

多足類の形態学的特徴を模擬したロボットの実現と
そのロコモーションに関する考察

2021 年

岡山理科大学大学院
工学研究科
システム科学専攻

宮本 直輝

多足類の形態学的特徴を模擬したロボットの実現と
そのロコモーションに関する考察

2021 年

岡山理科大学大学院
工学研究科
システム科学専攻

宮本 直輝

目次

第1章	序論	1
1.1	多足類の形態と歩容	1
1.2	多脚ロボットと構成論的アプローチ	1
1.3	身体性, 形態学的計算, 陰陽制御	2
1.4	研究目的	3
第2章	小型軽量な多足類ロボットの開発	5
2.1	基本アイデア	5
2.1.1	i-CentiPot P (implicit brain centipede robot prototype)	6
2.1.2	駆動機構	7
2.1.3	体節の構成	7
2.1.4	可撓性シャフト (Torque Coil)	8
2.1.5	脚	8
2.2	歩行実験	9
2.2.1	体幹のうねりについて	9
2.2.2	屋外実験	11
2.3	結言	12
第3章	i-CentiPot 壱号機の開発とその歩容	13
3.1	i-CentiPot 壱号機	13
3.1.1	駆動メカニズム	13
3.1.2	体節	13
3.1.3	柔軟脚	14
3.1.4	i-CentiPot 壱号機の仕様	14
3.2	脚の波と胴部のうねりについて	15
3.3	屋外実験	18
3.4	結言	19
第4章	操舵機能を持つ i-CentiPot 弐号機の開発とその歩容	21
4.1	i-CentiPot 弐号機の概要	21
4.2	能動湾曲機構	22
4.2.1	能動湾曲機構の性能評価	23
4.3	位相変更に伴う移動速度の変化	26
4.4	屋外試験	28
4.5	結言	29

第5章	触覚機構と自律移動	30
5.1	ムカデの触覚	30
5.2	触覚機構	30
5.3	触覚による湾曲動作	31
5.4	触覚を用いた実験	32
5.4.1	障害物に対する回避行動の検証	32
5.4.2	触角機構による歩行の差異	33
5.4.3	実験で生じた問題点と改善策	34
5.5	障害物への衝突に対する検証	35
5.5.1	試験方法	35
5.5.2	実験結果	36
5.6	結言	36
第6章	モーションキャプチャを用いた i-CentiPot の歩容解析	37
6.1	モーションキャプチャを用いた計測	37
6.2	実験	38
6.2.1	脚の接地点と胴体のうねり	38
6.2.2	胴体の振動	41
6.3	結言	42
第7章	脚の密度を向上させた i-CentiPot 参考機	43
7.1	i-CentiPot 参考機	43
7.2	実験	45
7.2.1	i-CentiPot 参考機の歩容	45
7.2.2	歩行時の滑りについて	46
7.3	結言	48
第8章	多足類と i-CentiPot の持つ不気味さについて	49
8.1	不気味の要素	50
8.1.1	体表の状態	50
8.1.2	形態	50
8.1.3	動き	50
8.1.4	その他	51
8.2	i-CentiPot の不気味さ	51
8.2.1	移動環境と不気味さ	52
8.2.2	i-CentiPot 02 W : 脚と不気味さ	53

8.2.3 i-CentiPot 参考機：脚の密度および滑りと不気味さ	53
8.3 アンケート	53
8.3.1 アンケート 1 回目	53
8.3.2 アンケート 2 回目	54
8.4 結言	55
第9章 動力学モデルによる多足類の運動解析	57
9.1 動力学モデル	57
9.2 数値シミュレーション	59
9.2.1 脚の角振動数に対する歩容の変化	59
9.2.2 脚の位相差と胴体のうねりの関係	62
9.3 結言	63
第10章 結論	64

第1章 序論

生物は予測不能で時々刻々変化する環境で適応的な移動を行うことができる。その中でもムカデやゲジ、ヤスデなど多足類は、移動時に地面に対して離散的に脚を接地するため、凹凸地形等において高い移動能力を持つだけでなく、胴部を伸縮させることで土壤に潜ったり、ヘビのように胴部をうねらせながら泳いだりするなどさまざまなロコモーションをみせることが知られている。この多足類の持つ高い移動能力、さらには移動のための知能は非常に興味深く、これまでに生物学だけでなくロボット学の視座から考察する試みがなされてきた。

1.1 多足類の形態と歩容

多足類（多足亜門）は唇脚綱（ムカデ綱）と倍脚上綱（ヤスデ上綱）に分けられる。多足類において代表的なムカデ（ムカデ綱）は一般に1体節に1対の脚を持ち、体節側面から左右にのびるように配置される形態をもつ。脚の運動は基本的に左右逆相で、連続する脚については、オオムカデ目やジムカデ目において前から後ろに伝播する後退波、ゲジ目やイシムカデ目で進行波を発生させる。また、この脚の波に合わせて胴部をうねらせながら移動する[1,3]。Manton [2]は、このうねりが脚の運動によって発生し、移動速度が高速になるにつれて振幅が増幅することを観察した。その結果、うねりは受動的であり、移動速度の上昇に従ってこれを抑制するためにエネルギーを消費しなければならず非効率的であると考察した。これに対し Anderson ら[4]は、オオムカデ（*Scolopendraheros*）の胴部にある筋肉の筋電位を計測し、オオムカデはうねりを能動的に発生させていることを示し、機構的に後退波とうねりが歩幅を増幅させるなどの利点を持つのかどうか明らかにすべきであると述べている。

ヤスデ（ヤスデ綱）は一般に頭部に近い体節に1対の脚を持つが、その他の体節はムカデと異なり2対の脚を持つ。脚は体節下部から側方にのびるように配置され、胴部からはみ出す場合や、胴部の下方に隠れる場合など横方向の長さには様々な形態が存在する。ヤスデが移動する場合、基本的に左右同相で、後ろから前に伝播する進行波を脚に発生させる[5]。このとき、胴部は基本的にうねりを生じない。また、ヤスデは胴部を伸縮させることで土壤内に潜るといったロコモーションも有する[6]。

1.2 多脚ロボットと構成論的アプローチ

多足類は多脚で細長い形態学的特徴を有するため、接地点が離散的に分布することから地面の凹凸に対して形態学的に適応可能であるだけでなく、脚の切断などに対してもロバストである。したがって、移動性能の高いロボットを実現するために、多脚を有する様々なロボットが開発されてきた。例えば Koh ら[7]は、胴体にある程度柔軟性を持たせ、剛体としての脚を回転させることで NIST 標準規格や礫で覆われた不整地上を移動することが可能な 24 脚ロボットを実現している。しかし、このような生物の特徴（細長く多くの脚を持つ）を模倣してロボットを開発する研究は、不整地での高い走破性を持

つ移動機構の開発に主眼が置かれているため、ロボットがどのような歩容を示し、実際のムカデとどのような関係にあるのかという報告はされていない。

このような生物から学ぶというロボット工学的な研究に対し、ロボットをつくることで生物の知能を理解する構成論的な研究手法[8]が注目されている。前節で述べた多足類の歩行メカニズムを解明する生理学的研究のように、運動の映像や筋電位などの生体信号を計測するだけでは脚の制御方法や知能的振る舞いの源泉を理解ことはむずかしい。このような問題に対し、生理学的、解剖学的な知見に基づいてロボットを構成し生物と同様の振る舞いが再現されるかどうか検証するのが構成論的アプローチである。

例えば、実際のムカデの歩容と比較した研究として、MEMS 技術で実現された極めて小型のロボットで Hoffman らの結果[9]がある。彼らはピエゾアクチュエータによって駆動される脚の後退波（頭部から尾部へ移動する波）で受動的な胴部にうねりが創発され、胴部のうねりが移動速度を増加させるという実際にムカデが示すロコモーション[3]と同様の興味深い結果を示している。しかし、ピエゾアクチュエータの駆動には外部電源が必要で、平面上における歩行のみしか示されていない。また、脚の波の進行方向とうねりの関係についての考察はなされていない。また、形態や外部電源の必要性から、自然環境において移動することは困難であるものと思われる。動力学モデルに基づく数値シミュレーションとして、安井らは路面からの接地感覚をフィードバックする単純な位相振動子を用いてサジタル面内の2次元モデルにムカデと類似した歩容を実現するとともに、脚の切断に対する適応性を示している[10]。さらに、水平面内の2次元モデルを用いて水面におけるロコモーションへの切り替えに関する考察も行っている[11]。

ヤスデの研究として加納ら[12]は、歩行時の脚間協調を実現する自律分散的な位相振動子を提案し、ロボットに実装することでヤスデが見せる環境の凹凸や部分的な脚切断に対する適応性を再現し、ヤスデの歩容と比較することでその有効性を検証している。得られた結果は環境と相互作用することで得られる感覚情報をフィードバックするだけで、自律分散的に歩容が創発することを示し、さらにヤスデに見られる適応的振る舞いを再現した点は非常に興味深い。しかし、ロボットは能動的に脚を動作させるためにヤスデが持つ形態学的特徴としての滑らかさや柔軟性を持っていないため、自然環境において自律的に移動させるためには新たな機構が必要となるものと考えられる。その他にヤスデの脚波と移動方向に関する数理的考察[13]や、ヤスデの伸縮による移動についての考察[14]なども行われている。

1.3 身体性、形態学的計算、陰陽制御

上述したように多足類は形態に依存したロコモーションを用い、無限定環境下において自在に行動することが可能である。しかし、ムカデやヤスデの脳は非常に小さく、脚をどのように動かすのか細かく制御しているとは考えにくい。また、無限定環境下で移動する場合、移動を妨げる要因をすべて想定することは不可能で、小さな脳というリソースで想定できる事象も少ない。このような問題に対し、Pfeifer ら[8]は、知能には脳だ

けでなく身体と環境との相互作用が必要であるという身体性を提唱するとともに、身体の形態学的特徴が脳神経系の計算を分担（形態学的計算）し、その負荷を低減していると述べている。さらに、大須賀[15]は、この身体と環境との相互作用の中には制御則（陰的制御則）が隠れており、それによって無限定な環境でもうまく制御（本論文の主題では脚による移動）が可能となるとしている。したがって、高度な知能（明示的な制御としての陽的制御）ではなく知能が生まれる源泉「知能の源泉」が身体と環境との相互作用、さらに踏み込んで環境にあるとし、明示的な知能を可能な限り排除することで知的な（に見える）振る舞いがロボットによって実現できるのかどうか検証することの必要性を説いている。

1.4 研究目的

本論文では、これまでに述べてきた多足類の持つ形態学的特徴が見せる知能的な振る舞いとしての歩容に注目する。多足類はその細長い胴体と多脚、なめらかな形状および柔軟性という形態学的特徴を持つ。このような形態学的特徴を巧く利用することで比較的小型かつ軽量のロボットを構成し、多足類に見られる歩容と比較することで形態学的特徴がどのような役割を果たしているのか考察する。特に、大須賀が述べている[15]ようにできる限り明示的な知能を取り除くことで、ほぼ形態学的特徴のみによって自律的に移動可能なロボットを実現する。また、自然環境でどのように移動するのか、つまり、単純な形態学的特徴と自然環境との相互作用でどのような振る舞いをみせるのか実験により明らかにする。さらに、動力学モデルを構築し、脚の動きと歩容の関係を詳細に解析する。多足類の移動能力は工学的にも有用である。そこで、実現される多足類の形態学的特徴を再現したロボットに自律移動性能の向上を目的とする機構を導入し、その有効性を検証する。

本論文の構成を以下に示す。

まず第 2 章では、比較的小型・軽量でムカデの形態を模擬した多足類ロボット *i-CentiPot P* の開発について述べる。具体的には、試作機の設計方針やメカニズムについて述べ、環境と脚が接地することによって胴部にうねりが発生することを実験により示す。

i-CentiPot P で生じた問題点を解消するために、第 3 章では、球面関節で体節を連結しなめらかな表面形状の胴体と柔軟脚を持つ *i-CentiPot* 弐号機について、さらに第 4 章では、胴部前方の能動湾曲機構を取り入れた *i-CentiPot* 弐号機の開発について述べ、ムカデに見られる歩容を創発するとともに、自然環境下で自律的に移動しある種の知能的振る舞いを示すことについて考察する。第 5 章では、より効率的な自律移動のために触覚機構を *i-CentiPot* 弐号機に導入するとともにその効果について検証し、第 6 章では、様々な脚配置に対して歩容が変化することについてモーションキャプチャを用いることで定量的な解析をおこなったことについて述べる。

第7章では、より自然な歩容を実現するために脚の滑りを低減する接地密度の高い脚構成の i-CentiPot 参考機の開発について述べる。また第8章で多足類の持つ不気味さについて考察し、より密集した脚と滑りの少ない歩容が不気味さにどのような影響を与えるのか検証する。

第9章では i-CentiPot の動力学モデルを導出し、数値シミュレーションによって脚の位相と振動数の変化に対して歩容がどのように変化するのか詳細に解析する。

最後に第10章で本論文の結論を与える。

第2章 小型軽量な多足類ロボットの開発

前章で述べたように、多足類が持つ機能をロボットで実現することはロボット工学的にもロボット学的にも重要である。しかし、一般に多脚ロボットを開発しようとするとき、多脚であるがゆえに脚部や胴体部の関節の機構が寸法や重量が増大し、多脚本来の優位性が失われるという問題がある。例えば、脚部や胴体部に能動関節を使用する場合、関節を駆動させるためのモータや電子デバイスを実装する必要があり、関節の数に比例して増加する。したがって、小型のRCサーボモータを用いたとしても、4脚および6脚の場合で、小さくても数十立方センチメートル、数キログラム程度の大きさとなる可能性が高い。また、実際の多足類ほどの駆動脚を持つと、幅数十センチ、長さは数メートル、重量は数十キロとなることが予想され、小型のRCサーボモータでは十分な出力を得ることができない。アクチュエータの出力を大きくすると、さらに大型で高重量になる。また、各関節を厳密に目標軌道に追従させようとするとき、関節数の増加に対して制御系が複雑となり、適応的な移動の実現をさらに難しくする。

このような問題に対し、明示的な制御を排除し、身体の形態学的特徴を巧く利用することで、駆動機構や制御系を単純化した多足類ロボットの設計手法を考える。この手法は、生物と環境の相互作用によって計算負荷が低減されるという形態学的計算という考え方に基づいている。そこで本章では、形態学的特徴を利用することでできる限り軽量かつ小型にした多脚ロボットを実現したことについて述べる。また、その移動特性と歩容、特に胴部のうねりについて考察する。

2.1 基本アイデア

多足類は複数の体節を能動的な関節で結合した胴部を有しており、この構造をロボットで再現すると大型で、高重量となることが予想される。ここで、著者らによって提案した移動機構である柔軟全周囲クローラ[16]を紹介する。柔軟全周囲クローラ (Flexible Mono-tread mobile Track : FMT) は全体を被覆した状態で上下左右方向に広範な湾曲を行える単一のクローラ型移動機構である。

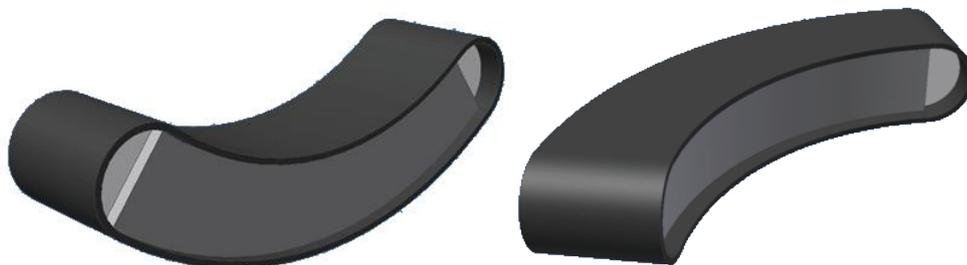


Fig.2.1 Vertical and lateral flexion of FMT

FMT は複数の椎体が 1 自由度の受動的な回転関節で連結され、機体後部に配置したモータとワイヤによる拮抗駆動によって湾曲動作を実現している。また、ワイヤにはある程度のたるみがあるため、関節が路面環境になじむように湾曲し、高い環境適応性を有している。この FMT の椎体構造から着想を得て、本研究で開発する多足類ロボットは受動的な関節で複数の体節を結合する多関節構造を用いることとした。これによって、能動的に関節を制御しなくても環境へ身体をなじませながら移動することが期待できると考える。

次に脚の駆動方法について考える。軽量化のために、脚のアクチュエータを最低限にとどめることを考える。しかし、複数の体節を結合した構造とするため体節間で動力を伝達する機構が必要となる。そこで林の提案するクローラロボットの遠隔操作機構[17]で使用されている可撓性シャフトを導入する。可撓性シャフトは屈曲時においても回転運動を伝達できるため、屈曲する関節で結合された各体節への動力伝達にこれを用いた。

2.1.1 i-CentiPot P (implicit brain centipede robot prototype)

以上の基本アイデアに基づいて多足類ロボット i-CentiPot P [18]を開発した (Fig.2.2)。i-CentiPot P は全長約 750mm, 32 本の脚と 16 体節を持つ。胴部は体節を受動関節連結することで構成され、1 体節につき 1 対の脚が配置されている。左右脚の位相差は 180° である。また、可撓性シャフトで繋がれた複数のモータを用いてすべての脚を動作させている。

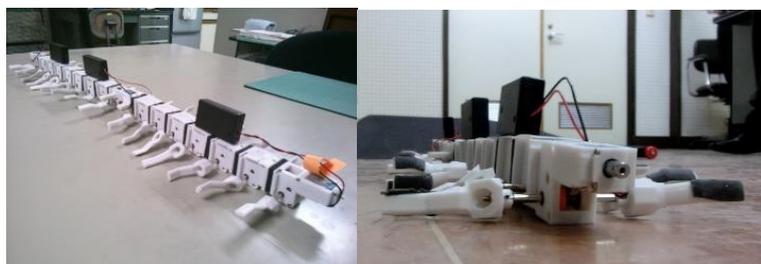


Fig. 2.2 i-CentiPot P

2.1.2 駆動機構

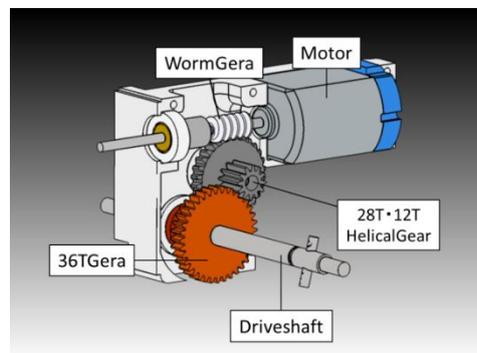


Fig. 2.3 Gear box of driving segment

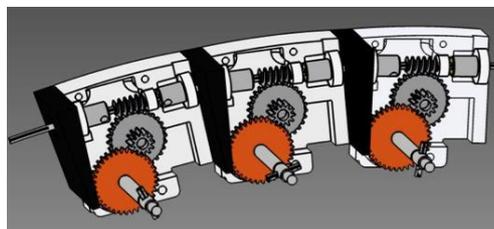


Fig. 2.4 Body segments connected by flexible shaft

Fig. 2.3 に体節の駆動機構を示す。脚の動作には DC モータ（レブチューン 2 モータ RRO, TAMIYA）を使用している。モータの仕様は、定格電圧である 3.0V 時に出カトルク 1.5mNm, 回転数 14900rpm, 消費電流 1.8A となっており, 公称トルク 126Nm, 公称回転数 14900rpm で脚を回転させることができる。直列接続されたニッケル水素電池 (3.6V, 750mAh) は, 各モータに直結され, 機械的なスイッチを使用して on/off する。モータの回転は減速比 28 : 1 のウォームギア・ヘリカルギアおよび, 減速比 3 : 1 のヘリカルギア・平歯車によって駆動軸へ 84 : 1 に減速され伝達する。Fig 2.4 に示すように, 胴部に沿った可撓性シャフトによって各体節内のウォームギアを接続し, すべての脚を同期して回転させている。

2.1.3 体節の構成

体節は Fig. 2.3 に示すモータを内蔵した駆動体節と, Fig. 2.4 に示すモータを内蔵しないアイドラ体節の 2 種類がある。これらは 3D プリントによって造型されており, 材質はポリカーボネイトである。i-CentiPot P は 3 個の駆動体節と 13 個のアイドラ体節からなり, 先頭, 前から 8 番目, 最後尾の体節が駆動体節である。また, 体節間には板厚 5mm の天然ゴムスポンジ板が貼付られ, 各関節でピッチ方向に 12.9° , ヨー方向に 19.2° の受動的な屈曲が可能となっている。

2.1.4 可撓性シャフト (Torque Coil)

体節間の動力伝達には、可撓性シャフト (トルクコイル, 朝日インテック株式会社) を採用している. トルクコイルは SUS304 および SUS316 を使用した細径多条多層コイルで, Fig. 2.5 に示すように, 前頭部から尾端まで線形な伝達特性を実現している.

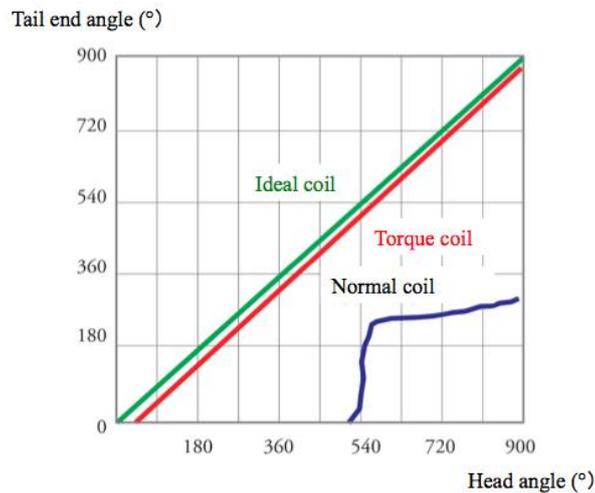


Fig. 2.5 Specification of torque coil

2.1.5 脚

Fig. 2.6 にポリカーボネート製の脚を示す. つま先と駆動軸の中心との間にはオフセットがあり, 地面との接触時に推力を発生する. 体節の両側に配置された脚は, 前述のように 180° の位相差を持っているため, Fig. 2.7 に示すように, 平らな床面上では, 胴体はロール方向に最大で 5.2° 傾斜している. このオフセットによって, 胴部に受動的なうねりが発生する. 脚は前後で 45° の位相差を有しており, 脚は地面に対して少なくとも 4 つの接地点をもつ. 脚の波は, 頭から尾部に向かって伝播する後退波となる.

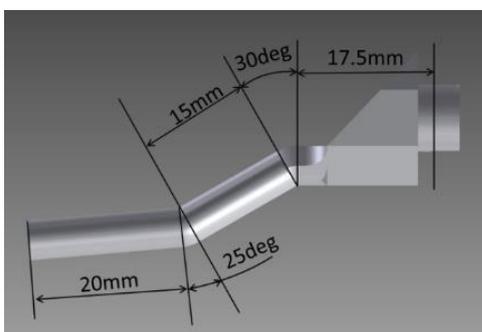


Fig. 2.6 Leg

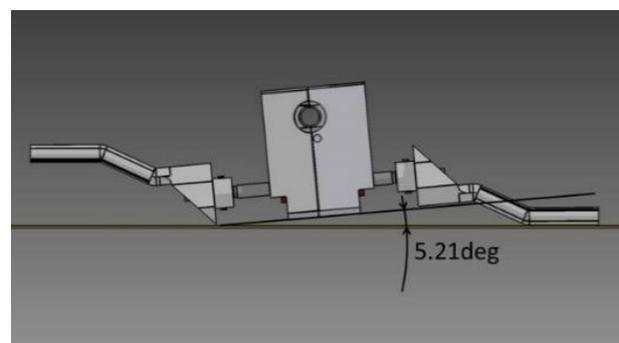


Fig. 2.7 Rotation given by a pair of leg

2.2 歩行実験

まず、緩斜面の乗り越え性能を評価する。Fig. 2.8 に歩行実験の連続写真を示す。図から、i-CentiPot P は受動的に体を湾曲させ湾曲する傾斜面に沿って登っていることがわかる。i-CentiPot P は進行方向の制御をしていないにも関わらず、自律的に方向を変えて前進、つまり障害物の回避や乗り越えを行うことができることを確認した。さらに、振幅は小さいが、脚の接地によって胴部に波が発生することを確認した。つまり、身体の機械的な受動要素が、適応的な行動をとる多足類のうねりの原因となっていることが示唆される。

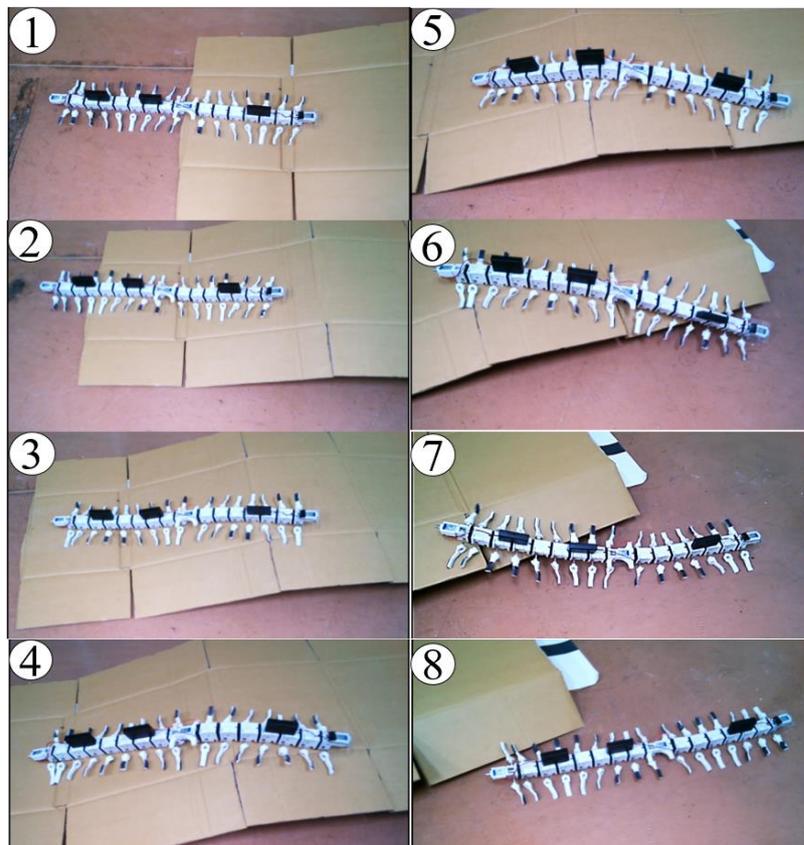


Fig. 2.8 Mobility of i-CentiPot P

2.2.1 胴部のうねりについて

次に、胴部のうねりについて述べる。Fig. 2.9 は、図の左側を進行方向とした i-CentiPot P の歩容を、Fig. 2.10 は背面から見たときの胴部のうねりを示している。Fig. 2.9 の上図において、右脚 4、5 本目が接地しており、第 5 脚の周囲の複数の体節は、中央図に比べて左側（図の下方方向）に凸状になっている。上図の右脚 13 番と中図の左脚 14 番も地面に接触しており、体節が接地している脚の反対側に凸状になっていることがわかる。こ

のような胴部のうねりの特徴は、**Fig. 2.11** に示すように実際のムカデの歩容にも見られる。なお、脚が短く、オフセットが小さいため、うねりの振幅は小さい。



Fig. 2.9 Body undulation of i-CentiPot P

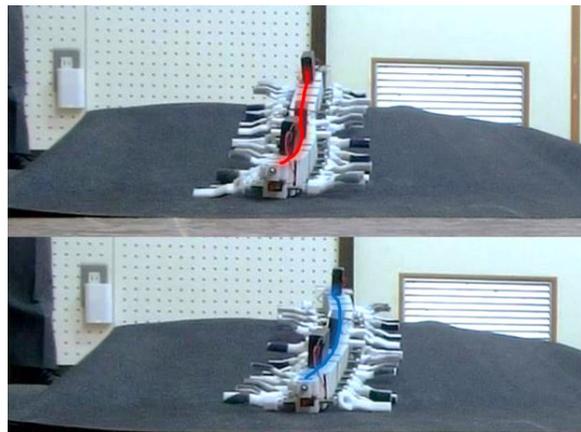


Fig. 2.10 Body undulation (rear view)



Fig. 2.11 Body undulation of a centipede

2.2.2 屋外実験

最後に、砂地での移動性能の試験について述べる。Fig. 2.12 にフィールドテストの様子を示す。歩行を開始してしばらくは進むことができたが、脚の回転が停止し、動作しなくなった。i-CentiPot P は Fig. 2.13 に示すように、体節の底部が開いているため、ギアボックスに小石（直径 0.5mm 程度）が侵入したことが原因である。また、脚が凹凸路面によって接地できず、脚の回転による推進力が十分得られないといった問題点も確認された。したがって、自然環境での移動を考える場合、路面に接地するための脚や胴体形状の設計や防塵などの改良が必要である。



Fig. 2.12 Field test (i-CentiPot P stuck in the left figure.)



Fig. 2.13 Open space in the ventral side of the body segment

2.3 結言

本章では、細長く多くの脚を持つというムカデの形態学的特徴を可撓性シャフトによる駆動機構と受動的で柔軟な胴部によってシンプルに構成することで比較的小型で軽量のロボット i-CentiPot P を実現した。実験の結果、i-CentiPot P は自律的に障害物の乗り越えもしくは回避が可能であるとともに、ムカデに見られる胴部のうねりが生じることを確認した。胴部は受動関節によって連結された構造であるため、身体と地面との相互作用がうねりを生み出していることを意味する。したがって、ムカデの形態学的特徴がある程度構成されたことで環境との相互作用が歩容に強く影響し、ムカデ示す歩容を i-CentiPot P が結果として創発したといえる。しかし、脚や胴部を始めとする機構が多足類の形態から遠く、また、水平面や簡単な傾斜面など人工的な環境でしか移動できないためそのふるまいはぎこちない。したがって、その振る舞いは多足類が見せる知能的なものとは遠いという問題がある。

第3章 i-CentiPot 壱号機の開発とその歩容

前章で述べた i-CentiPot P は細長く多脚で胴部が受動的に湾曲するという多足類の形態学的特徴を構成することでムカデが示す胴部のうねりを持つ歩容や簡単な障害の自律的回避などが実現された。しかし、胴部形状がなめらかでない、脚の柔軟性がないなど形態学的に多足類から遠いため、自然環境での自律的な移動など多足類が見せる知能的なふるまいは見られないという問題点が残されていた。

本章では i-CentiPot P の問題点を解決するために、多足類、特にムカデの形態学的特徴をさらにとりいれた i-CentiPot 壱号機[19]の実現と自然環境におけるふるまいおよび歩容の解析について述べる。

3.1 i-CentiPot 壱号機

多足類の形態学的特徴として以下の4点を挙げるができる

1. 細長い胴体
2. 多脚
3. 胴体表面がなめらか
4. 胴体や脚は柔軟性を持つ

i-CentiPot Pは、特徴1, 2を持つが、3, 4の滑らかさや柔軟性については再現できていなかった。そこで、新たな試作機i-CentiPot壱号機は胴体表面を関節も含めてできる限り突起のないなめらかな形状とし、脚は柔軟素材を用いて作成することでより多足類の持つ形態に近いロボットを実現する。

3.1.1 駆動メカニズム

壱号機の脚駆動メカニズムは基本的にi-CentiPot Pと同じである。モータは高出力のハイパーダッシュモータPRO (TAMIYA) とし、負荷を低減するために2~3体節に一つとなるように合計6個用いている。また、これらのモータはリレー (G5LE-14) を介して同時に起動することができる。モータの回転は1/84に減速し脚を駆動する。このDCモータを1セルのLiPoバッテリーに対して2個直列結合すると平地移動時の脚の回転数は154rpmとなる。

3.1.2 体節

壱号機はギアボックスを被覆することで砂などの粒子の侵入を低減している (Fig. 3.1 左)。また路面の凹凸の影響を低減するために、多足類の持つなめらかな表面形状を実現している。さらに、各体節は球面関節で連結することで胴部全体がなめらかに連結される (Fig.3.1 右)。この球面関節は天然ゴムスポンジによって結合することにより、上下左右方向に最大約 30°湾曲可能である。これは i-CentiPot P と比較して湾曲範囲がおおよそ50%拡大されたことを意味する。

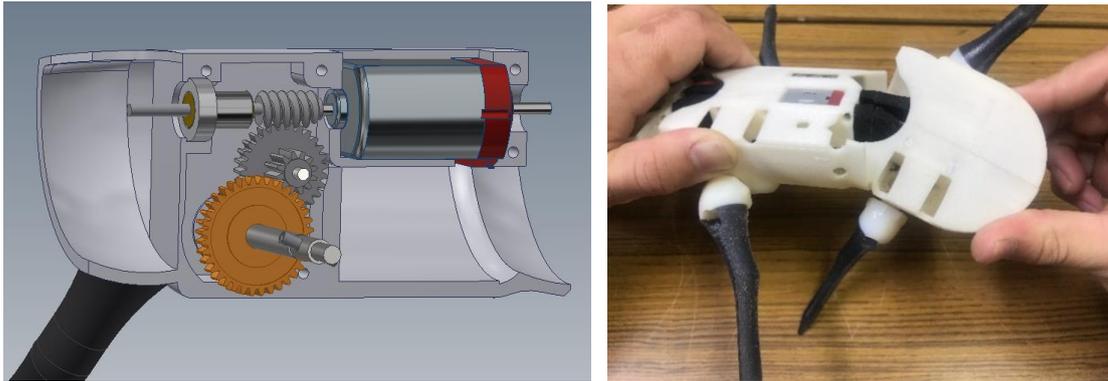


Fig.3.1 Actuation mechanism for a segment (left) and spherical joint (right)

3.1.3 柔軟脚

i-CentiPot P の脚は固く，狭隘空間や自然環境では障害物への衝突や引っかかりにより移動が不可能となるという問題があった．また，凹凸面で脚が路面から離れ推力を十分に発生することができないという問題も生じている．このような問題を解決するために，**Fig. 3.2** に示す熱可塑性エラストマを用いた柔軟脚を導入した．柔軟脚は障害物に接触すると湾曲することでこれを回避することが可能で，さらに，回転中心とのオフセットを大きくとることで凹凸路面からも十分な推進力を得ることが可能となる．また，駆動軸との連結部は固く，路面接地部は柔らかい構造を実現するために，脚先端に向けて柔らかさが3段階で変化する構成となっている．

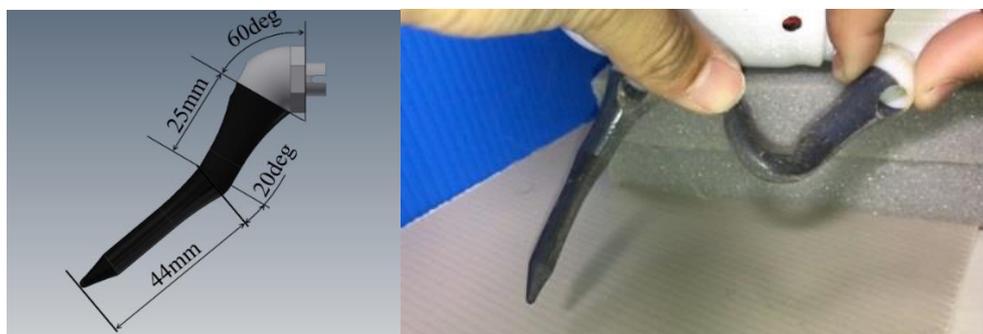


Fig. 3.2 Flexible leg

3.1.4 i-CentiPot 壱号機の仕様

Fig 3.3に実現した多足類ロボットi-CentiPot壱号機を示す．壱号機は16個の体節と32本の脚を持ち，全長1.23m，脚を含む幅は185mm，高さ60mm，重さ1.7kgとなっている．スマートフォンなどでWiFiを経由してマイコン（ESP WROOM2）を動作させ，リレーによって脚の回転をオンオフすることが可能である．

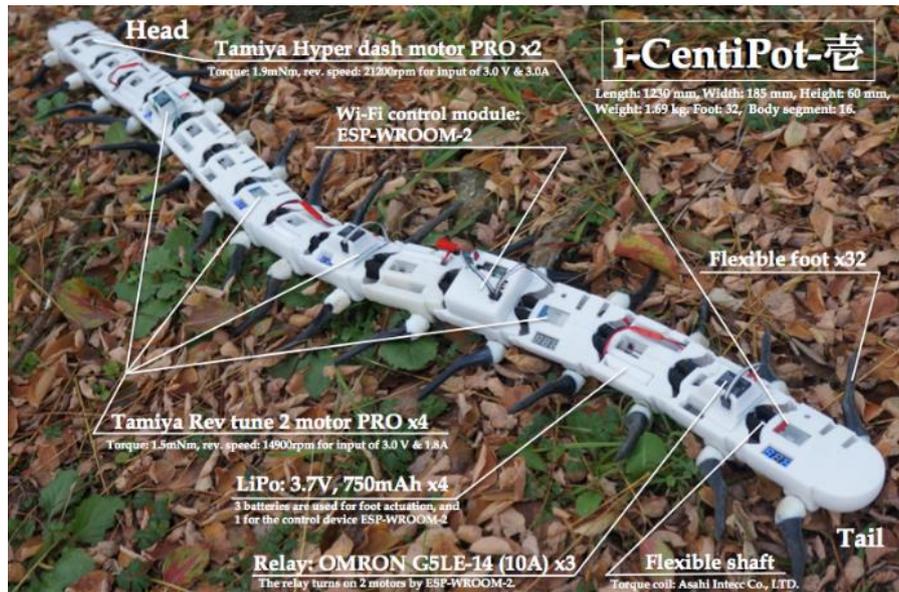


Fig. 3.3 i-CentiPot 01

3.2 脚の波と胴部のうねりについて

i-CentiPot 壺号機は脚の位相を変化させることで歩容を変化させることが可能である。i-CentiPot を右側面から見て反時計回りを正とし、 i 番目の脚の角度を φ_i とすると以下のような脚の動きが実現できる。

- 1) 前後位相差 $\varphi_{i+1} - \varphi_i < 0$ の場合、脚は後退波を発生 (Fig. 3.4 左)
- 2) 前後位相差 $\varphi_{i+1} - \varphi_i > 0$ の場合、脚は進行波を発生 (Fig. 3.4 右)
- 3) 左右位相差 180° (逆位相) (Fig. 3.5 左)
- 4) 左右位相差 0° (同位相) (Fig. 3.5 右)

この4つの場合についてどのような歩容を示すのか実験を行った。

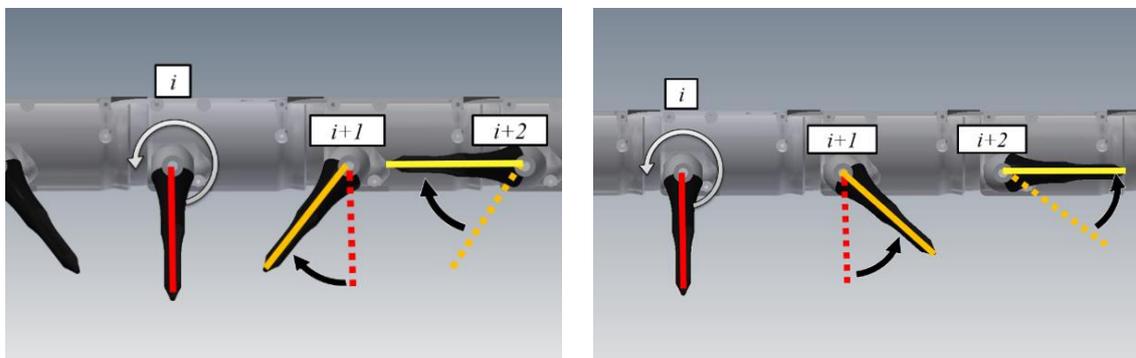


Fig. 3.4 Phase between consecutive legs (left: retrograde wave, right: direct wave)



Fig. 3.5 Anti-phase (left) and in-phase (right) of the left and right legs

まず、前後位相差を -45° （後退波）、左右を 180° （反位相）とした場合の連続写真を **Fig. 3.6** に示す。この場合、脚はムカデと同じ後退波を発生する。

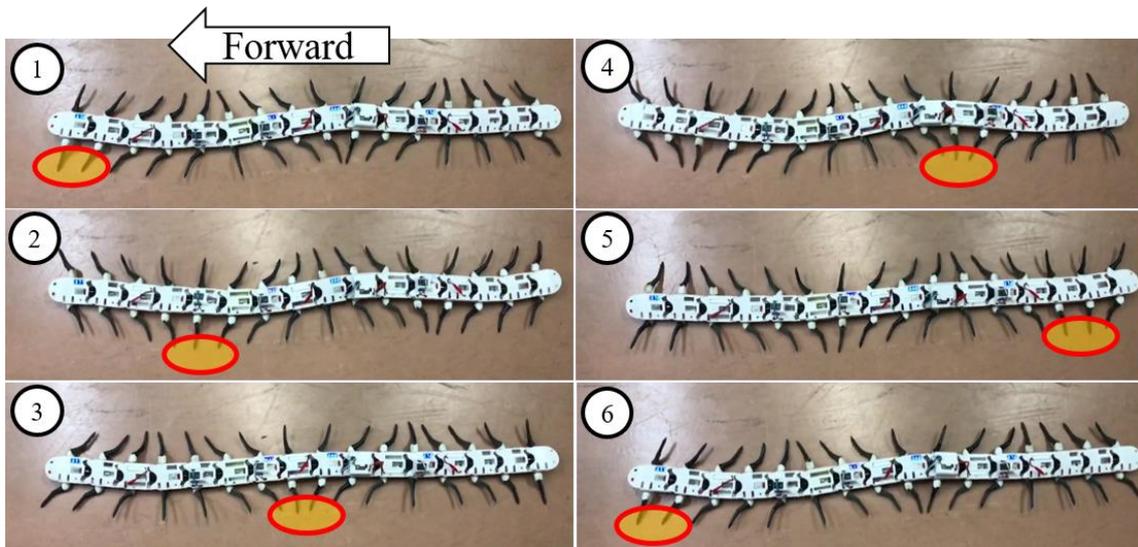


Fig. 3.6 Undulation and ground contact of legs for retrograde wave

この図から、胴部は脚が密になっている部分（**Fig. 3.6** の橙色楕円部分）を凹型にするように後退波を発生させながらうねっていることが確認できる。この胴部に発生する波は実際のオオムカデの歩行において観察されるものと定性的に類似している（**Fig. 3.7**）。

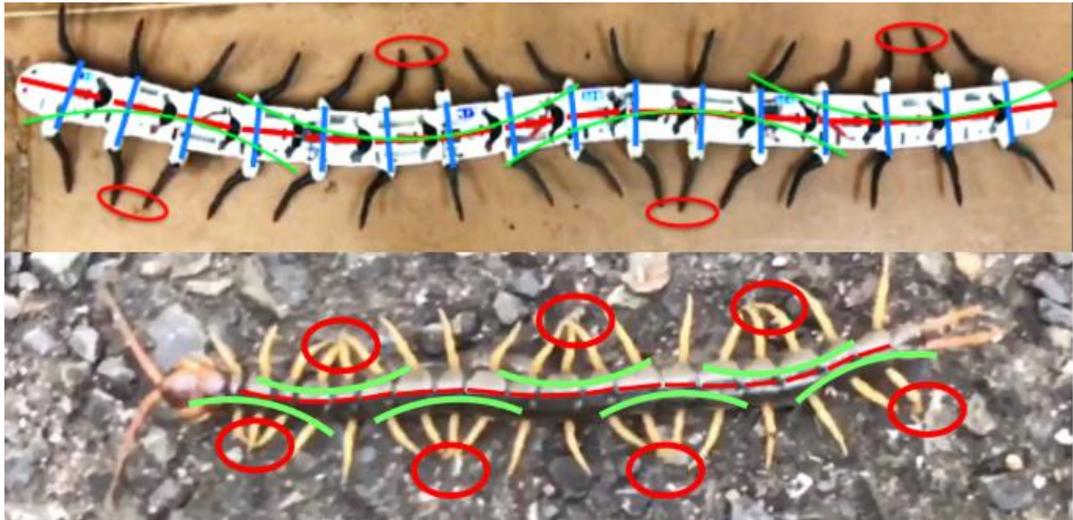


Fig. 3.7 Undulation of i-CentiPot (above) and centipede (below)

次に、脚の前後位相差を 45° （進行波）、左右を反位相に設定した場合の実験の連続写真を **Fig. 3.8** に示す。これはイシムカデが用いる足の動きである。

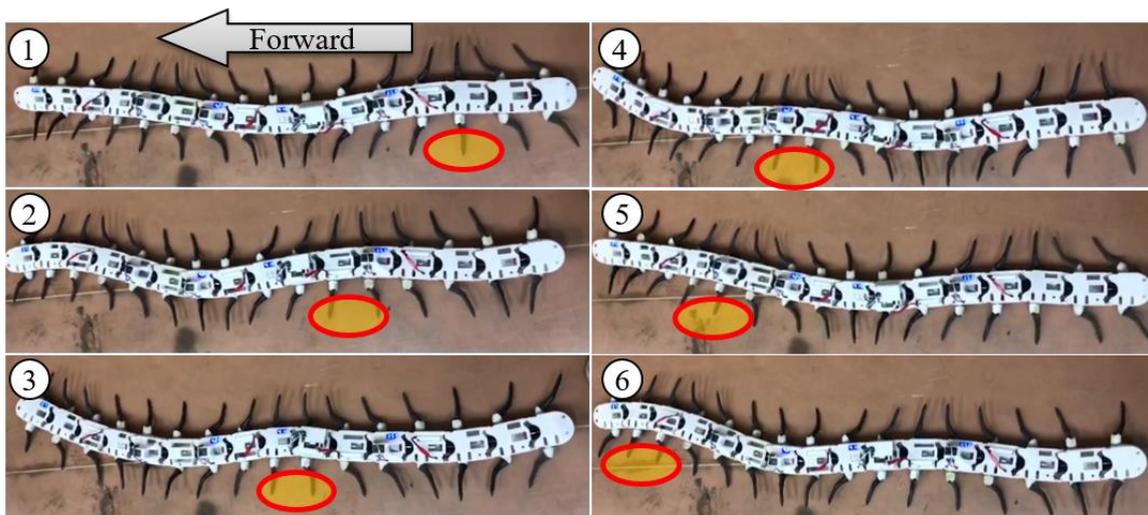


Fig. 3.8 Undulation and ground contact of legs for direct wave

この時、胴部は接地部側を凹型とするように進行波を発生させながらうねる。また、うねりの振幅は進行方向に対して増幅されている様子が確認できる。このうねりはイシムカデ（接地脚側が凸）とは逆相である。

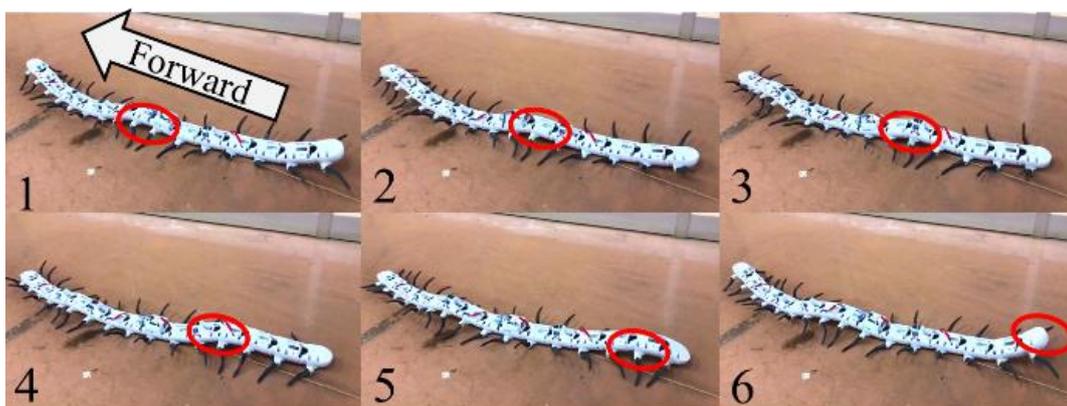


Fig. 3.9 Axial undulation with retrograde wave of legs. Phase difference between left and right legs was zero.

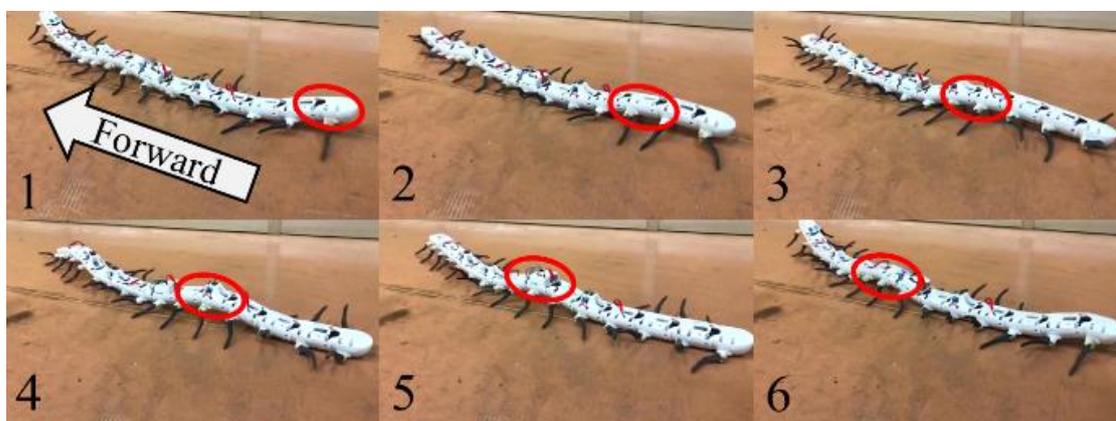


Fig. 3.10 Axial undulation with direct wave of legs. Phase difference between left and right legs was zero.

最後に、左右脚を同位相とし後退波および進行波を与えたときの歩容を示す。Fig. 3.9 は後退波を用いた歩容を示している。赤色の楕円は、胴体が上向きに凸部の領域を示している。脚の後退波に同期して頭部から尾部に向かって垂直方向のうねりが伝播していることが確認できる。

Fig. 3.10 は、進行波による歩容を示している。赤い楕円は胴体が上に凸になっている部分であり、垂直方向のうねりが脚の進行波に同期して尾部から頭部へと伝播していることがわかる。この脚配置はヤスデと同じである。しかし、胴体が上下方向に湾曲するためヤスデとは定性的に異なる運動となっている。

3.3 屋外実験

次にi-CentiPot番号機を用いて屋外環境で移動実験を行った。その様子を連続写真 (Fig. 3.11) に示す。図内③および④を見ると頭部体節と柔軟脚が障害物に接触し、その後、脚でこれを押しのけ自律的に進路を修正しながら進む様子が確認できる。移動実験では、

数センチ程度の高さを持つ石の列や路面の盛り上がりやくぼみに対しても制御機構を持たないにもかかわらず進路を修正しながら自律的に移動する様子が確認できた。基本的には、進路を遮るような障害物に対してポテンシャルの低い方向へ回避し、壁面など回避できない場合は頭部の形状に併せて左右どちらかに向きを修正しながら移動するものと考えられる。この特性は、i-CentiPotが細長く多くの脚を持ち、表面がなめらかな形状で柔軟であることが重要な役割を果たすことで得られるものと考えられる。例えば、i-CentiPot壱号機を5体節10脚として屋外環境においたとき、障害物によって移動することが困難となることからある程度の体長が必要であることがわかる。また、2章で述べたi-CentiPot Pの結果との比較から、i-CentiPot壱号機の胴体のなめらかな形状と脚の柔軟性を持つことが自律移動に有効であることがわかる。



Fig. 3.11 Field test

3.4 結言

本章では、多足類の形態学的特徴であるなめらかな胴体表面と柔軟な脚を構成する多足類ロボットi-CentiPot壱号機を設計・製作したことについて述べた。また、i-CentiPot壱号機を落ち葉や小枝が散乱する傾斜地で動作させると、障害物を状況に応じて回避、乗り越えなどを行い、ある程度自律的に移動できることを確認した。さらに、歩容が脚の前後左右の位相差を変化させることでどのように変化するのか実験による検証をおこなった。

その結果、オオムカデと同じように左右逆相で脚の後退波を発生させると定性的に類似した胴部のうねりが生じることを確認した。これは、前節で述べたi-CentiPot Pで確認された歩容と同じ結果であり、より明確にうねりを観測することが可能であった。イシムカデと同じ進行波を発生させた場合、胴部のうねりはイシムカデと逆相となるとともに、振幅が頭部方向に向けて増幅される傾向が確認された。接地脚側が凹状になるのは接地脚から反力が横方向に作用するためと考えられる。また振幅の増幅は、胴部が不安定に振動していることを意味しており、歩容としては効率が悪いものと考えられる。さらに、

ヤスデのように左右同相として実験を行った場合、胴部は上下方向にうねりを発生することが確認された。これは実際の生物には見られない歩容であり、胴部の関節の構成が不自然である（形態学的特徴を反映していない）ことを意味している。

i-CentiPot 壱号機の脚はモータのオンオフのみで制御されているため、環境の計測、脚の軌道追従制御や移動方向の決定などを陽に制御していない。したがって、ロボットの形態学的特徴と環境との相互作用のみで自律的なふるまいやムカデと類似した歩容を創発していることになる。これは、Pfeifer らによる形態学的計算（Morphological computation）や、大須賀による陰的制御則が i-CentiPot 壱号機に存在することによって実現されたものと考えられる。

問題点として、体節が受動関節のみで連結されているため、障害物によっては移動不可能となることが挙げられる。次章では関節の一部を能動化することで移動性能を向上させることについて述べる。

第4章 操舵機能を持つ i-CentiPot 式号機の開発とその歩容

i-CentiPot 壺号機は、多足類の形態学的特徴を構成することで自然環境下での自律的移動を実現した。しかし、くぼみや段差、三方を囲まれた袋小路などにおいて移動不可能になるという問題が生じた。i-CentiPot 壺号機は、胴部が受動関節となっているため、垂直方向に変化がある障害物、例えば段差や溝などに対して、頭部が下方へ垂れ下がる傾向にある。そのため、段差に対しては側方へ向きを変えて回避し、溝に対しては内部に進入して移動を継続する場合もあるが、障害物を乗り越えて前進することはできない。最悪の場合移動ができなくなることも観察された。このような問題を回避するために、胴部前方に拮抗駆動を導入し頭部を上下左右へ能動的に湾曲させることを考える。

そこで本章では、ロボット前部の関節に能動湾曲機構を持つ i-CentiPot 式号機[20]を開発し、その移動性能について考察したことについて述べる。



Fig. 4.1 i-CentiPot 02

4.1 i-CentiPot 式号機の概要

Fig. 4.1 に小型多足類ロボット i-CentiPot 式号機を示す。式号機は 1 対の脚を有する 17 の体節によって構成された胴体を持ち、全長 1.3m、全高 42mm、全幅 180mm (脚を含む)、重量 2kg である。各体節は壺号機と同様に可撓性シャフトを内包する天然ゴムスポンジと球面関節で連結されている。また、Wi-Fi を介してスマートフォンやタブレット PC などのモバイルデバイスで操作することが可能である。駆動機構は壺号機と同様のものになっているが、より大きいトルクを得るために DC モータを 8 個用いている。

4.2 能動湾曲機構

壺号機の問題点である障害物の回避能力を向上させるために、サーボモータとワイヤを使用した拮抗駆動による能動湾曲機構を壺号機に導入する (Fig. 4.2). 拮抗駆動は第4体節内に配置した2つのサーボモータ (KRS-3204 ICS) とサーボホーンに取り付けたワイヤを真鍮パイプのガイドを通して先端体節に固定することで実現している. この機構により, 前部4体節が左右方向および上方向 (Fig. 4.3) へ能動的に約30°湾曲することが可能となる. 下方向の湾曲動作は自重による受動関節の湾曲によって実現される.

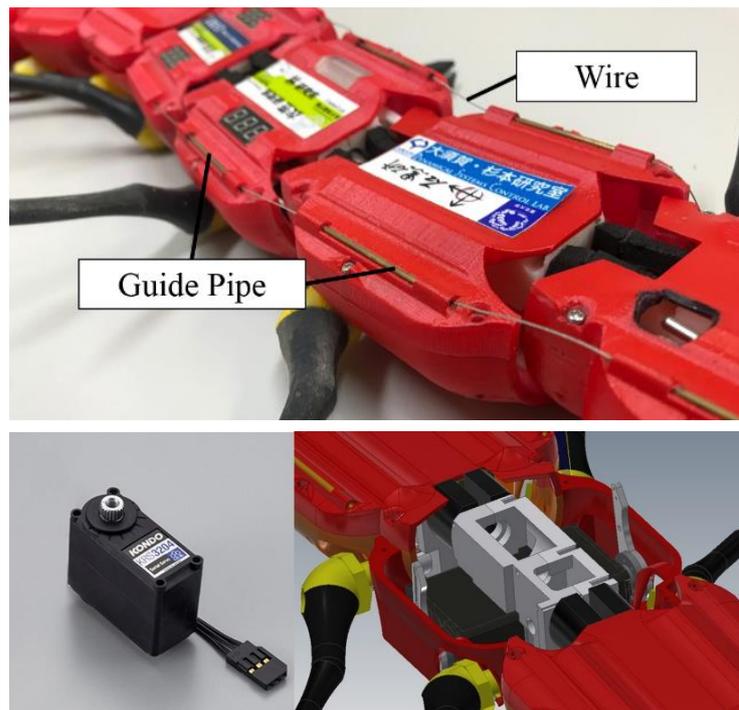


Fig. 4.2 Tendon mechanism for active flexion



Fig. 4.3 Active retro-flexion

4.2.1 能動湾曲機構の性能評価

式号機の能動湾曲機構による移動特性を評価するために、平面に設けた段差の踏破実験を行った。具体的には、段差を 20mm から 5~10mm 刻みで高さを変化させ、能動湾曲の有無でどのように踏破能力が変化するか明らかにする。

まず、受動的な湾曲のみでの段差の乗り越え実験について述べる。能動湾曲を行わない場合、先頭体節下部に設けた曲面に衝突した起伏に対してのみ、上方向に受動的に関節を曲げ踏破を行う。式号機は、30mm までの段差に対して受動的に上方向へ湾曲し、段差に乗り上げ踏破可能であった (Fig. 4.4)。しかし、30mm より高い段差では乗り越えることができなかった。段差高さが 55mm の時の試験を Fig. 4.5 に示す。式号機が段差にぶつかった後に、受動湾曲によって進行方向が左に変化していることがわかる。Fig. 4.6 に示すように頭部下側に設けた球面形状と障害物との幾何学的な関係からも、30mm 以上の段差に対して頭部を上方向に湾曲することが困難であることがわかる。

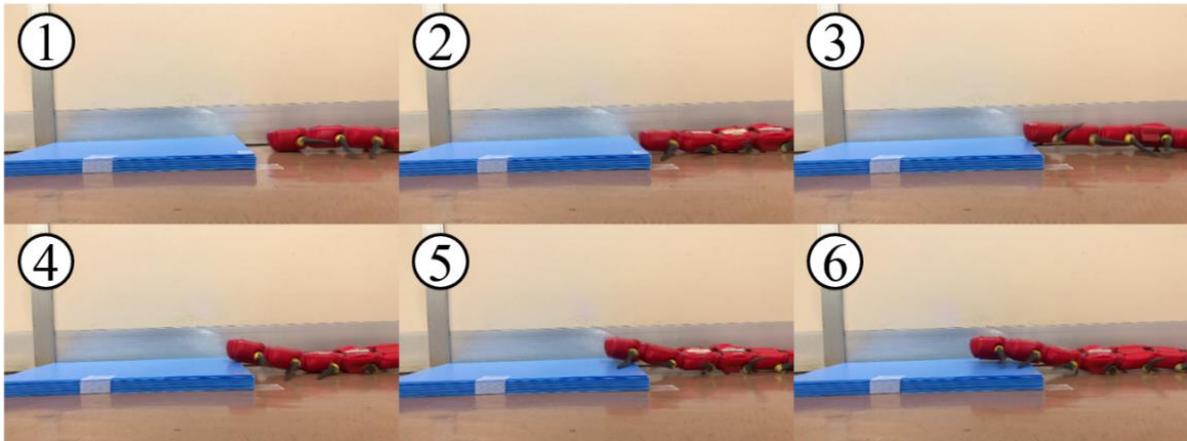


Fig. 4.4 Step climb-ability performance of passive flexion (height of 30mm)

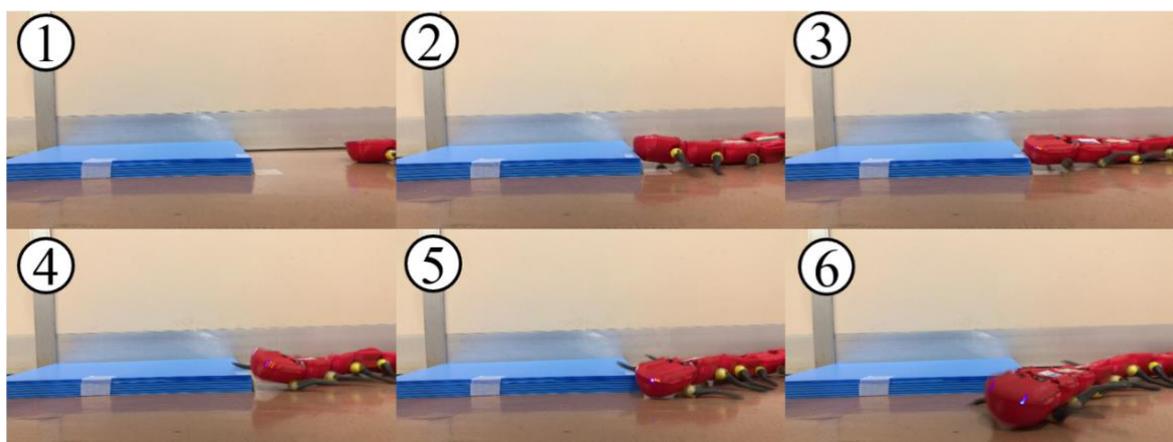


Fig. 4.5 Step climb-ability performance of passive flexion (height of 55mm)

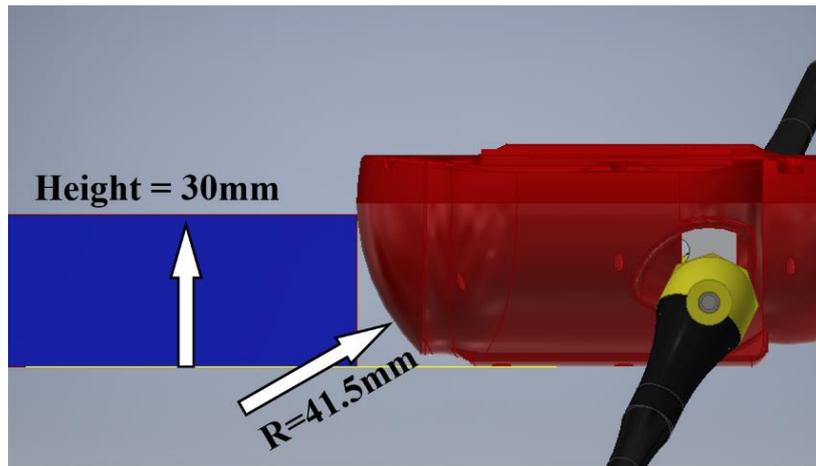


Fig.4.6 Image of head shape and steps

次に能動的に湾曲させて段差乗り越え性能を評価した．その結果，能動湾曲によって先頭体節を持ち上げることで 55mm の段差まで踏破可能であった (**Fig. 4.7**)．しかし，55mm より大きい段差に対しては，先頭の体節が乗り越えた後に後部体節の脚が滑り，身体を押し上げる十分な駆動力を得られないため段差を踏破できなかった．

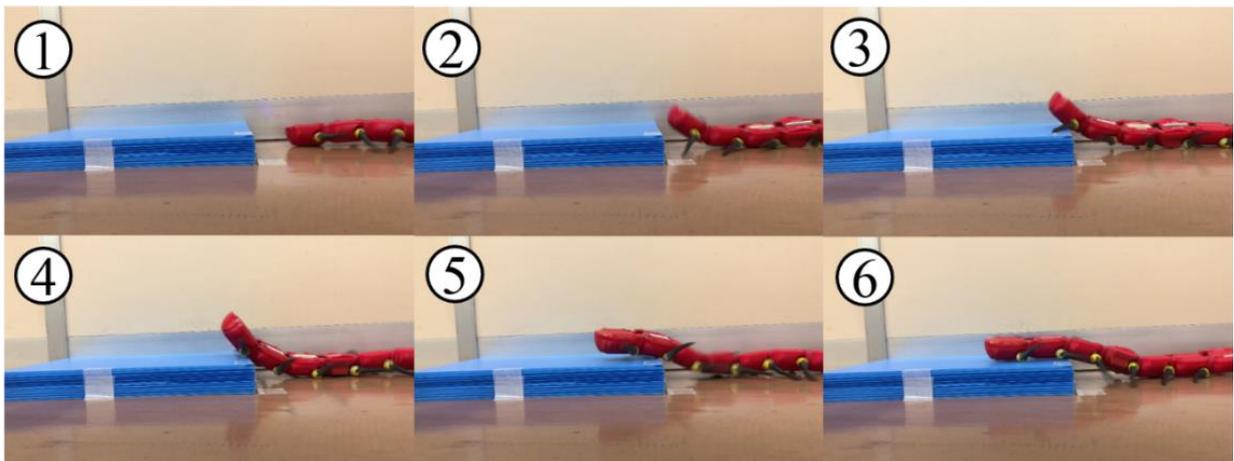


Fig. 4.7 Step climb-ability performance of active flexion (height of 55mm)

続いて、同一レベルの水平面を持つ壇を2つ用意し、その間隔を広げていくことで溝を生成し、この溝を跨ぎ越える試験を行った。間隔は 50mm から 5mm 刻みで増加させている。能動湾曲を行わない場合、約 2 体節分の長さに相当する 120mm 以上に設定した場合に、先頭体節が自重により下方へ湾曲し踏破に至らなかった。Fig. 4.8 に跨ぎ越えに成功した溝幅 120mm、Fig. 4.9 に踏破に至らなかった溝幅 125mm の試験の連続写真を示す。

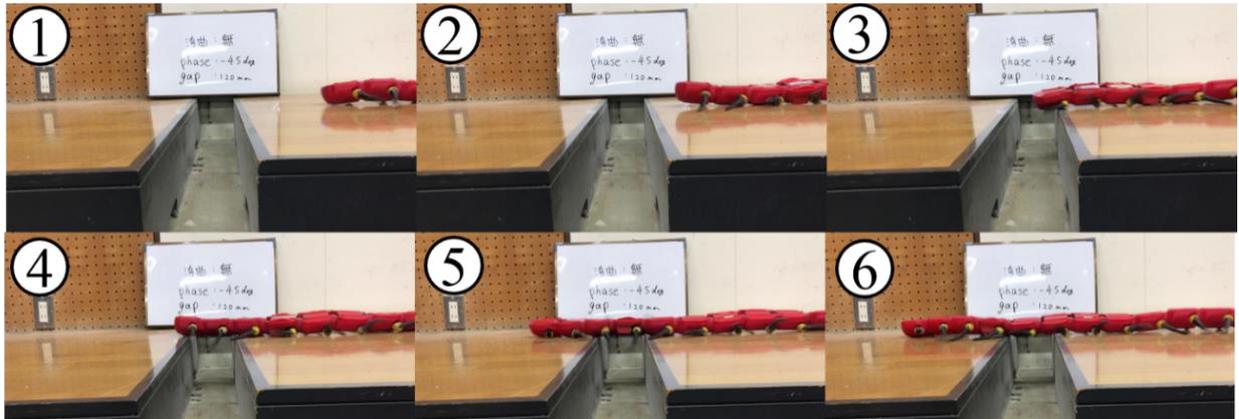


Fig. 4.8 The test of Crossing the gap due to passive flexion (Gap : 120mm)

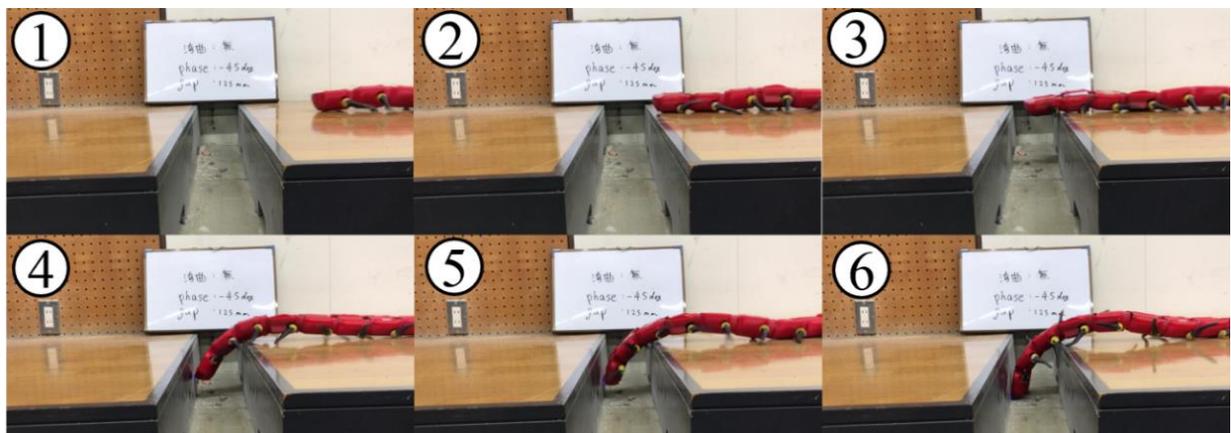


Fig. 4.9 The test of Crossing the gap due to passive flexion (Gap : 125mm)

上方向へ湾曲を行った場合、受動関節を上方へ能動的に維持する張力を加えることで、より広い溝を跨ぎ越えることができる。最終的に約 3 体節分の長さに相当する幅 180mm の溝を渡ることを確認した。この結果は受動湾曲時と比較して踏破可能な溝幅が 30% 向上したことを意味する。Fig. 4.10 と Fig. 4.11 に溝を跨ぎ越えている様子を示す。これらの実験結果から、能動湾曲が可能な i-CentiPot 式号機は壱号機と比較して垂直な壁面を持つ段差や溝などに対する移動性能が向上したことが示された。

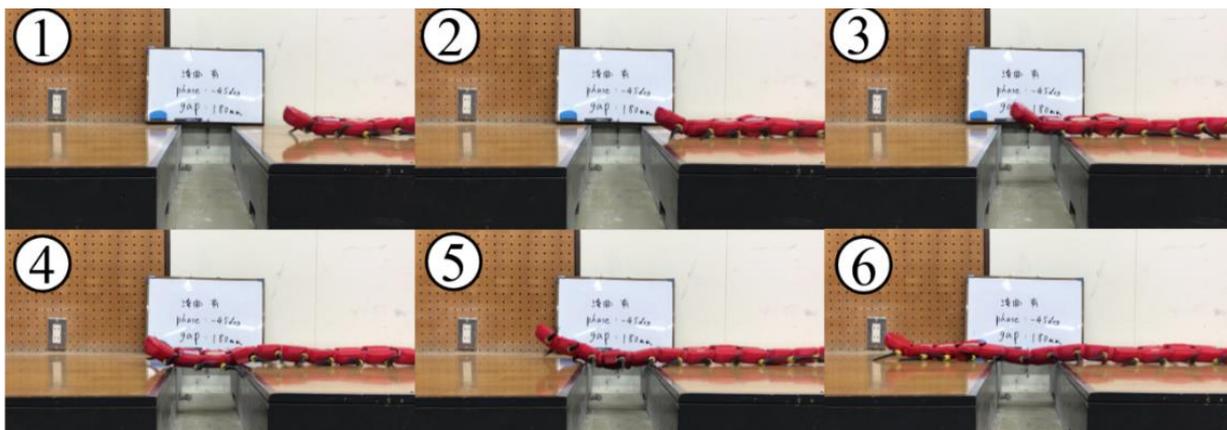


Fig. 4.10 The test of Crossing the gap due to passive flexion (Gap : 180mm)

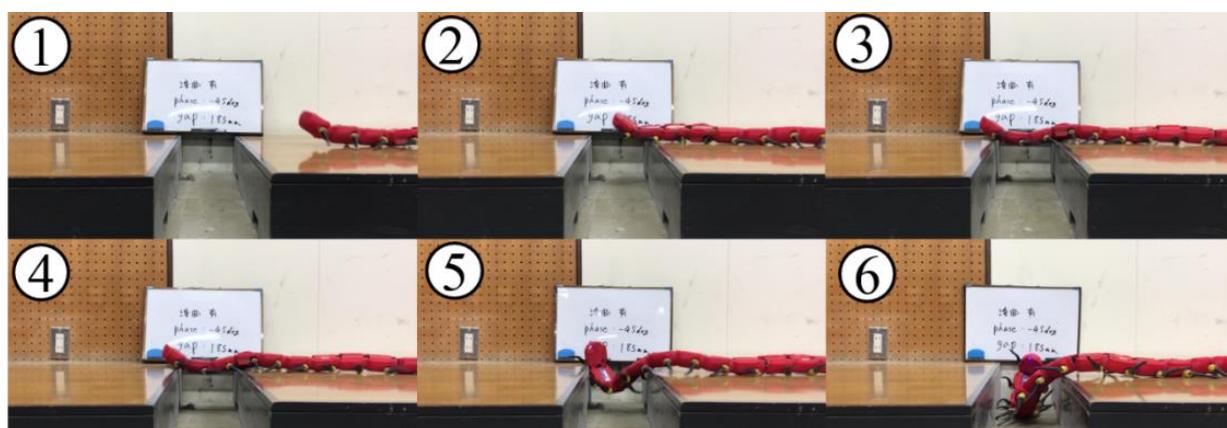


Fig. 4.11 The test of Crossing the gap due to passive flexion (Gap : 185mm)

4.3 位相変更に伴う移動速度の変化

i-CentiPot の脚の位相変更による移動特性を明らかにするために、脚の位相差を変更し実験を行った。具体的には、脚の前後の位相差 φ を $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 90^\circ$ と変化させた移動速度がどのように変化するか計測した。計測結果を Fig. 4.12 に示す。後退波、進行波に共通して $\varphi=30^\circ$ の移動速度と $\varphi=90^\circ$ の移動速度に約 3 倍の差が見られる。速度差が発生した原因として位相変更によって生じる脚接地数の増減が移動速度を変化させるものと考えられる。Fig. 4.13 は後退波での各位相差による支持脚の位置を表したものを示しており、(a)は $\varphi=-90^\circ$ 、(b)は $\varphi=-60^\circ$ 、(c)は $\varphi=-45^\circ$ 、(d)は $\varphi=-30^\circ$ となっている。図内の赤い楕円は路面と接触している部分を表す。移動速度の最も遅い設定である $\varphi=-30^\circ$ に設定したとき脚は 3 点で路面を蹴るが、 $\varphi=90^\circ$ の場合では 9 点で路面を蹴り床から駆動力を得ることになる。つまり、路面に接地して推進力を発生する脚の数によって移動速度が変化することを意味している。i-CentiPot は腹部を路面と接触させながら移動するため、前後脚の位相差によって生じる支持脚の増減が移動速度を変化させるものと考えられる。

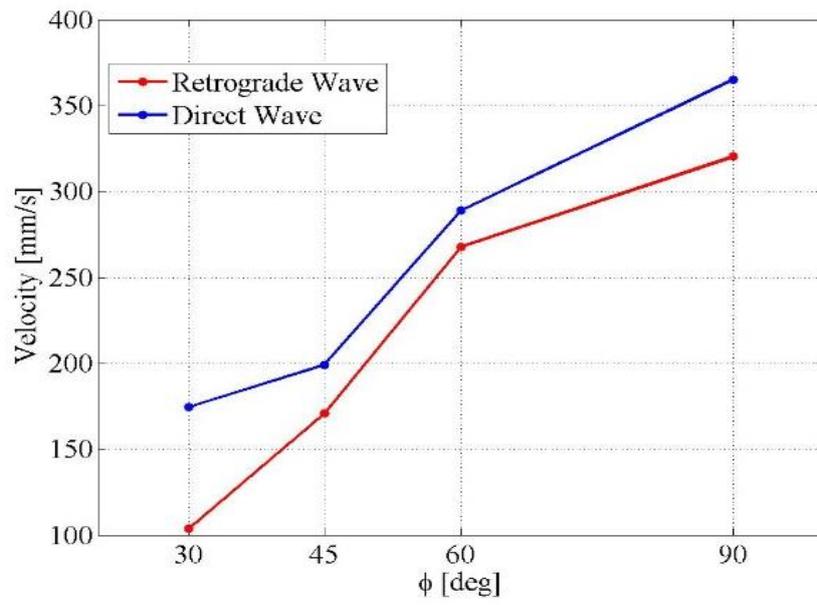


Fig. 4.12 Relationship between phase and velocity

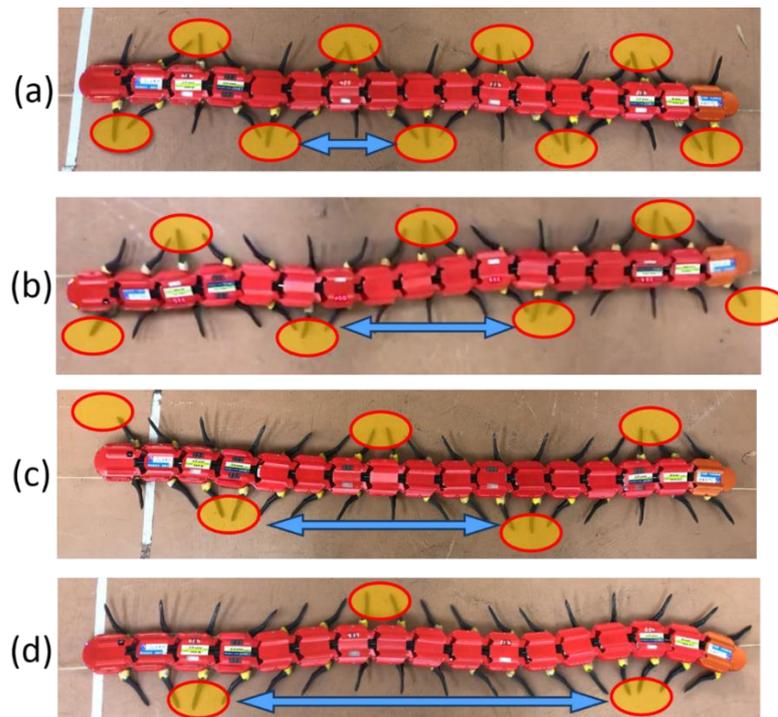


Fig. 4.13 Ground contact areas for phase of $-\pi/2$ (a), $-\pi/3$ (b) $-\pi/4$ (c), $-\pi/6$ (d)

4.4 屋外試験

最後に、i-CentiPot 式号機の屋外での実験について述べる。Fig. 4.14 に示すような枯葉が散乱した環境では i-CentiPot の脚と同程度の半径を持つ車輪型移動機構では動けなくなる可能性の高い。しかし i-CentiPot は受動関節によって凹凸のある路面環境に対して適応し、脚が回転することで枯葉を掻いて進むことが可能である。

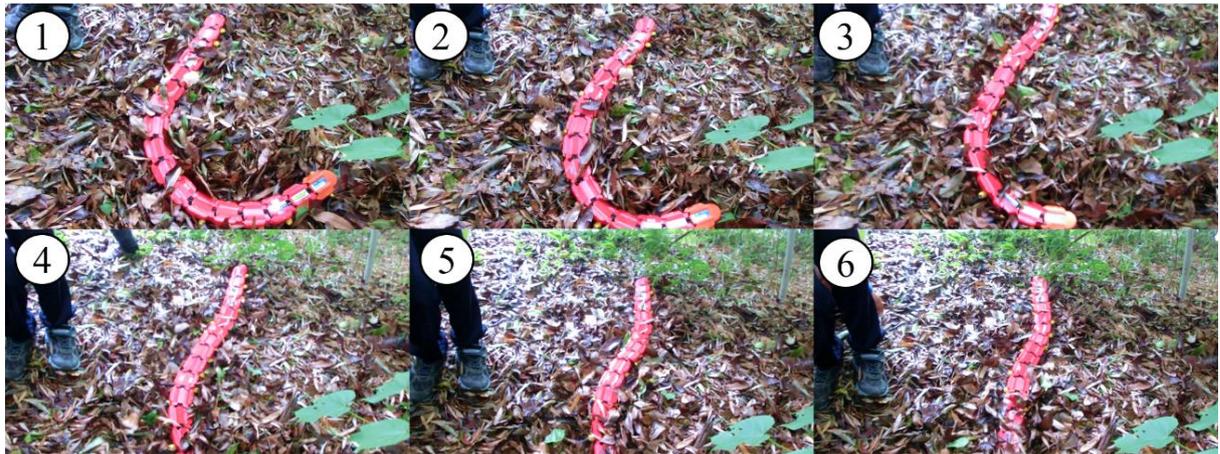


Fig. 4.14 Field test using i-CentiPot 02 on an undulated field with fallen leaves

Fig. 4.15 に屋外で行った段差踏破実験について示す。上述したように、屋内では路面との摩擦が小さいため先頭体節を押し上げる駆動力が確保できず段差を踏破できなかった。屋外では路面に存在する雑草や砂利などを蹴ることで頭部を段差上へ押し上げる十分な反力を得られたため、100mm のコンクリートブロックの踏破に成功した。

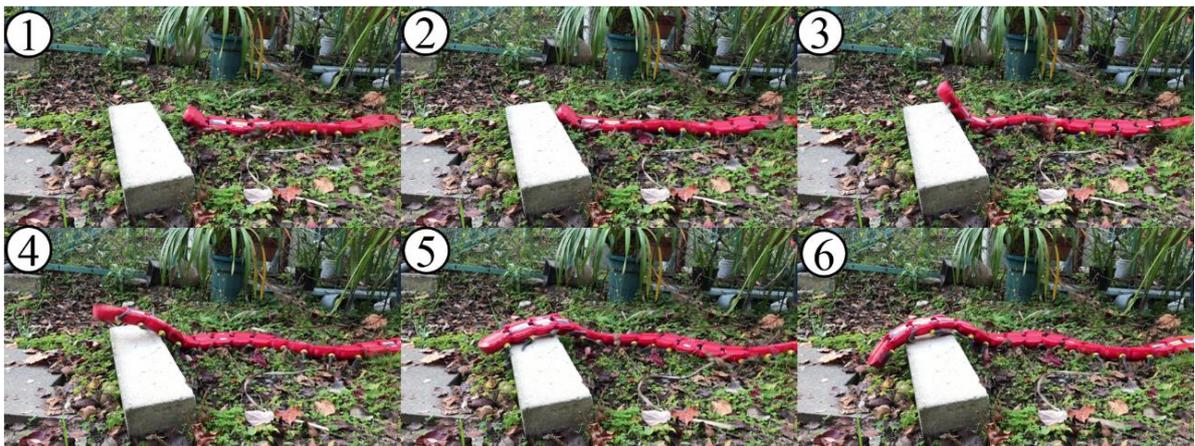


Fig. 4.15 Step climb-ability against a concrete brick in an outdoor environment (height of 100 mm)

4.5 結言

本章では, i-CentiPot の移動性能を向上させるために, 胴体前方の体節を能動湾曲させるワイヤ駆動機構を導入しその有効性を検証した. その結果, 壺号機では不可能であった垂直段差で 100mm, 幅 180mm の溝に対する乗り越え動作を実現した. 移動性能の向上は, 生物の知能の解明というよりは, ムカデロボットによる自律探査などへの応用可能性を広げるものである.

第5章 触角機構と自律移動

前章では i-CentiPot に能動湾曲機構を導入すると移動性能が向上することが示された。しかし、能動湾曲は無線 LAN を経由した指令によって実行されるため、環境に合わせて自律的に湾曲されるものではない。そこで本章では、より自律的な歩行を実現させるために触角機構を導入し、その有効性を検証する[21]。

5.1 ムカデの触角

生物は感覚器官を用いて周囲の情報を入手しながら自律的かつ適応的に移動している。ムカデは眼が退化しているためほぼ触角を用いて行動していると考えられている[22]。この知見に基づき、式号機に触角機構を導入し、障害物を避けるなどの自律移動の実現を目指す。

5.2 触角機構

Fig. 5.1 に触角機構の詳細を示す。触覚付け根にねじりコイルばね（ばね定数 $0.112 \text{ N} \cdot \text{mm/deg}$ ）と FS-T 型マイクロスイッチを設け、障害物に接触する部分には柔軟素材である 66 ナイロン製の結束バンドを取り付けている。また、頭部に設けた穴により動作範囲を制限することによって、触覚は外力がないとき前方へ突き出す姿勢をとり、障害物に接触するとスイッチが入る。触覚機構を搭載した式号機を **Fig. 5.2** に示す。

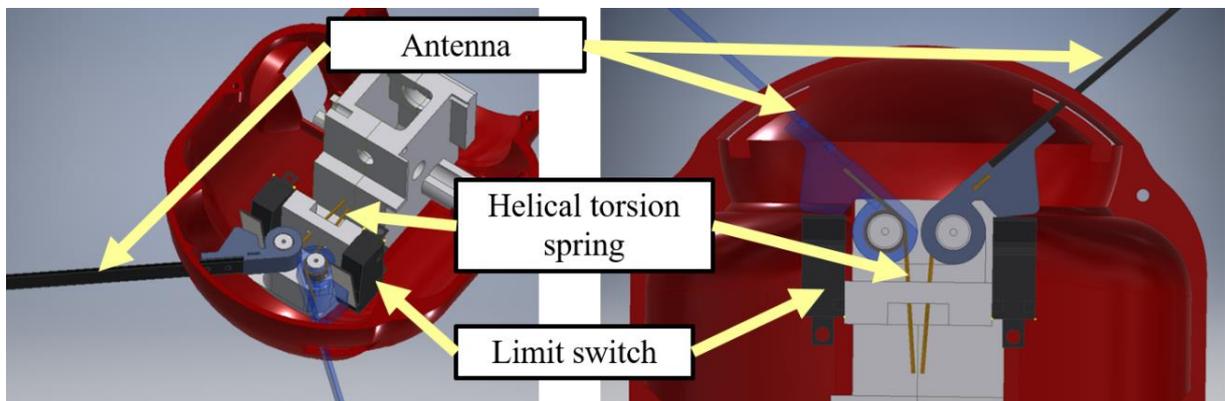


Fig. 5.1 Antennal mechanism



Fig. 5.2 i-CentiPot 02 equipped with an antenna mechanism

5.3 触覚による湾曲動作

触角が障害物に接触した場合、式号機の前部 4 体節にある能動湾曲機能を接触した触角とは反対方向に湾曲させる。具体的には、左側のマイクロスイッチが反応すると右に、右側が反応すると左に 3 秒間湾曲姿勢を維持するように RC サーボを制御する。また障害物が式号機の正面にあった場合、両方の触角が反応するため左右どちらかに進路変更する必要がある。式号機は能動的に湾曲しながら歩行した場合、右へ湾曲した方が進路を大きく変える傾向を持つ (Fig. 5.3)。そこで、両方の触覚へ入力が入った場合 2 秒間右へ湾曲させることとする。

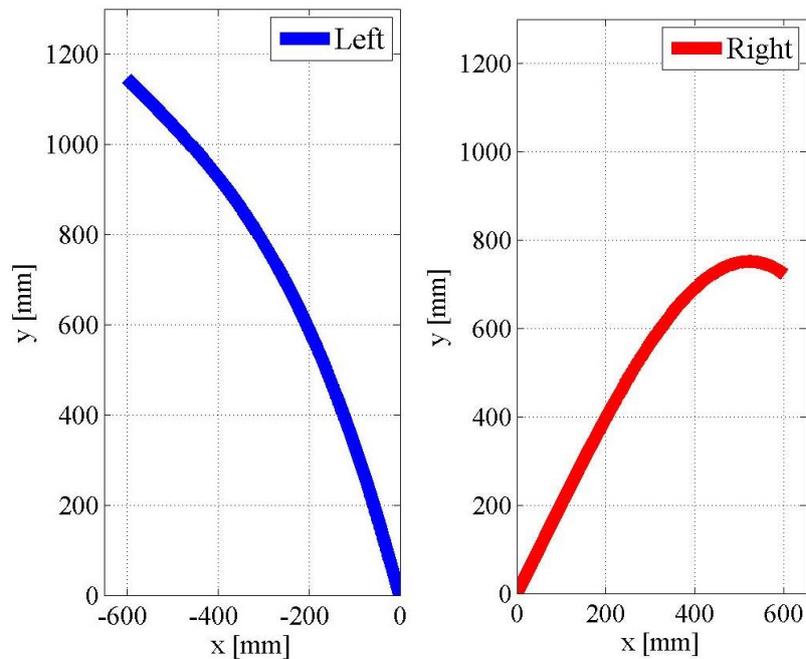


Fig. 5.3 Walking test results of active flexion

5.4 触覚機構を用いた実験

触覚機構が歩行にどのような影響を与えるのか明らかにするため、式号機を用いた歩行実験を行った。具体的には、点在する小型の障害物に対してどのような回避行動をとるのかについての実験と、壁型の障害物に対し衝突した場合にどのような歩行を示すかについての実験の、それぞれの結果について述べる。

5.4.1 障害物に対する回避行動の検証

まず、点在する障害物に対する触覚機構の歩行に対する影響を調べた。実験には縦 8cm、横 16cm のブロックを 2 段積み重ねて高さ 12.5cm とした障害物を使用した。ブロックとその配置を Fig 5.4 に示す。フィールドには縦 30cm、横 30cm の間隔でブロックを配置し、触覚機構を搭載した場合と、搭載していない場合とで複数回歩行させ、ほぼ同じルートを移動した場合について比較する。

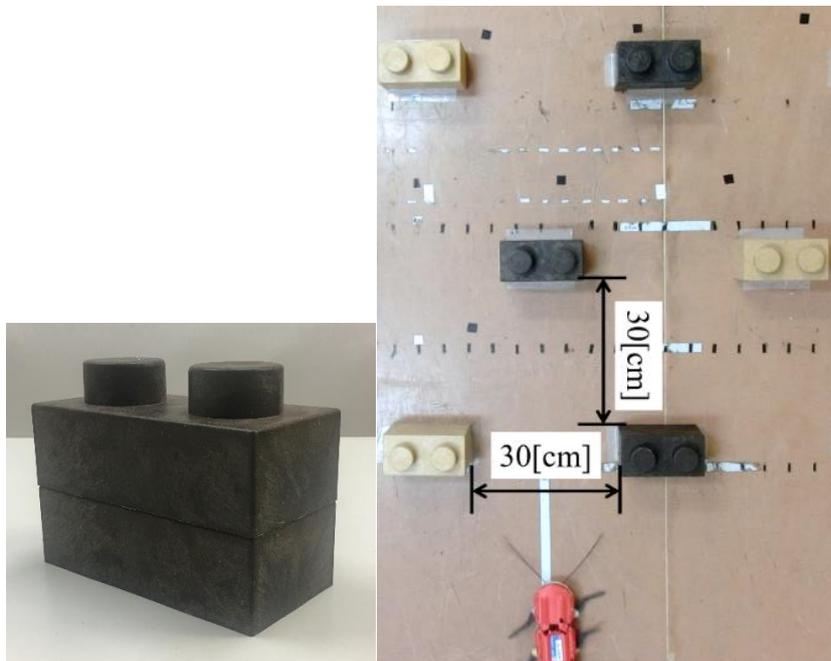


Fig 5.4 Plastic bricks (left) and distributed bricks on the test field (right)

5.4.2 触角機構による歩行の差異

歩行の様子を連続写真として **Fig. 5.5** に示す. 右図が触覚機構を用いて能動的に湾曲を行いながら走行させた様子で, 左図は受動的な湾曲のみで歩行を行った様子を示している.

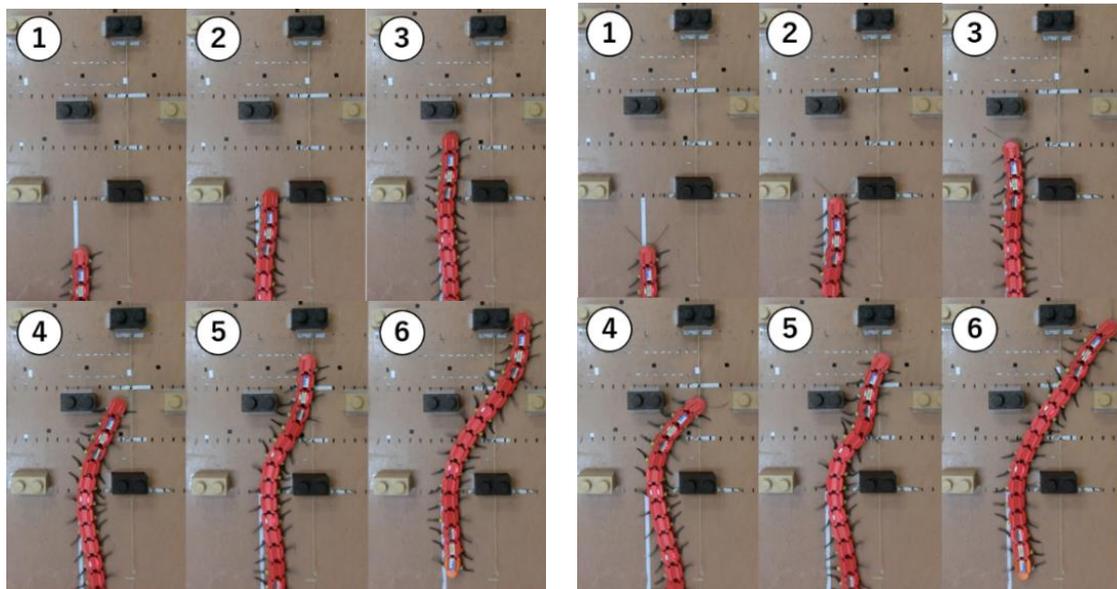


Fig 5.5 Avoidance behavior toward obstacles without antenna (left) and with antenna (right)

障害物に対して先頭体節がどの方向に進んだのかを明らかにするために, 0.4 秒ごとの頭部の向きを矢印として, 実験フィールドにプロットしたものを **Fig. 5.6** に示す.

触角がない場合, 障害物に接触後も体節の方向を変えず進むため, 機体の進路と体節の向きが一致していない (**Fig. 5.6** 左). これは頭部が障害物に衝突したまま前進していることを意味する. 頭部が壁面を通過したのち, 脚で障害物を蹴って体節の向きを変えている.

触角がある場合, 障害物に衝突後, 左側の触角に反応することで右側に湾曲し, 体節の方向を変えている. つまり, 能動的に方向転換し障害物を避けるように歩行しているといえる (**Fig. 5.6** 右).

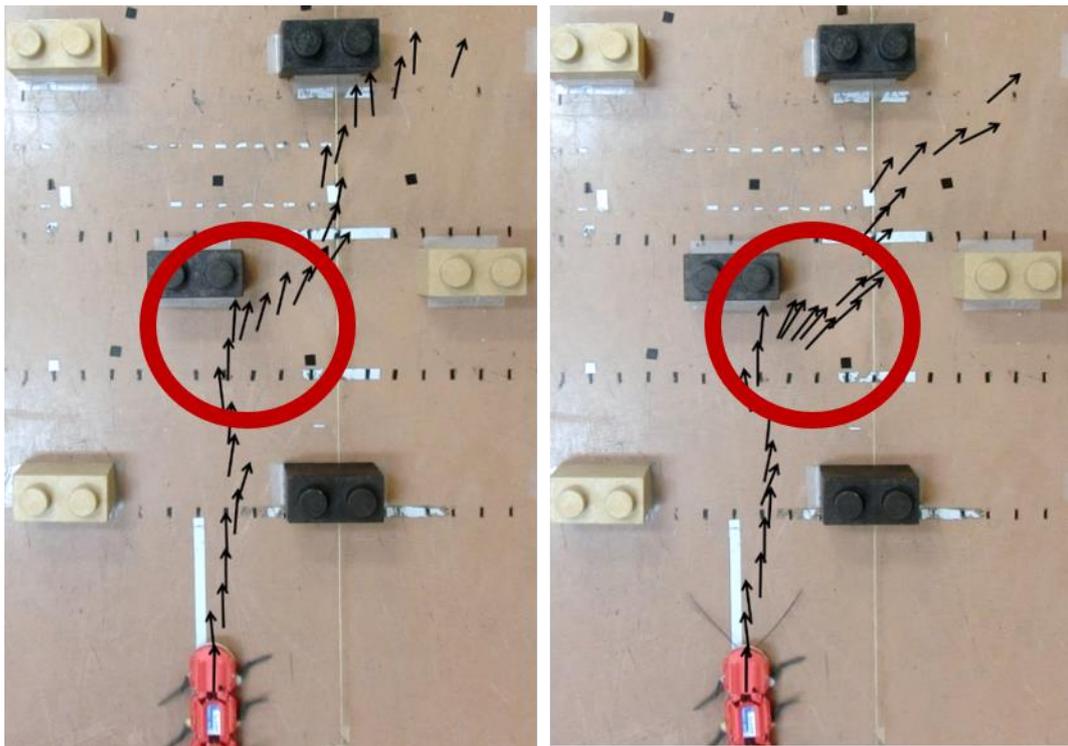


Fig. 5.6 Direction of the first segment every 0.4 seconds without antenna (left) and with antenna (right)

5.4.3 実験で生じた問題点と改善策

触角を持つ場合，先頭体節が障害物に引っかかると前進が困難となることがしばしば観察された．障害物に引っかかる様子を **Fig. 5.7** に示す．

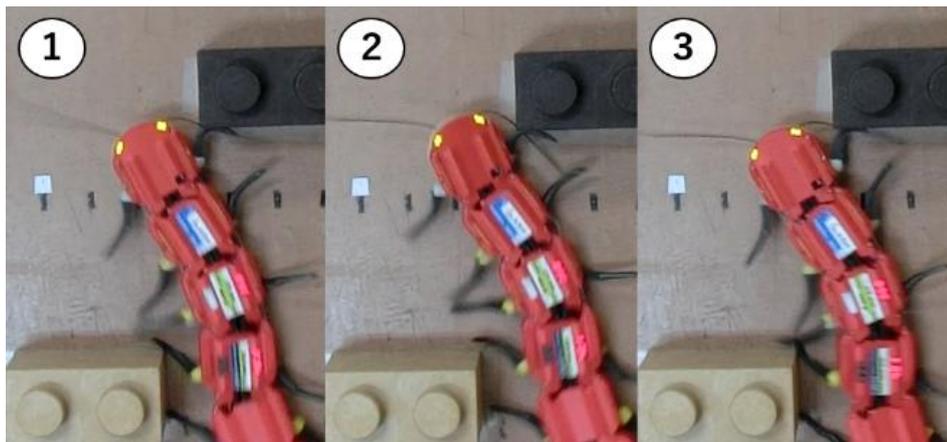


Fig. 5.7 A snapshot of the stack

触角を用いない場合，つまり受動的な湾曲のみで歩行する場合，身体の柔軟性を活かして障害物に応じて姿勢を変えることができることに対し，能動的に湾曲させた場合は，

胴部が湾曲姿勢を維持し続け、姿勢が膠着してしまう。そのため、環境からの反力による湾曲ができず、進行方向を変えることが困難となる。そこで、障害物に衝突し続け、どちらかの触角に3秒以上入力が入り続けた場合、上方向に湾曲するプログラムを新たに導入した。Fig. 5.8 に上方向への湾曲を行うプログラムを導入した場合の連続写真を示す。頭部を上方に湾曲させることで固定された姿勢が変化し、頭部が障害物の側面にずれ、障害物を回避することができた。

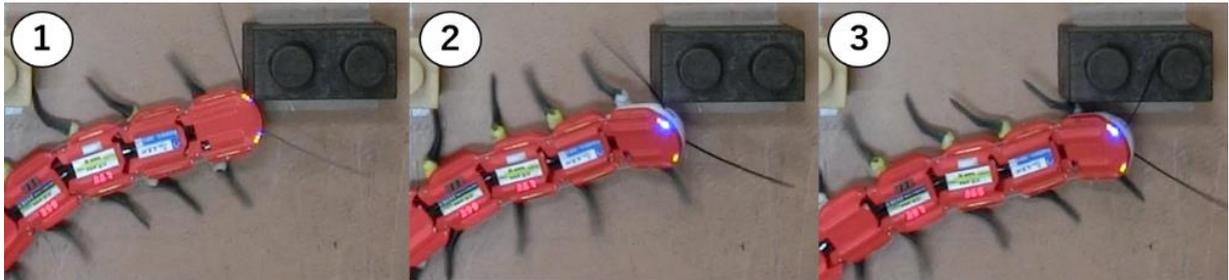


Fig. 5.8 Walking in the case of upward flexion

5.5 障害物への衝突に対する検証

次に、障害物に衝突した後どのような歩行をするかについて検証する。実験は壁と垂直に衝突するようなフィールドで触角の有無を条件としてそれぞれ歩行させる。

5.5.1 試験方法

試験環境を Fig.5.9 に示す。横幅 90cm の壁を使用し、中心に垂直に衝突させる。また、衝突する点から壁の左端までは約 45cm である。

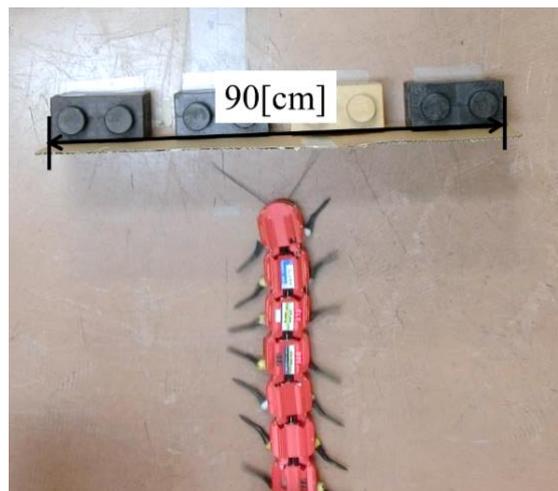


Fig.5.9 Test field

5.5.2 実験結果

Fig. 5.10 に先頭体節の向きと軌跡を示す．実線は先頭体節の軌跡，矢印は先頭体節の方向を示し，赤色は触角機構を持つ場合，青色は持たない場合をそれぞれ示している．触角がない場合，壁に衝突後も向きを変えず，壁に沿うようにして歩行しており，軌跡と体節の向きが一致していない．触角がある場合，壁に衝突後，右の触角が反応し左側に湾曲している．その結果，壁から離れるように進み，軌道と先頭体節の向きが一致してくることがわかる．つまり，障害物とは反対の方向に能動的に方向転換しているといえる．

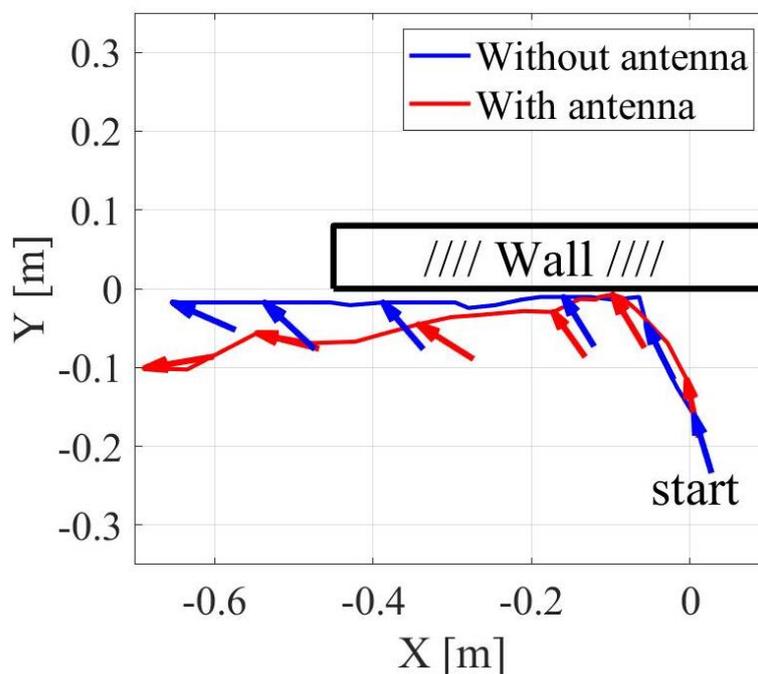


Fig. 5.10 Direction and trajectory of the first segment.

5.6 結言

本章では，i-CentiPot に自律移動させることを目的として式号機の前頭体節に触角機構を導入し，歩行実験によって障害物に対する触角機構の性能を評価した結果について述べた．具体的には，障害物の回避行動と衝突後の歩行について触覚の有無でどのように変化するのか比較した．触角機構を用いた場合，障害物に衝突すると同時に能動的に方向転換を行い，衝突後に障害物とは反対側へ方向移動することが示された．このことから，障害物に対して能動的に回避行動をとるといえる点で，従来よりも自律的な歩行が実現されたといえる．

第6章 モーションキャプチャを用いた i-CentiPot の歩容解析

これまでに、身体形状や柔軟性に基づいて環境との相互作用から得られる陰的制御則 [15] を積極的に利用することで、軽量かつ単純構造によって構成された小型多足類ロボット i-CentiPot を実現したことについて述べてきた。i-CentiPot は、単純に脚を回転させるだけでムカデと類似する胴部のうねりを創発し、自然環境などの凹凸面に対して高い環境適応性を持つ。また脚の位相差を変化させることで、移動速度やうねりの振幅などが変化する。しかし、i-CentiPot は小型であるため、センサ等を取り付けることが難しく定量的な歩容解析ができていなかった。人間やロボットの動作解析の一般的な方法として、ビデオカメラで撮影した映像を画像処理や目視で解析する方法や、身体に装着したマーカの 3 次元位置座標時系列を定量解析するモーションキャプチャを利用する方法がある。本章では i-CentiPot を様々な脚の位相差で歩行させ、光学式モーションキャプチャを用いて歩容を計測することで定量的に解析したことについて述べる。

6.1 モーションキャプチャを用いた計測

Fig. 6.1 にモーションキャプチャシステムの外観を示す。計測ソフト OptiTrack 社 Motive, 赤外線カメラ OptiTrack 社 Flex 13 を用いている。図に示すように赤外線カメラを地面から 1.4m 高さ地点に 4 台、0.4m 地点に 1 台設置して計測を行う。座標系はモーションキャプチャの仕様から図に向かって左方向を x 軸、鉛直下方を y 軸、進行方向を z 軸としている。0.4m 地点に設置した低視点のカメラは、脚に取り付けた反射マーカの死角を低減するためのものである。反射マーカは、すべての体節の中心部に 17 個、偶数体節に取り付けられた右脚の回転中心部に 8 個の計 23 個を使用している (Fig. 6.2)。実験では式号機を z 軸方向に歩行させ、フレームレート 120fps で撮影するものとする。実験では、位相差を $\pm 90^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 30^\circ$ として歩行させ、体節と脚の位置データをモーションキャプチャシステムで取得する。

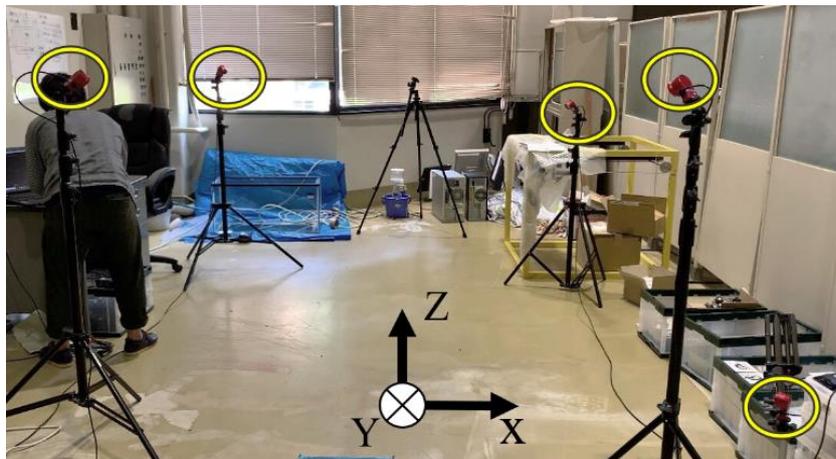


Fig. 6.1 Environment of experiment with motion capture system



Fig. 6.2 Position of markers putting on body segments and limbs

6.2 実験

6.2.1 脚の接地点と胴部のうねり

まず、位相差が -45° （つまり後退波）の場合において10フレーム毎の体節と脚位置を z - x 平面上にプロットしたものをFig. 6.3に示す. 進行方向は紙面左から右となっている. 図内の青線で繋がれた丸印が体節位置を表し, 体節の下に表示された赤と青の丸印は, 脚に取り付けたマーカが y 座標の閾値を超えた場合（赤）とそれ以外（青）に区別して脚位置を表示させているもので, 赤丸が接地したことを意味する. 図の上から下に向けて時間が進んでおり, 時間の経過と共に脚の接地位置と胴部のうねりが右から左に伝播している（つまり後退波である）ことが確認できる. また, 胴部に発生したうねりが脚の接地点に対して逆向きに凸となるように湾曲している. この胴部のうねりは, これまでに定性的に確認されたものと同じで実際のムカデと類似したものである. 下から2つめの図は胴部が直線に近い姿勢となっており, 明確にうねりを判別できるとはいいがたい. このように, 振幅は周期的に増減を繰り返しながらではあるが, これまで定性的に確認されていたオオムカデ（Fig. 6.4）に類似した胴部のうねりが歩行中持続的に生じていることが確認された.

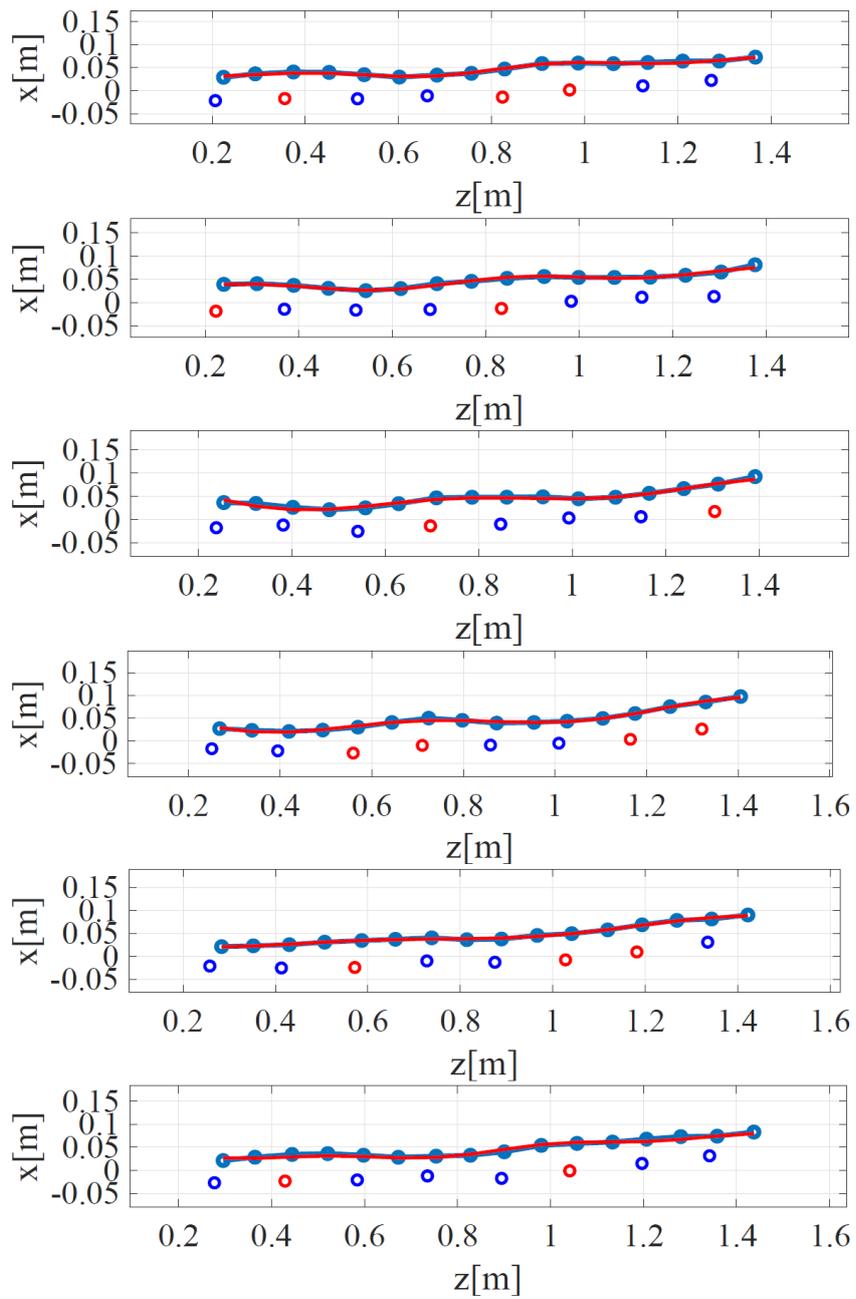


Fig. 6.3 Axial undulation and contact area of limbs (blue circle) in case of retrograde wave (-45°)



Fig. 6.4 Axial undulation of a centipede (Scolopendra)

つぎに、イシムカデのように位相差を 45° 、つまり進行波を脚に発生させた場合の結果を **Fig. 6.5** に示す. ロボットの進行方向は後退波と同様に左から右となっている. この図から、脚の接地点と胴部のうねりが進行方向と同じ、尾部（左）から頭部（右）へ伝播していることが確認できる. また、振幅は後退波で -45° としたときと比較して大きくなっていることも確認できる.

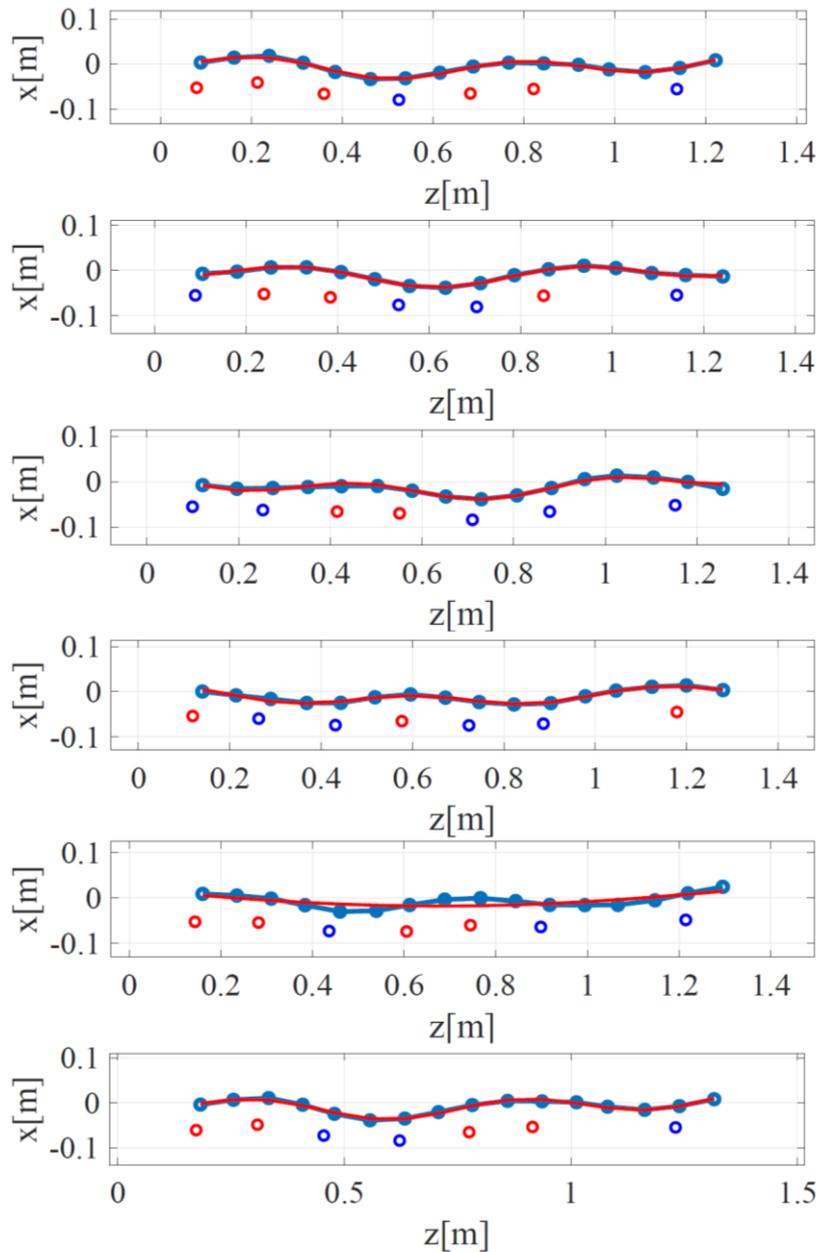


Fig. 6.5 Axial undulation and contact area of limb tips (blue circle) in case of retrograde wave (45°)

6.2.2 胴部の振動

Fig.6.3 と Fig.6.5 内に示した赤線は胴部のうねりを式 (6.1) に示す 2 項の正弦波を重ね合わせたものに対して最小二乗近似した結果を示している。

$$x = A_1 \sin(\omega_1 z + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 z + \varphi_2) \quad (6.1)$$

これらの図からわかるように、胴部のうねりが 2 つの正弦波によってうまく近似できていることが確認できる。この方法を利用して、位相差 90° , 60° , 45° , 30° とした場合の振幅の変化を調べた。実験は、各条件で数回試行し、直線的に移動した結果 1 つに対し、振幅の平均と最大値および最小値を求めている。得られた結果を Fig. 6.6 に示す。

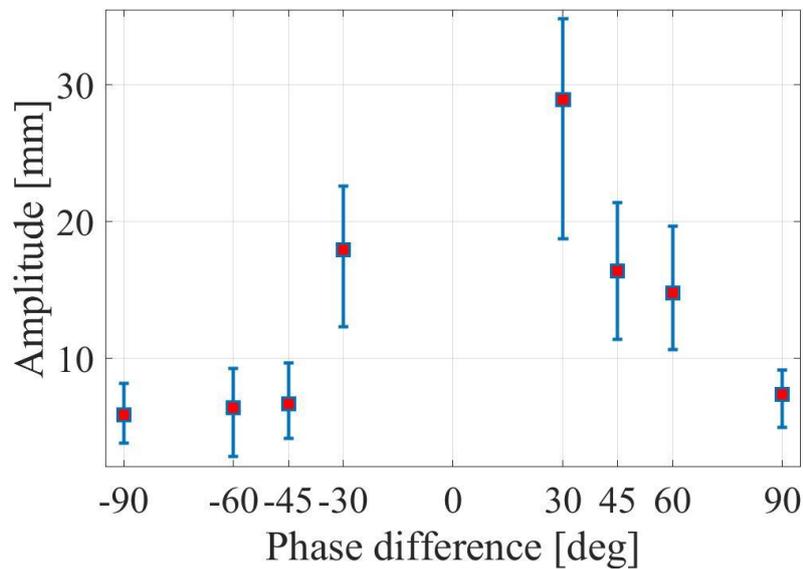


Fig. 6.6 Phase difference vs amplitude

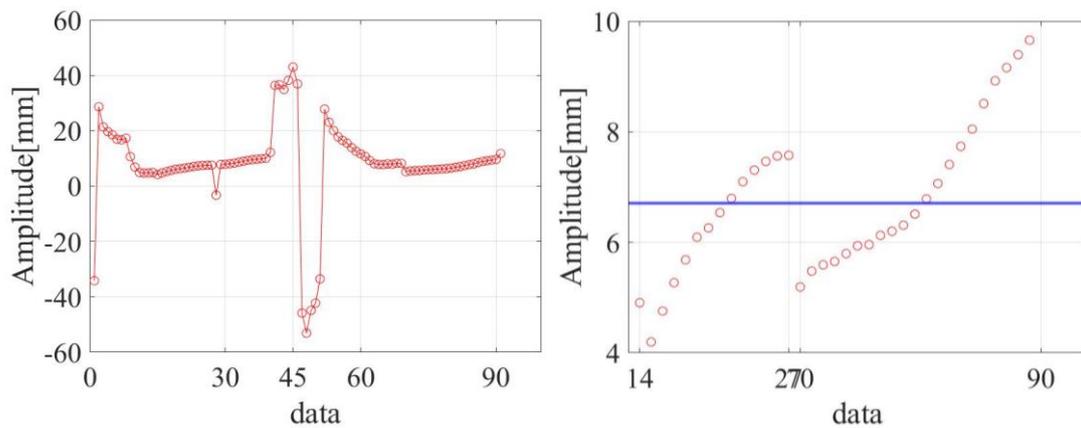


Fig. 6.7 Amplitude of the body undulation

それぞれの実験で取得されたマーカの動きを z - x 平面にプロット (Fig. 6.3 と Fig. 6.5) し、フレーム毎に正弦波近似によって得られた振幅の平均値を算出している。Fig. 6.7 は位相差 -45° における胴部の振幅を各フレーム (横軸) 毎に示したものである。左が歩行全体を示し、右は振幅が大きく変動しない部分を抽出したものである。左図を見ると、10 フレーム付近から 40 フレーム付近、および、50 フレーム付近から 90 フレーム付近までは比較的一様な振幅が得られている。しかし、歩き始めと 40 フレームから 50 フレームにかけては大きく振幅が変動していることがわかる。これは胴部のうねりの周期が大きく頭部と尾部に渡って一つの腹となるような精度の悪い近似結果 (進行波 (45° , Fig.6.5) の下から 2 番目の図参照) となることが原因である。このように近似がうまくできていないフレームは取り除いている。

Fig. 6.6 から位相差が小さくなるにつれて振幅が大きくなる傾向があることがわかる。後退波の場合、位相差が -45° から -90° で振幅の変化が相対的に小さくなっている。振幅は胴部のうねりと脚の接地のタイミング[23]や胴部の振動特性に依存するものと考えられるため、より広範囲でより細かい位相差に対する振幅の変化を明らかにする必要がある。進行波は後退波に対して振幅が大きい。これは、脚が尾部から頭部へ波を伝播させることで生じる胴部のうねりが各体節を後方から押すことによるものと考えられる。

6.3 結言

本章では、多足類ロボット i-CentiPot の歩容を定量的に明らかにするために光学式モーションキャプチャを用いた解析について述べた。解析の結果、瞬間的には定性的に確認されていた i-CentiPot の脚に波動を与えると胴部のうねりが創発するという現象について、移動中継続的に現れていたことが示された。胴部のうねりは後退波、進行波に関わらず、脚に印可された波動と同じ方向に伝播し、接地する脚と反対側に凸となるように生じている。さらに、位相差の変化に対して振幅の変化を解析したところ、位相が小さくなるに従って振幅が大きくなることが確認された。後退波の場合、オオムカデに類似した胴部のうねりを創発することから、胴部の柔軟性と脚が外側に配置されている構造がオオムカデの移動時に発生するうねりに関わっていることを示唆しているものと考えられる。また、位相差の変化に対して振幅が変化することから、移動速度の変化が胴部振動特性に合わせて振幅を増減させていることも示唆している。

第7章 脚の密度を向上させた i-CentiPot 参考機

前章までに、i-CentiPotは単純に脚を回転させるだけでムカデと類似する胴部のうねりを創発し、凹凸面に対して高い環境適応性を持つことを示してきた。しかし、i-CentiPot 壱号機と弐号機は脚間隔が広く腹部と路面が接触した状態であったため、脚と路面との間に滑りが生じ、特に屋内など平滑な環境において不自然な歩容となっていた。多足類は脚によって胴部を支持しており、平滑な表面での歩行においても脚の滑りは基本的に生じない。

そこで本章では、脚によってある程度胴部を支持できるように、脚を高密度に配置したi-CentiPot参考機[24]を実現し、歩容をi-CentiPot弐号機と比較することで脚密度の影響について解析する。

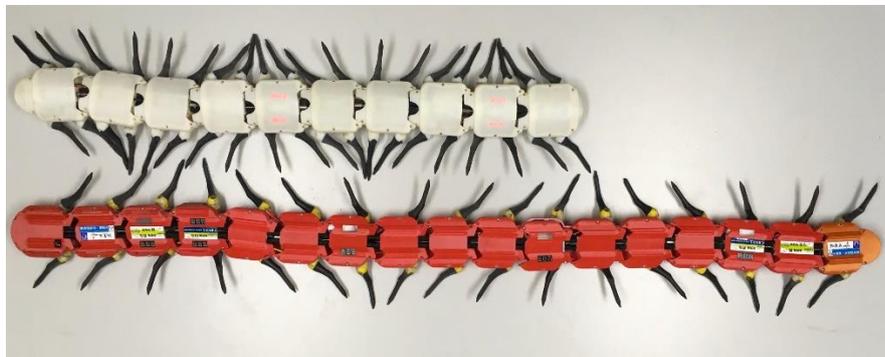


Fig. 7.1 i-CentiPot 03 (above) and i-CentiPot 02 (below)

7.1 i-CentiPot参考機

i-CentiPot壱号機と弐号機は脚の位相差を -45° とした場合、路面と4~5点で脚が密集するように接地する (Fig. 7.2)。このとき接地部分の間隔は584mmとなる。i-CentiPotの胴部はゴムスポンジで結合された3自由度の受動的な球面関節であるため胴部が自重で湾曲し、脚接地点間が広いと腹部が路面に接触する。そのため、歩行時に路面と腹部で摩擦が発生し、脚と路面との間に大きな滑りが生じる。この滑りは歩容の不自然さの大きな原因の一つと考えられる。この問題を解決するために、脚の分布密度を高めることで接地点間の距離を低減した新しい小型多足類ロボットi-CentiPot参考機を開発した (Fig. 7.1 上)。i-CentiPot参考機は全長855mm、全高50.2mm、重量1.5kgで10体節数を持つ。参考機は脚を密集させるために1体節に2対4本、合計40本の脚を持つ。また、全ての脚の間隔を統一するため、体節間の長さを従来の15mmから20mmに変更している。Fig. 7.3は後退波となるように脚の位相差を前後で -45° として歩行させた様子を示している。この場合、脚が接地する間隔は328mmとなり、自重による胴部の湾曲が軽減されている。

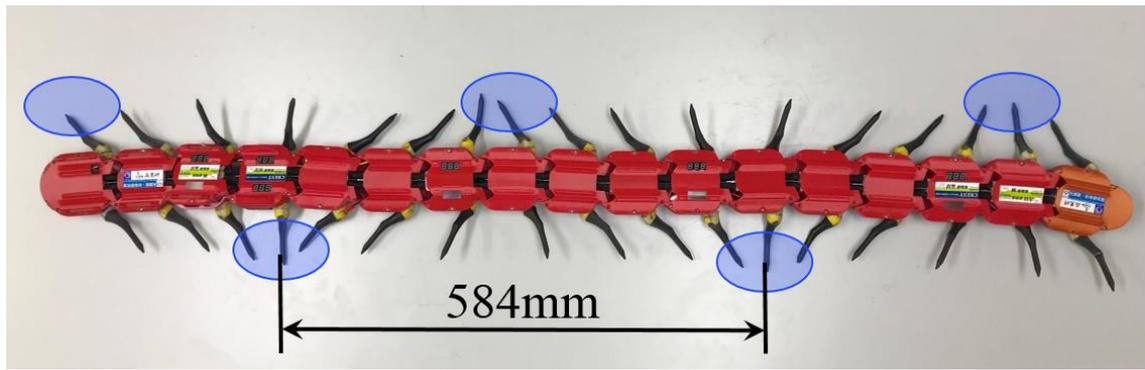


Fig. 7.2 Interval of the areas for the ground contacts of i-CentiPot 02

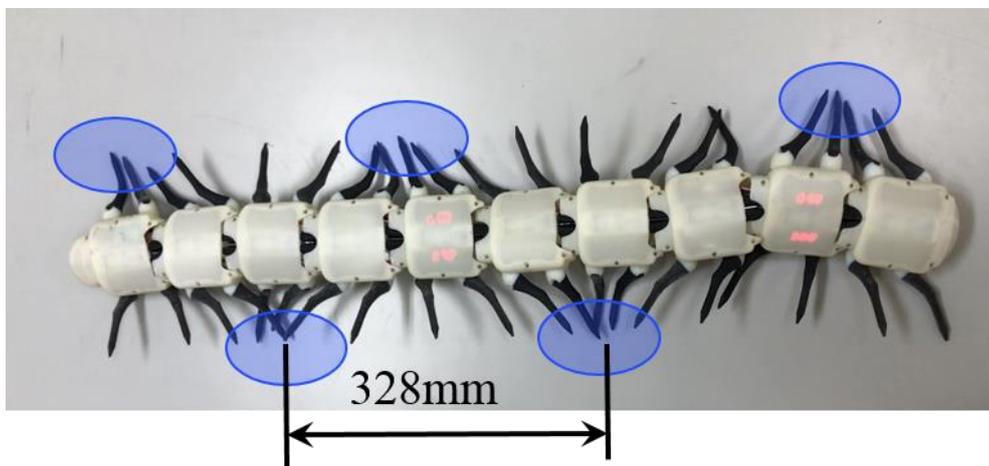


Fig. 7.3 Interval of the areas for the ground contacts of i-CentiPot 03

Fig. 7.1に示した参考機と弐号機は同じ脚形状を持つことから、参考機は脚の密度がかなり高くなっていることが確認できる。弐号機は脚間ピッチ72.8mm、脚密度（単位長さあたりの本数）0.27本/cmであるのに対し、参考機の脚間ピッチ41.1mm（弐号機に対して56.4%）、脚密度は0.49本/cm（180%）となっている。

参考機の体節の断面図をFig. 7.4に示す。体節内部にはウォームギア、28T・12Tヘリカルギア、36T・14Tギア、36Tギアからなる減速機構を内蔵している。モータへの負荷トルクの増加が考えられるため、参考機の減速比は壱号機と弐号機で用いた84:1から216:1に変更している。1体節から2対の脚を配置するためアイドルギアを介してもう一方の駆動軸に動力伝達を行っている。Wi-Fi制御モジュールESP-WROOM-2に接続されたリレーを介し、3つの直列のモータにLiPoバッテリー（4.2V、750mAh）を2つ直列に繋ぐことで電力を供給している。ギアボックスが壱、弐号機と比較して大型化したため、上部の突起を低減する目的で薄く滑らかな形状に変更している。

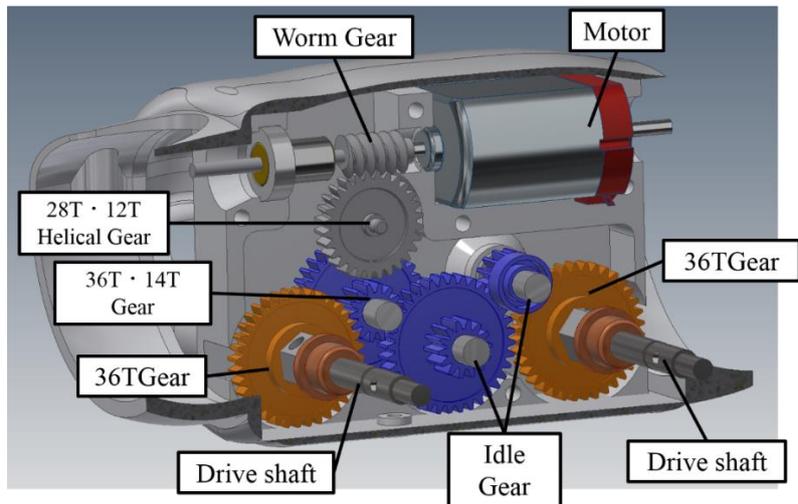


Fig. 7.4 Gear reduction system for i-CentiPot 03

7.2 実験

7.2.1 i-CentiPot参考機の歩容

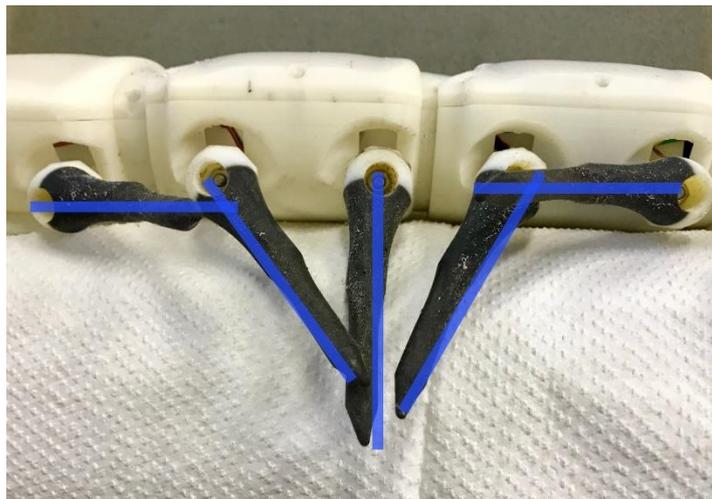


Fig. 7.5 Leg configuration generating the retrograde wave

i-CentiPot参考機を用いた平滑な路面での歩容の連続写真を**Fig. 7.6**に示す. 脚の位相は**Fig. 7.5**に示すように反時計回りを正として前後の脚の位相差を -45° に設定しているため脚と胴部は後退波を発生する. この歩容は従来のi-CentiPotと同じものであるが[19], 胴部のうねりの振幅は, 式号機で7mm, 参考機で16mmであり振幅の増加を確認した.

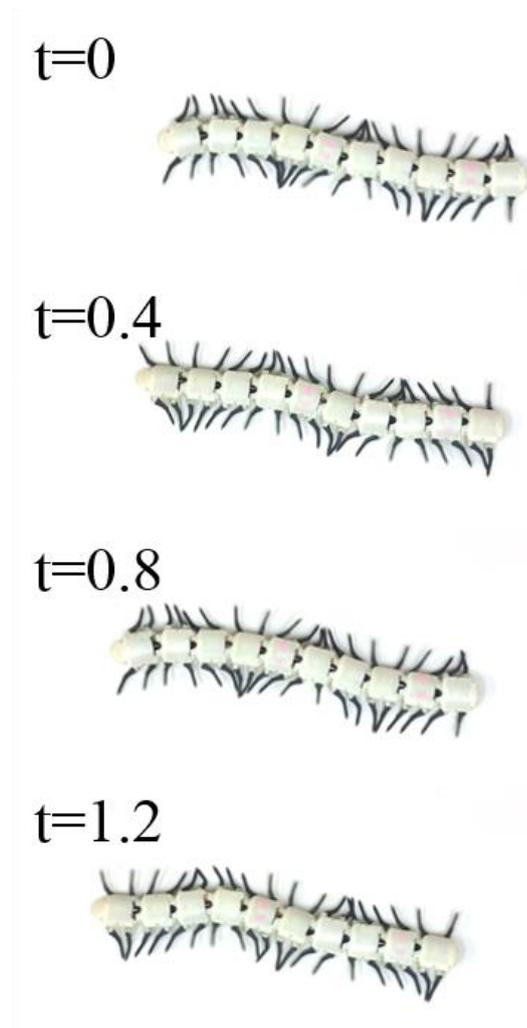


Fig. 7.6 Locomotion of i-CentiPot 03

7.2.2 歩行時の滑りについて

つぎに、i-CentiPot 式号機と参考機の歩容を比較した。Fig. 7.7は0.4秒ごとのスナップショットに脚の接地点を明示したものである。黒線は0秒と1.2秒時の頭部の到達位置を表し、青線は各時刻での脚の接地位置を表している。この図から、参考機は式号機と比較して接地点の移動量が小さいことがわかる。また、移動量は接地点の移動量に対して式号機と参考機のどちらも小さい。これは、各ロボットの脚が滑りながら移動していることを意味している。この点を明確にするために、脚の周速度に対する移動速度である滑り率を計測した。具体的に、式号機と参考機を平面で歩行させ、移動速度 V と脚の回転数に基づいて計算された周速度 V_f を用いて次式により滑り率を求めている。

$$s = \left(1 - \frac{V_f}{V}\right) \times 100 \quad (7.1)$$

実験時に両ロボットの条件を統一するため、式号機の脚の回転数を参考機とほぼ同等になるように調節している。実験より、式号機と参考機の脚の回転数をそれぞれ N_2 、 N_3 とすると $N_2=1.03\text{rps}$ 、 $N_3=1.17\text{rps}$ となった（左下添え字はi-CentiPotの番号を示す）。回転軸から接地点までの距離 R は30mmであるので（Fig. 7.8），接地点での周速度 Vf は、式号機で $Vf_2=194\text{mm/s}$ 、参考機で $Vf_3=221\text{mm/s}$ となる。移動速度はそれぞれ $V_2=71\text{mm/s}$ 、 $V_3=171\text{mm/s}$ であった。したがって、式(7.1)より式号機の滑り率は $S_2=63.4\%$ 、参考機の滑り率は $S_3=22.5\%$ となる。この結果から、式号機と比較して参考機は滑り率が小さく、脚の滑りの少ない歩行が実現されているといえる。

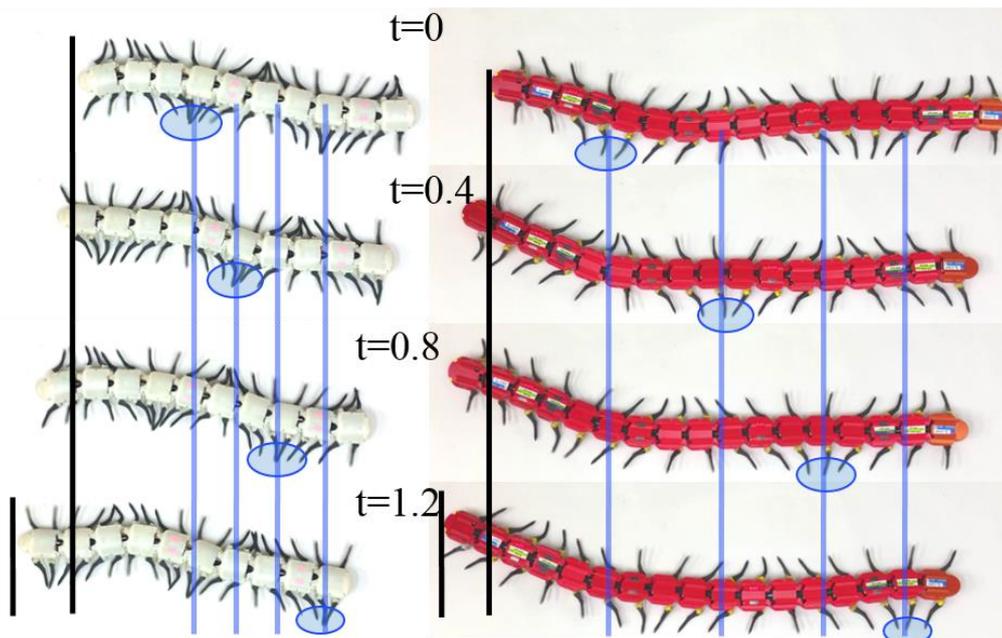


Fig.7.7 Comparison of locomotion between i-CentiPot02 (right) and i-CentiPot03 (left)

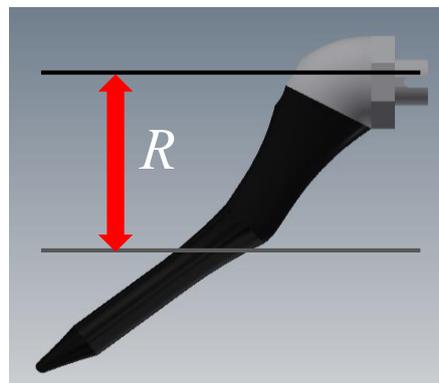


Fig. 7.8 Leg rotation radius

7.3 結言

本章では、より高密度に脚を配置した小型多足類ロボットi-CentiPot参考機を実現し、平滑な路面における歩容および、滑り率を用いた移動特性の評価について述べた。脚密度を増加することで脚の接地間隔が小さくなり、腹部の接地範囲が抑制された。その結果、i-CentiPot式号機と比較して滑り率が40%減少し、滑りが少ないという意味で自然な歩行が実現された。

第8章 多足類と i-CentiPot の持つ不気味さについて

多足類は細長い胴体に多数の脚を持ち、時々刻々変化する自然環境の中で自在に移動することが可能である。人はこの多脚を波打たせ胴体をうねらせながら移動する様子に「ゾワゾワする」[25]、つまり、恐れや嫌悪といった情動を誘発する場合が多い。人はヘビに対して情動の一つである恐怖感を本能的に覚えると言われているが[26]、多足類に対するゾワゾワ感も不気味さから来る恐怖や嫌悪に関係しているものと考えられる。我々はこの不気味さと身体構造およびロコモーションの関係について、「なにが不気味さを誘発させるのか？」という興味を持っている。

人を模したロボットを含む人工物に対する不気味な感じについて森は不気味の谷[27]を提唱している。不気味の谷は、人工物（映画やゲームなどに登場するCGによる人物やアンドロイド）がデフォルメされている段階、つまり、人にあまり似ていない段階では感じないが、ある程度人に近い外見を持つと急激に不気味さを覚える（Fig. 8.1）という経験に基づくものである。森らの解釈によれば、この不気味さは健康な人に対して、人工物がもつ何らかの意味での構造的欠陥に起因するとされている。多足類はそもそも「ゾワゾワする」のであり、その不気味さは人とは大きく異なる多脚を持ち細長いという身体構造と移動形態そのものに起因していると推測され、不気味の谷底に位置するものとする（Fig. 8.1）。

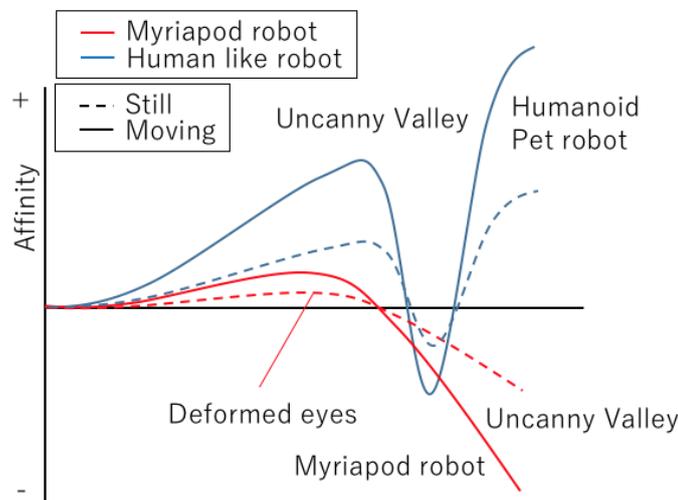


Fig. 8.1 Uncanny valley for myriapod robots

しかし、これまでに実現された昆虫類や蜘蛛類より多くの脚を持つ多脚ロボット（例えば、Koh による災害対応を意識したシンプルな多脚ロボット[7]、Hoffman らの小型多脚ロボット[9]、加納らによる多脚ロボット[12] や青井らによるもの[28, 29]、メカモ・センチピード[30] など）が我々にゾワゾワする感覚を与えることは少なく、不気味の谷底に近づくものが実現されているとは言いがたい。ホビーユースでの百(むか)ラジ！ USB

赤外線RC[31]はある種の不気味さを外見として再現しているが、脚によって移動するのではなく、胴体に配置された車輪により推進するため、不気味さが外見に強く依存するという点で興味深いものであるが脚ロボットという範疇とは言えない。我々はより不気味な超多脚ロボットを構成すれば、多足類の持つ不気味さだけでなくその移動するための知能を何らかの意味で再現できているのではないかと考えている。さらに、不気味な印象を与えるロボットはメカニズムとして性能がよいとも考えており、不気味さはある種の性能指標としても捉えられものと期待している。そこで本章では、これまでに実現してきた多足類ロボット*i-CentiPot* [18, 19, 20, 24]に対して感じられる不気味さについて考察する。

8.1 不気味の要素

不気味とは「何となく不安で恐ろしいさま。気味の悪いさま」（大辞林）とされている。気味（きみ、きび）は「心身に感ずる，快・不快の気持ち」である。ここではムカデなどの生物に限らずさまざまなものに対してどのような要素が我々に不気味な感じを生じさせているのか列挙してみる。

8.1.1 体表の状態

まず、体表の状態は触れたときのイメージや見た目そのものの印象から気持ち悪さを与えている。表現としては以下の言葉を挙げる。ネバネバ、ぬめぬめ、つるつる、てかてか、ざらざら。基本的には濡れている、粘液がついている、体毛で覆われている、色が気持ち悪い（気持ち悪い色でも議論ができそうである）、模様、滑らかさなどが不気味さを生じさせている。

8.1.2 形態

形態もまた不気味さを与える。特に、人間やペットなどの身近な哺乳類とは異なる形態や本来の形態からの変形、さらには質感に不気味さを感じる。例えば、柔軟性から生じる身体の変形として潰れ、伸び膨張、屈曲、ねじれなどが挙げられる。質感としての柔らかさも場合によっては不気味さを誘発する。また、異形は簡単に不気味さを与えてくれる。身体の部分的欠損、変形や、異なる種の形態学的特徴、例えばムカデなどが持つ超多足で細長い胴体などは形態そのものが不気味さの要因となる。

8.1.3 動き

動きによって生じる不気味さも考えられる。例えば敏捷さ、予測不能な動き、非定常な動き（例えば体の部分的欠損によるもの）などが恐怖感を与える。また、森らも指摘しているように、形態的に同じものでも静止時と動作時では動いているときの方がより不気味さを増幅する。

8.1.4 その他

その他, 匂い, 音 (鳴き声) はそのものが不気味さを与えるだけでなく, 周囲の状況 (例えばムカデがでそうな場所) などと相まって恐怖のトリガーとなる現象の兆し (いないけどいるような感じ) を与える.

8.2 i-CentiPot の不気味さ



Fig. 8.2 i-CentiPot 01 (top left), 02 (top right), 02 W (bottom left), and i-CentiPot 03 (bottom right)



Fig. 8.3 i-CentiPot 01(top), i-CentiPot 02 W(2nd), i-CentiPot 02(3rd), i-CentiPot 03(4th), *Scolopendra subspinipes mutilans* (bottom)

これまでに述べてきたように本研究では多足類ロボットi-CentiPotシリーズを試作してきた (Fig. 8.2) [18, 19, 20, 24]. このi-CentiPotは壺号機 (Fig. 8.2左上, およびFig. 8.2最上図) が32脚, 式号機 (Fig. 8.2右上およびFig. 8.3上から3番目) が34脚, 参号機 (Fig. 8.2右下およびFig. 8.3上から4番目) が40脚を持ち, 胴体は受動要素による球面関節で連結された16体節 (壺号機), 17体節 (式号機) および10体節 (参号機) を持つ. 基本的にはムカデと同様に一体節あたり一対の脚を持つが, 参号機は脚密度を高めるため一体節あたり二対の脚を持っている (これはヤスデが保つ構造である). また, 後述する式号機の脚を車輪に置き換えたi-CentiPot 02 WをFig. 8.2左下およびFig. 8.3上から2番目に示す. i-CentiPotは超多脚ロボットとしては比較的小型 (1.2m) 軽量 (1.5-2kg) である. 機械的に与えられた位相差を持つ脚が回転することで前進し, 脚の波に合わせて胴体のうねりを創発する. このロボットをイベントなどで子供から大人までに観察してもらった結果, 「気持ち悪い」という感想を多くいただいた. 興味深い点は, 気持ち悪さと同時に「かわいい」という親和感を持つ方もかなりいたことである. さらに, 小学生未満の幼児がi-CentiPotを見て恐怖し, 場合によっては泣いてしまうということもしばしば観察されている. (トラウマにならないように遠隔操作を体験してもらい, 静止状態でさわってもらいなど心のケアも必要と考えている). しかし, これまでの実験から, 歩行中のi-CentiPotを上方から見た場合 (Fig. 8.3), ムカデなどにくらべ脚がまばらで, 低位置から長手方向に見て脚が密集する場合 (Fig. 8.2左上) と比較して不気味さに欠けていた. また, 床などの平面上に置いて走行させた場合と, 落ち葉のあるような自然環境下で走行させた場合とでは不気味さを感じる度合いが異なることも確認している.

前節で議論した不気味の要素において, i-CentiPotシリーズで実現されたものは, 体表の状態としての滑らかさと滑りやすさ, 動きとして環境に合わせて変化する非定常性と予測不可能性, 形態学的特徴として, 柔軟性 (脚と胴部の柔らかさ) と異形 (超多脚と細長い胴体) である. これらの要素の中で何が不気味さを優位に感じさせるのかという点が問題となる. そこで, i-CentiPotを用いて不気味さの要因を考察する. 具体的にはi-CentiPotと走行環境の条件を変え, 条件の違いによって得られる不気味さを変化させることでその要因を限定する.

8.2.1 移動環境と不気味さ

i-CentiPotを走行させるとき, 環境によって不気味さの印象が異なる. 室内の滑らかな平面上を移動する場合, 壺号機と式号機に顕著であるが, 脚が路面に対して滑るため脚の回転に対して移動速度が遅い. この滑り (式号機で滑り率63%) はある種の不自然さ (不気味さが減少する) を与える. しかし, 自然環境, 例えば土で構成され散乱する落ち葉などで覆われた緩やかな凹凸地面では, ムカデの生息域に類似していることと地表のテクスチャによって脚の滑りが低減されるなどにより屋内の不自然さが軽減され, より不気味な感覚が増幅される. 静止状態でも, 自然環境下のFig. 8.2と屋内床面上のFig. 8.3を比較するとその印象が大きく異なることが確認できる. 現時点では, 実験を行った

一部の感想でしかないが，環境の変化が不気味さに影響を与えるものと考えられる．

8.2.2 i-CentiPot 02 W : 脚と不気味さ

多足類は多くの脚が波打ちながら移動する点の不気味さの主要因と考えられる．そこで，i-CentiPot 式号機の脚を車輪に変更したi-CentiPot 02 Wと比較した（自然環境下のFig. 8.2左下と屋内床面上のFig. 8.3, 2番目参照）．この図から，静止状態において脚の存在が不気味さを与えていると捉えられるかもしれない．動作時は脚が回転するため，さらに不気味さが増幅される．定量的な評価は難しいが，脚の存在と動作は不気味さに強く寄与しているものとする．上述したように超多脚という形態学的特徴は異形性であり，人が本質的に自分と異なる形態を有する生物に不気味さを感じることに起因するのかもしれない．ただ，車輪を持つ場合も異形であることには変わりがないので，なぜ脚の方が不気味なのかについては更なる考察が必要である．

8.2.3 i-CentiPot 参考機 : 脚の密度および滑りと不気味さ

移動環境と不気味さにおいて指摘したが，脚の滑りが不気味さに影響すると考えられる．この滑りを低減させるために，脚の配置密度を高めた試作機i-CentiPot 参考機（Fig. 8.2右下およびFig. 8.3上から4番目）を開発している．次章のアンケートで不気味さについて検証するが，脚密度もまた不気味さにある程度寄与しているものとする．

8.3 アンケート

i-CentiPot 式号機とi-CentiPot 参考機を用いて多足類ロボットの不気味さに関するアンケート調査を実施した．回答者の多くは7～10歳程度の小学生であるが，その家族（成人）の回答も得たため，年齢にはばらつきがある．

8.3.1 アンケート 1 回目

1回目のアンケートは，i-CentiPot は不気味もしくは気持ち悪く感じるものであることを前提としている．具体的には，従来のi-CentiPot 式号機と脚密度を変更したi-CentiPot 参考機のどちらがより不気味もしくは気持ち悪いと感じるかを選択し，その理由について用意した項目で当てはまるものを選択する形式を採っている．理由として用意した選択項目は，脚数，移動速度，色，音，胴部長さ，柔軟性，動き方，形状である．アンケートの回答者は27名であった．

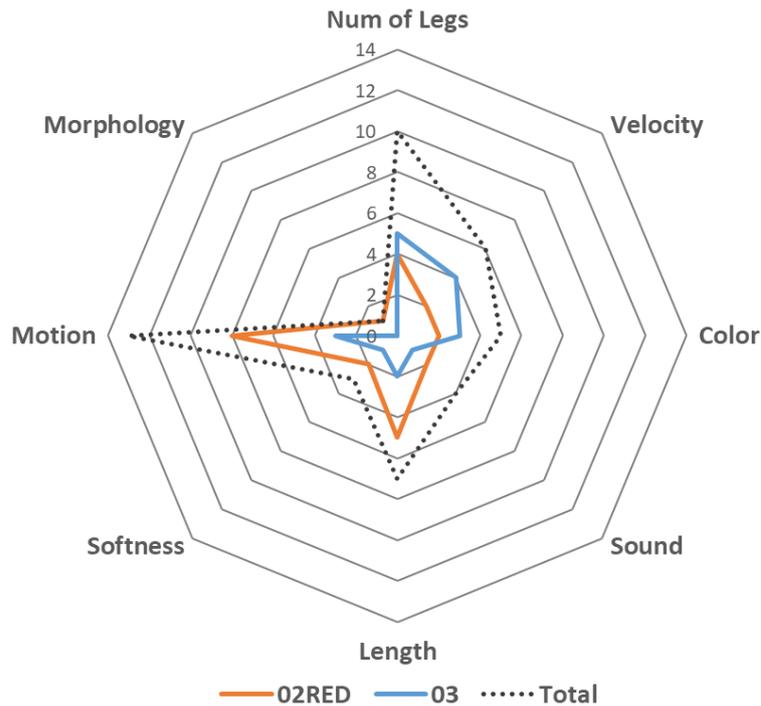


Fig. 8.4 The first questionnaire of uncanniness

アンケート結果から、弐号機が12票，参号機が10票となり，弐号機のほうがより不気味で気持ち悪いと感じるというものであった．それぞれのロボットを選択した理由をレーダーチャートとして**Fig. 8.4**に示す．弐号機を選択した理由として動き方を挙げた人数が多く参号機との差が顕著である．自由記述欄には「脚の動きが気持ち悪くて，またニョロニョロ動くのが気持ち悪さを増していました」という記入が見られた．参号機を選択した理由では脚数が最も多く，移動速度，色も票数が多い．自由記述の欄には「脚が速かった」などの，脚のすべりを改善したことによる移動速度の増加に関するコメントが見られた．全体として，動き方，脚数，胴部の長さ，移動速度，色の順で不気味さの要因が挙げられている．

8.3.2 アンケート2回目

2回目のアンケートは両ロボットについて，カッコイイ，かわいい，気持ち悪い，怖い，その他，の選択肢の中から該当するものを選ぶことで，そもそも不気味と感じているかどうか問うことも含める内容とした．第1項目に対する回答で気持ち悪い，怖いと答えた場合，そう感じた理由を用意した項目の中から選択する．理由として挙げた選択項目は第1回とほぼ同様に，脚数，移動速度，音，胴部長さ，脚の密度，体の動き方，脚の密集部の動き，胴体形状，脚形状である．アンケートの回答者は31名であった．

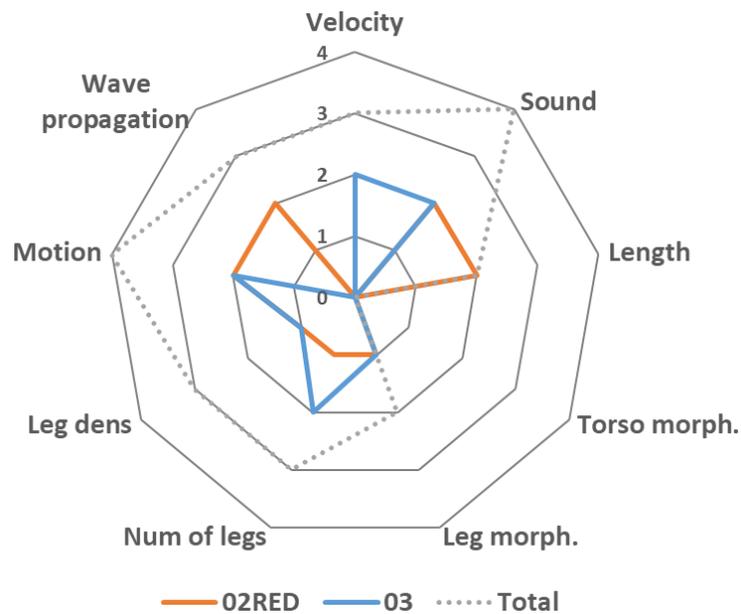


Fig. 8.5 The second questionnaire on uncanniness

質問1での回答は、かっこいい16票、かわいい2票、気持ち悪い7票、怖い4票、その他3票となっている。かっこいいと回答した人数が最も多く、可愛いも含めて**Fig. 8.1**における親近感の要素が多く、ムカデなど実際の生物に感じる不気味さは表現されていないといえる。また、気持ち悪い、怖いと回答した被験者は、式号機に対して4名、参号機で5名がより強く気持ち悪さや恐怖を感じるという結果となっている。さらに、不気味さを感じた理由についてのレーダーチャートを**Fig. 8.5**に示す。式号機を選択した理由は、音、胴部長さ、体の動き方、脚の密集部の動きの票数が多く、とくに胴部長さと脚の密集部の動きは参号機との差が顕著である。自由記述欄には「摩擦が少ない、効率が悪そう」という記入が見られた。参号機を選択した理由では脚数、移動速度、音、体の動き方を選択した人数が多い。特に移動速度については式号機との差が顕著である。両者に共通して体の動き方と音、それに続いて脚数、脚密度、移動速度が選択理由として多い傾向が見られる。1回目のアンケートと同様に、動き方や移動速度といった動作に関わる項目や、脚数や脚密度といった形状に関わる項目を挙げた被験者が多い点は、上述した不気味さの要素と方向性が一致する。音についてはモータ音がかなり大きく、不意に動作させた場合、この音によって恐怖を感じるのではないかと考えられ、興味深い結果ではあるが、本章で議論するロボットの本質的な不気味さとは無関係と考えるべきである。

8.4 結言

本章は、多足類ロボット*i-CentiPot*の不気味さについて考察した。まず、生物や人工物に感じられる不気味の要素を列挙し分類を行った。また、*i-CentiPot*シリーズについていくつかの条件を変更して比較することで*i-CentiPot*が与える不気味さの要素を明らかに

した。さらに、アンケートを行うことでどのような要素が不気味であるか調査をおこなった。その結果、動きや形態学的な特徴が不気味さを与える主な要因であるという傾向が見られた。したがって、i-CentiPotはムカデなどの多足類が有する不気味さをその形態や動きによってある程度再現しているものと考えられる。しかし、本報告の考察は主観的で、得られたアンケートも表面的なものであるため、不気味さについてさらに深い調査や考察が必要と考える。

第9章 動力学モデルによる多足類の運動解析

上述してきたように，身体形状や柔軟性に基づいて環境との相互作用から得られる陰的制御則を積極的に利用することで，軽量かつ単純な機構を用いた多足類ロボット i-CentiPot を開発してきた．また，i-CentiPot は脚を回転させるだけでムカデと類似する胴部のうねりを創発し，凹凸面に対して高い環境適応性を持つことを示してきた．しかし，実際にロボットを用いて脚の位相差や回転数などの条件を自由に与えて歩容を解析することは困難であり，実験により得られた結果は限定的な条件に対するものであった．

そこで本章では，i-CentiPot のより詳細な解析を行うことで多足類の歩行メカニズムを明らかにするために，受動要素で連結された体節を持つ動力学モデル[32]を構築し歩容解析をおこなったことについて述べる．

9.1 動力学モデル

i-CentiPot を2次元2Nリンク系 (Fig. 9.1) としてモデル化し，ラグランジュの方法により運動方程式を導出する．

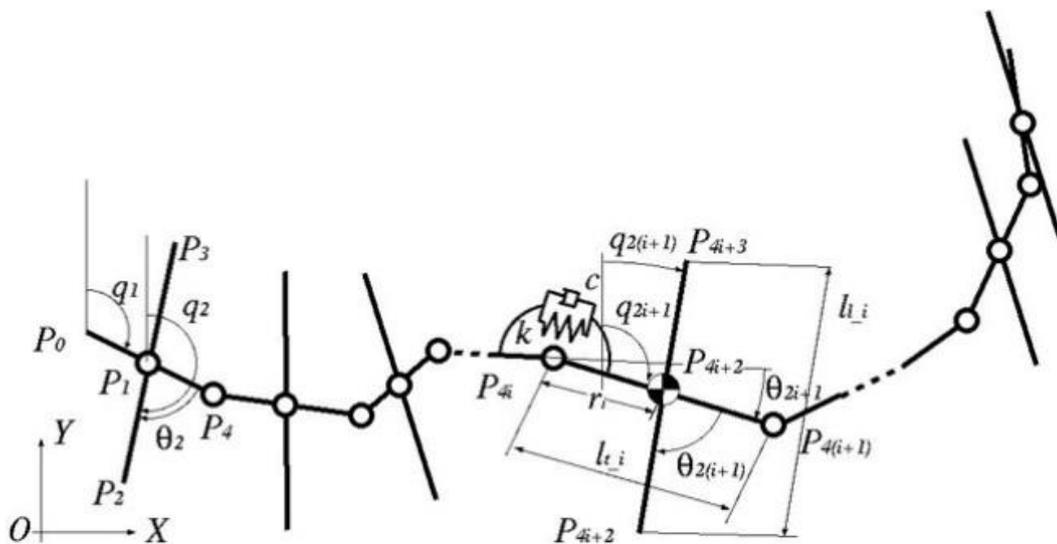


Fig. 9.1 Link system for i-CentiPot

一般化座標を $q = [q_1, \dots, q_{2N}, P_0^T]^T \in \mathfrak{R}^{(2N+2) \times (2N+2)}$ とする． $P_0 = [x_0, y_0]^T \in \mathfrak{R}^{2 \times 1}$ は胴部の後端で， $q_i (i = 1, \dots, 2N)$ は各リンクの絶対角度を表している．得られた運動方程式は次式で与えられる．

$$J(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = \Gamma \quad (9.1)$$

ただし， $J, C \in \mathfrak{R}^{(2N+2) \times (2N+2)}$ は慣性行列，遠心コリオリ行列， $\Gamma \in \mathfrak{R}^{(2N+2) \times 1}$ は一般化力である．脚先端に作用する摩擦力 f_{si} は垂直抗力とリンク先端 P_{si} (右/左脚: $= P_{4i-2} /$

P_{4i-1} の速度 $v_{P_{si}} = \dot{P}_{si}$ (対路面滑り速度) の関数として与えられる摩擦係数 $\mu(v_{si})$ によって以下のように与えられる.

$$f_{si} = -\frac{v_{si}}{|v_{P_{si}}|} \mu(v_{si}) F_{P_{si}} \quad (9.2)$$

$$\mu(v_{si}) = \mu_0 (1 - e^{-a(|v_{si}|)}) \quad (9.3)$$

ただし, μ_0 は最大摩擦係数, a は正の定数である. 仮想仕事の原理から, 摩擦力によって生じたすべてのリンクに作用する外力ベクトル $\Gamma_f \in \mathfrak{R}^{(2N+2) \times 1}$ は,

$$\Gamma_f = \sum_{k=1}^N \Gamma_{f_{si}} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial P_{si}}{\partial q} \right)^T f_{si} \quad (9.4)$$

となる. 式 (9.1) の一般化力 Γ は Γ_f と関節トルク $\tau = [0, \tau_2, \dots, \tau_{2N}, 0, 0]^T \in \mathfrak{R}^{(2N+2) \times 1}$ の和である.

$$\Gamma = \Gamma_f + \tau \quad (9.5)$$

前述したように左右の脚は 1 つのリンクで表され, 推進力は脚が交互に地面を蹴るときに発生する. 脚の先端が後方に回転するとき地面に接触し摩擦力が作用するという仮定から, 垂直抗力は

$$F_{P_{si}} = (m_t + m_l)g, P_{si} = \begin{cases} P_{4i-1}, & \dot{\theta}_{2i} \geq 0 \\ P_{4i-1}, & \dot{\theta}_{2i} < 0 \end{cases} \quad (9.6)$$

となる. また, 脚の目標軌道は次式で与える正弦波とした.

$$\theta_{2i_d} = A \sin(\omega t - i\varphi) + \frac{\pi}{2} \quad (9.7)$$

ただし, A , ω , φ はそれぞれ振幅, 脚の角振動数, 位相差である. この目標軌道に対し脚をPD制御することによって追従させる.

9.2 数値シミュレーション

本節では、動力学モデルを用いた数値シミュレーションについて述べる. i-CentiPot式号機の物理パラメータを参考に、脚と体節の長さをそれぞれ0.280mおよび0.144mとし、質量はそれぞれ0.360kgおよび0.364kgとしている. また、振幅を $\pi/8\text{rad}$ 、位相差を $-\pi/4\text{rad}$ 、関節のばね定数と粘性係数はどちらも0.02とし、摩擦係数は0.3とした. シミュレーションでは脚8対、胴体8体節の合計16リンクモデルを用いた.

9.2.1 脚の角振動数に対する歩容の変化

Fig. 9.2は動力学モデルの脚の角振動数を $\pi/4\text{rad/s}$ としたシミュレーション結果の3~4秒ごとのスナップショットである. 図左側が頭部で右を進行方向としている. また、接地点を赤丸印で表している. 歩行開始時は歩行が過渡的であるため、定常的な歩行となった10.7秒付近から図示している. この図より、歩行中、脚先の疎密波と胴部のうねりが前から後ろへ伝播していることがわかる.

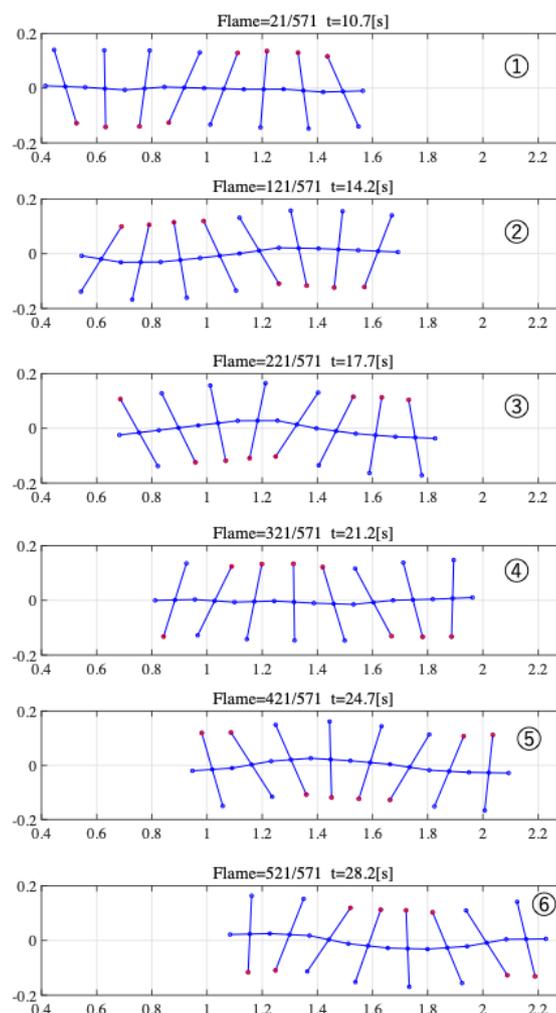


Fig. 9.2 A simulated result of locomoting i-CentiPot

脚の波とうねりとの関係を明らかにするため、脚の位相差とうねりの関係をFig. 9.3に示す。上図は歩行のスナップショットであり、中央図は脚の位相差を赤線、各体節の波を青線で表している。中央図において、第4脚付近で赤線が右肩下がりとなりながらx軸を横断し、同時に胴部が左側に湾曲しP16（第5関節）が極大となっている。これはムカデやi-CentiPotと類似した歩容であり、脚の位相差に対し胴部のうねりが1/4周期遅れることがその条件となっている。下図は各関節のy軸の変化と脚の位相差の時間変化を表したものである。黄色は高い値、濃い青色は低い値を示している。脚の波は頭から尾に伝播する後退波であり、うねりは脚から約1/4周期遅れて伝播していることから、このシミュレーション結果において常にムカデやi-CentiPotと同じ歩容を示していることがわかる。

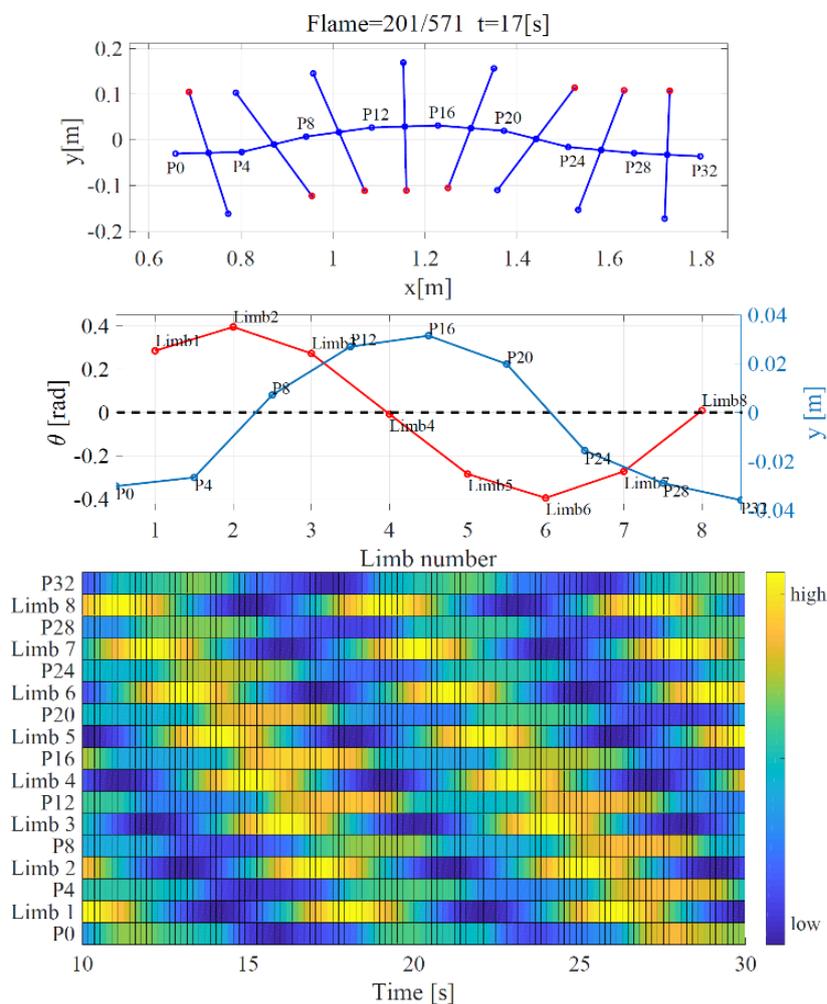


Fig. 9.3 Snapshot of the gait (above), and phase difference of the limbs (red line) and lateral displacements of the axial undulation (10 times of the original, blue line) in case of $\pi/4$ rad/s (middle), and a spatiotemporal pattern of body joints and phase difference of legs (bottom).

次に角振動数 4π rad/sにおける結果をFig. 9.4に示す. Fig. 9.4上図より胴部のうねりを確認できる. しかし, $\pi/4$ rad/sの時とは逆に脚の接地部と同じ方向に胴部が凸型となるように湾曲している. Fig. 9.4中央図は第6脚付近において赤線が右肩下がりとなりながらx軸を横断し, 同時に胴部が右側に湾曲しP20 (第5関節) で極小となっている. これはムカデやi-CentiPotとは逆方向に胴部がうねっていることを意味し, 脚の位相に対して胴部のうねりが1/4周期進むことが条件である. Fig. 9.4下図は, 各関節のy軸の変化と脚の位相差の時間変化を示している. この図から, シミュレーションを通して胴部のうねりが脚の位相差から約1/4周期すすんで伝播していることがわかる.

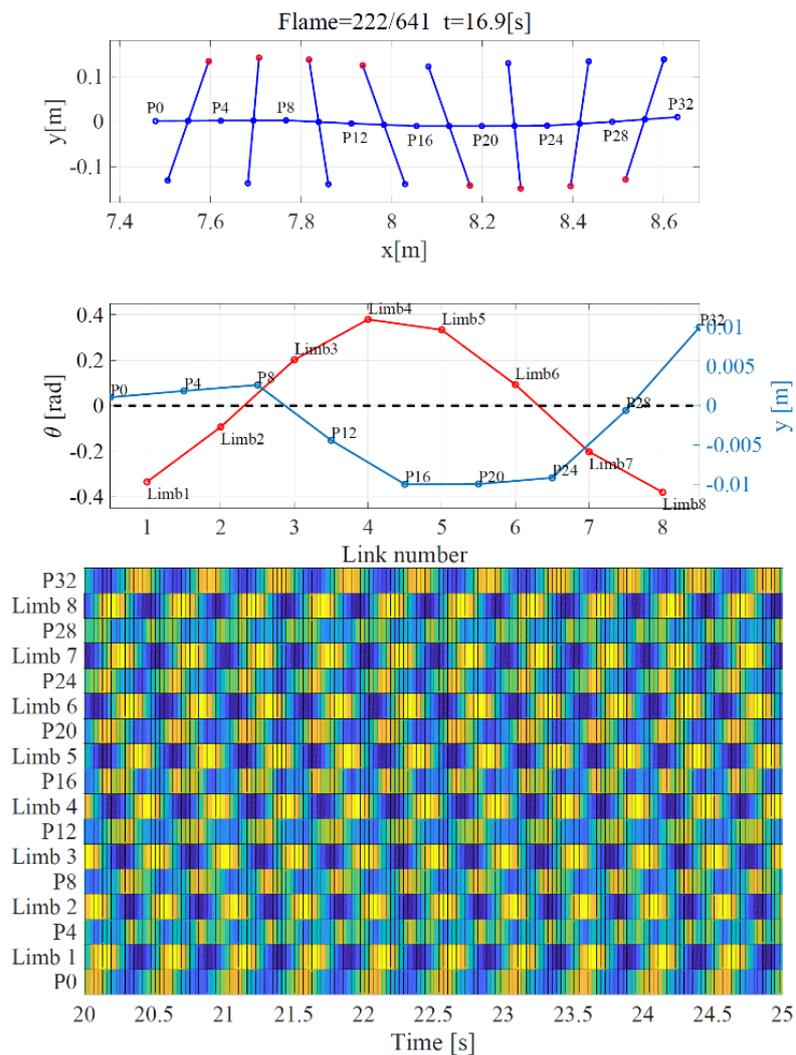


Fig. 9.4 Snapshot of the gait (above), and phase difference of the limbs (red line) and lateral displacements of the axial undulation (10 times of the original, blue line) in case of 4π rad/s (middle), and a spatiotemporal pattern of body joints and phase difference of legs (bottom).

9.2.2 脚の位相差と胴部のうねりの関係

最後に、脚の位相差に対して胴部のうねりがどのように変化するか明らかにするために、脚の角振動数を $\pi/4$ rad/s とし、位相差を $-11\pi/12 \sim \pi$ rad まで $\pi/12$ rad 間隔で変化させてシミュレーションをおこなった。位相差が負の時後退波、正の時進行波となる。胴部の振幅を **Fig. 9.5** に、重心の移動速度を **Fig. 9.6** にそれぞれ示す。 **Fig. 9.5** より、脚の位相差の絶対値が小さい時、胴部のうねりの振幅が大きくなる傾向が確認できる。

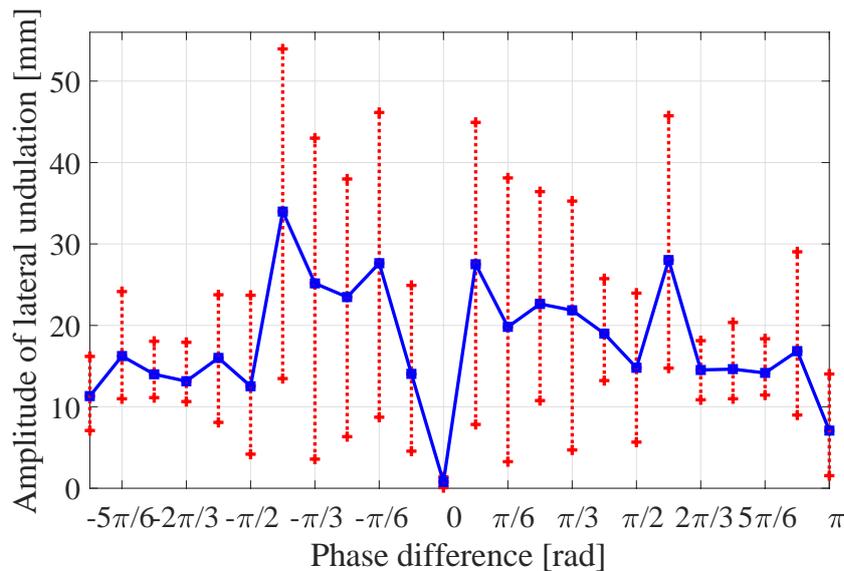


Fig. 9.5 Amplitude of the axial undulation.

Fig. 9.6 より、脚の位相差の絶対値が小さく胴部のうねりが大きい時、後退波を選択すると移動速度が大きくなり、進行波では位相差が 0 の場合よりも速度が小さくなる。胴部のうねりが小さい時、移動速度は相対的にかなり遅くなっていることも確認できる。

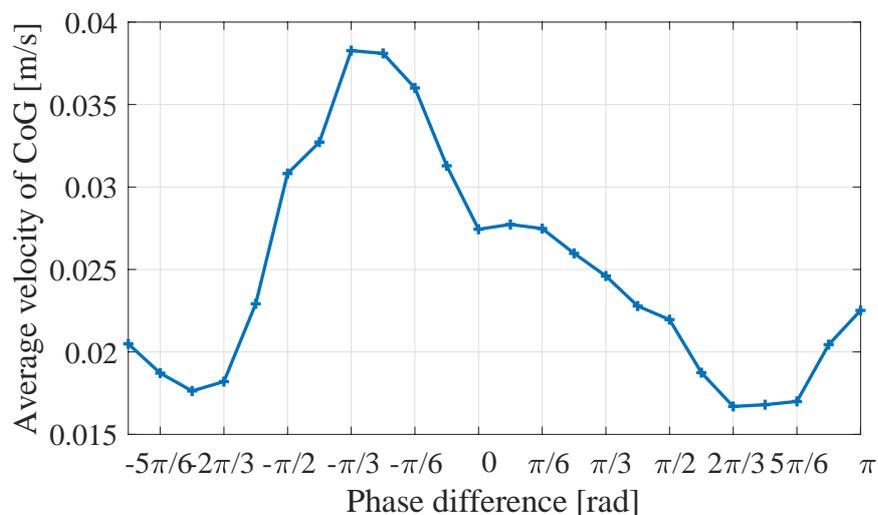


Fig. 9.6 Average velocity of center of gravity.

オオムカデや i-CentiPot において脚が後退波を生じるとき、胴部のうねりは脚の振幅を増大させ、その結果歩幅が大きくなることで移動速度が増加することが知られている [3][8]。得られた結果はこれらの知見に加え、イシムカデが用いるような進行波において胴部のうねりが移動速度を低減させ、うねりが小さいとさらに移動速度が低下することを明らかにした。したがって、ムカデのように左右で 180° の位相差を持つ場合、脚で後退波を発生し適度に胴部をうねらせながら移動する歩容が移動速度の意味で有利であるといえる。胴部のうねりが受動的に創発することは、オオムカデがこの現象をうまく利用しながら歩容を生成している可能性を示唆しているものと考えられる。進行波を生じる場合、受動的な胴体に対して逆相のうねりが生じ、移動速度が減少することは、イシムカデがこのうねりを体節や筋配置などによって構造的に抑制し、さらに能動的に逆向きの運動を作り出す必要があることを示している。

9.3 結言

本章では、ムカデ及び i-CentiPot が示した歩容や特徴を明らかにすることを目的とし、受動要素で連結された体節を持つ動力学モデルを構築し、数値シミュレーションによって歩容解析を行った。

その結果、角周波数が小さい場合、接地点に対して胴部が逆方向へ湾曲するオオムカデや i-CentiPot と類似した歩容が創発された。しかし、角周波数が大きい場合、胴部のうねりが逆位相となる、つまり接地点に対して胴部が同じ方向へ湾曲することを確認した。また、位相差の絶対値が小さい時、胴部のうねりが大きくなりやすく、後退波の場合移動速度が大きくなる傾向が確認された。したがって、ムカデのように左右で 180° の位相差を持つ身体特性を持つ場合、後退波を発生し胴部をうねらせながら移動する歩容が移動速度の意味で有利であるといえる。また、オオムカデは胴部にうねりが受動的に発生する現象を巧く利用している可能性を示唆している。進行波を発生させる場合は、受動的なうねりを抑制するために身体形状の進化や能動的な運動の生成をする必要性を示唆している。

第10章 結論

本論文では、明示的な知能をできる限り取り除くことで形態学的特徴と環境との相互作用のみによって動作する多足類ロボットの実現を目的とし、なめらかで細長く柔軟な胴体と多脚を持つ比較的小型な多足類ロボット*i-CentiPot*シリーズを開発した。また、その歩容を中心とするふるまいについて考察をおこなうとともに、移動能力を向上させるために能動湾曲機構と触覚機構を導入しその有効性を検証した。さらに、動力学モデルを導入することでより詳細に脚の配置と歩容の関係について考察を行った。

その結果、ムカデのように左右脚を逆位相とし、後退波を与えると胴部に遊脚の振幅が増加するように左右方向の後退波が生じるというオオムカデと同様の歩容が創発されることを確認した。進行波を与えた場合、胴部のうねりがイシムカデとは逆相となる。また、左右脚を同位相にすると胴部に上下方向の波が生じ、前後の位相差によって移動速度が変化することを観察し、条件によっては後退するという現象を確認した。さらに、動力学モデルを用いた数値シミュレーション結果から、左右脚が逆相の場合、前後の位相差が $\pi/2$ 未満で後退波を発生させた場合に移動速度が最も大きくなり、進行波を発生させると体幹のうねりは増幅されるが歩幅が減少し移動速度が小さくなることが示された。つまり、オオムカデは昆虫（トライポッドの場合前後で π の位相差）と比較して小さい前後の位相差をもつなめらかな後退波を脚に生じさせ、胴部を受動要素によって共振させながら能動的にうねらせることで歩幅を広げより高速に移動していると言える。この結果は、AndersonやHoffmanが得た「オオムカデは胴部を能動的にうねらせる」ことで「歩幅を増幅させ移動速度を向上させている」という結果から更に踏み込んで、「なぜオオムカデは脚に進行波ではなく後退波を生じさせるのか？」という問いに一つの答えを与えるものである。また、進行波を生じるイシムカデの歩容については、胴部の受動的なうねりは速度低下を招くため、これを逆相で発生させるために体節形状や筋配置を進化させ、能動的にうねりを発生させる必要性を示唆している。実際、イシムカデの体節は大小の背板が交互に配置され、これがうねりを抑制していると考えられている[1]。さらに、ヤスデの脚の配置については「脚の振動方向が同じであってもアンカーを打つタイミングによって移動方向を変化させることができる」というTanakaらが示した数理的な結果を実証するものである。

*i-CentiPot*はモータのオンオフのみで駆動されるにも関わらず、自然環境下における自律移動を実現している。その重要な要因は多足類の形態学的特徴として細長く多くの脚をもち、胴体や脚が柔軟でなめらかな形状を持つ点にあった。また、落ち葉などが散乱する屋外環境で動作することで、屋内の平坦な路面などと比較してより「自然な」ふるまいを示している点は、*i-CentiPot*の形態だけでなく環境との相互作用が重要であることを意味している。したがって、*i-CentiPot*が環境と交わることで生物の持つ知能のエッセンスの一端を表現しているものと期待する。これに関連して、*i-CentiPot*に対して人は不気味さを感じる点について議論した。多足類の不気味さは、人と全く異なる形態やふるまいに強く依存するものと考えられる。つまり、人が*i-CentiPot*に不気味さを感じる点

も、このロボットが多足類の特徴やふるまい、その背景にある知能のエッセンスを捉えている可能性を示唆している。

さらに、比較的軽量で小型の多足類ロボット*i-CentiPot*が自然環境下で自律移動を可能とした点は、多足類の形態学的特徴を巧く構成すればスイッチのオンオフや簡単な触覚による単純な制御でも（つまり小さな脳、もしくはより原始的な神経のみでも）ある程度有効な移動ロボットを実現できることを示すものである。例えば、*i-CentiPot*にカメラなど簡単なセンサを取り付け複数屋外に放つことで探査活動を自律的に行える可能性がある。知能としてはかなり原始的で、移動能力は限定されるが、安価で単純な複数のロボットを配置することで効果的な探査が行える可能性がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり終始あたたかい御指導，御教授と激励を賜りました岡山理科大学工学部 衣笠 哲也教授に心から感謝の意を表します。

また，岡山理科大学工学部 吉田 浩治教授，林 良太教授，大阪大学工学部 大須賀 公一教授，杉本靖博 准教授，末岡 裕一郎 助教，角田 祐輔様，石川 将人 教授，南 裕樹 准教授，増田 容一 助教には本研究に対する有益な御討論，御助言をいただきました。深く感謝いたします。

さらに，ロボット製作についてご協力をいただいた石黒章夫 教授並びに石黒・加納研究室の方々に深く御礼申し上げます。

最後に本研究を遂行するにあたり，実験，ロボット製作等にご協力くださった衣笠研究室の卒業生の方々および衣笠研究室の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] S. M. Manton, The evolution of arthropodan locomotory mechanisms- part 3. The locomotion of the chilopoda and Pauropoda, *J of the Linnean Society of London (Zoology)*, 42, 118-167, 1951.
- [2] S. M. Manton, *The Arthropoda: habits, functional morphology and evolution*. Oxford: Clarendon Press, 1977.
- [3] Lewis, J. G. E. (1981), *The biology of centipedes*, Cambridge University Press.
- [4] B. D. Anderson, J. W. Shults, and B. C. Jayne, Axial kinematics and muscle activity during terrestrial locomotion of the centipede *scolopendra heros*, *The J. of Experimental Biology*, 198, 1185-1195, 1995
- [5] S. M. Manton, The evolution of arthropodan locomotory mechanisms- part 4. The structure, habits and evolution of the diplopoda, *J of the Linnean Society of London (Zoology)*, 42, 299-368, 1953.
- [6] A. Garcia, S. Priya, and P. Marek, Understanding the locomotion and dynamic controls for millipedes: Part 1 -Kinematic analysis of millipede movement, *Proc. of ASME 2015 Conf. on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems SMASIS 2015*, V002T06A005, 2015.
- [7] D. Koh, et al., "Centipede robot for uneven terrain exploration: design and experiment of the flexible biomimetic robot mechanism", *Proc. of the 2010 3rd IEEE RAS & EMB, Intl. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp.877-881, 2010.
- [8] Rolf Pfeifer and Josh Bongard, "How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence," A Bradford Book, 2006.
- [9] K. L. Hoffman, and R. J. Wood, Passive undulatory gaits enhance walking in a myriapod millirobot, *Proc. of Intl. Conf. on Robotics and Automation*, 1479-1486, 2011.
- [10] Yasui, K., et al. (2017), Decentralized control scheme for myriapod robot inspired by adaptive and resilient centipede locomotion, *PLOS ONE*, DOI:10.1371/journal.pone.0171421
- [11] Yasui, K., et al. (2019), Decoding the essential interplay between central and peripheral control in adaptive locomotion of amphibious centipedes, *Scientific Reports* 9, Article number: 18288
- [12] T. Kano, K. Sasaki, K. Yasui, D. Owaki, and A. Ishiguro, Decentralized control mechanism underlying interlimb coordination of millipedes, *Bioinspiration & Biomimetics*, 12(3), 036007, 2017.
- [13] Y. Tanaka, J. Ito, T. Nakagaki, and R. Kobayashi, Mechanics of peristaltic locomotion and role of anchoring, *J. of The Royal Society Interface*, 9, 222-233, 2012.

- [14] A. J. C. Garcia, Inspired Locomotion for Rumen Monitoring through Remotely Operated Vehicle, Dissertation of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2018.
- [15] 大須賀, 知能はどこから生まれるのか? : ムカデロボットと探す「隠れた脳」, 近代科学社, 2018.
- [16] T. Kinugasa, R. Iwado, N. Miyamoto, M. Kurisu, M. Okugawa, T. Haji, K. Yoshida, H. Amano, R. Hayashi, Shelled Structure for Flexible Mono-tread Mobile Track, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 52, no. 3-4, pp. 891-896, 2016.
- [17] 林良太, 辻尾昇三, 余永, 可撓性シャフトを用いたクローラロボットの遠隔操縦機構, 日本ロボット学会誌, 25(3), pp.422-428, 2007.
- [18] T. Kiungasa, K. Osuka, R. Hayashi, N. Miyamoto, K. Yoshida, Development of a small and lightweight myriapod robot using passive dynamics, Artificial Life and Robotics, Volume 22, Issue 4, pp 429-434, 2017.
- [19] T. Kinugasa, N. Miyamoto, K. Ouka, R. Hayashi, K. Yoshida, D. Owaki, A. Ishiguro: Myriapod Robot i-CentiPot via Passive Dynamics- Emergence of Various Locomotions for Foot Movement –SICE 2017, 0197, 2017.
- [20] 宮本直輝, 衣笠哲也, 吉田浩治, 林良太, 大須賀公一, 石黒章夫, 大脇大, 受動要素を利用した小型多足ロボット i-CentiPot RED(貳号機)の開発, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 C2-1, 2017.
- [21] 大谷牧恵, 宮本直輝, 衣笠哲也, 大須賀公一, 林良太, 吉田浩治, 受動要素を利用した小型多足類ロボット i-CentiPot の開発ー触角を用いた i-CentiPot 貳号機の自律移動についてー, 日本機械学会 中国四国学生会 第 49 回学生員卒業研究発表講演会, 2019.
- [22] 有吉立, きらいになれない害虫図鑑, 幻冬舎, p.56-61, 2018.
- [23] Y. Tanaka, et al., Mechanics of peristaltic locomotion and role of anchoring, J. R. Soc. Interface, vol.9, pp. 222-233, 2012.
- [24] 宮本直輝, 衣笠哲也, 吉田浩治, 林良太, 大須賀公一, 受動要素を利用した小型多足類ロボット i-CentiPot 参号機の実現と歩容解析-足の密度の増加に伴う移動性能の変化-, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, p34-p37, 2018.
- [25] 金子隆一, ゾワゾワした生き物たち, SB クリエイティブ, 2012.
- [26] 戸田山和久, 恐怖の哲学, NHK 出版, 2016.
- [27] 森政弘, 不気味の谷, Energy, Vol. 7, No. 4, 1970.
- [28] S. Aoi, Y. Egi, and K. Tsuchiya, Instability-based mechanism for body undulations in centipede locomotion, Physical Review E, Vol. 87, No. 1, 2013.

- [29] S. Aoi, et al., Advantage of straight walk instability in turning maneuver of multilegged locomotion: a robotics approach, *Scientific Reports*, 6:30199, 2016.
- [30] 株式会社学研ホールディングス, メカモ・センチピード, <https://otonanokagaku.net/products/mechanic/centipede/detail.html>
- [31] 株式会社日本トラステクノロジー, 百 (むか) ラジ! USB 赤外線 RC, <http://www.jtt.ne.jp/shop/product/mukade rc/>
- [32] 伊東和輝, 衣笠哲也, 藤本大樹, 石垣忍, 吉田浩治, 林良太, "四足歩行動物の旋回に関する力学考察 -大型竜脚類の旋回特性に関する構成論的考察に向けて -, 第 24 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp268-269, 2019.