2 次元フーリエ変換による写真の客観的評価に関する研究

Study on Objective Evaluation about Photographs Using 2D Fourier Transformation

伊 藤 雅 浩 *,　福 川 芳 郎 **

ITO, Masahiro　FUKUKAWA, Yoshiro

Abstract

The purpose of this work is to establish objective evaluation by using 2D Fourier Transformation for General photographs that had been able to only evaluate by subjective method so far. Fine Art photographs and Applied Art photographs have clear and objective evaluation criteria. However, the others have only had vague subjective ratings like 'good photos' until now especially in Japan. As a result of we analyze fluctuation about various General photographs quantitatively by using Discrete Fourier Transform (DFT), could confirm that these photographs which point to tend '$1/f^{1.5}$ Fluctuation' meet the necessary standards for 'good photos'. Form the above; we conclude '$1/f^{1.5}$ Fluctuation' can be an index value to objectively evaluate 'good photos'.

1. はじめに

1826 年、ニエプスによって初めて写真が撮影されて以降、科学技術の発展とともに数多くの写真が撮影されるようになった。さらには、2000 年前後のインターネット、およびデジタルカメラやスマートフォンの一般普及に伴い、撮影・公開される写真は爆発的に増加し、いまや写真を撮影する行為は文字を書くと同様に特別な行為ではなくなった。

写真には様々な種類が存在し、大きくはファイン・アート系、応用美術系、一般写真系に分類される。後述するように、ファイン・アート系、応用美術系には明確かつ客観的な価値基準が存在する。しかし、一般写真系は「良い写真」、「悪い写真」というような感覚的で曖昧な表現で語られることが多い。それらにはこれまで明確な評価軸が存在しなかったため、見る側の好みや知識などといった主観的な評価基準により評価せざるを得なかった。

武者 [1]により、音楽や絵画に対して$1/f$ 型の周波数に対するゆらぎ研究がなされて以降、これまで絵画 [2]やテクスチャ [3]などの 2 次元平面画像に対してゆらぎ解析を用いた研究が行われている。そこで本研究では、これまで主観的な評価でしか判断することができなかった一般写真について、2 次元フーリエ変換による数値的な客観評価方法の確立を目的とする。

*アーティスト／プログラマー

**ブリッツ・インターナショナル　ギャラリスト

2. 写真の定義

本研究において対象とする写真は次節以降のように区分し定義する。

2.1. ファイン・アート系写真[4)]

現在ではオークション市場で数億円の値がつけられるように、写真はアート作品の表現方法のひとつとして認知されている。ファイン・アート系の写真は、作品のオリジナリティーを写真史と対比して評価するという明確な基準が存在する。

中心となるのは現代アート分野のアーティストがデジタル化の恩恵を受けて制作した現代アート系写真である。これらは写真そのものの価値だけではなく、アイデア・コンセプトが明確に提示された「写真を用いたファイン・アート作品」である。

さらにここには、20 世紀写真（クラシック写真）も含まれる。20 世紀写真とは主にアナログ銀塩カメラを用いて撮影された写真であり、モノクロームの抽象的な美しさと、印刷では表現できないファイン・プリントの再現性が価値基準となる。現在は、現代アートによる視点からの再評価が進んでおり、それにより作品の市場価値が影響を受け始めている。また、撮影機材に関わらず、写真史の系譜に連なり一定の評価を受けた写真についても、現代アート系写真と区別するため 20 世紀写真に含むものとする。

2.2. 応用美術系写真

インテリアの装飾用写真、広告などの商業写真を含む。コンテクストではなく、優れたグラフィカル、色彩の組み合わせなどのデザイン性が評価されるため、これらの写真も明確な価値基準が存在する。また商業写真ではクライアント、デザイナーの制作意図を的確に反映しているかによって写真の良し悪しが判断される。

2.3. その他の写真

前述の二つのカテゴリーに該当しない写真として、一般的な公募展、写真賞、写真雑誌のコンテスト写真などが挙げられる。なお、本研究ではその他の写真に区分される写真のうち、第三者によって評価の対象となる写真を「一般写真」と称する。このような写真を選定する際には実に多様な価値基準が存在する。なかでも、主たる判断基準として「良い写真」であることに重きが置かれるが、この「良い写真」の持つ意味が曖昧かつ多岐にわたる。

ここで「良い写真」とは、撮影者自身が楽しむパーソナルな写真の場合は自身が満足のいく写真を意味するが、一般写真においては評価者、選考者が存在するため、彼らが選出した写真が結果として「良い写真」であるといえる。ところが、彼らの知識や写真を見立てる力量の差によって選出される写真は大きく異なるため、これまで「良い写真」について明確な指針が存在しなかった。

そこで、本研究では「良い写真」を選出するうえで評価基準が主観的かつ不明確であった一般写真を客観的に評価するため、2 次元フーリエ変換による数値的な評価方法の確立を目的とする。なお、本研究では「良い写真」を数値評価する上で、第三者によって選定された様々なカテゴリーの写真に対してゆらぎ計算を実施し、得られたゆらぎ値の統計値を「良い写真」の指標値とする。加えて、おもに写真史およびアート写真市場で一定の評価を受けた写真に対してもゆらぎ計算を行い、算定した「良い写真」の指標値との比較・検証を実施する。

3. 一般写真の位置付け

一般写真は見る（評価する）側の持つ評価基準により様々に解釈されるため、ファイン・アート系写真に属する現代アート系写真のように、

必ずしもオリジナリティーを写真史と比較して評価するとは限らない。ただし、評価者、選考者が写真家、写真研究者、写真評論家など写真に精通する人物であった場合、基礎知識として評価の基準となるのは主にファイン・アート系に属する 20 世紀写真であるといえる。したがって、本研究において一般写真における評価の基準軸となるのはこの 20 世紀写真とする。

加えて、第 2.3 節で示したように、一般的な公募展、写真賞、写真雑誌のコンテスト写真など、第三者によって評価の対象となる写真を一般写真と称した。一方で、第 2 章で示したように、本研究における写真の区分に従って写真を分類すると、歴史や記録としての写真、記念写真(結婚、卒業)、報道写真、業務用写真(天候、X 線、建築、証明)などの写真もまた「その他の写真」に含まれる。このような写真においては、撮影目的が明確に規定されており、「良い写真」のように曖昧な評価軸は存在しない。しかし、これらの写真やパーソナルな写真が公募展やコンテストに出品された場合は、主たる評価軸とは異なる、第三者によって評価の対象となる写真となり得る。そのため、ファイン・アート系、および応用美術系に属さない写真については、本研究で対象とする一般写真の定義に充足すると解釈する。

4. ゆらぎ

4.1. 時間特性

「$1/f$ ゆらぎ」とは、1925 年に J. B. Johnson が発見したゆらぎの総称である。真空管を流れる電子電流が抵抗値に一定ではなく不安定にゆらいでおり、近似的にパワースペクトル密度が周波数 f に反比例する関係性がみられたことに由来する[5]。規則的なものの中に適度なランダムさを含む「$1/f$ ゆらぎ」は、心臓の鼓動、炎の揺れ、クラシック音楽などにみられ、人間が心地よさを感じることができる指標とされている。ただし、自然現象などにみられる「$1/f$ ゆらぎ」とは時間的変化によるものであり、現象には時間経過の中に適度な不規則性があることを意味する。

4.2. 空間特性

写真における $1/f^{\alpha}$ ゆらぎの算定方法については第 5 章で詳しく述べるが、ローパスフィルター処理などと同様に、本研究では 2 次元フーリエ変換による画像処理の手法を用いる。2 次元フーリエ変換とは、ピクセル間の強度値変化を空間周波数分布に変換する処理手法であり、テクスチャ解析のひとつとして「$1/f^{\alpha}$ ゆらぎ」が用いられる。このことから、時間的変化を伴わない写真を含めた 2 次元平面画像のゆらぎとは、画像の「強度値変化による度合いの指標」であるといえる。ここで、強度値変化とはピクセル間の明度・濃淡・階調を表す。そのため、写真におけるゆらぎとは一般的に認知されている「時間特性のゆらぎ＝心地良さの指標」と異なる点に留意されたい。

図 4.1 に示すように、1 次元パワースペクトル密度 $P(r)$ と空間周波数 f との間には、累乗近

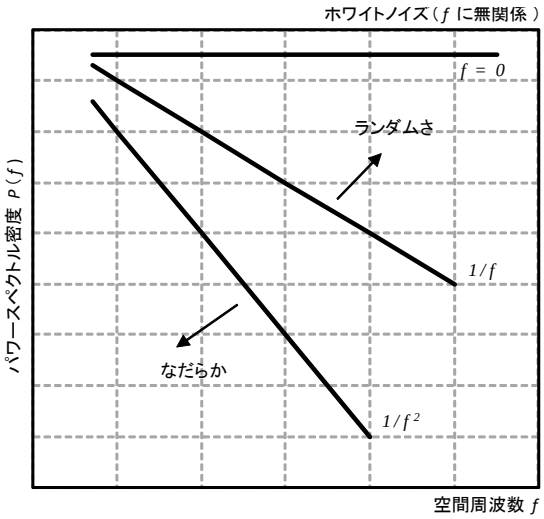


図 4.1　$1/f^{\alpha}$ ゆらぎの特徴

似的に右下下がりの直線的な関係性がみてとれることが知られている。武者 [1]によると、印象派の絵画や写真などは「$1/f^2$ 型」、水墨画や漫画は「$1/f$ 型」のゆらぎの傾向を示すとされ、「$1/f$ 型」から「$1/f^0$ 型」に向かうほどランダムさが増加、「$1/f^2$ 型」に向かうほど変化が少ない（＝なだらかな）傾向にあるとされる。また、画像の抽象性が増すにつれて、近似直線は $1/f$ に近づく傾向にあるとされる。

以上を踏まえ、写真におけるゆらぎ値の傾向を以下のように仮定し、第 6 章以降で検証する。

(i) 武者 [1]が述べるように、印象派の絵画は形態の明確な描写よりも、その場の空気感や光といった印象を表現したものであるため、濃淡の変化が少ない＝「$1/f^2$ ゆらぎ」の傾向にある。一方で、写真は機械的な特性上細部が鮮明となることから、印象派の絵画と比較すると濃淡の変化が大きくなる傾向にあると考える。ただし、抽象的な写真においては「$1/f$ ゆらぎ」の傾向を示すことから、一般写真における「良い写真」とは「$1/f$ ゆらぎ」と「$1/f^2$ ゆらぎ」との中間に位置する「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」を示す傾向にある。

(ii) 自然現象など（時間特性）における「$1/f$ ゆらぎ」は心地よさを感じられる指標である。一方で、写真（空間特性）における「$1/f$ ゆらぎ」は本研究で「良い写真」の指標値と位置付ける「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」と比較すると、濃淡の変化による度合いが大きく、濃淡の均整がとれていないことを意味する。このことから、「$1/f$ ゆらぎ」の傾向を示す写真は「良い写真」ではないと位置付ける。

(iii) 同一の被写体であったとしても、フレーミングを変更することによりゆらぎ値も変化することから、ゆらぎ値は的確なフレーミングの指標値になり得る。

(iv) 「良い写真」を撮影することができる撮影者とは、眼下の風景における光の濃淡や階調といった強度値の変化と写真全体のフレーミングを直観的（感覚的）に捉えることができる能力に長けている可能性がある。

5. 解析方法

本研究では、写真における$1/f^{\alpha}$ ゆらぎを算定するためにプログラム処理 [6]（C#, Microsoft Visual Studio 2010）を用いる。なお、解析に用いる写真はカラー・モノクローム問わず、人間の視覚特性は色差成分よりも輝度成分に対して強い感度を持っている点を考慮し、元画像をグレースケール画像に変換する。その際、（式 5.1）を用いて画像が持つカラー情報を RGB 色空間から YCC 色空間（YC_bC_r 方式）へと変換する。

$$
\begin{aligned}
Y &= 0.2990R + 0.5870G + 0.1140B \\
C_b &= -0.1687R - 0.3313G + 0.5000B + 128 \\
C_r &= 0.5000R - 0.4187G - 0.0813B + 128
\end{aligned}
\quad \cdots（式\ 5.1）
$$

（式 5.1）は YC_bC_r 方式と呼ばれ Y は輝度、C_bが青系統、C_rが赤系統それぞれの色相と彩度を表す。なお、輝度 Yは人間が感じる輝度とほぼ比例した数値になるように設定された近似式であるのが特徴である。変換したグレースケール画像の RGB 値（R=G=B, 0≦R≦255）に対して 2 次元離散フーリエ変換（DFT）を行い、各空間周波数領域におけるパワースペクトル値を算出する。画像$f\ (x, y)$におけるフーリエ変換 $F(u, v)$ は（式 5.2）によって定義される。

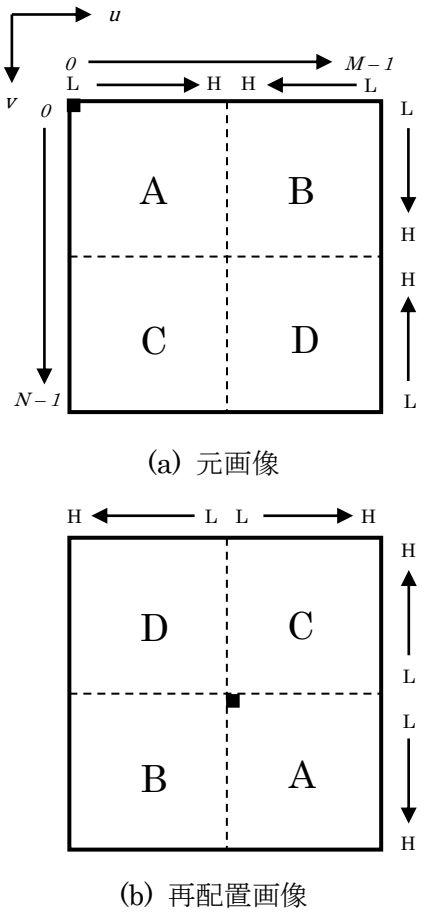
$$
F(u,v) = \frac{1}{MN}\sum_{v=0}^{N-1}\sum_{u=0}^{M-1} f(x,y)e^{-j\frac{2\pi ux}{M}}e^{-j\frac{2\pi vy}{N}}
\quad \cdots（式\ 5.2）
$$

ここで、画像$f\ (x,y)$の画素数は$M \times N$ pixel、u,v は空間周波数であり、$F(u,v)$は空間周波数スペクトルと呼ばれる。なお、本研究における空間周波数とは「単位ピクセル内における画素値の変化度合い」を指す。これは、単位ピクセル（=1 ピクセル）移動した場合における濃度値の変化度合いを「空間的な周波数」として定義したものである。

2 次元離散フーリエ変換（DFT）の結果は複素画像となり、複素関数$F(u,v)$の実数部と虚数部をそれぞれ$F_r(u,v)$、$F_i(u,v)$とすると、2 次元パワースペクトル$P(u,v)$は（式 5.3）で与えられる。

$$P(u,v) = |F(u,v)|^2 = |F_r(u,v)|^2 + |F_i(u,v)|^2$$

・・・（式 5.3）



(a) 元画像

(b) 再配置画像

図 5.1　パワースペクトル図

2 次元パワースペクトル$P(u,v)$は空間周波数u,v の強さを表す。画像の左上を原点（0,0）としたとき、図 5.1 (a)のような空間周波数スペクトル画像が得られる。さらに、図 5.1 (a)を 4 区分に分割し、図 5.1 (b)のように再配置することにより、中心付近が低周波成分、外側に向かって高周波成分となる 2 次元パワースペクトル図（以下､｢パワースペクトル図｣という）となる。ここで、図 5.1 において$u,v\ = 0,0$（■部）は直流（AC）成分、その他の領域は交流（DC）成分と呼ばれ、2 次元離散フーリエ変換（DFT）の性質上 AC 成分は DC 成分に比べて過大なパワースペクトルが生じる。

ただし、パワースペクトル図を用いた分析手法は写真の強度値度合いを定性的＝「パワースペクトル図を識別して画像の特性を読み解く方法」でしか評価することができない。そこで、本研究では定量的＝｢数値的な客観評価の確立｣を目的としているため、平面座標$P(u,v)$を極座標形式$P(r,\theta)$に変換すると、原点から等しい半径r上にある成分の総和$P(r)$は（式 5.4）で与えられる。

$$P(r) = \sum_{\theta=0}^{2\pi} P(r,\theta) \qquad \text{（式 5.4）}$$

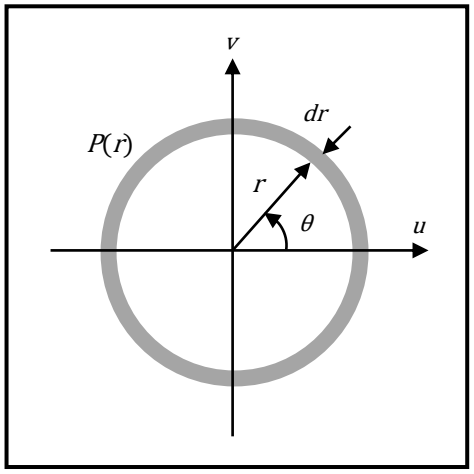


図 5.2　動径方向分布図

$P(r)$は動径方向分布と呼ばれ、$P(r)$は図 5.2 のように画像中心から $r=\sqrt{u^2+v^2}$ の距離に存在する環状領域内のパワースペクトルの総和を表している。なお、画像の方向特性を分析するためには水平軸から角度θ における線形領域内の総和＝角度方向分布$q(\theta)$が用いられる。定性的にパワースペクトル分析を行ううえでは$P(r)$と$q(\theta)$の両方向分布を用いる方法が一般的ではある。しかし、本研究ではゆらぎ値を用いた数値的な客観評価が目的であるため、$P(r)$を用いてゆらぎ値の算定を実施する。

以上により、横軸を空間周波数、縦軸をパワースペクトルの総和とし、両対数グラフをとることで、図 4.1 に示したような右下下がりの相関がみてとれる。空間周波数をf 、傾きをα、定数をβとすると、環状領域内のパワースペクトル総和（以下､「パワースペクトル密度」という）と空間周波数の関係式は（式 5.5）で与えられる。

$$\log P(r) = \log\beta - \alpha\log f$$

$$= \log\beta + \log\left({}^{1}/_{f^{\alpha}}\right) \qquad \text{（式 5.5）}$$

ここで、αはゆらぎ値を表し、$\alpha=0$ はホワイトノイズ、$\alpha=1$ は$1/f$ ゆらぎ、$\alpha=2$ はランダムウォークノイズと呼ばれている。

6. ゆらぎ値の検証

6.1. ゆらぎ値αの統計的算定

本研究では一般写真において「$1/f^{\alpha}$ゆらぎ」の指標値を客観的に算定するため、The Paris Photography Prize（https://px3.fr/, 以下､「PX3」という）という、海外で催されている写真コンペティションにおいて、過去 5 年間（2014～2018 年）に入賞した写真およそ 3300 枚に対してゆらぎ計算を実施した。その結果を図 6.1、および表 6.1 にそれぞれ示す。図 6.1 は横軸にゆらぎ値α、縦軸に出現回数をとった発生頻度分布図、表 6.1 はゆらぎ計算結果の統計値である。図 6.1、および表 6.1 の結果から、一般写真において第三者によって選定された写真＝「良い写真」はおおよそ「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向を示していることがみてとれる。

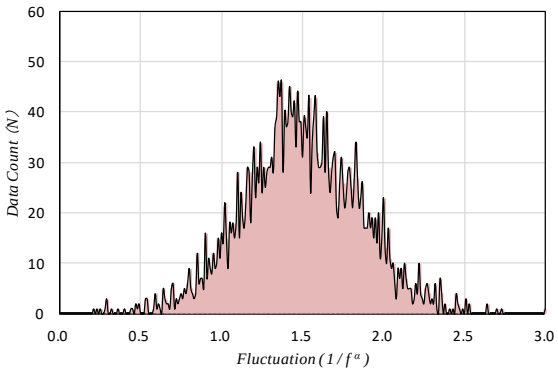


図 6.1　ゆらぎ値α　発生頻度分布図

表 6.1　ゆらぎ計算結果（統計値）

項目		結果
総数	N	3272
平均値	μ	1.49
中央値	M	1.48
標準偏差	σ	0.362
最大値	Max α	3.92
最小値	Min α	0.21

ここで、ゆらぎ値αの統計的算定において、PX3 を選択した理由を述べる。PX3 は 2007 年より世界中の写真と対象とした、インターネットオンライン上のコンペティションである。プロ・アマチュアを問わずに応募可能であり、広告（Adverting）、自然（Nature）、ファイン・アート（Fine Art）などのようにカテゴリー別に入賞者が選出される。審査員には写真家だけではなく、キュレーター、ギャラリスト、雑誌編集者など、多角的な視点で写真が選定されているのが特徴である。このことから、算定した

ゆらぎ値の統計値を「良い写真」の指標値と用いることに際して、使用した写真が本研究で対象とする一般写真であること、ならびに本研究者自身が選定した写真を用いてはいない点から、算定したゆらぎ値は客観的な指標となり得ると考える。

なお、ゆらぎ計算時には第 6.3 節に示す通り、長辺方向サイズを 1024 pixel に拡大した画像に対して計算を実施した。この点については、今後の課題として第 10 章(i) に示す。

6.2. 画像種別

武者 [1]が述べるように、メディア（絵画、写真など）の種類によってゆらぎ値の傾向が異なるとされる。そこで事前検証として、次項より武者 [1]がゆらぎ値の傾向を示した印象派の絵画、風景写真、及び抽象性を示す画像として、一般的に$1/f$ ゆらぎと称される木目画像についてゆらぎの検証を実施する。

6.2.1. 絵画（印象派）

武者 [1]によると、印象派の絵画は「$1/f^2$ ゆらぎ」の傾向を示すとされる。そこで、事前検証として印象派を代表する画家のひとりである Alfred Sisley の作品 [7]を用いてゆらぎの計算を実施した。ゆらぎの計算に用いた元画像を図 6.2、ゆらぎ計算結果を図 6.3、パワースペクトル図を図 6.4 にそれぞれ示す。

図 6.3 において上部波線は$1/f$ ゆらぎ、下部波線は$1/f^2$ ゆらぎ、●点は当該画像の各空間周波数におけるパワースペクトル密度、実線は累乗近似により算出したゆらぎ近似直線である。ゆらぎ計算の結果、当該画像におけるゆらぎ値は$\alpha = 1.53$（$R^2 = 0.967$）であり、全体的にみて武者 [1]が述べる「$1/f^2$ ゆらぎ」（≒ $1/f^2$ 寄りのゆらぎ）の傾向を示した。なお、R^2は決定係数を表し、R^2が 1.0 に近いほど累乗近似による

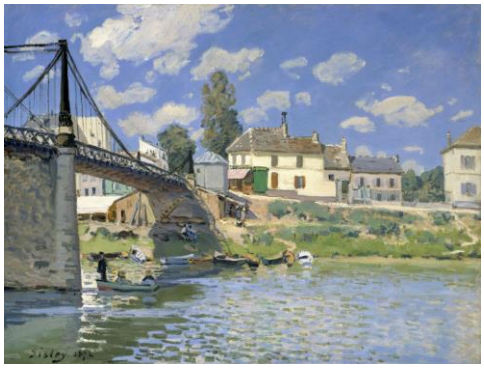


図 6.2　元画像（絵画）[7]

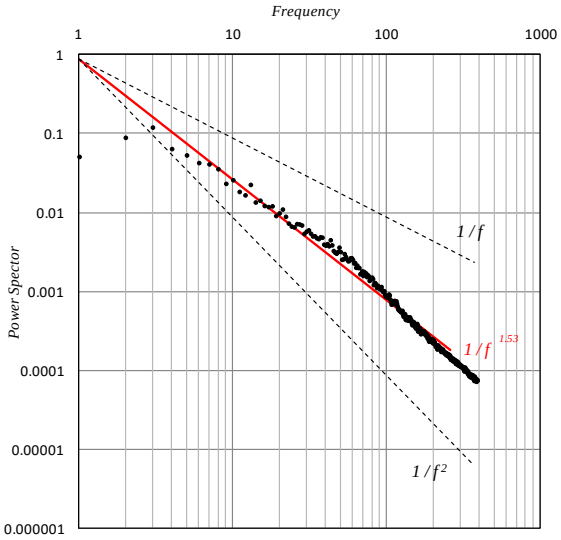


図 6.3　ゆらぎ計算結果（絵画）

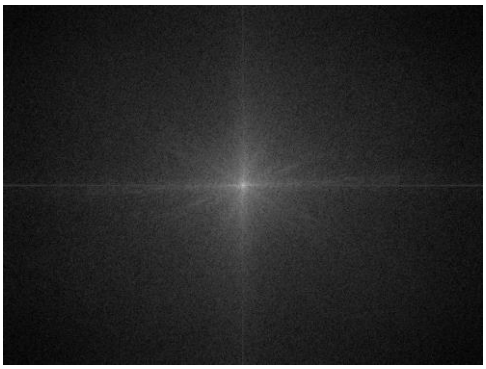


図 6.4　パワースペクトル図（絵画）

相関がよいことを意味する。ここで、ゆらぎ値を計算する前段階にあたるパワースペクトル図（図 6.4）についてふれる。

パワースペクトル図は第 5 章で示したように、

図 6.5　元画像（写真）[8)]

図 6.8　元画像（テクスチャ）[9)]

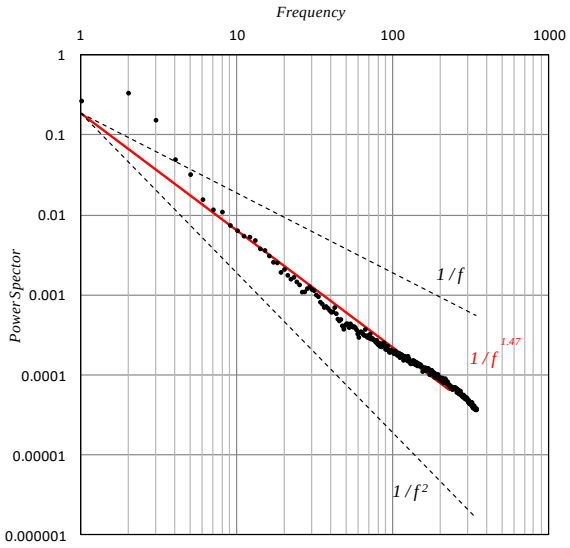


図 6.6　ゆらぎ計算結果（写真）

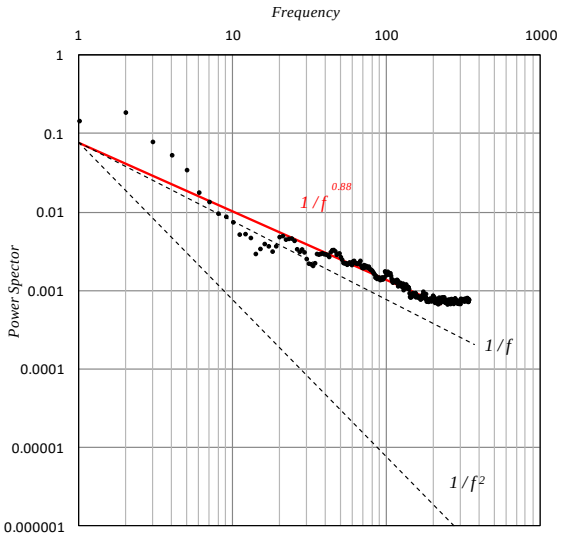


図 6.9　ゆらぎ計算結果（テクスチャ）

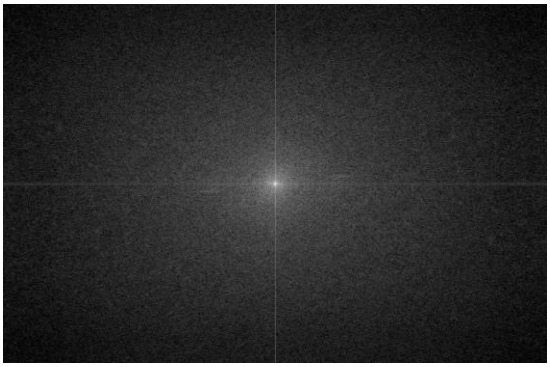


図 6.7　パワースペクトル図（写真）

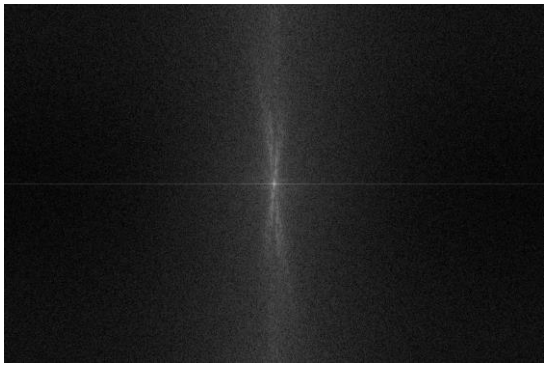


図 6.10　パワースペクトル図（テクスチャ）

中心付近が低周波成分、外側に向かって高周波成分を表す画像となる。図 6.4 から、図 6.2 におけるパワースペクトルは低周波数成分に集中していることがみてとれる。低周波成分が卓越した画像は濃度がなだらかに変化＝輪郭部分が鮮明ではないことを意味する。印象派の絵画は形態の明確な描写よりも、その場の空気感や光といった印象を表現したものであるため、低周

波成分が卓越したパワースペクトル図となる。なお、第 5 章で示したように、パワースペクトル図を定性的に分析するためには、動径方向分布$P(r)$と角度方向分布$q(\theta)$を算定することで、画像における特徴的な空間周波数帯、および方向特性を論じることが可能となる。

6.2.2. 写真（風景）

武者 [1]によると、印象派の絵画と同様に風景写真もまた「$1/f^2$ ゆらぎ」の傾向を示すとされる。そこで、事前検証としてデジタルカメラを用いて撮影した風景写真 [8]を図 6.5、ゆらぎ計算結果を図 6.6、パワースペクトル図を図 6.7 にそれぞれ示す。ゆらぎ計算の結果、当該画像におけるゆらぎ値は$\alpha = 1.47$（$R^2 = 0.974$）であり、図 6.2 と同様に全体的にみて武者 [1]が述べる「$1/f^2$ ゆらぎ」（≒ $1/f^2$ 寄りのゆらぎ）の傾向を示したが、写真のゆらぎ値は「$1/f$ ゆらぎ」と「$1/f^2$ ゆらぎ」との中間程度に位置する「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向がみられた。

パワースペクトル図に着目すると、絵画のパワースペクトル図（図 6.4）よりも写真のパワースペクトル図（図 6.7）の方が低周波成分から高周波成分の全域にわたって濃淡の変化が生じていることがみてとれる。高周波数成分を多く含む画像は、隣接する濃度値が急激に変化＝輪郭が強調された画像を意味することから、事前検証の結果は写真の特性を的確に示しているといえる。

6.2.3. 抽象性画像

武者 [1]によると、抽象性を示す画像は「$1/f$ ゆらぎ」を示すとされる。そこで、事前検証として一般的に癒しの効果があるといわれる木目画像 [9]を図 6.8、ゆらぎ計算結果を図 6.9、パワースペクトル図を図 6.10 にそれぞれ示す。

ゆらぎ計算の結果、当該画像におけるゆらぎ値は$\alpha = 0.88$（$R^2 = 0.930$）であり、武者 [1]が述べる「$1/f$ ゆらぎ」の傾向を示した。自然現象など（時間特性）において、規則性の中にランダムさを持ち合わせる「$1/f$ ゆらぎ」は鑑賞者に心地よさを与えるとされる。しかしながら、「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の写真と比較すると「$1/f$ ゆらぎ」を示す写真は濃淡の変化度合いが大きいことを意味し、写真全体を通して濃淡の均整がとれた写真ではないといえる。このことから、「$1/f$ ゆらぎ」を示す写真は「良い写真」の必要条件を満たすとは言い難い。

6.3. 画像サイズ

画像サイズが増加するにつれ、累乗近似による近似式は高周波成分のパワースペクトル密度に寄与し、同一画像であるにも関わらずゆらぎ値が大きく変化することが想定される。そこで、本節では図 6.5 の写真において長辺方向の画像サイズが2^x pixel となる 512、1024、2048 pixel としたときのゆらぎ計算結果を表 6.2、および各画像サイズによるパワースペクトル密度の重ね合わせ図を図 6.11 にそれぞれ示す。なお、2^xpixel 値を選択した理由として詳しくは今後の課題（第 10 章(ii)）で述べるが、2 次元高速フーリエ変換（FFT）によるゆらぎ値計算にも対応できることを見越したためである。

図 6.11 に示したように、画像サイズが増加したとしても、パワースペクトル密度は同等の傾向を示した。しかしながら、画像サイズが増加するにつれ、低周波数成分（f = 1～10）にお

表 6.2　画像サイズによるゆらぎ値

画像サイズ（*pixel*）	α	R^2
512	1.70	0.985
1024	1.47	0.974
2048	1.37	0.980

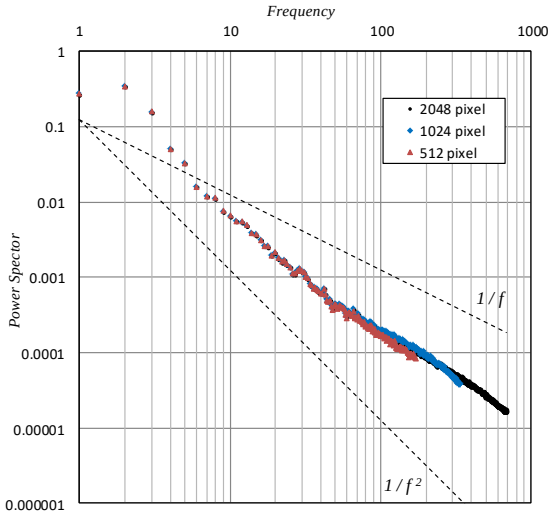


図 6.11　ゆらぎ計算結果（全画像サイズ）

ける累乗近似曲線の相関が悪くなる一方で、高周波成分の寄与によって表 6.2 のようにゆらぎ値αも変化する傾向がみてとれた。

以上の結果を踏まえ、本研究では定量的にゆらぎ値を算出するため、当該画像におけるゆらぎ値の平均値程度にあたる 1024 pixel を長辺方向における画像サイズとし、アスペクト比を変更せずに画像サイズを相対的に修正した画像に対してゆらぎ計算を実施する。

6.4. フレーミング

写真において、フレーミング（＝構図）は写真の良し悪しを判断する上で重要なファクターのひとつである。そのため、フレーミングが変更されることにより画像構成、および対象となる空間周波数領域も変化するため、ゆらぎ値にも影響がでることが想定される。そこで本節では、フレーミングの選択によるゆらぎ値の変化を検証するため、オリジナルフォーマット（35mm フォーマット）[10]の写真を図 6.12、スキャニングした元画像から被写体を中心としてスクエアフォーマットにトリミングした写真を図 6.13 にそれぞれ示す。

ゆらぎ計算の結果、ゆらぎ値は 35mm フォーマット：$\alpha = 1.00$（$R^2 = 0.968$）、スクエアフォーマット：$\alpha = 1.41$（$R^2 = 0.947$）をそれぞれ示した。特筆すべきは、フレーミングを変更したことにより本研究で「良い写真」の指標値と位置付ける「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」へと変化した点であり、写真全体において濃淡のバランスが改善されたといえる。

図 6.12　$\alpha = 1.00$

図 6.13　$\alpha = 1.41$

6.5. 定量的評価

一般的に写真のフォーマットは一定ではないため、画像サイズの統一性がなければ定量的な評価が行えない。そこで、本研究では定量的な評価を実施するため以下の通りとした。

・長辺の画素数：1024pixel（第 6.3 節参照）
・アスペクト比　：変更なし
・拡　　張　　子：TIFF 形式

ここで、書籍などの印刷物からデジタルデータを作成する際は、写真印刷の実用解像度である 300 dpi でスキャニングを実施し、取得した画像データに対して、Adobe Photoshop CC 2018 を用いてアスペクト比を変更せずに長辺方向の画素数を 1024pixel に変更した。なお、2 次元フーリエ変換処理時には、1 ピクセル毎の濃度値を用いて計算する（第 5 章参照）。そのため、ウェブ上で取得した写真のように低解像度（72, 96 dpi など）であったとしても、色域・画像サイズが同一である場合、ゆらぎ値の結果は同値を示す。

また、第 6.3 節で示したようにゆらぎ値の計算は 2 次元離散フーリエ変換（DFT）の性質上、

高周波数成分の精度が悪くなるため、画像の短辺方向の$1/2$をナイキスト周波数とし空間周波数を低周波数成分、中周波数成分、高周波数成分の 3 区分に分割し、低～中周波数成分（空間周波数全体の 3 分の 2）をゆらぎ計算の対象区間とした。あわせて、直流（AC）成分（$u, v = 0, 0$）は交流（DC）成分に比べて過大なパワースペクトル密度を示し、ゆらぎ値の累乗近似計算に大きく寄与することから、動径方向分布$P(r)$計算時には直流（AC）成分を除外した。加えて、本研究では写真そのものを評価の対象とするため、黒枠などが付いている画像の場合は枠部を除外してゆらぎ計算を実施した。

7. 追加検証

第 5 章でゆらぎ値の解析方法を、第 6 章でゆらぎの検証、および客観評価における定量的な評価手法をそれぞれ示した。本章では本研究で「良い写真」の指標値として定義した「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」と比較するため、追加検証としておもに写真史およびアート写真市場で一定の評価を受けた写真に対してゆらぎ計算を実施する。なお、第 4.2 節で示した仮定の考察については第 8.2 節に示し、本章ではゆらぎ計算結果を示すにとどめる。表 7.1 にゆらぎ計算結果を、図 7.1～図 7.10 に本検証に用いた元画像をそれぞれ示す。ここで、αはゆらぎ値、R^2は決定係数である。

表 7.1　ゆらぎ計算結果

Image No.	α	R^2
①	1.51	0.966
②	1.57	0.992
③	0.70	0.901
④	1.56	0.952
⑤	1.56	0.989
⑥	1.28	0.987
⑦	0.89	0.929
⑧	1.26	0.974
⑨	1.28	0.944
⑩	1.57	0.980

図 7.1　画像①[11]

図 7.2　画像②[12]

図 7.3　画像③[13]

図 7.4　画像④[14]

図 7.5　画像⑤[15]

図 7.6　画像⑥[15]

図 7.7　画像⑦[16]

図 7.8　画像⑧[17]

図 7.9　画像⑨[18]

図 7.10　画像⑩[19]

8. 考察

第 6 章、および第 7 章で示した結果をもとに、本章では第 4.2 節で示した写真におけるゆらぎ値の傾向に対する仮定ついて考察する。あわせて、第 7 章で追加検証に用いた各写真におけるゆらぎ値との関連性について述べる。

8.1. 仮定の考察

(i) 一般写真における「良い写真」の指標値を算定するため、PX3 で過去 5 年間に入賞したおよそ 3300 枚の写真についてゆらぎ計算を行った（第 6.1 節参照）。その結果、第三者が選定した写真＝「良い写真」は統計値として「$1/f$ ゆらぎ」と「$1/f^2$ ゆらぎ」との中間に位置する「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向を示した。このことから、一般写真において「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向を示す写真が「良い写真」の客観的評価の指標値として有用であると考える。

(ii) 自然現象など（時間特性）における「$1/f$ ゆらぎ」とは心地よさを感じられる指標である。一方で、写真（空間特性）における「$1/f$ ゆらぎ」は、本研究で「良い写真」の指標値と位置付ける「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」と比較すると、濃淡の変化による度合いが大きいため、写真全体として濃淡の均整がとれてはいない。このことは、図 6.1 で示したように、「$1/f$ ゆらぎ」を示す写真は第三者により選定される可能性が「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」に比べて大幅に減少していることからも明らかであり、「$1/f$ ゆらぎ」の傾向を示す写真は「良い写真」であるとはいえない。

(iii) 第 6.4 節で同一被写体であったとしてもフレーミングを変更することによりゆらぎ値が変化することを確認した。オリジナルの写真（35mm フォーマット、図 6.12）をスクエアフォーマット（図 6.13）に変更したことによって、ゆらぎ値は 1.00 から 1.41 へと変化した。スクエアフォーマットの写真は一般的な横長の写真（35mm フォーマット）よりも落ち着いた印象があるといわれるように、ゆらぎ値が「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向に変化したことから、フレーミングを変更したことによって写真全体における濃淡のバランスが改善されたことを示す。このことから、写真におけるフレーミングは「良い写真」を選定するうえで重要なファクターであるとともに、ゆらぎ値がフレーミングの良し悪しを判断するための指標値になり得るといえる。

(iv) 「良い写真」の指標値である「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」は、「強度値変化の度合い」がバランスよくフレーム内に収められていることを意味する。また、フレーミングの選択がゆらぎ値の結果に影響を及ぼす（第 6.4 節参照）ことから、「良い写真」を撮影することができる撮影者とは、眼下の風景における光の濃淡や階調、および写真全体の構成（＝フレーミング）を直観的（＝感覚的）に捉えることができる能力に長けていると考える。

8.2. 追加検証の考察

(i) 画像①[11]（図 7.1）：アメリカ現代写真の元祖といわれるウォーカー・エバンスの作品。アメリカの原風景をパーソナルな視点で撮影した作品群は、写真史における教科書的な「良い写真」として知られており、本作も「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向を強く示している。

(ii) 画像②[12]（図 7.2）もまた「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向を示す写真である。アジェの写真は、もともと建築家などアーティストのための資料として撮影されていたものであり、必ずしもアート写真として撮影されたも

のではなかった。のちにマン・レイがアジェの写真にアート性を見出し評価したことで、それまで無名であった作家が今では近代写真の先駆者と呼ばれるようになったように、「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向を示す写真は、本来アート写真として撮影されていない写真であったとしても、アート写真としての条件を満たす可能性がある写真＝「良い写真」であるといえる。

(iii) 画像③[13] (図 7.3) : コレクター人気が高く、現代アート・オークションで高額取引されているアンドレアス・グルスキーの作品。彼は、現代資本主義における最前線の状況をテーマに、絵画のように巨大なサイズで表現している。グルスキー作品の高評価はその作家性に寄与するところが大きいため、市場で高額取引されている作品であるとしても、「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向は弱く、「良い写真」を数値評価するゆらぎ値との関連性が低いことがみてとれる。

(iv) 画像④[14]（図 7.4）: スナップショットにより「決定的瞬間」を撮影することで知られるアンリ・カルティエ=ブレッソンの有名作。彼のトレードマークの「決定的瞬間」は、まさに「良い写真」の意味に近いといえる。本検証でも「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」との強い関連性がみてとれる。

(v) 画像⑤[15]（図 7.5）・画像⑥[15]（図 7.6）: 20 世紀アメリカ風景写真の巨匠アンセル・アダムスの代表作、および名作。彼の雄大なモノクローム写真は「良い写真」の典型例といえるであろう。彼はファイン・アート系写真に属する 20 世紀写真の代表的な写真家であるとともに、評価基準としては、被写体の自然風景そのものを重視する、カラーを中心としたネイチャー系写真のカテゴリーにも属している。画像⑤[15]は市場で人気の高い作品であり、本検証でも「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」との強い関連性が読み取れる。一方で画像⑥[15]は、ネイチャー系による評価に近い作品であると考えられるため、「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向においては画像⑤[15]と比較するとやや関連性が弱い。

(vi) 画像⑦[16]（図 7.7）はフリー素材としてインターネット上に掲載されていた風景写真である。デジタルカメラを用いたパンフォーカス写真は、境界が先鋭化されているため、銀塩写真と比較すると違和感を覚える写真となる。これは、銀塩写真はハロゲン化銀の光分解によって生成される銀粒子が不規則に配置されているのに対して、デジタルカメラの撮影素子は均等に細分化されており、隣接する 1 素子の濃淡差が急激に変化することが要因であると考える。このことから、濃淡の度合いが強い写真は「$1/f$ ゆらぎ」を示す傾向にあり、「良い写真」であるとはいえない。

(vii) 画像⑧[17]（図 7.8）: 社会的風景を撮影したアメリカのコンテンポラリー・フォトグラファーであるゲイリー・ウィノグランド。彼の写真には人間社会の観察と批評が込められており、現実を写真に置き換えて表現する点が特徴とされている。現在、彼の作家性は現代アートの視点から再評価されており、アート界やオークション市場で高い人気を誇っている。しかし、本検証では「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」との関連性をそれほど強く示してはいないため、「良い写真」であるとはいえない。

(viii) 画像⑨[18]（図 7.9）・画像⑩[19]（図 7.10）: 市場価値の定まってはいない、無名の新人アーティストによる作品。画像⑨[18]は建造物の平行的な画面構成であるため、濃淡の変化が明瞭であることから「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」

の傾向はやや弱い。一方で、「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向を示している画像⑩[19]は、写真全体において濃淡のバランスがとれているといえる。このことから、画像⑩[19]の写真の方が「良い写真」に位置付けられ、一定の評価を受ける可能性がある写真であるといえる。

9. 結論

本研究は、これまで主観的な方法でしか評価することができなかった一般写真に対して、2次元フーリエ変換を用いた数値的な客観評価方法の確立を目的とした。

ゆらぎ値の統計的算定の結果、「良い写真」とは「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」の傾向を示す写真であることが確認できたとともに、写真史において一定の評価を受けたものや、アート写真として位置付けられている写真についても同等の傾向がみてとれた。

以上により、一般写真を客観的に数値評価するうえで、「$1/f^{1.5}$ ゆらぎ」が「良い写真」を見極める一つの指標値として有用であると結論付ける。

10. 今後の課題と展望

(i) ゆらぎ値αの統計値算定時における課題

PX3の応募規定には長辺サイズが1000 pixel以下と明記されている。しかし、第6.3節で示したように、本研究では長辺方向サイズを1024 pixelと規格化した。そのため、拡大時に伴う画質の劣化を最小限に抑えるために機械学習（深層畳み込みニューラルネットワーク）を用いた高解像度プログラム[21]を利用し、拡大した写真を用いてゆらぎ値計算を実施した。この際、問題となるのは拡大画像を用いることによる画像データの信頼性であり、ゆらぎ計算結果がオリジナル画像と同値であるとは言い難い。

一方で、オリジナル画像の場合はゆらぎ値αの平均値、および中央値が1.51と、第6.1節で示した統計値と比較しても大きな差は見られなかった。これは、ゆらぎ計算時に用いた全画像の6割程度が長辺方向サイズ1000 pixelを満たしていた（＝本研究の規格化サイズと同等である）ため、ゆらぎ値の計算結果への影響度が低いと考える。ただし、オリジナル画像の場合は定量的な画像サイズ非統一性の問題が生じる。

以上により、画像データのオリジナリティー、および画像サイズが本研究の規格化サイズを満たす一般写真に対してゆらぎ計算を実施した場合においても、同等の結果が得られることを今後の課題としたい。

(ii) 実用化に向けた処理への拡張

デジタルカメラ本体の機能に本研究手法を導入することにより、プレビュー画面でゆらぎ値αを確認できることが可能となる。それによって、絞り値（F値）、シャッタースピード、ISO感度に加えて、「良い写真」の指標値として「ゆらぎ値（α値）」がデジタルカメラの標準機能として流布することに期待したい。

なお、2次元離散フーリエ変換（DFT）は写真のアスペクト比に依存することなく、写真全体に対して計算が行えるのが利点である。一方で、欠点として画素数が大きくなればなるほど処理に時間がかかる。本研究では写真全体を対象としてゆらぎ値を算定する目的であったため、DFTによる計算方法を採用した。ただし、デジタルカメラ内で処理可能であるローパスフィルター処理などにおいては高速フーリエ変換（FFT）が用いられている。一般的に縦=横=N=2^x pixel を満たすことが与条件ではあるが、FFT を用いることで処理時間が大幅に短縮できる。そのため、FFTを用いて算定したゆらぎ値についても、本研究と同等の結果が得られる

ことを今後の課題としたい。

(iii) 客観的評価方法の高精度化

本研究は一般写真における数値的な客観評価の一つの指標として有用な手法であると考えるが、「良い写真」とは、構図、テーマ、写真史（美術史）の系譜、出身派閥への配慮など、実際の選考基準は多岐にわたる。なかでも、評価者、選考者の知識量と写真を見立てる力量の差が選出結果に大きく寄与しているのが現状である。

近年、人工知能（AI）技術を用いた画像認識の研究[20]などが盛んに行われている。そこで、本研究手法を人口知能のディープラーニング（深層学習）に付帯させることにより、より客観的な方法で写真を評価することができるようになることを今後の課題としたい。

参考・引用文献

1) 武者利光, ゆらぎの世界, 講談社, 1980
2) 戸次直明, 茶谷 裕, 飛松省三, 名画における画素のゆらぎ, 国士舘大学情報科学センター紀要 第 33 号, 30-42, 2012
3) 森 俊夫, 高柳紅美, 日下部信行, 遠藤善通, 周波数解析による凸凹のある布表面のゆらぎの評価, 繊維製品消費科学 Vol. 44 No. 5, 279-285, 2003
4) 福川芳郎, デジタル革命の進行と写真マーケット, 日本写真芸術学会誌 －平成 29 年度 第 26 巻・第 1 号－, 9-13, 2017
5) J.B. Johnson, The Schottky Effect in Low Frequency Circuits, Physical Review, Vol. 26, 71, 1925
6) 酒井幸市著, 画像処理とパターン認識入門, 森北出版, 2006
7) Alfred Sisley, The Bridge at Villeneuve-la-Garenne, 1872, https://www.metmuseum.org/art/collection/search/437680, (参照 2018-04-21)
8) 伊藤雅浩, No Title, 2013
9) テクスチャ・木目, フリー画像素材ベイツ・グラフィックス https://www.beiz.jp/web/download/wood-texture/00229.html, (参照 2018-05-17)
10) 牛腸茂雄, Self and Others, 未来社, 1994
11) Walker Evans, Vicksburg Negroes and shop fronts. Mississippi, 1936, https://digitalcollections.nypl.org/items/169f58a0-bad6-0132-5166-58d385a7bbd0, (参照 2018-05-17)
12) Eugène Atget, Hotel de Sens, rue de l'Hôtel de Ville, Paris (early 1900s), https://www.metmuseum.org/art/collection/search/282111, (参照 2018-05-17)
13) Andreas Gursky, アンドレアス・グルスキー, 読売新聞東京本社, 2013
14) Henri Cartier-Bresson, Masters of Photography, Aperture, 1997
15) Ansel Adams, Ansel Adams: 400 Photographs, Little, Brown and Company, 2007
16) 風景・景色, フリー画像素材 ベイツ・グラフィックス https://www.beiz.jp/web/download/countryside/00020.html, (参照 2018-05-17)
17) Garry Winogrand, Public Relations, Museum of Modern Art, 2004
18) 伊藤雅浩, 東京オベリスク - case03 東京オリンピック 1964-2013 -, 2014
19) 伊藤雅浩, No Title, 2017
20) 李 元中, 人工知能技術を用いた画像認識, 医用画像情報学会雑誌 第 34 巻 2 号, 96-99, 2017
21) waifu2x, http://waifu2x.udp.jp/index.ja.html, (参照 2019-03-29)