

インタラクティブ GA による仮想日本庭園設計

難波 政佳*, 小部 昌史**, 蔡 東生***

*筑波大学理工学研究科, **筑波大学理工学研究科卒, ***筑波大学電子情報工學系

本研究では、日本庭園(石庭)に着目し、実在の庭園設計書を参考にして古くからの慣習的設計ルールを抽出し、さらに形状解析モデルを用いて既存の石庭(龍安寺石庭)の形状特性を抽出した。さらに、これらの特徴を用い、3次元空間中で仮想日本庭園設計を作成する。庭園設計は、慣習的設計ルールと龍安寺石庭から抽出した形状特性を利用した庭園構成要素配置の制約充足問題と考えることができる。そこで、その解法の1つである「遺伝的アルゴリズム」に着目し、その応用手法である「インタラクティブ GA」を用いて、システムの支援と共に利用者が対話的に庭園設計を行うことのできるアプリケーションを開発する。

Designing Japanese Garden using Interactive GA

Masayoshi Namba*, Masashi Kobe**, Dongsheng Cai***

*Master's Program in Science and Engineering at University of Tsukuba

**Master's Program in Science and Engineering at University of Tsukuba graduation

*** Institute of Information Sciences and Electronics, University of Tsukuba

1-1-1 Ten-nou-dai, Tsukuba, 305-8573, Japan*, **, ***

In this research, we focused based on Japanese garden, e.g. (rock garden etc) and listed design rules of them actual garden specifications. Furthermore, extracted a shape characteristic of existing rock gardens with a shape analysis model. And applied them to a virtual Japanese garden design in three-dimensional space by expressing them on a computer. We can regard a garden design as a condition sufficiency problem of the garden component arrangement that used design rule of custom and an extracted shape characteristic. Then we observed the "Genetic Algorithm" which is one of the solution methods of a constraint satisfaction problem. And developed application with which a user can perform an interactive garden design with support of a system using "interactive GA".

1. はじめに

近年、Dawkins のバイオモルフ[1]や L-system に基づいた植物の生成[2]など、進化計算法[3]の CG 生成への応用が多くなってきている。また、龍安寺石庭の空間構成を、形状解析モデルを用いて解析する手法が提案された[4]。そこで本研究では、「石庭」に着目し、インタラクティブ GA を用いて 3 次元空間上にバーチャル庭園の構築を試みた。

庭園設計の指針として、「設計段階で職人が拠り所とする慣習的設計ルール」に着目した。しかし、このルールの用い方は古くから職人の経験によっているため、このルールのみでは自動的に庭園設計を行うことはできない。そこで、形状解析法を用いて「既存の石庭(龍安寺石庭)の形状特性」を抽出し、職人の経験によっていた部分の要素を明らかにすることが本研究の目的である。

そして、庭園設計を慣習的設計ルールと、龍安寺石庭の形状特性を利用した庭石配置の制約充足問題(CSP: constraint satisfaction problem)と考え、インタラクティブ GA を用いて、設計支援ツールとして対話的にバーチャル庭園設計を行うことのできるアプリケーション開発を試みる。

また、被験者を募り実装したアプリケーションを用いて実験を行った。

2. 日本庭園について

2.1 庭園の分類

世界には様々な庭園が存在するが、それらは大きく分けて自然式、整形式の 2 つに分類できる[5]。自然式は庭園の設計に際し構成要素の姿、配置を自然のままの様子を大事に行い、「自然美」を追求する様式である。一方、整形式は構成要素の姿や配置を幾何学的に加工し、「整形・対称美」を追求する様式である。前者には主に日本庭園、中国庭園、イギリス庭園等が含まれ、後者にはフランス庭園、イタリア庭園等が含まれる。

また、日本庭園においては、利用の面からも回遊式と鑑賞式の 2 つに分類することができる。前者は園内を回遊して楽しむことを主目的としたものであり、桂離宮等の大規模庭園がこれにあたる。後者は茶室や住宅等に添えられ、茶に座した時等、固定された 1 視点からの鑑賞を主目的とした小〜中規模庭園である。

今回参考にした庭園設計書[5][6][7]が対象としている庭園は、小〜中規模のものがほとんどであり、また、大規模庭園の設計は小規模な庭園における設計の組合せと考えられる。そこで、本研究では後者の鑑賞式庭園、特に龍安寺石庭に代表される枯山水庭園[8]を対象とする。

2.2 日本庭園の慣習的設計ルール

前述のように、日本庭園は「自然美」を基本としているため、評価基準の定量的な扱いが難しく、その美し

さの指標の測定、庭園の自動構築は困難である。しかしながら、全ての庭園設計が何の設計基準もなしに個々の設計者の全くの自由、創作によって行われているわけではもちろんない。ここでは、庭石における慣習的設計ルールについて、実在の庭園設計書[5][6][7]を参考にリストアップしてまとめた。ルールは大別して(1)据え方に関するルール、(2)数の構成に関するルール、(3)位置的な相関に関するルール、の3つの範疇のルールが存在した。

(1) 据え方に関するルール

安定感・奥行き感を強調するため、以下の3つのルールが存在する。

i) 地面と平行に配置

天端が平らな石を据える場合、平らな面が地面と平行になるように据えたとされている(図1)。

ii) 左右均等に配置

山形の石を据える場合、左右の傾斜角度が等しくなるように据えたとされている(図2)。

iii) 2面以上が見える配置

庭園の主要な視点から石を見たときに、少なくとも石の2面以上が見えるように配置するとされている(図3)。主要な視点に関しては第3章で詳説する。

これら据え方に関する3つのルールを考慮して、庭石のモデリングを行った(図4)。

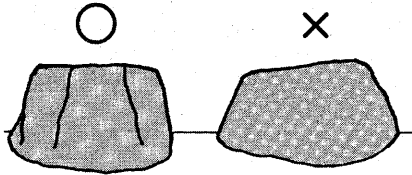


図1：地面と平行に配置
Fig.1 The arrangement which is parallel to the ground

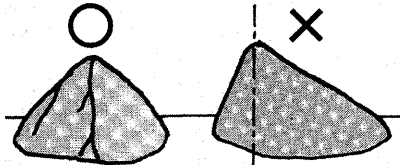


図2：左右均等に配置
Fig.2 The arrangement that right and left are equal

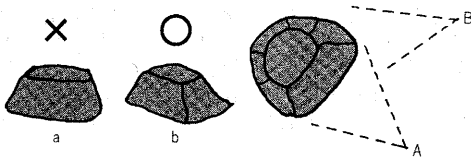


図3：2面以上が見える配置
Fig.3 The arrangement that we look at more than two sides



図4：ルールを考慮してモデリングを行った庭石
Fig.4 The garden stones modeling in consideration of rules

(2) 数の構成に関するルール

i) 奇数単位の組合せで石群として配置

3石または5石を基本とする奇数単位の石群として、石を配置する。特に、3石構成の場合、サイズの大きい石から順に、真、副、対と呼ぶ(図5)。

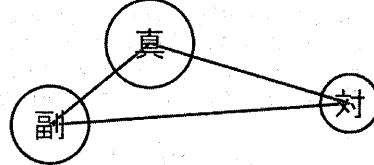


図5：3石構成のときの役名
Fig.5 An official title of three stone constitution

(3) 位置的な相関に関するルール

i) 中央部を避ける配置

視界を遮り、見苦しい庭園となることを防ぐため、庭園中央部を避けて石を配置する。具体的には、図6のAで示された部分を避ける。

ii) 鈍角不等辺三角形形状の配置

真、副、対の石を配置するとき、真の石の位置が鈍角となる鈍角不等辺三角形となるように心掛ける。また、多くの石を使用する場合には、再帰的に鈍角不等辺三角形を形作るように配置する(図7)。

iii) 石相互間の位置関係に対する考慮

石相互間には、隣接関係と対立関係が存在する(図8)。石群内では、真の石を他の石が隣接関係になるようにする。また、石群同士では、真の石同士が対立関係になるようにする。

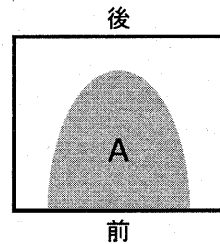


図6：中央部を避ける配置
Fig.6 The arrangement which avoids central part

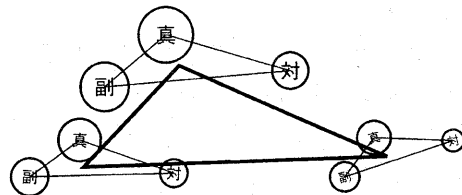


図7：再帰的な鈍角不等辺三角形形状
Fig.7 Recursive obtuse angle scalene triangles

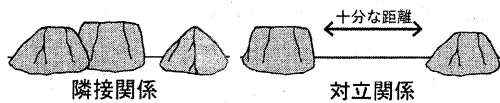


図 8：隣接関係と対立関係
Fig.8 Adjacency relation and Opposition relation

3. 龍安寺石庭の分析

枯山水の名庭として世界的に知られる龍安寺(京都市右京区)の石庭について、「ランダムに見える石群の配置に 1 本の「中心軸ツリー」の描像が隠されていて、安心感を与える構成になっている」という分析結果がトンダーらによって発表された[4]。トンダーらは、石群の位置と強さを数値化し、視覚認識学で使われる「中心軸変換[9]」と呼ばれる方法で、石群の間に隠された対称線を探り出した。これらの対称線は、1 本のツリーを形作っており、その幹は石庭の最良の鑑賞ポイントに向かっている。

しかし、この中心軸ツリーは図 7 に見られる再帰的に構成された鈍角不等辺三角形の対称軸に他ならない。ツリー自体は再帰性を意味し、竜安寺の石庭は 3 回の再帰性を持っている。また、以後すべての龍安寺石庭の図は[8]の実測図から引用した。

3.1. 分析 1

「中心軸が最良の鑑賞ポイントに向かっていること」は、前述の設計ルールに存在した「鈍角不等辺三角形の対称線が最良の鑑賞ポイントに向かっていること」に他ならない。そこで、龍安寺石庭の庭石配置から 3 段階の再帰的に構成される鈍角不等辺三角形を抽出した(図 9)。そして、全体的な庭構成を表していると考えられる第 1 段階と第 2 段階の 3 つの大きい三角形に注目し、各構成要素ごとに中心軸変換をかけると、それぞれの中心軸が最良の鑑賞ポイント付近に集中していることが確認できる(図 10)。中心軸変換は生体などの構造解析に使われるが、この場合は図 9 に見られる 3 段階の再帰的に構成されている鈍角不等辺三角形の中心線が最良の鑑賞ポイントに向かっていることを意味している。つまり、庭園要素の再帰的構成を一望することができ、庭の構成から人間の視覚に再帰的な広がりを感じさせる眺望が最良のポイントであると言える。

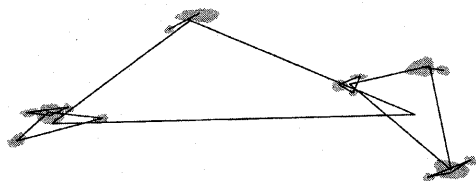


図 9：15 石で構成される鈍角不等辺三角形
(一部例外で 2 石構成の群が存在)
Fig.9 obtuse angle scalene triangles to consist of 15 stones

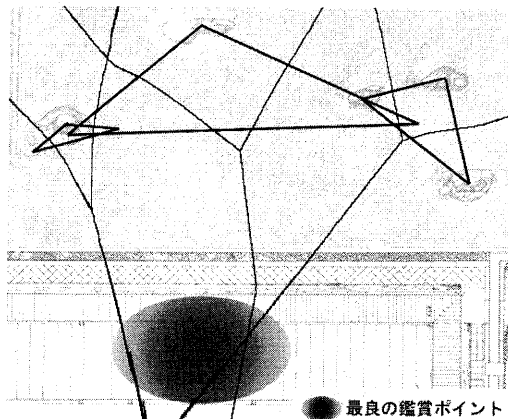


図 10：大きい三角形に中心軸変換をかけた図
Fig.10 After medial axis transform

3.2. 分析 2

次に 3 段階の再帰的に構成される鈍角不等辺三角形(図 9)に注目し、すべての石と群のサイズを測定したところ、ほぼ Zipf の法則が成り立つことが確認された(図 11)。ここでのサイズは、Hausdorff 距離を用いた。Zipf の法則は、この配置がフラクタル的であることを意味する[10]。さらに、多少の揺らぎは存在するが、この再帰的構成は反復関数系(IFS)で表現されるフラクタルとして考えられ、アトラクタは図 12 のようになる。また、その次元は約 0.97 である。

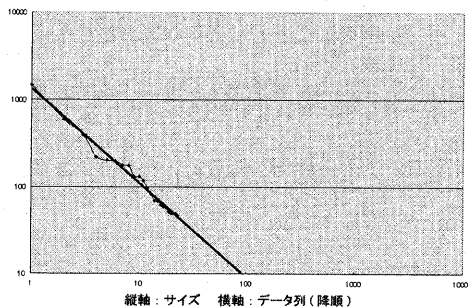


図 11：サイズデータの両対数グラフ
Fig.11 A double logarithmic chart of size data

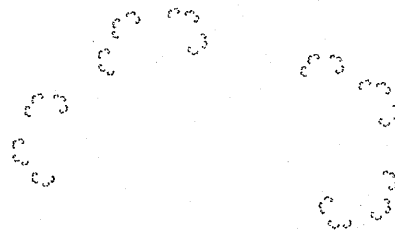


図 12：庭石構成のアトラクタ
Fig.12 Attractor of garden stone constitution

4. インタラクティブ GA による庭園設計

遺伝的アルゴリズム(GA)とは、自然界の生物進化をモデルとして問題における最適解の探索を行うアルゴリズムであり、制約充足問題に対して幅広く使われている解法である。GA を用いた理由は、この方法では探索の方法を陽に指定する必要がなく、設計ルールの表現のみで配置探索を実現できると考えたからである。

しかし、数多くの要素とルールを組み入れるため、GA における染色体としての解個体のコーディング、評価関数の設定、適応度の計測と個体の選択が困難になってしまおうと考えられる。また、あまりに複雑な制約を設定してしまうと、適応度の高いものとしてシステムが決定した配置が必ずしも利用者が美しいと感じられるものではなくてしまう恐れがある。そこでシステムに人の主観を取り入れ、双方向的な庭園設計にすること、要素の増加による制約の複雑化を避けることを目的とし、インタラクティブ GA を導入する。

4.1. インタラクティブ GA

インタラクティブ GA とは GA の応用的手法であり、GA で行われていた選択部分をシステムでなく人間が行うというものである[11]。GA が自然淘汰による生物進化の過程をモデルとしていたのに対し、インタラクティブ GA は人為選択による品種改良の過程をモデルとしているといえる。

インタラクティブ GA は人間に選択を行わせるため、世代を形成する個体数にはおのずと限界があり、個体の多様性という点では単純 GA に及ばない部分がある。さらに、人間が個体を認識するために、染色体を理解しやすい表現型として適切な出力装置を介して表示する必要がある。

しかしながら、その解探索のプロセスには人間の美感や感性が大きく反映されることになり、よって評価関数の設定が難しいとされる人間の主観的要素が絡んだ問題に対して有効であるとされ、現在までに CG やグラフィックアート等の芸術分野を中心に様々な研究がなされている[12][13]。

4.2. 実装方法

庭園のサイズを幅、奥行きともに 25 の正方形とする。庭石の数、大きさはある範囲内で利用者が自由に設定可能である。ただし 3 石ずつの石群単位での設定となっている。庭石は、据え方に関するルールに基づいてモデリングされたものを使用し、座標、サイズを遺伝データとする。

実行は、初期世代の個体群生成として各配置図に石の位置をランダムで設定する。そして、それらに対してシステムの適応度評価が行われ、適応度順にソートした個体群の表現型としての庭園配置図を表示して、ユーザからの入力待ちとなる。染色体の遺伝子型としては各石の構造体を並べた構造体配列とし、評価関数としては、「慣習的設計ルール」と「既存の石庭(龍安寺石庭)の形状特性」をもとに設定した制約に対する違反度を測るものとした(表 1)。設定した制約にはそれぞれ重みが与えられており、適応度を fitness、重みを weight、制約に対する違反の度合いを degree とすると、

染色体の適応度は式 1 で与えられる。

$$\text{式 1: fitness} = \frac{1}{\sum (\text{weight}_i * \text{degree}_i)} \quad (i \text{ は制約の番号})$$

ここで違反の度合いとしては、各制約が満たされていない場合の、その程度の大きさ(例えば石群内の真の石とその他の石の隣接関係が満たされていないなら、その他の石が真の石からどれほど離れているかの距離)を実数値として与えるようにした。また、重みは龍安寺石庭の適応度を測定することにより決定した。

表 1 IGA における石の配置に対する制約と重み
Table.1 condition and weight for stones

番号	石配置の制約	重み
1	全ての石が中央部を避けている	1.54
2	石群同士、石群中の石が鈍角不等辺三角形を形成している	1.32
3	石群同士(群中の真の石同士)が対立関係にある	0.53
4	各石群中の石が隣接関係にある	2.0
5	中心軸が視点を通っている	1.22

利用者からの選択が行われると、GA オペレータとして交叉と突然変異を実行する。ここでの交叉はランダムに生成したマスクビットにより決定する一様交叉で、石単位と石群単位の 2 種類の交叉を行っている。また突然変異は近傍へのランダムな変化とした。交叉と突然変異の終了後は再びシステムによる適応度評価、適応度順にソートしての庭園配置図表示となり、再び利用者からの選択待ちとなる。このような流れを繰り返していくことにより、利用者の主観を取り入れた石の配置を行うことができる。実行にあたっては個体数を 100、交叉率を 0.8、突然変異率を 0.01 とした。

5. 庭園設計システム

5.1. システム構成

システムは利用者に対して庭園設計図の表示を行う庭園表示部と GUI による操作を行うコントロール部から成り立っている。左側がコントロール部、右側が庭園表示部である。システムの全体像を図 13 に示す。

選択は利用者の好みに合う庭園配置図の番号を指定することで行う。また、TOP_VIEW、SIDE_VIEW、WALK_THROUGH(図 14)の 3 つの表示方法があり、これらを切り替えることにより庭石構成をつかむことができるようになっていく。そして Exec_GA ボタンを押すと、選択されている個体をもとに GA オペレータが実行される。

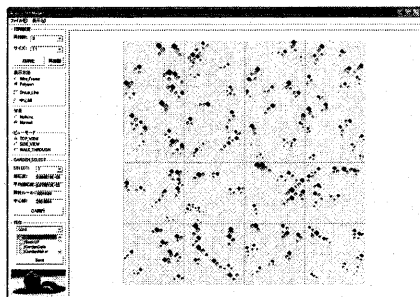


図 13: 実装したシステムの全体像
Fig.13 A total image of the system

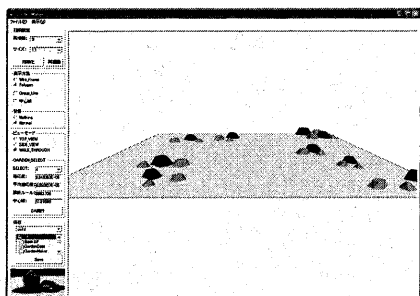


図 14: ウォークスルーモード
Fig.14 Walk-through mode

5.2. 対話型設計プロセス

庭石の初期設定が終わると、設計プロセスに入る。まず、コントロール部の初期化ボタンを押すと、ランダムに庭石が配置され、システムによる適応度評価が行われた後、適応度の高い個体からソートした結果が表示される。

次にその中から利用者が好みに合うものを選択し、Exec_GA ボタンを押すと選択された配置図を元に GA オペレータが実行され、再び適応度の高い個体からソートした結果が表示される。この手続きを繰り返していくことで庭園設計を進めていく。

5.3. 庭園設計システムを用いた実験

本研究で実装した庭園設計システムを用いて、実際に庭園設計を行う実験を試みた。被験者を 20 人募り、慣習的設計ルールと龍安寺石庭の形状特性についての説明を行った後、実際に庭園設計システムを用いて庭園設計を行った。そして、設計途中で被験者が選択した庭園のデータを記録した。記録したデータ内容は、石と石群のサイズデータであり、IGA の選択は 1 被験者につき 10 回行った。

この実験から、全体的な傾向として設計が進むにつれて得られたデータ列の両対数グラフの傾きが徐々に直線に近づいていくこと (Zipf の法則を満たすようになること) が確認できた。つまり、人間のこのような設計プロセスには、システム自体を自己組織化へ向かわせる仕組み (アトラクタを持つダイナミカルシステム [14]) に類似したシステムが働いているといえる。この実験の一例を図 15 に示す。

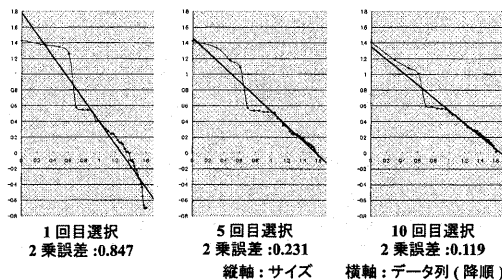


図 15: 実験結果の両対数グラフ

Fig.15 Double logarithmic chart of experimental results

この実験で得られた最も適応度の高かった庭園図にレイトレーシングを施し、背景を合成したものを図 16 に示す。また、図 16 の中心線を矢印で表した物を図 17 に示す。

7. 考察と今後の展望

7.1. 考察

同実験では、龍安寺石庭同様、庭石配置に再帰的な鈍角不等辺三角形を作り、最大の三角形を構成する庭石の中心軸が最良の鑑賞ポイントに向かっている結果になることが確認できた (図 17)。また、多少の揺らぎは存在するが、結果として庭石配置に Zipf の法則がほぼ成り立つ (図 18)。

庭園設計システムを用いた実験では、設計が進むにつれて庭石配置が Zipf の法則を満たすようになることが確認された。つまり、庭園設計には、石の配置について自己組織化へ向かわせるメカニズムがあり、人間の意識と関わりがあると考えられる。

また、インタラクティブ GA は人間に選択を行わせるため、システム操作者の疲労問題を考慮しなければならず、提示できる個体数は、画面上に表示できる面積で制限を受けるため、個体の多様性という点では単純 GA に及ばない部分がある。同様に、探索世代数も、せいぜい 10 世代や 20 世代といったオーダーにならざるを得ない。

7.2. 今後の課題

本実験では、慣習的設計ルールに注目し、IGA を用いることにより石庭をバーチャルに作成してみた。その結果は、龍安寺の石庭と同様、石の配置は再帰的にかつ、“中心軸ツリー構造の中心線”は視点付近に向かっていることが判明した。今後は、フラクタルランドスケープを応用するなどして、龍安寺石庭に見られた Zipf の法則を庭園設計に取り入れる方法を考えていきたい。

また、実験の被験者の数を増やし、より正確なデータによる考察を行いたいと考えている。

さらに、砂の表現の追求や庭石の詳細なモデリング、さらなる設計ルールの抽出などを考えている。

そして、過去に取り組んできた樹木や池を含む日本庭園設計 [15] に応用していくことを考えている。

参考文献

- [1] The Blind Watchmaker, R.Dawkins, Longman, 1986.
- [2] Interactive evolution of L-system grammars for computer graphics modeling, J.McCormack, Biology to Computation, pp.118-130, Amsterdam, Netherlands: IOS Press, Aug./Sept.1993.
- [3] Interactive Evolutionary Computation: Fusion of the Capacities of EC Optimization and Human Evaluation, Hideyuki Takagi, Proceedings of the IEEE, vol.89, no.9, pp.1275-1296.
- [4] Visual structure of a Japanese Zen garden, GertJ.Van Tonder, Michael J. Lyons, Yoshimichi Ejima, Nature, vol.419, pp.359-360, Sep26, 2002.
- [5] 作庭帖 自然風庭園の手法, 秋元通明著, 誠分堂新光社.
- [6] 庭園の設計, 永嶋正信著, 理工図書株式会社.
- [7] 施工本位 石組写真集, 上原敬二編, 加島書店.
- [8] 日本庭園の美 龍安寺 枯山水の海, 西川孟著, 株式会社集英社.
- [9] Biological Shape and Visual Science (Part 1), Harry.Blum, Journal of Theoretical Biology, vol.38, pp.205-287, 1973
- [10] The Science of Fractal Images, Springer, 1988, Chapter 1, Fractals in nature: From characterization to simulation
- [11] 遺伝的アルゴリズム, 北野宏明編, 産業図書
- [12] 対話型進化計算法の研究動向, 高木英行, 畝見達夫, 寺野隆雄, 人工知能学会誌 13(5), 1998
- [13] インタラクティブ GA に基づく画像検索システムの評価, 長尾光悦, 山本雅人, 鈴木恵二, 大内東, 人工知能学会誌 13(5), 1998
- [14] 非線形力学の展望 I カオスとゆらぎ, E.Atlee Jackson 著, 田中茂, 丹羽俊雄, 水谷正大, 森真 訳, 共立出版株式会社, 1994
- [15] インタラクティブ GA を用いた日本庭園設計支援ツール, 難波政佳, 平成 13 年度筑波大学第三学群情報学類卒業研究論文

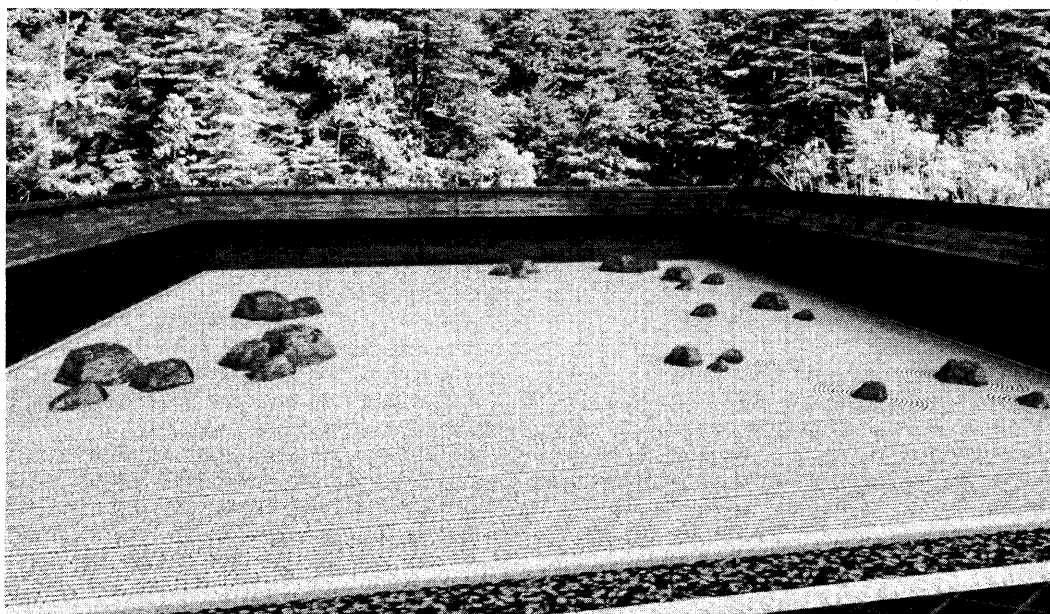


図 16 : 実行結果に背景を合成した庭園
Fig.16 The garden which composed a result and a background

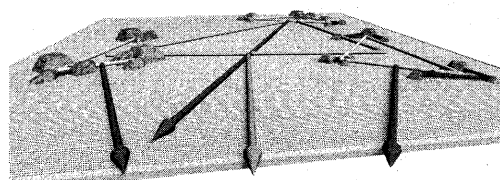
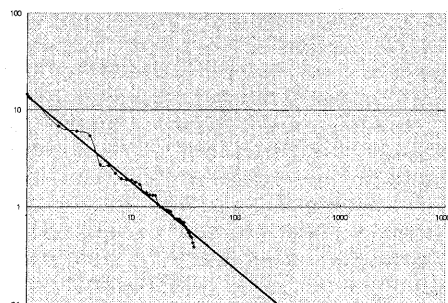


図 17 : 実行結果の中心線
Fig.17 Centerline of a result



縦軸: サイズ 横軸: データ列 (降順)
図 18 : サイズデータの両対数グラフ
Fig.18 A double logarithmic chart of size data