

四川省パズルにおける状態空間構造を利用した難易度判定

是川 空^{1,a)} 小谷 善行²

受付日 2011年8月31日, 採録日 2012年3月2日

概要: 本研究ではパズルの思考過程のモデル化の研究として, 四川省と呼ばれる麻雀牌を利用したパズルの難易度推定を行う。これは四川省パズルの問題に対して, 計算機によって算出された状態空間が持つ特徴量と, 人間が実際に問題を解いているときの正答率や解答時間などの難易度に関わる項目との間にどのような相関があるかを測るものである。四川省パズルの持つ状態空間は解状態への経路を持つ状態と持たない状態の2つに分割することができる。解状態への経路を持つ局面を solvable 局面, 持たない局面を unsolvable 局面と定義し, 問題から局面構造の特徴として平均可能手数, solvable 局面と unsolvable 局面の割合, 平均 unsolvable 遷移パス割合, unsolvable 局面空間の最長経路の4種類の特徴量を抽出した。それに対し人間のパズルを解く思考過程を得る方法として, Web 上に四川省プログラムを設置しデータを収集した。収集されたデータから各問題に対する解答時間と正答率に対する難易度指標値を算出した。問題から得られた特徴と収集したデータから算出した難易度指標値の間の相関を測るため, 回帰分析によって特徴から難易度指標値を推定する予測式を得た。この結果より平均解答時間を推定するには平均可能手数が大きく寄与していることが分かった。一方で正答率は平均可能手数に加え状態空間構造の特徴を回帰式に導入することで相関が向上した。

キーワード: パズル, 四川省パズル, 解探索アルゴリズム, 難易度判定, 状態空間構造

Difficulty Rating of Shisen-sho Puzzle by a Structure of State Space

TAKASHI KOREKAWA^{1,a)} YOSHIYUKI KOTANI²

Received: August 31, 2011, Accepted: March 2, 2012

Abstract: We discuss and evaluate metrics for difficulty rating of the Shisen-sho puzzle to model the human thinking process. We measure the correlation between the metrics for computers such as information of the state spaces and the features which are related to the difficulty of the problems such as the accuracies or the answering time of humans. State space of the Shisen-sho puzzle can be classified into two parts: one has the path to answer state and the other does not have it. We define the former as solvable state, and the latter as unsolvable state. We extracted four metrics, the average number of available moves, the rate of solvable states, the average length of the longest path from a solvable state to an unsolvable state, and the distance of the longest path in the unsolvable state space, from each problem. In addition, we collected the actual data which will help us to model the human thinking process via the game we posted on the website and got the averaged accuracies and the averaged answering time of humans for each problem. We analyzed the correlation between the metrics from the state space and that from human data. The experiment shows the average number of available moves contributes greatly to presume the average time to be solved. Moreover, the correlation of the accuracy improved by introducing the metrics from the state space as well as the average number of available moves.

Keywords: puzzle, Shisen-sho puzzle, search algorithm, difficulty rating, structure of state space

¹ 東京農工大学工学府電子情報工学専攻
Department of Electronic and Information Engineering,
Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agri-
culture and Technology, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan

² 東京農工大学工学研究院先端情報科学部門

Division of Advanced Information Technology & Computer
Science, Institute of Engineering, Tokyo University of Agri-
culture and Technology, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan
a) no_color_ku@yahoo.co.jp

1. はじめに

本研究ではパズルの思考過程のモデル化の研究として、四川省と呼ばれるパズルの難易度推定を行う。四川省パズルは麻雀牌を利用したパズルの一種で、並べられた牌を一定のルールに従い逐次的に取り除き、すべての牌を取り除くことが目的である。四川省パズルの難易度推定のため、初期状態の牌の並べ方を問題とし、問題ごとに状態空間が持つ特徴量を計算機によって算出し、人間に実際に問題を解いてもらい、正答率や解答時間などの難易度に関わる項目を測定し、その間にどのような相関があるかを測る。計算機によって問題の状態空間の特徴である平均可能手数、unsolvable局面の割合、平均 unsolvable 遷移パス割合、unsolvable 局面空間の最長経路の長さを算出し、四川省プログラムを使った Web 上における被験者実験から得られた平均解答時間と正答率に対して解析を行ったところ、算出した 4 種類の特徴と解答時間に対して 0.700、正答率に対しては 0.519 の相関係数を持つ回帰式を得た。

2. パズル研究と難易度

2.1 四川省パズル

四川省は 1 人用のパズルゲームであり、多くのゲーム機などでソフトが制作され広く遊ばれている*1。パズルの特徴としては完全情報で確定性があり、有限の空間を持つ。麻雀牌を利用したゲームであるが必ずしも麻雀牌を利用しなければならないわけではなく、同じ種類の牌が 4 つある複数の牌セットを用いる。牌の大きさを単位とした格子状に、使用する牌をすべて並べた盤面を初期状態 (図 1) とし、ルールに沿って牌を取り除き、最終的にすべての牌を取り除いた状態を得ることがパズルの目的である。

盤面上の同じ種類の牌 2 つの組合せが以下の条件のいずれかを満たしている場合、その 2 つの牌をペアとして 1 組選んで盤面から同時に取り除く (単純に取る、ともいう) ことができる。

12	10	02	07	08	04	01	12	15	06
07	04	05	06	03	04	06	01	02	07
03	02	07	01	08	09	10	10	11	03
09	11	12	13	11	13	13	01	05	09
13	05	14	11	04	12	14	14	14	09
05	15	02	10	08	15	15	03	06	08

図 1 四川省パズルの初期状態

Fig. 1 An initial state of Shisen-sho puzzle.

*1 「二角取り」, 「万里の長城」などの名前でも呼ばれることもある。

- 格子状の盤面で上下または左右に 2 つの牌が隣り合っている。
- 盤面の格子の水平、垂直に沿った 3 本以下の連続する直線分を引いたとき、その線の上に他の牌が存在しないような線分を 1 本以上引ける。

盤面上で取ることのできるペアには引く線の数によって図 2 のようなパターンがある。

盤面の初期状態と牌を取る順番によっては、これ以上取ることができるペアがなくなってしまう「手詰まり」状態に陥ることがある (図 3)。四川省パズルの目的はすべての牌を盤面から取り除いた状態を得ることであることから、このような状態になった場合、目的を達成できずプレイヤーの敗北となる。初期盤面を生成した時点ですべての牌を取り除く手順が存在せず、問題として成立していない盤面も存在する。

2.2 パズルと難易度研究の背景

2.2.1 難易度研究

人間が行っている問題解決のための思考過程モデルを得るために、パズルなどの問題を解く思考過程をモデル化する研究がさかんに行われている。パズルにおける思考過程は、問題と目的が明確に示された環境の中で問題解決が行

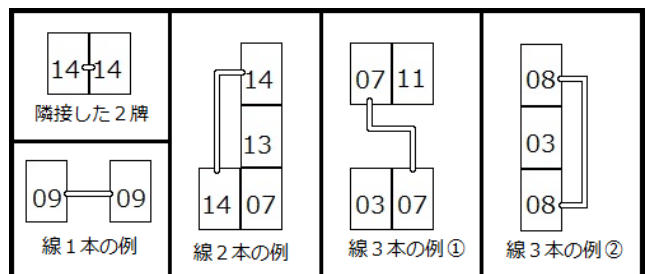


図 2 牌ペアの取れる条件の例

Fig. 2 Examples of condition that tile can be taken.

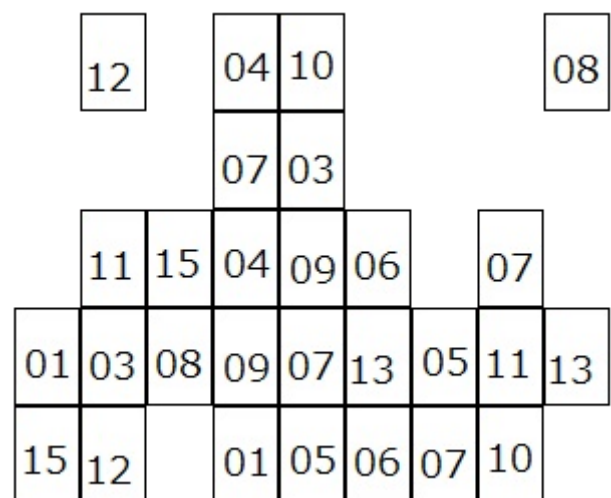


図 3 手詰まり状態の例

Fig. 3 Example of a deadlock state.

われ、問題外の知識を用いないのでモデル化しやすいからである。

本研究ではパズルの思考過程モデルの中でも特に問題の難易度判定モデルに着目する。今までにもパズルの難易度に関するいくつかの研究が行われている。具体例として、ハノイの塔 [1], 9 連環 [2] のような包含関係を利用したものや、数独 [3], [4], [5] のように問題の解経路に含まれている論理の難しさを測るもの、15 パズル [6] や川渡り問題 [7], 倉庫番 [8], [9] のように山登り的によりゴールへ近い方向へ局面を進めるモデルを用いたものなどが存在する。

四川省パズルの問題は盤面に牌を並べた初期状態で与えられる。本研究の目的は、問題から計算した問題の特徴と、人間が実際に問題を解いたデータから得られた難易度に関する指標を照らし合わせ相関を得ることである。

四川省パズルでは問題のサイズと並べ方を固定した場合、解答を得るまでに必要とする牌を取るステップ数が牌数の半分となり、すべての問題で等しい。盤面上において牌ペアが取れるかどうかの判定は非常に単純であるため、牌の取りかたによる難易度の重みは非常に小さいと考えられる。また、問題はつねに解へ近づく方向へ遷移し、取る牌の手順によって局面は大きく変化するため山登り的なアプローチは通用しない。

解答者は問題の目的を達成するために、つねに手詰まりを避ける思考を行わなければならない。このような思考の特徴を利用することは有用であると考えられる。そこで本研究では問題の状態の遷移をパスとした状態空間構造を利用し、問題の持つ手詰まりの構造に関する特徴を難易度の指標として利用する。

2.2.2 難易度の指標データ

四川省パズルでは同じ大きさの問題に対して難易度を割り振ったような問題集は存在していない。そこで四川省パズルの難易度の指標として、人間が問題を解答する際の行動記録を用いる。本研究では多様な人間が解答を行ったデータを採取する方法として、問題集を解答可能なプログラムを Web 上で公開し不特定多数の人間が問題を解いたデータを収集する。この方法は被験者を募って問題集を解かせる実験に比べ、実験データの質は低下するが多くのデータが収集できることが期待できる。

3. 四川省パズルの問題構造

四川省パズルでは人間は盤面上から取れる牌を探し出し、その中でどの牌ペアを次に取るかを選択していく。牌を取った後に得られた局面に対して逐次的に取る牌を決定していく過程を繰り返すことで初期状態から解状態までの解答経路 1 つを発見することが四川省パズルの目的であると考えられる。四川省パズルの状態を表す局面を定義すると、局面の遷移はその状態で取れる牌のペアを 1 つ選び盤面上から取ることに相当する。局面から取れる

牌が複数ある場合、遷移先は分岐しそれぞれ別の局面に遷移する。そこで四川省パズルの状態空間は取った牌の数が初期局面からの遷移数に等しい有向グラフで表される。人間はそれぞれの局面において子局面のどれに遷移するかを選択し、状態空間を下に移動していく。牌の取り方によっては違う経路でまったく同じ局面にたどりつくこともある。初期局面から末端ノードである局面までの経路 1 つは人間が解答を終えた際の解答手順に相当する。すべての局面は初期局面からの経路を 1 つ以上持つ。末端ノードの局面は解局面か手詰まり局面であり、手詰まり局面は異なる深さに存在したり、複数存在したりすることがある。

4. 問題からの特徴抽出

四川省パズルは初期状態によって状態空間の構造が大きく変わる。状態空間の構造は人間が問題を解いている過程を構造的に表し、探索手法などによって解析が可能である。本章では難易度推定に有用であると考えられる特徴とそれを状態空間の構造から取り出す方法について述べる。

4.1 可能手数

局面におけるプレイヤーの可能手は盤面の中で条件を満たし取り除くことができる牌のペアである。四川省パズルの性質上、取るペアと同じ種類で別の組合せのペア以外の可能手は次の局面でも必ず可能手になっている。現局面と次の局面での可能手数は大きく変動せず、現局面で可能手が多い場合、問題を解きやすいということが考えられる。

問題の状態空間を探索し、各局面において可能手数を測定した。この可能手数の平均値を問題の特徴として利用する。今回の実験では、状態空間全体での平均可能手数とあわせて、状態空間を初期局面からの距離によって 2 分割し、前半と後半のそれぞれで平均可能手数を求めている。

4.2 solvable 局面と unsolvable 局面

まず四川省パズルの状態空間中の局面を、solvable 局面と unsolvable 局面に分類する (図 4)。solvable 局面とは解局面への経路を 1 つ以上持つ局面と解局面そのものことであり、unsolvable 局面とは解局面への経路を 1 つも持たない局面と手詰まり局面のことである。プレイヤーが問題を解いている際に unsolvable 局面にたどりついた場合、そこからどのような手順で牌を取っていても必ず手詰まりとなり、ゲームに敗北する。

プレイヤーが問題を手詰まりにならないように解くためには、局面の分岐の中からつねに solvable 局面を選択していく必要がある。局面が solvable か unsolvable かについては計算可能ではあるが自明ではない。よってプレイヤーが solvable 局面から unsolvable 局面への遷移がある局面で正しい判断ができるかという点は目的を達成する目安となる。

問題の状態空間を付録 A に示したアルゴリズムで深さ

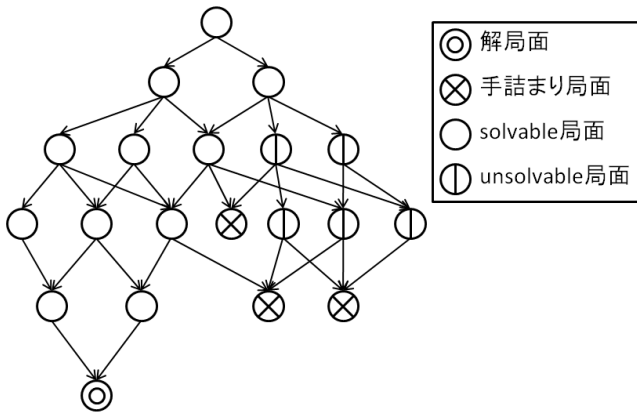


図 4 四川省パズルの状態空間構造
Fig. 4 Structure of state space for Shisen-sho puzzle.

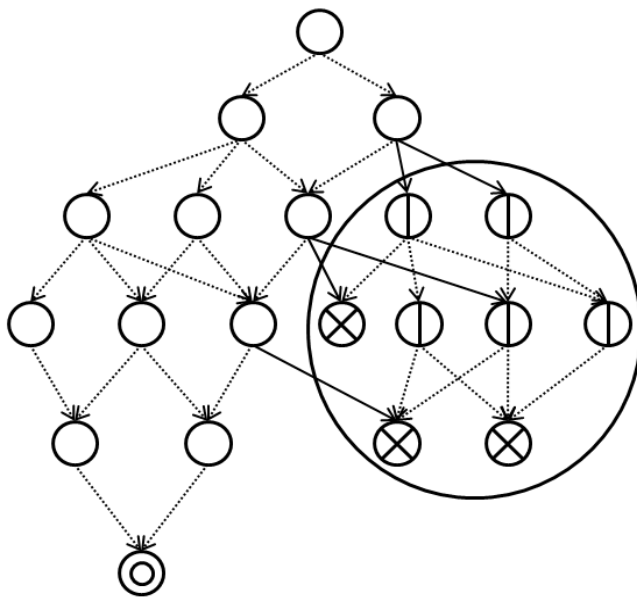


図 5 solvable 局面と unsolvable 局面
Fig. 5 Solvable states and unsolvable states.

優先探索を行い、各局面が solvable 局面か unsolvable 局面かを計算し、以下の3つの情報を問題の特徴として取りだした。

4.2.1 solvable 局面と unsolvable 局面の割合

問題の初期状態をルートとした状態空間において、局面を solvable 局面と unsolvable 局面に分類したときの全局面数に対する solvable 局面数の割合を計算する。図 5 では○で囲った内側と外側の局面の数の割合である。状態空間中の solvable 局面の割合が小さい場合、unsolvable 局面へ向かう可能性が高くなるため、手詰まりを避けるのがより難しくなると考えられる。

4.2.2 平均 unsolvable 遷移パス割合

状態空間の中で solvable 局面から unsolvable 局面へ遷移するようなパスが全パス中で占める割合を計算する。四川省パズルにおいて、パズルに敗北するのは手詰まり局面へ到達したときではなく、solvable 局面から unsolvable 局面

へ遷移したときである。unsolvable 局面からは解局面への経路が存在しないため、かならず手詰まり局面へたどりつくからである。そこで状態空間から solvable 局面を取りだし、その局面の可能手による遷移後の局面が unsolvable 局面である可能手の数の総和を計算し、全局面の分岐数に占める割合を求める。図 5 における実線で示した局面の遷移パスの割合である。局面の遷移に unsolvable 局面への遷移が多い問題では手詰まりを起こしやすく難しくなると考えられる。

4.2.3 unsolvable 局面のみで構成された状態空間における最長経路の長さ

状態空間の中から unsolvable 局面のみで構成された部分空間を得る。空間中の局面遷移のパスの中で最も長い経路を最長経路とし、経路における遷移の数を長さとする。これは solvable 局面から unsolvable 局面への遷移があるとき、そこから実際の手詰まり局面への牌を取るステップ数が最も多い経路を表している。次の可能手を選択する際にその局面から実際の手詰まり局面へのステップ数が多いほど、その経路を予想しにくくなり unsolvable 局面への経路を選択してしまう場合が増えると考えられる。図 5 では○で囲んだ状態空間の部分において最長のパスとなるような解経路を探し、その長さを測定する。手詰まり局面を判断することが問題の目的を達成するために必要であるため、難易度の指標として有用であると考えられる。

5. 四川省パズルのプレイ実験

四川省パズルの特徴と難易度の関係を測る指標として人間がパズルを解く行動記録をもとに難易度のデータを作成する。今回は人間の行動記録を収集する手段として、Web上にブラウザで閲覧可能な状態にした四川省プログラムを用意し、不特定多数のプレイヤーにゲームをプレイしてもらいその過程を記録した。プログラムが使用する問題集として15種類の牌60個を10×6の格子状に敷き詰めた形状の盤面をランダムに生成し100問用意した*2。プレイヤーごとに問題の出題順はランダムに設定してある。問題の途中でプレイヤーは盤面を初期状態に戻す、現在解答中の問題を諦めるなどの行動をとることができる。また手詰まり状態になった場合も初期状態に戻すか諦めるかを選択することになる。

この実験により得られたデータから、途中で操作を3分以上中断したデータと、ゲーム開始直後に問題を諦めたデータを事前処理として取り除き、残りのデータからプレイヤー数のべ90人分、プレイ回数1,647問分(解答時間:約57時間分)の行動記録データを収集した。行動記録データには牌を取った手順や各ステップにおける思考時間、手詰まりになった回数や解答へたどりついた回数、問題の5段階主観評価が含まれている。

*2 解経路が存在しない問題として成立していない問題でないことを確かめてある。

6. 難易度解析

プレイ実験のために作成した 100 問の四川省パズル問題集について、4 章で示した 4 種類の特徴から 6 つの変数として、

- ① 平均可能手数：全体
 - ② 平均可能手数：前半
 - ③ 平均可能手数：後半
 - ④ solvable 局面の割合
 - ⑤ 平均 unsolvable 遷移パス割合
 - ⑥ unsolvable 空間の最長経路の長さ
- をそれぞれ得た。

また四川省パズルのプレイ実験におけるログから各問題の難易度指標値を得る。Web 上におけるプレイ実験は不特定多数の試験者による自由参加でのプレイデータ収集のため、各々のプレイヤーの事前知識や習熟度を確認したり、それらを揃えるために十分なチュートリアルを行ったりすることが困難である。そのため、四川省パズルへの習熟度が大きく異なるプレイヤーのデータが混在して収集されることになる。一方でプレイヤーはランダムに選ばれた出題順で好きな数だけ問題をプレイするため、プレイヤーごとにプレイしていない問題や複数回プレイしている問題が出現する。このため各難易度指標データは潜在的にどの程度の習熟度のプレイヤーが解答したかというデータを持ち、問題の難易度推定を行う際にノイズとなる。この問題を緩和するために、各データにおいて、どの程度の習熟度のプレイヤーによ

表 1 問題から抽出した 6 つの特徴と難易度指標の相関

Table 1 Correlations between 6 metrics and measures of difficulties.

説明変数	目的変数	重相関	自由度調整済み決定係数
①	平均解答時間	0.652	0.420
②	平均解答時間	0.674	0.449
③	平均解答時間	0.648	0.414
②③	平均解答時間	0.683	0.455
④	平均解答時間	0.018	-0.010
⑤	平均解答時間	0.088	-0.002
⑥	平均解答時間	0.163	0.017
②③④⑤⑥	平均解答時間	0.700	0.463
①	正答率	0.389	0.143
②	正答率	0.401	0.152
③	正答率	0.391	0.145
②③	正答率	0.408	0.149
④	正答率	0.217	0.037
⑤	正答率	0.260	0.058
⑥	正答率	0.294	0.077
②③④⑤⑥	正答率	0.519	0.230

るデータかを加味することとする。収集したデータ中の測定値からプレイヤーごとに解答時間の平均値と正答率を求め、各データにおいて、測定値から平均値を引いた値を難易度指標データとする。この難易度指標データを問題ごとに平均値を求めて、それぞれ時間指標値、正答率指標値といった難易度指標値として用いる。

さらに事前実験として平均可能手数が前半と後半の分割に用いる値を、説明変数として前半と後半の両方を用いたものと指標値の相関が高かった値から求め、13 とした。

平均解答時間または正答率を目的変数としたとき、6 つのそれぞれの特徴による重回帰分析と、平均可能手数の前半と後半の組合せおよび②～⑥の特徴による重回帰分析によって相関を求めた(表 1)。なお、説明変数の種類の数が多いほど重相関の値は良くなる傾向があるため、説明変数の数によって自由度を調整した決定係数である自由度調整済み決定係数を併記する。また②～⑥の特徴を用いた重回帰分析によって得られた回帰式による推定値を X 軸、プレイ実験によって得られた測定値を Y 軸において問題ごとの値をプロットしたものを図 6 および図 7 に示す。

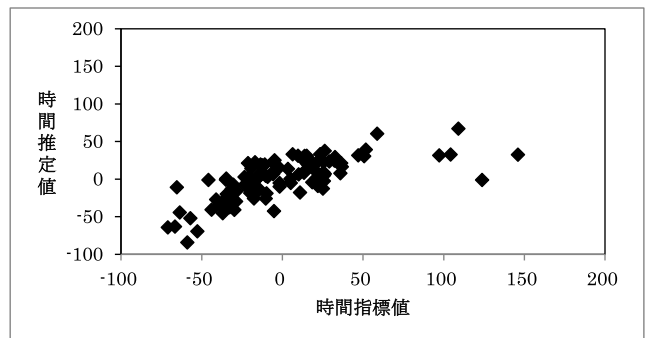


図 6 変数②～⑥の回帰式による推定値と測定値による平均解答時間の散布図

Fig. 6 Scatter chart between measured value and prediction value of average time by ②-⑥ metrics.

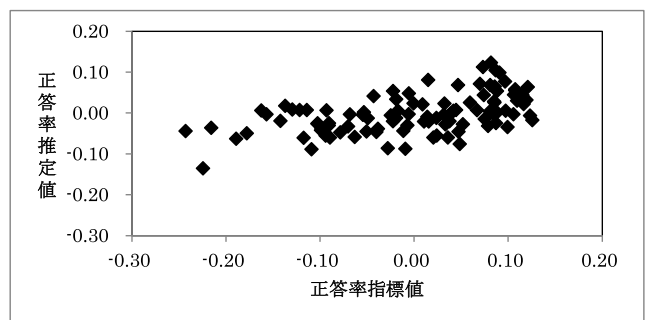


図 7 変数②～⑥の回帰式による推定値と測定値による正答率の散布図

Fig. 7 Scatter chart between measured value and prediction value of accuracy by ②-⑥ metrics.

7. 考察

四川省パズルは状態空間の構造を解析することにより局面が solvable か unsolvable かの明確な判断が可能である。問題の正答率に焦点を当てたとき、状態空間中の solvable 局面と unsolvable 局面の特徴が大きく関係してくると考えられる。状態空間をたどる遷移が同確率で起こると仮定すると、分岐していく局面の性質から、構造の浅い部分にある局面ほどその局面にたどりつく可能性が高い。また、可能手数は前半には盤面の進行に合わせて増大し、後半に入ると減少する傾向がある。実験結果の①と②と③を比較すると、全体の平均可能手を用いた相関よりも、前半と後半に分けた平均可能手の方が相関は大きい。②と③はもう片方のデータを含んでいないため①に比べると情報が少ないはずだが、①より大きい相関が得られていることから、先述のような可能手数の変化量をうまく分割できたためだと考えられる。また、①と②③の結果を比較すると、②③でより大きい相関と自由度調整済み決定係数を得ることで、深さによる変数の重みづけがうまくいったことが確認できる。

問題から得られた6つの特徴と難易度解析の結果より、6つの特徴の中でも局面の平均可能手数が問題の難易度の指標において大きな比重を占めていることが分かる。特に問題の平均解答時間については②③のみの回帰式の相関が0.683であり、②～⑥の変数の回帰式の相関0.700に匹敵している。局面の可能手数が多問題では解答者が取れる箇所を探す時間が少なく済むため、可能手数は平均解答時間に大きく寄与していると考えられる。一方で、問題の正答率については②③のみの回帰式の相関が0.408であるのに対し、残り④～⑥の特徴を加えた回帰式の相関は0.519まで向上している。④～⑥の特徴は問題の状態空間から手詰まり局面についての特徴を得たものであり、正答率の相関の向上に寄与していると考えられる。

より多くの実験データを得るためにWebを利用したプレイ実験は有用だった。被験者を募って行う実験では被験者の習熟度の調整などが行いやすく、より質の高いデータを得ることが可能であるが、今回の実験のように多くの問題に多数のプレイ回数を必要とするような実験では質よりも量が重視されるべきである。問題の特徴の種類を増やしたり、問題集に実際の四川省パズルの難易度分布を反映させたりするには問題数を増やす必要があり、問題が持つ指標項目の真値に測定値を近づけるためには各問題のプレイ回数を増やす必要がある。また問題サイズの拡大によってより特徴の差がある問題を用いることができると考えられる。今後より詳しい問題の特徴を難易度判定に組み込むためには以上のようなプレイ実験の拡大と、より多くの行動記録の収集が必要となる。

8. おわりに

本研究ではパズルの思考過程のモデル化の研究として、四川省パズルと呼ばれるパズルの難易度推定を行った。四川省パズルが持つ状態空間を solvable 局面と unsolvable 局面の2つに分類し、状態空間から問題の手詰まりの特徴を算出した。またWeb上に設置した四川省プログラムを利用して人間が実際に問題を解いたデータを多く収集し、問題の解答時間や正答率などの難易度に関わる項目のデータを収集した。この2つのデータについて解析を行ったところ、平均可能手数、solvable 局面の割合、平均 unsolvable 遷移パス割合、unsolvable 空間の最長経路の長さの4つの特徴を利用することで、平均解答時間に対して0.700、正答率に対して0.519の相関を持つ回帰式を得た。四川省パズルにおいて平均解答時間を推定するためには平均可能手数が重要である。また正答率においては平均可能手数に加えて solvable 局面に関する特徴を加えることでより精度の高い推定を行うことができる。

今後の展望としては、

- 状態空間の特徴に深さの重みをつけた特徴を利用することでより精度の高い難易度判定システムを得ることができると考えられる。
- 四川省パズルの問題が持っている難易度分布をより正確に反映するため、事前に難易度推定を行った問題集の使用、より特徴の差が表れると考えられる大きな問題での実験、また問題数の増強が求められる。
- 問題数の増加への対応や、難易度指標データの精度向上のため、Web上でのプレイ実験によるより多くのデータ収集が必要である。
- 問題中に出現する牌のパターンを用いた特徴を利用する。頻出する問題を手詰まりにしやすい盤面パターンを作成し、パターンの有無や個数を特徴に用いて難易度との関連を図る。
- 上海などのパズルも一部の不完全情報を除いてほとんど同様の状態空間を持っており、本手法の応用が可能であると考えられる。
- 難易度推定システムを応用した問題集作成システム。プレイヤーの問題への習熟度に合わせて難易度を調整するシステムへ応用が可能である。

などがあげられる。

参考文献

- [1] Kotovsky, K. and Simon, H.: Why are some problems hard? Evidence from tower of Hanoi, *Cognitive Psychology*, Vol.17, No.2, pp.248-294 (1985).
- [2] Kotovsky, K. and Simon, H.: What Makes Some Problems Really Hard: Explorations in the Problem Space of Difficulty, *Cognitive Psychology*, Vol.22, No.2, pp.143-183 (1990).

- [3] Petr, J. and Radek, P.: Human problem solving: Sudoku case study, Technical Report FIMU-RS-2011-01, Masaryk University Brno. (2011).
- [4] Radek, P.: Difficulty Rating of Sudoku Puzzles by a Computational Model, *24th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference 2011*, pp.434–439 (2011).
- [5] Martin, H. and Truong, H.-M.: SudokuSat-A Tool for Analyzing Difficult Sudoku Puzzles, *Tools and Applications with Artificial Intelligence*, Koutsojannis, C. and Sirmakessis, S. (Eds.), Vol.166 of Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, Berlin (2009).
- [6] Zygmunt, P. and Li, Z.: Solving combinatorial problems: The 15-puzzle, *Memory and Cognition*, Vol.33, No.6, pp.1069–1084 (2005).
- [7] Greeno, J.G.: Hobbits and orcs: Acquisition of a sequential concept, *Cognitive Psychology*, Vol.6, No.2, pp.270–292 (1974).
- [8] Petr, J. and Radek, P.: Human Problem Solving: Sokoban Case Study, Technical Report FIMU-RS-2010-01, Masaryk University Brno. (2011).
- [9] Petr, J. and Radek, P.: Difficulty Rating of Sokoban Puzzle, *STAIRS 2010, Proc. 5th Starting AI Researchers' Symposium*, pp.140–150 (2010).

付 録

A.1 solvable 局面判別アルゴリズム

```

void solvable_distance_search(){
    problem=load_problem(p);           //問題の読み込み
    solvable_distance(problem, initial_position); //初期局面から探索開始
}

int solvable_distance(position){
    position.distance=∞;                //初期値として解局面への距離を∞に設定
    if(position.move.length!=0){       //この局面に可能手がある場合
        for(each position.move){       //局面からの可能手を全て列挙
            next_position=position.do_move(move); //可能手から次局面を生成
            if(solvable_distance(next_position)==0){ //次局面が solvable 局面である
                position.distance=0; //この局面も solvable 局面
            } else if(solvable_distance(next_position)<position.distance){ //次局面が unsolvable 局面かつ, 現局面よりも手詰まりからの距離が短い
                position.distance=solvable_distance(next_position)+1; //現局面の手詰まりからの距離は, 子局面の距離に 1 を加えたもの
            }
        }
    } else {
        if(position.last_hai==0){ //可能手がなく, 残り牌が無いので解状態
            position.distance=0; //この局面は solvable 局面
        } else {
            position.distance=1; //手詰まり局面
        }
    }
    output(position, position.distance); //この局面の値を出力
    return position.distance;
}

```




是川 空 (学生会員)

2008年東京農工大学工学府博士前期課程修了。現在、同工学府博士後期課程在学中。パズルの解法、思考過程に関連した人工知能の研究に従事。



小谷 善行 (正会員)

東京農工大学大学院工学系研究科情報工学専攻教授。1977年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了，工学博士。東京農工大学講師・助教授を経て，1994年より現職。コンピュータ将棋協会設立，12年間会長，現，副会長。東京農工大学情報工学科西村コンピュータコレクション（情報処理学会分散コンピュータ博物館）世話人。論文誌編集委員，ゲーム情報研究会主査等歴任。ゲームシステム・自然言語における学習・知識獲得・創造性の研究に従事している。