

JAERI - M
88-080

二足歩行ロボット運動学的シミュレーション
—ロボット運動学計算プログラムと作画—

1988年4月

石黒美佐子・藤崎 正英*

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, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 株原子力資料サービス

二足歩行ロボット運動学的シミュレーション
— ロボット運動学計算プログラムと作画 —

日本原子力研究所東海研究所計算センター
石黒美佐子・藤崎 正英*

(1988年3月30日受理)

本報告は、計算センターに62年度から新設された人間動作シミュレーション研究の研究課題のうち、人間動作をロボット運動学でモデル化し、人間の各関節の動く角度を計算し、映像化するという試みについて報告する。初年度でもあるので、人間動作の最も基本である歩行運動に関するロボット運動学計算を取り上げる。ユーゴスラビアのヴコブラトヴィッチによって書かれた本に記載されているプログラムをFACOM M-780上で動くように整備すると共に、歩行の様子をコマ取り風に図形化した。

主に、二足歩行運動学の数学モデル、計算プログラムの整備方法、基本歩行パターンなどの入力データの与え方、計算結果とその検証、歩行イメージの図形表現について記述する。一方、ロボット運動学と二足歩行に関する文献サーベイの結果も示す。

Numerical Simulation of Human Biped Locomotion
— Computer Program for Solving Robotics Equations
and for Representing the Walking Image —

Misako ISHIGURO and Masahide FUJISAKI^{*}

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

(Received March 30, 1988)

This report describes the numerical simulation of the motion of human-like robot which is one of the research theme of human acts simulation program (HASP) begun at the Computing Center of JAERI in 1987. The purpose of the theme is to model the human motion using robotics kinematic/kinetic equations and to get the joint angles as the solution. As the first trial, we treat the biped locomotion (walking) which is the most fundamental human motion. We implemented a computer program on FACOM M-780 computer, where the program is originated from the book of M. Vukobratovic in Yugoslavia, and made a graphic program to draw a walking shot sequence.

Mainly described here are the mathematical model of the biped locomotion, implementation method of the computer program, input data for basic walking pattern, computed results and its validation, and graphic representation of human walking image. Literature survey on robotics equation and biped locomotion is also included.

Keywords: Robots, Kinematic Equation, Kinetic Equation, Biped Locomotion, Human, Walking, Two Legs, Robotics, Solid Model

* On lieve from FUJITSU Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 関連文献のサーベイ	4
2.1 ロボット機械関連文献	4
2.2 二足歩行ロボット関連文献	5
3. 二足歩行運動学モデル	20
3.1 歩行モデル概要	20
3.2 Zero Moment Point (ZMP)	21
3.3 ロボット運動学方程式	21
3.4 境界条件	25
3.5 数式モデルのエラー修正	25
4. 二足歩行計算プログラム	30
4.1 プログラムの内容と計算フロー	30
4.2 二足歩行計算プログラムの整備	30
4.3 数値積分概要	31
5. 入力データ	38
5.1 二足歩行プログラム入力データ	38
5.2 基本歩行パターン	39
5.3 ZMPの移動に関するデータ	41
6. 計算結果とその検証	46
6.1 出力結果	46
6.2 結果の検証	46
7. 二足歩行動作の三次元ソリッド・モデルによる表示	57
7.1 作画プログラム作成手順	57
7.2 プログラムの実行方法	58
7.3 出力画像	59
7.4 三次元モデラーSOLVERの問題点	59
8. 63年度計画	68
9. おわりに	69
謝 辞	69
参考文献	70

Contents

1. Introduction	1
2. Literature survey	4
2.1 Literature survey on robotics equation	4
2.2 Literature survey on biped locomotion	5
3. Robotics kinematic/kinetic equation for biped locomotion	20
3.1 Outline of the mathematical model	20
3.2 Zero Moment Point (ZMP)	21
3.3 Robotics kinematic/kinetic equation	21
3.4 Boundary condition	25
3.5 Error correction of the mathematical model	25
4. Computer program for biped locomotion	30
4.1 Contents of the program and its flow	30
4.2 Implementation of the program	30
4.3 Outline of numerical integration	31
5. Input data	38
5.1 Input data for the program	38
5.2 Basic human walking pattern	39
5.3 Data for ZMP movement	41
6. Computed results and its validation	46
6.1 Computed results	46
6.2 Validation of the results	46
7. Representation of human walking image by 3-D solid modeler	57
7.1 Implementation method of graphic system	57
7.2 Execution procedure of graphic system	58
7.3 Picture generated	59
7.4 Problems on 3-D modeler SOLVER	59
8. Future plan in the fiscal year 1988	68
9. concluding remarks	69
Acknowledgments	69
References	70

1. はじめに

昭和62年度から計算センターに研究テーマとして“人間動作シミュレーション”が認められ、研究が開始された。研究内容は、原子炉など大規模システムに対する人間の振舞をシミュレーションするため、課された命令の理解、置かれた環境の認識、動作判断と動作、および環境変化への対応など人間の行動を支配する各要素について高度なシミュレーション技術を開発することである。本報告では、これらのうち人間の基本動作の1つである二足歩行に関してロボット運動学的にシミュレーションを得ようという試みを取り上げ、特にこのための計算プログラムについて記述する。

従来、産業用機械としてのロボットの開発は、人間に似たものを作るというSF的発想から脱して、必要とする機能のみを強化し実現することによって、爆発的な発展をとげた。一方、二足歩行、指と腕の協調制御など人間の動作メカニズムを工学的な観点から解明しようという研究も日本の大学を中心に続いている。ロボット運動学的観点からは、産業用ロボットは、各種作業用ロボットのハードウェアの設計並びに動作の制御に重点が置かれる。人間の動作に関する工学的研究は、高西氏によれば大きく分けて2つの分野からなる⁽¹⁾。1つは人間工学的アプローチであり、実際の歩行運動の計測など工学的解析に力点が置かれ、バイオメカニズムと呼ばれている。他の1つは制御工学的アプローチであり、歩行ロボットによる二足歩行の実現などハードウェアの実現を目標としており、バイオメカニクスと呼ばれている。ここでは、歩行ロボットの実現を考慮せず人間動作の模擬という前者の立場をとる。

ロボットの数学モデルとしては、ロボットの関節の位置、姿勢 $X = (x, y, z, \theta, \phi, \psi)$ および速度 dx/dt 、加速度 d^2X/dt^2 を計算するための運動学 (Kinematics) と重心、力、回転モーメントを計算する動力学 (Kinetics) とがある。二足歩行動作は不安定な二足歩行をいかにうまく制御するかという立場から支持足の足底の支点 ZMP (Zero Moment Point) の移動などが重要となり運動学のみでは解決しない。

ここで取り上げるのは、歩行時の歩行パターン、速度、など人間の意志による決定を行うレベル⁽¹⁾に関する運動学方程式に関するものであり、平衡保持のための重心制御を行うなどのフィードバック制御は考慮しない。基本歩行パターンとして、例えば足を平にして歩く、通常の歩行をする、階段を昇る、降りる、といったものを入力データで与える。

ここでの研究においては、ロボット運動学に関する基本的な事項については東大の高野氏らによる文献⁽²⁾と、計測制御学会によるロボット基礎講習会テキスト^{(3), (4)}を参考とした。その他、原研でのこの分野の仕事として多関節マニピュレータの運動学を取り扱った文献⁽⁵⁾を参考にした。二足歩行の数値シミュレーションに関しては、日本ロボット学会誌の二足歩行ロボット特集が参考になった。特集には、早大加藤氏による歴史と課題⁽⁶⁾、阪大有本氏らによる階層制御⁽⁷⁾、早大高西氏による準備歩行⁽¹⁾、この分野の研究者による座談会⁽⁸⁾のほか7編が記載されている。このほか、先端的技術動向を知る上で早大のWL-10RDによる動歩行の実現⁽⁹⁾、科学万博に出展された早大と日立が共同で開発した二足歩行ロボットに関する文献⁽¹⁰⁾が有効であった。

二足歩行の実際の計算プログラム作成に関しては、ヴコブラトヴィッチの本（加藤，山下訳）⁽¹¹⁾に記載されている腕固定の歩行プログラムを用いた。しかしながら、このプログラムは利用マニュアルがないこと、筆者のこの分野の研究に対する知識不足、また大きな数学モデルのエラーなどもあったことから、原研で動くようになるまでフル・タイムではないが約2カ月を要した。ここでの歩行モデルは、Fig. 1.1, Fig. 1.2で示すごとく人間を7つの関節と12のボディを持つロボットで表現し、簡単な歩行動作に関する運動学方程式を解き、各時点での各関節での位置、角度（ $x, y, z, \theta, \phi, \psi$ ）を計算する。この場合、角度の一部は足の動きを示す基本歩行パターンとして入力し、拘束条件として、床反力を利用して支持足が床に固定されるという条件を与えて運動学方程式を解き、腰の曲る角度（ ϕ ）と足元の左右の動き（ θ ）を解として求める（Fig. 1.2参照）。

今回整備したプログラムは、左右足の関節角を基本歩行パターンとして与えている点でシミュレーションとアニメーションの中間といえる。基本歩行パターンを入力しないで、接地状態、けり出し方法などに対応した人間歩行と類似した拘束条件を運動学方程式に課すことによって全関節角が方程式から求められればよりシミュレーション的になる。倒立振子の原理による解析などの力学的本質の適用が試みられているが^{(1), (7)}、現在のところ直接それが関節角を求める手法として完成されていない。

当面の目標は、Fig. 1.1, Fig. 1.2に基づく計算結果を3次元ソリッド・モデルを用いて映像化することである。また、ヴコブラトヴィッチの本には、上記モデルの拡張として腕を自由に動かす場合の一般的数式モデルのオイラー角による表現が与えられている。数学モデル、入力歩行パターン、フローチャート、出力結果の一部も記載されており、これらを参考にして一般的な二足歩行プログラムの開発が可能なので挑戦したい。

計算結果の映像化については、63年度に原研に導入を予定しているCeller Array Processor (CAP)⁽¹³⁾の利用を予定している。今回は、計算結果の検証のためにコマ取り風に図形を出力するにとどめた。これに記しては、電総研から導入した三次元ソリッド・モデラーSOLVER⁽¹²⁾を利用した。

本報告では、簡単な二足歩行動作の運動学的シミュレーションによって得た知見をとりまとめた。まず、関連文献のサーベイを行う。引き続き、二足歩行運動学の数学モデル、計算プログラムの整備、歩行パターンの与え方、計算結果とその解釈の仕方、計算結果の三次元ソリッド・モデルによる表示などについて述べる。

簡単な歩行動作に関する運動力学方程式を解き、関節の位置、角度を計算し、歩行動作を映像化する。

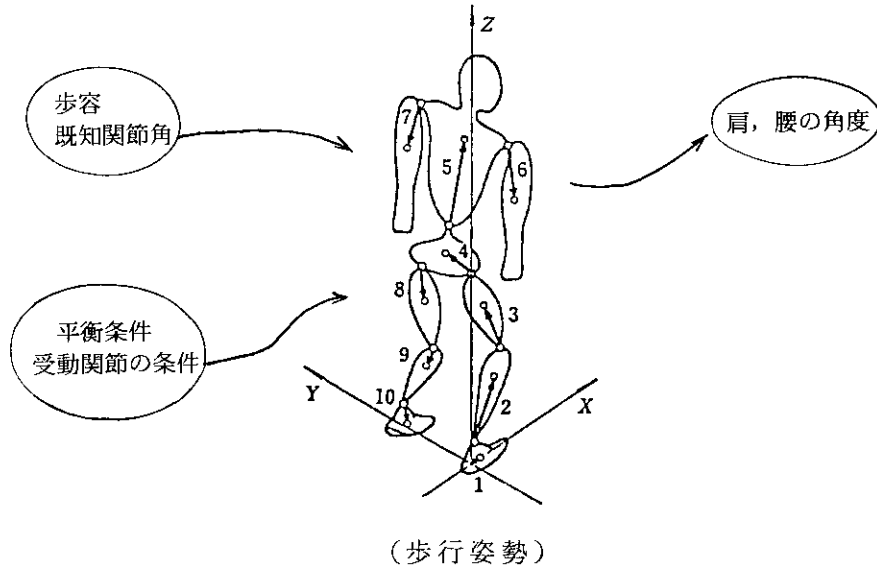


Fig. 1.1 Simulation for human biped locomotion

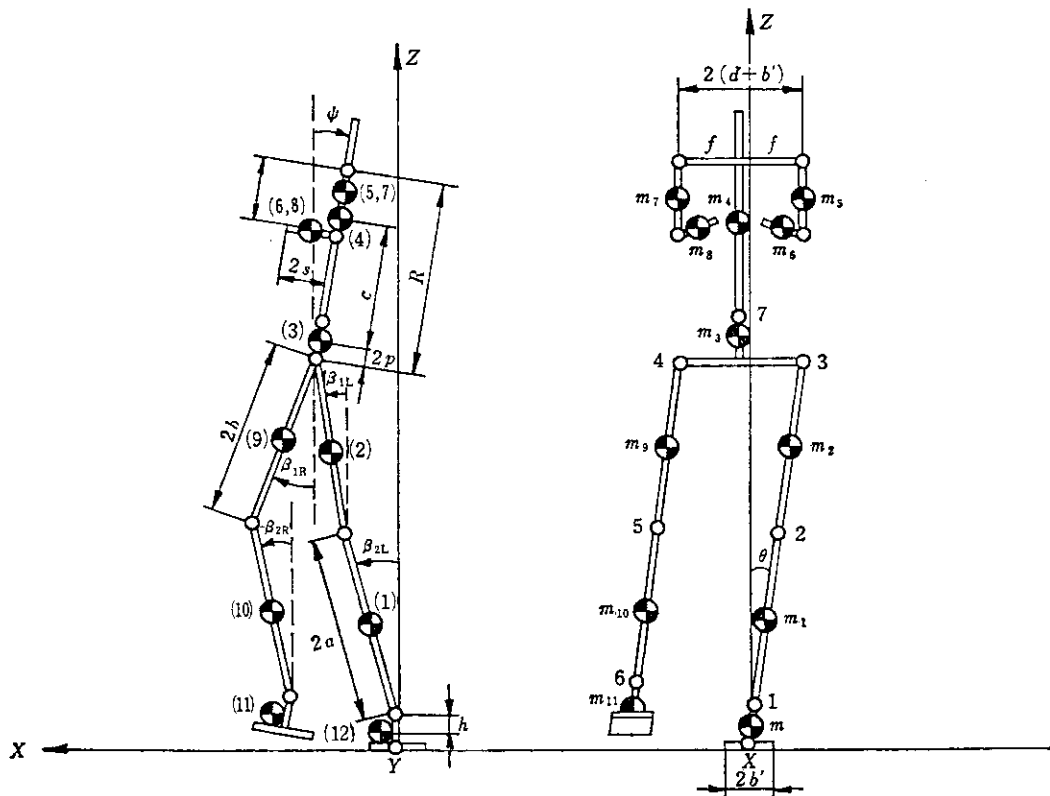


Fig. 1.2 Configuration of human biped locomotion model (11)

2. 関連文献のサーベイ

2.1 ロボット機械関連文献

文献〔2〕

M. Takano et al, Development of Computer Simulation System of Kinematics and Dynamics of Robot, Journal of the Faculty of Engineering, the Tokyo Univ., Vol. XXXV1, No.4 (1982).

各関節に回転 (Rotation: X, Y, Z軸に対する回転) か並進 (Linear: 左右・前後・上下運動) のいずれか1つの自由度をもつ最も簡単な マニピュレータ (Fig. 2.1)の動きに関する運動学ならびに動力学方程式を導き, 関節の位置, 姿勢, 加わる力, モーメントなどを計算するためのプログラムについて述べている。関節の位置 (x, y, z) , 姿勢 (θ, ϕ, ψ) などは, 各々のボディに固有な座標系 (オイラー表現), ただし, z 軸は並進或いは回転主軸と一致させ回転は右周りを+にとる (Fig. 2.2) から, 基準座標系 (ラグランジュ表現) に変換マトリックスによって変換する方法がとられている。回転と並進運動についてはFig. 2.3に示す。

論文は, ロボットの関節の位置 $X = (x, y, z)$, 姿勢 $\theta = (\theta, \phi, \psi)$, 速度 dx/dt , 角速度 $d\theta/dt$, 加速度 d^2X/dt^2 , 角加速度 $d^2\theta/dt^2$ など Kinematics に関する計算 (第2章), 関節に加わる力とモーメントなど Kinetics に関する計算 (第3章), 手先に力が加わった場合のロボットの姿勢の変化の計算 (順問題) (第4章), 6自由度を持つロボットの手先の関節の6変数 $(x, y, z, \theta, \phi, \psi)$ の値が既知のとき, 他の6関節の回転角または並進値 $(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5, \phi_6)$ を求めるための解法, つまり6つの未知数に対して6方程式を解く問題 (逆問題) (第5章), 最後にこれらを実現するためのプログラムの説明 (第6章) でできている。全体を通じて基本的な事項がよく整理され記述されているので, 筆者のように専門分野外のものにもよく判る。

文献〔3〕

内山 勝, ロボット機構学, ロボット基礎講習会テキスト, 日本計測制御学会 (1986).

ロボットのハードウェア機構と機構に対して数学的解析を行うための基礎的手法について解説している。ロボットのジョイントの種類として回転と直進 (=並進) があり, ロボットの運動機能を表す図記号の J I S 規格表示が Table 2.1 のように示されている。機械としてのロボットは, 人間の関節のように1つのジョイントに対して3自由度が与えられていることは少ないが, スタンフォード・アーム (Fig. 2.4) のように多自由度関節もある。3自由度関節 (Fig. 2.5) ではよく使う姿勢範囲に特異点と呼ばれる制御不能な所が存在する。ロボット・マニピュレータを考えた場合, ジョイントの回転角や, 並進量よらなるジョイント変数ベクトルを $Q = (q_1, q_2, \dots, q_m)$ と置き, 手先の位置, 姿勢を示す作業座標ベクトルを $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ と置いたとき, その関係を $P = F(Q)$ で表す。ここで n はロボットの自由度で, m は作業座標の次

元である。 $n = m = 6$ が一般的である。数学的には、特異点とは F のヤコビアン のランクが m 未満となる点である。

本文献では、ロボット機構を具体例によって解説（第2章）、オイラー座標によるリンク（= ボディ）に固有な直交座標系 Σ_i 、 i はリンク番号、の導入（第3章）、変換ベクトル、或いは変換マトリックスにより Σ_i から基準座標系 Σ_0 へ変換するための2方法（第4、5章）を解説している。上記の関数 F のヤコビアンを計算する方法 $Q = F^{-1}(P)$ （第6章）を求める逆運動学の解法（第7章）、特異点解析（第8章）、最近のトピックとしてロボットの機構評価手法（第9章）を与えている。

文献〔4〕

吉川 恒夫, ロボットの動力学, ロボット基礎講習会テキスト, 日本計測制御学会 (1986).

ロボット・アームの運動学方程式を誘導する方法として、従来からよく利用されてきた変換マトリックスを用いたラグランジュ法と、最近計算速度の速さから実時間制御へ利用され始めたニュートン・オイラー法を示し、両方法の導出手順を解説している。

まず第2章では、力学の基礎事項として、古典的なニュートンの運動の第2法則とその変形であるオイラーの運動方程式を示し、これらに関連づけてラグランジュの運動方程式を導く、第3と4章では、 n 自由度ロボット・マニピュレータに対するラグランジュ法とニュートン・オイラー法の導出手順を各々導く。第5章では、動力学的性能評価として、目標軌道からそれを実現するのに必要な駆動入力を求める問題（逆問題）に対して、両手法の計算量の比較が Table 2.2 のように示されている。表によると計算時間はラグランジュ法では自由度 n の3乗に比例するが、ニュートン・オイラー法は n に比例する。ここで $n = 6$ 。最後に第6章では、ロボット・アームの動的可操作性、つまり、手先が動き得る範囲についても述べている。

文献〔5〕

佐々木 忍, 多関節ロボット・マニピュレータの逆運動学方程式に最小化手法を適用した新しい解法, 計測制御学会論文集 Vol. 23-3 (1987).

6 関節のマニピュレータ (Fig. 2.6) に対し、マニピュレータの先端の位置や姿勢を指定してそれに対する関節解を求めるいわゆる逆問題を高速に解く方法について述べている。従来は逆ヤコービ行列による線型化反復法が用いられてきたが、あるべき先端の位置と試みに決めた位置との差が最小になるように選ぶ、先端から肩方向へ関節解を決めていく“最小化法”を新たに開発した。計算時間は逆ヤコービ法の約 $1/4$ で且つ充分良い精度の解が得られている。第2章では新しい計算アルゴリズムを第3章では計算例と計算時間について記述されている。

2.2 二足歩行ロボット関連文献

文献〔6〕

加藤 一郎, 二足歩行ロボット —その歴史と課題—, 日本ロボット学会誌 Vol. 1-3 (1983).

二足歩行の研究の歴史が、Table 2.3 のように示される。このうち、WAP, WL は早大の加藤, 高西氏らによるもの, Asshy は芝浦工大の佐藤氏らによるもの, Bipman は東工大の森, 加藤氏らによるもの, 韋駄天は阪大の有本氏らによるもの, 健脚は阪大の増淵, 古荘氏らによるもの, Biper は東大の三浦氏らによるもの, CW は千葉大の美多氏によるものである。足踏機, Powered Duckling はオックスフォード大によるものである。今後の課題として、つまり、電源, コンピュータなどのための紐つきからの解放と、自律化、つまり、外乱に対する適応能力を挙げている。

文献〔7〕

有本 卓, 宮崎 文男, 二足歩行ロボットの階層制御, 日本ロボット学会誌 Vol. 1-3 (1983).

人間歩行ロボットのダイナミクスについて、二足歩行運動の中からロボットの重心(胴のあたり)に関する部分を単純な形で抽出することを重点に記述している。

第2章で人間モデルの各リンク要素として、リンク長、質量、慣性モーメント、質量中心とジョイントの距離などが与えられたとき、鉛直軸となす角度 θ をパラメータとしてラグランジュの方法で運動学方程式 $A\ddot{\theta} + B\dot{\theta}^2 + C\sin\theta = Du$, ここで u は外力トルク、を導く。行列 A の固有値は、人間系では胴体の重量が大きいことから正の十分大きいものは1つ (A と置く) しかない。 A に付随する固有ベクトルに意味付けを与えると共に、上記の運動方程式に人間歩行と類似な (Homomorphic) 拘束条件が付加された場合や高速歩行時の両脚とも地面から離れる場合などの式の導出方法が示されている。第3章では、固有値のモード分析として、上記の運動学方程式が特異摂動系で表現できること (有本氏らによる別の文献有り)、その場合遅い運動モード (A に対応する) に付随する変数 ξ (θ を座標変換したもの) は倒立振り運動 $\ddot{\xi} = A\xi + Bu$ (ξ は重心と原点を結ぶ線分が鉛直軸となす角、 u は外力) で近似できることが示される (Fig. 2.7 参照)。第4章では、進行方向の前面からみた横方向 (Frontal plane) の運動の影響を考慮に入れる制御システムの構成方法が取り上げられている。制御システムは遅い運動モードと速い運動モードに層別化されており、後者は実時間の関節毎に局所的なフィードバック制御に関係している。第5章では制御システムを実際の二足歩行ロボットに適用した結果が示されている。ZMP 以外の二足歩行運動学方程式系の1つの発展の方向がこの文献で示される。

文献〔1〕

高西 淳夫, 二足歩行ロボットによる準動歩行, 日本ロボット学会誌 Vol. 1-3 (1983).

バイオメカニズム的観点から二足歩行ロボットの基礎について述べ、準動歩行を実現した早大の WL-9 DRMK II ロボットに関して具体的に解説している。第2章では、情動的側面として人間の運動制御を

- a. 上位レベル 歩行パターン, 速度, 方向など意志による決定レベル
- b. 中位レベル 平衡保持のための重心制御を行う歩行安定化のためのフィードバック系
- c. 下位レベル 特定の歩行パターンを動的に補償するサーボ系 (動力系)

にわけ、上位レベルの研究が今後の課題であることが述べられている。力学的側面として重心の

静力学的な釣合により系を安定化する静歩行と普通に人間が行っている動歩行について示している。静歩行は、片足（支持脚）で重心を支え他方の脚（遊脚）が後方から前方へ移動する時期と重心が後方の足から前方の足に切り換る時期の繰り返しによって成立していると考え（Fig. 2.8）。動歩行では、重心の運動とリンク各部の運動の合成として動力学的に捉える。しかし、システムの動力学を完全に扱うのは難しいので簡素化をはかり、Fig. 2.9(a)で示すように支持脚が上体を支え重心の運動がほとんどない単脚支持相、および同図(b)のように両脚は動かさないまま重心が動的に後脚から前脚に切り替る立脚切換相により成立していると考え。

第3章では、準動歩行ロボットWL-9 DR (Dynamic Refine) に到る二足歩行ロボット研究の流れについて記述している。さらに、第4章では足首部にトルク・フィードバック機能を持たせ、より柔軟な歩行を実現したWL-9 DRMK IIの準動歩行について示している（Fig. 2.10）。 θ を重心と原点を結ぶ線分が鉛直軸となす角とすると、菱形部分は動的安定領域を示す。ここでの準動歩行は、単脚支持相は静的に立脚切換相は動的に取り扱われ、立脚切換相は足底のある倒立振り子モデルで近似されている。実時間制御方式、歩行実験についても記述している。第5章では、WL-9 DRMK IIのハードウェアについて示している。

文献〔8〕

座談会、二足歩行ロボット研究の現状、日本ロボット学会誌 Vol. 1-3 (1983)。

伊藤正美（名大，司会），有本 卓（阪大），加藤一郎（早大），加藤了三（東亜大），佐藤（芝浦工大），高西淳夫（早大），古荘純次（岐阜大），三浦宏文（東大），美多 勉（千葉大）の二足歩行ロボット研究をリードする各氏によって、研究の動機、開発の意義、現代制御理論は使えるか、新しい機構学、二足歩行ロボットとマニピュレータの違い、センサー、上体とアクチュエータ、着床時の衝撃力の制御、将来への抱負が語られた。このうち将来への抱負に関しては、自立型歩行ロボット開発のため消費エネルギーを考慮したハードウェア、ソフトウェアの研究、人間の歩行制御の研究、人間に近いロボットの開発、環境に応じて歩行パターンを変えられる適応歩行の研究、視覚、圧力などセンサー機能、学習機能を持たせ二足歩行ロボットの知能化を目ざす、ハード面を中心にロボットの設計法の整理、現代制御理論の実証と二足歩行ロボットから問題点を発掘して新しい理論をつくる、制御理論の立場でソフトで何処までできるかを追及する、など挙げられた。

文献〔9〕

高西 淳夫，他，二足歩行ロボット WL-10RDによる動歩行の実現，日本ロボット学会誌 Vol. 3-4 (1985)

外乱のない平坦地における二足歩行ロボットWL-10RDの動歩行の実現について動力学解析、制御方法、ハードウェア、歩行実験結果などの面から述べている。

第2章では、床面上の支持点P（多点接地も含む）に関する運動方程式を立て、Pに作用する力とトルクに対して歩行運動に関する拘束条件を与える。第3章では、動歩行の制御方式として、1歩行周期を単脚支持相と立脚切換相に分けた制御を提案している（前記Fig. 2.9参照）。単脚支持相においては、足底が地上に固定された12自由度のリンク・システムとして扱い、ZMP

が支持脚の足底面内にあるように設定歩行パターンを作成し、これに従った歩行を行わせる。立脚切相は更に4つのフェーズに分けられ (Fig. 2.11), 倒立振子モデルによる近似式に各フェーズにおける拘束条件を与え, 設定角度, 弾性係数, 粘性係数などの制御パラメータを予め決め, これらを用いて足首部のトルクと機械インピーダンスを歩行時に適切に変更し, 接地時のショックを和らげスムーズに後脚から前脚への切り換えをはかる実時間制御方式がとられているようである。実時間制御については, 筆者の機械に関する基礎知識の不足から詳細を理解するのは難しい。

第4章では, WL-10RDを実現するための軽量化された機械モデル, マイクロコンピュータ Z8002を搭載した制御装置について記述している。第5章では, コンピュータ・シミュレーションと機械モデルによる繰り返しテストにより実機に適した動歩行へと発展させ, その結果得られた歩行ステック図 (Fig. 2.12)や立脚切相の制御パラメータが示される。

文献〔10〕

加藤 一郎, 他, 脚方式移動ロボットの開発, 日立評論, Vol. 68-10 (1986)。

1985年の科学万博に出展した自律型二足歩行ロボットWHL-11 (Waseda Hitachi Leg 11) の開発の概要について紹介している。

歩行方式形態は, 静歩行, 準動歩行, 動歩行のうち (Fig. 2.13 参照) のうち, 立脚切相のみを動力学的に取り扱う (文献8 参照) 準動歩行に依っている。その自由度構成は Fig. 2.14 に示すとおりである。展示された歩行ロボットは電源以外をすべて本体に搭載したため重量120kg, 全高144.7cmと大きく, 歩行速度も1歩10秒 (人間の歩行では1歩1秒) と遅いが, 将来必要となる主要技術を盛り込んだ点で開発意義が大きいと述べられている。ハードウェア概要, マイクロコンピュータ内臓の制御ユニット, サーボ系を司る油圧ユニットについても述べられると共に, 歩行パターン生成手順 (Fig. 2.15) についても示されている。

文献〔11〕

M. Vukobratovic (加藤 一郎, 山内 忠 訳), 歩行ロボットと人工の足, 日刊工業新聞社 (1975)。

ヴコブラトヴィッチは, ベオグラード大学 (ユーゴスラビア) で教鞭をとり, 二足歩行の解析および身障者用歩行機械の開発を行ってきた。本書の内容については, 第1章では, 歩行ロボットの数学モデルについて基本的事項に始まり, 協調制御による運動の構成法, 歩行系の運動方程式のオイラー角による表現と計算アルゴリズムについて述べている。第2章では, 外乱のあるときに動的平衡を保つための安定化法を主題としている。第3章では, 協調制御による計算プログラムの出力結果事例を, (1)足を水平に保つ歩行, (2)通常の歩行, (3)階段を昇る, (4)階段を降りる, などの種々の歩行について示している。関節における駆動トルクなどのエネルギー解析法とその計算結果, 駆動トルクの周波数解析, 駆動部の設計条件, 当時 (1975) の歩行機械の紹介なども示されている。

付録では, Fortran で書かれた二足歩行プログラムを載せている。筆者の本報告の主題はこのプログラムの原研での整備に関するものであるので詳細は次章以下に譲る。

Table 2.1 JIS standard notation of robot motion⁽³⁾

番号	名称	図記号	運動方向(参考)	備考
1	立動(1)			
2	立動(2)			
3	回転機構			
4	旋回(1)	(1) (2)	(1) (2)	(1) 通常用いることが多い図記号。 (2) (1)の側面を表す図記号。
5	旋回(2)	(1) (2)	(1) (2)	(1) 通常用いることが多い図記号。 (2) (1)の側面を表す図記号。
6	差動歯車			
7	ボールジョイント			
8	は(把)握			
9	保持など			手先が凹工具になっているもの含む。ロボット用工具は、ここでは規定しない。
10	設置基準面 (ベース)			地面、テーブルなどをいう。

Table 2.2 Comparison of amount of computation for solving robotics inverse kinematic equations between Neuton Euler method and Lagrange method⁽⁴⁾

方 法	乗 算	加 算
ラグランジュ法	$32\frac{1}{2}n^4 + 86\frac{5}{12}n^3 +$ $171\frac{1}{4}n^2 + 53\frac{1}{3}n - 128$ (66,271)	$25n^4 + 66\frac{1}{3}n^3 +$ $129\frac{1}{2}n^2 + 42\frac{1}{3}n - 96$ (51,548)
ニュートン・ オイラー法	$150n - 48$ (852)	$131n - 48$ (738)

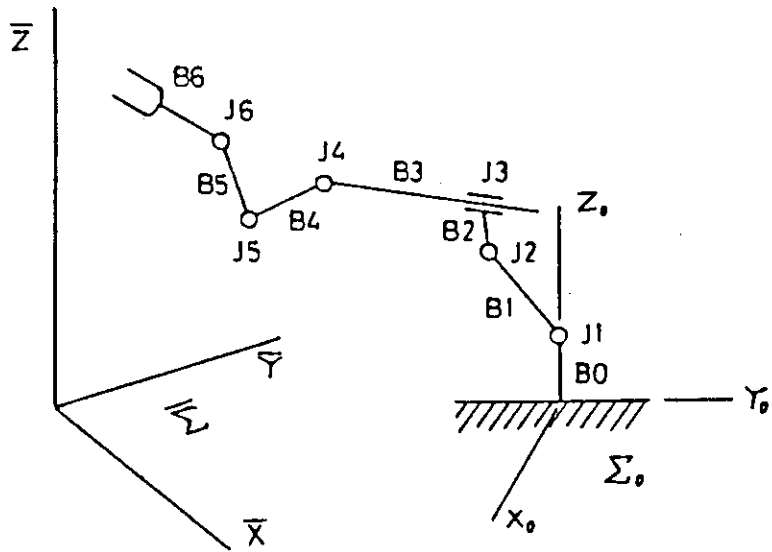
(注) ()内は $n = 6$ の場合

Table 2.3 History of biped locomotion robot⁽⁶⁾

期	年度 (昭和)	ロボット名	特						徴	
			自由度	動力	重量 kg	身長 cm	歩幅 cm	速さ 秒/歩	次元	歩行形態制御方式など
I	45	WAP-2 足踏機	10 3 伸縮型膝	空 油	5	84	18		3	静完全歩行 2 竹馬形足踏み
	46	WAP-3	10	空	5	83	18		3	静完全歩行(平地, 階段, 斜面), 適応制御
	47	WL-5	10	油	130	125	15	45	3	静完全歩行, 負荷定格30kg
	48	Powered Duckling Asshy-3	1 12	電 油					3	静完全歩行 直立, 重心左右移動
II	54	Asshy-10	17	油	200	200			3	片足直立, 両足屈伸, 動力 源搭載
		F-1	1	電						径路創成リンク機構, 直進 つりあいおもり制御
		Biper-1,2	2	電						ロール軸まわりの制御
	55	Bipman-2	4 伸縮型膝	電					2	竹馬形1歩の動歩行
		Biper-3	3	電					3	竹馬形定常足踏み, ピッチ とロールの協調制御
	56	WL-9DR	10	油	43	100	45	10	3	準動完全歩行
		N-1	5	電					2	両脚支持相の制御
		韋駄天-1	5	電				1	2	動定常歩行
		健脚-1	4	電	30	110	30		3	動定常歩行
		Biper-4	7	電				0.2 ~0.3	3	動定常歩行
		CW-1	6	電	15	75	12 ~30	1	2	動定常歩行
	57	WL- 9DRmkII	10	油	43	100	45	6	3	準動完全歩行, 足首のトルク 制御
N-2		7	電						自律歩行を目指す	
韋駄天-2		7	電	29	140	25	0.8	3	動定常歩行, バランサ移動 による前頭面制御	
Biper-5		3	電						計算機搭載	
58	WL-10R	12	油	70	120	45	6	3	計算機搭載, 方向転換を目 指す	
	Asshy-13	17	油						計算機搭載, 静歩行を目 指す	
	F-2	1	電			26	0.8 ~0.5	3	上部部の8字形運動による 動定常歩行	
	健脚-2	6	電	40	120				準備中	
	CW-2		電			50			けりの実現を目指す	

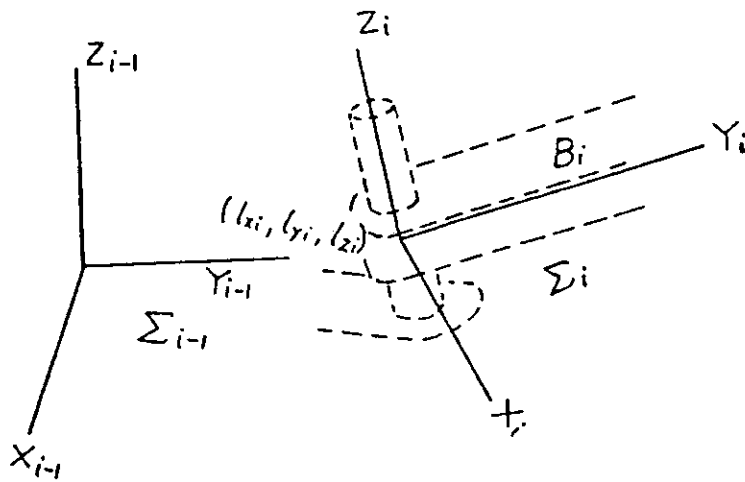
注) 1. 定常歩行とはスタート, ストップを除く歩行部分。

2. 完全歩行とはスタート, ストップを含む全歩行を意味する。



The origin of Σ_i -coordinate system is at joint J_i .
 $\bar{\Sigma}$ is working space coordinate system.

Fig. 2.1 Numbering of bodies and joints of robot⁽²⁾



Σ_i -coordinate system is fixed on body B_i

Fig. 2.2 Σ_i -coordinate system fixed on body B_i ⁽²⁾

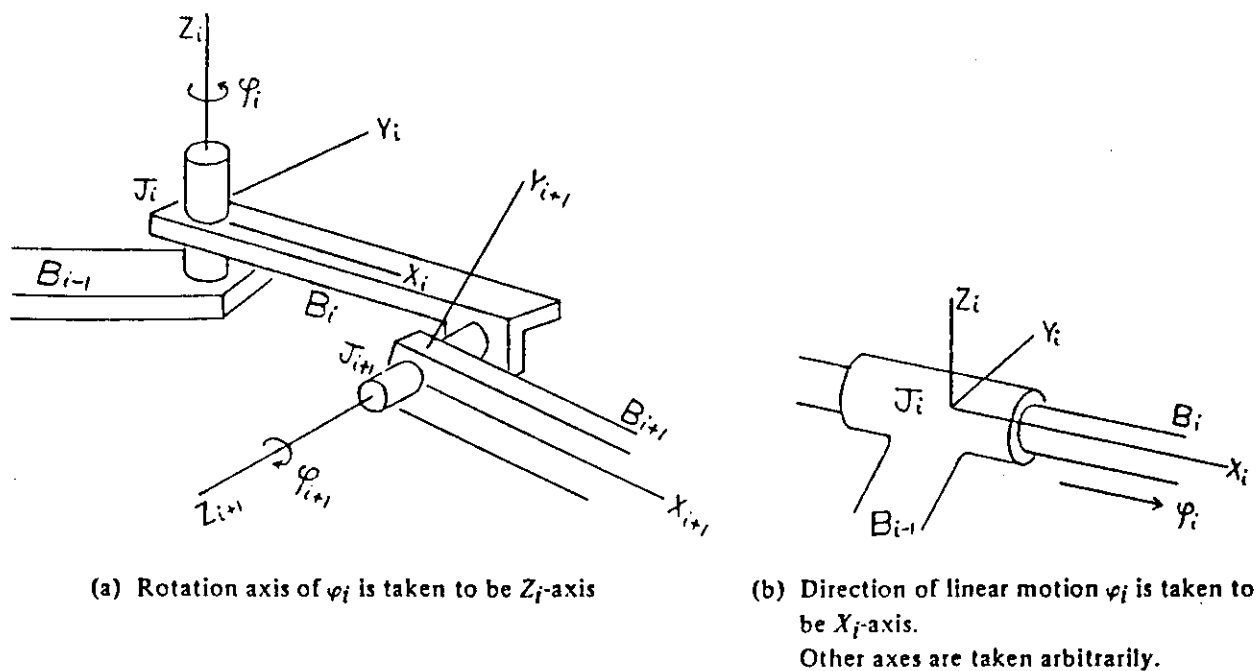
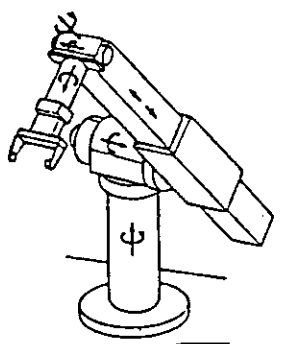


Fig. 2.3 Rotation and linear motions of joint⁽²⁾



スタンフォードアーム

Fig. 2.4 Stanford arm⁽³⁾

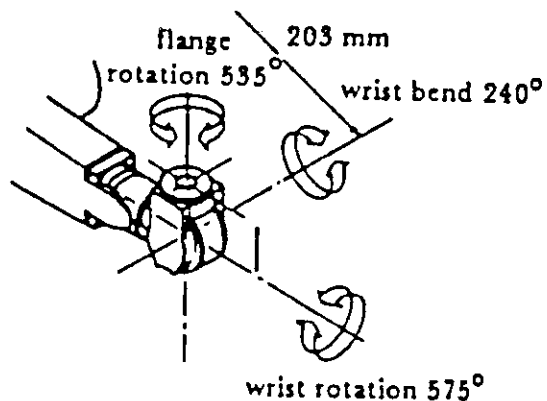


Fig. 2.5 Joint with three degree of freedom⁽³⁾

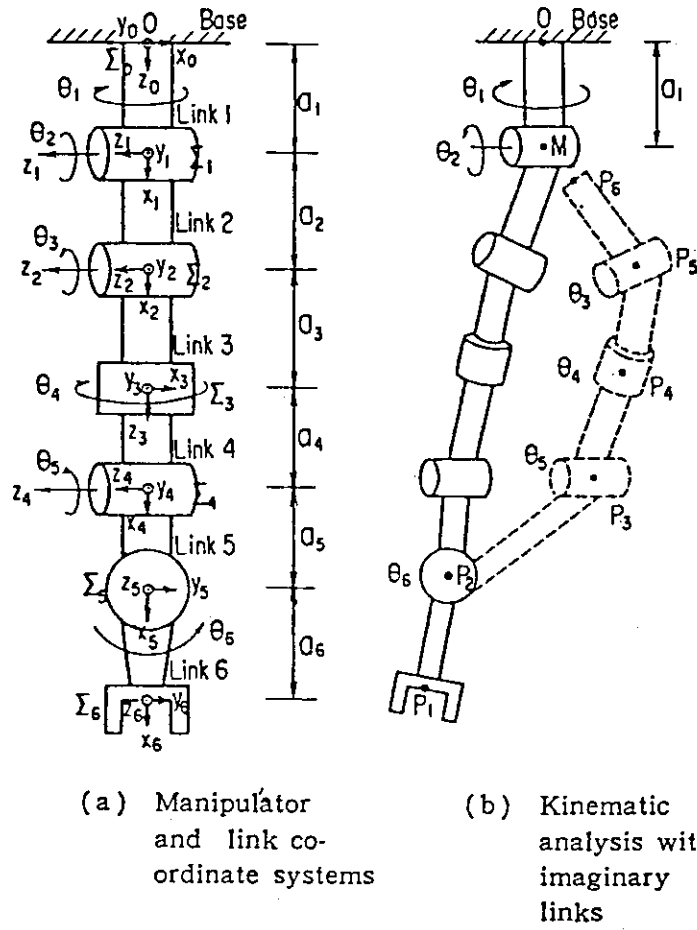


Fig. 2.6 Manipulator with six degree of freedom⁽⁵⁾

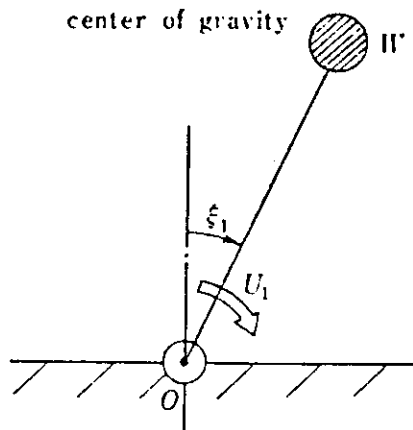
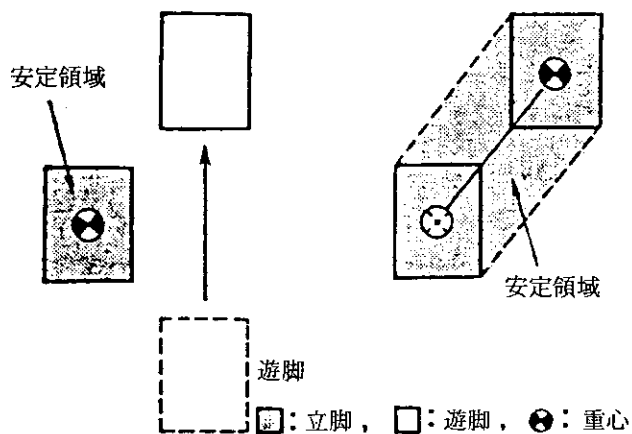
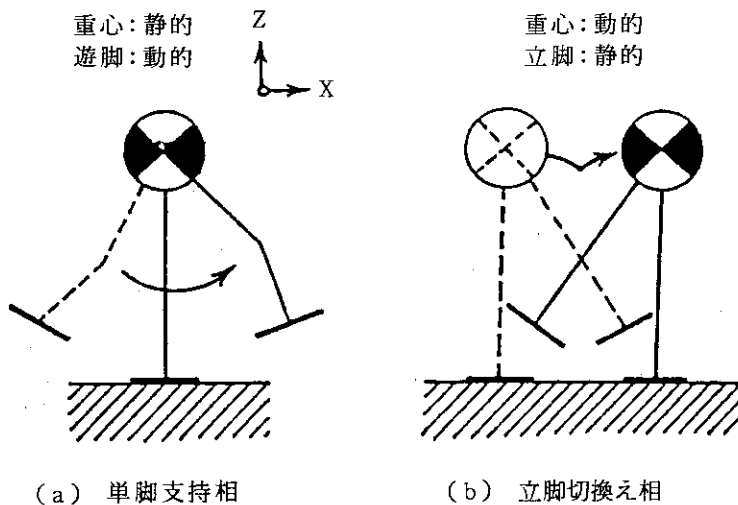


Fig. 2.7 Motion of inverted pendulum corresponding to the lower mode eigenvalue⁽¹⁾



(a) 单脚支持期 (b) 立脚切换え期

Fig. 2.8 Static walking⁽¹⁾



(a) 单脚支持相 (b) 立脚切换え相

Fig. 2.9 Dynamic walking (X-Z plane)⁽¹⁾

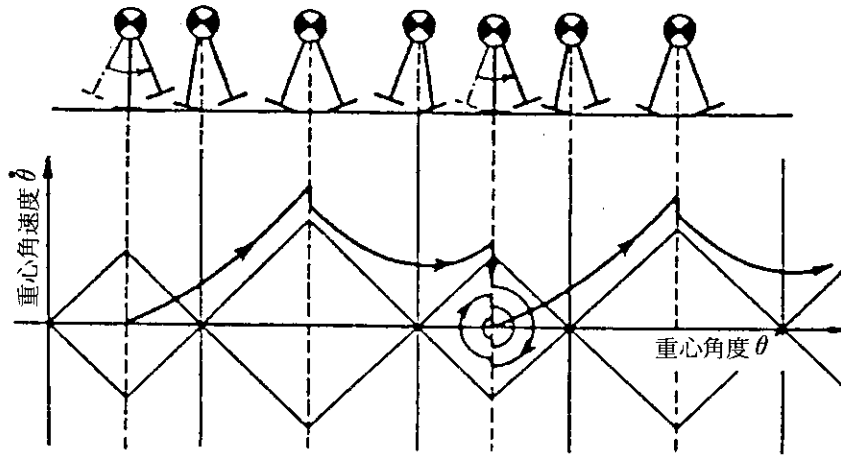


Fig. 2.10 Human biped locomotion and its phase space of the robot WL-9DR⁽¹⁾

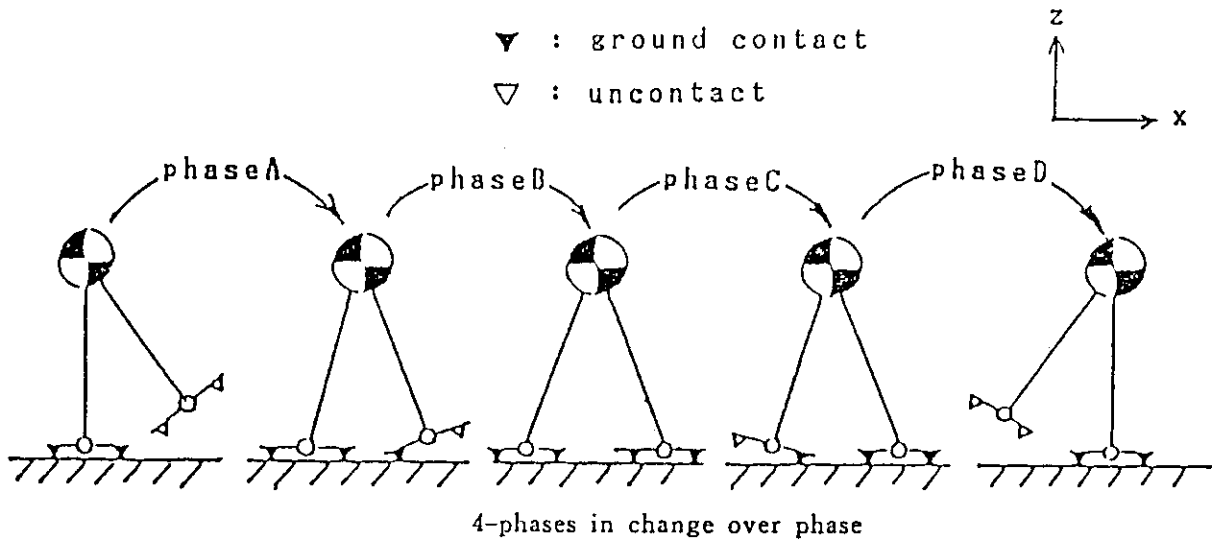


Fig. 2.11 Four-subphases in change over phase⁽⁹⁾

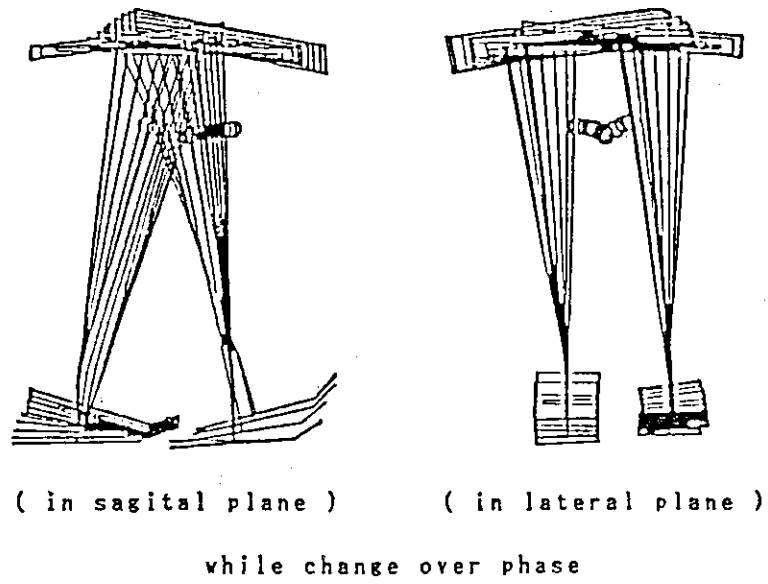


Fig. 2.12 Stick-graph in change over phase⁽⁹⁾

名称	歩行形態	模 式 図
静 歩 行	重心軌跡は常に足底面内	<p>重心</p>
準 動 歩 行	重心軌跡は立脚切換期だけ足底面外	
動 歩 行	重心軌跡は常に足底面外	

Fig. 2.13 Classification of walking pattern⁽¹⁰⁾

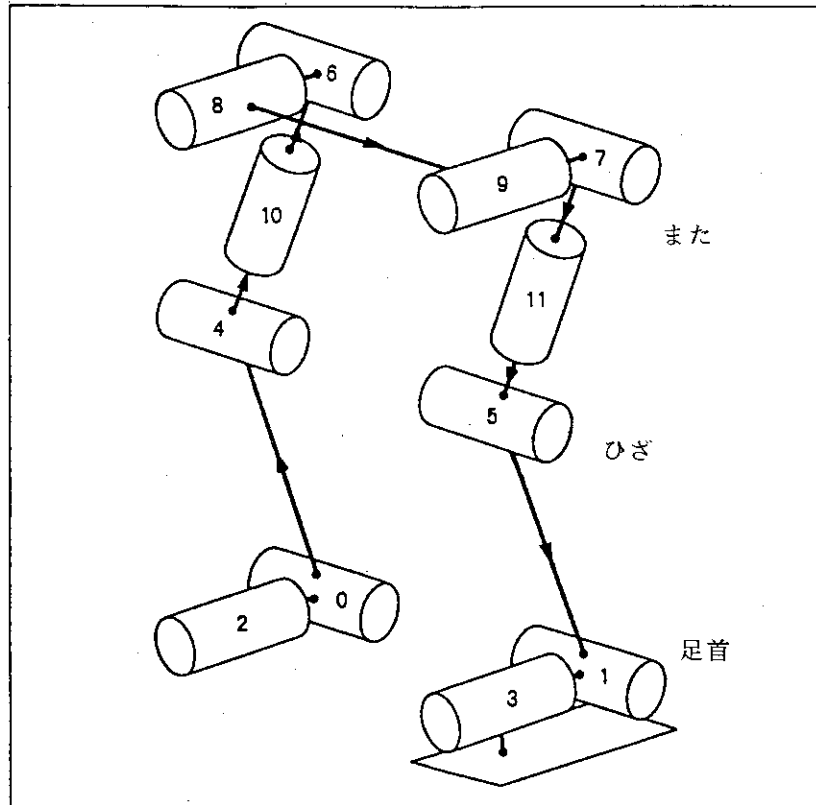
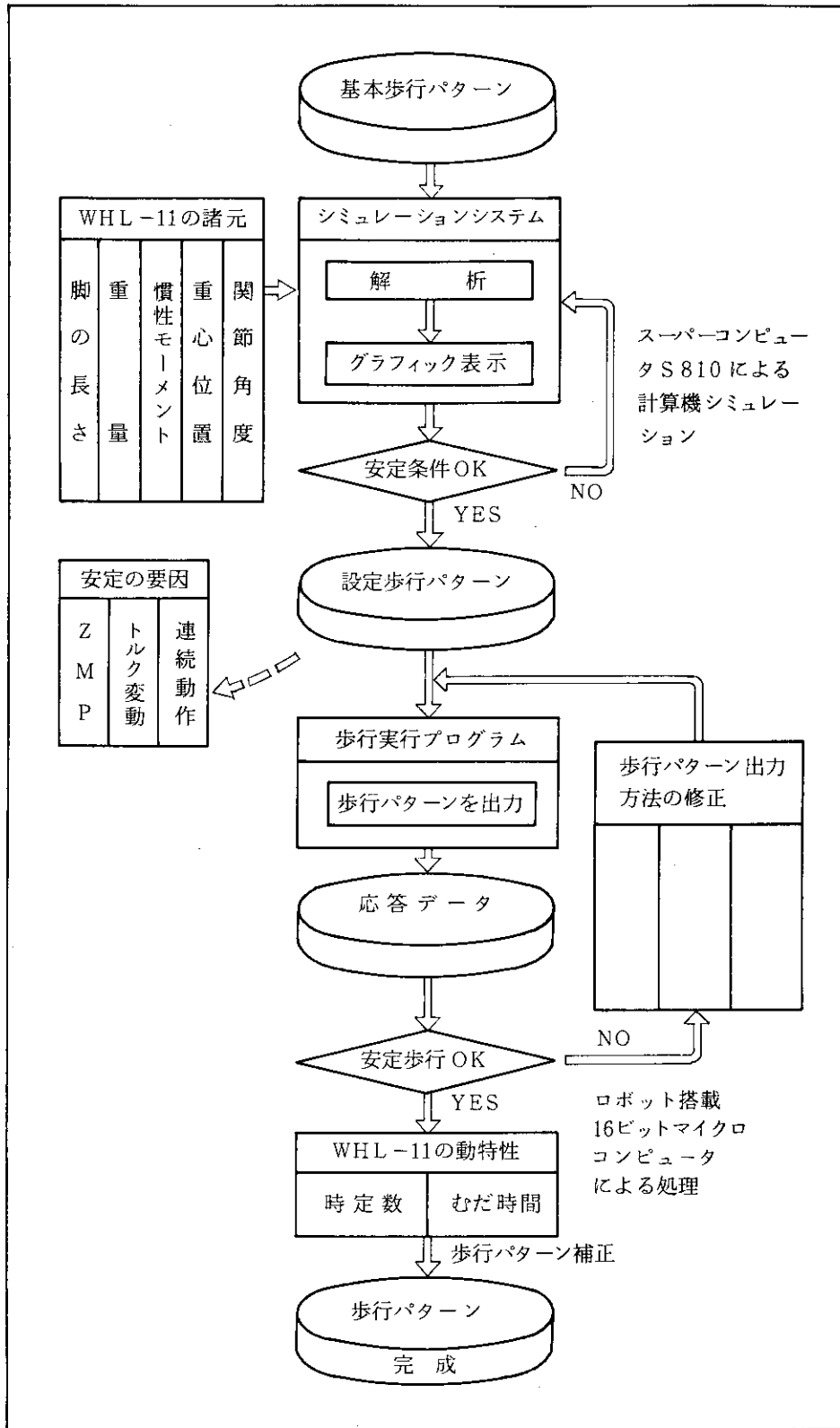


Fig. 2.14 Configuration of freedom of the biped locomotion robot WL-10R⁽¹⁰⁾



基本歩行パターンを作り，計算機シミュレーションによりWHL-11用の設定歩行パターンとする。更に歩行実験により歩行パターンを完成する。

Fig. 2.15 Walking pattern generation procedure of the robot WHL-11⁽¹⁰⁾

3. 二足歩行運動学モデル

3.1 歩行モデル概要

人間をく体モデル化するためには、指関節などの細かい動きを除いたとしても、頭、胴体上部、胴体下部、左右上腕、左右下腕、左右手、左右上脚、左右下脚、左右足の15ボディが必要である。この場合、関節は、首、左右肩、左右肘、左右手首、腰、左右足のつけ根、左右膝、左右足首の14となる。このく体モデルをロボット・モデルに置き換えて人間動作をロボット運動学方程式化することを考える。人間の各関節の動きには並進運動はなく、X軸回りの回転 θ 、Y軸回りの回転 ϕ 、Z軸回りの回転 ψ のみを考慮すればよい。したがって、最大42自由度のロボットとみなすことができるが、全関節が必ずしも3自由度持つわけではない。

しかしながら、ここで取り扱うのは、Fig. 1.2に示すように腕と首固定のモデルであり、前記のうち腰と左右下肢合せて7関節と、首と手を除く12ボディを対象とする。7関節の自由度は回転のみであるとすれば(θ , ϕ , ψ)合せて21となる。しかし、本モデルでは、変数として取り扱うのは軸足(関節番号1)の θ 方向と、腰(関節番号7)の ϕ 方向の角の2つとする。下肢の関節角は軸足を除いて ϕ 方向のみ動くことと仮定し、足首関節1, 6, 膝関節2, 5, 股関節3, 4を β_{1L} , β_{1R} , β_{2L} , β_{2R} , β_{3L} , β_{3R} と記し、入力データで与える。この他の関節角は不動とする。結局、合計の自由度は8となる。

人間を12ボディ、7関節、8自由度のロボットで表現し、ロボット運動学、動力学方程式を解くことによって右足1歩の歩行運動の時間的変化を求めようとするものである。即ち、一步の歩行時間を40に分割し、時間メッシュ $t_1, t_2, \dots, t_{40}, t_{41}$ における12ボディの重心の(x, y, z)座標を計算する。歩行時間は可変にとれるが、一応、人間歩行を考えて1歩1秒かかるとすれば $\Delta t = 0.025$ となる。歩行には、支持期と揺動期があり、例えば、右足の歩行運動では、左足で支持した右足は揺動状態と考え、左足が支持期、右足が揺動期にあるとする。また、左足の歩行運動ではこの逆となる(Fig. 3.1)。

下肢の関節の ϕ 方向の角は歩行の周期性と左右対称性から、足首関節(1, 6), 膝関節(2, 5), 股関節(3, 4)のペアに対し、1歩遅れで $\beta_{1R} = -\beta_{1L}$, $\beta_{2R} = -\beta_{2L}$, $\beta_{3R} = -\beta_{3L}$ が成り立つ。符号が左右逆転するのは、ボディ固有のオイラー座標では若い番号の関節を原点とするので逆向きになるからである。ここでは、左足関節の回転角 β_{1L} , β_{2L} , β_{3L} に関して支持期と揺動期の2歩分、つまり、81時点を入力データで与えることにする。右足関節の符号を逆転させて作る。この入力データを基本歩行パターンと呼ぶ(詳しくは、5.2節参照)。右足の歩行運動が計算できれば、周期性と左右対称性から左足の歩行運動が求められる。

Table 3.1にはボディのサイズ、Table 3.2にはボディの重量と慣性モーメントを示す。

3.2 Zero Moment Point (ZMP)

Fig. 1.2の二足歩行モデルでは足底が地面に固定された8自由度のリンク・システムとして扱い、Zero Moment Point (ZMP) (Fig. 3.2)が支持足のX軸上にあると仮定する。即ち、ZMPで地面に固定されているとし、ZMPを基準座標の原点としてモデル化する。

ZMPの歩行中での移動位置を入力データで与える。ZMPには関節番号12をあてる。一般の歩行ではZMPは踵から指先方向に移動する。ZMPの移動は測定データから見るとかなり複雑な動きを示すが、⁽¹¹⁾ここでは、階段関数で与えることにする。接地から T_1 秒は重心より手前 β_2 の位置に、その後の T_2 秒は重心の位置に、最後は重心より先の β_1 の位置にあるとする (Fig. 3.3)。
(T_1 , T_2 , β_1 , β_2)を歩容と呼び、入力データで与える。

3.3 ロボット運動学方程式

ロボット運動学方程式としてはZMPにおけるX軸とY軸に対するモーメントがゼロであるという力学的拘束条件のみを考慮する。Fig. 3.4の関節pを考えた場合、

(関節pでの回転モーメント) = (ボディiの回転運動の関節pへの寄与部分)
+ (ボディiに線加速度を与えるのに必要な関節pでのモーメント)
+ (ボディiの重力による関節pでのモーメント)
で表現できる。⁽¹¹⁾

(1) ボディiの回転運動の関節pへの寄与部分

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}_i = [J] \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} + [\omega] [J] \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ここで、 ω は回転速度、 J は慣性テンソルである。また、

$$[\omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

(2) ボディiに線加速度を与えるのに必要な関節pでのモーメント

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}_{ip} = m_i \begin{bmatrix} 0 & -Z & Y \\ Z & 0 & -X \\ -Y & X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} = m_i [X] \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

ここで、 X , Y , Z はボディiの基本座標系での重心の座標である。また、

$$[X] = \begin{bmatrix} 0 & -Z & Y \\ Z & 0 & -X \\ -Y & X & 0 \end{bmatrix} \quad \text{とおく。}$$

(3) ボディ i の重力による関節 p へのモーメント

$$-m_i \{X\} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ここで、 m_i はボディ i の重量、 g はグラムを表す。

結局、関節 p でのモーメントは次式となる。

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}_p = \sum_{i=1}^n \epsilon_{ip} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}_i + \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}_{ip} + \sum_{i=1}^n m_i \{X\} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ここで、 n はボディの数、 ϵ_{ip} はボディ i が関節 p のモーメントに寄与する場合は 1、そうでない場合は 0 を与える。

(3.1) ~ (3.4) 式をここでのモデル (Fig. 1.2) にあてはめると、ZMPにおけるモーメントがゼロ、つまり、 $p = 12$ で $M_x = 0$ 、 $M_y = 0$ となる。また $n = 12$ である。

(3.4) 式の第 1 項は次式のように計算される。

$$\begin{aligned} M_i^{(x)} &= \theta_i (J_{xi} \cos^2 \psi_i + J_{zi} \sin^2 \psi_i) + 2 (J_{zi} - J_{xi}) \dot{\theta}_i \dot{\psi}_i \sin \psi_i \cos \psi_i \\ M_i^{(y)} &= \dot{\psi}_i J_{yi} \cos \theta_i + \ddot{\theta}_i (J_{xi} - J_{zi}) \cos \psi_i \sin \theta_i \sin \theta_i + \dot{\theta}_i \dot{\psi}_i \cos \theta_i \{ (J_{zi} - J_{xi}) \\ &\quad \times (\sin^2 \psi_i - \cos^2 \psi_i) - J_{yi} \} + (J_{xi} - J_{zi}) \dot{\theta}_i^2 \cos \psi_i \sin \psi_i \cos \theta_i \end{aligned}$$

上式より、角加速度による任意の部分のモーメントはそれぞれ次のように表わされる。

$$\begin{aligned} M_1^{(x)} &= \ddot{\theta} (J_{x1} \cos^2 \beta_{2L} + J_{z1} \sin^2 \beta_{2L}) + 2 (J_{z1} - J_{x1}) \dot{\theta} \dot{\beta}_{2L} \sin \beta_{2L} \cos \beta_{2L} \\ M_2^{(x)} &= \ddot{\theta} (J_{x2} \cos^2 \beta_{1L} + J_{z2} \sin^2 \beta_{1L}) + 2 (J_{z2} - J_{x2}) \dot{\theta} \dot{\beta}_{1L} \sin \beta_{1L} \cos \beta_{1L} \\ M_{3,4,5,6,7,8}^{(x)} &= 0 \\ M_9^{(x)} &= \ddot{\theta} (J_{x9} \cos^2 \beta_{1R} + J_{z9} \sin^2 \beta_{1R}) + 2 (J_{z9} - J_{x9}) \dot{\theta} \dot{\beta}_{1R} \cos \beta_{1R} \cos \beta_{1R} \\ M_{10}^{(x)} &= \ddot{\theta} (J_{x10} \cos^2 \beta_{2R} + J_{z10} \sin^2 \beta_{2R}) + 2 (J_{z10} - J_{x10}) \dot{\theta} \dot{\beta}_{2R} \sin \beta_{2R} \cos \beta_{2R} \\ M_{11}^{(x)} &\approx 0 \\ M_1^{(y)} &= J_{y1} \ddot{\beta}_{2L} \cos \theta + \ddot{\theta} (J_{x1} - J_{z1}) \sin \theta \sin \beta_{2L} \cos \beta_{2L} + \dot{\theta} \dot{\beta}_{2L} \sin \theta \{ (J_{z1} - J_{x1}) \\ &\quad \times (\sin^2 \beta_{2L} - \cos^2 \beta_{2L}) - J_{y1} \} + (J_{x1} - J_{z1}) \dot{\theta}^2 \cos \theta \sin \beta_{2L} \cos \beta_{2L} \\ M_2^{(y)} &= J_{y2} \ddot{\beta}_{1L} \cos \theta + \ddot{\theta} (J_{x2} - J_{z2}) \sin \theta \sin \beta_{1L} \cos \beta_{1L} + \dot{\theta} \dot{\beta}_{1L} \sin \theta \{ (J_{z2} - J_{x2}) \\ &\quad \times (\sin^2 \beta_{1L} - \cos^2 \beta_{1L}) - J_{y2} \} + (J_{x2} - J_{z2}) \dot{\theta}^2 \cos \theta \sin \beta_{1L} \cos \beta_{1L} \\ M_{3,4,5,6,7,8}^{(y)} &= J_{y3,4,5,6,7,8} \ddot{\psi} \\ M_9^{(y)} &= J_{y9} \ddot{\beta}_{1R} \cos \theta + \ddot{\theta} (J_{x9} - J_{z9}) \sin \theta \sin \beta_{1R} \cos \beta_{1R} + \dot{\theta} \dot{\beta}_{1R} \sin \theta \{ (J_{y9} - J_{x9}) \\ &\quad \times (\sin^2 \beta_{1R} - \cos^2 \beta_{1R}) - J_{y9} \} + (J_{x9} - J_{z9}) \dot{\theta}^2 \cos \theta \sin \beta_{1R} \cos \beta_{1R} \\ M_{10}^{(y)} &= J_{y10} \ddot{\beta}_{2R} \cos \theta + \ddot{\theta} (J_{x10} - J_{z10}) \sin \theta \sin \beta_{2R} \cos \beta_{2R} + \dot{\theta} \dot{\beta}_{2R} \sin \theta \{ (J_{z10} - J_{x10}) \\ &\quad \times (\sin^2 \beta_{2R} - \cos^2 \beta_{2R}) - J_{y10} \} + (J_{x10} - J_{z10}) \dot{\theta}^2 \cos \theta \sin \beta_{2R} \cos \beta_{2R} \end{aligned} \quad (3.5)$$

ここで、 J_{xi} , J_{yi} , J_{zi} はボディでの X, Y, Z 方向の慣性モーメントで Table 3.2 に示された値である。 ψ_i は Z 軸廻りの回転角を総称したもので β_{1L} , β_{1R} , ..., β_{3R} と ϕ などを指す。

第 2 項を計算するためにはボディの重心座標を計算する必要がある。ボディ i の重心座標 $X(i)$, $Y(i)$, $Z(i)$, $i = 1, 2, \dots, 12$ は次式で与えられる。

X-Coordinates

$$\begin{aligned}
 X(1) &= F * \cos \theta * \sin (\beta_{2L}) + X(12) + H * \sin (\beta_{3L}) \\
 X(2) &= X(1) + F * \cos \theta * \sin (\beta_{2L}) + O * \cos \theta * \sin (\beta_{1L}) \quad (\text{注}) \\
 X(3) &= X(2) + O * \cos \theta * \sin (\beta_{1L}) \\
 X(4) &= X(3) + Q * \sin \phi \\
 X(5) &= X(3) + (RR - E) * \sin \phi \\
 X(6) &= X(3) + (RR - 2 * E) * \sin \phi + SS * A_{11} * \cos \phi \\
 X(7) &= X(5) \\
 X(8) &= X(6) \\
 X(9) &= X(3) + O * \cos \theta * \sin (\beta_{2R}) \\
 X(10) &= X(3) + (2 * O * \sin (\beta_{1R}) + F * \sin (\beta_{2R})) * \cos \theta \\
 X(11) &= X(3) + (2 * O * \sin (\beta_{1R}) + 2 * F * \sin (\beta_{2R})) * \cos \theta + H * \sin (\beta_{3R}) \\
 X(12) &= \begin{cases} \beta_2 * \cos (\beta_{3L}) + UH * \sin (\beta_{3L}) & 0 \leq t < T_1 \\ 0 & T_1 \leq t < T_2 \\ -\beta_1 * \cos (\beta_{3L}) + UH * \sin (\beta_{3L}) & T_2 \leq t < 1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

(注) X(2)の計算についてはヴコブラトヴィッチの本にミスあり。

Y-Coordinates

$$\begin{aligned}
 Y(1) &= F * \cos (\beta_{2L}) * \sin \theta \\
 Y(2) &= 2 * Y(1) + O * \cos (\beta_{1L}) * \sin \theta \\
 Y(3) &= Y(2) + O * \cos (\beta_{1L}) * \sin \theta - D \\
 Y(4) &= Y(3) \\
 Y(5) &= Y(4) - FF \\
 Y(6) &= Y(5) + SS * A_{11} \\
 Y(7) &= Y(4) + FF \\
 Y(8) &= Y(7) - SS * A_{11} \\
 Y(9) &= Y(3) - D - O * \cos (\beta_{1R}) * \sin \theta \\
 Y(10) &= Y(9) - (O * \cos (\beta_{1R}) + F * \cos (\beta_{2R})) * \sin \theta \\
 Y(11) &= Y(10) - F * \cos (\beta_{2R}) * \sin \theta \\
 Y(12) &= 0
 \end{aligned}$$

Z - Coordinates

$$\begin{aligned}
 Z(1) &= F * \cos(\beta_{2L}) * \cos\theta + Z(12) + H * \cos(\beta_{3L}) \\
 Z(2) &= Z(1) + (F * \cos(\beta_{2L}) + O * \cos(\beta_{1L})) * \cos\theta \\
 Z(3) &= Z(2) + O * \cos(\beta_{1L}) * \cos\theta + PP \\
 Z(4) &= Z(3) + Q * \cos\phi \\
 Z(5) &= Z(3) + (RR - E) * \cos\phi \\
 Z(6) &= Z(5) - E * \cos\phi + SS * A_{11} * \sin\phi \\
 Z(7) &= Z(5) \\
 Z(8) &= Z(6) \\
 Z(9) &= Z(2) + O * (\cos(\beta_{1L}) - \cos(\beta_{1R})) * \cos\theta \\
 Z(10) &= Z(9) - (O * \cos(\beta_{1R}) + F * \cos(\beta_{2R})) * \cos\theta \\
 Z(11) &= Z(10) - F * \cos(\beta_{2R}) * \cos\theta - H * \cos(\beta_{3R}) \\
 Z(12) &= \begin{cases} -\beta_2 * \sin(\beta_{3L}) + UH * \cos(\beta_{3L}) & 0 \leq t < T_1 \\ 0 & T_1 \leq t < T_2 \\ \beta_1 * \sin(\beta_{3L}) + UH * \cos(\beta_{3L}) & T_2 \leq t < 1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

($T_1, T_2, \beta_1, \beta_2$ はZMPの移動に関する量でFig. 3.3を参照のこと。) (3.6)

重心の加速度 $\ddot{X}(i), \ddot{Y}(i), \ddot{Z}(i)$ は、各々 $X(i), Y(i), Z(i)$ を、自由度となっている回転角 $\theta, \phi, \beta_{1L}, \beta_{2L}, \beta_{3L}, \beta_{1R}, \beta_{2R}, \beta_{3R}$ で2階微分したものである。 $X(1)$ を例にとれば、次式のように計算できる。

$$\begin{aligned}
 X(1) &= f * \cos\theta * \sin(\beta_{2L}) + X(12) + h * \sin(\beta_{3L}) \quad (\text{Fig. 1.2 参照}) \\
 \dot{X}(1) &= -f * \dot{\theta} * \sin\theta * \sin(\beta_{2L}) + f * \dot{\beta}_{2L} * \cos\theta * \cos(\beta_{2L}) + \dot{X}(12) \\
 &\quad + h * \dot{\beta}_{3L} * \cos(\beta_{3L}) \\
 \ddot{X}(1) &= -f * \ddot{\theta} * \sin\theta * \sin(\beta_{2L}) - f * (\dot{\theta})^2 * \cos\theta * \sin(\beta_{2L}) \\
 &\quad - f * \dot{\theta} * \dot{\beta}_{2L} * \sin\theta * \cos(\beta_{2L}) + f * \ddot{\beta}_{2L} * \cos\theta * \cos(\beta_{2L}) \\
 &\quad - f * \dot{\theta} * \dot{\beta}_{2L} * \sin\theta * \cos(\beta_{2L}) - f * (\dot{\beta}_{2L})^2 * \cos\theta * \sin(\beta_{2L}) \\
 &\quad + \ddot{X}(12) \\
 &\quad + h * \ddot{\beta}_{3L} * \cos(\beta_{3L}) - h * (\dot{\beta}_{3L}) * \sin(\beta_{3L}) \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

取り扱いを簡単化するために、 $V(i), W(i), P(i), A(i), B(i), C(i), R(i), S(i), T(i)$ を次式に基づく係数であるとする。

$$\begin{aligned}
 \ddot{X}(i) &= V(i) * \ddot{\theta} + W(i) * \ddot{\phi} + P(i) \\
 \ddot{Y}(i) &= A(i) * \ddot{\theta} + B(i) * \ddot{\phi} + C(i) \\
 \ddot{Z}(i) &= R(i) * \ddot{\theta} + S(i) * \ddot{\phi} + T(i) \quad , i = 1, 2, \dots, 12 \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

上記の(3.5)式の結果から $V(1), W(1), P(1)$ は次式のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 X(12) &= V(12) * \ddot{\theta} + W(12) * \ddot{\phi} + P(12) \quad \text{と置くと,} \\
 V(1) &= -f * \sin\theta * \sin(\beta_{2L}) + V(12)
 \end{aligned}$$

$$W(1) = W(12)$$

$$\begin{aligned} P(1) = & -f * (\dot{\theta})^2 * \cos \theta * \sin(\beta_{2L}) - f * \dot{\theta} * \dot{\beta}_{2L} * \sin \theta * \cos(\beta_{2L}) \\ & + f * \ddot{\beta}_{2L} * \cos \theta * \cos(\beta_{2L}) \\ & - f * \dot{\theta} * \dot{\beta}_{2L} * \sin \theta * \cos(\beta_{2L}) - f * (\dot{\beta}_{2L})^2 * \cos \theta * \sin(\beta_{2L}) \\ & + P(12) \\ & + h * \ddot{\beta}_{3L} * \cos(\beta_{3L}) - h * (\dot{\beta}_{3L})^2 * \sin(\beta_{3L}) \end{aligned} \quad (3.9)$$

第3項はTable 3.2に示した重力値と(3.5)式から計算できる。

運動学方程式は、 $p = 12$ で $M_x = 0$ 、 $M_y = 0$ で与えられるので(3.4)式の X 、 Y 要素をゼロと置けばよい。得られた式を θ 、 ϕ について括り、その他の項を右辺にもってくれば、次式を得る。

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

運動学方程式の解としてタイム・ステップ k での $\ddot{\theta}(k)$ 、 $\ddot{\phi}(k)$ 、 $k = 1, 2, \dots, 41$ が求まる。

(3.10)式に加えて(3.6)式などを利用して12ボディの重心座標 $X(k)$ 、 $Y(k)$ 、 $Z(k)$ 、 $k = 1, 2, \dots, 41$ を計算する。しかしながら、計算値はその時点でのZMPを座標の原点とした相対的なものなので注意を要する。X軸方向に歩くが、X軸への進行は、左右の支持足切り換と、支持足内でのZMPの変化(3.2節参照)を考慮にいれて実際の座標位置を計算し直す必要がある。通常は歩き始めの支持足のZMPを絶対座標ゼロにとる(詳細は7.1節参照)。

3.4 境界条件

一步の歩行の時系列データを得るための拘束条件は、歩行動作は左右対称で、また周期的でなければならない。すなわち、初期値(Initial guess)をうまく選んで全関節で次の条件の成立する解を求める。

$$\begin{aligned} \theta(1) &= -\theta(41), & \dot{\theta}(1) &= -\dot{\theta}(41), \\ \phi(1) &= \phi(41), & \dot{\phi}(1) &= \dot{\phi}(41) \end{aligned} \quad (3.11)$$

また、得られた角度が異常に大きくないことも必要である。

3.5 数式モデルのエラー修正

ヴコブラトヴィッチのプログラム⁽¹¹⁾の $X(2)$ の計算にエラーがあり、記載されているプログラムでは、

$$X(2) = 2 * X(1) + O * \cos \theta * \sin \beta_{1L}$$

と計算されていた。次のように修正すべきである。

$$X(2) = X(1) + \cos \theta * (F * \sin \beta_{2L} + O * \sin \beta_{1L})$$

$X(2)$ の修正に伴い、 $\dot{X}(2)$ 、 $V(2)$ 、 $P(2)$ の計算式も以下のように変更されなければならない。

$$\begin{aligned} X(2) &= X(1) + \cos \theta * (F * \sin \beta_{2L} + O * \sin \beta_{1L}) \\ &= X(1) + CO1 * (F * SL2 + O * SL1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{X}(2) &= XP(2) \\ &= \dot{X}(1) - \dot{\theta} * \sin \theta * (F * \sin \beta_{2L} + O * \sin \beta_{1L}) \\ &\quad + \cos \theta * (F * \dot{\beta}_{2L} * \cos \beta_{2L} + O * \dot{\beta}_{1L} * \cos \beta_{1L}) \\ &= XP(1) - DV(3) * SI1 * (F * SL2 + O * SL1) \\ &\quad + CO1 * (F * PL2 * CL2 + O * PL1 * CL1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{X}(2) &= XPP(2) \\ &= V(2) * \ddot{\theta} + W(2) * \ddot{\phi} + P(2) \\ &= V(2) * PD(3) + W(2) * PD(4) + P(2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{X}(2) &= \ddot{X}(1) - \ddot{\theta} * \sin \theta * (F * \sin \beta_{2L} + O * \sin \beta_{1L}) \\ &\quad - (\dot{\theta})^2 * \cos \theta * (F * \sin \beta_{2L} + O * \sin \beta_{1L}) \\ &\quad - \dot{\theta} * \sin \theta * (F * \dot{\beta}_{2L} * \cos \beta_{2L} + O * \dot{\beta}_{1L} * \cos \beta_{1L}) \\ &\quad - \dot{\theta} * \sin \theta * (F * \dot{\beta}_{2L} * \cos \beta_{2L} + O * \dot{\beta}_{1L} * \cos \beta_{1L}) \\ &\quad + \cos \theta * \{ F * \ddot{\beta}_{2L} * \cos \beta_{2L} - F * (\dot{\beta}_{2L})^2 * \sin \beta_{2L} \\ &\quad \quad + O * \ddot{\beta}_{1L} * \cos \beta_{1L} - O * (\dot{\beta}_{1L})^2 * \sin \beta_{1L} \} \\ &= \ddot{X}(1) + \{ -SI1 * (F * SL2 + O * SL1) \} * \ddot{\theta} \quad \rightarrow V(2) * \ddot{\theta} \\ &\quad + \{ -DV(3) * 2 * CO1 * (F * SL2 + O * SL1) \\ &\quad \quad - 2 * DV(3) * SI1 * (F * PL2 * CL2 + O * PL1 * CL1) \\ &\quad \quad + CO1 * (F * DL2 * CL2 - F * PL2 * 2 * SL2 \\ &\quad \quad + O * DL1 * CL1 - O * PL1 * 2 * SL1) \} \quad \left. \vphantom{\ddot{X}(2)} \right\} \rightarrow P(2) \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned} CO1 &= \cos \theta, SI1 = \sin \theta, SL1 = \sin \beta_{1L}, SL2 = \sin \beta_{2L}, CL1 = \cos \beta_{1L}, \\ CL2 &= \cos \beta_{2L}, PL1 = \dot{\beta}_{1L}, PL2 = \dot{\beta}_{2L}, DL1 = \ddot{\beta}_{1L}, DL2 = \ddot{\beta}_{2L} \\ DV(1) &= \theta, DV(3) = \dot{\theta}, PD(3) = \ddot{\theta}, PD(4) = \ddot{\phi} \end{aligned}$$

上記のエラーは、次節でのべる運動学計算プログラムの実行結果を検証した際に、左足歩行と右足歩行とで歩幅が異なるのでコーディングをチェックしたところX(2)の計算式のエラーが見つかった。ほかの計算式についてもチェックしたが正しいことが判明した。

Table 3.1 Body size⁽¹¹⁾

意 味	記 号	サイ ズ
下 腿 の 1/2 の 長 さ	F	0.193 m
大 腿 の 1/2 の 長 さ	O	0.214
腰から測った胴体上部の質量中心の高さ	Q	0.246
腰から測った腕関節の高さ	RR	0.406
上 腕 の 1/2 の 長 さ	E	0.154
前 腕 の 1/2 の 長 さ	SS	0.132
足の質量中心から測った足首関節の高さ	H	0.070
骨 盤 の 巾	D	0.170
腕の関節から首の推軸までの長さ	FF	0.222
足の裏から測った足首関節の高さ	U	0.100
股関節から測った骨盤の質量中心の高さ	PP	0.092
ヒールの高さ	UH	0.03
前腕と胴体上部の横方向面内の角度	A11	0.707 Rad.

記号は DATA 文で使われているもの

Table 3.2 Gravity and moment⁽¹¹⁾

ボディ No.	重 量 kg m (AM)	慣 性 モーメント kg m ²			
		J _x C5X	J _y C5Y	J _z C5Z	J _{xz} XZ
1	0.321	0.0039	0.004	0.00038	0.00352
2	0.841	0.0112	0.012	0.003	0.0082
3	0.696				
4	3.085		0.1370		
5	0.207		0.0020	0.00022	
6	0.114	0.0025	0.00425	0.00014	
7	0.207		0.002	0.00022	
8	0.114			0.00014	
9	0.841	0.0112	0.12	0.003	0.0082
10	0.321	0.0039	0.004	0.00038	0.00352
11	0.153	0.0006	0.0005	0.00045	
12	0.153				

() 内は DATA 文で使われている記号

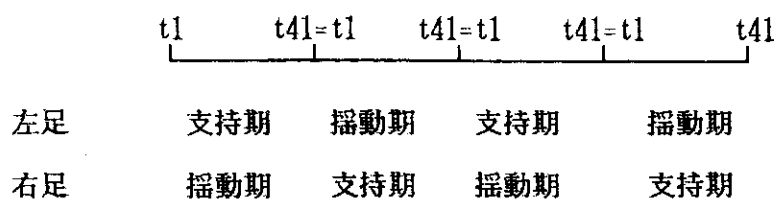


Fig. 3.1(a) Walking phase during four steps

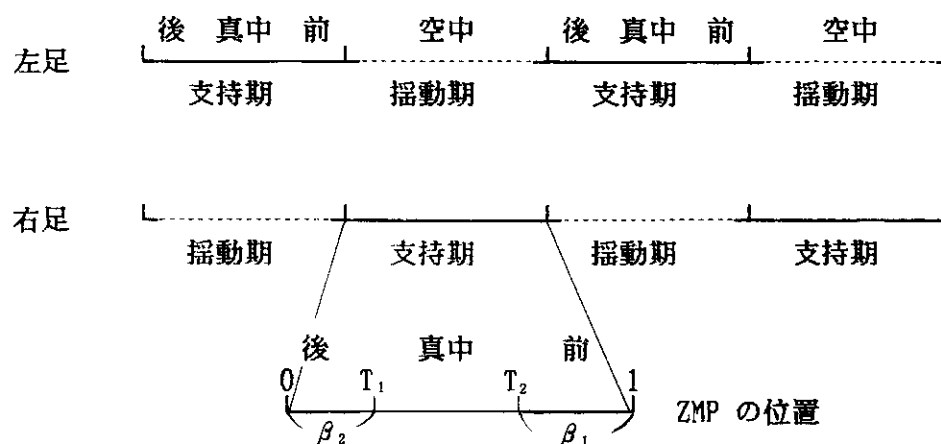
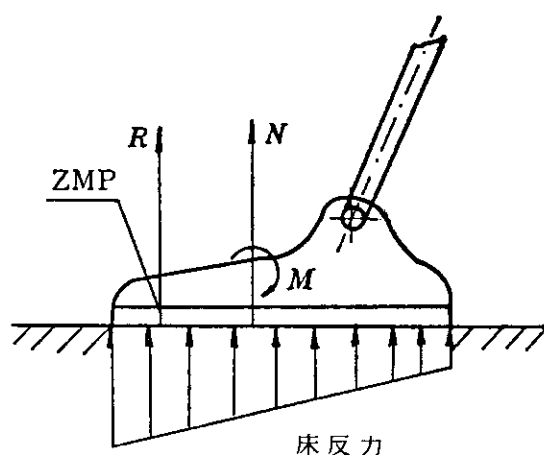


Fig. 3.1(b) Position of gravity center of foods and the ZMP during four steps



床反力を足の指示面の中心に集めると、力NおよびモーメントMを定義することができる。合成力Rの作用点を考えれば、この点のまわりのモーメントをゼロとしてRの働く点を定義することができる。これをZMP (Zero Moment Point) と呼ぶ。

Fig. 3.2 Zero Moment Point (ZMP)⁽¹¹⁾

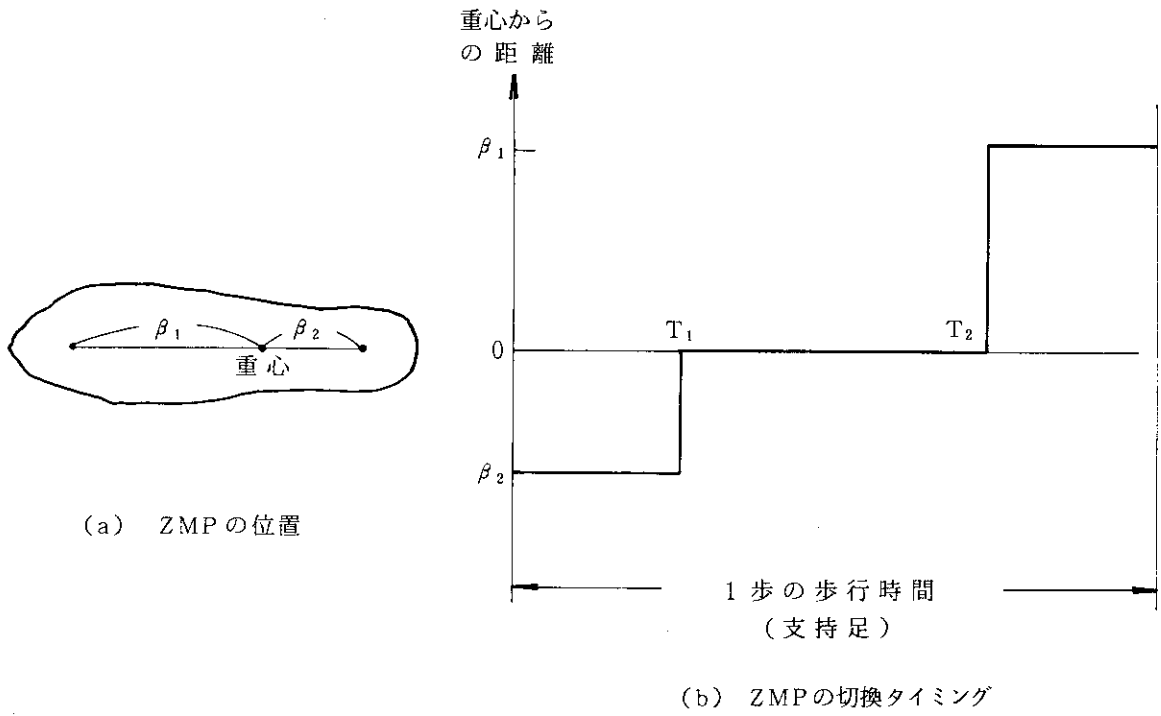


Fig. 3.3 Timing of ZMP transfer

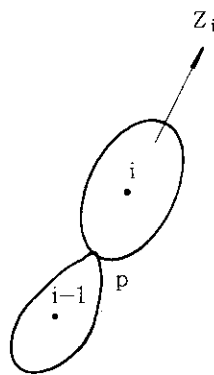


Fig. 3.4 Joint p

4. 二足歩行計算プログラム

4.1 プログラムの内容と計算フロー

プログラムは以下の4つの独立な計算部分から成り立っている。

(1) G A I T

折線グラフで与えられた基本歩行パターンのスムージングを行う。

(2) B I D Y N

スムージングされた下肢の関節角を入力として、3.3節で示した式(3.1)～(3.10)の微分方程式を解き、腰の前後に曲る角度 ϕ 、足元の左右の動き θ を解として求める。

(3) M O M A

BIDYNによって導いた解を用いて12ボディの重心での(x, y, z)座標、1次微係数、2次微係数、各ボディ重心におけるX, Y, Z軸方向のトルクを計算する。

(4) S E R V O

BIDYN, SERVOの計算結果を利用して、左右足首、左右膝、左右股、支持足首の横方向、腰の前後方向の運動に必要な関節アクチュエータの関節角、角速度、負荷トルク、機械的パワーを計算する。この部分はハードウェア作成上必要とする事項なので今回は整備しなかった。

上記4プログラムの流れはFig. 4.1に示される。原研版ではMOMAの出力結果を利用した歩行シーンの作画ルーチンを作成した。図形処理の詳細は第7章に示される。

4.2 二足歩行計算プログラムの整備

プログラムの整備には以下の作業が必要となった。

(1) IBM版からFACOM版への変換

主にIBM SSPサブルーチンのFACOM SSLへの置き換えを行った。Fig. 4.2には各プログラムを構成するサブルーチンの木構造を示す。サブルーチンのうちIBM SSLサブルーチンは(*)で示される。それらは次のように変換された。

SE15 (スムージングを行う) → FACOM SSLのSMLE1に置き換える。

DET3 (1次, 2次微係数の計算) → 直接書き下す。

MINV (逆マトリックスを求める) → FACOM SSLのMINVSに置き換える。

(2) プログラム・エラーの修正

3.5節で述べたもの以外に次の2点があった。

プログラム BIDYNのCOMMON ラベル名の誤り:

COMMON/GAITE/... ⇒ COMMON/GAIT/..... ISN 12

サブルーチンDERIVに未定義変数があり、著者との照会の上以下の項を削除する。

$$- Z(J) * D2XR(I)$$

ISN 307

$$+ Z(J) * D2YR(I)$$

ISN 310

(3) 基本歩行パターンなどの入力データの作成 (5章参照)

(4) 初期値パラメータのサーベイ

BIDYNの入力データとして解 $(\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi})$ の初期値を与える必要があるが、数値積分は初期値に非常にセンシティブなため、かなり精度のよい初期値を与えないと積分不能のエラー・メッセージで打ち切られる。従って計算可能な初期値を見付けるまでの試計算を必要とする。

4.3 数値積分概要

プログラムの中核は(3.1)～(3.10)式で示された常微分方程式を(3.11)式の境界条件に基づいて解くことである。常微分方程式の解法にはアダムス・モルトン予測子・修正子法(Predictor/Modifier Method)が使用される。全体の計算フローはFig. 4.3に示される。まずルンゲクッタ法により初期の予測値が計算され、積分の結果得られた θ, ϕ などの値が非現実的に大きい場合にはエラー・メッセージを出して終る。初期エラー・チェックの後、反復法によって境界条件が満足されるまでアダムス・モルトン法による積分が行われる。予測子を得るためにはアダムス・バッシュフォースの4次の陽解法が使用され、修正子を得るためにはアダムス・モルトンの3次の陰解法が使用される。ルンゲクッタ法の数式はTable 4.1に、アダムス・バッシュフォースとアダムス・モルトンの予測子・修正子法はTable 4.2に示される。これらの数値積分のコントロールはサブルーチンNIODESで行われる。プログラム・フローはFig. 4.3で示される。ちなみに、(3.1)～(3.10)式による運動学方程式の解法はサブルーチンDERIVでなされる。DERIVでは、 $Y(t) = (\theta(t), \phi(t), \dot{\theta}(t), \dot{\phi}(t))$ とおき、 $\dot{Y}(t) = F(Y(t))$ を計算する。具体的には(3.10)式の右辺の計算に含まれる $(\theta(t), \phi(t), \dot{\theta}(t), \dot{\phi}(t))^T$ を既知量(更新前の値)とし、 $(\ddot{\theta}(t), \ddot{\phi}(t))^T$ を変数として解く。

反復法で左足一步の出始め t_1 での初期値 $X(t_1)$ を

$$X^{n+1}(t_1) = X^n(t_1) + \Delta X, \text{ ここで } n \text{ は反復回数} \quad (4.1)$$

のように更新することが目的である。その方法を説明する。

$$\Delta Y = \| Y^0(\text{new}) - Y^T(\text{new}) \|$$

を計算し、 ΔY を小さくすればよい。ここで、

$$Y^0(\text{new}) = X^n(t_1)$$

$$Y^T(\text{new}) = X^n(t_{41})$$

$$Y = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)^T = (\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi})^T \quad (4.2)$$

ΔX の計算には2通りの方法が使用される。つまり、

$$\Delta e = \| X^n(t_1) - X^n(t_{41}) \|$$

と置いて、 Δe が基準値（ここでは1~4のある値が用いられる）より大きい場合には傾斜法（Gradient法）が、そうでない場合には通常のコソビ法が用いられる（Fig.4.4）。修正量として、傾斜法では ∇J が、コソビ法では ΔQ が計算される。いずれを使う場合も ΔY^0 、 ΔY^T の計算が必要である。それらは次のように計算される。

$$\Delta Y^0 = Y^0(\text{new}) - Y^0(\text{old})$$

$$\Delta Y^T = Y^T(\text{new}) - Y^T(\text{old})$$

ここで、

$$Y^0(\text{old}) = X^{n-1}(t_1) \quad (\text{プログラムでは配列 ZS})$$

$$Y^T(\text{old}) = X^{n-1}(t_{41}) \quad (\text{プログラムでは配列 XS}) \quad (4.3)$$

$Y^0(\text{new})$ は $X(t_1)$ を $\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi}$ の4変数に対し0.005だけ振って使用する。 $Y^T(\text{new})$ は $Y^0(\text{new})$ を初期値とした積分の結果求められる。具体的にはFig.4.5の計算プログラムに従う。

Gradient法の ∇J の計算方法を次に示す。

$J = \| Y^0(\text{old}) - Y^T(\text{old}) \|$ と置き、(3.11)式の境界条件の符号を考慮し、次のノルムをとる。

$$J(Y^0) = \{ (Y_1^0 + Y_1^T)^2 + (Y_2^0 - Y_2^T)^2 + (Y_3^0 + Y_3^T)^2 + (Y_4^0 - Y_4^T)^2 \}^{1/2} \quad (4.4)$$

∇J は次式に従う。

$$\begin{aligned} \nabla J &= [\nabla_1 J, \nabla_2 J, \nabla_3 J, \nabla_4 J]^T \\ \nabla_1 J &= \{ (Y_1^0 + Y_1^T) (1 + \Delta Y_1^T / \Delta Y_1^0) - (Y_2^0 - Y_2^T) \Delta Y_2^T / \Delta Y_1^0 \\ &\quad + (Y_3^0 + Y_3^T) \Delta Y_3^T / \Delta Y_1^0 - (Y_4^0 - Y_4^T) \Delta Y_4^T / \Delta Y_1^0 \} / J \\ \nabla_2 J &= \{ (Y_1^0 + Y_1^T) \Delta Y_1^T / \Delta Y_2^0 + (Y_2^0 - Y_2^T) (1 - \Delta Y_2^T / \Delta Y_2^0) \\ &\quad + (Y_3^0 + Y_3^T) \Delta Y_3^T / \Delta Y_2^0 - (Y_4^0 - Y_4^T) \Delta Y_4^T / \Delta Y_2^0 \} / J \\ \nabla_3 J &= \{ (Y_1^0 + Y_1^T) \Delta Y_1^T / \Delta Y_3^0 - (Y_2^0 - Y_2^T) \Delta Y_2^T / \Delta Y_3^0 \\ &\quad + (Y_3^0 + Y_3^T) (1 + \Delta Y_3^T / \Delta Y_3^0) - (Y_4^0 - Y_4^T) \Delta Y_4^T / \Delta Y_3^0 \} / J \\ \nabla_4 J &= \{ (Y_1^0 + Y_1^T) \Delta Y_1^T / \Delta Y_4^0 - (Y_2^0 - Y_2^T) \Delta Y_2^T / \Delta Y_4^0 + (Y_3^0 + Y_3^T) \\ &\quad * \Delta Y_3^T / \Delta Y_4^0 + (Y_4^0 - Y_4^T) (1 - \Delta Y_4^T / \Delta Y_4^0) \} / J \end{aligned} \quad (4.5)$$

Jacobi法で計算する場合の感度行列 ΔQ は次のようになる。

$$\Delta Q = A^{-1}q$$

$$q = (Y_1^0 + Y_1^T, Y_2^0 - Y_2^T, Y_3^0 + Y_3^T, Y_4^0 - Y_4^T) \quad (4.6)$$

ここで、

$$A = \begin{bmatrix} \Delta Y_1^T / \Delta Y_1^0 + 1 & \Delta Y_1^T / \Delta Y_2^0 & \Delta Y_1^T / \Delta Y_3^0 & \Delta Y_1^T / \Delta Y_4^0 \\ \Delta Y_2^T / \Delta Y_1^0 & \Delta Y_2^T / \Delta Y_2^0 - 1 & \Delta Y_2^T / \Delta Y_3^0 & \Delta Y_2^T / \Delta Y_4^0 \\ \Delta Y_3^T / \Delta Y_1^0 & \Delta Y_3^T / \Delta Y_2^0 & \Delta Y_3^T / \Delta Y_3^0 + 1 & \Delta Y_3^T / \Delta Y_4^0 \\ \Delta Y_4^T / \Delta Y_1^0 & \Delta Y_4^T / \Delta Y_2^0 & \Delta Y_4^T / \Delta Y_3^0 & \Delta Y_4^T / \Delta Y_4^0 - 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

ここで述べた反復計算はプログラムBIDYNのメイン・ルーチンでなされる。

Table 4.1 Runge-Kutta integration

$$\left. \begin{aligned}
 x^{(1)}_n &= x_n + \frac{h}{2} f^{(1)}_n, & f^{(1)}_n &= f(x_n, t_n), \\
 x^{(2)}_n &= x_n + \frac{h}{2} f^{(2)}_n, & f^{(2)}_n &= f(x^{(1)}_n, t_n + \frac{h}{2}), \\
 x^{(3)}_n &= x_n + hf^{(3)}_n, & f^{(3)}_n &= f(x^{(2)}_n, t_n + \frac{h}{2}), \\
 x_{n+1} &= x_n + \frac{h}{6} (f^{(1)}_n + 2f^{(2)}_n + 2f^{(3)}_n + f^{(4)}_n), & f^{(4)}_n &= f(x^{(3)}_n, t_{n+1})
 \end{aligned} \right\}$$

Table 4.2 Adams-Moulton integration

名 称	種類	公 式	位数
オイラー法	1陽	$y_{m+1} = y_m + h y'_m$	1
後退オイラー法	0陰	$y_{m+1} = y_m + h y'_{m+1}$	1
中点公式	2陽	$y_{m+1} = y_{m-1} + 2h y'_m$	2
台形公式	1陰	$y_{m+1} = y_m + \left(\frac{h}{2}\right)(y'_m + y'_{m+1})$	2
ミルンの予測子	4陽	$y_{m+1} = y_{m-2} + \left(\frac{4h}{3}\right)(2y'_{m-2} - y'_{m-1} + 2y'_m)$	4
ミルンの修正子	2陰	$y_{m+1} = y_{m-1} + \left(\frac{h}{3}\right)(y'_{m-1} + 4y'_m + y'_{m+1})$	4
アダムス・バッシュ フォースの公式	2陽	$y_{m+1} = y_m + \left(\frac{h}{2}\right)(3y'_m - y'_{m-1})$	2
	3陽	$y_{m+1} = y_m + \left(\frac{h}{12}\right)(23y'_m - 16y'_{m-1} + 5y'_{m-2})$	3
	4陽	$y_{m+1} = y_m + \left(\frac{h}{24}\right)(55y'_m - 59y'_{m-1} + 37y'_{m-2} - 9y'_{m-3})$	4
アダムス・モー ルトンの公式	2陰	$y_{m+1} = y_m + \left(\frac{h}{12}\right)(5y'_{m+1} + 8y'_m - y'_{m-1})$	3
	3陰	$y_{m+1} = y_m + \left(\frac{h}{24}\right)(9y'_{m+1} + 19y'_m - 5y'_{m-1} + y'_{m-2})$	4
	4陰	$y_{m+1} = y_m + \left(\frac{h}{720}\right)(251y'_{m+1} + 646y'_m - 264y'_{m-1} + 106y'_{m-2} - 19y'_{m-3})$	4

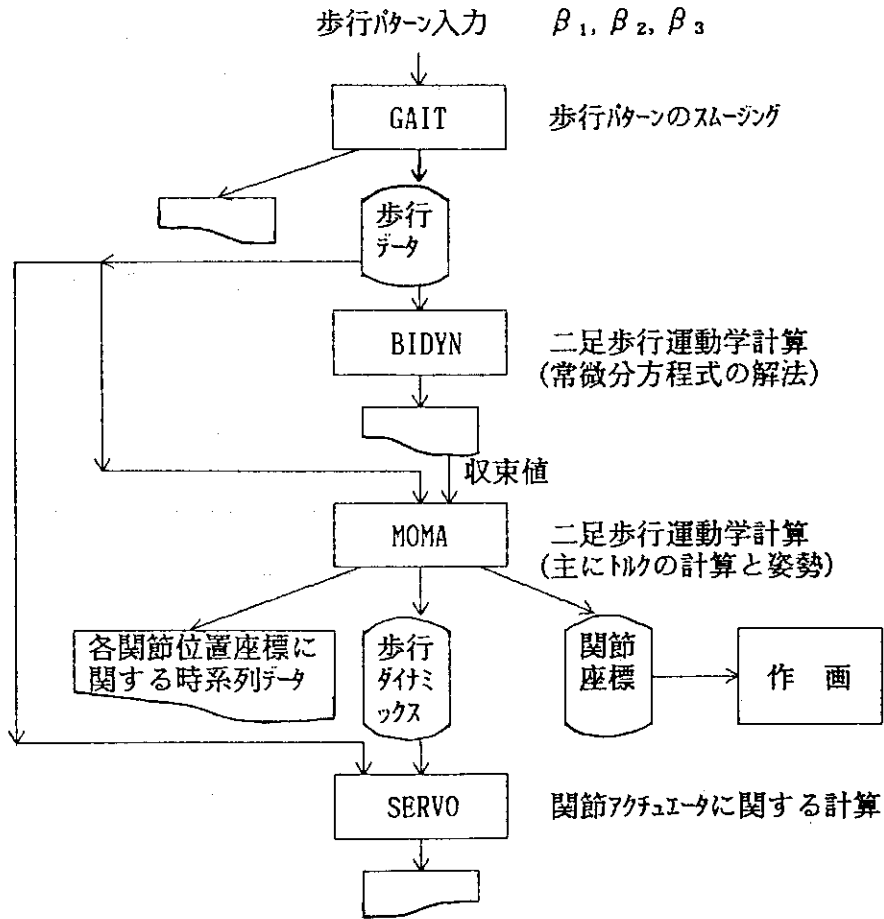


Fig. 4.1 Program structure of the robotics kinematic/kinetic motion

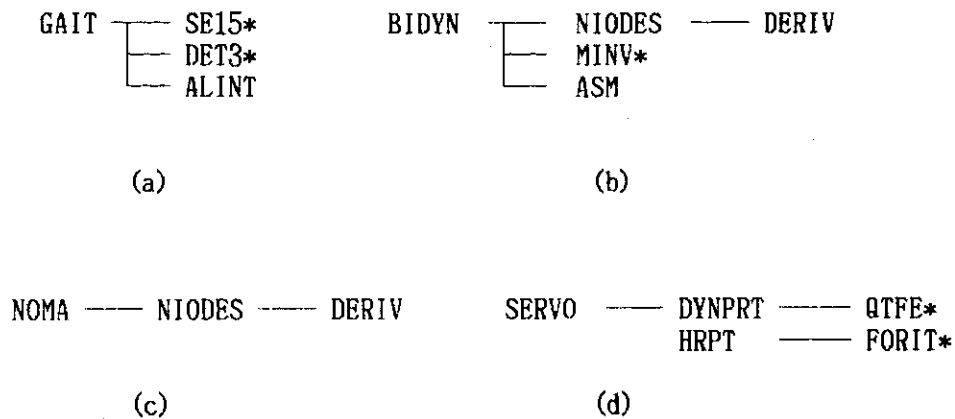


Fig. 4.2 Tree structure of each program and IBM SSP subroutines (Noted by *)

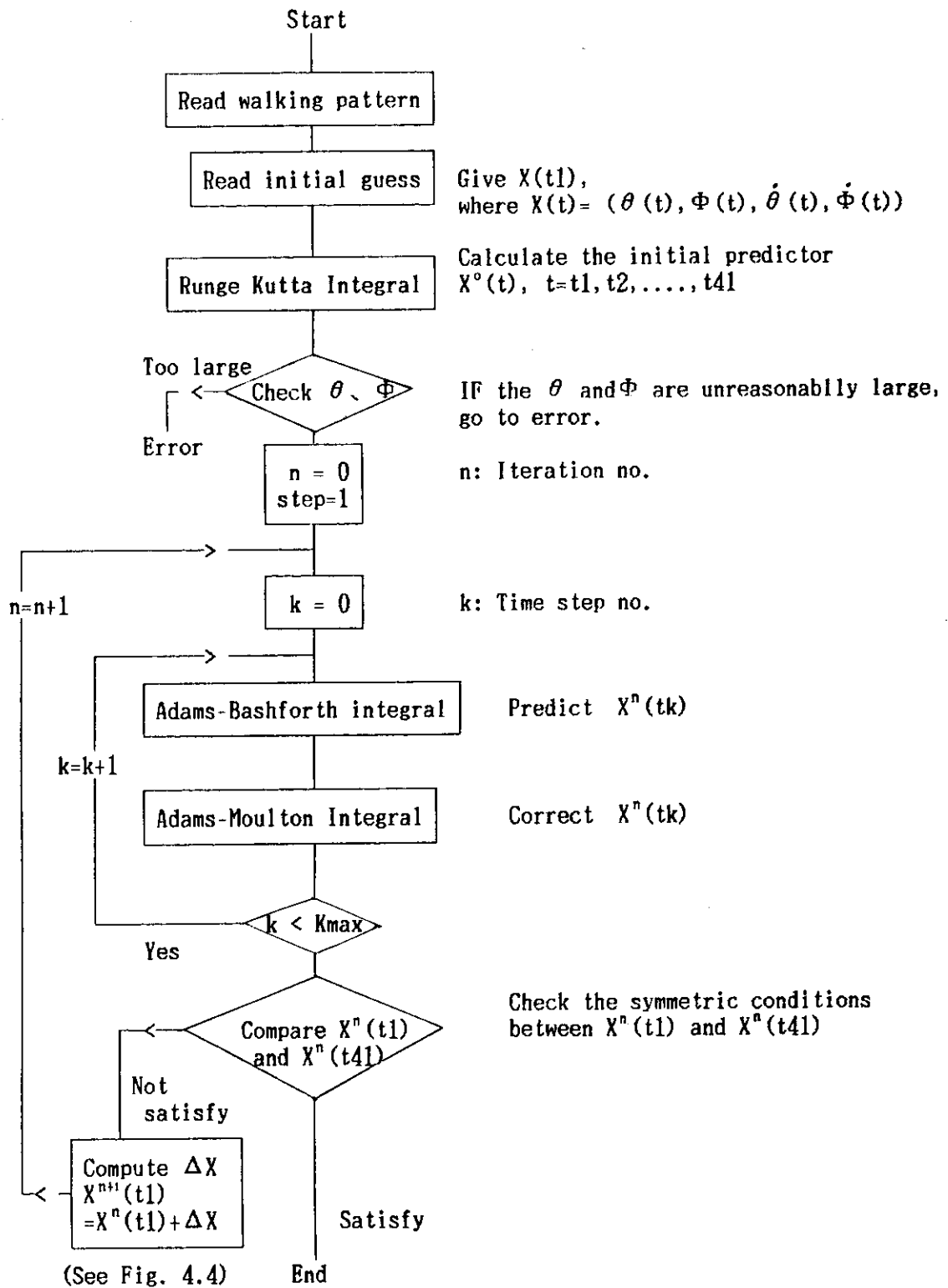


Fig. 4.3 Program flow of the solution scheme

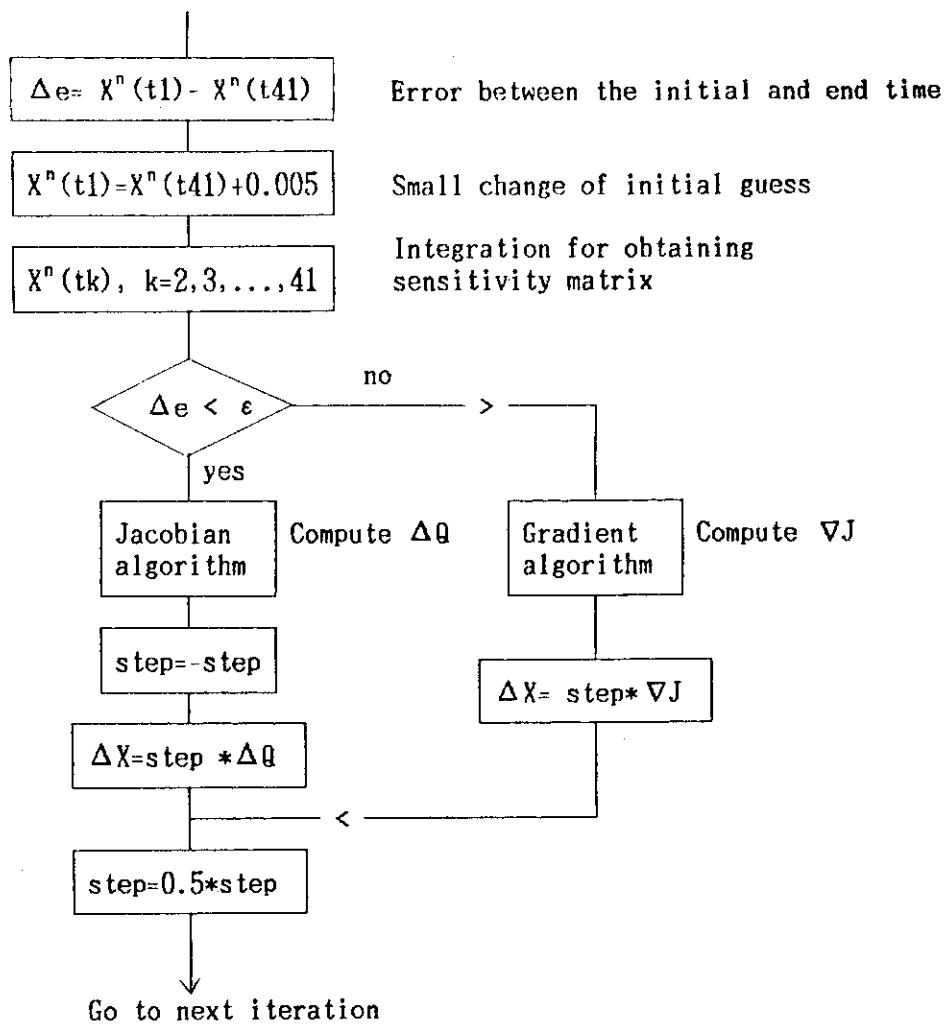


Fig. 4.4 Computational flow determining ΔX

```

DO 1001 JJ=1,4
DO 1000 J=1,4
1000 DEP(J)=ZS(J)
DEP(JJ)=DEP(JJ) + 0.005
DO 1002 J=1,4
1002 ZN(J)=DEP(J)

Integrate from the initial value DEP
and get the new end value in DEP

DO 49 J=1,4
4 B(J) = DEP(J) - XS(J)    Compute  $\Delta Y^T$ 
D(JJ) = ZN(JJ) - ZS(JJ)  Compute  $\Delta Y^O$ 
If  $\Delta e < \epsilon$  then go to Jacobian algorithm,
else goto Gradient algorithm
1000 CONTINUE

```

Fig. 4.5 Program flow determining ΔX

5. 入 力 デ ー タ

5.1 二足歩行プログラム入力データ

Fig.4.1のプログラムのうちGAIT, BIDYN, MOMAの入力データの与え方と事例を示す。
入力データは使い易さを考えてBIDYNについては元のものと一部異なっている。

(1) GAIT

Line 1	(F10.6)	1歩の歩行に要する時間(sec.)	TCYM
Line 2	(2F10.6)	揺動期の開始タイム・ステップ番号 支持期の開始タイム・ステップ番号 ($1 < ILSW < ILSUP < 81$)	ILSW ILSUP
Line 3	(80H)	コメント(第1欄は空白)	
Line 4	(15)	折線グラフで基本歩行パターンを与える場合の折点の総数	LM
Line 5	(16I5)	折点となるタイム・ステップ番号(両端の1, 81を含む)	ILM
Line 6	(8F10.5)	折点での角度座標(Radian)	ALM
Line 7,8,9,10		次の基本歩行パターンをLine 3,4,5,6と同様に入力する。 以下同じ。	

(2) BIDYN

Line 1	(80H)	コメント(第1欄は空白)	
Line 2	(80H)	コメント(第1欄は空白)	
Line 3	(2F8.3)	時間ファクター(GAITで入力したものを1とする)PER 角度ファクター(同上)SFO	
Line 4	(4F8.3)	ZMPが踵から重心に移動する時刻(秒) ZMPが重心から足先に移動する時刻(秒) (PERを考慮に入れた時間で入力する) 足先から重心までの長さ 踵から重心までの長さ	T1 T2 BE1 BE2
Line 5	(4F20.8)	$\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi}$ の初期値(タイム・ステップ番号1での値)	DEP
Line 6	(4F20.8)	次に試すべき初期値をLine 5と同様に入力する。 以下同じ。 解がでない場合は、反復の指標(PERF. INDEX)が小さくなるものを系統的に与えて、根気よくサーベイする必要がある。	

(3) MOMP

Line 1	(80H)	コメント	
--------	-------	------	--

Line 2	(80H)	コメント	
Line 3	(2F8.3)	時間ファクター (GAITで入力したものを1とする)	PER
		角度ファクター (GAITで入力したものを1とする)	SFO
		(PER, SFOはGAITと同じ値を用いる)	
Line 4	(4F8.3)	ZMPが踵から重心に移動する時刻 (秒)	T1
		ZMPが重心から足先に移動する時刻 (秒)	T2
		(PERを考慮に入れた時間で入力する)	
		重心から足先までの長さ	BE1
		踵から重心までの長さ	BE2
		(T1, T2, BE1, BE2はGAITと同じ値を用いる)	
Line 5	(4F20.8)	$\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi}$ の GAITでの収束値 (タイム・ステップ番号1での値)	DEP

Fig. 5.1, Fig. 5.2, Fig. 5.3にGAIT, BIDYN, NOMAの入力事例を示す。この事例は足を常に平行にして歩く、つまり、常に足がX軸と平行になっている状態である。したがって、 β_{3L} および β_{3R} は常にゼロであり入力する必要はない (Fig. 1.2 参照)。

5.2 基本歩行パターン

Fig. 1.2 の下肢の関節角 $\beta_{1L}, \beta_{2L}, \beta_{3L}$ の入力方法を述べる。1歩の歩行時間を40に分割し、時間メッシュ t_1, t_2, \dots, t_{41} における下肢の関節角 $\beta_{1L}, \beta_{2L}, \beta_{3L}, \beta_{1R}, \beta_{2R}, \beta_{3R}$ を入力データから得る。しかしながら、既に 3.1 節で述べたように歩行の周期性と左右対称性から、足首関節 (1,6), 膝関節 (2,5), 股関節 (3,4) のペアに対し、1歩遅れで $\beta_{1L} = -\beta_{1R}, \beta_{2L} = -\beta_{2R}, \beta_{3L} = -\beta_{3R}$ が成立するから、左足関節角 $\beta_{1L}, \beta_{2L}, \beta_{3L}$ に関して支持期と揺動期の2歩分、つまり、81時点を入力データで与えることにする。

基本歩行パターンとして現在利用できるものは、ヴコブラトヴィッチの本に掲載されている次の7種と筆者の求めに応じてヴコブラトヴィッチから直接送られたもの1種の計8種である。

- (1) 腕を固定し、足を常に水平に保った場合
- (2) 腕を自由にし、等価質量を付加し、通常の歩行をする場合
- (3) 腕を固定し、滑らかに平地歩行する場合
- (4) 腕を固定し、通常の平地歩行する場合
- (5) 腕を固定し、大きな歩幅を持った特別の歩行
- (6) 腕を固定し、足を常に水平に保ち、階段を上る場合
- (7) 腕を自由にし、足を常に水平に保ちつつ階段を下る場合
- (8) 腕を固定し、通常の平地歩行する場合 (直接送られたもの)

これらの内(1)~(7)のデータについては本に折線グラフが記されているのみである。これらのグラフを読み取りスムージング・プログラム GAIT への入力データを作成する必要がある。また(8)のデータは、GAIT への入力としてではなく、GAIT からの出力値であり、二足歩行運動学プログラム BIDYN の入力データである (Fig. 4.1 参照)。すなわち、81時点におけるスムージ

ング後の β_{1L} , β_{2L} , β_{3L} の関節角と各々の微係数, 2次の微係数の数値データ・リストが送られてきた。

本年度試したのは, データ(1)と(8)である。(2)と(7)は腕を自由にした歩行のためのものであり本プログラムで利用できないが残りのデータについては利用可能である。

データ(1)の折線グラフ (Fig. 5.4) からの入力データの作り方を次に述べる。Fig. 5.4の上方の図は, 左足を支持足として右足を1歩前進させる場合の関節角の対応を ϕ_1, ϕ_3 で示している。これらを Fig. 1.2 の記法に当てはめると

$$\beta_{1R} = -\beta_{1L} = \phi_3, \beta_{2L} = \phi_1, \beta_{3L} = 0$$

となる。

Fig. 5.4のグラフでは左右2歩の歩行に関し, 時間軸を20分割し, 各タイム・ステップでの関節角を 1° を 0.5mm で表示している。タイム・ステップを80分割した場合の折線グラフの各折点での値を Radian で得る必要がある。グラフのメモリを読み取り以下のように作成する。

$$\beta_{1L} (= -\phi_3)$$

折点	縦軸の長さ	角度 Degree (x 2)	角度 Radian (x 3.14/180)
1	- 4 mm	- 8°	-0.1396
25	5 mm	10°	0.1745
38	3 mm	6°	0.1047
53	-11 mm	-22°	-0.3839
67	-10.5mm	-21°	-0.3665
81	- 4 mm	8°	-0.1396

$$\beta_{2L} (= \phi_1)$$

折点	縦軸の長さ	角度 Degree (x2)	角度 Radian (x 3.14/180)
1	- 5 mm	-10°	-0.1745
35	6.5mm	13°	0.2268
43	14.5mm	29°	0.5061
50	6 mm	12°	0.2094
81	-10.5mm	-10°	-0.1745

上記の折線グラフのスームージングによって, 2歩の歩行に関する関節角の $t_1, t_2 \dots, t_{81}$ での時系列データが与えられたとして, 揺動期と支持期 (Fig. 3.1 参照) がいつから始まるかを明示する必要がある。これはゴコプラトヴィッチの本では明らかではないので, Fig. 5.4の下部に示された腰の3方向の回転角の計算値のグラフからヒントを得て決めた。つまり左右のぶれ θ (X軸回りの回転) がゼロになる時点を切換期と見なした。図では t_{33} がそれに当る。実際の歩行と照らし合せると t_{33} は揺動期の始まり, したがって t_{73} が支持期の始まりであることがわかる。

以上の結果から β_{1L} , β_{2L} に関して Fig. 5.1 に示した GAIT の入力データが作成された。またゴコプラトヴィッチから送られたデータ (データ(8)) のグラフ表示は Fig. 5.5 に示される。本に記載されているデータ(4)に類似の歩行パターンと考えられる。

5.3 ZMPの移動に関するデータ

測定によると歩行中のZMPの位置については踵から足先へ、また左右のふれも歩く速度や方向などに応じて変化するものである。ここでは進行方向であるX軸方向の変化のみを考える。

Fig. 3.4 に従って $(T_1, T_2, \beta_1, \beta_2)$ の入力データを与える。これもヴコブラトヴィッチの本に記載されているものに頼るしかない。

Fig. 5.6 に腕を固定し足を常に水平に保った歩行をする場合のZMP移動事例 I ~ V が、また Fig. 5.7 に腕を固定し通常の平地歩行する場合のZMPの移動事例 I ~ V が示される。Fig. 5.2 で与えた $(T_1, T_2, \beta_1, \beta_2)$ のデータは足を水平に保って歩行する場合の事例 V に当る。

```

TSS UTILITY COMMAND  V10L20  LIST  DATE 88.02.16
DATA SET NAME : J1431.GAIT.DATA(GAIT)

10006      2.0
20011      33  73
30001  BETA1
40009      6
50009      1  25  38  53  67  81
60012 -0.1396  0.1745  0.1047  -0.3839  -0.3665  -0.1396
61004  BETA2
70009      5
80010      1  35  43  50  81
90009 -0.1745  0.2268  0.5061  0.2094  -0.1745
    
```

Fig. 5.1 Input data for program GAIT

```

TSS UTILITY COMMAND  V10L20  LIST  DATE 88.02.16  TIME 15.46.23
DATA SET NAME : J1431.GAIT.DATA(BIDYN)

10018  BETA1 AND BETA2 ARE READ
20018
30020      1.0      1.0
40023      0.20      0.6      0.035      0.02
132118      0.007      0.30      0.70      1.8
142119      0.02      0.30      0.70      1.8
152119      0.007      0.40      0.70      1.8
162119      0.007      0.30      0.70      2.0
172119      0.007      0.30      0.70      1.6
    
```

Fig. 5.2 Input data for program BIDYN

```

TSS UTILITY COMMAND  V10L20  LIST  DATE 88.02.16  TIME 15.46.39
DATA SET NAME : J1431.GAIT.DATA(MOMA)

10000  BETA1 AND BETA2 ARE READ
20000
30000      1.0      1.0
40003      0.2      0.6      0.035      0.02
92104      0.00083247      0.03079999      0.70261312      2.12083340
    
```

Fig. 5.3 Input data for program MOMA

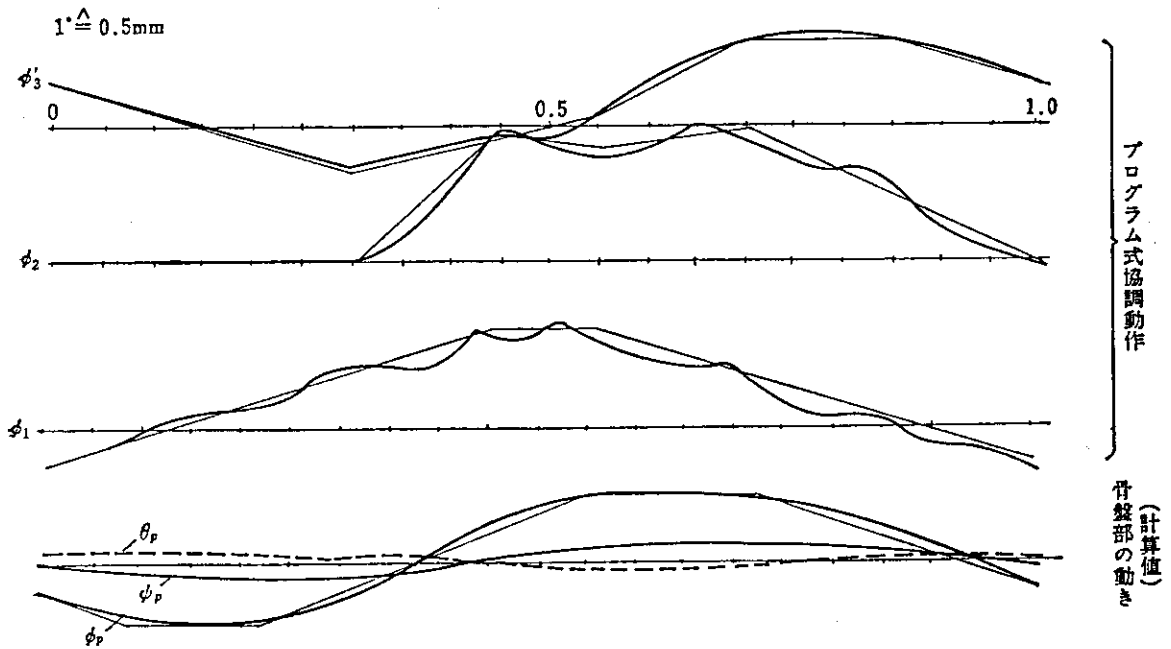
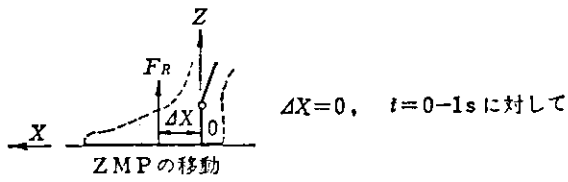
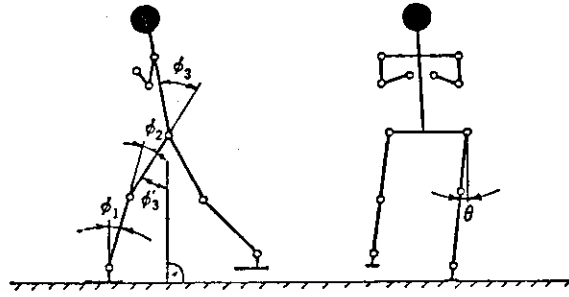


Fig. 5.4 Basic walking pattern in fixed arms and flat gait ($\phi_3 = \beta_{1R}$, $\phi_1 = \beta_{2L}$)⁽¹¹⁾

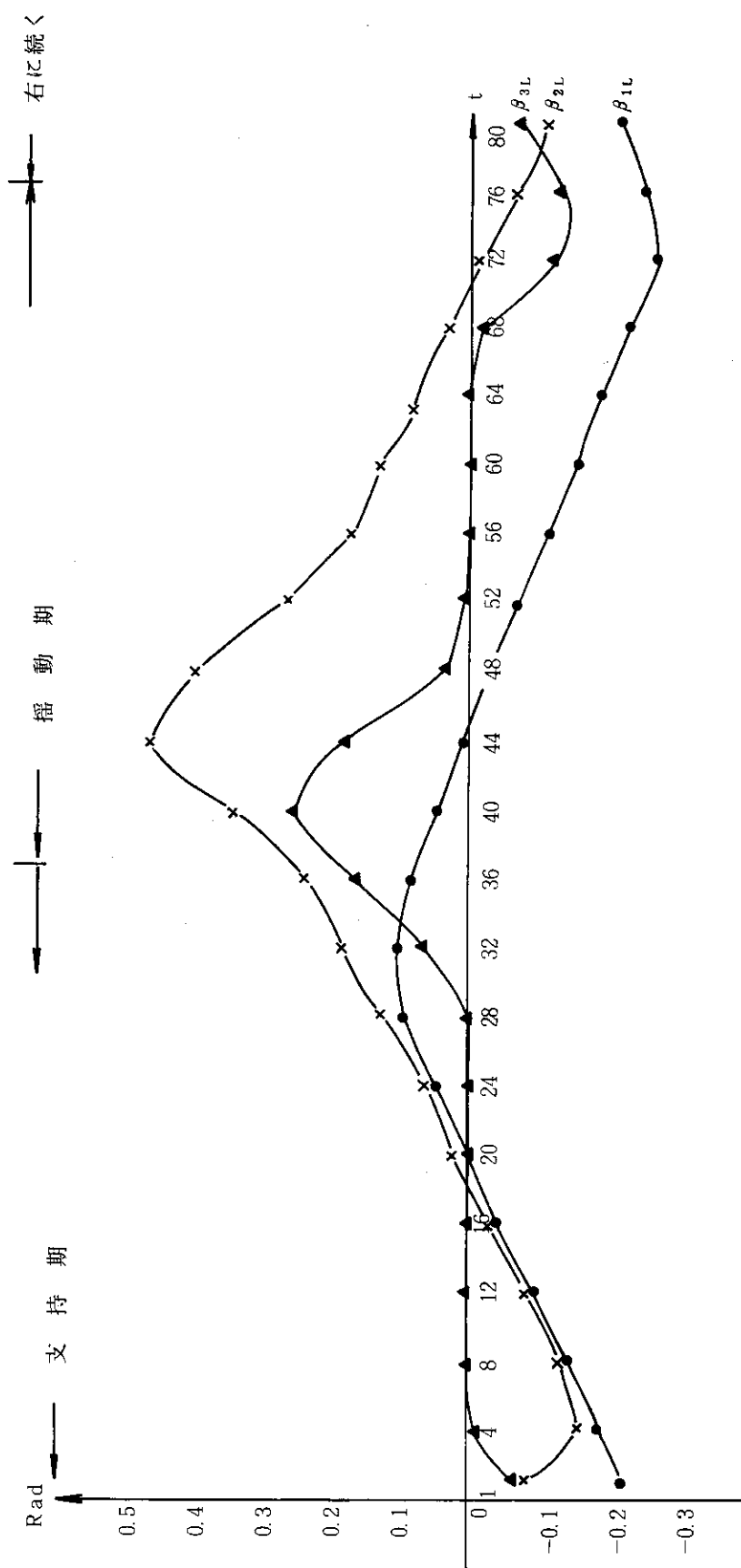
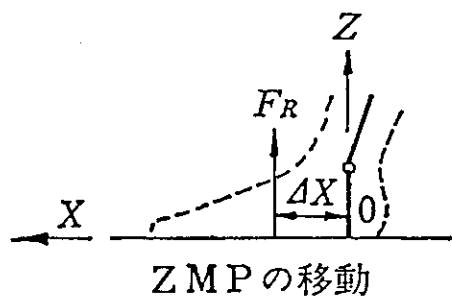
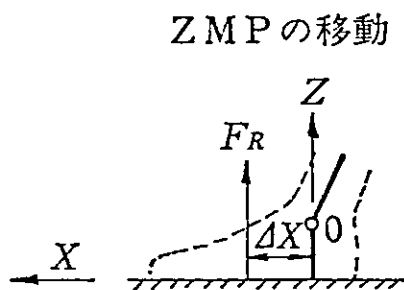


Fig. 5.5 Basic walking pattern in fixed arms and flat gait
(The data were sent from Vukobratovic)



事例	t (s)	ΔX (m)
I	0 - 1	0
II	0 - 0.3	0.0
	0.3 - 0.5	0.035
	0.5 - 1.0	0.070
III	0 - 0.5	0.0
	0.5 - 0.8	0.035
	0.8 - 1.0	0.070
IV	0 - 0.2	-0.020
	0.2 - 1.0	0.0
V	0 - 0.2	-0.020
	0.2 - 0.6	0.0
	0.6 - 1.0	+0.035

Fig. 5.6 Transfer of ZMP in flat gait⁽¹¹⁾



事例	t (s)	ΔX (m)
I	0 - 0.15	-0.05
	0.15 - 0.5	0
	0.5 - 1.0	0.07
II	0 - 0.15	-0.02
	0.15 - 0.6	0
	0.6 - 1.0	0.07
III	0 - 0.15	-0.03
	0.15 - 0.6	0
	0.6 - 1.0	0.1
IV	0 - 1.0	0
V	0 - 0.15	-0.05
	0.15 - 1.0	0

Fig. 5.7 Transfer of ZMP in usual gait⁽¹¹⁾

6. 計算結果とその検証

二足歩行計算プログラムの実行結果は、7章で示す図形表示によって妥当性がチェックできる。ここでは、各プログラムでの計算結果の出力リストを示すと共に それを利用して計算結果の妥当性に関して検証を与える。

6.1 出力結果

基本歩行パターンをスムージングするためのプログラムGAITの出力結果をFig.6.1に示す。Fig.6.1(a)は、2歩分の股の関節角 β_{1L} の折線グラフ入力時のデータのコピーを示す。Fig.6.1(b)は、1歩分のスムージング後の支持期（左足）の関節角を示す。Fig.6.1(c)は、同じく揺動期（右足）の関節角を示す。

二足歩行運動学方程式を解くプログラムBIDYNの出力結果をFig.6.2に示す。水平歩行で且つZMP事例Ⅳを取り上げる。Fig.6.2(a)は、微分方程式を対称条件を満足するまで反復法によって解く。Performance index (PERF. INDEX) が所定の値になると終了する。Fig.6.2(b)は、微分方程式の解 $(\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi})$ の時系列を示す。同じ基本歩行パターンを入力しても、ZMPの移動事例によって ϕ は大きく異なる。当然のことながら、ZMPが後ろになればなる程 ϕ は負の方に大きくなる、事例Ⅱでは上体は最大40°後ろに反る。

各ボディの重心座標はプログラムMOMAによって計算される。その出力結果をFig.6.3に示す。Fig.6.3(a)は、BIDYNで得た収束値とZMPの移動（いずれも入力データ）について示す。Fig.6.3(b)は、歩き始め (t_1) での各ボディのトルク、重心座標、1次微係数、2次微係数の値を示す。Fig.6.3(c)は、歩き終り (t_{41}) での値を示す。これらの値は時間刻み0.025秒毎、つまり t_1, t_2, \dots, t_{41} に出力されるが間は省略した。

6.2 結果の検証

上記のFig.6.3(b)と(c)を用いて計算結果の簡単な検証を行う。事実この検証によって3.5節で述べた数式モデルのエラーを見付けた。歩行の左右対称性から歩き始めと歩き終りでは歩幅が同じで、また、各ボディでの位置関係も対称性がなければならない。ここでは下肢のボディのペア：足(11, 12)、下脚(1, 10)、上脚(2, 9)の座標をチェックする。

$$\begin{array}{llll}
 t = t_1 & X_{11} - X_{12} = -0.2766 & Y_{11} - Y_{12} = -0.3400 & Z_{11} - Z_{12} = 0.0049 \\
 & X_{10} - X_1 = -0.2234 & Y_{10} - Y_1 = -0.3400 & Z_{10} - Z_1 = 0.0083 \\
 & X_9 - X_2 = -0.0850 & Y_9 - Y_2 = -0.3400 & Z_9 - Z_2 = 0.0058 \\
 t = t_{41} & X_{11} - X_{12} = 0.2766 & Y_{11} - Y_{12} = -0.3400 & Z_{11} - Z_{12} = 0.0049 \\
 & X_{10} - X_1 = 0.2234 & Y_{10} - Y_1 = -0.3400 & Z_{10} - Z_1 = 0.0083 \\
 & X_9 - X_2 = 0.0850 & Y_9 - Y_2 = -0.3400 & Z_9 - Z_2 = 0.0058
 \end{array}$$

足の軌跡に関してはFig.6.4に示される。

CONTROL

BETA1

INDICES OF THE BREAK UP POINTS	ANGLES VALUES AT BREAK UP POINTS
1	-0.1396
25	0.1745
38	0.1047
53	-0.3839
67	-0.3665
81	-0.1396

NUMBER OF BREAK UP POINTS IS 6

Fig. 6.1(a) Computed result of GAIT, input data copy

ORIGINAL GRAPH	SMOOTHEN ANGLE	VELOCITY	ACCELERATION
-0.2693	-0.2693	0.6483	-0.0008
-0.2530	-0.2530	0.6483	-0.0002
-0.2368	-0.2368	0.6483	0.0005
-0.2206	-0.2206	0.6483	-0.0420
-0.2044	-0.2044	0.6462	0.0723
-0.1882	-0.1883	0.6519	0.1880
-0.1720	-0.1718	0.6556	-0.4069
-0.1558	-0.1555	0.6316	-1.3891
-0.1396	-0.1403	0.5852	-1.8149
-0.1265	-0.1263	0.5402	-1.3797
-0.1134	-0.1132	0.5162	-0.4071
-0.1003	-0.1004	0.5199	0.1890
-0.0872	-0.0872	0.5257	0.0728
-0.0742	-0.0742	0.5235	-0.0437
-0.0611	-0.0611	0.5235	0.0000
-0.0480	-0.0480	0.5235	0.0000
-0.0349	-0.0349	0.5235	-0.0000
-0.0218	-0.0218	0.5235	0.0001
-0.0087	-0.0087	0.5235	-0.0000
0.0044	0.0044	0.5235	-0.0001
0.0174	0.0175	0.5235	0.0002
0.0305	0.0305	0.5235	0.0001
0.0436	0.0436	0.5235	-0.0003
0.0567	0.0567	0.5235	-0.0001
0.0698	0.0698	0.5235	0.0003
0.0829	0.0829	0.5235	0.0001
0.0960	0.0960	0.5235	-0.0002
0.1091	0.1091	0.5235	-0.2583
0.1221	0.1222	0.5106	0.4304
0.1352	0.1346	0.5450	1.1188
0.1483	0.1494	0.5665	-2.4095
0.1614	0.1629	0.4245	-8.2434
0.1745	0.1706	0.1544	-10.8073
0.1691	0.1706	-0.1158	-8.2430
0.1638	0.1648	-0.2578	-2.4090
0.1584	0.1577	-0.2363	1.1187
0.1530	0.1530	-0.2019	0.4301
0.1477	0.1477	-0.2148	-0.2584
0.1423	0.1423	-0.2148	-0.0001
0.1369	0.1369	-0.2148	0.0001
0.1315	0.1315	-0.2148	-0.3803

Fig. 6.1(b) Computed result of GAIT, time step = 0.025
joint angle of support leg (left)

ORIGINAL GRAPH	SMOOTHEN ANGLE	VELOCITY	ACCELERATION
0.1315	-0.1315	0.2148	0.3803
0.1262	-0.1262	0.2338	-0.6345
0.1208	-0.1199	0.1830	-1.6488
0.1154	-0.1170	0.1514	3.5518
0.1101	-0.1123	0.3606	12.1504
0.1047	-0.0990	0.7589	15.9304
0.0721	-0.0743	1.1572	12.1496
0.0396	-0.0411	1.3664	3.5484
0.0070	-0.0060	1.3346	-1.6476
-0.0256	0.0256	1.2840	-0.6335
-0.0582	0.0582	1.3029	0.3785
-0.0907	0.0907	1.3029	0.0003
-0.1233	0.1233	1.3029	0.0002
-0.1559	0.1559	1.3029	0.0015
-0.1885	0.1885	1.3030	-0.0001
-0.2210	0.2210	1.3029	-0.4738
-0.2536	0.2536	1.2793	0.7893
-0.2862	0.2850	1.3424	2.0483
-0.3188	0.3207	1.3817	-4.4145
-0.3513	0.3541	1.1216	-15.1024
-0.3839	0.3768	0.6266	-19.8015
-0.3827	0.3854	0.1316	-15.1028
-0.3814	0.3834	-0.1285	-4.4137
-0.3802	0.3790	-0.0891	2.0494
-0.3789	0.3789	-0.0261	0.7881
-0.3777	0.3777	-0.0497	-0.4729
-0.3764	0.3764	-0.0497	-0.0000
-0.3752	0.3752	-0.0497	0.0
-0.3740	0.3740	-0.0497	0.0000
-0.3727	0.3727	-0.0497	-0.2092
-0.3715	0.3715	-0.0602	0.3488
-0.3702	0.3697	-0.0323	0.9068
-0.3690	0.3699	-0.0148	-1.9531
-0.3677	0.3690	-0.1299	-6.6836
-0.3665	0.3634	-0.3490	-8.7630
-0.3503	0.3515	-0.5681	-6.6832
-0.3341	0.3350	-0.6832	-1.9522
-0.3179	0.3174	-0.6657	0.9067
-0.3017	0.3017	-0.6378	0.3474
-0.2855	0.2855	-0.6483	-0.2087
-0.2693	0.2693	-0.6483	0.0008

Fig. 6.1(c) Computed result of GAIT, time step = 0.025
joint angle of swing leg (right)

BIPED'S NOMINAL DYNAMICS

FOR
BETA1 AND BETA2 ARE READ

SCALE FACTORS	PER= 1.0000	SFO= 1.0000		
SUPP. LOGIC -	ZMP = -0.020 FOR TIME 0. TO 0.200			
	ZMP = 0.0 FOR TIME 0.200 TO 1.000			
	ZMP = 0.0 FOR TIME 1.000 TO 1.000			
STATE VECTOR INITIAL VALUE		0.299999995	0.699999995	2.300000019
TIME INDEX 38				
STATE VECTOR NORM IS TOO BIG, TRY NEW INITIAL VALUE				
SUPP. LOGIC -	ZMP = -0.020 FOR TIME 0. TO 0.200			
	ZMP = 0.0 FOR TIME 0.200 TO 1.000			
	ZMP = 0.0 FOR TIME 1.000 TO 1.000			
STATE VECTOR INITIAL VALUE		0.299999995	0.699999995	2.300000019
TIME INDEX 38				
STATE VECTOR NORM IS TOO BIG, TRY NEW INITIAL VALUE				
SUPP. LOGIC -	ZMP = -0.020 FOR TIME 0. TO 0.200			
	ZMP = 0.0 FOR TIME 0.200 TO 1.000			
	ZMP = 0.0 FOR TIME 1.000 TO 1.000			
STATE VECTOR INITIAL VALUE		0.299999998	0.699999995	2.300000114
TIME INDEX 36				
STATE VECTOR NORM IS TOO BIG, TRY NEW INITIAL VALUE				
SUPP. LOGIC -	ZMP = -0.020 FOR TIME 0. TO 0.200			
	ZMP = 0.0 FOR TIME 0.200 TO 1.000			
	ZMP = 0.0 FOR TIME 1.000 TO 1.000			
STATE VECTOR INITIAL VALUE		0.299999995	0.500000000	2.300000114
TIME INDEX 38				
STATE VECTOR NORM IS TOO BIG, TRY NEW INITIAL VALUE				
SUPP. LOGIC -	ZMP = -0.020 FOR TIME 0. TO 0.200			
	ZMP = 0.0 FOR TIME 0.200 TO 1.000			
	ZMP = 0.0 FOR TIME 1.000 TO 1.000			
STATE VECTOR INITIAL VALUE		0.299999995	0.699999995	1.800000114
STATE VECTOR TERMINAL VALUE		1.01949406	-0.54711151	6.68774986
PERFORMANCE INDEX		4.94285583		
ITERATION 1				
IN. VAL. PERTB.	27.0326233	59.4566193	4.41749382	27.1785278
NORMLZD. IN. VAL. PERTB.	0.01136653	0.02500000	0.00185744	0.01142738
INTEGRATIONS 1				
NEW IN. VAL.	-0.00436653	0.27499992	0.69814253	1.78857327
TERMINL. VAL.	-0.10194588	0.78225861	-0.90198668	5.19078607
PERF. INDEX	3.44749355			
ITERATION 2				
IN. VAL. PERTB.	8.69114304	34.7026978	0.28787541	15.3668661
NORMLZD. IN. VAL. PERTB.	0.00626114	0.02500000	0.00020759	0.01107037
INTEGRATIONS 1				
NEW IN. VAL.	-0.01062767	0.24999988	0.69793510	1.77750206
TERMINL. VAL.	-0.16542953	0.58634932	-1.10790702	4.50011941
PERF. INDEX	2.58375740			

Fig. 6.2(a) Computed result of BIDYN, status of convergence

IN. VAL. PERTB.	-0.00028271	-0.14249456	-0.00228969	0.30313802
NORMLZD. IN. VAL. PERTB.	-0.00004960	-0.02500000	-0.00040171	0.05318414
INTEGRATIONS 1				
NEW IN. VAL.	-0.00076329	0.02499963	0.70513105	2.05561447
TERML. VAL.	-0.00922177	-0.01718600	-0.72877812	2.46588507
PERF. INDEX	0.41323173			
ITERATION 12				
IN. VAL. PERTB.	-0.00021194	-0.11765140	-0.00204316	0.25408620
NORMLZD. IN. VAL. PERTB.	-0.00004503	-0.02500000	-0.00043415	0.05399133
INTEGRATIONS 1				
NEW IN. VAL.	-0.00080832	-0.00000037	0.70469689	2.10960579
TERML. VAL.	-0.00702640	-0.03444640	-0.72320345	2.43220292
PERF. INDEX	0.32505274			
ITERATION 13				
IN. VAL. PERTB.	-0.00014972	-0.09285766	-0.00174935	0.20368195
NORMLZD. IN. VAL. PERTB.	-0.00004031	-0.02500000	-0.00047098	0.05483715
INTEGRATIONS 1				
NEW IN. VAL.	-0.00084863	-0.02500037	0.70422590	2.16444206
TERML. VAL.	-0.00485053	-0.05151575	-0.71764897	2.39942398
PERF. INDEX	0.23692238			
ITERATION 14				
IN. VAL. PERTB.	-0.00009545	-0.06805849	-0.00139347	0.15193540
NORMLZD. IN. VAL. PERTB.	-0.00003506	-0.02500000	-0.00051187	0.05581059
INTEGRATIONS 1				
NEW IN. VAL.	-0.00088369	-0.03000037	0.70371401	2.22025204
TERML. VAL.	-0.00269704	-0.06816335	-0.71211147	2.36807806
PERF. INDEX	0.14921719			
ITERATION 15				
IN. VAL. PERTB.	-0.00004851	-0.04331633	-0.00097366	0.09863901
NORMLZD. IN. VAL. PERTB.	-0.00002800	-0.02500001	-0.00056195	0.05692948
INTEGRATIONS 1				
NEW IN. VAL.	-0.00091169	-0.07500035	0.70315206	2.27718067
TERML. VAL.	-0.00037212	-0.08411968	-0.70659650	2.33876723
PERF. INDEX	0.06237092			
ITERATION 16				
IN. VAL. PERTB.	-0.00001327	-0.01868619	-0.00048102	0.04368731
INTEGRATIONS 1				
NEW IN. VAL.	-0.00092496	-0.09368652	0.70267099	2.32086754
TERML. VAL.	0.00094424	-0.09460121	-0.70259480	2.32052324
PERF. INDEX	0.00098050			

Fig. 6.2(b) Continued (Iterations 3 ~ 11 are skipped)

BETA1 AND BETA2 ARE READ

SCALE FACTORS SOLUTION FOUND IN 16 ITERATIONS PER= 1.0000 SFD= 1.0000

-SUPP. LOGIC - ZMP = -0.020 FOR TIME 0. TO 0.200
 ZMP = 0.0 FOR TIME 0.200 TO 1.000
 ZMP = 0.0 FOR TIME 1.000 TO 1.000

TIME (SECC)	THETA (RAD)	PSI (RAD)	DTHETA (RAD/SEC)	DPSI (RAD/SEC)	FORCE X (KP)	FORCE Y (KP)	FORCE Z (KP)	D2THETA (RAD/SEC**2)	D2PSI (RAD/SEC**2)
0.0	-0.0009	-0.0937	0.7037	2.3209	-5.2842	-9.6178	59.6687	-2.1829	-7.0311
0.0250	0.0100	-0.0377	0.6499	2.1615	-6.0351	-9.1972	61.1022	-2.0558	-6.0377
0.0500	0.0316	0.0146	0.6002	2.0243	-6.3493	-8.7240	62.2489	-1.9317	-5.1989
0.0750	0.0460	0.0632	0.5537	1.8623	-4.6522	-8.2397	63.5486	-1.8038	-6.6005
0.1000	0.0593	0.1076	0.5102	1.6857	-2.6943	-7.7719	63.9560	-1.6778	-6.7212
0.1250	0.0715	0.1476	0.4697	1.5299	-1.8320	-7.4089	64.5692	-1.5689	-5.7859
0.1500	0.0828	0.1836	0.4306	1.3270	0.1283	-7.4212	62.4335	-1.5896	-13.0677
0.1750	0.0931	0.2118	0.3892	0.8524	2.9536	-7.6869	75.6292	-1.7366	-24.5649
0.2000	0.1022	0.2245	0.3444	0.1467	5.7242	-7.7636	80.0536	-1.8079	-29.5592
0.2250	0.1103	0.2190	0.3002	-0.5521	5.1036	-7.5046	78.2082	-1.6937	-24.8702
0.2500	0.1173	0.1987	0.2608	-1.0157	2.0790	-6.8661	72.0964	-1.4494	-10.8835
0.2750	0.1234	0.1710	0.2273	-1.1582	2.0790	-6.8661	72.0964	-1.4494	-1.5774
0.3000	0.1287	0.1425	0.1970	-1.1649	-2.2844	-6.1567	68.4287	-1.2624	-2.1954
0.3250	0.1332	0.1126	0.1682	-1.2498	-2.6029	-5.1743	68.0104	-1.1760	-3.0310
0.3500	0.1371	0.0803	0.1409	-1.3147	-2.0990	-5.0246	67.7773	-1.1179	-3.1118
0.3750	0.1403	0.0469	0.1146	-1.3549	-2.0833	-4.8232	67.2736	-1.0395	-1.5565
0.4000	0.1426	0.0126	0.0892	-1.3912	-2.5857	-4.6577	67.1448	-1.0019	-1.2735
0.4250	0.1448	-0.0226	0.0643	-1.4211	-2.5022	-4.6200	67.2927	-0.9950	-1.1297
0.4500	0.1461	-0.0583	0.0399	-1.4343	-2.8328	-4.4906	66.7340	-0.9349	0.5520
0.4750	0.1468	-0.0938	0.0180	-1.3896	-3.2569	-4.2273	65.4842	-0.8144	2.9465
0.5000	0.1470	-0.1275	-0.0012	-1.2966	-3.0754	-4.0269	64.8725	-0.7408	4.0427
0.5250	0.1467	-0.1586	-0.0199	-1.2015	-2.1283	-4.1739	65.5632	-0.7791	3.2937
0.5500	0.1460	-0.1878	-0.0408	-1.1428	-0.2333	-4.4850	66.9879	-0.8950	1.3090
0.5750	0.1447	-0.2161	-0.0644	-1.1290	1.3512	-4.7144	67.7692	-0.9736	0.1916
0.6000	0.1427	-0.2443	-0.0890	-1.1206	1.2348	-4.7773	67.7304	-0.9836	0.7583
0.6250	0.1402	-0.2720	-0.1136	-1.0910	1.3163	-4.8717	67.7615	-1.0016	1.3509
0.6500	0.1371	-0.2988	-0.1391	-1.0540	1.6882	-5.0402	67.9793	-1.0436	1.5851
0.6750	0.1332	-0.3246	-0.1659	-1.0061	1.8243	-5.2461	68.4371	-1.0946	2.5260
0.7000	0.1287	-0.3490	-0.1938	-0.9475	2.5785	-5.4214	67.9924	-1.1326	1.3802
0.7250	0.1235	-0.3723	-0.2225	-0.89326	3.2890	-5.5933	67.2134	-1.1674	0.2437
0.7500	0.1176	-0.3951	-0.2534	-0.8559	1.4952	-6.2368	71.7190	-1.3491	8.6749
0.7750	0.1108	-0.4126	-0.2909	-0.4617	-1.6025	-7.3533	80.5515	-1.6608	22.7704
0.8000	0.1030	-0.4159	-0.3353	0.2307	-3.2281	-8.1171	84.6890	-1.8391	29.9771
0.8250	0.0940	-0.4007	-0.3810	0.9454	-2.1417	-8.0421	79.8980	-1.7671	25.1496
0.8500	0.0840	-0.3704	-0.4228	1.4172	1.2430	-7.5013	70.5485	-1.5894	11.9733
0.8750	0.0729	-0.3323	-0.4617	1.5821	3.9657	-7.4731	65.3043	-1.5798	3.6193
0.9000	0.0609	-0.2920	-0.5031	1.6661	4.6715	-8.1239	66.1548	-1.7512	4.5683
0.9250	0.0477	-0.2488	-0.5490	1.8079	5.2479	-8.6840	66.1703	-1.8826	5.1652
0.9500	0.0334	-0.2017	-0.5974	1.9474	4.9618	-9.1741	65.6134	-2.0019	6.8949
0.9750	0.0178	-0.1507	-0.6490	2.1496	4.5448	-9.6988	64.9686	-2.1257	9.2327
1.0000	0.0009	-0.0946	-0.7026	2.3205	7.3861	-9.6320	60.4200	-2.1226	1.2680

Fig. 6.2(c) Computed result of BIDYN, θ , ϕ , $\dot{\theta}$, $\dot{\phi}$

BIPED'S NOMINAL DYNAMICS

FOR
BETA1 AND BETA2 ARE READ

STATE VECTOR	INITIAL VALUE	-0.00092496	-0.09368646	0.70267093	2.32086754
SUPP. LOGIC -	ZMP = -0.020	FOR TIME	0. TO 0.200		
	ZMP = 0.0	FOR TIME	0.200 TO 1.000		
	ZMP = 0.0	FOR TIME	1.000 TO 1.000		

Fig. 6.3(a) Computed result of MOMA, converged values given by input

TIME 1.000

TRANSLATION TORQUES																				
JOINT 1			JOINT 2			JOINT 3			JOINT 4			JOINT 5			JOINT 6			JOINT 7		
TQX	0.89934E+00	0.45389E+01	0.83775E+01	0.83775E+01	0.25430E+00	0.12387E-01	0.12387E-01	0.12387E-01	0.12387E-01	0.10853E-02	0.10853E-02	0.10853E-02	0.10853E-02	0.10853E-02	0.10853E-02	0.10853E-02	0.10853E-02	0.10853E-02	0.10853E-02	0.10853E-02
TQY	0.93811E+00	-0.74587E+00	-0.79148E+00	-0.79148E+00	0.13323E+01	0.12737E+00	0.12737E+00	0.12737E+00	0.12737E+00	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02
TQZ	-0.27956E-01	-0.77175E+00	-0.12814E+01	-0.12814E+01	0.66466E-01	0.89780E-03	0.89780E-03	0.89780E-03	0.89780E-03	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09
ROTATION TORQUES																				
JOINT 1			JOINT 2			JOINT 3			JOINT 4			JOINT 5			JOINT 6			JOINT 7		
TQX	-0.63874E-01	-0.56303E-01	-0.32508E-01	-0.32508E-01	-0.32508E-01	-0.32508E-01	-0.32508E-01	-0.32508E-01	-0.32508E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TQY	0.19948E+00	0.18706E+00	0.19110E+00	0.19110E+00	0.12073E-02	0.12073E-02	0.12073E-02	0.12073E-02	0.12073E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TQZ	0.60400E-01	0.59144E-01	0.56260E-01	0.56260E-01	0.56260E-01	0.56260E-01	0.56260E-01	0.56260E-01	0.56260E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTAL TORQUES																				
JOINT 1			JOINT 2			JOINT 3			JOINT 4			JOINT 5			JOINT 6			JOINT 7		
TQX	0.96321E+00	0.45952E+01	0.84100E+01	0.84100E+01	0.28681E+00	0.20439E-01	0.20439E-01	0.20439E-01	0.20439E-01	-0.10853E-02	-0.10853E-02	-0.10853E-02	-0.10853E-02	-0.10853E-02	-0.10853E-02	-0.10853E-02	-0.10853E-02	-0.10853E-02	-0.10853E-02	-0.10853E-02
TQY	0.73862E+00	-0.93293E+00	-0.98257E+00	-0.98257E+00	0.13311E+01	0.12724E+00	0.12724E+00	0.12724E+00	0.12724E+00	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02	-0.13394E-02
TQZ	-0.88356E-01	-0.83089E+00	-0.13376E+01	-0.13376E+01	0.10205E-01	0.51725E-03	0.51725E-03	0.51725E-03	0.51725E-03	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09	0.92410E-09

CENTER'S OF GRAVITY DYNAMICS

X(1)	0.3872E-01	X(2)	0.1056E+00	X(3)	0.1338E+00	X(4)	0.1107E+00	X(5)	0.1102E+00	X(6)	0.2175E+00
Y(1)	0.1762E-03	Y(2)	0.5502E-03	Y(3)	-0.1693E+00	Y(4)	-0.1693E+00	Y(5)	-0.3913E+00	Y(6)	-0.2979E+00
Z(1)	0.2891E+00	Z(2)	0.6903E+00	Z(3)	0.9944E+00	Z(4)	0.1239E+01	Z(5)	0.1245E+01	Z(6)	0.1083E+01
DX(1)	0.7906E-01	DX(2)	0.1125E+00	DX(3)	0.6694E-01	DX(4)	0.6352E+00	DX(5)	0.6490E+00	DX(6)	0.3136E+00
DY(1)	-0.1328E+00	DY(2)	-0.4147E+00	DY(3)	-0.5637E+00	DY(4)	-0.5637E+00	DY(5)	-0.5637E+00	DY(6)	-0.5637E+00
DZ(1)	-0.1606E-01	DZ(2)	-0.2593E-01	DZ(3)	-0.1973E-01	DZ(4)	0.3373E-01	DZ(5)	0.3503E-01	DZ(6)	0.2171E+00
D2X(1)	0.5453E+00	D2X(2)	0.9948E+00	D2X(3)	0.8990E+00	D2X(4)	0.1334E+01	D2X(5)	0.1344E+01	D2X(6)	0.5831E+00
D2Y(1)	-0.3788E+00	D2Y(2)	-0.1217E+01	D2Y(3)	-0.1675E+01	D2Y(4)	-0.1675E+01	D2Y(5)	-0.1675E+01	D2Y(6)	-0.1675E+01
D2Z(1)	-0.2429E+00	D2Z(2)	-0.5892E+00	D2Z(3)	-0.6926E+00	D2Z(4)	-0.1982E+01	D2Z(5)	-0.2013E+01	D2Z(6)	-0.1041E+01
X(7)	0.1102E+00	X(8)	0.2175E+00	X(9)	0.1906E+00	X(10)	0.2621E+00	X(11)	0.2766E+00	X(12)	0.0
Y(7)	0.5275E-01	Y(8)	-0.4058E-01	Y(9)	-0.3394E+00	Y(10)	-0.3398E+00	Y(11)	-0.3400E+00	Y(12)	0.0
Z(7)	0.1245E+01	Z(8)	0.1083E+01	Z(9)	0.6961E+00	Z(10)	0.2974E+00	Z(11)	0.3492E-01	Z(12)	0.3000E-01
DX(7)	0.6490E+00	DX(8)	0.3136E+00	DX(9)	-0.6671E-01	DX(10)	-0.1151E+00	DX(11)	-0.9814E-02	DX(12)	0.0
DY(7)	-0.5637E+00	DY(8)	-0.5637E+00	DY(9)	-0.4188E+00	DY(10)	-0.1387E+00	DY(11)	-0.3528E-02	DY(12)	0.0
DZ(7)	0.3503E-01	DZ(8)	0.2171E+00	DZ(9)	-0.5672E-01	DZ(10)	-0.8664E-01	DZ(11)	-0.7957E-01	DZ(12)	0.0
D2X(7)	0.1344E+01	D2X(8)	0.5831E+00	D2X(9)	0.8471E+00	D2X(10)	0.7846E+00	D2X(11)	-0.1250E+00	D2X(12)	0.0
D2Y(7)	-0.1675E+01	D2Y(8)	-0.1675E+01	D2Y(9)	-0.1186E+01	D2Y(10)	-0.2972E+00	D2Y(11)	0.1013E+00	D2Y(12)	0.0
D2Z(7)	-0.2013E+01	D2Z(8)	-0.1041E+01	D2Z(9)	-0.5045E+00	D2Z(10)	-0.2691E+00	D2Z(11)	-0.1273E+00	D2Z(12)	0.0

STATE VECTOR TERMINAL VALUE 0.00094433 -0.09460098 -0.70259446 2.32052326

Fig. 6.3(c) Computer result of MOMA, X-Y-Z coordinates and torques of the gravity center of bodies at the time t41 (=1)

7. 二足歩行動作の三次元ソリッド・モデルによる表示

二足歩行プログラムの整備に伴い、計算結果を検証する目的で三次元ソリッド・モデルによる二足歩行ロボットの静止画を日本語ラインプリンタ（NLP）に出力できるようにした。ここで扱うロボットは、1秒間で1歩ずつ左右交互に足を踏み出す。したがって、2秒で元の姿勢と同じになり、その後はその繰り返しになる。

7.1 作画プログラム作成手順

本作業は端末でも処理できるようにイメージ・ファイル（原研のプロット・ルーチン用のコマンド・ファイル）作成とイメージ・ファイルのNLP出力の2つのプロシジャに分け、さらに前者は3つのステップ、後者は2つのステップから構成している。全体の処理フローをFig.7.1に示す。ここでは、各プロシジャ・ステップの概要について述べる。

A. イメージ・ファイル作成プロシジャ

MOMAで出力された0～1秒の関節の座標を元にして、時刻TS秒からTE秒までTD秒間隔での歩行動作の静止画のイメージ・ファイルを作成する。

(1) 座標計算・SOLVER用コマンド生成ステップ

・座標計算

MOMAから出力される関節の座標データは、0秒から1秒まで0.025秒間隔で41個ある（Fig. 6.3参照）。ところが、各時刻での座標は、その時刻でのZMPを原点とした相対座標であるため0秒でのZMPを原点とした絶対座標に変換する必要がある。また、時刻が1秒以降である場合には、1秒までの絶対座標を基にして左右交互に足が踏み出されるのを考慮に入れて計算する必要がある。以上の2点から時刻TS秒からTE秒までの各時刻の座標を決定する。この座標計算ルーチンのリストをFig.7.2に示す。0.0秒のZMPを原点とした時の歩行中のZMPの移動例（4歩分）をFig.7.3に示す。図中のLは1歩で進んだ距離を示す。 β_1 は支持足重心から爪先までの距離、 β_2 は支持足重心から踵までの距離を示す（Fig. 3.3参照）。

・SOLVER用コマンド生成

関節の座標からのロボットの静止画作成は、電総研から導入したSOLVER⁽¹²⁾を用いた。計算された各時刻での関節の座標と入力された視点から、その時刻での画像を生成するようなSOLVERのコマンド列をファイルに出力する。モデリングは、頭部を球、関節を立方体、その他を四角柱で行った。

(2) SOLVERステップ

(1)で出力された各時刻でのコマンド列からイメージ・ファイルを作成する。ライブラリを変えることによってこの時点でもロボットの姿勢をNLPに出力することができるが、モデリング工程もすべて出力され効率が悪いので、一旦ファイルに出力し次のステップで編集を行う。

(3) 編集 1 ステップ

(2)で問題となったモデリング工程を削除するためイメージ・ファイルを編集する。このステップによって、各時刻の完全なロボットの形をした1シーンが1シーン/1メンバでファイルに出力される。

B. イメージ・ファイルのNLP出力プロシジャ

イメージ・ファイル作成プロシジャで作成された各時刻でのイメージ・ファイルを1シーン/1頁でNLPに出力する。この時、時間変化を見るため何シーンかを1頁に重ねて出力することもできる。Aの処理は、CPU時間が長くなるため、多くのイメージ・ファイルを処理するためにNLPへの出力を別プロシジャにした。

(1) 編集 2 ステップ

NLPに出力したい時刻、視点、重複出力のオプションを入力すると、イメージ・ファイルの数メンバを選択・編集して1つのファイルに出力する。

(2) GROUT ステップ

(1)で編集されたファイルを入力してNLPに出力する。

7.2 プログラムの実行方法

実行は、以下の3つのコマンド・プロシジャを用いて行う。

A. 運動計算 (コマンド名: GAIT)

機能: GAIT, BIDYN, MOMAの3つのステップを計算し、イメージ・ファイル用座標データを作成する。

ファイル入力: GAIT, BIDYNのSYSINデータ

端末入力: GAIT, BIDYNのSYSINデータのデータセット名及びメンバ名

イメージ・ファイル作成用座標データのデータセット名

ファイル出力: イメージ・ファイル作成用座標データ

実行例: 足を水平にして歩く (データ(1)) 歩行運動を計算して、イメージ・ファイル用の座標データをデータセット@GRAPH.DATA (CASE1)に出力する例をFig.7.4に示す。

B. イメージ・ファイル作成 (コマンド名: GAITGRA)

機能: 座標計算・コマンド生成, SOLVER, イメージ・ファイル編集の3つのステップを実行し、1メンバー/1イメージの区分編成ファイルを作成する。出力メンバー名は、5文字で視点を示す英字を先頭にして、時刻を示す4文字の数字で構成されている。1枚のイメージ・ファイルを作成するのに必要なCPU時間は10秒前後である。従って、端末のCPU時間の制限が2分の場合に作成できるイメージ・ファイルは10枚前後となる。

ファイル入力: Aで出力したイメージ・ファイル作成用座標データ

端末入力: イメージ出力する開始時刻, 出力間隔

視点 (右側面, 左側面, 上面, 正面, 右斜め正面の5種類)

イメージ・ファイル作成座標データのデータセット名

出力イメージ・ファイルのデータセット名

ファイル出力：イメージ・ファイル

実行例：GAITで出力した座標データの@GRAPH.DASE1)を入力し、時刻0.0秒から時刻1.0秒まで0.5秒間隔で右斜め側面から見た場合のロボットのイメージ・ファイル3枚分をデータセット@CASE1.DATAに出力する例をFig.7.5に示す。

この場合はA0000, A0500, A1000の3メンバーが出力される。

C. イメージ・ファイルのNLP出力（コマンド名：GAITGRA2）

機能：B.で作成したイメージ・ファイルを入力とし、視点と出力時刻で一意に決定されるメンバー名を選択し、その画像をNLPに出力する。この時、ロボットの時間的な動きを見るためいくつかのイメージを重ねて出力することも出来る。

ファイル入力：イメージ・ファイル

端末入力：イメージ出力する開始時刻，終了時刻，出力間隔

視点（右側面，左側面，上面，正面，右斜め正面の5種類）

重ね合わせするかオプション

NLP出力：ロボットのイメージ画像

実行例：Bで作成したイメージ・ファイル@CASE1.DATAを入力として、時刻0.0秒から時刻1.0秒まで0.5秒間隔で右斜め側面から見た場合のロボットのイメージ画像を、NLPに出力する例をFig.7.6, Fig.7.7に示す。Fig.7.6は、1時刻1ページで3ページ出力し、Fig.7.7は、3時刻を1ページで重ね合わせて出力する。

7.3 出力画像

A. 水平歩行

足を水平にし（データ(1)），ZMPの時系列パターンが事例IVで歩く場合の時刻0.0秒から時刻2.0秒まで0.25秒間隔で重ね合わせた出力画像をFig.7.8に示す。この画像は、2歩分の歩行を表しており、Fig.7.8(a)は真横から見た図で、Fig.7.8(b)は真正面から見た図である。

B. 通常の平地歩行

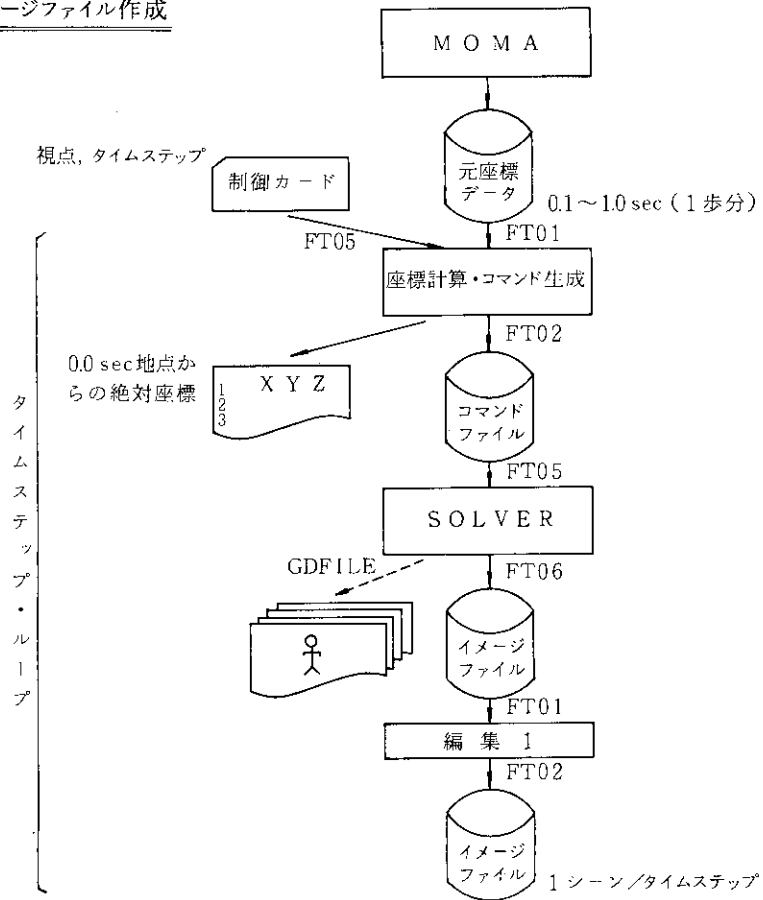
通常の平地歩行で（データ(8)），ZMPの時系列パターンが事例Iの場合の同様の図をFig.7.9に示す。またこの時のコマ取り図をFig.7.10に示す。いずれも真横から正面側に20°ずらして見た図である。0秒時と2.0秒時は同一の姿勢を取るが視点が固定しているため異なった画像となっている。

7.4 三次元モデラーSOLVERの問題点

今回は、ロボットのモデリングを行うためSOLVERを用いたが、コマンドの不備のためメッシュ表現や面塗りのような立体感のあるプリミティブが表示できない。またカラー表示も不

可能なためそのまま SOLVER を用いても動画化はできない。したがって、今後立体感やカラーの表現が簡単にできる動画作成機能と関節データ等のシミュレーション結果を直接取り入れられるようなインターフェースを持ったツールが必要である。高速画像作成表示装置 CAP⁽¹³⁾での映像化を考えているので、CAPでの三次元モデラー FUSION⁽¹⁴⁾によって実現させる計画である。

イメージファイル作成



イメージファイル出力

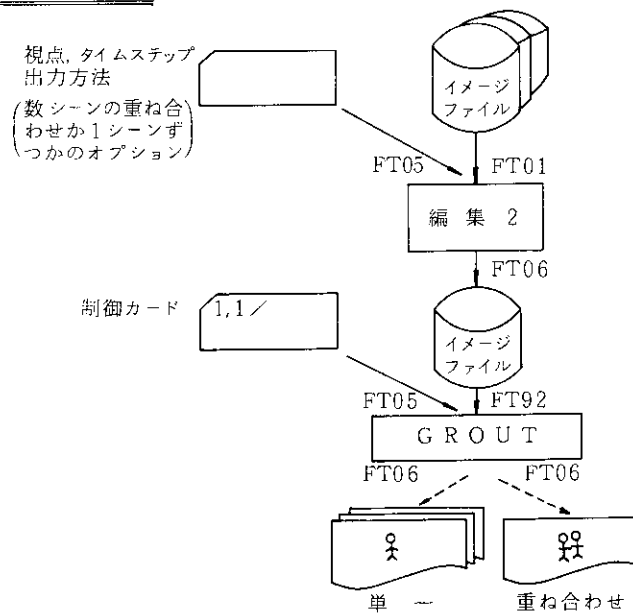


Fig. 7.1 Program flow for graphics

```

DO 1 J=1,41
T(J,1)=TORG(J)
DO 5 I=1,12
IF(T(J,1).GE.O.O.AND.T(J,1).LT.T1) THEN
X(I,J,1) = XORG(I,J)
ELSEIF(T(J,1).GE.T1.AND.T(J,1).LT.T2) THEN
X(I,J,1) = XORG(I,J) + BE2
ELSEIF(T(J,1).GE.T2.AND.T(J,1).LE.1.) THEN
X(I,J,1) = XORG(I,J) + BE1 + BE2
ELSE
WRITE(6,9600) J,I,X(I,J,1),T(J,1)
STOP 16
END IF
Y(I,J,1) = YORG(I,J)
Z(I,J,1) = ZORG(I,J)
5 CONTINUE
1 CONTINUE
DO 10 K=2,CYCLE
DO 11 I=1,12
X(I,1,K)=X(I,41,K-1)
Y(I,1,K)=Y(I,41,K-1)
Z(I,1,K)=Z(I,41,K-1)
11 CONTINUE
DO 20 J=2,41
T(J,K)=TORG(J) + K-1
X(5,J,K) = XORG(7,J)-XORG(7,1)+X(5,41,K-1)
Y(5,J,K) = -(YORG(7,J)-YORG(7,1))+YORG(5,1)
Z(5,J,K) = ZORG(7,J)-ZORG(7,1)+Z(5,41,K-1)
X(6,J,K) = XORG(8,J)-XORG(8,1)+X(6,41,K-1)
Y(6,J,K) = -(YORG(8,J)-YORG(8,1))+YORG(6,1)
Z(6,J,K) = ZORG(8,J)-ZORG(8,1)+Z(6,41,K-1)
X(9,J,K) = XORG(2,J)-XORG(2,1)+X(9,41,K-1)
Y(9,J,K) = -(YORG(2,J)-YORG(2,1))+YORG(9,1)
Z(9,J,K) = ZORG(2,J)-ZORG(2,1)+Z(9,41,K-1)
X(10,J,K) = XORG(1,J)-XORG(1,1)+X(10,41,K-1)
Y(10,J,K) = -(YORG(1,J)-YORG(1,1))+YORG(10,1)
Z(10,J,K) = ZORG(1,J)-ZORG(1,1)+Z(10,41,K-1)
X(11,J,K) = XORG(12,J)-XORG(12,1)+X(11,41,K-1)
Y(11,J,K) = -(YORG(12,J)-YORG(12,1))+YORG(11,1)
Z(11,J,K) = ZORG(12,J)-ZORG(12,1)+Z(11,41,K-1)
X(7,J,K) = XORG(5,J)-XORG(5,1)+X(7,41,K-1)
Y(7,J,K) = -(YORG(5,J)-YORG(5,1))+YORG(7,1)
Z(7,J,K) = ZORG(5,J)-ZORG(5,1)+Z(7,41,K-1)
X(8,J,K) = XORG(6,J)-XORG(6,1)+X(8,41,K-1)
Y(8,J,K) = -(YORG(6,J)-YORG(6,1))+YORG(8,1)
Z(8,J,K) = ZORG(6,J)-ZORG(6,1)+Z(8,41,K-1)
X(2,J,K) = XORG(9,J)-XORG(9,1)+X(2,41,K-1)
Y(2,J,K) = -(YORG(9,J)-YORG(9,1))+YORG(2,1)
Z(2,J,K) = ZORG(9,J)-ZORG(9,1)+Z(2,41,K-1)
X(1,J,K) = XORG(10,J)-XORG(10,1)+X(1,41,K-1)
Y(1,J,K) = -(YORG(10,J)-YORG(10,1))+YORG(1,1)
Z(1,J,K) = ZORG(10,J)-ZORG(10,1)+Z(1,41,K-1)
X(12,J,K) = XORG(11,J)-XORG(11,1)+X(12,41,K-1)
Y(12,J,K) = -(YORG(11,J)-YORG(11,1))+YORG(12,1)
Z(12,J,K) = ZORG(11,J)-ZORG(11,1)+Z(12,41,K-1)
X(3,J,K) = XORG(3,J)-XORG(3,1)+X(3,41,K-1)
Y(3,J,K) = -(YORG(3,J)+2.0*YORG(3,1))
Z(3,J,K) = ZORG(3,J)-ZORG(3,1)+Z(3,41,K-1)
X(4,J,K) = XORG(4,J)-XORG(4,1)+X(4,41,K-1)
Y(4,J,K) = -(YORG(4,J)+2.0*YORG(4,1))
Z(4,J,K) = ZORG(4,J)-ZORG(4,1)+Z(4,41,K-1)
DO 30 I=1,12
IF(T(J,K).GE.REAL(K-1).AND.
& T(J,K).LT.T1+REAL(K-1) ) THEN
ELSEIF(T(J,K).GE.T1+REAL(K-1).AND.
& T(J,K).LT.T2+REAL(K-1)) THEN
X(I,J,K) = X(I,J,K) + BE2
ELSEIF(T(J,K).GE.T2+REAL(K-1).AND.
& T(J,K).LE.REAL(K)) THEN
X(I,J,K) = X(I,J,K) + BE1 + BE2
ELSE
WRITE(6,9610) K,J,I,X(I,J,K),T(J,I)
STOP 16
END IF
30 CONTINUE
20 CONTINUE
10 CONTINUE

```

Fig. 7.2 Subroutine for mapping time-advanced coordinate into a standard one.

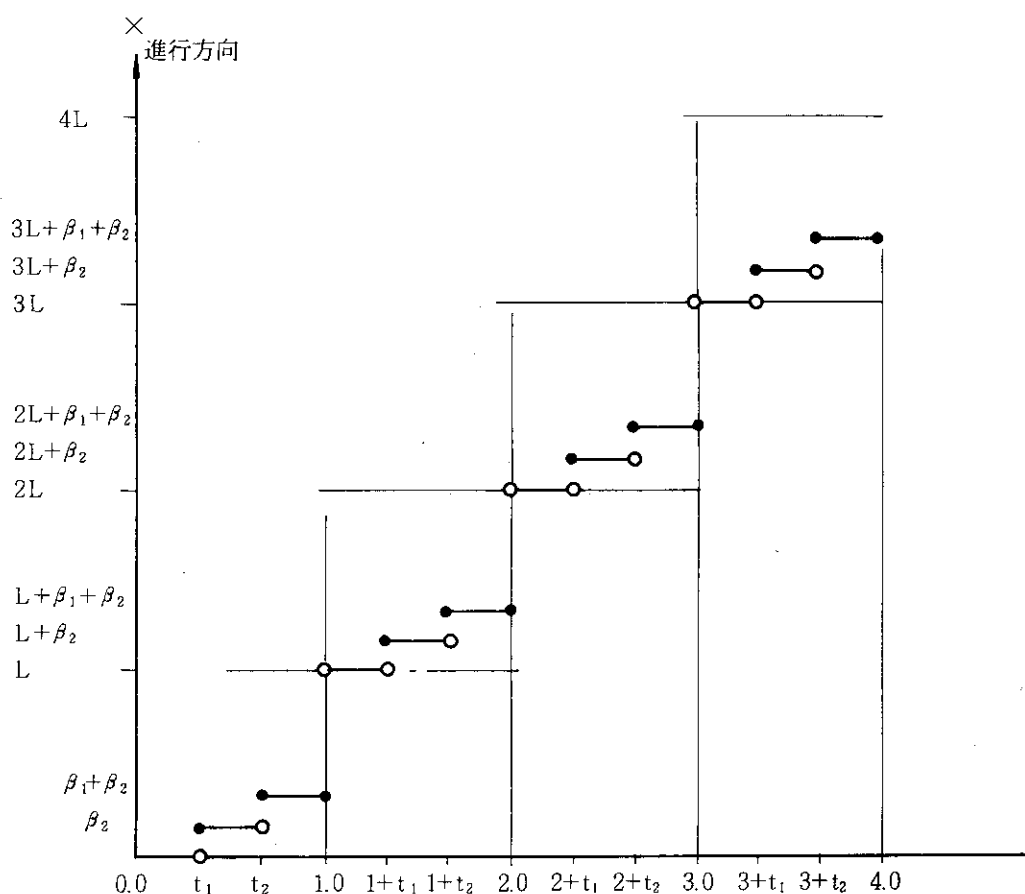


Fig. 7.3 Example of the ZMP transfer during walking

```

GAIT
** ENTER ** SYSIN DATASET NAME OF GAIT AND BIDYN ==> GAIT.DATA
** ENTER ** MEMBER NAME OF GAIT.DATA FOR GAIT ==> GAITE3
** ENTER ** MEMBER NAME OF GAIT.DATA FOR BIDYN ==> BIDYN1
** ENTER ** OUTPUT DATASET NAME FOR GRAPHIC ==> @GRAPH.DATA(CASE1)
DSNAME=@GRAPH.DATA(CASE1) NEW ALLOCATED
DSNAME=@BDATA.DATA NEW ALLOCATED FOR GAIT-STEP FT01F001
                                BIDYN-STEP FT01F001,FT03F001
                                MOMA-STEP FT01F001,FT05F001

** GAIT STEP START **
GAIT STEP FT06F001 DSNAME=GAITPR.OUTLIST NEW ALLOCATED
** GAIT STEP ENDED **
** BIDYN STEP START **
BIDYN STEP FT06F001 DSNAME=BIDYNPR.OUTLIST NEW ALLOCATED
** BIDYN STEP ENDED **
** MOMA STEP START **
MOMA STEP FT06F001 DSNAME=MOMAPR.OUTLIST NEW ALLOCATED
** MOMA STEP ENDED **
READY

```

Fig. 7.4 Use of command GAIT

```

READY
GAITGRA
** ENTER ** INPUT DATASET NAME OF ROBOT DATA (PS)=) @GRAPH.DATA(CASE1)
** ENTER ** OUTPUT DATASET NAME OF IMAGE DATA (PO)=) @CASE1.DATA
** TIME FOR PLOT **
IF ( FROM 0.000 SEC TO 2.000 SEC INTERVAL 0.250 SEC )
THEN INPUT 0,2000,250 ==> 0,1000,500
** VIEW POINT **
(FRONT=>F,RIGHT=>R,LEFT=>L,DOWN=>D,ASKANT=>A) ==> A

<1ST-STEP> MAKING SOLVER COMMAND
* ENTER * VIEW POINT NAME (FRONT,RIGHT,LEFT,DOWN,ASKANT)
* ENTER * PRINT FLAG AND GRAPHIC FLG
* ENTER * TIME CYCLE
CYCLE = 1
*** TIME *** 0.0 SEC
*** BETA3 *** LEFT = 3.701 DEG RIGHT = -14.152 DEG
KANSETU NO. 1 : X = 0.2168E-01 Y = 0.1272E-02 Z = 0.2948E+00
KANSETU NO. 2 : X = -0.4386E-01 Y = 0.3932E-02 Z = 0.6960E+00
KANSETU NO. 3 : X = -0.8763E-01 Y = -0.1647E+00 Z = 0.9975E+00
KANSETU NO. 4 : X = 0.4067E-02 Y = -0.1647E+00 Z = 0.1226E+01
KANSETU NO. 5 : X = 0.6304E-02 Y = -0.3867E+00 Z = 0.1231E+01
KANSETU NO. 6 : X = 0.3550E-01 Y = -0.2934E+00 Z = 0.1123E+01
KANSETU NO. 7 : X = 0.6304E-02 Y = 0.5732E-01 Z = 0.1231E+01
KANSETU NO. 8 : X = 0.3550E-01 Y = -0.3600E-01 Z = 0.1123E+01
KANSETU NO. 9 : X = -0.9291E-01 Y = -0.3361E+00 Z = 0.6916E+00
KANSETU NO. 10 : X = -0.1662E+00 Y = -0.3387E+00 Z = 0.2970E+00
KANSETU NO. 11 : X = -0.2513E+00 Y = -0.3399E+00 Z = 0.4851E-01
KANSETU NO. 12 : X = 0.4796E-01 Y = 0.0 Z = 0.3317E-01
<1> ENDED TIME = 0.000 SOLVER COMMAND ==> @GEDCMD.DATA(A0000)
<2ND-STEP> SOLVER COMMAND START
PLEASE ENTER KEY
<2> SOLVER COMMAND ENDED
TIME = 0.000 PLOT DATA => @GEOWK.DATA DISP=SHR
<3RD-STEP> EDITING PLOT DATA START
<3> ENDED
TOTAL ENDED TIME = 0.000 EDITED PLOT DATA ==> @CASE1.DATA(A0000)
:
時刻0.5 秒と時刻1.0 秒も同様に処理し、イメージ・ファイルをデータセットに格納する。
TOTAL ENDED TIME = 0.500 EDITED PLOT DATA ==> @CASE1.DATA(A0500)
TOTAL ENDED TIME = 1.000 EDITED PLOT DATA ==> @CASE1.DATA(A1000)
** END OF EXECUTION **
READY

```

Fig. 7.5 Use of command GAITGRA

```

READY
GAITGRA2
** ENTER ** IMAGE FILE ( PD ) DATASET NAME ==> @CASE1.DATA
** TIME FOR PLOT **
IF ( FROM 0.000 SEC TO 2.000 SEC INTERVAL 0.250 SEC )
THEN INPUT 0,2000,250 ==> 0,1000,500
** VIEW POINT **
(FRONT=>F,RIGHT=>R,LEFT=>L,DOWN=>D,ASKANT=>A) ==> A
** EDIT MODE **
( LINK => L , MONO => M ) ==> M
** MONO MODE **
MEMBER = A000 LINKED PLOT DATA ==> @GEOWK2.DATA DISP=SHR
** MONO MODE **
MEMBER = A050 LINKED PLOT DATA ==> @GEOWK2.DATA DISP=MOD
** MONO MODE **
MEMBER = A100 LINKED PLOT DATA ==> @GEOWK2.DATA DISP=MOD
** NLP OUTPUT STEP **
* START GRAPHIC OUTPUT *
OUTPUT OPTION, HFCT,IFSTRT,IFEND,INUNIT,ICOPY,IDBG,IREC=
1.00 1 9999 89 0 0 80
* END OF PROCESSING, TOTAL RECORDS= 143 TOTAL OUTPUT FRAMES= 4 *
** END OF EXECUTION **
READY

```

Fig. 7.6 Use of command GAITGRA2 for drawing single image)

```

READY
GAITGRA2
** ENTER ** IMAGE FILE ( PD ) DATASET NAME ==> @CASE1.DATA
** TIME FOR PLOT **
IF ( FROM 0.000 SEC TO 2.000 SEC INTERVAL 0.250 SEC )
THEN INPUT 0,2000,250 ==> 0,1000,500
** VIEW POINT **
(FRONT=>F,RIGHT=>R,LEFT=>L,DOWN=>D,ASKANT=>A) ==> A
** EDIT MODE **
( LINK => L , MONO => M ) ==> L
** LINK MODE **
MEMBER = A000 LINKED PLOT DATA ==> @GEOWK2.DATA DISP=SHR
** LINK MODE **
MEMBER = A050 LINKED PLOT DATA ==> @GEOWK2.DATA DISP=MOD
** LINK MODE **
MEMBER = A100 LINKED PLOT DATA ==> @GEOWK2.DATA DISP=MOD
** NLP OUTPUT STEP **
* START GRAPHIC OUTPUT *
OUTPUT OPTION, HFCT,IFSTRT,IFEND,INUNIT,ICOPY,IDBG,IREC=
1.00 1 9999 89 0 0 80
* END OF PROCESSING, TOTAL RECORDS= 140 TOTAL OUTPUT FRAMES= 1 *
** END OF EXECUTION **
READY

```

Fig. 7.7 Use of command GAITGRA2 for drawing time-advanced images in pile

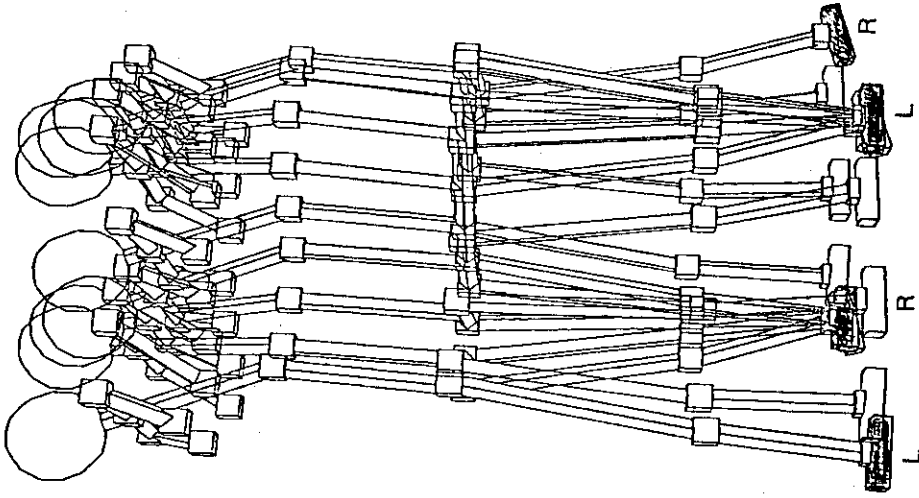


Fig. 7.9 Walking image during two steps in usual gait, eight shots every 0.25 sec. are piled, viewed from the point rotated 20° to the front

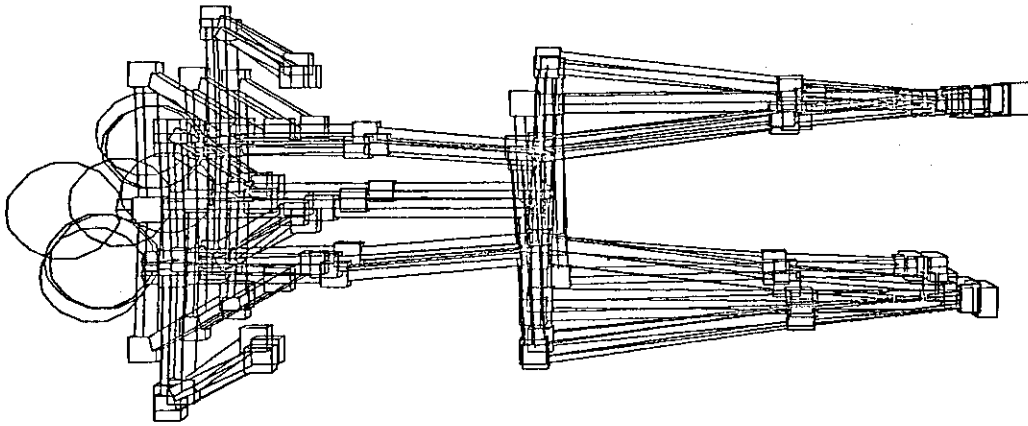


Fig. 7.8(b) Walking image during two steps in flat gait, eight shots every 0.25 sec. are piled, viewed from the front (Y-Z plane)

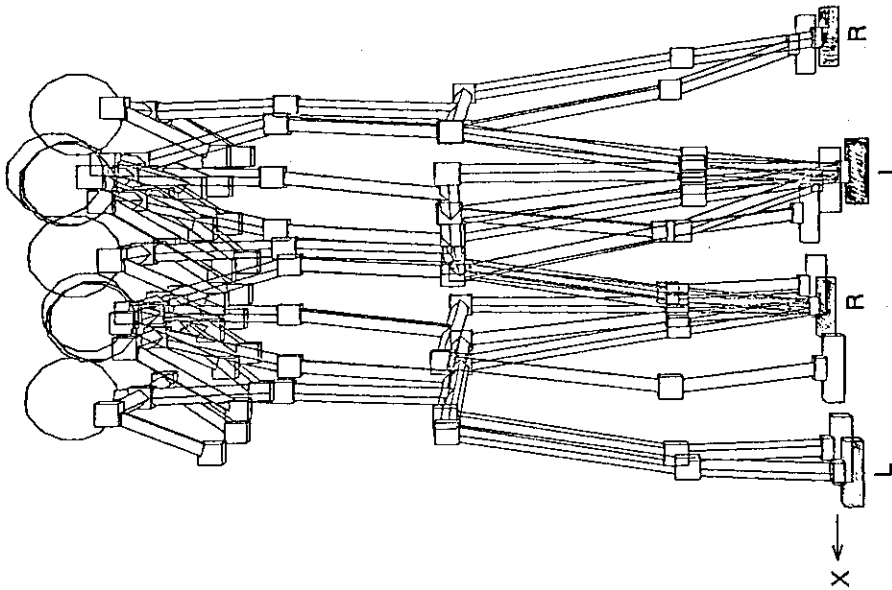


Fig. 7.8(a) Walking image during two steps in flat gait, eight shots every 0.25 sec. are piled, viewed from sideward (X-Z plane)

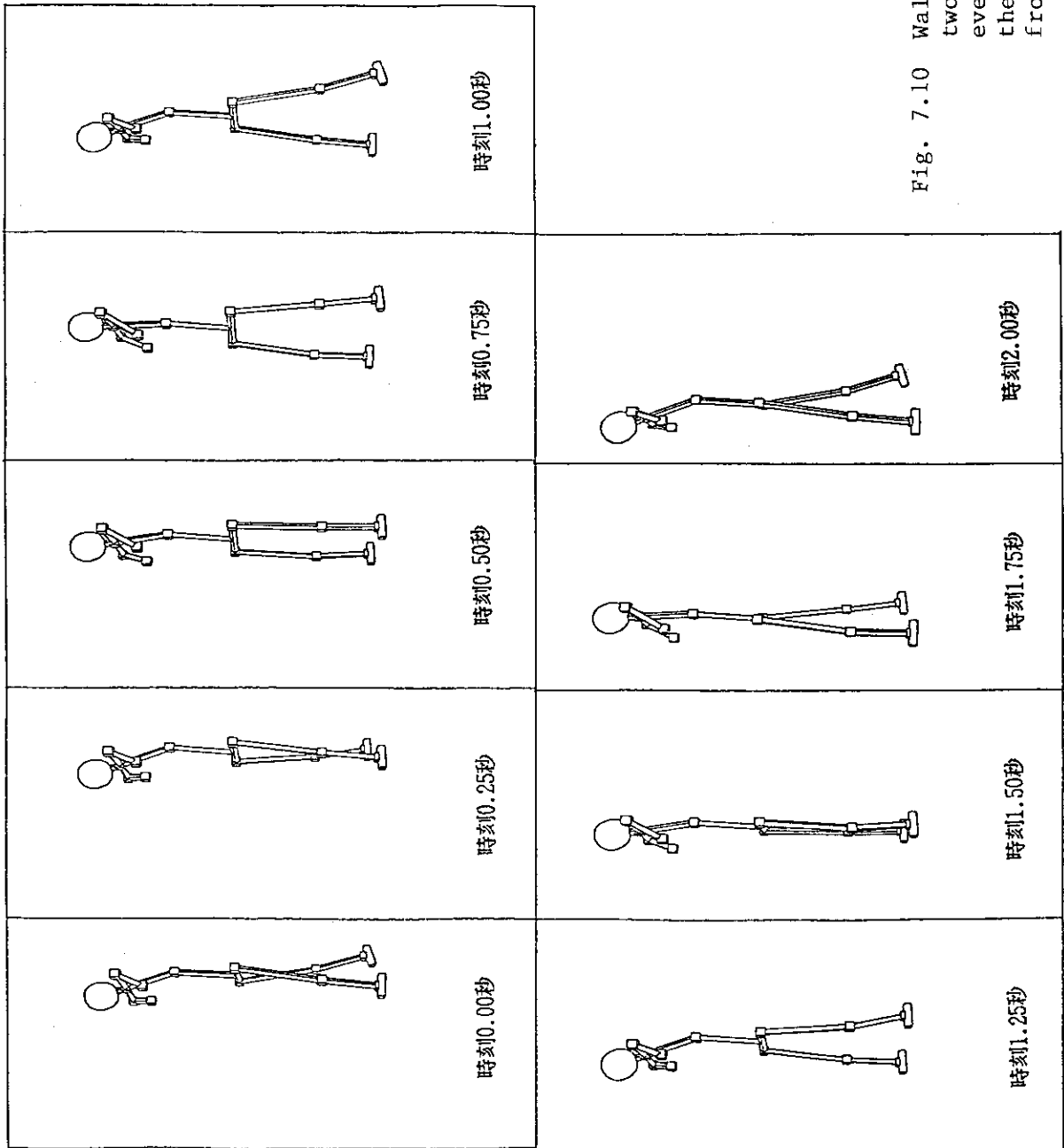


Fig. 7.10 Walking shot sequence during two steps in usual gait, every 0.25 sec., viewed from the point rotated 20° to the front

8. 63 年 度 計 画

(1) 二足歩行プログラムの原研版開発

Vokoburatvic の本⁽¹⁾に、今回整備したプログラムの発展形として腕を自由にした歩行モデルの運動学方程式の導出方法が記載されている。歩行パターンは入力で、足元、腰の関節角の2変数に加えて、両腕の肩とひじの関節角を変数とする合計6変数のモデルを扱っている。これを参考にして原研版の計算プログラムを開発する。原研版の二足歩行運動学計算プログラムを開発することによって、二足歩行運動学方程式の今後の発展形を取り込むことが可能となり、また、歩行以外の動きを計算するための基礎となるプログラム開発手法を修得できる。

(2) 歩行動作の映像化

簡単な建造物の中で人間が歩く様子を映像化する。このため、CAP⁽¹³⁾を使って人間のく体モデル化を行い、ロボット運動学計算の結果に基づき、人間の歩く速度に即した動画を作成する。

(3) ロボット運動学に関連した調査

- a. 二足歩行に関連し、現在のプログラムでは下肢の関節角を歩行パターンとして時系列データで与えているが、ZMP以外に力学的な拘束条件を追加して運動学方程式の解として手足の運動を導くことが可能かどうか、もし可能とすれば、どのような運動(力)学方程式を追加すべきか。
 - b. 両腕協調動作、指と腕の協調動作を表すロボット運動学方程式
 - c. 上記の応用として、物を持ち上げるバルブを廻すといった作業、物を持って歩くなどに関する運動学方程式
- 上記の項目 a については原研内での調査をする。b, c については大学に調査を依頼する。

9. お わ り に

二足歩行運動学計算プログラムの基本的なものについて整備が終った。力学的な拘束条件が足の裏のZMP,つまり支持足のX方向とY方向のモーメントがゼロであるという2本の方程式に基づいている。従って解として得られる変数も2つで、この場合、腰の前後へのぶれと足元の左右へのぶれが求まる。肝心の下肢の関節の回転角は全て入力データで与えている。このような意味から今回整備したプログラムはシミュレーションとアニメーションの中間といえる。二足歩行運動学に関しては歩行ロボット作成上は静歩行から準動歩行、動歩行へ発展している⁽¹⁾。しかし、運動学方程式から下肢の関節角を導出しているものは見あたらない。

人間の動作は必ずしも力学的な合理性で決るわけではなく、過去の学習、直感、感情など種々の要因に左右されている。これらの結果として生じる実際の人間動作に類似した拘束条件で数式で定義できれば、より多くの関節角を未知変数として取り扱える。当面のできることは、有本氏らの提唱としている⁽⁷⁾歩行支持期の人間の重心(腰のあたり)の移動の倒立振り運動による数式化を試みることである。この場合揺動期に滑らかに繋ぐことができるかどうかが課題となる。

人間動作の運動学方程式化は、十分な機械力学的、生理的知見に基づいてなされる必要があり、外部の専門家の協力が不可欠である。また、人間の動作という観点からはそれほど研究の進んだ分野ではないので課題は豊富にある。原研の研究テーマでどこまでやるか、また、やれるかを見極めないと泥沼に陥ることにもなりかねない。

シミュレーションによる人間動作の映像化は他でなされていないのでできるだけ早い機会に試みたい。そのためには、3次元ソリッド・モデル化機能を持ち、カラー表示が可能で、かつ動画作成機能を持つ高機能画像作成・表示システム(ソフトウェア、ハードウェア)が必要である。

今回試みた作図システム SOLVER では前記のいずれの機能も不満足である

謝 辞

本研究は筆者にとって初めての分野の仕事であり、取り掛かるまで暗中模索が続いたが、仕事を進めるにあたり原研の篠原慶邦氏に有益な助言と文献紹介を戴きましたことを感謝する。三次元モデラー SOLVER の利用にあたっては、計算センター樋口氏に使用する上での助言を頂きましたことを感謝する。

9. お わ り に

二足歩行運動学計算プログラムの基本的なものについて整備が終った。力学的な拘束条件が足の裏のZMP, つまり支持足のX方向とY方向のモーメントがゼロであるという2本の方程式に基づいている。従って解として得られる変数も2つで、この場合、腰の前後へのぶれと足元の左右へのぶれが求まる。肝心の下肢の関節の回転角は全て入力データで与えている。このような意味から今回整備したプログラムはシミュレーションとアニメーションの中間といえる。二足歩行運動学に関しては歩行ロボット作成上は静歩行から準動歩行, 動歩行へ発展している⁽¹⁾。しかし、運動学方程式から下肢の関節角を導出しているものは見あたらない。

人間の動作は必ずしも力学的な合理性で決るわけではなく、過去の学習, 直感, 感情など種々の要因に左右されている。これらの結果として生じる実際の人間動作に類似した拘束条件で数式で定義できれば、より多くの関節角を未知変数として取り扱える。当面のできることは、有本氏らの提唱としている⁽⁷⁾歩行支持期の人間の重心(腰のあたり)の移動の倒立振子運動による数式化を試みることである。この場合揺動期に滑らかに繋ぐことができるかどうかが課題となる。

人間動作の運動学方程式化は、十分な機械力学的, 生理的知見に基づいてなされる必要があり、外部の専門家の協力が不可欠である。また、人間の動作という観点からはそれほど研究の進んだ分野ではないので課題は豊富にある。原研の研究テーマでどこまでやるか、また、やれるかを見極めないと泥沼に陥ることにもなりかねない。

シミュレーションによる人間動作の映像化は他でなされていないのでできるだけ早い機会に試みたい。そのためには、3次元ソリッド・モデル化機能を持ち、カラー表示が可能で、かつ動画作成機能を持つ高機能画像作成・表示システム(ソフトウェア, ハードウェア)が必要である。

今回試みた作図システム SOLVER では前記のいずれの機能も不満足である

謝 辞

本研究は筆者にとって初めての分野の仕事であり、取り掛かるまで暗中模索が続いたが、仕事を進めるにあたり原研の篠原慶邦氏に有益な助言と文献紹介を戴きましたことを感謝する。三次元モデラー SOLVER の利用にあたっては、計算センター樋口氏に使用する上での助言を頂きましたことを感謝する。

参 考 文 献

- [1] 高西淳夫, 二足歩行ロボットによる準動歩行, 日本ロボット学会誌 vol.1-3 (1983).
- [2] Takano et al, Development of Computer Simulation System of Kinematics and Dynamics of Robot, Journal of the Faculty of Engineering, Tokyo Univ. vol. XXXVI, No.4 (1982).
- [3] 内山 勝, ロボット機構学, ロボット基礎講習会テキスト, 日本計測制御学会 (1986).
- [4] 吉川 恒夫, ロボットの動力学, ロボット基礎講習会テキスト, 日本計測制御学会 (1986).
- [5] 佐々木 忍, 多関節ロボット・マニピュレータの逆運動学方程式に最小化手法を適用した新しい解法, 計測制御学会論文集 vol. 23-3 (1987).
- [6] 加藤一郎, 二足歩行ロボット—その歴史と課題—, 日本ロボット学会誌 vol. 1-3 (1983).
- [7] 有本 卓, 宮崎文男, 二足歩行ロボットの階層制御, 日本ロボット学会誌 vol. 1-3 (1983)
- [8] 座談会, 二足歩行ロボット研究の現状, 日本ロボット学会誌 vol. 1-3 (1983)..
- [9] 高西淳夫, 他, 二足歩行ロボット WL-10RDによる動歩行の実現, 日本ロボット学会誌 vol. 3-4 (1985)
- [10] 加藤一郎, 他, 脚方式移動ロボットの開発, 日立評論, vol. 68-10 (1986).
- [11] M.Vukobratovic (加藤一郎, 山内 忠 訳), 歩行ロボットと人工の足, 日刊工業新聞社 (1975).
- [12] 越川和忠, SOLVER: A Solid Modeler for Vision Engineering Research, 私信 (1985).
- [13] 石井光雄, セルラーアレイプロセッサCAP, 映像情報, vol. 9-18 (1986).
- [14] 村上公一, 他, コンピュータグラフィックスのための統合環境, 情報処理学会第35回全国大会, 6G-1~6G-3 (1987)