解 説

ヘビ型ロボット

—生物の模倣から生物を超えたロボットへ—

Snake-like Robot

— Super-biological Robots and Imitative Biological Robots —

松 野 文 俊* *東京工業大学

Fumitoshi Matsuno* *Tokyo Institute of Technology

1. は じ め に

私は蛇が嫌いである。怖いのである。見るのも嫌である。しかし、ヘビロボットの研究をしている。ヘビロボットには魅力を感じる。その魅力を紹介しよう。

では、まず象の鼻のような多関節マニピュレータと蛇のような多関節ロボットについて考えてみよう。どちらも自由度がたくさんあって冗長なロボットである点は共通している。その冗長自由度を巧みに使って様々なタスクを実現できる。また、リンク間の干渉など問題点もよく似ている。では、両者の違いは何であろうか？ 象の鼻は象の胴体に付いていて環境に固定されていると見なせる。したがって、象は足を使って移動し、鼻で移動したりはしない。足は移動、鼻はマニピュレーションと機能分割されている。

一方、蛇は足を持っていない。蛇に足をつけると「蛇足」というが、本当に役に立たないかどうかは分からない。実は蛇足は有用で役に立ち、ヘビに足を付けた蛇足ロボットが素晴らしい機能を発揮できるかもしれない（この記述こそ蛇足かもしれない）。それはさておき、何もしなければ環境に固定されない蛇は、象の鼻にはなれないのか？ イヤイヤ、蛇は体の一部で木に絡みついたりして環境との固定点を作り出し、マニピュレータ的な動作をする。では、蛇は移動できないであろうか？ 蛇は立派に移動する。体全体に波を作ってうねりながら走行する。平坦な環境だけでなく不整地もまったく苦にしない。象は足と鼻の両方を使っても木に登れないが、蛇は走行だけではなく、木登り・谷渡し走行・木から木への飛び移り・物へのからみつきなど様々な機能を有している。蛇は機能分割されたメカニズムにはなっていない。同じような部分が単純に連結してできているだけで、その部分単体だけではほとんど何の機能も持たない。しかし、その単純で低機能な部分をたくさん連結することで、移動やマニピュレーションなど、すばらし

い機能を創出する。蛇はすばらしい。

象のような足による歩行では、足は環境との摩擦の力を借りて、その反力で胴体を移動させる。蛇は足がないのにどのようにして推進するのであろうか？

2. ヘビ型ロボットの研究の流れ

蛇の歩容に関する生物学的観点からの研究は古くからなされておき、四つの歩容モード（serpentine, side-winding, concertina, rectilinear）があることが知られている [1]～[4]。しかし、工学的に蛇の歩容を実現しようという試みはそれほど古くはない [5]。世界で最初にヘビ型ロボットを実現したのは、広瀬らである [6] [7]。広瀬らは、実際の蛇を飼育して、その推進運動を観察し、蛇が体幹方向と体幹に垂直方向の摩擦の差を利用して推進していることを見出し、そのメカニズムをいかにして工学的に実現するかを考えた。その結果、受動車輪をもつボディーを関節で結合することにより蛇をモデル化し、体幹方向には摩擦が少なく、体幹に垂直な方向には摩擦が大きい、蛇の摩擦特性をもつメカニズムを開発した。この車輪付きリンク機構の各関節に位相差を持つ正弦波を入力することにより、うねり走行が可能であることを開発したヘビ型ロボットにより明らかにした [6] [7]。そして、蛇が推進する際に描く蛇行曲線をサーペノイド関数として定式化した。蛇は足がないものの、体全体で摩擦力を受け止め反力を得ているのである。

広瀬らのこの研究以来、ヘビ型ロボットはその冗長性を活かし、災害現場などで生存者を探索したり、宇宙における複雑な作業空間での作業を行ったり、狭く細長い配管内を調査するロボットとして、世界的に注目を集めている。ヘビ型ロボットはその冗長性を利用して環境に適応し、移動形態を変化させることにより複雑な環境下での推進を可能とする。ヘビ型ロボットの持ちうる移動形態として、図 1 に示すように、車輪拘束型、尺取り虫型、リング型など、多様な形態が提案されている [8]～[11]。

最近では、コンパクトなユニットを結合させ、多様な移動形態を生成でき、さらに分離・再結合が可能で、非常にフレキシブルなモジュラーロボットも開発されている [12] [13]。

原稿受付 2002 年 2 月 25 日

キーワード: Snake-like Robot, Locomotion, Unit Design, Hyper-redundant System

*〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259

*Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa

図1 ヘビ型ロボットの多様な移動形態

図2 プロトタイプシステムのユニット

このように様々なヘビ型ロボットが開発されてきたが、本質的に広瀬ヘビのメカニズムを超えたアイデアは出ていないように思える。広瀬研ではそのフロンティアとしての精神は脈々と続いており、現在も精力的にヘビ型ロボットの開発がなされている。近年開発された ACM-R3 [14] は三次元運動を可能としたヘビ型ロボットであり、ラジコンによるマニュアル操作で自立的に動き、見る者はその動きのしなやかさに驚かされる。さらに驚かされるのは、巧みなジョイスティックさばきでヘビを操るオペレータである。

なぜ、蛇は足がないのに推進できるのか？ の疑問に広瀬らは明快な答えを示してくれた。しかし、蛇自身がどのように動きを生成して推進しているのか？ の疑問は完全には解き明かされてはいない。最近になり、ヘビ型ロボットを自律的に動かすこと、すなわち、自動制御することにも興味をもたれ、研究がなされ始めた。Burdickら [15]、Chirikjianら [16] は蛇のサイドワインディング走行の運動学について議論している。Ostrowskiらは微分幾何学の手法を用いて、ヘビ型ロボットの運動などを含むノンホロノミックシステムに対する可制御性の性質を解析している [17]。また、Maは受動車輪による速度拘束を前提としない、摩擦力を陽に表現したモデルを提案し、動力学シミュレータを開発している [18]。しかし、これらの研究では、制御系の構成については議論されていない。

制御のアプローチとして、Prauteschらは二次元平面上を運動する車輪型ヘビロボットに対して動力学モデルを導き、リアプノフの方法によってヘビ先頭の位置決めができるフィードバック制御則を提案した [19]。しかしながら、ロボットが特異姿勢である一直線や円弧の状態に収束してしまうという問題点を抱えていた。この問題に対して、星らは動的可操作性の概念を車輪型ヘビロボットに適用し、それを増大化させるようにヘビ先頭の位置に対する目標値をサンプリングごとに与える手法を提案した [20]。また、Dateらは受動車輪の受ける横拘束力に着目し、車輪型ヘビロボットの横拘束力を最小化することにより受動車輪が横滑りする危険性を軽減する制御則を提案した [21]。Saitoらは車輪

のないヘビ型ロボットに対する非線形摩擦モデルを導出し、エネルギー効率の観点からうねり推進の解析を行い、準線形化入力変換に基づいた制御器を提案している [22]。小野らは関節にばね機構を搭載した車輪型ヘビロボットに対して、関節の入力トルクに関節角度の正帰還を行い、自励振動を発生させることにより、高速な推進を実現した [23]。また、我々もユニットの概念に基づいた車輪型ヘビロボットの設計と冗長性を活かして様々なタスクを実現する制御則について研究している [24]。

3. ユニット 構成

さて、多様な移動形態を持つ三次元冗長ヘビ型ロボットの実現を考えた場合、拡張性・耐故障性・メンテナンス性が重要となる。これらの特性を持たせるためには、ユニットを複数連結することによりロボットを構築することが有効である。ユニットとはシステムを構成する最小単位で、冗長ヘビ型ロボットをユニット化することにより、先の三つの必要条件を満足することができる。

- 拡張性：基本ユニットが複数連結することにより全体を構成しているので、その後の分離や再構成が可能である。また、基本ユニット以外のユニット、例えばエンドエフェクタなどを容易に取り付けることができる。
- 耐故障性：一部のユニットが故障した場合でも、ほかのユニットが補うことにより、ロボット全体としての機能が完全に停止する危険性が少ない。
- メンテナンス性：一部のユニットが故障した場合でも、そのユニットを新しいユニットに交換することにより、迅速な修理が可能である。

我々の研究室で開発した三次元冗長ヘビ型ロボットのユニットを図2に示す [11]。ユニットの基本部品の素材には超ジュラルミンを使い軽量化を計った結果、大きさが $82 \times 82 \times 67$ [mm]、本体重量が 300 [g] と小型・軽量のユニットが実現できた。ユニットには関節が一つあり、体幹と直角方向に1自由度を有する。関節を駆動するアクチュエータとしてステッピングモータを用いており、関節の位

図3 体幹ねじりによるV字型移動

置制御あるいは速度制御が可能である。このユニットの大きな特徴は、それぞれのユニットの回転軸を同一方向にする結合と 90° のオフセットを持たせる結合とが可能となっている点で、適当なユニットにオフセットを持たせて結合することにより三次元空間を運動する超冗長移動ロボットの構成が可能となる。さらにユニットにオプションで、車輪拘束型移動用の受動車輪を取り付けることができる。

4. ねじり動作による推進

ユニット構成の特徴として耐故障性をあげたが、その一例として駆動軸が 90° ずれた二つのユニットのみで実現可能な、体幹ねじりによる移動について説明しよう。この二つのユニットのみを使って体幹ねじりを行う移動をV字型移動と呼んでいる。V字型移動とは、ロボットの体幹がある関節で折れ曲がり、その折れた部分をねじることにより移動する形態である。図3のようにリンク L_1 と L_2 の間の関節を J_1 、リンク L_2 と L_3 の間の関節を J_2 とする。リンク L_1 と L_2 は θ_d の相対角を持ち、リンク L_2 と L_3 は一直線であるとし、関節 J_1 の回転軸 z_1 と関節 J_2 の回転軸 z_2 は 90° のオフセットを持っているとする。関節 J_1 を z_1 軸周りの正方向に、関節 J_2 を z_2 軸周りの負方向に回転させる (state 1) と、リンク L_1 は滑らず、関節 J_2 が持ち上がり (state 2)、ロボットの体幹が 90° ねじられる (state 3) と、関節 J_2 が前方へ移動したことになる [11]。この移動形態は、推進する際に使う関節は少ないので、ユニットの一部が故障して動かなくなった場合にも、残りの関節を利用して移動することにより、目的地点まで到達可能となる。その移動実験の結果を図4に示す。

5. 拘束と冗長性

さて、本章では象の鼻 (マニピュレータ) とヘビ型ロボットの運動学に基づいて、拘束と冗長性について考えてみたい。ベースリンクが環境に固定されたマニピュレータの場合、マニピュレータの関節変数ベクトル θ とマニピュレ

図4 V字型移動モードによる推進実験

ータの手先位置・姿勢ベクトル p には

$$p = f(\theta) \quad (1)$$

の関係があり、運動学方程式は

$$\dot{p} = \frac{\partial f}{\partial \theta} \dot{\theta} = J(\theta) \dot{\theta} \quad (2)$$

となる。マニピュレータが冗長であるとは手先の自由度 ($\dim p = 6$) よりマニピュレータの関節数 ($\dim \theta$) のほうが多いことである。では、ヘビ型ロボットの運動学はどうであろうか？ 鎌首をもたげた車輪型ヘビロボットの先頭リンクの位置・姿勢ベクトル w は、環境に接している受動車輪による速度拘束式 (車輪は横滑りしない) を用いると

$$A(w, \theta) \dot{w} = B(w, \theta) \dot{\theta} \quad (3)$$

と表現される。ただし、 θ はヘビ型ロボット全体の関節変数ベクトルであり、 $\dim w = 6$ とする。ヘビ型ロボットの運動学方程式 (3) において、 $A = I$ と行列 A が単位行列の場合には、式 (3) はロボットマニピュレータの運動学方程式 (2) に等価となり、式 (3) は式 (2) を含んでいることが分かる。このことは、ヘビ型ロボットの尻尾 (最終尾リンク) が環境に固定され、車輪拘束がなければ、ヘビ型ロボットの運動学はマニピュレータと同じになることを意味している。持ち上がっていないヘビ型ロボットのリンクのうち受動車輪を取り付けたリンクの数を m 、ヘビ型ロボット全体の関節数を n とすると、式 (3) の行列 A は $m \times 6$ 、行列 B は $(m+3) \times n$ となる。ヘビ先頭の運動である $\dot{w}$ を与えた場合に、行列 B が正則であれば、関節速度は $\dot{\theta} = B^{-1} A \dot{w}$ と一意に決まってしまう。このことは、ヘビ先頭の位置・姿勢に関して関節変数は冗長自由度がな

いことを意味している。したがって、ヘビ型ロボットに対する冗長性は従来のマニピュレータに対応する冗長性（冗長性 1）

ヘビ先頭の位置・姿勢の自由度 $\leq$ 関節の数
だけでなく、新たな冗長性（冗長性 2）

方程式の数（= 車輪の数 + 3） $<$ 関節の数
を導入する必要がある。このことは、持ち上がっていないリンクの受動車輪の数を減らすこと、すなわちヘビ型ロボットと環境との接触点を減らすことが、冗長性 2 を増加させることを意味している。冗長性を活かすことにより、ヘビ先頭の位置・姿勢の制御だけでなく、特異点回避・障害物回避・転倒回避など様々なサブタスクが実現できる [24]。

6. お わ り に

ヘビ型ロボットは生物の蛇を模倣することにより開発されてきた。生物の機能を工学的に実現することには意義があり、その重要性を何ら否定するものではないが、模倣からは本物を超える何かは生まれてこないように感じられる。生物の持っている機能を工学的に理解して確かめることと、生物を参考に生物が持っているメカニズムに捕らわれることなく、その機能を工学的に実現することは、似通っているが、別のアプローチのように思う。その意味で、蛇に足を持たせることを直ちにナンセンスとはいいい切れないように思う。現状では、本物の蛇の機能を完全に達成できるヘビ型ロボットはまだ完成していない。しかし、本来の生物が持っている以上の機能を実現するロボットを開発することは重要である。生物模倣型ロボットの先には生物を超えたロボットがあるように思われる。また、ヘビ型ロボットの制御に関する問題は、やっと研究が始まったばかりであり、未解決問題が山積している状況である。今後の進展に期待したい。

なお、本解説で紹介した研究成果の一部は文部科学省科学研究費（東工大 COE 形成基礎研究費スーパーメカノシステム）によるものである。

参 考 文 献

- [1] J. Gray: "The Mechanism of Locomotion in Snakes," J. Exp. Biol., vol.23, pp.101-123, 1946.
- [2] J. Gray and H. Lissmann: "The Kinetics of Locomotion of the Grass-snake," J. Exp. Biol., vol.26, no.4, pp.354-367, 1950.
- [3] H. Lissmann: "Rectilinear Locomotion in a Snake," J. Exp. Biol., vol.26, no.4, pp.368-379, 1950.
- [4] J. Gray: Animal Locomotion. pp.166-193, Norton, 1968.
- [5] Y. Umetani and S. Hirose: "Biomechanical Study of Serpentine Locomotion," Proc. 1st RoManSy Symp., pp.171-184, 1974.
- [6] S. Hirose and Y. Umetani: "Kinematic Control of Active Cord Mechanism with Tactile Sensors," Proc. 2nd RoManSy Symp., pp.249-260, 1976.
- [7] S. Hirose: Biologically Inspired Robots (Snake-like Locomotor and Manipulator). Oxford University Press, 1993.
- [8] N. Takanashi, S. Yashima, K. Aoki and T. Nishizawa: "Com-

- plete Modular Links for Hyper Redundant Robots," Proc. COE Super Mechano-Systems Workshop '99, pp.108-113, 1999.
- [9] B. Klaassen and K. Paap: "GMD-SNAKE2: A Snake-Like Robot Driven by Wheels and a Method for Motion Control," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3014-3019, 1999.
- [10] K.-U. School, V. Kepplin, K. Berns and R. Dillmann: "Controlling a Multijoint Robot for Autonomous Sewer Inspection," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1701-1706, 2000.
- [11] T. Kamegawa, F. Matsuno and R. Chatterjee: "Proposition of Twisting Mode of Locomotion and GA based Motion Planning for Transition of Locomotion Modes of a 3-Dimensional Snake-like Robot," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2002 (to appear).
- [12] M. Yim, D. Duff and K. Roufas: "PolyBot: a Modular Reconfigurable Robot," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.514-520, 2000.
- [13] M. Yim, Y. Zhang and D. Duff: "Modular Robots," IEEE Spectrum, vol.39, no.2, pp.30-34, 2002.
- [14] M. Mori and S. Hirose: "Development of Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D Mobility," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1552-1557, 2001.
- [15] J. Burdick, J. Radford and G. Chirikjian: "A Sidewinding Locomotion Gait for Hyper-Redundant Robots," Advanced Robotics, vol.9, no.3, pp.195-216, 1995.
- [16] G. Chirikjian and J. Burdick: "The Kinematics of Hyper-Redundant Robotic Locomotion," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.11, no.6, pp.781-793, 1995.
- [17] J. Ostrowski and J. Burdick: "The Geometric Mechanics of Undulatory Robotic Locomotion," Int. J. of Robotics Research, vol.17, no.6, pp.683-701, 1998.
- [18] S. Ma: "Analysis of Creeping Locomotion of a Snake-like Robot," Advanced Robotics, vol.15, no.2, pp.205-224, 2001.
- [19] P. Praetesch, T. Mita and T. Iwasaki: "Analysis and Control of a Gait of Snake Robot," 電気学会産業応用部門論文誌, vol.120-D, pp.372-381, 2000.
- [20] 星, 三平, 古賀: "動的可操作性を考慮した多関節ヘビ型ロボットの自律推進制御", 日本ロボット学会, vol.18, no.8, pp.1133-1140, 2000.
- [21] H. Date, Y. Hoshi, M. Sampei and S. Nakaura: "Locomotion Control of a Snake Robot with Constraint Force Attenuation," Proc. American Control Conference, pp.113-118, 2001.
- [22] M. Saito, M. Fukaya and T. Iwasaki: "Serpentine Locomotion with Robotic Snakes," IEEE Control Systems Magazine, vol.22, no.1, pp.64-81, 2002.
- [23] 小野, 右手, 中島: "自動駆動ヘビ形推進機構に関する研究", 日本機械学会論文集, vol.68, 2002 (掲載予定).
- [24] 松野, 茂木: "冗長蛇型ロボットの運動学モデルに基づいた制御とユニット設計", 計測自動制御学会論文集, vol.36, no.12, pp.1108-1116, 2000.

松野文俊 (Fumitoshi Matsuno)

1986 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。大阪大学基礎工学部助手、神戸大学工学部講師、助教授を経て 96 年より東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授（知能システム科学専攻）となり、現在に至る。主に、ロボティクス・制御理論・レスキューシステムに関する研究に従事。89 年度本学会研究奨励賞、93 年度システム制御情報学会論文賞、97 年度消防防災科学論文賞（消防庁長官表彰）、2001 年度計測自動制御学会論文賞・武田賞などを受賞。IEEE、情報処理学会、GIS 学会などの会員、工学博士。（日本ロボット学会正会員）