

Visual PageRank による龍安寺石庭解析

蔡東生[†] 大石誠也^{††} 望月茂徳[‡]
王雲[†] 浅井信吉^{*} 福本麻子⁺

世界遺産にも登録されている龍安寺の石庭は枯山水庭園の代表的庭園として良く知られている。この石庭に配置された15個の石は、一見ランダムに配置されているように見えるが、平安時代に書かれた、作庭記のような作庭指南書に基本的に従っていると言える。しかしながら、作者は不詳であり、その配置デザイン上の目的はよくわかっていない。本論文では龍安寺においてアイ・トラッキング実験を行い、石（もしくは石群）から石（もしくは石群）への視線の遷移をリンクとして計測することにより、視線のPageRankを求め、石庭の配置デザイン構造を明らかにする。

Visual analysis of Ryoanji rock garden using visual PageRank

Dongsheng Cai Seiya Ohishi Shigenori Mochizuki
Yun Wang Nobuyoshi Asai Asako Fukumoto

The Rock garden in Ryoanji declared a World Heritage is known as the representative Karesansui garden. The fifteen rocks are distributed according to the traditional garden design text book such as Sakuteiki on the other, it seems to have random distribution. However it is unknown who design and what purpose is design for. In this paper, we perform the eye tracking experiments and measure "PageRank" for eye movement assuming the eye movement from one rock (or rocks group) to another as a forward link among 15 rocks in the garden. Finally we discuss about the design structure of rocks distribution of the garden.

1. はじめに

龍安寺石庭はわずか75坪の空間に大小15個の石を配している。一見ランダムに配置されているようで、完全に周囲の空間と調和し無駄を排除した、静謐で抽象的な落ち着いた空間を作り出している。作者は不詳であり、作者がどのような意図でこの庭を設計したかは、未だによく分かっていない。一般的に「虎の子渡しの庭」「七五三の庭」と呼ばれており、設計者諸説として、相阿弥説や細川勝元説、金森宗和説、義天玄承説、子建西堂説など多数挙げられてきたが、確証を得るのは大変困難である[1]。日本庭園は中国や朝鮮などの大陸からの文化・思想に多大なる影響を受けながら独自に発展し、作者の心象世界や作為が『庭』という空間をキャンパスに立体的に描かれる。そこには仏教が解く宇宙感や蓬萊・神仙世界、自然美が凝縮され、物語や説話、詩歌の情景までもが題材となりうる。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庭師による全くの自由、創作によって行われているわけではもちろんない。むしろ日本庭園の設計は、実は完全な自由創作は少なく、慣習的な設計ルールに基づいて設計されており、慣習的縛りが強く、独創性を出せる部分は多くない。

日本庭園の慣習的設計ルールの詳細については、実在の庭園設計書[2][3][4]にリストアップされている。日本庭園のデザイン上の特徴としては、一般的に西洋の庭園がシンメトリー(左右対称)にデザインされるのに対し、日本庭園では、平面的位置関係でも、立面的位置関係でも、華道における花の配置に見られるような鈍角不等辺三角形を基本に構成する。さらに、華道・生け花の構成理論で使われる「真・副・体」「主・副・対」「天・地・人」などの考え方と同様に、鈍角不等辺三角形において、差をつけて「真・副・対」などとよばれる主従関係を持たせるように石を配置することが特徴となっている。

本論文では、形状解析法などを用いて既存の石庭の形状特性を抽出し、ルール適用の仕方と、庭師が設計に埋め込む隠された感性とアイデアを形状解析と実際のアイ・トラッキング実験で明らかにする。

[†] 筑波大学大学院システム情報工学研究科
University of Tsukuba, Graduate School of Systems and Information Engineering

^{††} 筑波大学情報学群
School of Informatics, University of Tsukuba

[‡] 立命館大学映像学部
Ritsumeikan University, College of Image Arts and Sciences

^{*} 会津大学コンピュータ理工学部
University of Aizu, School of Computer Science and Engineering

⁺ 慶応義塾大学
Keio University

2. 一般的な石庭の庭作ルール

日本庭園の最大の特徴は「自然」のままを活かすということであり、石庭の場合は、自然の石をそのまま利用することになる。日本庭園の配置原理は生け花同様「真・副・対」さらに「控・前置・見越」が加わることがあるが、配置原理は平面図的にも、立体図的にも「鈍角不等辺三角形」が基本となっている。真の石の氣勢¹がどちらかの方向にかけている場合、これを埋め合わせるためにより小ぶりの石を副として加える。この真・副を引き立てるのが対になる。ユニットの前景を引き締めるのが、「前置」で、ユニット全体の奥行き感を出すのが「見越」になる。不等辺三角形はそれ自体完結しないので、次々繰り返して三角形を構成していき、群として不等辺三角形を構成していく。しかし、その繰り返し方は具体的によく分かっていない[3][5][6]。

大きさ、形の異なる3個の石を組み合わせる場合も、主の役割をもつ石（真）と従の役割をもつ石（副）、その二石をさらに調和させ均衡を保つために添える石（対）、以上の三石をもって組むのが三石組の基本である。また、立体的に見て各石の頂点が、平面的に見て各石の中心点が、それぞれ鈍角不等辺三角形になるように組まれる。五石、七石・・・と多数の石を組む場合でも、一石、二石組、三石組を基本単位(群)として、組み合わせることによってまとめられる。

庭を構成するこうした石群要素の氣勢が強ければダイナミックな庭になり、おとなしく均一的な氣勢をもっていれば安定感のある落ち着いた庭になる。また、石の数が多かった場合は同様に、奇数単位で、基本的に鈍角不等辺三角形の構成で群を作り、「真」の群を中心に設定して全体のバランスを考えながら三角形の群を構成していき、最後に、各群の構成を同じように再帰的な三角形構成で考えていく（図1）。

ここで言うバランスは、各視点から、「真」もしくは重点方向、Tonderら[7]のいう中心軸方向を見たとき、石同士が重なり、その一部あるいは半ばを隠すことにより、その景色を想像させ、奥行きを感じさせるバランスである。この手法を「暗示」と呼んでいる[5]。即ち日本庭園では、見える部分より、見えない部分の方が重要であり、これは、水墨画に見られる手法である。また、別に「アイストップ」という効果があり、これは、園路の突き当たりのような、目につきやすいところに、灯籠や、水鉢のような見応えのある添景物をおいて鑑賞する方法である。暗示による手法とアイストップの関係は相対する表現で、暗示による手法を9割以上使用し、アイストップ表現はわずかにすることにより、静謐な庭園となる。

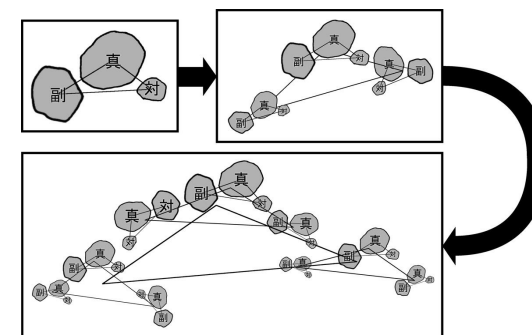


図1:再帰的な鈍角不等辺三角形

3. 龍安寺石庭の基本構造

龍安寺石庭を一般的に説明する「七五三の庭」とは、7, 5, 3個の石の構成要素からなる対・真・副の群として表現されている庭のことである[8]。この群の分け方に基づき、図2のように慣習的設計ルールの一つである「鈍角不等辺三角形の配置」に注目し、龍安寺石庭を最大3段階に再帰的に構成する鈍角不等辺三角形形状を表示した。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も考えられ、左から5・2・3・2・3の構成になっている。実際には、図2のように、七石の構成は成立していない。すなわち、「五八二の庭」になっている。この図2を見ると、鈍角不等辺三角形が様々なスケールで様々に変形されて表現されている。この鈍角不等辺三角形形状の変化のある繰り返しのため、庭園に統合性、多様性、全体性が生まれることになる。

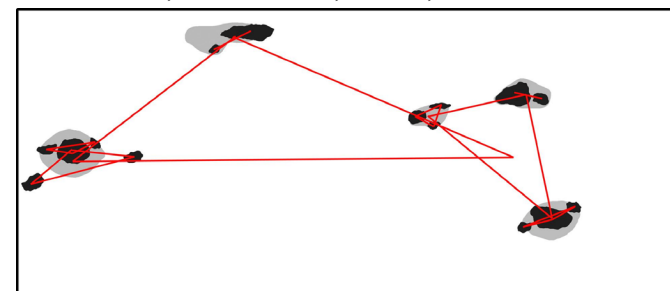


図2: 龍安寺石庭の再帰的な鈍角不等辺三角形

また、各視点から、「真」もしくは重点方向を見たとき、その一部あるいは半ばが必ず隠されており、その景色を想像させ奥行きを感じさせる手法で「暗示」「アイストップ」

¹氣勢とは石の形や大きさ、石理などから生まれる勢いの印象である。石を見たときに感じる力の方向性が、目に見えない線となって空中に出ているようなものである[1][3][4][5]。石を組む際にはこの氣勢を無視してはならない。

ピング」が効果的に効いていることが図3のように分かる。

次に再び3段階の再帰的に構成される鈍角不等辺三角形(図2)に注目し、すべての石と群のサイズをHausdorff距離で測定し、そのサイズを降順にlog-logプロットで表示すると、図4のように傾きが-1のほぼ直線になるZipfの法則[9]の成立が確認された。Zipfの法則は、この配置がフラクタル的であると同時に $1/f$ 揺らぎをなすことを意味する[9]つまり、鈍角不等辺三角形がフラクタル的に一定のスケールで繰り返し使われていることを示す。さらに、サイズの変化に $1/f$ ノイズ的な揺らぎが存在している。

自然界は、秩序とランダム性の混じり合ったフラクタル的な美しさを持っている。そのため、Zipfの法則は、自然界で大変多く見られる法則である。このZipfの法則が成り立つことは、庭園がより自然の景観を表現していることを示す指標の1つとして考えられる。

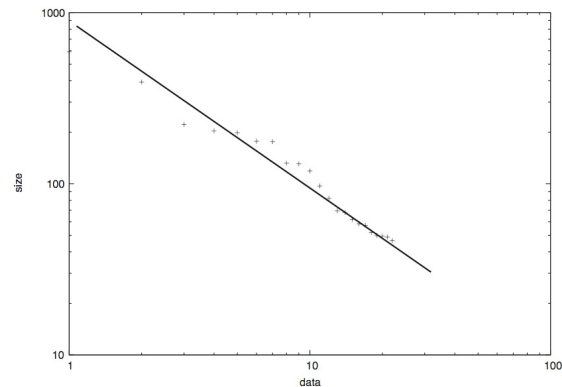


図3(左図): 最適鑑賞位置から見た「暗示」効果の現出例

図4(右図): 龍安寺石庭のサイズデータ両対数グラフ 傾き: 約-1.04

4. アイ・トラッキング実験と視覚的ページランク

4.1 アイ・トラッキング実験について

図5のように、龍安寺の石庭は大きく分けると三つの大きい石群である第1石群(副)、第2石群(真)、第3石群(対)により構成されているとする。それぞれの石群をさらに細かく分けた小石群もしくは石(ここでは全て小石群とする)に対し、以下のような番号付けを行う。第1石群は1-1(副の副)、1-2(副の真)、1-3(副の対)の3つの小石群で構成されている。第2石群は2-1(真の副)、2-2(真の真)の2つ小石群で構成されている。第3石群は3-1(対の副)、3-2(対の真)、3-3(対の対)の3

つの小石群で構成されている。また、鑑賞・注視場所を5つに分け、position1, position2, position3, position4, position5とする。

今回、日本庭園について全く知識のない10人に対してアイ・トラッキング実験を行った。10名の被験者に持ち運び可能なアイ・トラッカーを装着してもらい、石庭を鑑賞できる廊下を2分間鑑賞しながら自由に動いてもらい、最終的に自分の好きな場所を探してもらった。

視覚運動は、鑑賞者が興味を持った場所に視点を固定する固定視と、次に興味を抱いた場所に視点を移動するときの瞬間的な視点の動きであるサッケード(瞬間的視点移動)に分けられる。今回の実験では、被験者が自由に動き回れるため、注視時間は、その石、もしくは石群を見ている間とした。実験では、被験者は試験時間中80%以上の時間、石もしくは石群の鑑賞に費やしていた。

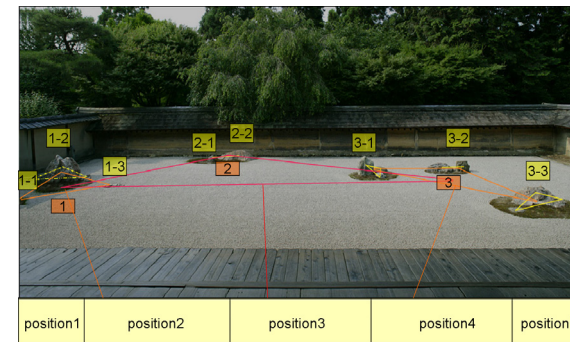


図5: 各石群、中心軸と鑑賞場所

4.2 眼球の運動と軌道について

最初に、代表的な被験者の視線の軌跡を図6に示す。被験者の鑑賞位置と視線の動きを5段階に色分けして表示している。被験者の視線は廊下で対角方向を中心に、メインの石群1,3とそこにあるサブの石群の三角形をなぞりながら、廊下を右から左、左から最終的に被験者の選んだ「最適鑑賞ポイント」へ、というように視線は対角の石をなぞりながら、端から端へ移動する。移動中には1,2,3の順に繰り返し石をなぞっていく様子が見られる。サブの石群も同じように再帰的に、1,2,3もしくは3,2,1の順になぞっていく。また必要に応じて石の形も視線で追っている。

このことから、被験者は無意識のうちに真、副、対の三角形を、メインの石群と、サブの石群で再帰的に忠実になぞっている。すなわち、庭園を設計した庭師の造形意図を無意識のうちに認識していることが分かる。また、廊下で各石群に対して庭を見渡したときサブの石群1,3の鈍角の対角になる位置、すなわち、各鈍角の対辺の垂直二等分線方向(中心軸に近い線)から1,3の石群を見ている。この方角では、真、副、対

の石の構成で、石が互いに部分的に隠れ、特に、「暗示」効果が顕著になる。これは、鈍角不等辺三角形の再帰的繰り返しとともに、図 3 のように見せたい石を一部もしくは半ば隠すことにより、その光景を想像させ、奥行きを感じさせる手法である「暗示」を被験者も意識していることが分かる。同時に、石の重なりが顕著であることから、設計者がこの方向各から石群が見られることも意識していることが分かる。この被験者が図の 3, 4, 5 の"最適鑑賞位置"に近いところでも、1, 3 の石群をみており、これは 1, 3 の石群の中心線方向に向いており、それぞれのサブ石群に"暗示"効果を一番感じやすいところになっている。

しかし、ここで特筆すべき点は、1, 2, 3, 3-1, 3-2, 3-3 へと三角形をなぞっていく上で、意図的に設計ルールにおける、例外、不規則性が埋め込まれていることである。すなわち、2, 3-2 は故意に 3 石ではなく、2 石構造になり、2, 特に 3-2 で見られるようにこの不規則性に視線が乱れていることである。これは、石の重なりによる「暗示」を強く意識させ、故意にこの不規則性により、注意、興味を引きつけているとも考えられ、また、被験者が、他の場所で、三角形を忠実になぞっており、この 2 石に対しての視線の乱れなどから、無意識に違和感を感じている可能性を示唆している。

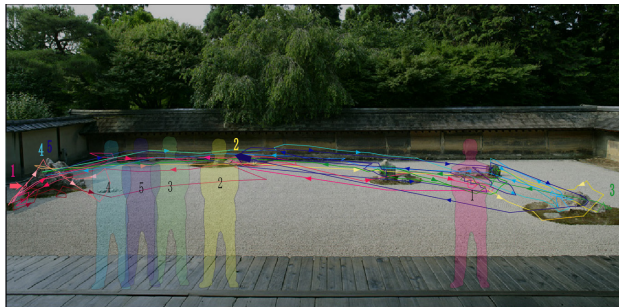


図 6: 平均的な被験者の 22 秒間の視線軌跡

4.3 ホットスポット

次に、被験者がどの石群に対して強く注視していたか（ホットスポット）を分析する。図 7 にそれぞれの石群 1, 2, 3 の被験者 10 人の平均注視時間を赤の円で、そのサブの石群 1-1, 1-2, 1-3, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2, 3-3 の被験者 10 人の平均注視時間を黄色で表示する。ここで、1, 2, 3 の石群の平均注視時間はそれぞれのサブの石群の注視時間の総和である。ここで興味深いのは、それぞれサブの石群では、必ず、真の石もしくは石群、すなわち、1-2, 2-2, 3-2 の平均注視時間が最大になっている。これは、先の図 2 の説明で述べた、鈍角の対角方向で見ることを強く意識していることが分かる。さらに、このサブの真の石を中心にサブの対、副を真より少ない時間、副、対はほぼ同じぐらいの

時間で見てることが分かる。第一段階メインの石群でみたとき、3 すなわち、対の石群にもっとも大きな注視時間が注がれ、次に 2 である真、その次に 1 である副の石群の順に注視時間が注がれていることが分かる。これは、3 の対の石群がサブのサブまで再帰的に鈍角三角形の構成が繰り返され、もっとも複雑な構成をしているため、注視時間がより長くなったと考えられる。

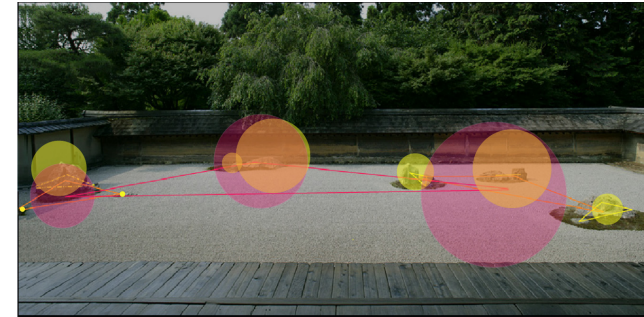


図 7: 10 人の被験者による平均注視時間の結果

4.4 鑑賞ポイント

下記表 1 は鑑賞位置を五つに分けて、10 人被験者が最終的に選んだ最適だと感じる鑑賞ポイントの結果である。全体の石群の鈍角三角形、石群 2, 3 のサブの三角形の中心方向、ここでは、鈍角の対角の辺の垂直二等分線方向に視線が向うことができる位置 Position 2（仏間口）を選ぶことが多いことが分かる。次に多い Position 4（上間口）を選んだ被験者は庭に対角に石群 1 をよく見ていることが分かる。

Position 番号	1	2	3	4	5
選択人数	1	6	0	3	0

表 1: Position ごとの最適鑑賞ポイント選択数の結果

4.5 視覚的ページランク

近年、ウェブページのランキング、解析に PageRankTMがよく注目されている[10]. PageRank は「多くの良質なページからリンクされているページは、やはり良質なページである」という再帰的な関係をもとに、全てのページの重要度を判定したものであり、ウェブの持つ膨大なリンク構造という特性を生かしている。ページ A からページ B へのリンクをページ A によるページ B への支持投票とみなし、Google はこの投票数によりそのページの重要性を判断する。しかし Google は単に票数、つまりリンク数を見るだけではなく、票を投じたページについても分析する。「重要度」の高いページによって投じられた票はより高く評価されて、それを受け取ったページを「重要な

もの」にしていくのである。こうした高評価を得た重要なページには高い PageRank (ページ順位) が与えられ、検索結果内の順位も高くなる。PageRank は Google におけるページの重要度を示す総合的な指標であり、各検索に影響されるものではない。

まず、リンク関係を隣接行列の形で表す。あるページ i から別のページ j へリンク数を行列 (i, j) 成分に割り当てる。一回リンクする時 (i, j) を 1 にし、2 回このリンクが発生したら、 (i, j) を 2 にする。リンクのない時 (i, j) を 0 にする。ページ数を 8 とするとこの行列は 8×8 の 8 次正方行列になる。次に、隣接行列を転置し、それぞれの列ベクトルの総和が 1 (全確率) になるようにそれぞれのリンク数で割る。作られた行列は「推移確率行列」と呼ばれ、確率変数を持ち、各行ベクトルは状態間の推移確率を表す。さらに、推移確率行列の最大固有値に属する固有ベクトルを求め、確率ベクトルに正規化すると PageRank が得られる。

PageRank のリンクと同じ考えで、ある石もしくは、石群から注視する視線は次ほどの石、もしくは石群に動くかをリンクとして考え、隣接行列を作成し、視線運動における PageRank、すなわち、Visual PageRank を求める。先に述べたとおり、同じ石を見ている間は、同じ石に注視していると考えているので、同じ石の別の部分を注視した場合、一つの注視と考えている。従って、ここでは自己リンクは考えていない。

	1_1	1_2	1_3	2_1	2_2	3_1	3_2	3_3
1_1	0	41	0	3	1	0	0	0
1_2	39	0	43	46	62	1	4	0
1_3	1	38	0	8	18	0	0	0
2_1	1	40	6	0	156	0	3	0
2_2	3	65	15	143	0	55	65	4
3_1	0	1	0	7	76	0	101	10
3_2	1	7	0	0	40	132	0	114
3_3	0	0	0	0	2	6	121	0

レベル 2 : 隣接行列

レベル 2 : PageRank

	1	2	3
1	0	138	5
2	130	0	127
3	9	125	0

レベル 1 : 隣接行列

レベル 1 : PageRank

表 2 : レベル 2 における 10 人の被験者のリンク総和の隣接行列と PageRank の結果

表 3 : (下表) レベル 1 における 10 人の被験者のリンク総和の隣接行列と PageRank の結果

10 人の被験者に対して、レベル 1 とレベル 2 の石、石群に対しての隣接行列と PageRank を求めた後、10 人のリンク数の総和によってすべてのリンク関係の隣接行列と PageRank を求め、表 2, 3 に示す。さらに、10 人被験者のリンク総和の隣接行列と

PageRank を用いた石群相互のリンク関係に関する推移図を図 8, 9 に表す。図中では推移確率 0.02 以上のみ表示した。なお、リンクだけではなく、リンクに注視時間の重み付けを行った PageRank 解析でも同様の結果が得られる。

レベル 1 のメインの石群の PageRank をみると、2 の石群の PageRank が最大となる。これは、設計者の造形意図が真を中心にこの構造を作成したことと「視覚的不協和」[11] がここに置かれていることに関連している。また、この結果は鑑賞者の意識と設計者の作為が一致していることを意味している可能性がある。すなわち、鑑賞者はほとんどと言っていいほど、1 の副、3 の対を見る場合必ず、2 の真を介して見ており、石の造形を真、副、対の鈍角三角形としてみていることが分かり、同時に、2 の真の「不協和」を強く意識し、この 2 の真の石群を中心に見ていることが分かる。サブの石群で見ても同様で、必ず、真の石もしくは石群を介して、副、対の石群をみており、真の真の石の PageRank が最大になっている。また、各サブの石群でも、それぞれの、真の石もしくは石群の PageRank が最大になっており、メインと同じ構造が、サブの石群でも再帰的、フラクタル的に繰り返されている。また、真の中でも、どの石との組み合わせでも三角形のルールをはずしている「不協和」を持つ、2 と 3-2 の PageRank が飛び抜けて大きくなっている。これは、設計者が真を中心に副、対と配置していった造形意図を、この視覚的「不協和」を中心に何度も見ていることを示す。また、三角形ルールがここで突然破れており、被験者が無意識に引っかかり、とまどい、何度も見直していることが分かる。すなわち、鑑賞者の意識を集中させたい意図と一致しているとも言える。この石庭では、設計者の造形意図と鑑賞者の無意識の理解がほぼ一致していると思われる。

また、このルールが破られ、「視覚的不協和」を持つ 4 石は、同時に、氣勢が突然柔らかい、伏せがちの石に替わっている。これは、この 2, 3-2 の石群が壁に最も近く、伏せがちに、遠近効果を強めるために「アイストップ」として配置されていると考えられる。この石群は、鑑賞者からもっとも遠く、氣勢を弱めることで、奥行き感が出せる。

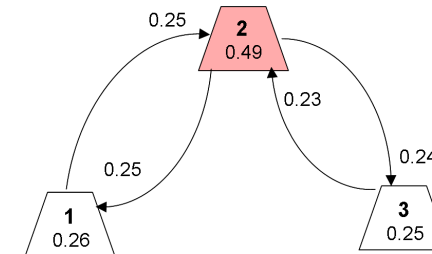


図 8 : レベル 1 石群の推移図 (推定確率 0.02 以上のみを表示)

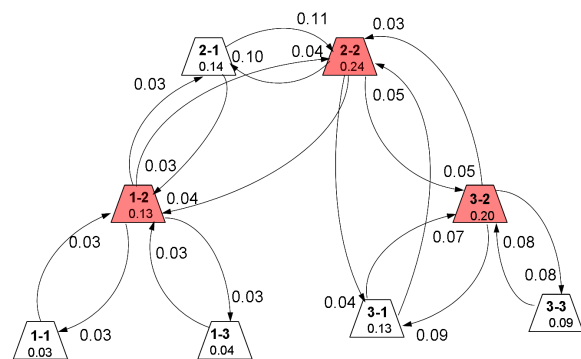


図 9: レベル 2 石群の推移図 (推定確率 0.02 以上のみを表示)

5. 結論

龍安寺の石庭は一見してランダムな石配置が行われているようだが、一般的な作庭ルールに基づく再帰的な鈍角不等辺三角形による構成が行われており、アイ・トラッキング実験および PageRank による解析の結果、鑑賞者は無意識のうちに作庭意図を理解しているといえる。その上で、「真・副・対」の 3 石配置を例外とする 2 石配置箇所では鑑賞者が無意識に引っかかり、とまどい、何度も見直していることが分かる。すなわち、鑑賞者の意識を集中させたい意図があり、鑑賞者も無意識のうちにこの意図に従ったのではないかと考察される。このような意図は偶然の産物であるとは考えにくい。なぜなら龍安寺石庭が $1/f$ というフラクタルリズムを持つこと、全ての方向から石が重なり合う暗示効果が巧みに用いられていること、アイストップ効果などの効果的な遠近法が用いられていることなどから、設計において相当の計算が行われていると考えたほうがより自然であるからである。

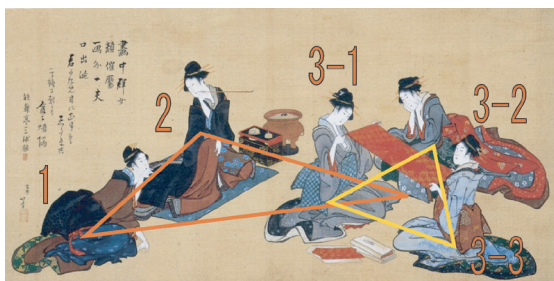


図 10: 葛飾北斎「五美人図」

3 石または奇数石を鈍角不等辺三角形に従って配置するような構成方法は、庭園以外にも多く用いられる構成であり、図 10 で示される葛飾北斎「五美人図」においては、対のグループに 2 石を加え、「副、真、対の副、対の真、対の対」という 5 石配置のように人物が配置されている。このような構成は、安定と広がりを持たせる手法として他の絵画や華道などにおいても見ることができる。

しかしながら、龍安寺石庭を鑑賞する際に鑑賞者は自由に移動することができ、従って、見る位置によって石が隠れ 3 石から 2 石へと見た目上変化し、安定感や視覚的不協和効果が動的に変化することが考えられる。このような空間構成手法は、龍安寺が建立されたといわれる 1450 年当時においては極めて稀であり、予期しない視覚的形態を多用する現代芸術作品に対しても十分示唆を与える可能性がある。

謝辞

視線解析装置 EMR-8 は、株式会社ナックイメージテクノロジーから提供を受け、同社高田健司さんからご指導頂きました。実験に関しては、龍安寺岩田晃治さん、立命館大学映像学部細井浩一教授、京都府商工労働観光部長 山下晃正さんにご協力頂きました。論文中の龍安寺石庭写真は写真家 水野克比古さんにご提供頂きました。実験被験者として立命館大学映像学部諸君のご協力を頂きました。また、本研究は文部科学省平成 20 年度大学院教育改革支援プログラムとして採択された ITC ソリューションアーキテクトプログラムのシステム開発プロジェクトとして行われました。

参考文献

- 1) 山田奨治, "禅という名の日本丸", 弘文堂, 2005
- 2) Jiro Takei, Marc Peter Keane, "Sakuteiki, visions of the Japanese garden: a modern translation of Japan's gardening classic", Tuttle Publishing, 2001
- 3) 秋本通明, "作庭帖", 誠分堂新光社, 2000
- 4) 著者不明, "作庭記"
- 5) 伊坂晃太郎, "和庭の美と景", ニューハウス出版, 2000
- 6) 進士五十八, "日本の庭園", 中央公論新社, 2005
- 7) Gert J. Van Tonder, et. al., "Perception psychology: Visual structure of a Japanese Zen garden", Nature 419, 359-360, 2002
- 8) 西川孟, "日本庭園の美龍安寺枯山水の海", 集英社, 1989
- 9) Gabaix, X., "Zipf's Law for Cities: An Explanation", Quarterly Journal of Economics, 114 (3), 739-767, 1999
- 10) Page, L., et. al., "The Pagerank Citation Ranking: Bringing Order to the Web", 1998
- 11) Solso, R., "Cognition and the Visual Arts", MIT Press, 1996