螺旋尺取り方式を用いて円柱を移動するヘビ型ロボットの提案

亀川 哲志*・斉

偉**・五福 明夫*

A Proposal of Spiral Inchworm Gait for a Snake Robot Moving on a Cylinder

Tetsushi KAMEGAWA*, Wei QI** and Akio GOFUKU*

Hyper redundant snake robot systems have possibility of utilizing in many fields, although there are control complexity problems when attempting to climb obstacles. An example of the climbing obstacles by snake robot is helical rolling motion which have been used to climb a cylinder. However, helical rolling motion is not available to step over an obstacle on a cylinder such as a flange. In this paper we propose a new spiral inchworm gait, by simplifying a gait from a biological snake, which can be used to present an alternative gait to the helical rolling motion for pitch-yaw connected robotic snakes to climb obstacles. The shape of the robot under spiral inchworm motion is planned by using mathematical continuum curve model. Some experimental results are shown to verify the effectiveness of the spiral inchworm gait.

Key Words: snake robot, spiral inchworm gait, cylinder

1. はじめに

生物の蛇は単純な形態であるにもかかわらず、多様な移動形態を用いてさまざまな環境下を移動し、時には物体に巻き付いて対象物の把持や体の支持なども行なう。単純な形態でありながら多様なタスクを行なう蛇の特徴を模倣したロボットを開発することは大きな利点があると考えられており、ヘビ型ロボットの機構や動作原理、制御について数多くの研究がなされてきた。

これまでに、生物の蛇の移動時の蛇行曲線がサーペノイド曲線と呼ばれる曲線になることが解明され、さらに生物の蛇は体幹に対する接線方向と法線方向との摩擦差により推進しているとの知見に基づき、受動車輪を備えたヘビ型ロボットが作製されてロボットによる滑らかな推進が実現された¹⁾。また、それまで2次元平面上での動きに限られていたヘビ型ロボットの動作空間を3次元に拡張するために、ピッチ軸とヨー軸を交互に組み合わせて構築したヘビ型ロボットが作製され、多様な移動形態による移動が実現された^{2), 3)}。さらに、ヘビ型ロボットが円柱に巻きついた状態で螺旋捻転運動と呼

ばれる運動を行なうことにより、円柱の内部や外部といった3次元の環境を移動することが実現されている^{4)~6)}。

ヘビ型ロボットが配管や木などの円柱形状の環境に沿って移動し、点検や監視などの作業をするといった産業への応用が期待される。そのような実用を考えた場合、ヘビ型ロボットは円柱の径などの円柱形状の変化にある程度対応できることが望ましい。これまでに、螺旋捻転運動により円柱の径が大きく変化しない場合には適応的に螺旋の半径を調整して円柱上を移動するアルゴリズムは提案されている⁷⁾。しかしながら、産業用プラントの配管の外周に巻きついて移動する場合には、配管の継ぎ目にあるフランジを乗り越えるといった大きな段差を乗り越える必要がある。

そこで本研究では、生物の蛇が円柱形状の物体の上を移動する方法を参考にし、離散的に円柱を把持して体を支持し、把持する地点を順次送る動作を実現する螺旋尺取り方式をヘビ型ロボットの新たな移動形態として提案する。螺旋尺取り方式をヘビ型ロボットに実装する際には、ヘビ型ロボットのなす形状を連続曲線モデルで計画しておいて、それから離散折れ線モデルへ当てはめる手法^{8)~10)}を用いる。折れ線モデルへの離散化により連続曲線で計画した形状に対して多少の誤差が生じるが、本研究で用いるヘビ型ロボットのようなピッチとヨーの関節が交互に連結された構造は、離散化による形状の誤差が比較的小さいという知見が得られている⁹⁾。本稿では実際に螺旋尺取り方式を実装したヘビ型ロボットが円柱上の段差のある障害物を乗り越える実験を行ない、提案手法の有用性を確認した結果を示す。

* 岡山大学大学院自然科学研究科 岡山市北区津島中 3-1-1

** 内蒙古民族大学機械工程学院
中華人民共和国内蒙古自治区遼寧市霍林河大街 22 号

* Graduate School of Natural Science and Technology,
Okayama University, 3-1-1 Tsushimanaka, Kita-ku,
Okayama

** Mechanical Engineering, Inner Mongolia University For
The Nationalities, 22 Huolinhe St., Horqin, Tongliao, Inner
Mongolia, China

(Received March 29, 2014)

(Revised July 4, 2014)

Fig. 1 Overview of the experimental snake robot and its one unit

Fig. 2 Outline of the snake robot control system

2. ヘビ型ロボットの構成

本研究に用いるヘビ型ロボットの全体とロボットを構成するユニットを **Fig. 1** に示す。ヘビ型ロボットはピッチとヨーの関節をもつ 2 自由度のユニットを直列に連結して構築されている。関節駆動用のアクチュエータとして市販のサーボモーター (Dynamixel RX-28) を使用している。1 ユニットのサイズは長さ 0.145 m, 幅 0.050 m, 重量は 0.185 kg である。

ヘビ型ロボットのシステム構成を **Fig. 2** に示す。関節駆動用サーボモーター RX-28 にはモータ制御用の基盤が内蔵されており、制御用 PC から RS485 規格の通信で特定のコマンドを RX-28 に送信することで、ヘビ型ロボットの各関節の目標角度を個別に設定することができる。ヘビ型ロボットの最後尾にはスリッピングが取り付けられており、ヘビ型ロボットが捻転運動を行なってもコードが振れないようになっている。なお、ヘビ型ロボットのアクチュエータへは外部の安定化電源から 16 V の電圧が供給されており、最大で 3.70 Nm のトルクを発生できる。

3. 連続曲線モデルから目標関節角度の導出

本研究では、文献 8)~10) などで述べられている、ヘビ型ロボットの運動計画をする際にヘビ型ロボットの体幹形状を曲率と捩率を用いて連続曲線モデルとして表現する方法を採用する。その後、連続曲線で表現された体幹形状を離散化して、ヘビ型ロボットの各関節の目標角度を決定する。以下にその概略を説明する。

3.1 Frenet-Serret の公式による曲線の表現

ヘビ型ロボットを太さのない線とみなすと、その体幹形状は空間曲線とみなせる。ある空間曲線を $\mathbf{c}$ とおくと、空間曲

Fig. 3 Illustration of backbone curve

Fig. 4 Definition of $\psi(s)$

線 $\mathbf{c}$ の形状は、曲線の始点からの曲線の長さ (弧長) s に関する連続微分方程式として、Frenet-Serret の公式により曲率 $\kappa(s)$ と捩率 $\tau(s)$ によって以下のように与えられる。

$$\begin{cases} d\mathbf{c}(s)/ds &= \mathbf{e}_1(s) \\ d\mathbf{e}_1(s)/ds &= \kappa(s) \mathbf{e}_2(s) \\ d\mathbf{e}_2(s)/ds &= -\kappa(s) \mathbf{e}_1(s) + \tau(s) \mathbf{e}_3(s) \\ d\mathbf{e}_3(s)/ds &= -\tau(s) \mathbf{e}_2(s) \end{cases} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{c}(s) = (x(s), y(s), z(s))$ は曲線の座標を示すベクトルであり、 $\mathbf{e}_1(s), \mathbf{e}_2(s), \mathbf{e}_3(s)$ はそれぞれ正規直交基底をなす単位ベクトルで、 $\mathbf{e}_1(s)$ は曲線の接線方向、 $\mathbf{e}_2(s)$ は曲線が曲がる方向、 $\mathbf{e}_3(s)$ は $\mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2$ で与えられる方向のベクトルとして定義される。

3.2 背びれ曲線による表現

(1) 式で与えられる Frenet-Serret の公式では、ヘビ型ロボットに存在する背と腹の向きを考慮することができない。そこで、文献 9) において背びれ曲線と呼ばれる表現が提案されている。背びれ曲線では、**Fig. 3** に示すような背びれ座標系 (機体座標系) $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_p, \mathbf{e}_y$ を連続曲線とみなしたヘビ型ロボットに張り付ける。 $\mathbf{e}_r$ は曲線の接線方向の単位ベクトル、 $\mathbf{e}_p, \mathbf{e}_y$ はそれぞれピッチ軸方向とヨー軸方向の単位ベクトルである。これら機体座標系の基底ベクトルと定義により、空間曲線 $\mathbf{c}$ はつぎのように表わすことができる。

$$\begin{cases} d\mathbf{c}(s)/ds &= \mathbf{e}_r(s) \\ d\mathbf{e}_r(s)/ds &= \kappa_y(s) \mathbf{e}_p(s) - \kappa_p(s) \mathbf{e}_y(s) \\ d\mathbf{e}_p(s)/ds &= -\kappa_y(s) \mathbf{e}_r(s) + \tau_r(s) \mathbf{e}_y(s) \\ d\mathbf{e}_y(s)/ds &= \kappa_p(s) \mathbf{e}_r(s) - \tau_r(s) \mathbf{e}_p(s) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $\kappa_p(s), \kappa_y(s), \tau_r(s)$ は、それぞれピッチ軸回りの曲率、ヨー軸回りの曲率、ロール軸回りの捩率である。本研究で使用するヘビ型ロボットはピッチ軸、ヨー軸の二つの関節のみでロール軸は存在しないので $\tau_r(s) = 0$ となる。また、**Fig. 4** に示すように $\mathbf{e}_1(s) = \mathbf{e}_r(s)$ とし、 $\mathbf{e}_2(s), \mathbf{e}_p(s)$ のな

す角を $\psi(s)$ と定義すると,

$$\begin{cases} \mathbf{e}_p(s) = \mathbf{e}_2(s) \cos \psi(s) - \mathbf{e}_3(s) \sin \psi(s) \\ \mathbf{e}_y(s) = \mathbf{e}_2(s) \sin \psi(s) + \mathbf{e}_3(s) \cos \psi(s) \end{cases} \quad (3)$$

となるため, Frenet-Serret の公式で与えられる曲線と背びれ曲線の関係は次式ようになる.

$$\begin{cases} \psi(s) = \int_0^s \tau(s) ds + \psi(0) \\ \kappa_p(s) = -\kappa(s) \sin(\psi(s)) \\ \kappa_y(s) = \kappa(s) \cos(\psi(s)) \end{cases} \quad (4)$$

ここで $\psi(0)$ はねじれの初期値を意味する積分定数であり, 既知または任意の定数である. 従来の螺旋捻転運動ではこの値を変化させることで機体座標系が曲線に沿って回転するのでヘビ型ロボットは捻転動作を生じる. 本研究における実験では $\psi(0) = 0$ とする. (4) 式により, Frenet-Serret の公式で 3 次元空間内の曲線が与えられれば, その曲線を機体座標系での曲率 $\kappa_p(s)$, $\kappa_y(s)$ を用いて表わすことができる.

3.3 目標関節角度の導出

連続曲線モデルを機体座標系での曲率 $\kappa_p(s)$, $\kappa_y(s)$ を用いて表現した後に, これを離散化してヘビ型ロボットの各関節のなすべき相対角度を導出する.

ヘビ型ロボットの各リンクの長さを δs とすると, 曲率の定義より, 位置 s でのリンク間の相対角度は $\kappa_p(s)\delta s$ あるいは $\kappa_y(s)\delta s$ となる. 本研究で使用するヘビ型ロボットは奇数番目にピッチ, 偶数番目にヨーの関節がならぶ構造になっているので, ピッチ関節とヨー関節の間の距離を δs , 関節番号を $i = 1, 2, \dots$ とするとヘビ型ロボットの各関節の目標角度はつぎのように与えられる.

$$\begin{cases} \theta_p^d = \kappa_p(i\delta s)2\delta s & (i = 1, 3, 5, \dots) \\ \theta_y^d = \kappa_y(i\delta s)2\delta s & (i = 2, 4, 6, \dots) \end{cases} \quad (5)$$

ここで, θ_p^d はピッチ軸関節の目標角度, θ_y^d はヨー軸関節の目標角度である.

4. 螺旋尺取り形状の生成

4.1 生物の蛇の移動様式

文献 11) によると, 生物の蛇の一種であるコーンスネイク (別名アカダイショウ) は, 木の枝のような細い円柱上を移動する場合, Fig. 5 に示すような移動形態を見せる. 特に Fig. 5 の A のように, 蛇が円柱を垂直に上る場合には, 円柱に巻き付いて把持する場所 (図中の灰色の部分) を変えながら移動するようすがみとれる. この方法は, 蛇が円柱に巻きついて尺取り虫のように把持する箇所を順に移動させながら前進しているため, 本研究ではこのような移動形態を螺旋尺取り方式と名付けることとする. なお, 生物の蛇の場合は所望の方向へ前進する際に頭部は一定の方向を向いているが, 本稿ではヘビ型ロボットの先頭節の向きは考慮せず, 生物の蛇の体幹が円柱を離散的に把持して進行するというこののみを参考にする.

Fig. 5 The effects of perch incline on locomotor mode and movement. The tracings are from dorsal view videos of a corn snake (SVL=102 cm, mass=400 g, 4.1 cm perch) and show seven consecutive images at equal time intervals within a single cycle of concertina locomotion (A, B). The downhill sequence (C) is for the same total time as A. The shaded areas indicate static contact with the perch. (A) Uphill 90°. (B) Horizontal. (C) Downhill 90°. The times between successive images of B and C are 0.53 s, and 0.7 s for A. (cited from literature ¹¹⁾)

4.2 螺旋尺取り形状

螺旋尺取り形状をヘビ型ロボットがなすためには, 円柱を把持する部分と進行方向に体幹を進める部分とが交互に現れるようにすればよい. これを達成するための基本的な方針として, (1) 式の曲率 κ と振率 τ を一定値に設定した際に形成される常螺旋形状を基準として, 円柱を把持する部分では曲率 κ を大きく振率 τ は小さくし, それ以外の部分では曲率 κ を小さく振率 τ は大きくなるようにすればよい. Fig. 6 に提案する螺旋尺取り形状の一例を示す. このような特徴を再現すべく, まずはデカルト座標系において目標形状を設計することを考える. ここで, 目標形状はデカルト座標系において次式で与えられる.

Fig. 6 A shape of spiral inchworm in the case of $a=0.30$, $b=0.05$, $c=0.20$, $e=0.10$, $d=3$

$$\begin{cases} x = (a - b \sin ct) \cos t \\ y = (a - b \sin ct) \sin t \\ z = e(d \cos ct + t) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 a , b は螺旋半径を決定するパラメータ、 c は螺旋半径が変化する周期を決定するパラメータである。また、 d は曲線が z 方向に伸び縮みするときの送り幅を調整するパラメータ、 e は螺旋の z 軸方向の増加率である。なお、それぞれのパラメータは負の値をとらないものとする。 t は媒介変数である。

以下に、各パラメータの設定指針について述べる。(6)式により、Fig. 6に示すように z 軸まわりに螺旋曲線が形成され、螺旋半径は $(a-b)$ から $(a+b)$ の間で変化する。ロボットに螺旋尺取り形状を実装した場合、ロボットが円柱を把持する部分の螺旋半径は $(a-b)$ になり、ロボットが一番円柱から離れる部分の螺旋半径は $(a+b)$ になる。そこで、ヘビ型ロボットの体幹の半径 r_r 、把持する円柱の半径 r_c 、それと乗り越える障害物の高さ h が既知である場合、パラメータ a と b の値は以下の連立方程式を解くことにより得られ、ロボットに実装する際の目安が与えられる。

$$\begin{cases} a - b = r_c + r_r \\ a + b = r_c + r_r + h \end{cases} \quad (7)$$

つぎに、パラメータ c の設定指針について述べる。 c は巻き数に対する把持部の出現頻度とみなせるので、1より大きな値の場合は、把持部と伸展部がヘビ型ロボットが円柱に1周巻き付く間にどちらも出現することになり都合が悪い。さらに、巻き数 n (ただし $n > 1$)に対して、少なくとも $1/n$ 以上の値に設定しておかないと、ヘビ型ロボットが尺取り動作を行なう最中に円柱を把持する領域がなくなる場合が発生する。つまり、 c は、

$$\frac{1}{n} < c < 1 \quad (8)$$

の範囲で値を決定することになる。

つぎに、パラメータ d の設計指針について述べる。このパラメータは、伸展部の螺旋の送り幅に影響を与える。基本的には、伸展部において大きな送り幅であるほうが障害物の乗り越え時などにおいて望ましいと考えられるが、 d を大きな値に設定しすぎるとリンク同士が干渉する恐れが生じる。リンク間の干渉を防ぐためには、媒介変数 t に対する z 方向の増加率が常に正であればよい。すなわち、

$$\frac{dz}{dt} = e(1 - cd \sin ct) > 0 \quad (9)$$

の関係を常に満たすようにすればよいので、螺旋形状をなすために e は $e > 0$ に設定されることを加味すると、 $cd < 1$ という条件を満たす範囲でパラメータ d の値を決定すればよい。

最後に、パラメータ e についての設定指針について述べる。簡単のため、ヘビ型ロボットが円柱に常螺旋($b = 0, d = 0$)で巻き付いている場合を考える。今、ヘビ型ロボットを全長を L とし、半径 r の円柱に n 周巻き付かせることとすると、 $t = 2\pi n$ の範囲で螺旋形状が作られることになるので、円周方向の巻き付き量 $2\pi nr$ を底辺に、 z 方向の巻き付き幅 $2\pi ne$ を高さとする直角三角形の斜辺がヘビ型ロボットの全長 L になる関係から、三平方の定理より、

$$L^2 = (2\pi nr)^2 + (2\pi ne)^2 \quad (10)$$

となる。(10)式を e について解くことにより、 e の設定値の目安が得られる。

以上により、デカルト座標系において螺旋尺取り形状の設計をした後に、幾何学的な条件から次式により目標形状を曲率 κ と捩率 τ を使った空間曲線として表現することができる。

$$\begin{aligned} \kappa(t) &= \frac{\sqrt{(\dot{y}\ddot{z} - \dot{z}\ddot{y})^2 + (\dot{z}\ddot{x} - \dot{x}\ddot{z})^2 + (\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x})^2}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)^{3/2}} \\ \tau(t) &= \frac{x^{(3)}(\dot{y}\ddot{z} - \dot{z}\ddot{y}) + y^{(3)}(\dot{z}\ddot{x} - \dot{x}\ddot{z}) + z^{(3)}(\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x})}{(\dot{y}\ddot{z} - \dot{z}\ddot{y})^2 + (\dot{z}\ddot{x} - \dot{x}\ddot{z})^2 + (\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x})^2} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $\dot{x}$ や $\ddot{x}$ はそれぞれ x の t に関する1階微分と2階微分、 $x^{(3)}$ は x の t に関する3階微分である。ただし、(11)式により求めた螺旋尺取り形状をなす曲率 κ と捩率 τ は媒介変数 t を引数とする関数 $\kappa(t)$, $\tau(t)$ であることに注意されたい。ヘビ型ロボットの各関節の目標角度を求める際には、(1)式のFrenet-Serretの公式にあるように、曲線の長さ s の関数として $\kappa(s)$, $\tau(s)$ を求めなくてはならない。そこで、媒介変数 t と曲線の長さ s の関係を考慮して、 s に関する曲率 $\kappa(s)$ と捩率 $\tau(s)$ を以下に求める。

4.3 媒介変数 t と曲線の長さ s との関係

$t = 0$ のときを曲線の始点とし、そこから任意の媒介変数の値 $t = \theta$ の間の曲線の長さ s は線積分の公式から次式によって与えられる。

$$s(t) = \int_0^\theta \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz(t)}{dt}\right)^2} dt \quad (12)$$

(6)式を微分し、(12)式に代入すると次式が得られる。

$$s(t) = \int_0^\theta \sqrt{A^2 + b^2 c^2 B + C^2 e^2} dt \quad (13)$$

Fig. 7 Illustration of shift algorithm

ここで、 $A = a - b \sin(ct)$, $B = 1 - \sin^2(ct)$, $C = 1 - cd \sin^2(ct)$ である。(13) 式により媒介変数の値 t に対応する曲線の長さ $s(t)$ を求めることができるので、 s に関する曲率 $\kappa(s)$ と捩率 $\tau(s)$ は

$$\begin{aligned} \kappa(s(t)) &= \kappa(t) \\ \tau(s(t)) &= \tau(t) \end{aligned} \quad (14)$$

として求まる。

4.4 シフト制御による螺旋尺取り動作

(6) 式で計画した螺旋尺取り形状の軌道に沿ってヘビ型ロボットの形状が変化するようにシフト制御を導入する。ここでのシフト制御とは、計画された形状の軌道に沿うようにヘビ型ロボットの先頭位置が曲線の長さのパラメータ s の増加に伴い移動したと仮定して、各関節の目標値を s の値に応じて順次後方に送ることにより、ヘビ型ロボット全体の形状を変化させるものである。これにより、ヘビ型ロボットの形状は、事前に計画された螺旋尺取り形状の一部を切り取った形をなして逐次更新されることになる。なお、本稿においては、空間内に設定した形状の軌道と実際のロボット位置の軌跡との間の誤差のフィードバックなどは行なっておらず、事前に計画した軌道にロボットが追従している保証はない。

本研究では、下記のアルゴリズムによりシフト制御を実装している (Fig. 7 参照)。

- (1) 各関節ごとに曲率と捩率を一定量保持するキューを用意する。このとき、刻み幅 Δs をリンク長 l とキューのサイズ M に対して $\Delta s = l/M$ となるように設定する。
- (2) 螺旋形状に沿った移動速度の指令値 $\dot{s}$ に応じてロボットの先頭位置 s_h を更新する。ただし、本稿では移動速度は常に 0 以上の値とし、後退はしないものとする。
- (3) s_h が設定された刻み幅 Δs を超えたら、刻み幅の位置の曲率 $\kappa(s(t))$ と捩率 $\tau(s(t))$ を求めて第 1 関節のキューの先頭に保持する。また、キューの最後のデータをつぎの関節のキューの先頭に渡す。
- (4) 各関節はキューの最終要素を参照し、目標角度 θ^d を 3 章の手順で計算して関節を駆動する。

シフト制御により、第 1 関節以後の関節は第 1 関節と同じ関節角度に順次なっていくので、ロボットの形状は (6) 式で計画した連続曲線モデルに沿って再現され、前方から後方への形状を伝える運動が実現される。

また、ヘビ型ロボットは初期状態においてすべての関節が

角度 0 deg の一直線の状態であるが、シフト制御を用いて先頭関節から順次螺旋尺取り形状を成して後方の関節に目標角度を伝搬していくことで、ロボットの形状は初期状態から一気に螺旋尺取り形状に変形するのではなく、徐々に螺旋尺取り方式の移動形態へ推移させることができる。

5. 実験

5.1 シミュレーション実験

螺旋尺取り方式によるヘビ型ロボットの挙動を確認するために、物理計算エンジン ODE (Open Dynamics Engine) を用いて、ヘビ型ロボットに水平に置かれた円柱を移動させるシミュレーション実験を行なった。ヘビ型ロボットの各リンクは ODE においてカプセル形状で近似し、サイズや重量、また関節の構成は Fig. 1 の実機と同じになるようにモデルが構築されている。本実験では、ヘビ型ロボットは 9 ユニット (18 リンク) を連結した構成になっている。また、ヘビ型ロボットが移動する環境として、半径 0.057 m の円柱を ODE の中に用意した。ロボットと円柱との間の摩擦係数は 0.7 に設定されている。また、以下の実験において円柱への巻き数 n はロボットの全長と円柱半径のバランスを考慮して、 $n = 2.3$ と設定し、螺旋形状に沿った移動速度の指令値は $\dot{s} = 0.6 \text{ m/s}$ とした。

はじめに (6) 式のパラメータ a, b, c, d, e を 4.2 節の設計指針に基づいて導出し、その値を用いてシミュレーション実験を行ない、ヘビ型ロボットの挙動を確認した。まず、(7) 式において、 $r_c = 0.057$, $r_r = 0.025$, $h = 0.03$ とすると、 $a = 0.097$, $b = 0.015$ となる。また、 c については、(8) 式の範囲でなるべく小さな値を採用することとし、 $c = 0.435$ と設定した。 d については、(9) 式の範囲でなるべく大きな値を採用することとし、 $d = 2.29$ と設定した。 e については、(10) 式より、 $e = 0.038$ と設定した。このパラメータのセットを pattern A と呼ぶ。シミュレーションの結果を Fig. 8 の pattern A に示す。Fig. 8 は、円柱の中心軸方向に対するヘビ型ロボットの先頭リンクの重心位置の時間変化を表わしている。シミュレーション実験により、ロボットの平均移動速度は 0.10 m/s であり、ヘビ型ロボットは螺旋尺取り方式で円柱上を移動できたものの、把持部において十分な把持が達成されておらず、大きなすべりが生じて効率的な推進ができていないことが確認された。これは、円柱への巻き数が少ない場合には、尺取り形状変化の周波数を十分小さくすることができず、把持部でヘビ型ロボットが円柱を十分包み込む前に、形状を伸展させてしまうことが影響していると考えられる。

そこでつぎに、対象となる円柱の半径を実際より小さく見積もることにより、把持部で十分な把持を達成させることを考え、その効果をシミュレーションにより確かめた。ここでは、 $r_c = 0.050$ と円柱半径を実際より少し小さい値に仮定した。これにより、 a の値は $a = 0.090$ として設定される。そのほかのパラメータは pattern A と同じとなる。このパラメータのセットを pattern B と呼ぶ。シミュレーションの結果を

Fig. 8 の pattern B に示す. このときのロボットの平均移動速度は 0.21 m/s であった. さらに, このときのヘビ型ロボットの挙動を Fig. 9 に示す. Fig. 9 において, フレーム間の時間は 0.1 sec である. シミュレーション結果より, pattern B ではヘビ型ロボットは十分に円柱を把持しており, すべりが発生せずに効果的に螺旋尺取り方式で円柱上を移動できていることが確認された.

さらに, パラメータ c の値をなるべく小さくするのではなく, 少し大きめに設定した場合のヘビ型ロボットの挙動について確認する実験を行なった. ここでは, pattern A に対して, c の値を $c = 0.600$ と大きくとり, それに伴い d の値を $d = 1.67$ と小さくし, かつ円柱に十分把持するように a の値を $a = 0.080$ と調整した, pattern C について実験を行なった. その結果を Fig. 8 の pattern C に示す. このときのロボットの平均移動速度は 0.16 m/s であった. pattern C においては, 把持部が比較的高い頻度で出現するものの, リンク同士の干渉を防ぐために伸展部の螺旋の送り幅が小さくなり, 結果として平均移動速度は低くなった. しかしながら, 把持部が高い頻度で出現することは, 安定した螺旋尺取り移動, すなわち円柱からの滑落を防ぐことに寄与するため, 状況によって c ならびに d の値を適切に調整することが必要である.

また, 以上のシミュレーション結果のいずれにおいても, ロボットが螺旋尺取り運動で移動するとともに, 少しずつ捻転運動をしていることが観察された. これは, シフト制御により (6) 式で計画した螺旋尺取り形状に沿ってロボットの形状を変化させているので, (4) 式においてロボットの振率 τ を積分する影響のため, ロボットを曲線に沿って移動させるようにすると結果として捻転動作が発生するものと理解できる.

さらに, ヘビ型ロボットを垂直な円柱に対して上方に移動させるシミュレーションも行なった. この場合, ロボットと円柱との間の摩擦係数を 5.5 とすることでヘビ型ロボットが螺旋尺取り方式で円柱を登ることが確認された. しかしながら, この摩擦係数の値は実際には大きな値であるので, 実機においてはロボット表面の材質を工夫したりトルクの大きなアクチュエータを使って把持力を向上させるなどして摩擦力を稼ぐ必要がある.

5.2 実機実験

さらに, 螺旋尺取り方式による移動の有用性を確認するために, 実機実験を行なった. 実機実験においても, ヘビ型ロボットは 9 ユニット (18 リンク) で構成されており, 半径 0.057 m の水平横方向の円柱上を移動する.

5.2.1 障害物のない円柱上の移動

まず, 何も障害物のない円柱上を螺旋尺取り方式で移動する実験を行なった. 実験のようすを Fig. 10 に示す. この実験において, (6) 式のパラメータ a, b, c, d, e は, シミュレーション実験の pattern B と同じ設定になっている. また, 螺旋形状に沿った移動速度の指令値は $\dot{s} = 0.5 \text{ m/s}$ とした. この際, ロボットの先頭リンクの円柱中心軸方向の平均移動速度は 0.15 m/s であった. この実験により, 実機においてもシ

Fig. 8 Simulation results of movement distance along cylinder with three patterns of parameters

Fig. 9 An example of simulation result with the parameters of pattern B ($a=0.090, b=0.015, c=0.435, d=2.29, e=0.038$)

ミュレーションと同様に螺旋尺取り方式で円柱上を移動できることが確認された. また実機実験においても, ロボットが螺旋尺取り運動で移動することに加え, 捻転運動も生じていることが観察された.

5.2.2 障害物のある円柱上の移動

つぎに, 本研究で提案する螺旋尺取り方式と従来の螺旋捻転運動による移動方式とで障害物のある円柱上をそれぞれ移動させて, 提案方式の有用性を確認した結果を示す.

●従来の螺旋捻転運動を用いた場合

従来の螺旋捻転運動では, ヘビ型ロボットは曲率 $\kappa(s)$ と振率 $\tau(s)$ が一定の曲線の形状をなし, そのまま捻転動作を行なうことでロボットが円柱上を移動する. 実験において, 高さ 0.01 m の障害物を円柱に巻き付けた場合, 従来の螺旋捻転運動でもこれを乗り越えることができた. ある程度小さな段差であれば, ヘビ型ロボットの関節のサーボの弾性により螺旋半径を多少広げて段差を乗り越えることができる. しかしながら, 外力によりサーボモータに負荷をかけることになるので望ましい解決策とはいえない. さらに, 円柱に巻き付ける

Fig. 10 An example of experimental result of moving on a cylinder with the parameters of pattern B ($a=0.090$, $b=0.015$, $c=0.435$, $d=2.29$, $e=0.038$)

Fig. 11 An example of experimental result of stepping over 0.05 m obstacle on the cylinder with helical rolling motion

障害物の高さを 0.03 m にした場合の実験のようすを **Fig. 11** に示す。この場合、ロボットは障害物に乗り上げることはできるものの、先頭節が障害物の先の円柱に届かない状況になり、円柱から脱落してしまった。また、円柱上の障害物の高さをさらに高く 0.05 m にした場合には、螺旋捻転運動ではヘビ型ロボットはその障害物に乗り上げることができなかった。

●螺旋尺取り方式を用いた場合

つぎの実験において、(6) 式のパラメータ a, b, c, d, e は、シミュレーション実験の pattern B と同じ設定にした。螺旋尺取り方式を用いた移動実験において、まず、円柱に巻き付けた障害物の高さが 0.01 m の場合には、螺旋捻転運動を用いた場合と同様に問題なく乗り越えることができた。つぎに、螺旋捻転運動を用いた場合には円柱から脱落していた 0.03 m の高さの障害物を円柱に巻き付けた場合の実験の結果を **Fig. 12** に示す。実験により、螺旋尺取り方式を用いた移動によって螺旋捻転運動では脱落してしまった高さの障害物を踏破することが確認された。

Fig. 12 An example of experimental result of stepping over 0.03 m obstacle on the cylinder with spiral inchworm motion with the parameters of pattern B ($a=0.090$, $b=0.015$, $c=0.435$, $d=2.29$, $e=0.038$)

さらに、螺旋捻転運動では乗り上げることができなかった高さ 0.05 m の障害物がある場合の実験のようすを **Fig. 13** に示す。この実験においては、螺旋尺取り形状のパラメータは $a = 0.106$, $b = 0.027$, $c = 0.417$, $d = 2.4$, $e = 0.0287$ と設定している。結果として、ヘビ型ロボットは前半部分においては障害物に乗り越えることができたものの、後半部分において障害物に乗り越えることができず、また、前半部分が円柱から脱落してしまった。これは、現状のヘビ型ロボットの全長においては、障害物に乗り越えるように螺旋尺取り形状設計すると把持部が 1 箇所しか生成できず、そのため片持ち梁のようになった伸展部が重量の影響で下方にさがり、障害物への乗り上げを困難にしていることが影響している。前半部分においては、障害物への十分な押しつけ力が発生した状態において捻転動作の効果により障害物に乗り越える結果となったが、後半部分は重力に打ち勝って体幹をもち上げることができなかった。さらに、ロボット螺旋形状の中心軸と円柱の中心軸の方向がずれる影響により、ロボットが円柱から脱落する状況に至っている。この問題は、螺旋尺取り方式で移動中に把持部をいつも 2 箇所以上生成できる程度にロボットの全長を増やし、伸展部が下方にさがることを防ぐことができれば解決されと考えている。

6. 終わりに

本稿では、ヘビ型ロボットの新たな移動形態として螺旋尺取り方式を提案した。また、螺旋尺取り形状をなす曲線をデカルト座標系で設計した後、連続曲線モデルでの曲率と振率を求めてロボットの各関節の目標角度を導出した。さらに、シミュレーション実験と実機実験により、提案する螺旋尺取り方式をヘビ型ロボットに実装してその挙動を確認し、従来の螺旋捻転運動では乗り越えられなかった段差のある円柱を移動できることを確認した。

本稿では、螺旋捻転運動では乗り越えられない段差を乗り

Fig. 13 An example of experimental result of stepping over 0.05 m obstacle on the cylinder with spiral inch-worm motion with parameters of $a=0.106$, $b=0.027$, $c=0.417$, $d=2.4$, $e=0.0287$

越える場合に螺旋尺取り方式による移動が有利である結果を述べたが、円柱の特に段差のない部分を移動する際には螺旋捻転運動で移動したほうが効率がよい。そこで今後は、環境に応じて螺旋捻転運動と螺旋尺取り方式とを切り替える方法を検討する予定である。また、生物の蛇が円柱上を移動する際に頭部の向きを変えないまま移動するように、先頭リンクの向きを一定に保ったまま螺旋尺取り方式で移動するための方策を検討する予定である。さらに、事前に計画した移動経路をヘビ型ロボットが追従するような制御方策の開発や、ロボットが円柱を把持している部分で十分な摩擦力を発生するための力を考慮した解析が今後の課題である。

謝辞 実験に協力いただいた、岡山大学工学部機械システム系学科の小松信氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 広瀬茂男：生物機械工学，工業調査会 (1987)
- 2) M. Mori and S. Hirose: Three-Dimensional Serpentine Motion and Lateral Rolling by Active Cord Mechanism ACM-R3, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 829/834 (2002)
- 3) 亀川，松野：三次元蛇型ロボットにおける体幹ねじり型移動の解析と GA による移動形態推移時の運動計画，日本ロボット学会誌，**21**-5, 509/516 (2003)
- 4) K. Lipkin, I. Brown, A. Peck and H. Choset: Differentiable and Piecewise Differentiable Gaits for Snake Robots, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 1864/1869 (2007)
- 5) T. Kamegawa, T. Harada and A. Gofuku: Realization of cylinder climbing locomotion with helical form by a snake robot with passive wheels, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 3067/3072 (2009)
- 6) T. Baba, Y. Kameyama, T. Kamegawa and A. Gofuku: A snake robot propelling inside of a pipe with helical rolling motion, Proc. SICE Annual Conf., 2319/2325 (2010)

- 7) D. Rollinson and H. Choset: Gait-Based Compliant Control for Snake Robots, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 5123/5128 (2013)
- 8) 森，山田，広瀬：三次元索状能動体 ACM-R3 の設計開発とその基本操舵制御，日本ロボット学会誌，**23**-7, 886/897 (2005)
- 9) 山田，広瀬：索状能動体の研究—多関節体幹による連続曲線近似法—，日本ロボット学会誌，**26**-1, 110/120 (2008)
- 10) H. Date and Y. Takita: Control of 3D Snake-Like Locomotive Mechanism Based on Continuum Modeling, Proc. IDETC/CIE ASME Int. Design Engineering Technical Conf. & Computers and Information in Engineering Conf., 1351/1359 (2005)
- 11) H. Astley and B. Jayne: Effects of perch diameter and incline on the kinematics, performance and modes of arboreal locomotion of corn snakes, The Journal of Experimental Biology, **210**, 3862/3872 (2007)

[著 者 紹 介]

亀 川 哲 志 (正会員)

2004 年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。同年，NPO 国際レスキューシステム研究機構研究員を経て，2006 年より岡山大学大学院自然科学研究科助手，2007 年同助教，2008 年同講師となり，現在に至る。この間，2004 年ローマ大学客員研究員，2012 年カーネギーメロン大学客員研究員。ヘビ型ロボット，レスキューロボットの研究に従事。日本機械学会，日本ロボット学会，システム制御情報学会の会員。博士 (工学)。

斉 偉

2014 年岡山大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。同年，内蒙古民族大学機械工程学院助手となり，現在に至る。ヘビ型ロボットの研究に従事。

五 福 明 夫 (正会員)

1983 年京都大学大学院工学研究科博士前期課程電気工学第二専攻修了。84 年京都大学原子エネルギー研究所助手。現在，岡山大学大学院自然科学研究科教授。大規模プラントの診断手法と運転員支援システム，球面モータ，医療支援システムなどの研究に従事。京都大学工学博士。日本原子力学会，日本機械学会，システム制御情報学会，ヒューマンインタフェース学会，人工知能学会，IEEE など各会員。