

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	3次元素状能動体の機構と推進制御の研究
Title(English)	
著者(和文)	森淳
Author(English)	Makoto MORI
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第6249号, 授与年月日:2005年9月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:広瀬茂男
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第6249号, Conferred date:2005/9/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学 平成 17 年度 学位論文

## 3 次元索状能動体の機構と推進制御の研究

大学院 理工学研究科 機械宇宙システム専攻

森 淳



# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景 . . . . .	1
1.2	目的 . . . . .	8
1.3	本論文の構成 . . . . .	11
第 2 章	3DACM の基本理論	13
2.1	3DACM の立体形状基礎理論 . . . . .	13
2.2	3DACM の推進制御基礎理論 . . . . .	17
2.3	まとめ . . . . .	20
第 3 章	3DACM の推進運動とその制御	21
3.1	3DACM のシフト型推進運動 . . . . .	24
3.2	3DACM の捻転型推進運動 . . . . .	33
3.3	3DACM の部分適用による推進合成 . . . . .	39
3.4	推進法分類 . . . . .	45
3.5	まとめ . . . . .	46
第 4 章	3次元索状能動体 ACM-R3 の設計	47
4.1	設計の概要 . . . . .	47
4.2	機構の設計 . . . . .	52
4.3	電装系の設計 . . . . .	61
4.4	センサー系の検討 . . . . .	67
4.5	まとめ . . . . .	69
第 5 章	各種推進実験	71
5.1	シフト制御運動比較実験 . . . . .	71
5.2	Side-Winding 推進実験 . . . . .	79
5.3	Pedal-Waving 各推進実験 . . . . .	80

---

5.4	捻転合成推進実験 . . . . .	82
5.5	部分適用 Lateral-Walking 合成推進 . . . . .	85
5.6	まとめ . . . . .	93
第 6 章	3DACM 設計の展開	95
6.1	機構設計の改良点 . . . . .	96
6.2	電装系の再構築 . . . . .	100
6.3	まとめ . . . . .	106
第 7 章	結論と今後の課題	107
7.1	結論 . . . . .	107
7.2	今後の課題 . . . . .	108
付録 A	RC サーボモータ	111
A.1	信号波形 . . . . .	111
A.2	電流対トルク線図 . . . . .	112
付録 B	TITech-SH2Tiny	113
B.1	3DACM Program for TITech SH2Tiny . . . . .	113
B.2	各種機能の利用割当 . . . . .	113
B.3	HCAN protocol . . . . .	119
参考文献		123
謝辞		127
研究業績		129

# 目次

1.1	Recent humanoid type robot," ASIMO"	2
1.2	Regular creeping motion of a snake.	3
1.3	EMG measure experiment of regular motion.	4
1.4	Snake like robot, "ACM-III."	4
1.5	Snake like robot "ACM-R1"	5
1.6	Flexible arm "ELASTOR (ACM-7)"	6
1.7	Snake-like mechanism gripper "SoftGripper-I"	6
1.8	Three Dimensional Active Cord Mechanism," ACM-R2"	7
1.9	Polybot	8
1.10	GMD-SNAKE2	8
1.11	SewerRobot	9
2.1	Standard Posture.	15
2.2	Example of solution of equations(2.2).	15
2.3	Relation of Frame.	16
2.4	Rotation of dorsal reference frame around the s-axis.	17
2.5	Comparison of models and discrete models.	18
3.1	hierarchy of ACM's locomotion.	22
3.2	Nomenclature of gliding configuration in regular creeping motion.	24
3.3	2D type Serpentine Locomotion.	25
3.4	Steering of 2D type Serpentine Locomotion.	26
3.5	Comparison of pitch steered curves.	27
3.6	Sinus-Lifting locomotion of the real snake[1].	28
3.7	Sinus-Lifting Locomotion of Eq.3.8.	29
3.8	$\kappa_{pitch}^1(u)$ to $\kappa_{pitch}^0$ term of Sinus-Lifting.	30
3.9	Side-Winding locomotion of the real snake.	30

3.10	Side-Winding locomotion of the real snake. . . . .	32
3.11	Rolling Image. . . . .	34
3.12	Lateral Rolling locomotion Image. . . . .	35
3.13	Twisted Serpentine Locomotion. . . . .	36
3.14	Lift Rolling Locomotion. . . . .	37
3.15	Helical Locomotion. . . . .	38
3.16	Lateral Walking locomotion Image. . . . .	40
3.17	Lateral-Walking mixture image. . . . .	42
3.18	The three lateral-walking waves mixture image. . . . .	43
3.19	The three lateral-walking waves mixture locomotion image. . . . .	44
4.1	Snake like robot “ACM-R3” . . . . .	47
4.2	Definition of coordinates and joint angles. . . . .	53
4.3	Some of Joint Mechanisms for 3D-ACM. . . . .	54
4.4	Joint Axes of the Unit. . . . .	55
4.5	Gear Train of the Unit Mechanisms. . . . .	56
4.6	Unit Mechanisms. . . . .	57
4.7	The wheel arrangement in a radial pattern. . . . .	58
4.8	The imploved wheel arrangement in a radial pattern. . . . .	58
4.9	The large wheel arrangement with side of unit. . . . .	59
4.10	The passive wheels layout makes the effects of the half angle Mechanism. . . . .	60
4.11	Motion Range of the Unit. . . . .	60
4.12	The currents of control commands. . . . .	63
4.13	The chart of control commands. . . . .	64
4.14	Unit Control Board. . . . .	65
4.15	The Controller and input interface. . . . .	66
4.16	Torque and angle data logger. . . . .	69
4.17	ACM-R3 data log setup. . . . .	69
5.1	Serpentine Locomotion of ACM-R3. . . . .	72
5.2	Torque ratio for s-axis. . . . .	72
5.3	Muscle cross-sectional area. . . . .	73
5.4	Produced torque of Serpentine motion. . . . .	73
5.5	Twisted Serpentine Locomotion of ACM-R3. . . . .	74
5.6	Produced torque of Twisted Serpentine motion. . . . .	74

5.7	Sinus-Lifting motion of ACM-R3. . . . .	76
5.8	Produced torque of Sinus-Lifting motion. . . . .	76
5.9	Running Surface shape of Twisted Serpentine. . . . .	78
5.10	The intermittent side-winding locomotion. . . . .	79
5.11	The Pedal-Waving locomotion. . . . .	81
5.12	The Pedal-Waving steering locomotion. . . . .	82
5.13	The Lateral-Walking and Pedal-Waving locomotion. . . . .	83
5.14	The Lateral-Rolling locomotion arch type. . . . .	84
5.15	The Lateral-Rolling locomotion Serpentine type. . . . .	85
5.16	The Lean Serpentine locomotion. . . . .	86
5.17	The Lateral-Rolling in Sinus-Lifting posture. . . . .	86
5.18	The Lift-Rolling locomotion. . . . .	87
5.19	The Lateral-Walking locomotion. . . . .	87
5.20	The Lateral-Walking locomotion. . . . .	88
5.21	The Lateral-Walking locomotion in leaning posture. . . . .	89
5.22	The Lateral-Walking and Lateral-Rolling in serpentine. . . . .	90
5.23	The Rotational Lateral-Walking mixture experiment for straight posture. . . . .	91
5.24	The Rotational Lateral-Walking mixture experiment for serpentine posture. . . . .	92
5.25	The Rotational Lateral-Walking mixture experiment for serpentine posture. . . . .	93
6.1	ACM-R3(Leftside) and ACM-R3n(Rightside). . . . .	96
6.2	Worn gear of “ACM-R3.” . . . .	97
6.3	stainless steel gear of “ACM-R3.” . . . .	98
6.4	raise head of “ACM-R3n.” . . . .	99
6.5	Plastic wheel. . . . .	100
6.6	wireless head camera. . . . .	101
6.7	TITechSH2TinyBoard. . . . .	103
6.8	PowerSupplyBoard. . . . .	103
6.9	BatteryCharger. . . . .	104
6.10	The chart of new control commands. . . . .	104
6.11	The comparison of charge style. . . . .	106

---

A.1	The servomotor ERG-VB . . . . .	111
A.2	Specification of the servomotor ERG-VB . . . . .	112
B.1	ACM Program Basically Chart . . . . .	114
B.2	SH2NumberingSequence . . . . .	115
B.3	HCAN2 Chart . . . . .	116
B.4	MTU0a Interrupt Chart . . . . .	117

# 表目次

3.1	Rolling condition of ACM. . . . .	40
3.2	Locomotive classification of ACM. . . . .	45
4.1	Compare with Snake Robot of Kevin. . . . .	57
4.2	Specifications of the ACM-R3 . . . . .	70
B.1	TITechSH2TinyProgram . . . . .	118
B.2	Identifier setting of HCAN for 3DACM . . . . .	119
B.3	Format A Protocol of HCAN for 3DACM . . . . .	120
B.4	Format B Protocol of HCAN for 3DACM . . . . .	121
B.5	Format C Protocol of HCAN for 3DACM . . . . .	122



# 第 1 章

## 序論

### 1.1 背景

現在，ロボットの存在はなくてはならないものになりつつある．国連機関である国連欧州経済委員会 (ECE) と国際ロボット連盟 (IFR) が共同実施した調査「World Robotics 2004」によれば，2004 年前半の産業用ロボット発注台数は 18%増加したという．家庭用でも，2003 年に 61 万台の自動式の掃除機・芝刈り機が稼働しており，2004 年から 2007 年の間に 400 万台が増える予想だという．特に日本では従業員 1 万人当たり 320 台のロボットが利用されており，自動車産業ではこの数字はさらに高く，日本・イタリア・ドイツでは，従業員 10 人につき 1 台の割合でロボットが利用されている．

また富士経済 (株) の 2005 年見通しでは，産業用ロボットの 4 大市場需要 (数量ベース) は，日本 82,390 台，アジア市場 33,075 台，米州 30,785 台，欧州 28,875 台と，日本の需要が半分近く (46%) を占め，次いでアジア (18.5%)，米州 (17.2%)，欧州 (16.1%) の順となっている．種別で見ると，日本及び米欧州では溶接系・塗装系ロボットの割合が高く，アジアは取り出しロボット，液晶・PDP ガラス搬送ロボットが主流である．

これらの実用化された産業用ロボットのほとんどは，一般的に工場据置型の腕型ロボットとなる．これらのロボットは，一部駆動範囲の広い直動レールの上を移動できるものもいるが，基本的には「工場内」という人工的に整備された環境下でしか十分な能力を発揮することができない．無論，作業の緻密さを要求される分野に対しては，据置型のロボットが主力として働くことになると思われるが，今後のロボットを考えるに，生産現場のような固定した空間だけでなく，屋外作業や乗物などより広範囲な目的に対してロボットが利用されてゆくことが大いに期待されるため，ロボット自身が移動する能力を持つことは大変重要であると考える．

このような観点に基づき，現在「移動可能なロボット」の研究が多種多様に行われている．近年では「移動可能なロボット」の典型例としてヒューマノイド型の歩行ロボット研

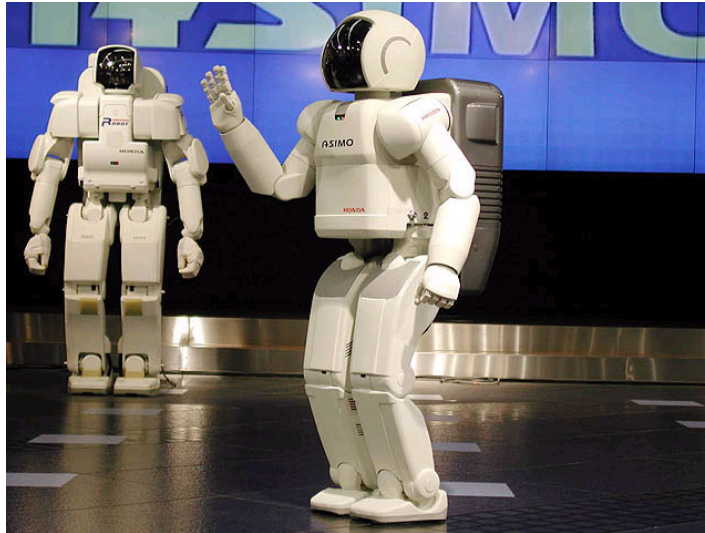


Fig. 1.1: Recent humanoid type robot, "ASIMO"

究が盛んに行われ (Fig.1.1), 画像認識, センシング, 協調作業, ナビゲーションなど多くの細分化された研究分野を統合する研究も盛んに行われている。さらに近年では移動ロボットの最も根本的な機能である「移動機構」そのものについても注視されている。なぜならば, どんなに優れた制御法やセンシングデバイスが確立されたとしても, 最終的にその移動を実現するのは機械要素であり, これらの機構による性能以上のものは物理的に実現し得ないからである。この立場に基づき, 現在までに節体幹型, 脚型, クローラ型, 車輪型など機構の研究を中心とした様々なタイプの移動ロボットが研究開発されている。

本研究においては更に「すべてに適応できる汎用的な機構は非効率である」という立場で研究を行っている。言い換えれば「作業内容に応じて各々最適な機構が存在する」ということである。一例を挙げるならば, 我々人間の代わりに作業が出来るよう完全な人型ロボットがあったと仮定し, 「ものを遠距離で運ぶ」という仕事を適用すると, このロボットを用いるよりも自動車を使用した方がはるかに効率的であろう。このように目的とする作業に応じて最適な実現方法が各々存在するという考え方をもとに, 従来までに作業内容及び作業環境に応じた様々なタイプの移動機構について研究している。すなわち研究開発する移動ロボットにおいて, その移動機構及び作業内容を第一義的に考えるとともに, それが適用できる範囲を常に見極めていく立場である。

vi) ヘビをモデルとしたロボットにおいて最も重要な研究は, 広瀬らによるものである。ヘビの生物機械としての基本要素を抽出した概念を, 「能動的に屈曲しうる関節ユニットを直列に多数連結し, 索状を成す機能体」と定義し, 「索状能動体 “Active Cord Mechanism” (略して 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について, 機械モデルを実際に構築して論じている [1]。



Fig. 1.2: Regular creeping motion of a snake.

「ヘビは足がないのになぜ前進できるのか？ (Fig.1.2)」という、多くの人々が古くから抱いてきた素朴な疑問が、研究の契機となっている。17世紀以降、動物学者らによるヘビの解剖学的研究が行われるようになり、その移動運動に関しても幾つか言及された。ウロコを立て引っかけて進むとか、腹部を吸盤状にして前進するなどの説があげられたが、これらの報告には定量的な運動解析が含まれていないなど、工学的な根拠に乏しい誤った説であった。

広瀬らによるヘビの移動運動に関する研究は1970年代から始まった。ヘビの移動運動を工学的な立場で明らかにするために、広瀬らはヘビ体幹を微小リンクに置き換えて力学的な解析を行った。滑走形態および推進力などの考察を行い、実際にヘビの滑走形態の撮影、滑走時の筋電位及び体幹に働く力の測定などの動物実験を行うことにより (Fig.1.3)、ヘビは自らの摩擦の異方性を利用して推進していると結論づけた。

さらに広瀬は機械モデルを用いた検証実験を行い、導出した理論の正当性を検証した。開発した機械モデルは索状能動体3号機 ACM-III と名付けられた (Fig.1.4)。20節の直列リンクからなり、全長2[m]、全重量28[kg]、各節1個のDCモータ及びポテンシオメータによりサーボ系を構成している。制御系はアナログ回路で構成され「導出した理論に基づいた滑走体形を取るように隣接する節に順次屈曲指令を渡す(シフト制御)」ことで、くねりながら推進する様子を確認した。世界で初めて機械モデルによるヘビ形推進を実現した。推進速度は0.4[m/s]であった。また、側面に接触センサを取り付け、狭い通路内をセンシングしながら推進する実験にも成功しており、狭隘空間内での具体的な推進法の可能性を示すと同時に、その制御は簡易なものでも実現しうることを示した。しかし、演算処理やデータ収集のため、また動力源となる電力を供給するために、外部と有線で接続された状態で実験を行っていた。移動体において電源線や制御線で外部と接続されている有

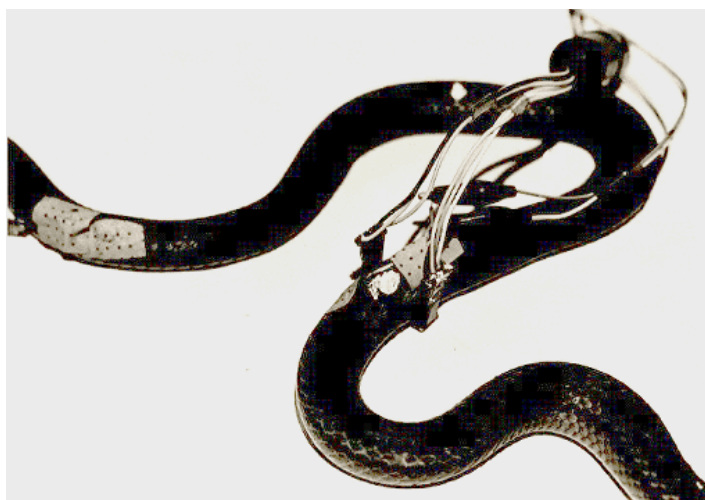


Fig. 1.3: EMG measure experiment of regular motion.

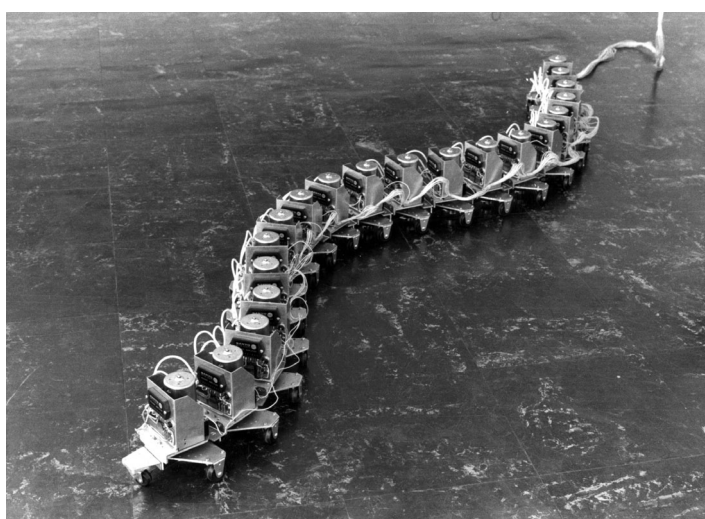


Fig. 1.4: Snake like robot, “ACM-III.”

線システムは、移動範囲や速度また移動時における安全性等の主要機能に著しい制約を受けるとの知見から、移動体においてシステムの自立化は実験室レベル、及び将来の実社会での運用を考えても有意義であり、以降の移動体モデルの課題として自立化（無線化）が掲げられた。

1996年には ACM-III に代わり、次期機械モデル ACM-R1[3] の開発を行った (Fig.1.5) . ACM-R1 は全 16 節、全長 2.4[m]、総重量 24[kg] であり、その特徴はシステムの完全自立化にある。バッテリー及び制御用マイコンを搭載し、送信機によりパラメータを送ることで、機械モデルそのものが独立して運動できるようになった。送信パラメータは、主に ACM-III で実現した、ヘビのようにくねるほふく推進の制御値であり、操縦自体は市販

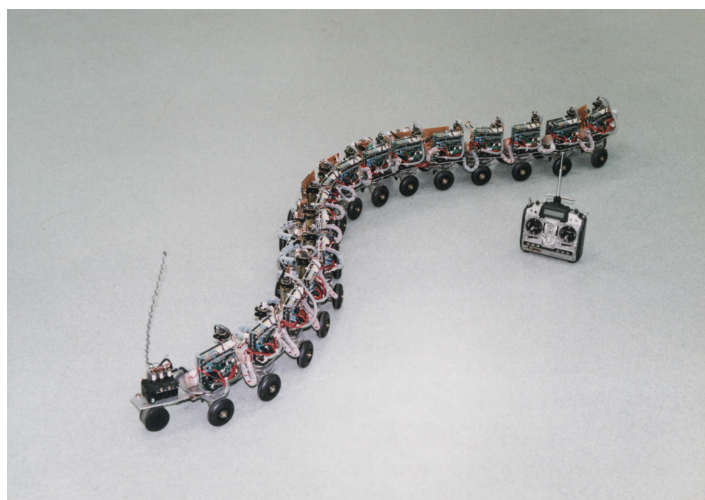


Fig. 1.5: Snake like robot “ACM-R1”

の無線式自動車模型とほぼ変わらない操作で行えるよう配慮した。リノリウム板上で最高速度 1m/s を達成し、約 30 分の自立滑走が可能など、有線システムであった前機械モデル ACM-III に比して、高い移動能力を有する。実際のヘビは、移動する路面の滑り易さ、傾斜などの環境変化に応じて、形態を変化させることで効率のよい移動を実現している。ACM-R1 では氷上での滑走、及び斜面での登坂など滑走条件を変えての推進実験を行い、その上でこの適応動作を機械モデルにおいて実現するため、路面にあわせて滑走体形を変化させる実験を行った。

一方で、ヘビの体幹は移動するときは脚として用いられ、獲物を捕らえるときは腕として用いられる、といった具合に多様な機能性を持っている。科学的興味により開始されたヘビの研究だが、その推進原理を明らかにした後、このさまざまな機能を工学的に応用することをめざし、移動機能、マニピュレータ及びグリッパなどの作業機能の分野にそれぞれ展開している。例えば、腕としての機能を持たせた実験機として、複雑な空間内を通り対象物を把持することが可能な ELASTER(Fig.1.6) (後に内視鏡に利用できるほど小型なものも開発した) や、ワイヤを利用して任意形状のものを同一把持力で柔らかく覆い掴むことが出来るソフトグリッパー (Fig.1.7) などが挙げられる [1]。

これらの研究は、机上での理論構築に留まることなく、実際に機械モデルを構築し、現物を用いた検証までを行うという本研究室の基本方針に沿って進められている。マニピュレータおよびグリッパとしてヘビ構造を用いる最大の利点としては、曲率の大きい曲線をもって対象物にアプローチ出来る点にあり、機構的に曲線側面に対し一様な力分布でものを把持するなどの機能を持たせることも容易であることが挙げられる。しかし、これらのロボットに移動機能を持たせようとするのは少々困難である。その理由としては、動作部分に直接アクチュエータを用いて動作の障害とすることを嫌い、ワイヤーなどの伝達機

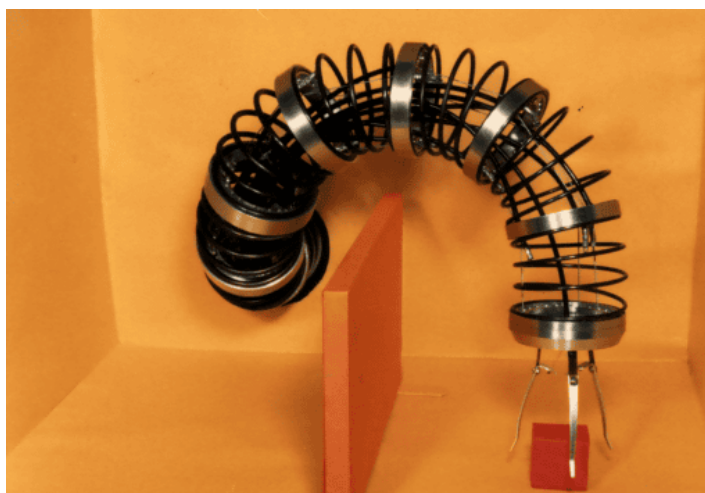


Fig. 1.6: Flexible arm “ELASTOR (ACM-7)”

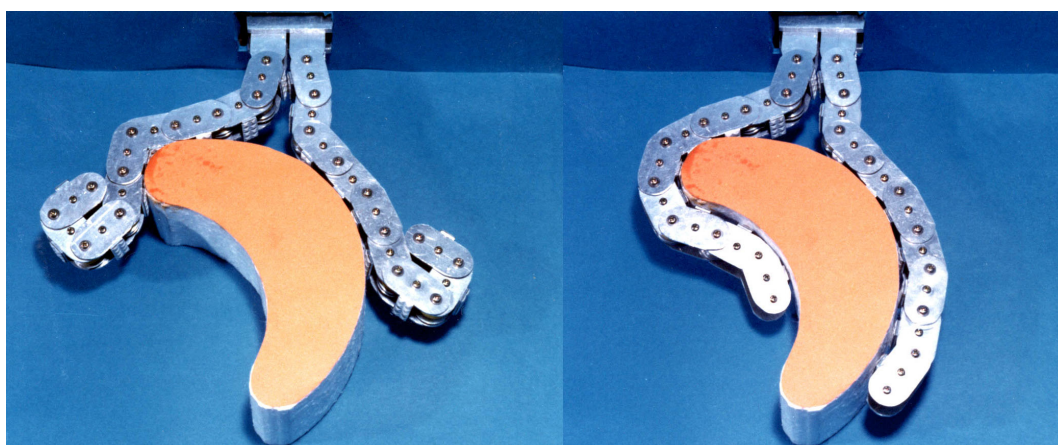


Fig. 1.7: Snake-like mechanism gripper “SoftGripper-I”

構を経て根本部位にアクチュエータを集中配置する傾向が多いためであり、特徴を出そうと全長を長くするほど、この根本部は大きく重くなってしまうからである。このため、最近ではソフトグリッパとしての応用・利用が盛んに行われている。

vii) これまでに、3次元型の索状能動体として、有線ながら斜旋回機構を導入し空間的な屈曲を可能とした移動体モデル OBLIX[2] や、高剛性アームモデル MOGURA などを開発していた。一方で生態ヘビの滑走形態を実現できる索状能動体として、2次元運動モデル ACM-R1[3](Fig.1.5)が開発されたのち、1999年に次期3次元索状能動体機械モデル ACM-R2[4]の開発が行われた。ACM-R2は、全14節、全長2.4m、総重量30kgであり、その特徴はワイヤ干渉駆動による高トルク三次元型の完全自立索状能動体という点にある。バッテリーおよび制御用マイコンを各節に搭載可能、分散制御を行えるように考慮されている。関節毎に角度・トルクの計測が可能であり、力制御も実現可能である。



Fig. 1.8: Three Dimensional Active Cord Mechanism,”ACM-R2”

広瀬らの研究以後，他の研究者もそれぞれヘビ型ロボットについて研究を展開しており，近年の索状能動体の研究は3次元型が主体となっている．馬は生物筋肉の生理学的特性を定量的に考慮して蛇行曲線と呼ばれる新たな関数で滑走体型を近似した [7][8]．滑りを考慮に入れた動力学解析を行い，節数による推進力変化などについてシミュレーションを行った [9]-[13] ほか，斜面での蛇行形態 [14]，蛇行推進の振幅・周期を調整しての軌道トラッキング研究 [15] など広く研究を行っている．蛇型ロボットのノンホロノミックシステムとしての制御理論の開発は，近年美多・岩崎らによって TITech COE/SMS Project(1997-2001) の一貫として進められている [17][18]．また三平らは，従来のマニピュレータ制御と蛇型移動ロボットの制御理論の融合を目指して，可操作性を評価基準とした運動制御法を検討している [19][20]．伊達らは蛇型ロボットの3次元的な推進法について解析的アプローチでシミュレーションを行っている [21]．

Chirikjian と Burdick は超冗長ロボットの移動法として垂直方向の波動が伝播することで推進する Traveling wave gait(Pedal-Waving) や，それを応用した把持 [22]，Sidewinding について検討した [23]．G.Poi らは Pedal-Waving による段差の乗り越えを検討した後，機械モデルの構成を行っている [24]．Kevin Dowling は各節 Pitch と Yaw の自由度を持つユニットに正弦波を入力し，位相と大きさをシミュレーション上で最適化することで V 字体幹で Roll 方向に回転するなどの移動様式を報告し，簡易な機械モデルによる実験を行った [29]．さらに M.Yim らは節体幹の持つ Modularity に着目して節の脱着が可能な，再構成移動体を構成し連続的な Pedal-Waving や環状になりクローラとして移動したり，歩行形態への再構成も実現している (Fig.1.9)[25]．Modularity という着眼点では，村田らの M-TRAN3 により，モジュール同士の結合・分離を含めた移動が実現されている [26]．

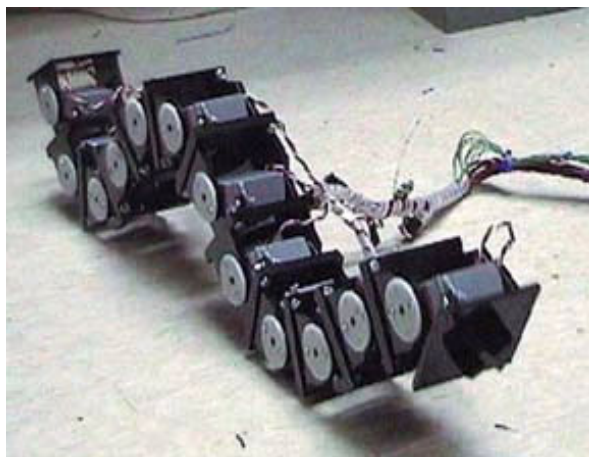


Fig. 1.9: Polybot



Fig. 1.10: GMD-SNAKE2

より実際的なアプリケーションを目的として、B.Klaassenらは配管内での検査用として能動車輪により駆動される GMD-SNAKE2 を構成している (Fig.1.10)[28]。K.-U.Schollらも配管内点検移動用に、左右独立動車輪ユニットを 3 自由度関節で連結したロボットを開発している (Fig.1.11)[27]。亀川らは災害救助時の探索用ロボットとして、クローラによる移動ではあるものの、3 次元索状能動体のロボット“KOHGA”を開発、研究を行っている [30]。

## 1.2 目的

### 1.2.1 将来展望

「能動的に屈曲しうる関節ユニットを直列に多数連結し、索状を成す機能体」が、十分に細長く頑丈なモデルとして実現したならば、実社会に対して非常に有用であると筆者らは考えている。

その理由は、同一体をもって把持や移動などの多様な機能を持たせることが出来るというだけではない。ヘビ類は、草原・荒野などは言うに及ばず、樹上・密林・砂漠・水中・

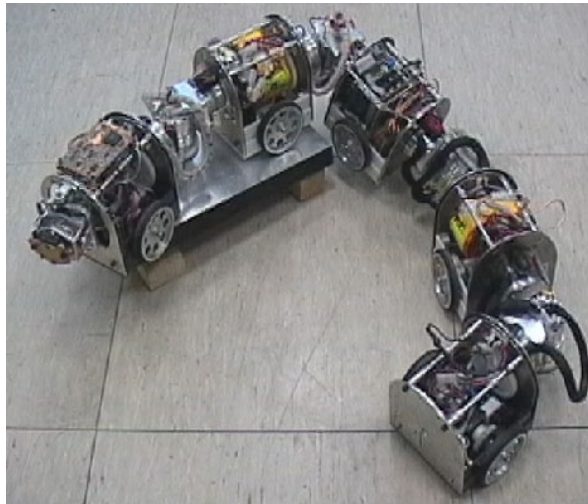


Fig. 1.11: SewerRobot

海底に至るまで実に広範囲にわたって生息している．もしヘビと同等の機能を持つ索状能動体が完成したならば，これら全ての生息域において，ロボットの作業を行うことが可能となる．その移動原理から，さらに氷上においても運動が可能であることが判明している [3]．常に力学的に安定な姿勢で推進を行えるため，クレパスでの谷渡りなども可能となるであろう．特に関節間は屈曲運動のみであるため，機密性の向上が優れ，ほふく推進運動の効率が水中でも良好なことと合わせ，水陸両用移動体になりうる可能性がある．

また，狭隘な空間に対しても，頭さえ通過してしまえば全身を通すことが可能という侵入性の高さも挙げられる．このとき，体幹軸長さを増加させることで運搬量そのものを向上させ，かつ自重を体幹全体に分散させることが出来るため，脆弱な場所でも移動が可能である．

工学的にも，体幹がユニット化された節から構成可能であるため，再構成が可能であれば著しく冗長で信頼性の高いシステムとなりうる．また，体幹を切り離しての無中枢系的動作も期待できる，などの応用性もある．

以上のような特徴から，現実的な利用目的として，人間ではなかなかアプローチしにくい環境に対する点検作業が挙げられる．特に上下水道管やガス管内など生活パイプラインに対する保守点検作業に関しては，人間による点検の場合には一時的な利用停止が必要であり，ロボット化への期待は非常に高い． $\phi 100$ [mm] 程度の配管内部からの厳密な内壁点検・内壁洗浄・メンテナンスなども可能となる．また，家屋の天井裏・床下など進入しにくい場所の点検作業に関しても同様で，配管に比べれば活動可能な空間は若干広がるものの，やはり人間が作業を行うには狭い場所である．これらが十分に可能となれば，同じ技術で被災時の倒壊家屋に生存者が居ないか確認する早期発見作業にも利用が可能となる．通常時は点検作業・非常時には人命救助と位置づけることで利用価値も高まる．実は

この用途に対して現在の技術レベルですぐに製作可能な実験機として索状能動体の派生機「蒼龍」シリーズも開発しているが、配管内における運動性能を考慮した場合は水陸両用索状能動体としての運動法が効率的との予測が立てられる。この防塵防水機能の点でも前述の通り有利であり、本論で述べる実験機の後継機として水陸両用の自立型索状能動体移動体をすでに開発し、両環境において充分移動可能であることを確認している。

索状能動体は、人間に比べてより小さな隙間にも進入可能であるが、小さくなればなるほどアクチュエータ出力は減り、二次電池の容量も小さいものになってしまうため、より高性能な構成要素が開発されるまでは、小型化には限界がある。しかし、もしアクチュエータの小型化・多量投入などが可能になった場合には、様々な場所に索状能動体を適用することが可能である。例えば、消防活動で利用する消火ホース自体が現場にのびていき効率的に消火作業にあたり、通信線が自動でそのときにあった最適なネットワーク構成を実現してくれたり、能動的に衝撃から守ってくれるような荷物の梱包材などが可能になる。紐を編めば2次元的な面になるため、例えば高層ビルからの救助などでの滑り台も、安全に降りられるよう螺旋を描いてくれるようになっていたり、衣服の繊維に使えば、すべての服はフリーサイズで体を圧迫することがなくなるだろう。編み物などでできている各種ぬいぐるみは本物のように動き出し、軍手をはめただけで握力が強化されるかもしれない。肩が凝ると肩をもんでくれる上着、季節にあわせて風通しが変わるセーター、水につけるだけで手もみ洗いしてくれる衣服など。立体的に編むことも可能であるため、建築物自身がアクティブになり、街の再構成や地震・津波などの自然災害から能動的に守ってくれるかもしれない。

夢の世界に思われるかもしれないが、「線」要素を組むことで「面」「立体」に話を拡張できることを考慮すれば、可能性は無限に広がる。

### 1.2.2 本論文の位置づけ

本論文は、ACM に関してまずその空間運動の基礎理論を構築し、2次元モデルを元とする基本的な推進制御の体系化と実現について種々の知見・考察を付記し、3次元索状能動体として十分な研究を行う実験機の構築と検証を通し、3次元索状能動体の基礎理論と開発の指標とするものである。

現在の索状能動体は、2次元機械モデルから3次元的に屈曲可能な機械モデルがいくつか発表されたばかりであり、これに対して従来2次元モデルについて行われてきた研究成果を、3次元モデルに発展する必要がある、この基礎的な理論を構築する必要がある。

これまでの2次元モデルは、ACM-R1[3]に代表されるように、シフト制御を用いることで高い走行性を実現している。いかに3次元モデルといえども、通常は平面的な移動を行うと考えられる。2次元モデル同様の高い走行性を保持し、さらに3次元モデルならで

はこの走行や特殊な移動などに発展させ、これらを体系化した上で、初めて次の段階として 3 次元的な運動論へ発展させることが肝要と考える。

無論、高度なマッピングを元に包括的に経路計画を行い、その通りに運動を実現する研究も先に紹介したとおり盛んに行われている。経路計画やそれに倣う動作計画などの研究は非常に重要なことであり、将来的には必要な研究である。しかし、これに要求される高度なセンサ系・情報処理系を搭載するためには、実機モデル自身の巨大化・重量化を招くおそれがある。

そのため、まずは簡易なシフト制御運動を移動の礎とし、これを元に生物ヘビの運動を検討し、徐々に生物ヘビではない 3 次元的な移動法に発展させる手法をとり、煩雑な制御なくフィールドを自由に活動できるような 3 次元索状能動体の開発と制御系を構築することを本論文の目的とする。

### 1.3 本論文の構成

本論文は「3次元索状能動体の機構と推進制御の研究」と題し全 7 章で構成する。

以降、本論で「3次元索状能動体」を「3DACM」と略すこととする。

第 1 章「序論」では、本研究の背景と目的を述べた。現在のロボット市場は拡大傾向にあり、今後移動機構が重要となるであろうこと。索状能動体の歴史を述べ、2次元モデルから 3次元モデルへの転換期を迎えていること。そして、本論文は ACM に関してまずその空間運動の基礎理論を構築し、2次元モデルを元とする基本的な推進制御の体系化と実現について種々の知見・考察を付記し、3次元索状能動体として十分な研究を行いうる実験機の構築と検証を通し、3次元索状能動体の基礎理論と開発の指標とするものであることを示した。

第 2 章「3DACM の基本理論」では、まず実機モデルと空間曲線モデルとの関係を明らかにし「背びれ曲線」の概念を提示した上で、実際の推進式を背びれ曲線の曲率モデルで論じることとする。また、基本推進法の構造として「シフト制御」「捻転制御」「部分適用制御」の 3 つに分類しそれぞれ解説する。

第 3 章「推進体系別制御法」では、先に分けた基本推進法の 3 制御を組み合わせることで実現される様々な推進法について分類し、具体的な曲率制御式を提示する。また、従来の 2 次元的なほふく推進の操舵制御についてもより詳細な検討を述べる。

第 4 章「3次元索状能動体 ACM-R3 の設計」では、3次元索状能動体の基本推進論にて論じる動作を十分実現しうる索状能動体の実機モデルとして開発した「ACM-R3」について、詳しく説明する。

第 5 章「各種推進実験」では、先に述べた推進式を元に実機を用いて行った推進実験について述べる。

第 6 章「3 次元索状能動体 ACM-R3n の設計」では、先に述べた ACM-R3 の運用過程を経て出てきた改良点を改善し、特に電装系について様々な索状能動体に適用可能な基本概念と回路系を構築・実装した新規モデルを開発したので、報告する。

第 7 章「結論と今後の展開」では、本研究で得られた結論を述べるとともに、残された課題と今後の展開について述べる。

## 第 2 章

# 3DACM の基本理論

本章では、まず実機モデルと空間曲線モデルとの関係を明らかにし「背びれ曲線」の概念を提示した上で、実際の推進式を背びれ曲線の曲率モデルで論じることとする。また、基本推進法の構造として「シフト制御」「捻転制御」「部分適用制御」の3つにわけ各々を定式化する。

### 2.1 3DACM の立体形状基礎理論

索状能動体の形状を制御する際には、連続したモデルを用いて統一的に論じることが望ましい。ここでは、最初に3次元空間内において連続的なモデルの形状を決定する手法を示し、次にその連続的なモデルに沿った体形を ACM-R3 等の機械モデルで実現する方法を示す。索状能動体の連続的なモデル形状を表わす手法としては、すでに Chirikjian[22] や伊達 [21] らも提案を行っているが、ここでは空間曲線の理論を拡張した手法を用いる。

#### 2.1.1 立体曲線の基礎方程式

理想的な索状能動体は、無数の関節を微小間隔で並べたものであり、連続形状をとりうる。これを連続モデルと呼ぶことにする。この連続モデルを太さのない線と見なすと、これは空間曲線となる。この空間曲線  $c$  の形状は、曲線の始点から測った曲線の長さ (弧長)  $s$  に関する連立微分方程式として、Frenet-Serret の式で与えられる [36].

$$\begin{cases} \frac{dc}{ds} &= \mathbf{e}_1 \\ \frac{d\mathbf{e}_1}{ds} &= \kappa(s)\mathbf{e}_2 \\ \frac{d\mathbf{e}_2}{ds} &= -\kappa(s)\mathbf{e}_1 + \tau(s)\mathbf{e}_3 \\ \frac{d\mathbf{e}_3}{ds} &= -\tau(s)\mathbf{e}_2 \end{cases} \quad (2.1)$$

ここで  $c$  は曲線の座標を示すベクトルである。曲線の座標は弧長  $s$  の関数であり、成分を記述すると  $c = \{x(s), y(s), z(s)\}$  である。 $\kappa(s)$  と  $\tau(s)$  はそれぞれ曲率と捩率と呼ばれ、

曲線の形状を決定する関数である.  $\{e_1, e_2, e_3\}$  は正規直交基底をなす単位ベクトルの組であり,  $e_1$  は曲線の接線方向の単位ベクトル,  $e_2$  は曲線が曲がる方向の単位ベクトル,  $e_3$  は  $e_3 = e_1 \times e_2$  で与えられる単位ベクトルである. 式 (2.1) は,  $(\tau(s)ds e_1 + \kappa(s)ds e_3)$  という回転ベクトルで回転しながら  $e_1$  方向に  $ds$  ずつ移動する移動座標系  $\{e_1, e_2, e_3\}$  の原点が描く軌跡が曲線  $c$  になることを示している.

さて, 索状能動体を太さのない線と見なせばこの空間曲線でモデル化できるが, 実際の索状能動体には太さが存在し, その表面には背や腹の方向がある. そのため,  $e_2$  と  $e_3$  が曲線の形状によって与えられる式 (2.1) は, 索状能動体の曲線形状を示すことには適さない. このため, 移動座標系を曲線の形状から分離できるように Frenet-Serret の式を拡張した以下の連立微分方程式を導入する.

$$\begin{cases} \frac{dc}{ds} = & e_r \\ \frac{de_r}{ds} = & \kappa_{yaw}(s)e_p - \kappa_{pitch}(s)e_y \\ \frac{de_p}{ds} = -\kappa_{yaw}(s)e_r & + \tau(s)e_y \\ \frac{de_y}{ds} = \kappa_{pitch}(s)e_r & - \tau(s)e_p \end{cases} \quad (2.2)$$

形の上では, 式 (2.2) は Frenet-Serret の式 (2.1) に項を二つ加えたただけであり,  $c$  が曲線の座標を,  $e_r$  が曲線の接線方向の単位ベクトルを示すのは式 (2.1) と同じである. しかし,  $e_p, e_y$  の意味は式 (2.1) の  $e_2, e_3$  と大きく異なる. 式 (2.1) の  $e_2, e_3$  が曲線の形状から与えられたのに対し, 式 (2.2) の  $e_p, e_y$  は (Fig.2.1) に示すように索状能動体に貼りついた機体座標系の基底ベクトルとして定義する. ここで Fig. 2.1 は, 4.2.1 章において離散的なモデルの座標系を定義した Fig. 4.2 に対応しており, 式 (2.2) は 4.2.1 章の議論の自然な拡張であると言える. 式 (2.2) が Frenet-Serret の式 (2.1) ともう一つ異なる点は, 機体座標系  $\{e_r, e_p, e_y\}$  の回転が  $(\tau(s)ds e_r + \kappa_{pitch}(s)ds e_p + \kappa_{yaw}(s)ds e_y)$  という 3 軸の成分を持つ回転ベクトルで与えられる点である. これにより, 機体座標系  $\{e_r, e_p, e_y\}$  を曲線の形状とは分離して扱うことが可能になる. 初期条件と  $\tau(s), \kappa_{pitch}(s), \kappa_{yaw}(s)$  が与えられればこの式 (2.2) は解析的または数値的に解くことができ, 解  $\{c, e_r, e_p, e_y\}$  を得る.

曲線と機体座標系を独立なものとして扱う方法は, これ以外にも Chirikjian らのように, 曲線によって一意に決まる座標系を基準とした  $e_r$  周りの回転量によって機体座標系の姿勢を決める方法などが考えられるが [22], 我々の式は索状能動体の捩れと屈曲を直接に表しているため, 索状能動体の形状を扱う上で利点が多い. また, 同じアイデアの式が伊達らによって既に発表されているが [21], 一般的な理論としての検討が十分になされていないとは言えないため, 今後の式展開のためにも前述のような我々の目的にあった記述方法を使うことにする. 解の一例を Fig. 2.2 に示す. これには機体座標系の  $e_p(s), e_y(s)$  が描く軌跡も合わせて示した. この様子が細長い魚の背びれに似ているので, 式 (2.2) の解で定義される曲線を “背びれ曲線 dorsal reference curve” と呼ぶことにする. また, 機体

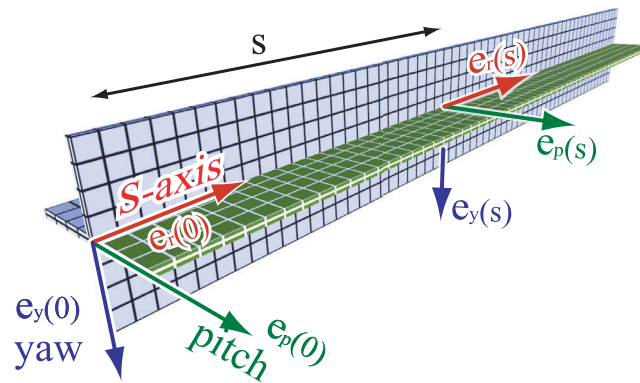


Fig. 2.1: Standard Posture.

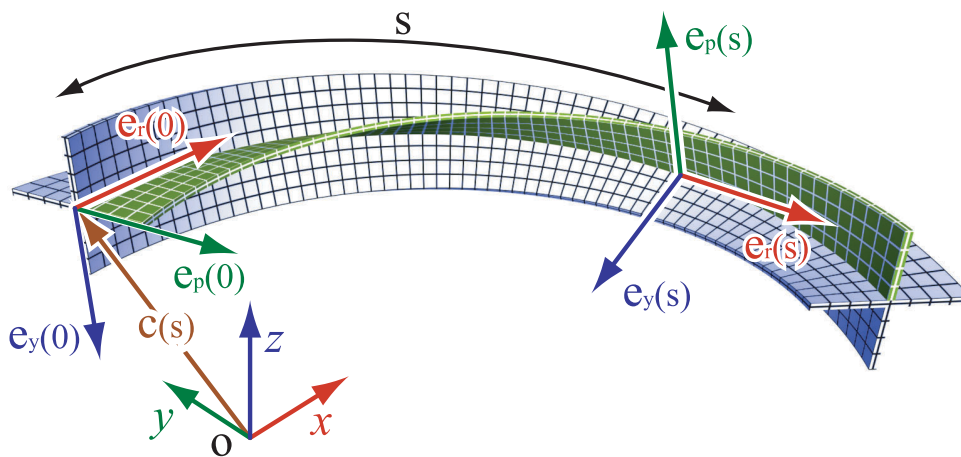


Fig. 2.2: Example of solution of equations(2.2).

座標系  $\{e_r, e_p, e_y\}$  を“背びれ座標系 (Dosal Reference Frame)”と呼ぶことにする。

以上の手法を用いると、結局のところ連続モデルの形状を決定するのは  $\tau(s)$ ,  $\kappa_{yaw}(s)$ ,  $\kappa_{pitch}(s)$  という3つの関数となる。よって以降の議論では、 $\tau(s)$ ,  $\kappa_{yaw}(s)$ ,  $\kappa_{pitch}(s)$  について検討していくことになる。

### 2.1.2 連続形 3DACM への基礎方程式の適用

本論文で論じる 3DACM は、後述するが2方向の屈曲関節を持つ構造である。よってこれを理想化すると、 $\tau(s) = 0$  の連続モデルとなる。ここでは、 $\tau(s) = 0$  の連続モデルと数学的に記述される曲線モデルとの対比を考察する。

数学的には任意の空間曲線は式 (2.1) のように曲率と捩率とで与えられる。よって、式 (2.1) の曲率と捩率を式 (2.2) で  $\tau(s) = 0$  とした  $\kappa_{yaw}$  と  $\kappa_{pitch}$  に変換できればよい。

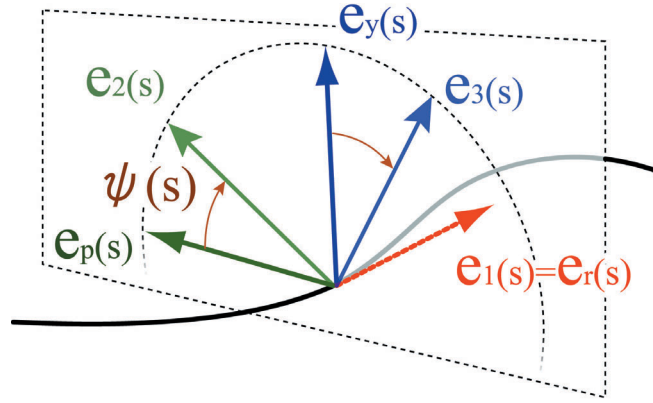


Fig. 2.3: Relation of Frame.

$\tau(s) = 0$  のモデルの形状を表す方程式は、以下である。

$$\begin{cases} \frac{dc}{ds} = & \mathbf{e}_r \\ \frac{d\mathbf{e}_r}{ds} = & \kappa_{yaw}(s)\mathbf{e}_p - \kappa_{pitch}(s)\mathbf{e}_y \\ \frac{d\mathbf{e}_p}{ds} = -\kappa_{yaw}(s)\mathbf{e}_r \\ \frac{d\mathbf{e}_y}{ds} = \kappa_{pitch}(s)\mathbf{e}_r \end{cases} \quad (2.3)$$

$\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_r$  として上記の合計 8 個の式が同時に成り立つという条件から得られる  $\kappa(s)$ ,  $\tau(s)$ ,  $\kappa_{yaw}$ ,  $\kappa_{pitch}$  の関係式が、以下のように導出できる。

$$\begin{cases} \kappa_{pitch} = -\kappa(s) \sin(\psi(s)) \\ \kappa_{yaw} = \kappa(s) \cos(\psi(s)) \\ \psi(s) = \int_0^s \tau(s) ds + \psi(0) \end{cases} \quad (2.4)$$

ここで  $\psi(s)$  の意味は Fig. 2.3 に示すように  $\mathbf{e}_2$  と  $\mathbf{e}_p$  がなす角である。  $\psi(0)$  は変換の際に現れる積分定数で、既知であるか、または自由に決められる定数である。  $\psi(0)$  を変化させると背びれ座標系が曲線周りに回転する (Fig.2.4)。これは 3.2 節にて説明する「捻転」の現象を示しているが、詳細は後述する。

式 (2.4) から  $\psi(s)$  を消去すると、次式を得る。

$$\begin{bmatrix} \kappa_{pitch} \\ \kappa_{yaw} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi(0) & -\sin \psi(0) \\ \sin \psi(0) & \cos \psi(0) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} -\kappa \sin \left( \int_0^s \tau(s) ds \right) \\ \kappa \cos \left( \int_0^s \tau(s) ds \right) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

つまり  $\kappa(s)$ ,  $\tau(s)$  で与えられる曲線は、式 (2.4) により  $\tau = 0$  の背びれ座標系でも記述できることになる。

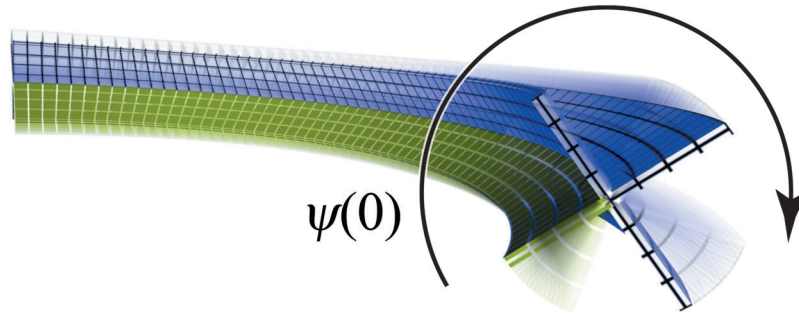


Fig. 2.4: Rotation of dorsal reference frame around the s-axis.

### 2.1.3 離散形 3DACM への適用

以上のように表記される連続曲線に対して，ACM-R3 のような離散的なリンク系を沿わせる制御法を検討する．式 (2.5) より，連続モデルは  $s$  から  $s + ds$  の間において， $e_p$  まわりに  $\kappa_{pitch}(s) ds$  だけ曲がり， $e_y$  まわりに  $\kappa_{yaw}(s) ds$  だけ曲がる．したがって，ACM-R3 における屈曲軸間の距離を  $\delta s$  とすると， $i$  番目の関節の屈曲角度  $\theta_i$  は次の式で近似できる．

$$\theta_i = \begin{cases} 2\delta s \kappa_{yaw}(i\delta s) & (i : \text{even joint}) \\ 2\delta s \kappa_{pitch}(i\delta s) & (i : \text{odd joint}) \end{cases} \quad (2.6)$$

ただしこれは先頭の関節から数えて奇数番目の関節を pitch 回転関節とし，偶数番目の関節を yaw 回転関節とした場合である．係数の 2 は，pitch 回転関節同士，yaw 回転関節同士の間隔が  $2\delta s$  であることに対応している．

この式を用いたときの連続モデルと離散モデルとの形状の比較のため，ヘビの推進形態を表記するサーペノイド曲線 (Serpentoid curve) [1] と基本的な空間曲線である螺旋形状との 2 例について離散化モデルを生成し，もとの連続曲線と比較した結果を Fig. 2.5 に示す．この図から，式 (2.6) の離散モデルは連続モデルによく一致する．また他のさまざまな形状に関しても同様の傾向が観察できた．そのため以降の制御関数は式 (2.5) の連続モデルで与え，ACM-R3 への関節角度指令は式 (2.6) によって行うこととする．

## 2.2 3DACM の推進制御基礎理論

2.1 節を通して，索状能動体の形状を表す準備ができた．厳密には，時間によらない索状能動体の全経路曲線を表すことになる．本節では，この経路曲線から索状能動体の全長長さだけ切り出し，実機モデルに適用する部分，すなわち推進について取り扱う．索状能動体の 3 次元的推進法の動作構造として「シフト制御」「捻転制御」「部分適用制御」の 3

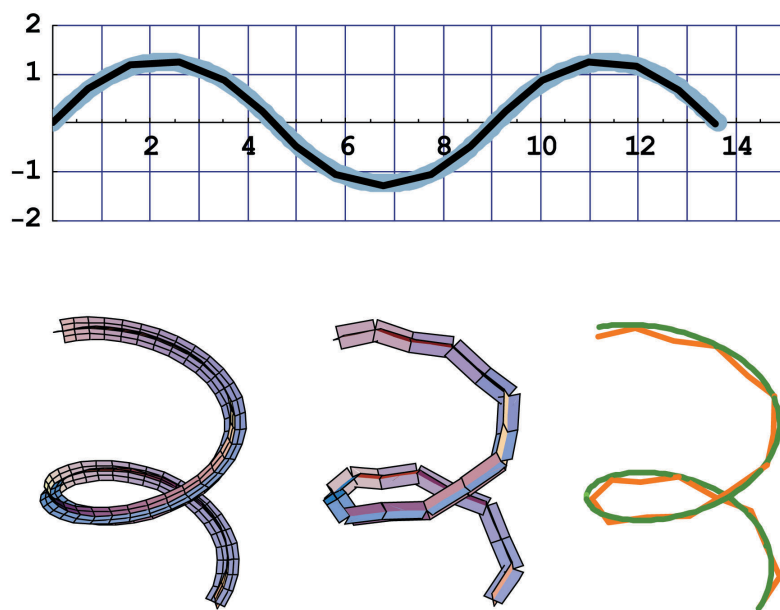


Fig. 2.5: Comparison of models and discrete models.

種の制御に分けて体系化を行う．これらを重ね合わせることで，様々な運動を生成することが出来る．

大野らは，体幹が屈曲だけでなく伸縮運動も行う 3 次元運動型について研究しており，体幹曲線を  $\kappa_{pitch}$ ,  $\kappa_{yaw}$ , 伸縮自由度相当の 3 つの制御に対し，時間の周期関数で記述される三つの波形の重ね合わせで表現して体系化を図っていた [5]．しかし伸縮自由度は现阶段では考慮しないため，シフト制御による重ね合わせとほぼ同等の記述となる．また，捻転制御については特殊な扱いとなるため，新たに体系化を行うものである．ただし，将来的に伸縮自由度を考慮する場合は，以下に論じる  $s$  に対しても時間  $t$  の関数と見なしうる，つまり  $s = N(t)$  として扱うことが可能であると考えられる．

### 2.2.1 シフト制御

シフト制御とは，空間曲線  $c$  に対し曲率  $\kappa(s)$  のパラメータ  $s$  を時間的に変化させ，長さ方向に曲率を伝播させることである．ACM-III など 2 次元的な索状能動体の制御系はアナログ回路で構成され「導出した理論に基づいた滑走体形を取るように，隣接する節に順次屈曲指令を渡す」ことで，くねりながら推進していた．これがシフト制御となる．

理想的なシフト制御運動は， $s$  軸方向に対し自由に動きつつその直交方向に拘束力が働く環境であれば，曲線  $c$  に沿って運動する，というものである．イメージ的には，空間軌道曲線  $c$  が常に存在し，ある時刻  $t$  に索状能動体の長さ分だけ軌道曲線が見え，長さ一定のままで時々刻々見える範囲が変化するような運動に相当する．ここで，媒介変数  $u$  を用

いと、索状能動体上の  $s$  (これは空間曲線の  $s$  にも相当する)、時刻  $t$  とし、無次元化量としての単位長さを  $L$ 、単位時間を  $T$  とすると、シフト制御は以下のように定式化が可能である。

$$\begin{bmatrix} \kappa_{pitch} \\ \kappa_{yaw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(u) \\ G(u) \end{bmatrix} \equiv S(u) \quad , \quad u \equiv \frac{s}{L} - \frac{t}{T} \quad (2.7)$$

ただし、実制御において停止したり任意の速度で推進するためには、 $t$  を実時間  $t_{real}$  に対して任意にコントロールすればよく、例えば制御用の任意の連続関数として  $H$  を用いると  $t \equiv H(t_{real})$  と扱うことで任意に運動生成が可能となる。

### 2.2.2 捻転制御

捻転制御は、2.1.2 節最後に述べたとおり、二軸屈曲モデルに変換した際に現れる積分定数  $\psi(0)$  を時間によって変化させることで、背びれ座標系が曲線周りに回転する現象 (Fig.2.4) である。最も重要な点は、先のシフト制御とは全く独立に操作しうる値である、という点にある。従来までは変曲点のない曲線形状にのみ適用してきたが、曲線であれば任意に適用可能であることを指摘し、ほふく推進において実例を示していた [32]。その定式化がこれに当たる。式 (2.5) と全く同じだが、 $\psi(0)$  を任意位置・任意時間によって操作するとし、 $s$  軸周りの回転変換行列を  $E(s, t)$  として記述し直すと以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} \kappa_{pitch} \\ \kappa_{yaw} \end{bmatrix} = E(s, t) \begin{bmatrix} -\kappa \sin \left( \int_0^s \tau(s) ds \right) \\ \kappa \cos \left( \int_0^s \tau(s) ds \right) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

これにより生成される運動は接地条件によって種々に異なる。シフト制御によるグライド推進が可能な場合、基本的には  $s$  軸方向と接地面法線方向に互いに直交する向きに推進力を発生できる。

### 2.2.3 部分適用制御

部分適用制御は、厳密には推進力となる制御法ではなく、先に述べた 2 種類の制御を索状能動体のどの部位にどの程度の強度で表現するか、という倍率 (Amplification) 的な要素である。ゆえに単独では用いず、推進力ベクトルを調整するために利用する。先の 2.2.1 節で定義したシフト制御に対し定式化すると以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} \kappa_{pitch} \\ \kappa_{yaw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{pitch}(s, t) \cdot F(u) \\ A_{yaw}(s, t) \cdot G(u) \end{bmatrix} \equiv A(s, t) \cdot S(u) \quad , \quad u \equiv \frac{s}{L} - \frac{t}{T} \quad (2.9)$$

上式において「 $A(s, t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 」(倍率が 1) であれば、通常のシフト制御と変わりなく、「 $A(s, t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ 」であれば yaw 軸成分のみが抽出される。

### 2.2.4 統合制御による推進式化

以上 3 つの推進制御を合成することで，3DACM の推進制御式が定式化できる．すなわち

$$\begin{bmatrix} \dot{\kappa}_{pitch} \\ \dot{\kappa}_{yaw} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n (A_i(s, t) \cdot E_i(s, t) \cdot S_i(u_i)) \quad , \quad u_i \equiv \frac{s}{L_i} - \frac{t}{T_i} \quad (2.10)$$

となる．この考えを基本として，次章で各種推進の制御式を述べる．

## 2.3 まとめ

本章では，立体形状を記述する基礎方程式として「背びれ曲線」を提示し，この曲率モデルで推進制御式を論じる準備を行った．また，実機モデルと背びれ曲線モデルとの関係を明らかにした．基本推進法の構造として「シフト制御  $S(u)$ 」「捻転制御  $R(u)$ 」「部分適用制御  $A(s, t)$ 」の 3 種の制御に分け，それぞれを定式化した上で，この制御を用いて種々の推進制御式を記述できる式 (2.10) を準備した．

## 第 3 章

# 3DACM の推進運動とその制御

この章では、先に述べた 3 種の制御を組み合わせることで実現される様々な推進法について分類し、具体的な曲率制御式を提示する。それぞれの制御法の色濃く・基礎的な推進順に紹介する。これはほぼ実現してきた順に一致する。まず、概観としてどのような推進があるのか、分類も併せて以下に示す (Fig.3.1)。

### シフト制御群

概して生体へビのなし得る推進法は、シフト制御を主とする推進に分類される。これはへビの生体内部系によるものと考えられる。

- ・ S-1 : 基準ほふく推進

シフト制御推進そのものであり、最も基本的な推進法として、操舵法についても論じる。

- ・ S-2 : Sinus-Lifting 推進

生体へビが行う、より一般的なほふく推進。基準ほふく推進から pitch 軸成分が付加される。振幅は僅かであり、半分の周期で位相をずらすことで腹部のみを接地させる。

- ・ S-3 : Side-Winding 推進

砂漠に住むへビが行う推進法。Sinus-Lifting 推進とは pitch 軸成分の周期が異なり、推進方向も振幅中心軸方向と異なり斜め方向に進む。

- ・ S-4 : Pedal-Waving 推進

尺取り虫的な推進法。波形の送り方向が異なる。操舵についても論じる。

- ・ S-5 : 角度抑制シフト推進

対地適用的な角度抑制制御を行う推進法。波形を生成しなくても場合によっては進める点で他と異なるが、他の推進との合成で最も効果を発揮する。

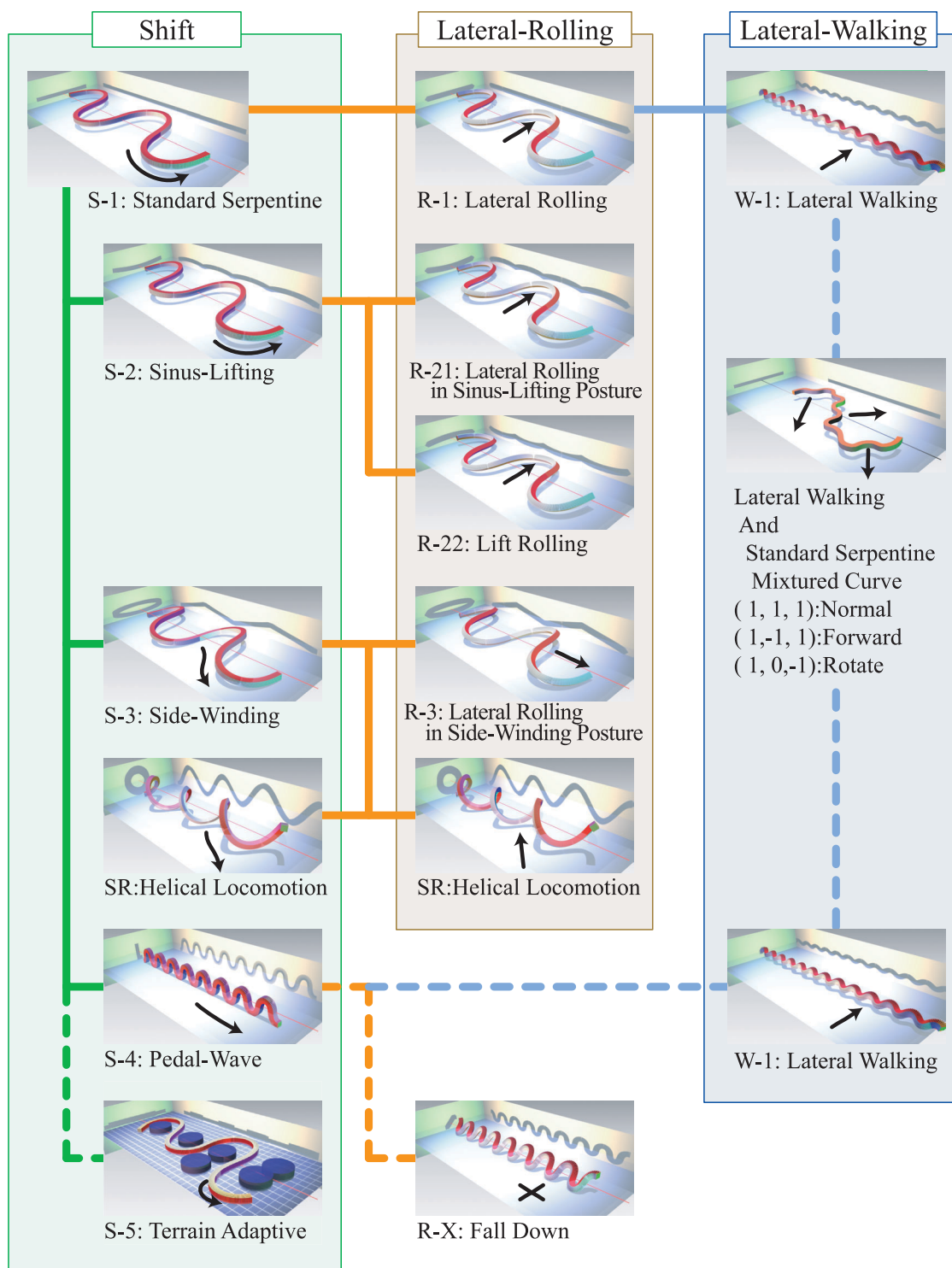


Fig. 3.1: hierarchy of ACM's locomotion.

## 捻転制御群 ~ Lateral-Rolling

次に、捻転制御によって生じる体幹軸まわりの回転を主に利用した推進を扱う。曲線形状であれば原理的に生成可能であることを述べ、いわゆる通常の捻転推進を解説する。またシフト推進と組み合わせた推進法について4種紹介する、いずれも非生物的な運動が多い。

- ・ **R-1** : 捻転型ほふく推進

ほふく推進中に捻転を合成した式を述べる。いずれも同時生成が可能である。

- ・ **R-2** : 捻転型 Sinus-Lifting 推進

Sinus-Lifting 推進中に捻転を合成した式を述べる。

- ・ **R-3** : Lift-Rolling 推進

Sinus-Lifting 推進を天地逆にした状態。選択的な接地条件で捻転推進が可能である。

- ・ **SR** : らせん推進

Side-Winding の pitch・yaw 軸振幅が同等の場合におこる特殊状態について述べる。

## 部分適用群 ~ Lateral-Walking

最後に、同じ捻転動作を行っても、常に Lateral-Rolling 推進になるわけではないことを示し、発生しうる別の推進でありかつ部分適用制御として最も重要と考えられる、Lateral-Walking 推進について論じる。次にこの微小補助波形で生成し部分的に適用することで、様々な運動へ発展することが可能であることを説明する。波の重ね合わせを利用して、主推進波形成分に対し、ノイズ的微小波形運動成分を付加する。

- ・ **W-1** : Lateral-Walking 推進

曲線形状が特殊な場合に限り、体幹が転がらず浮き上がって歩く運動に変化する。

- ・ **Lateral-Walking** 合成推進

全体に Lateral-Walking 波形を加える推進である。

- ・ **Lateral-Walking** 併用 Pedal-Waving 推進

Pedal-Waving も Lateral-Walking も推進波形が比較的細かいことを利用して、切り替えることを考える。

- ・ **Lateral-Walking** 部分適用推進推進

任意の推進中に部分的に Lateral-Walking 推進を合成することで、全体波形を変化させないままに推進力の合成により方向転換などを行う可能性について述べる。

以下に詳しく述べることとする。

## 3.1 3DACMのシフト型推進運動

### 3.1.1 基準ほふく推進

平面運動を行う索状能動体がほふく推進を行うときには、その体型はサーペノイド曲線を構成する。このようなほふく運動を以降基準ほふく推進と呼ぶことにする。曲線に沿って推進運動を行うには、 $s$  で一意に空間曲線形状を決定し、時間  $t$  の経過と共に生成される曲線の位置  $s$  をずらしながら指令値を伝播させればよい。これは先のシフト制御のみで記述が可能である。この基準ほふく推進を体幹についての yaw 軸曲率  $\kappa_{yaw}(s, t)$  と pitch 軸曲率  $\kappa_{pitch}(s, t)$  で表記すると、

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi(u)) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

のように示される。ここで各変数に対し 2.2 節で述べた各変数に以下の意味を付加する。すなわち Fig. 3.2 に示すように、 $L$  は 1 周期の長さ、 $T$  は体型 1 周期分の波形を進行させるのにかかる時間周期である。また、 $\kappa_{yaw}^0$  は曲率の振幅である。

式 (3.1) で表現される基準ほふく推進の形状の一例を Fig. 3.3 に示す。

### 3.1.2 基準ほふく推進の 3 次元操舵法

ここで、索状能動体の最も基本的な推進である式 (3.1) の基準ほふく推進について、もう少し詳細に検討することにする。すなわち、3 次元的なステアリング制御とその体型を検討する。従来から検討してきた基準ほふく推進の操舵制御は、Fig. 3.4 に示す yaw 軸操舵を行なったほふく推進体型 (yaw steered curve) を取らせる操舵制御のみであった。しかし 3 次元運動を考えるにあたり、さらに pitch 軸と roll 軸についての操舵も検

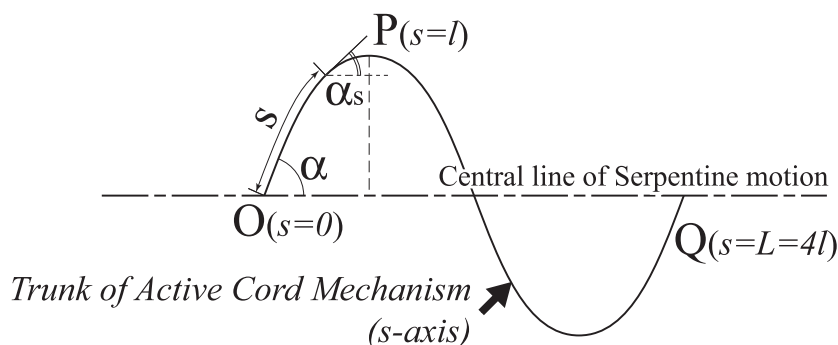


Fig. 3.2: Nomenclature of gliding configuration in regular creeping motion.

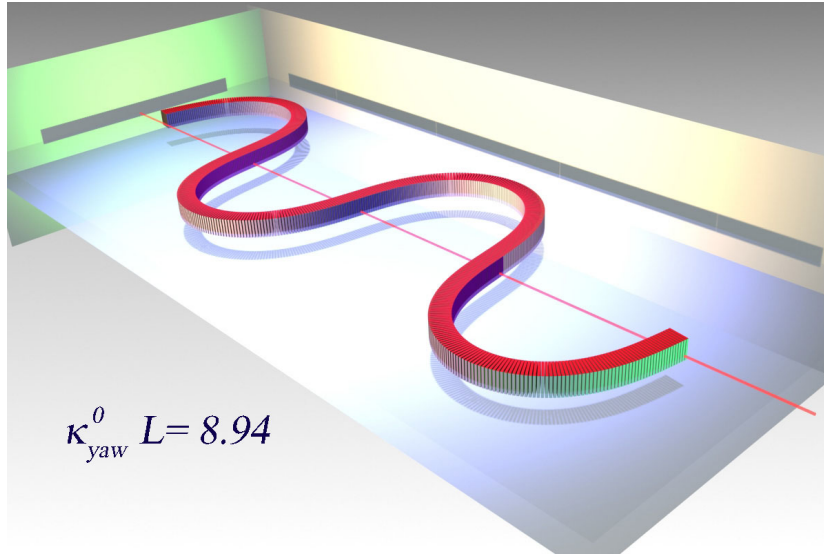


Fig. 3.3: 2D type Serpentine Locomotion.

討しなければならない．そのためこの2軸について統一的に議論することにする．なお，Fig. 3.4 に示す波形は， $\kappa_{yaw}(u)$  の振幅  $\kappa_{yaw}^0 L = 8.94$  である基本波形（基準ほふく推進）に対してと，ある  $s$  以上の値に対し yaw 軸操舵の操舵量と pitch 軸操舵の操舵量を各々  $\kappa_{yaw}^1(u)L = \kappa_{pitch}^2(u)L = 1.12$  とした場合，また roll 軸操舵の操舵量に関しては  $\psi_{roll}^1(u) = 0.79s/L$  とした場合の体型をシミュレーションで誘導し表記したものである．

Fig. 3.4 の yaw 軸操舵を行なったほふく推進体型（yaw steered curve）は従来から検討してきた操舵法であるが，この操舵は式 (3.1) の yaw 軸曲率に操舵量  $\kappa_{yaw}^1(u)$  を付加すれば実施可能である．その体型曲線は，

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi(u)) + \kappa_{yaw}^1(u) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

と示される．ここに示す操舵量  $\kappa_{yaw}^1(u)$  は文献 [1] においてはパラメータ  $B$  と表記していたものであり，この値を  $s$  の関数として変化させれば連続的に平面内での操舵が可能である．この操舵項はシフト制御そのものであり，2つのシフト制御を加算したものと捉えることができる．

pitch 軸操舵を行なったほふく推進体型（pitch steered curve）は，一見すると yaw 軸操舵と同様に，式 (3.1) の  $\kappa_{pitch}(s, t)$  成分に対して，以下のように操舵量  $\kappa_{pitch}^1(u)$  を加えれば表記可能なように見える．

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi(u)) \\ \kappa_{pitch}^1(u) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

しかしこのような操舵を行うと，確かに pitch 軸周りに回転したほふく推進が生成できるが，同時に Fig.3.5(a) で観察されるように，体幹の体型振幅の最大部分（両翼・P点近

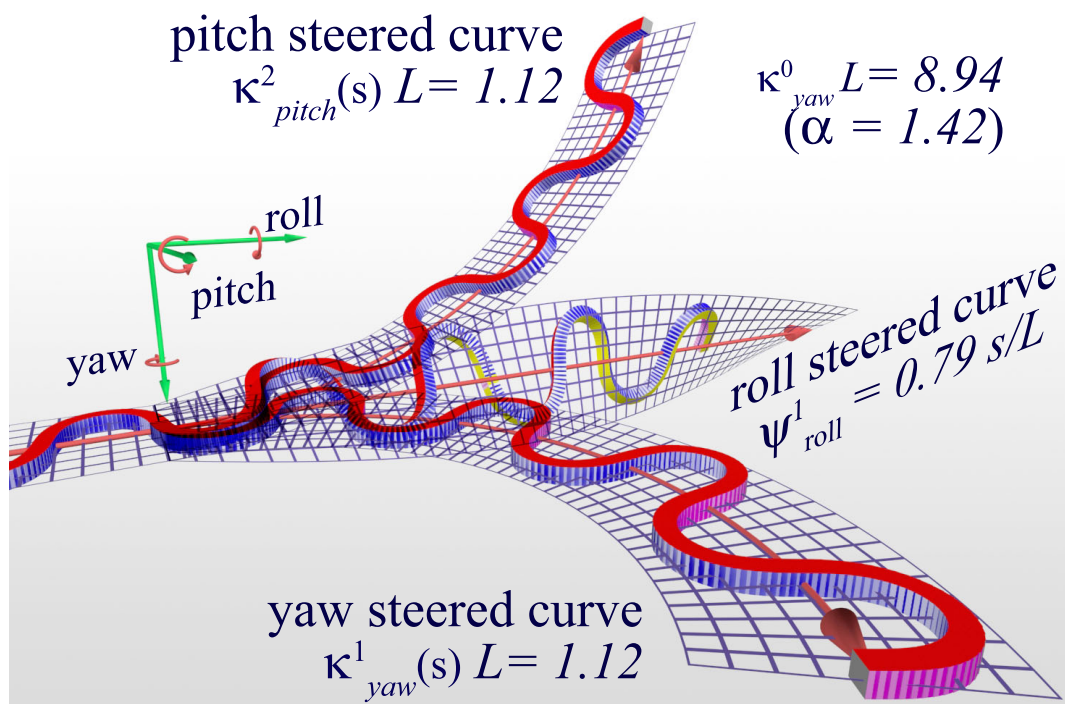


Fig. 3.4: Steering of 2D type Serpentine Locomotion.

傍)が、あたかも体幹全体で球形を覆うような反る体型をとる。これは体型が蛇行しているために、体幹に沿った pitch 角についての屈曲運動が、ほふく推進体型の中心部(O 部近傍)では体を反らす動きを生み出すように働くためである。

このような O 点周辺の反り体型を極力生成しない pitch 軸操舵法は、体型に沿っての pitch 軸屈曲が中心軸方向に与える変化量を考慮すれば誘導できる。一般にサーペノイド曲線で蛇行する索状能動体について、Fig. 3.4 に示すようなほふく推進体型が中心軸と交わる点 O での中心軸との角度をくねり角  $\alpha$  とし、O 点から距離  $s$  の点の体幹が中心軸となす角を  $\alpha_s$  としたとき、

$$\alpha - \alpha_s = \frac{1}{\delta s} \int_0^s \theta(s) ds \quad (3.4)$$

の関係が成り立つ。そのため距離  $s$  でのくねり角  $\alpha_s$  は

$$\alpha_s = \alpha \cos\left(2\pi \frac{s}{L}\right) \quad (3.5)$$

と表記できる。そのためこの角度  $\alpha_s$  に応じて pitch 軸操舵を行なえば P 点部の反り体型は軽減できる。その操舵法は、

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa^0_{yaw} \sin(2\pi u) \\ \kappa^2_{pitch} \cos(\alpha \cos(2\pi u)) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

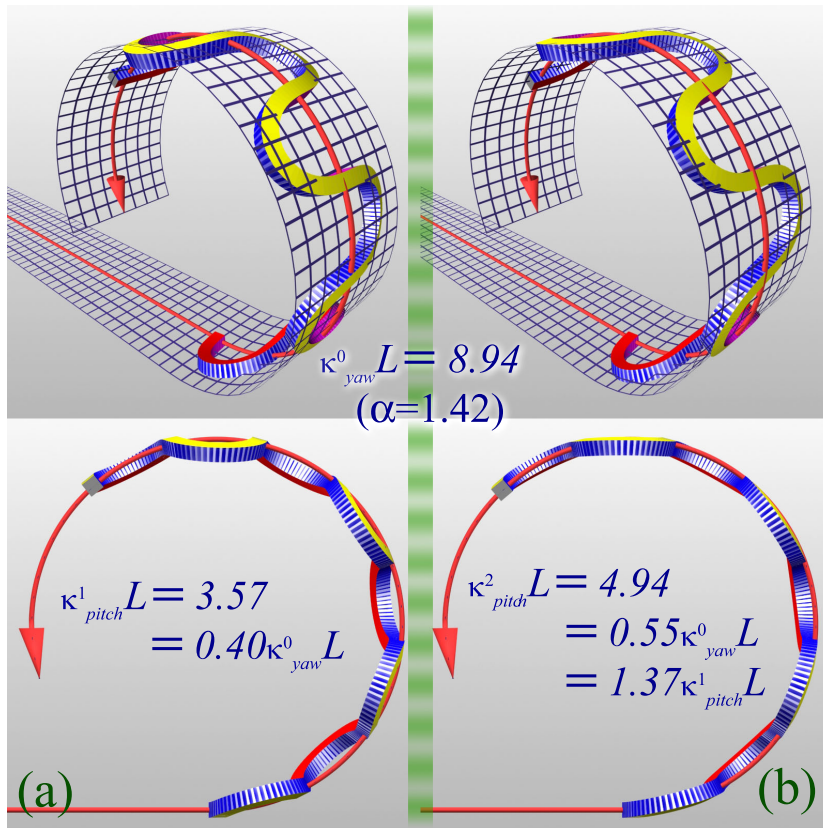


Fig. 3.5: Comparison of pitch steered curves.

と表記できる．このようにして誘導したほふく推進体型を Fig. 3.5(b) に示す．なお，Fig. 3.4 の pitch 軸操舵を行なったほふく推進体型 (pitch steered curve) もこの操舵制御で誘導した体型である．

この式 (3.6) による pitch 軸操舵法では P 点部の反り体型はまだ若干残されるが，誤差は微小であり機械モデルの制御には後述するようにこの制御でほとんど支障がない．ただしより厳密な，屈曲走行面に完全に沿う pitch 軸操舵法に関する考察は，今後引き続き行なってゆく予定である．

さて，roll 軸まわりの操舵を行なったほふく推進体型 (roll steered curve) は，Fig. 3.4 に示すように，ほふく推進体型の中心軸についての体型の回転を生ずる操舵法である．上記の pitch 軸周り・yaw 軸周りの操舵法とは異なり，roll 軸周りの操舵法により生成される結果については，これを実現する索状能動体の関節構成と密接な関係にある．本論文の実機モデルでは，後述する Fig. 4.3(2) のように pitch 軸・yaw 軸方向に交互に屈曲する直鎖リンク機構の索状能動体であるが，基準ほふく推進の運動面を単に推進方向軸周りに傾ける操舵ではなく，Fig. 3.4 の roll 軸操舵曲線 (roll steered curve) に示すように，傾い



Fig. 3.6: Sinus-Lifting locomotion of the real snake[1].

た状態でも体幹節定義の yaw 軸は常にほぼ同一方向（鉛直上方向）に向け続けているような蛇行を実現する操舵法となる．この操舵法は，

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = E(\psi_{roll}^1(s, t)) \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi u) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

と表記できる．ここで  $E$  は体幹の中心軸（ $s$  軸）に関する操舵量  $\psi_{roll}^1(s, t)$  分の回転変換を示す回転変換行列である．

ただし，この操舵法も roll 軸操舵を行なう操舵量に相当する換率  $\tau(u)$  が微小である場合にのみ成り立つ近似解である．その近似解としての誤差は，Fig. 3.4 を観察すると式 (3.7) によって roll 軸操舵した後の体型が走行面に対して縫うように上下にぶれていることから観察できる．この誤差を完全に除去する操舵法についての考察も，今後引き続き行なってゆく予定である．

### 3.1.3 Sinus-Lifting 推進

Fig. 3.5 にも示したように，基準ほふく推進の pitch 軸操舵を行なうと，ほふく体型の屈曲部 pitch 軸周りに回転するだけでなく，P 点部反り上がり体型が生成されることはすでに論じた．実はこのような体型は，Fig. 3.6 のように実際のヘビの滑走体型においても観察されている．それは，Fig. 3.2 の形の節部（O 点）を接地させ屈曲部を浮かす推進体型であり，筆者らはこの体型を Sinus-Lifting 推進と呼んでいた [1]．そして Sinus-Lifting 推進は，基準ほふく推進において体幹屈曲力を推進力に変換しようとするとき，体幹の O 点部分が集中的に横滑りしやすくなるため，この部分の横滑りを体幹の荷重を集中するこ

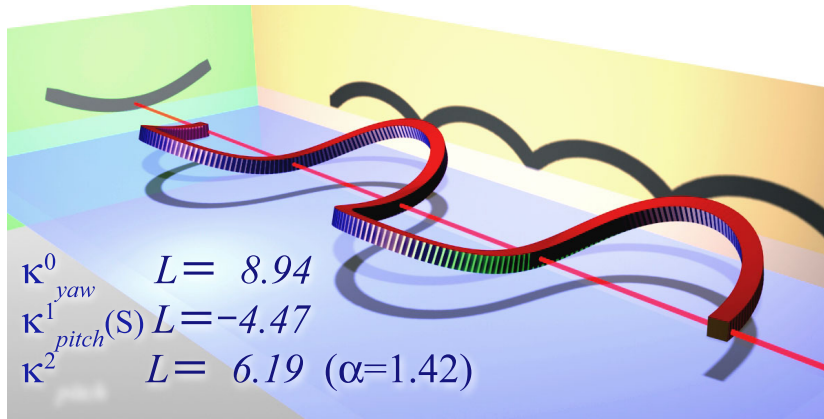


Fig. 3.7: Sinus-Lifting Locomotion of Eq.3.8.

とで防止することを可能とする姿勢であると解釈できることも論じた．

この Sinus-Lifting 推進は，基準ほふく推進体型に対して式 (3.5) の pitch 軸操舵で体型を反り上げ，そのとき生じた pitch 軸回転を式 (3.6) の操舵で打ち消す，つまり

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi u) + \kappa_{yaw}^1(u) \\ \kappa_{pitch}^1(u) + \kappa_{pitch}^2 \cos(\alpha \cos(2\pi u)) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

としても生成できる．この実現例を Fig. 3.7 に示す．しかしさらに積極的に P 点部を上げるためにほふく推進体型の 2 倍周期の波動を pitch 軸に加え，さらにそのとき生じてしまうほふく推進体型の pitch 軸周りの回転を，先に論じた pitch 軸操舵法の pitch 軸操舵補正で打ち消す．つまり，

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi u) + \kappa_{yaw}^1(u) \\ \kappa_{pitch}^0 \sin(4\pi u) + \kappa_{pitch}^1(u) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

とすれば，さらに明確に Sinus-Lifting 推進の体型を生成することができる．この式 (3.9) における波動生成例を Fig. 3.8(a) に，pitch 軸周りの回転補正例を Fig. 3.8(b) に示す．

Sinus-Lifting 推進はその特性上少しでも P 点部を持ち上げることさえ可能であれば実現できる．理論上はこの式 (3.8) と式 (3.9) の間に大きな違いはないが，この微小持ち上げについて考慮すると，式 (3.8) では  $\kappa_{pitch}^1(u)$  と  $\kappa_{pitch}^2$  の双方について考慮する必要があるが，式 (3.9) は  $\kappa_{pitch}^0$  のみを操作すればほぼ実現可能なため，次章の機械モデル推進実験においては式 (3.9) を用いて制御を行うこととした．なお，機械モデルで Sinus-Lifting 推進を安定して実現するには，走行中に接地点を少なくとも 2 点取り続ける必要があるため全体幹のくねりの周期数は 1.5 周期以上であることが必要である．

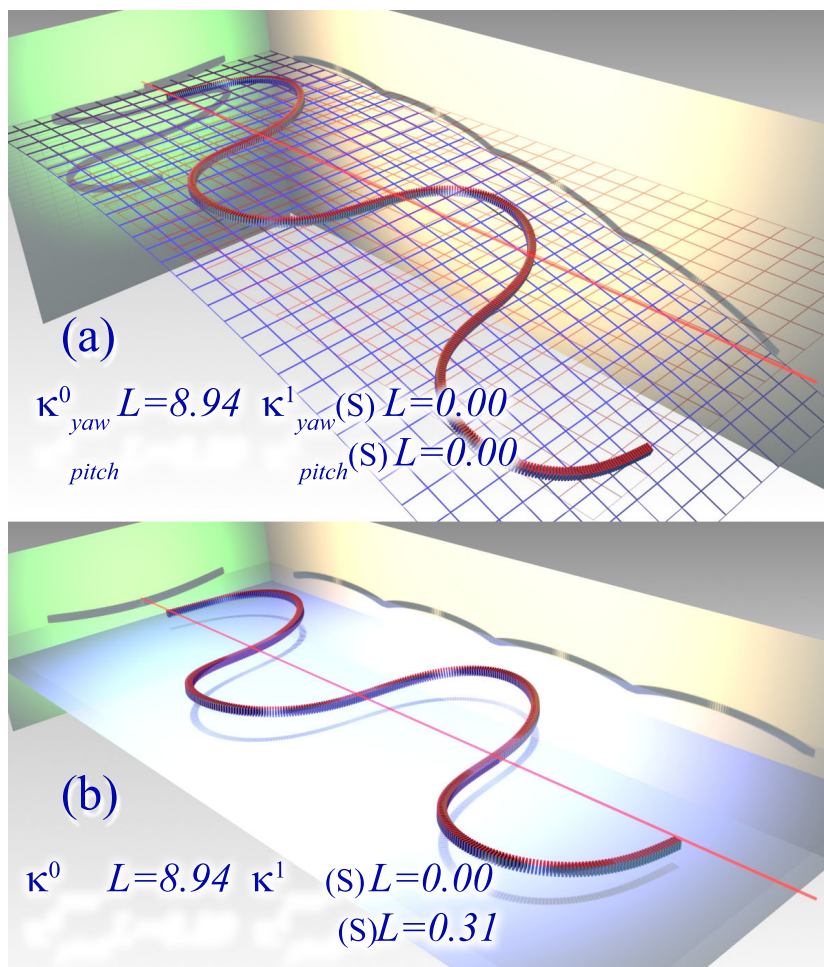


Fig. 3.8:  $\kappa_{pitch}^1(u)$  to  $\kappa_{pitch}^0$  term of Sinus-Lifting.



Fig. 3.9: Side-Winding locomotion of the real snake.

### 3.1.4 Side-Winding 推進

砂漠に住むヘビは、Fig. 3.9 に示すように、横方向に這うように進む。これは、Fig. 3.2 の形の節部（O 点，Q 点）を接地させ、その間を浮かす推進体型であり、筆者らはこの体型を Side-Winding 推進と呼んでいる [1]。推進原理を簡易に説明すると次のようになる。鎌首をもたげ、空中にわずかに浮いているうちに横に首を曲げ、移動先に頭をつける。こうして出来た頭と体のアーチ部をそのまま後ろに送りつつ、動作を繰り返すことで横方向に移動する運動である。この運動はシフト制御推進ではあるものの、摩擦比を利用した推進ではなく、受動車輪が無い状態でも移動が可能であることが特徴で、砂漠のような脆弱な土地でも移動が可能である。また、毛足の深い絨毯など受動車輪の動作しにくい走行面においても、Side-Winding 推進ならば問題なく移動できるため、有用な推進である。また、走行面に対し十分な摩擦力があるならば、傾斜面や少々の段差を昇降する際にも、この安定した推進法は非常に有効である。

生体蛇の走行形態を模するに、走行平面への投影形状は通常のほふく推進とほぼ一致するため、Yaw 軸についてはほふく推進の制御式を適用できる。鉛直成分については、1 周期の腹ごとに接地し、それ以外の点では接地しないよう体幹軸を制御すればよく、Pitch 軸基本波形をほふく推進と同様に角度に対し正弦波的な変化を与えることで実現可能である。

正弦波的な曲率生成を行う際の定式化は以下のように表現できる。

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi u) \\ \kappa_{pitch}^0 \cos(2\pi u) \end{bmatrix}, \quad \kappa_{yaw}^0 \gg \kappa_{pitch}^0 > 0, \quad \kappa_{pitch}^0 \approx 0 \quad (3.10)$$

$\kappa_{yaw}^0, \kappa_{pitch}^0$  の条件式は、Pitch 軸動作は接地条件の変化のみを目的とするため Yaw 軸振幅ほど必要ではないこと、また擦れのない 3 次元的連続曲線であり厳密には体幹軸周りにねじれを生じることから、極力 0 に近いことが望ましいことを示している。このシミュレーション例を Fig.3.10(a) に示す。

このねじれ現象は滑走面が推進軸まわりに回転する成分が大きく、校正するためには基準ほふく推進の Roll 軸操舵が有効となる。そのため Roll 軸操舵成分を式 (3.10) に加えて補正を行う。この補正式を以下に示し、シミュレーション例を Fig.3.10(b) に示す。

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = E(\psi_{roll}^1(s, t)) \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi u) \\ \kappa_{pitch}^0 \cos(2\pi u) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

この補正項  $E(\psi_{roll}^1(s, t))$  は、当然ながら  $\kappa_{pitch}^0$  が小さくなるほど極小となることが判っている。Fig.3.10(a)(b) 双方を比較すると、滑走面の回転を効果的に防いでいることが判る。しかしを詳細に見ると、開始点と着地点において体幹軸はほぼ平行になっているものの、体幹軸まわりの角度に位相が発生していることが判る。これは擦れない屈曲モデルで

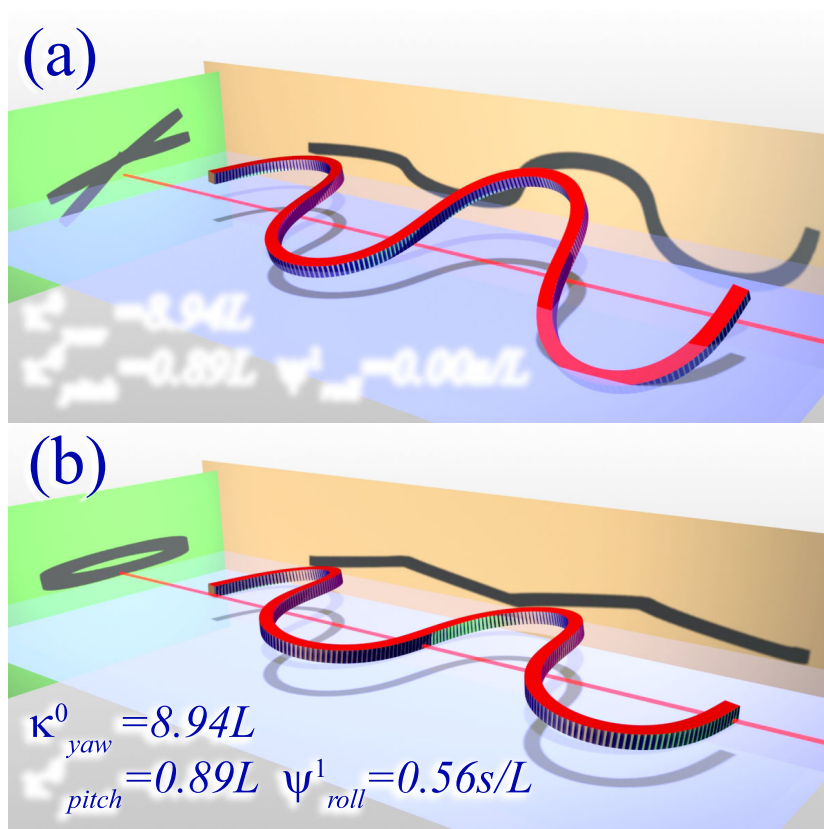


Fig. 3.10: Side-Winding locomotion of the real snake.

あるために軌道決定時に生じる擦れ成分である．実モデルにおいて，特に ACM-R2 のように接地可能面が限られる機体の場合には注意が必要である．これらの影響を防ぐためにも， $\kappa_{pitch}^0$  は小さい値であることが望ましい．

なお，機械モデルで Side-Winding 推進を安定して実現するには，走行中に接地点を少なくとも 2 点取り続ける必要があるため全体幹のくねりの周期数は 2 周期以上であることが必要である．

### 3.1.5 Pedal-Waving 推進

これは重力方向に波を発生させ後方から前方に波を伝播させることで，接地点を連続的に前方に遷移させて推進する方法である．すでに大野らが移動速度に関して詳しく検討しているため詳細は省くこととするが [5]，1 周期波を伝播するときに推進する距離は，体幹長さ<sup>0</sup>と走行平面への射影長さ<sup>0</sup>の差であることから，推進速度は基準ほ<sup>0</sup>く推進に比べて遙かに遅くなる．しかし，この運動の大きな利点は先の Side-Winding 推進同様脆弱な土地で移動することが可能であり，かつ推進側面方向に対しては機体幅さえあれば推進可能<sup>0</sup>なところにある．ただし，推進力を十分に生かすには，体幹軸方向への摩擦力が必要であ

り，これは基準ほふく運動に用いる摩擦比特性に反するため注意が必要である．この運動を定式化すると，以下ようになる．

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \kappa_{pitch}^0 \sin(2\pi w) \end{bmatrix}, \quad w \equiv \frac{s}{L} + \frac{t}{T} \quad (3.12)$$

ただし，機械モデルで Pedal-Waving 推進を安定して実現するには，走行中に接地点を少なくとも 2 点取り続ける必要がある．このため全体幹のくねりの周期数は 2 周期以上であることが必要である．

一方，この推進の yaw 軸操舵について考察する．式 (3.12) 上では基準ほふく推進を縦にただけであるので同様に操舵しがちであるが，重要なのは推進速度と波形伝播速度の違いである．ここで，曲線  $c$  の投走行面へ投影した距離を 1 周期当たり  $L_p$  とし，接地面において滑りがないとすると，下記のように yaw 操舵することが可能である．

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^1(v) \\ \kappa_{pitch}^0 \sin(2\pi w) \end{bmatrix}, \quad v \equiv \left(1 - \frac{L_p}{L}\right) \left(\frac{s}{L} - \frac{t}{T}\right) \quad (3.13)$$

### 3.1.6 角度抑制シフト推進

ACM-III において側面に触覚センサを取り付け，壁面を押しつけることで迷路内推進を行う，いわゆる側抑制制御シフト推進が実現された [1]．この推進法は，基礎式 (2.7) に対して  $F(u)$ ， $G(u)$  に各々外力による角度抑制項として  $F_{restraint}(u)$ ， $G_{restraint}(u)$  を付加することで，3 次元的な角度抑制制御によるシフト推進が可能となる．

$$\begin{bmatrix} \kappa_{pitch} \\ \kappa_{yaw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(u) \\ G(u) \end{bmatrix} \equiv S(u), \quad u \equiv \frac{s}{L} - \frac{t}{T} \quad (3.14)$$

ただし，原理はそれほど難しくはないものの，この制御を行う場合には外環境のセンシングが問題となる．本論で扱う実機モデル ACM-R3 においては（第 4 章で詳細に述べるが），外部センシングを省いた形で運用しているため，すぐにこの推進を行うことは難しい．また大型受動車輪に覆われているため外部接触型のセンサを利用するのは困難である．更にこれを発展させた実機モデル ACM-R3n においては（これも詳細は（第 6 章）で述べる），電源基板により関節トルクと相関関係にある電流値を計測することが出来るため，このような制御を行うことは不可能ではないが早急実現すべき課題として，ここでは推進法を示すに留めておく．

## 3.2 3DACM の捻転型推進運動

索状能動体が直線状態でない場合，水平面上において roll 軸操舵制御を全ての体幹に対して一律に与えると，2.2.2 節に述べたとおり重力が体幹を走行面に押し付けるため体

幹の形状姿勢が変わらず，体幹が自らの体幹軸周りに回転を行なう Fig. 2.4 のような運動を生成する．その結果，屈曲運動にもかかわらず，回転運動が生成され (Fig.3.11)，体幹はほふく推進で推進する方向とは直交する横方向に連続的に回転しながら横移動を始める．roll 軸操舵制御は操舵の目的で導入した制御法であるが，これを連続的に行なうとほふく推進とは異なる種類の推進法が生成されることは興味深い．以降，このように体幹軸周りの回転によって連続的な回転運動を生成する移動法を総じて「捻転推進」 (Fig.3.12)，また任意の曲線状態で実現できることから，ほふく推進と捻転推進を同時に遂行する推進法を特に「捻轉型ほふく推進」と呼ぶことにする．

この「捻転推進」は体幹のすべての部位の  $\kappa_{yaw}$  および  $\kappa_{pitch}$  を一様に回転させれば，体幹が直線状態でない限り任意の波形状態で生成可能である．このことは，第 2.1.2 章で論じた背びれ座標系を曲線まわりに Fig. 2.4 のように回転させることと同義である．つまり，体幹軸の端部に  $\psi_{roll}^1(t)$  の体幹軸周りの回転を与えたとき，体幹の距離  $s$  で時刻  $t$  の体幹軸周りの roll 角は，

$$\psi(s, t, \psi_{rs}(t)) = \psi(s, t) + \psi_{roll}^0(t) \quad (3.15)$$

であり，この回転を roll 軸に与えたときの  $\kappa_{yaw}$  および  $\kappa_{pitch}$  は， $E(\psi_{roll}^1(t))$  を体幹軸まわりの回転変換行列と定義すれば，

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t, \psi_{rs}(t)) \\ \kappa_{pitch}(s, t, \psi_{rs}(t)) \end{bmatrix} = E(\psi_{roll}^1(t)) \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

と求められる．この体幹軸周りの捻転推進は，体幹軸に沿ったほふく推進とは独立に定義され実行可能である．

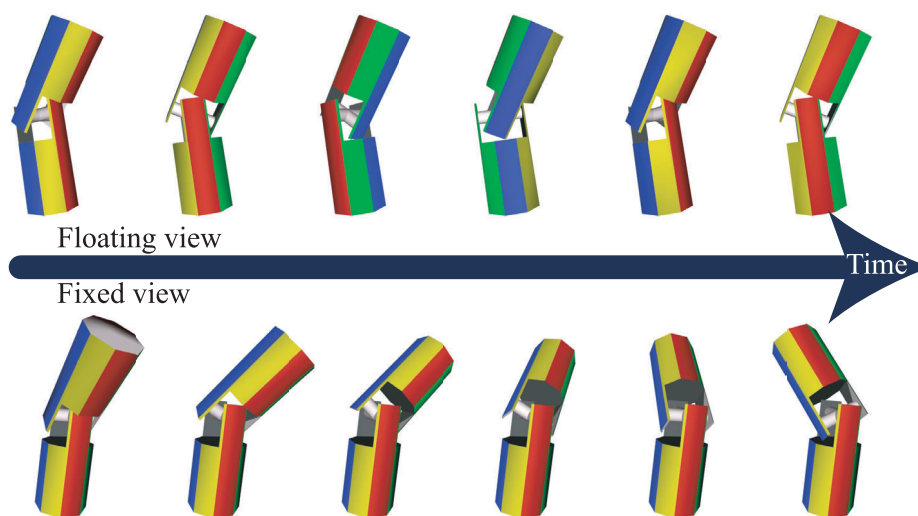


Fig. 3.11: Rolling Image.

捻転推進の利点は、受動車輪を有する索状能動体の実機モデルであっても、高い摩擦を有する方向に運動するという点にある。ほふく推進はその摩擦比による推進のために登坂能力はそれほど高くはないが、捻転推進はより高い登坂能力を発揮できる。

### 3.2.1 捻転型ほふく推進

特例として捻転角を  $\psi_{roll}^1(t) = 45^\circ$  に固定した捻転型ほふく推進を誘導しておく。これは式 (3.16) で  $\psi_{roll}^1(t) = \pi/4$  の回転変換を行なったものに相当し、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi}{4} & -\sin \frac{\pi}{4} \\ \sin \frac{\pi}{4} & \cos \frac{\pi}{4} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi u) + \kappa_{yaw}^1(u) \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi u) + \frac{\sqrt{2}}{2} \kappa_{yaw}^1(u) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi u) + \frac{\sqrt{2}}{2} \kappa_{yaw}^1(u) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.17)$$

と示される。このような捻転型ほふく推進で基準ほふく推進を行うことを考えると、pitch 軸と yaw 軸の両方の駆動軸の回転で推進トルクが生成できる。つまり干涉駆動 [4] が行えることから搭載アクチュエータを有効に利用できる大きな推力が生成可能だと予測できる。Fig. 3.13 にシミュレーション例を示す。

### 3.2.2 捻転型 Sinus-Lifting 推進

前述の Sinus-Lifting 推進の形状において、捻転動作を行うことは可能であるが、接地している場所は理論的には離散的に直線上に並んでいる。そのため、側面方向に捻転制御によって推進力を発生し移動することは可能であるが、好ましくない揺動を引き起こすと考えられる。

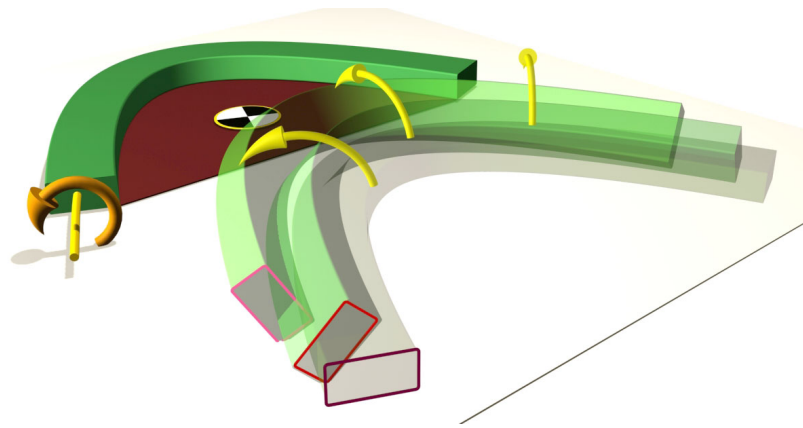


Fig. 3.12: Lateral Rolling locomotion Image.

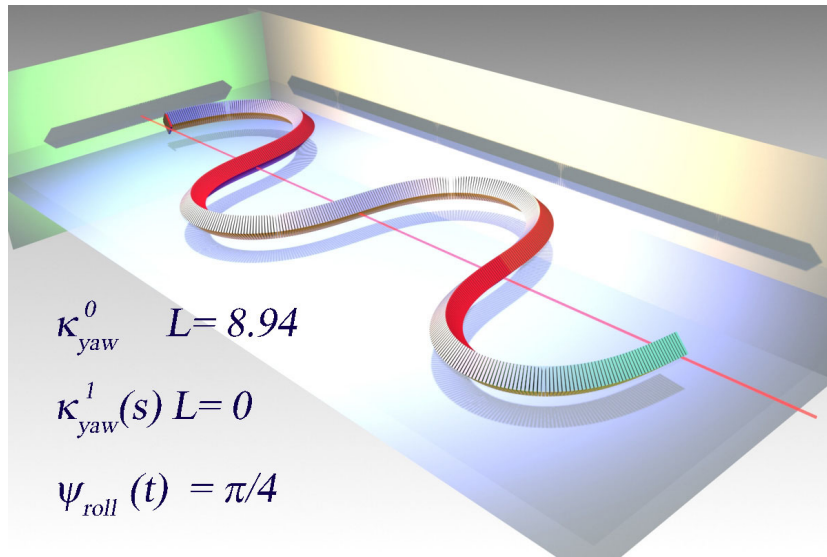


Fig. 3.13: Twisted Serpentine Locomotion.

しかし，単純な捻転推進として考察を行うと興味深い．接地面近傍は楕円柱状と見なしうるため，体幹のなす面全体をそれなりの半径を持つ大型車輪として考えることができる．このため細かい凹凸面を有する不整地に対して踏破性に富んだ推進形態である可能性がある．Sinus-Lifting 推進自体について，走行接地点を選択的に行える推進形態と捉えることとすれば，この組み合わせは不整地に対して高い移動性をもたらす可能性があり，実に興味深い．

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = E(\psi_{roll}^1(t)) \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi u) + \kappa_{yaw}^1(u) \\ \kappa_{pitch}^0 \sin(4\pi u) + \kappa_{pitch}^1(u) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

### 3.2.3 LiftRolling 推進

Sinus-Lifting 推進と捻転推進の組み合わせは揺動を引き起こすが，Sinus-Lifting 推進の天地を逆にすると波形の腹で接地するため安定して体幹を持ち上げることができる．

捻転推進方向の安定性は基準ほふく推進での捻転推進とほぼ等しく，かつ接地点が少ないため接地節への荷重集中が起こり，より摩擦係数の低い走行面に対しても移動が可能となる．

また，多少の凹凸のある地面に対して捻転推進を行う場合，接地していない部分では推進力を発生できないため，思わぬ方向に推進してしまう場合があり得るが，この推進法ではすべての接地線が平行となるため，捻転による進行方向も堅実となる．

ただし，グライド推進のための摩擦特性そのままに Lift-Rolling 推進を行ってしまうと，接地点は全てほふく推進軸方向に対しての摩擦比が小さくなるように整列してしまう

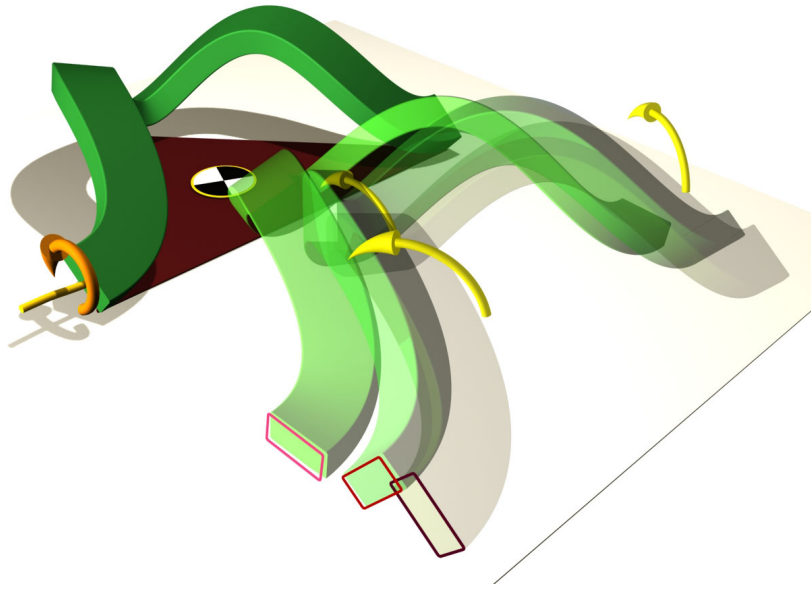


Fig. 3.14: Lift Rolling Locomotion.

ため，捻転推進の直角方向に対して拘束力を失ってしまう欠点を持つことになるため注意が必要である．

### 3.2.4 螺旋捻転推進

螺旋捻転運動 [6] は，水中移動を行う索状能動体 HELIX の開発において提案された，従来にない斬新な推進法である．すなわち，水中を運動する際は，海へびのような基準ほふく運動による推進ではなく，3 次的に水を掻きながら推進する点で効率がよい，という発想に基づき，螺旋形状をとりつつ捻転を行い前後に推進する研究が進められている．HELIX ではこの推進法に対し，幾何学的螺旋式から体幹形状を決定し，この実現を機構的構造により簡易化し，捻転によって推進するとして制御式を導出している．これを背びれ曲線として記述すると以下の通りになる．

$$\begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}^0 \sin(2\pi u) \\ \kappa_{pitch}^0 \cos(2\pi u) \end{bmatrix}, \quad \kappa_{yaw}^0 = \kappa_{pitch}^0 \quad (3.19)$$

上記のように，式 (3.10) と変わらない式となる．ただし， $\kappa_{yaw}^0$ ， $\kappa_{pitch}^0$  の条件は異なり，本来は形状定義なので  $u$  の代わりに  $s / L$  となるが，本質的な相違はない．この計算例を Fig. 3.15 に示す．さて， $\kappa_{yaw}^0 \equiv \kappa_{pitch}^0 \equiv \kappa^0$  としたとき，これに捻転制御をかけて推

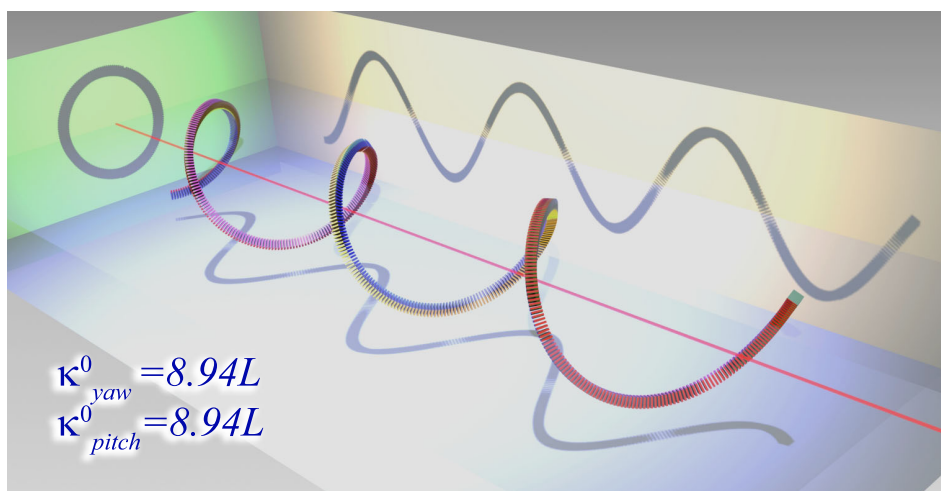


Fig. 3.15: Helical Locomotion.

進する場合の式を以下に展開する．

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} &= E(\psi_{roll}^1(t)) \cdot \kappa^0 \begin{bmatrix} \sin(2\pi u) \\ \cos(2\pi u) \end{bmatrix} \\
 &= \kappa^0 \cdot \begin{pmatrix} \cos \psi_{roll}^1(t) & -\sin \psi_{roll}^1(t) \\ \sin \psi_{roll}^1(t) & \cos \psi_{roll}^1(t) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \sin(2\pi u) \\ \cos(2\pi u) \end{bmatrix} \\
 &= \kappa^0 \begin{bmatrix} \sin(2\pi u - \psi_{roll}^1(t)) \\ \cos(2\pi u - \psi_{roll}^1(t)) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

つまり，螺旋推進においては，シフト制御での波形推進と，捻転制御での波形推進とでは，進行方向が異なるものの全く同じ効果をもたらすことが判る．

また，捻転1周期の速度とシフト制御1周期の速度が同等であることを示しているため，運動自身はかなり高速な運動に対応するものと考えられる．HELIXの水中推進実験においては，層流状態でのシミュレーションとほぼ同様の推進速度を実現しているが，HELIXの後継機であるACM-R5の水中推進実験において層流条件の速度制限をせずに推進を試みたが，素早い動きである基準ほふく推進に比べて推進速度が出なかった．これについては，螺旋形状が円形状と同様に水力を発生し得ない形状であるためと考えることができるが，今後より厳密な検証実験を要する．また水切版の角度は体幹軸に平行に取り付ける状態が最も好ましいとの結果を示していたが[6]，水中におけるグライド推進として考えると理解しやすい．

上記の通り，この螺旋捻転推進は水中での運動を主として考えられてきた推進法であるが，係数によってはSide-Winding推進，基準ほふく推進と同じ制御式となる．そのため，係数比を制御するだけで，陸上での移動，砂浜など土壌のもろい水際での移動，そして水中での移動とほぼシームレスに運動遷移が可能であり，非常に重要な式である．また，Side-Winding推進を実現するような係数比であれば，Lateral-Rolling捻転動作を併

用することが可能であるため、切り分けがどのあたりで行われるのか今後とも研究が必要となる

この運動を陸上で行う場合、基本的に捻転運動と同等と見なされるが、体幹軸に滑りやすい摩擦特性がある場合、配管内など円筒面内で運動すると、側壁からの反力が体幹軸方向への推進力として働き、効率の良い推進が出来る可能性があるため、配管内推進にとっても重要な推進と考える。

### 3.3 3DACM の部分適用による推進合成

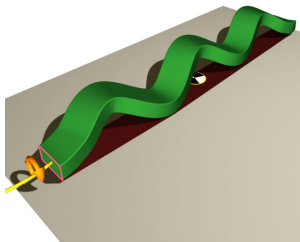
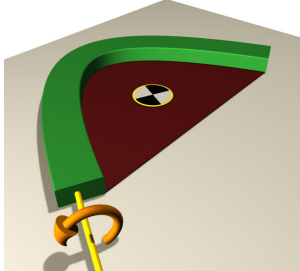
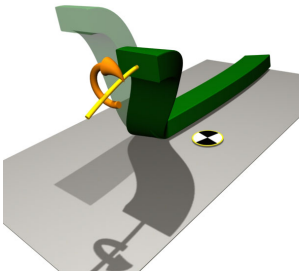
まず、部分適用波形の基礎となる Lateral-Walking 推進について説明する。

#### 3.3.1 Lateral-Walking 推進

上記までの捻転推進は、理論曲線まわりの回転を行うことで、体幹軸の倣うべき理論曲線と走行面との姿勢関係を保持したままに生じる運動であった。しかし実際には地上では重力が存在し、安定余裕域外に重心がくると転倒するのが通常である。それでも転がる現象、準安定的に回転運動を生じて移動を行う運動が、すなわち前述までの捻転運動である。さらに実機では理論曲線とは違い体幹軸に沿って有限幅の安定余裕を有するため、仮に直線状態であったとしても静的安定性を有する場合がある。本論で実験に用いている索状能動体 ACM-R3 も、接地節は体幹軸半径方向に最大で 43mm の安定領域を有する。このため、もし体幹軸まわりのどの角度に対しても、重心が静的安定領域内に収まったままであれば、走行平面に対し体幹軸は回転・転倒することなく、本来の捻転推進の進行方向とは逆の方向に静歩行をはじめることになる。この境界を table. 3.1 に示す。以降、従来までの連続転倒による捻転運動を「Lateral-Rolling」、後者を「Lateral-Walking(Fig.3.16)」と区別する。この表は、その瞬間瞬間に対し適用するものである。例えば、振幅の大きい Pedal-Waving 推進中に捻転動作を行った場合、はじめは体幹軸幅内に重心があるが、そのうち重心は安定余裕外に移動するため、転倒する。転倒すると Pedal-Waving 波形は基礎ほふく推進と同等となり、重心は体幹軸幅を超えるが総支持客安定余裕内にとどまり続けるため、安定して Lateral-Rolling 運動を続ける、といった具合である。ただし、振幅の小さい Pedal-Waving であれば、常に体幹幅内に重心がとどまり続け、その場で継続的に Lateral-Walking 推進を行うこととなる。また、Sinus-Lifting 推進の捻転運動は、その接地条件は理論的には直線状になるが、体幹全体が円筒的な曲面で接地しているため、「転倒」に該当する状態でもすぐに元の形状に戻る準安定的状態であるため、転倒状態と Lateral-Rolling 推進を繰り返しながら準安定的に Lateral-Rolling 推進を行う。

さて、Lateral-Walking 運動の制御式は Lateral-Rolling と全く同じであるため省略す

Table. 3.1: Rolling condition of ACM.

重心位置	線素 (体幹軸) 幅内	総支持脚安定余裕内	安定余裕外
捻転動作	Lateral-Walking 推進	Lateral-Rolling 推進	転倒 (重心位置移行)
状態例			

るが, Lateral-Walking を行う際には式 (2.10) でいう  $S_i(u)$  成分の形状は自然とほぼ直線に近い形状となる. 静的安定余裕内に重心を保持する必要があるため, 理論曲線の波形振幅は自ずと実験機の最大安定領域内 (体幹軸直径にほぼ等しい) に限定される. この細かい波形であっても, 体幹軸のなす面が走行面と平行である瞬間では, 理論的にほふく推進を行うことは可能である. しかし実機においてはあまりにも節構成に対して波長が短すぎたために著しく推進効率は落ちてしまう.

この移動法の特徴は, 他の捻転動作と異なり, かつ Side-Winding 推進と同様に「接地点部分は運動をしない」ことである. Lateral-Rolling は, 結局のところ車輪と同様に地面に対して回転運動を伴って進むため, 砂地のような脆弱な走行面では運動効率の低下や推進不可能状態になる恐れがある. この推進は準静的運動であり, かつ対地接触部分は地面に対して回転運動を行わない. このため, 脆弱であったり高摩擦係数な走行面でも安

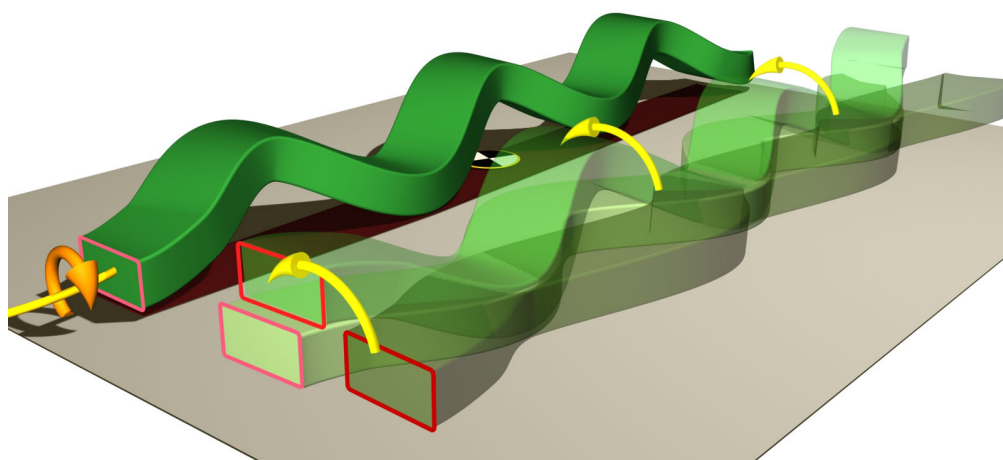


Fig. 3.16: Lateral Walking locomotion Image.

定して移動できると考えられる．但し，移動速度そのものは通常の捻転推進に比べ著しく遅い．1回転の運動をするとき，Lateral-Rolling では最大で外周分だけ推進できるが，Lateral-Walking では安定領域分しか推進できない．断面が正方形の体幹をもつ索状能動体では，ちょうど半分の移動速度となる．

もしこの Lateral-Walking 推進を任意の波形に適用する方法があれば，Lateral-Rolling 推進と同様，非常に有用な推進法となりうる．そこで，特に最後に解説した Lateral-Walking 推進を微小補助波形として，部分的に適用する手法を提案する．この手法は，上記までのシフト制御の推進・捻転制御の推進をそのまま，もしくは部分的に適用していくことも可能で，様々な運動を生成する手法として非常に有用である．

### 3.3.2 Lateral-Walking 波形合成

先に述べたように，Lateral-Walking 推進はその条件から全体的にほぼ直線に近い形状で，微小波形を捻転させざるを得ない．これは静的安定余裕を保持するために Lateral-Walking で利用される曲線の波形振幅を実験機の最大安定領域内（体幹軸直径にほぼ等しい）に限定する必要があるためである．しかし，この制限を逆手に取り，Lateral-Walking 運動で利用される周波数成分を一般運動波形に対してノイズのような微小振動波形成分として扱うことを考える．つまり，索状能動体自身を「波」と考え，通常のほふく推進などの大きな「波」に対してノイズ成分のような小さな「波」を重ね合わせ，小さな「波」成分で Lateral-Walking を行うことで，従来の捻転運動式と同様，任意の体幹形状に Lateral-Walking を実現することができる (Fig.3.17)．従来通りの主波形成分を  $S_{main}$ ，これに対する微小波形成分を  $S_{noise}$  とし，これを定式化すると以下ようになる．

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \kappa_{yaw}(s, t) \\ \kappa_{pitch}(s, t) \end{bmatrix} &= E_{main}(s, t) \cdot S_{main}(u) + E_{noise}(s, t) \cdot S_{noise}(u_1) \\ u &\equiv \frac{s}{L} - \frac{t}{T} \quad , \quad u_1 \equiv \frac{s}{L_1} - \frac{t}{T_1} \end{aligned} \quad (3.21)$$

$S_{main}$  に影響を与えないように  $S_{noise}$  の振幅と周期は小さいほど良いと考えられるが，振幅は  $E_{noise}(s, t)$  と共に Lateral-Walking の移動速度に関係するために微小にはできず， $S_{main}$  に対応する最適値が存在すると考えられる．また，純粋に  $S_{main}$  を実現する場合に比べて， $S_{noise}$  の屈曲要素も併せて実現する場合は相対的に体幹軸長さが短くなる効果が生じるため， $S_{main}$  の実現できる波長が短くなってしまう．また  $S_{main}$  が 3 次元的な波形である場合には，体幹姿勢への捻れを考慮する必要もある．

蛇足であるが，どの状態であれ  $S_{main}$  は  $E_{main}$  によって通常に捻転を行うことができるし， $E_{main}$  と  $E_{noise}$  により複数同時に捻転を生成することも可能である．

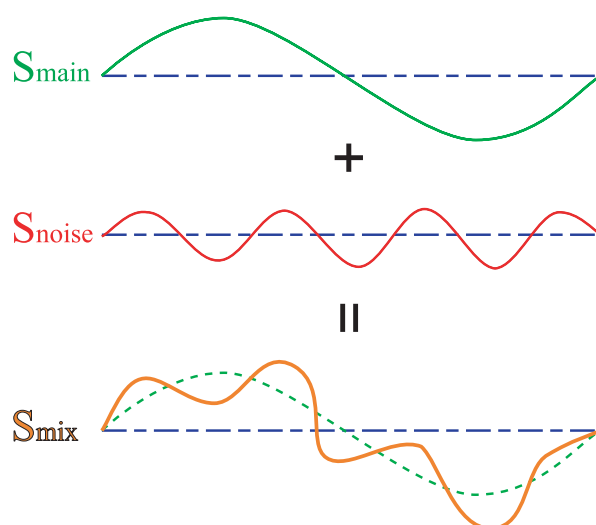


Fig. 3.17: Lateral-Walking mixture image.

### 3.3.3 Lateral-Walking 推進部分適用

上記の波形合成を応用して、任意の方向に運動することを考える。つまり、合成可能な Lateral-Walking 運動を「体幹軸直交方向に推進力を発生させる」運動であると捉え、波形の任意の場所に推進力を発生させ、体幹全体の合力として任意の方向に推進するという考え方である。簡単のために基準ほふく推進形状を例に解説を行う。Fig. 3.18 のように、体幹全長  $L$  で基準ほふく推進 1 周期を再現するシフト制御を  $S_{main}$  とする。これに対し、 $L/3$  ずつの長さに区分けし、端から微小波形要素として  $S_{LW1}$ ,  $S_{LW2}$ ,  $S_{LW3}$  を割り当て、各々の捻転制御  $E_{LW1}$ ,  $E_{LW2}$ ,  $E_{LW3}$  で並進力を発生させることを考える。このときの制御式を下に記す。

$$\begin{bmatrix} \kappa_{pitch} \\ \kappa_{yaw} \end{bmatrix} = E_{main}(s, t) \cdot S_{main}(u) + \sum_{i=1}^3 (A_{LWi}(s, t) \cdot E_{LWi}(s, t) \cdot S_{LWi}(u_i)) \quad (3.22)$$

$$u_i \equiv \frac{s}{L_i} - \frac{t}{T_i}$$

ここで、 $A_{LWi}(s, t)$  は、各区間  $i$  において 1、それ以外では 0 となる関数とする。この状態では、以下の 3 種類に生成運動を  $E_{LW1}$ ,  $E_{LW2}$ ,  $E_{LW3}$  について全て同様に捻転動作を開始すれば、すなわち  $E_{LW1} = E_{LW2} = E_{LW3} > 0$  であれば、通常の Lateral-Walking 推進となる (Fig.3.19)(a)。ここに、小さい矢印は  $i = 1, 2, 3$  において発生させている推進力であり、背景の大きな矢印がその合力として発生するであろう推進力を示している。次に、中央の部位のみ逆方向に捻転させるよう制御を場合は、 $E_{LW1} = -E_{LW2} = E_{LW3} > 0$  と表すことが出来、ほぼ主波形によるほふく推進方向に対して Lateral-Walking 推進を

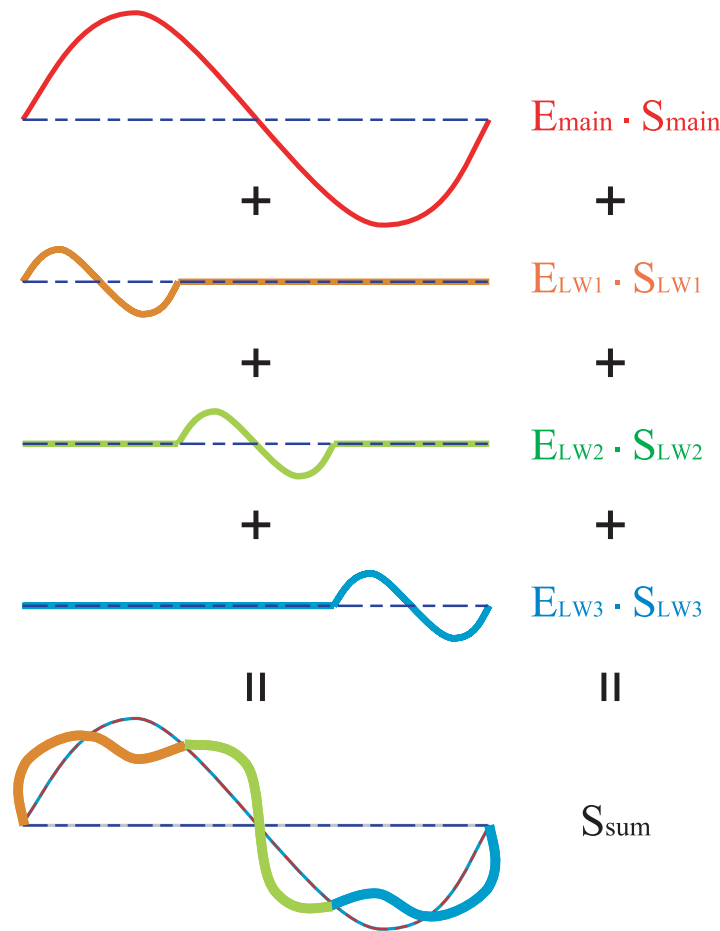


Fig. 3.18: The three lateral-walking waves mixture image.

開始する (Fig.3.19)(b) . そして最後に , 中央の部位は振幅を 0 とし , その前後で互いに逆方向に捻転させるよう制御を場合は ,  $E_{LW1} = -E_{LW3} > 0$  ,  $E_{LW2} = 0$  であり , このときは主波形中心に超信地旋回を開始する (Fig.3.19)(b) . このように , Lateral-Walking 運動を適宜部分適用し合成することで , 全方向移動を行うことができる .

### 3.3.4 Pedal-Waving と Lateral-Walking の併用

シフト制御では , Pedal-Waving 推進を行うことで体幹軸投影線に沿って推進可能であることは既に論じた . (但し , 体幹軸方向に対してもある程度の摩擦力を発生できなければ , Pedal-Waving 推進として移動はできない) . 細かな波形で操舵を行わない Pedal-Waving 形状で捻転動作を行うと , 捻転制御で解説した Lateral-Walking 推進になり , その生成される運動は走行平面を体幹軸方向とその直交側面方向に対して並進動作を行うことになる . これを 3.3.3 節のように部分適用し運動させることで , さらに効率の良い全方向移動を行える可能性がある . ここまで部分適用合成について , その主波形を基準ほふく

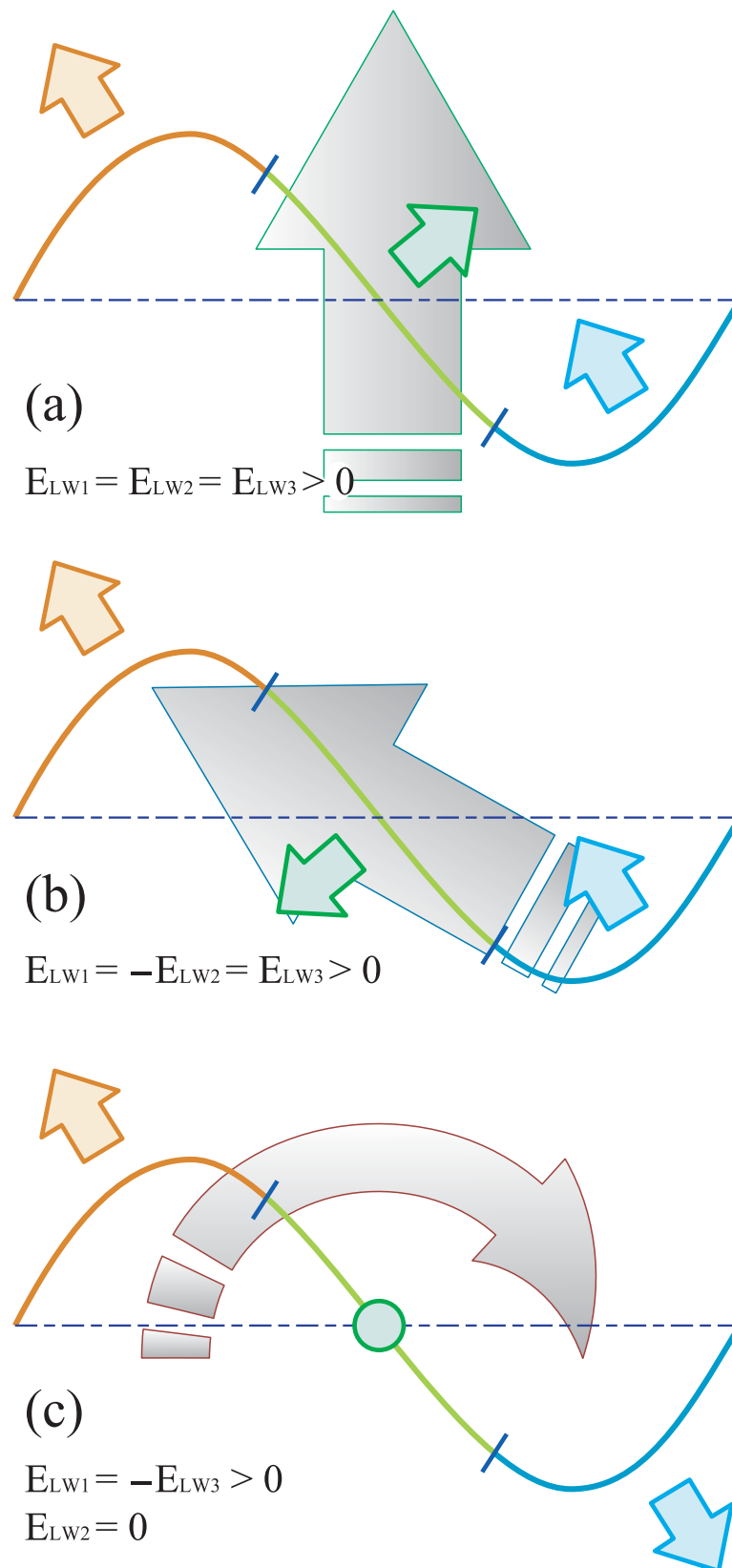


Fig. 3.19: The three lateral-walking waves mixture locomotion image.

Table. 3.2: Locomotive classification of ACM.

対地相対運動	接地点の移動	シフト制御	捻転制御	統合制御
あり (すべり有り)	摩擦比無関係	アコーデオン運動		
	摩擦比を利用	基準ほふく推進 Sinus-Lifting 推進 Terrain-Adaptive	(らせん推進)	捻転型ほふく推進
なし (すべり無し)	連続的移動	Pedal-Wave Side-Winding Helical-Locomotion Spiraling-motion Loop-Wheeling	Lateral-Rolling	各種操舵動作, Lateral-Rolling 各種合成
	離散的移動		Lateral-Walking	全方位移動 その他複合波形推進

推進として論じてきたが、この主波形がどのような形であっても全方向移動が可能であることを示唆している。すなわち、現在静的に安定状態にあり、接地している体幹軸方向と推進したい方向を全て把握できていれば、理論的には微小波形要素を足し適用することで全方向移動を行うことが可能である。

ただし、Lateral-Walking 推進が行えない Pedal-Waving 推進波形では、捻転動作は即座に転倒することを意味するため、注意が必要である。

### 3.4 推進法分類

以上、制御則的な分類を行い、それぞれの制御法の色濃く・基礎的な推進順に紹介してきた (Fig.3.1)。前述のとおり、シフト制御と捻転制御の区分けの根拠は、「曲線の構成要素である曲率を時系列に対し変化させる」という観点から、体幹軸方向に変化させるか、体幹軸まわりに変化させるか、という互いに独立した制御であるという点にある。このため、3.1 は両者の組み合わせが任意に可能なこと、シフト制御による各々の曲線形状に対して捻転制御を同時生成した場合に発生する推進法、という系統をも示しており、基礎的な統合制御を視野に入れると重要な分類である。

しかし索状能動体の推進法はここに示したものが全てではなく、接地条件によって各節動作を変化させるような推進法も十分に考えられる。原理的にはシフト制御と捻転制御の統合制御として全ての運動は記述はできるが、動作生成の思想が異なる推進も存在し、さらに言えばこれまで述べてきた位置制御的な推進法ではなく各節トルク制御による推進なども考えられるため、網羅的な分類とは言い難い。

また、同一の制御を行ったとしても、対地的要因により実現される運動が異なるものも存在する。例えば Sinus-Lifting 推進における捻転と Lift-Rolling 推進とは接地方向が異

なるだけと解釈することも可能である。

そこで、基本的制御としてシフト制御要因、捻転制御要因、複合制御要因（その他）の3種に分類し、かつ対地的相対運動の有無を主要因とした分類表を3.2に示す。

### 3.5 まとめ

本章では、種々の推進法について、系統にわけそれぞれ定式化した。

まずシフト型では基本となる基礎ほふく推進とその3次元的な操舵制御について詳しく述べ、厳密な操舵は難しく補正式が必要であることを述べた。続いて Sinus-Lifting 推進、Side-Winding と生物ヘビが行っている運動とその有用性について述べた。また Pedal-Waving についても述べ、操舵には別周波数波形が必要であることを述べた。

次に捻転動作による各種合成推進について述べ、特に捻転動作に特徴的な Lift-Rolling 推進、および螺旋推進について述べた。

最後に、捻転動作によって引き起こされる現象が Lateral-Rolling、Lateral-Walking、転倒の3種であることを述べ、特に Lateral-Walking 推進について他の推進法と合成する方法を述べ、全方向移動をする手法について述べた。

## 第 4 章

# 3 次元索状能動体 ACM-R3 の設計

本章では，3次元索状能動体の基本推進論にて論じる動作を十分実現しうる索状能動体の実機モデルとして開発した「ACM-R3」(Fig.4.1)について，詳しく説明する．

### 4.1 設計の概要

#### 4.1.1 先行研究

ACM-R3 の設計を開始した時点では，3次元的に屈曲しうる索状能動体自体は世界でも数種類しかなかったため，参考に出来るロボットは少なかった．

序論でも例を挙げたが，Polybot(MarkYim)[25] や GMD-SNAKE2(B.Klaassen)[28]などは高機能ではあるが，機構そのものが複雑化している欠点もあり，かつ当時は外部が

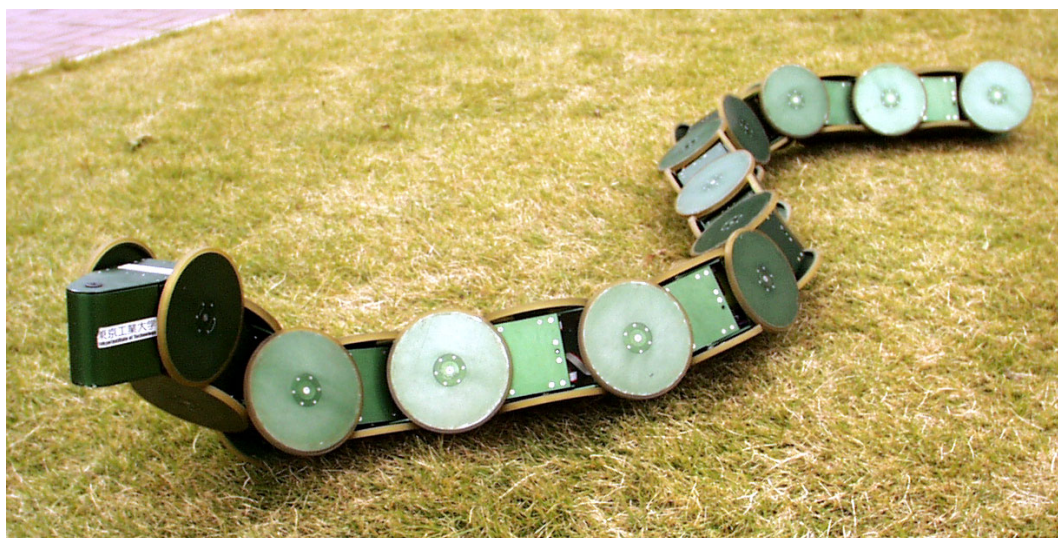


Fig. 4.1: Snake like robot “ACM-R3”

らの電源供給によるものであった。SewerRobot(K.-U.Scholl)は自立して動くものの、非常に高機能であるが故か節数が非常に少なく、能動車輪による移動を前提としているために3次元素状能動体としての推進論研究には適さないと考える。

唯一3次元動作の解析検証の目的で作成されているLimblessRobot(KevinDoeling)[29]は、節数は十分にあるものの、自重保証力以上のトルクを出力することは困難に思われ、かつ外界に対する摩擦比の考慮は一切ない。

これらのロボットにおいて顕著に見受けられた問題点として・小型モータを十分に減速せずに使用している

- ・外部からの電源供給を受け有線状態で動作することを前提としている
  - ・機構が複雑で節数が稼げず、かつ重量が重くなっている
- 等が挙げられる。

特に有線で外部から電源供給・動作指令を行って実際に動作させる手法は、外部に高度な計算機を配することで緻密な情報処理と高度な計画に基づく運動を生成することが可能となり、かつ最も不可避な重量問題となる電池を配することが出来るために飛躍的に運動能力が高まる利点を持つため、一見有効な手段に思える。

しかし、基本推進法として基準に据えているシフト制御則は、そもそも高度な処理を行わずとも推進が可能であるという利点を有しているため、さらに近年では高性能かつ非常に小型のマイコンが流通していることから、必ずしも外部で演算処理を行う必要はないと判断できる。

また、有線の存在自身が実機モデルに与える影響も考慮しなくてはならない。逆説的ではあるが、自重が軽量化されればされるほど、電線自身の堅さや重量から受ける影響は大きくなるため、配線どりなどに注意を払わなくてはならず、かつ運動自身にも影響を与えることとなる。

近年では、特に災害救助ロボットにおいて、ロボット自身にトラブルがあった場合、また初期段階で垂直穴に対してアプローチする場合などに対しての「命綱」的な役割を担うことが可能であること、瓦礫内に対して無線の浸透性が低いことなどから、無線化も可能であるが敢えて有線式を採用する傾向がある。しかし本論の目的と照らし合わせると、無線であることが望ましいと考える。

以上のことから、実験機の設計上重要な項目として

- ・出力トルクのインピーダンスマッチングを行う
- ・簡単な機構で節数を増やす
- ・無線式

が挙げられる。

#### 4.1.2 本研究室における従来研究の検討

また、これまで本研究室においても、系統的に様々な索状能動体が開発されてきている。3次元的な運動をするものとしては蛟龍・OBLIX[2]なども存在する。蛟龍は動車輪を持ち、節ごとに yaw 軸回転自由度と pitch 軸直動自由度を有していたが、この構成は3次元曲線的動作を表現するには適さないと考える。また OBLIX は斜旋回機構を持ち自重補償力は強いが、基準ほふく推進を実現するにはあまり適さない自由度配置となるため拡張実験機という観点からは最適ではないと考えた。そこで、基準ほふく運動の実験・駆動試験において高い評価を持つ ACM-R1[3] と、当時最新の3次元型索状能動体である ACM-R2[4] から継承すべき利点、および改善すべき点などを考察した。

ACM-R1(Fig.1.5) は、基準索状能動体の実機モデルとして、yaw 軸能動自由度を持ち、1/2 角機構を備えた受動車輪と、ある程度ダンパとして働く受動的 Pitch 軸自由度を有している。駆動電源として Ni-Cd 電池を全 16 節に分散配置し、すべての電池を直列につなぐことで全体の電源供給源としていた。また、外部からの無線により推進指令を受け、全節の角度生成・シフト制御部の演算を一手に引き受けるマイコンを中央に配し、各節のモータドライバに各々指令を与えていた。

この実機モデルに対し、特筆すべき点は以下の通りである。

- ・ 受動車輪を用いたスライド推進移動体の構築
- ・ 1/2 角機構導入による滑走軌道の平滑化
- ・ サスペンション機能による対地適応性確保 (pitch 軸受動)
- ・ 各節ローカル位置制御化
- ・ システムの自立化
- ・ 環境への高い適応性の実証 (平地上・氷上)

このモデルをできるだけ継承し3次元モデルへの拡張を行うが、改良すべきと考える点が特に1つ挙げられる。

ACM-R1 では、1つの大容量二次電池をすべての節に分散配置する思想設計であった。重量の上で問題となりやすい二次電池を全節に分散配置することで、各節の車輪にかかる自重を均等に分配することが可能であった。しかし関節屈曲部に二次電池内部電源線と、各節への分配用電源線との両方を配する必要があるため、動作するごとに電線を曲げる効果が働き、電源線そのものの寿命が短くなる欠点を持っていた。特に電源線は、情報線に比べて太く堅いため、運動に対しての抵抗になりやすく、逆にストレスも受けやすい。このため断線・ショート等の事故も発生しやすくなる。過去に実際起こったことだが、電源線電位の短絡がどこか一カ所でも起これば配線上すべての電池が同時に短絡状態に陥り、

二次電池自身も損傷を受け、配線も総交換を要することになる。このため、事故の際の被害は大きい。また、節の増減を行うことも電氣的に不可能である。

ACM-R2 は (Fig.1.8) , ACM-R1 の後継機で自立型の 3 次元モデルとして開発されたモデルである。1 節につき yaw 軸と pitch 軸を 2 つのアクチュエータを搭載し、干渉駆動により効率的な 3 次元的運動が可能である。また動力伝達にワイヤ系を用い、過負荷が生じたときには滑りが生じアクチュエータを保護する機構を導入しているほか、アクチュエータ支持部で反トルクを計測できるようにしている。各節に制御回路を搭載し、最終節の主回路にて指令を統括する形式を採用しており、各節ごとに二次電池を搭載することが可能となっている。サスペンション付きの受動車輪を腹部に持ち、外殻構造をとっているため体幹軸まわり全ての方向に接地することが可能である。

この実機モデルの特徴を箇条書きにすると

- ・ 3次元運動の実現（ピッチ軸駆動）
- ・ ワイヤ駆動による干渉駆動
- ・ pitch 軸・yaw 軸の 2 自由度 1 ユニット化
- ・ yaw 軸同志の中間点に車軸を配置することで 1/2 角機構と同等の効果を得た
- ・ 過負荷トルク保護機構の導入（M-Drive）
- ・ トルク検出機構の導入（FloatDifferentialTorqueSensor）
- ・ サスペンション機能の継承
- ・ 自立的運動が可能

となる。

しかし、機能を豊富に盛り込んでいるが故にまだ大きく重く、それを支えるためにアクチュエータも高出力なものを利用しているため、電力消費が大きいという欠点が認められている。またトルク制御・位置制御を試みているものの、制御系および電装系が円熟しておらず、ワイヤ駆動系との擦り合わせが難しいことも判明した。索状能動体の小型軽量化は常に課題として成り立つが、このほかにも下記に述べるとおり改善点がいくつか存在する。

ACM-R2 自体プロトタイプから軽量化が進められてはいるものの、種々の機構を内包しているが故に重量削減が困難となっている部位がいくつか見受けられる。3次元実機モデルとして機能を向上させる上では良い参考になるが、複雑な機構であるためどうしても高価なものになってしまう。

ACM-R1 と同様下腹部に備え付けられた受動車輪は、3次元的屈曲を行う際に干渉しないよう、車輪径をある程度小さく設計されていた。このため、2次元の多少凹凸のある平面でも安定して滑走が可能にするためにも、サスペンション機能を体幹部と車輪との間に設けることとなった。しかし、3次元的運動（例えば鎌首をもたげるなど）を行う際に、

サスペンション機能が働くために対地姿勢が変化してしまい、簡易な制御で運動を行わせることが難しくなることが判明した。

ACM-R1 は 2 次元モデルゆえ、体幹軸周りに対して滑走面は唯一と定まった。しかし、3 次元モデルにとって体幹軸周りに滑走可能な面が固定されてしまうと、非常に限定された動作しか取れなくなる可能性がある。無論、受動車輪としての機能と固定足場としての機能を任意に選択可能な状態にすることも重要と考えるが、基本を 2 次元滑走モデルとしているため、体幹軸まわり全方位に対し、2 次元モデルと同様の対外環境効果を持つ機構が望ましい。この理想は、体幹軸中心に滑走面が円筒状になることが望ましく、その軸周りに対して同様な滑走状態を取り得る状態が最も望ましいと考える。生体へびに言い換えるならば、その表皮の持つ滑らかさを実現することが望ましい、ということになる。

以上のことから、新規に作成する 3DACM「ACM-R3」について、実現が望ましい機能をまとめると以下ようになる。

- ・ システムの自立化
- ・ 体幹軸まわりに滑走面が自由に取り得る
- ・ 1/2 角機構と同等の効果を持つ車輪機構
- ・ 過負荷トルク保護機構の導入
- ・ トルク検出機構の導入
- ・ 各節ローカル位置制御化

#### 4.1.3 まとめと検討

以上より、3DACM に望ましいと思われる機能を以下にまとめた。

- ・ システムの自立化 (無線化)
- ・ 体幹軸まわりに滑走面が自由に取り得る
- ・ 1/2 角機構と同等の効果を持つ車輪機構
- ・ 簡単な機構で節数を増やす
- ・ 出力トルクのインピーダンスマッチングを行う
- ・ 過負荷トルク保護機構の導入
- ・ トルク検出機構の導入
- ・ 各節ローカル位置制御化

さて、本研究の目的としては、3 次元索状能動体として十分な研究を行いうる実験機の構築と、2 次元モデルを元とする基本的な推進制御の体系化と実現について種々の知見を得るものであった。本実験機で最も重要な機能は 3 次元運動性能である。運動能力を高

めるには、構造を簡易化し軽量化を図ることが最も効果的であり、アクチュエータ出力が少々減少したとしても十分な運動能力を得ることができる。そのため応用的機構要素として2項目を省く決断をした。すなわち過負荷トルク保護機構を省き破損箇所を制御することで代替し、トルク検出機構を省き、しかし電装的計測能力は残した。

3次元的な運動を行う際、転倒や過度の自重保持などが十分起こりうると予測される。このためにも、過負荷トルク保護機構を導入することは重要な課題であると考えられる。しかし裏を返すと、瞬間的な出力トルク上限を保護機構で失う可能性もあり、これは本論の目的の達成を阻害するおそれがあるため、あえて本機に対しては採用しないこととした。そのかわり安価かつ比較的交換容易な部品が破損しやすいよう強度的に設計し、破壊制御を行うこととする。

出力トルクを計測することが出来れば制御的な応用に非常に役に立つ。が、しかし機構的に導入すると重量増を招きがちであり、電流センサもまだ小さなものは入手し難かったため、角度情報のみを元とした位置によるシフト制御を基盤とし、採用しないこととした。

メンテナンスしやすい簡単な機構と強固な構造、総合的に部品点数を少なくすること。節構成数の変化に対応できることなどを考慮に入れる必要があるが、これらは全て利便性の向上にもつながる。この解決策として、先に述べたような構造の簡易化を強化するとともに、1関節1自由度としてUnit化を行うことを検討した。これにより利用者は任意の節構成数に調整し、残りの節を予備交換節として使用することも可能であり非常に効率的である。最小1自由度1Unitとすることで、Pitch/yawの特性は同等となり、ひいては体幹軸周りの特性をほぼ同一として扱うことが出来るため、理論検証用としても有用であると考えられる。

また、配線についても同様で、Unit間の配線を極力少なくすることで、メンテナンス性および運用時の信頼性の向上も図った。また、ACM-R2と同様であるが、各節にはワンチップマイコンを配し、自由にプログラミング変更が可能ないようにも配慮した。当実験機は、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)によっても複数台製作され、同研究グループにて種々の研究に利用されている。

## 4.2 機構の設計

### 4.2.1 ジョイント軸の配置に関する検討

3次元運動を実現する索状能動体 ACM-R3 の設計を論ずる。ヘビ型の3次元運動を生成するにはいくつかの運動自由度の配置が考えられるため、リンクとジョイントとを交互に持つ構成を念頭に置き、このジョイントの回転軸配置について検討を行う。

検討にあたっては体幹軸方向をs軸とし、Fig. 4.2に示すとおり体幹姿勢を直線にした

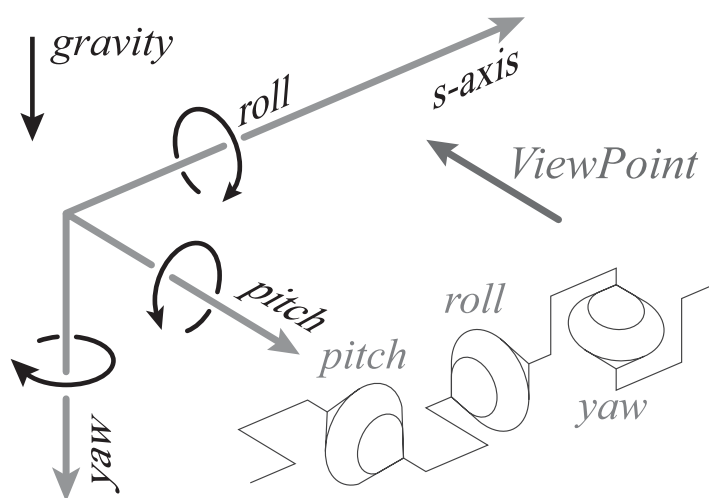


Fig. 4.2: Definition of coordinates and joint angles.

ときの  $s$  軸周りの回転軸を roll 軸，鉛直下向きの回転軸を yaw 軸，そして roll 軸・yaw 軸と右手系をなすような垂直方向を pitch 軸と定義する．そして，各節に定義する相対座標系の基底ベクトルは，基準姿勢での roll 軸，pitch 軸，そして yaw 軸に一致して  $e_r$ ， $e_p$ ， $e_y$  と定義する．このように関節の回転軸を定義したとき，ACM として利用可能な関節構成としては Fig. 4.3 のようなものが考えられる．

Fig. 4.3(1) の 1 関節はユニバーサルジョイントのように， $e_p$  駆動軸と  $e_y$  駆動軸が 1 点で交わるような 2 自由度関節を連結したものである．実際のヘビの体幹は，その可動範囲は狭いもののこの自由度構成に対応していると考えられる．Fig. 4.3(2) は  $e_p$  駆動軸と  $e_y$  駆動軸を交互に連結した機構，Fig. 4.3(3) は  $e_r$  駆動軸と  $e_p$  駆動軸とを交互に連結した機構，Fig. 4.3(4) は  $e_r$  駆動軸と体幹軸と斜め軸に回転する軸を有する機構，Fig. 4.3(5) は  $e_r$  駆動軸・ $e_p$  駆動軸・ $e_y$  駆動軸の直交 3 軸周りの関節を連結して構成した機構である．これらの機構の特徴を以下に述べる．

Fig. 4.3(1) は筆者らが水中遊泳型ヘビロボット HELIX[6] に導入している機構でもある．自然な屈曲運動を実現できるが，関節部の機構が若干複雑となる．Fig. 4.3(2) は，節長さが短ければ Fig. 4.3(1) と同様な屈曲運動を擬似的に実現でき，また機構も単純に構成できる．Fig. 4.3(3)(4) は体幹の体幹軸周りの回転を実現できる機構であり，特に Fig. 4.3(4) は回転軸を斜めに設けた斜旋回機構と筆者らが名づけた機構 [2] である．これらは体幹が伸展していても，その特異姿勢を利用することで大きな自重を支持できるという特徴を有するが，同じその特異姿勢が自在な運動性を制約してしまう場合もある．Fig. 4.3(5) は 3 軸周りの自由度を有するため当然高い運動性を発揮し得る機構構成である．また Fig. 4.3(3)(4) も， $e_r$  駆動軸の角度を  $90^\circ$  ずつずらせば Fig. 4.3(5) の関節構成と等価の運動性を示す．しかしいずれも関節機構の過重量化は避けられない．

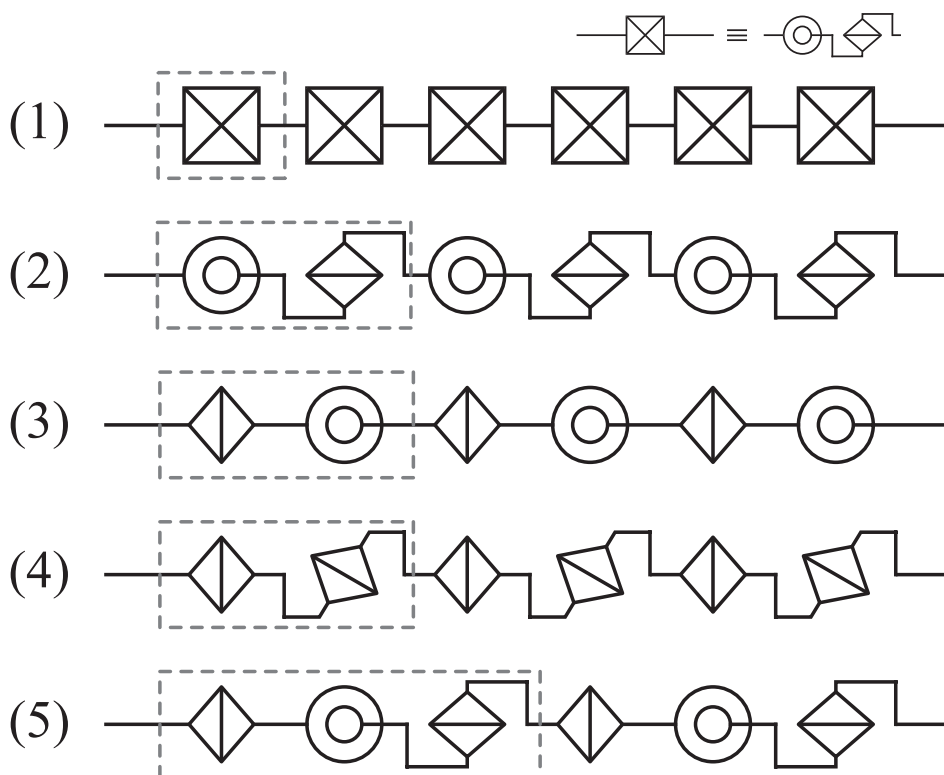


Fig. 4.3: Some of Joint Mechanisms for 3D-ACM.

これらの特性を総合的に対比した結果，新たに開発する ACM-R3 の基本機構としては，軽量化と高い運動性能を実現できる Fig. 4.3(2) の機構構成を採用した．つまり ACM-R3 は，Fig. 4.4 のように 1 関節に 1 自由度のみの駆動系を搭載し，その回転軸を交互に 90° 交叉させ直鎖状に連結する機構とした．節ユニットは 2 枚の平板とコの字型部材とで外殻構造を構成し，軽量性・堅牢性・内部構造の保護性を実現した．

#### 4.2.2 アクチュエータに関する検討

節屈曲用のアクチュエータとしてはモータを使用する．一般的には，トルク要求から大出力なものを選ぶと大型のモータが必要になり，質量的にもスペース的にも大きいものとなる．小型なものを使用するとトルクは小さくなり，回転数が非常に大きくなる．索状能動体の関節部として要求される性能は，回転速度はさほど速くなくて良く，むしろ高トルクを必要とする．特に 3 次元運動を行う際には他節群を支持しうる高トルクを発生させられることが望ましい．

これを解決する方法として小型モータにギアを多段付加し減速する方法が考えられる．しかしギア設計はかなりの精度が要求される．ギアヘッド付きのモータも存在するが，標準のギアヘッドモータでは減衰比に上限がある．また，通常のモータでは制御回路を別途

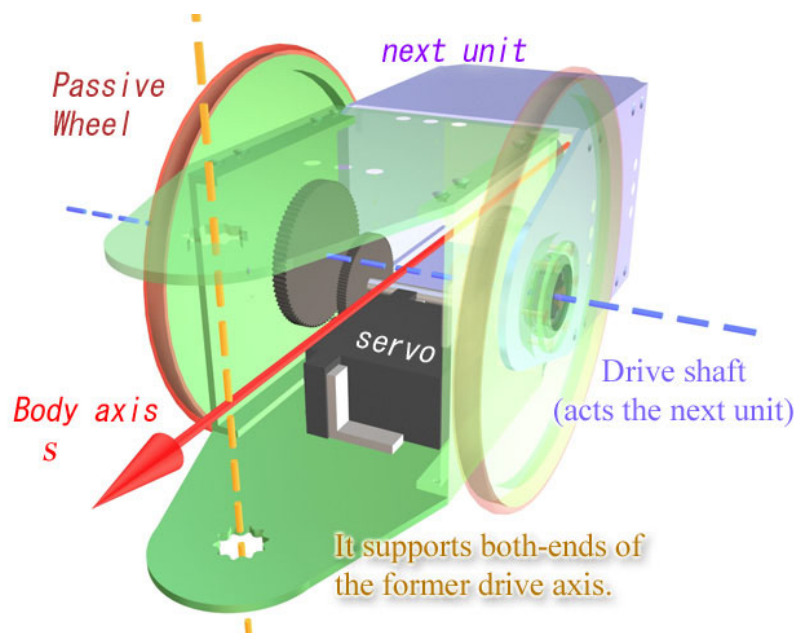


Fig. 4.4: Joint Axes of the Unit.

用意する必要があり，容積も大きくなるため複雑化しやすい．一般的にギアヘッドモータは長細い円筒形となるが，ACM で屈曲軸に平行配置しようとするとき体幹幅に影響をきたし，宜しくないという一面もある．さらに高出力なものを選ぶと必然的に電圧も高くなり，バッテリー駆動が困難になりやすい．

そこで，市販品の模型用モータである RC サーボモータ（Sanwa 製 ERG-VB，サイズ  $39 \times 20 \times 37.4$  [mm<sup>3</sup>]，重量 62 [g]）を採用した．このモータは制御アンプも組み込みギアユニットが内蔵されており，かつコンパクトに纏まっている．当サーボモータの特性を負荷実験にて測定した結果，最大出力は約 3.6W，アクチュエータとしての出力重量比は 58 [W/kg]，定格回転速度は約 10.5 [rad/sec]，最大効率は約 23%であった．また，電流センサを用いてサーボモータの特性を調べた結果，停動トルクは 1.3 [Nm]，トルク定数は 0.52 [Nm/A] のモータ相当であることも確認した．この関係を用いて後に示す推進実験での出力トルク計測を行った．これについては後述する．

なおこの重量には組み込みギアユニットと駆動アンプの重量も含まれている．この RC サーボモータに相当するギアヘッドモータを使用したとして一例をあげると，maxon 社 221024 モータ (3.5[W]) に 134158 ギアヘッドをとりつけ， $\phi 22 \times (58.3 + 14.9)$  [mm<sup>3</sup>] となる．

なお，ごく最近ではヒューマノイド模型目的に RC サーボモータが強固に取り付けられる治具が販売されるようになってきているが，当時は模型に搭載する状態そのものであり，すなわちゴムを介して本体に取り付け，筐体の振動から RC サーボモータを保護する

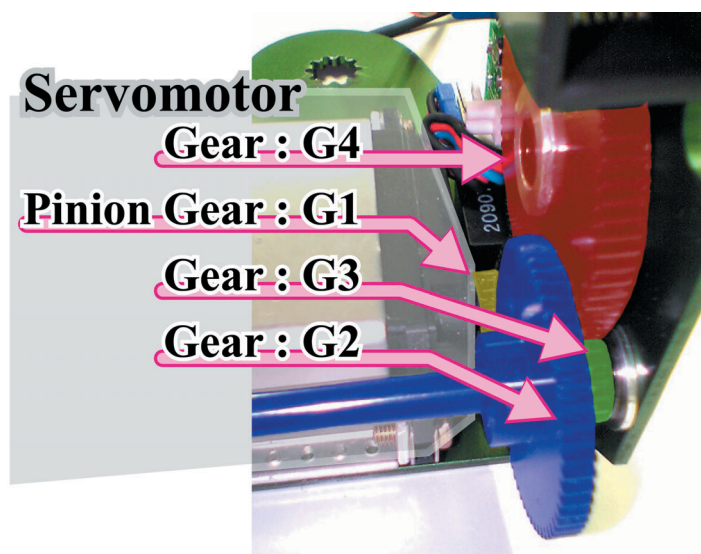


Fig. 4.5: Gear Train of the Unit Mechanisms.

仕様であった．また，RC サーボモータのケースはプラスチックで出来ており，強固なねじ止めを行うと破損するおそれがあった．そのため，サーボモータを帯状の曲げ金具で覆いこむようにして筐体に固定し，サーボ出力軸方向のズレ防止のためだけに，従来の固定穴を利用して固定した．これにより比較的精度良く，かつ堅固なギア出力系を構築することが出来た．

#### 4.2.3 出力伝達機構

先に述べたように，このアクチュエータの定格回転速度は約  $10.5$  [rad/sec] であるが ACM-R3 の体幹屈曲角速度は  $0.6$  [rad/sec] 程度で十分である．そのため，RC サーボモータの出力軸は Fig. 4.5, Fig. 4.6 に示すようにピニオンギア  $G1$  とギア  $G2$  の第 1 の減速機と，ギア  $G2$  と同軸で左右一対のギア  $G3$  とギア  $G4$  の第 2 の減速機の組み合わせで合計  $1:15$  の減速を行った．その結果，回転数  $0.6$  [rpm] で  $3.5$  [N·m] の連続トルクを生成できた．また，第 2 段の減速部において左右両側に同一の出力を伝えている．このギア  $G4$  は，隣接節の構造体の両端を成す平板に自動車用スプライン軸を介して固定されているため，隣接節にねじり要素のない安定したトルク伝達を実現することができる機構となっている．また，こうすることでギア  $G4$  幅を減少させ内部容積を稼ぐとともに，ギア・平板スプライン部にかかるトルクを分散させ，ギア部破損などのないよう頑強な構造と成している．以下に 3DACM の性能比較として，Kevin Dowling らの SnakeRobot[29] のスペックと併記した．

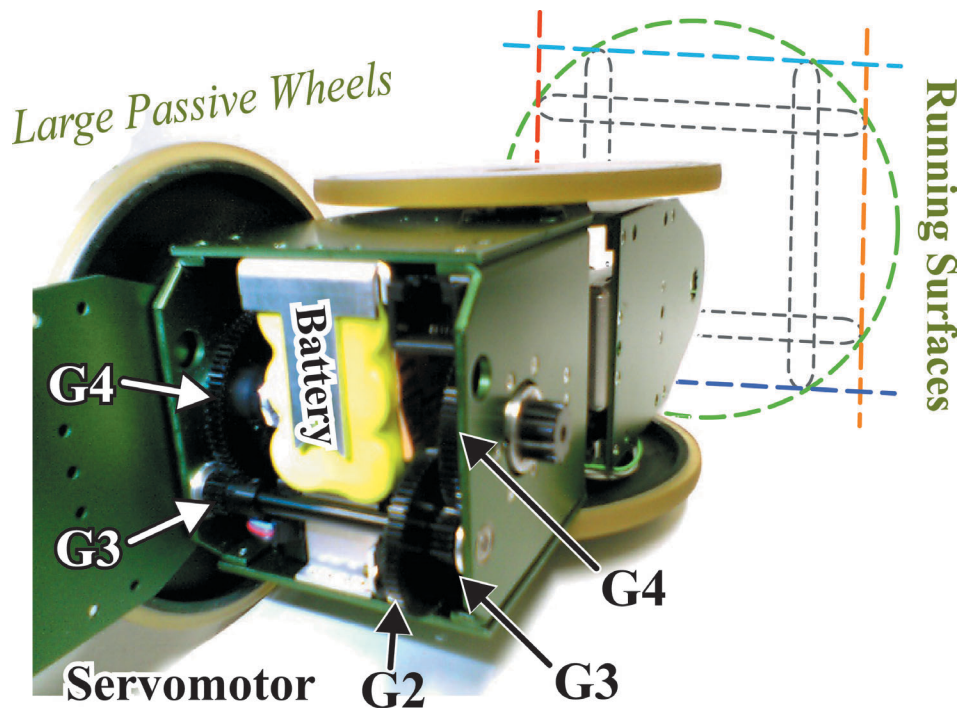


Fig. 4.6: Unit Mechanisms.

Table. 4.1: Compare with Snake Robot of Kevin.

each joint	Unit mass [g]	Joint length [cm]	Max Torque [Nm]	Angler velocity [rad/s]	Support units
ACM-R3	575	8.0	19.1	0.7	8
Snake Robot	74	5.1	0.84	5.2	6

#### 4.2.4 体幹摩擦特性に関する検討

ヘビは、方向によって異なる摩擦係数を有する特性、つまり体幹表面が体幹軸方向に滑りやすく体幹軸の法線方向に滑りにくいという特性を利用することでほふく推進運動を行う。従来の2次元運動を行う索状能動体でこの特性を実現するには、接地する節の面に車輪を装備すればよかった [1]。しかし3次元運動を行う索状能動体においては、この特性を体幹節全面に与える必要があり、実現は容易ではない。

最も単純に考えれば、たとえば小型のキャスターを体幹の全面に多数装備する機構が考えられる (Fig.4.7) が、この方法では重量がかさみ、小型キャスター部にゴミが詰まったり障害物へ噛みこみやすくなる欠点を持つ。また、屈曲角を大きくする際には車輪同士が

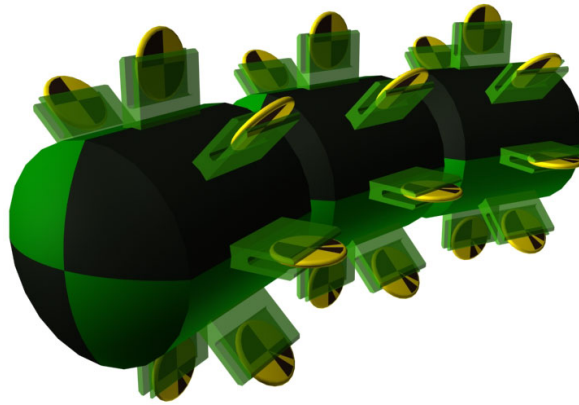


Fig. 4.7: The wheel arrangement in a radial pattern.

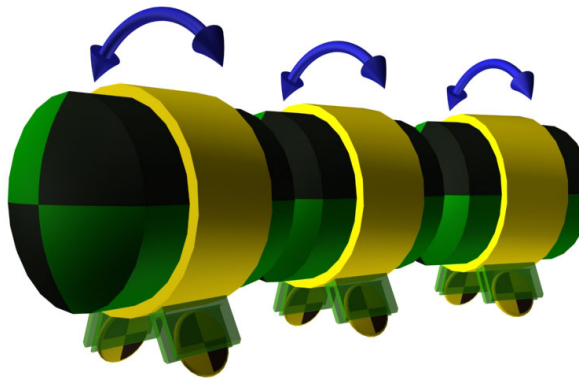


Fig. 4.8: The improved wheel arrangement in a radial pattern.

干渉するため、車輪径にも充分留意が必要となる。

この改良案として (Fig.4.8) が挙げられる。すなわち摩擦比生成のため体幹軸まわりに自由に回転できるようにした小型キャストを用いる手法であり、これは OBLIX[2] などに用いられている。体幹軸まわりの動作は受動であっても自重により走行下面に移動するため摩擦比を得ることはできるが、体幹軸まわりの回転方向に対する拘束がないため、特に捻転動作による運動を実現することは非常に困難となる。また能動的に走行面に合わせることを考えると、任意曲面において摩擦比を得ることが可能であるが、機構・制御の双方で複雑化するため好ましくない。

これに比べ、体幹節を覆うような大型の車輪を用いる手法が考えられる (Fig.4.9)。しかし節体幹自身に軸を配置すると図のように車輪と体幹が干渉し屈曲角が著しく制限されるため、配置を十分に考慮しなくてはならない。

そのため ACM-R3 では、節の屈曲軸を回転軸とする一対の大型受動車輪で節全体を囲むという特有の形態を導入した。車輪径を大きく取ることで、車輪単体としても地形の凹凸に適応しやすく、ゴミが詰まりにくい。かつこの構成は (Fig.4.10) に示すとおり、受動

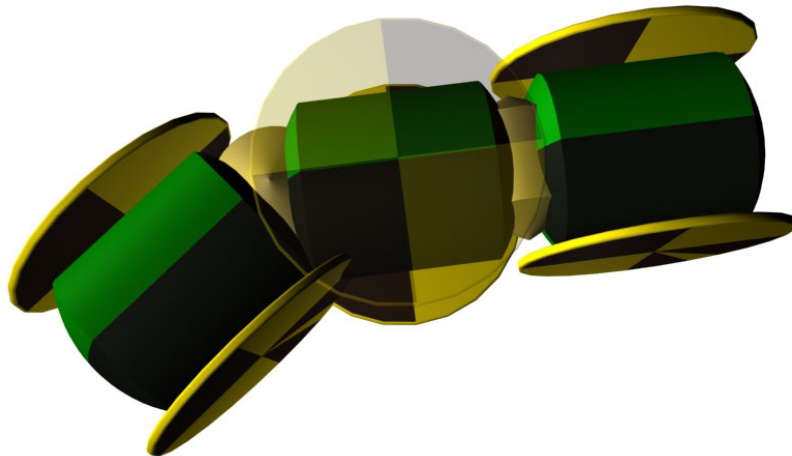


Fig. 4.9: The large wheel arrangement with side of unit.

車輪の軌跡が  $1/2$  角機構と同等の軌道を通ることになるため，ACM-R1 同様に屈曲時の車輪の横滑りを低減化する効果が期待できる．また，回転軸を屈曲軸と一致させているので，直径が大きくても節の屈曲駆動を妨げ難い特性を発揮する．その結果 Fig. 4.11 に示すように大きな可動範囲（車輪取り付け時  $62^\circ$  車輪取り外し時  $91^\circ$ ）を確保することが可能となった．

さらに，隣り合う車輪は Fig. 4.6 のように正面から見ると「井」の字型に配列するようにした．この配置を行なった結果，凹凸のない滑らかな滑走面上である限り，どのような姿勢でも受動車輪のみが滑走面に接触する移動が可能となった．そしてどのような姿勢でも，体幹軸方向には滑りやすく法線方向には滑り難いという特性を生成できるようになった．なおこの大型車輪は，節機構の保護部材としても機能する．

ただし，摩擦特性を必要としない推進の研究のため，またメンテナンスを容易とするよう，ねじを一つはずすだけでこの車輪をはずすことが可能なよう設計を行った．

ただし，正面から「井」の字型に大型車輪を組む場合，その車輪半径は下に示すとおり幾何学的に 2 つの制約を受ける．それは

- ・ 車輪が車輪として動作するため底面部高さが存在すること
- ・ 隣接する車輪同士が干渉しないこと

である．ACM-R3 の場合，関節駆動軸と車軸を一致させているため，車軸間距離  $2La$  は駆動軸間距離  $80[\text{mm}]$  と同一である．大型車輪半径を  $R$  型，大車輪厚さを  $T$ ，体幹中心軸からの大型車輪取り付け距離を  $Lr$  とすると，底面部高さ  $Hw$  は

$$Hw = R - Lr - T > 0 \quad (4.1)$$

である．また車輪同士が干渉するときは必ず車軸中心の平面上，かつ互いの車輪平面上で

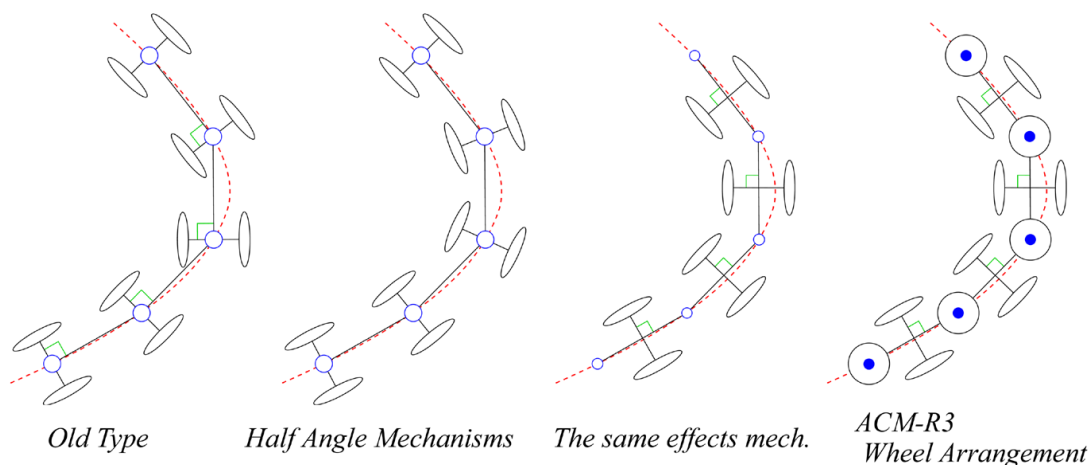


Fig. 4.10: The passive wheels layout makes the effects of the half angle Mechanism.

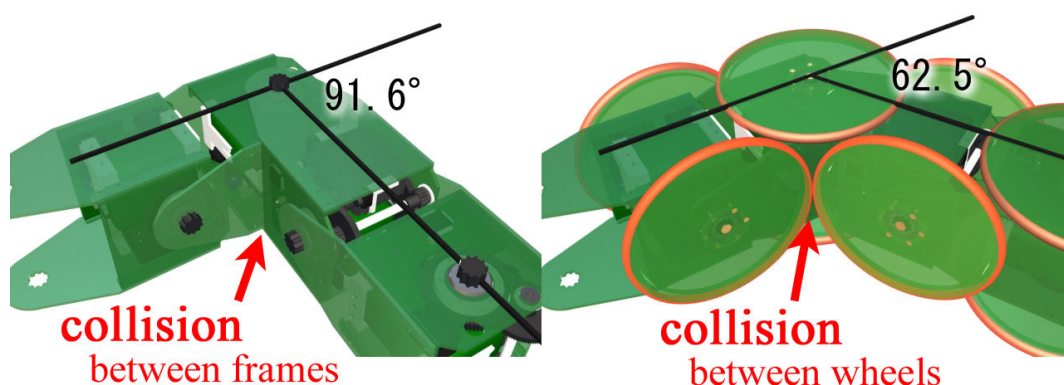


Fig. 4.11: Motion Range of the Unit.

接触することから

$$Lr^2 + La^2 > R^2 \quad (4.2)$$

という条件式を導くことが出来る．この範囲内で  $Hw$  を大きくとることが設計上重要となる．実際には，内部に搭載する必要のある機構系や電装系の配置を考慮した上で  $La$  および  $Lr$  が小さくなるよう設計し，後に  $Hw$  を考慮して  $R$  を決定する手順となる．

ACM-R3 における設計採用値は， $La = 40[\text{mm}]$ ， $Lr = 37[\text{mm}]$ ， $R = 53[\text{mm}]$  相当， $T = 6[\text{mm}]$  であるから， $Hw = 12[\text{mm}]$  であり，式 (4.2) も満たさずであったが，車輪外周のウレタンゴム焼き付けの形状が角形に近かったため  $R$  相当値が増加，車輪同士が軽く接触する現象が見られた．このため車輪取り付け時にスペーサを介することで  $Lr = 39[\text{mm}]$  とし，確実に車輪同士が接触しないよう改善を施した．

## 4.3 電装系の設計

### 4.3.1 ユニット化構造の導入

古くから索状能動体は基本的に機構部・制御信号的なユニット化が試みられてきた。同様な駆動ユニットがあれば、それを連結することで索状能動体として機能することになる。しかし、電装系についてユニット化を行う試みは、近年ようやく始められた。一つには、外部回路による集中制御が主であったことから、全てのユニットに独立した線を這わせることが多く、電源供給も外部から等しく投入することが多かったためである。しかし、自立化させるということは、外部から豊富な電力を供給できないということでもあり、大容量高出力を保つには、ACM-R1 でなされたように大電源を分散配置する方法が有効である。ACM-R2 では二次電池の分散配置を予定していたが、外部電源投入なしでの運用はあまりなされなかった。アクチュエータも 20[W]<sup>2</sup> 機構成であったため、連続駆動時間を長くとるにはそれなりに大きな二次電池を要する。

そこで、ACM-R3 においては徹底的に電装系でもユニット化を行うことにした。その結果、機構的にも小型軽量化を進めることができ、このような悪循環を断ち切るのに一役買っている。以下に特に気をつけた点として 3 つ挙げる。

ひとつめは、分散制御的な設計である。各節ごとにプログラミング可能なマイコンチップを含む制御回路を搭載し、分散的な制御もできるようにした。このため各節内部での独立制御も可能であり、研究目的に応じてユニット毎のカスタマイズ（センサの付加など）が容易となる。当実験機では RC サーボモータを利用しているため、自動的に位置制御ループがモータ部で組まれることになるが、これが仮に普通のモータであったとしても、節単体として制御を行うことが可能であるため、中央制御側からみれば位置制御を自動で行うユニットとして扱うことが出来るため、機構変更への対応力も高まっている。

次に、省配線化を徹底的に行った。索状能動体は制御を行うアクチュエータ数が非常に多いため、自然と配線数が多くなる。しかし、こうした多量の配線の引き回しはアクチュエータ部分の抵抗負荷となるだけでなく、小型軽量化を図る上でも好ましくなく、さらに短絡・断線・メンテナンスミスなどによる事故発生の原因にもなりやすいために非常に好ましくない。特に電源配給線は影響が大きいため、1 本でも多くの省配線化を行う必要がある。これに対し、電源については二次電池をユニットごとに搭載することができれば、上記の危険回避は可能である。かつ先のとおり制御回路をユニット内に搭載してしまえばユニット内での主要な制御用配線を閉じることができ、各節間で制御のための高位通信を行うことで、各節間には情報伝達に必要なケーブル数のみを這わせるだけで済む。

最後に、自立運動を行うための二次電池のユニットごとへの搭載が挙げられる。ACM-

R3 は RC サーボモータを利用する方針が固まっており、このモータ出力は 3.6[W] で駆動するのに従来ほど電力を必要としない。そのため、各ユニットに独立した二次電池を搭載しても長時間の運用が見込める。よって、本機では二次電池として 7.2[V]、1.6[Ah] の NiMH 型二次電池を各ユニットごとに搭載することとした。これは単三電池 6 本分に相当し、緊急の場合には市販の一次電池（単三）6 本直列構成でも利用が可能である。

以上の改良を施したことにより (Fig.4.6), (Table.4.2) のようなユニット構成を実現できた。この構成での最長連続駆動時間は 2 時間半を記録している。

### 4.3.2 信号伝達系の検討

第 3 章で論じたような推進論を実現するためには、各節に対し制御式に則った角度を生成する必要がある。これを実現する方法はいくつか存在する。

ACM-III においては、各指令値の制御はアナログ回路により行われた。先頭節に指令を送った後、0 次ホールド回路にて順に次の節へ指令をシフトしていく方法である。しかし、この手法では逆方向へ推進することが出来ず、また捻転生成を行うことが困難となるため、3 次元的な屈曲運動を充分再現することは難しいと考える。

ACM-R1 では指令値制御がデジタル化され、中央の 1 節に搭載された 1 台の計算機により指令値を算出し、D/A コンバータを通して一括して全ての節のモータドライバに出力する方法が採られた。最初の指令値は、R/C 用送受信機を用いて無線で伝達するため、ロボットとしては自立化する事には成功している。しかしこの方法では、計算機と各節のモータドライバが直接情報線で結ばれているため配線数が節数個本数ありメンテナンスが非常に困難であること、アナログ信号であるためノイズに弱く、シールド線を用いたために機構を圧迫していたこと、など欠点も多く見られた。

ACM-R2 では各関節ユニットに 2 台のモータドライバと 2 台の歪みゲージ、そしてマイコン (H8/3048F 16MHz) を搭載しこれに対応した。各節はモータドライバにより位置制御を行い、位置のフィードバック値としてトルクセンサの値を入力することで、ローカルループでトルク制御を行う。マイコンにより行う処理は各種 A/D・D/A 変換およびホスト PC とのシリアル通信のみであり、運動計画全体の処理は最終節のホスト PC で行う仕様となっている。節間はシリアル通信のため、体幹を駆けめぐる情報線は比較的少なくなったが、まだ太い電源供給線が全節を貫いていたため、機構に圧迫される危険性ははらんでいた。また節ごとに取り外しメンテナンスを行うことは非常に困難であった。

本実験機では、電装系のユニット化を進めるに即し基本的な各指令値制御を各節で行う手法を採用した。これにより指令伝達を通信で行い、省配線化を進め、簡易化・軽量化が図れるためである。さらに無線による自立性を実現するため、総括的には Fig. 4.12 に示すような信号伝達系となる。

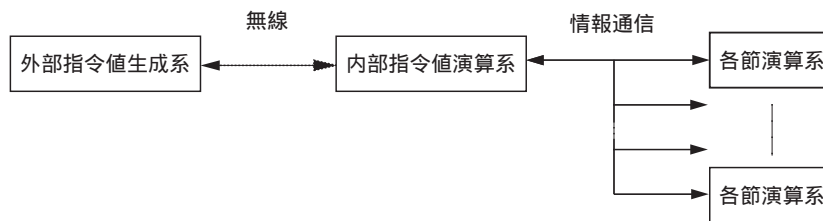


Fig. 4.12: The currents of control commands.

信号伝達の流れを説明する．まず操縦者は「外部指令値生成系」にて，ACM-R3 のとる行動（推進・屈曲動作・把持など）を決定する．そして生成された指令値（行動）が無線を通じて ACM-R3 本体内部にある指令値演算系に伝達される．無線を使用するのは単にロボットを完全自立系にするためである．「内部指令値演算系」で具体的に各節毎の指令値を生成し，各節に搭載した演算系に指令値を伝達する．極力関節間を省配線化するために，情報通信（ACM-R3 ではシリアル通信）を利用する．最後にこの「各節演算系」にて受け取った情報を元に関節内のアクチュエータを制御する．この角度信号の伝達自身は目新しいものではなく，ACM-R2 のものとほぼ同様である．

しかし，電源系の配線は 4.3.1 でも述べたとおり，従来の完全自立型索状能動体とは異なり，各節ごとに独立した 2 次電源を搭載し，電源的にも各ユニットで独立して動作が可能である．しかし一連のロボットとして駆動を同期させる必要があるため，全ての節電源を同時に On/Off できる仕様であることが望ましい．誤動作を起こした際，直接的に非常停止が可能である構成にすることは安全面上からも重要な事項である．そこで，情報線として全節を貫く電源スイッチ用の信号線を通し，リレーを介することで，各節の二次電池電源の独立を守りつつも，同時に電源投入を行える手法を採用した．このため，主電源投入スイッチは非常停止スイッチの役割も果たし，ユニット数・順序によらず駆動させることが可能である．

ここで，以下に ACM-R3 で構築した制御系ハードウェア構成を Fig. 4.13 に示し，信号伝達順に解説を行う．

#### i) 航空機 RadioControl 用送信機

有線システムは移動体の機能を十分に発揮することができないため，入力した指令値を無線で送信するシステムを構築する．ロボットの操作性・無線操縦を考慮した結果，航空機模型用の送受信機を採用する事にした．当送信機は 7ch のアナログ信号と 1ch の On/Off 信号を送信することができる．操縦者が同時に指令でき，かつ 3DACM を操作するチャンネル数を考えると，適度な信号数と思われる．指令値の意義付けは「内部指令値演算系」で事前に行う．

#### ii) RadioControl 用受信機 (i) と対をなす)

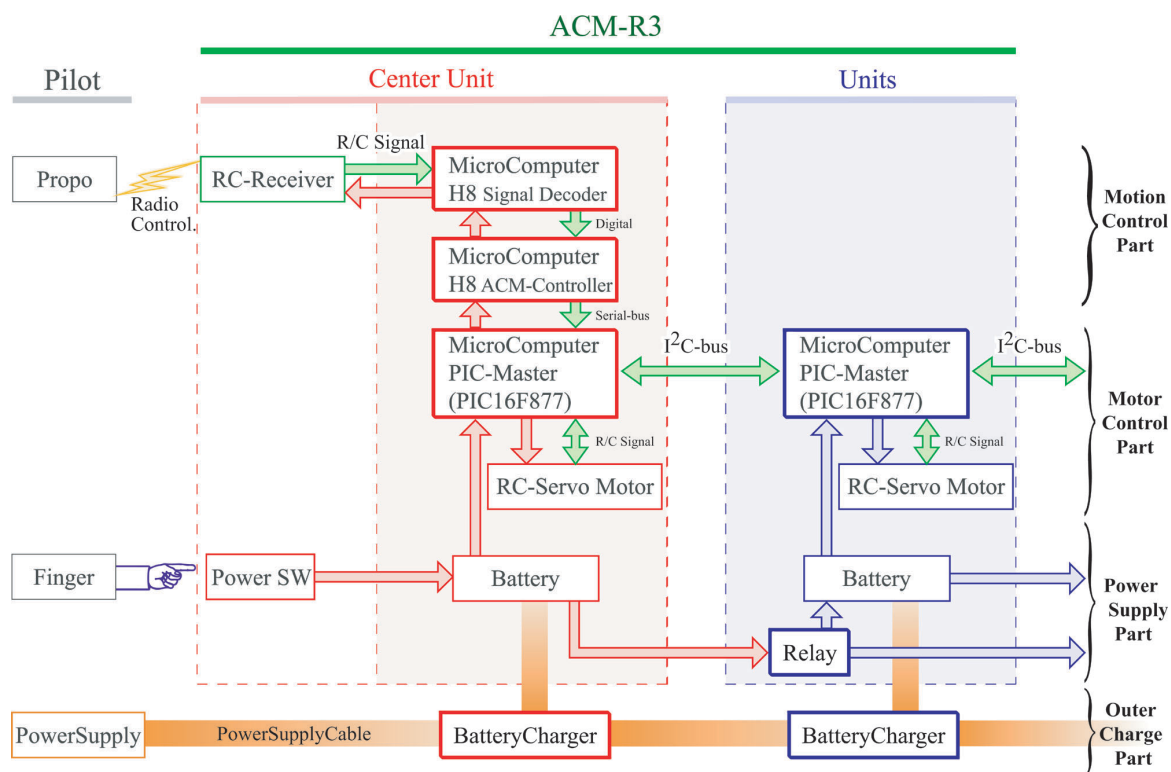


Fig. 4.13: The chart of control commands.

受信機のサイズは  $70 \times 32 \times 25$  [mm<sup>3</sup>] 以内であり，節に搭載するのに充分小型である．出力信号はサーボモータ駆動用のパルス出力信号となる．

iii) HITACHI H8/3048F 使用 AKI-H8 マイコンボード (信号変換用)

サーボモータ駆動用信号を電圧信号に変換する．本来の制御系には必須の基盤ではないが，内部指令値演算系の処理を軽減するために別途天死してある．

iv) HITACHI H8/3048F 使用 AKI-H8 マイコンボード

ACM-R3 制御の要となるボード．「内部指令値演算系」である．iii) で生成した電圧信号を A/D 変換で読みこみ，各 ch 指令値より指令内容を判別・軌道生成・各関節角度指令生成を行い，シリアル通信で各節へ指令を与える．通信速度は暫定的に 38400 [bps]．1 節当たり 16bit のデータ / 角度データ 7bit を送信する．

v) PIC Unit Control Board

各節 1 基盤ずつ搭載されている制御回路 (Fig.4.14)．H 8 からのシリアル通信で指令値を受け取り，自節の生成角度を確認し，サーボモータへパルス出力信号を送る他，要求に応じて現在の角度を H 8 に返信する機能を持つ．当基盤は基本的に ACM-R3 に対して 2 節分の制御を行うことが可能．トルクセンサなどを別途搭載すれば，ローカルに力制御を行うことも可能である．

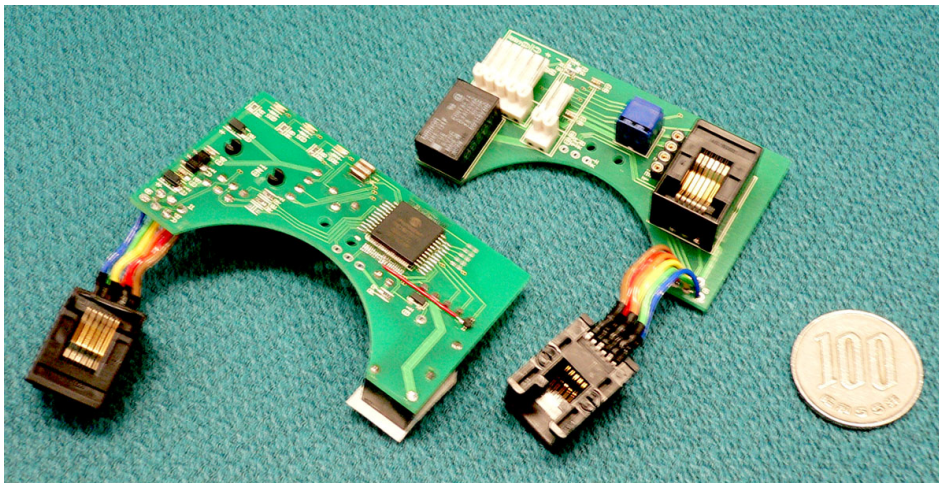


Fig. 4.14: Unit Control Board.

vi) RadioControl 用サーボモータ

v) からの信号に対し，関節出力軸に取り付けられたポテンショメータの値と比較しながら自動的にローカル位置制御を行う．

ACM-R3 全体における制御信号は以上のように伝達される．

各節の主電源に関しては，各節に電源用のリレーを設置することにより，全節一括して on/off の切り替えを可能とした．

### 4.3.3 操縦入力系の検討

外環境からの指令を行う装置として，RC 用送信機を採用したことは前述した．ここでは，その具体的な操縦法について述べる．

3DACM の形状は先述のとおり，曲線長位置に対する pitch 軸・yaw 軸の 2 軸直交の曲率を決定することで一意に定めることが出来る．つまり  $\kappa_{yaw}(s, t)$   $\kappa_{pitch}(s, t)$  を伝達出来れば良いことになる．ここで  $s, t$  を任意に操作するのは非常に困難であるが，ことシフト制御に限定して制御するならば，2.2.1 節で示したとおり， $u \equiv \frac{s}{L} - \frac{t}{T}$  の関係式を元に指令をすればよいことになる．例えば先頭節を  $s = 0$  とし，これに対し指令し続けると，時刻  $t$  が進むにつれ  $\kappa_{yaw}(s, t)$   $\kappa_{pitch}(s, t)$  が自動的に決定されていく．この  $t$  の再現値を決定してやれば，シフト方向の速度について自由にコントロールすることが可能となる．つまり， $\kappa_{yaw}(0, t)$   $\kappa_{pitch}(0, t)$   $t$  の 3 チャンネルを指令できれば，任意のシフト制御曲線を生成することが可能となる．さらに，捻転制御はこれらに関わらず常に生成可能であり，1 チャンネル分を利用すれば実現が可能である．

以上 4 チャンネルをもって 3DACM の基礎操縦系とし，Fig. 4.15 に示すように操作割り当てを行った．これにより，基本操縦は両親指 2 本で操縦が可能のため，非常に安定し

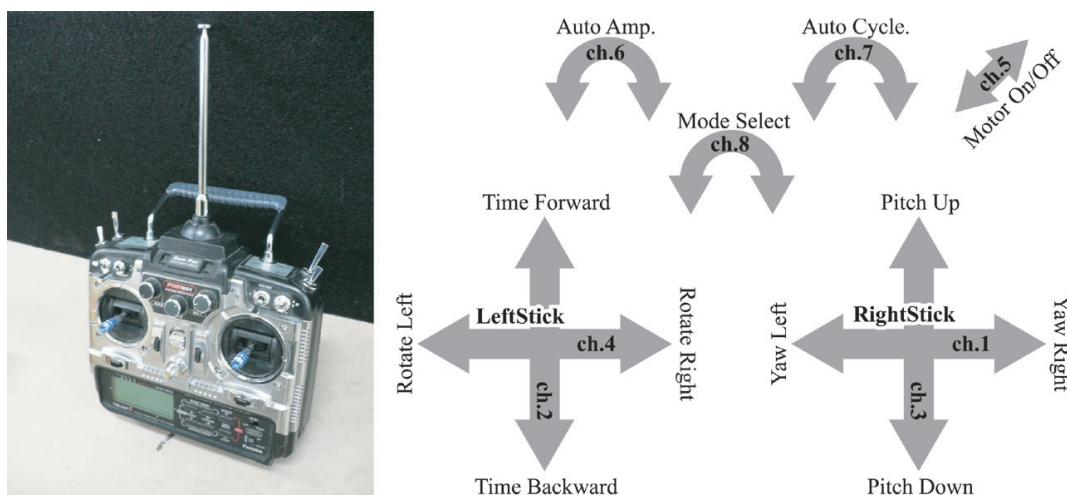


Fig. 4.15: The Controller and input interface.

た状態で自由なシフト制御を行うことが可能となっている。また、この操縦系は自動車の R/C 操縦系を踏襲しており、右手は「体幹軸上から前方を向きどちらに体幹を曲げたいか」その量を直感的に入力すれば良く、自動車のハンドル操作に一致している。左手は「実機を上空から見てどの方向に進みたいか」その推進方向を直感的に入力すればよいように配置しており、推進力さえあればその方向は一致する。また、5 番チャンネルに対しサーボモータ信号を停止する非常停止信号スイッチとして割り当て、非常動作時にすぐに動作停止が行えるよう工夫した。これにより、数々の場面で事故を防止できた。

残りのうち 8 番チャンネルは各種モード変更に利用し、選択したモードによって 6,7 番チャンネルなどの効果を変更するよう工夫した。例えば、基準ほふく推進の際、自動で波形を生成するよう振幅や波長を調整したり、波形合成時の振幅や捻転方向などを決定するなど、特殊な場合に利用している。

以上のように、シフト制御の推進力発生原理が自動車に比較して特殊であるため、推進に関するの馴れは必要であるが、なればこそ入力方法は非常に簡便であるよう注意を払い設定している。

#### 4.3.4 内部処理系の検討

従来なされてきたシフト制御は非常に断続的な運動を起こしており、滑らかさに欠けていた。その理由は、節数ごとに情報を保持し、情報を遷移していたためである。しかし内部処理系プログラム上で考えると、この物理的節数の制約は無意味であることが判る。時間  $t$  は  $s$  の遷移のみを意味するため、 $s$  による曲率  $\kappa_{yaw}(s)$   $\kappa_{pitch}(s)$  を記憶し、適宜対応する節に角度を提供すればよいことになる。内部処理を行う演算器の性能によってどれほ

ど細分化できるかが決まるが，ACM-R3 では全節に対し 512 分割し，それぞれの位置の曲率に対応する数値を yaw 軸・pitch 軸各々記憶，遷移させることとした．つまり，何節構成になっていようと内部処理系では「512 節の離散モデル」を扱っていることになる．実機 21 節換算すると，関節軸間距離 80[mm] のところ，3.1[mm] の分解能で動作していることになる．実際，この処理により従来機にない非常に滑らかなシフト推進が実現できている．

また，時間  $t$  の操作により関数内要素全てシフトするのではなく，読み取り先を 1 要素ずらして読み取り，捻転も関節指令値の段階で回転行列をかけることで，無駄な演算を省き同等の効果を得るよう工夫している．

## 4.4 センサー系の検討

### 4.4.1 位置制御

前述の通り ACM-R3 はアクチュエータとして市販の R/C サーボモータ「SANWA 製 ERG-VB」を採用している．一般に R/C サーボモータは駆動用電源  $V_{cc}$ ， $V_{dd}$  と角度指令用信号線の 3 本の電気的入力により，自動的に位置制御を行うよう動作する．これは，内部にモータのほか制御回路とポテンシオメータを有しているために実現できているわけであるが，そのために製品ごとに最大回転角や速度も決定されており，採用品では動作角は  $\pm 90$  度と制限を受けている．しかし，先述の通り外部にギア列を組みインピーダンスマッチングを行った場合には，R/C サーボモータ本体にはこの動作角を超えた動きが要求される．このため，必然的に改造を行うこととなる．

具体的には，内部を分解し，最大角を物理的に制限しているピンを取り外して機構的な無限回転制限を解除し，R/C サーボモータ出力ギア段に直結されているセンサ・ポテンシオメータを取り外す．このポテンシオメータを入力装置として任意角度情報を渡すことで，元の位置制御をそのまま利用することが可能となる．また，そのままポテンシオメータのトリマを固定すれば，R/C サーボモータへの指令値に対し相関のある速度出力が得られる．

幸いにして，サーボモータの有効動作角と ACM-R3 ユニットの想定有効駆動角はほぼ同一である．そこでユニットの最終出力段に対して同じポテンシオメータを取り付けることで，サーボモータの制御回路をそのまま利用しつつ系全体として減速を行うことに成功した．

蛇足だが，原点の位置調整は，サーボモータへの角度指令信号を変化させて行うよう設計したため，機構的取り付けは至って簡易である．

#### 4.4.2 電流計測装置

以上により基本的な3次元索状能動体の推進運動実験は可能となるが、定量的な情報を計測し記録する装置を省いている。第5章「各種推進実験」において、特に3種の基本推進を行う際、関節にどの程度のトルクがかかるのか計測実験を行った。このときにどのように計測したのか、その計測法を以下に述べる。

R/Cサーボモータ内部には位置制御回路が組み込まれているため、入力電流を計測しただけではモータにどの程度のトルクが生成されているのかを正確に知ることは出来ない。そこで、R/Cサーボモータ内部に組み込まれているモータ配線に直接電流センサを直列につなぎ、外部に取り付けた別のワンチップマイコンで電流センサの計測値を読み取り記録することとした。

電流計測機は、ナナレム社製ホール電流検出器(LTS6-NP)を利用した([http://www.lem.co.jp/products/product\\_j.html](http://www.lem.co.jp/products/product_j.html))。これをモータ配線に直結し、データ線をH8-3664マイコンのA/D変換機能で値を取り込む。ホール電流検出器は4つ利用し、各々の節のポテンシオメータの電圧も取り込むことで、4節分の電流・角度データを同時取得できる計測装置を作成した(Fig.4.16)。ただし、R/Cサーボモータへの指令信号周期は14.8[ms]であることが判っているため、1次フィルタを通した上でサンプル間隔を31.25[ms]とした。

電流センサ値と生成トルクの校正実験、およびポテンシオ値を生成角度の校正実験を行い、取得データとトルク・角度の相関関係を確認した結果、計測装置にかかわらずポテンシオ自身にノイズがのりやすい傾向にあることが判明した。このことから、これ以降開発したほぼ全ての機体に対し、R/Cサーボモータをポテンシオメータ外付けで利用する場合には別製品を利用することとした。

また、取得される角度データ(ポテンシオ電圧)は、アクチュエータへの供給電源に左右されないことも確認した。

実際には、この4節を計測したい場所の節と付け替えて使用する(Fig.4.17)。

#### 4.4.3 充電器に関する考察

上記の工夫により、電源線を節間に通すことのないよう電装系を構築し、関節の動作抵抗や障害を未然に防ぐことができ、通常の運用上はさほど問題は起こらなかった。動作時間も通常運用で1時間(ACM-R1の倍程度)は動作可能であることが判明した、しかし、二次電池を完全にユニット別に分割した電装系のままのため、各節に対し充電基盤を介して充電を行わなくてはならず、煩雑な作業である。実機動作中の問題は回避できている

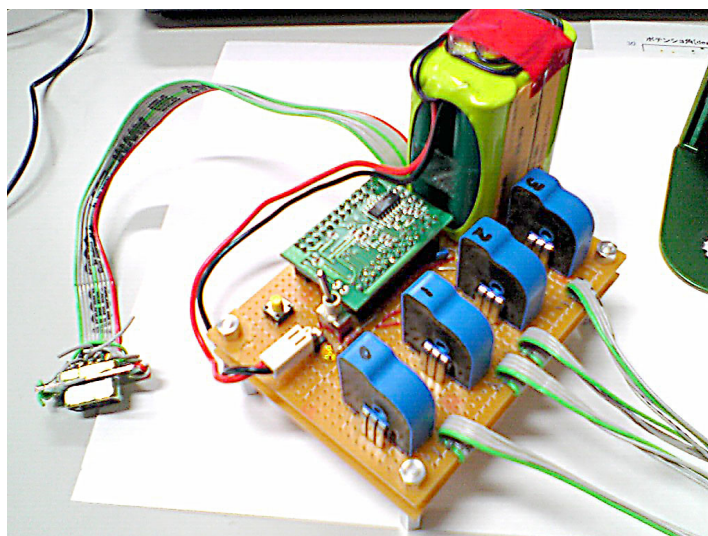


Fig. 4.16: Torque and angle data logger.



Fig. 4.17: ACM-R3 data log setup.

が、充電は避けて通ることの出来ない作業であり、今後は改善すべき事項であるとの認識を得た。

## 4.5 まとめ

以上から、製作した 3DACM の実験機「ACM-R3」について、ユニット性能および全体の性能を Table 4.2 にまとめる。

本機は無線操縦機の指令により、自立的にシフト制御・捻転制御を基礎とする各種推

Table. 4.2: Specifications of the ACM-R3

Unit	Output torque	19.1 [N·m]		
	Size	123 × 66 × 72 [mm <sup>3</sup> ]		
	Wheel Size	φ110 [mm]		
	Weight	576 [g]		
	Motor	Sanwa ERG-VB	(3.6W)	62 [g]
	Outer Gear	Spur gear	(1/15)	37 [g]
	Battery	Ni-MH	(7.2V 1.6Ah)	173 [g]
	Controller	PIC16F877		15 [g]
Total	Number of joints	20(yaw10/pitch10)		
	Size	1755 × 110 × 110 [mm <sup>3</sup> ]		
	Weight	12.1 [kg]		

進を行うことができる 3DACM である。機構は非常にシンプルかつ剛性の高い外殻構造をとる。1 自由度のユニットを体幹軸まわりに 90° 回転させ結合させることで、Pitch・Yaw と同じユニットを利用し、両軸に対し同じ特性を保つ。体幹を着脱の容易な大型受動車輪が覆い、どのように接地しても体幹軸方向に滑りやすく、直交方向に滑りにくい摩擦特性を得ることができる。この特性のままでも、62.5° と可動角を広く確保している。

電装系においてもユニット化をすすめ、各節に半ば独立した電装系を構築しており、各節内におけるローカルな制御ができるほか、自由な節数でも実験が可能である。簡易かつ直感的な操縦系を構築し、また内部処理系を工夫することで、従来と比較して非常に滑らかな推進を実現した。

## 第 5 章

# 各種推進実験

第 3 章で誘導した推進制御法を，開発した索状能動体の機械モデル ACM-R3 に組み込み，各種の走行実験を行なった．

### 5.1 シフト制御運動比較実験

シフト制御の推進として，特にほふく推進，捻転型ほふく推進，Sinus-Lifting 推進の 3 種に関して詳細な実験を行った．第 10，11 関節，及び第 16，17 関節のサーボモータへの入力段に 4.4.2 節で述べた電流センサを取り付け，その消費電流量を計測できるようにした．この電流センサの値は関節出力トルクと比例関係にあるため，減速歯車の摩擦に起因する誤差は多少出るがほふく推進中の関節の生成トルクに相当するものである．ただし，実際に取得した第 16，17 関節のデータと第 10，11 関節の出力値は，全実験を通してほとんどその傾向が同じであったため，以降に示す実験結果は第 10，11 関節の出力値のみを記載している．

走行条件としては，すべての推進方法において体長に対して 1.5 周期分の波形を生成した．生成振幅角は約  $20^\circ$ ，くねり角  $\alpha$  は約  $32^\circ$  であった．これらの値は  $\kappa_{yaw}^0 L = 3.5$  に相当する．

#### 5.1.1 推進実験の結果

##### 基準ほふく推進

基本的な基準ほふく推進について推進時に発生するトルク分布の傾向を知るため，推進力に寄与する yaw 軸屈曲運動を生成する体幹に沿った偶数番目の関節 10 ヶ所について生成トルクを計測し，その波形を最小二乗法で正弦波近似し，その平均と標準偏差を Fig. 5.2 にまとめた．その結果，その分布は体幹中央部において大きく，両端部では減少

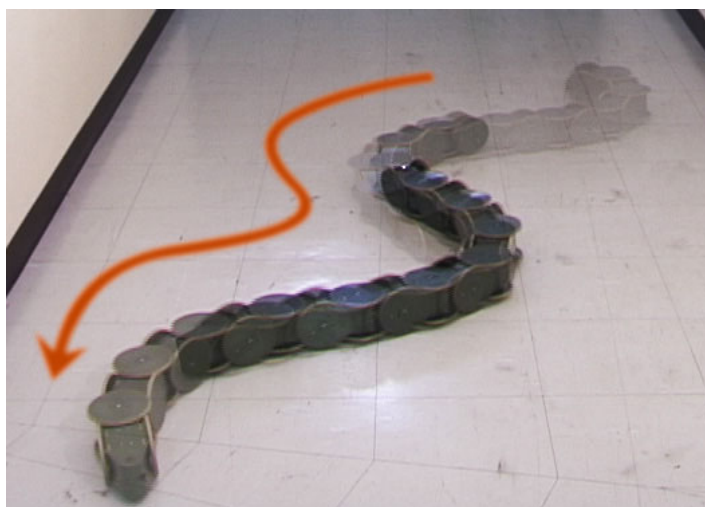


Fig. 5.1: Serpentine Locomotion of ACM-R3.

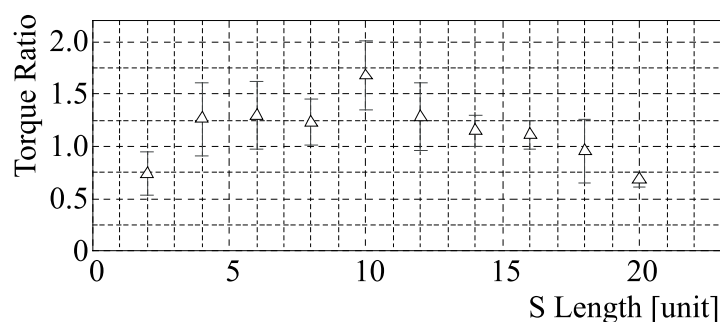


Fig. 5.2: Torque ratio for s-axis.

してゆく分布であることが分かった。

筆者らはすでに Fig. 5.3 に示すように、実際のヘビを解剖し体幹軸方向に対する筋肉断面積の分布を計測している [1]。この分布を Fig. 5.2 に示す発生トルクの分布と比較すると、それらにはほぼ同様の傾向が見られることがわかる。これらに対応することから実際のヘビの体幹形状は、実際的に蛇行運動に必要な駆動トルクに対応する断面形状を有するように適応したとも解釈できると考えられる。なお、実際のヘビと同じように頭部と尾部が細くなるような質量分布の関節機構を製作し、それを用いてほふく推進時の発生トルクを計測すれば、さらに類似した傾向が観察されると思われる。

つぎに、基準ほふく推進中の第 10 関節 (yaw 軸)、第 11 関節 (pitch 軸) での駆動トルクの計測を行なった。その結果を Fig. 5.4 に示す。

図中の実線・一点鎖線は、各々の Yaw・Pitch の測定結果を、最小二乗法により近似した正弦波である。これらと比較すると角度は正弦波となるが、トルクは正弦波形とは異なる。しかし「周期関数となる」「高周波成分を除去する」2 点の理由から、比較を行うた

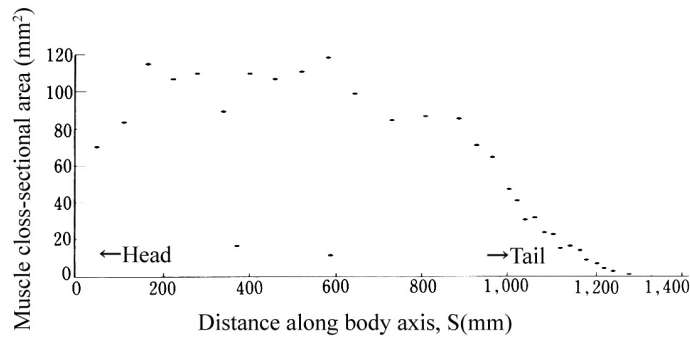


Fig. 5.3: Muscle cross-sectional area.

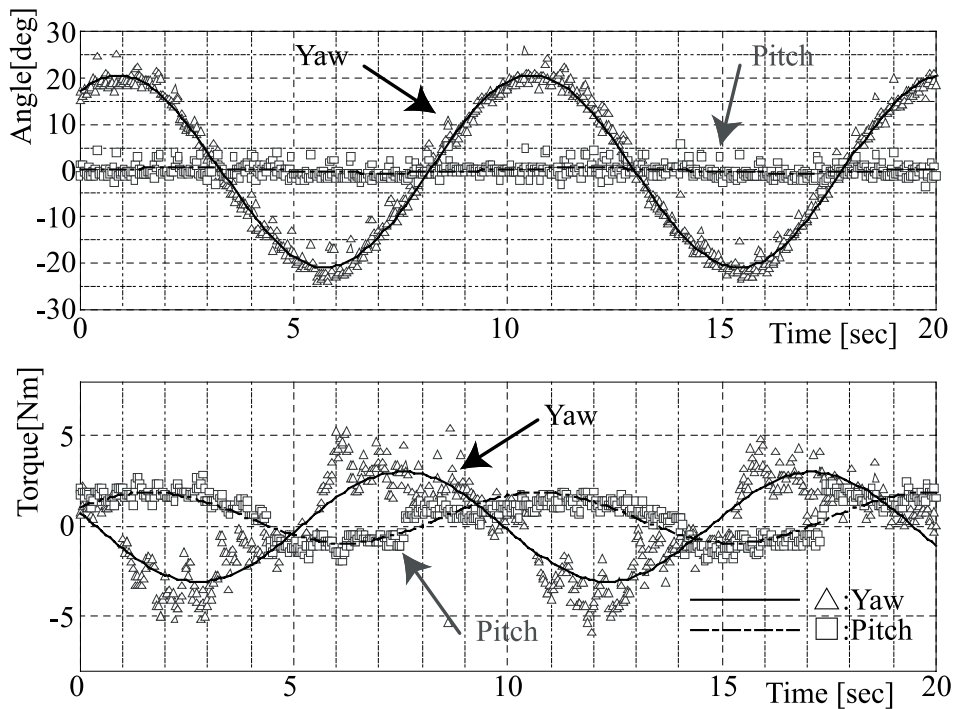


Fig. 5.4: Produced torque of Serpentine motion.

めに同様に正弦波近似とした．この近似は以下の実験でも行うことにする．「O点付近での駆動トルクが最大になり，P点付近で生成トルクが0になり，その方向が切り替わる」という実際のヘビの走行時の測定結果とは同じ傾向が観察できた．

また，基準ほふく推進では本来推進力を生成していないはずの pitch 軸も Fig. 5.4 のように若干トルクを発生することが分かった．そのため，pitch 軸モータに電源を投入しない基準ほふく推進の実験も行なった．この走行条件では，pitch 軸トルクがゼロになるだけでなく，yaw 軸トルク振幅も 3.0 [Nm] から 2.4 [Nm] に減少することが観測された．

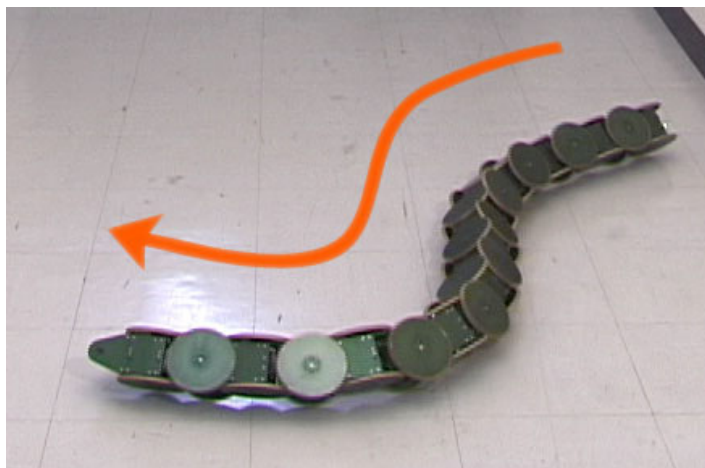


Fig. 5.5: Twisted Serpentine Locomotion of ACM-R3.

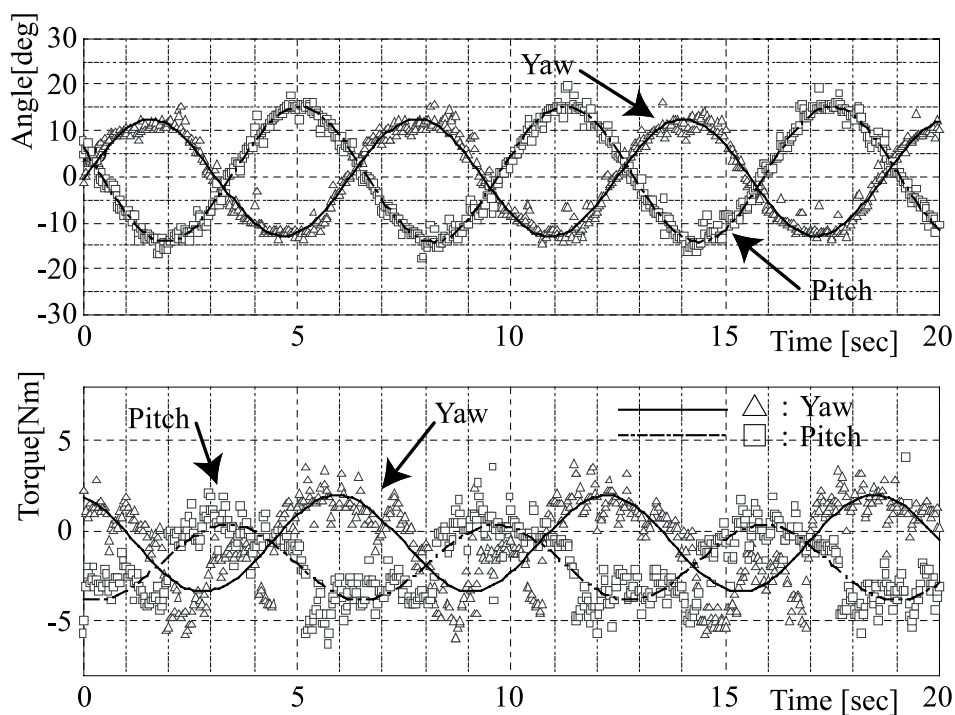


Fig. 5.6: Produced torque of Twisted Serpentine motion.

### 捻転型ほふく推進

基準ほふく推進に対して式 (3.17) で示す  $45^\circ$  の roll 軸操舵制御を行なった捻転型ほふく推進での実験を行なった。そのときの、体型を Fig. 5.5 に、そして第 10 関節 (yaw 軸)、第 11 関節 (pitch 軸) の駆動トルクの計測結果を Fig. 5.6 に示す。このような捻転

型ほふく推進は、すでに述べたように pitch・yaw 回転双方で推進力を配分できる干涉駆動が実現され、そのことで必要な最大発生トルクが抑えられる利点を有すると第 3.2.1 節で論じた。実際、基準ほふく推進では Fig. 5.4 に示されているように pitch 軸の生成トルクが 3.0[Nm]、yaw 軸生成トルクが 1.4[Nm] であったが、捻転型ほふく推進を行なうと Fig. 5.6 に示されているように pitch 軸の生成トルクが 2.1[Nm]、yaw 軸の生成トルクが 2.7[Nm] となっており、捻転型ほふく推進では yaw 軸の生成トルクは減少し、pitch 軸と yaw 軸に負担が分散されることが計測できた。

### Sinus-Lifting 推進

実際のへびで観察される Sinus-Lifting 推進の生成実験も行った。その体型概観を Fig. 5.7 に示す。

このとき式 (3.8) より導かれる  $\kappa_{pitch}^1(s)$  の補正値をかけない場合と、 $\kappa_{pitch}^1(s)$  の補正値を過剰にかけた場合の 2 通りについて駆動実験を行い、第 10 関節 (yaw 軸)、第 11 関節 (pitch 軸) での駆動トルクをそれぞれ計測した。その結果を Fig. 5.8 に示す。推進パラメータは各々以下のとおりであった。

- 補正なし : 
$$\begin{cases} \kappa_{yaw}^0 L = 3.6, \\ \kappa_{pitch}^0 L = 0.43, \kappa_{pitch}^1(s) L = 0.00 \end{cases}$$
- 補正あり : 
$$\begin{cases} \kappa_{yaw}^0 L = 3.7, \\ \kappa_{pitch}^0 L = 0.43, \kappa_{pitch}^1(s) L = 0.13 \end{cases}$$

Fig. 5.8 において、細かい周期が pitch 軸動作、その 2 倍の周期変動が yaw 軸動作に相当する。推進速度から算出した yaw 軸と pitch 軸の位相差は 0.7 秒であることから、yaw 軸 O 点で pitch 軸角が最小値、P 点で最大値をとることがわかる。また、各々そのときにトルク値も最大となっている。

補正値の有無について、補正なしの推進が  $\kappa_{pitch}^0 L = 0.43$  に対し、過剰補正時では  $\kappa_{pitch}^0 L = 0.63$  に相当する反り上がりとなっていた。それでも Fig. 5.8 によると、Yaw 軸振幅誤差は 2% 未満、正弦波近似が最適近似ではないが Pitch 軸振幅誤差は 7% 程度、トルク振幅中心のずれは 0.37[Nm] であり、推進形状・生成トルク共にあまり差は出ていないことが判った。

また yaw 軸トルク振幅は 2.4[Nm] であり、これに比べて Pitch 軸トルク振幅が 3.4[Nm] と圧倒的に大きくなっていることが確認されたが、基準ほふく推進の yaw 軸トルク振幅 3.0[Nm] に比べては小さかった。

また ACM-R3 による Sinus-Lifting 推進を、摩擦係数の低い走行面と、浅い芝生や深い

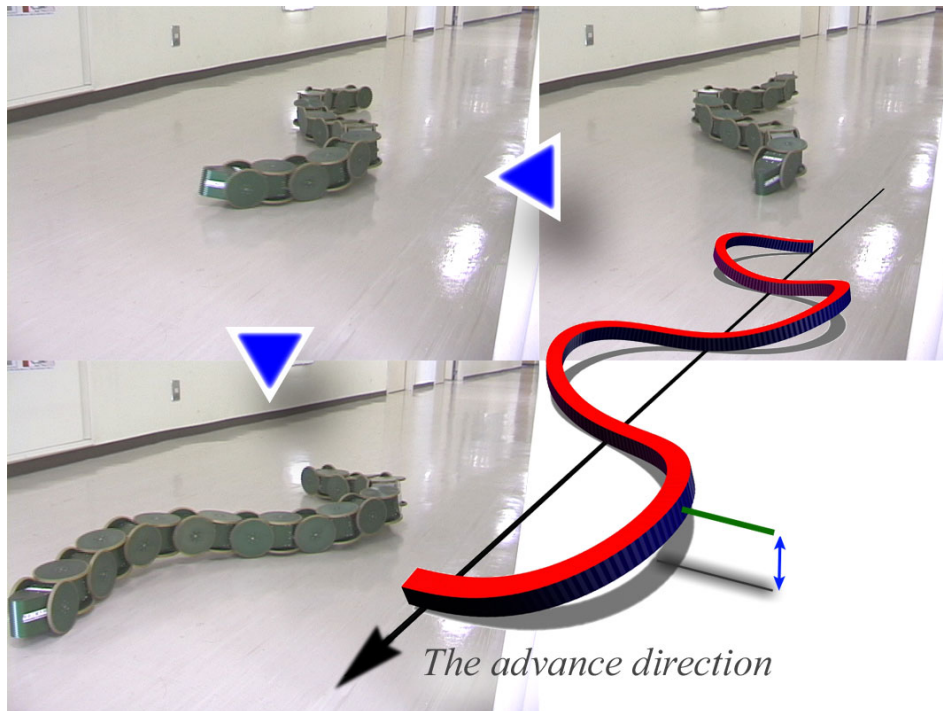


Fig. 5.7: Sinus-Lifting motion of ACM-R3.

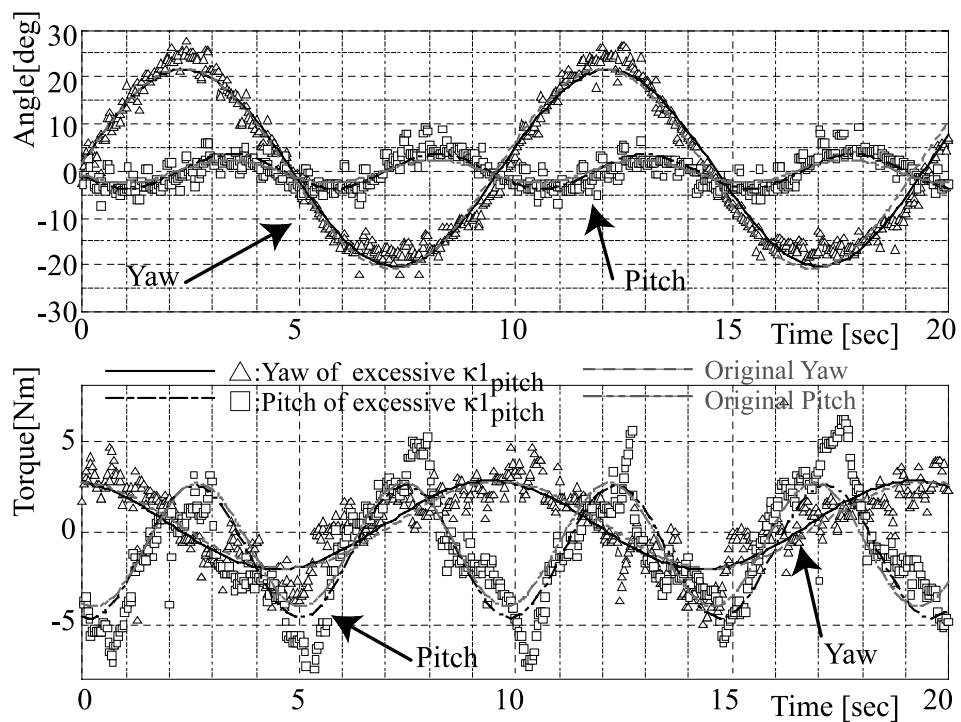


Fig. 5.8: Produced torque of Sinus-Lifting motion.

絨毯など，平面的ではあるが車輪が少量沈むような高い摩擦係数を持つ走行面において実施した．その結果，Sinus-Lifting 推進は通常の基準ほふく推進と比較して，低摩擦面ではよりすべりが少なく，高摩擦面ではより走行面からの抵抗を受けずに滑らかに推進できるという結果が得られた．

### 5.1.2 推進実験の考察

#### 基準ほふく推進

Fig. 5.4 と Fig. 5.6 と Fig. 5.8 とに示す基準ほふく推進，捻転型ほふく推進，そして Sinus-Lifting 推進の比較は，それぞれの走行形状と走行条件はほぼ同一であり単位節の計測トルクが総合効率にほぼ比例すると考えられるため，出力トルクの値で特性を比較できると考えられる．比較の結果基準ほふく推進が最も推進効率が良いことが分かった．

また，基準ほふく推進では Fig. 5.4 の生成トルクは矩形波状となったが，その詳細なメカニズムはまだ解析できていない．しかし使用した駆動モータは，回転速度や出力トルクにかかわらず，回転方向と逆向きに 1.2[Nm] 程度の抵抗トルクを受けるものであることが基礎実験で確認できている．そのためその抵抗成分がこのような矩形型のトルク分布を生成する一つの要因ではないかと筆者らは推定している．

基準ほふく推進中に，推進に寄与しないはずの Pitch 軸方向に多少のトルクが生成され，Pitch 軸駆動系の電源を落とすと若干 Yaw 軸のトルクも減少する傾向が見られたのは，移動中に発生する運動と指令値の誤差が生成した現象であると予測される．今後さらに凹凸のある走行面でのほふく推進などを実現してゆくには，この効果を考慮してインピーダンス制御などを導入することが必要になると予測される．

#### 捻転型ほふく推進

第 3.2.1 節で述べたように， $45^\circ$  捻転ほふく推進では通常の基準ほふく推進と比較すると，pitch 軸，yaw 軸両者が推進力を生成でき，基準ほふく推進に比べて生成可能な最大推進トルクが倍になることから，生成可能なトルクや回転速度に上限がある機械モデルのための走行法としては重要な走行法であると考えられる．

ただし，実測すると  $45^\circ$  捻転ほふく推進は基準ほふく推進と比較すると，約 1 割ほど多く推進トルクを必要とした．これは以下の現象に起因している筆者らは考えている．ACM R3 は Fig. 4.3(2) のように pitch 軸と yaw 軸を交互に配置した構造であるため，捻転角  $\psi_{roll}^1(t) = 45^\circ$  の状態でそれぞれの軸を屈曲させると体幹軸は推進平面内に留めることが出来ず，Fig. 5.9 のように上下に若干ぶれる．このぶれは大きく屈曲する P 点部で

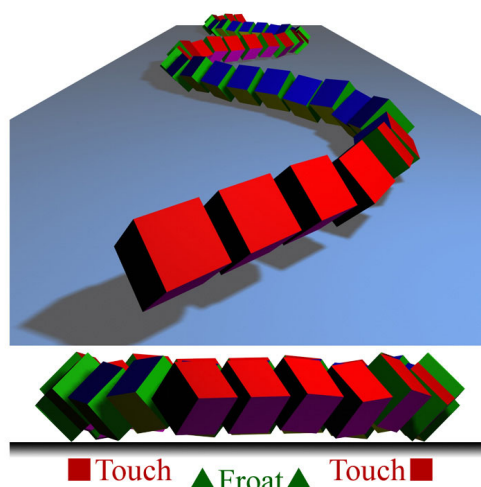


Fig. 5.9: Running Surface shape of Twisted Serpentine.

最も大きく O 点付近では少ない．そのため最も推進力に寄与する O 点部が浮く傾向になり，この効果が推進効率を落とし多目にトルクを必要とする．

なお，この効果は Fig. 4.3(1) のような機構であればもちろん生じない．Fig. 4.3(2) の節構成の場合には Sinus-Lifting 推進の制御も組み合わせると，体幹全体をほぼ均一か若干 P 点部を反り上げる体型を取らすことで逃げられると思われる．この走行法の妥当性は今後実験的に検討してゆく予定である．

### Sinus-Lifting 推進

Sinus-Lifting 推進は，基準ほふく推進と比較すると，yaw 軸まわりのトルク振幅は 2 割強の減少がみられたが，pitch 軸まわりのトルク振幅は 1.4[Nm] であったものが yaw 軸の 2.4 倍程度まで上昇しており，総合的な推進効率としては全推進中最も悪い推進法であった．しかし，摩擦係数の低い走行面や，浅い芝生や深い絨毯などの通常の基準ほふく推進では移動できない環境でも，この Sinus-Lifting 推進なら推進できる場合もあることが観察できた．これは，1) 実際のヘビと同様に，もっとも推進力を生成するのに寄与する率の高い O 点付近に自重を集中できる．2) 絨毯面などのやわらかい走行面では，体幹全体を絨毯に接触させるときの摩擦力が大きいため，体の一部のみを接触させるという体型の方が摩擦による抵抗力を受け難い．そして，3) 離散長さの機械モデルが絨毯面などのやわらかい走行面を移動するときには，各節は必ずしも連続的な軌道を辿れず，左右に微妙に突き出した動きを行なう．そしてこの効果は屈曲角度が大きい P 点部により大きく生まれる．そのため P 点部をそらせる体型の方が抵抗を減らせる，などの理由によると筆者らは考えている．

Sinus-Lifting 推進は、体幹を浮かせるために多くのエネルギーが必要で、機械モデルではあまり実用的でないとして筆者らは最初考えていた。しかし、この Sinus-Lifting 推進体型でなければ前進が出来ない路面環境があることから、Sinus-Lifting 推進は工学的にもその重要性が高いことが確認出来た。

## 5.2 Side-Winding 推進実験

実際のヘビで観察される Sinus-Lifting 推進の生成実験を行った。3.1.4 節で述べたように、pitch 軸動作は浮く程度でかまわないため、極力  $\kappa_{yaw}^0 \gg \kappa_{pitch}^0 > 0$ ,  $\kappa_{pitch}^0 \approx 0$  となる形で実験を試みる。

式 (3.10) の成す形状では Fig. 3.10 に示されるとおり、ほぼ楕円柱曲面をもって接地することになる。このとき全体長に対して 2 周期以上の波形を確保しなければ、接地点数が 1 となり安定して運動することができない。さらに先述の Sinus-Lifting 推進中の捻転推進の状態のように楕円柱曲面に沿って揺動を起こしてしまう恐れがある。特に前者の問題については、節数が限られている実機では必ずと離散化問題の影響を大きくしてしまう。これらの問題から、式 (3.10) そのままの制御式をそのまま適用することは実用的ではない。

実機に対し多周期適用することでも Side-Winding 推進を実現することは可能である。例えば ACM-R3 の場合、4 節 1 周期での各節振幅は Pitch $10^\circ$ 、Yaw $30^\circ$  のとき補正角  $1.3^\circ$  となる。しかしこれでは推進距離があまり大きく取れない上に、離散化の影響はかなり大きい。また、3.2.4 で述べたように、数式上は螺旋推進と同様であるため、どちらかという Lateral-Walking 推進同等の動作原理による安定化となるため差別化が図れない。

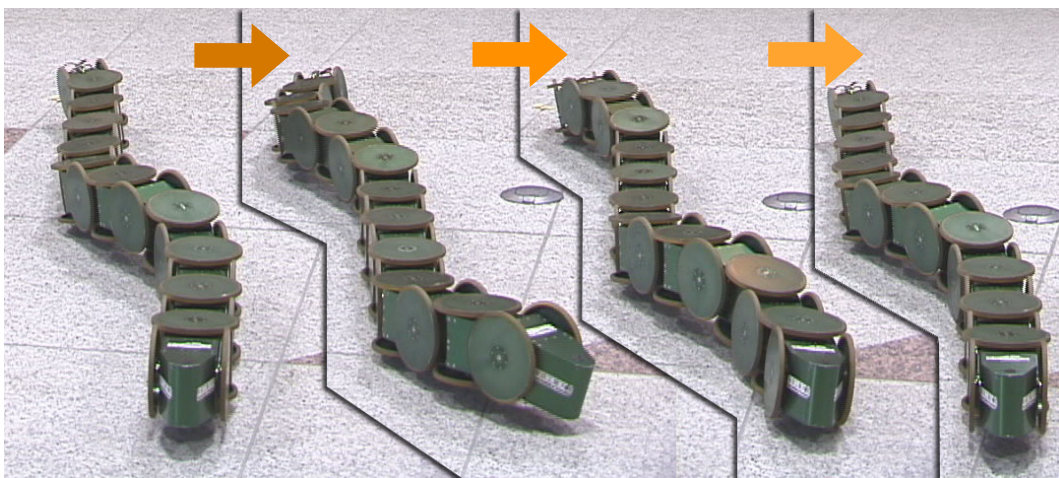


Fig. 5.10: The intermittent side-winding locomotion.

これらの問題を避けるために、Side-Winding を 1 周期分生成することに若干の間歇状態を割り込ませる手法を提案する。間歇状態にある節は、 $\kappa_{yaw}^0 = \kappa_{pitch}^0 = 0$  とし、直線形状とする。こうすることで、走行面に対して曲面で接することを防ぐことが出来、理論式での揺動を抑えることが可能となる。そればかりか、安定して接地しているために、全長に対する周期数も 2 周期以上という制約がなくなる。この方法を用いることで、実機でも安定して移動できることを確認した。

理論的には接地面に対する摩擦係数は一様に高くても問題なく移動できるが、グライド推進のための受動車輪を取り付けた実験においても（体幹軸方向の摩擦係数が少ない状態においても）、側面方向移動が可能であることを確認した。Fig. 5.10 は間歇 Side-Winding 推進で受動車輪をつけたときの移動風景である。受動車輪がある場合、理論的にも接地点接線方向に対し拘束力を持たない状態となるが、当実験においても、進行波形の伝播速度を速めた場合には、やはり体幹軸方向に対する滑走が生じることを確認した。先のねじれ成分問題に加え節数不足による離散化問題に起因して、接地状態に遷移する節が、接地点に対して平行ではなく進入角度をもち、微小なグライド推進が発生したためと考えられる。最後に、小波形 Side-Winding 推進、および間歇 Side-Winding 推進に対して捻転推進を適用する実験も試み、それぞれ Lateral-Walking 推進、Lateral-Rolling 推進として実現可能であることも確認した。

### 5.3 Pedal-Waving 各推進実験

Pedal-Waving 推進では、原理的に体幹軸方向に滑空する索状能動体では実現できないため、大型受動車輪をはずしての実験となる。

#### 5.3.1 直進推進実験

直進に進む実験結果を Fig. 5.11 に示す。この実験において、全体幹長に対し 3 周期の波形を適用している。非常にゆっくりした推進ではあるが、前進している様子が確認できた。ACM-R3 では高々 10 自由度を安定のため 3 周期に割り当てているため、到底滑らかに推進しているとは言い難い。この推進法は宙に浮かせている節長が長いほど推進速度も速いため、より効率よく推進させるためには、より多自由度構成の索状能動体で行うことがよいと判断する。

#### 5.3.2 操舵推進実験

式 (3.13) を ACM-R3 に適用し、Pedal-Waving 推進中に操舵をする実験を行った (Fig.5.12)。ただし、外環境に対するセンサを取り付けていないため、推進速度を計測し

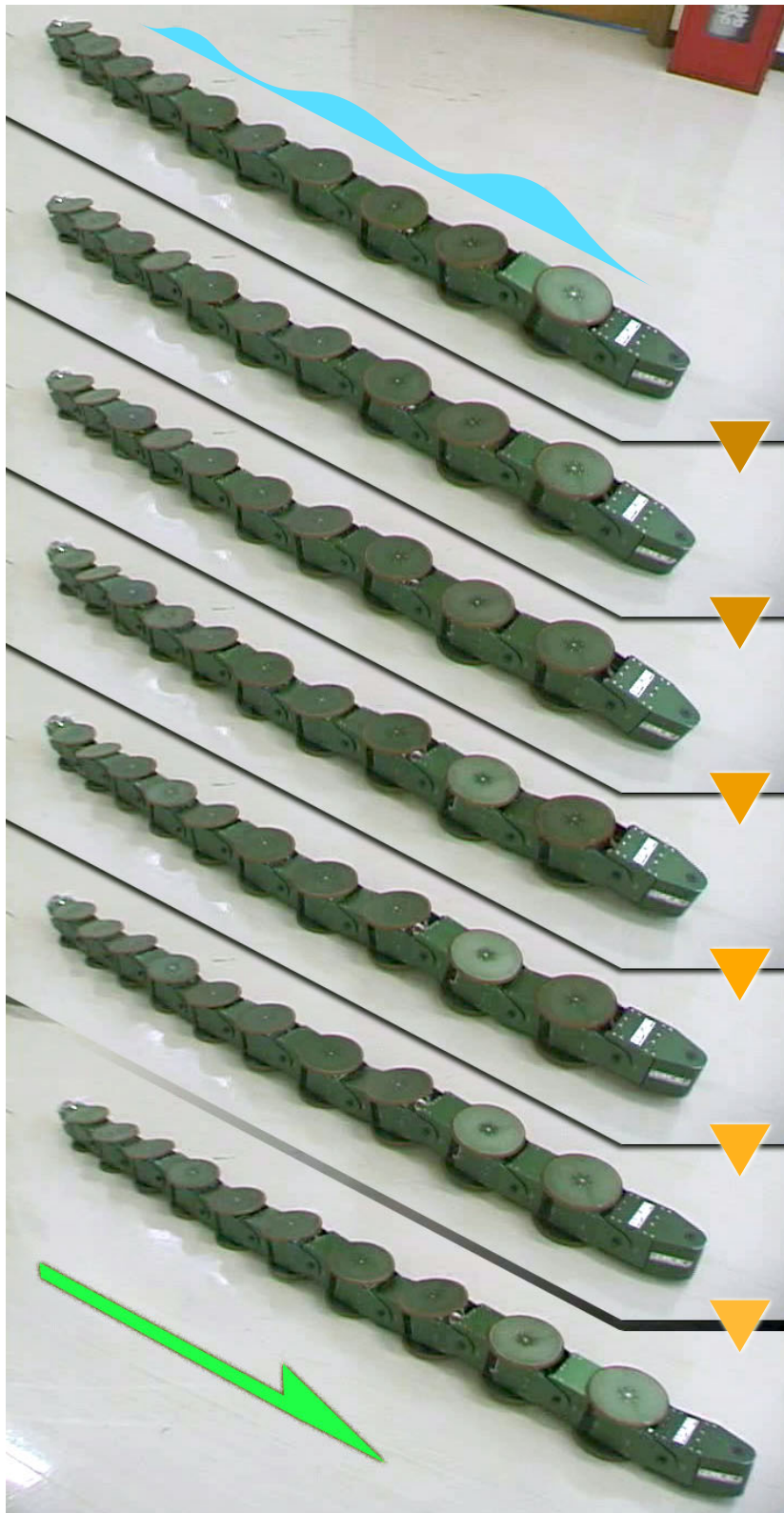


Fig. 5.11: The Pedal-Waving locomotion.

での自動操舵は行えなかった．そのため，波形送り速度と操舵送り速度の比率を目視により設定して操舵を行っており，あまり正確な推進速度比ではないものの，操舵はできていることが確認できた．しかし，Pedal-Waving 推進では振幅や周期によって推進速度も変化するため，可能ならば外環境との相対速度を自動的に取得できるようなセンサを併用して操舵を行うことが望ましいと考える．

### 5.3.3 Pedal-Waving 側方移動実験

3.3.4 節にて述べた通り，任意の空間曲線形状をとる索状能動体において，全方向移動を提示できる可能性をもつ制御法の最も基礎となる Pedal-Waving 推進と Lateral-Walking 推進の併用について実験を行った (Fig.5.13)．

結果，全体幹長に対し 3 周期に相当する小型波形を適用した場合，Pedal-Waving 推進と Lateral-Walking 推進とのどちらにも適用が可能であったことが判った．そのため，Pedal-Waving 推進による体幹軸方向移動，および Lateral-Walking 推進による側面方向移動のいずれも切り替え運用が可能であることを確認した．ただし，この小型波形が走行面と平行な状態になる瞬間は，Pedal-Waving 運動による推進はできないため，この 2 波合成による全方向移動を計画する際には注意が必要であることが実験によって確かめられた．

## 5.4 捻転合成推進実験

以下に，捻転制御に由来する推進実験について述べる．捻転推進は，受動車輪の有無にかかわらず，およそ全ての索状能動体で実現が可能である．それゆえに汎用的な扱いが期待できる．

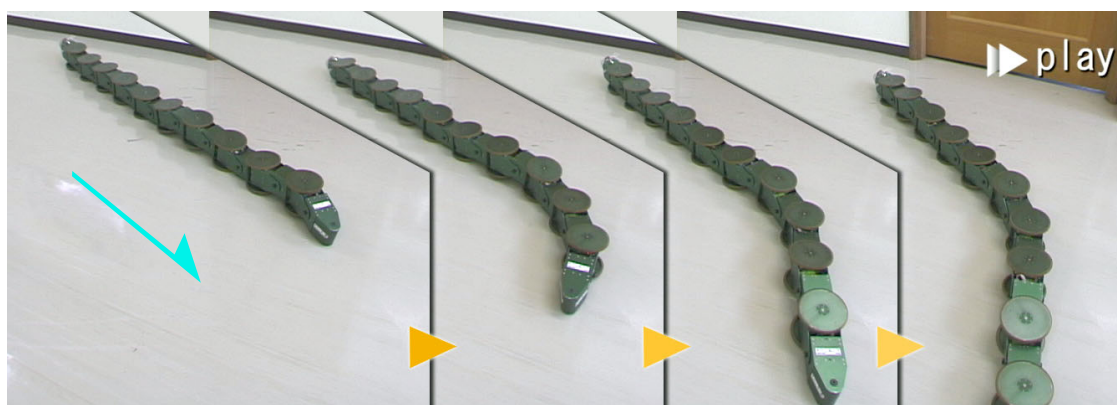


Fig. 5.12: The Pedal-Waving steering locomotion.

### 5.4.1 Lateral-Rolling 推進

円弧状での捻転運動を Fig. 5.14 に示す．シフト制御によるほふく推進は，曲率変化がないと推進が出来ないが，捻転推進は曲率が存在すれば推進することが可能である．この差異が現れる形状として，円弧形状が挙げられる．ただし，実運用上で問題となりうる状況は非常に限定的である．例えば，毛足の深い絨毯などでシフト制御推進の負荷が大きい場合，曲率勾配の小さい状況では推進力を発生するのに大きな出力抵抗を受ける．この際に捻転運動を利用してより抵抗の少ない場所へ移動する，もしくは前述の捻転型ほふく推進形状になり，各軸のアクチュエータへの負担を軽減する，などである．

### 5.4.2 ほふく推進の捻転動作

3.2.1 節にあるような，ほふく推進中に捻転動作を行った (Fig.5.15) ．

また，捻転推進とほふく推進の同時生成も可能であることを確認した (Fig.5.16) ．

同時生成が可能なので，使い方としては傾斜面や凹凸面を走行する際，車輪が方当たりしないよう，もしくは機体を水平に保つよう制御することが可能である．

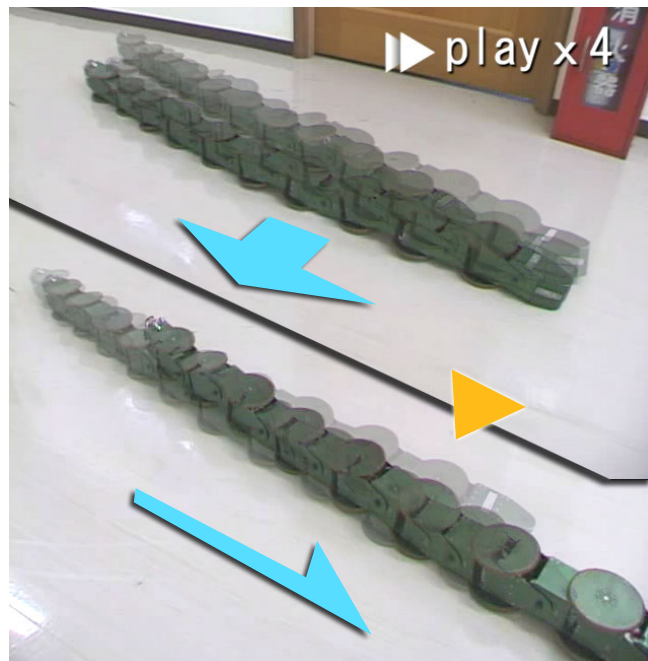


Fig. 5.13: The Lateral-Walking and Pedal-Waving locomotion.

### 5.4.3 Sinus-Lifting 推進の捻転動作

3.2.2 節にあるように，Sinus-Lifting 推進中に捻転動作を行った (Fig.5.17) .

任意のタイミングで，ほふく推進軸と直交方向に移動可能であることを確認した．Sinus-Lifting の走行面に対する全体形状は，推進軸に対して平行な楕円柱的曲面をなす．このため，捻転推進の推進方向に対して前後動の揺動を伴う可能性があり，実機においてもこの揺動運動を伴うケースを確認した．このことから，Sinus-Lifting 推進で高速移動している最中に捻転推進を行うことは，可能ではあるが揺動が起こる場合があり，悪くすると走行接地点を変化させてしまい走行効率の低下を招く恐れがあるため，望ましくないという知見を得た．

### 5.4.4 LiftRolling 推進

3.2.3 節にあるように，Lift-Rolling 推進実験を行った (Fig.5.18) .

予測されたとおり，揺動のない安定した推進が可能であることを確認した．ただし，通常の Sinus-Lifting 推進同様 pitch 軸曲率を上げるほど捻転時に発生する角度変位も増加するため，速度を出すことは難しくなる．

### 5.4.5 Side-Winding 推進の捻転動作

Side-Winding 推進中に Lift-Rolling 推進を行えるかどうかの実験を行った．

その結果，予測されたとおり間歇状態の Side-Winding 推進中では揺動のない安定した推進が可能であることを確認した．ただし，周期を多く適用した場合の捻転動作は，

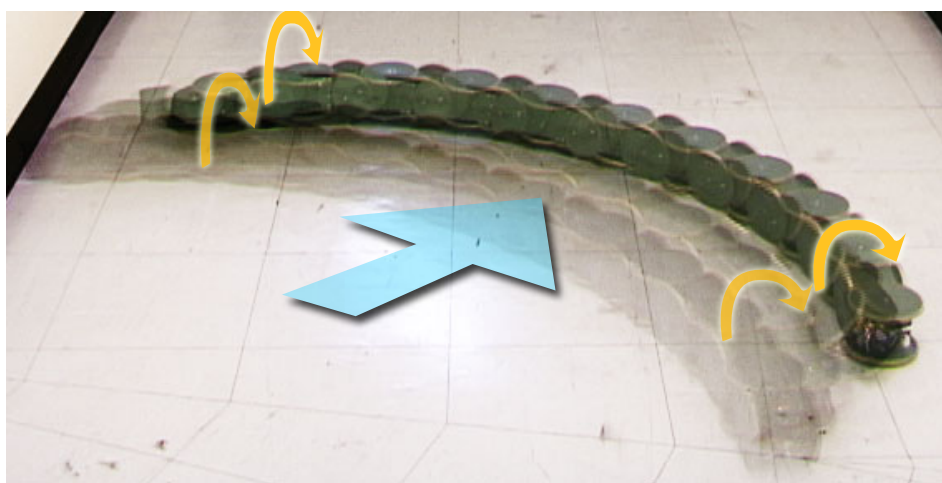


Fig. 5.14: The Lateral-Rolling locomotion arch type.

Lateral-Walking 動作となってしまうことも判った．安定余裕的に重なりやすい推進であるために，明示的に Lateral-Rolling か Lateral-Walking かを使い分けたいときは注意を要する．

## 5.5 部分適用 Lateral-Walking 合成推進

ここではまず合成の基本となる Lateral-Walking 推進について推進実験を行い，3.3 で述べたように Lateral-Walking 推進を微小補助波形として各種推進法に部分的に適用する実験を試みた．

### 5.5.1 Lateral-Walking 推進

3.3.1 節に述べたとおりの運動例を以下に示す (Fig.5.19) ．

実機としての最大の特徴は，回転運動を伴わないため体幹軸に対し滑走方向を一方向にしか保たない索状能動体であっても実現が可能であるという点である．通常の捻転動作は，ACM-R3 のように体幹軸まわり全ての向きに対し接地しうることを前提として設計されている索状能動体でなければ，十分に活用することは難しいと考えられる．無論，転倒時の鉛直方向復帰動作として利用することは可能であるが，僅かながら移動させるという行動は体幹軸まわりに僅かに回転したままになってしまうため，実用的ではない．このような用途に対しては，Lateral-Walking 動作による調整が最も効果的である．

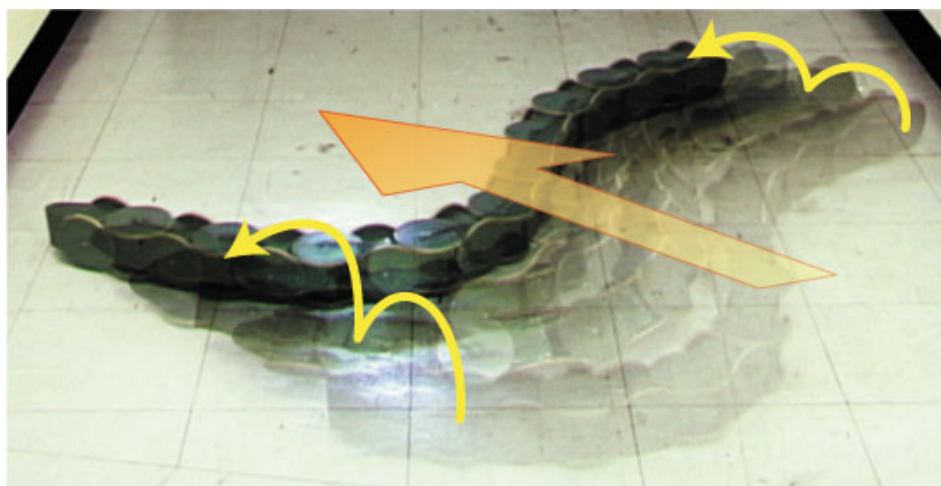


Fig. 5.15: The Lateral-Rolling locomotion Serpentine type.

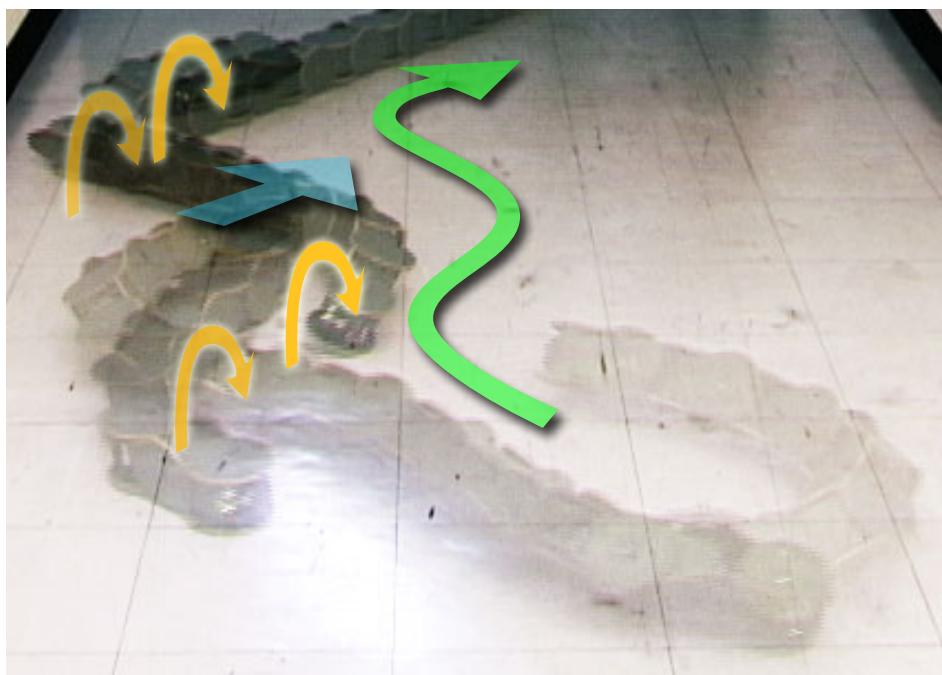


Fig. 5.16: The Lean Serpentine locomotion.

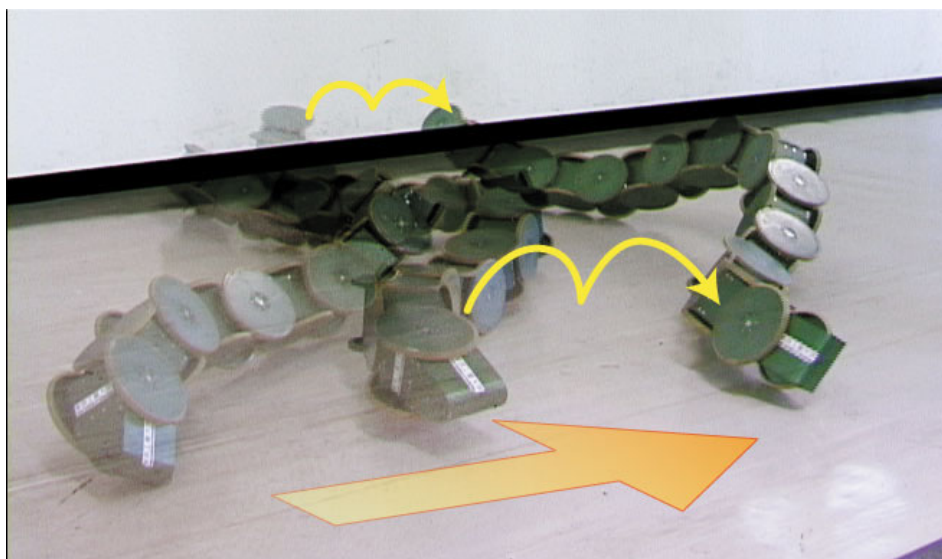


Fig. 5.17: The Lateral-Rolling in Sinus-Lifting posture.

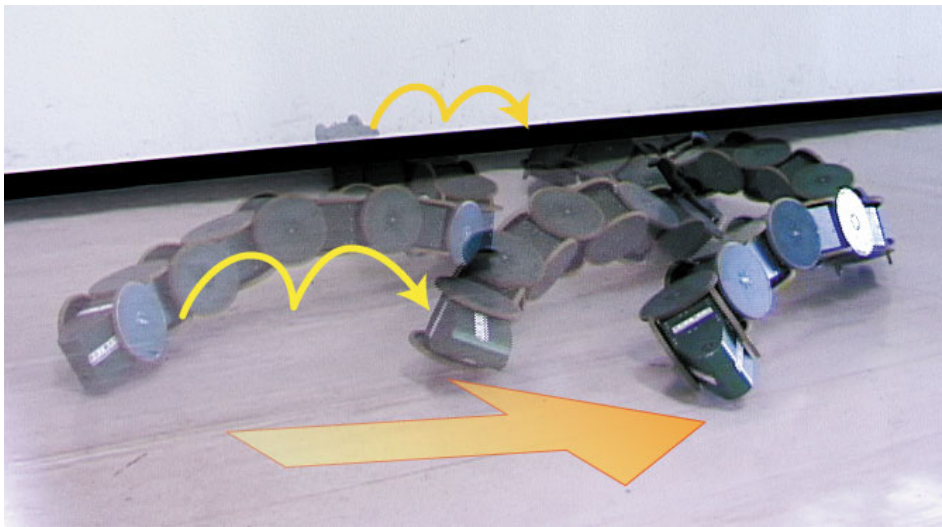


Fig. 5.18: The Lift-Rolling locomotion.

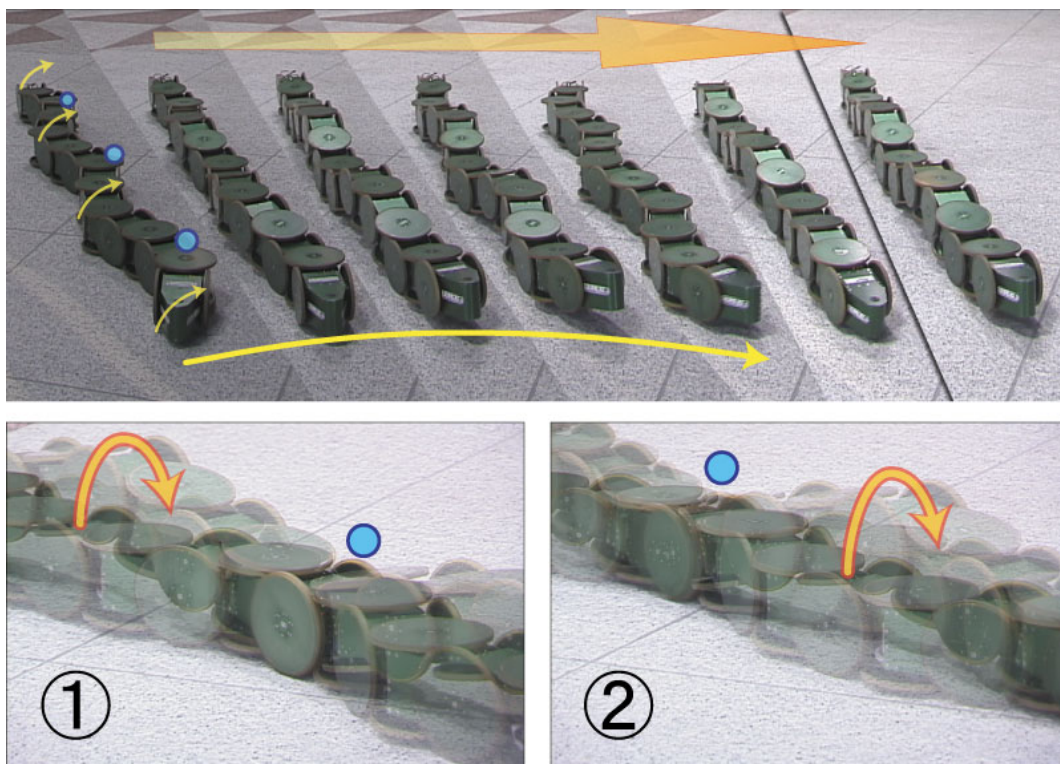


Fig. 5.19: The Lateral-Walking locomotion.

### 5.5.2 ほふく推進との合成

主波形成分としてほふく推進を行っている最中に，微小波形 Lateral-Walking 推進を適用する実験を行った (Fig.5.20) .

図からわかるように，任意曲線とともに適用出来ることを確認できた .

#### 傾斜したほふく推進との合成

さらに，捻転により 45 度傾斜させたほふく推進形状においても，同様の実験を行った (Fig.5.20) .

この運動においても，ACM-R3 の離散化による影響は否めないものの，運動自体は実現できていることを確認した .

#### ほふく形状での Lateral-Rolling 推進との合成

ほふく推進形状の状態では，Lateral-Rolling 推進と Lateral-Walking 推進とを同時に生成する実験を行った (Fig.5.22) .

Lateral-Walking の波形によって接地点が減少し，Lateral-Rolling 推進が少々不安定動作を起こしていたものの，実現は可能であることが確認できた . 予測通り Lateral-Rolling の推進速度が Lateral-Walking の推進速度を大きく超えてしまっていたため，同時動作に

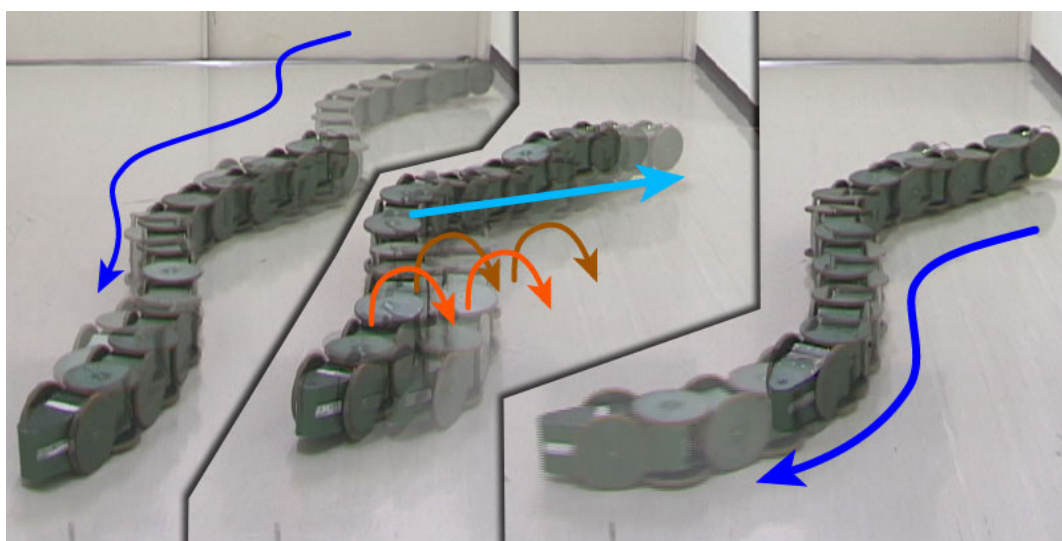


Fig. 5.20: The Lateral-Walking locomotion.

おいての Lateral-Walking の有用性はほとんどないことも確認できた。

### 5.5.3 Lateral-Walking 推進部分適用実験

3.3.3 節で論じた合成を実験により検証した。式 (3.22) においては  $E_{LW_i}$  の正負にのみ言及したが、ここでは全長 1 周期の主波形に対し、全長 3 周期分の小波形を Lateral-Walking 推進に割り当てて実験を行う。また、この小波形の捻転成分は同期をとるものとし下記の式が付加的に成立するよう配慮する。

$$\begin{bmatrix} E_{LW1} \\ E_{LW2} \\ E_{LW3} \end{bmatrix} = E(\psi_{roll}^1(t)) \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

ここで、 $(a, b, c)^T$  によって分類を行う。 $(a, b, c)^T = (1, 1, 1)^T$  であれば Fig. 3.19(a) に相当する通常の Lateral-Walking 推進相当であり、

$(a, b, c)^T = (1, -1, 1)^T$  であれば Fig. 3.19(b) に相当する斜め方向への Lateral-Walking 推進相当であり、

$(a, b, c)^T = (1, 0, -1)^T$  であれば Fig. 3.19(c) に相当する超信地旋回の Lateral-Walking 推進相当である。

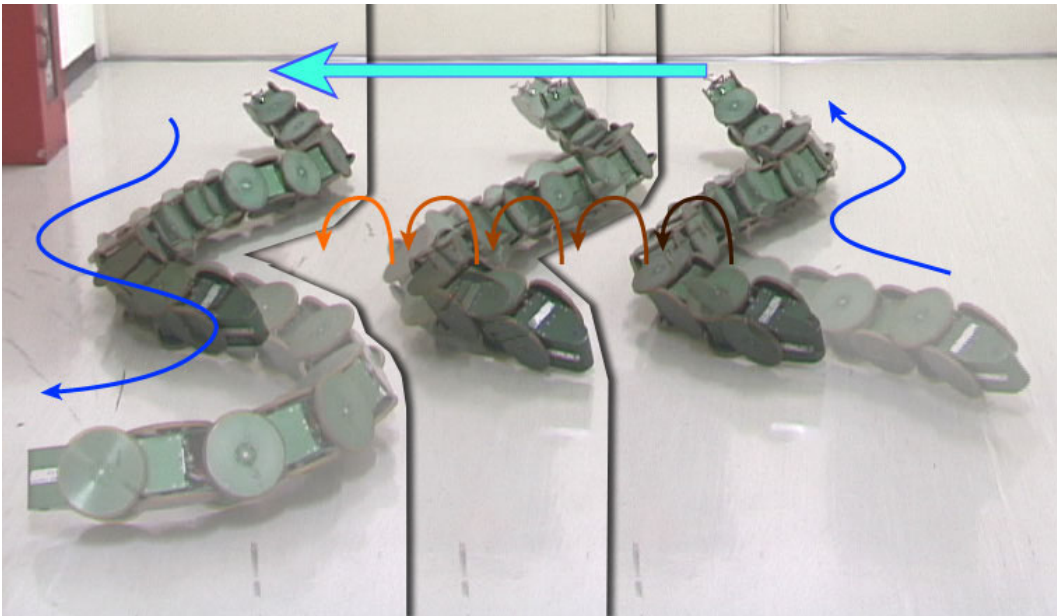


Fig. 5.21: The Lateral-Walking locomotion in leaning posture.

### $(1, 0, -1)^T$ 型の直線形状適用実験

式 (3.22) において,  $(1, 0, -1)^T$  型, つまり超信地旋回型についての実験を行う. 1 周期を 3 分割した適用実験において, 際に最も旋回運動がしやすいような推進力を発生する体幹形状は直線形状であるため, まずはこれに対して適用実験を行った (Fig.5.23). 実験の結果, 想定どおり超信地旋回が可能であることを確認した.

### $(1, 0, -1)^T$ 型のほふく推進形状適用実験

式 (3.22) において, 引き続き  $(1, 0, -1)^T$  型, つまり超信地旋回型についての実験を行う (Fig.5.24).

先の状態に比べ, 両端部での推進力発生方向が外周側に向くため, 旋回運動の効率がおちることは明白であり, そのほかの影響が出るかどうか問題であった. 実験の結果, 若干体幹曲線が伸縮するような動作を伴って超信地旋回が可能であることを確認した. 動作

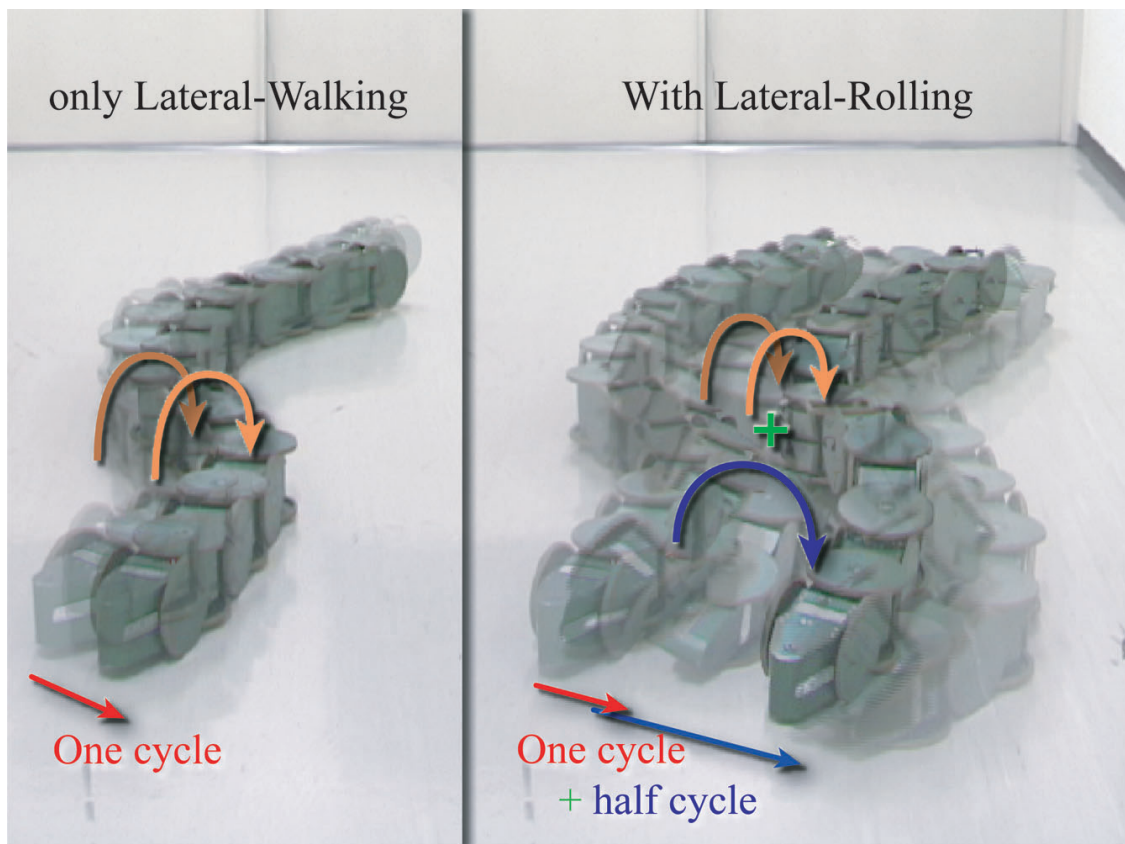


Fig. 5.22: The Lateral-Walking and Lateral-Rolling in serpentine.

を見る限り，体幹軸に沿って配置された大型受動車輪の摩擦比が効果的に働いているようにも見受けられた．

#### $(1, -1, 1)^T$ 型のほふく推進形状適用実験

式 (3.22) において，最後に  $(1, -1, 1)^T$  型，つまり斜め方向（準ほふく推進方向）への並進型についての実験を行う (Fig.5.25)．

実験の結果，ほぼ想定通りの方向に，あたかも人がほふく前進をするかのように並進できることを確認した．

以上の実験を通して，Lateral-Walking 推進は計を部分適用することで従来にない移動法を合成することが可能であることが確認できた．移動速度は微々たるものであり，この運動をほふく運動のような主的移動には向いていないと思われる．主的移動波形との波長比は，最低でも 3 倍あれば実現は可能であることも確認できた．ただしこの値以上の比は当実験機で検証することは難しく，現段階において微小波形が主波形に対し少なからず影

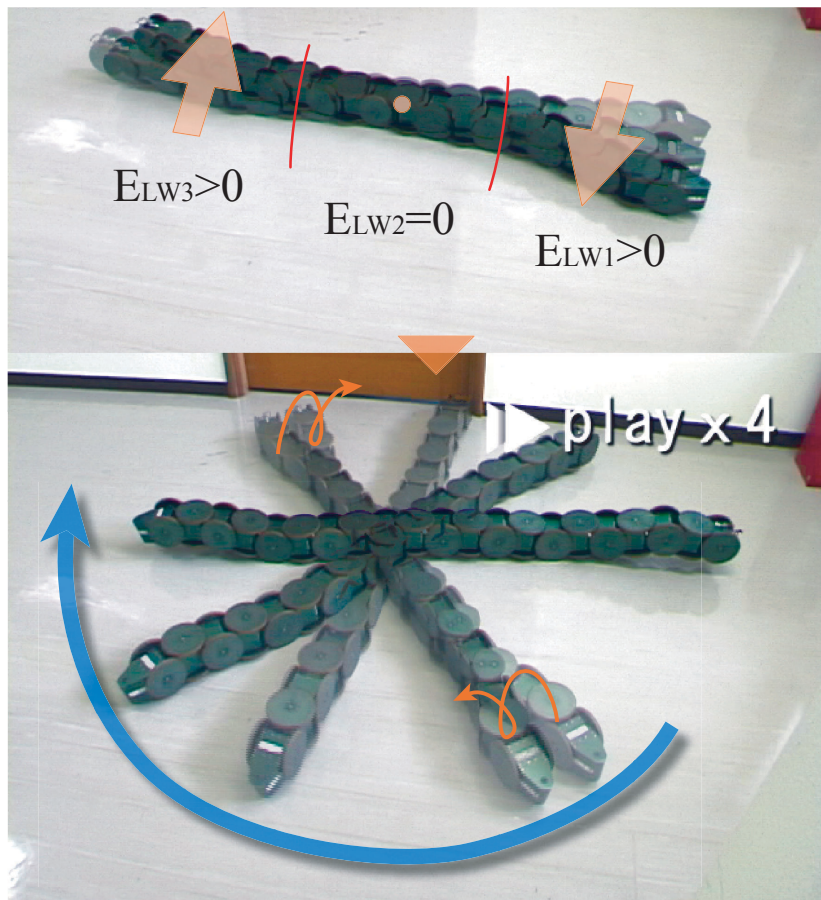


Fig. 5.23: The Rotational Lateral-Walking mixture experiment for straight posture.

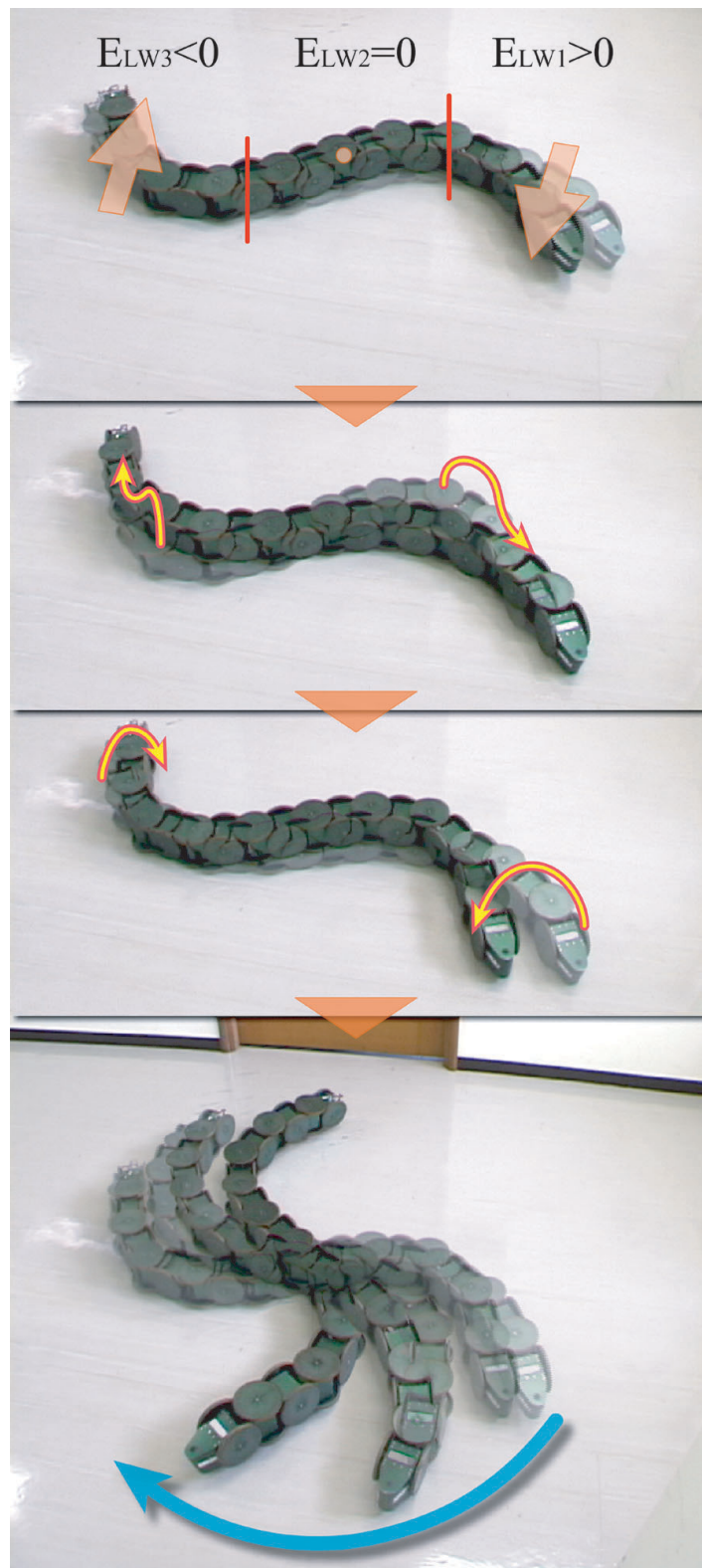


Fig. 5.24: The Rotational Lateral-Walking mixture experiment for serpentine posture.

響を与えていることをここに明記しておく。

これらの運動は、いずれも接地状態にある体幹に対し適用しないと意味がないため、一見応用範囲が狭いように思われるが、3次元的な凹凸面を移動する際に接地条件が判らないままで移動することはほぼあり得ないため、この条件はさほど困難ではないと考える。生成される移動方向の制約が少ないこと、あくまでも局所運動であり全体波形に対して影響が少ないことなどの優れた特徴を利用することで、3次元的な滑走面における行動選択肢の多様化が期待できる。

## 5.6 まとめ

この章では、第4章で論じ、開発した3DACM実験機「ACM-R3」を用いて第3章で論じた各種推進について検証実験を行った。

シフト制御運動の推進実験において、基礎ほふく推進、捻転型ほふく推進、Sinus-Lifting 推進の3種については、より詳細にモータ電流計測実験を行った。基準ほふく推進に比べ、他2種はいずれもより多くエネルギーを要していたものの、捻転型ほふく推進は pitch・yaw 両アクチュエータ個々の負担は軽減されていることが確認された。また Sinus-Lifting 推進においては摩擦係数の低い走行面や、浅い芝生や深い絨毯などの通常の基準ほふく推進では移動できない環境でも移動できることがあり、工学的に興味深い移動であることが判った。Side-Winding 推進では、間歇的に波形を送ることで安定した推進が可能であることが判り、また受動車輪を装備した状態でも移動が可能であることが確認できた。Pedal-Waving 推進では周期の異なる波形を合成することで操舵を行うことが可能であることが判り、また微小振幅波形において捻転運動を行うことで Lateral-Walking 推進を生成し、全方向に並進することができることを確認した。

捻転合成推進実験において、ほぼ全てのシフト制御推進に対し Lateral-Rolling 推進合

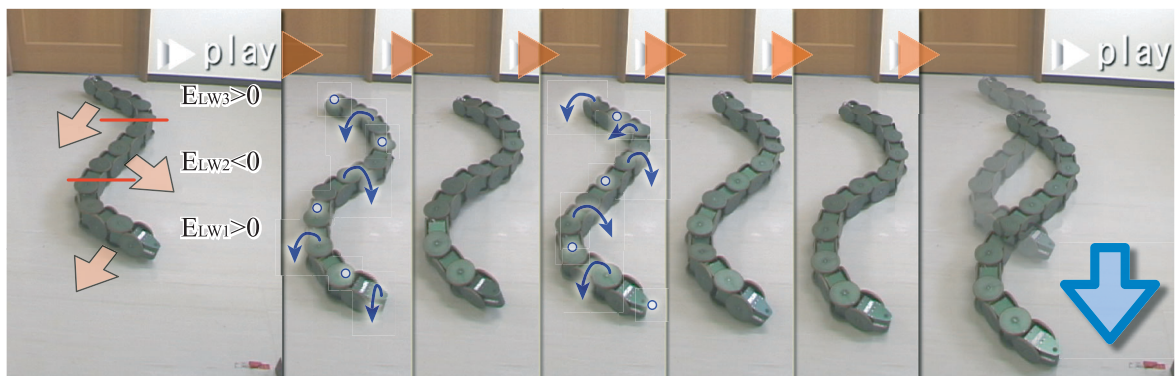


Fig. 5.25: The Rotational Lateral-Walking mixture experiment for serpentine posture.

成が可能であることが確認できた。また、Lift-Rolling 推進も可能であるが、節数制限によりぎこちなさが認められた。

振幅の小さい状況で Lateral-Walking 推進が可能であることを確認し、これを微小波形とし、ほふく推進形状・傾斜ほふく推進形状において合成可能であることを確認した。また、ほふく推進形状に対し部分的に適応し、捻転方向により推進力発生方向を制御し、例えば全方向に移動することが可能であることを示し、行動選択肢の多様化など応用性の高い手法であることを確かめた。

## 第 6 章

# 3DACM 設計の展開

3DACM の実機モデルとして開発した ACM-R3 は、これまで述べてきた種々の実験のほかにも、作成直後から現在に至るまで国内外を問わず一般の方々に推進法の動作デモンストレーションを行う機会に多く恵まれた。主な機会を以下に抜粋する。

- ・ 東京工業大学 文化祭 (工大祭)「先端口ボットの世界」(開催年)
- ・ 2001-11-16 ~ 2001-11-25 ロボフェスタ神奈川 2001 横浜会場
- ・ 2002-03-28 ~ 2002-03-31 ROBODEX2002
- ・ 2002-11-02 ~ 2002-11-04 ロボットフェスティバル 2002(ロボットグランプリ併設)
- ・ 2003-03-31 ~ 2003-04-06 ROBODEX2003
- ・ 2003-09-22 ~ 2003-10-05 Thailand Science-Tech 2003
- ・ 2003-11-08 ~ 2003-11-09 第 7 回ロボットグランプリ併設展示
- ・ 2004-05-28 第 26 回日本ロボット学会シンポジウム ロボットの作り方
- ・ 2004-06-20 ロボティクスメカトロニクス講演会 2004 発表にて
- ・ 2004-09-05 ICAM'04 Exhibition(旭川)
- ・ 2005-01-09 ~ 2005-01-22 イタリア・フェスティバル in 東京ドーム
- ・ 2005-03-21 第 8 回ロボットグランプリ併設展示

このような機会を通して、ロボット自体のデモンストレーション時の問題のほかにロボット運用・輸送・メンテナンスなどに関して様々な知見を得られた。2005 年 6 月現在愛知万博博覧会が開催されており、NEDO 展において水陸両用の 3 次元索状能動体後継機として ACM-R5 を動展示することになっている。この ACM-R5 の評価機という位置づけで ACM-R3 を作成し直す機会を得た。そこで改良機 ACM-R3n(Fig.6.1)における各種改修点と、どのような索状能動体に対しても適用可能なように構築した電装系について説明し、今後の 3DACM 設計の展開について考察する。



Fig. 6.1: ACM-R3(Leftside) and ACM-R3n(Rightside).

## 6.1 機構設計の改良点

ACM-R3 の機構部に関しては、概ね当初の設計思想通り機能した。堅固な外殻構造はもとより、大型車輪など、構体系は一度も破損に至っていない。しかし出力伝達機構に関して、特に交換しやすい部位に破損箇所を集中させる傾向をもたせ設計した部位周辺は、近年破損が確認されてきている。そのため、出力伝達機構部をより堅牢なものにするよう変更する。

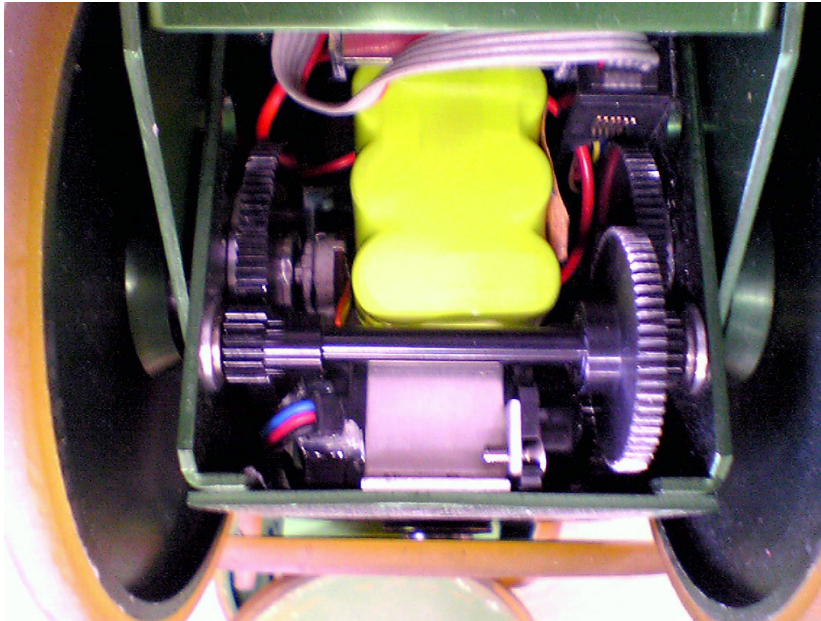


Fig. 6.2: Worn gear of “ACM-R3.”

### 6.1.1 ギア列の総ステンレス化

ACM-R3 運用中、鎌首もたげ動作中にバランスを失い倒れ込んだり、滑走中壁に激突したり、段差から滑落したり、といった撃力が加わることがある。また、壁面に向かって移動したり、床面が絨毯など摩擦の過度に高い状態で運動したり、何かに絡まれながら運動したり、といった過負荷状態での運動を短期間連続的に行うこともある。これらが生じる際、R/C サーボモータ内部が破損しないよう、Fig.4.6 の歯車 G2, G3 を止めるピンが破損するよう設計しているものの、年を経て歯車 G2, G3, G4 の摩耗が激しくなっている (Fig.6.2)。また、アルマイト処理時の痕跡に起因して歯車 G2, G3 を結ぶシャフトの両端が折れる事件も発生した。

ACM-R3 の構造体はほぼ全てアルミ合金系で作成しているため、摩耗・損傷の激しい部位をステンレス化することで、運用寿命の長期化を図った `figreffig:newgear`。この変更で最も弱くなる部位は歯車列 G2, G3 とシャフトを止めるピン部であり、破損が生じた場合にも安価に容易に交換できるよう配慮している。また、この変更でユニットの重量が増加するが、他の部位で軽量化を図ることでバランスをとる。

堅牢な出力系に改良した結果、特に鎌首動作において従来よりも安定した動作を行うことができるようになった (Fig.6.4)。

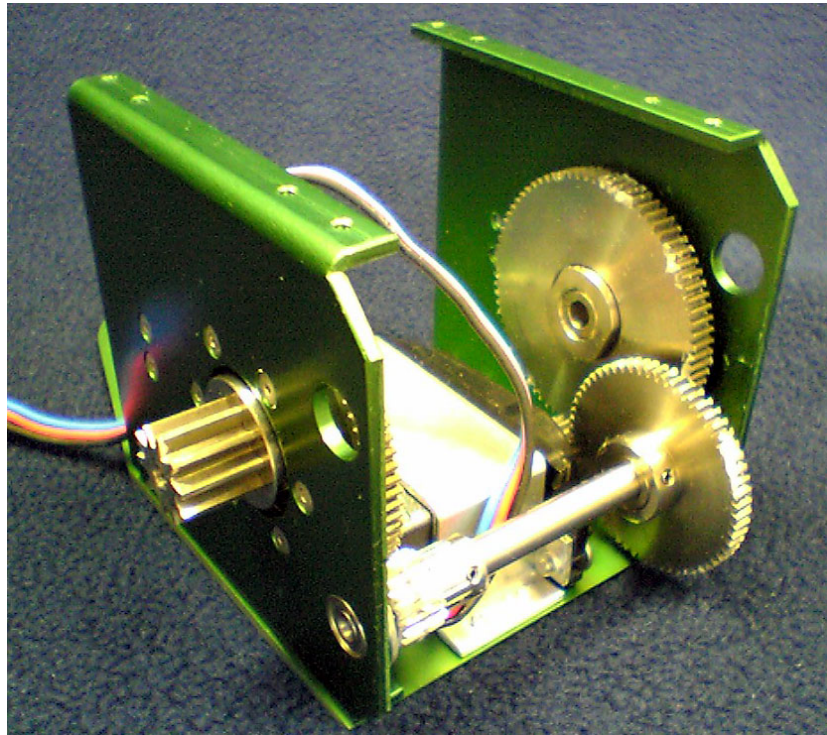


Fig. 6.3: stainless steel gear of “ACM-R3.”

### 6.1.2 大型受動車輪変更

大型受動車輪は特に不具合が生じていたわけではない。しかしシャフトにベアリング1つを介して固定されているだけであるため、ベアリング自身のガタが車輪のガタとなり、車輪先端部では車軸方向に2[mm]弱ほどのガタとして動く状態であった。このガタは、シフト制御推進時においてロスを生じる原因となる。また、外周部に焼き付けているウレタンゴムの硬度がかなり硬いため、衝撃力吸収要素としては少々不安がある。現状交換するほどの摩耗はないものの製作コストも高く、見栄えも若干よくない仕上がりであった。そのため、再設計時において改良案があれば導入したいと考えていた。

この時期にはすでに ACM-R4[34] において改良型の大型受動車輪が開発されていた。すなわち、大型受動車輪の材質をポリカーボネートに変更し、軽量化を図るとともに、ある程度斜め方向から荷重がかかると僅かながら変形することで衝撃力を和らげる効果を持たせることが可能であった。ただし通常の運動においては、大幅な変形をしないよう形状設計を行っている。また、外周部をウレタンゴム焼き付けではなく市販のOリングを利用することで、損傷時の交換しやすさと大幅なコストダウン、さらなる衝撃吸収性を得る可能性が高かった。この機構を ACM-R3n に採用し、シャフト部のベアリングも2重に取り付けることでガタを極力減らすことに成功した。(Fig.6.5)



Fig. 6.4: raise head of “ACM-R3n.”

### 6.1.3 小型軽量化

先述の通り，車輪径は同等なので，最外周径は変化していない．しかし内部の外殻構造についてより小型化を目指した．体幹軸に垂直な断面で， $72[\text{mm}] \times 66[\text{mm}]$ であった外殻構造部を， $68[\text{mm}] \times 62[\text{mm}]$ と縦横ともに $4[\text{mm}]$ ずつ小型化することに成功した．板厚はともに $2[\text{mm}]$ である．また関節軸間距離も変更なく $80[\text{mm}]$ のままとした．

### 6.1.4 無線カメラ搭載

ACM-R5は水陸両用3 DACMであり，狭隘空間内や遠隔地での探査活動に対する知見を得る目的もあるため，先頭節に広角レンズの無線カメラを取り付け，照明に高輝度LEDを取り付けている．このため，ACM-R3nにおいても同様に取り付けることとした．

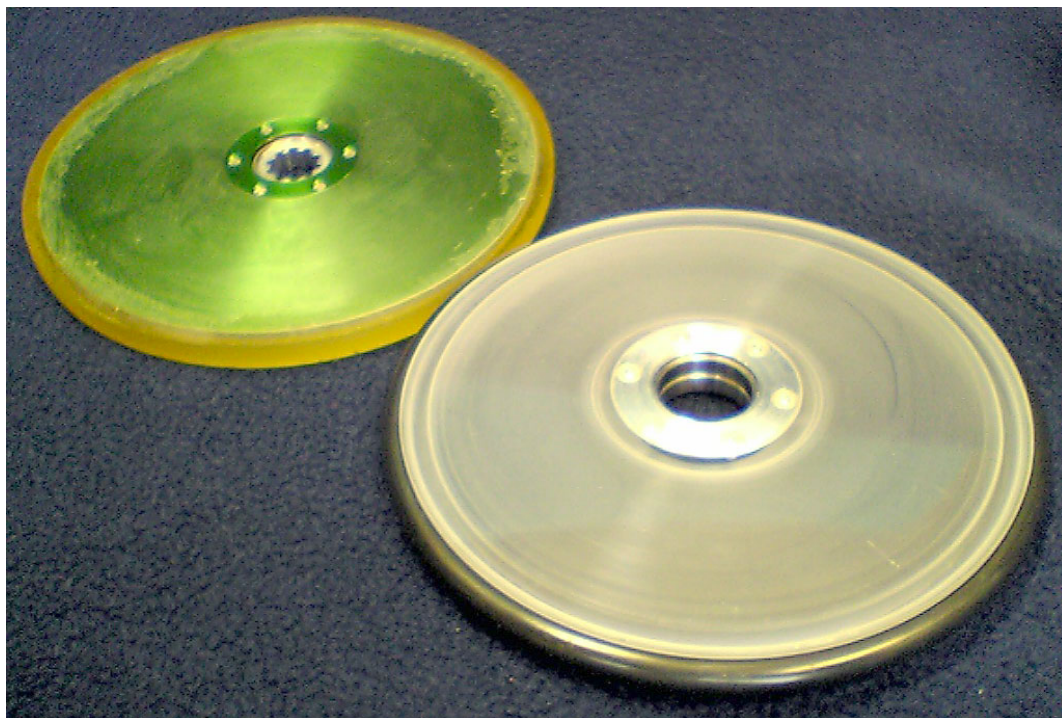


Fig. 6.5: Plastic wheel.

外殻構造からレンズ部位が突出しないようユニット外殻縁を出ないように先頭節に設計し、万一平面的な壁に激突した場合にも機構的に保護されるよう工夫した (Fig.6.6)。

## 6.2 電装系の再構築

長期にわたり ACM-R3 を運用してきたが、電装系に関する問題点は大きく 2 つ挙げられた。

一つは充電問題である。ACM-R3 の主眼点はユニット化であったため、二次電池の電力供給も各ユニットで内部完結されている。充電時のことを考慮し、二次電池を制御基盤に接続するコネクタは外部から操作しやすい位置配置してはいるものの、各節ごとにコネクタをはずし、外部の充電基盤に結線する作業が必要であり、非常に煩雑であった。特に 2 週間毎日動展示を行う必要のあったタイでのデモンストレーションでは会期中に 3 度ほどの充電を行うこととなり、少々大変であった。本来は実験機であるため、充電系についての要求事項はさほど気にする必要はないものの、近い将来に実用機として開発する際には、充電のしやすさを含めた運用体系の改善を検討する必要がある。

もう一つは制御回路プログラムによる問題である。各節に制御用に搭載したマイコンの能力が不足していたわけではないが、プログラム開発コストの都合上「この節が何番目に当たる節なのか」という情報はあらかじめ各マイコンに書き込んだ上で運用していた。幸



Fig. 6.6: wireless head camera.

い制御回路に問題があって交換を要したことはそうそうなかったものの、機構的トラブルが生じた際にその破損節だけを取り外して利用する、などといった再構成的な運用は、この問題のために出来なかった。これを回避するためには、節をつなぎ変えただけでその順番を内部的に自動認識できるような工夫が必要となる。

これらの改善を行うとともに、ACM-R5をはじめとする種々の索状能動体モデルでも利用が可能なように、新たに電装系を構築することとなった。

### 6.2.1 電装系ユニット化の再構築

「ユニット化」を主眼におくことに変更はないが、ユニット単位を変更した。

ACM-R3では各動作軸ごとにユニット化をしていたが、新規電装系では3次元動作の基本単位である「2軸」単位に電装系ユニット化を行うこととした。これは第2章で述べたとおり、3次元索状能動体を自由な空間曲線に沿わせるには「平行でない2軸」屈曲成分さえあれば可能なためであり、これを構成要素としたほうが自然であると考えたからである。そして機構的ユニット単位と電装的ユニット単位は必ずしも一致する必要はない。

この1ユニット単位内に、従来は1制御基板でまとめていたが、今回は充電機能を含めて3基板に分けることにした。

ACM-R3の制御回路は、1枚の基板のなかに全てを集約したため非常にコンパクトであったが、逆に拡張性に欠けていた。新規回路ではマイコン基板 (Fig.6.7) と電源管理基板 (Fig.6.8)、そして充電基板 (Fig.6.9) の3回路に分割することとした。これにより各々

の基板ごとに改良・変更を行うことができるようになったほか、各種基板を別用途に転用する等、索状能動体に限らず多様なロボット間で共通化を図ることも可能である。

また、全ての節に渡って電源配線を引き回すのは、以前にも述べたように望ましくない。しかし 2 次電池充電を一括して行うことが可能であれば、機器自身の運用コストは非常に改善される。そこで、充電時の電流を低く抑えるとして、比較的細い線を全ての節に通し、各節に小さな充電基盤を配することで、外部電源から一括して全ての節の 2 次電池を独立に充電できるよう改良した。

そして、充電基板を新規に追加することにより、従来の Ni-MH 電池よりも高性能な Li-ion 電池を利用することが可能となった。これは従来のものに比べ電気密度が向上しているほか、放電特性もよく、電圧のメモリ効果を起こしにくいという良い特性をもつ電池である。しかし従来の電池以上に厳重管理を行わないと、破損時により危険を伴うため、なかなか入手できないという経緯があった。

そのほか、内部ポテンショメータをそのまま使わず、市販のポテンショメータに変更し、信頼性を高めるなど、詳細な変更も行っている。また、節番認識シーケンスおよび隣接節情報伝達の導入を視野に入れ、情報線配置にも変更を行った。

ACM-R3 では、機構的・回路的破損を生じた場合に、物理的に節構成を変更することができたが、内部回路の番号を接続順に再認識する機能を付加せずじまいであった。このため中間部位に不具合が生じた際には、修理を行うほか無かった。このような状態を回避し索状能動体として正常に動作するように、3 DACM 電源投入直後に、先頭から尾部にわたり電装系としての節順番を再認識するよう改良した。通信に HCAN-BUS を利用しており、このままでは全てのユニットが等位に存在するため順番付けすることは不可能である。そのため、隣接回路の I/O ポート 2 本を直結し、これと併せて通信することで節番認識も隣接節認識も可能なよう配慮した。未実装だが、隣接節にトラブルが発生した場合にも、隣接する電装的ユニットがこの異変を関知し、内部指令値演算系に通知して復帰を図る、などの機能も付加可能である。

## 6.2.2 信号伝達系の再構築

以下に新しく構築した制御構成を解説する。(Fig.6.10)

### i) 航空機 RadioControl 用送信機

ACM-R3 と同様である。ただし、命令系統は 8ch ではなく 9ch に拡張されている。

### ii) RadioControl 用受信機 (1 と対をなす)

ACM-R3 と同様である。

### iii) TITech SH2-Tiny (SH2-7047 Micro Computer Board)

高性能なマイコンボードであるため、ACM-R3 の制御処理回路のほぼ全ての作業を行

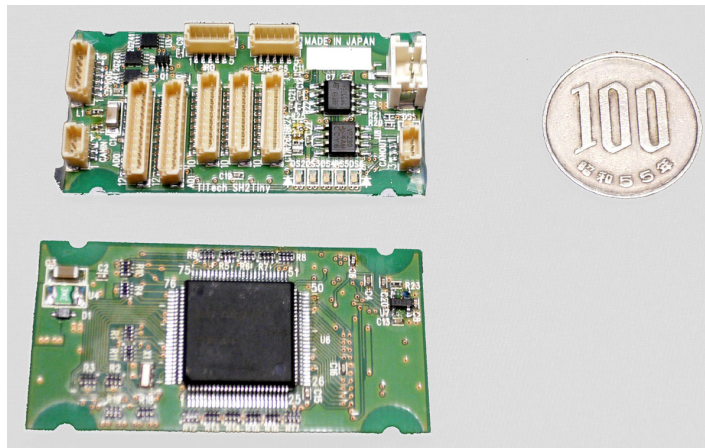


Fig. 6.7: TITechSH2TinyBoard.

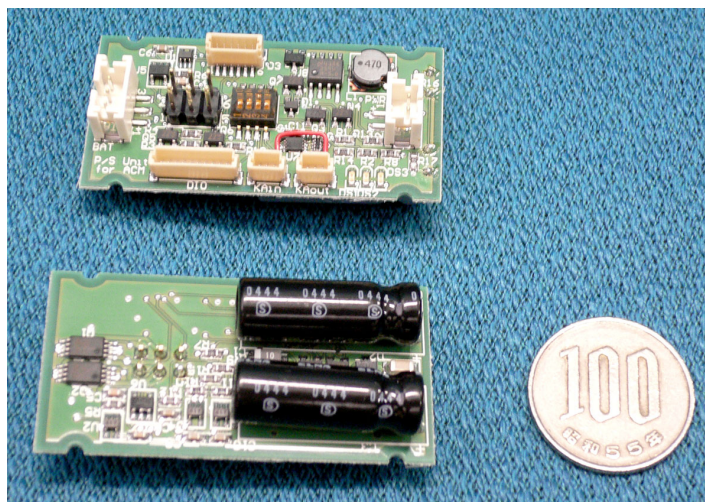


Fig. 6.8: PowerSupplyBoard.

うことが出来る．結線によって「内部指令値演算系」か「各節演算系」かのどちらかの処理を担当するが，プログラムは同一のもので動作するよう配慮している．このため，末端節を含む全ての電装的ユニット交換が可能となった．各 SH2 間の通信は CAN-BUS を用いているため，転送の信頼性は格段に向上している．

「内部指令値演算系」であれば，起動時に節番号決定シーケンスを行う．その後，受信機から指令信号を解釈し，全節の角度生成を行い，前節にその信号を送信するとともに，自らも「各節演算系」の処理を行う．

「各節演算系」であれば，受け取った指令を元に R/C サーボモータの指令信号を生成し電源基板に送る．同時に自ユニット内情報を「内部指令値演算系」にフィードバックする．

マイコンボード間の通信は HCAN2（全ボードがバス型のトポロジーとなっている），および前後のボードに対し相互に 2 本ずつ IRQ を通して行う．

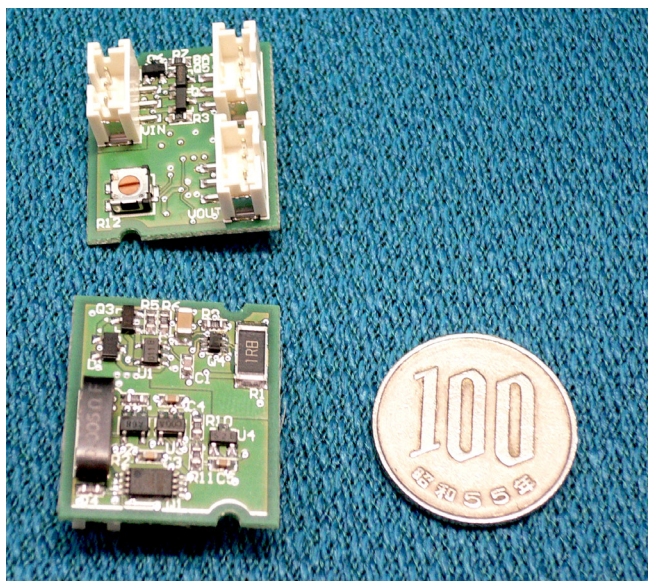


Fig. 6.9: BatteryCharger.

## v) PowerSupplier

TITech SH2-Tiny 基板は、外部からの整流された電源を元に動作する．そのため、この基板で充電基板から供給される 2 次電池の電力を整流する．そのほか、全節の電源およびモータへの出力電源を一括して操作できるようにスイッチを有し、また 2 次電池の電位や R/C サーボモータに流れる電流にほぼ比例した電位を TITechSH2-Tiny に結線して伝え

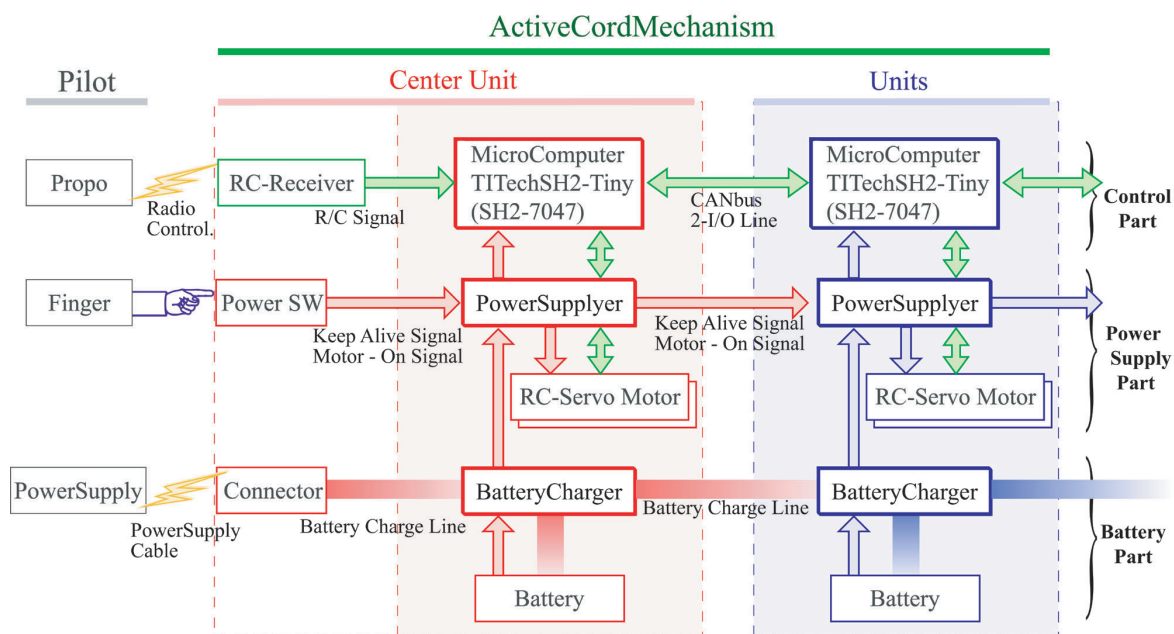


Fig. 6.10: The chart of new control commands.

ることが可能である。

vi) RadioControl 用サーボモータ

v) からの信号に対し，関節出力軸に取り付けられたポテンショメータの値と比較しながら自動的にローカル位置制御を行う。

vii) BatteryCharger

外部からの電源供給により，2次電池を充電することが出来る。また，万が一出力回路が短絡した場合にも，2次電池からの出力電流量が一定以上流れないように電流制限回路を内包している。さらに結線ミスがあった場合にも，ある程度の逆電圧なら防げるよう対策されている。

以上のように，非常に完成度の高い電装系を構築した。

節番号の順位付け（ナンバリング）を行うのに最も簡易な方法は，前後に隣接したマイコンとの通信のみ可能とし，これを数珠繋ぎにすればよい。しかしこの方式では，途中のマイコンが瞬断により動作不能となった場合には，それ以降のマイコンも動作しなくなる欠点を持つ。またこの場合に復帰シーケンスを実装することも容易ではない。

そこで ACM-R3 ではバス型トポロジのシリアル通信と，接続の前後判断を行うために前後マイコン間のみを接続する I/O コードを実装した。ただし自動ナンバリングシーケンスを実装していなかった。

しかしマイコン間の I/O コードが1本の場合には，互いの出力を同時に互いが知ることはできない。このため信号の方向性が生じてしまう。これを回避するため，新規マイコンボードでは前後に対し2本ずつ計4本の I/O コードを伝達することとした。これを利用することで，起動時のナンバリングだけでなく，どこかのマイコンが動作不能に陥った場合にも前後のマイコンがこれを関知し，復旧を助けることも容易となる。この復帰シーケンスは，将来節単位でのロボット再構成の技術にも活用が可能と考える。

以上に述べた新型電装系は，実際に ACM-R3n および水陸両用索状能動体 ACM-R5 の双方で運用しており，双方ともにほぼ同一のプログラムで十分動作していることを確認している。この両型機ともに，すでに愛知万博などで基準ほふく推進，捻転推進，Side-Winding 推進などの動作実験相当のデモンストレーションをこなしている。

また，既に運用面での利便性向上が顕著であることを確認している。充電を行う際，従来は各節の二次電池に充電コードを差し込む作業を行っていたが本構成では末端部に充電コードを接続するだけで済む (Fig.6.11)。この利点は充電時の手間・誤接続などのミスを低くすることができるほか，特に水密系ロボットにおいて外部接続のための開閉部を一箇所に集中できることの利点は高い。また，節順番や節数を自由に変更できることは，長期運用する上での臨機応変な運用を可能にした。

今後さらにプログラムの改良を行い，各種の推進実験について詳細に検討を行うとともに新しい推進についても開発を行っていく。

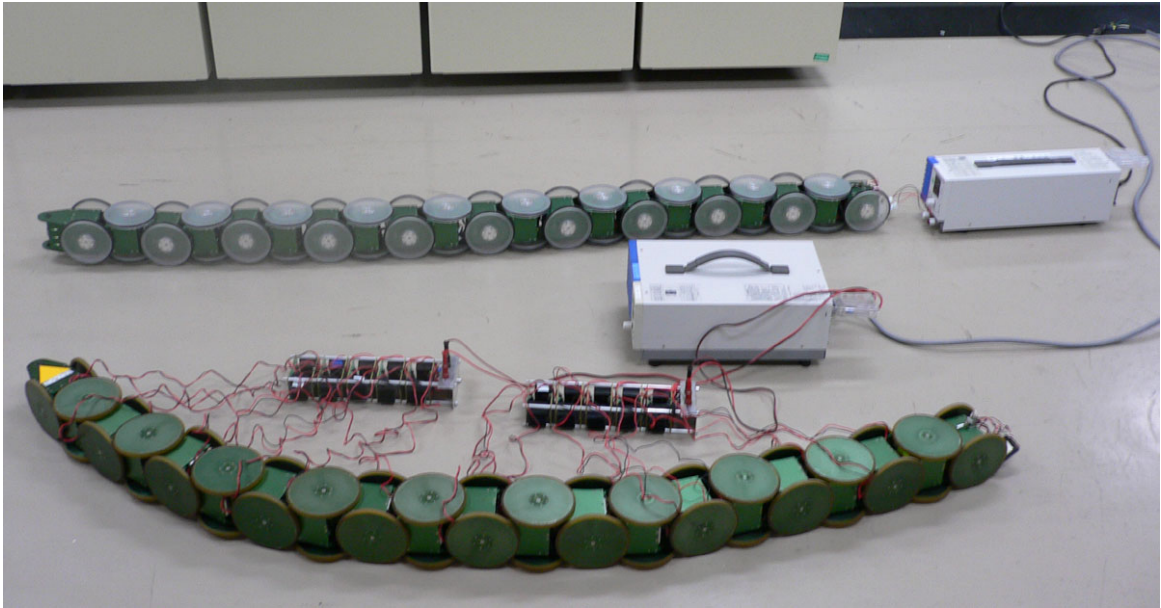


Fig. 6.11: The comparison of charge style.

### 6.3 まとめ

この章では、実機モデル ACM-R3 の改良実機モデル ACM-R3n について述べた。また、運用性・メンテナンス性に優れた電装系を構築し、複数の実機モデルで実際にその有効性を確かめた。以上を含め、実用的な 3DACM に必要な事項を以下にまとめる。

- ・ 体幹軸まわりに滑走面が自由に取り得る
- ・ 簡易かつ堅牢な機構
- ・ 出力トルクのインピーダンスマッチングを行う
- ・ 過負荷トルク保護機構の導入
- ・ 強固な機構・耐故障性の向上
- ・ 破壊制御によるメンテナンス負担軽減
- ・ 機構系ユニットと電装系ユニットの個別単位検討
- ・ システムの自立化 (無線化)
- ・ 自己構成再検知機能
- ・ トルク検出機構の導入
- ・ 高分解能制御
- ・ センサー系の搭載
- ・ 各種部品の汎用化

## 第7章

# 結論と今後の課題

### 7.1 結論

第1章「序論」では、本研究の背景と目的を述べた。能動的に屈曲し得る関節ユニットを直鎖連結したひも状の機能体である「索状能動体」は、狭隘空間の探索作業など多くの分野でその特有の運動性能を発揮することが期待されているが、3次元運動を行う ACM の構成法と制御法に関する検討は従来ほとんど行われていないことを挙げた。本研究は、ACM に関してまずその空間運動の基礎理論を構築し、それに基づく ACM のための数々の推進制御法および操舵法に関する検討を行い、さらにそれらの有効性を3次元索状能動体として十分な研究を行う実験モデルの構築と検証を通し、3次元索状能動体の基礎理論と開発の指標とするものであることを示した。

第2章「3DACM の基本理論」では、3次元運動を行う ACM の体形記述とその推進制御法の基本理論を述べた。はじめに機械モデルと空間曲線の間を明らかにし、空間曲線に関してその形状だけでなく、曲線自体の表面捻れをも記述できる「背びれ曲線」の概念を新たに導入し、これを用いて ACM のための推進制御法を定式化している。ついで、ACM の基本制御を「シフト制御」「捻転制御」「部分適用制御」の3つに分類するとこれらの組み合わせで ACM の全ての推進制御が記述できることを明らかにした。

第3章「3DACM の推進運動とその制御」では、3次元運動を行う ACM の具体的な推進制御法とその推進特性を論じた。これらは、関節屈曲指令を ACM の体幹に沿って伝播するシフト制御に基づく「基準ほふく推進」「Sinus-Lifting 推進」「Side-Winding 推進」「Pedal-Waving 推進」、体幹全体を体幹軸まわりに回転させる捻転制御を利用した「Lateral-Rolling 推進」「捻転型ほふく推進」「捻転型 Sinus-Lifting 推進」「Lift-Rolling 推進」「らせん推進」「Lateral-Walking 推進」、そしてこれらの制御法を ACM 体幹の一部に適用させる部分適用制御を用いた「Lateral-Walking 合成推進」「Lateral-Walking 併用 Pedal-Wave 推進」「Lateral-Walking 部分適用推進」などである。なお「基準ほふく推

進」については、推進面が3次元的に屈曲する移動面での操舵法も検討した。

第4章「3次元索状能動体 ACM-R3 の設計」では、第3章で検討した各種運動を実現させる ACM の実機モデルの機構系、電装系、センサ系の設計を論じた。機構系に関しては、自由度構成の比較検討から1自由度1ユニット構造を導入し、どのような姿勢でも体軸に沿った摩擦抵抗を軽減化させるため一对の大型受動車輪を関節屈曲駆動軸両端に設置する構造を提案し、軽量高負荷特性を発揮する関節駆動系を開発した。電装系においては、ユニット化構造の特性を発揮する信号伝達系、電力供給系、操縦系を開発した。センサ系では、関節角センサや生成トルクを計測するモータ電流計測センサの構成法を論じた。そして、開発した実機モデル ACM-R3 の性能を最後にまとめた。

第5章「各種推進実験」では、第3章で述べた推進制御式を元に、機械モデル ACM-R3 の各種推進実験の結果をまとめた。そして「基準ほふく推進」「捻転型ほふく推進」「Sinus-Lifting 推進」については移動時の生成トルクの計測を行い、実際の移動特性を明らかにした。また、捻転制御群では捻転現象を2つに大別し、シフト制御を捻転制御に重ね合わせることによって、実際のヘビが行う動作だけでなくヘビが行わない新たな推進動作も実現できることも示した。「Lateral-Walking」を「基準ほふく推進」の体幹の一部に重ね合わせた部分適用制御によりホロノミックな全方向移動も実現した。

第6章「3DACM 設計の展開」では、ACM-R3 の運用上で発生した問題点を挙げ ACM-R3 の特性を改善する機構的・電装的な改良案を示した。特に電装系については様々な索状能動体に適用可能なモデルとして、節番号自動認識機能を有する信号伝達系や充電装置などの検討を行なった。そしてその考察の有効性を、新たに製作した改良機 ACM-R3n、および水陸両用機 ACM-R5 の動作実験で具体的に確認し、今後の索状能動体開発への指針を示した。

以上を要するに、本論文では能動的に屈曲し得る関節ユニットを直鎖連結したひも状の機能体である索状能動体について、その3次元体形を表記するための「背びれ曲線」の概念を導入して「シフト制御」「捻転制御」「部分適用制御」の3の基本制御法に基づく数々の運動制御法を提案し、索状能動体を構成するための関節駆動機構、電装系、センサ系を検討し、試作した機械モデルの動作実験によってそれらの有効性を具体的に検証してきた。

## 7.2 今後の課題

3次元索状能動体の研究を行うにあたり、今後さらに検討が必要なものを以下に重要度順に挙げることにする。

### 7.2.1 3次元的角度抑制制御の確立

3.1.6 節でも述べたが、理論としては側抑制制御 [1] を 3 次元に拡張したものであり、実現はさほど難しくはないが非常に重要な制御である。

実機モデルの 3 次元化が進み、既に水陸両用 3 次元モデルも運用が開始されている。これらを実用化するには、自然環境や不整地を走行することは避けて通れない。しかし機構内にダンパ要素を導入することは要注意事項であり (4.1.2)、3 次元索状能動体ではアクティブに対地適応走行を行う性能が重要と考えられる。そこで、何らかのセンシングを行い、角度抑制制御が可能になれば、準平面運動もスムーズに運動でき、少々の凹凸や狭隘空間では抑制制御だけで推進が可能になる。

また、将来複雑な 3 次元軌道生成を行いシミュレーション結果通りに制御を行おうとする際においても、現実には必ず誤差が生じるため、思わぬ拘束が発生する可能性もある。このような場合に、角度抑制制御が負荷感応型であれば自動的に補正することが期待される。以上のことから、負荷感応型の角度抑制制御機能の早期実現を行う予定である。

### 7.2.2 関節保護機構の導入

索状能動体はその性質上、メンテナンスしやすい状況においては非常に運用しやすい機体であるが、狭隘空間探査など機構系全体の信頼性が要求される場合には超冗長自由度が災いするため運用上非常に注意を要する。そこで簡易かつ小型の自動復帰型関節保護機構を有することが望ましい。(開発中の ACM-R4, R5 についてはトルクリミッタ機構は既に導入されている)。

### 7.2.3 各種センサ系の付加と各種推進運動の操舵制御の検討

本論で紹介した実機モデルは外環境からの情報はほぼ取得していないため、操縦者が視認を行い指令値としてフィードバックを行うことで制御を行っている。しかしこのまま実用化を行うのは難しく、その前段階として加速度センサや非接触式センサなどを利用して走行路面や障害物回避などの手法を確立する必要がある。これとともに、取得した情報から各推進の操舵制御についてもより詳しく検討していく必要があると考える。特に水中螺旋推進運動については、まだ操舵制御についての詳細な検討はなされていない。

#### 7.2.4 自由度の増設

あくまでも小型・軽量化・高出力化を前提としての、屈曲自由度を向上させる必要性がある。特に複合波形を合成する制御法を用いる場合には離散化問題による理論形状からの逸脱が如実に顕れるため、実機モデルを用いた検証が難しくなる。3次元索状能動体において運動性能の向上と関節数の増加は対極的な命題であるが、これをいかに実現できるかが、今後の索状能動体の研究推進に大きく関わってゆくであろう。

以上のような基礎研究的課題を徐々に実現しつつも、人命探査用や配管内点検用などの現実的かつ実用的な索状能動体を開発して行くことも非常に重要である。

#### 7.2.5 「腕」と「脚」の機能統合

最終的には環境を問わず移動が可能であり、かつ別途開発が進められている「作業」「把持」機能を統合し、同一体で様々な能力を併せ持つ機能体としての索状能動体の開発を目指す。

## 付録 A

# RC サーボモータ

ACM-R3 および ACM-R3n で利用している SANWA 製 R/C サーボモータ [ERG-VB](Fig.A.1) の指令信号解析結果，および電流対トルク測定実験結果を記す．

### A.1 信号波形

使用した RC サーボモータ，SANWA 製「ERG-VB」の信号波形について述べる．

- ・ 指令波形は周期 14.8[ms] の矩形波である
- ・ 周期ごとにモータに電力供給がなされる
- ・ 安定して指令できる最短認識周期は 10[ms] 程度である
- ・ HIGH で波形開始，LOW までの時間で位置 (角度) 制御をおこなっている
- ・ 原点位置は約 1520[ $\mu$ s]，振れ幅は約  $\pm 600$ [ $\mu$ s] である

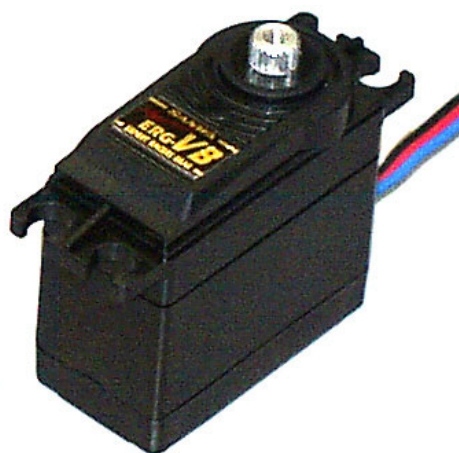


Fig. A.1: The servomotor ERG-VB

## A.2 電流対トルク線図

以下に同サーボモータの電流値対トルク線図を示す。

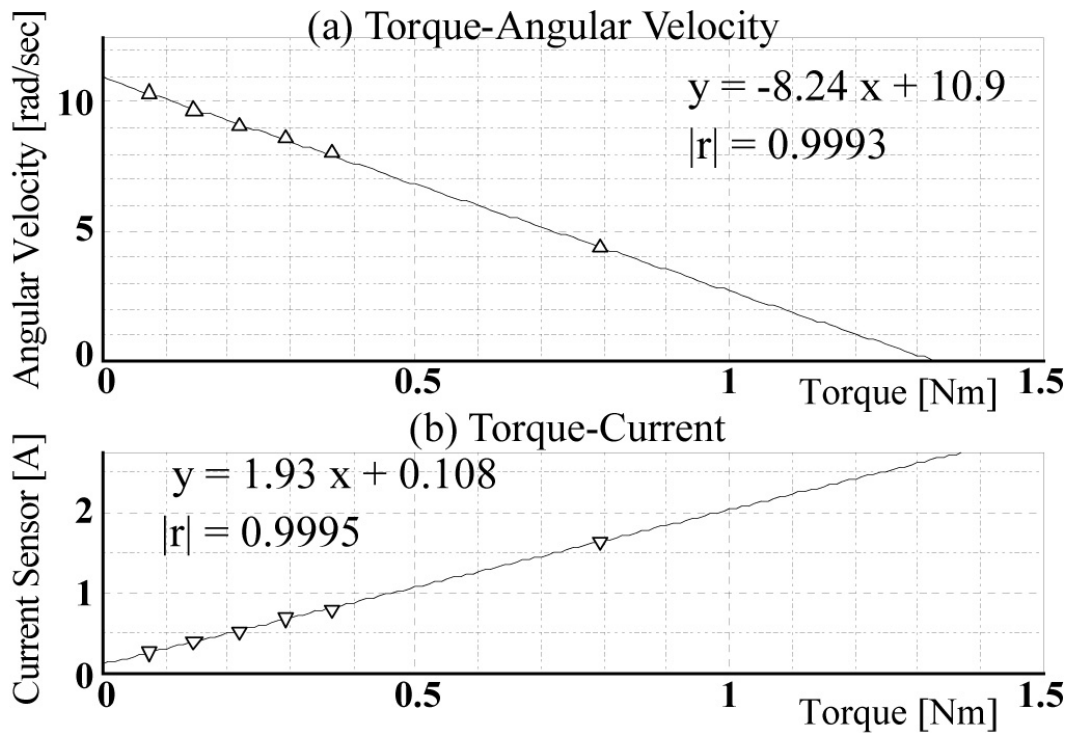


Fig. A.2: Specification of the servomotor ERG-VB

## 付録 B

# TITech-SH2Tiny

以降，ACM-R3n をはじめとする多くの ACM で利用可能な SH2 プログラム資料などを記す．

### B.1 3DACM Program for TITech SH2Tiny

概要としては，まずマスター・スレーブの判別を行い，次に電装系の順列を決定し，最後に通常制御ループに移行する．

起動部で PortA，6.7 番ピンが GND ならマスターと判定する．

電装系の順列決定は，隣接節同志を結線した IRQ0～3 と，全節に等しく接続されている HCAN 通信を用いて決定する．

通常制御ループでは，マスターは MTU3,4 と IRQ0 を用いて無線受信機 9ch 分の指令を受信し，それを元に波形生成を行い，HCAN を通じてスレーブに生成すべき角度などの情報を伝達する．

以上をふまえ構築したプログラムの簡易チャートを以下に示す．

### B.2 各種機能の利用割当

各機能の利用概要は以下の通りである．

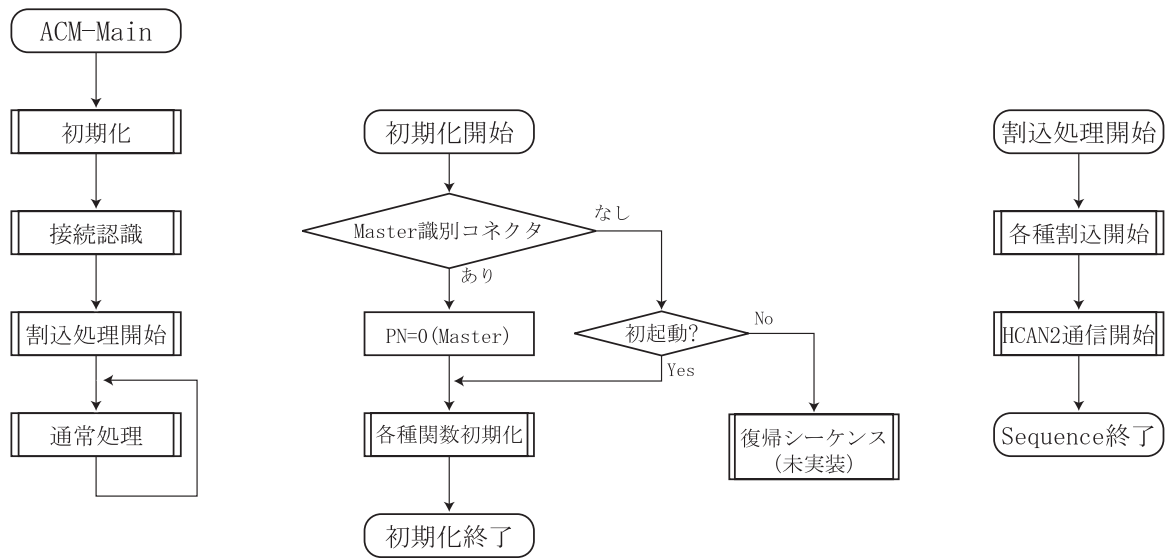


Fig. B.1: ACM Program Basically Chart

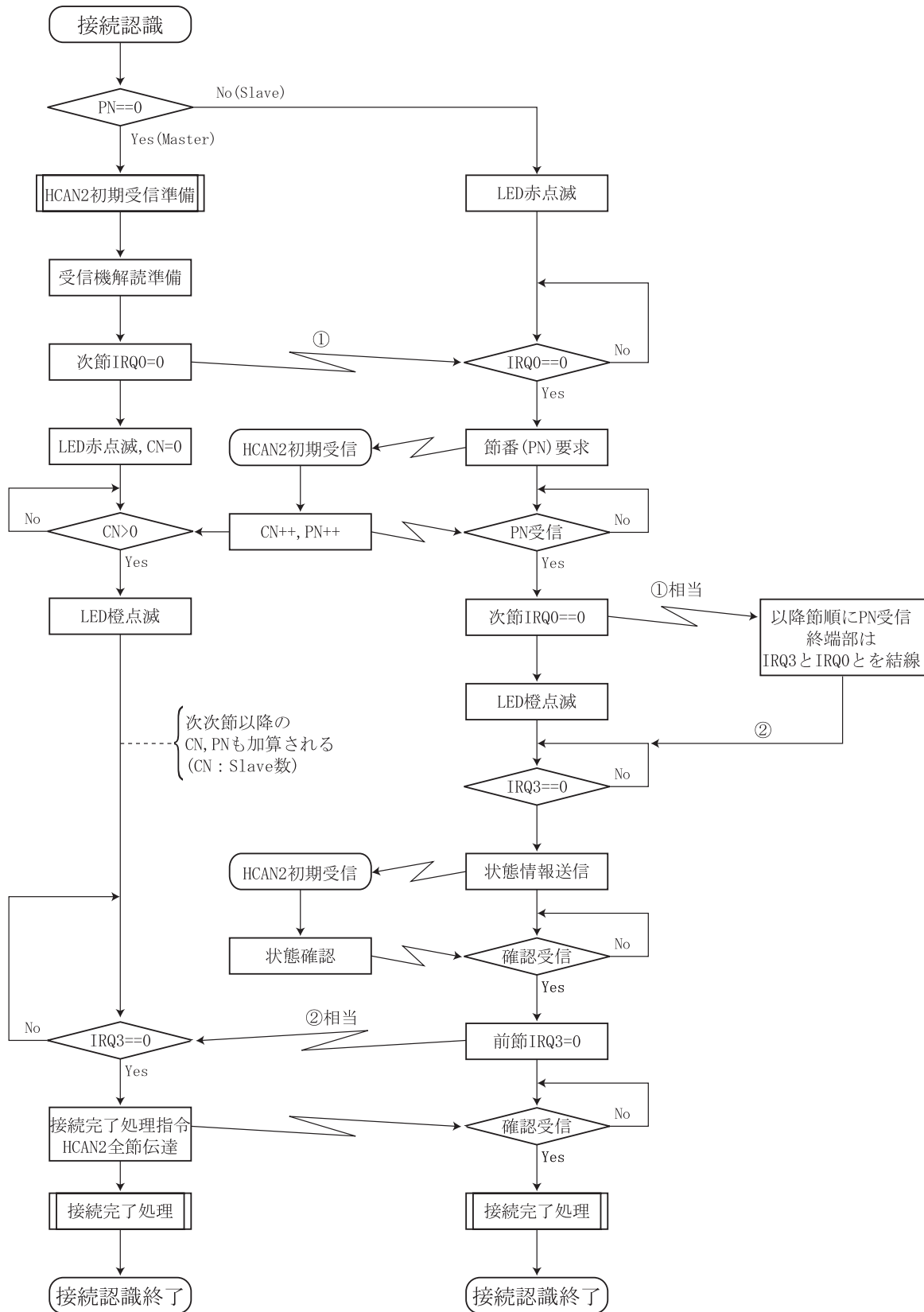


Fig. B.2: SH2NumberingSequence

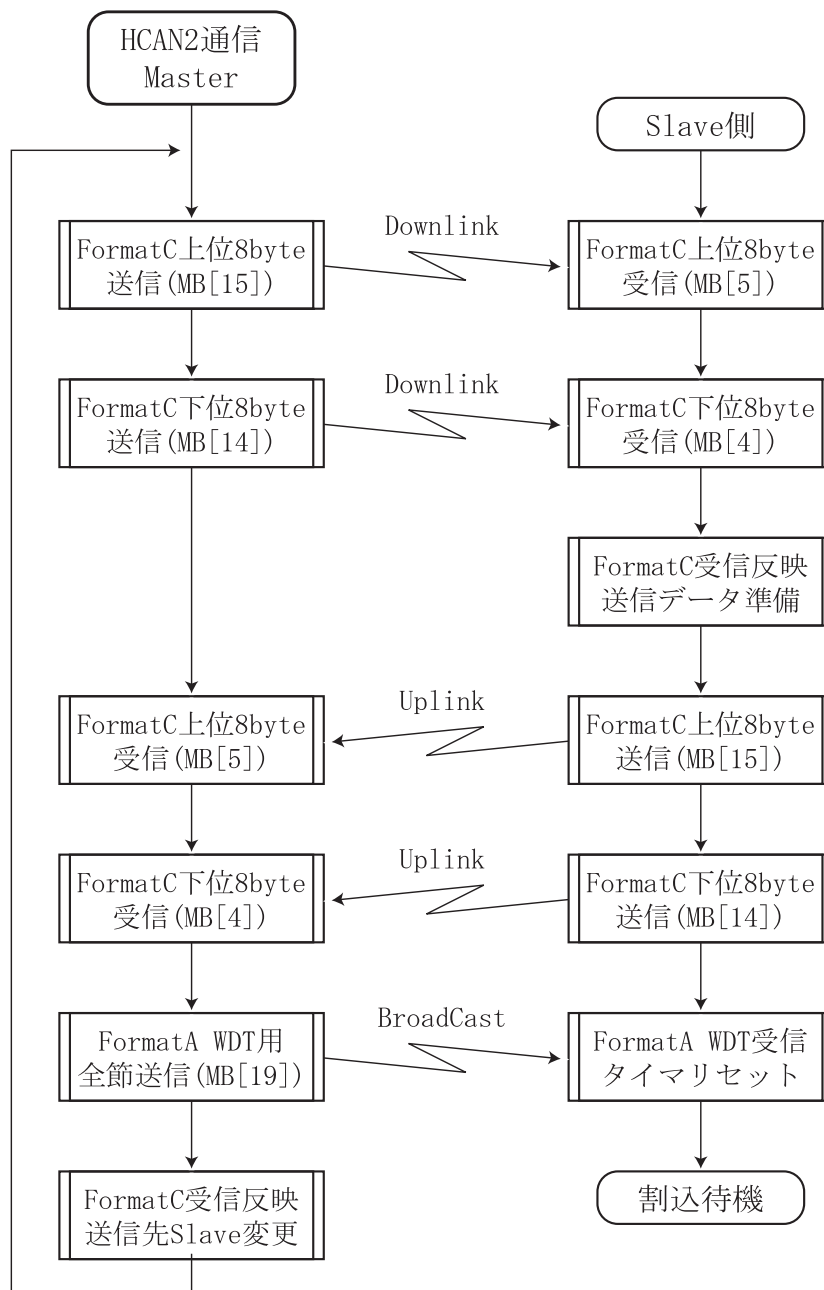


Fig. B.3: HCAN2 Chart

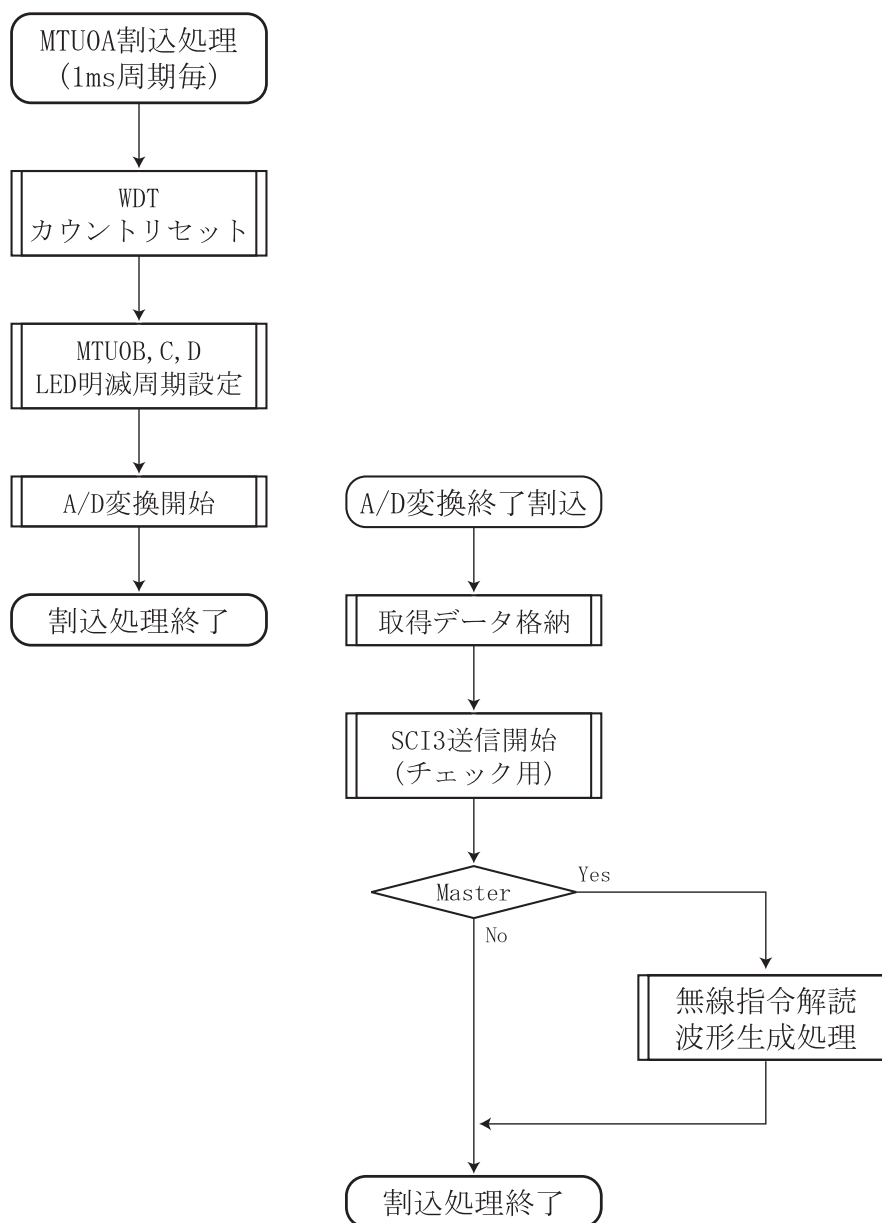


Fig. B.4: MTU0a Interrupt Chart

Table. B.1: TITechSH2TinyProgram

MTU0	A	1ms A/D 変換トリガ WDTclear	
	B	BATT	
	C	MOT1VOL	
	D	MOT2VOL 各 LED	
AD0	2.0ms ごと読み出し		
AD1	2.0ms ごと読み出し SCI3 トリガ		
SCI3	2.0ms ごと data 吐出		
MTU1	MOT1	信号指令値制御 $P\phi/1$	
CMT0	MOT1	信号周期制御 $P\phi/128$	
MTU2	MOT2	信号指令値制御 $P\phi/1$	
CMT1	MOT2	信号周期制御 $P\phi/128$	
MTU3	A	Propo ch.1	TIOC3A
	B	Propo ch.2	TIOC3B
	C	Propo ch.3	TIOC3C
	D	Propo ch.4	TIOC3D
MTU4	A	Propo ch.5	TIOC4A
	B	Propo ch.6	TIOC4B
	C	Propo ch.7	TIOC4C
	D	Propo ch.8	TIOC4D
IRQ0	Propo ch.9		

## B.3 HCAN protocol

HCAN の通信仕様を以下に述べる .

Table. B.2: Identifier setting of HCAN for 3DACM

BIT	設定内容	注記	MB(master)	MB(slave)
10	全節への指令	Format A,MOTON/OFF など	Tx:19 Rx: 9	Tx:19 Rx:9
9	個別緊急信号	Format B, 初期設定用	Tx:18 Rx:8	Tx:18 Rx:8, 0
8	SlaveToMaster	Format C,0:Uplink 1:Downlink		
7	情報種別 Bit 4	maybe always 0	Tx:17,16 Rx:7,6	Tx:17,16 Rx:7,6
6	情報種別 Bit 2	0:Upper 1:Lower	Tx:15,14 Rx:5,4	Tx:15,14 Rx:5,4
5	SH2TinyBoardID	64		
4	SH2TinyBoardID	32		
3	SH2TinyBoardID	16		
2	SH2TinyBoardID	8	ID : 1-60	0:Master
1	SH2TinyBoardID	4		31,62,63:Dead
0	SH2TinyBoardID	2		61: Default

Table. B.3: Format A Protocol of HCAN for 3DACM

byte	bit	内容
7	7,6,5,4 3:2 1:0	n/a MOT1ON/SIG MOT2ON/SIG
6		CN ( 接続 Slave 数 )
5		MOT1 最小周期
4		MOT2 最小周期 )
3		MOT1 周期変数
2		MOT2 周期変数
1		MOT1 角度抑制変数
0		MOT2 角度抑制変数

Table. B.4: Format B Protocol of HCAN for 3DACM

byte	bit	Uplink	Downlink
7		SH2 phase	newPN
6		MOT1Angle	SH2phase
5		MOT2Angle	
4	7:6 5:4 3:2 1:0	MOT1Angle Low2bit MOT2Angle Low2bit MOT1ON/SIG MOT2ON/SIG	
3	7,6,5,4 3,2,1,0	always 0 IRQ3,2,1,0	
2		BatteryVoltage High8bit	
1		MOT1 VOL	
0		MOT2 VOL	

Table. B.5: Format C Protocol of HCAN for 3DACM

byte	bit	Uplink	Downlink
15		MOT1SIG High8bit (yaw)	MOT1Angle High8bit
14		MOT2SIG High8bit (pitch)	MOT2Angle High8bit
13	7:6 5:4 3:2 1:0	MOT1SIG Low4bit  MOT2SIG Low4bit	MOT1Angle Low2bit MOT2Angle Low2bit MOT1SIG/ON MOT2SIG/ON
12		MOT1 抑制 High8bit (yaw)	MOT1 抑制 High8bit
11		MOT2 抑制 High8bit (pitch)	MOT2 抑制 High8bit
10	7,6,5,4 3,2,1,0	MOT1 抑制 Low4bit MOT2 抑制 Low4bit	MOT1 抑制 Low4bit MOT2 抑制 Low4bit
9		MOT1 最小周期 all0 for / SIGstop	MOT1 周期
8		MOT2 最小周期 all0 for / SIGstop	MOT2 周期
7		MOT1 周期変数	MOT1FET High8bit
6		MOT2 周期変数	MOT2FET High8bit
5		MOT1 角度抑制変数	BatteryVoltage High8bit
4	7:6 5:4 3:2 1:0	MOT2 角度抑制変数	MOT1 Low 2bit MOT2 Low 2bit Battery Voltage Low 2bit KA SelfOn
3		累積的な RotationHigh8bit	IRQ0,1,2,3-I/O HighLow
2		累積的な RotationLow8bit	n/a
1		LED 信号: Forward:4bit Yaw:4bit	
0		LED 信号: Pitch:4bit Roll:4bit	

## 参考文献

- [1] 広瀬：生物機械工学．工業調査会，1987.
- [2] 広瀬・織田・梅谷：斜旋回機構を用いた索状能動体とその制御．計算自動制御学会論文集中，vol.17, no.6, pp.686–692, 1981.
- [3] G. Endo, K. Togawa and S. Hirose: “Study on self-contained and Terrain Adaptive Active Cord Mechanism,” Proc. of the IROS, pp.1399–1405, 1999.
- [4] K. Togawa, M. Mori, and S. Hirose ”Study on Three-dimensional Active Cord Mechanism: Development of ACM-R2”, Proc. of the IROS, pp.2242–2247, 2000.
- [5] H. Ohno and S. Hirose: “Design of Slim Slime Robot and its Gait of Locomotion,” Proc. of the IROS, pp.707–715, 2001.
- [6] 高山，広瀬：“螺旋回転推進を行う三次元索状能動体の研究,” 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.5, pp.625–635, 2004.
- [7] 馬 書根：“へびの運動形態に関する研究（第一報：へびの直進蛇行移動体型曲線）” 日本機械学会論文集，62-593（C編），pp.230–236, 1996.
- [8] Shugen MA: “Analysis of Snake Movement Forms for Realization of Snake-like Robots”, Proc. of ICRA, pp.3007–3013, 1999.
- [9] 馬，増子，広瀬：“へびの運動形態の改名およびへび型ロボットの研究・開発（第2報：各種蛇行体型曲線の移動効率における比較）”，第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集（Vol.3），pp.1165–1166, 1995.
- [10] 馬，広瀬：“へびの運動形態の改名とへび型ロボットの研究開発-へび型移動ロボットの蛇行移動-”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’96 論文集（Vol.A），pp.251–254, 1996.
- [11] 馬・内藤：“へび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.391–392,1997.
- [12] A. Naito and S. Ma: “Analysis of Creeping Locomotion of Snake-like Robots”, Proc. of 3rd Asian Conf. on Robotics and Application, pp.393–398, 1997.
- [13] Shugen MA: “Simulation of Snake-like Robot Creeping Locomotion Adapted

- to Environment”, Proc. of TITech COE/Super Mechano-Systems Workshop(SMS'99), pp.94–103, 1999.
- [14] 田所, 馬, 井上: “ヘビ型ロボットの斜面蛇行移動体形”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会, 1L15, 2003.
- [15] Changlong Ye, Shugen Ma, Bin Li, Yuechao Wang: “Turning and Side Motion of Snake-like Robot”, Proc. of ICRA, pp.5075–5080, 2004.
- [16] Kousuke Inoue, Shugen Ma, and Chenghua Jin: “Neural Oscillator Network-Based Controller for Meandering Locomotion of Snake-Like Robots”, Proc. of ICRA, pp.5064–5069, 2004.
- [17] P. Prautsch, T. Mita: “Control and Analysis of the Gait of Snake Robots,” Proc. of the ICCA, pp.502–506, 1999.
- [18] P. Pavel, T. Mita, T. Iwasaki: “Dynamical Control of a snake robot,” Proc. of the SICE, pp.85–86, 1999.
- [19] 伊達, 星, 三平, 石井: “横拘束力を考慮したヘビ型ロボットの動的な操作性とその推進制御,” ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 論文集, 2 P1-84-129, pp.17–20, 2000.
- [20] H. Date, M. Sampei and S. Nakaura: “Motion Control of a 3D Snake Robot on a Surface,” Proc. of the SICE, pp.17–20, 2002.
- [21] H. Date, M. Sampei and S. Nakaura: “Motion Control of a 3D Snake Robot on a Surface,” The 2nd annual conference on control systems, Proc. of the SICE, pp.17–20, 2002.
- [22] G. S. Chirikjian and J.W. Burdick: “Kinematics of hyper-redundant locomotion with applications to grasping,” Proc. of the ICRA, pp.720–727, 1991.
- [23] J. W. Burdick, J. Radford and G. S. Chirikjian: “A “Sidewinding” Locomotion Gait for Hyper-redundant Robots,” Proc. of the ICRA, vol.3, pp.101–106, 1993.
- [24] G. Poi, C. Scarabeo and B. Allotta: “Traveling wave locomotion hyper-redundant mobile robot,” Proc. of the ICRA, pp.418–423, 1998.
- [25] Mark Yim et al.: “PolyBot: a Modular Reconfigurable Robot,” Proc. of the ICRA, pp.514–520, 2000.
- [26] S. Murata, E. Yoshida, K. Tomita, H. Kurokawa, A. Kamimura, S. Kokaji: “Hardware Design of Modular Robotic System” Proc. of the IROS, pp.2210–2217, 2000.
- [27] K.-U. Scholl et al.: “Controlling a Multijoint Robot for Autonomous Sewer Inspection,” Proc. of the ICRA, pp.1701–1706, 2000.
- [28] Bernhard Klaassen et al.: “GMD-SNAKE2: A Snake-Like Robot Driven by Wheels and a Method for Motion Control,” Proc. of the ICRA, pp.3014–3019,

- 1999.
- [29] Kevin Dowling: “Limbless Locomotion: Learning to Crawl,” Proc. of the ICRA, pp.3001– 3006, 1999.
  - [30] Tetsushi Kamegawa, Tatsuhiro Yamasaki, Hiroki Igarashi, and Fumitoshi Matsuno: “Development of The Snake-like Rescue Robot ” KOHGA ” ” Proc. of the ICRA, pp.5081– 5086, 2004.
  - [31] M. Mori and S. Hirose: “Development of Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D mobility,” Proc. of the IROS, pp.1552–1557, 2001.
  - [32] M. Mori and S. Hirose: “Three-dimensional serpentine motion and lateral rolling by Active Cord Mechanism ACM-R3,” Proc. of the IROS, pp.829–834, 2002.
  - [33] M. Mori, H. Yamada and S. Hirose: “3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, 2005.
  - [34] 山田, 広瀬: “実用的 3次元索状能動体 ACM-R4 の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’05, 神戸, 神戸国際展示場, 2005-06-09–11, 2A1-S-031
  - [35] 広瀬, 森, 山田, 千木崎: “水陸両用ヘビ型ロボット「ACM-R5」の機構と制御の研究”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’05, 神戸, 神戸国際展示場, 2005-06-09–11, ALL-N-020
  - [36] 田沢: 曲線論・曲面論-Mathematica で探索する古典微分幾何学- . ピアソン , 1999.



# 謝辞

本論文の執筆にあたり，細部にわたり熱心に御指導下さいました東京工業大学大学院理工学研究科 機械宇宙システム専攻 広瀬 茂男 教授と，研究生生活を支えて下さいました家族に謹んで御礼申し上げます．そして本研究に数多くの御助言を下さいました米田 完助教授，本論文について御討論下さいました伊能 教夫 教授，三平 満司 教授，小俣 透 助教授に厚く御礼申し上げます．また，快適な研究環境を支えてくださり有益な御助言を下さいました福島.E. 文彦 助手，鈴木 秀昭 技官に御礼申し上げます．

索状能動体開発において，ACM-R1 及び RollerWalker を通しデモ・メンテナンス含め総括的なロボット論を御指導下さいました遠藤 玄 氏（現ソニー），ACM-R2 を通し設計論を御指導下さいました外川 圭司 氏（現ソニー），電装系構築の際御指導戴いた瀧田 謙介 氏（現 NPO 国際レスキューシステム研究機構），木村 仁 助手（現伊能研），桑原 裕之 氏（現 NPO 国際レスキューシステム研究機構），本論における体幹記述法や新機開発など数多く助言・助力して戴いた山田 浩也 氏（現 博士1年），ACM-R5 構築と万博デモをはじめ強力なサポートをして戴いた千木崎 俊太郎 氏（現 鈴村・山崎研 修士1年），小上 和訓 氏（修士1年）に心より感謝致します．

本研究に数多くの助言やアイデアを下さり，また数多くのデモを共にした太田 祐介 助手（現 COE），河上 篤志 氏（現 VBL 研究員），高山 俊男 助手（現小俣研），程島 竜一 氏（現 博士4年），本村 和寛 氏（現 博士3年），新井 雅之 氏（現 博士2年），多田隈 健二郎 氏（現 博士2年）ほか，本研究を支えてくれた広瀬・米田研究室OB・メンバーの皆様，および多くの実験装置製作に全面的にご協力いただきました（株）小野電機製作所の皆様，ご支援下さった皆様に深く感謝致します．



# 研究業績

## 印刷論文

- [P1] M. Mori, H. Yamada and S. Hirose: “3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, 2005. (掲載予定)

## 査読付き国際会議

- [C1] Makoto Mori and Shigeo 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 (IROS '01), Maui, Hawaii (2001-10-29 to 2001-11-03) pp.1552–1557.
- [C2] Makoto Mori and Shigeo Hirose; “Three-dimensional serpentine motion and lateral rolling by Active Cord Mechanism ACM-R3,” Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '02), EPFL, Switzerland (2002-09-30 to 2002-10-04) pp.829–834.

## その他の口頭発表

- [O1] 森 淳 , 広瀬 茂男; “汎用型索状能動体 A C M - R 3 の開発”, 第 18 回日本ロボット学会 学術講演会, 草津, 立命館大学, 2000-09-12–14 , 予稿集第 3 分冊 3O13 , pp1427-1428
- [O2] 森 淳 , 広瀬 茂男; “3 D 運動を行う索状能動体 A C M - R 3 の開発”, ロボティクスメカトロニクス講演会'01, 高松, サンメッセ香川, 2001-06-08–10, 1P1-A3
- [O3] 森 淳 , 広瀬 茂男; “Development of 3D mobile snake-like robot Active Cord Mechanism ” ACM-R3”, T. I. Tech. COE/ Super Mechano-System Symposium 2001, Yokohama, 2001-11-19–20, HRS5
- [O4] 森 淳 , 広瀬 茂男; “3次元索状能動体 A C M - R 3 を用いた推進実験”, ロボティクス

- メカトロニクス講演会'02, , 松江, くにびきメッセ, 2002-06-07-09, 1A1-L06
- [O5] 森 淳, 広瀬 茂男; “索状能動体の側面方向移動に関する研究”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'04, 名古屋, 名城大学, 2004-06-18-20, 2P2-L1-14
- [O6] 森 淳, 広瀬 茂男; “索状能動体のための複合波形合成型 体型運動制御”, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 岐阜, 岐阜大学, 2004-09-15-17, 3I15
- [O7] Shigeo Hirose and Makoto Mori. “Biologically Inspired Snake-like Robots,” , Keynote paper of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO'04), 2004-08-18-22

## 本論文に関係しない論文・発表

- [Z1] M. Mori, R. Hayashi, S. Matunaga and Y. Ohkami, “On Ground Experiments of Reconfigurable Brachiating Space Robot,” Proc. 9th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, Sagamihara, ISAS, July 22-23, 1999, pp.227-232.

## 本論文に関係しない論文・発表（共著）

### 印刷論文

- [x1] K. Yoshihara, Y. Sugiura, M. Sekiguchi, K. Ui, S. Tsurumi, K. Nakaya, M. Mori, S. Matunaga and Y. Ohkami, “Concept Design of HAYATE: Small Satellite for Supporting Antarctic Geophysical Observations,” Polar Geoscience, No.12, October 1999, pp.240-247.
- [x2] K. Nakaya, S. Tsurumi, H. Sawada, M. Mori, K. Ui, R. Hodoshima, N. Maeda, H. Okada, N. Miyashita, M. Iai, K. Konoue, O. Mori and S. Matunaga, “Titech CanSat Project 2000: Sub-Orbital Flight and Balloon Experiment,” the Journal of Space Technology and Science, Vol.16, No.1, 2000, pp.9-18.
- [x3] K. UI, K. NAKAYA, K. KONOUE, H. SAWADA, S. TSURUMI, M. MORI, R. HODOSHIMA, N. MAEDA, H. OKADA, N. MIYASHITA, M. IAI, O. MORI and S. MATUNAGA, “Titech CanSat 2000 : The sub-orbital flight experiment of the micro-satellite model,” M. Rycroft and N. Crsby (eds.), Smaller Satellites: Bigger Business? Concepts, Applications and Markets for Micro/Nanosatellites in a New Information World, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002, pp.417-418.

- [x4] H. SAWADA, K. UI, M. MORI, H. YAMAMOTO, R. HAYASHI, S. MATUNAGA and Y. OHKAMI, "Micro-gravity Experiment of a Space Robotic Arm Using Parabolic Flight," *Advanced Robotics*, Vol. 18, No. 3, 2004, pp. 247-267.

### 査読付き国際会議

- [y1] S. Matunaga, K. Yoshihara, Y. Sugiura, M. Sekiguchi, S. Tsurumi, K. Nakaya, H. Sawada, M. Mori, K. Ui and O. Mori.: "Titech Micro-Satellite Model: CanSat for Sub-orbital Flight," 2000 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, March 18-25, 2000, 2.0204.
- [y2] S. Matunaga, R. Hayashi, H. Yamamoto, H. Sawada, M. Mori, K. Ui, and Y. Ohkami, "Architecture and Design for System of Reconfigurable Brachiating Space Robot," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Dever, Aug. 15-17, 2000, AIAA 2000-4380.
- [y3] K. Yoshihara, Y. Sugiura, M. Sekiguchi, H. Sawada, S. Tsurumi, K. Nakaya, M. Mori, K. Ui, N. Maeda, O. Mori and S. Matunaga, "Titech Cansat Project - 1999 Sub-Orbital Flight Experiment of Small Satellites the Size of a Soft Drink Can," Proc. 22nd International Symposium on Space Technology and Science, Morioka, May 28-June 4, Vol. 2, 2000-o-1-11v, 2000, pp.2348-2353.

### 口頭発表

- [z1] 吉原圭介, 杉浦嘉紀, 関口正人, 宇井恭一, 鶴見辰吾, 中谷幸司, 森淳, 松永三郎, 狼嘉彰, "南極観測支援衛星「はやて」の概念設計," 第18回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨, 東京, 1998年10月, pp.6-8.
- [z2] K. Yoshihara, Y. Sugiura, M. Sekiguchi, K. Ui, S. Tsurumi, K. Nakaya, M. Mori, S. Matunaga and Y. Ohkami, "'HAYATE' Satellite for Support of Antarctic Observations," 1998 University Space Systems Symposium, Oahu, Hawaii, November 10-11, 1998.
- [z3] 上野浩史, 佐藤等, 吉田哲二, 狼嘉彰, 松永三郎, 林良一, 森淳, "再構成歩行型宇宙ロボットの実験システム", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集 Vol.2, 平塚, 神奈川, 1999, pp.321-322.
- [z4] 神野誠, 竹貝朋樹, 狼嘉彰, 松永三郎, 宇井恭一, 森淳, "再構成歩行型宇宙ロボットの地上実験アームの開発", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集 Vol.2, 平塚, 神奈川, 1999, pp.323-324.

- [z5] 林良一, 宇井恭一, 森淳, 松永三郎, 狼嘉彰, 神野誠, 上野浩史, ”再構成歩行型宇宙ロボット (RBR) の単アーム地上実験,” 第 43 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 神戸, 1999 年 10 月, 99-1A3, pp.25-30.
- [z6] 吉原圭介, 杉浦嘉紀, 関口正人, 澤田弘崇, 鶴見辰吾, 中谷幸司, 森淳, 宇井恭一, 前田直秀, 森治, 松永三郎, ”CANSAT 東工大ミッション - テザー利用超小型機構の基礎実験について -,” 第 43 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 神戸, 1999 年 10 月, 99-2A7, pp.485-490.
- [z7] K. Yoshihara, Y. Sugiura, K. Konoue, M. Sekiguchi, S. Tsurumi, H. Sawada, K. Nakaya, M. Mori, K. Ui, N. Maeda, O. Mori and S. Matunaga, ”CanSat Project and Suggestion of TSUMUJI satellite,” 1999 University Space Systems Symposium, Kauai, Hawaii, November 6-8, 1999.
- [z8] 澤田弘崇, 林良一, 山本 宏, 森淳, 宇井恭一, 松永三郎, 狼嘉彰, 上野浩史, ”再構成歩行型宇宙ロボットの微小重力性能評価実験,” 第 16 回宇宙ステーション講演会/第 13 回有人宇宙飛行技術シンポジウム, 筑波, 2000 年 4 月, 2A7.
- [z9] 澤田弘崇, 林良一, 山本 宏, 森淳, 宇井恭一, 松永三郎, 狼嘉彰, ”再構成歩行型宇宙ロボット RBR の航空機微小重量実験,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 CD-ROM, 熊本, 2000 年 5 月, 2P1-08-004.
- [z10] 澤田弘崇, 山本 宏, 林良一, 宇井恭一, 森淳, 松永三郎, 狼嘉彰, ”再構成歩行型宇宙ロボット (RBR) 航空機実験の評価検証,” 第 44 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 上巻, 福岡, 2000 年 10 月, 00-1C4, pp.168-173.
- [z11] 程島竜一, 澤田弘崇, 森淳, 中谷幸司, 鶴見辰吾, 前田直秀, 此上一也, 森治, 松永三郎, ”東工大 CanSat2000 (第 1 報: カメラ画像取得ミッション),” 第 44 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 下巻, 福岡, 2000 年 10 月, 00-3E1, pp.1429-1434.
- [z12] Koji Nakaya, Shingo Tsurumi, Hirotaka Sawada, Makoto Mori, Kyoichi Ui, Ryuichi Hodoshima, Naohide Maeda, Hideto Okada, Naoki Miyashita, Masafumi Iai, Kazuya Konoue, Osamu Mori and Saburo Matunaga, ”Introduction of TITech Small Satellite Projects,” 2000 University Space Systems Symposium, Hilo, Hawaii, November 11-14, 2000.

## 主なロボットデモンストレーション

- [R3:1] 東京工業大学 文化祭 (工大祭) 「先端ロボットの世界」(開催年)
- [R3:2] 2001-11-16 ~ 2001-11-25 ロボフェスタ神奈川 2001 横浜会場
- [R3:3] 2002-03-28 ~ 2002-03-31 ROBODEX2002

- [R3:4] 2002-11-02 ~ 2002-11-04 ロボットフェスティバル 2002(ロボットグランプリ併設)
- [R3:5] 2003-03-31 ~ 2003-04-06 ROBODEX2003
- [R3:6] 2003-09-22 ~ 2003-10-05 Thailand Science-Tech 2003
- [R3:7] 2003-11-08 ~ 2003-11-09 第 7 回ロボットグランプリ併設展示
- [R3:8] 2004-05-28 第 26 回日本ロボット学会シンポジウム ロボットの作り方
- [R3:9] 2004-06-20 ロボティクスメカトロニクス講演会 2004 発表にて
- [R3:10] 2004-09-05 ICAM'04 Exhibition(旭川)
- [R3:11] 2005-01-09 ~ 2005-01-22 イタリア・フェスティバル in 東京ドーム
- [R3:12] 2005-03-21 第 8 回ロボットグランプリ併設展示
- [R3n:1] 2005-05-12 ~ 2005-05-22 知的財産が拓く未来の夢展, モリゾー・キッコロメッセ,  
EXPO2005 AICHI JAPAN
- [R5:1] 2005-05-12 ~ 2005-05-22 知的財産が拓く未来の夢展, モリゾー・キッコロメッセ,  
EXPO2005 AICHI JAPAN
- [R5:2] 2005-06-09 ~ 2005-06-19 プロトタイプロボット展, モリゾー・キッコロメッセ,  
EXPO2005 AICHI JAPAN

