

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11)特許番号

特許第3132156号
(P3132156)

(45)発行日 平成13年2月5日(2001.2.5)

(24)登録日 平成12年11月24日(2000.11.24)

(51)Int.Cl.⁷

識別記号

F I

B 2 5 J 5/00
9/10

B 2 5 J 5/00
9/10

F
A

請求項の数 3 (全 12 頁)

(21)出願番号 特願平4-155916

(22)出願日 平成4年5月22日(1992.5.22)

(65)公開番号 特開平5-318340

(43)公開日 平成5年12月3日(1993.12.3)
審査請求日 平成10年10月27日(1998.10.27)

(73)特許権者 000005326

本田技研工業株式会社
東京都港区南青山二丁目1番1号

(72)発明者 竹中 透

埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式
会社本田技術研究所内

(72)発明者 長谷川 忠明

埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式
会社本田技術研究所内

(74)代理人 100081972

弁理士 吉田 豊 (外1名)

審査官 田村 耕作

(56)参考文献 特開 昭62-97005 (J P, A)

特開 昭63-150176 (J P, A)

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 脚式移動ロボットの歩容生成装置

1

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】 基体と、それに連結された複数本の脚部とを備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、
a. 前記ロボットが予定する歩行面が第1、第2の少なくとも2つの面を含むとき、第3の面と前記ロボットのZMP目標位置を仮想的に設定する設定手段、及び
b. 動力学によって求められるZMP位置が前記設定されたZMP目標位置となるように前記ロボットの歩容を決定する歩容決定手段、
を備え、前記設定手段は、前記第1、第2の面上の2点を結ぶ線分上を連続的に移動するように前記ZMP目標位置を設定すると共に、前記第3の面を、その法線ベクトルが前記第1の面の法線ベクトルから前記第2の面の法線ベクトルに連続的に変わり、かつ前記ZMP目標位置を常に含むように設定することを特徴とする脚式移動

2

ロボットの歩容生成装置。

【請求項2】 基体と、それに連結された2本の脚部とを備えた2足歩行の脚式移動ロボットの歩容生成装置において、
a. 前記ロボットが予定する歩行面が第1、第2の少なくとも2つの面を含むとき、前記脚部の一方の先端の第1の足底を支持面とする片脚支持期から両脚支持期を経て前記脚部の他方の先端の第2の足底を支持面とする片脚支持期に移行する際、前記第1の足底の接地する第1の面から前記第2の足底の接地する第2の面に連続的に変化する仮想的な第3の面を想定し、その上に前記ロボットのZMP目標位置を仮想的に設定する設定手段、及び
b. 動力学によって求められるZMP位置が前記設定されたZMP目標位置となるように前記ロボットの歩容を

決定する歩容決定手段、
を備え、前記設定手段は、前記第 1、第 2 の面上の 2 点を結ぶ線分上を連続的に移動するように前記 ZMP 目標位置を設定すると共に、前記第 3 の面を、その法線ベクトルが前記第 1 の面の法線ベクトルから前記第 2 の面の法線ベクトルに連続的に変わり、かつ前記 ZMP 目標位置を常に含むように設定することを特徴とする脚式移動ロボットの歩容生成装置。

【請求項 3】 前記設定手段は、前記第 1、第 2 の面に前記第 1、第 2 の足底の接地圧重心点をそれぞれ設定すると共に前記第 1、第 2 の足底の接地圧重心点を結ぶ線分上を連続的に移動するように前記 ZMP 目標位置を設定することを特徴とする請求項 2 項記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 この発明は脚式移動ロボットの歩容生成装置、より具体的には 2 足歩行の脚式移動ロボットの歩容生成装置であって、単一平面から構成されていない不整地などを移動するときも動力学的な平衡条件を満足して安定に歩行できる様にしたものに関する。

【0002】

【従来の技術】 脚式移動ロボット、特に 2 足歩行の脚式移動ロボットとしては、特開昭 6 2-9 7 0 0 5 号、特開昭 6 3-1 5 0 1 7 6 号公報記載のものなどが知られている。また脚式移動ロボットを含むロボットの制御については、「ロボット工学ハンドブック」、日本ロボット学会編、1 9 9 0 年 1 0 月 2 0 日）に詳しい。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】 ところで、脚式移動ロボットの制御においては上記の「ロボット工学ハンドブック」の 3 4 7 頁以下に詳述されている様に、ZMP の概念を導入し、それが目標軌跡を辿る様にロボットの歩容を決定することが知られている。その場合、接地面を含む最小凸多角形の中に ZMP が存在することが、動的な力の平衡をとる条件となる。更に、接地面を含む最小凸多角形の中なるべく中央に ZMP が存在する様に歩容を設計すれば、安定余裕の高い歩容となる。

【0004】 しかし、ZMP は単一平面、特に単一の水平面でのみ成立する概念であり、ロボットが不整地や勾配が変化する斜面などを移動する場合、通常、法線方向や高さが異なる 2 つ以上の床面に同時に接地しているときが存在するので、歩容設計に従来の ZMP 概念を適用することができない。

【0005】 従って、この発明の目的は上記した不都合を解消することであり、従来の ZMP 概念を拡張し、不整地など 2 つ以上の平面に同時に接地する場合においても安定した歩容を生成できる様にした脚式移動ロボットの歩容生成装置を提供することにある。

【0006】 また、ロボットに作用する慣性力と重力の

合力と合モーメントが連続、換言すれば、各脚に作用する床反力の合力と合モーメントが連続であれば、ロボット重心の加速度が連続になって滑らかな動きを実現することができ、更には足底と床との間の接地感を高めることができるなど、脚式移動ロボットを制御する上で種々の利点がある。

【0007】 従って、この発明の第 2 の目的は、不整地などを安定して歩行できると共に、床反力の合力と合モーメントが連続である様に歩容を生成する様にした脚式移動ロボットの歩容生成装置を提供することにある。

【0008】

【課題を解決するための手段】 上記した課題を解決するためにこの発明は以下のように構成した。後述する実施例の表現を付記して説明すると、請求項 1 項にあっては、基体（上体）2 4 と、それに連結された複数本の脚部（脚部リンク）2 とを備えた脚式移動ロボット 1 の歩容生成装置において、前記ロボットが予定する歩行面が第 1、第 2 の少なくとも 2 つの面（第 1 接地面、第 2 接地面）を含むとき、第 3 の面（仮想床面）と前記ロボットの ZMP 目標位置を仮想的に設定する設定手段（制御ユニット 2 6、S 1 0 から S 1 8）、及び動力学によって求められる ZMP 位置が前記設定された ZMP 目標位置となるように前記ロボットの歩容を決定する歩容決定手段（制御ユニット 2 6、S 2 0）を備え、前記設定手段は、前記第 1、第 2 の面上の 2 点を結ぶ線分上を連続的に移動するように前記 ZMP 目標位置を設定すると共に、前記第 3 の面を、その法線ベクトルが前記第 1 の面の法線ベクトルから前記第 2 の面の法線ベクトルに連続的に変わり、かつ前記 ZMP 目標位置を常に含むように設定する如く構成した。請求項 2 項にあっては、基体（上体）2 4 と、それに連結された 2 本の脚部（脚部リンク）2 とを備えた 2 足歩行の脚式移動ロボット 1 の歩容生成装置において、前記ロボットが予定する歩行面が第 1、第 2 の少なくとも 2 つの面（第 1 接地面、第 2 接地面）を含むとき、前記脚部の一方の先端の第 1 の足底を支持面とする片脚支持期から両脚支持期を経て前記脚部の他方の先端の第 2 の足底を支持面とする片脚支持期に移行する際、前記第 1 の足底の接地する第 1 の面から前記第 2 の足底の接地する第 2 の面に連続的に変化する仮想的な第 3 の面（仮想床面）を想定し、その上に前記ロボットの ZMP 目標位置を仮想的に設定する設定手段（制御ユニット 2 6、S 1 0 から S 1 8）、及び動力学によって求められる ZMP 位置が前記設定された ZMP 目標位置となるように前記ロボットの歩容を決定する歩容決定手段（制御ユニット 2 6、S 2 0）を備え、前記設定手段は、前記第 1、第 2 の面上の 2 点を結ぶ線分上を連続的に移動するように前記 ZMP 目標位置を設定すると共に、前記第 3 の面を、その法線ベクトルが前記第 1 の面の法線ベクトルから前記第 2 の面の法線ベクトルに連続的に変わり、かつ前記 ZMP 目標位置を常に含む

ように設定する如く構成した。請求項 3 項にあっては、前記設定手段は、前記第 1、第 2 の面に前記第 1、第 2 の足底の接地圧重心点をそれぞれ設定すると共に前記第 1、第 2 の足底の接地圧重心点を結ぶ線分上を連続的に移動するように前記 ZMP 目標位置を設定する如く構成した。

【0009】

【作用】ロボットが予定する歩行面が第 1、第 2 の少なくとも 2 つの面を含むとき、第 3 の面とロボットの ZMP 目標位置を仮想的に設定し、動力学によって求められる ZMP 位置が設定された ZMP 目標位置となるようにロボットの歩容を決定し、さらに第 1、第 2 の面上の 2 点を結ぶ線分上を連続的に移動するように ZMP 目標位置を設定すると共に、第 3 の面を、その法線ベクトルが第 1 の面の法線ベクトルから第 2 の面の法線ベクトルに連続的に変わり、かつ ZMP 目標位置を常に含むように設定する如く構成したにより、面が異なるときも ZMP を連続的に移動させることができ、安定した歩容を実現することができる。

【0010】

【実施例】以下、脚式移動ロボットとして 2 足歩行の脚式移動ロボットを例にとって、この発明の実施例を説明する。図 1 はそのロボット 1 を全体的に示す説明スケルトン図であり、左右それぞれの脚部リンク 2 に 6 個の関節を備える（理解の便宜のために各関節をそれを駆動する電動モータで示す）。該 6 個の関節は上から順に、腰の脚部回旋用（z 軸まわり）の関節 10R、10L（右側を R、左側を L とする。以下同じ）、腰のロール方向（x 軸まわり）の関節 12R、12L、同ピッチ方向（y 軸まわり）の関節 14R、14L、膝部のピッチ方向の関節 16R、16L、足首部のピッチ方向の関節 18R、18L、同ロール方向の関節 20R、20L となっており、その下部には足平 22R、22L が装着されると共に、最上位には筐体（上体）24 が設けられ、その内部には制御ユニット 26 が格納される。

【0011】上記において腰関節は関節 10R（L）、12R（L）、14R（L）から構成され、また足関節は、関節 18R（L）、20R（L）から構成される。また、腰関節と膝関節との間は大腿リンク 32R、32L で、膝関節と足関節との間は大腿リンク 34R、34L で連結される。ここで、脚部リンク 2 は左右の足についてそれぞれ 6 つの自由度を与えられ、歩行中にこれらの $6 \times 2 = 12$ 個の関節（軸）をそれぞれ適宜な角度に駆動することで、足全体に所望の動きを与えることができ、任意に 3 次元空間を歩行することができる様に構成される。先に述べた様に、上記した関節は電動モータからなり、更にはその出力を倍力する減速機などを備えるが、その詳細は先に本出願人が提案した出願（特願平 1-324218 号、特開平 3-184782 号）などに述べられており、それ自体はこの発明の要旨とするこ

ろではないので、これ以上の説明は省略する。

【0012】図 1 に示すロボット 1 において、足首部には公知の 6 軸力センサ 36 が設けられ、足平を介してロボットに伝達される x、y、z 方向の力成分 F_x 、 F_y 、 F_z とその方向まわりのモーメント成分 M_x 、 M_y 、 M_z とを測定し、足部の着地の有無と支持脚に加わる力の大きさと方向とを検出する。また足平 22R

（L）の四隅には静電容量型の接地スイッチ 38（図 1 で図示省略）が設けられて、足平の接地の有無を検出する。更に、筐体 24 には傾斜センサ 40 が設置され、x-z 平面内と y-z 平面内の z 軸に対する、即ち、重力方向に対する傾斜角度と傾斜角速度を検出する。また各関節の電動モータには、その回転量を検出するロータリエンコーダが設けられる。更に、図 1 では省略するが、ロボット 1 の適宜な位置には傾斜センサ 40 の出力を補正するための原点スイッチ 42 と、フェール対策用のリミットスイッチ 44 が設けられる。これらの出力は前記した筐体 24 内の制御ユニット 26 に送られる。

【0013】図 2 は制御ユニット 26 の詳細を示すブロック図であり、マイクロ・コンピュータから構成される。そこにおいて傾斜センサ 40 などの出力は A/D 変換器 50 でデジタル値に変換され、その出力はバス 52 を介して RAM 54 に送られる。また各電動モータに隣接して配置されるエンコーダの出力はカウンタ 56 を介して RAM 54 内に入力されると共に、接地スイッチ 38 などの出力は波形整形回路 58 を経て同様に RAM 54 内に格納される。制御ユニット内には CPU からなる第 1、第 2 の演算装置 60、62 が設けられており、第 1 の演算装置 60 は後で述べる様に生成されて ROM 64 に格納されている歩容（腰軌道、足平軌道）を読み出して目標関節角度を算出して RAM 54 に送出する。また第 2 の演算装置 62 は RAM 54 からその目標値と検出された実測値とを読み出し、各関節の駆動に必要な制御値を算出し、D/A 変換器 66 とサーボアンプを介して各関節を駆動する電動モータに出力する。

【0014】続いて、この制御装置の動作を歩容生成を中心に説明する。

【0015】図 3 はその動作を示すフロー・チャートである。この制御においては、図 4 に示す様な二面角 θ で接する 2 つの床面（平面）の境界において、2 本の脚部がそれぞれ異なる床面に同時に接地しているときの歩容生成に焦点をおく。ここで左脚部の足底（足平 22L の底面。「第 1 足底」と称する）の接地面を第 1 接地面、右脚部の足底（足平 22R の底面。「第 2 足底」と称する）の接地面を第 2 接地面とする。ここで「接地面」は床面上のロボットと床との接触領域の意味で使用する。また第 1、第 2 接地面を含む平面を、「第 1 接地床面」、「第 2 接地床面」と称する。尚、「床面」は、実際の床が途中で切れていても無限大の広がりを持つ、数学的意味合いの平面とする。

【0016】図3フロー・チャートにおいては、先ずS10において絶対座標系、第1座標系、第2座標系を設定する。絶対座標系のz軸は、鉛直方向上向きにとる。第1座標系は第1接地床面をx-y平面とする相対座標系を、第2座標系は第2接地床面をx-y平面とする相対座標系を示す。図4に示す如く、第1、第2座標系は簡略化のため足関節18、20R(L)の交点の直下に原点をおき、そのx軸を進行方向にとると共に、そのz軸を第1、第2接地床面の法線ベクトルと同一向きにと*

$f_{i \rightarrow (p \rightarrow)}$: 第i接地面から見た第i接地圧分布

$$(f_{i x \rightarrow (p \rightarrow)}, f_{i y \rightarrow (p \rightarrow)}, f_{i z \rightarrow (p \rightarrow)})^T$$

【0018】また第i接地面からロボット1に作用する力とそのモーメントとを第i床反力と呼び、数2の様に記述する。

第i接地面から見た第i床反力：(E_i, U_i, Z_i, F_i, M_i)^T

ここで、

Z_i : 第i座標系から見た第i接地圧重心位置(第i床反力作用点とも言う)

$$(Z_{i x}, Z_{i y}, Z_{i z})^T$$

Z_{i x}は、第i接地面から見た第i接地圧分布 $f_{i z \rightarrow (p \rightarrow)}$ の重心x座標

Z_{i y}は、第i接地面から見た第i接地圧分布 $f_{i z \rightarrow (p \rightarrow)}$ の重心y座標

Z_{i z}は0

F_i : 第i座標系から見た第i床反力の力成分

$$(F_{i x}, F_{i y}, F_{i z})^T$$

M_i : 第i座標系から見た第i床反力のモーメント成分

$$(M_{i x}, M_{i y}, M_{i z})^T$$

ただし、 $M_{i x} = 0$ かつ $M_{i y} = 0$

【0020】図5に示す様に、接地圧重心点は、z方向のモーメントM_zを除き、x、y方向のモーメントM_x、M_yが生じない様な床反力の作用点を意味する。全ての接地面で発生する床反力の合力と合モーメントとを全床反力と呼ぶ。床反力は図6に示す様に、ロボット1に作用する重心mgと慣性力-maの合力に対抗して生ずる反力であり、これらロボット1に作用する力が動力学的に平衡しているとき、ロボット1は安定に歩行する。

【0021】続いてS12に進み、第1足底を支持脚とする片脚支持期の最後の時刻をt_sとし、両脚支持期を経て第2足底を支持脚とする片脚支持期に移る時刻をt

※る。尚、第1、第2接地面の法線ベクトルの向きは、床内部から床表面に向かう向きにとる。座標系の各軸の向きは回転マトリックスE_iで示す(「i」は数字(絶対座標系は0とする))を示す。以下同じ)。また第i接地面で発生する接地圧分布を第i接地圧分布と呼び、図5に示す如く、第i接地面から見た第i接地圧分布を数1に示す様に $f_{i \rightarrow (p \rightarrow)}$ と記述する。

【0017】

【数1】

【0019】

【数2】

eとし、時刻t_sのときの第1足底の接地圧重心点と時刻t_eのときの第2足底の接地圧重心点とを求める。続いて、両者を結んで仮想ZMPの軌道を図4に破線で示す様に設定する。図示例の様に、両脚支持期の初めの期間に、それまで支持脚であって脚がベタ足で接地している場合には、時刻t_sにおける第1足底接地圧重心点は足平の中央付近に設定しておき、ベタ足期間が終了する頃につま先(足平22L先端)に移動させれば、安定余裕の高い歩容を生成することができる。両脚支持期にベタ足期間がない場合には、第1足底の接地圧重心点は、両脚支持期ではつま先に固定しておけば良い。第2足底の接地圧重心点は、かかと付近(足平22R後端)に設

定する。尚、時刻 t_s では、第 2 足底に床反力が発生していないので、ZMP 位置と第 1 足底の接地圧重心点は一致する。同様に、時刻 t_e では ZMP 位置と第 2 足底の接地圧重心点は一致する。

【0022】ここで、第 1 座標系から見た第 1 足底接地圧重心点を $Z1 \rightarrow$ とし、第 2 座標系から見た第 2 足底接地圧重心点を $Z2 \rightarrow$ と記述する。従って、絶対座標系か

$U_i \rightarrow$: 絶対座標系から見た第 i 座標系の原点座標

$$(U_{ix}, U_{iy}, U_{iz})^T$$

E_i : 絶対座標系から見た第 i 座標系の基準ベクトルを列に持つ行列

E_i の第 1 行 ($e_{i11}, e_{i12}, e_{i13}$)

E_i の第 2 行 ($e_{i21}, e_{i22}, e_{i23}$)

E_i の第 3 行 ($e_{i31}, e_{i32}, e_{i33}$)

【0024】次いで、S14に進んで第 1 座標系を設定する。第 1 座標系の原点は、第 1 足底接地圧重心点とする。即ち、 $U11 \rightarrow = U1 \rightarrow + E1Z1 \rightarrow$ と記述する。ここで、第 1 座標系の z 軸の向きは、第 1 座標系の z 軸の向きに一致させる。第 1 座標系の y 軸の方向は、第 2 接地床面の法線ベクトルと第 1 接地床面の法線ベクトルの外積の向きにとる。即ち、2つの平面の交線の向きにとる。

【0025】次いで、S16に進んで第 2 座標系を設定する。第 2 座標系の原点は、第 2 足底接地圧重心点とする。即ち、 $U21 \rightarrow = U2 \rightarrow + E2Z2 \rightarrow$ とする。また第 2 座標系の z 軸の向きは、第 2 座標系の z 軸の向きに一致させる。また第 2 座標系の y 軸の方向は、第 2 接地床面の法線ベクトルと第 1 接地床面の法線ベクトルの外積の向きにとる。これは図 4 に示す如く、第 1 座標系の y 軸の向きと同じである。

【0026】次いで S18 に進み、時間と共に移動する第 3 の平面 (仮想床面) を想定し、これを第 3 床面と呼ぶ。そして第 3 床面を $x-y$ 平面に含む第 3 座標系

$$U31 \rightarrow = h \left((U21 \rightarrow + E2Z2 \rightarrow) - (U11 \rightarrow + E1Z1 \rightarrow) \right) + (U11 \rightarrow + E1Z1 \rightarrow)$$

【0028】尚、関数 h の簡単な例は、数 5 の式となる。

【0029】

【数 5】

$$h = (t - t_s) / (t_e - t_s)$$

【0030】次いで S20 に進んで、ロボット 1 の運動から動学的に求められる仮想床面上の ZMP 位置が、第 3 座標系の原点に一致する様にロボットの軌道を生成する。ここで仮想床面上の ZMP とは、ロボットに作用する慣性力と重力の合力と合モーメントに、動学的

*ら見た第 1 足底接地圧重心点は、 $U1 \rightarrow + E1Z1 \rightarrow$ 、絶対座標系から見た第 2 足底接地圧重心点は、 $U2 \rightarrow + E2Z2 \rightarrow$ となる。尚、 U_i は並進ベクトルを、 E_i は前記した様に回転マトリックスである。並進ベクトル $U_i \rightarrow$ と回転マトリックス E_i は、数 3 の様に定義する。

【0023】

【数 3】

*系を想定する。第 3 座標系の原点は、仮想床面上の設定したい仮想 ZMP 位置に一致させるものとする。またその y 軸の向きについては、先に第 1 座標系と第 2 座標系とでそれらの y 軸の向きを一致させてあることから、第 3 座標系の y 軸も同一向きにする。設定したい仮想 ZMP 位置、即ち、第 3 座標系の原点位置 $U31 \rightarrow$ を、時刻 t_s から時刻 t_e までの間に、第 1 足底接地圧重心点 (即ち、 $U11 \rightarrow$) から第 2 足底接地圧重心点 (即ち、 $U21 \rightarrow$) へ徐々に移し、絶対座標系から第 3 座標系への回転変換マトリックス $E31$ を、 $E11$ から $E21$ へ徐々に変化させる。図 7 にそれを示す。ここで、具体的には同図に示す如く、 $U31 \rightarrow$ を、 $U11 \rightarrow$ と $U21 \rightarrow$ を端点とする線分上を、 $U11 \rightarrow$ から $U21 \rightarrow$ に徐々に移動させる。この場合、時刻 t_s で値が零、時刻 t_e で値が 1 となる関数 h を設定することによって、 $U31 \rightarrow$ を数 4 の様に表すことができる。

【0027】

【数 4】

に平衡する各足底に作用する床反力の合力と合モーメントを、仮想床面の 1 点に作用する合力と合モーメントに変換したときに、全モーメントの床面法線方向成分以外の成分が零となる作用点のことを言う。

【0031】ところで、図示のロボット 1 の関節自由度は 12 個あるので、支持脚足平 22R (L) を基準として腰 (左右の腰関節の中心) の位置と姿勢、遊脚足平 22L (R) の位置と姿勢を決定すれば、12 個の関節角度の全てを決定することができる。このとき、関節角度が加速度まで連続に変化するためには、ロボットの腰の位置と姿勢、遊脚足平の位置と姿勢が、加速度まで連続

に変化すれば良い。しかし、動力学から求められる ZMP が設定された ZMP 位置に一致する様な腰の位置は直接的に設計することができないので、以下の様にして腰軌道を設計する。

【0032】即ち、ZMP とロボットの運動量の関係 *

$$F a 0 + m g = m G c d d$$

* は、ニュートン・オイラー方程式と力の作用点の変換式によって数 6 から数 9 に示す様に関係づけられる。図 8 に使用する物理量の定義を示す。

【0033】

【数 6】

(ニュートン方程式)

【0034】

※ ※ 【数 7】

$$M a 0 + G c \times (m g) = L w d + L v d \quad (\text{オイラー方程式})$$

【0035】

★ ★ 【数 8】

$$F a 0 = E 3 1 F a 3 1 \quad (\text{力の座標変換式})$$

【0036】

☆ ☆ 【数 9】

$$M a 0 = E 3 1 M a 3 1 + (U 3 1 + E 3 1 Z 3 1) \times E 3 1 F a 3 1$$

(作用点とモーメントの関係および座標変換の式)

【0037】これらより、数 10 に示す式が得られる。 ◆ 【数 10】

【0038】

$$E 3 1 M a 3 1 = L w d + L v d - G c \times (m g)$$

$$- (U 3 1 + E 3 1 Z 3 1) \times (m G c d d - m g)$$

【0039】ところで、Z 3 1 は ZMP であるので、数 11 の方程式を満足する。

【0040】

【数 11】

$$M a 3 1 x = M a 3 1 y = 0$$

$$f (H i p x, H i p y, H i p z, \dots) = 0$$

【0043】上記した数 10、数 11、数 12 の式を満足する様に、腰軌道を設定していけば、実際の ZMP が目標の位置となる腰軌道を生成することができる。数 10 の式の形から明らかな様に、重心の加速度と ZMP とが同一の式に乗算項として入っているので、ZMP の移動が連続的であり、仮想床面の法線方向の方向角の変化が連続的であれば、腰軌道は加速度まで連続になる。ただし、このとき、足平の位置・姿勢および腰の姿勢は連続でなければならない。以上によって歩容が決定される。

【0044】次いで S 2 2 に進んで決定された歩容に基づいて 12 個の関節の目標角度を計算し、次いで S 2 4 に進んで姿勢安定化も考慮してサーボ制御値を計算するが、これは公知の技術なので、説明は省略する。

【0045】この実施例は上記の如く構成したので、不整地などにおいて左右の脚部が法線方向が異なる 2 つ以上の床面に同時に接地している様な場合でも、安定余裕の高い歩容を生成することができる。これについて、図 9、図 10 を参照して説明する。図 9 は図 4 に示した様な二面角 θ をなして交差する 2 つの平面に両脚が接地し

【0041】数 10 の式と数 11 の式だけでは腰位置運動の自由度が 1 つ残ってしまうので、数 12 の式の様な腰位置に関する拘束条件式を 1 つ加える。

【0042】

【数 12】

た状態を上から見た展開図であり、従来の ZMP 概念を用いて ZMP を設定した例を示す説明図である。また図 10 は同様の展開図にこの発明に係る拡張した ZMP 概念を用いて設定した ZMP の例を示す説明図である（正確にはこの発明では仮想床面に ZMP を設定する）。従来の概念を用いて ZMP を設定した図 9 の場合には、交線を超えた位置で平面が異なることから、ZMP 軌道の連続性が失われる。即ち、ZMP は力 F と鉛直軸まわりのモーメント成分 M_z とから表現されるが、このうちモーメント成分 M_z は歩容で決定されてしまうものであって操作することができない。従って、従来の ZMP 概念によれば、平面が切り替わったところで ZMP が不連続となり、しかもその飛び量を予め把握することができず、ZMP が最小凸多角形の中に確実が存在するか否かを保証することができない。最小凸多角形の外に出ても、足底の摩擦力が無限大であれば良く姿勢を保持できるが、足底の摩擦力は一般に有限であるので、結果的に姿勢を崩して転倒する恐れがある。

【0046】それに対し、この発明によるときは、仮想的な床面を想定して仮想 ZMP 軌道を設定していること

から、図 10 に示す様に平面が切り替わっても ZMP を最小凸多角形において常に中央付近に位置させることが可能となる。また生成する軌道、特に腰の軌道を加速度まで連続させると共に、仮想 ZMP 軌道も図 4、図 7 に示す様に連続的に移動させる様にしたので、ロボットの滑らかな動きを実現することができ、足底と床面との接地感を高めることができ、更にサーボモータの目標値への追従制御も容易となる。

【0047】また、この発明による拡張された ZMP 概念を用いることにより、片脚支持期において、支持脚足底接地面に前記仮想床面を一致させ、かつ支持脚足底の接地圧重心点の設計軌道（片脚支持期では ZMP 設定軌道と同一）に前記仮想 ZMP を一致させることにより、従来通りの片脚支持期歩容も同様に生成することができる。

【0048】図 11 はこの発明の第 2 実施例を示す、図 7 と同様の接地圧重心と第 3 1 座標系の遷移を示す説明図である。この実施例の場合には、実際の床面（第 1、第 2 接地床面）上に設定した。

【0049】尚、上記において、第 1 1 座標系および第 2 1 座標系の y 軸の方向は、第 2 接地床面の法線ベクトルと第 1 接地床面の法線ベクトルの外積の向きにとらな *

$$\begin{aligned} \text{合ベクトル} &= \text{第 1 1 座標系の } z \text{ 軸方向ベクトル} * (1 - k) \\ &+ \text{第 2 1 座標系の } z \text{ 軸方向ベクトル} * k \end{aligned}$$

ただし、

k は時刻 t s で値が 0、時刻 t e で値が 1 となる関数である。

【0054】尚、上記において ZMP 軌道が連続である例を示したが、それに限られるものではなく、不連続であってもある程度の効果を挙げることができる。また、床面は平面でなくても良く、その意味で特許請求の範囲で『面』と記述した。

【0055】更に、上記において第 3 1 座標系の原点を軌道上に固定したが、それに限るものではなく、適宜移動させても良い。

【0056】更に、上記において腰軌道を生成する例を示したが、それに限られるものでなく、重心軌道を生成しても良い。更に、腰軌道を生成する際に収束演算を用いる場合、収束演算回数に制限を与えた近似計算を用いるものでも良い。

【0057】更に、上記において腰軌道などの歩行パターンを予め設定しておく場合に適用する例を示したが、それに限られるものではなく、歩行のときリアルタイムに求める様にした技術にも応用可能である。

【0058】更に、上記において 2 足歩行の脚式移動ロボットを例にとって説明してきたが、それに限られるものではなく、3 足以上の脚式移動ロボットにも妥当するものである。

* くても良い。ただし、その場合には前記の仮想床面の向きを設定するときに、第 1 実施例の様な簡便な手法を使用することができず、例えば仮想床面の向きをオイラー角を用いて表現し、オイラー角を徐々に変化させる様な手法が必要となる。

【0050】尚、第 3 1 座標系の原点位置 U 3 1 → の移動を比例配分で行う手法を示したが、この他にも種々な関数を用いて良い。逐次表現により関数 h を定義すれば、リアルタイムの歩容変更にも対応することができるので、一層良いであろう。

【0051】尚、第 3 1 座標系の z 軸の向きを設定する手法は先に例示したものに限られるものではなく、第 3 1 座標系の z 軸の向きと第 1 1 座標系の z 軸の向きとの間の角度と第 2 1 座標系の z 軸の向きと第 1 1 座標系の z 軸の向きとの間の角度比を、時刻 t s で値が 0、時刻 t e で値が 1 となる様に徐々に変化させても良い。

【0052】更には、第 3 1 座標系の z 軸方向ベクトルを、次の数 13 に示す式で与えられる合ベクトルの向きに設定しても良い。

【0053】

【数 13】

【0059】

【発明の効果】請求項 1 項にあっては、基体と、それに連結された複数本の脚部とを備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、前記ロボットが予定する歩行面が第 1、第 2 の少なくとも 2 つの面を含むとき、第 3 の面と前記ロボットの ZMP 目標位置を仮想的に設定する設定手段、及び動力学によって求められる ZMP 位置が前記設定された ZMP 目標位置となるように前記ロボットの歩容を決定する歩容決定手段を備え、前記設定手段は、前記第 1、第 2 の面上の 2 点を結ぶ線分上を連続的に移動するように前記 ZMP 目標位置を設定すると共に、前記第 3 の面を、その法線ベクトルが前記第 1 の面の法線ベクトルから前記第 2 の面の法線ベクトルに連続的に変わり、かつ前記 ZMP 目標位置を常に含むように設定する如く構成したので、不整地など 2 つ以上の面が連続する場所を移動するときも安定した歩容で歩行することができる。

【0060】請求項 2 項にあっては、基体と、それに連結された 2 本の脚部とを備えた 2 足歩行の脚式移動ロボットの歩容生成装置において、前記ロボットが予定する歩行面が第 1、第 2 の少なくとも 2 つの面を含むとき、

前記脚部の一方の先端の第 1 の足底を支持面とする片脚支持期から両脚支持期を経て前記脚部の他方の先端の第 2 の足底を支持面とする片脚支持期に移行する際、前記第 1 の足底の接地する第 1 の面から前記第 2 の足底の接地する第 2 の面に連続的に変化する仮想的な第 3 の面を想定し、その上に前記ロボットの ZMP 目標位置を仮想的に設定する設定手段、及び動力学によって求められる ZMP 位置が前記設定された ZMP 目標位置となるように前記ロボットの歩容を決定する歩容決定手段、を備え、前記設定手段は、前記第 1、第 2 の面上の 2 点を結ぶ線分上を連続的に移動するように前記 ZMP 目標位置を設定すると共に、前記第 3 の面を、その法線ベクトルが前記第 1 の面の法線ベクトルから前記第 2 の面の法線ベクトルに連続的に変わり、かつ前記 ZMP 目標位置を常に含むように設定如く構成したので、本来的に安定性の低い 2 足歩行の脚式移動ロボットが不整地など 2 つ以上の面が連続する場所を移動するときも、安定した歩容で歩行することができる。

【0061】請求項 3 項にあっては、前記設定手段は、前記第 1、第 2 の面に前記第 1、第 2 の足底の接地圧重心点をそれぞれ設定すると共に前記第 1、第 2 の足底の接地圧重心点を結ぶ線分上を連続的に移動するように前記 ZMP 目標位置を設定する如く構成したので、簡易な構成でありながら、本来的に安定性の低い 2 足歩行の脚式移動ロボットが不整地など 2 つ以上の面が連続する場所を移動するときも、安定した歩容で歩行することができる。

【0062】

【0063】

【図面の簡単な説明】

【図 1】この発明に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置を全体的に示す概略図である。

【図 2】図 1 に示す制御ユニットの説明ブロック図である。

*

*【図 3】この発明に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置の動作を示すフロー・チャートである。

【図 4】図 1 のロボットが歩行を予定する 2 つ以上の平面が連続する歩行面を示す説明図である。

【図 5】図 3 フロー・チャートで用いる接地圧重心点の定義を示す説明図である。

【図 6】図 1 に示すロボットに作用する力を簡略的に示す説明図である。

【図 7】図 3 フロー・チャートで用いる仮想床面に設定する第 3 1 座標系の移動軌跡を示す説明図である。

【図 8】図 3 フロー・チャートで用いる軌道生成に使用する式の定義を示す説明図である。

【図 9】従来の ZMP 概念を用いて 2 以上の連続する平面に設定する ZMP を示す説明図である。

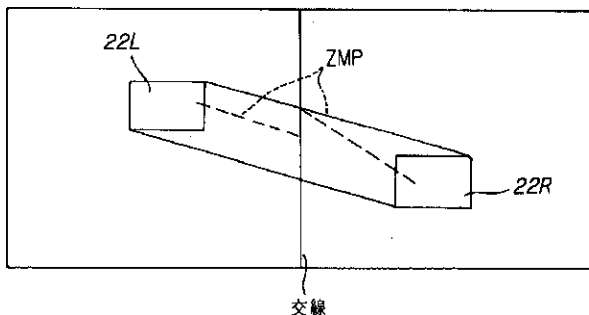
【図 10】この発明による拡張した ZMP 概念を用いて 2 以上の連続する平面に設定する ZMP を示す説明図である。

【図 11】この発明の第 2 実施例を示す図 7 と同様の第 3 1 座標系の移動軌跡を説明する説明図である。

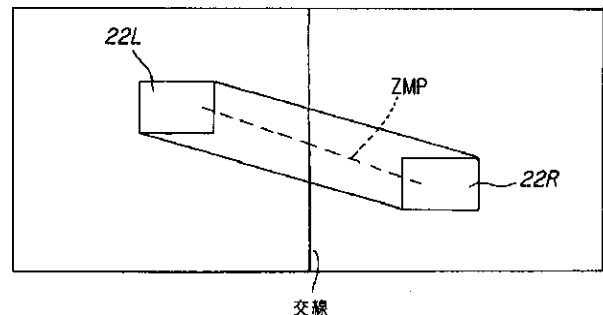
【符号の説明】

1	脚式移動ロボット（2 足歩行ロボット）
2	脚部リンク
10 R, 10 L	脚部回旋用の関節
12 R, 12 L	腰部のロール方向の関節
14 R, 14 L	腰部のピッチ方向の関節
16 R, 16 L	膝部のピッチ方向の関節
18 R, 18 L	足首部のピッチ方向の関節
20 R, 20 L	足首部のロール方向の関節
22 R, 22 L	足平
24	筐体
26	制御ユニット
36	6 軸力センサ

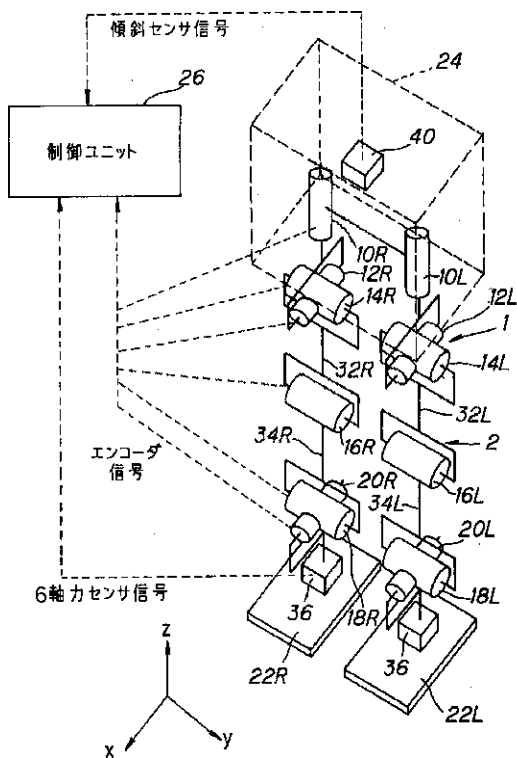
【図 9】



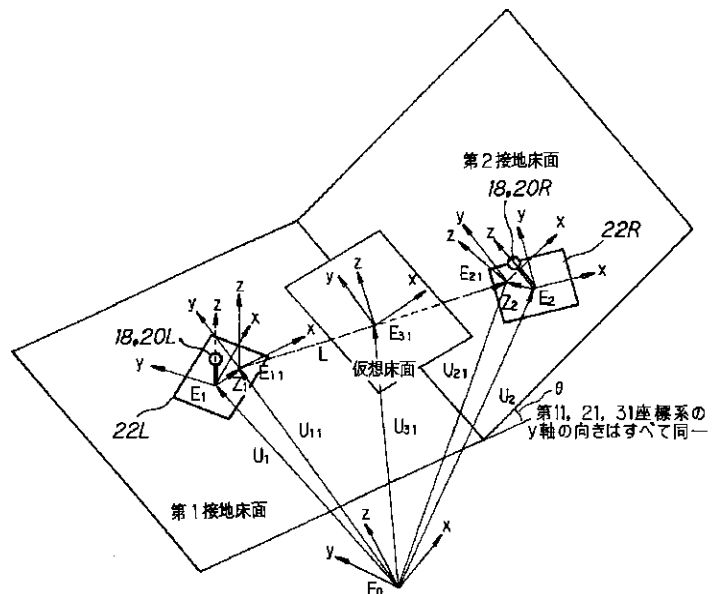
【図 10】



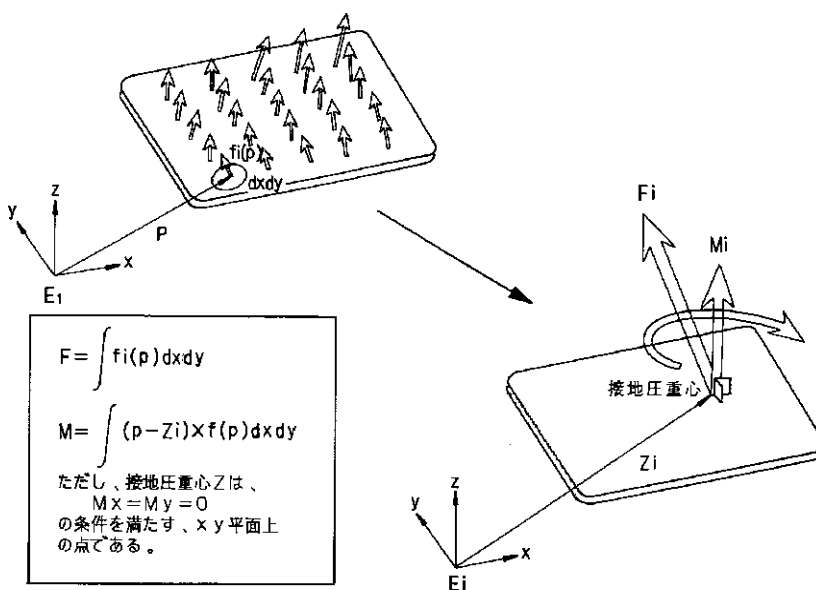
【図1】



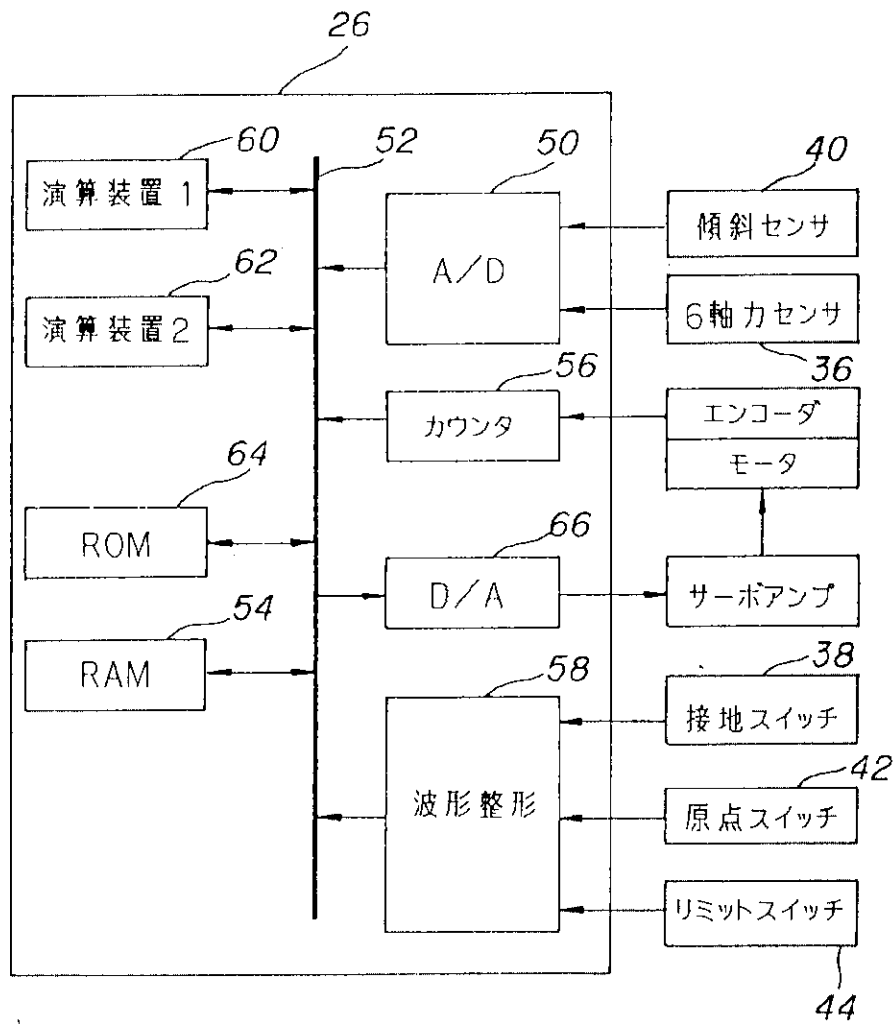
【図4】



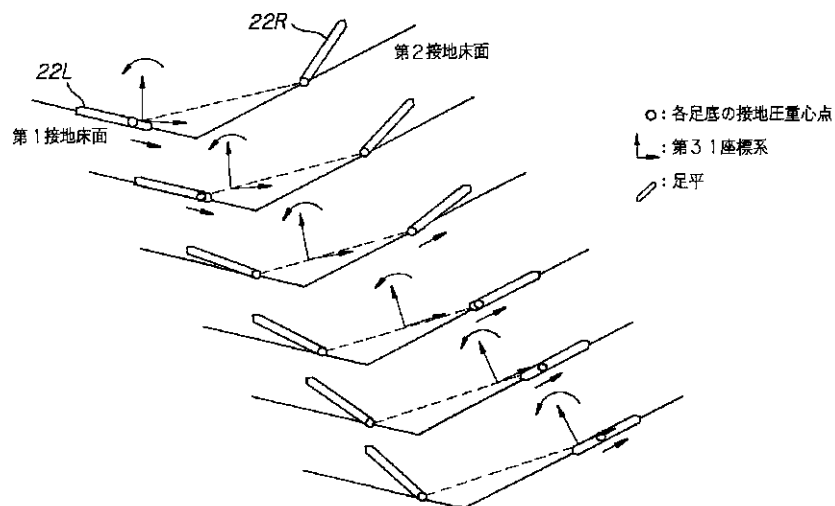
【図5】



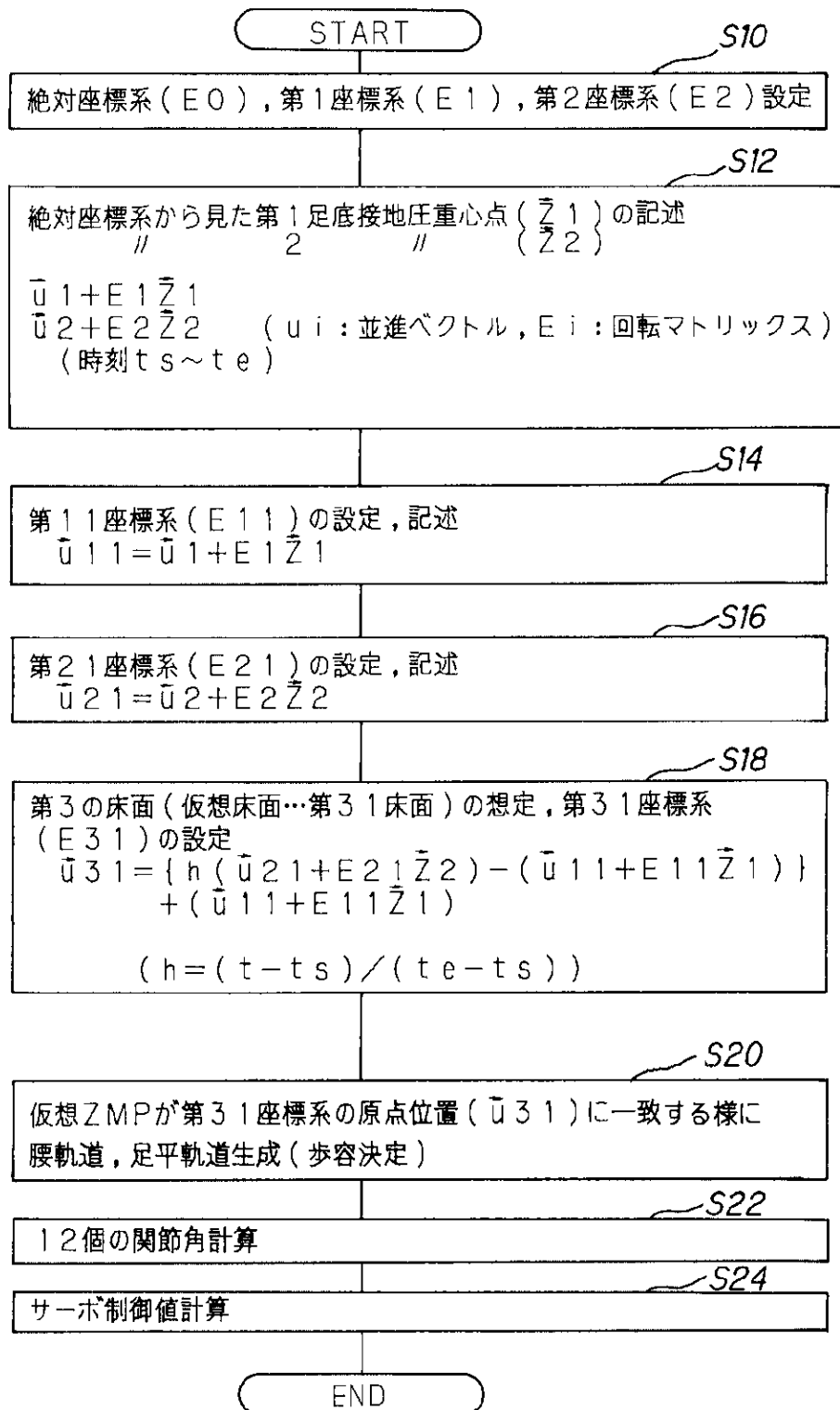
【図2】



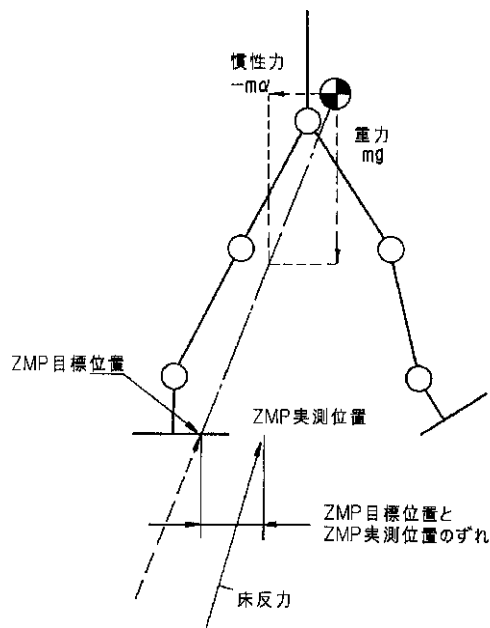
【図7】



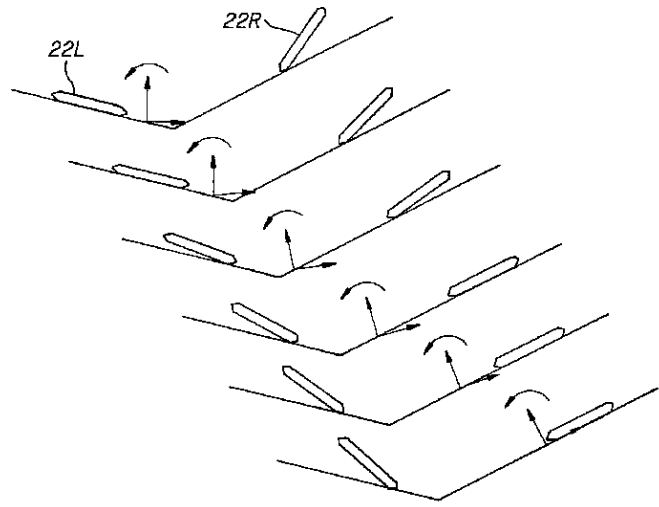
【図3】



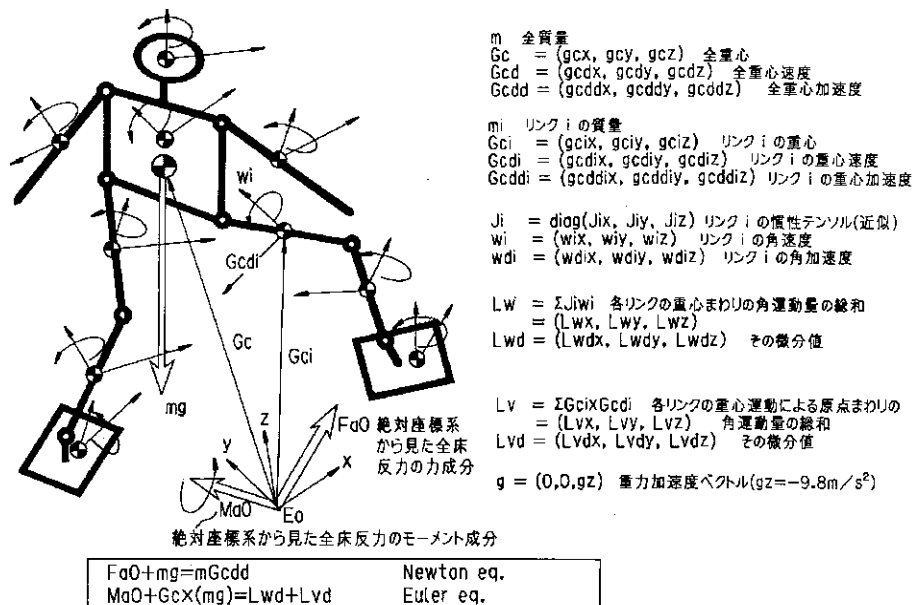
【図6】



【図11】



【図8】



フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, D B名)

B25J 5/00

B25J 9/10