

脚方式移動ロボットの開発

Development of Legged Walking Robots

ロボットは、従来の製造業用だけでなく、第一次あるいは第三次産業を含む新しい市場への展開が予想されている。このようなロボットには、自律的に移動する機能が必要となる。ロボットの移動機構は、車輪方式、クローラ方式、脚方式に分けられ、脚方式が最も広範な領域を移動できる。しかし、脚方式の場合、多自由度機構の動的安定性を確保して、運動制御をするなどの技術課題を解決する必要がある。このような脚方式の移動ロボットの主要技術開発を目的として、2足歩行ロボット(「科学万博-つくば'85」展示)を開発した。このロボットは電源以外すべてロボットに搭載し、1歩10秒の準動的歩行を実現した。更に、万博期間中の6箇月間40km以上を踏破して実用化に向けての第一歩を踏み出した。

加藤一郎*
藤江正克**
吉田富治***
一柳 健****
中野善之*****

Ichirô Katô
Masakatsu Fujie
Tomiharu Yoshida
Ken Ichiryû
Yoshiyuki Nakano

1 緒 言

1980年代に入って、ロボットは製造業分野での市場を確立したばかりでなく、それ以外の産業分野にも新しい需要を喚起しつつある^{1)~3)}。このような分野のロボットは広い領域で作業することから、従来のマニピュレーション機能だけでなく、自律的に移動する機能が必要となる。自律的に移動するロボットを実現しようとする試みは既に国内外で広く行なわれてきており、それらのうちで最初の本格的な試みは1970年のSRIによる“SHAKY”⁴⁾であると一般に言われている。“SHAKY”は次の四つの特徴を備えている。

- (1) 視角装置による移動環境の認識
- (2) 障害物の検知と回避
- (3) 車輪走行
- (4) 走行電動機駆動及び制御回路用の電源電池の搭載

この研究以降、各所で移動ロボットの研究が盛んになった。更に、研究内容も、(1)移動のための行動計画、視覚による環境認識などの知能化技術の開発、(2)移動機構とその制御技術の開発、の二つの要素技術の流れに分化した。本稿では以下後者について論じる。

移動機構は一般に次の3方式に大別できる。これらの各方式が移動できる環境は次のようにまとめることができる。

- (1) 車輪式
- 車輪式は、連続面及び車輪半径に対して無視できるほど小さな凹凸のある面を移動することができる。
- (2) クローラ式
- クローラ式は、連続面及び無限軌道を介して連続面とみなすことが可能な範囲の不連続面を移動することができる。
- (3) 脚式
- 脚式は、連続面及び不連続面を移動することができる。

2 国際科学技術博覧会つくば'85展示 2足歩行ロボット

これまでに述べてきた背景に基づいて、歩行ロボット固有の技術課題に取り組む第一歩として、早稲田大学と日立製作所は協力して2足歩行ロボット“WHL-11”(Waseda Hitachi Leg 11)を開発し製作した。

このWHL-11は昭和60年3月17日から一般公開された国際科学技術博覧会つくば'85(以下、科学万博-つくば'85と略す。)

の政府テーマ館人間ゾーンに展示され、半年の期間中に総計40km以上の歩行実演を行なった。

2.1 準動的歩行をする2足歩行ロボット

WHL-11は早稲田大学で既に20年近くの歴史をもつ2足歩行ロボット研究の成果を踏まえたロボットであり、その基本技術である準動的歩行について表1を用いてまず簡単に紹介する^{5),6)}。

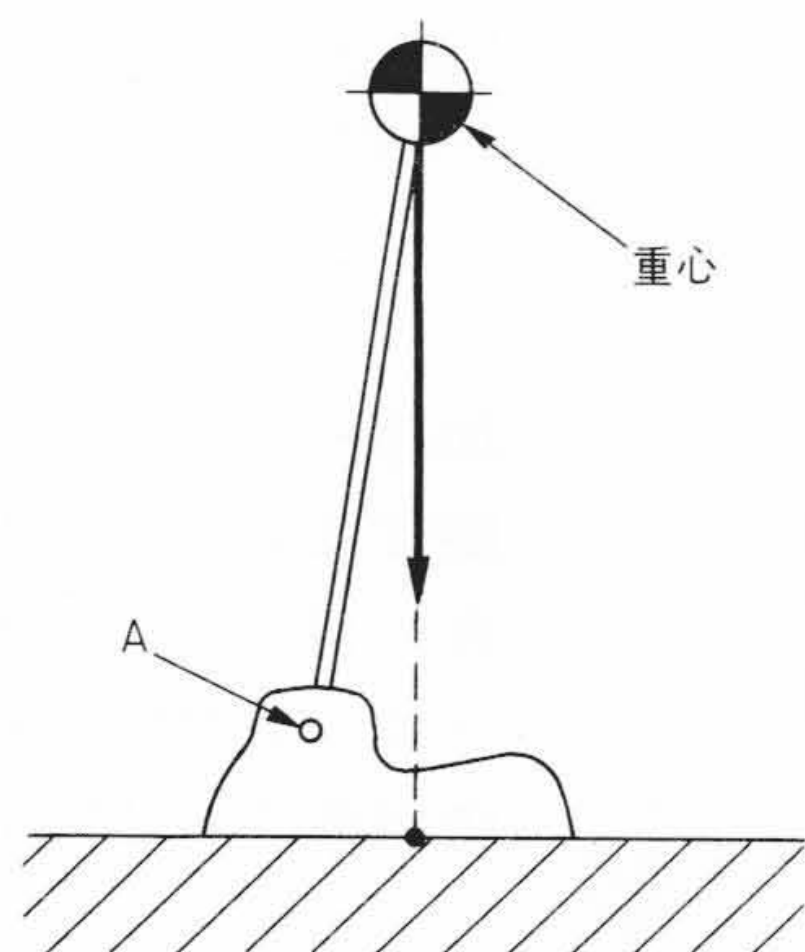
着地している足を立脚、床から浮いた足を遊脚とすると、歩行は片足(立脚)で重心を支え、他方の足(遊脚)が後方から前方へ移動する時期(単脚支持期)と、重心が後方の足から前方の足へ切り換わる時期(立脚切換期)の二つの期間の繰返しによって成立していると考えられる。我々人間が、音を立てないようにそっと歩く、いわゆる抜き足差し足という歩き方

表1 歩行形態の分類 静歩行は重心軌跡が常に足底面内に、動歩行は足底面内にあり、準動歩行はその中間で立脚切換期だけ動歩行をする。

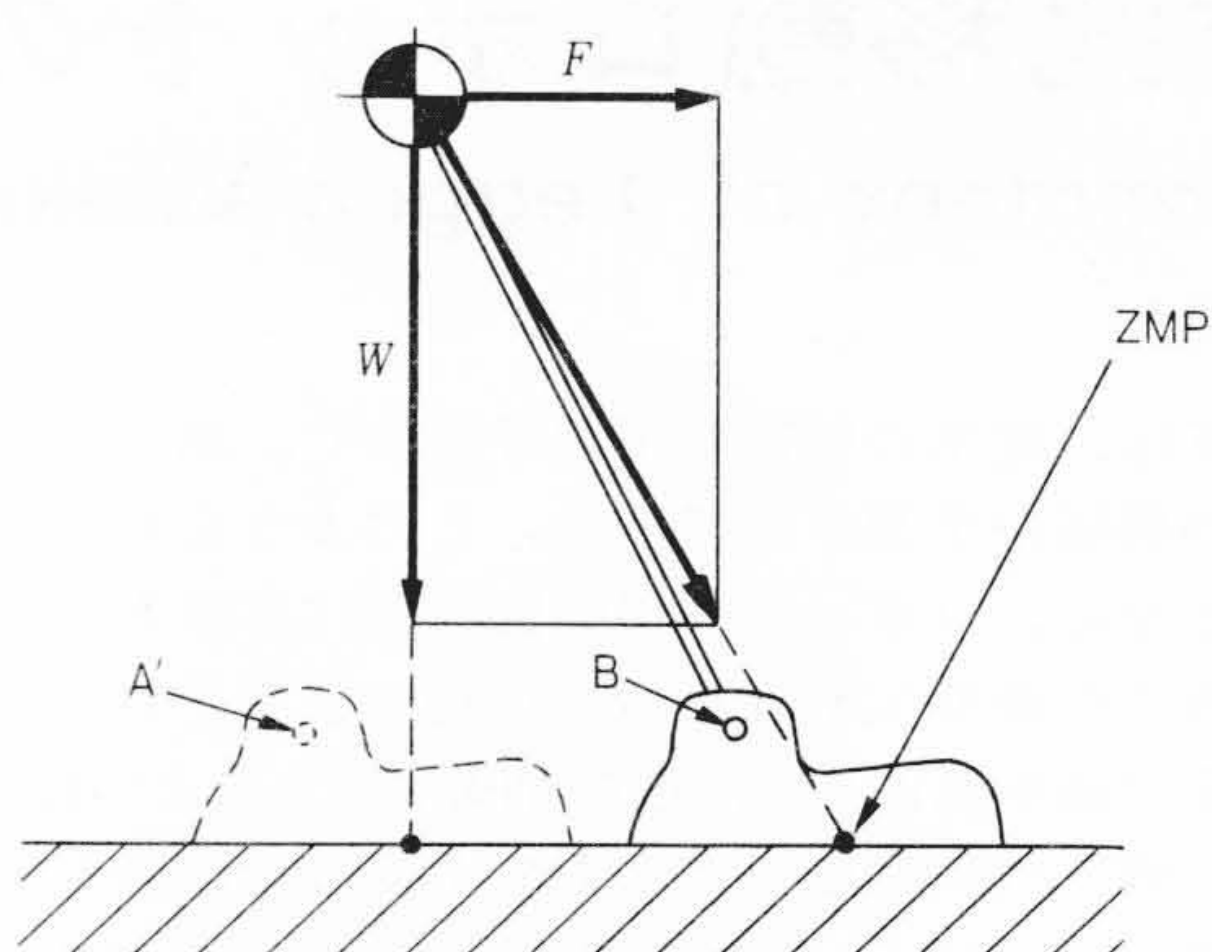
名 称	歩行形態	模 式 図
静 歩 行	重心軌跡は常に足底面内	
準動歩行	重心軌跡は立脚切換期だけ足底面外	
動 歩 行	重心軌跡は常に足底面外	

* 早稲田大学理工学部 ** 日立製作所機械研究所 *** 日立製作所日立工場 **** 日立建機株式会社研究所 工学博士

***** 日立製作所機械研究所 工学博士



(a) 立脚時



(b) 立脚切替時

注：略語説明 ZMP(Zero Moment Point), W(重力), F(慣性力)

図1 立脚切替期の運動 立脚時は重心は足底面内にあるが、立脚切替期にはそれまで接地していた足がA点回りに倒立振り子の運動を行ない、B点のある足に重心を移す。

は、歩行系の重心の位置だけに注目し、前述の二つの期間とも常に重心の静力学的なつり合いを確保して歩くもので静歩行と呼ぶ。これに対し、普通に成人が行なっている歩行を動歩行と呼ぶ。すなわち、重心に関しては位置だけでなく速度、加速度を加えた運動を、またリンク各部の位置、速度、加速度を考慮して動的な安定性を確保した歩行である。早稲田大学では、静歩行から動歩行に至る中間段階の歩行として、立脚切替期だけに動的歩行状態を取り入れた準動歩行を実現している。すなわち、単脚支持期には床面上に投影した重心位置が、立脚の足底面内から外れないように遊脚を前方に振り出す(静歩行)。立脚切替期には、図1に示すようにそこまで接地していた足が接地足の足首を中心に倒立振り子の運動を行ない、重心をその後足から振り出した前足に動的に切り換える(動歩行)。このとき前足は、重力と慣性力の合力のベクトルが地面と交わる点に接地する。この点では、この合力は前足を回転させる力として作用しないことから、この点をZMP(ゼロモーメントポイント)と呼ぶ。この繰返しによりロボットに準動歩行を行なわせている。

ロボットは片足に6自由度、両足合計12自由度をもち、自由度構成は図2に示すように、足首に2(ピッチ軸, ロール軸), ひざ部に1(ピッチ軸), また(股)部に3(ピッチ軸, ロール軸, ヨー軸)となっている。

ロボットの制御は以下のプロセスで実現している。まず、コンピュータ、シミュレーションにより、重心及びリンク各部を合わせた運動の安定性を確保できる条件下での単脚支持期、立脚切替期の設定歩行パターンを作成する。次に、これを用いてロボットを歩行させ、繰返し実験により実機に適したパターンに修正する。ここで完成した歩行パターンを各関節の角度データとしてロボット上のメモリに記憶し、それに従って歩くことにより準動歩行を実行する。

2.2 WHL-11の概要

今回開発した2足歩行ロボットWHL-11は、総重量120kg, 全高144.7cm, 脚長90cm, 図3に示したとおりで、脚の各関節に取り付けられた油圧のロータリアクチュエータの回転角度などをサーボ弁を介して制御する制御ユニット、角度指令に応じて関節を駆動する油圧ユニット及び制御対象である肢ユニットで構成されている。すなわち、このロボットは動力源(電源)以外のすべての機能、例えば頭脳に相当するマイク

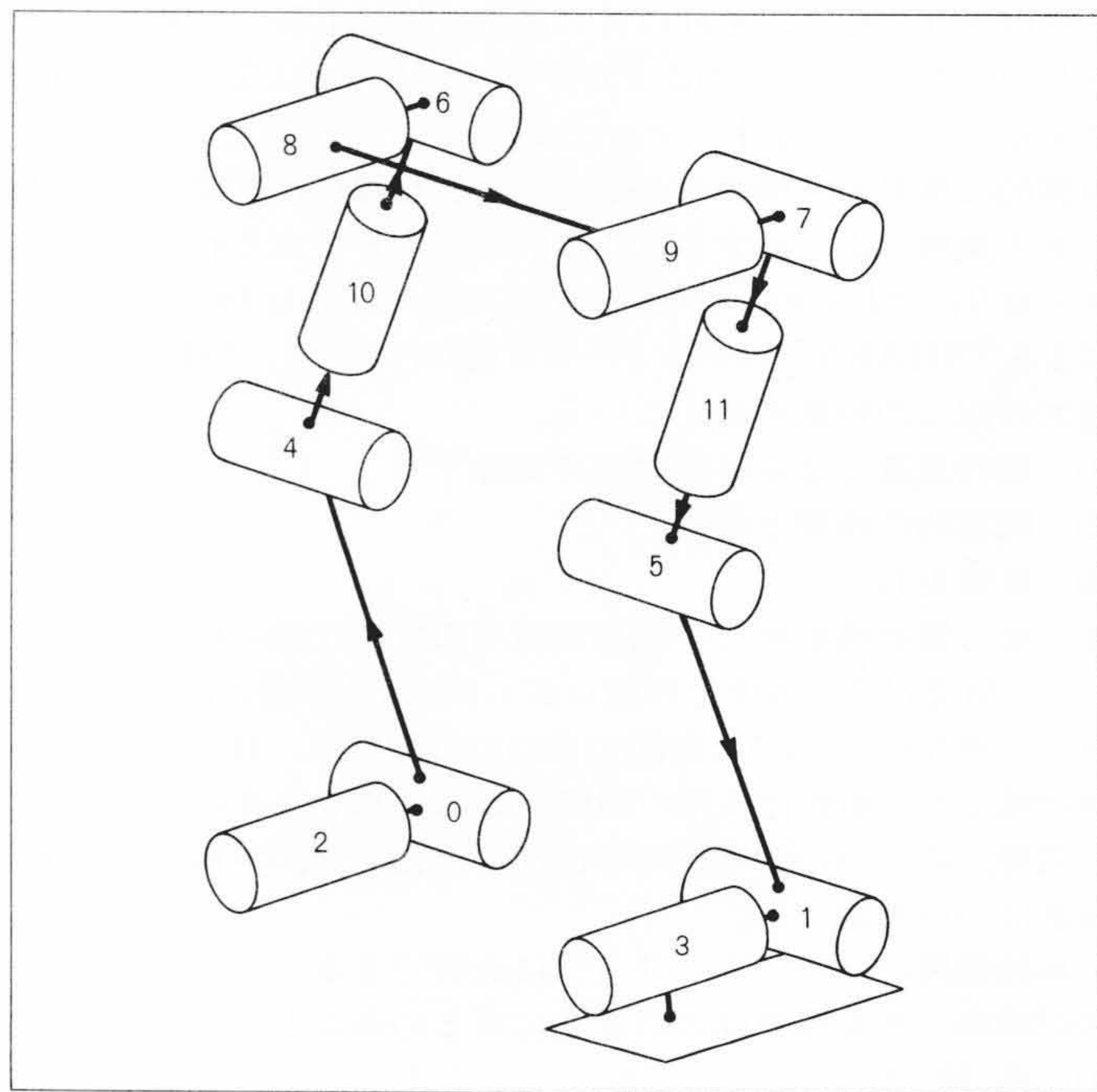


図2 2足歩行ロボットWHL10Rの自由度構成 各足とも足首に2, ひざ部に1, また部に3となっている。

ロコンピュータ及び心臓に相当するポンプ、電動機なども本体に搭載させているところに大きな特徴があり、今回の開発により実用化に向けて第一歩をしるしたと思う。以下、その特徴となる技術について述べる。

2.3 制御ユニット

制御ユニットはロボットの各部に取り付けたセンサからの情報をもとに各関節への角度指令を演算処理し、肢体ユニットの動作を決定する機能をもつ。制御ユニットのハードウェアは、関節角度指令の演算を行なう16ビットマイクロコンピュータを中心にマルチバスで周辺と接続している。デジタル角度指令をアナログサーボ系に伝えるD-Aコンバータ、関節角度情報をポテンシオメータから高精度に読むA-Dコンバータ、設定歩行パターンを格納する256kバイトROM(Read Only Memory)などを備えており、以下の制御を実行する。

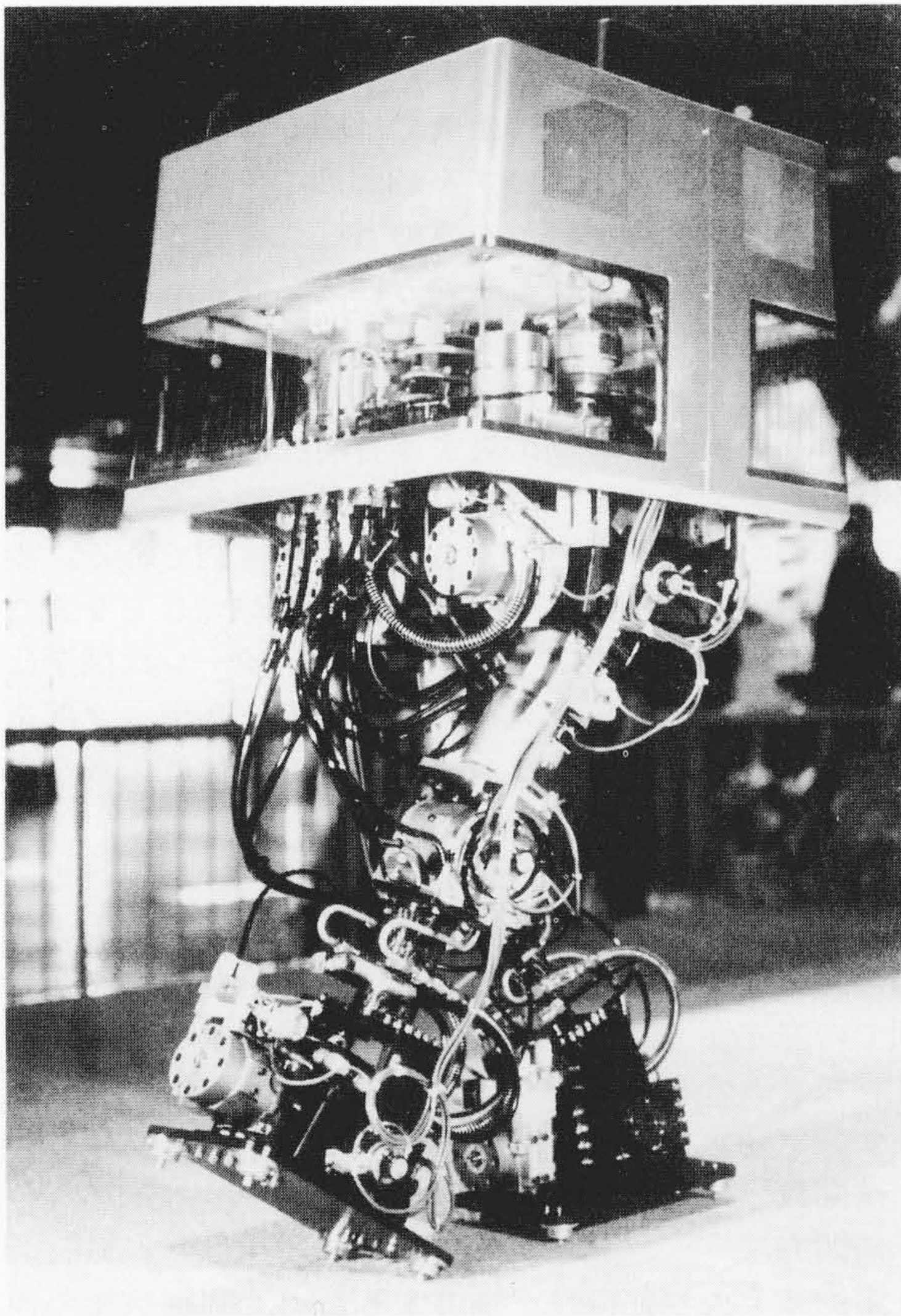


図3 EXPO展示2足歩行ロボットWHL-11 科学万博-つくば'85で、日本政府テーマ館で6箇月間40km以上を踏破した実演風景を示す。

設定歩行パターンは既に述べた準動歩行であるが、立脚切換期の着地衝撃が少なく、また長期歩行による機械特性の変化にも適応可能な歩行パターンとしたことが、今回の開発の大きな特徴である。

歩行パターンを生成する手順は、図4に示すように大形コンピュータを用いてオフラインでデータを作る(設定歩行パターン)過程と、そのデータをロボット上のROMに移して歩行実験により最適なデータを作る(歩行パターン)過程で構成し

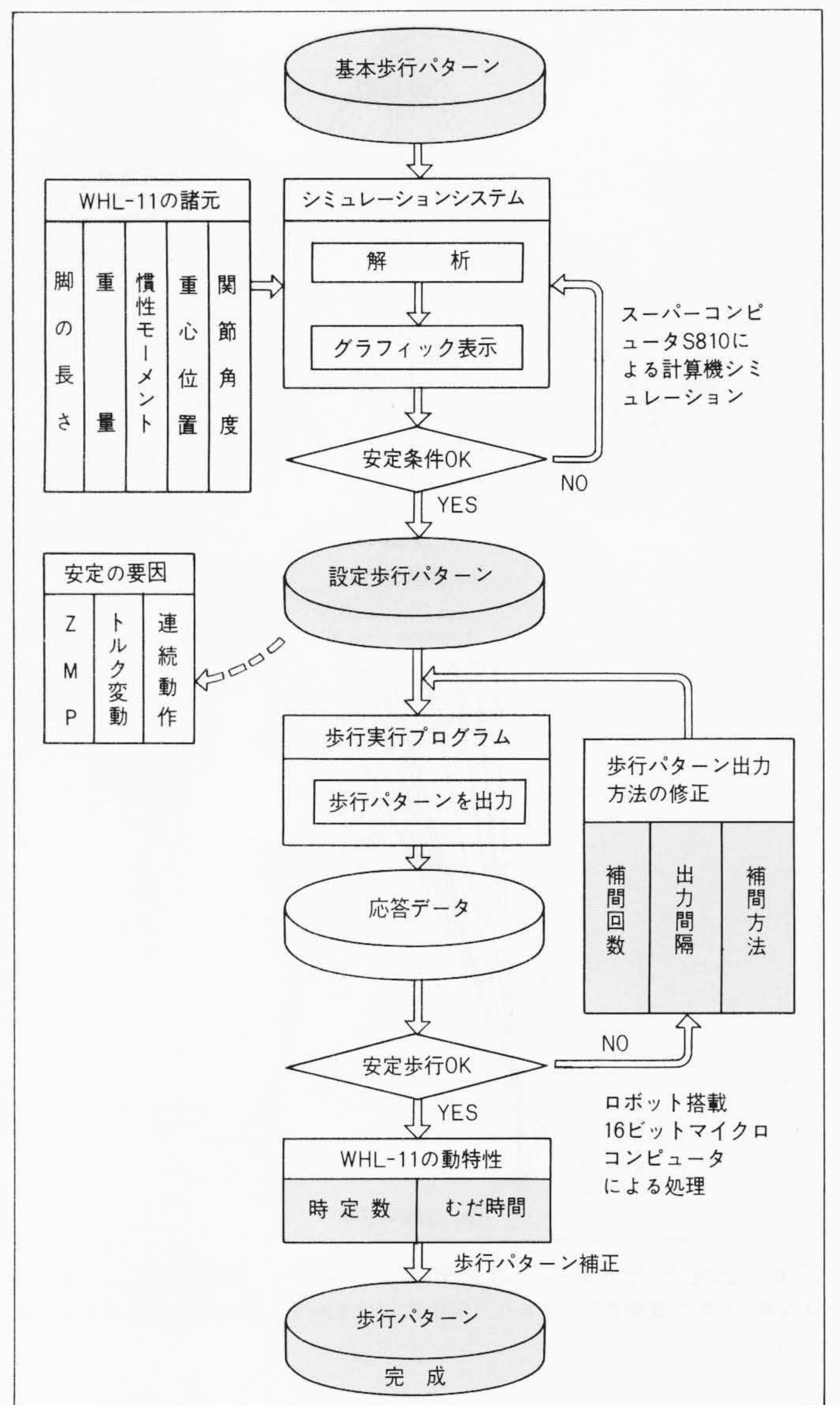


図4 歩行パターンの生成手順 基本歩行パターンを作り、計算機シミュレーションによりWHL-11用の設定歩行パターンとする。更に歩行実験により歩行パターンを完成する。

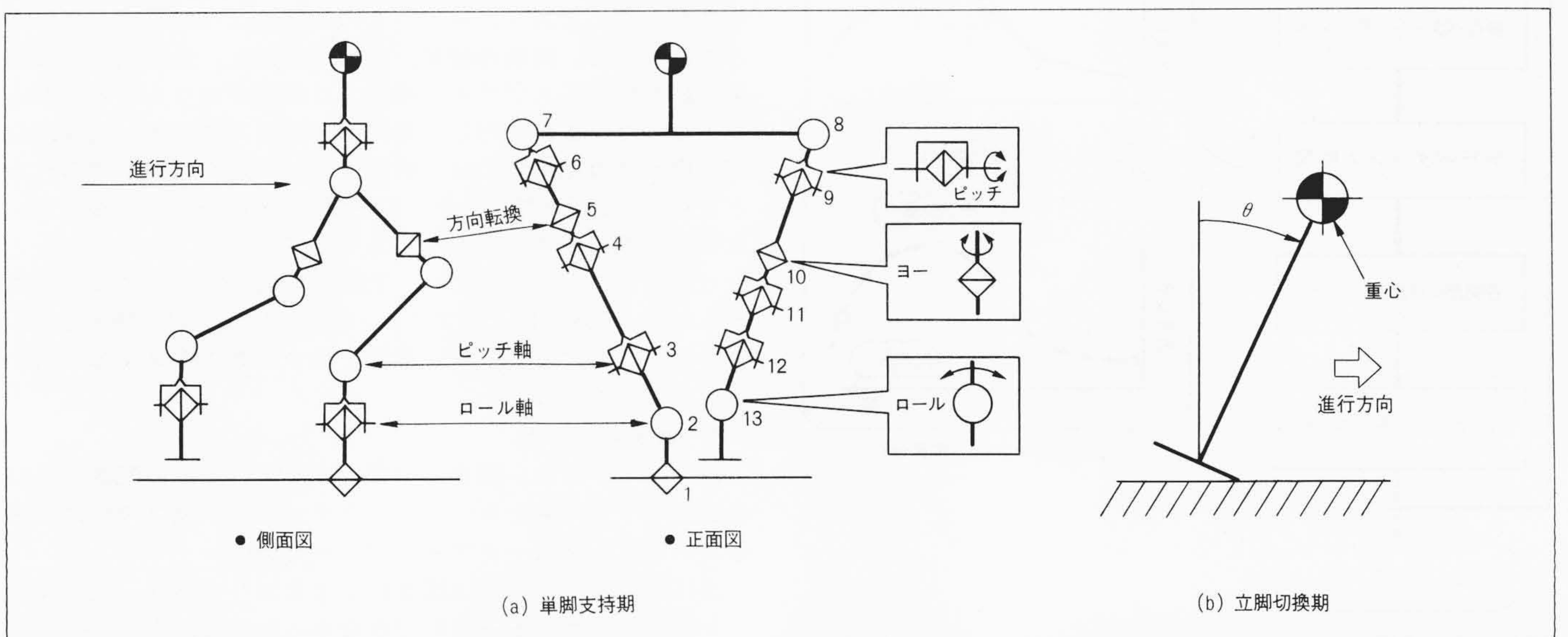


図5 歩行解析シミュレーションモデル 単脚支持期には1の接地関節を根元に、13の関節をもつマニピュレータモデル、立脚切換期は倒立振り子のモデルを使用する。

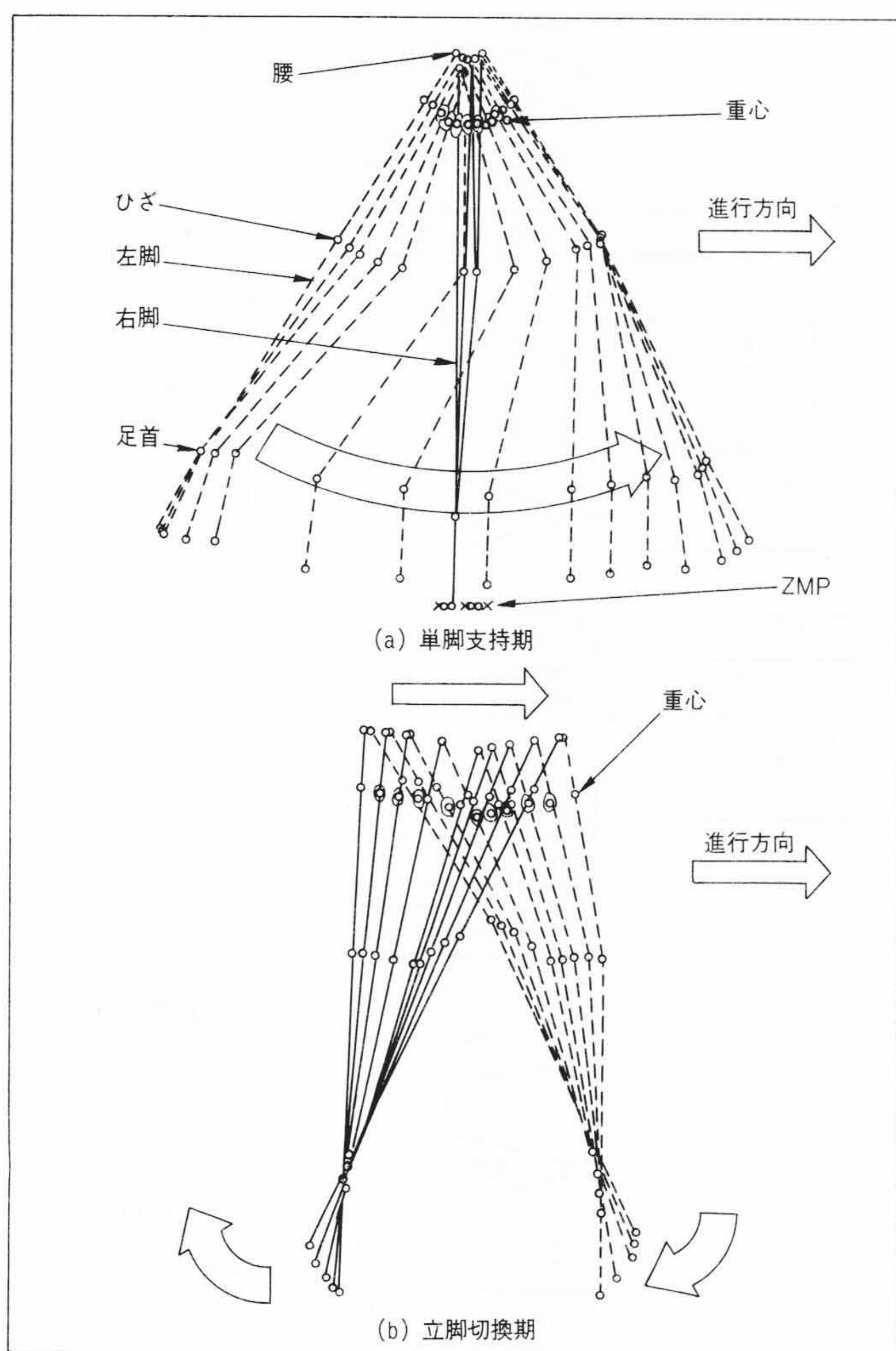


図6 設定歩行パターンのスティック線図 計算機シミュレーションより導いた脚の運動を示しており、図中実線は立脚を、点線は遊脚を示している。

ている。以下、各々の過程について順次述べる。なお、歩行パターンは各関節ごとの角度データから成っている。

まず設定歩行パターンの生成では図5に示すように、単脚指示期では着地点を根元とする13関節のマニピュレータモデルを設定してラグランジェの運動方程式を導き、立脚切換期は倒立振り子モデルによる運動方程式を導き、歩行解析を行なった。ここで準動歩行が成立する条件をZMPの位置で設定し、スーパーコンピュータS810を用いた計算機シミュレーションにより、歩行1周期に対する各関節の角度量を計算し設定歩行パターンとする。図6はこの計算機シミュレーションにより求めた脚の運動を示すスティック線図である。歩行パターンはち(緻)密に作成すると格納領域が大きくなることから、ロボット上のROMに格納した歩行パターンは図7に示すように粗いデータとし、実際の歩行制御は各データ間を滑らかに結ぶための補間を行なって、各関節に角度指令を出力している。

以上の手順により導いた設定歩行パターンを用いて、実際に歩行実験を行ない実機に適した歩行パターンを生成する。今回の開発では次の4点に着目し、関節駆動トルクと立脚切換期での安定性を評価して長期安定歩行を実現した。

- (1) システムの動特性
- (2) サンプル時間
- (3) 補間数
- (4) 補間方法

まずシステムの動特性を補償するため、制御対象の逆伝達関数を求めて歩行パターンにたたみ込む方法を検討したが、制御対象が複雑なうえ、実際の歩行実験により、本制御対象は一次遅れ要素とむだ時間要素で十分近似できることが明らかになり、時定数とむだ時間を考慮した。

サンプリング時間及び補間数は、相互に影響しあって歩行特性を左右することから、サンプリング時間20~60ms、補間回数16~48の各組合せすべてに対する全関節のアクチュエータ駆動必要トルクを検討し、サンプリング時間20ms、補間回数48を最適値として得た。

また、補間方法については、直線補間及び三次スプライン補間を検討した。三次スプライン補間は、データ間を三次スプライン関数で滑らかにつなぐものであり、この曲線は関節の動きが滑らかなだけでなく、曲線全体のひずみを最小にする性質を備えており、ロボットの補間には一般に適しているとされている。実験の結果、立脚切換期に、直線補間では脚に揺れが生じ、スプライン補間では振動が生じることが明らかとなった。これに対して単脚支持期はスプライン補間、立脚切換期は直線補間では立脚切換期に安定な状態が得られるとともに、歩行全域にわたって各関節の駆動トルクが少なく、立脚切換期の最大駆動トルクも極めて少ないことが明らかとなった。この実験結果より、上記の長期歩行の目的に適合させるため、直線補間とスプライン補間を使い分けて使用した。この使い分けにより、安定歩行を乱す立脚の振動を極小にすることが可能となった。

2.4 油圧ユニット

油圧ユニットは、図8に示すように、各関節に配置している12個のサーボ弁とロータリアクチュエータ及び腰部に配置しているポンプモータアセンブリから成る。

油圧ユニットの構成は図9に示すとおりであり、従来ロボットに油圧ユニットを搭載できなかったのは、アクチュエータ駆動のための消費エネルギーが大きいことと、ポンプモータアセンブリが大きいためであった。後者については、今回

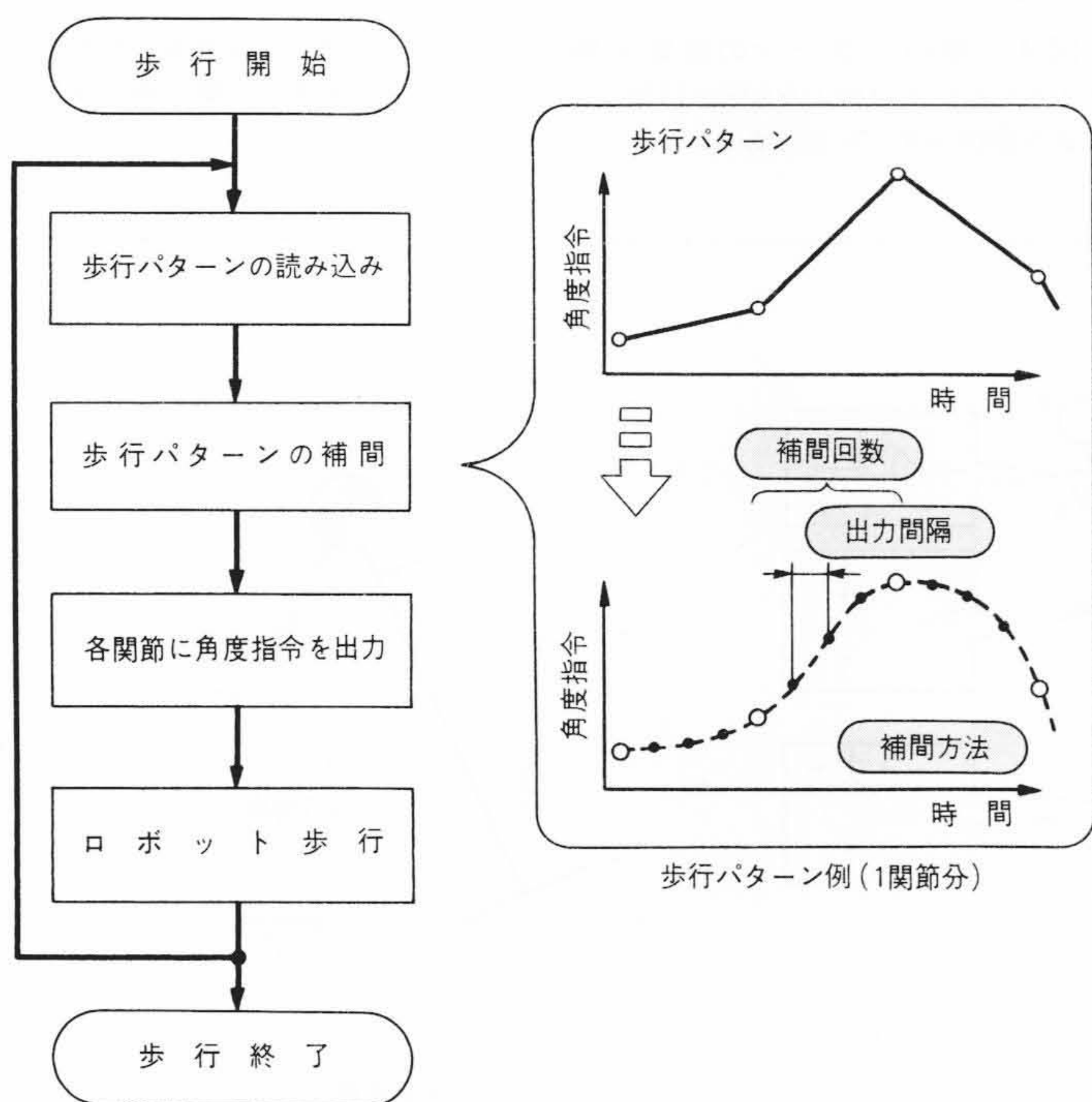


図7 歩行実行フロー ROMに格納した歩行パターンは、○印で示したように粗いデータであり、●印で示した補間データを演算して実際の各関節の角度指令として出力する。

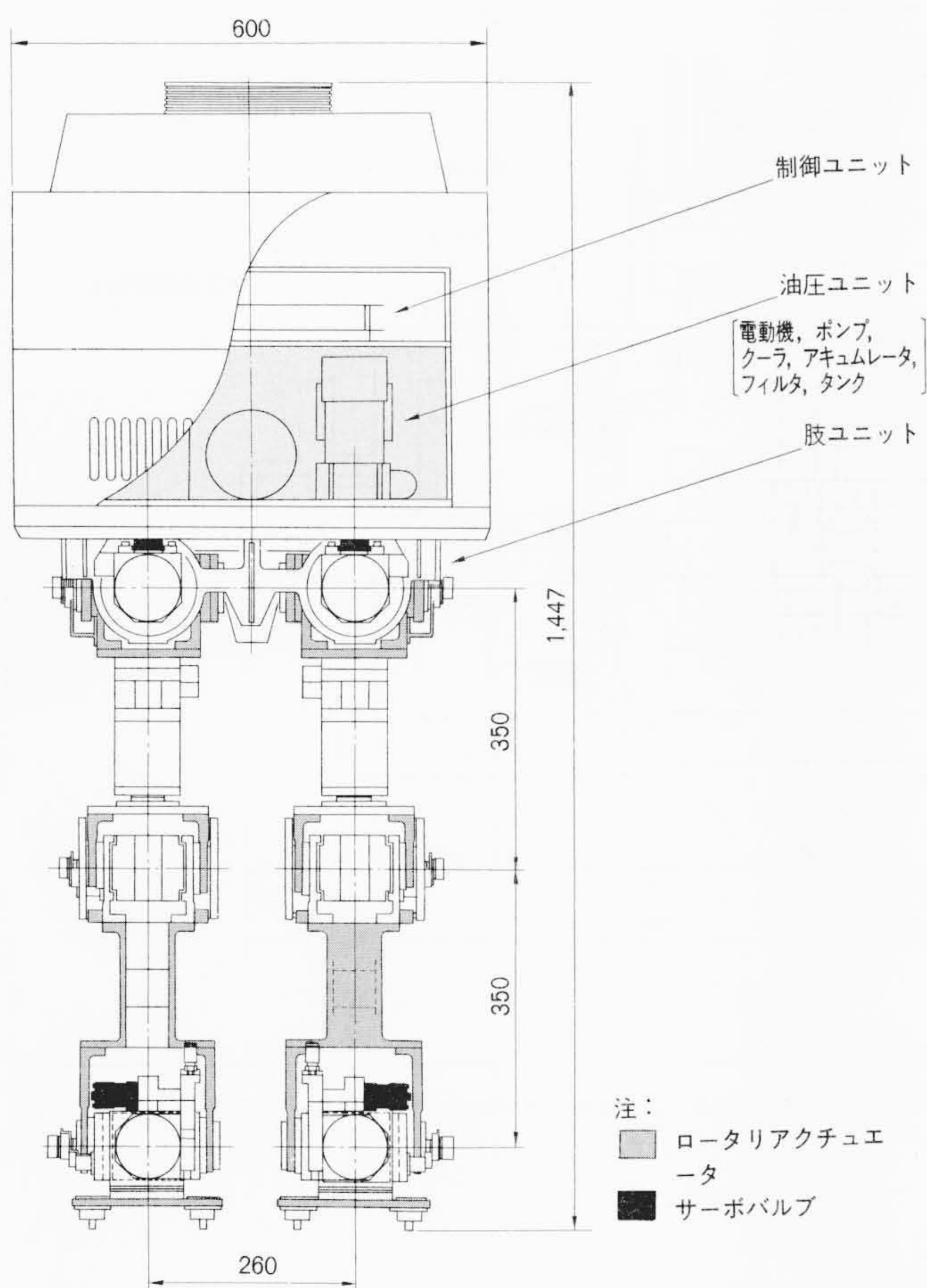


図8 2足歩行ロボットWHL-11の構造 全高1,447mm, 全幅600mm, 全重量120kgで, 計算機システムと油圧ポンプモータユニットを搭載している。

表2 ロータリアクチュエータ仕様 足首, ひざ, また各々に用いたロータリアクチュエータの仕様であり, 最大トルク20kgf・m, 最大重量2.7kgで内部漏れはすべて0.3l/min以下である。

項目	足 首		ひざ	また		
	ピッチ	ロール	ピッチ	ピッチ	ロール	方向転換
出力トルク (kgf・m)	20	10	10	20	15	5
可動角 (deg)	60	45	45	60	45	90
ベーン数 (枚)	2	2	2	2	2	1
重量 (kg)	2.7	2.0	2.0	2.7	2.3	2.0
外形寸法 幅×奥行×高さ (mm)	85×90.5 ×110	82×82 ×95	82×82 ×89	85×86.5 ×110	85×86.5 ×96	82×82 ×69.5
トルク重量比 (kgf・m/kg)	7.4	5.0	5.0	7.4	6.5	2.5
内部リーク量 (l/min)	0.3以下					

はインバータ駆動の1.4kW電動機で, 定格7MPa, 10l/minの圧力補償付きアキシアルピストンポンプを制御することにより, 全重量6.8kgを実現しロボットに搭載することができた。

更に, アクチュエータ駆動系の消費エネルギーを最小にするための要件は, サーボ弁及びロータリアクチュエータを軽量構造とすることと, それらの内部油漏れを極小にすることである。各ロータリアクチュエータの仕様は表2に示すとおりであり, トルク/重量比は最大でも7.4で電動機並みであり, 電動機に比べて優れた性能を実現した。各アクチュエータの内部油漏れは0.3l/minとなっている。また, 図10にその構造を示した内部油漏れの少ないマイクロフォースモータ形サーボ弁を新たに開発した。本サーボ弁は定格流量3l/min, 圧力7MPa, 重量260gと世界最小を実現しており, 内部漏れはノ

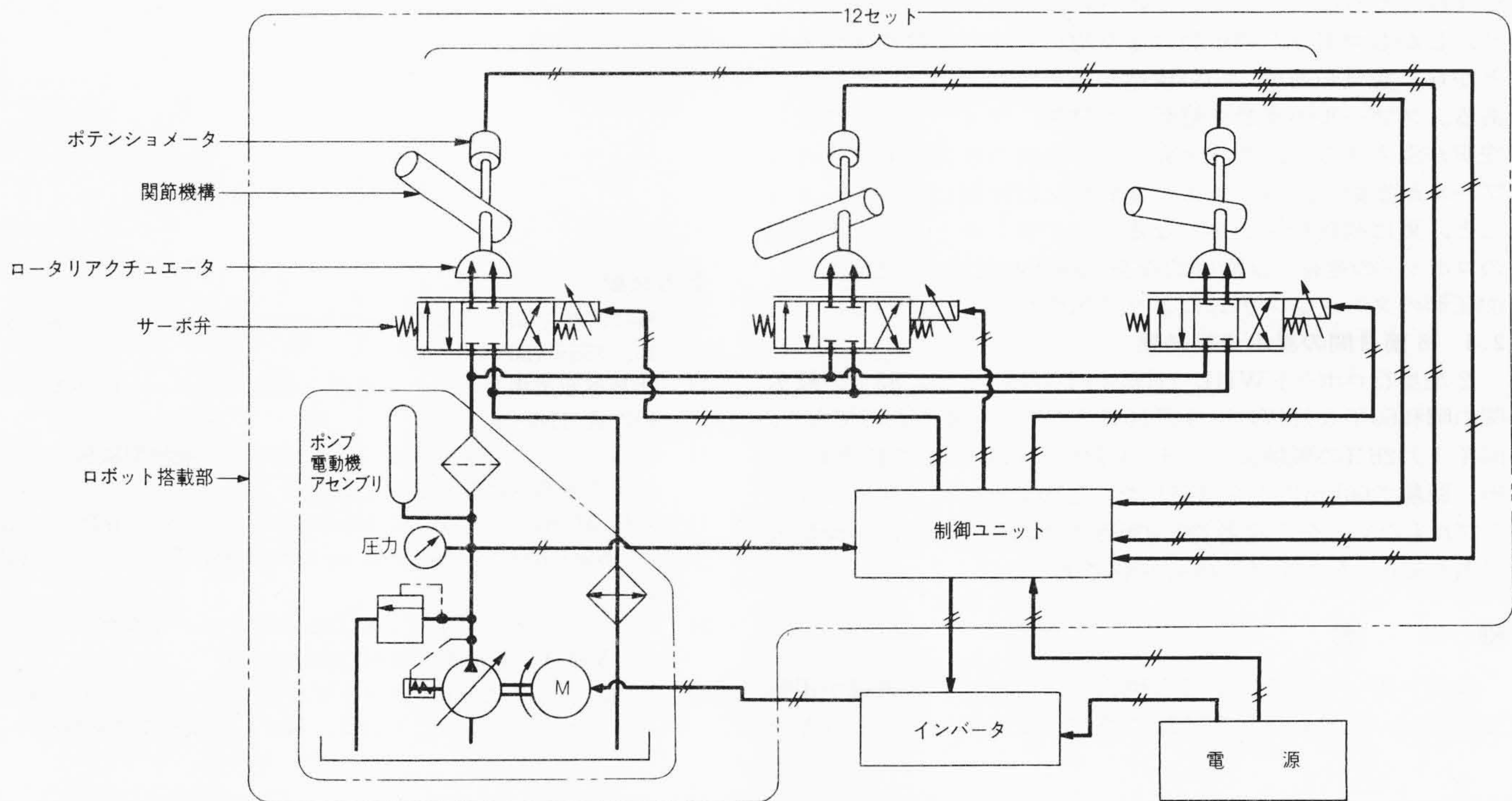


図9 油圧ユニット構成図 12の関節に配置しているサーボ弁と, ロータリアクチュエータ及び腰部に配置しているポンプモータアセンブリから成っている。

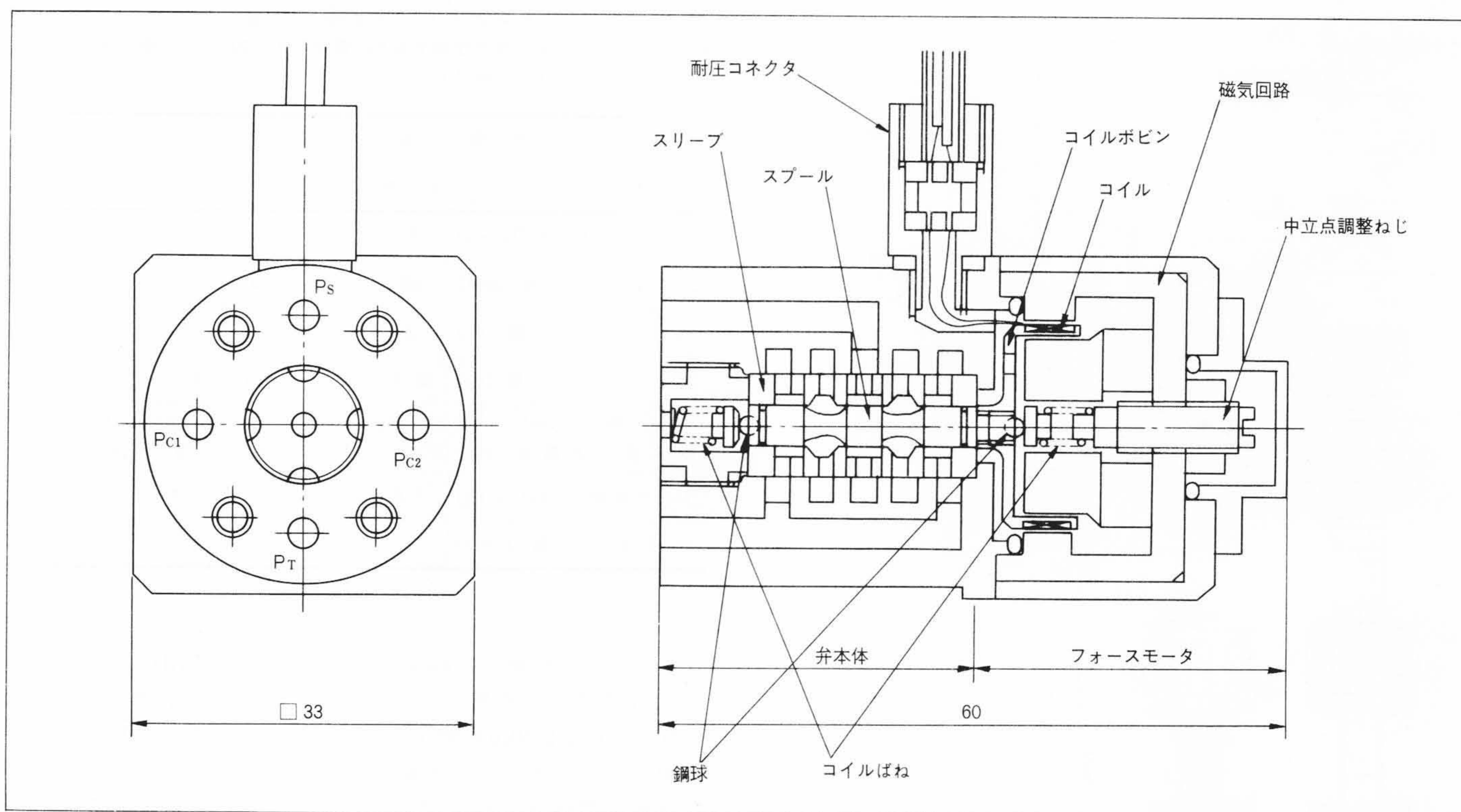


図10 マイクロフォースモータ形サーボ弁 弁本体と弁のスプールをコイルを用いて駆動するフォースモータから成っている。定格流量3l/min, 圧力7MPa, 重量260gで世界最小を実現した。

ズルフラップ形の従来製品の $\frac{1}{3}$ (0.1l/min)とすることができ、更に上記アクチュエータとの一体化による関節全体としての軽量化も可能となった。

今回のサーボ弁の開発で最大の問題は、オイルダンパによる制動に伴って生じたもので、フォースモータ部分に空気が蓄積し、サーボ弁の運動を乱すことであった。すなわち、最初空気抜きを完全にしておいても、戻り通路から空気が押し込まれてくること、及びサーボ弁の取付姿勢がさまざまであり、しかもロボットの歩行により更にさまざまに変化することから、空気が蓄積しない構造が極めて難しいという問題である。スプールの運動を解析した結果、フォースモータ部に空気が混入すると、サーボ弁の戻り通路の圧力変動によりスプールが振動し、特に急激な変動時には片側に寄ってしまうこと、更に制動特性が悪くなることが明らかとなった。今回のロボットの運転では徹底的な空気抜きを実施するとともに、加圧形のタンクシステムにより空気発生を抑えている。

2.5 6箇月間の展示歩行結果

2足歩行ロボットWHL-11は、科学万博-つくば'85で一般公開の昭和60年3月17日～9月16日までの展示歩行だけでなく、同年1月26日の現地搬入以来、3,749.5往復、歩数で13万4,982歩、距離で60km以上を踏破した。この間展示に支障を来すトラブルもなく、全入場者約2,030万人中、日本政府テーマ館入場者約550万人の注目を集め好評であった。

3 結 言

移動ロボット、その中でも現状の技術だけでは実現が困難であるが、実現した場合活躍の場が大変大きいであろうと予

想される歩行ロボットの主要技術を盛り込んだ2足歩行ロボットを開発した。この技術は、原子力関連を中心にしたプラント内の危機などの点検ロボットに応用し、威力を発揮すると思われる。更に、今後の需要の高まりが予想される第一次産業、第三次産業で活躍するロボット実現に必要な技術となろう。

参考文献

- 1) 藤江, 外: 知覚誘導クローラ形移動ロボット, 日立評論, 66, 10, 755～758(昭59-10)
- 2) (社)日本産業用ロボット工業会: 産業用ロボット長期需要予測報告書(1985-3)
- 3) 助機械システム振興協会: 社会資本維持補修型機械システムに関する調査研究報告書(1982-3)
- 4) J.H. Munson: The SRI Intelligent Automation Program: 1st National Symposium on Industrial Robots, 113(1970-4)
- 5) 高西: 2足歩行ロボットによる準動歩行, 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 3, 36～43(1983-10)
- 6) 高西, 外: 2足歩行ロボットWL-10RDによる動歩行の実現, 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No. 4, 67～77(1985-8)