

報告番号	甲 第 13140 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 時間的制約充足型統合制御に基づく事象駆動型 6 脚移動ロボットの不整地歩行
(Dynamic Walking on Irregular Terrain of Event-Driven Hexapod Robot based on the Time Constraint Satisfaction Problem for Control Architecture Integration)

氏 名 村田 勇樹

論 文 内 容 の 要 旨

第 1 章：序論

これまで、多脚移動ロボットの研究においては、制御器をどのように設計すべきかが一つの課題として挙げられていた。多脚移動ロボットの制御器は、機能毎に分割したモジュール構造が採用されることが多い。その分割された機能のうち歩行に必要なものには例えば、姿勢制御や運動計画、接触センサを用いた局所制御などの複数の制御の要素(本論文では制御要素と呼ぶ)が含まれている。いずれも制御要素間の相互作用を考慮しつつ、実装しなければならない。なぜなら、単純に制御要素同士を組み合わせるだけでは相互の働きが衝突し、デッドロックに陥ることも考えられるからだ。加えて、ある実験環境上で制御要素同士の干渉がないことが確認できても、環境を変えた場合には正常に動作する保証がない。本研究では、6脚移動ロボットを対象として環境を限定せずに制御要素の制御を含む制御系の設計を行う手法を提案する。

本章では、研究背景として従来の脚移動ロボットの従来の研究や実用化に向けての動きを紹介しながら、本研究の立ち位置を述べる。

本論文は 7 章により構成される。2 章は本研究の多脚ロボットの制御に使う分散歩行制御法「接地点追従法」を説明する。3 章ではこの 2 章で提案した歩行制御法を含むロボットの制御器設計を行うために使うモデル検査を説明する。4~6 章ではモデル検査を使ってどのように接地点追従法を含む制御系の設計法として各章毎に別の手法を提案する。ただし、各

章では制御系の設計方法だけでなく、制御器に含まれる制御要素(姿勢制御や運動計画等)が異なるため、章の最初にこの制御要素を列挙した上で、制御器設計の手法を述べる。

第2章：接地点追従法の概要

本章では稲垣らが提案した事象駆動型分散歩行制御法「接地点追従法」を説明する。この手法は、先頭脚の接地点を後続脚へ引き継ぎながら推進させる制御であり、全ての脚の運動計画が先頭脚に集約されるという特徴をもつ。この手法は本来ムカデ型ロボット用に考案された手法である。そのため、以降の章で使用される接地点追従法はこの章で説明されるものから6脚ロボット用に改良されているため、各章毎にどういった改良が施されたか、あるいはロボットの歩行に必要な姿勢制御・運動計画等の複数の制御要素をどのように取り込んだかを1つずつ説明する。そのため、2.1節では接地点追従法を説明するために必要な変数の定義を行い、2.2節で稲垣らが提案したムカデ型ロボット用の接地点追従法の説明をする。2.3節でこの初期の接地点追従法を基に行われたこれまでの先行研究とそれに対する本研究の立ち位置について述べる。2.4節で述べたように本研究での接地点追従法の6脚ロボット用の改良を説明する。

第3章：モデル検査の概要

本研究では、接地点追従法を含む制御器設計の過程で、制御器のデッドロック検証にモデル検査を用いる。モデル検査は、システムの振舞いを網羅的に計算機上で展開し、全ての振舞いで動作仕様を保証できるかを証明する手法である。本章ではこのモデル検査の説明をする。まず、3.2節では形式手法、3.3節では形式検証、3.4節ではモデル検査を順番に説明し、数々の形式手法の中でのモデル検査のフレームワークを述べる。そして、3.4.1節でモデル検査に使用する抽象モデル(時間オートマトン)、3.4.2節で動作仕様の記述方法を述べ、3.4.3節でこの2つを使ったモデル検査の仕組みを述べる。

第4章：時間オートマトンとモデル検査を用いた6脚移動ロボットの接地可能領域の導出

これまで脚移動ロボットの制御器設計における一つの課題として、制御器のパラメータを設計する研究がされてきた。例えば、CPG(中枢パターン生成器)を使った脚移動ロボットの歩行では、ニューラルネットの重みや、あらかじめ歩容を限定した制御に関しては歩行周期、遊脚・接地のデューティ比等のパラメータを遺伝的アルゴリズム、強化学習を含む何かしらの最適化手法に基づいて導出する手法が提案されてきた。本章では制御器設計の課題のうち、このパラメータ設計に着目する。

地点追従法の先行研究においても設計すべきパラメータが存在する。例えば、前任者の岸らが提案したA*探索を用いた接地点探索(運動計画)の手法においては、ロボットの脚が接地できる領域(以後、接地可能領域と呼ぶ)を簡易な直方体領域で与えていた。しかしながら、この領域は定量的な指標に基づいて設計されたものではないため、ロボットの歩行の弊

害となる状況も存在し、場合によってはデッドロックのきっかけにもなる。例えば、接地点追従法は後続脚へ接地点を引き継ぐことで歩行が成立するが、この後続脚へ脚先が届かない状況が生まれるのである。他にも脚先の移動速度や接地点計画にかかる時間を含む歩行制御法に関する複数の制御パラメータを定量的な手法で導出する必要がある。そこで、本章では、ロボットが歩行し続ける(デッドロックを回避する)ための接地可能領域および、歩行制御のパラメータを導出する。

そこで、4章では、数学的根拠をベースにデッドロックを回避できるかを検証できるモデル検査(3章)を使う。このモデル検査そのものはモデルの動作仕様を確認するために用いられるのが一般的だが、本章ではモデル検査を制御器のパラメータ設計に応用するためのアルゴリズムを提案する。この手法は前任者の野村らの手法を参考にする。野村らはムカデ型移動ロボットの動作を時間オートマトンによりモデル化し、デッドロック回避および接地点追従法における先頭脚から最尾脚への接地点の受け渡しが可能であるか等の動作仕様に関するモデル検査を行った。このモデル検査を行う過程で、ロボットの動きに相当する時間オートマトン上の時間パラメータ(時間制約)を逐次更新することで、以上のデッドロック回避等の動作仕様を数学的根拠に基づき保証可能なロボットの振る舞いの集合を導出することができる。本章では、野村らのムカデ型ロボットではなく、6脚ロボットを対象としたモデル設計・満たすべき動作仕様を提案する。4.2節では対象とする6脚ロボットの制御要素を列挙し、4.3節ではそれらを含む制御器設計を実現するための時間パラメータを導出する。4.4節で時間パラメータを接地点追従法の制御上のパラメータ(接地可能領域等)に対応させる手順を踏まえ、最後に物理エンジン上のシミュレーション上で本手法の効果を確認する。

第5章：制約充足型統合制御「Timekeeper 制御」による制御の統合

4章では、モデル検査を使って導出した時間パラメータ(本章では時間制約)を接地点追従法における制御パラメータ(接地可能領域等)に対応させてロボットの制御に用いた。しかし、この方法をとったことでロボットの歩行制御における3つの新たな問題が生じた。1つは、時間制約を制御パラメータに対応させる都合上脚の遊脚運動を等速直線運動に限定していること、2つ目は接地可能領域が脚の可到達域よりも狭い範囲で与えられたために、脚の運動の幅が極端に制限されていること、3つ目は時間制約の縮尺に相当する等価時間係数 k を固定した前提で歩行制御のパラメータを決定したことである。この等価時間係数は全ての状態の滞在時間の最大値・最小値にかかっているため、 k の値は各脚の歩行周期に大きく影響する。 k を固定した場合、各状態の滞在時間だけでなく、歩行周期の振れ幅も限定される。ロボットの歩行周期は移動する不整地環境に応じて、任意に変えられることが望ましい。

そこで、本章では時間制約に関する制約充足問題を解きつつ、ロボットの多様な運動を保証する制約充足型統合制御「Timekeeper 制御」を提案し、不整地歩行上でもデッドロックを回避する6脚移動ロボットのロバストな制御器設計を実現する。

Timekeeper 制御では、モデル検査により得られた時間制約の保証の過程で接地点追従法

の各制御モードの滞在時間の観測とそれに応じた時間制約の等価時間係数 k の更新, 滞在時間を調整するような制御介入を行う。

まず, 5.2 節で 6 脚移動ロボットの構造と接地点追従法の改良点を説明する。5.3 節で 4 章の時間制約を保証させる制約充足の手法とそれを実現するための制約充足型統合制御「Timekeeper 制御」のアルゴリズムを説明する。5.4 節では Timekeeper 制御の細部の手法を決定する上で, 実施した物理エンジン上のシミュレーションと実機実験を順番に述べる。これによって, 本手法による動作仕様の保証と制御器内の制御要素同士の干渉が厳密に防がれることを確認する。

第 6 章 : 6 脚移動ロボットの Timekeeper 制御の改善による歩行の多様性

5 章では, 制約充足型統合制御「Timekeeper 制御」を提案することで, 接地点追従法を含む制御器内の制御要素同士の統合とそれによる 6 脚移動ロボットの不整地歩行を実現させた。

しかし, この研究にはまだ 1 つの問題が残っている。4・5 章で追加した 6 脚ロボット用の遊脚条件(4.2.4 節:追加した制御モード 4→1 の遷移条件)により, ロボットの歩容が意図的に tripod gait になるように動きの制限が与えられていたことである。この遊脚条件はロボットの支持多角形を維持する目的で追加されたいっぽうで, この遊脚条件をあたえない 2 章の接地点追従法に基づいて 4 章の時間制約の探索を行った際に, 「3 点以上の支持脚を維持する」という仕様を満たす時間制約が見つからなかったという経緯がある。このときは, 3 章のモデル検査に基づくシステム開発・動作検証の考え方に基づき, どの時間制約(ロボットの振る舞い)をシステム(接地点追従法による動作)に与えても動作仕様(3 点以上の支持脚を維持する)を満たせなかったことから, システムそのものを変更する必要があると考えた。そこで, 4 章では支持多角形を維持するための遊脚条件をロボットの制御に加えざるを得なかった。これによって, 稲垣らによる接地点追従法では, wave gait による歩容の中で, 幅広い遊脚・接地のタイミングの調整ができたのに対して, 4・5 章では tripod gait のみに限定されてしまった。

その後, 研究を継続する中で 4 章の時間オートマトンに用いた時間制約は本来脚毎に分けて与えるべきであることが分かった。なぜなら接地点追従法は先頭脚, 最尾脚, それ以外の脚の制御オートマトンについてモード間の遷移条件が異なるからである。例えば, 先頭脚での制御モード 2 は前方脚の接地点を待つ状態ではなく, 接地点計画を行う状態であるし, 最尾脚の制御モード 4 の遊脚条件は他の脚と異なる。この細部の制御オートマトンの違いにより, 動作仕様(デッドロックを回避, 3 点以上の支持脚を維持等)を保証するために必要とされる脚の振る舞い(時間制約)も脚毎に異なる可能性が高いのである。つまり, 各脚に個別の時間制約を与えることで, tripod gait を強いる遊脚条件を追加せずに, ロボットの動作仕様を保証する時間制約が導出できるのではないかと考えられる。

ただし, この個別の時間制約を与える上で, モデル検査を使った 4 章の手法を直接使う

ことは探索する時間制約の数を比べると現実的ではない。4章では、時間制約の最大値、最小値と状態数5つを含む全部で $10(=2 \times 5)$ 個の変数を探索していた。これを6脚ロボットで脚毎に導出する場合、扱う変数は60個となり、4章に比べて膨大な探索時間が必要となる。5章のTimekeeper制御についても変数の増加は計算遅れを招く可能性が高い。このことを加味して本手法では、モデル検査を用いた時間制約の探索方法とTimekeeper制御の手法も各脚に異なる時間制約を与えた場合の接地点追従法に使うために改良する。

6章では、6.2節で6脚移動ロボットの構造と接地点追従法に追加した制御要素を説明する。6.3節でモデル検査を用いた各脚の時間制約の導出(4章)の改良をし、6.4節でTimekeeper制御の改良を行う。6.5章で実機実験を行い、手法の改良の効果とそれによるロボットの振る舞いの変化を確認する。

第7章：結論

本研究では、不整地環境において動作仕様を保証させる6脚移動ロボットの制御器設計の開発を実現した。不整地上の歩行を目的とした脚移動ロボットには、基本となる歩行のルール(歩行制御法)、制御センサ類による周囲環境の認識、それに対応する運動計画の手法、姿勢制御、接触センサを用いた緊急回避や局所制御等の複数の制御要素を統合した制御器の設計が必要になる。この制御器による歩行の動作検証はロボットの開発環境で行われるため、他の歩行環境でロボットを動作させた場合、制御器に含まれる制御要素同士の干渉が起こる可能性がある。この制御要素同士の干渉によってはロボットの歩行制御法が止まる(デッドロックを起こす)こともある。本研究では、この「デッドロックを起こさない」という目標の動作仕様とロボットの歩行制御によるロボットの振る舞いをモデル検査手法に基づき解析することで、デッドロックを起こさず、かつ静歩行を維持(3点以上の接地点を維持)するロバストな制御器の開発手法を提案した。