

平成 18 年 9 月終了
博士（工学）学位論文

健康増進を目的とする 4 足馬ロボット
の基礎研究
Fundamental Research on the Quadruped Horse Robot
for Health Promotion

平成 18 年 8 月
高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
学籍番号 1078005
陶 衛軍
Tao Weijun

論文の要旨

まず研究の背景について説明する。健康であれば、個人が幸せだけでなく、社会への貢献も可能である。病気になった後には、治療などで健康に回復する可能性があるが、工学的角度から言うと、事後「誤差修正の事後行為」である。日常生活において体を積極的に鍛えていれば、疾病を予防できるし、身体素質もより向上される。これこそが健康作りの秘訣であることは知られているが、計画的に実施するのは決して容易ではない。原因としては、根性以外にはトレーニング方法にも問題があると考えられる。例えばジョギングや水泳などは、能動的運動法として有効ではあるが、単調な運動や時間の使い方だけに結局長く続けられないことが少なくはない。一方、乗馬療法は、能動的運動法と違って、走っている生馬による他動運動から、騎乗者の多様な自動運動を誘発させる仕組みである。すなわち、乗馬療法は、自ら能動的に運動する意思はないので、負担は感じられないし、多様な運動を楽しめ、長く続けられる。しかし、乗馬療法は、生馬に乗って行なわれるので、馬の飼養や場所の確保などの制限があるため、やはり日頃気軽に実施できない。また、生馬が個人の特性を考慮して最適な運動が得られない。もし、生馬と同等な動きをする乗馬ロボットが開発できれば、生馬の欠点を克服でき、何方も容易に乗馬ロボットによる乗馬療法を受けられる。そこで、我々の研究グループは、Stewart パラレル構造に基づいて、定位型乗馬ロボットを開発し、多量な実験を通して、馬の歩行パターンと健康増進効果との定量関係を見つけた。しかし、これらのロボットは、室内に定位で使われるので、生馬のような前進速度による健康増進効果と室外の自然環境による心理上の促進効果を獲得できない。より良い健康増進効果を得るために、本研究は、自然環境でも使用できる健康増進用 4 足馬ロボットの開発を目的と

して、機械構造の設計と歩行法に関する基礎研究を行ったものである。

以下では、三年間で得られた成果による学位論文の構成予定について詳細に述べる。

① 乗馬療法の原理とメカニズム（第2章）

健康増進用4足馬ロボットの開発の理論根拠としては、乗馬療法の原理とメカニズムについて明らかにする必要がある。具体的に言えば、乗馬療法に対してどのような健康増進効果があるのか、どうしてそれらの健康増進効果があるのか、などの問題である。これらの問題を解明するために、本章では、まず乗馬療法の起源と身体的・心理的健康増進効果について紹介した。次に、生馬の馬身運動と騎乗者の姿勢調整を総合的に考えて、乗馬療法システムの簡略化を行って、その運動方程式を導出した。さらに、乗馬療法システムの簡略化モデルを用いて、乗馬による健康増進メカニズムの数学表現の試みを行った。

② 構造モデルの設計および運動解析（第3章）

健康増進用4足馬ロボットの開発に当たって、まず第一歩としては4足馬ロボットの構造モデルを設計することである。つまり、どのような構造モデルであれば、生馬のように歩行でき、乗馬療法のような健康増進効果を得られるかが、解決すべき問題となっている。本章では、まずこの問題に応じて、生馬の構造を参考にして、4足馬ロボットの構造モデルを提案した。その後、提案した構造モデルに基づいて、4足馬ロボットの歩行における胴体の運動自由度を検討することで、健康増進機能の実現可能性を検証した。さらに、4足馬ロボットの歩行制御の基礎となる逆運動学計算式と運動方程式を導出した。

③ 構造パラメータの設定と実験機の製作（第4章）

4足馬ロボットの構造モデルを提案した後には、各構造パラメータの設定および

同じ構造である実的なロボットの製作が非常に重要である。本章では、まず生馬の寸法を参考し、騎乗者の便利さを考えて、4足馬ロボットの胴体の構造パラメータを設定した。その後、4足馬ロボットの歩行効率を計算し評価指標として、脚の各リンクの最適な長さを求めた。そうして、提案した構造モデルの各構造パラメータを設定することにより、研究対象とする4足馬ロボットを理論的に確立した。さらに、確立した4足馬ロボットを参考にして、安価と高い運動能力がある小型4足馬ロボットを製作した。製作したロボットは、確立した4足馬ロボットの約1/4の寸法であり、脚毎に3個、全体で12個の小型DCモーターがある。また、製作したロボットの胴体と足先には、それぞれ胴体の姿勢角を検出できる傾斜センサーと床反力を計測できる力センサーを搭載している。

④ 健康増進用4足馬ロボットの平地歩行法（第5章）。

健康増進を目的とする4足馬ロボットの歩行法は、一般的な4足ロボットの歩行法と異なっており、安定な歩行を実現することだけではなく、乗馬療法の健康増進機能を実現することも必要である。本章では、健康増進を目的とする4足馬ロボットの平地歩行法に注目している。そのため、まず乗馬療法における馬身運動を計測して、これにより、4足馬ロボットの胴体の姿勢角運動を決めた。次に、4足馬ロボットの歩行の安定性を分析することにより、一番高い安定性がある各脚の歩行順番を獲得し、遊脚の歩行軌道を計画した。そうして、健康増進を目的とする4足馬ロボットの平地歩行法を開発した。最後に、シミュレーションと小型4足馬ロボットの歩行実験により開発した平地歩行法の有効性を検証した。

⑤ 健康増進用4足馬ロボットの適応歩行法（第6章）。

室外での自然環境で健康増進を行うためには、室外での自然地面に対応できる適応歩行法が不可欠である。ここでの自然地面は平地と凹凸地面と斜面により構成さ

れた軽度不整地である。本章では、これらの平地と凹凸地面と斜面に対して、4足馬ロボットの健康増進機能を実現できる適応歩行法を開発した。具体的に、まず地面状況や安定性の評価などに対して、いくつかの設定を行った。次に、軽度不整地の地面状況に応じて、遊脚の運動軌道の計画と床反力の検出値によって得られるリアルタイム調整により、遊脚の適応的な接地を実現した。健康増進機能の実現と歩行の安定性の確保を前提として、胴体の姿勢角運動を決め、検出した床反力中心から胴体の前後・左右運動をオンラインで決定する手法を提出し、健康増進を目的とする4足馬ロボットの適応歩行法を開発した。最後に、製作した小型4足馬ロボットを実験対象として、軽度不整地での歩行実験により開発した適応歩行法の有効性を確認した。

以上により本論文では、健康増進を目的とする4足馬ロボットの基礎研究として、ロボットの機械構造設計と歩行法について研究した。具体的に得られた研究成果は次のとおりである。まず、簡略化した乗馬療法システムの簡略化に基づいて、乗馬による健康増進メカニズムの数学表現の試みを行った。次に、生馬の構造と乗馬療法により、4足馬ロボットの構造モデルを提案し、4足馬ロボットの運動学と動力学を導出して、実際に小型4足馬ロボットを製作し、本構造モデルの有効性について実証した。さらに、健康増進機能を実現するには、4足馬ロボットの平地歩行法適応歩行法を開発し、実験により本歩行法の有効性を示している。

目 次

第1章 序論

1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究の目的.....	4
1.3 本論文の構成.....	5

第2章 乗馬療法の原理とメカニズム

2.1 はじめに.....	10
2.2 乗馬療法の効用.....	11
2.3 乗馬療法の原理.....	15
2.4 乗馬療法のメカニズム.....	16
2.5 シミュレーションおよび検討.....	24
2.6 まとめ.....	33

第3章 構造モデルの設計および運動解析

3.1 はじめに.....	37
3.2 4足馬ロボットの構造モデル.....	38
3.3 4足馬ロボットの運動学.....	41
3.4 4足馬ロボットの動力学.....	49
3.5 まとめ.....	52

第4章 構造パラメータの設定と実験機の製作

4.1 はじめに.....	56
4.2 常歩の歩行パターン.....	57
4.3 構造パラメータの設定.....	61

4.4	小型4足馬ロボットの製作.....	66
4.5	まとめ.....	78
第5章 健康増進用4足馬ロボットの平地歩行法		
5.1	はじめに.....	81
5.2	胴体と各脚の動き.....	82
5.2	遊脚の軌道計画.....	85
5.4	シミュレーションおよび検討.....	89
5.5	歩行実験.....	93
5.6	まとめ.....	97
第6章 健康増進用4足馬ロボットの適応歩行法		
6.1	はじめに.....	100
6.2	問題設定.....	101
6.3	適応歩行法.....	106
6.4	歩行実験.....	115
6.5	まとめ.....	124
第7章 結論		
7.1	本研究により得た成果.....	126
7.2	今後の課題.....	128
本論文に関係する著者の研究発表.....		129
謝辞.....		130

第1章 序論

本論文は健康増進を目的とする4足馬ロボットの開発に当たる基礎研究を述べたものである。具体的には、本論文において乗馬療法の原理とメカニズムを解明する上で、4足馬ロボットの機械構造の設計と歩行法の開発について論じている。そのため、本章では乗馬による健康増進の手法について概説し、本研究の背景として、これまでの健康増進用乗馬ロボットの開発を述べる。そして本研究の目的とその意義について説明する。最後に、4足馬ロボットの開発に当たって本研究の具体的な内容と本論文の構成をまとめる。

1.1 研究の背景

健康であれば、個人が幸せだけでなく、社会への貢献も可能である。病気になった後には、治療などで健康に回復する可能性があるが、工学的角度から言うと、事後「誤差修正の事後行為」である。日常生活において体を積極的に鍛えていれば、疾病を予防できるし、身体素質もより向上される。これこそが健康作りの秘訣であることは知られているが、計画的に実施するのは決して容易ではない。原因としては、根性以外にはトレーニング方法にも問題があると考えられる。例えばジョギングや水泳などは、能動的運動法として有効ではあるが、単調な運動や時間の使い方だけに結局長く続けられないことが少なくは無い。一方、乗馬療法^[1-3]は、能動的運動法と違って、走っている生馬による他動運動から、騎乗者の多様な自動運動を誘発させる仕組みである。すなわち、乗馬療法は、自ら能動的に運動する意思はないので、負担は感じられないし、多様な運動を楽しめ、長く続けられる。しかし、

乗馬療法は、図 1.1 に示すように生馬に乗って行なわれるので、馬の飼養や場所の確保などの制限があるため、やはり日頃気軽に実施できない。また、生馬が個人の特性を考慮して最適な運動が得られない。もし、生馬と同等な動きをする乗馬ロボットが開発できれば、生馬の欠点を克服でき、何方も容易に乗馬ロボットによる乗馬療法を受けられる。それから、何方も日頃気軽に健康を作られるために、乗馬療法の健康増進機能を目的とする乗馬ロボットの開発が望まれることになる。

これまで、乗馬療法の健康増進機能を目的とする乗馬ロボットの開発については数例報告されている。山口らが、垂直平面内に馬身の二次元運動を実現できる乗馬シミュレータを開発した^[4]。木島らが、リンク構造によりからくり乗馬システムを開発して、定位で生馬の一つの運動パターンを実現した^[5]。木村らが、前後・左右・上下方向への動作と各軸への回転方向という 6 自由度の動作をシリアル構造により動作を再現できる生馬シミュレータを開発して、これにより腰部や背部の健康増進効果を検証した^[6]。我々の研究グループは、Stewart パラレル構造に基づいて、6 自由度の動作を実現できる定位型乗馬ロボット(図 1.2)を開発し、多量な実験を通して、馬の歩行パターンと健康増進効果との定量関係を見つけた^[7-10]。さらに、この定位型乗馬ロボットを元に商品化したものとして、松下電工(株)では乗馬療法機器「ジョーバ」(図 1.3)を開発し、これにより腹筋や背筋の筋力強化や全身の糖代謝の向上や歩行能力・バランス感覚の向上など健康増進効果が実証された^[11]。

しかし、これらの乗馬療法の健康増進機能を目的とするロボットは、室内に定位で使われるので、生馬のような前進速度による健康増進効果と室外の自然環境による心理上の促進効果を獲得できない。従って、より良い健康増進効果を得るために、生きている馬のように自然環境で歩けるとともに健康増進機能を実現できる 4 足馬ロボットの開発が注目される。



図 1.1 乗馬療法の様子



図 1.2 定位型乗馬ロボットシステム



図 1.3 乗馬フィットネス機器「ジョーバ」(松下電工)

1.2 研究の目的

健康増進を目的とする 4 足馬ロボットの開発にあたっては、機械工学・制御工学・生体工学など大幅な領域をカバーしており、主に構造設計・歩行法の開発・ロボットシステムの構築・健康増進効果の検証など課題がある。本研究は、4 足馬ロボット開発を目的として、その機械構造と歩行法に関する基礎研究を行ったものである。

具体的には、本研究においては、以下の五つの具体的な課題を検討している。①乗馬療法の原理とメカニズムの検討。なぜそれらの健康増進効果が獲得できるのか。②構造モデルの設計および運動解析。どのような構造ならば、4 足馬ロボットが歩行を行いながら、健康増進を実現できるのか。4 足馬ロボットの胴体と各脚の運動は、如何にして実現できるのか。③構造パラメータの設定と実験機の製作。提案した構造モデルに基づいて、4 足馬ロボットの構造パラメータを設定し、小型 4 足馬ロボットの製作を行う。④4 足馬ロボットの平地歩行法。平地で歩行を行いながら、健康増進機能を実現するために、4 足馬ロボットの平地歩行法を開発する。⑤4 足馬ロボットの適応歩行法。室外での自然環境で健康増進を行うために、それに対応できる適応歩行法を開発する。

これらの五つの課題を解決すれば、この 4 足馬ロボットの機械構造を確定できるし、健康増進機能のある歩行法を獲得できるし、健康増進用 4 足馬ロボットの開発の必要な基礎を構築できる。

本研究の 4 足馬ロボットの意義としては、屋内用乗馬ロボットのメリットである低コストと専用インストラクターの不必要を活かしつつ、屋外で行うことにより青空の下で実践できることから、より良い健康増進効果が得られる。また、この 4 足馬ロボットは、歩行ロボットの優れた不整地走破能力を発揮しているため、農林用ロボットや山間の搬送ロボットなどに応用できる極めて有益なシステムであると考えている。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．アウトラインは図 1.4 に示す．

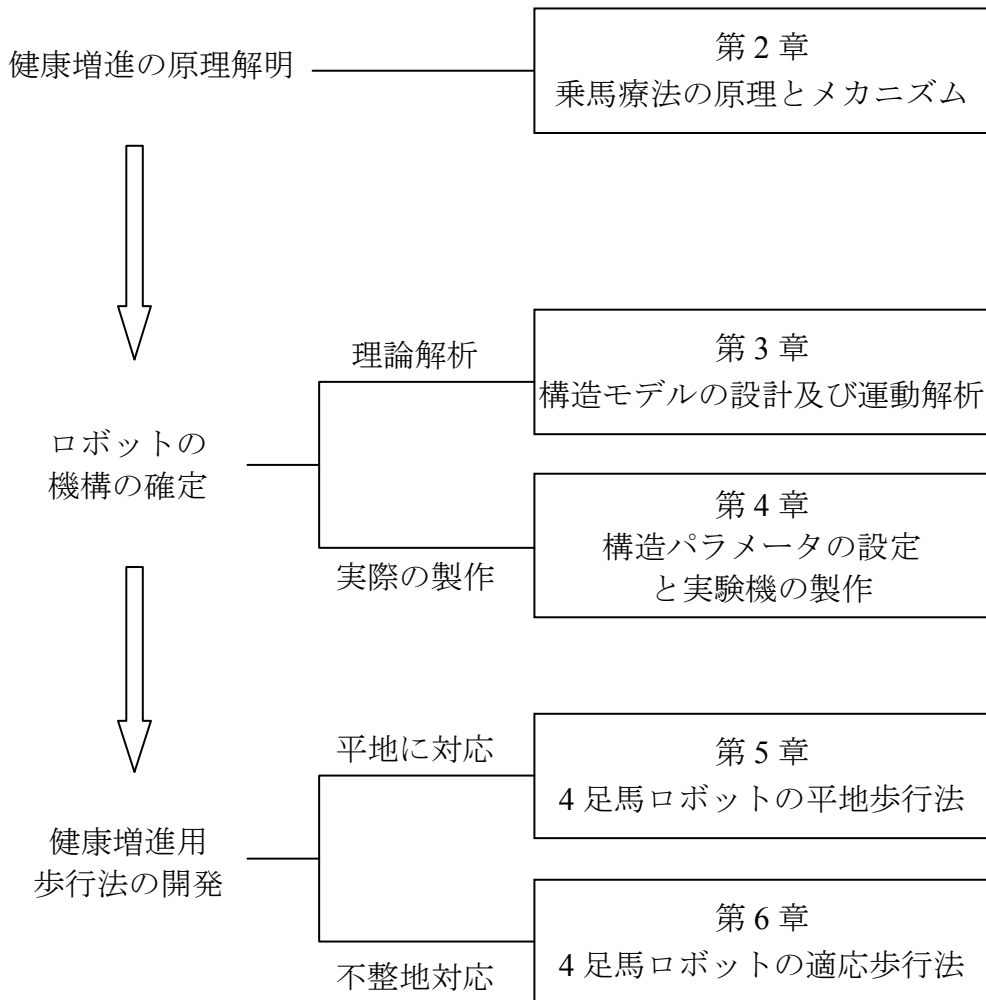


図 1.4 本論文の構成と各章の関係

第2章では，4足馬ロボットを用いて乗馬療法の健康増進機能を実現する理論根拠として，乗馬療法の原理とメカニズムについて明らかにする．ロボットで乗馬療法の健康増進機能を実現するためには，乗馬療法の原理とメカニズムについて明らかにする必要がある．具体的に言えば，乗馬療法に対してどのような健康増進効果

があるのか、どうしてそれらの健康増進効果があるのか、などの問題である。これらの問題を解明するために、本章では、まず乗馬療法の起源から身体的・心理的健康増進効果について紹介する。次に、生馬の馬身運動と騎乗者の姿勢調整を総合的に考えて、乗馬療法システムの簡略化を行って、その運動方程式を導出する。さらに、乗馬療法システムの簡略化モデルを用いて、乗馬による健康増進メカニズムの数学表現を試みる。

第3章では、健康増進を目的とする4足馬ロボットの開発に当たって、まず第一歩としては、4足馬ロボットの構造モデルを設計することである。つまり、どのような構造モデルであれば、生馬のように歩けるとともに、乗馬療法のような健康増進効果を得られるかが、解決すべき問題となっている。本章では、まずこの問題に応じて、生馬の構造を参考にした4足馬ロボットの構造モデルを提案する。その後、提案した構造モデルに基づいて、4足馬ロボットの歩行における胴体の運動自由度を検討することで、健康増進機能の実現可能性を検証する。さらに、歩行制御の基礎となる4足馬ロボットの逆運動学計算式と運動方程式を導出する。

第4章では、4足馬ロボットの構造モデルを提案した上で、各構造パラメータの設定および同じ構造である実的なロボットの製作を行う。具体的には、まず生馬の寸法を参考して、騎乗の便利さを考えて、4足馬ロボットの胴体の構造パラメータを設定する。その後、歩行においての歩行効率を評価指標として、4足馬ロボットの脚の各リンクの最適な長さを求める。そうして、提案した構造モデルの構造パラメータを設定することにより、研究対象とする4足馬ロボットを理論的に確立する。さらに、研究対象とする4足馬ロボットを確立した上で、安価と高い運動能力がある小型4足馬ロボットを製作する。

第5章では、4足馬ロボットの基礎的な歩行法として、健康増進機能を実現できる4足馬ロボットの平地歩行法を検討している。健康増進を目的とする4足馬ロボットの歩行法は、一般的な4足ロボットの歩行法と異なっており、安定な歩行を

実現することだけではなく乗馬療法のような健康増進機能を実現することも必要である．そのため，まず乗馬療法においての馬身運動を計測し，これにより，4足馬ロボットの胴体の姿勢角運動を決める．次に，4足馬ロボットの歩行の安定性を分析することにより，一番高い安定性がある各脚の歩行順番を獲得し，遊脚の歩行軌道を計画し，健康増進を目的とする4足馬ロボットの平地歩行法を開発する．最後に，シミュレーションと小型4足馬ロボットの歩行実験により開発した平地歩行法の有効性を検証する．

第6章では，室外での自然環境で健康増進を行うために，乗馬療法の健康増進機能を実現できる4足馬ロボットの適応歩行法を検討している． 室外での自然環境で健康増進を行うためには，室外での自然地面に対応できる適応歩行法が不可欠である．ここでの自然地面は平地と凹凸不整地と斜面により構成された軽度不整地である．具体的に，まず地面状況や安定性の評価などに対していくつかの設定を行う．つぎに，軽度不整地の地面状況に応じて，遊脚の運動軌道の計画と床反力の検出値によって得られるリアルタイム調整により，遊脚の適応的な接地を実現する．健康増進機能の実現と歩行の安定性の確保を前提として，胴体の姿勢角運動を決め，検出した床反力中心から胴体の前後・左右運動をオンラインで決定する手法を提案し，健康増進を目的とする4足馬ロボットの適応歩行法を開発する．最後に，製作した小型4足馬ロボットを実験対象として，軽度不整地での歩行実験により開発した適応歩行法の有効性を検証する．

最後の結論として，本研究により得た成果のまとめおよび今後の課題について述べる．以上，本論文をまとめると，健康増進を目的とする4足馬ロボットの機械構造設計と歩行法に関する基礎研究を行って，健康増進を目的とする4足馬ロボットを開発するための必要な基礎を作った．

参考文献

- [1] Martha J. Blery, Nancy Kauffman : The Effects of Therapeutic Horseback Riding on Balance, *Adapted Physical Activity Quarterly*, 5, p. 221-229, 1988.
- [2] Bracher, M.. Therapeutic horse riding: What has this to do with occupational therapists. *British Journal of Occupational Therapy*, 63, 277-282, 2000.
- [3] 太田 恵美子: 乗馬療法. 畜産の研究, Vol.51, No.1, pp.148-153,1997.
- [4] Masaaki Yamaguchi, Nobuhiro Iguchi: Development of a horseback riding simulator. *Advanced Robotics*, Vol.6, No.4, pp.517-528,1992.
- [5] 木島竜吾, 橋本幸治, 江 依法, 青木隆明, 小鹿丈夫: 全体性を有する療法のためのVRカラクリ乗馬システムの構築とその効果検証. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.6, No.3, 2001.
- [6] 木村哲彦: 生馬シミュレータの開発. *医療*, Vol.40, No.8, pp.749-755,1986.
- [7] 仲島了治, 四宮葉一, 関根修, 王碩玉, 石田健司, 木村哲彦: VR乗馬療法システムの開発とその効果検証に向けての取り組み. *ヒューマンインタフェース学会誌・論文誌(別刷)*, Vol.1, No.4, pp.81-86,1999.
- [8] 四宮葉一, 関根修, 仲島了治, 澤田一哉, 王碩玉, 石田健司, 木村哲彦: 乗馬療法機器の開発と筋力トレーニング効果の検証. *日本バーチャルリアリティ学会誌*,

Vol.6, No.3, pp. 197-202, 2001.

[9] Youichi Shinomiya, Shuoyu Wang, Kenji Ishida, Tetsuhiko Kimura: Development and Muscle Strengelh Training Evaluation for Horseback Riding Therapeutic Equipment, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14, No.6, pp.597-603, 2002.

[10] 石田健司, 木村哲彦, 四宮葉一, 王碩玉: 総論 治療 乗馬ロボット, 総合リハビリテーション, Vol.30, No.11, pp.1087-1090, 2002.

[11] <http://www.mew.co.jp/wellness/fitness/s-xeu6413-fla.html> ナショナル乗馬フィットネス機器 ジョーバ(施設向け).

第2章

乗馬療法の原理とメカニズム

健康増進を目的とする4足馬ロボットの開発の理論根拠としては、乗馬療法の原理とメカニズムである。そのため、4足馬ロボットを開発する前に、乗馬療法の原理とメカニズムを明らかにする必要がある。本章では、乗馬療法システムを簡略化する上に、乗馬療法のメカニズムの数学表現を試みる。

2.1 はじめに

乗馬による健康増進は、障害者乗馬・乗馬療法と呼ばれている。乗馬療法においては、走っている生馬による他動運動から、騎乗者の多様な自動運動を誘発させ、心理的・身体的健康増進効用をもたらす。このことから、乗馬療法は、ヨーロッパを中心にアメリカ、オーストラリアなど世界的に広く行われており、障害者・高齢者のリハビリテーション訓練としても利用されている^[1-5]。

乗馬療法の原理は、生体工学と医学の角度から生馬による他動運動から騎乗者の自動運動を誘発させるように纏められる。しかしながら、乗馬療法において、生馬の他動運動はどのように騎乗者の自動運動を誘発させるか、すなわち乗馬療法のメカニズムは、あまり明らかにされていない。一方、本研究での4足馬ロボットを開発するためには、その理論根拠とする乗馬療法の原理とメカニズムを明らかにする必要がある。従って、本章では、乗馬療法の歴史と効用について紹介し、乗馬療法システムの簡略化を行って、その運動方程式を導出した。さらに、乗馬療法システムの簡略化モデルを用いて、乗馬療法のメカニズムの数学表現を試みる。

2.2 乗馬療法の効用

まず、乗馬療法の歴史を概略的に述べる。乗馬療法のはっきりとした起源は解っていないが、紀元前 400 年頃、ギリシャで見つかった文献に、「負傷した兵士を馬に乗せて治療した」という記述が残っている。現代では、1950 年代、障害者のリハビリメニューとして、イギリス、ドイツで乗馬療法が始まった。このあと、ヨーロッパやアメリカでは、乗馬の効果が医学的にも検証され、身体障害や知的障害のある方々や高齢者のリハビリテーションメニューとして活用されている。日本でも 1980 年代から、乗馬療法が広まっている。欧米と日本での乗馬療法の歴史は、それぞれ表 2.1 と表 2.2 に示している^[6]。

表 2.1 欧米での乗馬療法の歴史

1950 年代	障害者向けの乗馬療法はイギリス、ドイツで始まり、次第に世界的に普及する。
1952 年	乗馬のできる理学療法士たちが、コペンハーゲンで乗馬療法を開始する。
1962 年	イギリスで「障害者乗馬助言委員会」が結成する(初めての全国組織)。
1969 年	イギリスの障害者乗馬助言委員会が「障害者乗馬協会(RDA)」となる。アメリカで「NARHA(北米障害者乗馬協会)」が設立する。
1970 年	ドイツで「治療的乗馬協会」設立する。
1972 年	パリで「国際障害者連盟第 1 回世界大会」開催する。
2000 年	シドニーでパラリンピック馬術競技を開催する。

表 2.2 日本での乗馬療法の歴史

1970 年	ドイツより，日本にはじめて障害者乗馬が紹介される
1980 年代	日本において障害者乗馬が本格化する．
1986 年	「日本障害者乗馬連盟」が創設され，RDA の支部となる
1989 年	国立特殊教育研究所と共同研究がスタートする(最初の行政との取り組み)．
1995 年	「日本障害者乗馬協会(JRAD)」設立(日本障害者乗馬協会は全国に 12 支部 14 団体)．
1998 年	障害者乗馬のためのインストラクター養成学校が開校する．

つぎに，乗馬療法の健康増進効果を紹介する．乗馬療法を通じて，大きく分けて身体的・心理的な健康増進効果が得られる．身体的効果は，主に生馬のリズミカルな三次元の揺れが，人間の体と脳に一定の理学的効果をもたらし，脳幹が刺激され，筋肉の発達，血液の循環を助け，筋肉運動の整合や，姿勢，平衡感覚，移動感覚，各部の機能を向上させ，健康全般を促進する^[7]．心理的効果は，青空の下で乗馬をする・視線が高くなるといったことでえられる「解放感」や騎乗時に馬を御するフィード・バックからの「精神的満足感」である．以下では，それぞれ身体的効果と心理的効果を挙げる^[8]．

身体的効果：

① 健康と楽しみの獲得

乗馬を活発に行うことが一般的な健康維持（循環と呼吸）につながり，また，障害のために通常の活動が制限されている人でも楽しむことが出来る．

② 腰部背部の筋肉の強化

サポートを受けて静止した馬の上に座ることから，馬の動きを自分でコントロールするまでの過程で腰部背部の筋肉が強化される．

③ バランスと筋肉の協同の向上

乗馬・下馬の際に必要な動きや、歩調と方向を変化させたりしながらバランスを維持する運動を行うことで、バランスと筋肉の協同が身につく。

④ 歩行の再教育

一定でなかったりアンバランスな歩行をする人は、骨盤を水平にし、正常な人の歩行パターンと類似している馬の歩行（正常で左右対称の歩き方）を体験することによって、自分の歩行パターンを向上させることができる。

⑤ 痙攣性の脳性麻痺の緩和

リズムカルな馬の動きと温かい馬のからだに直接触れることによって、硬くなった筋肉がリラックスし、自由に動けるようになる。

⑥ 股関節の柔軟化

大腿筋が鍛えられ、股関節が柔軟になることで動作が機敏になり転倒を予防することができる。

心理的効果：

① 自信・満足感の獲得

馬に乗ることで、今まで体験したことのない高い視野、スピード感を得ることができるので、「馬に乗った」という満足感を得られ、更には「大きな馬を操れた」という自信が生まれます。

② 意思・感情の表現

馬の騎乗中は馬と意思の疎通を図らなければなりません。これを続けていると、騎乗者は馬に自分の意思や感情を伝え、馬と友情を結びたくなり、自分自身の意思や感情を十分に表現することが出来ます。

③ 協調性・調和性の向上

社会から隔離されていると感じている障害者は、乗馬により、家族や友人に馬場

や騎乗の様子を話す機会が生まれます。そのことで他人の話を聞いてもらい、話を聞くようになり、協調性が・調和性が身につきます。

その上、乗馬療法は、知的障害に対する優れた効果がある。障害者への乗馬療法の最良の点は、馬を相手に、青空の下で実践できることに尽きる。訓練室や養護教室で行っているような訓練を、馬と一緒に楽しみながらできることの意義は大きい。場合によっては継続的な訓練以上に目覚ましい効果をあげるため、知的障害や情緒障害を持った子供の療育の手段ともなり得る。こうした運動については、ドイツのアントニウス・クローガー博士が綿密に検証している。

- ① 不安を軽減する
- ② 行動が安定する
- ③ 信頼の度合いを高める
- ④ 自己評価能力を高める
- ⑤ 自尊心を育む
- ⑥ 知覚・運動能力を向上させる
- ⑦ 対人関係のコツをおぼえる
- ⑧ 攻撃傾向が減少する
- ⑨ 嫌悪感や恐怖を減少させる
- ⑩ 積極的な社会性を発達させる

なお、乗馬療法においては、騎乗者に生馬を乗らせ、数人のインストラクターが指導を行う必要がある。また、安全性を考慮して、乗馬療法は、常に低い走行速度である常歩を中心に行われている。

2.3 乗馬療法の原理

乗馬療法においては、走っている生馬の馬身が周期的な動きを行っており、騎乗者が落馬しないように姿勢調整を無意識のうちにやっている。それから、乗馬療法の原理は、図 2.1 に示すように、走っている生馬の他動運動から、騎乗者の自発的姿勢調整という自動運動を誘発させ、身体的効果を獲得させるということである。

乗馬療法の原理によって、健康増進機能の実現要点としては、馬身の動きと騎乗者の自発的な姿勢調整である。馬身の動きは、空間的な三次元運動であり、6つの運動自由度がある。騎乗者の姿勢調整は、上体のバランスを保つことを目的として、図 2.2 に示すような腰部の前後・左右周りの回転により行われている。

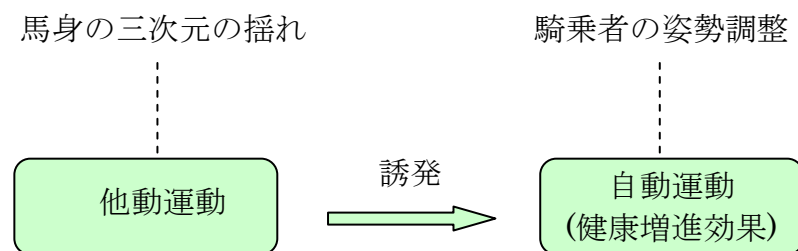


図 2.1 乗馬療法の原理

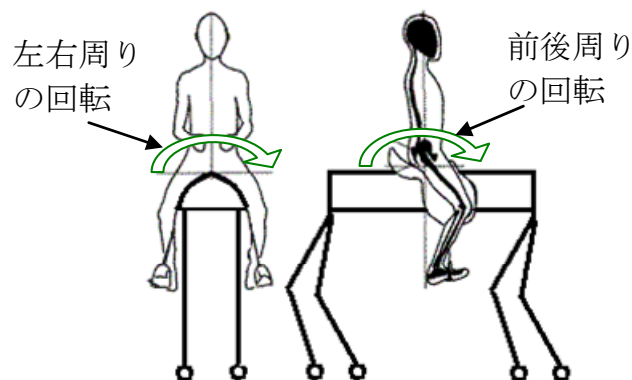


図 2.2 腰部の前後・左右周りの回転

2.4 乗馬療法のメカニズム

乗馬療法の原理によって、騎乗者の身体的効果は、上体のバランスを保つことから、腰部の前後・左右周りの回転という姿勢調整により獲得される。それで、騎乗者の姿勢調整がどのように行っているのかは、乗馬療法のメカニズムの解明に当たる肝要な問題である。生理学の常識によって、人間の姿勢調整は前庭反射系のバランス制御により行われているという知見がある。従って、乗馬療法のメカニズムを解明するために、騎乗者のバランス制御を検討することが必要である。そのため、本節では、乗馬システムの簡略化と騎乗者のバランス制御を検討する上で、乗馬療法のメカニズムを明らかにする。具体的には、まずバランス制御の原理と流れについて紹介する。次に、筋生理学上の関節モデルを導入することにより、騎乗者の腰部関節および乗馬療法システムの簡略化を行う。さらに、簡略化した腰部関節と乗馬療法システムに基づいて、乗馬療法におけるバランス制御を解析する上で、乗馬による健康増進メカニズムの数学表現を試みる。

(1) バランス制御の原理と流れ

まず、生理学の角度からバランス制御の原理を紹介する^[9]。高い所から背を下にして落とされたとしても、ネコは、回転して足から着地することができる。また、赤ん坊の頭を急に後方に倒すと、眼は下方を向いて視線を保とうとする。これらは、身体のバランスが崩れたときに平衡を保とうとする反射の例である。このような身体の平衡を感知する感覚受容器が、前庭系の半規管および耳石器、筋・腱の固有受容器である。これらの感覚受容器で獲得した身体の平衡情報は、神経情報として脳に伝えて、前庭反射系のバランス制御を引き起こせる。乗馬療法においては、騎乗者の上体は、自発的に前庭反射系のバランス制御を行っている。

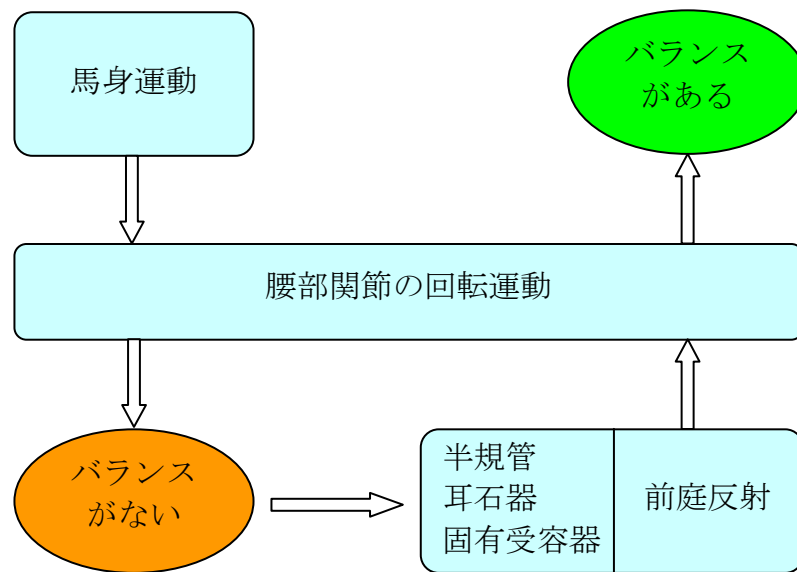


図2.3 乗馬療法におけるバランス制御の流れ

つぎに、乗馬療法に対して、騎乗者のバランス制御の流れを説明する。乗馬療法において、馬身の他動運動から上体の姿勢が乱されると、騎乗者は半規管および耳石器で観測された頭部の姿勢情報と固有受容器で観測された身体の姿勢情報によって自発的にバランス制御を通じて姿勢の調整と回復を行える。このバランス制御の流れは、図2.3に示している。騎乗者の腰部関節の制御信号は、前庭反射からのニューロン信号であり、腰部背部の筋の収縮運動と伸張運動を引き起こせる。

(2) 乗馬療法システムの簡略化

騎乗者の腰部関節を簡略化するために、Hogan・伊藤らによって提唱された双線形関節モデル^[10-11]を導入する。導入された双線形関節モデルは、図2.4に示すような構造がある。

この双線形関節モデルによって、関節は主動筋と拮抗筋と呼ばれる2本の筋により駆動されている。これらの筋は、前庭系からの制御信号とする運動ニューロンによって制御される。

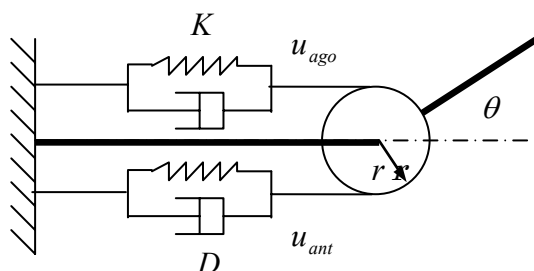


図2.4 双線形関節モデル

その上に，Hoganらは，筋をばねダンパー系として記述し，運動ニューロンの発火頻度と筋が関節周りに発生するトルクとの関係を式(2.1)と(2.2)で記述される双線形モデルとして定式化することで筋肉の運動特性をうまく説明することができることを示した^[10]．

$$T_{ago} = (F_0 - K\theta - D\dot{\theta})ru_{ago} \quad (2.1)$$

$$T_{ant} = -(F_0 + K\theta + D\dot{\theta})ru_{ant} \quad (2.2)$$

T_{ago} は主動筋が発生する関節トルク， T_{ant} は拮抗筋が発生する関節トルク， F_0 は筋が発生することのできる張力の最大値， K は筋のばね定数， D は筋の粘性係数， θ は関節角度， u_{ago} は0から1の間に値を持つ主動筋の活動度，つまり運動ニューロンの発火頻度， u_{ant} は同様に0から1の間に値を持つ拮抗筋の活動度をそれぞれ表す．

乗馬療法における騎乗者の腰部関節は，導入した双線形関節モデルにより簡略化できる．そうすると，騎乗者の腰部関節の回転運動は，運動ニューロンの信号となっている主動筋と拮抗筋の活動度により制御できる．以下では，簡略化した腰部関節を用いて，乗馬療法システムを簡略化する．

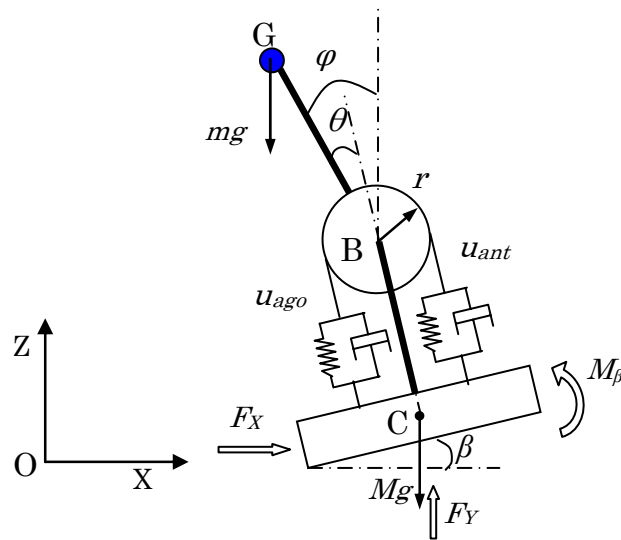


図2.5 簡略化した乗馬療法システム

乗馬療法においては、騎乗者の腰部以下の部分は、馬身と一緒に動いているので、馬身の一部と見なせる。そうすると、乗馬療法システムは、馬身と騎乗者の腰部関節と騎乗者の上体により構成されている。一方、馬身の動きと騎乗者の姿勢調整の運動関係を分析すると、騎乗者のバランスに影響する主要要素は馬身の前後・左右の移動と前後・左右への傾斜運動である。また、腰部関節の前後周りの回転と左右周りの回転は同じような制御過程がある。従って、ここでは、簡略化するために、腰部関節が前後周りの回転運動だけを行うことを設定する。このことから、馬身は相応的に前後移動と前後への傾斜運動を行うことを設定する。そうして、乗馬療法においての馬身は前後移動と前後への傾斜運動がある剛体で表され、腰部関節は前後まわりの双線形モデルで表され、騎乗者の上体は腰部関節まわりの倒立振り子と見なすことができる。簡略化した乗馬療法システムは、図2.5に示している。

図 2.5 においての固定座標系 O-XZ は、生馬の前進方向を X 軸の正方向、鉛直上方向を Z 軸の正方向としている。倒立振り子の回転中心は点 C、腰部関節の回転中心は点 B、騎乗者の上体中心は点 G で表し、点 C と点 B との距離は $|CB|=h$ 、点 B と点 G との距離は $|BG|=d$ を設定する。腰部関節の回転角度と上体と鉛直方向との

なす角をそれぞれ θ と φ ，腰部関節の回転半径を r とする．また，馬身の受ける X 軸方向と Z 軸方向の外力をそれぞれ F_X ， F_Z ，馬身と腰部の回転トルクをそれぞれ M_β ， τ_B とする．また，馬身の回転中心 C の位置座標を (X, Z) ，上体の重心 G の位置座標を (P_X, P_Z) とする．

以上の設定に基づいて，ラグランジュ法を利用して，乗馬療法システムの運動方程式を導出してみる．そのため，まず馬身と倒立振子により構成された振子系の持つ運動エネルギー T と位置エネルギー U を次のように計算する．

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{P}_X^2 + \dot{P}_Z^2) + \frac{1}{2}J_m\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}M(\dot{X}^2 + \dot{Z}^2) + \frac{1}{2}J_M\dot{\beta}^2 \quad (2.3)$$

$$U = mgP_Z + MgZ \quad (2.4)$$

ここで， m と M はそれぞれ騎乗者の上体と馬身の質量， J_m と J_M はそれぞれ騎乗者の上体と馬身の慣性モーメントである．式(2.3)と(2.4)により，ラグランジュ関数 L は次のように計算できる．

$$L = T - U = \frac{1}{2}m(\dot{P}_X^2 + \dot{P}_Z^2) + \frac{1}{2}J_m\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}M(\dot{X}^2 + \dot{Z}^2) + \frac{1}{2}J_M\dot{\beta}^2 - mgP_Z - MgZ \quad (2.5)$$

その上，関係式 $P_X = X + h \sin \beta + d \sin \varphi$ ， $P_Z = Z + h \cos \beta + d \cos \varphi$ と $\varphi = \beta + \theta$ がある．腰部関節が実際に馬身と直接につながっているので， $h = 0$ とする．これらの関係式を式(2.5)に代入し整理すると，次の式が得られる．

$$L = \frac{1}{2}m\{\dot{X}^2 + \dot{Z}^2 + d^2(\dot{\theta} + \dot{\beta})^2 + 2d\dot{X}(\dot{\theta} + \dot{\beta})\cos(\theta + \beta) - 2d\dot{Z}(\dot{\theta} + \dot{\beta})\sin(\theta + \beta)\} \\ + \frac{1}{2}J_m(\dot{\theta} + \dot{\beta})^2 + \frac{1}{2}M(\dot{X}^2 + \dot{Z}^2) + \frac{1}{2}J_M\dot{\beta}^2 - mg\{Z + d\cos(\theta + \beta)\} - MgZ \quad (2.6)$$

乗馬療法システムの一般化変量と一般化力は，それぞれ $q = (X, Z, \beta, \theta)$ と $Q = (F_X, F_Z, M_\beta, \tau_B)$ で表して，ラグランジュ法によって次のような運動方程式が得られる．

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2.7)$$

式(2.6)で計算したラグランジュ関数 L を式(2.7)に代入して，各一般化変量に対して整理すると，以下のような式(2.8)-(2.11)が得られる．

$$(m + M)\ddot{X} + md(\ddot{\theta} + \ddot{\beta})\cos(\theta + \beta) - md(\dot{\theta} + \dot{\beta})^2\sin(\theta + \beta) = F_X \quad (2.8)$$

$$(m + M)\ddot{Z} + md(\ddot{\theta} + \ddot{\beta})\cos(\theta + \beta) - md(\dot{\theta} + \dot{\beta})^2\sin(\theta + \beta) + (m + M)g = F_Z \quad (2.9)$$

$$(md^2 + J_m)\ddot{\theta} + (md^2 + J_m + J_M)\ddot{\beta} + md\ddot{X}\cos(\theta + \beta) - md\ddot{Z}\sin(\theta + \beta) \\ - mgd\sin(\theta + \beta) = M_\beta \quad (2.10)$$

$$(md^2 + J_m)(\ddot{\theta} + \ddot{\beta}) + md\ddot{X}\cos(\theta + \beta) - md\ddot{Z}\sin(\theta + \beta) - mgd\sin(\theta + \beta) = \tau_B \quad (2.11)$$

式(2.8)-(2.11)は，乗馬療法システムの運動方程式である．この運動方程式は，馬身と騎乗者の上体の間の運動と外力の関係を表している．

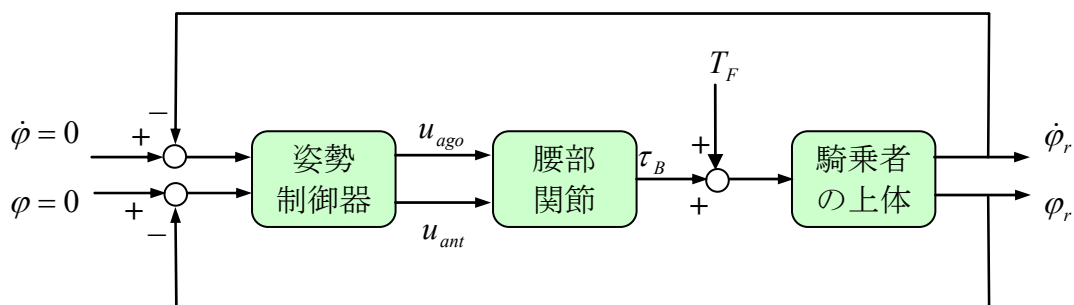


図2.6 乗馬療法のメカニズムの近似モデル

(3) 乗馬療法のメカニズム

ここでは、簡略化した乗馬療法システムに基づいて、騎乗者のバランス制御を解析する上で、乗馬による健康増進メカニズムの近似モデルと数学表現を試みる。

乗馬療法におけるバランス制御の目的は、倒立振子とする騎乗者の上体を安定に立たせることである。それで、バランス制御の平衡点は $\phi = 0$, $\dot{\phi} = 0$ になっている。それから、バランス制御の近似モデルを求めるために、腰部関節は一つのモーター、馬身の運動は制御においての外乱とみられる。また、腰部関節の制御信号は、前庭系からの運動ニューロンの発火頻度 u_{ago} と u_{ant} である。そうすると、乗馬療法のメカニズムの近似モデルは、図2.6に示されている。

この近似モデルによって、乗馬療法でのバランス制御は、まっすぐな上体と鉛直方向とのなす角 $\phi = 0$ と角速度 $\dot{\phi} = 0$ になることを目的としている。近似モデルの構成は、姿勢制御器と腰部関節と騎乗者の上体の三つの部分である。以下では、これらの三つの部分を数式で表現することで、このメカニズムの近似モデルを明らかにする。

まず、前庭系の姿勢反射のような機能を担っている姿勢制御器を検討する。姿勢制御器の入力は騎乗者の上体と鉛直方向とのなす角、姿勢制御器の出力は運動ニューロンの発火頻度 u_{ago} と u_{ant} である。バランス制御の原理によって、上体と鉛直方

向とのなす角 φ が大きくなればなるほど、腰部関節の逆方向に回転するトルクおよびニューロンの発火頻度 u_{ago} と u_{ant} の変化量は大きくなる。また、ニューロンの発火頻度 u_{ago} と u_{ant} は、部関節の双線形モデルにおいてのばねダンパーの変化量に係する。すなわち、 $\varphi_r = 0$ になるとき、 $\tau_B = T_{ago} + T_{ant}$ は0になるべきである。それから、ニューロンの発火頻度 u_{ago} と u_{ant} は、次のような式により近似できる。

$$u_{ago} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{K}{F_0} \theta + \frac{D}{F_0} \dot{\theta} \right) + \frac{K_\varphi}{F_0} (-\varphi_r) + \frac{D_\varphi}{F_0} (-\dot{\varphi}_r) \right\} \quad (2.12)$$

$$u_{ant} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{K}{F_0} \theta + \frac{D}{F_0} \dot{\theta} \right) - \frac{K_\varphi}{F_0} (-\varphi_r) - \frac{D_\varphi}{F_0} (-\dot{\varphi}_r) \right\} \quad (2.13)$$

この中で、 K_φ は正の係数、 $\theta = \varphi - \beta$ である。また、式(2.12)-(2.13)と腰部関節の双線形モデルを表す式(2.1)と(2.2)によって、腰部関節の出力 τ_B は、以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} \tau_B = T_{ago} + T_{ant} = & (F_0 - K\theta - D\dot{\theta}) \cdot r \cdot \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{K}{F_0} \theta + \frac{D}{F_0} \dot{\theta} \right) + \frac{K_\varphi}{F_0} (-\varphi_r) + \frac{D_\varphi}{F_0} (-\dot{\varphi}_r) \right\} \\ & - (F_0 + K\theta + D\dot{\theta}) \cdot r \cdot \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{K}{F_0} \theta + \frac{D}{F_0} \dot{\theta} \right) - \frac{K_\varphi}{F_0} (-\varphi_r) - \frac{D_\varphi}{F_0} (-\dot{\varphi}_r) \right\} \end{aligned} \quad (2.14)$$

式(2.14)を整理すると、つぎの式(2.15)が得られる。

$$\tau_B = T_{ago} + T_{ant} = -r(K_\varphi \varphi_r + D_\varphi \dot{\varphi}_r) \quad (2.15)$$

つぎに、騎乗者の上体の動力学モデルを検討する。騎乗者の上体の動力学は、簡略化した乗馬療法システムの運動方程式においての式(2.11)で表される。腰部関節

の出力 τ_B により上体の姿勢角 φ を求めるために、式(2.11)の簡単化を行なう必要がある。そのため、まず、馬身の鉛直方向での座標 Z は固定値を設定することから、 $\ddot{Z}=0$ である。つぎに、乗馬療法におけるバランス制御によって、倒立振子の平衡点が議論の対象となる。この平衡点から振子の角度 $\varphi=\theta+\beta$ が微小に変動した場合を考えると、 $\sin(\varphi)=\sin(\theta+\beta)\approx\theta+\beta$ と $\cos(\varphi)=\cos(\theta+\beta)\approx 1$ のように近似することが可能である。以上の関係を式(2.11)に代入すると、つぎの式(2.16)が得られる。

$$(md^2 + J_m)\ddot{\varphi} + md\ddot{X} - mgd\varphi = \tau_B \quad (2.16)$$

式(2.16)で表す騎乗者の上体の動力学を用いて、腰部関節の出力 τ_B から、上体の姿勢角 φ を求められる。

以上より、図2.6における各構成部分を数式で表現することにより、乗馬療法のメカニズムを解明し、その数学表現の試みを行った。

2.5 シミュレーション及び検討

本節では、シミュレーションにより、乗馬療法のメカニズムの数学表現について検証する。具体的には、まずバランス制御のデジタルシミュレーションを行うために、乗馬療法メカニズムの近似モデルを数式で離散化する。次に、離散化した近似モデルに基づいて、与えた信号に対応する上体の姿勢角運動を求めて、乗馬療法メカニズムの数学表現について検証する。さらに、異なる馬身運動による健康増進効率の計算法を提案し、シミュレーションにより提案した計算法について検証する。

(1) 近似モデルの離散化

乗馬療法メカニズムの近似モデルは、図2.6に示すような構造になっており、式(2.15)と式(2.16)により表されている。それで、近似モデル離散化は、式(2.15)と式

(2.16)に基づいて行われる。

まず，サンプル時間 dt を設定し，式(2.15)によって上体の姿勢角から腰部関節の回転トルクを次のように求める。

$$\tau_B(t) = -r \cdot \{K_\varphi \cdot \varphi(t-1) + D_\varphi \cdot \dot{\varphi}(t-1)\} \quad (2.17)$$

このあと，式(2.16)で求めた $\tau_B(t)$ から上体の姿勢角の角加速度は次の式により計算できる。

$$\ddot{\varphi}(t) = \{\tau_B(t) + mgd \cdot \varphi(t) - md\ddot{X}(t)\} / (md^2 + J_m) \quad (2.18)$$

ここで，上体の姿勢角が連続的に変化することがあるので，式(2.18)においての $\varphi(t)$ は $\varphi(t+1)$ となる。そうすると，時刻 t での姿勢角の加速度は，時刻 t での上体の前進方向の加速度と時刻 $t-1$ での姿勢角によりつぎのように計算できる。

$$\ddot{\varphi}(t) = \{\tau_B(t) + mgd \cdot \varphi(t-1) - md\ddot{X}(t)\} / (md^2 + J_m) \quad (2.19)$$

さらに，微分の計算法によって，次のような関係式が得られる。

$$\dot{\varphi}(t) = \dot{\varphi}(t-1) + \ddot{\varphi}(t) \cdot dt = \dot{\varphi}(t-1) + \{\tau_B(t) + mgd \cdot \varphi(t-1) - md\ddot{X}(t)\} / (md^2 + J_m) \cdot dt \quad (2.20)$$

$$\varphi(t) = \varphi(t-1) + \dot{\varphi}(t) \cdot dt \quad (2.21)$$

式(2.20)と式(2.21)によって，時刻 $t-1$ での姿勢角 $\varphi(t-1)$ と姿勢角の角速度 $\dot{\varphi}(t-1)$ が既知ならば，時刻 t での姿勢角 $\varphi(t)$ と姿勢角の角速度 $\dot{\varphi}(t)$ も計算できる。よって，

乗馬療法メカニズムの近似モデルの離散化を実現した．ただし，式(2.20)と式(2.21)においての各パラメータは，以下のように設定する．上体の質量 $m = 30\text{kg}$ ，上体の高さ $d = 0.4\text{m}$ ，上体のモーメント慣量 $J_m = md^2 = 4.8\text{kgm}^2$ ，腰部関節の回転半径 $r = 0.1\text{m}$ である．

(2) シミュレーション

まず，姿勢制御器を表している式(2.17)中のパラメータ K_φ ， D_φ を確定し，乗馬療法メカニズムの姿勢回復機能を検証する．そのため，馬身が動かないと設定した上に，時刻 $t=0$ で $\varphi(0) = 10^\circ$ と $\dot{\varphi}(0) = \ddot{\varphi}(0) = 0$ とする初期状態を与えて，パラメータ K_φ と D_φ を調整することでシミュレーションを行った．シミュレーション結果としては， $K_\varphi = 70$ と $D_\varphi = 7$ の時，図 2.7 に示すような上体の姿勢回復過程を得た．図中の実線は，上体の姿勢角 φ の時間変化を表している．

このシミュレーション結果によって，騎乗者の上体は時刻 $t=0$ で与えた初期状態を受けた後に，提案した近似モデルを用いてバランス制御を行なうことで，およそ $t=2$ 秒の時に上体の姿勢角 φ は平衡点に達成し，上体の姿勢回復過程が終わった．つまり，制御器のパラメータ $K_\varphi = 70$ ， $D_\varphi = 7$ を設定した時，バランス制御の近似モデルは，上体の姿勢回復機能を実現できたと分かる．

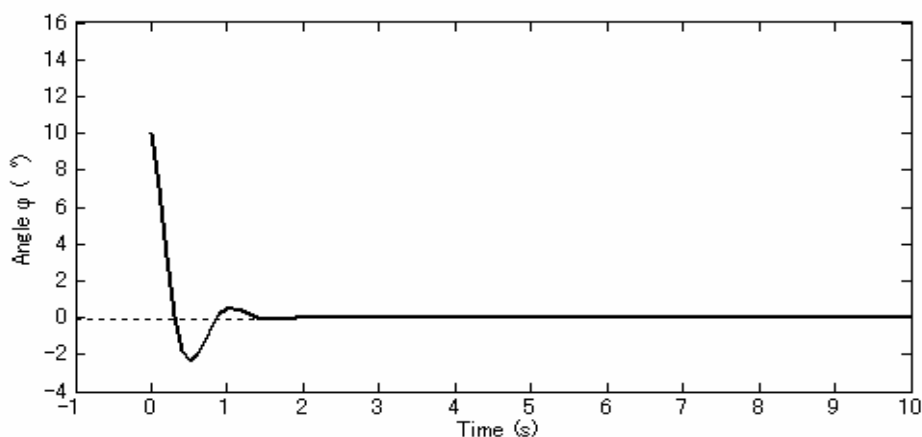


図 2.7 与えた初期状態による上体の姿勢角 φ の時間変化

次に、指定した馬身運動に対応する上体の姿勢角運動のシミュレーションを行なうことで、乗馬療法メカニズムの近似モデルを検証する。指定した馬身運動は、前後移動と前後傾斜運動である。まず馬身の前後移動と前後傾斜運動をそれぞれ設定した上で、上体の姿勢角運動のシミュレーションを行った。さらに、馬身の前後移動と前後傾斜運動を同時に行なう場合に対して、上体の姿勢角運動のシミュレーションを行った。これらのシミュレーション結果を図 2.8 から図 2.10 に示す。ここでは、馬身に対して過度の加速度を避けるために、緩く変化する加速度がある正弦曲線を馬身運動の例としている。

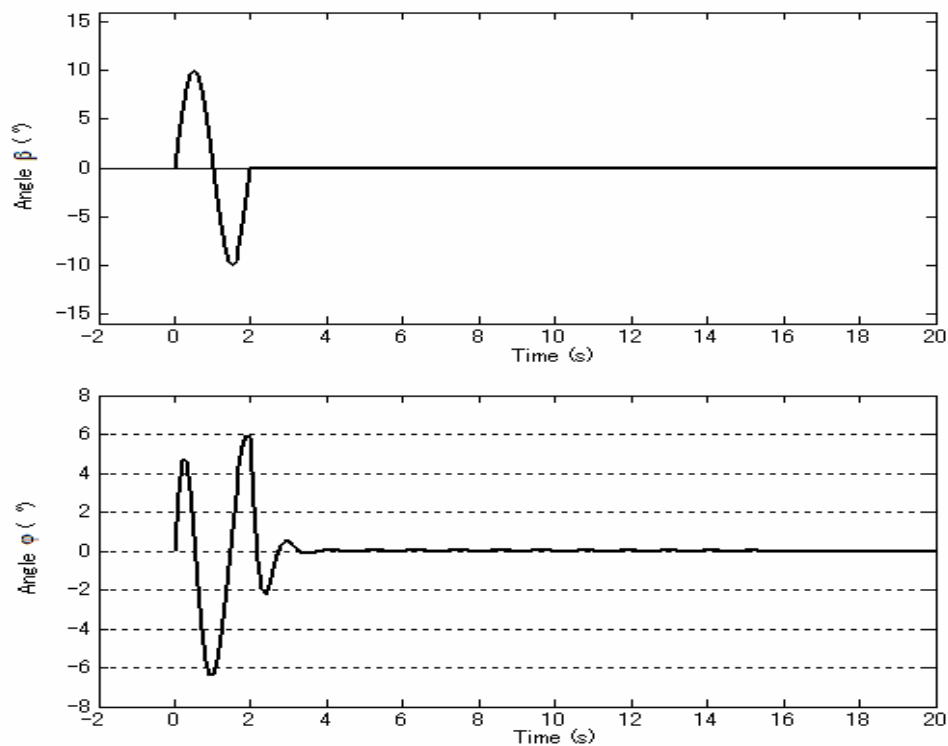


図 2.8 馬身の前後傾斜運動による上体の姿勢角 ϕ の時間変化

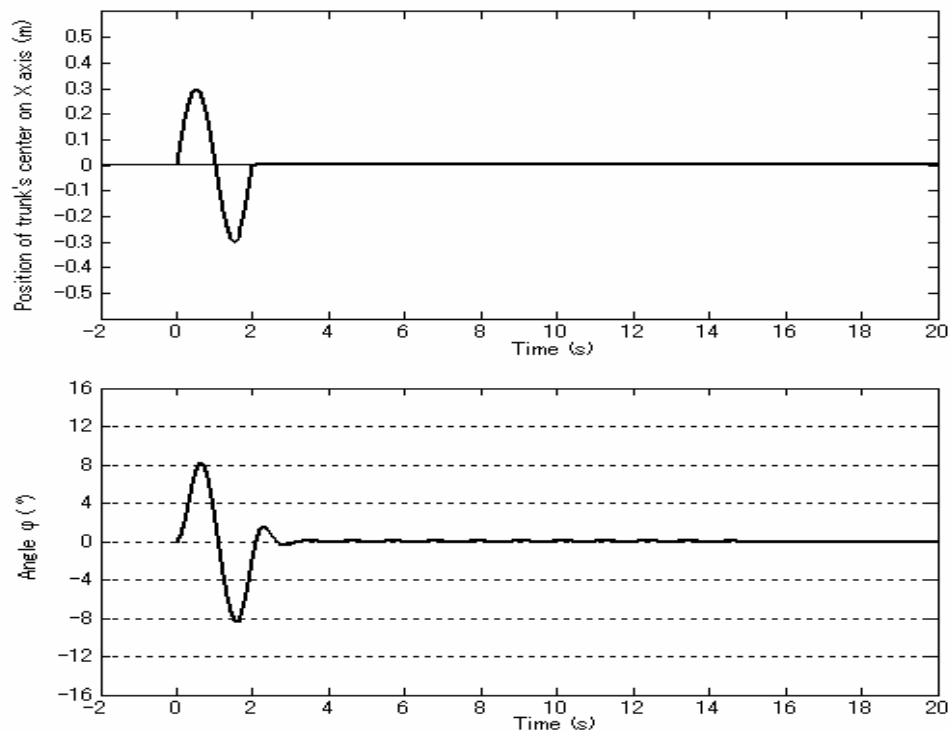
図 2.9 馬身の前後移動による上体の姿勢角 φ の時間変化

図 2.8 のグラフは、指定した馬身の姿勢角 β とシミュレーションで獲得した上体の姿勢角 φ の時間変化の一例として示したものである。馬身の姿勢角 β は、 $t=0$ から $t=10$ 秒までの間に正弦曲線に従って変化している。これに対応して、上体の姿勢角 φ は、姿勢制御により調整しており、およそ $t=11$ 秒から徐々に平衡点に達した。図 2.9 のグラフは、馬身を $t=0$ から $t=10$ 秒までの間に正弦曲線に従って前後方向に移動させると、上体の姿勢角 φ は、およそ $t=11$ 秒から徐々に平衡点に達した。図 2.10 のグラフでは、以上の馬身の前後移動と前後傾斜運動を同時に行なう場合の上体の姿勢角 φ の時間変化を示した。このグラフによって、上体の姿勢角 φ は、同様におよそ $t=11$ 秒から徐々に平衡点に達したとわかる。

これらのシミュレーション結果によって、乗馬療法メカニズムの近似モデルを用いて馬身の前後移動と前後への傾斜運動による上体の姿勢回復・姿勢保持が行え、乗馬療法メカニズムの数学表現の実現可能性を確認した。

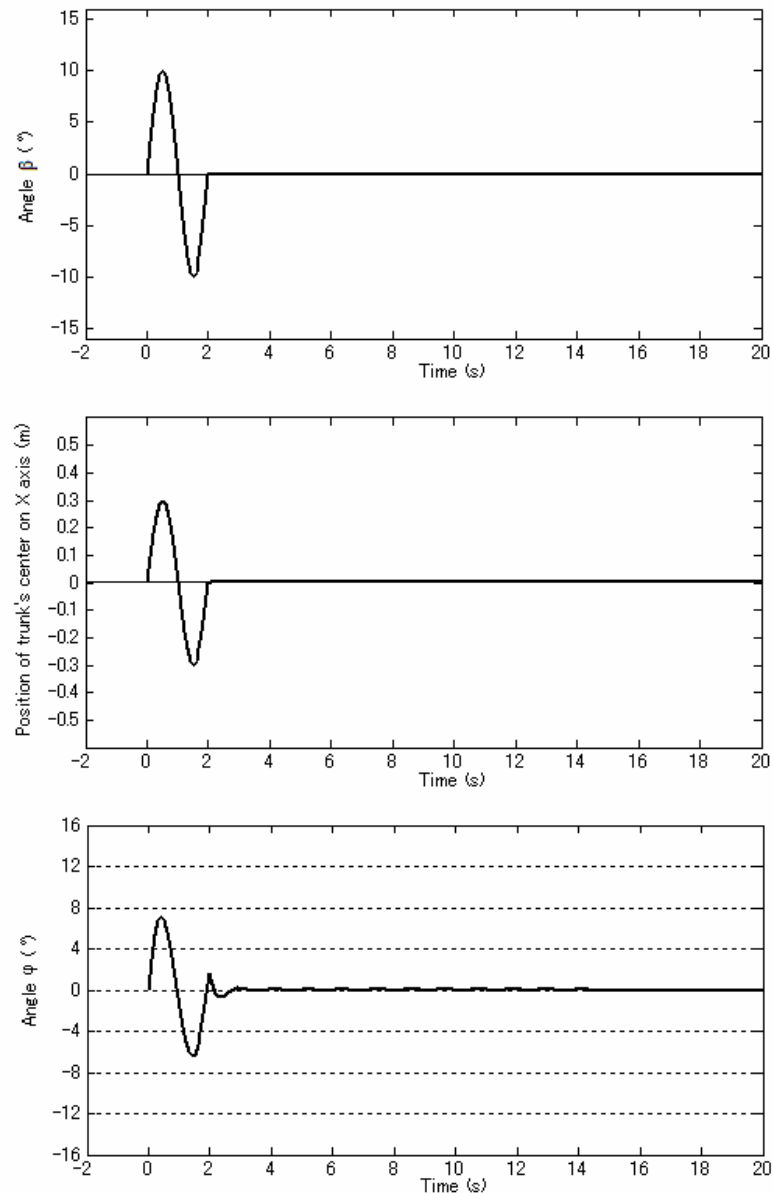


図 2.10 馬身の前後移動と前後傾斜運動による上体の姿勢角 φ の時間変化

(3) 健康増進効果に関する討論

乗馬療法のメカニズムによって、腰部関節の回転運動は、主動筋と拮抗筋の総的なトルクにより行われている。その上、主動筋と拮抗筋のトルクは、筋の張力と活動度により決められる。それから、乗馬療法による腰部背部の筋力強化などの効果は、腰筋背筋の活動度と張力との積により表されると考える。つまり、馬身が動か

ない初期状態に比べて、腰筋と背筋の初期活動度からの増量と筋の張力との積が大きくなるほど、筋力強化など効果が大きくなる。そして、馬身その他動運動による健康増進の効率 P_m は、次の式で表すことができる。

$$P_m = \frac{\int_0^T T_{ago} \cdot \delta(u_{ago} - u_{ago}^0) dt + \int_0^T T_{ant} \cdot \delta(u_{ant} - u_{ant}^0) dt}{T} \quad (2.22)$$

ただし、 u_{ago}^0 と u_{ant}^0 は、馬身が動かないときの主動筋と拮抗筋の初期活動度であり、 T は馬身その他動運動の周期である。活動度の計算式(2.12)と式(2.13)によって、 $u_{ago}^0 = u_{ant}^0 = 0.5$ が得られる。また、関数 $\delta(x)$ は、次の式で表される。

$$\delta(x) = \begin{cases} x, & \text{if}(x > 0) \\ 0, & \text{if}(x \leq 0) \end{cases} \quad (2.23)$$

計算した健康増進の効率 P_m を評価指標として、異なる馬身運動による健康増進効果を評価することができる。以下では、健康増進の効率 P_m の計算法について検討するために、馬身の前後移動の一例とする正弦曲線を利用して、シミュレーションを行った。これらのシミュレーション結果は、図 2.11 から図 2.13 までに示している。

図 2.11 のグラフは、前後移動の正弦曲線とその場合の上体の姿勢角 φ を示したものである。この正弦曲線は、周期 $T = 2$ 秒と時間区間 $t \in [0, 20]$ がある。獲得した上体の姿勢角 φ は、同様に周期的に変化しており、その周期もおおよそ 2 秒であるとわかる。

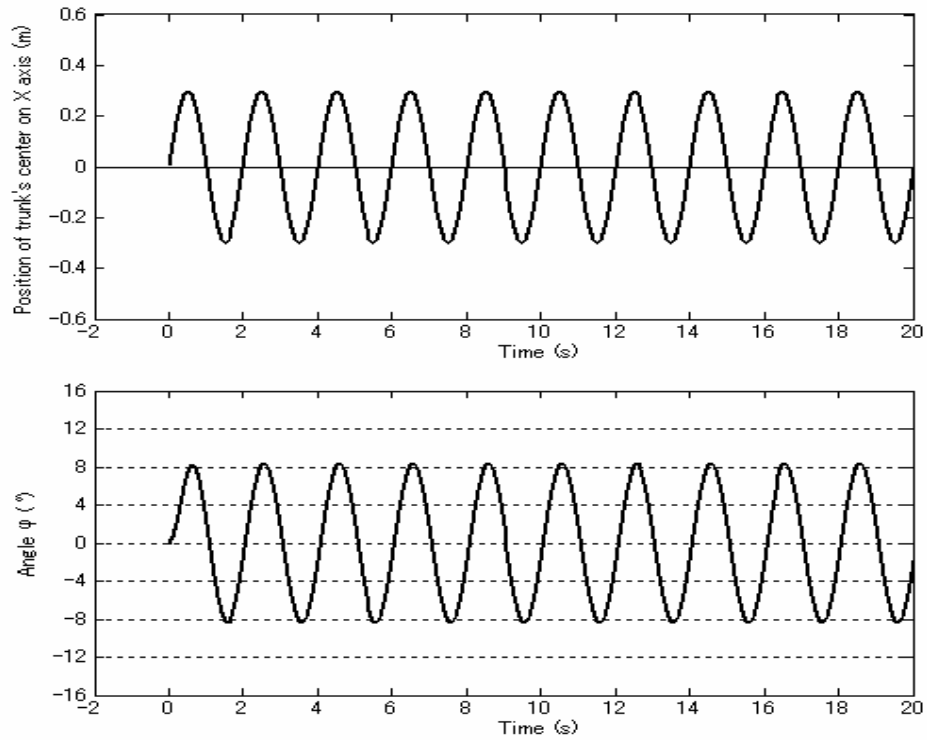


図 2.11 馬身の連続的な前後移動と上体の姿勢角 φ の時間変化

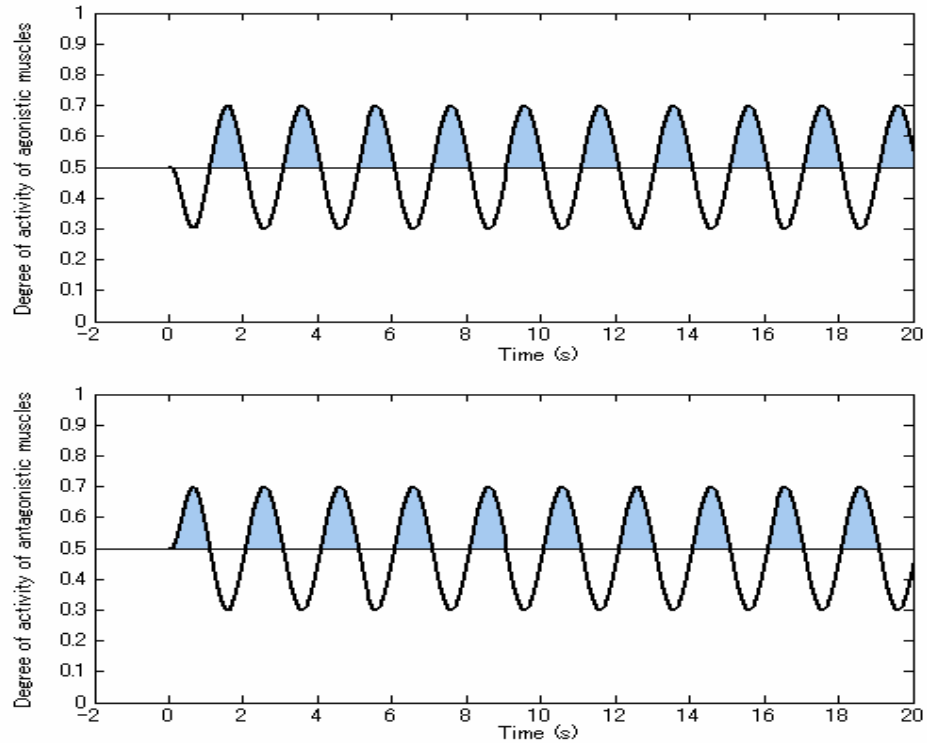


図 2.12 獲得した主動筋の活動度 u_{ago} と拮抗筋の活動度 u_{ant}

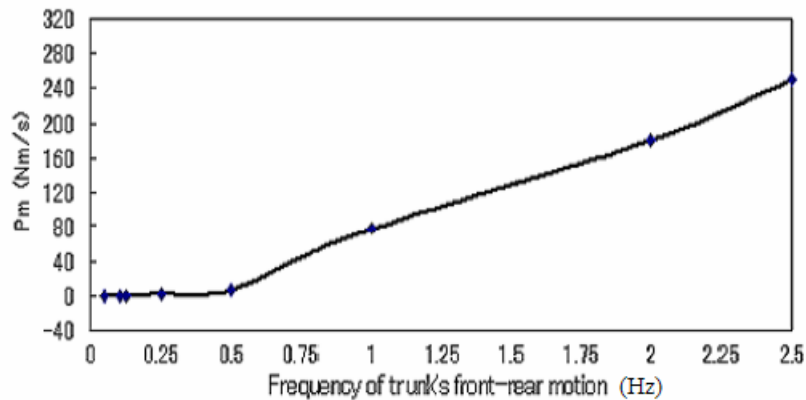


図 2.13 正弦曲線の頻度と計算した健康増進の効率 P_m

表 2.3 異なる正弦曲線の周期に対応する健康増進の効率 P_m

周期 T (s)	20	10	8	4	2	1	0.5	0.4
P_m (Nm/s)	0.0403	0.1800	0.2594	1.1601	7.2193	77.96	180.89	249.94

図 2.12 のグラフは、 $K = 0.5K_\phi$ 、 $D = 0.5D_\phi$ を設定し、シミュレーションにより獲得した主動筋の活動度 u_{ago} と拮抗筋の活動度 u_{ant} を示したものである。図中の塗りつぶした部分は、初期活動度 u_{ago}^0 と u_{ant}^0 以上の部分、すなわち馬身の運動により引き起こした健康増進の役割を担っている部分と考えられる。また、式(2.22)に従って、 $K = 0.5K_\phi$ 、 $D = 0.5D_\phi$ のときに計算した健康増進の効率は $P_m = 7.2193 \text{ Nm/s}$ である。さらに、馬身運動の正弦曲線の周期 T が異なる値を取って、相応的な健康増進の効率 P_m を計算した。獲得した健康増進の効率 P_m は表 2.3 に示されている。より直観的に表現するために、正弦曲線の頻度を横座標とし、健康増進の効率 P_m を図 2.13 のように表している。シミュレーションにおいては、サンプル時間 $dt = 0.1$ から姿勢角 ϕ の変化を観測できるために、正弦曲線の頻度は 2.5 Hz 以下の値を取ることが設定されている。図 2.13 によって、健康増進の効率 P_m は、正弦曲線の頻度の増加に従って増加している。具体的には、頻度が 0.5 より小さくなると、健康増

進の効率 P_m はほぼ 0 に近くなり、頻度が 0.5 から 2.5 までの間で、健康増進の効率 P_m が速く増加することが分かる。一方、人間の姿勢調整について考えると、上体の姿勢角の急激な変化に対する姿勢回復過程は、上体の姿勢角の緩い変化に対する姿勢回復過程に比べて、より大きいエネルギーを消耗すると考えられる。したがって、これらのシミュレーション結果は人間の姿勢調整に関する経験と符合していることから、健康増進の効率 P_m により異なる馬身運動による健康増進効果を評価する可能性を示唆した。

2.6 まとめ

本章では、乗馬療法の歴史と効用について紹介し、乗馬療法システムの簡略化モデルを用いて、乗馬療法のメカニズムの数学表現を試みる。具体的には、以下のように進めた。

まず、乗馬療法の歴史や身体的・心理的效果や原理などをまとめる上で、導入した筋生理学上の関節モデルを騎乗者の腰部関節で近似して、乗馬療法システムを簡略化し、その運動方程式を導出した。

つぎに、簡略化した乗馬療法システムに基づいて、乗馬療法メカニズムの近似モデルを得て、その数学表現を試みて、乗馬療法のメカニズムを解明した。

さらに、シミュレーションで乗馬療法のメカニズムを検証した。具体的には、まずシミュレーションを行なうために、乗馬療法メカニズムの近似モデルを数式で離散化した。つぎに、離散化した乗馬療法メカニズムの近似モデルに基づいて、与えた信号による上体の姿勢角運動のシミュレーションを行なって、乗馬療法のメカニズムの数学表現について検証した。最後に、馬身運動による健康増進効率の計算法を提案し、シミュレーションにより提案した健康増進効率の計算法について検証した。

以上の乗馬療法のメカニズムに関する検討および成果は、乗馬療法による健康増

第2章 乗馬療法の原理とメカニズム

進の基礎理論を得るだけでなく、本研究での健康増進用4足馬ロボットの開発にも役立つと思われる。

参考文献

- [1] Adrian M.Bain: Pony Riding for the Disabled, Physiotherapy, Vol.51, pp.263-265,1965.
- [2] R.Dlin, A.Ayalon, O. Yazdi, O. Inbar, D.Snir: The influence of therapeutic horseback riding on physiological biomechanical, and psychomotor variables. Maccabiah-Wingate International Congress on Sport & Coaching (1989:Wingate), pp.131-140,1991.
- [3] Barbara Teichmann Engel: The horse as a modality for occupational therapy. Occup. ther. Health care (USA), Vol.1, No.1, pp. 17-34, 1995.
- [4] MacKinnon, J. R., Noh, S., Lariviere, J., MacPhail, A., Allan, D. E., & Laliberte, D.: A study of therapeutic effects of horseback riding for children with cerebral palsy. Physical and Occupational Therapy in Pediatrics, Vol.15, pp.17-34, 1995.
- [5] Land, G., Errington-Povalac, E., & Paul, S.: The effects of therapeutic riding on sitting posture in individuals with disabilities. Occupational Therapy in Health Care, Vol.14, pp.1-12, 2001.
- [6] <http://national.jp/kenko/exercise/joba/special/sp08.html>. 乗馬療法の歴史.
- [7] <http://www.equinst.go.jp/center/index.html>. ようこそ競走馬総合研究所へ
- [8] <http://www.jrad.jp>. 日本障害者乗馬協会

第2章 乗馬療法の原理とメカニズム

[9] Elaine N.Marieb 著, 林正 健二, 小田切 陽一, 武田 多一, 浅見 一羊, 武田 裕子: 人体の構造と機能(第二版), pp253-255, 医学書院.

[10] N.Hogan: Adaptive control of mechanical impedance by coactivation of antagonist muscle. IEEE transactions on Automatic control, Vol.29, pp.681-690, 1984.

[11] 伊藤宏司, 伊藤正美: 生体とロボットの運動制御. 計測自動制御学会, 1989.

第3章

構造モデルの設計および運動解析

健康増進を目的とする4足馬ロボットの開発に当たって、まず第一歩としては、構造モデルを設計することである。また、馬身と各足の運動制御を行うために、4足馬ロボットの運動解析が必要である。本章では、室外での自然環境でも使用できる4足馬ロボットの構造モデルを提案し、その運動解析について検討する。

3.1 はじめに

ロボットの構造モデルは、ロボットの基本的な要素としており、理論的に言えばロボットの行える運動を決めることができる。それで、健康増進用4足馬ロボットの開発に当たって、まず第一歩としては、4足馬ロボットの構造モデルを設計することになる。すなわち、どのような構造であれば、4足馬ロボットは、生馬のように歩けるとともに乗馬療法の健康増進効果を得るのかが、解決すべき問題である。

一方、これまで色々な4足ロボットが開発されたが、馬のように長脚や高重心と言った特徴がある4足馬ロボットは少ない。例えば、TITAN型4足ロボット^[1-3]や「鉄犬」4足ロボット^[4-6]は、それぞれ爬行型4足ロボットと犬型ロボットと見られている。また、論文^[7-8]で開発された4足馬ロボットは、馬のようなトロット動歩行のみを実現するために弾性エネルギーが蓄えられる脚構造をしているので、乗馬療法においての6自由度運動を実現できず、健康増進を目的とする4足馬ロボットに適合できない。したがって、本章では、生馬の構造を参考にして、健康増進を目的とする4足馬ロボットに適合する構造モデルを提案し、その運動解析について検

討する．

具体的には，健康増進を目的とする4足馬ロボットの構造モデルを中心に，以下のように進める．まず，生馬の脚構造を参考にして，健康増進用4足馬ロボットの構造モデルを提案し，歩行における胴体の運動自由度を検証する．つぎに，提案した構造モデルに基づいて，4足馬ロボットの運動学と動力学を解析し，逆運動学と運動方程式を導出する．

3.2 4足馬ロボットの構造モデル

4足馬ロボットの構造モデルは，乗馬療法における生馬のような運動を実現しなければならない．そのため，まず馬の構造を参照し簡略化して，4足馬ロボットの構造モデルを提案する．つぎに，歩行における胴体の運動自由度を計算することにより，提案した構造モデルの有効性を検証する．

馬の骨格と各関節は，図3.1に示している．この図によって，馬の前脚と後脚は，骨格の形がある程度異なっているが，同様に股関節，膝関節と足関節という三つの関節があると見られる．その中に，股関節は前後軸周りの回転と左右軸周りの回転により構成され，膝関節は左右軸周りの回転だけがある．足関節は，各足に安定な接地を実現させる必要があることから，実的に空間的な三次元回転を行える．それで，4足馬ロボットの構造モデルは，生馬の構造を参考にして，股横関節と股縦関節によりロボットの股関節が構成されるとともに，左右軸周りの回転だけがある膝縦関節を設置する．また，4足馬ロボットの各脚に足関節を設置せず，その代わりに球形足先を採用する．この球形足先は，4足馬ロボットの各脚に任意な角度で接地させるだけでなく，関節数の減少と構造モデルの簡単化などの利点がある．

設計した構造モデルは，図3.2に示すように，胴体と4本の脚により構成されている．この構造モデルによって，4足馬ロボットの各脚には，股横関節，股縦関節と膝縦関節の三つの関節と球形足先がある．

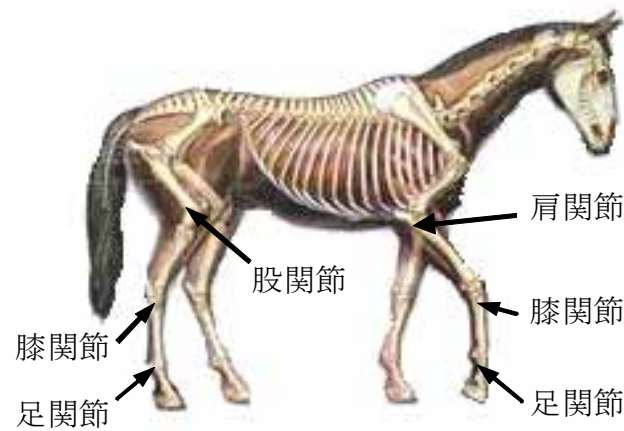


図 3.1 生馬の骨格と各関節

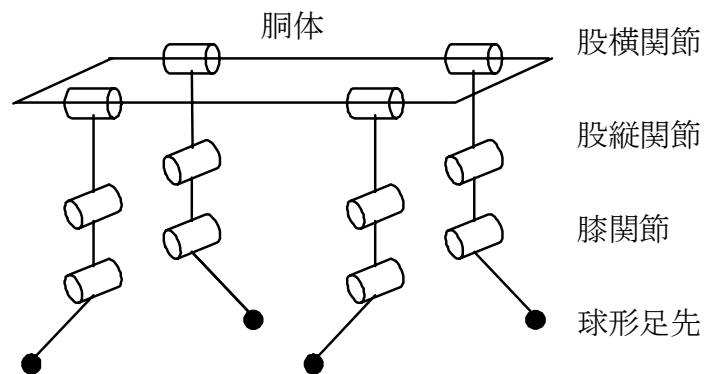


図 3.2 4足馬ロボットの構造モデル

設計した構造モデルの有効性を検証するために、歩行における胴体の運動自由度を計算する必要がある。一般的に、生馬の歩様は、歩行速度の増加によって、常歩・速歩・駆歩・襲歩という4種類がある。生馬の乗馬療法は、一般的に低い歩行速度である常歩を中心に行われている。常歩には、各脚が指定の順に従って順次歩行するので、少なくとも3本の足が接地するという特徴がある。ここでは、設計した構造モデルに基づいて、4足馬ロボットの常歩における胴体の運動自由度が馬身運動の6自由度を満たすかどうかを検討する。

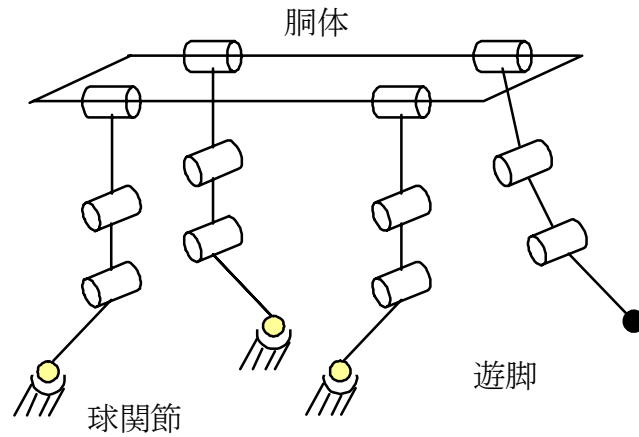


図 3.3 3 脚で接地する 4 足馬ロボットの様子

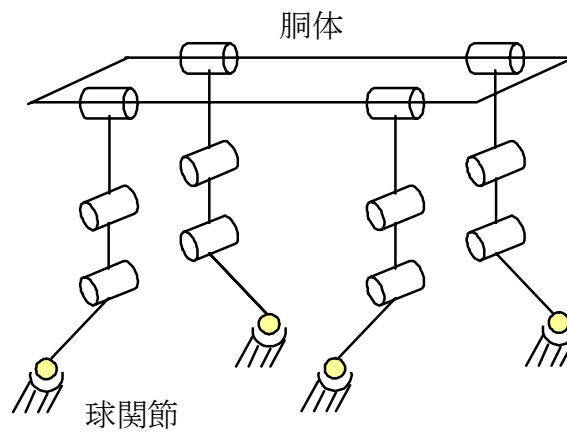


図 3.4 4 脚で接地する 4 足馬ロボットの様子

常歩において、4 足馬ロボットは、3 本の脚で接地する場合と 4 本の脚で接地する場合の二つある．ここで、接地脚が球形の足先で接地するのは、この接地脚が一つの球関節を通じて接地すると見なされる．それで、二つの場合での 4 足馬ロボットは、それぞれ図 3.3 と 3.4 のような機構略図で表れる．

図 3.3 と図 3.4 には、4 足馬ロボットの胴体、接地する脚と地面により、それぞれ 3 連結連鎖と 4 連結連鎖の平行機構が構成される．それから、胴体の運動自

由度数は、パラレル機構の運動自由度の計算方法^[9]によって求められる。この計算方法は、式(3.1)に示している。ここで、 g はパラレル機構の運動自由度を表し、 l と n はパラレル機構の剛体(地面を含む)と関節の数、 d_i は i 番目の関節の自由度数である。

$$g = 6(l - n - 1) + \sum_{i=1}^n d_i \quad (3.1)$$

図 3.3 によって、 $l=11$ ， $n=12$ ， $\sum_{i=1}^n d_i = 18$ であることから、胴体の運動自由度数

$g_a = 6$ である。図 3.4 によって、 $l=14$ ， $n=16$ ， $\sum_{i=1}^n d_i = 24$ であることから、このとき

の胴体の運動自由度数 $g_b = 6$ である。つまり、この構造モデルに基づく 4 足馬ロボットは、常歩における胴体がいつでも 6 自由度があり、馬身運動の 6 自由度の要求を満たせる。

3.3 4 足馬ロボットの運動学

運動学とは、力の詳細には立ち入らずに、物体の運動のみを記述する方法を論ずる学問の分野である。4 足馬ロボットの運動学には、主に 4 足馬ロボットの胴体と各脚の運動、すなわちそれらの位置や速度などに関する関係を幾何学的な観点から調べるということである。本節では、4 足馬ロボットの胴体と各関節との運動関係を解明するために、4 足馬ロボットの逆運動学を求める。

(1) 座標系の設定と位置・姿勢の表現

まず、4 足馬ロボットの構造モデルを参考して、図 3.5 に示すように地面上の基準座標系 Σ_N と胴体上の物体座標系 Σ_B を設定する。基準座標系 Σ_N の原点を N ，直交する 3 軸を X_N ， Y_N ， Z_N とし、軸 X_N と Y_N の方向をそれぞれロボットの前進方向と左方向とする。物体座標系 Σ_B の原点を胴体の中心点 B ，直交する 3 軸を X_B ，

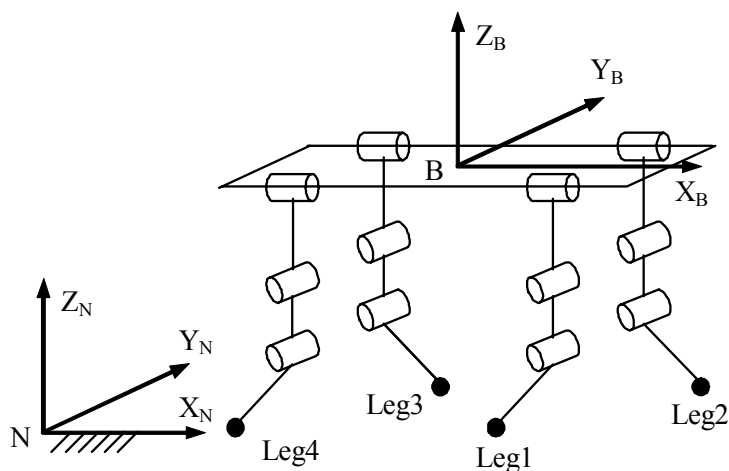


図 3.5 4足馬ロボットの座標系

Y_B , Z_B とし, 軸 X_B と Y_B の方向をそれぞれ胴体の前方向と左方向とする. Σ_N と Σ_B の相対的位置関係のうち回転に関する部分は, 三つの回転により生成して, 回転行列 ${}^N R^B(\phi_B)$ で表れる. ここで, $\phi_B = (\phi_B^{(1)}, \phi_B^{(2)}, \phi_B^{(3)})^T$ である. $\phi_B^{(1)}$ と $\phi_B^{(2)}$ と $\phi_B^{(3)}$ は, それぞれ Σ_N 上の軸 Z_N と Y_N と X_N 周りに回転する角度, つまり, ロボットの三つの姿勢角: ヨー, ピッチとロールである. それから, 回転行列 ${}^N R^B(\phi_B)$ は, 以下の式 (3.2) により計算できる.

$${}^N R^B(\phi_B) = \begin{bmatrix} c\phi_B^{(1)} & -s\phi_B^{(1)} & 0 \\ s\phi_B^{(1)} & c\phi_B^{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\phi_B^{(2)} & 0 & s\phi_B^{(2)} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\phi_B^{(2)} & 0 & c\phi_B^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi_B^{(3)} & -s\phi_B^{(3)} \\ 0 & s\phi_B^{(3)} & c\phi_B^{(3)} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

ここで, $c\phi_B^{(j)} = \cos(\phi_B^{(j)})$ と $s\phi_B^{(j)} = \sin(\phi_B^{(j)})$ である. さらに計算すれば, 式(3.2)により回転行列 ${}^N R^B(\phi_B)$ を次のように表せる.

$${}^N R^B = \begin{bmatrix} c\phi_B^{(1)} c\phi_B^{(2)} & c\phi_B^{(1)} s\phi_B^{(2)} s\phi_B^{(3)} - s\phi_B^{(1)} c\phi_B^{(3)} & c\phi_B^{(1)} s\phi_B^{(2)} c\phi_B^{(3)} + s\phi_B^{(1)} s\phi_B^{(3)} \\ s\phi_B^{(1)} c\phi_B^{(2)} & s\phi_B^{(1)} s\phi_B^{(2)} s\phi_B^{(3)} + c\phi_B^{(1)} c\phi_B^{(3)} & s\phi_B^{(1)} s\phi_B^{(2)} c\phi_B^{(3)} - c\phi_B^{(1)} s\phi_B^{(3)} \\ -s\phi_B^{(2)} & c\phi_B^{(2)} s\phi_B^{(3)} & c\phi_B^{(2)} c\phi_B^{(3)} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

つぎに、設定した座標系に基づいて、胴体の位置・姿勢と各座標ベクトルの表現法を論じる．具体的には、基準座標系上の胴体中心点 B の位置は、ベクトル $r_B = (x_B, y_B, z_B)^T$ で表し、胴体の姿勢角は、ベクトル $\phi_B = (\phi_B^{(1)}, \phi_B^{(2)}, \phi_B^{(3)})$ で表す．また、基準座標系 Σ_N と物体座標系 Σ_B 上のベクトルは、それぞれ左上の添字「N」と「B」で表示する．

(2) 胴体の運動解析

基準座標系 Σ_N における胴体の速度と角速度をそれぞれベクトル ${}^N v^B$ と ${}^N \omega^B$ で表すと、以下の式(3.4)と(3.5)が得られる．

$${}^N r^{NB} = r_B = (x_B, y_B, z_B)^T \quad (3.4)$$

$${}^N v^B = {}^N \dot{r}^{NB} = \dot{r}_B \quad (3.5)$$

また、胴体の角速度を求めるために、胴体の上に股関節の中心点を H で表すと、ベクトル ${}^N r^{NH}$ は(3.6)により表現できる．

$${}^N r^{NH} = {}^N r^{NB} + {}^N r^{BH} \quad (3.6)$$

式(3.7)を時間で微分すれば、次のようになる．

$${}^N \frac{d}{dt} r^{NH} = {}^N \frac{d}{dt} r^{NB} + {}^N \frac{d}{dt} r^{BH} \quad (3.7)$$

ここで、 Σ_N 上のベクトル ${}^B r^{NH}$ は定数であるので、微分した結果は0になる。それから、式(3.7)から次のように計算できる。

$${}^N \frac{d}{dt} r^{NH} = {}^N \frac{d}{dt} r^{NB} + {}^N \frac{d}{dt} ({}^N R^{B \cdot B} r^{BH}) = {}^N \dot{r}^{NB} + {}^N \dot{R}^{B \cdot B} r^{BH} \quad (3.8)$$

全てのベクトルは同じ座標系で表示するために、つぎの式(3.9)が得られる。

$${}^N \frac{d}{dt} r^{NH} = {}^N \dot{r}^{NB} + {}^N \dot{R}^{B \cdot B} R^{N \cdot N} r^{BH} \quad (3.9)$$

また、点Hの速度 ${}^N v^H$ は、点Bの速度 ${}^N v^B$ と胴体の角速度 ${}^N \omega^B$ に次の式により計算できる。

$${}^N v^H = {}^N v^B + {}^N \dot{R}^{B \cdot B} R^{N \cdot N} r^{BH} = {}^N v^B + {}^N \omega^B \times {}^N r^{BH} \quad (3.10)$$

式(3.10)によって、胴体の角速度を求めることができる。求めた胴体の角速度は、次の式(3.11)で表される。

$${}^N \omega^B = \begin{bmatrix} 1 & -s\phi_B^{(1)} & c\phi_B^{(1)}c\phi_B^{(2)} \\ 0 & c\phi_B^{(3)} & 0 \\ 0 & 0 & -s\phi_B^{(1)} \end{bmatrix} \cdot \dot{\phi}_B \quad (3.11)$$

(3) 各脚の運動解析

まず，脚 i ($i=1,2,3,4$)の各関節の回転角度は，ベクトル $\theta_i = (\theta_i^{(1)}, \theta_i^{(2)}, \theta_i^{(3)})^T$ で表される．また，脚 i のリンク j ($i=1,2,3$)の重心は，このリンクの中心点 L_{ij} で置く．それから，基準座標系上の脚 i のリンク j の位置は，ベクトル ${}^N r_{ij}^{NL}$ で表され，物体座標系上の脚 i のリンク j は，ベクトル ${}^B r_{ij}^{NL}$ で表される．ベクトル ${}^N r_{ij}^{NL}$ とベクトル ${}^B r_{ij}^{NL}$ との位置関係は，図 3.6 に示される．

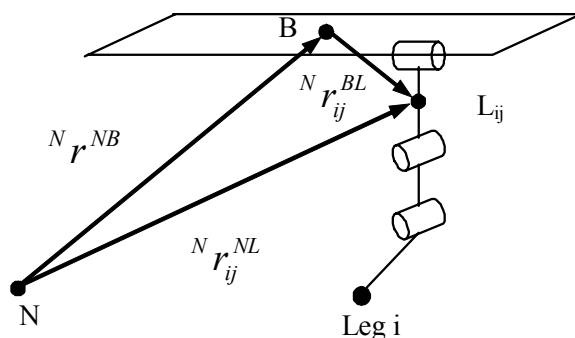


図 3.6 脚 i のリンク j の位置ベクトル間の位置関係

図 3.6 によって，次のような関係式がある．

$${}^N r_{ij}^{NL} = {}^N r^{NB} + {}^N r_{ij}^{BL} = {}^N r^{NB} + {}^N R^{B \cdot B} \cdot {}^B r_{ij}^{BL} \quad (3.12)$$

ここで，ベクトル ${}^B r_{ij}^{BL}$ は，各関節の回転角度のベクトル θ_i の関数である．式(3.12)を時間で微分すれば，次のようになる．

$${}^N \frac{d}{dt} r_{ij}^{NL} = {}^N \frac{d}{dt} r^{NB} + \frac{d}{dt} ({}^N R^{B \cdot B} \cdot {}^B r_{ij}^{BL}) = {}^N \dot{r}^{NB} + {}^N \dot{R}^{B \cdot B} \cdot {}^B r_{ij}^{BL} + {}^N R^{B \cdot B} \cdot \dot{{}^B r}_{ij}^{BL} \quad (3.13)$$

ここで、関係式 ${}^N R^{B \cdot B} \dot{r}_{ij}^{BL} = \dot{r}_{ij}^{BL}$ がある．式(3.13)をさらに整理すると，各リンクの重心点の速度ベクトル ${}^N v_{ij}^L$ は，次のような式(3.14)により計算できる．

$${}^N v_{ij}^L = {}^N v^B + {}^N v_{ij}^{BL} + ({}^N \dot{R}^{B \cdot B} R^N) \cdot {}^N r_{ij}^{BL} = {}^N v^B + {}^N v_{ij}^{BL} + {}^N \omega^B \times {}^N r_{ij}^{BL} \quad (3.14)$$

各リンクの重心点 L_{ij} の速度ベクトル ${}^N v_{ij}^L$ を獲得すれば，同じリンク上でほかの点も計算できる．このあと，リンク上の二つの点の速度から，リンクの角速度が求められる．

(4) 4足馬ロボットの逆運動学

4足馬ロボットの逆運動学とは，指定した4足馬ロボットの胴体と各脚の運動から各関節の回転運動を求める問題である．4足馬ロボットの胴体と各脚の運動は実際に各関節の回転運動の制御により行われるので，4足馬ロボットの逆運動学が不可欠である．したがって，ここでは，4足馬ロボットの逆運動学を解明する．

まず，前述した4足馬ロボットの基準座標系 Σ_N と物体座標系 Σ_B に基づいて，4足馬ロボットの右前脚の構造を図3.7に示す．基準座標系 Σ_N と物体座標系 Σ_B のベクトルは，それぞれ左上角の添字「N」と「B」で表す．また，右前脚では，股横関節と股縦関節の中心を点Hと点M，膝縦関節の中心点と足先の位置を点Kと点Fとし，各リンクの長さを l_1 ， l_2 と l_3 で表している．

図3.7によって，基準座標系 Σ_N 上のベクトル ${}^N r^{HF}$ は，同じな座標系上のベクトル ${}^N r^{NF}$ と ${}^N r^{NB}$ と ${}^N r^{BH}$ を通じて，つぎのように求められる．

$${}^N r^{HF} = {}^N r^{NF} - {}^N r^{NB} - {}^N r^{BH} \quad (3.15)$$

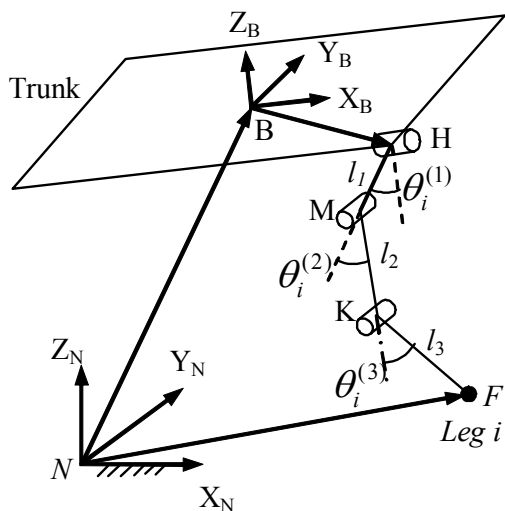


図 3.7 4 足馬ロボットの右前脚の構造

一方，ベクトル ${}^N r^{HF}$ は，各リンクの物体座標系 Σ_B 上のベクトル ${}^B r^{HM}$ ， ${}^B r^{MK}$ と ${}^B r^{KF}$ および式(3.4)の回転行列 ${}^N R^B$ により，次のように計算できる．

$${}^N r^{HF} = {}^N R^B ({}^B r^{HM} + {}^B r^{MK} + {}^B r^{KF}) \quad (3.16)$$

式(3.15)と(3.16)をまとめると，次のような式が得られる．

$${}^N r^{NF} - {}^N r^{NB} - {}^N r^{BH} = {}^N R^B ({}^B r^{HM} + {}^B r^{MK} + {}^B r^{KF}) \quad (3.17)$$

式(3.17)の両側に回転行列 ${}^N R^B$ の逆行列をかけて整理すると，次のような式になる．

$$({}^N R^B)^{-1} ({}^N r^{NF} - {}^N r^{NB}) - {}^B r^{BH} = {}^B r^{HM} + {}^B r^{MK} + {}^B r^{KF} \quad (3.18)$$

基準座標系 Σ_N 上の足先 F の位置ベクトルを $r_F = (x_f, y_f, z_f)^T$ とすると， ${}^N r^{NF} = r_F$

である．また，ロボットの胴体の長さとは幅は d と w で表して， ${}^B r^{BH} = (\frac{d}{2}, -\frac{w}{2}, 0)^T$ で

ある．その上，物体座標系 Σ_B 上のベクトル ${}^B r^{HM}$ ， ${}^B r^{MK}$ と ${}^B r^{KF}$ は，各関節の関節角により表現できる．各ベクトルを式(3.18)に代入すると，次のような式(3.19)が得られる．

$$({}^N R^B)^{-1} \times \begin{bmatrix} x_f - x_b \\ y_f - y_b \\ z_f - z_b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d/2 \\ -w/2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(l_1 + l_2 \cos \theta_i^{(2)} + l_3 \cos(\theta_i^{(2)} + \theta_i^{(3)})) \sin \theta_i^{(1)} \\ -l_2 \sin \theta_i^{(2)} - l_3 \sin(\theta_i^{(2)} + \theta_i^{(3)}) \\ -(l_1 + l_2 \cos \theta_i^{(2)} + l_3 \cos(\theta_i^{(2)} + \theta_i^{(3)})) \cos \theta_i^{(1)} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

式(3.19)の左側は，ベクトル r_B ， r_F と ϕ_B の関数となっているので，関数 $h(r_B, r_F, \phi_B)$ を使うことで表現できる．

$$h(r_B, r_F, \phi_B) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = ({}^N R^B)^{-1} \times \begin{bmatrix} x_f - x_b \\ y_f - y_b \\ z_f - z_b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d/2 \\ -w/2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

それから，式(3.19)-(3.20)により，右前脚の関節角ベクトル $\theta_i = (\theta_i^{(1)}, \theta_i^{(2)}, \theta_i^{(3)})^T$ が求められる．

$$\theta_i = \begin{bmatrix} \theta_i^{(1)} \\ \theta_i^{(2)} \\ \theta_i^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \frac{h_2}{h_3} \\ \arctan \frac{h_1}{l_b} - \arccos \frac{l_b^2 + h_1^2 + l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot \sqrt{l_b^2 + h_1^2} \cdot l_2} \\ \arccos \frac{l_b^2 + h_1^2 - l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

ここで, $l_b = \sqrt{h_2^2 + h_3^2} - l_1$ があり, h_j ($j=1,2,3$) は式(3.20)により計算できる. 式(3.21) は4足馬ロボットの右前脚の逆運動学であり, 他の脚の逆運動学も同様に求められる. 得られた逆運動学によって, 胴体中心 B と足先 F の位置ベクトル r_B と r_F 及び姿勢角ベクトル ϕ_B を指定すると, 唯一の関節角ベクトル $\theta_i = (\theta_i^{(1)}, \theta_i^{(2)}, \theta_i^{(3)})^T$ を計算できる. これは, 各関節角の制御により4足馬ロボットの胴体と各脚の運動を実現する基礎となる.

3.4 4足馬ロボットの動力学

4足馬ロボットの動力学は, 4足馬ロボットの受ける外力と各関節の運動との相互関係を表現することである. 4足馬ロボットの歩行において, 設計した歩行パターンを正確に実現するために, 各関節の回転運動を安定にかつ精度よく制御することが要求される. この要求に応じて, 各関節の回転運動に影響を及ぼす各種の外力を考慮し, 4足馬ロボットの動力学を解明する必要がある. そこで, 運動方程式を導出方法の一つであるラグランジュ法を用いて, 4足馬ロボットの動力学を解明する. ラグランジュ法を選ぶ理由は, 各リンク間の干渉する力の計算の煩雑さを避け, 一般化座標を用いて直観的に外力と運動との関係を表現できるからである.

まず, ラグランジュ法により, 一般化座標 q を決める. それで, 4足馬ロボットの胴体と各脚の運動状態すべてを表現するために, 4足馬ロボットの一般化座標 q は, つぎのように表される.

$$q = [r_B^T \quad \phi_B^T \quad \theta_1^T \quad \theta_2^T \quad \theta_3^T \quad \theta_4^T]^T \quad (3.22)$$

つぎに, $L = T - U$ で表わされるラグランジュ関数 L を計算する. ここで, T は4足馬ロボットの運動エネルギー, U は4足馬ロボットの位置エネルギーを表わす.

第3章 構造モデルの設計および運動解析

運動エネルギー T は，胴体の運動エネルギー T_B と各脚の運動エネルギー T_i ($i=1,2,3,4$)により構成される．以下では， $r_{ij}=^N r_{ij}^{NL}$ ， $v_B=^N v^B$ ， $v_{ij}=^N v_{ij}^{NL}$ ， $\omega_B=^N \omega^B$ で簡単に記述して，胴体の運動エネルギー T_B と各脚の運動エネルギー T_i と位置エネルギー U は，それぞれ次のように計算する．

$$T_B = \frac{1}{2} m_B v_B^T v_B + \frac{1}{2} \omega_B^T I_B \omega_B \quad (3.23)$$

$$T_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (m_{ij} v_{ij}^T v_{ij} + \omega_{ij}^T I_{ij} \omega_{ij}) \quad (3.24)$$

$$U = r_g^T \cdot (m_B r_B + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 m_{ij} r_{ij}) \quad (3.25)$$

ここで， m_B と m_{ij} は，胴体と各リンクの質量であり， I_B と I_{ij} は，胴体と各リンクの慣性モーメントである．ベクトル $r_g = (0 \ 0 \ -g)^T$ であり， g は重力加速度である．ラグランジュ関数 L は，次のように表される．

$$L = T - U = T_B + \sum_{i=1}^4 T_i - U \quad (3.26)$$

式(3.23)-(3.25)を式(3.26)に代入すると，ラグランジュ関数 L は，次のように計算できる．

$$L = \frac{1}{2} m_B v_B^T v_B + \frac{1}{2} \omega_B^T I_B \omega_B + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 (m_{ij} v_{ij}^T v_{ij} + \omega_{ij}^T I_{ij} \omega_{ij}) - r_g^T \cdot (m_B r_B + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 m_{ij} r_{ij}) \quad (3.27)$$

得たラグランジュ関数 L は、一般化座標 q で表現すると、次のようになる。

$$L = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} - U(q) \quad (3.28)$$

式(3.28)において、 $D(q)$ は4足馬ロボットの慣性行列としており、正の対称行列である。さらに、式(3.28)で表すラグランジュ関数 L を用いて、4足馬ロボットの運動方程式を求める。ラグランジュの運動方程式は、つぎの式(3.29)で表される。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (3.29)$$

Q_i は一般座標 q に対応する一般力である。それで、獲得したラグランジュ関数 L をラグランジュの運動方程式に代入して、次のような式(3.30)が得られる。

$$D(q)\ddot{q} + \dot{D}(q)\dot{q} - \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \right) + \frac{\partial}{\partial q} U(q) = Q_i \quad (3.30)$$

式(3.30)によって、一般力 Q_i は、4足馬ロボットの慣性力 $D(q)\ddot{q}$ と速度に依存する遠心力とコリオリ力 $c(q, \dot{q}) = \dot{D}(q)\dot{q} - \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \right)$ と重力項 $g(q) = \frac{\partial}{\partial q} U(q)$ により構成される。これによって、式(3.30)を簡略化すると、次のようになる。

$$D(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) = Q_i \quad (3.31)$$

また, 慣性行列 $D(q)$ は, 特別な構造であるので, 式(3.31)は次のように表される.

$$\begin{bmatrix} D_r & D_{r\phi}^T & D_{r\theta 1}^T & D_{r\theta 2}^T & D_{r\theta 3}^T & D_{r\theta 4}^T \\ D_{r\phi} & D_\phi & D_{\phi\theta 1}^T & D_{\phi\theta 2}^T & D_{\phi\theta 3}^T & D_{\phi\theta 4}^T \\ D_{r\theta 1} & D_{\phi\theta 1} & D_{\theta 1} & 0 & 0 & 0 \\ D_{r\theta 2} & D_{\phi\theta 2} & 0 & D_{\theta 2} & 0 & 0 \\ D_{r\theta 3} & D_{\phi\theta 3} & 0 & 0 & D_{\theta 3} & 0 \\ D_{r\theta 4} & D_{\phi\theta 4} & 0 & 0 & 0 & D_{\theta 4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{r}_B \\ \ddot{\phi}_B \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_r \\ c_\phi \\ c_{\theta 1} \\ c_{\theta 2} \\ c_{\theta 3} \\ c_{\theta 4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_r \\ g_\phi \\ g_{\theta 1} \\ g_{\theta 2} \\ g_{\theta 3} \\ g_{\theta 4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_r \\ Q_\phi \\ Q_{\theta 1} \\ Q_{\theta 2} \\ Q_{\theta 3} \\ Q_{\theta 4} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

得た式(3.32)は, 4 足馬ロボットの運動方程式である. この式において, 慣性行列 $D(q)$ の子行列は, 3 行 3 列である. 遠心力とコリオリ力 c と重力項 g と一般力 Q におけるベクトルは, 全て 3 行 1 列である. Q_r と Q_ϕ は, それぞれ胴体の受ける外力とトルク, $Q_{\theta i}$ ($i=1,2,3,4$) は脚 i の各関節の回転トルクである. 慣性行列 D は, 式(3.29)を整理した後で, 式(3.30)と比べることで獲得できると思われる.

3.5 まとめ

健康増進を目的とする 4 足馬ロボットを開発するために, 適切な構造モデルを設計する必要がある. 本章では, 室外での自然環境でも使用できる要求に応じて, 生馬の構造を参考にして, 健康増進用 4 足馬ロボットの構造モデルの設計および運動解析について検討した. 具体的には, 健康増進用 4 足馬ロボットの構造モデルを中心に, 以下の通りがある.

① 4 足馬ロボットの構造モデルの設計. 本研究の 4 足馬ロボットは, 歩行パターンの実現だけでなく, 胴体の運動による健康増進効果の実現も要求される. それで, 生馬の脚構造を参考にするとともに, 胴体の運動自由度を考える上で, 健康増進用 4 足馬ロボットの構造モデルを提案し, 歩行における胴体の運動自由度を検証

することで、提案した構造モデルの有効性を検証した。

② 健康増進用4足馬ロボットの逆運動学と動力学の解明. 健康増進用4足馬ロボットの歩行制御を行うために、その逆運動学問題と動力学問題を解明しなければならない。そのため、提案した構造モデルに基づいて、健康増進用4足馬ロボットの運動解析と動力学解析を行い、その逆運動学の解法と運動方程式を獲得した。

参考文献

- [1] 広瀬茂男, 梅谷陽二: 4足歩行機械システムの開発: 第1回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, pp.101-106, 1982.
- [2] 広瀬茂男, 増井和幸, 菊池秀和, 福田靖, 梅谷陽二: 4足歩行機械 TITAN III の構成とその基本特性, 第2回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, pp.13-19, 1984.
- [3] 広瀬茂男, 福田 靖, 菊池秀和, 4足歩行機械の制御システム: 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.4, pp.304-324, 1985.
- [4] 木村 浩, 秋山 征一, 桜間 一彰: 神経振動子を用いた四足ロボットの不整地動歩行と整地走行, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.8, pp.1138-1145, 1998.
- [5] 福岡泰宏, 木村 浩: 4足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行——体性感覚・前庭感覚による調節——, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4, pp.510-517, 2001.
- [6] 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.5, pp.1-12, 2003.
- [7] 牧田忍, 古荘純次: 馬型4足歩行ロボットの開発(第1報 PONYの機構開発および制御システム), 日本機械学会論文集(C編), Vol.69, No.02, pp.140-147, 2003.

第3章 構造モデルの設計および運動解析

[8] 牧田忍, 古荘純次: 馬型4足歩行ロボットの開発(第2報 PONYによるトロット歩行実験), 日本機械学会論文集(C編), Vol.69, No.02, pp.148-155, 2003.

[9] Jean-Pierre Merlet: Parallel Robots(pp.9-11), Kluwer academic publishers, 2000.

第4章

構造パラメータの設定と実験機の製作

前章では、健康増進を目的とする4足馬ロボットの構造モデルの設計および運動解析について検討した。本章では、構造モデルの各構造パラメータの設定手法について検討し、決めた構造パラメータを参考にして小型4足馬ロボットを製作する。

4.1 はじめに

前章で健康増進用4足馬ロボットの構造モデルを設計したが、各構造パラメータはまだ設定していない。各構造パラメータの設定は、ロボットの安定性や移動効率などに関係するので、非常に重要である。例えば、設定した構造パラメータが適合しなければ、適当な構造モデルでも安定な歩行を実現できない。そのため、如何に健康増進用4足馬ロボットの構造パラメータを適切に設定するかが、構造モデルを設計した後に解決すべき問題となっている。本章では、前章で提案した構造モデルに基づいて、健康増進用4足馬ロボットの構造パラメータを設定する手法を検討し、その検討結果によって小型4足馬ロボットを製作する。

具体的には、まず乗馬療法における馬の歩様とする常歩のパターンを解析する。次に、乗馬療法において、馬身の動きを計測して、数式で馬身運動のデータの周期化と近似を行う。その後、解析した常歩の歩行パターンと獲得した馬身の動きに基づいて、4足馬ロボットの構造パラメータの設定手法を検討する。さらに、設計した構造モデルと設定した構造パラメータを参考にして、小型4足馬ロボットを製作する。

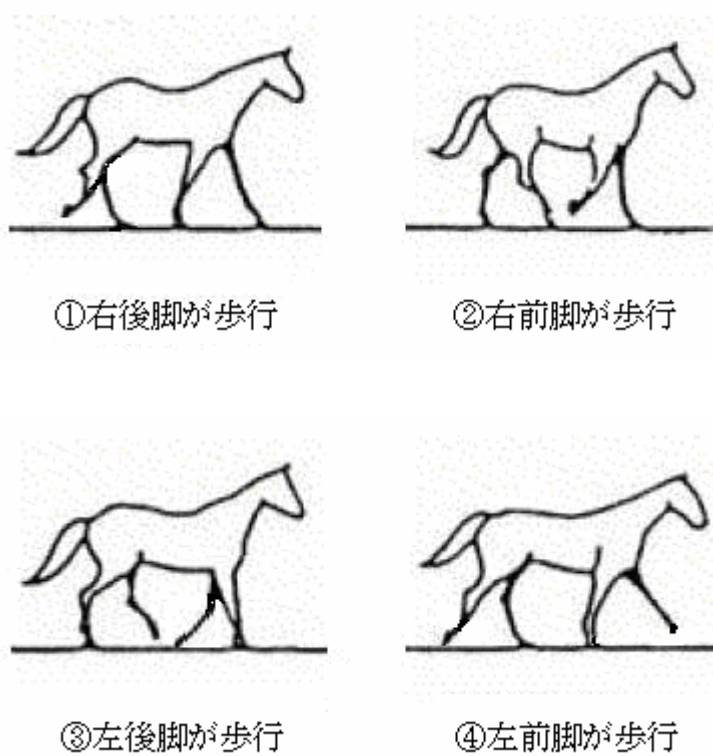


図 4.1 常歩における各脚の歩行順序

4.2 常歩の歩行パターン

生馬を使う乗馬療法は，一般的に常歩を中心に行われている．生馬の常歩^[1]は，図 4.1 に示すように，各脚が一定の順序に従って順次歩行する歩様となっており，少なくとも 3 本の足が接地しているという特徴がある．各脚の歩行順序は，①右後脚-②右前脚-③左後脚-④左前脚のようになる．

常歩においての各脚は，着地している支持期と歩いている歩行期の二つの状態がある．そして，常歩の一つの歩行周期は，図 4.2 に示すように，各脚の支持期と歩行期の変化，すなわち着地状態の変化により表すことができる．図中の実線と点線は，各脚の支持期と歩行期，RR, RF と LR, LF は，それぞれロボットの右後足，右前足と左後足，左前足， T_h は遊脚の歩行時間を表している．

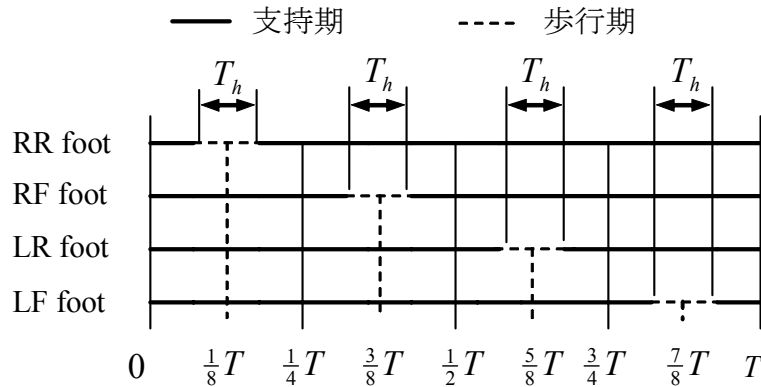


図 4.2 生馬の常歩の一つの歩行周期

数式で常歩の歩行周期を表現するために、歩行周期 T に関係なくデューティ・ファクター λ が使われる。デューティ・ファクター λ は、一つの周期内に支持期と歩行周期 T との比率ということであり、つぎのように表される。

$$\lambda = (T - T_h) / T \quad (4.1)$$

定義したデューティ・ファクター λ により、各脚の状態の時間変化は表現できる。

例えば、脚 i の歩行期は、 $t \in (\frac{2i-1}{8}T - \frac{1-\lambda}{2}T, \frac{2i-1}{8}T + \frac{1-\lambda}{2}T)$ で表される。これに

より、常歩における任意な時刻 t に対応する各脚の状態が決まり、常歩の歩行周期を表現できる。常歩においては常に3脚または4脚が着地するので、デューティ・ファクター λ の計算式によって、 $\lambda \geq 0.75$ の関係式が得られる。

実際には、生馬の常歩において、各脚の状態が変化するとともに、馬身は一定の軌道に従って動いている。それで、生馬の常歩をパターン化するために、馬身の運動軌道を求めることも必要である。したがって、本研究グループは、乗馬療法における馬身運動を計測した^[2-3]。

具体的に、まず生馬の鞍に6ヶ所でマーカーを取り付けて、乗馬療法を実行しながら、これらのマーカーの位置を高速度カメラにより撮影して、最後に画像処理と動作分析ソフトにより生馬身運動を採取する。採取した馬身運動は、図4.3に示すような6自由度がある三次元運動であり、X軸、Y軸とZ軸上の移動とロール(Roll)角、ピッチ(Pitch)角とヨー(Yaw)角の回転により構成されている。ここで、座標系の原点Oは、地面上の固定点であり、X軸とY軸とZ軸の正方向は、胴体中心の前方向と左方向と上方向である。

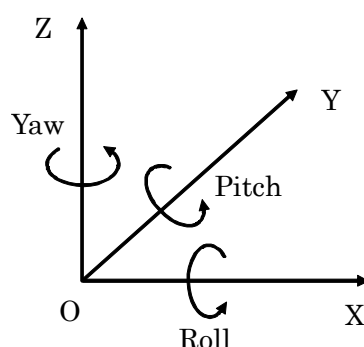


図4.3 6自由度がある馬身運動の構成

このあと、制御用データ量の減少や動作スピードの調整などの要求から、馬身運動の6自由度三次元データの周期化と近似を行った。周期化した馬身運動の時系列動作データは図4.4に示している。図中のX軸のデータは、歩幅の等速移動分を引き出し計算したデータである。このあと、式(4.2)に示すように、5次までのフーリエ級数で馬身運動の近似を行った。式内のパラメータ a_n と Φ_n は、各項の振幅と位相である。 $T=4$ 秒である。

$$f(t) = \sum_{n=1}^5 a_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t}{T} + \Phi_n\right), \quad (T \text{ は周期}) \quad (4.2)$$

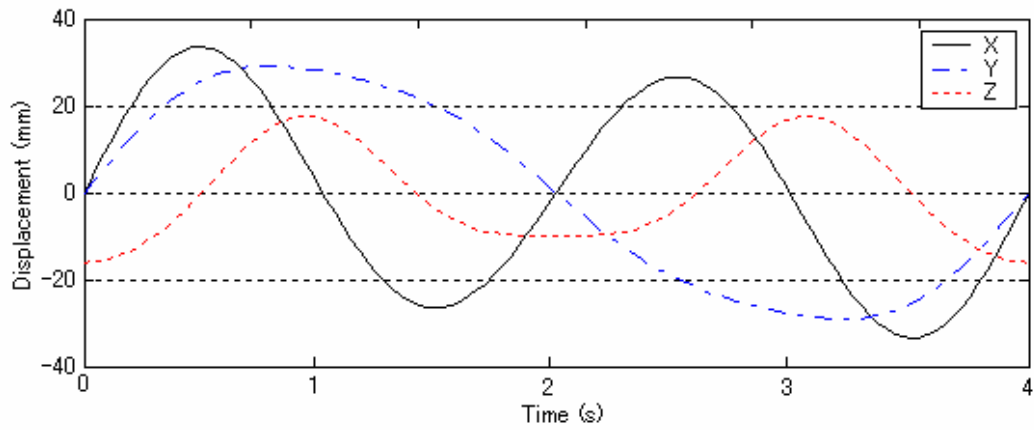


図 4.4 (a) 周期化した馬身の X 軸, Y 軸と Z 軸上の移動

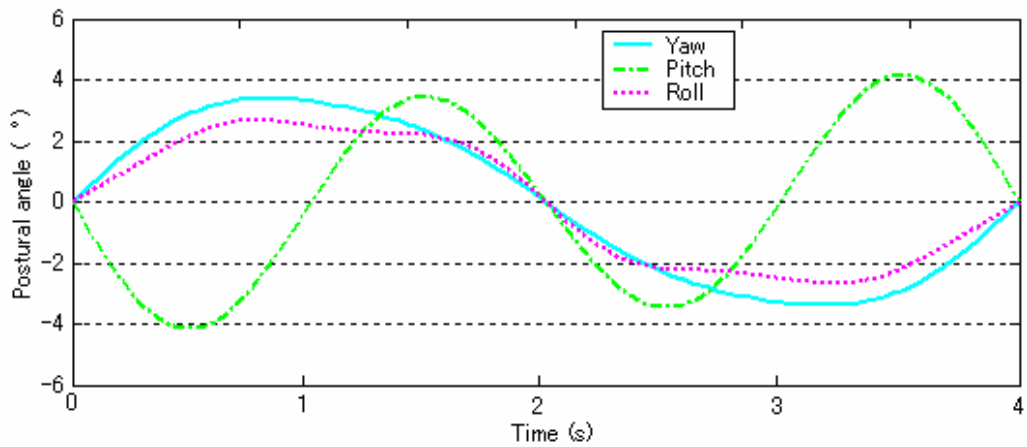


図 4.4 (b) 周期化した馬身のヨー角, ピッチ角とロール角の回転

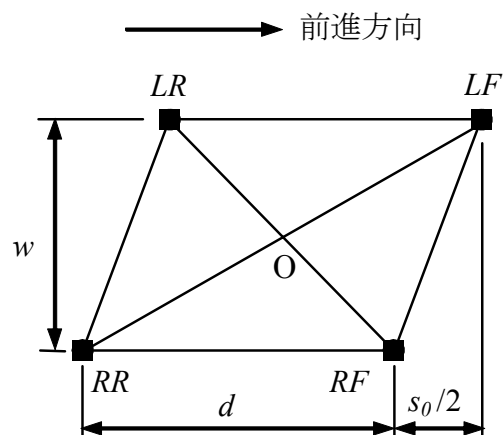


図 4.5 4 足馬ロボットの各脚の初期位置

さらに、生馬の常歩を参照して、各接地脚の足先の初期位置を図 4.5 に示すように設定する。つまり、右脚の足先は、対応する左脚の足先より後ろで $1/2$ の歩幅 s_0 のところに置く。歩幅 $s_0=480\text{mm}$ である。同脚の前進方向での距離は、ロボットの胴体の長さと同じに、左脚と右脚との左右方向での距離は、ロボットの胴体の幅と同じに設定する。また、遊脚の運動軌道は、上昇幅 $h_0=100\text{mm}$ の正弦曲線とし、デューティ・ファクター $\lambda=0.88$ 、胴体の質量 $m_b=60\text{kg}$ 、歩行における胴体の高さ $H=700\text{mm}$ とした。

以上の分析と設定によって、乗馬療法における生馬の常歩を参考にして、4 足馬ロボットの常歩の歩行パターンを解明した。この常歩の歩行パターンにより、脚の各リンクの長さを決められる。

4.3 構造パラメータの設定

3 章で構造モデルを設計した後に、さらに健康増進を目的とする 4 足馬ロボットの構造パラメータを設定する。構造パラメータは、主に胴体の長さ d と幅 w 、脚の各リンクの長さ l_1 と l_2 と l_3 がある。ここで、胴体の長さとは胴体の幅は、騎乗の便利さと小型化の要求によって、 $d=800\text{mm}$ と $w=520\text{mm}$ のように設定した。また、脚の歩行動作を行うとともに胴体の高さを減らすために、股横関節と股縦関節は、同じところに設置した。つまり、リンク 1 の長さは $l_1=0$ になる。脚のリンク 2 とリンク 3 の長さ l_2 と l_3 は、歩行の移動効率などに関係するので、すべての歩行過程に対してシミュレーションを行うことにより設定しなければならない。以下では、常歩のシミュレーションおよび移動効率の分析により、脚のリンクの長さ l_2 と l_3 を設定する。

まず、前述した乗馬療法においての生馬の常歩パターンを用いて、歩行過程のシミュレーションにより、リンクの長さの可能な範囲を決める。このシミュレーションの流れは、次のようになる。まず、設定した馬身の歩行高さ $H=700\text{mm}$ によって、

l_2 と l_3 の値は区間 $[0,700]$ 内に限定されると設定する．そして，すべての l_2 と l_3 に対して，3章で求めた4足馬ロボットの逆運動学を用いて，生馬の常歩パターンを実現できるかどうかを検討する．図4.6に示す黒い区域が，生馬の常歩パターンを実現できる l_2 と l_3 の範囲となっている．

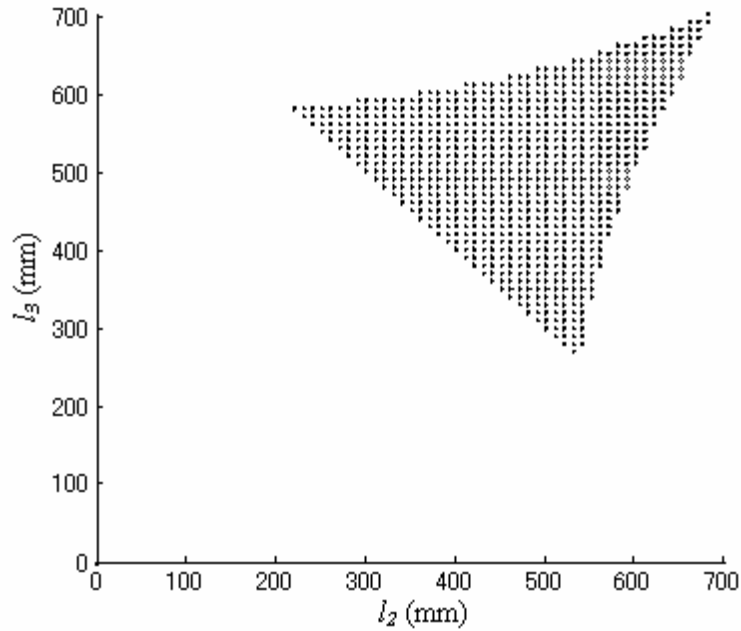


図 4.6 構造パラメータ l_2 と l_3 の範囲

さらに，構造パラメータ l_2 と l_3 の範囲に対して，常歩の移動効率を評価することにより，適切な構造パラメータ l_2 と l_3 の値が求められる．ここでは，4足馬ロボットが常歩を行なう際に消費されるエネルギーは，主に各関節のトルクによるエネルギーと考えた．よって，一つの歩行周期において，4足馬ロボットの消費されるエネルギー E_T は，次のように計算できる^[4]．

$$E_T = \int_0^T \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 \delta(\tau_{ij} \dot{\theta}_{ij}) dt \quad (4.3)$$

式中の τ_{ij} と $\dot{\theta}_{ij}$ は、それぞれ脚 i の関節 j の発生するトルクと角速度である．関数 $\delta(x)$ は、次のように表される．

$$\delta(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

一つの歩行周期内で消費されるエネルギー E_T を計算した上で、単位移動距離にあたるエネルギー P は、常歩の移動効率の評価指標としており、次のように計算できる．

$$P = E_T / x_T \quad (4.5)$$

ただし、 x_T はロボットの一つの歩行周期内の移動距離であり、ロボットの歩幅と同じの値となる．つまり、 $x_T = s_0$ である．式(4.3)-(4.5)を組み合わせると、つぎのような式が得られる．

$$P = \frac{1}{s_0} \int_0^T \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 \delta(\tau_{ij} \dot{\theta}_{ij}) dt = \frac{1}{s_0} \sum_{t=0}^{t=T} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 \delta(\tau_{ij}(t) \Delta\theta_{ij}(t)) \quad (4.6)$$

式(4.6)によって、単位移動距離にあたるエネルギー P は、歩行における各関節のトルク τ_{ij} と角度の変化量 $\Delta\theta_{ij}$ と歩幅 s_0 と周期 T により計算できる．式(4.6)中の歩幅 s_0 と周期 T は、常歩の歩行パラメータとして決められ、角度の変化量 $\Delta\theta_{ij}$ は、常歩の歩行パターンから逆運動学計算により得られる．そして、単位移動距離にあたるエネルギー P を求めるためには、歩行における各関節のトルク τ_{ij} を求めることが必要である．そのため、3章で導出した運動方程式(3.32)によって、各関節のトル

クに関する式は次のようになる．

$$D_{r\alpha}\ddot{r} + D_{\phi\alpha}\ddot{\phi} + D_{\theta\alpha}\ddot{\theta}_i + c_{\alpha} + g_{\alpha} = Q_{\alpha} \quad (4.7)$$

各関節のトルク計算を簡略化するために，ここでは，ロボットの重心は胴体中心を設定し，各脚の質量およびその影響を考えない．また，ロボットの歩行速度及び関節の回転速度は遅くなるため，遠心力とコリオリ力項 c_{α} は無視できるとした．式(4.7)を整理して，次のようになる．

$$Q_{\alpha} = \tau_i - ({}^B J_i^P)^T ({}^N R^B)^{-1} \cdot {}^N F_i = 0 \quad (4.8)$$

式(4.8)における ${}^B J_i^P$ ， ${}^N R^B$ と F_i は，それぞれ脚 i の Jacobian 行列と回転行列と床反力ベクトルである．式(4.8)によって，各脚のトルクベクトル $\tau_i = (\tau_{i1} \ \tau_{i2} \ \tau_{i3})^T$ は，次のように計算できる．

$$\tau_i = ({}^B J_i^P)^T ({}^N R^B)^{-1} \cdot {}^N F_i \quad (4.9)$$

式(4.9)における床反力ベクトル F_i は，4足馬ロボットの力学分析により求められる．まず，4足馬ロボットの力学分析によって，以下のような関係式が得られる．

$$m_B \ddot{z}_B - m_B g = \sum_{i=1}^4 F_{iZ} \quad (4.10)$$

$$m_B \ddot{x}_B \cdot z_B + m_B g \cdot x_B + I_{BY} \cdot \ddot{\phi}_B^{(2)} = \sum_{i=1}^4 (F_{iZ} \cdot x_B) \quad (4.11)$$

$$m_B \ddot{y}_B \cdot z_B + m_B g \cdot y_B + I_{BX} \cdot \ddot{\phi}_B^{(3)} = \sum_{i=1}^4 (F_{iz} \cdot y_B) \quad (4.12)$$

また，脚 i は遊脚になる前に，脚 i の床反力は一定の値から 0 までに変化するの
で，つぎのように表される．

$$F_{iz} = \begin{cases} F_{iz}^0 (1 - \frac{(t-t_{i0})}{(1/4-\beta)T}), & t \in [t_{i0}, t_{i1}] \\ 0, & t \in (t_{i1}, t_{i2}) \end{cases} \quad (4.13)$$

式中の t_{i0} と t_{i1} と t_{i2} は，それぞれ前の遊脚が着地する時刻と脚 i が遊脚になる時刻
と遊脚 i が着地する時刻である．そうすると，式(4.10)-式(4.13)によって，各脚の床
反力の分量 F_{iz} ($i=1,2,3,4$) が求められる．また，各脚の床反力の分量 F_{ix} と
 F_{iy} ($i=1,2,3,4$) は，地面の摩擦力としており，簡略化するために次のように設定した．

$$\frac{F_{ix}}{F_{iz}} = \mu_1 \quad (4.14)$$

$$\frac{F_{iy}}{F_{iz}} = \mu_2 \quad (4.15)$$

その上，ロボットの X 軸と Y 軸上の力学分析によって，次の二つの式が得られる．

$$m_B \ddot{x}_B = \sum_{i=1}^4 F_{ix} \quad (4.16)$$

$$m_B \ddot{y}_B = \sum_{i=1}^4 F_{iy} \quad (4.17)$$

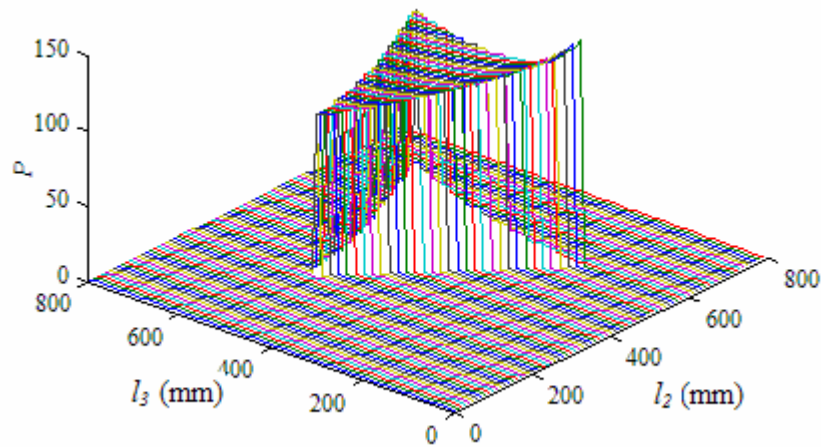


図 4.7 構造パラメータ l_2 と l_3 に対応するエネルギー P

そして、各脚の床反力の分量 F_{iz} を求めた後に、式(4.14)-式(4.17)によって、各脚の床反力の分量 F_{ix} と F_{iy} ($i=1,2,3,4$)が求められる。これにより、床反力ベクトル F_i が求められ、求めた F_i を式(4.9)に代入して、各関節トルク τ_{ij} を計算する。計算した各関節トルク τ_{ij} を式(4.5)に代入すると、単位移動距離にあたるエネルギー P が求められる。

以上の分析に基づいて、健康増進用 4 足馬ロボットを対象として、生馬の常歩を行なえる構造パラメータ l_2 と l_3 を用いて、計算した単位移動距離にあたるエネルギー P は、図 4.7 に示したようになる。

図 4.7 によって、 $l_2=560\text{mm}$ と $l_3=380\text{mm}$ になる際に、4 足馬ロボットの単位距離に当たるエネルギー P が最小値になるため、4 足馬ロボットの移動効率が一番良くなる。その結果、すべての構造パラメータは、胴体の長さ $d=800\text{mm}$ 、胴体の幅 $w=520\text{mm}$ 、脚の各リンクの長さ $l_1=0$ 、 $l_2=560\text{mm}$ 、 $l_3=380\text{mm}$ のように設定できる。

4.4 小型 4 足馬ロボットの製作

第4章 構造パラメータの設定と実験機の製作

本節では、設定した構造モデルと構造パラメータに基づいて、さらに実的な 4 足馬ロボットを製作することを検討する．ここでは、低コストで健康増進を目的とする 4 足馬ロボットの運動能力を検証するために、簡易型ラジコンサーボモーターを用いて、小型 4 足馬ロボットを製作する．

(1) モーターの選択及び制御法

まず、トルクと質量との比率が大きくなることから、サーボモーター PDS-2144FET を選択して、関節のアクチュエーターとしている．このサーボモーターは、図 4.8 と表 4.1 に示している．

サーボモーター PDS-2144FET の回転角度は 180° 程度までしか有らない．この範囲内において、簡単に正確な回転角度の制御ができる．モーターのケーブルの色と意味は、以下のように設定されている．

- ① 白：制御信号を入力する．
- ② 赤：+の電源を加える．
- ③ 黒：GND

すなわち、赤と黒のケーブルに電源を加え、白のケーブルにサーボモーターの停止角度を決めるための制御信号を与える．ここでの電源電圧は、6V である．制御信号は、図 4.9 に示すようなパルス信号である．

20ms の周期で 1ms から 2ms 幅のパルス信号を加えると、サーボはパルス幅に見合った角度で左右に首を振る．1.5ms 幅のパルスにすると、ほぼ中間位置で停止し、それよりも短いパルス幅だと左周りに、長いパルス幅だと右周りに首を振る．つまり、1.5ms 幅を中心として、約 ± 0.5 ms だけパルス幅を増減させることによって、連続的に首振りの角度を制御することができる．ちなみに、実験に使用した PDS-2144FET では、0.725mS ～ 2.225mS のパルス幅の間で、 180° 弱の首振りを行なった．この範囲外のパルス幅を加えると、ジーンとうなって動かなかったり、無反応だったりする．



図 4.8 サーボモーターPDS-2144FET

表 4.1 PDS-2144FET のスペック

速度	0.13s/60° (6V)
トルク	13Kg.cm (6V)
寸法	41×38×20mm
重量	54.5g
配線	赤：電源 (4.8～6V) 黒：GND 白：制御信号
パルス周期	10～20ms
パルス幅	1.0～2.0ms

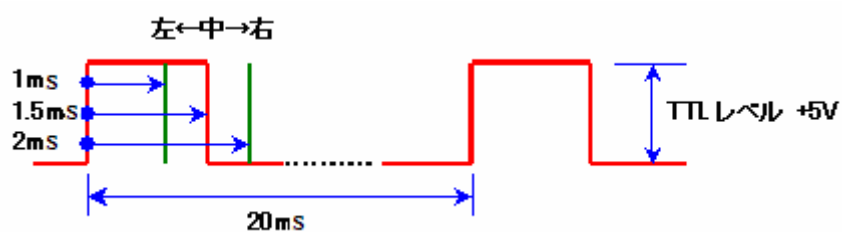


図 4.9 サーボモーターPDS-2144FET の制御信号



図 4.10 イトーレイネツ製サーボブラケット

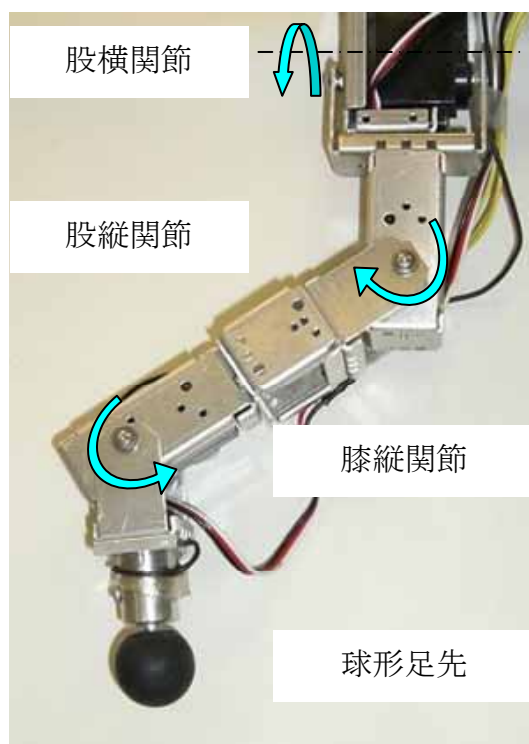


図 4.11 小型4足馬ロボットの脚構造

(2) 脚の構造と足先部分の設計

サーボのブラケットは、より剛性の高いイトーレイネツ製のサーボブラケット（PDF-2144FET 用）を使用している(図 4.10). 脚の構造は、図 3.1 に示す健康増進を目的とする4足馬ロボットの構造モデルに従って、図 4.11 に示すように三つの関節により構成されている.

この脚構造において、一つの関節の回転運動は、一つのサーボモーターを用いて実現している。足先部分は、球形のゴムを利用することにより、任意の角度で着地することができると考えて、このようにした。

(3) 制御システムの構築

小型4足馬ロボットの歩行を制御するためには、適当な制御システムを構築することが必要である。ここでは、選択したサーボモーターに対して、小型4足馬ロボットの歩行制御を目的として、図4.12に示すような制御システムを構築する。

図4.12の制御システムは、主にPC、無線通信機、マイコンボードと小型4足馬ロボット上の傾斜計と力センサーにより構成される。以下では、制御システムの各部分について詳しく説明する。

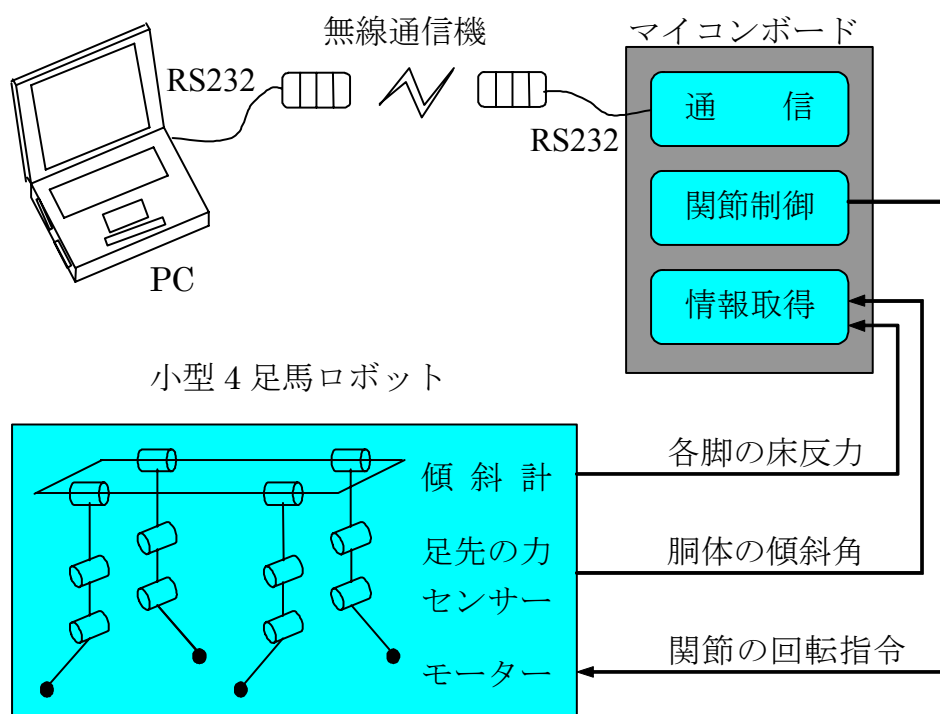


図4.12 小型4足馬ロボットの制御システムの構造

- PC

制御システムにおいての PC は，制御インターフェイス用ソフトウェア Visual C++6.0 をインストールしたノート PC である．この PC は，設定した制御周期内に，小型 4 足馬ロボットの軌道計画や逆運動学計算を行なって，計算した各関節の角度を無線通信機でマイコンボードに転送する．このあと，マイコンボードから送られたロボットの胴体の傾斜角と各足先の床反力を受け取る．これらの機能は，Visual C++6.0 で作ったプログラムにより実現している．

- 無線通信機

無線通信機としては，小型 4 足馬ロボットと PC との通信を無線で行なえるように RS232C ネットワークアダプターを搭載する．二つのネットワークアダプターは，それぞれ PC とマイコンボードとつながっている．ネットワークアダプターは，図 4.13 と表 4.2 に示している．



図 4.13 ネットワークアダプター

表 4.2 ネットワークアダプターのスペック

占有周波数帯域		2.400～2.4835GHz	
通信方式		DS-SS 方式	
データ転送速度		1Mbps	
通信可能距離		屋内約 25m, 屋外約 30m	見通しのよい場所
使用チャンネル		3ch からいずれか 1 つを選択 Ch-A:2.442GHz Ch-B:2.412GHz Ch-C:2.472GHz	ブッシュスイッチ設定
セキュリティ ID		256 パターンから選択可	ディップスイッチ設定
電源	電源電圧	DC5V±5%	
	消費電流	最大約 600mA	
外形寸法		W72×H28×D107mm	突起物含まず
質量		約 100g	

- マイコンボード

マイコンボードは、PC との通信、各関節の制御とロボットの情報取得の三つの機能を持っている。具体的に、マイコンボードは、PC からの各関節の角度を RS232 でもらって、各関節の制御を行っている。同時に、小型 4 足馬ロボットの各センサーの検出値を取って、PC に転送する。マイコンボードは、HD64F7045F28 制御 CPU を搭載している SH2-7045F を使用している。このマイコンボードは、図 4.14 と表 4.3 に示しており、16 個の PWM 出力用端子があるので、最大で 16 個のサーボモーターを制御できる。



図 4.14 SH2-7045F マイコンボード

表 4.3 SH2-7045F マイコンボードのスペック

CPU	HD64F7045F28
クロック	28MHz 固定
外部メモリ	1 M ビット S-RAM 装着 8 ビットデータバス接続
通信機能	RS-232C レベル ステレオピンジャック装備
電源監視	リセット IC 装備
動作温度	0～+40℃
電源	DC5V±5% 150mA
寸法	W82.8×D64.0×H15.0mm
コネクタ等	30,40,50 ピン端子各 1 個 バッテリーバックアップ端子 通信用ステレオジャック 外部 RAM モード切替えジャンパ CPU モード切替えディップスイッチ

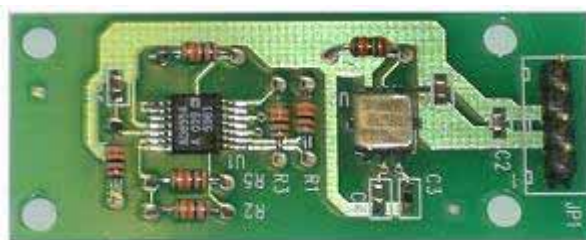


図4.15 傾斜センサー基板SNS-A3111

- 傾斜計

歩行における情報を取得するために、製作した小型4足馬ロボットには、胴体の姿勢角を計測する傾斜計と各脚の床反力中心を計測する力センサーが取り付けられている。

傾斜計は、株式会社ESPの傾斜センサー基板SNS-A3111を用いている。この基板は、2軸加速度センサー(ANALOG DEVICES社製ADXL-202)に応用することで、胴体の傾斜角度をリアルタイムで検出できる。基板の様子は、図4.15に示している。

電源電圧が+5Vのときに傾斜計の出力は、 $2.5V \pm 0.6V$ とする直流電圧であるので、小型4足馬ロボットのマイコンボードのA/Dにより検出できる。傾斜角度は、0であるときに、出力電圧は約2.5Vになる。傾斜角度を $\pm 90^\circ$ とすると、出力電圧はおおよそ $\pm 0.6V$ 前後変化する。

- ・ カセンサー

足先の力センサーとしては、共和電業製 LMA-A-10 型小型圧縮型ロードセルを使用し、増幅 IC として AD623 を利用してその出力信号を増幅する回路により構成される。ロードセルの様子と仕様は、図 4.16 と表 4.4 に示している。

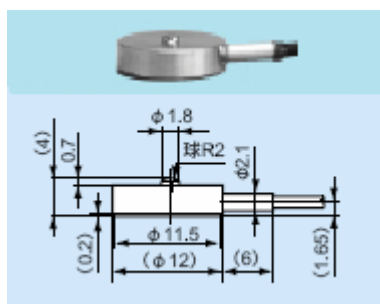


図 4.16 LMA-A-10 型小型圧縮型ロードセル

表 4.4 LMA-A-10 型小型圧縮型ロードセルのスペック

定格容量	10N (1.020kgf)
許容過負荷	150%
定格出力	0.75～2mV/ V (1500～4000×10 ⁻⁶ ひずみ)
非直線性	±1%RO 以内
ヒステリシス	±1%RO 以内
繰り返し性	1%RO 以下
許容印加電圧	7V AC または DC
推奨印加電圧	1～5V AC または DC
入力抵抗	350Ω±2.5%
出力抵抗	350Ω±2.5%
許容温度範囲	－10～60℃
温度補償範囲	0～50℃
ケーブル	0.035mm ² , 4心シールド 耐熱ビニル2m, 外径1.7mm

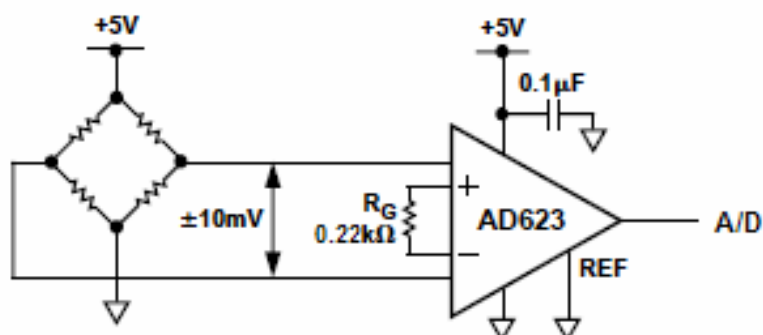


図 4.17 力センサーの信号増幅処理回路

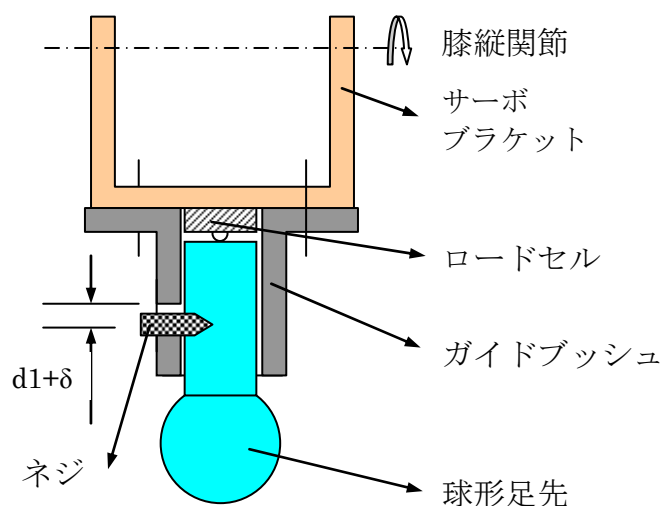


図 4.18 足先の構造及び小型圧縮型ロードセルの取り付け

力センサーの信号増幅処理回路は、図 4.17 で表される。図中の左側は、小型圧縮型ロードセルの等価ブリッジ回路である。AD623 で増幅した出力信号は、0～5V 内の電圧であるので、マイコンボードの A/D で読み取れる。

小型圧縮型ロードセルは、足先の内に内蔵しており、接地しているリンクの長さ方向の力しか検出できない。足先の構造及び小型圧縮型ロードセルの取り付けは、図 4.18 に示した。

図 4.18 に示すように、ロードセルは、接着剤を用いてサーボブラケットと固定

する．ガイドブッシュ上の穴の直径は， $d1+\delta$ ($\delta>0$)のように設置して，ネジの直径 $d1$ より大きくした．これにより，ロードセルは，地面からの床反力を受けられる．

(4) 製作した小型4足馬ロボット

製作した小型4足馬ロボットシステムは，図 4.19 に示している．表 4.5 は，ロボットの仕様を示した．このロボットの寸法は，前節で設定した4足馬ロボットの構造パラメータを参考にして，およそ実際の4足馬ロボットの4分の1になっている．製作した小型4足馬ロボットは，実際の4足馬ロボットより小さいサイズであるが，同様な構造モデルがあるので実際の4足馬ロボットの運動能力や歩行法を検証できると考えられる．また，この製作したロボットは，主に4足馬ロボットの構造モデルや運動能力や歩行法について検証することを目的とするので，簡略化するために馬首を取り付けないことと，実際の4足馬ロボットのように人間を乗せる機能を考えない．

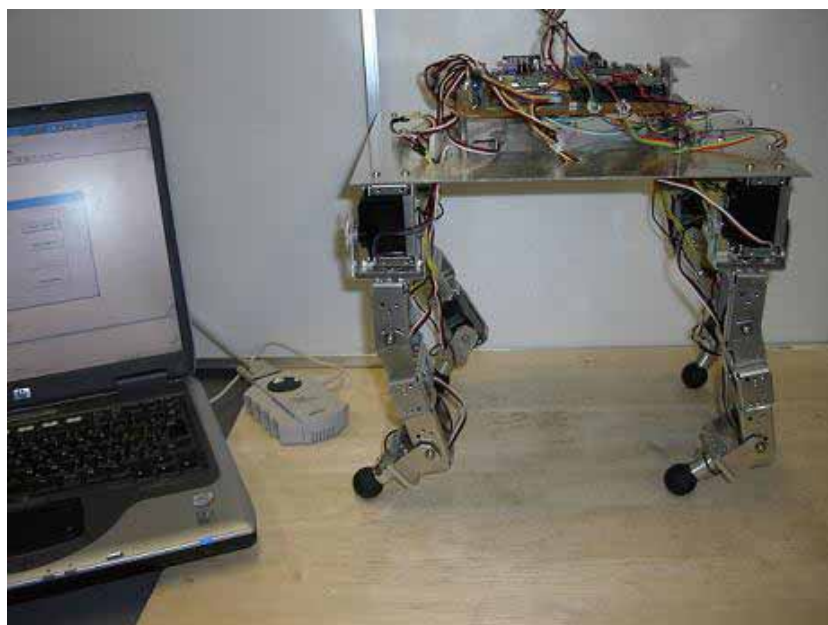


図 4.19 製作した小型4足馬ロボット

表 4.5 製作した小型4足馬ロボットの仕様

寸法	210mm(長さ)×150mm(幅)×360 mm (高さ)
リンクの長さ	$l_1=70\text{mm}$, $l_2=120\text{mm}$, $l_3=90\text{mm}$
重量	約 2kg (バッテリーを含まない)
関節数	3 個 (脚 1 本あたり)×4
マイコンボード	SH2-7045F (1 個)
サーボモーター	PDS-2144FET (12 個)
力センサー	LMA-A-10 型ロードセル (4 個)
傾斜計	傾斜センサー基板 SNS-A3111 (1 個)

(4) 小型4足馬ロボットの歩行制御

小型4足馬ロボットの歩行制御は、PCとマイコンボードで行っている。PCは歩行の軌道計画および逆運動学計算を行って、各関節の回転角度を求めている。マイコンボードは、PCで求めた各関節の回転角度に基づいて、関節の回転制御と歩行における情報取得の役割を持っている。

4.5 まとめ

本章では、前章で設計した構造モデルの上に、さらに各構造パラメータの設定と実験機の製作について検討した。具体的には、以下のような二つの成果を得た。

① 各構造パラメータの設定手法。まず、生馬の常歩の歩行パターンを解析して、健康増進用4足馬ロボットの歩行パターンを求めた。つぎに、その歩行パターンに対して、騎乗の便利さと歩行における移動効率の計算結果によって、4足馬ロボットの構造パラメータを設定した。

② 小型4足馬ロボットの製作。4足馬ロボットの構造モデルや運動能力や歩行法について検証するために、安価で同じような構造モデルである小型4足馬ロボッ

第4章 構造パラメータの設定と実験機の製作

トを製作し，その制御システムを構築した．製作した4足馬ロボットは，4足馬ロボットの運動制御や歩行法などの実験対象として用いられる．

参考文献

- [1] 常歩, フリー百科事典「ウィキペディア (Wikipedia)」.
- [2] 仲島了治, 四宮葉一, 関根修, 王碩玉, 石田健司, 木村哲彦: VR 乗馬療法システムの開発とその効果検証に向けての取り組み. ヒューマンインタフェース学会誌・論文誌(別刷), Vol.1, No.4, pp.81-86, 1999.
- [3] 四宮葉一: 他動的揺動刺激技術の運動療法機器への応用に関する研究, 博士(工学)学位論文, pp.23-30, 2004.
- [4] 木村 浩, 下山 勲, 三浦 宏文: 四足動歩行ロボットの力学の解析, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.5, pp.3-15, 1988.

第 5 章

健康増進用 4 足馬ロボットの平地歩行法

3 章と 4 章では、健康増進を目的とする 4 足馬ロボットの構造モデルの設計と構造パラメータの設定手法について述べた。その構造モデルに基づいて、さらに 4 足馬ロボットの歩行法を開発する必要がある。本章では、健康増進を目的とする 4 足馬ロボットの平地歩行法を開発し、製作した小型 4 足馬ロボットの歩行実験によりその平地歩行法の有効性を検証する。

5.1 はじめに

健康増進を目的とする 4 足馬ロボットは、屋外で生馬のように歩行することで乗馬療法の健康増進機能を実現することを目的とする。この目的を達成するために、機械構造の設計と歩行法の開発は、基本条件の二つとして不可欠である。3 章と 4 章では、構造モデルの設計と構造パラメータの設定を行うことで、4 足馬ロボットの機械構造を確定した。本章では、健康増進を目的とする 4 足馬ロボットの平地歩行法について検討する。

健康増進を目的とする 4 足馬ロボットの平地歩行法は、一般的な 4 足ロボットの平地歩行法と異なっている。一般的な 4 足ロボット、例えば TITAN 型 4 足ロボットや鉄犬型 4 足ロボットや牧田らの馬型 4 足ロボットなどの平地歩行法^[1-4]は、歩行の安定性を確保することだけ要求されている。健康増進を目的とする 4 足馬ロボットの平地歩行法は、歩行の安定性を確保することだけでなく、胴体の姿勢制御により乗馬療法の健康増進機能を実現することも要求される。本章では、まず健康増進機能を実現するために、乗馬療法おいての馬身運動の計測結果によって 4

足馬ロボットの胴体の運動を決めて、歩行安定性への分析から4足馬ロボットの各脚の歩行順番を求める。この後、着地の時の衝撃を軽減できる4足馬ロボットの遊脚の軌道計画を行う。そうして、4足馬ロボットの平地歩行法を開発する。つぎに、提案した平地歩行法に対して、歩幅とデューティ・ファクターから安定性への影響を解明する。さらに、製作した小型4足馬ロボットを実験対象として、姿勢角の運動実験と歩行実験により開発した平地歩行法の有効性について検証する。

5.2 胴体と各脚の動き

健康増進を目的とする4足馬ロボットの平地歩行には、4章で紹介した常歩を利用する。それで、各歩行パラメータは、以下のように設定する。歩幅 $s_0=480\text{mm}$ 、デューティ・ファクター $\lambda=0.88$ 、歩行における胴体の高さ $H=680\text{mm}$ である。これに基づいて、胴体の動きと各脚の歩行順番を検討する。

(1) 胴体の動き

2章で解明した乗馬療法のメカニズムによって、乗馬療法の健康増進機能を実現するのは、騎乗者のバランスを崩れさせる馬身他動運動が必要である。具体的には、騎乗者に健康増進効果を与える他動運動は、主に馬身の前後・左右運動と前後・左右傾斜運動により構成されている。それから、健康増進を目的とする4足馬ロボットの平地歩行法においては、胴体は馬身の前後・左右運動と前後・左右傾斜運動を行わなければならない。そのため、4足馬ロボットの胴体の運動は、4章で述べた馬身運動^[5-6]を参照して、図5.1(a)と5.1(b)に示すような前後・左右運動と前後・左右傾斜により構成される。なお、ここでの前後運動は、歩幅 $s_0=480\text{mm}$ から決められる等速運動を含まない。もし、4足馬ロボットの平地歩行において、このような胴体の運動を行えば、乗馬療法のような健康増進効果が得られると考えられる。

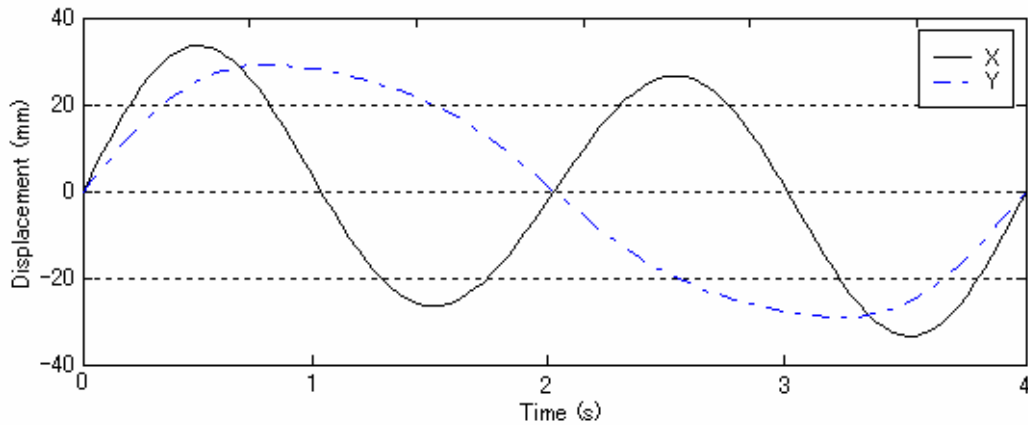


図 5.1(a) 胴体の前後・左右移動

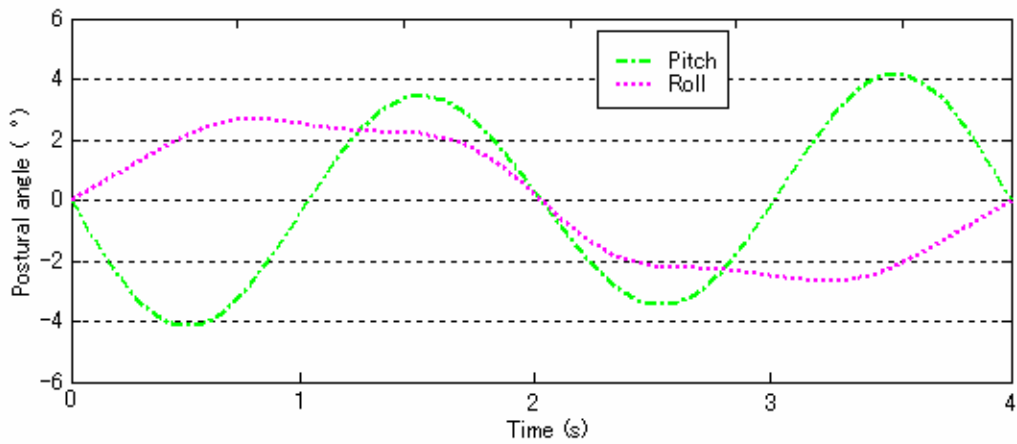


図 5.1(b) 胴体の前後・左右傾斜運動

(2) 各脚の歩行順番

4足馬ロボットの胴体の運動を決めた後に、遊脚の歩行順番は、歩行の安定性の主要因となっている。一方、4足馬ロボットの胴体と各脚の質量は生馬と違うので、遊脚の歩行順番を直接、生馬と同じようにしても歩行の安定性を保証できない可能性がある。したがって、ここでは、歩行の安定性を分析することにより、最適な歩行順番を求める。

歩行の安定性を分析するためには、安定性の評価方法が不可欠である。これまで、歩行の安定性に対して、いくつかの評価方法が提案された^[7-12]。ここでは、評価の便

利さと直観性から、「安定余裕(SD : *Stable Distance*)」^[7]のような安定性評価方法を採用する。つまり、歩行面上の重心の投影点が、各支持脚の接地点によって形成される支持多角形に入れば、このときでの安定性がある。その上、重心の投影点から支持多角形の各辺との距離の最小値は、「安定余裕」と呼んでいる。安定余裕が大きくなればなるほど、重心の投影点が支持多角形の真中に近くなって、ロボットの安定性が高くなる。この評価方法によって、4足馬ロボットの歩行の安定性が、歩行における重心の投影点と支持多角形の二つの要素により決められる。

重心の投影点は、4脚の前後・左右対称である特性を考慮して、胴体中心の投影点により近似できる。ここでの歩行面が平地であるので、重心の投影点の運動と胴体中心のX軸とY軸上の運動と同じになる。それから、前述の馬身運動と設定した歩幅 s_0 によって、重心投影点の運動曲線を求められる。また、歩行における支持多角形は、4章で述べた各足先の初期位置を設定したので、歩幅 s_0 と歩行順番により決められる。

以上の設定と分析から、ここでは、各歩行順番の場合に対して、安定余裕の評価方法により4足馬ロボットの歩行の安定性を検討する。具体的に、まず、ある歩行順番を設定して、一つの歩行周期内での各時刻の支持多角形を求める。次に、重心の投影点と支持多角形の各辺との位置関係を分析することで、各時刻での重心の投影点が支持多角形に入るかどうかを判断する。重心の投影点がいつでも支持多角形に入れば、この歩行順番に基づく歩行の安定性があると判断できる。その結果、全ての歩行順番の中で、RR-RF-LR-LFとLR-LF-RR-RFのような二つは、歩行の安定性を保証できる。さらに、この二つの歩行順番の場合に対して、一つの歩行周期での各時刻の安定余裕を求めて、安定余裕の最小値 SD_{\min} を求める。その結果、RR-RF-LR-LFとLR-LF-RR-RFの二つの歩行順番の場合には、安定余裕の最小値 SD_{\min} がそれぞれ37.4mmと4.5mmである。それから、ここでは、より大きい安定余裕がある歩行順番RR-RF-LR-LFを選択している。

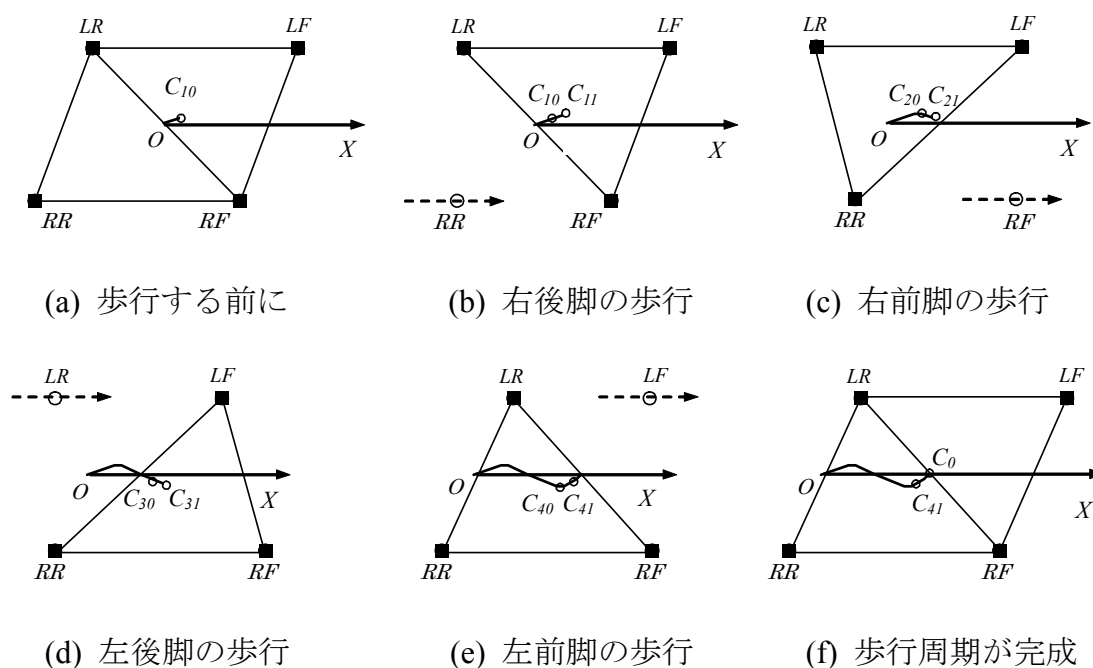


図 5.2 4 足馬ロボットの平地歩行の一つの周期

選択した遊脚の歩行順番と重心の投影点の運動によって、4 足馬ロボットの平地歩行の一つの周期が図 5.2(a)-(f)により示される．図中の C_{i0} と C_{i1} ($i=1,2,3,4$) は、それぞれ i 番目の遊脚の歩行開始時刻と歩行終了時刻での重心の投影点である．

5.3 遊脚の軌道計画

遊脚の歩行順番を決めた後で、遊脚の歩行軌道を計画することが必要である．ここでの遊脚の歩行軌道は、平地での歩行における遊脚の足先の運動軌道である．それから、まず図 5.3 に示すように、円滑な正弦曲線を用いて足先の運動経路を決めた． X_h 軸の正方向は歩行の前進方向を、 Z_h 軸の正方向は地面から垂直上方向とし、パラメータ h_0 と s_0 は、歩行における足先の上昇幅と歩幅である．この後、図 5.3 に示す運動経路に従って、それぞれ標準正弦波軌道と合成サイクロイド軌道を計画し、遊脚離脱時の振動と遊脚着地時の衝撃を理論解析と比較実験で検討する．

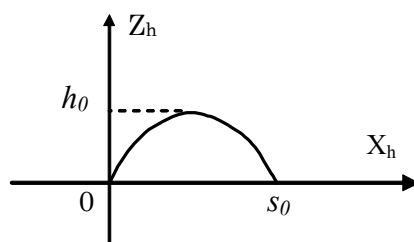


図 5.3 平地歩行における足先の運動経路

(1) 標準正弦波軌道

まず，図 5.3 に示す運動経路に従って，標準正弦波軌道を利用し，足先の運動軌道を計画する．すなわち，足先の運動軌道としては，前進方向には等速運動とし，鉛直方向には正弦波としており，式(5.1)と式(5.2)により表される．

$$x_h = s_0 \cdot t_h / T_h \quad (5.1)$$

$$z_h = h_0 \cdot \sin(\pi \cdot t_h / T_h) \quad (5.2)$$

ここで，前述した平地歩行の歩行パターンを参照して，その時のロボットの歩行パラメータを代入した時の足先の運動を求める．この際，パラメータとして歩幅 $s_0 = 480\text{mm}$ ，足先の上昇幅 $h_0 = 100\text{mm}$ ，歩行周期 $T = 4$ 秒，遊脚時間 $T_h = 0.48$ 秒を一例として選び， X_h 軸と Z_h 軸上の足先軌道を示す．この運動を前進方向と，鉛直方向の運動を分解して，その位置，速度，加速度の変化を時間軸に対して示したものが図 5.4 である．この図によって， $t = 0$ と $t = T_h$ の離脱点，着地点で速度の不連続が生じており，無限大の加速度が生じている．このような運動は，実際の脚離脱時に制御の位置誤差を生じ，脚着地時に衝突による衝撃，振動を生じることになる．この衝撃は，脚に過大な床反力を与えてとともに，胴体に揺れを与え，歩行の安定性に悪影響を生じさせる．

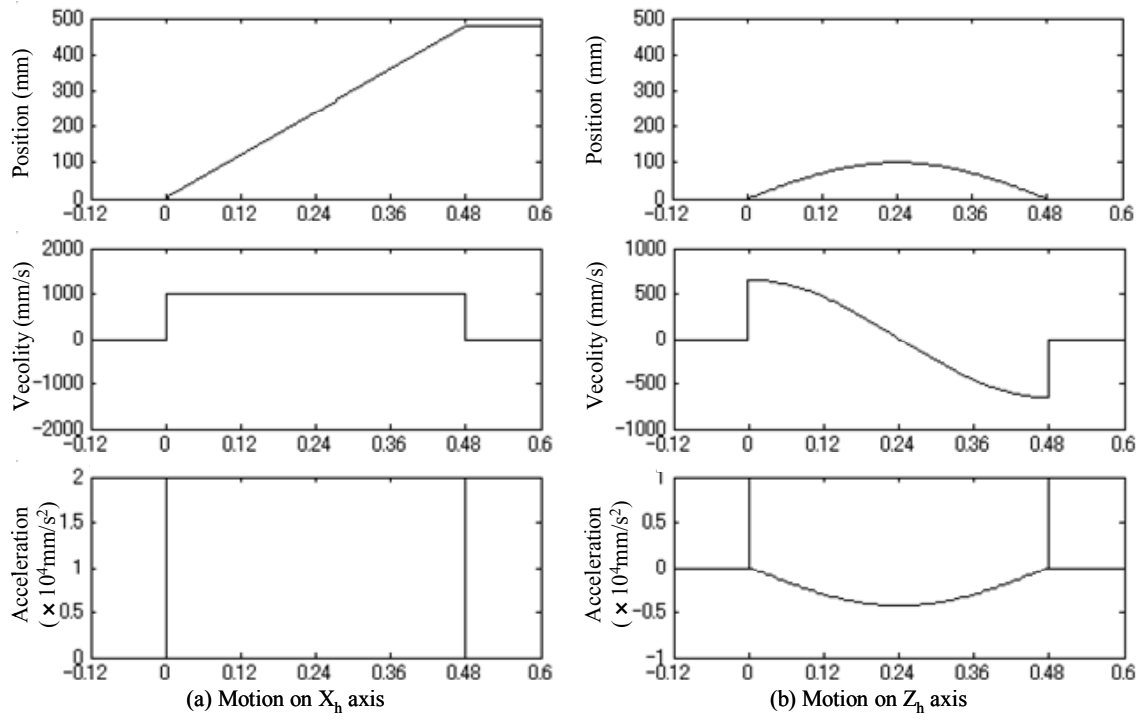


図 5.4 足先の標準正弦波軌道

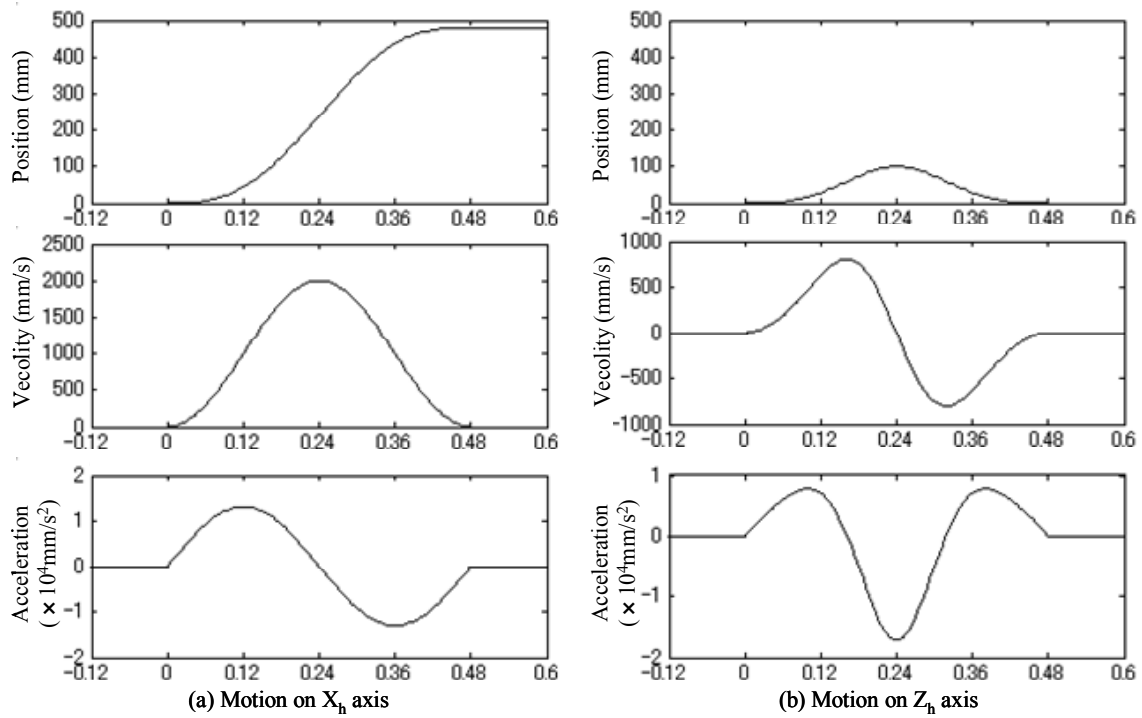


図 5.5 足先の合成サイクロイド軌道

(2) 合成サイクロイド軌道

4足馬ロボットの脚離脱時の振動と着地時の衝撃を軽減するために、図5.3に示す遊脚の運動経路に対して、離脱時と着地時にも足先の速度、加速度が連続になるような軌道を計画することが必要である。そこで、合成サイクロイド軌道を利用して、足先の運動軌道を計画し、脚離脱時の振動と着地時の衝撃を軽減する。この足先の合成サイクロイド軌道は、式(5.3)と式(5.4)に示すように計画された。

$$x_h = s_0 \cdot \left(\frac{t_h}{T_h} - \frac{\sin(2\pi \cdot t_h / T_h)}{2\pi} \right) \quad (5.3)$$

$$z_h = h_0 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{x_h}{s_0}\right) \quad (5.4)$$

歩幅 $s_0 = 480\text{mm}$ と $h_0 = 100\text{mm}$ と $T_h = 0.48$ 秒である時、足先の運動が図5.5に示している。つまり、足先の離脱と着地の時の X_h 軸と Z_h 軸上の速度と加速度が0になって、脚離脱時の振動と着地時の衝撃を小さく抑えられる。

(3) 遊脚軌道の比較実験

ここで、製作した小型4足馬ロボットを利用して、標準正弦波軌道と合成サイクロイド軌道の比較実験を行った。実験結果としては、歩行における各脚の検出した床反力の時間変化である。図5.6は、一つの歩行周期内に二つの遊脚軌道の歩行実験における各脚の床反力を示したものである。この図によって、合成サイクロイド軌道は、標準正弦波軌道に比べて、歩行における床反力の波乱を小さく抑え、脚離脱時の振動と着地時の衝撃を軽減できた。従って、平地歩行においては、脚離脱時の振動と着地時の衝撃を軽減するために、合成サイクロイド軌道を採用する。

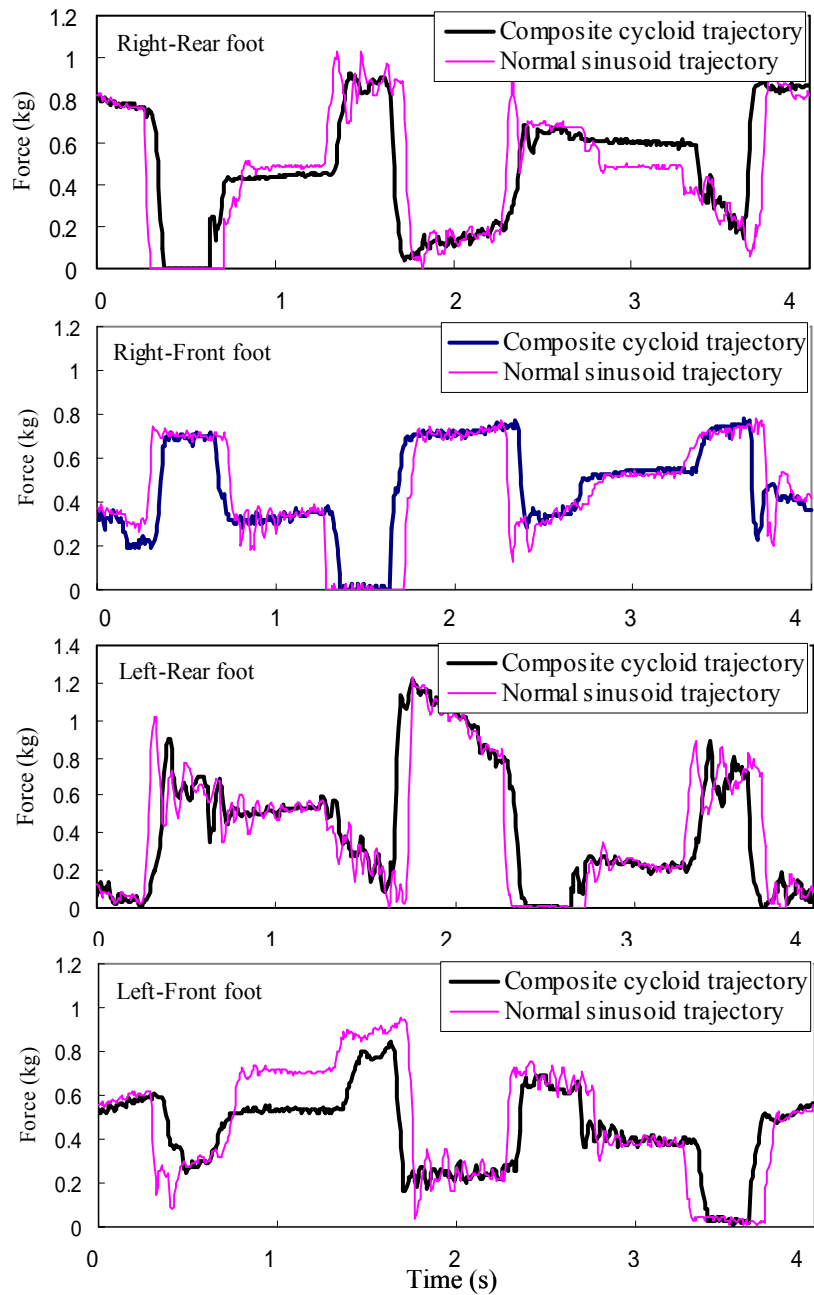


図 5.6 二つの遊脚軌道を用いる比較実験における床反力の時間変化

5.4 シミュレーションおよび検討

本節では、歩行過程のシミュレーションを行うことにより、提案した4足馬ロボットの平地歩行法の有効性を検証する。シミュレーションにおいて、胴体の長さと胴体の幅は、 $d=800\text{mm}$ と $w=520\text{mm}$ とし、脚の各リンクの長さは、 $l_1=0$, $l_2=560\text{mm}$,

$l_3=380\text{mm}$ とした．歩行における胴体の高さ $H=700\text{mm}$ ，歩幅 $s_0=480\text{mm}$ ，遊脚の上昇幅 $h_0=100\text{mm}$ ，デューティ・ファクター $\lambda=0.88$ とした．シミュレーションの結果としては，図 5.7 と図 5.8 に示す各関節の回転角度と安定余裕である．

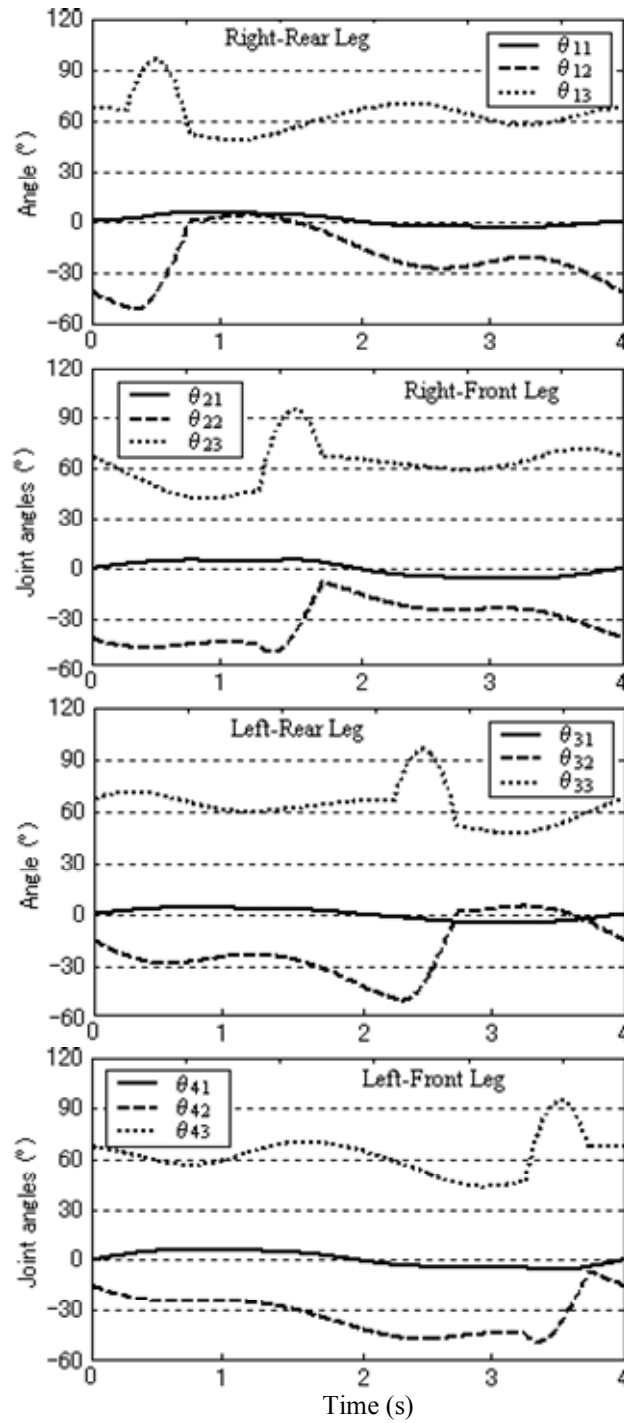


図 5.7 一つの歩行周期内の各脚の関節角

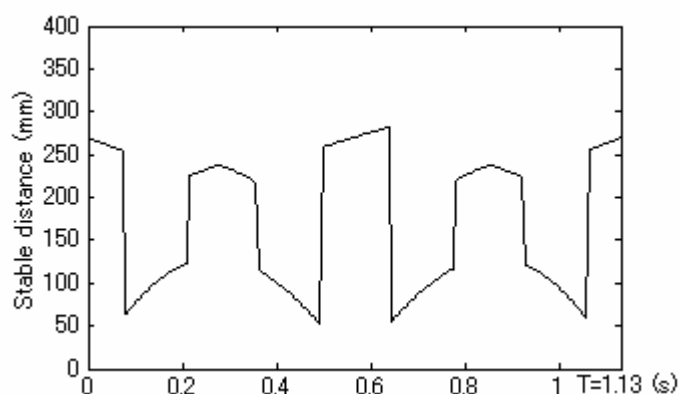


図 5.8 一つの歩行周期内の安定余裕

図 5.7 によって、4 足馬ロボットの各関節の回転角度は、連続的な実数となっており、関節の可能な回転範囲に入っていると考えられる。また、関節角度 θ_{i2} と θ_{i3} ($i=1,2,3,4$) が大きく変化する場合は、遊脚の歩行を行っている。その結果より、この 4 足馬ロボットは各関節の回転により胴体と遊脚の運動を実現でき、提案する 4 足馬ロボットの平地歩行法の有効性を検証した。

図 5.8 中の曲線の谷と峰は、それぞれ 4 足馬ロボットの 3 脚接地と 4 脚接地の安定余裕である。この図によって、4 足馬ロボットは 4 脚支持の状態から 3 脚支持の状態になる際に、安定余裕の値が大幅に減少する。この原因は、脚の接地状態の変化から引き起こされる支持多角形の変化である。また、すべての歩行周期において一定の安定余裕があることから、この平地歩行法の安定性が保たれると分かった。

以上のシミュレーションは、指定した歩幅 $s_0=480\text{mm}$ とデューティ・ファクター $\beta=0.88$ を前提条件として、4 足馬ロボットの平地歩行法は一定の安定余裕があることを検証したが、これらの歩行パラメータが歩行の安定性にどのように影響するかは、あまり明らかにしていない。そのため、以下では、さらに提案した 4 足馬ロボットの平地歩行法に対して、歩幅 s_0 とデューティ・ファクター β から歩行の安定性への影響を調べる。

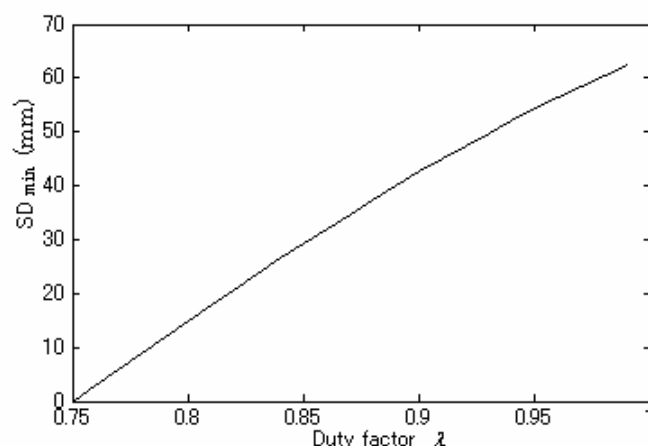


図 5.9 デューティ・ファクター λ と安定余裕の最小値 SD_{\min}

デューティ・ファクター λ は、各遊脚の歩行の開始時刻と終了時刻を決めているので、支持三角形の形成に影響する。それから、前述した平地歩行法に基づいて、歩幅は $s_0=480\text{mm}$ と設定して、デューティ・ファクター λ の値を変化させるとともに、安定余裕の最小値 SD_{\min} を計算した。その結果から、得た安定余裕の最小値 SD_{\min} の曲線を図 5.9 に示した。

図 5.9 により、デューティ・ファクター λ が大きくなると、安定余裕の最小値 SD_{\min} も大きくなることが分かる。例えば、 $\lambda=0.88$ のとき、安定余裕の最小値 $SD_{\min}=37.4\text{mm}$ であり、 $\lambda=0.99$ のとき、安定余裕の最小値 $SD_{\min}=63.0\text{mm}$ である。これは、デューティ・ファクター λ が大きくなればなるほど、4 足馬ロボットの遊脚の歩行期が短くなるからである。

歩幅 s_0 による安定余裕の最小値 SD_{\min} への影響は、支持三角形の形状を決定することで行っている。この影響を解明するために、前述した平地歩行法に基づいて、デューティ・ファクターは $\lambda=0.88$ を設定して、歩幅 s_0 の変化に対応する安定余裕の最小値 SD_{\min} を調べた。得た安定余裕の最小値 SD_{\min} の変化曲線が図 5.10 により示されている。この図によって、歩幅 s_0 の増加に従って、安定余裕の最小値も増加することが分かる。

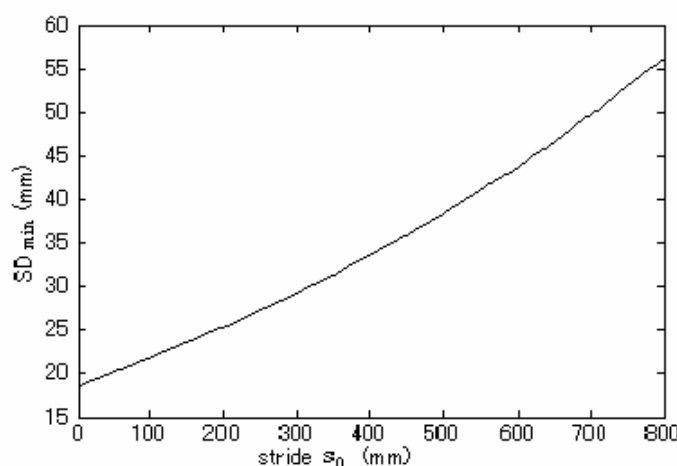


図 5.10 歩幅 s_0 と安定余裕の最小値 SD_{min}

その結果，提案した4足馬ロボットの平地歩行法においては，歩幅 s_0 とデューティ・ファクター λ による歩行の安定性への影響を解明した．それで，歩行パラメータとする歩幅 s_0 とデューティ・ファクター λ の調整により，提案した4足馬ロボットの平地歩行法の安定余裕の最小値を調整できると考えられる．

5.5 歩行実験

前節でシミュレーションにより提案した平地歩行法を理論的に検証した上で，本節では，製作した小型4足馬ロボットを実験対象として，歩行実験により提案した平地歩行法の有効性について検証する．ここでは，製作した小型4足馬ロボットが実的な4足馬ロボットの寸法の約1/4なので，歩行において同時に胴体の移動運動と姿勢角運動を実現するのは難しくなる．したがって，以下では，まず製作した小型4足馬ロボットを用いた姿勢角運動実験により，その健康増進機能を検証する．つぎに，製作した小型4足馬ロボットの歩行実験により，提案した4足馬ロボットの平地歩行法の有効性について検証する．

姿勢角運動実験においては，全ての脚が接地していると設定した上で，小型4足馬ロボットの胴体は，図5.1(b)中のYaw角とPitch角の運動に従って姿勢角運動

を行っているとした．図 5.11(a)-(d)では，姿勢角のある小型4足馬ロボットの様子
を示した．ここで，胴体の Yaw 角，Pitch 角と Roll 角は， α ， β と γ で表される．図
5.12 では，一つの歩行周期内で，実験において測定した姿勢角を示している．これ
らの実験結果によって，小型4足馬ロボットは，指定した胴体の Pitch 角と Roll 角
を実現できると考えられる．

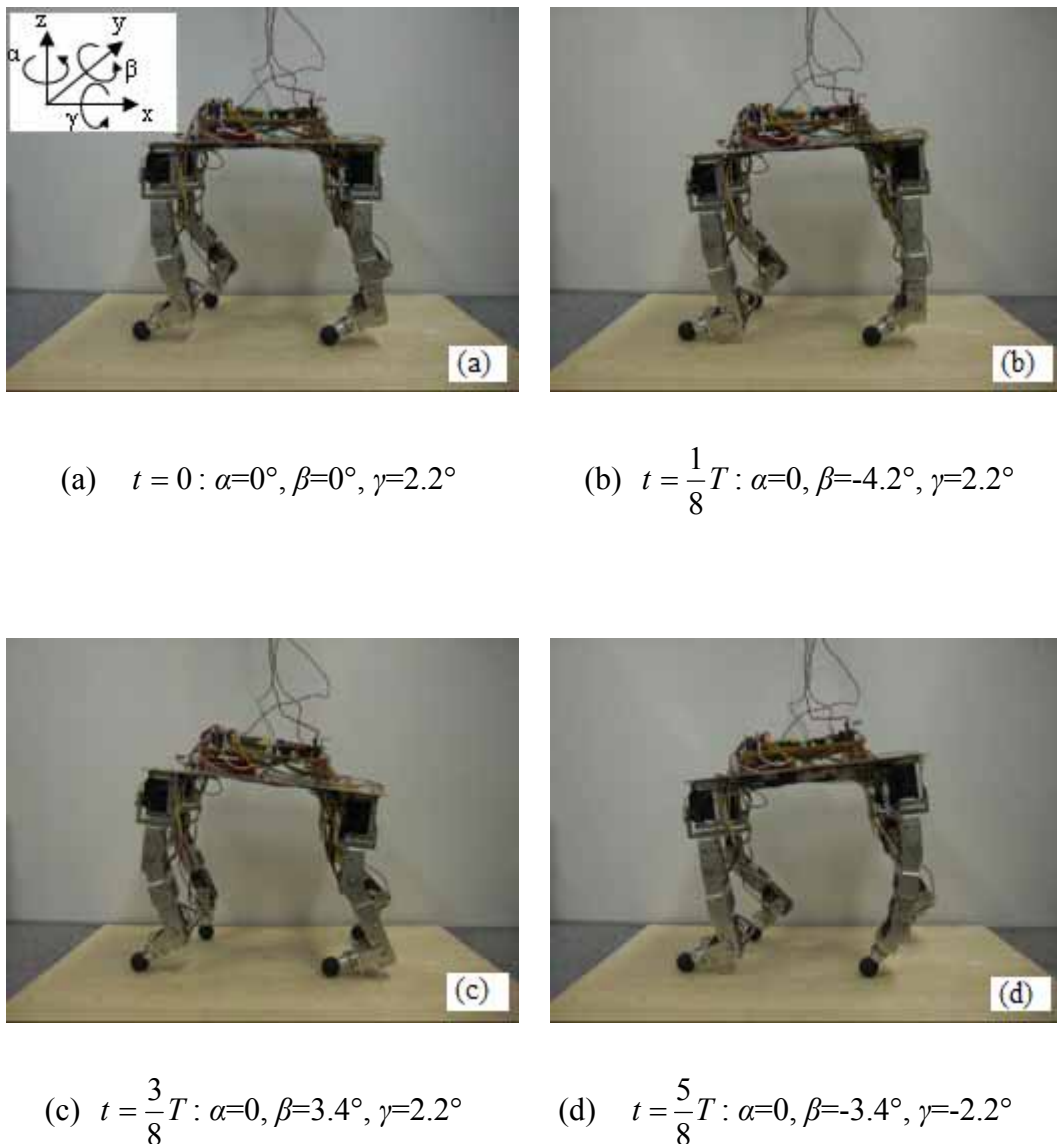


図 5.11 姿勢角のある小型4足馬ロボット

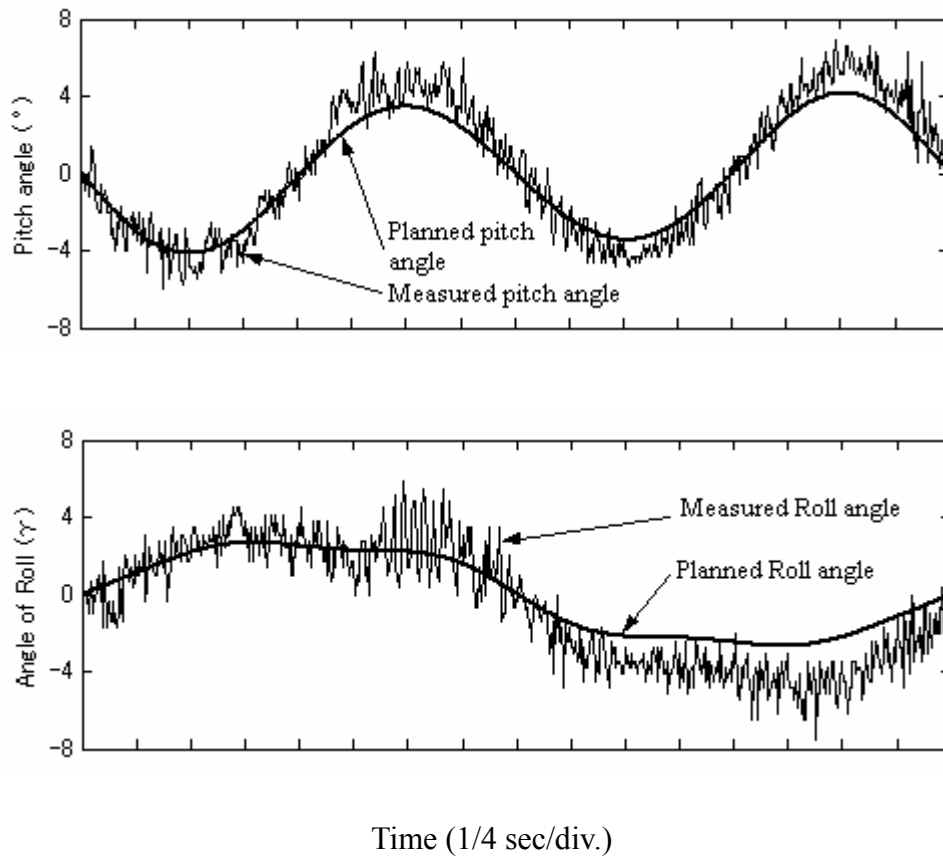


図 5.12 小型4足馬ロボットの胴体の姿勢角

このあと、主に歩行の安定性に着目して、胴体が X 軸と Y 軸の移動のみを行って、小型4足馬ロボットの歩行実験を行った。実験において、歩幅 $s_0=120\text{mm}$ とデューティ・ファクター $\lambda=0.88$ であり、歩行周期は、モータの回転速度の制限から、 $T=4$ 秒を設定した。実験結果としては、小型4足馬ロボットの安定な歩行に成功した。各脚の歩行の様子は図 5.13(a)-(d)に示している。

また、歩行実験において、各足先の圧力センサーを用いて実的な重心の投影点を求めて、支持多角形と結合し各時刻での安定余裕を求めた。求めた安定余裕の変化曲線は、図 5.14 に示している。

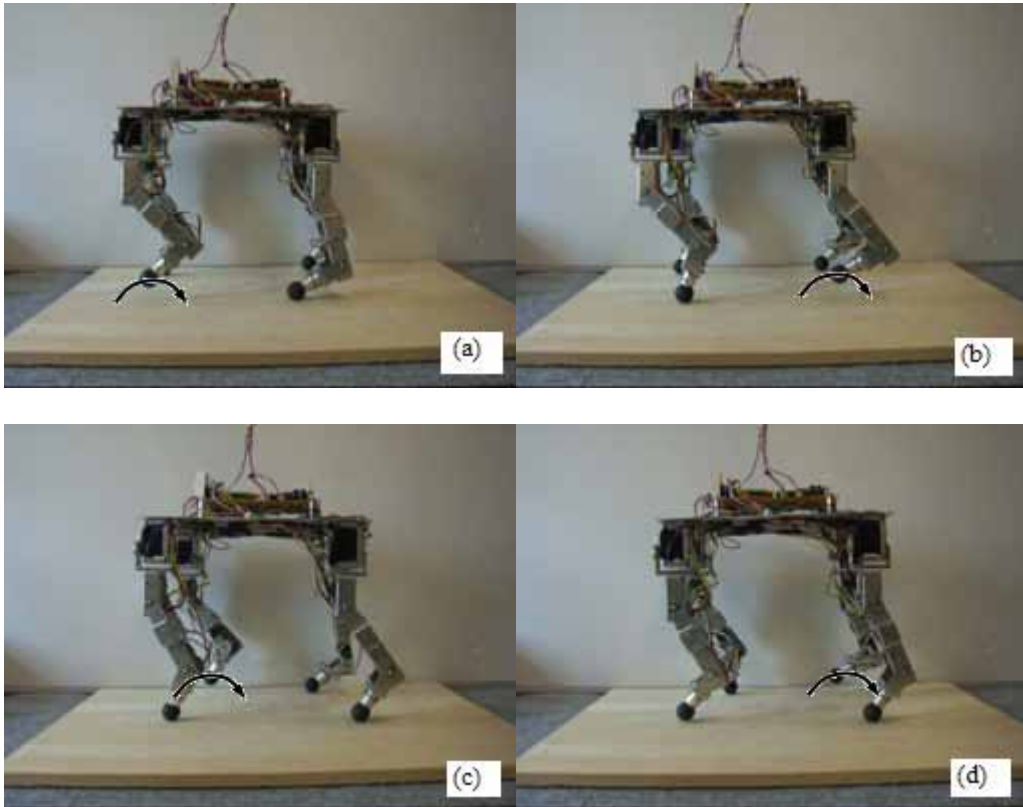


図 5.13 製作した小型4足馬ロボットの各脚の歩行の様子

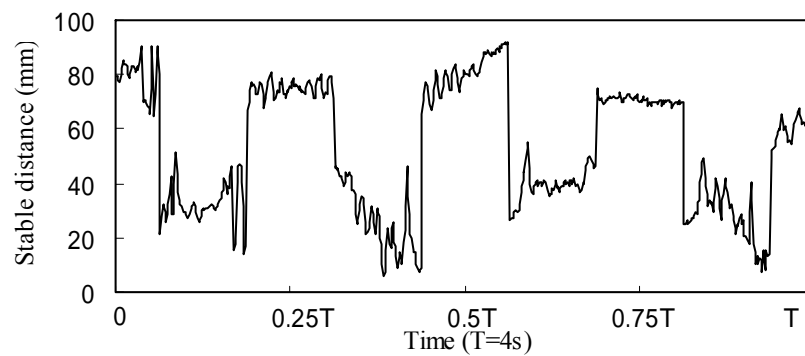


図 5.14 小型4足馬ロボットの平地歩行実験における安定余裕

図 5.14 によって、一つの歩行周期内に、安定余裕が正であるので、この小型4足馬ロボットの歩行の安定性が検証された。また、一定の計測誤差があるが、曲線の峰と谷は、図 5.8 のシミュレーション結果と大体合っていると考えられる。

小型4足馬ロボットの姿勢角運動実験と歩行実験によって、提案した4足馬ロボットの平地歩行法は、乗馬療法における馬身運動のように動けるとともに、歩行の安定性を確保できる。その結果、提案した4足馬ロボットの平地歩行法の有効性を実証した。

5.6 まとめ

本章では、前述した4足馬ロボットの構造モデルと構造パラメータに基づいて、健康増進機能がある4足馬ロボットの平地歩行法を提案し、シミュレーションおよび実験により、提案した平地歩行法を検討した。具体的には、以下のようにまとめられる。

まず健康増進機能を実現するために、乗馬療法における馬身運動の計測結果によって、4足馬ロボットの胴体の運動を決めた。つぎに、歩行安定性への分析から4足馬ロボットの各脚の歩行順番を求めて、遊脚の運動軌道を設計した。これにより、健康増進を目的とする4足馬ロボットの平地歩行法を提案した。さらに、シミュレーションにより提案した平地歩行法を検証し、歩行パラメータである歩幅とデューティ・ファクターから安定性への影響を解明した。最後に、製作した4足馬ロボットを実験対象として、姿勢角運動実験と歩行実験により提案した平地歩行法の有効性を実証した。

参考文献

- [1] 広瀬茂男, 福田 靖, 菊池秀和, 4足歩行機械の制御システム: 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.4, pp.304-324, 1985.
- [2] 木村 浩, 秋山 征一, 桜間 一彰: 神経振動子を用いた四足ロボットの不整地動歩行と整地走行, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.8, pp.1138-1145, 1998.
- [3] 牧田忍, 古荘純次: 馬型4足歩行ロボットの開発(第1報 PONYの機構開発および制御システム), 日本機械学会論文集(C編), Vol.69, No.02, pp.140-147, 2003.
- [4] 牧田忍, 古荘純次: 馬型4足歩行ロボットの開発(第2報 PONYによるトロット歩行実験), 日本機械学会論文集(C編), Vol.69, No.02, pp.148-155, 2003.
- [5] 仲島了治, 四宮葉一, 関根修, 王碩玉, 石田健司, 木村哲彦: VR乗馬療法システムの開発とその効果検証に向けての取り組み. ヒューマンインタフェース学会誌・論文誌(別刷), Vol.1, No.4, pp.81-86, 1999.
- [6] 四宮葉一: 他動的揺動刺激技術の運動療法機器への応用に関する研究, 博士(工学)学位論文, pp.23-30, 2004.
- [7] R.B. McGhee, and A.A. Frank: On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits, Math. Bioscience, Vol.3, pp.331-351, 1968.
- [8] 広瀬茂男, 岩崎広之, 梅谷陽二: 歩行機械の静的安定評価基準, 第21回自動計

測制御連合講演会, pp.253-254, 1978.

[9] E.G. Papadopoulos and D.A. Rey, A New Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3111-3116, 1996.

[10] DOMINIC A. MESSURI and CHARLES A. KLEIN, Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-Terrain Locomotion,” IEEE JOURNAL OF ROBOTICS AND AUTOMATION, Vol.RA-1, No.3, pp.132-141, 1985.

[11] A. Ghasempoor and N. Sepchiri:“A Measure of Machine Stability for Moving Base Manipulators,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2249-2254, 1995.

[12] A.Goswami, Foot rotation indicator (FRI) point: A new gait planning tool to evaluate postural stability of biped robots, In Int. Conf. On Robotics and Automation, 9(2): 47-52, Detroit, MI, may 1999.

第 6 章

健康増進用 4 足馬ロボットの適応歩行法

屋外で健康増進を行うために、4 足馬ロボットは、平地での歩行だけではなく、不整地での適応歩行も要求される。そのため、本章では、健康増進を目的とする 4 足馬ロボットの適応歩行法を開発し、製作した小型 4 足馬ロボットの歩行実験により提案手法の有効性を検証する。

6.1 はじめに

屋外での自然環境において、平地よりも、一定の凹凸と傾斜度がある軽度不整地ほとんどである。それで、屋外での自然環境で 4 足馬ロボットにより健康増進を行うために、軽度不整地に対応できる適応歩行法が必要である。一方、これまで、4 足ロボットの適応歩行法が数多く報告されたが^[1-4]、健康増進を目的とする 4 足馬ロボットに適用できることが言わない。本章では、健康増進を目的とする 4 足馬ロボットの軽度不整地に対応できる適応歩行法を開発する。

健康増進を目的とする 4 足馬ロボット適応歩行には、前章で開発した平地歩行法と同じように、歩行の安定性を確保するだけでなく、乗馬療法の健康増進機能も実現しなければならない。そのため、まず地面状況や安定性の評価などに対していくつかの設定を行う。つぎに、軽度不整地の地面状況に応じて、遊脚の運動軌道の計画と床反力の検出値によって遊脚の適応的な接地を実現する。その上、健康増進機能の実現と歩行の安定性の確保を前提として、胴体の姿勢角運動を決め、検出した床反力中心から胴体の前後・左右運動をオンラインで決定する手法を提案し、健康

増進を目的とする4足馬ロボットの適応歩行法を開発した。最後に、製作した小型4足馬ロボットを実験対象として、平面と軽度不整地と小斜面での歩行実験により提案した適応歩行法の有効性を検証する。

6.2 適応歩行の問題設定

4足馬ロボットの適応歩行を論じてゆくため、本章では、歩行面と歩様の設定や安定条件について、いくつかの問題設定を行う。

(1) 歩行面の設定

一般的には、乗馬療法を行える自然環境は、一定の広さと緩い凹凸変化がある荒地または路面など自然地面を意味し、激しい凹凸変化がある地面と急な坂は含まない。これらの自然地面は、平地と軽度凹凸不整地と緩やかな斜面のような三つの典型的な歩行面により表現でき、軽度不整地と呼ばれる。軽度不整地における凹凸地面と斜面は、図6.1に示すような特徴がある。

図6.1(a)に示す凹凸地面は、凹凸の高低差を ΔH で表される。図6.1(b)中の斜面は、歩行ロボットの斜面での踏破能力の限界を考慮して、傾斜角 λ が 0° から 10° までの緩やかな斜面と設定する。

(2) 適応歩行の歩様

生馬を使う乗馬療法は、一般的に低い歩行速度である常歩を中心に行われている。ここでの常歩は、各脚が指定の順に従って順次歩行する歩様としており、少なくとも3本の足が接地するという特徴がある。そこで、同じ健康増進効果の獲得と安全性の考慮から、4足馬ロボットの適応歩行においては、常歩の歩様を採用する。さらに、生馬の歩行の特徴を参照して、各脚の歩行順番は右後脚-右前脚-左後脚-左前脚のように設定する。また、4足馬ロボットの歩行を開始する際に、各足の初期位置は、図6.2に示すように設定する。

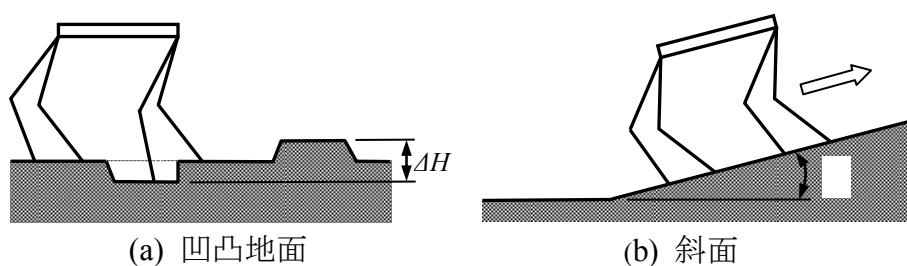


図 6.1 適応歩行における軽度不整地

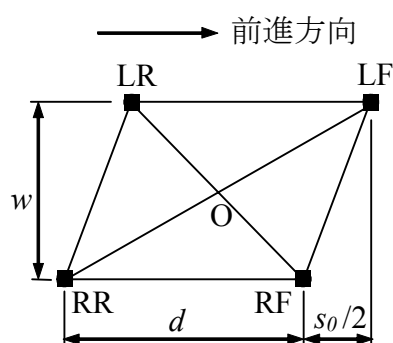


図 6.2 4 足馬ロボットの各足の初期位置

図 6.2 中の LF (Left-Front foot) と LR (Left-Rear foot), RF (Right-Front foot) と RR (Right-Rear foot) は、それぞれロボットの左前足と左後足, 右前足と右後足を表す. この図 6.2 に示すように, 右脚の足先の初期位置は, 対応する左脚の足先の初期位置より後ろの歩幅 s_0 の半分のところに設定する. また, 同脚の前進方向での距離は, ロボットの胴体の長さ d と同じに設定するとともに, 左脚と右脚との左右方向での距離は, ロボットの胴体の幅 w と同じである.

(3) 適応歩行の安定条件

4 足馬ロボットの適応歩行の前提条件は, 歩行の安定性を確保することである. そこで, 如何に軽度不整地に対応し, 歩行の安定性を確保するかが, 適応歩行の実現において重要な点となる. ここでは, 床反力中心に基づく安定性の評価法を導入することにより, 適応歩行の安定条件を明らかにする.

まず、4足馬ロボットの適応歩行における安定性評価法を検討する。適応歩行における安定性は、軽度不整地から悪影響を受けるので、常に不安定になる可能性がある。そこで、適応歩行における安定性を確保するために、軽度不整地での安定性をリアルタイムに評価することが必要である。そのため、以下では、安定性をリアルタイムに評価できる「床反力中心」を導入する。

Goswani(1999)らの定義によって、床反力中心(CoP: Center of Pressure)は、ロボットの支持多角形平面上に各床反力の総合的な作用点である^[5]。床反力の合力をこの作用点に置けば、この合力から生じるトルクは、各床反力のトルクの総和と同じである。具体的に、各脚の歩行面に垂直な床反力を F_i 、足先の X 座標と Y 座標(基準座標系)を X_i 、 Y_i とすれば、床反力中心の位置(X_{cop}, Y_{cop})は、次の式(6.1)と(6.2)により計算できる。ここで、軽度不整地の凹凸差が小さいので、この凹凸状況から支持多角形平面への変化を考えない。

$$X_{cop} = \sum X_i F_i / \sum F_i \quad (6.1)$$

$$Y_{cop} = \sum Y_i F_i / \sum F_i \quad (6.2)$$

つぎに、計算した床反力中心と支持多角形の位置関係によって、適応歩行における安定性があるかどうかをリアルタイムに判別できる。すなわち、床反力中心がロボットの支持多角形に入れば、安定性があると判断できる。逆に、床反力中心がロボットの支持多角形に入らなくなれば、安定性を失ったと判断できる。

また、歩行中の外乱と騎乗者の揺れ動きによる安定性への悪影響を克服するために、歩行の安定性をオンラインで定量的に評価しなければならない。そのため、安定性がある場合には、床反力中心と支持多角形の各辺との距離を計算して、距離の最小値を「床反力中心の安定余裕」と呼んで、適応歩行の安定性を定量的に評価する指標としている。

さらに、床反力中心に基づく安定性の評価法により、4足馬ロボットの適応歩行の安定条件を解明する。適応歩行において、4足馬ロボットは、4脚で接地する場合と3脚で接地する場合がある。一般的に、4脚で接地するときの安定性は確保しやすいので、ここでは主に3脚で接地する場合の安定性に注目する。具体的に、まず騎乗者の身体の揺れ動きによる安定性への影響を克服するために、床反力中心の安定余裕の基準値 d_{s0} を設定する。このあと、設定した基準値 d_{s0} によって、歩行中の床反力中心の安定区域を求める。

図 6.3(a)と 6.3(b)の塗りつぶした三角形は、それぞれ安定余裕の基準値 d_{s0} により求めた右後脚と右前脚の歩行における床反力中心の安定区域である。図 6.3 (a)と図 6.3 (b)の安定区域を総合して、右後脚と右前脚の歩行における床反力中心の共通安定区域を得られ、図 6.3 (c)中の $\Delta S_1S_2S_3$ で表される。同様に、左後脚と左前脚の歩行過程での床反力中心の共通安定区域は、図 6.3 (d)中の $\Delta S_4S_5S_6$ で表される。そして、適応歩行の安定条件としては、右後脚と右前脚の歩行における床反力中心が $\Delta S_1S_2S_3$ に入ること、かつ左後脚と左前脚の歩行における床反力中心が $\Delta S_4S_5S_6$ に入ることである。この安定条件によって、適応歩行における安定性は床反力中心の調整により保たれると考えられる。

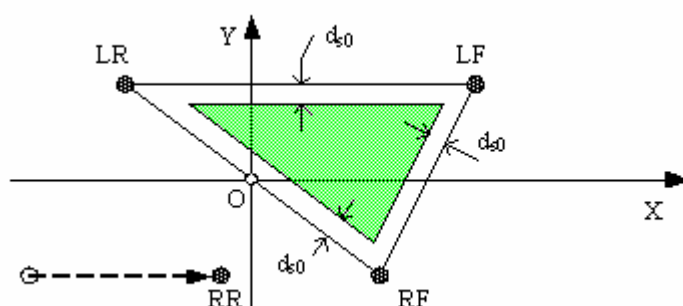


図 6.3(a) 右後脚の歩行過程の安定区域

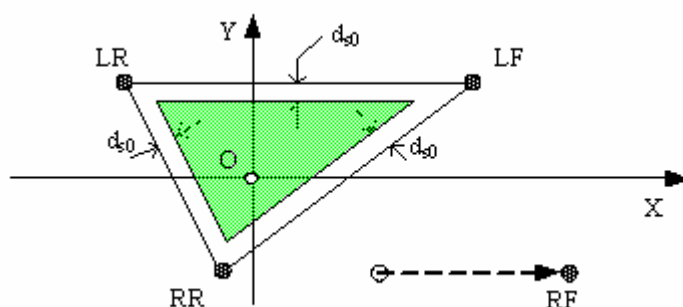


図 6.3 (b) 右前脚の歩行過程の安定区域

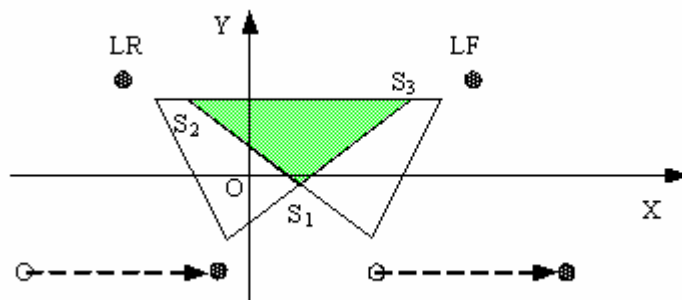


図 6.3 (c) 右前脚と右後脚の歩行過程の共通安定区域

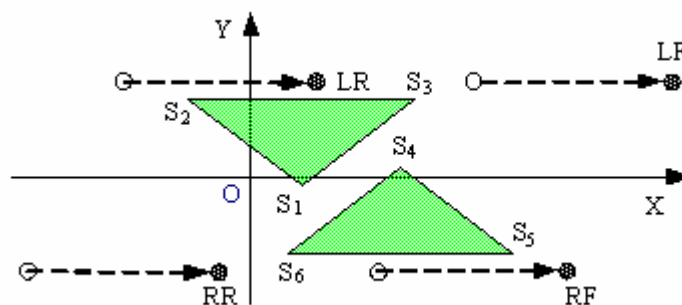


図 6.3(d) 右側の脚と左側の脚の歩行過程の共通安定区域

6.3 適応歩行法

4足馬ロボットの開発は、室外の自然環境で乗馬療法の健康増進効果を得ることを目的とする。このことから、4足馬ロボットの適応歩行は、歩行の安定性を確保することだけでなく、乗馬療法の健康増進機能を実現することも要求される。これらの要求に応じて、本章では、まず適応歩行の多様な地面に適応できる遊脚の軌道を決定して、乗馬療法の健康増進機能の実現と歩行の安定性の確保から、4足馬ロボットの胴体の前後・左右方向への姿勢角運動と前後・左右方向への移動を決めることで、適応歩行における胴体の運動を求める。

(1) 遊脚着地の適応性

適応歩行においては、遊脚の歩行軌道は不整地の凹凸状況に対応することが必要である。そのため、まず地面の凹凸状況を考慮して、足先の運動経路を決める。次に、遊脚着地の時の衝撃を軽減するために、足先の軌道計画を行う。また、歩行する際には、地面の凹凸状況に応じて、計画した足先の軌道をリアルタイムに調整することで、遊脚着地の適応性を実現する。

まず、足先の運動経路は、地面の凹凸状況へのリアルタイム調整を行えることから、図6.4に示すように上昇段階 P_1P_2 と前進段階 P_2P_3 と復帰段階 P_3P_4 により構成される。

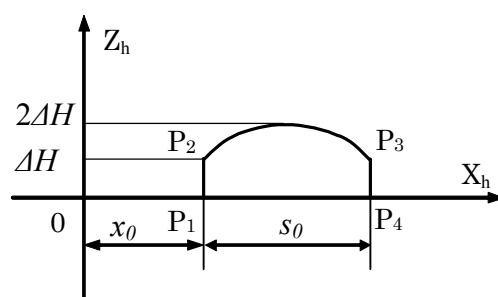


図 6.4 適応歩行における遊脚の運動経路

この運動経路によって、遊脚の上昇段階に地面の凸点への衝突を避けるとともに、遊脚の復帰段階に地面の凹凸に適応できる。パラメータ s_0 は、歩幅である。また、遊脚の歩行期の総時間を T_h 、歩行期の時刻 t_h に対応する足先の座標を x_h と z_h とする。これに基づいて、遊脚離脱の時の振動と着地の時の衝撃を軽減するために、足先の離脱と着地の時の X_h 軸と Z_h 軸上の速度と加速度が0になることが必要である。これに応じて、計画した遊脚の足先の軌道は、式(6.3)-(6.8)で表れる。

$t_h \in [0, T_h/4]$ のとき、つまり上昇段階 P_1P_2 :

$$x_h = x_0 \quad (6.3)$$

$$z_h = \Delta H \cdot [4t_h / T_h - \sin(8\pi t_h / T_h) / (2\pi)] \quad (6.4)$$

$t_h \in (T_h/4, 3T_h/4)$ のとき、つまり前進段階 P_2P_3 :

$$x_h = s_0 \cdot [2(t_h - T_h/4) / T_h - \sin(2\pi(t_h - T_h/4) / T_h) / (2\pi)] \quad (6.5)$$

$$z_h = \Delta H \cdot \sin(\pi \cdot x_h / s_0) \quad (6.6)$$

$t_w \in [T_h/4, 3T_h/4]$ のとき、つまり復帰段階 P_3P_4 :

$$x_h = x_0 + s_0 \quad (6.7)$$

$$z_h = \Delta H - \Delta H \cdot [4t_h / T_h - \sin(8\pi(t_h - 3T_h/4) / T_h) / (2\pi)] \quad (6.8)$$

適応歩行における遊脚軌道への調整は、主に遊脚の復帰段階で行っている。この段階では、各脚に設置した力センサーの検出値から、遊脚が接地かどうかを判断する。この判断結果によって、計画した遊脚軌道を調整する。それから、遊脚の復帰過程は、図 6.5 に示すような流れがある。

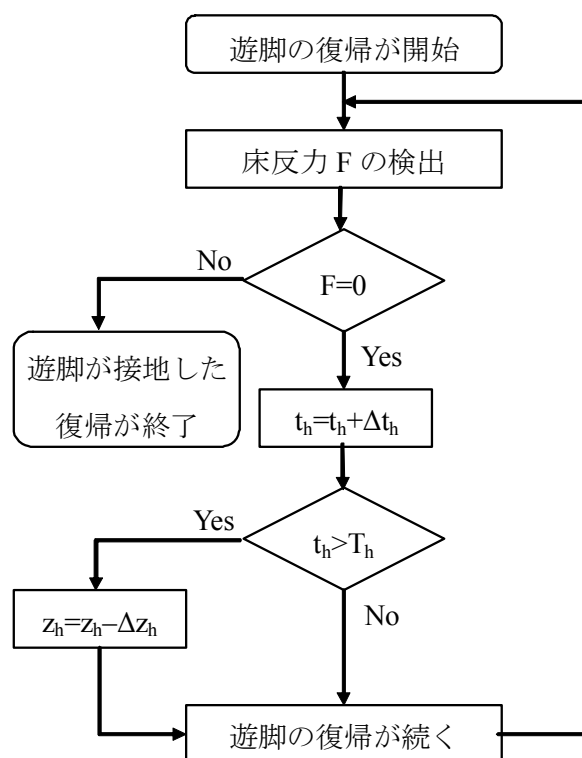


図 6.5 遊脚の復帰段階の調整過程

この図 6.5 によって, 遊脚の復帰過程では, 力センサーの検出値 F が 0 になれば, 遊脚がまだ接地していないと判断するため, 足先の運動が続く. 力センサーの検出値が 0 より大きくなれば, 遊脚が接地したと判断して, 足先の復帰過程が終了する. それで, 計画した遊脚軌道と復帰過程での調整過程により, 凹凸不整地での遊脚の適応的な接地を実現できる.

また, i 番目($i=1,2,3,4$)の遊脚の歩行の開始時刻は, $t_i=(2i-1)T/8-T_w/2$ を取り, 復帰過程の足先の調整時間は, $\Delta T_w=T_w/4$ と設定する. このことから, 各脚の支持状態によって, 4 足馬ロボットの適応歩行の歩行周期は, 図 6.6 により表される. 図中の実線と点線は, それぞれ各脚の支持期と歩行期を表している.

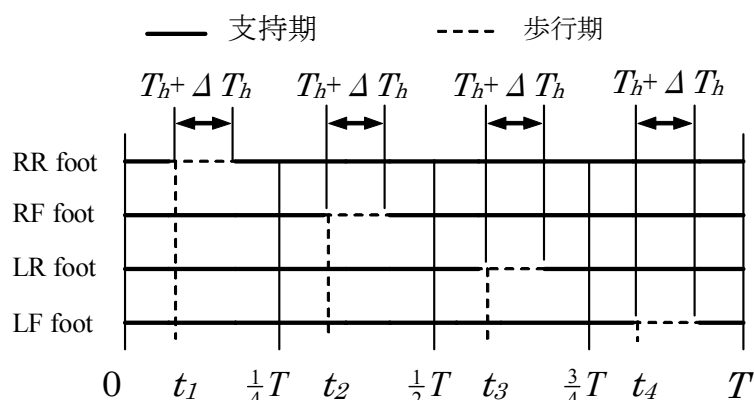


図 6.6 4 足馬ロボットの適応歩行の歩行周期

(2) 胴体の動き

適応歩行においては、胴体の動きは、乗馬療法の健康増進機能を実現するだけでなく、床反力中心の位置を調整することも要求されている。そのため、以下では、それぞれ乗馬療法の健康増進機能と床反力中心の位置調整によって、適応歩行における4足馬ロボットの胴体の動きを決める。

一般的に、乗馬療法の健康増進効果は、4足馬ロボットの胴体の前後・左右移動または前後・左右方向まわりの姿勢角運動により実現される。前節検討した適応歩行の安定条件によって、適応歩行における安定性は床反力中心の調整により保たれる。この床反力中心の位置調整は、主に4足馬ロボットの胴体の前後・左右移動により決められる。つまり、4足馬ロボットの胴体の前後・左右運動を計画することにより、床反力中心に基づく適応歩行の安定条件を満たし、適応歩行の安定性を確保できると考えられる。そこで、同時に健康増進機能と床反力中心の位置調整を行うために、4足馬ロボットの胴体は、4章で計測した馬身運動の前後・左右周りの姿勢角運動を採用するとともに、胴体の前後・左右移動により適応歩行における安定性を確保する。採用した前後・左右方向まわりの姿勢角運動は、図 6.7 に示している。

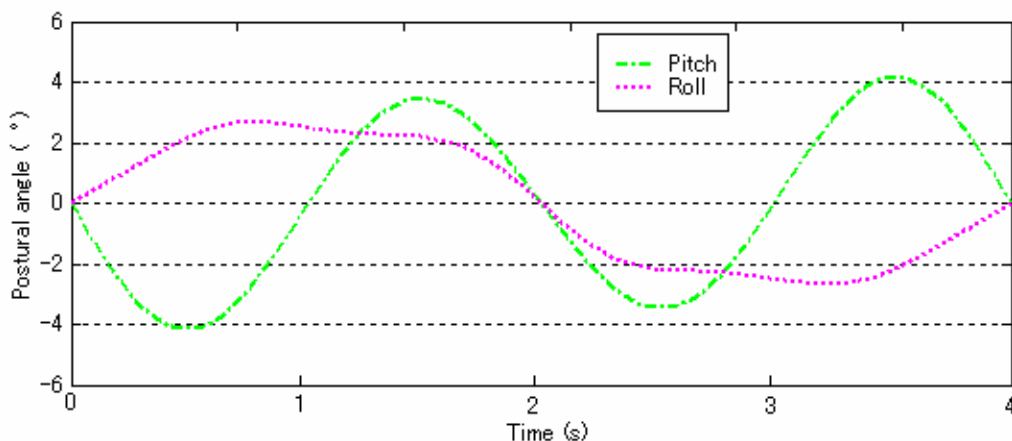


図 6.7 周期化した馬身の前後・左右方向への姿勢角の運動曲線

このあと、適応歩行法において胴体の前後・左右移動を決める手法を検討する。具体的には、前章で述べた適応歩行の安定条件に従って、歩行の安定性の確保のため床反力中心の目標位置を計画し、ファジィ推論により胴体の前後・左右運動を求める。

まず、床反力中心の目標位置の計画について述べていく。前節で得た適応歩行の安定区域は、図 6.8 に示している。このあと、前節で述べた適応歩行の安定条件を参考にして、床反力中心の共通安定区域 $\Delta S_1 S_2 S_3$ の各辺は、つぎの式(6.9)-(6.11)で表される。

$$S_2 S_3 : y = \frac{w}{2} - d_{s0} \quad (6.9)$$

$$S_1 S_2 : y = -kx + \frac{k}{\sqrt{1+k^2}} d_{s0} \quad (6.10)$$

$$S_1 S_3 : y = k\left(x - \frac{s_0}{2}\right) + \frac{k}{\sqrt{1+k^2}} d_{s0} \quad (6.11)$$

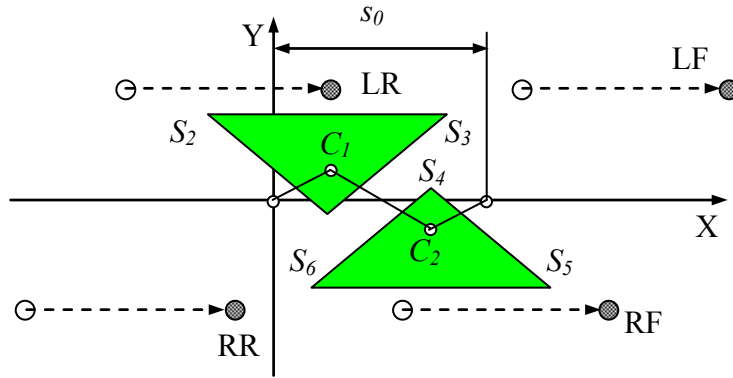


図 6.8 一つの歩行周期内の床反力中心の運動軌道

ただし、 $k = \frac{w}{d - s_0/2}$ である．このあと、右後脚と右前脚の歩行過程における床反力中心の目標位置を、共通安定区域 $\Delta S_1 S_2 S_3$ 内の点 C_1 と置く．点 C_1 の X 軸上の座標は、 $x_{c1} = \frac{s_0}{4}$ を設定する．さらに、点 C_1 と $\Delta S_1 S_2 S_3$ の各辺の位置関係から、点 C_1 の Y 軸上の座標 y_{c1} は、つぎの式(6.12)を満たさなければならない．

$$-k \frac{s_0}{4} + \frac{k}{\sqrt{1+k^2}} d_{s0} < y_{c1} < \frac{w}{2} - d_{s0} \quad (6.12)$$

ここで、 $d_{s0} < \frac{w}{4}$ を設定する上で、 $y_{c1} = y_{c2} = d_{s0}$ を取ると、点 C_1 の Y 軸上の座標 y_{c1} は式(6.12)を満たせる．同様に、左後脚と左前脚の歩行過程での床反力中心の目標位置は点 C_3 で表して、 $x_{c2} = \frac{3s_0}{4}$ と $y_{c2} = d_{s0}$ が得られる．それで、各脚の歩行過程において、床反力中心が目標位置に達したら、歩行の安定性を確保できると考えられる．また、床反力中心の初期位置と一周期の歩行を行ったあとの位置は、それぞれ X 軸上の原点 O と点 C_3 で表し、 $|OC_3| = s_0$ とした．

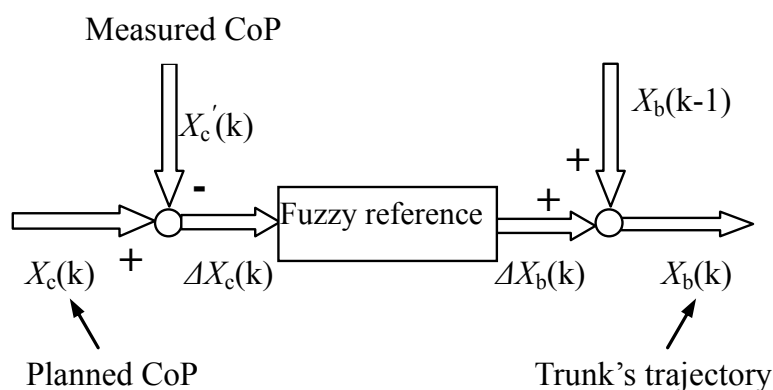


図 6.9 ファジィによる胴体中心の移動量の獲得

次に、床反力中心の目標位置を決定した上で、4足馬ロボットの胴体の前後・左右運動を求める。適応歩行での地面状況は未知なものであるから、床反力中心に決定した目標位置に達するために、胴体の運動を地面状況に応じて自動的に生成しなければならない。そこで、如何に床反力中心の位置誤差から胴体中心の移動量を求めるかが、主な問題点となっている。一方、床反力中心の移動量と胴体中心の移動量との変化関係は、ロボットの各部分の質量と位置からの影響を受けているので、直接的に求めるのは難しくなる。そこで、ファジィ推論を用いて、床反力中心の移動と胴体中心の移動との変化関係を近似し、図 6.9 に示すように床反力中心の位置誤差 $\Delta X_c(k)$ から胴体中心の移動量 $\Delta X_b(k)$ を求める。

図 6.9 に示したように、以下のような流れがある。まず k 番目の床反力中心の目標位置 $X_c(k)$ は、計画した床反力中心の運動軌道によって決めることができ、このときの床反力中心の実際の位置 $X'_c(k)$ は、各脚の力センサーにより検出できる。つぎに、床反力中心の目標位置と実際の位置から、床反力中心の位置誤差 $\Delta X_c(k)$ が求められる。さらに、床反力中心の位置誤差 $\Delta X_c(k)$ をファジィ推論の入力とし、ファジィ推論を用いて胴体中心の移動量 $\Delta X_b(k)$ を得られる。最後に、得た胴体中心の移

動量 $\Delta X_b(k)$ と $k-1$ 番目の胴体中心の位置 $\Delta X_c(k-1)$ により, k 番目の胴体中心の位置 $X_b(k)$ を求める. その結果, 4 足馬ロボットの適応歩行において, 計画した床反力中心の運動軌道と計測した実際の床反力中心の位置から, 各時刻での胴体中心の目標位置を求めることで, 胴体中心の適応的な軌道計画を実現できる.

ファジィ推論の各ルールは, 相関的な経験により作成できる. まず, 床反力中心と胴体中心の移動量との変化関係の考察によって, 以下のような定性な経験が得られる. 4 足馬ロボットの胴体中心は, 前方向に移動すると, 床反力中心も前方向に移動する. ほかの方向, すなわち後方向・左右方向には, そのような依存性変化関係も分かる. その上, 胴体中心の移動量が大きくなれば, 床反力中心の移動量も増加する. また, 4 足馬ロボットの胴体中心の前後方向と左右方向での運動は, 主に床反力中心の前後方向と左右方向での位置に影響するので, それぞれ前進方向と左右方向でファジィルールを設計し, 式(6.13)と (6.14)により表わした.

$$R_x^i: \text{if } \Delta x_c = A_x^i, \text{ then } \Delta x_b = b_x^i; \quad (6.13)$$

$$R_y^i: \text{if } \Delta y_c = A_y^i, \text{ then } \Delta y_b = b_y^i; \quad (6.14)$$

ここで, R_x^i と R_y^i は, それぞれ前進方向と左右方向でのファジィルール, $i=1, 2, \dots, 7$ である. Δx_c と Δy_c は, 床反力中心の位置誤差 ΔX_c の前進方向と左右方向の値, Δx_b と Δy_b は, 胴体中心の移動量 ΔX_b の前進方向と左右方向の値である.

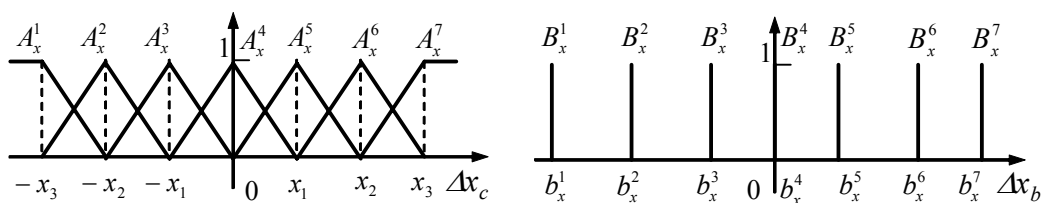


図 6.10(a) 前後方向でのファジィ集合のメンバーシップ関数

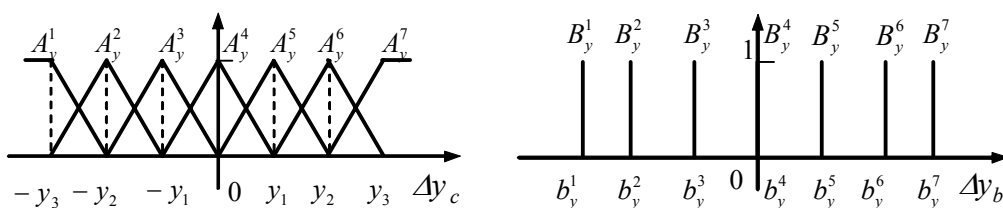


図 6.10(b) 左右方向でのファジィ集合のメンバーシップ関数

前件部のファジィ集合 A_x^i と A_y^i を三角型メンバーシップ関数，後件部のファジィ集合 B_x^i と B_y^i を実数をとし，図 6.10(a) と 6.10(b) に示す．図 6.10 中の各パラメータは，実際のロボットの歩行過程においての調整により得られる．このファジィ推論は，Mamdani らの簡略型推論法^[6]を使うと，以下の流れのようになる．まず，前後方向と左右方向との入力と各ルールの前件部との適合度 W_x^i と W_y^i を求める．次に，後件部の実数値を取り込み，以下のような式(6.15)と式(6.16)により推論法の出力とする 4 足ロボットの胴体中心の移動量 Δx_b と Δy_b を求める．

$$\Delta x_b = \sum (W_x^i \cdot B_x^i) / \sum W_x^i \quad (6.15)$$

$$\Delta y_b = \sum (W_y^i \cdot B_y^i) / \sum W_y^i \quad (6.16)$$

胴体中心の移動量を求めると，4 足馬ロボットは，この移動量に従って胴体を移動することで，計画した床反力中心の運動軌道を追従する．もし，実際の床反力中心が計画した運動軌道を追従できれば，4 足馬ロボットの適応歩行の安定条件によって，適応歩行の安定性を確保できると考えられる．

以上の遊脚軌道決定と胴体の運動決定に関する手法によって，乗馬療法の健康増進効果の獲得と歩行の安定性の確保が行なえる上に，4 足馬ロボットの適応歩行を実現できると考えられる．適応歩行における 4 足馬ロボットの胴体は，乗馬療法の健康増進効果を与える前後・左右への姿勢角運動を行うと同時に，歩行の安定性の確保から地面状況に適応できる前後・左右運動も自動的に生成する．

6.4 歩行実験

本節では、製作した小型4足馬ロボットを用いて、平地と凹凸地面と斜面での歩行実験により、開発した4足馬ロボットの適応歩行法の有効性について検証する。これらの実験においては、モータの回転速度の制限から歩行周期 $T=16$ 秒を設定しており、歩幅 $s_0=80\text{mm}$ と安定距離の基準値 $d_{s0}=20\text{mm}$ を決めている。

(1) 平地での歩行実験

平地での歩行実験においては、脚の歩行時間 $T_w=0.1T$ と $\Delta T_w=0$ を設定しており、遊脚の足先の運動を正弦曲線としている。実験結果の一例として、図 6.11 から図 6.15 までのグラフに示している。

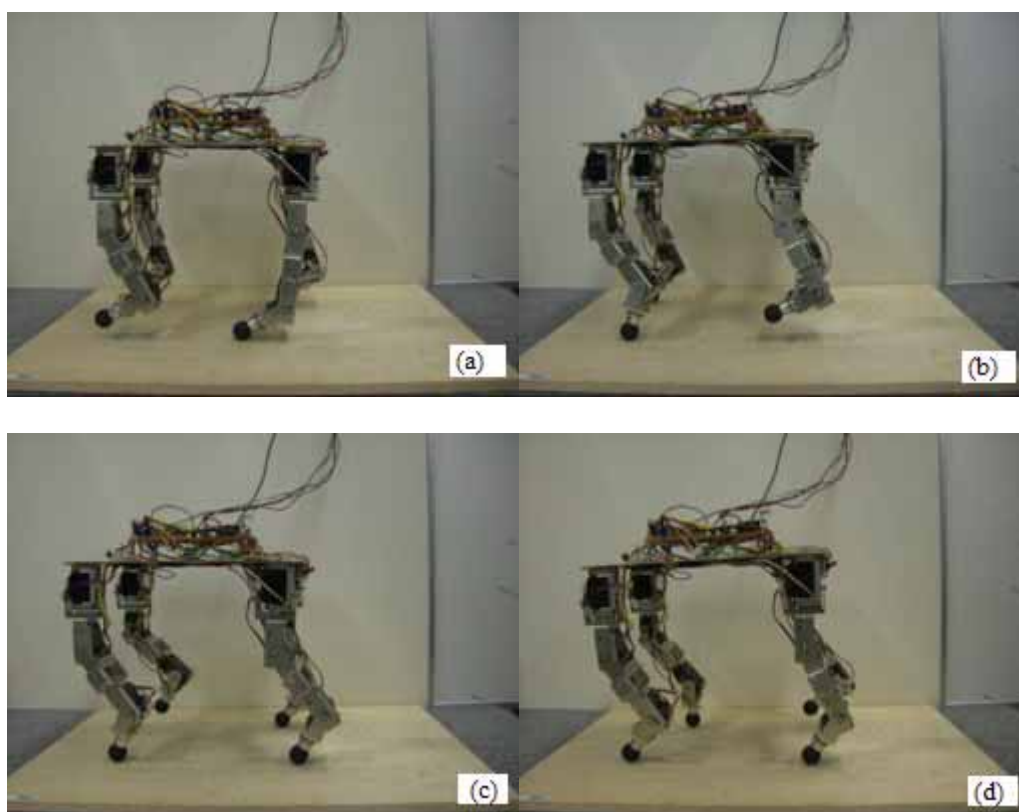


図 6.11 平地での各脚の歩行の様子

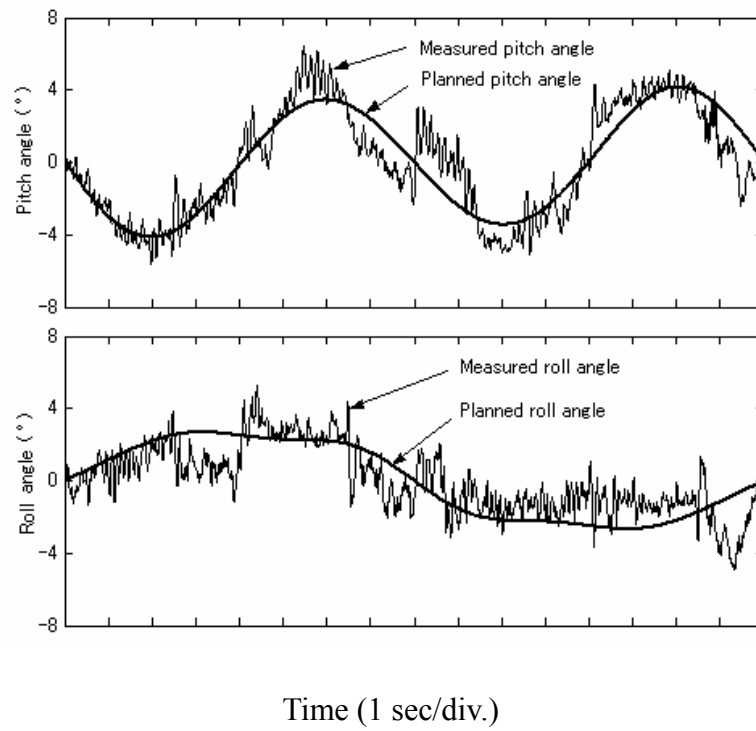


図 6.12 平地での適応歩行実験における胴体の姿勢角

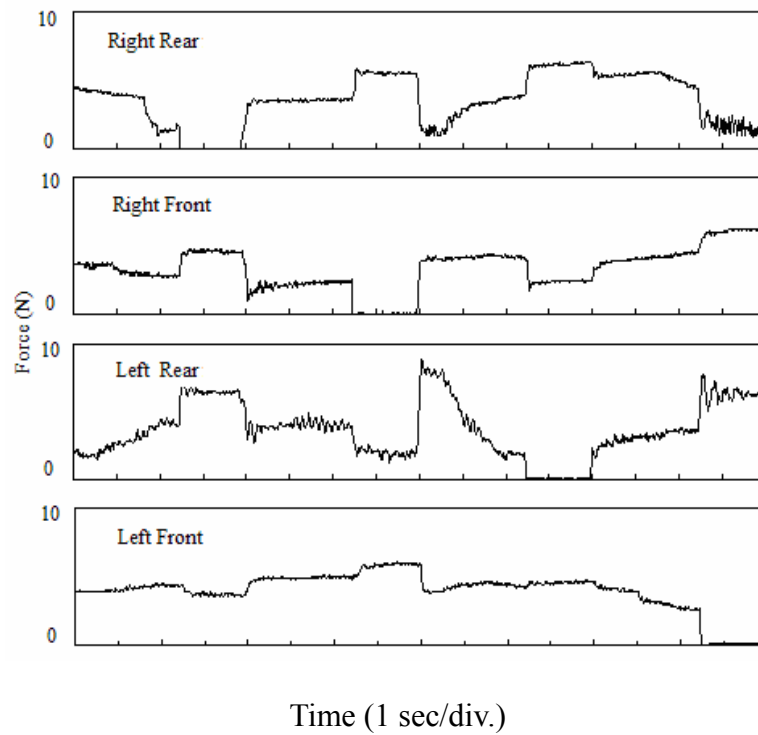


図 6.13 平地での適応歩行実験における実測した床反力

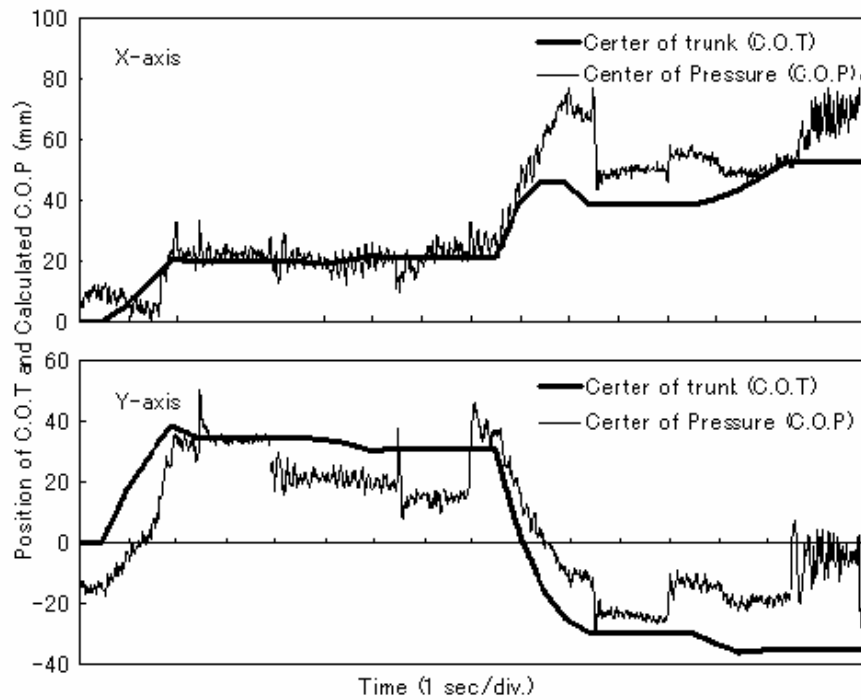


図 6.14 平地での適応歩行実験における胴体中心と床反力中心

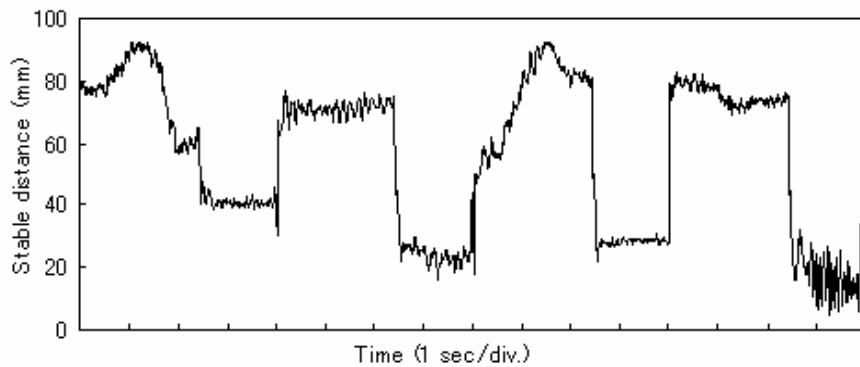


図 6.15 平地での適応歩行実験における安定余裕

図 6.11 から図 6.15 までは，一つの歩行周期内の平地での適応歩行実験の実験結果を示している．図 6.11(a)-(d)は，右後脚－右前脚－左後脚－左前脚の順序に従って歩く各脚の歩行様子を表している．図 6.12 のグラフは，歩行における胴体の姿

姿勢角の変化曲線である．この変化曲線が計画した胴体の姿勢角運動と符号できたことから，平地での適応歩行において，胴体の姿勢角運動による健康増進機能を備えていると考えられる．

図 6.13 と図 6.14 は，平地での歩行実験における各脚の床反力および計算した床反力中心の位置を示している．図 6.13 において，脚の床反力が 0 になっている段階は，この各脚が遊脚になっている過程である．それから，この図 6.13 によって，各脚は指定した順に歩行する際にいつでも 3 本以上の脚が接地しており，常歩の歩様行われていることが分かる．図 6.14 によって，右側脚と左側脚の歩行期での床反力中心は，設定した目標位置(20,20)と(60,-20)を追従していると考えられる．

図 6.15 のグラフは，歩行における床反力中心に基づく安定余裕の実測値を示している．この図によって，歩行における床反力中心の安定余裕は，ほぼ設定した最小の安定余裕 $d_{s0}=20\text{mm}$ の条件を満たした．つまり，4 足馬ロボットの平地での適応歩行実験において，歩行の安定性を確保できると分かった．

これらの実験結果への分析によって，4 足馬ロボットの適応歩行法を用いて，平地での安定な歩行が行えるとともに，健康増進機能の実現できることを確認した．

(2) 斜面を登る歩行実験

斜面を登る歩行実験においては，脚の歩行時間 $T_w=0.1T$ と $\Delta T_w=0$ を設定しており，遊脚の足先の運動を正弦曲線としている．斜面は，木の板により作られており，約 6° の傾斜角がある．これらの設定に基づいて，実験結果の一例として，図 6.16 から図 6.19 までに示している．

図 6.16(a)-(d)は，斜面での歩行ビデオから得た各脚の斜面での歩行様子である．この図によって，小型 4 足馬ロボットの各脚は，右後脚－右前脚－左後脚－左前脚の順序に従って安定に歩けることが分かる．図 6.17 のグラフは，歩行における胴体の姿勢角の変化曲線である．ロボットの胴体の実測したピッチ姿勢角は，斜面の

傾斜度を含んでいるので、計画した胴体のピッチ姿勢角より大きくなることが分かる。

図 6.18 のグラフは、斜面での歩行実験においての胴体の動きと計算した床反力中心の位置を示している。図 6.18 によって、右側脚と左側脚の歩行期での床反力中心は、それぞれ設定した目標位置(20,20)と(60,-20)を追従していると分かる。

図 6.19 のグラフは、斜面歩行においての床反力中心に基づく安定余裕の実測値を示している。この図によって、歩行における安定余裕は、ほぼ設定した最小的な安定余裕 $d_{s0}=20\text{mm}$ の条件を満たした。つまり、4 足馬ロボットの斜面での適応歩行実験において、歩行の安定性を確保できると分かった。

これらの実験結果の分析によって、4 足馬ロボットの適応歩行法を用いて、安定に斜面を登ることができるとともに、健康増進機能の実現できることを確認した。

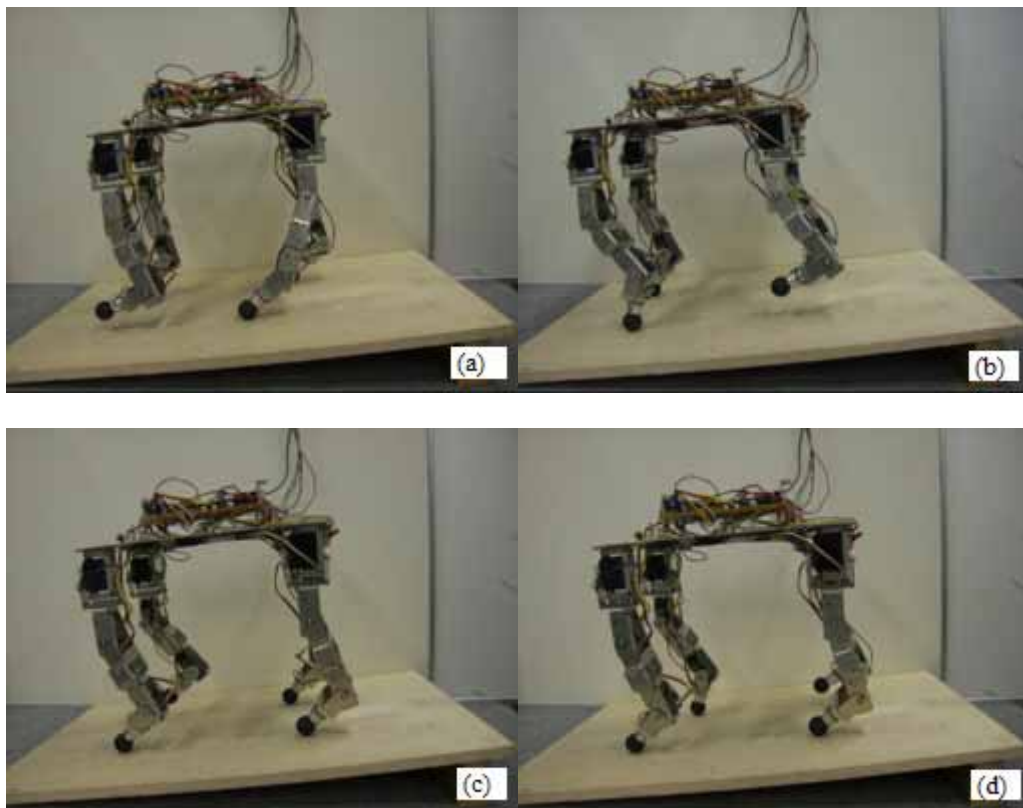


図 6.16 斜面を登る適応歩行実験における各脚の歩行の様子

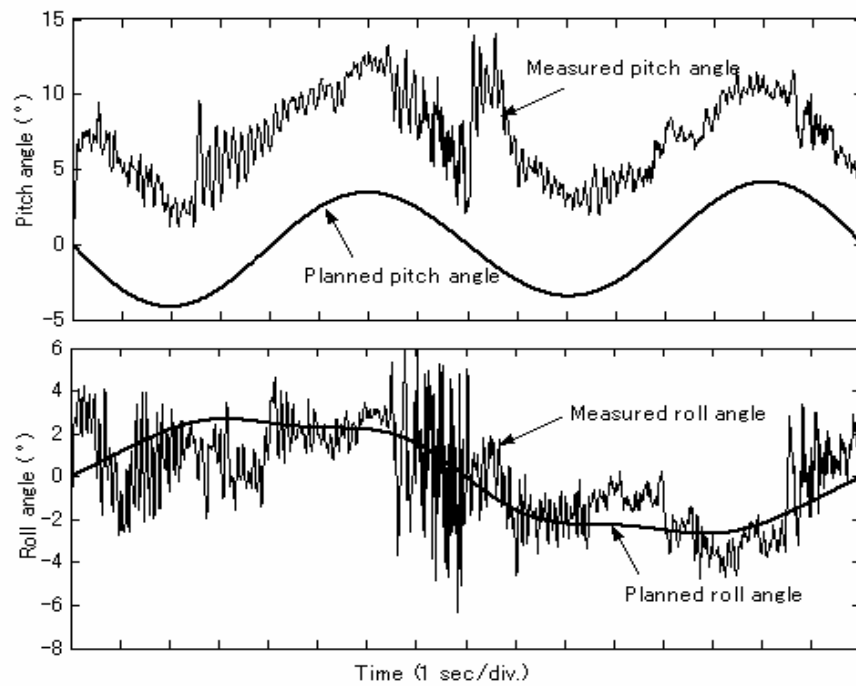


図 6.17 斜面を登る適応歩行実験における胴体の姿勢角

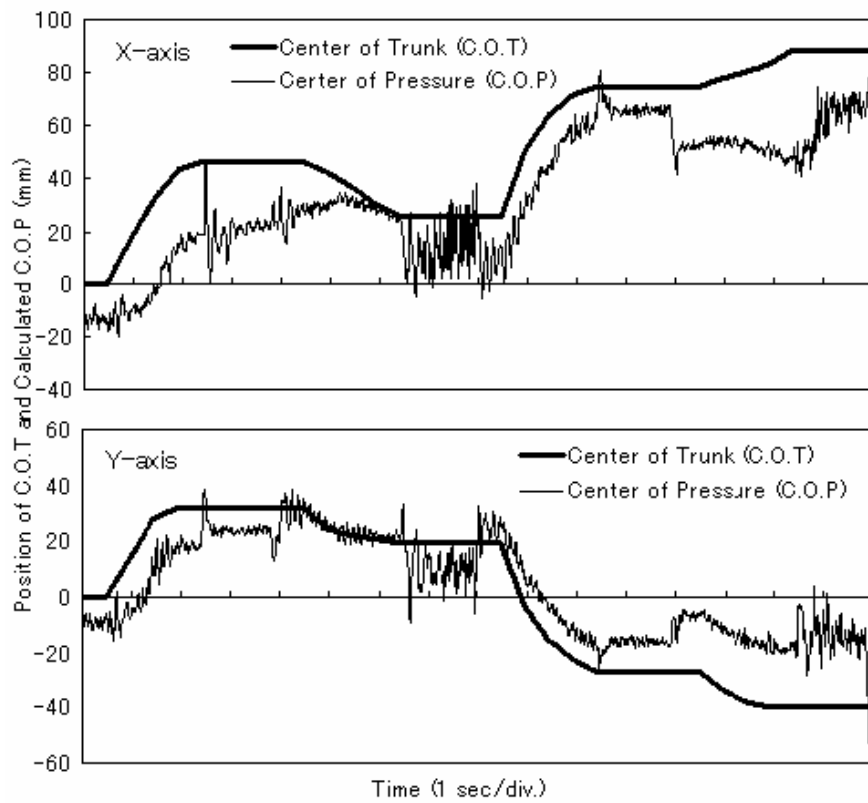


図 6.18 斜面を登る適応歩行実験における胴体中心と床反力中心

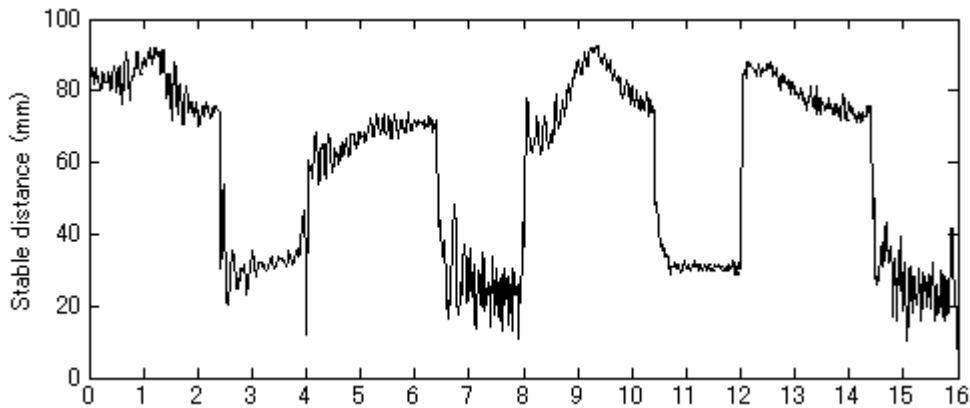


図 6.19 斜面を登る適応歩行実験における床反力中心の安定余裕

図 6.19 のグラフは、斜面歩行における床反力中心に基づく安定余裕の実測値を示している。この図によって、歩行における安定余裕は、ほぼ設定した最小的な安定余裕 $d_{s0}=20\text{mm}$ の条件を満たした。また、曲線における峰と谷は、それぞれ小型4足馬ロボットの支持期と歩行期を表している。

(3) 凹凸地面での歩行実験

凹凸地面での歩行実験においては、脚の歩行時間 $T_w=0.1T$ と $\Delta T_w=0.25$ を設定しており、遊脚の足先の運動を図 6.4 に示す歩行軌道としている。凹凸地面は高さ 25mm と 15mm の二つの障害物により構成されている。これらの設定に基づいて、実験結果の一例として、図 6.20 から図 6.22 までに示している。

図 6.20(a)-(h)は、凹凸地面での各脚の歩行の様子である。図 6.21 のグラフは、歩行における胴体の姿勢角の変化曲線である。この図によって、小型4足馬ロボットの胴体の姿勢角は設定した姿勢角に従って変化していることが分かった。図 6.22 のグラフは、凹凸地面での歩行実験において求めた安定余裕を示している。この図によって、凹凸地面での歩行の安定余裕は設定した最小的な安定余裕 $d_{s0}=20\text{mm}$ より小さくなる場合があるが、一定の安定余裕があることが分かる。

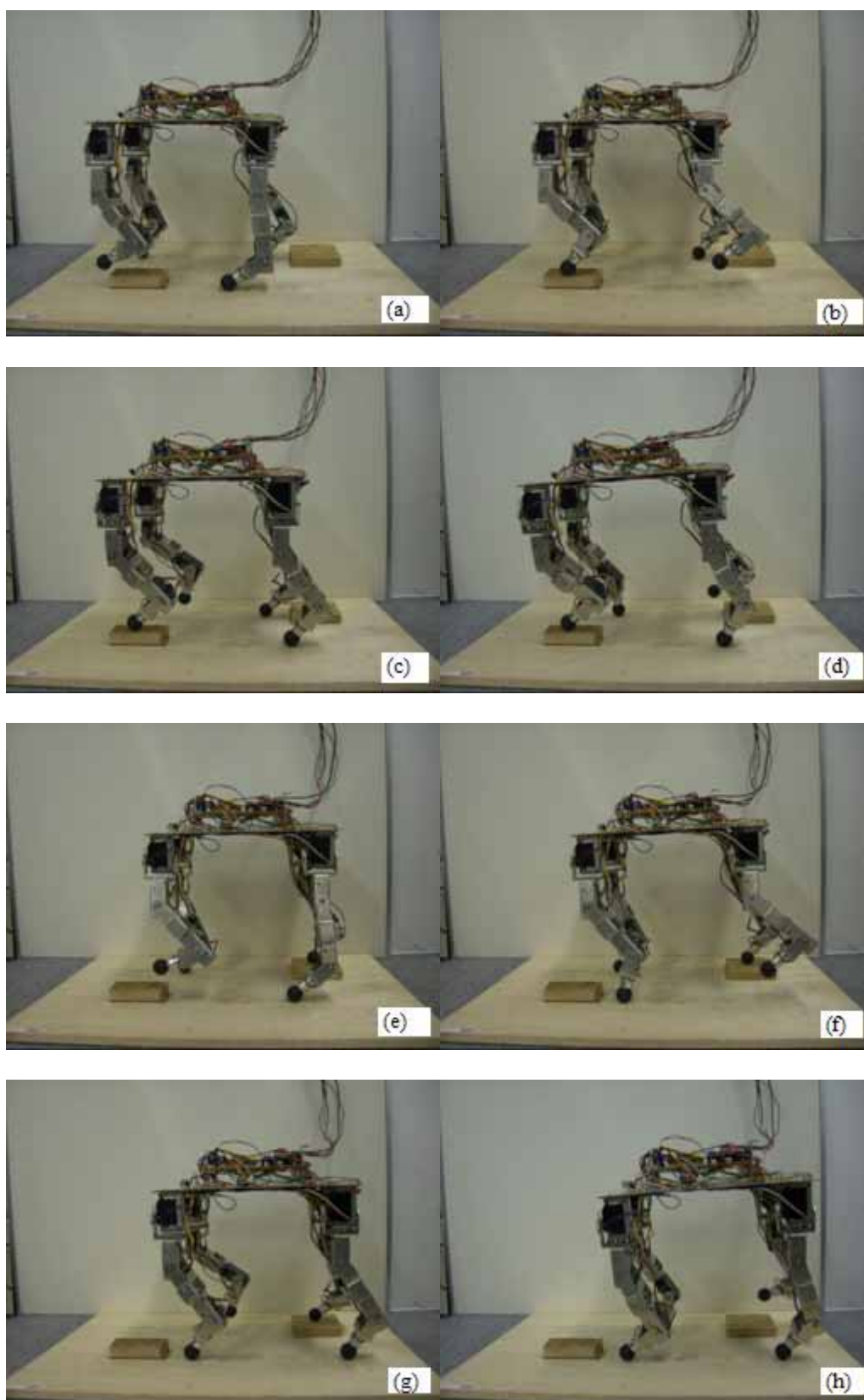


図 6.20 凹凸地面での二つの歩行周期内の各脚の歩行の様子

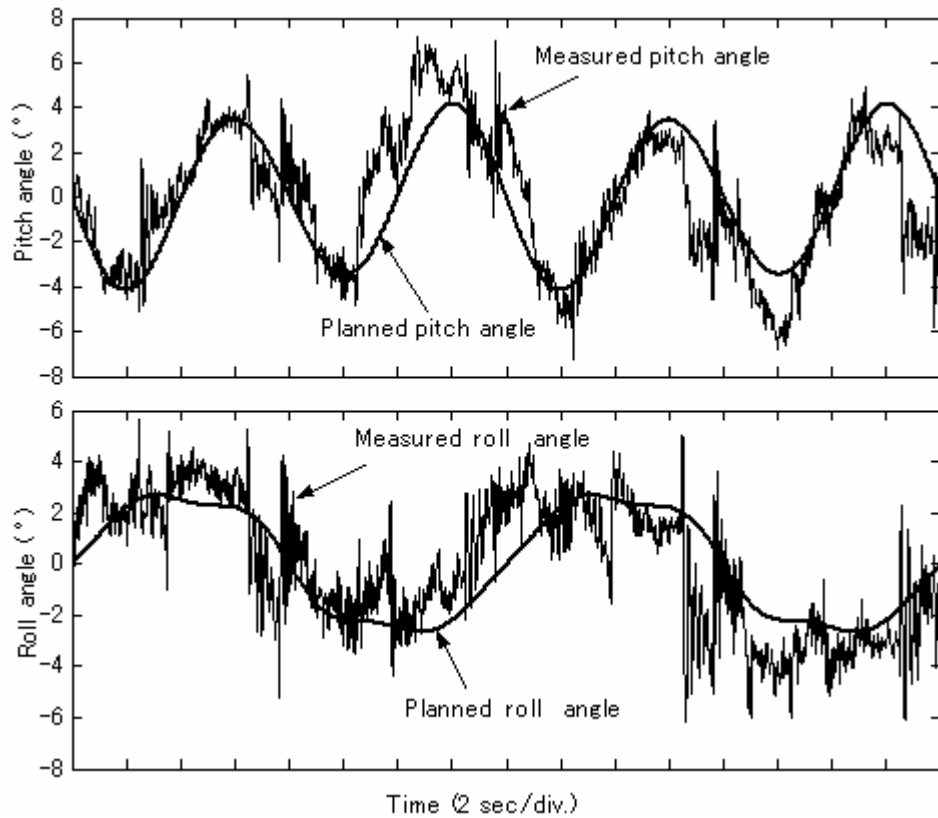


図 6.21 凹凸地面での二つの歩行周期内の胴体の姿勢角

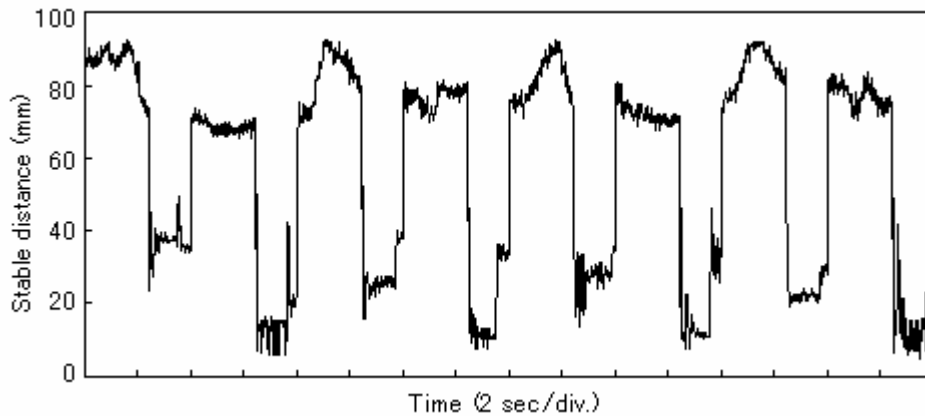


図 6.22 凹凸地面での二つの歩行周期内の安定余裕

これらの歩行実験によって、提案した4足馬ロボットの適応歩行法を用いて、平地、斜面と凹凸地面での安定歩行を実現できるとともに、健康増進機能を実現できた。そして、提案した適応歩行法の有効性を確認した。

6.5 まとめ

本章では、室外での自然環境で 4 足馬ロボットにより健康増進を行うために、室外での軽度不整地に対応できる適応歩行法を開発した。具体的に、まず地面状況や安定性の評価などに対していくつかの設定を行った。つぎに、軽度不整地の地面状況に応じて、遊脚の運動軌道の計画と床反力の検出値によって得られるリアルタイム調整により、遊脚の適応的な接地を実現した。健康増進機能の実現と歩行の安定性の確保を前提として、胴体の姿勢角運動を決め、検出した床反力中心から胴体の前後・左右運動をオンラインで決定する手法を提案し、健康増進を目的とする 4 足馬ロボットの適応歩行法を開発した。最後に、製作した小型 4 足馬ロボットを実験対象として、平面と軽度不整地と小斜面での歩行実験により提案した適応歩行法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] 安達弘典, 小谷内範穂, 中村達也, 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, 1991.
- [2] 福岡泰宏, 木村 浩: 4足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行——体性感覚・前庭感覚による調節——, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4, pp510-517, 2001.
- [3] 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.5, pp.1-12, 2003.
- [4] 竹村 裕, 上田 淳, 松本吉央, 小笠原 司, 神経振動子経由の左右揺動・姿勢調整反射を用いた4脚ロボットの三次元適応歩行, 日本ロボット学会誌, vol.22, No.4, pp.528-534, 2004.
- [5] A.Goswami, Foot rotation indicator (FRI) point: A new gait planning tool to evaluate postural stability of biped robots, In Int. Conf. On Robotics and Automation, 9(2): pp.47-52, Detroit, MI, may 1999.
- [6] 田中一男: アドバンスドフエジィ制御, 共立出版株式会社, 1994.

第7章 結論

第2章から第6章までにおいて、健康増進を目的とする4足馬ロボットの開発を目的として、構造モデルの設計や運動解析について検討して、平地歩行法と適応歩行法を提案し、製作した小型4足馬ロボットの歩行実験により提案した歩行法の有効性を確認した。結論とする本章では、まず本研究により得た成果をまとめて、それから今後の課題などを述べる。

7.1 本研究により得た成果

乗馬療法は、能動的運動法と違って、走っている生馬による他動運動から、騎乗者の多様な自動運動を誘発させる仕組みである。しかし、生馬に乗って行なわれるので、馬の飼養や場所の確保などの制限があるため、乗馬療法はやはり日頃気軽に実施できない。よって、何方も日頃気軽に健康を作られるために、生馬の欠点を克服し、乗馬療法の健康増進機能を目的とする乗馬ロボットの開発が望まれることになる。我々の研究グループは、Steward パラレル構造に基づいて、定位型乗馬ロボットを開発し、多量な実験を通して、馬の歩行パターンと健康増進効果との定量関係を見つけた。さらに、より良い健康増進効果を得るために、本研究は、自然環境でも使用できる健康増進用4足馬ロボットの開発を目的として、機械構造の設計と歩行法に関する基礎研究を行ったものである。以下、本論文における各章で得られた結論を整理する。

第2章では、ロボットで乗馬療法の健康増進機能を実現するために、乗馬療法の原理とメカニズムについて解明した。具体的には、まず乗馬療法の起源から身体

的・心理的健康増進効果について紹介した。次に、生馬の馬身運動と騎乗者の姿勢反射を総合的に考えて、簡略化した腰部のモデルを用いて乗馬療法のメカニズムを解明し、シミュレーションによりこのメカニズムの合理性を検証した。

第3章では、健康増進を目的とする4足馬ロボットの構造モデルを提案し、その運動解析を行った。具体的には、まず生馬の構造を参考にした4足馬ロボットの構造モデルを提案した。その後、提案した構造モデルに基づいて、4足馬ロボットの歩行における胴体の運動自由度を検討することで、健康増進機能の実現可能性を検証した。さらに、歩行制御の基礎となる4足馬ロボットの逆運動学計算式と運動方程式を導出した。

第4章では、健康増進を目的とする4足馬ロボットの構造パラメータの設定手法を検討し、小型4足馬ロボットを製作した。具体的には、まず騎乗の便利さと生馬の寸法を参考にして、4足馬ロボットの胴体の構造パラメータを設定した。その後、歩行における歩行効率を評価指標として、4足馬ロボットの脚の各リンクの最適な長さを求めた。そうして、提案した構造モデルの構造パラメータを設定することにより、研究対象とする4足馬ロボットを理論的に確立した。さらに、確立した4足馬ロボットを参考にして、低いコストと高い運動能力がある小型4足馬ロボットを製作した。製作したロボットは、確立された4足馬ロボットの約1/4の寸法であり、脚毎に3個、全体で12個の小型DCモーターがある。また、製作したロボットの胴体と足先には、それぞれ胴体の姿勢角を検出できる傾斜センサーと床反力を計測できる力センサーを装備している。

第5章では、4足馬ロボットの健康増進機能を実現できる適応歩行法を開発した。具体的には、まず乗馬療法における馬身運動を計測して、これにより、4足馬ロボットの胴体の姿勢角運動を決めた。次に、4足馬ロボットの歩行の安定性を分析することにより、一番高い安定性がある各脚の歩行順番を獲得し、遊脚の歩行軌道を計画した。そうして、健康増進を目的とする4足馬ロボットの平地歩行法を開発し

た．最後に、シミュレーションと小型4足馬ロボットの歩行実験により提案した平地歩行法の有効性を検証した．

第6章では、平地と凹凸不整地と斜面により構成された軽度不整地に対して、4足馬ロボットの健康増進機能を実現できる適応歩行法を開発した．具体的には、まず地面状況や安定性の評価などに対していくつかの設定を行った．つぎに、軽度不整地の地面状況に応じて、遊脚の運動軌道の計画と床反力の検出値によって得られるリアルタイム調整により、遊脚の適応的な接地を実現した．健康増進機能の実現と歩行の安定性の確保を前提として、胴体の姿勢角運動を決め、検出した床反力中心から胴体の前後・左右運動をオンラインで決定する手法を提出し、健康増進を目的とする4足馬ロボットの適応歩行法を開発した．最後に、製作した小型4足馬ロボットを実験対象として、平面と軽度不整地と小斜面での歩行実験により提案した適応歩行法の有効性を確認した．

7.2 今後の課題

本論文では、健康増進を目的とする4足馬ロボットの開発に当たって、機械構造の設計と歩行法に関する基礎研究を行った．また、提案した構造モデルと歩行法を検証するために、小型4足馬ロボットを製作した．これらの研究成果は、健康増進を目的とする4足馬ロボットを開発する基礎を構築した．今後では、本論文での研究の上に、人間を乗せることができる4足馬ロボットの開発に当たって、制御法の開発など研究に努力していきたいと考えている．

国内会議：

[1] 陶 衛軍, 王 碩玉, 河田耕一, 四宮葉一, 石田健司, 木村哲彦: 健康増進を目的とする四足歩行乗馬ロボットの開発, 第 9 回知能メカトロニクスワークショップ, pp.91-94, 2004.

[2] 陶 衛軍, 王 碩玉, 河田耕一, 四宮葉一, 石田健司, 木村哲彦: 姿勢調整を利用した四足歩行乗馬ロボットの歩行制御, 第 14 回インテリジェントシステムシンポジウム, pp.3-4, 2004.

[3] 陶 衛軍, 王 碩玉, 河田耕一, 四宮葉一, 石田健司, 木村哲彦: 馬ロボットの静歩行を目的とする安定性の定量化と姿勢調整法, 第 9 回日本知能情報ファジィ学会中国・四国支部大会, pp17-20, 2004.

[4] 陶 衛軍, 王 碩玉, 河田耕一, 四宮葉一, 石田健司, 木村哲彦: 強化学習による 4 足ロボットの安定歩行獲得, 第 10 回日本知能情報ファジィ学会中国・四国支部大会, pp.7-10, 2005.

[5] 陶 衛軍, 王 碩玉, 河田耕一, 四宮葉一, 石田健司, 木村哲彦: 強化学習による 4 足ロボットの安定歩行獲得, 中国四国支部第 44 総会・講演会論文集, NO.065-1, pp.439-440, 2006.

国際会議：

[6] Weijun Tao, Shuoyu Wang, Koichi Kawata, Youichi Shinamiya, Kenji Ishida, Tetsuhiko Kimura : A Learning Method for Stable Walking of a Quadruped Robot, SICE Annual Conference 2005, pp.1181-1186, August in 2005, Okayama in Japan.

謝 辞

本論文は筆者が高知工科大学大学院工学研究科基礎工学専攻博士後期課程において行った研究をまとめたものである。

本研究に貴重な機会を下さり、種々な御援助を筆者に与えて下さるとともに、始終御指導を下さった高知工科大学知能システム工学科 王碩玉教授に対しては心から深く感謝致します。

本研究における健康増進の基礎を構築した四宮葉一氏に深く感謝致します。本研究においてロボットの開発やプログラムの開発をお手伝頂いた松浦君に感謝致します。

日頃、御検討御協力を頂いた大学院生や学部生の多くの方々、学会発表や論文査読の場などにおいて御討論や御助言を頂きました方々に深く感謝致します。

また、筆者の中国華中科術大学大学院機械工学専攻修士課程において種々な御指導を頂き、留学の機会を与えて下さいました呉昌林教授に対しては心から深く感謝致します。

最後に、筆者の研究に御理解を示し、始終支援をしてくれた家族に心から深く感謝致します。