

(19)日本国特許庁（J P）

(12) 特 許 公 報（B 2）

(11)特許番号

特許第3148830号
(P3148830)

(45)発行日 平成13年 3 月26日 (2001. 3. 26)

(24)登録日 平成13年 1 月19日 (2001. 1. 19)

(51)Int.Cl.⁷

識別記号

F I

B 2 5 J 5/00
13/08

B 2 5 J 5/00
13/08

F
Z

請求項の数 4 (全 31 頁)

(21)出願番号 特願平4-137886

(22)出願日 平成 4 年 4 月30日 (1992. 4. 30)

(65)公開番号 特開平5-305586

(43)公開日 平成 5 年11月19日 (1993. 11. 19)

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

(74)代理人 100081972

弁理士 吉田 豊 (外 1 名)

審査官 八木 誠

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 脚式移動ロボットの歩行制御装置

1

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】 上体と、それに関節を介して連結されると共に、少なくとも 1 個の関節を有する複数本の脚部を備える脚式移動ロボットの歩行制御装置において、

a . 前記脚部の関節と前記脚部の先端を連結する衝撃吸収機構、

b . ロボットの目標姿勢を生成する目標歩容生成手段、

c . 前記ロボットに作用する床反力を測定してその作用点たる Z M P 実測位置を検出する検出手段、

d . 前記検出された Z M P 実測位置を目標とする Z M P 位置と比較し、その偏差を求める偏差算出手段、

および

e . 前記求められた偏差に応じて前記目標姿勢を修正する目標姿勢修正手段、を備えると共に、前記目標姿勢修正手段は、前記修正した目標姿勢に前記ロボットの関節

2

変位を追従させ、よって前記求められた偏差が減少するように、前記衝撃吸収機構の変形による応力を生じさせることを特徴とする脚式移動ロボットの歩行制御装置。

【請求項 2】 上体と、それに関節を介して連結されると共に、少なくとも 1 個の関節を有する複数本の脚部を備える脚式移動ロボットの歩行制御装置において、

a . 前記脚部の関節と前記脚部の先端を連結する衝撃吸収機構、

b . 前記ロボットの目標姿勢を生成する目標歩容生成手段、

c . 前記ロボットに作用する、所定の基準点まわりの床反力モーメントを検出する床反力モーメント検出手段、

d . 前記検出された床反力モーメントを目標とする床反力モーメントと比較し、その偏差を求める偏差算出手段、

10

および

e. 前記求められた偏差に応じて前記目標姿勢を修正する目標姿勢修正手段、を備えると共に、前記目標姿勢修正手段は、前記修正した目標姿勢に前記ロボットの関節変位を追従させ、よって前記求められた偏差が減少するように、前記衝撃吸収機構の変形による応力を生じさせることを特徴とする脚式移動ロボットの歩行制御装置。

【請求項 3】 前記所定の基準点が目標とする ZMP 位置であ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行制御装置。

【請求項 4】 さらに、

f. 前記上体の傾斜角度および / または傾斜角速度を検出する検出手段、

g. 前記検出された上体の傾斜角度および / または傾斜角速度を指令値と比較し、その偏差を第 2 の偏差として求める傾斜偏差算出手段、

を備えると共に、前記目標姿勢修正手段は、前記偏差算出手段によって求められた偏差および傾斜偏差算出手段によって求められた第 2 の偏差に応じて前記目標姿勢を修正することを特徴とする請求項 1 項から 3 項のいずれかに記載の脚式移動ロボットの歩行制御装置。

【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行制御装置に関し、より具体的には予期しない凹凸があっても安定に歩行できる様にしたものに関する。

【0002】

【従来の技術】脚式移動ロボットとしては例えば、特開昭 62 - 97006 号公報記載の 2 足歩行のものが知られている。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】脚式移動ロボットは、車輪式、クローラ式などの他の形態のロボットに比較して支持多角形の変化が大きいため、姿勢が不安定になりやすく、特に 2 足歩行ロボットの場合にはそれが顕著となる。

【0004】従って、この発明の第 1 の目的は、脚式移動ロボットにおいて歩行する床に予期しない凹凸、傾斜があっても、その影響を受けることなく、常に安定した姿勢を保って歩行することができる様にした脚式移動ロボットの歩行制御装置を提供することにある。

【0005】また、このような脚式移動ロボットが安定に歩行するためには、所定の力学的な安定条件を満足しなければならない。従って、ロボットはリアルタイムにその力学問題を解きながら歩行するか、あるいは予め解いておいて歩行することになる。そのときに使用されるロボットのモデルが、実際のロボットを十分に精度良く近似していれば良いが、実際にはモデル化の困難な要素が多く含まれていたり、種々の制約、例えば演算処理時間の短縮やモデル製作労力の軽減などから、近似モデルが

使用されることが多い。

【0006】従って、この発明の第 2 の目的は、ロボットの姿勢復元力を可能な限り一定に保たせてロボットを常に一定の復元力をもった倒立振子で近似することができる様に、制御系の線形化を図る様にした脚式移動ロボットの歩行制御装置を提供することにある。

【0007】更には、このような脚式移動ロボットにおいては、床から受ける反力とロボット側から床に作用する重力と慣性力との合力とをバランスさせて歩行することになるが、その着地時の衝撃力が大きいと、姿勢を崩す一因となり、安定した歩行を期待することができない。

【0008】従って、この発明の第 3 の目的は、ロボットが受ける着地衝撃を可能な限り低減して安定した姿勢で歩行することができる様にした脚式移動ロボットの歩行制御装置を提供することにある。

【0009】

【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例えば請求項 1 項に示す如く、上体と、それに関節を介して連結されると共に、少なくとも 1 個の関節を有する複数本の脚部を備える脚式移動ロボットの歩行制御装置において、前記脚部の関節と前記脚部の先端を連結する衝撃吸収機構、ロボットの目標姿勢を生成する目標歩容生成手段、前記ロボットに作用する床反力を測定してその作用点たる ZMP 実測位置を検出する検出手段、前記検出された ZMP 実測位置を目標とする ZMP 位置と比較し、その偏差を求める偏差算出手段、および前記求められた偏差に応じて前記目標姿勢を修正する目標姿勢修正手段、を備えると共に、前記目標姿勢修正手段は、前記修正した目標姿勢に前記ロボットの関節変位を追従させ、よって前記求められた偏差が減少するように、前記衝撃吸収機構の変形による応力を生じさせるように構成した。

【0010】

【作用】衝撃吸収機構を備えると共に、ZMP 実測位置が ZMP 目標位置よりずれたときは、その偏差に応じて衝撃吸収機構の変形による応力を生じさせることから、予期せぬ凹凸を踏んだときも迅速に姿勢の崩れを極力抑えることができると共に、偏差に応じて行うことから、ロボットの復元力を一定にする、即ち、ロボットを常に一定の復元力をもった倒立振子で近似することができる、線形な制御特性を得ることができる。その結果、この安定化制御のみならず、他の種の安定化制御をも容易に採り入れることができる。また常に設計値通りの姿勢を保持することから、着地衝撃も効果的に減少することができる。

【0011】

【実施例】以下、脚式移動ロボットとして 2 足歩行の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、腰の脚部回転用の関節 1 0 R, 1 0 L (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 1 2 R, 1 2 L、同ピッチ方向 (y 軸まわり) の関節 1 4 R, 1 4 L、膝部のピッチ方向の関節 1 6 R, 1 6 L、足首部のピッチ方向の関節 1 8 R, 1 8 L、同ロール方向の関節 2 0 R, 2 0 L となっており、その下部には足平 2 2 R, 2 2 L が取着されると共に、最上位には上体 (筐体) 2 4 が設けられ、その内部には制御ユニット 2 6 が格納される。

【0 0 1 2】上記において腰関節は関節 1 0 R (L), 1 2 R (L), 1 4 R (L) から構成され、また足関節は、関節 1 8 R (L), 2 0 R (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 3 2 R, 3 2 L で、膝関節と足関節との間は大腿リンク 3 4 R, 3 4 L 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 - 3 2 4 2 1 8 号、特開平 3 - 1 8 4 7 8 2 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ところではないので、これ以上の説明は省略する。

【0 0 1 3】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 3 6 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 2 2 R (L) の四隅には静電容量型の接地スイッチ 3 8 (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、上体 2 4 には傾斜センサ 4 0 が設置され、x - z 平面内の z 軸に対する傾きとその角速度、同様に y - z 平面内の z 軸に対する傾きとその角速度を検出する。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 4 0 の出力を補正するための原点スイッチ 4 2 と、フェール対策用のリミットスイッチ 4 4 が設けられる。これらの出力は前記した上体 2 4 内の制御ユニット 2 6 に送られる。

【0 0 1 4】図 2 は制御ユニット 2 6 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 4 0 などの出力は A / D 変換器 5 0 でデジタル値に変換され、その出力はバス 5 2 を介して RAM 5 4 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 5 6 を介して RAM 5 4 内に入力されると共に、接地スイッチ 3 8 などの出力は波形整形回路 5 8 を経て同様に RAM 5 4 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 6 0, 6 2 が設けられており、第 1 の演算装置 6 0 は後述の如く ROM 6 4 に格納されている腰の姿勢の軌跡の特徴などを表すパラメータを読みだして基準歩容を生成し、次いでそれから目標関節角度 (関節駆動パターン) を算出して RAM 5 4 に送出する。また第 2 の演算装置 6 2 は後述の如く RAM 5 4 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て D / A 変換器 6 6 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。

【0 0 1 5】続いて、この制御装置の動作を説明する。

【0 0 1 6】図 3 はその動作を示す構造化フロー・チャート (PAD 図) である。同図を参照して説明すると、先ず S 1 0 において腰の軌跡の特徴を表すパラメータから腰の姿勢 (即ち、腰の傾きと向き) を算出する。次いで S 1 2 において ZMP 軌道の特徴を表すパラメータから運動方程式により導かれる ZMP 目標位置を算出する (ZMP 軌道が折れ線表現で表されているときは、特徴を表すパラメータも折点座標で与えられる。尚、ここで「ZMP」は、床反力によるモーメントが零となる床面上の点を意味する)。次いで S 1 4 において足平軌道の特徴を表すパラメータ、例えば着地位置、片脚支持期時間から両足平の位置、姿勢を算出し、次いで S 1 6 において無理な姿勢にならない腰の高さを求め、S 1 8 において ZMP が目標位置になるように腰の水平加速度、水平位置を求める。このように、S 1 0 から S 1 8 は基準歩容を作成する作業を示しており、この実施例の場合には前述の如く、腰の姿勢の軌跡の特徴などを表すパラメータが一步ごとのデータとして予め設定されており、それから腰、ZMP、足平の位置・姿勢などの軌道を算出して基準歩容とする。尚、後で述べる如く、この基準歩容から各関節の目標角度が具体的に算出される。

【0 0 1 7】次いで、S 2 0 に進んで脚コンプライアンス制御値の演算を行う。図 4 はその作業を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

【0 0 1 8】図 4 に従って説明を開始する前に、図 5 を参照してこの実施例で言うコンプライアンスについて説明する。

【0 0 1 9】先にも述べた様に、ロボットから床に作用する力 (ロボットの重力と慣性力の合力) と床からロボットに作用する床反力とが釣り合っていれば、ロボットは安定に歩行する。これを集中荷重系におきかえて説明すると、ZMP 実測位置 (実測床反力の中心点) が前記した ZMP 目標位置 (設計値で想定した床反力の中心点) に一致していれば、ロボットは設計値通りの姿勢を保って歩行する。従って、この発明においては最初の実

施例において、両脚に取りつけた 6 軸力センサ 3 6 から、後側の足にかかる床反力と前側の足にかかる床反力を測定し、これらの合力である総合の実測床反力を求め、その作用点である ZMP 実測位置を求めて ZMP 目標位置と比較する。そして、図 6 に示す様に、ZMP 実測位置が前側にずれていたら（この場合、ZMP 目標位置のまわりに図示の如くモーメントが生じてロボットを後傾させる）、そのずれ量に応じて前側の足平を垂直に持ち上げる（あるいは、そのずれ量に応じて後側の足平を垂直に下げるか、前側の足平を垂直に持ち上げつつ後側の足平を垂直に下げる）。この動作により、前側の足にかかる床反力が、後側の足にかかる床反力に比べて相対的に減少するので、ZMP 実測位置は後退して ZMP 目標位置に近づく。かかる制御をこの明細書では『脚コンプライアンス制御』と呼ぶ。即ち、この明細書では脚コンプライアンス制御は、ZMP 目標位置と ZMP 実測位置とのずれを解消する制御を意味する。あるいは、ZMP 目標位置まわりに発生したモーメントを解消する制御と言うこともできる。

【0020】即ち、動力学計算に基づく理想的な歩容に従ってロボットを歩行させるとき、両脚支持期に予期せぬ凹凸に遭遇するなどしてロボットがわずかに前傾したとする。この明細書で言う脚コンプライアンス制御を行わないとすると、ロボットは後側の足平が浮き上がり、全荷重が前側の足にかかり、その結果、床反力作用点（ZMP 実測位置）は、前側の足裏に移る。つまり、ロボットの傾斜に対してほとんど 2 値的に ZMP が変化する（図 7）。これに対し、脚コンプライアンス制御を行った場合には、実測床反力中心（ZMP 実測位置）が設計床反力中心（ZMP 目標位置）よりも前にずれたとき、前側の足平を持ち上げることで、上体が前傾したまま両脚が接地した姿勢になる。このときの ZMP 実測位置と ZMP 目標位置のずれは足平の持ち上げ高さに比例し、足平の持ち上げ高さは上体の傾斜角に比例するので、ZMP 実測位置と ZMP 目標位置のずれと、上体の傾斜角も比例する。尚、後で述べる様に、比例勾配は脚コンプライアンスの大きさに反比例し、脚コンプライアンスの量が大きいほどロボットの傾斜角に対する比例領域が拡大する（図 8）。

【0021】尚、この脚コンプライアンス制御は両脚支持期に限って行うものではなく、片脚支持期にも行って良い。また、脚コンプライアンス制御の発振を防ぎ、かつ荷重変動の高周波成分を機械的に吸収させるため、図 9 に示す様に、足関節 1 8, 2 0 R (L) 下部にばねやゴムなどの衝撃吸収機構を挿入しておくのが望ましい。

【0022】以上を前提として図 4 を参照して脚コンプライアンス制御値の演算について説明すると、先ず S 1 0 0 で 6 軸力センサ 3 6 の検出値を取り込む。次いで、S 1 0 2 において ZMP 実測位置を求める。図 1 0 を参照してその手法を説明すると、任意の原点まわりのモー

メント $M \rightarrow$ を求め、次いで力 $F \rightarrow$ を求め、次いで $M \rightarrow = F \rightarrow \times L \rightarrow$ となる距離ベクトル $L \rightarrow$ を求めて、その距離 L だけ平行移動させて床との交点を求めて終わる。

【0023】次いで、S 1 0 4 に進んで ZMP 実測位置と ZMP 目標位置とを比較し、ずれ方向、即ち、ZMP 実測位置が ZMP 目標位置よりずれているときは、前側にずれているか、後側にずれているかを判別すると共に、その差（ずれ量） x を距離で算出する。続いて S 1 0 6 に進んで算出された差 x に所定のゲイン K_f と実測床反力 F （ないしはその上下方向（ z 方向）成分 F_z ）を乗じて足平の姿勢補正量を求める（床反力に乘じない手法でも良い）。即ち、先に述べた様に、ZMP 実測位置が ZMP 目標位置より前にずれていれば、図 6 に示す様に設計床反力中心（ZMP 目標位置）まわりに発生したモーメントがロボットを後傾させるが、前側の足の足平を垂直に上げるか、後側の足の足平を垂直に下げるか、あるいは前側の足の足平を垂直に上げると共に、後側の足平を垂直に下げる様に足平の姿勢補正量を求めて S 1 0 8 で姿勢補正量に応じて足平の位置補正を行うことにより、逆方向のモーメントを生じさせる、即ち、ZMP 実測位置を ZMP 目標位置に近づけることができ、姿勢のバランスを回復させることができ、ロボットを設計値通りの姿勢で歩行させることができる。尚、このとき姿勢修正量（足平の持ち上げ高さ）は図 8 に示す様に、ずれ量 x に応じて決定され、ずれ量 x は上体の傾斜角に比例することから姿勢修正量は上体の傾斜角に比例する。即ち、ロボットの姿勢復元力と上体の傾斜角との比をロボットの姿勢復元力係数とすると、上体の傾斜角に応じて姿勢修正量を決定することにより、ロボットの姿勢復元力係数を可能な限り一定の値とすることができる。即ち、ロボットを常にある一定の復元力係数を持った倒立振子で近似することができ、線形な制御特性を得ることができる。尚、姿勢の修正方向は、実測 ZMP が設計 ZMP より後側にずれてロボットに前方向のモーメントが作用しているときは足平の駆動方向を逆にし、後側の足の足平を上げるか、前側の足の足平を下げるか、ないしはその両方を行う様に足平の姿勢補正量を求めることになる。

【0024】再び図 3 フロー・チャートに戻り、続いて S 2 2 に進んで足平の位置・姿勢と腰の位置・姿勢とから全 1 2 個の関節についてその目標角度を求める。尚、S 2 0 の脚コンプライアンス制御値演算において図 4 フロー・チャートによって足平の姿勢が補正されたときは、補正された姿勢に基づいて目標角度を求める。続いて S 2 4 に進んで前記した傾斜センサ 4 0 の出力からロボットの傾き（実姿勢傾斜角および実姿勢傾斜角速度）を検出し、指令値との偏差を求めてその偏差が減少するように目標姿勢を修正する。尚、この修正についての詳細な説明は省略する。続いて S 2 6 に進んで関節を目標角度に追従制御する。これは、図 2 に示した第 2 の演算

装置 6 2 において制御するものであるが、この制御はこの発明の要旨には関係しないので、詳細な説明は省略する。

【0025】この実施例は上記の如く構成したので、修正した目標姿勢に前記ロボットの関節変位を追従させ、よって前記求められた偏差が減少するように、前記衝撃吸収機構（図 9 に示す）の変形による応力を生じさせることとなり、床に予期しない凹凸があっても ZMP 実測位置が ZMP 目標位置からずれることがあっても、その差を効果的に解消し、ZMP 目標位置まわりにロボットを転倒させようとするモーメントが生じて、それを打ち消すことができる。即ち、ロボットを常に一定の復元力を持った倒立振子で近似することができるようにしたので、制御特性を線形にすることができて制御系の設計が容易となり、他の姿勢安定化制御などの組み合わせが容易となると共に、床に予期しない凹凸があっても安定して歩行することができる。また ZMP 実測位置を ZMP 目標位置に一致させるように制御することから、着地衝撃も低減する（ここで着地衝撃は、床反力のうちの大きなものを言う）。

【0026】図 1 1 はこの発明の第 2 の実施例を示す、図 4 と同様の脚コンプライアンス制御値演算サブルーチン・フロー・チャートである。第 1 実施例と相違する点に焦点をおいて説明すると、ずれ方向とずれ量 x を求めた後（S 2 0 0 ~ S 2 0 4）、S 2 0 6 に進んで図 6 末尾に示す様に、床と足平の関係を一定に保ったまま床を傾斜させたときと仮想したときの座標回転角を図示の如く求め、S 2 0 8 に進んで両足平の位置・姿勢を ZMP 目標位置まわりに上記回転角だけ回転させる様に、姿勢を修正する。ここで、床の傾斜角 θ は、 $\theta = \text{ずれ量} \times \text{ゲイン} K_f$ 、で決定する。

【0027】この実施例の場合、図 6 末尾に示す様に実測 ZMP 位置が前にずれている場合には、後側の足平が実際の床（実線で示す）を強く蹴ることとなって床反力を生じさせ、ZMP 実測位置を ZMP 目標位置に近づけることができる。即ち、この場合も図 6 上部に示したモーメントと逆方向のモーメントを生じさせることができ、姿勢の崩れを防ぐことができる。また、この実施例においても、ずれ量に比例した復元力を与えることができる。即ち、復元力係数を一定にして線形な制御特性を得ることができる。

【0028】図 1 2 はこの発明の第 3 実施例を示す、先の図 3 と同様のフロー・チャートである。第 1 実施例（ないしは第 2 実施例）と相違する点に焦点をおいて説明すると、この実施例においては S 3 0 0 ~ S 3 0 6 で脚コンプライアンス制御値を演算した後、S 3 0 8 に進んで無理な姿勢にならない腰の上下方向（ z 方向）高さを求め、次いで S 3 1 0 に進んで脚コンプライアンス制御を行って足平位置・姿勢を修正しても ZMP が目標位置になる様に、腰の水平加速度と水平位置とを求め、S

3 1 2 に進んで足平位置・姿勢および腰の位置・姿勢（S 3 0 6 のサブルーチンにおいて修正されたときはその修正値）に基づいて目標関節角度を求める。尚、以後の S 3 1 4、S 3 1 6 を含む残余の構成は第 1 実施例（ないしは第 2 実施例）と異なる。

【0029】即ち、脚コンプライアンス制御は、床の凹凸や傾斜などによる外乱があっても、ZMP 実測位置が ZMP 目標位置からずれないようにすることが主目的であるので、脚コンプライアンス制御を行っても ZMP 目標位置自体は、ずれないことが望ましい。即ち、脚コンプライアンス制御によって足平の姿勢を修正するのみで ZMP 実測位置を ZMP 目標位置に戻すことができるが、その結果、上体の姿勢が変化して ZMP 目標位置自体が所期の位置からずれることも起こり得る。ここで、脚の質量、特に先端の質量が上体に比べて十分に小さければ、設計 ZMP 位置のずれは無視することができるので、上体の水平位置は基準歩容のままで良い。図 1 に示した構成において足平 2 2 の質量は上体 2 4 に比して十分に小さいとは言いが、第 1 実施例（ないしは第 2 実施例）の場合には脚コンプライアンス制御を行うことによる上体への影響は実質的には非常に小さいと考え、無視した。それに対して第 3 実施例では図示した如く、上体の水平方向の位置、加速度を修正したものである。よって、第 1 実施例（ないしは第 2 実施例）の効果に加えて、姿勢安定化を一層精緻に行うことができる効果を有する。尚、第 3 実施例において、S 3 0 8 の腰の上下方向高さの修正は行わなくても良い。

【0030】尚、脚コンプライアンス動作が小さければ、脚コンプライアンス制御値演算サブルーチンを歩容生成部 2 の途中またはその後に移しても良い。そうするときは、歩容生成部 1 と歩容生成部 2 の演算を予めオフラインで行っておくことができるので、演算能力の低いコンピュータを用いるとき好都合である。

【0031】図 1 3 はこの発明の第 4 実施例を示す、先の図 4（第 1 実施例）、図 1 1（第 2 実施例）と同様な、脚コンプライアンス制御値演算に関するサブルーチン・フロー・チャートである。同図を参照して説明すると、S 4 0 0 において 6 軸力センサ検出値を取り込んだ後、S 4 0 2 に進んで ZMP 目標位置まわりに実際に発生しているモーメントを求め、S 4 0 4 に進んで実モーメントとモーメント指令値（通常は零に設定）との差を求め、S 4 0 6、S 4 0 8 に進んで第 2 実施例と同様に偏差にゲインを乗じて座標回転角を求め、それに応じて両足平の位置・姿勢修正量を求めるようにした。

【0032】第 4 実施例は実測の床反力の分解のしかたにおいて従前の実施例と異なる。即ち、従前の実施例においてはモーメントなしの力だけのベクトルで床反力を分解したときの作用点位置に着目したのに対し、第 4 実施例においては ZMP 目標位置にかかる値を力とモーメントに分解したときのモーメントに着目したものであ

り、その意味では従前の検出手法と本質的には相違ない。

【0033】尚、第4実施例において図13サブルーチン・フロー・チャートに従って脚コンプライアンス制御値を演算した後、目標関節角度を算出することになるが、その際には第1実施例の図3に示す様に上体の位置・姿勢を修正しない様にしても良く、あるいは第3実施例の図12に示す様に上体の水平方向の位置・加速度を修正しても良い。第4実施例の効果としてはZMP目標位置まわりにモーメントを直接的に検出して脚コンプライアンス制御値を決定することから、従前の実施例に比して一層線形で安定した姿勢制御を実現することができる。

【0034】この第4実施例を図14のブロック線図に基づいて平地歩容について説明する(基準歩容が勾配 θ_1 の斜面の歩容なら、下記説明において $\Delta\theta$ および $\Delta\theta_{comm}$ を $\theta_1 + \Delta\theta$ および $\theta_1 + \Delta\theta_{comm}$ に置き換えれば良い)。図において、設定された位置・姿勢から各関節の変位を求める、いわゆる逆キネマティクス演算部では、基準歩容において床を $\Delta\theta_{comm}$ 傾けたときの姿勢を計算する。変位コントローラによって、図1に示したロボットの関節変位が、逆キネマティクス演算部から出される姿勢指令に追従する。図1に示したロボットを完全剛体であると想定し、実関節変位から得られる姿勢について、ロボットと足平接地面接線(図中のAAダッシュ線)とがなす相対角度を $\Delta\theta$ とする。変位コントローラの追従性が十分高ければ、 $\Delta\theta$ は $\Delta\theta_{comm}$ に一致する。このとき、ロボットと床の相対角度から、ZMP目標位置まわりの床反力実モーメントMまでの伝達関数Gは、数1に示すようになる。

【0035】

【数1】

$$G = \frac{1}{1 / K l e g + K f}$$

【0036】これは、図15に示す如く、バネ定数 $1 / (1 / K l e g + K f)$ の曲げバネと等価である。

【0037】この第4実施例においては、ロボットが予期しない凹凸を踏むなどして目標ZMP位置まわりにモーメントが生じたとき、それを直接的に検出してそのモーメントの大きさに比例する座標回転角を仮想的に求め、その仮想的な角度だけ足平の位置・姿勢を目標ZMP位置まわりに回転させる様に修正する、即ち、目標ZMP位置まわりに生ずるモーメントを直接的に検出し、それを打ち消す様に同一位置まわりに逆方向のモーメントを生じさせる様にしたので、第1ないし第3実施例の場合に比して、前にも述べた如く、一層制御特性の線形化と姿勢の安定化制御を実現することができる。更に、上体についても図12に示したと同様に水平方向の位置・加速度を修正するときは、なお一層的に制御特性の

線形化と姿勢の安定化を図ることができる。

【0038】尚、ZMP目標位置は連続的にまたは断続的に移動することから、急激にZMP目標位置が移動する歩容に対しては、モーメント計算中心や脚コンプライアンス動作の回転中心をZMP目標位置にとると、急激な挙動変化が発生しやすくなって、跳ねるなどして安定して歩行することができなくなる恐れがある。従って、このような歩容に対してはモーメント計算中心や脚コンプライアンス動作の回転中心を、ZMP目標位置に近いが、それよりも穏やかに移動する点、例えばZMP目標位置にフィルタをかけてスムージングした点においても良い。

【0039】図16はこの発明の第5実施例を示す、第4実施例の図13と同様の脚コンプライアンス制御値演算サブルーチン・フロー・チャートであって、第4実施例と相違する点は、ZMP目標位置に代えて、基準点、例えば支持脚のくるぶし(図1において足関節18, 20R(L)の交点)の床面への投影点まわりのモーメントを求め、その点まわりに回転させるものである(S502, S508)。他のステップを含む残余の構成は第4実施例と同様であり、上体の修正の有無も第4実施例と同様である。床反力モーメントを求めるのが若干容易となる反面、第4実施例に比して若干制御値が劣るのを除けば、効果も第4実施例と同様である。尚、基準点は移動する点であっても良い。

【0040】図17は第6実施例を示しており、従前の実施例と相違する点は、ZMP目標位置から遠い側の足平を激しく移動させると脚が発振する恐れがあることから、図18に示す様に、遠い側の足平の回転座標上の移動角度 θ_1 を、近い側の足平のそれ θ_2 に比し、小さくした。尚、足平の駆動手法を第2実施例に従ったが、第1実施例の上下動についても妥当するものであり、また上体についても修正してもしなくても良い。

【0041】図19はこの発明の第7実施例を示しており、進行方向に向かって横への転倒力がかかる場合に対処するものである。即ち、従前の実施例は進行方向、即ち、y軸まわりに作用するモーメントMyを検出して制御値を演算するものであったが、この実施例の場合、横方向(x軸まわり)のモーメントMxも検出して制御値を演算する様にした(S700~S708)。尚、第2実施例に準拠して説明したが、この手法は他の実施例にも妥当する。またモーメントを用いたが、横方向の力Fyを用いても良い。

【0042】図20はこの発明の第8実施例を示しており、第4実施例に関して示した図14のブロック線図において、ロボット本体と床との間にフィルタ80を介挿したものである。例えばこのフィルタの伝達関数を $1 / (1 + T S)$ (ただし、Tは時定数)とする。変位コントローラの追従性が十分高いとすると、 $\Delta\theta$ は $\Delta\theta_{comm}$ に一致する。従って、ロボットと床との間の相対角

度から ZMP 目標位置まわりの床反力実モーメント M までの伝達関数 G は、数 2 に示す様になる。

$$G = \frac{-1}{1/Kl_{eg} + Kf / (1 + TS)}$$

【0044】脚剛性 Kl_{eg} が十分高ければ、 $1/Kl_{eg}$ は無視することができ、同式は数 3 の様になる。

【0045】

【数 3】

$$G = \frac{-T}{Kf} S + \frac{-1}{Kf}$$

【0046】これは、図 21 に示す様に、ネジリバネとネジリダンパを並列に組んだ機構と等価である。即ち、ロボット本体と床との間にメカニカルダンパを挿入したのと等価なダンピング効果を得ることができ、遊脚が着地したときの跳びはねを防ぐことができる。また、かかるローパスフィルタをコンプライアンス制御のフィードバックループに挿入するため、副次的な効果として、高周波に対するループゲインを下げることができ、コンプライアンス制御系の安定度が高まり、発振を防ぐことができる。また 6 軸力センサ 36 から進入する高周波ノイズを除去することもできる。

【0047】図 22 ないし図 28 はこの発明の第 9 実施例を示す。

【0048】脚式移動ロボットにおいて、関節を変位制御で駆動する場合、上に述べた脚コンプライアンス制御を行わないとき、歩行中の両脚支持期に姿勢が少しでも前に傾くと、後側の足平が床から離れて全荷重が前側の足平に乗るため、後ろに戻そうとする極めて大きな復元力が発生する。即ち、前記した復元力係数が、両脚支持期では極めて大きくなる。従って、このような状態でさらに上体の傾きあるいは重心のずれを両脚の動きにフィードバックする姿勢安定化制御を行うと、復元力係数がさらに大きくなり、それに見合った十分なダンピング効果を与えることができなくなる。この結果、かえって姿勢を不安定にしてしまう。従って、この実施例では、上に述べた脚コンプライアンス制御を行いつつ、上体の傾きにに応じて姿勢安定化制御を行う様にした。尚、上に述べた脚コンプライアンスを行う代わりに、関節をトルク制御で駆動することによっても脚にコンプライアンスを与えることができるが、ロボットと床との相対位置に対応するコンプライアンス特性は、姿勢によって大きく変化するため、床の凹凸・傾斜などに対する外乱抑制特性が一致しない。

【0049】以下、図 22 ないし図 23 フロー・チャートを参照して第 9 実施例を説明する。

【0050】図 22 は第 3 実施例に関して説明した図 12 と同様のメインルーチン・フロー・チャートであって、相違する点は、その S810 において脚コンプライ

アンス制御値のみならず、安定化制御値も演算する点である。図 23 はその演算を示すサブルーチン・フロー・チャートであり、実モーメントと指令値との差を求めた後 (S900~S904)、S906 において図示の如く、上体の実傾斜角度と傾斜角速度と指令値との偏差 (前記した第 2 の偏差) に所定のゲインを乗じて安定化制御値を求め、脚コンプライアンス制御値に合算して座標回転角を求め、S908 においてその値に修正するようにした。このように、安定化制御値と脚コンプライアンス制御値で同一の関節を対象とするようにしたこと、で、制御を簡易にしている。

【0051】図 24 はそれを示すブロック線図であり、図示の如く、PD 制御を用いて上体の姿勢安定化制御を行っている。ここで、前記した様に、 $\Delta\theta$ が $\Delta\theta_{com}$ に一致し、ZMP 実測位置が ZMP 目標位置に一致すると仮定すると、図 24 は図 25 の様に変形することができる。図 25 から明らかな様に、ロボットと制御系とを合わせてトータルなシステムは線形であり、従って、姿勢傾斜安定化制御には、古典制御理論、最適制御理論、ロバスト制御理論などの様々な線形制御理論を適用することができる。図 26 に状態フィードバック制御を用いた例を示す。

【0052】第 9 実施例は上記の如く構成したので、修正した目標姿勢 (より詳しくは、検出された床反力モーメントと目標とする床反力モーメントとの偏差 (あるいは検出された ZMP 実測位置と目標とする ZMP 位置との偏差) および前記した第 2 の偏差に応じて修正した目標姿勢) に前記ロボットの関節変位を追従させ、よって前記求められた偏差が減少するように、前記衝撃吸収機構 (図 9 に示す) の変形による応力を生じさせることとなり、関節部の摩耗や慣性の影響によって実用化が困難な関節トルク制御を導入することなく、姿勢安定化制御を実現することができる。即ち、両足平の変位を設計値から故意にずらすと、脚コンプライアンス制御により、ずらし量に応じた姿勢復元力が発生する。従って、上体傾斜フィードバックによる姿勢安定化制御において、復元力を発生するための操作量には、足平の変位ずらし量を用いることができる。また片脚支持期、両脚支持期の如何にかかわらずロボットの姿勢復元力係数をほぼ一定に保たせることができるので、ロボットを常にある一定の復元力を持った倒立振子に近似できる。その結果、制御系が線形近似でき、姿勢安定化制御則が容易に設計できる。また床に予期しない凹凸・傾斜があっても、その影響をあまり受けずに、鉛直方向に対する上体の傾きをほぼ設計値通りに維持されたまま、歩行させることがで

きる。

【0053】ここで、図25に示すフィルタ800には後で述べる様に第8実施例で述べたと同じ構成が適用可能であるが、ここでは別の例としてフィルタの伝達特性を1にして更に検討を加える。即ち、制御系の動特性に着目するために、床反力モーメント指令を0とみなしてコンプライアンス制御をまとめると、図25は図27の様に變形することができる。図27は、図28に示すバネとアクチュエータを持つ倒立振子と等価である。この様に単純化すると、様々な線形制御理論の適用が可能となるだけでなく、単純モデルの挙動からロボットの姿勢制御を類推することができるので、応答性や各種外乱に対する抑制特性など種々な特性の最適な組み合わせが、実験やシミュレーションを多く重ねなくても、容易に見つけだすことができる。尚、フィルタ800には図20と同じ様に、メカニカルダンパと等価なダンピング効果を与えて良いことは言うまでもない。即ち、上体の傾き角をフィードバックする姿勢制御において、図23で示した様に、安定性を高めるために上体の傾き角速度（または接地点と重心とを結ぶ直線の傾き角速度）もフィードバックするが、リンク系の剛性不足や歩容の滑らか不足などで上体が高い周波数で振動すると、傾き角速度に大きな高周波変動が発生するため、傾き角速度フィードバックゲインを大きくすると、脚が振動または発振してしまう恐れがある。そこで、第8実施例で用いたのと同じフィルタを用いると、傾き角速度フィードバックを補って姿勢制御系の安定度を高めることができるので、傾き角速度フィードバックゲインを小さめに設定しても、十分な安定性を確保することができる。尚、遊脚が着地したときの跳びはねを防止するなどの効果は第8実施例と同様である。

【0054】尚、上記実施例において種々の例を示したが、變形例はこれに止まるものではない。即ち、この制御においては、整理すると、

1. 検出対象
 - a. ZMP目標位置とZMP実測位置とのずれ量
 - b. ZMP目標位置まわりの床反力によって発生する力のモーメント
 - c. 基準点まわりの床反力によって発生する力のモーメント
2. 足平の動作
 - a. 片足の上下
 - b. 両足の上下
 - c. 足平の回転
 - d. ZMP目標位置から遠い側の足平の動作量を他の足平のそれに対して小さくする
3. 上体の水平方向の動作
 - a. 基準歩容保持
 - b. 水平方向について位置、加速度を修正
4. 上体の上下方向の動作

- a. 基準歩容保持
- b. 腰高さを再計算
5. 上体の姿勢安定化制御
 - a. 行わない
 - b. 行う

となるが、これらは全て組み合わせ可能であり、実施例に示したのはその一例に過ぎない。

【0055】また上記において、歩行データ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適用させても良い。

【0056】また上記において、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。

【0057】

【発明の効果】請求項1項にあっては、上体24と、それに関節(10~14R, L)を介して連結されると共に、少なくとも1個の関節(16~20R, L)を有する複数本の脚部(脚部リンク2)を備える脚式移動ロボット1の歩行制御装置において、前記脚部の関節と前記脚部の先端を連結する衝撃吸収機構(図9に示すばねまたはゴム)、ロボットの目標姿勢を生成する目標歩容生成手段(制御ユニット26、S10~S18、S300~S304、S308、S310)、前記ロボットに作用する床反力を測定してその作用点たるZMP実測位置を検出する検出手段(6軸力センサ36、制御ユニット26、S20、S306、S100、S102、S200、S202)、前記検出されたZMP実測位置を目標とするZMP位置と比較し、その偏差(ずれ方向、ずれ量X)を求める偏差算出手段(制御ユニット26、S20、S306、S106、S108、S206、S208)、および前記求められた偏差に応じて前記目標姿勢を修正する目標姿勢修正手段(制御ユニット26、S20、S306、S106、S108、S206、S208)、を備えると共に、前記目標姿勢修正手段は、前記修正した目標姿勢に前記ロボットの関節変位を追従させ、よって前記求められた偏差が減少するように、前記衝撃吸収機構の變形による応力を生じさせる(電動モータ、制御ユニット26、S22~S26、S312~S316)ように構成したので、予期しない凹凸に遭遇したときも姿勢の崩れを極力抑えることができると共に、偏差に応じて目標姿勢を修正するところから、姿勢の復元力を一定にすることができてロボットを倒立振子で近似することができ、線形な制御特性を得ることができ、また着地時の衝撃も吸収することができる。

【0058】請求項2項にあっては、上体24と、それに関節(10~14R, L)を介して連結されると共に、少なくとも1個の関節(16~20R, L)を有する複数本の脚部(脚部リンク)を備える脚式移動ロボッ

ト１の歩行制御装置において、前記脚部の関節と前記脚部の先端を連結する衝撃吸収機構（図９に示すばねまたはゴム）、前記ロボットの目標姿勢を生成する目標歩容生成手段（制御ユニット２６、Ｓ１０～Ｓ１８、Ｓ３００～Ｓ３０４、Ｓ３０８、Ｓ３１０、Ｓ８００～Ｓ８０８）、前記ロボットに作用する、所定の基準点まわりの床反力モーメントを検出する床反力モーメント検出手段（６軸力センサ３６、制御ユニット２６、Ｓ２０、Ｓ３０６、Ｓ４００、Ｓ４０２、Ｓ５００、Ｓ５０２、Ｓ６００、Ｓ６０２、Ｓ７００、Ｓ７０２、Ｓ８１０、Ｓ９００、Ｓ９０２）、前記検出された床反力モーメントを目標とする床反力モーメントと比較し、その偏差を求める偏差算出手段（制御ユニット２６、Ｓ２０、Ｓ３０６、Ｓ４０４、Ｓ５０４、Ｓ６０４、Ｓ７０４、Ｓ８１０、Ｓ９０４）、および前記求められた偏差に応じて前記目標姿勢を修正する目標姿勢修正手段（制御ユニット２６、Ｓ２０、Ｓ３０６、Ｓ４０６、Ｓ４０８、Ｓ５０６、Ｓ５０８、Ｓ６０６、Ｓ６０８、Ｓ７０６、Ｓ７０８、Ｓ８１０、Ｓ９０８）、を備えると共に、前記目標姿勢修正手段は、前記修正した目標姿勢に前記ロボットの関節変位を追従させ、よって前記求められた偏差が減少するように、前記衝撃吸収機構の変形による応力を生じさせる（電動モータ、制御ユニット２６、Ｓ２２～Ｓ２６、Ｓ３１２～Ｓ３１６、Ｓ８１２～Ｓ８１６）ように構成したので、同様に常に安定した姿勢を確保することができると共に、線形な制御特性を得ることができ、着地時の衝撃の吸収することができる。

【００５９】請求項３項にあっては、前記所定の基準点が目標とするＺＭＰ位置であるように構成したので、脚部を駆動した結果ＺＭＰ目標位置が移動したときも良く修正することができ、一層的確に前記した効果を得ることができる。請求項４項にあっては、さらに、前記上体の傾斜角度および／または傾斜角速度を検出する検出手段（制御ユニット２６、傾斜センサ４０）、前記検出された上体の傾斜角度および／または傾斜角速度を指令値と比較し、その偏差を第２の偏差として求める傾斜偏差算出手段（制御ユニット２６、Ｓ２４、Ｓ３１４、Ｓ８１０、Ｓ８１４、Ｓ９０６）、を備えると共に、前記目標姿勢修正手段は、前記偏差算出手段によって求められた偏差および傾斜偏差算出手段によって求められた第２の偏差に応じて前記目標姿勢を修正する（制御ユニット２６、Ｓ２４、Ｓ３１４、Ｓ８１０、Ｓ８１４、Ｓ９０６、Ｓ９０８）ように構成したので、上体傾斜フィードバックによる姿勢安定化制御において復元力を発生させるために操作量には脚部関節の変位ずらし量を用いることができ、関節部の磨耗や慣性の影響によって実用化が困難な関節トルク制御を導入することなく、制御系を線形近似することができ、姿勢安定化制御を容易に実現することができる。

【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行制御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】図２に示す制御ユニットの動作を示すメイン・フロー・チャートである。

【図４】図３フロー・チャートの中の脚コンプライアンス制御値演算サブルーチンを示すフロー・チャートである。

10 【図５】図４の脚コンプライアンス制御を説明する説明図である。

【図６】図４の脚コンプライアンス制御を説明するもので、脚部の駆動手法を示す説明図である。

【図７】図４の脚コンプライアンス制御のＺＭＰ目標位置とＺＭＰ実測位置とのずれ量とロボットの傾斜角との関係を示すグラフ図である。

【図８】図４の脚コンプライアンス制御のＺＭＰ目標位置とＺＭＰ実測位置のずれ量と脚コンプライアンス制御値の大小の関係を示すグラフ図である。

20 【図９】図４の脚コンプライアンス制御に適したロボットの足部構造を示す説明図である。

【図１０】図４の脚コンプライアンス制御のＺＭＰ実測位置の検出手法を示す説明図である。

【図１１】この発明の第２実施例を示す脚コンプライアンス制御値演算の別の例を示すフロー・チャートである。

【図１２】この発明の第３実施例を示す脚コンプライアンス制御と併せて上体位置の再修正を行う例を示すフロー・チャートである。

30 【図１３】この発明の第４実施例を示す脚コンプライアンス制御値演算の別の例を示すフロー・チャートである。

【図１４】第４実施例を説明するブロック線図である。

【図１５】図１４に示すロボットを簡略にモデル化した説明図である。

【図１６】この発明の第５実施例を示す脚コンプライアンス制御値演算の別の例を示すフロー・チャートである。

40 【図１７】この発明の第６実施例を示す脚コンプライアンス制御値演算の別の例を示すフロー・チャートである。

【図１８】第６実施例の制御を説明する説明図である。

【図１９】この発明の第７実施例を示す脚コンプライアンス制御値演算の別の例を示すフロー・チャートである。

【図２０】この発明の第８実施例を示す制御ループにフィルタを介挿した状態を示すブロック線図である。

【図２１】図２０のフィルタの特性を機械的に説明する説明図である。

50 【図２２】この発明の第９実施例を示す脚コンプライア

ンス制御に別の安定化制御を組み合わせた制御を示すフロー・チャートである。

【図 2 3】図 2 2 フロー・チャートの脚コンプライアンス制御と安定化制御の制御値演算サブルーチンを示すフロー・チャートである。

【図 2 4】第 9 実施例を説明するブロック線図である。

【図 2 5】図 2 4 のブロック線図を簡略的に変形して示すブロック線図である。

【図 2 6】第 9 実施例を状態フィードバック制御手法で実現した例を示すブロック線図である。

【図 2 7】図 2 5 のブロック線図をフィルタの伝達特性を 1 にして変形した例を示すブロック線図である。

【図 2 8】図 2 7 を機械的構成に置き換えて示す説明図である。

【符号の説明】

* 1

ット)

2

1 0 R , 1 0 L

1 2 R , 1 2 L

1 4 R , 1 4 L

1 6 R , 1 6 L

1 8 R , 1 8 L

2 0 R , 2 0 L

10 2 2 R , 2 2 L

2 4

2 6

3 6

8 0 , 8 0 0

脚式移動ロボット (2 足歩行ロボ

脚部リンク

脚部回旋用の関節

股部のロール方向の関節

股部のピッチ方向の関節

膝部のピッチ方向の関節

足首部のピッチ方向の関節

足首部のロール方向の関節

足平

上体

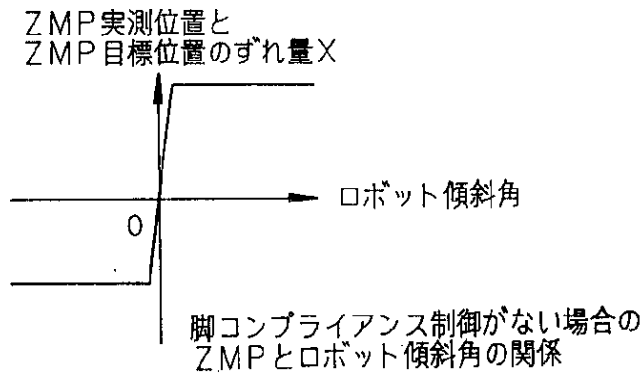
制御ユニット

6 軸力センサ

フィルタ

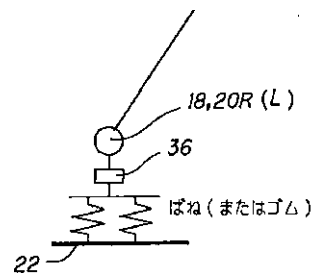
*

【図 7】

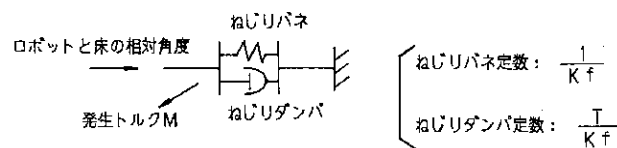
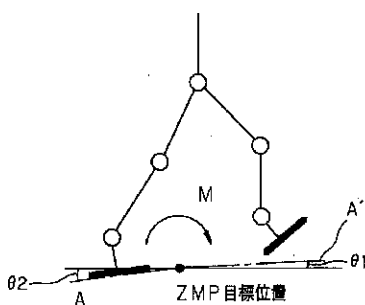


【図 1 8】

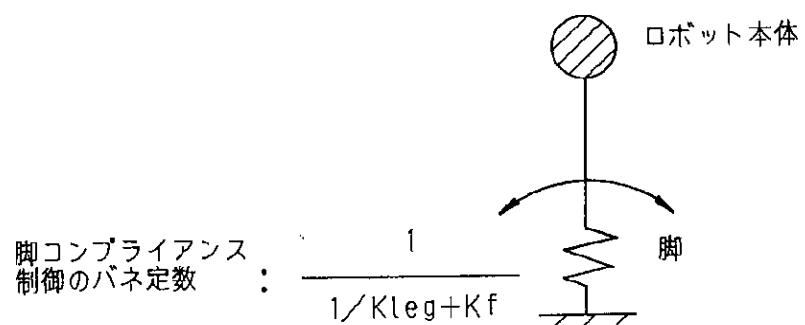
【図 9】



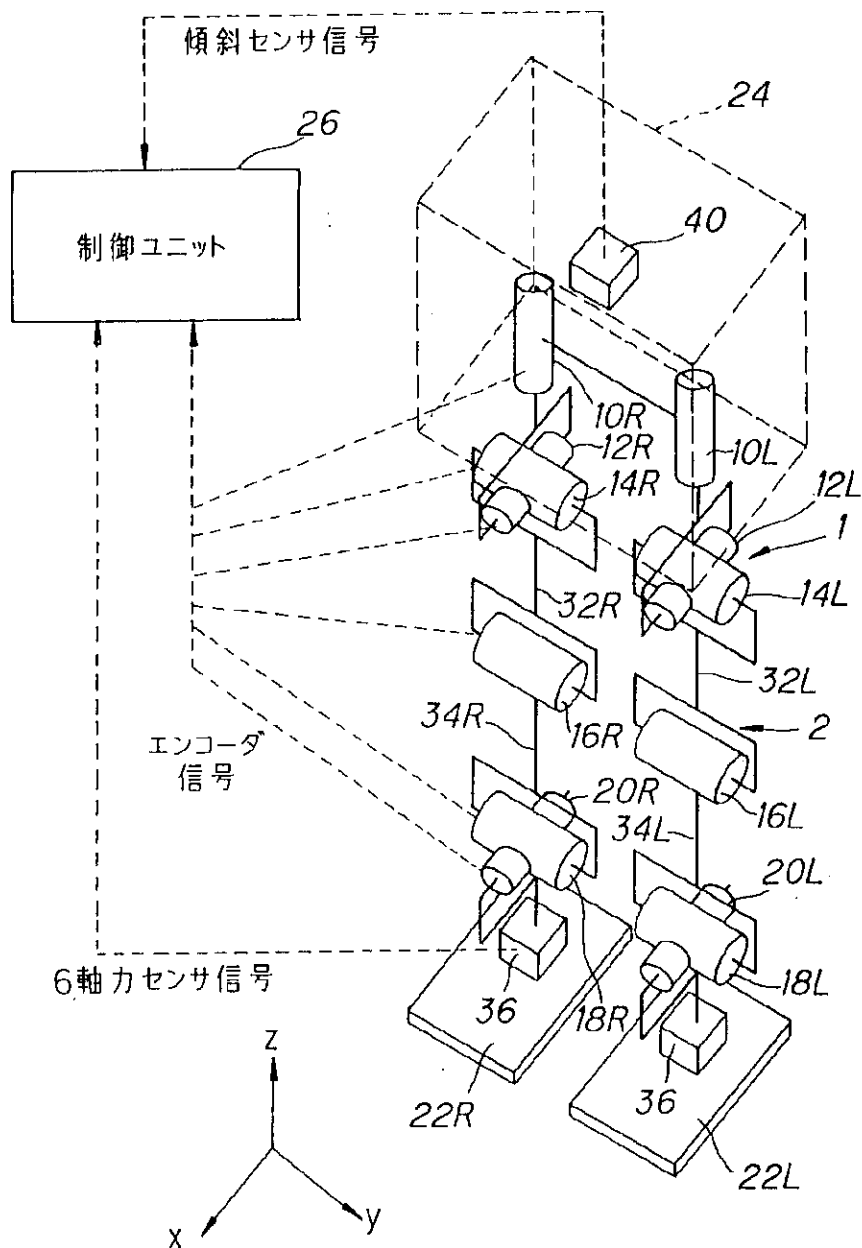
【図 2 1】



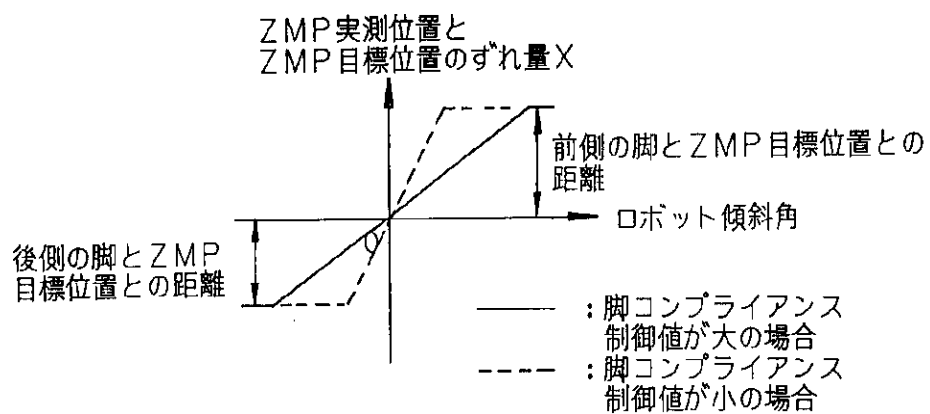
【図 1 5】



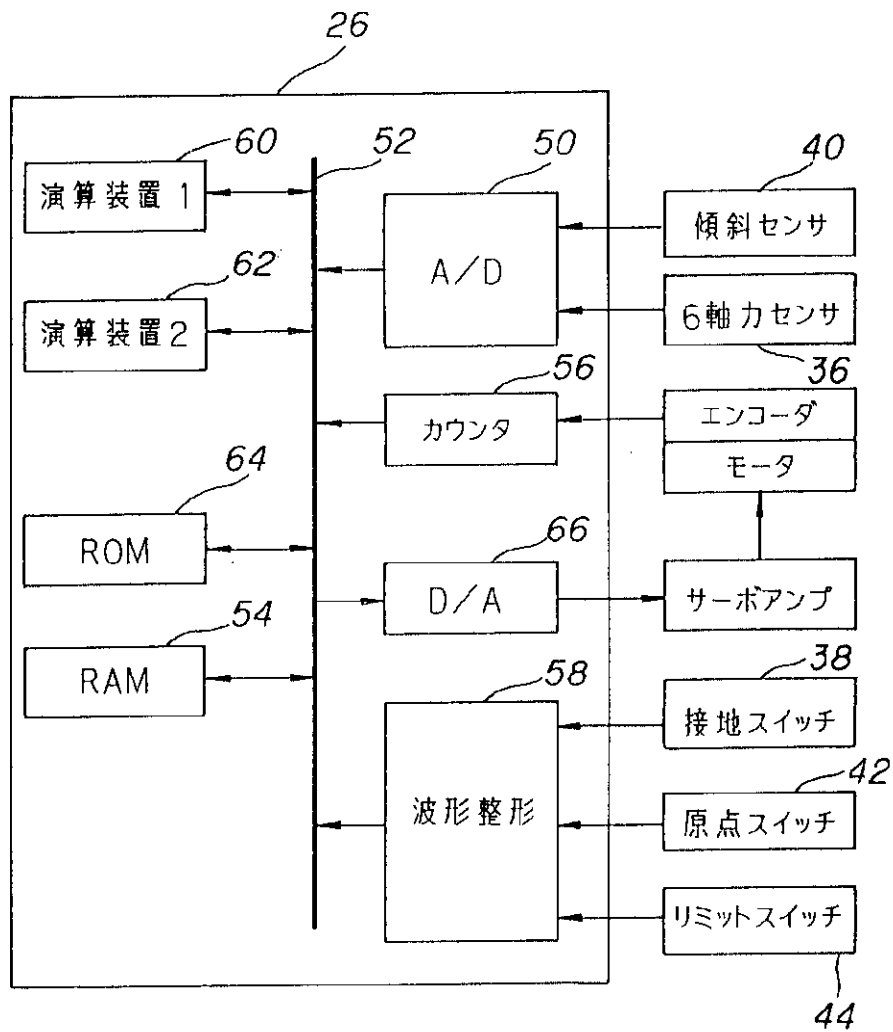
【図 1】



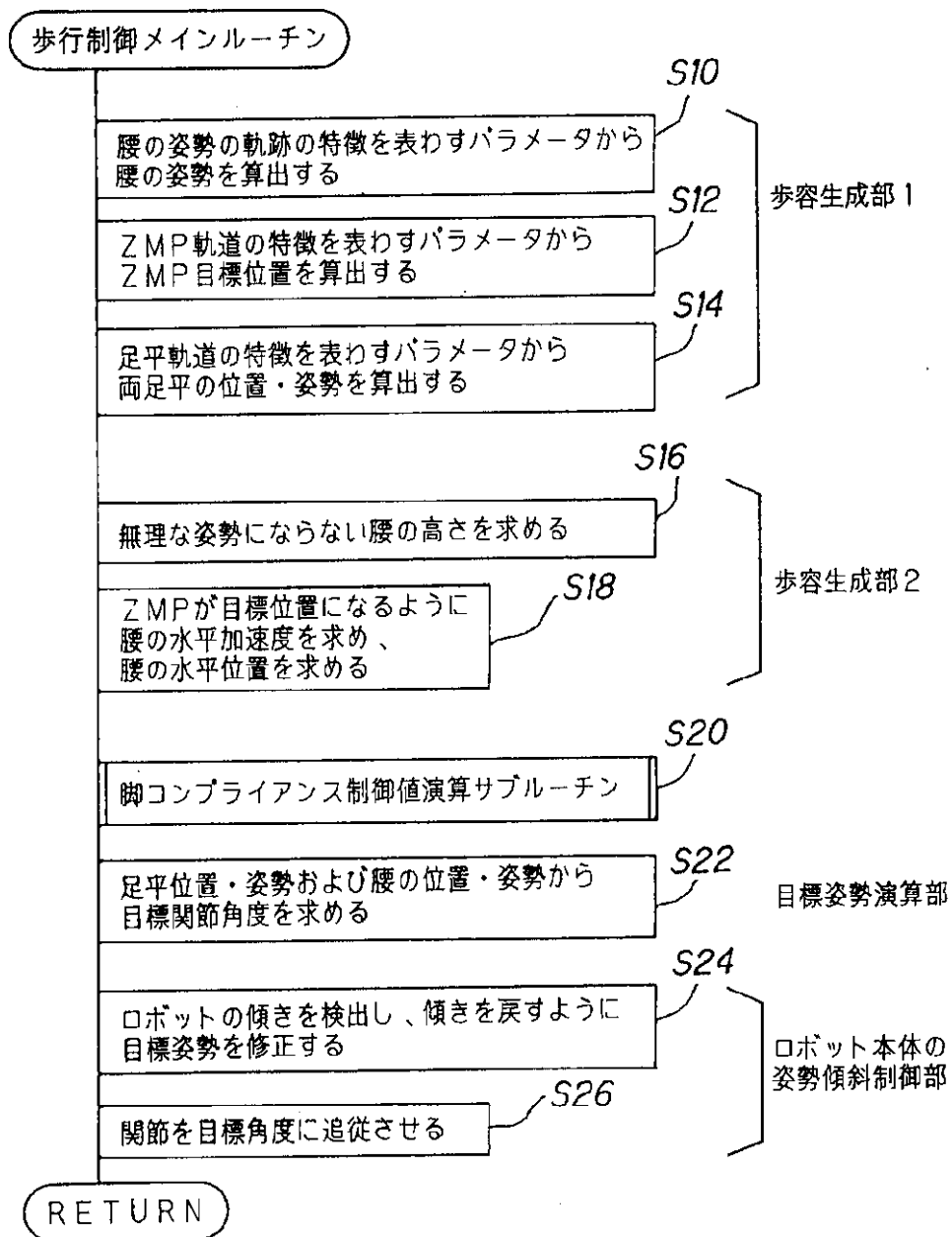
【図 8】



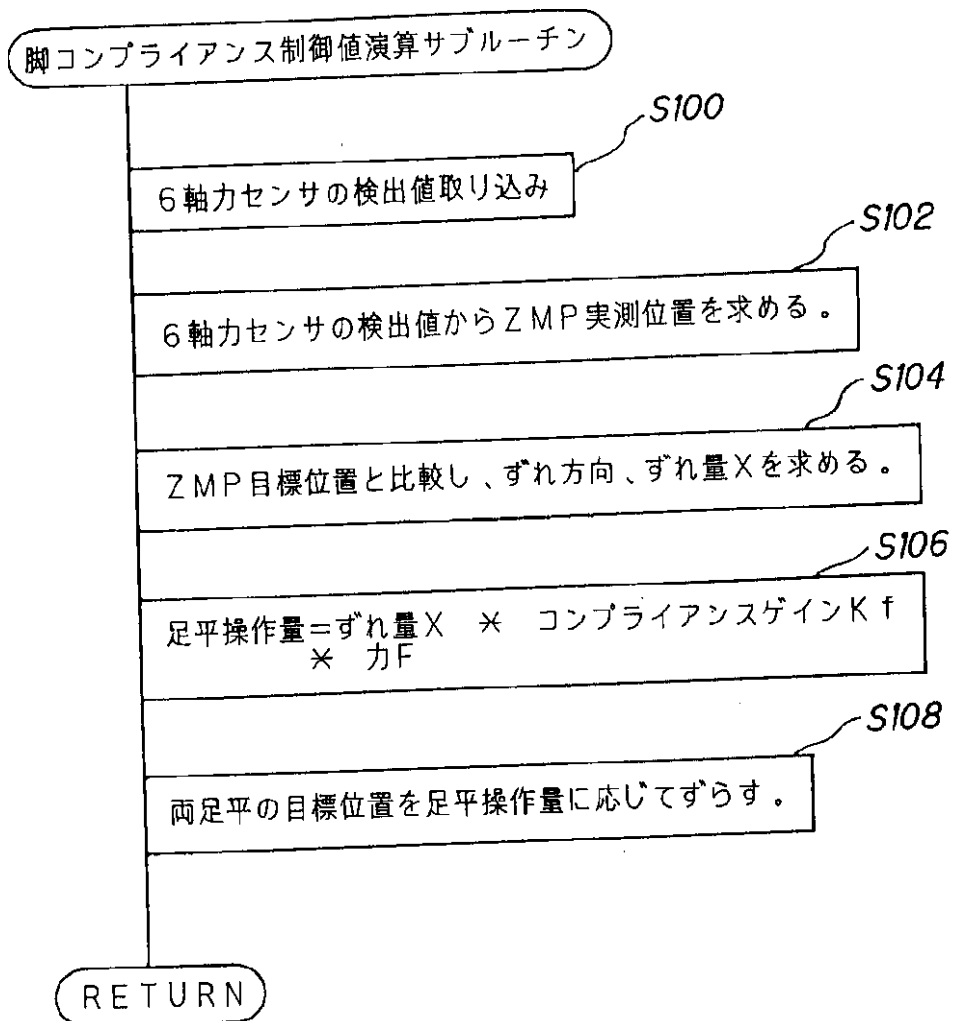
【図 2】



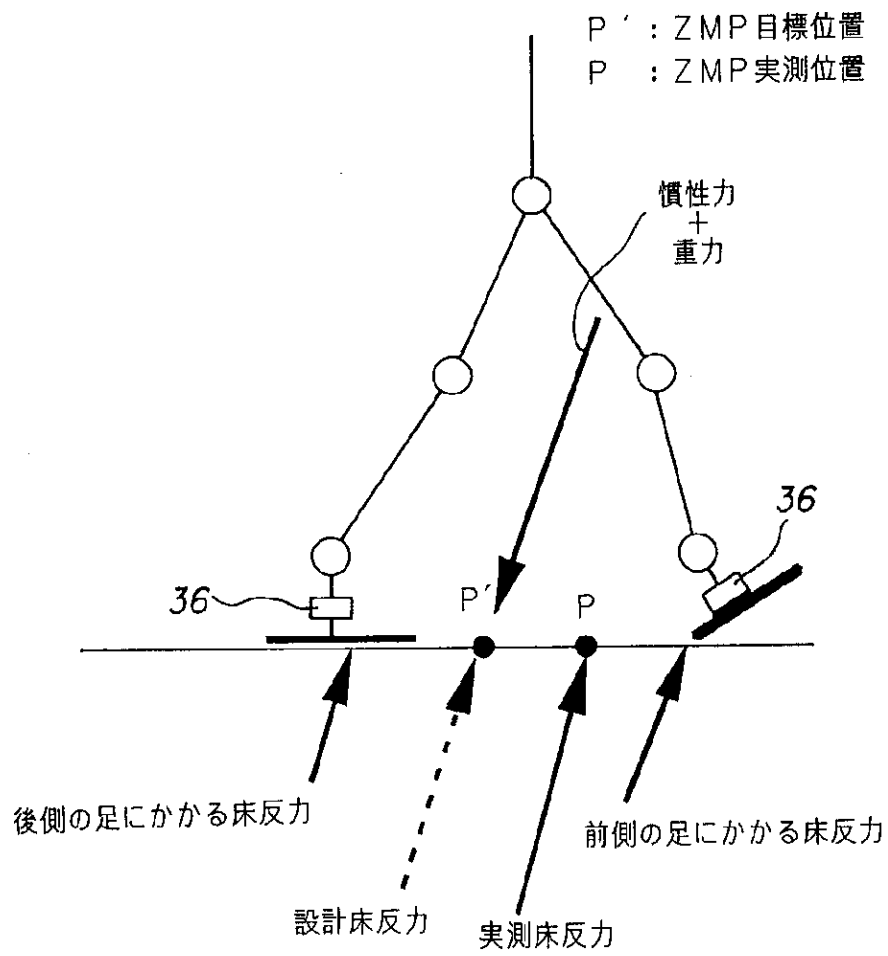
【図 3】



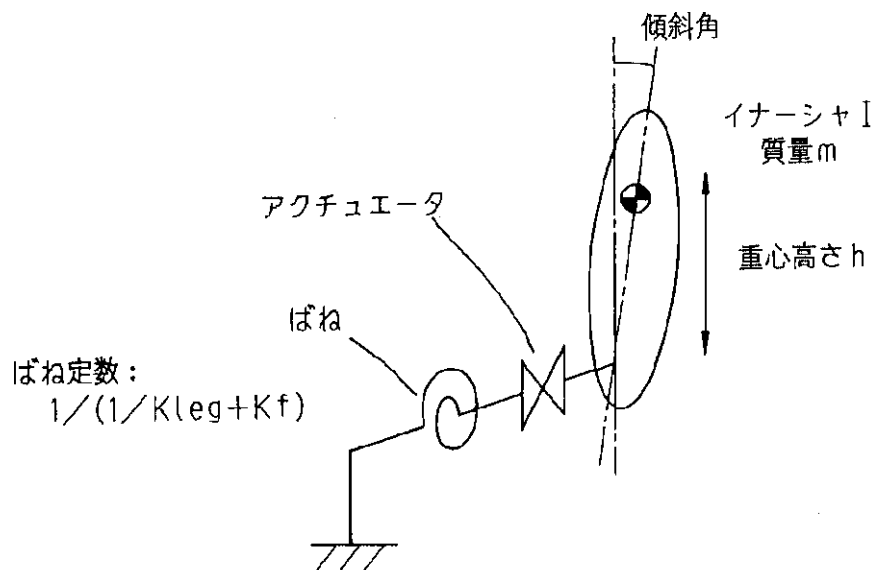
【図 4】



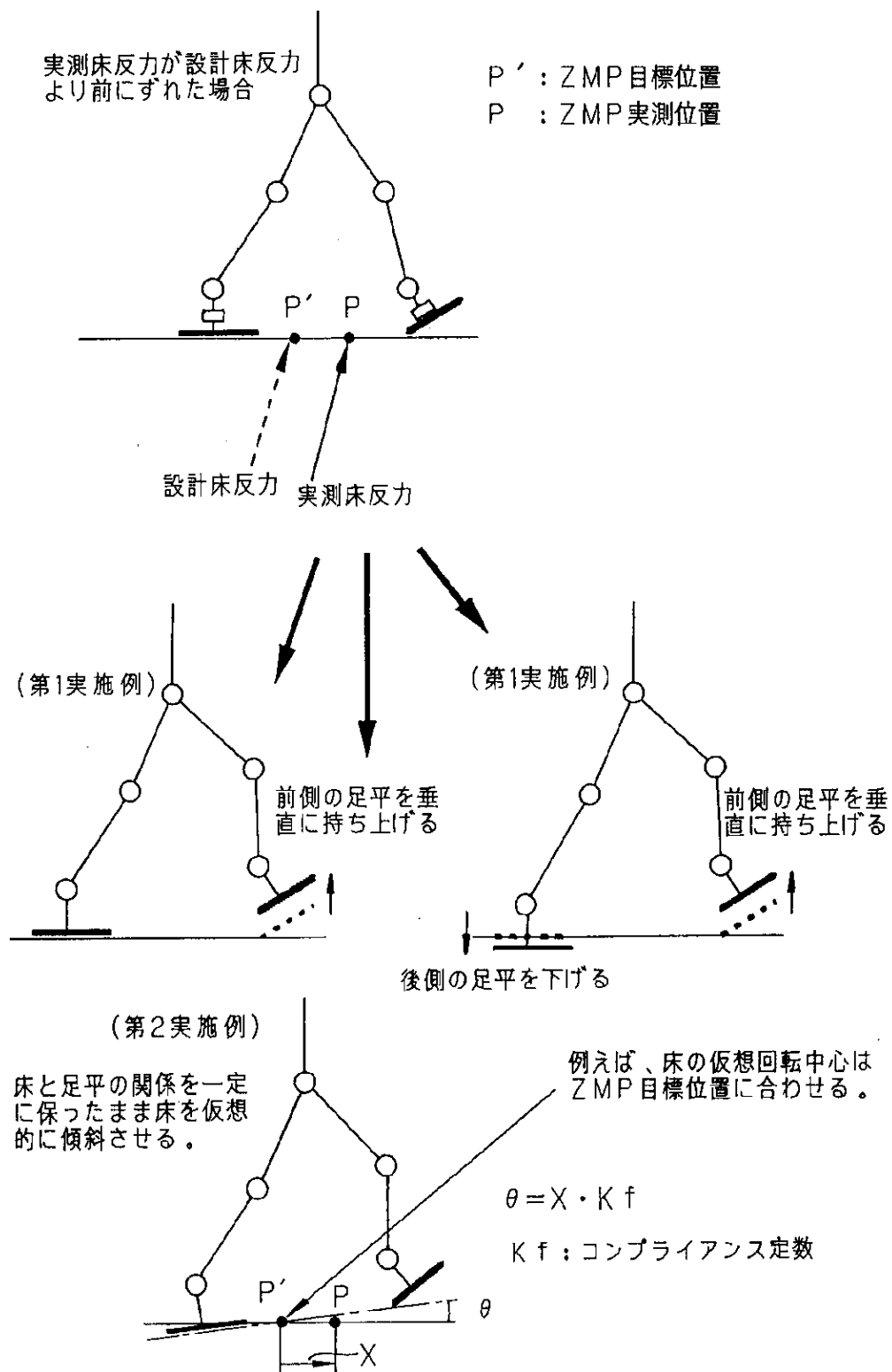
【図 5】



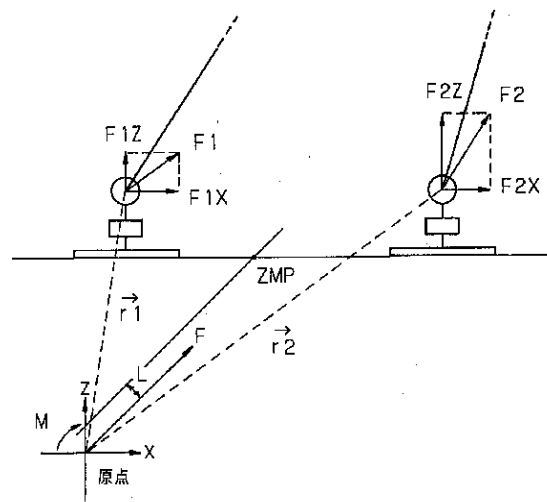
【図 2 8】



【図 6】



【図 10】



原点まわりのモーメントMを求める

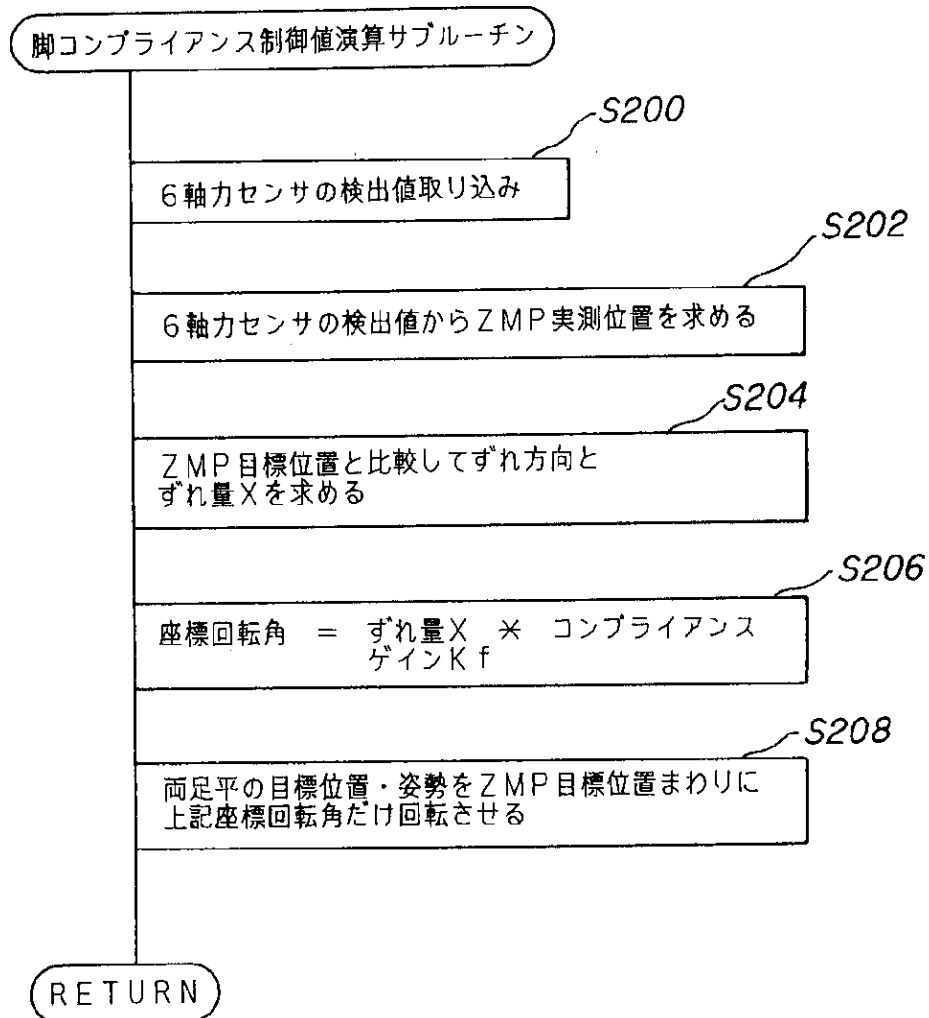
$$\vec{M} = \vec{r}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2$$

(ただし、 $\times$: 外積)

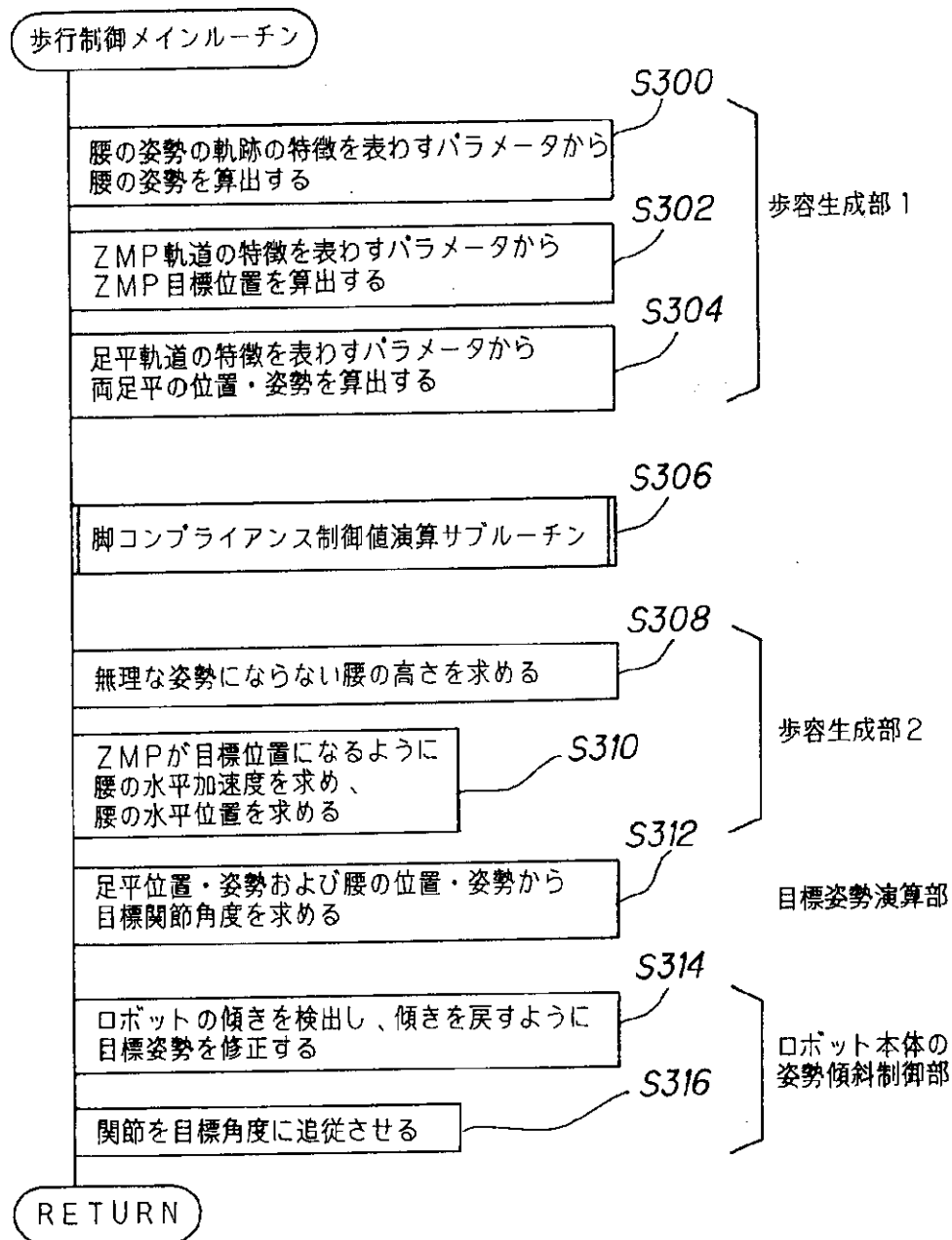
$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

$$\vec{M} = \vec{L} \times \vec{F} \text{ となる } \vec{L} \text{ を求める}$$

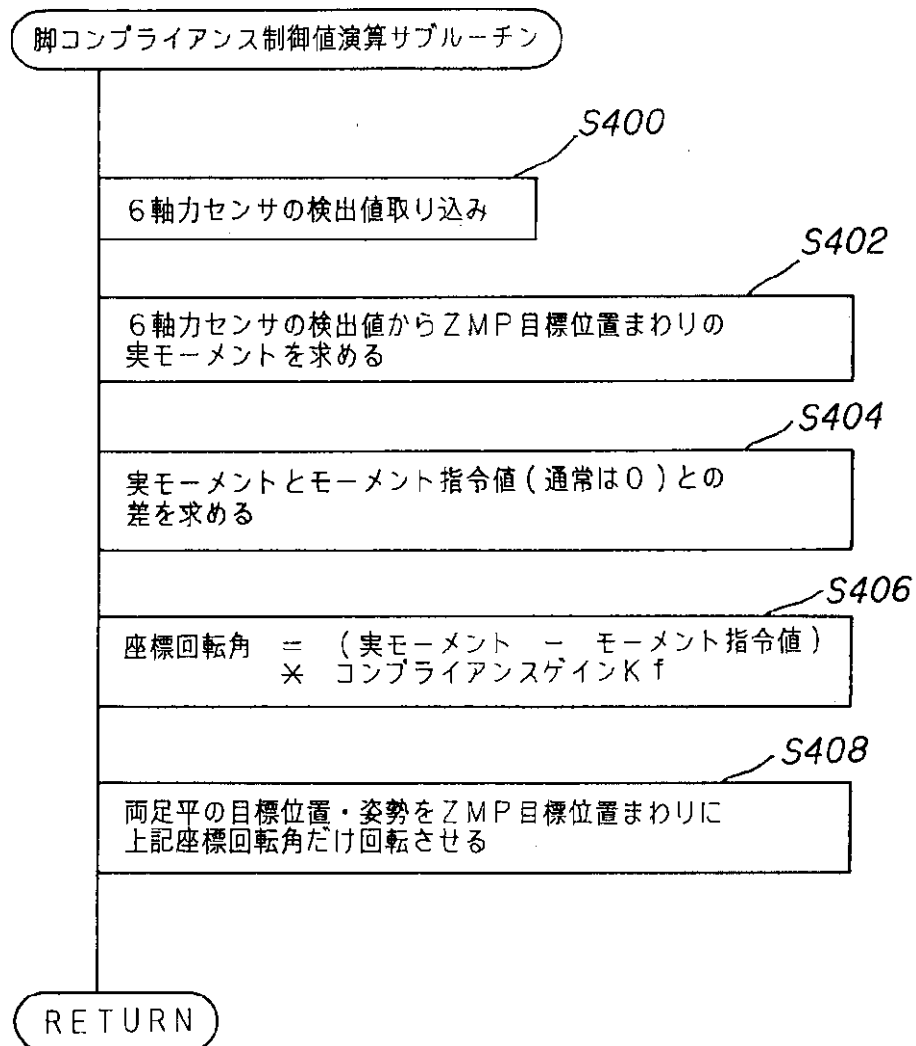
【図 1 1】



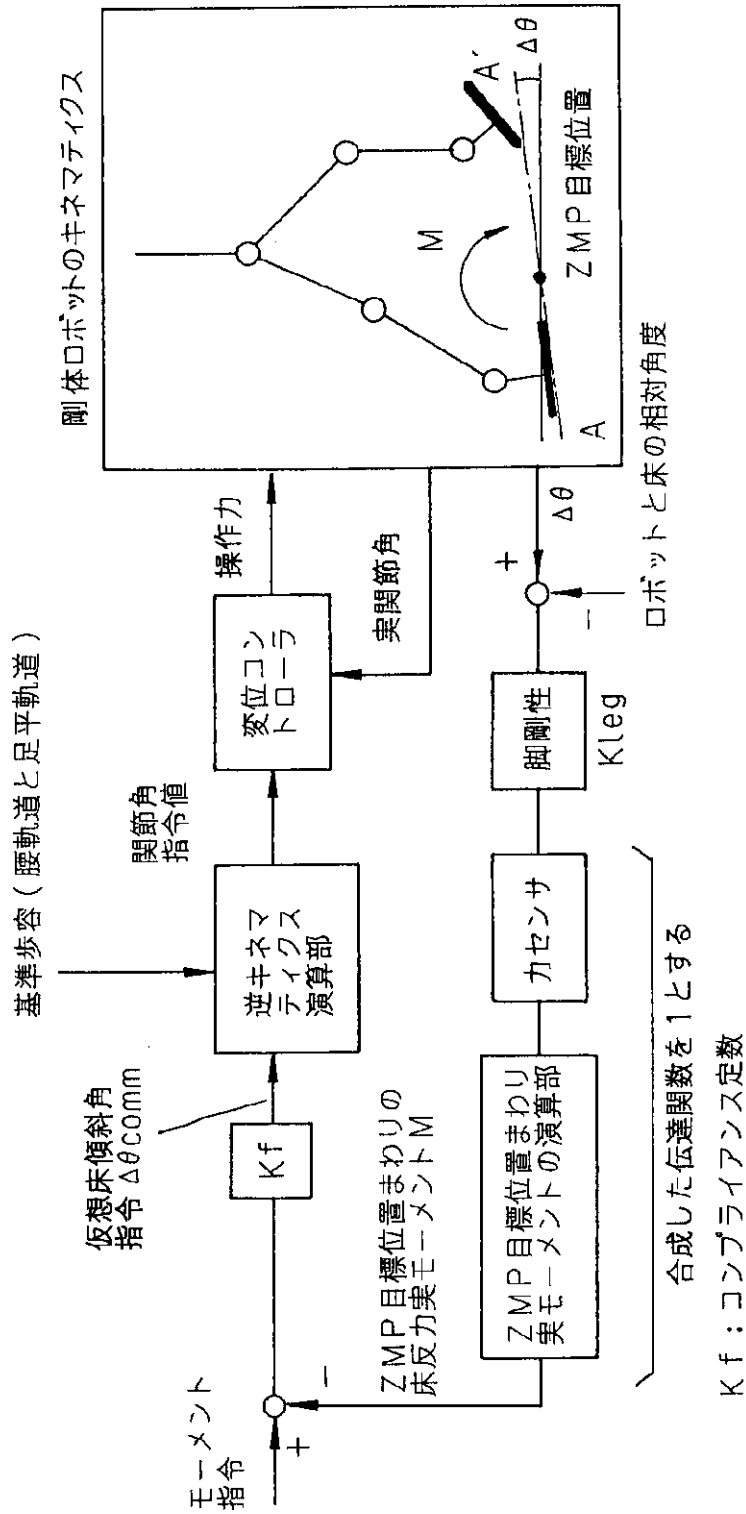
【図 1 2】



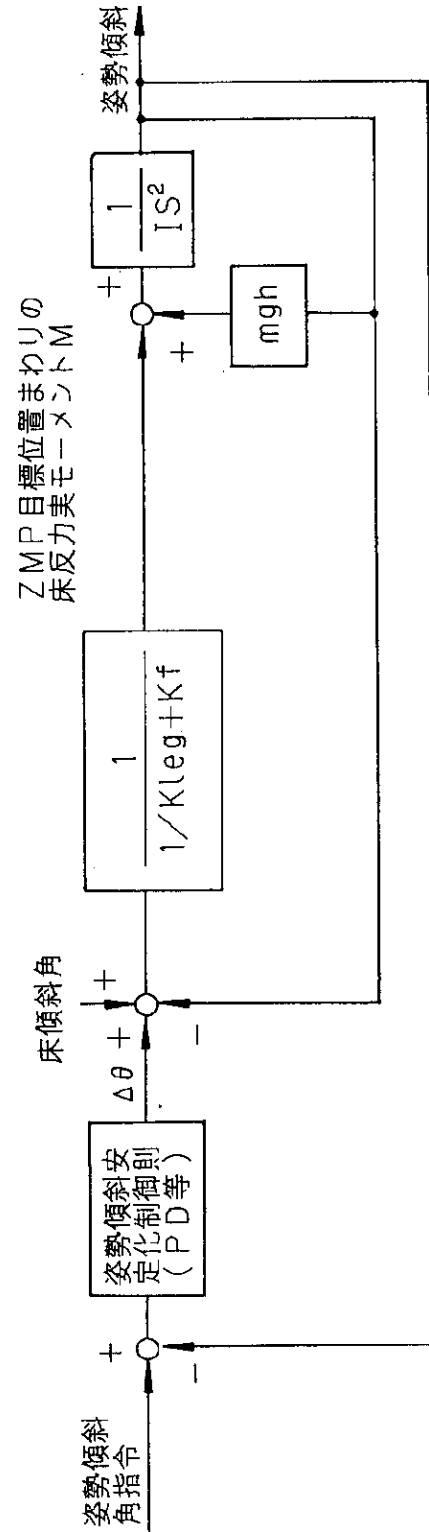
【図 1 3】



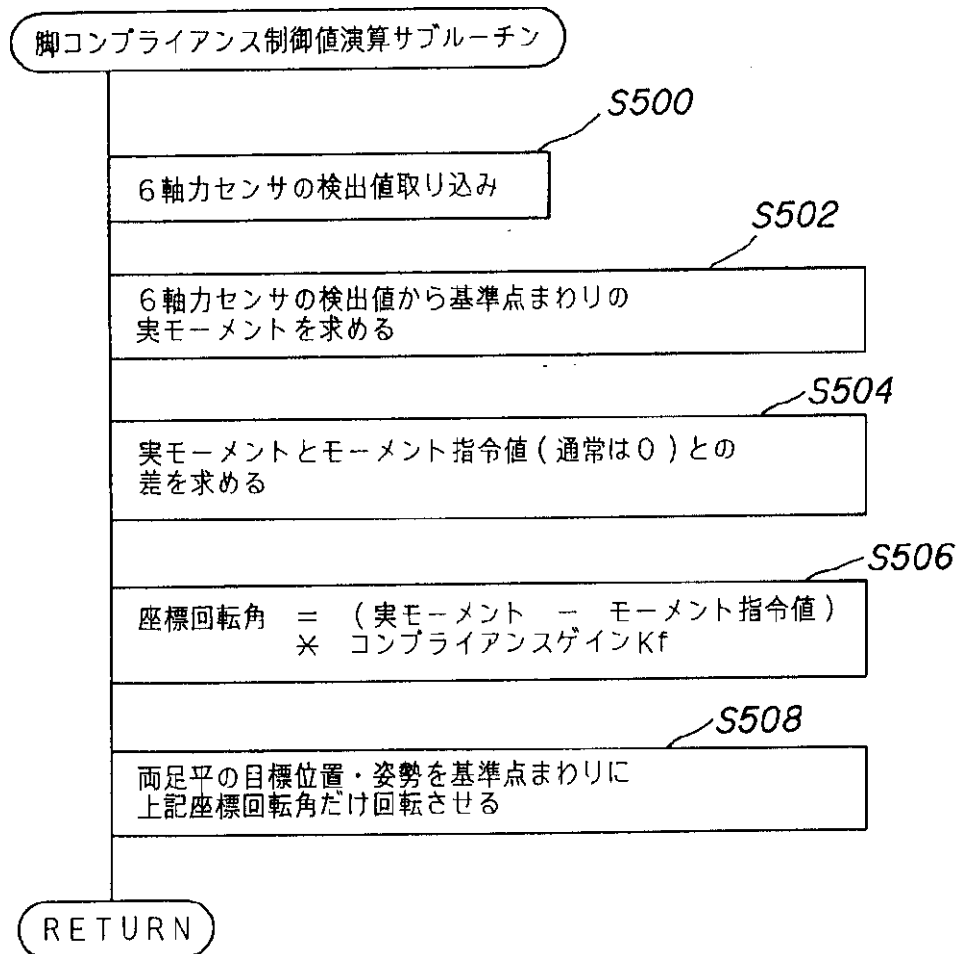
【図 14】



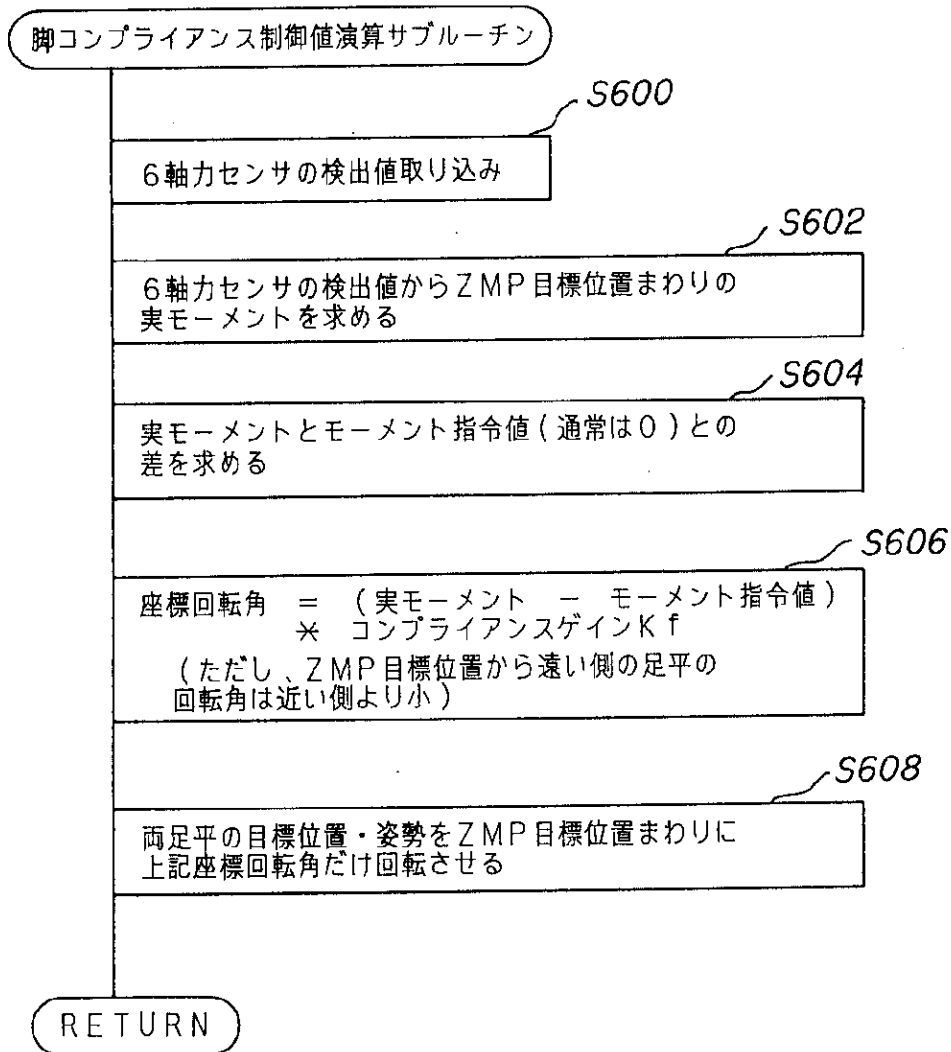
【図 27】



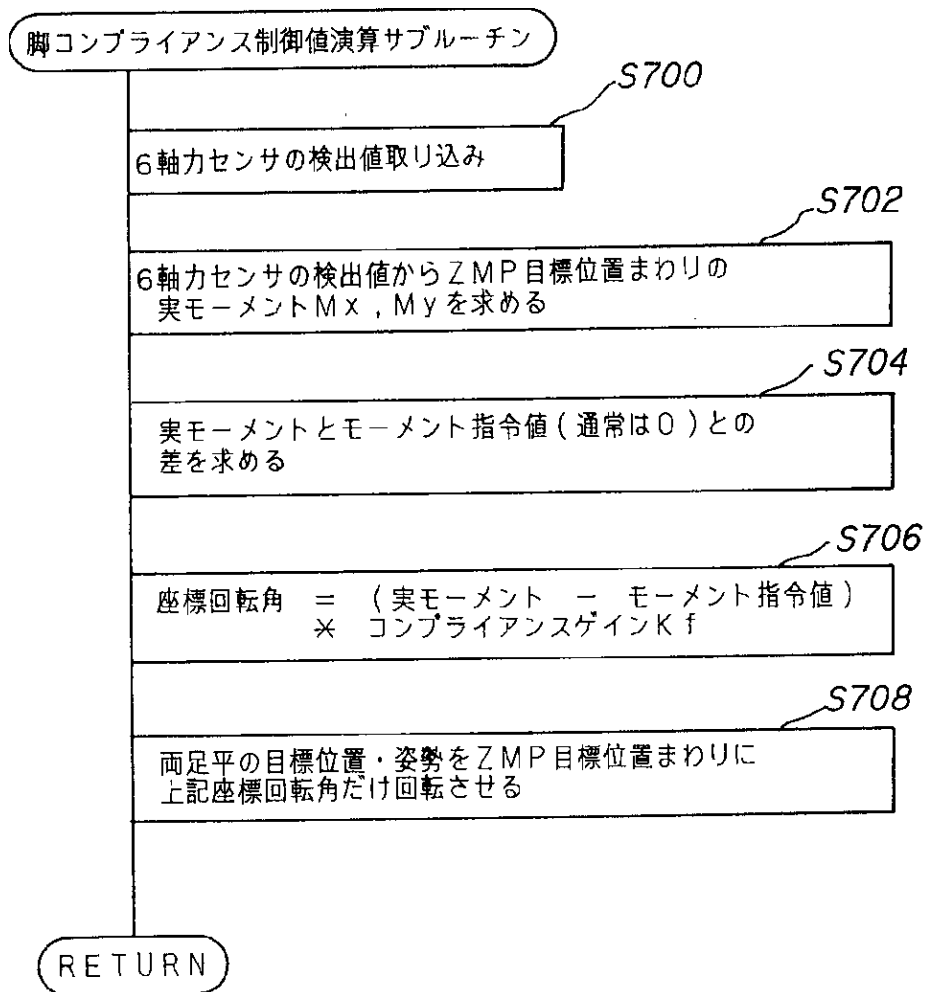
【図 1 6】



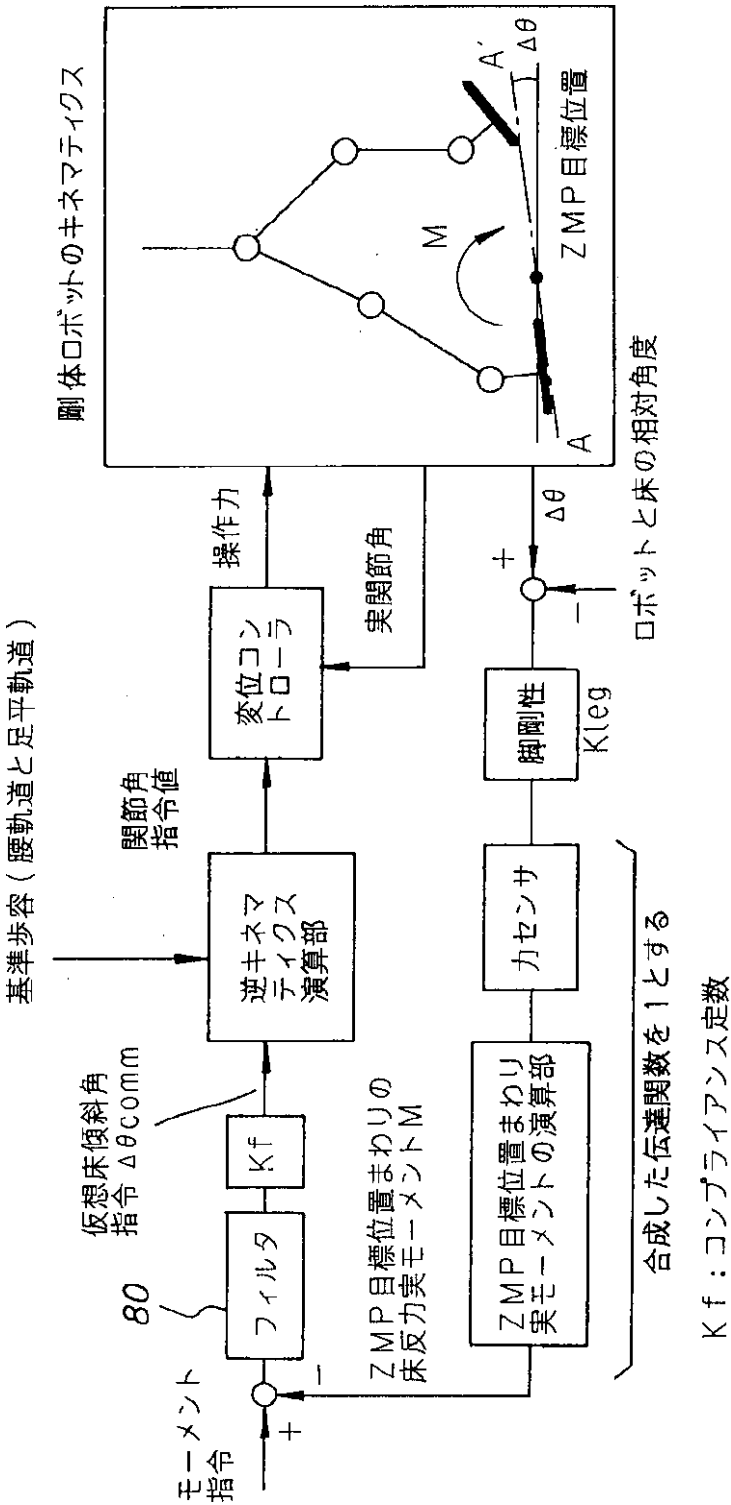
【図 1 7】



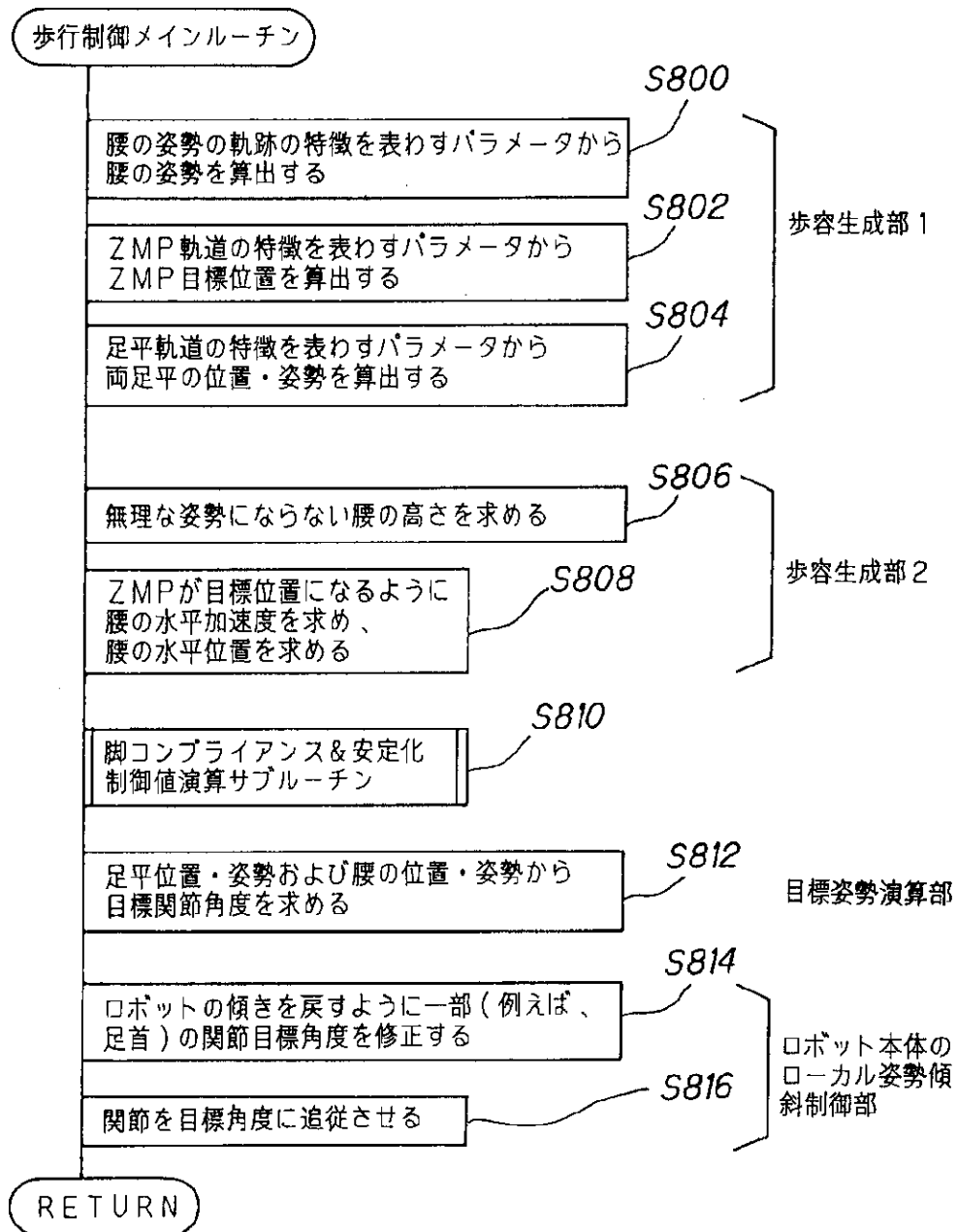
【図 19】



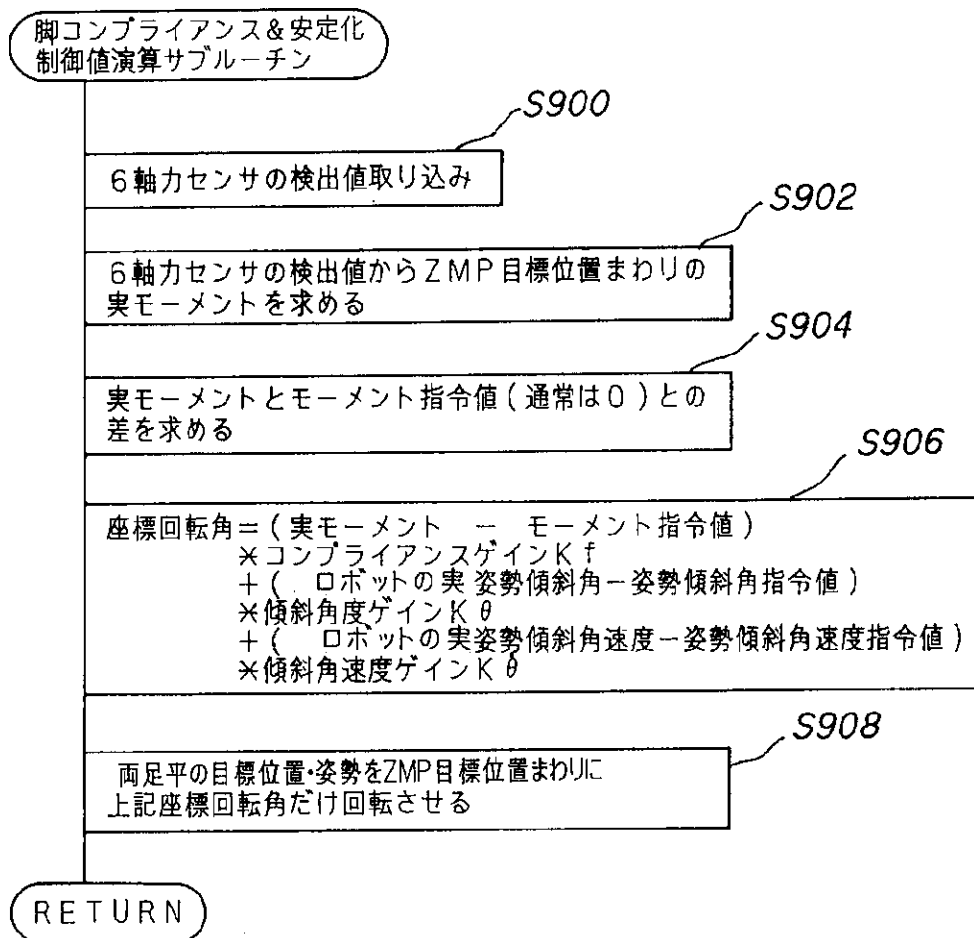
【図 2 0】



【図 2 2】

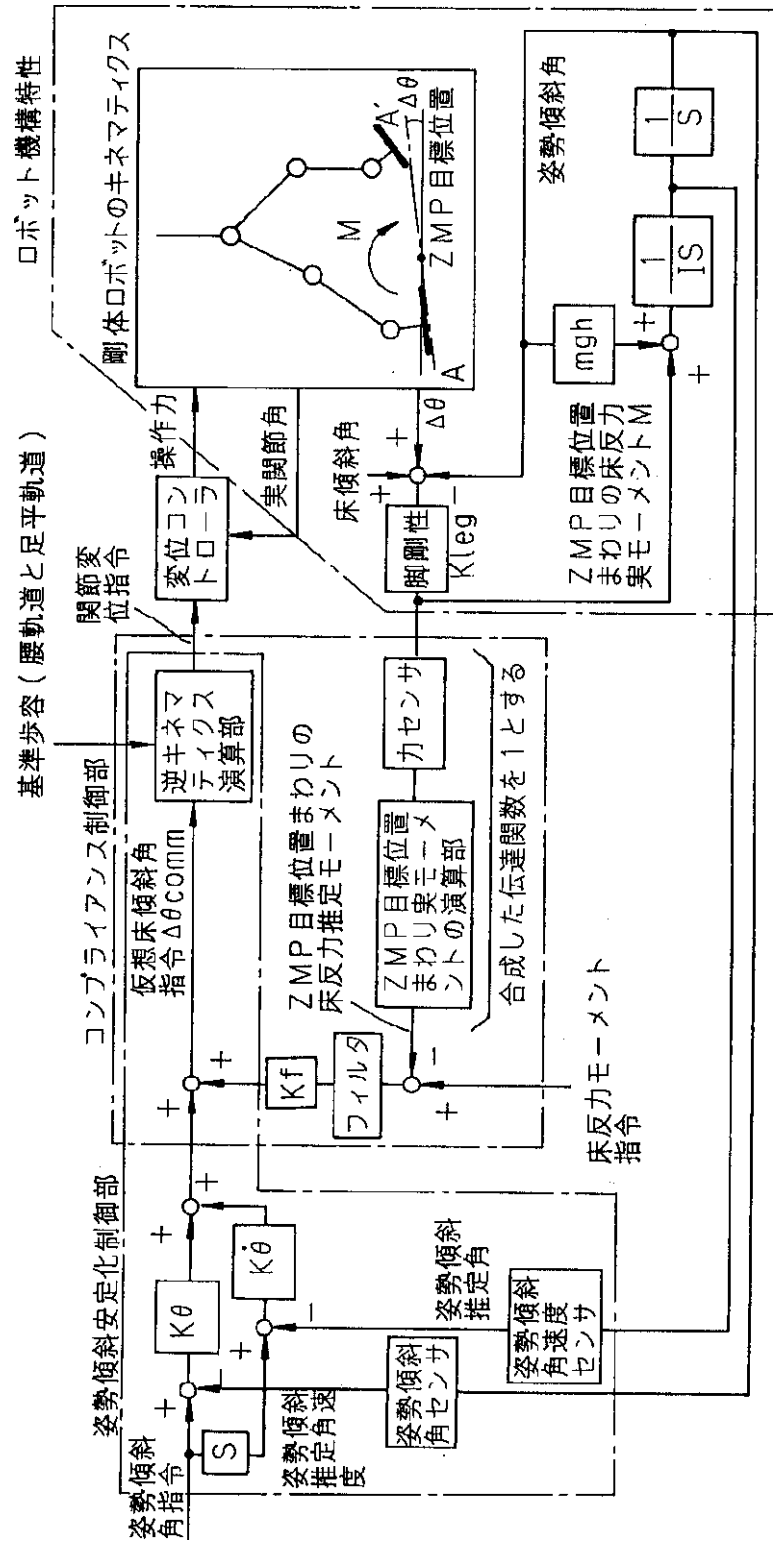


【図 2 3】



[illegible]

【図 2 6】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開 平 3 - 161290 (J P , A)
特開 昭61 - 211177 (J P , A)
特公 昭48 - 39425 (J P , B 1)
M i o m i r V u k o b r a t o v
i c 著 , 加藤一郎訳 , “ 歩行ロボットと
人工の足 ” , 日刊工業新聞社 , 昭和50年
3月31日 , p . 156 - 178

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷ , D B 名)
B25J 5/00
B25J 13/00,13/08