

卒業論文

ゲーム「2048」のプレイヤーについて

08-152021 金澤望生

指導教員 山口和紀 教授

2018 年 1 月

東京大学教養学部学際科学科総合情報学コース

概要

インターネットブラウザやスマートフォン上で遊ぶことのできるパズルゲーム「2048」は 2014 年 3 月に公開されて以来世界中で人気を博すパズルゲームとなったが、これにはルールが直感的で理解しやすい一方でその攻略法を会得することが難しいという 2048 特有の性質によるところが大きい。この性質により 2048 はゲーム AI 研究の題材としても多く取り上げられ、特に強化学習を用いて訓練したプレイヤーが Szubert & Jaśkowski など多くの研究者によって発表された。しかしながら、これらのプレイヤーには人間が 2048 を遊ぶ際に用いる経験的な知見は盛り込まれておらず、また強化学習によって必ずしも学習できているとは言えない方策も存在している。本研究においては、特に人間が 2048 を遊ぶ際に大きなタイルを隅に寄せる傾向があることに注目し、これを「maximum-in-corner 方策」と名付け、既存研究による強化学習ベースのプレイヤーに組み込んだ。その結果、maximum-in-corner 方策を組み込んだプレイヤーは既存の強化学習で訓練したのみのプレイヤーよりも有意に優れた指標を残し、強化学習だけでは習得できない人間の経験的な知見を AI プレイヤーにトップダウン的に適用することの効果を示した。

キーワード 2048, パズルゲーム, 強化学習, ヒューリスティクス

目次

第 1 章	導入	1
1.1	モチベーション	1
1.2	本研究の目的	1
1.3	2048 について	2
1.4	2048 のルール	3
第 2 章	先行研究	6
2.1	Szubert & Jaśkowski (2014)	6
2.2	Wu et al. (2014)	9
2.3	Oka & Matsuzaki (2016)	13
2.4	Yeh et al. (2016)	15
2.5	Jaśkowski (2017)	18
第 3 章	ヒューリスティックス	23
3.1	base 方策	23
3.2	array 方策	24
3.3	maximum-in-corner 方策	24
3.4	ヒューリスティックスと強化学習によるプレイヤーの関係	24
第 4 章	提案と実装	27
4.1	maximum-in-corner 方策の導入	27
4.2	実装	28
第 5 章	実験	32
5.1	実験の目標	32
5.2	実験のセットアップ	32
5.3	実験 1 : maximum-in-corner 方策の有用性の提示	33
5.4	実験 2 : 二段階の corner ratio を使用することによる効果の提示	34
5.5	実験 3 : 学習率および学習ゲーム数の変更による性能の向上の提示	36
第 6 章	考察と結論	41

iv 目次

6.1	実験 1 の考察	41
6.2	実験 2 の考察	41
6.3	実験 3 の考察	42
6.4	実験の成果	43
6.5	future works	43
謝辞		44
参考文献		45

第 1 章

導入

本章においては、2048 を本研究の題材として採用した動機付けを述べるとともに、2048 というゲームのあらましやルールについて説明し、次章以降の展開に対する準備を行う。

1.1 モチベーション

「2048」[1] は、インターネットブラウザおよびスマートフォンなどの端末でプレイすることができるパズルゲームである。非常にシンプルで誰もが直感的にルールを理解できるのに対し、ゲームを理解したり安定して勝ち続けたりすることは非常に難しい [4]2048 は、その絶妙なバランスが評価されて非常に多くの人々が遊ぶようになった。同時に 2048 はゲーム AI 研究の対象としても活発に取り上げられるようになり、近年では強化学習を用いて訓練した非常に強いプレイヤーが複数の研究者から発表されている [4][5][6][7][8]。

これらのプレイヤーの実装手法は汎用性が高く、他のゲーム（特に 2048 に類似したゲーム）や課題に対しても適用することが可能な手法が多く用いられている [7] 反面、人間が 2048 をプレイする際に用いている経験的な知識・方策は明示的に組み込まれていないことが多い。一部の先行研究においては特徴量として人間が注目する指標を組み込んでいる [7] ものの、これらの指標も強化学習によって訓練されるため、経験的な知識が学習によって獲得されるとはいえない。

1.2 本研究の目的

本研究においては、これまでに発表されてきた強化学習で訓練を行う 2048 プレイヤーに対して、人間による経験的な知識に基づく新たなヒューリスティックスを導入する。このヒューリスティックスは強化学習による価値関数とは独立に組み込み、強化学習によって訓練された学習器を補助する形で適用することにする。新たなヒューリスティックスを導入した結果、ヒューリスティックスを導入していない 2048 プレイヤーよりも、導入したプレイヤーの方が良い性能を示すことを明らかにするのが、本研究の目的である。

1.3 2048 について

2048 が Gabriele Cirulli によって GitHub 上に公開されたのは 2014 年 3 月のことである [2]. Cirulli は 2048 を開発していた当時、「1024」および「2048」*¹というゲームに熱中していた [3]. これらのゲームはどちらも Asher Vollmer によるゲーム「Threes」にルールがよく似ている類似作品であるが、Cirulli は当時 Threes の存在については認識していなかった. Cirulli はこれらの Threes に端を発するゲームを改良するべく新たなゲームを開発し、ついに「2048」として公開することとなった. ここで挙げた 1024, Cirulli が参考にした 2048, そして Cirulli 自身が発表した 2048 は全て Threes の類似作品であるものの、これらの作品群の中では Cirulli による 2048 が最も人気を集めており、全世界で 2300 万人以上の人々が 2048*²で遊んだとされる [3].

2048 はシンプルで直感的にルールを理解できる一方で、マスターすることが非常に難しいゲームであることが特徴となっており、このために多くのプレイヤーを熱中させていると同時にゲーム AI 研究の題材としても多く取り上げられていると考えられる. また、ゲームとしての 2048 について着目すると、2048 については以下のような特徴を挙げることができる：

完全情報ゲームである

2048 は単一の状態から始まり、1 人のプレイヤーが自分の手番で何かしらの行動を起こすことによって状態が遷移し、さらにプレイヤーはゲームの状態を全て把握することができる. したがって、2048 は完全情報ゲームであると言える.

非決定論的ゲームである

2048 は 1 人のプレイヤーによってのみプレイされるゲームであるが、状態の変化の際には乱数によって決定される要素があるため、プレイヤーは次の状態を知ることはできない. したがって、2048 は非決定論的 (nondeterministic) ゲームである. ただし、プレイヤーは次の状態がいくつあり、その状態にどれぐらいの確率で遷移するのか自分で計算することはできる.

明確な終局が予め設定されていない

チェスや将棋といったゲームについては、どのような状態に到達するとゲームが終了するのか規定されており、プレイヤーはお互いに相手を終局に向かわせることを念頭にゲームをプレイする. 一方で、2048 には次の状態に遷移することが不可能になったらゲームが終了するというルールはあるものの、その状態に到達するまでは無限にゲームを進めることができる. すなわち、プレイヤーが熟達すればするほど長い時間ゲームを進めることができ、その分プレイヤーの優秀さを示す指標も良くなる. この特徴により、2048 は強化学習やゲーム AI のベンチマークとしてよく機能していると考えられる.

*¹ Cirulli 自身が発表した 2048 とは似ているが、ルールが異なる別のゲームである

*² なお、ここから単に 2048 と表記した場合、それは Cirulli が開発した 2048 のことを指す

1.4 2048 のルール

1.4.1 用語定義

盤面

2048 を遊ぶのに用いる大きな土台のことで、 $4 \times 4 = 16$ 個のマスが正方形をなすように並べられている。1 つのマスは、空であるか、1 個のタイルが入っているかのどちらかである。1 個のタイルには $2^n (n > 0)$ の数 1 つが書かれている。また、盤面を囲んでいる 4 辺のことを盤面の終端と呼ぶことにする。

初期盤面 (*initial state*)

プレイヤーが 2048 のゲームを始める時には、必ず初期盤面を与えられる。初期盤面とは、全てのマスにタイルが入っていない状態の盤面に対して、2 個のランダムタイル（後述）が与えられた盤面のことである。プレイヤーはゲームごとに異なる初期盤面を与えられるが、ランダムタイルがどの位置に発生するかはそのゲームを始めるまで分からないため、その初期盤面を予想・決定することはできない。

終末盤面 (*terminal state*)

プレイヤーが 2048 のゲームを進めた結果、後述するアクション選択が行えない盤面に到達したなら、その時点でゲームを終了する。この時の盤面を終末盤面とする。終末盤面には空のマスが存在しない。

ν -タイル

ν という数が書かれたタイルのことを ν -タイルと呼ぶことにする。

ランダムタイル

2048 のゲームを遊ぶ中で、ランダムタイルと呼ばれる新しいタイルが盤面に追加されることがある。ランダムタイルは盤面上のランダムな空のマ스에追加される。それぞれの空のマ스에ランダムタイルが追加される確率分布は一様分布である。なお、空のマスが存在しない盤面に対してランダムタイルが追加されるような状況は、2048 のゲーム中に存在しない。ランダムタイルは 2-タイルと 4-タイルのどちらかであり、2-タイルが追加される確率は 0.9、4-タイルが追加される確率は 0.1 と定められている。ランダムタイルが追加されるマスの位置と、そのタイルが 2-タイルであるか 4-タイルであるかどうかは、それぞれランダムに決定される。

報酬 (*reward*) とスコア

2048 における報酬とは、プレイ中の報酬加算（後述）の手順で獲得する数値のことを指す。報酬を獲得したら、スコアにその値を加算する。初期盤面を与えられた時のスコアは 0 であ

4 第1章 導入

り、ゲームが終了するまでに加算された報酬の総和がそのゲームの最終的なスコアである。

プレイ

本研究において、プレイという用語を以下のように定義する：

- ある盤面を与えられたプレイヤーが1回のプレイを行うと、次の盤面を与えられる。終末盤面に到達するまで、プレイヤーは何度もプレイを行うことができ、その度に次の盤面を与えられる。
- 1回のプレイは、アクション選択、遷移、ランダムタイル生成の3つの手順からなる。
- プレイヤーは、1回のプレイにおいて、1回のアクション選択を行う。なお、プレイヤーはアクション選択の結果行われる遷移の後どのような盤面になるのか計算して求めることはできるが、遷移の後どのマスにランダムタイルが生成されるかを前もって知ることはできない（確率的に予想することはできる）。

1.4.2 ゲームとプレイヤー評価の流れ

2048 において、以下の手順を「1 ゲーム」と数える。

1. ゲームを開始する。プレイヤーは初期盤面を与えられる。ゲーム開始時のスコアは 0 である。
2. プレイを行う。プレイは次の 3 つの手順からなる：
 - (a) アクション選択：盤面上の全てのタイルを動かす方向を、上下左右のうちいずれかから選ぶ。ただし、次の手順で遷移を行っても盤面に変化が生じないようなアクションを選ぶことはできない。
 - (b) 遷移：盤面上の全てのタイルを、選択したアクションの方向へ、他のタイルもしくは終端に接触するまで動かす。もし任意の 2ν -タイル 2 つが接触したならば、マージを行う。マージを行ってもなお、アクションの方向へ動かすことができるタイルがあるならば、さらに他のタイルか終端に接触するまで動かす。
 - マージ：アクションの方向に向かって前方のタイルを削除して、新たに 2ν -タイルを生成する。後方のタイルを削除する。新たに生成された 2ν -タイルはこの遷移中二度とマージを行わない。同一列において複数組のマージできるタイルがあるならば、マージは前方のタイルを優先して順番に行う。
 - 報酬加算：プレイ中にマージが発生した結果、新たに盤面に 2ν -タイルが生成されたならば、 2ν を報酬としてスコアに加算する。報酬加算はマージを行った結果新たに生成された全てのタイルについて行う。
 - (c) ランダムタイル生成：1 個のランダムタイルを盤面上に生成する。
3. 1 回のプレイが終末盤面に到達することなく終了したならば、次のプレイを行う。もしプレイ中に終末盤面に到達したならば、ゲームを終了する。

1.4.3 2048 で重要な指標

maxtile

ゲームが終末盤面に到達した時点で、盤面上で最も大きな数のタイルを *maxtile* と呼ぶ。近年の 2048 プレイヤの研究の多くは 16384-タイルの作成に成功しており、32768-タイルの作成に成功したプレイヤもある [8]。32768 を達成することが 2048 のプレイヤ実装において大きなメルクマールとなることから、32768-タイルを作成できた割合を指標とすることもある [8]。

勝率

2048 において、 $maxtile \geq 2048$ ならば、プレイヤーの勝利であると定義されている。多くの研究が 90% 以上の勝率を達成しているが、ゲーム木探索を組み合わせたプレイヤは勝率は 100% を達成しており、勝率については問題にしないこともある。

スコア

2048 において最も重要な指標がスコアである。プレイヤの学習が終わった後にその性能を検証するゲームを何度か行った際、その検証中のスコアの算術平均を取った平均スコアと、その検証中に最も高かったスコアである最高スコアの 2 つが、プレイヤの性能を示す指標として用いられることが多い。

1.4.4 2048 プレイヤの学習に関する用語定義

学習ゲーム

プレイヤを訓練するために行うゲームのことで、価値関数などのパラメータの更新を行いながらゲームを進める。ゲームを開始してから終末盤面に到達するまでを 1 ゲームと数え、1 ゲームが終了したら次の学習ゲームに進む。後述する通り、学習ゲームをどれくらい行うかについては実験者が指定する。一般的に学習ゲームを多く行えば行うほど学習器の性能は良くなるが、特定の状況に特化して学習を行う過学習を引き起こす可能性もある [7]。

検証ゲーム

訓練されたプレイヤを用いてゲームを行う。この際、価値関数などのパラメータは参照するだけで更新は行わない。1 回の実験において、学習ゲームを行う回数 n と、学習中に検証ゲームを行うインターバルのゲーム数 i と、検証ゲームを行う回数 m は実験者が指定する。 i, m については、本研究および先行研究においては $i = 5000, m = 1000$ と指定されている。 n については研究により左右するが、1 回の実験あたり 100,000 ゲームか、500,000 ゲームか、もしくは 1,000,000 ゲームの学習ゲームを行うようになっている。本研究では $n = 500000$ もしくは $n = 1000000$ としている。

第 2 章

先行研究

この章では、2048 プレイヤを実装した先行研究について、その研究が用いた手法と実装されたプレイヤの成績について紹介する。

2.1 Szubert & Jaśkowski (2014)

Szubert & Jaśkowski は、強化学習の手法の 1 つである TD 学習を用いたプレイヤの訓練と n タプルネットワークを用いた価値関数^{*1}の表現を組み合わせることによって、人間の知識やゲーム木探索を使用しないで十分強い 2048 プレイヤを実装することに成功した。

2.1.1 TD 学習

TD 学習の「TD」とは *temporal difference* の略であり、すなわち状態間における価値の差分を学習することによって価値関数 $V(s)$ の訓練を行う手法である。TD 学習は Tesauero によるバックギャモンへの適用 [10] でよく知られるようになり、碁 [11][12] やオセロ [13][14]、チェス [15] におけるゲーム AI の方策決定の手法として用いられるようになった。2048 にあてはめると、盤面 s の評価値と、その盤面の 1 プレイ後の盤面 s'' の評価値の差分を取り、これを現状定まっている s の評価値に足し込んでいくことで価値関数の更新を行うことになる。2048 プレイヤに対して TD 学習を適用する方法はさまざまなものがあるが、Szubert & Jaśkowski が検討した適用の方法は以下の通りである：

アクションの評価 (Q 学習)

平易な価値関数の実装として最初に考えられるのが、アクション a を選択した時の盤面 s の価値を評価する関数 $Q(s, a)$ を学習する **Q 学習**である。Q 学習において、行動評価値 $Q(s, a)$ は以下のように更新される：

^{*1} 本研究および先行研究における価値関数 (value function) とは、2048 の盤面全体の集合 S からその盤面の評価値を示す数値 W への写像 $V: S \rightarrow W$ であり、 $V(s)$ はルックアップテーブルなどに保持されている盤面 s の評価値を参照してその値を返す。盤面の状況をもとにその評価値を計算して値を返す評価関数 (evaluation function) とは異なる

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha(r + \max_{a' \in A(s'')} Q(s'', a') - Q(s, a))$$

ここで、 r は盤面 s においてアクション a を選択したことにより得られた報酬、 s'' は盤面 s においてプレイを行った後の盤面、 $A(s)$ は盤面 s において選択可能なアクションの集合である。この Q 学習においては、プレイ後の盤面 s'' における最も高い行動評価値と報酬の和と、現在の盤面 s においてアクション a を選択することの行動評価値の差を取り、学習率 α を掛けて $Q(s, a)$ に足し込むという形で、行動価値関数の更新を行っている。

なお 2048 に Q 学習を適用する場合は、どの盤面に対しても有り得るアクションは高々 4 つしかないで、 s と a の組み合わせにより値を与える 1 つの関数を使用するのではなく、4 通りのアクションごとに価値関数 $V_a(s)$ ($a \in \{\text{UP, DOWN, RIGHT, LEFT}\}$) を使用することができる [4]。この場合、アクション a に対する行動評価値 $V_a(s)$ は以下のように更新される：

$$V_a(s) \leftarrow V_a(s) + \alpha(r + \max_{a' \in A(s'')} V_{a'}(s'') - V_a(s))$$

盤面の評価 (TD(0))

次に、TD(0) を利用して盤面 s の価値を評価する手法が挙げられる。TD(0) は最もシンプルな TD 学習のアルゴリズムであり、TD(0) における価値関数 $V(s)$ は次の式のように更新される：

$$V(s) \leftarrow V(s) + \alpha(r + V(s'') - V(s))$$

一般に、TD(0) によって制御されるエージェントは $r + V(s'')$ を目標とする [9]。したがって、盤面の評価を行う際にはこの値を最大化するようなアクションを選択することになるが、このモデルにおいては $r + V(s'')$ の期待値を最大化するようなアクションを選択する。すなわち、ある盤面 s の価値は以下のように評価され、この値を最大化するアクションを選択することになる：

$$R(s, a) + \sum_{s'' \in S''} P(s, a, s'') V(s'')$$

ここで、 $R(s, a)$ は盤面 s においてアクション a を選択した際に獲得する報酬を与える関数、 S'' は盤面 s においてプレイを行った後に有り得る盤面の集合を、 $P(s, a, s'')$ は盤面 s においてアクション a を選択した後に盤面 s'' が得られる確率を与える関数を表す。

盤面の評価モデルは価値関数として単一の $V(s)$ のみを保持していればよいから、4 つの価値関数を保持する必要があるアクションの評価モデルに対して優位性がある一方で、1 つのアクションを評価する際にそのアクションの結果得られる全てのプレイ後の盤面を求める必要がある。2048 では最大で 15 個の空のマスが存在し、これらのマスに生成されるランダムタイルは 2 種類で、さらに 4 方向へのアクションを選択できることから、1 回のアクション選択のために最大で 120 個の盤面を求めなければならない。このため、盤面の評価モデルはアクションの評価モデルと比べて実行速度が非常に遅いプログラムとなってしまう。

遷移後盤面の評価 (TD(0))

最後に提案されたのが、アクションの評価モデルと盤面の評価モデルの組み合わせとも言える遷移後盤面の評価モデルである。遷移後盤面の評価モデルにおいては、単一の価値関数 V を用いるが、この価値関数は盤面 s に対して適用するのではなく、 s の遷移後の盤面 s' (afterstate, すなわち遷移を行った後でランダムタイルを生成する前の盤面) に対して適用する。ランダムタイル生成後ではなく遷移後の盤面ならば1つのアクションに対して高々1個しか存在しないため、計算量を抑えることが可能になる。このモデルにおいては、以下の値を最大化するアクションを選択する。

$$R(s, a) + V(T(s, a))$$

ここで、 $T(s, a)$ は盤面 s においてアクション a を選択した際に遷移した後の盤面、すなわち s' を与える関数である。また、遷移後盤面の評価モデルにおいては、 $V(s)$ の更新を連続した2つの遷移後盤面の評価値を用いて行い、以下のように更新されることになる。

$$V(s') \leftarrow V(s') + \alpha(r_{next} + V(s'_{next}) - V(s'))$$

ここで、 s'_{next} とは s の1プレイ後の盤面 s'' の遷移後盤面として最も評価値が高い盤面を、 r_{next} は s'_{next} への遷移によって獲得した報酬を表す。遷移後盤面の評価モデルにおいては、 $r_{next} + V(s'_{next})$ を目標として学習が行われる。

Szubert & Jaśkowski による実験の結果、以上の3つのモデルのうち最も性能が良いのは遷移後盤面の評価を行うモデルであった。以降、本研究および先行研究において単に TD 学習と表記した場合、それは Szubert & Jaśkowski が実装した TD(0) による遷移後盤面の評価モデルのことを指すこととする。

2.1.2 n タプルネットワーク

TD 学習によって盤面の評価とその学習を行うことができるが、盤面と評価値をどのように結びつけるかが問題になる。まず、2048 で有り得るすべての盤面に対して評価値を与える1対1対応のルックアップテーブル (LUT) を作成することを考えると、2048 で有り得る盤面の数は $(4 \times 4)^{18} \approx 4.7 \times 10^{21}$ と膨大な数になり、このような LUT を計算機上で実装することは現実的に不可能である。

そこで、一部のマスの組み合わせによる「タプル」というクラスターを作成し、さらに複数のタプルを組み合わせることで盤面を表現する手法「n タプルネットワーク」を2048に導入することが、Szubert & Jaśkowski によって提案された。たとえば、図2.1のようなnタプルネットワークを実装した場合、1つのゲーム内で保持すべき重みの数は860625であり、全ての有り得る盤面に対するLUTを保持するのに対して非常に少なく済む。

n タプルネットワークは Bledsoe & Browning によりパターン認識に用いられたのが最初の採用例である [16]。ゲーム AI の分野では、Lucas によってオセロに適用されたことをきっか

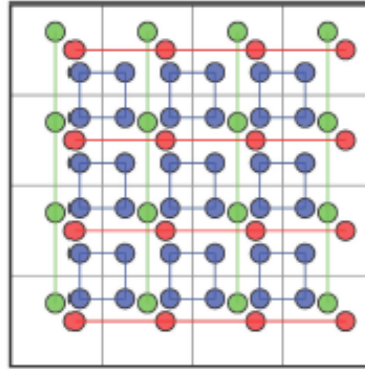


図 2.1. n タプルネットワークの例

けに、より広く知られるようになった [17].

2.1.3 結果と課題

本手法をもとに行った実験のうち、最も良い勝率を達成したプレイヤーを用いて 10 万ゲーム中の成績を検証したところ、勝率は 0.9781 であり、平均スコアは 100,178 であった。1 ゲーム中に達成されたスコアで最も良かったのは 261,526 であった。本手法は探索ベースの手法よりも大幅に高速で、かつ成績が良かった [4].

しかしながら、この手法ではスコアを最大化することを目指して学習を行うため、「常に 2048-タイルを生成すること」よりも「時々 16384-タイルを生成すること」が重視される傾向があり、したがって勝率は必ずしも 100% を達成できていない。

2.2 Wu et al. (2014)

Wu は、Szubert & Jaśkowski の手法を改良し、木探索を用いた先読みと組み合わせることによってさらに良いプレイヤーを実装することに成功した。

2.2.1 n タプルネットワークの配置の改善

Wu は、Szubert & Jaśkowski が考案した n タプルネットワークのうち、直線型で 4 タプルとして配置していたタプルを、図 2.2 (b) のように柄杓型の 6 タプルに変更した。これによって増える重みの数は約 2 倍程度であったが、この変更によって Szubert & Jaśkowski のものよりも飛躍的に良い成績を得ることができた。なお、何故このようなタプルの配置が最善だと判断したのかについて、Wu は論文において言及していない。

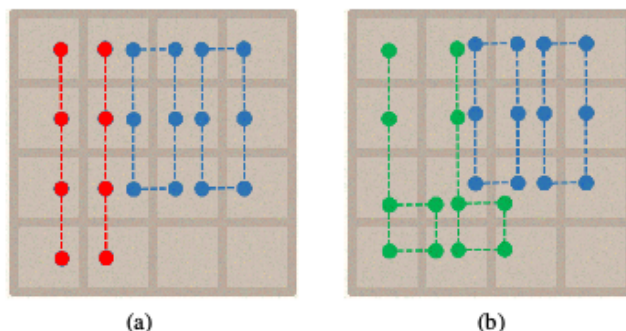


図 2.2. Szubert & Jaśkowski (a) と Wu (b) が提案した n タプルネットワーク

2.2.2 Multi-Stage TD 学習の導入

Multi-Stage TD 学習 (MS-TD 学習) とは、ゲームのステージ^{*2}に応じて異なる価値関数を保持することによって、それぞれの局面に対してより適切な重みを学習させることを目的とした手法である。Wu は学習ゲームのそれぞれのゲームを 3 つのステージに分割し、ゲームプレイも同様に 3 つのステージに分割して行うようにした。Wu の提案した 2048 における MS-TD 学習は、以下のような手順で学習を行う。なお、「 T_{16k} 」とは「その 1 ゲームの中で初めて 16384-タイルを生成することに成功した時」、「 T_{16+8k} 」とは「その 1 ゲームの中で初めて 16384-タイルを生成した後に、初めて 8192-タイルを生成することに成功した時」のことを示す。

1. 第 1 ステージにおいては、初期盤面からゲームを始めて、価値関数が十分飽和するまで学習を行う。このステージで学習された価値関数の重みのことを「第 1 ステージ価値関数」と呼ぶことにする。また、学習ゲーム中に T_{16k} を達成したなら、その時の盤面を全て保存しておく。
2. 第 2 ステージにおいては、第 1 ステージで保存した盤面からゲームを始めて、TD 学習を行う。このステージで学習された価値関数の重みのことを「第 2 ステージ価値関数」と呼ぶことにする。また、学習ゲーム中に T_{16+8k} を達成したなら、その時の盤面を全て保存しておく。
3. 第 3 ステージにおいては、第 2 ステージで保存した盤面からゲームを始めて、TD 学習を行う。このステージで学習された価値関数の重みのことを「第 3 ステージ価値関数」と呼ぶことにする。

その後、以下のような手順でゲームプレイを行う。

^{*2} 本手法においては、盤面に新しい大きな数のタイル（例えば 16384-tile）が生成された時を境界として、ゲームをいくつかのステージに分ける

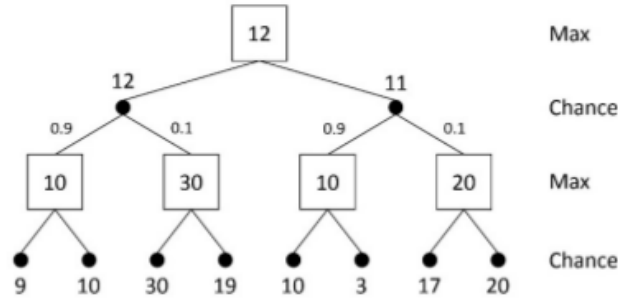


図 2.3. Expectimax 木の例 (Wu et al.)

1. 盤面が T_{16k} を達成するまでは、第 1 ステージ価値関数を用いてゲームプレイを行う。
2. 盤面が T_{16k} を達成してから T_{16+8k} を達成するまでは、第 2 ステージ価値関数を用いてゲームプレイを行う。
3. 盤面が T_{16+8k} を達成してからは、第 3 ステージ価値関数を用いてゲームプレイを行う。

2.2.3 Expectimax 木探索

Szubert & Jaśkowski によって、木探索ベースの 2048 プレイヤは強化学習で訓練したプレイヤに劣ることが示されたが、Wu は強化学習によるプレイヤに対して Expectimax 木探索を補助的に組み合わせることによって、さらにプレイヤの性能を高めようと試みた。

Expectimax 木探索には、Max ノードと Chance ノードという 2 種類のノードがあり、それぞれのノードの値は子ノードから決定される。Max ノードの値は、子ノードのうち最も大きな値のノードの値となる。例えば図 2.3 の根ノードの値は 12 であるが、これは子ノードの「12」と「11」のうち最大の値である 12 を取ったものである。一方で Chance ノードの値は子ノードの期待値となる。例えば図 2.3 の根ノードの子ノードの 1 つである「12」というノードは、0.9 の確率で 10 となるノードと 0.1 の確率で 3 となるノードの期待値、すなわち $0.9 \times 10 + 0.1 \times 3 = 12$ によって 12 という値が決定する。

Wu の提案においては、Max ノードはいわゆる盤面、すなわちこれからプレイヤがアクションを選択して遷移を行おうとする盤面であり、Chance ノードは遷移後盤面、すなわちこれからランダムタイルが発生しようとしている盤面であると考えられる。例えば、ある盤面（アクション選択と遷移が終わった直後の盤面）の評価値を深さ 3 の Expectimax 木探索を用いて求めたい時、例えば図 2.4 のような探索木が考えられる。

根ノード s は Max ノードであるから、その子ノード（以下、 s'_n ($0 \leq n \leq 3$) と表す）は Chance ノードであり、その数は可能なアクションの数 = 4 である。根ノードの評価値 $V(s)$ は $\max\{V(s'_n), 0 \leq n \leq 3\}$ である。次に、 s'_0 に注目すると、この Chance ノードの子ノード（以下、 s''_m ($0 \leq m \leq 27$) と表す）は Max ノードであり、その数は有り得るランダムタイル生成後の盤面の数 = 14 (空のマス数) \times 2 (ランダムタイルの種類数) = 28 である。評価

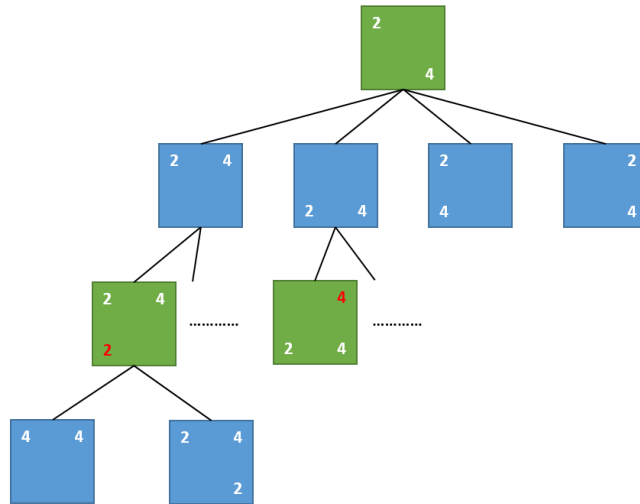


図 2.4. 2048 の盤面を Expectimax 木に当てはめた例。緑の盤面が Max ノード，青の盤面が Chance ノードを表す。

値 $V(s'_0)$ は $V(s''_m)$ の期待値で与えられる。さらに s'_0 に注目すると，この Max ノードの子ノードは Chance ノード (s'_{next}) であり，なおかつ葉ノードである。葉ノードの値は価値関数 V によって与えられるから，再帰的に親ノードの値も求めることができ，最終的に根ノードの評価値 $V(s)$ も求められる。

以上のように，Expectimax 木の各ノードに盤面を当てはめることによって，任意の深さで先読みをしてから盤面の評価値を求めることが可能であることが示された。Expectimax 木探索を用いて先読みをすることで，将来の盤面を予想してより良いアクションを選択できるようになったが，これはスコアの面での成績が良くなることに繋がる一方で， $maxtile = 2048$ を達成する割合，すなわち勝率の向上にも大きな影響をもたらした。

2.2.4 結果と課題

Wu によるプレイヤーは Szubert & Jaśkowski のものに比べて著しく良い成績を達成した。まず Szubert & Jaśkowski が達成できなかった 32768-タイルの生成に成功し，10.9% の確率で 32768-タイルを生成できるようになった。勝率に関しては 1 を達成，すなわち 2048-タイルは 100% の確率で生成できるようになり，平均スコアは 328,946，最大スコアは 605,752 を記録した。これは当時としては 1 つの例外*³を除き，当時の計算機による 2048 プレイヤの中で最も優れた成績であった。

一方で，n タプルネットワークの形状変更や MS-TD 学習のステージ分けの方法について

*³ Xiao による Wu よりも深い先読みと人間による調整を行った評価関数を用いたプレイヤーがこの例外であるが，Wu のものよりも 100 倍遅い： <https://www.youtube.com/watch?v=JQut67u8LIg>

表 2.1. 形成されうる n タブルの数

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
All	77	252	567	1051	1465	1674	1465	1051	567	252	77
Connected	8	17	33	68	119	195	261	300	257	169	66

は、この研究で示された手法が最も良いということを説明する根拠が述べられておらず、依然として改良の余地は残していた。特に n タブルネットワークの形状変更については、次の Oka & Matsuzaki の研究で詳しく検討されることとなった。

2.3 Oka & Matsuzaki (2016)

Szubert & Jaśkowski は当初図 2.1 のような n タブルネットワークを考案していたが、この n タブルネットワークによる学習器はあまり性能が高くなく、平均スコアは 10 万ゲーム学習した時点で 5 万～6 万程度にとどまっていた。そこで、図 2.2 (a) のような n タブルネットワークへの改良が行われ、その結果平均スコア・勝率ともに改善することができた。さらに Wu は Szubert & Jaśkowski の考案した n タブルネットワークを改良し、成績を伸ばすことができた。

しかしながら、ここまでは「タブルのサイズを大きくすると学習器の成績も良くなる」という大まかな関係しかわかっておらず、成績を最善にする n タブルネットワークはどのような形状になるのか厳密には検討されていなかった。これを厳密に検討したのが Oka & Matsuzaki である。

2.3.1 n タブル単体の性能の評価

Oka & Matsuzaki は、まず n タブル単体の性能を網羅的に評価することを目指した。2048 の盤面上で n 個のタイルを選んで形成されうる n タブルの数は、表 2.1 の通りとなっている^{*4}。

Oka & Matsuzaki は Connected タブルのうち、十分性能が良く、なおかつ現実的に n タブルネットワークとして運用することができる $N = 6$ と $N = 7$ の場合のみ検討することとした。彼らは次に、形成されうる Connected な 6 タブル 68 個の中からランダムに 10 個のタブルを選んで 100 万ゲームの学習を行う実験を 680 回^{*5}繰り返し、各タブルの性能を比較可能な数値として算出した。7 タブルについても同様の実験を行った。

その結果、6 タブルと 7 タブルのうち最も優れた 4 つのタブルと最も劣った 4 つのタブルが、図 2.5 の通り明らかになった。

^{*4} 「Connected」とは、タブル上の全てのタイルが 1 個以上の他のタブルと隣接していることを示す

^{*5} $680 \times 10 = 6800$ より、全てのタブルが 100 回は選ばれるようにするため

















N	4 best tuples				4 worst tuples			
	$\langle 6-01 \rangle$	$\langle 6-02 \rangle$	$\langle 6-03 \rangle$	$\langle 6-04 \rangle$	$\langle 6-65 \rangle$	$\langle 6-66 \rangle$	$\langle 6-67 \rangle$	$\langle 6-68 \rangle$
6								
	31,161	24,530	22,207	20,576	9,644	9,642	9,563	9,052
7								
	32,900	23,504	23,483	23,338	8,543	8,204	7,918	7,683

図 2.5. 最も優れている／劣っている上位 4 つの 6 タプル・7 タプル (Oka & Matsuzaki)

2.3.2 n タプルネットワークに組み込む n タプルの数の検討

6 タプルおよび 7 タプルの性能が判明したので、性能が良い任意の数のタプルを組み合わせることで n タプルネットワークを作成することが可能になった。Szubert & Jaśkowski および Wu は 4 個のタプルを組み合わせることで n タプルネットワークを作成していたが、Oka & Matsuzaki は 5 個以上のタプルを組み合わせることを検討した。すなわち、n タプルの数が多くなればなるほど n タプルネットワーク全体としての性能も上がると思われるが、最も性能が良くなるタプルの数は何個かを明らかにすることである。

実験においては、6 タプルの場合最大で上位 45 個、7 タプルの場合最大で上位 10 個のタプルから n タプルネットワークを作成することとした。各 n タプルネットワークに対して、600 万ゲーム学習を行わせ、10,000 ゲームごとに平均スコアと最大スコアを記録した。その結果が図 2.6 である。左上のグラフは性能上位 m 個の 6 タプルによる n タプルネットワークを用いた学習器の成績のうち、平均スコアを示す。右上のグラフは性能上位 m 個の 7 タプルによる学習器の平均スコアを、左下のグラフは性能上位 m 個の 6 タプルによる学習器の最高スコアを、右下のグラフは性能上位 m 個の 7 タプルによる学習器の最高スコアを示す。

上記の通り、実験群の中では 10 個の 7 タプルを組み合わせたタプルネットワークが最も良い成績を収めることがわかった。なお、グラフからも読み取れるが、7 タプルによるネットワークに関しては 600 万ゲーム学習しても平均スコア・最高スコアが収束しない。そのためさらに組み合わせるタプルを増やすとさらに成績が良くなることが考えられるが、技術上の制約により $m = 11$ 以上は実現できなかった*6。

*6 7 タプルを組み合わせることでタプルネットワークを作成する場合、重みを保持するために 1 個のタプルにつき 1GB のメモリを消費しなければならない。Oka & Matsuzaki が実験を行った環境はメモリが 12GB しか確保できなかったため、 $m = 11$ 以上は実験を行うことが困難だったのではないかと考えられる。また、この研究においてゲーム木探索を組み込むことができなかったのもメモリの制約が原因ではないかと考えられる。

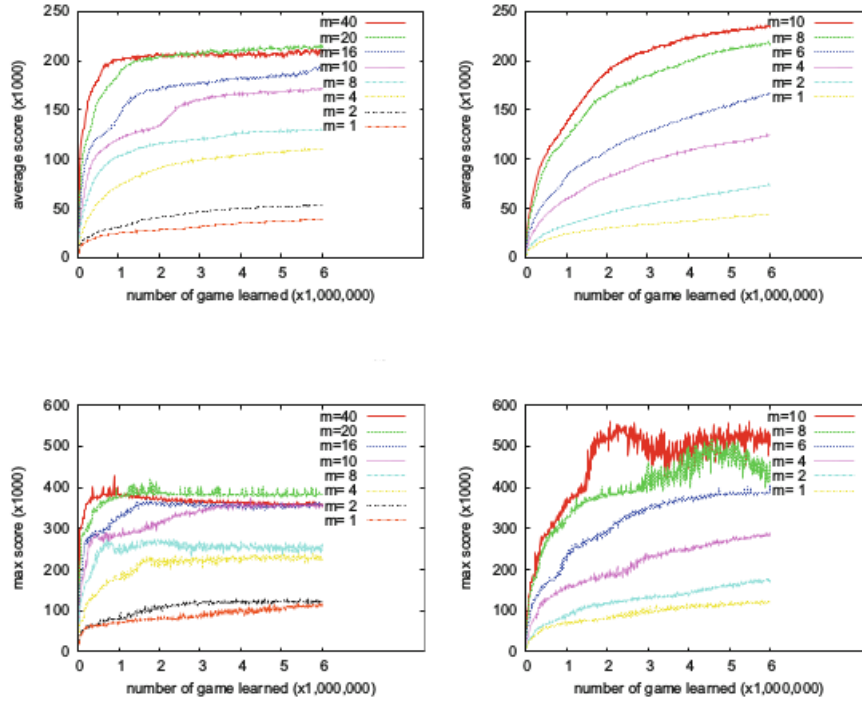


図 2.6. 成績上位タプル m 個を組み合わせたタプルネットワークの実験. 図の左列は 6 タプル, 右列は 7 タプルによるネットワークによる実験の結果である (Oka & Matsuzaki)

2.3.3 結果と課題

Oka & Matsuzaki の研究における最も良い n タプルネットワークは, 勝率が 0.9850, 平均スコアが 234,136, 最高スコアが 504,660 という成績を残した. これはゲーム木探索を用いない計算機を用いた 2048 プレイヤとしては最も良い成績であった. しかしながら, ゲーム木探索を用いなかったことによりゲーム序盤では安定性を欠いてしまい, Wu が達成した勝率 1 を割り込む形となってしまったし, 単純に 2048 プレイヤとしての成績を比べると Wu のものよりも平均スコア・最大スコアともに低くなっている. 一方で, ゲーム木探索を採用しなかったことはプログラムの高速化という点では利があり, 1 秒あたり 88000 手の遷移を行うことができるプログラムとなった. これは Wu の研究と比べて約 290 倍高速である.

2.4 Yeh et al. (2016)

Yeh は Wu et al. (2014) の研究にも参画していた共同研究者で, Wu の研究の流れを引き継ぐ形で 2048 プレイヤの改良を行った. Wu の研究で用いた MS-TD 学習の考え方, 改良された n タプルネットワーク, Expectimax 木探索は引き続き用いられているため, この研究で新たに加わった要素のみを述べる.

2.4.1 新たな特徴量の追加

Yeh は, n タプルネットワークによる学習の他に, 盤面に表れる種々の特徴量を追加の価値関数として用いることとした. 盤面の評価値には従来の n タプルネットワークによる評価値と新たに採用した特徴量による価値関数の和を用い, これを TD 学習で訓練した. なお, 採用した特徴は以下のつである.

1. 大きな数が書かれたタイルの個数
2. 何も書かれていないタイルの個数
3. 異なる数が書かれた (distinct) タイルの個数
4. マージすることができるタイルのペアの組数
5. 書かれているタイルの数が $(\nu, 2\nu)$ の形になっているタイルのペアの個数

2.4.2 MS-TD 学習のステージ分けの改良

Wu は MS-TD 学習を行うにあたり 3 ステージに分けて訓練・ゲームプレイを行っていたが, このステージの分け方をさらに細かくした. Yeh によってテストされたステージ分けは以下の通りである. なお, T_{x+y+zk} という表記は, 「盤面に初めて $1000x, 1000y, 1000z$ のタイルが同時に現れた時」のことを指す. 各タイルの数は百の位で切り捨てられて表現されている.

- 戦略 1 : $T_{8k}, T_{16k}, T_{16+8k}$ を境界として 4 つにステージを分ける
- 戦略 2 : $T_{16k}, T_{16+8k}, T_{16+8+4k}$ を境界として 4 つにステージを分ける
- 戦略 3 : $T_{16k}, T_{16+8k}, T_{16+8+4k}, T_{16+8+4+2k}$ を境界として 5 つにステージを分ける
- 戦略 4 : $T_{16k}, T_{16+8k}, T_{16+8+4k}, T_{16+8+4+2k}, T_{16+8+4+2+1k}$ を境界として 6 つにステージを分ける

まず戦略 1 をテストした際, T_{8k} を境界としてステージを分けることは意味がないことがわかったため, 戦略 2 以降では T_{16k} 以降のステージ分けのみを考えることとした. 戦略 2 から戦略 4 をテストした結果, 平均スコアでは戦略 4 が最も優秀であることがわかったが, 最高スコアと 32678-タイルの到達率では戦略 3 が最も優秀であった. 各戦略ごとの成績は表 2.2 の通りである. 各学習器は 3 手先読みによるゲームプレイを行っており, 最高スコアを除く各指標は 10,000 ゲームの検証ゲームの結果の平均である.

以上の結果より, Yeh は戦略 3 が最も優れたステージ分けだと判断し, これ以降は戦略 3 を用いて実験を行った.

2.4.3 学習率の調整

TD 学習をより正確に行うために, まず学習率 $\alpha = 0.0025$ で TD 学習を行った後, 価値関数に大きな改善が見られなくなったと判断したら, 学習率 $\alpha = 0.00025$ に変更して学習を続行

表 2.2. 戦略 1~4 のステージ分けによる MS-TD 学習で訓練した学習器の成績 (Yeh et al.)

	戦略 1	戦略 2	戦略 3	戦略 4
16384-タイル作成率	87.23% ($\pm 0.65\%$)	87.68% ($\pm 0.64\%$)	87.68% ($\pm 0.64\%$)	87.68% ($\pm 0.64\%$)
32768-タイル作成率	14.15% ($\pm 0.68\%$)	15.30% ($\pm 0.71\%$)	18.31% ($\pm 0.76\%$)	16.82% ($\pm 0.73\%$)
最高スコア	594,716 ($\pm 51,886$)	579,996 ($\pm 40,583$)	614,204 ($\pm 10,053$)	610,011 ($\pm 13,720$)
平均スコア	349,996 ($\pm 3,433$)	350,150 ($\pm 9,097$)	361,395 ($\pm 9,892$)	364,438 ($\pm 9,448$)
速度 (手数/秒)	1,152 (± 93)	1,165 (± 114)	1,106 (± 106)	1,078 (± 104)

させるようにした。

2.4.4 TD(λ) の使用

Szabert & Jaśkowski および Wu は TD 学習において TD(0) を使用していたが、将来の盤面と報酬を見通しながら学習を行うために、Yeh は TD(λ) の導入を行った。Yeh は $\lambda = 0.5$ とし、前方の 5 ステップ・バックアップの報酬を平均化することとした。目標とする収益 R_t^λ は以下の式の通りである。

$$R_t^\lambda = 0.5R_t^1 + 0.25R_t^2 + 0.125R_t^3 + 0.0625R_t^4 + 0.0625R_t^5$$

なお、 R_t^n は $R_t^n = \sum_{k=0}^{n-1} V(s_{t+n})$ で与えられる。

2.4.5 結果

上記の改良を重ねた結果、Yeh は平均スコア 443,526、最大スコア 793,835 と非常に良い成績の学習器を訓練することに成功した。なお、32768-タイルへの到達率は 31.75%、1 秒あたりの遷移速度は 500 手であった。さらに、検証ゲーム中のある 1 ゲームにおいて 65536-タイルを生成することにも成功した。これは強化学習ベースの 2048 プレイヤでは当時として最も強く、Xiao による深い先読みによる探索ベースのものよりも平均スコアでは優っており、Yeh の方が 125 倍速いプログラムであった。

2.5 Jaśkowski (2017)

Jaśkowski は, Yeh までの 2048 プレイヤの改良の流れを受け継ぎながら, これまで用いられてきた TD 学習や訓練・検証のステージ分けなどに対して改良を加えつつ, 新たな手法を加えることでさらに優秀なプレイヤの実装を目指した.

2.5.1 自動的な学習率決定アルゴリズムの適用

Jaśkowski は $TD(\lambda)$ を使用する点は Yeh の研究を継承したが, TD 学習で最も重要なパラメータである学習率を決定するにあたり, 新たな手法を提案した. すなわち, Yeh の研究では手動で学習率が設定されていたのに対して, Jaśkowski はこれまでに提案されてきたオンライン適応学習による学習率決定のアルゴリズムを 2048 にも適用することを試みた.

Bagheri et al. による Connect 4^{*7}への適用の研究において, これらの学習率決定アルゴリズムはいずれも標準的な TD 学習よりも良い成績を残すことが明らかとなったが [18], 一方で長期的に見るとアルゴリズム間の差はそこまで大きいものにはならなかった. そこで, Jaśkowski は最もシンプルな Temporal Coherence ($TC(\lambda)$) と, より先進的でチューニングの必要がない Autostep を選択して実験することにした.

$TC(\lambda)$

これまでの $TD(\lambda)$ では実験者が学習率 α を手動で決定していたが, $TC(\lambda)$ においては, 手動で決定される α の代わりに以下のパラメータを用いて学習率 γ を決定する.

- メタ学習率 β : 実験者が手動で設定するパラメータ
- 累積誤差関数 $E(s)$: これまで TD 学習で価値関数 $V(s)$ の更新を行う際に用いてきた誤差 $\delta_t = r_{t+1} + V(s_{t+1}) - V(s_t)$ を, $V(s)$ の更新を行う際に $E(s)$ に対して加算する. 盤面 s は価値関数と同様に, n タプルネットワークを用いて近似される
- 累積絶対誤差関数 $A(s)$: $V(s)$ の更新を行う際に, δ_t の絶対値を $A(s)$ に対して加算する. 盤面 s は価値関数と同様に, n タプルネットワークを用いて近似される
- 適応学習率 α : $E(s)$ と $A(s)$ の値によって自動的に決定されるパラメータ

適応学習率 α は以下の式で求められる.

$$\alpha = \begin{cases} \frac{|E_i[s'_k]|}{A_i[s'_k]}, & \text{if } A_i[s'_k] \neq 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

また, 学習率 γ は以下の式で求められる.

^{*7} いわゆる「四目並べ」に近い 2 プレイヤ対戦型のボードゲーム

$$\gamma = \frac{\alpha \times \beta}{m} \quad (m \text{ は } n \text{ タプルネットワークに格納されているタプルの数})$$

このような学習率の求め方をすることによって、累積誤差と累積絶対誤差の値が近い場合は学習率が大きく、逆に累積誤差と累積絶対誤差の差が大きくなると学習率は小さくなる。ある盤面 s に対して累積誤差 $E(s)$ と累積絶対誤差 $A(s)$ の差が大きいということは、 s に対して負の値の δ_t が加算されることが多くなっているということであり、すなわちそれはこの盤面に対しての価値関数の評価が上手く行っていないということであるから、学習率を低くして価値関数の更新を穏やかに行うのは理にかなっていると考えられる。

Autostep

Autostep は Mahmood[19] によって提案されたアルゴリズムで、Sutton による IDBD[20] の拡張にあたる。Autostep では、ステップサイズの上限を定め、もしステップサイズが大きくなりすぎていることが検知されたらステップサイズ値を小さくするという方法で、IDBD を改良したものである。Autostep では 3 種類のパラメータを設定する必要があり、Jaśkowski の研究では、このうち初期ステップサイズ $\alpha_{init} = 1.0$ 、割引率 $\tau = 0.0001$ は固定され、メタ学習率 μ の値をいくつか選択して実験が行われた。

結果

Jaśkowski は、前述の 2 つの自動的な学習率決定アルゴリズムに加え、従来の TD 学習^{*8}を採用した合計 3 種類の手法で、1 手先読み（すなわち、先読みを行わない）と 3 手先読みの 2 つの条件で実験を行った。その結果、全ての学習率決定手法のうち、1 手先読みの場合は $TC(\lambda)$ で $\beta = 1.0$ の時に平均スコアが最も良くなり、3 手先読みの場合は $TC(\lambda)$ で $\beta = 0.5$ の時に平均スコアが最も良くなった。1 手先読み・3 手先読みの場合ともに、 $TD(\lambda)$ および Autostep はどのように学習率・メタ学習率を設定しても $TC(\lambda)$ に優る平均スコアを達成することはできなかった。

Jaśkowski は、Autostep は定常的な教師データが存在する作業に特化しているため、訓練データが定常的ではない 2048 にはあまり適していなかったと考えている。また、 $TC(\lambda)$ および Autostep 両者に共通する欠点として、何かしらの近似した盤面に対応する重みを保持する必要があることから、 $TD(\lambda)$ よりも多くの n タプルネットワークを保持しなければならないため、計算時間が長くなってしまうことを指摘している。

2.5.2 Multi-Stage Weight Promotion

Jaśkowski は Wu が提案した MS-TD 学習の考え方を概ね継承したが、ステージ分けと重みの選択において細かい改良を加えた。

^{*8} $TC(\lambda)$ および $TD(\lambda)$ においては、 $\lambda = 0.5$ とした

新しいステージ分け

Wu では3ステージ, Yeh では5ステージに分けることが最善であるとされていたステージ分けについて, Jaśkowski は 2^g ステージに分け (g は正の整数), また各ステージの「長さ」 l を $l = 2^{15+1-g}$ と定義した. 例えば $g = 4$ の時, 長さ $l = 2^{12} = 4096$ である. この場合, 以下のようなステージ分けがなされる.

1. ステージ1: 初期盤面から T_{4096} まで
2. ステージ2: T_{4096} から T_{8192} まで
3. ステージ3: T_{8192} から $T_{8192+4096}$ まで
4. ステージ4: $T_{8192+4096}$ から T_{16384} まで
5. ...
6. ステージ16: $T_{32768+16384+8192+4096}$ から T_{65536} まで

なお, $TC(\lambda)$ で導入した累積誤差関数 E と累積絶対誤差関数 A についても同様にステージ分けを行って重みを保持する.

Weight Promotion

Wu および Yeh のステージ分けにおいては, 新しいステージの学習を始める際に再び何も学習していない状態から n タプルネットワークの訓練を行わなければならなかったため, 汎化性能が著しく損なわれていた. この汎化性能の弱体化はステージ数が多くなればなるほど進むため, Yeh はステージを多くすれば多くするほど学習器の性能は悪くなることを指摘しており, その結果5ステージに分けるのが最も良いと考えたのである. この問題を「ステージ数を多くしない」以外の方法で解決するために, Jaśkowski は各ステージの初期状態の評価値を, 前のステージの同じ盤面から引き継ぐことにした. Jaśkowski はこの方策を Weight Promotion と呼び, 上記の多段ステージ分けとともに提案した.

結果

Jaśkowski は, 以下の6つの条件について, 1手先読みと3手先読みの2つの条件を掛けあわせて合計12の実験を行った. なお, WP は Weight Promotion を適用したことを示し, 6. 以外の5つの実験においては全て共通の5つの6タプルによる実験を行った.

1. ステージ分けを行わない (純然たる $TC(\lambda)$)
2. $g = 4$
3. $g = 3, WP$
4. $g = 4, WP$
5. $g = 5, WP$
6. 5つの7タプルによる $TC(\lambda)$ で, ステージ分けを行わない

この結果, 1手先読みでは6. の7タプルによる $TC(\lambda)$ が最も良い成績を取め, 1. に関して

も 2. と 5. の実験には成績が優るなど、ステージ分けに対しては顕著な効果が見られなかった。一方 3 手先読みでは 4. の実験が最も良い成績を収め、ステージ分けを行わない 1. と 6. の実験よりも高い平均スコアを得た。また学習プロセスに注目すると、ステージ分けを行う実験では平均スコアが単調増加していたのに対し、ステージ分けを行わない場合は平均スコアが逆に悪くなっていることが確認された。

以上の結果より、Jaśkowski はステージ分けを行わない学習器は 1 手先読みの条件に対して過学習が起きてしまうが、ステージ分けを行う学習器は過学習に耐性があり、成績の悪化は起こらなくなると結論付けた。なお、Weight Promotion については 1 手先読みに対しても 3 手先読みに対しても適用することでより良い成績が得られることが確認された。

2.5.3 Carousel Shaping と余剰タプルの追加

Carousel Shaping

前節のステージ分けにおける改良を行った際、従来の学習器は 1 手先読みの条件の下で過学習を行ってしまい、3 手先読みでは学習を重ねるに従って成績を落としてしまうという状況が確認された。これは従来の Multi-Stage 学習ではゲームで重要になる終盤のステージでの学習時間が少なくなってしまうことが原因であると考えた Jaśkowski は、終盤のステージにおける学習時間を確保するため、Carousel Shaping という新たな Multi-Stage 学習の手法を提案した。Carousel Shaping の疑似コードを Algorithm 1 に示す。

Algorithm 1 Carousel Shaping

```

1: function CAROUSELSHAPING
2:    $stage \leftarrow 1$ 
3:    $initstates[x] = \emptyset$  for  $x \in \{1 \dots 2^g\}$ 
4:   while not enough learning do
5:     if  $stage = 1$  then
6:        $s \leftarrow \text{INITIALSTATE}()$ 
7:     else
8:        $s \leftarrow \text{RANDOMCHOICE}(initstates[stage])$ 
9:      $\text{LEARNFROMEPISODE}(s) \triangleright$  Updates  $initstates$ 
10:     $stage \leftarrow stage + 1$ 
11:    if  $stage > 2^g$  or  $initstates[stage] = \emptyset$  then
12:       $stage \leftarrow 1$ 
13: end function

```

Carousel Shaping (CS) では、明確に学習を行うステージを分けるのではなく、1 回のゲームの中で複数のステージにまたがった学習を可能にする。ステージ 1 の初期盤面から学習を始め、もし途中でステージ分けの境界にあたる盤面に到達したならその都度 $initstates$ に登録し

つつ^{*9}学習を行う。学習が1ゲーム分終わったら次のステージに進み、そのステージの初期盤面を取得し、学習を行う。もしステージが2⁹を超えるか、そのステージの初期盤面がまだ1つも記録されていなかった場合、ステージ1に戻って学習を行う。このように、CSはその名(carousel=回転木馬)の通り学習するステージをローテーションさせながら学習を行う。

余剰タプルの追加

Jaśkowski が導入した最後の手法が余剰タプルの追加 (Redundant Encoding) である。これまで使用してきた5個の6タプルに加え、より小さい2個の3タプルと5個の4タプルをタプルネットワークに加えて学習を行う。ここで追加したタプルは既に使用しているタプルの形状の中に含まれているため、一見すると無意味なタプルではあるが、追加することでより速く汎化することが確認された。ただし、サイズが小さいとはいえ7個のタプルを追加するため、学習時間は非常に長くなる。

2.5.4 結果

以上の改良を加え、さらに Expectimax 木探索による探索を、先読みする手数ではなく1手あたり1000ミリ秒という時間単位で許容したところ、Jaśkowski による2048プレイヤは平均スコア609,104を記録した。これは先行研究のいずれよりも優れた成績である。またこの研究における最も優秀なプレイヤは1秒に1手のペースでアクションを選択するため、1秒あたり500手進めることができる Yeh のものより表面上は遅くなるが、仮に1秒に上限1000手のペースでアクションを選択するよう調整した場合は平均スコアが527,099となり、Yeh の443,526を上回る。すなわち、学習のみならず検証時のプレイにおいても Yeh のプレイヤよりも性能が高いということになる。

^{*9} *initstates* は各ステージの初期盤面を保持するデータ構造で、各ステージごとに最近到達された初期盤面1000個を保持する

第 3 章

ヒューリスティックス

先行研究で挙げられてきた 2048 プレイヤは、強化学習によって有り得る 2048 の盤面の評価値を記録しておき、盤面に応じて最も価値が高いと思われる盤面につながるアクションを選択するという方策のもとにプレイを行ってきた。翻って人間が 2048 をプレイする場合、人間が盤面の価値を評価・記憶することは明らかに不可能である。そのため、人間が 2048 をプレイする際には、ある一定の方策をいくつか持ち、その方策に従う盤面を導き出すようにアクションを選択していると考えられる。ここで、人間が採用していると考えられる 2048 の方策をいくつか挙げる。

3.1 base 方策

人間が 2048 をプレイする時、一般的に大きな数のタイルを盤面のうちいずれか 1 辺に寄せようとする傾向がある。この方策を **base** 方策と名付けることとする。base 方策に基づいたプレイのフローの例は以下の通りである。

- 盤面の任意の辺 4 マスに「基地」(base) を作って、大きなタイルを蓄える場所と決めておく^{*1}
- 基地以外の残りの 9 マスを使って、新しく数の大きいタイルを作成する
- 基地にマージできるタイルを作成できたら、基地にあるタイルへマージする
- 基地内でマージすることができるタイルの組ができたら、それらをマージし、さらに大きな数のタイルにする

もし基地を定めない場合、大きなタイルが盤面のあちらこちらへ移動することとなる。2 μ -タイルを作成することが困難な μ -タイル——例えば 2048-タイルなどが盤面を上下左右に移動することを考えると、例えば 4-タイルや 8-タイルといった小さなタイルのマージを行う妨げとなり、盤面の自由度が極端に下がる。そのため、より長くゲームを行うためには base 方策に従うことが重要であると考えられる。

^{*1} プレイヤ自身の好みによって下や左などの辺が基地に選ばれるが、どの辺を選んだとしても対称な盤面を作ることができるので、どの辺を基地に選んでも実質的に変わらないと考えられる

3.2 array 方策

人間が base 方策に従って 2048 プレイする際、基地の中ではできる限りタイルが「 $2^k - 2^l - 2^m - 2^n$ ($0 < k < l < m < n$)」といった形へ、タイルの数が降順もしくは昇順になるように整列 (array) させる傾向がある。この方策を **array 方策** と名付けることとする。

この方策は base 方策との相乗効果が高い。例えば「32 - 64 - 128 - 256」という順列の基地を作った場合、基地の外で 32-タイルの作成に成功すれば、そのまま基地内でマージを行うことによって 512-タイルを作成することができる。あるいは、基地の外で 128-タイルの作成に成功した場合はマージを行うと「32 - 64 - 512」となるが、この状態でも array 方策は維持されており、ゲームを長く進めていても保持しやすい性質である。

3.3 maximum-in-corner 方策

最後に、最もシンプルな方策として **maximum-in-corner 方策** を挙げる。この方策では、現状の盤面における *maxtile* が四隅のどれかのマスにあることを重視する。これは array 方策の拡張的な方策と考えられる。例えば「2 - 32 - 2048 - 2」という順列の基地を考えると、前の 3 つのタイルは array 方策に従っているものの、「2048 - 2」という並びは array 方策に反している。この状況を解決するためには、以下のいずれかの操作が必要になる。

1. 2 および 32 にタイルをマージし続け、2048-タイルを作成し、既に存在している 2048-タイルとマージする
2. 2048 に隣接している 2-タイルを基地の外へと移動させ、2048-タイルを順列の終端へと移動させる

このうち、1. を実現させることは難しいと考えられる。なぜなら、基地のうち 2 マスがマージすることができないタイルで占められているため、より少ないバッファでタイルをマージすることが必要になるからである。一方で、2. を実現させることも同様に難しい。横もしくは縦一列に並んでいるタイルの中から、1 つだけを選んで基地から外す操作をすることを、意図して行うのは難しい。したがって、一度 array 方策に反する順列を作ってしまった場合、array 方策に従うような順列に復帰させることは非常に難しいということになる。

このような困難な状況に陥ることを防ぐため、あらかじめ array 方策に反する順列を作らないような方策が必要になる。これが **maximum-in-corner 方策** であり、大きな数のタイルができる限り盤面の隅から離れないことで、より array 方策を長く実現できるようにしている。

3.4 ヒューリスティックスと強化学習によるプレイヤーの関係

強化学習によって訓練された 2048 プレイヤーがこれらの方策に従っているかどうかを確かめるために、各方策に 2048 の盤面がどれくらい従っているかを定量的に表現する評価関数を実

装した．それぞれの評価関数の定義は以下の通りである．これらの 3 つのスコアを 1 ゲーム中全ての盤面に対して算出し，その総和を盤面の数で割った値をそのゲームの各スコアの代表値とする．

- **base 方策**：盤面上で最も大きな数のタイルのうち，上位 4 個のタイルの数の和を σ とする．盤面の終端にある 4 辺のうち，最も大きな数のタイルが集まっている辺の中から 1 つを選び，その辺のタイルの数の和を π とする． $\frac{\sigma}{\pi}$ をこの盤面の **base 方策スコア** とする
- **array 方策**：盤面上の base におけるタイル*²の並びにより，以下の通り **array 方策スコア** を決定する：
 - － base の左端から右端まで一度も順列の昇順/降順が逆転しなかった場合，2 点とする*³
 - － base の左端から右端までの間，1 回だけ順列の昇順/降順が逆転した場合，1 点とする
 - － base の左端から右端までの間，2 回順列の昇順/降順が逆転した場合，0 点とする
- **maximum-in-corner 方策**：盤面の四隅のうちいずれか 1 つ以上のマスに *maxtile* が存在するなら，**maximum-in-corner 方策スコア** を 1 点とする．この条件を満たさなければ **maximum-in-corner 方策スコア** は 0 点である

これらのスコアが強化学習によって訓練されたプレイヤーにおいて習得されていることを示すため，ランダムプレイヤー*⁴において 1000 ゲームを行った際のスコアと，強化学習により価値関数の訓練を 500,000 ゲームにわたって行ったプレイヤーにおいて 1,000 ゲームの検証ゲームを行った際のスコアを比較した．その結果，全ての方策スコアについて，99% 以上有意に強化学習によるプレイヤーの方が優れていることを示した．以上により，強化学習により価値関数の訓練を行ったプレイヤーは，各方策を自然と習得していることが示された．

ところで，強化学習によるプレイヤーの base 方策スコアの平均値は 0.912 であった．この値が 1 であれば全ての盤面において base 方策が守られていることになるが，ゲーム終盤においてタイルの移動が制限されると base 方策を守ることが難しくなることを考慮すると，base 方策はかなり高い確率で守られると考えられる．一方で array 方策スコアの平均値は 1.61，maximum-in-corner 方策スコアの平均値は 0.816 であった．base 方策が“満点”の 9 割を達成していたことを考えると，これらのスコアはやや低めである．また前述の通り maximum-in-corner 方策は array 方策の拡張的な方策であるから，maximum-in-corner 方策スコアが改善すれば array 方策スコアも改善する可能性があり，その結果プレイヤーの性能が向

*² もし空のマスがあるなら，そのマスには 0-タイルが入っていると考え

*³ 例えば，「2-4-4-8」のように，同じ数のタイルが隣接している場合がある．このような base の「4-4」については順列の昇順/降順が逆転しなかったと考える．一方で，このような base の「2-4」や「4-8」においても昇順/降順の逆転は発生していない．したがって，このような base は一度も順列の昇順/降順の逆転が発生していないから，array 方策スコアは 2 点と考える．以下，base 内で同じ数のタイルが隣接している場合は同様に考える

*⁴ 全ての盤面において可能なアクションの中からランダムにアクションを選択するプレイヤー

上すると考えられる。

以上より，本研究においては特に maximum-in-corner 方策に注目し，先行研究の強化学習を使用したプレイヤーに対してより強く maximum-in-corner 方策に従うような改修を導入することによって，2048 プレイヤの性能に一定の改善が見られるものと考えた。

第 4 章

提案と実装

4.1 maximum-in-corner 方策の導入

強化学習を用いて盤面ごとに評価値を学習した 2048 プレイヤにおいて maximum-in-corner 方策を導入する場合、強化学習によって訓練された価値関数 $V(s)$ をある程度尊重しつつ、maximum-in-corner 方策に従ってアクションの選択がなされるように、方策に従っている評価値を割り増して評価する必要がある。そのため本研究においては、以下のように maximum-in-corner 方策を適用することとした。

1. アクション選択の手順において、選択可能なアクションを a_n ($0 \leq n < 4$) とする。
2. 選択可能なアクションを元に、遷移を行った後の盤面 s_{a_n} を求める。
3. 求められた盤面に対する評価値 $V(s_{a_n})$ を求める。
 - この時、もし s_{a_n} の *maxtile* が盤面の四隅のいずれかのマスにあるならば、 $V(s_{a_n}) = \rho \times V(s_{a_n})$ とする。 ρ は実験者が設定する 1 以上の定数であり、この定数のことを **corner ratio** と呼ぶこととする。
4. 評価値を全ての有り得る盤面に対して求めた後、最も大きな $V(s_{a_n})$ を与えるアクション a_n を選択する。

この実装によって、「価値関数 $V(s)$ をある程度尊重しつつ方策に従っている評価値を割り増して評価する」というプレイヤの挙動を、以下のように表現することが可能になる。ここで、maximum-in-corner 方策に従うアクションの中で (corner ratio による割増前に) 最も大きな評価値を与えるアクションを a_σ 、maximum-in-corner 方策に従わないアクションの中で最も大きな評価値を与えるアクションを a_τ とする。

4.1.1 $V(s_{a_\sigma}) > V(s_{a_\tau})$ の場合

corner ratio による割増を行わなくても、 a_σ が選択できるアクションの中で最も大きな評価値を与えるアクションであるから、 a_σ が選択される。このアクション選択は強化学習による価値関数と maximum-in-corner 方策の両方に従っている。

4.1.2 $V(s_{a_\sigma}) < V(s_{a_\tau})$ かつ $\rho V(s_{a_\sigma}) > V(s_{a_\tau})$ の場合

corner ratio による割増を行わなければ、 a_τ が選択できるアクションの中で最も大きな評価値を与えるアクションである。しかしながら、評価値の割増を行うと $\rho V(s_{a_\sigma})$ の方が大きな評価値を与えるから、結果としては a_σ が選択される。この場合、 $V(s_{a_\sigma})$ と $V(s_{a_\tau})$ の差は小さいため、僅かに評価値が高いものの maximum-in-corner 方策には従わないアクションを選択するのであれば、僅かに評価値が低いものが maximum-in-corner 方策に従うアクションを選択したほうが良いという考えに基づき、割増込みで高い評価値を与えるアクション a_σ が選択される。

4.1.3 $V(s_{a_\sigma}) < V(s_{a_\tau})$ かつ $\rho V(s_{a_\sigma}) < V(s_{a_\tau})$ の場合

corner ratio による割増を行わない場合は a_τ が最も大きな評価値を与えるアクションであるが、割増を行ったとしても a_τ が最も大きな評価値を与えるということ是不変である。この場合、学習によって a_τ が maximum-in-corner 方策に従うアクションと比べて非常に良いアクションであると判断されたということになるので、maximum-in-corner 方策はここでは棄却し、強化学習によって導かれた最善のアクションを選択する。

なお、上記の場合分けにおいては $V(s_{a_\sigma}) < V(s_{a_\tau})$ かつ $\rho V(s_{a_\sigma}) < V(s_{a_\tau})$ の場合のみ maximum-in-corner 方策を棄却したが、実際は $V(s_{a_\sigma}) < V(s_{a_\tau})$ かつ $\rho V(s_{a_\sigma}) > V(s_{a_\tau})$ の場合においても maximum-in-corner 方策を棄却した方が良かったという場合が存在する可能性がある。このような、「誤って maximum-in-corner 方策に従ってしまったが、実際は従わなかった方が良かった」という状況のことを、**corner 誤謬**と呼ぶことにする。基本的に本研究においては、たとえ corner 誤謬が存在していたとしても maximum-in-corner 方策を導入することにより得られる効用の方が大きいと考えるが、corner 誤謬による弊害が大きくなった場合、すなわち maximum-in-corner 方策を使用しないプレイヤーと比べて使用するプレイヤーの性能が悪くなってしまう場合は、maximum-in-corner 方策の導入の方法について検討し直す必要があることに留意しておく。

4.2 実装

まず、maximum-in-corner 方策を採用せず、遷移後盤面を評価する通常の TD 学習の疑似コードを Algorithm 2 に示す。この疑似コードは Szubert & Jaśkowski の実装に基づく。なお、 $\text{VALIDACTIONS}(s)$ は盤面 s に対して選択可能なアクションの集合を返す関数、 $\text{COMPUTEAFTERSTATE}(s, a)$ は盤面 s とアクション a に対して遷移後の盤面 s' と報酬 r を返す関数、 $\text{INITIALIZEGAMESTATE}()$ は初期盤面を返す関数、 $\text{ISTERMINALSTATE}(s)$ は盤面 s が終末盤面ならば true を返す関数、 $\text{GETNEXTSTATE}(s)$ は遷移後の盤面 s に対してランダムタイルを生成する関数である。

本研究においては、Algorithm2 のうち、関数 CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATE に Algorithm3 の 9 行目から 11 行目を加えた関数 CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATE-CORNER を実装すると同時に、その盤面の *maxtile* が四隅のマスにあるかどうかを判断する関数 ISMAXTILEINCORNER を実装する。

なお、CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATE は、 n タプルネットワークを用いてプレイする*1関数 PLAYGAME および n タプルネットワークを訓練する関数 LEARNEVALUATION に呼ばれている、 n タプルネットワークを参照して最も良い遷移後盤面と報酬を返す関数である。CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATE と CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATECORNER を両方実装しておいて、検証ゲームを行う際にどちらかの関数を呼ぶようにすることで、検証ゲームと学習ゲームのどちらか、もしくはそのどちらもにおいて maximum-in-corner 方策を採用することができるようになる。

Algorithm 2 Temporal Difference Learning (TD(0))

```

1: function GETBESTVALUEACTION( $s$ )
2:    $A(s) \leftarrow \text{VALIDACTIONS}(s)$ 
3:    $bestValue \leftarrow -\infty$ 
4:   for all  $a$  such that  $a \in A(s)$  do
5:      $s', r \leftarrow \text{COMPUTEAFTERSTATE}(s, a)$ 
6:      $value \leftarrow r + V(s')$ 
7:     if ( $value > bestValue$ ) then
8:        $bestValue \leftarrow value$ 
9:     endif
10:  endfor
11:  return  $bestValue$ 
12: end function
13:
14: function CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATE( $s$ )
15:    $A(s) \leftarrow \text{VALIDACTIONS}(s)$ 
16:    $bestValue \leftarrow -\infty$ 
17:    $bestAfterstate$ 
18:    $bestReward \leftarrow 0$ 
19:   for all  $a$  such that  $a \in A(s)$  do
20:      $s', r \leftarrow \text{COMPUTEAFTERSTATE}(s, a)$ 
21:      $value \leftarrow r + V(s')$ 
22:     if ( $value > bestValue$ ) then
23:        $bestValue \leftarrow value$ 

```

*1 ここでの「プレイ」とは、検証ゲームを行うという意味である

30 第4章 提案と実装

```
24:          $bestAfterstate \leftarrow s'$ 
25:          $bestReward \leftarrow r$ 
26:     endif
27: endfor
28: return  $bestAfterstate, bestReward$ 
29: end function
30:
31: function PLAYGAME
32:      $score \leftarrow 0$ 
33:      $state \leftarrow \text{INITIALIZEGAMESTATE}()$ 
34:     while  $\neg \text{IS TERMINAL STATE}(s)$  do
35:          $s', r \leftarrow \text{CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATE}(s)$ 
36:          $s'' \leftarrow \text{GETNEXTSTATE}(s')$ 
37:          $score \leftarrow score + r$ 
38:          $s \leftarrow s''$ 
39:     endwhile
40:     return  $score$ 
41: end function
42:
43: function LEARNEVALUATION
44:      $score \leftarrow 0$ 
45:      $targetValue \leftarrow 0$ 
46:      $state \leftarrow \text{INITIALIZEGAMESTATE}()$ 
47:     while  $\neg \text{IS TERMINAL STATE}(s)$  do
48:          $s', r \leftarrow \text{CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATE}(s)$ 
49:          $s'' \leftarrow \text{GETNEXTSTATE}(s')$ 
50:          $score \leftarrow score + r$ 
51:          $targetValue \leftarrow \text{GETBESTVALUEACTION}(s'')$ 
52:          $V(s') \leftarrow V(s') + \alpha(targetValue - V(s'))$ 
53:          $s \leftarrow s''$ 
54:     endwhile
55: end function
```

Algorithm 3 Maximum-in-corner Policy

```

1: function CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATECORNER( $s$ )
2:    $A(s) \leftarrow \text{VALIDACTIONS}(s)$ 
3:    $bestValue \leftarrow -\infty$ 
4:    $bestAfterstate$ 
5:    $bestReward \leftarrow 0$ 
6:   for all  $a$  such that  $a \in A(s)$  do
7:      $s', r \leftarrow \text{COMPUTEAFTERSTATE}(s, a)$ 
8:      $value \leftarrow r + V(s')$ 
9:     if ISMAXTILECORNER( $s$ ) then
10:        $value \leftarrow \rho \times value$ 
11:     endif
12:     if ( $value > bestValue$ ) then
13:        $bestValue \leftarrow value$ 
14:        $bestAfterstate \leftarrow s'$ 
15:        $bestReward \leftarrow r$ 
16:     endif
17:   endfor
18:   return  $bestAfterstate, bestReward$ 
19: end function

```

第 5 章

実験

5.1 実験の目標

本研究の実験は、maximum-in-corner 方策が 2048 プレイヤに対して有効であることに加え、本方策の特性について明らかにするために、以下の 3 つの事柄を示すことを目標とする。

- 一般に、maximum-in-corner 方策を採用すること自体は 2048 プレイヤの性能を高める可能性がある
- 学習ゲームを重ねるにつれ強化学習による学習器の性能は良くなるので、高い corner ratio の値は corner 誤謬を引き起こす
- 1 ゲームの中でゲームが終盤に近づくに連れて corner ratio の値を小さくすることで、corner 誤謬の発生を抑制できる

以上の目的のもと、本研究においては以下の 3 つの実験を行った。

- **実験 1**：検証ゲームに対して、 $\rho = 1.2$ として corner bonus を適用する
- **実験 2**：検証ゲーム、学習ゲーム、もしくは検証ゲームと学習ゲームの両方に対して、ゲーム内の進行状況に応じて $\rho = 1.2$ または $\rho = 1.1$ として corner bonus を適用する
- **実験 3**：より精密な学習を行うため、学習率と学習ゲーム数を変更する。また corner bonus の値について、実験 2 では 1 種類しかなかった変更するタイミングを、実験 3 においては 3 種類用意する

5.2 実験のセットアップ

プログラムの実装

プログラムについては、Szubert & Jaśkowski による Java の実装 [21] を元に、C++ で実装を行った。基本的に 2048 の学習器を訓練するために学習ゲームと検証ゲームを行うプログラムは全て実装したが、n タプルネットワークに対して対称な n タプルを取得するためのクラス `StandardSymmetryExpander` および学習データをファイルへ出力・入力する際に用いるシ

リアライザは実装しなかった。

実行環境

実験 1 の実行環境は以下の通りである。

- CPU : Intel Core i7-2600S (2.80GHz, 8 コア)
- メモリ : 16GB
- OS : ubuntu 16.04.3 LTS
- コンパイラ : g++ 5.4.0

メモリが多く必要になったため、実験 2・実験 3 は以下の環境で行った。

- CPU : AMD Opteron Processor 6274 (1.40GHz, 64 コア)
- メモリ : 256GB
- OS : ubuntu 16.04.1 LTS
- コンパイラ : g++ 5.4.0

n タブルの対称性と実行時間

実験 2 および 3 については W_u による n タブルネットワークの配置を用いた。 W_u は 4 つの基本タブルを保持し、盤面を回転・反射させることで、基本タブルに対する 1 つの盤面の学習において、さまざまな配置の盤面を学習させることを可能にした。一方この実験においては、盤面ではなく基本の n タブルの配置を回転・反射させて、基本タブルと対称なタブルを保持するようにした。これによって、 W_u と同様に高い性能で学習することが可能になったが、1 回の実験にあたって約 3 億個の重みを保持する必要が出てしまい、その結果 1 回の実験ではメモリを 10GB 消費することとなった。

このような n タブルネットワークの条件の下で実験を行った結果、実験 3 は 500,000 ゲームの学習が終了するまで約 17 時間、1,000,000 ゲームの学習が終了するまでには約 40 時間を要した。

5.3 実験 1 : maximum-in-corner 方策の有用性の提示

まず最初に、maximum-in-corner 方策を使用することに効果があるのか調べるため、 $\rho = 1.2$ として実験を行った。詳細な実験のセッティングは以下の通りである。

- 学習ゲーム数 : 500,000
- 学習率 : 0.01
- n タブルネットワークの配置 : Szubert & Jaśkowski のスタイル
- CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATECORNER を使用するゲーム :
 - 使用しない (ベースライン)

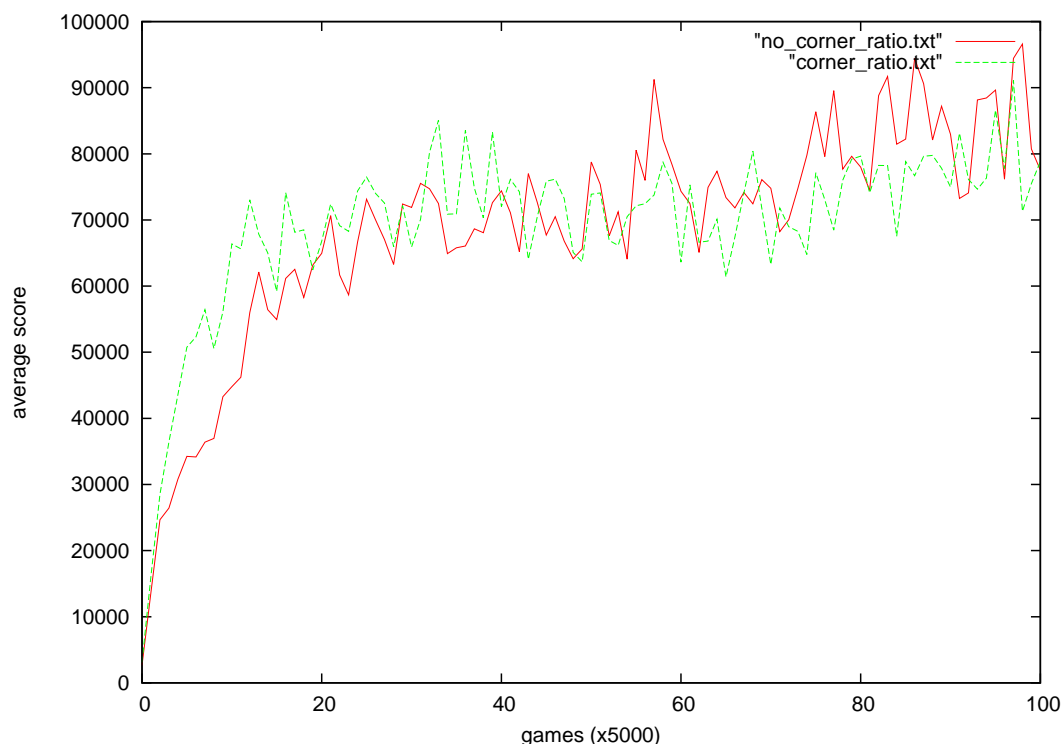


図 5.1. 実験 1 : maximum-in-corner 方策の有用性の提示. 「no_corner_ratio」は, maximum-in-corner 方策を導入しない, 強化学習による評価値のみを用いたプレイヤーである. 「corner_ratio」は, 検証ゲーム中に $\rho = 1.2$ の corner ratio を適用したプレイヤーである.

– 検証ゲーム

- 使用する corner ratio : $\rho = 1.2$

上記の実験の結果のうち, 各検証ゲームにおける平均スコアをグラフにプロットしたのが図 5.1 である. 全体的な傾向としては, 約 200,000 ゲームほどの学習を終えるまでの間は corner ratio あり, すなわち maximum-in-corner 方策を採用したほうが成績が良い. しかしながら, その後は maximum-in-corner 方策なしの方が全体的に成績が良くなり, 一応平均スコアは伸び続けているものの maximum-in-corner 方策ありの方は成績が低調になる. 500,000 ゲーム学習した中で, 検証中に corner ratio なしのプレイヤーが記録した最も高い平均スコアは 96,600 (490,000 ゲーム学習時点) で, corner ratio ありのプレイヤーが記録した最も高い平均スコアは 91,103 (485,000 ゲーム学習時点) であった.

5.4 実験 2 : 二段階の corner ratio を使用することによる効果の提示

実験 1 においては検証ゲーム中に一貫して $\rho = 1.2$ としていたが, 学習ゲームが進んだ後もこの値を使い続けることはあまり良くないということがわかった. そこで, 実験 2 において

は、ゲームの状況に応じて異なる corner ratio の値を使用することとした。また、実験 1 では検証中のみに maximum-in-corner 方策を採用していたが、実験 2 においては学習中および検証中と学習中の両方に採用する条件も設定することとした。maximum-in-corner 方策の適用は「これまでに学習した価値関数の値を割り増す/割り引く」という形で行われるため、どのゲームに対して方策を適用するかによってプレイヤーの挙動が大きく変わると考えられる。この挙動の変化を確認するために、実験 2 においては方策を適用するゲームを 3 通り用意したのである。

なお、ゲームの進行状況を示す指標としては、スコアと *maxtile* を用いることができる。どちらの指標を用いて corner ratio を変更するのがより適当かを判断するため、今回の実験ではスコアを参照する実験と *maxtile* を参照する実験の両方をそれぞれ行った。詳細な実験のセッティングは以下の通りである。

- 学習ゲーム数：500,000
- 学習率：0.01
- n タプルネットワークの配置：Szubert のスタイル
- CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATECORNER を使用するゲーム：
 - 使用しない（ベースライン）
 - 検証ゲーム
 - 学習ゲーム
 - 検証ゲームと学習ゲームの両方
- 使用する corner ratio： $\rho = 1.1$ もしくは 1.2
- corner ratio を変更する条件：
 - 最初は $\rho = 1.2$ とし、スコアが 70,000 に到達したら $\rho = 1.1$ とする
 - 最初は $\rho = 1.2$ とし、*maxtile* = 4096 が達成されたら $\rho = 1.1$ とする

この実験の結果のうち、平均スコアの推移をプロットしたグラフを図 5.2 から図 5.4 に示す。実験結果のうち、maximum-in-corner 方策を適用しているものについてはいずれもベースラインよりも平均スコアを上回っているが、検証ゲームに適用したものと検証ゲーム・学習ゲームの両方に適用したものについては、顕著にベースラインよりも平均スコアが高くなっている。また全体的な傾向としては、corner ratio を平均する条件にスコアを使用する方が平均スコアが良くなることが多い。

実験 2 の結果、ゲームの進行に応じて corner ratio を変更することにより、TD 学習によって学習器の性能が良くなった後でも、maximum-in-corner 方策を適用することでさらなる成績の向上が行われることがわかった。それと同時に、ゲームの進行に応じて corner ratio を割り引くことで、corner 誤謬の発生を抑制できるということもわかった。なお、500,000 ゲームの学習を終えた時点で maximum-in-corner 方策なしプレイヤーが記録した平均スコアは 77,524 であり、maximum-in-corner 方策ありの中で最も高い平均スコアは、検証ゲームと学習ゲームに corner ratio を適用し、スコア 70,000 を達成したら corner ratio を変更したプレイヤーが記録した 142,645 であった。学習途中も含めると、検証ゲームに corner ratio を適用して、

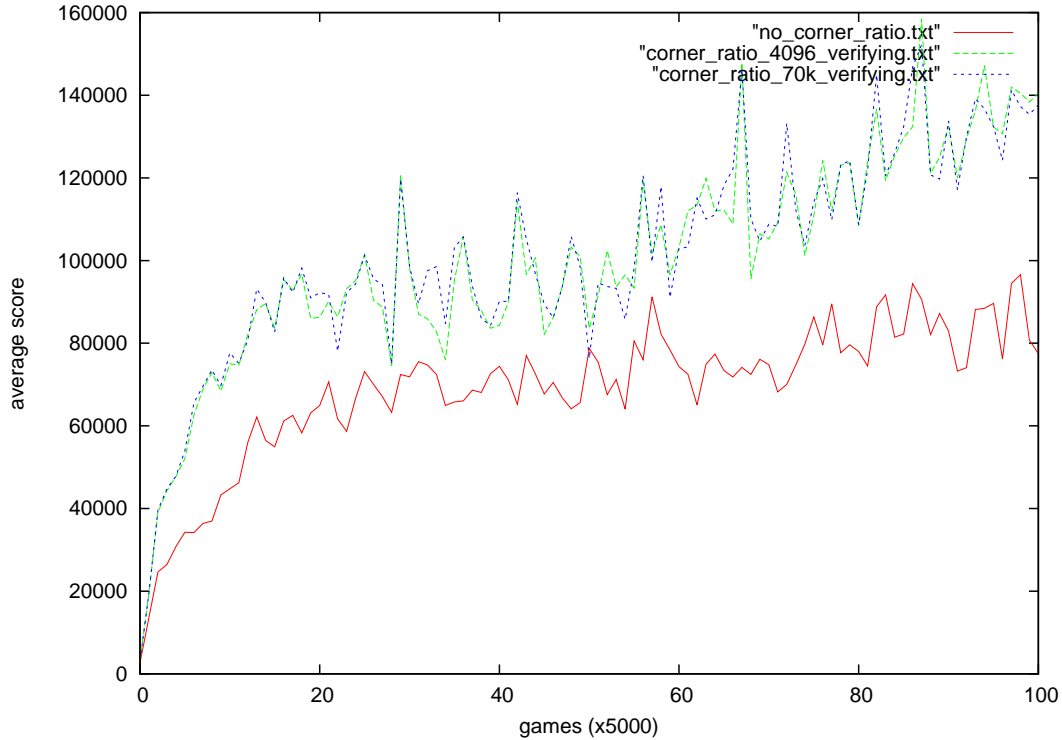


図 5.2. 実験 2：検証ゲームへの maximum-in-corner 方策の適用。「no_corner_ratio」は、maximum-in-corner 方策を導入しない、強化学習による評価値のみを用いたプレイヤーである。「corner_ratio_4096_verifying」は、検証ゲーム中に、 $maxtile = 4096$ を達成するまでは $\rho = 1.2$ ，達成した後は $\rho = 1.1$ の corner ratio を適用したプレイヤーである。「corner_ratio_70k_verifying」は、検証ゲーム中に、スコア 70,000 を達成するまでは $\rho = 1.2$ ，達成した後は $\rho = 1.1$ の corner ratio を適用したプレイヤーである。

$maxtile = 4096$ を達成したら corner ratio を変更したプレイヤーが 435,000 ゲーム学習終了時点で記録した、158,466 が最も高い平均スコアであった。

5.5 実験 3：学習率および学習ゲーム数の変更による性能の向上の提示

実験 3 においては、より 2048 プレイヤとしての性能を高めるために、学習率を 0.0025^{*1} に引き下げ、学習ゲーム数を従来の 2 倍の 1,000,000 ゲームに変更した。学習率を引き下げることで価値関数 V の更新が穏やかになるため、学習の速さは若干遅くなるものの、その分精密な学習がなされて最終的な性能は高くなることが期待される。これに加えて、ゲーム中のスコアに応じて corner ratio を変更することが有効であると判明した実験 2 の結果を踏まえて、corner ratio を変更する条件として設定するスコアの境界値をさまざまな値に変動させて実験

^{*1} Szubert & Jaśkowski の実験において、 $\alpha = 0.0025$ がより良い結果をもたらすことが示されていたことによる

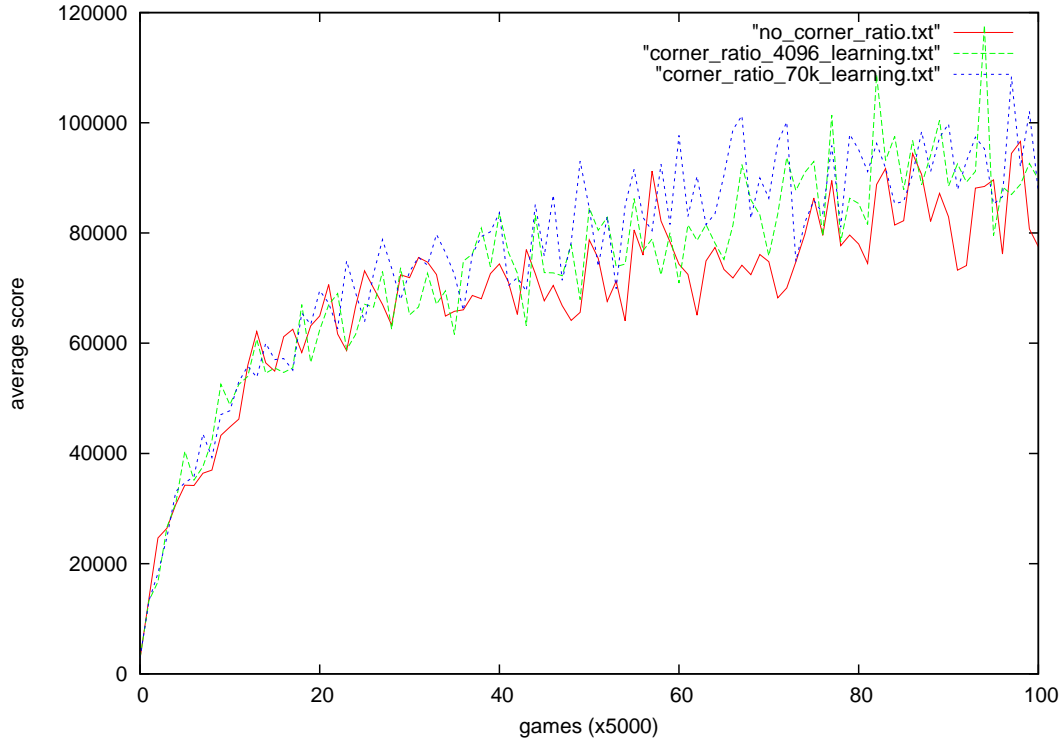


図 5.3. 実験 2：学習ゲームへの maximum-in-corner 方策の適用。「no_corner_ratio」は、maximum-in-corner 方策を導入しない、強化学習による評価値のみを用いたプレイヤーである。「corner_ratio_4096_learning」は、学習ゲーム中に、 $maxtile = 4096$ を達成するまでは $\rho = 1.2$ ，達成した後は $\rho = 1.1$ の corner ratio を適用したプレイヤーである。「corner_ratio_70k_learning」は、学習ゲーム中に、スコア 70,000 を達成するまでは $\rho = 1.2$ ，達成した後は $\rho = 1.1$ の corner ratio を適用したプレイヤーである。

を行った．その他の条件も含めた実験のセッティングは以下の通り．

- 学習ゲーム数：1,000,000
- 学習率：0.0025
- n タプルネットワークの配置：Wu のスタイル^{*2}
- CHOOSEBESTTRANSITIONAFTERSTATECORNER を使用するゲーム^{*3}：
 - － 使用しない（ベースライン）
 - － 検証ゲーム
 - － 検証ゲームと学習ゲームの両方
- 使用する corner ratio： $\rho = 1.1$ もしくは 1.2
- corner ratio を変更する条件：

^{*2} どのような n タプルネットワークに対しても maximum-in-corner 方策が適合することを示すために、Szubert & Jaśkowski の実装よりも高級な Wu の実装による n タプルネットワークを用いた

^{*3} 実験 2 において学習ゲームのみに ChooseBestTransitionAfterstateCorner を使用することには効果が見られないことがわかったため、実験 3 の条件からは除外した

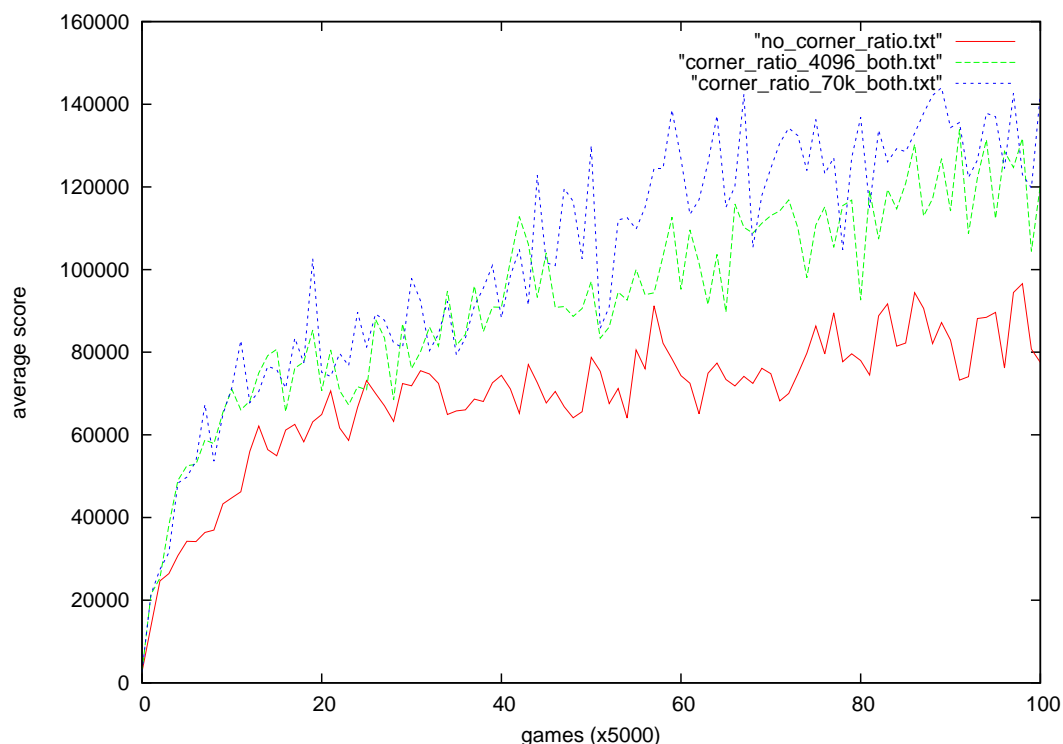


図 5.4. 実験 2: 検証・学習ゲームへの maximum-in-corner 方策の適用. 「no_corner_ratio」は、maximum-in-corner 方策を導入しない、強化学習による評価値のみを用いたプレイヤーである。「corner_ratio_4096_both」は、検証・学習ゲーム中に、 $maxtile = 4096$ を達成するまでは $\rho = 1.2$ 、達成した後は $\rho = 1.1$ の corner ratio を適用したプレイヤーである。「corner_ratio_70k_both」は、検証・学習ゲーム中に、スコア 70,000 を達成するまでは $\rho = 1.2$ 、達成した後は $\rho = 1.1$ の corner ratio を適用したプレイヤーである。

- 最初は $\rho = 1.2$ とし、スコアが 60,000 に到達したら $\rho = 1.1$ とする
- 最初は $\rho = 1.2$ とし、スコアが 70,000 に到達したら $\rho = 1.1$ とする
- 最初は $\rho = 1.2$ とし、スコアが 80,000 に到達したら $\rho = 1.1$ とする

- ランダムシード : 3 種類

この実験の結果のうち、平均スコアの推移をプロットしたグラフを図 5.5 から図 5.7 に示す。ランダムシードによって結果に差があるが、全体的に見て以下の傾向を読み取ることができる。

- 学習率 0.0025 の条件の下においては、検証ゲームのみに maximum-in-corner 方策を適用しても、ベースラインと比べて顕著な差は現れない
- 約 300,000 ゲームほど学習するまでは、どの条件の間にも顕著な差は見られない
- 約 500,000 ゲームほど学習した後は、検証ゲームと学習ゲームの両方で maximum-in-corner 方策を適用したプレイヤーの性能が顕著に良くなる
- 局所的に他のプレイヤーが上回っていることもあるが、全体的に見ると「検証ゲームと学

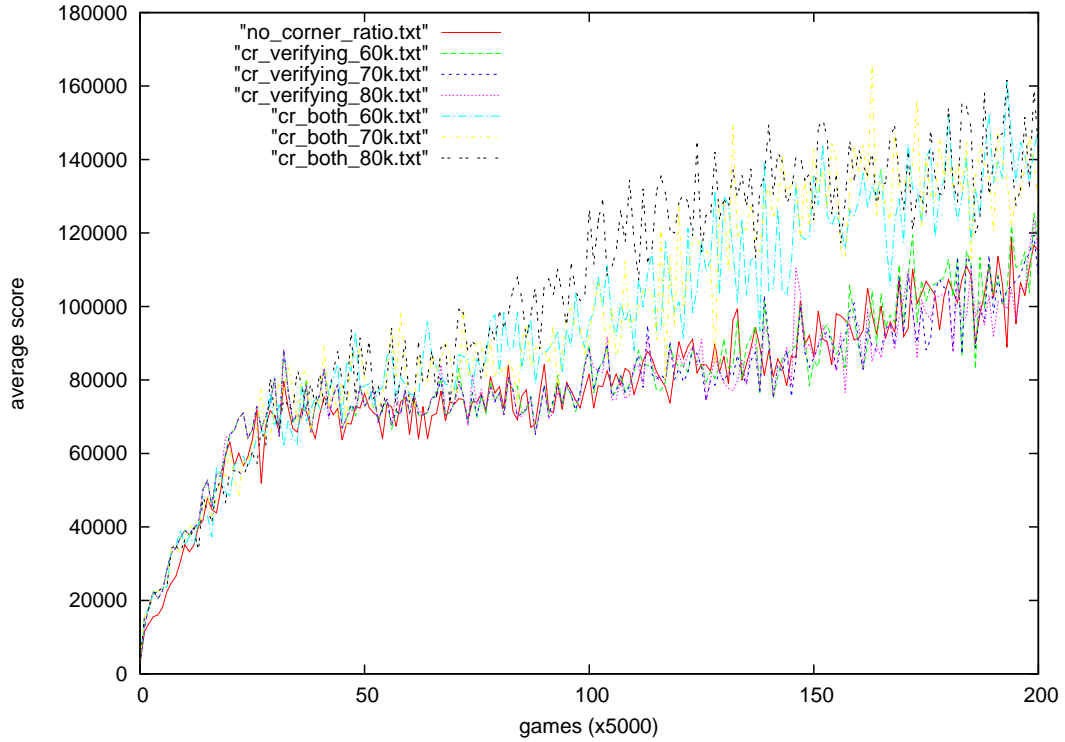


図 5.5. 実験 3：ランダムシード A

習ゲームの両方」で「最初は $\rho = 1.2$ とし、スコアが 80,000 に到達したら $\rho = 1.1$ とする」条件で corner ratio を変更するプレイヤーの成績が最も良い

なお、3つのランダムシードによる実験の結果において、corner ratio の適用をしなかったプレイヤーの 1,000,000 ゲーム学習時点で記録した平均スコアの平均は 111486.3 であった。一方で、corner ratio を検証ゲームと学習ゲームに適用し、スコア 80,000 が達成されたら corner ratio を変更するプレイヤーが 1,000,000 ゲーム学習時点で記録した平均スコアの平均は 148502.0 であった。なお、学習途中も含めた実験全体の中で記録された最も大きな平均スコアは、ランダムシード C の検証ゲームと学習ゲームの両方に corner ratio を適用する実験のうち、スコア 70,000 で corner ratio を変更するプレイヤーが、890,000 ゲーム学習時点で記録した、197,065 であった。

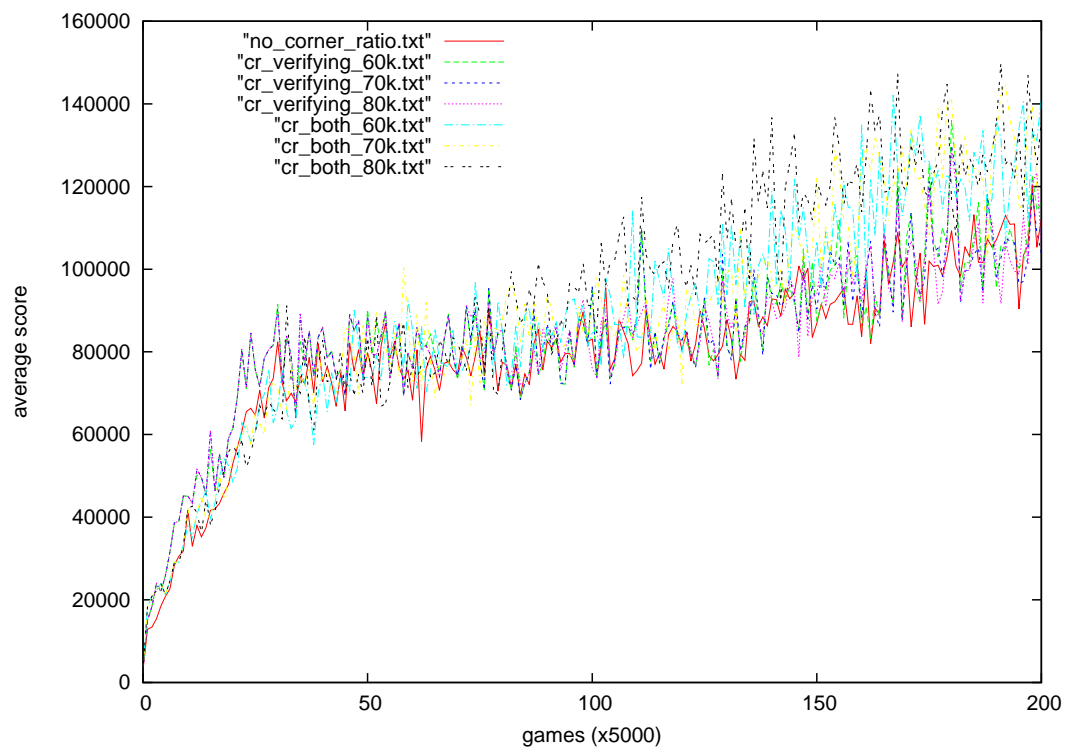


図 5.6. 実験 3 : ランダムシード B

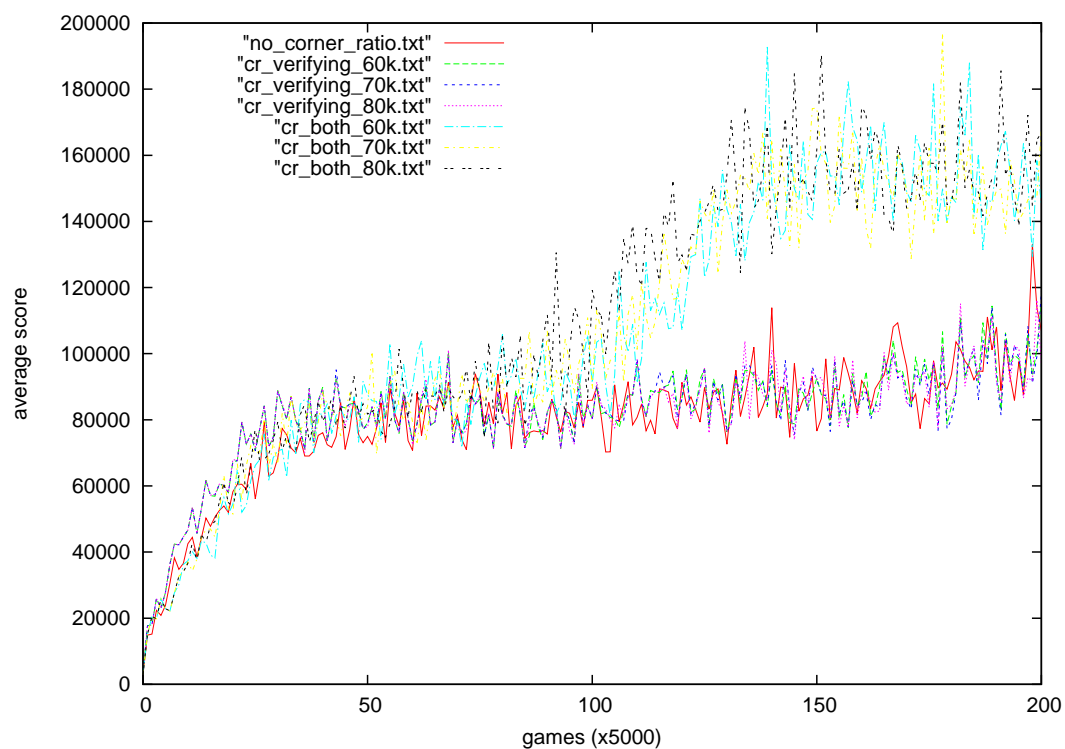


図 5.7. 実験 3 : ランダムシード C

第 6 章

考察と結論

6.1 実験 1 の考察

実験 1 の結果より，強化学習によって訓練したプレイヤーに maximum-in-corner 方策を導入することには，一定の効果があることが明らかになった．しかしながら，本方策を導入したプレイヤーの性能は 200,000 ゲームほど学習した時点で本方策を導入しないプレイヤーに追い抜かれてしまい，500,000 ゲーム学習した時点においては本方策を導入しないプレイヤーの性能の方が良くなった．

まず，学習プロセスの中の初期段階においては本方策を導入したプレイヤーの方が強かったということは，強化学習による価値関数がまだ十分な学習を経ていない状況において，maximum-in-corner 方策が補助的なヒューリスティックスとして有効に働いたことを示すと考えられる．言い換えるならば，学習プロセスの初期段階においては誤って maximum-in-corner 方策に従わないアクションが導く盤面を高く評価していることが多く，maximum-in-corner 方策はこの誤りを補正する役割を担ったのである．

一方で，学習が十分進むと maximum-in-corner 方策の有用度が減ったことから，学習序盤と終盤で同じ corner ratio の値を採用することは 4.1 で問題にした corner 誤謬を引き起こすと考えられる．学習が進むに連れて，価値関数が表現する盤面の評価値は繰り返し更新され，より正確に盤面の価値を表現することができるようになる．この状況のもとで，まだ十分訓練されていない状態の価値関数と同じ基準で corner ratio を適用してしまうと，実際は maximum-in-corner 方策を棄却した方が良かった盤面においても maximum-in-corner 方策を尊重してしまい，結果として悪い盤面を導くアクションを選択してしまう可能性が高くなってしまうと考えられる．

6.2 実験 2 の考察

実験 1 で明らかになった maximum-in-corner 方策の欠点を補うため，実験 2 においてはゲームの進行状況に応じて 2 段階の corner ratio を使用することにした．その結果，maximum-in-corner 方策を導入したプレイヤーは導入しないプレイヤーよりも性能が非常に良くなり，500,000

ゲーム学習が終わった時点でも引き続き本方策を導入したプレイヤーの方が性能が良いことが明らかになった。

実験2においてゲームが特定の指標を達成した段階で corner ratio を割り引くことに意味があったということは、実験1において発生していた corner 誤謬が減ったということの意味する。すなわち、maximum-in-corner 方策に従わないが、maximum-in-corner 方策に従うよりも十分良い評価値を持つ盤面を、より多く採用することができたということである。もちろん、本方策を導入しないプレイヤーよりも導入するプレイヤーの方が性能が良くなっていることから、ゲームの終盤においても本方策を導入することは十分効果があると考えられる。しかしながら、corner ratio の割引により実験1よりも良い結果が出ていることによって、ゲームの終盤においては強化学習による評価値をより尊重しながら maximum-in-corner 方策を導入することが必要になることが明らかになった。

一方で、実験2においては maximum-in-corner 方策を導入するゲームの対象を、検証ゲーム、学習ゲーム、検証ゲームと学習ゲームの両方の3種類に広げて実験を行っている。この結果、検証ゲームのみに本方策を導入するプレイヤーが最も性能が良く、次いで検証ゲームと学習ゲームの両方に導入するプレイヤーが良く、学習ゲームに導入するプレイヤーは本方策を導入しないプレイヤーとほとんど性能が変わらなかった。このことは、強化学習のプロセスの中で価値関数の学習に maximum-in-corner 方策を組み込みながら訓練することは大きな効果がなく、強化学習とは独立に検証ゲームの中で maximum-in-corner 方策を導入するほうが効果があることを意味する。これは、学習ゲームの中のアクション選択において maximum-in-corner 方策に従ったとしても、その次の盤面が導く目標値 (Algorithm2 内の 51 行目によって与えられる *targetValue*) においては maximum-in-corner 方策には従っていないため、検証ゲームのみに maximum-in-corner 方策を使用するよりもその効果が「薄まって」価値関数に蓄積されてしまい、結果として大きな性能の向上には繋がらないことを示していると考えられる。なお、検証ゲームと学習ゲームの両方に maximum-in-corner 方策を導入しても結果があまり良くならないのは、検証と学習で二重に本方策を導入したことで過学習が引き起こされてしまっているからと考えられる。

6.3 実験3の考察

実験3においては、学習率の調整と学習ゲーム数の倍増を行った。この調整により、maximum-in-corner 方策を導入するか否かに関わらずプレイヤーの最終的な性能は上がり、どのランダムシードにおいても 1,000,000 ゲーム学習した時点で平均スコアが 100,000 を超えた。これは実験2までのプレイヤーは達成できないことであった。一方 maximum-in-corner 方策を導入したプレイヤーに関しては、検証ゲームにのみ本方策を導入したプレイヤーが導入しないプレイヤーと大差ない性能を示したのに対して、検証ゲームと学習ゲームの両方に導入したプレイヤーは導入しないプレイヤーよりも有意に良い性能を示した。

方策の対象ゲームと結果の関係が実験2と逆転しているのは、学習率の調整によってより精密な学習が行われるようになったことに起因するものと考えられる。すなわち、学習率が下

がったことにより、価値関数がより精密に学習されるようになった結果、検証ゲームのみに方策を導入するプレイヤーは corner ratio を評価値に掛けても選択するアクションが方策を導入しないプレイヤーとあまり変わらなくなってしまうため、方策を導入しないプレイヤーと比べて顕著に良い性能を示すことができなくなってしまうと考えられる。一方で、検証ゲームと学習ゲームの両方に方策を適用するプレイヤーに関しては、検証と学習の両方において maximum-in-corner 方策を導入することで、より明瞭にプレイヤーのアクション選択に方策を反映することができ、評価値に対する補正を反映することが引き続き可能になったため、方策を導入しないプレイヤーよりも性能が良くなったものと考えられる。

6.4 実験の成果

以上の実験により、Szubert & Jaśkowski および Wu の先行研究をベースとした、強化学習を用いて訓練した素朴な 2048 プレイヤに対して、新たなヒューリスティックスである maximum-in-corner 方策を補助的に導入することにより、この方策を導入しないプレイヤーよりも、導入するプレイヤーの方が良い性能を示すということが分かった。特に、学習率を $\alpha = 0.0025$ 、学習ゲーム数を 1,000,000 として、検証ゲームと学習ゲームの両方に maximum-in-corner 方策を導入した時、最も高い平均スコアを得られるということが分かった。

今回の一連の実験で特に注目すべきと思われるのが、先行研究の中で最もシンプルな n タプルネットワークである Szubert & Jaśkowski の実装と、彼らのものよりも複雑な Wu の実装の両方で maximum-in-corner 方策が有効であると判明したことである。すなわち、これらの 2 つの n タプルネットワークの実装は自力で maximum-in-corner 方策を“習得”することはできない。特に Wu の実装は角のマスを含めた非常に多くの n タプルからなるが、それでも本方策に従うような価値関数を学習することはできなかった。すなわち、maximum-in-corner 方策は、ある程度複雑な n タプルネットワークを実装したとしても直ちに学習されない、学習が難しいヒューリスティックスであると考えられる。今回、人間の手でヒューリスティックスを導入することによって学習器の性能が向上するケースがあるとわかったということは、一定の意義があると思われる。

6.5 future works

これまでの 2048 プレイヤの研究においては、強化学習によるプレイヤーの実装を中心として、強化学習を補助する種々の手法を導入することによりプレイヤーの性能を改善してきた。一方、本研究において強化学習とは独立のヒューリスティックスで強化学習によって訓練された価値関数を補助することで、限定的な実装に対してではあるがプレイヤーの性能が改善することが示された。今後の研究において、本研究で有効であると分かった maximum-in-corner 方策以外にも有効なヒューリスティックスが存在することを明らかにし、またこのヒューリスティックスを導入することでさらなる 2048 プレイヤの性能改善を行える可能性があると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，1 年間ご指導いただき，実験にあたって計算資源を提供していただいた，指導教員の山口和紀教授に感謝いたします。また，Y ゼミにて本研究や発表内容に対してアドバイスをくださった山口和紀研究室の皆様にも感謝いたします。最後になりますが，3 年次に履修した実習にて，課題として 2048 プレイヤの作成というテーマを課していただき，本研究の端緒を開いてくださった金子知適准教授に感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- [1] 2048. <https://gabrielecirulli.github.io/2048/>. 2018 年 1 月 7 日閲覧.
- [2] Megan Rose Dickey. Puzzle Game 2048 Will Make You Forget Flappy Bird Ever Existed. Business Insider, <https://www.businessinsider.com/2048-puzzle-game-2014-3>. 2018 年 1 月 7 日閲覧.
- [3] Gabriele Cirulli. 2048, success and me. <https://medium.com/@gabrielecirulli/2048-success-and-me-7dc664f7a9bd>. 2018 年 1 月 7 日閲覧.
- [4] Marcin Szubert & Wojciech Jaśkowski. Temporal Difference Learning of N-Tuple Networks for the Game 2048. In IEEE Conference on Computational Intelligence and Games, pages 1-8, Dortmund, Aug 2014. IEEE.
- [5] I-Chen Wu, Kun-Hao Yeh, Chao-Chin Liang, Chia-Chuan Chang, Han Chiang. Multi-Stage Temporal Difference Learning for 2048. In Technologies and Applications of Artificial Intelligence, pp 366-378. Springer, 2014.
- [6] Kazuto Oka & Kiminori Matsuzaki. Systematic Selection of N-Tuple Networks for 2048. In International Conference on Computers and Games (CG 2016), Leiden, The Netherlands, 2016.
- [7] Kun-Hao Yeh, I-Chen Wu, C. H. Hsueh, Chia-Chuan Chang, Chao-Chin Liang, and Han Chiang. Multi-stage temporal difference learning for 2048-like games. In IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, preprint. 2016.
- [8] Wojciech Jaśkowski. Mastering 2048 with Delayed Temporal Coherence Learning, Multi-Stage Weight Promotion, Redundant Encoding and Carousel Shaping. In IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, preprint. 2017.
- [9] R. Sutton & A. Barto. 『強化学習』(三上貞芳・皆川雅章訳) 森北出版, 2000.
- [10] G. Tesauro. Temporal Difference Learning and TD-Gammon. Communications of the ACM, vol. 38, no. 3, pp. 58-68, 1995.
- [11] T. P. Runarsson & S. M. Lucas. Co-evolution versus Self-play Temporal Difference Learning for Acquiring Position Evaluation in Small-Board Go. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 9, no. 6, pp. 628-640, 2005.
- [12] N. N. Schraudolph, P. Dayan, & T. J. Sejnowski. Learning to Evaluate Go Positions via Temporal Difference Methods. In Computational Intelligence in Games, ser. Studies

- in Fuzziness and Soft Computing, N. Baba and L. C. Jain, Eds. Springer Verlag, Berlin, 2001, vol. 62, ch. 4, pp. 77-98.
- [13] S. van den Dries & M. A. Wiering. "Neural-Fitted TD-Leaf Learning for Playing Othello With Structured Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 23, no. 11, pp. 1701-1713, 2012.
- [14] M. G. Szubert, W. Jaśkowski, & K. Krawiec. On Scalability, Generalization, and Hybridization of Coevolutionary Learning: A Case Study for Othello. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, vol. 5, no. 3, pp. 214-226, 2013.
- [15] J. Baxter, A. Tridgell, & L. Weaver. Learning to Play Chess Using Temporal Differences. *Machine Learning*, vol. 40, no. 3, pp. 243-263, 2000.
- [16] Woodrow Wilson Bledsoe & Iben Browning. Pattern recognition and reading by machine. In *Proc. Eastern Joint Comput. Conf.*, pages 225-232, 1959.
- [17] Simon M. Lucas. Learning to play Othello with N-tuple systems. *Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems, Special Issue on Game Technology*, 9(4):0120, 2007.
- [18] S Bagheri, M Thill, P Koch, & W Konen. Online Adaptable Learning Rates for the Game Connect-4. *Computational Intelligence and AI in Games, IEEE Transactions on*, 8(1):3342, 2016.
- [19] Ashique Rupam Mahmood, Richard S Sutton, Thomas Degris, and Patrick M Pilarski. Tuning-free step-size adaptation. In *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2012 IEEE International Conference on, pages 2121-2124. IEEE, 2012.
- [20] Richard S Sutton. Adapting bias by gradient descent: An incremental version of delta-bar-delta. In *AAAI*, pages 171-176, 1992.
- [21] N-Tuple Networks for the Game 2048. <https://github.com/mszubert/2048>