

インタラクティブGAを用いた日本庭園の設計

難波 政佳*, 小部 昌史**, 蔡 東生***

*筑波大学第三学群情報学類 **筑波大学システム情報工学研究科 ***筑波大学電子情報工学系

昨今の大容量通信インフラの整備や計算機の性能向上に伴い、文字や図形だけではなく、画像、映像、VRML等を用いた3次元空間等による情報伝達が一般的になっている。そこで本研究では、「日本庭園」に着目し、現実的設計ルール、特に禁止ルール用い、その基づく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、制約充足問題(CSP:constraint satisfaction problem) 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、システムの設計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した。

Japanese Garden Design using Interactive GA

Masayoshi Nanba*, Masashi Kobe**, Dongsheng Cai***

*College of Information Sciences, Third Cluster of Colleges, University of Tsukuba

**Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

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

Traditional Japanese garden design consists of many factors to deliberately consider, : such as : natural geometric restrictions ; aesthetic or artistic feelings ; designing styles ; and formalistic restrictions. In this report, we use some rules based on traditional Japanese formalistic restriction rules in Japanese garden and set up a constraint satisfaction problem (CSP). We apply Genetic Algorithm (GA) to this problem. Furthermore, to include user's aesthetic or artistic feelings we use interactive GA to solve this CSP for Japanese virtual garden design.

1. はじめに

昨今の計算機の性能向上や大容量通信インフラの整備に伴い、我々を取り巻く情報の表現手法も大きく変化してきた。現在では画像、音声だけによる表現だけではなく、映像、CG、3次元空間表現等が複合された高度な表現が一般的となっている。また、CG、3次元空間表現の世界においては、ノンフォトリアリスティックなもの、人の感性を刺激するもの等、追求される表現目的が多様化してきている。そこで本研究では、「日本庭園」に着目し、3次元空間上にバーチャル庭園を構築することを試みた。本研究は以前より各方面で研究されてきたバーチャル庭園設計において、実際の設計規則を充足するという新しい視点に立ってCSP(constraint satisfaction problem)として問題が設定されている。また、インタラクティブGAを庭園設計に応用した例はまだ存在していないと考えられ、当該研究分野に貴重な知見をもたらすものであると見なされる。

2. 日本庭園について

3. 2.1 庭園の分類

世界に現存する庭園は、大別して自然式と幾何学式の2つがあるが、日本庭園は自然式に属するものであり、さらに表現形式により細かく分けられる(表1)。また利用の面から見ると、園内を散策して楽しむ回遊式と、主に1視点からの鑑賞を楽しむ鑑賞式の2つが存在する[1]。本研究では後者を対象とした。

種別	表現形式	表現内容
自然式	写景的	自然の景をそのまま表現
	縮景的	自然の景を縮小して表現
	象徴的	山を木や石で、海を砂利で表現、等
	抽象的	自然、材料にとらわれずに自由に表現
幾何学式	対称	中心軸に対して対称、中心点から放射状等
	非対称	対称ではないが、直線・円が基本

表1：形式による庭園の分類 [2]

2.2 日本庭園の構成要素

庭園には樹木だけで構成されているものや石だけで構成されているもの等があるが、多くは樹木、庭石、蹲踞、池、流れ等の様々な要素の組合せで構成されている。ここで、庭園構成要素の各々について、種別、要素名、設計における配置優先順位、設計時に考慮する配置ルール、の4つの観点から分類した結果を表2に示した。

種別	要素名	優先順位	配置ルール
石	灯籠 飛石 庭石(石組)	2	視点からの位置、見え方(置き方)を考慮
	蹲踞		
水	滝 流れ 池	1	同上
	植栽		

表2：日本庭園の構成要素の分類

2.3 修景重点について

修景重点とは庭園構成上の重要な施設のことで、鑑賞者の注意をひき、庭園全体の表情を伝えるポイントであり、写真に例えるならば、庭園全体がフレーム全体とすると、修景重点はその中ではっきりとピントの合った部分、被写体の強調されている部分にあたる。その内容については具体的に以下のような構成、配置を考えるとされている。

(構成)

- ・他の部分より大きな、または多くの樹木を配置する。
- ・他の部分より大きな、または多くの庭石を配置する。
- ・他の部分より地形を高くする。
- ・滝、灯籠、蹲踞等を設ける。

(配置)

- ・基本的に庭園内に1箇所。広い庭園には副重点を設けてもよいが、鑑賞者に与える印象の強弱に区別をつける。これは庭園全体の印象が散漫としたものになってしまうのを防ぐためである。
- ・庭園中央部を避けて右奥か左奥に配置。中央部に配置してしまうと視界が遮られて見苦しい。

2.4 植栽におけるルール

庭園設計とは様々な要素をどのようにして組み合わせるかを考える事である。石、水の要素は基本的に庭園内に1箇所、あるいは少数のみ存在させるため、配置に関しては主に視点からの見え方や置き方を考慮すればよい。しかし樹木、低木は庭園内に数多く存在するため、配置に際しては要素間の相互位置関係、個々の形や大きさに関するもの等、複雑で多数の事項を考慮しなければならない。

ここでは樹木、低木といった植栽における設計ルールについて、実在の庭園設計書[2][3][4]を参考にリストアップしてまとめた。ルールには大別して(1)数の構成に関するもの(2)位置的な相関に関するもの、の2つの抽象的なものが存在する。

2.4.1 数の構成に関するもの

庭園への樹木の配置は1本1本ごとに独立で考えるのではなく、「3本、または5本を基本とし、奇数単位の本数を寄せ植えして1株とした木群の配置を考える」とされている。寄せ植えの本数については、以下のような意味付けがなされている。

- 1本植 : 独立樹。庭園全体を圧倒するような印象を持つものは1本だけで配置することがある。ただし幹や枝振りが立派なものを用いる。
- 3本植 : 寄せ植えの基本となるもの。
- 5本植 : 3本とそれに属するもの2本。又は美の中心となる1本とそれに従属するものの組合せ。
- 7本以上 : 上記のものとの組合せ。

また、寄せ植えの際の各樹木には「役木」としての名称が与えられている。図1に示したものは5本植の例であり、円が樹木を表し、その中の文字が役木としての名称となっている。円の大きさはそれぞれの高さに比例している。

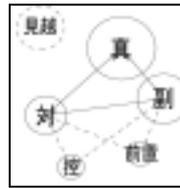


図1: 役木名称の説明図

- 真: 1株の中心となるもの。その株中で最も大きい。
- 副: 真をおぎなうもの。真と同種でやや小さい。
- 対: 真、副と対比させるもの。それらと別種で副より小さいものを使う。
- 控: 地表との連絡。低木を使う。
- 前置: 控と同様。
- 見越: 真の後方に配置することがある。

2.4.2 位置的な相関に関するもの

1) 中央部を避ける配置

全ての植栽は庭園中央部を避けて配置する。修景重点の項で述べたのと同様に、中央部に高さのあるものを配置してしまうと視界が遮られ、見苦しく落ち着きのない印象を感じさせるものになってしまう。

2) 不等辺三角形の配置

各木群中で樹木の配置を行う際に、真、副、対の樹木の位置が不等辺三角形を形作るようにこころがける。特に、真の樹木の位置が鈍角となるようにする。日本庭園は元々自然美を追求した表現に主体が置かれているが、自然界においては直線形状がほとんど見られず、樹木の並びも不規則であるため、それに従う形でこのような配置方法が考案された。また、多くの樹木を配置する際の木群同士、さらに木群をまとめて大きな群として扱った場合の大群同士においても同様の形になるように、再帰的に不等辺三角形を形作っていく(図2)。

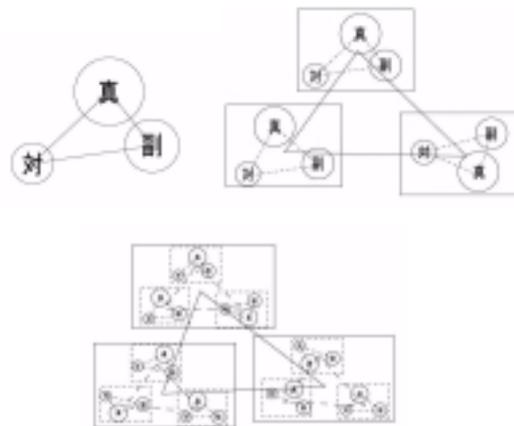


図2: 再帰的に不等辺三角形の配置を行う

3) 遠近感に対する考慮

樹木を使い近景、遠景を設けて対比させることにより遠近感を強調し、庭を広く感じさせる。

4) 樹木相互間の位置関係に対する考慮

樹木相互間の位置関係には、対立関係、関係関係、支配関係の3つの場合がある。それぞれを図3~5に示した。

木群同士では真の樹木同士がお互いに対立関係となるようにし、木群内の個々の樹木の位置は真の樹木が他を支配する関係になるように、特に低木の位置は完全に支配関係になるようにする。関係を考えるのは、多くの木群を配置するのにいくつかの群をまとめて大群として扱う時の内部の木群同士である。

A：対立関係にある樹木

それぞれの樹木の位置を中心、高さを半径とした半球が交わらないとき。

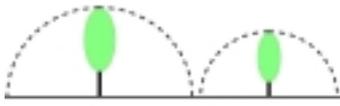


図3：対立関係にある樹木

B：関連関係にある樹木

それぞれの樹木の位置を中心、高さを半径とした半球が交わるとき。

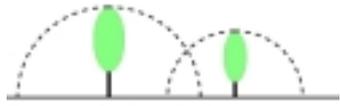


図4：関連関係にある樹木

C：支配関係にある樹木

1本の樹木の位置を中心、高さを半径とした半球内に他の樹木の位置が含まれるとき。

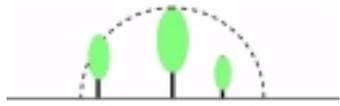


図5：支配関係にある樹木

4. 遺伝的アルゴリズムを用いた庭園設計

3.1 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm：以下 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、巡回セールスマン問題、ナップザック問題、図形配置問題等の組合せ最適化問題に対して幅広く使われている解法である[18][19]。

自然界における生物の進化過程は、周りの環境への適応度の高い個体ほど高い確率で生き残り、子孫を繁栄させて進化していくが、適応度の低い個体はやがて死滅して姿を消していくという自然淘汰の繰り返しである。GAのプロセスはこの過程をモデルとしており、優良解同士を適当に組み合わせることで最適解を探索するというものである。

遺伝的アルゴリズムを用いた理由は、この方法では探索の方法を陽に指定する必要がないので、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。

3.2 GA による庭園設計

庭園設計のプロセスを設計の禁止ルールを考慮した庭園構成要素の配置組合せとみなし、GA を応用して制約充足問題 (CSP) を満たす物で設計を行った。まずは樹木のみについて、庭園内の配置決定を行う。

3.3.1 庭園のデータ設定

庭園のサイズを幅 20、奥行き 20 の正方形とする。庭園中に配置する樹木として、7本の樹木から成る木群を修景重点と

して1株設定し、さらにその他に5本の樹木から成る木群が1株と、3本の樹木から成る木群を3株、合計で21本を設定した。配置を考える際の相互の影響半径となる樹木の高さとしては、影響半径が大きい程その支配関係にある樹木本数も多いものと考え、修景重点である木群の真の樹木に最も大きい値を、群中の他の樹木は真の高さから少しずつ減じた値を設定した。その他の木群についても同様に樹木の本数に応じた値を設定した。

3.3.2 実装方法

各樹木のデータは位置の X 座標、Y 座標、高さ、それが属する木群番号、役木名をメンバとして持つ構造体として表現する。位置については、実数値をそのまま入れてしまうと配置の多様性は高まるが、後述する評価関数による適応度の測定が困難になるため、庭園中の縦横の辺を単位長さ刻みで分割してできる格子点の座標のみを取り得る値とする。

染色体の遺伝子型としては各樹木の構造体を並べた構造体配列とし、評価関数としては、前述の設計ルールをもとに設定した制約 (表3) に対する違反度を測るものとした。ここで、樹木の位置的な相関に関する制約に加え、さらに物理的な制約として樹木の位置の重複を判定するものを追加した。また、数の構成に関するものについては、既に遺伝子型の表現の際に7、5、3、3、3本ずつの樹木として木群を区切ってあるので、制約としては設定しなかった。設定した制約にはそれぞれ制約違反の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、染色体の適応度は次式で与えられる。

$$fitness = \frac{1}{\sum (weight_i * degree_i)} \quad (i \text{ は制約の番号})$$

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 (例えば木群内の真の樹木とその他の樹木の支配関係が満たされていないなら、その他の樹木が真の樹木の影響半径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。

番号	制約	重み
1	全ての樹木が中央部を避けている	10
2	木群同士、各木群中の樹木が不等辺三角形を形成している	10
3	木群同士 (群中の真の樹木同士) が対立関係にある	10
4	各木群中の樹木が真の樹木の支配下にある	10
5	樹木の位置が重複していない	100

表3：設定した制約とそれぞれの重み

選択は評価関数により計測された適応度によるルーレット選択とし、最も適応度の高い個体を無条件で次世代に残すエリート保存戦略を取り入れた。交叉はランダムに決定された配列中の1点を交叉点として染色体の遺伝子の持つ位置データを交換する1点交叉とし、突然変異は樹木の位置をランダムに変更することで実現した。

3.3.3 実行結果

染色体の個体数を 100、世代数の上限を 2000、交叉率を 0.8、突然変異率を 0.01 として GA を実行した。図6に示すのが世代毎の平均適応度の推移のグラフ、図7に示すのが世代毎の最大適応度のグラフ、そして図8に示すのが実行結果として得られ

た樹木配置図である(視点をやや上方において見下ろしたもの)

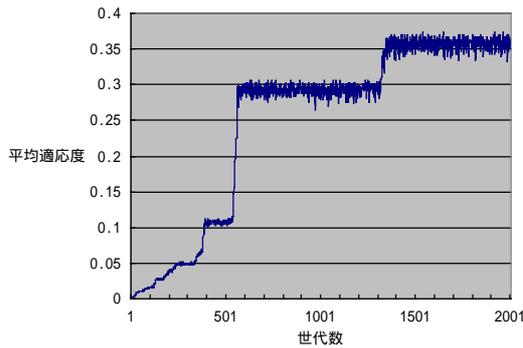


図6：世代毎の平均適応度の推移のグラフ

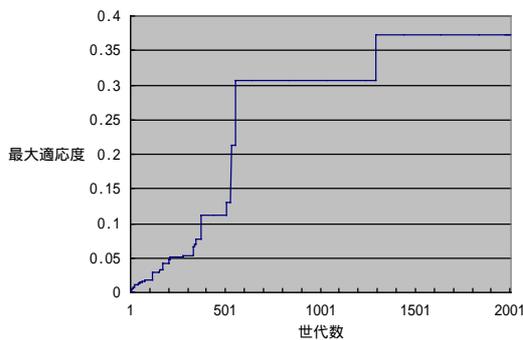


図7：世代毎の最大適応度の推移のグラフ

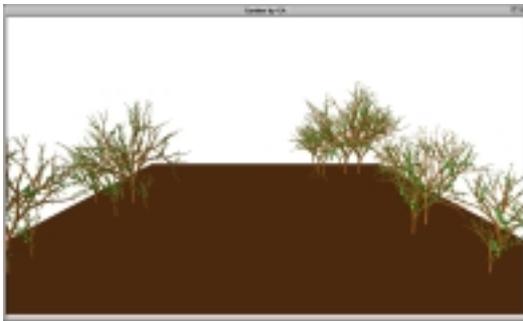


図8：GAにより樹木のみを配置をした庭園

3.4 インタラクティブGAの導入

次に、新たな庭園構成要素として池、庭石を組み入れることを考える。しかしそうすると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う。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人が美しいと感じられるものではなくなってしまう恐れがある。そこでシステムによる一方的なものであった庭園設計プロセスに人の主観を取り入れること、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。

3.5 インタラクティブGA

インタラクティブGAとは対話型GA、模擬育種法とも呼ばれる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[25]。インタラクティブ

GAの流れは以下になる。

- 1：ランダムにN個の染色体を生成して、初期世代の個体群を形成する。
- 2：各個体に対し、その染色体の遺伝子型を表現型に変換する。
- 3：変換された表現型の情報をもとに、人間の主観的判断によって望ましい個体を選択する。
- 4：選ばれた個体の染色体を親として、各種遺伝的操作によりN個分の染色体を生成し、新たな世代の個体群を形成する。
- 5：終了条件を満たせば終了。そうでなければ2に戻る。

単純GAの流れと比較すると、評価関数をもとに行われていた選択の部分が人間の主観に基づいて行われるように変更されているが、優良解同士の組合せにより最適解を探索するという点では同様である。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よう。

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観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ような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して様々な研究がなされている[25][26][27]。

3.6 インタラクティブGAによる庭園設計

樹木の配置のみを行っていた単純GAによる庭園設計を拡張し、池、庭石の要素を追加し、インタラクティブGAに基づく庭園設計アプリケーションを開発した。

3.6.1 庭園のデータ設定

庭園のサイズを先のものよりやや小さくし、幅、奥行きともに16の正方形とする。構成要素は池、庭石、樹木を考え、それぞれのデータはある範囲内で利用者が自由に設定できるものとした。ただし樹木については本数単位ではなく、3本ずつの木群単位での設定となっている。また、利用者の主観による評価、選択を前提としているため、システムとして修景重点の存在は扱わない。

3.6.2 実装方法

池は円で近似し、その中心のX座標、Y座標、半径をメンバとする構造体として表す。庭石は多角形で近似し、その中心のX座標、Y座標、サイズをメンバとする構造体とし、複数の場合は構造体配列とする。各樹木のデータの扱いは単純GAでの時と同様とする。それぞれの取り得る位置の座標は、庭園の縦横の辺を単位長さで区切り、さらにそれを4分割した格子点とし、単純GAで実装した時に比べて位置の多様性を高めた。つまり縦横の格子点の数は庭園のサイズの4倍になる。

実行はまず池と庭石の配置をランダムに行い、利用者が好みにあうものを選択し、以降のそれらの配置は選択されたもので固定する。その後、初期世代の個体群の生成として各配置図に

樹木の位置をランダムで設定し、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。ここで樹木の位置を設定する際に、単純 GA においては要素同士の重なりは考慮せず、評価関数によるチェックという形になっていたが、インタラクティブ GA では利用者に対する表示を行う以上、物理的におかしい配置は避けるべきであると考え、要素同士の重複が発生しないように最初からチェックしながら行うようにした。また、評価関数は単純 GA で用いたものと同様に、設計ルールをもとにした制約に対する満足度を測るものとした。ここで、遠近感を強調することを目的とし、近景、遠景を配置する制約を増やした。設定した制約とそれぞれの重みは表 4 の通りである。物理的制約（樹木の位置重複がないか）が入っていないのは、上述の理由、すなわち最初から要素同士の重複が発生しない値を設定しているということによる。また、いくつかの制約に負の重みが与えられているが、これは正の制約であるためであり、違反度を減少させるように働いている。

番号	制約	重み
1	全ての樹木が中央部を避けている	10
2	木群同士、各木群中の樹木が不等辺三角形状を形成している	-10
3	木群同士（群中の真の樹木同士）が対立関係にある	10
4	樹木が多い場合、大きな群の中の木群同士が隣接関係にある	10
5	各木群中の樹木が真の樹木の支配下にある	10
6	近景が存在する	-10
7	遠景が存在する	-10

表 4：インタラクティブ GA において設定した制約と重み

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 1 点交叉ではなく、各遺伝子座の値をどちらの親染色体から引き継ぐかを、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とした。また突然変異は局所的探索能力の向上を期待して、近傍（変異前の位置から $-1 \sim +1$ グリッド単位）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、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庭園設計を実現する。また、システムによる適応度評価も平行して行っているため、常に最上位に表示された個体のみを選んでいくと、単純 GA の流れとほとんど変わらないのは、いわずもがなである。実行にあたっては個体数を 16、交叉率を 0.8、突然変異率を 0.01 とした。

4 庭園設計システムの実装

4.1 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。

表示部では、設計を実行中の庭園の表示を行う。コントロール部で庭園を眺める視点を変更することができ、真上からの鳥瞰モード (TOP_VIEW)、斜め上からの俯瞰モード (SIDE_VIEW)、選択されている庭園内のウォークスルーモード (WALK_THROUGH) の 3 通りの設定が可能である。それぞれを図 9～図 11 に示す。

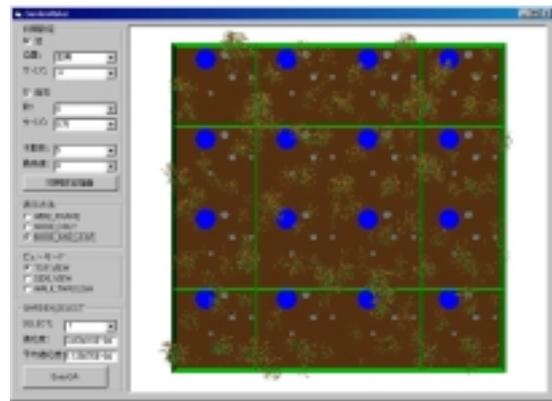


図 9：真上からの鳥瞰モード (TOP_VIEW)

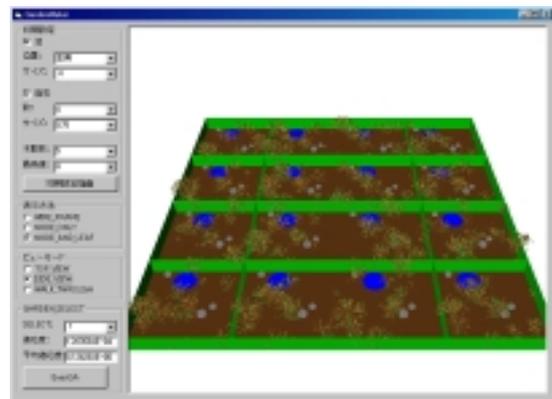


図 10：斜め上からの俯瞰モード (SIDE_VIEW)

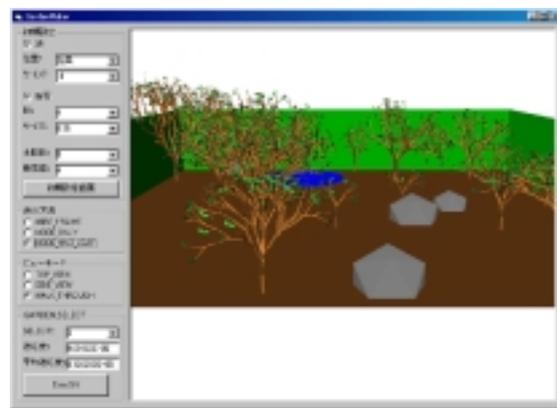


図 11：選択されている庭園内のウォークスルーモード (WALK_THROUGH)

コントロール部では初期設定として、池、庭石、樹木の有無、サイズ、数の設定をする。また、視点モードの変更、描画モードの変更、庭園の選択、GA オペレータの実行が行える。描画モードはワイヤーフレーム (WIRE_FRAME)、樹木の葉がなく枝のみ (NODE_ONLY)、樹木の葉と枝の完全描画 (NODE_AND_LEAF) の 3 通りの設定が可能であり、後者のものほど描画に時間がかかる。また、視点モード、描画モードを変更すると、それと同時に表示部の庭園表示もリアルタイムで変更される。

選択は利用者の好みにあう庭園配置図の番号を指定することでを行い、配置図番号は左上が 1、その右隣が 2、という並びになっており右下が 16 になる。このとき、システムの適応度評価を元にしたソート済みの表示になっているので、左上のもの

ほど適応度が高い個体である。ExecGA ボタンを押すと、選択されている個体をもとに GA オペレータの実行を行う。

4.2 対話型設計プロセス

データ入力が終わると、設計プロセスに入る。池と庭石を要素として取り入れる設定にした場合はまずそれらの配置のみが表示され(図12) 利用者がその中から最も好みにあうものを選ぶと(図13) それらの配置は全て固定され、次に初期状態の樹木を配置したもの(図14) が示される。池と庭石のどちらも取り入れない場合は最初から樹木を配置したものが示される。

利用者が配置図を1つ選択してGA オペレータを実行すると、システムによる適応度評価が行われ、適応度の高い順にソートした結果が表示される。ここまでを1ステップとし、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(図15~22) なお、比較のために各ステップでの適応度が最低の配置図も示した。

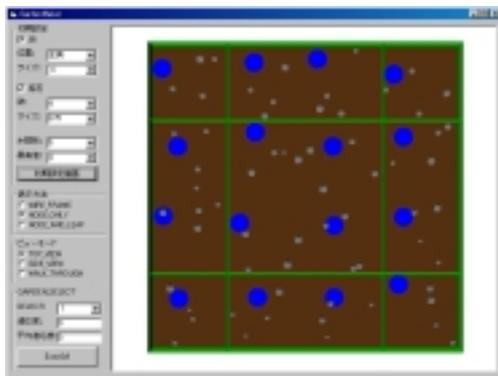


図12：池と庭石のみが表示されたもの

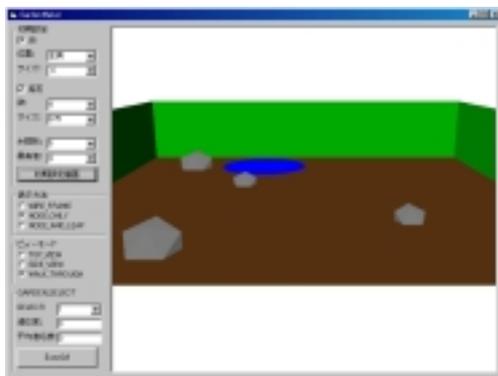


図13：選択した池と庭石のみの配置図

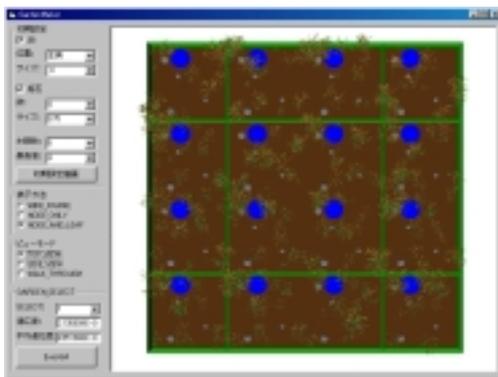


図14：初期状態として樹木が配置されたもの

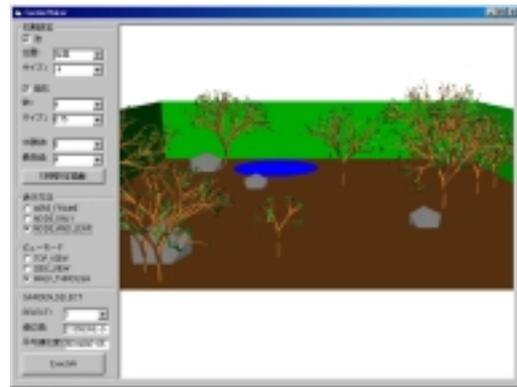


図15：1ステップ目で選択した配置図

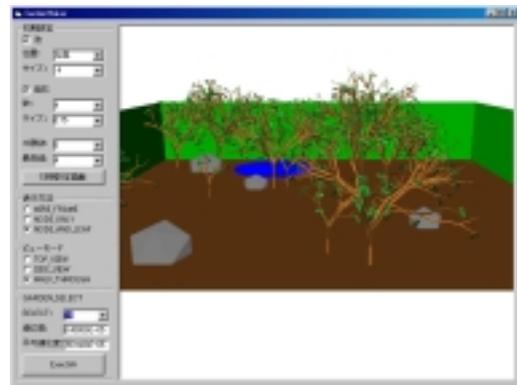


図16：1ステップ目で適応度が最低の配置図

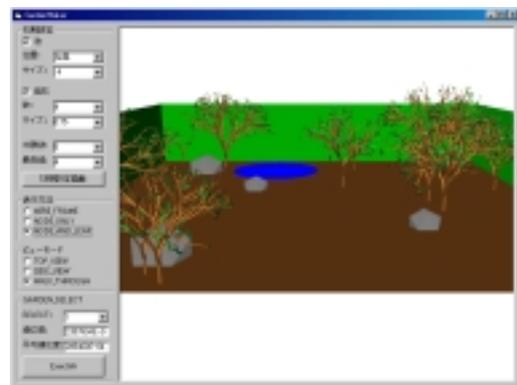


図17：2ステップ目で選択した配置図

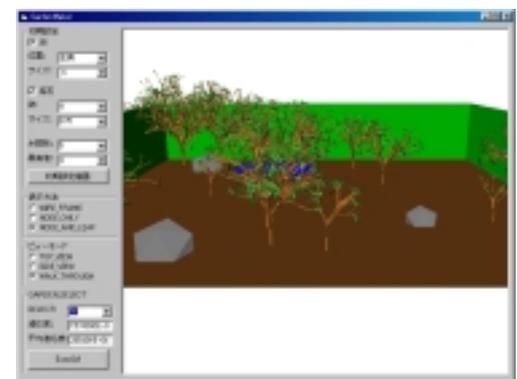


図18：2ステップ目で適応度が最低の配置図

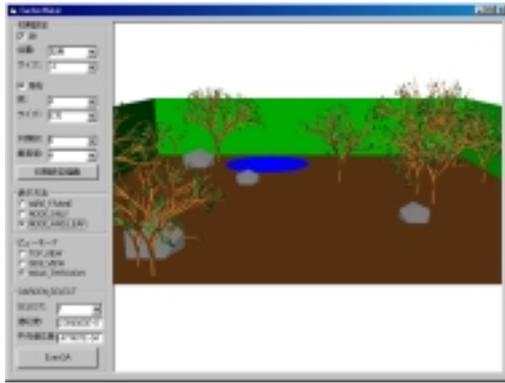


図 19 : 3ステップ目で選択した配置図

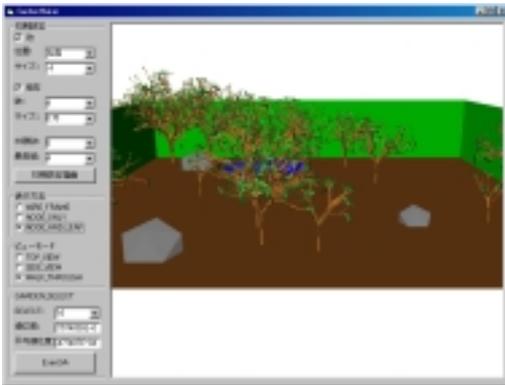


図 20 : 3ステップ目で適応度が最低の配置図

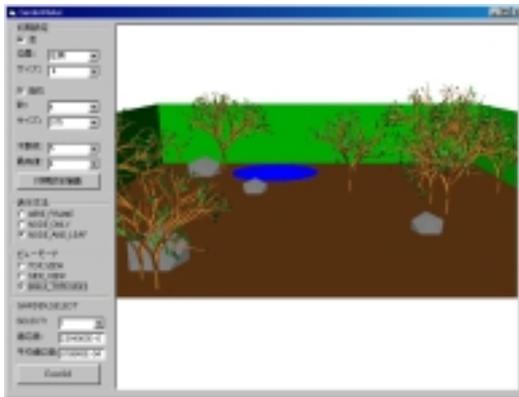


図 21 : 4ステップ目で選択した配置図

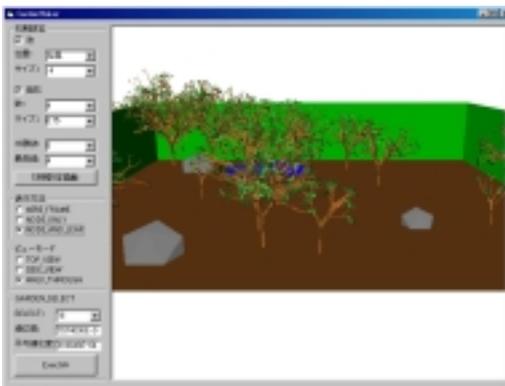


図 22 : 4ステップ目で適応度が最低の配置図

4.3 実行結果

図 23 に示すのが世代毎の平均適応度の推移のグラフ、図 24 に示すのが実行結果として得られた樹木配置図である。

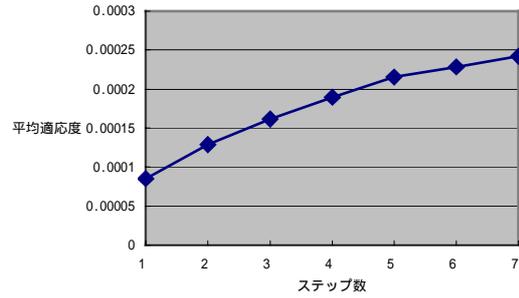


図 23 : 平均適応度の推移のグラフ

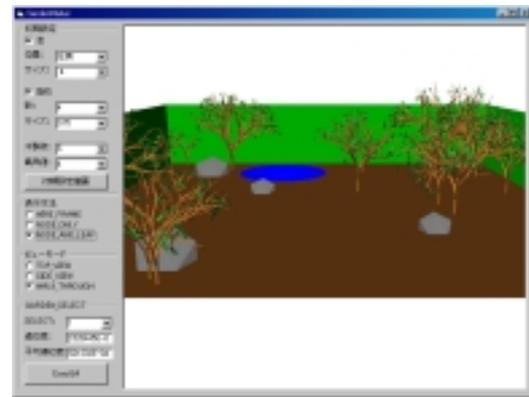


図 24 : 最終的に得られた樹木配置図

5 考察と今後の展望

5.1 研究のまとめ

本研究では日本庭園を対象としてその設計ルールの中の制限ルールを抽出し、最適化手法である遺伝的アルゴリズムを用いて計算機による3次元バーチャル庭園の構築を行った。樹木モデルの作成には L-system を用いた。さらにインタラクティブ GA の手法を用いて、利用者の主観に基づく庭園設計を行うことのできるシステムを開発した。

5.2 考察

インタラクティブ GA を用いた庭園設計システムは、選択と GA オペレータを繰り返していくことで利用者の満足度も高まっていくことが期待できる。さらに、各ステップでのシステムの計測する平均適応度が徐々に上昇していくことが認められた。現在の問題点は、視点切り替え、表示庭園切り替えの際の表示部の再描画にかなり時間がかかることである。特に樹木を高く設定しすぎると、描く枝の数が格段に増えてしまい描画にかなりの時間がかかってしまう。

樹木モデルの作成については、Stochastic L-system を用いているためにそれぞれの樹木が違った形にはなるが、Parametric L-system の書き換え規則を1つだけしか設定していないため、樹種の違いを感じさせる程のものではなかった。それにより真、副、対の樹木、低木の見た目による違いを明らかにできなかったため、表示される庭園の視覚的相違がわかりづらいという点がある。

5.3 今後の課題

今後の課題としてはまずL-systemによる樹木モデルをさらに多様化し、樹種の違いを持たせることが第一であると考えている。真、副と対の樹木の違い、低木の樹形等を視覚的にはっきりと認識できるようにしたい。さらに現段階では葉の表現が不完全なため、それを改善する必要がある。

また、実際に庭師の方に意見をお聞きし、考慮する制約の数を増やすことにより、さらにリアルな庭園にしたい。

庭園設計システムにおいてはプログラムの効率の改善、描画方法の改善等を行って描画、実行速度を高めていかなければならない。また、現段階では庭園構成要素は池、庭石、樹木の3種類だけに限られているので、さらに多くの要素を取り入れることについても検討していきたい。

参考文献

- [1] 「1/f ゆらぎを使った庭園設計に関する研究
-自然な樹木配置の提案-」
馬場利光 1997 年度筑波大学卒業論文
- [2] 「作庭帖：自然風庭園の手法」
秋元通明 誠文堂新光社 1996
- [3] 「作庭と植栽 -飯島亮作品集-」
飯島亮 誠文堂新光社 1993
- [4] 「庭木・花木 配置と仕立て方入門」
誠文堂新光社 1972
- [5] 「日本庭園の秘法：渋さの解明」
斎藤勝雄、和田貞次 日貿出版社 1970
- [6] 「日本庭園の特質に関する研究」
進士五十八 造園雑誌53(1) 1989
- [7] 「日本庭園における庭木と庭石の構成特性
ならびにその応用による庭園の自動設計」
千葉喬三、林俊克 造園雑誌49(3) 1986
- [8] 「桂離宮庭園のデザイン要素のフラクタル性について」
徐英大、森本幸裕 ランドスケープ研究60(1) 1996
- [9] 「日本庭園のデザイン要素のフラクタル性について」
徐英大、森本幸裕 ランドスケープ研究60(5) 1997
- [10] 「The Algorithmic beauty of Plants」
P.Prusinkiewicz, A.Lindenmayer Springer-verlag 1990
- [11] 「The Artificial Life of Plants」
P.Prusinkiewicz, Mark Hammel, Radomir Mech
SIGGRAPH98 CourseNote22 1998
- [12] 「Visual Models of Plants Interacting with Their Environment」
P.Prusinkiewicz, Radomir Mech
SIGGRAPH98 CourseNote22 1998
- [13] 「Realistic modeling and rendering of plant ecosystems」
Oliver Deussen, Pat Hanrahan, Bernd Lintermann, Radomir
Mech SIGGRAPH98 CourseNote22 1998
- [14] 「Synthetic topiary」
P.Prusinkiewicz, Mark James, Radomir Mech
Proceedings of SIGGRAPH'94 ACM SIGGRAPH 1994
- [15] 「Developmental Models of Herbaceous Plants
for Computer Imagery Purposes」
P.Prusinkiewicz, A.Lindenmayer, J.Hanan
Proceedings of SIGGRAPH'88 ACM SIGGRAPH 1988

- [16] 「向日性による樹木の自然な枝振りのCGシミュレーション」
千葉則茂、金丸直義、高橋清明、斉藤伸自
電子情報通信学会誌 J75-D- 1992
- [17] 「CGのための樹木の生長モデル
-架空の「植物ホルモン」による自然な樹形の生成-」
千葉則茂、大川俊一、村岡一伸、三浦守
電子情報通信学会誌 J76-D- 1993
- [18] 「遺伝的アルゴリズム」
北野宏明 産業図書 1994
- [19] 「遺伝的アルゴリズム：GAの謎を解く」
伊庭齊志 オーム社 1994
- [20] 「絵でわかる 遺伝子とDNA」
石浦章一 日本実業出版社 1997
- [21] 「制約充足問題の基礎と展望」
西原清一 人工知能学会誌12(3) 1997
- [22] 「制約充足問題の近似解法」
狩野均 人工知能学会誌12(3) 1997
- [23] 「設計における知識表現とモデリング」
中島裕生 人工知能学会誌7(12) 1992
- [24] 「An Intelligent Assistant for the Design of Green Areas」
Perez-Cruz, J.L., R.Conejo, L.Mandow
Knowledge Based Systems for Civil and Structural
Engineering Civil-Comp Press 1993
- [25] 「対話型進化計算法の研究動向」
高木英行、畝見達夫、寺野雅雄 人工知能学会誌13(5) 1998
- [26] 「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
- [27] 「模擬育種法を用いた画像フィルタシーケンスの自動生成の試み」
武藤武士、駒形伸子、上田勝彦
ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」 1998