

## 龍安寺石庭における視線解析

大石誠也<sup>†</sup> 浅井信吉<sup>††</sup> 蔡東生<sup>†</sup>

UNESCO 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言われ、年間に多くの参観者が訪れる。龍安寺石庭は 15 個の石が白い砂の上に抽象的にちりばめられたシンプルな庭園である。本稿では龍安寺にて行われたアイ・トラッキング実験のデータから、二種類の眼球運動に注目した 2 通りの解析を行う。1 つ目は跳躍運動に注目した解析で、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”を求めた。2 つ目は固視微動に注目した解析で、石群を見ている時の眼球運動の周波数特性を求めた。これらの結果から、無名の設計者の隠された意図を明らかにする。

### Eye Movements Analysis in the Ryoanji Stone Garden

Seiya Oishi<sup>†</sup> Nobuyoshi Asai<sup>††</sup>  
Dongsheng Cai<sup>†</sup>

The stone garden of the Ryoanji temple which is registered with UNESCO world heritage is said to be the most famous garden of the dry landscape Japanese garden, and attracts many visitors for long years. This stone garden has 15 stones; those are placed on the white gravel in the abstract. In this paper, we analyze the data of an eye tracking experiment by two ways. First, we calculate the ”PageRank” of eye movement by assuming the eye movement from one stone(or stone group) to another is a link. Second, we calculate frequency component of involuntary eye movement during fixation. These results reveal the agenda of the ancient anonymous garden designer.

### 1. はじめに

昔から、美術作品を鑑賞者の視覚の面から解析しようという研究が多くなされてきた。近年では、アイ・トラッカーと呼ばれる装置が開発されたお陰で、より正確な視覚運動測定実験が可能になっている。何かを鑑賞する際、人は必ず自分が興味を惹かれる部分に視線を向ける。人間の視覚において、視覚対象に関する情報を明確に得られる視野範囲は非常に狭く、そのために目の動きは活発になり、得られた情報を処理する脳の活動も活発になる。そのため、人の目の動き、または脳の働きというものにはその鑑賞者の感性とともに、どの鑑賞者にも共通するような、その視覚対象の構造、構成要素がもつ特性が反映されるのではないかと考えられる。

本稿では美術作品として代表的な日本庭園と言われる龍安寺石庭を対象とした視線解析を行う。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、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形態的特徴を持っている。特に龍安寺石庭はわずか 15 個の石の配置のみで世界遺産に選ばれるほどの美しさを表現している。一般的に、「虎の子渡しの庭」「七五三の庭」と呼ばれているが、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。

本稿では先行研究[1]で行った実験のデータを用い、2 通りの解析を行う。

1 つ目は跳躍運動に注目した解析である。先行研究では石群から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”を求めた。その結果、特定の石群の PageRank が極めて高くなり、龍安寺石庭における鑑賞行動には視覚的不協和が関係している可能性が示された[1]。この結果と、龍安寺石庭が持つ特徴「どこから見ても石が 1 つは隠れる」に注目し、石の隠れ方によって鑑賞位置を 3 つに分け、石の見え方による PageRank の変化を調べる。これにより石の見え方による鑑賞者が石庭から受ける印象の変化を推定する。

2 つ目は固視微動に注目した解析で、石群を見ている時の眼球運動の周波数特性を求める。石群毎に固定視を抽出し、眼球運動の x 軸、y 軸成分と瞳孔半径のデータから離散フーリエ変換により周波数成分を求め比較する。これを 1 つ目の解析結果と合

<sup>†</sup> 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 コンピュータサイエンス専攻  
University of Tsukuba

Graduate School of Systems and Information Engineering  
Department of Computer Science

<sup>††</sup> 会津大学コンピュータ理工学部

The University of Aizu Computer Science and Engineering

わせ、石から受ける印象と固視微動の関係を推定する。

## 2. 龍安寺石庭

龍安寺石庭は、幅 25 メートル、奥行 10 メートルほどの敷地に白砂を敷き詰め、帯目を付け、15 個の石を 5 か所に点在させただけのシンプルな庭である。自然石という具象的な材料を使いながら、配置の構成美という抽象的な世界を築いた点が、独創的とされる所以である。実際の風景をまねた具体的な庭園は、制作者の意図や作品の美しさを理解しやすいのだが、その一方で、抽象的な庭園は、美しさよりも何を表現しているかということが論点になりやすい。15 個の石は、庭をどちらから眺めても、必ず 1 個は他の石に隠れて見えないという特徴がある。

### 2.1 慣習的設計ルール[2]

日本庭園には、作意であるテーマがあり、作者の心象世界が『庭』という空間をキャンパスに立体的に描かれる。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。慣習的な設計ルールが存在する。

日本庭園の最大の特徴は「自然」のままを保つと言うことである。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。

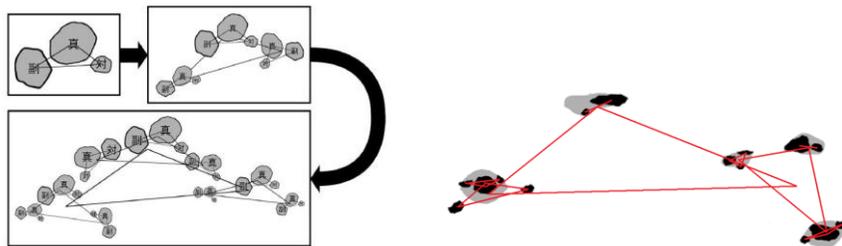


図 1 鈍角不等辺三角形の再帰的配置(左)と龍安寺石庭における再帰性(右)

### 2.2 フラクタル性

先行研究[1]にて、龍安寺石庭における 3 段階の再帰的に構成される鈍角不等辺三角形(図 1 右)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 2 のように傾きが-1 のほぼ直線になる Zipf の法則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。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。

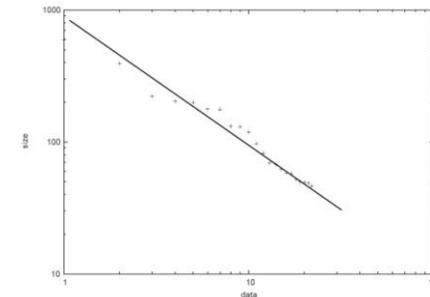


図 2 三角形サイズの両対数グラフ

## 3. 眼球運動

眼球運動には、両眼が相関して動く共同運動、輻輳開散眼球運動と、これらの運動の元となる、各眼に生じる固視微動、随従眼球運動、跳躍眼球運動(サッカード)がある[3]。本稿では、眼球運動は固定視と跳躍運動に分けて考える。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カードに分けられる。

### 3.1 跳躍運動

跳躍運動はサッカードとも呼ばれ、本を読んだり静止画を観察しているときに、注目している対象物が移動する際や、動いている画像を追従しているとき、画像が早すぎて追従できなかったり、動きを予測しているときに生じる、跳ぶような速い動きで

ある。網膜は中心部のごく限られた部位のみ視力が優れているので、外界の情報の詳細は網膜中心部に投影しなければ詳細を把握することができない。つまり、跳躍運動は外界から必要な情報を取り入れるうえで重要な役割を果たしている。我々がものを見る場合の眼球運動は、大部分が跳躍運動である。

### 3.2 固視微動

固視微動(図3 固視微動)は注視時に生じる非常に小さな動きである。視覚系にとってノイズと見なされることもあるが、網膜の解像度を保ち、はっきり見るために欠かせない運動とも考えられている。固視微動には、ドリフトとトレマ、フリックの3つの成分がある。ドリフトは、小さな滑らかな動き、トレマは非常に小さな高周波の振動、フリックは小さな跳ぶような動きで、跳躍運動(サッカー)を小さくした動きとしてマイクロサッカーとも呼ばれている。固視微動は単なるノイズではなく、空間上に浮かんでいる眼球の方向を一定に保つための動きや、網膜像を鮮明に保つための動きと考えられている。フリックは神経のインパルスを反映しているとも考えられ、脳内の視覚情報処理機構を考える上で、見過ごすことのできない眼球運動である。

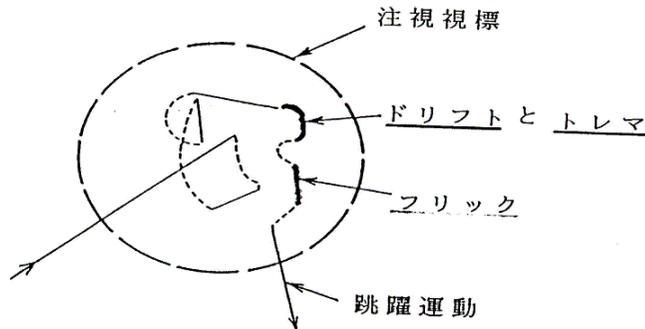


図3 固視微動

### 3.3 随従眼球運動

随従眼球運動は頭を動かさない状態で動いている対象を追従している時に生じる、滑らかで連続的な眼の動きである。その最大速度はたかだか毎秒30度程度である。それ以上の速度で動く物体を見るときは、物体が視野中心からずれるたびにサッカーが発生する。

## 4. 視線解析

### 4.1 アイ・トラッキング実験

本稿の解析には先行研究[1]で行った実験のデータを使用した。実験装置はナックイメージテクノロジー株式会社のアイ・トラッカー EMR-8B(図4 EMR-8B 図5 EMR-8Bの記録データ図4)を使用した。検出レートは60Hz(片目)、検出分解能は眼球運動0.1度、瞳孔径0.02mmとなっている。EMR-8B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。この映像をビデオで記録しておき、後でオプションの解析システムにより被験者の眼球の中心方向への向きから、X軸とY軸に対する角度や瞳孔径などのデータを出力できる(図5)。

先行研究[1]では日本庭園について全く知識のない10名に対して、アイ・トラッキング実験を行った。10名の被験者にEMR-8Bを装着してもらい、石庭を2分間自由に歩きながら鑑賞してもらい、最終的に自分の好きな場所を探してもらった。



図4 EMR-8B



図5 EMR-8Bの記録データ

### 4.2 石群の番号付けと鑑賞位置の分割

図6のように、龍安寺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、第2石群、第3石群により構成されているとする。さらに細かく分けると、第1石群は1-1、1-2、1-3の3つの小石群で構成され、第2石群は2-1、2-2の2つの小石群で構成され、第3石群は3-1、3-2、3-3の3つの小石群で構成されている。

龍安寺石庭は鑑賞者の立つ位置によって他の石の影に隠れる石がある。本稿ではその隠れる石が鑑賞者の鑑賞行動にどのように影響しているかを検証する。そのために隠れる石により鑑賞位置を図6のように分類する。Position1から見ると石群3-1で石が1つ隠れる。Position2から見ると石群1-2も3-1も3石全て見える。Position3から

見ると石群 1-2 で石が 1 つ隠れる。

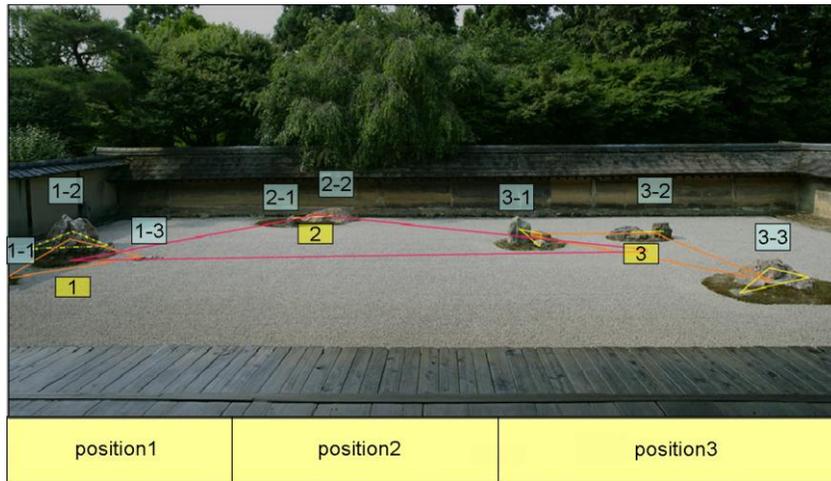


図 6 石群の番号付けと鑑賞位置の分割

### 4.3 PageRank 解析

#### 4.3.1 PageRank

PageRank とは、「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る[4]。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、当該のページの重要性を判断する。単に票数、つまりリンク数を見るだけではなく、「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、それを受け取ったページを「重要なもの」にしていく。

同様に、石群に対して、注目に値する重要な石群はたくさんの石群からリンクされると考えられる。また、重要な石群からのリンクは価値が高いと考えられる。そのため、石群の PageRank を求めることで石群の重要度を推定できると考えられる。

#### 4.3.2 解析方法

まず実験データから、ある石群を見た後、他の石群へ視線を動かすサッカードをリンクとして抽出する。次にそのサッカードが発生した時の鑑賞者の立ち位置により、リンクを 3 つのグループに分ける。そしてグループ毎に PageRank を計算する。

PageRank を求めるにはまず、リンク関係を隣接行列の形で表す。ある石群  $i$  から別の石群  $j$  へリンク数を行列の  $(i,j)$  成分に割り当てる。例えば、一回リンクする時は

$(i,j)$  を 1 にし、2 回このリンクが発生したら、 $(i,j)$  を 2 にする。リンクのない時は  $(i,j)$  を 0 にする。石群は 8 つあるのでこの行列は  $8 \times 8$  の 8 次正方行列になる。今回は自己リンクは考えないことにする。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 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。次に、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る。さらに、確率ベクトルを正規化すると PageRank が得られる。PageRank と推移確率を掛け合わせると石群同士の引用度がわかる。自分に向かってきた引用度の合計が自分の PageRank となっている。

#### 4.3.3 解析結果

各 Position から見た時の石群の PageRank を図 7 に示す。石群毎に左から観賞位置を分割しない場合の PageRank, Position1 から見た時の PageRank, Position2 から見た時の PageRank, Position3 から見た時の PageRank を棒グラフで表している。

観賞位置に関わらず石群 2-2 が高くなり、石群 3-1 と 3-2 がそれに続いている。また、観賞位置別に見ると全鑑賞位置から見た時の PageRank に比べ、自分に近い位置の石群の PageRank が高くなる傾向がある。

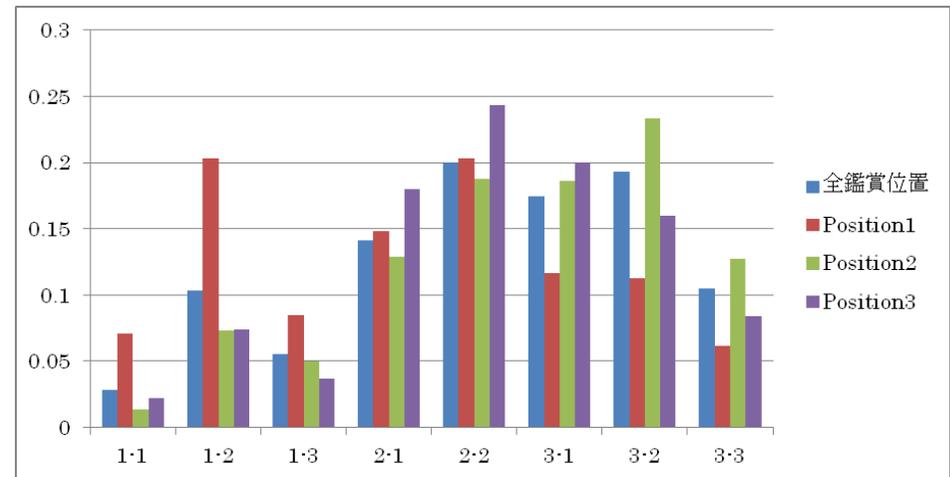


図 7 各観賞位置から見た時の石群の PageRank

#### 4.3.4 考察

先行研究[1]では全鑑賞位置から見た時の PageRank のみを求めた。その結果、観賞者は他の石群に比べ 2-2, 3-2 の石群の重要度が高いと感じていることが分かった。こ

ここで視覚的不協和が発生している可能性がある。視覚的不協和は、自分が見ると期待したものと、実際に見えているものとの間に不一致を経験する時に生じる心理的緊張状態を指す。この2つの石群は3石で1つの鈍角三角形を構成するというルールから外れている(図1右)。このルールからの逸脱が不協和を引き起こし、2つの石群のPageRankを上げていると考えた。人は不協和を感じた時、それを解消しようとする。観賞者は無意識にルールを理解し、不協和により見えない石を想像するなど、想像力を引き出される。その為、石が隠れてルールから外れて見える石群(Position1から見た石群3-1, Position3から見た石群1-2)も他と比べて高くなると予想した。しかし、結果は逆に低くなるというものだった。これには2つの理由が考えられる。

1つ目の理由はデータ数が少ないため、この結果の統計的な信頼性が低い可能性がある。Position1と3での鑑賞時間やリンク数を合わせても、Position2での鑑賞時間とリンク数に及ばない。これは最適鑑賞位置がPosition2付近にある[1][5]ことが原因であると考えられる。このためPosition1と3のデータ数が少なく、被験者の個性等が強く出ている可能性がある。

2つ目の理由は他の石群に強く興味を引かれる要素がある可能性である。position1から観賞しているとき、図7から石群1-2,2-1,2-2のPageRankが際立って高くなっている事がわかる。また、position3から観賞しているとき、石群2-1,2-2,3-1のPageRankが際立って高くなっている事がわかる。石群2は3石1群のルールに従わず常に視覚的不協和が生じている石群である。これは2石しかない石群2を見る際、手前に映る石群を加えて3石1群のようにしようとしている可能性がある。「真・副・対」の3石がそろっている場合、副-真-対、対-真-副というような繰り返すことが多くなる。この視線の動きができない石群2のために、無意識に3つ目の石になる石群を求めた結果、石群2と手前にある石群のPageRankが高くなった可能性がある。

#### 4.4 固視微動の周波数解析

固視微動は神経のインパルスを反映しているとも考えられ、脳内の視覚情報処理機構を考える上で、見過ごすことのできない眼球運動だと考えられているが詳しいことはわかっていない。そこで本稿では、石群ごとの固視微動の周波数特性を求めて比較し、石群のPageRankと照らし合わせることで視覚対象から受ける印象と固視微動の関係性の解明を試みる。

##### 4.4.1 解析方法

まず実験データから石群を見ているときの固定視を抽出する。その固定視を眼球の回転運動のx軸、y軸成分、瞳孔径のデータごとに離散フーリエ変換を使い周波数特性を求める。それぞれのデータを石群ごとに集めて平均を求め、比較する。ここで、石群1-1と1-3は固定視のデータが少なく、PageRankから重要度も低いと考えられるの

で省略した。また、石群2-1と2-2はまとめて石群2とした。

##### 4.4.2 解析結果

石群毎の周波数特性の平均を図8に示す。x軸は周波数、y軸はパワースペクトルの対数グラフとなっている。どの周波数特性においても際立った違いは見られなかった。瞳孔径において石群1-2だけが他と比べ高周波成分が強くなっている。

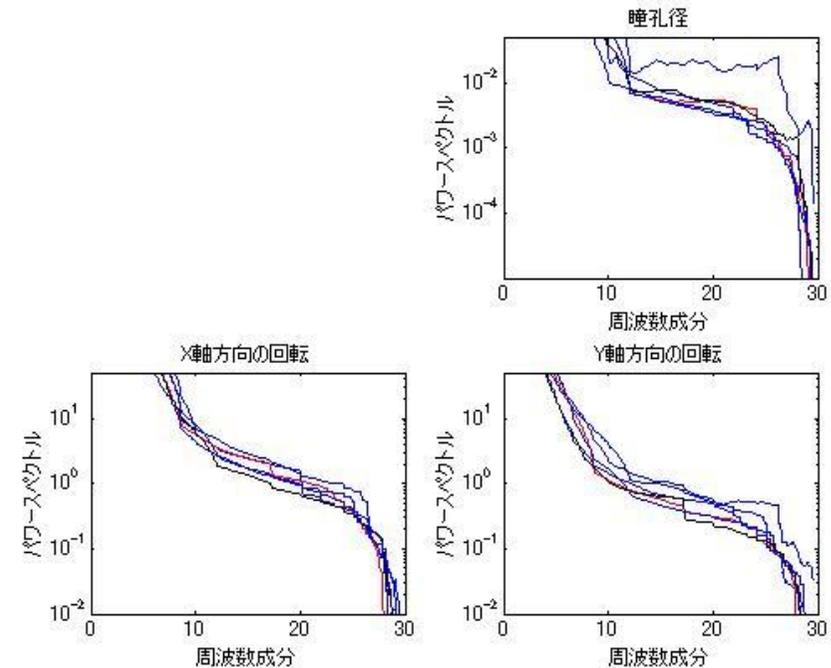


図8 瞳孔径とx軸,y軸方向の眼球回転運動の周波数特性

##### 4.4.3 考察

視覚的不協和により鑑賞者に緊張感を与える石群を見るとき、脳の活動が活発になりその影響が固視微動に現れる可能性があると考えたが、石群毎の周波数特性に大きな違いは見られなかった。これには2つの理由が考えられる。

1つ目の理由はサンプリングレートが低すぎるため、正確な固視微動が測定できていない可能性がある。アイ・トラッカーEMR-8Bはサンプリングレートが60Hzなの

で、眼球運動に 30Hz 以上の高周波成分が含まれる場合、視線軌跡を正確に計測できない。

2 つ目の理由は鑑賞行動による精神状態の変化程度では周波数特性に変化はでない可能性である。龍安寺石庭における視覚的不協和により感じる緊張感はそれほど強くなく、PageRank を上げる効果はあるが固視微動に大きな影響は与えない可能性がある。この場合、周波数特性とは違う解析を検討する必要がある。

## 5. まとめ

本稿では、アイ・トラッカーを使い龍安寺石庭における観賞駆動を計測したデータから 2 通りの解析を行った。PageRank 解析では、石の隠れ方から観賞位置を分割し、各観賞位置から見た時の PageRank を求めた。その結果、図 7 に示すように、各観賞位置から見た場合自分に近い石群の PageRank が高くなることがわかった。周波数解析では石群毎の固視微動から離散フーリエ変換により周波数成分を求め、図 8 の結果を得た。

今後は今回の解析結果から出てきた問題点や可能性を考慮した解析を行う。まずは石群を見ている時の固視微動について、2 分間の鑑賞を通した周波数特性の時間変化を比較する。また、よりサンプリングレートの高いアイ・トラッカーを使った実験を行いたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 望月茂徳, 蔡東生, 浅井信吉, 王雲, 福本麻子:  
造形の禅問答: 龍安寺庭園設計者の謎かけ一見えない石を見せる設計者の隠された作為
- 2) 秋元通明: 「作庭帖 自然風庭園の手法」, 誠分堂新光社, 2000
- 3) 福田忠彦, 渡辺利夫: 「ヒューマンスケープ視覚の世界を探る」, 日科技連出版社, 1996.
- 4) Google の秘密 - PageRank 徹底解説 [http://homepage2.nifty.com/baba\\_hajime/wais/pagerank.html](http://homepage2.nifty.com/baba_hajime/wais/pagerank.html)
- 5) GertJ.Van Tonder, Michael J. Lyons, Yoshimichi Ejima: Visual structure of a Japanese Zen garden, Nature, vol.419, pp.359-360, Sep26, 2002.