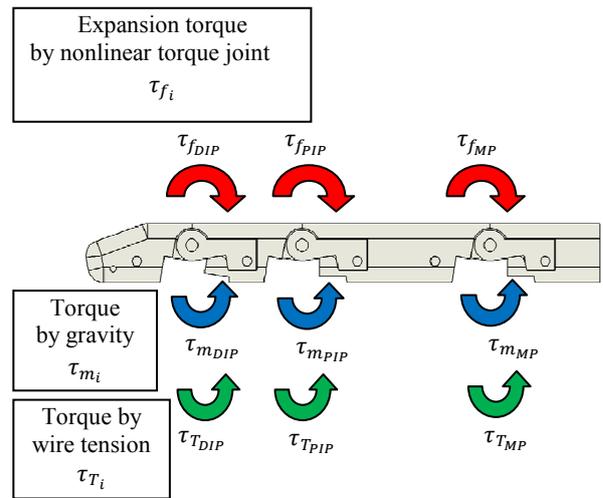


Fig.6 Torque which occurs on a finger

れ独立して動かすことができない。そして、各関節の動作は関節を伸展させる力に依存する。つまり関節を伸展させる力をそれぞれ設定することで、関節の動作を設計することが可能である。ここで、動作設計の一つの指針として適応的把持を採用する。適応的把持の動作を図5に示す。この把持動作は根元側の関節から順に屈曲することで受動的に物体形状に沿う把持動作が可能となる。

この動作順を決定するのは各関節に働くトルクバランスであり、断面変形ばねの選定が重要となる。ここでは3つの関節を持つ指を想定した力学モデルより、適応的把持動作を行うための条件式を求める。各関節は図6のように、重力によるトルク τ_{m_i} 、断面変形ばねによる伸展トルク τ_{f_i} 、ワイヤ張力によるトルク τ_{T_i} が発生する。この3つのトルクバランスを考慮し、適応的把持の条件を求める。

図6のように指が完全に伸展した状態を初期状態とすると、初期状態では完全に伸展するために、

$$\begin{aligned} |\tau_{fM}| &> |\tau_{mM}| \\ |\tau_{fP}| &> |\tau_{mP}| \\ |\tau_{fD}| &> |\tau_{mD}| \end{aligned} \quad (1)$$

を満たす必要がある。

初期状態から重力方向に屈曲する場合を考えると、各関節のトルクは、

$$\tau_{m_i} + \tau_{T_i} = \tau_{f_i} \quad (2)$$

で釣り合うため、MP, PIP, DIP 関節の順に屈曲させるためには、

$$\tau_{fP}(\theta_P=0) - \tau_{mP} > \tau_{fM}(\theta_M=\pi/2) - \tau_{mM} \quad (3)$$

$$\tau_{fD}(\theta_D=0) - \tau_{mD} > \tau_{fP}(\theta_P=\pi/2) - \tau_{mP}$$

となる必要がある。ここで、断面変形ばねが定トルク特性と仮定すると、

$$\tau_{fD} - \tau_{mD} > \tau_{fP} - \tau_{mP} > \tau_{fM} - \tau_{mM} \quad (4)$$

と表すことができる。

同様に反重力方向に屈曲する場合の条件を求めると、各関節のトルクが

$$\tau_{m_i} - \tau_{T_i} = \tau_{f_i} \quad (5)$$

で釣り合うため、MP, PIP, DIP 関節の順に屈曲させるためには、

$$\tau_{fD} + \tau_{mD} > \tau_{fP} + \tau_{mP} > \tau_{fM} + \tau_{mM} \quad (6)$$

であればよい。また、屈曲方向にかかわらず十分条件として

$$\tau_{fD} > \tau_{fP} > \tau_{fM} > \tau_{mM} > \tau_{mP} > \tau_{mD} \quad (7)$$

を満たす必要がある。式(4), (6), (7)の全て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が可能となる。

4. 試作による実験と評価

4-1. 基本構成

試作したロボットハンド指部の外観を図7に、表1に各部重量と重心距離を示す。

ワイヤにより屈曲し、各関節に配した断面変形ばねによって伸展する劣駆動機構となっている。寸法や関節可動範囲は成人男性の平均的な指の値に準じるが、今回は都合上、長さのみ

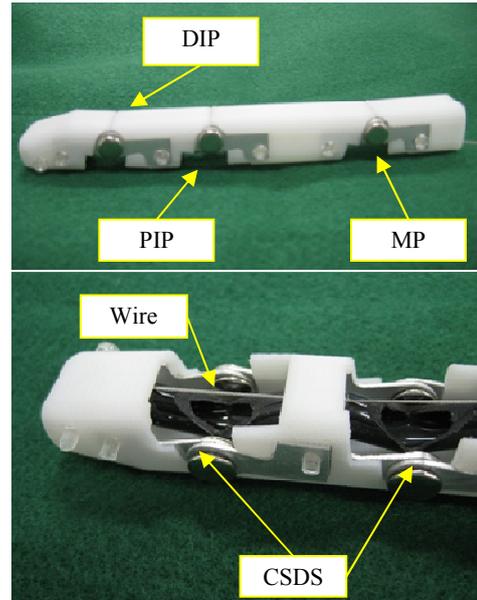


Fig.7 CSDS Robot Finger

Table 1 Finger parts weight

	DIP	PIP	MP
Weight (g)	5.77	12.40	20.74
Joint - Gravity point (mm)	18	36	70
Torque by gravity (Nmm)	1.01	4.37	14.22

1.2 倍大きくしている。フィンガ 1 本の重さは 20.74g となった。

4-2. 断面変形ばねの選定

式(4), (6), (7)の条件より、断面変形ばねを選定する。手順は以下の通りである

(1) $\tau_{fM} > \tau_{mM}$ となる τ_{fM} を決定する。

(2) 式(4), (6), (7)より

$$\tau_{fP} > \tau_{fM} - \tau_{mM} + \tau_{mP} \quad (8)$$

$$\tau_{fP} > \tau_{fM} + \tau_{mM} - \tau_{mP} \quad (9)$$

となる τ_{fP} を決定する。

(3) 式(4), (6), (7)より

$$\tau_{fD} > \tau_{fP} - \tau_{mP} + \tau_{mD} \quad (10)$$

$$\tau_{fD} > \tau_{fP} + \tau_{mP} - \tau_{mD} \quad (11)$$

となる τ_{fD} を決定する。図8に選定した断面変形ばねのトルク特性を、表2に選定した断面変形ばねのパラメータを示す。

図 8 において、断面変形ばねは伸展トルクの変動の少ない 45deg~135deg を使用範囲として使用する。また各関節の伸展トルクは 45deg の時の値で選定すると、指を屈曲させた後に再び伸展させる場合に伸展力が足りなくなる恐れがあるため、伸展トルクの最小の値をもって選定している。

5. 実験と評価

5-1. 動作実験

導出した条件式で適応的把持の動作を達成できるのか実験的に確認する。ロボットフィンガをアクチュエータに接続し、動作実験を行った。今回はアクチュエータとして空気圧シリンダを使用し、ワイヤと空気圧シリンダをつなぎ、シリンダへ 10s 毎に圧力を増加させて印加する。ワイヤ張力はひずみゲージで、関節角度はカメラで撮影した画像解析によって、それぞれ取得した。図 9 に重力方向屈曲の指の動作履歴を、図 10 に実験より得られた関節角度とワイヤ張力の関係を示す。

図 9 より、根元側の関節から順に屈曲し、適応的把持の動作を実現できていることが確認できる。図 10 より、4N までの張力増加で MP 関節が 0~100deg まで屈曲する。この時、PIP、DIP 関節は屈曲していない。次に 5N までの張力増加で PIP 関節が 0~100deg まで屈曲し、最後に 12N までの張力増加で DIP 関節が 0~90deg まで屈曲する。

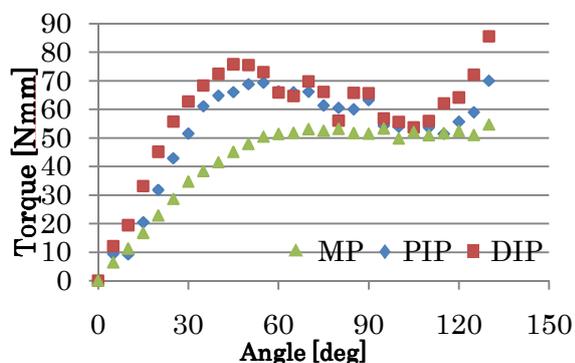


Fig.8 Characteristic of CSDS

Table 2 Selected CSDS

Joint	DIP	PIP	MP
Material	Polyurethane	Polyolefin	Nylon
Diameter	8	8	6
Cut depth	50%	50%	50%

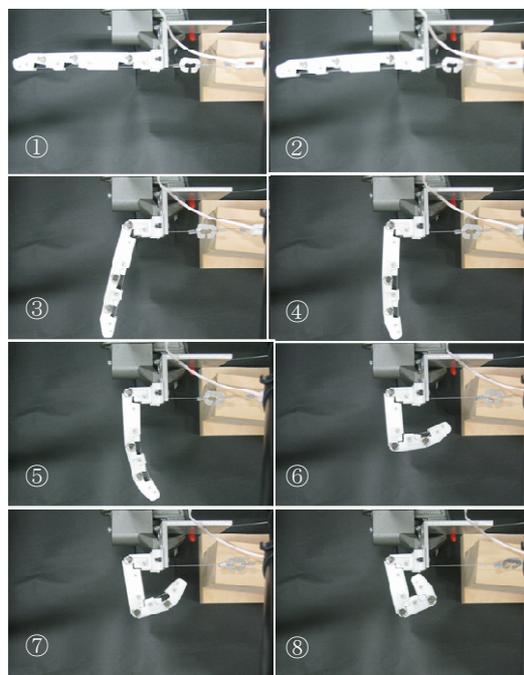


Fig.9 The result of an experiment

実験の結果、指が完全に屈曲するのに必要な張力は 12N 程度であった。

5-2. 屈曲時のアクチュエータ出力の評価

ここで、フィンガを屈曲させるために必要な張力をトーションバネによる機構と比較した。指の重量は同じとし、重力によるトルクを考慮し、式(4), (6), (7)を満たすように市販されているトーションバネを用いて選定した。選定したトーションバネのパラメータを表 3 に示す。図 11 にトーションバネを用いたフィンガの関節角度変位に対する腱張力を示す。図 11 より、はじめ 7N までの張力増加で MP 関節が 0~100deg まで屈曲する。この時、PIP、DIP 関節は共に屈曲していない。次に 20N までの張力増加で PIP 関節が 0~100deg まで屈曲し、最後に約 120N までの張力増加で DIP 関節が 0~90deg まで屈曲する。

図10と図11より、本フィンガはトーションバネを用いたフィンガと比較すると、約10分の1の力で屈曲可能であることがわかる。これより指を屈曲させるためのアクチュエータ出力を低減することができ、より小型・低出力のアクチュエータで動作させることができると考えられる。

6. ロボットハンドへの応用

断面変形ばねを用いたロボットフィンガを応用した劣駆動ロボットハンドを図12に示す。劣駆動機構を採用した本ロボットハンドでは指を屈曲させるために必要な力と、把持力として発生させる力が一つのアクチュエータにより出力される。断面変形ばねを劣駆動機構と組み合わせることで、指を屈曲させるためのアクチュエータの出力を低減することができ、より大きな把持力の発揮が期待できる。

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い、適応的把持の条件を満たす断面変形ばねを選択し、動作実験を行った。動作実験の結果、提案する適応的把持動作が屈曲方向に関わらず実現され、条件式の妥当性を確認した。またロボットフィンガの屈曲時のアクチュエータ出力の評価よりアクチュエータの出力を軽減可能であることを確認した。

今後は設計したロボットハンドにおいて、把持実験を行い、様々な形状の物体把持について検証を行っていく。

Table 3 Parameter of torsion spring

Joint	DIP	PIP	MP
Spring constant [N/mm]	0.38	1.92	12.84
Initial force [N]	1.44	5.76	30.82

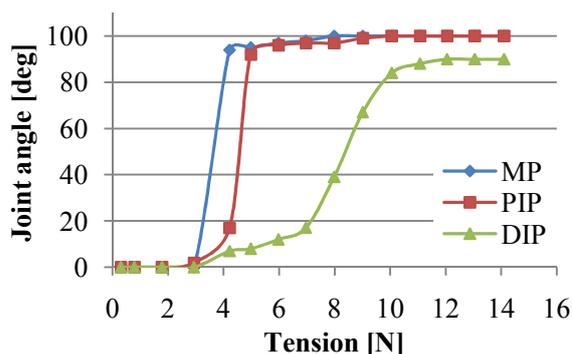


Fig.10 Extension force and joint angle of CSDS finger

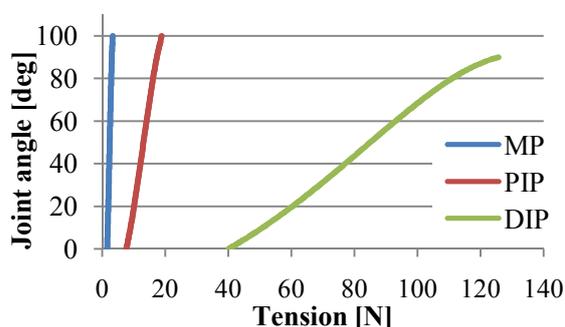


Fig.11 Extension force and joint angle of torsin spring finger

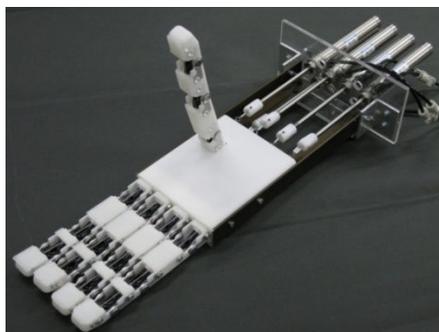


Fig.12 Appearance of CSDS Robot hand

参考文献

- [1] 経済産業省, ロボット分野の技術戦略マップ
- [2] Skyler A. Dalley, Thoumas E. Wiste, Thomas J. Withrow, and Michael Goldfarb, "Design of a Multifunctional Anthropomorphic Prosthetic Hand With Extrinsic Actuation", IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS. Vol. 14, No.6 (2009)
- [3] 神川康久, 前野隆司, "ヒトの把持力分布を模倣した5指なじみ把持機構を有する義手の開発", 日本機械学会論文集 (C編) 74 巻 746号(2008)
- [4] 石垣光暁, 齋藤直樹, 佐藤俊之 "断面変形ばねと定トルク関節機構の提案", No.11-5 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 講演概要集, 1A1-J01, 2008.