JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	神経振動子を用いたヒューマノイドロボットの人間に近い行動制御
Author(s)	村上，享平
Citation	
Issue Date	2008-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/4362
Rights	
Description	Supervisor:丁洛榮，情報科学研究科，修士

JAPAN ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

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人間に近い行動制御

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

村上 享平

2008 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人間に近い行動制御

指導教官　丁 洛榮　准教授

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

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

0610085 村上 享平

提出年月: 2008 年 2 月

Copyright © 2008 by Kyohei Murakami

概 要

本研究では, 安定な力と不安定な力を見事に調和させた人間の歩行動作に着目し, シミュレーション環境上に配置されたヒューマノイドロボットに適応させて歩行生成を行った. 提案手法では, 神経振動子, 仮想バネ・ダンパ等による安定性の確保と, 重力や慣性力といった不安定な力の積極的な利用を行い, その結果を人間の歩行形態やデータと比較, 検証を行った. また, 外乱として, 段差を設けた環境を設定し, シミュレーションを行った結果, 姿勢を安定化させて定常歩行に戻ることができた. これらを応用して, ヒューマノイドロボットが人間に近い歩行を生成ができるならば, 実社会に投入した際に, 今以上の親近感を持って我々の生活に溶け込むことが期待できる.

目 次

第1章　序論 **1**
1.1　背景 1
1.2　研究の目的と論文構成 3

第2章　神経振動子 **5**
2.1　CPG 5
2.2　運動パターンの生成過程 5
2.3　神経振動子 6
2.4　神経振動子の引き込み特性 7

第3章　人間の歩行とロボットの歩行について **8**
3.1　人間の歩行 8
3.2　既存のヒューマノイドロボット 9
3.3　特異値問題 10

第4章　基礎実験 **12**
4.1　神経振動子の引き込み範囲 12
4.2　重心位置による効率性の検証 13

第5章　歩行生成について **16**
5.1　使用するシミュレータの紹介と用語の定義 16
5.2　歩行生成方法概略 17
5.3　Frontal 平面の動作生成方法 18
5.4　Sagjittal 平面の動作生成方法 20
5.4.1　歩行状態の定義 20
5.4.2　状態の切り替え条件 22
5.4.3　支持脚期 22
5.4.4　遊脚期 24

第6章　検証 **30**
6.1　歩行形態からの検証 30
6.2　データからの検証 33
6.3　ロバスト性に関する検証 41

第 7 章　結論 **44**
7.1　まとめ 44
7.2　今後の課題 44

第1章　序論

1.1　背景

近年, 様々なロボットの実用化に向けての研究が盛んである. こうした研究開発の背景には, 昨今の日本における高齢化社会の深刻化といった事情が見え隠れしている. 特に, 高齢化社会に伴い, 介護・福祉への関心や労働力不足への懸念が高まっている. これらの社会的背景のもと, 人間の代わりに作業を行わせるために, ロボットの需要は図 1.1[1], 図 1.2[1] からも読み取れるように日常生活や医療福祉といった分野で伸びを見せ, 今後, 急激に需要が増加していくことが伺える.

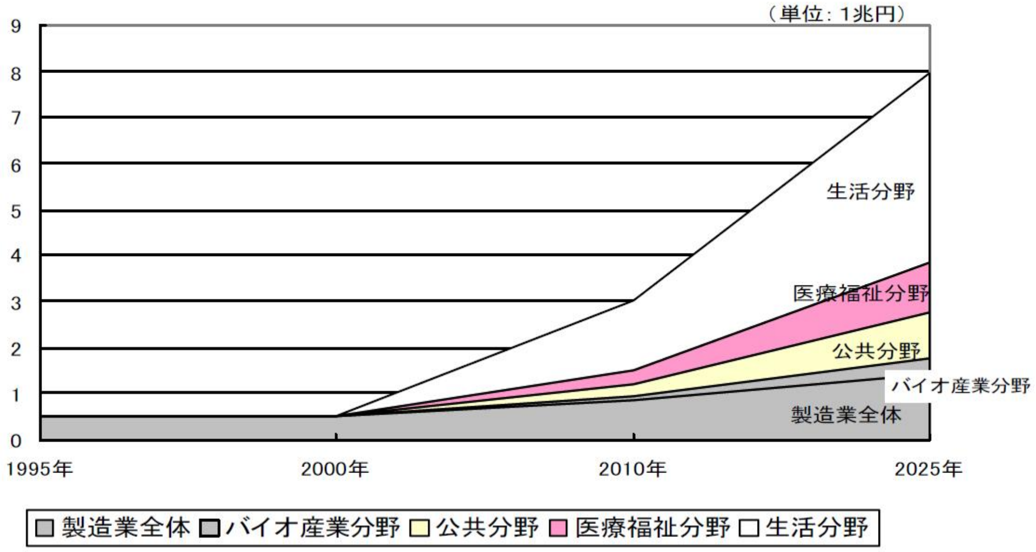

図 1.1: 将来のロボットの市場規模予測

ただし, これらの分野で活躍が期待されるロボットは, 産業用ロボットとの決定的な違いを要求される. それは, 人間の環境において人間と直接触れ合う機会が増えるために, 複雑で繊細な作業も求められるということである. この期待に応えるために, 特にヒューマノイドロボットの研究が盛んである. ヒューマノイドロボットを開発する上での大きな利点は三つある [10] と言われている.

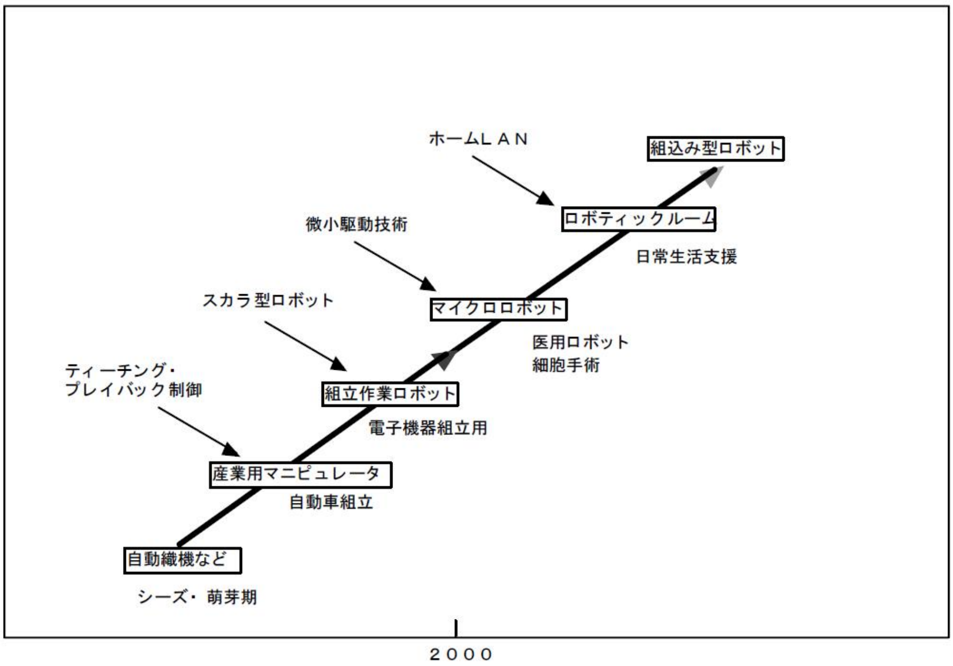

図 1.2: ロボット産業の展開イメージ

- 人間の環境がそのまま適用できる.
- 人間の使う道具がそのまま使える.
- 人間の形をしていることそのものに意味がある.

第一と第二の特徴は, ロボットを実社会に投入する上で重要となる特徴である. 現在の社会インフラは当然のことながら, 人間用に整備されている. 一方, ロボット全般には様々な形態が存在するが, 人間社会にロボットを投入した場合, そのロボットが適応できる環境や道具に整備し直さなければならないとしたら大変, 非効率である. 人間のために整備された環境において, より我々の環境に適応し溶け込むためには, 人間型のロボットが最適であるといえる.

さらに, 我々の環境に溶け込むことを考えたとき, 第 3 の特徴をもつヒューマノイドロボットに大きな意味が付加される. 前述のように人間と直接触れ合う機会が増えるならば, 人間に似た形をすることで, 思い入れが向上する [10]. これが第三の特徴の利点である. 例えば, 介護福祉といった繊細な作業を行う際, 介護される側の人間には不安はつきものである. この不安を少しでも取り除き, 安心感を得るためには, 人間と同じような形をしていることが利点となる.

このように, ヒューマノイドロボットには, 他のロボットと違い, 多くの可能性がある. しかし, ヒューマノイドロボットを実環境で使用するためには, 安定した二足歩行は不可欠である. ところが, 人間の環境のように未知環境においての安定かつ適応的な行動生成を

行うことは難しい. 現在, この問題点を解決するために, 様々な安定化手法が考案されている. その一つが神経振動子である. 神経振動子は, 動物の脊髄中にあるとされる中枢パターン生成器（CPG:Central Pattern Generator）[4] をモデル化したものである. 動物はこの CPG によって, 様々な環境下で, 適応的な行動を生成できるとされている. 神経振動子を用いることで, 生物の適応的行動生成を行う運動制御のシステムを利用した制御手法が可能となる. 多賀ら [3] はこれを利用して, 人間の歩行運動の制御方法を提案した. 現在, この神経振動子を用いてヒューマノイドロボットの二足歩行に応用するための研究が盛んに行われている.

また, ヒューマノイドロボットの安定化制御については様々な研究がなされているが, 一方, 人間に近い動作を行わせる研究は後回しにされがちである. これは, 実社会での使用を目的としているために安定化手法を開発するのが先決で, 人間のような歩行はエンターテイメントの分野であるとして軽視されがちであるからである. しかし, 人間の歩行を観察した場合, 安定と不安定を見事に融和させて歩行を行っていることに気づく. この観点のもとに近年, 重力という制御不可能な力を利用した受動歩行にも注目が集まっている. これは何の動力もなしにカタカタと斜面を歩く昔ながらのおもちゃのような力学的機構を応用した歩行であり,McGeer[2] は動力なしの単純化した二足歩行モデルで下り坂の斜面での安定した歩行が行えることを提唱した. 受動歩行を行う利点として, エネルギー効率がよいことが言われている.

1.2 研究の目的と論文構成

ヒューマノイドロボットの理想形は, 人間のようにスムーズ, かつ, 安定した歩行が行えることである. しかし, 実社会での使用に耐えうるためには, まずは安定性の確保が重要であることは言うまでもない. 特に未知環境下において, 適応的な行動を生成しなくてはならない. 既存のコントローラでは制御対象や環境を正確にモデリングする必要があり, 未知環境や突発的な外乱に対するロバスト性が実現できない. そこで, 近年, ロバスト性に優れ, 環境のモデリングを必要としない神経振動子に注目が集まっている.

一方で, 生物規範型である神経振動子をコントローラに用いたとしても, 広く一般的に用いられるロボットの制御手法では, 人間に近い, 人間のような歩き方を生成することは困難である. これは, 現在の多くのロボットが, 遅れ 0 のハイゲインフィードバックによって, ステップごとに各関節角度を指定した制御になっているからである. 各関節の角度を指定した制御の場合, 外乱に弱く, ぎこちない, いかにもロボットといった動きになってしまう.

しかし, 人間の歩行を観察すると, 重力や慣性力といった一見, 不安定とも言える力を上手く利用した動きや, 各関節の筋肉の協調, つま先の動きなどを利用していることがわかる.

そこで, 本研究ではロボットを単質点系と捕らえ, 神経振動子と仮想的なバネ・ダンパシステムによって安定性を確保し, さらに人間の歩行動作を導入することで, より人間に近く, 安定した歩行生成を提案し, 提案手法によって現在のロボットの機構で, どの程度人に近づけられるのかの検証を行う.

次に本論文の構成について, 述べる. 本論文の第 2 章では神経振動子について, 第 3 章で人間とロボットの歩行について触れ, 第 4 章で基礎実験, 第 5 章で歩行生成方法について, 第 6 章では検証を行い, 第 7 章に, まとめ, 今後の課題を述べる.

第2章　神経振動子

2.1　CPG

人間や動物などの歩行や遊泳といった周期的運動は比較的下位レベルの制御機構が働いていると考えられている．こうした周期的運動は脊髄中にあるとされる中枢パターン生成器 (Central Pattern Generater:CPG) によって生成されていると考えられている. 現在までに除去脳猫など神経生理学の研究, 実験から, 様々な動物の脊髄中に CPG が存在し, リズム運動を生成していると考えられている [4]. また, リズム運動の生成だけでなく四肢間の協調も各肢にある CPG のネットワークで構成されているとされている.

2.2　運動パターンの生成過程

運動パターンの生成過程を図 2.1[4] に示す.

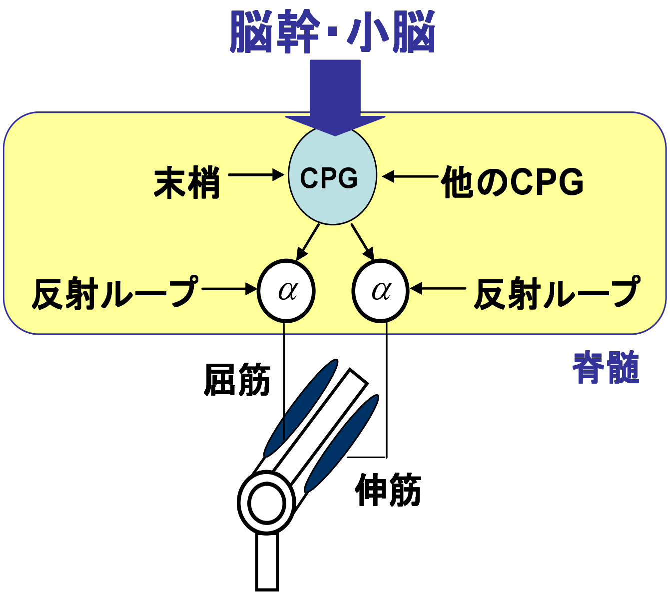

図 2.1: 運動パターンの生成過程

CPG は小脳・脳幹といった上位中枢から持続入力を受けることで活動する．同時に, 末梢や他の CPG からの入力によっても変化する．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通して屈筋・伸筋の運動ニューロンに伝達される．また, 運動ニューロンや介在ニューロンレベルで主に小脳によって負荷に対する補償や適切な反射回路の選択が行われ, 調整後, 最終的に運動パターンが筋に出力される [4].

2.3　神経振動子

神経振動子は, CPG 内でみられるニューロン間の興奮と抑制のメカニズムを数学的に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松岡 [5] 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 2.2 に示す．

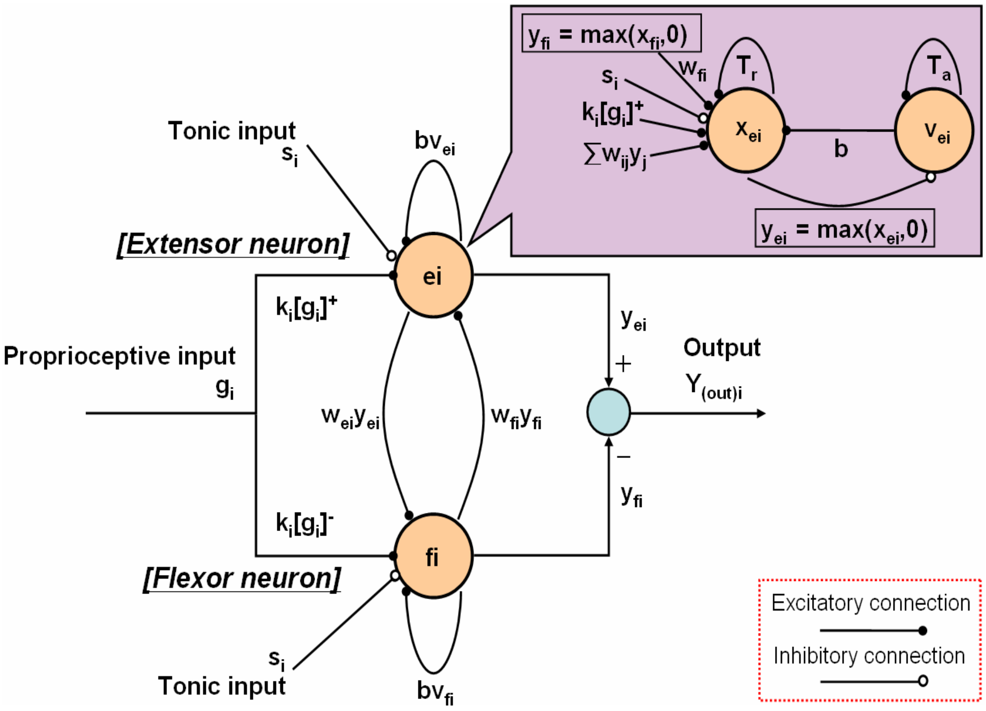

図 2.2: MNO の構成図

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．

次に, MNO の運動方程式を式に示す.

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

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 の正の部分を扱っており, $y_{e(f)i}$ は全体の出力である. $\omega_{ij}y_i$ 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　神経振動子の引き込み特性

神経振動子の大きな特徴として, 引き込み特性というものが存在する [6][8]. 神経振動子は適切に設定されたパラメータのもとで, ある固有の振動を行うが, その振動に対して, 外部からの周期的な持続入力を与えてやることで, 自身の固有周波数を変化させて, 入力された信号の周期に同調していくという性質がある. これを神経振動子の引き込み特性と呼ぶ.

第3章　人間の歩行とロボットの歩行について

既存のヒューマノイドロボットが, いかにもロボット然とした歩行に終始しているのは, 当然のことながら, 人間の歩行アルゴリズムとは異なった制御手法だからである. 形状は年々人間に近くなっていくものの, その制御手法は人間の歩行とは明らかに異なったままである. この大きな理由として, 人間の形状とロボットの形状が, 完全には一致していないために, 理想的な人間の歩行アルゴリズムを直接搭載することができないからである. そこで, 本研究の目的である人間に近い歩行を実現するために, 人間の歩行とは何か, 特にロボットとの違いは何かを, まずはじめに考察を行った.

3.1　人間の歩行

まず, 人間の歩行の特徴として挙げられるものの中に以下のような項目があげられる.

- 膝関節の最大限の伸展を利用した鳥歩きとは異なる歩行
- 少ない重心移動
- 踵で着地し, つま先で離床
- 最小限のトウ・クリアランス
- 重力・慣性力を積極的に利用

まず, 人間の歩行を観察すると, 鳥歩きとは異なり, 膝関節の伸展を最大限利用して歩行していることに気づく. この歩行方法によるメリットは２つ存在し, それは環境踏破性とエネルギー効率である. まず, 環境踏破性について述べる. 人間に限ったことではないが, 各リンクの長さは, そもそも普遍である. 人間は膝を最大限に伸ばすことで, 関節稼動領域を最大限利用することができる. 通常の歩行時に膝がまっすぐ伸びているからこそ, 段差や斜面といった状況で遊脚を屈曲できる範囲が増え, その分, 高い段差を乗り越えたりすることができる. また, 転倒しそうになったり, 歩行速度を上げたいときには, 遊脚を大きく振り上げ, 次の支持脚としての足裏着地点を大きく前方にとることができる.

さらに, エネルギー効率が良いことが挙げられる [16]. 膝を伸ばすことで, 必然的に腰の高さ, ひいては, 重心位置を高く保持することが可能になる. これによって, 人間の歩行の特徴である動歩行を行う際に, 重心を前方へ倒れこませながら歩行することを容易にしている.

さらに, 少ない重心移動での歩行も特徴である. 人間の二足歩行の特徴として, 歩行中の重心は上下左右に偏移せざるをえないが, その偏移が大きければ大きいほど大きなエネルギーを必要としてしまう. 健常歩行では左右の歩隔を狭くしたり, 骨盤を左右にシフトすることで, 左右の動きを抑えている [16][18]. この左右偏移（ローリング動作）は平均的な成人の体格では約 3 cm 程度である. このローリング量が少なくて済むのも膝関節が伸びていることと関連がある. また, 上下の動きにおいては, 立脚初期に見られる足関節底屈や, 膝の屈曲で重心が不必要に上昇することを抑制している [16][18].

さらに, 踵で着地し, つま先で離床する様子が見られる. この一連の動作によって, 前方への重心の倒れこみを用いて, スムーズな重心移動を形成することができ, やはり, 効率よい歩き方になっている.

また, 健常歩行の特徴として, 非常にエネルギー効率の良いことが分かっている. 一般的に筋は短縮性収縮, 伸張性収縮, どちらにおいても生理的エネルギーが必要である. しかし, 生理的エネルギーは力学的エネルギーと比例関係ではないとされている. 一般に, 生理的エネルギーは力学的エネルギーの増加に伴って 2 次関数的に増加する [16]. このため, 筋に負担をかけない歩行が理想的である. そのために, 健常歩行では, 筋力だけを使って歩くのではなく, 重力や慣性力を巧みに使用している. 代表が, 遊脚の脚の振り出しである. このように健常歩行では二足歩行の不安定さを巧みに利用して歩いている. さらに, 健常歩行では最小限のマージンで歩こうとする [16][18]. たとえば, 遊脚においても, 健常歩行のトウ・クリアランスは床面ぎりぎりの非常に小さい値をとる. 遊脚の条件として, 床面に足が接触してはならない. もし接触すると転倒を引き起こしてしまうからである. 人間の場合は, 床面ぎりぎりの位置を保ち, 遊脚を前方に振り出すことができるため, エネルギーの消費量を最小限に抑えている.

3.2 既存のヒューマノイドロボット

人間の歩行を, つぶさに観察・解析を行い, その構造からアルゴリズムまで全て導入すれば人間に酷似したロボットが出来上がるはずである. しかし, その仕様を満たすためには, 現在のロボットは人間とあまりにかけ離れすぎていて, このアプローチは現実的ではない. 人間が有している脚部の構造で, 機構自体が複雑なために, なかなか導入されない機構の代表例が, つま先の機構である. 人間のつま先には複数の関節が存在するために, その再現を行うことは稀で, 通常, ヒューマノイドロボットは平面状の足裏を持つにとどまっていることが多い. よって, 本研究で使用するロボットもこれに倣い, 一般的な足裏形状のままで, 人間に近い歩行を行うこととした.

さらに, 人間とロボットの歩行の様子で最も異なるのは膝関節を最大限伸ばした状態を

含んだ歩行か否かである．人間の場合,膝関節の伸展を最大限利用することで,重心位置を高く保つことができる．この特性のために,最小限のローリング動作で重心移動を行うことができ,それに伴って,エネルギー効率が良くなる.また,関節稼動領域が増加するので,環境の踏破性が向上している．さらに,重心位置が高い分,重力を利用した動きをすることができる.

これだけ,利点があるのだから,ヒューマノイドロボットも,この形態にすれば良いと思うのは自然な発想である．しかし,現在のヒューマノイドロボットは重心を低くした鳥歩きが主流である．この理由として,まず挙げられるのは,重心を高くすることで安定性が悪くなってしまうという欠点である．ロボットの使用を考えた際に,安定した歩行は重要である.そこで,安定性の確保のために,ロボットは重心を低くし,鳥歩きを行っている.

さらに,鳥歩きを行わざるを得ない大きな理由として次に挙げる,機構における特異値問題が存在している.

3.3　特異値問題

ヒューマノイドロボットの歩行が人間とは異なり,鳥歩きに近くなっている大きな理由の一つとして特異値問題があげられる.ここで,特異値問題について触れる．通常,マニピュレータ等の機構には特異点が存在する．ここで単純な機構における具体例として図 3.1[19] を示す.

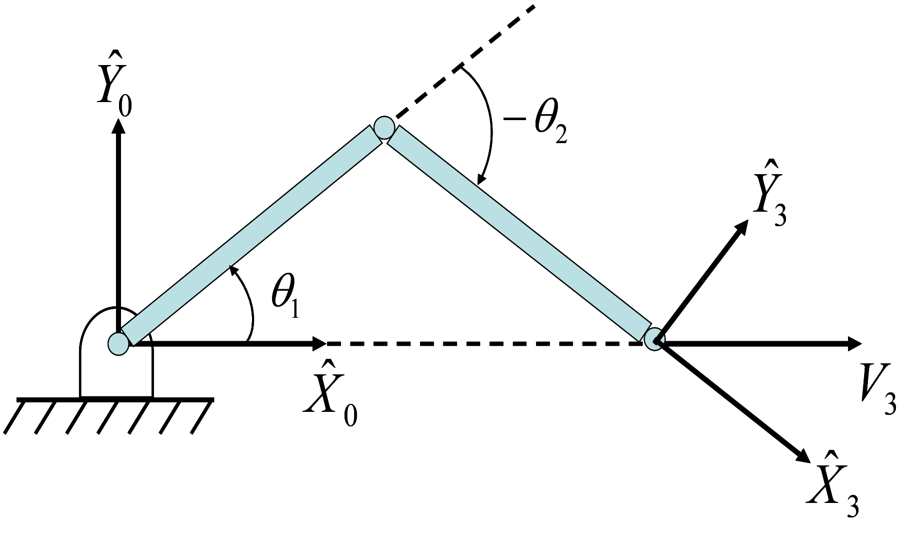

図 3.1: 特異値問題の例

$$
\begin{aligned}
\dot{\mathbf{\Theta}} &= \boldsymbol{J}^{-1}(\Theta)\boldsymbol{V} \\
\boldsymbol{J}^{-1} &= \frac{1}{l_1 l_2 sin\theta_2}\begin{bmatrix} l_2 cos(\theta_1+\theta_2) & l_2 sin(\theta_1+\theta_2) \\ -l_1 cos\theta_1 - l_2 cos(\theta_1+\theta_2) & -l_1 sin\theta_1 - l_2 sin(\theta_1+\theta_2) \end{bmatrix} \\
\dot{\theta}_1 &= \frac{cos(\theta_1+\theta_2)}{l_1 sin\theta_2} \\
\dot{\theta}_2 &= -\frac{cos\theta_1}{l_2 sin\theta_2} - \frac{cos(\theta_1+\theta_2)}{l_1 sin\theta_2}
\end{aligned}
\tag{3.1}
$$

特異点とはヤコビアンが特異となるθが存在する点のことである. デカルト空間速度から関節角速度を計算した場合にある点において関節角速度が無限大となってしまい, 機構の自由度が縮退してしまう点のことである [19]. 通常の制御では, この特異点を回避するように制御し, ロボットの場合もこれに順ずる. ヒューマノイドロボットの歩行に当てはめた場合, 膝関節が伸び切った場合にこの特異点問題が生じる. よって, 通常は特異点を回避するために, 膝関節が伸びきらないように制御するため, 鳥歩きとなってしまう. しかし, この場合, 人間の歩行とは異なり, せっかく人間型形状を有しているにも関わらず, 踏破性などの利点が縮退してしまっている.

このほかにも, 人間の歩行においては, 支持脚, 遊脚の各動作において, 特徴的な部分がいくつも見受けられる. それぞれについては, 各動作生成の項目で後述する.

第4章　基礎実験

本章では実際の歩行生成の前段階の準備として, いくつかの基礎的検証を行った結果を示す.

4.1　神経振動子の引き込み範囲

神経振動子は周期的な持続入力に対して, 自身の固有周波数を変化させて, 入力の周期に同調していく特性がある [6][8]. しかし, この引き込みにも限界が存在し, あまりに, かけ離れた入力に対しては同調できない. そこで, どの程度の引き込み範囲があるのか検証を行った. 検証方法としては, 神経振動子に対して,$A\sin(\omega t)$ を入力し, 周期 ω, 振幅 A を変化させた.

その結果を図 4.1 に示す

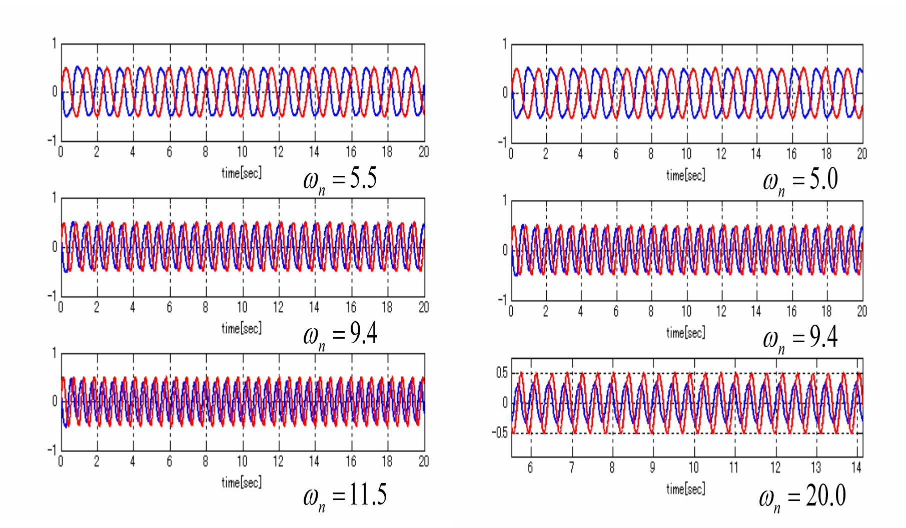

図 4.1: 神経振動子の引き込み

結果としては, 振幅, 振動数が共に引き込めるのは, 約 6[Hz] ほどで, 振動数のみならば 15[Hz] ほどの引き込み範囲が存在した. このように, 周期には応答性が良いが振幅には応答性は限られるということが分かった. さらに, 速い周期には比較的, 追従性が良いが, 遅いものには追従性が悪いことが分かった.

4.2 重心位置による効率性の検証

前述のように, 人間は, 重心位置を高く保ち, ラテラル平面における支持脚動作（ローリング動作）を最小限のマージンで行っている. これにより人間の歩行効率は高いものになっているとされている. ここで, ロボットに適応した場合にも同じことが言えるのかどうかを検証した. ロボットは前述の通り, 機構上の問題から特異点が存在するため, 単純に膝関節をまっすぐに伸ばすことはできない. そこで, 後述するシステムにより, 特異値問題に対処し, 膝関節の伸展を最大限利用した場合の比較を行った. 以下に, 生成した支持脚動作における膝関節のトルクとエネルギーを図 4.2, 図 4.3 に示す.

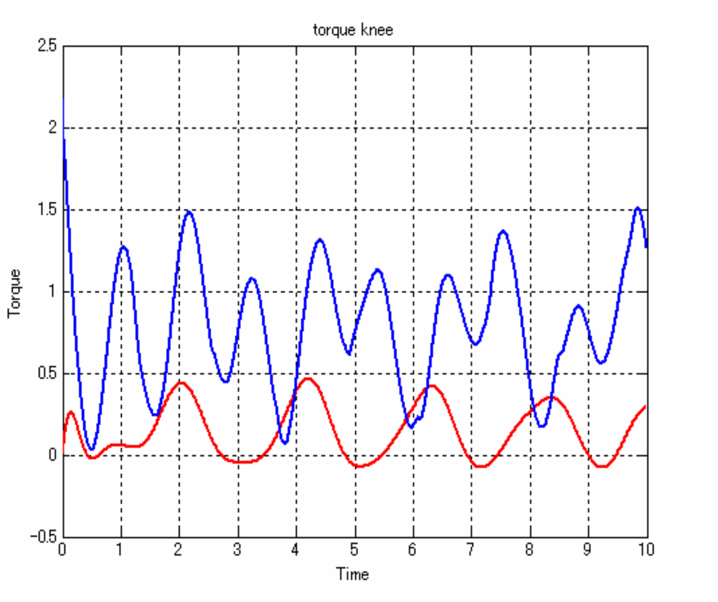

図 4.2: サジタル平面の支持脚膝トルク

赤線が膝関節角度＝ 0, 青線が膝関節角度＝ 40 から動作開始した場合の結果である. 動作の概要は, 初期位置と同じ高さを維持しながら前後にピッチング動作を行わせた. シミュレーションにより, 膝関節が伸び切った状態を含めた場合の方が, より少ないトルク, エネルギーで動作できることが分かった.

次にラテラル平面の支持脚動作結果を図 4.4, 図 4.5 に示す.

図からわかるように, 膝関節を伸ばした状態, 及び, 曲げた状態でのラテラル平面における股関節, 足首関節のトルクにはほとんど差が生じない. しかし, 膝を曲げた状態を保つためのサジタル平面のトルクは以前生じているため, やはり, 鳥歩きではなく, 膝を伸ばした人間に近い歩行の方がより, エネルギーの無駄が生じないことが分かる.

これらの結果をもたらしたのは, 重力の積極的な利用が行えたからであると考えられる. 人間に照らし合わせて考えてみても, 膝を曲げた状態を維持するのは非常に苦痛である. これは, 状態の維持には各筋肉に大きな負荷がかかるからである. 人間の歩行というのは, 前

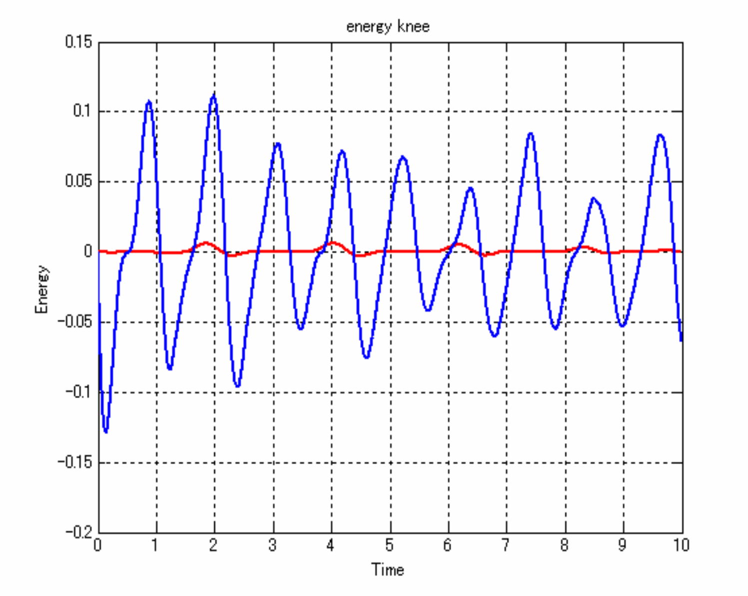

図 4.3: サジタル平面の支持脚膝トルクパワー

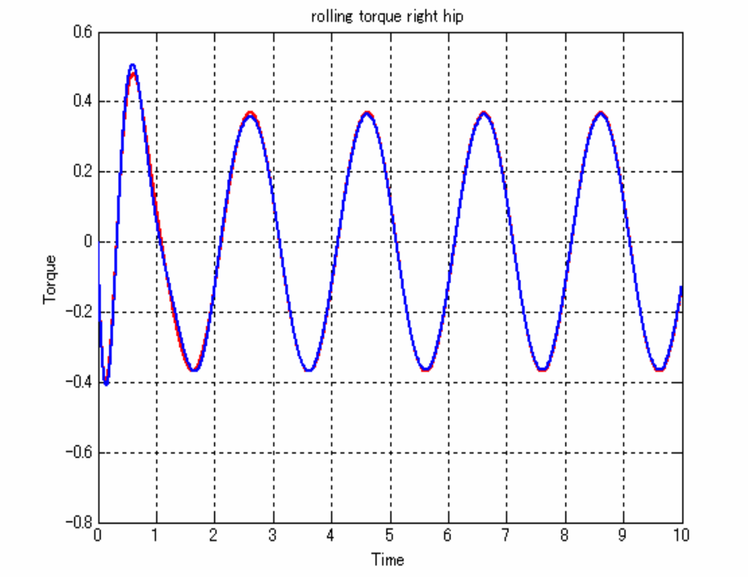

図 4.4: ラテラル平面の支持脚腰トルク

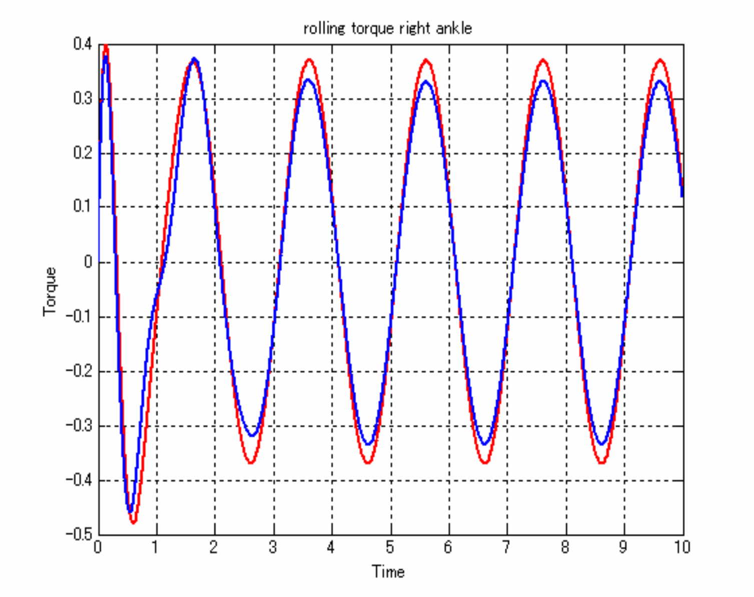

図 4.5: ラテラル平面の支持脚足首トルク

述のように非常に効率の良いものであるはずで, それに比べて, エネルギーを無駄に消費してしまう現在の多くのヒューマノイドロボットは, 非効率であるといえる. この実験の結果から, 膝を伸ばして, 腰（重心）の位置を高く保った動きをさせた方がエネルギー効率が良いことが分かった.

第 5 章　歩行生成について

5.1　使用するシミュレータの紹介と用語の定義

本研究ではシミュレータとして, OpenHRP2[13][14] を用いる. OpenHRP2 は独立行政法人産業総合技術研究所, 東京大学, 財団法人製造科学技術センターによって開発された統合ソフトウェア開発環境である.OpenHRP2 を用いることでロボット実機を用いることなく, ロボット動作制御則を仮想環境内で開発, 検証することができる [13]. また, OpenHRP2 は, 分散ソフトアーキテクチャである CORBA に基づいて構成されている [13]. 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 のモデル [15] を利用した. HOAP-1 の DH パラメータを図 5.1[15] に示した.

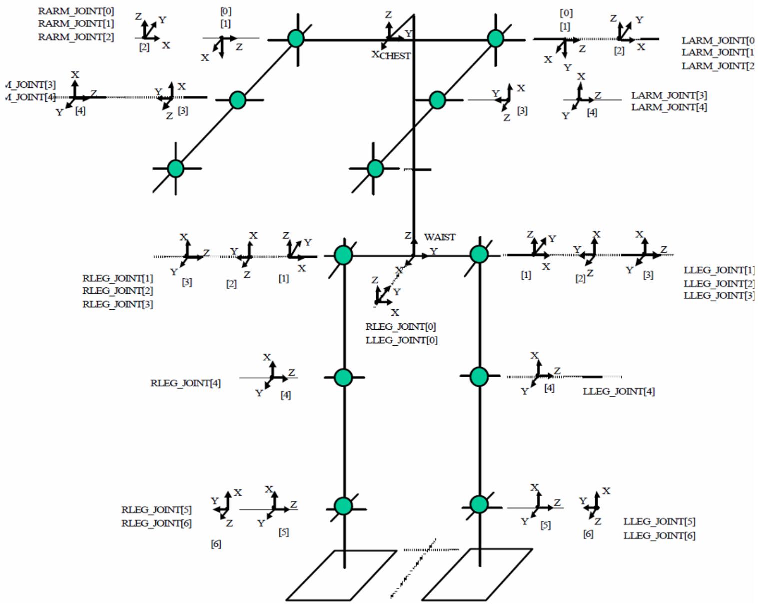

図 5.1: DH パラメータ

5.2　歩行生成方法概略

歩行動作を生成する上で,Sagjittal 平面と Frontal 平面に分割して考える．それぞれの平面の定義 [20] を図 5.2 に示した.

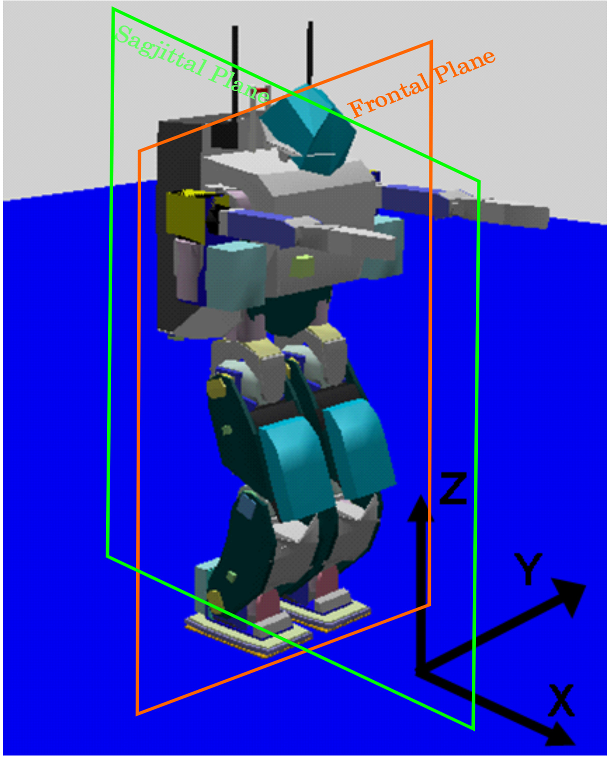

図 5.2: 平面の定義

図のように Sagjittal 平面とは身体を前後に貫く線で鉛直に切った縦断面のことである．また,Frontal 平面とは Sagjital 平面に垂直な縦断面のことを指す [20].

また, 本研究においては, ロボットの質量は一点に集中しているという単質点系モデルとして扱う [7]．この単質点系モデルに取りつけた脚部の各リンクモデルと重心を制御対象とすることにより歩行生成を行う．以下に, 歩行生成の全体概略図 5.3 を示す.

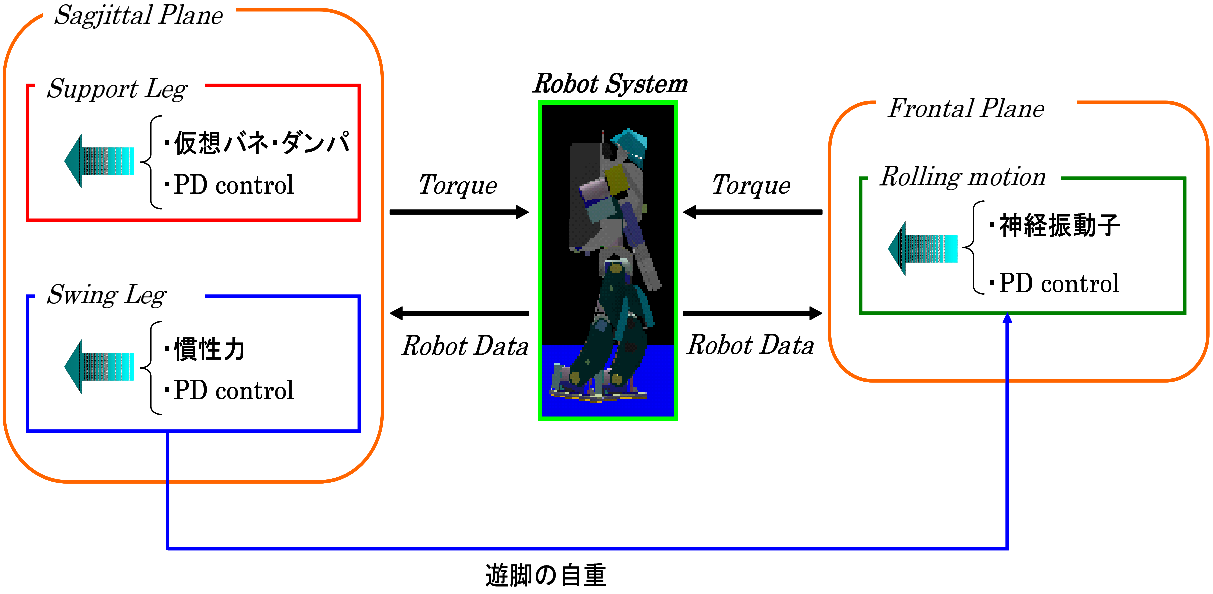

図 5.3: 歩行生成の全体概略図

なお, 次節以降で各平面における動作生成方法について触れる.

5.3 Frontal 平面の動作生成方法

まず Frontal 平面の動作について述べる．今回使用したヒューマノイドロボットのモデルの脚部でローリング関節を有しているのは足首関節と腰関節のみである．よって, 安定的な重心の位置にするためには, 片方のローリング角度が決定すれば, もう片方は一意に決めることができる．よって, 一つの神経振動子の出力に追従させることで実現できる [7]. 以下に,Frontal 平面におけるローリング動作生成の図 5.4 と式 5.1[7] を示す.

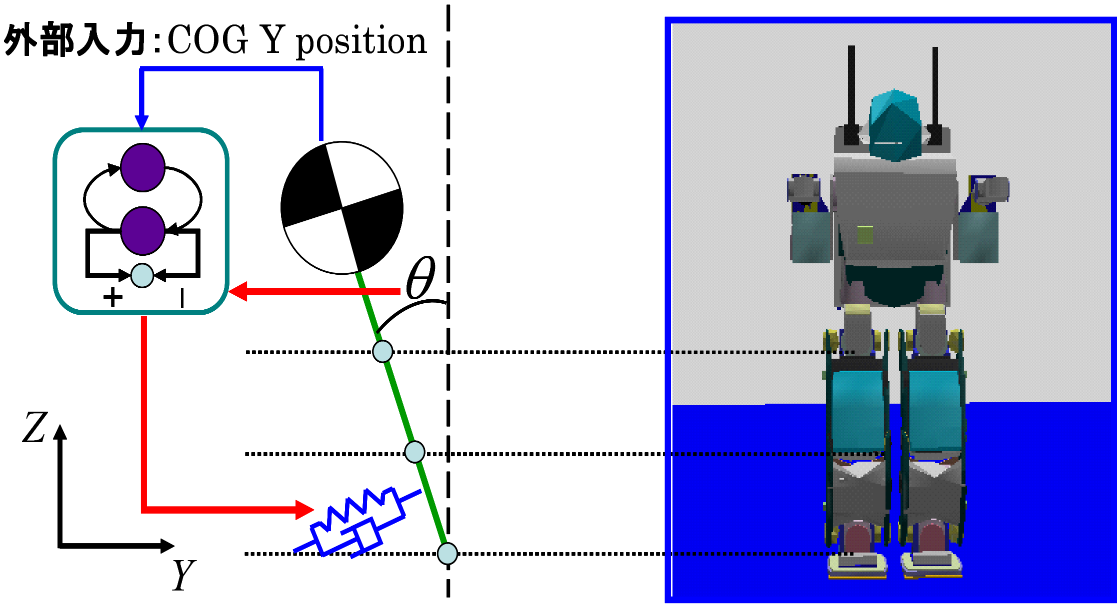

図 5.4: Frontal 平面の動作生成概略図

$$\tau_{ankle} = rp_{ankle}(NOout - \theta_{ankle}) - rv_{ankle}\dot{\theta}_{ankle}$$
$$\tau_{hip} = rp_{hip}(-NOout - \theta_{hip}) - rv_{hip}\dot{\theta}_{hip} \quad (5.1)$$

ここで, rp_i, rv_i はバネとダンパの係数である．また,τ はトルク,NO_{out} は神経振動子の出力,θ は各関節角度である．

そもそも,Frontal 平面における人間のローリング動作というのは, 歩行や足踏み動作の際に重心を支持脚側に移動し, 脚を地面から離すことができるようにするのが目的である．一方, 通常のロボット（特に関節角度制御）の歩行制御では, 「脚を上げても安定するように」が, ローリング動作を行う目的である．ここに, 人間とロボットの歩行動作の生成に差が生じている．人間の歩行の場合, 平均的な体格で, 歩行の際に行われる重心の全移動幅は, わずか 3cm[21] である．これは, 人間がローリングに安定性を求めているのだけではなく, 片足を上げるためのマージンを確保する目的のためにローリングを行っているとも考えられる．

本研究においても, この着目のもと, ローリングの主目的を, 片足を上げるためのマージン確保のための動作を行わせるものとした．この手法を実現するために, ローリング動作の目標値として, 神経振動子の出力を用いている．前述のように, 神経振動子の持つ特性として, 持続的な固有入力を与えることで, ある一定の周期, 振幅でリズムを生成する. 歩行は通常リズム的なものであるため, 周期に関して引き込みの範囲の広い神経振動子はこの Frontal 平面における動作生成のコントローラとして適切であると考えた．

5.4 Sagjittal 平面の動作生成方法

次に Sagjittal 平面の動作生成概要を図 5.5 に示す.

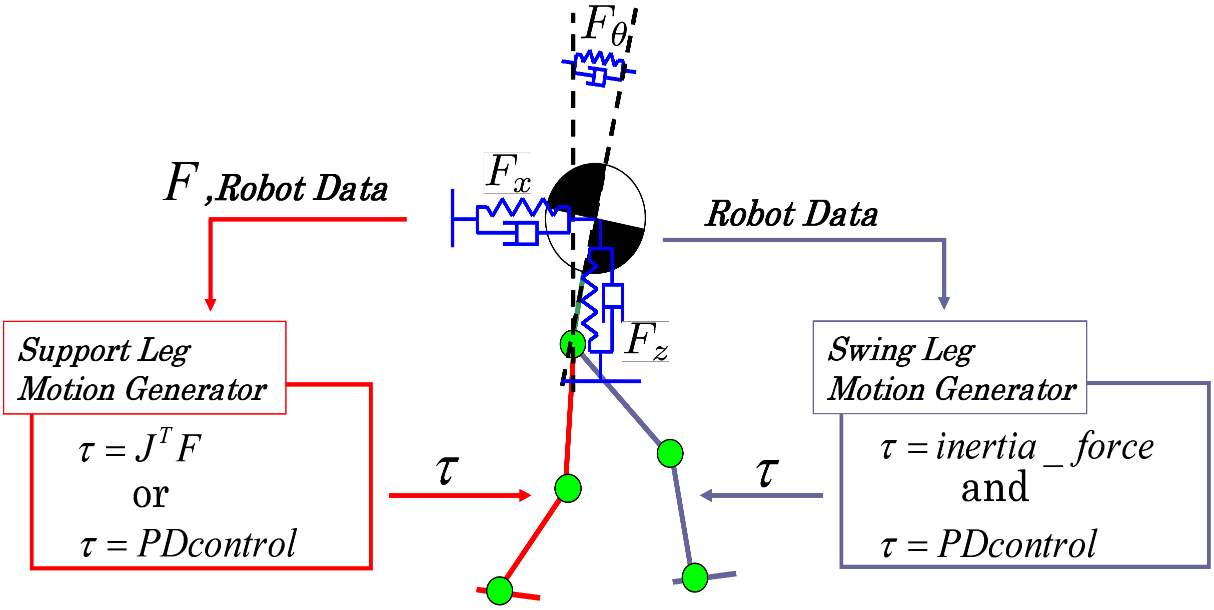

図 5.5: Sagjittal 平面の動作生成概略図

Sajital 平面の大まかな概要を述べると, 支持脚には安定性を重視して, 主に仮想バネ・ダンパモデルによる制御を, 遊脚には重力, 慣性力を積極的に利用したトルク制御を行っている.

5.4.1 歩行状態の定義

ここで, 本研究における歩行生成の各状態の定義を行う. 歩行における左右の脚の状態は足裏を地面に接して体重を支えるための支持脚と, 地面に接していない遊脚とに分類される. 通常のロボットの歩行においては関節角度指定制御が多いので, 支持脚期と遊脚期の 2 つの分類があれば, 事足りることが多い. しかし, 人間の歩行データ [18] を見ると, 確かに支持脚期と遊脚期が交互に, 周期的なリズムで切り替わっていくが, 各期間の中でさらに状態がいくつもあり, 複雑な動きをしていることが分かる. この原因として, 脚部の各筋肉の協調や重力・慣性力といった力の利用を行っているからであり, 単純に支持脚期と遊脚期の 2 つに分類しただけでは, 人間の歩行に近づけることは困難であると考えた.

そこで, 本研究では, 支持脚期と遊脚期をさらに分類し, 支持脚期を前期, 後期に, 遊脚期を初期, 前期, 後期, 終期の 4 つの, 計 6 種類の状態に分類した. よって, これらの各状態の組み合わせによって, ロボットの状態は計 10 種類の状態を持つと仮定した. 分類の概要を図 5.6 に示す.

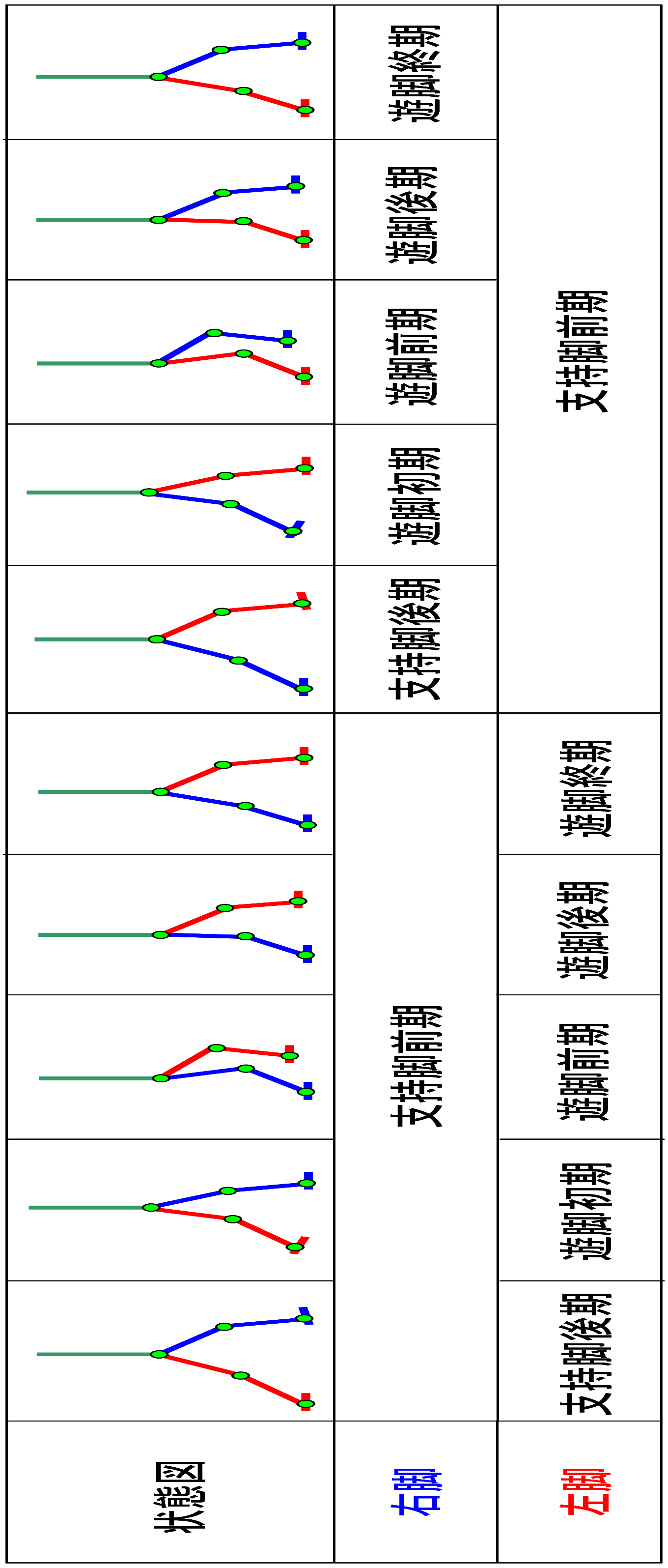
状態図
右脚
支持脚前期
支持脚後期
遊脚初期
遊脚前期
遊脚後期
遊脚終期
左脚
支持脚後期
遊脚初期
遊脚前期
遊脚後期
遊脚終期
支持脚前期

図 5.6: 支持脚の分類

5.4.2 状態の切り替え条件

さらに, 各状態の切り替え条件について述べる.

表 5.1: 状態の切り替え条件

状態遷移			切り替え条件
支持脚前期	⇒	支持脚後期	もう一方の足裏が床反力を受けた時
支持脚後期	⇒	遊脚初期	重心の進行方向位置が支持脚の足首関節を通過後
遊脚初期	⇒	遊脚前期	遊脚初期になってから T_a 経過後
遊脚前期	⇒	遊脚後期	遊脚初期になってから $(T_a + T_b)$ 経過後
遊脚後期	⇒	遊脚終期	遊脚初期になってから $(T_a + T_b + T_c)$ 経過後
遊脚終期	⇒	支持脚前期	その足裏が床反力を受けた時

次節以降で, 各状態の制御について詳しく述べる.

5.4.3 支持脚期

支持脚前期

支持脚前期における脚部の役割は「バランスを保ちながら, 重心を前方に移動すること」である. ここで, 支持脚前期における各関節の役割と制御方法を示す.

支持脚前期において特に重要なのが上述の「バランスを保つこと」である. この役割を実現するために, 仮想バネ・ダンパの考え方を用いる.

- 仮想バネ・ダンパシステム

  Pratt ら [11][12] 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, この手法を参考に制御システムを構築する.

$$
\begin{aligned}
F_x &= cp_x(COG_d - COG_x) - cv_x C\dot{O}G_x \\
F_z &= mg + cp_z(COG_{z_0} - COG_z) - cv_z C\dot{O}G_z \\
F_\theta &= -cp_\theta \theta - cv_\theta \dot{\theta} \\
\theta &= \theta_a + \theta_k + \theta_h
\end{aligned}
\tag{5.2}
$$

ここで, COG_d は目標の出力, $COG_{x,z}$ 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.

さらに, 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. 以下の導入は, 文献 [11] を参考にした. 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.

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x \\ z \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L1\sin(\theta_a) - L2\sin(\theta_a + \theta_k) \\ L1\cos(\theta_a) + L2\cos(\theta_a + \theta_k) \\ \theta_a + \theta_k + \theta_h \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

次に, 式 (5.3) の両辺を各関節角度で編微分して, ヤコビアンを求める.

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 \\ J_{21} & J_{22} & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

ここで,

$$\begin{aligned} J_{12} &= -L2\cos(\theta_a + \theta_k) \\ J_{11} &= J_{12} - L1\cos(\theta_a) \\ J_{22} &= -L2\sin(\theta_a + \theta_k) \\ J_{21} &= J_{22} - L1\sin(\theta_a) \end{aligned} \tag{5.5}$$

式 (5.4) 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.

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{J}^T \boldsymbol{F} \tag{5.6}$$

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

支持脚前期における各関節はこの仮想バネ・ダンパシステムで生成されるトルクによって, 遊脚期の重心の不安定な状態を修正しつつ, 重心を前方へ移動させていく. このときの式 (5.7) を示す.

$$\begin{aligned} \tau_h &= \tau_{VMC_h} \\ \tau_k &= \tau_{VMC_k} \\ \tau_a &= \tau_{VMC_a} \end{aligned} \tag{5.7}$$

ここで, 式 (5.7) の右辺はそれぞれ式 (5.6) で生成されたトルクである.

支持脚後期

支持脚後期における脚部の役割は「バランスを保ちながら, 踵離れをし, つま先で離床」することである.

重心位置を安定させて, バランスを保つのは支持脚前期と同様であるため, 基本的には仮想バネ・ダンパを用いる.

ただし, 支持脚前期と異なり, 足首関節には別個に制御を行った. この理由として, 各関節の役割の違いが存在するためである.

基本的にバランス, つまり, 上体の姿勢を保つ役割を担っているのは股関節であるとされている [16]. 膝関節は着地時などの衝撃吸収, 足首関節は身体全体を前方に押し出す駆動源として働く [16]. 特に足首関節は Frontal 平面のローリング動作と相まって, 踵の強いローリングを経て, つま先で離床する [16]. ただし, 今回使用したロボットモデルはつま先構造がないため, 人間と同じようにつま先で蹴る（つま先で支持する）ことは不可能である. そこで, ロボットの重心が前方へ押しだされ, 回転運動による体幹モーメントが発生し, 次の遊脚に移るまでの間, 足裏支持を保つように制御した. 式 (5.8) に示す.

$$
\begin{aligned}
\tau_h &= \tau_{VMC_h} \\
\tau_k &= \tau_{VMC_k} \\
\tau_a &= -K_{p_a}^{sp_b}(\theta_a - (-\theta_{att} - \theta_k - \theta_h)) - K_{d_a}^{sp_b}\dot{\theta}_a
\end{aligned}
\tag{5.8}
$$

ここで,θ_{att} は, 上体姿勢を鉛直軸から測った角度,K_p, K_d はゲインである.

5.4.4 遊脚期

支持脚期においては, バランスを保つことを主目的としていた. ただし, 人間の歩行の場合は, 前方への推進力として, 重心の動力による体幹モーメントを利用したものになっているため, 本研究においては, 支持脚後期の足首関節をＰＤ制御によって, 体幹モーメントを発生させることで, 重力の積極的な利用を行った.

一方, 遊脚期においては, より一層, 重力や慣性力を利用した動きを行っているのが人間の歩行である. ここで, 遊脚期における脚部の慣性力の利用の根本的な原理を示す.

まず, 遊脚期の脚部が慣性力に強く左右された動きを行っている理由を示す. 支持脚期の場合は, 下肢に作用する慣性力は非常に小さいため, 無視できる範囲になっている [16]. しかし, 遊脚期の下肢は振子のように, 慣性の法則が働いている. 下肢の動きを最も単純に表すと, 丁度, 図 5.7 のようになる.

図 5.7 のように, 手を前方へ動かすと, 振子は慣性力によって, 逆方向へ動き出す.

人間の下肢の動きもこれと同じ原理が利用されている. 図 5.8 のように, 振り出しの前半は膝関節が屈曲し, 膝には前方向の加速度が生じる. 加速度を受けた下腿部はそれに逆らうような慣性力を受ける. この力によって, 下腿部は後ろに跳ね上がる. また, 股関節の

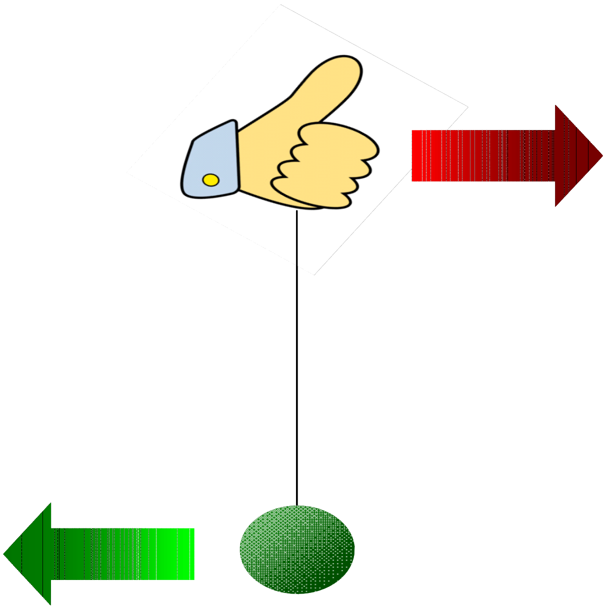

図 5.7: 慣性の法則 [16]

屈曲が終わる遊脚終期では, 膝の動きは徐々に減少していく. よって, 下腿部は後ろ向きの加速度を生じ, 対抗して, 前向きの慣性力を受けることになる. この慣性力によって, 下腿部は前方へ跳ね上がる [16].

人間は, このような慣性力を上手く利用し, 最小限のエネルギーによって歩行することができる.

ただし, 遊脚といえども, 完全に振り子（慣性力）のみによって歩行しているわけではない. 実際には, 慣性力の他にも, 各関節の筋力も活動している. 一例を挙げるならば, 遊脚期の初期と終期に見られる膝関節の筋肉の働きである. もし, 遊脚が完全に振り子の法則に従うのであれば, その振り出しの周期は振り子の長さ, つまり, 下肢の長さで決定してしまう. しかし, 歩行速度を変えることがあるのが人間である. その際に, 膝関節の筋肉が働く. 図 5.9 のように, 遊脚初期においては踵が蹴り上がりすぎるのを防ぎ, 遊脚終期では, 膝伸展を抑えて, 伸びきってしまうのを抑制している [16][18].

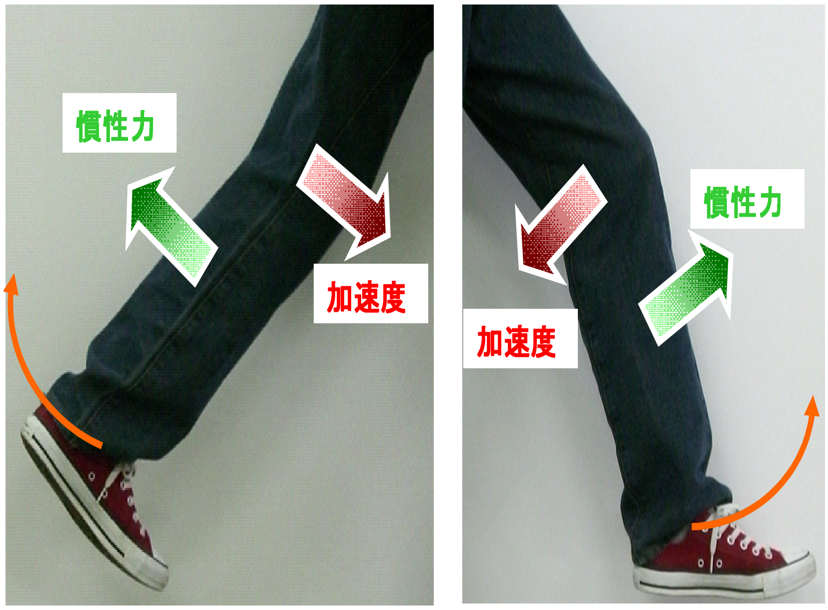

図 5.8: 加速度と慣性力の働き [16]

図 5.9: 遊脚期の膝の働き [16]

遊脚初期

遊脚初期における役割は,「支持脚後期からのスムーズな移行」と「振り上げのための加速度の生成」と定義した. 特に股関節においては現在, 支持脚後期のトルクと逆回転させて振り上げを行わなくてはならない. 人間の場合は, 各筋肉の協調によって, スムーズに逆方向へ移行させることができる. 一方, 今回のロボットには筋肉がないので, これをPD制御によって生成させることにした.

しかし, この動作生成の際に, 一つの問題点が生じる. それは, トルクを逆回転で付加した場合に, 膝関節が逆に曲がってしまい [7], シミュレーションが破綻してしまうという点である. 後述する遊脚前期において, 膝に慣性力を利用した動きを持たせると, 逆関節になろうとする. そこで, この遊脚初期という期間を導入して, 支持脚から遊脚へのスムーズな移行を行い, 次の遊脚前期における膝の慣性を用いた動作を生成させるための前段階として制御を行う. 実際の動作として, 片方の足が支持脚になったときにそちらの足が遊脚となる. 式で表すと以下の式 (5.9) になる.

$$\begin{aligned}\tau_h &= -K_{p_h}^{sw_e}(\theta_h - \theta_{h_d}^{sw_e}) - K_{d_h}^{sw_e}\dot{\theta}_h \\ \tau_k &= -K_{p_k}^{sw_e}(\theta_k - \theta_{k_d}^{sw_e}) - K_{d_k}^{sw_e}\dot{\theta}_k \\ \tau_a &= -K_{p_a}^{sw_e}(\theta_a - (-\theta_{att} - \theta_k - \theta_h)) - K_{d_a}^{sw_e}\dot{\theta}_a\end{aligned} \tag{5.9}$$

この際, トルクを生成するためにＰＤ制御を行うわけだが, 逆関節に対応させるために, Ｄ項目のゲインを $K_{d_h}^{sw_e} > K_{d_k}^{sw_e}$ とした.

ＰＤ制御におけるＤ項目とはすなわち, 速度の追従性である. 股関節が膝よりも先に早く動き, それに遅れて膝関節が曲がっていくという遊脚前期の状態を再現させるために, この遊脚初期で, 追従速度の差を作るようにした. この作用によって, 股関節は膝関節や足首関節より相対的に大きな加速度を生じさせることができる.

遊脚前期

遊脚前期における役割は「慣性力を積極的に利用した振り上げ」である. 提案する手法によって生成された歩行は, 一般のロボットのようなぎこちない動きとは異なり, スムーズに最小限のエネルギーで振り出すことができる.

遊脚初期において生成された股関節の加速度を利用し, 膝を屈曲させる. この屈曲を慣性力で再現させるために, 各関節のトルク生成を以下の式 (5.10) で行う.

$$\begin{aligned}\tau_h &= -K_{p_h}^{sw_f}(\theta_h - \theta_{h_d}^{sw_f}) - K_{d_h}^{sw_f}\dot{\theta}_h \\ \tau_k &= 0 \\ \tau_a &= -K_{p_a}^{sw_f}(\theta_a - (-\theta_{att} - \theta_k - \theta_h)) - K_{d_a}^{sw_f}\dot{\theta}_a\end{aligned} \tag{5.10}$$

遊脚後期

遊脚後期は遊脚初期と前期（特に前期）によって下肢の振り上げがされた後の補正的な役割を担うと定義した. 遊脚全体の動きをあえて単純化して述べるならば,「足を振り上げて, 振り下ろす」ということになる.

この振り上げは主に遊脚前期で行われるのだが, 慣性力を利用しているために, 振り上げすぎや逆に振り上げ不足となることがある. 人間の場合においても, 遊脚期に振り上げを行った際, 各筋肉の協調で, いきすぎを抑えている. これと同様のメカニズムをこの遊脚後期で行う. 式 (5.11) で示す.

$$\begin{aligned}
\tau_h &= -K_{p_h}^{sw_b}(\theta_h - \theta_{h_d}^{sw_b}) - K_{d_h}^{sw_b}\dot{\theta}_h \\
\tau_k &= -K_{p_k}^{sw_b}(\theta_k - \theta_{k_d}^{sw_b}) - K_{d_k}^{sw_b}\dot{\theta}_k \\
\tau_a &= -K_{p_a}^{sw_b}(\theta_a - (-\theta_{att} - \theta_k - \theta_h)) - K_{d_a}^{sw_b}\dot{\theta}_a
\end{aligned} \tag{5.11}$$

遊脚終期

遊脚終期で行うのは, 次の支持脚前期へ移行するための前段階の制御である. すなわち, 支持脚前期として, 適切な位置へ各関節を制御して, 遊脚の振り下ろしを行う. 式 (5.12) で示す.

$$\begin{aligned}
\tau_h &= -K_{p_h}^{sw_t}(\theta_h - \theta_{h_d}^{sw_t}) - K_{d_h}^{sw_t}\dot{\theta}_h \\
\tau_k &= -K_{p_k}^{sw_t}(\theta_k - \theta_{k_d}^{sw_t}) - K_{d_k}^{sw_t}\dot{\theta}_k \\
\tau_a &= -K_{p_a}^{sw_t}(\theta_a - \theta_{a_d}^{sw_t}) - K_{d_a}^{sw_t}\dot{\theta}_a
\end{aligned} \tag{5.12}$$

ここで, 設定した各パラメータを表 5.2 に示す.

表 5.2: 各パラメータ

$K_{p_a}^{sp_b}$	50.0	$K_{d_a}^{sp_b}$	15.0		
$K_{p_h}^{sw_e}$	50.0	$K_{d_h}^{sw_e}$	15.0	$\theta_{h_d}^{sw_e}$	-0.6132
$K_{p_k}^{sw_e}$	50.0	$K_{d_k}^{sw_e}$	4.1	$\theta_{k_d}^{sw_e}$	0.8727
$K_{p_a}^{sw_e}$	50.0	$K_{d_a}^{sw_e}$	15.0		
$K_{p_h}^{sw_f}$	43.0	$K_{d_h}^{sw_f}$	4.0	$\theta_{h_d}^{sw_f}$	-0.6132
$K_{p_a}^{sw_f}$	43.0	$K_{d_a}^{sw_f}$	4.0		
$K_{p_h}^{sw_b}$	50.0	$K_{d_h}^{sw_b}$	15.0	$\theta_{h_d}^{sw_b}$	-0.6132
$K_{p_k}^{sw_b}$	50.0	$K_{d_k}^{sw_b}$	15.0	$\theta_{k_d}^{sw_b}$	0.8727
$K_{p_a}^{sw_b}$	50.0	$K_{d_a}^{sw_b}$	15.0		
$K_{p_h}^{sw_t}$	50.0	$K_{d_h}^{sw_t}$	15.0	$\theta_{h_d}^{sw_t}$	-0.1928
$K_{p_k}^{sw_t}$	50.0	$K_{d_k}^{sw_t}$	15.0	$\theta_{k_d}^{sw_t}$	0.2613
$K_{p_a}^{sw_t}$	50.0	$K_{d_a}^{sw_t}$	15.0	$\theta_{a_d}^{sw_t}$	0.1963

第6章　検証

6.1　歩行形態からの検証

得られた結果の歩行の様子を図 6.1 に示す.

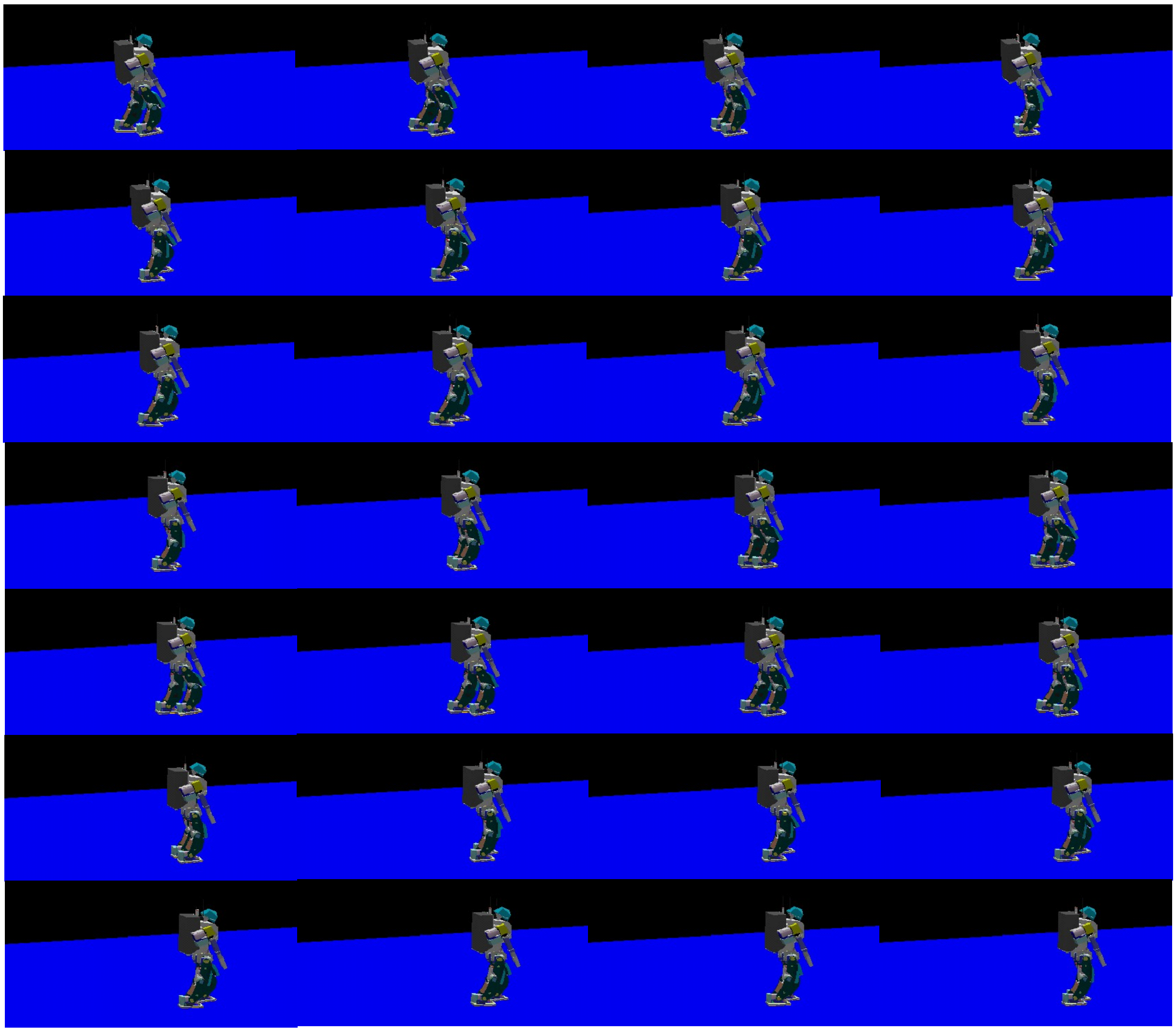

図 6.1: 歩行結果

ここで, 人間の実際の歩行に, どの程度近づけたのかについて論ずる. まず, 人間の歩行には図 6.2 のような発達と退行が存在する.

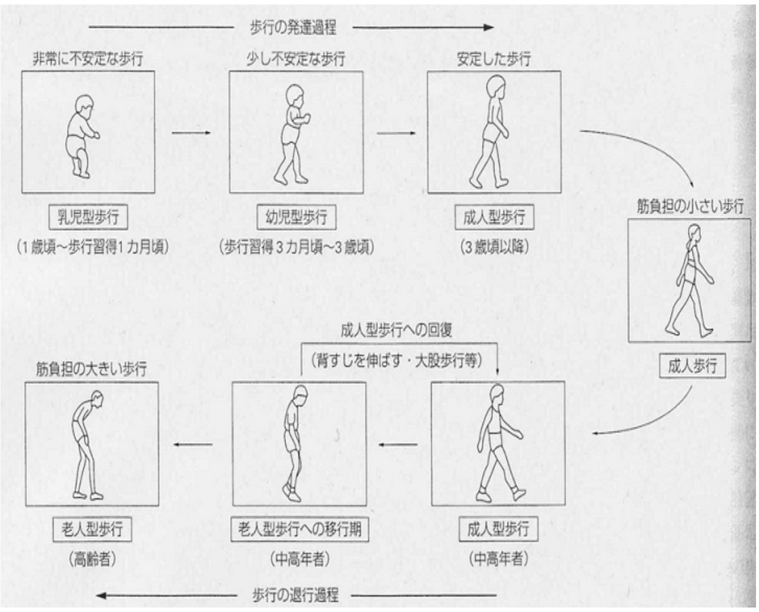

図 6.2: 発達と退行 [18]

歩行の獲得から始まり, 年齢と共に各筋力の発育やバランス感覚といったものが洗練されていき, さらに, 老いと共に退行していく. ここで, 発育と退行は丁度, 逆課程をたどるとされている. 以下に, 乳児型歩行, 幼児型歩行, 成人型歩行の 3 形態 [18] について, 特徴を示す.

表 6.1: 歩行の 3 形態

乳児型歩行	幼児型歩行	成人型歩行
上腕を前へ	上腕は少し降ろす	上腕は完全に降りる
膝を常に屈曲	腰の位置が高くなり始める	直立時に近い腰の高さ
つま先または足底全体で着地	踵とつま先の同時着地	踵着地・つま先離床
遊脚は斜め前へ	すり足的な歩行	
片足支持は瞬間のみ可能	体前傾姿勢を利用して前方へ移動	上腕のスイング
常に過剰な筋活動		合理的な筋活動
体後傾姿勢になりがち		体直立姿勢に移行

各形態に特徴が存在し, うち, 今回生成された歩行は, 幼児型と成人型の特徴を併せ持つ

こととなった. 合致した特徴は,
幼児型歩行で見られる

- 上腕は少し降りる
- 体前傾姿勢を利用して前方へ移動する

また, 成人型歩行の

- 直立時に近い腰の高さを維持する.
- 踵着地のつま先離床
- 体直立姿勢に移行

といった点である.

特に幼児型歩行の二つの特徴は重力, 加速度の助けをかりて, 前方への歩行を開始するという歩行初期に, この特徴が見られた. また, 成人型歩行の特徴は歩行が安定しはじめてからの部分で見られる. 直立時に近い腰位置を保持しているので, ローリングやエネルギー消費量も少なくてすむ. この動きが再現できたのは, 膝が特異値問題に対応しているためである.

また, 踵着地とつま先離床も見られる. ここで, 踵着地のつま先離床によるトウ・クリアランスの様子を図 6.3 に示す.

図 6.3: トウ・クリアランス

今回使用したモデルは足裏が平面の剛体であるために, 接触は通常の人間の歩行のようにはいかない. しかし, 各関節の制御とローリングの作用によって, 踵から着地し, その後, 踵の強いローリング作用により, つま先離床による蹴り出しを実現している. さらに, 仮想バネ・ダンパモデルによって支持脚を制御しているために, 常に体直立を維持しようとした力が働いていることも功を奏している. なお, 体直立姿勢と体前傾姿勢の両方の特徴をもっているのは, 基本的には仮想バネ・ダンパモデルの働きによって, 体直立姿勢を保とうとするが, 前方方向への加速が足らずに, 脚の振り上げが少なくなった場合, 強制的に前方向へ進ませているためである. このため, 加速が減少した後に, 仮想バネダンパによって, 体前傾姿勢になりその後, 再び体直立姿勢になる.

6.2　データからの検証

次にデータによる検証を行う. 人間の歩行に, 近づけようとした場合, 前述のように, ロボットにはつま先の機構がないという相違点が存在する. これによって, ロボットの歩行には, つま先で地面を捕らえておける期間が極端に短くなってしまう. 言い換えるならば, 両足支持期間が極端に短いのである. よって, 通常の人間の歩行データとの比較は意味をなさない. そこで, 人間の歩行のうち, 両足支持期間の短い競歩におけるデータと比較することとした. 競歩は歩行（両脚が地面と接する期間の存在するもの）から走行（両脚が完全に宙に浮いている期間の存在するもの）へ移行する部分のものであるため, 今回のロボットの構造で実現できる最大の理想データであると考えた. ちなみに, 競歩と歩行のデータの違いは, 特徴的には同じであるが, その波形の遷移が競歩の方が顕著である. 以下に人間の競歩におけるデータと, 今回得られた関節のデータを示す.

次に示すのが人間のトルクとトルクパワーの図 6.4[18], 図 6.5[18] である.

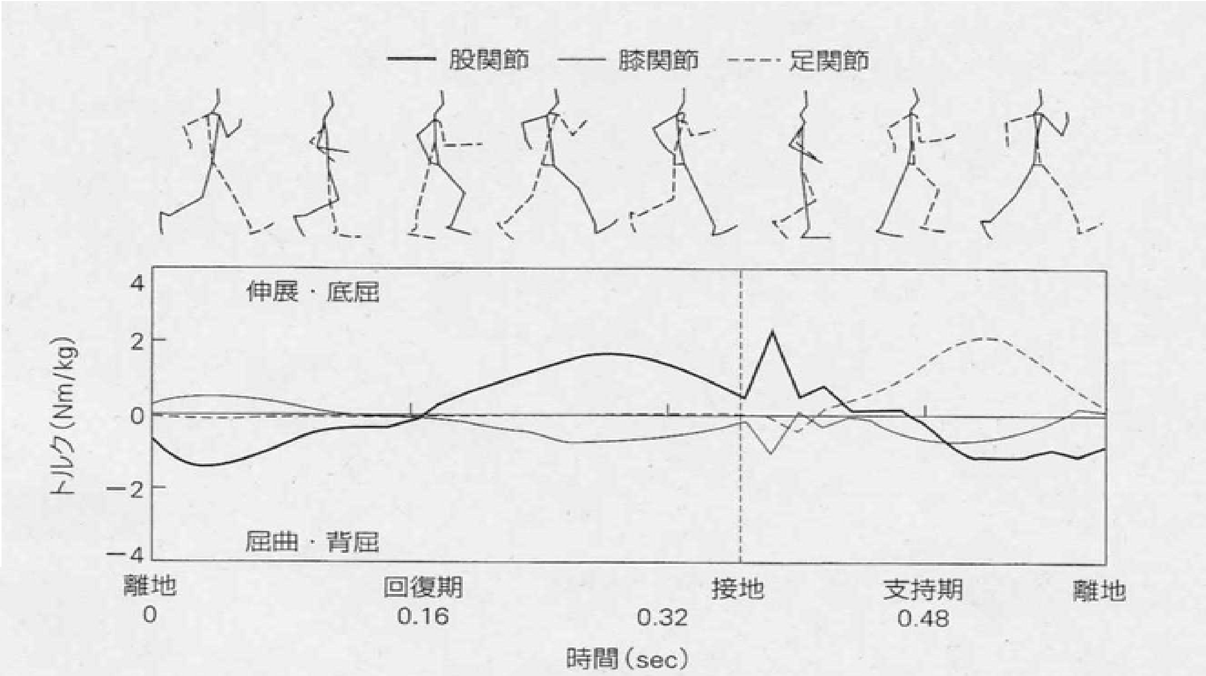

図 6.4: 人間のトルク [18]

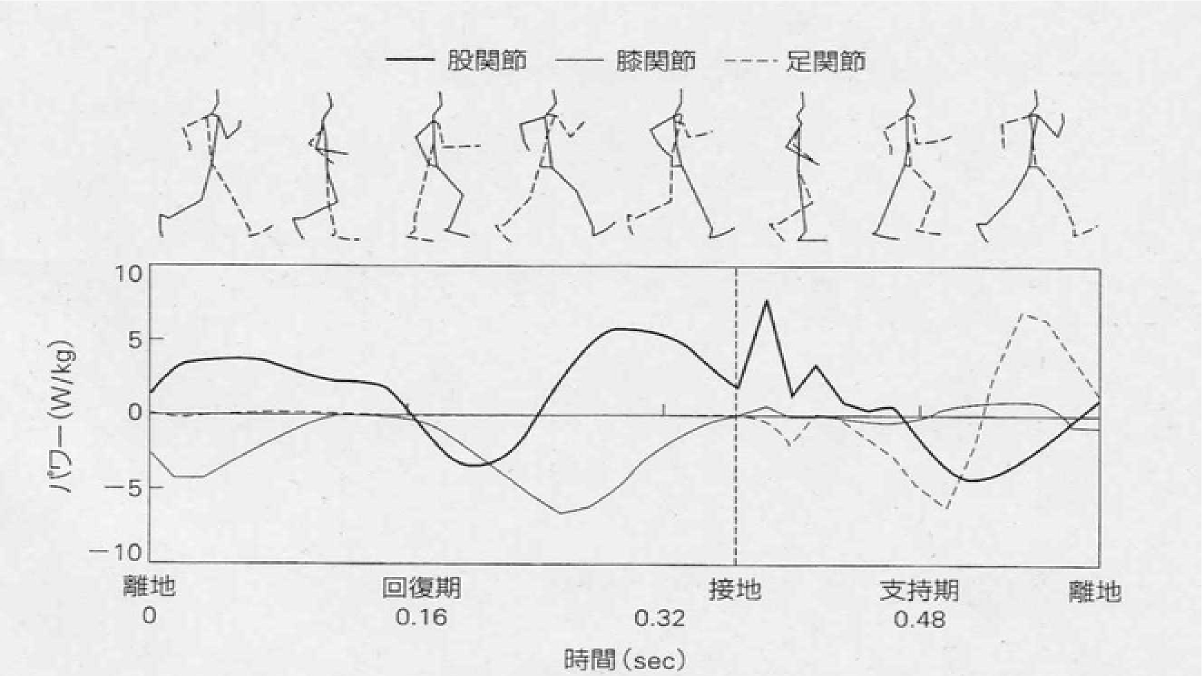

図 6.5: 人間のトルクパワー [18]

ここで, 各データにおける符号等の定義を示す.

表 6.2: 各データの定義

データ	用語定義	符号
関節トルク	足首関節底屈（背屈）トルク	＋ (-)
	膝関節伸展（屈曲）トルク	＋ (-)
	股関節伸展（屈曲）トルク	＋ (-)
関節トルクパワー	足首関節底屈（背屈）トルクパワー	＋ (-)
	膝関節伸展（屈曲）トルクパワー	＋ (-)
	股関節伸展（屈曲）トルクパワー	＋ (-)

簡潔に述べるならば, 身体が伸びる方向を+としている.

さらに, 正のトルクパワーとは, トルクと角速度が同符号ということであり, 筋肉の短縮性収縮にあたる. この場合, 筋が積極的に活動し, 力を生成しているという意味を持つ [16].

また, 負のトルクパワーは, トルクと角速度が異符号の時である. 筋の伸張性収縮にあたり, 筋力が床反力とのつりあいに負けて, トルクをかけている方向とは逆に動く時期である. これは, 仕方なしに引きずられているわけではなく, 制動力として力を発生させている時期である [16].

まず股関節のトルクとトルクパワーを図 6.6 図 6.7 に示す.

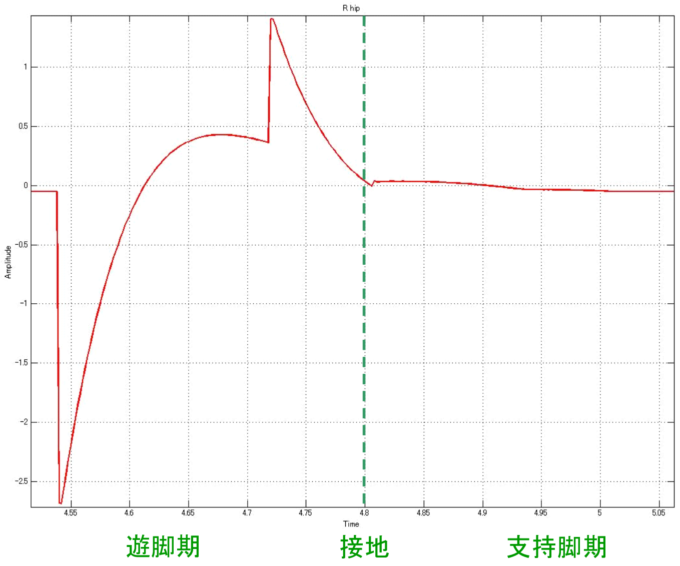

図 6.6: 股関節トルク

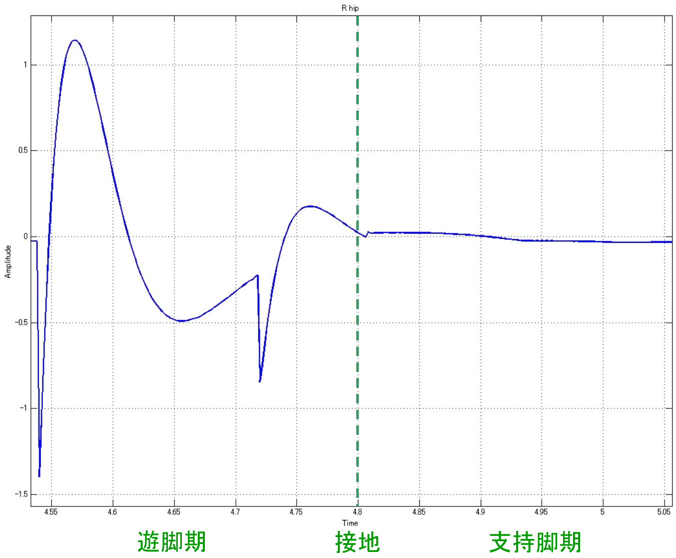

図 6.7: 股関節トルクパワー

遊脚期前半で, 負のトルクが発揮され, そのときのトルクパワーは正である. この時期のトルクパワーは遊脚を前方に振り出すために役立っていると考えられる [18]. その後, トルクが負から正へ変わると同じタイミングで, 負のトルクパワーが発揮されている. このときのトルクパワーは前方への振り出しすぎを抑えている. その後, 支持脚期の半ばまでみられる正のトルクパワーは遊脚の後方への振り戻しによって, 接地時の衝撃による歩行速度の減少を防ぐ役割をしている [18]. 支持脚後半では, トルクが負, トルクパワーが負である. よって, 支持脚への後方への振り出しを抑制し, 離床後に前方へ振り出すことに役立っている [18].

次に膝関節のトルクとトルクパワーを図 6.8 図 6.9 に示す.

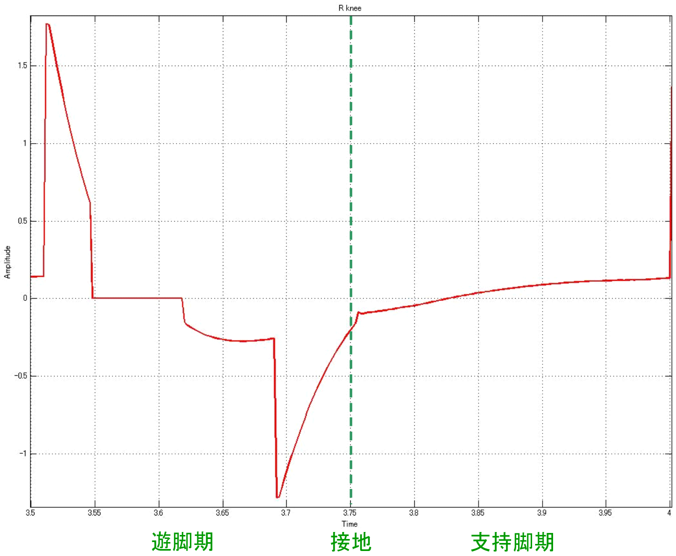

図 6.8: 膝関節トルク

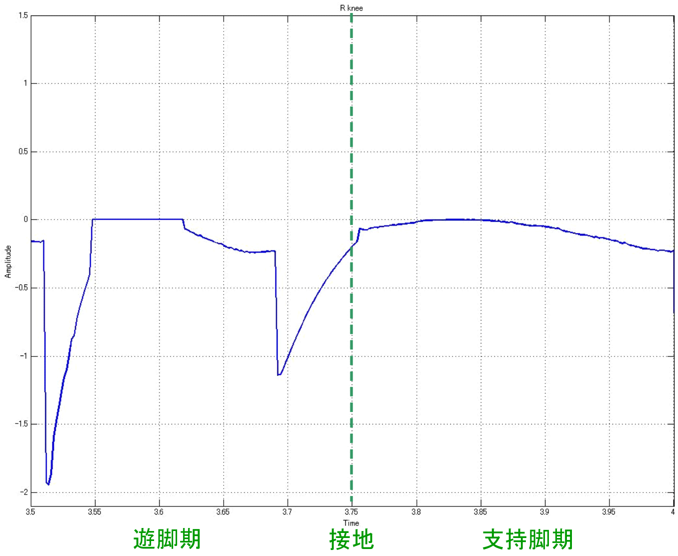

図 6.9: 膝関節トルクパワー

膝関節においては, 遊脚前期において, トルクが正, パワーが負である. つまり, 膝の伸展モーメントを働かせながら屈曲している. よって, パワーが負になり, 伸展筋が伸張性収縮を行い, 膝の過剰な屈曲を押さえ, 踵が蹴りあがるのを防いでいる [16].

また, 人間の遊脚期における伸展トルクからトルク 0 を経て, 屈曲トルクへと遷移していく様がデータでも見られる.

さらに, 遊脚期後半のトルクが負のとき, 屈曲モーメントが働きながら膝関節が伸びていくため, パワーが負となる. つまり, 屈曲筋が伸張性収縮によって, 膝の伸展を押さえ, 伸びきってしまうのを防いでいる [16]. また, 立脚期の中期から後半にかけて, 膝は屈曲していく. これは遊脚にむけて, 大腿部が前へ振り出されるからである [16]. つまり, 膝関節は伸展モーメントを働かせながら, 屈曲していくため, パワーが負になり, 膝が屈曲しすぎないように制動をかけている.

また, 特に特徴的なのは, 接地直後の膝関節に屈曲トルクが生じている部分である. 人間の場合, エネルギー消費量を積極的に抑えるために, 重心の上下動はなるべく抑えられている [16][18]. もし, この屈曲トルクがなく, 接地後に膝関節が曲がらないとしたら, 上下動は大きくなってしまいエネルギーは無駄に必要となる. 今回生成された歩行でこの動きが見られたのは仮想バネダンパモデルによって, 常に重心の位置がなるべく上下しないように働く力を生成しているからである.

さらに足首関節のトルクとトルクパワーを図 6.10 図 6.11 に示す.

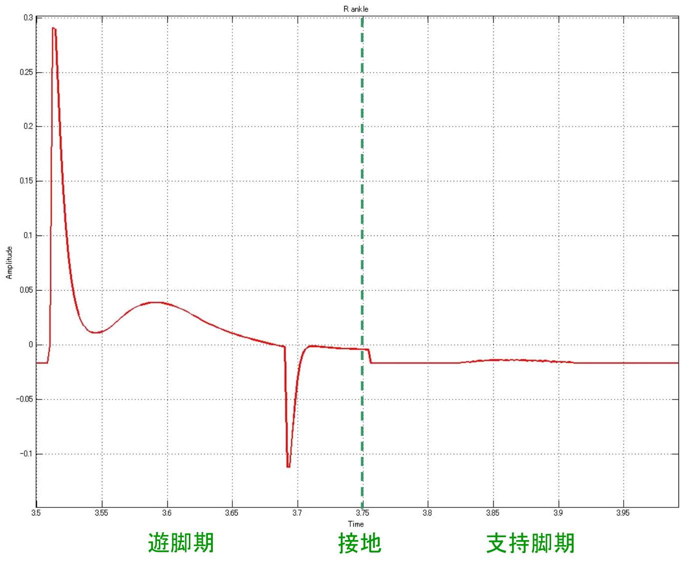

図 6.10: 足首関節トルク

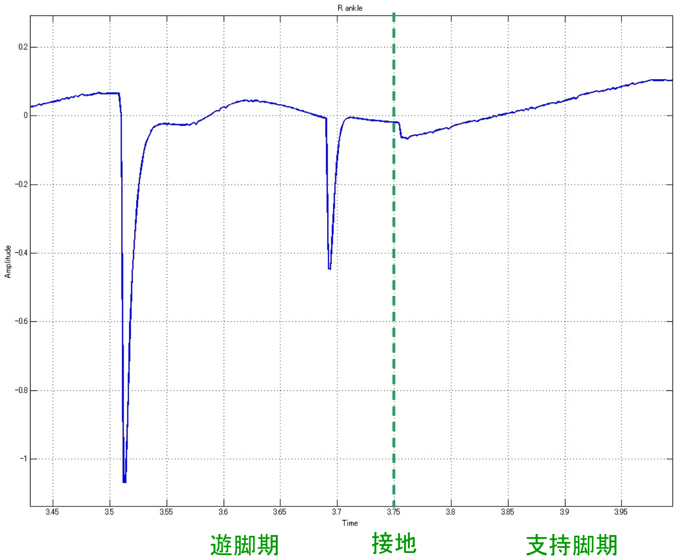

図 6.11: 足首関節トルクパワー

足首関節において, 支持脚前半において, トルクが負, パワーが負である. よって, 負のトルクをかけながら, 足首が底屈している. この伸張性収縮により, 踵の着地が行え, かつ, 踵着地後に, つま先が静かに接地することができる. これがない場合, 踵着地時の衝撃がそのまま加わり, つま先が急激に床にうちつけられてしまう [18].

さらに, 支持脚中盤で, 負のトルクを発生させて, 負のパワーとなる. 次の両足支持期にむけて, 身体が倒れすぎないように身体の落下に制動をかけている [16].

一方で, 支持脚後期では, トルクの符号が異なっている. 人間は大きく正のトルクがかかるのに対し, ロボットは負のトルクである. ただし, どちらも正のパワーである. これはロボットの構造として, つま先がないため, つま先による完全な蹴り力を生成できないためと考える. 離床直前まではつま先保持にしてしまうわけにいかないため, ギリギリまで, 支持脚を保とうとしているためである. そのため, もう片方の足が支持脚になり, 現在, 支持脚であった足が遊脚になった場合に, 通常の人間の動作に少し遅れる形で, 正のトルクとトルクパワーが発揮され, 足首を伸展させる. よって, この伸展により, 振子状の足の長さが変化し, 次の膝関節がトルク 0 になった状態のときに, 人間と同様に慣性力を利用するようはたらいている.

以上が全般的な結果である. 足首関節の立脚の後期と遊脚の前期については, 人間とロボットの構造の差異のため異なったデータとなったが, そのほかは, 概ね, 一致する傾向をみせた. また, 制御則が不連続な切り替えため, 切り替えの瞬間に, 余計なトルクが生じるが, それ以外は全般的に人間のデータと傾向が一致する. 特に遊脚期における各状態の切り分けの性能により, 振り上げ等のいきすぎを抑えていることが伺える.

次に腰関節のローリングと神経振動子の出力を図 6.12 に示す.

図から分かるように, はじめは, 神経振動子の振幅と重心のローリング量は振幅が一致しない．本研究では, 定常歩行を目的としているため, 歩きはじめは不安定である．ただし, 周期に関しては追従性を見せている．これは, 前述の神経振動子の特性どおりである．結果の波形を見ると, 後半で振幅も追従する．本研究では,Frontal 平面と Sagjittal 平面を切り離した制御を行ってはいるが, Frontal 平面における安定性を Sagjittal 平面の遊脚の振り上げ, 振り下ろしで生じる自重によって, 助けている. これにより, 歩き始めてからしばらくすると歩行が安定化する．歩行が安定化した後に, 神経振動子の追従性が働き, より強固な安定性を示すことができた.

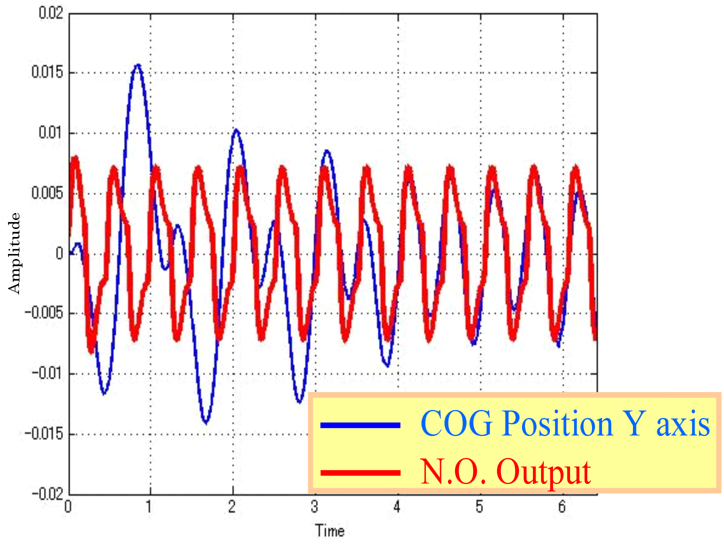

図 6.12: ローリング動作

また, 一周期分の重心の高さ遷移の図 6.13 を示す.

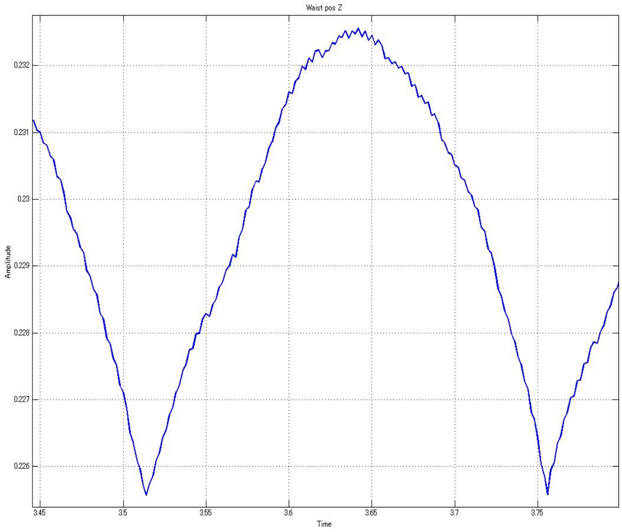

図 6.13: 重心の高さ

図からわかるように, 重心の高さは, 単脚支持で高く, 両足支持で低くなっている．なお, 両足支持期が短いのは, ロボットにつま先構造がないので, 支持脚と遊脚を足裏センサで感知し, 瞬時に切り替えたためである．

6.3 ロバスト性に関する検証

次にロバスト性に関する検証について述べる．外乱として 2cm 程度の段差を下り降りる様子を図 6.14 に示す．

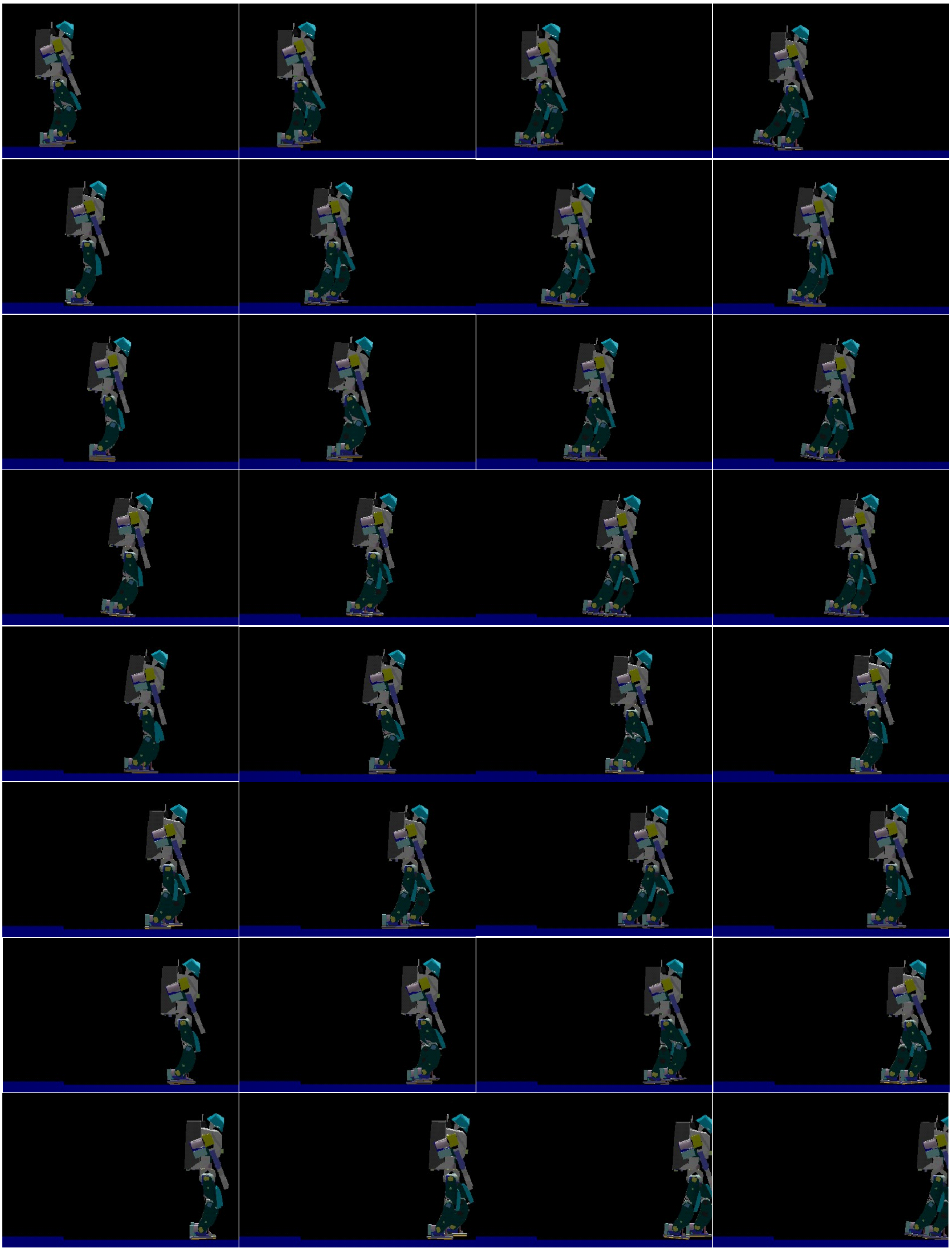

図 6.14: 段差を下り降りる様子

外乱として, 路面の環境が変化したが, ロボットは姿勢を回復して, 転倒せずに, 歩き続けることができた. 姿勢回復の様子を見ると, まず, 遊脚終期において, 接地するべき路面が段差のために存在していないため, 遊脚終期が長く維持される. さらに, 足裏は剛体なので, 足裏の段差との接触点を中心として, 前方へと姿勢が倒れこむ. その後, 遊脚だった右脚が接地し, 床反力を受けることで, 左右の脚の支持脚, 遊脚が入れ替わる. さらに, この動きの最後のほうで, 姿勢は完全に安定化して, もとに戻る. この姿勢回復に最も貢献しているのが, 仮想バネ・ダンパと慣性力を利用した制御である. 仮想バネ・ダンパによって, 常に上体は鉛直に, かつ, 同じ高さを維持しようとする力が生成されている. この力によって, トルクが割り当てられて, 姿勢は安定になるが, これを助けているのが遊脚の慣性力による制御の効果である. 姿勢が前方に傾いたために, 遊脚で振り出される大腿部は大きく振り出されることになる. それに伴って, トルクを排した膝関節を制御している遊脚前期で, 膝関節は通常の歩行に比べて, 大きく前へ振り出されることになる. さらに, 下肢が振り出されることで, 上体は逆方向の加速度を受けて, 仮想バネダンパの x 方向の力の生成を助け, 上体は鉛直になるよう制御される. これを繰り返し, たたらを踏むようにして, 姿勢が安定化に向かっていく.

第7章　結論

7.1　まとめ

本研究では, 安定性と共に, 重力や慣性力といった不安定な力を利用した人間の歩行動作に着目し, 研究を行ってきた. また, 得られた結果を検証した結果, 幼児型歩行と成人型歩行の中間程度の歩行形態が生成できたことが分かった. さらに, 人間の競歩時のデータと比較し, いくつかの類似点を得ることができた. そして, 外乱として 2cm 程度の段差を設けてシミュレーションを行い, 姿勢回復させることができた. 本研究におけるこれらの結果から, 安定化した二足歩行を生成する場合に, 局所的に安定化手法を施すのではなく, 不安定な力をも利用して, マクロな視点で, 歩行全体としての安定化を図ることの有効性を示すことができた.

7.2　今後の課題

人間に近い制御のうち, 今回は定常歩行を主眼として研究を行ったが, 人間の歩行においては, 歩き始めと歩き終わりの状態が存在し, 定常歩行とは少々異なるメカニズムを有している. そこで, 今後の課題として, そのメカニズムをロボットに適応し, 静止直立状態からの歩き始めと, 静止直立状態の歩き終わりの歩行を実現し, より, 人間らしい歩行を行うことが必要である. また, 斜面などにおける制御や, 上肢の振りを利用するなどして, 踏破性を向上させて, より, 人間に近い歩行を生成させ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准教授に心から深く御礼申し上げます. また, 大学院博士前期課程の鵜飼真広氏には, 第５章におけるゲイン調整に関する非常に役立つ助言をしていただきました. さらに同, 瀬尾若葉氏は研究面だけでなく, 日々の生活における様々な面で支えてくださいました. ここに, 改めて感謝いたします. 加えて, 日々の様々な面において, ご助言, ご協力くださった丁研究室の博士後期, 前期課程の皆様に御礼申し上げます.

参考文献

[1] ”平成 12 年度 21 世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略調査報告書（要約版）”, 社団法人 日本機会工業連合会, 社団法人 日本ロボット工業会, http://www.jara.jp/publication/dl/rt.pdf 平成 13 年 5 月.

[2] T.McGeer, ”Passive Dynamic Walking”, Int. J. of Robotics Research, vol.9, No.2 pp62–82, 1990.

[3] 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.

[4] 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.

[5] K. Matsuoka, ”Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators”, Biological Cybernetics, Vol.56, pp345–353, 1987.

[6] 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.

[7] 村井 真也, ”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, 修士論文, 2007.

[8] Matthew M. Williamson, ”Robot Arm Control Exploiting Natural Dynamics”, PhD thesis MIT, 1999, 1999.

[9] 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

[10] 梶田 秀司, ”ヒューマノイドロボット”, オーム社, 2005.

[11] J. Pratt, ”Exploiting Inherent Robustness and Natural Dynamics in the Control of Bipedal Walking Robots”, PhD thesis, MIT 2000.

[12] 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.

[13] 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.

[14] OpenHRP, http://mikilab.doshisha.ac.jp/dia/

[15] 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.

[16] 江原 義弘, 山本 澄子, "ボディダイナミクス入門 歩き始めと歩行の分析", 医歯薬出版株式会社, 2005.

[17] 多賀 厳太郎, "脳と身体の動的デザイン 運動・知覚の非線形力学と発達", 金子書房, 2002.

[18] 金子 公宥, 福永 哲夫　編"バイオメカニクス 身体運動の科学的基礎", 株式会社　杏林書院, 2004.

[19] John J.Craig　著, 三浦 宏文・下山 勲 訳, "ロボティクス 機構・力学・制御", 共立出版株式会社, 1991.

[20] 阿江 通良, 藤井 範久, "スポーツバイオメカニクス 20 講", 朝倉書店, 2002.

[21] 大道 等, "重心運動のバイオメカニクス一身体速度と外的仕事の生体力学的分析", 不昧堂出版, 2003.

[22] 島津 晃 , 浅田 莞爾, "バイオメカニクスよりみた整形外科 改訂第 2 版", 金原出版株式会社, 平成 5 年.

[23] 宮下 充正 , 小林 寛, "走る科学", 大修館書店, 1990.

[24] 勝田 茂, "運動生理学 20 講　第 2 版", 朝倉書店, 1999.

[25] 深代 千之 , 平野 裕一 , 桜井 伸二 , 阿江 通良, "スポーツバイオメカニクス", 朝倉書店, 2000.

[26] 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.

[27] Tomomichi Sugihara, "Mobility Enhancement Control of Humanoid Robot based on Reaction Force Manipulation via Whole Body Motion", PhD thesis, 2004.

[28] 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.

[29] 株式会社ゼットエムピー, ”ジャイロセンサのヒューマノイドへの応用ガイド”, http://www.zmp.co.jp/data/gyro/guide.pdf

[30] 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.