

## 論文内容の要旨

### 論文題目

「解探索の時間管理手法を導入した実時間タスクプランニングに関する研究」

氏名 船瀬 龍

本論文は、自律システムを構成する核となるタスクプランニングを現実の問題に適用する際に最も重要となる課題の一つである「計算時間の扱い方」について、一つの統一的な方法論を提案するものである。

与えられた目的を達成するための行動を計画するタスクプランニング技術について、現実には存在する問題を扱うことを目指して様々な研究が行われているが、大きく二つの方向性の研究に分類することができる。一つは、探索アルゴリズムのモデル化できる現象の範囲を拡大することによって、より現実的で複雑な問題を扱おうとする方向性の研究であり、不確定な状態遷移モデルの扱い方や可観測ではない問題への対応など、様々な研究がなされてきた。もう一つの方向性の研究が「プランニングに要する計算時間の扱い方」に関するものである。実環境ではプランニング中にも状況が時々刻々変化するため、オフラインで十分にプランニングしてから解を実行するということができず、計算時間の扱い方は実環境でプランニングする際に最も重要になってくる課題であると言える。しかし、時間が差し迫った状況でプランニングしなければならないような問題が現実には多数存在するにもかかわらず、そういった場合の計算時間の扱い方については、統一的に解決する方法が存在しないのが現状である。

従来の研究における「プランニングに要する計算時間」の扱い方としては、「最適な解をなるべく速く計算するアルゴリズム」を開発し、十分無視できる程度に計算時間を短くしようとするものと、計算時間を無視できないことを前提として、プランニング中の状況の変化に対応するために解探索に割り当てる時間を制御するようなものがある。前者については、状況の変化に対応できるくらいの速さで計算ができれば実環境でのプランニングは確かに可能であるが、そのようなアプローチは計算時間の問題を根本的に解決するものではない。なぜなら、どれだけ速いアルゴリズムを開発しても、あるいは、どれだけ計算機の能力が将来的に向上したとしても、扱える問題の規模には必ず限界があり、計算時間の問題が完全に無視できるようになることは考えられないからである。その意味では後者のようなアプローチが有望だと考えられるが、探索時間の制御方法を恣意的に設計者が設定しているような研究や、個別の問題や個別の探索アルゴリズムについての探索時間制御方法を議論している研究が多い。計算時間の問題を適切に扱うためには、「置かれた状況がどのくらい時間が差し迫った状況なのかその場で判断し、あらかじめ決めておくのではない柔軟な方法で探索時間を制御する」という、人間が普段無意識に行っているような実時間問題解決

方法を実現し、さらにその制御手法を問題依存ではなく広い範囲の問題に適用できる方法論として確立することが必要である。これが現実問題における実時間プランニングの本質であると考えられるが、このような計算時間の扱い方に関する統一的な方法論はこれまであまり研究されてこなかった。

そこで本研究では、「状況に応じて柔軟に探索時間を制御することによって、なるべく良いプランニング結果を得ること」が実時間プランニングであると考え、そのために必要となる探索時間制御手法を、広範囲の問題に適用できる統一的な方法論として導出することを目的とする。

本論文ではまず、探索に時間を費やすことのメリットとデメリットを定量的にトレードオフすることが探索時間制御に必要であるとして、効用関数という評価基準を定義した。ここで定義した効用関数は、「探索時間を費やして解を得て、その解をある状況ある時刻において実行した結果、どの程度プランニングの目標が達成されるか」というプランニングのサイクルの **End-to-End** の評価基準であるが、このように定義することによって、任意の問題における探索時間のメリットとデメリットを汎用的かつ定量的に表現できる形式になっている。そして、置かれた状況に応じて常に効用という単一の評価基準を最大化する形で探索時間を制御するような汎用の枠組みを、探索後の効用関数の予測に基づいて探索を制御するメタ推論のアーキテクチャとして定式化した。ここで定式化したメタ推論アルゴリズムは、任意の問題での探索時間制御アルゴリズムについて常に成り立つ部分を汎用の枠組みとして定式化したものであり、その一部を個々の問題用にカスタマイズして実装することによって、任意の問題について同じ枠組みにのっとった実時間プランニングアルゴリズムが構築されることになる。

本論文では次に、実際に個別の問題にこの汎用の枠組みを適用する際の方法論を導出した。個別の問題での実装の核となるのが、探索後に得られる効用を予測するモデルの構築であるが、予測モデル構築のためにはまず問題ごとに効用関数を分析し、いくつかの形式に分類することが必要であることを示した。そして、解の質という解自体の持つ静的な特徴を無次元量で表現した量とその問題において定義できるかどうか効用の予測の仕方を大きく変える要因であることを示し、それぞれの分類ごとに効用予測モデル構築の手順を整理して示した。ここで示した手順は、実際に実時間プランニングアルゴリズムの設計者が行わなければならない手順であり、先に導出した汎用の枠組みと合わせることで、実時間プランニングシステムを構築するための統一的な方法論が与えられることになる。

本論文の後半では、いくつかの具体的な問題に対して提案手法を適用することで、その有効性を確認した。最初に、列車選択という、人間が実生活で経験する実時間問題解決の例を取り上げ、提案手法を適用することで効用関数を最適化するように探索時間が制御されることを確認した。それと同時に、「これ以上探索することが有効かどうかを考えてその都度判断しながら探索する」という、人間が無意識に行っている思考の過程が提案手法によって上手く表現されることも示した。もう一つの具体的な問題として宇宙機の軌道計画

問題を取り上げたが、これは、予定されている最適なタイミングでの軌道変更に失敗した後、早急に軌道を再計画しなければならないという状況を想定した問題であり、時間が差し迫った状況で的確に判断しなければならないプランニング問題の典型例である。この問題では、なるべく長時間の探索を行って最適に近い解を得たいという要求があるのに対して、軌道変更が最適なタイミングから遅れれば遅れるほど得られる軌道の最適性が悪化することも考慮に入れて上手く探索時間を制御しなければならない、さらに、状況の差し迫り方がプラナ側には読めないという難しい問題であるが、探索後に得られる効用をその時点までに見つかった解からオンラインで推定するという、人間のモデル化能力を模擬した統計的な手法によって効果的に探索時間を制御できることが確認された。

以上の成果は、プランニングを実時間で行う際の計算時間の扱いについての一般的な枠組みを与えるものである。本枠組みは、これまでは **Toy Problem** と呼ばれる簡単な問題しか扱えなかったタスクプランニングを現実問題に適用する際の最も重要な課題である「計算時間の問題」を統一的に扱うことを可能にするものであり、「現実問題に適用可能な AI」を実現することに大きく貢献するものと考えられる。