迷路の構造を記述するための新たな特徴量の提案と特徴量同士の 関係性の考察

今村隆輝1 小島俊輔2 木原久美子3

概要:迷路の構造は最も基本的な構造である直線や分岐点などの特徴的なマスの数で記述されてきた。しかし、マスが連結したものである迷路の構造をマスの数で記述するのは難しい。本研究では、迷路の構造を記述するための新たな特徴量の提案した。正解の経路(正道)、間違いの経路(誤道)、正解の経路で2分された誤道の部分領域の3つの2次的な構造を定義し、それぞれの構造を記述する特徴量を提案した。提案した特徴量について迷路の大きさの変化に伴う分布の変化を解析した。さらに、提案した特徴量が迷路の構造を記述するのにどのような関係性を持つのかについて考察したところ、正道の曲がり角の数と誤道の部分領域の総経路長比によって正解の経路の形状が表現され、誤道の周縁長の合計によって誤道のコンパクトさが表現されることが分かった。

キーワード:迷路、構造、迷路サイズ、正道、誤道、特徴量、2次的な構造、パズル、ゲーム

Proposal of New Features to Describe the Structure of Mazes and Disscusion of Relationship between Features

RYUKI IMAMURA¹ SHUNSUKE OSHIMA² KUMIKO KIHARA³

Abstract: Maze structure has been described by the number of component cells that have structural features, called basic property. However, it was difficult to identify the maze structure from the differences in statistics about the number of these cells. In this study, we proposed new features quantity for maze structure identification.

1. はじめに

迷路は、古くからパズル遊びのツールとして使われてきた.迷路の遊び方は単純にスタートからゴールまでの解を探索する方法だけではない.スタートからゴールまでの解を求めることで絵や文字が浮かび上がる絵画的迷路[1][2][3]や迷路の各マスに漢字が割り振られ、画数の多いマスにのみ進むことができるというような迷路に更に制限を掛けたもの[4][5]など様々なパズル遊びのツールになっている.また近年ではゲームのダンジョンにも迷路は用いられており、ゲームで迷路を選定する際には、迷路を解く場合に重要になる要素である正解の経路の複雑さや迷路がどのように解かれるのかというような観点が重要視されている[6][7].

現在では迷路を自動生成するアルゴリズムも多数開発されている[8][9]. 迷路生成アルゴリズムは、一般的にグリッドグラフからの最小全域木を生成する手法が用いられており、アルゴリズムに依存した特徴のある迷路が生成される. 迷路生成アルゴリズムが生成する迷路の特徴を分析するために最も基本的な構造である直線や分岐点などのマスの数が用いられている[8][10]. Kim らは直線, 分岐点(T字,

しかし、本研究でも示すようにマスの数ではマスが連続した一連の構造である迷路の構造を記述するのは難しい. 例えば、ゲームのダンジョンに用いる迷路を選定する際には正解の経路や迷路全体の構造などのマスの数では表すことのできない迷路の構造は重要な基準となる. 迷路の構造を詳細に記述できれば、迷路の利用者はより自らの目的に即した迷路を選択できるであろう.

そこで本研究では、迷路全体の形状や、正解の経路の形状といった迷路の構造を表現するために、迷路の構造を定義し、迷路の構造を記述する特徴量を提案する。具体的には、正解の経路(正道)、間違いの経路(誤道)、正道によって2分される誤道の部分領域を迷路の2次的な構造として定義し、それぞれの構造を記述する特徴量を提案する。そして、その特徴量の性質と特徴量が記述する迷路の形を

十字),曲がり角,行き止まりのマスを Basic Property とし 3×3 , 4×4 , 5×5 のグリッドグラフから生成される全ての 最小全域木の特徴を分析し,新たな迷路生成アルゴリズム を提案した。また,Buck は迷路の自動生成アルゴリズムの 特徴を行き止まりの数,曲がり角の数,T字の数,十字の数の観点で比較しアルゴリズムが生成する迷路の差を明らかにした。

¹ 熊本高等専門学校専攻科 生産システム専攻

Production Systems Engineering Course, Advanced Courses, National Institute of Technology, Kumamoto College

² 熊本高等専門学校 リベラルアーツ系

Faculty of Liberal Studies, National Institute of Technology, Kumamoto College

³ 熊本高等専門学校 拠点化プロジェクト系/生物化学システム工学科 Faculty of Project Centers / Department of Biological and Chemical Systems Engineering, National Institute of Technology, Kumamoto College

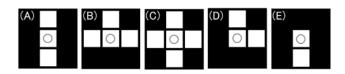


図 1 迷路の基本構造

分析することで、迷路の構造を記述する際の特徴量の関係 性を考察する.

2. 対象とする迷路

本研究で対象とした迷路の条件を以下に示した.

- 迷路を構成する最小単位をマスと呼び,通行できるマスを経路,通行できないマスを壁と呼ぶ。
- 1マスの形状は正方形である. また,経路と壁の1マスの大きさは同じものとする.
- 迷路は外周が1マス分壁で覆われているものとした.
- 迷路のサイズは、実質的な迷路の範囲を示すため、外周を覆うの壁のすぐ内側の縦と横のマス数で定義した.本研究では縦と横のマス数が同じ n×n マスの迷路を用いた.以降 n×n の迷路のサイズを迷路サイズ n と表す.また n は必ず奇数となる.例えば、図 2(a)の迷路は迷路サイズ 17 である.
- スタートとゴールを結ぶ解が 1 通りとした. 迷路中に ループ (閉路) を含まないことを意味する.
- 迷路中には到達できない道は存在しないものとした. また,迷路の道の幅は1マスのみで2マス以上の広い 空間は存在しないものとした.

本研究では、これらの条件を満たすことができる迷路を迷路生成アルゴリズムを用いて生成した。迷路生成アルゴリズムは AldousBroder, Division, GrowingTree, Kruskal, Prims, Sidewinder の代表的な6つを用いた。迷路の生成には Python の迷路生成ライブラリである Mazelib を用いた.

迷路サイズ 5 から迷路サイズ 49 までの 23 のサイズを迷路を生成した. 迷路の数は各サイズで 600 個生成した.

3. 迷路の特徴量の定義と提案

3.1 迷路の基本特徴量

迷路の基本特徴量は迷路の最小構成単位であるマスの特徴を定義した.迷路のマスは接続するマスの数や位置によって直線,分岐点(十字,T字),曲がり角,行き止まりの5つの単位構造に分類される(図1).迷路の基本特徴量は迷路中の経路がどのようなマスの割合で占められているかを表現でき,迷路全体の特徴を大まかに捉えることができるため,迷路の解析に頻繁に用いられている[8][10].そこで,迷路中の直線,分岐点(十字,T字),曲がり角,行き止まりの数を特徴量として求めた.

3.2 2次的な構造に関する特徴量

迷路を正解の経路(正道),正道から伸びるゴールへたどり着かない間違いの経路(誤道),正道で2分される誤道の

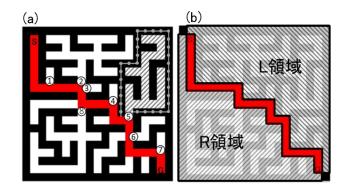


図 2 誤道の特徴量と誤道の部分領域: (a) 誤道の周縁 長と隣接誤道数. (b)誤道の部分領域.

部分領域の3つを迷路の二次的な構造として定義した.

3.2.1 正道に関する特徴量

スタートからゴールを結ぶ最短の経路を正道と定義した. 正道は迷路を解くあたり必ず通る箇所であるため,迷路の選択において最も重要である. 正道の経路長と正道の曲がり角の数は正道の形を制御すると考えられる. 正道はスタートとゴールを結ぶ線分であり分岐などを含まないため,経路の長さによってある程度形状が制限されるためである. また,曲がり角の数によって正道がどれだけ曲がっているかを表現できるため,同じ経路の長さでも形の差を表現できる. また実際に正道の曲がり角の数は迷路の解析や迷路を実験で用いるときの評価基準として使われている[11]. 本研究では,正道の総マス数を正道の経路長とした. また特に明記されていなければ以後の章では経路長はその構造の総マス数とする.

3.2.2 誤道に関する特徴量

正道からの伸びるゴールへ到達しない経路を誤道と定義した.一つの誤道は正道との分岐点を始点とし、複数の行き止まりを持つ. 誤道は迷路の大部分を占めることが多いため、誤道の形状を表現する特徴量は迷路全体の構造の記述に大きく影響する.

誤道の特徴量として、誤道の周縁長の合計と、隣接誤道数の合計を定義した。誤道の周縁のイメージを図2(a)の灰色のドットで示した。図2(a)のように誤道の凹んだ部分を無視した誤道の外周を周縁とし、外周のマス数を周縁長とした。例えば、図2(a)の⑤の誤道の周縁長は31マスである。この周縁長をそれぞれの誤道で求め、合計したものを誤道の周縁長の合計とした。

誤道の周縁長は誤道の総経路長が長く、より広範囲に広がるほど長くなる。そのため、誤道の周縁長は迷路中の誤道がどのような経路長で迷路上に分布しているのかを表現できると考えた。

次に隣接誤道数の合計は、壁を挟んで隣接している誤道の数を重複の無いように数えた. 例えば図 2 (a) で⑤の誤道に着目すると②④⑥の誤道と隣接しており、この場合の隣接誤

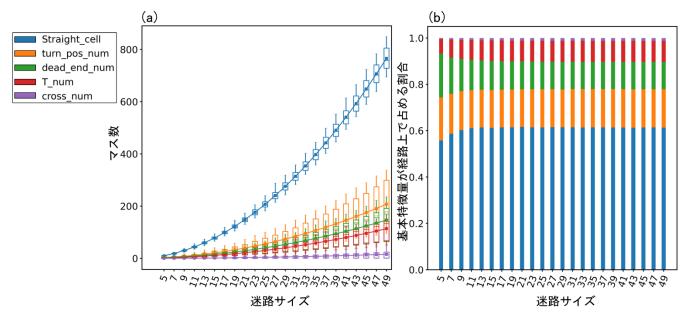


図 3 迷路サイズに対する迷路の基本特徴量の分布の変化と迷路内の基本特徴量の比率

道数は3本となる.また重複がないように数えるため、次に⑥の誤道に着目としたとすると、⑤との隣接は既に数えているため⑥と隣接した誤道は⑦のみの1本となる.

隣接誤道数の合計は迷路中に図 2 (a) の②のような経路 長が長く、迷路全体へ延びるような誤道が多いときに、値が 高くなる. 一方で、⑧の誤道のように経路長が長いが、一部 分へ固まるような経路は隣接するが増えないため、隣接誤道 数は少なくなる. このように、隣接誤道数を求めることによって、誤道の総経路長や入り組み具合のような構造を記述で きると考えた.

3.2.3 誤道の部分領域に関する特徴量

誤道は正道によって必ず2つの領域に二分される. 本研究では、スタートからゴールへ進む方向に対して、左側をL領域、右側をR領域と定義し、それぞれの特徴量を求めた(図2(b)). 誤道の部分領域を定義することによって、L領域とR領域の大きさの比較や、各領域ごとの形状を特徴付けることができるため、誤道全体の特徴量と比べより詳細に構造を記述することができると考えた.

L 領域, R 領域の誤道の本数, 誤道の総経路長, 誤道の経路長のばらつきを求めた. また本研究ではばらつきとして標準偏差を求めた.

迷路の面積は一定であるため、L 領域とR 領域の面積は比として表現しやすい、そこでL 領域とR 領域の誤道の経路長と誤道の本数の比を定義した(式 (1), (2)). 各領域の特徴量の比を取ることによって、領域間の関係を1つの軸で表現することができる.

$$LR_size_ratio = \frac{R_size}{R_size + L_size} - 0.5 \quad (1)$$

$$LR_num_ratio = \frac{R_num}{R_num + L_num} - 0.5 \quad (2)$$

最後に本研究で使用した迷路の特徴量を表1に示した.

表 1 本研究で使用した迷路の特徴量

衣 1 本研先で使用した述路の特徴重			
区分	単位構造	特徴量名	略記
基本特徴量	マス	直線のマスの数	Straight_cell
		曲がり角の数	turn_pos_num
		T字のマスの数	dead_end_num
		十字のマスの数	T_num
		行き止まりの数	Cross_num
2 次 は 造 特 量	正道	正道の経路長	correct_path_len
		正道の曲がり角の数	turn_num
	誤道	誤道の周縁長の合計	border_l
		隣接誤道数の合計	neighbor_sum
	誤道の部 分領域	L 領域の誤道の総経 路長	L_size
		L領域の本数	L_num
		L領域の誤道の経路 長のばらつき	L_size_std
		R 領域の誤道の総経 路長	R_size
		R 領域の本数	R_num
		R 領域の誤道の経路 長のばらつき	R_size_std
		L 領域と R 領域の誤 道の総経路長の比	LR_size_ratio
		L領域と R 領域の誤 道の本数の比	LR_num_ratio

4. 迷路の特徴量の分布の解析

4.1 迷路の基本特徴量の分布と迷路サイズの関係

迷路サイズの変化に対する直線,分岐点(十字, T字),曲がり角,行き止まりの数の分布の変化と迷路サイズの変化に

対する基本特徴量が経路上で占める割合の変化を図 3 に示した.また,図中の回帰曲線は各迷路サイズの平均値を用いて算出し,どれも2次近似で近似した.迷路の基本特徴量は迷路サイズが増加するにつれて,二次関数的に増加する傾向が見られた.迷路サイズが増加すると迷路の壁と経路の合計であるマスの総数は2乗のオーダーで増加する.そのため,経路のマスの数を数えたものである迷路の基本特徴量もまた,2次関数的に増加したと考えられる.

基本特徴量が経路上で占める割合は迷路サイズが 17 未満ときに変動があり、迷路サイズ 17 付近で直線 0.61: 十字 0.012: T字 0.09: 曲がり角 0.16: 行き止まり 0.11 の比率に収束した. これは迷路サイズ 17 未満の迷路と 17 以降の迷路では迷路の性質が異なることを意味する.

4.2 2次的な構造の特徴量の分布と迷路サイズの関係

4.2.1 正道の特徴量の分布と迷路サイズの関係

迷路サイズに対するに対する正道の経路長と正道の曲が り角の数の分布の変化を図4に示した.また,図中の回帰曲 線は各迷路サイズの平均値を用いて算出し,どれも2次近似 で近似した.正道の経路長と正道の曲がり角の数は迷路サイ ズが増加するに連れて2次関数的に増加した.正道の経路長 は分散が大きく,迷路によって正道の経路長は大きく変化し, それに伴い正道は多種多様な形状が存在すると解釈できる.

4.2.2 誤道の特徴量の分布と迷路サイズの関係

迷路サイズに対する誤道の周縁長の合計と隣接誤道数の合計の分布の変化を図5に示した.また,図中の回帰曲線は各迷路サイズの平均値を用いて算出し,どれも2次近似で近似した.誤道の周縁長の合計と隣接誤道数の合計は迷路サイズが増加するにつれて2次関数的に増加した.誤道の周縁長の合計の分布は各迷路サイズで箱が広く全体的に幅広く分布した.一方で隣接誤道数の合計は分布の幅は狭い傾向が見

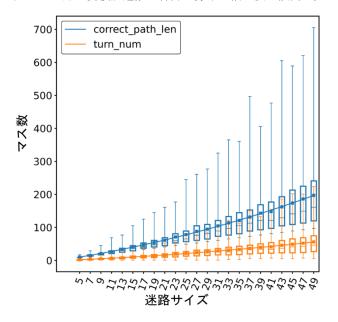


図 4 迷路サイズに対する正道の特徴量の分布の変化

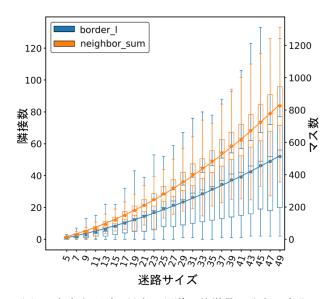


図 5 迷路サイズに対する誤道の特徴量の分布の変化

られた.

増加する傾向が見られた.

4.2.3 誤道の部分領域の特徴量の分布と迷路サイズの関係

迷路サイズに対するL領域R領域の誤道の総経路長,誤道の本数,経路長のばらつきの分布の変化を示した(図6(a)(c)(d)). また,迷路サイズに対する正道の経路長とL領域の誤道の総経路長が経路上を占める割合の変化を図6(b)に示した.L領域とR領域の誤道の総経路長と経路長のばらつきは迷路サイズが増加するにつれて2次関数的に増加した.また,誤道の本数は線形的に

正道の経路長とL領域の誤道の総経路長、R領域の誤道の総経路長が経路上を占める割合は迷路サイズが増加するごとに変動し、一定の比率に収束することはなかった。傾向としては、正道の経路長は迷路サイズが大きくなるごとに比率が減っていき、逆にL領域、R領域の総経路長は増加する傾向が見られた。また、L領域とR領域の誤道の総経路長の増加の程度を比較するとR領域の方がより増加する傾向が強いことがわかる。

正道の経路長とL領域の誤道の総経路長,R領域の誤道の総経路長が経路上を占める割合の変化から,迷路サイズが9以下の迷路では正道が占める割合が大きいため,迷路サイズ9以下の迷路では,正道の構造を表現することで迷路全体の構造の多くの割合を記述できると解釈できる.一方で,迷路サイズ11以上の迷路では,誤道の占める領域が正道を上回るため,正道の構造より誤道の構造の表現の方が,迷路全体の構造を記述する上で重要になると考えられる.

5. 特徴量同士の関係性の考察

迷路の基本特徴量と本研究で提案した迷路の特徴量が記述することができる迷路の構造の差を検証するため、それぞれの特徴量に基づいて迷路を抽出し構造の差を考察した.また、迷路全体を記述する上で、特徴量間がどのような関係性

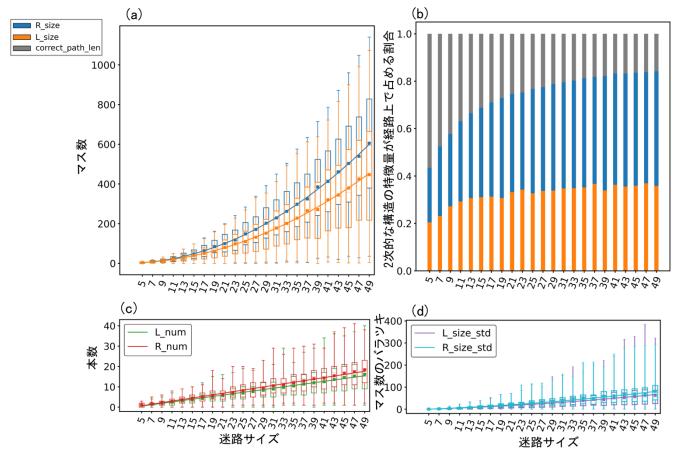


図 6 迷路サイズに対する誤道の部分領域の特徴量の分布の変化と迷路中の正道の長さと各領域の誤道の総経路長の比率

があるのかについて考察した.

5.1 迷路の基本特徴量が記述する迷路の構造

迷路の基本特徴量を複数用いても迷路の構造は決定できなかった. 迷路の基本特徴量のうち, T字路の数, 十字路の数, 行き止まりの数が同じ (T字路の数=8, 十字路の数=0, 行き止まりの数=6) 22 個の迷路を図 7 に示した. また迷路は正道を赤色で示した. 列挙された迷路の形をみると, どれも概ね似たような形状ではあるが, 迷路の誤道の一本当たりの大きさや, 曲がり具合や, 本数などはどれもばらばらでありった.

5.2 2 次的な構造に関する特徴量が記述する迷路の構造 5.2.1 3 つの特徴量を用いた迷路全体の構造の記述

正道の形状を表現するL領域とR領域の誤道の総経路長の比と正道の曲がり角の数,誤道の形状を表現する誤道の周縁長の合計の3つを軸に取った3Dプロットを示した(図8(a)).迷路は正道の曲がり角の数と誤道の周縁長の合計によって,なだらかな坂のような分布を取った.正道の曲がり角の数と誤道の周縁長の合計を軸に取った図8(c)のプロットを見ると,正道の曲がり角の数が多く,誤道の周縁長の合計が長い迷路はほとんど存在しなかった.

5.2.2 正道の曲がり角の数と L 領域と R 領域の誤道の総経路長の比率による迷路の分類

横軸にL領域とR領域の誤道の総経路長の比,縦軸に正道

の曲がり角の数をとり迷路をプロットした(図 8 (b)). また,5.1 の基本特徴量の条件で抽出した迷路に関しては図中に迷路の形を示した. また22 個のうち紙面に入る任意の13 個の迷路を選出し、軸の値の順に並べて表示した.

迷路を見ると横軸の L 領域と R 領域の誤道の総経路長の 比では、正道の形状が表現された. L 領域と R 領域の誤道の 総経路長の比が低いほど、L 領域の占める割合は大きくなり、 正道は迷路の左下側を通った. また比の値が高いほど R 領域 の占める割合はおおきくなり、正道は迷路の右上側を通った.

さらに縦軸では正道の曲がり角の数によって正道の形状の複雑さを表現された.曲がり角の数が少ないときには,正道は直線が多いシンプルな形状をとり,曲がり角の数が多いときには,複雑な形状を取った.よってL領域とR領域の誤道の総経路長の比と正道の曲がり角の数は正道の形状を表現する関係性を持つことが示された.また,L領域とR領域の誤道の総経路長の比は正道の形状を記述し,正道の曲がり角は正道の複雑さを記述する特徴量であった.

5.2.3 誤道の周縁長の合計と L 領域と R 領域の誤道の総経 路長の比による迷路の分類

横軸に、L領域とR領域の誤道の総経路長の比、縦軸に誤道の周縁長の合計としたときの結果を図8(d)に示した.図8(b)と同様に、5.1の基本特徴量の条件で抽出した迷路に関しては図中に迷路の形を示した.また22個のうち紙面に

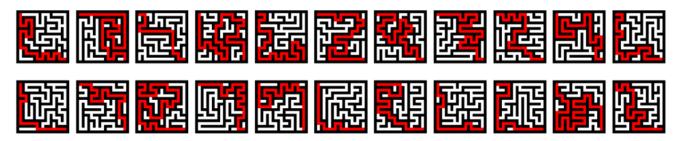


図7 迷路の基本特徴量が同じ値(T字=8, 十字=0, 行き止まり=6)の迷路

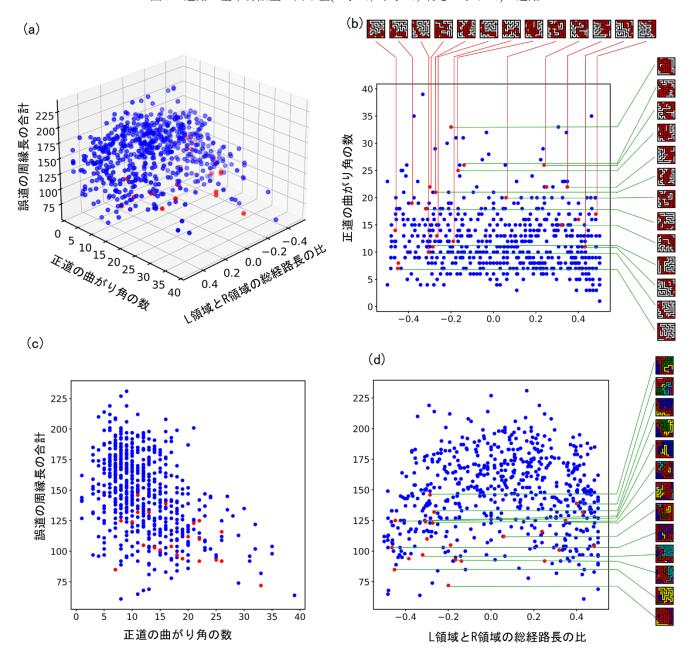


図 8 2次的な構造に関する特徴量を軸とした迷路の分布: T字=8,十字=0,行き止まり=6の迷路を赤色のプロットで示し、任意の13個の迷路を軸の横に表示した。また、該当するプロットと迷路を赤もしくは緑の線で結んだ。(a)L領域とR領域の誤道の総経路長の比、正道の曲がり角の数,誤道の周縁長の合計を軸とした3Dプロット。(b)L領域とR領域の誤道の総経路長の比と正道の曲がり角の数を用いた迷路の分布。(c)正道の曲がり角の数と誤道の周縁長の合計を用いた迷路の分布。(d)L領域とR領域の誤道の総経路長の比と誤道の周縁長の合計を用いた迷路の分布。

入る任意の 13 個の迷路を選出し、軸の値の順に並べて表示 した. また誤道の周縁長の軸に示した迷路は誤道を別々の色 で塗り分けて表示した.

L領域とR領域の誤道の総経路長の比は正道の形状を記述した. 縦軸の誤道の周縁長の合計は,値が低いものは誤道の経路長が比較的短いか,長くても誤道の範囲は広がっておらずコンパクトにまとまっている傾向が見られた. 一方,値が高いものほど誤道は細長く入り組むように伸びる傾向があった. 誤道の周縁長の合計では誤道のコンパクトさのようなものを表現できた.

L 領域と R 領域の誤道の総経路長の比と誤道の周縁長の合計では,正道の形状と誤道の形状を表現できるため,迷路全体の構造を記述できる関係性を持つといえる.

6. 結論

本研究では迷路の基本特徴量に比べて更に大きい迷路の構成単位である正道, 誤道, 誤道の部分領域を 2 次的な構造と定義し, その特徴量の提案と分布の解析と迷路の形の記述力の考察を行った. 提案した特徴量の分布と迷路を占める特徴量の割合は迷路サイズによって影響を受けることを示した. また, 本研究で提案した特徴量はどれも迷路の基本特徴量より迷路の構造を表現することができた. L 領域と R 領域の誤道の総経路長の比, 正道の曲がり角の数, 誤道の周縁長の合計は迷路全体の構造を記述できる関係性を持つことを示した.

参考文献

- [1] 池田 心, 橋本 隼一. 確率的最適化を用いた絵画的迷路生成. 情報処理学会論文誌. 2012, vol. 53, no.6, p.1625-1634.
- [2] 岡田吉央, 上原隆平. 絵画的迷路の作り方. 数理解析研究所講 究録. 2009, vol. 1649, p. 58-65.
- [3] 中井亮平, 岡田吉央. 絵画的迷路作成アルゴリズムの改善. 数 理解析研究所講究録. 2010, vol. 1691, p. 162-166.
- [4] 嘉来進之助. 左脳を鍛える大人の迷路. 主婦の友社, 2004,p. 6-11.
- [5] 米山公啓. 右脳と左脳を鍛える! 大人の迷路パズル傑作選. 廣 済堂出版, 2006, p30-31.
- [6] Nintendo. 2017. The Legend of Zelda: Breadth of the Wild.
- [7] 藤平 啓汰, シュエ ジュウシュエン, 池田 心. 人間らしさを 考慮したテストプレイヤを用いる迷路の自動生成と難易度評 価. The 26th Game Programming Workshop 2021, 2021, p.192-199
- [8] Kim et al. Design-Centric Maze Generation. FDG'19, 2019, p.26– 30.
- [9] V.Bellot et al. How to generate perfect maze?. Information Sciences. 2021, vol 572m p.444-459.
- [10] Jamis Buck. Mazes for Programmers: Code Your Own Twisty Little Passages. 1, Pragmatic Bookshelf, 2015.
- [11] Chafee MV, et al. Impact of path parameters on maze solution time. Arch Ital Biol. 2002,vol 140, no.3 ,p.247-51.