

内62-11

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

2足歩行ロボットの動歩行に関する研究

申 請 者

高 西 淳 夫

Takanishi Atsuo

機械工学専攻・生物制御工学研究

昭和 62 年 10 月

本論文では、人間の下肢構造に似た2本の脚機構を有する移動機械システム（以下2足歩行ロボットとよぶ）に対し、平坦路上で成人なみの歩行機能を実現するための制御手法について論じた。

歩行の全周期にわたり静的な力である重力のみのバランスをとっている歩行を静歩行とよぶ。一方、人間の成人の行っている歩行で、その全周期について静的な力である重力に、動的な力である慣性力も加えてバランスをとっている歩行を動歩行とよぶ。

現在までに2足歩行ロボットの動歩行とその制御に関する研究報告は数多くある。しかしそれらの大半は理論的提案に過ぎず、機械モデルを用いた歩行実験により理論を実証するには至っていない。また機械モデルによる実験を行っている例もないではないが、左右方向には転倒することがない2次元モデルを用いたものが多数を占めている。あるいは3次元モデルの場合であっても、歩行の開始・終了時に人間その他の介助を必要とする定常歩行のみの実現に留まっている。3次元モデルによる動歩行で、しかも歩行開始から終了までをロボット自身が自律的に行う歩行（以下動完全歩行とよぶ）はまだ実現されていない。

そこで本研究では、

- ① 3次元2足歩行モデルの平坦路上における動完全歩行を実現するための歩行制御方式を提案する。
- ② ①の制御方式の有効性を、具体的に機械モデルを製作し、実験的に立証することを目指す。

本論文の概要を章を追って以下に述べる。

第1章では、まず本研究の目的を述べた。つぎに序論として2足歩行ロボットの開発・研究の流れを振り返り、本研究の歴史的背景を紹介した。最後に本研究により導かれた成果について、本研究に関連するいくつかの研究分野から見た本研究の意義を明らかにした。

第2章では、現在の2足歩行ロボット研究をいくつかの基礎的項目について整理し、2足歩行ロボット研究の現状について概観した。また本研究に要請される2足歩行ロボットの仕様、機能ならびに力学モデルを明らかにした。

1980年代に入り現在まで、2足歩行ロボットの研究はもっぱらわが国において行われている。その数は15グループを越え、様々な形態・機能の機械モデルが製作され、種々の歩行制御手法が提案されている。本章では数あるこれらの研究を「機械モデル」、「歩容」、「モデリング」、および「制御」という視点から整理した。その結果、本研究に要請される2足歩行ロボットの仕様としては3次元モデル、歩行機能については動完全歩行、さらにその歩行制御には路面に作用可能なモーメントが、ある範囲に限られる力学モデル（人間形力学モデル）の導入が必要であることを明らかにした。

第3章では、まず歩行システムの力学系を動力学視点から定式化した。同式

をもとに支持状態と関係付けたかたちで歩行システムの運動に関する必要条件を明らかにし、安定な歩容（支持シーケンスと質点軌道）について検討を行った。

2足歩行ロボットに限らず多足歩行ロボットやクローラ式移動ロボットなどは、路面との摩擦力をもってその推進力としている移動システムである。このような移動原理をもつ移動システムの1つである2足歩行ロボットの歩行運動は、2脚の繰り返し運動により足部と路面の作る支持点または支持面に対する作用（力）により生じ、このとき移動の全期間にわたってどちらかの足部は常に路面と接している。このことは、歩行による移動が足部と路面との接触によって可能になる一方、その運動は全くの自由ではなく、足部が路面と常に接触していなければならないという条件により、拘束されることを意味している。したがって、歩行軌道の計画あるいは歩容の安定性の吟味など、歩行に関するあらゆる力学的検討を行う際の土台となる力学モデルには、上述のような拘束条件が含まれていることが必要となる。

本章前半では、まず上記のような移動原理を持つ移動システムを「歩行システム」と名付け、それに特有の拘束条件付きの力学系を動力学視点から定式化した。次にこの結果をもとに、路面支持状態との関係において歩行システムの運動に関する必要（制限）条件を明らかにした。

ところで、歩行システム全体が前進して行く支持状態と質点軌道が求まり、これが上記の必要条件を満足するものであれば、そのような軌道は支持状態に関係なく歩行成立の十分条件となる。しかしながら現実には、機械モデルや歩行環境に様々な制限事項や不確定要素が存在する。このため、どのような支持状態でもロボットが安定な歩行を実現できるとは限らない。

そこで本章後半では、前半の結果をもとに支持点の数と関係付けたかたちで、安定な歩容についての動力学検討を行った。その結果、多点支持→多点支持→…→多点支持という支持状態の遷移シーケンスが、動完全歩行を実現させるため最も安定性の高い歩容であるという結論を得た。この歩容を「多点支持歩行」と名付け、その支持状態判別のため「ZM・NFP」とよぶパラメータを考案・導入した。

第4章では、本論文の主題である2足歩行ロボットの動完全歩行を実現するための歩行制御方式を提案した。

前章における結論、つまり動定常歩行のみではなく完全歩行に必要な静歩行から動歩行までの首尾一貫した安定性の把握・保持が可能な多点支持歩行を本制御方式の目標歩容とした。

2足歩行は歩行中周期的に力学的拘束状態が変わるという脚式移動特有の力学系を持っている。特に立脚の切り換え動作中においては大きな衝撃力が加わり、これが安定な歩行の維持に少なからぬ影響を及ぼす。

以上のような背景から本章では、次のような歩行制御方式を提案した。まず、

1 歩行周期を「立脚切換相」および「単脚支持相」とよぶ2つの運動相に分ける。立脚切換相においては足首関節を柔軟にして衝撃を緩衝することを考え、歩行前に「設定歩行パラメータ」と名付けた足首関節のばね定数、粘性係数、トルク設定値ならびにバネの中立点位置を、計算機シミュレーションにより決定しておく。

歩行時には、その関節特性を位置およびトルクのフィードバック制御を用いて実現し、衝撃を緩衝した滑らかな立脚の切り換え動作を行う。

一方単脚支持相では、歩行前に「設定歩行パターン」とよぶ関節の設定軌道を、計算機シミュレーションにより支持状態を確認し、計画・作成しておく。

ところで、立脚切換相ではトルクをフィードバックするために実際の軌道に設定軌道との偏差を生じてしまう。そこで歩行時には、まず関節は位置のフィードバック制御を行う。この制御系に対し、偏差を生じている実軌道から滑らかに設定軌道に移行する目標軌道を与えることで、多点支持状態を保持しつつ歩容の安定化を図る。

また本章後半では、Luhらの逆動力学計算アルゴリズムを利用して単脚支持相における支持状態を判別する手法を提案した。これは、2足歩行ロボットに限らず様々な形態のリンク構造を有する歩行システムの支持状態判別に用いることができる汎用性の高い手法である。

第5章では、2足歩行ロボットシステムWL-1ORDの開発、および同モデルに前章までに述べた歩容と制御方式を適用し行った歩行実験を中心に述べた。

本章前半の中核をなす機械モデルWL-1ORDの設計は「制御装置を搭載し、動歩行が可能な人間形2足歩行ロボット」という条件下で行った。すなわち、人間形ということから自由度構成および各部の寸法などではできるだけ人間のそれに近くするように配慮したこと、動歩行可能ということから構造部材やアクチュエータを軽量化したこと、制御装置搭載ということから電気回路の高実装密度化および低消費電力化を図ったことなどを具体的に述べた。

ところで前章で提案した歩行制御方式にとって、高い精度の設定歩行パターンおよび設定歩行パラメータ作成が不可欠であること、さらに実際のロボットが多自由度システムかつ動力学的取り扱いが必要であることから、その作成作業はコンピュータの支援なしでは考えられない。

そこで、歩行パターン(パラメータ)作成支援システム「WALK MASTER-3」を開発したのでその機能について概要を述べた。

歩行実験の結果、WL-1ORDは史上初の動完全歩行を実現した。歩行時間は、歩幅40[cm]で平均1歩1.5[秒]、最高1歩1.3[秒]である。歩行実験の項では、実験データをもとに本論文で提案した歩行制御方式の有効性を明らかにするとともに、その問題点についても考察・検討を行った。

第6章は結論であり、これまでの各章で得られた成果をまとめた。