

## バーチャル石庭の設計と解析

佐久間 大典† 蔡 東生 †

我々の研究室では以前より「日本庭園」に着目し、日本庭園設計をバーチャルに進めるためのアプリケーションの開発などを行ってきた。本研究では設計手法として用いている遺伝的アルゴリズム (GA)、またそれを発展させたインタラクティブ GA (IGA) に注目し、石庭設計過程におけるシャノンの情報エントロピーを計測し、それがどのように増加していくかを調べる。またバーチャル石庭の解析という別の観点から、実際に設計した石庭を用いて作成したムービーを、アイ・トラッカーを用いて鑑賞し、石庭の構造から求める中心軸方向における視点の動きを観察し、解析する。

### Virtual Zen Garden composed of rocks and mosses: Design and Analysis

Daisuke SAKUMA † DongSheng CAI †

In the present paper, we virtually design a Japanese garden focusing on design of Zen garden composed of rocks and mosses on an empty rectangle space in a Zen temple. In this research, we focus on a genetic algorithm (GA) and interactive GA (IGA), and calculate how the entropy of Zen garden would increase in design process using Shannon information theory. Moreover, in another viewpoint of analyzing a virtual Zen garden, we conduct a experiment using a eye tracker and observing the eye motion on the screen during observers virtually walk-through in Zen garden composed of rocks and mosses and analyze it.

### 1. はじめに

我々の研究室では以前より「日本庭園」に着目し、日本庭園設計をバーチャルに進めるためのアプリケーションの開発などを行ってきた。また最新の研究では設計対象を石庭に絞り、その設計実験の結果から、設計された石庭はフラクタル的性質をもち、Zipf の法則が成立していることが確認された[1]。このバーチャル石庭設計アプリケーションでは、その設計手法として遺伝的アルゴリズム (GA) と、さらにユーザーの主観により最も良いと感じる解を選ぶことができるようにしたインタラクティブ GA (IGA) を用いている。そこで、本研究ではこの IGA に注目し、シャノンの情報理論を用いて世代ごとの石庭がもつ情報エントロピーがどのように増加していくかを計測する。

また最近、ユネスコ世界遺産の一つである京都龍安寺の石庭の空間的な構造を、中心軸変換法を用いて解析する研究が行われた[2]。その結果、龍安寺において最適鑑賞ポイントであると言われていた場所に石庭の中心軸が向いていることがわかった。このことから自然を鑑賞する人々は無意識にその構造の中心軸を認識していると思われる。また、これは石庭の中心軸方向が指す最適鑑賞ポイントはシャノンの情報エントロピーが最大になるポイントであることを示していると考えられる[3]。そこで、第2の研究として、バーチャル石庭の解析という観点で、実際に設計した石庭でバーチャル・ウォーク・スルーを行うムービーを鑑賞してもらい、そのときの鑑賞者の視点の動きをアイ・トラッカーを用いて観察する実験を行う。この実験において、設計した石庭の中心軸方向、つまり最適鑑賞ポイントを横切る際、鑑賞者の視点中心軸方向に安定するかどうかを観察することがこの研究の目的である。

† 筑波大学 システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering at  
University of Tsukuba

## 2. シャノンのエントロピー

まず情報量を定義して、情報を数量的に測れるものとする。ある有限個  $n$  の状態  $\{x_1, \dots, x_n\}$  をとりうるランダム変数  $X$  を考える。また、状態  $\{x_1, \dots, x_n\}$  には対応する生起確率  $\{P(x_1), \dots, P(x_n)\}$  が与えられるとする。このとき、状態  $x_i$  が生起したときの、それが与える情報量は、

$$I(x_i) = \log_2 \frac{1}{P(x_i)}$$

のように定義される。これを状態  $x_i$  の自己情報量といい、エントロピーとは平均自己情報量、即ち上に示した情報量の期待値であり、

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log P(x_i)$$

のように定義される。

また、複数の事象について考える場合に、個々の事象間に相関関係がない場合は加算性によって個々の事象ごとのエントロピーを単純に足し合わせることができるが、事象間に相関関係が存在する場合、二つの事象の結合事象を考えなければならない。ここで、 $n$  個の状態  $\{x_1, \dots, x_n\}$  をとりうるランダム変数  $X$  に加え、 $n'$  個の状態  $\{y_1, \dots, y_{n'}\}$  を持つランダム変数  $Y$  を考える。このとき  $X$  が  $x_i$ 、 $Y$  が  $y_j$  という結合事象の結合エントロピーは、

$$H(X, Y) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n'} P(x_i, y_j) \log P(x_i, y_j)$$

で求められる。さらに、事象  $X$  と事象  $Y$  の間に相互関係が存在する場合、事象  $Y$  の取り得る状態は  $X$  に依存する。このとき、 $Y$  の取り得る状態の状態数とその各々に対応する確率は  $X$  の状態によって変わってくる。そこで  $X$  の状態を条件とした  $Y$  の条件付き確率というものを考えなければならない。ここで、 $Y$  の状態  $y_j$  が  $X$  の状態  $x_i$  に依存する場合、 $X$  の状態が  $x_i$  であると知っているという条件の下で、 $Y$  の状態が  $y_j$  になる条件付き確率は、 $P(y_j | x_i)$  のように表される。このとき、 $X$  が状態  $x_i$  であると知っているという条件の下で取り得る

すべての  $Y$  の状態に対するエントロピーはその条件の下での  $0$  から  $N'$  までの  $Y$  の各状態の条件付き確率の期待値で求められ、さらにすべての  $X$  の状態に対しての  $Y$  の状態に対するエントロピーの平均をとることで、 $X$  の状態を知っているという条件の下での  $Y$  についての平均条件付き自己情報量、つまり条件付エントロピー  $H(Y | X)$  は、

$$H(Y | X) = - \sum_{i=1}^N P(x_i) H(Y | x_i)$$

のように求められる。またここで、 $P(x_i)P(y_j | x_i) = P(x_i, y_j)$  という関係を用いることで、

$$\begin{aligned} H(Y | X) &= - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N'} P(x_i) P(y_j | x_i) \log_2 P(y_j | x_i) \\ &= - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N'} P(x_i, y_j) \log_2 P(y_j | x_i) \end{aligned}$$

のようにさらに単純化することができる。

## 3. IGA を用いたバーチャル石庭の設計

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : 以下 GA) とは、自然界の生物進化 (選択淘汰・突然変異) をモデルとした、確率的探索・学習・最適化の一手法であり、最適解の探索問題に対して幅広く使われているアルゴリズムである。その GA を利用したシステムを双方向的にし、要素の増加による制約の複雑化を避けるために人の主観を取り入れたのがインタラクティブ GA (IGA) である。この IGA を用いた石庭設計は以下のようになる。

1. 初期遺伝子として、100個の初期石庭がランダムに生成され、その中からユーザーが最も良いと感じる石庭を選択する。
2. 個々の石庭間で交叉、つまり石庭のもつ庭石の位置情報の入れ替えが行われる。
3. 交叉によって決まった個々の庭石の配置に対して突然変異が起こる。ここでは周囲への1格子分の変化である。
4. 新しい100個の石庭が生成される。
5. ステップ1に戻り、繰り返す。

交叉は交叉率 0.7 で入れ替えるかどうかが決まり、それからどの石庭の要素と入れ替えるかを定めるが、このときユーザーが選んだ石庭が 0.5 の確率で選ばれ、選ばれなかった場合はランダムに選ばれる。また突然変異は確率 0.01 で起こり、隅の場合は現位置を含めた周囲 4 格子、辺の場合は 6 格子、内部の場合は 9 格子に変異する (図 1)。

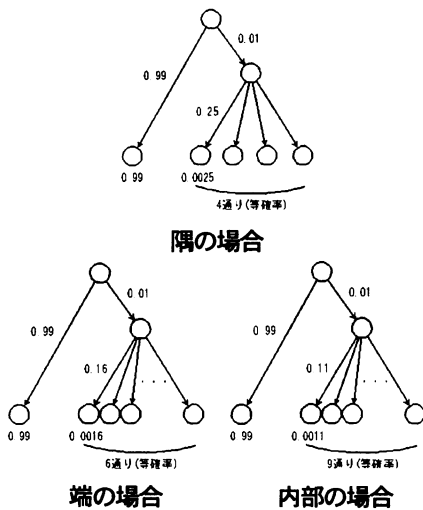


図 1 突然変異の場合分け

庭石は一つずつではなく真、副、対からなる 3 つずつの群単位で扱い、群の個数はユーザーによって選択可能である。この庭石の配置を情報として持つ石庭に対して IGA を行うことによってユーザーが最良と感じる石庭を設計していく [1]。

#### 4. エントロピーの計測

それでは設計過程でのエントロピー変化を計測することを考える。ここで計測対象として扱う事象は交叉と突然変異となる。遺伝操作であるこれらはここでは情報通信路として考えられ、この GA モデルに対するシャノンのエントロピーは、1000 個の遺伝子が存在しているときの、この二つの事象の結合エントロピーとして、

$$H(C_n, M_n) = H(C_n) + H(M_n | C_n)$$

のように求められる。ここで、 $C_n$ 、 $M_n$  はそれぞ

れ第  $n$  世代における交叉と突然変異の事象を示す。また、上の式の右辺第 2 項目は条件付きエントロピーであり、

$$H(M_n | C_n) = \sum_j^k C(j) H_j$$

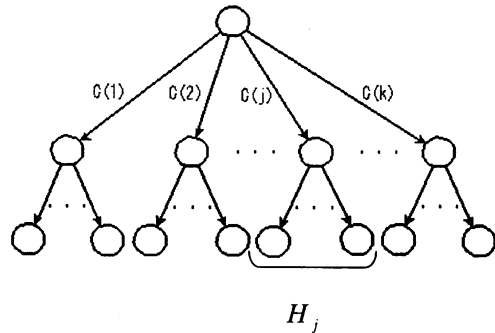


図 2 エントロピーの分枝分解性 [4]

図 2 のように交叉の結果によって突然変異によるエントロピーが変化する。

以上のような計算方法で実際に設計しながら求めたエントロピーの変化の様子が図 4 である。図 3 は世代ごとの石庭の平均適応度である。

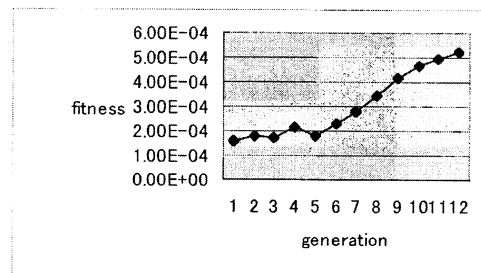


図 3 世代ごとの平均適応度

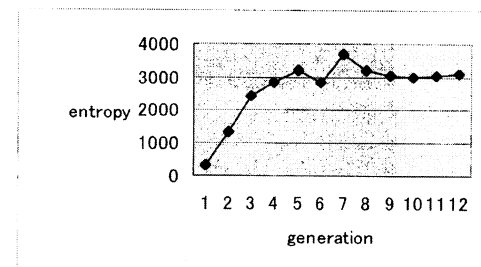


図 4 エントロピーの変化

## 6. アイ・トラッキング実験

次に第2の研究として、バーチャル石庭の解析という観点で、実際に設計した石庭でヴァーチャル・ウォーク・スルーを行うムービーを鑑賞してもらい、そのときの鑑賞者の視点の動きをアイ・トラッカーを用いて観察する実験を行う。被験者には図5に示すような形で、スクリーン上に乗る図6の1から6のように左→右→左に移動するムービーを頭を動かさずに目で追って観てもらおう。



図5 実験風景

実験は3人の被験者に対して行い、その結果の映像において、特に最適鑑賞ポイント付近での図が図7である。図8は一人の被験者の最適鑑賞ポイント付近での視点の動きの段階的な図である。

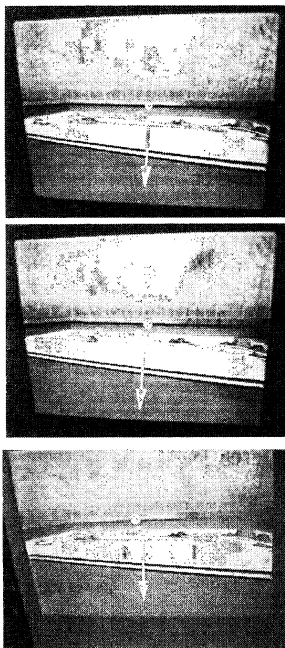


図7 中心軸方向での視点

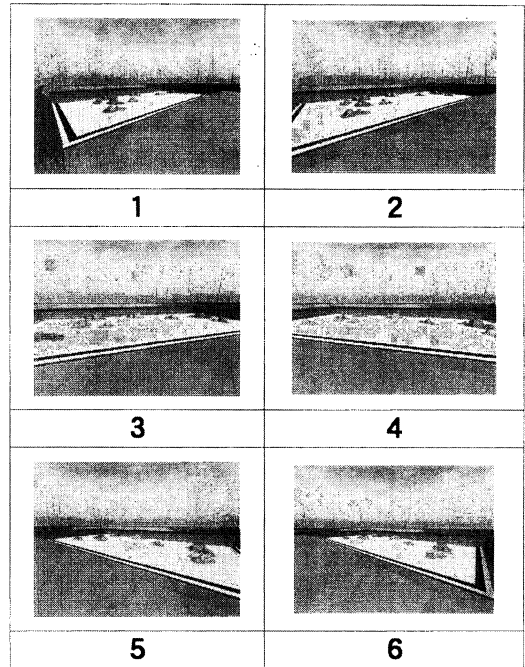


図6 実際に使用した映像の段階図

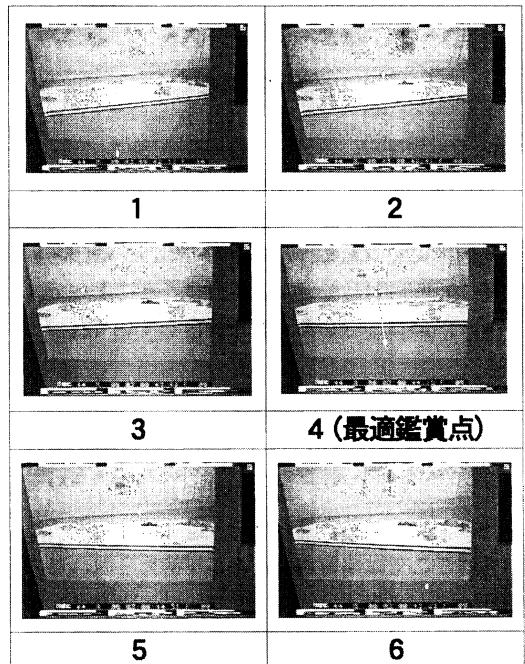


図8 実験結果の図（最適鑑賞ポイント付近）

## 7. 考察と今後の展望

IGA を用いたバーチャル石庭設計において、シャノンのエントロピーは GA によって世代が進むにつれて増加し、12 世代程で安定する様子が見られた。この結果はバーチャル石庭設計において、同じく 12 世代程でフラクタル的性質をもち、Zipf の法則が成立していく結果[1]と一致している。また、6, 7 世代目でのエントロピーの変化は突然変異による拡散と集中のために起こったものだと思う。

またアイ・トラッキング実験の結果において、3 人の被験者の結果を比較すると、どの被験者の場合も最適鑑賞ポイント付近では、端に比べて石庭の中心軸方向に視点が安定する様子が見られた。また、そのポイントを過ぎるとまた視点が不安定になっている。結果を段階的に解析した結果、最適鑑賞ポイントを通る時間が約 3 秒ほどで、その内視点が中心軸方向に安定している時間が約 1.5 秒であり、外れたとしてもそれほど大きな動きは見られない。この結果から考えても、石庭を鑑賞した被験者がその構造の中心軸を無意識に認識して鑑賞していたということが言える。

最後に今後の展望としては、今回はバーチャル・ウォークスルーを行う映像であったので、各ポイントごとで固定した場合の視点の動きを観察する実験を行い、その視点の動きを解析したい。また、庭園の設計として石庭だけに絞らず、木、池などの要素も加えた回遊式庭園の構築を行い、その場合の、エントロピーの計測や、アイ・トラッキング実験を行いたい。

## 参考文献

- [1]: 「インタラクティブ GA を用いたバーチャル石庭」筑波大学理工学研究科修士論文  
難波政佳 平成 15 年度
- [2]: “Virtual structure of Japanese Zen garden”  
Gert. J. Van Tonder etc Nature, vol.419, pp.359-360
- [3]: Leyton M. Comp. Vis., Graph., Img. Proc. 38, 327-341(1987)
- [4]: 「情報エントロピー論」堀部安一 森北出版  
1989
- [5]: 「遺伝的アルゴリズム」北野宏明 産業図書  
1993