修士学位論文

接地圧検知能力を有する3次元ヘビ型 ロボットの開発とその環境適応移動

平成 17 年度

茨城大学大学院 理工学研究科 システム工学専攻

学籍番号 04NM925S 氏 名 田邉 裕基

ABSTRACT

Snake-like robots can move even in some ill-conditioned environments such as on uneven or soft ground or in narrow space, where wheel-driven or legged robots cannot easily proceed. The aim of this study is to development a 3D snake-like robot that has 20-DOF and ability to detect ground pressure, and to verify the mechanical superiority and realization of environmentally adaptive locomotion. Its basic performance as a 3D snake-like robot is confirmed by snake motion experiment, and its mechanical superiority is proven by simulation. On the other hand, the environmental information, especially friction and normal force from the ground, is important for the snake-like robot to take a suitable movement form for the environment. In this study, the snakelike robot is able to sense whether each section is grounded or nongrounded by detection of normal force from the ground. In order to detect state of ground contact, ground pressure detection system is proposed and used. This system enables the snake-like robot to realize the environmentally adaptive locomotion.

In this thesis, we show a structure, mechanical and electric specifications of 3D snakelike robot's joint unit developed in this study. A characteristic of the mechanism is that rotatable angle of joints is larger than conventional types, and size and weight is smaller. Then we explain the ground pressure detection system for sensing state of ground contact, and we mention a control module composed of a computing equipment, sensor circuits and a battery mounted on each joint unit to realize self-sufficiency of the robot. We also describe control method for realizing 2D and 3D natural snake movement, such as serpentine or sinusoidal locomotion(2D) and sinus-lifting or sidewinding locomotion(3D). In each locomotion, its control method is based on functions of curvature that is called serpenoid curve.

Next, we describe the environmentally adaptive locomotion using the ability to detect ground pressure that is a conspicuous feature of the snake-like robot. In this study, we propose 2 environmentally adaptive locomotions named "Autonomous road-following locomotion" and "Efficient crevasse-crossing locomotion". The snake-like robot has 10-DOF on yaw and pitch axis respectively and it judges state of ground contact according to sensory information about normal force from the ground detected by sensors installed in passive wheels of links with pitch-axis joints. This contact information will be used as feedback signal for calculation of desired rotation in pitch-axis to realize autonomous following to curved surface or efficient crevasse-crossing locomotion. In crevasse-crossing locomotion, the robot stiffens its body when it reaches a crevasse. The effectiveness of these environmentally adaptive locomotions is verified by the real robot experiment.

要旨

蛇を模倣した生物機械であるヘビ型ロボットは,柔軟で能動的な体幹形状を活 用することで,車輪駆動型や歩行型では推進が困難である激しい凹凸や軟弱な地 盤上,狭隘地等においても移動可能である.本研究では,ロボット全体で20自由 度という超冗長性を有し,かつ胴体と滑走面との接地状態を検知できる,3次元へ ビ型ロボットの開発を行い,その機構的優位性と環境適応移動について検証する. 機構面の検証については,3次元ヘビ型ロボットとしての十分な基本性能を確保し ていることを,蛇の動作の実験により確認した上で,従来のヘビ型ロボットより も優れた機構的特徴を有することをシミュレーションにより証明する.一方,へ ビ型ロボットにとっての外部環境の情報,特に路面から受ける摩擦や抗力は,そ の環境に適した移動形態をとるための重要な判断材料となる.本研究では,外部 環境情報として路面から受ける垂直抗力を検出し,それによりロボットと滑走面 との接地,非接地の判定を体節ごとに行う.各体節における接地状態の検出には, 感圧センサとリニアガイドを車輪機構と組み合わせた,接地圧検知システムを利 用する.このシステムにより得られる情報を,関節の駆動制御に用いることで,へ ビ型ロボットの環境適応移動の実現が期待できる.

本論文では,まず,開発した3次元ヘビ型ロボットの関節ユニットの構造や機械 的,電気的仕様を示す.特に,機械的仕様において,従来型を上回る可動範囲を 有していることと,小型かつ軽量に仕上がっていることが特徴である.また,接 地状態の判定のための接地圧検知システムについて説明し,その具体的な構成に ついて述べる.さらに,ロボットの自立化のために各関節ユニットに搭載してい る計算装置,センサ回路,電源によって構成される制御モジュールの詳細につい ても示す.ついで,自然界で観測される,蛇行(サーペンタイン)やサイナソイ ダルといった2次元動作形態と,サイナスリフティングやサイドワインディング といった3次元動作形態を,開発したロボットで実現するための制御法について 具体的に述べる.いずれの形態においても,本研究ではサーペノイド曲線と呼ば れる,曲率についての関数をベースとして用いている.

引き続き,開発したヘビ型ロボットの持つ大きな特徴である,接地圧検知能力 を利用した環境適応移動について述べる.本研究で提案する移動形態は2つあり, 1つは「自律的路面追従」であり,もう1つは「効率的クレバス渡り」である.ヘ ビ型ロボットは,ヨー軸とピッチ軸回りに10自由度ずつ有しているが,そのピッ チ軸関節の下部に設置された受動車輪が路面から受ける垂直抗力を検出して,接 地状態の判定を行う.そして,この判定結果をピッチ関節の指令値計算に対する フィードバックとして用いることにより,曲面や凹凸状の路面に自律的に追従し たり,路面の裂け目にさしかかった時のみ,体幹を重力方向に対して硬直させる ような,エネルギー効率の良いクレバス渡りを行うことができる.これらの環境 適応移動の有効性については,実機実験によって検証を行った.

目次

第1章	序論	1
1.1	自然界における蛇............................	2
1.2	ヘビ型移動ロボット	4
	1.2.1 生物機械としての特徴	4
	1.2.2 外部環境の認識	6
1.3	従来の研究	6
1.4	本研究の目的	7
1.5	本論文の構成	9
第2章	ヘビ型ロボットの体節構造	11
2.1	はじめに...............................	12
2.2	関節ユニットの機構と仕様........................	12
	2.2.1 2自由度の関節機構	14
	2.2.2 受動車輪機構	14
	2.2.3 接地圧検知システム	15
	2.2.4 関節ユニットの機械的仕様	18
2.3	制御用回路モジュール	18
	2.3.1 センサ使用回路	18
	2.3.2 関節制御モジュールの仕様	20
2.4	ヘビ型ロボットの構築	22
2.5	おわりに..............................	22
第3章	ヘビ型ロボットの動作制御	25
3.1	はじめに	26
3.2	位置制御系	26
3.3	体形曲線	26
3.4	蛇の動作の制御法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
	3.4.1 2次元動作	28
	3.4.2 3次元動作	29
3.5	接地圧検知による駆動制御・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
	3.5.1 自律的路面追従	31
	3.5.2 効率的クレバス渡り	31

ii

3.6	おわりに...............................	33		
第4章	実機実験及びシミュレーション			
4.1	はじめに...............................	36		
4.2	実験装置の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36		
4.3	蛇の動作の実現	37		
	4.3.1 2次元動作実験	37		
	4.3.2 3次元動作実験	42		
	4.3.3 基本性能の検討	42		
4.4	高可動性による旋回及び坂登りへの効果	47		
	4.4.1 旋回半径と最大関節角度の関係	47		
	4.4.2 くねり角と斜面推進効率の関係	47		
4.5	環境適応移動の実現	51		
	4.5.1 凹凸面における路面追従実験	51		
	4.5.2 クレバス渡り実験	56		
	4.5.3 接地圧検知能力の考察	57		
4.6	おわりに...............................	57		
第5章	結論	59		
5.1	本論文のまとめ	60		
5.2	今後の展望	61		
謝辞		63		
参考文南	χ	65		
発表論な	ζ	69		
付録A	PWM 信号のパルス幅の導出	71		
付録B	関節ユニットの外観と寸法	75		

図目次

1.1	Capability of biological snakes
1.2	Movements of snake
1.3	Snake-like robot in extreme environments
1.4	Unique movements of snake-like robot
1.5	Past 3D snake-like robot
1.6	3D snake-like robots in our laboratory
2.1	Joint unit of 3D snake-like robot
2.2	Internal structure of the joint unit
2.3	2-DOF joint mechanism
2.4	Direction of tangent and normal of snake body
2.5	Passive wheel mechanism
2.6	Ground pressure detection system
2.7	Schematic diagram of the sensor circuit
2.8	Relation between output voltage and load 20
2.9	Control module for the joint unit
2.10	3D snake-like robot
3.1	Servo control system
3.2	Body shape curve
3.3	2D movement form
3.4	3D movement form
3.5	Definition in row of joint units
3.6	Valley type adaptation
3.7	Mount type adaptation
3.8	Crevasse adaptation
4.1	Communications of command server and snake-like robot
4.2	Real machine experiment of serpentine locomotion for condition 3 ($\alpha_0^y =$
	45, Kn = 1.5)
4.3	Real machine experiment of serpentine locomotion for condition 6 ($\alpha_0^y =$
	60, Kn = 2.0)

4.4	Real machine experiment of sinusoidal locomotion for condition 1 ($\alpha_0^p =$	
	30, Kn = 1.5)	40
4.5	Real machine experiment of sinusoidal locomotion for condition 2 ($\alpha_0^p =$	
	30, Kn = 2.0)	41
4.6	Real machine experiment of sinus-lifting locomotion for condition 1	
	$(\alpha_0^y = 45, \alpha_0^p = 10, Kn = 1.5)$	43
4.7	Real machine experiment of sinus-lifting locomotion for condition 2	
	$(\alpha_0^y = 60, \alpha_0^p = 10, Kn = 1.5)$	44
4.8	Real machine experiment of sidewinding locomotion for condition 1	
	$(\alpha_0^y = 45, \alpha_0^p = 10, Kn = 1.5)$	45
4.9	Real machine experiment of sidewinding locomotion for condition 3	
	$(\alpha_0^y = 45, \alpha_0^p = 10, Kn = 2.0)$	46
4.10	Relation between $^{max}\theta^{y}$ and R for turning movement ($\alpha_{0}^{y} = 60, Kn = 2.0$)	48
4.11	Real machine experiment of turning movement ($\alpha_0^y = 60, Kn = 2.0,$	
	K1 = 2.0)	49
4.12	Relation between moving distance and $\alpha_0^{y}(^{max}\theta^{y})$ for creeping locomo-	
	tion on a slope	50
4.13	Real machine experiment of concave following movement	52
4.14	Real machine experiment of convex following movement	53
4.15	Real machine experiment of uphill movement	54
4.16	Real machine experiment of downhill movement	55
4.17	State of stuck that can happen when there is no sensor feedback	56
4.18	Real machine experiment of crevasse-crossing movement	57
A.1	Puls for control of RC servo motor	72
A.2	Relation with GRD value and angle of servo horn	73
B .1	External view and size of the joint unit	76

iv

表目次

2.1	Specifications of RC servo motor	3
2.2	Details of passive wheel section	6
2.3	Mechanical specs of the joint unit	8
2.4	Specifications of other 3D snake-like robots	8
2.5	Specifications of the control module	20
2.6	Comparison as snake-like robot	22
4.1	Command transmitted from server	36
4.2	Real machine parameter 3	37
4.3	Parameter for serpentine locomotion and observed speed	37
4.4	Parameter for sinusoidal locomotion and observed speed	37
4.5	Parameter for sinus-lifting locomotion and observed speed 4	2
4.6	Parameter for sidewinding locomotion and observed speed 4	2
4.7	Parameter for turning movement	18
4.8	Simulation parameter	19
4.9	Experimental environment parameter	51
4.10	Parameter for concave and convex follow	51
4.11	Parameter for uphill and downhill movement	52
4.12	Parameter for crevasse-crossing movement	56
A.1	Specifications of control signal for Futaba servo	13

第1章 序論

目次

1.1	自然界における蛇	
1.2	ヘビ型移動ロボット	
	1.2.1 生物機械としての特徴4	
	1.2.2 外部環境の認識	
1.3	従来の研究 6	
1.4	本研究の目的	
1.5	本論文の構成 9	

1.1 自然界における蛇

蛇は一本の紐状の単純な形態でありながら,その体幹形状を複雑に変化させる ことによって様々な環境に適応することのできる生物である.その適応能力の高 さは,自然界でみられる以下のような環境への対応状態からもうかがえる.

- 体幹をくねらせることにより,凹凸の激しい荒れ地でも推進することができる(Fig.1.1(a)).
- 自重を体幹全体に分散させることで,砂地や沼地などの軟弱な地盤上でも推進できる(Fig.1.1(b)).
- 細長い体幹を硬直化して,力学的に安定な姿勢を保持することによって,枝から枝へ乗り移るといった動作が可能である(Fig.1.1(c)).
- 体幹のくねりによって,陸上だけでなく水上を泳いで移動することもできる (Fig.1.1(d)).



(a) Wildland



(b) Sandy soil



(c) Branch contact



(d) Swimming

Fig.1.1: Capability of biological snakes

また,蛇は環境に応じて様々な移動形態をとることができるが,大きく分類すると以下に示す4種類の移動方法が考えられている[1].

- 蛇行式移動... 蛇のほとんど全種類にみられる典型的な移動形態であり,体 幹を連続的に湾曲させることで推進する(Fig.1.2(a)).
- 直線式移動 … ミミズの様に移動する方法で,移動メカニズムとしては極めて 単純であるが,進行方向に対する摩擦力が大きいため効率が悪い(Fig.1.2(b)).
- アコーディオン式移動…原理的には、静止摩擦係数が動摩擦係数よりも大きいことを利用して推進する.そのため、いかにすべりやすい環境においても移動可能だが、その推進効率は非常に低い(Fig.1.2(c)).
- サイドワインダ式移動… 滑走中に体幹の一部を浮き上げ,あたかもスパイラルコイルが転がるように推進を行う.この移動形態には体幹と滑走面とのすべり運動がなく,体幹は常に上から押さえるように地面をとらえる(Fig.1.2(d)).



(a) Serpentine movement



(c) Concertina movement



(b) Rectilinear movement



(d) Sidewinding movement

Fig.1.2: Movements of snake

1.2 ヘビ型移動ロボット

従来の移動ロボットは,その多くが車輪やクローラに代表される無限回転機構 により推進するものであった.車輪駆動によって移動するロボットは舗装路のよう に整備された路面上であれば,滑らかかつ高速に推進することができるが,激し い凹凸や段差の登り降りは困難である.一方,我々人間をはじめ地上に存在する 多くの動物が行っている移動形態は脚を用いた歩行である.この脚を利用して移 動する歩行ロボットであれば,凹凸路面の走破や段差の乗り越えなども可能であ るが,砂地や沼地などの軟弱な地盤上での移動には不向きである.なぜなら,移 動形態の原理上,有限な点に重量を集中させてしまうからである.

ところが,自然界においては蛇が上述のような環境にも対応していることを前 節で述べた.そこで,この蛇のもつ高い環境適応能力を移動ロボットに適応する ことによって,従来型の移動ロボットでは対応しきれなかった環境下での移動も 可能になることが期待される.

1.2.1 生物機械としての特徴

蛇の体幹は,寸法の極めて小さな関節を100個以上繋げた形で構成されている. そのため,各関節の可動限界角が小さいにも関わらず全体としては複雑な体幹形 状をとることができている.しかし,生物機械としてのヘビ型ロボットを製作す る場合は,生物の蛇と比較すると1関節当たりのサイズが大きくなる上,その個 数も生物の蛇のように多くはできず,10数個程度が現実的である.よって,実際 の機械システムにおいては各関節の可動範囲は極力大きい方が良い.

また,ヘビ型ロボットの各関節をユニット化しておけば,ロボット全体として 冗長で信頼性の高いシステムを実現することができる.それにより,環境適応能 力の高さ以外にも以下のような利点が挙げられる.

- 一部のユニットが故障・破損した場合でも,他のユニットがその部分を補う 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低い.
- 分離や再結合が容易であるため、1体のヘビ型ロボットを2、3体に分割し協調作業を行うことも可能である.
- 体幹を巻きつけることにより、物の把持などもできるため、グリッパやマニ ピュレータとしても機能する[2][3].

さらに,ヘビ型ロボットは従来の移動ロボットと比較して進行方向に対する断 面積が小さくて済む.また,ユニット数を変更する必要があったとしても,通常 は直鎖状に連結していくので断面積は一定である.これにより,従来のロボット では入り込めないような狭い隙間への進入も可能である.

このような特徴を有するヘビ型ロボットは,以下に示すような,従来の移動ロ ボットや産業用ロボットでは作業が困難な極限環境での活躍が期待されている[4].

- 震災発生時の被災地における生存者の探索 (Fig.1.3(a))
- 草木の密集地帯における地雷の撤去作業(Fig.1.3(b))
- 細長い配管内における点検作業

また,本研究では直接扱わないが,ローリングトラック[5]やラテラルローリング[6]といった自然界ではみられない動作もヘビ型ロボットの移動形態として提案されている(Fig.1.4).このように,生物機械であるヘビ型ロボットは,生物の模倣だけでなく,生物を越えた側面ももっている.



(a) Search for survivors in disaster area



(b) Movement in dense stand of plants

Fig.1.3: Snake-like robot in extreme environments



(a) Rolling track

(b) Lateral rolling

Fig.1.4: Unique movements of snake-like robot

1.2.2 外部環境の認識

蛇の移動形態については前節でも述べたが,実際に蛇が採用すべき形態を決定 する際には,外部の環境情報を判断材料として用いていると考えられる.その具 体例としては,滑走面上の摩擦力や滑走面から受ける抗力といった力学的情報を はじめ,地表付近の温度や湿度といった化学的情報も考えられる.

すなわち,蛇を模倣した生物機械であるヘビ型ロボットにおいても,高い環境 適応能力を実現するには,上述のような外部環境情報を,センサを用いて認識で きるべきである.そして,取得したセンサ情報をもとに,運動形態を変化させら れることが望まれる.

1.3 従来の研究

ヘビ型ロボットは,能動的な1つ以上の自由度を有する関節ユニットを直鎖状 に連ねていくことにより構成される.ヘビ型ロボットの中には,各関節ユニット が有する自由度が1つのみで,さらにその自由度が全て同一軸回りのものである ことにより,2次元的な運動のみを行うタイプも存在する.

しかし,生物の模倣という観点からいえば,実際の蛇と同様に3次元動作も行 えるべきである.実際,従来の研究で開発されたものの多くは全体として3次元 的に動作できるヘビ型ロボットである.従来開発された3次元ヘビ型ロボットを 以下に示す.

- ACM-R2:体幹を持ち上げる際の出力トルクを向上させるために,ワイヤとハー モニックギアの組み合わせにより,大きな減速比を得ている.同時に差動機 構を用いることで,モータパワーを有効に活用している.これによりヨー, ピッチ軸回りの2自由度を有する(Fig.1.5(a))[7].
- ACM-R3: 各関節には1自由度ずつしか有していないが,それらのユニットに 90°のオフセットをもたせて連結することで,全体として3次元運動を実現 できる(Fig.1.5 (b))[8][9].
- Slim Slime:単位節の伸縮と屈曲動作に,圧縮空気分配メカニズムによる空気圧 駆動を用いている.この単位節を直列に連結することによって,3次元動作 を可能にしている(Fig.1.5(c))[10][11].
- GMD-Snake:動力の伝達機構にワイヤを用いていて,障害物を乗り越えるといった3次元的な運動が可能である(Fig.1.5(d))[12][13].
- OROCHI: ユニバーサルジョイント内部を,斜板駆動機構で駆動するアクティ ブユニバーサルジョイントと呼ばれる関節機構を採用している.これは,両 軸を互いに捻ることにより2自由度を得る方法である(Fig.1.5(e))[14][15].
- OBLIX:傾斜した回転軸回りに旋回する斜旋回機構と,同軸回りに旋回する同 軸旋回軸とを交互に連結することによりヨー,ピッチ軸回りに動作すること ができる.これにより,屈曲軸の機構がコンパクトにできている(Fig.1.5(f)) [16][17].

しかしながら,従来開発された3次元ヘビ型ロボットの多くは,各関節の可動 範囲の大きさは十分とはいえず,生物の蛇同様の複雑な体幹形状の採用は困難で あった.こうした従来の問題点に対し,本研究室においても関節の可動性能を追 求した3次元動作可能なヘビ型ロボットの開発を行ってきた(Fig.1.6)[18][19].

Fig.1.6のヘビ型ロボットは,可動性能については従来のものより向上したが,ロ ボットの自立化ができておらず,外部装置との接続による拘束の影響で動作に制 限があった.さらに,実用面からいえば関節ユニットのサイズや重量は抑制すべ きであるが,Fig.1.6(b)に示す3自由度関節を有するヘビ型ロボットは,自由度が 多いために必要なデバイスも多くなり,重量やサイズの増加は避けられなかった.

また,1.2.2項で外部環境の認識について述べたが,これまでのところ,取得した外部環境情報をヘビ型ロボットの駆動制御に用いることによる,自律的な環境への適応動作は十分に検討されていない.

1.4 本研究の目的

本研究では,前節で述べた課題を克服することで,従来の性能を上回るような3 次元動作可能なヘビ型ロボットの開発を行う.以下に,具体的なテーマを挙げる.



(a) ACM-R2



(b) ACM-R3



(c) Slim Slime



(d) GMD-Snake



(e) OROCHI



(f) OBLIX





(a) 2-DOF snake robot

(b) 3-DOF snake robot

Fig.1.6: 3D snake-like robots in our laboratory

- 高い可動性能の実現
- 外部環境情報の認識
- 重量, サイズの抑制
- 外部装置からの自立

さらに,外部環境情報にもとづいて自律的に動作するための関節の駆動制御法 を提案する.そして,その駆動制御を本研究の関節ユニットに適用することで,ヘ ビ型ロボットの環境適応移動の実現を行う.また,実機実験やシミュレーション 実験を通して,本研究のヘビ型ロボットの基本性能や,機構的な優位性について の検証も行う.

1.5 本論文の構成

本論文は5章構成であり,本章以降は以下に示す構成になっている.

まず第2章で,開発した関節ユニットの機械的構造を述べたうえで,関節自由 度機構や接地圧感知機構について説明する.そして,関節ユニットと制御用回路 モジュールの仕様とともに,これらを連結して構築した3次元へビ型ロボットに ついて述べる.

第3章では,関節の位置制御系について示したうえで,ヘビ型ロボットの体形 曲線について言及する.そして,それをベースとした蛇の動作を行うための制御 式を示す.さらに,本関節ユニットの接地圧検知能力を用いた,自律的な路面追 従と,効率的なクレバス渡りを実現するための駆動制御について述べる.

第4章では,開発したヘビ型ロボットに対し,前章で示した制御式を用いることで蛇の動作の実機実験を行い,基本性能を確認する.さらに,シミュレーショ

ン実験を通して,機構的優位性の検証を行う.また,前章で述べた2種類の環境 適応移動の実機実験を行う.

そして第5章で,本論文の内容を総括し,今後の展望について述べる.

第2章 ヘビ型ロボットの体節構造

目次

2.1	はじめ	12	
2.2	関節コ	1ニットの機構と仕様	
	2.2.1	2 自由度の関節機構14	
	2.2.2	受動車輪機構 14	
	2.2.3	接地圧検知 システム 15	
	2.2.4	関節ユニットの機械的仕様18	
2.3	制御用	19回路モジュール	
	2.3.1	センサ使用回路 18	
	2.3.2	関節制御モジュールの仕様20	
2.4	ヘビ型	』 ロボットの構築 22	
2.5	おわり)に	

2.1 はじめに

本章では,まず開発した関節ユニットの機械的な構造を述べた上で,関節自由 度機構,受動車輪部の機構,接地圧検知システムについて説明する.そして,そ の関節ユニットと関節の制御に用いる回路モジュールの仕様を述べ,最後にこれ らを連結して構築した3次元ヘビ型ロボットについて示す.

2.2 関節ユニットの機構と仕様

関節ユニットは,ヘビ型ロボットを構築する上での構成単位であり,ロボット 全体の性能を左右する重要な要素である.本研究で開発した,3次元ヘビ型ロボットの関節ユニットを Fig.2.1 に示す.さらに,この関節ユニットの部品構成を模式 的に表した図を Fig.2.2 に示す.

この関節ユニットは, RC サーボモータを含んだフレームセット2つを直交させ て締結し, さらにその一方に受動車輪を取り付けた形となっている.そのフレー ムの材質には軽量,安価で加工の容易なアルミを使用している.また,駆動軸の 両持ち支持を実現するため,サーボホーンの反対側では,サーボフレームとメイ ンフレームの間を,ベアリングと加工した金属カラーを用いて支持している.

本関節ユニットで使用している RC サーボモータの仕様を Table 2.1 に示す.



Fig.2.1: Joint unit of 3D snake-like robot



No.	Part	No.	Part
1	Main frame	4	RC servo motor
2	Face frame	5	Support collar
3	Servo frame	6	Passive wheel section

Fig.2.2: Internal structure of the joint unit

Manufacturer	Futaba	
Model	S3305	
Туре	Analog	
Gear	Metal	
Torque	8.9kg-cm (6V)	
Speed	0.2sec/60deg (6V)	
Weight	46g	
Size	40×38×20mm	

Table 2.1: Specifications of RC servo motor

2.2.1 2自由度の関節機構



Fig.2.3: 2-DOF joint mechanism

本研究の関節ユニットは直交する2軸周りに回転可能となっている.その2自由 度関節機構の概念図をFig.2.3に示す.また,Fig.2.3の状態を基準位置(±0°)とし た時の各関節の可動限界角度は,車輪が付加されている方(ピッチ側)が+90°,-45°であり,もう一方(ヨー側)が±90°となっている.

以降の議論においても,関節軸方向と前後方向について言及する際は,常に Fig.2.3 に示すヨー軸とピッチ軸,頭側と尻尾側の定義に従うものとする.

2.2.2 受動車輪機構

蛇が匍匐(ほふく)運動による推進,すなわち蛇行移動を実現するためには,腹部と地面との間に,ある摩擦条件が必要になる.その摩擦条件とは,推進方向に対しては滑りやすいが,横滑りはしにくい性質を持つことである.これは,体幹の接線方向摩擦係数 μ_t と,法線方向摩擦係数 μ_n との間に式(2.1)の関係が成り立っている状態と言い換えることができる.

$$\mu_n \gg \mu_t \tag{2.1}$$

また,この場合の接線と法線の方向とは,それぞれ Fig.2.4 に示す方向となる.



Fig.2.4: Direction of tangent and normal of snake body

このような性質をヘビ型ロボットに簡単に付与する方法としては,以下の2つ が考えられる.

- スキーやスケートのエッジ
- キャスターなどの受動車輪

エッジを利用すると,雪原や氷上での滑走[20]を目的とする場合には有効であ るが,硬平地において式(2.1)を満たすためには,受動車輪の利用が望ましい.そ こで,本研究ではFig.2.5に示すような受動車輪機構を考案した.

この車輪はベアリングを内蔵したタイプであり,今回のように接線方向と法線 方向の摩擦係数の差を大きくしたい場合には特に有効である.さらに,左右の車 輪の間には,やはりベアリング内蔵のローラが挟まれている.このローラによっ て,小さな障害物が車輪間に入り込んだ場合でも滑らかに乗り越えられる.この 車輪機構部で使用されている各部品の詳細を Table 2.2 に示す.

2.2.3 接地圧検知システム

前項で述べた受動車輪機構には,蛇行移動の実現に必要な摩擦条件を満たすこと以外にも重要な機能がある.それが,環境適応移動のための接地圧検知システムである.

Fig.2.5の中のリニアガイドとは直動ベアリングのことであり,本機構ではこの ガイドレールが受動車輪を貫くシャフトと連動して上下に微小変動する.その変 動によって,ガイドレールの先端面がメインフレーム側に取り付けられた感圧セ ンサの圧力検出部を加圧または減圧することになり,それにより関節ユニットが 接地しているのか,非接地(浮いている)状態なのかを感知できる仕組みになっ ている.この接地圧検知システムの詳細を Fig.2.6(a)に示す.また,本システムで 用いている感圧センサ,イナストマー[21]を Fig.2.6(b)に示す.このセンサは,圧 力変化によるゴムの変位(歪み)に伴って電気抵抗値が変化するという特徴を持っ ている.このシステムを関節の制御に利用することで,ヘビ型ロボットの環境適 応移動を実現できると考えられる.



No.	Part	No.	Part
1	Passive wheel	4	Linear guide
2	Roller	5	Wheel frame
3	Guide rail holder	6	Connection plate

Fig.2.5: Passive wheel mechanism

	Material	Туре	Manufacturer
Linear guide	Stainless steel	LWLC5C1R23BHS1	NIPPON THOMPSON
Passive wheel	Urethan	UMBB6–28	MISUMI
Roller	Aluminum(A5052)	RORA20-25	MISUMI



(a) Details of the system



(b) Pressure conductive sensor, INASTOMER

Fig.2.6: Ground pressure detection system

2.2.4 関節ユニットの機械的仕様

Tuble 2.5. Weenamear spees of the Joint and			
Size [mm ³]		130×62×77	
Weight [kg]		0.281	
Output torque [Nm]		0.872	
Rotate speed [rpm]		49.8	
Movable angle [deg]	Yaw	±90 (180)	
	Pitch	+90, -45 (135)	

Table 2.3: Mechanical specs of the joint unit

Table 2.4: Specifications of other 3D snake-like robots

		ACM-R3	OROCHI	3DOF-SNAKE
Size [mm ³]		110×110×110	$185 \times 42 \times 42$	230×70×70
Weight [kg]		0.6	0.6	0.9
Movable angle [deg]	Yaw	±62 (124)	±60 (120)	±90 (180)
	Pitch	±62 (124)	±60 (120)	±90 (180)
	Roll	-	-	±180 (360)

本研究で開発した感圧式関節ユニットの機械的な仕様を Table 2.3 に示す.また, 参考のため従来の3次元ヘビ型ロボットの関節ユニットの仕様を Table 2.4 に示す. Table 2.4 より,本研究の関節ユニットが従来のものと比較して軽量であることや, ヨー,ピッチ軸回りの可動範囲が広いことなどがわかる.

2.3 制御用回路モジュール

本研究では,各関節に対する指令値の計算にH8/3694Fマイコン[22]を用いる. そして,このH8マイコンボードを本研究室で製作されたインタフェースボードに 載せて使用する.また,圧力センサを使用するために必要な回路を製作し,H8マ イコンによるセンサ出力の取り込みを可能にした.

2.3.1 センサ使用回路

2.2.3 項で述べたように,本研究で用いる感圧センサは圧力の大きさに応じて電気抵抗値が変化する仕様となっている.

そこで,このセンサを使用して圧力変化を検出するために,センサへの電源供給と,出力を電圧変化として取り出すための回路の製作を行った.本研究で製作したセンサ用回路の回路構成をFig.2.7 に示す.





Fig.2.7: Schematic diagram of the sensor circuit

また,負荷と出力電圧の関係を調べるため,この回路に電源電圧5Vを供給して 行った特性試験の結果をFig.2.8 に示す.なお,図中に示す電圧値は,同様の試験 を4回繰り返して得られた各値の平均値を使用している.



Fig.2.8: Relation between output voltage and load

2.3.2 関節制御モジュールの仕様

製作したセンサ用回路とマイコンボード,バッテリによって構成される関節制御 モジュールを Fig.2.9 に示す.図中の電源ラインにより,バッテリから電源を供給 されたマイコンが,センサ使用回路へ5Vの電源電圧を供給できる.なお,サーボ モータへの電源供給も同じバッテリで行うため,節ごとの単一電源駆動となって いる.この制御モジュールの仕様を Table 2.5 に示す.また,総重量は79 [g],厚 みは20 [mm] 程度である.ここで,Fig.2.9(b) において,前後のモジュール間でセ ンサ出力値の受け渡しを行っていることについては,3.5 節で詳しく述べる.

	Component	Spec. or Type	Manufacturer
Main controller	CPU	Clock 20MHz	Renesas Technology
(H8/3694F board)	Memory	ROM 32Kbyte	
		RAM 2Kbyte	
Sensor circuit	Amplifier	LM2904(Dual Op-Amp)	National Semiconductor
Battery	Li-Po(2cell)	7.4V 700mAh	Air Craft

Table 2.5: Specifications of the control module

Sensor circuit



(a) Components of the control module



(b) Signal-flow of the control module

Fig.2.9: Control module for the joint unit

2.4 ヘビ型ロボットの構築



Fig.2.10: 3D snake-like robot

これまでに述べてきた関節ユニットを直列に 10 個連結した上で,それぞれに前 節で述べた制御モジュールを搭載することで,Fig.2.10 に示す 3 次元ヘビ型ロボッ トを構築した.このヘビ型ロボットは,自由度の総数と種類は ACM-R3 と同じで あるが,体幹の全長と断面積,総重量については,いずれもより小さく抑えるこ とができている(Table 2.6).

Table 2.6: Comparison as snake-like robot

1			
	Our 3D snake-like robot	ACM-R3	
Total DOF	20(Yaw10/Pitch10)	20(Yaw10/Pitch10)	
Length of body [mm]	1300	1755	
Cross-section area [mm ²]	62×97	110×110	
Total weight [kg]	3.6	12.1	

この構成では,先頭ユニットのピッチ自由度と最後尾ユニットのヨー自由度は ロボットの移動運動には使用しないことになる.しかし,例えば Fig.2.10 では先 端に無線カメラが取り付けてあり,その仰角の調整などに,余った自由度を利用 することができる.

2.5 おわりに

本章においては,開発した関節ユニットの関節自由度機構や受動車輪機構,接 地圧感知機構について説明した上で,その関節を制御するための制御用モジュー ルの構成と,構築した3次元ヘビ型ロボットの仕様について述べた. また,開発した関節ユニットは,従来のものと比較して高い可動性能を有して おり,さらに10ユニットを連結して構築した,3次元ヘビ型ロボットととしても, 従来型に対する機構的優位性がみてとれた.

第3章 ヘビ型ロボットの動作制御

目次

3.1	はじめに...........................	26
3.2	位置制御系	26
3.3	体形曲線	26
3.4	蛇の動作の制御法...........................	28
	3.4.1 2次元動作	28
	3.4.2 3次元動作	29
3.5	接地圧検知による駆動制御...................	30
	3.5.1 自律的路面追従	31
	3.5.2 効率的クレバス渡り	31
3.6	おわりに	33

3.1 はじめに

本章では,まず開発した関節ユニットの位置制御について述べる.そして,関 節に対する指令値の計算に用いる体形曲線について言及した上で,それをベース とした,いくつかの蛇の動作を実現するための制御式を示す.さらに,本関節ユ ニットの有する大きな特徴である,接地圧検知能力を活用した自律的な路面追従 と効率的なクレバス渡りを実現するための駆動制御について説明する.

3.2 位置制御系

本研究のヘビ型ロボットにおいて,実際に制御対象となるのは,各関節ユニットに搭載されているRCサーボモータである.RCサーボモータは,ケース内に小型DCモータとポテンショメータ,制御回路が内蔵されていて,この制御回路へ入力する信号はPWM(Pulse Width Modulation)信号となる.このPWMの値を,目標とするサーボ軸角度に応じた値に設定することで,PWM駆動によるモータの位置制御[23]を容易に実現することができる.Fig.3.1にこのサーボ制御系を示す.



Fig.3.1: Servo control system

3.3 体形曲線

蛇が移動しているときに描く体幹の形状のことを体形曲線と呼ぶ.蛇が移動時 に体軸法線方向に滑らない(横滑りしない)と仮定すると,この体形曲線は蛇の 滑走時の移動軌跡と等しくなる.

蛇の滑走時の体形曲線については,古来より様々なものが提案されてきた.例 えば,三角波や正弦波によって近似されたものなどがあった.また,H.Hertelは, x軸方向とy軸方向の正弦関数を合成したミアンダー曲線と称する曲線でもって, 蛇の水泳時の体形を近似できるとした[24].

これらの提案に対して,梅谷によってクロソイド曲線による体形曲線の近似が なされた[25].この曲線はフレネル積分[26]により表示され,曲率が曲線長に比 例して変化するという関係を x-y 座標で表現したものである.
しかし,体形全体をこの曲線で構成した場合,筋肉の収縮速度(曲率の変化率) が不連続となる点が存在することから,自然な仮定であるとはいえなかった.そこ で,広瀬らによって筋肉の収縮速度までも全体軸に沿ってなめらかな曲線として,

「曲率が曲線に沿って正弦波状に変化する曲線」

が提案された.この曲線はサーペノイド曲線[1]と呼ばれ,蛇の移動時の体形をもっともよく近似することが,観測実験により明らかにされている.よって,本研究では,ヘビ型ロボットの体形曲線としてこのサーペノイド曲線を利用する(Fig.3.2).サーペノイド曲線を用いて,体形曲線の曲率 $\kappa(s_p)$ を次のような式で表す.

$$\kappa(s_p) = -\frac{2K_n \pi \alpha_0}{L} \sin\left(\frac{2K_n \pi}{L} s_p\right) + K_1 \tag{3.1}$$

このサーペノイド曲線を,生物機械であるヘビ型ロボットに適用するためには, 曲線をリンク長によって離散化する必要がある.そこで,体形曲線を等間隔に分 割した点を通る接線を各リンクと近似すると,そのリンク同士のなす角,すなわ ち関節角度 $\theta_i(s)$ は,以下のような式で表される.

$$\theta_i(s) \approx \int_{s+s_{p_{i-1}}+\frac{1}{2}l}^{s+s_{p_i}+\frac{1}{2}l} \kappa(u) du$$
(3.2)

$$\approx \int_{s+(i-1)l+\frac{1}{2}l}^{s+il+\frac{1}{2}l} \kappa(u) du \tag{3.3}$$

$$\theta_i(s) = -2\alpha_0 \sin\left(\frac{K_n\pi}{n}\right) \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n}i\right) + K_1 l$$
(3.4)

ここで, K_n は S-形状の数, α_0 は初期くねり角, s_p は体形曲線の曲線長, s は体 形曲線に沿う蛇型ロボット末端の移動距離, L は体幹全長, K_1 はバイアス曲率, lは各リンク長, n(=L/l) はリンク数, i(=1,2,...,n-1) は関節番号である.



Fig.3.2: Body shape curve

3.4 蛇の動作の制御法

本研究で開発したロボットは,各関節ユニットにヨーとピッチの2自由度を有 している3次元動作可能なヘビ型ロボットである.ここでは,開発した3次元へ ビ型ロボットを用いて,自然界で実際に見られる2次元と3次元の運動形態を実 現するための動作制御について述べる.

3.4.1 2次元動作

2次元動作形態には,水平面上の2次元動作と垂直面上の2次元動作が考えられる.これらは,ヨー軸またはピッチ軸回りのどちらか一方の周期的くねり動作となるため,前節で述べたサーペノイド曲線を,波の伝搬方向だけ考慮して用いることで,蛇行(サーペンタイン)とサイナソイダルの2つを実現する.これらの移動形態を各平面に投影したものをFig.3.3 に示す.



Fig.3.3: 2D movement form

この蛇行式移動の推進原理については 2.2.2 項で述べた通りである.一方,サイ ナソイダルは,上下の波(垂直面上に投影される波)を進行方向とは逆向きに伝搬 させることで推進する移動形態である.この形態は,推進効率は低いが,進行方向 に対する摩擦のみが影響するため受動車輪等は不要である.これらの動作を,本研 究で開発したヘビ型ロボットで実現するための制御式を,それぞれ式(3.5),(3.6) に示す.

[Serpentine]

$$\begin{bmatrix} \theta_i^y(s) \\ \theta_i^p(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\alpha_0^y \sin\left(\frac{K_n\pi}{n}\right) \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n}i\right) \\ 0 \end{bmatrix}$$
(3.5)

[Sinusoidal]

$$\begin{bmatrix} \theta_i^y(s) \\ \theta_i^p(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -2\alpha_0^p \sin\left(\frac{K_n\pi}{n}\right) \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n}i\right) \end{bmatrix}$$
(3.6)

ただし, Kn: S-形状数, α_0^y : ヨー軸の初期くねり角, α_0^p : ピッチ軸の初期くねり角, L: 体幹全長, $\theta_i^y(s)$: ヨー関節角度, $\theta_i^p(s)$: ピッチ関節角度, s: 移動距離, l: リンク長, i: 関節番号, n: リンク数.

3.4.2 3次元動作

3次元動作形態では,ヨー軸回りの動作とピッチ軸回りの動作をある規則に従っ て組み合わせる必要がある.本研究で実現を試みるのは,蛇が高速移動時に用い るサイナスリフティングと砂漠でガラガラ蛇が用いるサイドワインディングの2つ の移動形態である.これらの移動形態を各平面に投影したものを Fig.3.4 に示す.



Fig.3.4: 3D movement form

サイナスリフティングとは,水平面上の体形曲線における曲率ピーク部を常に 浮き上がらせることで,最も横滑りを生じやすい曲率ゼロ,すなわち体幹中心部 分に自重を集中させて横滑りを抑え,推進効率を上げる移動形態である.この形 態を式(3.5)のヨー関節への入力を用いて表現するには,以下の規則をピッチ関節 側へ適用すればよい.



また,サイドワインディングとは,水平面上の体形曲線において,半波長毎に互い違いに体幹の浮上と支持を行うことで,あたかもスパイラルコイルが転がるように動作する移動形態である.サイナスリフティング同様に,この形態を式(3.5)のヨー関節への入力を用いて表現するには,以下の規則をピッチ関節側へ適用すればよい.

Rules between yaw and pitch for sidewindingRatio of wavelength:yaw : pitch = 1 : 1Phase difference between yaw and pitch:
$$-\pi$$

上記の規則に適合するように求めた,サイナスリフティングとサイドワインディングの制御式を,それぞれ式(3.7),(3.8)に示す.

[Sinus-lifting]

$$\begin{bmatrix} \theta_i^y(s) \\ \theta_i^p(s) \end{bmatrix} = -2 \begin{bmatrix} \alpha_0^y \sin\left(\frac{K_n \pi}{n}\right) \sin\left(\frac{2K_n \pi}{L}s + \frac{2K_n \pi}{n}i\right) \\ \alpha_0^p \sin\left(\frac{2K_n \pi}{n}\right) \sin\left(\frac{4K_n \pi}{L}s + \frac{4K_n \pi}{n}i - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix}$$
(3.7)

[Sidewinding]

$$\begin{bmatrix} \theta_i^y(s) \\ \theta_i^p(s) \end{bmatrix} = -2\sin\left(\frac{K_n\pi}{n}\right) \begin{bmatrix} \alpha_0^y \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n}i\right) \\ \alpha_0^p \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n}i - \pi\right) \end{bmatrix}$$
(3.8)

ただし, Kn: S-形状数, α_0^y : ヨー軸の初期くねり角, α_0^p : ピッチ軸の初期くね り角, L: 体幹全長, $\theta_i^y(s)$: ヨー関節角度, $\theta_i^p(s)$: ピッチ関節角度, s: 移動距離, l: リンク長, i: 関節番号, n: リンク数.

3.5 接地圧検知による駆動制御

本研究では,感圧センサを用いた接地圧検知システムにより,ヘビ型ロボット の体幹が地面から受ける抗力を検知する.このシステムにより,以下に示すよう な動作が可能になると考えられる.

1. 浮き上がりを検出した部分を押さえつけ,自律的に体幹を路面に追従させる.

2. 路面にクレバスの存在を検知した場合に,体幹を硬直させて渡りきる.

本研究では,1と2の動作形態を,それぞれ「自律的路面追従」,効率的クレバス 渡り」と呼称する.



Fig.3.5: Definition in row of joint units

ヘビ型ロボットの体幹, すなわち直列に連結された関節ユニットの並びに対す る定義をFig.3.5 に示す.本研究のヘビ型ロボットの関節は, 2.2.1 項で述べた通り の2自由度機構であるが,ここではピッチ自由度のみを対象とした議論を行う.こ こで, f_iのとり得る値は2値であり,接地状態を1,非接地状態を0で表すとする. また,センサは左右に搭載されているので,左側センサと右側センサの値の論理 和をとることで,関節ユニットの f_iの値が決まる.

3.5.1 自律的路面追従

Fig.3.5 において, *i* 番目の関節は,常に $f_{i-1} \ge f_i$ の値を参照した上で,以下の 条件に従って動作する.ここで, θ_i^p はピッチ関節に対する指令角度を, *inc* θ^p はそ の指令角度の増加量をあらわす.また,どちらの条件も満たさない場合には動作 しない(現状を維持する).

$$\begin{cases} f_{i-1} = 1\\ f_i = 0 \end{cases} \Rightarrow \quad \theta_i^p = \theta_i^p + {}^{inc}\theta^p \tag{3.9}$$

$$\begin{cases} f_{i-1} = 0 \\ f_i = 1 \end{cases} \Rightarrow \quad \theta_i^p = \theta_i^p - {}^{inc} \theta^p \tag{3.10}$$

式 (3.9), (3.10)の必要条件を,それぞれ凹追従条件,凸追従条件と呼ぶ.この凹 追従または凸追従動作の組み合わせによって,Fig.3.6に示す谷型適応や,Fig.3.7 に示す山型適応を実現できる.なお,図中の数字はそれぞれ *f*_{*i*-1}, *f*_{*i*}, *f*_{*i*+1}の値を示す.

3.5.2 効率的クレバス渡り

ヘビ型ロボットが,重力方向に対して常に体幹を硬直させていればクレバスに 遭遇しても支持トルクの限界の範囲内であれば渡り切れる.しかし,その場合は, 必要性の有無に関わらず常に全てのピッチ関節に位置指令を与え続けなければな



(b) Pattern-2

Fig.3.6: Valley type adaptation



(b) Pattern-2

Fig.3.7: Mount type adaptation

らず,エネルギー効率の面で望ましくない.これに対し,接地圧感知能力を用い れば,前部のユニットが非接地を検知した時のみ,ピッチ関節に対する位置制御 を開始し,その部分を硬直させることにより,効率の良いクレバス渡りを行うこ とができる.Fig.3.5において,以下に示す条件に合致した時,i番目のピッチ関節 の制御を開始すると同時に,その関節に基準(ゼロ)位置指令を出す.

$$\begin{cases} f_{i-1} = 0\\ f_i = 1 \end{cases} \Rightarrow \quad \theta_i^p = 0 \tag{3.11}$$

これにより, Fig.3.8 に示すクレバス適応を実現することができる(印は, 位 置制御による硬直を表す).



Fig.3.8: Crevasse adaptation

3.6 おわりに

本章においては,開発した関節ユニットに対する位置制御系と,関節の指令値 の計算に用いる体形曲線について示した上で,その曲線をベースとして用いた蛇 の動作形態を実現するための制御法について述べた.

また,接地圧検知能力を活用した自律的路面追従と効率的クレバス渡りを実現 するために提案した駆動制御手法について説明した.

第4章 実機実験及びシミュレー ション

目次

4.1	はじめに	6
4.2	実験装置の構成	6
4.3	蛇の動作の実現	7
	4.3.1 2次元動作実験 3	7
	4.3.2 3次元動作実験 4	2
	4.3.3 基本性能の検討 4	2
4.4	高可動性による旋回及び坂登りへの効果	7
	4.4.1 旋回半径と最大関節角度の関係4	7
	4.4.2 くねり角と斜面推進効率の関係4	7
4.5	環境適応移動の実現5	1
	4.5.1 凹凸面における路面追従実験5	1
	4.5.2 クレバス渡り実験 5	6
	4.5.3 接地圧検知能力の考察	7
4.6	おわりに	7

はじめに 4.1

本章では,まず実験装置の構成について示したうえで,開発した3次元ヘビ型 ロボットに対し,3.4節で示した制御手法を適用することで行う,蛇の動作の実機 実験について述べる.また,本研究室で開発されたヘビ型ロボットの運動解析用 シミュレータを用いたシミュレーション実験によって,本研究のヘビ型ロボット の持つ機構的な優位性を検証する.そして,本研究のヘビ型ロボットの持つ大き な特徴である接地圧検知能力を利用した環境適応移動の実験を行い,その有効性 を検証する.

実験装置の構成 4.2

実機実験に用いた装置は、開発したヘビ型ロボット本体と、指令サーバとして 使用する PC1 台である.ロボットとサーバとの通信には,シリアルコミュニケー ションインタフェース(RS-232C)を使用し,サーバから動作開始信号や停止信号 を各関節ユニット上の制御モジュールへ送信する.この実験装置の構成を Fig.4.1 に示す.また,サーバから送信するコマンドをTable 4.1 に示す.



Fig.4.1: Communications of command server and snake-like robot

bie	Command	Role	sei
	'G'	Start of movement	
	'Q'	Stop of movement	

Table 4.1 d transmitted from se rver

4.3 蛇の動作の実現

3.4 節で示した,自然界における蛇の動作形態を実現するための制御法を,開発した3次元ヘビ型ロボットに適用して実機実験を行った.この実機実験において 共通となる実機パラメータをTable 4.2 に示す.

Table 4.2: Real machine parameter

п	Number of units	10
l	Link length [m]	0.13
L	Allover length [m]	1.3

4.3.1 2次元動作実験

蛇行(サーペンタイン)移動の実機実験の際に使用したパラメータと移動速度 の観測値を Table 4.3 に示す.同様に,サイナソイダルの実機実験に使用したパラ メータと移動速度の観測値を Table 4.4 に示す.ただし,本実験におけるサイナソ イダル形態については,受動車輪をロックして,その効果をキャンセルすること により推進を可能としている.

Table 4.3: Parameter for serpentine locomotion and observed speed

		1	2	3	4	5	6
α_0^y	Initial winding yaw angle [deg]	30	30	45	45	60	60
Kn	Number of S-shapes	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0
	Moving velocity [m/s]	0.119	0.116	0.127	0.102	0.109	0.089

Table 4.4: Parameter for sinusoidal locomotion and observed speed

		1	2
α_0^p	Initial winding angle(pitch) [deg]	30	30
Kn	Number of S-shapes	1.5	2.0
	Moving velocity [m/s]	0.022	0.089

また, Table 4.3の条件③, ⑥のときの実験風景を, それぞれ Fig.4.2, Fig.4.3 に示す. 同様に, Table 4.4の条件①, ②のときの実験風景を, それぞれ Fig.4.4, Fig.4.5 に示す. なお, 実験風景をおさめた連続写真のフレーム間隔はほぼ1秒である.

Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]

Fig.4.2: Real machine experiment of serpentine locomotion for condition 3 ($\alpha_0^y = 45$, Kn = 1.5)

Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]



Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]



Fig.4.4: Real machine experiment of sinusoidal locomotion for condition 1 ($\alpha_0^p = 30$, Kn = 1.5)

Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]



Fig.4.5: Real machine experiment of sinusoidal locomotion for condition 2 ($\alpha_0^p = 30$, Kn = 2.0)

4.3.2 3次元動作実験

サイナスリフティングの実機実験の際に使用したパラメータと移動速度の観測 値を Table 4.5 に示す.同様に,サイドワインディングの実機実験に使用したパラ メータと移動速度の観測値を Table 4.6 に示す.ただし,サイドワインディングは 他の形態とは異なり,体軸の側面方向に移動するため,観測速度もこの方向に対 する値を示す.

Table 4.5: Parameter for sinus-lifting locomotion and observed speed

		1	2
α_0^y	Initial winding yaw angle [deg]	45	60
α_0^p	Initial winding pitch angle [deg]	10	10
Kn	Number of S-shapes	1.5	1.5
	Moving velocity [m/s]	0.121	0.110

Table 4.6: Parameter for sidewinding locomotion and observed speed

		1	2	3
α_0^y	Initial winding yaw angle [deg]	45	30	45
$\alpha_0^{\tilde{p}}$	Initial winding pitch angle [deg]	10	10	10
Kn	Number of S-shapes	1.5	2.0	2.0
	Moving velocity [m/s]	0.024	0.049	0.077

また, Table 4.5 の条件①, ②のときの実験風景をそれぞれ Fig.4.6, Fig.4.7 に示 す.同様に, Table 4.6 の条件①, ③のときの実験風景をそれぞれ Fig.4.8, Fig.4.9 に示す.なお,前項同様,連続写真のフレーム間隔はほぼ1秒である.

4.3.3 基本性能の検討

蛇行移動,サイナソイダル,サイナスリフティング,サイドワインディングの4 つの動作形態に対して条件を変えて実験を行った結果,どの条件においてもなめ らかに運動する様子がみてとれた.これらの動作形態は,いずれも実際の環境に おいて蛇が行う運動形態としてよく知られているものである.よって,本研究で 開発したロボットは,3次元へビ型ロボットとしての十分な基本性能を有している といえる.

Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]



Fig.4.6: Real machine experiment of sinus-lifting locomotion for condition 1 ($\alpha_0^y = 45$, $\alpha_0^p = 10$, Kn = 1.5)

Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]



Fig.4.7: Real machine experiment of sinus-lifting locomotion for condition 2 ($\alpha_0^y = 60$, $\alpha_0^p = 10$, Kn = 1.5)

Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]



Fig.4.8: Real machine experiment of sidewinding locomotion for condition 1 ($\alpha_0^y = 45$, $\alpha_0^p = 10$, Kn = 1.5)

Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]



Fig.4.9: Real machine experiment of sidewinding locomotion for condition 3 ($\alpha_0^y = 45$, $\alpha_0^p = 10$, Kn = 2.0)

4.4 高可動性による旋回及び坂登りへの効果

2.2.4 項で述べた通り,開発したヘビ型ロボットの関節ユニットは従来のものより機構的に優れた仕様となっている.特に関節の可動範囲の広さは,ヘビ型ロボット自体の可動性能に直接影響するため,大きな優位性であるといえる.そこで,この可動範囲の大きさが,ヘビ型ロボットの移動運動にどのようにいかされるかを, 実機実験及びシミュレーションによって検証する.なお,本研究では,蛇行形態による旋回と坂登りの2つの状況を対象として検証を行う.

4.4.1 旋回半径と最大関節角度の関係

ヘビ型ロボットが蛇行により推進する際に,その体形曲線に対しバイアスを加えることで,任意の方向に旋回することができる.それは,式(3.5)の $\theta_{yi}(s)$ にバイアス項 K_1l を付加した以下の形で表される.

$$\begin{bmatrix} \theta_{yi}(s) \\ \theta_{pi}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\alpha_0^y \sin\left(\frac{K_n\pi}{n}\right) \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n}i\right) + K_1l \\ 0 \end{bmatrix}$$
(4.1)

また,バイアス曲率 K_1 と旋回半径Rの関係を以下に示す.

$$R = \frac{1}{K_1} \tag{4.2}$$

しかし,このバイアス曲率の値は関節の可動限界角による物理的な制限がある. そのため,たとえば関節の可動範囲が狭いヘビ型ロボットが回頭する場合は,大 回りを余儀なくされることになる.逆に関節の可動範囲が大きいほど,回頭に要 するスペースを抑えることができる.

本研究で開発したヘビ型ロボットにおける,蛇行旋回半径Rと最大関節角度^{max θy} との関係をFig.4.10に示す.この例では,初期くねり角を 60°,S-形状数を 2.0 と しているが,バイアス項は sin 関数の外側にあるため,他のパラメータの場合も同 様の曲線となる.具体的には,図中の漸近線の高さ位置が変化するだけである.ま た,この漸近線がバイアスを加えない場合の最大関節角度となる.

Fig.4.10 より,本研究のヘビ型ロボットが,S-形状数2.0,初期くねり角60°の体形をとる場合,理論的には旋回半径0.4 [m]前後での小回りまでが可能であることが分かる.Table 4.7 のパラメータを用いて行った蛇行旋回実験の様子をFig.4.11に示す.

4.4.2 くねり角と斜面推進効率の関係

自然界では,蛇は斜面を登る際に後ろの方のくねりを大きくする体形をとることが観測されている.これは,斜面上での蛇行移動は水平面上の場合に比べて横



Fig.4.10: Relation between $^{max}\theta^{y}$ and R for turning movement ($\alpha_{0}^{y} = 60, Kn = 2.0$)

 Table 4.7: Parameter for turning movement

α_0^y	Initial winding yaw angle [deg]	60
Kn	Number of S-shapes	2.0
<i>K</i> 1	Curvature bias	2.0 (R=0.5)

滑りが発生しやすく,推進効率が低下するので,これを防ぐためだと考えられる. よって,ヘビ型ロボットにおいてもくねりの大きさを変化させることで斜面上で の運動が変化することが予想できる.しかし,くねりの大きさもまた,関節の可動 限界角による物理的な制限がある.そのため,同じ傾斜角と動作形態であっても, 関節の可動範囲によってはくねりの限界が低く,斜面を登れない場合もあり得る.

本研究では、このくねり角と斜面上の移動距離との関係を調べるためにシミュレーション実験を行った.この実験では、本研究室で開発されたヘビ型ロボットの動力学解析シミュレータ [27]を用いた.実験で使用したシミュレーションのパラメータを Table 4.8 に示す.このシミュレーションにおいて得られた、S-形状数 *Kn*=1.5, 2.0, 2.5, 3.0 のそれぞれに対する、傾斜角 ψ (=10, 12, 14, 16, 18 [deg])ごと のくねり角と推進距離の関係を Fig.4.12 に示す.また、それぞれのくねり角の時の最大関節角度 *max* θ^y の値も *x* 軸の下部にあわせて示す.なお、移動距離の正負の 符号は斜面の上方または下方を表している.すなわち、符号が正の場合は斜面を 登っているが、負の場合は斜面からすべり落ちていることになる.

Fig.4.12 より,同じ傾斜角でも関節の可動限界角によっては登ることができなかったり,登れたとしてもより大きくくねることができる場合と比較すると推進効率は下がってしまうことがわかる.例えば,Fig.4.12(a)によると,可動限界角が63.5°では18°の坂を登れないが,72.6°以上あれば登ることができる.



Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]

Fig.4.11: Real machine experiment of turning movement ($\alpha_0^y = 60, Kn = 2.0, K1 = 2.0$)

Table 4.8:	Simulation	parameter
14010 1101	Simananon	parameter

Shape of a unit	Rectangular solid
Size of a unit [m]	0.130×0.062×0.077
Number of units	10
Mass of a unit [kg]	0.36
Distance from i-th joint to the CG of i-th link [m]	0.065
Distance from i-th joint to the friction point of i-th link [m]	0.058
Friction coefficients in tangent direction	0.01176
Friction coefficients in normal direction	0.5294
Limit of torque [Nm]	± 0.8722
Total simulation time [sec]	30.0
Sampling time [sec]	0.03



Fig.4.12: Relation between moving distance and $\alpha_0^{y}(^{max}\theta^{y})$ for creeping locomotion on a slope

4.5 環境適応移動の実現

本研究では,凹凸路面やクレバスを模倣した環境を設置したうえで,3.5節で述べた接地圧検知能力を用いた2種類の駆動制御法を,開発した3次元ヘビ型ロボットに適用して環境適応移動実験を行った.なお,2.3.1項において負荷-電圧特性を示した(Fig.2.8)が,本実験では出力電圧0.49Vをしきい値として,この値を下回る場合が非接地($f_i = 0$),それ以外の場合を接地($f_i = 1$)として扱う.

また,この実験において使用した環境パラメータを Table 4.9 に示す.

 Table 4.9: Experimental environment parameter

Angle of gradient at concavo-convex road [deg]	±20
Length of gap at crevasse road [m]	0.22

4.5.1 凹凸面における路面追従実験

[ヨー軸:駆動なし ピッチ軸:路面追従駆動]

凹凸路面上において,凹追従と凸追従の基本動作実験をそれぞれ行った.この 実験で使用している駆動関節はピッチ関節のみであり,前後の移動は手押しによ り行っている.また,ピッチ関節が動作条件を満たした時の駆動速度は,動作周 期毎の指令値の増加量^{inc θP}の増減によって調整することができる.この凹追従と 凸追従の実験の際に使用したパラメータを Table 4.10 に,またそのときの様子を それぞれ Fig.4.13, Fig.4.14 に示す.

<u>Table 4.10:</u>	Parameter	for	concave	and	convex	foll	OW

		Concave	Convex
${}^{inc} \theta^p$	Coefficient of pitch speed	0.1	0.1

これらの実験の結果,凹凸面に対してゆるやかにピッチ関節が体幹を追従させるように駆動することを確認した.

[ヨー軸:蛇行駆動 ピッチ軸:路面追従駆動]

ピッチ関節に対しては上述の路面追従駆動を行い,ヨー関節に対しては蛇行駆動を行いながら凹面,凸面を両方含んだ段差の走破実験を行った.実験は登り方向と下り方向にわけて行った.段差の登りと下りの実験の際に使用したパラメータを Table 4.11 に,またそのときの様子をそれぞれ Fig.4.15, Fig.4.16 に示す.

これらの実験の結果,ピッチ関節が能動的に路面に接地しようとすることで,例 えばセンサフィードバック無しの状態では,姿勢が崩れてスタックしてしまうよ うな段差においても有効であることを確認した.

Fig.4.17 に示すようなスタック状態は,能動的にピッチ関節が駆動しないために 傾斜に入った体幹部が浮いたままになり,さらに先端部分が自重や振動の影響で

Inter-frame spacing $\Rightarrow 1$ [sec]

Fig.4.13: Real machine experiment of concave following movement

		Uphill	Downhill
${}^{inc}\theta^p$	Coefficient of pitch speed	0.1	0.3
α_0^y	Initial winding yaw angle [deg]	45	45
Kn	Number of S-shapes	2.0	2.0

Table 4.11: Parameter for uphill and downhill movement



Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]

Fig.4.14: Real machine experiment of convex following movement

Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]



Fig.4.15: Real machine experiment of uphill movement

Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]



Fig.4.16: Real machine experiment of downhill movement



Fig.4.17: State of stuck that can happen when there is no sensor feedback

急にバックドライブした結果,体幹前部がくの字に屈曲したことが原因と考えられる.

4.5.2 クレバス渡り実験

地面の裂け目を模倣した環境において,クレバス渡りの実機実験を行った.この実験における推進力はヨー軸の蛇行駆動によって得ている.

ピッチ関節が動作条件を満たすまでは,ピッチ軸に対する位置制御は行われず, フリーの状態である.そして,動作条件を満たした瞬間に,関節の位置制御を開 始するとともに基準(ゼロ)位置指令を与えることで,重力方向に対して体幹を 硬直させて,そのまま蛇行の推進力で裂け目を渡る.

この実験の際に使用したパラメータを Table 4.12 に,またそのときの様子を Fig.4.18 に示す.

Table 4.12: Parameter for crevasse-crossing movement

α_0^y	Initial winding yaw angle [deg]	45
Kn	Number of S-shapes	2.0

この実験の結果,裂け目に突入した体幹部位をピッチ関節の保持トルクで支持 することで,重力方向に対して体幹を硬直してクレバス走破を実現できることを 確認した.

Inter-frame spacing $\doteqdot 1$ [sec]



Fig.4.18: Real machine experiment of crevasse-crossing movement

4.5.3 接地圧検知能力の考察

本研究で開発した関節ユニットが有する接地圧検知能力によって,凹凸やクレバ スの存在する路面における環境適応移動を実現することができた.しかしながら, その適応度についてはさらなる改善の余地があると思われる.上述の2つの環境 適応動作に対する実機実験において使用したパラメータは,いずれも試行錯誤的 に決定したものであり,何らかの最適化手法を用いて決定したものではない.ま た,設置した実験環境も簡素なもので,誤差を多く含んでいる可能性は否めない.

ただし,今回行った実験からでも,この接地圧検知能力が性質として優れていることは十分にいえると思われる.

4.6 おわりに

本章においては,開発したヘビ型ロボットに対して蛇の動作制御手法を適用し, 自然界で実際に観測される移動形態を実機により実現することで,3次元ヘビ型ロ ボットとしての基本性能を確認した.さらに,動力学に基づいたヘビ型ロボット の運動解析シミュレータを用いてシミュレーション実験を行い,本研究のヘビ型 ロボットの持つ機構的な優位性についての検証を行った.

また,開発した関節ユニットの特徴である接地圧検知能力を利用した路面追従 移動と効率的クレバス渡りといった動作の実機実験を行った.これらの環境適応 移動の実現により,本研究で提案し,実装した接地圧検知システムの有効性を確 認した.最後に,この接地圧検知能力に対する全体的な考察を述べた.

第5章 結論

目次

5.1	本論文のまとめ	 •						•			•						•				•	•	•		60	
5.2	今後の展望	 •		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		61	

5.1 本論文のまとめ

実際の環境には,伝統的な移動手法である歩行や車輪駆動による移動ロボット では推進が困難である場所が数多く存在していたため,これらの環境にも対応し 得る新しい形態のロボットとして,ヘビ型ロボットに関する研究が行われてきた. しかし,従来の研究で開発されたヘビ型ロボットでは,まだ機構面,制御面にお ける性能は十分とはいえなかった.

本研究では,従来は実現できていなかった性能を有する3次元へビ型ロボット の開発を行った.そして,その機構的優位性の検証や,その性能を発揮するため の動作制御法についての提案を行い,実機実験による各動作形態の実現を行った. 以下で,本論文の内容について総括する.

開発した3次元ヘビ型ロボット

本論文では,開発した感圧式関節ユニットの2自由度関節機構,車輪機構,接 地圧検知システムの詳細について述べた.この接地圧検知システムでは,感圧セ ンサとリニアガイドを組み合わせた手法を用いた.また,製作したセンサ使用回 路を含む制御モジュールの構成と仕様を示した.このモジュールの計算装置には, H8/3694Fマイコンボードを採用した.そして,この関節ユニットと制御モジュー ルを10セット製作し,これらを直列に連結することで,接地圧検知能力を有する 3次元ヘビ型ロボットを構築した.

接地状態の検知による環境適応移動

本論文では,開発したヘビ型ロボットの有する接地圧検知能力を利用した,2種 類の環境適応移動について提案した.1つ目の自律的路面追従は,感圧センサに よって,前後に隣接した関節ユニットの前側と後ろ側の接地状態を参照し,それ に応じてピッチ関節が凹追従動作,凸追従動作,非動作といった選択をすること で,結果として山型や谷型の適応動作を実現できる形態である.2つ目の効率的ク レバス渡りは,非接地状態を検知した時にピッチ関節の位置制御と硬直指令を開 始することで,無駄なエネルギー消費を抑えて路面の裂け目を走破できる形態で ある.これらの環境適応移動は,実機実験により実現することができた.

基本性能の確認と機構的優位性の検証

本論文では,サーペノイド曲線をベースに用いて,よく知られた幾つかの蛇の 動作を実現することにより,開発した実機の3次元ヘビ型ロボットとしての基本 性能を確認した.また,関節の可動限界角と蛇行旋回半径の限界との関係を明ら かにすることで,本研究のヘビ型ロボットの機構的優位性について検証した.さ らに,動力学を考慮したヘビ型ロボットの運動解析シミュレータを用いて得られ た,関節の可動範囲と斜面上での運動との関係からも,優位性がみてとれた.

5.2 今後の展望

開発したヘビ型ロボットは,各関節ユニットに搭載した制御モジュールによっ て体節単位での自立を実現しているが,指令サーバからのコマンド送信は有線で 行っている.今後はこの通信を無線化して,ロボットの完全自立化を実現するこ とが望まれる.

本研究で使用した制御モジュールは,関節ユニットの上部に載せただけの単純 な配置になっている.これは実機実験時の調整や普段の整備性を配慮したためで あるが,実用的とはいえない.この配置についても,制御モジュールのさらなる 集積化と併せて検討しなければならない.同時にこのモジュールの防塵・防水対 策も施す必要がある.

実現した環境適応移動は,性質として有効であることはいえたが,定量的な評価については議論していない.また,使用するパラメータについても,環境への 適応度という評価指標による最適化が望まれる.その際には,適応度の具体的な 定義についても検討しなければならない.

本研究で用いた感圧センサの測定範囲は,物理的には0~2000gfであり,電気的 には電源電圧(~30V)の大きさに比例して範囲が延びていく.本研究では使用し たバッテリとH8マイコンに実装されたA/D変換器の電気的制限から,力制御を 実現するのに十分な測定範囲を確保できなかったために,接地または非接地(1ま たは0)の判定によるON/OFF制御を行った.しかし,現在の動作性能を損なわな い程度に,小型で軽量なDC/DCコンバータを搭載できれば,測定範囲の拡大が可 能となり,位置指令型のインピーダンス制御[28]などが実現できると考えられる.
謝辞

本研究の遂行に当たり御指導下さった茨城大学工学部知能システム工学科馬書 根助教授(現立命館大学 COE 推進機構教授)に深く感謝の意を表します.また, 本論文をまとめるに際し,懇切な御指導と熱心な御討議を頂いた浜松 芳夫教授, 星野 修教授,森 善一助教授に深く感謝します.また,研究において御意見,御協 力下さいました同研究室井上康介助手,同学科石黒美佐子教授,城道介教授,新 村 信雄教授,米澤 保雄助教授,新納浩幸助教授,坪井一洋助教授,近藤久講師, 岩崎 唯史助手,梅津 信幸助手に感謝の意を表します.

在学中に多岐に渡り指導して頂いた馬研究室卒業生の皆様に感謝致します.特に,本研究に関し細やかな指導をして頂いた,田所 直樹氏((株)日立工機),川 瀬 雅之氏((株)アルパイン),本田 善徳氏((株)コンピュートロン),付清軍 氏((株)スリーエス),金承華氏((株)ファナック),柳田 聡司氏((株)富士 写真フイルム),綿引栄作氏((株)ITジャパン)に深く感謝します.

同研究室ヘビチームとしてゼミ等において熱心な討論を頂いた, 藍光平氏, 佐々 木亮氏, 佐藤智紀氏(現名古屋大学大学院), 浅野裕之氏, 住考明氏, 佐藤記 一氏に深く感謝致します.

ゼミ等において熱心な討論を頂いた同研究室院生 Anshuka Srivastava 氏,張磊 氏,劉順氏,森園和也氏,染谷研二氏並びに学部4年生の大塚春樹氏,谷口俊 也氏に深く感謝の意を表します.

参考文献

- [1] 広瀬茂男:生物機械工学.工業調査会,1987.
- [2] R. S. Desai, C. J. Rosenberg, J. L. Jones: "Kaa: An Autonomous Serpentine Robot Utilizes Behavior Control," Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol.3, pp.250–255, 1995.
- [3] E. Paljug, T. Ohm, S. Hayati: "The : JPL Serpentine Robot: a 12 DOF System for Inspection," Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.3, pp.3143–3148, 1995.
- [4] http://www1.ai-link.ne.jp/free/news/talknow/talk_page/2001_7.htm
- [5] K. Støy, W.-M. Shen, P.M. Will: "A simple approach to the control of locomotion in self-reconfigurable robots," Robotics and Autonomous Systems 44, pp.191– 199, 2003.
- [6] 森, 広瀬: "3 次元索状能動体 ACM-R3 を用いた推進実験", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 2002.
- [7] K. Togawa, M. Mori, S. Hirose: "Study on Three-dimensional Active Cord Mechanism-Development of ACM-R2," Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2242–2247, 2000.
- [8] M. Mori, S. Hirose: "Development of Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D mobility," Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1552–1557, 2001.
- [9] 森, 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, vol.23, no.7, pp.886–897, 2005.
- [10] H. Ohno, S. Hirose: "Study on Slime Robot (Proposal of Slime Robot and Design of Slim Slime Robot)," Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2218–2223, 2000.
- [11] H. Ohno, S. Hirose: "Design of Slim Slime Robot and its Gait of Locomotion," Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1552–1557, 2001.

- [12] http://www.gmd.de/Japan/Projects/gmdsnake.html
- [13] R. Worst, R. Linnemann: "Construction and operation of a Snake-like Robot," IEEE International Joint Symposia on Intelligence and Systems, pp.164–169, 1996.
- [14] 高梨,青木,谷嶋:"完全モジュラー型関節の開発と超多自由度ロボット「おろち」への適用",第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集,pp.499–500, 1995.
- [15] 高梨,青木,谷嶋:"超多自由度ロボット「おろち」の歩容制御",日本機械学 会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96 講演論文集,vol.A,pp79-80,1996.
- [16] http://www-robot.mes.titech.ac.jp/robot/snake/oblix/oblix.html
- [17] 広瀬茂男: ロボット工学. 裳華房, 1987.
- [18] 田邉,馬,井上:"ロール回転型2自由度関節による3次元蛇型ロボットの開発",日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集CD-ROM, 2P1-H-21,2004.
- [19] S. Ma, G. Lan, Y. Tanabe, R. Sasaki, K. Inoue: "A Serpentine Robot Based on 3 DOF Coupled-driven Joint," Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.37–42, 2004.
- [20] 遠藤,外川,広瀬: "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—",日本ロボット学会誌,vol.18,no.3,pp.419–425,2000.
- [21] http://www.inaba-rubber.co.jp/b_products/inastmer/sf.html
- [22] http://japan.renesas.com/fmwk.jsp?cnt=h83694_h83694n_root.jsp&fp=/products /mpumcu/h8_family/h8300h_tiny_series/h83694_h83694n_group/
- [23] 松日楽, 大明: ロボットシステム入門.オーム社, 1999.
- [24] H. Hertel: バイオエンジニアリング. 朝倉書店, 1985.
- [25] 梅谷陽二:生物工学.共立出版,1977.
- [26] 野邑雄吉:応用数学.内田老鶴圃, 1957.
- [27] 田所,馬,井上,田邉: "蛇型ロボットの3次元斜面蛇行移動の運動解析",日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 CD-ROM, 2P2-L1-11, 2004.
- [28] 川崎晴久:ロボット工学の基礎.森北出版,1991.

- [29] 島田義人: H8/Tiny マイコン完璧マニュアル. CQ 出版社, 2005.
- [30] 麥田憲司: "ステッピング・モータとラジコン用サーボ", トランジスタ技術 2000年2月号, pp.185–187, CQ 出版社, 2000.

発表論文

- [1] 田邉,馬,井上:"ロール回転型2自由度関節による3次元蛇型ロボットの開発",日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 CD-ROM, 2P1-H-21,2004.
- [2] 田所,馬,井上,田邉:"蛇型ロボットの3次元斜面蛇行移動の運動解析",日本機 械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 CD-ROM, 2P2-L1-11, 2004.
- [3] S. Ma, G. Lan, Y. Tanabe, R. Sasaki, K. Inoue: "A Serpentine Robot Based on 3 DOF Coupled-driven Joint," Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.37–42, 2004.
- [4] 田邉,馬,井上:"接地圧検知能力を有する3次元ヘビ型ロボットの開発とその環境適応移動",日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論 文集 CD-ROM, 2006.(投稿中)

付録A PWM信号のパルス幅の導出

本付録では,本研究で用いている RC サーボモータを,任意の角度動作させるため に必要となる PWM 信号のパルス幅の導出について述べる. 以下で, RC サーボモータの軸角度と, PWM 信号のパルス幅を決めるレジスタの値との関係を求める手順を示す.

PWMの周期



Fig.A.1: Puls for control of RC servo motor

RC サーボモータを制御する信号は, Fig.A.1 に示すように, High(5V) 期間と Low(0V) 期間が存在するパルスとなる.ただし, Low 期間の方は PWM(パルス) 周期を指定することで自動的に決まることになる.一般的なサーボではこの PWM 周期はおよそ10~20 [msec] であるが, この周期には以下の特徴がある.

- 周期が多少違ってもサーボの駆動軸角度には直接影響しない.
- 周期が短いほどトルクとレスポンスが高い.

本研究では,トルクとレスポンスを重視し,PWM 周期を10[msec]に指定する.

カウンタクロックの分周比

PWM 信号とは,本来は I/O ポートの出力レベルを, High と Low に交互に切り 替える方法で生成されるが, H8/3694F のタイマ W を使うと,より簡単に出力で きる [29].タイマ W を PWM モードに設定した際に,タイマカウンタがカウント アップする周期を決めることになる.しかし,これがシステムクロックと同じ周 期では実現できない場合は分周が必要になる.

まず, PWMの周波数 f だが, 上述の通り PWMの周期 T は 10 [msec] なので,

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10 \times 10^{-3}} = 100 \text{ [Hz]}$$
 (A.1)

となる.次に,システムクロック φ が 20MHz (2.3.2 項の Table 2.5 参照)の場合 に必要になるカウント数を計算すると,

$$\frac{\phi}{f} = \frac{20 \times 10^6}{100} = 200000 \tag{A.2}$$

となり,16 bit マイコンでカウントできる最大値(65535)を越えているので,分 周が必要になる.この場合は,4分周すれば,200000/4=50000カウントで済み,16 bit に収まる.これにより,分周比は4と決まる.

角度とレジスタ値の対応

分周比が4と決まっているので,カウンタクロックは以下のように求まる.

$$\frac{\phi}{4} = \frac{20 \times 10^6}{4} = 5 \text{ [MHz]}$$
 (A.3)

ここで,レジスタ値を GRD とすると, PWM の High レベル幅(パルス幅) W は,

$$W = \frac{1}{5 \times 10^6} \times GRD \tag{A.4}$$

$$\therefore GRD = (5 \times 10^6) \times W \tag{A.5}$$

と表せる.また,フタバ製サーボの制御信号の仕様を Table A.1 に示す [30].

Table A.1: Specifications of control signal for Futaba servo				
	Neutral	Variable range	Signal level	
	1.52 [msec]	±0.5 [msec]	CMOS/TTL	

Table A.1 の値を用いると、パルス幅W = 1.52 [msec] のときは、

$$GRD = (5 \times 10^6) \times (1.52 \times 10^{-3}) = 7600$$
 (A.6)

となり,この値によってサーボホーンは基準位置を示す.同様に,W = 1.52 +0.5 = 2.02 [msec] のときは GRD=10100, W = 1.52 - 0.5 = 1.02 [msec] のときは GRD=5100と求まる.これらの値をもとにしたサーボの動作試験により求めた,実 用範囲内での角度とレジスタに与える数値との対応関係を Fig.A.2 に示す.



Fig.A.2: Relation with GRD value and angle of servo horn

付録B 関節ユニットの外観と寸法

本付録では,本研究で開発した関節ユニットの外観や寸法について,設計の段階 で用いた CAD の図を使って示す.





Fig.B.1: External view and size of the joint unit