

学 位 論 文 題 名

A Study on Autonomous Blimp Control with Reinforcement Learning

（強化学習を用いた自律飛行船制御に関する研究）

学位論文内容の要旨

近年、3次元空間を移動可能なロボットとして飛行船に関する研究が注目を集めている。飛行船は、浮力により低エネルギーで長時間移動することができ、飛行機やヘリコプターなどに比べて室内の3次元空間を安全に飛行できる。そのため、災害時の建造物内や高所など、人間や地上ロボットでは進入が困難である場所における実用化が期待される。しかし、飛行船は慣性が大きいため、制御入力ですぐさま飛行船の動きに反映されるとは限らない。また環境中のわずかな空気の流れの影響を受けやすい、非線形性が強いなどの特性を持ち、制御が極めて困難である。このため従来の飛行船の研究では、障害物のない空間で目標位置に停滞するまたは到達するという簡単なタスクしか達成されなかった。

本学位論文では、飛行船のより実用的な利用にむけて、3次元空間における障害物回避が可能な自律飛行を実現することを目的としている。3次元空間での制御は困難が予想されるため、まず2次元に限定された空間において、飛行船を質点として簡略化したモデルを用い、強化学習に基づいた制御手法により複雑なタスクを達成できることを示している。さらにシミュレーションによる結果を実機で有効に利用することにより、実機による制御が可能であることを示している。

これらの結果をふまえ、3次元空間における制御への拡張を行っている。3次元に拡張するにあたり、飛行船を剛体としてモデル化し、遠心力やコリオリ力を考慮することにより、より詳細な力学モデルを構築してシミュレータを作成している。最後に3次元空間での障害物回避タスクのための行動価値関数の設計をおこない、シミュレータにより効果を確認している。

結果として強化学習に基づいた制御手法により、シミュレーション及び実環境において2次元空間における複雑なタスクを達成できることを示した。また、飛行船の3次元力学モデルを構築し、適切な行動価値関数を設計することにより3次元空間での障害物回避が可能であることをシミュレーションにより確認した。

各章の内容を以下に要約する。

第1章では、飛行船の特性とその従来研究を概観し、研究背景・研究意義について述べている。

第2章では、飛行船に適用する学習手法について述べている。飛行船は慣性が大きい

め、限定された空間で目標位置の方向が急に切り替わるようなタスクなどは非常に難しく、PID 制御のようなフィードバック制御だけでは対応できないと考えられる。ここでは主に CMAC-based Q-learning と遺伝的アルゴリズム(GA)を組み合わせた手法について説明している。凡化能力のある CMAC-based Q-learning という強化学習手法と GA を組み合わせることによって、飛行船がセンサ入力の状態空間を適応的に決定することができることを示している。

第 3 章では、2 次元平面における飛行船の制御について述べている。壁に囲まれた空間を飛行するタスクと複数の目標位置をシーケンシャルに通過するというタスクに 2 章で述べた学習手法を適用し、シミュレータにより効果を確認している。さらに、シミュレータで得られた結果を実機に適用できることを示している。

第 4 章では、飛行船の大きさ・使用目的に応じた力学モデルを構築する必要性から、本研究で対象とする飛行船の実機の特性を基に、より詳細な飛行船の 3 次元シミュレータの構築について述べている。第 3 章で用いたモデルが飛行船を質点として表現しているのに対し、ここでは飛行船を剛体としてモデルを記述し、遠心力なども考慮している。また、シミュレータと実機に同じ出力を与えて位置を計測し、シミュレートされた飛行船が実機の動きとほぼ等しい動きであることを観測することによりシミュレータの妥当性を示している。

第 5 章では、構築したシミュレータにより 3 次元空間での位置制御を学習制御および PD 制御により実現している。また、特に慣性が高いという特性に着目し、行動価値関数を適切に設計することで 3 次元空間での障害物回避が可能であることをシミュレータにより確認している。

第 6 章では、本学位論文の結論について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 内 東

副 査 教 授 大 森 隆 司

副 査 教 授 嘉 数 侑 昇

副 査 教 授 和 田 充 雄

学 位 論 文 題 名

A Study on Autonomous Blimp Control with Reinforcement Learning

(強化学習を用いた自律飛行船制御に関する研究)

飛行船は、浮力を用いた空中移動を行うため移動にかかるエネルギーコストが小さく、少ない資源で長時間移動が可能であり、また飛行機やヘリコプターなどに比べ室内空間を安全に飛行できる。そのため災害時の建造物内や高所など、人間や地上ロボットでは進入が困難である空間における観測活動や点検作業等への利用が期待される。しかし、飛行船は慣性が非常に大きいため、制御入力に即時に飛行船の動きに反映されるとは限らない、環境中のわずかな空気の流れの影響を受けやすい、プロペラ出力などの非線形性が強い等の特性を持ち制御が極めて困難である。

本論文は、このように運動特性が不安定な飛行船の自律飛行制御を実現するための基礎研究を行ったものである。このために力学モデルを構築し、自律飛行船制御のために強化学習及び進化的手法を組み合わせた制御手法を提案している。さらに提案した力学モデル及び制御手法の有効性をシミュレーション及び実機による実験により示している。

飛行船制御のための学習手法としては、強化学習手法のひとつである CMAC-based Q-learning を用いている。この手法は近傍の経験の汎化に優れていることから学習速度の上昇が期待できる。これに遺伝的アルゴリズム(GA)を組み合わせることにより、実環境において連続値をとるセンサ空間を環境やタスクに応じて適応的に離散化することができる。

強化学習を用いた自律飛行制御の可能性について、最初に飛行船を質点として簡略化した2次元モデルにより詳細に検討している。すなわち、2次元平面において壁に囲まれた空間を飛行するタスクと複数の目標位置を順に通過するタスクに対し、提案する制御方法を適用して自律飛行が実現可能であることをシミュレーションにより示している。さらにシミュレーションで得られた結果を実機に適用することにより、実環境における飛行船制御においてもこの手法が有効であることを示している。

次に、2次元モデルでの詳細な検討結果を基に、3次元モデルに対する適用を検討してい

る。3次元モデルに拡張するにあたり、これまで提案されている大型飛行船の力学モデルなどを参考にし、本研究で対象とする飛行船の実機の特性を考慮したより詳細な3次元力学モデルを記述している。飛行船は剛体としてモデル化され、遠心力なども考慮されている。また、シミュレータと実機に同じ出力を与えて位置を計測し、動作を比較して3次元力学モデルの妥当性を示している。さらに、シミュレーションにより3次元空間での学習制御とPD制御による位置制御を比較検討し、タスクが複雑な場合には学習制御が有効であることを示している。また慣性が大きいという特性に着目し、行動価値関数を適切に設計することで3次元空間での障害物回避が可能であることをシミュレーションにより示している。

これを要するに、著者は、運動特性が不安定な飛行船の自律飛行制御を実現するための基礎研究として、飛行船の力学モデルを構築し、自律飛行制御のために強化学習及び進化的手法を組み合わせた制御手法を提案し、その有効性をシミュレーション及び実機による実験により明らかにしたものであり、複雑調和系工学及び自律飛行船研究の進歩に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。