

# 主論文の要約

論文題目    **Selection and Integration Architecture of Locomotion Control for Multi-Locomotion Robotic Systems**  
(マルチロコモーションロボットのための運動制御器選択・統合アーキテクチャ)

氏名    小林 泰介

## 論文内容の要約

本論文は、マルチロコモーションロボットシステム (MLR システム) に汎用性及び拡張性を与えるために、最適運動の選択アルゴリズム及び複数運動制御器の統合理論を提案・立証したものである。

近年、大規模震災被害を背景に、災害対応ロボットの需要が急速に高まっている。これらのロボットは、被災者の救助といった作業実行能力は当然のことながら、災害現場のような複雑・未知環境において、確実かつ迅速に長時間行動するための優れた移動能力が問われる。ロボットの移動能力の向上を目的とした研究は古くから為されているが、そもそも単一の運動 (移動形態) が有する移動能力は偏りがあり、各運動が有効な環境は異なっている。例えば、2足歩行は移動効率の面で優れているが、安定性の面では4足歩行に劣っている。このため、単一の運動のみ用いるロボットでは複雑・未知環境に適応できない。

この問題に対し、MLR システムは、複数の運動を有し、その中から状況に最適な運動を選択することで全体としての移動能力向上を果たす。この概念は複雑・未知環境への適応に必須といえる。MLR システムの実現に向けて、(1) 複数の運動制御、(2) 周辺環境及びロボット内部状態の認識、(3) 運動性能と認識結果に基づく最適運動の選択、の3つの技術課題が挙げられる。これらを解決するために、我々はプロトタイプとして、Gorilla Robot の開発を進め、MLR システム実現に向けた研究を推進してきた。

従来研究において、MLR システムらしい状況に応じた最適運動の選択に関する研究は十分に行われておらず、外部環境の複雑さ、あるいは内部状態の不確実性を認識・計測して、

その値を単純な閾値処理で運動を選択する程度であった。また、提案されている手法はどれも問題設定に特化したものとなっていた。これでは汎用性に乏しく、異なる問題設定における最適運動の選択に適用できるものではなかった。一方で、(1)に関する従来研究では、個々の運動制御に注目して移動能力向上を目指しており、その制御器は個々の運動に特化したものであった。そのため、MLRシステムにより運動を切り替える際には、各運動制御器を安定に切り替えることが求められ、運動の種類を増やすにつれて、安定に切り替える設計に払う労力が膨大になることが予想された。

本論文では、これらの問題を解決してMLRシステムを実現するために、(1)汎用性の高い最適運動の選択アルゴリズム、(2)拡張性を向上させる複数の運動制御器の統合理論、を提案し、実機実験及びシミュレーションによりそれぞれを検証した。(1)の選択アルゴリズムは3～5章に、(2)の統合理論は6～8章にまとめられている。

以上については、1章において、研究背景及び動機を、2章において、MLRシステムの紹介と現状の問題点についてまとめている。

3章では、提案する選択アルゴリズム、Selection Algorithm for Locomotion (SAL)の基本設計と代表的な適用事例を述べている。SALは認識フェイズと選択フェイズの2つから構成されている。

認識フェイズでは、外部環境の複雑さ及びロボット内部状態の異常を目標値と計測値の誤差として評価し、それらの情報を3つの転倒要因（内部モデル要因・外力要因・環境要因）への統合を介して、最終的に転倒リスクへと統合する。この一連の統合はベイジアンネットワークにより実現されており、各要素は信念確率によって表現されている。この信念確率はオフライン・オンラインで学習されたものを用いた。このようにすることで、ロボットは自身の状態を直観的に扱いやすい転倒要因及び転倒リスクによって理解でき、これらを次の選択フェイズで容易に利用できる。

選択フェイズでは、各運動の価値を同一尺度で評価するために、運動報酬を定義した。これは、転倒リスク・移動速度・エネルギー効率、3つに関する定量評価値から構成されている。移動速度及びエネルギー効率に応じた基本報酬から、転倒リスクに応じた天引き量を決定することで、不安定になりやすい高効率な運動はハイリスクハイリターンな報酬設計に、安定性は高いが効率の悪い運動はローリスクローリターンな報酬設計となる。この報酬設計の差は各運動を比較する際に効果的に働き、単純な運動報酬の比較でも状況に応じて報酬の逆転が起き、適切な運動選択が可能となる。また、従来の閾値処理による運動選択とは異なり、切り替える境界は状況によって陰的に定義される。このため、新たな運動を選択肢として追加する際には、その運動報酬を評価できるようにすれば良い。

以上により設計されたSALは、2足・4足歩行といった歩容の選択と、各歩容における移動速度の調整を実現した。各歩容の運動報酬を単純に比較することで最適歩容の選択を実現し、遷移に時間はかかるものの大幅に移動能力を変更することで、ロボットの適応可能環境を拡大させた。移動速度は、現在の速度と僅かに加減速した場合の速度ごとの運動

報酬を評価・比較することで調整され、移動能力の変化は僅かながら即座の状況変化への対応を実現した。

4章では、SALの汎用性を高めるために、2足歩行における腕振りの大きさをSALにより調整できるように拡張した。腕振りの大きさと運動報酬の関係性をシミュレーションより導出し、運動報酬を腕振りの大きさの関数と仮定した。この仮定により、運動報酬の腕振りの大きさに関する勾配情報がわかり、最急降下法により連続的に運動報酬を最大化する腕振りの大きさを導出できた。

また、2つの性質の異なる腕振り戦略を提案し、各々の転倒要因に対する有効性を検証した。その検証結果を基に、転倒要因に応じた腕振り戦略の重み付け線形和を図った。これにより、発生している転倒要因に適した腕振り戦略を最適な腕振りの大きさで実行することになり、2足歩行の移動能力、すなわち安定性と移動効率、の向上を実現した。

5章では、SALで評価している転倒要因を組み込んだ新たな評価関数を定義・活用した、2足歩行時における杖利用方法の選択を実現した。前章では、転倒要因を腕振り戦略の統合に用いたものの、その利用方法は定性的な実装方法であり、汎用的に利用できるものではなかった。本章では、運動報酬の単純な比較では運動間の差異を十分に表現できない問題に対して、転倒要因及び運動報酬を用いた新たな評価関数を定義している。すなわち、発生した転倒要因ごとに各運動を実行することで得られた運動報酬を強化学習により蓄積することで、転倒要因と運動の親和性を評価する。歩行時の杖利用方法は、片脚と同期させて動かす場合や3本目の脚として動かす場合など幾つか考えられるが、それらの性能差は運動報酬では十分に表現できないと予想されるため、この手法が適用できる。シミュレーションを通じて、転倒要因と杖利用方法の親和性を学習した後、実機実験により杖利用方法の選択がもたらす移動能力向上を実証した。

6章からは複数の運動を統合するための制御理論について述べる。まず本章で、統合制御理論の要となる **Passive Dynamic Autonomous Control (PDAC)** についてまとめている。PDACはロボットが環境と点接触しているものと仮定した上で、全身関節角をその点接触している点周りの接触角と連動させて動作させる仮想拘束を与えることで運動を生成する。この2つの要素により、ロボットの全身ダイナミクスが接触角のみに依存した自律系へと置き換えられる。従来研究では、このPDACを用いて2足・4足歩行などを実現している。しかし、PDACの課題として、生成される運動及びその定常状態（移動速度）が仮想拘束に大きく依存してしまう点である。複数の運動を統合して制御するには、仮想拘束に依存しない形で移動速度を制御可能にし、その上で仮想拘束を複数の運動を表現できるように設計することが必要といえる。本論文では、例として2足歩容に注目して統合を図った。

7章では、まず2足歩容の移動速度を仮想拘束に依存しない形で制御した。このために、2足歩容の遊脚運動に着目した。遊脚運動は着地位置及び速度により、次ステップの運動状態、すなわち移動速度を更新できる。ただし、その更新の関係は仮想拘束によって異なるため、一意に設計することはできない。そこで、遊脚運動と移動速度の定性的な関係性

のみを実装し、仮想拘束による差異は、目標速度と計測された移動速度との差分を基に、逐次関係性を調整することで補償する。本手法が漸近的に移動速度を目標速度へと収束させることを数値解析的に実証した。これは複数の仮想拘束に対して検証され、それぞれで収束速度などは異なるものの、有効であることが確認された。

8章では、2足歩行・走行を一括して表現できる仮想拘束を設計することで、2足歩行・走行の統一的な制御を実現した。この統一により、歩行・走行間の遷移が仮想拘束の内部パラメータ1つを調整するだけで獲得され、複数の運動を扱う上での煩雑化を回避できる。仮想拘束はバネ・ダンパを並列に備えた振子と単質点から構成される **Damping and Spring-Loaded Inverted Pendulum (D-SLIP)**モデルを基に設計した。すなわち、D-SLIPモデルの時間発展ダイナミクスを、接触角に関する非線形二次微分方程式へと変換した後に、線形化を施して微分方程式の解を導出した。この解をダイナミクス規範型仮想拘束とする。これの最大の特徴は、減衰比の大小に応じて歩行と走行のどちらが発現するかが容易に想定できる点である。よって、この減衰比を移動中に調整すれば、歩行・走行を自在に切り替える移動を実現できる。調整手段として、人が歩行と走行をエネルギー効率が最大となるよう移動速度に応じて切り替えている点に注目した。減衰比を歩行・走行用に固定した上で、移動速度を変化させた際のエネルギー効率を確認することで、エネルギー効率を最大にできる遷移速度を見出した。この速度前後で歩行と走行を切り替えるように減衰比を調整することで、人のように、低速時には歩行を、高速時には走行を共通の運動制御器から自然と発現させることに成功した。

最後に、9章では、本論文のまとめと、MLRシステムの今後の展望について述べた。