T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	不整地推進を行う索状能動体の設計と運動制御
Title(English)	
著者(和文)	高山俊男
Author(English)	Toshio Takayama
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第5719号, 授与年月日:2004年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第5719号, Conferred date:2004/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

平成 15 年度 学位論文

不整地推進を行う索状能動体の設計と運動制御

東京工業大学 理工学研究科 機械宇宙システム専攻

髙山 俊男

目次

第１章 序論

1.1 研究の背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1

1.2 目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2

1.3 本論文の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3

第２章 不整地移動型ロボットの設計

2.1 現在存在する探索方式と位置同定の手段・・・・・・・・・・・・・・・・・5

2.2 瓦礫内探査装置の潜入手段・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7

2.3 レスキューロボットに求められる機能・・・・・・・・・・・・・・・・・・9

2.4 利用に適した移動ロボット・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・10

2.5 索状能動体の分類・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・13

第３章 省自由度化を目指した索状能動体「蒼龍Ⅰ･Ⅱ号機」の開発

3.1 実現すべきロボットの寸法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・19

3.2 不整地移動索状能動体の省自由度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・20

3.3 蒼龍Ⅰ号機の構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・22

3.4 蒼龍Ⅰ号機を構成する要素の選定と設計・・・・・・・・・・・・・・・・・24

3.4.1 連結機構と駆動方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24

3.4.2 ローリングの拘束機構・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・29

3.4.3 各姿勢変化軸に導入するバネ性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・31

3.4.4 クローラの選定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 35

3.4.5 蒼龍駆動用アクチュエータの選定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・37

3.4.6 電源と制御装置の選定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・39

3.4.7 操縦装置とインターフェイス・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41

3.5 蒼龍の基本動作特性実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・42

3.5.1 旋回性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・42

3.5.2 超壕性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・45

3.5.3 超堤性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・45

3.5.4 転倒復帰・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・48

3.5.5 不整地走行実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・48

3.6 蒼龍Ⅰ号機の問題点と改良・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・50

3.6.1 クローラ長に関する問題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・50

3.6.2 直動軸における衝撃吸収機構の配置・・・・・・・・・・・・・・・・・・51

3.6.3 運搬用持ち手の取り付け・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・52

3.6.4 車体間連結分解機構・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・53

第４章 実用化を目指した索状能動体「蒼龍Ⅲ号機」の開発

4.1 蒼龍Ⅲ号機の構成と改良点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・54

4.1.1 蒼龍Ⅲ号機の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・54

目次

4.1.2 有線誘導方式の必要性と車体内搭載容量の確保の問題・・・・・55
4.1.3 その他の狭まったクローラの問題点・・・・・・・・・・・・・・・57
4.1.4 動力伝達軸に関する問題点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・58
4.2 蒼龍Ⅲ号機の機構と設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・61
4.2.1 新しい連結機構のメカニズム・・・・・・・・・・・・・・・・・・61
4.2.2 クローラ駆動モータの配置と出力・・・・・・・・・・・・・・・・64
4.2.3 回転軸の防塵防水・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・65
4.2.4 連結分解機構・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・68
4.3 基本走行性能・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・68
4.3.1 旋回性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・68
4.3.2 超壕性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・70
4.3.3 超堤性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・71
4.4 蒼龍Ⅰ・Ⅲ号機による平常時転用のための試験・・・・・・・・・・・73
第５章 気密型の索状能動体 HELIX の機構と運動制御
5.1 索状能動体による移動方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・75
5.2 スピロヘータの螺旋回転型遊泳運動の力学・・・・・・・・・・・・・77
5.2.1 観測されているスピロヘータ運動・・・・・・・・・・・・・・・・77
5.2.2 スピロヘータ運動の基本原理と解析の準備・・・・・・・・・・・・78
5.2.3 各力の成分が全体に与える影響力・・・・・・・・・・・・・・・・80
5.2.4 スピロヘータ運動の生体駆動系の推定・・・・・・・・・・・・・・82
5.3 螺旋回転型遊泳体機械モデルの開発・・・・・・・・・・・・・・・・84
5.3.1 基本構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・84
5.3.2 “HELIX”の関節の機構・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・85
5.3.3 試作モデル HELIX-I の駆動系設計・・・・・・・・・・・・・・・88
5.3.4 捻転運動を行うための関節角度の制御・・・・・・・・・・・・・・88
5.3.5 水切り板の取り付け角度に関する考察・・・・・・・・・・・・・・94
5.4 試作した HELIX-I での遊泳実験・・・・・・・・・・・・・・・・・99
第６章 結論と今後の課題
6.1 結論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・101
6.2 今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・102

謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・104
参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・105
研究業績・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・108

第1章 序論

1.1 研究の背景

1995 年 1 月 17 日に発生した阪神淡路大震災で，多数の人間が倒壊家屋内に閉じ込められ死傷した．兵庫県観察医務局の調査分析結果によると，**Table 1-1** に示す様に震災による死亡者のうち 91.9%は当日午前 6 時までに死亡しており，殆どは即死状態だったとされている．さらに，**Table 1-2** の救出者のうち生存者の占める割合を救出時間別に見ると，日を追って生存者の割合が激減する事がわかり，同じ調査で 12.2%にのぼるとされた焼死者の中には，瓦礫の下で動けないまま，生きながらにして炎にのまれた人も少なくないとされている．[1]また，災害医療の分野では，早く適切な医療を行えば，救出後に死亡する人の 4 分の 1 を助けられると言われている．そのため，瓦礫内に閉じ込められた者を早期に発見・救出する必要がある．しかし阪神淡路地震のでは倒壊した建物の外部からでは生存者の救助を求める声が騒音によってかき消されてしまい，発見がとても困難である事が分かった．しかも倒壊建築物内の探査は更なる倒壊による２次被害の危険性があり．煙やガス等が充満しているような場所もあり，内部へ人が侵入しての探査活動は困難であった．

Dead Time		Dead Number	Total Number
1/17	5:46～6:00	2,221	2,221(91.9%)
	～9:00	16	2,237(92.6%)
	～12:00	47	2,284(94.5%)
	～23:00	12	2,296(95.0%)
	Unknown	110	2,406(99.6%)
1/18		5	2,411(99.8%)
1/20		2	2,413(99.9%)
1/21		1	2,414(99.9%)
1/22		1	2,415(100.0%)
1/25		1	2,416(100.0%)

Table 1-1　The number of deaths

		1/17	1/18	1/19	1/20	1/21
Fire Defence Agency	Rescued	604	452	408	238	121
	Living	486	129	89	14	7
Self Defence Force	Rescued	88	354	475	246	88
	Living	32	66	44	12	3
Total Number of Rescued		692	806	883	484	209
Total Number of Living		518	195	133	26	10
Living Rate (%)		74.9	24.2	15.1	5.4	4.8

Table 1-2　The death rate of rescued victims

また，2001 年 9 月 11 日の WTC におけるテロ事件の様な鉄骨や鉄筋コンクリートの高層ビルにおける倒壊事件では，簡易な移動ロボットによって瓦礫内に多くの死者が倒れていることが発見され移動ロボットによる探査の有効性が判った. WTC で利用したロボットは，一部は専用に研究が行われていた物の他，配管内や下水道等を調査するロボットや軍事偵察用の小型遠隔操縦車両が多数利用された．[2]配管内や下水道は保守点検の必要が有るが，その多くは人が入れない程狭い物，もしくは水に満たされた汚い空間であり人間が直接入って検査するには重労働であり，早くから調査用の遠隔操作ロボットが研究利用されており，この技術を転用した物であった．[3]WTC では出火や粉塵を抑えるために，大量の水が撒かれ，粉塵と入り混じって泥状になった場所でロボットを利用しなければならなかったため，元来から対環境性を考慮して開発してきたこうした移動ロボットが活躍する事ができた.

他にも狭い空間でありながら人が点検検査を行う必要のある空間として建物の床下があげられる．一般家屋の床下は高さ 40～50cm 程度の空間で，上下水道，ガス，空調等の配管が通っており，配管の調査やカビやシロアリ等による腐食を防ぐため定期的な点検が必要となっている．内部はコンクリートの壁で仕切られた小部屋に分かれており，壁には所々人がかろうじて通れる程度の小さな通路が開いている．点検作業では床に設けられた数少ない侵入口より入って，通路を利用して埃の溜まった内部を這って移動する．床面積の狭い一戸建てであればまだ良いが，床面積の広い集合住宅等では建物の端にある点検口から侵入し，全区域を点検する必要があり重労働となっている．また場合によっては空調の増設工事で配管が通路を塞ぎ点検が不能となっている場所もある．この様な場合ガス管等の危険な物はは配管を新たに建築物の外壁に増設する必要が有り費用が高くなる．そのためこうした空間を遠隔操縦で検査する事のできる移動ロボットの開発も望まれている．また防空壕跡，採石場跡，鍾乳洞等は地上に建築物を建てる際に地盤沈下の原因となるため調査をする必要が有るが崩落やガス等の危険性が有り，鍾乳洞や採石場跡等では水没してしまった空間で水中遊泳を行う必要もある．[4]こうした空間を移動する能力をもつ不整地移動ロボットがあれば狭隘空間だけではなく，人間が行うには危険な岩場の調査や惑星探査ロボット等に応用する事ができる.

1.2 目的

本論文では狭い空間で足場が悪く，粉塵や水やガス等が存在している場所を不整地と定義し，不整地を境界無く移動する事のできる不整地移動ロボットと呼ぶ．背景で説明した様に不整地移動ロボットには使用目的が多数ある．しかし，床下や配管の保守点検作業や防空壕跡の調査等は時間的制約が少なく，その時その時で状況に応じた道具を準備する余裕があるが，レスキュー活動では一刻を争う作業であり，早期の実用化が望まれている．しかしレスキューだけを目的とした不整地移動ロボットでは生産数が少ない為に単価が高

くなるだけでなく，平常時には使う事が無いため操縦者の数や操縦技術の訓練不足といった問題も生じる．しかし倒壊家屋内の様な凹凸のある狭い空間での移動可能なロボットを平常時には需要のある上記した類の保守点検作業に利用する事で，量産性や操縦者の問題を解決する事ができる．

本論文は主に不整地移動ロボットとして倒壊家屋内を移動するロボットについて必要な能力を調べ，ヘビ型のロボットである索状能動体が不整地移動に適していることを明確にする．さらに早期に実現する事が可能で移動能力の高い索状能動体と，対環境性に優れた索状能動体が相反する特性を持つ索状能動体である事を明確にし，早期の実用化を目指す索状能動体については，省自由度化と平常時の利用を視野に入れた設計法を示し，対環境性を考慮に入れた索状能動体に関しては完全気密型の水陸両用な索状能動体を実現するための設計手法を示し，それぞれの実験機を製作して基本動作実験をおこない，動作性能を確認する事を目的とする．

1.3 本論文の構成

本論文は，全 6 章から構成される．

第 2 章「不整地移動型ロボットの設計」では不整地移動ロボットの必要性と最適なロボットの種類を明確にする．まず現在利用可能な探索機器の能力を明確にして，移動ロボットにより倒壊家屋内部へ直接侵入しての探査の必要性を明らかにする．続いて不整地移動に利用する事のできる可能性のある移動ロボットを分類分けし，ヘビ型ロボットである索状能動体の優位性を明確にする．さらに索状能動体の種類を分類分けし，能動関節と能動推進器を共に持つ物が最も不整地移動に適している事を明らかにすると同時に，能動推進器が気密構造にする事を妨げる事を示す．対環境性という点では能動推進器を持たない物が高く，気密構造に作る事で水陸両用の移動ロボットを構成する事ができる事を示すと同時に，能動推進器を持たないと超冗長な索状能動体となってしまい，緊急の実用化には向かない事を示す．最後に本研究では能動関節，能動推進の両方を持つ物について実用化を目指した開発と，能動関節のみを持つ完全気密な水陸両用型の移動ロボットの開発を同時に行う事を述べる．

第 3 章「省自由度化を目指した索状能動体「蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機」の開発」では早期に実現する為の手法として能動関節と能動推進器を持つ索状能動体の省自由度化の手法を示し，これを実現する為の設計法を述べる．まず，不整地移動に必要となる移動能力である，旋回，超壕，超堤，転倒回復を行う索状能動体が最小連結節数３，最小駆動自由度３自由度で実現できる事を明確にする．続いてこの自由度で駆動する移動ロボットの関節機構の設計手法を述べ，実験機「蒼龍Ⅰ号機」を製作する．さらに実験機により動作性能を評価する．最後に蒼龍の持つ車両構成の特徴である，連結車両の車体毎にセンサ搭載車体，駆動装置搭載車体，制御装置搭載車体と分かれている点に注目し，車体交換を行う事でより多目的

に利用が可能である事を示し， 車体交換を容易に行う事のできる実験機「蒼龍Ⅱ号機」を製作する．

第 4 章「実用化を目指した索状能動体「蒼龍Ⅲ号機」の開発」では，新たに改良型の「蒼龍Ⅲ号機」の設計法について述べる．まず有線誘導による遠隔操縦の必要性とその問題点について述べ，通信線を車体内に搭載する手法を提案する．さらに「蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機」の実験により判った車体構造上の問題点を明らかにして，これを解決する為の手法を検討し，「蒼龍３号機」の製作を行い，動作性能を評価する．さらに蒼龍の一般的需要に対する活用方法として一般家屋の床下点検に利用できる事を確認する為の実験を行う．

第 5 章「気密型の索状能動体 HELIX の機構と運動制御」では対環境性に優れた能動関節を持ち能動推進器を持たないヘビ型索状能動体の移動方法として，これまでに無い全く新しい水中遊泳方法である螺旋回転推進を提案し，これを実現する為の完全気密型の２自由度屈曲関節の開発を行う．まずヘビ型索状能動体の移動方法のこれまでに行われてきた研究について言及し，陸上，水中を問わず蛇行運動による推進では全ての推進力を出している節と出していない節が存在している事を指摘し，一方でスピロヘータと呼ばれる微生物が体全体を螺旋形にして回転しながら流体中を前進する特徴的な運動を行い，この運動では全ての体幹が均等に推進力に寄与しており，より効果的な遊泳である可能性があることを示す．さらに力学的にこの様な遊泳が可能である事を計算により示す．次に水中遊泳を行う索状能動体に利用する完全気密型の関節構造について検討し，試作した気密型２自由度関節を用いた索状能動体 HELIX により提案する水中遊泳理論の確認実験を行う．

第 6 章「結論と今後の課題」では結論と今後の課題について述べる．

第2章 不整地移動型ロボットの設計

本章では不整地の代表例として倒壊家屋内部を扱い，不整地移動ロボットとしてヘビ型ロボットである索状能動体が適している事を明確にする．そこでまず不整地探査に移動ロボットが必要である事を明確にするために，現在存在している探査機器の能力を明確にして，瓦礫外からの大まかな探査と内部にカメラ等のセンサを入れて直接の正確な位置同定が必要である事を述べる．次に内部探査に利用可能となる可能性のある移動体を分類分けして，それぞれの長所と短所を挙げ，索状能動体が不整地移動に適している事を明確にする．さらに索状能動体を分類分けしてそれらの特徴を挙げ，最も機動性に優れ実用化に最も適した索状能動体と最も対環境性に優れた索状能動体が相反する特徴を示す事を示し，本論文でこの両者について同時に研究を行っていく事を示す.

2.1 現在存在する探索方式と位置同定の手段

被災者探索にどの様な機械が必要となるかを明らかにする為には，現在どのようなセンサが利用できるかを明らかにする必要がある．鶴谷三郎氏等による「レスキュー活動に於ける生存者探索技術」によると，現在，被災者の探索に利用されている方法を大まかに分類すると①光学機器，②電磁波レーダー，③音響，④ガス，臭い，の４通りに分けることができる．[5]

光学機器を利用した探索方法として一般的な物として CCD カメラがある．これらは人間が直接視覚で確認する事ができ，被災者の状況確認が確実に行う事ができる．赤外光を利用したカメラは可視光よりも粉塵に強く温度センサとしても機能する．また赤外光を利用した炭酸ガスレーザレーダを用いた視覚センサは煙や炎を透して対象の反射強度分布を示す明暗画像や対象物までの距離分布の画像を得ることが出来る．[6]しかしこれらのセンサは障害物越しに探査する事が出来ないため，受光部を瓦礫内部に送り込む必要がある．

電磁波レーダーとして現在手に入るもののほとんどが平坦な地表から走査し反射波の強弱から異物または空洞の存在を知るものであり，瓦礫などの上からの走査が困難である．また瓦礫内の空間からの反射もあり出力画像から埋没物の同定が困難であると考えられ，災害現場での適用は困難であると考えられる．西独科学技術省の補助で開発された生存者探索システムは，犯罪捜査等に用いる目的で開発されたため，技術情報が一切公開されていないが，電磁波が放射される立体角内の人間あるいは動物の心拍および呼吸を検知するもので，心拍数，呼吸回数から生存者の有無と同時にその人数をも判定することが出来るとされている．この装置は，走査面を必要とせず，瓦礫の上からでも利用できる．機種には２機種あり，大規模災害用では，小型アンテナで左右 70 度，上下角 106 度，最大距離 30 m，大型アンテナで左右角 45 度，上下角 70 度，最大距離 50m，パラボラアンテナでは左右角 34 度，上下角 24 度，最大距離 90mである．小規模災害及び犯罪捜査用は上下左右角 60 度，最大距離 20mとなっている．ただし，電磁波の放射立体角内のどこに生存者がいる

かまでは検知できないようであるので，生存者がいる場合には，進入探索を行える機器で位置確認や状況確認をする必要がある．

音響を利用する物としては地中の音響を採取するものと，超音波をレーダーの様に利用して煙や暗闇を透かして画像を得るものがある．音響探知器で現在あるものは，建物の床から階下の会話を聞き取れるレベルの集音力をもつが，音源位置の同定機能がない．超音波視覚センサは通産省の大型プロジェクト極限作業ロボットの開発で火災などの災害時の探索用として日本電気が開発したもので，測定範囲 2m，距離分解能 1cm 以下，最大視野角±30 度，方位角分解能±1.5 度を得ている．検出対象としては直径 2mm のワイヤも検出でき，かつ，水平面内断面画像や，正面画像として提示することも可能であるが，瓦礫の外部から探査する事ができる物ではなく瓦礫内部で使用する必要がある．[7]

ガス，臭いを利用した技術としては，炭酸ガス検出方式と犬が挙げられる．炭酸ガス検出方式のものは，消防研究所で開発され，押込式，自走式，穴開式がある．何れも吸引パイプを瓦礫中に挿入し，ポンプ吸引したガス中の二酸化炭素濃度を検出し，それにより人の存在を検出する．半径約 10mの広範囲の探索が可能で，各検出箇所の濃度を比較することにより，ある程度の位置同定も可能である．犬の利用では常日頃からの訓練と飼育が必要ではあるが，瓦礫内への侵入能力が高くＴＶカメラ，マイク，スピーカー等との組み合わせにより状況把握や被災者との会話も可能となる事も期待できた．しかし阪神淡路震災でスイスの災害救助隊が救助犬により救助活動を行い，堆積物があると嗅覚が働かず，人手で堆積物を取り除く必要が有ったが，人間が近づくと嗅覚に影響を及ぼし，雑音で探査に集中する事ができないため，作業に時間がかり，また人間だけではなく隠れていた猫や転倒した冷蔵庫の生物等にも反応してしまったが遺体が全焼してしまった場合には反応しないといった問題が明らかとなった．[1]

以上の事から障害物を透過して探査を行う事のできる物は正確な位置や状況を確認する事が出来なく，正確な位置同定と状況把握をするためには機材を瓦礫内部に送り込まなければならないという事が判る．よって有効であると考えられる救出活動は，１）瓦礫外からの電磁波，音響，ガス等を用いたおおよその位置の確認，２）カメラ等を瓦礫内部に入れて正確な位置確認及び瓦礫内の状況把握，３）掘削救助，の 3 ステップに分けられると考えられる．１）においては瓦礫の上に探査装置を設置または持って移動することは危険である．そこで小型の遠隔操縦型のヘリコプターや飛行船**(Fig.2-1)**を用いたり，ハイパーテザーと呼ばれる２台の移動車両間に張られた通信と電源供給能力をもつケーブルにぶら下げられた探査装置を車両間で往復させる事で瓦礫の上部より非接触に安全に探査する方法**(Fig.2-2)**が有効であると考えられる．[8][9][10][11]２）においてはカメラや集音マイク等の人間の視聴覚による直接の探査が有効であると考えられ，これらを瓦礫内へ進入させる装置が必要となる．またこの装置を利用する事で被災者と直接コンタクトをとる事ができ状況確認や一時的な救援物資送り込む等に役立てる事も出来る．そして最後の３）段階目で人間の救出を行う．

Fig.2-1 Autonomous airship for rescue

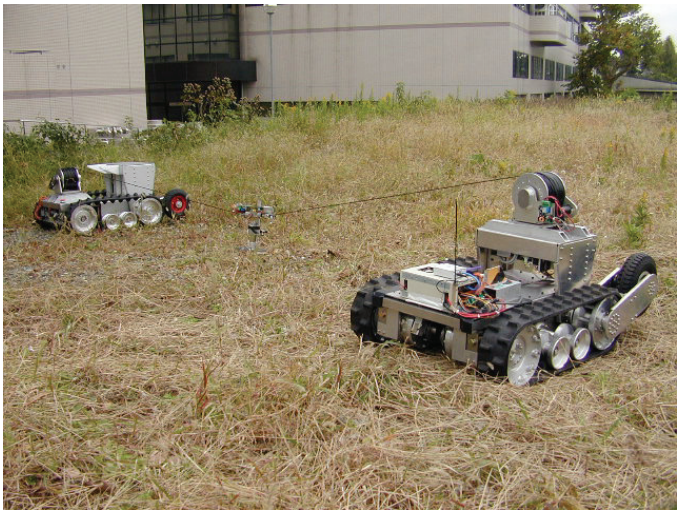


Fig.2-2 Hyper tether and carrier vehicle

2.2 瓦礫内探査装置の潜入手段

この様に瓦礫内部に探査機器を送りこむ為の方法として，技術的段階を追って実現していく必要がある．この段階として３つの段階が考えられる．

まず最も簡単な第１段階として，棒の先端にカメラやマイクを取り付けた物を瓦礫の隙間に差し込み，テレビモニター等で確認する方法である．しかしこの方法では直線的な空間にしか差し込む事が出来ず，入り組んだ空間の奥には入れることが出来ない．日本機械工業で開発された棒カメ**(Fig.2-3)**は先端が柔軟に曲がる棒を後から押し込んで受動的に曲げて内部に侵入させる事ができるが，２度３度以上の曲がった場所には入れる事が出来ず，またその侵入させる方向も手元から任意に操作できない．[12] また複雑な内部に押し込む

ためには棒に当たる部分が柔らかくなければならないが，これが柔らかいと後ろから押し込んだ時に棒が挫屈してしまい，奥に到達する事ができない．また複雑な地形に合わせて形状を曲げていくと曲がり角で大きな摩擦が発生してより挫屈しやすくなる，これを改良した物として，東京工業大学で開発されたスリムスライムスコープ(**Fig.2-4**)がある．これは二重になった袋の内側から空圧をかけて，中の袋を手繰り出しながら伸びていき，障害物に当たると柔軟にその方向を変えるものであり，これにより外部との摩擦は生じないが，二重袋の中の摩擦のせいで複数回曲げる事が出来ない事がわかっている．[13]

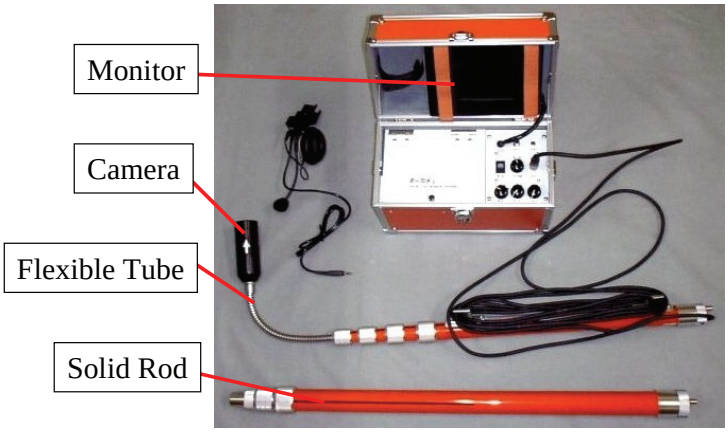


Fig.2-3 Bokame

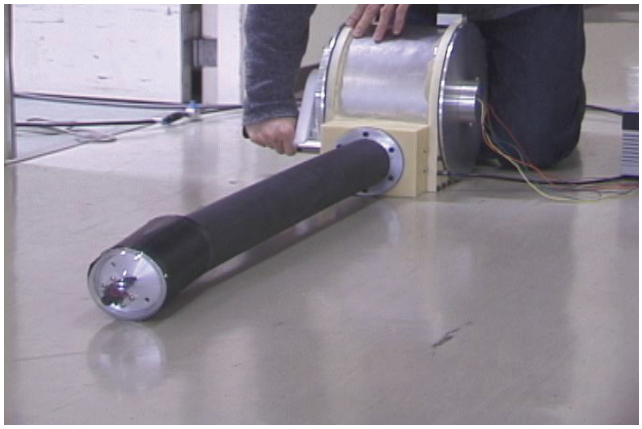


Fig.2-4 Slim Slime Scope

第２段階として考えられるのが，手元から操作して任意の場所で曲げる事の出来る棒状の物を瓦礫の隙間に差し込み，先端部のみを進みたい方向に曲げ，瓦礫内の複雑な経路に合わせて体を曲げていくものである．これに当たる物として，東京工業大学で開発された Active Hose-II(**Fig.2-5**)があるが，この装置では柔軟な胴体を後から押すことによって挫屈してしまう事を防ぐために，胴体の節々に小さなタイヤ上の物をつけて，推進力を出している．[14]

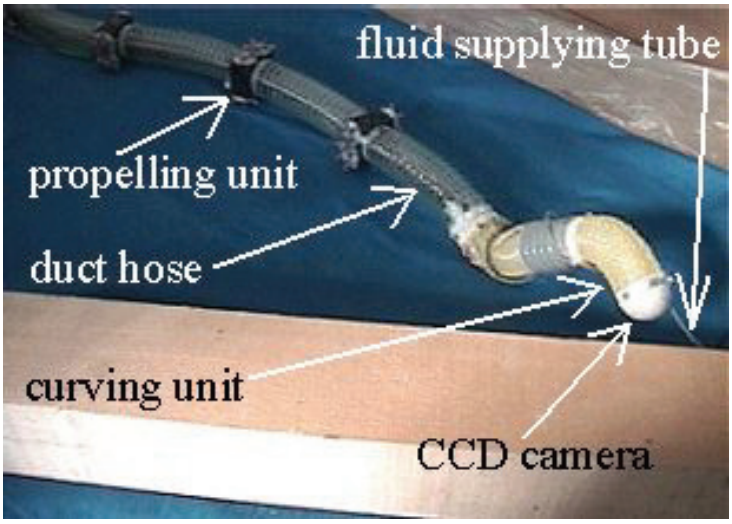


Fig.2-5 Active Hose-I

そして第３の段階として後から押し込む力を借りずに，自ら推進力を発生させて遠隔操縦で移動する不整地移動ロボットが必要となる．

2.3 レスキューロボットに求められる機能

阪神淡路大震災において，これまでのレスキュー機器の問題点が明らかになり東京消防庁の長井庸二氏は，開発が望まれるレスキュー機器の基本事項として，次のことをあげている．[15]

・大型，小型，汎用等に分けての開発
・大型では十分なパワーのある物
・長時間もって使える軽量小型のもの
・油圧等の動力を遠隔から遅れるもの
（狭い場所で動力用のエンジンを運転すると酸欠などの心配がある）
・バッテリ駆動のもの
・操作性のよいもの
・高度の取扱技術を要しないもの
・機動性，搬送性のよいもの
・火花が出ないもの
・雨水，ほこり，温度，ガス等に強いもの
・部品交換等メンテナンスの容易なもの
・廉価であるもの

これらの事項を瓦礫内探査に用いる移動ロボットについて整理しなおすと 1) バッテリ駆動である事，２）機密性に優れている事，３）モータの数が少ない事の３つに分けること

ができる．1）については瓦礫内の探査に利用できる移動ロボットは探査機器や制御装置を利用することからもバッテリ駆動がよい．またメンテナンス性を考慮するとバッテリは一般に入手しやすい電池や充電する手段が容易である自動車バッテリの様な汎用的な物が望ましい．2）については電気を利用する事から地下空間等に溜まったガスへの引火しないよう，また防水防塵の点からもロボットは完全に気密構造である事が望ましい．3）については瓦礫内ではロボットの回収が不可能になる場合も有り，廉価に大量生産できる事が望まれている事からモータ及びそれに伴う機構部を少なくして値段を安くすることは重要である．またモータの数が少なければロボットを軽くする事ができ，メンテナンス性も高くなる．また値段が安ければ床下点検等の大きな需要のある一般作業にも利用でき，継続的に保守部品の供給を行う事ができ，操縦者の育成にもなる．よって以降これらの事を移動ロボットの評価基準として用い，利用に適した移動ロボットを検討する．

2.4 利用に適した移動ロボット

瓦礫内での狭く曲がりくねった空間を進むためには小型の車体であると同時に，高い不整地走破性を持たなくてはならない．利用できる移動ロボットを長所と短所によって分類すると **Fig.2-6** の様になり，単車体のタイヤやクローラなどの転輪を用いる物と，脚による歩行による物と，ヘビや尺取虫のように関節が直列に連結された細長い物とに分けられる．以下にこれらの移動体を利用した物の前例と利点と不利点について述べる．

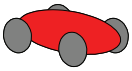
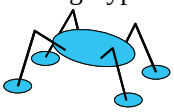
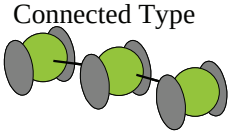
Classified	Merit	Demerit
Wheel Type (single body) 	○ High reliability ○ Easy to make	○ Low mobility in the collapsed structures
Leg Type 	○ High mobility on the debris	○ Difficult to make small practical applications ○ Low reliability
Connected Type 	○ High mobility on the debris ○ Large space to carry sensors	○ Low reliability

Fig.2-6 Classification of moving devices

単車体のタイヤやクローラを用いたロボットは自由度が少なく信頼性が高いが，高い段差や広い谷間渡りを行う為には長い車体が必要であり，車体が長くなると入り組んだ瓦礫内での旋回性能に不利となる．クローラ車両型で段差踏破力を高め，旋回時にはたたむことのできるアームを取り付けた IS ROBOTICS の Urban II（**Fig.2-7**）や神戸大学の UMRS-IV

等のような物もあるが，このような単車体の移動体では幅の広い隙間渡りを行う事はできない．[16][17]車輪型の移動体で車軸の回転力を減速してバネに蓄え，この力を解放することで跳躍して段差を乗越えることのできる Mini Whegs(**Fig.2-8**)というロボットを Case Western Reserve University で開発しているが，バネによって力を蓄えるロボットでは小型の物しか跳躍力が期待できず，探査機器を搭載する事ができない．[18]空圧シリンダは力，速度共に十分に大きく，これを利用して東京工業大学で L-in-R(**Fig.2-9**)という物も研究されているが，十分な跳躍力を出す為には車体を軽く作らねばならず，通常移動用には大きなホイール２個しか用いていないため不整地移動には向かない．[19] またこれらの跳躍移動ロボットで隙間渡りを行う場合には跳躍により高く跳ね上がる必要が有り，天井の低い場所での移動には向かない．

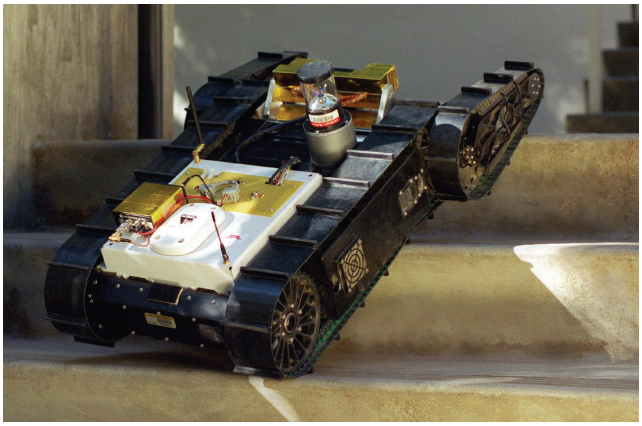


Fig.2-7 Stair climbing motion of Urban II

Fig.2-8 Jumping motion of the mini Whegs

Fig.2-9 Jumping motion of the L-in-R

歩行方式の移動ロボットは自由度が多く信頼性が低いが，虫が壁や天井に張り付いて移動する事で高い機動力を持つ事ができ，犬や猫の行動力を考慮に入れれば有効な移動手段であると考えられる．虫の大きさのロボットを機械により実現する事は難しいが，虫の頭部に電気信号を発生する装置を取り付けて遠隔操縦で操作する生物と機械を融合した“バイオボット”と呼ばれる物が東京大学で研究されており利用が期待できる．[20]しかしこの大きさのロボットは実現してもカメラ等の高度な探索機器を搭載する事はできず探査機器搬送用の移動体としては利用し難い．犬や猫の大きさで瓦礫内での移動を前提に指向性が無くなるように放射線状に配置した脚構造をもった物の研究も行われているが，十分な出力を持っているとは言えず，犬や猫の様な高い機動力や探査機器の搭載力は期待できない．[21]また歩行式の移動ロボットは，転輪式の移動ロボットと同等な出力にすると，転輪よりも大きな動作範囲が必要となり，狭い空間に侵入するには適していない．将来的に小型高出力なアクチュエータが開発されても単車体型の移動ロボットと同様に，隙間渡りには跳躍を利用する必要が有り天井の低い瓦礫内の移動には適さないと考えられる．

連結型の移動ロボットは索状能動体と呼ばれ，連結台数が多くなるとそれだけ自由度が多く信頼性が低くなってしまうが，全長が長くなっても正面投影面積が小さく，先端の車体の後を後の車体がついていくため，隙間に入っていくという動作に適している．また谷渡りや段差乗り越えも長い胴体を利用して容易に行う事ができる．またヘビは手に当たる把持部位を持たないが，細長い胴体の尻尾に近い側を木の枝に巻きつけて把持動作をして安定性を増しながら，胴体の頭側を伸ばして他の枝へと移動する等，通常の移動車両のでは出来ない様な高い機動力を発揮する事ができ，これを模した動作による高い移動性能が期待できる．また，長さを長くする事で節毎に分散させて多くの探査用機器等を搭載する事も出来る．よって連結型の移動ロボットは単体型の移動ロボットに対して瓦礫内の移動に適していると言える．[22]

2.5 索状能動体の分類

索状能動体は各関節が能動的に駆動できる物とできない物，各節に能動的推進器を持つ物と持たない物の 2 種 2 通りの４つの分類に分けられる(**Fig.2-10**)．このうち推進器も関節駆動力も持たない物は推進する事が出来ない．そこでその他の３種類，能動推進－受動関節，受動推進－能動関節，能動推進－能動関節についてその特徴を示し，不整地移動に適した索状能動体について述べる．

	Active Connection	**Passive Connection**
Active Propulsion	**MOIRA**	**GUNRYU**
Passive Propulsion	**ACM-R3**	

Fig.2-10 Classification of Connection Robot

能動推進－受動関節の索状能動体としては東京工業大学で開発された玄武(**Fig.2-11**)や群龍(**Fig.2-12**)や明治大学で開発された JYU-RON-I の連結車両型ロボットがある．[23][24][25] これらは関節部に自由度を持たないため省自由度で構成する事で信頼性を高く作る事ができる．各節は左右に独立して動く事の出来る転輪を持ち，玄武は車輪で４節８自由度，群龍と JYU-RON-I はクローラで２節４自由度を持つ．また関節部が柔軟に変形するため，関節を能動的に動かした場合に必要となる，内力を発生させない為の複雑な制御をする必要が無く，容易に各節を接地させることができ，確実に推力を得る事が出来る．そのため大型車両ではあるが連節バス等ですでに実用化がされている．[26]しかし受動関節では関節角度を支持することが出来ないため，谷間渡り動作では乗り出した節が谷に垂れ下がってしまい幅の広い谷渡りを行う事ができず，また段差に乗り上げる時に後節に押し上げられた前節が不安定となってしまう．また関節角度を能動的に変える事が出来なければ横転状態からの回復も難しい．また推進力に駆動輪を用いると無限回転軸となり，水圧がかかる場所での防水構造は難しく，ヒモや綿埃の様な絡みつくゴミにも弱くなる．推進力に脚方式

を用いればこの問題は解決できるが自由度が多くなってしまい，連結部を省自由度にする利点が生かされない．

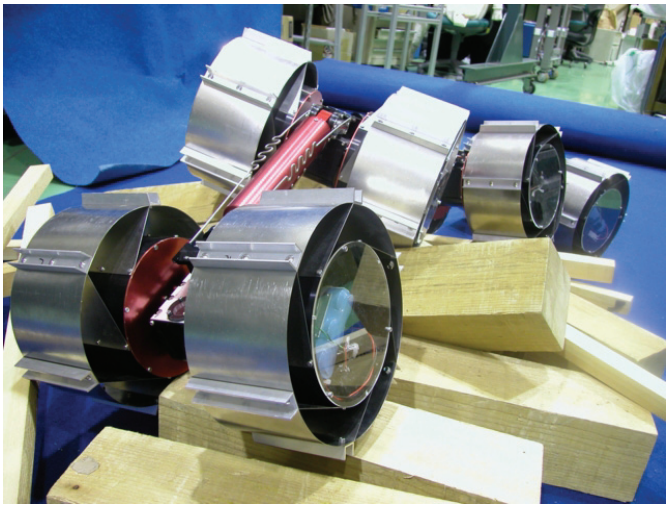


Fig.2-11 Genbu III (8DOF)

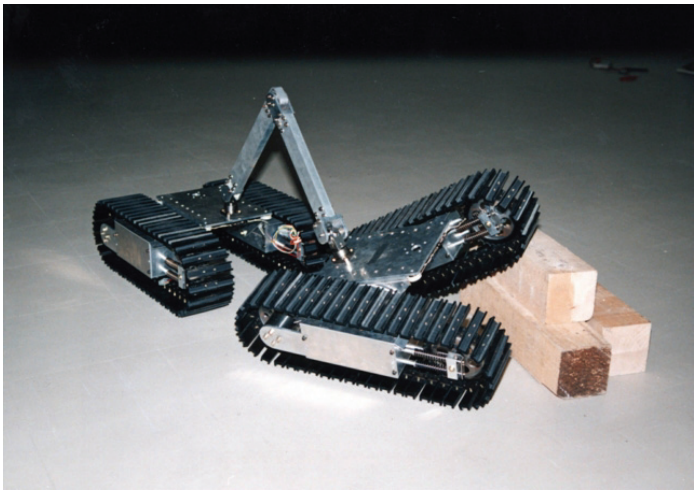


Fig.2-12 Gunryu (4DOF)

受動推進－能動関節の索状能動体は生物に例えるとヘビ型の移動体で，東京工業大学で開発された ACM-R3(**Fig.2-13**)やスリムスライムロボット(**Fig.2-14**)等がこれに当たる．[27][28]能動関節を持つと谷渡り運動では胴体を伸ばして架橋運動を行う事ができ，段差乗り越え運動についてもヘビが鎌首を持ち上げる様な動作で安定して行う事ができる．また能動推進器を持たないため，機密性が高く耐環境性に優れており，水陸両用の移動ロボットとして利用する事ができる．しかし連結節数が多くないと滑らかに動作を行う事ができず，ACM-R3 では 1 方向に屈曲する関節が縦横交互の向きに 20 個連結され 20 自由度，ス

リムスライムロボットでは縦横の屈曲と伸縮を行う 3 自由度の節が 6 個連結され 18 自由度と高自由度になっており信頼性や生産性が低くなってしまう．また節を地形に合わせて屈曲させて多くの節を接地させなければ推進力を得る事が出来ないため，各節の接地状況や関節力等を計測する必要が有り，制御が複雑で早急の実用化は難しい．こうした問題を解決する為に姫路工業大学で開発された Inchworm Robot は自由度を減らして 5 節 5 自由度で構成した尺取虫動作をするロボットで有るが，1 周期進む毎に尺取虫の様に胴体を上方に突き出す必要が有り，天井の低い場所での移動には不向きであると考えられる．[29]しかしヘビ型のロボットは十分な連結数と制御能力があればヘビの様な多様な移動と機能が期待できる．また車輪のような無限回転軸を持たないため機構部を完全な気密構造にしやすく対環境性にも優れ水中遊泳も可能とり，地上も水中も境界無く胴体の屈曲運動だけで推進する水陸両用の移動ロボットとして利用する事が出来る．

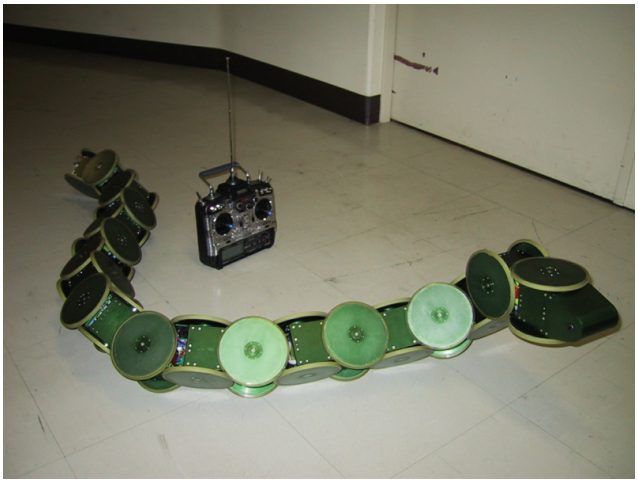


Fig.2-13 ACM-R3 (20DOF)

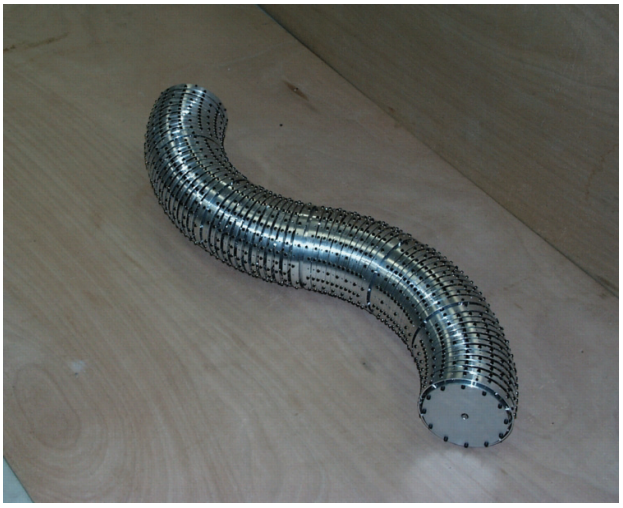


Fig.2-14 Slim Slime Robot (18DOF)

能動推進－能動関節型の索状能動体は生物に例えるとムカデ型の移動体で，京都大学で開発された MOIRA(**Fig.2-15**)や東京工業大学で開発された蛟龍(**Fig.2-16**)等がこれに当たる．[30][31]この索状能動体は能動関節による高い不整地適応能力と，推進器による確実な推進能力の両者を兼ね備えるため，最も高い不整地移動能力を示す．しかし両方に駆動装置を持つために連結節数が増えると自由度が飛躍的に大きくなり重さ信頼性共に実用的ではなくなってしまう．ただし，各節に推進器を持つために連結節数が少なくても 容易に推進力を得る事ができ, MOIRA は 4 節 3 関節で各節に周りをおおう様な 1 自由度クローラを持ち，各関節は縦横 2 自由度の首振り運動を行い 10 自由度，蛟龍は 7 節 6 関節で底面に車輪も持ち，各節は横方向の首振りと鉛直方向の上下動の 2 自由度を行う事で車体を常に水平に保つ様に動作し，19 自由度となっている．また自由度は連結節数が多くても工夫により減らす事も可能で，電気通信大学で開発された KOHGA(**Fig.2-17**)では 8 節 7 関節有るが，前後端節は探査機器搭載用と割り切ってクローラを装備せず，前から 2，3 節目は左右のクローラが一緒に駆動，4～7 節は左右のクローラが独立して駆動，また前後の 2 関節のみを橋渡しや段差乗り越え用に 2 自由度の能動節にして中央の三関節は受動節にすることで 18 自由度となっており，同じ構成で全節の左右のクローラを独立に駆動し全節に 2 自由度を持たせた場合の 30 自由度から大幅に自由度を減らしている．[32]しかし推進器に転輪を用いると前述した様に対環境性において受動推進方式の物に劣る. かといって脚方式をとった Palo Alto Research Center で開発された 7 節連結のムカデ型ロボット(**Fig.2-18**)では 55 自由度と高自由度となってしまい実用的と言えないうえに，足の動作範囲が胴体の左右に広がってしまい狭い空間に入っていくには適さなくなる．[33]また能動関節型のヘビ型ロボットでは水中でも関節の屈曲によるくねり運動によって遊泳を行えるが，実用化のために節数を減らすと屈曲による水中遊泳は期待できず，駆動輪では水底や水面を移動する事はできても水中遊泳を行う事はできないためスクリュー等を取り付けると，さらに自由度と回転軸を増やす事になり実用化にも対環境性にも不利となってしまう．

Fig.2-15 MOIRA (10DOF)

Fig.2-16 Kouryu (19DOF)

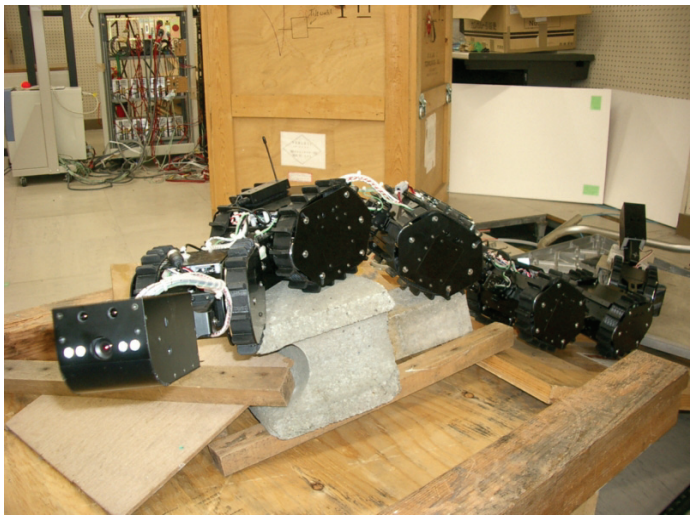


Fig.2-17 KOHGA (14DOF)

Fig.2-18 PolyBot (55DOF)

以上のことをまとめると，能動推進－能動関節型の索状能動体が最も移動能力が高く，少ない関節数でも高い移動能力を有するため，最も実用化に適しているが，転輪等の無限回転軸を有するため気密性が低く耐環境性に難があり，受動推進－能動関節型の索状能動体は気密構造にする事が容易で耐環境性が最も高く，水陸両用の移動ロボットとして利用できる可能性があるが，高い移動能力を発揮するには多くの関節を必要とするため，早期の実用化は難しく，この両者は能動推進器の有無によって早期の実用化と耐環境性において相反する特徴を持っていると結論付けられる．よって能動推進－能動関節型の物に関しては早期の実用化を考慮に入れ，陸上での利用を主眼において自由度を減らして，信頼性や生産性を高める方向で開発をする必要がある．今現在早急に必要としている倒壊家屋内探査等における多くの移動空間では，消防車による放水や水道管の破裂等で出来た水溜り内を走行する程度の防水性があれば十分であり，転輪駆動軸等へのゴミの絡みつきに関しても，回転部にゴミが巻き込まれない様なシールドを取り付けるか，巻き込まれても外れる構造にすれば実用上の差し支えはないと考えられる．しかし出火や粉塵を抑えるために大量の水が撒かれて泥水化した場所も多々あり，こうした空間での長時間の利用を考えると，将来的には機械的にも制御的にもより信頼性の高い物ができたときに利用する事ができる受動推進－能動関節型の索状能動体についても実際に動作可能なモデルを開発して，動作実験を通じて完全気密型索状能動体の構造や運動特性に対する知見も得ておく必要もある．

そこで本論文では第３章と第４章では能動推進－能動関節型について自由度を減らして実用化をめざす手法を論じ，第５章では受動推進－能動関節型について水陸両用型の索状能動体を目指して気密性に特化した索状能動体の機構と運動制御について論じ，それぞれの機構を実現する具体的な設計手法を提示し，動作実験によりその有効性を明らかにする．

第3章 省自由度化を目指した索状能動体「蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機」の開発

本章では不整地移動ロボットのなかでも早急に実用化しなければならないレスキュー用瓦礫内探査ロボットの開発のために能動推進－能動関節型の索状能動体を取り上げ，実用化のための省自由度化の手法について議論し，実験機として蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機を開発し走行実験により動作特性を確認する.

3.1 実現すべきロボットの寸法

倒壊家屋内での移動を考えるには，まず，どのような空間がそこに存在しているかを考えなければならない. 阪神大震災では主に横転したビル, 途中の階が押しつぶされたビル, 外から見ると完全に潰れているように見える倒壊家屋等があり，これらの内部では机や棚等の家具や天井から落ちた梁が支えとなり，その上に天井や屋根等が乗っていて，人が生存している場合この高さ 30～40[cm]の隙間に閉じ込められていた．移動ロボットはその隙間を移動しなければならない．またフロアが広いビルでは特定の階のみが潰されてそれ以外の階は通常の状態になっているものや，下層の階が潰れた物では倒壊しかけて隣接するビルに寄りかかった状態の物等も存在し，これらの中を人が探査することは余震や更なる倒壊による二次災害の危険もあり，ビル内を自走して上部階に移動して活動する必要がある事から，一般的な建造物内での移動が可能な機動性を持たせる必要性がある．これは建築基準法より（**Table3.1**），公共の施設として一般的に使われている網掛けの部分に注目した．またこのようなビル内にはオフィス用品である棚等が倒れて散乱しているため，これを乗越える若しくは回避して移動する必要が有り, 40～50[cm]の段差は乗り越えられる事が望ましい. さらに 2.3 章で述べた条件も考慮に入れて本機の設計条件を以下のように決定した.

(1)高さ，幅共に 20[cm]以下で細長い胴体を持つ.
(2)壁面に接触する事無く 120[cm]×120[cm]の床面で旋回可能.
(3)高さ 40[cm]の段差を乗り越えられる.
(4)階段等を含む傾斜角 40[deg]の斜面を登坂可能.
(5)重量は一人で容易に扱えるように 10[kg]以内とする.
(6)電源は充電手段の確保が容易もしくは交換の容易な内部電源を持つ.
(7)操作は遠隔操作，出来れば無線操縦が望ましい.
(8)本体内にＣＣＤカメラや集音マイクを搭載するスペース持つ.
(9)平時に別の目的で利用できる有用な機能性を持たせる事が可能である.

Size of parts of stairs based on the Japanese construction guidelines					
	kinds of stairs	width of stairs or landings	height of a step	Depth of a step	gradient
1	for elementary school children	more than 140cm	under 16cm	more than 26cm	under 31.6°
2	junior high school , high school , store>1500㎡, theater,entertainment hall , public hall , meeting place	more than 140cm	under 18cm	more than 26cm	under 34.7°
3	upper flowers･･･next upper room＞200 ㎡ basement･･･room in the floor＞100 ㎡	more than 120cm	under 20cm	more than 24cm	under 39.8°
4	houses except apartment house	more than 75cm	under 23cm	more than 15cm	under 56.9°
5	stairs except No. 1 ～No. 4	more than 75cm	under 22cm	more than 21cm	under 46.3°
6	machine room of elevator	nonrestrictive	under 23cm	more than 15cm	under 56.9°
7	escalator	80 or 120cm			under 30.0°

Depth of landings based on the Japanese construction guidelines more than 120cm

Width of corridor based on the Japanese construction guidelines		
uses ＼ arrangement	case of rooms on both sides	the others
for elementary , junior high and high school students	2.3m	1.8m
・for patients in hospital ・public corridor in apartment or room of which total area is more than 100㎡ ・in floor having more than 4 rooms of which area is more than 200㎡	1.6m	1.2m

Size of doorway of emergency elevator based on the Japanese construction guidelines
Width is more than 100cm. Height is more than 210cm.

Table 3-1 Extract of the Japanese construction guideline [34]

3.2 不整地移動索状能動体の省自由度化

不整地移動ロボットとして能動関節で各節に推進器を持つ物が有効である事は２章で述べた．このタイプの移動体は一般的に能動関節は縦横の首振りと，接地性向上及び転倒からの回復の為の捩れ方向の 3 自由度，推進器は車体の左右に車輪やクローラ等をもち，左右が独立して駆動され１節毎に２自由度をもつ．このため２台の連結車両で７自由度を持ち，１台の連結車両が増える毎に５自由度づつ自由度が増える．そのため自由度を減らす為にはまず連結数を減らす事が望ましい．まず少ない車体数で高い接地性を確保するためにクローラを利用する．また，足場の悪い場所での谷間渡り走行では **Fig.3-1** の様に奇数節では全長の半分まで乗り出す事が出来るが，偶数節では中央で車体を支持できずに谷に落ちてしまう．そのため連結数は奇数台が望ましく最小の構成数は３車体となる．

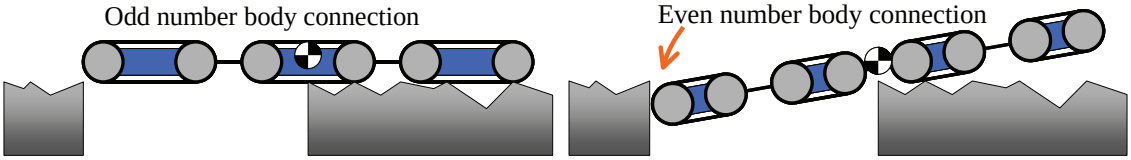


Fig.3-1 Difference between even number body and odd number body

一般的なクローラ車両では **Fig.3-2** 左図の用に左右のクローラを独立に駆動して速度差を生じさせて，任意の場所を中心に回転を行う超信地旋回を行う．しかし連結車両型のロボットが車両の中央を中心にして超信地旋回を行うと，車長が長いために障害物にぶつかってしまい，車両長の長い連結車両型ロボットでは有効な旋回方法では無い．連結車両型ロボットでは **Fig.3-2** 右図の様に関節をヨー軸周りに屈曲して車両全体を弧状にして旋回動作を行う事ができ，この状態では先頭の車体の通過した後を後続の車体が通過していく為，狭い空間での旋回移動にはふさわしいと考えられる．この時厳密にはクローラの左右で速度差が発生するが，狭隘空間に侵入するロボットは車体が細く左右のクローラの間隔が短いため速度差はそれ程生じない．よってクローラは左右同時に前後に動けばよく，また車両全体が同時に前後進するため，全ての車体のクローラも同時に前後に動けばよく，クローラの自由度は車体全体で 1 自由度あればよい．この時連結節数が多いと，複雑な障害物配置にあわせて節を屈曲させなければならないが，連結数が少なく車両全長が短ければ，前後の車体は中央の車体を挟んで対称に姿勢変化をして弧状になる事で旋回動作を行う事ができ，この場合ヨー軸は車両全体で 1 自由度あればよい．

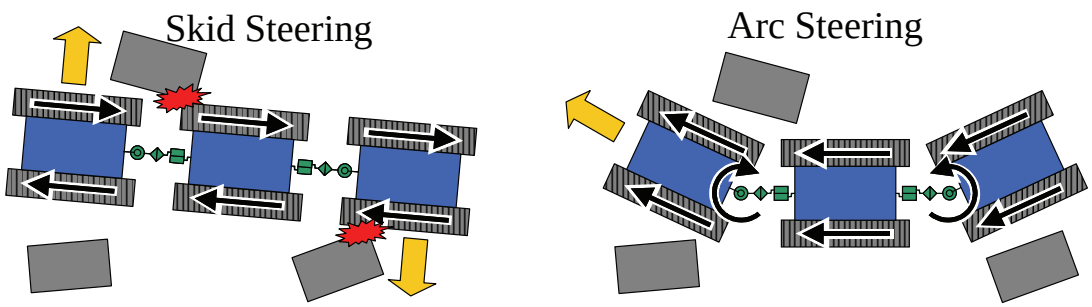


Fig.3-2　2 types of steering motion in debris

段差乗り越えを行うにはピッチ軸周りの姿勢変化を利用する．Fig.3-3 の様に水平に開いた空洞を避けて段に乗り上げる為に前の車体を持ち上げ，段に乗り上げた後，後の車体を押し下げて車両全体を持ち上げる．この動作においても前後車体が中央車体を挟んで対称に動けばよく，ピッチ軸も車両全体で 1 自由度あれば十分な機能を持つと考えられる．ただしこの運動において，後部車体上方に低い天井が存在してしまうと，後部車体が接触してしまうと言う問題も考えられるが，ここでは省自由度化のためにこの方式を採用する．

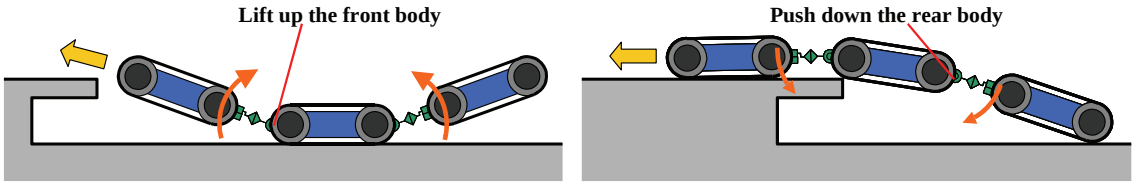


Fig.3-3 Use pitch angle for step climbing

転倒時には一般的な連結型車両ではロール軸周りの姿勢変化を利用して，端の節から順番に表向きになっていくが，ピッチ軸とヨー軸の運動を組み合わせると **Fig.3-4** の様に捻転運動を行う事ができ，横に転がる事で転倒から復帰する事が出来る．このためロール軸の能動回転は省く事ができる．また車体周囲全面に推進器が配置されていればその必要はないが，一般的配置の車体左右にクローラを取り付けた物では，不整地で左右のクローラを均等に接地させるために **Fig.3-5** の様にロール軸周りの姿勢変化を利用する必要がある．これはロール軸周りにバネ性を持たせて自重により変形して接地する様にする事で能動自由度は減らす事が出来る．よって車輪，ヨー軸，ピッチ軸の３自由度を能動的に駆動するだけで高い運動性を持った連結車両型ロボットが構成出来る．

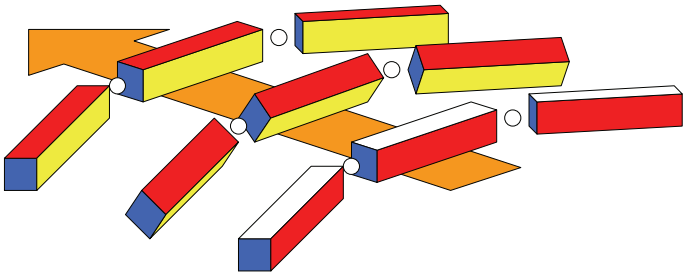


Fig.3-4 Roll over motion by distortion motion

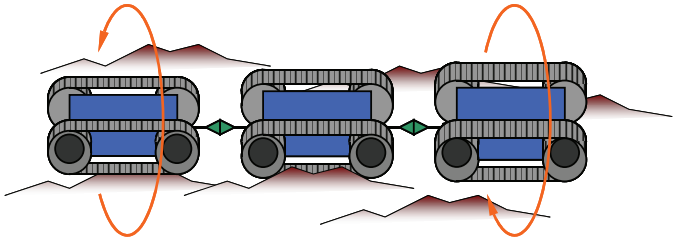


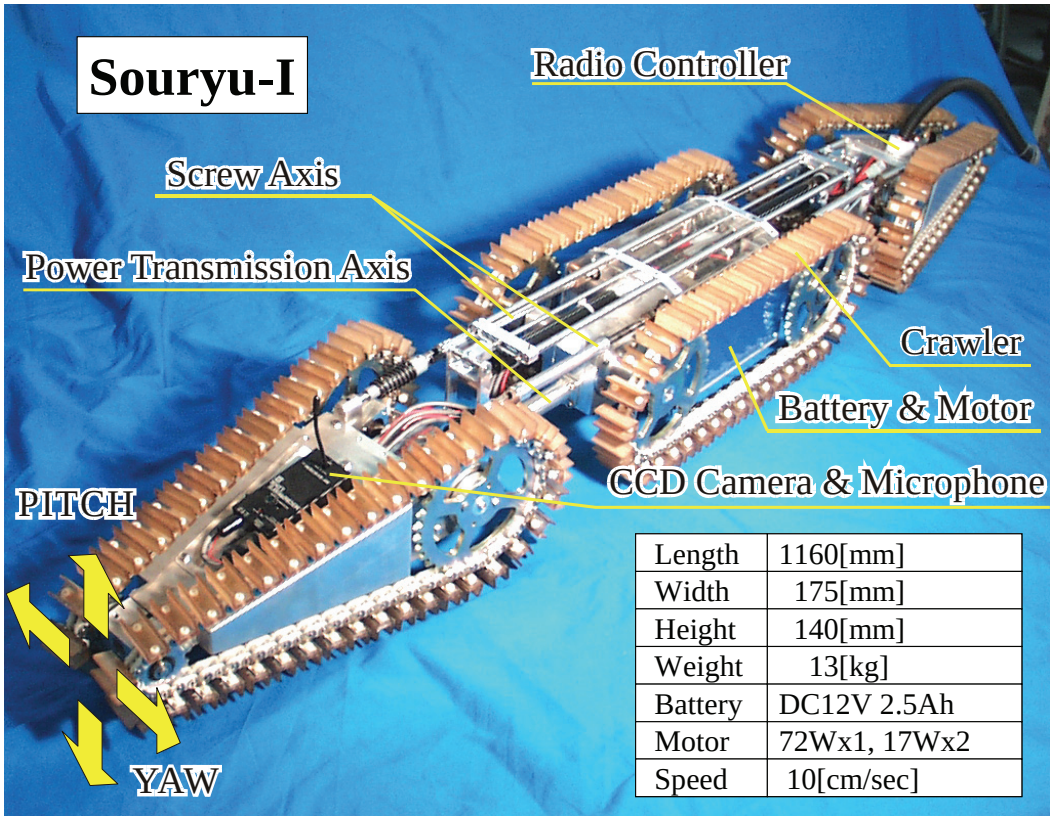
Fig.3-4 Fit for terrain by rolling elasticity

3. 3 蒼龍 I 号機の構成

以上の省自由度化を実現する連結車両型ロボットとして **Fig.3-5** に示す蒼龍 I 号機を製作した．車両は３つの車体からなり，全ての車体は左右をクローラで覆われ車体を保護すると同時に，転倒時等にも何れかのクローラが接地することで動作することができる．この方式では天井側にクローラが接触すると逆向きの推進となり，抵抗が生じるという問題もあるが，本機では小型軽量化を優先し，車高より低い空間に天井を押し上げて侵入する様な動作は行わない物として，最も単純な構造とした．前後の車体は狭い隙間に入り込み易いようにクサビ上になっており，先端が入れば車両側面を擦りつけながら中に入っていく事が出来る．また前後の車体は中央の車体に直動軸２本と動力伝達軸１本からなる３本の

軸からなる連結機構で接続され，直動軸２本の伸縮の組み合わせて前後の車体の姿勢をヨー軸とピッチ軸周りに屈曲させる．この屈曲角度は後述する連結機構の構造から決定され，動力伝達軸のユニバーサルジョイントが動力伝達を行う事のできる範囲である±30[deg]で屈曲を行う事ができる．直動軸は中央車体に搭載された２つのモータで前後の連結部を連動して駆動し，前後の車体は中央の車体を挟んで対称に姿勢変化をする．また動力伝達軸の回転によって中央車体から前後の車体に動力を伝達し全てのクローラを１つのモータで駆動している．これによりどのクローラが接地していても，全ての推力を利用する事ができる．これら３本の軸からなる連結機構は，走行時に邪魔とならないよう正面から見てクローラの間に配置される．上記全てのモータとバッテリを中央の車体に搭載する事で前後の車体は大きな搭載スペースを確保する事ができる．前部車体にはカメラやマイク等の被災者探査用の機器等，後部車体には無線装置や制御機器等を搭載する事が可能となる．

設計寸法に関しては，全長が長いほど超壕や超堤動作には有利となるが，旋回半径は大きくなってしまう．しかし旋回運動は切り返しなどを利用することで擬似的に小さい半径で動く事も可能であるため，本機では人が一人で容易に扱える大きさと重さを基準にし，100[cm]前後であれば 10[kg]程度の重量に抑えられると考えた．3 つの車体の長さはクローラが全ての車体の接地機会が均等になる様にほぼ同じ長さとなる様にした．実際の寸法は図中の物となった．駆動装置の出力の選定や動作速度等に関しては後述する．



Length	1160[mm]
Width	175[mm]
Height	140[mm]
Weight	13[kg]
Battery	DC12V 2.5Ah
Motor	72Wx1, 17Wx2
Speed	10[cm/sec]

Fig.3-5 Total view of the Souryu-I

3.4 蒼龍Ⅰ号機を構成する要素の選定と設計

蒼龍を構成する要素は，駆動装置として連結機構，クローラ，両者を駆動するモータ，回路電気装置として電池，モータドライバ，制御装置，無線機器，センサが上げられる．以下にこれらの選定と設計手法を示す．

3.4.1 連結機構と駆動方法

蒼龍で採用した連結機構は**Fig.3-10**A に示すような片側が白丸で表されたユニバーサルジョイントで支持された回転軸１本と両側がユニバーサルジョイントで支持された直動軸２本により繋がれた２枚の三角版で表す事ができる．この時 B の様に直動軸の片方を伸ばし片方を縮めると２枚の板はヨー軸周りの姿勢変化を行う事が出来る．また C の様に両方の直動軸を同時に伸縮するとピッチ軸周りの姿勢変化を行う事が出来る．これら２本の直動軸はネジとナットからなっており，手前側のユニバーサルジョイントは回転を固定し，後ろ側のユニバーサルジョイントの回転は後ろの三角板から伝達出来る様になっている．よって後の三角板側に固定したモータを動力源に駆動することが出来る．さらに片側のみにユニバーサルジョイントを持つ図中下部の軸が回転可能である場合，この軸を介して片側の板からもう片方の板への動力伝達を行う事ができる．しかしこの軸が回転可能である場合 D のように２枚の板はロール方向に拘束されずに自由に回転できてしまう．そのためこの回転を拘束する機構を導入する必要があるが，この手法は後に述べる．この３本の軸のうち動力伝達軸は単純に回転するだけであるが直動軸は伸縮運動を行うため，連結機構が地面に触れても壊れにくい動力伝達軸を車体下部に配置して直動軸を車体上部に配置する事が妥当であると考えられる．また，姿勢変化の変化角度は動力伝達軸のユニバーサルジョイントが動力伝達器として機能する±30[deg]程度までとなる．

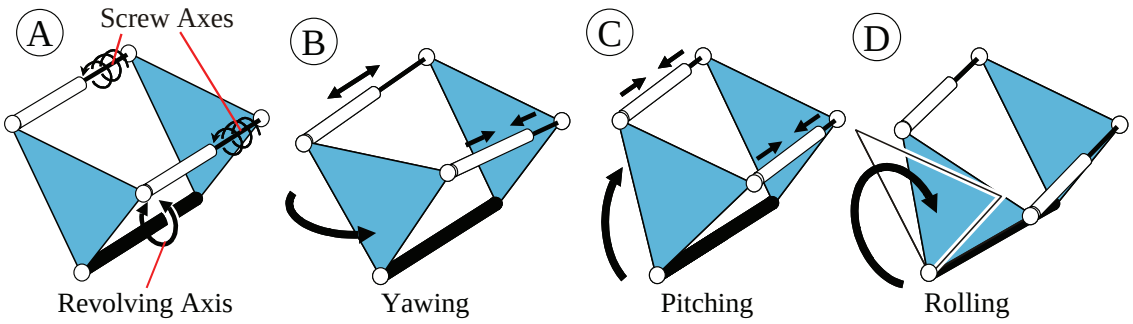


Fig.3-10 Posture change mechanism

以上の説明において説明の簡略化のために動力伝達軸のユニバーサルジョイントは手前側の３角板の同一面状に配置した．このジョイントは２枚の３角板面の外に存在する事もできるが，連結機構を小型に構成する事を前提に２枚の３角板の間であれば何処にでも存

在する事ができる．しかし直動軸の回転を固定したユニバーサルジョイントを A，回転して動力を伝達するユニバーサルジョイントを B，首振り運動の姿勢変化の中心となる動力伝達軸のユニバーサルジョイント C とすると，**Fig.3-11** の様に C が A，B の間に存在している場合にピッチ角を変化させると，C が直動軸 AB に接近し特異点に近付いてしまう．そのため C は A もしくは B の直下に存在している方が良い．ユニバーサルジョイント C は動力伝達を行うため，連結機構の屈曲角度は±30[deg]程度と決定されるが，この時ユニバーサルジョイント B も直動軸を効率良く駆動するために屈曲角度は小さい方が良い．そこで **Fig.3-12A** の様に C が手前の３角板に存在している場合と **Fig.3-12B** の様に後ろ側の３角板の存在している場合について，姿勢変化による B の角度変化を計算することでこれを調べる．

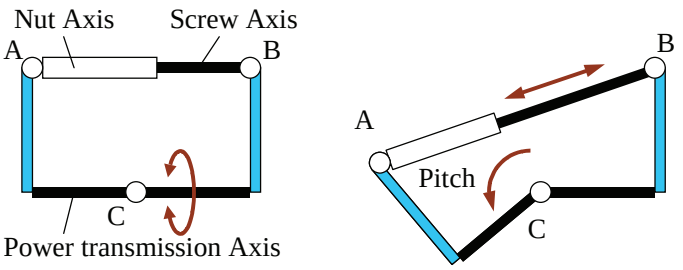


Fig.3-11 Side view of the connection mechanism with changing posture around pitch axis

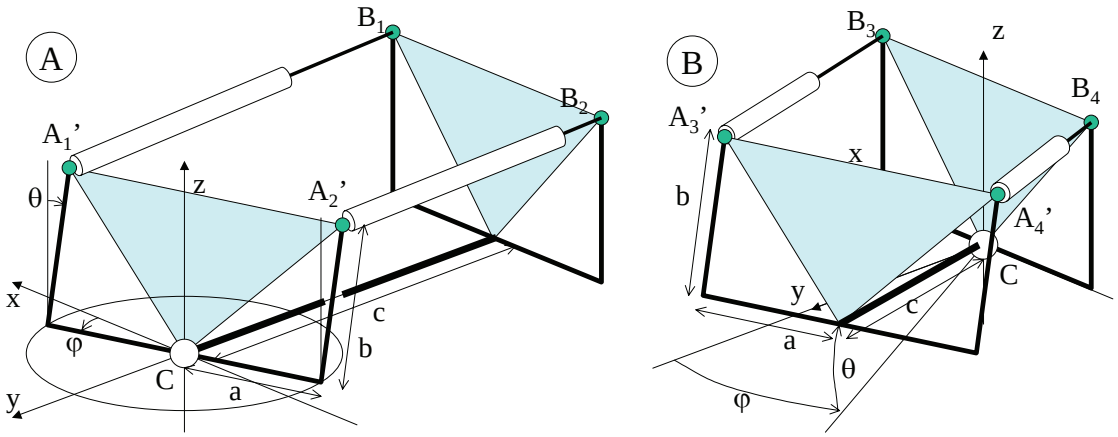


Fig.3-12 Coordinate system of the link mechanism of Souryu-I

Fig.3-12 の様に C が A の直下にある場合とジョイント B の直下にある場合の座標系を，ジョイント C を原点にとり後部三角版が xz 平面に平行になる様とる．またユニバーサルジョイント A の x 軸回りにピッチ角θ，z 軸回りにヨー角φ回転する姿勢変化後の位置を A’とする．姿勢変化前の x 軸正側に存在している直動軸のジョイント A_1，B_1，A_3，B_3 の座標は姿勢変化前に以下の座標とする．

$$A_1 = \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ b \end{pmatrix}, \quad B_1 = \begin{pmatrix} a \\ -c \\ b \end{pmatrix}, \quad A_3 = \begin{pmatrix} a \\ c \\ b \end{pmatrix}, \quad B_3 = \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ b \end{pmatrix} \tag{3-1}$$

ピッチ角，ヨー角による回転行列　R_θ，R_ϕはそれぞれ以下に示す回転行列となる．

$$R_\theta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \tag{3-2}$$

$$R_\varphi = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3-3}$$

よって車両が，ヨー角φ，ピッチ角θとなる時，A_1 A_3は次の位置に移動する．

$$\begin{aligned} A_1' &= R_\varphi \cdot R_\theta \cdot A_1 \\ &= \begin{pmatrix} a\cdot\cos\varphi + b\cdot\sin\varphi\cdot\sin\theta \\ a\cdot\sin\varphi - b\cdot\cos\varphi\cdot\sin\theta \\ b\cdot\cos\theta \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{3-4}$$

$$\begin{aligned} A_3' &= R_\varphi \cdot R_\theta \cdot A_3 \\ &= \begin{pmatrix} a\cdot\cos\varphi + b\cdot\sin\varphi\cdot\sin\theta - c\cdot\sin\varphi\cdot\cos\theta \\ a\cdot\sin\varphi - b\cdot\cos\varphi\cdot\sin\theta + c\cdot\cos\varphi\cdot\cos\theta \\ c\cdot\sin\theta + b\cdot\cos\theta \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{3-5}$$

ベクトル$\overrightarrow{B_1A_1'}$ $\overrightarrow{B_3A_3'}$は，

$$\overrightarrow{B_1A_1'} = \begin{pmatrix} a\cdot(\cos\varphi - 1) + b\cdot\sin\varphi\cdot\sin\theta \\ a\cdot\sin\varphi - b\cdot\cos\varphi\cdot\sin\theta + c \\ b\cdot(\cos\theta - 1) \end{pmatrix} \tag{3-6}$$

$$\overrightarrow{B_3A_3'} = \begin{pmatrix} a\cdot(\cos\varphi - 1) + b\cdot\sin\varphi\cdot\sin\theta - c\cdot\sin\varphi\cdot\cos\theta \\ a\cdot\sin\varphi - b\cdot\cos\varphi\cdot\sin\theta + c\cdot\cos\varphi\cdot\cos\theta \\ b\cdot(\cos\theta - 1) + c\cdot\sin\theta \end{pmatrix} \tag{3-7}$$

よって，ユニバーサルジョイントB_1の動作角度α及びユニバーサルジョイントB_3の動作角度βはベクトル$\overrightarrow{B_1A_1'}$と$\overrightarrow{B_3A_3'}$がy軸となす角度となる．

$$\alpha = \arccos \frac{\overrightarrow{B_1A_1'} \cdot \vec{y}}{\left|\overrightarrow{B_1A_1'}\right| \cdot \left|\vec{y}\right|} \tag{3-8}$$

$$\beta = \arccos \frac{\overrightarrow{B_3A_3'} \cdot \vec{y}}{\left|\overrightarrow{B_3A_3'}\right| \cdot \left|\vec{y}\right|} \tag{3-9}$$

設計予定寸法より a=35[mm]，b=63[mm]，c=170[mm]を用いる．ユニバーサルジョイント C はクローラの動力伝達を行う必要があるため，±30[deg]の範囲内で屈曲させる事が出来る．そこでピッチ角 θ及びヨー角φを±30[deg]の範囲で動かし，動作範囲**(Fig. 3.13)**を比較するとαがβより大きな動作範囲を持ち，ジョイント C はジョイント A の直下にある方が好ましい事がわかる．

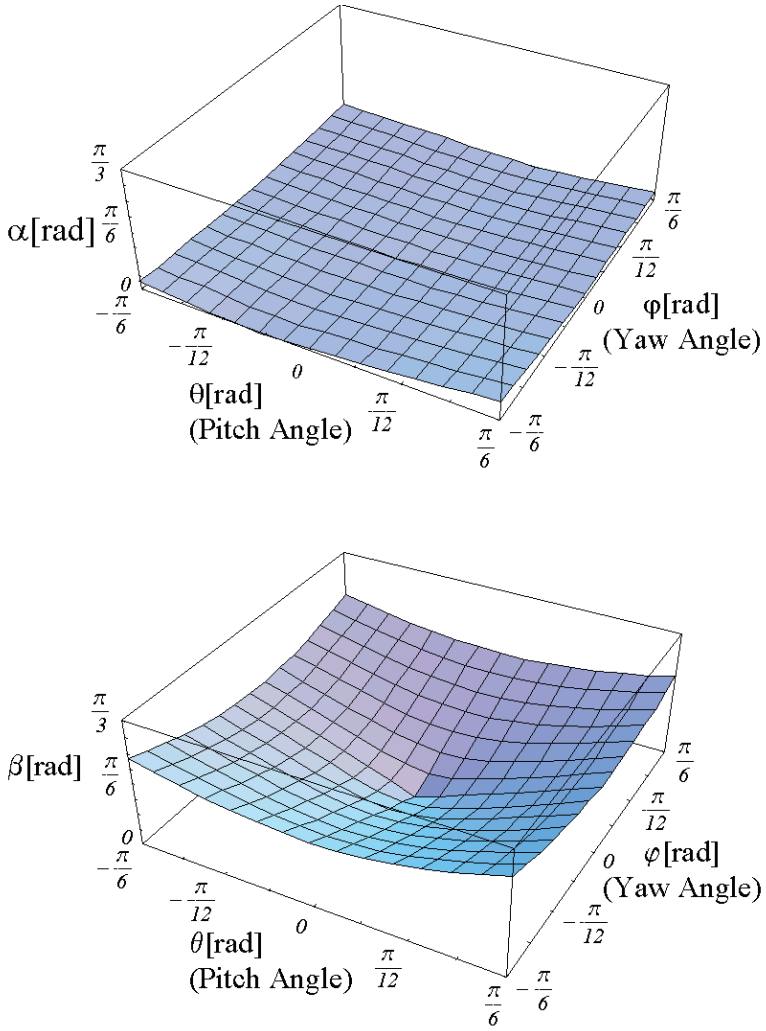


Fig. 3-13 The posture range of the universal joint B

上記の姿勢変化機構を **Fig.3-14** の様に前後で対象に配置し，中央の車体に搭載された２つのモータで動力分配軸を回転させ，この回転動力を用いて前後の連結機構を駆動することで，前後の連結機構を同時に駆動することができる．ここで１本の動力分配軸の前後に取り付けられた直動軸のネジは前後で逆向きのネジとなっており，前部の直動軸が縮む時には後部の直動軸も縮み，前部の直動軸が伸びるときには後部の直動軸も伸びる．そのため，前後の連結機構は対象に姿勢変化を行う事ができる．さらに中央の車体に搭載された１つ

のモータの動力を動力伝達軸を介して前後の車体に送ることができ，これを利用して全ての車体のクローラを１つのモータで駆動することが出来る．そのため３つの車体のクローラのいずれが接地していても常にこのモータの出力を全て利用する事が出来る．

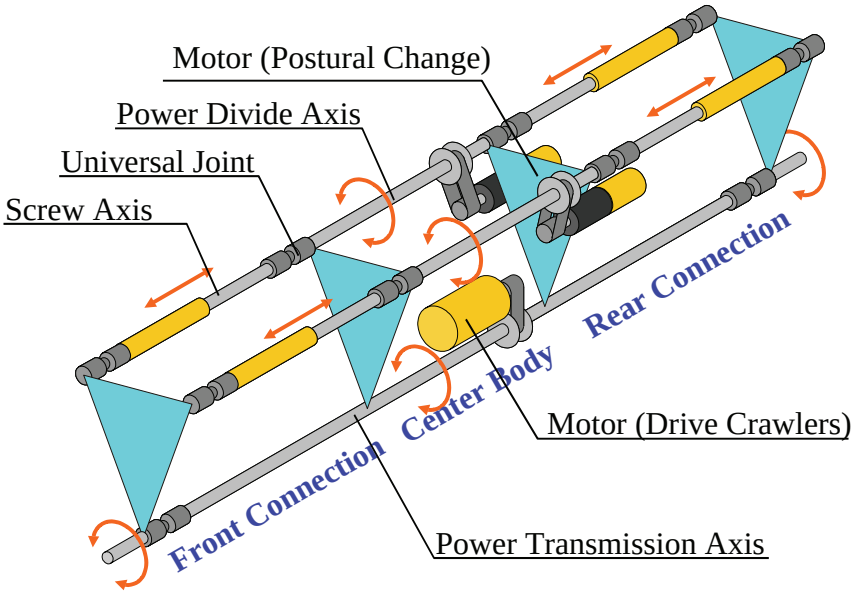


Fig.3-14 Symmetrical posture change mechanism

推進用モータはタイミングベルトを介して動力伝達軸を駆動する．動力伝達軸は車体長方向にその軸を持っており，クローラのホイールを回転させる為にはホイール方向である車体幅方向の回転軸に変換する必要が有る．回転軸方向を垂直に変換する方法としてウォームギア，蓮歯歯車等がある．本機では左右のクローラは同時に作動するため，左右のクローラ駆動ホイールの軸はつながっている．さらに中央車体において動力伝達軸は前後車体に動力を分配しているため，これも１本の軸で繋がっている．このとき蓮歯歯車では **Fig.3-15** の様に垂直に交差する２軸が交差し左右のクローラホイールを同時に駆動できない．また両側に歯車を配しても左右で逆転してしまい，これを回避する為には複雑な構造が必要となる．一方でウォームギアは伝達効率が悪いが軸が交差する事がなく，同時に大きな減速比が得られる．車体間で動力伝達を行うユニバーサルジョイントは，姿勢変化によりその角度を曲げるため，変化角度が大きくなると出力軸は等速回転ではなくなる．そのためこのユニバーサルジョイントが高速低トルクで動力伝達を行い，動力伝達軸からクローラホイール軸へ高い減速比で伝達する方がクローラ駆動ホイールの速度変化を低く押さえる事ができる．またウォームギアはバックドライブをしないため不整地で，特に登坂姿勢時に操作が用意となる．そこで本機ではウォームギアによって動力伝達軸からクローラ駆動ホイールに動力を伝達する．

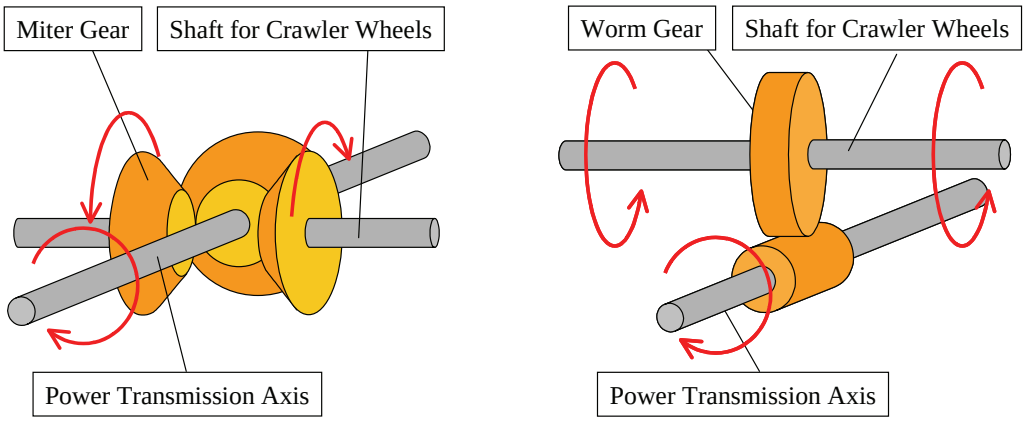


Fig.3-15 Difference between miter gear and worm gear

3. 4. 2 ローリングの拘束機構

先に述べたように本機構は３本の軸だけではローリングを拘束できないそのため何らかの機構を導入しなければならない．考えられる最も簡単な機構は，動力伝達軸のユニバーサルジョイントの中心と同じ場所に中心を持つジンバル機構をユニバーサルジョイントの周りに配置する方法であるが，ローリングにかかるトルクを全て受けるに十分な強度で作ると部材が大きくなってしまい，もともと車体下部にあるユニバーサルジョイントよりも下に部材が出てしまい走行時に不利となる．

そこで動力伝達軸の垂直面上にユニバーサルジョイント D を設け，このユニバーサルジョイントを介して中央車体側と前後車体側をリンクで連結することで，ユニバーサルジョイント D と動力伝達軸のユニバーサルジョイント C の２点でローリングを拘束する方法を考える．この場合ローリングのトルクは両ユニバーサルジョイントの距離で支持するため十分な強度を持たせることができる．

動力伝達軸の垂直平面状にユニバーサルジョイントを存在させる最も簡単な方法として，**Fig.3-16** に示すようなリンクを前後車体間に設ける方法があるが，この方式では姿勢変化によってユニバーサルジョイント D が上下に大きく動き，上に動いた時にはクローラより外に出てしまう．逆にこのリンクが下側に折れるようにすると，D が下部の動力伝達軸と接近してしまい，ロール軸周りにかかるトルクを支えるには不利な構造となってしまう．そこで **Fig.3-17** の様に受動的に伸縮する直動軸を中央車体と前後車体に固定してこの間をユニバーサルジョイント D で連結する方法を考えると D の高さが一定に保たれる．

しかし上記２つの拘束機構ではピッチ角の変化によりユニバーサルジョイント D が前後に動いてしまう．ジョイント CD を結んだ線が姿勢変化のヨー軸となるため，**Fig.3-18** の様にピッチ角を取り車体先端を持ち上げた状態でヨー軸周りの姿勢変化を行うと正面から見てロール軸周りの捩れが発生してしまい，車体底面が水平を保たず，屈曲方向のクローラが低くなってしまう．このため斜め前方の段差に旋回しながら乗り上げる際に，曲げた方

向のクローラが先に接地し旋回の外側のクローラが接地しにくいという問題が生じる．そのためユニバーサルジョイント D は C の真上に固定されることが望ましい．

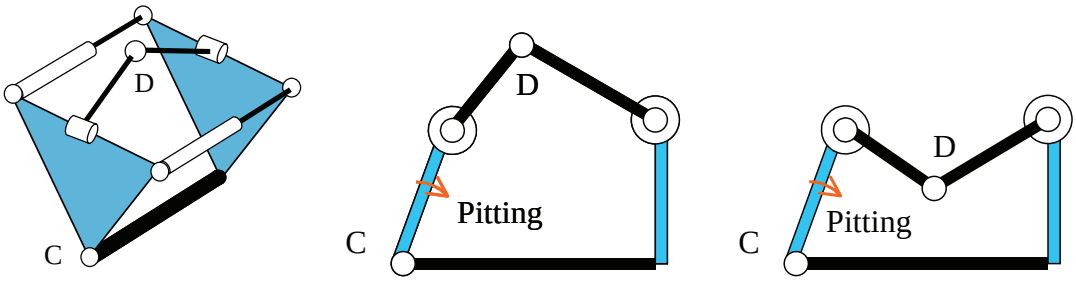


Fig.3-16 2 link mechanism for supporting the universal joint D

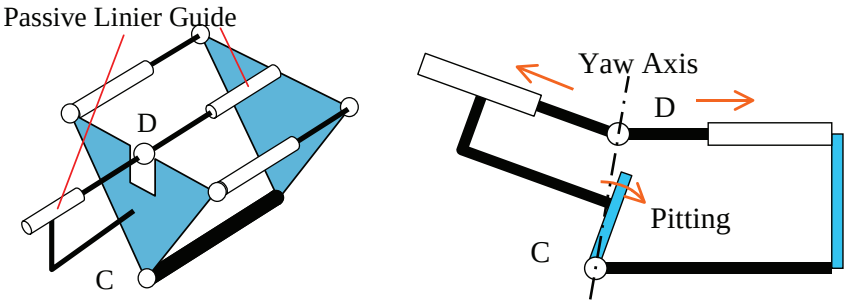


Fig.3-17 Use linier guide to support the joint D at high position

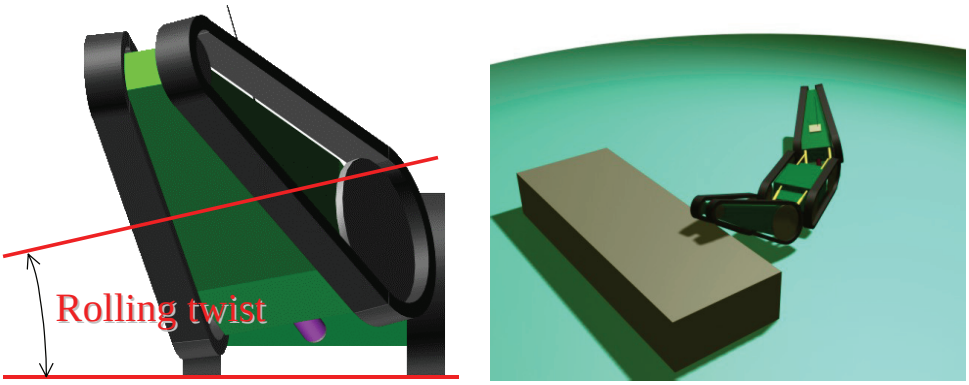


Fig.3-18 Rolling twist created by the moving joint D

そこでユニバーサルジョイント D がユニバーサルジョイント C の真上に固定される様に D を後部三角板に固定したロッドに固定し，これをリンクで前部三角版と連結する **Fig.3-19** に示すリンク機構を導入した．これによりピッチ軸を変化させてもヨー軸は常に垂直を保つまた，模式図では理解を助けるためリンクは前部の車体側に大きく突出しているが，実際の配置ではリンクは逆向きに取り付けられ D のロッドの下側で変形し，前部車体内を圧迫しない様になっている．

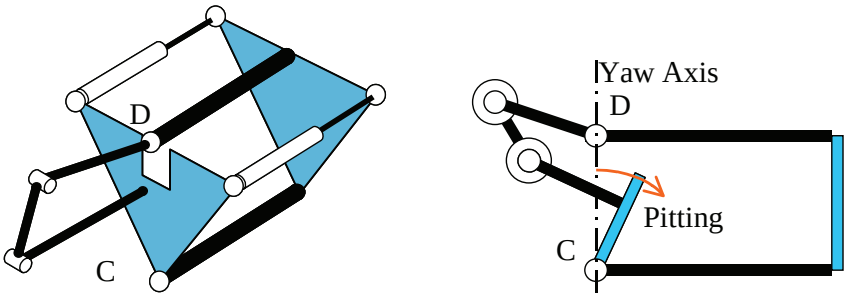


Fig.3-19 Introduced link mechanism to restrict rolling

3. 4. 3 各姿勢変化軸に導入するバネ性

バネ性は **Fig.3-20** に示す２種類のバネ性が必要となる．一つは接地性を高めるために自重で柔軟に変形する柔らかいバネ性であり，もう一つは滑落時などの衝撃荷重がかかったときに機構を守るための硬いバネ性である．柔らかいバネ性は左右のクローラの接地を助けるためロール軸周りに持つ必要があるが，ピッチ軸やヨー軸周りについては，谷渡り運動や，段差乗り上げで先端が垂れ下がらない事が望ましい．一方衝撃から車体を守るバネ性は全ての姿勢変化にも必要となる．そこで本機ではロール軸については姿勢変化機構の動作に影響を与えない程度の小さい動作範囲では柔らかく変形し，これを超えた範囲では硬いバネとして働くバネ性を，またヨー軸，ピッチ軸の周りのバネ性については自重では変形せず高荷重時にのみ変形する不感帯を持ったバネ性を持たせる．

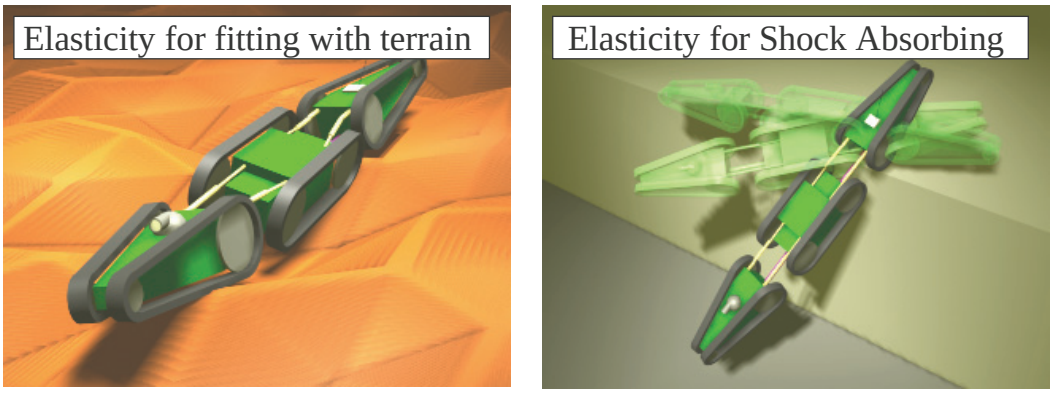


Fig.3-20 Required 2 types of elasticity

本機ではロール軸周りの回転のバネ性をロール軸周りの回転をリンクによって拘束している．そこで **Fig.3-21** の様にリンク軸がしなる事でバネ性を出す構造とした．このバネ性は姿勢変化機構の動作に影響を与えない程度の小さい範囲では自重で柔軟に変形する柔らかいバネ性を持ち，それより大きな範囲では衝撃荷重等がかかったときに機構を保護する為の硬いバネ性を持つ必要が有る．そこで本機では３本の細いステンレスロッドを用いてこれを実現した．このバネは動作範囲が狭い範囲では中央のロッドのみが柔らかいバネ性を

出し，一定の動作範囲を越えると中央のロッドは左右の硬いステンレスロッドに支えられたフレームにぶつかって 3 本のロッドが同時に曲がる事で硬いバネ性を出す.

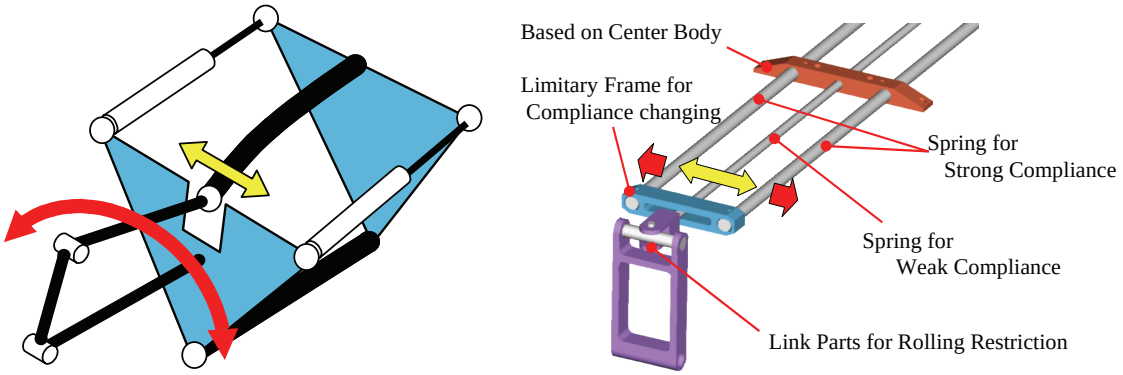


Fig.3-21 Introduced rolling elasticity link mechanism

柔軟変形域と衝撃吸収域の動作範囲は機構との干渉によって決定し，接地性のための柔軟変形域がローリング拘束軸先端で左右±15[mm]（ロール角±10[deg]），衝撃吸収域が±15～20[mm]（ロール角±13[deg]）とする．バネ性については，柔軟変形域では設計時での全車体の荷重 10[kg]の半分 5[kg]が片輪にかかった状態で最大変形に達し，衝撃吸収域は車体の全荷重が片輪にかかった状態で最大変形に達する程度として設計を行った．**Fig.3-22** に示す様にロール軸とクローラまでの距離は車幅の半分の 85[mm]，ロール軸から拘束軸までの距離 85[mm]であるため，クローラに 5[kg]がかかると拘束軸に係る力も 5[kg]となる．

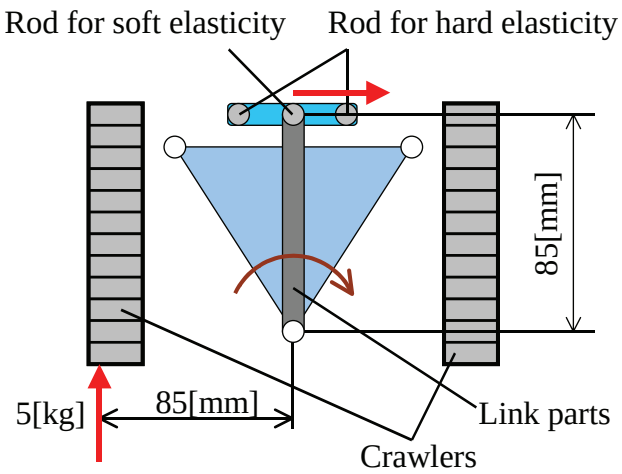


Fig.3-22 The length between forced point and joint and length of link parts

拘束軸先端の撓みδ[mm]は荷重 w[kg]，拘束軸長さ l[mm]，拘束軸径ϕd[mm]，弾性係数 E[kg/mm^2]とすると以下の式で表す事ができる．

$$\delta = \frac{64 \cdot w \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot \pi \cdot d^4} \tag{3-10}$$

よって撓みδ=15[mm]，荷重 w=5[kg]，拘束軸長さ l=170[mm]，ステンレスの弾性係数 $E=2*10^4$[kg/mm^2]とすると，必要となるロッド径は，d=4.86[mm]となり，ϕ5[mm]のロッドでは最大変形域に達しないと考え， ϕ4[mm]のステンレスロッドを用いた．このロッドのバネ性に加えて, 片輪に 10[kg]が掛かったときに最大変形に達するための硬いバネ性を示す様に変形域拘束枠を支える２本のロッド径を求めるとϕ6[mm]となる．

ピッチ軸ヨー軸周りの姿勢変化角度は直動軸の長さによって決定されているので，ピッチ軸ヨー軸周りにバネ性を持たせる場合には直動軸が伸縮方向にバネ性を持てばよい．しかし，直動軸はロール軸から離れた位置にあり，ロール軸周りの姿勢変化により横に大きく振られ，連結機構を正面から見ると **Fig.3-23** の様になり，クローラ等の他の機構と接触しやすく，ここが大きくなる事は好ましくない．そこで本機では直動軸の回転しないナット側を支持しているユニバーサルジョイントが前後にバネ性をもって動く様にした．この部品は **Fig.3-24** の様にユニバーサルジョイント側の前後にスライドするフランジ付きの部品（slide parts）に前部車体に固定された前後に動く為のシャフト（slide shaft）が刺さっていて，フランジの間に圧縮されたスプリングが入っていて，このスプリングを同時にシャフトに刺さった留めピンで挟んだ構造になっている．直動軸が引っ張られたり押されたりする力がこのスプリングの圧縮力を超えない範囲では動く事が無く，スプリングの圧縮力より大きな力がかかると **Fig.3-25** の様に引っ張られた場合には止めピンのユニバーサルジョイント側とフランジの前後車体側によってスプリングが圧縮され，圧縮された時には前後車体側の止めピンとユニバーサルジョイント側のフランジによってスプリングが圧縮される構造となっている．このスプリングの圧縮力を自重によってこの軸にかかる最大の値にすることで，自重では変形せず衝撃荷重等の高荷重時に変形することが可能となる．

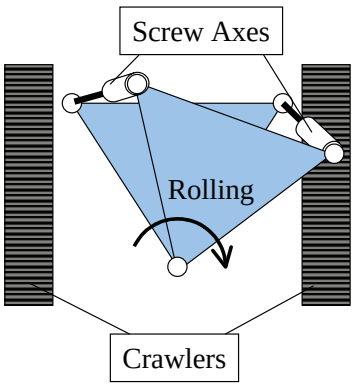


Fig.3-23 Swung screw axes by the rolling motion

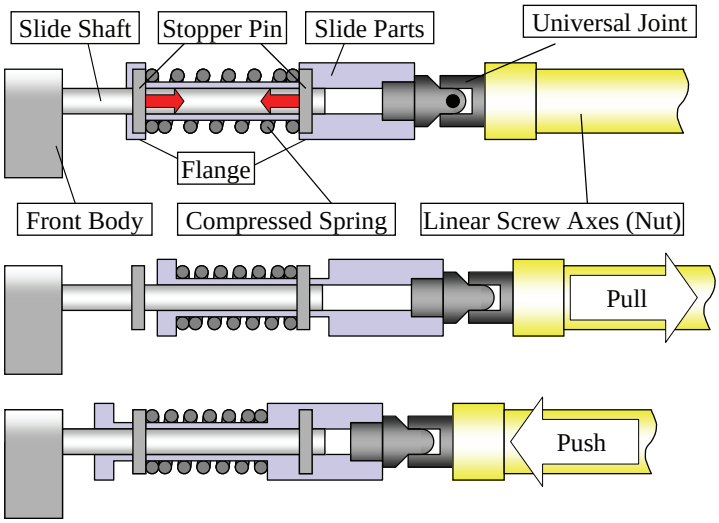


Fig.3-24 Introduced elasticity mechanism to screw axes

ここで用いるスプリング強さは **Fig.3-25** の様に前部車体が空中に浮いた状態でバネが変形し始めない強さとした．車体が水平であれば左右の直動軸 2 本で同時に支持するが，車体が傾いた状態には 1 本で支持しなければならない．リンク機構が傾いて **Fig.3-26** の様な姿勢で 1 本の直動軸で支持しなければならない力は，前部車体の荷重 W_f =3[kg]，ジョイントから前部車体重心までの距離は l_1 =200[mm]，姿勢変化軸から直動軸までの距離 l_2 =60[mm]より，3[kg]×200[mm]/60[mm]=10[kg]となる．よってバネには沢根スプリング標準ストックスプリング 5395（自由長 40[mm]，バネ定数 0.99[kgf/mm]，全タワミ 18.4[mm]）を用い，標準状態で 11[mm]圧縮して 10.9[kgf]の予負荷をかけた構造とした．これによりバネ性の働くストロークは±7.4[mm]となりピッチ角のバネ性による変化角度は±7.0[deg]となる．

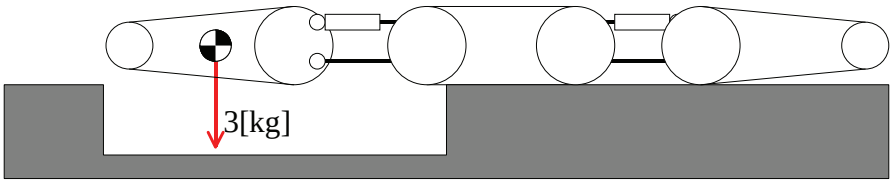


Fig.3-25 The connection mechanism support the floated front body without working elasticity

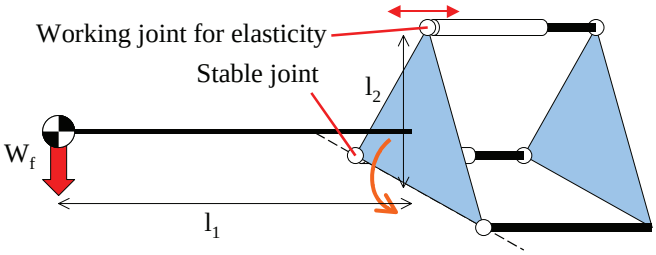


Fig.3-26 Working elasticity mechanism and stable elasticity mechanism

3.4.4 クローラの選定

蒼龍では推進にクローラを利用する．クローラは重機や建機の様な実用機で多く利用されており，そうした大きさの物であれば多くの種類が存在している．しかし本機体の様な小型の移動車両用のクローラは実用化されていない．玩具用に作られた物は重機・建機の物をスケールダウンした物であるが，大型のクローラ車両のクローラは自重を分散させ接地圧を下げるために面の平らな物を利用している．接地位置を選ばないという点ではこのクローラは有効であるが，小型軽量な車両で接地圧を下げてしまうと地面に対して十分なグリップ力を出す事ができなくなる．特に階段等を登坂する場合，平らなクローラでは滑ってしまう．これを解決する最も簡単な方法は **Fig.3-6** の様なグローサをクローラ面に貼り付ける方法が上げられるが，グローサでは階段のエッジと平行な方向にグローサの向きが向いた状態でないと引っ掛けることができない．これを解決するにはクローラの接地面を柔らかい物で覆って接地した地表に合わせて形を変える方法があり，この為にクローラ面に粉を詰めた袋を貼り付ける手法もあるが，軽量な車両で十分な変形をさせる事のできる柔らかい袋では，瓦礫内の釘やコンクリート片の様な尖った物で簡単に破れてしまう．[35] しかし本機体はクローラの幅が小さいため，**Fig.3-7** に示す様にグローサでエッジを挟む事のできる範囲角度が広く，グローサの爪を柔らかく高い高さの物にすると，変形する事でエッジをはさむ事のできる角度がさらに広がる．また **Fig.3-8** の様に接地して垂直方向に力がかかっている時には変形せず高い圧で接地するが，エッジに乗り上げる時には 1 つのグローサに荷重が集中して変形しグリップ力を高める事ができる．そこで本機ではウレタンゴムによる柔軟なグローサを用いる．グローサの柔らかさは経験的に決定し，硬度 90 のウレタンで歯厚 2[mm]高さ 10[mm]，歯の間隔は 10[mm]とした．

小型の移動体のクローラとして，タイミングベルトが薄く，軽く，強いため利用し易い．しかしベルトの横方向への脱落を防ぐフランジは高さが低く，ベルトとスプロケットホイールの間に小さなゴミを挟み込むだけで容易に外れてしまう．しかしフランジを高くするとフランジが地面や瓦礫と接触してしまい，フランジは変形してしまう．これを避ける為にはベルトを厚くするが，ベルトが厚くなるとホイールで曲げる力が大きくなり，動作抵抗が大きくなる．またグローサはベルト表面に接着で取り付けることになるが，クローラベルトはホイールや接地によって曲げられるため接着がはがれやすい．専用のグローサを初めから一体整形で作った物であれば利用できるが，販売されている物が無い．そこで蒼龍ではチェインを利用する．チェインは厚さが厚いがスプロケットホイールの歯がその分高くなっておりチェインが脱落せず，ツバ付きチェインを用いればグローサを容易に取り付けることもできる．ただし一般的なチェインは金属製のために重量が増加してしまうため本機では軽量化のためにブシュリンクにプラスティック，ツバ部にステンレスを用いたオリエンタルチエン工業のプラメイトチェーン（ピッチ 9.525[mm]の標準規格 35 型相当）**(Fig.3-9)**を用い，グローサの取り付けにも軽量化のため強化プラスティックのネジを用いた．

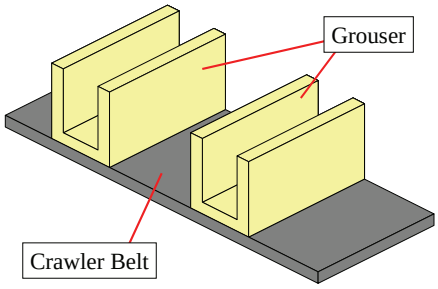


Fig.3-6 Grousers stuck on the crawler belt

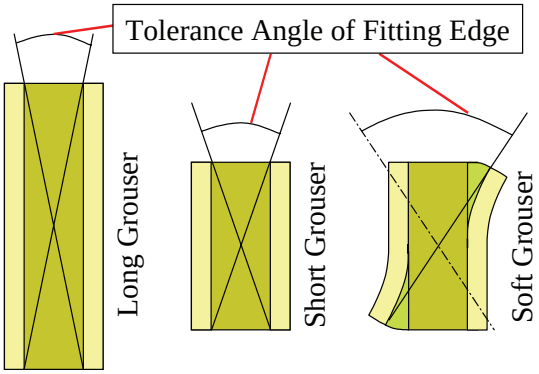


Fig.3-7 Effect of grousers length and suppleness for tolerance angle of fitting edge

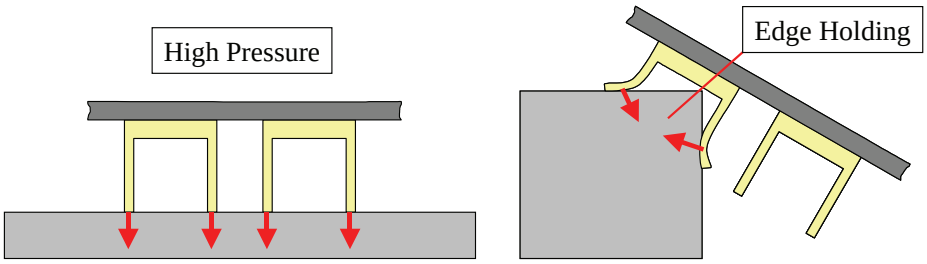


Fig.3-8 Effect of grousers suppleness on plane surface and step edge

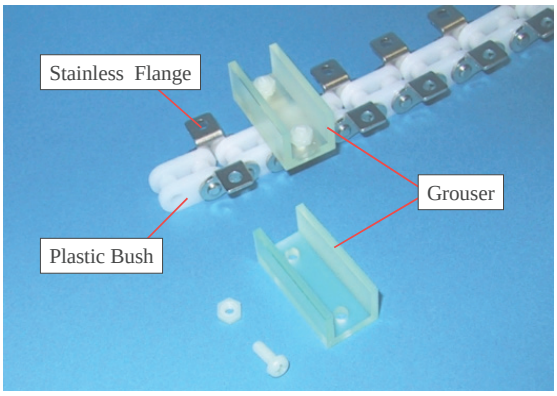


Fig.3-9 Plastic chain and urethan gum grousers

3.4.5 蒼龍駆動用アクチュエータの選定

蒼龍ではクローラ駆動と姿勢変化の２種類のアクチュエータを用いる．そこでまずクローラ駆動モータを，次に姿勢変化のモータを選定する．

クローラ駆動モータの必要出力は登坂時のトルクと速度，及び伝達系の効率から決められる．クローラのホイールの駆動トルクを求めるためには走行抵抗が必要となる．クローラ車両の走行抵抗 F[N]は１クローラ当りの負荷分布率α，車両重量 W[kg]，重力加速度 g[m/s^2]，走行抵抗係数ν，斜面傾斜角度θ[deg]を用いて以下の式で求められる．[36]

$$F = \alpha \cdot W \cdot g(\nu \cos\theta + \sin\theta) \tag{3-11}$$

通常の連結型移動車両では接地できずに推力を生成できないクローラも存在する可能性があるが，しかし本機は全てのクローラを 1 つのモータで駆動しているため，1 クローラ車両として扱う事ができα=1となる．車体重量 W は想定している 10[kg]とし，走行抵抗係数ν は車速の遅いクローラ車両として **Table 3-2** に示される物の最大のものを越える様ν=0.3 として，最大登坂角度は先に述べた建築物用階段として最大傾斜となるものを越える様にθ=60[deg]とした．これを用いると F=99.5[N]となる．

asphalt	0.05～0.06
gravel road	0.06～0.07
sand road	0.15
shoal area	0.15～0.30
snowy oad	0.2
damp ground	0.02～0.25

Table 3-2 Coefficient of driving resistance [36]

ホイールの駆動出力はトルクと回転速度から決定される．ホイール直径 R[m]としてクローラの走行抵抗 F[N]からホイールトルク T_h[Nm]を，車両の走行速度 V[m/s]からホイール回転速度 n[rpm]を求める式を以下に示す．

$$T_h = R/2 \times F \tag{3-12}$$

$$n = 60 \times \frac{V}{R \cdot \pi} \tag{3-13}$$

クローラのホイール径は車高から制限される．径が大きくなると走行速度は大きくなるが，トルクは小さくになる．逆にホイール径を小さくすると走行速度は遅くなるが，トルクは大きく出す事が出来る．瓦礫内の移動のためには車高および車幅は小さい事が望ましく最小直径は機体の設計時に決定される．本機では走行速度よりも最大トルクを優先的に設計に利用するので，ホイール径は最大の物を用いて計算を行う．瓦礫内で移動する為の車高制限よりホイール直径 R=0.2[m]を用いる．さらに走行速度 V=0.2[m/s]としてホイール

トルク T_h 及びホイール回転速度 n を求め，それぞれ T_h=9.95[Nm]，n=19.1[rpm]となる．これらを用いてクローラーホイールの出力 W_h[W]を求める式は(3-14)で表せ W_h=19.9[W]となる．

$$W_h = T_h \times \frac{n \times 2\pi}{60} \tag{3-14}$$

本機では，クローラ駆動モーターの動力を，ギアードモータよりタイミングベルトで動力伝達軸に伝え，ウォームギアで車軸につたえる．ギアヘッド効率η_g=0.8，タイミングベルト効率η_b=0.8，ウォームギア効率η_w=0.5 とすると必要なモータ出力 W_m は式(3-15)で求められ W_m=62.2[w]となる．

$$W_m = \frac{W_h}{\eta_g \times \eta_b \times \eta_w} \tag{3-15}$$

本機ではクローラ駆動には光進ミニモの DC12V モータ Type3557 012CR(72W)を使用した．ギアヘッドは 1/14 を用い，動力伝達軸への動力伝達にはタイミングベルトで 24:26 で減速し，最終段でのクローラホイール駆動トルクに耐えることのできるウォームギアは 1/30 であったためこれを用いた．この結果総減速比は 1/455 となりモータの無負荷回転数 5400[rpm]から考えると，無負荷としても推進速度が 12.4[cm/s]と予定速度よりも遅い物となり，実際の走行速度は 10[cm/s]程度となった．

姿勢変化機構に用いるモータは，捻転や段差乗り越え時に自重を持ち上げる必要があるため，これを保証するだけの出力が求められる．直動軸 1 本あたりに最低限必要となる出力は，直動軸 1 本のみで自重を持ち上げる動作を行う事のできる出力である．３つの車体の長さが同じとすると，車両先端と支点となるユニバーサルジョイントの距離 l_1 は予定全長 1.2[m]の約 1/3 となり l_1=0.4[m]．前後の車体で自重 W=10[kg]を分配するので，片側で半分の 5kg かかる．**Fig.3-27** の様に 1 本の直動軸のみを駆動して姿勢変化を行う場合，直動軸の作用点と連結部の距離 l_2 は先に示した設計予定のリンク長より l_2≒0.06[m]である．よって直動軸を駆動する力 F[N]は式(3-16)で表され F=280[N]が要求される．

$$F = \frac{W/2 \times l_1}{l_2} \times g \tag{3-16}$$

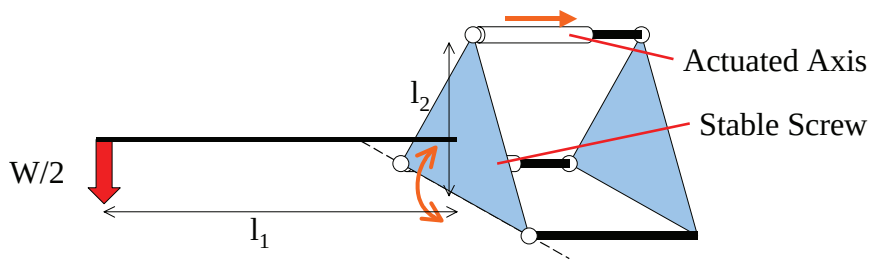


Fig.3-27 The effect of own weight for the screw axis

直動軸の伸縮に用いる送りネジのピッチを 0.1（P=0.001[m]），送りねじの効率η_s=0.5 とするなら，ネジを回すのに必要なトルク T_s は式(3-17)で求める事ができ，T_s=0.09[Nm]となる

$$T_s = \frac{F \times P}{2\pi \times \eta_s} \tag{3-17}$$

姿勢変化の速度は本機連結部のユニバーサルジョイントの動作範囲±30[deg]（≒ 1 [rad]）を 5 秒で動けば十分と思われ角速度は平均 0.2[rad/s]である．よって直動軸を l_2×0.2[rad/sec]=0.012[m/s]で動かせばよく，スクリューのピッチは P=0.001 なので，軸回転速度は式(3-18)で表す事ができ，直動軸ネジの回転速度 n_s は 720[rpm]となる．

$$n_a = \frac{l_2 \times 0.2}{P} \times 60 \tag{3-18}$$

よって，直動軸でのネジの回転の出力 W_s は式 3-18 で表され W_s=6.78[W]となる．

$$W_s = T_s \times \frac{n_a \times 2\pi}{60} \tag{3-19}$$

本機では直動軸の回転をを前後の送りネジに同時に伝えているため．この直動軸２本を１個のモータで駆動する必要が有る．またこの駆動軸に動力を伝達するためにギアヘッド，タイミングベルトを介しているので，ギアヘッドの効率η_g=0.8，タイミングベルトの効率η_b=0.8 を考慮に入れると必要となるモータの出力 W_m は式(3-20)で表され W_m=21.2[W]となる．

$$W_m = \frac{2 \times W_s}{\eta_g \times \eta_b} \tag{3-20}$$

本機では要求値よりも出力の小さい光進ミニモの DC12V モータ Type2342S 012CR(17W)を使用し，ギアヘッドには 1/14，タイミングベルトは減速無しとした．このモータの無負荷回転速度 8100[rpm]を 1/14 に減速すると送りねじでの回転速度は 580[rpm]となり，姿勢変化速度が遅くすることで大きな力を出している． また，車体を水平にした状態で行うヨー角のみによる左右の屈曲動作では 2 本の直動軸を同時に駆動して屈曲を行い，このとき±30[deg]の範囲を動作するのに掛かった時間は 6[sec]程度であった．

3. 4. 6 電源と制御装置の選定

電源は充電装置が容易に利用できる 12V 鉛蓄電池を採用する．鉛蓄電池は自動車で利用されており，自動車で充電する事ができるだけではなく，家庭用電源を利用する充電器も入手しやすい．レスキューロボットは災害現場までの運搬は自動車やバイク等を利用するため運搬用車両内で常時充電し続ける事ができる．また，鉛蓄電池は使用途中での追加充電や利用しながらの充電が可能となっているため，利用途中で電池が切れた場合に電源ケーブルを接続して有線で充電しながら運用する事もできる．

モータドライバは Titech　Driver Ver.4 を利用した. このモータドライバは単電源で利用す

る事で配線を減らす事ができ対故障性に優れている．これを利用してクローラ駆動モータの電流と左右の直動軸駆動モータの位置を制御する．クローラの出力について厳密に速度制御を行おうとすると，モータの回転数をロータリエンコーダやタコメータを利用してこれをモータドライバにフィードバックする必要があるが，これは機構が複雑なものとなると同時に配線数も増えて信頼性が低くなる．そのため本機体では入力した値に比例した電流を流す電流制御を利用する．直動軸の長さの位置制御を行うには，ロータリエンコーダ等を利用してモータの回転量を計測する方法と，直動軸の長さをポテンショ等を利用して直接計測する方法とが考えられる．しかしロータリエンコーダでは出力をデジタルデータで行うため, アナログ入力を利用する Titech Driver では入力の前で 1 つ余分な処理を必要とするうえ，ロータリエンコーダは機械の起動時に位置の初期化を行う必要が有るため利用には向かない．そのため本機体ではより直接的に直動軸の長さをリニアポテンショメータを用いて計測する方法をとる．直動軸の長さを計測する最も簡単な方法は直動軸にリニアポテンショメータを直接取り付ける方法であるが，直動軸は車体間にあり保護されていないため，ここに弱い電子部品であるリニアポテンショメータを直接配置する事は望ましくない．また直動軸はロール軸周りのバネ性によって左右に大きく振られ，クローラや他の部品と干渉しやすい事からも，ここにポテンショメータを取り付けて大きくしてしまうことは望ましくない. そこで本機では **Fig.3-28** の様に前後の直動軸に動力を分配する動力分配軸にネジを切り，このネジに取り付けられたナットの位置をリニアポテンショメータで計測する．この時直動軸のピッチが 1 に対して動力分配軸のピッチを 0.5 とする事で，リニアポテンショメータの動作範囲を直動軸の動作範囲の半分にでき，これにより計測部を小型化し中央車体内へ内蔵し保護する事ができる．

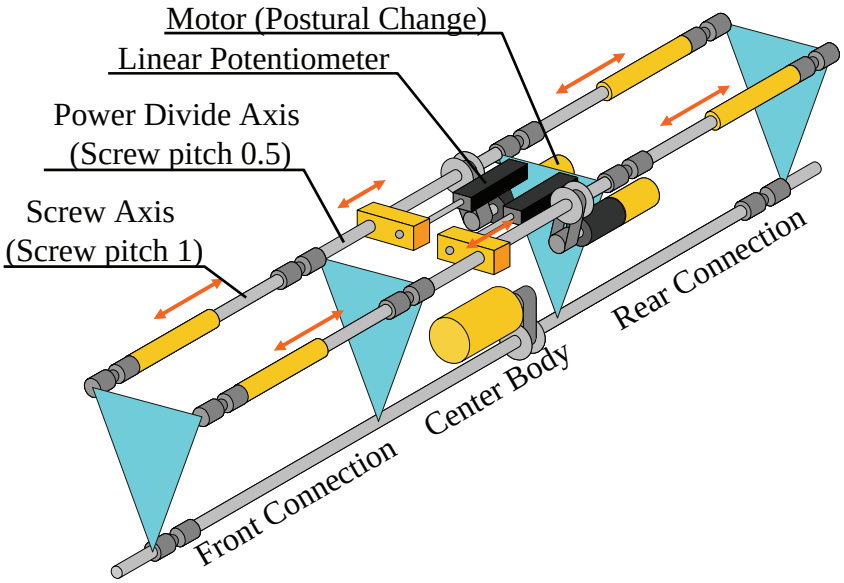


Fig.3-28 The linear potentiometer for measurement of the length of screw axes

本機は操縦者の指定するヨー・ピッチ軸の指令値に対して直動軸のとる長さを計算して制御を行わなくてはならない．制御装置の搭載については２通りの方法が考えられる．第 1 の方法は，操縦者の手元に左右直動軸の長さを求める計算装置があり，計算した左右の長さを無線装置で蒼龍本体に伝達する方法である．第 2 の方法は，計算装置を蒼龍に内蔵し無線装置で姿勢角度を伝達する方法である．前者のメリットは計算機を車体外に設ける為，蒼龍へその他の機器を搭載する空間を空けることができると同時に，機体が瓦礫内で回収不能となった場合の損害を少なくする事ができる．後者のメリットは計算機が内蔵されているため車体情報を自ら判断する事ができ，電波が届かなくなったら後退する等の処理を行う事ができる．本機体では姿勢角を直動機構の長さに変換する計算はさほど計算速度を要求されないため搭載する計算機として安価な PIC が利用でき，これが回収不能となっても損失はさほど大きくないと考え CPU を車両に搭載する制御系とし，用いる PIC として Basic Stamp2 を採用した．

3. 4. 7 操縦装置とインターフェイス

無線装置は **Fig.3-29** に示す汎用のラジオコントロール用の送受信機を用いた. この受信機はラジオコントロール規格のサーボとセットで利用することが前提となっており，受信したデータをパルスの幅で出力している．この受信機によってサーボに出されるべき信号を Basic Stamp2 により解析し, これを指令値に変換してアナログ値で Titech Driver に出力する．操縦者は無線装置でピッチ角とヨー角と推進方向を入力する．無線装置は左右に十字のアナログ出力を持った操縦桿が付いている．入力の方法として幾つかの方法が考えられるが，ここでは車両本体の姿勢形状を操縦者側で認識しやすい方法として片側の操縦桿の縦方向でピッチ角，横方向でヨー角を入力し，もう片方で推進トルクを入力する．必要としている自由度としてはこの 3 入力で十分であるが，推進と曲がっていく方向は同じ操縦桿で行う事ができるほうが直感的である．そこで本機体の操縦装置は左側の操縦桿で推進方向とヨー角を入力し，右側の操縦桿で姿勢変化のピッチ角とヨー角を入力するヨー角を重複して入力する方式を採用した．

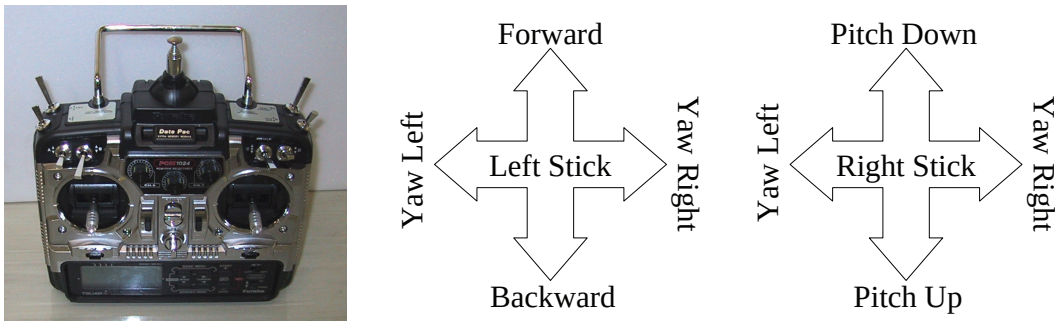


Fig.3-29 Controller and input interface

遠隔操縦の為の視覚センサとして CCD カメラを先端に取り付けた．車体先端についたカメラは先端のクローラの狭まった間に収められており，画像の左右端に車体先端のクローラが映ることでクローラの動作状況を確認する事ができる．また，カメラ自体は車体へ固定していため，前方向の映像しか見る事ができないが，車体の上下左右の首振り運動を用いて視角を広げる事ができる．カメラの映像は RF－SYSTEM のビデオトランスミッタを用いて無線で操縦者側のモニターで確認できる．またこのトランスミッタは音声も同時に伝播する事ができるので，マイクを取り付ければ音声も伝播する事ができる．

3.5 蒼龍の動作特性実験

3.5.1 旋回性

本車両はヨー軸回りの姿勢変化をした状態で走行することにより，旋回を行う．すべてのクローラは同時に等速に動くので，速度を V とし，先頭及び後部車体のクローラの傾きを α，ヨー角を ϕ とする．クローラの推進力を受ける点は，中央の車体はクローラ全面で接しているので中心，先頭と後部の車体は大ホイールでのみ接地しているので大ホイールの中点とする．車体ごとの速度は，中央車体推進速度 V_c として，前部及び後部車体速度 V_f 及び V_r はクローラの傾きより以下の式で表される．

$$V_f = V_r = V_c \times \cos\alpha \tag{3-21}$$

先頭と後部の車体のみで旋回が行われているならば，**Fig.3-30** に示す様に先頭と後部車体の速度ベクトルの法線の交点に旋回中心がある．

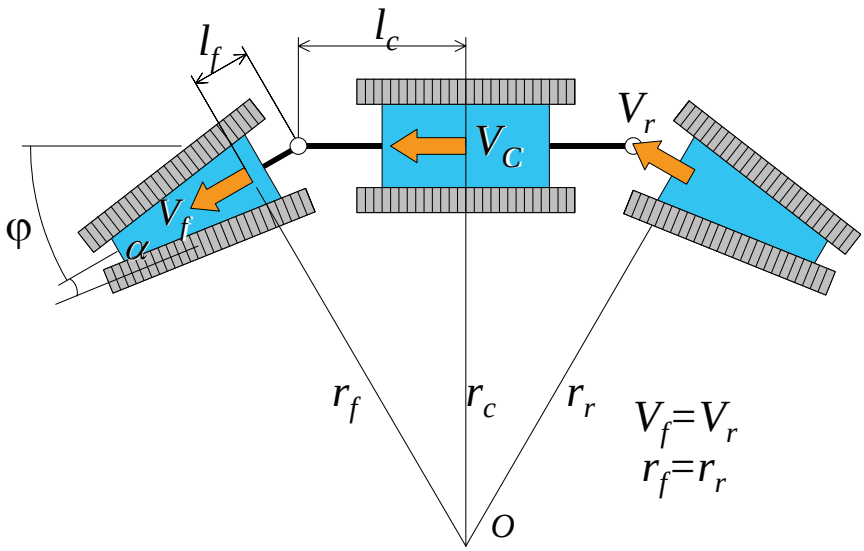


Fig. 3-30 The radius of turning

この場合，中央車体の旋回半径 r_c と前後車体の旋回半径 r_f は，以下の式となる．

$$r_c = \frac{l_c + l_f \dfrac{1}{\cos\varphi}}{\tan\varphi} \tag{3-22}$$

$$r_f = \frac{l_c + l_f \dfrac{1}{\cos\varphi}}{\sin\varphi} - l_f \tan\varphi \tag{3-23}$$

この時前後車体の旋回による角速度ω_f は式(3-23)で表す事ができる．

$$\begin{aligned}\omega_f &= \frac{V_f}{r_f} \\ &= \frac{V_c \cdot \cos\alpha}{\dfrac{l_c + l_f \dfrac{1}{\cos\varphi}}{\sin\varphi} - l_f \tan\varphi}\end{aligned} \tag{3-24}$$

中央車体がこの角速度で運動すると仮定して中央車体のクローラの速度がこれに等しい場合には矛盾無く旋回動作が行える．しかし異なるとクローラがスリップする事になる．角速度ω_f によって発生する中央車体の速度 V'_C は次の式となる．

$$V_c' = \omega_f \cdot r_c \tag{3-25}$$

よってスリップ率ξ は以下の様になる．

$$\xi = \frac{V_c - V_c'}{V_c} \tag{3-26}$$

姿勢変化の中心となるユニバーサルジョイントから中央車体中心までの距離 l_c =255[mm], ユニバーサルジョイントから前後車体の大ホイール中央までの距離 l_f =50[mm], 前後車体のクローラ取り付け角α =8[deg]を用いて，ヨー軸周りの姿勢変化角度範囲である 30°までのスリップ率ξ を求めると **Fig.3-31** の様になり，旋回角度が大きくなると中央車体のスリップ率が大きくなる事がわかる．

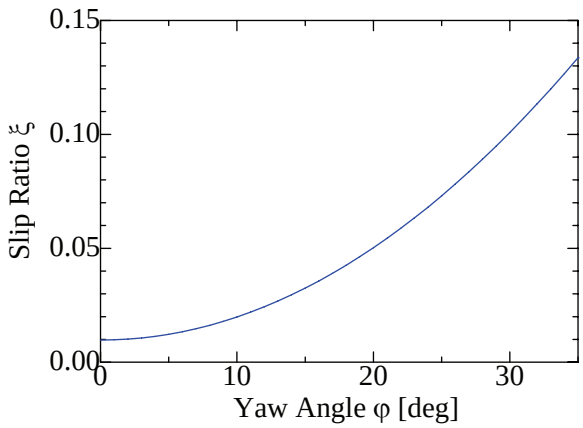


Fig.3-31 Slip Ratio of The Center Vehicle

この時中央車体がスリップするのではなく前後の車体がスリップすると考えると旋回半径は前後車体のみで旋回したときよりも大きくなる．中央車体の旋回半径を実験により計測すると **Fig.3-32** の様になり理論値よりも大きくなっている事が判る. この実験では車体間角度はモータの電源を切り，手動で姿勢角度を固定した状態にして実験を行ったため，通常の動作範囲の 30 度を越えた姿勢をとなっているが，スリップ率は十分に無視できる大きさであると考えられる事がわかる.

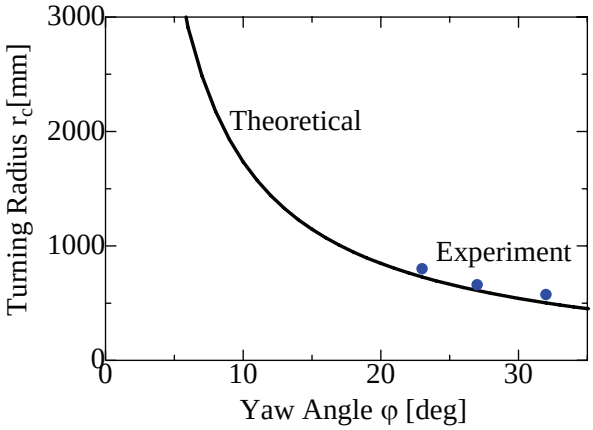


Fig.3-32 Graph of Yaw Angle-Turn Radius

不整地では 3 つの車体が均等に地面に接地する事が保証されないため，ピッチ角を用いて前後車体を下に押し下げて接地圧を高める事でより確実に旋回運動を行う．ピッチ角度を下げすぎると横転してしまうが, この動作を利用すると **Fig.3-33** の様に旋回半径内側のクローラを浮かせて外側のクローラのみで接地する事でより高い旋回性能を出す事ができ，平地では半径 440[mm]で旋回することが可能となる.

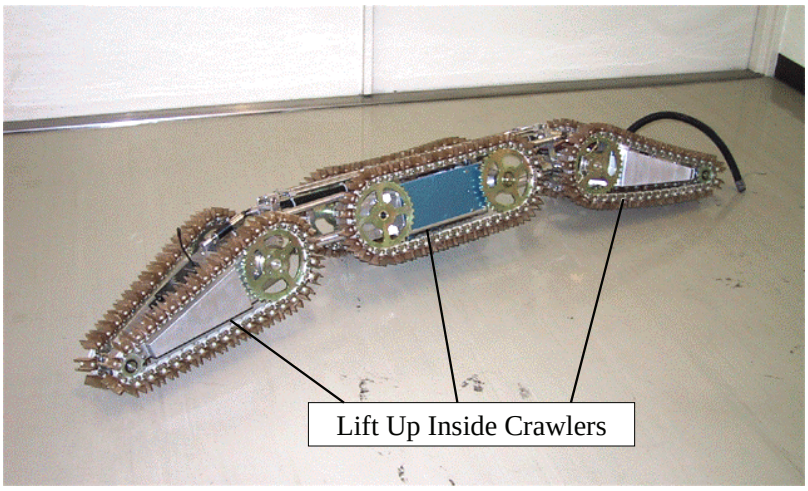


Fig.3-33 Super Turning

3.5.2 超壕性

アクティブ連結車両は連結した車体全体の長さを車両長として扱う事ができる．重心が壕縁を超える前に，先端が反対側に届いていれば超壕を行う事ができる．**Fig.3-34** の様に壕の幅 A，車両重心が車両中央にあるとすると，重心から車両先端までの長さ L/2，先端ホイールの半径 r となり，越えられる壕の幅 A は一般的なクローラの超壕距離を求める以下の式で求められる．[36]

$$A \leq L/2 - 0.2 \cdot r \tag{3-27}$$

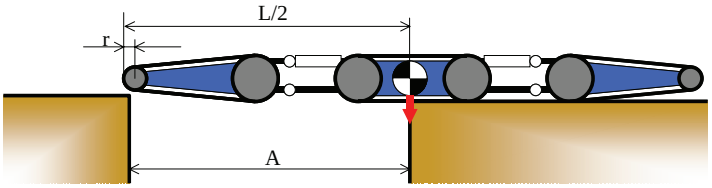


Fig.3-34 Trench width

本車両においては，重心が中央に在るものとすれば先端ホイール径 r=35[mm]として超壕性は 573[mm]となる．しかし 573[mm]での超壕実験を行ったところ，中央車体のクローラーがたるみ車両先端が下がり越える事ができなかった. この為 **Fig.3-35** の様にピッチ角をとらねばならず, またグローサが間欠的に接地するため, 実際には 540mm 程度の超壕を行った. また，本車両の重心が正確に中央に無い為，往復で超壕を行えたのは，500mm 強であった.

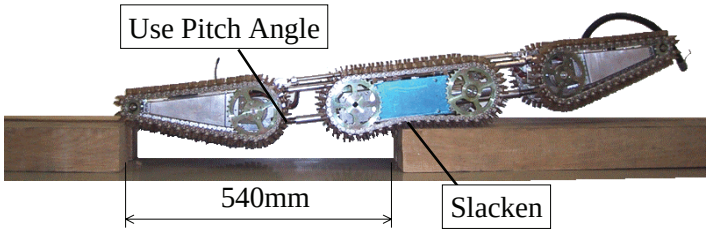


Fig. 3-35 Crossing a horizontal gap

3.5.3 超堤性

段差を乗越えるだけであれば先端のクローラを段差壁面に押し付けて乗り上げるだけで良いが，本車両は自ら潜り込む事のできる水平に開いた横穴を避けてその上の障害物に乗り上げる必要が有る. 本車両は **Fig.3-36** の様にピッチ角を利用してクローラ先端を持ち上げて高さ 210[mm]の横穴を避け, 後部のクローラにより先端を壁面に押し付けて段差に乗り上げ運動を開始する．段差に乗り上げた状態では車体を伸ばしてこれを乗越えようとすると車体先端が高くなり，**Fig.3-37** の様に天井の低い空間では妨げとなる．そこで車両先端がぶ

つからないようにピッチ角を下げて段差を乗越えることで段の上の狭い空間に入り込むことが可能となる．またこの姿勢変化により後部車体先端を押し下げることで中央車体を押し上げ，より高い段差を乗越える事ができる．

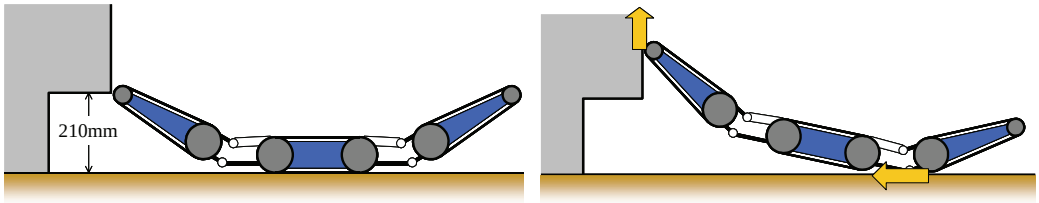


Fig.3-36 Avoid the cave and climb the wall

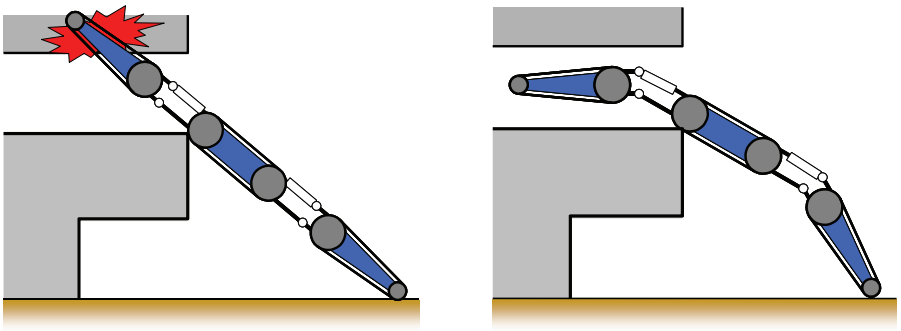


Fig.3-37 Avoid contact with the low ceiling by using posture change

クローラ車両の乗越えられる段差高さ H を求めるために重心位置を車体中心にあると仮定して **Fig.3-38** の様に車両全長 L，クローラ半径 r，車体角θ，段差高 H，クローラ接地点から重心までの距離 L_1，接地点から堤縁までの距離 L_2 とすると，式(3-28)の関係を満たす必要がある．

$$L_1 > L_2$$
$$\begin{cases} L_1 = (L/2 - r) \times \cos\theta \\ L_2 = r\sin\theta + \dfrac{H - r(1-\cos\theta)}{\tan\theta} \end{cases} \tag{3-28}$$

これを H について解くと次式になる．

$$H < (\frac{L}{2} - r)\sin\theta - r\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta} + r(1-\cos\theta) \tag{3-29}$$

本車両と同等の大きさの単体のクローラー車体を考え，L=1160[mm]　r=67.5[mm]をパラメータとして，式(3-29)に代入しグラフで表示すると H に頂点が現われ，超堤角θ=61[deg]の時 H=376[mm]が最大超堤高となる．この時超堤角は 60 度を越える．そのため前後長が長く左右幅の狭い機体では，左右方向に不安定となり転倒しやすくなってしまう．

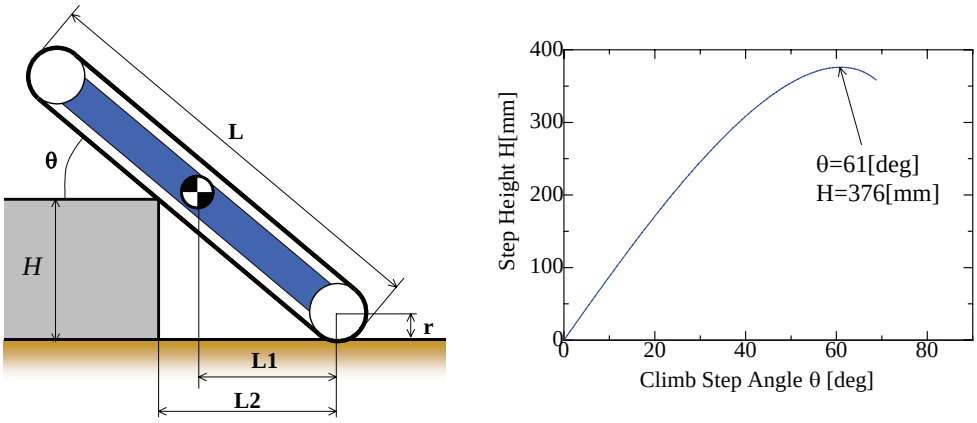


Fig.3-38 Relation between the climbable step height and climb step angle

この時姿勢変化を利用してピッチ角を下げると **Fig.3-39** の様になる. ここで中央の車体のリンク間長さ L_c 前後車体のリンク長さ L_f 車体中心軸から姿勢変化の中心となるユニバーサルジョイントまでの距離 a，大ホイール半径 R，小ホイール半径 r，超堤高 H とすると，これらの関係を表す式は式(3-30)になり，これを H について解くと式(3-31)となる．ここで実機寸法より L_c=508[mm]，L_f=291[mm]，R=70[mm]，r=35[mm]， a=23[mm]を代入し，ピッチ角を下げる方向に 0[deg]から 30[deg]の範囲で姿勢変化すると，ピッチ角を下げると登坂角が低くなると同時に，最大超堤高が高くなりより安定した状態で段差を越える事がわかる．走行実験では **Fig.3-40** の様に高さ 200[mm]の空間を避けて 420[mm]の超堤を行った.

$$L_1 > L_2$$

$$\begin{cases} L_1 = L_f\cos(\phi+\theta) + a\sin(\phi+\theta) - a\sin\theta + \dfrac{L_c}{2}\cos\theta \\ L_2 = L_f\cos(\phi+\theta) + a\sin(\phi+\theta) - a\sin\theta + \dfrac{R}{\sin\theta} \\ \qquad + (H - r - L_f\sin(\phi+\theta) + a\cos(\phi+\theta) - a\cos\theta)\dfrac{1}{\tan\theta} \end{cases} \tag{3-30}$$

$$H < \frac{L_c}{2}\sin\theta - \frac{R}{\cos\theta} + r + L_f\sin(\phi+\theta) - a\cos(\phi+\theta) + a\cos\theta \tag{3-31}$$

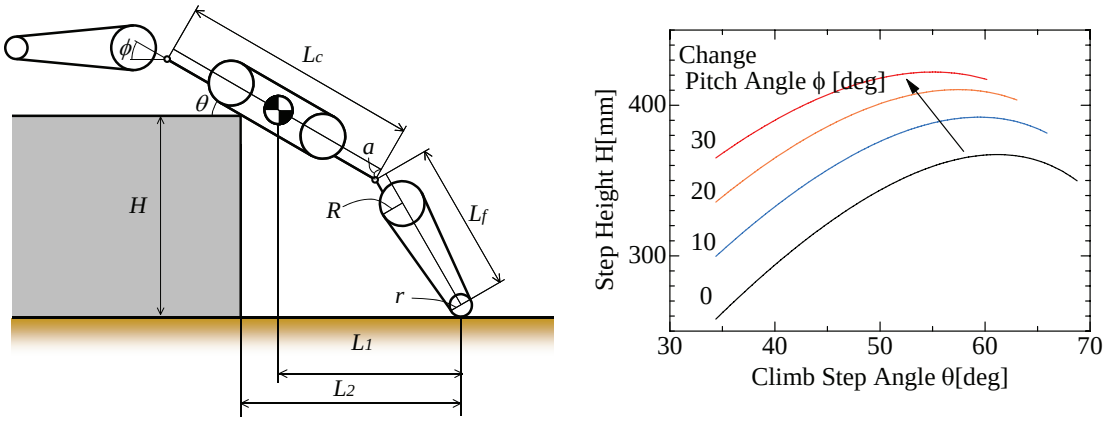


Fig.3-39 Move the climb step angle by the changing posture

3.5.4 転倒復帰

本機は基本的には上下逆さになっても走行が可能であるが，搭載器材が重力を利用して働くもの，たとえば自主落下方式の無線マイクを多数搭載していく場合や，車体上部に何らかの装置を取り付けた場合には，転倒からも回復させることができなければならない．本機の姿勢変化機構はロール方向に能動的に回転させる事はできないが，捻転と呼ばれる動作により転倒から回復することが出来る．捻転運動は姿勢変化入力側のジョイスティックを **Fig.3-41** の様にヨー角とピッチ角を回転させる様に姿勢を変化させる事で簡単にこの動作を実現できる．

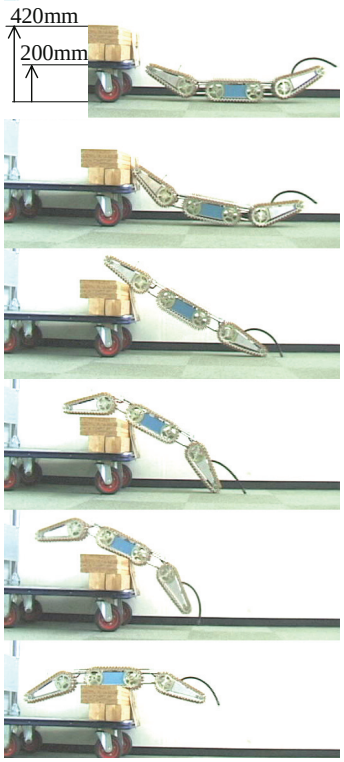


Fig.3-40 Ascending a step

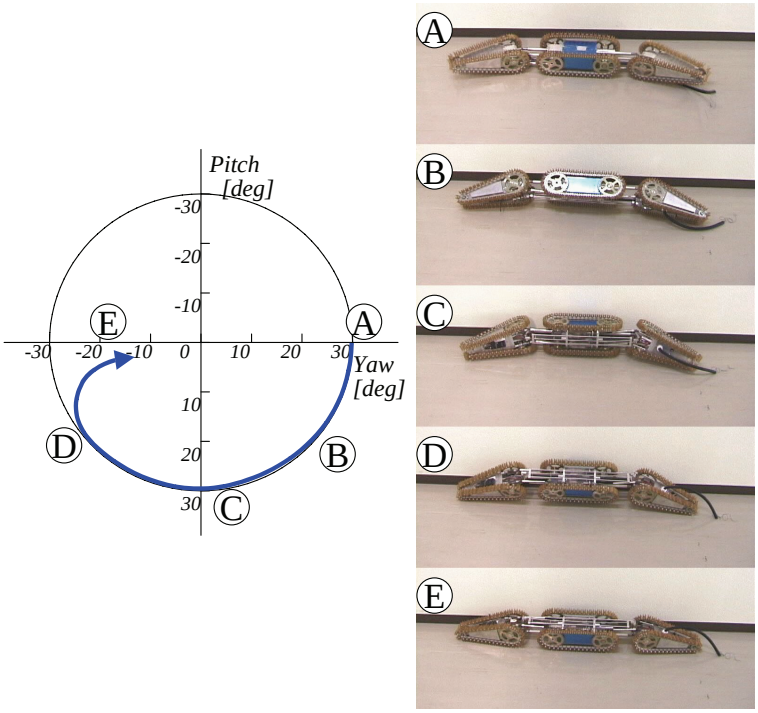


Fig.3-41 Roll over motion with joystick controll

3.5.5 不整地走行実験と蒼龍 I 号機のまとめ

蒼龍を用いて生活空間や取り壊し中のビルの瓦礫等，多くの走行実験を行った**(Fig.3-42)**．この実験により提案した３自由度の索状能動体が不整地において高い走行性を持っていることを確認した．また導入したバネ性が有効に機能している事を確認した．また角材等を利用して作った模擬実験場で車載カメラによる探索実験を行った．本機のカメラは車体先端に固定されており，**Fig.3-43** の様に先端で狭まっているクローラが画面両端に見えて動作状況が判る様になっている．この映像を見ながら操縦して対象物を発見する事ができた．

Fig.3-42 Experiment on the real debris

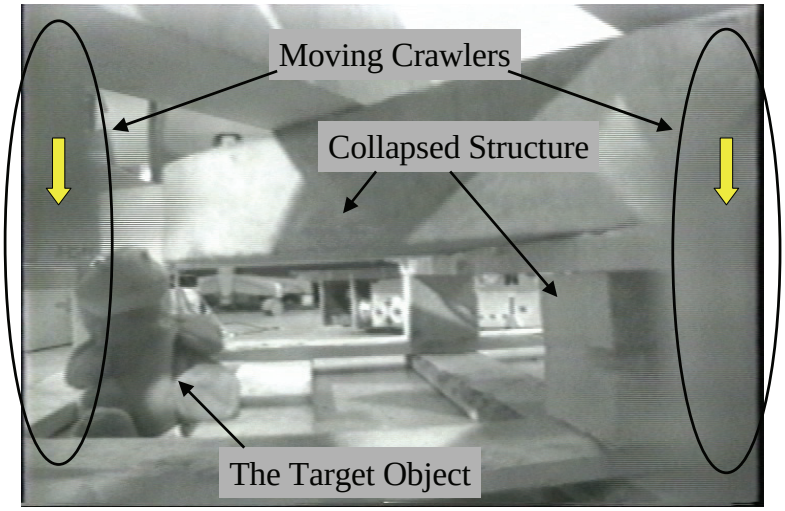


Fig.3-43 View of the CCD camera in the simulated collapsed structure

3.6 蒼龍Ⅰ号機の問題点と改良

蒼龍Ⅰ号機の走行実験により幾つかの問題がわかった．そこで蒼龍Ⅰ号機の連結機構の基本構成を利用しつつ，この問題を解決する改良型である蒼龍Ⅱ号機(**Fig.3-44**)を開発した．蒼龍Ⅱ号機は 2001 開館当初より 2004 年 1 月現在まで「日本科学未来館」でデモンストレーション展示中である．[37] 以下に蒼龍Ⅱ号機で改良した点について記述する．

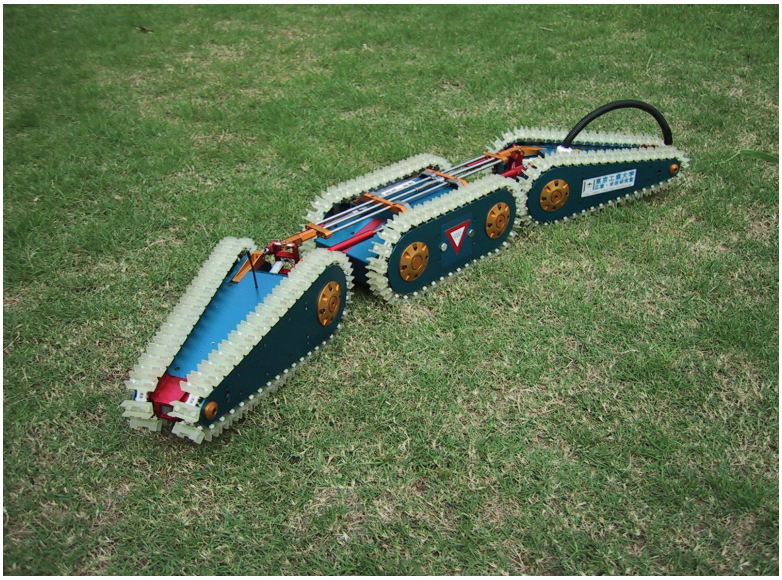


Fig.3-44 Total view of Souryu-II

3.6.1 クローラに関する問題

蒼龍Ⅰ号機において最も重大な問題点は全ての車体のクローラ長が同じであるという点であった．この事は車体先後端を考慮に入れて考えると，クローラのない場所が等間隔に存在していると言う事になり，等間隔な突起物に弱い事が判った．特に階段において階段の間隔が車体長と同じ場合に, 真直ぐな状態では **Fig.3-45** の様に連結機構の動力伝達軸が階段のエッジに引っ掛かりクローラが接触できなくなって登坂が不能となる．そのためピッチ角の変化を随時行いながら推進する必要があり操縦性に欠ける．連結機構の構造を変える事無くこの問題を回避するためには３つの車体のクローラ長さに偏りを持たせる事が有効である．前後の車体長を長くして中央車体を短くすると，**Fig.3-46** の状態 1 から状態 2 へと移行する間，後部連結機構が階段に接触している間は先頭車体のクローラが階段に触れる事ができ，状態 3 となり前部連結機構が階段に接触する時には後部車体のクローラが階段に接触する．これにより姿勢変化を利用する事無く容易に階段を上る事ができる．また，Ⅰ号機では転輪が剥き出しになっていたため，色々なゴミを巻き込みやすかったため，Ⅱ号機では側面に保護用のカバーを取り付けている．

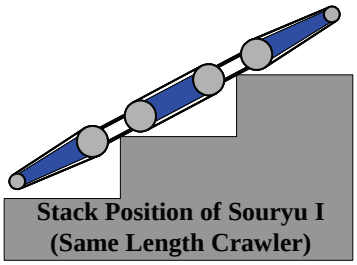


Fig.3-45 The problem of the same crawlers length

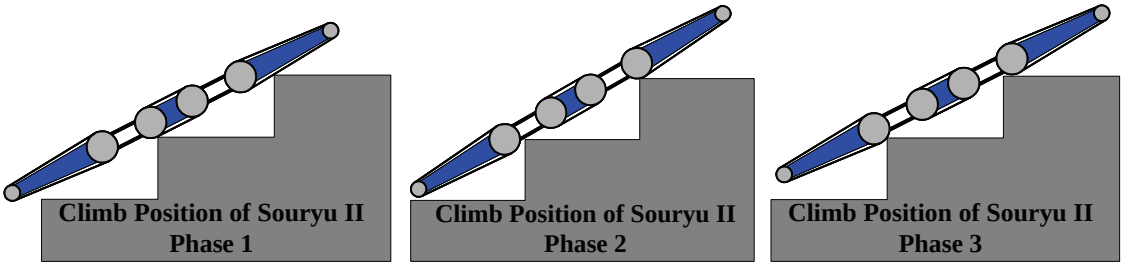


Fig.3-46 The effect of different length crawlers

3. 6. 2 各軸のバネ性の問題

ピッチ角，ヨー角周りの衝撃吸収機構は直動軸の延長軸上に配置すると，前後車体のクローラが先端に向かって斜めに傾斜しているため，衝撃吸収機構を長くする事ができない．また，クローラとの距離が近いために直径を大きくできず，強度不足にもなった．そこで II 号機では衝撃吸収のためのバネを **Fig.3-47** の様に直動軸支持ジョイント下部に配置することで部品を大型化した．ここでスプリングには沢根スプリング標準ストックスプリング 5432（自由長 50[mm], バネ定数 0.67[kgf/mm], 全タワミ 25.4[mm]）を用い, 標準状態で 15[mm] 圧縮して 10[kg]の負荷をかけた．ストロークは 10.4[mm]となり I 号機よりも 3[mm]長くなっている．またロール軸周りのバネ性については I 号機では柔らかすぎ，先頭車体が非接地状態の時に容易にロール運動を起こして傾いてしまうという問題が生じたため，II 号機ではローリング拘束軸の 3 本のロッド全てにϕ5[mm]の物を用いた構造とした．

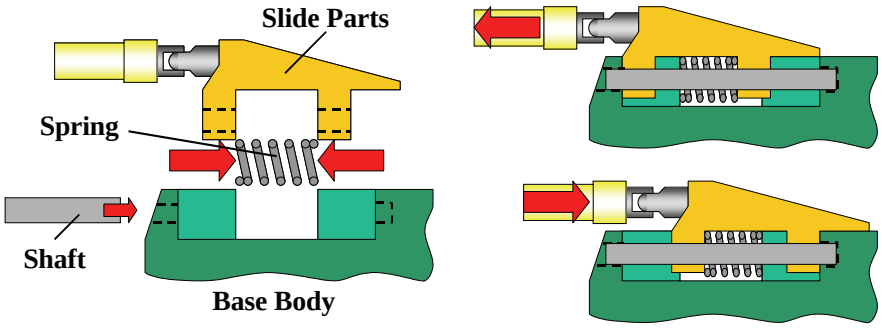


Fig.3-47 Newly introduced spring mechanism for shock absorbing

3.6.3 運搬用持ち手の取り付け

蒼龍のデモンストレーション等で運送業者に運搬を任せた際に，周り全てがクローラで覆われているために手で持ちにくいという問題がわかった．そのため操作者が容易に運べるよう，**Fig.3-48** の様な折畳式の取っ手をつけた．この取っ手は走行時には畳まれて車体と一体化しており，利用する時だけクローラ外に突出する構造となっている．

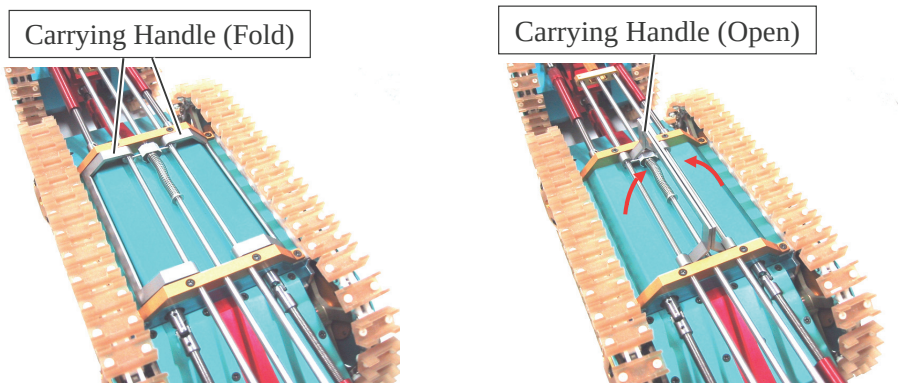


Fig.3-48　2 states of the carrying handle

3.6.4 車体間連結分解機構

蒼龍 I 号機は 3 つの車体からなり，前部車体は探査機器，中央車体は電源やモータの駆動装置，後部車体は無線装置やコンピュータ等の制御装置と車体毎にその機能が分散している．その為車体間で連結分解が可能であれば，**Fig.3-49** の様に作業目的に応じて車体を交換する事でより有効に活用できる可能性が有る．例えば前部車体を煙や粉塵で通常のカメラが利用できない場合に前述した超音波レーダー等のセンサを搭載した物に交換したり，被災者が瓦礫内から這い出ることを助けるジャッキを装備したり，閉じ込められた人に一時的に医薬品や食料などを届けるためのコンテナを装備したり，ソナーの様に利用できるばら撒き型の無線マイクロホンを搭載したりすることができる．後部車体についても，活動時間を延ばす増加バッテリを搭載したり，電波状況の悪い環境下では無線の中継局を投下したり，有線誘導方式を取るためにケーブルを放出巻き取りを行うリールを装備したり，将来的には高度な AI を持ったコンピュータを搭載してある程度の自動探査を行わせる事が可能となる．また緊急時用に被災者探査用の前後車体を用意しておけば，平常時に床下点検等に利用している車両の中央車体を利用して緊急時の大量出動も可能となる．このとき最も値段の高い駆動系を持つ中央車体を共有するため，生産性が向上する事になる．蒼龍の連結機構は動力伝達軸 1 本と直動軸 2 本とローリング拘束軸 1 本の 4 軸で構成されている為，**Fig.3-50** の様にこれらの軸の基部を手で回す事のできるネジとナットにする事で工具を使わずに簡単に分離合体が行う事ができ，車体交換が容易に行う事ができる．

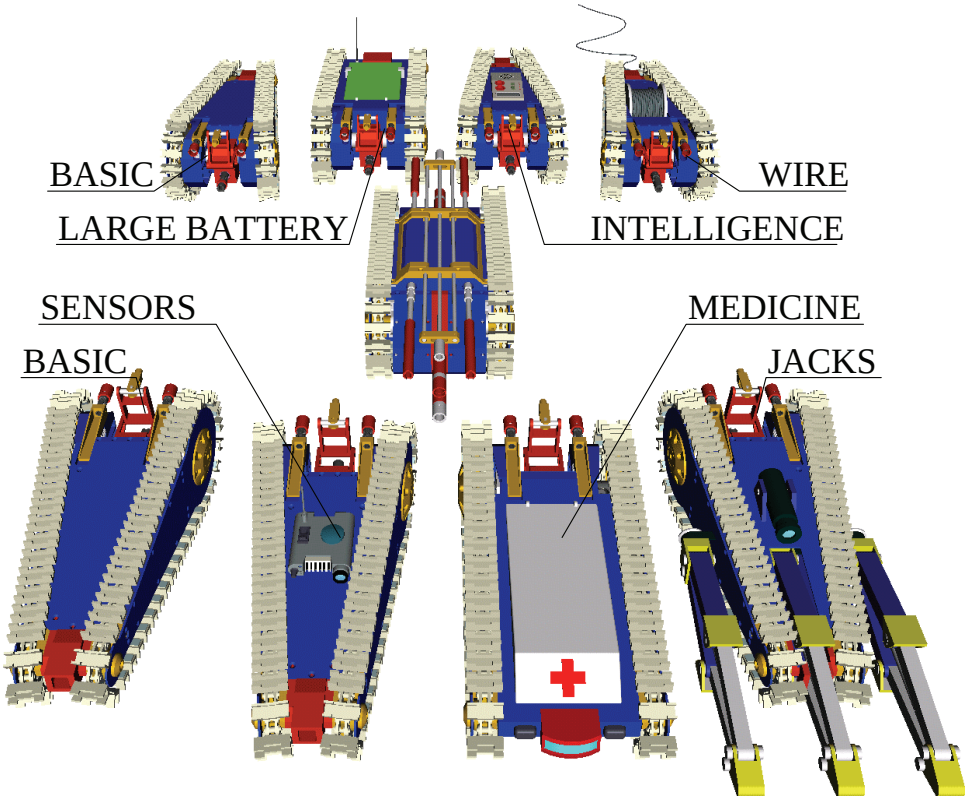


Fig.3-49 Concept of "Upgrades"

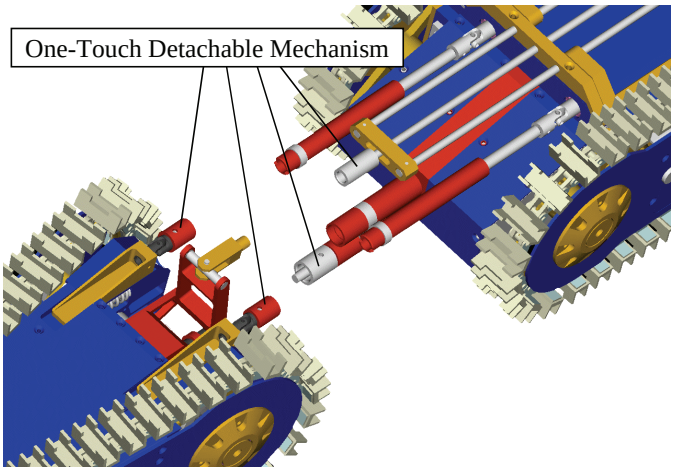


Fig.3-50 Detached Connection

3. 6. 5 蒼龍 II 号機の走行実験とまとめ

蒼龍 II 号機は博物館でのデモンストレーション展示用に製作したため，多くの走行実験を行う事ができなかった．しかし，クローラ長に偏りを持たせて階段での走行を容易にする手法は実験により有効である事が明らかとなり，バネ性に関してはデモンストレーションでこの部品が破損していないことから妥当な改良であったと判断できる．

第4章 実用化を目指した索状能動体「蒼龍Ⅲ号機」の開発

蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機による走行実験により，提案した連結機構による 3 自由度索状能動体で高い不整地走破性を実現できる事がわかった．しかし省自由度化による物を含め幾つかの問題点が明らかとなった．そこで本章ではこれらの問題点を指摘し，改良する手法を検討し，より実用的な索状能動体である蒼龍Ⅲ号機を開発する．

4. 1 蒼龍Ⅲ号機の構成と改良点

4. 1. 1 蒼龍Ⅲ号機の構成

製作した蒼龍Ⅲ号機を **Fig.4-1** に示す. 蒼龍Ⅲ号機の車体構成はⅠ・Ⅱ号機と同様３車体からなり，連結機構は蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機と同様に直動軸２本の伸縮の組み合わせによって前後対象に屈曲運動をおこなう．最大の変更点は傾斜したクローラを廃し，車体下部を貫通していた動力伝達軸を廃して車体ごとにクローラ駆動モータを搭載した点で，車両全体の自由度は 3 自由度から 5 自由度へと増えている．動力伝達を行わなくなった事で連結機構の屈曲角度は大きくなり，最大で 45[deg]まで屈曲することができる．以下にこれらの改良を加えた原因について明らかにする．

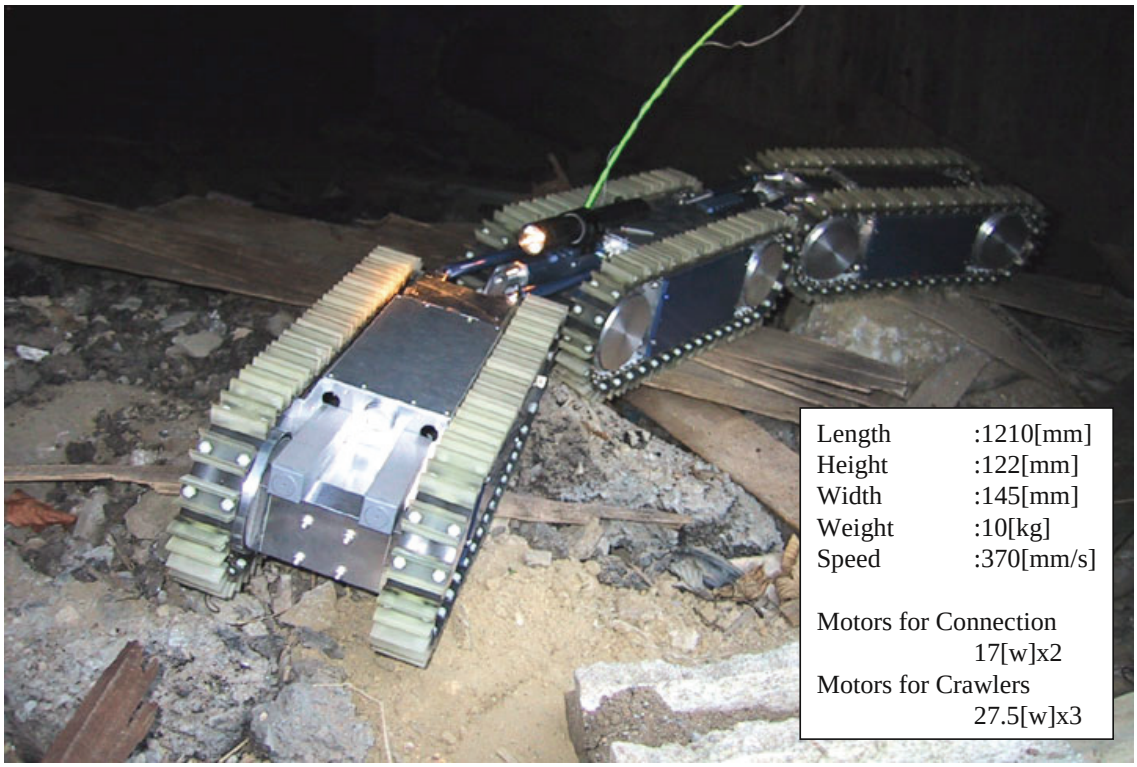


Fig.4-1 Total view of Souryu-III

4. 1. 2 有線誘導方式の必要性と車体内搭載容量の確保の問題

蒼龍 I 号機の走行実験の際，近代的な鉄筋コンクリートや鉄骨などのビル内で走行すると数 m という至近距離にいながら無線装置が届かなくなるという問題が度々生じた．そのため，金属を多用した近代建築物内では有線誘導による遠隔操縦の必要がある事がわかった．また WTC におけるレスキュー活動の際，瓦礫内部に空間がある可能性があるにもかかわらず侵入口が見つからないといった問題が生じた．このとき侵入口として注目されたのが **Fig.4-2** の様に崩壊したビルの鉄骨が地面に刺さった物や内部で折れた下水管等であった．これらの管は **Fig.4-3** の様に瓦礫内の空間まで到達しており，この管を利用してロボットを送り込み，内部を探査する事ができた．このときロボットは傾斜の急な管内は走行できず，電源及び通信に用いるケーブルで吊り下げて内部に送り込んだ．この様にケーブルは通信の為だけでなく，移動の為の補助として利用できる．また電源をケーブルにより供給するため，バッテリを搭載する必要がなくロボットの軽量小型化ができ，連続駆動も可能となる．これらの事からレスキュー用の不整地移動ロボットでは有線誘導式が適していると考えられる．

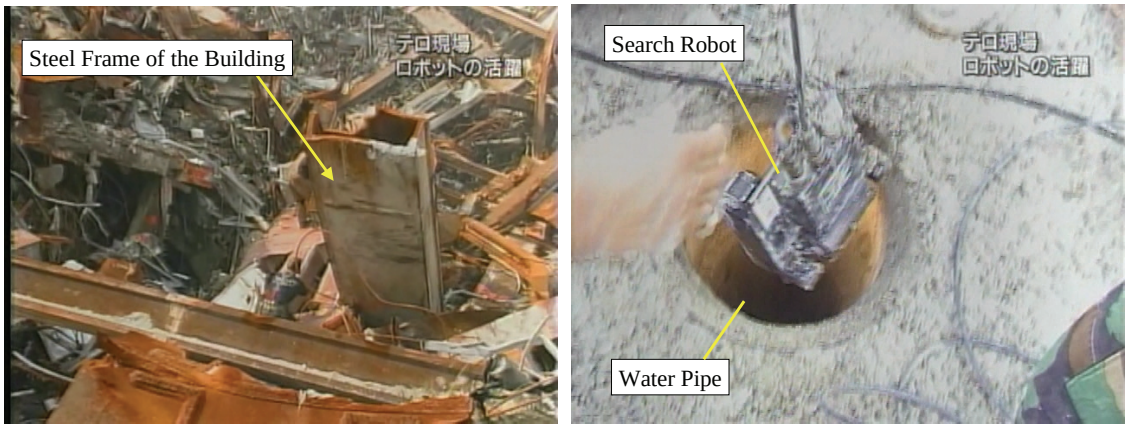


Fig.4-2 Hollow pipes pass through the collapsed structures (Broadcasted by NHK)

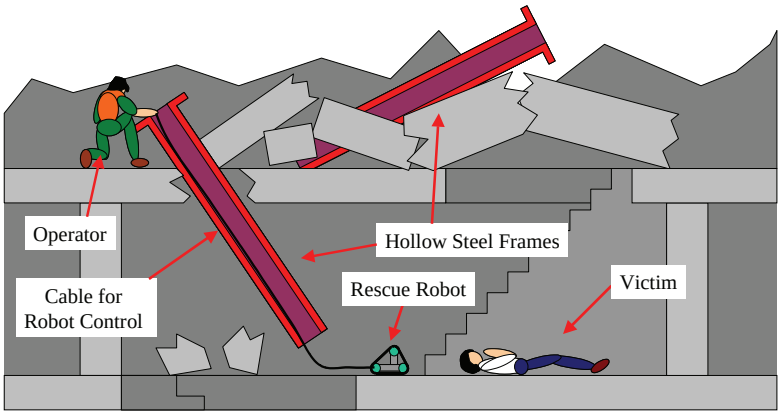


Fig.4-3 Use the penetrated steel frames for rescue operation

WTC で利用された有線誘導式のロボットはみな本体後部にケーブルを引きずって瓦礫内に侵入していき，オペレータが手元でケーブルを押し込む方式であった．しかしこの方法では **Fig.4-4** の様に地面に引きずられたケーブルによる抵抗や，曲がり角を曲がった場合にケーブルが角に引っ掛かる事で，長距離を移動する事ができない．そこで蒼龍Ⅲ号機では蒼龍Ⅱ号機の車体交換構想に有った有線操縦用ケーブルを巻いたリールを自ら搭載して，これを放出しながら推進する方式を採用する．この様にすると通信用のケーブルは地面に対して動かず，入り組んだ瓦礫内を有線で通信しながら移動することができる．さらに，自らがケーブルの放出巻取りを能動的に行うことができるため，これをウィンチとして利用して垂直な壁面を降りたり，行動不能になった場合にケーブルを引っ張ってその状態からの復帰を図る等といった利用方法が考えられる．また，障害物内から出てくる時に，侵入経路と同じ経路をケーブルを巻き取りながら後退せず，障害物を周って戻ってきたり違う出口から戻ってくると，ケーブルが中で障害物に引っ掛かって回収できなくなる．この場合はケーブルを切り捨て，車両側はケーブルリールごと交換し，交換したケーブルリールは後に再び新しいケーブルを巻いて再利用する事が効率的であると考えられる．

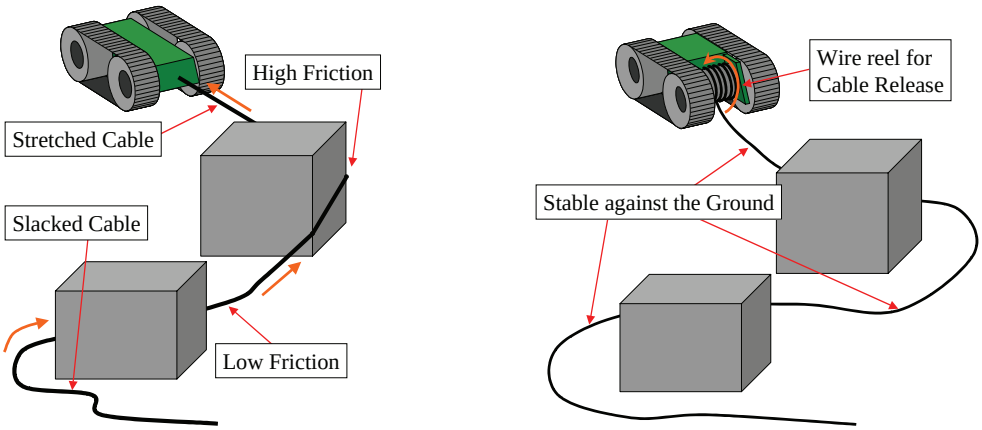


Fig.4-4 2 types of trailing cable for remote control

蒼龍Ⅲ号機では車体内にリールを持ち随時放出しながら走行し，十分な長さのケーブルを格納する必要があるために，太いケーブルは利用できない．さらに意図的にこれをウィンチとして利用する事も考えているため，通常のケーブルでは強度的に十分ではないと考え，当研究室で開発したハイパーテザーの利用を考えている．[38]ハイパーテザーは細い電線数本を拠り合わせたものをケブラー繊維で包んだ物で，引っ張り加重はケブラー繊維が受けるため細く柔軟なケーブルで十分な張力を出す事ができる．しかし細い電線では大きな電流が流せないため，モータが高出力を必要とする場合に備えて電源を別に用意する必要がある．そこで車両内に小型の鉛蓄電池を搭載してハイパーテザーによって通常移動および静止中には充電し，大出力でモータを駆動する時には電池に蓄えられた電気を利用する方式をとる．このケーブルリールを搭載するため蒼龍Ⅲ号機では後部車体に大きな搭載

スペースを設ける必要がある．しかし蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機の様な傾斜したクローラを装備していると車体内に大きな搭載空間を設ける事ができず，長距離を移動するための長いケーブルを巻いたリールを搭載する事ができない．そのため内部空間を広く取れる平行なクローラを導入する必要がある．

4. 1. 3 その他の狭まったクローラの問題点

4.1.2 章ではケーブルリール搭載空間の点から後部車体の狭まったクローラの問題点を述べたが，実験により前部車体の搭載力も必要である事が判った．蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機では車体先端に固定カメラを取り付けただけであったため，車体後部が障害物に引っ掛かっている場合その状況を確認できず対処の仕様がなく，また発見対象物の横を気付かずに通り過ぎてしまう事もあり，先頭車体には車体周囲を見渡す事のできる可動式のカメラや全周囲を見渡せる様複数のカメラを取り付ける必要がある事が判った．よって前部車体の搭載力も広げる必要性がある事がわかった．さらに搭載空間だけでなく走行性能においてもクローラを傾斜させた事によって幾つかの問題点が発生した．

まずクローラを傾けて取り付けた当初の理由は，先端が隙間の入り口に入れば，あとは車両側面を擦りつけながら隙間に強引に入っていく為であった．しかし，これは同時に車体中央部よりも細い空間に無理に車体を押し込む事が可能となり，引っ掛かってしまって進むことも戻ることも不可能な状態になる事があった．このため旋回式カメラで車幅を確認しながら隙間に侵入し，侵入できない空間には入らない方が有効であると判断できる．

また，前進時には後部車体のクローラの底面側が **Fig.4-5** の様に両側のクローラが内側に向かって動く動作となり，このため物を集めて挟み込む動作となってしまう．布のような柔らかい物であると，巻き込んだ布は車体後部をクローラに挟まれたまま持ち上げられ，車体上部で被さるようにクローラから離される．さらに車体上部のクローラは前方向に動いているため，布は前の車体まで運ばれ，さらに前の車体の狭まったクローラによって挟まれて，車体底面側まで運ばれる．これを繰り返すことで蒼龍の周りに布が巻きついてしまい行動不能となる．また硬いものを挟んでしまうとスタックして動かなくなり，それでも無理に動かそうとするとクローラが左右に押し広げられて切れるか外れてしまう．

さらに段差乗り越え時に車両前後端で接地状態となるが，この時クローラ前後端が狭まっているとクローラが平行に取り付けられていた場合と比べて **Fig.4-6** の様に重心支持多角形が小さくなり，転倒安定余裕が低くなってしまう．[39]

以上の事からクローラを傾斜させる方式には多くの問題点がある事がわかった．一方，前後車体のクローラ取り付け方法を中央車体と同様の物にすると，内部空間を広く取れるだけではなく，傾斜させる為の機構も廃する事ができ単純化軽量化も行う事ができ，また３つの車体で共通の部品を利用することもでき，生産性，メンテナンス性も向上する．そこで蒼龍Ⅲ号機では平行なクローラを採用し可能な限り３つの体は同一の部品で構成する．

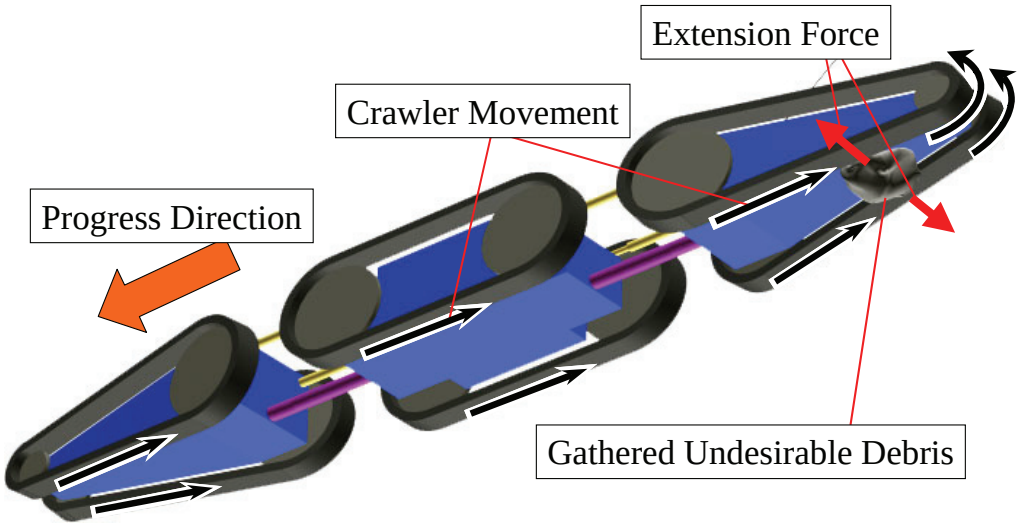


Fig.4-5 Debris gotten caught between the sharpened crawlers

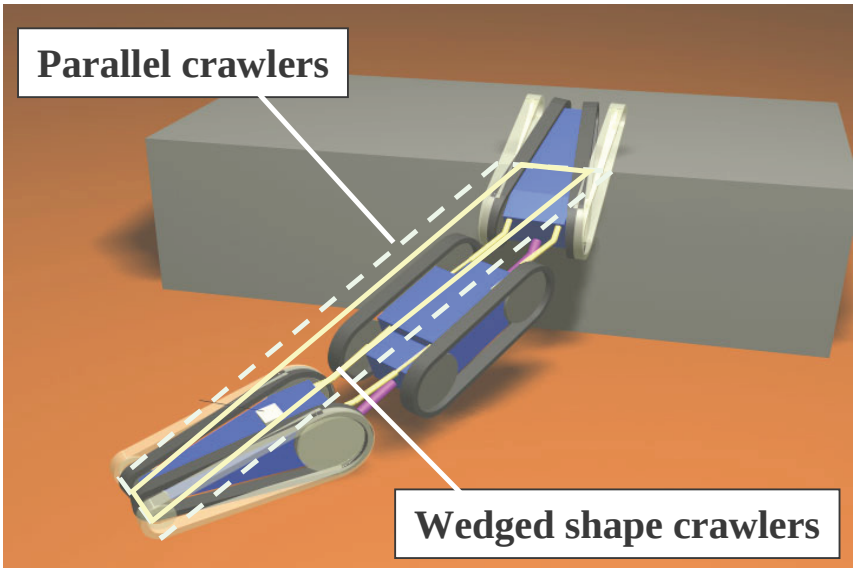


Fig.4-6 The supporting axis of over turn

4. 1. 4 動力伝達軸に関する問題点

蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機ではモータの数を減らす為に動力伝達軸を用いて３つの車体全てのクローラを１つのモータで駆動していた．このことはクローラがいかなる接地状態であっても必ずクローラ駆動モータの出力を全て使えるという利点があった．しかし動力伝達軸によってすべてのクローラを同時に動かす方式では，どこか一つのクローラがゴミをかみこんで動かなくなった場合に場合に，他のクローラも動かなくなるといった問題も生じた．特に前述した，狭まったクローラによるゴミ挟み込みによってこの問題が頻繁に起こった．これを回避するには通常ディファレンシャル機構を用いるが，ディファレンシャル機構で

は１クローラが浮いてしまった状態になるとそのクローラだけが回転して，推進することが出来ないという問題が生じ，これを回避する為にはさらに複雑な機構を用意せねばならなくなり，重量やコストの面からもあまり好ましくない．

また動力伝達軸は車体下部を通っているため，動力伝達軸が瓦礫に乗り上げクローラが地面に接触できない場合，正面からこれを見ると **Fig.4-7** の様に車両重心が動力伝達軸よりも高い位置にあるため不安定となる．さらに連結部では側面にクローラが無いため，**Fig.3-45** の様に前後両方の連結部で突起物に乗り上げた状態になると容易に横転してしまった．蒼龍Ⅱ号機では前後車体のクローラ長を中央車体のクローラ長と異なる長さとする事で，階段等の等間隔に突起のある空間での乗り上げ易さを回避したが，根本的解決にはなっておらず，不規則な凹凸では乗り上げる事が頻繁にあった．

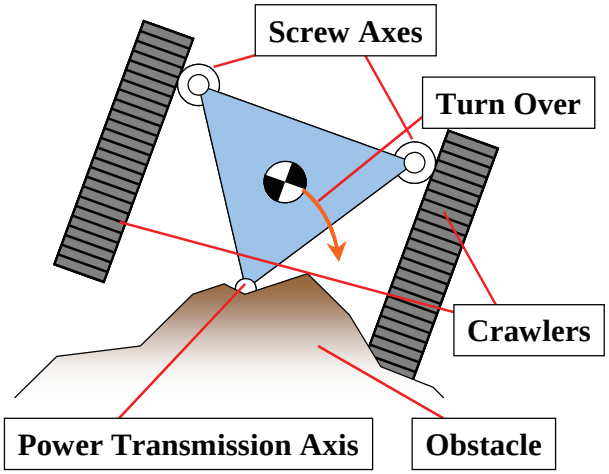


Fig.4-7 Stranded on the obstacle by the power transmission axis

さらに接地性を高めるためにロール軸周りにバネ性を持たせているが，ロール回転中心となる動力伝達軸は車体の底部にあり車体重心よりも低い位置となっている．そのため左右のクローラが接地できなくなった車体は容易に傾いてしまう．この問題は **Fig.4-8** の様に段差にピッチ角を上げて段に乗り上げる場合や，谷渡り運動のために車体が谷に侵入して接地できなくなった場合に発生する．前者についてはヨー角の姿勢変化によって車体が正面を向くように操縦せねばならず，後者についてはピッチ角をとって先端を持ち上げて水平にせねばならず，車体先端が水平位置になった時に見かけ上のヨー角は最大ヨー角よりも小さくなってしまう．またロール軸が２本の直動軸と離れているために **Fig.3-23** で述べたように，直動軸がロール運動により左右に大きく振れてしまい，クローラとの接触を避ける為にクローラを直同軸から離して配置しなければならず車両の小型化を妨げていた．また，動力伝達軸が車体底部を通るため，重量物であるクローラ駆動用の大型モータやバッテリをこの位置に低い位置に配置することが難しく，重心を低くすることを妨げることになり，車両全体としての安定性に不利な物となっていた．

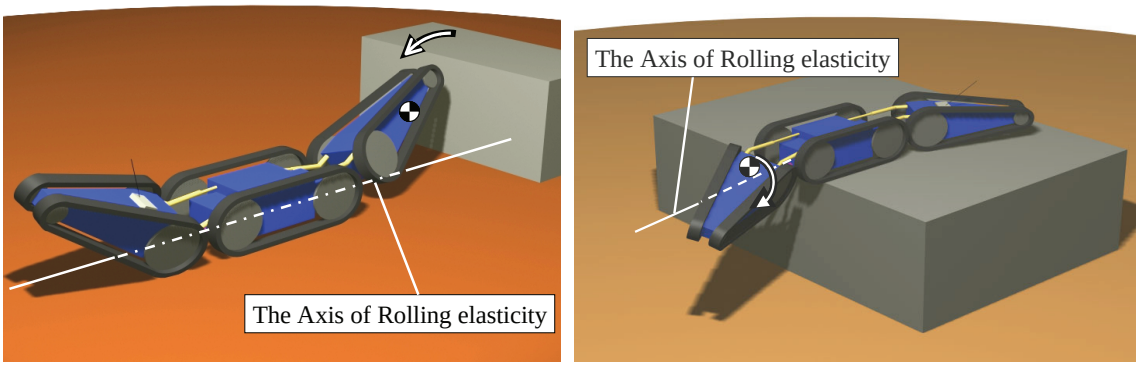


Fig.4-8 The undesirable effect of rolling elasticity

以上のように動力伝達軸の位置が車体下部に通っていることは不整地移動車両にとって不利であり，動力伝達軸による全クローラの同時駆動にも問題点があることがわかる．そこで新たに開発する蒼龍Ⅲ号機では３つの車体にクローラ駆動モータを分散させ，連結機構の改良を行う．クローラ駆動モータを３個に分散する事によって考えられるデメリットは接地状態によって全ての駆動モータが有効に利用されない事と，自由度が増える事による信頼性の低下の問題である．

前者は不整地で接地していない車体がある場合には，接地している車体のモータしか利用できないと言う問題であり，最悪の場合 1 車体のクローラで全ての推進をまかなう可能性も出てくる．このため３つの車体それぞれに大型のモータを搭載する必要があり，これは重量やコストの点からも問題となる．しかし動力伝達軸を利用しないため，姿勢変化の屈曲角度を大きく取る事ができる様になり，複数車体での接地状態としやすくなるため，全てのクローラを 1 モータで駆動する場合のモータよりは小型のモータを利用する事ができると考えられる．

後者はクローラ駆動モータを３つにすると機械的な自由度は増えてしまうが，１車体のクローラが停止しても２車体のクローラでも走行性能は劣るが動作が可能である事を考えると，1 モータの信頼性を r とするとモータを３つに分散させた場合の信頼性と 1 モータのみの場合の信頼性を比較した物が式(4-1)となり，モータ 1 個の信頼性 r が 0.5<r<1 の間であれば 3 個のモータで分散駆動させた方が信頼性は高くなると判断できる．また，ゴミを挟み込んで動作不能となった場合，転輪を逆回転させることで挟み込んだゴミを排除する事が可能であるが，１モータでクローラを駆動すると，場所を変えてゴミを排除する事ができず，狭い場所で物をかみこむとゴミを振り落とす事ができずに脱出する事ができないが，クローラ駆動モータを分散させておくと，残り２車体で開けた空間に移動してからゴミを排除する事で，再び正常な状態にする事が可能になる場合もある．以上の事から蒼龍Ⅲ号機ではクローラ駆動モータは３つに分散させる方式とする．

$$r^3 + {}_3C_2 \cdot r^2 \cdot (1-r) > r \qquad (0.5<r<1) \qquad (4\text{-}1)$$

4.2 蒼龍Ⅲ号機の機構と設計

4.2.1 新しい連結機構のメカニズム

動力伝達軸が不整地走行の邪魔とならないためにはこれが車体下部にないことが望ましい．しかし姿勢変化軸の中心となるピッチ軸ヨー軸の交点であるユニバーサルジョイントの位置は２本の姿勢変化の直動軸から離れた位置になければならない．そこでⅢ号機では動力伝達軸を廃して，**Fig.4-9** の様に後部三角板の直同軸 2 本の中間に固定された指示軸を途中で折り曲げて車体下部に延ばし，ここに姿勢変化のヨー軸とピッチ軸の交点となるユニバーサルジョイントを配置した．このときこのユニバーサルジョイントは動力伝達を行わないため回転の自由度をもたず，蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機で導入したようなローリング拘束リンクを導入する必要が無く構造が簡単になる．ただしローリング拘束リンクがなくなったため，別にロール軸周りのバネ性を発生させなくてはならない．蒼竜Ⅲ号機では後部三角板に固定された指示軸に軸周りのバネ製を持たせて，ロール軸周りの姿勢変化をこの軸周りに行う．このようにすると 2 本の直同軸の間にロール軸があるためロール軸周りに回転しても **Fig.4-10** の様に蒼龍Ⅰ号機の様に直同軸が左右に振られずクローラと干渉する心配がなく，クローラをすぐ近くに配置することができ車体幅を小さくできる． また連結機構のリンク長さも **Fig.3-13** でのパラメータを a=30，b=50，c=160 と小型化し，同時に車両を軽量化することで駆動モータ及び減速比は蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機と同じ物で設計を行った．

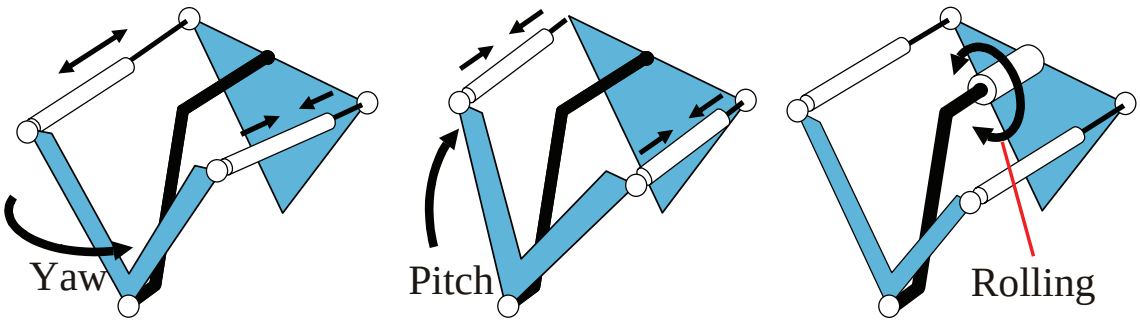


Fig.4-9 Newly introduced connection mechanism

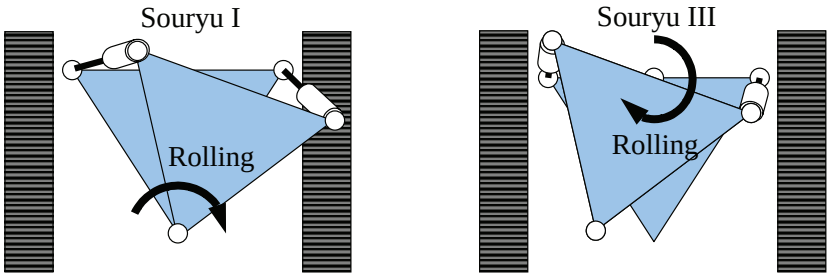


Fig.4-10 The swing motion of the screw axes

新たな連結機構を導入したことで接地性向上のためのロール軸が車体上部に移動し重心よりも高い位置となった．そのため車体がロール軸にぶら下がった状態となりクローラが接地していない状態になったときに安定しやすく，中央車体に関してはこれだけで不接地状態になった時に常に水平な状態を保つことができる．しかし前後車体についてはピッチ軸周りの姿勢変化だけを行ったときには水平を維持することができるが，ヨー軸周りの姿勢変化を行った場合には首振り運動に伴って重心が左右に動くためこれによってロール軸周りの姿勢変化をしてしまい，旋回しながらの谷渡り運動で走行性能が低くなってしまった．そこでロール軸周りのバネ性についても，一定加重がかかるまで変形を開始しない不感帯をもったバネを導入する必要がある．

ヨー軸，ピッチ軸周りのバネ性はⅠ・Ⅱ号機と同様の方式を用いるが，Ⅰ号機の方式では動作範囲が狭く，強度にも問題があった．これを改良したⅡ号機では直動軸の下部にバネを配置したが，Ⅲ号機では車高が低く後述するクローラ駆動機構の構造上この配置はできない．そこで新たにバネの機構を設計する．Ⅰ号機では衝撃吸収バネの内径の中にスライドする部品と軸を通したため，軸が細くなり強度不足となった．そこで **Fig.4-11** の様にバネの内側にスライドする部品に相当する物のみとして，スライド支持軸に相当する物はバネの外側に筒として配置した．利用するバネはⅡ号機と同じとして，沢根スプリング標準ストックスプリング 5432（自由長 50[mm]，バネ定数 0.67[kgf/mm]，全タワミ 25.4[mm]）を 15[mm]圧縮して 10[kgf]の圧縮力をかけた物を利用した．

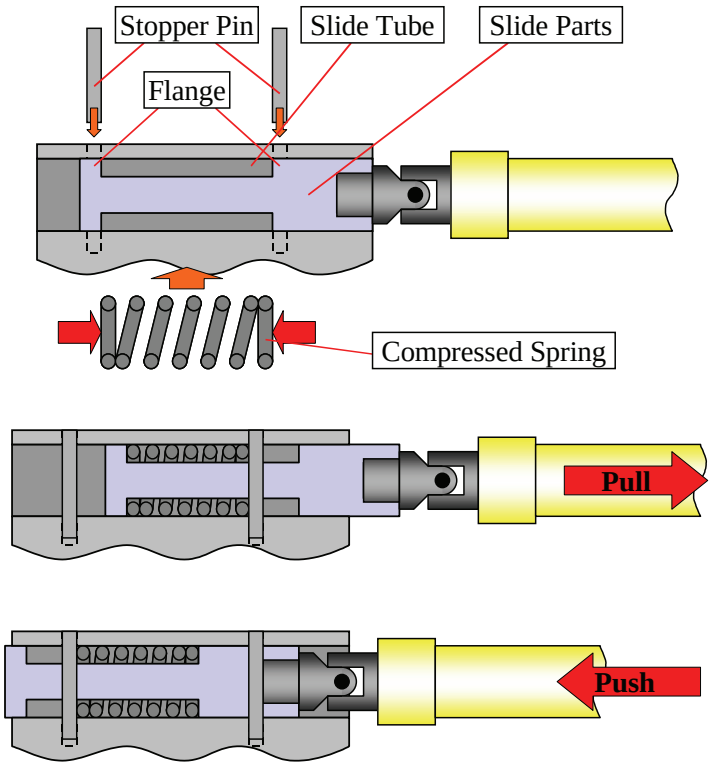


Fig.4-11 Elasticity for Pitching and Yawing

蒼龍Ⅲ号機ではロール軸周りにも不感帯を持ったバネ性を持たせる．ロール軸が車体上側にあり，姿勢変化による直動軸との接触も前述した様に起こり難いため，ここを太くする事で中にバネ性を組み込む．不感帯をもったロール軸周りのバネ性を出すために採用した構造を簡易に展開図として表した物が **Fig.4-12** である．ここでは横方向にスライドする部品の山と上方向にバネで押し上げられている部品の谷がかみあっていて，バネによって押し付けられた力を超えるまでスライド部品は横にスライドすることができない．蒼龍Ⅲ号機ではこの山と谷を **Fig.4-13** の様に円周状に配置した物をロール軸周りのバネ性として利用する．初期状態で押し付けているバネ力は先頭車体を岸からせり出してヨー角を 45[deg]屈曲させた時にロール軸にかかるトルクで変形しない程度とした．設計時の予定寸法重量より前部車体の重量 2[kg]，ヨー軸から前部車体重心までの距離を 150[mm]，予定最大屈曲角度を 40[deg]としてロール軸にかかるトルクを求めると式(4-2)の様に 193[kgf mm]となる．

$$150[mm]\times\sin(40[\mathrm{deg}])\times 2[kgf]=193[kgf\cdot mm] \qquad (4\text{-}2)$$

円周状の凹凸部品の直径を 20[mm]とすると，凹凸をスライドさせる力は以下になる．

193[kgf mm]/10[mm]=19.3[kgf] (4-3)

凹凸の傾き角度を 45[deg]とすると，押しつけるバネの強さも 19.3[kgf]となる．そこで部品の共通性を持たせるために，直動軸のバネ性に利用した物と同じバネを 2 個直列に配置して 20[kg]の力を出した状態とした．しかし最終的な設計寸法では最大屈曲角度は 45[deg]まで増え，逆に凹凸部品の直径は 16[mm]に縮小してしまったために，ロール運動を起こさずに行える屈曲は 30[deg]程度までとなっており，現状ではある程度以上ヨー角を屈曲させた場合はピッチ角も併用する必要がある．また車体内に装備を搭載して重量が変わると，必要となる圧縮力はより大きな物となる．一方このバネの初期圧縮力を高くしてしまうと接地性を高める為の柔らかいバネ性に影響を与えてしまうため，今後経験的に丁度良い値のバネ性を持つ様に調整していく必要がある．しかし段差に侵入する場合にはヨー角はあまり変化しないため，先頭車体のロール運動によって先端が傾く動作が発生せずに容易に乗り上げを行う事ができる．

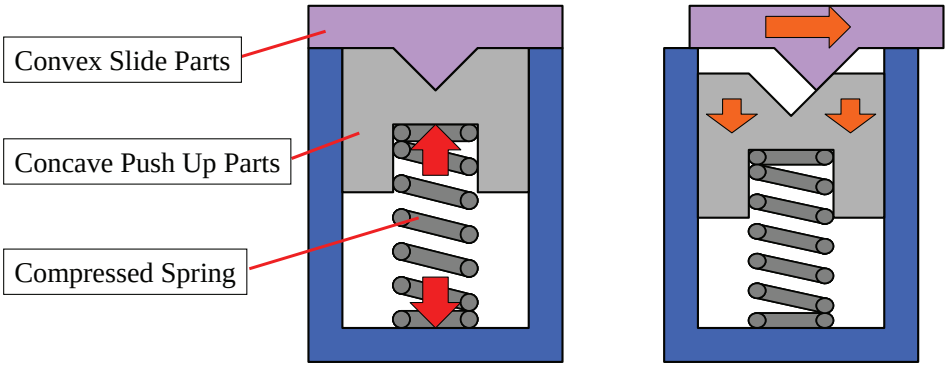


Fig.4-12 Development model of rolling elasticity

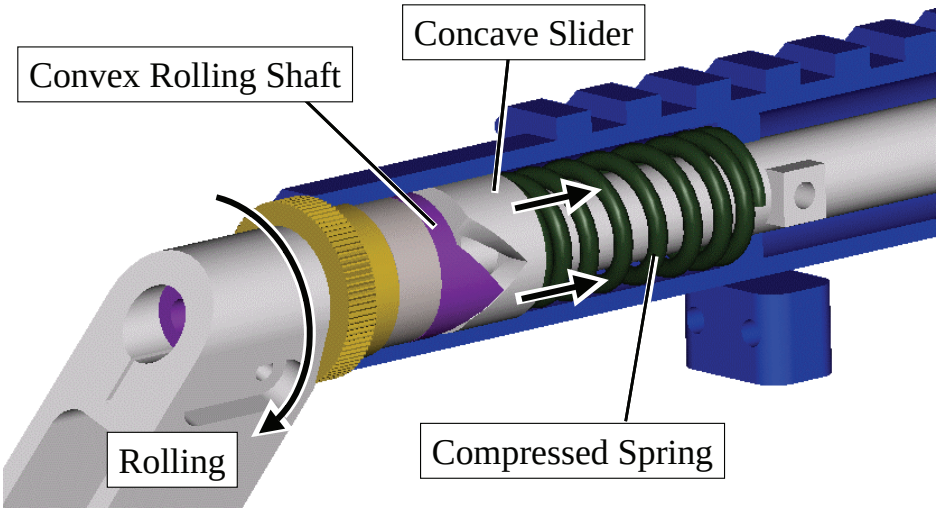


Fig.4-13 Cutaway model of rolling axis of Souryu-III

4.2.2 クローラ駆動モータの配置と出力

モータはクローラホイール軸と同方向に配置し，クローラホイールの間に駆動部を収める事でセンサや姿勢変化の駆動装置を収める胴体内を広くとる事ができる．このとき左右のクローラを同時に駆動するため，車体内を左右へ一本の軸が通っている必要がる．通常左右のホイールを接続する駆動軸はホイールの軸を用いる．のこの構造を車体正面から見ると **Fig.4-14A** の様になるが，車体が小さいためモータを長くする事ができず，車体底面とホイール駆動軸の隙間も狭く細いモータしか利用できない．そこで **Fig.4-14B** の様にクローラホイールを中空構造にして内歯歯車を切り，これを大口径のベアリングで支持し，ホイール中心軸とオフセットさせた駆動軸のギアでこれを駆動し，駆動軸のギアをモータのギアで駆動する．この様にする事でより大きなモータを利用する事ができる．

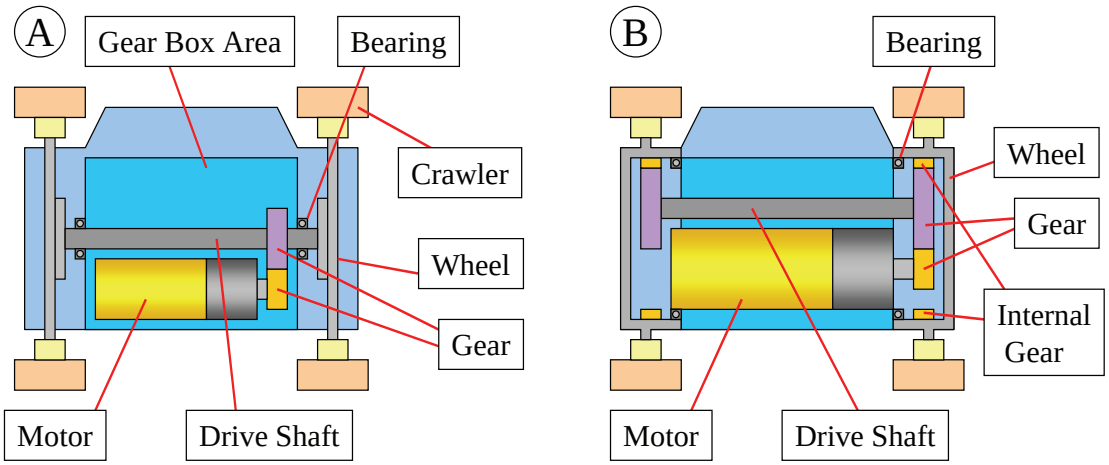


Fig 4-14 The arrangement of the position of the motor and drive shaft

蒼龍Ⅲ号機のクローラ駆動モータは３個に分割するため新たに選定する必要がある．前述した様に最悪の状況では全ての車体に蒼龍Ⅰ号機で用いた物と同等のクローラ駆動モータを必要とする可能性があるが，Ⅲ号機では車体構造を簡易化して重量を軽減する事と，蒼龍Ⅲ号機ではモータを車体横向きに配置することで効率の悪いウォームギアを利用せずに転輪を駆動する事から，Ⅰ号機で用いたモータよりも低い出力のモータが利用できる．しかし蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機の移動速度は体感上遅く感じ，また移動速度が速ければ動的な効果を利用して隙間を越えたり，段差に乗り上げる事が可能となる事から，Ⅲ号機では移動速度を早く設計する．理想的には軽量小型で負荷に応じて自動的に減速比を変える変速機があれば良いが現在利用できる物はまだない．よって車体重量 W=8[kg]，移動速度 V=0.4[m/s]，クローラホイール直径となる車体高さは小型化により R=0.12[m]として設計を行った．

蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機の通常の接地状態での登坂角度はおおよそ 45[deg]程度であり，これを越えるとクローラがスリップしてしまった．しかし最もクローラに負担がかかる **Fig.3-39** の様な段差越え運動では，乗越える瞬間には中央の車体のみで車体を支持し登坂角は 55[deg]付近となる．通常の接地状態の登坂状態ではクローラが滑ってしまいこの様な登坂角度を取る事は出来ないが，グローサが深く段差エッジを噛みこむ事でこれだけの登坂角度でもスリップを起こさずに登る事ができる．よってこの様な状態で推進できるモータである事が望ましい．

ホイール出力の計算は蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機と同様であり以下のパラメータを前述の式に適用する事で求められる．クローラ当りの負荷分布率αは前述した段差越えを想定してα=1，車両重量 W[kg]=8，移動速度 V=0.4[m/s]，ホイール直径 R[m]=0.12，重力加速度 g[m/s^2]=9.8，走行抵抗係数ν=0.3，斜面傾斜角度θ[deg]=55，とするとクローラホイールの出力 W_h[W]=31.1[W]となる．動力伝達は平歯車のみを用いて効率η=0.8 とすると出力 W=38.9[W]と求められる．よってモータは光進ミニモの DC12V モータ Type2657(定格 27.5 [W]最大 41.2[W])モータを採用し，ギアヘッドには 1/14 の遊星ギアを用い，ホイールの内歯歯車で 1/4 にして総合で 1/56 の減速比でクローラを駆動する．減速比が蒼龍Ⅰ号機よりも低く，負荷の高い状態でモータを駆動するため，モータの無負荷回転数 6300[rpm]の約半分で走行するとすると走行速度は 0.35[m/s]となる．走行実験では平地で 0.37[m/s]で走行を行った．

4.2.3 回転軸の防塵防水

蒼龍のクローラホイールは無限回転軸を持つため，この回転軸に気密性を持たせる必要がある．また直動軸部も回転軸で気密性を持たせる必要がある．蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機では回転軸の支持に非接触式のシールベアリングを用いたが，非接触式シールベアリングは防滴効果はあるが，水溜り等に入って水圧が掛かると容易に水漏れを起こしてしまう．また接触式のシールベアリングは摩擦抵抗が大きく，Ⅲ号機のホイール支持構造の様な大口径ベアリングでは大きな負荷となる．また，非接触式で隙間にグリスなどを注入する方式のラビリ

ンスシール等は，メンテナンスとしてグリスを注入しつづけなければならない．そのため接触式で負荷の少ない V リングの利用が有効であると考えられる．

ホイールの回転軸は断面図 **Fig.4-15** に示す様に V リングを配置した．スプロケットホイールの歯と内歯歯車の切られたホイール部は 4 点接触ベアリング 1 個で支えられ外側に蓋をして外側にたいして気密構造となっている．ベアリングを支持する中空軸は **Fig.4-16** の様に側面に穴が開けてあり，この穴から駆動軸のギアが出て内歯歯車を駆動する．この穴より車体内側には駆動部がないので，この内側に V リングを入れ内部を気密にする． しかし V リングはゴム製で硬い物に弱い為に，V リングの収まった空間は大きなゴミが入りにくいように隙間を狭くしている．

V リングの防水性に関しては，駆動部を水につけて 1 分程度モータ駆動したが，水の侵入は一切無かった．しかし細かい砂などが混ざった泥水での駆動実験では，まれに V リングと接触面の間に細かいゴミが挟まり，水の浸入が起こることが確認された．しかしゴミはすぐに外れ再び機密性は保たれ，機構内部に少量の水が侵入するだけですむ事が確認された．この事から数時間の作業では問題にはならないと考えられる．

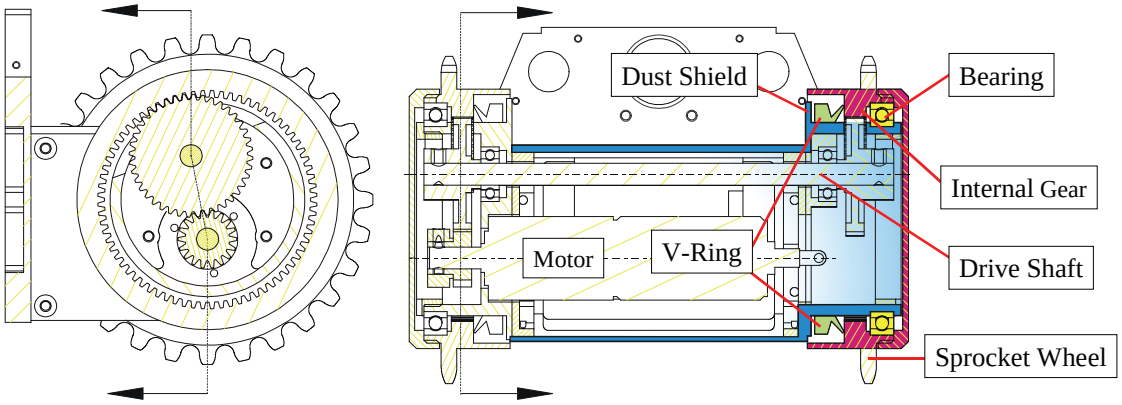


Fig.4-15 The section of wheel drive mechanism

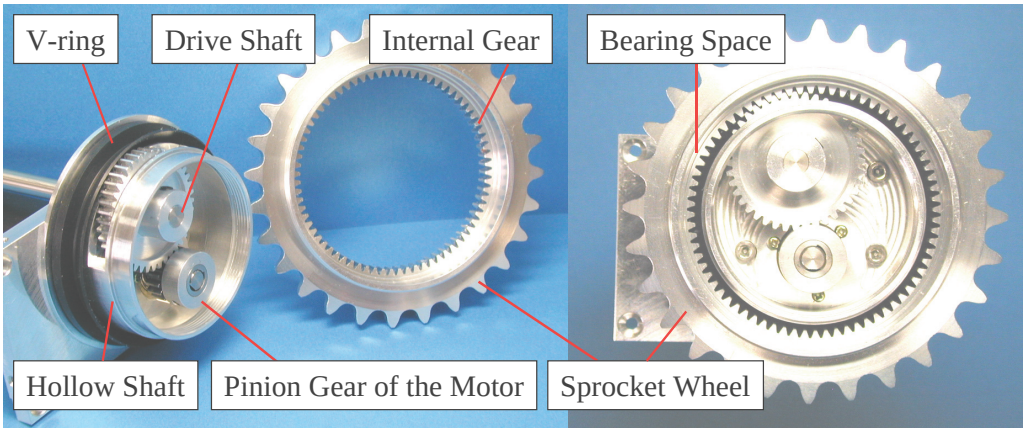


Fig.4-16 The product of the wheel mechanism

直動軸の回転部の保護は V リングを用いて行う場合 **Fig.4-17** の様になる．蒼龍Ⅲ号機ではこのような設計を行った．しかし V リングは回転部で摩擦が生じ抵抗となる．減速した後の大きなトルクの出る回転軸で利用するには十分であるが，直動軸はネジによって減速しているため，高速で回転するユニバーサルジョイント部でこれを利用する事は望ましくない．また，後述する床下走行実験では綿埃等がネジに巻き込まれて姿勢変化機構の動作を妨げる場合もあったため，ネジ部も含めて保護する事が望ましい．ナット部は回転せず前後動のみを行うので，**Fig.4-18** に示す様に蛇腹を用いてネジ部を含めて全てをカバーするという方式も考えられるが，蛇腹は柔らかく垂れ下がり，ネジ部と接触して擦れるため，長時間使用すると破れてしまう．そこで本論文では **Fig.4-19** の様な保護方式を提案する．これはナット部外側にスライドするカバーを取り付け，ネジを回転させるユニバーサルジョイントの場所では方向を変えられる様に短い蛇腹を経由して車体側固定する．さらにスライドカバーとナット部との間に O リングを入れて内部を密閉する．このとき O リングによりナットとスライドカバーの間に大きな抵抗が生じるが，ネジによって十分に減速された後の伸縮運動であるためこれは問題とならないと考えられる．

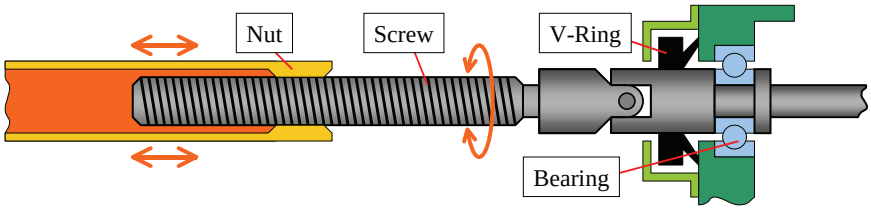


Fig.4-17 The protection of the screw axis by V-ring

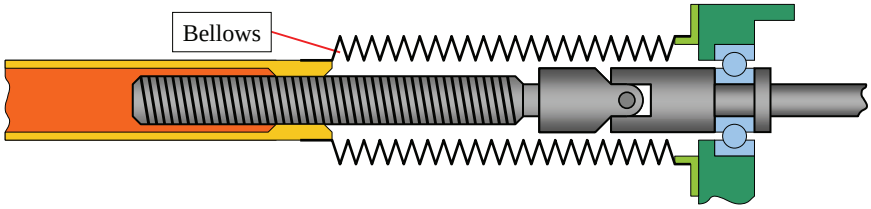


Fig.4-18 The protection of the screw axis by bellows

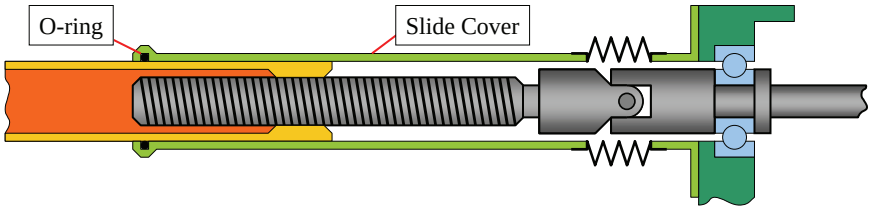


Fig.4-19 The protection of the screw axis by slide cover

4. 2. 4 連結分解機構

蒼龍Ⅲ号機もⅡ号機と同様に車体間の連結分解を簡単に行える物とした(**Fig.4-20**). これにより無線で利用できる場合には無線機と増加電池を搭載した車体と交換する等の作業目的に応じた車体交換が可能となる. Ⅱ号機では連結軸 4 本全てを外す必要があったが, Ⅲ号機は連結している軸が 3 本になった上に, 直動軸に取り付けられたバネ部を左右一体構造とする事で, 分解は 2 箇所のネジを外すだけで行える. また, ロール軸周りのバネ性は前後車体の重量によって内部バネに掛ける予負荷が変わるため, 車体によってバネ力を容易に交換できるよう, ロール軸バネ部もユニット化して容易に分離できる構造となっている.

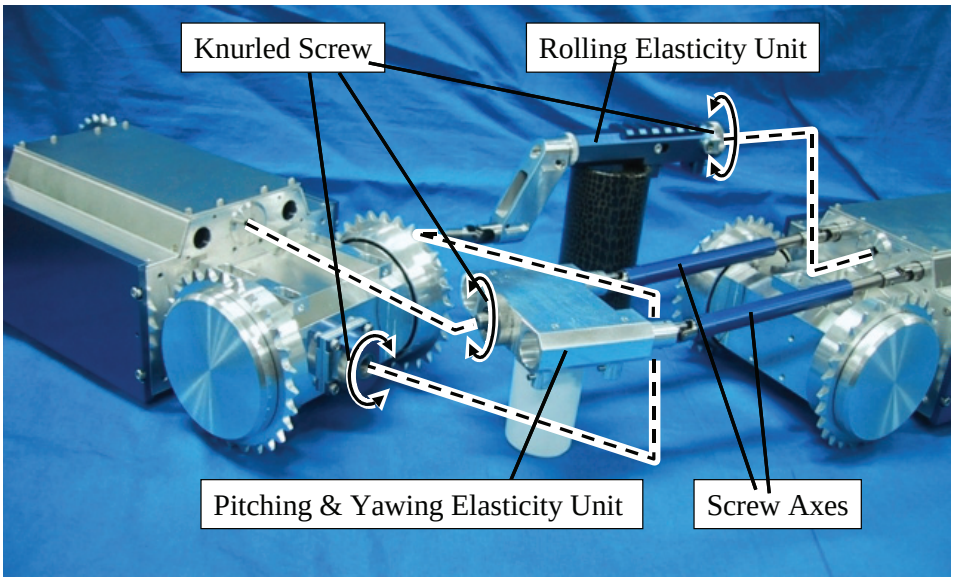


Fig.4-20 Connection detachable mechanism of Souryu-III

4. 3 基本走行性能

4. 3. 1 旋回性

旋回性は蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機と同様幾何学的に求める事ができる. ただし蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機では前後車体のクローラ作用点が連結器に近い大きい転輪側に寄っていたが, 蒼龍Ⅲ号機ではそれぞれ全て３つの車体の中央にあり **Fig.4-21** の様になる. 中央車体の旋回半径 r_c を求める式は蒼龍Ⅰ号機の旋回半径を求める式(3-22)が利用でき, l_c=249[mm], l_f=169[mm], φ=45[deg]を代入すると最小旋回半径 r_c=488[mm]と求まる. しかしⅢ号機の姿勢変化角度は 45[deg]と大きく中央車体のクローラのスリップがより顕著に現れる可能性がある.

実験による最小旋回半径は 720[mm]となった. 主な原因は最も質量の集中している中央車

体の接地圧が最も高くなり，中央車体でのスリップよりも前後車体のスリップの方が大きくなったためである．そのため前述した幅 1200[mm]の公共施設の通路で回頭する場合には切りかえしを行わなければならない．

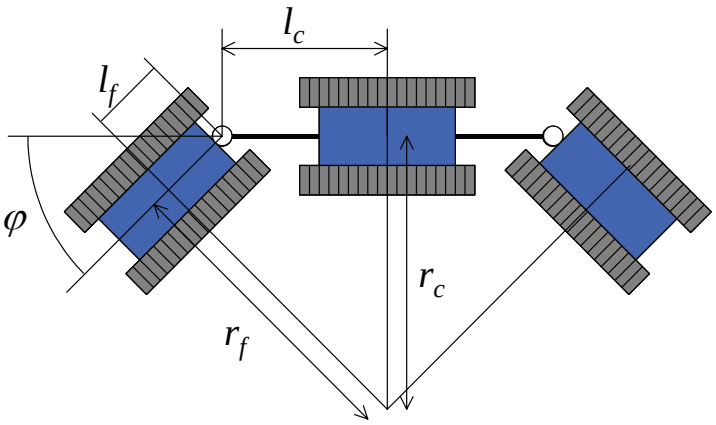


Fig.4-21 The theoretical radius of turning of Souryu-III

連結部に用いたユニバーサルジョイントは連結分解機構によって手動で容易に分離できる様に設計しているため，ここに機械的なガタが存在し，**Fig.4-22** の様にヨー角を取った状態でピッチ角を上げて，先後端を少しだけ浮かせると，前後車体の車体軸周りにロール運動をして，前後車体の中央車体寄りのホイールで旋回円弧内側のものだけが接地する状態となり，前後車体の荷重をこの一点で受けて高いグリップ力を発生させる事ができる．このとき接地点を前後車体の中央よりのホイールとすると l_f=45[mm]として扱う事ができ，理論値では 313[mm]が最小旋回半径となる．実験では半径 307[mm]で旋回を行った．

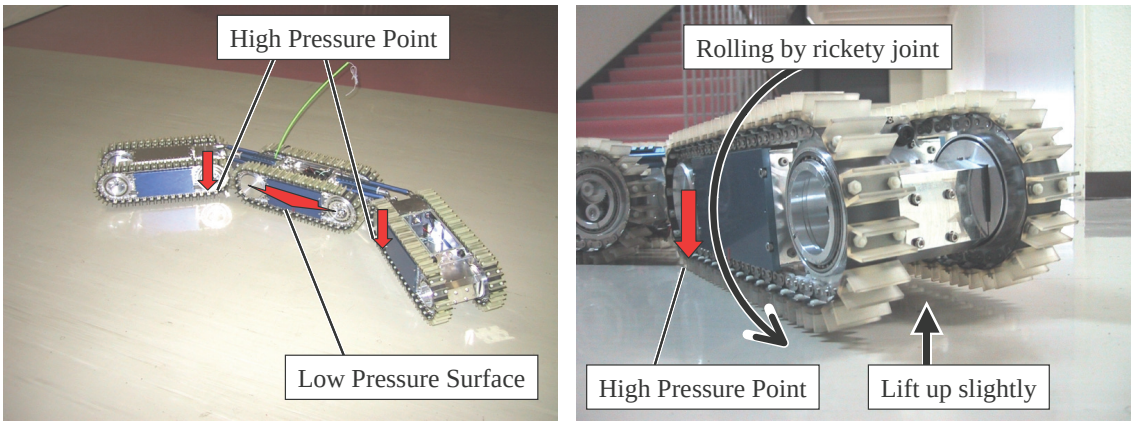


Fig.4-22 Super turning motion by using unsteady joint practically

この機械的ガタを利用した小半径による旋回運動は予測していない現象であり，また微妙な変化角度でしかないため，極めて平らな床面でしか利用できない．旋回半径が大きく

なるのは前後車体を基準に幾何学的に決定した旋回円弧よりも内側に中央車体が存在し，中央車体の旋回角速度が前後車体の旋回角速度よりも大きな速度を持っているためである．そこで蒼龍Ⅲ号機ではクローラ駆動モータが３つの車体で独立している事から，制御によって中央車体のクローラだけを遅くすれば理論値の旋回半径に近づくと考えられる．しかしクローラ駆動モータを厳密な速度制御を行うにはそのための速度計等が必要となる．そこでより小さい半径で旋回を行う場合には，中央車体のクローラを停止させてしまう方法が有効であると考えられる．このようにすると旋回円弧接線方向の力に抵抗力が発生し，理論値よりも小さい旋回半径での旋回が期待できる．この運動をピッチ角を変化させずに行うと前後の車体がスリップして，動く事ができなかった．このためピッチ角を僅かに下げて, 前後車体の接地圧を中央車体よりも高くすることで半径 410[mm]で旋回を行う事ができた．ピッチ角を利用して前後車体の接地圧を高くする方法では，接地圧のかかる位置が車両先後端に集中するが，探査機器やケーブルリール等を搭載する事で前後車体の接地圧が大きくなると，ピッチ角を利用せずに中央車体よりも前後車体の接地圧を高める事ができるため，この数値は小さくなる事が予測され，有効な手法であると考えられる． **Fig.4-23** にこれら理論値と実験値を示す.

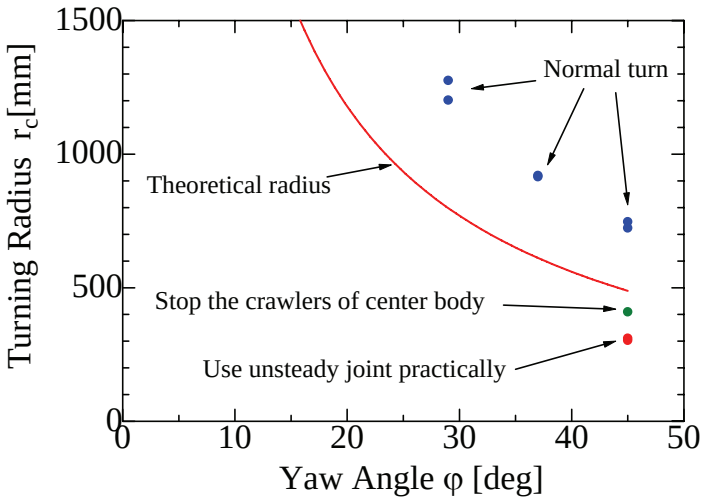


Fig.4-23 Experiment data and theoretical graph of turning radius

4. 3. 2 超壕性

蒼龍Ⅰ号機と同様にして超壕製は求める事ができ， **Fig.4-25** に式(3-27)を適用して L=1204[mm]，r=60[mm]を代入すると最大超壕幅は 590[mm]となる．蒼龍Ⅲ号機はクローラのチェインを胴体底面で支える様になっており，蒼龍Ⅰ号機の様に大きな撓みが発生しない. そのため実験では **Fig.4-26** の様に, 理論値と同じ 590[mm]での超壕動作を往復で行った.

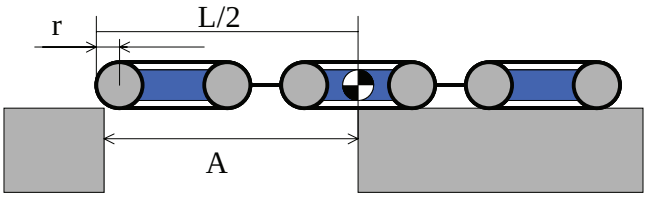


Fig.4-25 Trench width with Souryu-III

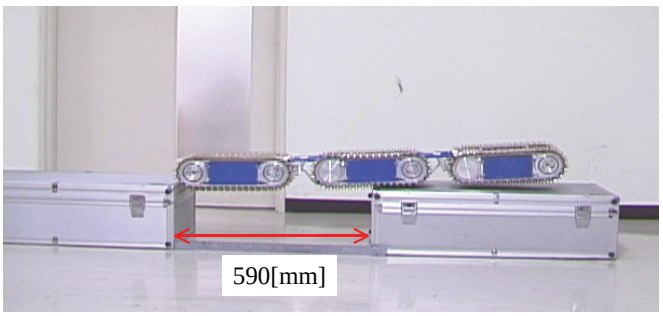


Fig.4-26 Gap crossing by Souryu-III

4. 3. 3 超堤性

蒼龍Ⅲ号機で乗り越える事のできる段差高さの理論値は蒼龍Ⅰ号機同様に式(3-31)を用いて出す事ができ，姿勢変化角度ϕは最大 45[deg]として L_c=498[mm]，L_f=293，R=60[mm]，r=R，a=10[mm]を用いて超堤高と登坂角を示すと **Fig.4-27** の様になり，ピッチ角を 45[deg]に取ると，登坂角が 30[deg]程度でも蒼龍Ⅰ号機と同等の超堤高を得ている事がわかる．また最大登坂高はピッチ角が 40[deg]近辺で頭打ちとなる事が判った．またこの値を用いると車両先端を持ち上げる事で回避する事のできる横穴の高さは 264[mm]となる．

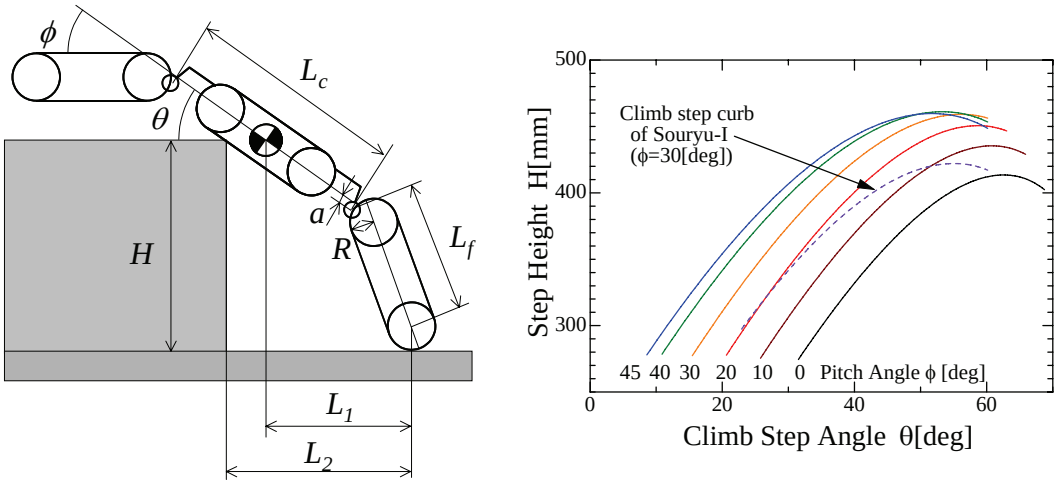


Fig.4-27 Move the climb step angle by the changing posture of Souryu-III

走行実験では高さ 483[mm]の段差を登り， **Fig.4-28** で示した最大超堤高を上回った．これは理論値では重心は中央の車体中央に固定して求めているが，実際には姿勢変化で前後の車体を下側に曲げることで重心が段差側に移動するため，理論地よりも高い段差を踏破することができた．前後の車体に探査機器やケーブルリール等を搭載すると，この効果はより大きくなると考えられ，より高い段差踏破性能が期待できる．また改善したロール軸周りのバネ性により車体が左右に傾かず，安定して段差に乗り上げる事を確認した．

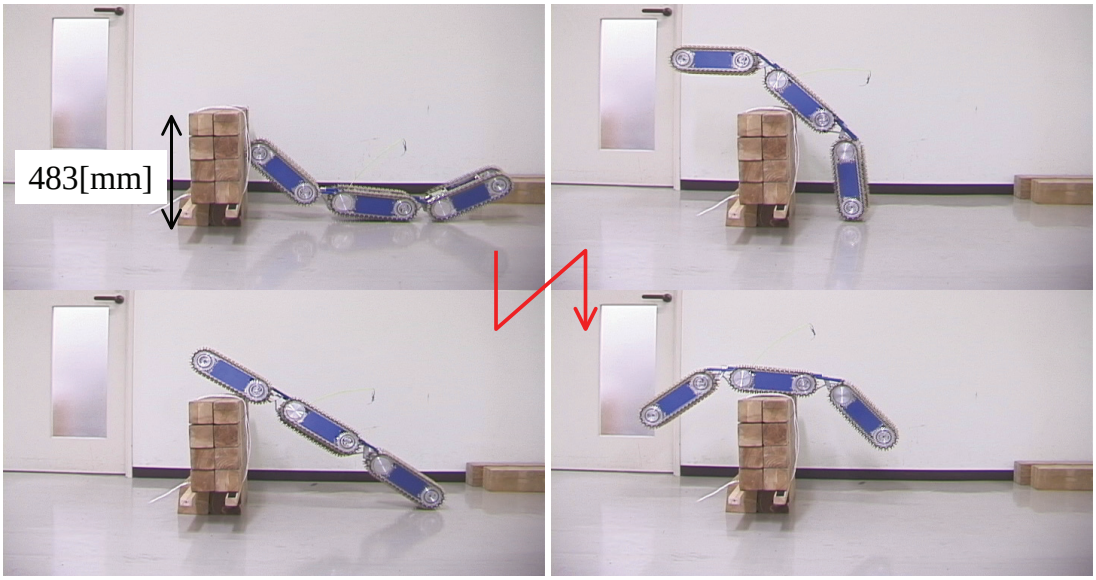


Fig.4-28 Ascend a step by Souryu-III

4. 3. 4 蒼龍Ⅰ号機と蒼龍Ⅲ号機の基本運動性能比較

蒼龍Ⅲ号機は蒼龍Ⅰ号機よりも細い胴体として狭い空間に潜入しやすくすると同時に，旋回性，超堤性，超壕性を高めている．両者を比較した物を Table 4-1 に示す．このことからⅢ号機はⅠ号機の設計時に要求した基本動作能力を実現している事が明らかとなった．

	Length	Width	Height	Weight
Souryu I	1160[mm]	175[mm]	140[mm]	13[kg]
Souryu III	1210[mm]	145[mm]	122[mm]	10[kg]

	The radius of Turning	Trench width of crossing	The height of avoidable cave	The step height of ascending	Speed
Souryu I	440[mm]	540[mm]	210[mm]	420[mm]	100[mm/s]
Souryu III	410[mm]	590[mm]	264[mm]	483[mm]	370[mm/s]

Table 4-1 Comparison of Souryu-I and Souryu-III

4.4 蒼龍Ⅰ・Ⅲ号機による平常時転用のための試験

レスキューロボットとして必要な機能として「平時に別の目的で利用できる有用な機能性を持たせる事が可能である」という条項を挙げた．蒼龍は需要が多い家屋の床下調査を平常時の仕事とする．床下調査はシロアリやカビなどを調べる為にライトとカメラを最低限装備しているため，緊急時には容易にレスキュー機器として転用する事が可能となる．実験は廃棄するモデルルームの床下で行った．

第 1 回目の実験では無線による遠隔操縦が可能である事を確認する事を目的とした．床下には支柱が存在しており，有線誘導により柱の周囲を回ってしまうと通信線が回収不能となるため，無線操縦する必要があるためである．走行実験は蒼龍Ⅰ号機を用いてモデルルームで行い，一部床板を剥がした場所から蒼龍を侵入させ，搭載カメラの映像のみを利用して遠隔操縦で床下を走行した(**Fig.4-29**)．これにより，床板等は問題なく無線電波を通す事がわかり，またカメラ映像による移動も可能である事が判ったが，点検作業のためには，周囲を見回すことのできる首振り式のカメラが必要となる事がわかった．またこの実験中に **Fig.4-30** の様に直動軸が綿埃を巻き込んで動かなくなるという問題が発生し, 直動軸の回転部にはカバーが必要であることが明らかとなった．

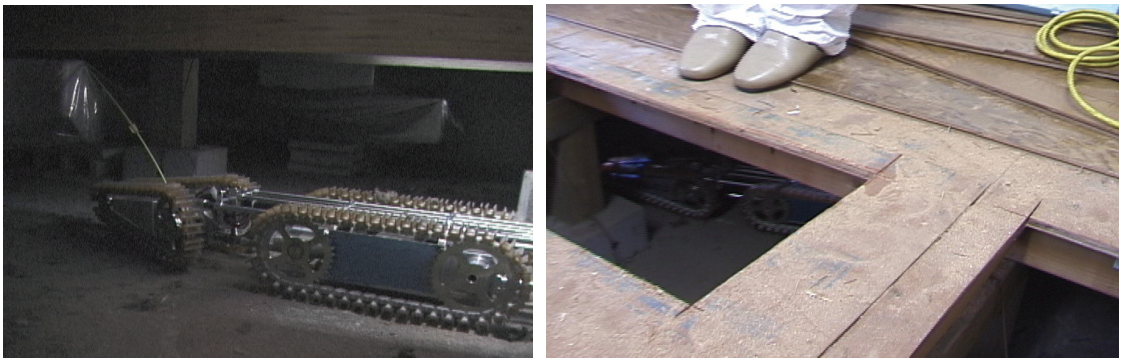


Fig.4-29 Under floor teleoperation test by Souryu-I

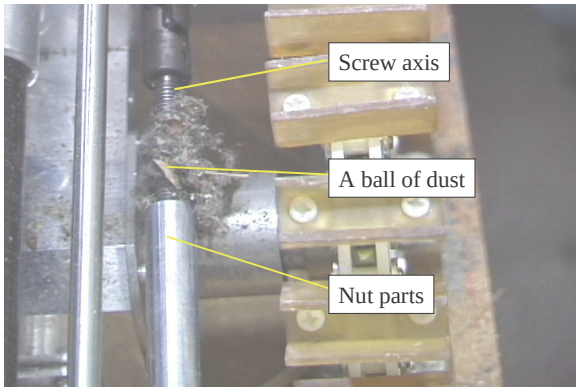


Fig.4-30 Entangled dust around screw axis

第 2 回目の実験は配管等が存在している空間での移動を確認する事を目的として，蒼龍Ⅲ号機にⅠ号機と同様の無線による制御装置を搭載した物を用いて，状況を目視しながら走行実験を行った．床下は **Fig.4-31** の様な状態で，梁は 2 個重ねられたコンクリートブロックの壁の上に置かれた振動吸収用のゴムブロックの上に置かれ，床面からの高さは約 40[cm]，床に這っている上水やガスのためのゴム管は直径約 3[cm]，このゴム管の上をまたぐように引かれた下水管の直径は約 15[cm]である．そのため，この下水管を越える場合は下水と梁の間の約 20[cm]の隙間を通り抜ける必要がある．走行実験では下水管越えを行い，壁の所々に開いた連絡路を通過して床下を全ての部屋にわたって移動して(**Fig.4-32**)，一般的作業に転用が可能である事を確認した．

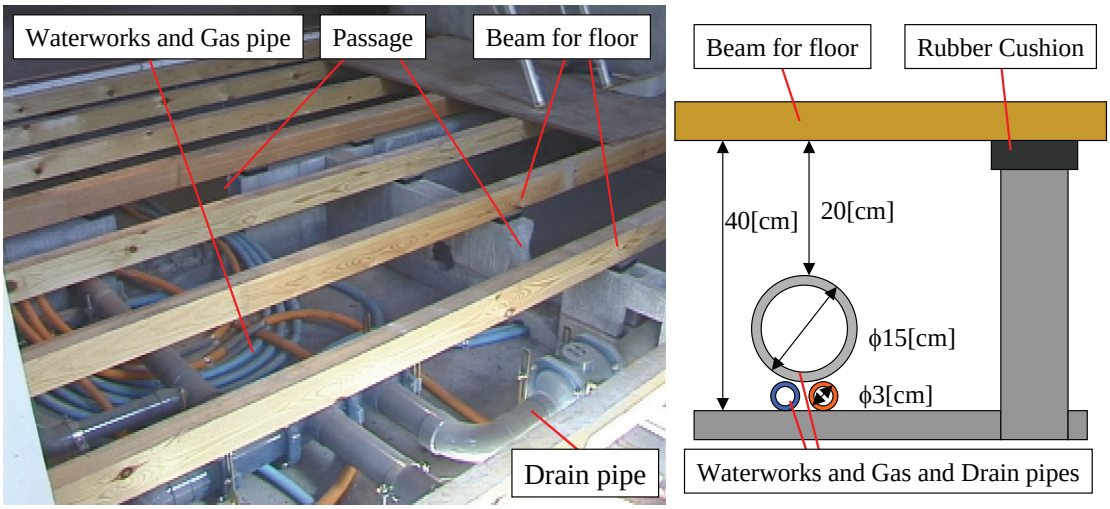


Fig.4-31 Condition of the under floor area and pipes

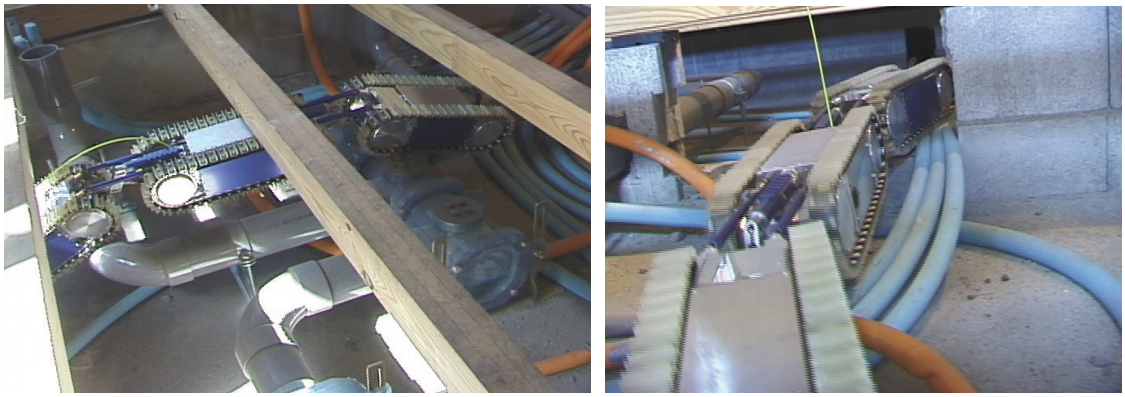


Fig.4-32 Moving test in the under floor area

第5章 気密型の索状能動体 HELIX の機構と運動制御

受動推進－能動関節型の索状能動体は対環境性では最も優れているが，実用的な運動性能を実現しようとすると自由度が大きく，現在の技術では実用的な物を構成する事は難しい．しかし将来実用化できれば完全気密で水陸両用な索状能動体となる可能性がある．本章では水陸両用型の索状能動体による移動方法について，これまで工学的に実現されていない水中遊泳方法を提案し,試作した完全気密型の 2 自由度屈曲関節を用いて実験を行う．

5.1 索状能動体による移動方法

ヘビに代表される細長い能動体幹を有する生物は，地上だけでなく水中遊泳においても体幹の屈曲運動のみで推力を生成している．船舶などでは船体から無限回転するロッドを外部に出してスクリューを回転させなければならないため，その回転部分で防水シールが必要となるが，屈曲運動のみで推進できる索状能動体ではこのようなシール機構が不要であり，このような特性を考えると索状能動体は対環境性が高く，水陸両用の移動体としても有効に利用できることは第 2 章で述べた．水陸両用であれば，災害現場での泥水が溜まった空間でも長時間の動作が可能となり，水中遊泳と荒地移動の両方を必要とする洞窟内探査の様な目的にも利用が可能となる．

索状能動体を用いたヘビの行う蛇行運動による平地の移動や傾斜登坂に関する研究は数多く行われている．[40][41]狭隘空間を移動する手法についても既に多くの研究がされており，単に障害物を回避するだけでなく壁面に体幹を押し付けることで，より効率的に推進すること等が示されている．[22]水中遊泳に関しても流体力学の分野の研究者によりヘビやウナギなどの水中遊泳運動に関する先駆的研究はすでにいくつか行われており，蛇行遊泳を行うヘビ型ロボットの試作もすでに行われ，遊泳実験の結果が報告されている[42][43][44]．そのため，地上と地中において蛇行推進運動を行う水陸両用型索状能動体の設計法に関する基本的な知見は，すでにある程度解明できている状況であると考えられる．

しかし，ヘビ型の水中遊泳運動は海ヘビやウナギなどが行う蛇行推進形態が唯一のものではない．顕微鏡下で観察される微生物の世界では，もう一つのかなり特異な遊泳形態が観察されることが報告されている．それは，スピロヘータ等が行う回転型の遊泳体型である．スピロヘータの回転型遊泳とは，スピロヘータが進行する方向を中心軸としたとき，スピロヘータの体幹をその中心軸の周囲にコイルスプリングのように螺旋形状をなし，その螺旋形状の体幹を中心軸周りに回転させながら遊泳するものである．

このようなスピロヘータの螺旋回転型遊泳運動に関しては，顕微鏡下で観察される特殊な移動運動であるためか，これまでそれに関する運動学の研究はほとんど無く，生物学者による観察結果の報告や，その運動生成機構に関する生体構造に関する考察などが報告さ

れているのみであった．また，スピロヘータの螺旋回転型遊泳運動を工学的に利用するという立場の研究は，世界的にもこれまでまったくなされていなかったと考えられる．

このように，スピロヘータの螺旋回転型遊泳運動は従来ほとんど注目されておらずほとんど研究されていなかったが，これを工学的に検討してみると，2 つの有効性が予測されると考えられる．第 1 の有効性は，すでに述べたように，体の屈曲運動のみで推進できるというヘビ型遊泳形態の一種であるため，完全密閉型の遊泳機構が実現できる点である．そして第 2 の有効性は，この遊泳法が，体幹を有限角屈曲させる運動によって体幹をコイルスプリング状に保ちスクリューのような無限回転運動を生成する遊泳運動であるため，スピロヘータの体幹は，そのすべての部分が推進力生成に寄与できる，という特性を発揮するという点である．このような特性の優位性は，ほふく推進型体型をなす海ヘビやウナギの遊泳と比較すると明らかと思われる．なぜなら蛇行運動によるヘビの推進力は体幹の法線方向にのみ出す事ができ，**Fig.5-1** は蛇行運動を行うヘビの推力の大きさの分布を示したものであるが，この体型では推力は体幹の O 点近傍では生成できるが P 点近傍ではほとんど生成できないからである[45].

なお，このような螺旋回転型遊泳運動はスピロヘータのような原始生物でのみ観察され，ヘビやウナギのような高等生物では見られない．このことからこの螺旋回転型遊泳法には効率や機能等において何等かの基本的な問題点がある可能性も否定できない．しかし高等生物がこのような回転運動で推進しないのは，この運動を行うと中枢神経系も回転し続けるため，目が回ってしまって正しく動けなくなるというようなことが原因ではないかと推察される．そしてもしこれが原因であれば，スピロヘータの螺旋回転型遊泳運動を機械モデルで実現することは，重力センサを体幹の中枢部に装備して操舵するなどの技術の導入で容易に対処でき，工学的な利用の障害とはならないと考えられる．

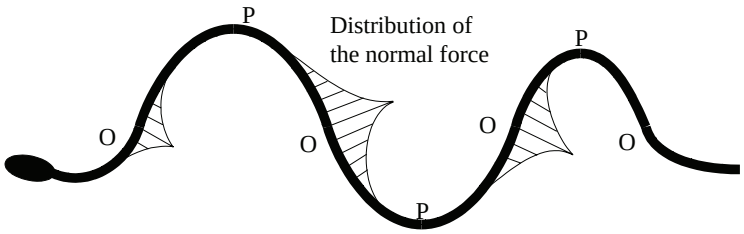


Fig.5-1 Distribution of the normal force in creeping motion of the snake

以上のことから，水陸両用索状能動体については工学的な検討がほとんどなされていなかったスピロヘータの螺旋回転型遊泳運動を対象として研究を進め，それを実現する機械モデルの製作を試みることにする．そこでまず基本的なスピロヘータの運動メカニズムについて検討し，その運動メカニズムの特性を明らかにする．ついで，スピロヘータの運動を実際の機械モデルで実現するための機械モデル構成法と運動制御法について検討を行い，実験機 HELIX により遊泳実験を行う．

5.2 スピロヘータの螺旋回転型遊泳運動の力学

5.2.1 観測されているスピロヘータ運動

スピロヘータとは **Fig.5-2** に示すような全長 5～15μm の微生物である[46]．歯槽膿漏などの原因となるスピロヘータは **Fig.5-3(a)**のようにコイルスプリングのような形状をなし高速回転する事で 40μm/s 程度で動き回ることが顕微鏡下で観察されている[47]．このスピロヘータの「螺旋回転型遊泳運動」の最大の特徴は，全体幹をコイルスプリングのような形態に保ちながら回転推進するという点である．多くのバクテリアで観察される運動は **Fig.5-3(b)**のような胴体に対して螺旋形状の鞭毛を回転型アクチュエータで 10000rpm 程度の高速回転を行っており，この時に鞭毛が生ずる回転反力は船舶がスクリューの回転反力を船体で支えている現象と同様に胴体で支えている物と考えられる．また **Fig.5-1** に示すような一般的なヘビ型の水中遊泳運動では，体幹が生み出す内部力は体幹の左右方向の運動によってバランスできることが容易に推定できる．しかし，本研究で対象とするスピロヘータの螺旋回転型遊泳運動は，**Fig.5-2** あるいは **Fig.5-3(a)**のように体幹全体がコイルスプリング状をなし，その全体の体幹が回転運動をしており，そのコイルスプリング状の体幹を回転運動させるときに生ずる反作用がどのように支えられているか自明でなく，いかにしてこのような運動が生成できるかを検討する必要がある．

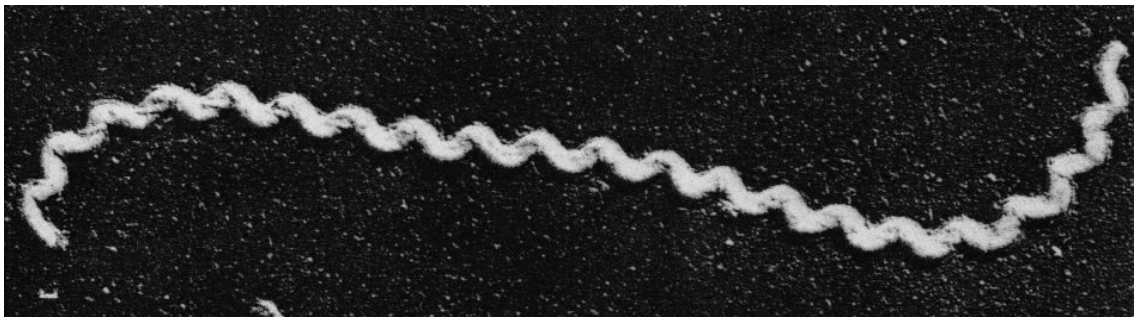


Fig.5-2 Spirochete [46]

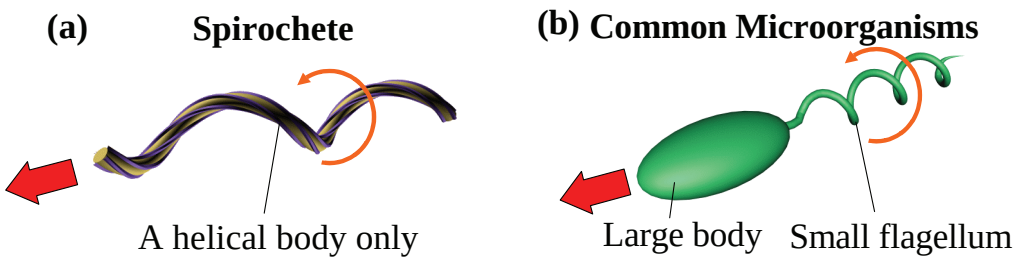


Fig.3 Comparison of the propulsive motion of the microorganisms

この推進のメカニズムとして考えられるのは，コイルスプリング状の体幹が推進方向を向いた中心軸周りに回転する一種の「公転運動」は，体幹が体幹の軸周りに回転するという一種の「自転運動」によって生成されるという仮定である．そこでこのような運動メカニズムでスピロヘータのような螺旋回転推進運動が実現できるかを以下で検討する．

5.2.2 スピロヘータ運動の基本原理と解析の準備

スピロヘータの運動を容易に解析するために螺旋体を **Fig.5-4** の様に無限につながった薄円柱からなる連続体とする．すなわち薄円柱の屈曲する方向を一定の割合で円柱の軸周りに回転させる事で螺旋形を作っていると想定する．この状態で全ての関節の屈曲方向を同時に変化させれば螺旋形状を保ったまま捻転運動が実現可能である[48]．捻転運動により見かけ上円柱自身が円柱軸周りに回転すると，スピロヘータのサイズでは微小でレイノルズ数が十分に小さいために流体の粘性による摩擦の影響が大きくなり，この運動によって各円柱軸回りにトルクが生成される．このトルクが螺旋全体に渡って加算され，螺旋全体を回転させる力を生成すると予測される．この効果を以降シミュレーション解析してみることにする．

まず解析の準備として，**Fig.5-4** のように螺旋体全体の座標系を $O\text{-}X_0Y_0Z_0$ として螺旋の回転軸を Z_0 座標とし，螺旋の開始点は X_0 軸上にあると仮定する．また螺旋の半径は R，螺旋全体の進行方向長さは S，螺旋の 1 周期の長さは H（よって螺旋巻数 q は S/H）とする．

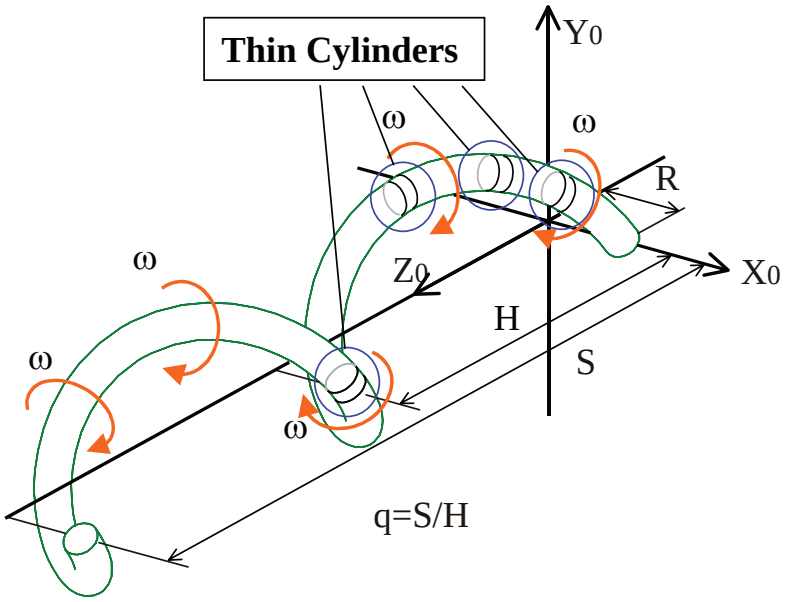


Fig.5-4 The model of the helical body for the Spirochete

このとき，螺旋形状を構成する細長い体幹の Z_0 軸座標 z における位置座標は，

$$\mathbf{B}(z) = \left[R\cos(\frac{2\pi}{H}z), \quad R\sin(\frac{2\pi}{H}z), \quad z \right]^T \qquad (5\text{-}1)$$

と示される．また，体幹座標系 **o-XYZ** を，**Fig.5-5** の様に原点が円柱体幹の任意の点 **B**(z)上であって，その **Z** 軸を体幹の軸方向，**X** 軸を Z_0 軸と直交し体幹に交わる軸のうち螺旋体幹外側へ向かう方向の軸，そして **Y** 軸はこれら **XZ** 軸に直交する軸と定義する．このように体幹座標系 **o-XYZ** を取ると，捻転運動による自転運動はどの部位に於いても体幹座標系の **Z** 軸回りの回転運動となる．

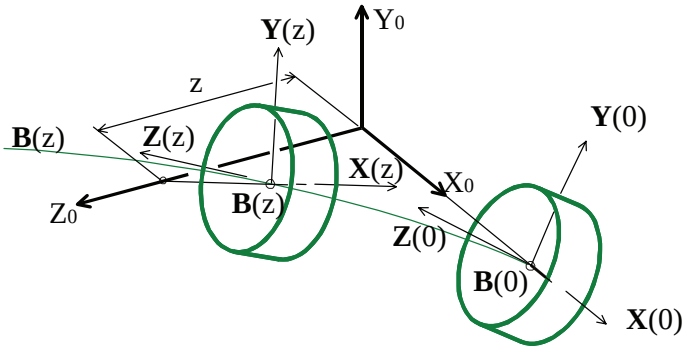


Fig.5-5 The coordinate system of the segment of helical body

さて，定常状態として螺旋体が公転運動として Z_0 軸回りに速度 Ω で螺旋回転を行い，その結果として体幹全体は Z_0 軸方向に速度 **V** で推進すると仮定しておくことにする．このような運動仮定すると，すべての体幹は **Fig.5-6** の様に **Y-Z** 平面内を速度 **V** と ΩR の合成速度 **v** で動くことになる．すなわち，螺旋体幹の各部の運動を **o-XYZ** 座標系で表現すると，公転運動が起きるときのすべての部分の運動はすべて同じ形式で表現できることがわかる．

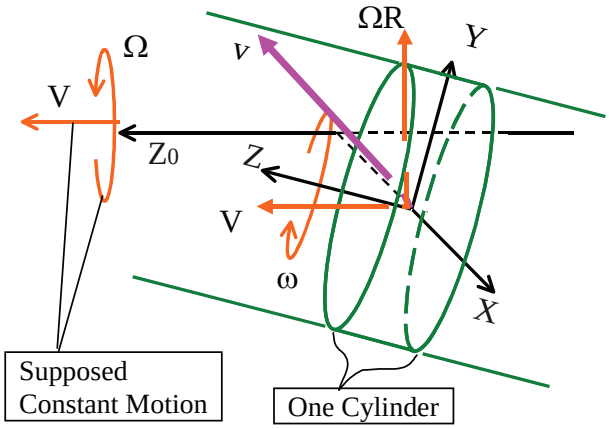


Fig.5-6 Motion and force acting on a segment of helical body

5.2.3 各力の成分が全体に与える影響力

以上の様に自転運動（螺旋捻転）と公転運動（螺旋回転）とそれに伴う並進運動（推進）が生成されるのであれば，その運動は体幹のどの部位の体幹座標系 **o-XYZ** においても， **Z** 軸周りに回転しながら平面 **Y-Z** 内の方向に並進運動を行う運動として同等に扱えることになる．そしてこの運動が流体中で行われたときに生成する力 **F** とトルク **T** は，**Fig.5-7** の様にすべての体幹部で発生し，これらは全てそれぞれの体幹座標系 **o-XYZ** を用いて同様に記述できることになる．すなわち任意の点 **B**(z)での力 **F** の **o-XYZ** 座標系での成分 F_X,F_Y,F_Z とトルク **T** の **o-XYZ** 座標系での成分 T_X,T_Y,T_Z は常に一定となる．

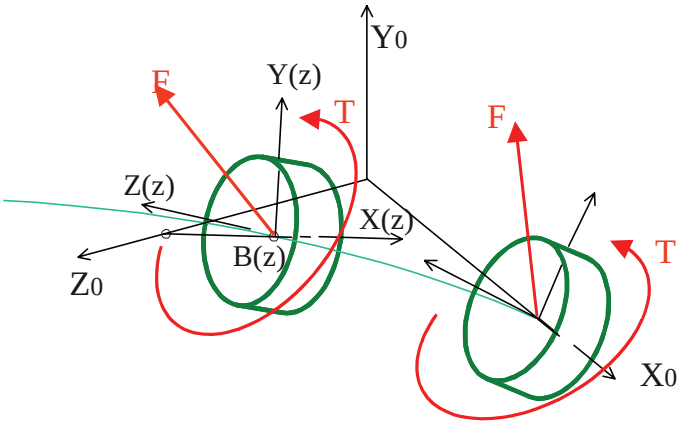


Fig.5-7 Total forces acting on a segment of helical body

さて，螺旋体全長に沿って発生した力 $\mathbf{F}(F_X,\ F_Y,\ F_Z)^T$ の各成分ごとの総和によって生成される螺旋体全体の並進加速度を $\dot{\mathbf{V}}(F_X)$，$\dot{\mathbf{V}}(F_Y)$，$\dot{\mathbf{V}}(F_Z)$ また角加速度を $\dot{\mathbf{\Omega}}(F_X)$，$\dot{\mathbf{\Omega}}(F_Y)$，$\dot{\mathbf{\Omega}}(F_Z)$ とし，螺旋体全長に沿って発生したトルク $\mathbf{T}(T_X,\ T_Y,\ T_Z)^T$ の各成分ごとの総和によって生成される螺旋体全体の角加速度を $\dot{\mathbf{\Omega}}(T_X)$，$\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Y)$，$\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Z)$ としたとき，それらは以下のように誘導できる．

$$\dot{\mathbf{V}}(F_X) = \frac{1}{M}\cdot\int_0^S F_X\cdot\mathbf{X}(z)dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{V}}(F_X)]\cdot F_X \tag{5-2}$$

$$\dot{\mathbf{V}}(F_Y) = \frac{1}{M}\cdot\int_0^S F_Y\cdot\mathbf{Y}(z)dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{V}}(F_Y)]\cdot F_Y \tag{5-3}$$

$$\dot{\mathbf{V}}(F_Z) = \frac{1}{M}\cdot\int_0^S F_Z\cdot\mathbf{Z}(z)dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{V}}(F_Z)]\cdot F_Z \tag{5-4}$$

$$\dot{\mathbf{\Omega}}(F_X) = \mathbf{I}^{-1}\cdot\int_0^S F_X\cdot(\mathbf{B}(z)-\mathbf{G})\times\mathbf{X}(z)dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(F_X)]\cdot F_X \tag{5-5}$$

$$\dot{\mathbf{\Omega}}(F_Y) = \mathbf{I}^{-1}\cdot\int_0^S F_Y\cdot(\mathbf{B}(z)-\mathbf{G})\times\mathbf{X}(z)dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(F_Y)]\cdot F_Y \tag{5-6}$$

$$\dot{\mathbf{\Omega}}(F_Z) = \mathbf{I}^{-1} \cdot \int_0^S F_Z \cdot (\mathbf{B}(z) - \mathbf{G}) \times \mathbf{Z}(z) dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(F_Z)] \cdot F_Z \tag{5-7}$$

$$\dot{\mathbf{\Omega}}(T_X) = \mathbf{I}^{-1} \cdot \int_0^S T_X \cdot \mathbf{X}(z) dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(T_X)] \cdot T_X \tag{5-8}$$

$$\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Y) = \mathbf{I}^{-1} \cdot \int_0^S T_Y \cdot \mathbf{Y}(z) dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Y)] \cdot T_Y \tag{5-9}$$

$$\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Z) = \mathbf{I}^{-1} \cdot \int_0^S T_Z \cdot \mathbf{Z}(z) dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Z)] \cdot T_Z \tag{5-10}$$

ただし，ここで M は螺旋体の質量，**G** は重心の位置，**I** は慣性モーメントで胴体長さ S の関数となっている. これらの流体から受ける力とトルクによって螺旋体に生ずる加速度と角加速度の効果はいずれも係数行列 $\mathbf{K} = (K_{X_0}, K_{Y_0}, K_{Z_0})^T$ によって記述しているが，この係数行列 **K** は螺旋形状とその構造によって決定される有次元の行列で質量及び慣性モーメントの逆数に相当したものとなっている．式(2)において $\mathbf{K}[\dot{\mathbf{V}}(F_X)]$は F_X の加速度 $\dot{\mathbf{V}}(F_X)$に対する影響力と定義し, 式(3)～(10)においても同様にそれぞれの F や T の加速度に対する影響力を表している．また式(5-11)の様にこれらの加速度を足した物が 0 となる時が定常状態で運動している状態となる.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{V}}(F_X) + \dot{\mathbf{V}}(F_Y) + \dot{\mathbf{V}}(F_Y) = 0 \\ \dot{\mathbf{\Omega}}(F_X) + \dot{\mathbf{\Omega}}(F_Y) + \dot{\mathbf{\Omega}}(F_Z) + \dot{\mathbf{\Omega}}(T_X) + \dot{\mathbf{\Omega}}(T_Y) + \dot{\mathbf{\Omega}}(T_Z) = 0 \end{cases} \tag{5-11}$$

以下に各々の係数行列 **K** の各成分が螺旋全長 S が増大するに従ってどのように変化するかを検討する．この時 **K** の特性を示す評価として螺旋全長 S を基準に取ると螺旋の形状による評価をしにくいため，螺旋巻数 q(=S/H)を用いる．なお，螺旋体の形状と体型のパラメータは，螺旋形状の半径 R は 10，周期長 H は 100，胴体直径は 8，密度は 1 と与える．また胴体全体の質量 M 及び慣性モーメント I の値は，胴体を構成する体幹の直径と密度によって誘導する．また係数行列 **K** のうち Z_0 成分 K_{Z_0} はそのまま誘導するが，X_0 成分と Y_0 成分については，式(5-12)で定義する合成成分 $K_{X_0Y_0}$ で特性を記述することとした．計算機によりグラフ化した結果を **Fig.5-8** に示す.

$$K_{X_0Y_0} = \sqrt{K_{X_0}{}^2 + K_{Y_0}{}^2} \tag{5-12}$$

Fig.5-8 の結果から，$\mathbf{K}[\dot{\mathbf{V}}(F_X)]$，$\mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(F_X)]$，$\mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(T_X)]$ では，F_X と T_X が Z_0 軸に常に直交している成分のため Z_0 成分 K_{Z_0} は常に 0 であること，また螺旋全長が延びて螺旋巻数 q が増えると全ての加速度の X_0Y_0 成分は 0 に収束してゆき，Z_0 成分のみが残されることが分かる．このことから，スピロヘータの螺旋捻転運動においては，螺旋巻数がある程度大きければ，螺旋体は Z_0 軸回りに回転しながら Z_0 軸方向に推進する加速度運動のみを生成できることが明らかとなった．またこのことから，螺旋巻数が大きい場合に連立式(5-11)においても Z_0 成分のみに注目して解けばよい事が明らかとなった.

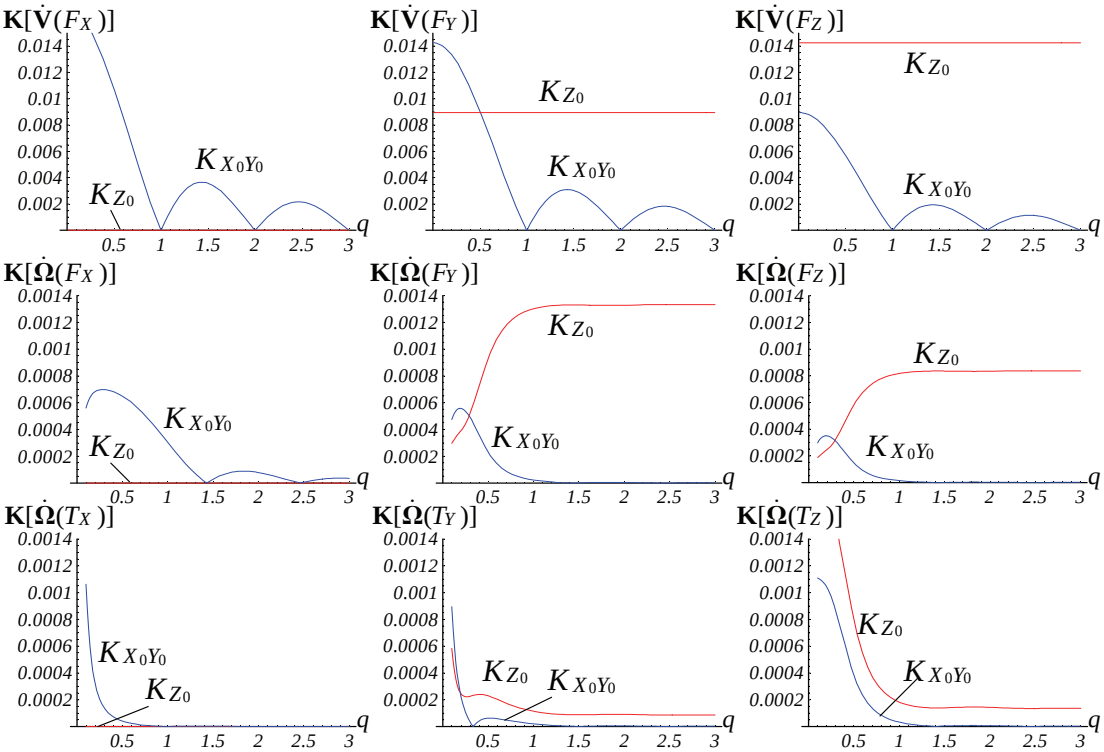


Fig.5-8 Change of the parameter K in accordance with the number of the spiral q

5.2.4 スピロヘータ運動の生体駆動系の推定

以上の解析から, スピロヘータが螺旋形状を成し, その体幹が体幹軸の周りに自転すると, 螺旋形状の体幹全体が回転しながら推進できることが明らかになった. それではこのような体幹の運動はスピロヘータのどのような生体メカニズムで生成されるのであろうか.

このメカニズムとしては, 3 つの仮説が考えられる.

第 1 の仮説は, すでに仮定してきたように円柱状の体幹の各部分が, その屈曲の方向を体幹の軸に沿って一定の割合で回転させてゆくことで実現するという運動メカニズムである. しかしこの運動メカニズムを作り出す駆動機構は, 実際のスピロヘータでは観察されていない. そのため, 少なくともスピロヘータの駆動系として, この仮説としては妥当でない.

第 2 の仮説は, **Fig.5-9** のようなスピロヘータの構造を考慮して筆者らが提案するものである. スピロヘータには螺旋状の体幹に沿ってさらに螺旋状となった軸索が複数巻かれている. そのため, もしもこの軸索が筋繊維として作用し, 次々に収縮を繰り返せば, 体幹は体幹軸周りに回転を始める. 螺旋体型の内側に位置する軸索の全長は短く, 外側に位置する軸索の全長は長くなる. そのため, 軸索の長さが変化すればこの運動が生成できるという運動メカニズムの仮説はかなり実際的と思われる[49]. 最近までこの仮説が正しいと考えていたが, 生物学分野の近年の研究では以下の第 3 の仮説が正しいとされているようである.

第 3 の仮説は, スピロヘータの体幹は, **Fig.5-10** の様に柔軟な中心軸部と, その中心軸を

囲むチューブ形状を成すゼリー状の膜で覆われている．そして中心軸とゼリー状の皮膜の間には，螺旋形状をなす硬い軸索が何本か通っている．そして軸索と中心軸との間には，生物分子モータと呼ばれる ATP を合成する際に用いる水素イオンの流れを制御するマイクロモータが存在し，スパイラル状を成す軸索に沿って中心軸と，それに引かれて外側の皮膜が回転させられるというメカニズムである[47][50].

ただし，現在までに行われた研究では，このように運動のメカニズムは明確化されてきているものの，この体幹に沿った回転運動がスピロヘータの螺旋推進運動にどのように変換されるかの検討はまだまったく行われていなかったようである．その意味で本節での考察は，スピロヘータの螺旋回転型遊泳運動に関して，バイオメカニカルな立場から一つの新たな知見を与えたものと考えられる．

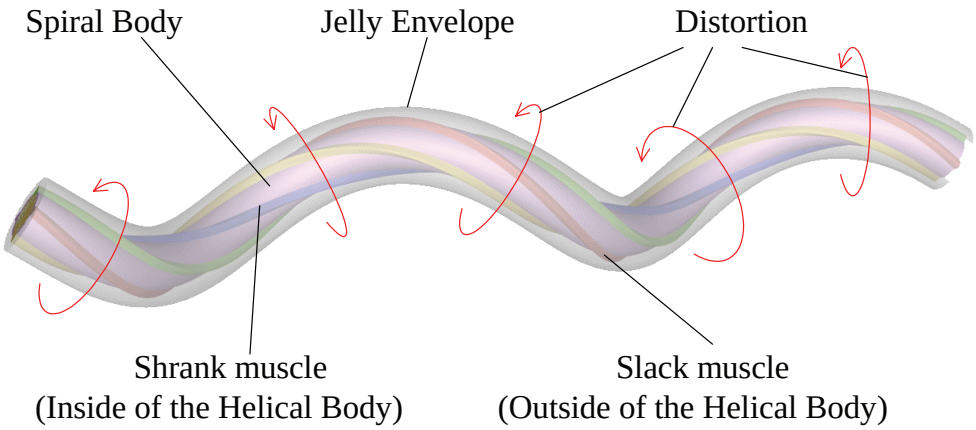


Fig.5-9 Internal organ of Spirochete (Supposition 2)

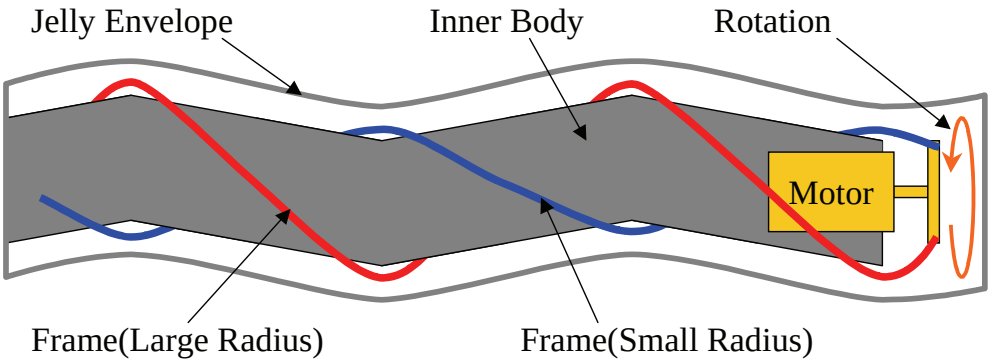


Fig.5-10 Driving mechanism of Spirochete (Supposition 3)

5.3 螺旋回転型遊泳体機械モデルの開発

5.3.1 基本構成

スピロヘータが行う螺旋回転型遊泳を工学的に実現するには，遊泳体の体幹に沿って体幹を回転運動させる機構を導入することが必要である．第 5.2.4 節で論じたように，そのような運動を実現するには，３つの仮説が想定できるが，水陸両用のヘビ型推進装置として利用することを考えた場合には，体幹を直列に連結された屈曲関節から構成し，その関節の２方向屈曲によって捻転運動を生成し，それによって螺旋回転型遊泳を行うという，仮説１に基づく推進メカニズムを採用することが適当であると考えられる．そのため以降，このような構造によって螺旋回転型遊泳を行う索状能動体を HELIX と呼び，その機構と制御を以降検討してゆくことにする．なお本論文であつかう HELIX の寸法は，最終的な利用目的でもある，被災者探査用ロボットや洞窟内調査用ロボットとして利用できる大きさであり，電気モータや制御回路や電源を内部に組み込みこみ，一人で容易に扱う事のできる大きさであるとして，胴体直径 100[mm]，全長 2000[mm]程度と考えている．また水中遊泳を行う事から重量は水と同密度程度とする．また気密性を持たせるため，電源は内部に搭載して，動作指令は無線によって行う物とする．なお第 4 章では近代的ビル内では有線誘導の必要性があると述べたが，HELIX が実用的に利用できる様になる頃には，無線の中継機がより小型で高出力の物が実用化されていると考えられ，有線にしなくても中継機を放出しながら移動する事で，瓦礫内部深くまで進入することが可能となると考えており，無線方式を採用した．

HELIX の構造としては，液体中で屈曲運動を生成できなければならないため気密性の高い直列多関節構造を必要とする．また，その密度は水中遊泳を行う場合には水とほぼ同じになるまで軽量化出来なければならない．スピロヘータはモータによる無限回転によって捻転運動を生成しているとされているが，仮説 1 の運動を想定する場合にはこの運動は体幹を成す各関節に２自由度の屈曲駆動系を導入することで実現できる．さらに，この関節は気密性を持たせる為に蛇腹等で覆わなければならない．また，スピロヘータの場合には，サイズがμm 単位で十分に小さく，捻転運動によって流体との間に生ずる粘性力を利用して反力を生成すると考えられ，ナノマシン等でこの運動を利用する場合には水切り板等を取り付ける必要は無いと考えられるるが，サイズが cm 単位ではるかに大きい索状能動体の場合には，その効果は期待できず，HELIX では各節には水切り板を取り付けて，捻転運動によって生ずる体幹軸周りの回転をトルクに変換することで推進力を生成するように構成する．

実際に直列に繋いだ 2 自由度屈曲関節を用いて螺旋構造を構築し，全節同時に捻転動作を行う事で螺旋形状を維持しながら捻転動作を行う事ができることを **Fig.5-11** に示す 11 関節からなる CG モデルを用いて確認した．螺旋回転推進による遊泳の基本的原理は，まず

HELIX のすべての関節が体幹軸方向に一定の位相差を持ちながら捻転運動を生成することによって螺旋捻転運動を生成し，見かけ上各関節は関節軸回りの回転運動を生成する．そして，これにより節表面に取り付けられた水切り板が流体からの力を受けることによって螺旋体が軸周りに回転し，螺旋軸方向に推進運動を行うというものとなる．

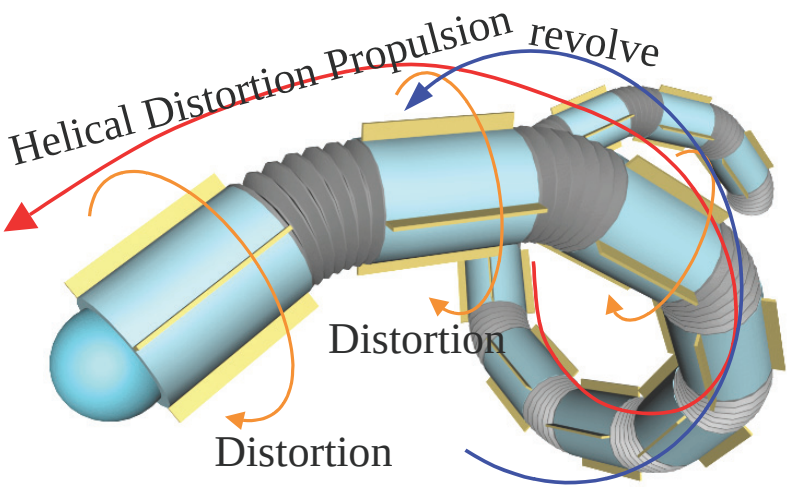


Fig.5-11 Overall figure and basic motion of “HELIX”

5. 3. 2 “HELIX”の関節の機構

捻転運動は一般的には **Fig.5-12**(a)のようなユニバーサル継手の中央にある十字部品の角度ξと角度ηをアクチュエータによって駆動する事で，A 側の軸と B 側の軸の間の角度をαに保ったままB側先端を一定角速度ωで円運動させる事で生成可能である．この動きはA軸とB軸を固定した視点で見ると，**Fig.5-12**(b)の様に A 軸 B 軸間の角度をαに保ったまま A 軸と B 軸を同時にそれぞれの軸周りに角速度ωで回転する運動となっている．しかし，よく知られている様に，ユニバーサルジョイントは等速ジョイントでないため，この運動を行おうとすると **Fig.5-13** の様に A 側と B 側で若干の回転角度に差が生ずる．

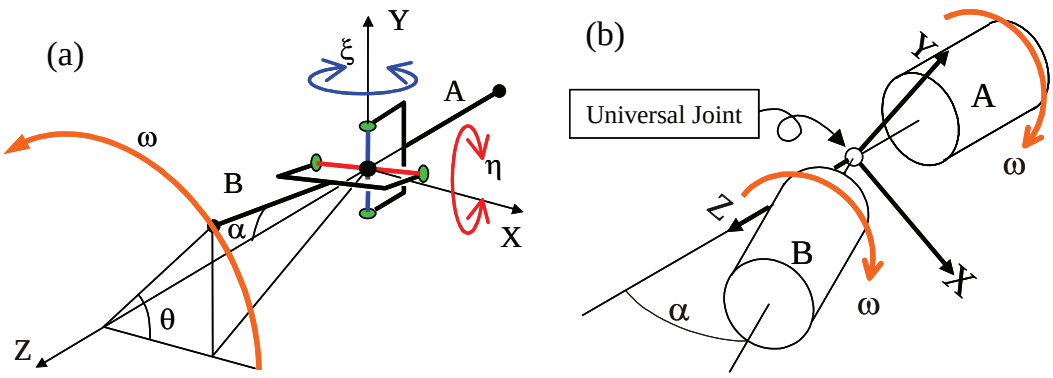


Fig.5-12 Actuator system of the HELIX using Universal Joint Mechanism

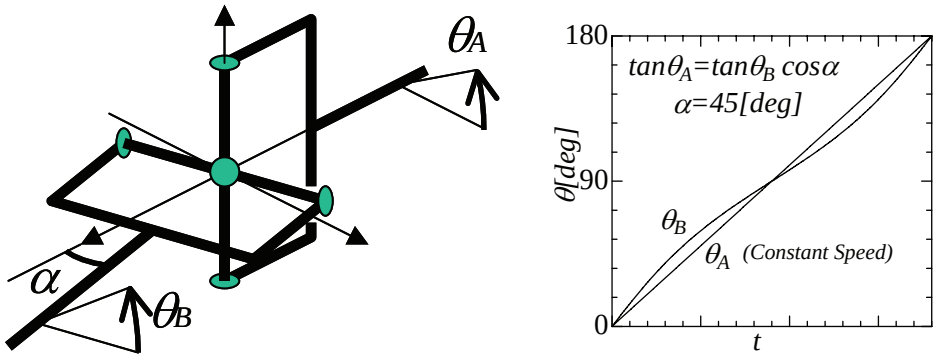


Fig.5-13 Non-constant velocity motion of the Universal Joint

一方，HELIX の関節部は防水性を生み出すため蛇腹で囲まれるが，蛇腹は柔軟な材料から出来た連続体であるためどの方向に曲げても同じ様に曲がる．つまり，蛇腹は等速運動伝達機構とみなせる．そのため不等速回転をするユニバーサルジョイントを用いた関節を等速回転をする蛇腹で覆って捻転運動を行うと，**Fig.5-14** の様に捻転運動に従って連結部において蛇腹とジョイントに角度差が生じ，節と蛇腹の両端を固定して密閉状態を維持したままでは捻転することは難しい．この問題点は，筆者らははじめ重視していなかったが，実際に試作して実験してみると，その効果は無視し得ないものであることが明確になった．

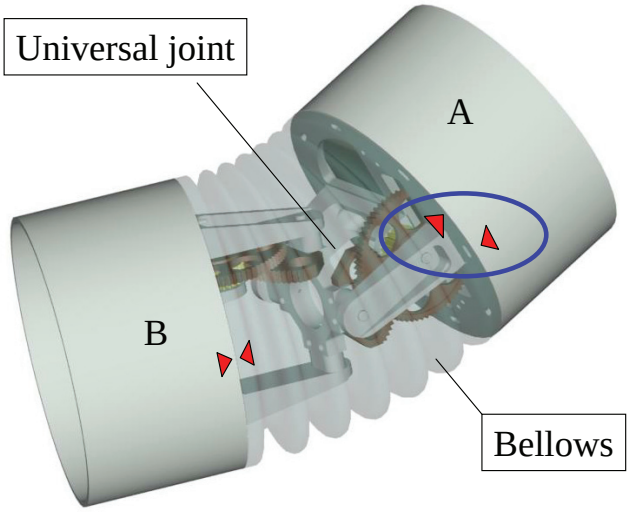


Fig.5-14 Torsional motion between bellows and body produced by the effect of Universal Joint Mechanism

この問題を解決するため，HELIX の関節機構には **Fig.5-15** に示すような中間ブロックを有する新しいユニバーサル機構を導入した. 普通のユニバーサル継手では中央にある十字型

の部品のη軸とξ軸の間の角度は 90 度に固定されている．それに対し開発したユニバーサル継手は，このη軸とξ軸の間の相対角度を **Fig.5-15** に示す様に，微小角度であるが回転自在としたものである．このように構成されているため，このユニバーサル継手は位置の 3 自由度，つまり回転の中心位置を拘束しながら，姿勢の 3 自由度を自由に保つ機構となっている．そしてこのうちのη軸とξ軸の 2 軸をモータで駆動し，角度 φは自由回転するように構成されているので，等速回転を行う蛇腹の運動にも追従することが可能となり，全体として堅牢で完全密閉型の等速伝達機構が実現できるものとなっている．

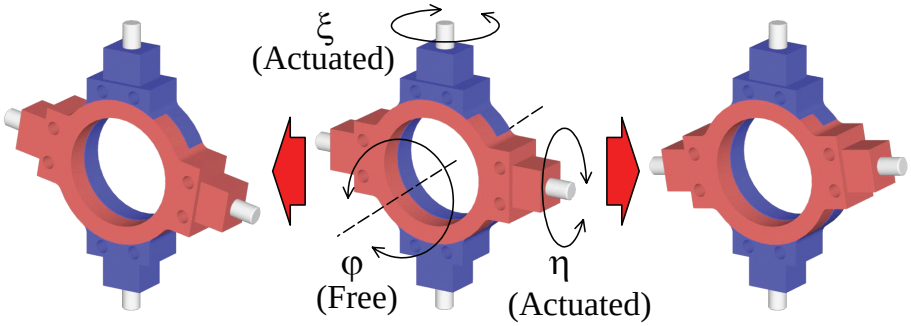


Fig.5-15 Introduced cross joint with 1 DOF for the new Universal Joint Mechanism

HELIX のユニバーサル機構を連結する最も基本的な構成は，**Fig.5-16**(a)のように全ての関節を真直ぐに連結するものである．このように連結しておけば，通常のほふく推進運動や，巻きつき把持動作など多様な運動が可能となり，水中では順に位相をずらして捻転運動を行う事で螺旋捻転運動が生成可能となる．ただし本試作モデルでは，螺旋捻転運動を簡単な制御システムで生成することを優先し，**Fig.5-16**(b)の様に関節を胴体軸回りに捩りながら連結して節毎の位相差を機械的に生成して，すべての関節が同じ位相の捻転運動を行うことで螺旋捻転運動を生成可能としている．

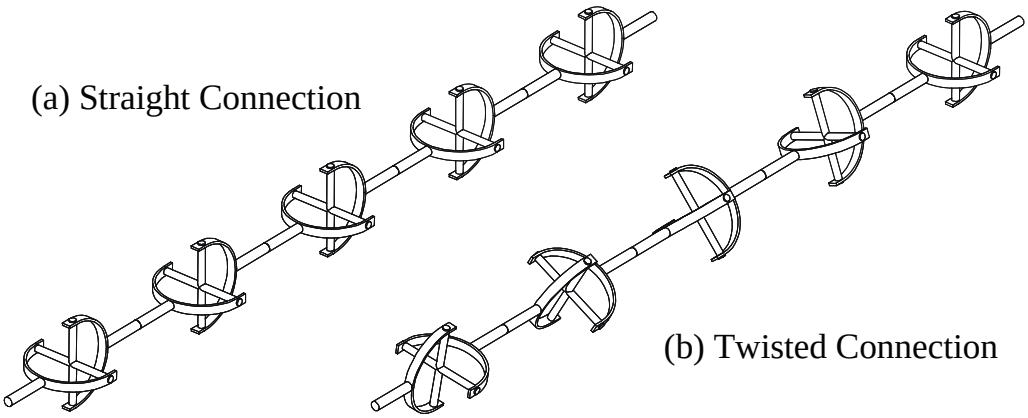


Fig.5-16 2 Types of the connection of the joints

5. 3. 3 試作モデル”HELIX”の駆動系設計

Fig.5-17 の様に関節部とそれを挟んで両側に胴体節半分を有する構造を HELIX の 1 ユニット機構として採用したこのユニットには 2 自由度関節機構を駆動するために 2 つの RC サーボ（Futaba S5801）を内蔵している．1/3 のギアを 2 段階はさみ，全体で減速比は 1/9，屈曲角は蛇腹の伸縮量によって決定され±30[deg]となっている．連結部品は O リングを用いた防水構造とし簡単に節の着脱ができるように構成した．また 15[deg]毎にキー溝を設け，キーにネジ穴をあけておくことで節表面に水切り板等の装備を 15[deg]間隔で可能とした．またキー溝によって節間の連結捩れ角度も 15[deg]毎に変えられるようにした．これらの機構は，今後最適な水切り板角度や遊泳姿勢を見つける実験に利用する予定である．各連結部品内にその節のサーボモータ用電池と，隣接するユニットとの通信用と自節モータ制御用の回路を組み込んだ．このような構造を導入することで，制御用コンピュータを先端節に装備するだけで，ピッチ角とヨー角の制御信号は全節に指示可能とすることができた．

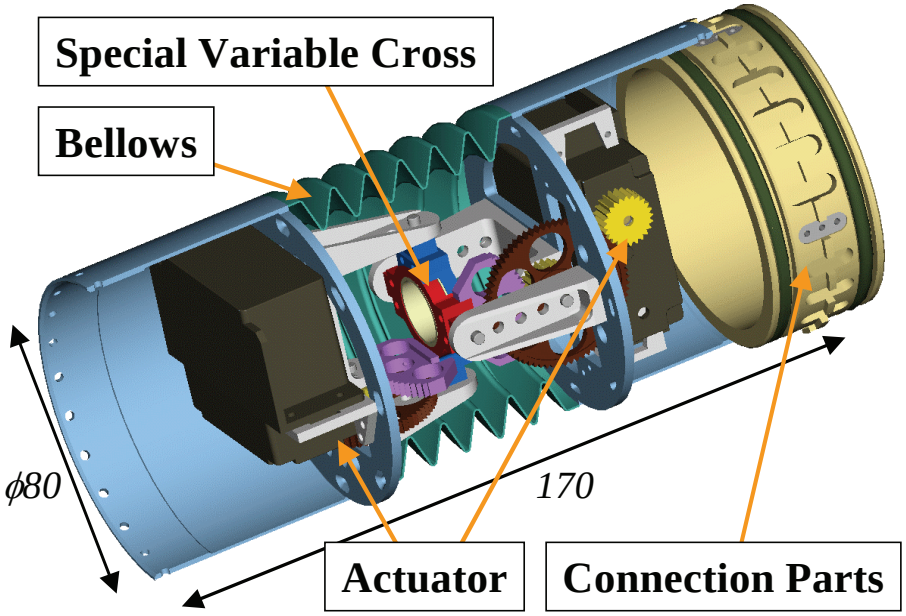


Fig.5-17 Unit mechanism of the HELIX

5. 3. 4 捻転運動を行うための関節角度の制御

HELIX により定速螺旋捻転運動を行うためには各ユニットの関節が捻転角度に一定の位相差を持って定速捻転運動を生成する必要がある．そしてこのような定速捻転運動は，隣接する節の軸間の角度を一定に保ったまま捻転角度を変化させる事で行う事が可能である．HELIX に採用した関節機構はヨー軸とピッチ軸をモータにより駆動しヨー角とピッチ角を制御する事で捻転運動を生成するものとした．ただし試作したモデルでは，すでに論じた

ようにヨー角とピッチ角が直交を保たない特殊なリンク構造を採用した．そのため，希望の捻転角度にさせるためのヨー角とピッチ角の計算には特別の手法が必要となる．また螺旋形状を決定するにも，螺旋形状特有の決定法が必要である．

そのため本節では，まず初めにヨー角，ピッチ角の制御によって，望みの節間角度と捻転角度を生成する制御手法を述べ，ついで誘導した節間角度と節間位相差から螺旋形状を特徴付ける螺旋半径と螺旋ピッチを決定して全体としての螺旋形状を定める制御法を述べることにする．

まず軸間角度αと捻転捻転角度θに対してヨー角ηとピッチ角ξがどのように表記できるかを明確化するため，Helix のある捻転運動を，外部の蛇腹の運動によって得た場合と，その同じ運動を内部のリンク機構の屈曲運動で生成した場合に分けて比較することとした．

まず外部の蛇腹については，**Fig.5-18** の様な座標系で捻転運動を行った動作を行う，すなわち，胴体 A と胴体 B の軸の交点を原点にとり，胴体 A の軸を Z 軸として，胴体 B の軸を Z 軸に対して角度α傾けて XZ 平面から角度θ回転させたものであるとする．この時，捩れを発生させずに胴体 A の座標系を胴体 B の座標系に変換するための座標変換行列 $\mathbf{E}_J$ は，X 軸周りの回転変換行列 $\mathbf{E}^i$ ，Y 軸周りの回転変換行列 $\mathbf{E}^j$，Z 軸周りの回転変換行列 $\mathbf{E}^k$ を用いて以下の様に示すことが可能である[51].

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_J &= \mathbf{E}^{k\theta}\mathbf{E}^{j\alpha}\mathbf{E}^{k(-\theta)} \\ &= \begin{bmatrix} C\theta^2 C\alpha + S\theta^2 & C\theta C\alpha S\theta - C\theta S\theta & C\theta S\alpha \\ C\theta C\alpha S\theta - C\theta S\theta & C\alpha S\theta^2 + C\theta^2 & S\theta S\alpha \\ -C\theta S\alpha & -S\theta S\alpha & C\alpha \end{bmatrix}\end{aligned} \tag{5-13}$$

ただしここで $C_a = \cos a, S_a = \sin a$ とした．

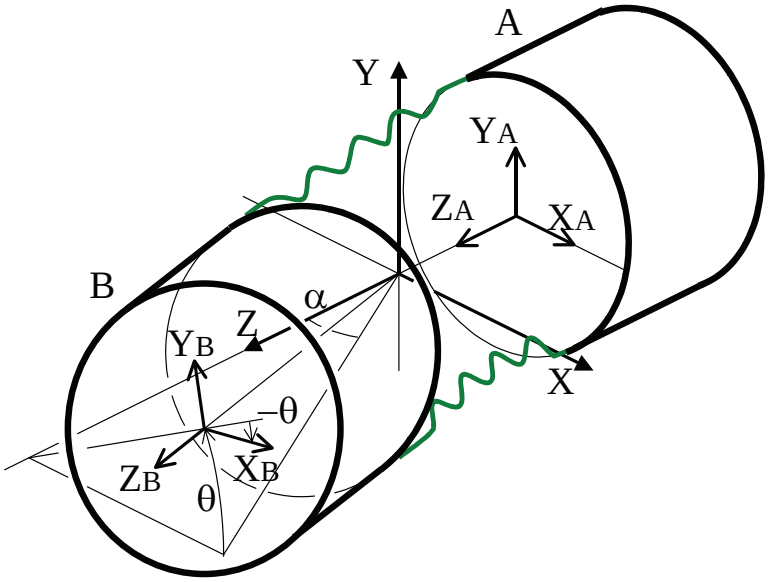


Fig.5-18 Notation of the motion produced by the Bellows

一方，内部のリンク機構の屈曲運動は，**Fig.5-19** に示す様にリンクの 3 軸がそれぞれη，ξ，φの回転を行ったとするのであれば，胴体 A の座標系を胴体 B の座標系に変換するための座標変換行列 $\mathbf{E}_L$ は以下の様に表記できる．

$$\mathbf{E}_L = \mathbf{E}^{j\xi}\mathbf{E}^{k\varphi}\mathbf{E}^{i\eta} = \begin{bmatrix} C_\xi C_\varphi & -C_\xi S_\varphi C_\eta + S_\xi S_\eta & C_\xi S_\varphi S_\eta + S_\xi C_\eta \\ S_\varphi & C_\varphi C\eta & -C_\varphi S_\eta \\ -S_\xi C_\varphi & S_\xi S_\varphi C_\eta + C_\xi S_\eta & -S_\xi S_\varphi S_\eta + C_\xi C_\eta \end{bmatrix} \tag{5-14}$$

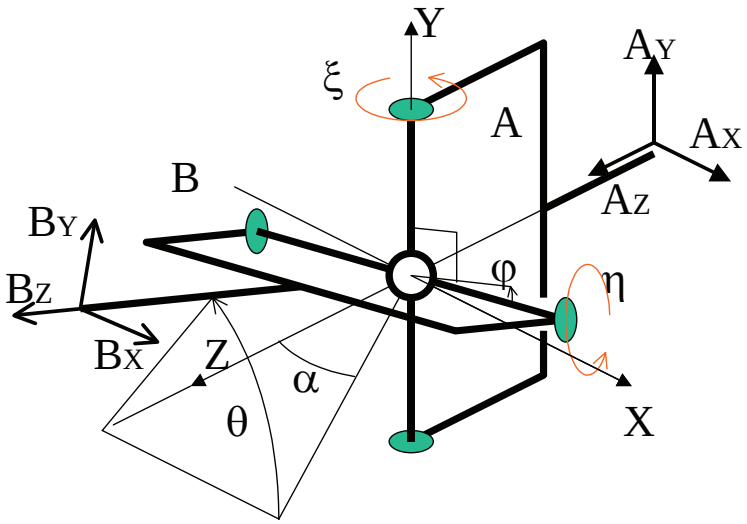


Fig.5-19 Notation of the motion produced by the Universal Joint actuators

以上に示した外側の蛇腹による座標変換行列 $\mathbf{E}_J$ と内部のリンク機構の屈曲運動による座標変換行列 $\mathbf{E}_L$ は等価でなければならない．そのためこれらの行列の 2 行 3 列目の要素$\mathbf{E}_{2.3}$と，2 行 2 列目の要素 $\mathbf{E}_{2.2}$ の比$\mathbf{E}_{2.3}$ /$\mathbf{E}_{2.2}$ から，また3行1列目の要素$\mathbf{E}_{3.1}$と，1 行 1 列目の要素 $\mathbf{E}_{1.1}$ の比$\mathbf{E}_{3.1}$ /$\mathbf{E}_{1.1}$ から，角ηと角ξは軸間角度αと捻転捻転角度θの関数として以下の様に記述できることがわかる．

$$\frac{-C_\varphi S_\eta}{C_\varphi C\eta} = \frac{S_\theta S_\alpha}{C_\alpha S_\theta{}^2 + C_\theta{}^2}$$
$$\therefore \eta = ATN\left(\frac{\sin\alpha\cdot\sin\theta}{\cos\alpha\cdot\sin^2\theta + \cos^2\theta}\right) \tag{5-15}$$

$$\frac{-S_\xi C_\varphi}{C_\xi C_\varphi} = \frac{-C_\theta S_\alpha}{C_\theta{}^2 C_\alpha + S_\theta{}^2}$$
$$\therefore \xi = ATN\left(\frac{\sin\alpha\cdot\cos\theta}{\cos\alpha\cdot\cos^2\theta + \sin^2\theta}\right) \tag{5-16}$$

HELIX で螺旋体型を構成する場合の形態の決め方は，**Fig.5-20** の様に各節の中心軸を Z_0 軸に沿った内接円筒(inscribed circle)に接するように各節をコイル状に曲げていくものと想定した．そしてこの螺旋の形状は，内接円筒の半径である「螺旋半径 R」と，第 1 節を Y_0-Z_0 平面に投影したとき，この第 1 節と Z_0 軸とのなす角である「螺旋の仰角γ」の 2 つを形態決定パラメータにすることとした．

以上のように HELIX の螺旋構造を定め，**Fig.5-21** に示すように，螺旋構造の隣接する関節 P_i と P_{i+1} の位置を X_0-Y_0 平面に投影したとき，それぞれの点が原点に対してなす角をβとし，また各節の Z_0 軸方向への投影長さを L_Z（L_Z＝L･cos γ）とすると，各関節の軸間角度αと捻転角度の位相差δは以下のようにして誘導可能である．

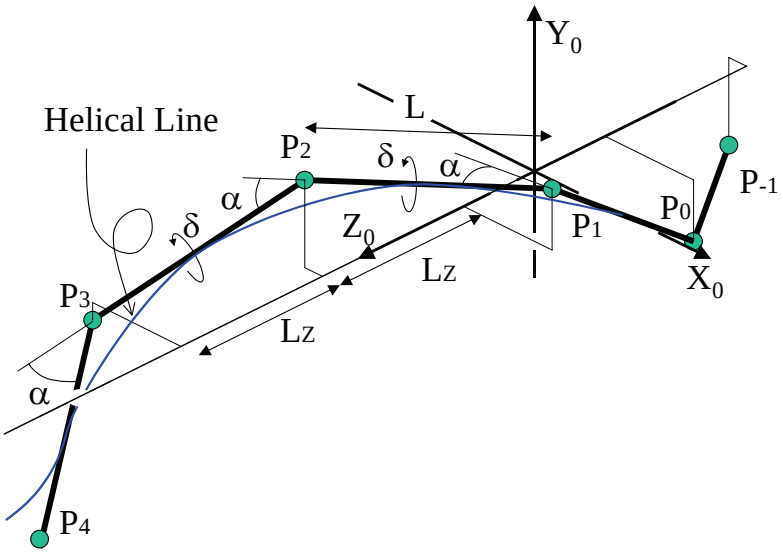


Fig.5-20 Discontinuous model of the HELIX

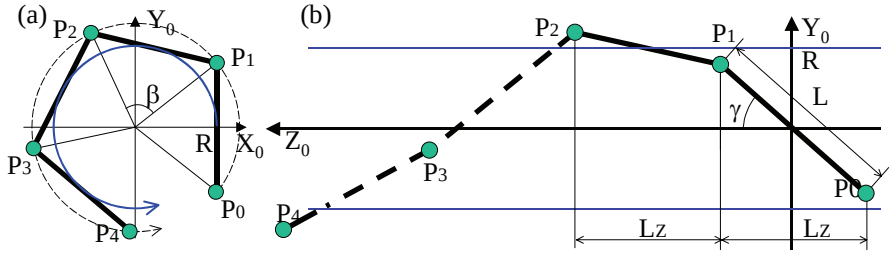


Fig.5-21 Front-Side View and coils around inscribed circle with diameter R

まず，螺旋体の任意の関節の位置座標 **P**n は以下の様に示される．

$$\mathbf{P}_n = \begin{pmatrix} R/\cos(\beta/2)\cdot\cos(n\cdot\beta-\beta/2) \\ R/\cos(\beta/2)\cdot\sin(n\cdot\beta-\beta/2) \\ (n-1/2)\cdot Lz \end{pmatrix} \tag{5-17}$$

ここで，関節間の長さが L であるから

$$L = \left|\mathbf{P}_{n+1} - \mathbf{P}_n\right| = \sqrt{4R^2\tan^2(\beta/2) + L^2\cos^2(\gamma)} \tag{5-18}$$

が成り立つ.これを展開するとβとγの関係が以下のように求まる

$$L\sin(\gamma) = 2R\tan(\beta/2)$$
$$\therefore \beta = 2\cdot\arctan\left(\frac{L}{2\cdot R}\sin(\gamma)\right) \tag{5-19}$$

このとき節間軸角度αは

$$\begin{aligned}\cos\alpha &= \frac{\left(\mathbf{P}_{n+1} - \mathbf{P}_n\right)\cdot\left(\mathbf{P}_{n+2} - \mathbf{P}_{n+1}\right)}{\left|\mathbf{P}_{n+1} - \mathbf{P}_n\right|\left|\mathbf{P}_{n+2} - \mathbf{P}_{n+1}\right|} \\ &= \frac{\left(2R\tan(\beta/2)\right)^2\left(1 - 2\sin^2(\beta/2)\right) + L^2\cos^2(\gamma)}{L^2} \\ &= 1 - 2\sin^2(\beta/2)\sin^2(\gamma)\end{aligned} \tag{5-20}$$

と与えられるが，ここで,

$$\cos\alpha = 1 - 2\sin^2(\alpha/2) \tag{5-21}$$

を式(5-19)に代入すれば

$$\sin(\alpha/2) = \sin(\beta/2)\sin(\gamma) \tag{5-22}$$

が求まる．そして式(5-19)(5-22)よりβを消去すると軸間角度αが螺旋半径 R と仰角γの関数として以下のように求まる.

$$\alpha = 2\cdot\arcsin\left(\frac{\sin^2(\gamma)}{\sqrt{4R^2/L^2 + \sin^2(\gamma)}}\right) \tag{5-23}$$

さらに位相差δについては，$\mathbf{P}_n$，$\mathbf{P}_{n+1}$，$\mathbf{P}_{n+2}$ の 3 つの関節点が形成する平面と $\mathbf{P}_{n+1}$，$\mathbf{P}_{n+2}$，$\mathbf{P}_{n+3}$ の 3 つの関節点が形成する平面のなす角度として誘導できる．しかし，一般の関節間でこの値を誘導するのは煩雑であるため, 特に n=-1 の特例で誘導することにした. この場合, 関節 $\mathbf{P_{-1}}$-$\mathbf{P_0}$ と関節 $\mathbf{P_2}$-$\mathbf{P_1}$ が X_0 軸回りに回転対象となっていることから節 $\mathbf{P_0}$-$\mathbf{P_1}$ が Z_0 軸と平行になるように X_0 軸回りに仰角γだけ回転させると，**Fig.5-22** の様に平面 $\mathbf{P_{-1}}$-$\mathbf{P_0}$-$\mathbf{P_1}$ 及び $\mathbf{P_0}$-$\mathbf{P_1}$-$\mathbf{P_2}$ は X_0Y_0 平面に直交し位相差δが X_0Y_0 平面上に投影可能である.

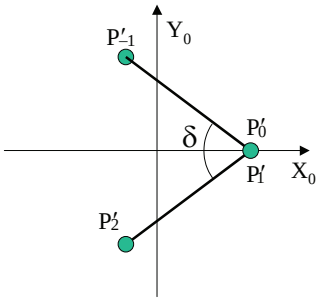


Fig.5-22 Projection of joint posture to X_0Y_0 plane and the angle δ

このとき関節点 $\mathbf{P}_2$’，$\mathbf{P}_1$’はそれぞれ

$$\mathbf{P}_1' = \mathbf{E}^{i\gamma} \cdot \mathbf{P}_1 = \left(R, 0, P_1'z\right)^T$$
$$\mathbf{P}_2' = \mathbf{E}^{i\gamma} \cdot \mathbf{P}_2 \tag{5-24}$$

で表されるため，以下の関係式を容易に誘導可能である．

$$\tan(\delta/2) = \left|\mathbf{P}_{2Y}'\right| / \left|R - \mathbf{P}_{2X}'\right|$$
$$= \frac{\left|R\cos(\gamma)\tan(\beta/2)\left(3 - 4\sin^2(\beta/2)\right)\right|}{4R\sin^2(\gamma)} \tag{5-25}$$

そして，式(5-19)(5-25)よりβを消去すると，位相差δが螺旋半径 R と仰角γの関係式として以下のように誘導できる．

$$\delta = 2 \cdot \arctan\left(\frac{L}{2 \cdot R} \cdot \cos\gamma \cdot \sin\gamma\right) \tag{5-26}$$

よって半径 R で仰角γの螺旋構造をとりながら速度ωで螺旋捻転運動を行うときの第 n 節の関節の時刻 t における角$\eta_n(t)$と角$\xi_n(t)$は以下のように与えればよいことがわかる．

$$\eta_n(t) = \arctan\left(\frac{\sin\alpha \cdot \sin(\omega \cdot t + n \cdot \delta)}{\cos\alpha \cdot \sin^2(\omega \cdot t + n \cdot \delta) + \cos^2(\omega \cdot t + n \cdot \delta)}\right) \tag{5-27}$$

$$\xi_n(t) = \arctan\left(\frac{\sin\alpha \cdot \cos(\omega \cdot t + n \cdot \delta)}{\cos\alpha \cdot \cos^2(\omega \cdot t + n \cdot \delta) + \sin^2(\omega \cdot t + n \cdot \delta)}\right) \tag{5-28}$$

ただしここでα，δは

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\sin^2(\gamma)}{\sqrt{4R^2/L^2 + \sin^2(\gamma)}}\right) \tag{5-23}$$

$$\delta = 2 \cdot \arctan\left(\frac{L}{2 \cdot R} \cdot \cos\gamma \cdot \sin\gamma\right) \tag{5-26}$$

である．

なおこのときの HELIX の全長 S と巻き数 q は連結節数が N であるならば以下の様に誘導可能である．

$$S = (N+1) \cdot Lz$$
$$= (N+1) \cdot L \cdot \cos(\gamma) \tag{5-29}$$

$$q = \left((N+1) \cdot \beta\right) / \left(2 \cdot \pi\right)$$
$$= (N+1) \cdot \arctan\left(\frac{L}{2 \cdot R}\sin(\gamma)\right) / \pi \tag{5-30}$$

なお後述する HELIX の実験ではδは固定され，α，ωのパラメータを変化させて遊泳体型を取らせた．この場合$\eta_n(t)$, $\xi_n(t)$は(5-27)(5-28)式から直接求まり，その時の体系パラメータ R, γと進行方向長さ S，巻き数 q は

$$\gamma = \arcsin\left(\sin(\alpha/2) \Big/ \sqrt{1 - \left(\cos(\alpha/2) \cdot \cos(\delta/2)\right)^2}\right) \tag{5-31}$$

$$R = \frac{L}{2} \cdot \sin(\alpha/2) \cdot \frac{\cos(\alpha/2) \cdot \cos(\delta/2)}{1 - \left(\cos(\alpha/2) \cdot \cos(\delta/2)\right)^2} \tag{5-32}$$

$$S = (N+1) \cdot L \cdot \frac{\cos(\alpha/2) \cdot \sin(\delta/2)}{\sqrt{1 - \cos^2(\alpha/2) \cdot \cos^2(\delta/2)}} \tag{5-33}$$

$$q = (N+1) \cdot \arccos\left(\cos(\alpha/2) \cdot \cos(\delta/2)\right) / \pi \tag{5-34}$$

と与えられる．

5.3.5 水切り板の取り付け角度に関する考察

螺旋回転型遊泳を工学的モデルである HELIX では各節で発生する力 F とトルク T を出す為に水切り板を節表面に取り付けるが，この水切り板の取り付け角度によって力やトルクの大きさが変わってくる．即ち，構想図にあるように水切り板を胴体の軸と同方向にまっすぐ取り付けると，回転により発生する反作用はトルクだけとなるが，**Fig.5.23** の様に傾けて取り付けるとプロペラの様な効果が発生して並進力も発生する事になる．そのため遊泳実験に螺旋回転型遊泳を最も行いやすい傾きの物を利用するために，定常状態における水切り板の取り付け角度による力のつりあいについて簡単な検討を行う．以降力の計算を容易におこなうため，再び胴体を連続薄柱による連続体として扱う．5.2.3 項では各節が発生している各力の成分がどの様にバランスして螺旋全体の定常運動を生み出しているかを求めたが，ここでは全体の収束は扱わず定常運動は約束された運動であるとして，各節内での力のバランスのみに注目する．また水切り板が取り付けられた円柱が流体中を軸周りに回転しながら並進する運動によって発生する力は，並進円柱が流体から受ける流体抵抗と，流体中で回転する水切り板が発生するトルクと並進力の 2 つの独立した力として扱う．なお回転円柱が流体から受ける力にはマグヌス効果と呼ばれる流体の流れと垂直方向に発生する力が存在するが，Fig.5-8 からも判る様に，流れと垂直方向である X 成分の力は推進方向である Z_0 方向の加速度への影響が無いため，ここでは無視する．

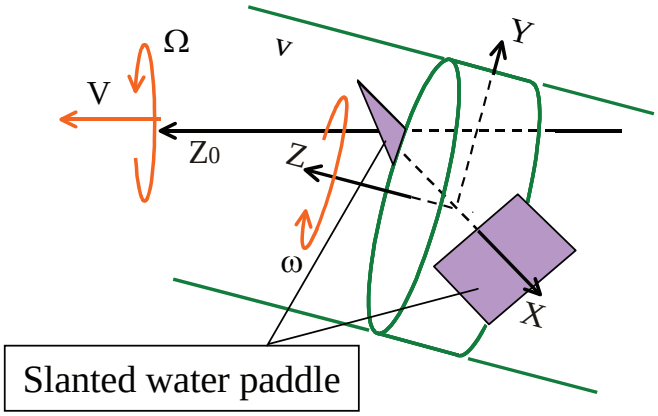


Fig.5.23 The Slanted water paddle equipped on a segment of helical body

胴体を構成する薄柱が流体からうける抵抗を **Fig.5-6** において X_0=0 での体幹を Y-Z 平面に投影した **Fig.5-24** に示す．X_0=0 であるため Y_0 軸は Z_0 軸と直交する単位ベクトルとして扱う事ができる．ここで薄円柱が螺旋全体の回転Ωと並進 V の合成速度 v で流体中を並進すると流体からの抵抗 D_B を受ける．この時移動速度 v と円柱軸 Z の方向が一致しない場合には，円柱は並進方向の反対方向に並進抵抗 C_D を発生させると同時に，並進抵抗 C_D に対して垂直な方向に揚力 C_L を発生させる．想定している機械モデルで円柱直径 10[cm]，流速 10[cm]，水の動粘性係数 $10*10^{-3}$[cm^2/s]とするとレイノルズ数は 10^4 となり，**Fig.5-25** はレイノルズ数が 2～3.6×10^5 で円柱が流体から受ける抵抗と揚力の実験値であり異なったレイノルズ数では有るが，流体からうける抵抗は 10^3～10^5 の範囲では似た様な挙動を示し，またここでは簡単な目安として利用する事を目的としているため，近似値としてこの値を利用する．[52]よって式速度 v の絶対座標系 Z_0 軸に対する角度をλとすると，発生する並進抵抗 C_D と揚力 C_L の大きさは以下の式で表す事ができる．

$$v = \sqrt{V^2 + (\Omega R)^2} \tag{5-35}$$

$$\lambda = \arccos(V / v) \tag{5-36}$$

$$C_D = \left| \left(1.1 \cdot \sin^3 |\lambda - \gamma| + 0.02\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot 2 \cdot r \cdot dl \right| \tag{5-37}$$

$$C_L = \left| \left(1.1 \cdot \sin^2 |\lambda - \gamma| \cdot \cos|\lambda - \gamma|\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot 2 \cdot r \cdot dl \right| \tag{5-38}$$

これを用いて抵抗 D_B の Y_0 成分 $D_B[Y_0]$と Z_0 成分 $D_B[Z_0]$は以下の様に示すことができる

$$D_B[Y_0] = -C_D \cdot \sin\lambda + \frac{\lambda - \gamma}{|\lambda - \gamma|} \cdot C_L \cdot \cos\lambda \tag{5-39}$$

$$D_B[Z_0] = -C_D \cdot \cos\lambda + -\frac{\lambda - \gamma}{|\lambda - \gamma|} \cdot C_L \cdot \sin\lambda \tag{5-40}$$

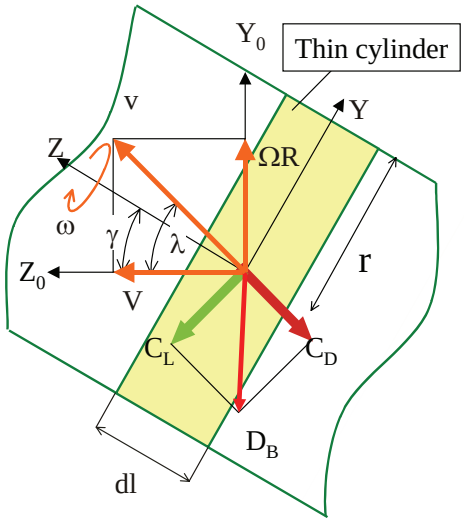


Fig.5-24 Resistance and lift up power of a segment of helical body

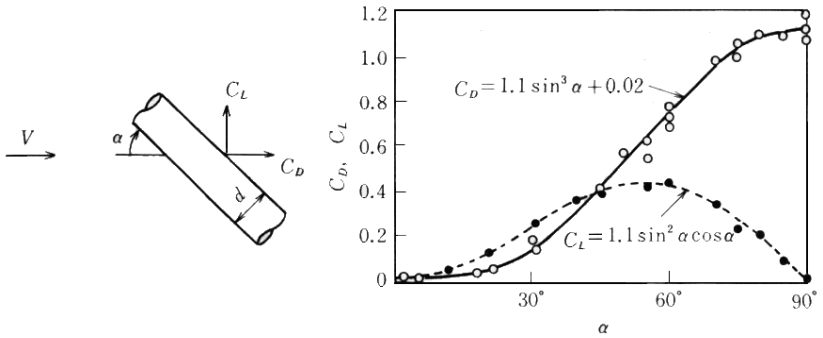


Fig.5-25 The resistance of the incline cylinder in the fluid(Re=2～3.6×10^5) [52]

次に水切り板が流体から受ける抵抗であるが，水切り板は薄円柱の単位長さあたりに対して，大きさ 1[cm^2]の正方形板を取り付け角度をεで枚数 P 取り付ける．**Fig.5-26** に示した **Fig.5-23** 図中手前側の水切り板に注目すると，体幹の並進 v と同時に自転ωと公転Ωの和の回転による速度 $(\omega+\Omega\cdot\cos\gamma)\cdot r$ で Y 軸負の方向に移動する．並進 v による Y 方向の影響は体幹裏側に取り付けられた対となる水切り板によりキャンセルされる物とすると，水切り板は v の Z 成分と $(\omega+\Omega\cdot\cos\gamma)\cdot r$ の合成した速度 w で流体中を進む．このとき速度 w の体幹軸 Z に対する傾きをζとする．このときの正方形板が流体から受ける抵抗 P_D と揚力 P_L は円柱が受ける抵抗同様に **Fig.5-27** に示す平板翼による実測値を近似値として用いた．[53]なお平板翼の抵抗についてのレイノルズ数については参考文献に記載されていなかったため不明であるが，参考文献が魚の尻尾振り運動による推進を機構により行う研究に関する文献であったため，本研究と同等の寸法であると判断しこれを用いた．よって発生する並進抵抗 P_D と揚力 P_L の大きさは w，ζを用いて以下の式で表す事ができる．

$$w=\sqrt{(v\cdot\cos(\lambda-\gamma))^2+((\omega+\Omega\cdot\cos(\gamma))\cdot r)^2} \tag{5-41}$$

$$\zeta=\arccos(w/(v\cdot\cos(\lambda-\gamma))) \tag{5-42}$$

$$\mathrm{P_D}=\left|\left(1.2\cdot\frac{|\pi/2-\varepsilon-\zeta|}{\pi/2}\right)\cdot\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot\mathrm{w}^2\cdot1\cdot\mathrm{dl}\right| \tag{5-43}$$

$$\mathrm{P_L}=\left|\left(1.5\cdot\cos^2|\pi/2-\varepsilon-\zeta|\cdot\sin^{\frac{1}{2}}|\pi/2-\varepsilon-\zeta|\right)\cdot\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot\mathrm{w}^2\cdot1\cdot\mathrm{dl}\right| \tag{5-44}$$

これを用いて一度体幹座標系に成分分解すると，Z 成分は並進力 F_P として働くが，Y 成分は体幹裏側に取り付けられた対となる水切り板の運動によりトルク T_P として働く事がわかる．体幹半径 r，水切り板の枚数を P とすると F_P，T_P はそれぞれ以下の式となる．

$$F_P=\left(-P_D\cdot\cos\zeta+-\frac{\pi/2-\varepsilon-\zeta}{|\pi/2-\varepsilon-\zeta|}\cdot P_L\cdot\sin\zeta\right)\cdot P \tag{5-45}$$

$$T_P = \left(-P_D \cdot \sin\zeta + -\frac{\pi/2 - \varepsilon - \zeta}{|\pi/2 - \varepsilon - \zeta|} \cdot P_L \cdot \cos\zeta \right) \cdot r \cdot P \tag{5-46}$$

並進力 F_P は Y_0 成分 $F_P[Y_0]$と Z_0 成分 $F_P[Z_0]$に分けられ，トルク T_P は Z_0 軸周りのトルクであるため螺旋の半径 R を用いると Y-Z 平面内での Y_0 方向の並進力 $F_T[Y_0]$として扱う事ができる．$F_P[Y_0]$，$F_P[Z_0]$，$F_T[Y_0]$はそれぞれ以下の式で表す事ができる．

$$F_P[Y_0] = F_P \cdot \sin\gamma \tag{5-47}$$

$$F_P[Z_0] = F_P \cdot \cos\gamma \tag{5-48}$$

$$F_T[Y_0] = \frac{T_P \cdot \cos\gamma}{R} \tag{5-49}$$

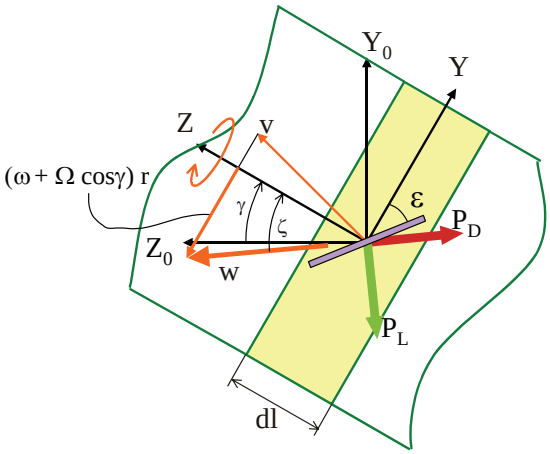


Fig.5-26 Resistance and lift up power created by the motion of one water paddle

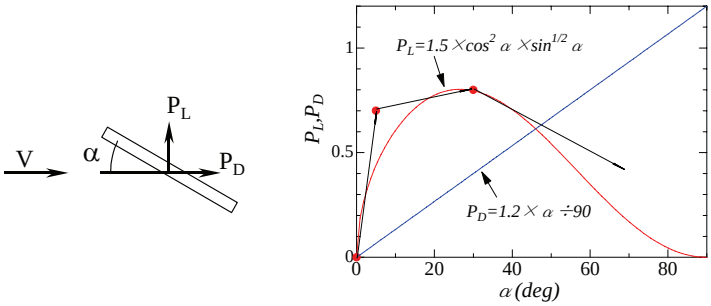


Fig.5-27 The resistance of the incline board in the fluid[53]

以上で求めた体幹箔円柱 D_B の抵抗と水切り板によって発生する並進力 F_P と F_T が体幹座標系がなす平面 Y-Z 内で釣り合いを保っている状態が定常状態となる．釣り合い状態を表す式は以下の様になる．

$$\begin{cases} F_P[Y_0] + F_T[Y_0] + D_B[Y_0] = 0 \\ F_P[Z_0] + D_B[Z_0] = 0 \end{cases} \tag{5-50}$$

螺旋の周期 S を 100[cm]，体幹半径 r を 4[cm]，捻転運動による自転速度ωを-1[rad/s]として螺旋半径 R を 5[cm]から 25[cm]まで変化させ，水切り板枚数 P を 2[枚]として水切り板の角度 e を 60[deg]から 90[deg]まで変化させ, 計算機によりシミュレーションした物が **Fig.5-28** である．このことより概算ではあるが，水切り板は 80～85[deg]程度で最も早く遊泳が行う事ができる事と，螺旋形状のピッチによっても推進速度が変わることが明らかとなった．

この事から，水切り板角度は理想的には 80～85[deg]程度でその時の螺旋形状に合わせてその角度を変化させる事ができれば速度的には最も有効であると考えられるが，水中遊泳は気密性が前提となっているため現実的ではない．また 80～85[deg]の角度で固定すると胴体の螺旋形状が逆ピッチになった場合には, 胴体に対して 95～100[deg]で取り付けた物となり，グラフでは示されていないが，極端に遊泳速度が下がる事が予測される．

一方, 陸上で蛇行推進を行う索状能動体では, 蛇行によって推進力を発生させるために, 体表に縦方向と横方向で摩擦係数に差を持たなければならない．そのため蛇行推進を行う索状能動体は胴体軸に沿った方向に受動輪や鍔を取り付けて胴体軸前後方向には滑りやすく，横方向には引っ掛かって動き難い構造としている．この事から，水掻き板についても胴体軸に沿った方向に取り付けておけば，水中での螺旋回転推進ではどちらの向きの巻き方となってもそれなりの効果を示し，陸上での蛇行推進にも利用でき，水陸両用型の索状能動体に適した取り付け角度であると考えられる．そのため，実験機による水中遊泳実験では水切り板の取り付け角度は 90[deg]とした．

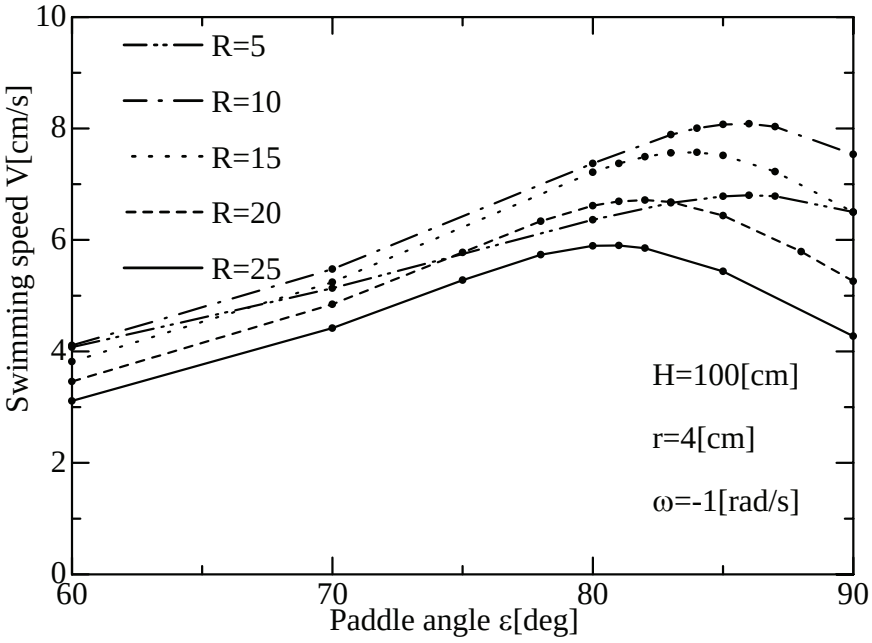


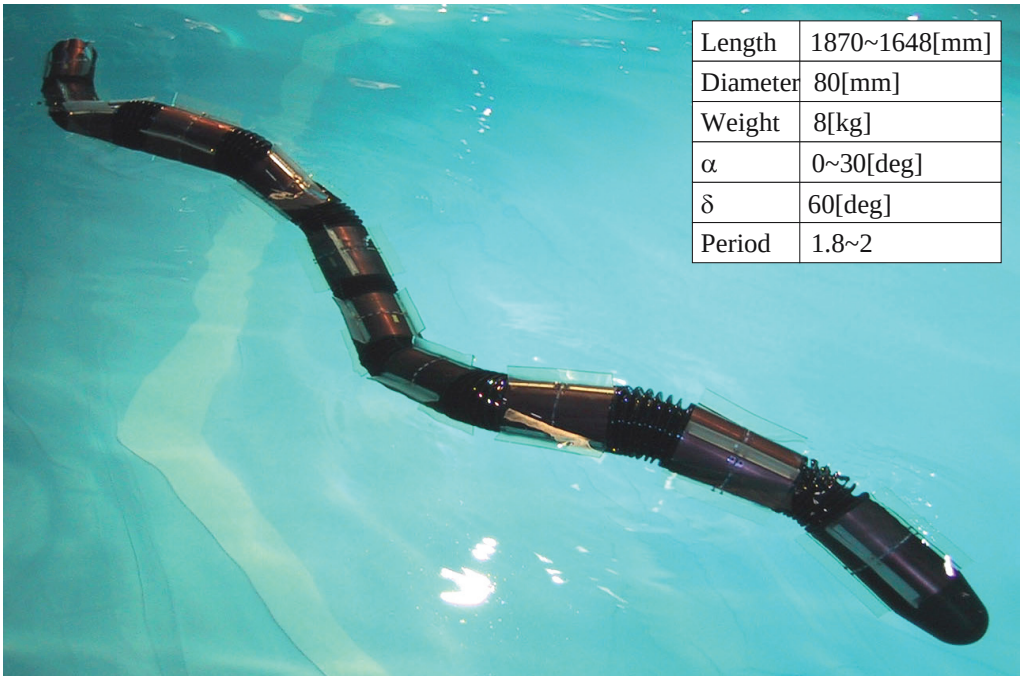
Fig.5-28 The effect of paddle angle for swimming speed

5.4 試作した HELIX-I での遊泳実験

以上の考察を元に 10 ユニット関節を連結した 10 関節（11 節）の索状能動 HELIX-I により水中での螺旋回転推進の確認実験を行った．捻転位相差δは連結時に 60[deg]で固定し，胴体軸間角度αのみを 0～30[deg]に変化させた．このとき螺旋巻数は上式(5-33)より 1.8～2 巻と求まる．これは **Fig.5-8** に示した様に比較的多くの **K** について Z_0 成分に対して X_0Y_0 成分が小さくなる．唯一この近傍で X_0Y_0 成分の大きくなる $\mathbf{K}[\dot{\Omega}(F_X)]$ については， **Fig.5-6** に示した様に各節が Y-Z 平面内での並進運動を行う場合，流体から受ける **X** 軸方向の力 F_X が **Y** 軸 **Z** 軸方向の力 F_Y，F_Z と比べて十分に小さいと考え，この螺旋巻き数を採用した．また仰角γ=0～28[deg] ，螺旋半径 R=0～61[mm]，進行方向長さ S=1870～1648[mm]となることは上式（32）から誘導される通りである．本実験で用いた水切り板は最も簡単な高さ 20[mm]幅 110[mm]の厚さ 2[mm]の長方形の板状のウレタンゴムで各節に 4 枚ずつ軸に沿った方向に取り付けた．後端節には制御用コントローラとラジコンの受信機を搭載し，操縦者が軸間角度αと捻転速度ωを無線で指示すると搭載した制御用コントローラが関節部ユニバーサルジョイントのヨー角ピッチ角を算出し，それを各駆動系に指令することで螺旋捻転運動を生成する構造とした．

HELIX-I はすべての節間角度αがゼロであるで真直ぐな初期状態から，節間角度αを変化させることで **Fig.5-29** の様な螺旋遊泳体型を取らせた． 先端を手で押さえて推進できない状態にして静止状態から捻転運動を開始すると，**Fig.5-8** に示した $\mathbf{K}[\dot{\Omega}(T_Z)]$ の計算結果のように胴体全体が螺旋の軸周りに回転し始めることを確認した. そして, 節間角度α≒20[deg], 捻転速度ω≒2[rad/sec]にすると **Fig.5-30** の様に回転速度Ω≒2.5[rad/sec]，並進速度 V≒15[cm/sec]で螺旋回転推進を行うことが確認できた．なお，本論文のはじめに行った解析では全節が水没している場合の螺旋回転推進について考察した．しかし，実際に製作した HELIX は若干比重が 1 より小さく胴体の一部が水面に出てしまった．その結果，水面に出た部分の水切り板が水をかかずに少しずつ横に並進してしまうという現象が観察された．

またこの実験結果を得た螺旋の姿勢α=20[deg]では螺旋 1 周期の長さ H=830[mm]，螺旋半径 R=46[mm]程度となる．水切り板は高さ 20[mm]長さ 110[mm]の物を 1 節 170[mm]辺り 4 枚取り付けたが, この事はシミュレーション上で胴体単位長さ辺り 1[cm^2]の水切り板を付けた枚数 P に換算すると P≒5 となる．よって水切り板角度の目安としたシミュレーションのパラメータを変え，H=83[cm]，R=4.6[cm]，P=5，ω=-2[rad/sec]を代入して計算を行うと，Ω=2.1，V=14.8[cm/s]となりシミュレーションの手法は近似的ではあったが妥当な方法であったと考えられる．



Length	1870~1648[mm]
Diameter	80[mm]
Weight	8[kg]
α	0~30[deg]
δ	60[deg]
Period	1.8~2

Fig.5-29 Swimming motion of the "HELIX-I"

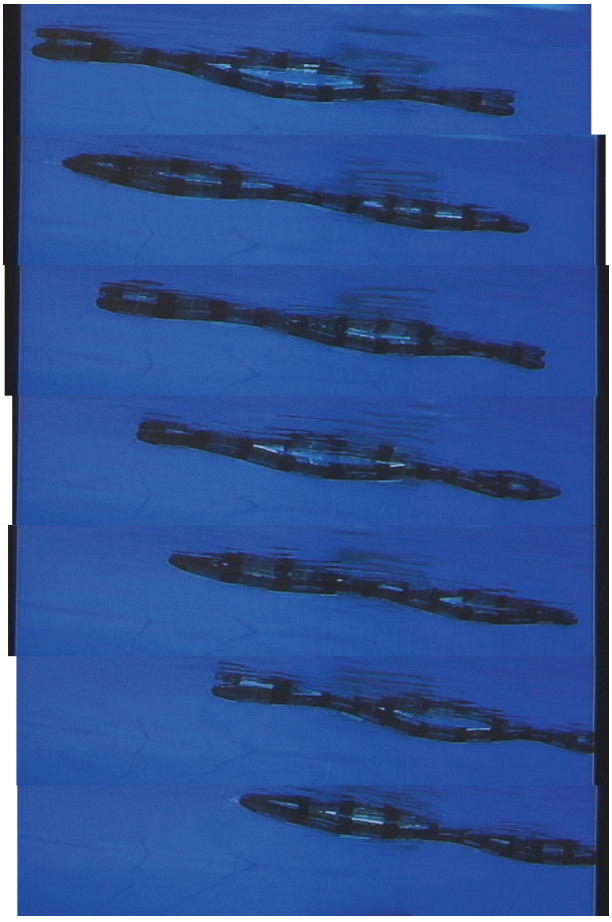


Fig.5-30 Serial motion of the "HELIX-I" viewed by the underwater camera

第6章 結論と今後の課題

6.1 結論

第１章「序論」では，本研究の背景と目的を述べた．すなわち，大規模地震等の広域災害時には人々が倒壊家屋内に閉じ込められることが多く，それらの被災者の救出のためには何よりもまず被災者を見つけ出すことが必要であること，そして二次災害防止の観点から地震直後の瓦礫内探査に遠隔操縦形の探査ロボットの開発が望まれていること，さらにそのロボットは，立体的に瓦礫が散乱し，土砂，塵埃，汚泥などの充満した劣悪な狭隘環境を踏破できる高い移動能力と耐環境性が必要であることを指摘し，本論文はそのようなロボットの設計と運動制御を論ずることを述べた．

第２章「不整地移動型ロボットの設計」では，不整地移動ロボットの開発上の基本問題点を論じた．すなわち，上述のような瓦礫内探索ロボットの形態としてはヘビのような細長い形態の索状能動体が適していること，また索状能動体は関節と推進器の能動性・非能動性から４つに分類でき，能動関節－能動推進器型は移動能力を最大化できるが多くの駆動自由度があるため重量過大になりやすく完全気密構造にし難いなどの問題点があること，能動関節－非能動推進器型は運動性能が若干劣るが気密性が原理的に保持しやすいため水陸両用の移動体に適していることなどを指摘した．そして本論文では第３章と第４章において能動関節－能動推進器型の索状能動体の開発を論じ，第５章において能動関節－非能動推進器型の索状能動体の開発を論ずることを述べた．

第３章「省自由度化を目指した索状能動体「蒼龍Ⅰ・Ⅱ号機」の開発」では，高い移動能力を備えた能動関節－能動推進器型の索状能動体を出来る限り少ない自由度で構成する開発法を論じた．すなわち３節直列連結構造で各節にクローラ推進機構を有し，全てのクローラを同時に駆動する１自由度と，前後の節を中央の節に対して対称的に上下左右に屈曲させる２自由度，合計３つの能動自由度を有する駆動系を有する索状能動体を提案し，「蒼龍Ⅰ号機」および「蒼龍Ⅱ号機」を実際に試作し，その駆動走行実験によって開発した試作機の特性と運動性能を明らかにした．

第４章「実用化を目指した索状能動体「蒼龍Ⅲ号機」の開発」では，蒼龍Ⅰ号機と蒼龍Ⅱ号機の駆動走行実験で明らかになったいくつかの問題点を明確化し，その問題点を解決する機構設計法を論じた．具体的には，たとえば蒼龍Ⅰ，Ⅱ号機において省自由度化のために採用した全クローラを１自由度で駆動するための動力伝達機構が不整地踏破性と防塵性を若干低下させていたという問題点は，３つの節のクローラを密閉型の駆動系によってそれぞれ個別に駆動し，同時に関節に対地適応性を高めた新しい２自由度屈曲駆動機構を導入することで解決している点などである．さらに本章ではこれらの考察を基に新たな機械モデルの仕様と設計を論じ，第３次機械モデル「蒼龍Ⅲ号機」を製作した。そしてその駆動走行実験によって試作した蒼龍Ⅲ号機は十分実用に供し得る性能を有することを明ら

かにした.

第５章「気密型の索状能動体 HELIX の機構と運動制御」では，汚泥を含む劣悪な環境下において優れた耐環境性と運動性を発揮すると考えられる能動関節－非能動推進器型の索状能動体の機構と運動制御を論じた．まず索状能動体の水中遊泳方法としては，一般的にはウナギや海ヘビなどが行う蛇行遊泳推進がこれまで研究されているが，本論文では微生物のスピロヘータが行う体幹全体を螺旋形にして回転推進するこれまで工学的にはまったく注目されていなかった遊泳運動に着目した．そして，このスピロヘータ型の推進は体幹の一部のみを推進力生成に使用する蛇行遊泳運動と比較すると，全ての体幹が推進力生成に等しく寄与する遊泳体型であるため工学的に実現すれば高性能な遊泳体を実現できる可能性があることを指摘し，その基本的な推進力生成メカニズムを解析的に明らかにした．ついでこのような水中遊泳を行う索状能動体を実現するために，小型軽量で完全気密型の２自由度屈曲関節の設計法を検討し，新しいベローズ密閉型の改良ユニバーサル駆動機構を提案した．さらにこの関節機構を 10 ユニット連結した索状能動体 HELIX-I を開発し，その遊泳実験から導入したスピロヘータ型の推進理論の妥当性を検証し、あわせてこの遊泳法の有効性を明らかにした.

よって本論文は災害時の瓦礫内探査等には細長い形状で能動的に屈曲できるヘビ型推進体である索状能動体が有効であることを示し，必要とされる不整地踏破性や耐環境性等に基づくその具体的な設計手法を明確化し，「蒼龍」「HELIX」の２種類の機械モデルの機構設計と運動制御を論じ，試作した４体の機械モデルの動作実験により，提案する手法が不整地移動として有効であるという結論を得た.

6.2 今後の課題

本論文では提案する移動手法を試作機による基本動作実験によりその有効性を明らかとしたが，今後は実際の運用まで含めて研究を進めていく予定である.

能動関節－能動推進器型の索状能動体「蒼龍」に於いては以下の課題が挙げられる.

１）蒼龍Ⅲ号機に搭載する能動駆動式通信線リールの開発を行う

本論文でも述べた様に，蒼龍Ⅲ号機は能動駆動される通信線リールを車体内に搭載する様に設計されている．そのため能動駆動式の通信線リールを開発し，蒼龍の推進に伴う通信線の放出巻取りの制御方法や，リールを能動的に利用した各種動作方法等についての研究を行う.

２）蒼龍Ⅲ号機に搭載する遠隔操縦用の駆動式カメラの開発を行う

蒼龍Ⅲでは周囲を見渡す事ができるように旋回式のカメラを取り付けるが，このカメラは旋回だけではなく上下方向に伸縮する物であれば観測可能な空間が広がる等の利点がある．こうした事からこのカメラをどのような自由度を持たせるか，また操縦者はどのような操作系でその操作を行うのが利用しやすいかなどのインターフェイスに関しても研究を

行う．

３）蒼龍Ⅲ号機を用いて床下環境での走行実験を行い，床下探査機器としての改良を行う

蒼龍Ⅲ号機は床下点検に利用可能な走行性能を示すことが確認された．しかし床下点検作業では腐食等を確認する為にはビデオカメラでは解像度が足らないため，高解像度のカメラ等を搭載する必要がある．そこでこうした目的に応じた改良を行う．

４）蒼龍を用いて様々な環境下での走行実験を行い，問題点の改良を行う．

床下点検以外にも蒼龍の様な不整地移動ロボットの一般需要がることは本論文中でも述べたとおりである．こうした多くの環境で蒼龍を用いた移動実験を行う事でこれまでにわからなかった様々な問題点が判ってくる可能性が有る．よって様々な環境での走行実験を行い，改良を行っていかなければならない．

能動関節－非能動推進器型の索状能動体「HELIX」に於いては以下の課題が挙げられる．

１）スピロヘータ型螺旋回転型遊泳とヘビ型蛇行遊泳に関するより定量的な比較を行う．

本論文ではスピロヘータ型螺旋回転型遊泳とヘビ型蛇行遊泳の効率等に関する定量的な比較までは至っていないためこれを行う．

２）スピロヘータ型螺旋回転型遊泳の最適遊泳形状に関する検討を行う．

HELIXを用いて遊泳形状と遊泳速度に関する実験を行い，理論値との比較を行い最適遊泳形状に関する検討を行う．

３）索状能動体HELIXの水掻き板の取り付け角度に関する実験を行う．

本論文では水掻き板の取り付け角度は工学的には真っ直ぐに取り付ける物が良いという結論を得たが，理論値では僅かに傾いている物が最も効率がよいという結論が得られている．そのため水掻き板の角度を傾けた物を製作し，遊泳実験により理論値との比較を行う．

４）索状能動体HELIXの水中での自在な操舵制御システムを導入し遊泳実験を行う．

現段階ではスピロヘータ型螺旋回転型遊泳は前後進のみしか行っていないが，移動ロボットとしてこれを利用する場合には自在に進行方向を変えられなければならない．そこで螺旋回転を行いながら旋回運動を行う運動制御方法を考案し，HELIX-Iにこれを実現する制御システムを導入して遊泳実験を行う．

５）索状能動体HELIXに水中遊泳から陸上推進へ境目のない移行を行う．

能動関節－能動推進器型の索状能動体の利点は水陸両用の移動体となり得る点である．よってHELIXを用いて水中と陸上での境目のない移動を行い，水陸両用型の移動ロボットとして利用可能であることを示す．

謝辞

本論文の執筆にあたりまして，細部にわたる御指導をしていただきました東京工業大学機械宇宙システム学科学科広瀬茂男教授と，研究生活を支援していただきました両親に謹んで御礼申し上げます．そして本研究を進めるにあたり多くの討論を持っていただいた東京工業大学機械宇宙システム学科学科米田完助教授に深く感謝いたします．また本論文について御討論していただきました杉本浩一先生，小俣透先生，山北昌毅先生に深く感謝いたします．また本研究において多くの助言をしていただいた機械宇宙システム学科 福島 E. 文彦 助手に厚く御礼申し上げます．さらに本研究の実験を手伝っていただきました共同研究者の新井雅之氏(M2)と，広瀬・米田研究室メンバーに感謝いたします．また試験機の製作に尽力していただきました（株）小野電機製作所の方々に感謝いたします．くわえて国際レスキューシステム研究機構の方々に感謝の意を表します．

なお本研究は文部科学省科学研究費(COE 形成基礎研究費スーパーメカノシステム)を使用して行われました．

参考文献一覧

[1]片岡隆夫;”[招待講演]震災時における救助活動の実際とレスキュー機器の考察”,日本機械学会[No97-15]第 2 回 JSME ロボメカ・シンポジア講演論文集,pp45-50,1997

[2] Inuktun Services Ltd., http://www.inuktun.com/

[3]株式会社バーナム, http://www.burn-am.com/

[4]川崎地質株式会社, http://www.kge.co.jp/Gijyutsu/Chikagoh/Chikagoh.htm

[5]鶴谷三郎,鈴木昭二,高梨伸彰,小野口一則,長田典子:”レスキュー活動における生存者探索技術”, 日本機械学会[No97-15]第 2 回 JSME ロボメカ・シンポジア講演論文集,pp31-34,1997

[6]高橋秀実，木村実，山田修，内藤宏之，佐野令面；“移動ロボット用 CO2 レーザレーダ３次元視覚センサ”，日本ロボット学会誌, Vol. 8, No. 4, pp. 385-389, 1990

[7]高梨伸彰;”超音波アレイセンサ”，日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 7, pp. 900-901, 1991

[8]森川泰,小森谷清,安達弘典;”自律型無人ヘリコプターの試作機体開発”,ロボティクス・メカトロニクス講演会’03,2P2-2F-A5,May,2003

[9] 羽田靖史福田靖,川端邦明,嘉悦早人,倉林大輔,後藤昇弘,淺間一;”被災者探索システム用飛行船の自律制御系の設計”,第 21 回日本ロボット学会学術講演回,1L28,2003

[10] E. F. Fukushima, N. Kitamura and S. Hirose,“Development of tethered autonomous mobile robot systems for field works”, Advanced Robotics, Vol. 15,No. 4, pp. 481-496, 2001.

[11] Paulo Debenest, Edwardo F. Fukushima, Shigeo Hirose; ”Development and Control of a Buggy Robot for Operations on Unstructured Terrain”, IROS’02, pp.763-768, 2002.

[12]日本機械工業,http://www.nikki-net.co.jp/shikizai/bokame/bokame.htm

[13]Daisuke Mishima, Takeshi Aoki, Shigeo Hirose;”Development of Pneumatically controlled Expandable Arm for seach in the Enviroment with Tight Access”,FSR2003, pp315-320, (July 14-16, 2003)

[14]Ato Kitagawa,Hideyuki Tsukagoshi,Masaki Igarashi;”Development of Small Diameter Active Hose-II for Serch and Life-prolongation of Victims under Debris”,Jurnal of Robotics and Mechatronics,Vol5 No.5,pp474-481,2003

[15]長井庸二,”レスキュー機器の現状と展望”,日本機械学会[No97-15]第 2 回 JSME ロボメカ・シンポジア講演論文集,pp51-54,1997

[16]Y. Xiong,L. Matthies;“Vision-Guided Autonomous Stair Climbing”,IEEE International Conference on Robotics and Automation , pp1842-1847,San Francisco, California, April 2000

[17]高島雅之,高森年,池内彰博,高島志郎,小林滋,山田雅俊;”レスキュー探査ロボット UMRS-IV による群探査のためのシミュレータとヒューマンインターフェースの設計・開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’03,2A1-2F-B6,May,2003

[18]Jeremy M. Morrey, Bram Lambrecht, Andrew D. Horchler, Roy E. Ritzmann, Roger D. Quinn;”Highly Mobile and Robust Small Quadruped Robots”, IROS 2003, pp.82-87,Las Vegas,

October 2003
[19]塚越秀行,佐々木正志,北川能;”空圧ジャンピングの基本特性”,日本ロボット学会第20回学術講演会,1J16,October 2002
[20]National Geographic 日本版,1997年7月号,pp138-139
[21]上川健司,新井健生,井上 健司,前 泰志;”センサを用いたリムメカニズムの全方向不整地歩容”,日本ロボット学会第21回学術講演会,1L18,Sep 2003
[22]広瀬茂男;”生物機械工学”,工業調査会,1987
[23]木村仁,清水圭輔,広瀬茂男;”連結型多車輪移動ロボット玄武の機構と制御”,ロボティクス・メカトロニクス講演会’03, 2P1-2F-B7, May,2003
[24] Shigeo Hirose, Takaya Shirasu, Fumihiko E. Fukushima: “A proposal for Cooperative Robot "Gunryu" composed of autonomous segments”, IROS1994, Munich, pp.1532-1538 (1994)
[25]木幡康之,加藤晋,西山榮枝;”小型探索レスキューロボット「JYU-RON」の研究”,第16回日本ロボット学会学術講演会,pp1151-1152,Sep,1998
[26] 京成バス株式会社 http://www.keiseibus.co.jp/
[27] Makoto MORI, Shigeo HIROSE :”Three-dimensional serpentine motion and lateral rolling by Active Cord Mechanism ACM-R3”, IROS2002, Lausanne, pp.829-834,(2002)
[28] H.Ohno,S.Hirose;”Design of Slim Slime Robot and its Gait of Locomotion”, Proc.of the IROS2001, pp707-715, (2001)
[29]布引雅之,長谷川素由,奥田孝一,滝田好弘,古瀬信浩;”尺取虫型人命探索ロボットの狭路移動に関する研究”,第16回ロボット学会学術講演会予稿集,pp.1149-1150.(1998)
[30]北島寛,正大須賀公一;”Mobile Inspection Robot MOIRA with 4 Sides Crawlers for Rescue Activity”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’03, 1P1-2F-B4, May,2003
[31] Akio Morishima,Shigeo Hirose;”Study on Articulated Mobile Robot Introduction and Experiment in Perspective Control”, Journal of Robotics and Mechatronics,Vol.15 No.1,pp70-76 (2003)
[32]亀川哲志,山崎達弘,五十嵐広希,松野文俊;”車両多連結ヘビ型レスキューロボット KOHGA の開発”,第21回ロボット学会学術講演会予稿集,1L14.(2003)
[33]Craig Eldershaw, Mark Yim, Ying Zhang, Kimon Roufas, Dave Duff ; “Motion planning with narrow C-space passages”, IROS2003, Las Vegas, October 2003, pp.1608-1613
[34]内田康之;”不整地走行車輪の検討と6輪型対地適応走行車HELIOS-Vの開発”, 東京工業大学平成11年度学位論文
[35]米田完、太田祐介、広瀬茂男;“粉体の変形特性を利用したハイグリップクローラの開発”,日本ロボット学会誌,Vol.15No.8, pp.1183-1193 (1997)
[36]林磐男;”タンクテクノロジー”,山海堂,1992
[37] http://www.miraikan.jst.go.jp/
[38]福島，広瀬，北村：“ハイパー･テザーの研究その6 ウィンチの試作とテザー遠隔駆動

作業機の位置制御実験”，第17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.379-380 (1999)
[39]広瀬茂男，塚越秀行，米田完；“不整地における歩行機会の性的安定性評価基準”，日本ロボット学会誌，Vol.16 No.8，pp1076-1082(1998)
[40] Gen ENDO, Keiji TOGAWA, Shigeo HIROSE: “Study on self-contained and Terrain Adaptive Active Cord Mechanism”, Proc. of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp1399-1405, 1999
[41] Keiji TOGAWA, Makoto MORI, Shigeo HIROSE, ”Study on Three-dimensional Active Cord Mechanism: Development of ACM-R2”, Proc. of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp2242-2247, 2000
[42]小林俊一：“屈曲運動生物を模倣した水中推進機構の推進力特性”，日本機械学会論文集(Ｂ編)60 巻 579 号，pp23-27，1994
[43]James P.Ostrowski, Joel W.Burdick:“The geometric mechanics of undulatory robotic locomotion”, International Journal of Robotics Research, vol.17(7), pp683-702, July 1998
[44]Kenneth A.McIsaac, James P.Ostrowski: “Motion Planning for Dynamic Eel-like Robots”, Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp1695-1700
[45]遠藤玄,外川圭司,広瀬茂男:”索状能動体に関する研究-システムの自立化と対地適応推進-”,日本ロボット学会誌 Vol.18,No.3,pp419-425, 2000
[46]三橋進,川上正也,橋本一,原田賢治:“Illustrations : Bacterial Infections <目で見る細菌感染症>”，群馬大学医学部微生物教室
[47]曲山幸生,後藤知伸;”高分子溶液中におけるらせん状細菌の遊泳速度の理論解析”,ロボティクスメカトロニクス講演会’02,2A1-H01,2002
[48]高山俊男,広瀬茂男;”螺旋推進を行う索状能動体 HELIX の研究”,第 18 回日本ロボット学会学術講演会,2F14,2000
[49]高山俊男,広瀬茂男:”水中螺旋推進を行う索状能動体の機構と構成”,ロボティクスメカトロニクス講演会’01, 1A1-A12,2001
[50] http://www.res.titech.ac.jp/~seibutu/
[51]広瀬茂男：“ロボット工学”，裳華堂，1987
[52]機械設計便覧編集委員会編：“機械工学便覧（第３版）”，丸善
[53]田中一朗,長井寛；“抵抗と推進の流体力学”，シップ・アンド・オーシャン財団

研究業績

印刷論文

[1]Toshio TAKAYAMA, Shigeo HIROSE; “Development of “Souryu I & II” -Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space-“, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol15, No.1, Feb.2003, pp61-69

[2]高山俊男, 広瀬茂男 ;“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.6 掲載予定

査読付国際学会

[1]Toshio TAKAYAMA, Shigeo HIROSE; ” Development of Souryu-I -Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space-“, IECON-2000, Nagoya, October 2000, pp143-148

[2]Toshio TAKAYAMA, Shigeo HIROSE; ” Amphibious 3D Active Cord Mechanism HELIX with Helical Swimming Motion”, IROS 2002, Lausanne, October 2002,pp775-780

口頭発表

[1]高山俊男, 広瀬茂男 ;“瓦礫内推進連結クローラ走行車「蒼龍 I 号機」の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’98, 仙台, 1998 年 6 月, 1CI4-1

[2]高山俊男, 広瀬茂男 ;“瓦礫内螺旋推進ロボット「HELIX」の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’00, 熊本, 2000 年 5 月, 2P1-54-131

[3]高山俊男, 広瀬茂男 ;“螺旋推進を行う索状能動体 HELIX の研究”,
第 18 回日本ロボット学会学術講演会, 草津,2000 年 9 月,pp729-730

[4]高山俊男, 広瀬茂男 ;“水中螺旋推進を行う索状能動体の機構と構成”,
ロボティクス・メカトロニクス講演会’01, 高松, 2001 年 6 月, 1A1-A12
[5]Toshio TAKAYAMA, Shigeo HIROSE ; ” Development of HELIX: a Hermetic 3D Active Cord Mechanism with Novel Spiral Swimming Motion”, TITech COE/ Super Mechano-System Symposium 2001, Yokohama, November 2001,HRS4(D3)

[6]Toshio TAKAYAMA, Shigeo HIROSE; “Development of “Souryu I & II” -Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space-“, TITech COE/ Super Mechano-System Symposium 2001, Yokohama, November 2001,HRS13

[7]高山俊男，広瀬茂男；“水中螺旋推進を行う索状能動体"HELIX"の開発”，ロボティクス・メカトロニクス講演会’02，松江,2002 年 6 月，1A1-L07

[8]高山俊男，広瀬茂男，新井雅之；“瓦礫内推進連結クローラ走行車「蒼龍Ⅲ号機」の開発”，ロボティクス・メカトロニクス講演会’03，函館，2003 年 5 月，2P1-2F-B5

出願特許

[1]広瀬茂男，高山俊男；“連結車両の車間連結機構“，理工学振興会 出願番号 2003-144865，出願日 2003.05.22

その他の業績

[1]国立科学未来館 常設デモ展示用ロボット「蒼龍Ⅱ号機」の製作