

## 論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 副田 俊介

本論文は、ゲームプログラミングにおいて広く用いられる AND/OR 木の探索を扱っている。チェスや将棋のような二人完全情報零和ゲームをプレイするプログラムを作成する場合は、ミニマックス法などのゲーム木探索に基づくアルゴリズムが有効であることが知られている。ゲーム木のうちでも末端における評価値が2値であるものは特に AND/OR 木と呼ばれている。ゲームの終盤等の探索は AND/OR 木としてモデル化が可能である。本論文は、AND/OR 木の探索を対象とした df-pn 駆動  $\lambda$ -探索、df-pn 駆動 dual  $\lambda$ -探索という二つの新たな探索アルゴリズムを提案し、実験によって有効性を確かめたものである。

本論文は6章から成る。第1章では研究の背景として、ゲーム木探索と AND/OR 木の関係、脅威度に基づいた探索、実験対象として扱った将棋のゲームとしての性質について述べている。

第2章では本論文と関連の深い二つの研究について紹介している。一つは証明数に基づく探索で、一つは脅威度に基づく探索である。証明数に基づく探索は、展開途中の木の形から導き出される予想コストを使った最良優先探索であり、中でも df-pn 探索というアルゴリズムが、詰将棋問題を解くプログラムなどで使われて成功を取っている。脅威度に基づく探索は、ゴールとの距離を用いた最良優先探索である。中でも脅威度をゲーム固有の性質を用いずに片方のプレイヤーが何回パス可能かを示す  $\lambda$ -次数で表現し、 $\lambda$ -次数を探索によって求める  $\lambda$ -探索が、多くのゲームに適用可能だという点で有望だと考えられている。ただ、 $\lambda$ -探索は深さベースの反復深化を用いているので、手数長い解を見つけにくいという弱点がある。

第3章では  $\lambda$ -探索と df-pn 探索を組み合わせた df-pn 駆動  $\lambda$ -探索アルゴリズムを提案している。これはノードの証明数、反証数をスカラー値ではなく  $\lambda$ -次数ごとのベクトル値とすることにより、この二つのアルゴリズムの自然な融合を実現したものである。また、OR ノードにおいて証明に適した次数での探索をおこなうために、次数に応じた仮想ノードを設定し、仮想ノードの選択を拡幅戦略として整理し複数の戦略を適用可能な形で形式化した。この拡幅戦略として、 $\lambda$ -探索で使われていた反復拡幅戦略と、必至問題ソルバで使われていた固定順序戦略以外に、証明数拡幅戦略という新たな戦略を提案している。また、詰将棋ソルバなどで使われていた Null 手優先、証明木トレース、df-pn+ 探索等のアルゴリズムを  $\lambda$ -探索に関する強化として一般化し、形式化をおこなっている。ゲーム固有の性質を用いないという  $\lambda$ -探索の特徴を生かしつつ、カスタマイズが可能なアルゴリズムを提案している点を本審査委員会は高く評価する。

第4章では敵味方がそれぞれ別のゴールを目指している状況で効率的な探索をおこなうアルゴリズムとして、df-pn 駆動 dual  $\lambda$ -探索アルゴリズムを提案している。ゲームの実戦では片方のプレイヤーがゴールに近づこうとする手が、他方のプレイヤーもゴールに近づけてしまうということが良くある。df-pn 駆動 dual  $\lambda$ -探索アル

ゴリズムは双方のプレイヤーの $\lambda$ -次数ごとの証明数、反証数のベクトル値を保持して、それに基づいた探索ノードの選択をおこなうことで、安全に勝つ手を優先的に探索するものになっている。この提案は $\lambda$ -探索の自然な拡張であり、効果も期待できる点で評価できる。

第5章では将棋の終盤問題を題材にした実験をおこない、提案する探索アルゴリズムの有効性を確認している。本論文で扱うアルゴリズムは、無限のリソースを使うとどれも同じ解を返すものなので、消費するリソースの量で評価するのが望ましい。ただ、現状ではリソースの制限により解けない問題もあるので、記憶するノード数を100万に制限するという条件のもとで、どれだけの問題を解けるか、解ける場合はどれだけノード数を要したかで比較して評価をおこなう。まず、 $\lambda$ -探索とdf-pn 駆動 $\lambda$ -探索の比較を将棋の必至問題の問題集を対象におこない、 $\lambda$ -探索では制限内に1問も解けなかったのに対して、df-pn 駆動 $\lambda$ -探索では同じ制限で3割弱の問題が解けるようになったことを確認した。また、Null手優先と証明木トレースの二つの強化を加えると6割弱の問題が解けるようになることを示した。それに加えて、詰将棋問題ソルバで用いられている将棋特有の強化についても個別に評価し、それらを組み合わせることで8割以上の問題が解けるようになることを示した。これらの強化を入れたプログラム上で拡幅戦略の評価をおこなった。その結果、必至問題に限れば固定順序戦略が、詰将棋問題に限れば反復拡幅戦略が適しているが、総合すると証明数拡幅戦略が一番優れていることを示した。df-pn 駆動 dual  $\lambda$ -探索アルゴリズムに関しては、実戦で生じた局面と、難しい問題集の両方を対象に、df-pn 駆動 $\lambda$ -探索アルゴリズムと比較をおこない、どちらに関しても解ける問題数の向上が見られることを確かめた。現在ゲームプログラム研究で一番注目されている将棋を対象に実用的な実験をおこない、良い結果を出している点が評価できる。第6章では、以上の結果を元に、結論と今後の課題について述べている。

以上のように本論文はゲームプログラミングにおいて広く用いられるAND/OR木探索において新たなアルゴリズムを提案し、その有効性を確かめたという点で、ゲームプログラミング研究に対する大きな学術的貢献が認められる。したがって、本審査委員会は博士(学術)の学位を授与するにふさわしいものと認定する。