

JAERI - M
93-253

ZMPの動的監視に基づく
2足歩行ロボットの制御法

1994年1月

久米 悦雄

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ㈱原子力資料サービス

ZMPの動的監視に基づく2足歩行ロボットの制御法

日本原子力研究所東海研究所情報システムセンター

久米 悦雄

(1993年12月13日受理)

日本原子力研究所情報システムセンターでは、原子力知能化システム技術の研究の一環として、1987年からHASP(Human Acts Simulation Program)と題する研究を進めており、HASPでは、原子力プラントにおける巡回点検人間形知能ロボットの研究開発を行っている。HASPの目的の一つに、2足歩行移動機構の設計研究があり、現在、多様な歩行パターン生成の動力学的検討を進めている。

従来の2足歩行制御法であるプログラム制御は、予め設定されたパターンで歩行を行なうため、歩行中のロボットに対する予期できない外乱などの動的な変化に頑強に対処できない。このため、歩行パターンの多様化高度化には、プログラム制御ではなくロボットの歩行中の状態を動的に検出し、これに基づいて安定化を行なうリアルタイム制御法が必要である。本研究では、このリアルタイム制御法の一つとしてZMP情報に基づく2足歩行制御法を提案する。本報告において新たに開発した制御法と、この制御法のシミュレーションによる妥当性の検証と考察について述べる。

Control Method for Biped Locomotion Robots Based on ZMP Information

Etsuo KUME

Computing and Information Systems Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 13, 1993)

The Human Acts Simulation Program (HASP) started as a ten year program of Computing and Information Systems Center (CISC) at Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) in 1987. A mechanical design study of biped locomotion robots for patrol and inspection in nuclear facilities is being performed as an item of the research scope. One of the goals of our research is to design a biped locomotion robot for practical use in nuclear facilities. So far, we have been studying for several dynamic walking patterns.

In conventional control methods for biped locomotion robots, the program control is used based on preset walking patterns, so it does not have the robustness such as a dynamic change of walking pattern. Therefore, a real-time control method based on dynamic information of the robot states is necessary for the high performance of walking. In this study a new control method based on Zero Moment Point (ZMP) information is proposed as one of real-time control methods. The proposed method is discussed and validated based on the numerical simulation.

Keywords: HASP(Human Acts Simulation Program), Biped Locomotion, Robot, ZMP(Zero Moment Point), Design, WL-12RV, Compensative Motion

目 次

1. はじめに	1
1.1 研究の目的	1
1.2 2足歩行ロボット研究の現状	2
2. 2足歩行制御方式	17
2.1 ロボット・モデル及び運動方程式	17
2.2 ZMPの動的監視に基づく制御法（直進完全歩行）	19
3. 制御法の妥当性の検証	29
3.1 基準データの決定（リンク径）	29
3.2 シミュレーション	29
4. おわりに	53
謝 辞	54
参考文献	55
付録A 歩行安定化補償動作の計算（直進定常歩行）	59
付録B 歩行実験	80

Contents

1. Introduction	1
1.1 Objectives	1
1.2 Recent Studies for Biped Locomotion	2
2. Control Method for Biped Locomotion	17
2.1 Biped Locomotion Robot Model and Equation of Motion	17
2.2 Control Method	19
3. Simulation of Biped Locomotion Robot	29
3.1 Determination of Bodies Data	29
3.2 Results of Simulation	29
4. Concluding Remarks	53
Acknowledgement	54
References	55
Appendix A Calculation of Compensative Motions	59
Appendix B Walking Experiments	80

1 . はじめに

1. 1 研究の目的

日本原子力研究所（以下、原研）では、原子力知能化システム技術の研究の一環として、1987年からHASP(Human Acts Simulation Program)と題する人工知能とロボティクスに関する研究を進めている^{1)~4)}。HASPでは、原子力プラントにおける巡回点検用人間形知能ロボットの研究開発を行っており、巡回点検のためのセンシング・システムを搭載した、2足歩行ロボット・システムの実現を目指している。この研究は人間形知能ロボットが日本語で与えられた作業命令から、意味を理解し、自己の行動を計画し、装置や機器が保有する情報を用いてプラント内の巡回点検を遂行するものである。本報告では、この人間形知能ロボットの移動機構を構成する2足歩行について報告する。

2足歩行に関する研究は、ロボットの本来持つ不安定性や機構の複雑さ制御の難しさなどから、実用化は困難であるとされてきた。しかしながら、近年のめざましいマイクロ・エレクトロニクスの発達により、いくつかの研究機関で2足歩行ロボットの研究を取り上げ、実験室レベルでごく基本的な歩行ではあるが、実際のロボットにより2足歩行を成功させている。本来、人間形ロボットの産業界への有効性は非常に高く、我々が対象とする原子力プラントにおいても、現在のプラントが多くの場合人間の存在（人間による保守・点検）を前提に作られているため、これら作業のロボットへの置き換えは人間形が最も適している。また、脚による移動は従来の車輪やクローラ・タイプと比べて、障害物回避や地形の変化に対する対地適応性が高い。さらに、ロボットが人間形であることは知能ロボットのための知識ベースを構築しやすく、ロボットへの作業の教示や指示が容易であるなどのすぐれた利点を持っている。

我々の研究の目的は、このプラント内巡回点検用人間形知能ロボットの設計であり、はじめに設計に有用なソフトウェアの開発を行っている^{5)・6)}。即ち、2足歩行をハードウェアで実現する前に、数値シミュレーションによってロボット設計パラメータの考察を行い、歩行安定性を十分に検討する。次にこの結果を基にプロトタイプ・モデルの試作を行い、シミュレーション・モデルの妥当性及び制御性の検証、ハードウェア上の問題点及び知能化の検討を行う。そして、統合化した人間形知能ロボットの設計を行うものである。

これまでに設計に有用なシミュレーション・ソフトウェア開発の観点から、直進定常歩行に関して、種々のタイプの補償動作の計算法を示してきた。しかし、この手法に代表されるような、従来の2足歩行ロボットの制御法は、事前のシミュレーションによって安定歩行パターンを解析し、それをプログラム制御することでロボットを歩行させるものであり、ロボットと環境との相互作用が予め分かっている必

要がある。特に、ロボットが歩行中に自身の状態（状況）を的確に把握し、それに基づいて歩行安定化制御をしているのではないため、予期できない外乱等には対処できない。また、安定歩行のための補償動作の計算は、非線形の微分方程式の初期値問題を定常歩行という仮定の下に周期解として扱っているため、解析対象とすることができる歩行パターンは限定される。さらに初期値問題に対する収束計算が必要であり、計算コストの増大など、多くの問題を持っている。

そこで、我々は、歩行パターンの多様化・高度化には、これまでのようなプログラム制御ではなく、ロボットの状態を検出しこれを基に安定化を行うリアルタイム制御法が必要であると考え、今年度新たにリアルタイム2足歩行制御法を提案した。本報告ではこの新たに開発した制御法と、この制御法のシミュレーションによる妥当性の検証、そして問題点及び今後の方針について述べる。また、これまで取り上げてきた安定動作解析法（制御法）について付録Aにまとめておく。

なお、本報告の内容は著者が平成3年11月から1年間、早稲田大学加藤研究室において実験研究に従事していた時に行った研究をまとめたものである。また、付録Bには歩行実験により得られた知見について記述する。

1. 2 2足歩行ロボット研究の現状

1. 2. 1 早稲田大学

(a) 研究の概要

2足歩行ロボットに関する研究は国内の大学を中心にいくつかの研究機関で行われている。その中でも先駆的役割を果たしてきているのが、早稲田大学である。早稲田大学においては、1966年より2足歩行ロボットの研究が開始され、数多くの研究成果を上げ現在に至っている。Table 1.1は、これまで早稲田大学が発表した油圧駆動方式による重量モデルWL (Waseda Leg) シリーズについての論文をまとめたものである^{1)~34)}。

早稲田大学では、2足歩行を機械モデルにより実現することで、人間の歩行メカニズムを工学的視点から解明することを目的としており、静歩行に始まり準動歩行、動歩行へと歩行形態もより人間に近いものが実現されている。現在では、一連のWL-12シリーズによって直進完全動歩行のみではなく、歩行中にロボットに作用する既知及び未知の外乱を補償しながらの歩行も可能になっている。また、1992年にはWL-12RVによって、2足歩行ロボットの最速記録である、0.3[m/step]、0.54[s/step]の高速歩行も実現³⁵⁾している。Fig. 1.1はこのロボットの制御方式の概略を示したものである。ロボットは歩行前に、予め歩行パラメータから歩容、安定領域、ZMP軌跡を決定し、これらを基に上体による補償動作を算出し、安定歩行パターンを作成しておく。通常はこの安定歩行パターンを基に、各関節の位置に関するローカル・フィードバック制御を行いながら、ロボットをプログラム制御し歩行させる。しかし、ロボットに未知の外乱が作用した場合は、力センサからの外

力情報を基にトランスピュータによって補償動作を高速に演算し、外力に対する補償を行うものである。

また、平成4年度においては、以下の3つのテーマの下に研究が進められている。

(1) 環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究

遊脚接地時の衝撃力をハードウェアの改良により緩衝する能力を持たせる。足底板の開発及びその制御方式の開発。未知の路面形状に対する適応歩行を目指す。但し、階段や障害物のある不整地ではなく、僅かな凹凸やうねりのある路面に対する補償や接地状況に応じた補償をリアルタイムで行うものである。

(2) 2足歩行ロボットの学習制御に関する研究

歩行安定化の機能を下肢の運動にも持たせる。歩行安定化を下肢軌道の繰り返し学習によって実現する。また、最適下肢軌道計画についても検討を行う。このための学習アルゴリズムの開発。学習は理論面からだけではなく、実際の歩行実験を繰り返すことによっても行う。

(3) 2足歩行ロボットの補償動作の学習

歩行中のZMP軌跡が安定領域を外れる歩行を対象とした、歩行の安定化のための上体補償動作の学習。ロボットを人間の介助によって歩行させ、このとき人間が行った介助動作(ロボットに作用した力・モーメント)を繰り返し学習し、安定歩行の実現を目指す。ロボットにハンドルを取り付け、6軸力センサにより介助情報を得る。オフラインの学習。

(b) WL-12シリーズ文献調査(修論・卒論)

(1) 江草 洋：環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究 - 上体補償型動歩行の実現 -，早稲田大学昭和61年度修士論文³⁶⁾。

WL-12シリーズの最初のモデル開発。はじめは殆どの部材をCFRPで作成していたため歩行中のたわみが大きかったが、上体補償型の2足歩行ロボットの有効性は十分に確認された。0.3[m/step]，2.6[s/step]動完全歩行の実現。

(2) 栃沢 守：環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究 - 既知の外力下での歩行の実現 -，早稲田大学昭和62年度修士論文³⁷⁾。

WL-12の剛性不足対策。外力発生装置の開発。既知の外力に対する補償動作を行いながらの歩行。10[kgf]矩形・台形状の外力下，0.3[m/step]，1.3[s/step]動完全歩行の実現。

(3) 武谷 明知：環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究 - 未知の外力に対応した2足歩行制御方式の開発 -，早稲田大学昭和63年度修士論文³⁸⁾。

外力作用位置・方向については既知，大きさ・形状・期間・時刻について未知とした外力に対する補償動作を行いながらの歩行。その制御方式の提案と予備実験。この段階ではコンピュータの処理速度が遅く，リアルタイムで外力に対する補償動作の計算はできない。

(4) 唐木 英行：環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究 - 未知の外力に対する適応歩行の実現 -，早稲田大学平成元年度修士論文³⁹⁾。

WL-12RⅡのコンピュータの処理速度改善にトランスペュータを採用し、大きき100[N], 時間幅0.3[s]の矩形の未知外力下での足踏み0.64[s/step]を実現した(リアルタイム制御)。

(5) 林 憲玉：2次元非平坦路における上体補償型2足歩行制御方式の研究，早稲田大学平成元年度修士論文⁴⁰⁾。

2次元非平坦路での歩行制御方式の開発。階段0.1[m]上り・下り2.6[s/step], 斜面±10[deg]を含む路面での1.6[s/step]動完全歩行を実現。

(6) 桑田 真宏：環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究 - 横方向の未知外力に対する適応歩行の実現 -，早稲田大学平成2年度修士論文⁴¹⁾。

昨年度対象とした後方からの未知外力を横方向からのそれに変えての適応歩行を試みた。WL-12RⅢの股部にロール軸回りの自由度を付加。これにともない足部に受動的自由度(ロール軸)を設ける(WL-12RⅣ)。100[N], 時間幅0.16[s]の横方向からの未知外力下で0.64[s/step]の足踏み歩行の実現。

(7) 岸 光一：6軸力センサを用いた2足歩行ロボットのZMP測定，早稲田大学平成2年度卒業論文⁴²⁾。

計算モデルと実際のロボットとのパラメータ値の誤差や，計算モデルに含むことのできない構造部材のたわみやガタのため，設定ZMPと実測ZMPとの間にズレがあることを指摘した。そのため6軸力センサを用いたZMP測定システムを開発し，歩行中の実測したZMPを利用した一つの制御方式として，学習制御を行った。学習制御については次の文献で述べられている。

(8) 李 清華：2足歩行ロボットの学習制御に関する研究 - 上体補償軌道の学習アルゴリズム -，早稲田大学平成2年度修士論文⁴³⁾。

従来の手法から上体の補償動作を算出し，この設定歩行パターンにより第1回目の歩行を行い，このときの設定ZMPと実測ZMPとの偏差を利用して新たな設定ZMPを求める。このZMPに対する上体の補償動作を算出し，第2回目の歩行を行い実測ZMPを得る。以上を繰り返すことで上体補償軌道の学習を行っている。偏差の収束性についてはシミュレーションによって確認している。

(9) 寸土勸：上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの研究，早稲田大学平成3年度修士論文⁴⁴⁾。

昨年度までは，上体運動によるピッチ・ロール軸まわりのモーメントのみの補償動作を行っていたが，歩行の高速化や外力補償歩行を行うに当たりヨー軸まわりの滑りが歩行安定性を妨げるという問題点が生じてきた。このため，従来までのロボットにこのヨー軸まわりのモーメントの補償機能を付加し，適応歩行の実現を行った。ヨー軸モーメント補償機構はWL-12の上体おもりを2分し，アーム先端に取り付けたこれらのおもりをヨー軸まわりに回転して偶力モーメントを発生させるものである。改良した2足歩行ロボットWL-12RVにより，従来まで実現できなかった，歩行しながらの未知外力補償及び歩行の高速化が達成された。

外力補償時：0.64[s/step], 0.1[m/step],

外力：100[N]（後方から，作用時刻は任意），時間幅0.18[s]
 高速歩行時：0.54[s/step]，0.3[m/step]（2.0[km/h]）

1. 2. 2 その他の研究機関（文献調査）

（a）国内2足歩行ロボット関連

近年の国内における2足歩行ロボット研究をTable 1.2にまとめる^{44)~52)}。国内では大学を中心として，いくつかの研究機関で研究が行われているが，研究の内容は早稲田大学が最も進んでおり，前節で述べたとおりである。その他の研究機関では，電通大や機械技研などが実際に動歩行を実現している。

電通大においては，早稲田大学と同様に人間形のロボットを対象にしており，制御工学及びロボット工学の立場から2足歩行を研究し，より人間に近い自然な歩行を2足歩行ロボットで実現することを目的としている⁵²⁾。機械技研においては非人間形の2足歩行ロボットを用いており，動的な2足歩行を機械システムによって実現することを目的としている⁵¹⁾。

（b）国外2足歩行ロボット関連

2足歩行ロボットに関する研究は国内の大学や研究機関などが多く，国外での研究は数少ない。国外で2足歩行ロボットの研究を行っているのは，Y.F. Zheng（クレムソン大学，現オハイオ州立大学）らのグループ^{53)・54)}，M.H. Raibert（CMU，現MIT）らのグループ^{55)~57)}などが主たるところで，その他にG. Bartolini（Univ. of Geona, Italy）らのグループ⁵⁸⁾やM. Cotsatis（INSTN, France）らのグループ⁵⁹⁾などがある。Y.F. Zhengらのグループは身障者の車椅子置き換えを目指しており，比較的人間形に近い。M.H. Raibertらのグループはホッピング型のロボットで，歩行と言うよりむしろ跳躍である。他に1本脚や4本脚のものもある。そのほかの研究はシミュレーションや2次元歩行，静歩行に関するものである。以下にこれらの論文のいくつかの抄訳を示す。

(1) Y.F. Zheng, et al.: On the Study of the Multiple Joint Biped Robots, Kernforschzent Karlsruhe, PP.133-152, 1987⁵³⁾。

2足歩行ロボットの静的な直立安定性と動歩行について考察し，クレムソン大学で開発した2足歩行ロボットSD-1，SD-2の設計仕様について述べている。

直立安定性については，安定マージン及び安定指標の2つを提案し，これを最適化する。この結果，最適安定性を重心をできるだけ低くし，重心を支持面の中央におくべきだとしている。また，動歩行については基本的な考え方は重心の床面へ正射影が足底安定領域内に入るように制御するもの（静歩行）であるが，立脚切り換え期に重心の床面へ正射影が安定領域をはずれる歩行であり，このときの衝撃力についての考察から安定歩行の運動制御アルゴリズムの開発を行っている。

この文献でも2足歩行ロボットの有効性を以下のように述べている。全文を記す。

Since many industrial environments were originally created for human operators, biped robots could be used to replace human beings in many

applications without any modification to the original set up that required a certain amount of operator mobility. This makes the biped robot very attractive for use in future automated manufacturing.

(2) Y.F. Zheng, J. Shen : Gait Synthesis for the SD-2 Biped Robot to Climb Sloping Surface, 1990⁵⁴⁾.

9リンク, 8DOFモデル, 全長約90[cm], 1.0[s/step], 12.7[cm/step]

平地から斜面(上り)への直接歩行が可能, ロボットの重心を支持脚の安定領域内に保持する(静歩行)

(3) J. Hodgins, J. Koe, M.H. Raibert : Running Experiments with a Planar Biped, Rob Res 3, PP. 349-355, 1986⁵⁵⁾.

ホッピング・タイプの2足歩行ロボット. ロボットの制御を, バウンス(鉛直方向の跳ね上がりの高さ), ボディの姿勢(直立を維持), 前進の走行(running)速度の3つに分け, それぞれ独立に制御している. 歩行はTether Boom(支持棒)によって支持されており2次元である. 前進・後退・上下運動が行える. このロボットはどちらかと言うと2足歩行ロボットと言うより, 1足ホッピング・ロボットの拡張型で, カンガルーがジャンプするとき尻尾を足と逆方向(前)に出して, うまくピッチングをコントロールしているように, ジャンプする脚と他方の脚との調和で歩行(走行)するもので, 実際に1本足で1.5[m/s]であった歩行が, 2足では4.1[m/s]にまで高速化している. なお, 歩行中に両脚支持となることはない(但し, のちの論文でflip[空中回転]に成功しており, この場合は両脚支持期が存在する).

ロボットのハードウェアは, 腰部に油圧のアクチュエータと脚部に油圧駆動によるエア・スプリング(脚は伸縮自在)を持ち, フレームはアルミニウムでコンピュータ・インタフェースを搭載する. センサは脚の長さ, アクチュエータの角度・角速度, エア・スプリングの圧力, 足の接地, ボディのピッチ角の情報収集を行う. また, ケーブルが付随しており, これにより油圧, 空気, 電力等の供給を行っている.

(4) H.B. Brown Jr, M.H. Raibert : Legs that Deform Elastically, RoManSy 6, PP. 436-443, 1987⁵⁶⁾.

弾性を持つ脚機構の設計と開発(1本脚). 弾性エネルギーの貯蔵については, そのエネルギーと重量比から, スチール, グラスファイバー, ゴム, ガス圧縮について比較し, ガス圧縮が優れているとしている. 機構面ではテレスコピックな脚の場合, その重量が重くなること, 機構が複雑で脚の長さを計測する特別なセンサが必要など欠点が多く, 関節脚ではつま先の動きが脚の軸方向と一致しない等の欠点を上げ, 脚回転(腰部)用油圧アクチュエータを持つエア・スプリング(制御が簡単である)による独自のホッピング・マシンを開発している.

(5) J. Koechling, M.H. Raibert : How Fast Can A Legged Robot Run?, ASME DSC, 11, PP. 241-249, 1988⁵⁷⁾.

脚式移動ロボットの歩行速度に関する論文. 速さはロボットのパフォーマンスの

尺度であると述べ、歩行速度を限定するパラメータについて考察している。ここでは、"dependency tree" を考案し、歩行速度を決定する各パラメータのつながりをツリー形式で記述している。これらの考察を基に2本脚のホッピング・ロボットの高速化実験を行っている。

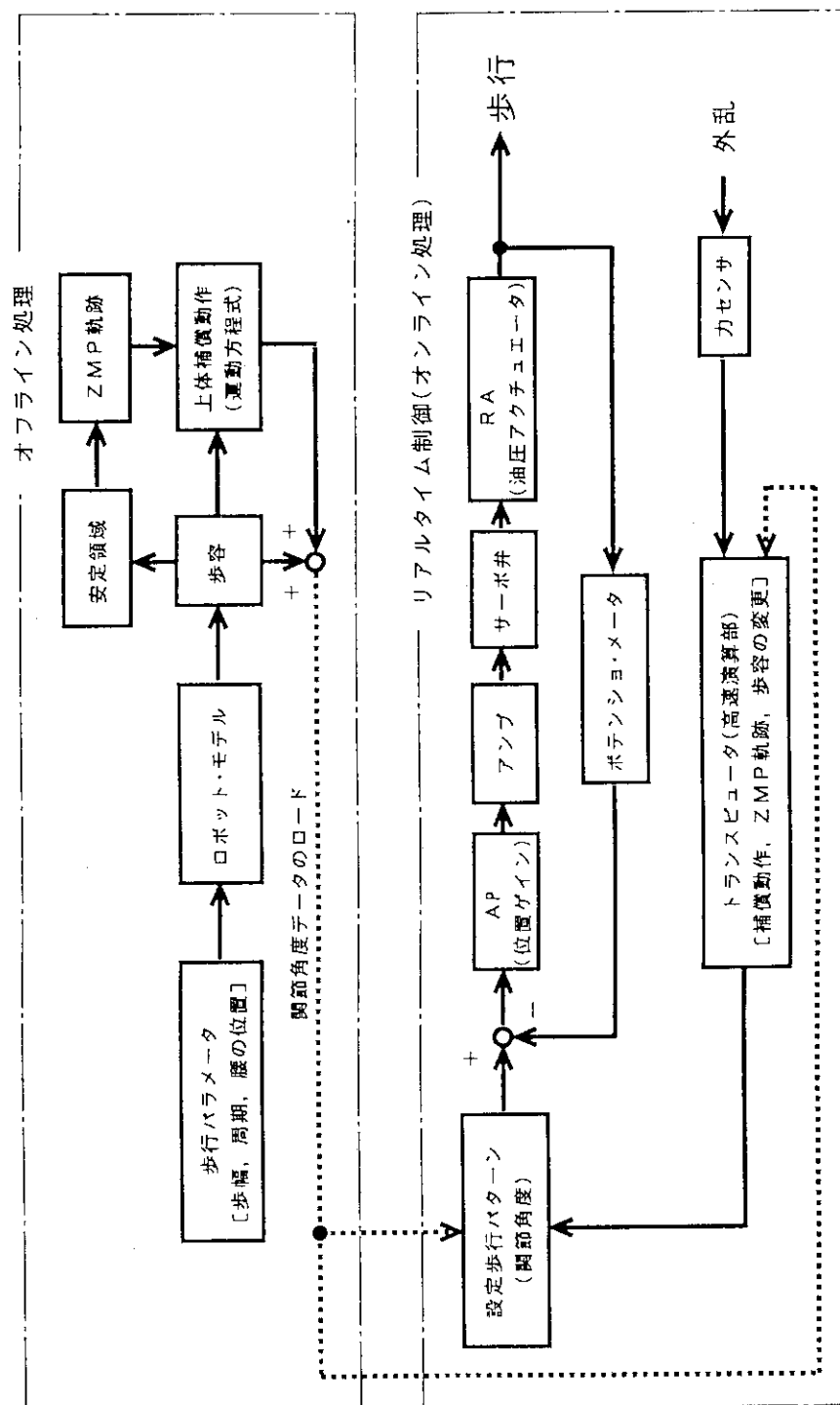


Fig. 1.1 Block diagram of control method for WL-12RV.

Table 1.1 Studies for biped locomotion at Waseda University.

1 / 6

ロボット名	開発年度	関連論文	特 徴						問題点 (今後の開発課題)		
			自由度 DOF	重量 kg	身長 cm	歩幅 cm	速度 s/step	ハードウェア 構造部材, アクチュエータ, センサ, 制御系		歩行形態	制御方式 補償動作 機械モデル 改良点 等
WL-5	S. 47	①2足歩行機械WASEDA LEG-5, 第11回SICE学術講演会 ②2足歩行ロボット(WABOT-1)の開発, 材料科学42	11	130	125	15	45	①高力アルミニウム合金 ②電気油圧式モータ 直動型油圧シリンダ・弁・制御系を三角リフトで構成 ③肘・肩・腕・股関節角度, 7自由度 ④CPUによる7自由度の検出 →格納・出力, 入力回路, 出力回路; 電気油圧式系, 状態検出	①単脚支持時の運動に限定してZMPが, 足底面内を通過して前方へ円滑に移行する歩行方式 ②脚部剛体系 ③上体有り(補償動作のためではない)	①構造的安定性(重心が常に支持足裏面内にある) ②上体有り(補償動作のためではない) ③設定歩行モードによる7自由度制御	①機械モータの重量が非常に大きい ②電気-油圧式系が目撃で止まらず発振現象を起こす ③歩行モードの作成は人間が試行錯誤によって選定するため, 労力を要する
WL-6D	S. 49	①2足歩行機械の動的歩行に関する解析, 第13回SICE学術講演会	-	-	-	-	-	①FRP(足本体) ②電気油圧式モータ ③肘・肩・腕・股関節角度, 圧力センサー検出	①進行方向内での運動に限定してZMPが, 足底面内を通過して前方へ円滑に移行する歩行方式 ②脚部剛体系 ③上体有り(補償動作のためではない)	①歩行速度が速い時にZMPの移行を円滑にするために, 上体部の補償動作を加味する ②圧力センサーからの情報をを用いてZMPを直接求めるアルゴリズムを設計する	
WL-8D	S. 53 ¹⁾	①油圧式2足歩行機械による準動歩行の研究, 材料科学45	12	65	144	20	7	①高力アルミニウム合金, CFRP(補強) ②電気油圧式モータ 直動型複動油圧シリンダ・弁 ③肘・肩・腕・股関節角度, 7自由度傾斜計, ポットの傾き, 床反力センサー ④階層構造: 歩容の選択(上位), 歩容制御(中位), 位置制御機構(下位)	①単脚支持期: 上体の動作を利用したZMP制御(上体の補償動作は設定ZMPと実際のZMPとの偏差に比例, 比例定数は実験から算出) 立脚切換え期: 倒立振り子モデル, 他脚の安定領域によって立脚の切換え(位相面解析) ②剛体系 ③設定歩行モードによる7自由度制御	①立脚切換え期において前頭面に, 安定領域に復帰する歩容が存在しない ②足底面(安定領域)が小さい	

¹⁾ 機械モータの開発はS. 50

Table 1.1 cont.

2/6

ロボット名	開発年度	関連論文	特 徴						問 題 点 (今後の開発課題)		
			自由度 DOF	重量 kg	身長 cm	歩幅 cm	速度 s/step	ハードウェア 構造部材, プログラム, センサ, 制御系	歩行形態	制御方式 補償動作 機構モデル 改良点 等	
WL-9DR	S. 55 ²⁾	①2足歩行機構の研究, 片岡 1986 ②2足歩行機構の研究, 片岡 1986	10 片脚:5	40.7	100	45	9	①CFRP, 高力アルミニウム合金 ②電圧油圧シリンダ ③複動型油圧シリンダ ④シリンダ: 関節角度, コレクタ : 関節角速度, 姿勢: 足首部トルク, マクローイッチ: 接地情報 ④階層構造: プログラム開発(上位), 0 ネット制御(中位), 位置フィードバック (下位)	準動歩行 平均台型歩行	①歩行全周期にわたり倒立振り子行 ル(位相面解析) ②設定歩行パターンに系の逆特性をた たみこみ補正(追従性向上) ²⁾ ③単脚支持期: 動的に動かす 立脚切換え期: 静的, 重心軌跡 を前足の安定領域に収束させる ④剛体系 ⑤下肢のみ ⑥設定歩行パターンによるプログラム制御	①逆脚の接地時の衝撃力 の影響(不安定要素) 安定点に収束するまで に時間がかかり, なめら かな足の切り換えができ ない
WL-9DRmk II	S. 56 ²⁾	①足首部にトルク制御機能を付加 した2足歩行機構による準動歩 行の研究, 第3回MIRA学会学術 講演会 ②2足歩行ロボットによる準動歩行 , 日本ロボット学会誌1巻3号	10 片脚:5	40.7	100	45	6	WL-9DRと同じ	準動歩行 平均台型歩行	①WL-9DRにおける問題点①解決: 足首部のトルクフィードバック制御により, 足首部に柔軟性を持たせる ②単脚支持期: 設定歩行パターンによ るプログラム制御(静的) 立脚切換え期: 接地状況により 足首部の制御状態を切換えるシナン ス制御(動的)	(準動歩行の完成)
WL-10R	S. 59	①THE REALIZATION OF PLANE WALKING BY THE BIPED WALKING ROBOT WL-10R, ROMANSY	12 片脚:6	80	144	45 15 20	4.8 15 20	下段WL-10DR参照	準動歩行 完全歩行 面歩行(静歩行) 側方 転回:90°	①WL-9DRmk IIと同じ ②転回: 重心移動相(両脚支持で の重心移動), 転回相(3-軸まわりの回転, 重 心ずれ補正) ③側方: 単脚支持相(逆脚を側方 に移動, 重心ずれ補正), 重心移動相(両脚支持での重心 移動) ④歩行パターン作成支援プログラムの開発	①動歩行

²⁾ WL-10DRの文献①による, ³⁾ この方法はWL-10DR等においても採用されている, ⁴⁾ 歩行パターンの自動生成を行う, S. 62までにより高度なWALK MASTER-4を開発している

Table 1.1 cont. 3 / 6

ロボット名	開発年度	関連論文	特						徴			問題点 (今後の開発課題)
			自由度 DOF	重量 kg	身長 cm	歩幅 cm	速度 s/step	ハードウェア 構造部材, ソフトウェア, センサ, 制御系	歩行形態	制御方式 機構モデル 改良点 等		
WL-10RD	S. 60	①足歩行ロボットのWL-10RDによる動歩行の実現, 日本ロボット学会誌 3巻4号 ②上体補償機構を有する2足歩行ロボットWL-12の開発, 第5回日本ロボット学会学術講演会	12 片脚:6	83	144	40	1.5	①CFRP, 高力FRP, 合金 ②電気油圧式モータ ③電気油圧式モータ+RA, その他:DCモータ+RSA ④シリアルリンク(0-9):DCモータ+回転角度, ソフトウェア:ソフトウェア出力軸角度, 至り:ソフトウェア出力軸トルク, ソフトウェア:接地情報 ⑤分散型階層構造(インテリジェント)	動歩行 完全歩行	①単脚支持期:ZMP規範により作成した設定歩行パターンによる7of7M制御(動的) 立脚切換え期:接地状況により足首部の制御状態を切換えるソニーX制御(倒立振子モデル, ZMP規範型, 動的) ②質点系 ③下肢のみ	①下肢機構部のみのため不整地や外力のある環境下での安定歩行のための補償機能が不十分	
WL-12	S. 62 ⁵⁾	①上体補償型2足歩行制御方式, 第26回SICE学術講演会 ②上体補償機構を有する2足歩行ロボットWL-12の開発, 第5回日本ロボット学会学術講演会	9 片脚:3 上体:3	107	180	30	1.3	①CFRP, シリアルリンク(ソフトウェア等) ②電気油圧式モータ 上体:自由度:複数リンク+モータ, その他:RA+モータ ③ソフトウェア:関節角度, ソフトウェア:関節角速度, 圧力センサ:出力トルク, ソフトウェア:関節の位置・速度, ソフトウェア:接地情報 ④ソフトウェア:モータ全体統括・制御, ソフトウェア:右・左脚, 上体を個々に制御	動歩行 直進完全歩行	①WL-10RDにおける問題点①解決:上体の補償動作を付加 ②ZMP規範型:任意の下肢軌道, 外力, ZMP軌道から上体の補償軌道を計算 ③質点系 ④設定歩行パターンによる7of7M制御	①構造部材全体の剛性不足 ②重量の過大 ③低速度の歩行において上体運動が大きくなり, 上体用7of7Mの可動角が不足する	
WL-12R	S. 63	①既知の外力環境下における上体補償型動歩行の実現, 第4回知能移動ロボットシンポジウム ⁶⁾ ②上体と腰の協調動作による2足歩行制御, 第27回SICE学術講演会 ③既知の外力環境下で歩行可能な2足歩行ロボットWL-12Rの開発, 第6回日本ロボット学会学術講演会	8 片脚:3 上体:2 り: 30	99	160	30	1.7	①CFRP, シリアルリンク(ソフトウェア等) ②電気油圧式モータ+RA+モータ ③ソフトウェア:関節角度, ソフトウェア:関節角速度, 圧力センサ:出力トルク, ソフトウェア:接地情報, カメラ(姿勢) ④WL-12のものに外力発生装置制御用7of7M板追加, カメラソフトウェアをソフトに設置	動歩行 直進完全歩行 既知の外力(進行方向後方から, 10kgf, 台形または矩形状)下の歩行	①WL-12における問題点①解決:足部リンク部材にCFRPの補強板 ②WL-12における問題点②解決:上体の直動リンクを取り除く(2自由度でも補償可能な, 安定歩行動作作成ソフトウェアを開発) ③WL-12における問題点③解決:上体と腰との協調による補償動作(評価回数:上体の振れが大きくならない, 腰が運動座標系から離れすぎない) ④外力発生装置開発	①足底板のため	

⁵⁾ 機械7%の開発はS. 61, ⁶⁾ 上体のみの協調ではない, ⁷⁾ 直接WL-12R IIの開発に関する論文ではないが, WL-12R IIを用いているものである

Table 1.1 cont.

4 / 6

ロボット名	開発年度	関連論文	特 徴							問 題 点 (今後の開発課題)	
			自由度 DOF	重量 kg	身長 cm	歩幅 cm	速度 s/step	ハードウェア 構造部材, 7軸力センサ, 制御系	歩行形態		制御方式 補償動作 機械モデル 改良点 等
WL-12R II (1)	H. 1	①6軸力センサを用いた2足歩行 歩みのZMPの測定法, 第7回日 本ロボット学会学術講演会 ⁷⁾	8 片脚:3 上体:2	99 上体 おも り: 30	160	-	-	①WL-12Rのものに6軸力センサを右 足下腿部に設置	動歩行 直進完全歩行 単脚支持静止状態 での静的外力	①6軸力センサを用いて下腿部にか かる6軸力を測定することにより ZMPを予測(単脚支持期のみ) ②WL-12Rにおける問題点①解決: 足底板の長さを短く、材質をアル ミに変更	①両脚の6軸力を測定し 、全歩行周期におけるZM Pを予測 ②ZMP予測による、歩行 安定性の把握、外乱に 応じた歩行の実現
WL-12R II (2)	II. 1	①未知の外力下における2足歩 行, 第7回日本ロボット学会学術講 演会	8 片脚:3 上体:2	99 上体 おも り: 30	160	0.64	WL-12Rに同じ	①上体のみの補償動作 ②①外力作用前:設定歩行モードに よる歩行 ③未知の外力作用後:ZMPを設定 ZMPに一致させるように上体の運 動で補償 ④②のままでは上体軌道が分散 してしまつたため、歩容(着地点) を変更して上体軌道を収束させる ⑤制御方式の検討	①補償動作計算は17414 ではない ②歩容(着地点)の変更 による、遊脚の着地時の 衝撃の影響		
WL-12R IV	H. 1	①REALIZATION OF OBSTACLE AVOIDANCE BY BIPED WALKING ROBOT EQUIPPED WITH VISION SYSTEM	8 片脚:3 上体:2	102 上体 おも り: 30	160	1.3 2.6 障害物回避が 可 変	①WL-12R IIの腰にCCDカメラ2つ設置 きで搭載	動歩行 直進完全歩行(平 坦地) 障害物またぎ:幅 30mm, 高さ30mmの 直方体障害物、但 し障害物は歩みに 対して垂直に置か れている	①予め歩行実験により、SVT, DDT と呼ばれる距離の7-7Lを作成 ②①歩行中右脚が接地したときに CCDカメラから映像を送る *障害物を検出した場合 (2)歩容の位置検出 (3)SVTから実際の距離を求める (4)DDTから7-7Lの高さを求める (5)停止 *障害物高さがまたぎ可能な場合 (6)小範囲測定で障害物の距離を 求める (7)⑥の結果から障害物に近づく モードとまたぎモードを決定 (8)障害物に近づき手前で停止 (9)障害物をまたぐ	①障害物の形、高さ、幅 、置かれている向きに 関する制限	

Table 1.1 cont.

5/6

ロボット名	開発年度	関連論文	特 徴							問題点 (今後の開発課題)	
			自由度 DOF	重量 kg	身長 cm	歩幅 cm	速度 s/step	ハードウェア 構造部材, 7自由度, センサ, 制御系	歩行形態		制御方式 補償動作 機械モデル 改良点 等
WL-12R III (1)	H. 1	①未知の外力下における上体補償型2足歩行の実現, 第28回SICE学術講演会 ②A CONTROL METHOD FOR DYNAMIC BIPED WALKING UNDER UNKNOWN EXTERNAL FORCE, IROS '90	8 片脚:3 上体:2	100 上体 おも り: 30	170	-	0.64	①WL-12R IIに補償動作計算用高速演算部を追加(1.5MHz, 16bit) ②WL-12R IIのソフトウェア, カメラ制御に変えてソフトウェアを採用, R/D変換ボードを0.5MHzに搭載	足踏み(未知の外力に対する)進行方向後方から矩形状の外力:100N, 時間幅0.3s	①制御方式はWL-12R IIと同じ ②WL-12R II(2)における問題点①解決:補償動作計算用高速演算部を追加 ③WL-12R II(2)における問題点②解決:着地前のある期間は着地目標位置を固定する(ジャイロセンサから適性値を決定) ④③のような適性制御を決定することで補償可能な外力の大きさを, 時間幅が向上 ⑤力が採用したことにより両脚の間隔を狭くでき, 骨盤のたわみを小さくした	①歩行中の未知の外力に対する補償 ②外力の加わる方向を変更した場合
WL-12R III (2)	H. 1	①非平坦路における上体補償型2足歩行, 第7回日本味理学会学術講演会 ②REALIZATION OF DYNAMIC BIPED WALKING STABILIZED BY TRUNK MOTION ON A SAGITTALLY UNEVEN SURFACE, IROS '90	8 片脚:3 上体:2	100 上体 おも り: 30	170	-	2.6 1.6	WL-12R III(1)と同じ	動歩行 直進完全歩行 (矢状面内の非平坦な踏面形状での歩行): 階段歩行:高さ10cm, 2.6s/stepの上り・下り 台形地形:傾斜土10°, 1.6s/step	①仮想踏面を定義(踏面形状は入力) ②上体の補償動作を計算 ③設定歩行モードによる力制御	①低速度の歩行において上体運動が大きくなり, 上体用ジャイロの可動角が不足する ②①のため下肢との協調による補償動作
WL-12R III (3)	H. 1	①A BIPED WALKING ROBOT HAVING A ZMP MEASUREMENT SYSTEM USING UNIVERSAL FORCE-MOMENT SENSORS, IROS '91	8 片脚:3 上体:2	100 上体 おも り: 30	170	30	1.7 3.4 4.7	①WL-12R IIIの左右足首に3軸力センサを設置	動歩行 直進完全歩行	①WL-12R II(1)での片足単脚支持のみのZMP測定を両脚全歩行周期用にN-147, 理論共に拡張 ②ZMP規範の系統的確認	①高速歩行時に測定ZMPに振動が生じる ②測定ZMPと実測ZMPの誤差が大きい

Table I.1 cont.

6/6

ロボット名	開発年度	関連論文	特						徴		問題点 (今後の開発課題)
			自由度 DOF	重量 kg	身長 cm	歩幅 cm	速度 s/step	ハードウェア 構造部材, 7チャンネル, カメラ, 制御系	歩行形態	制御方式 機械モデル, 改良点等	
WL-12RⅢ (4)	H. 2	①2足歩行ロボットにおける上体補償軌道の学習制御, 第9回日本ロボット学会学術講演会 ②LEARNING CONTROL OF TRUNK'S COMPENSATIVE MOTION FOR BIPED WALKING ROBOT BASED ON ZMP STABILITY CRITERION, IROS '92	8 片脚:3 上体:2	100 上体 おも り: 30	170	-	-	WL-12RⅢ(3)と同じ	単脚支持(立脚時 止, 逆脚前後に振 らせる) 動歩行 直進完全歩行	①軸力モータにより測定したZMPと設定ZMPとの偏差を利用して、初期ZMPを修正し、新たな上体補償軌道を求める この処理を繰り返して上体補償軌道を学習する ②単脚での学習予備実験(偏差の収束確認) ③動歩行に適用 歩行中位置ずれを変更: 接地時の衝撃力緩和のために膝と足首部の位置ずれを下げてコグナティブを持たせる	①高速歩行時に測定ZMPに振動が生じる ②偏差に対する重み係数を大きくすると補償モータも大きくなり、不安定になる
WL-12RⅣ	H. 2	①未知の外力下における2足歩行, 第9回日本ロボット学会学術講演会 ②衝撃緩衝材料を用いた脚底機構による2足歩行の安定化, 第9回日本ロボット学会学術講演会	10 片脚:4 上体:2	120 上体 おも り: 30	182	-	0.64	①WL-12RⅢの腰部に0-4軸の自由度を付加 ②0-4軸の受動的自由度を持ち、衝撃緩衝効果のある足底板	足踏み(未知の外 力に対する) 横方向から矩形状 の外力:100N, 時 間幅0.16s	①WL-12RⅢ(1)の横方向からの未知外力補償 ②(1)外力作用前:設定歩行パターンによる歩行 ②未知の外力作用後: 着地時刻を選択(事前にシミュレーションで決定) ③ZMPを設定ZMPに一致させるように上体の運動で補償 (4R3)のままで上体軌道が発散してしまいうため、(2)に従いZMPを変更して上体軌道を収束させる ③衝撃緩衝効果のある足底板の開発	①総重量増加による補償能力の低下 ②任意の方向からの未知外力に対する補償
WL-12RⅤ	H. 3	①上体運動により3軸モータを補償する2足歩行ロボットの開発, 第6回知能移動ロボットシンポジウム	9 片脚:3 上体:3	104 上体 おも り: 31	170	30	0.54	①WL-12RⅢの上体に3-軸の自由度を付加 ②上体おもりを7-Lを介して2分し、これを3-軸回りに回転させ偶力モータを発生	動歩行 直進完全歩行 高速歩行(従来の 1.5倍)	①3-軸モータ補償も含めた上体補償軌道計算 ②3-軸モータ補償により歩行の高速化を実現	①接地時の衝撃力の影響 ②低速歩行時の3-軸モータ補償はあまり必要がない

Table 1.2 Recent studies for biped locomotion at related organizations.

1 / 3

研究機 ロボット名	特 徴										問 題 点 (今後の開発課題)					
	自由度 DOF	重量 kg	身長 cm	歩幅 cm	速度 s/step	ハ ー 構造部材	ド 7軸電機	エ センサ	ア シリ	歩 静		行 完全	旋回 傾斜	形 階段	態 外乱	制 御 方 式 等
信州大 (H2)	12 片脚:6	9.1	55.6			7軸電機 DCモータ, SMA7軸電 モータ(方向 転換用)	マイク ロプロセ ッサ, 74 LSI			○		△ 静歩 行, ±5°			方向転換用 SMA を用い た7軸電機の開発	①実際の方向転換歩行は 成功していない
熊本大 (H1) SR-3	6 片脚:3			0	0.39 足踏み	DCモータ	ロケイン コイル			○					左右方向の運動を機械行 の固有の剛性を利用	①着地時の衝撃が大きい ②剛性のずれ
芝浦工大 (H1) Asshy-17	25 片脚:7	250	250						○						床面吸着歩行 床面より電力供給 上体・上肢有り	①歩行用の特別な床が必 要
静岡大 (H1)	6 片脚:3	12	66.5	30 25 25 30	1.5 3.3 2.0 2.8	DCモータ ハートモータ 付	マイク ロプロセ ッサ, ロ ケイン コイル, 74LSI			○			○ 上り ○ 下り 5cm ○ 跨ぎ		歩行を2次元に限定, 左 右方向は支持機構有り	①矢状面内の運動に限定 せず ・ 前頭面内の動きは考慮 せず
名古屋大 (S63)	6 片脚:3	21	70		0.5				○						歩行を2次元に限定, 左 右方向は支持機構有り 足首MM制御	①矢状面内の運動に限定 せず ・ 前頭面内の動きは考慮 せず ②MM不足

* 推定値

Table 1.2 cont.

2/3

研究機関名 ロボット	特 徴										問題点 (今後の開発課題)
	自由度 DOF	重量 kg	身長 cm	歩幅 cm	速度 s/step	ハ ー ド ウ ェ ア の 材 質	モ ー ト ー の 種 類	歩 動 の 種 類	行 走 の 種 類	制 御 方 式	
東京電機大 (H1)	10 片脚:5	11.3	98.2	0 35	8 8	アルミ、 CRP	DCモータ、 エンコーダ	○ ○	○ ○	重心移動 コトロ-リ、カサ自己搭載	①傾斜モータによる姿勢制御
東工大 (S62) YANBO	5	10	60		0.7			○	○	H/C地形 (高さの異なる 水平面) 用非人間形構造 静⇄動歩容の遷移可能	
機械技研 (H3)	5	27	37	12			DCモータ	○	○	線形倒立振り子モータ 歩行を2次元に拘束	①脚質量が上体質量に対 して十分に軽くない ②実時間制御
電通大/岐阜大 (H2) BLR-G2	8 片脚:4	25	97	35~ 40	1.0~ 1.2		DCモータ +モータ	○	○	角運動量制御型、IM配 分制御	
(H3) BLR-G3	10 片脚:5	28	102				0-リイン コーダ、 傾斜、 角速度、 超音波、 速度、 加速度、 IM、 床反力	○	○		

Table 1.2 cont.

3/3

研究機 口ボット 関名	特 徴										問 題 点 (今後の開発課題)					
	自由度 DOF	重量 kg	身長 cm	歩幅 cm	速度 s/step	ハ ー ド ウ ェ ア 材 質	ア ク シ ョ ン サ イ テ ル	歩 動 静	定 常	完 全		旋 回	形 状 傾 斜	階 段	態 外 乱	制 御 方 式 等
早大 (S63) WL-12R	8 片脚:3 上体:2	99	160	30	1.7	碳纤维、 CFRP	電気油圧 サーボ	非リニア アクチュエ ータ、マイ クシフト アクセル 、圧 力センサ	○	○	○	○	○	○	ZMP規範 上体補償動作型 7方向制御	①構造部材の剛性不足 ②過重量 ③低速歩行時の上体補償 動作角度不足 ④接地時の衝撃力
(H2) WL-12RⅢ	8 片脚:3 上体:2	100	170	0	0.64 足踏み 1.6 2.6			DYNA	○	○	○	○	○	○	未知の外力補償(進行方 向後方から腰部に作用)	⑤外力作用位置、方向の 変更 ⑥外力補償完全歩行の実 現
(H3) WL-12RⅣ	10 片脚:4 上体:2	120	182	0	0.64 足踏み				○	○	○	○	○	○	未知の外力補償(横方向 から腰部に作用) 衝撃緩衝材を用いた受動 回転(φ-軸)足底板	

2. 2 足歩行制御方式

2. 1 ロボット・モデル及び運動方程式

2. 1. 1 ロボット・モデルの概略

研究の対象とする2足歩行ロボット・モデルをFig. 2.1に示す。このモデルは上肢なし人間形モデルで、上体おもり、アクチュエータ等を質点とし、リンク構造部材を剛体とする準質点系モデルである。

一般にロボットをモデル化する場合、構造部材の考慮から剛体系での記述が普通であるが、質量がボディの一部に集中するような場合（例えば、アクチュエータの質量がリンクのそれに比較して非常に大きいような場合）は質点系での記述も可能である。本モデルは剛体系・質点系のどちらでも記述が可能で、シミュレーション段階ではその大きさや慣性モーメントが不明確であるアクチュエータやセンシング・システム等を質点とし、構造部材を剛体としており、これらの混在するモデルを許している。また、本2足歩行ロボット・モデルは8ボディ、7関節からなり、下肢の前頭面内の動きは両脚（legs）が平行で、足（foot）は常に床面と水平であると仮定し、下肢5自由度（ピッチ軸4自由度、ロール軸1自由度）、腰2自由度（ピッチ軸・ロール軸それぞれ1自由度）の合計7自由度を持つ（Fig. 2.2）。但し、現段階では直進歩行を前提とし方向転換の自由度は与えていない。

2. 1. 2 ロボット運動方程式

一般に剛体系の運動方程式は式(2.1)で表せる。

$$M = \sum_{i=1}^n (\mathbf{r}_i - \Delta \mathbf{r}) \times m_i \mathbf{G} + \sum_{i=1}^n (\mathbf{r}_i - \Delta \mathbf{r}) \times m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} + \sum_{i=1}^n \frac{d(\mathbf{J}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i)}{dt} \quad (2.1)$$

$\Delta \mathbf{r} = (X, Y, Z)$: 任意の点の位置ベクトル,

$\mathbf{M} = (M_x, M_y, M_z)$: $\Delta \mathbf{r}$ におけるモーメント,

n : ボディの数,

m_i : ボディ i の質量,

$\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$: ボディ i の重心位置ベクトル,

$\mathbf{G} = (0, 0, g)$: 重力加速度ベクトル,

$\mathbf{J}_i = \text{diag}(J_{x_i}, J_{y_i}, J_{z_i})$: 慣性テンソル,

$\boldsymbol{\omega}_i = (\omega_{x_i}, \omega_{y_i}, \omega_{z_i})$: ボディ i の角速度ベクトル

なお、ここではアクチュエータ、おもり等の質点もボディの一つとして数え、質点部については慣性テンソルを0行列として定式化を行う。

式(2.1)に関し床面上において、左辺のX成分とY成分が共に零になる点 Δr を、Zero Moment Point (ZMP)と呼び歩行中の安定な状態の規範として用いた。このZMPがロボットの足底接地面の形成する多角形の安定領域内に存在していれば、ロボットは安定に歩行できる¹⁶⁾。

また、式(2.1)は次の微分方程式の形となる⁶⁾。

$$\{M\} = [A] \{\ddot{\Xi}\} + [B] \{\dot{\Xi}^2\} + [C] \{\dot{\Xi} \dot{\Xi}\} + \{G\} \quad (2.2)$$

ここで、一般化された駆動力ベクトルを $\{M\}$ 、状態変数(関節角変数)を $\{\Xi\}$ で表し、係数行列 $[A]$ 、 $[B]$ 、 $[C]$ 及びベクトル $\{G\}$ は、定式化に使われた一般化座標の関数である。右辺第一項は慣性項、第二項は遠心力項、第三項はコリオリ力項、第四項は重力項である。本研究のZMP規範型の場合、前述のように運動方程式に対する拘束条件が、ZMPにおける式(2.1)のX成分とY成分が0であるという2つであり、一部の運動を規定し、安定な歩行パターンとなるように補償動作を計算することになる。式(2.2)の運動及び駆動力を既知な部分 $\{\Xi_0\}$ 、 $\{M_0\}$ と、未知な部分 $\{\Xi_u\}$ 、 $\{M_u\}$ に分離し、未知量について解くと式(2.3)、式(2.4)のようになる。

$$\begin{aligned} \{\ddot{\Xi}_u\} = & [A_{uu}]^{-1} (\{M_0\} - [A_{00}] \{\ddot{\Xi}_0\} \\ & - [P_0] (\{B\} \{\dot{\Xi}^2\} + \{C\} \{\dot{\Xi} \dot{\Xi}\} + \{G\})) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \{M_u\} = & [A_{uu}] \{\ddot{\Xi}_u\} + [A_{0u}] \{\ddot{\Xi}_0\} \\ & + [P_u] (\{B\} \{\dot{\Xi}^2\} + \{C\} \{\dot{\Xi} \dot{\Xi}\} + \{G\}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

ここで、各係数行列は以下のような意味を持つ。

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_u \end{bmatrix} \{M\} = \begin{bmatrix} M_0 \\ M_u \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$[R_0 \mid R_u] \begin{bmatrix} \Xi_0 \\ \Xi_u \end{bmatrix} = \{\Xi\} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_u \end{bmatrix} [A] [R_0 \mid R_u] = \begin{bmatrix} A_{00} & A_{0u} \\ A_{u0} & A_{uu} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2. 1. 3 支持足首強度計算

ロボットのリンク径は、ロボット・ボディ・データ：構造部材の材質、強度、寸法及び質量（質点部）から、単脚支持状態での支持足首における強度計算を行い、その結果を基に決定する。ロボット・システム全体をFig. 2.3のようにモデル化すると足首部における引張応力は以下のように表せる¹¹⁾。

$$\sigma = \frac{32W \sin \omega t}{\pi d^3} + \frac{4W \cos \omega t}{\pi d^2} \quad (2.8)$$

式(2.8)で得られた結果と構造部材の引張強さから、足首部アクチュエータ上部のリンク直径を決定する。本研究でのロボット・モデルは、比強さ、比剛性、コスト、加工の容易さなどの考慮から材質をアルミニウム合金と仮定した。アルミニウム合金は降伏点が鋼などに比べ低いため、安全率を5程度としてリンク径を決定する。なお、ここでは簡単のためリンクを円柱と仮定しているが、円筒形状とすることにより同じ強度でも軽量化することが可能である。他の部分のリンク径については、強度的に安全となる、最大荷重のかかる足首部アクチュエータ上部でのリンク径と同一とする。

2. 2 ZMPの動的監視に基づく制御法（直進完全歩行）

本研究でこれまで取り上げてきた安定動作解析（付録A参照：以後本文中、制御法Aと呼ぶ）においては、非線形微分方程式の初期値問題を定常歩行という仮定の下に、周期解としてこれを扱ってきた。しかし、歩行パターンにはこのような定常歩行だけではなく、発進・停止などの過渡歩行や方向転換などを含めた非定常歩行がある。これら非定常歩行には上記制御法を用いることはできない。直進完全歩行については、発進・定常歩行・停止を一つの周期と見なし、FFTによる周期解を得る方法もある^{17)・18)}。しかし、これらの手法は周期的な設定歩行パターンを事前に作成し、これをプログラム制御するには非常に有効であるが、ロボットが歩行中に自身の状況を的確に把握し、それに基づいて制御しているのではなく、扱える歩容に限界がある。

制御法Aを含め、これまで採用されている2足歩行制御方式のほとんどはZMP規範に基づくプログラム制御である。即ち、ZMP規範に基づく安定歩容、補償動作等をロボット運動のコンピュータ・モデルによって計算し、与えられた動作と設定すべき各関節などの駆動力との関係を事前に求める。プログラム化されたこの関係をロボットに搭載したマイクロ・コンピュータによって処理し、ロボット動作を制御する方式である。この方法では、予め設定されたパターンで歩行を行うため、歩行中のロボットに対する予期しない外乱等動的な変化に頑強に対処できない。こ

のような動的変化に対処するためには、歩行中に視覚等のセンサ情報を取り込んで2足歩行制御に反映させる高度な方法も考えられる。しかし、視覚情報処理等ばかりでなく、2足歩行機構や補償動作制御にも解決すべき多くの課題が残されている。つまり、時々刻々と変化するロボットの状態を検出し、それを基に安定化を行うリアルタイム制御法が必要であると考えられる。

本制御法では、ロボットの歩行状態を動的に検出し、これを基にZMPを算出し、このZMPが安定領域に存在するように補償動作を制御する。即ち、既に算出されたZMP軌跡から将来のZMPを推定し、この推定ZMPが安定領域を外れないような安定化補償動作を、ロボット動作の数学モデル等を用いて動的に生成するものである。本手法は、予期しない外乱に対しても適応可能であるが、今回は外乱の無い直進完全歩行に本制御法を適用し、その妥当性と有効性についてシミュレーションによって検証する。

2. 2. 1 制御法の概略

ここで取り扱うモデルは、直進完全歩行における任意の歩容に対する補償動作を上体で行うものである（付録A：A.1.1節で対象としたものと同じモデル）。

これまでの制御法は設定したZMP軌跡に完全に一致するようなロボット動作を解析していたが、この場合ロボット動作を周期的と見なし補償動作を周期解とする以外、補償動作は発散してしまう。また、事前にロボット全体の動作を解析しこれをプログラム制御するものであり、歩行中制御周期毎に補償動作を算出しこれによって安定化を行っているものではない。

本制御法ではこの発散の問題を安定領域を有効に利用することで回避しようとするものであり、歩行中制御周期毎に補償動作を算出し制御するリアルタイム制御を前提としている。本制御法のフローチャートをFig. 2.4に示す。強度計算は前述と同様に行う。基本歩行パターンの作成は基本的にこれまでの方法（付録A：A.1.1節参照）と同じであるが、はじめに定常歩行部の1歩を計算し、これに接続する境界条件を満足する過渡歩行部を作成する。腰及び遊脚の足の軌跡の作成にはスプライン関数による補間を用い、逆運動学計算には式(A.1.2)を用いる。但し、今回は腰の軌跡に関する考察は行わず、腰の高さは一定とし定常歩行時の腰の速度は等速とする。ZMP軌跡の作成もこれまで通り連続的な軌跡を作成する。また、過渡歩行部は発進・停止それぞれ1歩とし、発進の下肢動作を行う前及び停止の下肢動作が終了した後に、下肢は運動しないが上体だけ運動を行う歩容静止期を設ける⁵⁾。

この基本歩行パターンを基に、歩行させることを想定した上体補償動作のシミュレーションを行う。歩行動作中常にZMPを監視し、安定領域のほぼ中央に設定したZMPと実ZMPの偏差が、あるしきい値を越えると予想されるとき及び越えたときに、上体動作（前頭面 θ 、矢状面 ϕ 、 $\alpha = 0$ ；一定）によって補償を行い、偏差がしきい値内にあるときに補償動作を収束に向かわせる。なお、ZMPはX方向・Y方向とに分けて監視する。この実ZMP及び補償動作の算出については節を改

めて解説する。

2. 2. 2 ZMPの算出

ZMPの算出については、ロボットの運動状態を示す関節角のセンサ情報から式(2.1)を基に算出することができる。しかし、全ての関節において角度・角速度・角加速度の情報が必要であり、センシングもしくは数値計算を行わなければならない。このためセンサとコンピュータ間の通信の問題やセンサ取り付けによる過重量や設計変更、計算時間の増大や計算誤差の影響など実用上の問題が多い。また、外乱等が作用した場合についてもこれらをセンシングする必要があり、ロボット全体にセンサを張り巡らせなければならなくなるため、事実上全ての外乱に対処するのは不可能である。

そこで本研究では、これら全ての情報を含んでいる床反力に着目し、これを実測することによりZMPの算出を行う(但し、シミュレーションでは関節角情報から式(2.1)を基に算出する)。ZMPは床反力の合成力の作用点であることから、足底に複数の力センサを設置し、その床反力の鉛直方向成分から(1軸力センサで構成できる)ZMPを求めることが可能である。センサは最低限3つあればZMPの算出が可能であるが、本研究では両足の足底の4つ角全てにセンサを取り付けるものとする。これにより、足底の接地情報を常に監視できるとともに、冗長な情報の利用による、測定精度の向上も可能である。センサをFig. 2.5に示すように配置すると、ZMPは以下のように求められる。

$$\begin{aligned} l_{xL} &= \frac{L_x(F_{LR}+F_{RR})}{F} \\ l_{xR} &= \frac{L_x(F_{LF}+F_{RF})}{F} \\ l_{yL} &= \frac{L_y(F_{RF}+F_{RR})}{F} \\ l_{yR} &= \frac{L_y(F_{LF}+F_{LR})}{F} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$F = F_{LR} + F_{RR} + F_{LF} + F_{RF}$$

F_{LR} : 鉛直床反力(左後),

F_{RR} : 鉛直床反力(右後),

F_{LF} : 鉛直床反力(左前),

F_{RF} : 鉛直床反力(右前)

例えば、測定誤差などの影響によって、

$$\begin{aligned} l_{xF} + l_{xR} &\neq L_x \\ l_{yL} + l_{yR} &\neq L_y \end{aligned} \quad (2.10)$$

となった場合には,

$$\begin{aligned} \tilde{\Gamma}_{xF} &= \frac{l_{xF}^2 - l_{xR}^2 + L_x^2}{2L_x} \\ \tilde{\Gamma}_{yL} &= \frac{l_{yL}^2 - l_{yR}^2 + L_y^2}{2L_y} \end{aligned} \quad (2.11)$$

のように修正を行う。これは単脚支持での場合であるが、両脚支持の場合においては、式(2.9)を8点の床反力タイプに拡張することも可能であるが、それぞれの足におけるZMPと鉛直床反力(合成力)情報から以下のように求めるのが容易である²⁹⁾。

$$\begin{aligned} XZMP &= \frac{F_R X_R + F_L X_L}{F_R + F_L} \\ YZMP &= \frac{F_R Y_R + F_L Y_L}{F_R + F_L} \end{aligned} \quad (2.12)$$

F_R : 右足鉛直床反力(合成力),

F_L : 左足鉛直床反力(合成力),

$(x_R, y_R, 0)$: 右足ZMP,

$(x_L, y_L, 0)$: 左足ZMP

なお、センシングに際してはノイズ対策についての十分な検討が必要である。

2. 2. 3 ZMPの予測

この制御法は次期ZMPが安定領域を外れそうになると予想されるときに制御を行うものであり、ZMPの予測が必要である。このためにZMPの変化速度を用いる方法が考えられるが、直接ZMPの変化速度を検出することは困難であり、数値計算に頼らざるを得ない。ZMPの時間微分値を求めることは、シミュレーションにおいては角加速度の微分値が必要になるなど計算時間がかなり増大する。また、リアルタイムで行う場合、床反力の微分値が必要になるが、その時点での値の算出は不可能である(1ステップ前になる)。

しかし、本制御法ではそれほど正確な予測値を必要としないため、簡易で計算時間のあまりかからない手法が望ましい。そこで、今回は1)多項式近似(ラグランジ

補間)による推定, 2)微分値近似+オイラー法による推定の2つの場合^{6,2)}について検討を行う。1)の場合は3ステップ前までのZMPの値を用い, これを2次関数で近似し次のステップでのZMPを推定する。2)の場合は, 微分値を1ステップ前の値で近似し, オイラー法によって推定する方法である(簡単に言えば, 現在のZMPと1ステップ前のZMPとの差(変化量)をそのまま用いて, 次のステップでのZMPを推定するものである)。但し, これらの手法は外乱が無いかもしくは小さく, 比較的滑らかな歩行のような場合のZMP予測には有効であるが, ZMPの過渡的な変化の予測には不十分であり, 外乱や急激な動作によるZMP変化の推定には時間遅れをとまなう。しかし, 制御周期より短い時間に安定領域を外れるような外乱が作用した場合には制御のしようがないが(この問題はこのケースのみではなくロボット制御全てに共通する問題であり, 制御周期は制御量の計算時間とロボット動作のレスポンスに依存するため, 限界がある), それ以外なら本手法の適用は可能である。なお, 制御入力後の最初のステップでの予測はこれらの方法では不可能なため, 制御後の1ステップは制御を行わないものとする。

2. 2. 4 補償動作の生成

設定ZMPと実ZMPの偏差があるしきい値を越えると予想される場合(及び越えてしまった場合)の, この偏差に対応した制御入力の計算方法について述べる。

ロボットの運動方程式は式(2.2)に示される非線形連立常微分方程式である。この式から分かるように, 修正すべきZMP変更量とそれに対する補償動作の角度との関係を一般的に求めることは困難である。しかし, 式(2.3)のように変形すれば, 角度と角速度が与えられたときに, 角加速度について一般解を求めることは可能である。つまり, ZMPの変更量と補償動作の角加速度との関係を定量化することができる。実際に補償動作の角加速度曲線とZMP軌跡及び床反力曲線(X・Y成分)は, その形が非常によく類似している。ここでは, 式(2.3)により直接制御量(角加速度)を算出する方法を用いるが, ZMP変更量と角加速度との関係を定量的に評価しテーブル化する事ができれば, 制御の高速化やファジィ制御(メンバーシップ関数の作成)による安定歩行も可能になると考えられる。今回は同時に, 歩容静止状態で上体動作をいくつかの初期条件(角度, 角速度)の下に動作させ, ZMP変更量と角加速度との関係の定量化の可能性についての検討も行う。

ZMP偏差に対するZMP修正量はこの偏差に修正用ファクターを乗じて決定し, 上記の1)または2)の方法を用いて制御量(角加速度)を決める。この修正用ファクターは, シミュレーションを緩用して決定する。制御入力の型としては, パルス, ランプ, ステップなど種々のタイプが考えられるが, パルスはその時点のみの修正に終わってしまうこと, ランプは応答が遅くその間に安定領域を外れてしまう恐れがあること, ステップは補償動作がすぐに発散してしまい収束させるのが難しいことなどから, ここでは以下に述べるような制御入力の型とする。即ち, 角加速度はステップ状に立ち上がるがその後数秒の後に0に収束させる。このとき, 同時に角

速度，角度も0に収束させるのである。この条件を満足する制御入力を多項式を用いて作成する。条件は初期値と最終値の角度・角速度・角加速度となるため，5次関数での記述が可能であるが，角速度・角加速度の滑らかな収束を考慮すれば7次以上とするのが妥当である。そこで，制御入力の型を次式で記述し，各パラメータをシミュレーションにより決定する。

$$0 \leq t \leq t_c$$

$$\theta(t) = a_1(t-t_c)^n + a_2(t-t_c)^{n-1} + a_3(t-t_c)^{n-2}$$

$$\dot{\theta}(t) = a_1 n(t-t_c)^{n-1} + a_2(n-1)(t-t_c)^{n-2} + a_3(n-2)(t-t_c)^{n-3}$$

$$\ddot{\theta}(t) = a_1 n(n-1)(t-t_c)^{n-2} + a_2(n-1)(n-2)(t-t_c)^{n-3} \\ + a_3(n-2)(n-3)(t-t_c)^{n-4}$$

$$a_1 = \frac{t_c^2 \ddot{\theta}_0 + 2t_c \dot{\theta}_0(n-2) + \theta_0(n^2 - 3n + 2)}{2(-t_c)^n}$$

$$a_2 = \frac{t_c^3 \ddot{\theta}_0 + t_c^2 \dot{\theta}_0(2n-3) + \theta_0 t_c n(n-2)}{(-t_c)^n}$$

$$a_3 = \frac{t_c^4 \ddot{\theta}_0 + 2t_c^3 \dot{\theta}_0(n-1) + \theta_0 t_c^2 n(n-1)}{2(-t_c)^n}$$

(2.13)

$$t > t_c$$

$$\theta(t) = 0.0$$

$$\dot{\theta}(t) = 0.0$$

$$\ddot{\theta}(t) = 0.0$$

t : 制御入力時からの経過時間,

t_c : 収束までの時間,

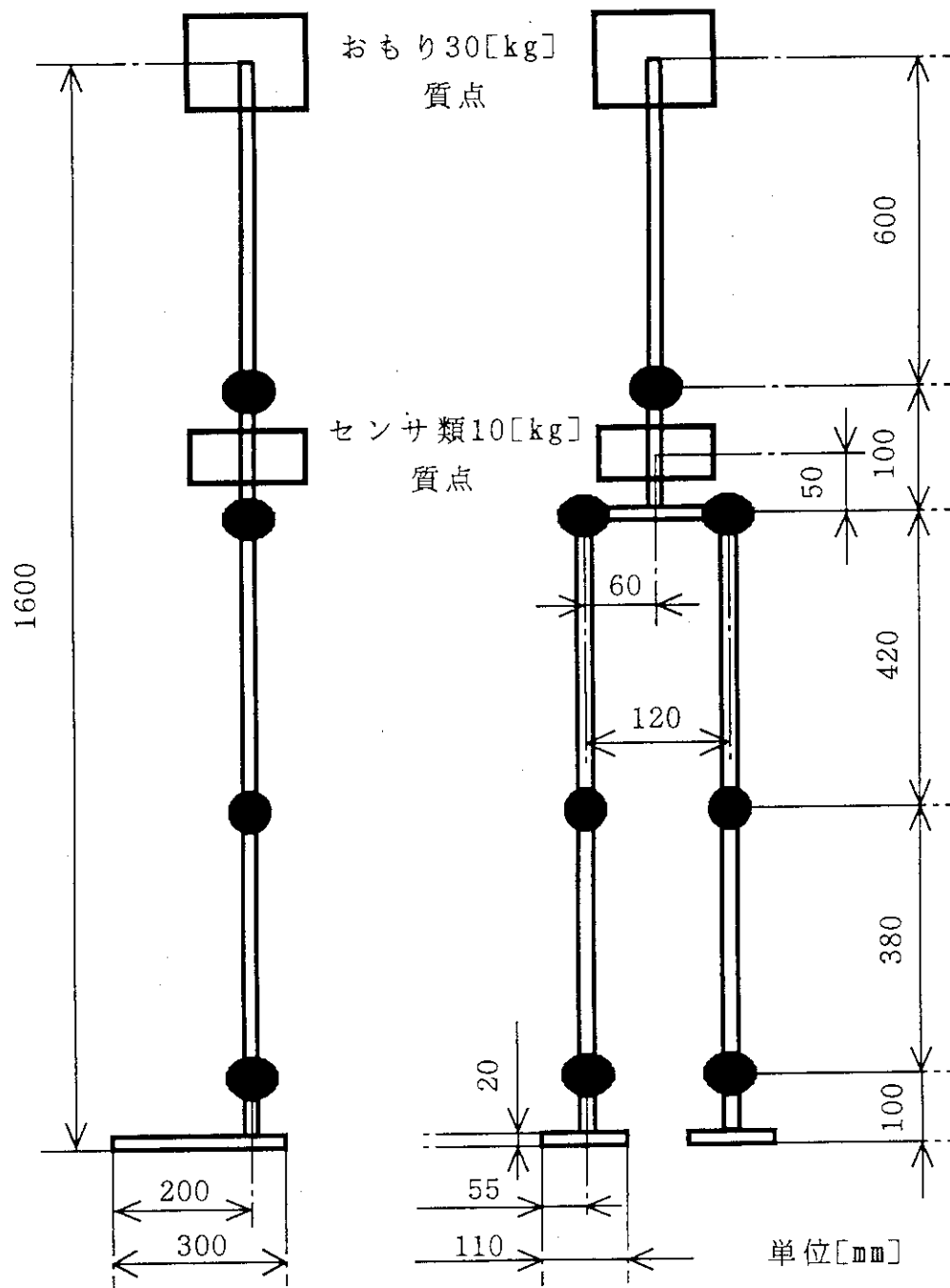
n : 制御入力の次数; $n \geq 7$

$\ddot{\theta}_0$: 初期角加速度 (制御入力),

$\dot{\theta}_0$: 初期角速度,

θ_0 : 初期角度

ϕ についても同様にして作成する。なお，実際の制御時には角加速度をトルク・センサか，加速度センサの組み合わせ（腰部と上体に設置）によって検出して角加速度制御を行うか，またはトルク制御を行うものとする。但し，ここでは角加速度制御に絞って話を進める。



構造部材アルミニウム合金
 (リンク直径40[mm],円柱,剛体)
 総重量約110[kg]

● : JOINT(1DOF), 5[kg], 質点
 ● : JOINT(2DOF), 10[kg], 質点

Fig. 2.1 Model of biped locomotion.

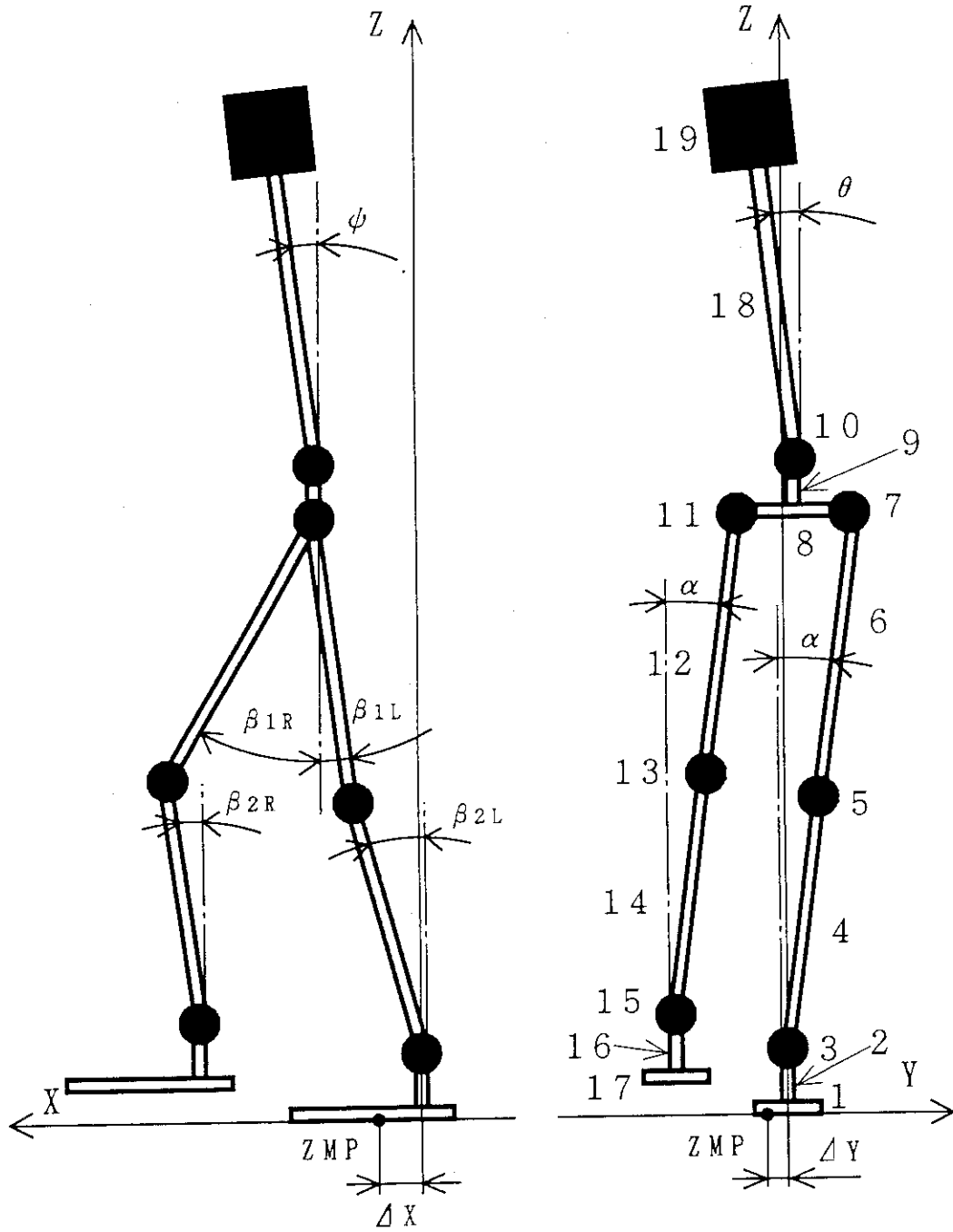


Fig. 2.2 Configuration of robot joints and bodies.

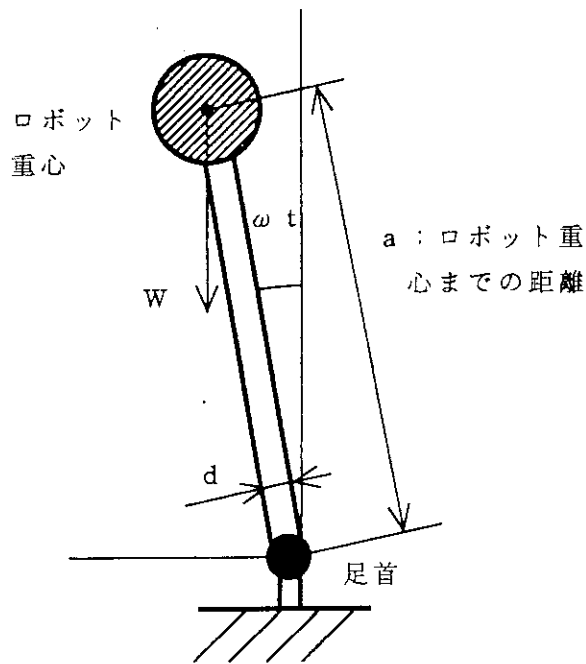


Fig. 2.3 Model for calculation of strength at ankle joint.

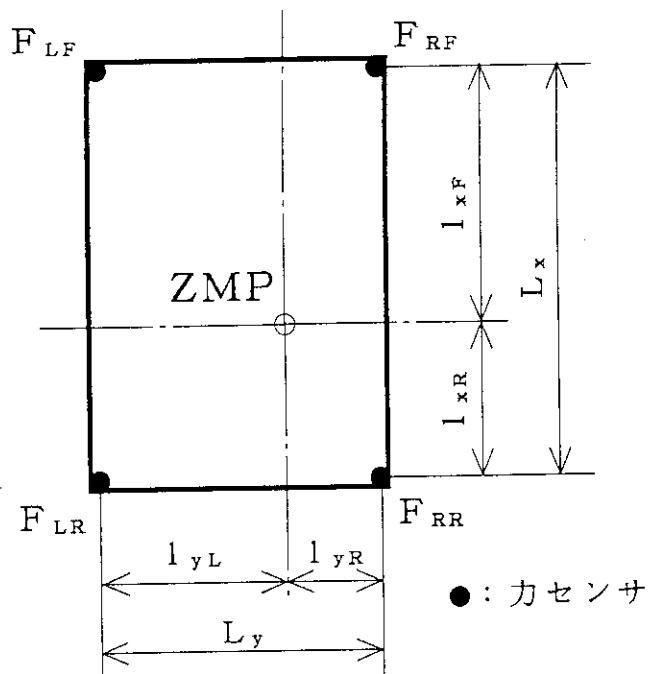


Fig. 2.5 Reaction force and ZMP at robot's sole.

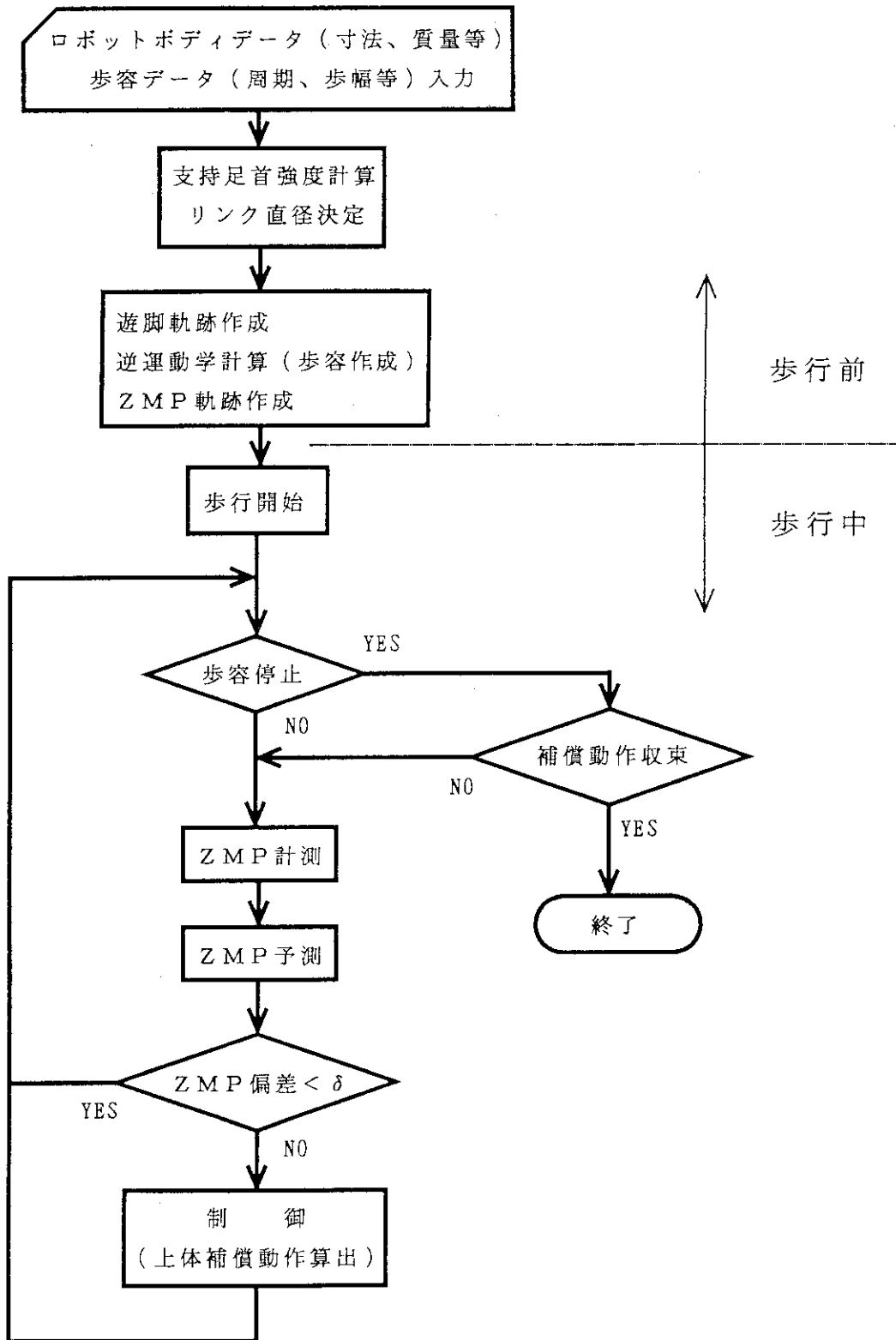


Fig. 2.4 Flow chart of new control method.

3. 制御法の妥当性の検証

3. 1 基準データの決定（リンク径）

Fig. 2.1に示した基準データにおける，足首部アクチュエータ上部のリンク径を決定する．リンク直径を30～50[mm]の範囲で変化させ安全率の計算を行った結果をTable 3.1に示す．なお，足首部の可動角はロール軸まわり-50～50[deg]，ピッチ軸まわり-10～10[deg]として計算を行った．但し，上体補償型モデル及び低自由度モデルでは，可動角がピッチ軸まわりのみであるため，Table 3.1の値よりも若干大きくなる．この結果から，基準データにおけるリンク径を40[mm]とする．

3. 2 シミュレーション

3. 2. 1 ZMPの予測

予測方法1)，2)について検討する．なお，本制御法においては制御周期を1/100[s]とする．歩容を歩幅300[mm]，1.0[s/step]とし上体を不動($\theta = \phi = 0$ ；一定)とした定常歩行を対象に，1歩間のZMPの予測値について，両者の実ZMPとの偏差の比較を行った結果をTable 3.2に示す．これらの結果から分かるように両者ともかなりよい近似であり，実用に値するものである．両者の違いは僅かであるが2)の微分値近似+オイラー法の方がやや精度がよい．本制御法ではこの2)の方法を用いるものとする．

3. 2. 2 ZMPと補償動作の定量的評価

上体補償動作(θ ， ϕ)の角加速度とそのときのZMPの変化量との関係の定量化を試みる．ロボットを歩容静止状態とし，上体の角加速度入力(パルス入力)によってZMPがどの程度変化するかをシミュレーションする．初期角度を-1～1[rad]，初期角速度を-3～3[rad/s]の範囲で変化させ，角加速度入力を-10～10[rad/s²]とした場合のシミュレーション結果の一例をFig. 3.1に示す．

この結果は θ ・ ϕ とも同一条件で動作させた場合のものであるが，ZMP変位と角加速度との間に，初期角度・角速度によってグラフの傾きが異なるが，ほぼ線形関係があることが分かる．初期角速度の違いによるZMP変位に与える影響は，初期角度の違いによるそれよりもかなり小さい．このため，初期角度についてはこれを考慮した制御入力(角加速度)としなければならないが，初期角速度についてはある程度範囲を限定すれば(Fig. 3.1の場合-2～2[rad/s]の範囲)，実用上変更を行うZMP範囲においてこれをほぼ無視できる．また，Fig. 3.1の場合，さらに ϕ の角度を-0.8～0.8[rad]に， θ を-0.5～0.5[rad]の範囲に限定すれば，Fig. 3.2に示すように初期角度別の完全な線形関係を仮定できる．この初期角度とFig. 3.2の

グラフの傾きとの関係はFig. 3.3のように表せる。しかし、これは θ と ϕ が同一動作をする場合のものであり、実際にはこれらの多くの組み合わせについて検討を行わなければならない。また、上体の動作は腰部に設けた2自由度で行うものであるが、回転の順番がY軸 $\phi \rightarrow$ X軸 θ であるため、上体のおもりの位置のX成分は ϕ だけの関数となるが、Y成分は θ のみでなく ϕ の影響も受ける。このため、YZMPの変更のための制御入力もXZMPのそれよりも大きくなる。この場合上体動作についての可動角の制限などが必要になってくる。このように、全ての場合について定量化するのは困難であり、ニューラル・ネットワークを用いてこれらの関係を学習させるなどの別の方法を用いるのが適当であると思われる。

3. 2. 3 制御入力の決定

制御入力に要求されるのは、第一に補償動作が発散しないこと、第二に角度の極値の絶対値が小さいこと、第三に角加速度の変動が小さいことである。制御入力曲線(式(2.13))は制御時の初期条件によってさまざまに変化する。大きく分類して、角度・角速度・角加速度の符号の組み合わせについて考えれば、8通りの組み合わせが存在する。このうち符号の組み合わせが正反対にあるものは同一と見なせるので、

$$\textcircled{1} +, +, +, \textcircled{2} +, +, -, \textcircled{3} +, -, +, \textcircled{4} -, +, +$$

の4通りである。Fig. 3.4は $\textcircled{1} \sim \textcircled{4}$ のタイプについて初期条件 $|\theta_0| = 0.5[\text{rad}]$, $|\dot{\theta}_0| = 1.5[\text{rad/s}]$, $|\ddot{\theta}_0| = 5.0[\text{rad/s}^2]$ と仮定し、 $n = 7$, $t_c = 2.0[\text{s}]$ とした場合のシミュレーション結果である。タイプ $\textcircled{3}$ は $\ddot{\theta} > 0$ で $\dot{\theta}$ は単調増加かつ $\dot{\theta} < 0$, よって θ は単調減少となるため理想的な制御入力曲線となる。しかし、タイプ $\textcircled{2}$ は比較的上記の条件を満たしているが、タイプ $\textcircled{1}$ と $\textcircled{4}$, とくに $\textcircled{1}$ は角加速度の変動が大きく、角度の極大値も大きくなっている。実際に制御する場合においてタイプ $\textcircled{1}$ は以外に多いパターンである。このタイプは角度の増大を抑えようとする、角速度を小さくしなければならず、このため角加速度の変動が大きくなる。ここではこのタイプを中心に n 及び t_c のパラメータ・サーベイを行う。

制御入力の次数については、次数を上げると角度の極大値を抑えることはできるが、角加速度のもどりが大きくなる。また、収束までの時間を長くすると角加速度の変動は小さくできるが、角度の極大値が大きくなる。 n , t_c ともに適当な値でのトレード・オフが必要である。今回は、定常歩行部歩幅300[mm], 1.0[s/step]の完全歩行を中心にシミュレーションを行い、 n , t_c の値をそれぞれ10, 2.0[s]で歩行中一定とした。しかし、制御のタイプや歩容に違いによってこれらの最適な値を決定することで、より適切な制御が可能になるとと思われる。

3. 2. 4 歩行シミュレーション

本制御法を適用した歩行のZMP軌跡のシミュレーション結果をFig. 3.5に示す。X方向のZMPについては安定領域内に入るように制御が適正に行われているが、Y方向のZMPについては安定領域を外れる部分がある。特に発進の1歩から安定領域を外れており、制御法の改良が必要である。今回は直進歩行を対象としているため、X方向については移動による慣性力によって補償効果が期待できるのに対し、Y方向には移動による慣性力が作用しないためである。

ここで、簡単なモデルを用いてZMPの変動について考察してみる。Fig. 3.6は補償動作の θ の1自由度について簡略化した1質点モデルである（上体は重り〔質点〕に対してリンクの比率が非常に小さいため、慣性モーメントを無視してもほとんど影響はない）。このようにモデル化するとZMPは式(3.1)となる。

$$\begin{aligned} YZMP = & - \frac{L[\sin\theta(g-L\dot{\theta}^2\cos\theta-L\ddot{\theta}\sin\theta)]}{g-L\dot{\theta}^2\cos\theta-L\ddot{\theta}\sin\theta} \\ & - \frac{L^2[\cos\theta(\dot{\theta}^2\sin\theta-\ddot{\theta}\cos\theta)]}{g-L\dot{\theta}^2\cos\theta-L\ddot{\theta}\sin\theta} \end{aligned} \quad (3.1)$$

式(3.1)において歩行開始期を考えると、つまり $\theta = \dot{\theta} = 0$ とすると、

$$YZMP = \frac{L^2\ddot{\theta}}{g} \quad (3.2)$$

となる。即ち、YZMPを正方向に移動させる場合 $\ddot{\theta}$ は正となる。これはYZMPの移動方向と逆方向に上体を振ることになる。この場合、角度は時間の2乗に比例して増大するため、重力項が徐々に支配的となり、YZMPは正方向への移動量が減少して、やがて負の方向に向かい出す。これを正の方向に戻すために、角加速度は更に正方向に大きくなりさらなる角度増大を招き、ついにはYZMPは安定領域を外れてしまう。これは、角速度・角加速度を無視できるとした場合に、式(3.1)が式(3.3)に示すように重心を表す静歩行の式となり、YZMPの移動方向と上体の移動方向が一致するためである。

$$YZMP = -L\sin\theta \quad (3.3)$$

つまり、ZMPの方程式は式(3.2)と(3.3)から分かるように角度と角加速度に関して、相反する性質を持つためこのようなことが起こるのである。これらのバランスによって発散しない補償動作が成立している。実際にYZMPにおいては角速度と角加速度が小さく静歩行と一致する（ZMP軌跡と重心の軌跡が一致）時期が存在

している。

制御法の改良としては、直進歩行においては歩行周期を長めにとり歩幅を大きくとることで、矢状面内で ϕ を動的に制御し、前頭面内では θ を静的に制御する方法も考えられる。しかし、周期が長くなるにつれ ϕ の動作が大きくなる可能性があり（付録A：A.2.1節参照）、歩行を不安定にする恐れがあるうえ、将来の方向転換等の歩容への適応が難しくなると考えられる。他に、静歩行で歩行を開始し動歩行に遷移させることも考えられるが、その遷移部分が困難であると思われる（付録A：A.2.1節参照）。また、YZMPが安定領域を外れそうになる前に支持脚を切り換える方法も考えられるが、ここでは歩容に対しては基本的にZMPの計測結果に基づく制御は行わないものとする。これは、歩容によって歩行安定化を行うことは可能であるが、この自由度は上体による補償動作のみではどうしても補償しきれない外乱などが作用した場合に用いるためである。

今回の直進歩行においては、この問題を発進の歩容静止期に前頭面のみ重心を支持脚側に移動させることで回避する。この移動においては、ZMPへの影響が少ない角加速度の範囲をシミュレーションにより決定する。この角加速度の範囲を $-0.4 \sim 0.4 [\text{rad/s}^2]$ とし、重心移動のための動作をこの範囲内で指定した角加速度 $\ddot{\theta}_{0a}$ と発進の歩容静止時間 t_{sa} から以下のように与える。

$$\begin{aligned}
 0 \leq t \leq \frac{t_{sa}}{2} \\
 \ddot{\theta}(t) &= \frac{2 \ddot{\theta}_{0a}}{t_{sa}} t \\
 \dot{\theta}(t) &= \frac{\ddot{\theta}_{0a}}{t_{sa}} t^2 \\
 \theta(t) &= \frac{\ddot{\theta}_{0a}}{3 t_{sa}} t^3 \\
 \\
 \frac{t_{sa}}{2} < t \leq t_{sa} \\
 \ddot{\theta}(t) &= -\frac{2 \ddot{\theta}_{0a}}{t_{sa}} t + 2 \ddot{\theta}_{0a} \\
 \dot{\theta}(t) &= -\frac{\ddot{\theta}_{0a}}{t_{sa}} t^2 + 2 \ddot{\theta}_{0a} t - \frac{\ddot{\theta}_{0a}}{2} t_{sa} \\
 \theta(t) &= -\frac{\ddot{\theta}_{0a}}{3 t_{sa}} t^3 + \ddot{\theta}_{0a} t^2 - \frac{\ddot{\theta}_{0a}}{2} t_{sa} t + \frac{\ddot{\theta}_{0a}}{12} t_{sa}^2
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

$$t > t_{sa}$$

$$\ddot{\theta}(t) = 0.0$$

$$\dot{\theta}(t) = 0.0$$

$$\theta(t) = 0.0$$

なお、歩容静止期においても角加速度制御は行う。

上記の改良の結果 Y Z M P においても安定領域に入るように的確に制御が行われるようになった。しかし、停止後の土体動作の収束が悪く、発散したり、収束しても収束が非常に遅い。これは、停止期の歩行時間（1歩に要する時間）を定常歩行期のそれと同一としていたためであり、この時間を短くすることで解決できる⁵⁾。実際に20～30[%]程度の時間短縮で、上体補償動作の発散しない完全歩行が達成できている。停止期はそれ以前の歩行にある程度は拘束されることになる。Fig. 3.7～3.9に完全歩行の7歩のシミュレーション結果を示す(スティック線図は0.2[s]間隔、矢状面は右足のみ表示)。また、これらの21歩の場合についても、補償動作に発散はなく、歩行停止とともに収束する安定歩行が可能となっている(Fig. 3.10～3.12)。この図から分かるように上体動作が完全な定常状態になるのは約10歩後である。

修正用ファクター、しきい値及び定常歩行期の腰の初期位置については、シミュレーションにより安定歩行となり補償動作の発散しない、かつ収束までの時間が短い場合についてサーベイし、最適値を決定した。修正用ファクターは0.2～0.5程度が適当で、これ以上になると角加速度が過渡的な動きとなるため、補償動作がぎこちなくなるうえ、発散する傾向がある。しきい値については、ここでは X Z M P : 0.05[m], Y Z M P : 0.04[m]としたが、この値も修正用ファクターと同様に、あまり小さくし過ぎると補償動作は発散する傾向にある。これは、補償動作の収束期間が短くなるためである。定常歩行期の腰の初期位置 X0 については付録 A の A.2.1 節と同様の結果を得ており、制御法 A で定常歩行時に上体補償動作が最適となる X0 が本制御法においても最適である。この最適値から離れすぎると上体動作の ϕ が収束しなくなる。また、この腰の位置は歩幅や歩行速度に密接に関係があり、これらに適した組み合わせが存在する。即ち、歩行速度に依存した最適な歩行パターン(歩幅、周期、腰の位置など)があり、このパターンは数多く存在するものではないと考えられる。

補償動作の計算は上記7歩の場合で CPU 時間が約 2.3[s] (F A C O M M-780/20; スカラ計算)であり、実用に十分値する。なお、補償動作を歩容にまで拡張する場合には、逆運動学計算に比較的多くの CPU を費やしているため、これらのアルゴリズムについて検討が必要である。

前述のように本制御法の有効性と妥当性が確認された。しかし、事前に修正用ファクターやしきい値などのいくつかのパラメータ・サーベイを必要とするためこれ

らについて定量化が必要である。これらの値は、歩行速度などのいくつかの歩容パラメータに依存する値であるから、さらにシミュレーションを進めることでこれらの定量化は可能であると考えられる。

Table 3.1 Factor of safety.

リンク直径 [mm]	安全率
30	2.20
35	3.45
40	5.07
45	7.10
50	9.57

Table 3.2 Errors of ZMP trajectory.

	X_{ZMP} 最大誤差 [mm]	Y_{ZMP} 最大誤差 [mm]	X_{ZMP} 累積誤差	Y_{ZMP} 累積誤差
多項式近似	4.1	0.4	114.0	59.9
微分値近似	3.4	0.3	113.3	59.7

300 [mm/step], 1.0 [S/STEP], 両脚支持時間 1 歩の 20 [%]

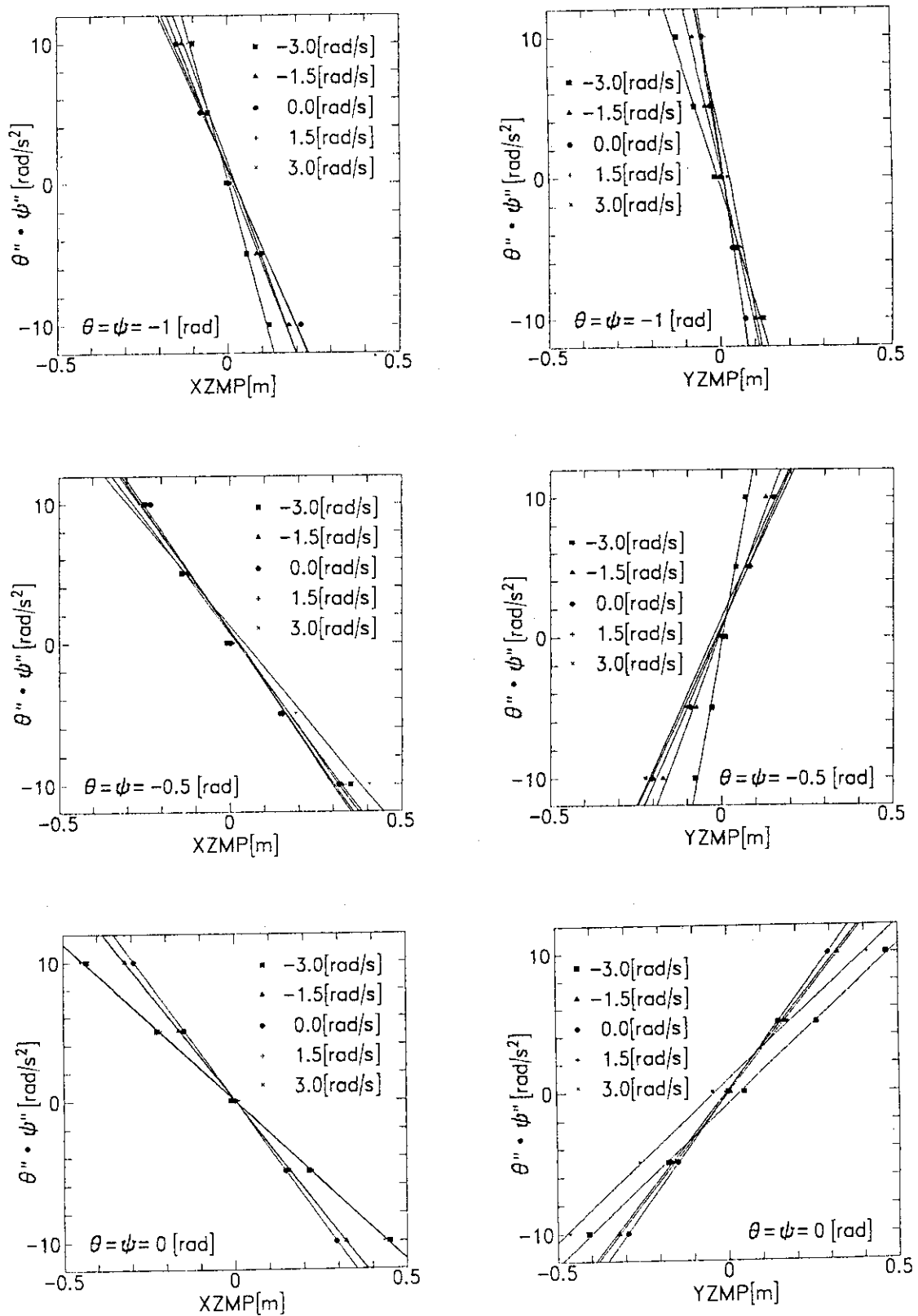


Fig. 3.1 Displacement of ZMP due to compensative trunk motions.

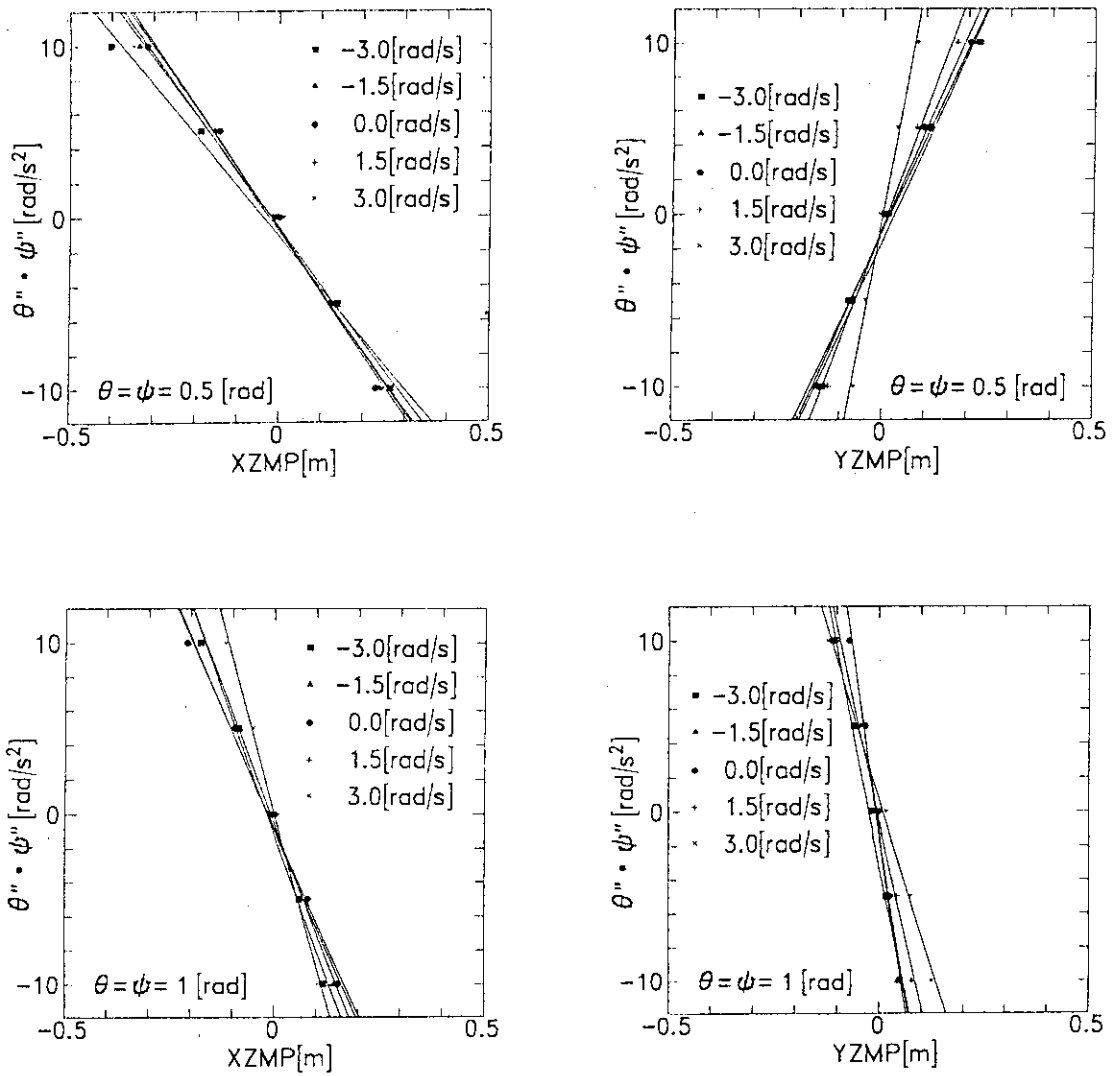


Fig. 3.1 cont.

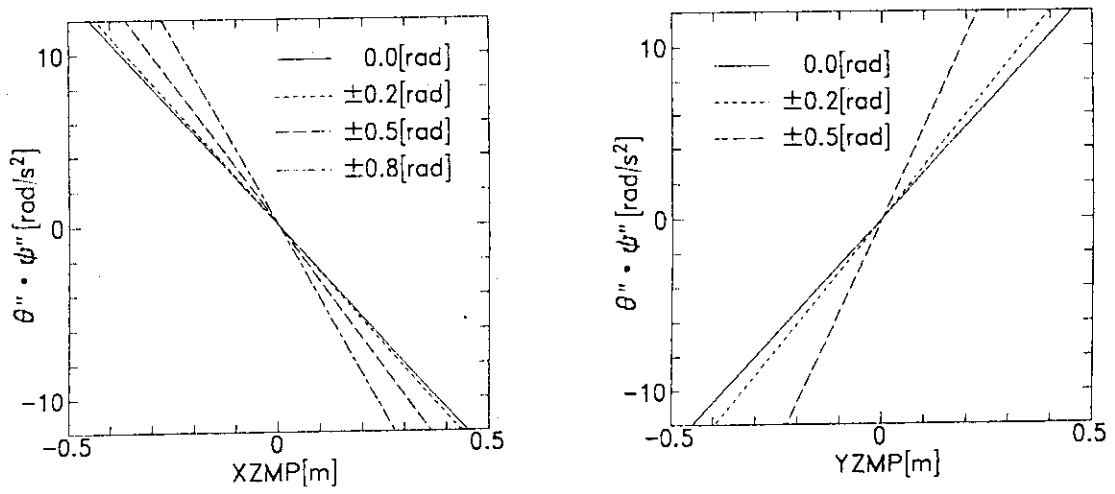


Fig. 3.2 Displacement of ZMP due to compensative trunk motions.

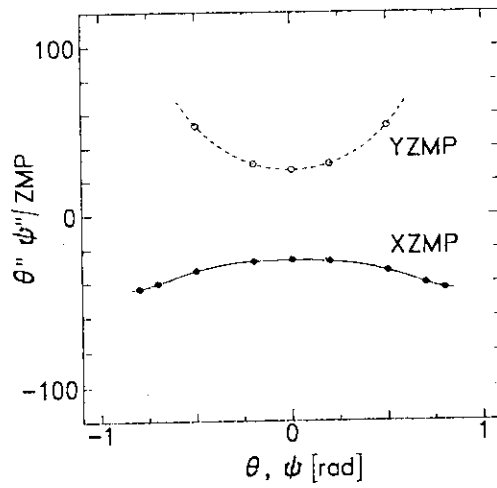


Fig. 3.3 Ratio of Displacement of ZMP to angular acceleration.

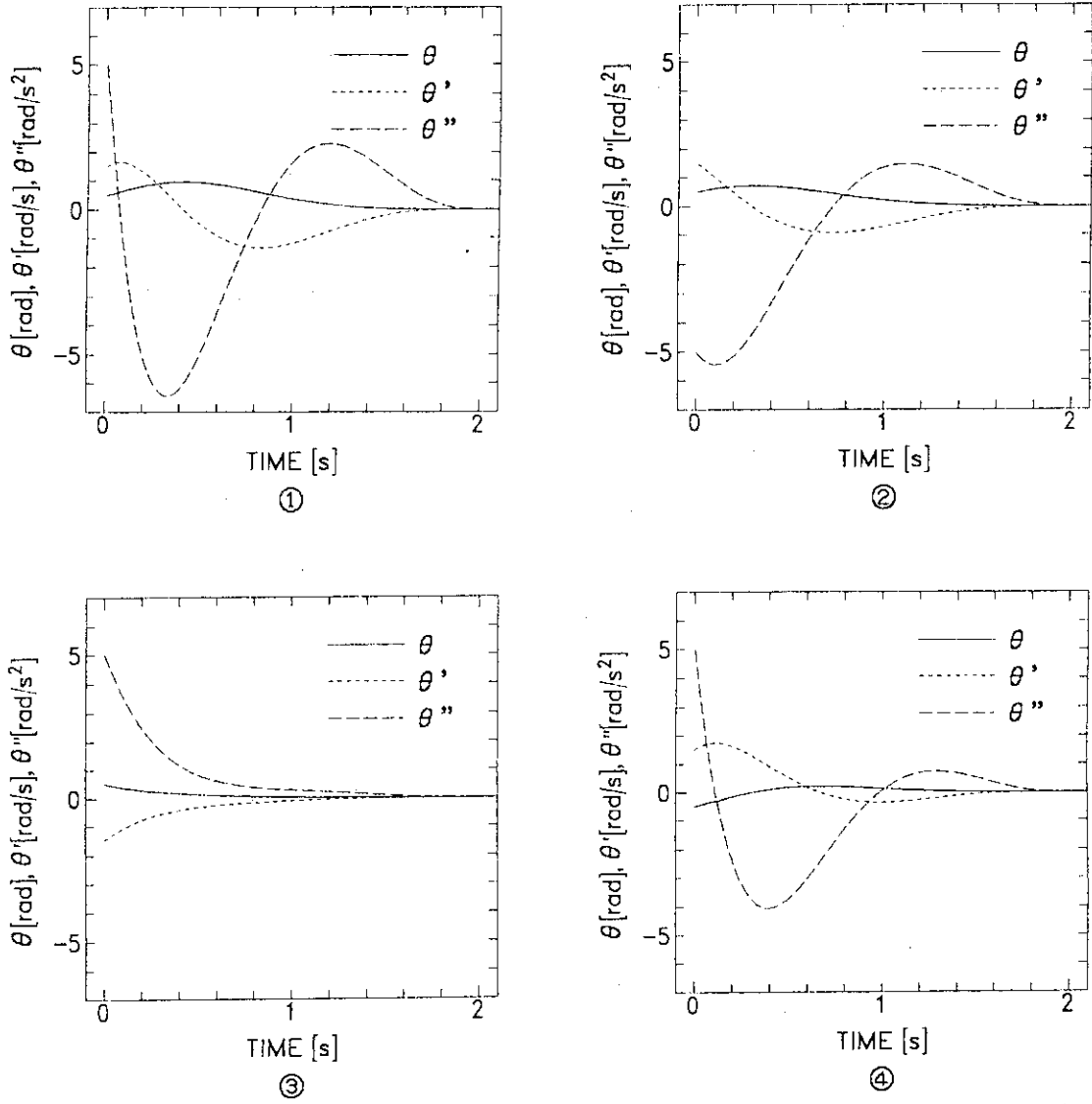


Fig. 3.4 Transition of controlled variable.

定常歩行部 : 0.3 [m/step] , 1.0 [s/step]

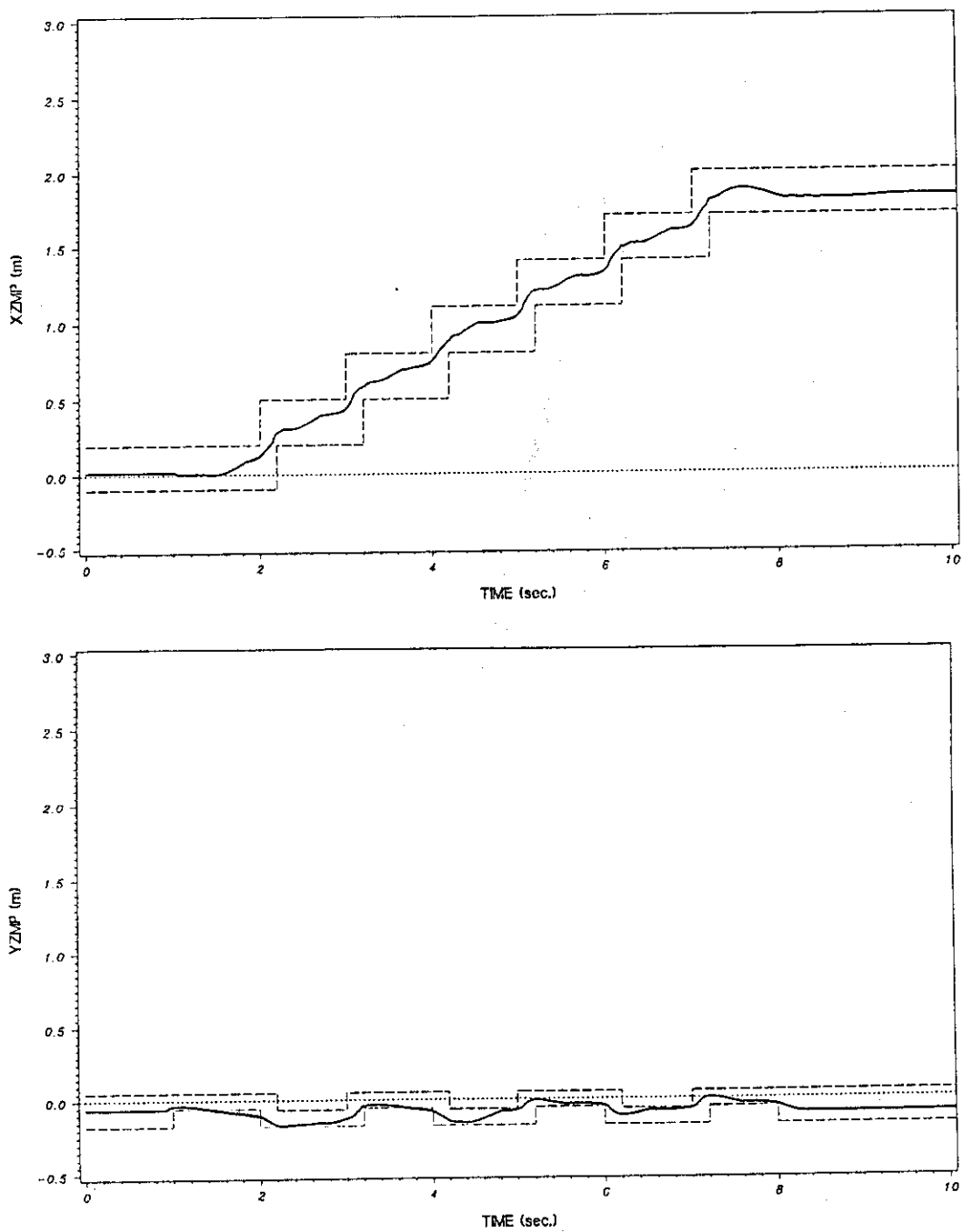


Fig. 3.5 Simulated result based on new control method. (ZMP trajectory)

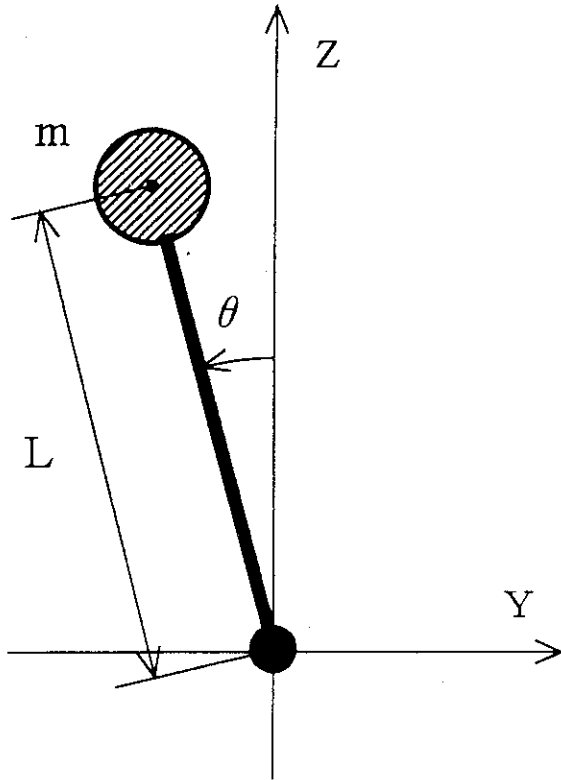
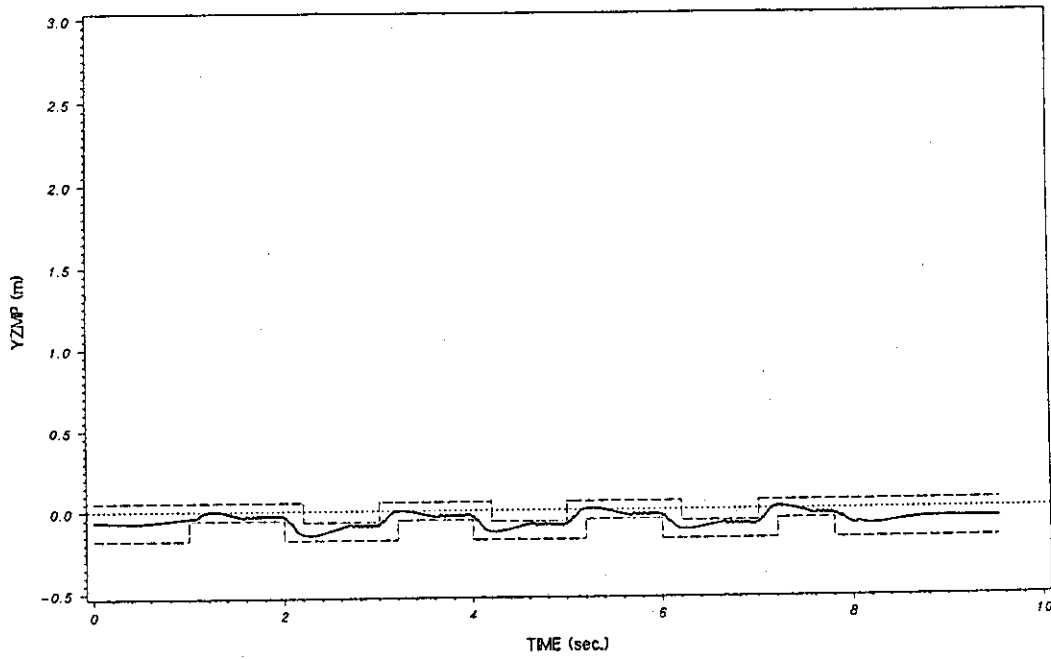
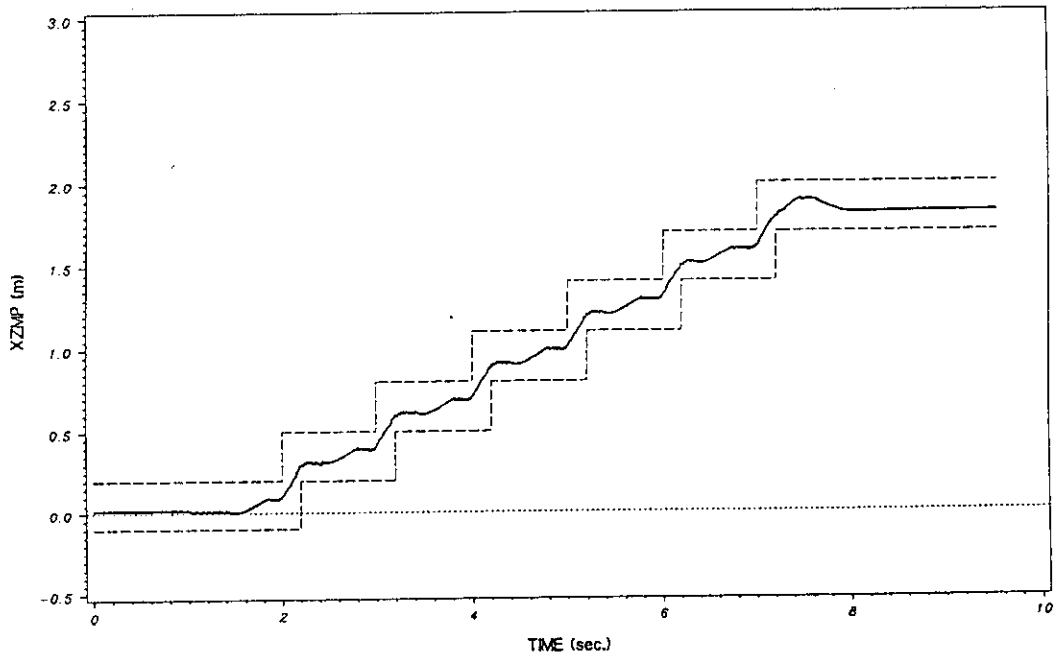


Fig. 3.6 One particle model of robot's trunk.

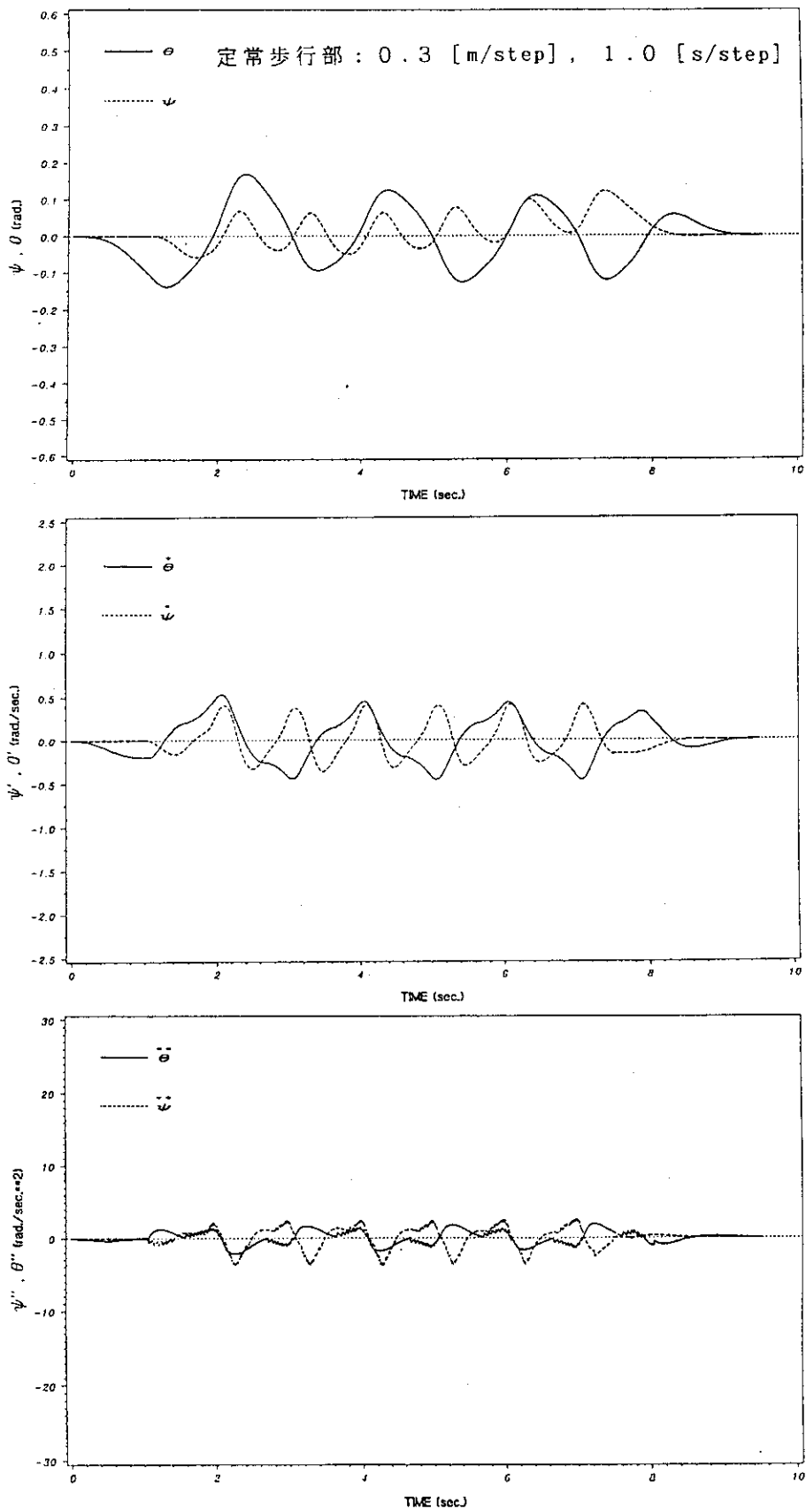
定常歩行部 : 0.3 [m/step], 1.0 [s/step]



(a)

ZMP trajectory

Fig. 3.7 Simulated results based on new control method.

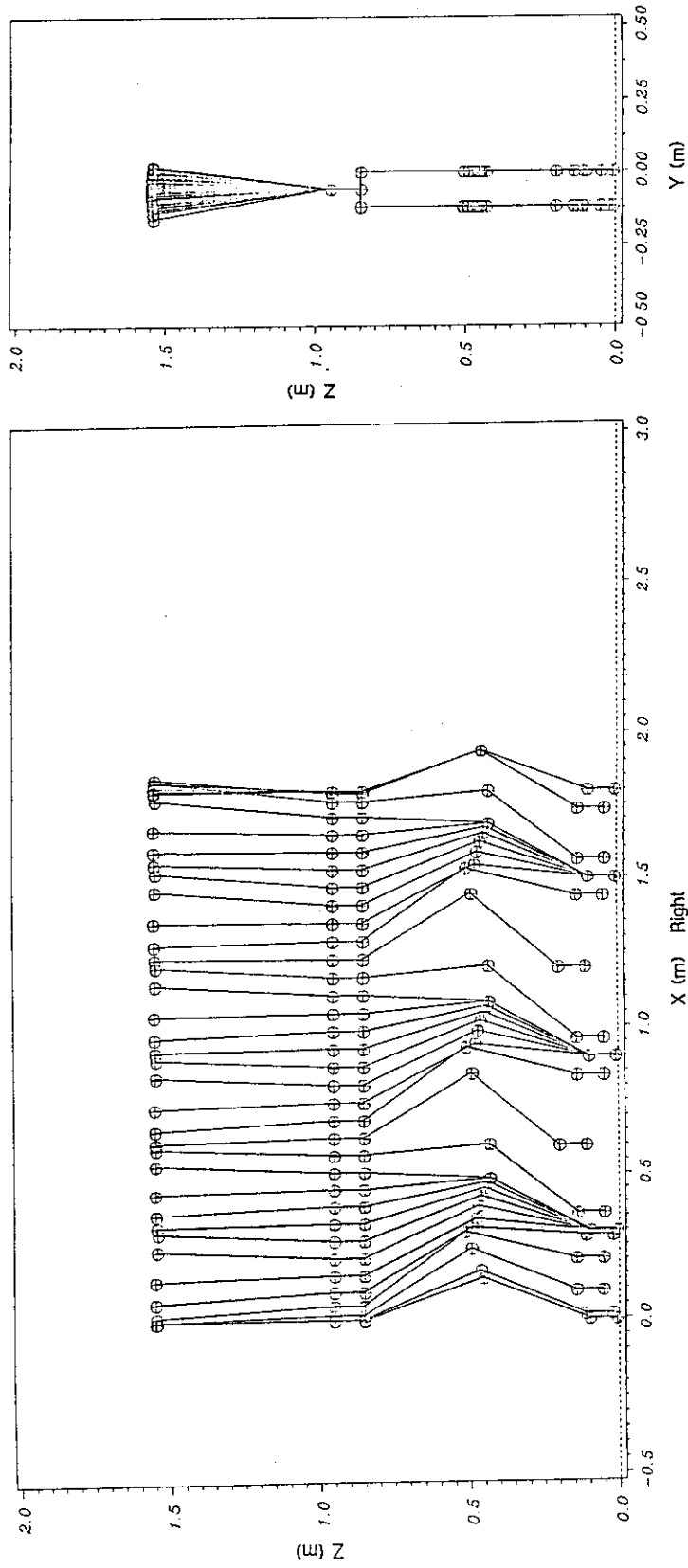


(b)

Compensative trunk motions

Fig. 3.7 Simulated results based on new control method.

定常歩行部 : 0.3 [m/step], 1.0 [s/step]

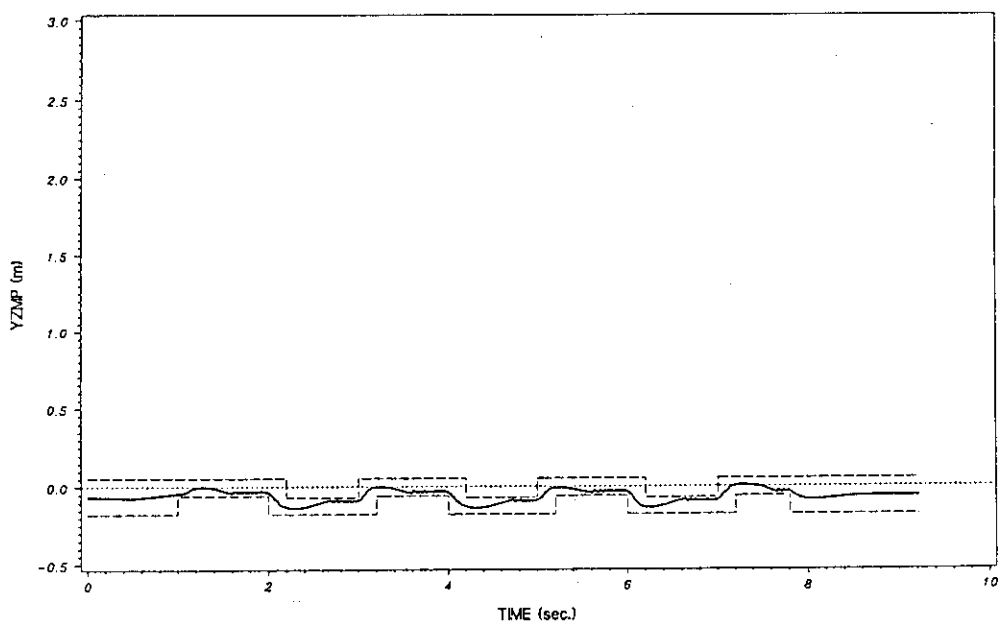
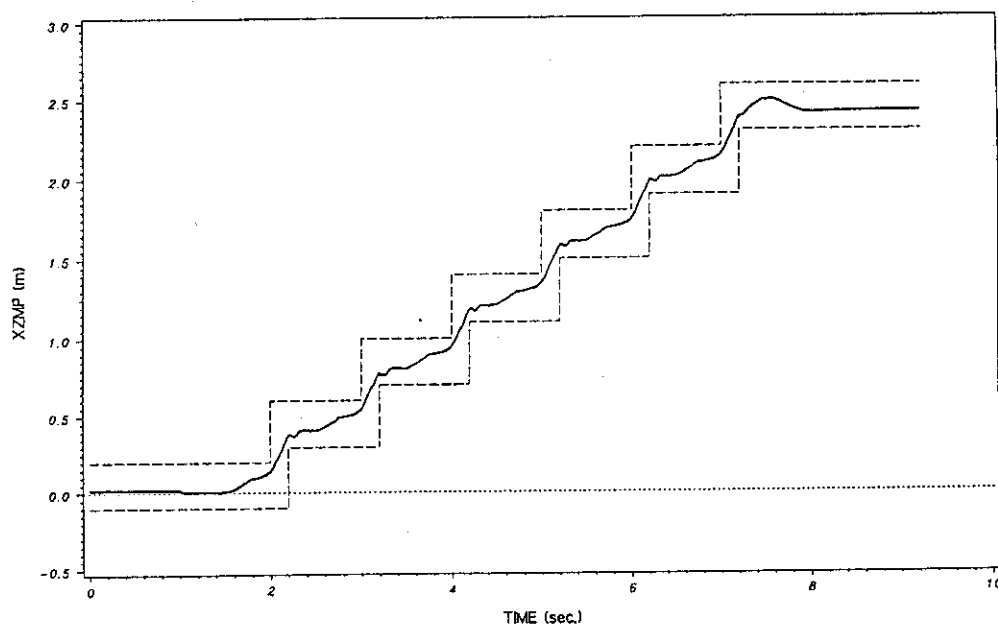


(C)

Walking

Fig. 3.7 Simulated results based on new control method.

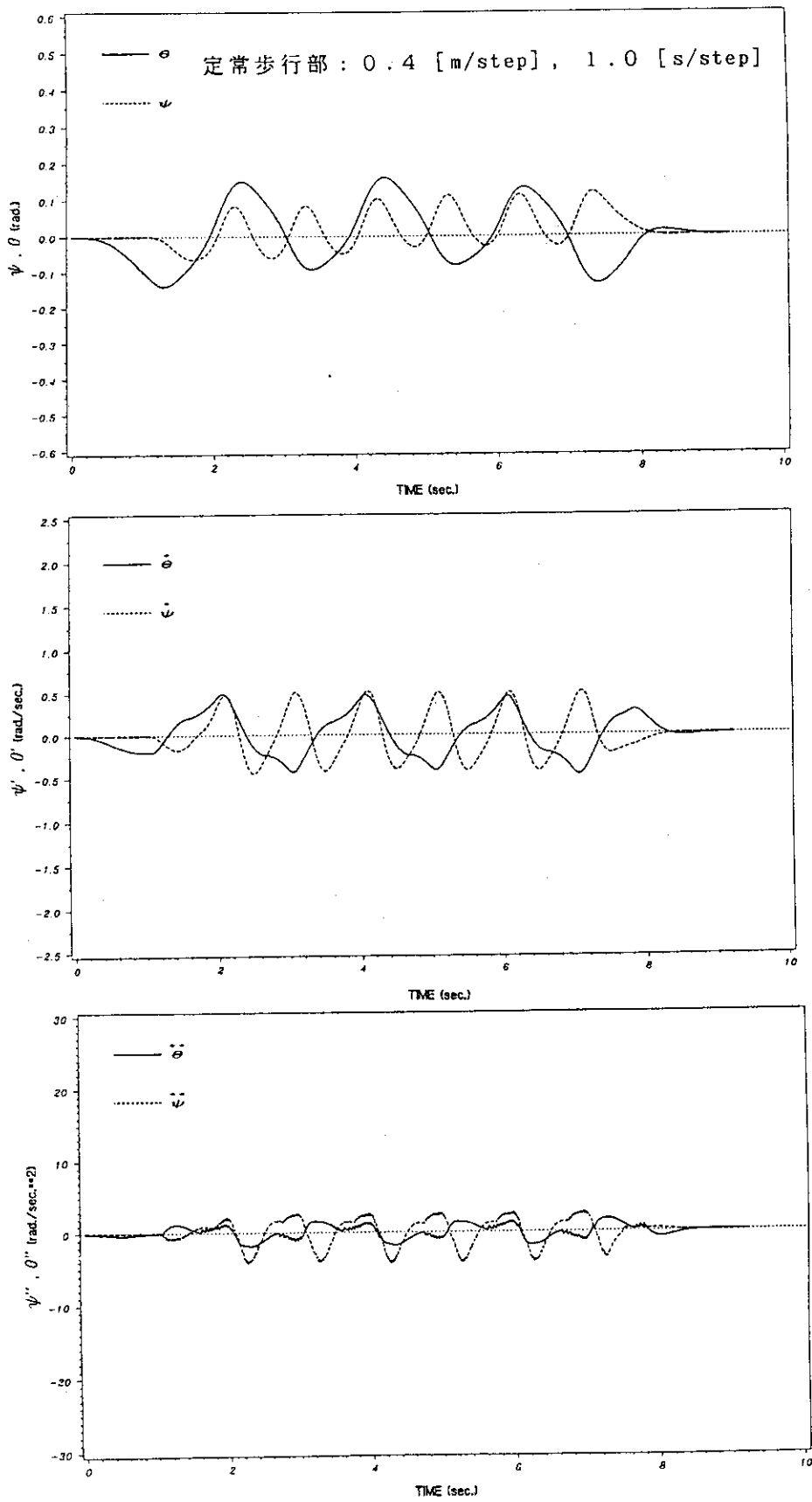
定常歩行部 : 0.4 [m/step], 1.0 [s/step]



(a)

ZMP trajectory

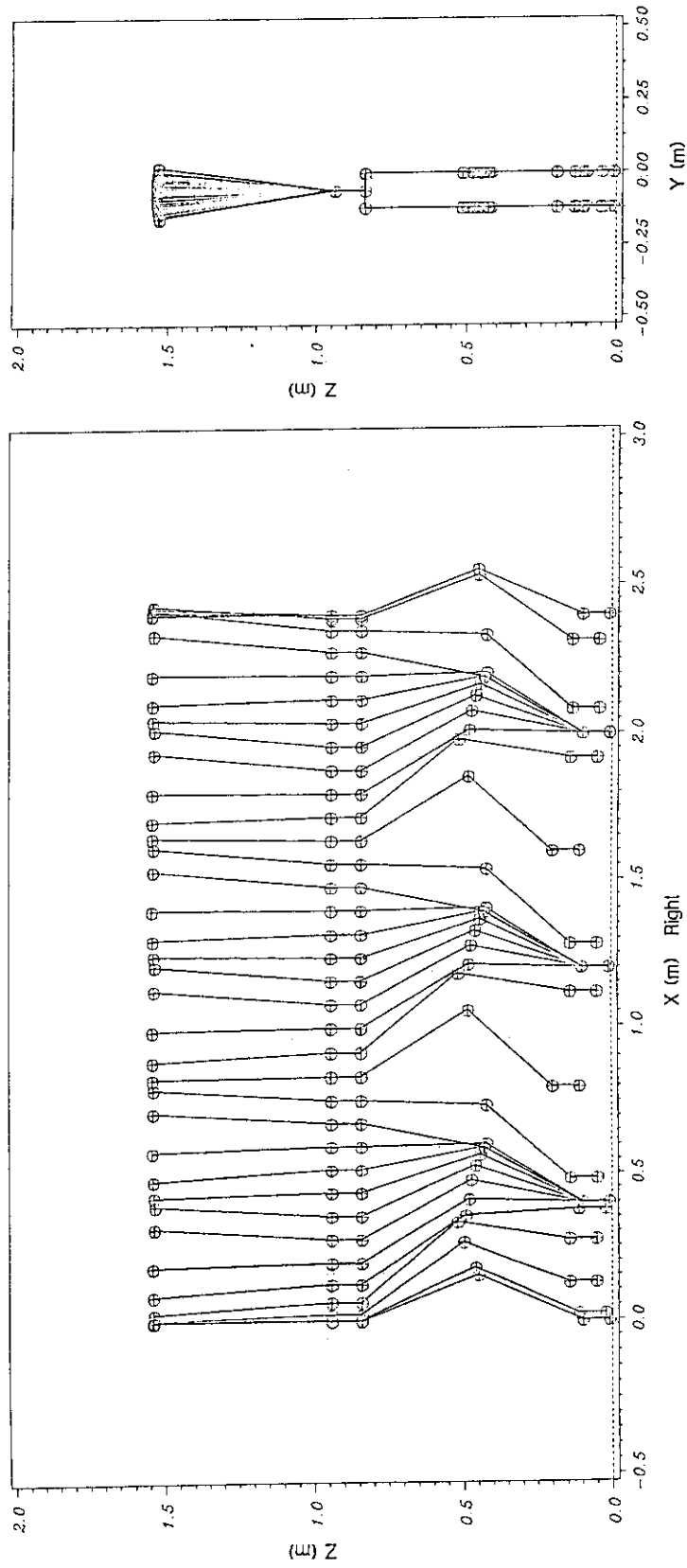
Fig. 3.8 Simulated results based on new control method.



(b)

Compensative trunk motions
 Fig. 3.8 Simulated results based on new control method.

定常歩行部 : 0.4 [m/step], 1.0 [s/step]

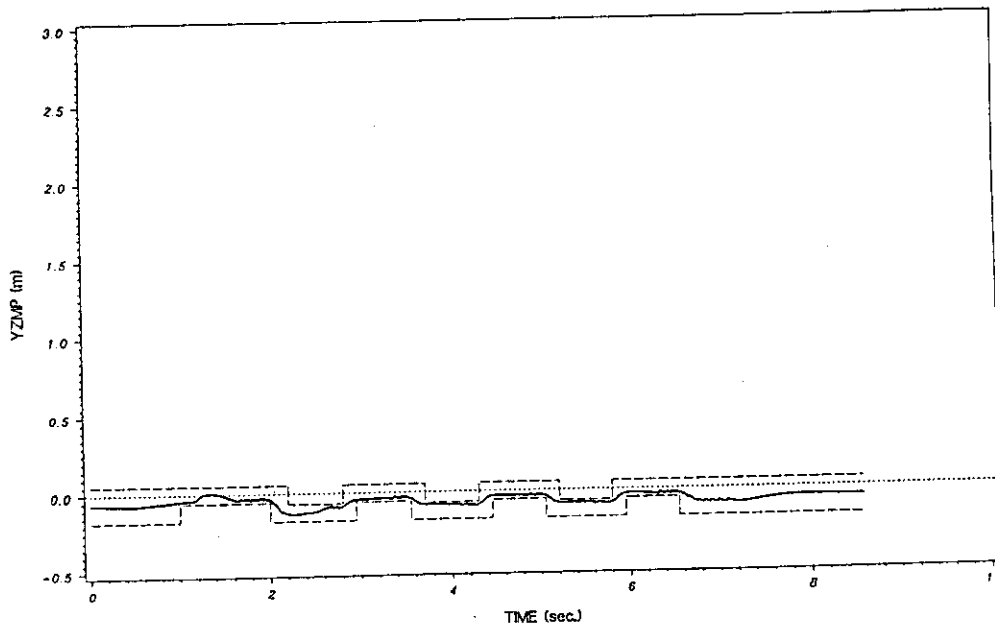
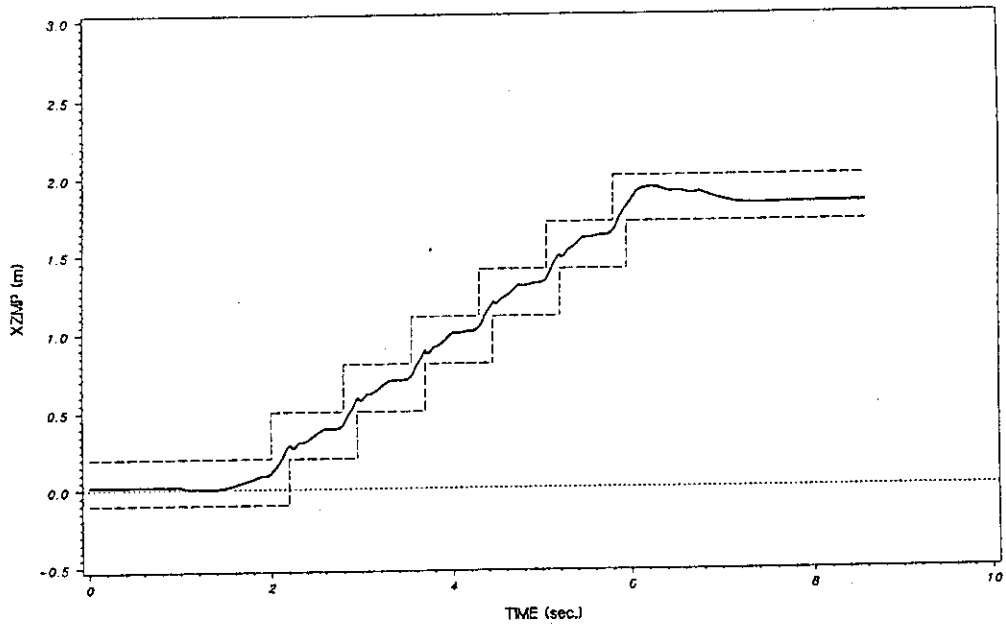


(c)

Walking

Fig. 3.8 Simulated results based on new control method.

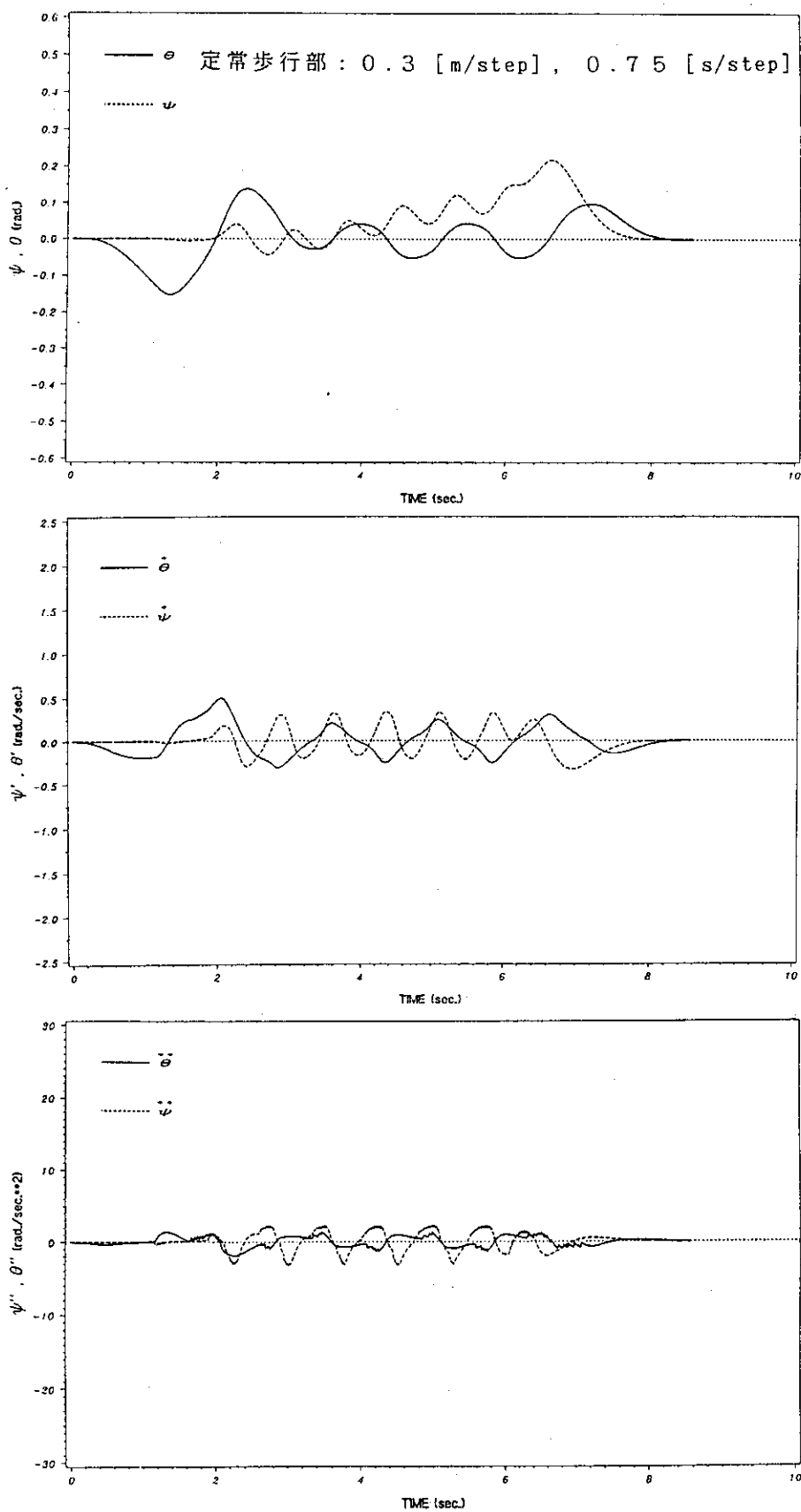
定常歩行部 : 0.3 [m/step], 0.75 [s/step]



(a)

ZMP trajectory

Fig. 3.9 Simulated results based on new control method.

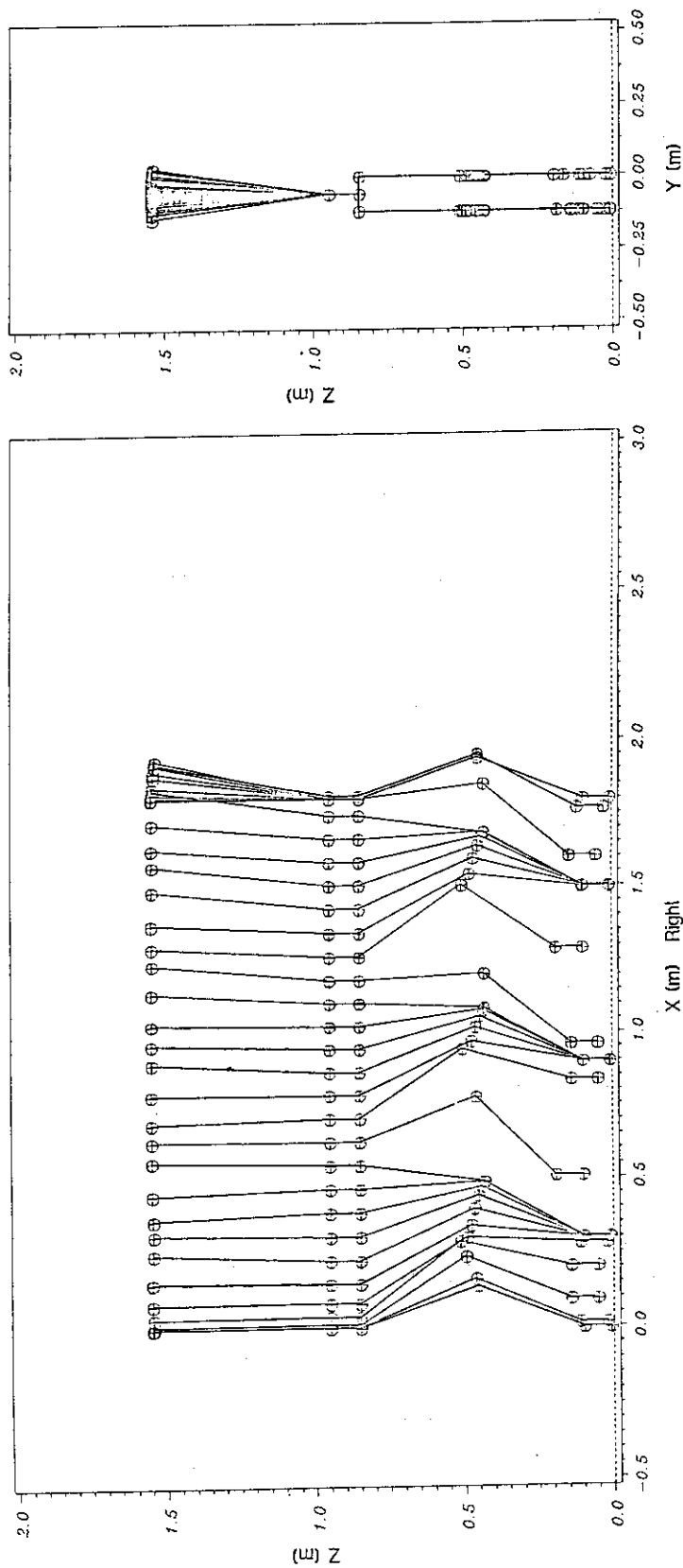


(b)

Compensative trunk motions

Fig. 3.9 Simulated results based on new control method.

定常歩行部 : 0.3 [m/step], 0.75 [s/step]



(c)

Walking

Fig. 3.9 Simulated results based on new control method.

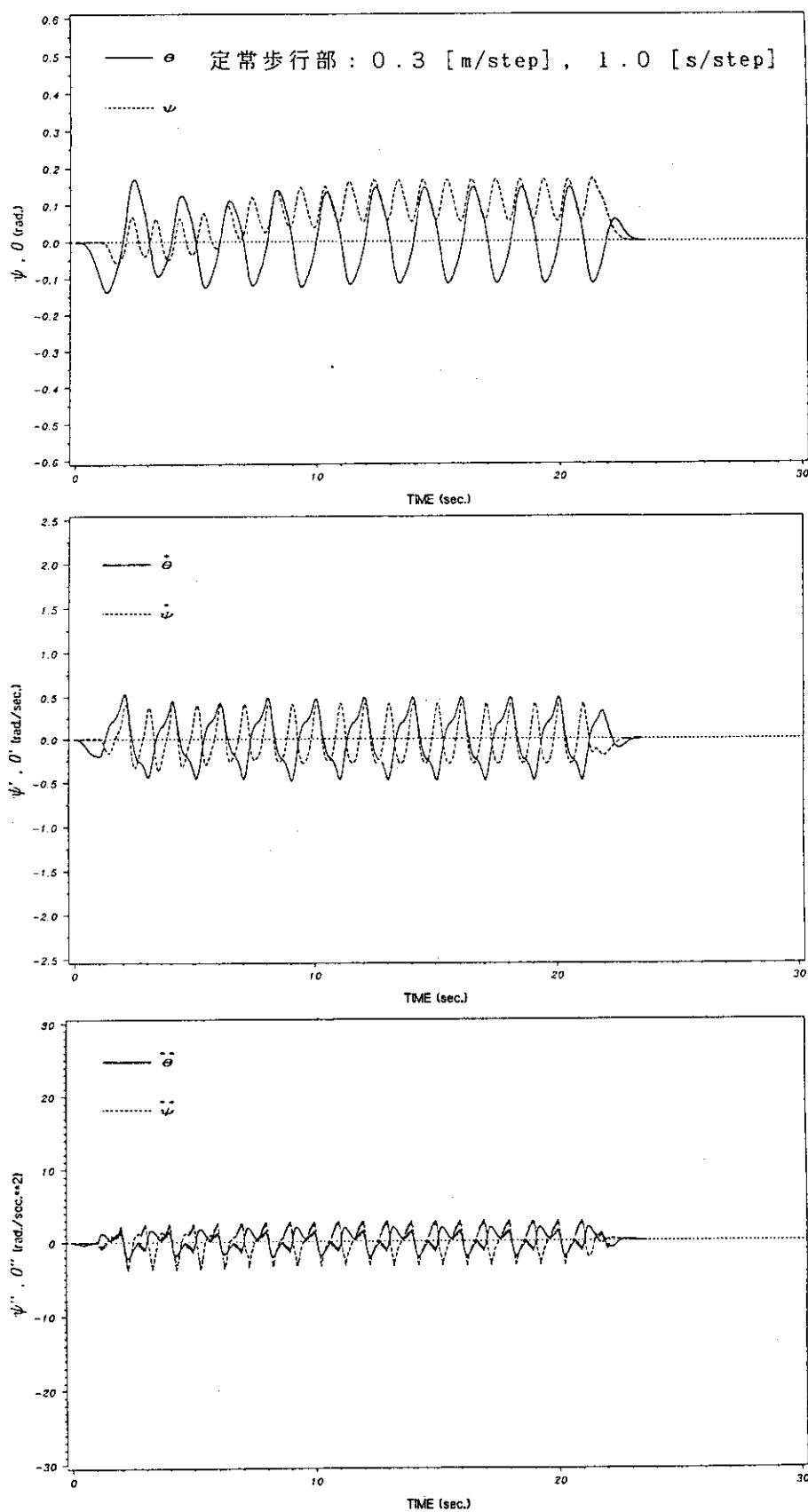


Fig. 3.10 Simulated result based on new control method.
 (compensative trunk motions : 21steps)

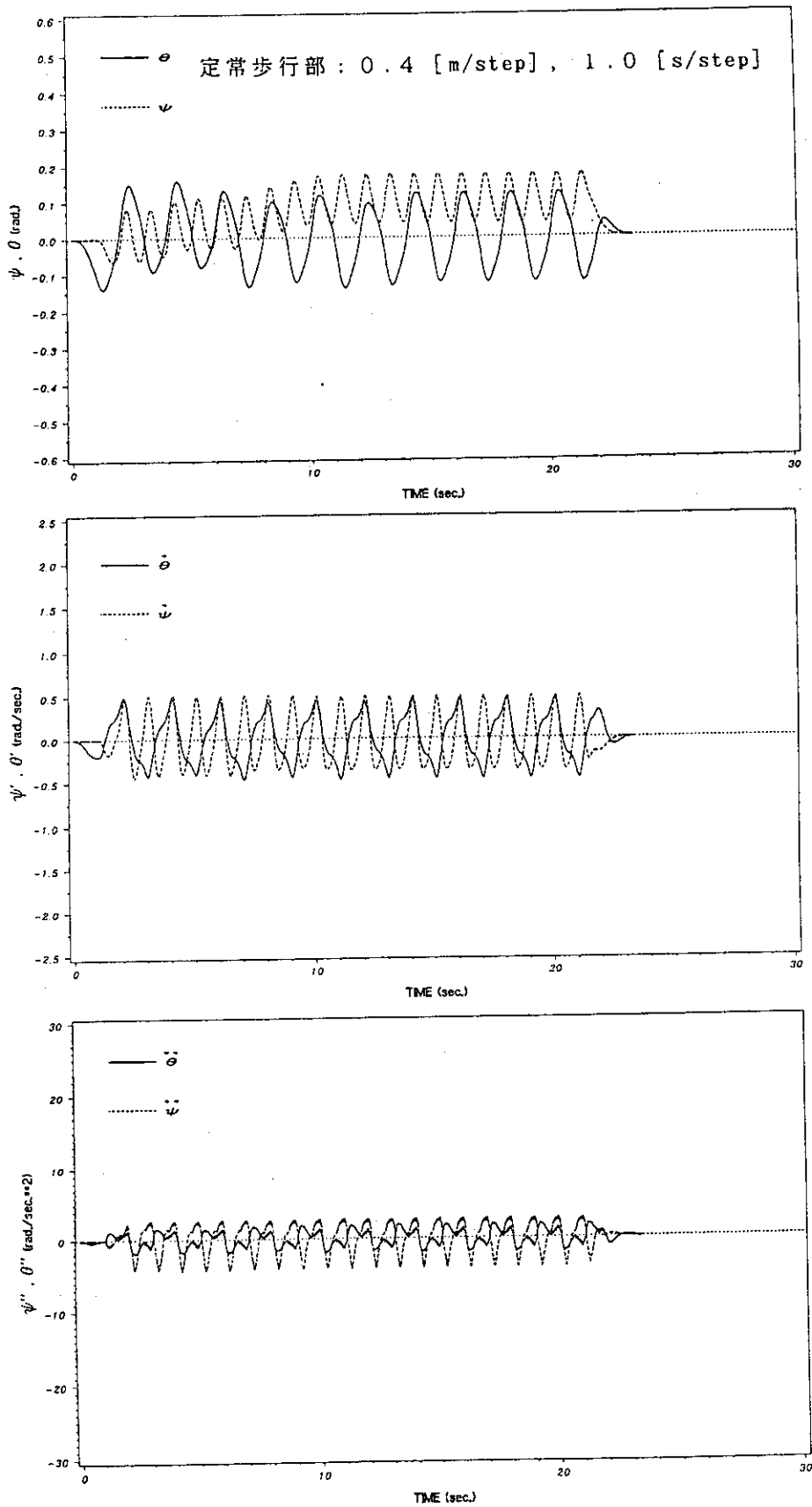


Fig. 3.11 Simulated result based on new control method.
(compensative trunk motions : 21steps)

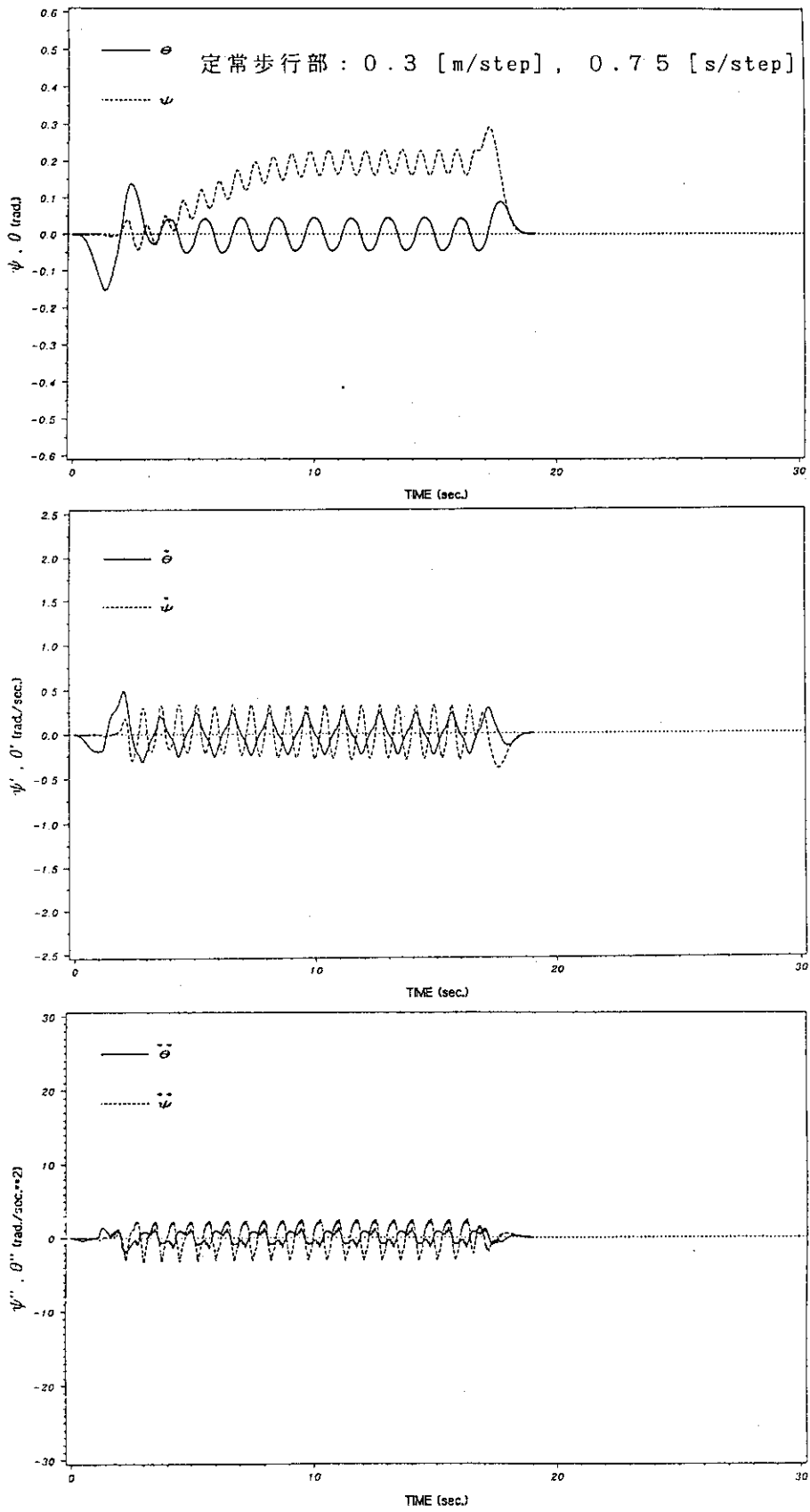


Fig. 3.12 Simulated result based on new control method.
 (compensative trunk motions : 21steps)

4. おわりに

本報告では、従来の2足歩行ロボットの制御法である、プログラム制御での歩行による問題点から、ロボット自身の現在の動作状況を検出しながら制御する方法の1つとして、ZMPの動的監視に基づく制御法を提案した。そして、外乱の無い直進完全歩行に本制御法を適用し、シミュレーションによってその妥当性を確認した。

しかし、まだいくつかの残されている制御上の問題がある。第1に腰及び足の軌道についてである。これらの軌道をエネルギーやアクチュエータのトルク・パワーなどに関する評価関数の下に最適化し、より安定で自然な歩行とするべきである。第2に外乱などによって、上体のみでは補償しきれない場合に対処するための、制御法の開発である。これは、歩幅や周期を変更することによって補償するか、制御法1の歩容補償型のように腰の位置の変更でも補償することが可能であると考えている。また、上体の胴の長さを長くすることも補償範囲の拡大につながる。第3に歩行の高速化や方向転換の自由度付加にともなう、ヨー軸まわりのモーメント補償の問題である。ヨー軸まわりのモーメントの補償は、WL-12RVのような方法や、腕を付加することによって可能になると思われる。但し、過重量など解決すべき問題は残る。

2足歩行ロボットの研究は、特に実験オリエンテッドな研究である。シミュレーションでは安定な歩行パターンであっても、歩行実験においては、ロボットの予想外の振動や衝撃、弾性変形に起因する不安定な歩行が数多く観測された。理論的には良くても実際には理論通りには行かない部分や、理論的にモデル化するのが難しい部分がある。歩行実験においては、前述の歩行への悪影響を軽減するため、歩行パターンの見直しや現場での調整が数多くみられた。この実験の繰り返しにより得られた知見をロボット設計にフィード・バックする事が重要で、これなくしてはロボットは成り立たない。早稲田大学での1年間の実験研究に携わり、2足歩行ロボットのハードウェア化の重要性を再認識した。

現在の2足歩行ロボットにはハードウェアに関して、まだ解決されなければならない問題がある。第1にロボットの軽量化である。構造部材の開発による軽量化はアルミニウム合金などはすでに限界であり、FRPにおいて20[%]程度の軽量化が見込める程度である⁶³⁾。構造部材の軽量化も重要であるが、より重要となるのはアクチュエータである。特に2足歩行ロボットのように多自由度モデルではこの影響は大きい。第2にこのアクチュエータの問題である。現在のアクチュエータはトルク重量比やパワー重量比の面で油圧系が有利であり、重量モデルのほとんどは油圧アクチュエータを用いている。しかし、油圧系はメンテナンスが大変であること、油温の影響を受けやすく扱いにくいこと、駆動源のロボットへの搭載によるさらなる過重量を招く恐れがあるなど欠点も多い。これは自ずから電動モータへと移行し

て行くものと思われる。今後、軽量で高出力のアクチュエータの出現が望まれる。第3にケーブルの問題である。現在はエネルギーの供給や情報の授受のためにロボットにはケーブルが付随している。これはロボットの行動範囲を狭めているだけでなく、自律化への妨げにもなる。当然これを無くした型にしなければならない。

今後の方針としては、本制御法の外乱等への適応性についての検討、上記問題点の解決及び方向転換動作の付加を行い、プロトタイプ・モデルの設計、2足歩行ロボット・ハードウェアの試作へと進めていく計画である。

謝 辞

1年間研究を進めるに当たり、適切な助言と指導を頂きました早稲田大学の加藤一郎教授、高西淳夫助教授、菅野重樹助教授に深く感謝いたします。また、歩行実験など2足歩行ロボット研究に多大の御協力を頂きました、2足歩行研究班の皆様にも深く感謝いたします。そして、研究に生活にたいへんお世話になった加藤研究室、高西研究室、菅野研究室の学生諸氏及びOBの皆様にも心より感謝いたします。

最後に、本報告書を書く機会を与えて頂きました情報システムセンター室長秋元正幸氏に深く感謝します。

て行くものと思われる。今後、軽量で高出力のアクチュエータの出現が望まれる。第3にケーブルの問題である。現在はエネルギーの供給や情報の授受のためにロボットにはケーブルが付随している。これはロボットの行動範囲を狭めているだけでなく、自律化への妨げにもなる。当然これを無くした型にしなければならない。

今後の方針としては、本制御法の外乱等への適応性についての検討、上記問題点の解決及び方向転換動作の付加を行い、プロトタイプ・モデルの設計、2足歩行ロボット・ハードウェアの試作へと進めていく計画である。

謝 辞

1年間研究を進めるに当たり、適切な助言と指導を頂きました早稲田大学の加藤一郎教授、高西淳夫助教授、菅野重樹助教授に深く感謝いたします。また、歩行実験など2足歩行ロボット研究に多大の御協力を頂きました、2足歩行研究班の皆様にも深く感謝いたします。そして、研究に生活にたいへんお世話になった加藤研究室、高西研究室、菅野研究室の学生諸氏及びOBの皆様にも心より感謝いたします。

最後に、本報告書を書く機会を与えて頂きました情報システムセンター室長秋元正幸氏に深く感謝します。

参考文献

- 1) 浅井 他：原子力知能化システム技術の研究，私信，1988.
- 2) 浅井，久米 他：原子力知能化システム技術の研究 -昭和63年度作業報告-，JAERI-M 89-023，1989.
- 3) 浅井，久米 他：原子力知能化システム技術の研究 -平成元年度作業報告-，JAERI-M 90-060，1990.
- 4) 浅井，久米 他：原子力知能化システム技術の研究（人間動作シミュレーションプログラム：HASP）-平成2年度作業報告-，JAERI-M 91-101，1991.
- 5) 久米：人間型ロボットの二足歩行シミュレーション，JAERI-M 91-047，1991.
- 6) 久米：人間型ロボットの二足歩行シミュレーション -シミュレーションモデルの開発-，第9回日本ロボット学会学術講演会，PP.315-318，1991.
- 7) 加藤 他：2足歩行機械 WASEDA LEG-5，第11回SICE学術講演会，PP.493-494，1972.
- 8) 加藤：2足歩行ロボット（WABOT-1）の開発，バイオメカニズム2，PP.173-184，1973.
- 9) 平林，加藤 他：2足歩行機械の動的歩行に関する解析，第13回SICE学術講演会，PP.131-132，1974.
- 10) 雁瀬，加藤(高)，加藤：油圧式2足歩行機械による準動歩行の研究，バイオメカニズム5，PP.269-280，1980.
- 11) 加藤(高)，高西，加藤 他：2足歩行機械システムの研究，バイオメカニズム6，PP.252-260，1982.
- 12) 高西，加藤 他：足首部にトルク制御機能を付加した2足歩行機械による準動歩行の研究，第3回バイオメカニズム学術討論会，PP.77-80，1982.
- 13) 高西：2足歩行ロボットによる準動歩行，日本ロボット学会誌1巻3号，PP.36-43，1983.
- 14) A. Takanishi, I. Kato, et al.: THE REALIZATION OF PLANE WALKING BY THE BIPED WALKING ROBOT WL-10R, Ro. man. sy '84, 1984.
- 15) 若原，高西，加藤 他：2足歩行パターン作成支援システム「WALK MASTER-4」の開発，第5回日本ロボット学会学術講演会，PP.575-578，1987.
- 16) 高西，加藤 他：2足歩行ロボットWL-10RDによる動歩行の実現，日本ロボット学会誌3巻4号，PP.67-78，1985.
- 17) 高西，加藤 他：上体補償型2足歩行制御方式，第26回SICE学術講演会，PP.505-506，1987.
- 18) 高西，加藤 他：上体補償機構を有する2足歩行ロボットWL-12の開発，第5回日本ロボット学会学術講演会，PP.579-582，1987.

- 19)高西, 加藤 他: 既知の外力環境下における上体補償型動歩行の実現, 第4回知能移動ロボットシンポジウム, PP.15-20, 1988.
- 20)高西, 加藤 他: 上体と腰の協調動作による2足歩行制御, 第27回SICE学術講演会, PP.643-644, 1988.
- 21)高西, 加藤 他: 既知の外力環境下で歩行可能な2足歩行ロボットWL-12Rの開発ーシステムの開発と上体と腰の協調動作による動歩行の実現ー, 第6回日本ロボット学会学術講演会, PP.111-114, 1988.
- 22)高西, 加藤 他: 6軸力センサを用いた2足歩行ロボットのZMP測定法, 第7回日本ロボット学会学術講演会, PP.689-690, 1989.
- 23)高西, 加藤 他: 未知の外力下における2足歩行ープログラム制御を用いた歩行実験による制御方式の検討ー, 第7回日本ロボット学会学術講演会, PP.695-698, 1989.
- 24)D. Shin, A. Takanishi, I. Kato, et al.: REALIZATION OF OBSTACLE AVOIDANCE BY BIPED WALKING ROBOT EQUIPPED WITH VISION SYSTEM
- 25)高西, 加藤 他: 未知の外力下における上体補償型2足歩行の実現, 第29回SICE学術講演会, PP.433-434, 1990.
- 26)A. Takanishi, I. Kato, et al.: A CONTROL METHOD FOR DYNAMIC BIPED WALKING UNDER UNKNOWN EXTERNAL FORCE, IROS '90, PP.795-801, 1990.
- 27)高西, 加藤 他: 非平坦路における上体補償型2足歩行, 第7回日本ロボット学会学術講演会, PP.691-692, 1989.
- 28)A. Takanishi, I. Kato, et al.: REALIZATION OF DYNAMIC BIPED WALKING STABILIZED BY TRUNK MOTION ON A SAGITTALLY UNEVEN SURFACE, IROS '90, PP.323-330, 1990.
- 29)Q. Li, A. Takanishi, I. Kato: A BIPED WALKING ROBOT HAVING A ZMP MEASUREMENT SYSTEM USING UNIVERSAL FORCE-MOMENT SENSORS, PP.1568-1573, IROS '91, 1991.
- 30)李, 高西, 加藤: 2足歩行ロボットにおける上体補償軌道の学習制御, 第9回日本ロボット学会学術講演会, PP.327-328, 1991.
- 31)Q. Li, A. Takanishi, I. Kato: LEARNING CONTROL OF TRUNK'S COMPENSATIVE MOTION FOR BIPED WALKING ROBOT BASED ON ZMP STABILITY CRITERION, PP.597-603, IROS '92, 1992.
- 32)高西, 加藤 他: 未知の外力下における2足歩行, 第9回日本ロボット学会学術講演会, PP.321-324, 1991.
- 33)高西, 加藤 他: 衝撃緩衝材料を用いた足底機構による2足歩行の安定化, 第9回日本ロボット学会学術講演会, PP.325-326, 1991.
- 34)高西, 加藤 他: 上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発ー高速動歩行の実現ー, 第6回知能移動ロボットシンポジウム, PP.1-6, 1992.

- 35) 寸土：上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの研究，早稲田大学平成3年度修士論文，1992.
- 36) 江草：環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究 - 上体補償型動歩行の実現 -，早稲田大学昭和61年度修士論文，1987.
- 37) 栃沢：環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究 - 既知の外力下での歩行の実現 -，早稲田大学昭和62年度修士論文，1988.
- 38) 武谷：環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究 - 未知の外力に対応した2足歩行制御方式の開発 -，早稲田大学昭和63年度修士論文，1989.
- 39) 唐木：環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究 - 未知の外力に対する適歩行の実現 -，早稲田大学平成元年度修士論文，1990.
- 40) 林：2次元非平坦路における上体補償型2足歩行制御方式の研究，早稲田大学平成元年度修士論文，1990.
- 41) 桑田：環境適応能力を持つ2足歩行ロボットの研究 - 横方向の未知外力に対する適歩行の実現 -，早稲田大学平成2年度修士論文，1991.
- 42) 岸：6軸力センサを用いた2足歩行ロボットのZMP測定，早稲田大学平成2年度卒業論文，1991.
- 43) 李：2足歩行ロボットの学習制御に関する研究 - 上体補償軌道の学習アルゴリズム -，早稲田大学平成2年度修士論文，1991.
- 44) 田中 他：形状記憶合金を用いた2足歩行ロボット用方向転換アクチュエータの試作，ロボティクス・メカトロニクス講演会'90，PP.187-188，1990.
- 45) 川路 他：固有のリズムに着目した2足歩行運動制御，第7回日本ロボット学会学術講演会，PP.673-674，1989.
- 46) 佐藤：静歩行における2足歩行ロボット機構の最適形状設計，第7回日本ロボット学会学術講演会，PP.681-684，1989.
- 47) 五十嵐，野飼：2足歩行ロボットによるSagittal Plane内の下位レベル適歩行に関する研究，日本ロボット学会誌7巻6号，PP.12-22，1989.
- 48) 武市 他：2足歩行への足首トルクの利用 - 踏ん張りの効果 -，第6回日本ロボット学会学術講演会，PP.119-122，1988.
- 49) 東原 他：コントローラを携帯した2足歩行ロボットの研究，ロボティクス・メカトロニクス講演会'89，PP.156-157，1989.
- 50) 米田：HC地形のための2足歩行ロボットの開発，第5回日本ロボット学会学術講演会，PP.585-586，1987.
- 51) 梶田，谷：線形倒立振子モードに基づく動的2足歩行の実時間運動生成，第30回SICE学術講演会，PP.575-576，1991.
- 52) 佐野，古荘：2足歩行ロボットBLR-G3の開発とその動的制御，第8回日本ロボット学会学術講演会，PP.303-394，1990.
- 53) Y. F. Zheng, et al.: On the Study of the Multiple Joint Biped Robots, Kernforschzent Karlsruhe, PP.133-152, 1987.

- 54) Y. F. Zheng, J. Shen : Gait Synthesis for the SD-2 Biped Robot to Climb Sloping Surface, IEEE Trans Rob Autom 6(1), PP.86-96, 1990.
- 55) J. Hodgins, J. Koe, M. H. Raibert : Running Experiments with a Planar Biped, Rob Res 3, PP.349-355, 1986.
- 56) H. B. Brown Jr, M. H. Raibert : Legs that Deform Elastically, RoManSy 6, PP.436-443, 1987.
- 57) J. Koechling, M. H. Raibert : How Fast Can a Legged Robot Run?, ASME DSC, 11, PP.241-249, 1988.
- 58) G. BARTOLINI, et al. : LEARNING AND VARIABLE STRUCTURE TECHNIQUES IN THE CONTROL OF MECHANICAL BIPED, Proc IEEE Conf Decis Control 28th(3), PP.2621-2628, 1989.
- 59) M. Cotsaftis, C. Vibet : Decoupled Control for 2D N-link Biped Walking System, Rob Auton Syst 5(2), pp.97-107, 1989.
- 60) M. Vukobratovic (加藤, 山下 訳) : 歩行ロボットと人工の足, 日刊工業新聞社, 1975.
- 61) 高西, 加藤, 久米 : 二足歩行ロボットWL-12 (Waseda Leg-12) の設計に関する調査報告, JAERI-M 91-197, 1991.
- 62) 長島 : 数値計算法, 槇書店, 1986.
- 63) 松井 : 繊維強化樹脂複合材料, 精密工学会誌 VOL.56 No.4, PP.22-25, 1990.
- 64) 川路 他 : 逆運動学を用いた2足歩行ロボットの目標軌道生成アルゴリズム, 第6回日本ロボット学会学術講演会, PP.123-124, 1988.
- 65) 高西, 加藤, 久米 : 二足歩行の運動学方程式化 - 直進における完全歩行の運動方程式 -, JAERI-M 90-093, 1990.
- 66) 山下 : 動的歩行 - 人間の歩行特性からの考察, 第20回SICE学術講演会, PP.433-434, 1981.
- 67) F. R. Sias, Jr., Y. F. Zheng : HOW MANY DEGREES-OF-FREEDOM DOES A BIPED NEED?, IROS '90, 1990.

付 録 A

歩行安定化補償動作の計算（直進定常歩行）

A. 1 補償動作の計算法

ここで述べる制御法⁶⁾は、事前にシミュレーションによって安定歩行パターンを解析し、この結果を設定歩行パターンとしてプログラム制御することにより、ロボットを歩行させるものである。以下に、3つのタイプの安定歩行パターンの解析法を示す。

A. 1. 1 上体補償型

このモデルは定常歩行における任意の歩容に対する補償動作を上体で行うものである。この計算のフローチャートをFig. A.1.1に示す。はじめに、2.1.3節で述べた強度計算を行い、次に以下の手順で解析を行う。

(a) 基本歩行パターンの作成

下肢の歩容及びZMP軌跡（これらを合わせて基本歩行パターンと呼ぶ）を作成する。歩容データ：歩行周期，歩幅，腰の初期位置・速度，両脚支持時間及び遊脚の足の最大高さから，遊脚の足の軌跡（支持脚の足は常に床面と全点接地しているものとする），逆運動学計算による歩容，安定領域内のほぼ中央を滑らかに移動するZMP軌跡を作成する。

遊脚の足の軌跡の作成には，床面との接地時の境界条件（相対速度・加速度がともに0）などを考慮しスプライン関数で補間して作成する。腰の軌跡については，進行方向（X軸）及び鉛直方向（Z軸）について，次式に示すように三角関数で記述し，任意の滑らかな軌跡の設定が可能である。

$$\begin{aligned}
 H_x &= H_{x_0} * \sin\left[\frac{2\pi}{t_s} * (t - t_{fx})\right] + \frac{sl}{t_s} * (t - t_{fx}) + H_{x_0} \\
 H_z &= \frac{H_{z_h} - H_{z_l}}{2} * \cos\left[\frac{2\pi}{t_s} * (t - t_{fz})\right] + \frac{H_{z_h} + H_{z_l}}{2}
 \end{aligned}
 \tag{A.1.1}$$

H_x : 腰のx方向の位置,
 H_z : 腰のz方向の位置,
 s_1 : 歩幅,
 t_s : 1歩に要する時間,
 H_{x_a} : x方向の振幅,
 H_{x_0} : x方向の位置 ($t = t_{fx}$),
 H_{z_h} : 腰のz方向の最大値,
 H_{z_l} : 腰のz方向の最小値,
 t_{fz} : 位相時間

但し、ここでは一定高を等速度（定常歩行時）で動くとして仮定した。これは、搭載する視覚センサ等への振動の影響を考慮したことによるものであるが、最適な歩容について考えるならば、腰の軌跡を何らかの評価関数（具体的な規範はまだ無いが、エネルギー最少など）の下で最適化する必要がある。

遊脚の足の軌跡及び腰の軌跡が決まれば幾何学的に膝関節の位置が決定され、逆運動学計算によって下肢の各関節角度を求めることができる。ロボットをFig. A. 1. 2に示す矢状面（支持足首を原点とした座標系：足首座標系）で考えれば、各関節角度は以下のように求められる⁶⁴⁾。

$$\begin{aligned}
 \beta_{1L} &= \tan^{-1} \left[\frac{x_8 R_2 - z_8 \sqrt{4 l_2^2 r_1^2 - R_1^2}}{z_8 R_2 + x_8 \sqrt{4 l_2^2 r_1^2 - R_1^2}} \right] \\
 \beta_{2L} &= \tan^{-1} \left[\frac{x_8 R_1 + z_8 \sqrt{4 l_2^2 r_1^2 - R_1^2}}{z_8 R_1 - x_8 \sqrt{4 l_2^2 r_1^2 - R_1^2}} \right] \\
 \beta_{1R} &= \tan^{-1} \left[\frac{(x_8 - x_{15}) R_4 - (z_8 - z_{15}) \sqrt{4 l_2^2 r_2^2 - R_5^2}}{(z_8 - z_{15}) R_4 + (x_8 - x_{15}) \sqrt{4 l_2^2 r_2^2 - R_5^2}} \right] \\
 \beta_{2R} &= \tan^{-1} \left[\frac{(x_8 - x_{15}) R_5 + (z_8 - z_{15}) \sqrt{4 l_2^2 r_2^2 - R_5^2}}{(z_8 - z_{15}) R_5 - (x_8 - x_{15}) \sqrt{4 l_2^2 r_2^2 - R_5^2}} \right]
 \end{aligned} \tag{A. 1. 2}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 r_1 &= \sqrt{x_8^2 + z_8^2} \\
 R_1 &= l_2^2 + r_1^2 - l_3^2 \\
 R_2 &= l_3^2 + r_1^2 - l_2^2 \\
 r_2 &= \sqrt{(x_{15} - x_8)^2 + (z_{15} - z_8)^2} \\
 R_4 &= l_3^2 + r_2^2 - l_2^2 \\
 R_5 &= l_2^2 + r_2^2 - l_3^2
 \end{aligned}
 \tag{A. 1. 3}$$

である。また、前頭面内の傾き (α) については、式(A. 1. 2)の計算の前に足首と股部の位置座標から容易に計算できる。

ZMP軌跡については、ロボットの支持脚の足底接地面によって形成される安定領域内に、いくつかの基本点列を与えこれを線形補間し、これに局部的スムージングを施して作成した。なお、前後の1歩を考慮し連続的な軌跡を作成する。また、基本点列は安定マージンが最大となる安定領域の中央に設定するが、両脚支持期は前後の単脚支持期とを連続に補間するため必ずしも安定領域の中央ではない。

(b) 補償動作の計算

(a)で作成した基本歩行パターンを入力とし、このZMP軌跡に追従させるための補償動作として、上体の矢状面内の動き ϕ と前頭面内の動き θ を求める。なお、両脚の前頭面内の動き α を補償動作とする事も可能であるが、同じ自由度を上体に設けており、この動作 (θ) で補償が可能であるため、ここでは $\alpha = 0$; 一定として解析を行う。このため、ここでのモデルは、足首部のロール軸のアクチュエータを外して考える。但し、股部のアクチュエータについては、今後の方向転換自由度の付加を考え、回転は行わないがそのままとする。

式(2.3)に関して言えば、未知の運動 $\{M_v\}$ が θ , ϕ であり、既知な駆動力 $\{M_o\}$ がZMPにおけるモーメントのX成分とY成分が0であるという拘束条件となる。式(2.3)は非線形の連立常微分方程式であり、基本歩行パターンの他に θ , ϕ の角度と角速度を初期値として与える必要がある。この入力初期値の推定に関しては、定常歩行を取り上げ歩行動作の周期性と1歩ずれた左右対称性から、1歩の始めと終わりでの θ , ϕ の角度と角速度が一致するという境界条件を設定し、これを満足する初期値を求める。正確には回転の方向を考慮して以下の式に従う。

$$\begin{aligned}
 \theta|_{t=0} &= -\theta|_{t=T/2} \\
 \dot{\theta}|_{t=0} &= -\dot{\theta}|_{t=T/2} \\
 \psi|_{t=0} &= \psi|_{t=T/2} \\
 \dot{\psi}|_{t=0} &= \dot{\psi}|_{t=T/2}
 \end{aligned}
 \tag{A.1.4}$$

T: 1歩行周期 (2歩)

即ち、補償動作に関する周期解を求めることになる。

入力初期値から1歩後の最終値の決定には、入力初期値と式(2.3)より得られる角加速度とを用いて、ルンゲ・クッタ、アダムス・モルトン法を併用して、数値計算により行っている。1歩分の計算の後境界条件のチェックを行い、境界条件が満足されなければ傾斜法または局所的方法を用いて入力初期値を修正し、境界条件を満足する初期値が見つかるまでこの処理を繰り返し行う。この数値計算法及び初期値の修正法については文献5)に詳しい。

A. 1. 2 歩容補償型

このモデルは、定常歩行における任意の上体動作に対する補償を歩容で行うものである。しかし、足の動作による補償を考えた場合、足の動きは当然のことながら移動の役割を果たす必要があり、要求された歩行速度を保ち簡易な障害物を回避(跨ぎ越え)したりすることが可能でなければならない。しかも、任意に動作させた場合には構造物(床面)やロボットの他の部分との干渉の問題や補償モーメント不足の問題も生じてくる。また、遊脚の接地時刻・位置のみの変更による補償も考えられるが、動作変更にもともなう衝撃力の影響やロボット動作のレスポンスの問題など、直接の補償動作として用いるのはやや困難である。このような理由から、足は設定した通りに動作すべきであり、足部の動作によって補償する事は望ましくないと考えられる。このため、本研究では足及び上体の動きは設定パターンで動作するとして、この動作に対する補償を歩容、即ち腰の位置を制御することで行う。この計算のフローチャートをFig. A.1.3に示す。

(a) 支持足首強度計算, 足の軌跡, ZMP軌跡及び上体動作の決定

支持足首強度計算によるリンク径の決定, 足の軌跡及びZMP軌跡については, A.1.1節と同様にして作成する。また, 上体動作については腰の動きとの協調やセンシングのための動作などが考えられるが, 今回は簡単のため一定値とした。

(b) 腰の軌跡計算

腰の位置の計算は, 脚の軌跡の逆運動学計算を含み, 腰の位置に対する運動方程式を直接解くことは非常に困難である。そのため, ここでは簡略モデルと設計対象モデルの二つを作成し2段階で安定歩行パターンを作成した。簡略モデルとは, (a)

で作成したZMP軌跡に追従する周期的な腰の動作を計算するためのモデルで、Fig. A.1.4に示すように、無質量で伸縮自在の下肢を有する。また、腰は一定高であり下肢の動きは遊脚の足のみを考慮し、他は無視した簡易モデルである。なお、腰の周期解の計算には、A.1.1節の上体補償型モデルの補償動作の周期解を求める方法と同じ方法を用いている。但し、境界条件を以下のように変更する。

$$\begin{aligned}
 x_0|_{t=0} &= x_0|_{t=T/2} - s_1 \\
 \dot{x}_0|_{t=0} &= \dot{x}_0|_{t=T/2} \\
 y_0|_{t=0} &= -y_0|_{t=T/2} \\
 \dot{y}_0|_{t=0} &= -\dot{y}_0|_{t=T/2}
 \end{aligned}
 \tag{A.1.5}$$

T : 1歩行周期 (2歩),

s_1 : 歩幅

(c) 歩容の計算

簡略モデルによって得られた腰の位置から、設計対象モデルの下肢の逆運動学計算をA.1.1節と同様にして行い、暫定の歩容を作成する。これでロボット全体の動作がとりあえず決定されたことになるが、この歩行パターンは設定されたZMP軌跡に追従するものではない。そこで、設計対象モデルにこのロボット全体の動作を入力し、設計対象モデルのZMP軌跡を求める。この計算は式(2.1)の Δr の成分を $(X_{ZMP}, Y_{ZMP}, 0)$ とおき、 X_{ZMP} , Y_{ZMP} について解けば求められる。この計算されたZMPと設定ZMPとの偏差を求め、Fig. A.1.3に示すようにZMPの偏差が許容値に収まるまで反復計算を行う。偏差の収束については、誤差の時間微分値をフィードバックする学習制御の方法などが考えられるが、ここでは早稲田大学で用いている偏差を直接設定ZMP軌跡に加えて再計算を行う方法を用いた⁶⁶⁾。計算は以下のように行う。

$$\begin{aligned}
 f(ZMP_P) &= ZMP_{C(1)} \\
 ZMP_{P(1)} &= ZMP_P + \varepsilon (ZMP_P - ZMP_{C(1)}) \\
 f(ZMP_{P(1)}) &= ZMP_{C(2)} \\
 ZMP_{P(2)} &= ZMP_{P(1)} + \varepsilon (ZMP_{P(1)} - ZMP_{C(2)}) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 f(ZMP_{P(n)}) &= ZMP_{C(n+1)} \doteq ZMP_P
 \end{aligned}
 \tag{A.1.6}$$

$f(x)$: 設計対象モデルのZMP軌跡 (ZMP_c) を導く,
 ZMP_p : 設定ZMP,
 ε : 誤差の増幅率 (定数),
 n : 繰返し回数

A. 1. 3 上体・歩容補償融合型

A. 1. 1節で示した上体補償型モデルとA. 1. 2節で示した歩容補償型モデルとを統合して、低自由度2足歩行ロボット・モデルを構築することが可能である。ここでは、矢状面内の補償動作を歩容補償型モデルを基に腰のX方向の動作で行い、前頭面内の補償動作を上体補償型モデルを基に上体の前頭面内の動作 θ で行う。この結果、直進歩行においては下肢のロール軸回りの1自由度と上体のピッチ軸回りの1自由度が不要になり、下肢4自由度、腰1自由度の低自由度モデルとなる。特に下肢のロール軸の1自由度には4つのアクチュエータを必要としていたため、これらを外すことによりかなりの軽量化が行える。

計算は以下の手順で行う。

(a) 支持足首強度計算, 足の軌跡及びZMP軌跡の決定

これまでと同様にして行う。

(b) 腰の軌跡及び上体動作の計算

この計算は歩容の解析の場合と同様に、簡略モデルと設計対象モデルの2つによる2段階で行う。なお、ここでの簡略モデルはFig. A. 1. 4において、 α と ϕ を一定値 ($\alpha = 0$) としたものである。このモデルにより、腰のX方向の位置及び上体のY方向の位置についての周期解を求める。周期解の解法はこれまでと同様である。但し、境界条件を以下のように変更する。

$$\begin{aligned}
 x_g|_{t=0} &= x_g|_{t=T/2} - s_1 \\
 \dot{x}_g|_{t=0} &= \dot{x}_g|_{t=T/2} \\
 y_{1g}|_{t=0} &= -y_{1g}|_{t=T/2} \\
 \dot{y}_{1g}|_{t=0} &= -\dot{y}_{1g}|_{t=T/2}
 \end{aligned}
 \tag{A. 1. 7}$$

T : 1歩行周期 (2歩),

s_1 : 歩幅

(c) 補償動作の計算

この計算はA. 1. 2節の(c)と同様にして行う。簡略モデルによって得られた腰の位置から、設計対象モデルの下肢の逆運動学計算を行い暫定の歩容を作成する。次に、

設計対象モデルにこのロボット全体の動作を入力し、設計対象モデルの ZMP 軌跡を求める。この計算された ZMP と設定 ZMP との偏差を求め、ZMP の偏差が許容値に収まるまで反復計算を行う。偏差の収束計算法についても A.1.2 節と同様にして行う。

A. 2 シミュレーション

A. 2. 1 上体補償型

上体補償型モデルを解析対象とした場合のシミュレーション結果を示す。補償動作の評価は出来るだけ動きの少なくなる場合を最適な動作と考え、振幅 (θ_{max} , ϕ_{max}), $a = \int |\dot{\theta}| dt$, $b = \int |\dot{\phi}| dt$ を規範とし、トルクの評価に角加速度 ($|\ddot{\theta}|_{max}$, $|\ddot{\phi}|_{max}$) を用いた。

(a) 歩行周期

歩行周期を変更した場合のシミュレーション結果を Fig. A.2.1 に示す。歩行周期が長く (低速) なるにつれ補償動作のトルクは減少するが動作角度が増大し、周期解が得られなくなる。これは、慣性力による補償効果が減少するため動作が大きくなるのである。つまり、角加速度が周期の 2 乗に反比例するため、周期が長くなるにつれ周期的補償動作における角加速度の減少が大きく、運動方程式における慣性項が小さくなり (同時に、遠心力項・コリオリ力項も)、重力項が支配的となるためである。

しかし、さらに角速度・角加速度が小さくなり、これらをほぼ 0 と見なせれば重力項のみの静歩行となり、補償動作は発散せず周期解となるはずである。つまり、2 足歩行ロボットによる歩行は静歩行と見なせる低速な歩行と慣性力による補償効果が期待できる高速な歩行は、アクチュエータなどのハードウェア上の問題がクリアになれば、比較的容易であるが、この中間に位置する中速での歩行が以外に難しいと思われる。

(b) 上体のおもりの質量及び高さ

低速歩行において周期解が得られない場合や可動角不足となってしまうような場合、補償能力の向上には上体おもりの質量増加や、位置を高くする事が考えられる。これらについてのパラメータ変更によるシミュレーション結果を Table A.2.1 に示す。ここではリンク径を一定とし、おもりの質量を 20~60[kg] の範囲で、胴の長さを 500~900[mm] の範囲で変化させた場合の安全率の変化を示している。おもりの質量を変化させた場合においては、上記の (a) で得られなかった歩行周期での周期解はやはり得られていない。また、これ以上質量を増加させることは安全率の面から望ましくない。胴の長さを変化させた場合は、長さが 800[mm] 以上 (Table A.2.1 のハッチングの部分) で、上記の (a) では得られなかった歩行周期での周期解が得られている。しかも、質量増加が少ないため安全率の低下も僅かである。この結果から、補償能

力の向上には上体のおもりの質量を増加させるより、おもりの高さを高く設計することが効果的であり、かつ強度の面からも有効であると言える。

(c) 歩幅

歩幅を200～400[mm]の範囲で変化させた場合のシミュレーション結果をFig. A. 2. 2に示す。矢状面の補償動作(ϕ)は歩幅増大(歩行速度高速化)につれ、角度・角加速度ともに増大するが、前頭面の補償動作(θ)はほとんど変化がない。

この歩行は直進であるため、前頭面の補償動作は歩行周期の変化(支持脚の切り替わり)には密接に関係してくるが、歩幅の変化による前頭面方向へのモーメント変化がほとんど無いため、歩幅にはあまり影響されないのである。また、矢状面の補償動作は歩行速度の観点から、動作角度について(a)とは逆の結果を示している。これは、歩行周期を短くしたことによる歩行速度の高速化は、角加速度が歩行周期の2乗に反比例することから、慣性項が支配的となるため重力項は大きなモーメントを発生する必要がなくなり、結果的に角度減少につながっている。それに対して、歩幅を長くしたことによる歩行速度の高速化は、補償すべきモーメントの増大に対して、周期的補償動作の角速度、角加速度の変化がそれほど大きくないため、慣性項、遠心力項及びコリオリ力項はあまり大きくなり、重力項へのモーメントの比重が大きくなり角度の増大を招くのである。

つまり、高速歩行には歩行周期を短くし、低速歩行には歩幅を小さくするのが有効であり、歩行速度に適した歩幅と歩行周期の組み合わせがあると言える。例えば、同じ歩行速度([m/s])について比較すると、歩幅200[mm]で1.0[s/step]の場合と歩幅300[mm]で1.5[s/step]の場合など、同じ速度であれば歩幅の小さい方が補償動作が小さくなり(角度・角加速度の両方とも)、ロボット全体の動作角度を小さくできる。これは、狭い場所の通過などの際に有効になると思われる。

文献66)によれば、人間の動歩行における歩幅と歩行速度には以下の関係がある。

$$\hat{\lambda} = 2.3 \hat{u}^{0.6} \quad (\text{A. 2. 1})$$

$$\hat{\lambda} = \lambda/h$$

$$\hat{u} = u/(hg)^{-0.5} ; \hat{u} < 0.8 \text{ で歩行(これ以上で走行)}$$

λ : 歩幅,

h : 脚長,

u : 歩行速度,

g : 重力加速度

式(A. 2. 1)からも、歩行速度が決定されれば一意に歩幅が決まり歩行周期も決まることが分かる。例えば、脚長0.8[m]で歩行速度を0.3[m/s]とした場合、歩幅は約0.48[m]周期は1.6[s/step]となる。但し、本2足歩行ロボットにこの条件で歩行させるのは幾何学的条件によりかなり無理がある。人間の歩行はつま先部による”蹴り”

を行っているため歩幅がかなり大きくとれるが、本2足歩行ロボットはつま先部の自由度を持たず、足部は床面と常に平行と仮定しているためあまり大きな歩幅はとれない（つま先部自由度の付加は今後の研究進展には重要な要素である。2足歩行ロボットにはこの自由度は必要不可欠なものとする文献⁶⁷⁾もある）。

(d) 腰のX方向初期位置 (X0)

定常歩行において腰の高さ・速度はとりあえず一定としたが、初期位置については任意である。ここではこの位置の違いによる補償動作への影響について検討する。このシミュレーション結果の一例をFig. A.2.3に示す。図から分かるように補償動作評価パラメータが極小となるX0が存在することが分かる。即ち、最適な腰の初期位置が存在すると言える。また、この位置は歩行周期には関係がなく、歩幅に依存した値である。

(e) 両脚支持時間 (Td)

歩行の1歩は一方の足のみが接地している単脚支持期と、両足が接地し支持脚を切り替える相となる両脚支持期とに分割される。これらの割合は歩行上重要なファクターである。Fig. A.2.4に両脚支持時間の変更による補償動作のシミュレーション結果の一例を示す。 $|\ddot{\theta}|_{max}$, $|\ddot{\psi}|_{max}$, b について極小となるTdが存在することが分かる。即ち、最適な両脚支持時間が存在すると言える。また、この時間は歩幅には関係なく、歩行周期に依存した値である。

(d), (e)の結果とも、前頭面内の補償動作 θ への影響は ψ に比べて僅かであった。

(d), (e)の結果を統合し、上体補償型モデルの安定歩行パターンを作成した一例をFig. A.2.5に示す（スティック線図は0.1[s]間隔、矢状面は右足のみ表示）。

(f) アクチュエータの質量と最大トルク

上記のシミュレーションでは、アクチュエータの質量をとりあえず1個5[kg]としているが、この質量がロボット全体の約50[%]を占めていることから、これの減少による軽量化へのポテンシャルは高い。ここでは、アクチュエータの質量とその時に必要となる最大トルクとの関係をシミュレーションによって検討する。

支持足首におけるリンクの安全率を上体補償型モデルの基準データと同じく5.1程度とし、上体おもりの質量をこの基準データにおけるロボット全体に占める割合と同じ29[%]程度とした。なお、その他の質量及びロボット全体の大きさは変化させない。これらの比較用のロボット・データをTable A.2.2に、シミュレーション結果をFig. A.2.6, Fig. A.2.7に示す。図は、単脚支持期における最大トルク（膝部：膝部が最も大きなトルクを必要とする）及び最大パワーの比較である。この結果は歩幅300[mm]で1.0[s/step]の場合のものであり、実際に適用するには安全を見込んでこれの3～5倍程度、さらに高速歩行させるに至ってはそれ以上の能力を持つアクチュエータが必要である。しかし、現状では軽量で高トルクのアクチュエータは開発レベルではあっても、製品レベルのものはまだ無く、高トルクを出しやすい油圧アクチュエータや減速機と電動モータとの組み合わせのものが多く、どちらも比較

的過重量となる。

(g) 数値計算の刻み幅 (制御周期)

ここで述べているシミュレーション結果は、全て数値計算における刻み幅を1/30 [s]としている。これは、シミュレーション結果を動画として表示する際に使用するVTRの1秒の駒割り数が30であるためこれに準じたものであるが、実際の制御周期としてはやや粗い刻みである。また、数値計算上も計算精度に問題が生じる可能性がある。Fig. A.2.8は、歩幅300[mm]で1.0[s/step]の場合において、刻み幅を1/10, 1/30, 1/50, 1/100[s]とした場合の補償動作の解析結果(収束値)についての比較である。刻み幅が1/10[s]のものは、やはり誤差が大きくなっているが他の場合はほぼ同一値に収束している。また、リチャードソン補外等による数値計算精度の向上も可能であるが、本制御法ではこの結果から取りあえず刻み幅は1/30[s]とする。しかし、実際の制御周期を考えれば1/50もしくは1/100[s]の方が望ましいと思われる。

A. 2. 2 歩容補償型

歩容補償型モデルを解析対象とした場合のシミュレーション結果の一例をFig. A.2.9に示す。ここで問題となるのはZMP軌跡の誤差の収束についてであるが、この誤差の評価には以下に示す式を用いた。

$$EP = \frac{2}{T} \int_{t=0}^{t=T/2} |ZMP_p - ZMP_c| dt \quad (A.2.2)$$

T : 1歩行周期 (2歩),

ZMP_p: 設定ZMP,

ZMP_c: 設計対象モデルのZMP

式(A.2.2)による評価はX, Y方向それぞれ別々に行った。許容値は安定領域のX, Y方向それぞれの長さの1[%]とした。Table A.2.3に誤差の収束値を示す。いずれも1.1[mm]以内に収まっておりほぼ設定ZMPと一致した。これは、安定領域内で0.4[%]以下の誤差である。なお、最大誤差が1.0[s/step]の場合においてX方向が8.0[mm]と若干大きくなっているが、この誤差が生じているのは単脚支持期と両脚支持期の接続点であり、制御周期が1/30[s]とやや長めでありZMPの変化が他のところに比べて急激であるためで、設定ZMP軌跡のスムージングの変更や制御周期を短くすることによって小さくできる。実際に制御周期を1/100[s]とした場合は、誤差の収束値はX・Y方向ともに0.5[mm]以下で、X方向の最大誤差は4[mm]程度となる。また、この程度の誤差は実用上何ら問題はない。

A. 2. 3 上体・歩容補償融合型

上体・歩容補償融合型モデルを解析対象とした場合のシミュレーション結果の一例をFig. A.2.10に、誤差の収束値をTable A.2.4に示す。補償動作は同じ基準データにおいて、ほぼ上体補償型モデルの θ と歩容補償型モデルの腰のX方向の位置とを合わせた形となっている。誤差については、歩容補償型の場合より若干大きくなっているが安定領域内で0.5[%]以下の誤差である。

Table A.2.1 Influence of balancing weight's mass and its height to factor of safety.

変更点	リンク直径 [mm]	おもり高さ [mm]	おもり質量 [kg]	安全率
おもり 質量	40	600	20	6.2
			30	5.1
			40	4.4
			50	3.8
			60	3.4
おもり 高さ	40	500	30	5.3
		600		5.1
		700		4.9
		800		4.7
		900		4.6

Table A.2.2 Robot bodies data.

アクチュエータ の質量 [kg]	おもり質量 m_w [kg]	リンク直径 d [mm]	ロボット質量 m_t [kg]	質量比 m_w/m_t [%]	安全率
5	30.0	40.0	102.8	29.2	5.1
4	25.5	38.0	87.4	29.2	5.2
3	21.0	35.5	71.8	29.2	5.1
2	16.5	33.0	56.4	29.3	5.2
1	12.0	30.0	40.8	29.4	5.4

Table A.2.3 Errors of ZMP trajectory.

歩行周期 T [s]	X_{ZMP} 最大誤差 [mm]	Y_{ZMP} 最大誤差 [mm]	X_{ZMP} E P [mm]	Y_{ZMP} E P [mm]
2.0	8.0	1.7	1.08	0.36
3.0	3.4	1.4	0.69	0.28
4.0	2.8	1.3	0.50	0.18

300 [mm/step], 両脚支持時間 1 歩の 20 [%]

Table A.2.4 Errors of ZMP trajectory.

歩行周期 T [s]	X_{ZMP} 最大誤差 [mm]	Y_{ZMP} 最大誤差 [mm]	X_{ZMP} E P [mm]	Y_{ZMP} E P [mm]
2.0	12.5	1.7	1.43	0.39
3.0	3.6	1.5	0.84	0.30

300 [mm/step], 両脚支持時間 1 歩の 20 [%]

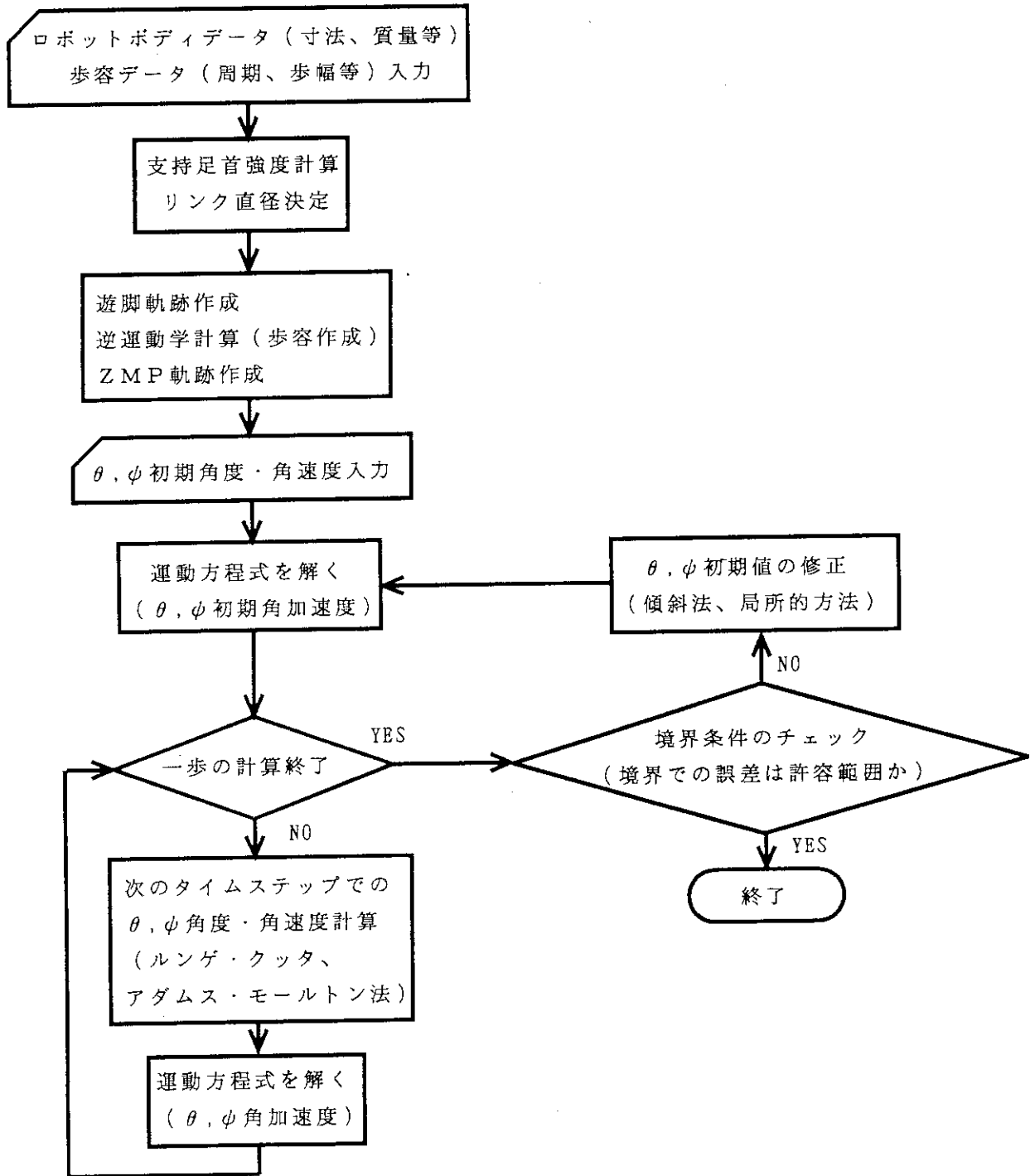


Fig. A.1.1 Flow chart of calculate compensative trunk motions.

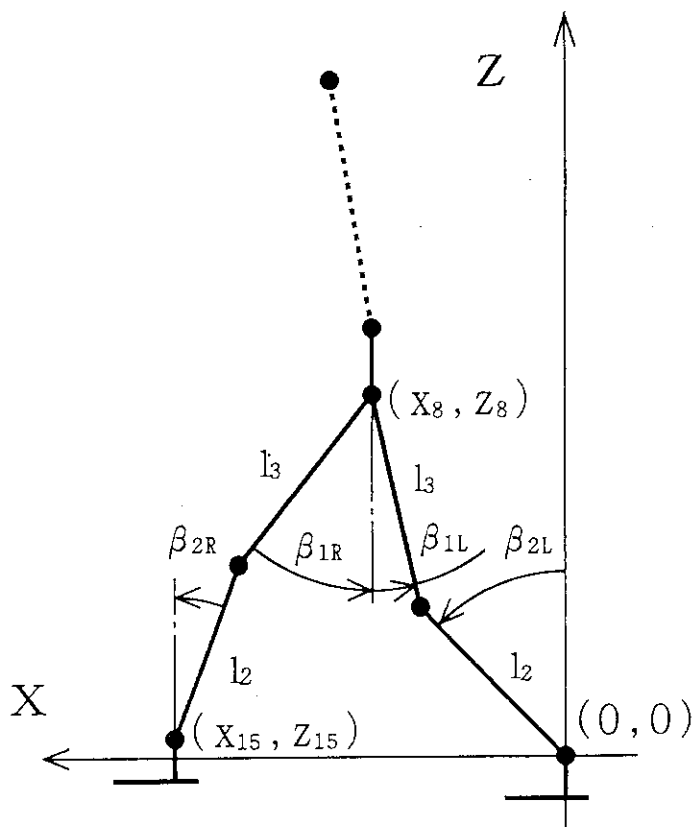


Fig. A.1.2 Ankle coordinate system in sagittal plane.

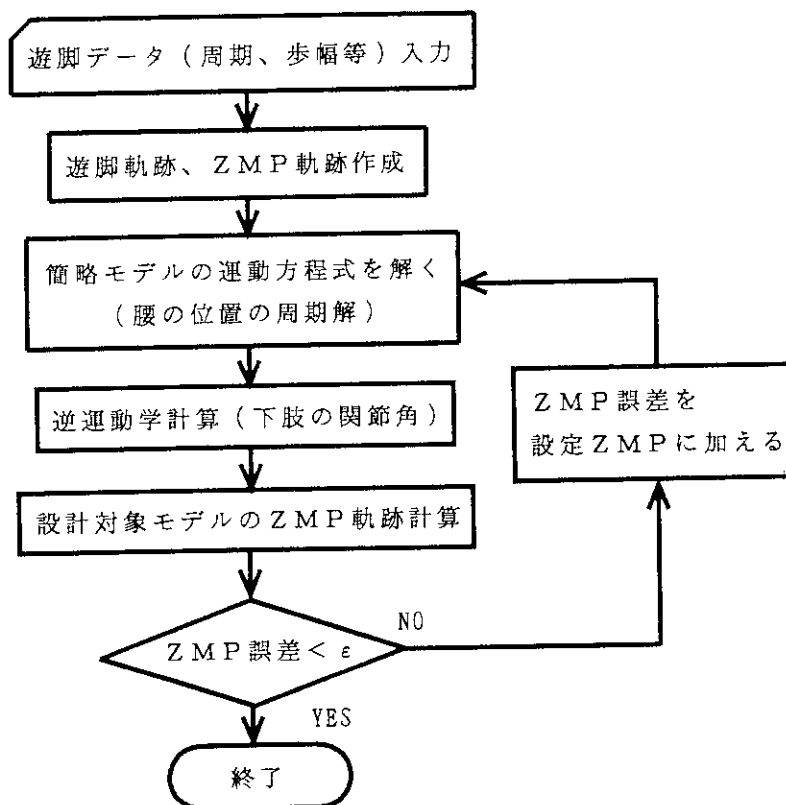


Fig. A.1.3 Flow chart to calculate compensative gait.

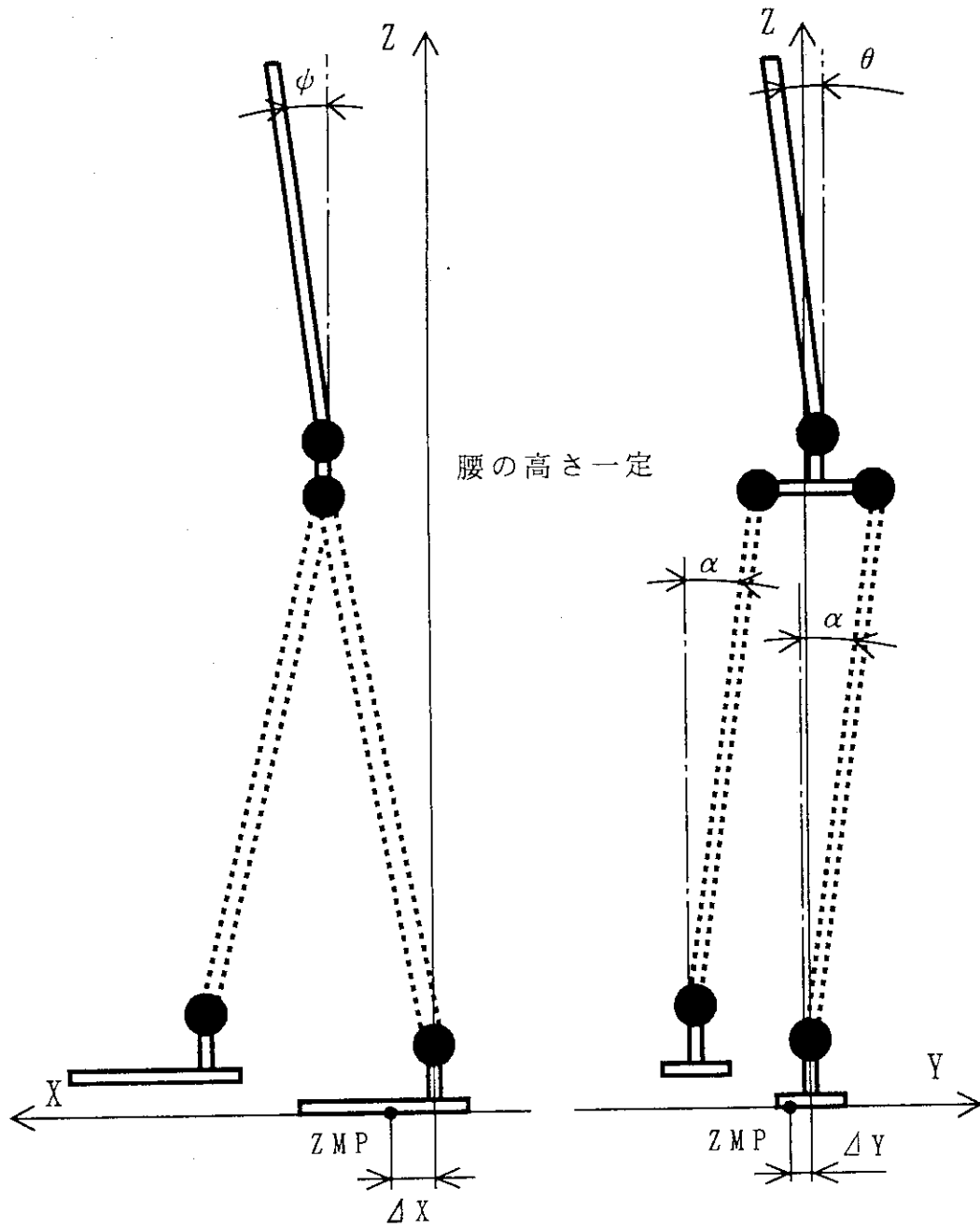


Fig. A.1.4 Simplified model of biped locomotion.

300[mm/step], 腰の X 方向の初期位置-100[mm], 両脚支持時間 1 歩の 20[%]

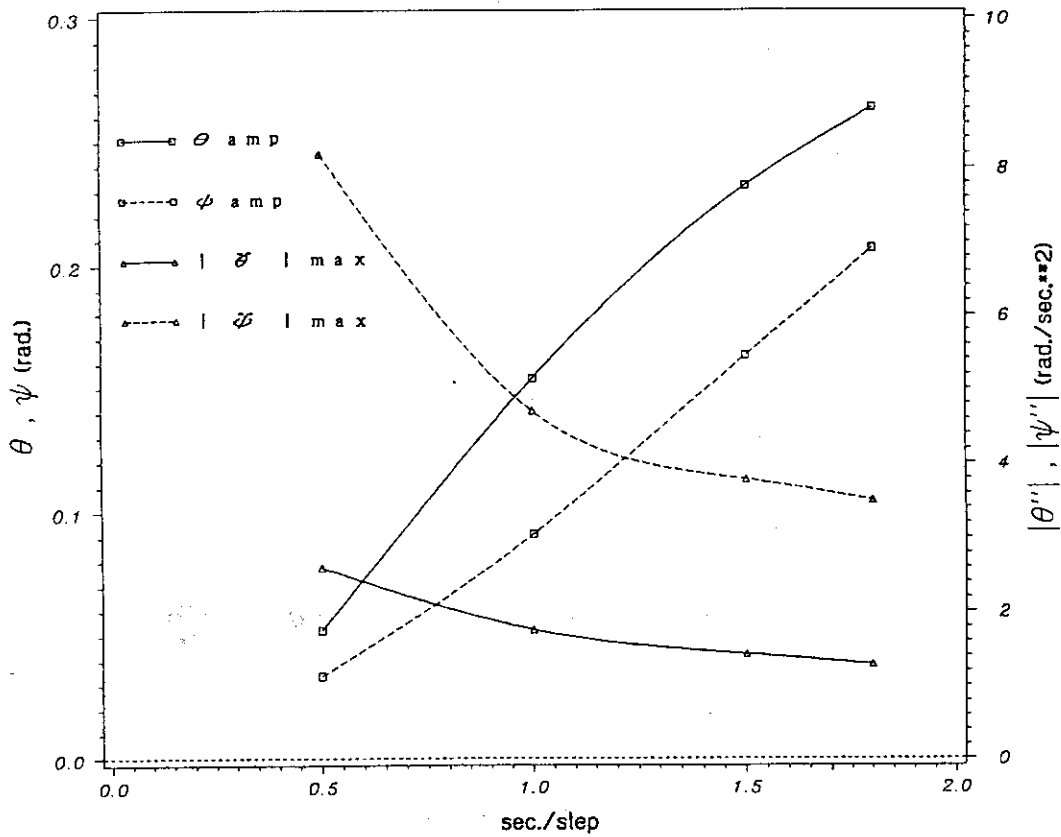


Fig. A.2.1 Influence of walking speed to compensative trunk motions.

腰の X 方向の初期位置-100[mm], 両脚支持時間 1 歩の 20[%]

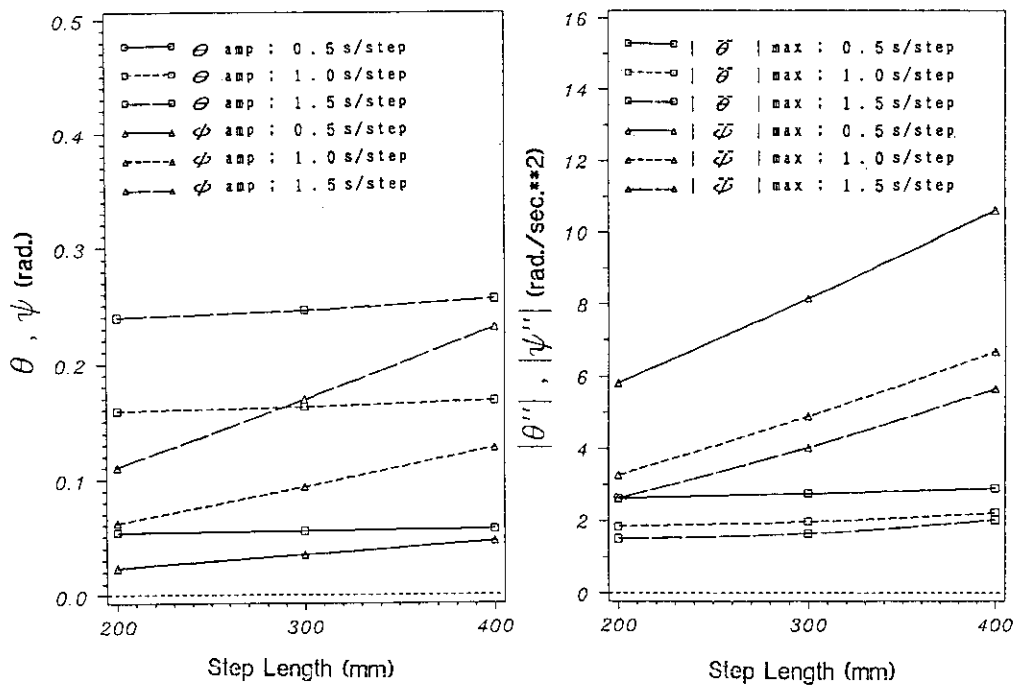


Fig. A.2.2 Influence of step length to compensative trunk motions.

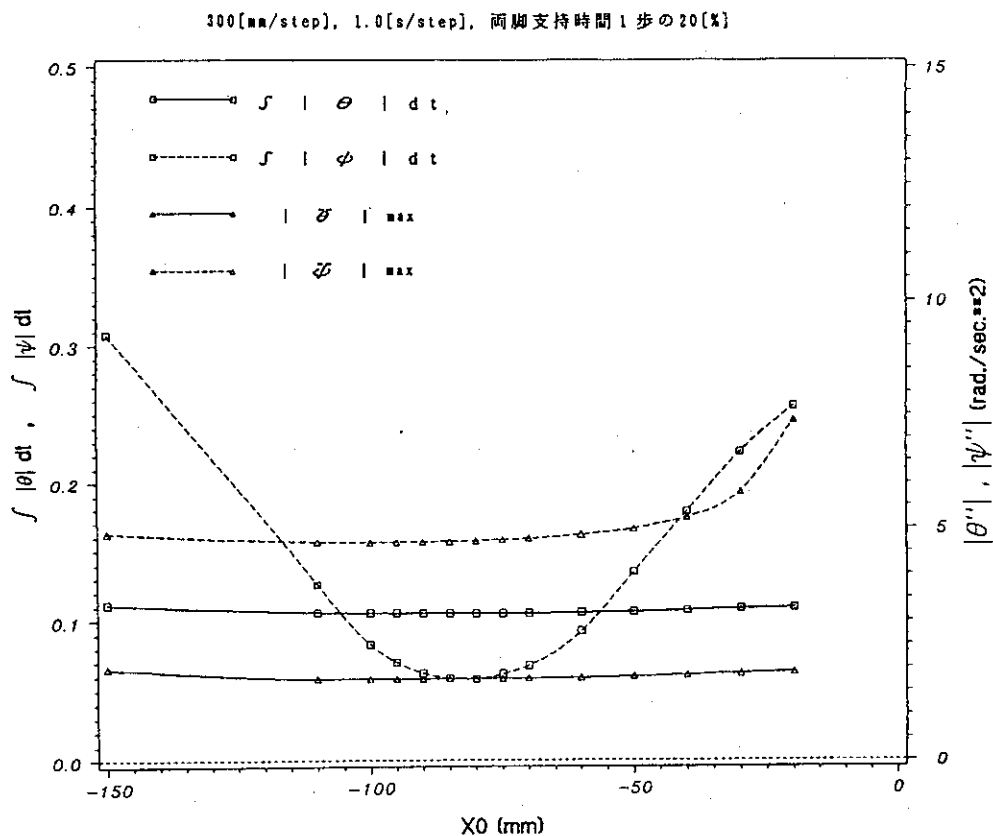


Fig. A.2.3 Influence of initial position of waist to compensative trunk motions.

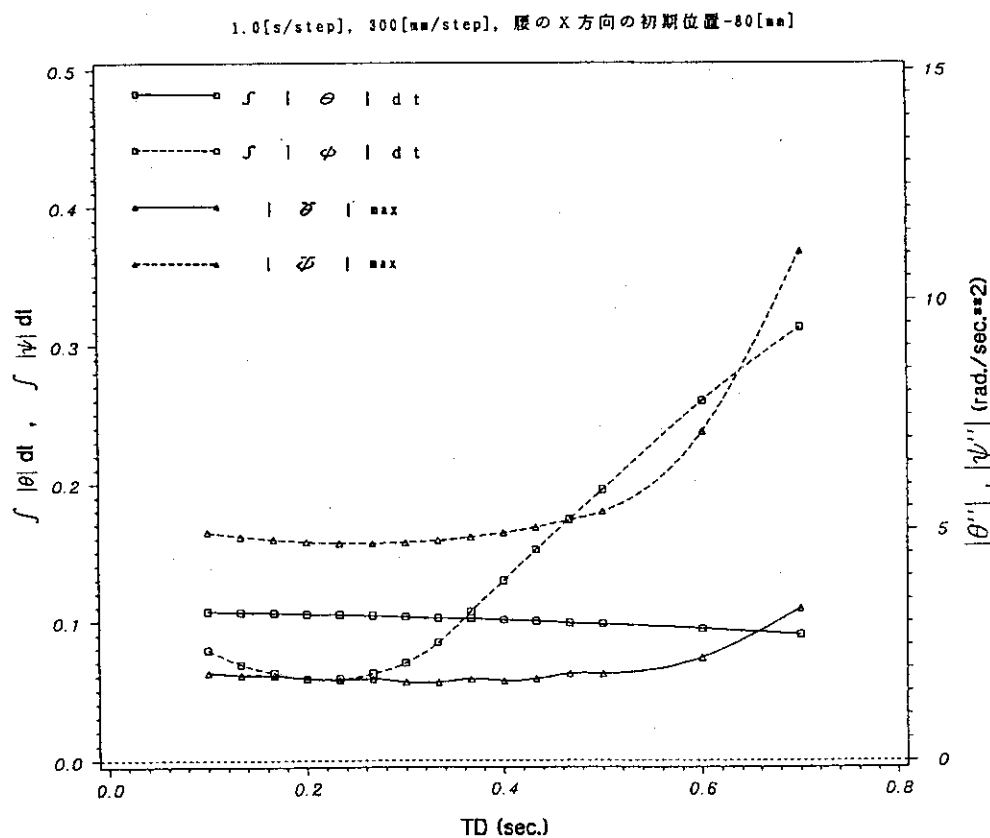


Fig. A.2.4 Influence of double supporting time to compensative trunk motions.

300[mm/step], 1.0[s/step], 腰の X 方向の初期位置-80[mm],
両脚支持時間 1 歩の 20[%]

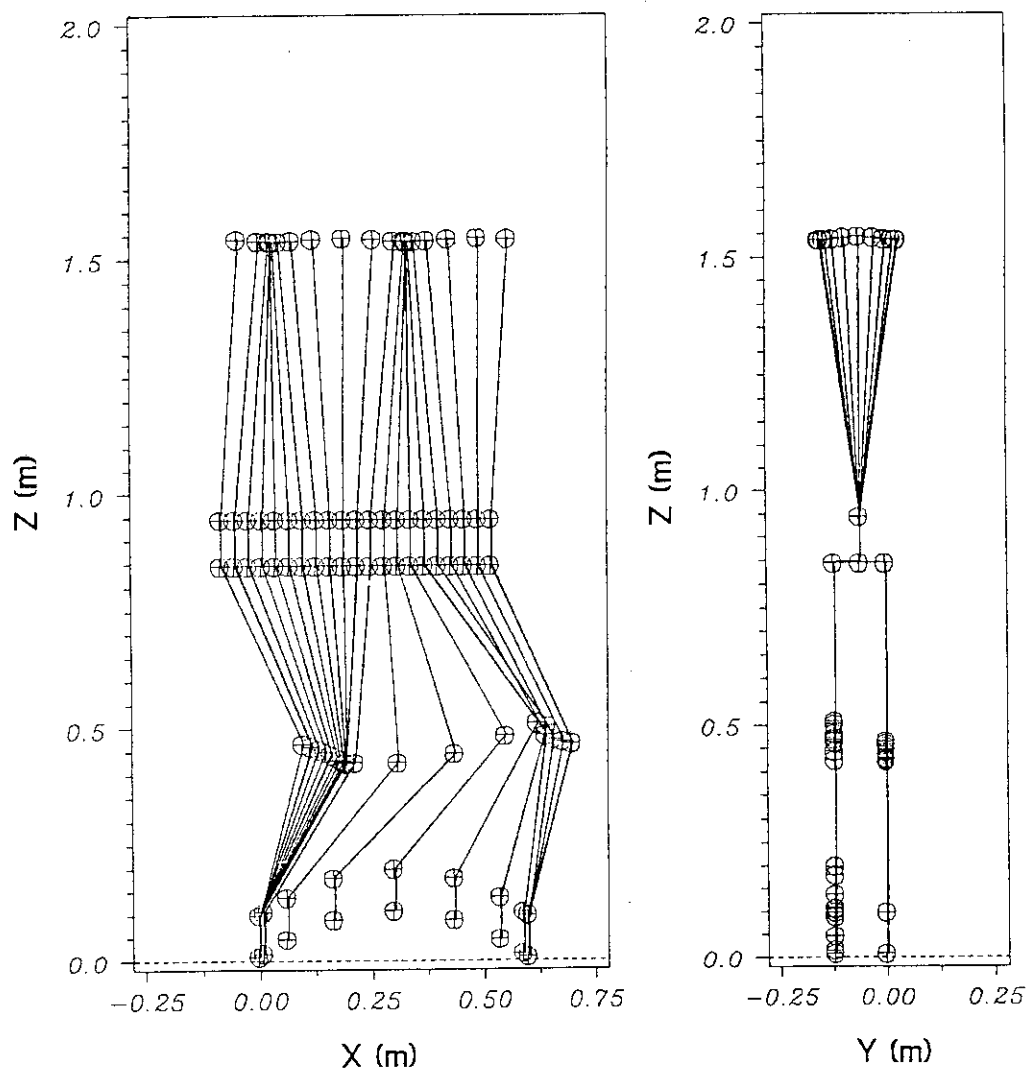


Fig. A.2.5 Simulated result of compensative trunk motions.

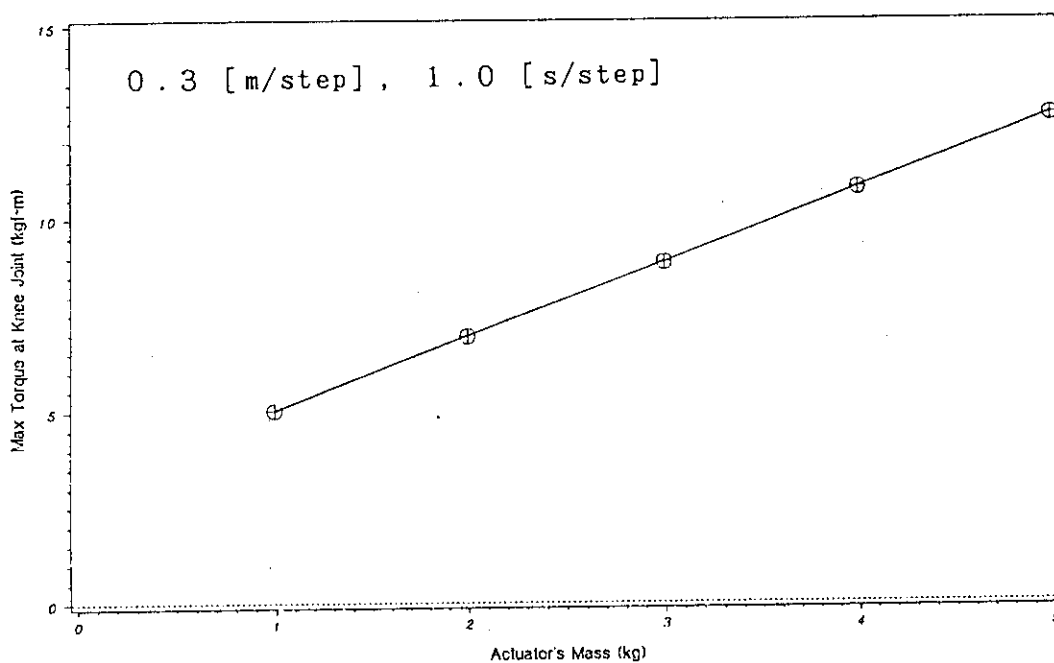


Fig. A.2.6 Influence of actuator's mass to maximum torque at knee joint.

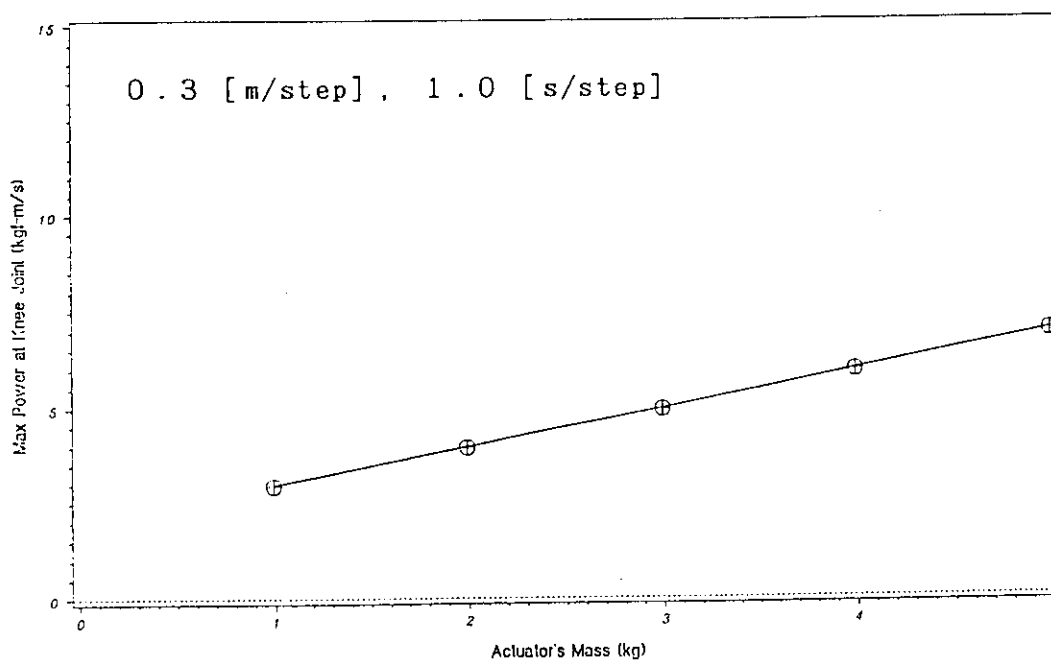


Fig. A.2.7 Influence of actuator's mass to maximum power at knee joint.

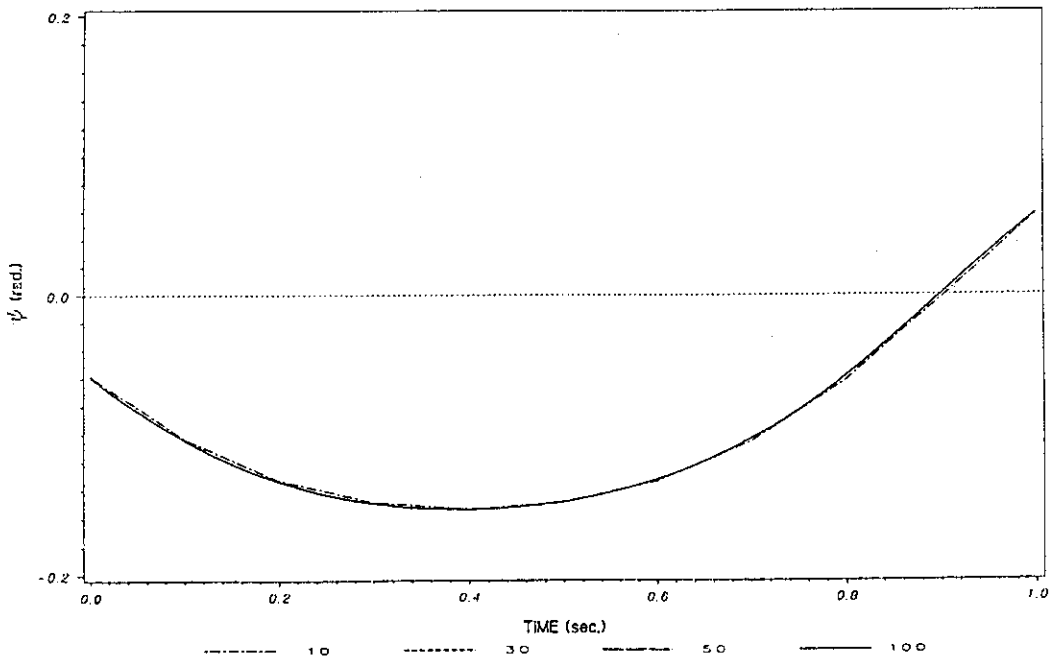
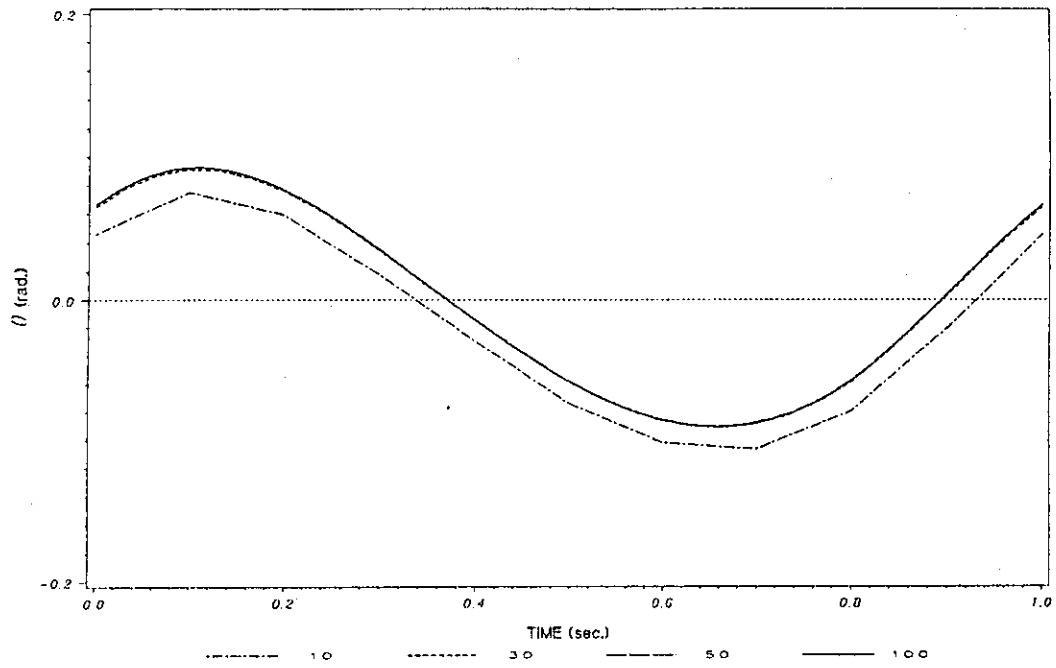


Fig. A.2.8 Convergence of compensative trunk motions.

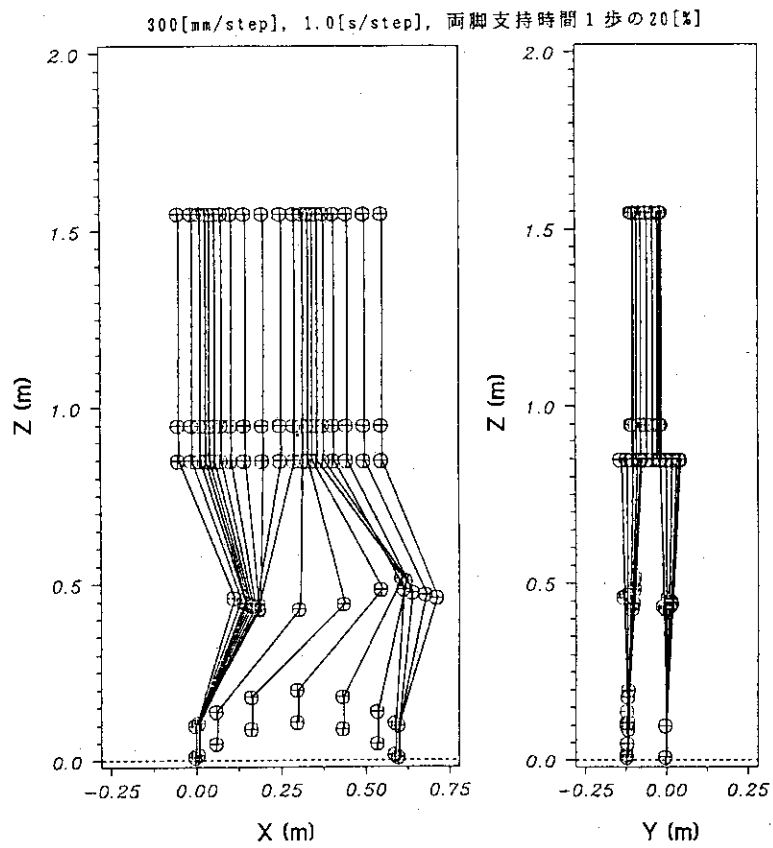


Fig. A.2.9 Simulated result of compensative gait.

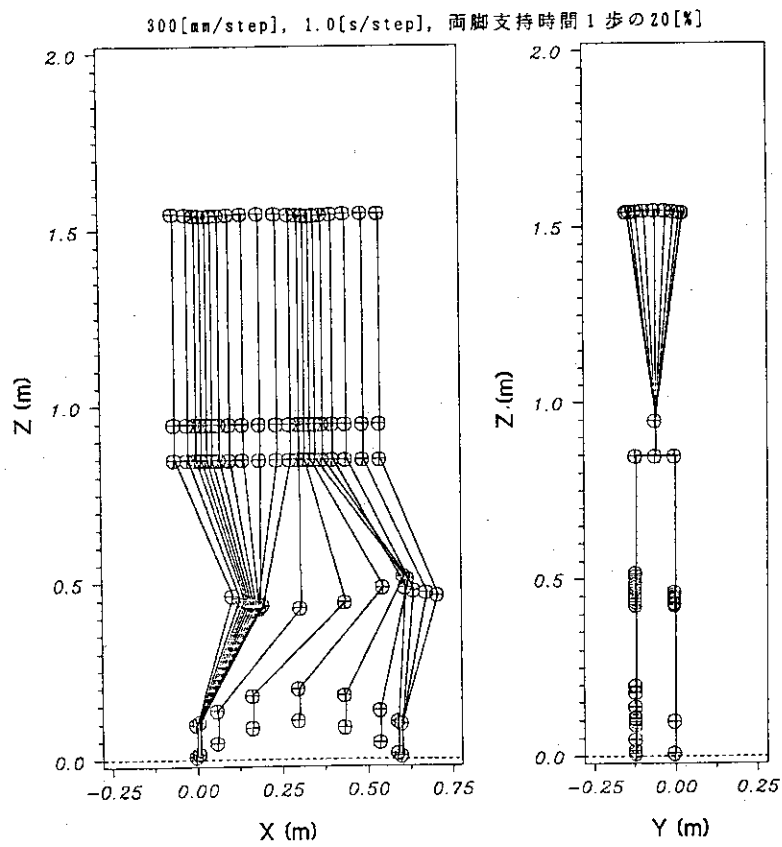


Fig. A.2.10 Simulated result of compensative motion. (5-DOF model)

付 録 B

歩行実験

原研では2足歩行ロボットのハードウェア化を進めているが、ロボットのハードウェア化のためには、具体的なロボット設計や実験による研究経験が不可欠である。しかし、原研には2足歩行ロボットのハードウェアについての経験は皆無であり、実際の2足歩行ロボットを設計・製作し、実験研究など研究実績の豊富な研究機関で技術習得する必要がある。また、2足歩行ロボットに限らずロボットに関する研究は、どうしてもその理論だけでは賄いきれない部分がある。例えば機械モデルのモデル化の誤差や機械的パラメータの誤差、アクチュエータの動特性などである。これらの問題やその制御法の妥当性に関しては、実際のハードウェアを用いた実験研究が重要になる。このため、早稲田大学加藤研究室において1年間の2足歩行ロボットの実験研究に従事した。本節では、早稲田大学の2足歩行ロボットWL-12RVを用いて行った歩行実験を通して得た知見について述べる。

(a) 機械モデル

WL-12RVは、ヨー軸まわりのモーメントを補償する機能を持つものである(この1自由度の付加でロボットは約20[kg]の質量増加となった)。これまでのモデルでは摩擦が十分に大きくこのモーメントは無視できるとしていたが、外力作用時や高速歩行においてヨー軸まわりの滑りが無視できなくなっていた。この機能の付加により外力作用時の歩行や高速な歩行が可能になった。しかし、確かにヨー軸補償モーメントを発生させた方が安定性がよいと思われるが、ヨー軸回りの補償が必要になるのは、外力補償時やより高速に歩行する場合においてであり、低速時にはあまり問題にならない。逆に不安定になる可能性もある。両足に振動ジャイロ・センサを取り付けヨー軸回りの角速度を測定し、補償効果の確認実験を行った結果では、0.96[s/step]の場合補償効果はあまりはっきりとはせず、0.64[s/step]、0.54[s/step]の場合においては、その効果が顕著であることが確認された(いずれも0.3[m/step])。特に0.54[s/step]の場合においては、ヨー軸回りの補償がない場合の歩行は不可能であった。

歩行実験に際し数多くのチェック・ポイントがあるが、特に重要なのはアクチュエータの0点調節(オルグ)である。ロボット自身が絶対座標系に対する自らの姿勢を検出するセンサを持たないため、0点調節のミスは歩行の不安定を招くことになる。また、モデルは重量が比較的重いものであるから、細部に機械的ガタを生じやすい。特にアクチュエータ周辺での発生はアクチュエータの発振現象となり、歩行はおろか危険な状態になることもある。しかし、ロボット全てを頑強に製作するのではなく、部分的には弱く衝撃を吸収する部分を設計に入れることも必要である。

これは、高価なロボットを転倒などによる致命傷から守るためである。

油圧系はその配管（油圧ホース）の影響をどれだけモデル化するかも問題である。ロボットは歩行中、腰部に取り付けられた油圧ホースを引きずりながら歩行しているため、全体的に歩行がやや後方に傾いている。経験的にZMPをやや前方に設定しているが、後方からの摩擦力（歩行速度に関して）としてモデル化するなどの検討が必要である。また、配管のとり回しや、アクチュエータの可動角の制限なども十分に考慮に入れた設計にする必要がある。

そのほか、プログラムの暴走などの緊急時への対策（緊急停止スイッチなど）や各種センサによる実験データの収集時における、高周波成分（ノイズ）に対する対策を十分に行う必要がある。ノイズを含んだデータはリアルタイム制御において大きな障害になる。また、ハードウェアの場合どうしても設計通りには行かず、現場・現物で調整すべきことが生じるため、実際に自ら機械ハードウェアを設計・製作し実験や改良などの経験を持つことが重要である。

(b) 油圧システム

早稲田大学では油圧系のアクチュエータを用いているが、油圧の場合トルク重量比が大きく、パワーがあるのが特徴である。特に重量の大きいロボットや物を搬送するロボットにおいては有効なアクチュエータである。但し、現在使用しているアクチュエータはパワーにおいてほぼ限界となっており、レスポンスの悪さや最大角速度不足の問題が生じている。

油圧系は油温の影響を受けやすく、歩行実験に入る前にエージングを行う必要がある；油温の影響だけではないが、歩行実験毎にアクチュエータの0点調整を行わなければならない；日によって動作に若干の違いがあるなどの問題点がある。ちなみに油の適温は35度程度である。また、油圧系は駆動源のロボットへの搭載が難しことやメンテナンスが大変であることが欠点である。エア抜きの作業も重要なメンテナンスの一つであり、メンテナンス性を考慮に入れた設計（細部：ボルトの位置や大きさ、配管のとりまわし等も）にすることが必要である。

さらに油圧ホースの取り付けなどによる、油圧系へのゴミやエアの侵入には十分注意しなければならない。

(c) 歩行安定性

シミュレーションによって歩行安定性が確認できても実際の歩行時には、足底の滑りや接地時の衝撃力、部材のたわみの影響などによって歩行が不安定になることがある。特に影響が顕著なのは、遊脚着地時の接地状況である。歩容は、遊脚が接地する場合、全点（足底4つ角の4点）接地するようにしたときが最も安定であり、2点や1点接地となると不安定な歩行になる。例えば、かかと接地・つま先離地の歩容は接地時に不安定になりやすく余り高速化できない。数回の実験で最速は、0.3[m/step], 1.7[s/step]程度である。この歩容は、着地時の接地点が少ないためにロボットのたわみなどにより容易に1点接地になってしまい、ロボット自体が回転してしまったり、衝撃力を発生しやすく不安定な歩行になりやすい。ちなみに昨年

度最速を実現したのは足底全点接地（着地時）の歩容である。遊脚の足の軌跡についても着地時の速度が衝撃力や滑りとなって現れる。特に着地時にX方向の速度を持っていると、障害物などにつまづいたようになってしまうため、着地は鉛直方向からが望ましい。また、部材のたわみや衝撃力などの影響により、両脚支持期において不静定問題が無視できなくなり不安定な状態になることもある。これは、歩行中アクチュエータは位置制御だけしか行っていないためである。プログラム制御による歩行は、一度バランスを崩すと不安定性は蓄積され安定な歩行は実現できない（復帰できない）。

実際の歩行においては、着地時の衝撃力などによる不安定な歩行は、各関節の位置ゲインの調整を行い、ある程度コンプライアンスを持たせることで安定化することもできる。但し、このゲインの決定は実験的に行うしかない。両脚支持期の不静定問題については、設定歩容において両脚支持期を持たないか、あっても数10[ms]程度とすることで回避することができる。