

世界遺産竜安寺枯山水石庭から癒しの仮想空間を開発

黄正<sup>†a)</sup> 王雲<sup>†b)</sup> 鐘傑<sup>†c)</sup>

From World Heritage a dry landscape garden of Ryouanzi to development of healing virtual space

Zheng HUANG<sup>†a)</sup>, Yun WANG<sup>†b)</sup>, and Jie ZHONG<sup>†c)</sup>

あらまし 本研究では、日本庭園と当時の庭園設計書に着目し、そのルールを抽出し、対話的遺伝アルゴリズム [1] を用いて 3 次元空間上に、自由度を加えた日本庭園的癒しの仮想空間を創造するツールを開発する。ツール開発のためアイトラッキングによる視線解析を用いて「既存の庭園の形状特性」「人間の心理的反応」を抽出し、鑑賞者の視点から庭師による「ルール」の適用の仕方を解析する。ここでは、既存の庭園の例として、竜安寺に注目する。

キーワード 対話的遺伝アルゴリズム, VRML, 慣習的設計ルール, アイトラッキング,

1. はじめ

世界遺産竜安寺の枯山水庭園にみられる日本庭園は、少ないオブジェクトのランダムに見える配置、とオブジェクトが配置されていない「無」の空間との「作為」はその庭園を鑑賞するもの感性を刺激し、精神的な安寧?禅の「無」の感覚?を与える。枯山水庭園にみられる静寂で、人々を禅の「無」の境地に導く日本庭園の設計法は、その記録が禅的に抽象的、精神的でよくわかっていない。

近年,Dawkins のパイオモルフ [1] や L-system に基づいた植物生成 [2] など、進化計算法 [3] を CG 生成へ応用する研究が多くなされている。

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]。日本庭園の設計には、華道における花の配置と同様、基本的な庭園構成要素配置に関する「教示」、「設計段階で庭師が拠り所とする慣習的設計ルール」が存在する。しかし、この「ルール(教示)」は慣習的で意味のわかってないものも多く、用い方には、古くから庭師の経験によ

る自由度が多いため、それが設計された庭園の特徴となっており、その背後にある「作為」を解析する必要がある。この「作為」は庭園構成要素配置に関する一種の“ノイズ・テクスチャ”と考えられる。このように、様々な庭師の個性、美意識、経験が関わってくるため、「ルール」のみで自動庭園設計を行うことはできない。

本研究で注目したアイ・トラッカーを用いた研究は非常に様々な分野に渡っており、大きく分けると心理学・神経科学、生産管理工学・ヒューマンファクター工学、マーケティング・広告、コンピュータサイエンスなどである [7]。近年の研究において、心理科学の分野では、絵画に対して鑑賞者の視点の注視データを取り、その複数の被験者のデータから Fixation Map (注視点と注視時間の三次元グラフ)を得て、それを鑑賞対象の絵画作品に明暗としてフィルタリングを行うことで、その絵画において重要な領域を視覚化する研究、[5] 生産管理工学・ヒューマンファクター工学の分野では、飛行機のフライト・シュミレーターにおいて進入、着陸時にパイロットの計器への注視がどのような配分になっているかを調べる研究 [6] や、昼夜の車の運転時の運転手の視点の動きを測定する研究 [7]、マーケティング・広告の分野では、Web ページの構成に関して視点の動きを測定してそのデータ反映させることが多く成されており、他にも様々な広告分野でそ

<sup>†</sup> 筑波大学システム情報工学研究科、茨城県つくば市  
Graduate School of Systems and Information Engineering,  
University of Tsukuba, tsukuba, ibaraki, 305-8577 Japan  
a) E-mail: hzh@aoi3.cs.tsukuba.ac.jp  
b) E-mail: wy@aoi3.cs.tsukuba.ac.jp  
c) E-mail: zhong@aoi3.cs.tsukuba.ac.jp

の配置に対して視点データを取り入れている。

また、コンピュータサイエンスの分野では眼球運動のデータを応用した研究が多く成されており、CGの分野ではノン・フォトリアリスティック・レンダリングの分野で、写真に対する視点データによってその写真を抽象化する研究 [8] がある。このように視点データを利用した研究は様々な分野に渡っているが、その中で本研究は、視覚心理学、認知科学の分野において視覚対象の空間をその構造の特性と、鑑賞者の視点の動きへの作用から解析して、その特性、例えば「癒し」空間を鑑賞する際の鑑賞者の視点データを用いて他の分野の空間設計に「癒し」効果を反映させるなどの3次元空間設計に視点データを応用しようという点が新しい試みであると考えられる。また、コンピュータ・グラフィックスに対しての視点データの新たな応用方法の開拓へと繋げていく橋渡しとしても位置を付けられると考える。

## 2. 研究目的

本研究では、日本庭園、その中でも特に世界遺産竜安寺枯山水庭園と当時の庭園設計書に着目し、そのルールを抽出し、対話的遺伝アルゴリズム [5] を用いて3次元空間上に、自由度を加えた日本庭園的癒しの仮想空間を創造するツールを開発する。図1

ツール開発のための1つのアプローチとして、形状解析法・アイトラッキングによる視線解析を用いて「既存の庭園の形状特性」「人間の心理的反応」を抽出し、鑑賞者の視点から庭師による「ルール」の適用の仕方（「作為」）を解析する。ここでは、既存の庭園の例として、竜安寺に注目する。

視点の動きについての詳細な解析は Matlab で解析ツールを作成し、それを随時改良を加えながら解析することを試みる。またこれまでの研究で抽出した設計ルール以外に、最古の庭園設計書 [10] [11] [12] から新たに取り入れるべきルールを抽出し、設計ツールを改良すると共に、それらのルールを既存の枯山水庭に照らし合わせて解析していくことを試みる。

## 3. 視線解析

被験者は10名、アイ・トラッカー装置図2をつけて、自由に歩きながら2分ぐらい鑑賞してもらい最終的に最適だと感じる鑑賞ポイントでとめて、鑑賞してもらおう図3。アイ・トラッカー装置によると、石庭を鑑賞する時、被験者の眼球の中心方向への向きからの

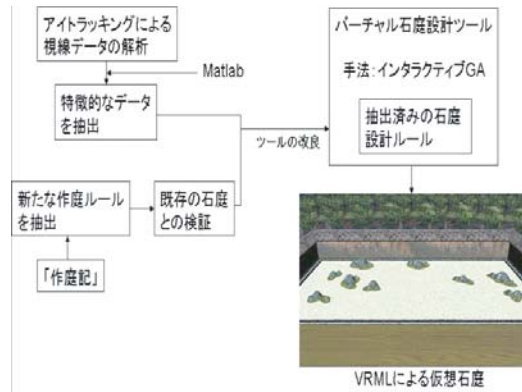


図1 研究の概略  
Fig.1 the summary of rasearch



図2 アイ・トラッカー装置:ナックイメージテクノロジ株式会社のアイ・トラッカー EMR-8B (Eye Make Recorder) 眼球運動計測装置、検出レート: 60HZ(片目)、検出分解能: 眼球運動 0.1angle、瞳孔径 0.02mm、ヘッドユニット重量: 約 250g、アイマークレコーダは視野映像にデータコードを重ねたビデオ信号を出力する。

Fig.2 Eye-track set:(Eye Make Recorder) measurement equipment of eye movement, Detection Rate: 60 HZ (one eye), Detection decomposition: eye movements 0.1angle, diameter of pupil 0.02 mm, Head Unit Weight: approximately 250 g, Eye Make Recorder: lap code of the data over image of field and then output video signal

x軸、y軸への角度、瞳孔径、移動速度、注視時間、静止画像、移動軌跡などを出力できる。

イラストレータで画像の処理:

実は被験者は石庭を鑑賞するときには、頭と体が動いているので、EMR-DExpressで分割された静止画像中の視線軌跡はおおよそ、頭が固定されていると考えられる。この静止画像の視線軌跡をイラストレータでトレースして、この軌跡を順番に繋いでいって竜安



図3 被験者アイ・トラッカー装置をつけて廊下で自由に歩きながら、石庭を鑑賞する

Fig.3 subject put on Eye Tracker set appreciating a stone garden as freely walking in the hallway.

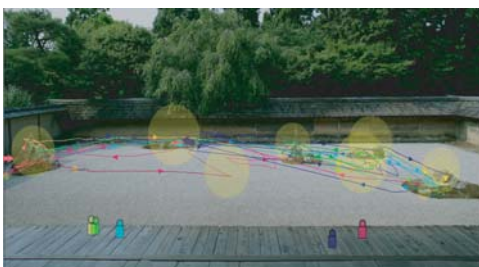


図4 イラストレータで処理された6番目被験者20秒の視線軌跡である、注視順位を5分割して色をつけている、(赤、黄色、緑、水色、青)1番から5番までの色が時間の早い順に割り当てられる。円の大きさは注視時間である。

Fig.4 the eye trajectory of the sixth subjects processed by Illustrator in 20 seconds, ranking gaze divided into five by different color (red, yellow, green, light blue, blue) from the first to fifth color indicates the order time. the size of circle is the time of gaze

寺画像の上に乗せる、最後もらった視線軌跡を頭が固定されると考える。実験を行う時にはエラーが多く軌跡が飛んでいるところがある、ここは読み飛ばして処理する。

イラストレータで処理された視線軌跡によると各被験者は以下の共通点を持っている。探索過程においての個々の群に注目する動きの繰り返しは多く見られる。

また石庭の鈍角三角形を構成する形状特性に沿って視点を動かす様子も見られる、対、副、真と中心軸方向の動きが繰り返されていることが分かる。フラクタルで追っているような感じが感じられる。

また、個人の興味と性格によって違う点を持っている。各鑑賞者により視点動きの速度違う、各群に注目

Position1	Position2	Position3	Position4	Position5
1	6	0	3	0

図5 鑑賞位置は五つに分けて、Positionごとの最適鑑賞ポイント選択数

Fig.5 the position of appreciation is divided into five, number of choose the optimum appreciation points at each Position

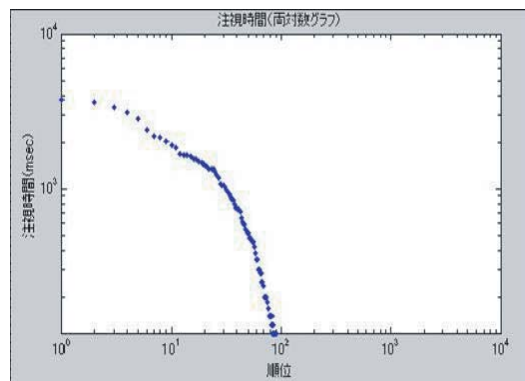


図6 注視時間傾き-0.96

Fig.6 the slope of gaze time is -0.96

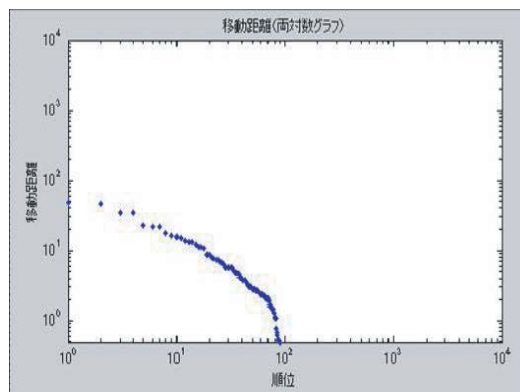


図7 移動距離傾き-1.07

Fig.7 the slope of movement interval is -1.07

する時の注視時間と繰り返す回数も違う、または最後選んだ最適鑑賞ポイントも違う。図5

Matlab でデータの処理：

注視時間を測定すると、データを降順に並べて、両対数を求めて傾きを調べると-0.96になる図6。移動距離を測定すると、データを降順に並べて、両対数を求めて傾きを調べると-1.07になる図7。石の形状特性は視点の動きに影響を与えている可能性があると考えられる。

#### 4. 作庭ルールと形状特性を抽出する

日本庭園は秩序とランダム性の混じり合ったフラクタル的な自然の美しさを追求する庭園である。また、日本庭園の設計は庭師の完全なる自由創作ではなく、各種庭園構成要素に関するルール等、様々な「慣習的設計ルール」に基づいて行われており、それに加え現存する石庭は個々に独自の特徴を持っている。

作庭ルール:

実際の庭園設計書[10][11][12]に着目し、庭石に関するルールを細かく分類すると、

(1) 据え方に関するルール: 安定感を出すために、天端が平らな石を据える場合は、平らな面が地面と平行になるように据え、山形の石を据える場合は、左右の傾斜角度が等しくなるように据える。また、立体感、奥行き感を出すために、庭園の最適鑑賞位置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。

(2) 数の構成に関するルール: 奇数単位の群で配置。庭園への庭石の配置は1石1石ごと独立したものとして考えるのではなく、「3石、または5石を基本とし、奇数単位の組合せで石群として考える」とされている。

(3) 位置的な相関に関するルール: 庭園中央部に庭石を配置すると、視界が遮られることにより圧迫感を受け、見苦しい庭園になってしまう。これを防ぐため、庭園中央部を避けて石を配置する。また、真、副、対の3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を形作るように、心掛ける図8。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9。さらに石相互間には、隣接関係と対立関係が存在し。接しているか、わずかに離れている石同士は隣接関係、十分な距離を持って離れている石同士は対立関係である。石群内では、真の石と他の石が隣接関係になるようにし、石群同士では、それぞれの真の石同士が対立関係になるようにする。

形状特性:

竜安寺石庭は、作庭年代が室町時代末期と大変古く、世界遺産に認定された世界的に有名な石庭である。一般に、竜安寺石庭は、「七五三の庭」として知られている。「七五三の庭」とは、庭園が7, 5, 3個の構成要素からなる群として表現されている庭のことである[13]。この群の分け方に基づき、慣習的設計ルールの1つである「鈍角不等辺三角形の配置」に注目すると、竜



図8 三つの石組: 真、副、対の3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を形作るように、心掛ける

Fig. 8 Three rock set: when the true, the deputy, the versus three pairs of stones placed if we place the true in obtuse angle of obtuse scalene triangle shape, it will keep in mind



図9 五つ以上の石組: 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

Fig. 9 more then five of the rock set: when palce a lot of stones, obtuse recursively scalene triangle shape to deploy

安寺石庭から、3段階に再帰的に構成される鈍角不等辺三角形形状を抽出される図9。2石構成になっている部分が存在するがこれは鈍角不等辺三角形の変形と考えられる。

この図10を見ると、鈍角不等辺三角形が様々なスケールで、かつ、様々に変形され、繰り返されて構成されている。つまり、竜安寺石庭の Reflectaphor は、この鈍角不等辺三角形であり、この繰り返しのために、庭園に統合性、多様性、全体性が生まれると考えられる。3段階の再帰的に構成される鈍角不等辺三角形(図10)に注目し竜安寺の石庭に対してすべての石と群のサイズを Hausdorf 距離で測定し[9]、そのサイズデータを降順に並べて、両対数を求めて傾きを調べ

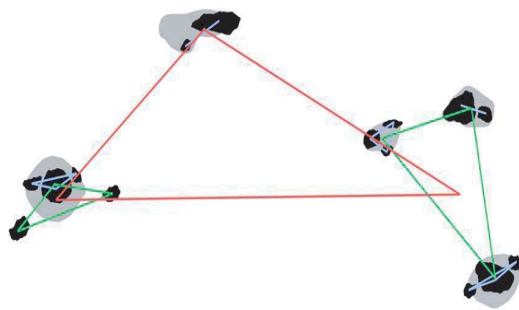


図 10 竜安寺石庭の再帰的な鈍角不等辺三角形  
Fig.10 obtuse recursively scalene triangle of Ry-ouan-ji garden.

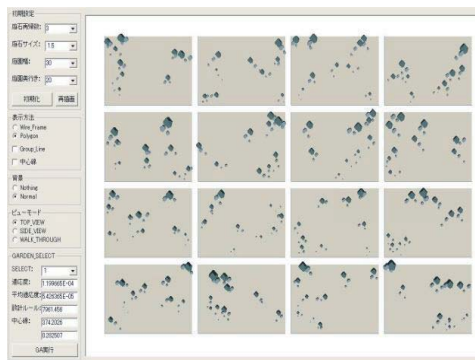


図 12 設計するアプリケーション  
Fig.12 Application design

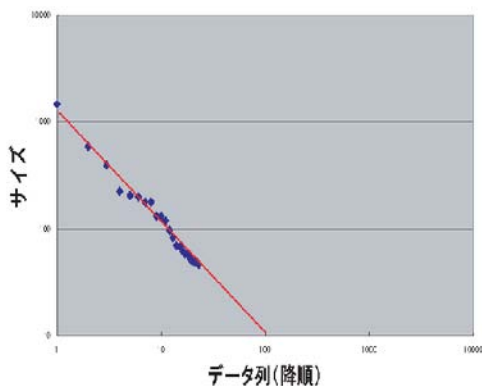


図 11 竜安寺の石庭に対してすべての石と群のサイズを Hausdorff 距離で測定しそのサイズデータを降順に並べて、両対数を求めて傾きを調べると-1.04 になる  
Fig.11 we with Hausdorff distance method to measure all the stone's and group's size of Ry-ouan-ji garden, then size of the data to be arranged in descending order of the double logarithmic coordinate .the slope is -1.04

ると-1.04 になる図 11。

これは Zipf の法則が成立していることを示し、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 [14]。さらに竜安寺石庭と同様に七五三の庭で有名な枯山水庭園 (真珠庵方丈東園, 東海庵書院中庭, 正伝寺庭園) に注目し、同様に Hausdorff 距離で測定すると、その傾きはそれぞれ-1.00、-1.16、-0.89 となり、どの庭園でも Zipf の法則の成立が確認される。これにより「Reflectaphor がフラクタル的に使われている」という形状特性は、普遍的な形状特性、つまり庭師が共通に持っている感性の 1 つであると考えられる。

## 5. IGA を用いた石庭の設計

「慣習的設計ルール」と「既存の石庭の形状特性」を考慮しながら、さらに IGA を用いることにより、人間の感性を取り入れながら、石庭を設計するアプリケーションを開発した図 12

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : 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。
4. 新しい100個の石庭が生成される。
5. ステップ2に戻り、繰り返す。

実行は、まずすべての庭園に対してランダムに各群の真の石を配置し、その後、副、対の石をそれぞれの真の石から半径 3.0 以内にランダムに配置する。つまり、初めから隣接関係が成立しやすい状態での初期配置となる。

初期配置の終わったすべての庭園に対してシステム

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。

利用者からの選択が行われると、IGA オペレータとして交叉と突然変異を実行する。(交叉：生物の繁殖をモデル化した部分。個体の遺伝子情報の一部を入れ替え、新しい個体を生成する。突然変異：遺伝子のコピーミスモデル化した部分。個体の遺伝子情報の一部が変化し、異なる情報を持つ。個体の多様性維持に使われる)。

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庭園設計を実現できる。

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庭石に対してIGAを行うことによってユーザーが最良と感じる庭石を設計していく[9]。

## 6. パーチャル庭石

本研究でVRML (Virtual Reality Modeling Language) は、Web上で3次元の仮想空間を実現することのできるプログラミング言語である。VRMLファイルはHTMLと同じように、ブラウザで閲覧することが出来る。これは、VRMLブラウザで見ることによって仮想世界を疑似体験できるものである。そして、製品定義や仮想現実プレゼンテーションのような複雑な場面の三次元の抗議を作成するために使用される。簡単なプログラムで多様な3次元空間を構築できるのが利点である。

本研究ではバージョン2.0を用い、描画用のプラグインにはCortona VRML Client 4.2を採用した。VRMLで庭石を設計するに当たり、慣習的設計ルールを元に、石の配置に関する部分では設計アプリケーション[9]を用いて、フラクタル性などの形状特性が取り入れられた庭石を設計し、この設計アプリケーションによって庭石の配置構造が決まったら、それを元にVRMLによって廊下や壁、周りの背景などをモデリング、テクスチャマッピングなどを行って作成し、鑑賞実験の対象として適しており、なるべく現実の庭石を鑑賞している感覚を味わえるレベルのパーチャル庭石を構築した。この際庭石のモデリングに関

しては前述した据え方に関するルールを取り入れて作成した。

または、鑑賞者が自由に鑑賞ポイントを選択できるために、首を振ることによって視界も自由に選べる環境の構築が必要であると考えた。

## 7. 考察

今研究で、竜安寺石庭を注目すると、アイトラッキングによる視線解析を用いて「既存の庭園の形状特性」「人間の心理的反応」を抽出し、鑑賞者の視点から庭師による「ルール」の適用の仕方を解析する。

日本庭園は、秩序とランダム性の混じり合ったフラクタル的な自然の美しさを追求する庭園である。今研究で秩序として慣習的設計ルールと既存の石庭の形状特性を使用している。また、これらルールの用い方の自由度がランダム要素として働いている。この両方の性質を持ちながら、IGAを用いた人の感性による連続性のある庭園設計を行うことにより、設計された庭園はフラクタル的な配置となり、より自然の景観に近い庭園を設計することができる。

先行研究からわかっている庭石における形状特性としてZipfの法則が成立することが確認された。本研究では、それがフラクタル性の形状特性がどのように鑑賞者の視点動きに影響するのか探るために、アイトラッキング技術を用いて、解析を行う。

鑑賞者は庭石を鑑賞する時の視線軌跡によると、探索過程においての個々の群と全て群に注目する動きの繰り返しは多く見られる。また庭石の鈍角三角形を構成する形状特性に沿って視点を動かす様子も見られる。石庭フラクタル性の形状特性などは視点の動きに影響を与えていると考えられる。これによると既存の庭園の形状特性と人間の心理的反応などを抽出し、鑑賞者の視点から庭師による「ルール」の適用の仕方(「作為」)を解析することができる。この慣習的設計ルールと当時の庭園設計指南書「作庭記(作者不詳)」に着目し、そのルールを抽出し、対話的遺伝アルゴリズムを用いて3次元空間上に、自由度を加えた日本庭園的の仮想空間を創造するツールを開発することができる。

今後で、解析結果を改善するために、不必要なノイズの少ないデータを取れる解析方法を探したい。鑑賞位置に関しては、被験者数を増やすなどを検討が必要である。また視点の動きのさらに上のレベルでの鑑賞者の心理や認知を探るためにマイクロサッカド(microsaccade)と眼球運動に関する神経活動と注意に

関する脳の動きなどを用いると考える。視覚心理学、認知科学の分野において視覚対象の空間をその構造の特性と、鑑賞者の視点の動きへの作用から解析して、その特性、例えば「癒し」空間を鑑賞する際の鑑賞者の視点データを用いて他の分野の空間設計に「癒し」効果を反映させるなどの3次元空間設計に視点データを応用しようという点が新しい試みであると考え。

#### 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, Gert J. Van Tonder, Michael J. Lyons, Yoshimichi Ejima, Nature, vol.419, pp.359-360, Sep26, 2002.
- [5] Fixation Maps: Quantifying Eye-Movement Traces, Wooding D, ETRA symposium, 2000.
- [6] Pilot's Attention Allocation During Approach and Landing Eye- and Head-Tracking Research in an A330 Full Flight Simulator, ISAP, Columbus, OH.
- [7] Visual Search for Traffic Signs: The Effects of Clutter, Luminance, and Aging, Human Factors, 43(3), 194-207.
- [8] Stylization and Abstraction of Photographs, Doug DeCarlo, Anthony Santella, SIGGRAPH2002
- [9] 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
- [10] 作庭帖 自然風庭園の手法、秋元通明、誠分堂新光社
- [11] 庭園の設計、永嶋正信、理工図書株式会社。
- [12] 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。
- [13] 日本庭園の美 龍安寺 枯山水の海、西川孟、株式会社集英社
- [14] The Science of Fractal Images, Springer, 1988, Chapter 1, Fractals in nature: From characterization to simulation.

(平成14年3月27日受付, 7月29日再受付)



王雲 (学生員)

平16 天津科学技术大学(中国)・現在、筑波大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程1年生。



鐘傑 (学生員)

平11 天津理工大学(中国)・現在、筑波大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程2年生。



黄正 (学生員)

平12 武汉大学(中国)・コンピュータサイエンス卒。平18 筑波大学院修士課程了。現在、筑波大学院システム情報工学研究科博士後期課程在学中。

**Abstract** In this study, Japanese gardens and the then design specifications of garden, extract the rules and apply the Interaction genetic algorithm [1] to the three-dimensional space and then apply degree of freedom to Japanese garden healing virtual space to develop a tool for creativity. With the eye analysis by Eye-tracking we can extract the [existing garden in the shape of property] and [human psychological reaction], from the viewpoint of viewer's we can analysis gardeners how to apply the rule. Here, as an example of an existing garden, we attention Ryouanzi

**Key words** Interaction genetic algorithm, V R M L, Customary design rules, Eye-tracking