

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	索状能動体に関する研究 - システムの自立化と対地適応推進 -
Title	
著者(和文)	遠藤玄, 外川圭司, 広瀬茂男
Authors	Gen Endo, Keiji Togawa, Shigeo Hirose
出典 / Citation	日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 3, pp. 419-425
Citation(English)	, Vol. 18, No. 3, pp. 419-425
発行日 / Pub. date	2000, 4
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) 2000 The Robotics Society of Japan.

索状能動体に関する研究

- システムの自立化と対地適応推進 -

遠 藤 玄* 外 川 圭 司* 広 瀬 茂 男*

Study on Self-Contained and Terrain Adaptive Active Cord Mechanism

Gen Endo*, Keiji Togawa* and Shigeo Hirose*

A snake is able to attain high terrain adaptability and versatile locomotion even though it has an extremely simple one-dimensional configuration. In order to utilize these functions for robotics, we have adapted the basic biological machine elements of the snake into the Active Cord Mechanism (ACM). And we have discussed about the creeping dynamics and applications to manipulation. In this paper, we developed a new experimental model named "ACM-R1" with a self-contained system, which realizes higher mobility and terrain adaptability compared with a past model. Next, gliding experiments on ice were carried out in order to demonstrate that the creeping motion is the same as the principle of skating. Finally, a new terrain adaptive control method for sloping surfaces is proposed, and we verified the effectiveness by slope climbing experiments.

Key Words: Snake-like Robot, Active Cord Mechanism (ACM), Creeping Locomotion

1. は じ め に

ヘビは一次元的で単純な形態でありながら、高い移動機能と環境への適応性を獲得している。このような汎用的で多彩な機能を工学的に応用することは非常に有用である。筆者らはヘビの生物機械としての要素を抽出した概念を“Active Cord Mechanism, ACM”と呼び、その移動方式の力学的検討やマニピュレーションへの応用を論じてきた。

特に移動方式に関してはヘビの典型的な推進であるほふく滑走の解析を行い、動物実験と比較検討した。また機械モデル“ACM III”を構築し、二次元平面上での推進運動を実現した[1]。

しかしながら過去の機械モデルでの検証は、ほふく推進運動の定性的な確認にとどまっており、定量的な考察の多くは未だなされていない。また研究動機そのものも生物機械としてのヘビをバイオメカニクスの立場から科学的に明らかにするという観点から生じており、ほふく推進そのものの工学的応用に対する議論は行われていなかった。

そこで本研究ではアクチュエータ出力や機構的拘束など、機械モデルを駆動する上で必然的に生ずる枠組みを第一義的に考え、それに適用しうる有用な運動制御法を構築していく立場をとるものとする。そして索状能動体としての効率的、対地適応的な移動制御法を提案し、実験的に検討していくことにする。

本論文では従来のモデル以上に、より自由で広範囲の移動を実現する新たな実験機として完全自立型索状能動体“ACM-R1”の開発を行う。またヘビのほふく滑走が原理的にスケートによる滑走と等価であることを示すため、氷上での滑走実験を行う。最後に滑走面の傾斜に応じてくねりを制御する対地適応的推進を提案し、その実証を行う。

2. 滑 走 理 論

ヘビの腹部側部は鱗に被われて滑りやすく、また推進運動をしようと力を入れるとスキーのエッジのように角ができ滑走時に体幹が法線方向にずれていくのを防ぐ。つまりヘビは体軸方向には滑りやすく法線方向には滑りにくいという摩擦特性を得ており、それが体側筋肉の収縮弛緩運動を体の軸に沿った川の流れるような推進運動に変換している。理論の詳細は文献[1]に譲り、ここでは本研究に関係する事項の概略のみを示す。

体軸とそれに直交する方向をそれぞれ接線、法線方向と定め、Fig. 1 に記号を示す。従来の滑走理論は簡単のため(1)体幹を連続体で表現(2)滑走体型とトルク分布は独立(3)静力学関係のみを検討(4)体幹は法線方向に滑りを生じない、という前提の下に解析を行っている。これらの仮定は厳密には満たされておらず、動力学を含めた馬らの解析もある[2][3]。

ヘビの滑走体型を表す関数としてサーペノイド曲線を仮定する。これは体軸座標 s に沿って曲率が正弦波状に変化する曲線であり、ヘビの滑走体型をよく近似する。位置 s における節間の屈曲角度を偏角 $\theta(s)$ と表すと最大偏角を A 、滑走体型の $1/4$ 周期の

原稿受付 1999 年 4 月 26 日

*東京工業大学工学部

*Tokyo Institute of Technology

体幹長さを l として

$$\theta(s) = A \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{s}{l}\right) \quad (1)$$

Fig. 1 の O 点 ($s = 0$) から P 点 ($s = l$) までの積分値をくねり角 α と定義すると, δs を単位節長さとして

$$\alpha = \frac{l}{\delta s} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot A \quad (2)$$

となる.

体軸方向の速度 V_s は, スリップが生じないと仮定することにより幾何学的に求められる. 屈曲の周期を T とすると

$$V_s = \frac{4l}{T} \quad (3)$$

推進方向速度 V_x は, l を推進方向 X に投影した長さ $X(l)$ と l との比である行程比を用いて表される.

$$V_x = V_s \cdot \frac{X(l)}{l} \quad (4)$$

また滑走の効率を特徴づける式として接線力と法線力の比を求めると次式が得られる.

$$\frac{F_t}{F_n} = \text{Serp}(\sigma) \cdot \alpha \quad (5)$$

ここで σ は, 筋肉の作動状態に対する定性的考察から推定される体幹トルク分布を特徴づけるパラメータ, $\text{Serp}(\sigma)$ は次式で表される定数である.

$$\text{Serp}(\sigma) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^\sigma \int_0^{\frac{\pi}{2}} x^{\sigma-1} \sin x \, dx, \quad \sigma > 1 \quad (6)$$

式(5)から, より大きな蛇行になるほど接線方向へ力が配分されることを示している. 法線力分布はトルク分布の2階微分のみから導かれ滑走体型に依存しない. 体軸に沿って描くと O 点で最大値となる概形をとる (Fig. 1).

また体幹が法線方向にスリップせずに推進を行う必要条件是

$$\alpha \geq \frac{1}{\text{Serp}(\sigma)} \cdot \frac{\mu_t}{\mu_n} \equiv \alpha_0 \quad (7)$$

与えられ, 接線方向と法線方向の摩擦係数比に依存してくねり

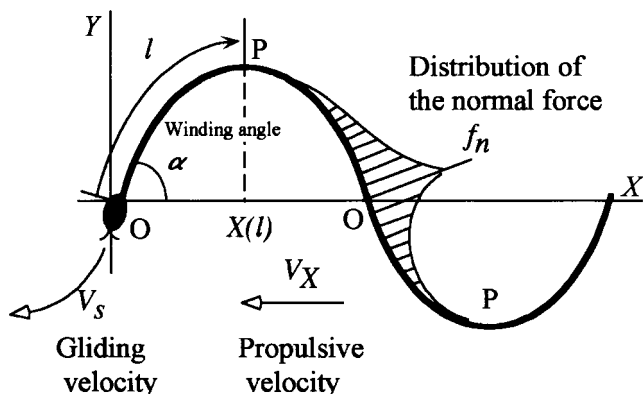


Fig. 1 Nomenclature of gliding configuration in regular creeping motion

角の下限値が規定される.

3. 自立索状能動体 “ACM-R1” の開発

本章ではヘビのほふく推進を実現する機械モデルとして完全自立型索状能動体 “ACM-R1” を構成する[4].

3.1 機構

ヘビ体幹を機械モデルで表現するには, 屈曲運動を行う能動関節をシリアルリンク系で連結する構造が適当であると思われる. これはヘビ体幹が脊椎骨とそれに付属する拮抗筋群からなる筋骨格系であることに対応している. 節数は現実的に構成しうる大きさと離散化誤差の影響, および制御計算機の都合などを考慮して全 16 節とした.

最も基本的な推進として二次元平面上での推進を考えると, ほふく運動のための屈曲自由度は滑走平面に対して垂直な軸周りのみとなる. Fig. 2 に示すように直鎖状に連結された関節に推進に必要な摩擦特性を付加するため, 転がり方向に回転自在な受動車輪を装備する. このとき離散化の影響と車輪の干渉を考慮して, 常に節の屈曲角度の半分の位置に車軸を調節する機構を導入した. 関節の可動範囲は ± 35 [deg] である.

各節は機構的に同等のユニットで構成されており, 節間はコイルスプリングによるサスペンションが導入されている. これにより各節にかかる荷重を均等化するとともに, 走行路面の凹凸に対する対地適応性を向上させている (Fig. 3).

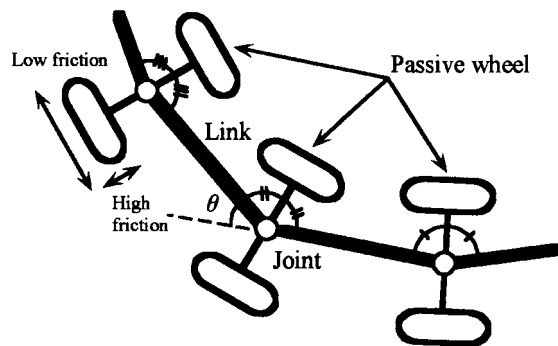


Fig. 2 Kinematic model

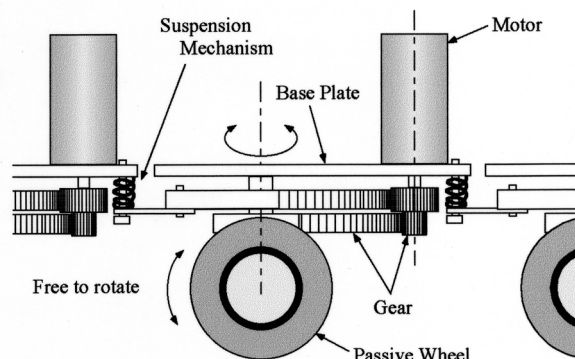


Fig. 3 Mechanism of one unit

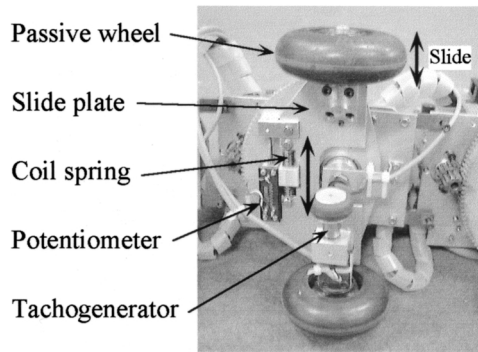


Fig. 4 Bottom view of the sensor installed joint

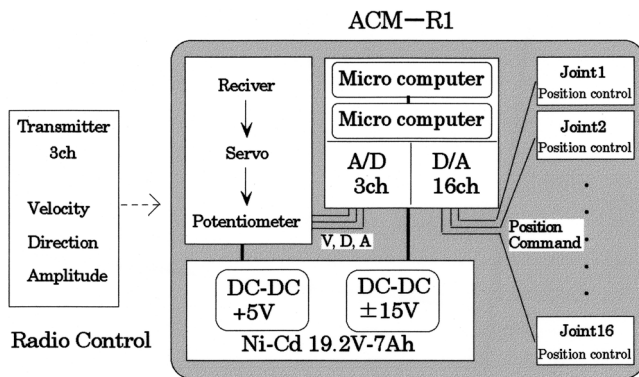


Fig. 5 Configuration of the control system

3.2 センサ

定常滑走時の走行状態を見るために法線力、体軸方向速度、関節トルクを計測する。センサ系の概観をFig. 4に示す。法線力センサは、リニアガイドにより車軸方向にスライド可能なプレートとコイルスプリング、ポテンショメータで構成されている。受動車輪を取り付けたスライドプレートをコイルバネで支えることで、法線力を変位としてポテンショメータで計測する。また体軸方向速度は小型の測定輪を用いてタコジェネレータにより計測する。さらにおおよその関節トルクを測定するため、モータコイルに流れる電流値を計測している。これらセンサを端部に影響されない第5, 13節に装備した。

3.3 システム構成

システム構成をFig. 5に示す。まず無線により、滑走の方向、速度、および屈曲の振幅を表すパラメータを送り、これらを元に制御計算機で各節への角度指令値を計算する。

制御計算機の計算負荷を減らすため、各節はTitech Robot Driver [5]によるローカルな位置制御を行うオープンループの制御とした。計算機はPICを用いた小型ワンボードマイコン (Parallax社 Basic Stamp II) を2個使用しており、相互にシリアル通信を行うことで指令値の演算および出力を行っている。また本マイコンボードは実装したままPCからBASICによるプログラム開発が直接行えるため、走行試験を繰り返し行いながら容易に制御プログラムを開発することが可能である。

また対地適応的推進などセンサ系からのフィードバックを用い

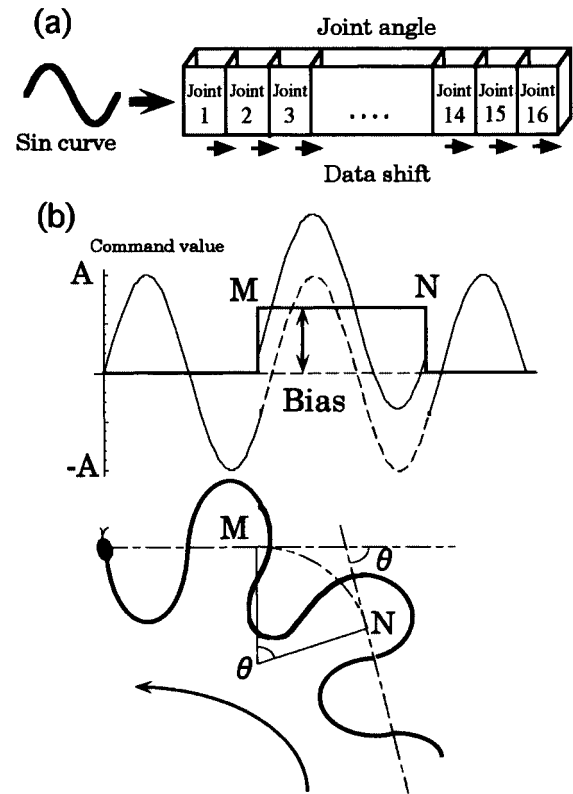


Fig. 6 (a) Control algorithm (b) Steering motion

た制御系を構築する場合は、ソフト、ハード両面で制約の少ない有線によるPCからの制御を行うこととした。したがって拡張性に注意して実装した。

電源は各節に1.2 [V]-7 [Ah]のNi-Cd電池を搭載し、これを直列に繋ぐことで19.2 [V]-7 [Ah]のバッテリーを構成している。この電源によりリリウム板上でおよそ30 [min]の動作が可能である。また外部の電源装置からの供給もできるように配慮した。

3.4 制御法

サーベノイド曲線による滑走は、各関節角が正弦波で振動することから、アクチュエータの最も基本的な振動運動と考えられる。また同時に計算負荷を著しく減少させることが可能である。

実装された制御アルゴリズムの概念図をFig. 6 (a)に示す。先頭節への指令値を配列に蓄え、順次一定時間ごとにそれを後方にシフトすることで蛇行運動を生成している。また推進速度の制御は、計算機上を流れる時間を実時間に対して調節することで滑走体型を変えることなく行うことができる。

推進方向の制御は屈曲を行う正弦波指令に対してバイアスをかけることにより、振動の中心値を変化させることで実現した。バイアスが0のとき体幹全体の屈曲の基準は直線上になるが、一定バイアスが作用したときは円弧になる。したがって一見複雑な蛇行推進運動でも通常の自動車のハンドルと同等の操作系を構成できる (Fig. 6 (b))。

さらに滑走体型を変化させるパラメータとして、屈曲の振幅Aを変化させることが可能である。振幅が大きくなることにより、

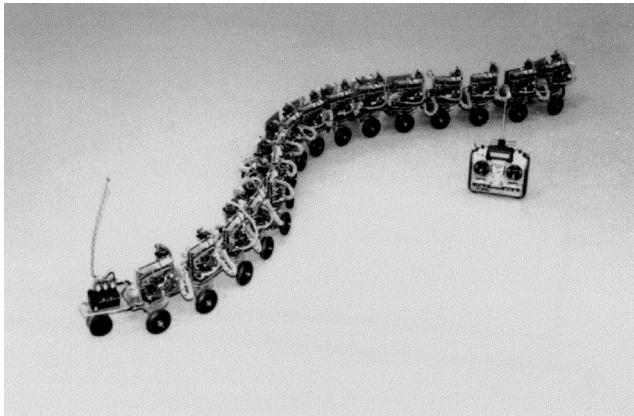


Fig. 7 ACM-R1

Table 1 Specifications of ACM-R1

No. of Unit	16
Dimension	2430×175×220 (mm)
Weight	28 (kg)
Actuator	50W DC Servo Motor × 16
Battery	Ni-Cd 19.2V-7Ah

より大きくなり角の蛇行を生成する(式(2)). 構成された ACM-R1 を Fig. 7 に, その諸元を Table 1 に示す.

4. 推進実験

構成した機械モデルが実際に滑走可能であることを確認するため, リリウム板上で滑走試験を行った. 滑走の体型はリンク長さと離散化の度合いを考慮して, サープノイド曲線一周期が全体幹長さ L に相当するように $l = L/4$ と固定し, 以降全ての実験に用いる.

$A = 22$ [deg] ($\alpha = 56$ [deg]), $T = 4.2$ [s] としたとき, 実測された滑走速度は $V_s = 0.50$ [m/s] であった. 理論滑走速度 0.53 [m/s] との差異は 5% 程度であり, よく一致していることが確認できる.

また周期を小さくすることでおよそ 1.0 [m/s] 程度の高速の推進も確認した. これは ACM III の 0.5 [m/s] に比して十分高速な推進である. なお, 速度の上限はソフトウェアおよび搭載した電源により規定されており, アクチュエータの定格出力の上限値ではない. したがってこれらを改良することにより移動速度を今後さらに向上させることが可能であると思われる. 推進速度は停止状態から最高速まで滑走体型を変化させることなく滑らかに調節することが可能であった.

また, ACM III では実現されなかった後退の動作も, 関節角指令値を後方から前方へシフトすることで実現することができた. これは従来から一般に言われている「ヘビはウロコを引っかけて進むため後退できない」という俗説への明確な反証である.

推進方向制御に関しては, バイアスを変化させることにより旋回動作を確認した. 体幹長さの 2 倍の距離があれば 90 [deg] 程度の進行方向の変化が可能である. このことからかなり自由な操舵

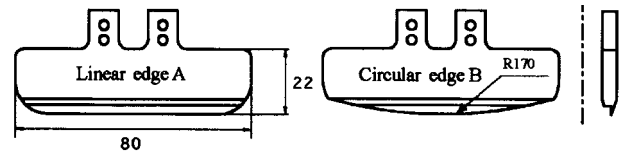


Fig. 8 Geometry of the edge A, B

Table 2 Kinetic friction coefficient

	μ_t	μ_n	μ_t/μ_n
Edge A	0.06	0.14	0.43
Edge B	0.05	0.43	0.12
Wheel	0.01	0.46	0.02

が実現されていることがわかる.

さらにアスファルトや絨毯といった多少の凹凸のある路面上での推進実験を行い, 車輪の転がり抵抗が大きな路面であっても屈曲の振幅を調節することによって十分に推進可能であることを確認した.

5. 氷上滑走

ACM-R1 が原理的に氷上でも滑走可能であることを実証するため氷上滑走試験を行った[6].

受動車輪をスケートエッジで置き換えることにより氷上での滑走を可能にする摩擦特性を付加する. 摩擦係数比による運動の違いを検討するため 2 種類のエッジ A, B を用いて実験を行った. 外形を Fig. 8 に示す. A, B とともに刃先は鋭く削られている. 予備実験として 2 節分の重量を負荷した 4 枚のエッジを氷上でゆっくりと滑らせ, その摩擦力を測定した. 求められた摩擦係数値を受動車輪の場合と併せて Table 2 に示す. エッジ B では氷との接触面積を極力減らすことによって接地圧を高め, 氷がより溶けやすくなっている. この効果により μ_n が A に比して大きくなっている.

α をおよそ 55 [deg] としエッジ A を装備して滑走させた. このとき横滑りを生じてその場で屈曲するのみで, ほとんど推進することができなかった.

次にエッジ B を用いた場合, 横滑りを起こさず地上を滑走するのと同様, およそ 0.5 [m/s] の速度で滑らかに滑走することができた (Fig. 9). また受動車輪による硬平地上での滑走とまったく同様に推進方向, 速度, 後退の動作などを確認した.

しかしながら人がスケートするような高速の移動は不可能であった. これは ACM-R1 の場合, 本体重量に比してエッジの総接地面積が大きいことため接地圧が低下し, 氷が溶けにくいためであると思われる. その結果, 通常のスケートや受動車輪のように μ_t を小さくすることができず, 推進速度は遅いものとなった. より高速な移動のためにはエッジ形状の検討やエッジそのものを加熱するなどが必要であると思われる.

以上の実験から, 摩擦係数の差があれば氷上のような非常に滑りやすい路面であっても推進できるというほふく推進独特の特徴

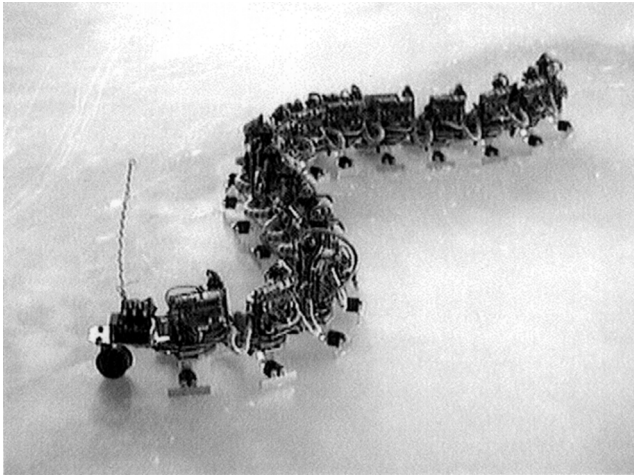


Fig. 9 Experiment on ice

が確かめられた。

6. 滑走面変化に対する適応滑走

ヘビは滑走面の摩擦係数比に応じてくねり角 α を適応的に変化させることが知られている。例えば法線方向に滑りやすい路面や、傾斜面の登坂のような場合には、より大きなくねり角を取ることで接線方向に力を多く配分する。

本章ではこれを機械モデルの制御則として導入し、滑走路面の变化に適応させることを考える。しかし摩擦係数を自由に变化させて実験することは難しいことから、滑走面变化の一例として今回は傾斜面を登坂させることを考える。これは摩擦係数比を变化させた場合と等価的に考えることができる。また適応推進の評価基準としては、移動体の最も基本的な物理量である推進速度の最大化を設定する。

まずはじめに水平面上での滑走を行い、くねり角と推進速度の関係を実験的に明らかにし、理論と比較する。またこの結果から推進速度を最大化するくねり角を導出する。

次に傾斜面に応じて、推進速度を最大化するくねり角を適応的に選択する手法を提案し、実験でその有効性を確認する[7]。

6.1 くねり角と推進速度

体軸方向速度 V_s を一定とし、くねり角 α と推進速度 V_x について定性的に考察する。

くねり角 α が大きくなると接線力が大きくなりその結果体軸方向への推進力は増加し、滑らかな滑走が可能となる(式(5))。しかし α が増大するに従って行程比は小さくなり、その結果、推進速度 V_x は低下する(式(4))。したがって推進速度を最大化するためには、式(7)に示される α の下限値で推進すればよい。

実験は式(3)で求められる体軸方向速度を0.1 [m/s]と固定し、くねり角を变化させたときの実際の滑走速度 V_{SE} を測定する。また同時に法線力およびモータ電流を計測する。次に V_s を变化させ、同様の測定を繰り返す。測定の範囲は V_s がおよそ0.1 [m/s]から1.0 [m/s]まで、くねり角は12.7 [deg]から89.1 [deg]まで变化させた。

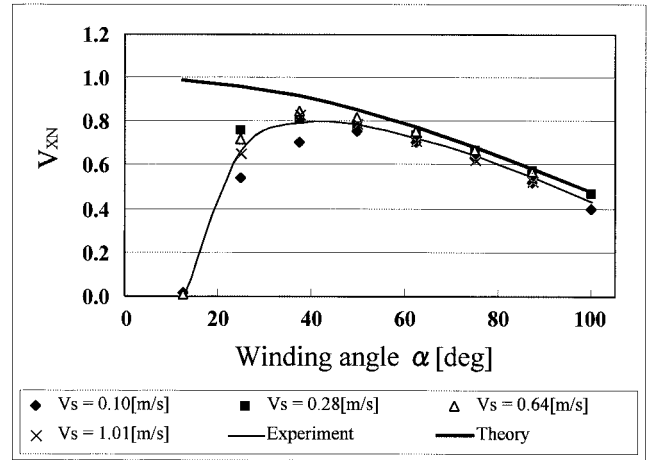


Fig. 10 Winding angle vs. normalized propulsive velocity on flat surface

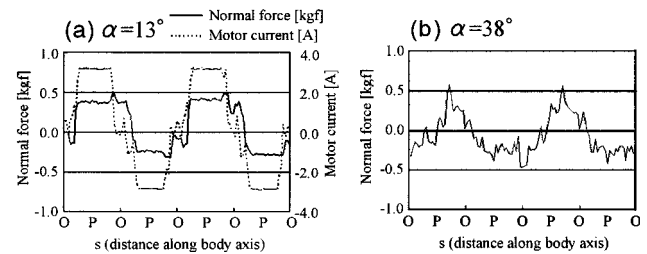


Fig. 11 Distribution map of the normal force

同様の滑走体で V_s のみを变化させて測定を行うことで、 V_s が大きくなることにより生ずる慣性力など動力的な影響を考察することができる。実験結果を検討するため、得られた V_{SE} に対して以下の正規化を行う。

$$V_{XN} = \frac{V_{SE}}{V_s} \cdot \frac{X(l)}{l} \quad (8)$$

正規化速度 V_{XN} とくねり角 α の関係をFig. 10に、また測定された法線力の一例をFig. 11 (a)(b)に示す。

まず動力的な影響であるが、理論滑走速度によらずくねり角に対して同様の傾向を見せていることから、滑走速度による慣性力の影響はほとんどないものと考えられる。したがって静力学関係のみで検討したとしても問題ないことが明らかになった。

次にくねり角と推進速度の関係であるが、 V_{XN} の平均値は上に凸なグラフとなり、 $\alpha = 43$ [deg]で最大値となった。

くねり角が大きい領域では理論値とよい一致が見られる。このときの法線力の分布はFig. 11 (b)のようになり、理論から求められた分布概形とも比較的よく一致する。しかしくねり角30 [deg]以下では急激に推進速度が低下していることがわかる。このとき例えば $\alpha = 13$ [deg]の法線力分布はFig. 11 (a)のように台形状になる。これはハードウェア的な電流制限がアクチュエータにかかったためである。またこのとき式(7)に示される滑走可能条件を十分満たしているにもかかわらず体幹はまったく推進することができなかった。くねり角が小さい領域の理論と実験の不一致

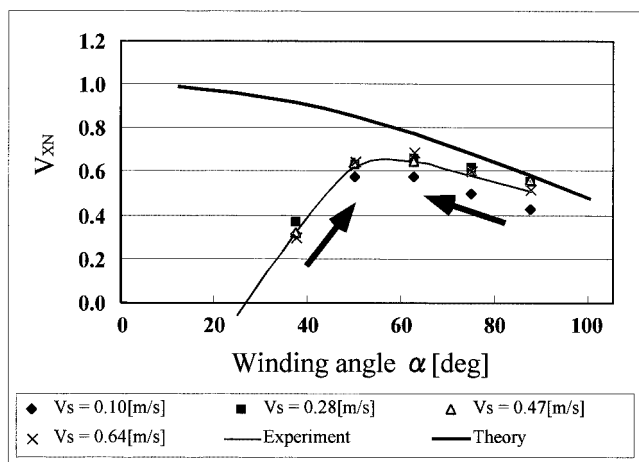


Fig. 12 Winding angle vs. normalized propulsive velocity on sloping surface

は以下2つの理由が考えられる。

まず機構的な側面として、実験機には節間にバックラッシュやサスペンションによる機構的なガタが存在するため、小さくなり角だと蛇行運動が吸収されてしまい、有効な推力を発生できないことが考えられる。

もう一つの理由として解析の仮定との差異が挙げられる。

従来理論においては滑走体型とは無関係に体幹のトルク分布を仮定し、これに基づいて式(7)が誘導される。しかしながら機械モデルを実際に制御する場合、滑走体型とトルク分布は独立に取ることができず、相関関係を持っている。本モデルにおいても制御しているのは位置のみであり、トルク分布は制御することができない。よってくねり角が小さくなることによりトルク分布が変化し、アクチュエータ出力の限界を超えてしまったものと考えられる。

以上の考察からくねり角が小さい領域では実験機のハードウェア的制約により推進速度が低下することが明らかになった。またこのとき滑走体型とトルク分布を分離して考える従来理論は適用できないことが明らかになった。より現実を反映するためにはトルク分布と滑走体型の関連を考慮した解析が必要である。

しかしながら機械モデルの効率的な推進制御法という立場から Fig. 10 をあらためて見ると、実験的に推進速度を最大にするくねり角が存在するという有用な結果が得られた。同様の実験を斜度4 [deg]の傾斜面上で行い、その結果を Fig. 12 に示す。水平面に比して、より大きなくねり角 ($\alpha = 56$ [deg]) が最適値となり、直観とも一致する結果である。

6.2 くねり角の適応推進

前節の結果を踏まえて、傾斜面に応じてくねり角を変化させる対地適応的推進を提案する。

これはくねりの大きさを微少変動させ、推進速度が向上した場合にはそのくねり角を採用する。すなわち Fig. 12 の矢印で示されるようにつねに推進速度を高めるよう漸近的にくねり角を変化させる方法である。本手法を用いれば摩擦係数比が異なる路面上を推進する場合でも対応することが可能である。したがって氷上滑走実験において推進不可能であったエッジAであっても、本

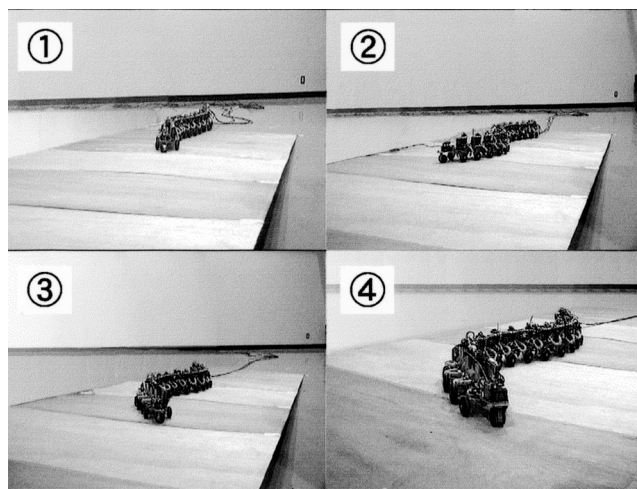


Fig. 13 Terrain adaptive propulsion

制御手法の導入により滑走可能になると考えられる。

本制御則を用いて水平面から傾斜面への登坂実験を行った。初期に設定したくねり角は20 [deg]である。傾斜面に乗り移るとしばらくは登坂することができず法線方向への横滑りや後退などが見られたが、徐々にくねりを大きくし登坂していく動作が確認された (Fig. 13)。

以上の実験からくねり角を変化させることによる傾斜面への適応推進が実現されていることがわかる。

7. ま と め

本論文ではヘビのほふく推進の工学的応用と機械モデルによる検証を目的として、自立索状能動体 ACM-R1 を構築した。

ACM-R1 は以前に構成された ACM III に比して完全自立型となるだけでなく推進速度もおよそ2倍になり、著しく高い性能を示した。実用的なロボット研究においてはそのときの技術環境に応じたデバイスを用いて常に実際のシステムを構築していくことが重要であると筆者らは考える。

構成された ACM-R1 を用いて氷上滑走実験を行い、原理的に氷上でも滑走できることを機械モデルで実証した。

次にくねり角と推進速度の関係を実験的に明らかにし、理論との比較を行った。その結果滑走体型とトルク分布を独立に扱う従来理論が適用できない場合があることを述べた。

さらに推進速度を評価指標として摩擦係数比に応じてくねり角を適応的に変化させる制御則を提案し、傾斜面への登坂実験によりその有効性を確認した。

今後の課題としては、機械モデルにおいては消費エネルギーを評価基準とした滑走の最適化や法線力センサの情報を用いた適応滑走などが挙げられる。また理論的側面では、より機械モデルに適した滑走理論として屈曲形態に依存したトルク分布をもつ、新たな滑走理論の検討が必要であると思われる。

謝 辞 快く実験の場を提供して下さいました神奈川スケートリンクの皆様深く感謝いたします。また本研究は文部省科学研究費 (COE 形成基礎研究費スーパーメカノシステムおよび特別研究員奨励費) を使用して行われました。

参 考 文 献

- [1] 広瀬茂男：生物機械工学．工業調査会，1987.
- [2] 馬：“ヘビの運動形態に関する研究（第1報：ヘビの直進蛇行移動体形曲線）”，日本機械学会論文集，62-593（C編），pp.230-236, 1996.
- [3] 馬・内藤：“蛇型移動ロボットにおける蛇行運動の解析”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'97論文集（Vol.A），pp.391-292, 1997.
- [4] 広瀬，遠藤：“完全自律型索状能動体“ACM-R1”の開発”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'97論文集（Vol.A），pp.309-310, 1997.
- [5] 福島・妻木・広瀬：“PWM制御方式DCサーボモータ駆動回路の開発”，第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.1153-1154, 1995.
- [6] 遠藤・外川・広瀬：“グライド推進の提案”，第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.209-210, 1998.
- [7] 遠藤・外川・広瀬：“索状能動体“ACM-R1”による対地適応推進の研究”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98論文集，1AII 1-3, 1998.



遠藤 玄（Gen Endo）

1972年10月20日生．1998年東京工業大学機械物理工学専攻博士前期課程修了．現在，同専攻博士後期課程に在籍．ヘビ型移動ロボット，脚－車輪型移動ロボットの研究に従事．1998年より日本学術振興会特別研究員．
（日本ロボット学会学生会員）



外川圭司（Keiji Togawa）

1975年8月22日生．1998年東京工業大学機械宇宙学科卒業．同年同大学大学院機械物理工学専攻修士課程進学，現在に至る．ヘビ型移動ロボット，脚－車輪ハイブリッド移動体の研究に従事．



広瀬茂男（Shigeo Hirose）

1947年12月6日生．1976年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了．同年，同大学機械物理工学科助手，1979年同大学助教授，1992年同大学教授，現在に至る．ロボットの機構，センサ，制御の研究に従事．工学博士．
（日本ロボット学会正会員）