

Title	神経振動子を用いたヒューマノイドロボットの動作生成と制御
Author(s)	村井, 真也
Citation	
Issue Date	2007-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/3601
Rights	
Description	Supervisor: 丁 洛榮, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

神経振動子を用いたヒューマノイドロボットの 動作生成と制御

北陸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

村井 真也

2007 年 3 月

修 士 論 文

神経振動子を用いたヒューマノイドロボットの 動作生成と制御

指導教官 丁 洛榮 助教授

審査委員主査 丁 洛榮 助教授
審査委員 松澤 照男 教授
審査委員 徳田 功 助教授

北陸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

510101 村井 真也

提出年月: 2007 年 2 月

概要

近年、日本において、高齢化が急速に進み、労働者人口の減少が大きな問題となっている。2020年には、就業可能人口が予想就業者数を200万人強上回り、労働力不足が顕在化する。特に、労働生産性の低い第3次産業の就業者数が年々伸び続けており、労働力の確保を行うためには、第3次産業の労働生産性を向上させることが一つの解決方法となってくる。将来のロボット市場規模予測では、現在主力の産業用ロボットの割合が減り、第3次産業向けロボットの割合が大幅に増加しており、将来的にロボットによる第3次産業の労働生産性向上が期待されている。しかし、現在存在するロボットの多くは、コストが高く、しかも限られた空間でしかタスクを行うことができないため、現状では第3次産業で利用できるロボットは非常に少ない。このため、実環境に対する適応性と自律性を持ったロボット制御を行うことが、現在のロボット工学の最大の関心であり、社会からも第3次産業で利用できるロボットが求められている。

多くのロボットが存在する中、ヒューマノイドロボットは、人間に似た形状をしているため、人間が生活している環境でそのまま利用でき、今まで人間が行ってきているタスクの代行も容易に行えるといった特徴を持つ。そのため、ヒューマノイドロボットは、福祉や危険地帯での作業など多方面で利用可能であり、ロボットを使用するためのインフラ整備を新規に行う必要がない。しかし、このような目的で使用するためには、実環境で2足歩行を実現できなければならない。そのため、現在のヒューマノイドロボットの研究では、実環境下における歩行の実現に向けた技術開発が行われている。

このような技術開発において注目されているのが、生物の運動生成プロセスを模範した制御システムである。動物の歩行は、比較的下位レベルの制御機構が関与していると考えられている。これらの周期的運動は、基本的にリズム運動と四肢間の協調制御で構成されている。このリズム運動を生成しているのが、脊髄の中にある中枢パターン生成器(以下CPG: Central Pattern Generator)であると考えられている。また、四肢間の協調制御も、各肢にあるCPGのネットワークにより実現されていると考えられている。CPGは、小脳・脳幹の上位中枢から持続入力を受けることで活動を行うが、同時に末梢からの入力や他のCPGからの入力によっても影響される。これらの刺激によりCPGはリズムパターンを生成し、その出力は、介在ニューロンを介して屈筋・伸筋の運動ニューロンに伝達される。また、運動ニューロン・介在ニューロンレベルで、負荷に対する補償や適切な反射回路の選択が主に小脳により行われ、それらの調整を受けた後、最終的に運動パターンが筋に出力される。

このように動物の歩行を生成しているCPGをモデル化したものが神経振動子である。神経振動子は未知環境に対しても適応することができ、ロバスト性にも優れている特徴を持つ。そのため、神経振動子モデルを用いた歩行シミュレーションが多く行われているが、現在のところ、実環境下で歩行を行えるヒューマノイドロボットは数少ない。この理由として、神経振動子のパラメータ問題がある。神経振動子は、設定しなければならないパラ

メータを多く持ち、それらの多くは、環境が大きく変化した際、再設定が必要となる。しかし、神経振動子のパラメータ設定の明確な方法論が確立されておらず、設計者が経験的にパラメータを決定していることが多い。この問題は、神経振動子を扱う上で解決しなければならない問題である。

本研究では、以上の問題を考慮して、環境に適応したヒューマノイドロボットの2足歩行を実現するために、3つの研究を進めた。一つ目は、神経振動子のパラメータ設定方法についての研究。本研究では、ヒューリスティックなパラメータ探索方法を採用し、簡単な動的モデルで検証を行った。その結果、構築したパラメータ調整システムの有効性を示すことができた。二つ目は、様々な床面環境下において2足歩行を実現するための歩行軌道生成についての研究。神経振動子を基幹とした位相振動子ネットワークを用いて、環境に適応した位相を生成し、この位相を用いて歩行軌道生成を行った。その結果、平面と傾斜面に対応した歩行軌道生成を行うことができ、実機テストでも検証できた。三つ目は、未知の外乱に対してロバスト性を持つ姿勢制御を考慮したヒューマノイドの歩行生成システムの研究。ロボットを単質点モデルとして考え、神経振動子と結合した仮想的なバネ・ダンパシステムを単質点モデルに取り付け、安定的な姿勢制御を考慮したヒューマノイドロボットの歩行生成システムを提案した。基礎的な研究結果で提案したシステムの有効性を示した。

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 研究の目的と論文構成	3
第2章 神経振動子	4
2.1 CPG	4
2.2 運動パターンの生成過程	4
2.3 神経振動子	4
2.4 神経振動子の特徴と性質	6
2.4.1 引き込み特性	6
2.4.2 安定解析	6
第3章 神経振動子のパラメータ調整システム	10
3.1 パラメータ調整システム	10
3.1.1 SA : Simulated Annealing	10
3.1.2 SA アルゴリズム	11
3.1.3 MNO パラメータ探索における SA アルゴリズム	13
3.2 パラメータ調整システムの検証	13
3.2.1 シミュレーション1 : タスク設定	13
3.2.2 シミュレーション1 : 結果	15
3.2.3 シミュレーション2 : タスク設定	18
3.2.4 シミュレーション2 : 結果	20
3.3 まとめと今後の課題	20
第4章 位相振動子ネットワークを利用した適応的歩行生成	25
4.1 使用するヒューマノイドロボットモデル	25
4.2 歩行制御アルゴリズム	27
4.3 位相生成器	27
4.3.1 位相生成器の構成	28
4.3.2 位相振動子のダイナミクス	28
4.3.3 位相振動子の動作	29
4.4 歩行軌道生成器	29

4.4.1	脚部ピッチ角の生成	31
4.4.2	脚部ロール角の生成	33
4.5	実験	33
4.5.1	実験結果	33
4.5.2	まとめと今後の課題	34
第 5 章	姿勢安定性を考慮した歩行生成	37
5.1	本章で使用するシミュレータの紹介と用語の定義	37
5.2	提案手法	39
5.3	サジタル平面の支持脚動作	40
5.4	ラテラル平面の支持脚動作	46
5.5	各動作間の同期方法	49
5.6	まとめと今後の展望	49
第 6 章	結論	51
6.1	まとめ	51
6.2	今後の課題	51

第1章 序論

1.1 はじめに

近年日本においては、高齢化が急速に進み、労働者人口の減少が大きな問題となっている。2020年の就業可能人口が6,603万人で、予想就業者数が6,829万人となっているため、226万人を下回ることが予想されており、労働力不足が顕在化する[1]。図1.1[2]を見ると、労働生産性の低いサービス業の就業者数が顕著に伸びていることがわかり、今後もサービス業での人手が多く要求されると考えられる。そのため労働力不足の解消方法の一つとして、サービス業の労働生産性を向上させることが挙げられる。図1.2[3]で示すように、将来のロボット市場規模予測では、現在主力の産業用ロボットの割合が減り、第3次産業向けロボットの割合が大幅に増加しており、将来的にロボットによる第3次産業の労働生産性向上が期待されている。そのため、現在では、実環境下で動作できるロボットの開発が中心に進められている。ヒューマノイドロボットは、人のために作られた環境がそのまま使用できるため、人が行っている作業の代行というタスクの実現を求められている。この実現のためには、様々な環境下でスムーズに移動運動(歩行、走行など)を可能にしなければならない。しかし、現状のヒューマノイドロボットの歩行動作は、正確な環境のモデリングが必要で、実環境において限定的である。そのため実環境における移動運動の実現に向けて様々な研究が行われている。現在注目されている手法が、様々な環境下でも適応的に運動を行うことができる生物の運動制御のシステムを利用した制御手法である。動物の歩行は、中枢パターン生成器(以下CPG:Central Pattern Generator)により歩行パターンが生成されていると考えられている[5]。多賀ら[4]は、CPGをモデル化した神経振動子を利用し、人間の歩行運動制御法を考案した。この手法を利用して、ヒューマノイドロボットの2足歩行シミュレーションが多く行われてきているが、実環境下で動作する実機はほとんどない。この主な理由として、神経振動子のパラメータ調整問題が挙げられる。神経振動子のパラメータ調整方法は、確立されておらず、現在は設計者の経験を基に調整するのが一般的である。また、適切にパラメータを調整しなければ、神経振動子是不安定なパターンを生成してしまうため、連続的に歩行することができない。このような問題を踏まえて、本研究では、神経振動子を利用したヒューマノイドロボットの歩行システムを構築し、シミュレーターと実機で検証する。

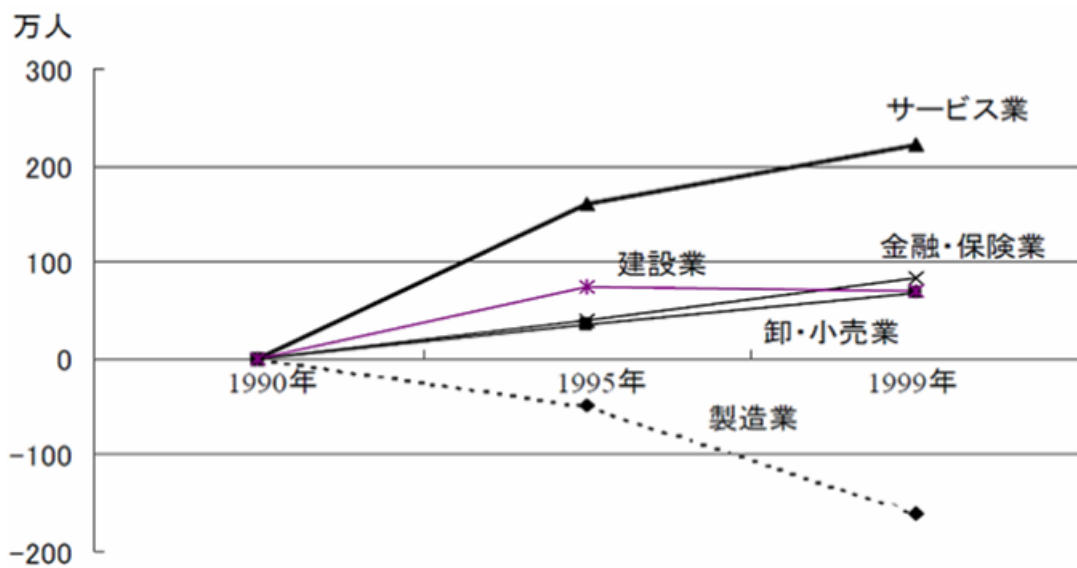


図 1.1: 産業分類別就業者数動向：日本 (1990 年からの増減)

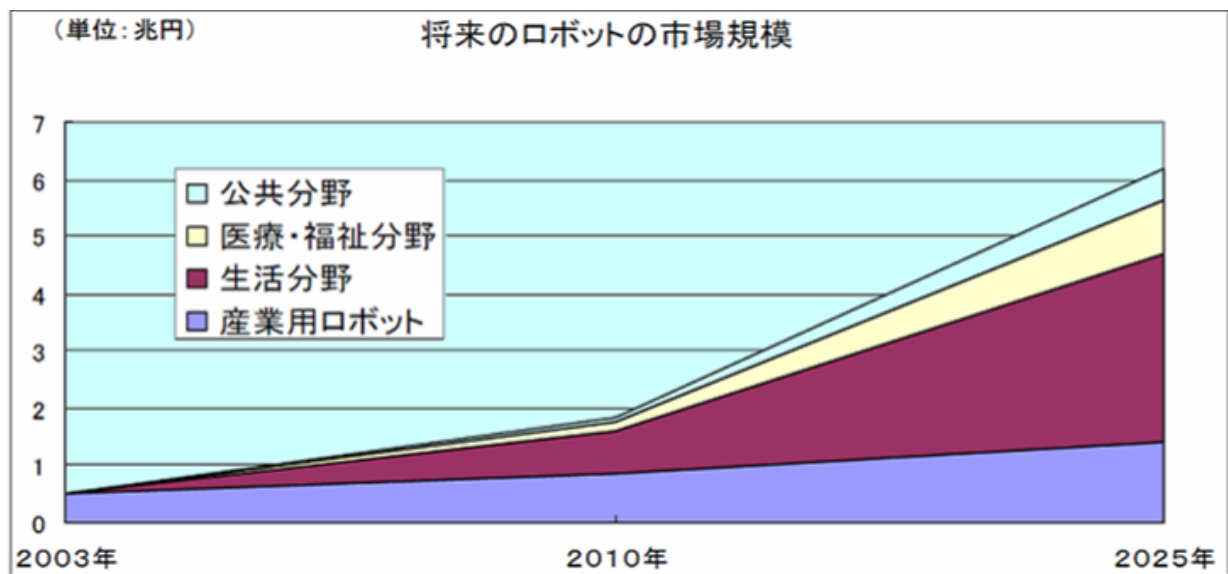


図 1.2: ロボット産業の市場規模予測について

1.2 研究の目的と論文構成

上述したように、現在のロボット工学において、様々な環境下で作業できるコントローラが必要とされている。このような条件に対して、既存のロボットコントローラは、制御対象や作業環境の情報を正確に把握する必要があった。これらのコントローラでは、未知環境で作業を行うことができず、実環境で実装するのは困難である。現在、このような問題に対して様々な研究が行われている。特に、予測不可能な環境下においても環境と相互作用しながら適応することができる神経振動子を用いた制御手法に注目が集まっている。神経振動子の利点として、大きく二つ挙げられる。(1) ロバスト性に優れている：ロボット工学において重要な問題である外乱や摂動に対しても対応ができる。(2) 環境のモデリングを必要としない：未知環境に対応でき、比較的簡単な計算で済む。このような利点があるが、実際に神経振動子を用いたコントローラの実装した例は少ない。この大きな理由として、パラメータの問題が含まれている。神経振動子は、多くのパラメータを持ち、それについての設計法が未だ見つかっておらず、現在のところ設計者が経験的にパラメータを決定している。

このような問題を踏まえ本研究では、様々な環境下におけるヒューマノイドロボットの歩行運動を実現するために、3つの目的を持って研究を進める。一つ目は、神経振動子のパラメータ設定方法についての研究。本研究では、ヒューリスティックなパラメータ探索方法を採用し、簡単な動的モデルで検証を行う。二つ目は、様々な床面環境下で2足歩行を実現するための歩行軌道生成についての研究。神経振動子を基幹とした位相振動子ネットワークを用いて、環境に適応した歩行軌道生成を行う。三つ目は、外乱に対してロバスト性を持つ姿勢制御システムの研究。ロボットを単質点モデルと考え、神経振動子と結合した仮想的なバネ・ダンパシステムを単質点モデルに取り付け、姿勢を安定化させるシステムを提案し、その基礎的な研究結果で有効性を示す。

次に本論文の構成を述べる。2章では、本研究で使用する松岡神経振動子について説明し、昨年度の研究結果を基に松岡神経振動子の特性についても説明する。3章では、神経振動子のパラメータ調整法を説明する。4章では、位相振動子ネットワークを利用した適応的歩行生成について説明する。5章で神経振動子と結合した仮想バネ・ダンパシステムを使ったヒューマノイドロボットの安定制御を提案する。5章では、本研究で得られて結果をまとめ、今後の課題を述べる。

第2章 神経振動子

2.1 CPG

人間や動物にとって生きるために必要な周期的運動(歩行や遊泳など)は, 比較的下位レベルの制御機構が関与していると考えられている. これらの周期的運動は, 基本的にリズム運動と四肢間の協調制御で構成されている. このリズム運動を生成しているのが, 脊髄の中にある中枢パターン生成器(以下 CPG: Central Pattern Generator)であると考えられている. また, 四肢間の協調制御も, 各肢にある CPG のネットワークにより実現されていると考えられている [5]. このように, CPG は人間の周期的動作を生成する重要な役を担っており, これらの運動を知る上では, 欠かせないであろう.

2.2 運動パターンの生成過程

運動パターンを生成する過程の概略図を図 2.1[5] に示す. CPG は, 小脳・脳幹の上位中枢から持続入力を受けることで活動を行うが, 同時に末梢からの入力や他の CPG からの入力によっても影響される. これらの刺激により CPG はリズムパターンを生成し, その出力は, 介在ニューロンを介して屈筋・伸筋の運動ニューロンに伝達される. また, 運動ニューロン・介在ニューロンレベルで, 負荷に対する補償や適切な反射回路の選択が主に小脳により行われ, それらの調整を受けた後, 最終的に運動パターンが筋に出力される [5].

2.3 神経振動子

神経振動子は, CPG をモデル化したものである. 現在, 一般的に利用されている神経振動子は, Matsuoka[6] が提案した松岡神経振動子(以下 MNO)である. 本研究も MNO を使用するものとし, また, 本論文で記載されている神経振動子は, MNO を指すものとする.

MNO の構成図を図 2.2 に示す. MNO は, 二つのニューロンが相互抑制するように配置されている. もし, MNO のパラメータが適切に調節されているならば, 位相平面でリミットサイクルが生じる. 安定したリミットサイクルが発生すれば, 持続的に周期運動を生成することができる.

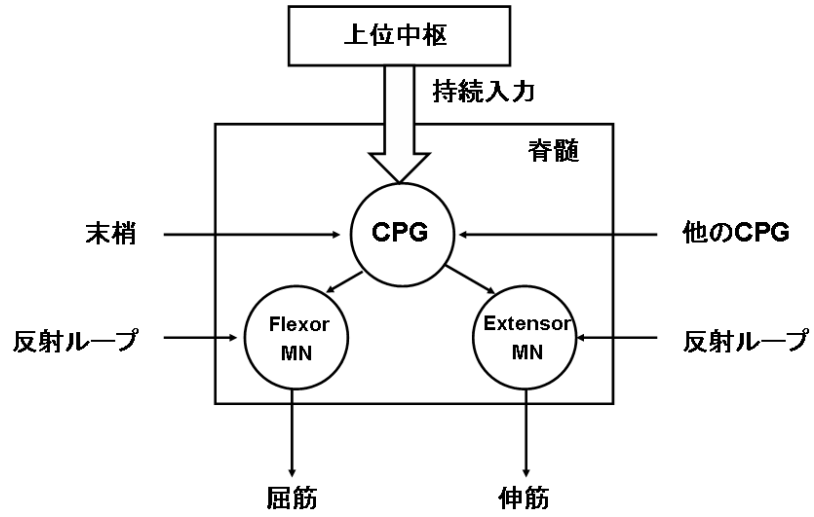


図 2.1: 運動パターン生成過程概略図

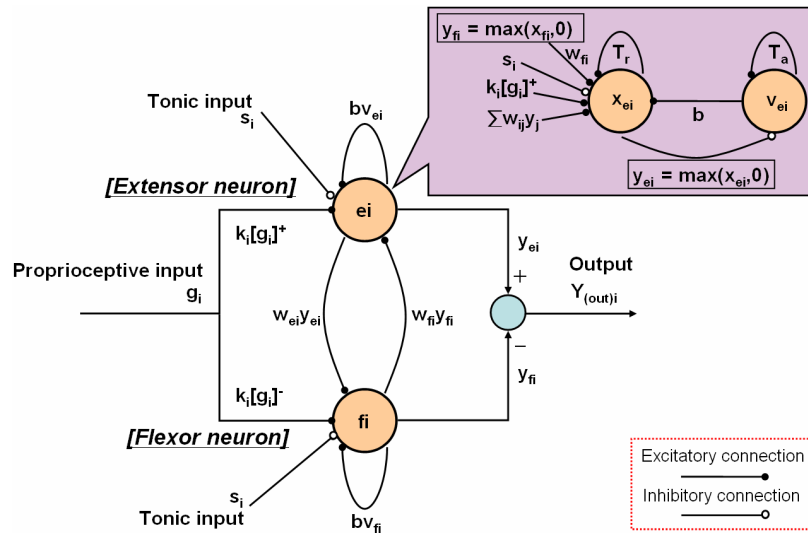


図 2.2: 神経振動子

次に, MNO の運動方程式を式 (2.1) に示す.

$$\begin{aligned}
\tau_r \dot{x}_{ei} + x_{ei} &= -\omega_{fi} y_{fi} - \sum_{j=1}^n \omega_{ij} y_j - b \nu_{ei} - \sum k_i [g_i]^+ + s_i \\
\tau_a \dot{\nu}_{ei} + \nu_{ei} &= y_{ei} \\
y_{ei} &= [x_{ei}]^+ = \max(x_{ei}, 0) \\
\tau_r \dot{x}_{fi} + x_{fi} &= -\omega_{ei} y_{ei} - \sum_{j=1}^n \omega_{ij} y_j - b \nu_{fi} - \sum k_i [g_i]^- + s_i \\
\tau_a \dot{\nu}_{fi} + \nu_{fi} &= y_{fi} \\
y_{fi} &= [x_{fi}]^+ = \max(x_{fi}, 0)
\end{aligned} \tag{2.1}$$

ここで, $x_{e(f)i}$ は発火率を表す i 番目のニューロンの内部状態. $\nu_{e(f)i}$ は適応係数 b で調整される適応度、または i 番目のニューロンの自己抑制効果を表す変数. それぞれのニューロンの出力 $y_{e(f)i}$ は, x_i の正の部分を取っており, $y_{e(f)i}$ は全体の出力である. $\omega_{ij} y_j$ はニューラルネットワーク内全体のニューロンからの入力を表している. また, 固有受容入力 g_i は, 正の部分を一方向のニューロンに, 負の部分を他方のニューロンに適応することで, 一方のニューロンが興奮し他方のニューロンが抑制されるように配置してある. 固有受容入力は k_i でスケール調整する. τ_r, τ_a は, それぞれの内部状態の時定数と i 番目のニューロンの適応効果を表している.

2.4 神経振動子の特徴と性質

2.4.1 引き込み特性

神経振動子は, 周期的な入力に対して, 自身の固有振動数を変化させ, 入力の周期にあわせる特性を持っている [7][8]. その神経振動子の引き込み特性を, 図 2.3 に示した. 図 2.3 の上図から順番に, 振幅が $A = 0.02, 0.1, 0.5$ で周波数が $\omega = 3.5$ の入力 $G = A \sin(\omega t)$ (赤色ライン) を与えた場合の神経振動子の出力 (青色ライン) を示している. 振幅が $A = 0.5$ のとき, 神経振動子が入力の周期と同期して振動しているのがわかる. これを神経振動子の引き込み特性と呼ぶ.

2.4.2 安定解析

神経振動子は, 非線形でロボット関節などのダイナミクスに結合している場合, とても複雑な動作が現れる. この動作は, 神経振動子のダイナミクスと神経振動子が結合しているシステムのダイナミクスの相互作用に依存する. そこで, 本節では, 1 リンクロボットアームに神経振動子を結合させたダイナミクスのリミットサイクル振動を生成する安定解

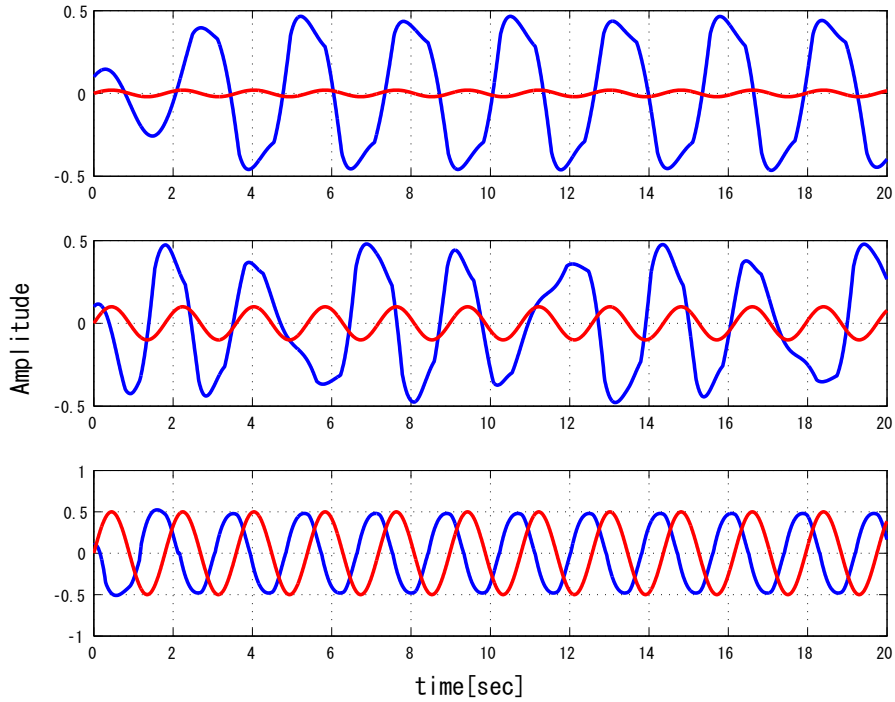


図 2.3: 神経振動子の引き込み特性

析を行う。リミットサイクル振動とは、非線形ダイナミクスの出力値を位相空間で表すと、一つの閉曲線を描き、この上を一定周期で回転する振動のことである。

解析の方法として、従来の非線形システムの安定解析方法である記述関数法 [9] を神経振動子に応用した方法を採用する。ここでは、Williamson[8] が示した手法を参考に安定解析を行う。

この方法は、駆動システム（ここではロボットアーム）と神経振動子を周波数特性で表現し、神経振動子の状態を決定する。この解析システムの概略図を図 2.4 に示した。ここで、駆動システムの伝達関数 $G(j\omega)$ を線形モデルとして仮定する。神経振動子モデルは、非線形であり周波数特性を持たない。そこで様々な振幅や周波数の信号を神経振動子に入力し、近似的に周波数特性を特定する。このように線形化された特性を $N(j\omega, A)$ と記述する。使用する解析システムで以下の条件式を満たす場合、非線形ダイナミクスはリミットサイクル振動を生成する。

$$N(j\omega, A)G(j\omega) = 1 \quad (2.2)$$

神経振動子の近似された周波数特性 $N(j\omega, A)$ の導入方法を説明する。まず、神経振動子への入力は、 $g_j = A \sin(\omega t)$ を適応する。神経振動子が、入力に対して引き込み特性を示したなら、神経振動子の出力と入力の周波数が一致していると考え、これをフーリエ変換し、神経振動子のゲインと位相を近似的に得る。また、様々な振幅、周波数を持つ入力を作成

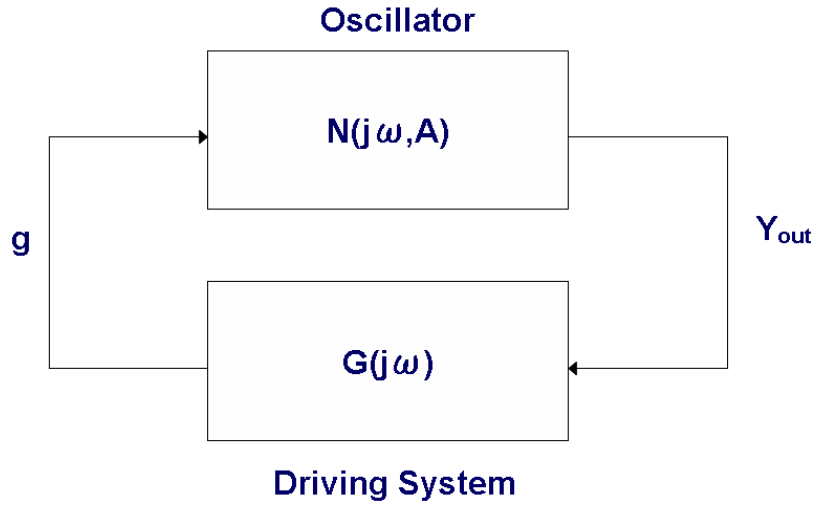


図 2.4: 解析システム概略図

し, 同様の手順で, 神経振動子の近似的な周波数特性を得る. 図 2.5 に神経振動子の周波数特性を示した. この結果は, 昨年度の本研究室で得られた解析結果であり [7], 本研究室で提案された EENO と神経振動子の結果が同時に表示されている. この結果を見ると, 入力振幅 A を変化させると, ゲインと位相両方影響を与えていることがわかる.

次に, 駆動システムである 1 リンクロボットアームの伝達関数を導入する. 駆動システムの運動方程式を式 (2.3) に示した.

$$m\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + k(\theta - \theta_{ref}) = 0 \quad (2.3)$$

ここで, m はモデルの質量, k はバネ係数, b は減衰係数である. また θ はアームの位置で, θ_{ref} はその目標値である. この伝達関数を, 式 (2.4) に示した.

$$G(j\omega) = \frac{k}{k - m\omega^2 + j\omega b} \quad (2.4)$$

図 2.6 に神経振動子と駆動システムの伝達関数の周波数特性を複素平面に示した. 前述したように, 式 (2.2) を満たす点でリミットサイクル振動が現る. その点を図 2.6 中に赤点で示している. この解析システムを利用した場合, $\omega = 8.9, A = 0.49$ となった.

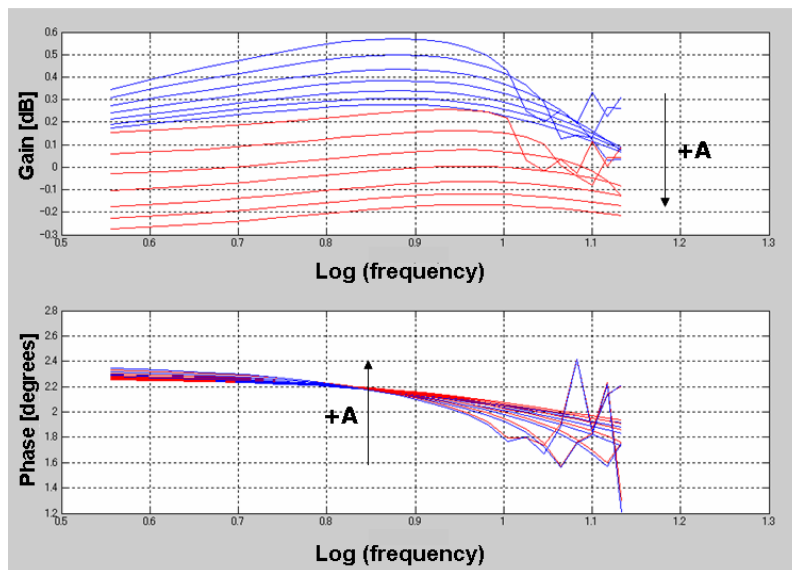


図 2.5: 神経振動子ボード線図

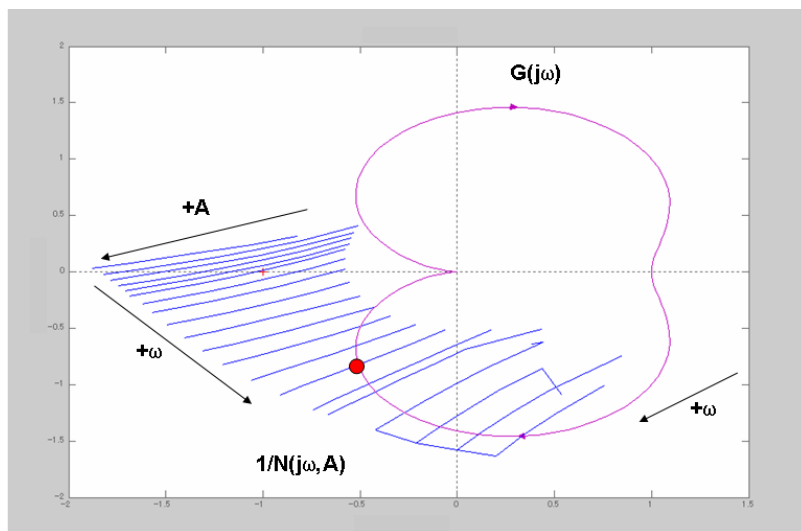


図 2.6: 複素平面における $1/N(j\omega, A)$, $G(j\omega)$

第3章 神経振動子のパラメータ調整システム

神経振動子をコントローラとして用いる場合、未知環境下においてロボットが持続的な周期的運動を実現するには、神経振動子のパラメータを最適に調整することが望ましい。これまでの研究で、この問題を解決する手法が多く提案されている。Hase ら [10] は、神経振動子を利用して人間の歩行シミュレーションを行うため、GA を利用して神経振動子のパラメータ調整を行った。また、Kondo ら [11] は SA を用いてパラメータを探索し、RNN を利用して探索したパラメータと一緒に自己受容感覚ベクトルが描く時間軌道を記憶させ、学習後は、RNN を時系列パターン識別器として用いることで、予測的に CPG のパラメータを切り替えた。

本研究では、Kondo ら [11] の提案した手法を基に、SA を利用したパラメータ調整システムを構築する。本章では、パラメータ調整システムについて説明した後、簡単な動力学モデルを用いてパラメータ調整システムを検証する。

3.1 パラメータ調整システム

神経振動子のパラメータを探索し、設定するシステムを図 3.1 に示す。このシステムの流れは、神経振動子に取り付けられている動力学モデルの動作を評価し、SA により最適パラメータを探索する。

3.1.1 SA : Simulated Annealing

Simulated Annealing(以下 SA) とは、Kirkpatrick ら [13] が開発した手法で、焼きなましと呼ばれる過熱炉内の個体の冷却過程を計算機上で模倣した最適化手法である。このアルゴリズムは、最適化問題、特に組み合わせ最適化問題を解く汎用近似解法の一つとして用いられている。SA は、基本的には局所探索をランダムに行うが、確率的に新しい解へ移ることができるので、局所解に陥ることを防ぐことができる特徴を持つ。また、アルゴリズム自体がとても簡単であることも特徴である。しかし、解を得るまでの時間が非常に長いという欠点があるため、現在では温度並列シミュレーテッドアニーリング (TPSA)[15] などのアルゴリズムが開発されている。

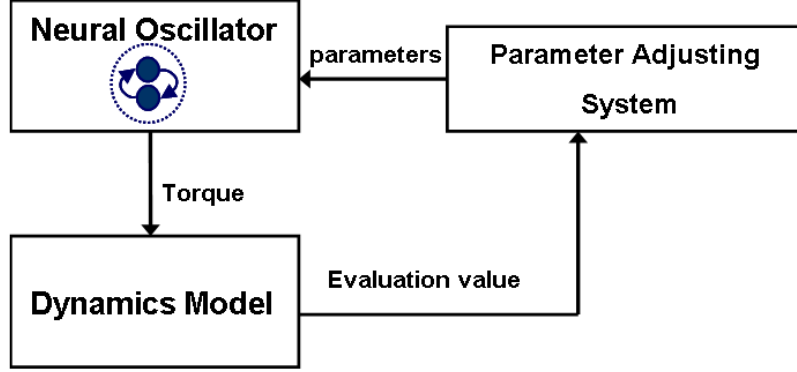


図 3.1: パラメータ調整システム概略図

3.1.2 SA アルゴリズム

SA のフローチャートを図 3.2 に示す. SA のアルゴリズムは, 主に生成処理, 受理判定, クリーニング処理で構成されている.

生成処理は, 現在の状態 s_c から新しい状態 s_n を生成する. 新しい状態を生成する方法は, 正規乱数を利用する. 式 (3.1) に新しい状態を生成する式を示す.

$$s_n = s_c + \alpha N(0, \sigma I) \quad (3.1)$$

ここで, α は学習比. $N(0, \sigma I)$ は正規乱数.

受理判定は, 新しく生成された状態 s_n のエネルギー E_n と現在の状態 s_c のエネルギー E_c の差分 ΔE , SA の制御パラメータである現在の温度 G を利用して, s_n を次の状態として受理するか否かを判定する. この判定式は, 式 (3.2) を使用する.

$$P_{accept} = \begin{cases} 1 & \text{if } E_n < E_c \\ \exp\left[-\frac{(E_n - E_c)}{G}\right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2)$$

クーリング処理は, 生成処理と受理判定が何度か行われた後, SA の制御パラメータである温度 G を下げる処理である. クーリング処理で使われる計算式は, 式 (3.3) に示した.

$$G = kG \quad (0.8 \leq k < 1) \quad (3.3)$$

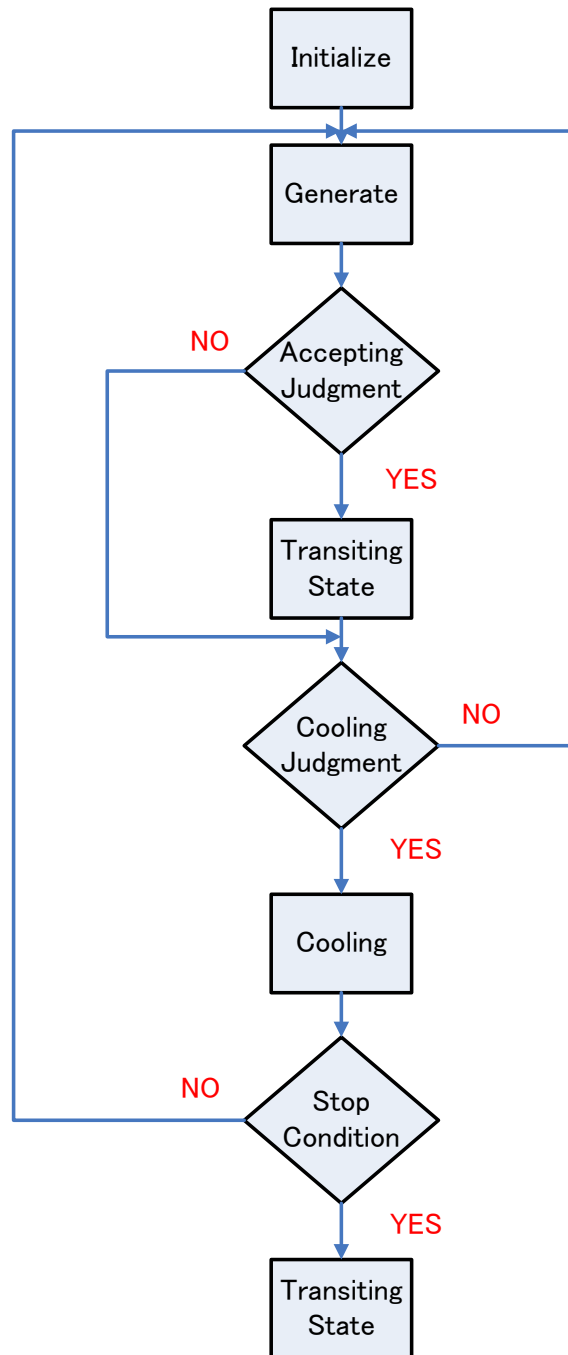


図 3.2: SA フローチャート

3.1.3 MNO パラメータ探索における SA アルゴリズム

上記したアルゴリズムを基に、本研究で用いた SA アルゴリズムを以下に擬似言語を使用して示す.

— SA Algorithm —

```
/*Define*/
-----
* initial MNO parameters :  $s_0$ 
* initial Energy value :  $e_0$ 
* initial temperature :  $G_0$ 
* current MNO parameters :  $s$ 
* current energy value :  $E_c$ 
* current temperature :  $G$ 
-----
/*Initialize*/
 $s = s_0$ ;  $E_c = e_0$ ;  $G = G_0$ ;
while ( $G < G_{min}$ )
  /*Generate*/
   $s_n = s_c + \alpha N(0, \sigma I)$ ;
  /*Accept judgment*/
  if ( $E_n < E_c$ )
     $s_c = s_n$ ;  $E_c = E_n$ ;
  else
     $P_{acc} = \exp[-\frac{(E_n - E_c)}{G}]$ ;
    if ( $P_{acc} > \text{random}[0, 1)$ )
       $s_c = s_n$ ;  $E_c = E_n$ ;
    end
  end
  /*Cooling*/
   $G = kG$ ; ( $0.8 < k < 1.0$ )
end
```

3.2 パラメータ調整システムの検証

以上のようなパラメータ調整システムを用いて、簡単な二つの動力学シミュレーションを行い、パラメータ調整システムの検証を行う.

3.2.1 シミュレーション 1 : タスク設定

まずはじめに、動力学モデルとして振り子モデルを使用する. 振り子モデルを使用したシミュレーション概略図を図 3.3 に示す. このシステムは、振り子を動作させる作用点で神経振動子を用いてトルクを生成する. このとき、神経振動子のパラメータ値は、設計者が任意に与える. 次に、振り子の 1 周期の運動を評価関数で評価する. この値を SA で用い

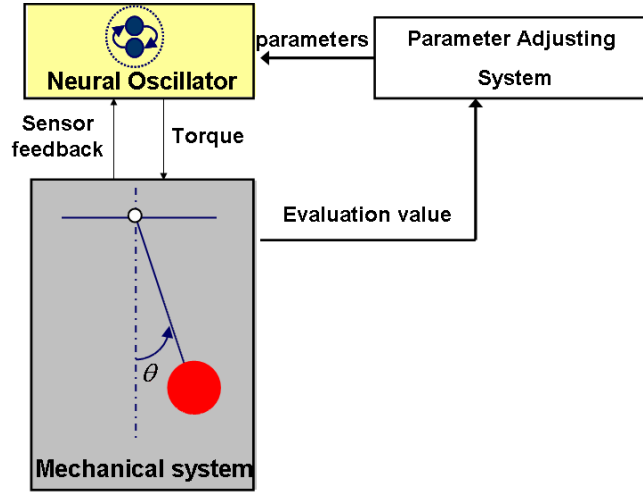


図 3.3: シミュレーション概略図

るエネルギー値として使用し、パラメータ調整機構により新しいパラメータを生成し、このパラメータを神経振動子で使用する。この過程を繰り返し、最適なパラメータを探索する。シミュレーションで用いた振り子モデルの運動方程式を式 (3.4) に示す。

$$ml^2\ddot{\theta} = -mgl \sin \theta - \mu\dot{\theta} + \tau \quad (3.4)$$

ここで、 m, l は、それぞれ振り子の質量、長さである。また、 $\mu\dot{\theta}$ は粘性摩擦で、 τ はトルクで本シミュレーションでは神経振動子の出力を用いた。

また、シミュレーションで用いた振り子モデルの評価関数を式 (3.5) に示す。この評価関数は、Kondo ら [11] の文献を参考にした。

$$\begin{aligned} E_{n1} &= \frac{1}{T} \int_T mgl(1 - \cos \theta) dt \\ E_{n2} &= \frac{1}{T} \int_T \frac{1}{2} \mu \dot{\theta}^2 dt \\ E_{n3} &= \frac{1}{T} \int_T \max(\tau \dot{\theta}, 0) dt \\ E_n &= -[E_{n1} - E_{n2} - E_{n3}] \end{aligned} \quad (3.5)$$

ここで、 T は振り子の 1 周期の時間を示している。シミュレーションで使用したパラメータを表 3.1 に示した。

α	learning rate	0.95
σ	coefficient of gaussian noise	1
G_0	initial temperature	100
k	coefficient of temperature	0.95
m	mass of pendulum	1.0 [kg]
l	length of pole	1.0 [m]
μ	friction coefficient	0.5

表 3.1: Parameters for the pendulum simulation

3.2.2 シミュレーション 1 : 結果

本シミュレーションでは, 様々な環境における評価を行うため, 振り子の長さ l を変化させる.

まず始めに, $l = 0.5[\text{m}]$ の環境下で神経振動子のパラメータを探索した. 探索する神経振動子パラメータは, 時定数 τ_r, τ_a と結合重み ω_f, ω_e とした. 図 3.4 は, このシミュレーションにおけるエネルギー値の変化を示している. 図 3.5, 図 3.6 は, それぞれ探索する神経振動子のパラメータ τ_r と ω_f の変化を示している. この結果から, エネルギー値は最小値で収束しており, 神経振動子のパラメータは最適な値を探索されている. 同様に, $l = 0.2[\text{m}]$, $l = 1.0[\text{m}]$ の各環境下で神経振動子のパラメータ探索を行った. その結果を表 3.2 に示す.

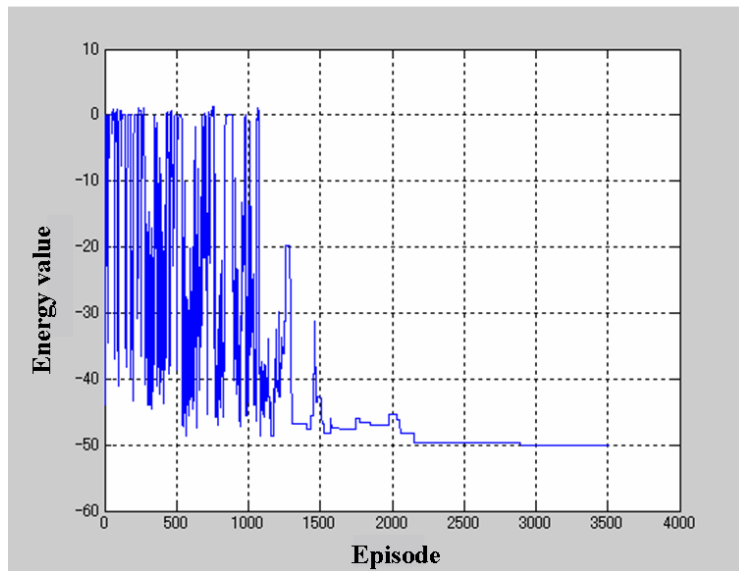


図 3.4: エネルギー値の変化

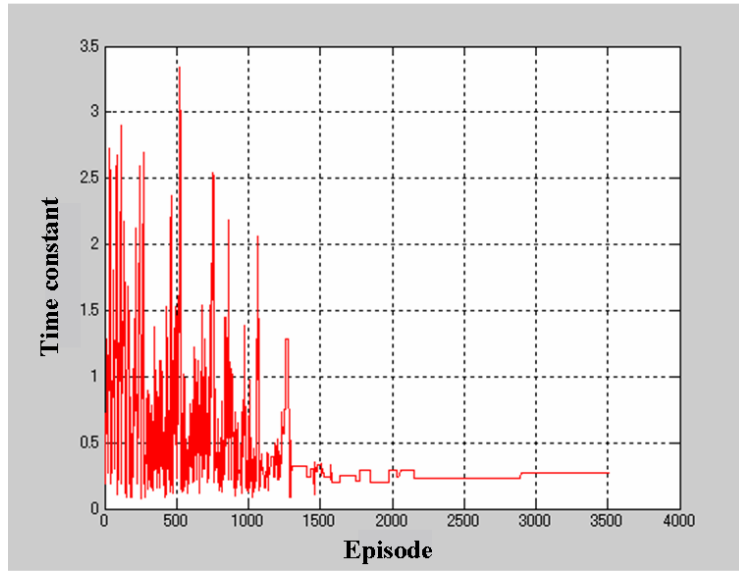


図 3.5: 探索パラメータ：時定数の変化

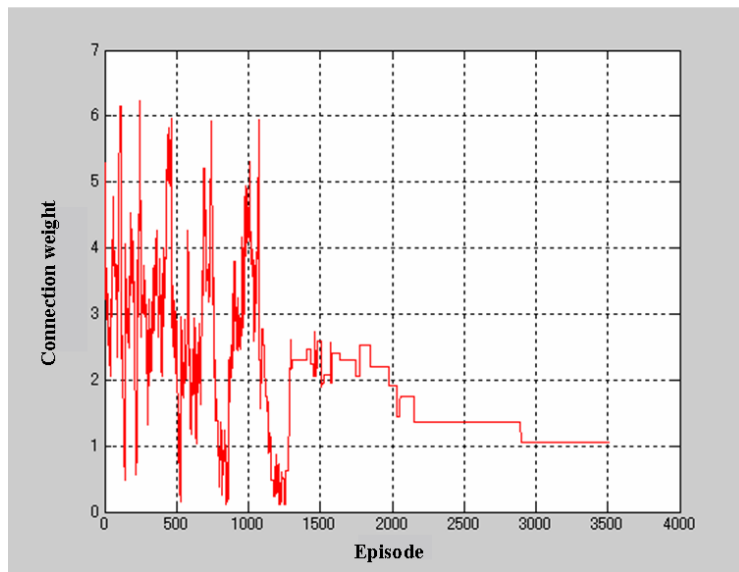


図 3.6: 探索パラメータ：結合重みの変化

Length	τ_r	ω_f
$l = 0.2[\text{m}]$	0.1314	1.2263
$l = 0.5[\text{m}]$	0.2697	1.0563
$l = 1.0[\text{m}]$	0.3736	0.5491

表 3.2: Optimal parameters

次に, 以下に示した二つの評価方法用いて, 探索したパラメータの性能評価を行う.

適応性評価

はじめに l の長さを 15[sec] ごとに随時変化させ, 各環境下で最適なパラメータに切換え, 振り子が安定した運動を行えるかを評価した. 図 3.7 にその結果を示す. 赤色ラインは神経振動子の出力 (振り子関節トルク) で, 青色ラインは振り子の振幅を示している. この結果から, 環境の変化に対してすばやく適応し, 安定した周期運動を行っているのがわかる.

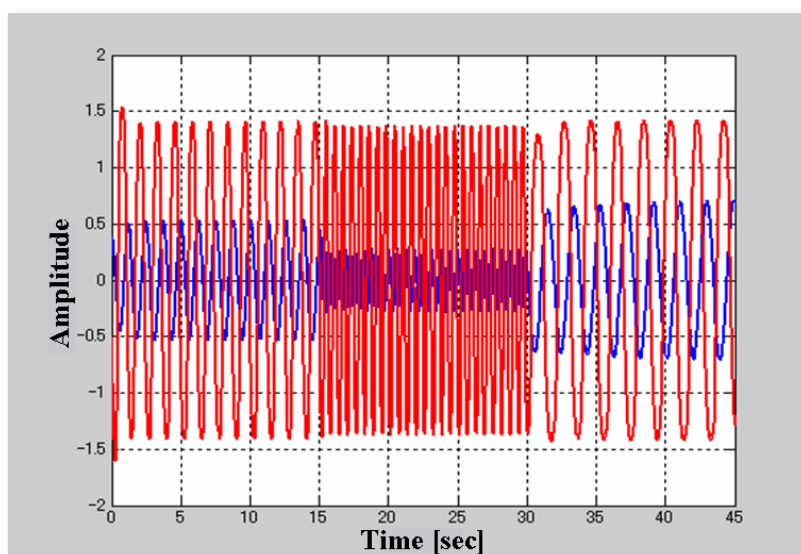


図 3.7: 環境の変化への適応性

エネルギー値の比較評価

はじめの評価方法と同様に l の長さを変化させ, 各環境下で最適なパラメータを使用したときの最小エネルギー値を取得し, この値と $l = 0.5[\text{m}]$ の最適パラメータのみを使用した場合の最小エネルギー値を比較した. 図 3.8 に示すように, $l = 0.5[\text{m}]$ 以外の箇所では, 各環境下で探索したパラメータを用いた場合のエネルギー値が小さくなっているため, パラメータ調整システムは, 設定した評価関数に従ってより良いパラメータ探索していたことがわかる.

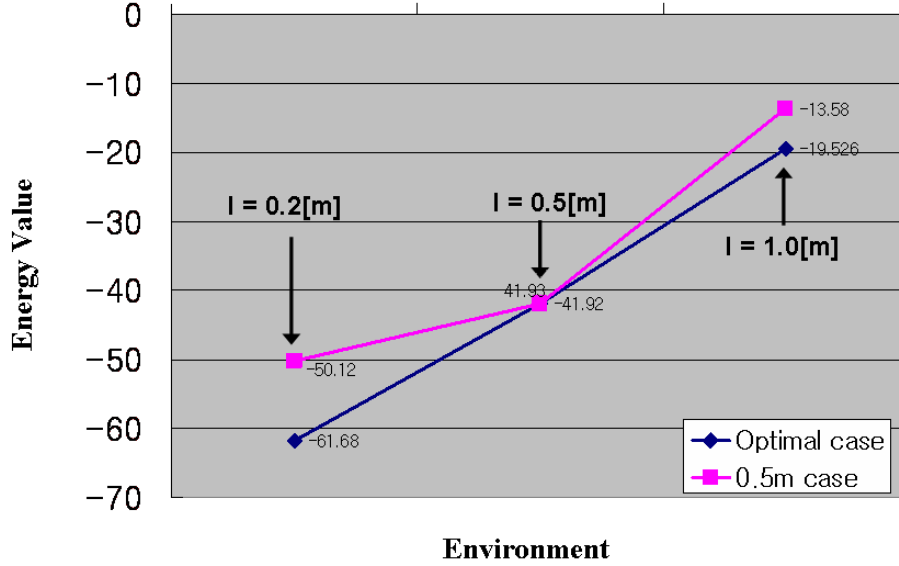


図 3.8: エネルギー値の比較

3.2.3 シミュレーション 2 : タスク設定

次に、クランクタスクを行う 2 リンクアームモデル [12] を用いて、パラメータ調整システムの検証を行う。2 リンクアームモデルを用いたシミュレーション概略図を図 3.9 に示す。このシミュレーションは、クランクに取り付けられた 2 リンクアームの各関節で、神経振動子を用いてトルクを生成し、クランク運動を実現する。初期パラメータは、クランク運動が行えるような神経振動子パラメータを設定し、クランク 1 周ごとの期間で動力学モデルを評価する。

シミュレーションで用いたクランクと 2 リンクアームの運動方程式を式 (3.6) に示す。

$$\begin{aligned}
 I\ddot{\theta} + B\dot{\theta} &= re^T \mathbf{F} \\
 \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{F}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

ここで、 I はクランクシステムの慣性モーメント、 B は粘性係数、 r はクランクの半径、 $\mathbf{F}$ はアームとクランクの接合部にかかる力、 $\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}$ 、 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\boldsymbol{\tau}$ 、 $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ はそれぞれアームの慣性項、コリオリ項、トルク、ヤコビ行列である。

また、シミュレーションで用いた評価関数を式 (3.7) に示す。この評価関数は、Kondo ら [11] の文献を参考にした。

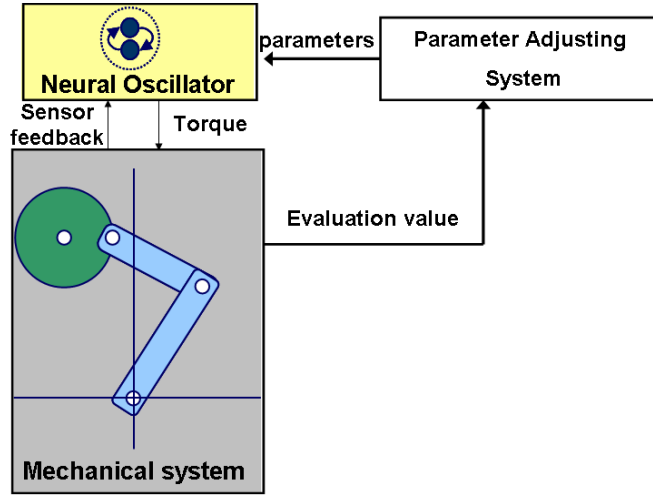


図 3.9: シミュレーション概略図

$$\begin{aligned}
 En_{i,1} &= \frac{1}{T} \int_T \dot{\theta} dt, \\
 En_{i,2} &= \frac{1}{T} \int_T 0.5 B^T C \dot{q}^2 dt, \\
 En_{i,3} &= \frac{1}{T} \int_T \max(\tau^T C \dot{q}, 0) dt, \\
 En_{ave,1} &= \frac{En_{1,1} + En_{2,1} + \dots + En_{i,1}}{i} \\
 En_{ave,2} &= \frac{En_{1,2} + En_{2,2} + \dots + En_{i,2}}{i} \\
 En_{ave,3} &= \frac{En_{1,3} + En_{2,3} + \dots + En_{i,3}}{i} \\
 En_{normalize,1} &= \frac{En_{i,1}}{En_{ave,1}} \\
 En_{normalize,2} &= \frac{En_{i,2}}{En_{ave,2}} \\
 En_{normalize,3} &= \frac{En_{i,3}}{En_{ave,3}} \\
 E &= -[En_{normalize,1} - En_{normalize,2} - En_{normalize,3}] \\
 C &= diag[0.0010.03856],
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

ここで, T はクランク 1 周を行うのにかかる時間を示している. $En_{i,*}$ は, i 回目のエネルギー値. $En_{ave,*}$ は, i 番目までのエネルギー平均値. $En_{normalize,*}$ は, $En_{ave,*}$ で正規化したエネルギー値. E は, 探索で使用する評価関数値.

	τ	ω	$bias$	k
Initial parameters	0.2500	2.0000	60.0000	1.0000
Optimal parameters	1.0075	1.8922	57.9575	2.4210

表 3.3: initial parameters and optimal parameters

3.2.4 シミュレーション 2 : 結果

探索する神経振動子のパラメータは、時定数 τ 、結合重み ω 、バイアス $bias$ 、自己受容係数 k として、パラメータ探索を行った。図 3.10, 図 3.11, 図 3.12, 図 3.13 にパラメータ探索における各パラメータと図 3.14 評価関数値の変化を示す。また、設計者が任意に与えた初期パラメータと探索したパラメータを表 3.3 に示す。

この二つのパラメータ (初期パラメータと探索パラメータ) を利用して、それぞれの動的モデル評価を比較し、パラメータ調整システムの検証を行う。図 3.15 に、各パラメータを使用した場合のアームのエンドエフェクター軌道を示した。図 3.15 の左図は、初期パラメータを用いた場合の結果で、右図は、探索したパラメータを用いた場合の結果である。これより、両方のパラメータでクランクタスクを達成できることが分かる。図 3.16 に、アームに取り付けられているクランクの回転角度の時系列を示す。探索したパラメータが初期パラメータよりもスムーズにクランクを回しているのがわかる。図 3.17 に、神経振動子の出力を示す。探索パラメータを利用した場合、初期パラメータのときよりも小さな振幅で、かつ少ない周期でクランクタスクを達成している。神経振動子の出力はアームの各関節トルクになっているので、より小さな関節トルクでタスクを達成していることになる。これらの検証結果から、パラメータ調整システムが設定した評価関数に対して最適なパラメータ探索を行っていることがわかる。

3.3 まとめと今後の課題

本章で紹介したパラメータ調整システムは、動的モデルを評価関数によって評価し、この評価関数に従って最適なパラメータを探索することができた。しかし、シミュレーションを行っている際にいくつか問題点を見つけたので以下に示す。

- パラメータ探索に莫大な時間がかかる。
- 評価関数の設定方法が確立されていない。
- クランクタスクのパラメータ探索に関しては、クランク運動を行うことができる初期パラメータを与えなければならない。

以上の問題を解決することが今後の課題である。

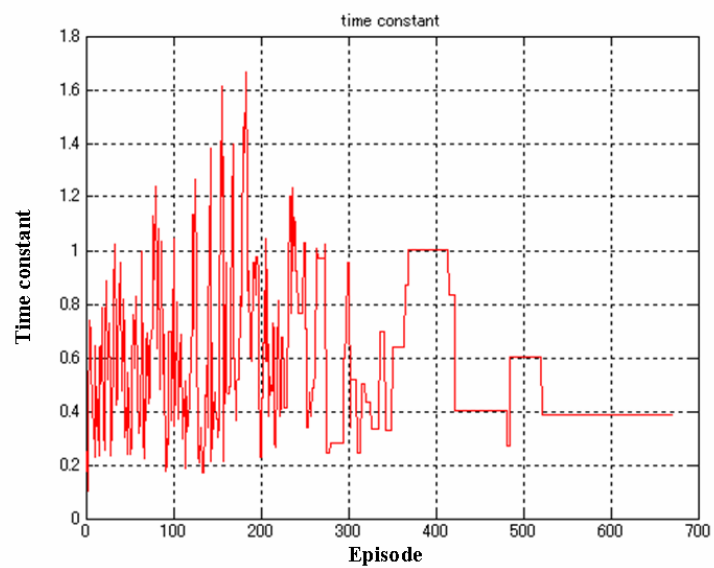


図 3.10: 探索パラメータ：時定数の変化

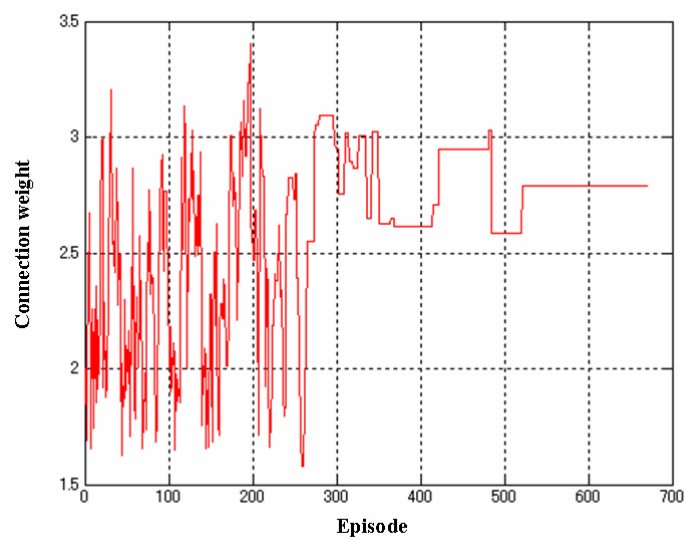


図 3.11: 探索パラメータ：結合重みの変化

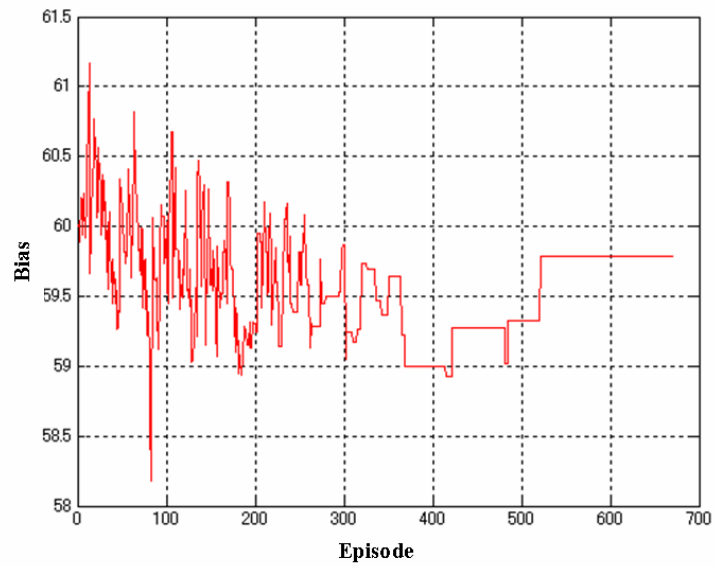


図 3.12: 探索パラメータ : バイアスの変化

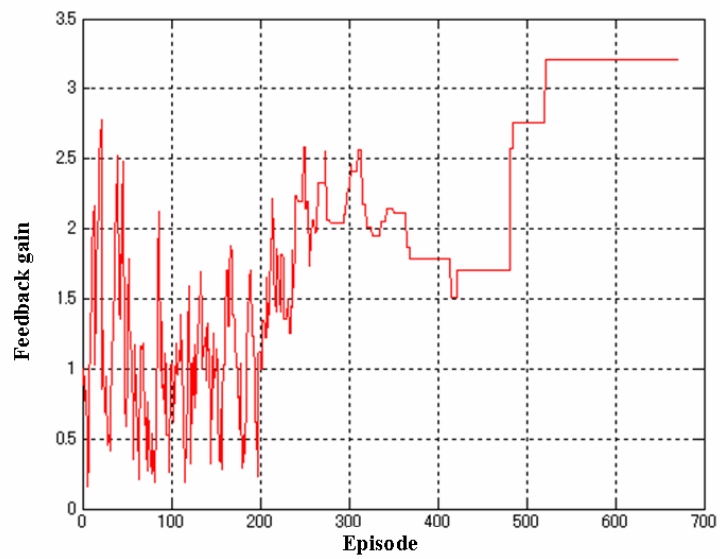


図 3.13: 探索パラメータ : 自己受容係数の変化

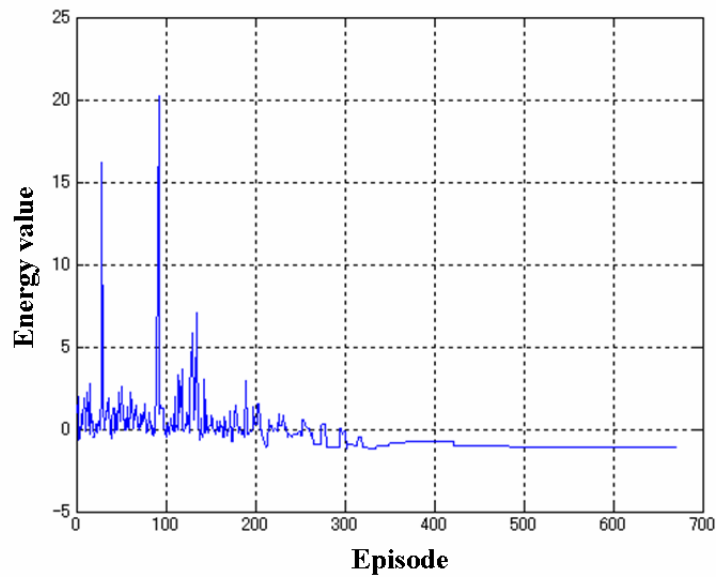


図 3.14: エネルギー値の変化

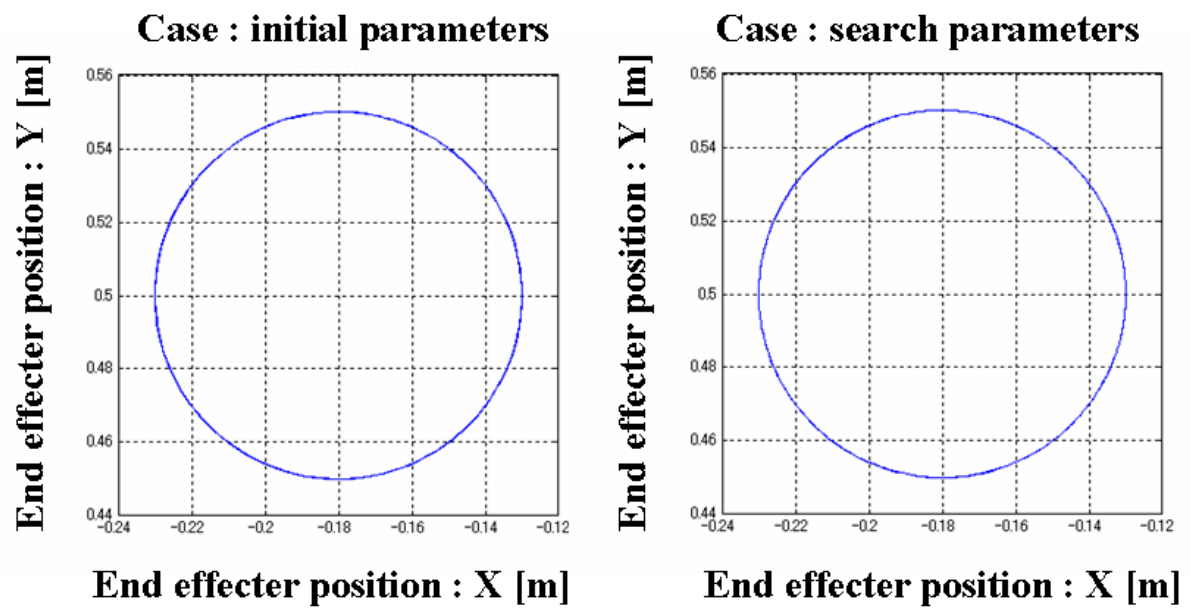


図 3.15: エンドエフェクタ軌道

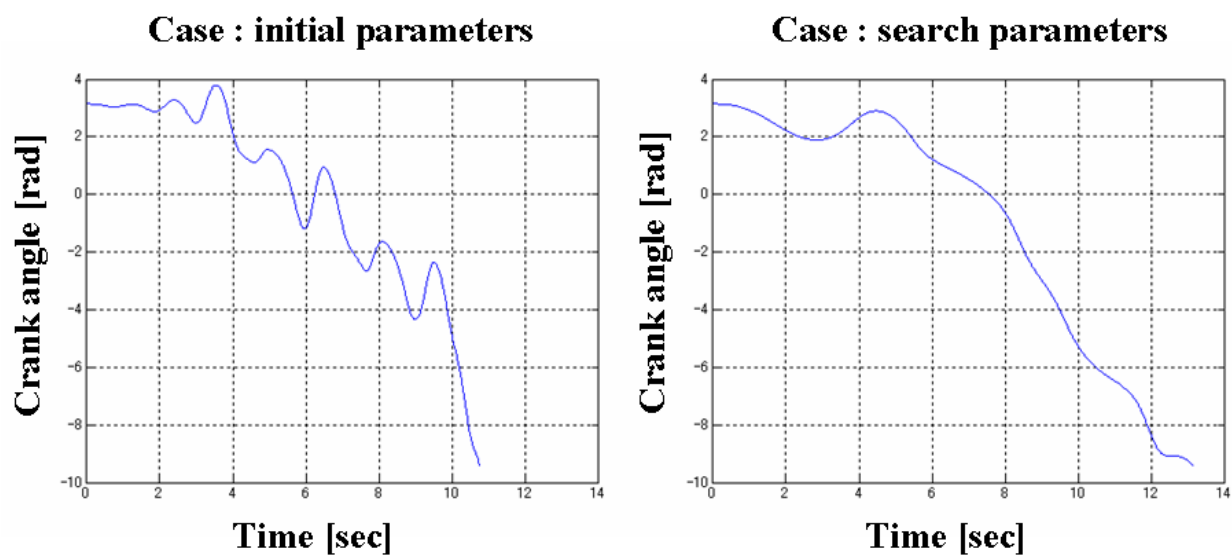


図 3.16: クランク角度

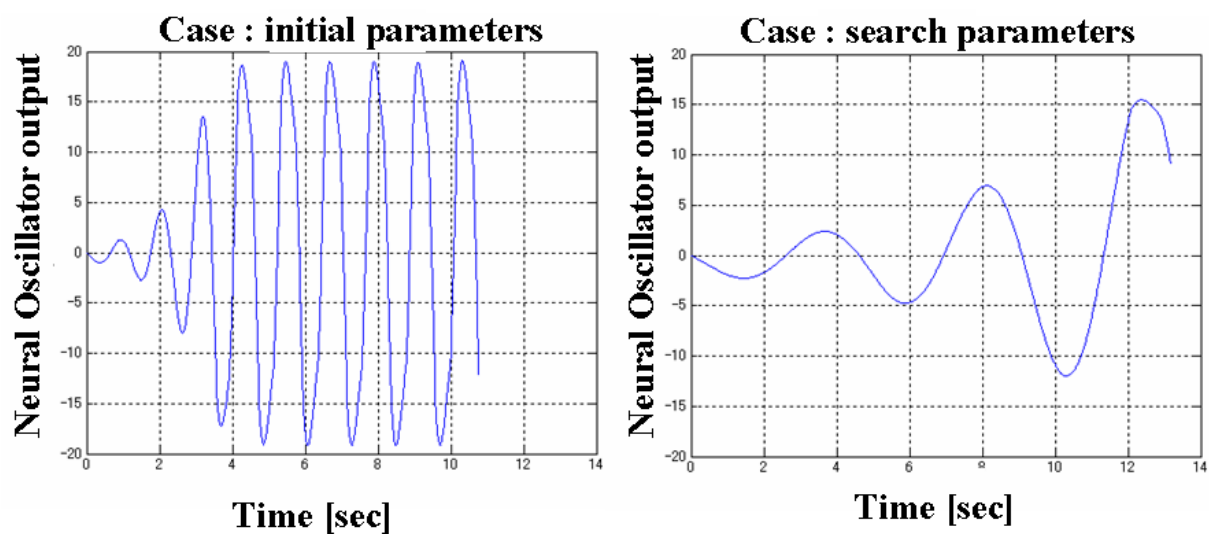


図 3.17: 神経振動子出力

第4章 位相振動子ネットワークを利用した適応的歩行生成

本章では、神経振動子を利用して床面環境の変化に対して適応的に歩行軌道を生成するシステムを構築することを目標とする。神経振動子の出力は、一般的に関節トルクや関節目標角度として使用されている。しかし、環境が大きく変化すると、神経振動子のパラメータを変更しなければ、安定したリミットサイクルを維持することは難しい。このような問題を回避するために、Tsuchiya ら [19] は非線形振動子の位相を歩行周期として使用し、この位相を足先軌道を生成する関数に入力することで、変化する傾斜面下で適応した2足歩行を実現した。この研究のように、2足歩行を実現するための神経振動子の役割を歩行周期の生成のみに限定することで、安定したリミットサイクルを容易に実現している。しかしながら、このアルゴリズムは非線形性が強いダイナミクスを有するため、環境の変化に対して即応的に適正な歩行軌道を生成することが困難である。そこで本章では、Tsuchiya ら [19] の研究を基によりシンプルな制御システムを構築し、環境の変化に対して即応性のある2足歩行アルゴリズムを提案し、実機により検証する [16][17]。

4.1 使用するヒューマノイドロボットモデル

本章で使用するヒューマノイドロボットのモデルは、富士通オートメーション株式会社より市販されている小型ヒューマノイドロボット HOAP-2.0 を基にしたモデルを使用する。そのため、本研究で使用するロボットの DH パラメータ座標とリンク長さのパラメータは、HOAP-2.0 に準拠する。

使用するロボットモデルは、5 自由度の腕 2 本、6 自由度の脚 2 本、2 自由度の頭部と 1 自由度の胴体部で合計 25 個の関節を持っている。関節の名称を図 4.1[18]、リンク長さのパラメータ定義を図 4.2[18] に、DH パラメータ座標定義を図 4.3[18] に、DH パラメータ一覧を図 4.4[18] に示す。

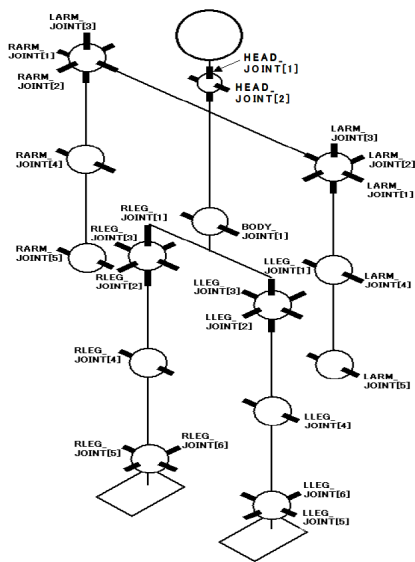


図 4.1: HOAP-2.0 関節名称

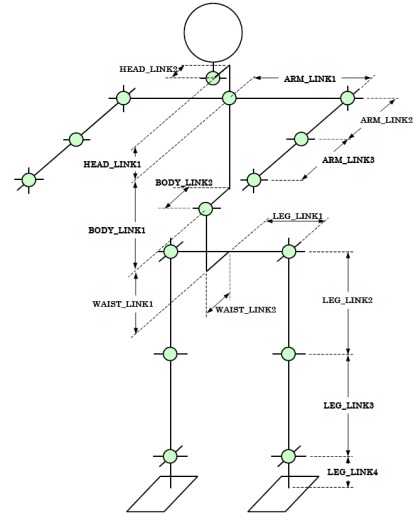


図 4.2: HOAP-2.0 リンク長さのパラメータ定義

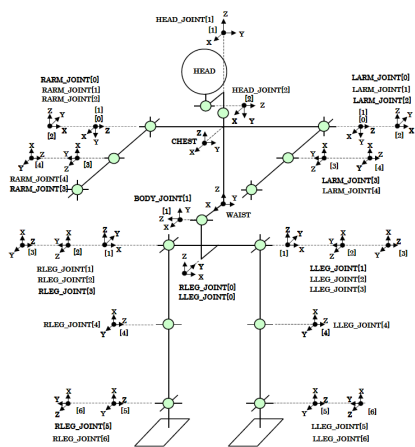


図 4.3: DH パラメータ定義座標 ($\theta[i]=0$ の姿勢)

	$a[i-1]$ (m)	$\alpha[i-1]$ (deg)	$d[i]$ (m)	$\theta[i]$ (deg)
CHEST	-BODY_LINK2	0	BODY_LINK1	0
HEAD_JOINT[1]	0	0	HEAD_LINK1	0
HEAD_JOINT[2]	HEAD_LINK2	-90	0	0
ARM_JOINT[0]	0	-90	(*)ARM_LINK1	0
ARM_JOINT[1]	0	0	0	$\theta[1]$
ARM_JOINT[2]	0	90	0	$\theta[2]+90$
ARM_JOINT[3]	0	90	ARM_LINK2	$\theta[3]+90$
ARM_JOINT[4]	0	90	0	$\theta[4]$
BODY_JOINT[1]	0	90	0	0
LEG_JOINT[0]	-WAIST_LINK2	-90	-WAIST_LINK1	90
LEG_JOINT[1]	(*)LEG_LINK1	0	0	$\theta[1]$
LEG_JOINT[2]	0	90	0	$\theta[2]+90$
LEG_JOINT[3]	0	90	0	$\theta[3]$
LEG_JOINT[4]	-LEG_LINK2	0	0	$\theta[4]$
LEG_JOINT[5]	-LEG_LINK3	0	0	$\theta[5]$
LEG_JOINT[6]	0	-90	0	$\theta[6]$
(*)右半身のときは負の値として下さい。				
	WAIST	→	CHEST	でリンク
ARM_LINK1	0.0995 m			
ARM_LINK2	0.1010 m			
ARM_LINK3	0.1460 m			
LEG_LINK1	0.0390 m			
LEG_LINK2	0.1020 m			
LEG_LINK3	0.1000 m			
LEG_LINK4	0.0370 m			
BODY_LINK1	0.0900 m			
BODY_LINK2	0.0340 m			
HEAD_LINK1	0.0810 m			
HEAD_LINK2	0.0080 m			
WAIST_LINK1	0.0550 m			
WAIST_LINK2	0.0340 m			

図 4.4: HOAP-2.0 DH パラメータ

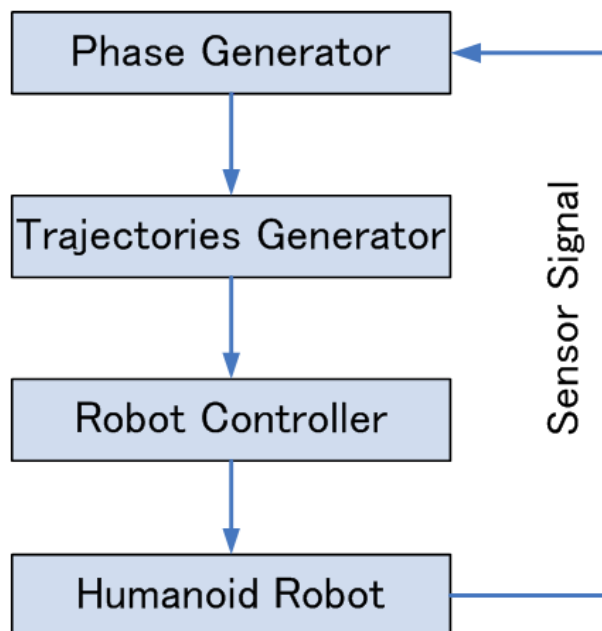


図 4.5: 歩行制御アルゴリズム概略図

4.2 歩行制御アルゴリズム

提案した歩行制御アルゴリズムの概略図を図 4.5 に示す. このアルゴリズムは, 主に位相生成器と歩行軌道生成器で構成されている. 位相生成器では, 歩行の周期を調整する位相を生成する. この位相を歩行軌道生成器に入力し, デカルト座標系において足先の歩行軌道を生成する. この歩行軌道を逆運動学を利用して各四肢の関節目標角度を求める. 最後に PD コントローラで各関節の動作を実現する. また, ヒューマノイドロボットの足裏センサのフィードバックを基に, 位相をリセットすることで床面の変化に適応した歩行軌道を生成することができる. 次節からは, 位相生成器と歩行軌道生成器について詳細を述べる.

4.3 位相生成器

前述したように, 位相生成器は歩行の周期を調整する位相を生成するモジュールである. ここでは, はじめに位相生成器の構成とダイナミクスについて述べ, 次に詳しい位相生成器の動作について述べる.

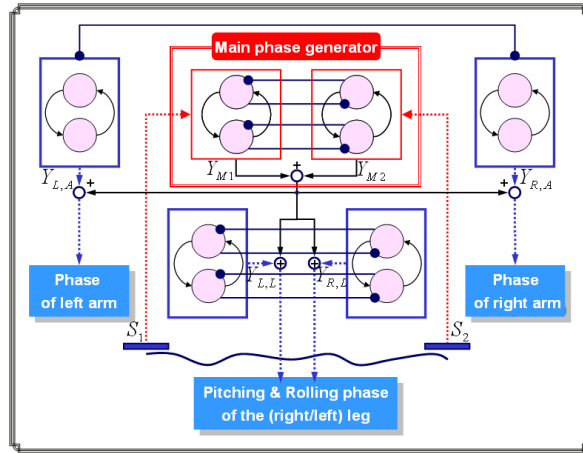


図 4.6: 位相生成器概略図

4.3.1 位相生成器の構成

位相生成器の全体図を図 4.6 に示す。位相生成器は、松岡神経振動子を基幹とした位相振動子のネットワークを意味する。このネットワークは、Main 位相振動子、Limb 位相振動子、Trunk 位相振動子 (図 4.6 では省略している) で構成されている。ここで、神経振動子の接続方法による振動子間の位相関係について説明する。接続方法は二つある。一つは、図 4.7 のように、Extensor Neuron と Extensor Neuron (Flexor Neuron と Flexor Neuron) を結合させる方法。この接続方法を用いると、二つの位相振動子間の位相関係は逆位相となる。二つ目は、図 4.8 にあるように Extensor Neuron と Flexor Neuron を結合させる方法。この接続方法を用いると、二つの神経振動子間の位相関係は同位相となる。これらの接続方法を用いて、右脚 (腕) と左脚 (腕) の神経振動子間は逆位相になるように、位相振動子ネットワークが構成されている。

4.3.2 位相振動子のダイナミクス

位相振動子のダイナミクスを式 (4.1) に示す。

$$\begin{aligned}
 Y_M &= Y_{M1} + Y_{M2} \\
 &= 2\nu t + \alpha(NO_{M1} + NO_{M2}) \\
 Y_{L,leg} &= \nu t + \alpha NO_{Lleg} \\
 Y_{R,leg} &= \nu t + \alpha NO_{Rleg} \\
 Y_{L,arm} &= \nu t + \alpha NO_{Larm} \\
 Y_{R,arm} &= \nu t + \alpha NO_{Rarm}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

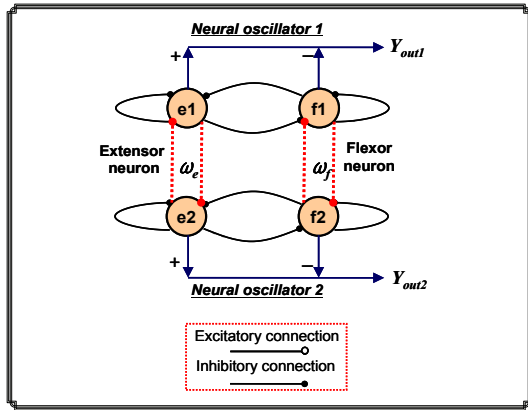


図 4.7: 神経振動子の接合方法 1 : 逆位相

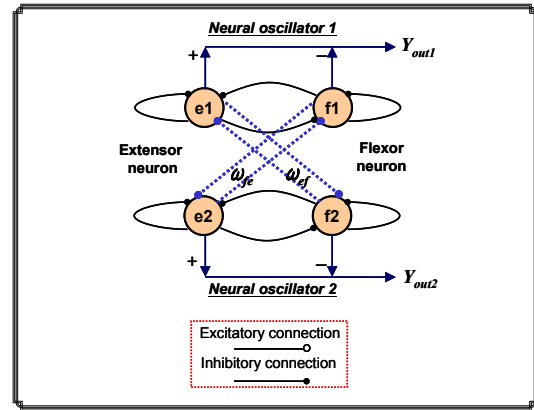


図 4.8: 神経振動子の接合方法 2 : 同位相

ここで, Y_* は各位相振動子の出力, ν は定数, NO_* は松岡神経振動子の出力を表している. また, 添え字 "M", "R", "L" は "main", "right", "left" を意味する.

4.3.3 位相振動子の動作

脚部位相振動子の出力を使って, 位相振動子の動作を説明する. 図 4.9 は, 床面環境が平面の場合の脚部位相振動子の出力である. このように出力は, 時系列に対して線形であり, $0 \sim \pi[\text{rad}]$ を swing mode (または stance mode), $\pi \sim 2\pi[\text{rad}]$ を stance mode (または swing mode) としている. 図 4.10 は, 床面が上り坂の場合の脚部位相振動子の出力である. π に達する前に足裏センサの入力がある. この場合, 足裏センサの入力は, 位相のリセットとして利用しているため, 足裏センサが入力した瞬間に位相値が π へリセットされ, 次の歩行モード (ここでは stance mode) に移る. 下り坂の場合でも同様に, 足裏センサの入力があった瞬間に位相値が π へリセットされている (図 4.11). このように位相出力を変えることで, 床面環境の変化に対して適応できる歩行を生成する.

4.4 歩行軌道生成器

3次元空間でヒューマノイドロボットの歩行を実現するために, 歩行軌道生成器の機能は二つある. 一つは, 脚部ピッチ角を生成する機能: サジタル面における足先軌道生成した後, 逆運動学で脚部関節角度を導出する. もう一つは, 脚部ロール角を生成する機能: ラテラル平面におけるロボット姿勢制御を行うため, 足首ロール角度と腰部ロール角度軌道を生成する機能. これら 2つの機能について説明する.

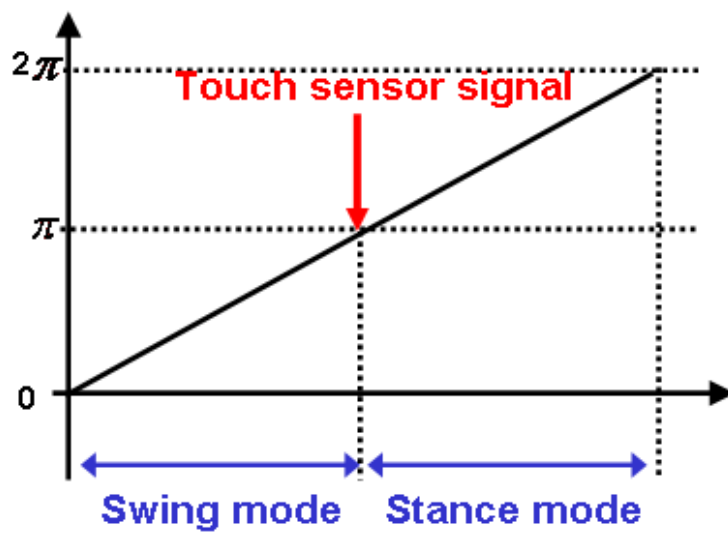


図 4.9: 脚部位相振動子の出力 [平面]

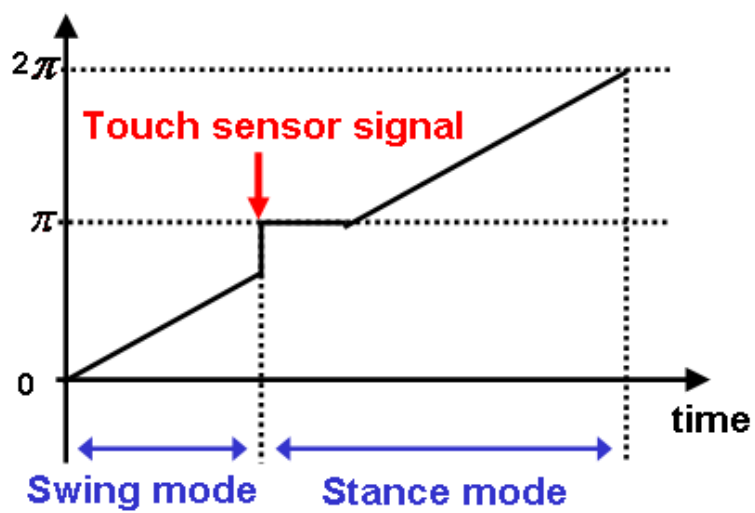


図 4.10: 脚部位相振動子の出力 [上り坂]

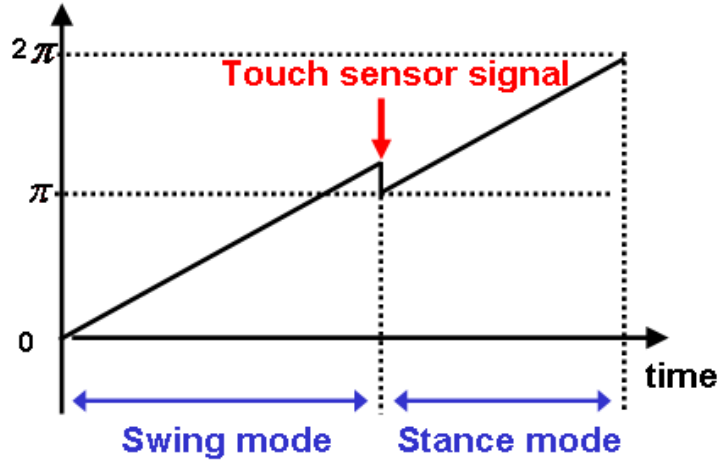


図 4.11: 脚部位相振動子の出力 [下り坂]

4.4.1 脚部ピッチ角の生成

はじめに、デカルト座標系におけるサジタル面の足先軌道を生成する関数を式 (4.2) に示す.

$$Trj_{RL}(x,z) = \begin{cases} (\frac{A_x}{2\pi}(2Y_{RL,leg} - \pi - \sin(2Y_{RL,leg})), \frac{A_z}{2\pi}(1 - \cos(2Y_{RL,leg}))) - H & (0 \leq 2Y_{RL,leg} < \pi \text{ のとき}) \\ (A_x(\frac{3}{2} - \frac{Y_{RL,leg}}{\pi}), H(2 - \frac{Y_{RL,leg}}{\pi})) & (\pi \leq 2Y_{RL,leg} < 2\pi \text{ のとき}) \end{cases} \quad (4.2)$$

ここで, A_x は, 矢状面での歩幅の決定する係数で, A_z は, 歩行軌道の高さを決定する係数である. H は, ヒューマノイドロボットの直立状態における腰部関節から足首関節までの高さ. $Y_{RL,leg}$ は, 右または左脚部の位相. また, 添え字”RL”は”右または左”を意味する.

この関数の出力は, 図 4.12(床が水平面の場合), 図 4.13(床が上り斜面の場合) に示した. 各図とも上図が右足首関節軌道, 下図が左足首軌道である. このように, この関数に入力する位相を変化させるだけで, 様々な傾斜面に対応した歩行軌道を生成できる.

次に, この軌道から逆運動学を用いて, 脚部の関節角度を求める. 求めた脚部の関節角度は, 図 4.14(床が上り斜面の場合) に示した. 青い色のラインは, 各ピッチング関節角度を示しており, 赤色のラインは, 各ローリング関節角度を示している. 図 4.14 の四角で囲っている部分において, 各ピッチング関節角度が一定期間同じ値になっている. この部分は歩行モードの変換点であり, ローリングの角度が $0[\text{rad}]$ になるのを待っている.

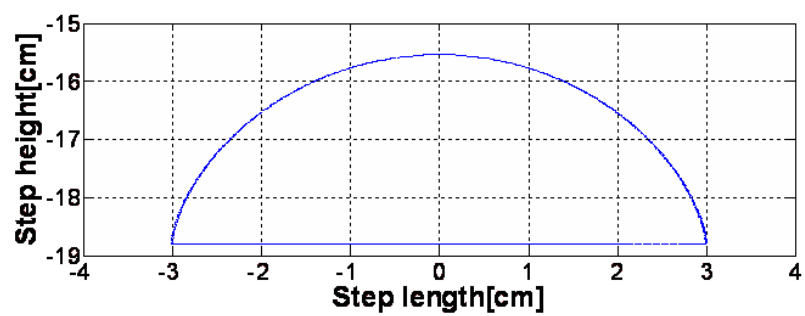
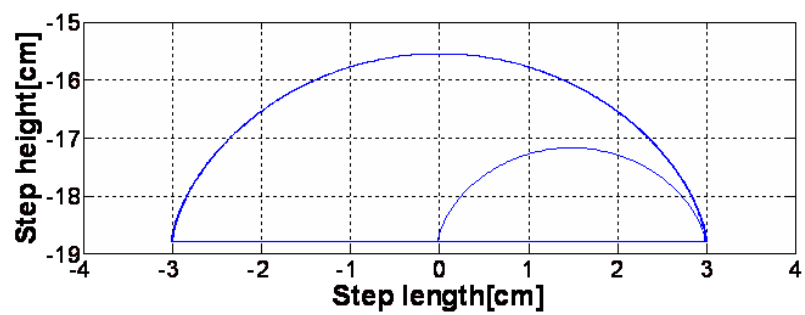


図 4.12: 足先軌道 [平面]

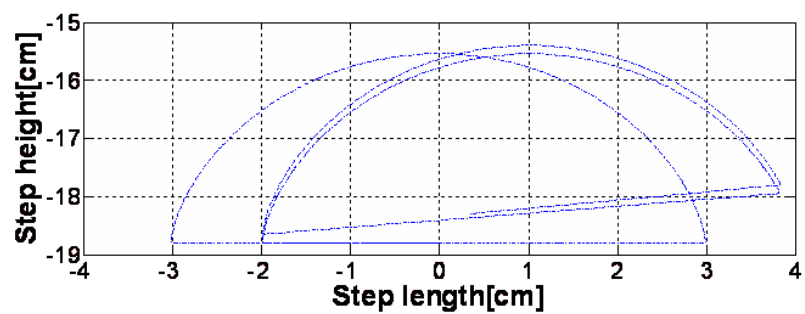
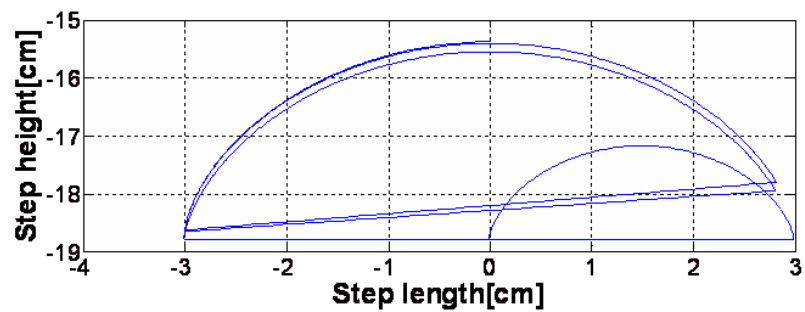


図 4.13: 足先軌道 [上り坂]

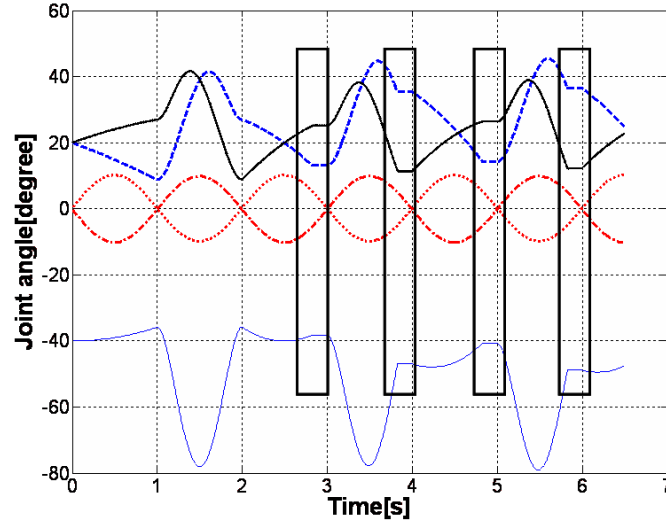


図 4.14: 脚部関節角度 [上り坂]

4.4.2 脚部ロール角の生成

使用するヒューマノイドロボットの脚部には, 足首ロール関節と腰部ロール関節がある. これらの関節角度を求める式を式 (4.3) に示す.

$$\begin{aligned}
 \theta_{L,hip} &= A_{roll} \cos(Y_M) \\
 \theta_{L,ankle} &= -A_{roll} \cos(Y_M) \\
 \theta_{R,hip} &= A_{roll} \cos(Y_M) \\
 \theta_{R,ankle} &= -A_{roll} \cos(Y_M)
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

ここで, A_{roll} は最大ロール角度. 添え字 "rhip", "rankle" はそれぞれ腰部ロール関節, 足首ロール関節を意味する.

4.5 実験

実機による実験では, HOAP-1.0 の改良版である HOAP-1.5 を使用した.

4.5.1 実験結果

提案したアルゴリズムで, 様々な環境における歩行実験を行った. 床面が平面の場合の歩行実験結果を図 4.15 に示す. 床面が上り斜面の場合の歩行実験結果を図 4.16 に示す. 床面が平面から斜面に変化する場合における歩行実験を図 4.17 に示す.

次に、提案したアルゴリズムで様々な歩行パターンを実験した。後ろ向き歩行での実験結果を図 4.18 に示す。反時計回りに回りながら歩行するパターンの実験結果を図 4.19 に示す。

4.5.2 まとめと今後の課題

シミュレーションと実機実験を通じて、様々な床面環境に適応した歩行軌道生成を実現することができた。平地から傾斜面への歩行では、環境の変化にすばやく適応し、軌道を修正することができた。しかし、いくつか解決しなければならない課題も出てきた。以下にその課題について箇条書きした。

- 制御システムへのフィードバックが、足裏タッチセンサー信号のみであったため、不安定な歩行になってしまった。
- 足裏タッチセンサー信号にノイズが乗ってしまい、誤差が生じることがある。
- 接地する際、接地脚の足が地面と水平になっていなければ、傾斜面を歩くことができない。そのため、このアルゴリズムでは、傾斜面の角度をある程度把握していなければ、歩行することができない。

以上これらの課題を解決することが重要となってくる。

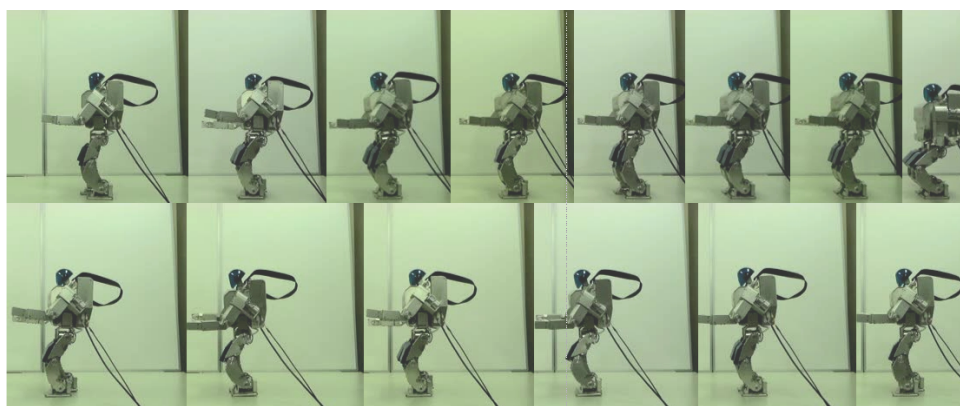


図 4.15: 実験：平面歩行

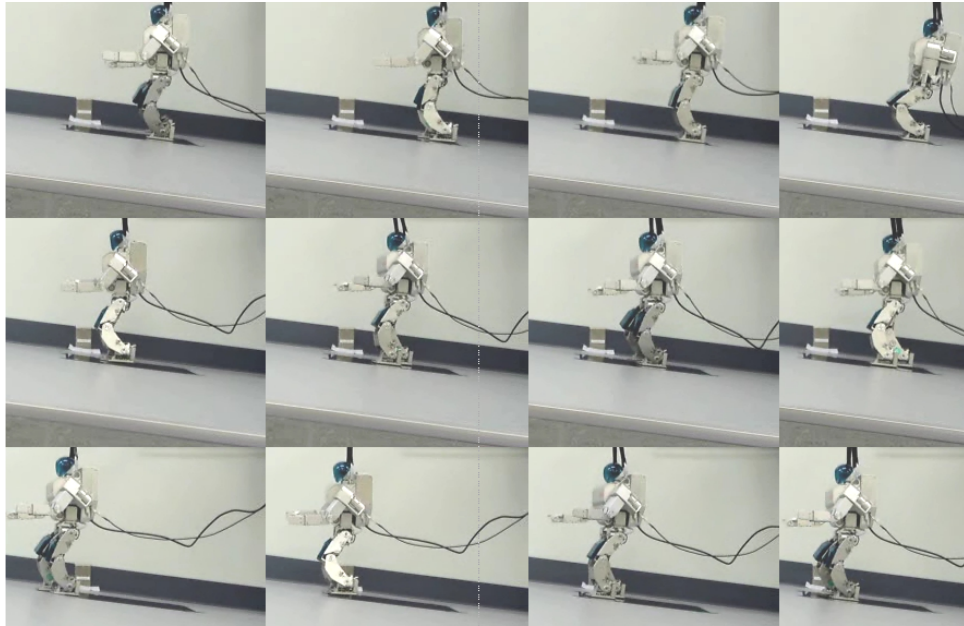


図 4.16: 実験：上り坂歩行

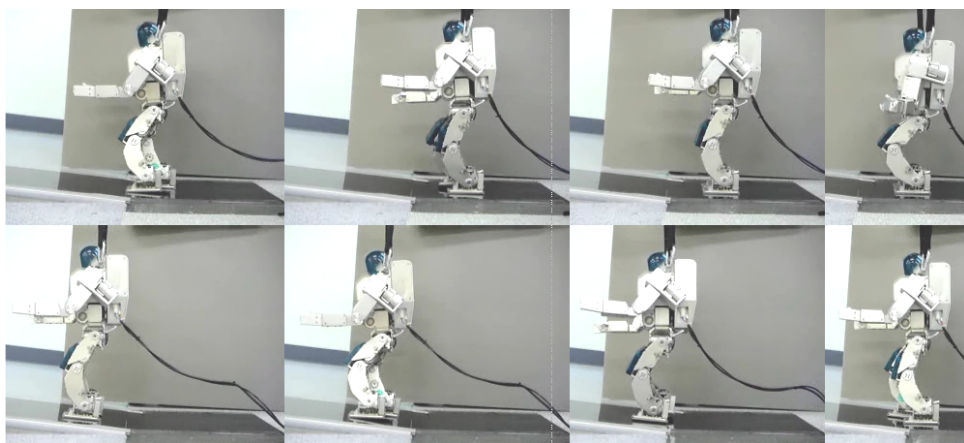


図 4.17: 実験：床面環境変化

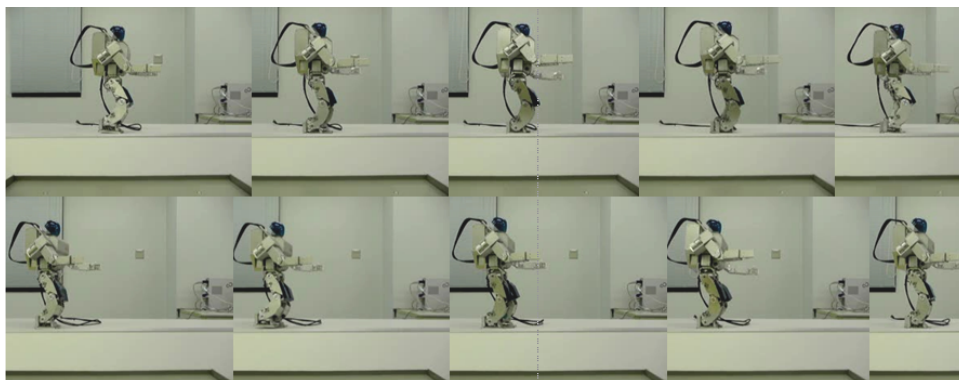


図 4.18: 実験：後ろ向き歩行

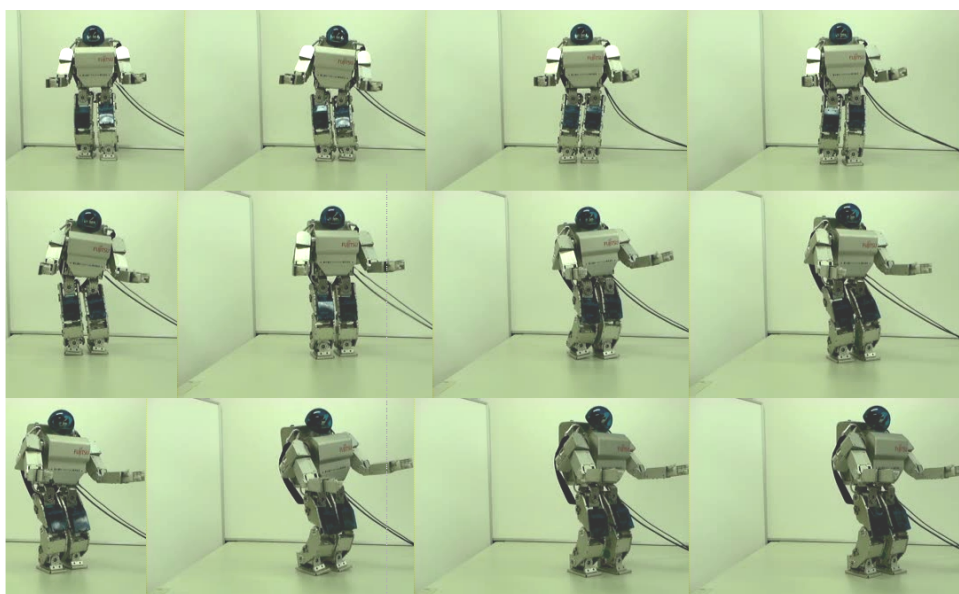


図 4.19: 実験：回転

第5章 姿勢安定性を考慮した歩行生成

前章では、位相振動子を用いて歩行タイミングを生成し、それにより床面環境の変化に対して、適応的な歩行軌道生成を行った。しかし、外乱に対して安定的な歩行の実現に関しては触れなかった。本研究では、簡単な制御システムを構築し、不整地や外乱に対して安定的な歩行の実現を目標とする。神経振動子は、環境に適応的な歩行パターンを生成することができるため、これを用いることで、複雑な制御構成を避ける。福岡ら [20][21] は、神経振動子の出力を利用して適応的な歩行パターンを生成し、仮想バネ・ダンパシステムを利用して、4足ロボットの安定的な歩行を実現した。また、Pratt ら [23][24] はヒューマノイドロボットの COG 位置の安定化を実現するために、仮想バネ・ダンパシステムを利用して必要な力を計算し、各脚部関節にトルクを分配させた。この方法で、外乱に対してロバスト性を示す歩行を実現した。本研究では、上記の研究を参考に、未知の外乱や不整地に対して姿勢安定性を有したヒューマノイドロボットの歩行生成システムを提案し、シミュレーションでその基礎的研究結果を示し、今後の方針を記述する。

5.1 本章で使用するシミュレータの紹介と用語の定義

本章で使用するシミュレータは、OpenHRP を用いる [25][26]。文献 [25] によれば、OpenHRP は、分散ソフトウェアアーキテクチャである CORBA に基づいて構成されている。これにより、ユーザが開発したソフトウェアをモジュールとして容易に追加することが可能である。本章では、このシミュレータ環境を使用するものとする。また使用したヒューマノイドモデルは、富士通オートメーション社の HOAP-1 [27] のモデルを利用した。HOAP-1 の DH パラメータを図 5.1 に示した。

また本章で使用する用語をここで定義する。

サジタル平面とラテラル平面の定義

図 5.2 と図 5.3 にサジタル平面とラテラル平面の図を示した。

3次元空間のデカルト座標定義

図 5.4 に 3次元空間のデカルト座標を定義した。

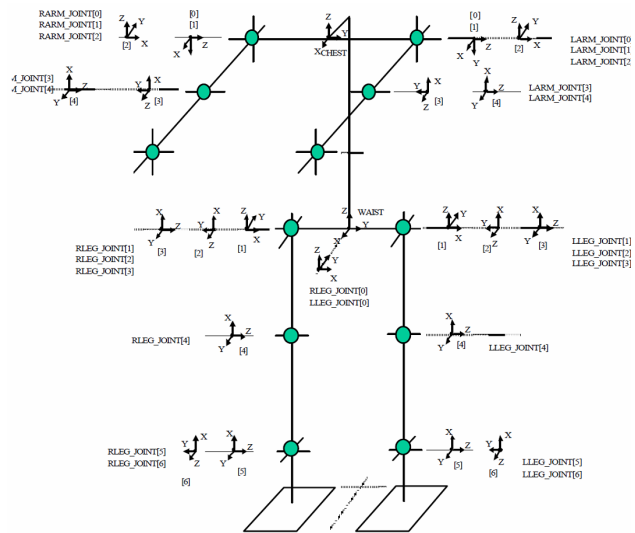


図 5.1: HOAPP-1 DH パラメータ

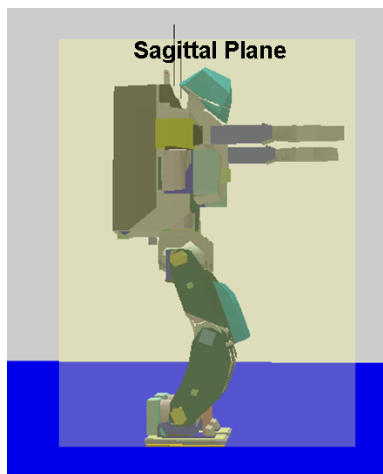


図 5.2: サジタル平面

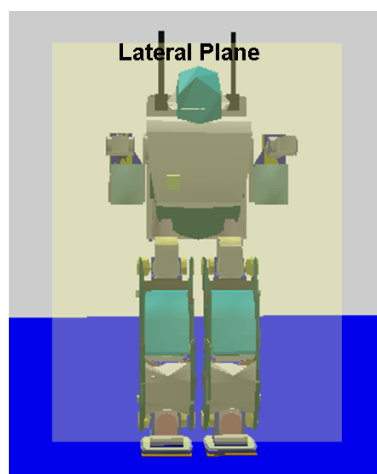


図 5.3: ラテラル平面

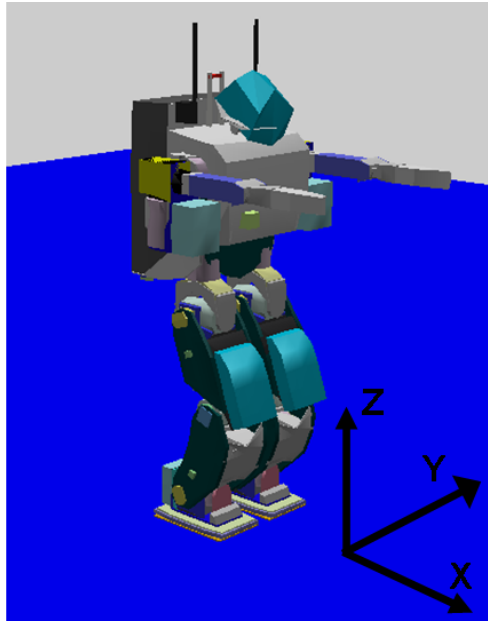


図 5.4: 3次元空間のデカルト座標軸定義

5.2 提案手法

提案した姿勢安定性を考慮した歩行生成システムを図 5.5 に示した。このシステムは、神経振動子が歩行パターンを生成し、この歩行パターンを目標値に仮想バネ・ダンパシステムを利用して、安定した運動を生成する。ここで、提案手法の特徴を以下に示す

1. 神経振動子を用いることによる両脚間などの同期
2. 神経振動子を用いることによる環境の変化への適応
3. 仮想バネ・ダンパシステムを用いることによる外乱への適応性
4. 簡単なシステムを用いることによる動作への理解が容易

これらの特徴を上手く生かした歩行動作生成を実現する。また、歩行を実現するための動作生成を次の3つのパートに分ける：(1) サジタル平面の支持脚動作, (2) ラテラル平面の支持脚動作, (3) サジタル平面の遊脚動作。

次節からは、詳しい動作生成の方法論(サジタル平面の支持脚動作, ラテラル平面の支持脚動作, 各動作の同期方法)と基本的なシミュレーション結果を示し考察を述べる。その後、今後の方針を簡単に示す。

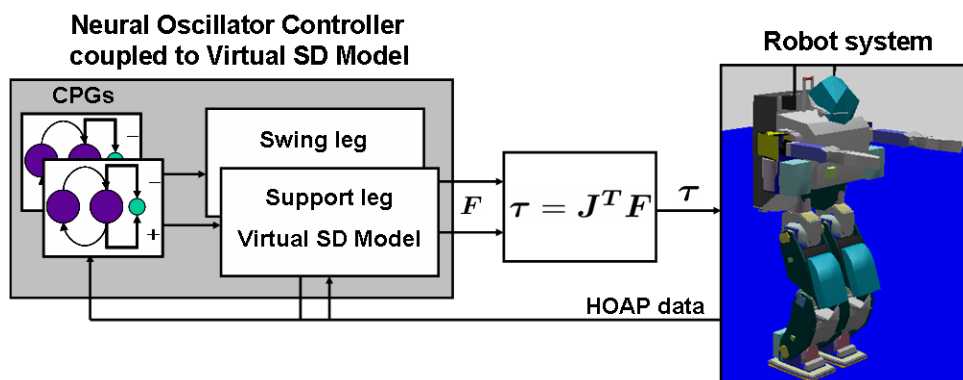


図 5.5: 提案手法概略図

5.3 サジタル平面の支持脚動作

サジタル平面の支持脚動作の生成過程は、次の通りである。まず神経振動子出力を COG の x 軸軌道として生成する。次に仮想バネ・ダンパシステムにより姿勢安定化を考慮して、神経振動子の出力に追従する脚部関節トルクを生成する。これと同時に、ロボットが安定して動作を行えるように2つのシステムを考える。膝関節が逆に曲がらない補償トルクを生成するシステムとロボットの体幹姿勢角度を補償するシステムである。以下にこれらのシステムの詳細を述べる。

神経振動子

神経振動子は、フィードバックとして現在のロボットの COG の x 軸上の値を用いる。神経振動子の出力については、 x 軸の COG 位置の目標値とする。このように神経振動子の出力軌道を x 方向に限定することで、ロボットの制御器内に非線形性を軽減し、より簡単な制御器を構成できる。

仮想バネ・ダンパシステム

Pratt ら [23][24] は、2 足歩行機を単質点系として考え、この質点を環境と結合された仮想バネ・ダンパにより、質点の運動を安定させた。本研究においても、この手法を参考に神経振動子結合型仮想バネ・ダンパシステムの制御システムを構築する。図 5.6 にその概略図を示した。ここで示してあるように、3 つの仮想バネ・ダンパシステムから構成されてい

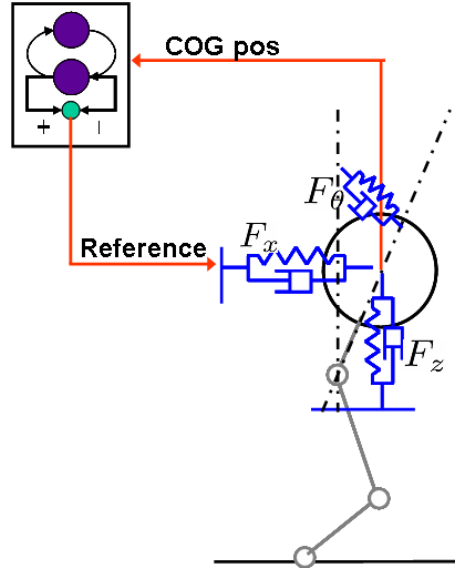


図 5.6: 神経振動子結合型仮想バネ・ダンパシステム

る. 各システムの出力は, 式 (5.1) で表せる.

$$\begin{aligned}
 F_x &= cp_x(NOout - COG_x) - cv_x\dot{COG}_x \\
 F_z &= mg + cp_z(COG_{z_0} - COG_z) - cv_z\dot{COG}_z \\
 F_\theta &= -cp_\theta\theta - cv_\theta\dot{\theta} \\
 \theta &= \theta_a + \theta_k + \theta_h
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

ここで, $NOout$ は神経振動子の出力, $COG_{x,z}$ は x 方向, z 方向の重心位置, COG_{z_0} は z 方向の重心目標高さ. θ_i は各脚部関節のピッチング角度, cp_i, cv_i はバネとダンパの係数. m はロボットの質量. また添え字 "a", "k", "h" はそれぞれ足首関節, 膝関節, 腰関節を表している.

このように, 神経振動子が生成するパターンを x 方向のみに固定して, サジタル平面の支持脚動作の動作パターンを生成する.

脚部関節トルク生成

仮想バネ・ダンパで生成した力を各脚部関節トルクとして割りあえてる方法を導入する [23]. 以下の導入は, 文献 [23] 参考にした. 図 5.7 を基に足首関節位置を原点として腰関節の位置と姿勢を以下の式のように求める.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ z \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L1 \sin(\theta_a) - L2 \sin(\theta_a + \theta_k) \\ L1 \cos(\theta_a) + L2 \cos(\theta_a + \theta_k) \\ \theta_a + \theta_k + \theta_h \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

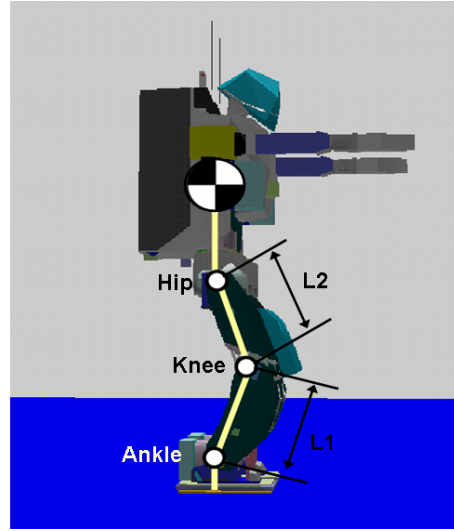


図 5.7: 脚部概略図

次に, 式 (5.2) の両辺を各関節角度で偏微分して, ヤコビアンを求める.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 \\ J_{21} & J_{22} & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

ここで,

$$\begin{aligned} J_{12} &= -L2 \cos(\theta_a + \theta_k) \\ J_{11} &= J_{12} - L1 \cos(\theta_a) \\ J_{22} &= -L2 \sin(\theta_a + \theta_k) \\ J_{21} &= J_{22} - L1 \sin(\theta_a) \end{aligned} \quad (5.4)$$

式 (5.3) より, 仮想バネ・ダンパで生成した力をトルクに変換することができる.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (5.5)$$

ここで, $\boldsymbol{\tau}$ は関節トルク, $\mathbf{F}$ は $\mathbf{F} = [F_x F_z F_\theta]^T$.

膝関節補償トルク生成

動作によっては, 膝関節が逆に曲がってしまうため, これを補償するトルクを生成する. この方法の概略図を図 5.8 に示す. 図 5.8 のように, 概念的には膝関節に接合された 2 つのリ

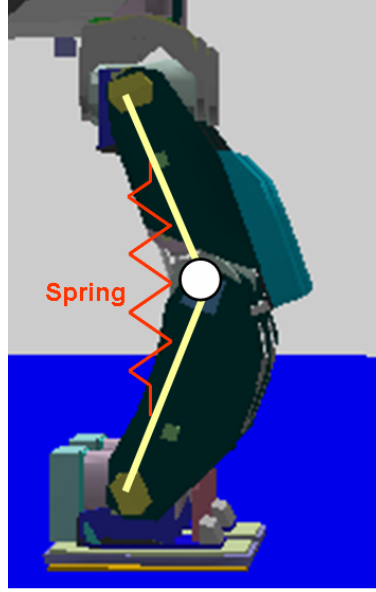


図 5.8: 膝関節補償トルク生成方法概略図

リンク間に仮想的なバネを取り付け, 安定した膝関節角度に戻すトルクを生成する. このシステムで生成するトルクの式を以下に示す.

$$\tau_n = \tau_{prev} + kk(\theta_{k0} - \theta_k) \quad (5.6)$$

ここで, τ_n は, 生成した膝関節トルク. τ_{prev} は, 仮想バネ・ダンパシステムで生成した膝関節トルク. kk は, バネ係数. θ_{k0} は初期膝関節角度.

体幹姿勢補償トルク生成

ヒューマノイドロボットは慣性系に固定されていないため, 関節角度のみのフィードバックでは姿勢を安定させることは難しい. そのため, 一般的に体幹姿勢を制御を行うのには, ジャイロセンサを用いて姿勢を計測し, フィードバック制御により補償する. 本研究においても, ジャイロセンサから計測された値を用いて腰部関節で体幹姿勢を行った. しかし, これまでのヒューマノイドロボットの研究において, この方法の問題点が指摘されている. 杉原ら [28] は, ジャイロセンサから得た値を数値積分して姿勢角度を検出しているため, 誤作動があることを指摘しており, その解決方法を提案している. また, 西脇ら [29] は, センサの時間遅れなどの問題でハイゲインにすることが困難で, 十分に補償ができないことや, 毎回起こる変形をフィードバックにより補償しているので歩行安定余裕が減少することや, 脚部に姿勢角センサが取り付けられていない場合, 非水平面接地時の地面の傾斜角も補償してしまうことの問題点を挙げ, 解決方法を提案している. 本研究も今後はこれらの問題に取り組む必要があり, 今後の課題の一つである.

シミュレーション

上記した方法を使用して、サジタル平面の支持脚動作のシミュレーションを行った。図 5.9 に、OpenHRP 上における両脚支持での動作経過を示した。図 5.10 に腰関節の x 方向の位置 (青線) と神経振動子の出力 (赤線) を示した。この結果から、目標値に対して少し遅れが出ているが、同期して安定動作を実現できていることが分かる。また、図 5.11 に、OpenHRP 上における片足支持の場合のシミュレーション結果を示した。これも両脚支持の場合と同様安定した動作を実現できた。

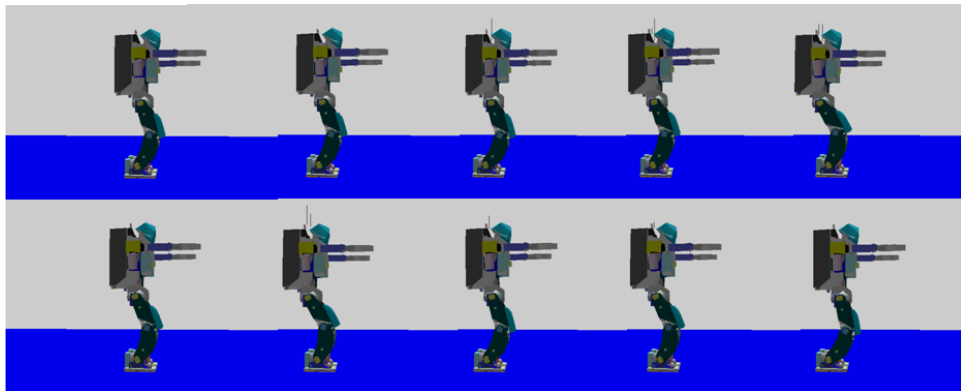


図 5.9: 両脚支持 : 0.5 秒毎の動作経過

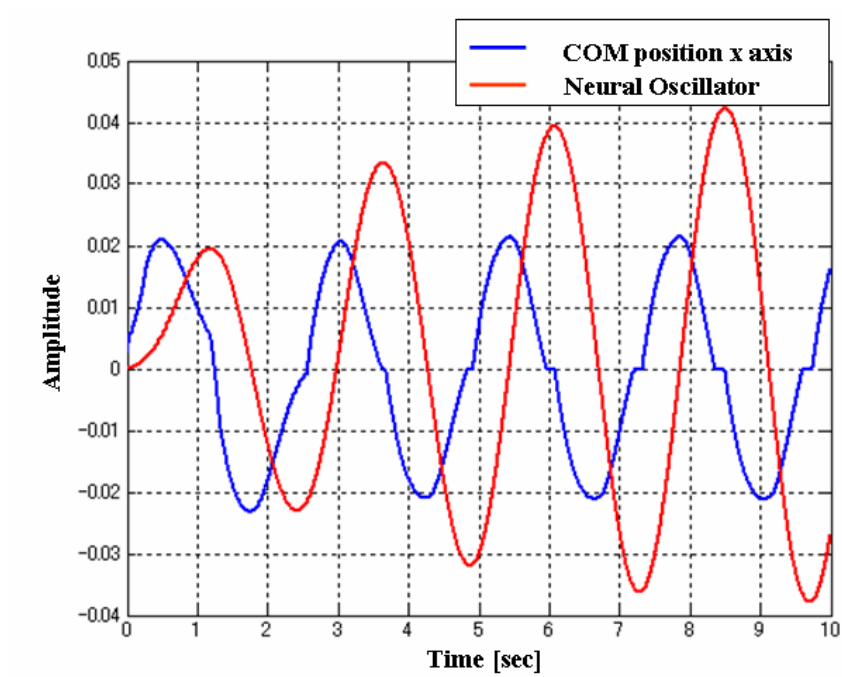


図 5.10: 両脚支持 (腰関節の x 位置と神経振動子の出力)

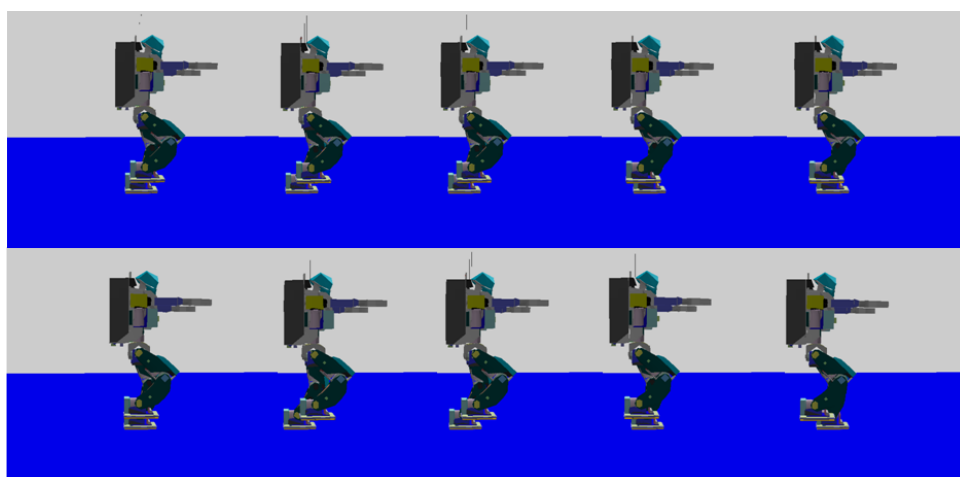


図 5.11: 片脚支持 : 0.5 秒毎の動作経過

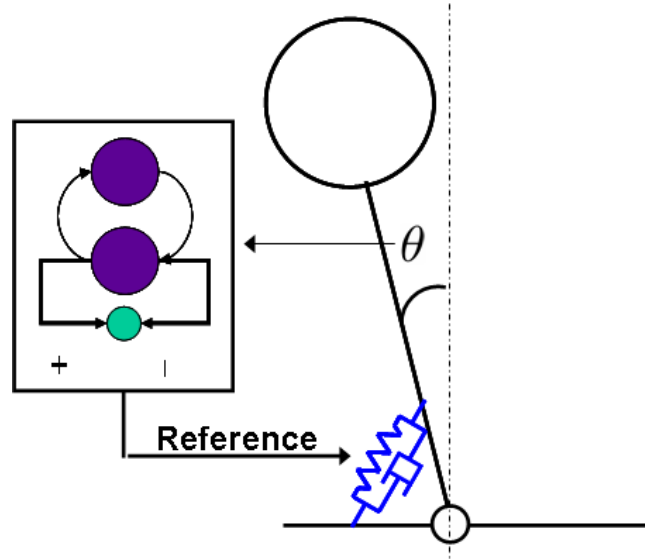


図 5.12: ラテラル平面の支持脚動作の生成方法概略図

5.4 ラテラル平面の支持脚動作

ラテラル平面の支持脚動作の生成方法概略図を図5.12に示す。今回使用しているヒューマノイドロボットモデルの脚部でローリング関節を有するのは、足首関節と腰関節のみである。そのため、ロボットの重心位置を安定させるためには、腰関節または足首関節のローリング角度が一つ決定すれば、もう一つの関節の角度は一意に決定する。このようなことから、一つの神経振動子の出力で関節軌道の目標値にすることができるので、ラテラル平面の姿勢制御器も簡単な制御器構成で実現できる。以下にラテラル平面のトルクを生成する式を示す。

$$\begin{aligned}\tau_{ankle} &= rp_{ankle}(NOout - \theta_{ankle}) - rv_{ankle}\dot{\theta}_{ankle} \\ \tau_{hip} &= rp_{hip}(-NOout - \theta_{hip}) - rv_{hip}\dot{\theta}_{hip}\end{aligned}\tag{5.7}$$

ここで、 rp_i, rv_i はバネとダンパの係数。

次に、これらの方法を使用して、ラテラル平面の支持脚動作のシミュレーションを行う。図5.13にOpenHRP上での動作経過を示した。安定した連続運動を行えているのがわかる。図5.14に、腰関節のy方向の位置(青線)と神経振動子の出力(赤線)を示した。サジタル平面の支持脚動作の場合と同様に、目標値である神経振動子の出力に対して少しの遅れが生じているが、同期して追従しているのが分かる。

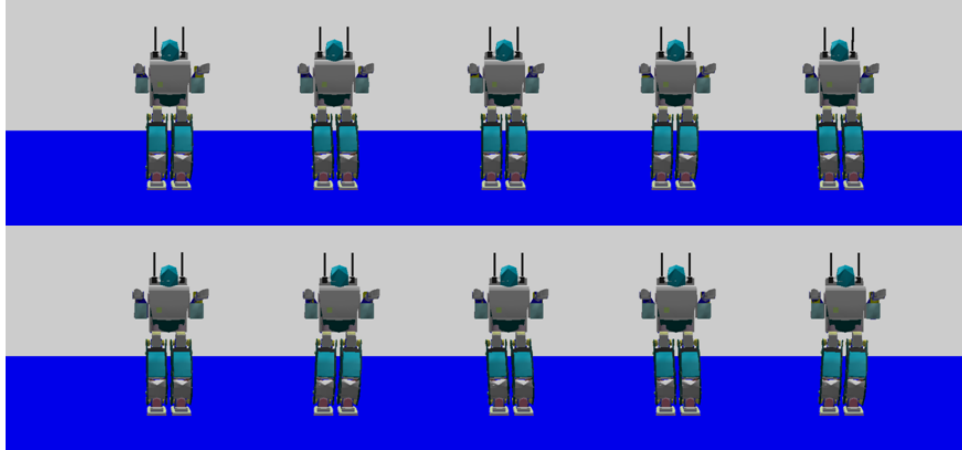


図 5.13: ラテラル平面 : 0.5 秒毎の動作経過

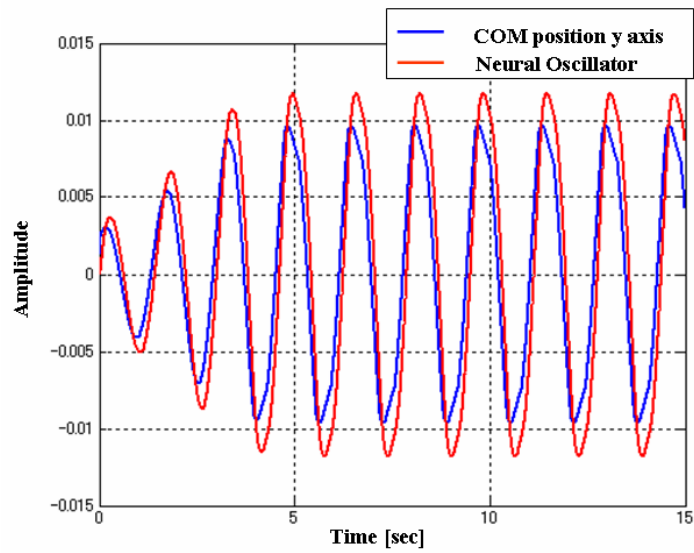


図 5.14: 腰関節の y 位置と神経振動子の出力

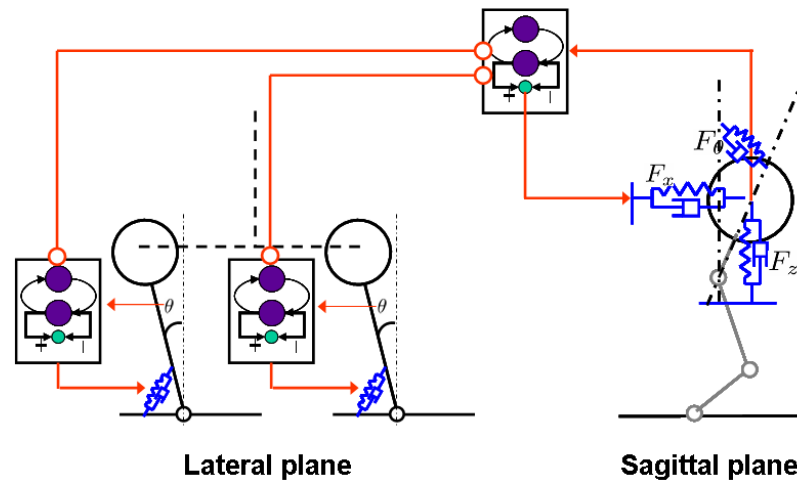


図 5.15: 同期シミュレーション方法概要

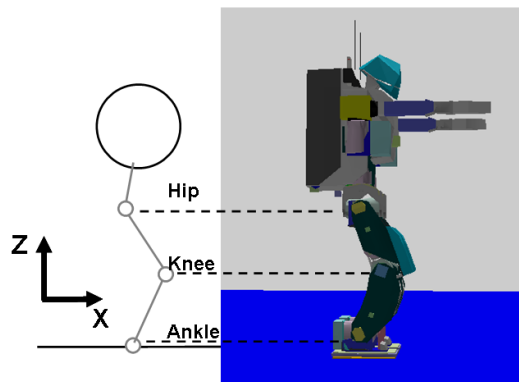


図 5.16: 3 リンク倒立振子モデル座標

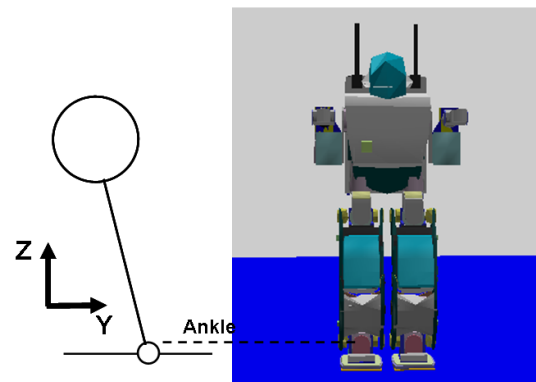


図 5.17: 1 リンク倒立振子モデル座標

5.5 各動作間の同期方法

2足歩行で重要なことは、各動作をすべて同期させることである。上述した動作生成は、すべて神経振動子が基幹となっているため、これらの神経振動子間で同期を取ることで、すべての動作が同期を取ることができる。前章で、神経振動子間の結合方法による位相関係を示しており、本章でもこの方法を採用する。

ここで、簡単な同期シミュレーションを行う。図 5.15 にシミュレーション方法の概要を示した。本シミュレーションは、3リンクの倒立振子モデルでサジタル平面の支持脚動作を、1リンクの倒立振子モデルでラテラル平面の支持脚動作を実装している。図 5.16 に3リンクの倒立振子モデルの座標設定を、図 5.17 に1リンクの倒立振子モデルの座標設定を示している。この座標設定は OpenHRP の座標と対応するように決定してある。これらのモデルを使用して、動作を生成する神経振動子間を結合し、二つの動作が同期を取れているか検証した。

図 5.18 に二つの神経振動子の出力結果を、図 5.19 に OpenHRP モデルの腰関節位置に対応する各モデルの位置 (x,y) を示した。この二つのモデルは、仮想バネ・ダンパシステムで使用する係数が違うため、目標値に対する遅れの違いが出てくる。このことを考慮して、各動作間の完璧な同期をとるために、神経振動子間の同期タイミングを少しずらしている。しかし、細かいパラメータの設定を必要とするため、各動作パートの遅れの違いを補償する解決方法を見つけることが望ましく、今後の課題である。

5.6 まとめと今後の展望

本章では、姿勢安定化を考慮した歩行生成システムの提案をした。このシステムを次の3つの動作パートに分けた：(1) サジタル平面の支持脚動作、(2) ラテラル平面の支持脚動作、(3) サジタル平面の遊脚動作。このうち (1)、(2) の動作生成手法とそのシミュレーション結果を示した。また、それぞれの動作の同期方法を提示し、その検証を行った。

今後の展望として以下の3つの点を挙げる。

1. サジタル平面の遊脚動作生成方法の提示と検証
2. 支持脚と遊脚の切換えシステムの提示と検証
3. サジタル平面とラテラル平面動作間の遅れ補償システムの提示と検証

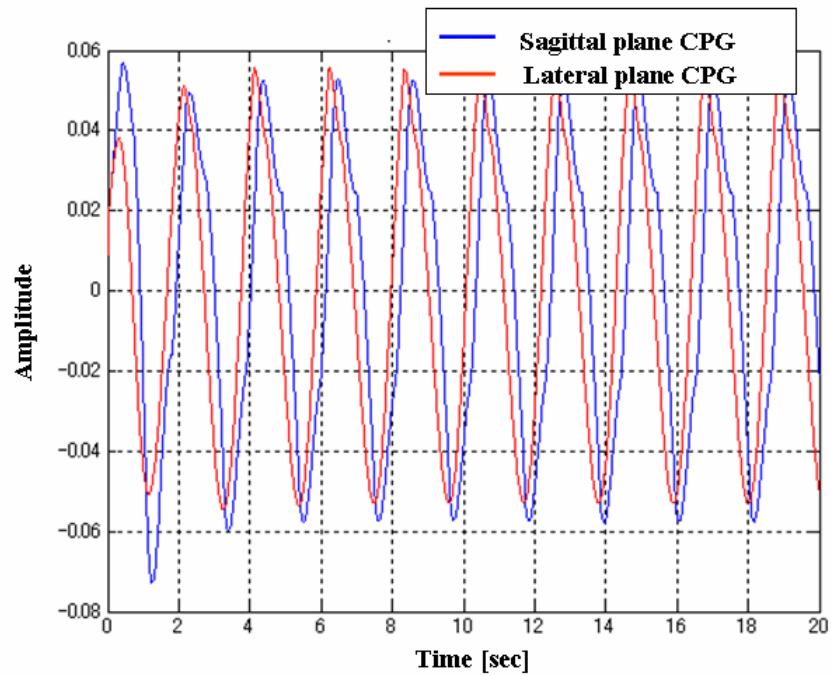


図 5.18: 神経振動子出力

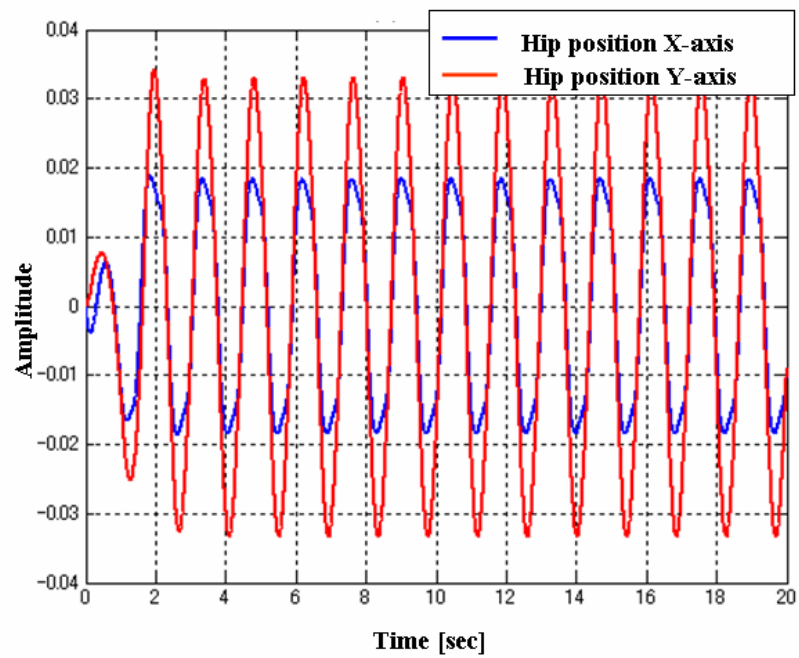


図 5.19: 腰関節の x,y 位置

第6章 結論

6.1 まとめ

本研究は, 様々な環境下でヒューマノイドロボットの歩行を実現するために3つのパートに分けて研究を行ってきた. 1つ目は, 神経振動子パラメータ調整の研究. 簡単な動力学モデルを使用して神経振動子のパラメータを調整することを実現できた. 2つ目は, 位相振動子を利用して様々な床面環境で歩行を実現できる軌道生成の研究. 上り坂, 平面に対して適応的に歩行軌道を生成することができた. そして3つ目は, 外乱に対してロバスト性のある歩行生成についての研究. 神経振動子を結合させた仮想バネ・ダンパシステムを利用することで, 安定的な歩行動作を実現させることを目標に, その基礎研究を行った.

6.2 今後の課題

本研究で3つのパートに分けて研究を行ってきたが, 3つ目の研究がまだ基礎研究段階にある. この研究を完成させ外乱に対してロバスト性のある歩行生成を実現することが先決である. そして, 次にこの3つのパートを一つのシステムとしてまとめることにより, 様々な環境下でヒューマノイドロボットの歩行を実現できることが期待される.

謝辞

本研究にあたり，ご指導ご鞭撻を頂いた北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 丁洛榮助教授に心から深く御礼申し上げます。

また，大学院博士後期課程の梁 佑誠氏，大学院博士前期課程の瀬尾 若葉氏と村上 享平氏には研究に関する助言をいただき大変感謝しております。

加えて日々の様々な面で助言やご協力を下さった丁研究室の博士後期課程，前期課程の皆様にも御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 日本政策投資銀行, ”最近の経済動向- 我が国産業構造の中期見通し”, 2004 年 12 月.
- [2] OECD, ”Labor Force Statistics”.
- [3] 新産業創造戦略および次世代ロボットビジョン懇談会報告書.
- [4] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu, ”Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment”, *Biological Cybernetics*, vol.65, pp147–159, 1991.
- [5] 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, pp147–164, 2001.
- [6] K. Matsuoka, ”Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators”, *Biological Cybernetics*, Vol.56, pp345–353, 1987.
- [7] 深谷 祐介, ”ニューラルオシレータを用いた動的システムの制御に関する研究”, 北陸先端科学技術大学院大学, 修士論文, 2006.
- [8] Matthew M. Williamson, ”Robot Arm Control Exploiting Natural Dynamics”, PhD thesis MIT, 1999, 1999.
- [9] E. Slotine, Weiping Li ”APPLIED NONLINEAR CONTROL”, Prentice Hall, pp157–190, 1991.
- [10] K.Hase, K.Miyashita, Sooylo OK and Y. Arakawa, ”Humanoid gait simulation with a neuromusculoskeletal model and evolutionary computation”, *J. Visual. Comput. Animat.* 2003, vol 14, pp73–92.
- [11] Toshiyuki Kondo, Takanori Somei, Koji Ito, ”A predictive constraints selection model for periodic motion pattern generation”, *Proceeding of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'04)*, 975/980 (2004)
- [12] K.Ohta, M.M.Svinin, Z.Luo, S.Hosoe, ”Optimal Trajectory Formation of Human Reaching Movement in Crank-Rotation Task”, *Systems and Computers in Japan*, Vol.36, NO.12, pp22–32, 2005.

- [13] Kirkpatrick,S.,Gelett Jr.C.D., Vecchi,M.P, "Optimization by Simulated Annealing", Science, 1983.
- [14] 同志社大学工学部知識工学科 知的システムデザイン研究科,
<http://mikilab.doshisha.ac.jp/dia/>.
- [15] 小西健三, 瀧和男, 木村宏一, "温度並列シミュレーテッド・アニーリング法とその評価", 情報処理学会論文誌, vol.36, pp797-807, 1995.
- [16] 梁 佑誠, 村井 真也, 丁 洛榮, "位相振動子ネットワークを利用した適応的歩行生成", 第24回日本ロボット学会学術講演予稿集, 3H21, 2006.
- [17] W. Yang, S. Murai, K. Murakami, W. Seo and N.Y. Chong, "Adaptation in Bipedal Locomotion Using Phase Oscillator Networks", The 3rd International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2006), pp18, 2006.
- [18] 富士通オートメーション株式会社, 小型ヒューマノイドロボット「HOAP-2」取扱説明書, 07版, 2004
- [19] S. Aoi, K. Tsuchiya, "Locomotion Control of a Biped Robot Using Nonlinear Oscillators", Autonomous Robots, Vol.19, pp219-232, 2005.
- [20] 福岡 泰宏, 木村 浩, "四足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行-神経・機械カップリング系構成法の提案とピッチ運動・CPG・ロール運動間相互引き込みの評価-", 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.4, pp1-12, 2003.
- [21] 福岡 泰宏, 木村 浩, "四足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行-自立型「鉄犬2」による屋外歩行の実現-", 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.1, pp138-154, 2007.
- [22] 梶田 秀司, "ヒューマノイドロボット", オーム社, 2005.
- [23] J. Pratt, "Exploiting Inherent Robustness and Natural Dynamics in the Control of Bipedal Walking Robots", PhD thesis, MIT 2000.
- [24] J. Pratt, G. Pratt, "Exploiting Natural Dynamics in the Control of a 3D Bipedal Walking Simulation", Proceedings of the 36 Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing, 1998.
- [25] 金広 文男, 藤原 清司, 梶田 秀司, 横井 一仁, 金子 健二, 比留川 博久, 中村 仁彦, 山根 克, "ヒューマノイドロボットソフトウェアプラットフォーム OpenHRP", 日本ロボット学会誌, Vol.21 NO.7, pp785-793, 2003.
- [26] OpenHRP, <http://mikilab.doshisha.ac.jp/dia/>

- [27] 富士通オートメーション(株), (株) 富士通研究所, "HOAP-1 仕様", 第2版, 2002.
- [28] 杉原 知道, 中村 仁彦, "レートジャイロの非積分型フィードバックによるヒューマノイドロボットの体幹姿勢安定化", 第24回日本ロボット学会学術講演予稿集, 2006.
- [29] 西脇 光一, 加賀美 聡, 國吉 康夫, 稲葉 雅幸, 井上 博充, "姿勢角センサを用いた股関節部の変形補償量獲得による歩行動作の安定化", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 2002.
- [30] Tomomichi Sugihara, "Mobility Enhancement Control of Humanoid Robot based on Reaction Force Manipulation via Whole Body Motion", PhD thesis, 2004.
- [31] G. Endo, J. Morimoto, J. Nakanishi, G. Cheng, "An Emprical Exploration of a Neural Oscillator for Biped Locomotion Control", 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA ,April, 2004.