

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11349

研究課題名（和文）高精細カメラのための超解像度測定法の開発

研究課題名（英文）Super-resolved measurement for high-definition camera

研究代表者

西 一樹（Nishi, Kazuki）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：00208125

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、画素間隔以下の高精度な解像度測定法の開発とともに、三脚・シャッター振動の解析および片ボケ測定への応用を目的とする。解像度測定の国際標準である「斜めエッジ法」においては、測定精度を比較検証するためのシミュレーションツールとともに周波数領域における計算法を新たに開発した。三脚・シャッター振動においては、撮影画像・レーザー干渉変位計・有限要素法による数値解析の3つのアプローチから振動の主たる原因を究明した。片ボケ測定においては、画像のコントラスト分布を求める方法と、像面全体が合焦する条件を利用することで、チャート面の傾きからセンサの傾きを求める方法を開発し有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

画像メディアの高精細化にともない、カメラの解像度に対する要求はますます高くなっている。解像度が高くなるとその測定も難しくなるため、カメラ技術とともに測定技術の向上も不可欠になる。高い解像度とは画素間隔以下の細かさまで像情報を記録できるレベルであり、そこまでの解像度を正確に測定可能にする方法は国際規格のものを含めこれまで存在しなかった。本研究は、この問題のブレークスルーを与えるものであり、有効な活用例としてシャッター振動の解析および片ボケ測定への応用を図るものである。世界をリードする我が国のカメラ開発を支援する強力なツールになるものと考えている。

研究成果の概要（英文）：This study aims at developing the high-accuracy measurement of image resolution with a sub-pixel definition, and applying it to the high-sensitive measurement of the shutter vibration and the biased image blurring. On the slanted-edge method specified as the international standard of the image resolution measurement, we have developed a numerical simulation tool for verification of the measurement accuracy and the new solution in the frequency domain. On the tripod and shutter vibration, we have investigated the main cause of the vibration by means of the camera image analysis, the laser interferometer and the numerical analysis based on the finite element method. On the measurement of the biased image blurring, we have developed the method for measuring the tilt of the image sensor from the test chart orientation by using the contrast distribution of the camera image and the focusing condition in all the image surface. Finally, we have checked the validity through some experiments.

研究分野：計測工学

キーワード：カメラ評価 解像度測定 振動測定 超解像 MTF 斜めエッジ法 片ボケ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

日本製が海外メーカーに押される中、カメラはいまだ世界シェアの7割を維持しており、家電製品の「最後の砦」とも言われる。他国の追随を許さない技術の高さがこれを支えている。

解像度はカメラ性能を代表する指標であり、被写体の細部をどこまで正確に画像に記録できるかを表す。特に一眼レフカメラなどの高級機では高い解像度を有し、画素間隔以下の細かさまで像情報を記録できる性能をもつ。その実現にはレンズ・撮像素子・シャッター機構・焦点制御・筐体までの総合的な技術力が要求されるため、解像度を正確に測定し評価することがカメラ技術の維持には不可欠である。

そのための統一的な基準として、カメラの解像度に対する測定法が国際規格として定められている。そこでは主観に依存しない評価方法として「斜めエッジ法」が提案されており、有償・無償のものを含め多数のソフトウェアツールが発表されている。画素間隔以下の(すなわちナイキスト周波数を超える)細かさまで測定可能であり、多くの市販カメラの評価に用いられている。しかしながら解像度の向上にともない、斜めエッジ法をはじめとする従来の方法では正確な測定が困難になっている。高解像化により画像の高周波成分を正確に測定する必要がある一方で、ノイズの影響を受けやすく、それを軽減するための平滑化処理が肝心の画像情報を劣化させてしまうからである。解像度が適正に評価されないことは、カメラ技術で世界をリードする我が国として死活問題である。

解像度測定に関連して、カメラ業界共通で頭を悩ませているのが「片ボケ」の問題である。片ボケとは、画像の左右もしくは上下の片方では焦点が合っているが他方ではボケてしまうなど、画像上でボケが不均一になる現象を表す。これは、レンズと撮像素子が正対して取り付けられていないために起こり、それが僅かであっても画像品質として問題になるため、製品出荷前に検出し補正することが不可欠になっている。特にスマートフォンカメラではその出荷量の多さから、品質管理において片ボケの事前検出は喫緊の課題になっている。

さらに解像度の向上にともない、三脚撮影時の微小な振動による画像への影響は無視できなくなっている。しかしながら、海外を含めてその影響について詳しく調べられたことはほとんどなかった。高精細画像の実現には振動原因の究明と対策も重要な課題である。

2. 研究の目的

以上の課題に対して本研究では、画素間隔以下の正確な解像度測定が可能な方法を提案し、実環境で使用可能な測定ツールとして実装を試みるとともに、三脚・シャッター振動の解析および片ボケ測定への応用を通して有効性を検証する。

(1) 斜めエッジ法の高精度化

従来の斜めエッジ法は、その計算過程において不均等間隔の画素データをサブピクセル間隔で平均化する処理(ピン処理)が必要なため、より高周波でのMTF(Modulation Transfer Function)測定には限界があった。計算アルゴリズムを見直すことによってこれまでの限界を超える方法を開発する。同時に従来法との定量比較を可能にするために、MTFを既知としたエッジボケ画像が生成可能なシミュレーションツールを作成する。

(2) 三脚・シャッター振動の解析

撮影時のシャッター操作による微小な振動を測定および解析することによって、解像度低下を招く振動原因を究明する。特に三脚の使い方でのどのような違いがあるかを調べ、解像度低下を軽減するための方策を提示する。

(3) 片ボケ測定

片ボケはレンズ・イメージセンサ間の配置の歪みが撮影画像上にボケの偏りとして現れる現象であるから、画像自身からそれを高感度に検出する方法を開発する。特にチャート面を傾けたときのボケの変化を調べることによって、センサの傾きを求める方法を提案し実験検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 斜めエッジ法の高精度化

ナイキストを超える任意の高域周波数にわたってMTFを求める方法として、画像の各行に対して周波数領域で成り立つ連立方程式を解くことによって求める方法を開発する(図1参照)。

画素間隔以下の情報はエイリアシング歪みになるが、各行で異なる位相を有することを利用して歪みを取り除く。もう一つの方法として、エッジ方向に近い方の画素配列に沿って画素データを読み取ることで、等間隔かつ狭い間隔でのサンプリングを実現する(図

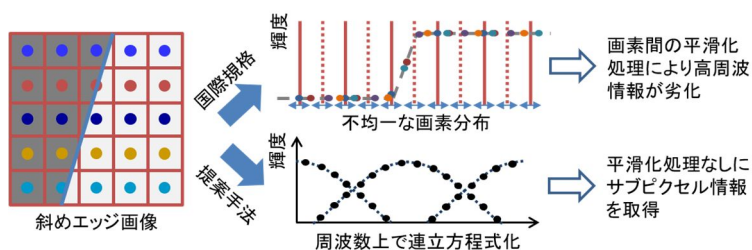


図1 周波数領域の解法

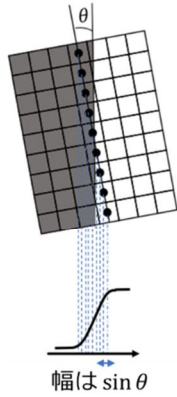


図2 エッジに沿った画素走査

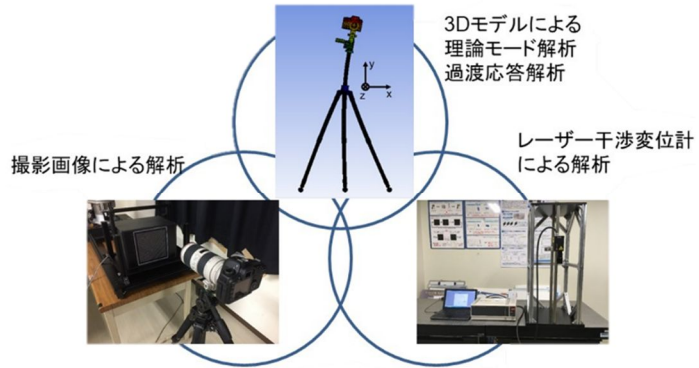


図3 振動測定・解析の3つのアプローチ

2 参照)。

従来法との定量比較のため、斜めエッジ画像に画素以下の任意の精度で人工的なボケを付与可能なシミュレーションツールを作成する。実際のレンズやカメラでは真の解像度を知ることは困難なので、既知のボケを数値的に付与できるようにする。サブピクセル以下の任意の細かさを有する画像データを作成し、ボケの点応答としてガウス関数および円筒関数の両者について検証が行えるようにする。これにより、斜めエッジ法により求めた MTF と解析的に得られる理論曲線との詳細な比較を行う。

(2) 三脚・シャッター振動の解析

振動の測定方法として、動画テストチャートに対する撮影画像から振動軌跡を求める方法(前研究課題で開発済み) およびレーザー干渉変位計によりカメラ・三脚外部から直接振動を検出する方法の2つを用いる(図3参照)。さらに、三脚およびカメラの3Dモデルを作成し有限要素法による数値解析を行う。

(3) 片ボケ測定

周期縞チャートに対する撮影画像の輝度振幅情報を用いて、画像上の任意の位置でコントラストを求める方法を提案する。これは撮影画像のスペクトル分布において周期縞成分と DC 成分の比をとり空間領域に戻すことによってコントラスト分布を得る。片ボケがないとコントラスト分布は一様になる。この状態はチャート面・レンズ面・イメージセンサ面の延長線が1点に交わるときにおきる(シャインブルーフの原理、図4参照)。その1つが全ての面が平行状態にあるときである。チャート面を少しずつ傾けながら撮影し、その都度コントラスト分布を計算する(図5参照)。コントラスト分布が一様になったときのチャートの傾きからセンサの傾きがシャインブルーフの原理より求まる。

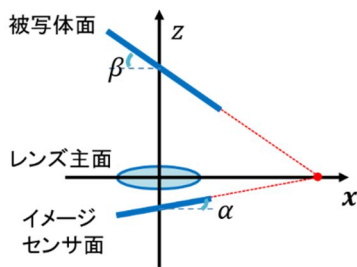


図4 シャインブルーフの原理

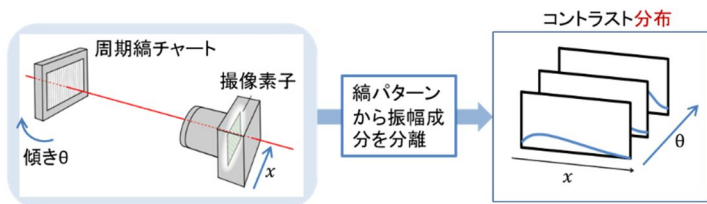


図5 コントラスト分布による片ボケ測定

4. 研究成果

(1) 斜めエッジ法の高精度化

最初に、斜めエッジ画像にガウシアンボケを付与したものに対して、国際標準準拠の斜めエッジ法を適用し MTF を求め理論値との比較を行った(図6参照)。ノイズなしの理想条件下では、

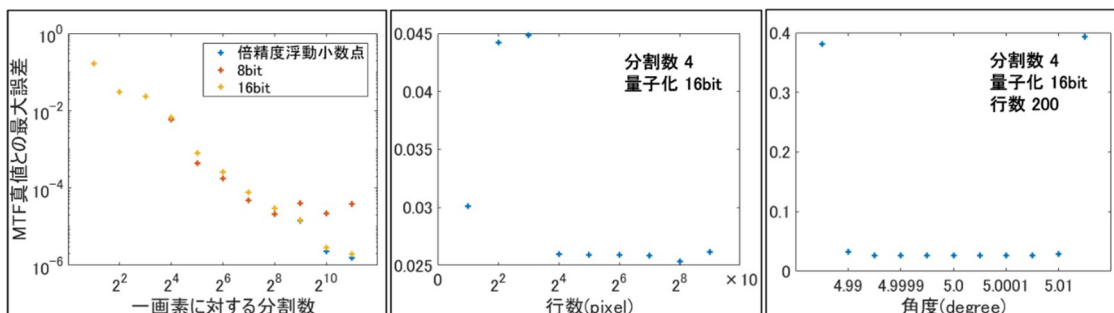


図6 斜めエッジ法の収束特性

画素の分割数を増すにしたがって理論値に漸近していくこと、MTFの計算誤差を抑えるにあたって必要となる画像行数およびエッジ傾斜角度の推定精度が明らかになった。斜めエッジ法について様々な研究がある中、理論値への収束性を確認できたのは世界初の成果である。

同ボケ画像に対して新たに考案した周波数領域での計算法を適用しMTFを求めた。各種の条件について従来法との推定精度の比較を行ったところ、提案法は画素の分割数が少なくても誤差は小さく、また画像の計算領域が小さくなるほど提案法が有利であることがわかった(図7参照)。これはディストーションを伴う画像への適用に有利な性質であり従来法にはなかった特徴であり、国際標準にとって代わる有効な方法になるものと考えられる。

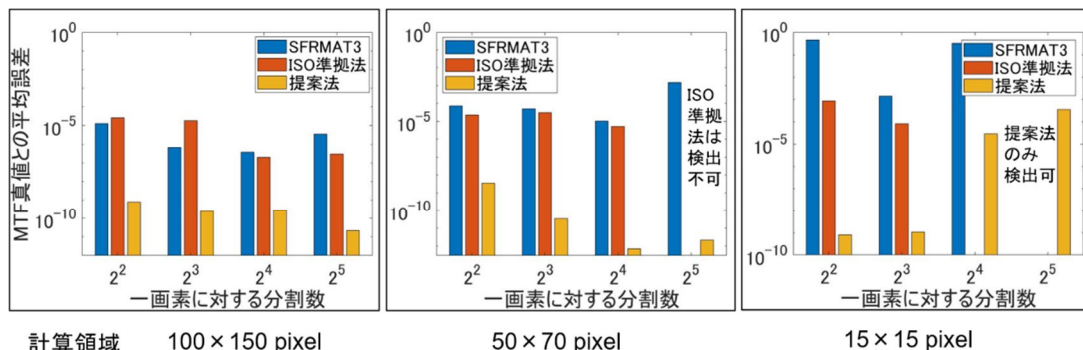


図7 各ツールの性能比較

(2) 三脚・シャッター振動の解析

三脚に一眼レフカメラを設置しシャッター時の振動を測定した(図8参照)。動画テストチャートを用いた場合の振動測定結果とレーザー干渉変位計による測定結果は振動のピーク周波数においてほぼ一致することが確認できた。また、用いた三脚・カメラを模擬した3Dモデルに対して有限要素法によるモード解析を行ったところ、それぞれのピーク周波数(モード1、2)に一致する振動モードが存在すること、これらの振動周波数が三脚のエレベータの長さに反比例して変化することがいずれの測定および解析でも確認できた(図9参照)。より高次の振動モードも存在するが、過渡応答解析により1次および2次のモードが支配的であることもわかった。

さらに詳しく調査するために、光学定盤上にカメラを設置しシャッター振動を抑制した上で測定したところ、空気の擾乱だけで微小な振動が生じていることが確認できた。この原因を調べるために同3Dモデルに対して理論モード解析を行ったところ、カメラと雲台のネジ接合部のわずかな緩みが原因であることが判明した。

以上は、これまでカメラユーザーの間で議論されたことはあったが、本研究のように科学的な方法で詳細に調べられた例はなく、高精細画像に向けたカメラ使用法に関する重要な知見と考える。

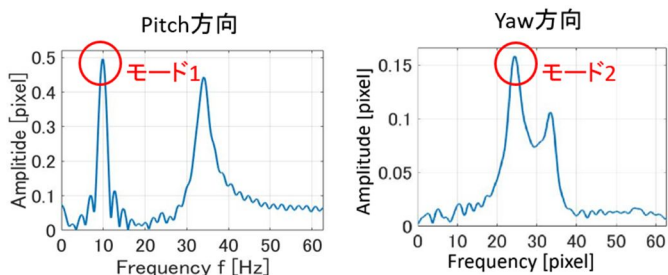


図8 動画テストチャートに対する撮影画像からの振動検出

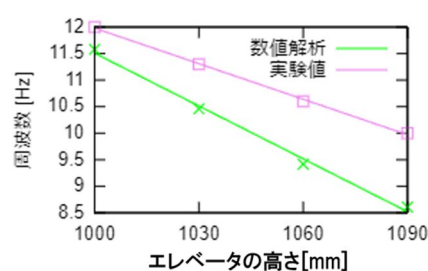


図9 エレベータ長と振動周波数の関係

(3) 片ボケ測定

チャート角を変えながら各撮影画像に対するコントラスト分布を求めた(図10)。コントラスト分布が最も一定になるときにシャインブルーの原理を満たす位置関係にあることを意味し、このときのチャート角からセンサ傾きが求められる。この方法を使ってセンサ傾きがどの程度

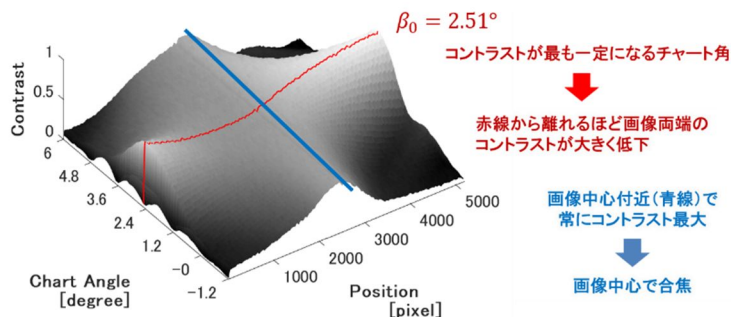


図10 各チャート角に対するコントラストマップ(センサ角 $\alpha = 0.00^\circ$ のとき)

表1 センサ角度の測定結果

付与したセンサ角 α [°]	0.00	-0.31	-0.62	-0.93
センサ角の推定値 $\hat{\alpha}$ [°]	0.00	-0.29	-0.60	-0.87
計測誤差($\hat{\alpha} - \alpha$)[°]	0.00	0.02	0.02	0.06

の精度で推定できるかを調べたところ、4%から8%程度の誤差で求められることを確認した(表1)。一方、光学設計ソフトによる同様の模擬実験では、1%以下の誤差で測定可能なことも確認した。前者が大きいのは実験装置の機械精度に問題があるためと考えられる。

スマートフォンカメラが広く普及する中、画像品質管理において本技術は重要な成果になるものとする。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小林 和行、川又 匠、西 一樹
2. 発表標題 画像の振幅情報と位相情報を用いたイメージセンサの傾き計測
3. 学会等名 第26回画像センシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦理花, 西 一樹
2. 発表標題 MTF計測のためのbin処理を必要としない傾斜エッジ法（その1）：周波数領域での解法
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤真輝, 西 一樹
2. 発表標題 MTF計測のためのbin処理を必要としない傾斜エッジ法（その2）：エッジ方向走査による解法
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富澤航太, 西 一樹
2. 発表標題 液晶ディスプレイをテストチャートとして用いたセンサ傾き計測
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中慧, 西 一樹
2. 発表標題 三脚振動の測定と解析
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊池 健太, 西 一樹
2. 発表標題 カメラのセンサ傾き計測に関する光学設計ソフトを用いた検証
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 天野 拓人、池田 直也、西 一樹
2. 発表標題 高精度MTF計測に向けた斜めエッジ法の改良
3. 学会等名 第24回画像センシングシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊池 創太、西 一樹
2. 発表標題 カメラ画像からの三脚振動測定と力学解析
3. 学会等名 第24回画像センシングシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川又 匠、西 一樹
2. 発表標題 不均一なボケ評価のためのコントラストマップ測定法
3. 学会等名 第24回画像センシングシンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関