

Title	上海ゲームの工夫が報われる問題生成のための人間の記憶選択と忘却のモデル
Author(s)	相良, 駿昇; シュエ, ジュウシュエン; 池田, 心
Citation	ゲームプログラミングワークショップ2023論文集, 2023: 48-55
Issue Date	2023-11-10
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/18829">http://hdl.handle.net/10119/18829</a>
Rights	<p>社団法人 情報処理学会, 相良駿昇, シュエ ジュウシュエン, 池田 心, ゲームプログラミングワークショップ2023論文集, 2023, 48-55. ここに掲載した著作物の利用に関する注意 本著作物の著作権は情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。Notice for the use of this material: The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.</p>
Description	第28回ゲームプログラミングワークショップ (GPW-23), 2023年11月17日-19日, 箱根セミナーハウス

# 上海ゲームの工夫が報われる問題生成のための 人間の記憶選択と忘却のモデル

相良駿昇<sup>†,1</sup> シュエ ジュウシェン<sup>†,2</sup> 池田心<sup>†,3</sup>

**概要:** 不完全情報ゲームのひとつである上海ゲームは、麻雀牌の山の中から同じ絵柄の牌のペアを取り除いていき、すべての牌を取り除くことができればゲームクリアとなる。牌が積み重なることにより、盤面上には絵柄を確認できない牌が存在することが多く、ゲーム結果は運に左右される面も大きい。特に、いわゆる最善手（見えない牌がランダムに配置されていると仮定した時にクリアできる確率が最も高い手）を選択したとしてもそれが裏目に出てしまうことがあり、プレイヤーの不満の原因のひとつになり得る。先行研究では、強さの異なる2つのソルバのクリア率によって、強いソルバが高い確率でクリアでき、弱いソルバはそうではない場合に良い問題であると定義した。しかしこの時のソルバは「ゲーム中に記憶しておくべき牌」を全て覚えられると仮定しており、これは人間プレイヤーからするとかなり難しく、辛い要求であるという問題があると考えた。そこで本研究では、先行研究の手法を発展させ、人間の記憶選択と忘却モデルを導入したソルバを用いることにより、人間プレイヤーにとって記憶負担の少ない、工夫が報われる問題の生成を目指す。

**キーワード:** 上海, 不完全情報ゲーム, 人間らしい, コンテンツ生成, 短期記憶

## Models of Humans' Memory Selection and Forgetting for Generating Shanghai Game Puzzles that Reward Players' Ingenuity

TOSHINORI SAGARA<sup>†,1</sup> CHU HSUAN HSUEH<sup>†,2</sup>  
KOKOLO IKEDA<sup>†,3</sup>

**Abstract:** Shanghai is an imperfect information game where players remove pairs of tiles with the same pattern from a pile of mahjong tiles. To win a game, the player needs to remove all the tiles. Each game is largely dependent on luck, as there are often tiles whose patterns cannot be seen due to the piling up of tiles. In particular, the so-called best move (the move with the highest probability of winning the game, assuming that invisible tiles are randomly placed) may unfortunately lead to a bad result and become a source of frustration for the player. In a previous study, the researchers defined "good" puzzles by employing two solvers with different strengths. A puzzle was defined to be good when the stronger solver had a high win rate while the weaker solver had a low win rate. However, their solvers were assumed to be able to memorize all the "tiles that should be memorized during the game," which we believe is problematic. The reason is that such an assumption is usually difficult and painful for human players. Therefore, in this research, we aim to generate puzzles that require less memory and can reward players' ingenuity by introducing humans' memory selection and forgetting models into the solvers in the previous study.

**Keywords:** Shanghai game, imperfect information game, human-like, content generation, short-term memory

### 1. はじめに

計算機技術の発展に伴い、パズルゲームの問題生成についての研究が行われており、詰め将棋[1]や数独パズル[2]などの完全情報ゲームの研究が代表として挙げられる。近年の研究では遺伝的アルゴリズムや教師あり学習などの手法を用いて、問題生成や生成した問題の評価を行っている。完全情報1人ゲームの問題では、すべての情報が明らかになっているため、ゲーム中の各局面において、確実にクリアできる手が一意に定まる。これに対して不完全情報1人ゲームの問題は、隠れている情報を含むため、確実にクリアできる手があるとは限らない。それぞれの着手のクリ

ア率を求めることは原理的には可能であるが、そのような着手を選択したことが原因となり、クリア失敗になることもある。クリア率が高い着手を考えて選択したにもかかわらず、こういった工夫が報われずに裏目に出てしまうと、プレイヤーは不満を感じる。正しい選択が報われて、裏目に出ずにクリアにつながるような問題が生成できれば、プレイヤーにより良いゲーム体験を提供できると考える。

不完全情報ゲームのひとつである上海ゲームは、麻雀牌を用いて遊ぶ1人用のパズルゲームである。積み上げられた麻雀牌から同じ絵柄のペアを2枚ずつ取り除くことでゲームを進めていき、すべての牌を取り除くことができればゲームクリアとなる。

† 北陸先端科学技術大学院大学  
Japan Advance Institute of Science and Technology, Nomi, Ishikawa  
923-1211, Japan  
1 s2210070@jaist.ac.jp  
2 hsuehchu@jaist.ac.jp  
3 kokolo@jaist.ac.jp

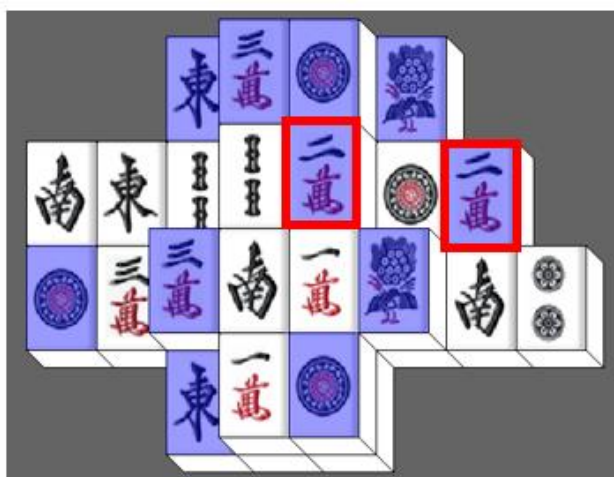


図 1. 上海ゲームの盤面例

上海ゲームの問題を生成するには、レイアウト（牌の初期配置の並び）を決めたいで牌を配置し、問題を生成する。完全にランダムに牌を配置すると、ほとんどの場合、解のない問題になってしまうため、解が必ず存在するように制約を設けて問題を生成する。それだけではまだ不十分で、難易度も解き味もバラバラな問題が生成されてしまう。簡単すぎる問題では深く考えることなく解けてしまい、難しすぎる問題ではクリアできずに不満を感じてしまう。そこで本研究では、この問題を解決するために、人間プレイヤーにとっての難しさを考慮した問題生成を目指す。

大町の研究[3]では、強さの異なる2つのソルバに上海ゲームの問題を解かせて、強いソルバが高い確率でクリアでき、弱いソルバはそうではない場合に良い問題であると定義した。このような方法で“良いはずの手が裏目に出る”ことを減らすことができるだろうという発想は本論文でも引き継ぐ。一方で、大町の用いたソルバは（強い／弱い）人間プレイヤーを十分模擬したものにはなっておらず、クリア率の推定値が人間プレイヤーのものに乖離する場合があると予想している。具体的には、大町の用いたソルバは「取り除いた牌を全て覚えていられる」と仮定している一方で、多くの人間プレイヤーにとってそれは難しい、または苦痛である。上海ゲームは取り除いた牌を記憶しておくことが重要なゲームであり、どの程度の数を記憶できるかがクリア率に大きく影響を与える。人間プレイヤーにとっては取り除いた牌をすべて記憶しておくことは難しく、記憶しておくべき牌の数が増えると一部の牌を忘れてしまうことがある。記憶しておくべき牌が多くなりやすい配置や、取り除いた牌を忘れることが致命的になるような配置では、人間プレイヤーに戦略や工夫よりも正確な記憶を求めるゲーム性になってしまい、これは多くの上海ゲームプレイヤーが求めるものとは異なると思う。

そこで本研究では、大町の研究の手法に人間の忘却のモデルを導入することにより、人間プレイヤーにとっての難易度を考慮した問題生成を行う。

## 2. 上海ゲーム

上海ゲームは積み上げられた麻雀牌の中から同じ絵柄の牌を2枚ずつ取り除いていき、最終的にすべての牌を取り除くことができたならゲームクリアとなる。この時、牌の左右両方が他の牌と接しているか、上に別の牌が重なっている牌は選択することができない。図1の盤面では、青く表示している牌が取り除くことができる牌である。ゲーム中に着手できる牌が無くなると、ゲームオーバーとなる。

上海ゲームの基本的な着手方針としては、着手不可能に繋がりがづらいうえを選択していくことになる。たとえば、(1)高く積まれた牌を着手する、(2)長い列を減らせるように着手する、(3)一度取り除いたことがある絵柄の牌を着手する、などの戦略が考えられる。(1)と(2)は、ゲームの後半に高く積まれた牌や長い列が残ってしまうと、後半の着手の選択肢が少なくなってしまうため、ゲームの序盤にそこを着手することで、後半の着手の選択肢を増やすという戦略である。(1)と(2)の戦略は必ずしも安全とはいえないため、他の候補との兼ね合いを考える必要があるが、(3)の戦略は次の段落で詳述するように安全であり、優先して選ぶべき戦略である。

上海ゲームでは初期配置の山の中にそれぞれの絵柄の牌が4枚ずつ存在する。プレイヤーが着手をする際、同じ絵柄の牌のペアを取り除いていくので、一度着手をすると、その絵柄の牌が4枚から2枚になる。もう一度その絵柄の牌を着手すると、次は2枚から0枚になる。4枚から2枚にするような着手の場合、残った2枚の牌の位置によっては着手不可能に陥ってしまう可能性がある。たとえば、残った2枚の牌が縦に積み重なっている場合が着手不可能に該当する。こうなってしまうと、下の牌を選択するために上の牌を取り除く手段が存在しないため、着手不可能になってしまう。これに対して、2枚から0枚にするような着手の場合、2枚の残り牌が発生することは無いため、着手不可能を引き起こすことは無い。ある絵柄の牌を一度着手すると4枚から2枚になり、その絵柄の牌をもう一度着手すると2枚から0枚の安全な着手になるため、一度着手した牌の絵柄を記憶しておくことで、以降の着手で安全な着手を選択することができる。このような着手を確定着手と呼ぶ。

以上のことから、上海ゲームでは一度着手した牌を記憶しておくことが非常に重要である。たとえば、図2のような盤面があったとき、いくつかの着手の選択肢が考えられるが、赤枠で囲んだ牌を過去に一度着手したことを記憶していれば、複数の選択肢の中から安全な着手を選択することができる。

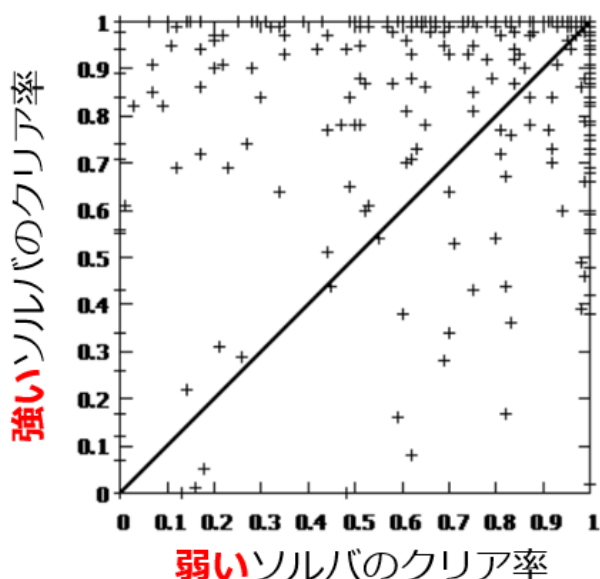


図 2. ソルバのクリア率による問題の分類

### 3. 関連研究

#### 3.1 強さの異なるソルバによる問題の分類

大町の研究では、上海ゲームの問題について、プレイヤーの技量が正しく反映されるような問題の生成を目指した。そのために、強さの異なる2つのソルバを作成し、それぞれのソルバのクリア率によって問題を分類した。

図2のグラフは上海ゲームの問題を、ソルバのクリア率でプロットした散布図である。分類した問題について、次のような傾向が見られたと主張している。

- どちらのソルバも高いクリア率 (図2の右上領域) : 確定着手が多く、先読みを必要とする場面も少ない、簡単すぎる問題。
- どちらのソルバも低いクリア率 (図2の左下領域) : 必要な先読みが非常に難しく、運に左右される選択肢も多い。期待値的には正しい選択が報われないことが多い、難しすぎる問題。
- 弱いソルバのクリア率が高く、強いソルバのクリア率が低い (図2の右下領域) : 運要素が非常に強く、理不尽さを感じる選択肢が多い問題。
- 強いソルバのクリア率が高く、弱いソルバのクリア率が低い (図2の左上領域) : 先読みが必要な局面が多いが、理不尽さや運要素が少ない問題。

以上のような傾向があり、強いソルバのクリア率が高く、弱いソルバのクリア率が低い問題が面白い問題であると主張している。しかし、このソルバは忘却を考慮していないことが問題であると我々は考えた。2章で述べたように、上海ゲームは記憶が非常に重要なゲームである。人間プレ

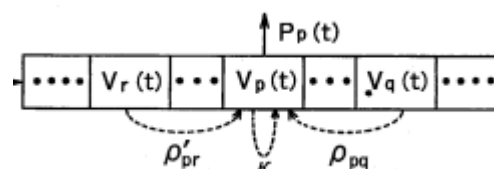


図 3. 連続時間モデルの概念図

イヤーの場合、先読みや着手の評価などの工夫を行いながら問題を解いていくが、覚えなければならない牌が増えると、一部の牌を忘れてしまう事がある。これに対して大町の研究のソルバは取り除いた牌を忘れることは無い。工夫して解くという部分は人間プレイヤーと共通しているが、取り除いた牌を忘れないという前提のソルバでは、人間プレイヤーにとっての難しさと齟齬が生じてしまうと考える。

#### 3.2 短期記憶の連続時間モデル

横井の研究[4]では、連続時間モデルという新たな短期記憶モデルを提案し、連続時間モデルの振る舞いが人間の短期記憶の特性を満たしていることを検証し、その妥当性を証明した。

短期記憶における忘却を引き起こす原因として、受動的崩壊、順向干渉、逆向干渉の3つが挙げられる。受動的崩壊とは、時間経過によって記憶している項目が消失することを指す。文字列として保持できるような項目を頭の中で復唱し、記憶を保持することをリハーサルというが、リハーサルを行わない場合、受動的崩壊によって比較的短時間で項目が消失する。順向干渉とは、先に記憶していた項目が後から記憶した項目に影響を与えて、その項目の情報を消失させる現象を指す。逆向干渉とは、後から記憶した項目が、先に記憶していた項目に影響を与えて、その項目の情報を消失させる現象を指す。

横井の研究の短期記憶モデルの概念図を図3に示す。このモデルには記憶した項目を格納しておくスロットが存在する。それぞれのスロットには情報量という数値が格納されており、これはそのスロットに格納されている項目の記憶の強さを表している。 $V_p(t)$ が時刻 $t$ における第 $p$ 項目の情報量を表しており、第 $p$ 項目の情報量の初期値 $h_p$ で $V_p(t)$ を割ることで、その項目の再生率が求まる。再生率とは、その項目を思い出せる確率を表す。 $\kappa$ は受動的崩壊の時定数であり、各スロットの情報量が $1/e$ に減少するまでの時間を表す。

横井のモデルでは、1つの項目が干渉によって単位時間に失う情報量は干渉する項目の情報に比例すると仮定しており、このときの比例定数を干渉定数としている。 $\rho_{pq}$ は第 $q$ 項目から第 $p$ 項目への順向干渉定数、 $\rho'_{pr}$ は第 $r$ 項目から第 $p$ 項目への逆向干渉定数を表している。干渉定数が大きくなるほど記憶が急速に失われ、干渉定数が小さくなるほど情報量の減少が緩やかになる。これらの干渉定数の値は被験者実験の結果から、グリッドサーチを行って決定した。

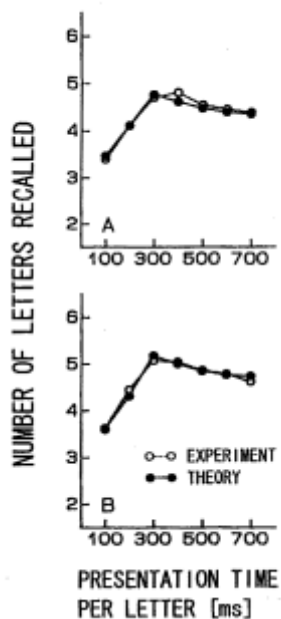


図 4. 連続時間モデルの検証

このモデルが想定している記憶タスクは、ごく短い時間間隔 (100ms~700ms) で提示される英数字を記憶するというタスクであり、人間の短期記憶のリハーサルやチャンキングといった挙動を考慮していない。リハーサルには維持リハーサルと精緻化リハーサルの2つがある。維持リハーサルとは、文字列として記憶できる項目を頭の中で繰り返し復唱することで、短期記憶を維持することを指す。精緻化リハーサルとは、記憶すべき項目を相互に関連付けたり、情報の意味付けを行うことを指す。チャンキングとは、いくつかの記憶項目をひとつのかたまりにして記憶することを指す。チャンキングを行うことにより、それぞれの項目をバラバラで記憶するよりも、多くの項目を記憶することができる。

連続時間モデルの検証結果を図4に示す。この検証は被験者実験によって行われた。被験者はディスプレイに逐次提示されるアルファベットを記憶し、すべてのアルファベットの提示が終わった後に、記憶しているアルファベットを答える。グラフの縦軸が正しく回答できた文字数、グラフの横軸が各アルファベットを提示する時間である。Aのグラフは6文字のアルファベットを提示、Bのグラフは7文字のアルファベットを提示した結果である。黒丸の折れ線グラフが被験者の結果、城丸の折れ線グラフが連続時間モデルのシミュレーション結果である。連続時間モデルの結果が被験者の結果と良い一致を示していることがグラフから読み取れる。

横井の連続時間モデルは人間の短期記憶の挙動に良い一致を示し、短期記憶の特性を満たすことが検証されている。そのため、我々の研究では連続時間モデルを採用する。ただし、我々が想定している上海ゲームにおける記憶のタス

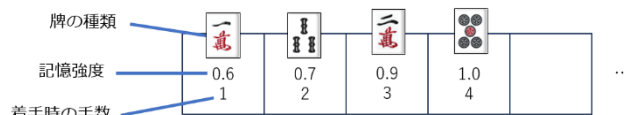


図 5. 忘れるモデルの概念図

クは、連続時間モデルが想定している記憶タスクとは異なり、リハーサルやチャンキングが有効である可能性が高い。そのため、連続時間モデルを上海ゲームに適用するには、リハーサルやチャンキングを考慮してモデルを改良する必要がある。

### 3.3 人間らしいモデルを用いたコンテンツ生成[5]

藤平の研究では、ロールプレイングゲームの2Dマップの自動生成について、人間プレイヤーの傾向を学習した人間らしいテストプレイヤーを作成した。このテストプレイヤーが迷路をプレイしたときの歩数に基づく難易度推定によって、簡単、普通、難しいなど、難易度別の迷路を自動生成した。

テストプレイヤーの選択傾向は人間プレイヤーの選択傾向と大まかに適合しており、自動生成した難易度別の迷路についても人間プレイヤーにとっての難易度とおおよそ一致していた。

藤平の研究のように人間らしいテストプレイヤーを用いて、人間プレイヤーにとっての難易度に基づいたコンテンツ生成に関する研究は、近年活発に行われている。

## 4. 提案手法

### 4.1 忘れるモデル

本研究では、先行研究の問題生成手法のソルバに人間らしい忘却を導入することによって、より人間プレイヤーにとっての難易度に基づいた問題生成を目指す。

まず、短期記憶の連続時間モデルを上海ゲームに適用するために改変した短期記憶モデルを作成する。この短期記憶モデルを忘れるモデルと呼ぶ。忘れるモデルの概念図を図5に示す。この忘れるモデルは、連続時間モデルと同様に複数のスロットに記憶する項目を格納する。それぞれのスロットには、牌の種類、情報量、着手時の手数が格納されている。情報量をここでは記憶強度と呼ぶ。記憶強度の初期値は1.0であり、他の項目からの干渉を受けることによって時々刻々と減少していく。ある時刻での記憶強度の値が、その項目の再生率となる。着手時の手数とは、その牌の着手がゲーム開始から何回目の着手かを表す。連続時間モデルでは、項目を入力した時間を干渉の計算に用いていたが、忘れるモデルでは着手時の手数を入力した時間の代わりに用いる。

次に、干渉の計算について説明する。干渉とは、項目同士の相互作用により、記憶強度が減少することを表す。干

渉が起こることにより、複数の項目を記憶している場合、手数経過で記憶強度が減少し、その項目を思い出せる確率が減少していく。干渉による記憶強度の減少量の計算式を以下に示す。

干渉先の記憶強度の減少量

$$= \frac{\text{干渉元の記憶強度}}{\text{着手時手数の差}} \times \text{干渉定数}$$

記憶強度の減少量は干渉元の記憶強度に比例するため、記憶強度が大きな項目は他の項目の記憶強度を大きく減少させる。項目同士の着手時の手数が離れているほど、干渉の度合いが小さくなる。干渉の計算に使用する干渉定数の値は、被験者実験のデータを用いて決定する。

#### 4.2 干渉定数の決定

干渉定数を決定する時、記憶力の高いプレイログと記憶力の低いプレイログをそれぞれ分けて干渉定数のチューニングを行い、記憶力の高い忘れるモデルと記憶力の低い忘れるモデルを構築する。これは、先行研究がソルバの強さによって分類したように、記憶力の良さによって問題の分類を行うためである。

干渉定数を決定した後、人間プレイヤーの短期記憶の挙動を予測できるかどうかの検証を行う。人間プレイヤーの記憶をある程度正しく予測できていることが確認できたら、ソルバに忘れるモデルを導入し、問題の分類を行う。ソルバの強さと記憶力の良さによって、以下の4種類のソルバができる。

- 記憶力が良く、強いソルバ
- 記憶力が良く、弱いソルバ
- 記憶力が悪く、強いソルバ
- 記憶力が悪く、弱いソルバ

これらのソルバに問題を解かせて、それぞれのソルバのクリア率によって問題を評価する。現状では、「記憶力が悪く、弱いソルバ」のクリア率が低く、「記憶力が良く、強いソルバ」のクリア率が高く、かつ「記憶力が悪く、強いソルバ」のクリア率も高いような問題が、良い問題なのではないかと考えている。このような問題は、実力がクリア率に影響を与える問題であり、人間プレイヤーにとって無理な記憶負担を強いることのない問題であると考えている。

分類した問題について、被験者実験によって問題の性質を評価する。記憶負担が大き過ぎないか、難易度は適切か、といった項目についてアンケートを行い、適切な問題生成が行えているか、検証を行う。

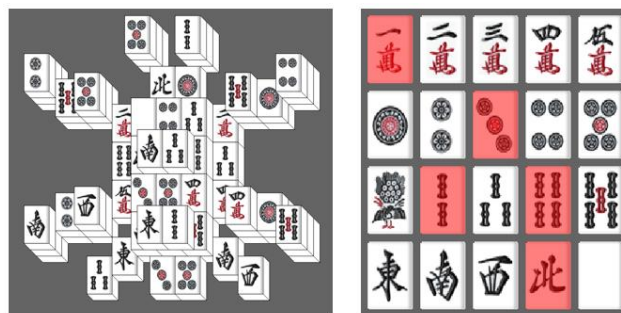


図 6. ゲーム画面と記憶調査画面

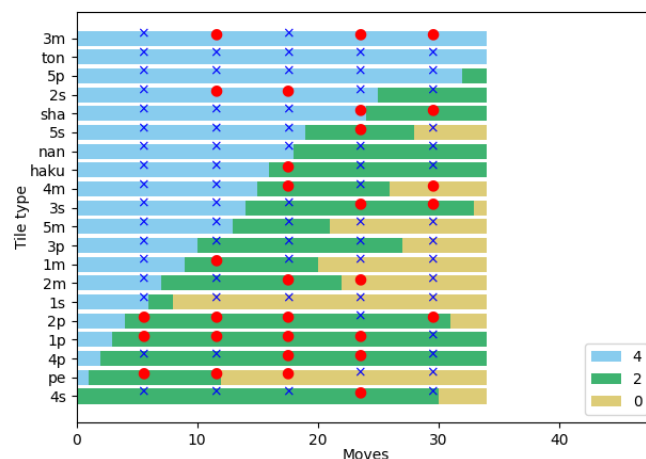


図 7. プレイログの一例

## 5. 人間の忘れ方を調査する被験者実験

はじめに、被験者実験によって人間プレイヤーのプレイログを集めて、どのような忘れ方があるのか、どの程度の牌の数を覚えていられるのか、といった分析を行う。その後、被験者実験のプレイログを用いて忘れるモデルを作成し、モデルの評価を行う。

### 5.1 被験者実験の概要

被験者実験では、被験者に上海ゲームをプレイしてもらい、ゲーム中の着手を5回行うごとに、記憶調査アンケートに回答してもらった。ゲーム画面と記憶調査画面を図6に示す。

記憶調査では、自分が記憶している牌をマウスクリックで選択して回答してもらう。本被験者実験のレイアウト(初期盤面)は牌80枚で構成されているので、使用する牌の種類は20種類となる。使用する牌の種類は図6に示した通りである。

一般的な上海ゲームでは、牌を144枚使用したレイアウトを使用することが多いが、本被験者実験ではゲームの難易度を考慮して、記憶すべき牌の数が減りすぎない、80枚の牌から構成されるレイアウトを使用した。実際のレイアウトは図6の通りである。

## 5.2 被験者実験の結果

被験者実験を行い、8人の被験者から136ゲーム分のプレイログが集まった。

ある1ゲーム分のプレイログをグラフにしたものを図7に示す。グラフの縦軸が牌の種類、横軸がゲームの手数を表している。横向きに伸びている帯グラフはそれぞれの牌の種類に対応しており、その牌が盤面に残っている枚数を表している。帯グラフが水色の時、その牌が盤面に4枚残っていることを表しており、帯グラフが緑色の時、その牌が2枚残っていることを表している。帯グラフが黄色の時、その牌がもう残っていない、つまり0枚であることを表している。たとえば図7のグラフでは、10手目時点では4枚残っている牌が12種類、2枚残っている牌が7種類、0枚の牌が1種類あることがグラフから読み取れる。以後、4枚残っている牌を4枚牌、同様に2枚牌、0枚牌という用語を用いて説明する。

グラフ上の○と×は記憶調査の回答結果を表している。記憶していると回答した牌を○、記憶していないと回答した牌を×として表示している。上海ゲームでは2枚牌のみを記憶しておくことが正しいので、グラフ上の帯グラフが緑色になっている領域を○、それ以外の水色と黄色の領域を×と回答することが望ましい。

プレイヤーごとのヒット率とクリア率の散布図を図8に示す。ヒット率については20~80%の範囲でばらつきがみられたが、クリア率については30~60%の狭い範囲で分布している。

プレイログを分析した結果、いくつかの特徴的な人間らしい短期記憶の挙動が見られた。例を以下に示す。

- **忘れる**：途中まで覚えていた牌を忘れてしまう。
- **覚えれない**：2枚牌が増えた時、最初からその牌を記憶できていない、あるいはわざと記憶しない。
- **似た牌との勘違い**：ある牌を着手した時、その牌とは別の牌を記憶してしまい、本来記憶すべきだった牌を記憶していない。
- **無駄に覚え続ける**：0枚牌を記憶し続ける。ゲームの進行上、不利になることは無いが、記憶領域を圧迫してしまう。
- **諦め**：2枚牌の種類が著しく増えた時、2枚牌を新しく記憶することや、0枚牌になった記憶項目を削除することを諦めてしまう。
- **面倒**：回答することが面倒になってしまい、適当に回答する。

## ヒット率とクリア率の関係

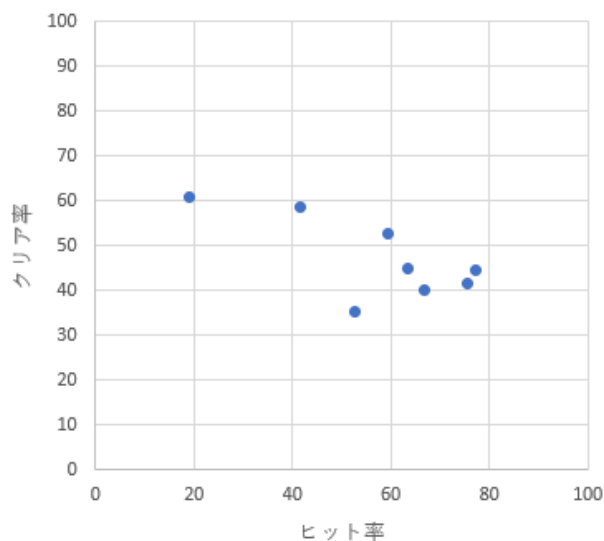


図8. ヒット率とクリア率の散布図

- **思い出し**：一度忘れた牌を思い出す。

以上のような人間らしい忘れ方が見られた。本研究ではまず、「忘れる」と「覚えれない」を再現することを狙う。他の挙動については上記2つの挙動と比較すると発生している頻度が少ないため、まずは上記2つの挙動に絞ってモデルの構築を行う。

## 6. 忘れるモデル

### 6.1 実験方法

被験者実験のデータを用いてグリッドサーチを行うことにより、忘れるモデルの干渉定数の適切な値を求める。先述した、記憶力の高い忘れるモデルと記憶力の低い忘れるモデルを構築するために、記憶力の高い被験者と記憶力の低い被験者のデータをそれぞれ使って、2つの干渉定数を決定する。評価関数として交差エントロピー誤差を用いた。

人間プレイヤーの着手履歴を順に忘れるモデルに入力し、プレイログの記憶調査の回答において、記憶していると答えた牌を1、記憶していないと答えた牌を0として、忘れるモデルのその時点での記憶強度との誤差を求めた。記憶強度の値が1に近いほど、思い出せる確率が高い、すなわち記憶していると答えられる確率が高いということになるため、人間プレイヤーが記憶していると答えた牌は記憶強度が高く、記憶していないと答えた牌は記憶強度が低いという状態が望ましい。

### 6.2 実験結果

グリッドサーチにより記憶力が高いモデルと記憶力が低いモデルの2つについて、それぞれ2つの干渉定数の値を

決定した。データ数は記憶力の低い被験者が 17 ゲーム分、記憶力の高い被験者が 20 ゲーム分である。サーチした範囲は 0.01 から 0.10, それぞれ 0.01 刻みで値を変化させた。グリッドサーチの結果から、それぞれの忘れるモデルの干渉定数を以下のように決定した。

表 1. 干渉定数の値

	順向干渉定数	逆向干渉定数
記憶力が高いモデル	0.02	0.01
記憶力が低いモデル	0.03	0.02

しかし、交差エントロピー誤差の値が最も小さいところで 0.4 程度と、あまり収束していなかった。これは、忘れるモデルが取り除いた牌を一度は記憶することを前提にしていることが原因として考えられる。図 9,10 は人間プレイヤーのプレイログと、同じ着手履歴を読み込ませた際の忘れるモデルのプレイログである。人間プレイヤーの場合は記憶する牌と記憶しない牌が分かれる特徴があり、記憶調査の○が横方向に分布しているような傾向があることがわかる。対して忘れるモデルの場合は、牌を一度は記憶することを前提としているため、満遍なく覚えて満遍なく忘れるような特徴があり、記憶調査の○が斜めに分布しているような傾向がある。このような覚え方、忘れ方の傾向の違いがあるために、現状の忘れるモデルを人間プレイヤーの記憶特性にフィッティングすることは難しい。

以上の結果から、忘れるモデルとは別に、着手を行ったタイミングで、その牌を記憶できるかできないかを予測する「覚えられないモデル」が必要であると考えた。

## 7. 覚えられないモデル

### 7.1 実験方法

覚えられないモデルは教師あり学習を用いて実装する。教師あり学習の手法として、ランダムフォレストを使用した。この覚えられないモデルは人間プレイヤーが着手を行った時、その牌を記憶できるか、記憶できないかを予測するモデルである。

モデルへの入力には着手の直前の記憶調査時点での記憶している牌の枚数と、着手した牌の種類とする。記憶している牌の枚数はそれぞれの牌のカテゴリ (萬子, 筒子, 索子, 字牌) ごとの牌の枚数を 4 次元のベクトルとして入力する。牌の種類は One-Hot 表現に変換して、20 次元のベクトルとして入力する。これら 2 つのデータを連結して、覚えられないモデルへの入力とする。

覚えられないモデルの出力は、その牌を記憶できるか記憶できないかの確率分布である。たとえば、記憶できる確率を 70%, 記憶できない確率を 30% と予測した場合、覚えられないモデルの出力は  $[0.7, 0.3]$  となる。

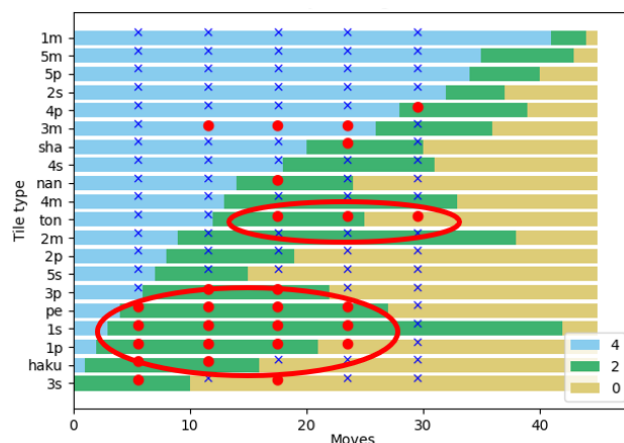


図 9. 人間プレイヤーのプレイログ

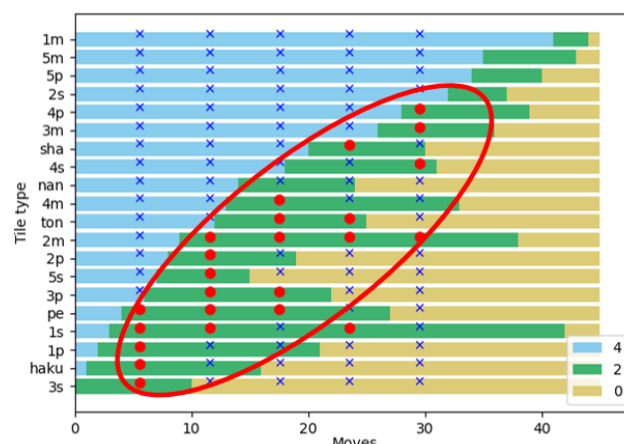


図 10. 忘れるモデルのプレイログ

記憶力の悪い覚えられないモデルと記憶力の良い覚えられないモデルを作成し、人間の記憶調査結果との比較を行う。この比較は「覚えられない率」という指標によって行う。覚えられない率とは、それぞれの記憶調査時点で新しく覚えなければならない牌が存在した時、その牌を記憶できている割合を表す。たとえば、ある記憶調査時点で新しく記憶しなければならない牌が 4 枚あった時、そのうちの 3 枚だけを記憶できていた場合、その記憶調査の覚えられない率は 25% となる。

学習するデータはヒット率によって記憶力が良いものと悪いものに分類した。ヒット率とは、それぞれの記憶調査時点で記憶しなければならない牌のうち、記憶できていた牌の割合を指す。記憶力が悪い覚えられないモデルは、ヒット率が 10% から 30% のデータを学習させた。データ件数は 34 ゲーム分である。記憶力が良い覚えられないモデルは、ヒット率が 70% から 100% のデータを学習させた。データ件数は 33 ゲーム分である。

### 7.2 実験結果

比較した結果を図 11, 12 に示す。グラフの縦軸が覚えられない率、横軸がアンケート番号 (1 回目の記憶調査, 2 回目の記憶調査...) を表す。

記憶力が良いモデルの方はある程度近い予測値を示しているが、記憶力が悪いモデルの方は人間プレイヤーの覚え



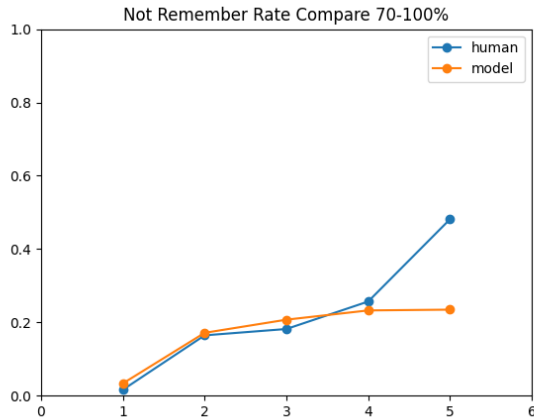


図 11. 覚えない率の比較  
記憶力の悪いモデル

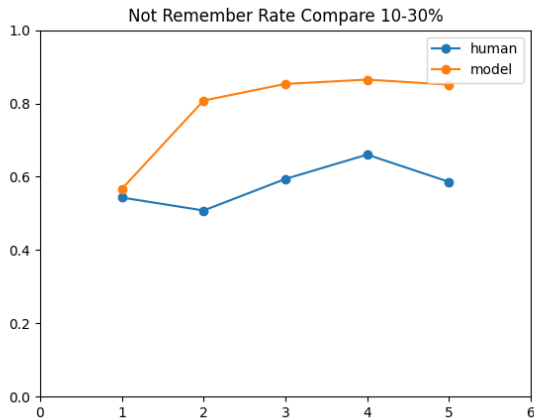


図 12. 覚えない率の比較  
記憶力の悪いモデル

ない率よりも著しく大きな予測値を示している。学習データ数が少ないこと、それに比べて有益な特徴量を与えられていないことから探索失敗につながったと考えており、発表までにはこの点を改善したい。

## 8. おわりに

本研究では人間プレイヤーにとって記憶負担が大きすぎず、適切な難易度の問題を生成することを目指した。そのために先行研究の強さの異なるソルバによる問題生成手法を発展させ、ソルバに人間らしい忘却を取り入れる手法を提案した。短期記憶の連続時間モデルを参考にした忘れるモデルを実装してわかった問題点を解決するために、新たに覚えないモデルを実装し、その挙動を調査した。

本論文で提案したモデルはいずれも人間プレイヤーの短期記憶特徴と高い適合率を示さず、検討の余地が残る結果となった。今後は覚えないモデルの改善を行い、覚えないモデルと忘れるモデルを組み合わせるうえで忘れるモデルのパラメータ調整を行う。

それぞれのモデルが適切に予測を行えることを検証した後、複数のソルバによる問題の分類を行う。生成した問題の特徴を被験者実験によって評価し、目標としていた問題が生成できているか、検証を行う。

## 9. 参考文献

- 宗藤大貴, and 長尾智晴. "進化計算法を用いた詰将棋の自動生成." ゲームプログラミングワークショップ 2019 論文集 2019 (2019): 1-6.
- 長尾卓, and 山本修身. "ヒントの少ない数独パズルの効率的な生成について." 第 84 回全国大会講演論文集 2022.1 (2022): 425-426.
- 大町洋. "強さの異なる人工プレイヤーを用いた, 不完全情報パズルの面白いインスタンス生成." JAIST 修士論文(2014).
- 横井博一. "短期記憶の連続時間モデルの検証." 九州工業大学研究報告. 工学 71 (1999): 29-41.
- 藤平啓汰. "プレイヤーを自然に誘導する 2D ゲームマップの自動生成." JAIST 修士論文 (2022).