

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ヘビ型ロボットのLoop-Gait 推進とその操舵制御の研究
Title	Steering Control of Loop-Gait Locomotion for snake-like robot
著者(和文)	大橋太郎, 山田浩也, 広瀬茂男
Authors	Taro Ohashi, Hiroya Yamada, SHIGEO HIROSE
出典 / Citation	, , , RSJ2009AC1M2-01
Citation(English)	, , , RSJ2009AC1M2-01
発行日 / Pub. date	2009, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2009 The Robotics Society of Japan.

ヘビ型ロボットの Loop-Gait 推進とその操舵制御の研究

大橋太朗 (東工大) 山田浩也 (東工大) 広瀬茂男 (東工大)

Steering Control of Loop-Gait Locomotion for snake-like robot

*Taro OHASHI(Tokyo Tech), Hiroya YAMADA(Tokyo Tech), Shigeo HIROSE(Tokyo Tech)

Abstract— In this paper, we discuss the steering control method of Loop-Gait locomotion. Loop-Gait is a locomotion mode for the non-wheeled snake-like robot. In this locomotion, the head and tail of the snake-like robot are connected. Then it moves like a crawler belt. The basic control method and steering control method of Loop-Gait locomotion is proposed. Those control method is verified by experiments with the snake-like robot "ACM-R7".

Key Words: Snake-like Robot, Loop-Gait, Steering Control

1. 序論

ヘビは手足のない胴体だけの単純な構造でありながら、地面や樹上、水中など、様々な環境を移動できる。そうしたヘビの特性を利用するため、今までに多くのヘビ型ロボットが研究・開発されてきた。

ヘビ型ロボットの機構や移動方法は様々だが、まず、車輪を有するものとそうでないものに分類することができる。車輪を有するもののうち、受動車輪を用いたヘビ型ロボットは、体幹軸方向には滑りやすく横方向には滑りにくい、という車輪によって生じる地面との摩擦の異方性を利用し、匍匐推進によってヘビのように滑らかに移動することができる [1]。この移動方法は移動効率が高く、また実際のヘビと同じ原理で推進力を得ているため、ヘビと同じように様々な環境下で活動できる可能性がある。しかし実際のヘビの関節数が数百であるのに対し、ヘビ型ロボットの関節数は数十しかなく、さらに質量が大きいためといった問題があるため、現在のヘビ型ロボットの匍匐推進による活動範囲は限られている。また、滑りやすい環境では車輪が摩擦の異方性を発揮できないため移動が困難であり、車輪に異物を巻き込む可能性もある。

一方、車輪のないヘビ型ロボットの移動方法としては、尺取虫のように這って進む Pedal-Wave 推進 [2]、砂漠のヘビのように、体を持ち上げ横に移動させながら進む Sidewinding 推進 [3][4]、体の端部同士を繋げて環状になり、体全体をクローラのようにして進む Loop-Gait 推進 [5][6][7] などが挙げられる。これらの移動方法は、車輪が有るものに比べて移動効率が低い場合が多い。しかしこれらの移動方法を組み合わせることで、現在のヘビ型ロボットのハードウェアでも様々な環境に対応できる可能性がある。

このうち車輪のないヘビ型ロボットの移動方法の一つである Loop-Gait 推進は、実際のヘビには見られないロボット特有のものである。Loop-Gait 推進はモジュール型ロボットの集合体の移動方法としても研究されており、現在までに平面・斜面移動 [5]、階段などの凹凸面の移動 [6]、動力学シミュレータを用いた加減速の制御 [7] などが研究されている。この移動方法ではロボットの重心位置が高くなるため、他の移動方法と比べると転倒しやすい、などの問題がある。しかしロボット



Fig.1 ACM-R7 in Loop-Gait Locomotion

全体を一つのクローラベルトと見なせるため凹凸面の適応性が高い。また関節数を増やすと、各関節の動作範囲が小さくても済むようになり、移動速度の向上が見込まれる。これらのことより、Loop-Gait 推進は車輪のないヘビ型ロボットの移動方法として有効であると考えられる。

しかし Loop-Gait 推進に関する研究は現在までに最も基本的な直進動作についてのみ行われており、高速運動への展開を可能とする運動形態の考察や操舵制御についての考察はまだなされていない。そこで本稿では、まず Loop-Gait 推進の直進時の制御方法を新たに定義したうえで、その操舵制御の手法を提案する。さらにそれを実際にヘビ型ロボット ACM-R7 (Fig.1) に適用した実験結果をふまえ、その有効性を検討する。

2. Loop-Gait 推進の操舵制御の手法

2-1 Loop-Gait 推進の制御手順

以下の手順で Loop-Gait 推進の制御を行う。

1. 原点 O から体幹軸に沿って測った曲線の長さ (弧長) s と時刻 t に対する曲率 $\kappa(s, t)$ を定義し、ヘビ型ロボットの形状を 3 次元曲線で表す。
2. それを有限個のリンクモデルに近似し、ヘビ型ロボットに適用する。

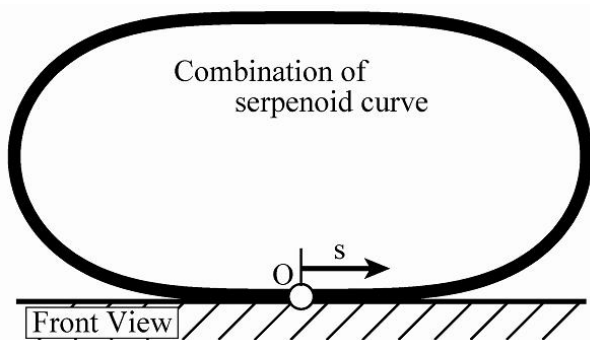


Fig.2 Base Model of Loop-Gait (Continuous Model)

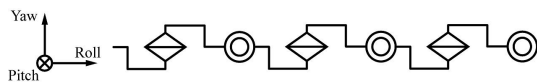


Fig.3 2 Axes Bended Model

またヘビ型ロボットの関節の構成方法には幾つ種類があるが、今回は Pitch 軸, Yaw 軸まわりそれぞれの屈曲関節を交互に直列につないだ 2 軸屈曲モデルを対象とする (Fig.3)。ここで Roll 軸は、ヘビ型ロボットの体幹軸に沿った方向, Pitch 軸, Yaw 軸はそれぞれ Roll 軸に直交した軸とする。

2.2 連続曲線による直進時の形状の定義

Loop-Gait 推進におけるヘビ型ロボットの形状には円や楕円を用いたもの [7], それらに直線を組み合わせたものなど, 幾つも候補が考えられる。また, 地形に応じて接地部分の形状を変化させる, という形状にこだわらない制御方法も研究されている [6]。それらに対し, 我々は弧長 s に沿った曲率が正弦波状に変化するサーペノイド曲線を組み合わせた形状を直進時の基本形状とし (Fig.2), それを元に操舵制御などを行う手法を提案する。サーペノイド曲線を用いると, 曲率 $\kappa(s, t)$ だけでなく曲率の弧長 s に対する 1 階微分, 2 階微分も連続的に変化するため, ロボットの関節角速度, 角加速度が滑らかに変化する [1]。また, 曲率を弧長 s の関数で表せるため, 曲率の定義が容易である。これらの理由より, サーペノイド曲線はヘビ型ロボットの制御に適しているといえる。よって Loop-Gait 推進においても, その基本形状はサーペノイド曲線を組み合わせたものを用いることとした。

各変数を以下のように定義すると, その曲率は式 (1)(2) で表される。また, このときの弧長 s に沿った曲率の変化 ($L_o = 1.0$) を Fig.4 に示す。

s : 弧長 [m]

t : 時刻 [s]

κ_p, κ_y : Pitch 軸, Yaw 軸の曲率 [rad/m]

L_o : ロボットの全長 [m]

T_s : 1 周期 [s] (曲率が一周を伝播する時間)

$$\kappa_p(s, t) = A \left\{ 1 - \cos 2\pi \left(\frac{2s}{L_o} - \frac{t}{T_s} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\kappa_y(s, t) = 0 \quad (2)$$

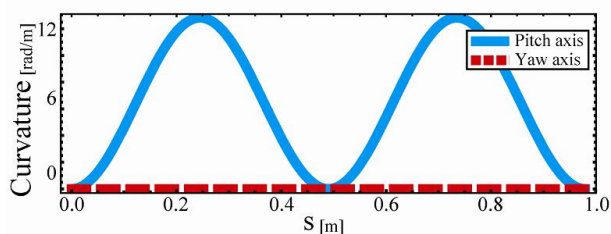


Fig.4 Curvature along the Body Line (Straight Motion)

ここで, 式 (1) の右辺の係数 A について考える。Loop-Gait 推進では, ロボットは全体で 1 つの輪を形成するため, 体が一周した後, 端部同士が同じ位置になければならない。前後対称な形状をとると, 原点 O から測った弧長が全長の半分の時点 ($s = \frac{L_o}{2}$) で, ロボットの Roll 軸の向きは $s = 0$ と比べて反対方向になっていなければならない。つまり Pitch 軸周りの曲率 $\kappa_p(s, t)$ を $s = 0$ から $\frac{L_o}{2}$ まで積分した値が π でなければならない。これを表すと式 (3) のようになり, A が式 (4) のように求まる。

$$\int_0^{L_o/2} A \left\{ 1 - \cos 2\pi \left(\frac{2s}{L_o} \right) \right\} ds = \pi \quad (3)$$

$$\therefore A = \frac{2\pi}{L_o} \quad (4)$$

このように, ロボットの全長 L_o が決まれば, Loop-Gait 推進時のロボットの形状を定義することができる。そして曲率がロボットの全長を伝播するのにかかる時間 T_s から, Loop-Gait 推進の速度を決定でき, 前後に直進することができる。

以上のように, この方法ではロボットの全長 L_o が決まると形状も一意に決まる。しかし Loop-gait 推進で斜面を登る場合などには, 形状を扁平にして, 重心位置をより低くした方が安定性が増す。このように, 状況に応じて形状を変えた方が良い場合も考えられる。そうした場合には, 例えば接地している部分や頂上部 ($s = \frac{s}{2}$) に新たに直線形状部分を挿入するなどして, 全体の形状を変化させることも可能である。

2.3 有限個リンクモデルへの近似

式 (1)(2) によって定義したヘビ型ロボットの形状を有限個の 2 軸屈曲リンクモデルで近似する。今回は, 弧長 s に沿った曲率を積分して関節の屈曲角とする方法をとった [8]。ここから各関節の屈曲角度を計算し, ロボットの制御を行う。

2.4 操舵制御

Loop-Gait 推進の操舵制御について述べる。Loop-Gait 推進において操舵を行う場合, Fig.2 において, 地面に接している部分の水平方向に曲がる関節 (この場合では Yaw 軸関節) が, 左右どちらかに曲がっていればよい。そこで Pitch 軸とは逆位相の曲率を Yaw 軸に与えることで, 地面に接している付近と頂上付近を水平方向に曲げるような形状を実現した (Fig.5)。このときの弧長 s に沿った曲率は式 (5)(6) で表される。

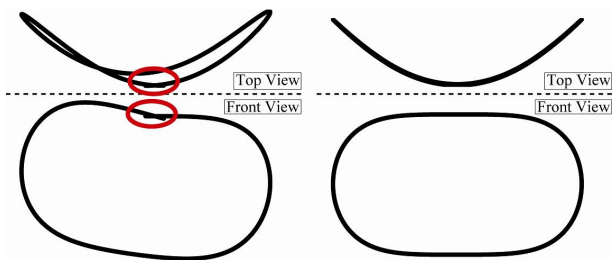


Fig.5 Figure in Steering Motion of Loop-Gait

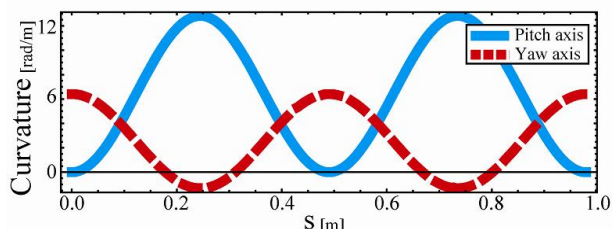


Fig.6 Carvature along the Body Line (Steering Motion)

$$\kappa_p(s, t) = \frac{2\pi}{L_o} \left\{ 1 - \cos 2\pi \left(\frac{2s}{L_o} - \frac{t}{T_s} \right) \right\} \quad (5)$$

$$\kappa_y(s, t) = \frac{2\pi}{L_o} \left[\left(C_{amp} + \frac{C_{off}}{2} \right) \left\{ 1 + \cos 2\pi \left(\frac{2s}{L_o} - \frac{t}{T_s} \right) \right\} - C_{off} \right] \quad (6)$$

ここで旋回強度 C_{amp} は, Pitch 軸最大曲率を 1 としたときの Yaw 軸の最大曲率の割合を表す. 補正係数 C_{off} は Pitch 軸と Yaw 軸に同時に曲率を与えたことによる端部同士の位置のずれを補正するためのものである. $C_{amp} = 0.5$, $C_{off} = 0.206$ とした場合の各軸の曲率のグラフを Fig.6 に示す. C_{amp} の絶対値を大きくとるほど, 接地部分付近での Yaw 軸の曲率が大きくなり, 旋回半径を小さくすることができる.

ここで C_{off} を C_{amp} に対して正しく設定しないと Fig.5 の左図のように端部同士がずれてしまう. 端部同士の距離が十分小さくなるよう各 C_{amp} に対する C_{off} を計算した結果, 線形の関係にあることがわかった. それを元に C_{off} の値を設定すると Fig.5 の右図のように, 連続曲線の端部でのずれを十分小さくすることができる. なお, Fig.5 は, $C_{amp} = 0.5$ において C_{off} に 0(左図)と 0.5(右図)をそれぞれ代入した場合の形状である.

ただし連続曲線で端部同士のずれがなく形状が定義できたとしても, それをリンクモデルに近似する際の誤差により, 端部同士の位置・角度にずれが生じる可能性は残っている. そのずれが大きい場合, 連続曲線をリンクモデルに近似した後に, 端部同士のずれが小さくなるよう再計算を行い各関節角度を修正し, ずれを十分小さくする必要がある.

3. ヘビ型ロボット ACM-R7 による実験

3.1 ACM-R7 の概要

今回の実験で用いた ACM-R7(Fig.1) は, 車輪を持たず, 上下 (Pitch 軸方向) と左右 (Yaw 軸方向) に曲が

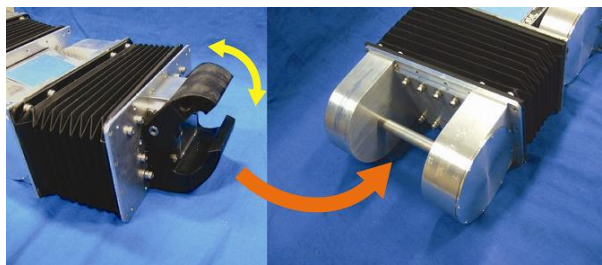


Fig.7 Gripper and Bar

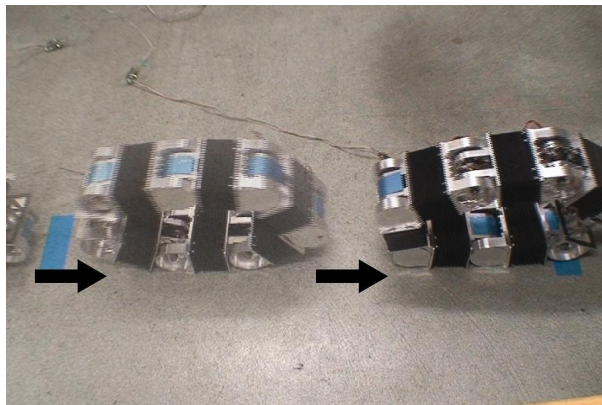


Fig.8 Straight Drive Motion

る関節が交互に連結されているヘビ型ロボットである [9]. Pedal-Wave 推進や Loop-Gait 推進で移動することを念頭に設計し, Pitch 軸関節可動範囲が大きい, 断面形状が角型, 防水防塵性を有する, といった特徴を有している.

今回は, Loop-Gait 推進時の端部同士の接続の際に使用するグリップ, および接続のためのバーを新たに設計・製作し, ACM-R7 に装着した (Fig.7). グリップ開閉動作にはサーボモータをウォームギアで減速して使用している. そのためバックドライブが生じず, グリップの閉状態を保持するのに電力を必要としない.

この ACM-R7(全 12 自由度構成) を用いて, 各種実験を行った.

3.2 直進動作

まず, 直進動作の実験を行った. 式 (1)(2)(4) を元に形状を制御し, その角度を伝播させる (時刻 t を変化させる) ことで動作を行わせた. その結果, Fig.8 のように問題なく動作した. $L_o = 1.001$, $T_s = 1.0$ の条件のとき, 移動速度は $143[\text{mm/s}]$ だった. 同じ ACM-R7 で Pedal-Wave 推進を行わせたときの速度 $38[\text{mm/s}]$ と比較しても, 移動速度が向上していることを確認した.

3.3 旋回動作

次に旋回制御について動作実験を行った. 実験は式 (5)(6) を元にして形状を制御し, その角度を伝播させることで Loop-Gait 推進を行わせた. 全長 $L_o = 1.001$, 周期 $T_s = 2.0$ の条件のもと, 旋回強度 C_{amp} を 0.10 から 0.30 まで 0.05 刻みで変えて実験を行い, その動作や旋回半径を記録した. $C_{amp} = 0.10$ および 0.25 のときの動作の様子を Fig.9 に示す. C_{amp} が 0.10 から 0.25 へ増加するにつれて旋回半径も小さくなっている

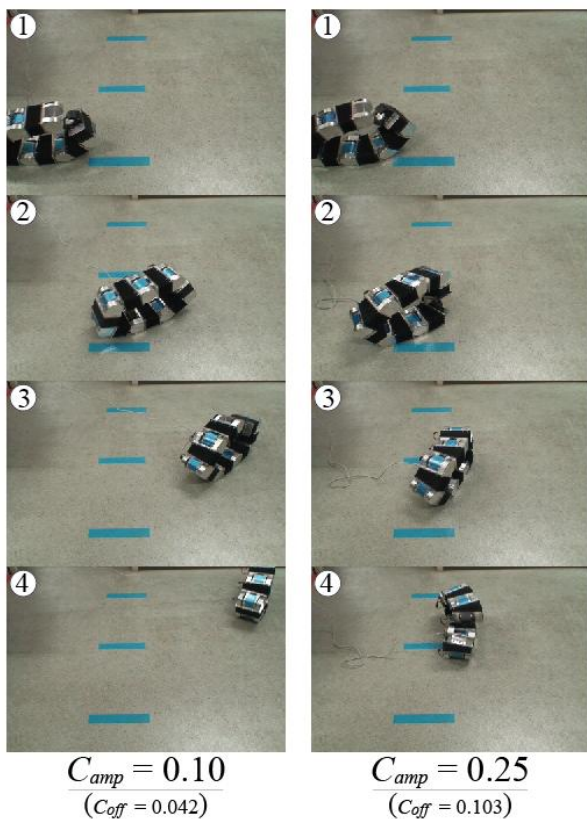


Fig.9 Steering control of Loop-Gait

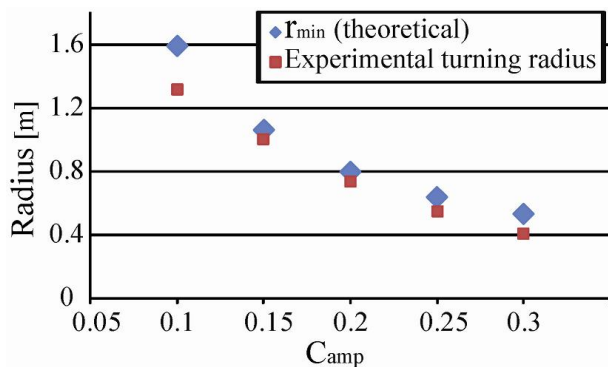


Fig.10 Turning Radius

ことが分かる．なお， $C_{amp} = 0.10$ のとき旋回半径は $1.32m$ ， $C_{amp} = 0.25$ のときは $0.55m$ であった．

このとき，連続曲線における Yaw 軸の最大曲率 $\kappa_{y \max}$ を式 (6) より求めると，それを元に連続曲線モデルにおける最小曲率半径 $r_{min} (= \frac{1}{\kappa_{y \max}})$ が計算できる． r_{min} と旋回半径の実験結果を Fig.10 に示す．そこからわかるように，実際の旋回半径は連続曲線モデルにおける Yaw 軸最小曲率半径 r_{min} とほぼ同等であった．この 2 つの値がほぼ等しいということは，ロボットに動作させたい旋回半径が決まれば，旋回強度 C_{amp} が算出されるということである．そして式 (5)(6) を用いてその場合のロボットの形状を求めることができるので，要求に沿った旋回動作を行わせることができるようになる．

また，実験を行う過程で旋回強度 C_{amp} の値を大き

くしていくと，端部同士の位置・角度にずれが生じてきた．これは連続曲線をリンクモデルに近似した際に発生した誤差だと考えられる．今回の実験では，そのずれを補正するための処理をまだ行っていないため，旋回動作時には端部同士を接続せずに実験を行った．もしずれを補正しないまま接続して実験を行った場合，ロボット全体が閉ループ系になるため，各関節に大きな負担がかかることになる．今回は実験時のロボットの関節数が少なかったため，端部を接続せずに動作させても各関節にかかるモーメントが小さく，実験を行うことができた．しかし節数をさらに増やす場合には，各関節角度を計算機上で修正し，端部同士の位置・角度のずれを補正するか，または接続部を弾性のあるものに変えてずれを吸収させる，といった方法をとらなければならない．

4. 結論と今後の課題

ヘビ型ロボットの移動方法の一つである Loop-Gait 推進について，その直進時における基本形状とそれに基づく操舵制御の手法を提案した．さらにそれらをヘビ型ロボット ACM-R7 に適用して実験を行い，Loop-Gait 推進の直進と旋回動作が行えることを確認した．

今後は，3 次元連続曲線を有限個のリンクモデルに近似した場合の端部同士の位置・角度のずれについて，それらが小さくなるよう制御方法を改良していく予定である．また，Loop-Gait 推進の旋回時にかかる遠心力を考慮し，ロボットの形状を速度・旋回半径に応じて変化させる操舵制御を行い，高速で旋回しても転倒することのないような制御方法を実証していく．

- [1] 広瀬茂男: “生物機械工学”，工業調査会,1987.
- [2] H. Ohno and S. Hirose: “Design of Slim Slime Robot and its Gait of Locomotion”, Proc. of IROS, vol.2, pp.707-715, 2001.
- [3] J. W. Burdick, J. Radford, G. S. Chirikjian: “A ‘sidewinding’ locomotion gait for hyper-redundant robots”, Advanced Robotics, Vol.9, No.3, pp.195-216, 1995.
- [4] 山田浩也, 広瀬茂男: “ヘビ型ロボットの Sidewinding 運動の操舵制御の研究”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3A2-01, 2008.
- [5] A. Kamimura, H. Kurokawa, E. Yoshida, S. Murata, K. Tomita, S. Kokaji: “Automatic Locomotion Design and Experiments for a Modular Robotic System”, IEEE ASME Transactions on Mechatronics, Vol.10, Issue 3, pp.314-325, 2005.
- [6] M. Yim, D. G. Duff and K. D. Roufas: “PolyBot: a modular reconfigurable robot”, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1, pp.514-520, 2000.
- [7] D. Mellinger, V. Kumar and M. Yim: “Control of Locomotion with Shape-Changing Wheels”, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1750-1755, 2009.
- [8] 山田浩也, 広瀬茂男: “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, Vol.26, No.1, pp110-120, 2008.
- [9] 大橋太朗, 山田浩也, 広瀬茂男: “大きな屈曲可動範囲を有するヘビ型ロボット ACM-R7 の設計に関する研究”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 講演論文集, 2A1-H21, 2008.