

2017 年度 卒 業 論 文

胴体の蛇行を考慮した
ムカデの歩行シミュレーションに関する研究

指導教員：渡辺 大地 准教授

メディア学部 ゲームサイエンス プロジェクト
学籍番号 M0114449
矢野 雅俊

2018 年 3 月

2017年度 卒業論文概要

論文題目

胴体の蛇行を考慮した
ムカデの歩行シミュレーションに関する研究

メディア学部

学籍番号：M0114449

氏名

矢野 雅俊

指導
教員

渡辺 大地 准教授

キーワード

ムカデ、蛇行運動、多足歩行、シミュレーション

近年、デジタルコンテンツにおいて様々な生物の生態や動作の表現がなされている。ツールの進歩によって人間の動作や4足歩行、鳥の羽ばたきなど様々なモーションを容易に表現できるようになっている。生物の中でも数十本の脚を持つ為、複雑な脚運びを行う節足動物の歩行アニメーションの生成も容易に生成が可能になった。本論文では中でもムカデが歩行する際、速度によって蛇行運動が変化する性質に注目した。ムカデはその歩行に持つ特徴から様々な研究が行われているが、歩行と蛇行を合わせた素早い移動のような素早い移動を可能にするという目的の研究は少ない。そこで、本研究は歩行に蛇行を加えることでより速い速度が可能か検証する為、歩行と蛇行を併せ持つ移動手法を提案する。実際のムカデの性質に注目している為、胴体の蛇行やムカデの足運びなどの性質も取り入れることとした。本手法は脚先が地面に着く接地点を設け、新しい接地点へ脚先が届くように歩行と蛇行を用いて次々と胴体を移動していき前進する。脚部や胴体の関節の制御などはゲームエンジン Unity を用いて実装した。脚部の一部動作については逆運動学の CCD 法を用いた。評価実験として複数の歩行と蛇行の要素が異なるモデルを同時に歩行することで比較し各移動の違いを検証した。実験の結果、歩行と蛇行を混ぜた移動方法は歩行のみの移動より速く蛇行のみの移動より遅いということが分かった。またそれぞれの動作を混合した時、歩行と蛇行の大きさが一定より大きくなると減速する現象を確認した。本手法は脚の動作に逆運動学を用いたことで実際にムカデが行う歩行と異なる移動となったことが考えられる。順運動学を用いた足運びと移動を実装し再度検証することが今後の課題となった。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	4
第2章	ムカデの特徴	5
2.1	ムカデの概要	5
2.2	ムカデの歩行の特性	5
2.3	取り扱った性質	9
第3章	手法解説	11
3.1	セグメントの定義	11
3.2	歩行動作の内容	13
第4章	検証と考察	18
4.1	検証方法と結果	18
4.1.1	検証1	18
4.1.2	検証2	20
4.1.3	検証3	22
4.2	考察	22
第5章	おわりに	24
	謝辞	25
	参考文献	26

目 次

2.1	歩行時の脚の運動の模式図	6
2.2	ヤスデの歩行運動周期	7
2.3	ムカデの歩行運動周期	7
2.4	歩行中の体節の位置	8
3.1	ムカデ型多脚歩行ロボット	12
3.2	ムカデ型ロボットの体節単体	12
3.3	時間経過で変動する脚部の位相を示す値 P	14
3.4	時間ごとの接地点の位置関係を示す俯瞰図	16
4.1	$t=5$ 時のムカデモデル	19
4.2	$t=10$ 時のムカデモデル	20
4.3	$t=5$ 時のムカデモデル	21
4.4	$t=10$ 時のムカデモデル	21

第 1 章

はじめに

1.1 研究の背景と目的

歩行シミュレーションはゲームとロボットの分野において重要な役目を持っている。ゲームの分野では 3D モデルの歩行アニメーションへの応用として用いられる。本研究では歩行の中でもムカデが行っている歩行に注目した。アニメーションにおいては制作ツールの進歩もあり、人間の動作だけでなく 4 足歩行や鳥類の羽ばたき等のモーションをリアルタイムに生成する手法の研究 [1][2][3] が盛んである。ムカデやヤスデなどの大型節足動物の複雑な歩行も、それらのアニメーション制作ツールを使って、実現が容易になってきている。代表的なモデリング、アニメーションツールに MAYA[4] や 3dsMax[5] がある。ロボット工学の分野でも、節足動物が持っている不安定な足場でも歩行できる事や足を失っても安定性を大きく欠くことがない等の多くのメリットがあることから、その性質を多脚歩行ロボットの歩行制御に用いている。その歩行制御は、災害時の救助ロボットとしての役割などを目的して製作する為、ロボットへの実装を前提とした歩行制御の研究が多く存在する。

アニメーション制作ツールの進化が盛んであり、様々なアニメーションを容易に生成する事が可能となっている中、ムカデは特徴的な歩行を行っており、その歩行の再現は困難である。また

ロボットの分野ではムカデの歩行の一つの特性に注目したものが多く、複数の特性を持った歩行制御の研究は少ない。

ムカデの歩行には速度を上げると蛇行が大きくなる性質と、前脚が地面についている場所を後脚が追従する性質がある。ここで、本研究では「前足が地面についている場所を後ろ足が追従する性質」を「接地点追従」と定義する。この2つの性質は、ムカデの歩行の様子を映している動画の観察から確認した。蛇行が大きくなるとは、進行方向を正面とした時、ムカデの胴体が蛇行によって左右に大きくずれることを示す。蛇行が小さい場合、左右のずれが小さくなり、直行運動に近づいていく。接地点追従はすでに前脚が確保している足場を後脚へ継承していくことで、脚を踏み外す危険を軽減する。胴体部を蛇行する事で、接地点追従により脚の前後の接地が可能な距離が拡大する。それにより歩行する際に脚が地面を蹴る時間が伸びることで移動速度の加速につながり、大量の脚を地面に拘束されていながらも素早い動きを可能としている。Manton ら [6] は、オオムカデの一種には歩行速度に応じて同時に接地する脚部の数が変化するという性質が存在することを示した。

本研究ではムカデの胴体の先頭が歩行時に辿っていく線を道筋と定義する。3dsMax には Character Animation Toolkit という拡張機能があり、道筋に沿って速度と角度に応じて脚の位置を自動生成する等アニメーションの生成を簡略化する事ができる。2足歩行や4足歩行はこの機能で実現できる。だが前述の機能ではムカデの蛇行運動と足運びの再現は困難である。道筋を波形状に作れば蛇行を行いつつ、正確な足のアニメーションを表現する事は確かに可能である。しかしムカデには蛇行時の胴体が描く波形の周期と足の歩行運動の周期が存在する。2つの周期には、ずれが存在し波長と振幅が同調している。このような法則がムカデの歩行に存在するため、適当な波形を道筋で生成し、蛇行しているように見せることが可能だとしても、ムカデの歩行の再現としては不足している。

ムカデの歩行についての研究は歩行の性質をロボット工学で用いているため、過去の研究は多

足歩行ロボットの歩行に関する研究であることが多い。それらの研究は不整地走破性に注目したものが大多数を占める。不整地走破性とは、起伏がある足場の上をどの程度安定して歩行することができるかを示す。増田ら [7] はムカデの体幹をロボットで再現し、単純な構造で高い走破性の実現を目指した。石垣ら [8] は地面の隆起に応じて、胴体を曲げる性質を利用したムカデ型ロボットを研究していた。稲垣ら [9] が行った研究では、受動体節関節を持つ多脚歩行ロボットに対し、前脚の接地点を後脚が継承して歩行を行う接地点追従法を提案し不整地の高い走破性を示した。しかし、脚を踏み外す等の原因で接地点の継承が一度失敗すると全ての体節がフリーズするという問題が生じていた。さらに体節関節が受動であるため、蛇行のように関節を能動的に動かした場合の歩行が正しく行われぬ。谷口ら [10] の研究では動体節構造を持つ多脚歩行ロボットに対し、接地点に接地脚を固定されるという拘束条件を用いた運動学的解析により、胴体の蛇行のみによって行う歩行パターンを得ている。しかし、脚先の拘束条件は接地点の摩擦係数が小さい場合に破綻し、ロボットの移動速度が減少する問題が生じた。この問題に対しては稲垣ら [11] が遺伝的アルゴリズムによる学習を用いることで、複数の摩擦環境に対応するという手段を取り、より速い移動を可能としている。

ムカデの歩行を再現するには、接地点追従と胴体の回転による蛇行運動を組み合わせる必要がある。体節と体節の間に設けた関節で、胴体の回転を行う蛇行運動を用いたムカデ型ロボットは稲垣ら [12] が紹介している。しかし本手法では、体節と体節を物理的に接続せず蛇行運動は先頭の体節から後部にかけて時間差で回転する角度をずらして行う。

本研究では歩行に蛇行を合わせるとより速い移動が可能になるのか確認するため、ムカデの歩行が持つ性質を参考にした歩行と蛇行を併せ持つ歩行制御を提案する。提案手法を用いて歩行と蛇行を合わせた移動と歩行のみの移動、蛇行のみの移動を行い比較することで、どの移動が最も速いのか検証を行う。

本手法はムカデの歩行時の脚の動作と蛇行する際の胴体の動作を組み合わせた移動方法である。

本研究における歩行と蛇行の動作には周期性があり、どちらも同一の周期を持っている。本手法は脚が地面に着く接地点を最初に決定し、接地点にたどり着く脚の動作と胴体の状態を決定する。その後、脚が接地するように脚先と胴体の位置を移動し次の接地点へ脚先を接地する。この動作を周期的に繰り返し移動を行う。

蛇行に生じた変化に応じて、移動速度が変化するか検証する為に、ムカデモデルに複数の歩行パターンを用意し数回に分けて歩行を行った。実験の結果、蛇行と歩行を混ぜた移動は歩行による移動より速い移動が可能になるが、蛇行のみの移動と比べると遅いということが分かった。

1.2 本論文の構成

本論文の構成を述べる。第 2 章では実際のムカデの概要と本研究との関係性を述べる。第 3 章では本研究の手法を説明する。第 4 章では検証内容と結果を述べる。第 5 章では検証結果から考察しまとめを述べる。

第 2 章

ムカデの特徴

2.1 ムカデの概要

ムカデは多数の足と体節を持つ節足動物の名称である。ムカデは頭部と歩肢の並んだ胴体からなり、頭部の次の体節には顎の形になった毒腺をもつ顎肢が存在する。それ以降の体節にはそれぞれ一对の歩肢が存在する。その数は分類によって異なり、およそ 27 対から 37 対ほどを示す。食性は肉食であり小動物を捕食する。中でもオオムカデ類は攻撃性が高く、人に対して攻撃をかけるものがあり、人の拘束状況下にある場合狂暴化し手あたり次第にかみつくななどの行動を起こす [13][14]。

2.2 ムカデの歩行の特性

ムカデやヤスデのような多数の脚をもつ節足動物の歩行にはある特性が動画での観察で確認されている。その特性は、それぞれの体節の脚の歩行周期に前後の歩肢の周期と一定のずれがある事である。先頭の体節から終点までの脚の歩行運動には周期性を持った波形を確認することができた。歩行運動の周期には、足先が地面に接している状態と足先が宙に浮いている状態の 2 つの位相が存在する。本研究では足先が地面に接している状態を接地相、足先が宙に浮いている状

態を遊脚相と定義する。以下の図 2.1 は接地相と遊脚相とその時点の脚の状態を記した模式図である。

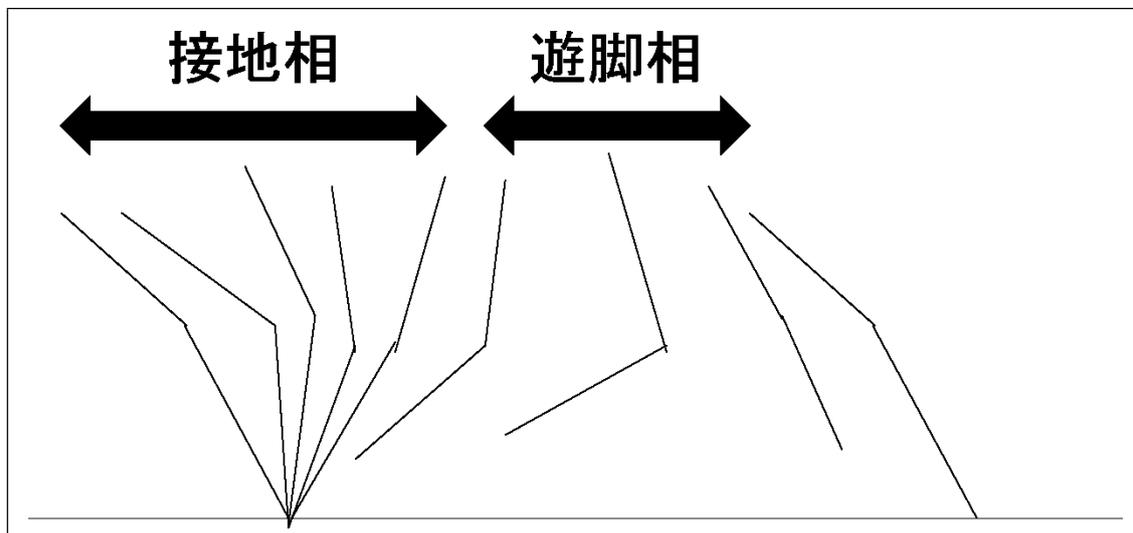


図 2.1 歩行時の脚の運動の模式図

脚は基本二本で一对という構造になっており、手や翼と名称は異なるが生物の大半は二対の脚を持っている。一对の脚における歩行時の接地相と遊脚相は、片足の位相が接地相である時、もう一つの脚は遊脚相にあるといった両足が互いとは逆の状態にある物と、片足が接地相の時、もう一つの脚も接地相にあるといった両足の状態が一致しているものがある。これら以外のパターンも存在するが本節を述べる上で不要である為省く。

ムカデとヤスデは、見かけや歩行運動が似ているが明確な違いが存在する。その違いとは両種はともに多数の体節が連なって体を形成しているが、一つの体節につきムカデは一对の脚を持ち、ヤスデは二対の脚を持っている。ヤスデの歩行は、体節の左右の足の周期は同調しており、周期のずれは前後の一对の脚部単位で生じている [15]。逆にムカデは体節の左右の足の周期は対称な動きを行っており、片足が接地している時反対側の足は接地していない状態を常に保っている [16]。なのでムカデは接地相と遊脚相が一致しない歩行を行う。図 2.2 と図 2.3 は縦軸が体節の中心を基準とした脚先の上下の位置を示し、横軸は経過時間を示している。波形が縦軸の値 0 の地点と

交わる時、脚先は体節の真横に位置する。

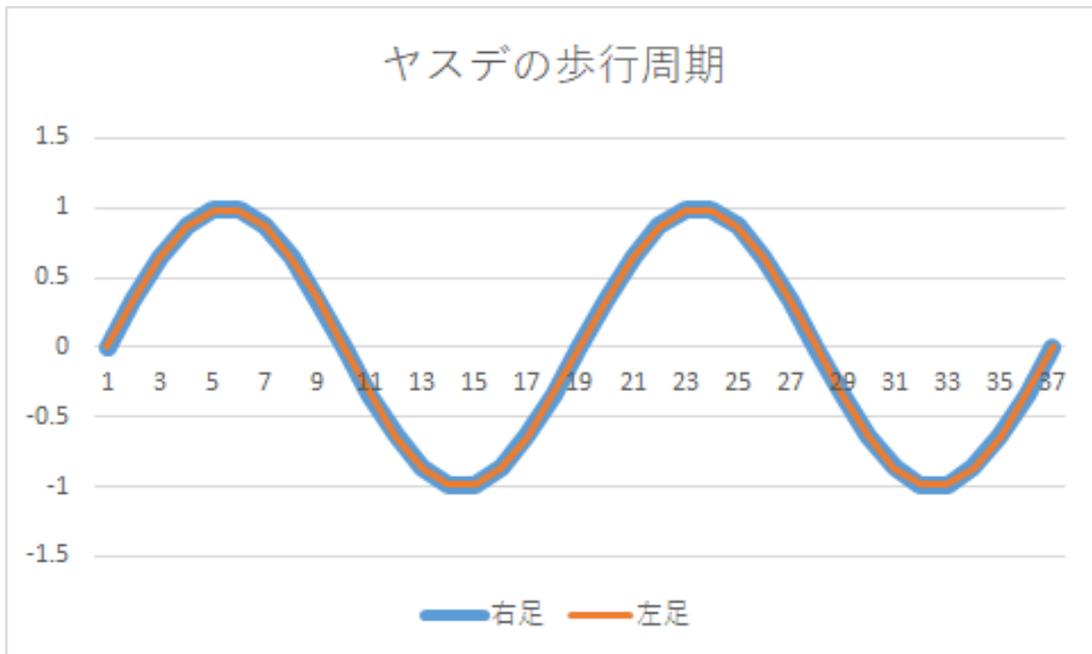


図 2.2 ヤスデの歩行運動周期

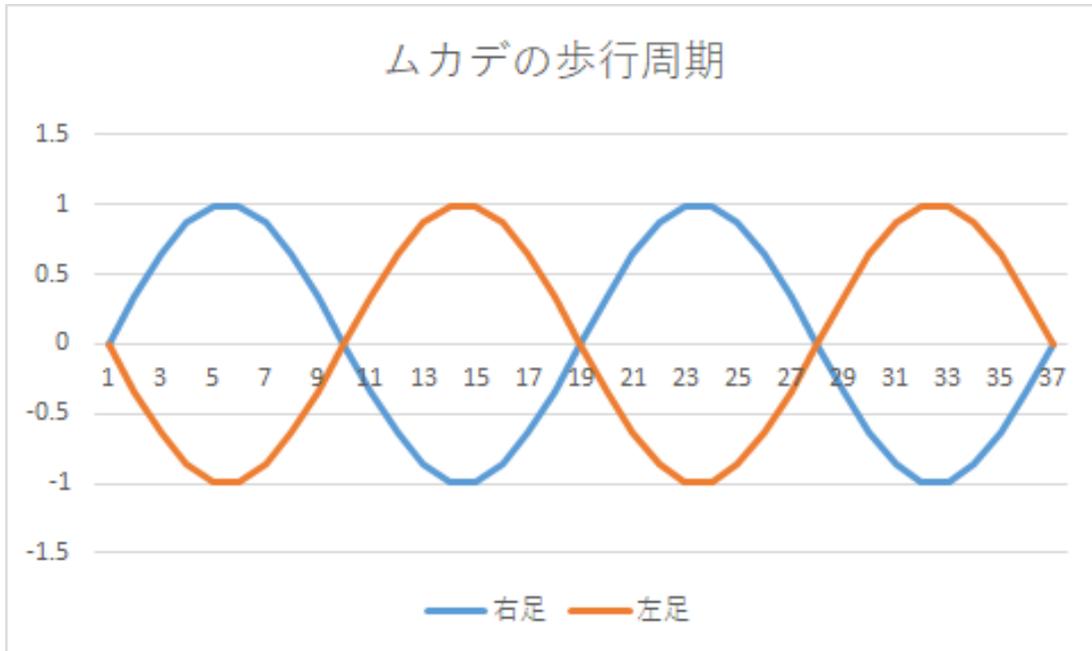


図 2.3 ムカデの歩行運動周期

蛇行を交えた歩行を行う時のムカデは、胴全体の軌跡が進行方向に対して直線状にならず、周

期性のある波形を描いている。単体の体節の軌跡が作る波形は、横軸に時間軸、縦軸に位置軸という軸を持つ。位置軸は体節が左右へずれる度合を示す軸である。例として一つの白い直線があると仮定する。この白線が位置軸の値0の地点に相当する。ムカデが白線をなぞる場合、一つの体節の軌跡は白線上から左右にズレながら進行する。このズレを示すのが位置軸の値である。本研究では胴体の進行方向を胴体軸、胴体が描く波形のことを胴波形と定義する。

波形の位置軸の値と脚の歩行周期にはある関係が存在する。位置軸の正の値を左、負の値を右と定義したとき、脚部の歩行周期の位相は特定の状態であることを示す。位置軸の値が正であるとき左側の脚の位相は遊脚相にあり、右側の脚の位相は接地相にある。位置軸の値が負である場合その逆になるという関係である。

図 2.4 は歩行中のムカデの体節の向きと位置を表すものである。図中の脚部の先端が複数重なっている側は接地相であり、その反対側の脚は遊脚相にある。

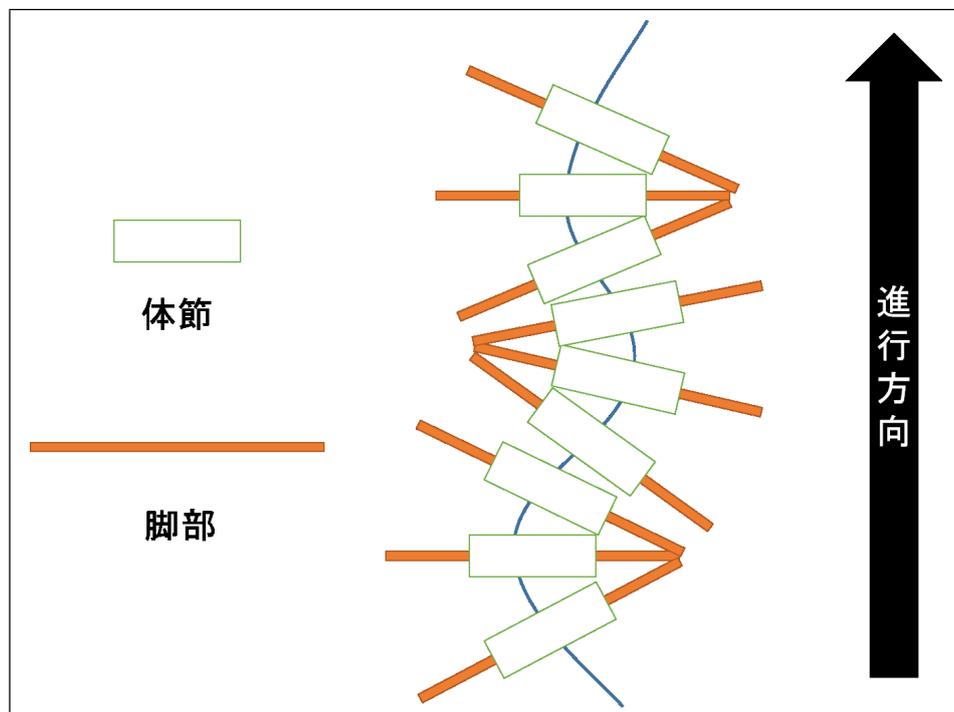


図 2.4 歩行中の体節の位置

さらにムカデは体節を中心とした時、脚先が移動した軌跡が波形となる。本研究では脚先の移

動の軌跡が描く波形を進行波と定義する。進行波については以下の通りである。

- 左右の脚に進行波が存在し異なる波形となっている。
- 進行波はグラフとして時間軸と移動軸を持つ
- 移動軸は体節の中心を基準とした、脚先の前後方向の位置を示す。
- 脚先は値が負であれば後方へ、正であれば前方へ移動している。0の場合、脚先は体節の真横に位置する。
- 進行波は脚部の位相、接地相と遊脚相が互いに入れ替わる時点で極値を取る。

接地相にあるときは、脚先を軸に体節を前方に押し出すため、体節から見て足先は後方へ下がって行く。その為、進行波は負となる。胴波形と脚の上下の位置を示す歩行周期、そして脚先の前後の位置を示す進行波の波形に周期のずれは存在するが、波長はすべて同じである。すなわちいずれかの波形に変化が生じた場合、他の波形にも影響を及ぼし歩行周期の位相が入れ替わるまでの期間の変化や胴波形の振幅が変動する。よって蛇行運動が激しくなる等の歩行パターンの変化を引き起こす。

脚を持つ節足動物が蛇行する時に、それぞれの体節の根元を蛇行運動によって移動し、脚先の接地が可能な領域を拡大することでより精密な動きを可能にしている。脚先の設置可能な領域を拡大する動作によって脚と体節の両方の力で前進することで、ムカデは歩行周期の1サイクルでより多くの距離の移動を可能としている。

2.3 取り扱った性質

2.2節ではムカデの歩行に見られる軌跡が波形になる胴体の動作、接地相と遊脚相を持つ歩行周期、そして進行波の3つの性質を述べた。本研究では以上3つの性質を取り扱った。軌跡が波形になる胴体の動作を取り扱った理由は、蛇行運動を実現に必要な要素だからである。蛇行運動は

胴体でうねりを打つ事で前進する移動手段であり、胴体のうねりは波形となるため軌跡が波形になる胴体の動作は欠かせないのである。接地相と遊脚相を持つ歩行周期と進行波を取り扱った理由は、ムカデの脚運びを再現する為である。ムカデは胴体の蛇行と脚で歩行を行う生物である為、蛇行による速度の変化を検証するためには同様に蛇行と脚の動作が必要だったからである。

以上より今回は軌跡が波形になる胴体の動作、接地相と遊脚相を持つ歩行周期、進行波の3つの性質を取り扱った。

第 3 章

手法解説

本章では、本研究の提案手法について述べる。3.1 節では本研究で用いるモデルについて述べる。3.2 節では本手法の歩行動作の内容を述べる

3.1 セグメントの定義

多足歩行の歩行制御を実装するためにまず、ムカデ型モデルを生成する。図 3.1 は実験に使用する多足歩行ロボットの図である。図 3.2 はムカデロボットの体節単体の図である。手法の実装に当たって、Unity Technologies 社が開発しているゲームエンジンである Unity[17] を使用した。

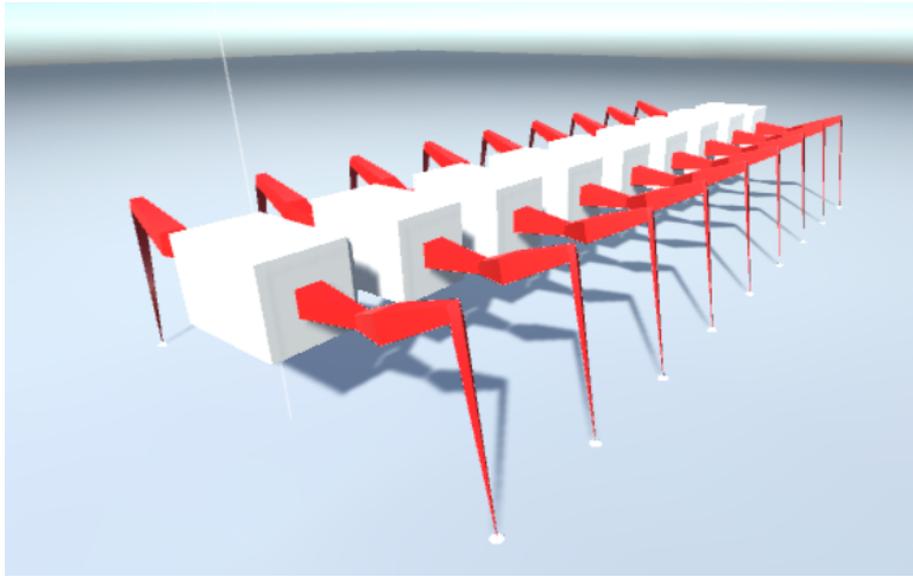


図 3.1 ムカデ型多脚歩行ロボット

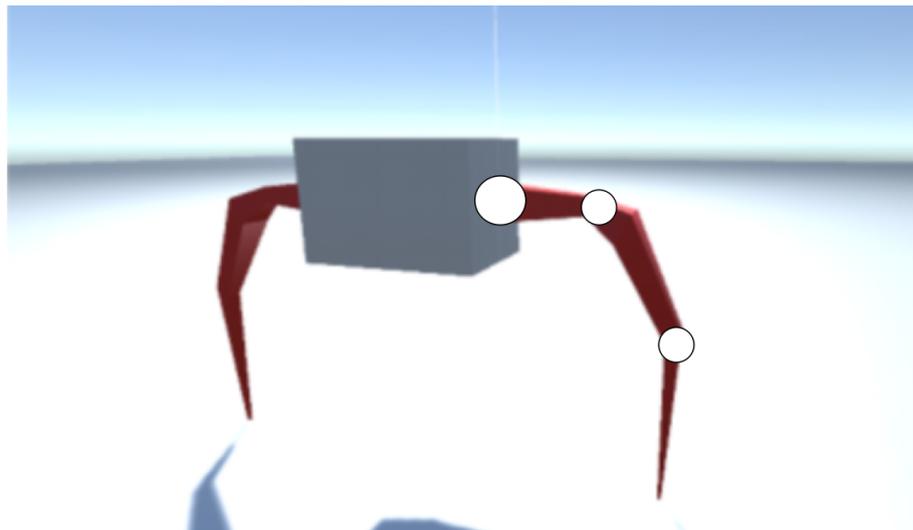


図 3.2 ムカデ型ロボットの体節単体

ムカデ型ロボットは多数のセグメントが連結して成り立っており、1つのセグメントは胴体と3つの関節を持つ左右の脚で構成されている。図 3.2 中の白点はセグメントの片足の3つの関節を示している。

以降はセグメント i の並びをロボットの進行方向から先頭を $i = 1$ とし、最後尾を $i = N$ とする。セグメント i は以下の情報を持つ。

- セグメント i には、遊脚相の脚を接地する為に目標地点の情報があり、これを目標接地点とする
- 先頭 $i = 1$ である セグメント i のみ、目標接地点の決定・取得と蛇行運動の旋回角度の決定を行う
- セグメント i の正面方向を方向ベクトルと定義する
- 後続 ($i \neq 1$) の セグメント i は セグメント $i - 1$ から目標接地点と方向ベクトルを継承する

以降は脚部の関節と骨の 1 セットを L_n とし、 n は関節の番号であり根元から順に $n = (0, 1, 2)$ と表す。脚部関節 L_n の持つ情報は以下のようなになる。

- 脚の根本を骨の始点として骨の終点にかけて伸びるベクトルが L_0 の方向ベクトルとなる。
- L_0 は方向ベクトルと体節の側面に垂直な線が成す角度 θ を有する
- セグメントの右側と左側に一つずつ L_0 が存在する
- 右の θ が正の値の角の場合、左の θ は負の値の角となる
- L_1 、 L_2 には回転軸の制限はない

脚部関節は L_0 のみ水平面とは垂直な直線を回転軸として回転し、関節 L_1, L_2 は上下前後に稼働する。

3.2 歩行動作の内容

この節は歩行時のセグメントの脚部の動作について述べる。

セグメントが有する脚部は遊脚相と接地相を一定周期ごとに行き来しており、左右の脚の周期には 180° のずれが生じている。それぞれの脚部には自身が遊脚相と接地相のどちらに属しているか判別するために位相値 P を設ける。位相値 P は -1 から 1 までの数値をとり、 \sin 関数の角度

に経過時間を加算し続けることで一定周期で増加と減少を繰り返している。図 3.3 の縦軸が位相値 P であり横軸が時間軸である。 P が減少中は接地相、増加中は遊脚相に属していることを示している。

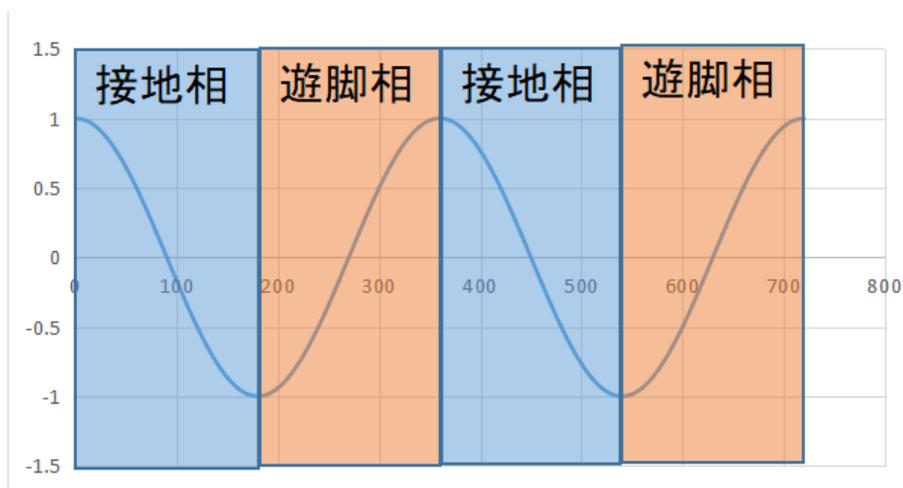


図 3.3 時間経過で変動する脚部の位相を示す値 P

経過時間が T 、周期速度が C とすると位相値 P は式 (3.1) になる。

$$\begin{aligned}\theta &= CT\pi \\ P &= \sin \theta\end{aligned}\tag{3.1}$$

接地相にある脚部は接地点に脚先を拘束するが、その条件として脚先と地面との摩擦係数が一定以上である必要がある。そこで今回の研究においては常にその条件が満たされていると仮定する。 θ の値は脚部の根本から目標接地点に伸びた方向ベクトルと、セグメントの方向ベクトルとの角度差だけ変化し、 P の値は遊脚相から接地相に移行する瞬間に最大値に達する。対して接地相から遊脚相に移行する際に最低値となる。セグメントは接地相に属している間は接地点を基準に回転、移動を行う。脚部先端を拘束している接地点を回転軸としてセグメントを進行方向に旋回する。その後、脚部を接地点に拘束することでセグメントを前面に押し出し推進力を得る。脚部の L_0 の方向ベクトルは、 P の値と歩幅の調整値 α によって決定する。歩幅の調整値 α は体節の

中心を基準として、脚先が前後に動く幅の範囲を示す。 α は 0 から 1 を取る定数であり、値が大きいほど脚先の移動する範囲が大きく、値が 0 の場合脚先は前後方向に一切動かない。 L_0 の方向ベクトル \vec{a} は左右に存在し右の方向ベクトルを \vec{a}_0 、左の方向ベクトルを \vec{a}_1 とする。セグメントの正面方向が y 軸正方向、セグメントの右側面を x 軸正方向、そして脚の長さを l と定義すると方向ベクトル \vec{a}_0 、 \vec{a}_1 を求める式は式 (3.4) となる。

$$\vec{v}_0 = (1 - |\alpha P|, \alpha P, 0) \quad (3.2)$$

$$\vec{a}_0 = l \frac{\vec{v}_0}{|\vec{v}_0|} \quad (3.3)$$

$$\vec{a}_1 = -l \frac{\vec{v}_0}{|\vec{v}_0|} \quad (3.4)$$

次に脚先 L_1 、 L_2 の方向ベクトルは目標接地点が確定したときに逆運動学を用いて決定する。脚部関節の逆運動学は Unity のアセットストアから逆運動学のアセット『GeneticIK』[18] を取得して使用した。ロボットの関節の角度や動作から接地点を求めることを順運動学といい、各関節の角度が確定した後に求める。逆運動学は接地点が先に確定しており、そこから動作や各関節の位置や角度を求める事を示す。本研究では接地点が存在することを前提に脚部の動作を決めるため、脚先を接地点に追従・拘束する際には、運動学を用いた場合のセグメントと、接地点の位置が動いた場合の関節の角度の算出が非常に困難である。逆運動学であれば接地点と関節 Leg_1 の座標から関節の方向ベクトルを求めることができるためこちらを利用した。方向ベクトルの近似解を求める際は Cyclic-Coordinate-Descent 法 (CCD 法)[19][20] と呼ばれるアルゴリズムを用いた。

次にセグメントの蛇行運動の動作について述べる。水平面と垂直な直線を軸 Y 、胴体の進行方向を \vec{g} と定義する。蛇行運動を行うためにセグメント i を回転する時、 Y 軸周りに \vec{g} を回転したベクトルがセグメント i の方向ベクトルとなる。 \vec{g} の回転角を Φ_0 とし、回転角が取ることのできる値の範囲の絶対値を $\pm\Phi_1$ と定義する。蛇足歩行中の Φ_0 の値は式 (3.5) で示す。

$$\Phi_0 = P\Phi_1 \quad (3.5)$$

本手法における胴体と脚の動作は以上の歩行と蛇行によって行われる。次に脚先の目的地となる接地点の決定について述べる。本研究における接地点は原則として1つのセグメントに1つだけ存在する。これは体節の2つの脚は片足が接地している時反対側の脚は遊脚しているという性質故である。その為、接地点は右左右と接地する脚を交互に入れ替えながら新しい接地点が決定する。現在の接地点を \vec{j}_t 、一つ前の接地点を \vec{j}_{t-1} とする。次の接地点 \vec{j}_{t+1} は脚の動作とセグメントの蛇行によって決定する。図 3.4 は各接地点の位置関係を示すものである。図中の対称軸 X を基準とすると \vec{j}_{t-1} と \vec{j}_{t+1} は線対称になる。

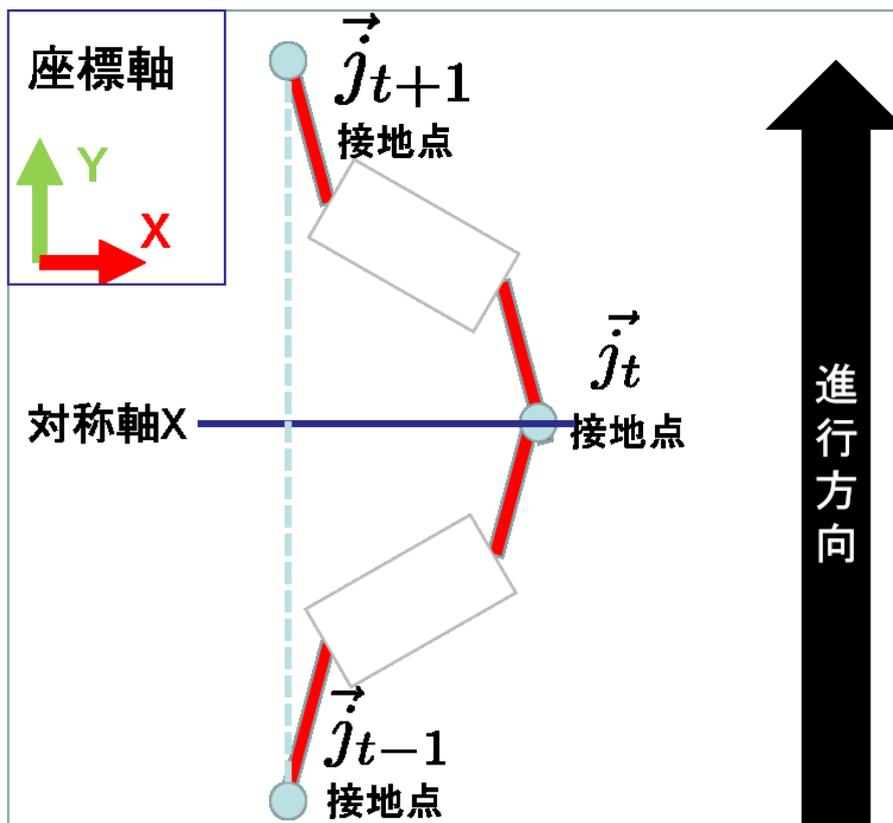


図 3.4 時間ごとの接地点の位置関係を示す俯瞰図

セグメント i が移動する際、接地点を基準として軸回転する。セグメント i の座標を \vec{s}_i 、現在の

接地点の座標を \vec{j}_i と示す。 \vec{s}_i と \vec{j}_i の距離を d とする。現在接地している脚の方向ベクトルを \vec{a} とする。セグメント $i+1$ の正面を y 軸、セグメントの右側面方向を x 軸と定義し、旋回後のセグメント i の座標 \vec{s}_i は式 (3.6) で示す。

$$\vec{s}_i = d(-\vec{a}) + \vec{j}_i \quad (3.6)$$

セグメント i の角度 θ_j と脚部の動作は、位相値 P の変動に応じて周期的に動作する。ムカデの移動速度に応じて周期が変化し、周期が短いほど蛇行運動が大きくなり、長いほど蛇行運動が小さくなる。以上が本手法の内容である。

第 4 章

検証と考察

本章では実験の検証方法と結果、考察を述べる。検証を行う内容は本手法を用いて歩行と蛇行を持つ移動と歩行のみ、または蛇行のみの移動のどれが速くなるのかである。

4.1 検証方法と結果

検証するムカデモデルには違いを判別するために歩行と蛇行の 2 つのパラメータを設定した。各パラメータは 0 から 1 の定数になっておりパラメータの高さは各移動方法ごとの移動量の高さを示す。パラメータが 0 の場合はその移動方法はモデルの移動に寄与していないということになる。検証はこれらのパラメータが異なる複数体のモデルを用意し同時に歩行を行い、一定時間後のモデルの進んだ距離を比較する。

4.1.1 検証 1

本手法を用いた、蛇行と歩行を混ぜた移動と歩行のみ、蛇行のみの移動の違いを検証する。今回の検証は歩行と蛇行が異なる 4 体のモデルで歩行を比較する。各モデルに設定したパラメータは以下の表 4.1 で示している。図 4.1 と図 4.2 は歩行中の各モデルの様子である。モデルは図の

左から A、B、C、D と並んでいる。経過時間 t の単位は秒である。複数の横に伸びた白線は、10メートル刻みで配置したものであり、進行方向は図の下方方向となっている。

表 4.1 検証 1 のモデルのデータ

モデル	A	B	C	D
歩行	1	0.33	0.66	0
蛇行	0	0.66	0.33	1

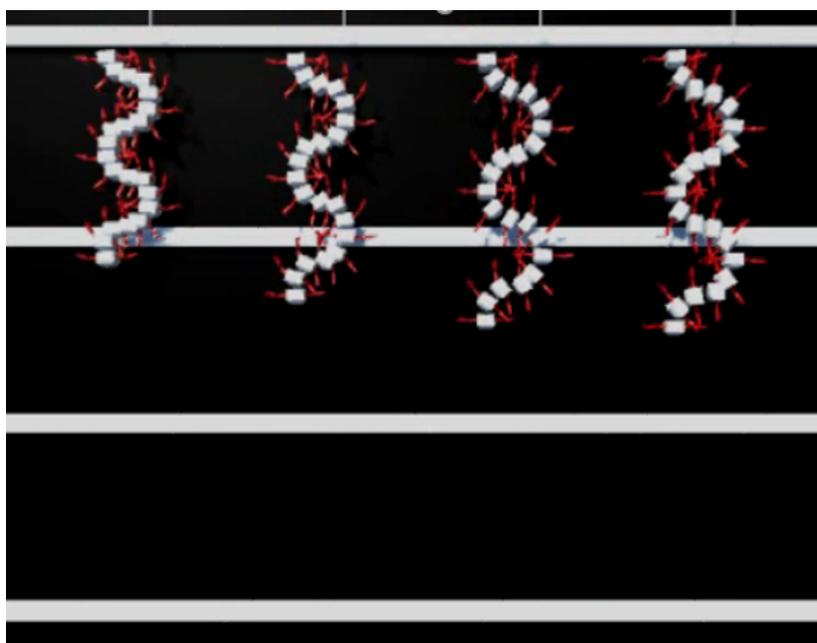


図 4.1 $t=5$ 時のムカデモデル

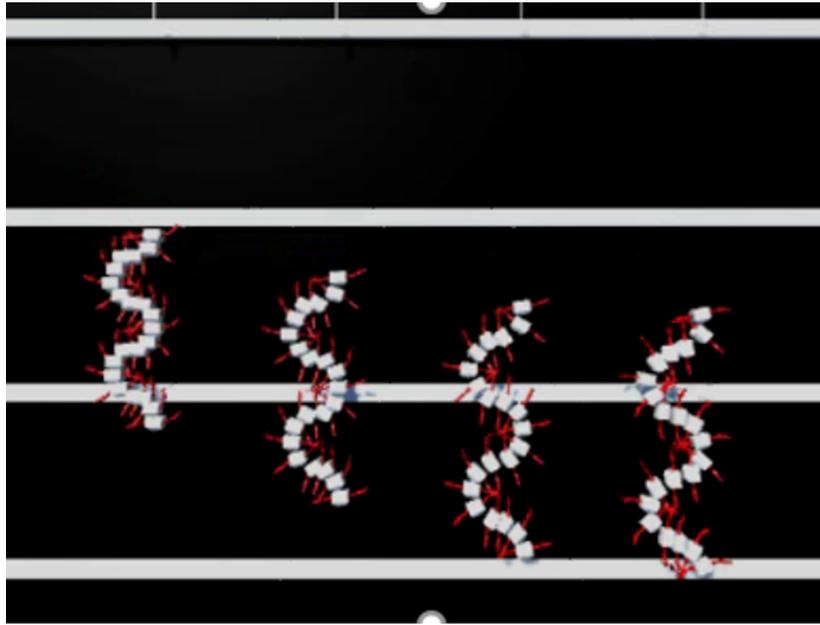


図 4.2 t=10 時のムカデモデル

検証 1 の結果、最も速いモデルは D となった。パラメータが釣り合う設定の場合、歩行よりも蛇行のパラメータが高い方が速いということが分かった。

4.1.2 検証 2

前回の検証で蛇行の比率が高いほうが速いという結果が見えたため蛇行のみを大きくすれば速くなるのか検証する。今回の検証は蛇行のみが異なる 4 体のモデルで歩行を比較する。前回の検証で蛇行の比率が高いほうが速いという結果が見えたため蛇行のみを大きくすれば速くなるのか検証する。各モデルに設定したパラメータは以下の表 4.2 で示している。図 4.3 と図 4.4 は歩行中の各モデルの様子である。モデルは図の左から A、B、C、D と並んでいる。進行方向は図の下方向となっている。

表 4.2 検証 2 のモデルのデータ

モデル	A	B	C	D
歩行	0.5	0.5	0.5	0.5
蛇行	0	0.66	0.5	0.65

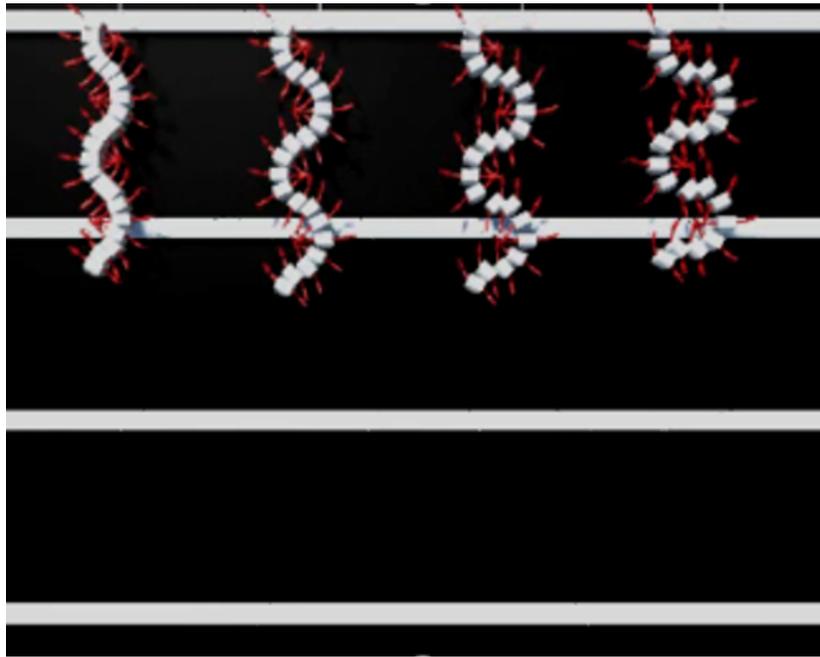


図 4.3 t=5 時のムカデモデル



図 4.4 t=10 時のムカデモデル

検証 2 の結果、最も速いモデルは C となった。蛇行のパラメータが最も高い D ではなく C が速いということは蛇行の大きさがそのまま移動速度の加速につながるわけではないことを示して

いる。

4.1.3 検証3

検証1と検証2から蛇行の大きさが移動速度の向上に影響を与えることと、歩行と蛇行には速度が速くなる比率が存在することが示された。今回の検証は、歩行のみと蛇行のみの移動と歩行と蛇行を混ぜた移動で現状で最も速いものを比較する。各モデルに設定したパラメータは以下の表4.3で示している。Aが歩行のみ、Bは歩行と蛇行の混合、Cが蛇行のみの移動となっている。移動量は各モデルが移動開始時の地点からどれだけ前方に進んだのかを示す値である。

表4.3 検証3のモデルのデータ

モデル	A	B	C
歩行	1	0.111	0
蛇行	0	0.833	1
移動量	41.175	58.888	59.152

検証3の結果、最も速いモデルはCとなった。よって本手法の移動は歩行と蛇行の混合よりも蛇行移動のみによって行われる方が素早い移動が可能だということが分かった。

4.2 考察

各検証の結果から以下のことが分かった。

- 歩行と蛇行を混ぜると歩行のみより速く蛇行のみより遅い移動が可能になる
- 蛇行と歩行では蛇行による移動のほうが推進力がある
- 歩行に蛇行を加えると一定の速度までは加速する
- 歩行と蛇行のパラメータが1を超えた場合減速する

歩行と蛇行を同時に行う事で移動速度の加速は実現している。しかし、蛇行のみに頼る移動の

ほうが最終的には速いという結果が出ている。検証 2 の結果でそれぞれの動作が一定以上の大きさになる時、移動速度が減速することから、歩行と蛇行を混合した移動は、それぞれの動作を一定の大きさに収める必要がある。そして歩行と蛇行では蛇行のほうが推進力を生むため、素早い移動ならば動作を合わせるよりも蛇行のみで移動したほうが速いという事になる。

第 5 章

おわりに

本研究はムカデが移動する際、速度が速いほど胴体の蛇行が大きくなる性質から、歩行に蛇行を加えるとより速い移動が可能なのか確かめる事を目的としてムカデの歩行性質を参考にした移動手法を提案した。その手法とは、脚部の歩行動作と体節の方向を一定周期で動かすムカデ型モデルを用いて、移動速度に応じて歩行運動と蛇行運動の周期性をもつ波形を変化させる方法である。今回の実験で行った検証から歩行と蛇行の動作を合わせると歩行より速く蛇行より遅い移動が可能になることが分かった。理想では歩行と蛇行の混合はどちらかの動作のみの移動より速くなるという結果だったがそうはならなかった。この結果になった原因の一つとしてモデルの動作に逆運動学を取り入れたことが一因だと考える。本来歩行は脚先を固定し踏ん張ることで身体を前進する。つまり始点と終点のどちらかは移動する。逆運動学では始点と終点が動かないように関節を動かす為、脚の踏ん張りともいえる力が逃げる動きをしてしまう。本来のムカデも順運動学によって脚を動かしていると考えられる。よって、今後の課題として本手法の逆運動学を順運動学に変更し、アルゴリズムを改良することで実際のムカデの移動へと近づけ検証を行いたい。

謝辞

本研究を形にできたのは、渡辺大地准教授と阿部雅樹実験助手のご指導と三上浩二教授からの助言を頂けたからだと思っております。心から感謝しております。また、アドバイスをしてくれた研究室の方々にも感謝いたします。

参考文献

- [1] 石塚真貴男. 3DCG におけるタコの腕と脚の動きの自動生成に関する研究. 東京工科大学卒業論文, 2006.
- [2] 土永まり子. 3DCG における鳥のはばたきモーションの自動生成プログラム. 東京工科大学卒業論文, 2006.
- [3] 河野央, 小田まり子, 秋山侑也. 口唇動作の数理モデルによる 3DCG アニメーションの自動生成. 日本デザイン学会 第 60 回研究発表大会, 2013.
- [4] AUTODESK. MAYA. <https://www.autodesk.co.jp/products/maya/overview>. 参照:2017.12.14.
- [5] AUTODESK. 3DSMAX. <https://www.autodesk.co.jp/products/3ds-max/overview>. 参照:2017.12.14.
- [6] S.M.Manton. The evolution of arthropodan locomotory mechanisms. *Z.Linnaean Soc.(Zool.)*, Vol. 46, pp. Issue306–7,251/484, 1965.
- [7] 増田一之. 柔軟な胴体と脚を有するムカデ型半自立ロボット. 法政大学大学院理工学・工学研究科紀要, Vol. 57, pp. 1–6, 2016.
- [8] 石垣安規. 不整地での自律走行を目的としたムカデ型レスキューロボットの開発—実環境へ

の適応一. 法政大学大学院理工学・工学研究科紀要, Vol. 56, pp. 1–8, 2015.

- [9] 稲垣伸吉. 受動態節間関節をもつムカデ型多脚歩行ロボットの接地点追従法による分散歩行制御. 計測自動制御学会論文集, Vol. 47, pp. 282–290, 2011.
- [10] 谷口卓生, 稲垣伸吉, 鈴木達也, 末松良一. 能動体節構造を持つ多脚歩行ロボットの歩行解析. 第 17 回自律分散システム・シンポジウム, Vol. 17, pp. 99–102, 2005.
- [11] 稲垣伸吉. 能動体節構造をもつ多脚歩行ロボットの歩行パターン生成～複数の摩擦環境を考慮した GA による学習～. 第 19 回自律分散システム・シンポジウム, Vol. 19, pp. 227–232, 2006.
- [12] 稲垣伸吉. 接地点追従による多脚移動ロボットの歩行制御～古くて新しい分散歩行制御～. 計測と制御, Vol. 54, pp. 265–271, 2015.
- [13] 動物 JP. 猛毒注意、ムカデの生態について。咬まれた時の対処。種類など. <http://xn--hhru84e.jp/mukade/>. 参照:2017.12.3.
- [14] エデンの西へようこそ. ムカデ大研究 (2003) . <http://www.geocities.jp/edenno24/kansatuki/mukade.html>. 参照:2017.12.4.
- [15] National Geographic. 動画 : Watch These Millipedes Glow in the Dark — National Geographic. https://www.youtube.com/watch?time_continue=31&v=N3k4IQHF1JA, 2015/05/15.
- [16] ヤタケサブチャンネル. 動画 : 【観察】百足の歩き方※グロ注意. <https://www.youtube.com/watch?v=BK6W0-OHA0Y&t=23s>. 参照:2017.12.3.
- [17] Unity Technologie. Unity. <https://unity3d.com/jp>. 参照:2017.12.8.
- [18] Unity Technologies. Generic IK. <https://assetstore.unity.com/packages/tools/animation/generic-ik-69646>. 参照:2017.1.20.
- [19] Chris Welman. *Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure ma-*

nipulation. M.Sc Thesis, Simon Fraser University, 1993.

- [20] TMPSwiki. CCD-IK and Particle-IK. <http://mukai-lab.org/wp-content/uploads/2014/04/CcdParticleInverseKinematics.pdf>. 参照:2017.1.20.