

# コネクト6におけるヒューリスティック評価関数を用いた探索法の提案と評価

西井優斗<sup>†</sup>愛媛大学工学部工学科<sup>†</sup>黒田 久泰<sup>‡</sup>愛媛大学大学院理工学研究科<sup>‡</sup>

## 1 はじめに

コネクト6とは、五目並べを拡張したボードゲームであり、六目並べとも呼ばれる。先手のプレイヤーが一石目を打ち、その後、双方が交互に二石ずつ打つ。先に石が縦、横、斜めのいずれかの方向に6つ並んだプレイヤーの勝利となる。両者の着手後の石の数が相手より常に1つ多くなっていることで、先手と後手に優劣がないと言われている [1]。このゲームは二人零和有限確定完全情報ゲームに分類される。その特徴として、両者が最善手を打ち続けた場合、先手必勝、後手必勝、引き分けのいずれかとなることが知られている。例えば、三目並べは引き分けに該当し、15×15以上のサイズの盤で行われる五目並べは先手必勝に該当する。コネクト6もいずれかに該当するが、推奨される盤のサイズが19×19以上と、盤面サイズが大きく、探索範囲が広いため、解析が進んでいないのが現状である。

本研究では、コネクト6において、有効的な探索手法を探求し、強力なプレイヤーを作成することを目的とする。また、作成したプレイヤーの強さと探索手法の有効性を評価するために、他の手法を用いたものとの対戦を行った。

## 2 概要

### 2.1 コネクト6における脅威

コネクト6における脅威とは、一方のプレイヤーが6目並ぶ(勝利する)のを避けるために、他方のプレイヤーが $t$ 個の石を置く必要があるとき、他方のプレイヤーにとって $t$ 個の脅威が発生していると定義する [2]。

### 2.2 VCFとVCST

コネクト6では、VCF(Victory by Connect Four)やVCST(victory by continuous single-threat-or-moremoves)といった戦法を用いるのが一般的である。

VCFは、3つ以上の脅威が作れるまで、2つの脅威を絶えず作り続ける探索手法であり、VCSTは、3つ以上の脅威が作れるまで、1つの脅威を絶えず作り続ける探索手法である [2]。両手法とも、内側に自分の石が並びやすく、逆に相手の石を外側に散らばらせることができるので、主導権を握りやすく、戦局を優位に進めることができる。

しかし、VCFやVCSTには、脅威を作れない場合の着手が弱い(単純に繋がっている石の数を高く評価したりするものが多い)ことや脅威を作ることを優先しすぎるがゆえに、より優勢な状況を作れる着手を逃すという課題が存在する。本研究では、VCFとVCSTを用いた単純な実装を従来方式として比較対象とする。

## 3 提案手法

コネクト6では探索範囲が膨大で、先読みできる深さが限られているため、ゲーム木の末端では、静的な評価を行うことで実質的にさらに数手先読みをする必要がある。実際に石を置いているわけではないので、正確な先読みではないが、ある程度高い精度の先読みをすることができる。従って、今回作成した評価関数における評価する並び(表1)は、ゲームの勝敗に影響を及ぼす全ての石の並びのパターンである。また、vcf5~vcst1のような並び単体に対しての評価値はなく、表2のように、これらの個数や組み合わせに対して評価値を付けている。

また、最善手の決定方法としては、ゲーム木の末端で自分の評価値と相手の評価値を比較して、自分の評価値の方が高い場合は、自分の評価値を返し、相手の方が高いときは相手の評価値に-1を掛けたものを返す。minimax法などとは異なり、どちらの手番でも評価値が最大のものを選択し最善手を求める。

また、石の並びのパターンは8つの石の並びで構成されている。コネクト6では、6つの石が連続で並べばよいので、6つの並びで構成された方が並びのパターン数が格段に少なくなるが、その場合、本来は脅威が1個であるが、2個と誤認識してしまう場合があるため、8つの並びで構成している。

Proposal and evaluation of a search method using heuristic evaluation function in Connect6

<sup>†</sup>Nishii Yuto, Department of Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

<sup>‡</sup>Kuroda Hisayasu, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

表 1 評価関数における評価する並び一覧

呼称	石の並び
win	石が 6 つ繋がっている並び
vcf5	脅威が 2 個&手番の石が 5 つ含まれている並び
vcst5	脅威が 1 個&手番の石が 5 つ含まれている並び
vcf4	脅威が 2 個&手番の石が 4 つ含まれている並び
vcst4	脅威が 1 個&手番の石が 4 つ含まれている並び
vcf3	vcf5 または vcf4 を作れる並び
vcst3	vcst5 または vcst4 を作れる並び
vcf2	vcf4 または vcf3 を作れる並び
vcst2	vcst4 または vcst3 を作れる並び
vcf1	vcf3 または vcf2 を作れる並び
vcst1	vcst3 または vcst2 を作れる並び

表 2 評価関数における評価値

呼称	石の並びの組み合わせ	評価値
勝利	win が 1 つ以上	9999
1TW	脅威が 3 個以上 (vcf5×2,vcf4×2,vcf4+vcst4,・・・)	300
2TW	1TW を作れる組み合わせ (vcf4+vcf3+vcst,vcf×3,・・・)	250
VCF	脅威が 2 個 (vcf5,vcf4)	200
VCST	脅威が 1 個 (vcst5,vcst4)	100
3TW	2TW を作れる組み合わせ (vcf3+vcf1,vcf2×2,vcf2+vcst2)	5
4TW	3TW を作れる組み合わせ (vcf1×2,vcf1+vcst1,・・・)	1

#### 4 高速化手法

まず、碁盤の表現としてビットボードを使用した。コネクト 6 では、縦、横、右斜め、左斜めの 4 方向を調べる必要があるため、各行を 32 ビット整数に格納した場合、シフト演算が複雑になる。そこで、あらかじめ各行、各列、右斜め、左斜めに対しても各要素を 32 ビット整数に格納した。コネクト 6 では、19×19 路盤を用いるので、縦と横は、32 ビット整数が 19 個、右斜めと左斜めは、32 ビット整数が 27 個となった。このようにすることで、それぞれの要素を 0~11 ビットシフトするだけの単純なシフト演算となった。また、これらの 32 ビット整数を AVX-512 を使用し、高速化を図った。AVX-512 は、インテル系の CPU に実装されている拡張命令セットの一つで、512 ビット (16 個の 32 ビット整数または 8 個の 64 ビット整数など) のベクトルデータを 1 度に処理することができる。各方向に対して 2 つの 512 ビットベクトルが必要になるので、合計 8 つ用いた。さらに、OpenMP(Open-Multi-Processing) によるマルチスレッドを使用した。OpenMP は、共有メモリ型マシン上での並列プログラミングを可能にする API である。

#### 5 実験結果

本実験では、提案手法を用いたプログラムと従来方式のプログラム同士、また、インターネット上で公開されている SDIN 無料ゲーム [3] で提供されているプログラム (Level 1~3) との対戦を行った。本実験で使用した計算機環境を表 3 に、結果を表 4 に、提案手法に高速化手法を加えた場合の 1 手の平均着手時間を表 5 に示す。

表 3 計算機環境

CPU	Intel@Xeon@Gold 6240R CPU@2.40GHz × 2
メモリ	128GB
コア数 (スレッド数)	24 × 2 (48 × 2)
OS	Ubuntu 22.04.3 LTS
コンパイラ	gcc ver.11.2.0
コンパイラオプション	-O2 -fopenmp -mavx512f

表 4 対戦結果

プログラム名	従来方式	SDIN-Level3	SDIN-Level2	SDIN-Level1
従来方式	-	2 - 8 3 - 7	1 - 9 2 - 9	0 - 10 0 - 10
提案手法	10 - 0 10 - 0			

上段…プログラム側が先手番の勝 - 敗, 下段…後手番の勝 - 敗

表 5 1 手の平均着手時間

プログラム名	1 手の平均着手時間 (s)	速度向上率
高速化手法なし	3240	1
ビットボードのみ	96	33
OpenMP のみ	280	11
ビット +OMP	27	115
ビット +OMP+AVX	12	540

ビット…ビットボード, OMP…OpenMP, AVX…AVX-512

#### 6 まとめ

ヒューリスティック評価関数を作成したことで、VCF や VCST の問題を改善でき、既存のプログラムに対して全勝することができた。また、ビットボードや AVX-512, OpenMP を活用したことで 1 手の着手時間が大幅に減少した。

#### 参考文献

- [1] Wu, I-Chen, Huang, Dei-Yen, and Chang, Hsiu-Chen, "Connect6", ICGA Journal, vol.28, no.4, pp.235-242, 2005.
- [2] Yihao Wu, Miao Su, Xiaorui Li, Yunpeng Zhang, and Ke Zhou: "Optimized VCST Algorithm for Connect6", 2021 33rd Chinese Control and Decision Conference(CCDC), pp.1813-1819, 2021.
- [3] SDIN 無料ゲーム「コネクト 6 (六目並べ)」  
<https://sdin.jp/browser/board/connect6/>