

他者に共謀を持ち掛けるための麻雀における モンテカルロ法プレイヤー

高田康介¹ 佐藤直之¹

概要: さまざまなゲームで強いコンピュータプレイヤーが活躍するようになったが、人間プレイヤーとのコミュニケーションには努力の余地がまだまだ大きいと考える。本研究では、そうした努力ができる課題の中で、プレイヤー同士の共謀に着目した。麻雀のような多人数のゲームでは、人間プレイヤーは言葉や身振りを介さずに、ゲーム内の行動のみで複数のプレイヤーが共謀してゲームを進めることもある。本研究では、こうした行動をコンピュータプレイヤーに実現させるために、「各プレイヤーの目線から認識される捨て牌の危険度リスト」をまじえたモンテカルロ法を提案した。この手法では、他プレイヤーから見えるゲーム局面を考慮することで、「1人で戦うよりもこちらと協力した方が得になる」という情報認識を他プレイヤーに促して、協力を期待した行動選択を行うことを狙う。単純な課題局面において提案手法プレイヤーに着手生成を3回させたところ、その全てにおいて、こちらが意図する「他者との共謀を期待した着手」を行う事を確認できた。

Artificial Player for Colluding with other players with Monte Carlo method in Mahjong game

KOSUKE TAKADA^{†1} NAOYUKI SATO^{†1}

Abstract: Competitive computer game players have been developed in various game genres, though, there is a lot of room for developing techniques for computer players which can communicate with human players. This research focuses on collusion by nonverbal communication among game players. In three or more player games (e.g. mahjong,) sometimes, players collide with another player by nonverbal communication (only actions in the game are used). Thus, this paper proposed a method for computer mahjong player to collide with other players. Computer players with this method, assign a "risk values" for each mahjong tile, the value means how many points a player will lose when he/she trashes the tile. An experiment was conducted to confirm the method works correctly. The proposed method player succeeded to make moves with "colliding with other players."

1. はじめに

さまざまなゲームでコンピュータプレイヤーが活躍している。チェスや囲碁といった完全情報ゲームはもとより、ポーカーのような不完全情報ゲームについても研究が進められている。そのために、多様なゲームでコンピュータプレイヤーが人間を上回る強さを発揮するようになった。

しかし、単純な強さ以外の側面については課題も多い。例えば、チームを組まずに複数人が同時に対戦するゲームで、いかにして他者と共謀を図るのか、その共謀への勧誘をどのようにして、もちかけるのか、それをコンピュータに自然に行わせるという目標は、まだ十分に達成されているとは言い難い。

そこで本研究では、麻雀を対象問題として扱い、そうした技術の探求を行う。麻雀は多人数の不完全情報ゲームで、図1のように4人のプレイヤーが互いにチームを組まずに競合する。そのため各プレイヤーは基本的に、自分の利益だけを追求して、プレイヤー間に結託と共謀の関係は存在しない。

一時的な共謀の関係であっても、ゲーム中にあからさまな発話などを用いて共謀への勧誘を行うことは、マナー違反とされている。しかし、一般に人間が麻雀を遊ぶ場合には、ゲーム内の行動を通じて、他プレイヤー同士との共謀を図ることは、よくある。例えば、麻雀のプロによる競技イベント『Mリーグ』[10]の2021年4月30日の第2試合におい



図1: 麻雀のゲームの様子

¹ 佐世保工業高等専門学校 専攻科 複合工学専攻

て、勝又健志プロが自身の捨て牌によって、多井隆晴プロに特定の牌を捨てることを促して、2人はそれぞれその局から利益を受けた。この非言語的なやり取りが確かに共謀の類であった事は、その局の解説担当である渋川難波プロの発言から自然と察せられる。

本研究は、このような言語を用いない形で、一時的な共謀を志向するコンピュータプレイヤーの手法を提案する。この手法は原始モンテカルロ法で着手を生成するが、シミュレーション中のプレイヤーは、他のプレイヤーに対する危険な牌についての想定モデルを持っている。本研究の提案プレイヤーは、自身の捨て牌によって他のプレイヤーに「自身の手牌」についてのヒントを与えて、2人が一緒に得をするような着手選択を他プレイヤーに持ち掛ける。

2. 関連研究

不完全情報の研究としてはポーカーに関するものが有名で、比較的簡単なサイズにした状況での最適解の導出[12]や、相手プレイヤーのモデリング[13]が試みられている。

麻雀の研究には、3層パーセプトロンの訓練により牌譜との一致率を上げる研究[1]や、UCTを用いた麻雀の研究[2]がある。他にも、決定木による戦略決定を志向したもの[3]や、残り牌から最良のアガリの形を目指すアルゴリズムの研究[4]や、Support Vector 回帰で危険牌の予測[6]、有効牌を数えて牌効率をあげる研究[7]などが試みられている。更には、パーセプトロンを導入して上級者棋譜から様々なゲームの要因を予測するモンテカルロ法の手法[8]や、手役を速さ重視で組むか点の高さ重視で組むかをパラメータの調整により判断するプレイヤーの研究もおこなわれた[9]。

中でも、我々の知る限り、麻雀対局サイトにて特に高いレーティングを実現した手法は水上らによるもの[5]であるが、この手法ではシミュレーション中の敵プレイヤーを抽象的なモデルとして扱っている。そうした工夫によって、計算は速くなり、「全員が自分のアガリを最優先に打つ」ような状況では非常に優れた判断ができるが、その一方で「誰かが自分のために、意図的に当たりの牌を切ってくれるかもしれない」ような状況を想定するためには、手法に改変が必要であると考えている。

そのため本研究では、ある種の共謀を考慮に入れた探索を行う。具体的には「極端に高い手役の完成を狙っているプレイヤーを妨害するために、ほんの少しの損得のみをやり取りする事で、対戦を即座に次局へ進めてしまう」ような、一時的な協力関係の形勢を考慮に入れるために、相手プレイヤーをあまり大きく抽象化せずモンテカルロ法を用いる。

3. 対象問題

3.1 麻雀

麻雀は、2~4人のプレイヤーが特定の牌の組み合わせ(役)を作り、和了(ホーラ)することで得点を得ることを目指すゲームである。ゲーム開始時、各プレイヤーには13枚の手牌が配られ、山から牌を1枚手牌に加え(ツモ)、手牌から1枚牌を捨てる(打牌)を順に繰り返すことで役の完成を目指す。

麻雀牌は、大きく数牌と字牌の二つに分けられる。数牌は萬子、筒子、索子の三色に分けられ、それぞれについて1~9の数字がついた計27種の牌からなる。字牌は東、西、南、北、白、發、中の計7種類からなる。これらの計34種それぞれが4枚あるため、麻雀牌の合計は計136枚となる。

役は基本的に4つの面子(メンツ)と1つの雀頭(ジャントウ)によって構成される。面子とは、同種類の牌3つ(刻子、コーツ)もしくは同色で数字が三連続した数牌(順子、シュンツ)といった、3つの牌の集合であり、雀頭とは同種類の牌2つの集合である。また、他プレイヤーの捨て牌によって面子が成立するときは、その牌を手牌に加えることができる。これを鳴きと呼ぶ。ツモによって和了した場合はツモもしくはツモ上がり、他プレイヤーの捨て牌を取って和了した場合はロンまたはロン上がりと呼ぶ。

各プレイヤーはゲーム開始時に持ち点を与えられており、最初に和了を達成したプレイヤーはツモ上がりの場合は他プレイヤー全員から分割して、ロン上がりの場合は最後に捨て牌を捨てたプレイヤーから役に応じた得点を得、一局が終了する。これを規定回数の局が終わるか、いずれかのプレイヤーの点数が0未満になるまで続ける。

その他重要な麻雀用語を以下に説明する。

安全牌 他プレイヤーにロン上がりされない牌。

危険牌 他プレイヤーにロン上がりされる可能性が高い牌。

有効牌 和了になるために手牌に必要な牌。

聴牌 (テンパイ) あと1枚で和了が成立する状態。

向聴 (シャンテン) 数 聴牌になるまでに必要な牌の数。

流局 山がなくなる等、和了以外の要因での局の終了。

振り込み 自分の打牌で他プレイヤーがロン上がりすること。降り 和了をあきらめ、安全牌のみを捨て続けることで振り込みを回避する行為。

ポン 鳴き的一种。他プレイヤーが打牌した牌を取って刻子を作る行為。

チー 鳴き的一种。自身の一つ前の手番プレイヤーが打牌した牌を取って順子を作る行為。

ドラ 和了した際に手牌に含まれていると役の得点に追加で得点に加算される牌。局の初めにランダムで決まる。

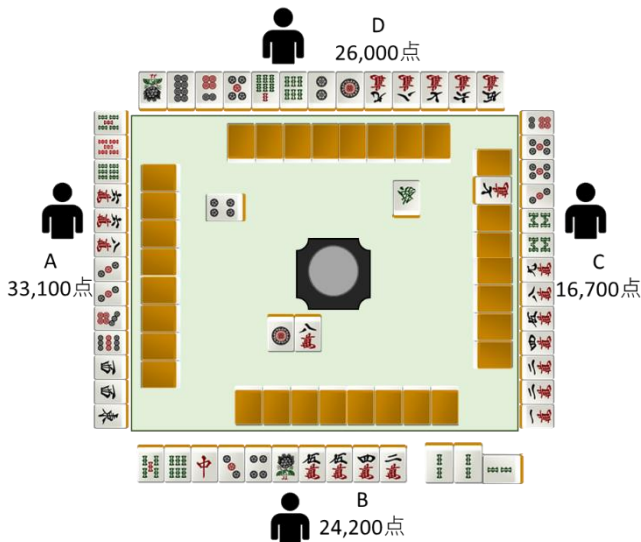


図2：暗黙に結託が行われた局。南4局でドラは八萬。

3.2 麻雀における結託・共謀

例えば図2のような局面を考える。これは麻雀プロの対戦であるMリーグ[10]の2021年4月30日第2試合の南4局にあたる局である。ここで対局者をプレイヤーA, B, C, Dとする。

プレイヤーAは点数が33,100点であり、2位のプレイヤーDに7,100点差をつけての1位である。一方で、プレイヤーBはあと1,800点で2位に昇格できる点差での3位である。このリーグでは、南4局の終了時には順位に応じたボーナスの点数(1位から順に50,000, 10,000, マイナス10,000, マイナス30,000点)が与えられるため、終局時の順位は大切になる。

この局は最終局なので、ここでプレイヤーAは1位をキープしたまま対局を終えたくて、あまり大きな波乱を望んでいないような状況である。そしてプレイヤーCは、なんとか2位に昇格できれば、順位点の恩恵もあって20,000点以上の得があるため、アガリ点が2,000点程度の安い手役であってもアガりたい状況になっている。

そのため、もしもプレイヤーCが安い手役を用意して、プレイヤーAがCのアガリを援助すれば、「2位になって対局を終えたいプレイヤーC」と「安全に1位のまま対局を終えたいプレイヤーA」の間には両得の関係が生じる。

そのような状況を踏まえて、図2でプレイヤーCは索子の二にポンを宣言して、続いて自身の手牌から、高得点につながるドラの牌を捨てた。つまりここでプレイヤーCは、自身の手牌が、役にリーチが含まれずにドラも含む可能性が低いような、安い点の手役である可能性が高いことを周囲に開示している。図2の局面からは、この後、プレイヤーCにとって上がりとなりそうな牌をプレイヤーAが毎順捨てて、プレイヤーCの上がりで対局が終っている。

この局を放送したAbemaTV[13]の番組において解説役を果たした麻雀プロも、そうしたAとCによる暗黙の協力の存在を肯定するような内容の解説を放送中に行っており、ある程度の実力がある人間からみれば2人の結託はあきらかである。しかしこの2人は、対局中に互いに会話をしておらず、この協力の関係は2人の選択した捨て牌によってのみ生じている。

このような、言語を用いずに、ゲーム内の行動のみによって2人(以上)のプレイヤー間による暗黙の結託を結ぼうとする手法の提案を本研究では試みる。

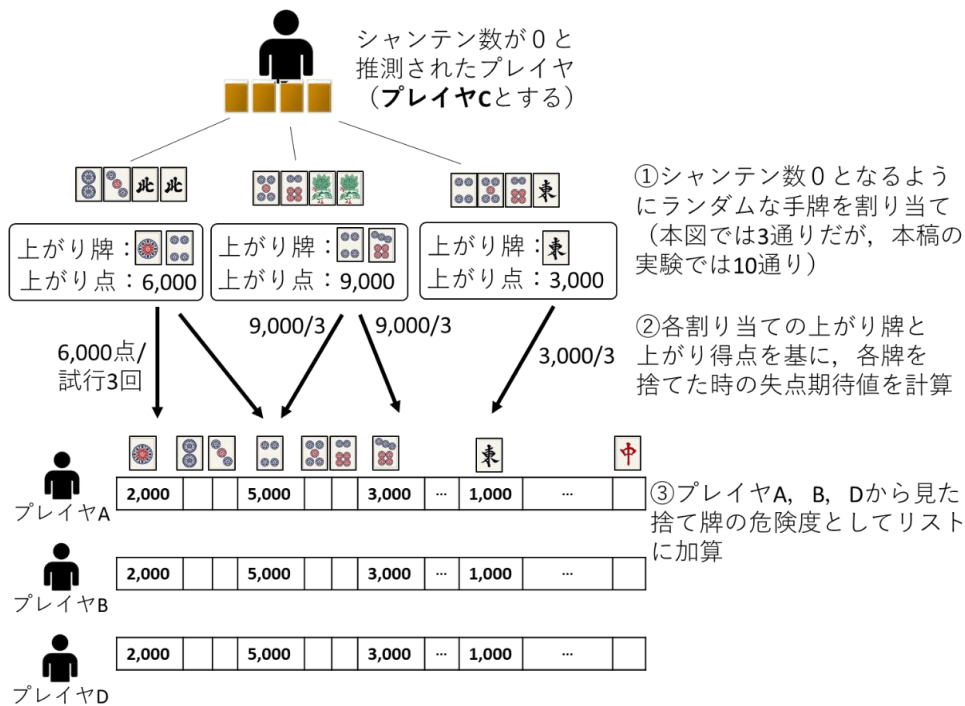


図3：提案手法の全体

4. 適用手法

本研究における手法の全体像を前頁の図3に示す。以下の4つの手順で提案手法のプレイヤーは動作する。

- 1). 現在の局面で、自身が捨てた牌それぞれに対応した次局面を生成する。そしてそこから更に、各プレイヤーの捨て牌から各自のシャンテン数を推測して、自分以外のプレイヤーの手牌にはそのシャンテン数と合致するような形での手牌の割り当てを行う。こうする事で、仮手牌確定局面を複数生成する。
- 2). そのシャンテン数の予測や、捨て牌から、各プレイヤーの上がり牌や上がり得点についての予測を行う。この予測を用いて、それぞれの仮手牌確定局面に、危険な牌のリストを用意する。
- 3). 山の牌の順序と種類をランダムに割り当てる。
- 4). 乱択シミュレーションを開始して、結果を集計する。シミュレーション中におけるプレイヤーは、2)で作成した危険な牌のリストを参照して捨て牌を選ぶ。

その結果局面におけるスコアを集計して、最も高い得点が望めそうな着手を行う。

こうした手順を踏むことで、提案プレイヤーは、

- ・自身の捨て牌によって、他プレイヤーがそれぞれ認識する「危険な牌に関する情報」に影響を与える。
- ・その情報の変化によって、他プレイヤーが提案プレイヤー(とそのプレイヤー自身)にとって有益な行動選択を行う可能性を考慮する。

といったことが可能になる。これによって、ゲーム内行動で共謀を持ち掛ける麻雀プレイヤーが構成できると考える。

以下、本稿における各手順の具体的詳細を示す。

4.1 シャンテン数予測に応じた手牌仮確定局面の生成

各プレイヤーがどれだけ上がりに近いかを表すシャンテン数を、捨て牌から推測して、そのシャンテン数に矛盾しない形で各プレイヤーの手牌にランダムな牌を割り当てる。そのシャンテン数の予測に関しては、グリーディーな人工プレイヤーを利用した。

4.1.1 シャンテン数予測のための予備実験

自身のシャンテン数が常に最小となるような捨て牌選択を行う人工プレイヤーを4つ用意した。それらは、シャンテン数が同等の場合には、捨て牌後の手牌から「更にシャンテンを下げる事ができる牌(専門用語でいうところの有効牌)」の枚数が最大となる牌を優先して捨てる。また、これらのプレイヤーは一切の鳴きを行わない。

これらの人工プレイヤーに1,000回の対局を行わせて、「今までに何枚の牌を引いて」おり、「三～七の数牌を既に何枚捨てている」時に、シャンテン数がいくつになっているかをデータとして集計した。このデータを基にして、あるプレイヤーが、

- ・現在までに何枚の牌を引いたか
 - ・そのプレイヤーからの捨て牌に、三～七の数牌がいくつ含まれるか
- を入力情報として、
- ・現在の手牌のシャンテン数の予測値
- を出力とするようなモデルを用意した。この入出力は、単純に統計的な割合に重みづけされたランダムな出力である。例えば牌を6枚引いた状態で、現在までに三～七までの数

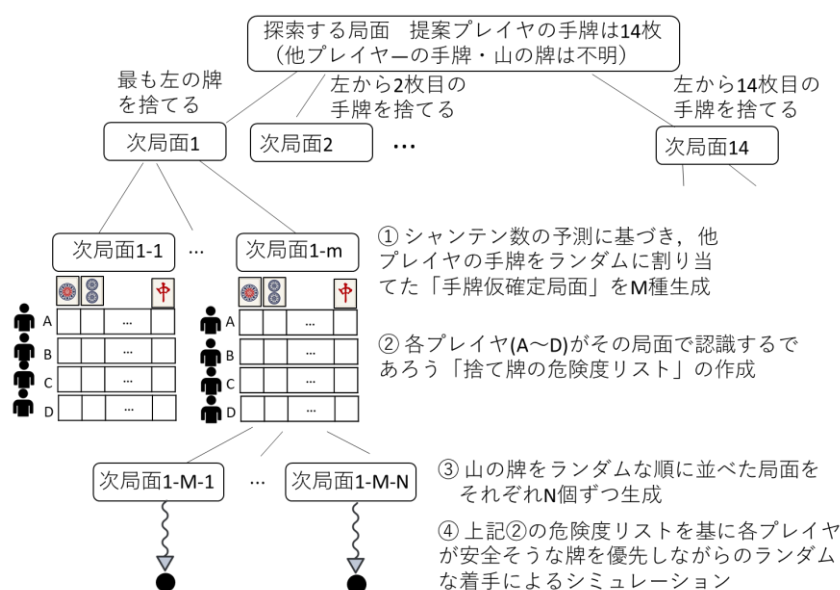


図4：捨て牌危険度リストの作成（ロンによる失点期待値の加算）

牌を1枚だけ捨てている時、シャンテン数が2の割合は約27%、シャンテン数1の割合は約61%、シャンテン数0(つまり聴牌)の割合は約8%であった。そのため、この予測のモデルは、現在まで引いた牌の枚数「6」とその中の三〜七の数牌の枚数「1」を入力として受け取った場合、27%の確率で「シャンテン数2」、61%の確率で「シャンテン数1」、8%の確率で「シャンテン数0」を出力する。

4.1.2 手牌の仮確定

4.1.1節のシャンテン数予測の割合を参考に、手牌を仮に割り当てた局面を生成した。まず、各プレイヤーのシャンテン数の予測を4.1.1節のモデルで行って、そのシャンテン数に矛盾しない形で各プレイヤーの手牌をランダムに割り当てる。この予測シャンテン数にはランダム性があるため、手配の仮確定局面は複数個、生成した。

4.2 各プレイヤー目線による捨て牌危険度リストの作成

4.2.1 ロン上がりによる危険度の考慮

各プレイヤー手牌の予測シャンテン数と、場の全体の捨て牌をもとに、各プレイヤーがもし聴牌である場合のロン上がり牌の種類と、上がり点数を予測した。先行研究[5]では、場の特徴量を基にした上級者牌譜からの予測モデル構築によりこうした予測を実現しているが、本稿においては単純に、乱択なシミュレーションを用いた。

具体的には、4.1節でシャンテン数が0と予測されたプレイヤーに対し、以下の試行を複数回繰り返した。

- i) シャンテン数が0となり、ランダムな手牌を割り当てる。その際に、「フリテン」にならないようにして、なおかつ73%の確率で両面待ち、27%の確率で、1種類の牌のみの待ちとなるようにした。
- ii) その手牌からの上がり牌のうちランダムな1牌を与えて、上がり得点を集計する。

手順i)における、両面待ちについての確率値73%については、麻雀の対局データ集計サイト[15]を参考にして、適当な上級プレイヤー4名の「良形待ち」の確率が平均で約73%であった事から決定した。

この試行を本稿の実験では10回繰り返して、手順i)の形からの上がり牌と、上がり点に関して、予測の値を得た。これを図4に示すような形で、「捨てる」と失点してしまう牌の種類」とその際の失点の期待値として、リストに値を格納した。

4.2.2 ツモ上がりによる危険度の考慮

麻雀では、相手のロン上がりにつながる危険な牌を捨てなくても、時間が経つうちに相手プレイヤーがツモ上がりをしてしまうことがある。そのため、どの牌を切った場合でも、それが特定のプレイヤーの上がりをもたない捨て牌であるならば、そのうち誰かのツモ上がりを実現させてしまうリスクを持つ。

よって図5のように、「誰かのロン上りを促す可能性の

ある危険牌」を除いた牌それぞれについては、誰かのツモによる失点の期待値を、ツモの成立確率と乗算した上で、失点の期待値としてリストに値を格納した。

厳密に言えば、誰かのロン上がりにとっての危険牌だからといっても、それはあくまで予測であり、実際にはロン上がりがされない可能性がある。これを考慮すれば、4.1.1節で危険の度合を割り当てた牌それぞれについても、「それがロンされなかった場合に、更に将来に誰かがツモをした場合の失点の期待値」も可能性に含めた値を格納すべきである。しかし今回は簡便のため図5のような方法をとった。

また、図5に出てくる「(終局までに)ツモ上がりをする確率」については、文献『新・科学する麻雀』に掲載のデータ表[14]の数値を基に、残りの巡目の数や、待ち牌の種類の数(不完全情報のため4.2.1節の乱択の情報を利用)から計算した。

シャンテン数が0と推測されたプレイヤー

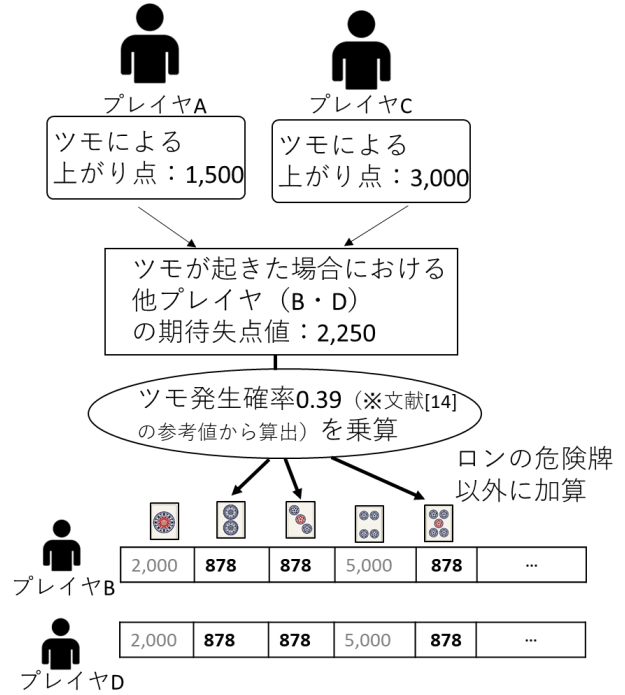


図5: 捨て牌危険度リストの作成(ツモによる失点期待値の加算)

4.2.3 危険度リストの完成

以上、4.2.1と4.2.2節の作業によって、各プレイヤーが認識する捨て牌の危険度に関するリストが完成する。これは、各プレイヤーはどの牌を捨てると、他プレイヤーから何点の失点が期待されるかというリストであり、モンテカルロ法の乱択シミュレーション中におけるプレイヤーの行動選択に利用される。

4.3 山の牌のランダム割り当て

ここまでの手法手順では、各プレイヤーの手牌しか、仮の確定としての情報を割り当てていないため、ここで山の牌

をランダムにシャッフルする手順を複数回繰り返すことで、シミュレーションの開始局面とした。

4.4 乱択シミュレーションの開始

モンテカルロ法ではシミュレーション中のプレイヤーはランダムな牌を捨てるが、この手法では 4.2 節で示した牌の危険度リストを参照して、捨てる牌を選んだ。危険度の低い牌を優先して選び、もし同等の危険度の牌があれば、複数の中から 1 枚を完全にランダムに選ぶことで決定した。加えて、シャンテン数が 0 のプレイヤーに関してはシャンテン数を上げない（つまり、あと 1 枚で上がれる手牌を維持する）ようにしたままで、危険度の低い牌を選んだ。

そして各シミュレーションプレイの終局時のスコアを集計することで、どの着手が最も良いのかを導いた。

4.5 提案手法による結託実現のシナリオの例

このような手法設計によって、例えば以下のようなシナリオに沿った仕組みでの『共謀の実現』を期待している。

i) 場に、上がり点の高そうなプレイヤー (X とする) がいる状況で、提案プレイヤーが、自身の上がり点が低いことを示す捨て牌や、自身の上がりに近いことを示す捨て牌を行う。

ii) 「他プレイヤー 2 名 (Y と Z とする) は、もし彼ら自身の上がりが見込みにくい状況であれば、X の上がり牌を捨てたり、あるいは X のツモ上がりを実現させるよりも、提案プレイヤーの安い上がりを援助した方が利益が大きいと判断するはずだ」と、提案プレイヤーは認識する。

iii) 提案プレイヤーは、そうした Y や Z からの上がりの援助を期待した上で、自身の利益を最大化する捨て牌を行う。そしてその判断は、「X に対しての高得点の振り込みによる失点のリスク」や、「自身への上がりの援助が Y や Z にとって確かに得になると彼ら自身が判断し得るのか」などの要素を考慮に含めた上で、行われる。

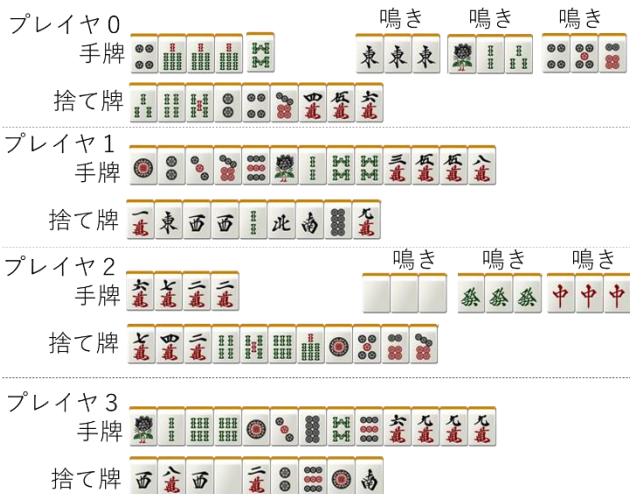


図 6 : 実験局面。鳴きによりできた牌の面子は全体に公開情報として開示される。

5. 実験

5.1 概要

提案手法による共謀が実現するかどうかを確かめるために、図 6 の局面にて着手生成の実験を行った。この局面ではプレイヤー 0 が提案手法プレイヤーであり、かつ手番である。

ここでプレイヤー 2 は、白・中・發の牌 3 種を既にポンしていて、上がりを実現すれば 32,000 点もの高得点となること、他のプレイヤー全員に確定的な情報として分かっている。ここでプレイヤー 0 は、あきらかに上がりの点数が低い。

更にこの局面では、プレイヤー 0 とプレイヤー 2 の捨て牌は三～七の数牌だらけになっており、有効な二面待ちや三面待ちの種類を非常に特定しやすくなっている。そのため、プレイヤー 1 や 3 は、それなりに強い自信をもって、「プレイヤー 0 の上がりを助けそうな牌」「プレイヤー 2 の上がりを実現させなさそうな牌」を選んで、捨てることができる。

こうした局面で、執筆者が認識する限りのおおよその既存手法においては、プレイヤー 0 は「自身の上がりプレイヤー 1 と 3 から明らかに援助される」可能性を考慮しない。それに対して提案手法は、自身の捨て牌の並びを見た周囲の他プレイヤーが「提案手法プレイヤーの上がり点が低く、なおかつ上りに近い」ことを認識している、と認識する。これによってプレイヤー 1 と 3 からは、提案プレイヤーに対して上がりを援助する捨て牌がありそうなことを考慮に含めて探索を行う。

よって、プレイヤー 0 は、プレイヤー 2 に対する直近の振り込みのリスクを避けて、プレイヤー 1 と 3 からの上がり牌をもらいにくくなるような「四筒捨て」よりも、他者からの援助を利用すれば速く上がりが実現できそうな「七索捨て」を優先すると予想される。

5.2 実験条件と結果

図 3 に示す手法全体像のパラメータ設定において、手牌仮局面の生成数 m を 10 個、各「不完全情報を適当に補間した局面」それぞれに対してのシミュレーション数 n を 10 回と定めた。そしてこの実験の試行回数を、全体で 3 回繰り返した。その結果、全ての試行で、他プレイヤーとの共謀を志向した「七索捨て」を選んだ。そのため、このような極端に共謀が有利となるように設定された架空の局面においては、提案手法が意図通りの、他プレイヤーの共謀を考慮する着手が行われたといえる。

6. 考察および今後の展望

今回の実験の状況では、あきらかに他プレイヤーが提案プレイヤーに対する振り込みを行うことが有利となる状況設定において、提案プレイヤーが他プレイヤーとの共謀を志向するように見える着手を行った。しかし課題も多いと考える。

まず、本稿で実装された手法の範囲内では、数多くの確率や期待値の扱いについて、精緻さに欠けるところが多く残った。例えば、「誰かのロン上がりを援助しうる牌を捨てた時にも、(それがロンされずに、) 遠い将来に他の誰かのツモ上がりが実現する可能性がある」といったような、種々の事象同士の同時確率や条件付き確率を十分に丁寧に考慮していない。これは、今回はひとまず手法の簡便さを優先しての実装を行うための措置であったが、将来的にはそれらを精密に考慮した設計へと発展させたい。

また、本稿の実験で観察されたのは「共謀してくれる他者の存在を前提とした場合の、自身の最善手」の選択ではあったが、自身から積極的に「他者を共謀に勧誘する手」であったとは言い難い。この「他者に共謀を勧誘する手」とは、例えば 3.2 項で示した局面で起こった、プレイヤー B の「八萬捨て」のような、自身の上がり点が安くなることをあえて周囲に教える着手であり、本研究はそうした着手の実現を目指したい。

こうした着手は、不完全情報を十分に精密に予測した上で探索を行えば、可能であるとは考える。ただし、現在の手法で採用されているような大雑把な予測の手法では、実現が難しいと考えるので、上級者棋譜の機械学習などの手法の適用を視野に入れたい。

また、本提案手法では「他者から持ち掛けられた共謀の勧誘を察して受け入れる」ようなプレイヤーの構成手法は取り扱わなかった。その理由は、先行研究[5]に見られるような、他プレイヤーを抽象化した形でのモンテカルロ法をそのまま適用した場合でも、単に期待得点の計算と比較によって、「共謀を察して受け入れる」着手は自ずと行われる、と判断したためである。

しかし麻雀とは別の多人数ゲームを考慮すれば、ゲームによっては「他者から持ち掛けられた共謀の勧誘を察して受け入れる」ように見える行動生成の、実現が難しい可能性がある。そのため、他の多人数ゲームで提案手法を適用してみることも課題の一つである。

謝辞： 本研究は JSPS 科研費 JP 21K17872 の助成を受けたものです。援助に感謝いたします。

参考文献

- [1] 北川竜平, 三輪誠, 近山隆, 麻雀の牌譜からの打ち手評価関数の学習, ゲームプログラミングワークショップ 2007 論文集, pp.76-83, 2007
- [2] 三木理斗, 三輪誠, 近山隆, UCT 探索による不完全情報下の行動決定, ゲームプログラミングワークショップ 2009 論文集, pp.43-50, 2009
- [3] 田中悠, 池田心, 麻雀初級者のための状況に応じた着手モデル選択, 研究報告ゲーム情報学 2014, pp.1-8, 2014
- [4] 原田将旗, 古宮嘉那子, 小谷善行, 麻雀における手牌と残り牌からの上がり探索による着手決定アルゴリズム CHE, 研究報告ゲーム情報学 2014, pp.1-4, 2014

- [5] 水上直紀, 中張遼太郎, 浦晃, 三輪誠, 鶴岡慶雅, 近山隆, 多人数性を分割した教師付き学習による 4 人麻雀プログラムの実現, 情報処理学会論文誌 55, pp.2410-2420, 2014
- [6] 海津純平, 吉仲亮, 篠原歩, 大局的な状況に応じて打ち方の変更を行う麻雀 AI, ゲームプログラミングワークショップ 2016 論文集, pp.154-157, 2016
- [7] 栗田萌, 保木邦仁, 麻雀における他家の手牌と待ちの予測に基づく放銃確率推定, 研究報告ゲーム情報学 2017, pp.1-8, 2017
- [8] 青木幸聖, 穴田一, 泣きを考慮した麻雀 AI, 情報処理学会論文誌 61, pp.990-995, 2020
- [9] 松田真治, 伊藤栄介, 麻雀における他家の待ち牌推測, 研究報告数理モデル化と問題解決 2020, pp.1-6, 2020
- [10] M リーグ [online], Available (<https://m-league.jp/>). [Accessed: 2022-10-11]
- [11] N, Abou Risk and D, Szafron. Using counterfactual regret minimization to create competitive multiplayer poker agents., AAMAS, pp. 159-166, 2010
- [12] D., Billings, D., Papp, J., Schaeffer and D, Szafron . Opponent modeling in poker. Aai/iaai, 493(499), 105, 1998.
- [13] AbemaTV [online], Available (<https://abematv.co.jp/>). [Accessed: 2022-10-11]
- [14] とつげき東北, 新科学する麻雀, ホビージャパン, 2021
- [15] 雀魂 DB - 雀魂牌譜屋 [online], Available (<https://mahjongsoul.club/content/雀魂牌譜屋>). [Accessed: 2022-10-11]