

## 8x8 オセロの完全解析に向けた並列ゲーム木探索 Parallel Game Tree Search for Complete Analysis of 8x8 Othello

山名琢翔

筑波大学理工学群工学システム学類

### 1. 研究目的

8×8 オセロは二人零和有限確定完全情報ゲームであり、コンピュータでゲーム木を終局まで探索することで厳密な最善手を見つけることができる。しかし、探索には膨大な計算資源を必要とするため、2023 年 10 月に発表された Takizawa による査読なし論文 *Othello is Solved* で弱解決(初手から双方が最善手を打ったときの終局結果を求めること)が報告されるまで、オセロの弱解決は達成されていなかった。弱解決の達成が報告された現在でも、オセロにおけるゲーム木探索は容易ではなく、膨大な計算資源を必要とする。例えば弱解決では  $1.5 \times 10^{18}$  もの局面を探索する必要があったと報告された。さらに、ゲーム木探索はその性質上、並列に探索を行うと逐次的な探索と比べて枝刈り効率が落ちてしまうという問題がある。

本研究では、ゲーム木探索を高速に実行するための手法を複数考案し、オセロを題材として実装し、性能を計測した。特に、スーパーコンピュータや GPU を積んだ家庭用コンピュータを使ってオセロのゲーム木探索を行うことを念頭に、効果的な探索手法を考案した。

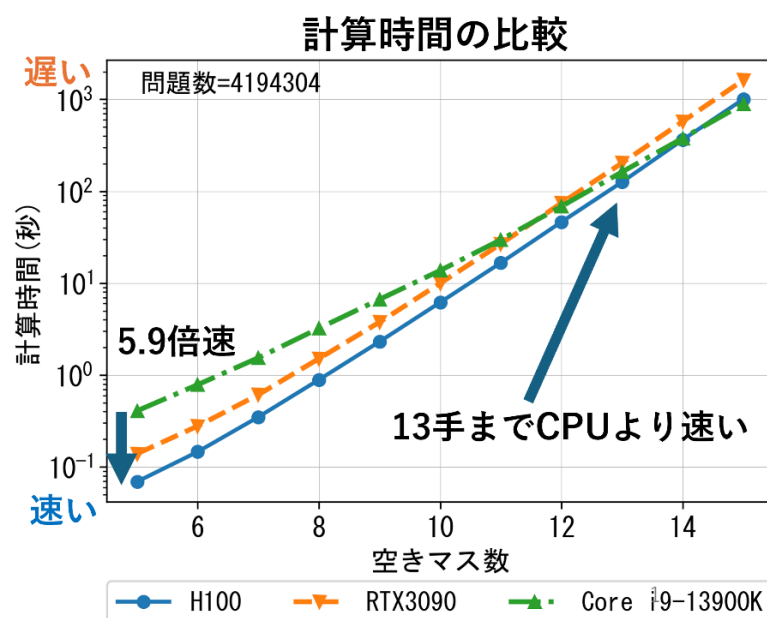
### 2. 研究成果の内容

本プロジェクトでは、GPU によるオセロの終盤探索と、深層学習を用いた評価関数の改善との 2 つの研究を行った。

GPU によるオセロの終盤探索では、スーパーコンピュータや GPU を搭載した家庭用コンピュータでオセロの終盤探索を行うことを念頭に置いた研究である。この研究は将来的に CPU と連携することを前提としており、GPU では大量の終盤問題を並列に解くという作業を行った。その結果、GPU を用いて  $\alpha \beta$  法(ゲーム木探索手法の一つ)を CPU よりも高速に実行することができた。また、高速化のためにゲーム木探索で有効に使えるロードバランシング手法を考案したり、GPU で効果的に使用できる Move Ordering 手法を見つけたりするという成果をあげた。実装には CUDA C++ を使い、スーパーコンピュータ Pegasus で実行した。

下図はオセロの終盤探索の計算時間を GPU (NVIDIA H100 および NVIDIA GeForce RTX3090) と CPU (Intel Core i9-13900K) で比べたものである。4194304 (=2<sup>22</sup>)個の局面を終局まで完全に先読みする時間を計測した。空きマス数(先読みの手数とほぼ言い換えられる)を変化させて計算時間を比較したところ、5 マス空きでは CPU に対して 5.9 倍速のスピードで探索できた。また、13 マス空き程度までは GPU

の方が CPU よりも高速に計算できた。なお、空きマス数(先読みの深さとほぼ同義)が増えると計算時間が指数的に増える傾向があるため、下図では縦軸(計算時間)を対数軸とした。



もう一つの成果として、深層学習を用いた評価関数の改善がある。本研究では、オセロにおいて広く使われているパターンによる評価関数において、パラメータ数が膨大であるという問題点に着目した。深層学習を圧縮手法として使用することで、膨大なパラメータを削減した。本研究ではパターン評価で使用する重みを深層学習によって調整するという工夫を行った。この工夫のため、深層学習を用いても探索スピードが遅くならず、パターン評価と同等のスピードで計算を行えるという利点がある。さらに、深層学習によって評価関数の性能が改善する傾向も認められた。

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

学際共同利用プログラムで使用した Pegasus には、NVIDIA H100 という高性能な GPU が搭載されている。この GPU によって、様々に条件を変えて多くの実験を行うことができ、GPU によるオセロの探索手法を効率的に改善することができた。さらに、手法の有効性を確認するための精密な実験を行うには膨大な計算資源が必要であるが、これも Pegasus によって短時間で十分な結果が得られた。

また、オセロの評価関数を作るためには大量の棋譜データが必要であるが、これも学際共同利用プログラムによって短時間で用意することができた。

### 4. 今後の展望

GPU を用いたオセロの終盤探索は、現時点で CPU との連携を行うまでには至っていない。今後は CPU と GPU を連携させて並列探索を行い、高速にオセロの局面を解析する手法を確立することを目指している。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

- ① 山名琢翔: GPU を利用したオセロの並列ゲーム木探索, 第 51 回 ゲーム情報学研究会 (若手奨励賞(GI 研究会)受賞)

(3) その他

- ① 山名琢翔: 人間に勝利してから四半世紀。まだ終わらないオセロ AI, 第 28 回ゲームプログラミングワークショップ (GPW-23) (招待講演)
- ② 山名琢翔: 弱解決から 2 ヶ月。オセロ AI で占う人間と AI の未来, 第 65 回プログラミング・シンポジウム (特別講演)

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※	
		当初配分	追加配分
Cygnus/Pegasus	○	6870	0
Wisteria/BDEC-01		0	0
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			