解 説

閉ループ弾性体による瞬発力発生機構

Impulse Force Generator based on Closed Elastica

望 山 洋^{*1} 山 田 篤 史^{*2} 藤 本 英 雄^{*2} ^{*1}筑波大学 ^{*2}名古屋工業大学Hiromi Mochiyama^{*1}, Atsushi Yamada^{*2} and Hideo Fujimoto^{*2} ^{*1}University of Tsukuba ^{*2}Nagoya Institute of Technology

1. 序：カメレオンの呪縛

そのときボスは、いつものようにトレードマークの長い顎鬚をなでながら軽く言い放った。

「カメレオンロボットを作れないかな？ カメレオンの舌のように遠くの獲物をパッと捕まえられのような画期的なものを。」

「は、はあ。」

カメレオンが舌を射出する加速度は50[G]である。これをコンパクトな機械で実現することは、容易ではない。火薬、ゴム、空気圧、…。手段を選ばずあらゆる角度から模索したが、コンパクトな高速捕獲マシンのアイデアは見つからない。

そんなある日、どうしてそのイメージが頭の中に思い浮かんだのであろうか？ 最近ではあまり見かけないプラスチックの下敷きが、両手の間でたわみベコベコと鳴りながら動いている様子が、頭の中に突然現れた。

「あっ。」

プロトタイプの製作には一日とかならなかった。帯状の弾性体の一端には自由関節としての蝶番、もう一端はモータ軸に固定された。たわんだ弾性体の中央部付近に、ピンポン球を軽く固定しておいた。制御プログラムを実行するとモータが回転した。たわんで横倒のC字型になっていた帯状弾性体は、モータの回転によって、そのボディをゆっくりとS字に変形している間、バチッ、という音とともに唐突に逆向きのC字型に姿を変えた。ピンポン玉は投げ飛ばされ、勢いよく天井にぶつかり、あらぬ方向に跳ね返った。

2. Closed Elastica

筆者らが提案している閉ループ弾性体 (Closed Elastica) による瞬発力発生機構は、弾性体の飛び移り座屈を利用す

図1 Shape transition of Closed Elastica

る。その基本型の形状遷移の様子を図1に示す。閉ループ弾性体は、帯鋼やアクリルプレート、カーボクロスプレートなど、ある程度の弾性を有する带状弾性体と二つの回転関節で構成される。回転関節の一方はモータで駆動される能動回転関節であり、もう一方は受動回転関節である。带状弾性体の両端は、それよりも短い一定の軸間距離を持つように配置された二つの回転軸にそれぞれ固定されるので、初期状態でたわんでいる。この状態から能動回転関節を駆動すると带状弾性体はS字形状に変形し、弾性エネルギーを蓄える。ある臨界形状を越えると、带状弾性体は飛び移り座屈を生じ、初期形状と対称の形状へと急激に変形する。この急変形によって、瞬発力を得ることができる。閉ループ弾性体で得られる瞬発力は、带状弾性体の飛び移り座屈を利用するため、座屈を発生させるために使用するモータの駆動速度にはほとんど依存しない。また、回転関節を一方に駆動させるだけで弾性エネルギーの貯蓄と放出がなされるため、蓄えられた弾性エネルギーを放出するための特別なトリガ機構を必要としない機構的な簡便さが特徴である。連続体を含んでいるが機構がシンプルであるがゆえ、理論的な取り扱いも可能であり、変分法を用いた静力学モデリング[24]や、準静的解析による形状遷移シミュレーション[3]を行うこともできる。ロボティクスにおいて、閉ループ弾性体は連続体ロボット (Continuum Robot) [25] の好例として位置づけられる。

原稿受付 2011年4月13日

キーワード: Flexible Robot, Impulse Force, Snap-through Buckling, Catapult

^{*1}〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1

^{*2}〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

^{*1}Tsukuba-shi, Ibaraki

^{*2}Nagoya-shi, Aichi

表 1 閉ループ弾性体の機構のバリエティ

番号	文献	種類	運動空間	駆動関節数	駆動方向切替	特徴
1	[1]	基本型	平面	1	要	片端駆動でシンプルな機構
2	[2] [3]	基本型	平面	2	要	両端駆動で M 字形状を経て座屈
3	[6] [7]	固定型	平面	1	要	片端を固定する最もシンプルな機構
4	[4] [5]	半固定型	平面	1	要	非駆動関節に回転制限付きフリージョイントを利用
5	[4] [5]	アーム型	平面	1	要	駆動関節軸と弾性帯をリンクで接続
6	[8]	半折れ型	平面	1	要	回転制限付きフリージョイントで 2 つの弾性帯を連結
7	[9]	尖状型	平面	2	要	直線性の高い高加速度の並進運動を生成
8	[4] [5]	アーム + 半固定型	平面	1	要	高い繰り返し周波数で片方向に瞬発力生成
9	[11] [12]	アーム + 固定型	平面	1	要	高い繰り返し周波数で片方向に瞬発力生成
10	[14]	アーム + 固定型	平面	1	不要	モータの一方回転を片方向繰り返し瞬発力に変換
11	[17]	基本型	空間	2	要	曲げ変形と捩れ変形を伴う回転型飛び移り座屈を生成
12	[18] [19]	アーチ型	空間	2	不要	モータの一方回転を繰り返し瞬発トルクに変換
13	[20] [21]	アーチ型	空間	1	不要	1 つのモータで繰り返し瞬発トルクを生成
14	[21]	非対称アーチ型	空間	1	不要	関節軸オフセットによる角運動量の調節
15	[22]	尖状型	空間	2	不要	尖状部が大きく動作
16	[15]	数珠型	平面	1	要	マイクロビーズとアクチンバンドルの直列構造
17	[16]	ねじりばね直列型	平面	1	要	メートル級大型装置向けで大瞬発力生成

3. 振：あるドクター学生の苦悩

残された時間は限られていた。起死回生の策で、研究テーマを Closed Elastica に変えた。しかし、これを発展させる新たなアイデアが浮かばない。もしかすると、発展性のない研究テーマなのか。それとも自分が研究者に向いていないのか。いろいろなことが頭によぎる。研究は進まない。

そんなある日、どうしてそのような手の動かし方をしたのだろうか？ 何とはなしに 10 センチほどの長さの焼き入れリボンを両手でもってぐねぐねとぐねらせていた瞬間、目の前のたわんだ弾性体がぐるっとねじれながらパチッと音を立て、素早く裏返し U 字形状になった。

「あっ。」

プロトタイプの製作には一日とかならなかつた。带状弾性体を U 字状にして、その両端をそれぞれモータの回転軸に取り付ける。ただし、いつもと取付の向きを変えて、モータの軸方向と、带状弾性体の長手方向とを合わせておく。二つのモータが互いに逆方向に回転すると、带状弾性体が捩れてゆっくりと M 字型に変形したかと思うと、突然くると裏返しになり、もとの U 字型に戻る。それはまるで、バスケットボールのチェストパスをするときの腕の俊敏な動きのようであった。早速、共同研究者の教員のもとへ走った。いつもダメ出しばかりの不機嫌そうな顔が、チェストパスの動きを見た瞬間、にわかに明るくなった。

「これって、どうやって思い付いたの？」

4. 豊富な機構のバリエティ

閉ループ弾性体の魅力は、何と言っても、シンプルな機構

でありながら豊富なバリエティがあることである。筆者らがこれまでに提案している閉ループ弾性体を表 1 に示す[†]。

たわませた带状弾性体の両端を二つの回転関節に取り付けた機構が基本型であるが、両方の関節をそれぞれ逆向きに駆動させると、弾性体は M 字形状を経て飛び移り座屈を生じ、弾性体中央部において直線性の高い俊敏な動作が得られる。固定型 [6] [7] は、非駆動関節を固定する、最もシンプルな機構である。半固定型 [4] [5] は、非駆動関節を回転制限付き自由関節とする機構であり、形状遷移サイクルの中に基本型と固定型の動作が混在する。

このように、関節に対する拘束により様々な機構が得られるが、带状弾性体への工夫によっても、機構に多様性を付与することができる。アーム型 [4] [5] は、带状弾性体と駆動関節を、剛体アームを介して結合する機構であるが、带状弾性体の一部の弾性を高くすることに相当し、モータの駆動範囲を小さくして繰り返し周波数を高めたい場合に用いられる。半折れ型 [8] は、带状弾性体の途中に回転制限付きの自由関節を設ける機構であり、形状遷移サイクルの初期状態に戻る過程において带状弾性体が折れ曲がることにより、一方の瞬発力発生を犠牲にして繰り返し周期を短縮できる。片方向のみに瞬発力が繰り返し要求される用途に適している。尖状型 [9] は、2 枚の带状弾性体を尖状になるように繋ぎ合わせた弾性体を用いる機構であり、両端駆動により弾性体は S 字と逆 S 字を貼り合わせたような複雑な形状を経て、飛び移り座屈に至る。直線性の高い、高加速度の並進運動を生成できる。

関節に対する工夫と、带状弾性体に対する工夫は、併用することも可能である。アーム + 半固定型 [4] [5]、あるいはアーム + 固定型 [11] [12] はその典型であり、高い繰り返し周波数で片方向の瞬発力を発生させることができる。ま

[†] 現時点での視点で分類を行っているため、開発時点での呼称と必ずしも一致しない。文献を参照する際は注意が必要である。

た、揺動クランクスライダ機構の導入により、モータの駆動方向の切り替えなしに、繰り返し瞬発力を発生することも可能である [14].

前章で紹介したように、モータの軸方向と帯状弾性体の長手方向が合うように、たわませた帯状弾性体の両端を二つの回転関節に取り付けると、弾性体の運動空間が二次元平面内に収まらない空間タイプの基本機構となる [17]. 空間タイプを特徴づけるのは、帯状弾性体が曲げのみならず、ねじりの変形を伴う回転型の飛び移り座屈が生じ、瞬発トルクが得られる点である. 実はこの空間基本型では、帯状弾性体の初期形状はU字型であるが、飛び移り座屈を繰り返し生じさせるためには、二つのモータの回転方向を切り替える必要がある. ところが、モータの回転軸を傾けてU字の口を広げたような初期形状の機構にすると、モータを一方方向に回転し続けるだけで飛び移り座屈が繰り返し生じる. これが空間アーチ型 [18] [19] であり、繰り返し周波数の高い瞬発トルクを得ることができる. しかも駆動する関節は片方だけでもよいことが確認されている [20] [21]. さらに駆動関節と非駆動関節の軸方向位置のオフセットにより、瞬発トルクが生成される際の角運動量を調節できることが明らかにされている [21]. 空間尖状型は、尖状弾性体の両端をねじることによって飛び移り座屈を生じさせる機構であり、尖状部が閉ループ構造を潜って大きく動作する点が特徴である [22].

以上の機構は、帯状弾性体の長さがおおよそ数センチから数十センチの範囲で機能する. これよりも極端にサイズが小さい場合や、逆に極端に大きい場合には、まったく異なる機構が求められる. 数珠型 [15] は、飛び移り座屈を利用した瞬発力発生機構をマイクロサイズで発現させるために開発された機構であり、実際には、分子モータの F_1 -ATPase に固定された、マイクロビーズとアクチンバンドルで構成される長さ約 $10\text{ }\mu\text{m}$ の弾性閉ループ構造を製作し、飛び移り座屈の生成に成功している. 一方、ねじりばね直列型 [16] は、物体投擲装置のために開発されたメートルサイズの機構であり、大瞬発力を発生させることができる.

5. Wild Robot Project

筆者らは、科学研究費補助金により「連続体ロボティクスに基づく動物に匹敵する俊敏性の機械実現」(基盤研究(B) 22360100, 平成 22~24 年度)の研究を推進している. この研究プロジェクトを、正式名ではないが、Wild Robot Project とよんでいる. ロボットは Wild には成り得ないが、野生動物のような機敏な動作が可能なロボットという意味を込めている. ロボットに瞬発力を付与する閉ループ弾性体は、この Wild Robot Project におけるキーテクノロジーである.

これまでに開発した Wild Robot の代表例を表 2 に示す. 平均 1 [m/s] の速度でジグザグ走行をする跳躍移動ロボッ

図 2 Kikker climbing a stair quickly

図 3 Impulsive Swimmer turning impulsively in water

表 2 閉ループ弾性体を利用した Wild Robot の代表例

番号	文献	ロボット名称	対照動物	機構	モビリティ	運動性能
1	[18] [19]	Elastica Jumper	コオロギ	空間アーチ型	陸上	1 [m] ジャンプ・ 1 [m/s] ジグザグ走行
2	[13]	Robotic Jerboa	トビネズミ	アーム + 固定型	陸上	瞬時直進 1.5 [m/s] ・旋回 11.5 [rad/s]
3	[14]	Robotic Kikker	カエル	アーム + 固定型	陸上	階段登り 0.7 [s/step]
4	[10]	Quick Capturing Robot	カメレオン	尖状型	陸上	0.3 [m] 離れた対象物の高速捕獲
5	[6] [7]	Kick-swimming Robot	アメンボ	固定型	水上	平均 $1.4\text{ [body length/s]}$
6	[21]	Impulsive Swimmer	アユ	空間非対称アーチ型	水中	旋回 2.4 [rad/s]
7	[22]	Flat Kick-swimming Robot	ヒラメ	空間尖状型	水中	瞬時 2 [body length/s]
8	[23]	Winged Kikker	モモンガ	アーム + 固定型	陸上 → 空中	自力で高所から離陸し滑空

ト [18] [19], 瞬時 11.5 [rad/s] の旋回能力を有する跳躍移動ロボット [13], 1 段あたり 0.7 [s] で階段を上ることのできる跳躍移動ロボット [14] (図 2), 2.4 [rad/s] の水中旋回能力を有する遊泳ロボット [21] (図 3) など, 卓越した運動能力を有する小型ロボットの開発に成功している. カメレオン型的高速捕獲も実現している [10]. 現在, 高い空中モビリティの実現へ研究を展開中である [23].

6. 結: カメレオンの果てに...

我々は一連の成果に満足していた. そのことはボスにも伝わると期待していた. しかし, ボスの表情は変わらない. そしてボスは, いつものようにトレードマークの長い顎鬚をなでながら, こう言い放った.

「次は鯉の滝登りロボットを作れないかな? 滝に逆らって登っていくような画期的な泳ぐロボットを。」

「えっ?!」

研究は続く...

参 考 文 献

- [1] H. Mochiyama, M. Watari and H. Fujimoto: "A Robotic Catapult based on the Closed Elastica and Its Application to Robotic Tasks," Proc. of IROS07, pp.1508–1513, 2007.
- [2] A. Yamada, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "Kinematics and Statics of Robotic Catapults based on the Closed Elastica," Proc. of IROS07, pp.3993–3998, 2007.
- [3] 山田篤史, 望山洋, 藤本英雄: "閉ループ柔軟カタパルトの静力学解析", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.2, pp.169–177, 2008.
- [4] 山田篤史, 渡正充, 望山洋, 藤本英雄: "跳躍ロボットのための非対称型閉ループ柔軟カタパルト", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.4, pp.363–371, 2008.
- [5] A. Yamada, M. Watari, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "An Asymmetric Robotic Catapult based on the Closed Elastica for Jumping Robot," Proc. of ICRA 2008, pp.232–237, 2008.
- [6] 山田篤史, 渡正充, 望山洋, 藤本英雄: "高剛性受動関節を有する閉ループ柔軟カタパルトと遊泳ロボットへの応用", 日本ロボット学会誌, vol.27, no.10, pp.1144–1153, 2009.
- [7] A. Yamada, M. Watari, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "A Robotic Catapult Based on the Closed Elastica with a High Stiffness Endpoint and Its Application to Swimming Tasks," Proc. of IROS 2008, pp.1477–1482, 2008.
- [8] A. Yamada, M. Watari, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "A Robotic Catapult Based on the Closed Elastica with an Anisotropic Stiffness Point and Its Application to Compact Jumping Robots," Proc. of CLAWAR 2008, pp.397–404, 2008.
- [9] 渡正充, 山田篤史, 望山洋, 藤本英雄: "尖状弾性柔軟部を有する閉ループ柔軟カタパルト", SI2008 講演論文集, pp.1181–1182, 2008.
- [10] 渡正充, 山田篤史, 望山洋, 藤本英雄: "尖状部を有する弾性閉ループ構造を用いた高速捕獲動作", ROBOMECH2009 講演論文集, 2A2-G09(1/3), 2009.
- [11] T. Tsuda, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "A Compact Kick-and-Bounce Mobile Robot powered by Unidirectional Impulse Force Generators," Proc. of IROS09, pp.3416–3421, 2009.
- [12] T. Tsuda, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "The Compact Kick-and-Slide Robot powered by Unidirectional Impulse Force Generators," Proc. of CLAWAR10, pp.229–236, 2010.
- [13] T. Tsuda, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "Robotic Jerboa: A Compact Bipedal Kick-and-Slide Robot powered by Unidirectional Impulse Force Generators," Proc. of IROS10, pp.2523–2524, 2010.

- [14] 津田剛志, 望山洋, 藤本英雄: "一方向回転駆動による繰返し片方向瞬発力発生機構", SI2010 論文集, pp.1463–1466, 2010.
- [15] H. Fujimoto, A. Yamada, H. Mochiyama, A. Sumino, K.V. Tabata, T. Dewa, M. Nango and H. Noji: "Challenge to Micro-Scale impulsive Force Generator," Proc. of the Second World Congress International Academy of Nanomedicine (IANM) NANOMED 2010, p.107, 2010.
- [16] 市川泰久, 望山洋, 藤本英雄: "物体投擲のためのねじりばねの直列構造に基づく瞬発力発生装置", 日本ロボット学会誌, vol.29, no.1, pp.47–54, 2011.
- [17] 山田篤史, 渡正充, 望山洋, 藤本英雄: "柔軟物の飛び移り座屈を利用したロボットマニピュレーション", SI2007 論文集, pp.631–632, 2007.
- [18] A. Yamada, H. Mamed, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "A Compact Jumping Robot utilizing Snap-through Buckling with Bend and Twist," Proc. of IROS 2010, pp.389–394, 2010.
- [19] A. Yamada, H. Mamed, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "A Compact Jumping Robot Based on Continuous Snap-through Buckling for Hybrid Environment," Proc. of CLAWAR 2010, pp.245–252, 2010.
- [20] A. Yamada, H. Mamed, Y. Sugimoto, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "An Impulsive Turning Mechanism for Swimming Robots Based on Repeated Snap-through Buckling," Proc. of CLAWAR 2010, pp.253–260, 2010.
- [21] A. Yamada, Y. Sugimoto, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "An Impulsive Force Generator Based on Closed Elastica with Bending and Distortion and Its Application to Swimming Tasks," Proc. of ICRA 2011, pp.957–962, 2011.
- [22] 今井翔太, 望山洋: "閉ループ弾性体による瞬発力発生機構を用いた薄型キック遊泳ロボット", ROBOMECH2011 講演論文集, 2A1-K02 (1/4), 2011.
- [23] 井上誠, 望山洋: "有翅跳躍ロボット", ROBOMECH2011 講演論文集, 2A1-K03 (1/4), 2011.
- [24] 望山洋: "閉ループ弾性体のロボット理論: 変分法からのアプローチ", SI2009 論文集, pp.636–639, 2009.
- [25] B. Siciliano and O. Khatib (eds.): Handbook of Robotics, Section 11.8: Hyperredundant manipulators. pp.261–265, Springer, 2008.

望山 洋 (Hiromi Mochiyama)

1998 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了. 防衛大学校, 名古屋工業大学を経て, 2007 年筑波大学大学院システム情報工学研究科准教授, 現在に至る. 博士 (情報科学). (日本ロボット学会正会員)

山田篤史 (Atsushi Yamada)

2008 年名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程修了. 同年同大学特任助教, 現在に至る. 柔軟物を用いたロボティクス, 画像誘導手術の研究に従事. 博士 (工学). (日本ロボット学会正会員)

藤本英雄 (Hideo Fujimoto)

1970 年名古屋大学工学部機械工学科卒業. 現在名古屋工業大学教授. 工学博士. スケジュール学会会長, 文部科学省科学技術学術審議会文化資源委員会委員, 愛知県ものづくり人材育成協議会座長, 日本ロボット学会理事など歴任. 日本機械学会フェロー. (日本ロボット学会正会員)