

NAIST-IS-DT0161026

博士論文

神経振動子に基づく四脚歩行ロボットの
環境適応歩容に関する研究

竹村 裕

2003年9月30日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

竹村 裕

審査委員： 小笠原 司 教授
石井 信 教授
杉本 謙二 教授
松本 吉央 助教授

神経振動子に基づく四脚歩行ロボットの 環境適応歩容に関する研究*

竹村 裕

内容梗概

本研究の目的は、路面環境の変化に柔軟に対応する歩容生成手法の構築である。歩行ロボットが様々な環境を移動するためには、環境やロボットの状態に応じた脚の運び方“歩容”を決定する必要がある。歩行を非線形の運動と捉え、ロボットと環境との厳密なモデルを利用し歩行を実現すると、想定された以外の環境には対応できない問題がある。この問題を解決するためにロボットはセンサ等から環境情報を獲得し、自ら歩容を環境に適応させる必要がある。本論文では、動的で非常に柔軟な歩行を行う動物の神経系に注目し、リズム発生機構（Central Pattern Generator:CPG）と反射機構を組み合わせたCPGベース型制御により、自律的に路面変化に対応する歩容生成手法について考える。

多くの生物の運動はその体内に張り巡らされた神経系により制御されていることは広く知られた事実であり、数多くの研究が行われてきた。それらの研究が進むにつれ、生体内部には神経振動子と呼ばれるリズム発生機構がありこれが生物の周期的な活動に深くかかわっていることが指摘されるようになった。このような生物学、神経心理学等で得られた知見に基づいて、ロボットの歩容を生成・制御することを試みる。

歩行運動が矢状面内の運動と前頭面内の運動との協調運動であることから、安定した歩行運動の実現には矢状面内の運動と協調を保つように前頭面内の運動を制御することが必要である。神経振動子経由の左右揺動運動・姿勢反射を用いて、矢状面内の運動との協調を保つように前頭面内の運動を生成する三次元的な歩行

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 博士論文, NAIST-IS-DT0161026, 2003年9月30日.

生成手法を提案する。この手法により、ロボットと環境との厳密なモデルを用いることなく整地・斜面での動的適応歩行の実現が可能となった。

CPGを利用して歩容を生成する場合に CPG パラメータ決定問題がある。高速シミュレーション環境を利用し、歩行パターンとエネルギー効率の関係を検証することにより、高エネルギー効率な歩行を実現する CPG パラメータを決定する手法を提案する。ロボットの幾何学的条件により最適な歩容パターンの存在が明らかとなり、速度に対する最適な CPG パラメータを決定することが可能となった。

脚による移動機構は脚が接地面に安定に接触している状態を前提に考える事が多いため、接地面において滑りが発生した場合には様々な問題が惹起する。路面摩擦が歩容およびエネルギー効率にどのような影響を与えるかを検証し、これにより得られた知見に基づき二つの滑り適応歩容を提案する。一つは、CPG 経由の滑り反射を利用した歩行パターンそのものを変更する滑り適応歩容、もう一つは、力制御を用いた滑りに瞬時に対応する滑り適応歩容である。これらの手法により、路面摩擦の変化、滑りに適応する歩容を生成することが可能となった。

CPG の潜在的な適応能力は示唆されていたが、リズム発生機構と反射機構を用いた歩容生成・制御系を構築することで、CPG を用いて環境適応歩容を実現する一手法を確立することができた。また、従来外乱とみなされていた脚先の滑りに着目し滑り適応歩容を実現するにより、滑りの重要性を示唆することができた。この結果は、歩行ロボットが未知環境での歩容を実現する上で有効な指針となる。

キーワード

四脚歩行ロボット, CPG, 適応歩容, 反射機構, 左右揺動運動, 滑り反射

Adaptive Gait Generation of Quadruped Robot Based on Neural Oscillators *

Hiroshi Takemura

Abstract

The purpose of this research is to develop adaptive gait generation methods which can tolerate changes in the environment. For the walking robot to walk over various surfaces, the trajectories of the legs (gait) must be determined so that it corresponds to the conditions of the robot and environment. When walk is defined as a nonlinear motion and a strict model of the robot and environment is used, a gait which cannot adapt to unanticipated environment is generated. To avoid such inadaptability, the robot must gather environmental information from its sensors and fit its gait to the environment. This thesis focuses on the nervous system of animals which perform dynamic and highly flexible walk, and a gait generating method which autonomously adapts to surface changes using a CPG (Central Pattern Generator) based control method is considered.

It is well-known that many animals control their motion through an internal nervous system network, and much research has been conducted. Through such, the existence of an internal rhythm generating system, neural oscillators, and the system's deep involvement in the animal's cyclic activities (breathing, locomotive motion, etc.) is becoming clear. The robot's gait in this thesis is based on such biological and neuropsychological studies of animals.

Locomotive motion is a collaboration of motion on the sagittal plane and that on the frontal plane. Therefore, for a stable motion, motion on the frontal plane

* Doctor's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT0161026, September 30, 2003.

must be controlled to coordinate with that on the sagittal plane. A three-dimensional locomotion generating method is proposed, where motion on the frontal plane synchronizes with that on the sagittal plane through a sideways sway motion based on neural oscillators. This method realizes a dynamic adaptive walk on regular and slope surfaces without the use of the strict model.

When generating and controlling walking motion based on the CPG, how such parameters are determined is very important. Using a fast three-dimensional dynamics simulation environment, a method to determine the CPG parameters based on energy consumption is proposed. The found existence of an optimal gait pattern according to the robot's geometric conditions is shown, making it possible to determine the optimal CPG parameters for a certain walking velocity.

Walking pattern is often generated on the assumption that the support legs are fixing to the ground without a slip, arising problems when a slip does occur. The effect slip has on energy efficiency is investigated in environments with varying frictions, and two methods for generating a slip adaptive gait are proposed based on the results. The first is a slip adaptive gait which uses the slip reflex via the CPG to change the walk pattern, and the second a gait which uses a force control which compensates for the slip immediately. Using such methods, a gait which is adaptive to the varying of surface friction and slip is possible.

Although potential adaptability of the CPG has been suggested, the problem of how to determine the parameters yet remains. The method for realizing an adaptive gait based on the CPG was established by developing a simple gait generation/control system which combines the rhythm generating mechanism and the reflective mechanism. This result will serve as an effective criterion when a walking robot generates a gait in an unknown environment.

Keywords:

Quadruped robot, CPG, Adaptive walking, Reflex structure, Sideways sway motion, Slip reflex

目次

第1章 緒論	1
1.1. 研究の背景	1
1.2. 研究の目的と基本的戦略	3
1.3. 本論文の構成	5
第2章 脚移動システム	9
2.1. 本章の趣旨	9
2.2. 移動機械としての脚型ロボットの意義	9
2.2.1 脚型ロボットの特徴	9
2.2.2 脚数と歩容	11
2.3. 脚型ロボットの歩容生成手法	13
2.4. CPG ベース型歩容生成	17
2.4.1 生物のリズム運動における制御機構	17
2.4.2 Central Pattern Generator と歩行の適応制御	19
2.4.3 リズム生成に基づく歩容生成	20
2.5. 歩容生成手法の特徴	22
2.6. 本章の結論	23
第3章 CPG ベース型制御による三次元適応歩容生成手法の提案	25
3.1. 本章の趣旨	25
3.2. CPG ベースによる三次元適応歩容	26
3.2.1 神経振動子モデル	26
3.2.2 神経振動子結合モデルによる歩行パターンの生成	27

3.2.3	左右揺動運動	29
3.2.4	姿勢反射の導入	31
3.3.	歩行実験	32
3.3.1	システム構成	32
3.3.2	ハードウェア構成	33
3.3.3	ソフトウェア構成	37
3.3.4	整地動歩行実験	40
3.3.5	不整地動歩行実験	43
3.4.	本章の結論	47
第4章	エネルギー効率に基づくCPGパラメータの決定手法の提案	49
4.1.	本章の趣旨	49
4.2.	高速三次元動力学シミュレーション環境	50
4.2.1	高速シミュレーション環境の必要性	50
4.2.2	シミュレーションツールキット：MathEngine Toolkits	51
4.2.3	開発したシミュレーション環境の構造と性能	52
4.3.	CPGパラメータ決定手法	53
4.3.1	パラメータ特性	54
4.3.2	エネルギー効率の計算方法	57
4.4.	シミュレーションによるエネルギー効率の算出	58
4.4.1	シミュレーション条件	58
4.4.2	歩容とエネルギー効率の関係	60
4.5.	本章の結論	70
第5章	路面摩擦が歩容およびエネルギー効率に及ぼす影響	73
5.1.	本章の趣旨	73
5.2.	路面摩擦がエネルギー効率に及ぼす影響	74
5.2.1	シミュレーション条件	74
5.2.2	歩行速度とエネルギー効率の関係	74
5.2.3	路面摩擦が歩容に及ぼす影響	76

5.3. CPG 経由の滑り適応歩容	78
5.3.1 滑り反射	78
5.3.2 シミュレーションによる滑り適応歩容実験	82
5.3.3 実機モデルによる滑り適応歩容実験	84
5.4. 本章の結論	85
第 6 章 力制御を用いた滑り適応歩容の提案	87
6.1. 本章の趣旨	87
6.2. 力制御を用いた滑り適応歩行	87
6.3. 脚先力制御	89
6.3.1 路面の勾配推定	89
6.3.2 付加力導出と力制御	91
6.4. 脚先力制御アルゴリズムの検証	94
6.4.1 シミュレーション条件	94
6.4.2 シミュレーション結果	96
6.4.3 実機モデルへの応用	100
6.5. 本章の結論	104
第 7 章 結論	107
7.1. 本研究の具体的成果	107
7.2. 課題と今後の展望	109
謝辞	111
参考文献	113

目 次

2.1	凹凸面平滑化特性	10
2.2	安定性余裕	14
2.3	ZMP の定義	14
2.4	転倒条件	16
2.5	倒立振子モデル	16
2.6	随意運動制御の情報の流れ	18
2.7	歩行運動の制御機構	19
2.8	歩行の適応制御	21
2.9	相互抑制による CPG	21
3.1	神経振動子モデル	27
3.2	神経振動子結合モデル	30
3.3	脚のリンクモデル	30
3.4	姿勢反射の概略	33
3.5	TITAN-VIII	34
3.6	自立型四脚歩行ロボット	35
3.7	ハードウェア構成	37
3.8	姿勢センサ:GU-3013	38
3.9	FSR 及び加速度センサ	38
3.10	ソフトウェア構成	39
3.11	整地動歩行実験の様子	41
3.12	整地動歩行実験結果	42
3.13	SSM 有無による右後脚の接地センサの状態	43

3.14	SSM 有無による重心軌道	44
3.15	斜面動歩行実験の様子	45
3.16	斜面動歩行実験の結果	46
4.1	シミュレーション環境と実機モデル	51
4.2	シミュレーション環境の構造	53
4.3	ロボットモデル	53
4.4	歩行パターン	54
4.5	歩行パターンと関節角度	56
4.6	簡略化した神経振動子結合モデル	59
4.7	α, τ と歩行速度 V の関係 (walk gait)	60
4.8	α, τ と歩行速度 V の関係 (trot gait)	61
4.9	α, τ と歩行速度 V の関係 (pace gait)	61
4.10	α, τ と歩行速度 V の関係 (bounce gait)	62
4.11	α, τ とエネルギー効率 ϵ の関係 (walk gait)	62
4.12	α, τ とエネルギー効率 ϵ の関係 (trot gait)	63
4.13	α, τ とエネルギー効率 ϵ の関係 (pace gait)	63
4.14	α, τ とエネルギー効率 ϵ の関係 (bounce gait)	64
4.15	各歩行パターンの歩行速度とエネルギー効率の関係	65
4.16	歩容とエネルギー効率の関係	66
4.17	第三リンク長の異なるロボットモデル	67
4.18	脚長の違いによるエネルギー効率 (walk gait)	68
4.19	脚長の違いによるエネルギー効率 (trot gait)	68
4.20	脚長の違いによるエネルギー効率 (pace gait)	69
4.21	脚長の違いによるエネルギー効率 (bounce gait)	69
5.1	歩行速度とエネルギー効率の関係	75
5.2	支持脚時の床半力	77
5.3	右前脚の進行方向の加速度	80
5.4	支持脚時のみの右前脚の進行方向の加速度	80

5.5	支持脚時の加速度の積算	80
5.6	滑り適応歩容実験の様子	81
5.7	重心移動距離と右前脚の第一関節角度	82
5.8	CPG 経由の滑り適応歩容の様子	83
5.9	第一関節角度の推移	84
6.1	実機モデル TITAN-VIII とリンクモデル	88
6.2	力制御を用いた滑り適応歩行の概要	90
6.3	勾配推定	90
6.4	支持脚の力制御	92
6.5	滑り補償	93
6.6	滑らないための条件 (ゲイン k_v , k_s 平面)	95
6.7	シミュレーションによる力制御を用いた滑り適応歩行実験の様子	97
6.8	支持脚線, 交差線方向の付加力	98
6.9	右後脚の X 方向移動距離	98
6.10	胴体の X 方向移動距離	99
6.11	PID 制御時の脚先加速度	99
6.12	力制御時の脚先加速度	100
6.13	実機モデルによる力制御を用いた滑り適応歩行実験の様子	101
6.14	支持脚時の右前脚の様子	102
6.15	右前脚の脚先加速度	103
6.16	遊脚から支持脚への遷移時の様子	104

表 目 次

2.1	歩容生成手法の比較	22
3.1	TITAN-VIII の基本仕様	36
3.2	FSR の基本仕様	36
3.3	加速度センサ：MA3-04Ac の基本仕様	36
5.1	摩擦と最適な歩行周期の関係	79
6.1	TITAN-VIII のリンクモデル	89
6.2	パラメータの説明	91
6.3	各関節制御 PID ゲイン	96

第1章 緒論

1.1. 研究の背景

ロボットが高度な機能を持ち、作業内容や作業対象が広がってきており、作業領域も工場内だけにとどまらず自然環境下や人間の居住空間にまで及んでいる。原子力プラントのような放射線環境下や深海底、更には地球外の惑星などの、人間が行くことのできない環境下で人間の代わりに作業を行うロボットに対する要望が高まっており、各所で研究・開発が行われている [1, 2, 3]。災害時における瓦礫内での救助機器の運搬や人命救助などのレスキュー活動に利用可能なロボットの研究・開発なども期待されている [4]。これら研究の重要課題の一つに移動機能を取り上げられており、ロボットの移動手段として脚式移動の実用化に対する要望が高まっている。脚式ロボットは冗長自由度を持った非線形システムであることから制御理論検証対象としても大きな魅力をもっており、これまでも様々な視点から脚式ロボットの研究がなされている [5, 6]。一脚 [7]、二脚 [8, 9, 10]、四脚 [11, 12, 13, 14, 15] を用いた整地走行や不整地歩行もある程度実現している。また多脚ロボットに関しては、脚の適切な機械的コンプライアンスを使用したオープンループ制御を用い不整地での高速移動を実現した研究などもある [16, 17]。これら従来の脚式ロボットの多くは、ロボットと環境との厳密なモデルを構築し、解析した結果を用いてロボットの関節軌道の生成を行い歩行や走行を実現している。あらかじめ路面などの環境情報が完全に分かっているならば、それに対応できる歩行制御プログラムを用意することは可能である。しかし、多様な不整地すべてに適応可能な歩行制御プログラムを用意することは一般に困難であり、自律的な適応が重要となる。しかも、ロボットが高速にしかも様々な環境を移動する場合には、モデル構築と解析を行って軌道を生成し制御するような方法は、非効

率かつ適応性に乏しいものと考えられる。

これに対し、実世界で自律的な適応を見せる多くの生物の運動はその体内に張り巡らされた神経系により制御されていることは広く知られた事実であり、そのメカニズムを解明するために数多くの研究も行われてきた。それらの研究が進むにつれ、生体内部には神経振動子と呼ばれるリズム発生機構がありこれが生物の周期的な活動（呼吸・移動運動など）に深くかかわっていることが明らかになってきた [18, 19, 20, 21]。動物の歩行運動は、主に脊髄に存在するリズム発生機構と抹消からの感覚などによる反射をもとに作り出された歩行リズムにより筋骨格系が駆動される。そして、脳幹・小脳・大脳などの上位中枢から刺激により筋活動の切り替えや歩行パターンの調整が行われ、実環境下でも規則的な歩行リズムをもとにした歩行運動が実現されることは、事実として広く受け入れられている。

このような生物学、神経心理学等で得られた知見に基づいて、自律的・創発的な歩行を実現しようとする試みが数多くなされてきた。これら生物規範型制御を用いて歩容を実現する研究は、環境適応性の実現に有効な手法であると考えられており、これまでに多くの研究がなされてきた。また、実機モデルを用いた実験も幾つか行われてきた。多賀ら [22, 23] は、神経振動子の持つ引き込み特性を利用し、下肢の動的物理モデルを用いてシミュレーションを行い、矢状面の二次元二足歩行に関する動的制御系を提案した。長谷ら [24] は、多賀らと同等の二足モデルにおいて、神経振動子の時定数などの主要なパラメータ、および、関節情報と神経振動子の組をパラメータとして GA を用いて最適な組み合わせを求め、学習が進むにつれて神経系の構造が単純化されることを示した。宮腰ら [25] は多賀の神経振動子モデルを用いることにより、安定した足踏みを実現できることをシミュレーションによって示した。木村ら [26, 27] は CPG と伸展・屈曲反射機構の組み合わせによる四足ロボットの整地走行、不整地動歩行を実現した。Tsujitaら [28] は非線形振動子を用いた歩行パターン制御系と脚軌道制御系を用いて四足歩行ロボットの速度に応じた歩容遷移を実現している。Ijspeertら [29], Lewisら [30] は、ヤツメウナギやサンショウウオの神経回路モデルを用いて、GAにより最適化された神経ネットワーク結合により水中での遊泳や地上での歩行が生成されることをシミュレーションにより示した。Beerら [31] は、アメリカゴキブリの神経モデ

ルを参考にし、CPGとして高位からの入力レベルに応じて周波数を調節可能な周期運動生成ニューロンを各脚に用い、移動速度の上昇に伴い、歩行パターンの遷移が自律的に発生することを示した。

しかし、これら実現された路面環境は非常に簡単なものであり、不連続な路面や路面摩擦の異なる環境での適応歩行は未だ実現されていない。CPGや反射のパラメータをロボットの筋骨格系に合わせて決定する手法も未確立であり、試行錯誤的なパラメータ調節の負担が問題となっている。さらに、シミュレーションのみの実験であるか、運動が平面内に拘束されているものが多く、拘束のない三次元的な歩行の実現のための制御手法は未だ確立されていないのが現状である。また、歩行速度の向上に伴い脚先の滑りが問題となるが、従来の研究では滑らない事を前提に行うか滑りを考慮しておらず、実際に滑ったときにどのように対処するか論じている研究はない。駆動電力まで含めた自立型のロボットでの実装など実用レベルに達している研究も未だほとんどない。

1.2. 研究の目的と基本的戦略

本研究の目的を述べる前に本研究で扱う路面環境について定義しておく。一般に不整地と言っても様々な路面環境が考えられる。本研究では路面環境を以下の四つに分類する。

- 整地（平面で傾斜の無い環境）
- 斜面・路面摩擦（平面で傾斜が有る、或いは路面摩擦が変化する環境）
- 小さな凹凸（跨ぎ越えることができるぐらいの小さな凹凸が存在する環境）
- 大きな凹凸（瓦礫など激しい凹凸が存在する環境）

CPGを用いて歩容を生成する場合、ZMP規範型（2.3節参照）よりエネルギー効率がよく、比較的速い速度の歩容が実現できる利点がある。この利点を生かせる環境は整地、斜面・路面摩擦、小さな凹凸と考えられる。そこで、本研究では路面環境として上記の3つの環境を前提として扱う。なお、大きな凹凸があるよう

な環境での動歩行は現在のところ実現されてはおらず、有効な手法が存在しないのが現状であり、本研究ではこのような環境は対象とはしない。

前節で述べたように、生物規範型の歩容制御はある程度確立されつつあるが、依然実用化されるまで完成された手法の確立には至っていない。従来研究の課題をここでもう一度明示しておくとして主に以下の3つの点が挙げられる。

- モデルの三次元化
- パラメータ決定手法の確立
- 滑りへの対処

本論文は、これらの問題点を踏まえ、路面環境の変化に柔軟に対応する歩容生成手法の構築を目的とし以下の研究を行う。

歩容を矢状面内の運動と前頭面内の運動との協調運動であるであると捉えると、安定した歩行運動の実現には矢状面内の運動と協調を保つように前頭面内の運動を制御することが必要である。二次元の運動の場合や、矢状面に比べて前頭面内の自由度が少ないものは、前頭面の運動に用いることができる総トルクが小さい。このため、前頭面内の運動は外乱の影響を受けやすく、矢状面の運動から前頭面内の運動への干渉を無視することは出来ない。神経振動子経由の左右揺動運動・姿勢反射を用いて、矢状面内の運動と協調を保つように前頭面内の運動を生成する三次元的な歩行生成手法を提案する。この手法を駆動電力まで含めた自立型のロボットに実装し、ロボットと環境との厳密なモデルを用いることなく整地・斜面での歩容を実現することによりこの手法の有効性を確認する。

CPGは外部入力のない状態では定常的な振動パターンを形成するが、関節角度などの体勢感覚の入力、あるいは前庭器官などの中枢神経からの入力に敏感であり、その影響のもとで多様な振動パターンを形成する。すなわち、CPGのパラメータを決定する場合には外部との相互作用も含めた環境で行う必要がある。ロボットと環境との相互作用も含めた、高速な三次元動力学シミュレーション環境をゲーム開発用に開発されたツールキットを用いることにより構築する。開発したシミュレーション環境を用いてエネルギー効率に基づくCPGパラメータの

決定手法を提案する。この手法は、速度に対して高エネルギー効率となる最適な CPG パラメータを決定するものである。

脚による移動機構は脚が接地面に安定に接触している状態を前提に考える事が多いため、接地面において滑りが発生した場合には様々な問題が惹起する。滑り・路面摩擦が歩容およびエネルギー効率にどのような影響を与えるかを検証する。得られた知見に基づき二つの滑り適法歩容を提案する。一つは、CPG 経由の滑り反射を利用した歩行パターンそのものを変更する滑り適応歩容であり、路面摩擦の変化に適応することを試みる。もう一つは、力制御を用いた滑りに瞬時に対応する滑り適応歩容であり、滑りが発生した時に脚先に付加的に力を加えて滑りに対応することを試みる。これらの手法により、路面摩擦の変化、滑りに適応する歩容を生成することが可能となる。歩行時の脚先滑りに着目した歩行研究は今まで行われておらず、滑り適応歩容の実現は、歩容研究に新たな視点の確立が期待される。また、この結果は滑りの重要性を示唆しており、歩行研究での新たな知見の獲得につながると考えられる。

本研究で得られる知見により、リズム発生機構と反射機構を用いた歩容生成・制御系を構築することで、CPG ベース型制御による環境適応歩容を実現する一手法の確立につながる。この結果は、歩行ロボットが未知環境での歩容を実現する上で有効な指針となることが期待される。

1.3. 本論文の構成

本論文は以下の 7 章より構成される。

- 第 1 章: 緒論 本研究の位置付け, 目的, 基本戦略そして歩行研究に与え得るインパクトを明確にした。
- 第 2 章: 脚移動システム 従来数多く行われてきた脚式ロボットに関する研究を, 制御手法の観点から整理し, 脚式ロボットの優位性を明らかにし, 各々の研究の位置づけを明確にする。本章で提案するアプローチ, つまりリズム発生機構と反射機構による CPG ベース型歩容生成の意義と特徴を明確にする。

第 3 章: CPG ベース型制御による三次元適応歩容生成手法の提案 歩容の三次元化を実現するために、神経振動子経由の左右揺動運動をもちいて、矢状面内の運動との協調を保つように前頭面内の運動を生成する CPG ベース型制御による三次元適応歩行生成を提案する。また、神経振動子経由の姿勢反射の導入による斜面適応歩容を提案し、実機モデルにより本提案手法の有効性を検証する。

第 4 章: エネルギー効率に基づく CPG パラメータ決定手法の提案 ロボットの制御アルゴリズムの開発環境として高速な三次元動力学シミュレーション環境の必要性について述べる。ゲーム開発用に開発された動力学演算ツールキットを用いることにより構築した高速三次元動力学シミュレーション環境について説明し、開発したシミュレーション環境を用いてエネルギー効率に基づく CPG パラメータの決定手法を提案する。これにより、歩行速度に対するエネルギー効率を最適にする歩行周期、歩幅を決定する事が可能となる。

第 5 章: 路面摩擦が歩容およびエネルギー効率に及ぼす影響 多脚歩行ロボットにおいては、多少の滑りが発生しても直ちに転倒する危険は少なく歩行を維持する事は可能であるが、エネルギー効率に影響を与えることは用意に考えられる。路面の摩擦条件の違いが歩容やエネルギー効率にどのような影響を与えるかを 4 章で述べた動力学シミュレータを用いて検証する。得られた知見に基づき滑り情報を利用した CPG 経由の滑り適応歩容を提案し、従来外乱とみなされていた脚先の滑りに適応する歩容を実現する。さらに、シミュレーションを用いて提案手法の有効性を検証し、実機モデルに応用して CPG 経由の滑り適応歩容の実現性について確認する。

第 6 章: 力制御を用いた滑り適応歩容の提案 脚先の滑りはそれが路面に及ぼす力が摩擦円錐からはみ出すことにより起きる。付加的に脚先に力を加えることで、合力を摩擦円錐内に誘導し滑りを抑える力制御による滑り適応歩容を提案する。脚先が滑る際の脚先加速度情報より脚が接地する路面の局所的な勾配を推定し、瞬間的に路面へアクチュエータにより力を付加するも

のであり、シミュレーションにより有効性を検討する。さらに、実機モデルに応用して提案手法の有効性の検証を行う。

第 7 章: 結論 本論文を結ぶ。本研究を通して得られた知見を総括し、今後の展開/可能性を述べる。



第2章 脚移動システム

2.1. 本章の趣旨

本章では，従来数多く行われてきた脚型ロボットに関する研究を，制御手法の観点から整理し，各々の研究の位置づけを明確にする．まず，脚型ロボットならではの優れた特徴について説明し，脚型ロボットの分類とロボットの移動機構の特徴を述べる．次に，従来研究を制御手法の観点から分類する．さらに，本章で提案するアプローチ，つまりリズム発生機構と反射機構によるCPGベース型歩容生成の意義と特徴を明確にする．

2.2. 移動機械としての脚型ロボットの意義

2.2.1 脚型ロボットの特徵

ロボットの移動機構として主に用いられている機構には，車輪型，クローラ型，脚型がある．或いは，それぞれを結合したハイブリット型などある．ローラーウォーカー [32] は車輪型と脚型とのハイブリット型として有名である．

車輪型，クローラ型は，構造の簡単さ，制御の容易さ，エネルギー効率の良さ，高速性などの特徴がありこれまでに多くの研究がなされてきた．これに対し，脚型移動は，機構や制御の複雑という欠点もあるが，脚型ならではの優れた特徴があり，多くの研究者が実用化に向けて研究を試みている．脚型による移動機械が有する特有の機能として主なものを以下にまとめてみる．

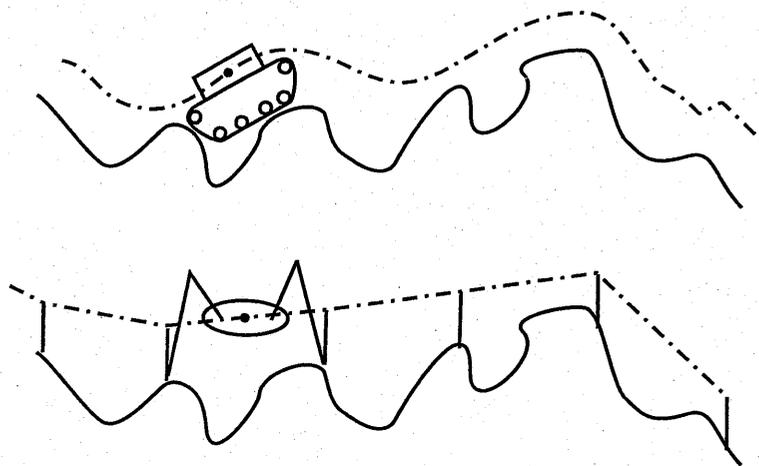


図 2.1 凹凸面平滑化特性

地表支持点の任意選択性

車輪型、クローラ型は荒地をタイヤあるいは履帯で平滑化して移動する。それに対して歩行機械は、まず脚支持点を図 2.1 のように適応的に選択し、ついでそれらの間を補完するような軌道を生成し、胴体をそれに沿わして移動を行う。このような移動方式をとるため、歩行機械は凹凸の激しい不整地でも脚支持点を適当に選択することにより滑らかに移動できる。たとえば、瓦礫の山によじ登らなければならない場合の移動装置として脚型は適している。

離散的な支持点を構成する機能

車輪型、クローラ型は連続的な轍を残す。それに対し、歩行脚の接地点は離散的である。このような特徴を有するため、歩行機械は階段の昇降、地上の障害物の非接触な跨ぎ越えなどの移動運動を用意に実現できる。例えば、踏んでしまいたくない地点があるとすると、車輪型、クローラ型では、大回りしなければならないが、脚型では、適当な支持点を選択することによって回避できる。

無スリップ方向転換機能

クローラ型は接地面圧を低減化する特性は大きいですが、その場で方向転換などを行うと大きな滑りが生じる。それに対して、歩行機械は脚裏面積が広くても、脚裏と地表面でスリップが生じない方向転換ができる。そのため、歩行機械は脆弱な面での移動に最適である。例えば、畳やフローリングなどを傷つきやすい環境を動き回らなければならないホームロボットなどには、この特徴は有効である。

確実に能動的な足場を構成する機能

移動機械が達成すべき機能は、ほとんどの場合、単なる移動だけではなく、目的地に到着したあと、そこで何らかの作業を行わなければならない。その作業を行うための足場となる機能も兼ねそなえることが必要とされる。その点、歩行機械は静止時にその脚をロックすれば、地形に従った確実な足場を構成することができる。さらに、重要なことは、脚は単に静止した足場になるだけではなく、搭載した作業装置を能動的に駆動するパラレルマニピュレータとしても使用できる点である。我々が何かハンドリング操作をする場合には、対象物が軽いときは、上腕だけで持ち上げ作業をする。しかし、対象物が重たい場合には、上腕と下肢を並列に駆動することによって強力な力で作業をする。これは、まさに脚をパラレルマニピュレータと利用する例である。

このように脚型には、車輪型やクローラ型には無い特徴を有しており実用化に向けて大きな可能性を秘めている。

2.2.2 脚数と歩容

実用的な歩行機械を構成しようとするとき、脚の本数は何本であることが望ましいか幾つかの側面から検討しておく。

まず、移動機械は駆動装置のみならず電源装置、制御装置をすべて搭載して動き回らなければならない。そのため駆動機構設計においては軽量化を実現することが重要である。そのため、駆動系の自由度は出来るだけ少なくするべきである。

例えば、現在広く世間で使用されている自動車は自由に動き回ることが可能であるが基本的にはアクセルとハンドル操作の二自由度に過ぎない。

また、脚型の特徴として能動的な足場を構成する機能を有していると前節で述べたが、カメラの三脚のように静的安定姿勢を維持するためには三本以上の脚が必要である。

さらに、安定維持法の観点からの歩行を一般的に分類すると、「静歩行」と「動歩行」、そして「準動歩行」に分類することができる [33]。ここで「静歩行」とは、その歩行の速度を低くしたと想定した場合でも静的安定が維持された計画通りの運動が維持できる歩行である。つまり三本以上の脚で静的安定を維持しながら他の一本以上の脚を復帰動作させることにより実現できる。よって、「静歩行」を行うためには4脚以上が必要である。足の裏の設置面積が大きく一脚でも静的安定性を維持できる玩具などもあるが、そもそも足が大きいとエネルギー効率が非常に悪く、実用化には向いていないと考えられる。実際に動物の足を見てみると点接触とまでは行かないものの体の割合に比べて足は非常に小さい物になっている。

「動歩行」とは、対象とする歩行で動的効果が期待できない遅い速度で実現しようとする計画通りの歩行ができず転倒を始めてしまう歩行である。つまり動的バランスを常に保ちながら歩行を維持するものである。「動歩行」は1脚のホッピング歩行から実現可能である。

「準動歩行」とは歩行中に動歩行と静歩行が混在する歩行である。「準動歩行」は、歩行中に三本以上の脚での静的安定状態が含まれる歩行であり、これは、3脚以上あれば実現可能である。

歩行速度を考えると静歩行に比べて動歩行では高速な移動が可能である。歩行速度を上げる手段としては、歩幅を大きくする、歩行周期を小さくする、デューティ比 β (一周期の歩行中で足が地面に設置している時間の比率) を小さくするということが考えられる。各脚の最大駆動速度 V_L が一定の場合には、歩行速度は式 2.1 が成り立つ。デューティ比 β が 0.5 の場合のときに最大推進速度を実現することが出来る。デューティ比 β をそれ以上小さくしていても歩行速度は上

がらない。

$$V = \frac{1-\beta}{\beta} V_L \quad (2.1)$$

四本以上の脚があれば静歩行と動歩行の両方を実現することが可能である。また、脚が六本以上のロボットではあれば半分の脚で静的安定性を保ちながら残りの脚を復帰させることにより静歩行を行いながらデューティ比 $\beta = 0.5$ の最大推進速度を実現することが出来る。以下本論文ではデューティ比 $\beta = 0.5$ 場合を中心に議論していく。

以上のような観点から、歩行機械を実現する上で最適な脚の本数を考えると、脚の本数は機構を単純化し軽量化するためには少ないほど望ましく、静歩行と動歩行を実現するためには四本以上の脚が必要である。つまり、四脚が最適であると考えられる。

2.3. 脚型ロボットの歩容生成手法

前節で述べたような歩行機械の優れた対環境適応能力を生かすには環境やロボットの状態に応じた脚の運び方（歩容）を決定してやらなければならない。

静歩行での代表的な歩容生成の方法に「安定余裕」によるものがある。「安定余裕」とは、歩行システムの重心が支持面への鉛直投影点と支持多角形の辺までの最短距離を安定余裕と呼び (図 2.2), この安定余裕を常に持つ歩行が静歩行であり、一歩行周期中の安定余裕の最小値を「安定余裕」と呼ばれている。また、これの斜面などに発展させた手法には、「転倒安定余裕」, 「傾斜度安定余裕」, 「Tipover Stability Margin」, 「Energy Stability Margin」, 「Dynamic Energy Stability Margin」, 「Normalized Energy Stability Margin」などがある [34]。これらの安定評価基準に従い、歩行中にこれらの安定評価基準を満たすように重心軌道や、脚先軌道などの歩行計画を幾何学的に計算する歩容生成方法である。

動歩行では、支持点を中心とした角運動量の保存則を用いるもの [35], 複数の接地点を仮想的に一つと見なして制御を行うのもの [7], 倒立振子を規範とした現代制御を応用するもの [8, 36], ZMP (Zero moment point) を規範として運動計画を行うもの [37, 38] などがある。この中で、現在、主に使用されているものは倒

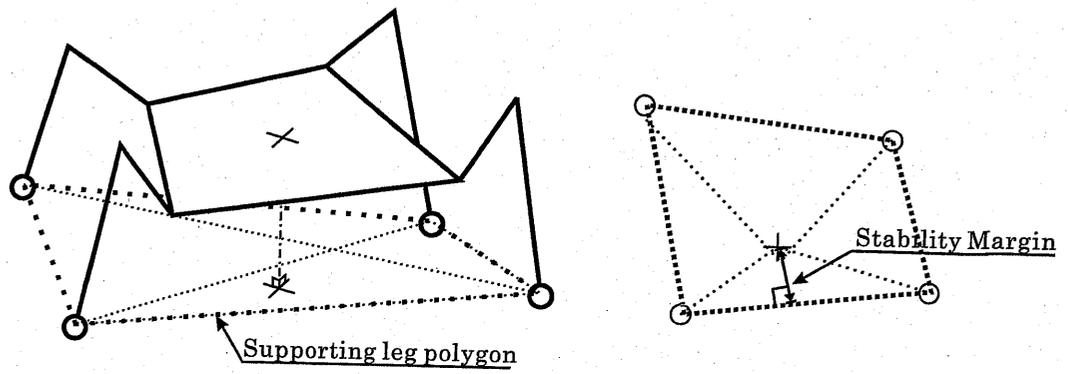


図 2.2 安定性余裕

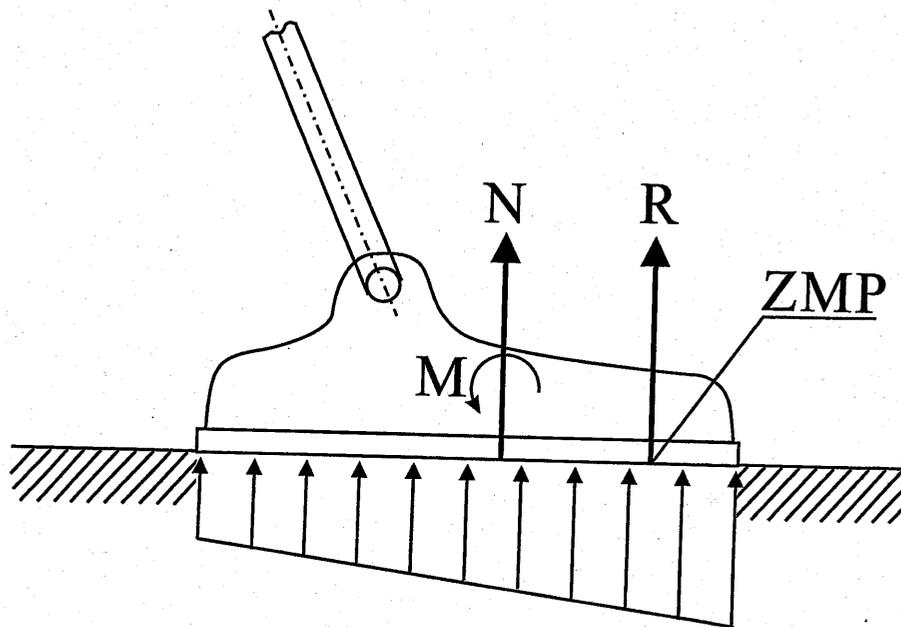


図 2.3 ZMP の定義

立振子を規範とした手法と、ZMPを規範とした手法である。

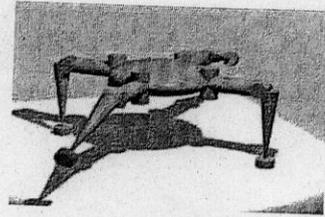
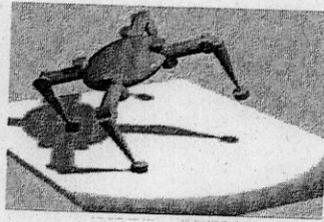
ZMP[39]とは、動的な重心投影点(床反力中心点)とも言うべきのもので、「歩行のあらゆる瞬間において脚底接地点が路面とが形成する支持多角形の辺上あるいはその内側にピッチ及びロール軸モーメントがゼロとなる点」[38]であり、図2.3のように示せる。ここで、力 N 、モーメント M は足裏の分布反力を脚の支柱面の中心に集めたものである。合成力 R の作用点を考えれば、この点回りのモーメントがゼロとして、 R の働く点を定義することができる。この点がZMPである。このZMPを接地脚が作る多角形上に常におくような軌道と制御を行うことによって安定した歩行を行う手法である。この手法の特徴としては、運動の非線形(干渉)成分まで計算することに相当し、比較的大きな運動にも対応でき、外乱が無い場合のフィードフォワード的な安定運動計画を生成出来ることである。最近ではホンダのヒューマノイドにもこの概念を採用している。脚底の大きな二足歩行ロボットにおける歩容生成には最も有効な手法の一つとされている。

倒立振子を規範としたものとは、四脚ロボットが転倒する際に必ず二脚支持状態を経由する(図2.4)ことに着目して、この状態を支持脚足首にアクチュエータが存在しない倒立振子のモデルに簡略化することによって(図2.5)、歩行軌道を生成する手法である。ZMPは比較的遅い動歩行に、倒立振子は周期的な比較的早い動歩行に有効であると一般的に考えられている。

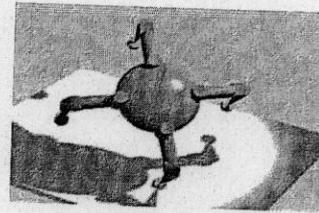
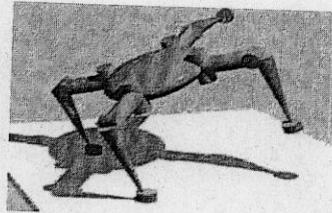
また、最近では強化学習やGA・GPなどの機械学習を用いたインテリジェント制御により歩容を生成する手法なども提案されている[40, 41, 42, 43]。

動歩行とは少し異なるが、バネ-ダンパ系でモデル化される筋骨格系での自己安定性を六脚ロボットに応用して、脚の適切な機械的コンプライアンスを利用し、ほぼオープンループで不整地を高速に移動可能なロボットも作られている[16, 17]。

斜面や段差、凹凸などの環境に適応した歩容に関する研究では、足に取りつけた力センサを用いて、傾斜地に適応する歩容の研究[44]や、ロボットに特別な機構を付加することなしに、脚のみで大きな段差や急勾配の階段を歩行できる手法[45]などがある。

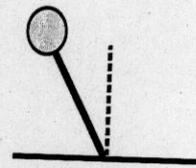
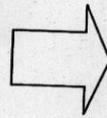
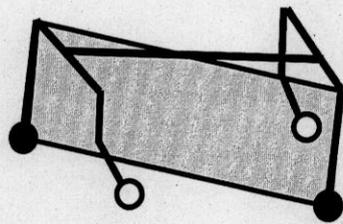


Stable

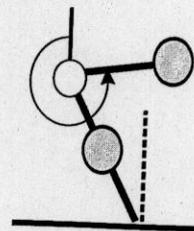
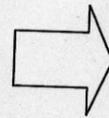
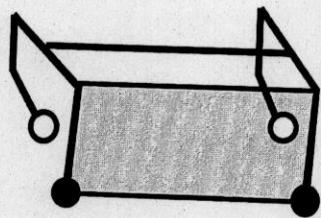


Unstable

図 2.4 転倒条件



Trot



Pace

図 2.5 倒立振り子モデル

2.4. CPG ベース型歩容生成

2.4.1 生物のリズム運動における制御機構

生物の歩く、走る、泳ぐ、跳ぶ、飛ぶといった運動は、一般的に“Locomotion”と呼ばれ、動物にとって最も重要で、かつ基本的な機能である。“Locomotion”は自分自身を維持し、推進する肢を周期的に運動させることによって行われ、その基本は各肢のリズム運動と肢間の協調機構にある。これまで、様々な観点からの研究が行われてきているが、それらは大きく二通りのアプローチに分けられる。一つは、バイオメカトロニクスの立場からの研究で各肢が体幹をどのように推進し、そのとき、関節、筋、腱などの器官がどのように働くかを力学的観点から明らかにしようとするもので、もう一つは、“Locomotion”を支える神経系、および制御回路がどのような構成になっているかを、また、動物に共通してみられる制御機構は存在するのか、存在するとすればどのようなメカニズムで働いているかを明らかにしようとするものである。

現在知られている随意運動制御の情報の流れを、各部位が担っていると考えられている機能とともに概念的に示すと図 2.6 のように示せる [46]。連合野、運動前野、補足運動野を中心とする上位中枢で運動の計画・プログラムが、運動野、脳幹・脊髄系、筋骨格系を中心とする下位側で運動の具体的な遂行・制御が行われていると考えられている。小脳は運動制御だけでなく、言語や思考を含む人の高次認識機能に重要な働きを示すことが分かってきている。このうち、小脳外側部は大脳皮質と相互に結合しており、運動の開始あるいは運動の動的パターンの計算、運動のタイミングの制御などに関与している。一方、小脳中間部は抹消神経からの入力情報を直接受け、運動の対象外部環境の変動に応じて運動指令やパラメータを絶えず調節するという適応制御系をとしての機能を有する。歩行運動は比較的下位のレベルにあり、その中心は脳幹・脊髄系にあり、随意的に速度を変えたり、歩幅を調節したりする場合は上位の運動プランニングのレベルが関与することになる。

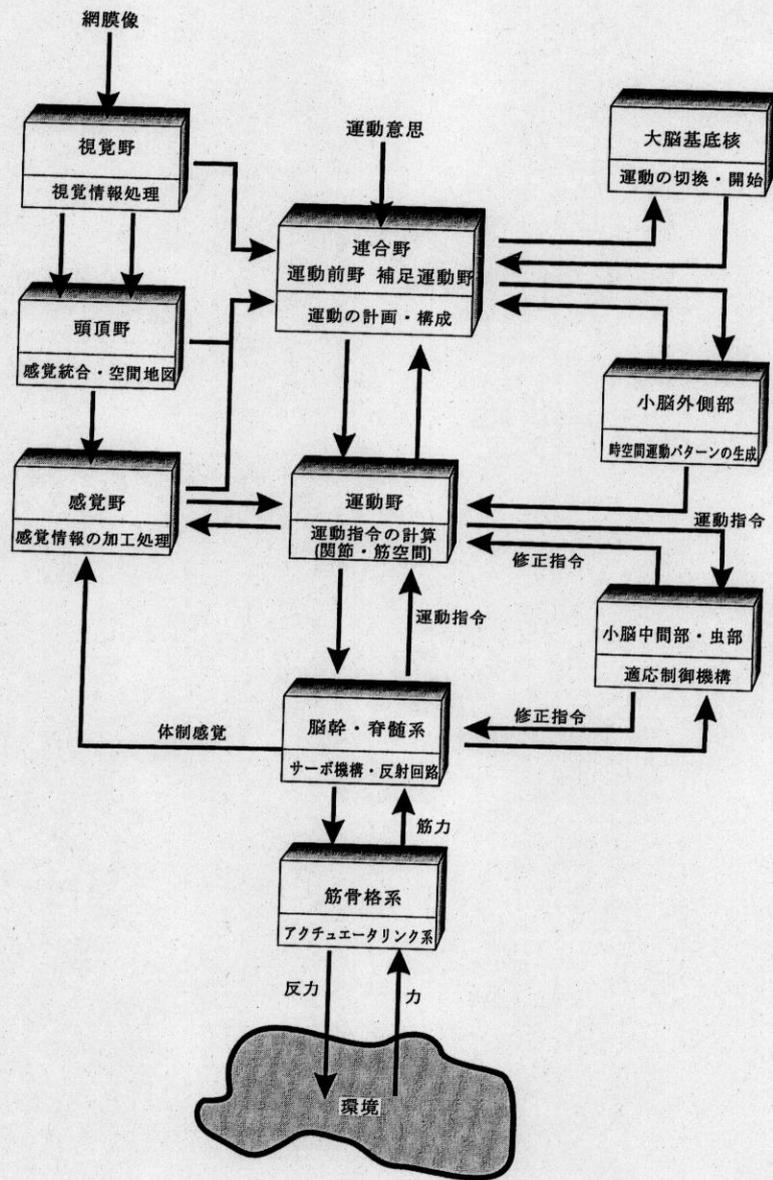


図 2.6 随意運動制御の情報の流れ

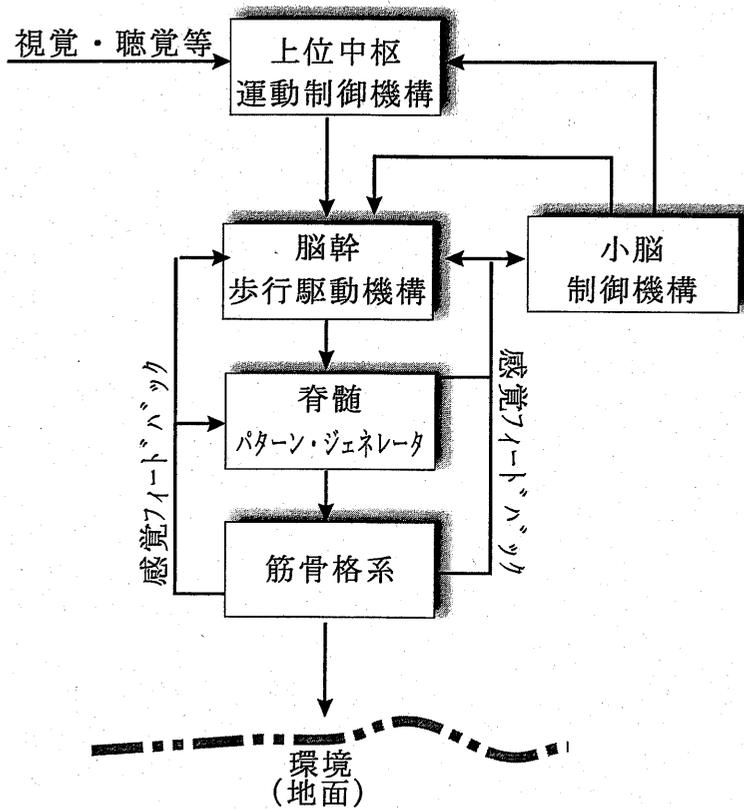


図 2.7 歩行運動の制御機構

2.4.2 Central Pattern Generator と歩行の適応制御

歩行運動は図 2.7 に示すように、主に脊髄、脳幹、小脳という三つのサブシステムにより制御されていると考えられている。歩行運動の基本である周期的なリズムの生成機構は、脊髄動物では脊髄にあると考えられている。このことについては、除脳ネコの実験 [47] が有名である。それによると、脊髄動物の歩行のリズム生成する Pattern Generator は脊髄中に存在し、歩行は中脳以下の比較的底レベルの神経系において自律的に生成されていることが明らかになっている。また、脊髄の Pattern Generator は歩行パターンの生成に不可欠であるが、それが歩行運動のすべてではない。皮膚感覚などの抹消神経からの感覚フィードバックによって筋活動の切り替えや、歩行パターンの変化が行われ、適応歩行が行われている。つまり、歩行制御においては、歩行リズムを作り出す基本的な Pattern Generator

の出力が脊髄反射弓, 脳幹を通して, 四肢に伝えられ基本的なリズムを作り出す。しかし, それと同時に歩行中には, 障害物や路面の凹凸, 滑りやすさ, 路面が登り坂であるか下り坂であるか, あるいは階段であるか等といった外界の状況にあわせて適応的に四肢の協調が行われなければならない。あるいは, 脚が障害物に当たったとき, 他の脚がその外乱を補償する方に足並みを整えなければならない。このような機能が小脳の適応制御によってなされている [48]。小脳中間部は, 四肢からの状態フィードバックを受けるとともに目標軌道とも言うべき歩行の基本的なリズムパターンを歩行の Pattern Generator から受け取っている (図 2.8)。この二つの入力为目标軌道と状態フィードバックであり, これは, 小脳に平行線維入力として与えられる。

2.4.3 リズム生成に基づく歩容生成

最も単純な Pattern Generator は図 2.9 に示す相互抑制回路である。この回路は次の条件が満たされると発振する。

1. ニューロン M_1 と M_2 はお互いに相手を抑制する。
2. M_1 と M_2 が発生するパルス頻度は時間とともに減少する。すなわち, M_1 と M_2 には疲労特性がある。
3. M_1 と M_2 には一定頻度の維持入力加わる。
4. M_1 は屈筋を, M_2 は伸筋を駆動するとする。

今, M_1 が興奮状態 (屈筋駆動) にあったとする。この時, M_1 の出力は M_2 を抑制している。しかし, 疲労効果によって, M_1 のパルス頻度は次第に減少していき, M_2 は維持入力を持続的に受けているので, ある時点から興奮状態 (伸筋駆動) にかわり, パルスを出し始める。その結果, M_2 の出力は M_1 を抑制し, M_1 のパルス頻度は減少し始め, 遂には M_1 は停止し, M_2 に活動が移る。この繰り返しのよって歩行リズムが生成される。

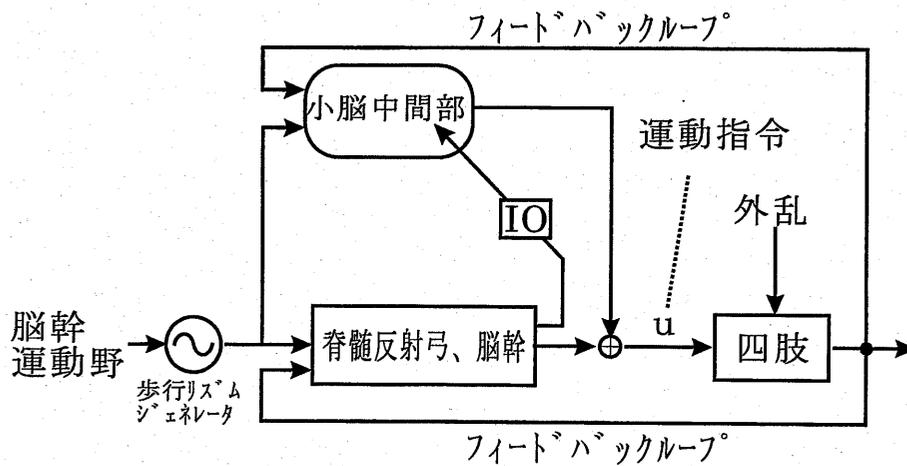
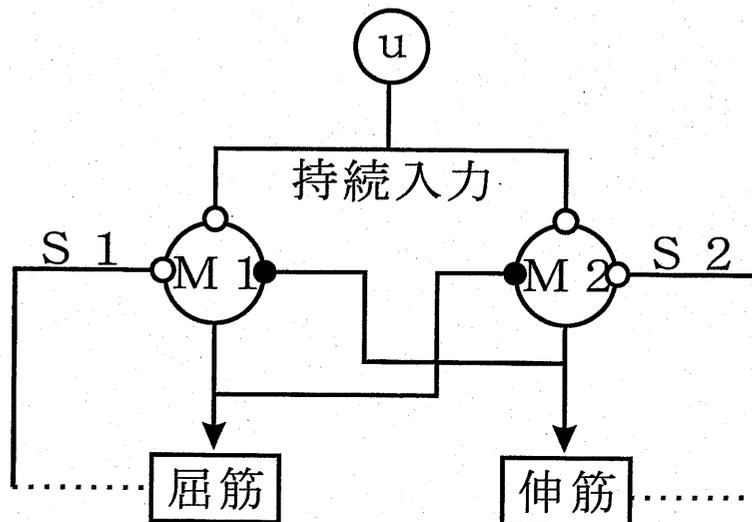


図 2.8 歩行の適応制御



● 抑制性入力 ○ 興奮性入力

図 2.9 相互抑制による CPG

表 2.1 歩容生成手法の比較

	ZMP 型	CPG 型	バネ-ダンパ型
主な特徴	安定性を保障 比較的大きな足に 有効	計算が容易 適応性	機械的コンプライ アンス オープンループ
運動計画・制御	分離型	一体型	分離型
エネルギー効率	低	中	高
センサの役割	大	中	小
運動	姿勢制御 低速歩行	リミットサイクル 中速歩行	機械的特性に依存 高速歩行
主要な制御部	上位神経システム 筋張力調整の学習	下位神経システム リズムと筋張力の 協調	筋骨格系 自己安定性

2.5. 歩容生成手法の特徴

前節まで述べた歩容生成手法の特徴をまとめると表 2.1 のようになる。ZMP 型は、比較的大きな足を持つロボットには有効であり、転倒しないことを保障しているもので歩行を行うことに対しては十分条件となる。そのため、胴体の姿勢制御を行う必要があり、エネルギーを余分に必要とする。現在に二足歩行ロボットは ZMP 型が主であるが、エネルギー効率は人間の約 5 倍以上であると言われている。これに対し、CPG 型はシステムと環境との相互作用の中で運動が創発的に生成・制御されるものであり、環境適応性には優れている。歩行に対しては必要条件となり、ZMP 型に比べエネルギー効率はよくなる。また、ZMP 型は軌道計画を行うループと制御を行うループとが別々に存在するが、CPG 型では、システムと環境をも含めた大きな一つのループで運動の計画・制御を行うことが可能であり、軌道ベースの制御手法とは根本的に異なる。バネ-ダンパ型は、受動的な機構が自己安定を持つことを上手く利用して不整地での高速移動を実現しているが、六脚口

ロボットとは異なり四脚ロボットでは脚の受動的なコンプライアンスだけでは不整地自律適応を実現することは困難である。

また、主な制御部位を検討すると、ZMP型は大脳や小脳といった上位神経システムであるのに対して、CPG型は脊髄、脳幹といった下位神経システムであると考えられ、バネ-ダンパ系は筋骨格系での自己安定化であると考えられる。“Locomotion”はできるだけ低レベルのシステムで行う方が望ましいと考えられ、バネ-ダンパ型が最も理想的ではあるが、機械的特性に大きく依存してしまい汎用的でない。以上のように、1.2で定義したような整地、斜面・路面摩擦が変化する環境、小さな凹凸のある環境ではCPG型が有利である。

2.6. 本章の結論

本章では、従来数多く行われてきた脚型ロボットに関する研究を分類・整理した。脚型ロボットの移動機構の特徴を述べ脚型ロボットならではの優れた特徴について説明し、脚型ロボットの有用性を明確にした。また、従来研究を制御手法の観点から分類することにより、各々の研究の位置づけを明確にした。さらに、生物の運動制御の特徴を説明し、リズム発生機構と反射機構によるCPGベース型歩容生成の意義と特徴を明確にし、それが従来研究での問題点を解決するのに有効な手段であることを示した。

|

|

第3章 CPGベース型制御による 三次元適応歩容生成手法 の提案

3.1. 本章の趣旨

本章では，2章で説明したCPGを利用した歩容生成を三次元の運動へ拡張した適応歩容の提案を行う．まず，本研究を通じて用いられる神経振動子モデルの説明を行い，基本となるCPGベース型歩容生成を説明する．次に，複数の神経振動子を相互に結合したリズム形成機構を中心とした神経振動子結合モデルを用い，各センサからのフィードバック入力を利用した反射運動による矢状面内の周期的な歩行パターンの生成と前頭面内の左右揺動運動との協調を行う三次元的な歩行生成手法を提案する．さらに，胴体の傾き情報をCPGにフィードバックすることのみで実現する姿勢反射について説明する．本手法は，従来の歩行ロボットの研究で常識とされた軌道計画ベースでの適応は存在せず，リズム発生機構と環境との相互作用の結果として，動的な適応が自律的に生成される．最後に，実機モデルに本提案手法を適応し整地・斜面での動歩行を実現することにより本手法の有効性を確認する．

3.2. CPG ベースによる三次元適応歩容

3.2.1 神経振動子モデル

神経回路によるリズム生成を説明するモデルとして種々のものが提案されている [49, 50, 51, 52]. 個々のニューロンのモデルとしては, その数学的扱いが他のモデルに比べて比較的容易であり, 相互に抑制する神経回路において振動を発生する条件等が詳しく解析されている松岡 [53] により提案されたモデルを採用する. このモデルは, 多賀 [23] により二足歩行の筋骨格モデルと接続することで, 路面変化や外力に対してロバストな歩行を生成できることをシミュレーションにより示され, 木村ら [27] により四足歩行ロボットの制御に用いられ, 整地・不整地動歩行を実現しその有効性が確認されているモデルと同様のものである.

このニューロンモデルを図 3.1 に示すように複数組み合わせ, 神経振動子モデルを構築する. 一つの神経振動子は式 (3.1) (3.2) (3.3) のように非線形一階連立微分方程式で表される. このモデルは, 二つのニューロンが互いに抑制し合う組により構成されている. ロボットの一つの関節は, それぞれの拮抗ニューロンの内部状態に比例する速度により駆動される. 各神経振動子には各センサ情報をフィードバック入力として用いる. このとき, 神経振動子と筋骨格系は相互に引き込まれ, 同じ周期と位相差で振動を始める.

$$\tau \dot{U}_{\{e,f\}i} = -U_{\{e,f\}i} + \sum_{j=1}^4 C_{ij} y_{\{e,f\}j} + C_{fe} y_{\{f,e\}i} - AV_{\{e,f\}i} + u_i + F_{\{e,f\}i} \quad (3.1)$$

$$\tau \dot{V}_{\{e,f\}i} = -V_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i} \quad (3.2)$$

$$y_{\{e,f\}i} = \max(U_{\{e,f\}i}, 0) \quad (3.3)$$

ここで, 添字 i は各神経振動子, $\{e, f\}$ はそれぞれ伸筋ニューロン, 屈筋ニューロンを表す. U, V はニューロンの内部状態, y はニューロンの出力を表す. u は視覚や聴覚などの上位中枢からの外部入力, F は関節角度等のフィードバック入力を意味する. A は疲労係数であり, τ は歩行周期等に関係する時係数を表す. C_{fe} は拮抗ニューロン間の結合係数, C_{ij} は結合されている他のニューロン間の

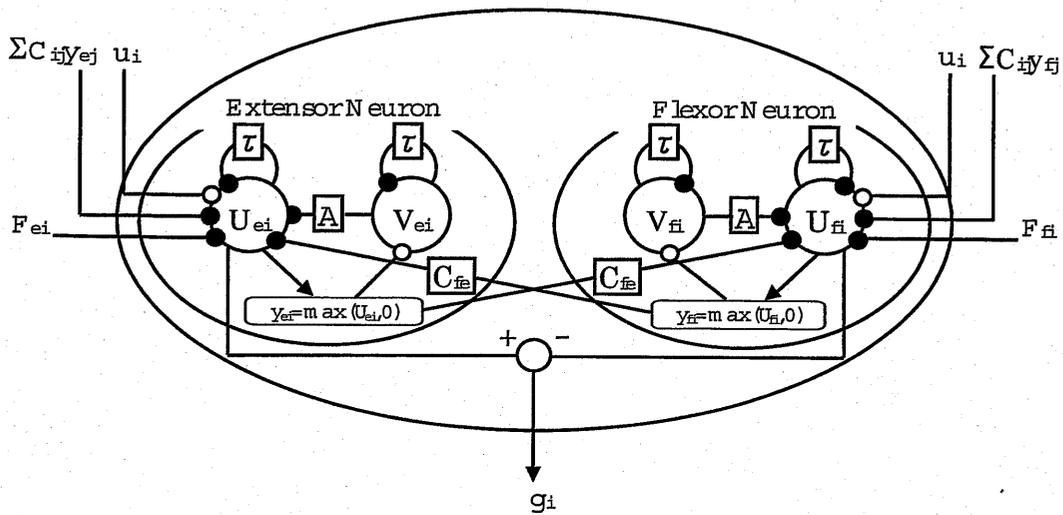


図 3.1 神経振動子モデル

結合係数である。結果として関節を駆動するモータへの出力は、

$$g_i = \alpha(U_{ei} - U_{fi}) \quad (3.4)$$

となる。 α は各ニューロンからの出力を、関節を駆動するモータ速度に変換するための係数である。本章においては u は一定値である。

3.2.2 神経振動子結合モデルによる歩行パターンの生成

本章では、各脚の第一関節を駆動する神経振動子を相互結合して4個の神経振動子(右前足:RF, 右後足:RR, 左前足:LF, 左後足:LRと名づける)からなるネットワークを構築する(図3.2)。このとき、複数の神経振動子は相互に引き込まれ、同一周期と固定位相差で振動を始める。各神経振動子間の結合係数は以下の式により与える。本研究では符号のみを考慮し結合係数の大きさは考慮しな

い。なお、ロボットの各脚のモデルとして図 3.3 のリンクモデルを想定している。

$$C_{ij} = \begin{cases} +1 & : \text{Excitatory Connection} \\ 0 & : \text{No Connection} \\ -1 & : \text{Inhibitory Connection} \end{cases} \quad (3.5)$$

本モデルでは結合係数の組み合わせを変えることにより walk gait, trot gait, pace gait, bounce gait など様々な歩行パターンを実現することが可能である。本研究では, trot gait を使用するために結合係数 C_{ij} に式 (3.6) の値を用いる。

$$\begin{aligned} C_{RFlf} &= C_{LFrf} = C_{RFrr} = C_{RRrf} = -1 \\ C_{LFlr} &= C_{LRlf} = C_{RRlr} = C_{LRrr} = -1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

フィードバック入力について考えると, 生物において重要なフィードバック運動の一つに反射がある。感覚受容器が刺激されると, その影響が効果器に現れる。この現象が意識とは直接関係ない場合を反射 (reflex) という。姿勢及び運動には様々な反射が関与しており, 歩行に関して代表的な反射の一つに伸張反射がある。伸張反射とは筋肉を引き伸ばすとその筋肉がもとの長さに戻ろうと収縮する反射である。また反射には, 受容器の順応の速さにより相動性と緊張性がある [54]。Grillner ら [55], 多賀 [23], 木村ら [27] による神経振動子への関節角度フィードバックは緊張性伸張反射に相当するという知見に基づき, 本研究でも式 (3.7) に示す関節角度フィードバック入力が入力されるすべての実験において採用されている。ここで, θ_p は, 第一関節角度を意味する。

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} F_{ei} \\ F_{fi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \max(\theta_{pi}, 0) \\ \max(-\theta_{pi}, 0) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

各脚すべての関節を神経振動子により制御することも可能であるが, 神経振動子の個数が増加するとそれに伴い決定しなくてはならないパラメータ数も増加してしまう。そこで本研究では, 第二関節を第一関節に連動して駆動する従属関節とすることにより, 神経振動子の増加を抑え脚先軌道計算の簡略化を図ることとする。具体的には式 (3.8) に従い, 各脚先の接地センサの情報を基に第一関節の

関節速度の微分値 ($\dot{\theta}_{pi}$) を第二関節の指令値 ($\dot{\theta}_{si}, \theta_{si}$) として用いる. k は [s/rad] の次元を持つゲインである.

$$\begin{cases} \dot{\theta}_{si} = k \frac{d\dot{\theta}_{pi}}{dt} & (\dot{\theta}_{pi} \geq 0) : \text{swing motion} \\ \theta_{si} = 0 & (\dot{\theta}_{pi} < 0) : \text{support motion} \end{cases} \quad (3.8)$$

これは, 第一関節が復帰動作を行う間に脚の上下動作を行うためである. 一般的に速度の微分値を速度として用いることはおかしく思われるが, 第一関節の動きは周期運動であるため速度の微分値を利用することにより位相差をずらすことが可能である. これにより, 復帰動作時に脚の上下動作, 支持動作時に必要なトルクを出力する協応的運動と脚先軌道計算の簡略化を行うことが可能になる. 第三関節については, 後述する左右揺動運動の実現に用いる.

3.2.3 左右揺動運動

前節で示したモデルを用いて歩行パターンの生成を行うのであるが, この手法のみでは矢状面の運動のみ考慮しており前頭面内の安定性を考慮していないことになり, 実機での三次元的な安定した歩行を実現することは困難である. 転倒しないことが目的であればこれだけで十分歩行は可能であるが, より安定性の向上を行うために前頭面内の運動として左右揺動運動を導入する. これは, 左右方向のみの加速度を調整することで, ZMP 軌道を支持脚対角線上に常に保つように胴体を左右方向に揺動する補償軌道を生成する手法である. 広瀬ら [56] は, 動力学を考慮した複雑な計算を行うことにより左右揺動軌道を生成し, 静止状態から連続的に推進速度の切り替えを可能にする歩容生成手法を提案している. 本研究では神経振動子を用いることにより複雑な軌道計算は行わず左右揺動運動を実現する手法を提案する.

前頭面内の運動を制御するために新たに神経振動子 (SSM: Sideways Sway Motion と名づける) を加え (図 3.2), 左右揺動運動に必要な左右方向の加減速パターンを生成する. この神経振動子は, 基本的には図 3.1 のモデルとほぼ同じだが, 関節角度フィードバック入力代わりに式 (3.9) に示すように胴体の左右方

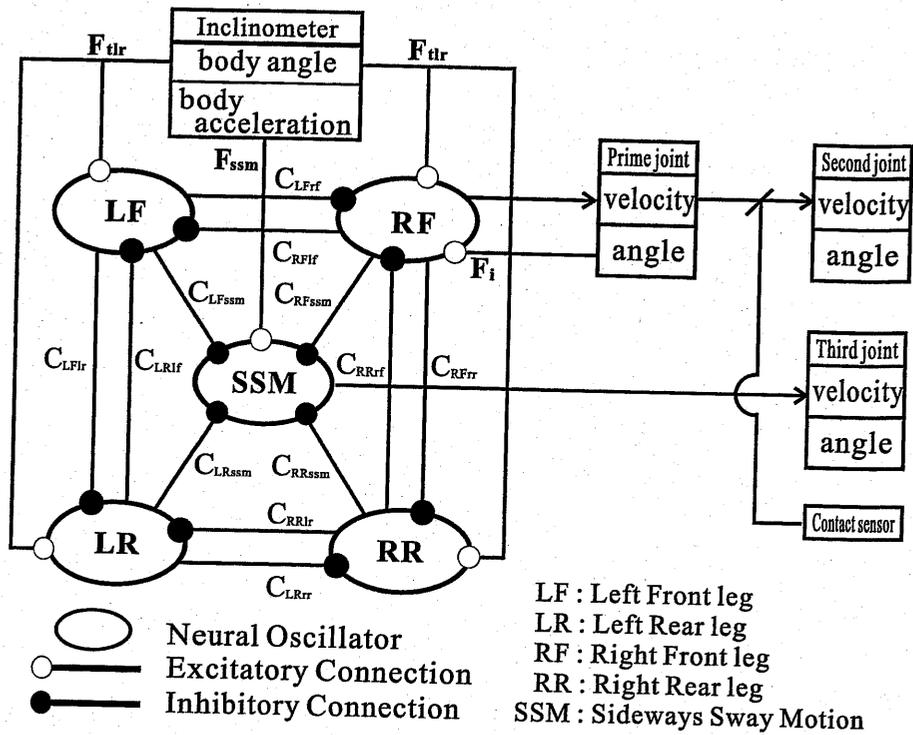


図 3.2 神経振動子結合モデル

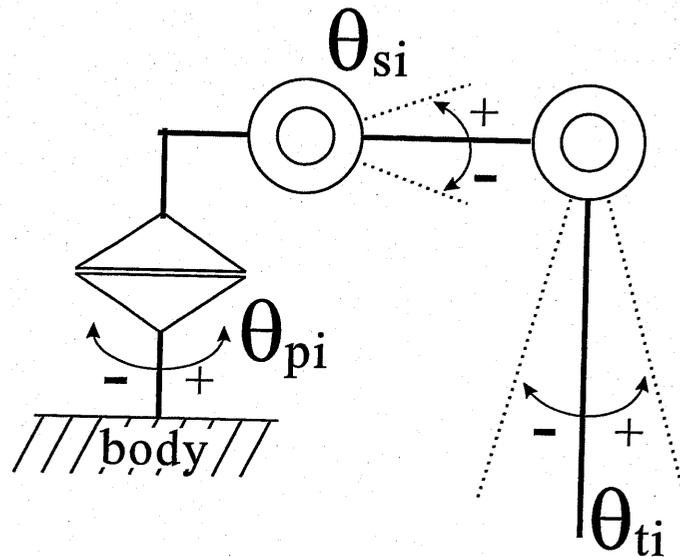


図 3.3 脚のリンクモデル

向の加速度 (a_x) をフィードバック入力とする.

$$\mathbf{F}_{ssm} = \begin{bmatrix} F_{ssm_e} \\ F_{ssm_f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \max(a_x, 0) \\ \max(-a_x, 0) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

左右揺動運動は左右方向の加速度のみを調整して行うために、左右方向の加速度は周期的に変化する. この周期的な値を神経振動子にフィードバックすることにより SSM と左右揺動運動を同期させる. SSM と前述のリズム形成機構との結合係数 (図 3.2) を次式のように定める.

$$C_{LFssm}, C_{RRssm} \gg C_{RFssm}, C_{LRssm} \quad (3.10)$$

これは、左右の揺動を矢状面の運動といかに同期させるかにより変化してくる. 本研究では、支持脚対角線上に ZMP 軌道を保つように揺動させるために上式のように定めた. 抑制結合により結合されているために、歩行速度が上がると左右揺動運動は小さくなり、逆に歩行速度が下がると大きくなる. SSM からの出力を各脚の第三関節の制御指令として用いる事により、実際に左右方向の加減速を行い、左右揺動運動を実現する. その結果、歩行パターンによる矢状面内の運動と左右揺動運動による前頭面内の運動とを協調させることができ三次元的歩行を生成することができる.

3.2.4 姿勢反射の導入

脚型ロボットが傾斜面を歩行するときは、脚型ロボットの特有の地面への適応性を発揮して、胴体を水平に保ったまま移動することが出来る. しかし傾斜面が急になると脚の可動範囲などのために胴体を傾斜させなければ歩行できなくなる. そのような傾斜面で胴体を傾斜させて歩行するときには胴体の重心の垂直投影点が斜面下方にシフトして支持脚多角形から外れて不安定になり、平地で用いていた歩容がそのままでは使えなくなる. この問題を回避するための単純な方法は図 3.4 に示すように胴体を斜面上方にシフトすることである.

そこで、斜面への適応のために神経振動子経由の緊張性迷路反射を導入する. この緊張性迷路反射は、姿勢反射の一種で、頭部の位置やその変化による重力の

方向の変動を前庭器官により感知し、延髄の前庭角を経て前庭脊髄路として脊髄へ下降し、四肢、体幹の筋の緊張を変化させる反射であり、頭部が上向きになると、伸筋のトーンが増し、逆に頭が下向きになると屈筋のトーンが高くなる [54]. この反射を本研究に応用するために、神経振動子へのフィードバック入力 F_{tlr} として新たに次式を加える.

$$F_{tlr} = \begin{bmatrix} F_{tlr_e} \\ F_{tlr_f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \max(\tan^{-1}(\frac{h \tan \phi}{l}), 0) \\ \max(-\tan^{-1}(\frac{h \tan \phi}{l}), 0) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

h は斜面からの重心までの距離, l は第一リンク+第二リンクの長さ, ϕ は矢状面内の胴体の傾きを表す. 本研究では, 歩行ロボットに頭部がないために, 胴体の傾きを使用した. 式 (3.1) に定常入力を加えると単純には加えた大きさだけニューロンの出力が大きくなることは知られている [53]. 式 (3.9) のように傾き角度により伸筋ニューロン, 屈筋ニューロンのどちらかにフィードバック入力を加えると加えられたニューロンの発火頻度が大きくなり, 結果として出力 g_i は入力された値の大きさだけシフトする. 式 (3.9) は, 胴体の傾き角度から第一関節角度の変化量を計算しフィードバック入力として使用している. 結果として出力は胴体の傾き角度を修正するだけ第一関節角度をシフトする値になる. この値は, 胴体の傾き角度に影響されるため傾き角度が一定であれば一定のシフト量になる. この反射により歩行ロボットの胴体が傾くと, 傾いた方向に胴体をシフトし姿勢を保持しようとする. これにより, 神経振動子の結合や内部パラメータの調整など行うことなく, フィードバック入力 (F_{tlr}) を加えることのみで斜面での安定した歩行が生成できる.

3.3. 歩行実験

3.3.1 システム構成

本実験で用いた実機モデルのシステム構成について述べる. 3.3.2 節でハードウェア構成について述べ, 3.3.3 節でソフトウェア構成について述べる.

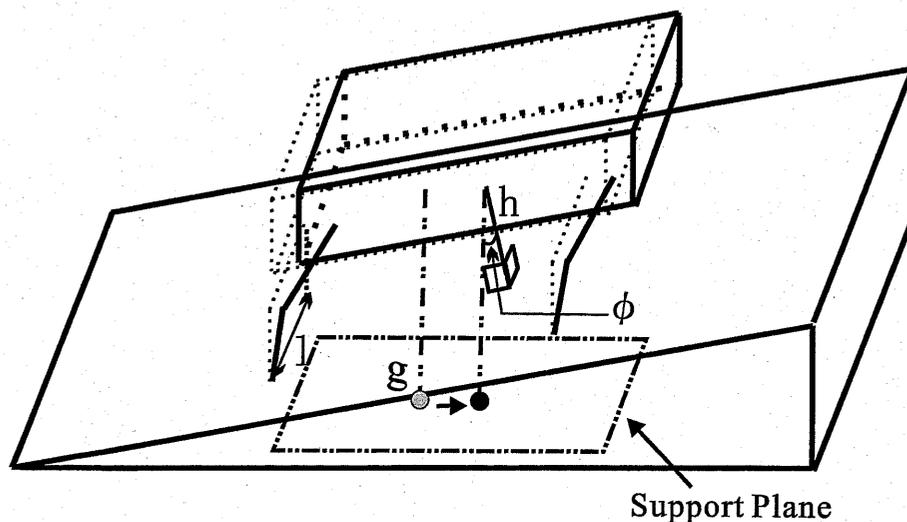


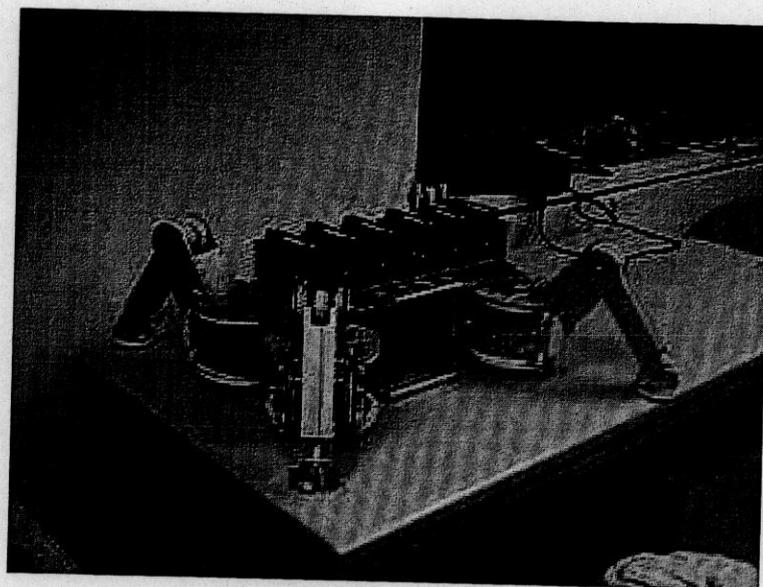
図 3.4 姿勢反射の概略

3.3.2 ハードウェア構成

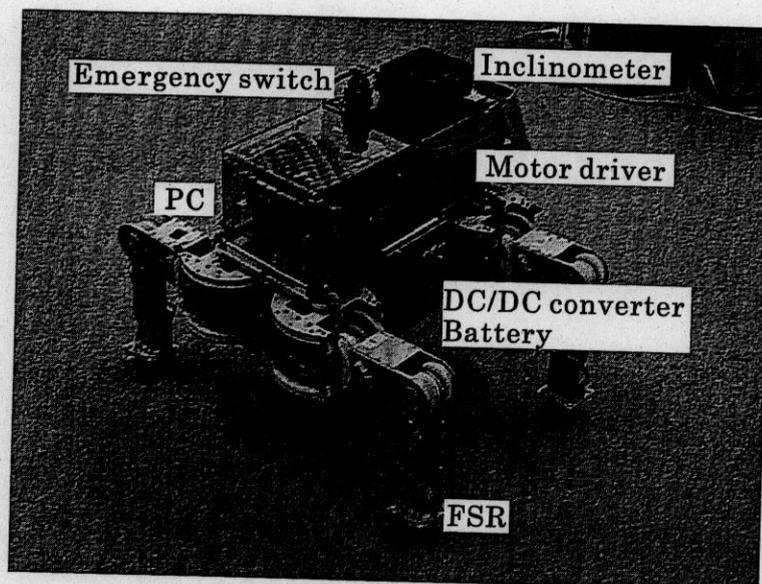
本研究で用いた四脚歩行ロボットは TITAN-VIII[57](図 3.5-(a)) である。これに、バッテリー、モータドライバ、コンピュータ、DC/DCコンバータ、ネットワークインターフェース、姿勢センサ等を搭載して自立型の歩行ロボット(図 3.5-(b))に改良した。

TITAN-VIIIは、3自由度4脚の、自由度と搭載能力を兼ねそろえた脚型ロボットの胴体(表 3.1)として、東京工業大学の広瀬らにより開発された。TITAN-VIIIの上部にモータドライバ、コンピュータ等を収納するための筐体を設置(図 3.6-(c))した。筐体の大きさは、 $438 \times 192 \times 155$ [mm]である。筐体の前方にコンピュータを、後方にモータドライバを配置した。また、腹部にはバッテリー(12V × 2)と、DC/DCコンバータを搭載している。

ハードウェアシステムの構成は図 3.7 のようになっている。大きく分けると、制御用コンピュータ部、TITAN-VIIIによる機構部からなっている。コンピュータ部は CPU:Pentium III-450[MHz]、MEMORY:128MBbytes DRAM、PCMCIA Card Slot、Radio Ethernet Card、I/O Board:RIF-01、OS:Linux 2.2.14、及び、RT-Linux

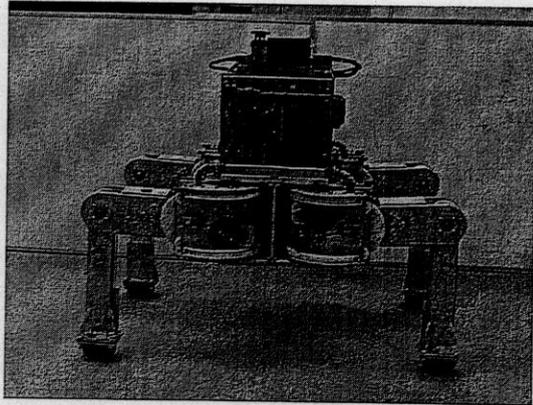


(a) TITAN-VIII

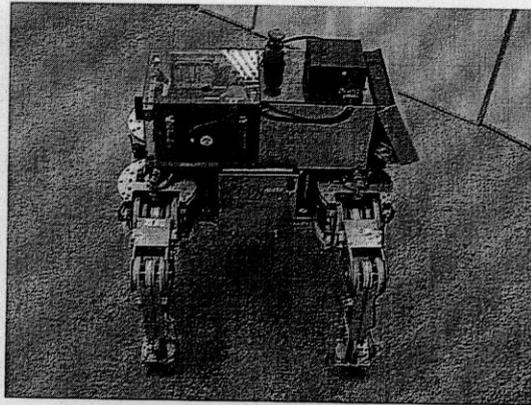


(b) 改良後の TITAN-VIII

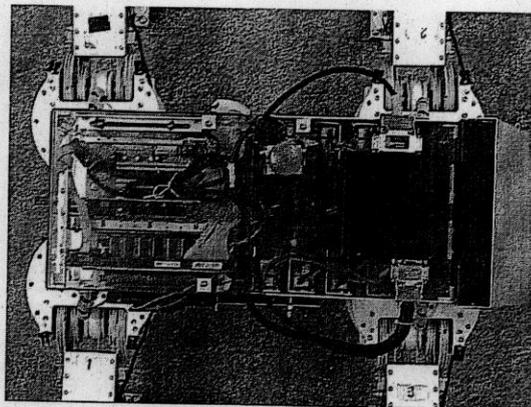
図 3.5 TITAN-VIII



(a) 正面



(b) 側面



(c) 上部

図 3.6 自立型四脚歩行ロボット

表 3.1 TITAN-VIII の基本仕様

寸法	400 × 600 × 250
脚数	4
自由度	12 (3 自由度 × 4 脚)
本体重量	約 20kg
可搬重量	約 7kg
アクチュエータ	DC サーボモータ (50[W] × 12)
駆動回路	TITECH ROBOT DRIVER × 12
位置センサ	ポテンシオメータ
電源	DC6 ~ 48[V] (モータ駆動用)
各脚の最大速度	0.9m/sec (遊脚時)

表 3.2 FSR の基本仕様

Active area diameter	5.0mm
Thickness	0.30mm
Active range	9.8kPa-980kPa

表 3.3 加速度センサ：MA3-04Ac の基本仕様

Weight	4g
Size	W20.5×D12.5×H5 (mm)
Active range	40m/sec ²

2.2を使用している。

TITAN-VIII には、姿勢センサとして、データテック社の GU-3013(図 3.8)を胴体中央に固定した。これは、振動ジャイロおよび加速度センサを各々 3 個使用したもので、姿勢角、加速度、角速度を RS232C で出力するものである。

各足には接触センサとして FSR(Force Sensing Resistors) を各足裏に、脚先にはマイクロストーン株式会社製の加速度センサ MA3-04Ac を搭載している(図 3.9)。FSR の仕様を表 3.2 に、加速度センサの仕様を表 3.3 に示す。また、ロボットの各関節にはポテンシオメータが装備されている。このポテンシオメータ、FSR 及び脚先加速度センサの値はロボットインターフェースボード(富士通 RIF-01)

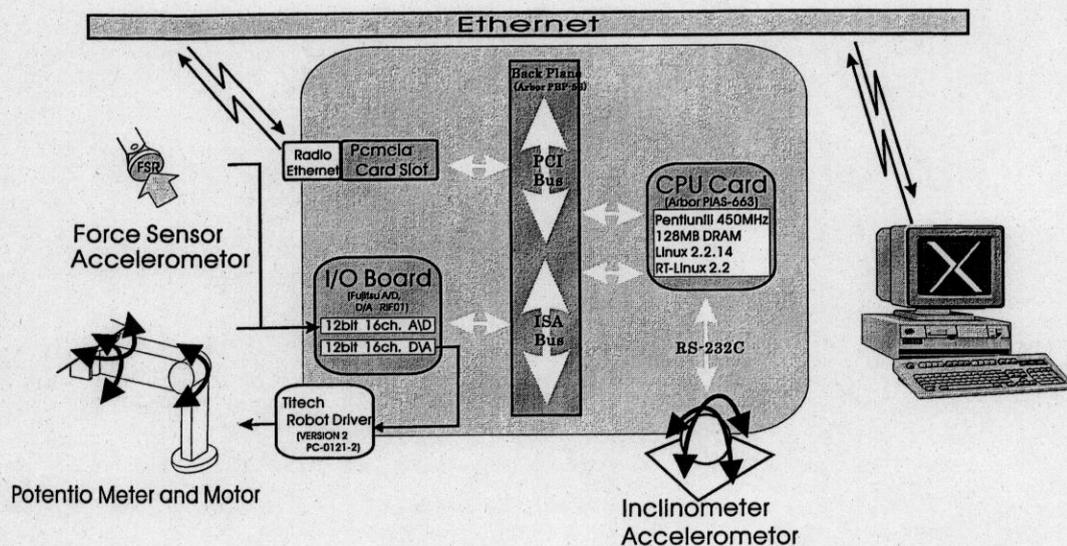


図 3.7 ハードウェア構成

を通してコンピュータに送られる。また、コンピュータはロボットインターフェースボードを通じてロボット本体のモータドライバ（岡崎産業 Titech motor driver Version 2 PC-0121-2）に関節角速度指令値を送る。

3.3.3 ソフトウェア構成

本研究では歩行ロボットをリアルタイムに制御するためのOSとして、RT-linuxを採用している。以下にRT-linuxでは概要について述べた後、具体的なプログラムの関係について説明する。

RT-LinuxではRT-Linuxカーネルの上にLinuxカーネルが存在し、Linuxカーネルは最もプライオリティの低いリアルタイムタスクとして処理される。そのため、リアルタイムタスクが存在しない場合は、通常のLinuxと変わりなく使用することができ、リアルタイムタスクが存在する場合は、その処理に余裕があればLinuxプロセスに実行権が回ってくる。リアルタイムタスクはカーネル空間で実行されるので、プログラムのバグは即システムダウンにつながるため、リアルタイム性が不要でないプロセスと必要なプロセスを明確に見極め、できるだけリアルタイムタスクの記述を少し、リアルタイム性が不要でない処理をLinuxプロ

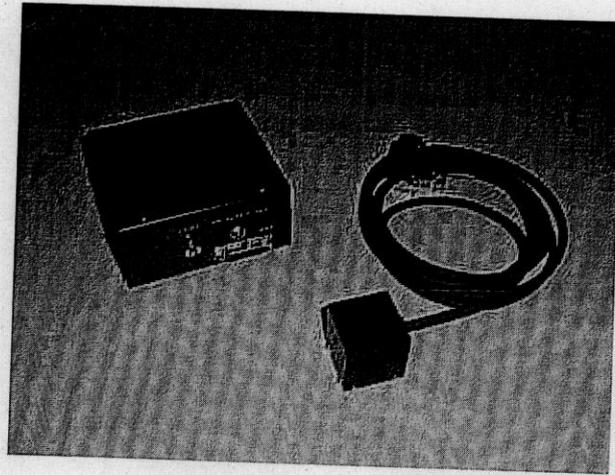


図 3.8 姿勢センサ:GU-3013

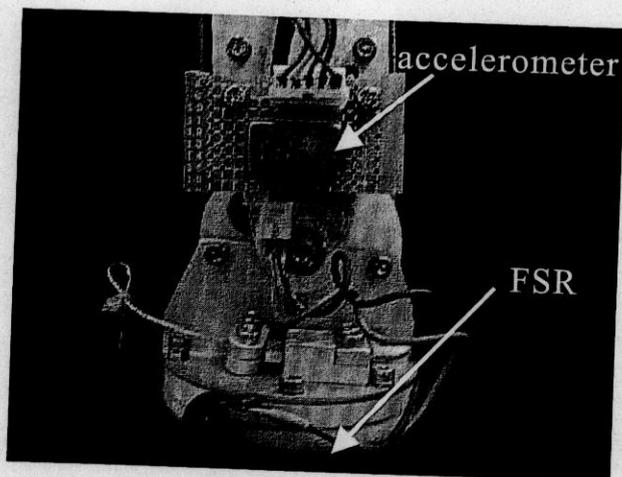


図 3.9 FSR 及び加速度センサ

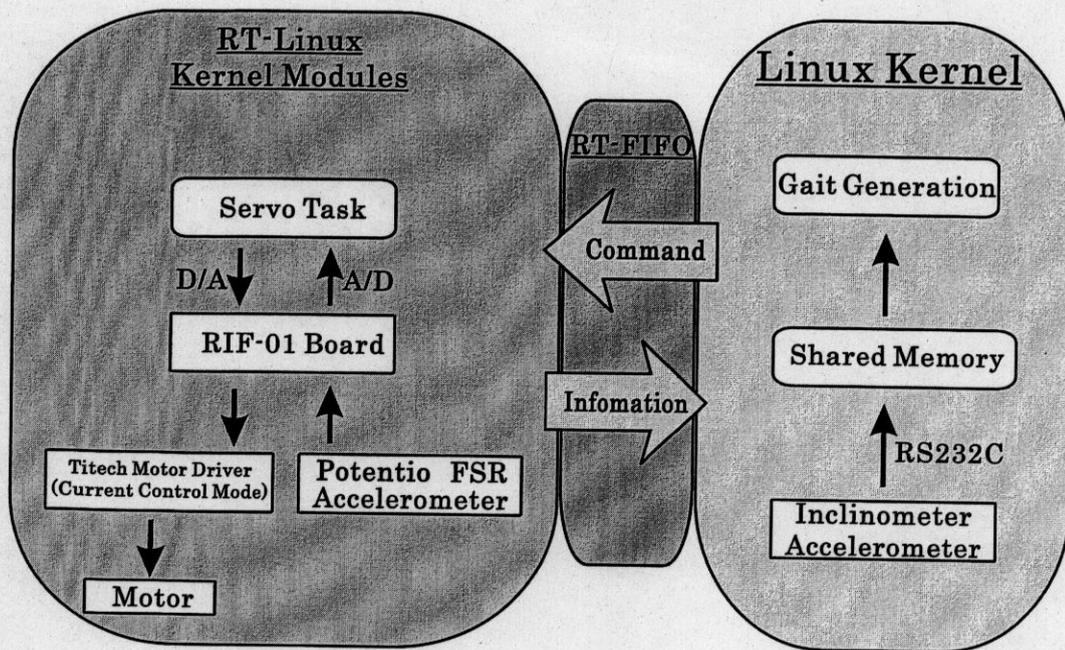


図 3.10 ソフトウェア構成

セスにすることが重要である。

図 3.10 は本研究でのソフトウェアシステムの構造を示したのもである。以下では、具体的な処理について Linux 側プログラム、RT-Linux 側のリアルタイムタスクにわけて説明する。

Linux 側のプログラムとして主な部分は歩行のリズム生成にある。各センサからの入力を基に、非線形連立微分方程式を解き、各関節の目標関節あるいは、目標速度等の各脚の動きを計算して、RT-FIFO を介して約 100[ms] で指令をリアルタイムタスクに送る。

姿勢センサの入力は RS232C を介して Shared Memory に格納されているものを随時読みに行き、ポテンションメータ、設置センサ、脚先加速度センサの入力は、RT-FIFO を介して送られてくる。ここで、RT-FIFO とはリアルタイムタスクと Linux プロセス間の通信手段である。

RT-Linux 側のプログラムはポテンショメータと接触センサの情報をもとに各脚の情報を獲得するタスクとモータのサーボタスクからなる。各脚の情報を獲得するタスクは、Linux 側プログラムで計算に必要な情報を時々刻々と獲得し、

RT-FIFOを介して、Linux側に送っている。サーボタスクでは現在の関節角と目標関節角などのLinux側の指令に対して位置制御、または、速度制御等を行っている。RT-Linux側でのサンプリング周期は10[ms]である。

なお、本実験で用いた神経振動子パラメータは、数学的・物理的条件を基にシミュレーションと経験を基に決定した。

3.3.4 整地動歩行実験

まず、平坦な路面での動歩行実験を行った。その時の様子を図3.11に示す。また、そのときの右前脚、右後脚の第一関節の角度、接地の状態、胴体の左右方向の加速度を図3.12に示す。

まず、図3.12-(a)の各脚の第一関節の角度の結果を見ると、安定して振動しリミットサイクルを形成していることが分かる。その上、右前脚と右後脚とは逆位相になっており、代表的な四脚歩行動物の動的歩行の一つである trot gait の時の歩行パターンを形成していることがわかる。また、図3.12-(b)の接地状態から、支持脚相と遊脚相の遷移がスムーズに行われており、デューティ比がほぼ0.5になっていることが分かる。図3.12-(a)と図3.12-(b)を比較してみると第一関節の動きに連動して支持脚相から遊脚相への移行が行われていることが分かる。3.2.2節で第二関節を第一関節の従属関節として簡略化して制御することにしたが、この結果より有効に機能していることが分かる。また、図3.12-(c)に示す胴体の左右方向の加速度も、脚の動きと同期して振動しており、左右揺動運動も第一関節の動きに連動して実現されていることが分かる。なお、このときの歩行は歩行周期約1.5sec、歩幅約0.16m、歩行速度約0.24m/secの動的歩行であった。

神経振動子SSMを付加して実現した左右揺動運動の有効性を検証するためにSSMを用いた場合と用いない場合のそれぞれの右後脚の接地状況を図3.13に示す。SSMを用いない場合には遊脚相中に接地センサの値がONになることが多々あり、脚を引きずることがあることを示している。このため支持脚相と遊脚相の移行がスムーズに行われず不安定な状態が続く歩行が行われている。それに比べ、SSMを用いた場合には支持脚相と遊脚相の遷移が的確に行われており遊脚相中に脚が接地することはほとんどない。このことから明らかにSSMを用いた場合の

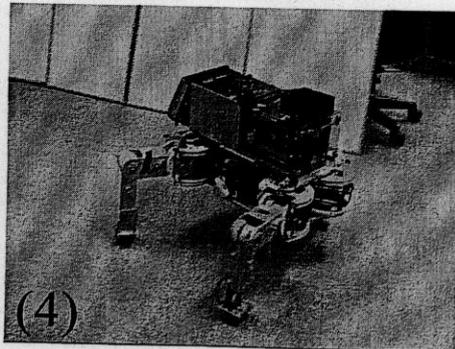
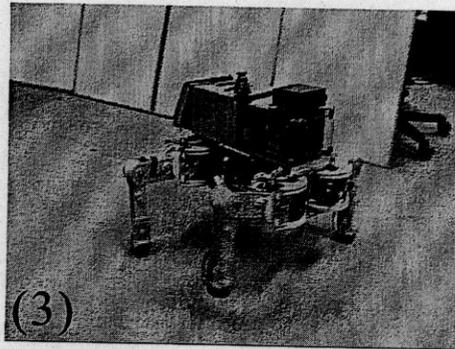
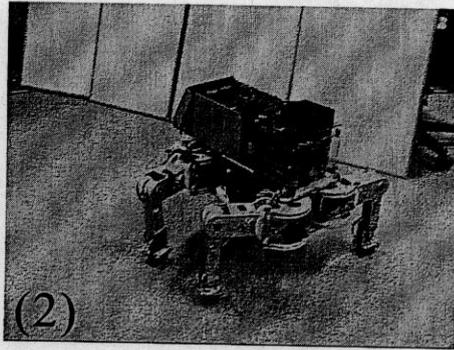
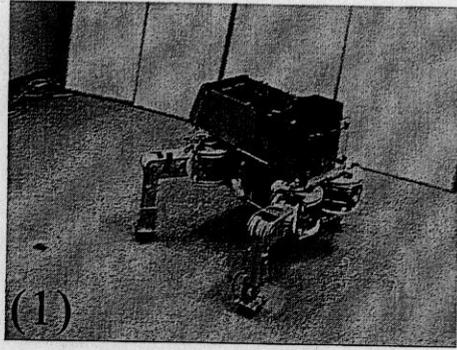
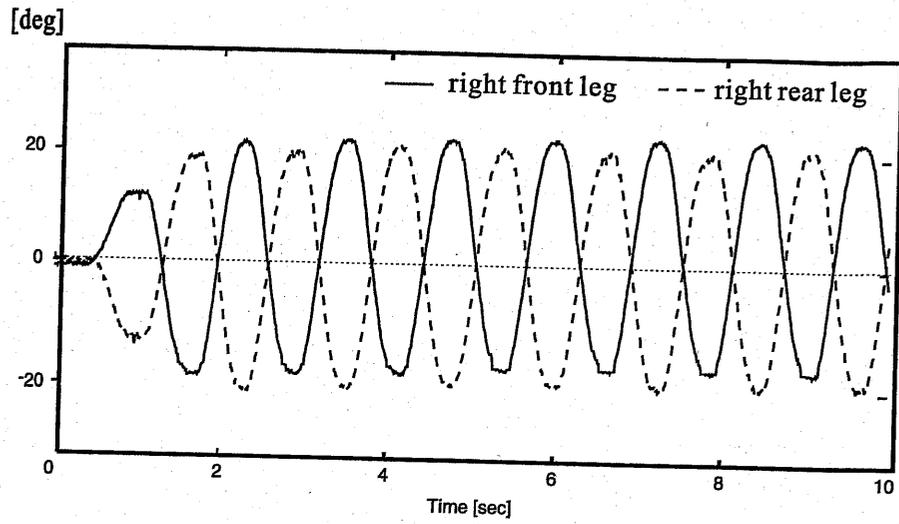
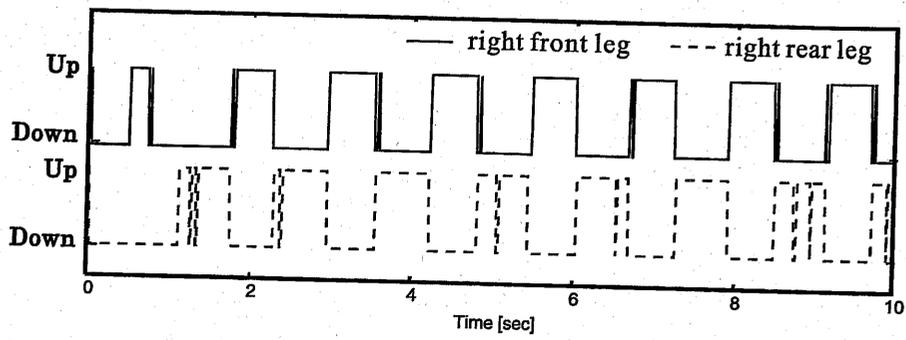


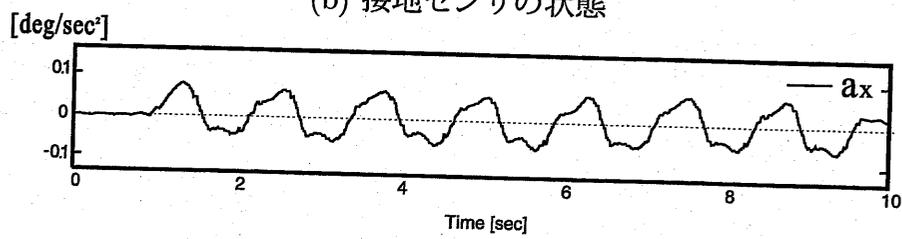
図 3.11 整地動歩行実験の様子



(a) 第一関節角度



(b) 接地センサの状態



(c) 胴体左右方向の加速度

図 3.12 整地動歩行実験結果

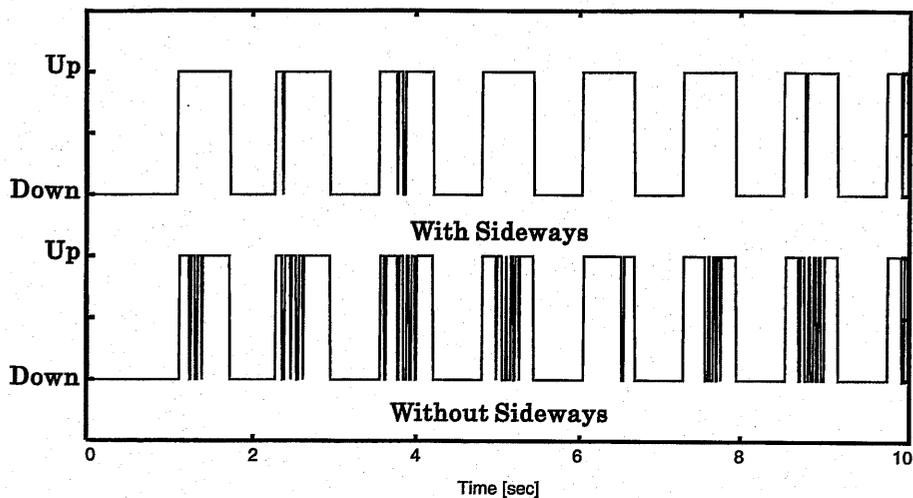


図 3.13 SSM 有無による右後脚の接地センサの状態

ほうがより安定した歩行を実現しており，SSM は歩行の安定性を向上させるのに有効であることが確認できる。

SSM を用いた場合と用いない場合でのロボットの重心軌道を図 3.14 に示す。重心軌道は実際に歩行を行ったときの関節角度及び接地センサより求めた値である。同時に実験で用いた歩容で広瀬ら [56] の手法により左右揺動を行った場合のシミュレーションにより求めた理想的な重心軌道も示す。SSM を用いた場合には重心が左右に動いており，左右揺動運動を実現していることが分かる。また，シミュレーションにより求めた重心軌道ともよく一致していること分かり，本手法により従来手法のように環境条件やロボットの幾何学的条件を含めた複雑な計算を行うことなく，CPG と単純なフィードバック入力により左右揺動運動を実現できたことは，本手法のロバスト性を支持する結果となる。

3.3.5 不整地動歩行実験

次に，斜面での動歩行実験を行った。斜面は多少湾曲しており傾斜角度は一定ではなく，斜度を調整できる斜面を作成して用いた。脚型ロボットはあらかじめ路面の情報は保持しておらず，歩行時のセンサ情報を基に歩行パターンを修正する。なお，実験に用いた神経振動子パラメータは整地歩行実験で用いたものと同

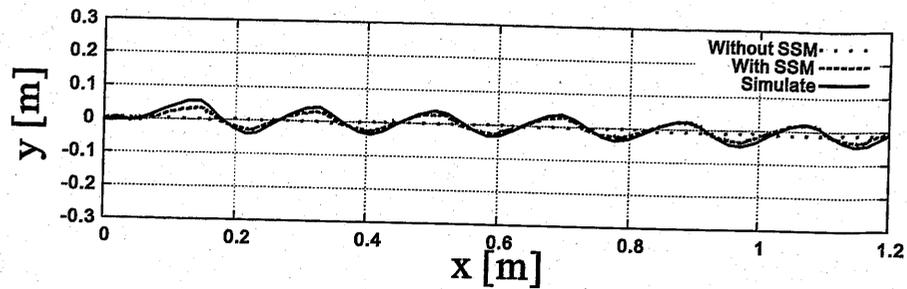


図 3.14 SSM 有無による重心軌道

様の値を使用した。

姿勢反射の有効性を検証するために姿勢反射を用いた場合と用いない場合での比較実験を行った。姿勢反射を用いないで斜面での歩行を行った場合には、約6度以上の斜面では歩行時に不安定な状態が続き、多くの滑りが発生し安定した歩行の実現はできず斜面を登りきることは出来なかった。一方、図3.15に示すように、姿勢反射を用いた場合は最大斜度10度程度の斜面歩行を実現した。

そのときの胴体の傾き角度、右前脚、右後脚の第一関節の角度、接地の状態、胴体の左右方向の加速度を図3.16に示す。

まず、図3.16-(a)の胴体の傾き角度と各脚の第一関節角度の結果を見ると、斜面を歩行するにつれて第一関節の角度がマイナス方向へシフトしていることが分かる。これは、姿勢反射の影響により斜面の傾きに対して姿勢を保持しようとし胴体を前方へ遷移させているためである。斜度10度の場合に式(3.11)により実機モデルの値(リンク長: $l = 200\text{mm}$, 斜面からの重心までの距離: $h = 246\text{mm}$)を用いてフィードバック入力の値を計算すると約12度となる。グラフから第一関節角度のシフト量は最大で約13度で計算結果とほぼ同値となっており、姿勢反射によるフィードバック入力が有効に作用していることが分かる。また、図3.16-(b)の接地状態から、整地動歩行実験同様に支持脚相と遊脚相の遷移がスムーズに行われており、図3.16-(a)と図3.16-(b)を比較してみると第一関節の動きに連動して支持脚相から遊脚相への移行が行われていることが分かる。姿勢反射を導入することにより平坦な路面同様に安定した歩行を実現している。

次に図3.16-(c)に示す胴体の左右方向の加速度も、脚の動きと同期して振動しており、斜面でも左右揺動運動が実現されていることが分かる。ただ、斜面の頂

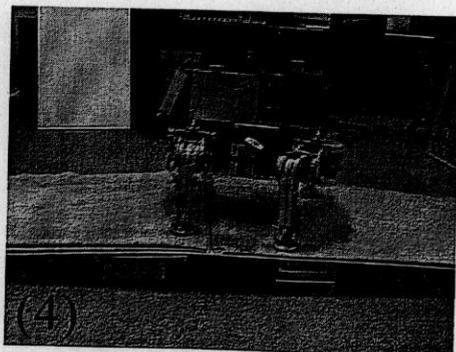
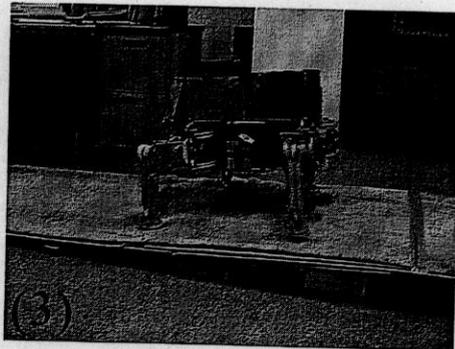
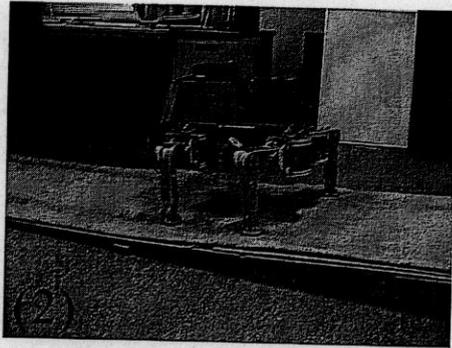
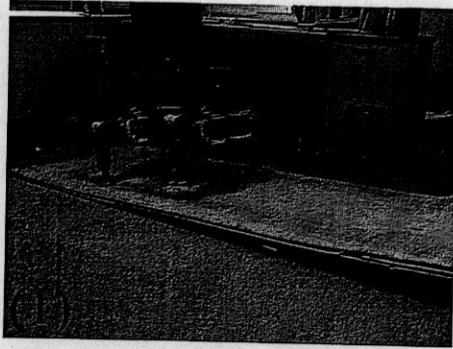
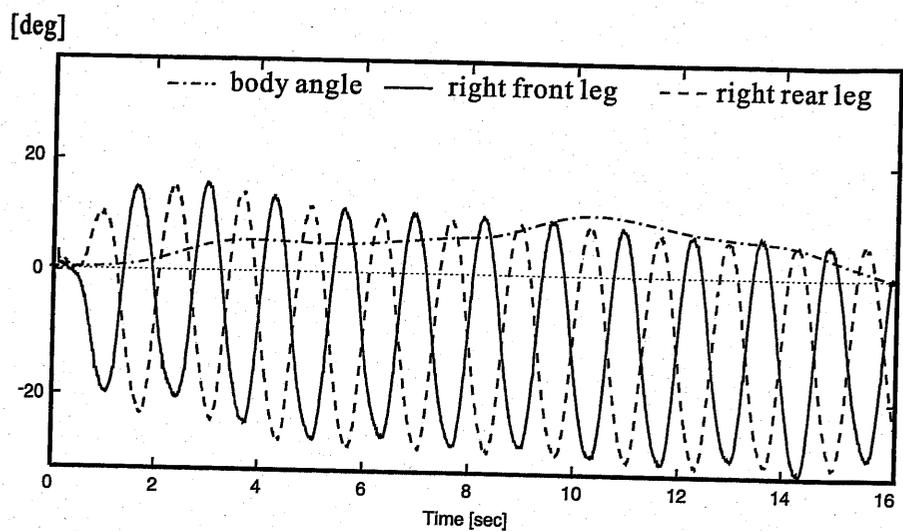
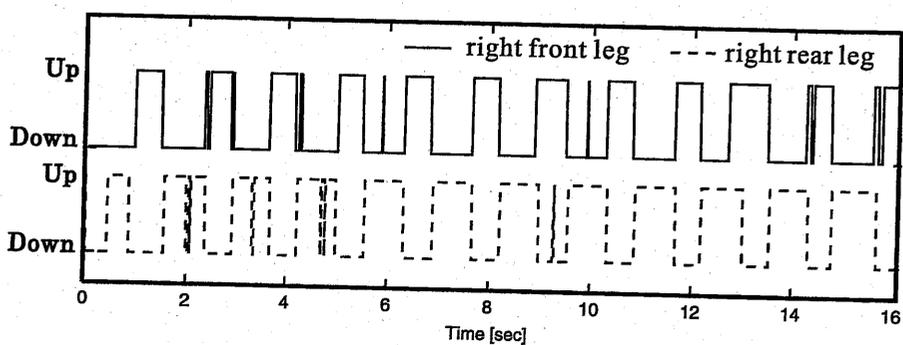


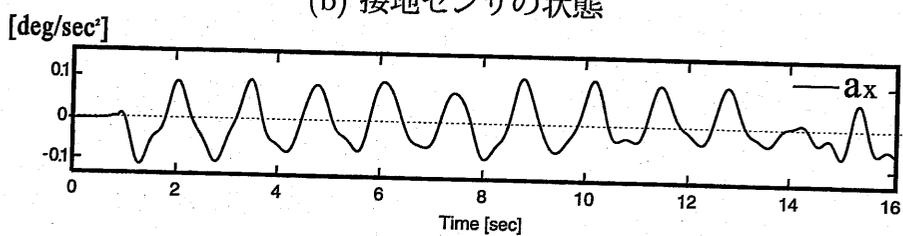
図 3.15 斜面動歩行実験の様子



(a) 胴体の傾き角度と第一関節の角度



(b) 接地センサの状態



(c) 胴体左右方向の加速度

図 3.16 斜面動歩行実験の結果

上付近で左右方向の加速度のパターンにずれが生じている。これは支持脚に大きな滑りが発生したため、神経振動子の出力に対して計画外の動きが生じ、左右揺動運動に必要な加速度を生成することができなかったためである。しかし、次の周期にはこの不規則な動作に対しての引き込み現象が起こり、滑らかな加速度を生成に成功している。

従来軌道計画を規範とした制御では、環境情報が既知の場合には斜面での動歩行もある程度可能であるが、本実験で用いた傾斜角度が一定ではなく多少湾曲しているような斜面での動歩行を実現するのは困難である。また、本手法は従来制御のように軌道計画を行っておらず、反射運動を通じて環境との相互作用によって斜面での動歩行を実現している。このような環境での動歩行が実現できたことは本手法の優れた点であり、多少の外乱であればロバストに対処できることを示唆している。

3.4. 本章の結論

ロボットの歩行運動の実現において重要なのは、歩行運動という周期的運動の維持である。つまり、歩行運動が矢状面内の運動と前頭面内の運動との協調運動であることから、三次元的に安定した歩行運動の実現には、矢状面内の運動と協調を保つように前頭面内の運動を制御し、且つ周期的運動を保つ必要がある。従来の多脚ロボットの研究では矢状面内の運動の生成を主としており前頭面内の運動の外乱等と考えられてきた。

本章では、複数の神経振動子を相互に結合したリズム形成機構を中心とした神経振動子結合モデルを用い、各センサからのフィードバック入力を利用した反射運動による矢状面内の周期的な歩行パターンの生成と前頭面内の左右揺動運動との協調を行う三次元的な歩行生成手法を提案した。これにより、従来CPGベース型制御により行われていたように運動を平面に制限する必要がなくなり、自由度の拘束をなくすことが可能となった。また、第二関節を第一関節の従属関節とすることにより脚先軌道計画の簡略化を行い、CPGベース型制御の簡易性と柔軟性を示すことが出来た。実機モデルに本提案手法を適応し動歩行を実現するこ

とにより本手法の有効性を確認した。左右揺動運動の有無による比較実験により、SSMを追加した神経振動子結合モデルを用いることで歩行時の安定性の向上させることができ、SSMが有効に作用することを確認した。

しかし、この左右揺動補償は慣性の大きな胴体を不必要に加減速することになり、動歩行が静歩行に対して持っている高効率性を失う恐れがある。trot gaitでは重心が接地脚対角線上の比較的近くにあるので、ZMPを対角線上に置く軌道も可能であるが、pace gaitなどでは、大きな脚底と脚首アクチュエータが必要となり困難である。今回の実験では、trot gaitを使用した点と、歩行周期がそれほど早くはなかったため、有効に働いたと考えられる。

整地動歩行実験で用いた各種パラメータを変化することなく斜面での動歩行を実現することにより、姿勢反射の有効性を確認した。なお、今回の実験は前後方向の傾斜面のみで行ったが、左右方向の傾斜面への応用は容易である。ただし、凹凸がある路面へのそのままでの応用は困難である。

本手法は、従来の歩行ロボットの研究で常識とされた軌道計画ベースでの適応は存在せず、リズム発生機構と環境との相互作用の結果として、動的な適応が自律的に生成される。これらの実験を通して、比較的簡単な計算と少数のパラメータのみで、柔軟性とロバスト性を兼ね備えた整地・不整地動歩行を実現できたことは、神経振動子結合の潜在的な適応能力を示唆している。

第4章 エネルギー効率に基づく CPGパラメータの決定手法 の提案

4.1. 本章の趣旨

3章でCPGベースの三次元歩容生成手法を提案したが、CPGを用いて歩行運動を形成・制御する場合にCPGの各パラメータを如何に決定するかが重要な問題となる。生物において、CPGにより作り出されるパターンの多くは外部環境・運動目的にふさわしく変化する。馬などの四足動物は、walk, trot, gallopといった異なる歩行パターンを、移動速度に応じて選択していることが知られている。馬が様々な速度で歩行を行うときに酸素消費量を計測した実験結果によると、速度に応じた歩行パターンの選択により単位距離移動する時の酸素消費量がほぼ一定に抑えられていることが報告されている[58]。すなわち、歩行パターンの選択は単位距離における消費エネルギーに基づいていると考えられる。CPGは外部入力のない状態では定常的な振動パターンを形成するが、関節角度などの体勢感覚の入力、あるいは前庭器官などの中枢神経からの入力に敏感であり、その影響のもとで多様な振動パターンを形成する。すなわち、CPGのパラメータを決定する場合には外部との相互作用も含めた環境で行う必要がある。

本章では、まず、ロボットの制御アルゴリズムの開発環境として高速な三次元動力学シミュレーション環境の必要性について述べる。次に、ゲーム開発用に開発された動力学演算ツールキットを用いることにより構築した高速三次元動力学シミュレーション環境について説明する。最後に、開発したシミュレーション環境を用いてエネルギー効率に基づくCPGパラメータの決定手法を提案する。

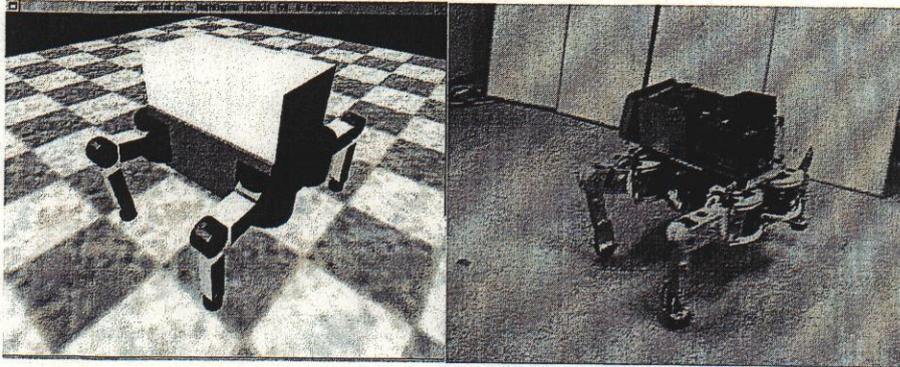
4.2. 高速三次元動力学シミュレーション環境

4.2.1 高速シミュレーション環境の必要性

ロボットのソフトウェア開発にはシミュレーション技術は不可欠であるが、二次元化等によるモデルの簡略化を行った場合には、三次元の現実世界でのロボットの振る舞いとのギャップが大きすぎる。特に歩行といった三次元の複雑な課題を実現しようとする二次元ではあまり問題にならないことでも三次元になると大きな問題となることは多々ある。ロボットの三次元運動のシミュレーションを行う場合、DADS (LMS International 社) や ADAMS (エムエスシーソフトウェア株式会社) といった商用の機構解析ソフトウェアが用いられることが多い。これらのソフトウェアでは動力学演算結果の正確さを非常に重視しているために、複雑な環境との接触等を含むシミュレーションを行うと膨大な計算量を必要とし、結果として実時間にたいして数倍から数百倍といった計算時間がかかってしまう場合がある。

一方でゲーム機の性能の向上に伴って、その上で実現されるゲームコンテンツに対する要求も厳しくなり、三次元世界におけるキャラクタのリアルな振る舞いを含んだソフトウェアの開発が望まれるようになった。このような背景をもとにこれらのゲーム機上でリアルタイムに動力学演算を行うため開発環境が幾つかの会社からリリースされている。これらのパッケージでは、計算の正確さよりは実時間性を重視しており、物理的には正確ではない側面も含まれていることが予想される。しかし、制御アルゴリズムの開発の初期段階や、高次の行動制御ソフトウェアの開発、機械学習等、正確性より高速性が重視される局面も多く存在すると考えられる。

CPG を用いた歩容生成手法は、外部環境等から与えられて振動的入力信号に対して自励振動を同期させていく性質がある。ロボットの非線形性と CPG の非線形性とのカップリングによって基本的な CPG のパラメータはある程度幅を持った値として決まってくる。この幅を持った値の中から最適な値を見つけ出すには繰り返し行うことがもっとも有効であると考えられる。機械学習など多くの試行を繰り返し行う場合計算コストの削減は開発コストに直接影響してくる。また、



(a) 歩行シミュレーションの様子

(b) 四脚歩行ロボット

図 4.1 シミュレーション環境と実機モデル

歩行が成功しているかどうかの判断基準として依然として人間の目によるところが多く、ゲームコンテンツ同様リアルタイムで表示可能なことは非常に重要である。このようなことから、多少動力学演算の不正確さが存在するとしても、高速性を重視したシミュレーション環境は有効である。

4.2.2 シミュレーションツールキット：MathEngine Toolkits

本研究では金弘ら [59] がヒューマノイドのシミュレーション開発に利用した MathEngine 社の動力学演算パッケージである、MathEngine Toolkits をシミュレーション環境の構築に利用した。ここで、このパッケージについて簡単に説明しておく。このパッケージは MathEngine Collision Toolkit (Mcd), MathEngine Dynamics Toolkit (Mdt), MathEngine Simulation Toolkit (Mst) の 3 つのツールキットを中核として構成されている。Mcd は物体間の干渉検査を行うツールキットである。距離の離れたオブジェクト間の検査を省略する干渉カリングやメモリ上のレイアウト等の工夫によって高速化が計られている。Mdt は剛体の動力学シミュレーションを行うツールキットである。他の物体と結合がない物体と、干渉や関節による拘束を受ける結合された剛体のツリーとで積分計算の方法を切り替えて行っている。関節は、発生できる力に制限のあるバネとしてシミュレートされている。これによってバネのシミュレーション時に発生しやすい不安定性を解

消している。この手法により接触をバネ-ダンパ系としてモデル化を行う際に、接触の周辺で積分の時間刻みを十分に小さな値に変更する必要がなくなり、通常のシミュレーションでは最大で数 ms の時間刻みを数 ms から数十 ms 程度の時間刻みでも安定して動作可能である。Mst は Mdt と Mcd の仲介を行うツールキットである。Mdt から Mcd への各形状データの位置・姿勢の転送、Mcd から Mdt への干渉情報の転送を行う。

4.2.3 開発したシミュレーション環境の構造と性能

4.2.2 で説明したツールキットを用いてロボット用のシミュレーション環境を開発した。ロボット用の環境にするために、新たにアクチュエータ及びセンサのシミュレーション機能を追加した。開発したシミュレーション環境の構造を図 4.2 に示す。制御計算と動力学演算は並列に実行させる。これによって開発したコントローラを実機における動作実験とシミュレーションとをシームレスに切り替えることが可能となる。オープンループで動作を再生するだけでなく、フィードバック系を含む制御系の開発にはセンサのシミュレーションが必要である。センサとして、角度センサ、加速度センサ、角速度センサ、力センサが利用可能である。モータ制御としては、位置制御、速度制御、力制御が可能である。また、ロボットのモデルファイルのみの切り替えにより、図 4.3 に示すように四脚歩行ロボットや二脚歩行ロボットのシミュレーションが可能である。

開発したシミュレーションを用いることで、16 自由度を有する脚式ロボットの歩行シミュレーションが平らな面との接触を含め 1 TimeStep あたり動力学演算に 6.23[ms]、干渉検査に 0.32[ms] (CPU : Pentium IV 2GHz OS: Linux) 程度で計算可能である。計算機の性能にもよるがレンダリングを含めても TimeStep を 10ms とすると実時間でのシミュレーションが可能である。開発したシミュレーション環境のもう一つの特徴として、モデルを剛体リンク構造で定義する点である。これによりロボットの複雑な運動方程式を計算する必要がなく、開発コスト削減につながる。

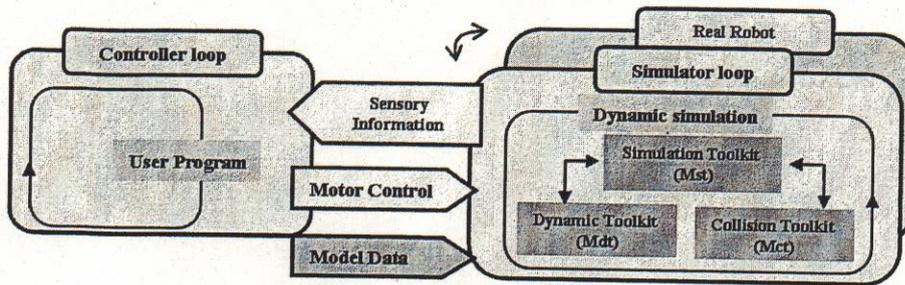
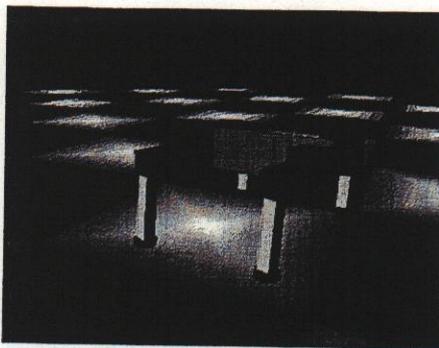
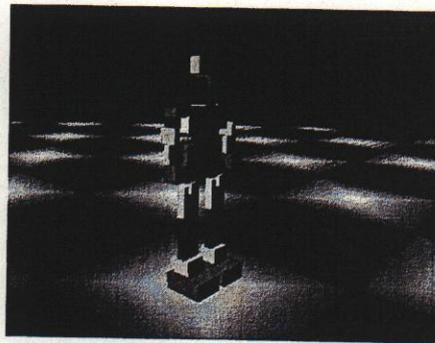


図 4.2 シミュレーション環境の構造



(a) 四脚歩行ロボット



(b) 二足歩行ロボット

図 4.3 ロボットモデル

4.3. CPG パラメータ決定手法

CPG パラメータの決定手法としていくつかの研究が行われてきた。Williamson[60] は記述関数を用いて神経振動子の振る舞いと安定性の解析手法を提案した。Miyakoshi ら [61] は神経振動子の振幅と周波数の自律調整手法を提案した。また、Hase ら [62] は GA を用いて CPG パラメータと関節情報の最適な組み合わせを求める手法を提案した。しかし、CPG パラメータを決定する上で、神経系と筋骨格系の直接的な関係を理解することは重要なことである。本手法の基本的なアイデアは、CPG パラメータと歩行パラメータの直接的な関係を明らかにしパラメータの単純化を行い、歩行速度、歩行パターン、エネルギー効率の観点から CPG パラメータを決定するというものである。

本アプローチは以下の二つのポイントから構成される。まず、パラメータを簡

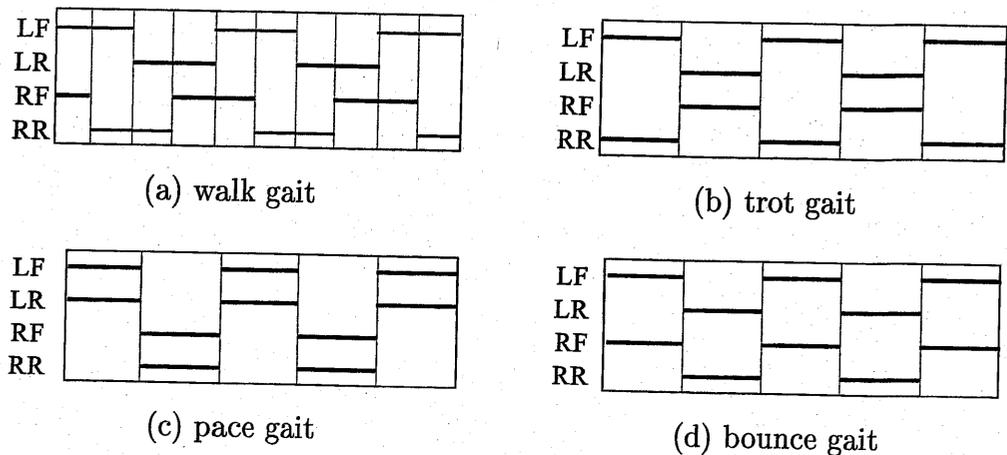


図 4.4 歩行パターン

単化するために、CPG パラメータと歩行パラメータの関係に基づき CPG パラメータの削減を行う。そして、前節で述べたシミュレーション環境を用い、歩行速度とエネルギー効率の関係を計算することにより、速度に対するエネルギー効率が最もよい CPG パラメータを決定する。

4.3.1 パラメータ特性

各脚の神経振動子間の結合係数は式 (3.5) に従い決定する。この組み合わせによって様々な歩容パターンが生成可能であることは 3.2.2 節で触れたが、ここでもう一度簡単に説明する。結合している神経振動子の結合係数を抑制性結合同士で結合すると位相差は 180 度となり、逆に興奮性結合同士で結合すると位相差は 0 度となる。また、抑制性結合と興奮性結合を組み合わせると位相差 90 度となる。四足動物の代表的な 4 つの歩容パターン (walk gait, trot gait, pace gait, bounce gait, 図 4.4 参照, 同図において, 太線は各脚の支持脚層期間を表す。また, デューティ比はすべて 0.5 である。) を生成するには以下のように結合係数 C_{ij} を組み合わせればよい。

- walk gait: 各脚の位相差 90 度

$$C_{RFlf}=C_{LFrf}=C_{RFrr}=C_{LFlr}=C_{RRlr}=C_{LRrr}=-1,$$

$$C_{RRrf}=C_{LRlf}=+1$$

- trot gait: 前脚と後脚, 右脚と左脚の位相差 180 度.

$$C_{RFlf}=C_{LFrf}=C_{RFrr}=C_{RRrf}=C_{LFlr}=C_{LRlf}=C_{RRlr}=C_{LRrr}=-1$$

- pace gait: 前脚と後脚の位相差 0 度, 右脚と左脚の位相差 180 度.

$$C_{RFlf}=C_{LFrf}=C_{RRlr}=C_{LRrr}=-1,$$

$$C_{RFrr}=C_{RRrf}=C_{LFlr}=C_{LRlf}=+1$$

- bounce gait: 前脚と後脚の位相差 180 度, 右脚と左脚の位相差 0 度.

$$C_{RFlf}=C_{LFrf}=C_{RRlr}=C_{LRrr}=+1,$$

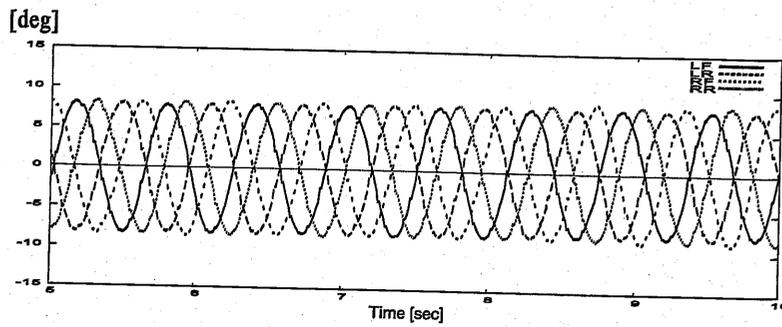
$$C_{RFrr}=C_{RRrf}=C_{LFlr}=C_{LRlf}=-1$$

結合係数 C_{ij} を上記のように設定した場合の 4 つの歩容パターン時の第一関節の角度をそれぞれ図 4.5 に示す. 同位相の場合グラフが重なり識別しにくいそれぞれ歩容パターンを実現していることが分かる.

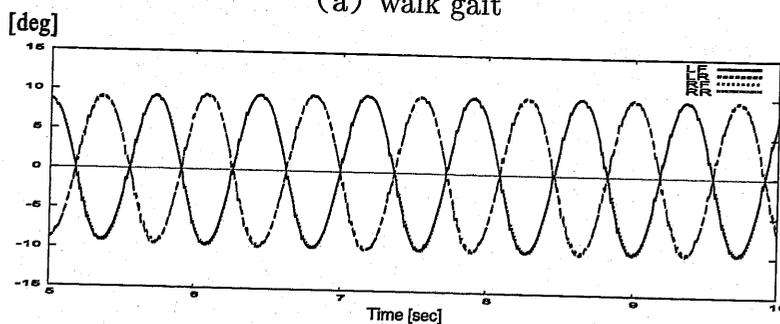
歩行機械の軌道は胴体に平行な垂直平面内のみで動くとする, 歩行機械の速度は

$$V = \frac{S}{\beta T} \quad (4.1)$$

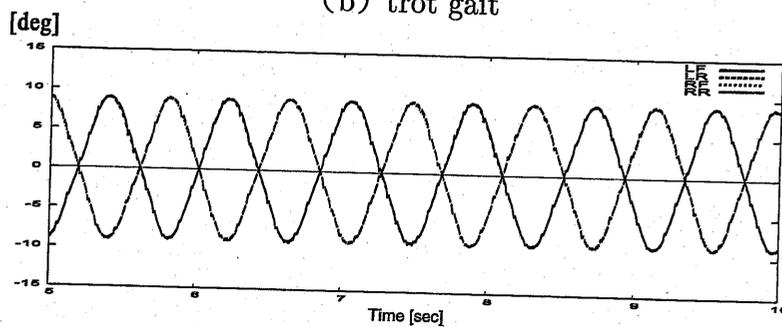
という関係が成立する. S は胴体に対する脚先の歩幅, V は歩行速度, T は歩行周期, β はデューティ比である. 本章では $\beta = 0.5$ とする. ある速度 V で移動するには, パラメータ (S, T) を決定する必要がある. このパラメータ (S, T) に反映する CPG パラメータは (τ, A, α) である. つまり, この CPG パラメータ (τ, A, α) を決定する必要がある. エネルギー効率を最も良くするこれらのパラメータを決めることが本章の主な目的の一つである. 疲労定数 A と時定数 τ は個別に変更すると, 周期と振幅に影響を与えてしまう. そこで, $\tau = mA$ と簡略化することで CPG のパラメータを S に関する項 α と T に関する項 τ に分離することが可能となる. これは, 直感的には分かりにくいかもしれないが, 以下に簡単に説明する. τ を大きくすると周波数が小さくなる. これは式 (3.1) より明らかである. 周波数が小さくなると, 一定方向の角速度指令を出力している時間が長くなり, 関節



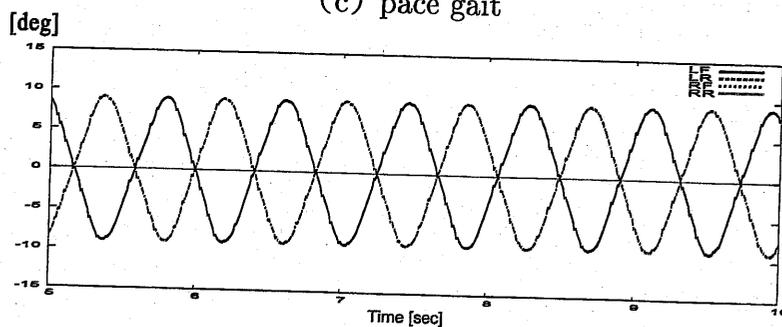
(a) walk gait



(b) trot gait



(c) pace gait



(d) bounce gait

図 4.5 歩行パターンと関節角度

は一定方向に回転し続ける。すなわち、 τ を大きくすると、周波数が減少するのに伴って歩幅が大きくなる。

A は疲労定数であり、この値が大きくなるとニューロンの疲労が早くなる。ニューロンの疲労が早くなるということは、このニューロンと抑制結合で結ばれているニューロンの発火が早くなる。これが相互に抑制結合で結ばれているなら、疲労定数を大きくすると周波数が増加してしまう。周波数が増加すると関節を一方方向に回転させる時間が短くなる。すなわち、 A を大きくすると周波数が増加するのに伴って歩幅が小さくなる。このことから、 τ と A を別々に変更すると、周波数だけでなく歩幅まで変わってしまう。

その上、ニューロンには関節角度フィードバックが常に入力されている。しかも、これは抑制結合により結合されている。つまり、関節が回転すればするほど、歩幅が大きくなればなるほど、ニューロンの発火を抑えようと働く。つまりこれは、 τ を小さくしたときに大きく影響する。すなわち、周波数に及ぼす影響は式(3.1)より明らかに τ の方が大きく、歩幅に及ぼす影響は τ と A は同程度となる。そこで $\tau = mA$ とし、適切な m を選んでやると歩幅を変更することなく周波数のみ変更することが可能になる。

4.3.2 エネルギー効率の計算方法

一般にアクチュエータが一定のエネルギー供給を受ける時には、速度や回転数が大きくなるほど力もしくはトルクは小さくなり、力や速度に付随した熱を発生する。DCモータの場合、モータに流れる電流 i 、電圧 u 、内部抵抗 R 、モータの回転角速度 ω 及びトルク $\Gamma = ki$ (k はモータの特性によって決まる定数)を用いると、 $u = Ri + k\omega$ ($k\omega$ は誘導起電力)が成り立つので、消費されるエネルギー e は次式で与えられる。

$$e = \int \{u(t)i(t)\} dt = \int \{\Gamma(t)\omega(t) + \gamma\Gamma^2(t)\} dt \quad (4.2)$$

ここで、 $\gamma = R/k^2$ は定数である。第一項は外に対して行う機械の仕事、第二項は熱散逸によるエネルギー消費を表す。第一項が負の値をとるときには、モータが外部からの仕事によりエネルギーを供給され、それを蓄えたことを意味する。筋

肉を含む多くのアクチュエータはこのエネルギーを蓄えることが出来ない。そこで、本研究では、第一項が負のときには機械的仕事が零になるようにし、各モータの消費エネルギー e_k を次式のように定義して用いる。

$$e_k = \int \{ \delta(\Gamma_k(t)\omega_k(t)) + \gamma\Gamma_k^2(t) \} dt$$

$$\delta(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0) \\ x & (x > 0) \end{cases} \quad (4.3)$$

歩行パターンの最適性の基準とするエネルギー効率の定義式として、次式のような移動仕事率 ϵ を用いる。

$$\epsilon = \frac{E}{VT} = \frac{\beta}{S} E, \quad E = \sum_{k=1}^n e_k \quad (4.4)$$

E は歩行機械が VT 進む間に各モータで消費したエネルギーの合計である。この式は、歩行機械が単位距離移動したときに要したエネルギー消費を表している。 ϵ が小さいとエネルギー効率が良いことを示す。

4.4. シミュレーションによるエネルギー効率の算出

4.4.1 シミュレーション条件

α と τ をそれぞれ変化させ、 α 、 τ と V の関係と α 、 τ と ϵ の関係を計算する。この結果より、ある歩行速度 V に対するエネルギー効率が最も良いパラメータ (α, τ) を検出することが可能である。三次元動力学シミュレーション環境として 4.2.3 節で述べた環境を利用する。ロボットの質量やリンク長などのパラメータは実機モデル TITAN-VIII (図 4.1-(b)) の値を用いる。歩容生成手法として、図 4.6 に示す簡略化した結合モデルを使用する。これは、3.2.2 節で説明した結合モデルから神経振動子 SSM を削除したものである。第一、第二関節は 3.2.2 節と同様に制御するが、第三関節は簡略化のために $\theta_{ti} = 0$ とし PD 制御を行う。

最適なパラメータ探索手法は以下のプロセスに従う。最初に、4つの歩容パターンで α と τ をそれぞれ変化させて数多くの歩行シミュレーションを繰り返す。 α は 0.025 刻みで $[0.025 \leq \alpha \leq 0.5]$ の範囲で変化させる。 τ は 0.5 刻みで

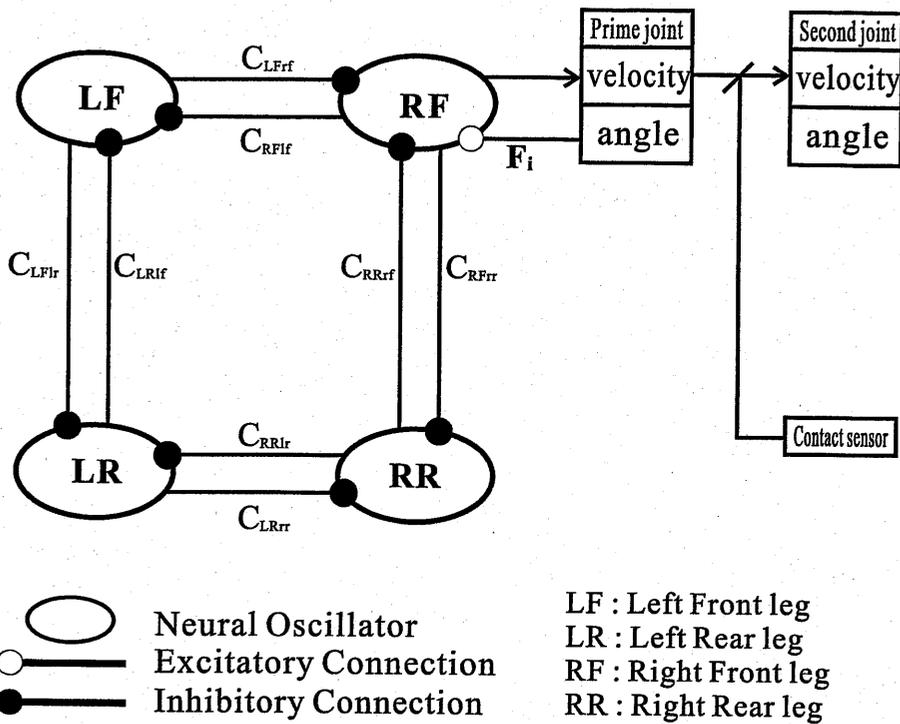


図 4.6 簡略化した神経振動子結合モデル

[$0.5 \leq \tau \leq 9.0$] の範囲で変化させる。なお、この範囲は安定な歩行が行える範囲を多少冗長に包括するように設定した。次に、繰り返し試行したシミュレーションの結果より $\alpha \cdot \tau$ と V の関係と $\alpha \cdot \tau$ と ϵ の関係を計算する。最後に、この結果より歩行速度 V とエネルギー効率 ϵ の関係を計算する。各試行は静止状態から始め 20 秒間の歩行を行う。歩行速度とエネルギー効率は定常状態と思われる 10-20 秒間で計算する。総試行回数は 1440 回で、総計算時間は約 28800 秒である。ハードウェアの耐久性と信頼性を考慮するとこの種の最適化を実機モデルのみを用いて実現することは困難である。

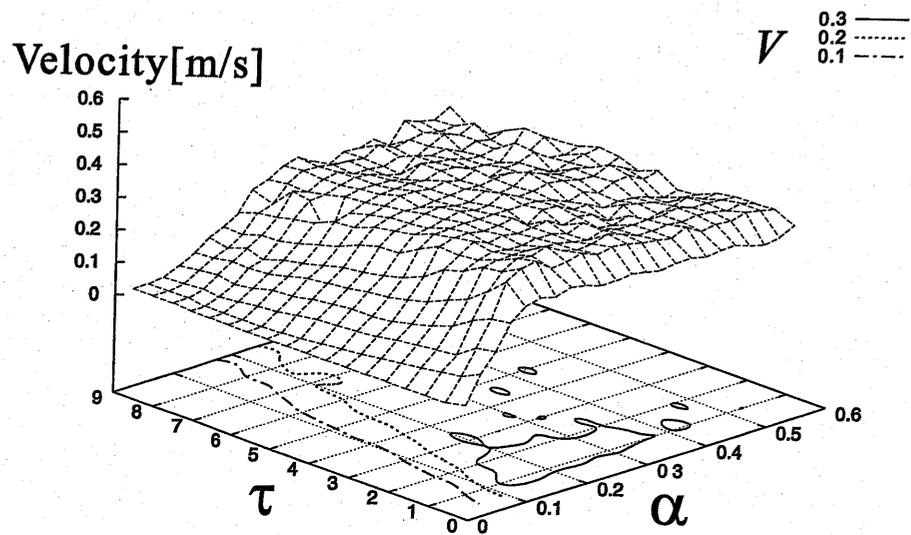


図 4.7 α , τ と歩行速度 V の関係 (walk gait)

4.4.2 歩容とエネルギー効率の関係

各歩行パターン時の $\alpha \cdot \tau$ と V の関係を図 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 に, $\alpha \cdot \tau$ と ϵ の関係を図 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 にそれぞれ示す. 歩行速度に注目すると, walk gait と tort gait では α の増加に伴い, また, τ の減少に伴い, 歩行速度が増加していることが分かる. tort gait では α がある値 ($\alpha =$ 約 0.3) 以上になると不安定になることが分かる. これは, 神経系と筋骨格系とのカップリングが上手く行えてないためである. 同様のことはエネルギー効率に対しても言え, 歩行速度が不安定になっている時にはエネルギー効率も悪くなっている. さらに, α または τ が小さい値の時は強制的にカップリングを行うとしているためにエネルギー効率は悪化している. pace gait では歩行周期が小さい時のみ高い速度で移動可能になっている. これは図 4.13 を見れば明らかに τ が小さい時のみ高エネルギー効率を示している. つまり, pace gait を実現するためには歩行周期を早くしなくてはならない. bounce gait では, 図 4.14 から高エネルギー効率な歩行を実現可能な τ と α の区間は非常に小さな範囲でしかなく, しかも τ , α ともに小さな値である. つまり, bounce gait を実現するためには歩行周期が早く歩幅の小さい歩行のみであることがわかる.

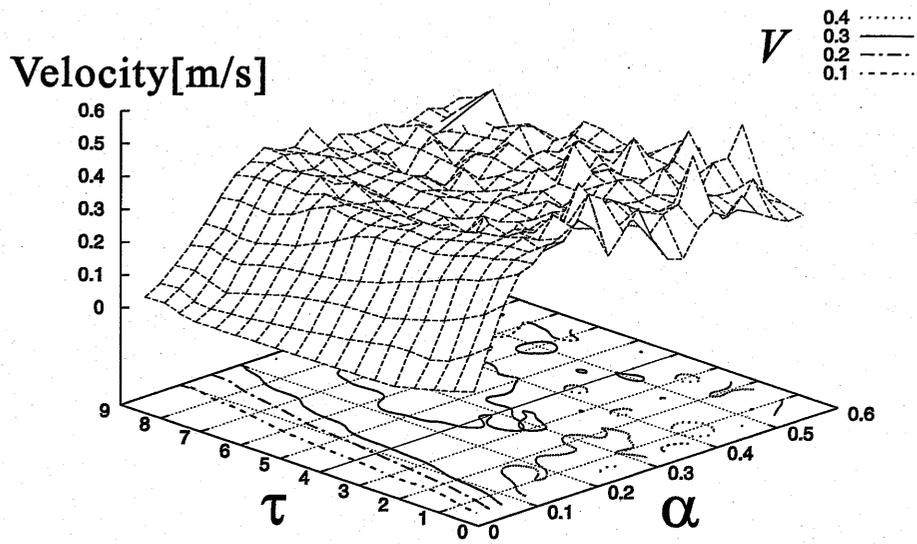


図 4.8 α, τ と歩行速度 V の関係 (trot gait)

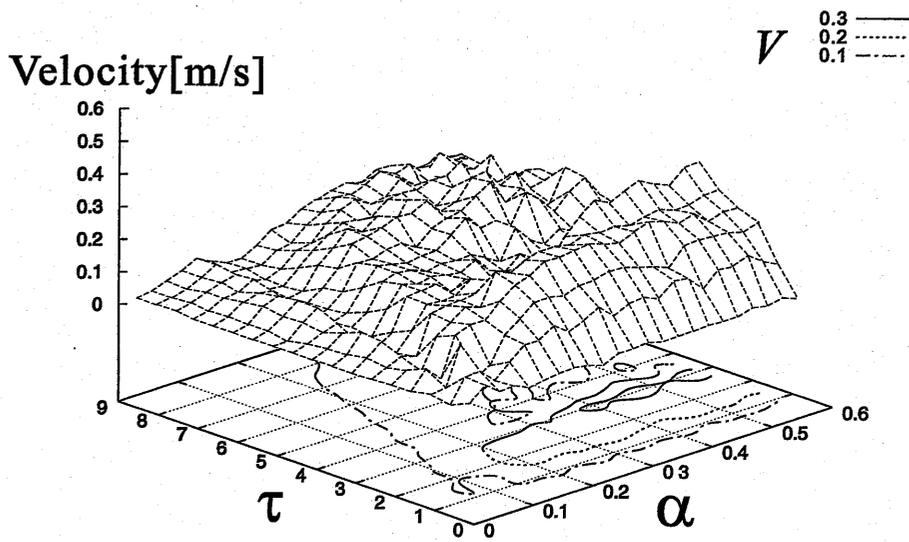


図 4.9 α, τ と歩行速度 V の関係 (pace gait)

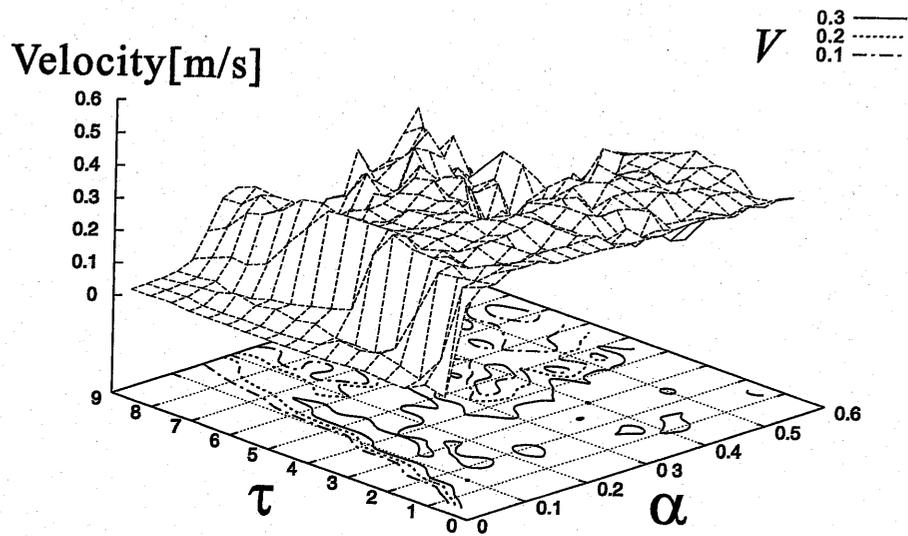


図 4.10 α, τ と歩行速度 V の関係 (bounce gait)

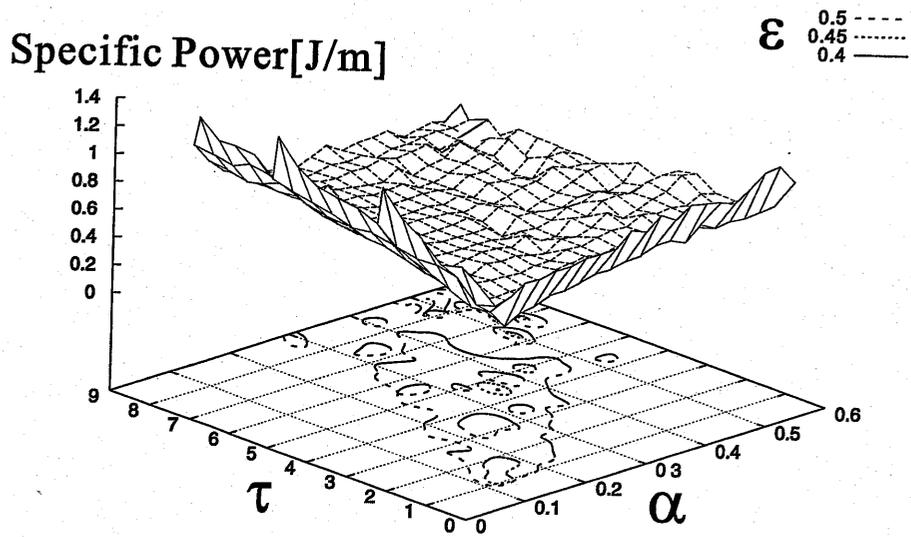


図 4.11 α, τ とエネルギー効率 ϵ の関係 (walk gait)

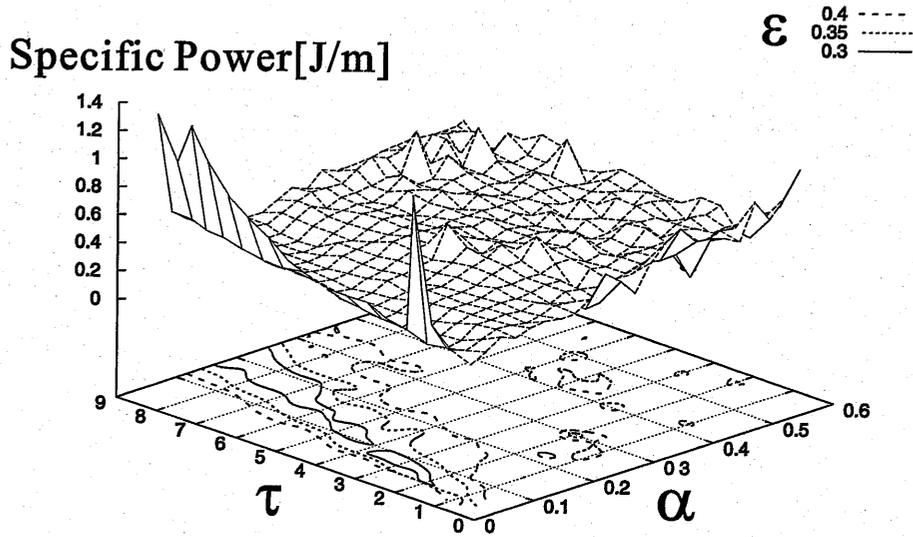


図 4.12 α, τ とエネルギー効率 ϵ の関係 (trot gait)

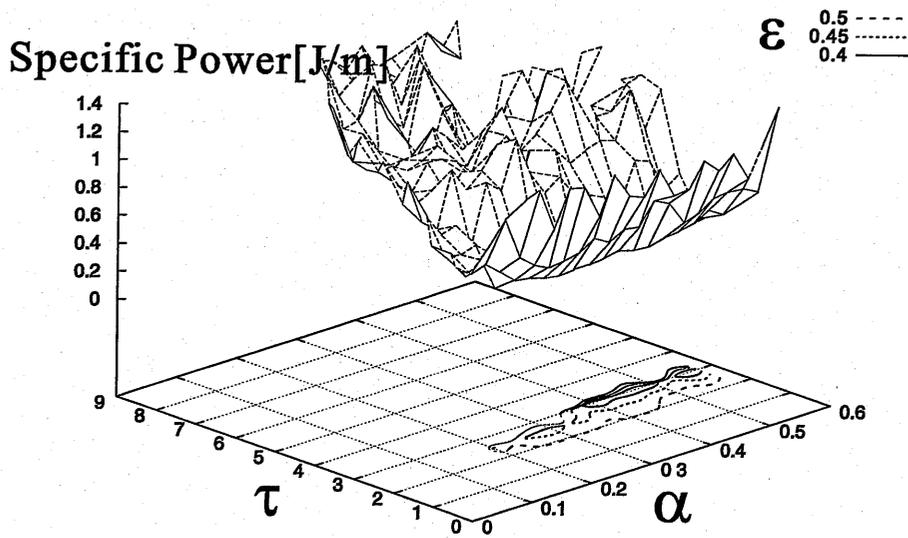


図 4.13 α, τ とエネルギー効率 ϵ の関係 (pace gait)

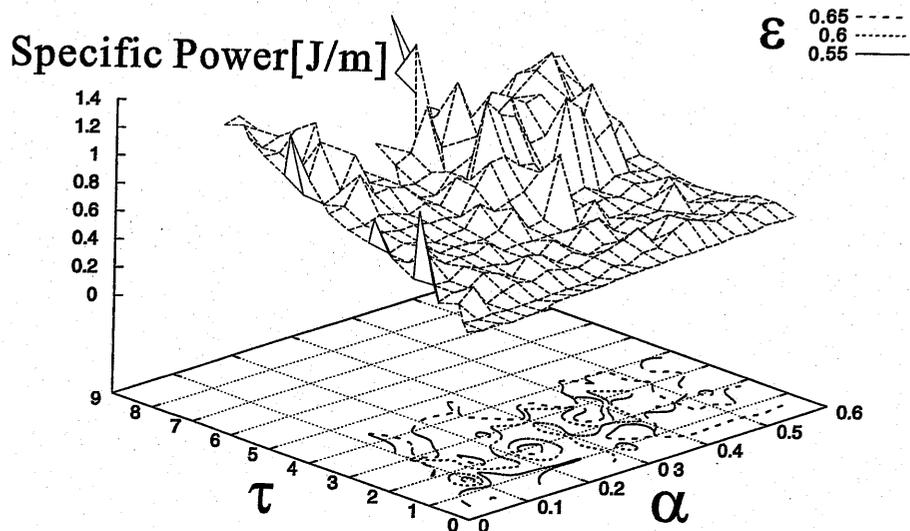


図 4.14 α, τ とエネルギー効率 ϵ の関係 (bounce gait)

4つの歩行パターン (walk, trot, pace, bounce) の歩行速度とエネルギー効率のすべての関係を図 4.15 に示す。これは、前に示した、 $\alpha \cdot \tau$ と V の関係と $\alpha \cdot \tau$ と ϵ の関係のグラフから計算したものである。同じ速度に対して複数の点が存在するのは、ある速度を実現するための α と τ の組み合わせが複数存在するからである。

図 4.15 から計算した各歩行パターン時の歩行速度 V と最適なエネルギー効率 ϵ の関係を図 4.16-(a) に示す。最適なエネルギー効率に対する機械的仕事による部分と熱消費による部分をそれぞれ図 4.16-(b), (c) に示す。

消費エネルギーを機械的仕事のみを考慮した場合、walk gait と trot gait においては、速度が高くなるにつれてエネルギー効率は悪くなっている。機械的仕事による項は、歩行速度が速くなるにつれて脚の運動エネルギーを供給するために大きくなる。pace gait と bounce gait に関しては、歩行速度が遅い場合には歩行自体が不安定かつ困難であったために、低速でのエネルギー効率も不安定に変化している。熱散逸による影響とトータルの移動仕事率に関しては、速度が高くなるにつれてエネルギー効率は良くなっている。歩行速度が遅い場合に発生する熱エネルギーは、支持脚層において脚が胴体を支えるために必要なトルクによる部分が大きくなる。歩容別にみると、trot gait が最も良く、広範囲の速度に対して

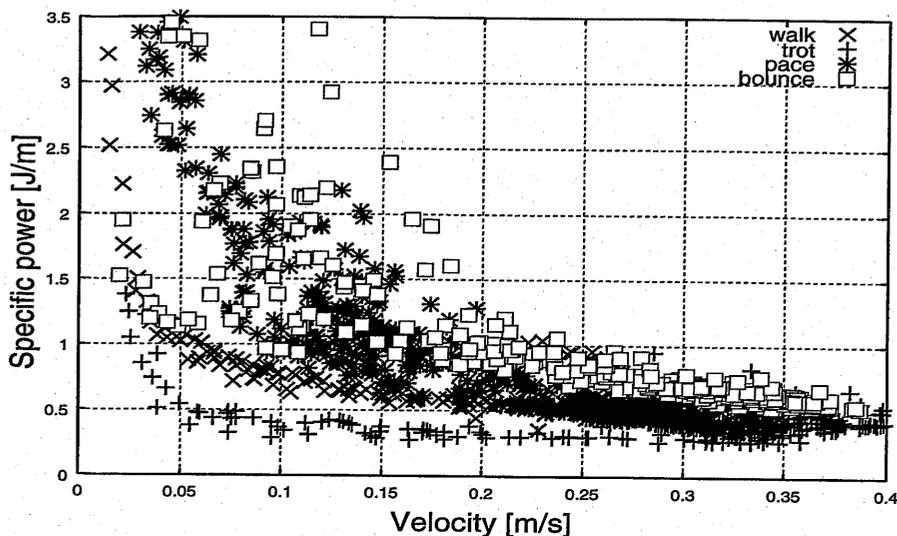


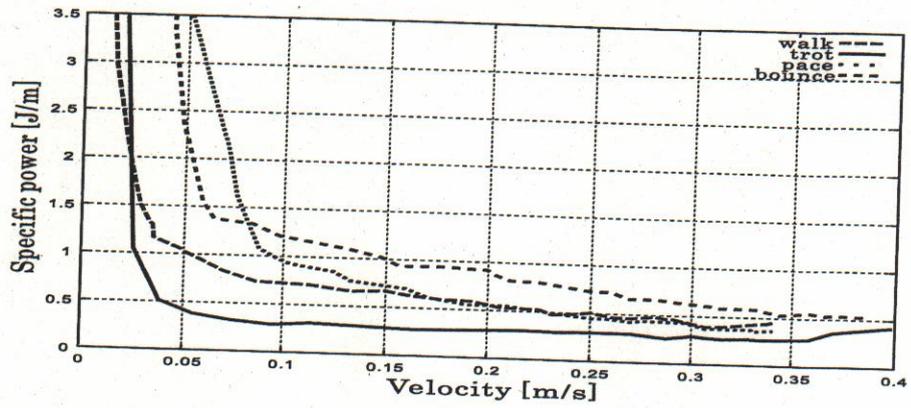
図 4.15 各歩行パターンの歩行速度とエネルギー効率の関係

高いエネルギー効率を示している。本研究で使用した歩行ロボットモデルで pace gait, bounce gait を実現するためには、歩行周期を早くして、歩幅を小さくする必要があるので全体としてエネルギー効率が悪くなっていると考えられる。

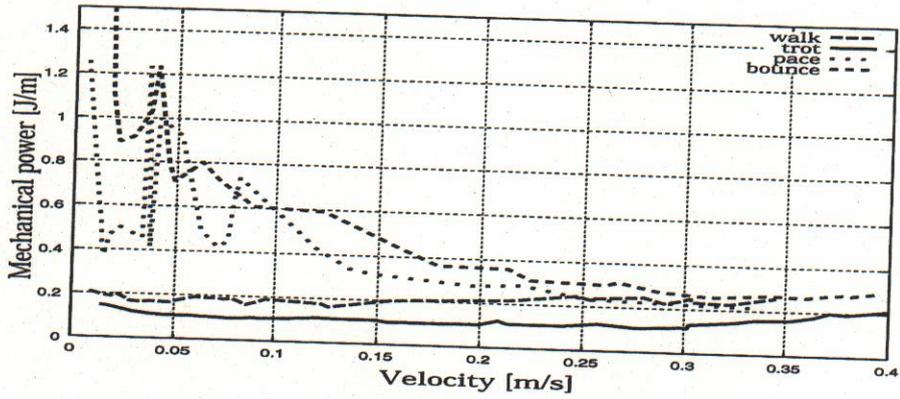
図 4.16-(a) から、ある歩行速度に対するエネルギー効率を最適にするパラメータ α と τ の組み合わせを決定することができる。例えば、trot gait で目標歩行速度 $V=0.3[\text{m/s}]$ で移動する場合、図 4.16-(a) から目標速度を実現する α と τ の組み合わせ、つまり $\alpha=0.125$ と $\tau=0.5$ を選択すればよい。

次に、ロボットの身体性、特に脚の長さの違いによるエネルギー効率の変化について考察する。図 4.17 に第三リンクの長さを変化したときのロボットのモデルを示す。このモデルは第三リンクの長さのみを変更したモデルであり、歩幅には影響を与えないが、重心位置が異なり、胴体のバランスに影響を与えるモデルである。図 4.17-(b) を基準となる脚長としたときに、図 4.17-(a) は第三リンク長を二分の一にしたモデルで、図 4.17-(c) は第三リンク長を二倍にしたモデルである。各モデルはリンク長のみ変化し、それ以外の条件は同じにしてある。このモデルを使用し前述のシミュレーション実験を行った。各歩行パターン別にシミュレーション結果を図 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 にそれぞれ示す。

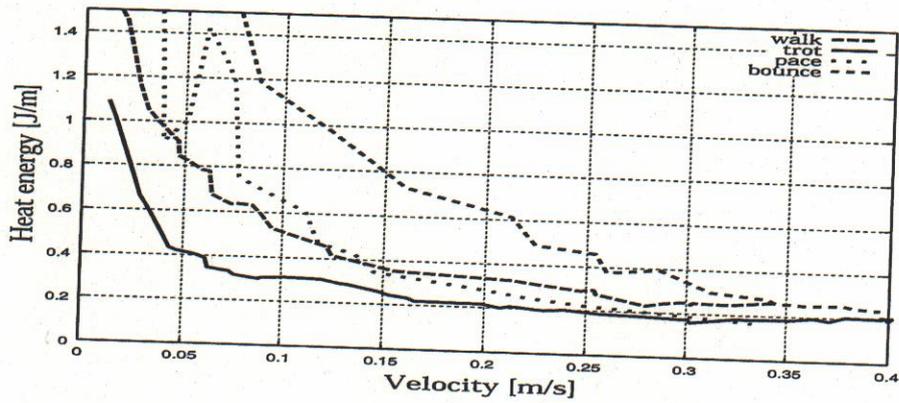
walk gait では、モデル (a), (b) においてはエネルギー効率にそれほど差が無



(a) 移動効率

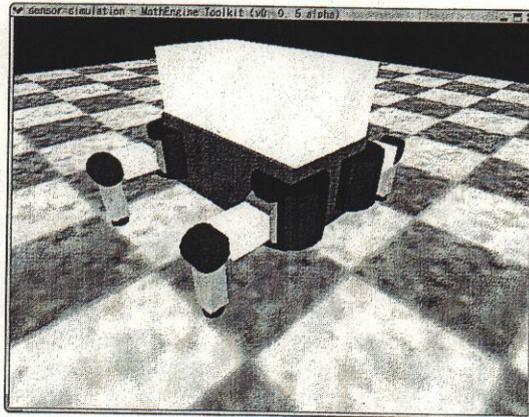


(b) 機械的仕事

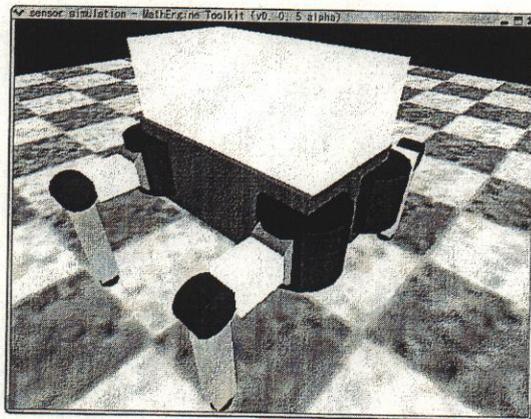


(c) 熱消費

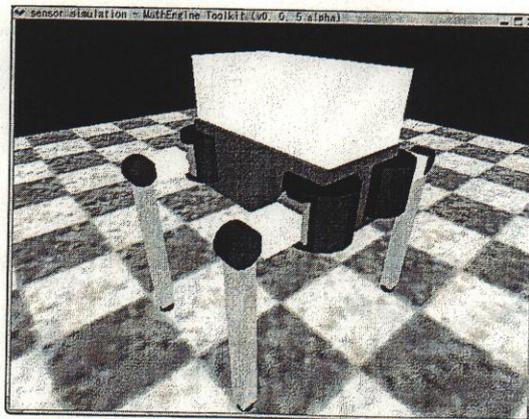
図 4.16 歩容とエネルギー効率の関係



(a) 脚の長さ 二分の一



(b) 脚の長さ 基準値



(c) 脚の長さ 二倍

図 4.17 第三リンク長の異なるロボットモデル

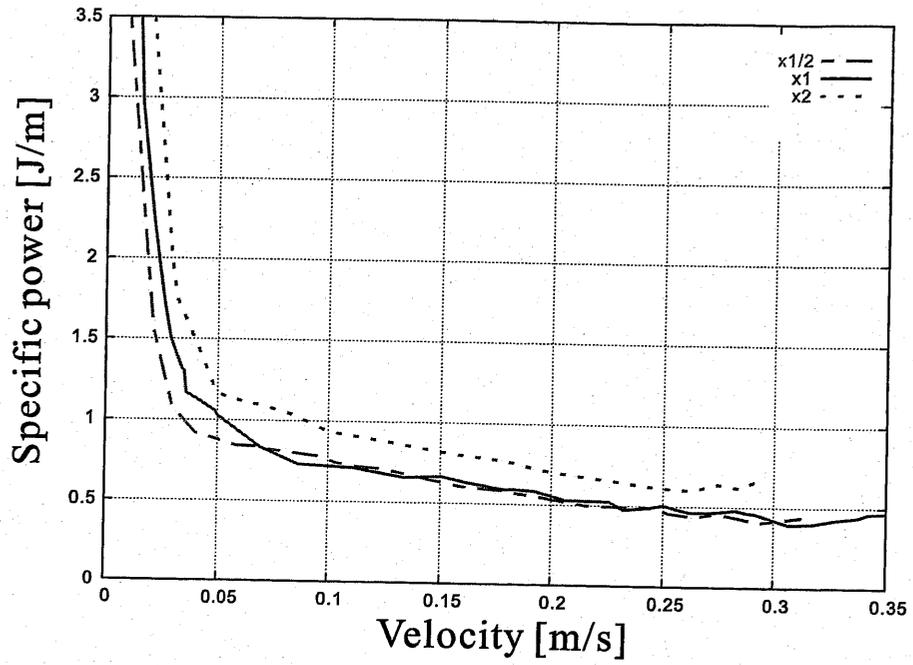


図 4.18 脚長の違いによるエネルギー効率 (walk gait)

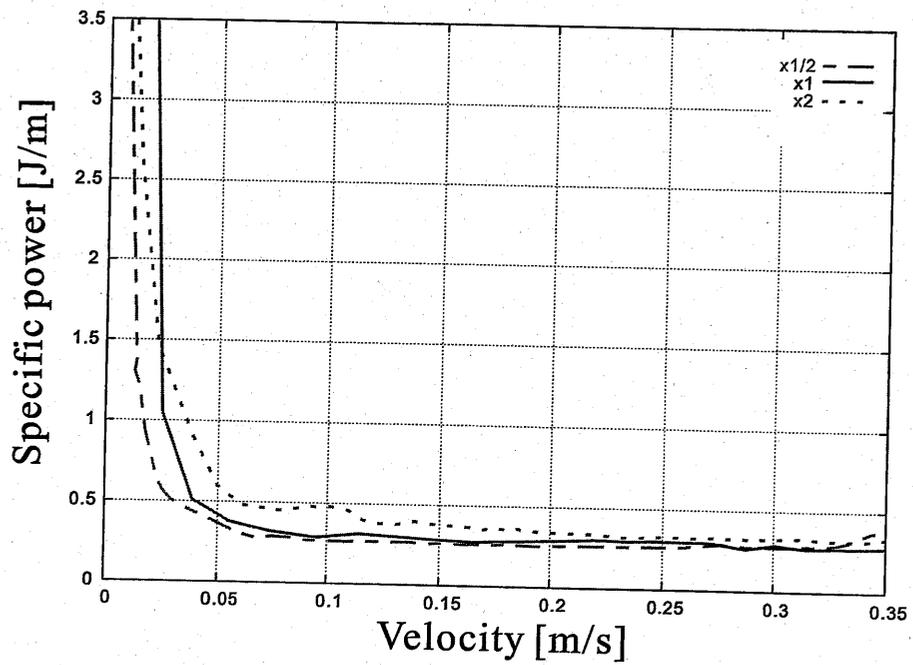


図 4.19 脚長の違いによるエネルギー効率 (trot gait)

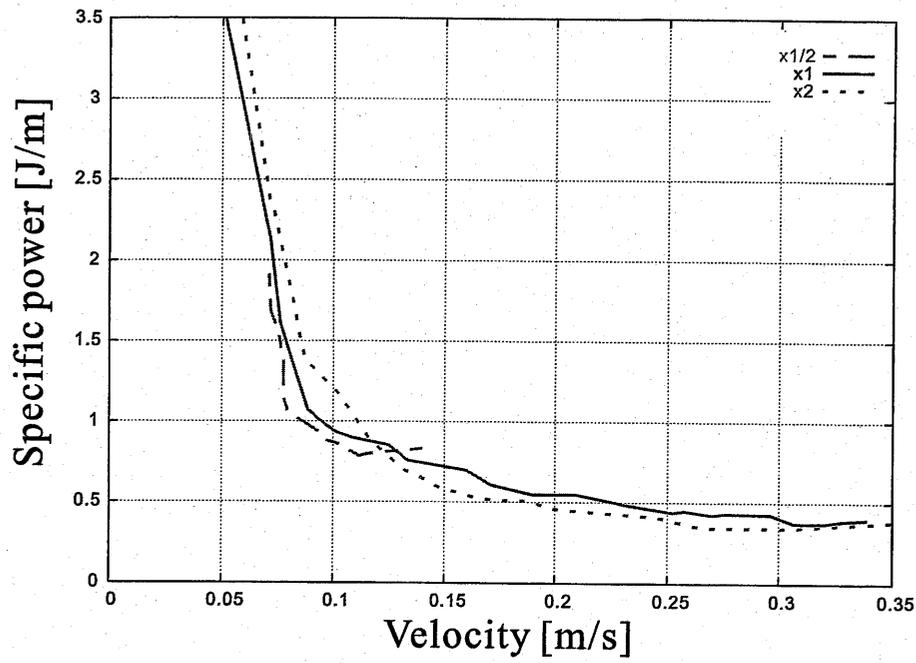


図 4.20 脚長の違いによるエネルギー効率 (pace gait)

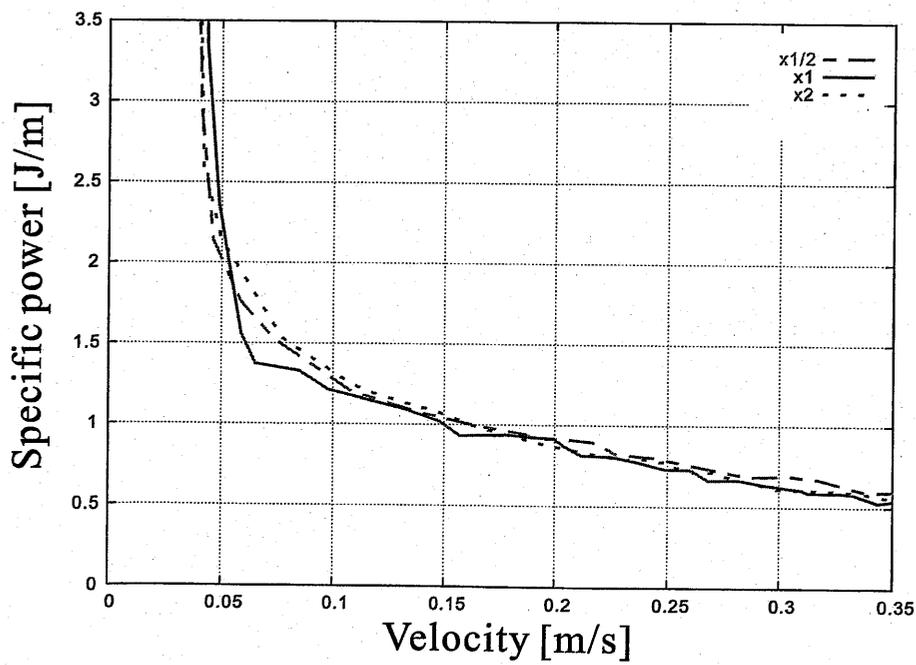


図 4.21 脚長の違いによるエネルギー効率 (bounce gait)

く、脚長が長いモデル (c) の場合にエネルギー効率が悪くなっている (図 4.18). これは, walk gait においては接地脚が三点あるために脚長が短くても胴体のバランスを崩すことは無く脚長による影響はほとんど無いと考えられる. しかし, 脚長が長いと逆にバランスを崩しやすくなり歩行が不安定になりやすいためエネルギー効率が悪くなっていると考えられる. trot gait では, 脚長が長いモデルでは低速では若干エネルギー効率が悪くなっているが, 速度の上昇に伴い脚長によるエネルギー効率の違いはそれほど現れていない (図 4.19). pace gait に関しては, 脚長が短いモデル (a) では, 歩行速度が約 $0.07 - 0.14 \text{ m/s}^2$ の区間しか歩行を実現できていない (図 4.20). 歩行速度を上げようとするともバランスを崩し上手くカップリングが行えず歩行が実現できなかった. pace gait に関しては脚長が長いモデルの方が有利である. 動物の歩行にもよく現れており, トカゲなどの脚長が短い生物では pace gait はほとんど見られず, 逆にラクダなどの脚長が長い生物では pace gait はよく用いられている. これは, pace gait は前後の脚が同位相であり左右の脚が逆位相となる歩行であるため, この歩行を実現するには遊脚層と支持脚層の切り替えの時に重心を左右に大きくずらす必要がある. このため脚長が長いモデルの方が有利な結果となったと考えられる. bounce gait に関しては, 脚長の違いによるエネルギー効率にはそれほど差が無い (図 4.21). これら実験結果より本研究で使用したロボットのリンク構造では tort gait が最もエネルギー効率がよい歩行パターンであると考えられる.

4.5. 本章の結論

本論文では, ロボットの制御アルゴリズムの開発環境として高速な三次元動力学シミュレーション環境の必要性について述べ, ゲーム開発用に開発された動力学演算ツールキットを用いることにより高速三次元動力学シミュレーション環境を開発した. この環境では, 16 自由度を有する脚式ロボットの歩行シミュレーションが平らな面との接触を含め 1 TimeStep あたり動力学演算に $6.23[\text{ms}]$, 干涉検査に $0.32[\text{ms}]$ (CPU: Pentium VI 2GHz OS: Linux) 程度で計算可能であり, レンダリングを含めても TimeStep を 10ms とすると実時間でのシミュレー

シミュレーションが可能であった。開発したシミュレーション環境を用いデューティ比 β での歩容パターンとエネルギー効率との関係を明確にした。また、構築したシミュレーション環境を用いて、エネルギー効率を最適にする歩行パラメータを決定する手法を提案した。

伊藤ら [63] は、動物の歩行を観測して得られたデータにより一般に遊脚時間は個体によって決まっており歩行速度によらないという報告 [64] と、犬の歩行では脚長で正規化された歩幅は接地率によらず一定になるとの報告 [65] に基づき歩幅と遊脚時間を一定にし、デューティ比を含めたエネルギー評価式を用い歩行速度の変化に伴う歩行パターンの遷移をシミュレーションにより実現した。遊脚時間を一定にするということは、歩行周期の変動に伴ってデューティ比も変化することとなる。この研究では、歩行において重要なパラメータである歩幅、歩行周期、デューティ比の内、歩幅を固定してデューティ比を変化させている。ロボットにおいて歩幅は可動範囲内であれば自由に選択することができ、遊脚時間も自由に変更することが可能であり、最適な歩幅、遊脚時間を選択すること自体重要な問題である。本章は、デューティ比を最大歩行速度実現可能な $\beta = 0.5$ と固定して、歩幅、歩行周期を変更することにより歩行速度に対して最適な歩幅、歩行周期を決定するものである。本章で得られた結果より、ロボットの幾何学的条件により最適な歩容パターンが存在するという知見を得た。本章で用いたロボットであれば、tort gait が広範囲で効率がよく、歩行遷移を行わず、歩幅、歩行周期を変更することにより効率が良い歩行を実現可能であることを示唆している。



第5章 路面摩擦が歩容および エネルギー効率に及ぼす影響

5.1. 本章の趣旨

移動ロボットには大別して車輪・クローラによる移動機構を備えたものと、脚による移動機構を備えたものがあるが、特に脚型ロボットは複数の足の設置状態を逐次変化する事によって移動を実現しており、広い環境適応力を有する。しかし、脚による移動機構は脚が接地面に安定に接触している状態を前提に考える事が多いため、接地面において滑りが発生した場合には、様々な問題を惹起する。従来、滑らない事を前提に軌道計画を行うか、或いは、滑らないように軌道計画を行うものであり、実際に滑ったときにどのように対処するか論じている研究はあまり見当たらない。歩行中に滑りが発生し、ロボット本体がバランスを崩した場合には、滑りそのものを検知せずに、暫時ロボット全体の姿勢・力学的状態を制御する事で対処しているため、不必要に多くの関節を駆動してしまう恐れがある。多足歩行ロボットにおいては、多少の滑りが発生しても直ちに転倒する危険は少なく歩行を維持する事は可能であるが、エネルギー効率に影響を与えることは容易に考えられる。人は歩行中に滑りが発生したら直ちに補償運動を開始して、転倒回避を試みる。3,4歩の遷移状態を経て、その環境に適応した歩容を獲得し、歩行を持続するといわれている。ロボットにおいても、滑りが発生した場合には何らかの補償運動が必要である。摩擦が異なる環境を歩行するときには、それぞれの環境に適した歩容を行う事が望ましい。

本章では、まず、エネルギー効率の観点から摩擦の歩容への影響を明らかにする。路面の摩擦条件の違いが歩容やエネルギー効率にどのように影響を与えるかを、三次元動力学シミュレータを用いて検証する。滑りを検知して適応歩容を行う

ことでより複雑な環境での移動能力の向上につながると考えられる。シミュレーションにより得られた知見を基に滑り情報を利用した CPG 経由の滑り適応歩容を提案し、シミュレーションにより有効性を確認する。さらに、実機モデルを用いて、CPG 経由の滑り適応歩容が実機モデルでも有効であるか確認する。

5.2. 路面摩擦がエネルギー効率に及ぼす影響

5.2.1 シミュレーション条件

路面の摩擦条件の異なる環境で歩行シミュレーションを行い、摩擦の違いによりエネルギー効率にどのような影響が現れるかを検証する。シミュレーション環境には 4.2.3 節で述べた環境を用いる。ロボットのモデルには、実機モデル TITAN-VIII (図 4.1-(b)) の値を用いる。路面状態としては平面で、滑りやすい路面、通常路面、滑りにくい路面 (摩擦係数 $\mu=0.4, 0.6, 1.0$) の 3 つの状態とする。歩容生成手法は 4.4.1 節で述べた手法を用いる。デューティ比は $\beta=0.5$ の一定値を使用する。各摩擦条件で、3.2.1 節で述べた α と τ をそれぞれ変化させ試行を繰り返す。各摩擦条件で、3.2.1 節で述べた α と τ をそれぞれ変化させ試行を繰り返す。各試行は、停止状態から始め 20 秒間の歩行を行う。歩容パターンは、4.4.2 節で最も本実機モデルに適している trot gait とする。4.4.1 節で述べた手法と同様に定常状態の 10-20 秒間で歩行速度・エネルギー効率の算出を行う。エネルギー効率の算出方法 4.3.2 節で述べた手法を用いる。

5.2.2 歩行速度とエネルギー効率の関係

図 5.1 に摩擦係数の違いによる歩行速度と単位移動距離あたりの最適なエネルギー効率の関係を示す。

歩行速度とエネルギー効率の関係は、摩擦の違いに関係なく低速ではエネルギー効率が悪く、速度の増加に伴いエネルギー効率は徐々に良くなり、歩行速度がある値を超えるとエネルギー効率は徐々に悪くなっている。これは、馬を対象に行った生体工学の研究結果とよく一致する結果が得られた [58]。

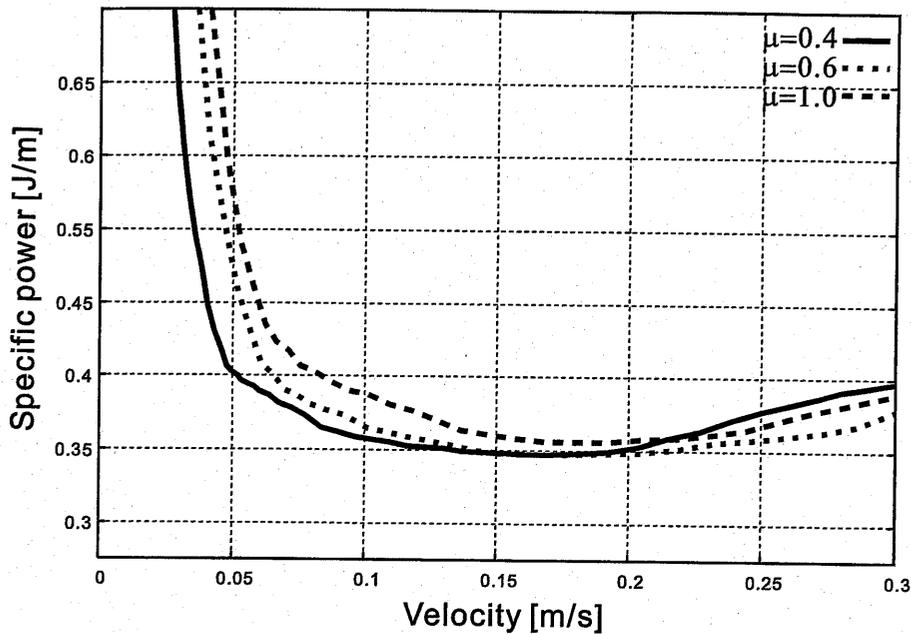


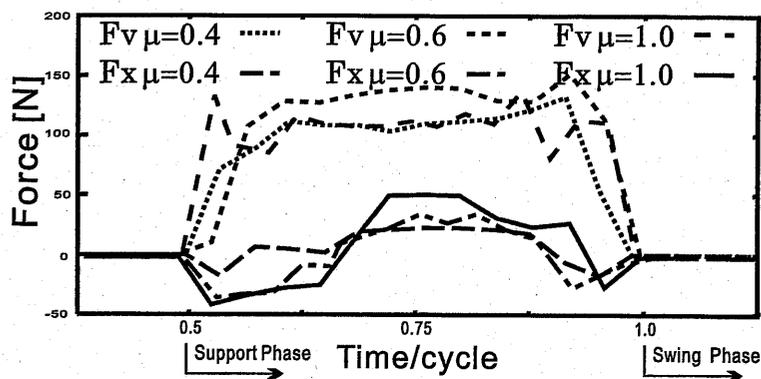
図 5.1 歩行速度とエネルギー効率の関係

摩擦係数の違いによるエネルギー効率の変化を見てみると、低速（歩行速度 $V < 1.5$ ）では、摩擦係数が小さいほどエネルギー効率が良くなっている。歩行速度 $V = 2.0$ 辺りでは、摩擦係数によるエネルギー効率の違いはほとんどなく、歩行速度 $V \geq 2.0$ になると摩擦係数 $\mu = 0.6$ の場合が最もエネルギー効率が良くなり、摩擦係数 $\mu = 0.4$ の場合が最もエネルギー効率が悪くなっている。各曲線のエネルギー効率の最小値は摩擦係数の増加に伴い大きくなっている。摩擦の影響は、歩行パターンに関係なく、摩擦が大きいとエネルギー効率が悪くなる傾向が見られる。直感的に摩擦が大きくなると、エネルギー効率が向上するように思われる。しかし本実験結果はそれとは異なる結果が現れた。次節で、この原因について考察し摩擦係数の違いにより移動効率と歩幅・歩行周期との関係を明らかにする。

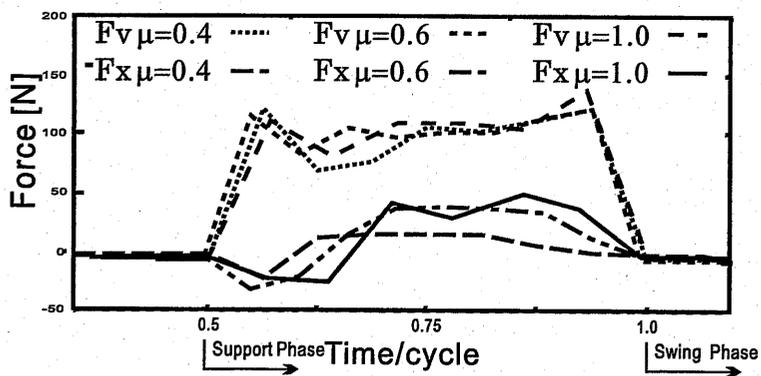
5.2.3 路面摩擦が歩容に及ぼす影響

一般に、摩擦が小さいと、滑りが発生してしまい、推進力が得られにくくなる。摩擦が大きいと、支持脚時に接地面を強く蹴りだすことが可能で、多くの推進力を得る事ができると考えられる。この現象は、歩行開始時に良く現れており、本実験でも歩行開始から定常状態になるまでの平均時間は、摩擦が大きいほど短くなっている。つまり、摩擦が小さいと歩行開始時に滑りが顕著に発生し、推進力を得られないために定常状態に至るまで時間がかかってしまう。しかし、本実験でのエネルギー効率の計算は、定常状態で行っているため、この影響は考慮していない。定常状態では、ロボット本体に歩行速度の影響による慣性力が働いているため、接地時には足先に推進方向の逆向き床半力が働く。遊脚の接地のタイミングの影響により、この床半力がブレーキのような働きをする場合がある。この力は摩擦が大きくなるにつれて大きくなる。図5.2に異なる摩擦 ($\mu=0.4, 0.6, 1.0$)、異なる歩行速度 ($V=0.1, 0.2, 0.3$) での一步分の接地時の床半力垂直方向成分 F_y 、床半力推進方向成分 F_x を示す。なお、歩幅はほぼ同じにし歩行周期のみ変化させている。つまり、脚先軌道はほぼ同じである。

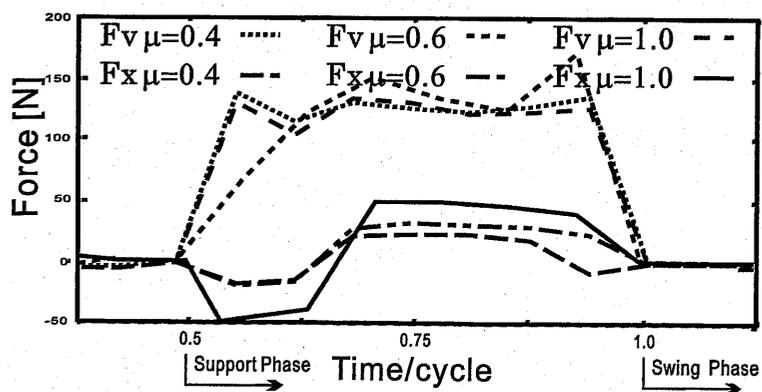
すべての場合において脚が接地した時、つまり床半力垂直方向成分 F_y に値が生じた時に、床半力推進方向成分 F_x は負の値を示している。床半力推進方向成分 F_x が負の値であることはロボットにとっては推進力ではなくブレーキとして働いている。この接地した瞬間の推進方とは逆の床半力は人間の歩行にも存在するもので、それ自体は歩行には必要なものである。しかし、この値は摩擦が大きくなればなるほど大きな値となり、必要以上に発生してしまう。歩行速度 $V=0.1$ の時には、摩擦係数に関係なく、支持脚が遊脚に変わる時、接地時同様に床半力推進方向成分 F_x は負の値を示している。これは、遊脚への移行がスムーズに行われてなく多少脚を引きずっていることを示している。これによって失われるエネルギーも摩擦が大きいほど大きくなる。歩行速度 $V=0.2$ の時にはこのような現象はなく、スムーズは移行が行われていることが分かる。このように床半力推進方向成分 F_x の負の値はブレーキのような働きをしている事が分かる。摩擦係数 $\mu=0.4$ の場合、図5.1より $V=0.2$ を超えるとエネルギー効率が悪くなっている。摩擦が小さい場合、慣性力によるブレーキの作用が働かないのと同時に、蹴りだしによ



(a) 歩行速度 0.1 [m/s]



(b) 歩行速度 0.2 [m/s]



(c) 歩行速度 0.3 [m/s]

図 5.2 支持脚時の床半力

る推進力も得られにくくなる。このブレーキ作用と推進力の関係により、速度をある値より上げるために、より多くのエネルギーを使用しなくてはならなくなり、効率が悪くなっている。また、支持脚の軌道は、第一関節の駆動で行っているので、円弧を描くようになる。そのため、何らかの影響で胴体のバランスを崩し、二つの遊脚の接地のタイミングがずれた場合には、先に接地した脚の支持動作により不必要な回転モーメントが発生する。このモーメントの発生により、推進力が減少し、回転運動を引き起こす。このモーメントもまた摩擦が大きいほど大きくなる。本実験は四足歩行ロボットで行っているために、二足ロボットのように、滑りにより転倒してしまうほどバランスを崩す事はなく、転倒による影響は見られなかった。以上のような理由により、摩擦係数と歩行速度・エネルギー効率の関係は図5.1のようになったと考えられる。摩擦係数の違いは、仮想的に斜面にも置き換えることができ、ここで得られた結果は斜面にも応用可能である。

次に、歩容の形態に関して考察する。歩行速度 $V=0.1, 0.2, 0.3$ の場合の摩擦係数と最適な歩幅・歩行周期の関係を表5.1に示す。歩行速度が小さい場合、摩擦係数が小さいと歩行周期が小さいほど効率がよく、歩行速度 $V=0.2$ の時は、歩行周期はほぼ同じになっている。歩行速度が速くなると、歩行周期が大きい歩行の効率が良くなっている。つまり、摩擦係数が異なると、同じ速度を実現するにも最適なエネルギー効率を得るには歩幅と歩行周期が異なることが分かる。滑りやすい路面では歩幅が小さく周期の早い歩行が効率的で、摩擦が大きい路面では歩幅が大きく周期の遅い歩容が効率的になる傾向があることがわかった。すなわち、摩擦が異なる環境では、効率の良い歩容形態にも差が出る事が分かる。

5.3. CPG 経由の滑り適応歩容

5.3.1 滑り反射

前節で得られた知見から、摩擦状態・歩行速度により歩行形態を変更することでエネルギー効率の向上につながる事が示唆される。この結果を踏まえ、滑り適応歩容を提案する。

まず、足先の加速度情報から滑りの同定を行う。滑りは理想的にはインパルス

表 5.1 摩擦と最適な歩行周期の関係

		Friction Coefficient		
		$\mu=0.4$	$\mu=0.6$	$\mu=1.0$
Velocity	$V=0.1$ [m/s]	$\tau=0.20$ $\alpha=0.02$	$\tau=0.35$ $\alpha=0.025$	$\tau=0.25$ $\alpha=0.025$
	$V=0.2$ [m/s]	$\tau=0.30$ $\alpha=0.035$	$\tau=0.30$ $\alpha=0.035$	$\tau=0.30$ $\alpha=0.035$
	$V=0.3$ [m/s]	$\tau=0.25$ $\alpha=0.040$	$\tau=0.40$ $\alpha=0.045$	$\tau=0.30$ $\alpha=0.045$

的な脚先加速度を発生させると考えられる。図 5.3 にシミュレーションによる通常の路面（静止摩擦係数 $\mu = 0.6$ ）から滑りやすい路面（静止摩擦係数 $\mu = 0.4$ ）へ歩行を行ったときの右前脚の進行方向の加速度を示す。これからわかるようにノイズなどの影響によりこれを特定するのは困難である。

図 5.4 に駆動入力による加速度の影響を取り除いて、さらに支持脚時のみの右前脚の進行方向の加速度を示す。このグラフから滑りやすいエリアにロボットが進行したときの多くの加速度が発生していることがわかる。

そこで、支持脚時中の加速の積算がある閾値を超えた場合に滑りとする。図 5.5 に図 5.4 のグラフから計算した支持脚時の加速度の積算を示す。滑りやすい路面では明らかに加速度の積算が大きくなっていることが分かり、滑りを特定することが可能であることを示している。この滑り情報をもとに CPG の時定数 τ の値のみを変更する。その結果、滑りの影響により歩行周期と歩幅が同時に変化することになる。CPG を用いた適応歩容には、視覚や聴覚などの上位入力またはセンサ情報のフィードバック入力を利用した手法などが考えられるが、本手法は CPG の時定数を直接変更することにより滑り適応歩容を実現する。

具体的には、滑りが発生すると一定量だけ τ を減少させる。しかし、これだけでは徐々に歩幅が小さく周期が早い歩容になるだけなので、逆の反応として、数歩滑りが生じない場合には τ を増加させる。これにより徐々に歩幅の大きいゆっくりした歩容に変化する。この反応を“滑り反射”と名づける。なお、 τ の値はシミュレーションにより求めた上下限值が存在する。

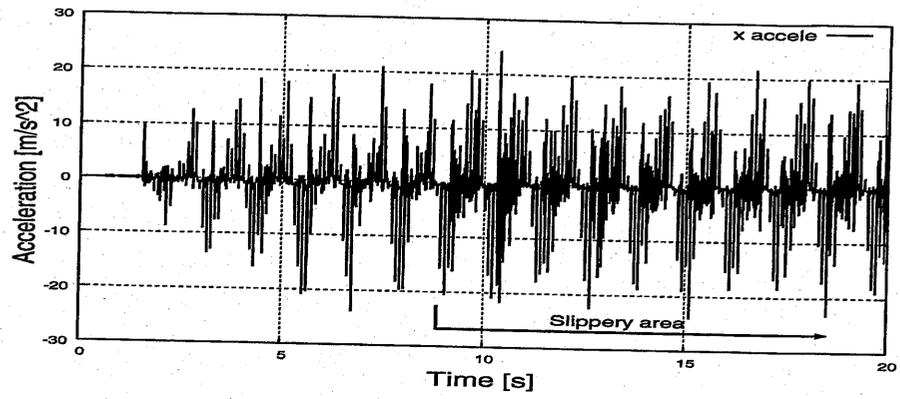


図 5.3 右前脚の進行方向の加速度

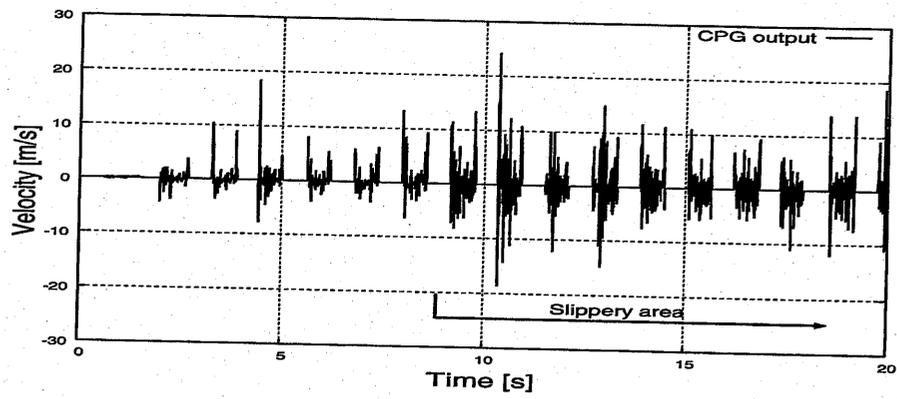


図 5.4 支持脚時のみの右前脚の進行方向の加速度

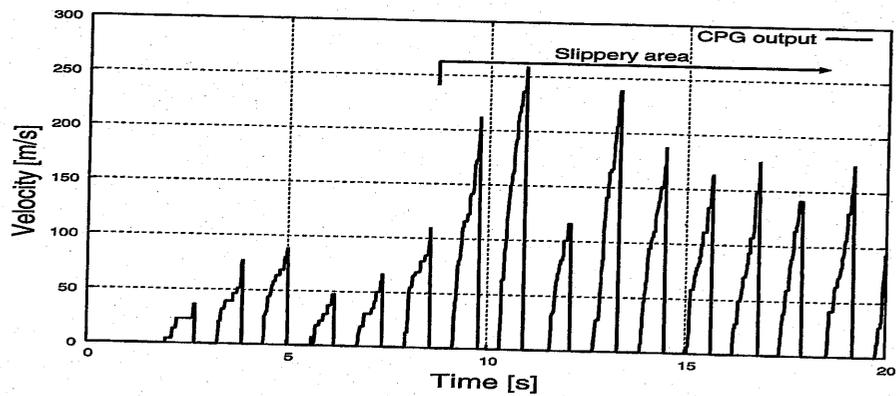


図 5.5 支持脚時の加速度の積算

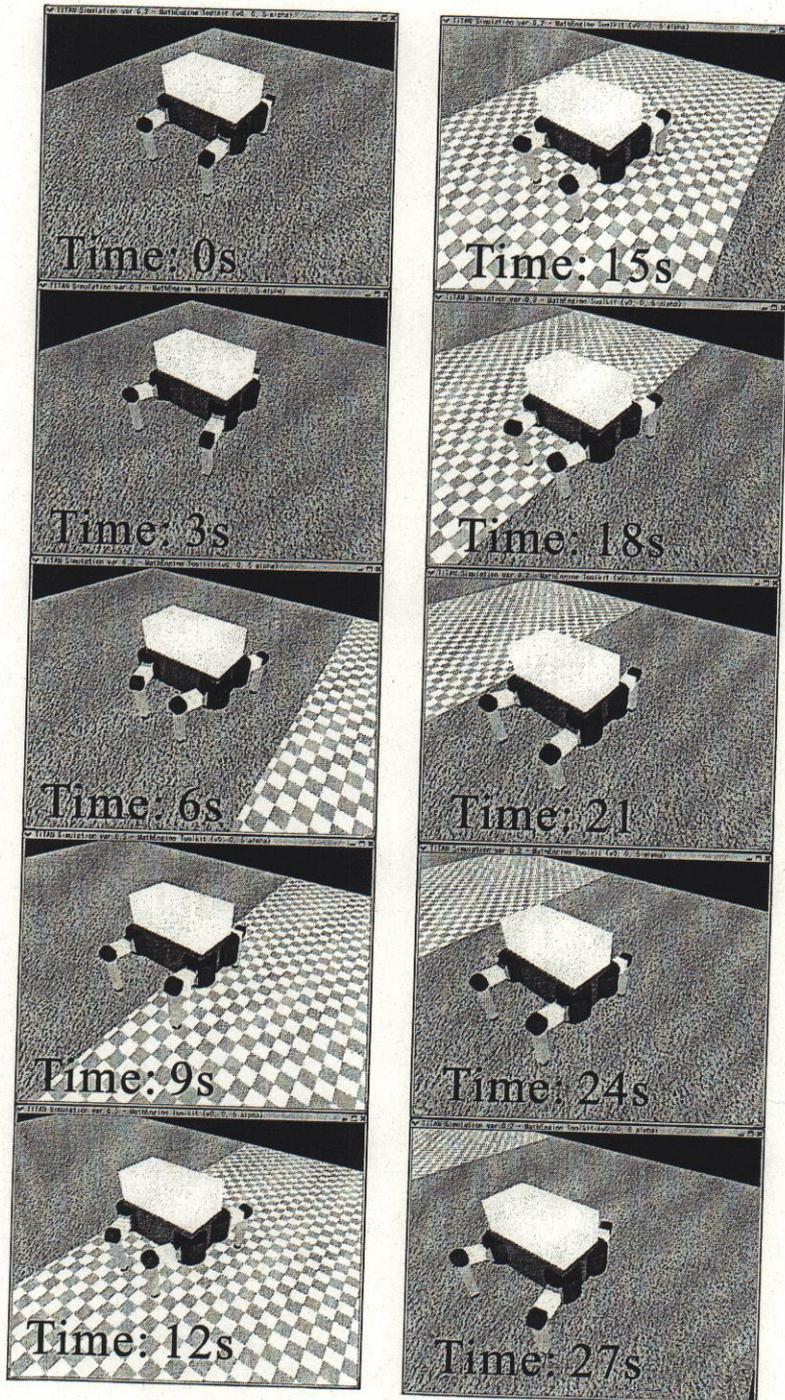


図 5.6 滑り適応歩容実験の様子

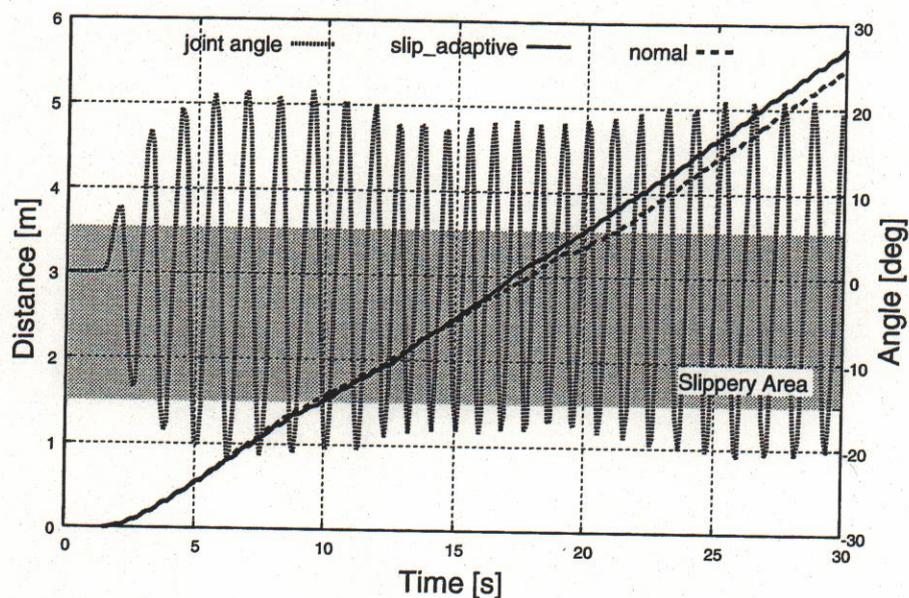


図 5.7 重心移動距離と右前脚の第一関節角度

5.3.2 シミュレーションによる滑り適応歩容実験

シミュレーション実験の様子を図 5.6 に示す。路面条件は、1.5~3.5m の区間が静止摩擦係数 $\mu = 0.3$ の滑りやすい路面であり、その他の区間が静止摩擦係数 $\mu = 0.7$ である。歩容は trot gait を用いる。ロボットモデルは前節と同様である。 α, τ の初期値はそれぞれ共通の値を用いる。

滑り反射を行った場合とそうでない場合の重心移動距離と、滑り反射時の右前脚の第一関節の角度を図 5.7 に示す。関節角度に注目すると、滑りやすい路面になると歩幅が徐々に小さくなり歩行周期が小さくなっていることが分かる。通常の路面に戻ると、歩幅が徐々に大きくなり歩行周期も大きくなっていることが分かる。移動距離は滑りやすい路面の後半から差が出ており提案手法では滑りやすい路面に適応していることが分かる。滑り反射を行った場合とそうでない場合での 30 秒間の実験を行ったが、エネルギー効率を計算したところ 5% ほど向上していた。本手法の有効性を示す結果がシミュレーション実験により得られた。

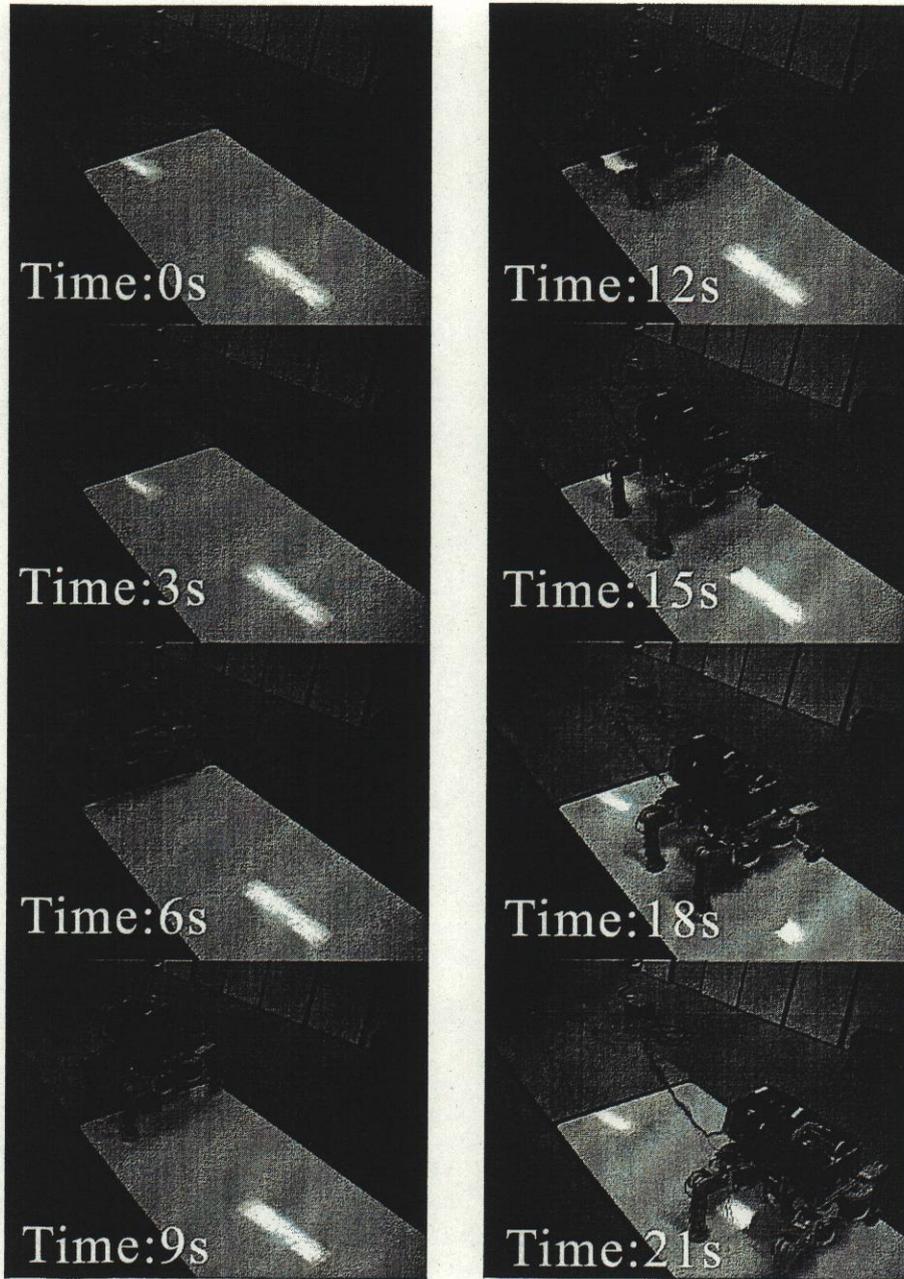


図 5.8 CPG 経由の滑り適応歩容の様子

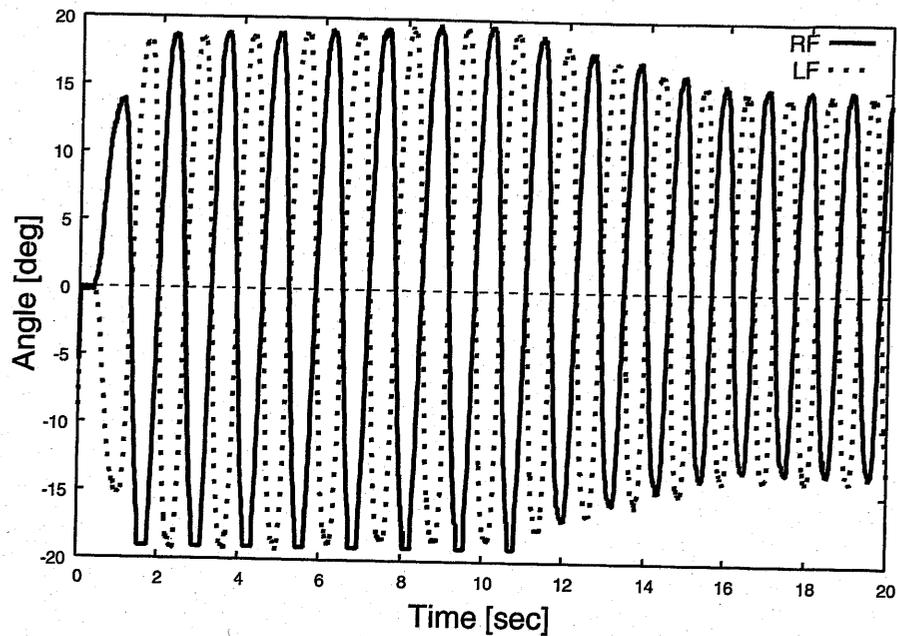


図 5.9 第一関節角度の推移

5.3.3 実機モデルによる滑り適応歩容実験

提案手法を実機モデルに応用して、滑り情報により歩容の変化が起きることを確認する。実験環境として、0~1.5mの区間の静止摩擦係数が約0.5で、1.5m以降の静止摩擦係数が約0.2の摩擦係数変化する路面を用いる。図5.8に実験の様子を、図5.9に右前脚・右後脚の第一関節角度の推移を示す。関節角度から、歩行が進むにつれて、徐々に歩幅と歩行周期が小さくなっていることが分かり、約±15度で収束していることが分かる。これは、摩擦係数の小さい路面に達した時に、脚先に閾値以上の滑りが発生し、CPG経路の滑り反射の影響により τ が変更されたためである。また、 τ にはリミットが設定されているためある値に収束することとなる。シミュレーションと同様の結果が得られていることが確認できる。滑り反射を用いない場合に比べ、移動距離も約2%伸びており、実機モデルでもCPG経路の滑り適応歩容が有効であることを確認できた。

5.4. 本章の結論

本章では、歩行時の滑りに着目し、摩擦条件が歩容およびエネルギー効率にどのような影響を与えるかを開発した三次元動力学シミュレーション環境を用いて検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 摩擦条件に関係なく、速度上昇に伴いエネルギー効率は上昇する。
- 滑りやすい路面では歩幅が小さく歩行周期の短い歩容が有効であり、滑りにくい路面では歩幅が大きくゆっくりした歩容が効率的である。
- 摩擦が異なる環境では、効率の良い歩容形態にも差がある。

これら得られた結果は摩擦状態、歩行速度に伴い、歩行形態を変えることにより効率の良い歩行が可能である事を示唆している。また、摩擦の変化は、仮想的に、斜面の歩行にも置き換える事ができ、斜面での適切な歩行形態の解明にもつながると考えられる。この結果を踏まえて、滑り反射を導入し、脚先の加速度情報を利用したCPG経路の滑り適応歩容を提案した。提案した手法を用いることにより、路面摩擦の異なる環境でのシミュレーション実験の結果、エネルギー効率は5%ほど向上した。歩行周期と歩幅を路面摩擦に適応するように変更することにより、路面摩擦が変化する環境への適応歩行が実現できた。さらに、実機モデルを用い、提案手法の有効性を確認した。

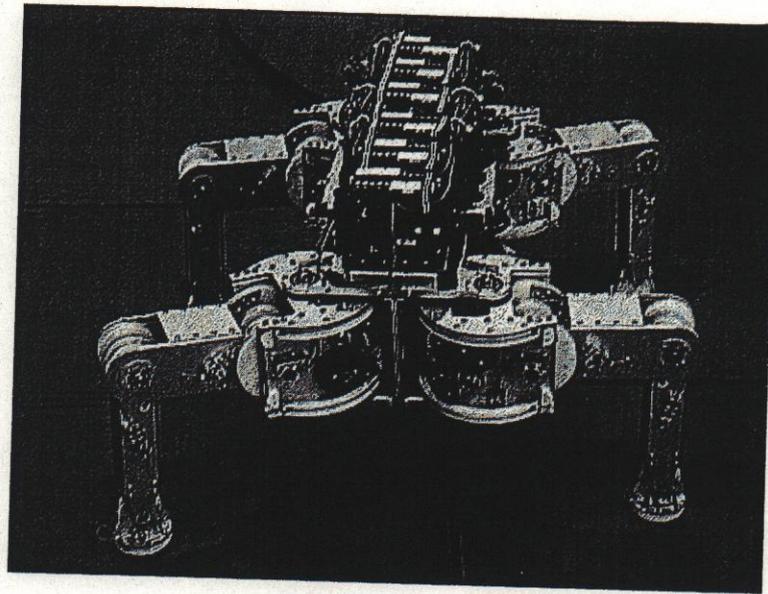
第6章 力制御を用いた滑り適応歩容 の提案

6.1. 本章の趣旨

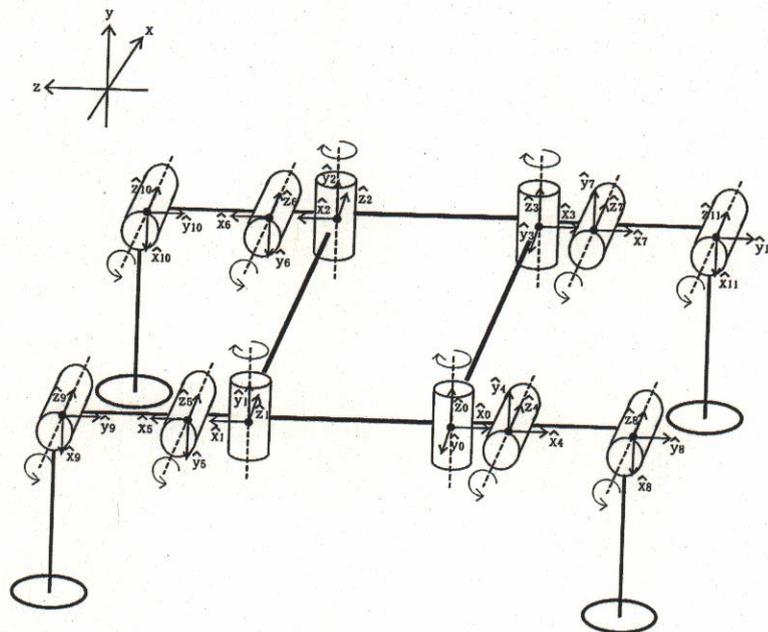
5章で路面摩擦の歩容およびエネルギー効率に及ぼす影響を検証した結果から得た知見を基にCPG経由の滑り適応歩容を提案した。これは、滑り情報を基に歩行周期・歩幅を変更し滑りに適応する歩容を生成するものである。滑りを検知して適応歩容を生成するまでにCPGを経由するために多少時間遅れがあり、長期的な計画には向いているが瞬時の対応には適していない。人や動物は歩いていて支持脚が著しく滑ったとき、瞬間的に路面を押さえつけるような動作を行い、その後、歩行パターンを変化させて対応している。そもそも脚先の滑りはそれが路面に及ぼす力が摩擦円錐からはみ出すことにより起きる。本章では付加的に脚先に力を加えることで、合力を摩擦円錐内に誘導し滑りを抑える力制御による滑り適応歩容を提案する。具体的には、脚先が滑る際の脚先加速度情報より脚が接地する路面の局所的な勾配を推定し、瞬間的に路面へアクチュエータにより力を付加するというものである。シミュレーション及び実機モデルを用いて本手法の有効性を確認する。

6.2. 力制御を用いた滑り適応歩行

本章で用いる四脚ロボットは3.3で説明したが、ここで、もう一度ロボット(図6.1(a))のリンクモデルを図6.1(b)のように定義しておく。各脚がヨー軸1自由度、ロール軸2自由度の3自由度を有する計12自由度13リンクのロボットであり、その主な仕様は表6.1に示す。



(a) TITAN VIII



(b) リンクモデル

図 6.1 実機モデル TITAN-VIII とリンクモデル

表 6.1 TITAN-VIII のリンクモデル

Body	400×600×250[mm], 11.6[kg]
First link	100×100×100[mm], 3.0[kg]
Second link	70×70×150[mm], 0.9[kg]
Third link	40×40×200[mm], 0.3[kg]
Foot link	φ 70[mm] h 20[mm] 0.2[kg]
sensor	touch, angle, gyro, accelerometer
actuator	DC motor

提案する力制御を用いた滑り適応歩行の概要を図6.2に示す。同図上側のループはパターンジェネレータにより生成された歩容に追従する各軸レベルの制御ループである。下側のループが力制御ループである。ある脚の支持脚期間中、脚先の滑り量がある閾値を越えると得られた加速度情報から推定された路面の局所的な勾配面に対して、脚先により力を瞬間的に付加する。ここで \ddot{r} は脚先加速度、 θ と $\dot{\theta}$ は関節の角度と角速度、 τ は関節トルク、 J^T は胴体から各脚先への転置ヤコビアンである。以後、本章では低レベルの制御としてパターンジェネレータにより生成された歩容軌道を各軸レベルの位置制御により実現するものとする。

6.3. 脚先力制御

6.3.1 路面の勾配推定

脚先での力制御を行う際に必要となる路面の勾配をロボットの各脚先の加速度情報から推定する方法について述べる。図6.3に示すように脚先に生じる加速度は路面に対し平行であると仮定し、路面の法線ベクトルを推定する。 A を観測される脚先加速度ベクトル a_i の集合、 p を推定する路面の法線ベクトル $p = [x_p, y_p, z_p]^T$ とすると $AP = 0$ (式6.1)が成り立つ。その時、推定する路面の法線ベクトル p は $A^T A$ の最小固有値に対する固有ベクトルとして求めることが出来る。

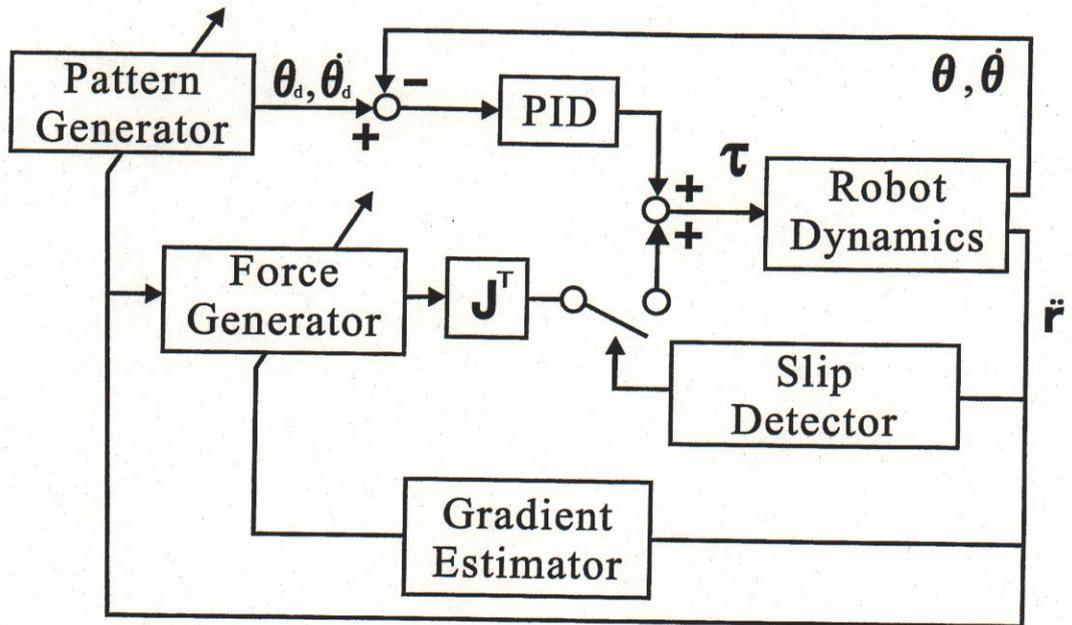


図 6.2 力制御を用いた滑り適応歩行の概要

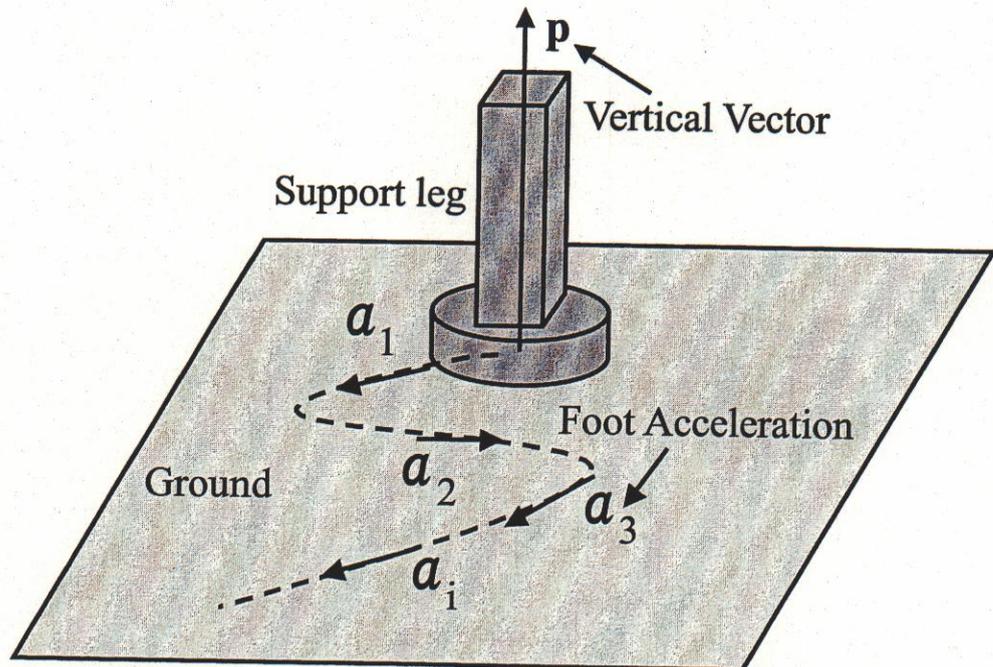


図 6.3 勾配推定

表 6.2 パラメータの説明

$N[N]$	脚先が路面から受ける垂直抗力
$F_s[N]$	脚先が路面に及ぼす力のうち支持脚線と路面法線の為す面への射影
$F_c[N]$	脚先が路面に及ぼす力のうち交差線と路面法線の為す面への射影
$a_s[m/s^2]$	支持脚線方向の滑り加速度
$a_c[m/s^2]$	交差線方向の滑り加速度
$\varphi[rad]$	F_s と路面法線ベクトルの為す角
$\phi[rad]$	F_c と路面法線ベクトルの為す角
μ_d	路面と脚先の動摩擦係数
$f_s[N]$	支持脚線方向への付加力
$f_v[N]$	路面法線方向への付加力
$f[N]$	付加力
$g[m/s^2]$	重力

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

6.3.2 付加力導出と力制御

図 6.4 に右後脚が滑っている場合の脚先加速度と力制御の様子を示す。なお、本章では以後 2 支持脚の接地点を結ぶ線を支持脚線，路面に沿って支持脚線に垂直な線を交差線と呼ぶことにする。図 6.4 を交差線，支持脚線方向から見た図を図 6.5-(a)，図 6.5-(b) にそれぞれ示す。このときの各パラメータは表 6.2 に示す。

脚先の滑りは本来 2 次元的で複雑なため，本稿では支持脚線方向，交差線方向

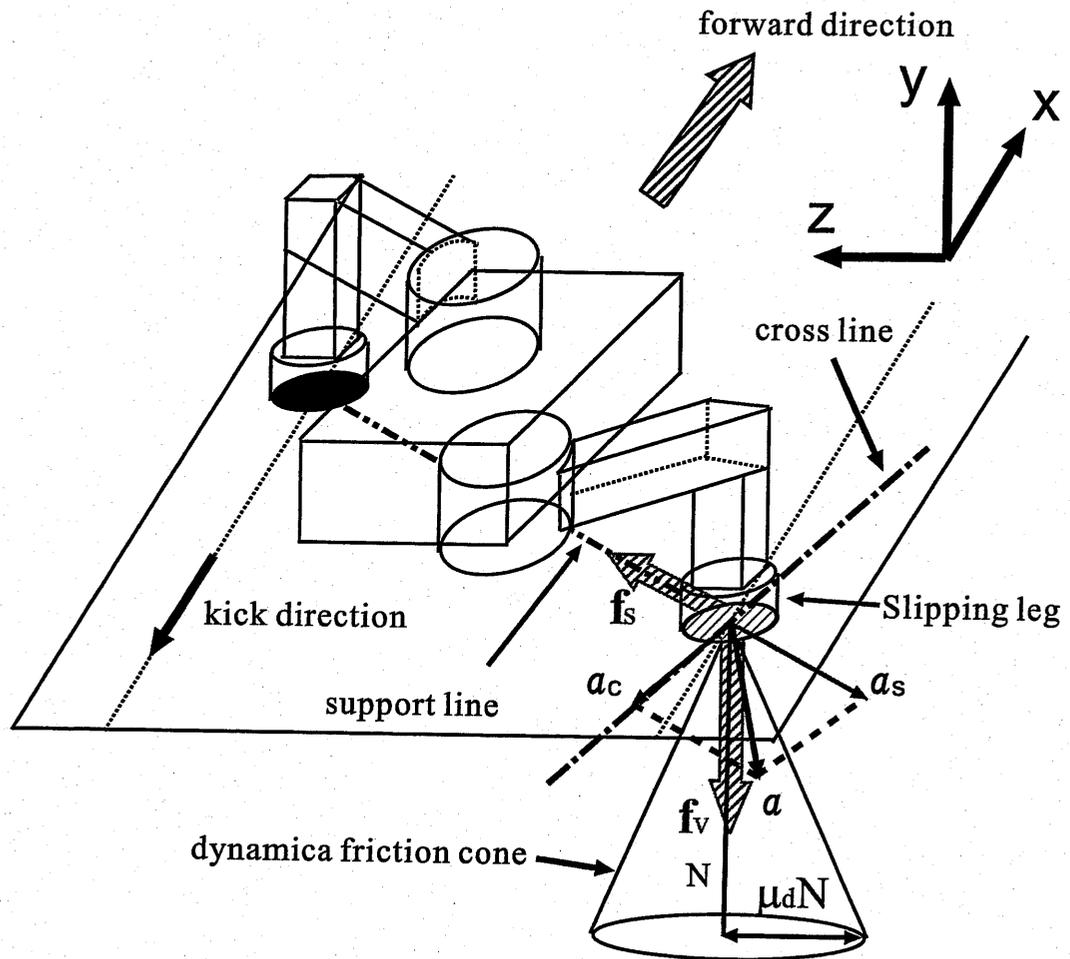


図 6.4 支持脚の力制御

に滑りを分配してそれぞれの方向に必要な付加力を考える。まず、交差線方向の滑りは図 6.5-(a) のように滑り加速度 a_c として現れる。この時必要な付加力は加速度と逆向きに付加すると胴体に回転モーメントを与えることになり、不適切である。よってこの場合路面法線方向に f_v 加えることで脚先に発生する合力を摩擦円錐内に誘導する。このときの滑らない条件は付加力 f_v を用いて式 (6.2) と表現できる。

一方、支持脚線方向の滑りは図 6.5-(b) のように滑り加速度 a_s として現れるが、このとき必要な付加力は支持脚線方向に f_s 付加されているので、 f_s を用いて式 (6.3) と表現できる。また、垂直抗力 N と F_s , F_c の間には自明より式 (6.4), (6.5)

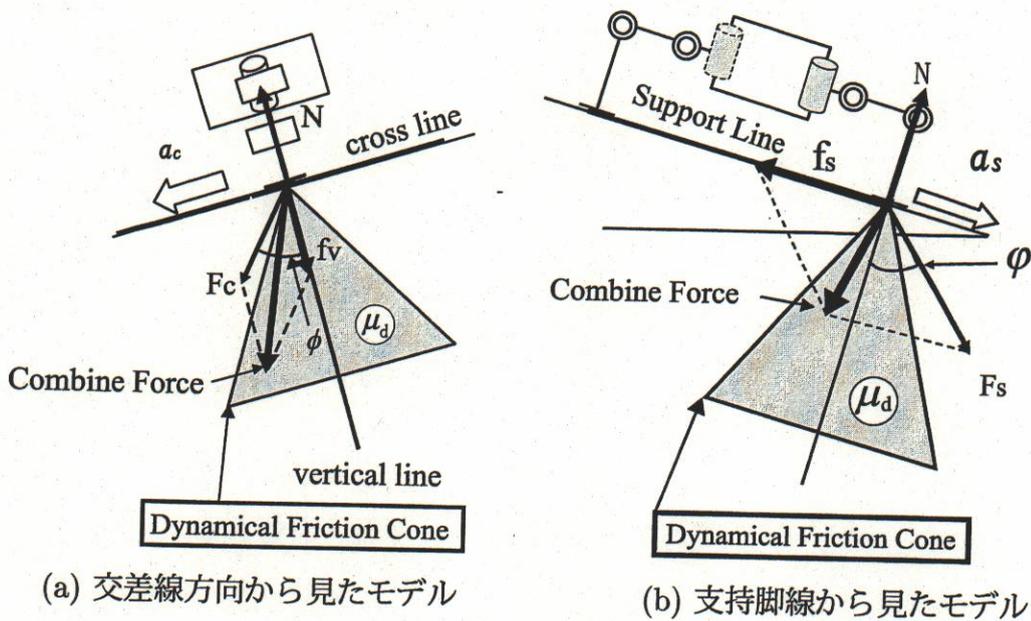


図 6.5 滑り補償

の関係が成り立つ。本研究では外部パラメータを用いない代わりに、滑り出す脚先を $m = \frac{N}{g}$ なる仮想的な質量を持つ物体と考える。これは、ニュートンの法則より力は $F = ma$ であり、脚先に質量が無い場合合力を発生させることが出来ないためである。よって、滑り出す脚先には式 (6.6), (6.7) の運動方程式が成り立つ。今、付加力の目標値をそれぞれ調節ゲイン k_v, k_s を用いて式 (6.8), (6.9) のようにおくと、最終的に式 (6.10)~(6.13) で得られる4つの連立不等式が導出される。これらの不等式を調節ゲイン k_v, k_s 平面において図示すると図 6.6 が得られる。これらのゲインは小さいことが望ましく、この問題は線形計画問題であることが分かる。この不等式中 N はセンサから得られ、 ϕ, φ は脚先が路面に及ぼす力の法線方向との為す角だが、およそ路面の交差線方向、支持脚線方向の傾斜角に等しいので未知のパラメータは動摩擦係数 μ_d のみである。動摩擦係数の値はたかだか $0 < \mu_d < 1$ である。しかも動摩擦係数は静止摩擦係数より小さいので実際には余裕を持った範囲になっている。つまり、滑らないための十分条件となる調整ゲイン k_v, k_s を求めることができる。また、この付加力に必要な関節トルクは以下

の式(6.14)より胴体から各脚先への転置ヤコビアンを用いて計算できる。

$$-\mu_d(N + f_v) < F_c \sin \phi < \mu_d(N + f_v) \quad (6.2)$$

$$-\mu_d(N + f_s) < F_s \sin \varphi + f_s < \mu_d(N + f_s) \quad (6.3)$$

$$F_s \cos \varphi = N \quad (6.4)$$

$$F_c \cos \phi = N \quad (6.5)$$

$$F_c \sin \phi - \mu_d N = ma_c \quad (6.6)$$

$$F_s \sin \varphi - \mu_d N = ma_s \quad (6.7)$$

$$f_v = k_v \frac{ma_c}{\mu_d} \quad (6.8)$$

$$f_s = -k_s ma_s \quad (6.9)$$

$$\mu_d N(k_v - 1) - N \tan \phi(k_v + 1) < 0 \quad (6.10)$$

$$\mu_d N(1 - k_v) + N \tan \phi(k_v - 1) > 0 \quad (6.11)$$

$$\mu_d \left(\frac{Na_c k_v}{g} + (1 + k_s)N \right) + N \tan \varphi(1 - k_s) > 0 \quad (6.12)$$

$$\mu_d \left(N(k_s - 1) - \frac{Na_c k_v}{g} \right) + N \tan \varphi(1 - k_s) < 0 \quad (6.13)$$

$$\tau = J^T(q) \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

$$F = [f, 0]^T$$

6.4. 脚先力制御アルゴリズムの検証

6.4.1 シミュレーション条件

開発した三次元動力学シミュレーション環境を用いて歩行実験を行う。前述した力制御による滑り適応歩容の有効性を確認するため、静止摩擦係数 $\mu = 0.2$ の

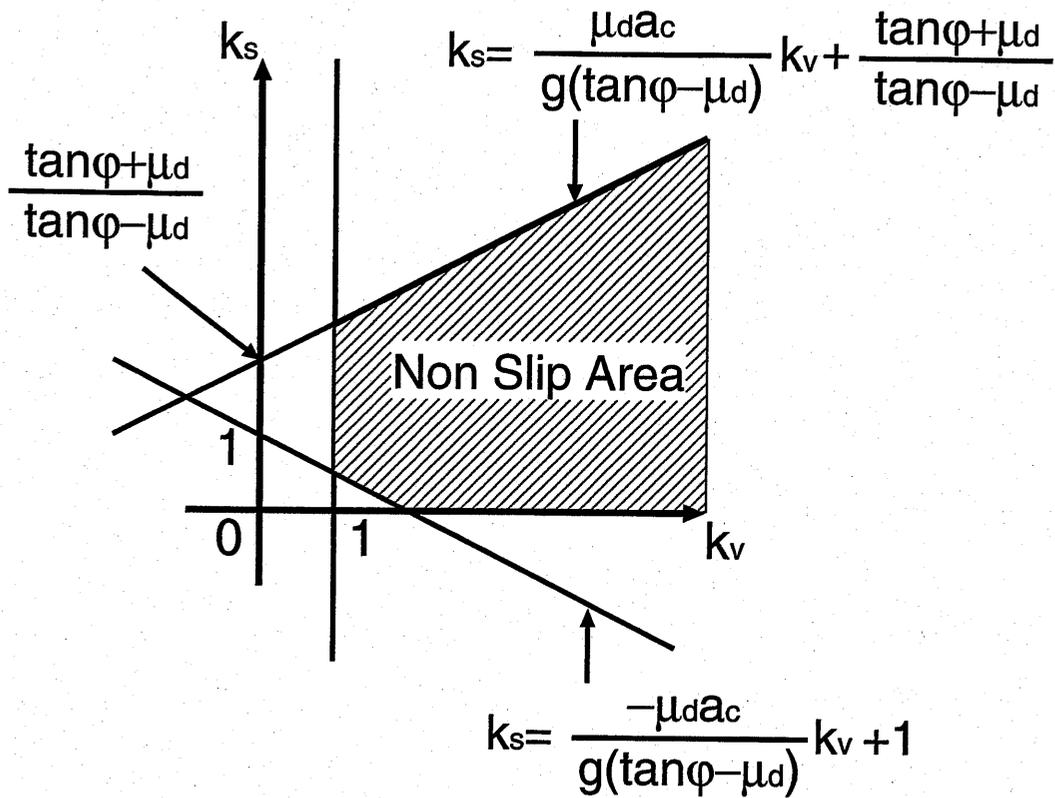


図 6.6 滑らないための条件 (ゲイン k_v , k_s 平面)

滑りやすい傾斜角なしの平面において各軸 PID 制御による歩行と提案する力制御による脚先付加力を加えた歩容 2 種類のシミュレーション実験を行う。経験的にゲイン $k_s = 0.2$, $k_v = 0.2$ とした。ここで参照した trot gait は歩行周期 2[s], 歩幅は 0.15[m] で, 6[s] 後の目標 X 座標は 0.825[m] である。なお, 各関節の PID ゲインは表 6.3 を用いた。これは整地歩行時には十分目標角度に追従する可能な値である。

以後右後脚に関して考察する。右後脚は 0-1[s], 2-3[s], 4-5[s] のとき支持脚となり, それ以外は遊脚となる。

表 6.3 各関節制御PID ゲイン

		Swing	Support
First joint	P[Nm]	15	100
	I[Nm/s]	0	1
	D[Nms]	1.2	1.2
Second joint	P[Nm]	20	150
	I[Nm/s]	0	1
	D[Nms]	1.5	1.5
Third joint	P[Nm]	10	120
	I[Nm/s]	0	1
	D[Nms]	1.5	1.5

6.4.2 シミュレーション結果

図 6.7 に脚先力制御を用いた場合の滑り適応歩行のシミュレーションの様子を示す。図 6.8 は右後脚に加えられた付加力，図 6.9, 6.10 はそれぞれ右後脚，胴体の移動量を示す。また，図 6.11, 6.12 は PID のみの時と力制御ありの時の右後脚先端における加速度の推移を示す。

図 6.9 より右後脚は支持脚期間中である 2-3[s], 4-5[s] において閾値を越える滑りが発生し，その結果図 6.8 に示す力が付加された。その結果，4-5[s]の間では滑りの補償量は比較的小さいものの，2-3[s]間では滑り量が約 1/2 まで改善されており，力制御の有効性が確認できる。また，このことは図 6.11, 6.12 より加速度レベルにおいても確認できる。つまり，力制御が作用している区間 2-3[s], 4-5[s] において PID のみの場合，この期間が右後脚は支持脚期間であるにもかかわらず支持脚線方向，交差線方向ともに同じ方向に加速度が発生している。これはある方向に滑っていることを意味した結果になっている。一方，力制御ありの場合はこの期間中，両方向とも加速度が正負に跨って振動している。これは支持脚の滑りを食い止めるため力制御が作用していると考えられる。

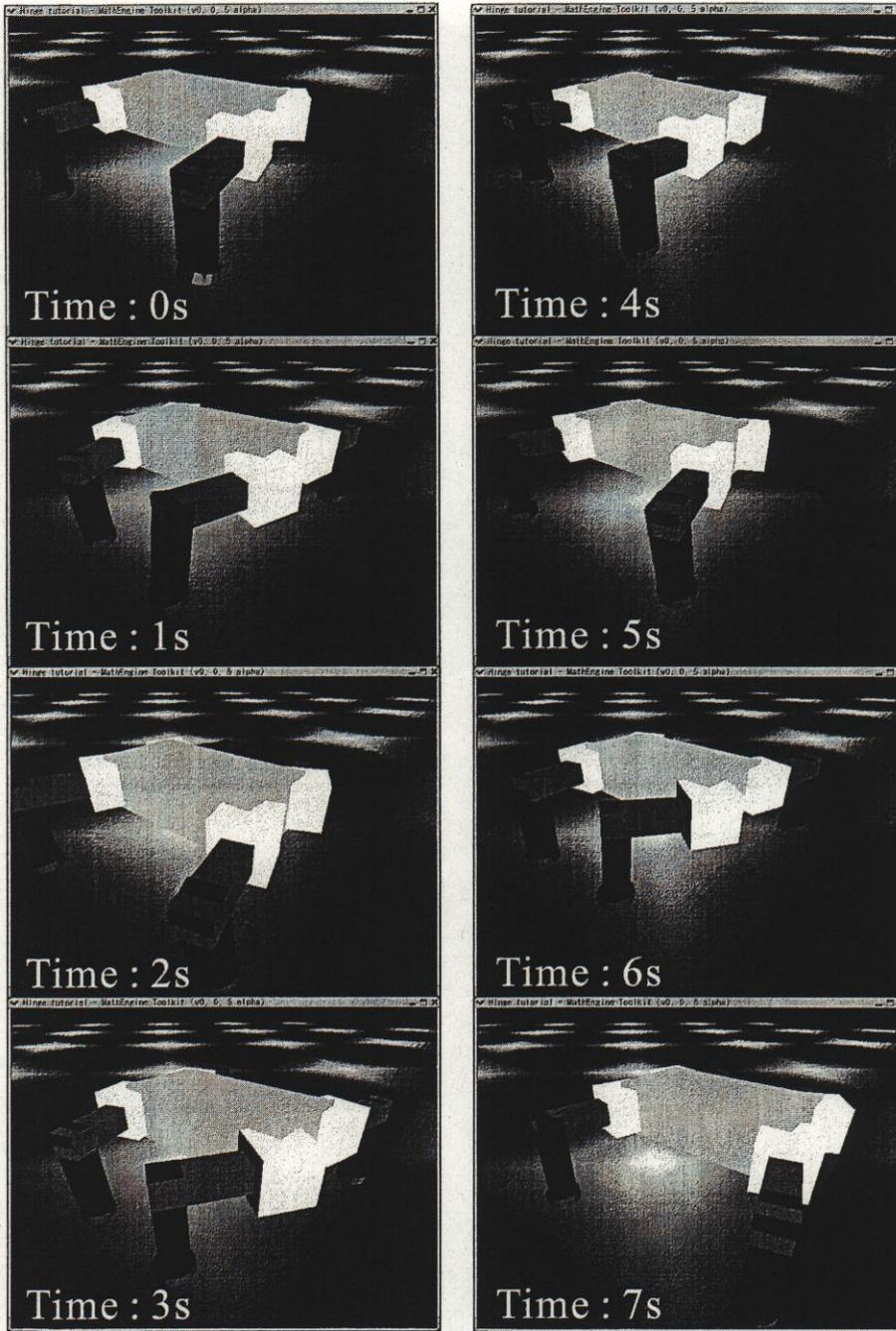


図 6.7 シミュレーションによる力制御を用いた滑り適応歩行実験の様子

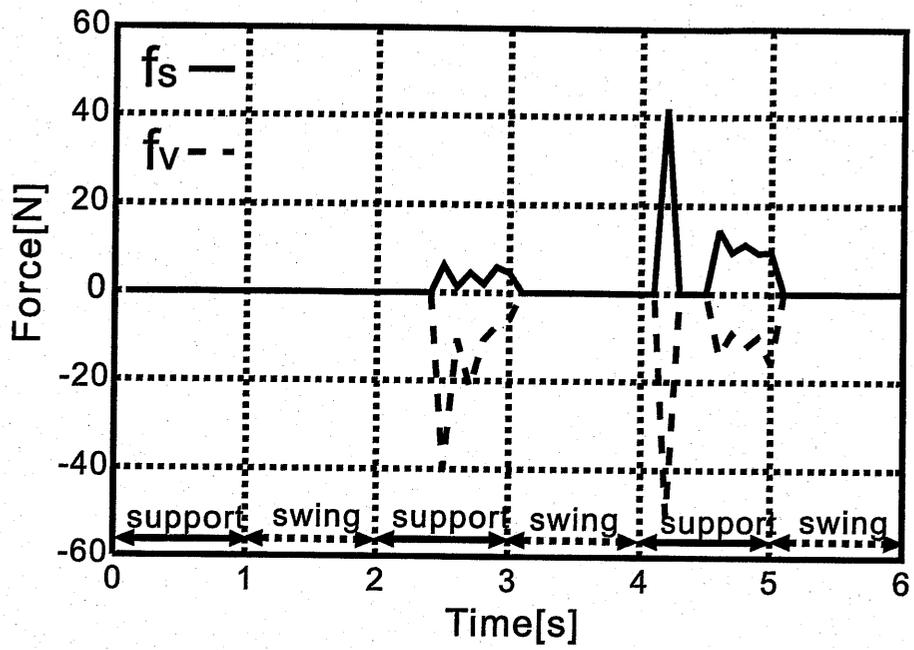


図 6.8 支持脚線, 交差線方向の付加力

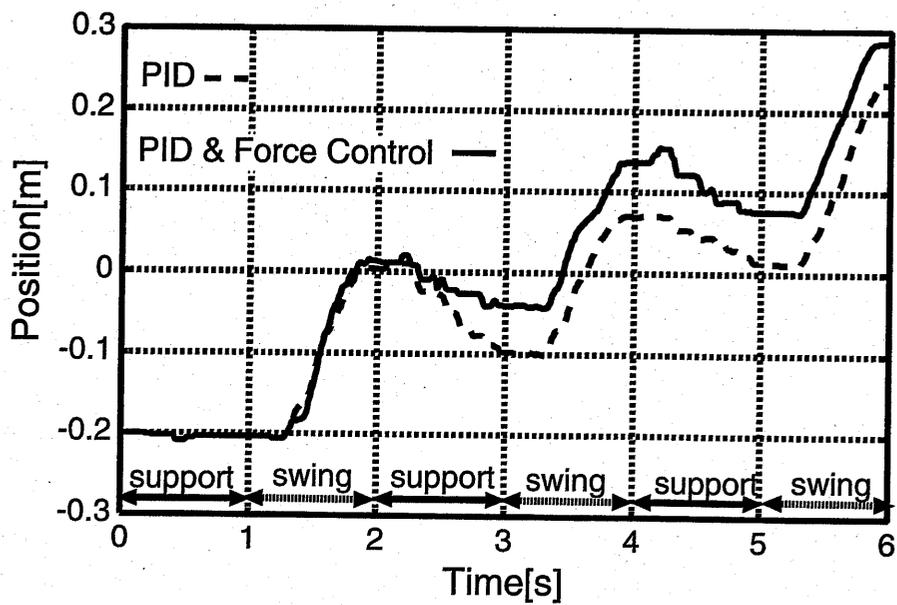


図 6.9 右後脚の X 方向移動距離

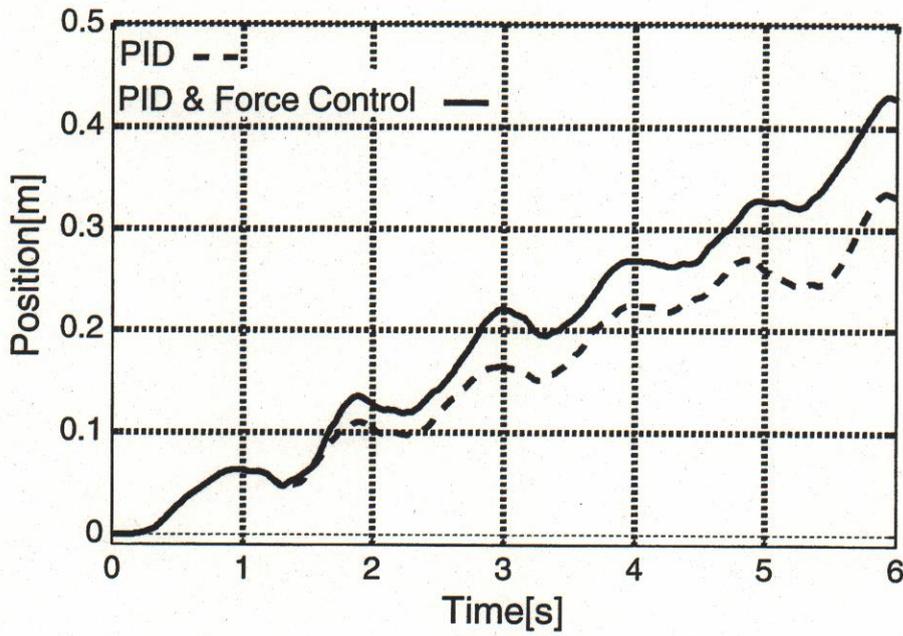


図 6.10 胴体の X 方向移動距離

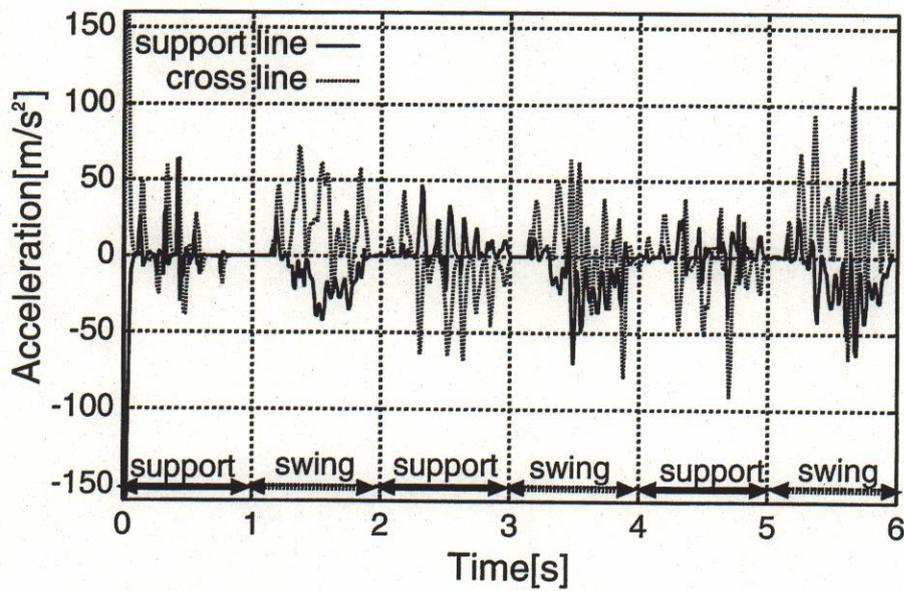


図 6.11 PID 制御時の脚先加速度

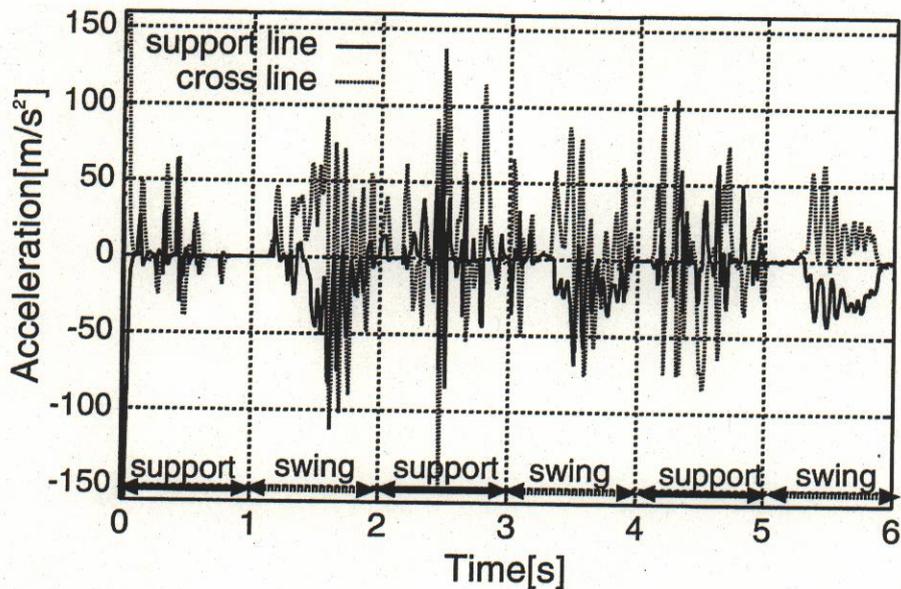


図 6.12 力制御時の脚先加速度

更に図 6.10 より、滑り易い路面のため胴体の移動量は PID のみでは目標の約 40%しか到達できなかつたが、力制御ありの場合は支持脚時における滑りが低減されていることから約 52%に増加していることが分かる。

6.4.3 実機モデルへの応用

力制御による滑り適応歩容を実機モデルに応用して、提案手法の有効性を確認する。実機モデルで用いる歩容は、シミュレーションと同じ、trot gaitで、歩行周期 2[s]、歩幅は 0.15[m]で、10 秒間の歩行を行った。ただし、今回は PID 制御ではなく、CPGによりこの歩容を作り出している。路面は静止摩擦係数約 0.2の滑りやすい傾斜角なしの平面である。図 6.13に力制御を用いた場合の実験の様子を示す。

図 6.14に接地した瞬間から支持動作中の右前脚四歩目の様子を示す。力制御無しの場合(図 6.14-(a))では、支持動作中に後方に滑っていることが分かる。四歩目では約 0.07m 滑っている。これに対して、力制御を用いた場合(図 6.14-(b))では、支持動作中ほとんど滑ってないことが分かる。この図は最も分かりやすい

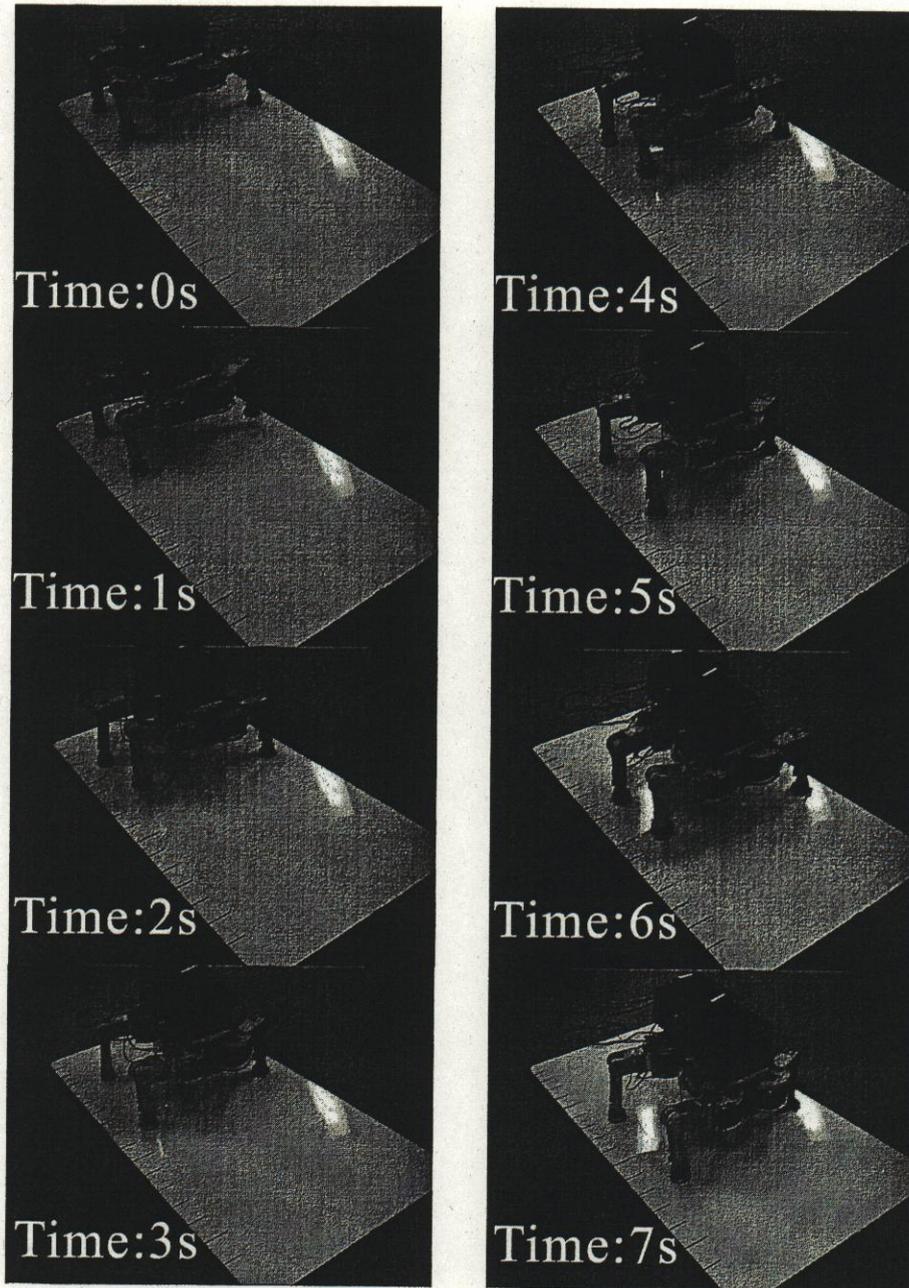
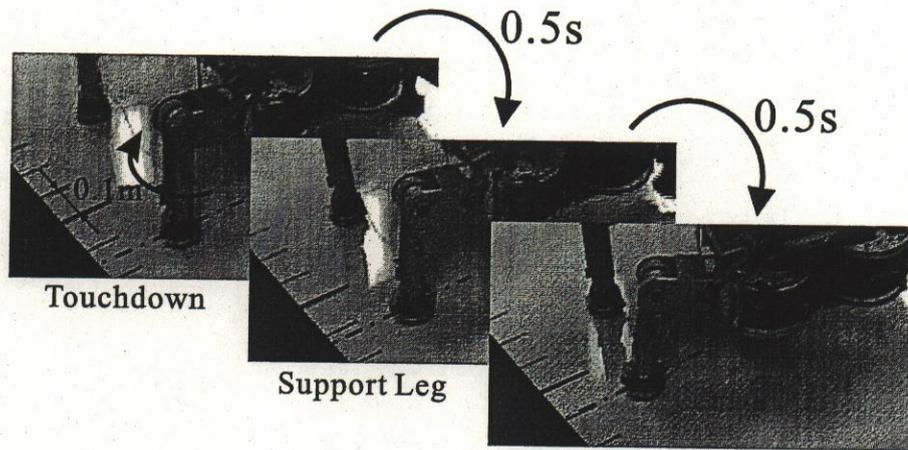
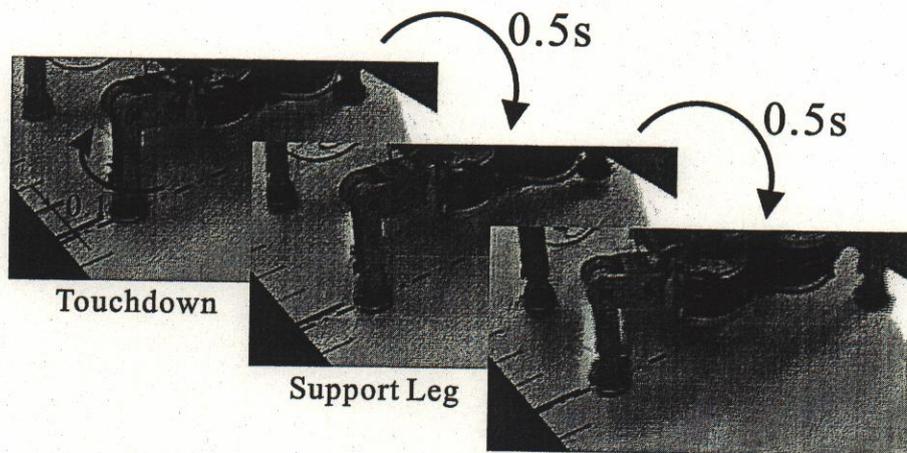


図 6.13 実機モデルによる力制御を用いた滑り適応歩行実験の様子



(a) 力制御無し



(b) 力制御有り

図 6.14 支持脚時の右前脚の様子

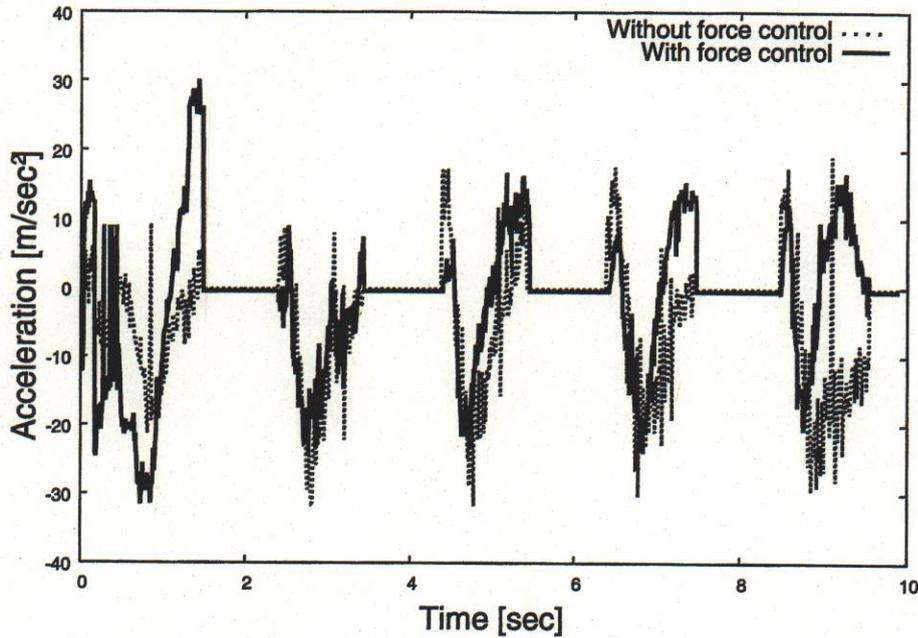


図 6.15 右前脚の脚先加速度

状況を示しており、力制御を用いても滑りは発生している。また、支持脚時の脚先加速度を図 6.15 に示す。全体的に、力制御を用いた場合の方が加速度は少ない、つまり、滑りが抑えられていることが分かる。移動距離に関しては、目標移動距離 1.35m に対して、力制御無しの場合は約 0.8m、力制御有りの場合は約 0.76m と 7% ほど移動距離が減少していた。これについては、力制御無しの場合では前方へも滑っているためである。図 6.16 に力制御無しの場合の右前脚が遊脚から支持脚へ移行したときの様子を示す。接地した瞬間から支持動作に移るのであるが、前方へ滑っていることが分かる。この時の滑り量は 0.05m ほどである。つまり、力制御を用いると前方への滑りも抑えるのに効果があることが分かる。このことは、図 6.15 において前方への加速度が減っていることから分かる。これは、シミュレーションでは、PID 制御で行ったところを実機モデルでは CPG によって歩容を生成することにしたためであると考えられる。実験での歩行速度は約 0.08m と低速であるため、図 5.1 に示すように、摩擦係数が小さいほどエネルギー効率がよくなる傾向がある。速度を上げて実験を行うと違った結果が出ると思われる。ただ、力制御を用いると滑りを抑えるのに効果がある事は十分示されている。さ

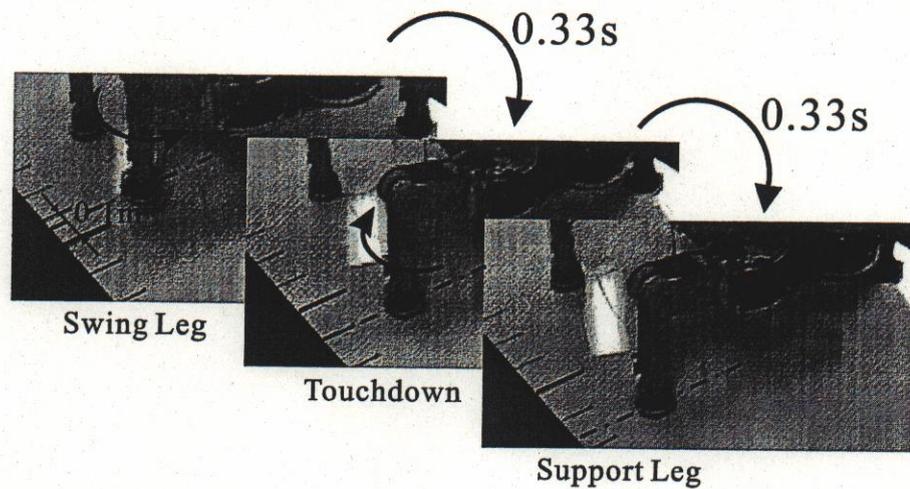


図 6.16 遊脚から支持脚への遷移時の様子

らに、力制御を用いない場合には、各足が不規則に滑ってしまい、直進することが困難であったが、それに比べ、力制御を用いると滑りが抑えられ、結果として、直進性にも向上が見られることが分かった。

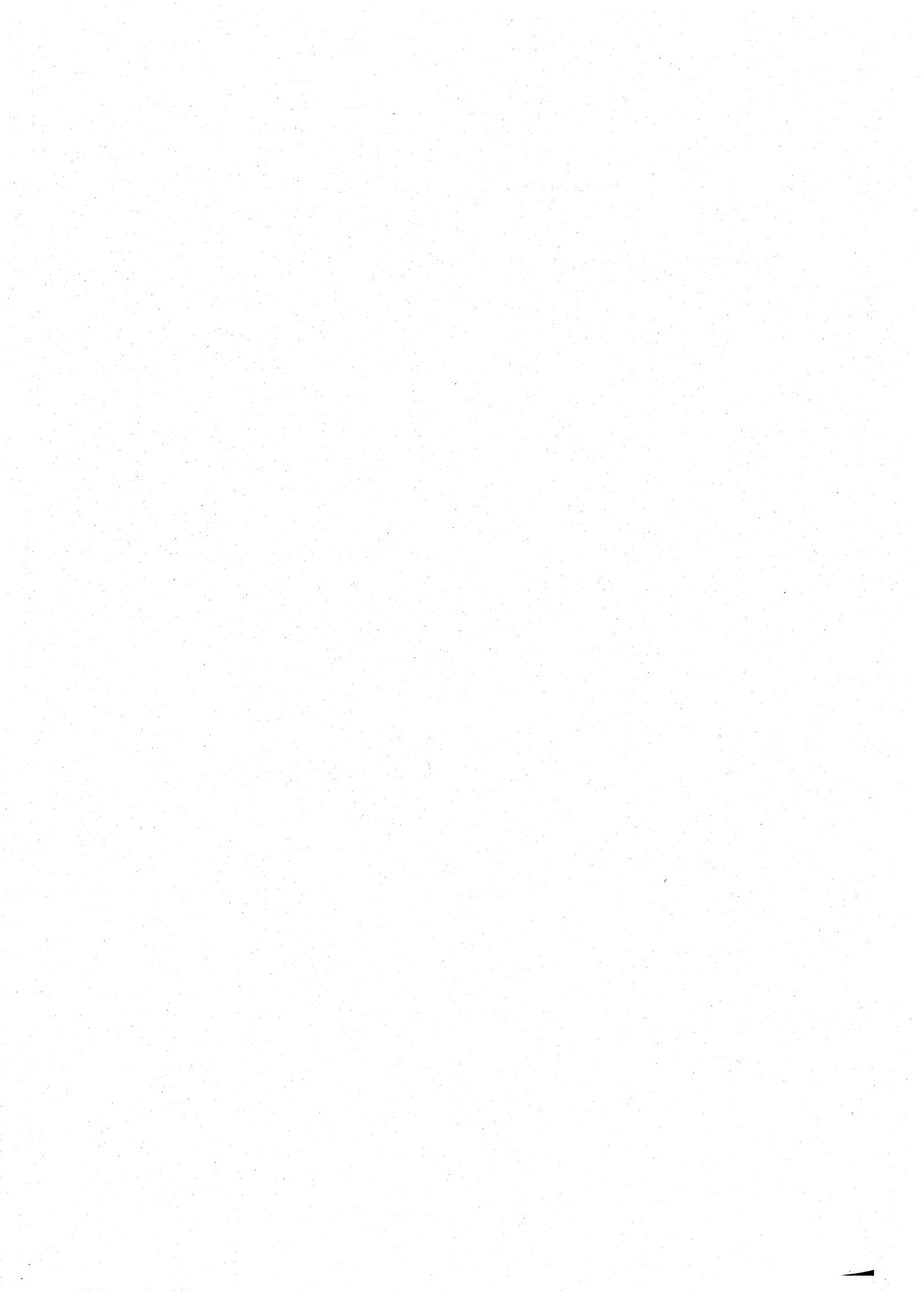
6.5. 本章の結論

本章では、歩行ロボットの脚先加速度情報を利用し、脚先滑りを適応的に補償する手法を提案した。具体的には、脚先の加速度情報より局所的な路面勾配を推定し、この情報から路面に水平な位置制御(蹴り出し動作)と同時に、即座に路面へ力を付加する位置と力のハイブリッド制御を実行するアルゴリズムを提案した。力制御により、脚先が地面に加える力を摩擦円錐内へ引き戻し、滑りを防ぐ効果がある。

本手法の検証に四脚歩行ロボット TITAN-VIII をモデルにシミュレーションを行った結果、脚先の滑りを抑えることができ、移動距離が 12%ほど向上し、本手法の有効性を確認した。また、本手法を実機モデルに応用し、実機モデルでも滑りを抑えるのに効果があることを確認した。本手法の特長は脚先加速度と脚にかかる垂直抗力のみ用い、外部環境のパラメータを必要としない点にある。滑りに適応するように脚先に力を付加することにより、異なる環境への適応歩行が実現

できた。本手法は理論的に斜面にも適応可能であり，斜面や脆弱な路面での応用が期待される。

本手法は従来外乱として扱われていた滑りに対して積極的に対応するという新たな研究対象を提示している。さらに，滑り情報のみ利用して，路面適応歩行を実現したことは，滑り情報の重要性，歩行において脚先の水平方向性分力の重要性を示唆している。



第7章 結論

7.1. 本研究の具体的成果

本研究では、CPG ベース型歩容生成での課題となっていた3つの点（モデルの三次元化，パラメータの決定，滑りへの適応）を課題と掲げた．ここで対象とした路面環境は，CPG ベース型歩容生成で有利と考えられる整地，斜面・摩擦変化，小さな凹凸の3つの環境に限定した．本研究は，路面環境の変化に柔軟に対応する歩容生成手法の構築を目的とし，リズム発生機構と反射機構を用いたCPG ベース型制御による環境適応歩容生成手法を提案し，実機モデルによる整地・斜面の適応歩容を実現した．さらに，脚先滑り情報に基づく滑り適応歩容を提案し，路面摩擦の異なる環境での適応歩容を実現した．以下に，各章において具体的に得られた成果をまとめる．

CPG ベース型制御による三次元適応歩容生成手法の提案 (第3章)

ロボットの歩行運動の実現において重要な点は，歩行運動という周期的運動の持続であり，さらに，歩行運動は矢状面内の運動と前頭面内の運動との協調運動である．三次元的に安定した歩行運動の実現には，矢状面内の運動と協調を保つように前頭面内の運動を制御し，且つ周期的運動を継続する必要がある．複数の神経振動子を相互に結合したリズム発生機構を中心とした神経振動子結合モデルを用い，各センサからのフィードバック入力を利用した反射運動による矢状面内の周期的な歩行パターンの生成と前頭面内の左右揺動運動との協調を行う三次元的歩行生成手法を示した．また，神経振動子経路の姿勢反射の導入による斜面への拡張を示した．従来の歩行ロボットの研究で常識とされた軌道計画或いは軌道

計画ベースでの適応は存在せず、本手法ではリズム発生機構と環境との相互作用の結果として、動的な適応が自律的に生成される。実機モデルに本手法を応用し整地・斜面動歩行を実現することにより本手法の有効性を確認した。

エネルギー効率に基づく CPG パラメータ決定手法の提案 (第 4 章)

ロボットの制御アルゴリズムの開発環境として高速な三次元動力学シミュレーション環境の必要性について述べ、ゲーム開発用に開発された動力学演算ツールキットを用いることにより高速三次元動力学シミュレーション環境を開発した。この環境では、16 自由度を有する脚式ロボットの歩行シミュレーションが平らな面との接触を含め 1 TimeStep あたり動力学演算に 6.23[ms]、干渉検査に 0.32[ms] (CPU : Pentium VI 2GHz OS: Linux) 程度で計算可能であり、レンダリングを含めても TimeStep を 10ms とすると実時間でのシミュレーションが可能である。

開発したシミュレーション環境を用い歩容パターンとエネルギー効率との関係を明確にした。ロボットの幾何学的条件により最適な歩容パターンが存在するという知見を得た。また、エネルギー効率の観点から歩行速度に対する最適な CPG パラメータの決定手法を提案した。

路面摩擦が歩容およびエネルギー効率に及ぼす影響 (第 5 章)

摩擦条件が歩容およびエネルギー効率にどのような影響を与えるかを検証した。その結果から、摩擦条件に関係なく速度上昇に伴いエネルギー効率は上昇する、滑りやすい路面では歩幅が小さく歩行周期の短い歩容が有効であり、滑りにくい路面では歩幅が大きくゆっくりした歩容が効率的である、摩擦が異なる環境では効率の良い歩容形態にも差があるという知見を得た。このことは、摩擦状態・歩行速度により歩行形態を変えることで効率の良い歩行が可能である事を意味する。この結果を基に、滑り反射を導入し、脚先の加速度情報を利用した CPG 経由の滑り適応歩容を提案し、歩行周期と歩幅を滑り (路面摩擦) に適応するように変更することにより、摩擦が変化する環境への適応歩行を実現した。シミュレーションにより提案手法の有効性を確認し、実機モデルを用いて滑り反射を実現するこ

とにより実機モデルにも有効であることを確認した。

力制御を用いた滑り適応歩容の提案 (第 6 章)

脚先の滑りはそれが路面に及ぼす力が摩擦円錐からはみ出すことにより起きる。付加的に脚先に力を加えることで、合力を摩擦円錐内に誘導し滑りを抑える力制御による滑り適応歩容を提案した。具体的には、脚先が滑る際の脚先加速度情報より脚が接地する路面の局所的な勾配を推定し、瞬間的に路面へアクチュエータにより力を付加するというものである。この手法が脚先滑りの低減と胴体の移動量向上に効果があることをシミュレーションにより確認した。実機モデルに応用することにより、実機モデルでも滑りを抑えるのに効果があることを確認した。本手法の特長は脚先加速度と脚にかかる垂直抗力のみを用い、外部環境のパラメータを必要としない点にある。

滑り情報のみ利用して、路面適応歩行を実現したことは、滑り情報の重要性、歩行において脚先の水平方向成分力の重要性を示唆している。

7.2. 課題と今後の展望

本論文では、動的で非常に柔軟な歩行を行う動物の神経系に注目し、リズム発生機構と反射機構を組み合わせた CPG ベース型制御による環境適応歩容について述べてきた。CPG はある程度の外乱は引き込み特性により吸収することが可能であるが、それ以上の場合に対応する為には、パラメータの変更や神経振動子の結合の切り替えを如何に行うかが重要になる。

Drew ら [66] は、神経生理学実験に基づいて猫が障害物をまたぎ越える際の遊脚の運動調整に関して、視覚に基づいて CPG への指令入力を調整するモデルを提案している。CPG のモデルとして神経振動子を用いた場合、CPG への指令入力は神経振動子への外部入力となる。筆者ら [67] も、上位中枢からの刺激を利用して障害物のまたぎ越えるを静歩行では実現しているが、本論文で提案した手法は下位レベルのみで行う適応歩容であり、外部入力に対しての考察は行っていない。

視覚センサ等を使用することにより下位の歩行制御だけではなく、上位中枢からの随意的な運動指令や姿勢制御などに対応するシステムの構築が不可欠となる。また、本論文ではデューティ比を変化せずとも最適な歩容可能であることを示したが、生物においては歩行速度に応じてデューティ比も変化することが確認されている。この点についてデューティ比の変化に伴うエネルギー効率変化、歩容パターンの遷移が生物とロボットで如何に異なるかの検討も重要であり、ロボットとして生物ではできない、ロボットだからこそできる効率の良い歩容の開発も重要な課題である。

本研究では従来外乱と考えられていた脚先の滑りに着目し、滑り適応歩容を提案した。これにより滑りの重要性が示唆され、今度、砂地などのやわらかい路面、泥濘などの脆弱な路面への拡張が考えられる。また、近年の人の歩行研究でも接地時の足裏の接線方向の力が重要ではないかと考えられている [68]。さらに、筆者ら [69] も人間の足指機能を調査した結果、歩行においては足裏の接線方向の力が重要ではないかと考えるようになった。今後、滑りの観点から人の歩行を計測・解析することにより得られた知見をロボットの歩容に応用することにより新たなアルゴリズムの開発につながると考えられる。

以上を実現することによって、より複雑な路面環境への適応可能な歩容生成手法の確立が期待される。

謝辞

本論文に書き記した一連の研究は、筆者が奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科在学中に、ロボティクス講座 (小笠原研究室) において執り行われたものです。この研究は多くの方々のお力添えにより実現することができました。ここでお礼を申し上げたいと思います。

本学 情報科学研究科 小笠原 司 教授は、修士課程から4年半にも渡って未熟な筆者を懇切な御指導と御助言によって、ここまで導いて頂きました。何とか本論文を執筆することができたのも、ひとえに小笠原教授の忍耐強いお力添えがあったからだと思います。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 今井 正和 助教授 (現 鳥取環境大学 教授) には、研究会などで多くの鋭いご質問を頂きました。研究の位置付けと研究方針を明確にすることができたのも、先生の質問によるところが大きいと思います。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 松本 吉央 助教授には、研究会等で厳しくも親切な御助言を頂きました。また、学会発表前には懇切丁寧な御指導、御助言を頂きました。何とか人並みに発表ができるようになったのも、ひとえに松本助教授の忍耐強い御指導のおかげだと思います。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 中村 恭之 助手 (現 和歌山大学 助教授) には、研究の取りまとめ方のように一般に軽視されがちな部分について様々な知識を御教授いただきました。この知識は今後研究を進めていく上でますます重要になると思います。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 上田 淳 助手には、普段からディスカッションして頂き、筆者のあいまいな考えを明確にすることができました。また、本論文を丁寧な添

削もしてくださり、本論文の完成に導いてくれました。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 石井 信 教授，杉本 謙二 教授 には，お忙しいところ博士論文の審査委員になって頂きまして，適切な御助言を頂きました。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 上田 悦子 さん には，日頃から人生の先輩として色々と貴重なアドバイスを頂き，良き相談相手になって頂きました。同期入学で博士前期過程からの4年半共に学生生活を過ごし，同時に博士課程を修了することができ大変うれしく思います。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 豊田 篤史 君（現 SANYO）には，シミュレーション環境の構築の手伝いをして頂きました。何とか利用可能なシミュレーション環境を構築することができました。ありがとうございました。

本学 情報科学研究科 出口 将人 君（現 リコー）には，力制御による滑り適応歩容の実装・実験をして頂きました。筆者の知識不足のせいで，なかなか有益なアドバイスができませんでしたが，何とか一手法を確立できました。ありがとうございました。

また，筆者が在学中，研究生生活/日常生活を様々な面で支えて頂いた本学 情報科学研究科 ロボティックス講座の卒業生，在学生の皆様に感謝致します。また，研究生生活/物品購入などが滞り無く行えるよう配慮して下さいました歴代秘書の方々に感謝致します。

最後に物心両面で筆者の学生生活を支えてくれた両親に深く感謝し，論文の結びとしたいと思います。

参考文献

- [1] 山本欣市, 柿倉正義. 極限作業ロボット そのメカニズムと設計技術. 工業調査会, 1992.
- [2] 藤江正克. 極限作業における4足歩行ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 366-371, 1993.
- [3] S. Kajita. Research of biped robot and humanoid robotics project (hrp) in japan. In *The Fourth International Conference on Machine Automation (ICMA '02)*, pp. 1-8, 2002.
- [4] 大須賀, 高森. 防災とレスキュー総論. 日本機械学会第75期通常総会講演会資料集(VI), pp. 636-639, 1998.
- [5] 古荘. 歩行ロボットの研究展開. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 306-313, 1993.
- [6] 米田. [特集] リファレンスオブリファレンス: 脚移動. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 7, pp. 897-901, 1998.
- [7] J. K. Hodgins and M. H. Raibert. Adjusting step length for rough terrain locomotion. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3, pp. 289-298, 1991.
- [8] S. Kajita and K. Tani. Adaptive gait control of a biped robot based on real-time sensing of the ground. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 570-577, 1996.

- [9] J. Yamaguchi, N. Kinoshita, A. Takanishi, and I. Kato. Development of a dynamic biped walking system for humanoid –development of a biped walking robot adapting to the humans' living floor –. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 232–239, 1996.
- [10] C. M. Chew, J. Pratt, and G. Pratt. Blind walking of a planar bipedal robot on sloped terrain. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 381–386, 1999.
- [11] S. M. Willard and R. A. Grupen. Building walking gaits for irregular terrain from basis controllers. In *Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 481–486, 1997.
- [12] 木村浩. 4足歩行ロボットの動歩行について. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 70–76, 1993.
- [13] 米田, 飯山, 広瀬. 四足歩行機械のスカイフックサスペンション制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 7, pp. 1066–1071, 1994.
- [14] M. Buehler, R. Battaglia, A. Cocosco, G. Hawker, J. Sarkis, and K. Yamazaki. Scout: A simple quadruped that walks, climbs and runs. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1707–1712, 1998.
- [15] W. Ilg, J. Albiez, H. Jedele, K. Berns, and R. Dillmann. Adaptive periodic movement control for the four legged walking machine bisam. In *Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 2354–2359, 1999.
- [16] U. Saranli, M. Buehler, and D. E. Koditschek. Rhex: A simple and highly mobile hexapod robot. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 616–631, 2001.

- [17] J. G. Cham, J. Karpick, J. E. Clark, and M. R. Cutkosky. Stride period adaptation for a biomimetic running hexapod. In *Proceedings of International Symposium on Robotics Research*, pp. 77–87, 2001.
- [18] G. S. Stent, W. B. Jr. Kristan, W. D. Friesen, C. A. A. Ort, M. Poon, and R. L. Carabrese. Neuronal generation of the leech swimming movement. *Science*, Vol. 200, pp. 1348–1357, 1978.
- [19] J. T. Bachanam and S. Grillner. Newly identified glutamate interneurons and their role in locomotion in lamprey spinal cord. *Science*, Vol. 236, pp. 312–314, 1987.
- [20] J. J. Collins and I. Stewart. Coupled nonlinear oscillators and the symmetries of animal gaits. *Nonlinear Science*, Vol. 3, pp. 349–392, 1993.
- [21] 佐藤. 「脳・神経と行動」: 運動プログラムと行動出力. 岩波書店, 1996.
- [22] G. Taga, Y. Yamaguchi, and H. Shimizu. Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators. *Biological Cybernetics*, Vol. 65, pp. 147–159, 1991.
- [23] G. Taga. A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion ii. real-time adaptability under various constraints. *Biological Cybernetics*, Vol. 73, pp. 113–121, 1995.
- [24] 長谷, 山崎. 2足歩行運動を生成する神経系構造の自律的獲得. 日本機械学会論文誌C編, Vol. 64, No. 625, pp. 3541–3547, 1998.
- [25] 宮腰, 多賀, 國吉, 長久保. 神経振動子を用いた三次元2足足踏みシミュレーション- ヒューマノイドの実世界内行動を目指して-. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 87–93, 2000.
- [26] 秋山, 木村. 神経振動子を用いた四足歩行- ペース, トロットの實現-. 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 227–228, 1995.

- [27] H. Kimura, K. Sakurama, and S. Akiyama. Dynamic walking and running of the quadruped using neural oscillators. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 50–57, 1998.
- [28] K. Tsujita, A. Onat, K. Tsuchiya, and Y. Kawano. Autonomous decentralized control of a quadruped robot locomotion using oscillators. In *Proceedings of International Symposium on A-Life and Robotics*, pp. 703–710, 2000.
- [29] A. J. Ijspeert, J. C. Hallam, and D. Willshaw. From lampreys to salamanders –evolving neural controllers for swimming and walking. In *Proceedings of SAB98*, pp. 390–399, 1998.
- [30] M. A. Lewis, R. Etienne-Cummings, A. H. Cohen, and M. Hartmann. Toward biomorphic control using a custom a vlsi cpg chips. In *Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 1289–1295, 2000.
- [31] H. J. Chiel R. D. Beer and L. S. Sterling. An artificial insect. *American Scientist*, Vol. 79, pp. 444–452, 1991.
- [32] 広瀬茂男, 竹内裕喜. ローラウオーカ: 新しい脚-車輪ハイブリッド移動体の提案. 日本機械学会誌 (C編), Vol. 62, No. 599, pp. 242–248, 1996.
- [33] 広瀬茂男, 米田完. 実用化 4 足歩行機械の開発に向けて. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 58–64, 1993.
- [34] 広瀬茂男, 塚越秀行, 米田完. 不整地における歩行機械の静的安定性評価基準. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 8, pp. 1076–1082, 1998.
- [35] 佐野明人, 古荘純次. 角運動制御による 2 足歩行ロボットの 3 次元動歩行. 計測自動制御学会論文集, Vol. 26, No. 4, pp. 459–466, 1990.
- [36] 木村浩, 下山勲, 三浦宏文. 四足歩行ロボットの力学的解析. 日本ロボット学会誌, Vol. 6, No. 5, pp. 367–378, 1988.

- [37] M. Vukobratovic, A. A. Frank, and D. Juricic. On the stability of biped locomotion. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. VME-17, No. 1, 1970.
- [38] 高西淳夫. 上体の運動によりモーメントを保証する2足歩行ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 348-353, 1993.
- [39] M. Vukobratovic (加藤一郎・山下忠訳). 歩行ロボットと人工の足. 日刊工業新聞社, 1975.
- [40] 千葉康徳, 小山角太郎, 野波健蔵, 内田洋彰. フィードバック誤差学習に基づく適応学習形2自由度制御系を用いた4足歩行ロボットの制御. 日本機械学会論文集(C編), Vol. 61, No. 581, 1995.
- [41] 市川真吾, 石黒章夫, 内川嘉樹. 進化的戦略を用いた6脚歩行ロボットの協調的脚運動の獲得. 第9回自律分散シンポジウム, pp. 145-148, 1997.
- [42] 小島一恭, 伊藤榮信. GAによる8脚歩行ロボットの歩行動作の獲得. 第10回自律分散システム・シンポジウム, pp. 291-294, 1998.
- [43] 牛尾将蔵, Mikhail Svinin, 上田完次. 強化学習による多足ロボットの自律的行動獲得. ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, pp. 2P2-27-031, 1999.
- [44] 安達弘典, 小山内範穂, 中村竜也, 中野栄二. 脚に設置された力センサを用いた4脚歩行ロボットの適応歩容. 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 6, pp. 707-717, 1993.
- [45] 梶沢光隆, 加賀美聡, 稲場雅幸, 井上博允. 四脚ロボットにおける逆台形歩容を用いた階段の昇降. 第17回日本ロボット学会学術講演会, pp. 127-128, 1999.
- [46] 伊藤宏司. 歩行運動とリズム生成. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 320-325, 1993.

- [47] M.L.Shik and G.N.Orlovsky. Neurophysiology of locomotor automation. *Physiol Review*, Vol. 56, pp. 465–501, 1976.
- [48] 川人光男. 脳の計算値論. 産業図書株式会社, 1996.
- [49] 銅谷, 吉澤. 神経回路網における運動パターンの記憶. 電子情報通信学会技術研究報告 (MBE), Vol. 87, No. 141, pp. 293–300, 1987.
- [50] K. Tsutsumi and H. Matsumoto. Ring neural network que a generator of rhymic oscillation with period control mechanism. *Biological Cybernetics*, Vol. 51, pp. 181–194, 1984.
- [51] J. S. Bay and H. Hemami. Modeling of a neural pattern generator with coupled nonlinear oscillatoers. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, BME*, Vol. 34, No. 4, pp. 297–306, 1987.
- [52] H. Yuasa and M. Ito. Coordination of many oscillators and generation of locomotory patterns. *Biological Cybernetics*, Vol. 63, pp. 177–184, 1990.
- [53] K. Matsuoka. Susained osillations generated by logical. *Biological Cybernetics*, Vol. 52, pp. 367–376, 1985.
- [54] 医学大辞典. 南山堂, 1998.
- [55] O. Andersson and S. Grillner. Peripheral control of the cat's step cycle. ii entrainment of the central pattern generators for locomotion by sinusoidal hip movements during fictive locomotion. *Acta Physiologica Scandinavica*, Vol. 118, pp. 229–239, 1983.
- [56] 広瀬茂男, 米田完. 4足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成. 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 3, pp. 267–275, 1991.
- [57] 広瀬茂男, 有川敬輪. 研究用プラットフォームとしての普及型歩行ロボット TITAN-VIII の開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 8, pp. 1191–1197, 1999.

- [58] D.F.Hoyt and C.R.Taylor. Gait and the energetics of locomotion in horses. *Nature*, Vol. 292, No. 16, pp. 239-240, (1981).
- [59] 金広文男, 稲葉雅幸, 井上博允. ゲーム用高速動力学演算パッケージを用いたロボットボディの仮想化. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2001, pp. 2P2-H3, (2001).
- [60] M. Williamson. Neural control of rhythmic arm movements. *Neural Networks*, Vol. 11, pp. 1379-1394, 1998.
- [61] S. Miyakoshi, M. Yamakita, and K. Furata. Juggling control using neural oscillators. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1186-1193, 1994.
- [62] K. Hase and N. Yamazaki. Computational evolution of human bipedal walking by a neuro-musculo-skeletal model. *Artificial Life and Robotics*, Vol. 3, pp. 133-138, 1999.
- [63] 伊藤聡, 湯浅秀男, 伊藤宏司. エネルギー消費による四足歩行パターン遷移の発振器-力学モデル. 計測自動制御学会論文集, Vol. 32, No. 11, pp. 1535-1543, 1996.
- [64] 伊藤宏司, 伊藤正美. 生体とロボットにおける運動制御. 計測自動制御学会, pp. 146-164, 1991.
- [65] 山崎信寿, 長谷和徳. 自由歩行における歩調・歩幅の生体力学的決定基準. バイオメカニズム, Vol. 11, pp. 179-189, 1992.
- [66] T. Drew, W. Jiang, B. Kably, and S. Lavoie. Role of the motor cortex in the control of visually triggered gait modifications. *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, Vol. 74, pp. 426-442, 1996.
- [67] 竹村裕, 松本吉央, 今井正和, 小笠原司. リズム生成に基づく歩行ロボットの跨ぎ越え動作の生成. 第18回日本ロボット学会学術講演会予講習, pp. 211-212, 2000.

- [68] 中西義孝, 日垣秀彦, 高嶋樹. 住環境評価としての床反力計の応用. 日本機械学会第二回福祉工学シンポジウム講演論文集, pp. 93-94, 2002.
- [69] H. Takemura, H. Iwama, A. Khiat, J. Ueda, Y. Matsumoto, and T. Ogasawara. of the toes role in human walk by a toe elimination and pressure measurement system. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2003.