

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25330188

研究課題名(和文)電子精密機械技術に着目したカメラ性能評価システムの開発

研究課題名(英文)Camera evaluation system focused on electronic and precision machines

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、シャッター振動・歪曲収差・撮像素子の傾斜度について計測・評価可能なシステムの構築を目指す。シャッター振動測定については、基準パターンの事前撮影とパターンマッチングの導入により画像上で $\pm 0.02$ 画素以下の検出精度が得られることを確認した。また歪曲収差の測定法においては格子パターンを利用した新たな手法を提案し、シミュレーションおよびカメラ撮影実験によりその有効性を確認した。さらに高SNRのMTF測定法を開発し、レンズと撮像素子の間の傾きを高精度に測定可能なことを実験により示した。

研究成果の概要(英文)：This subject aims at developing the measurement and evaluation system for shutter vibrations, optical distortions and inclinations of image sensor. For the shutter vibration measurement, the pattern matching technique using the reference pattern photographed in advance has been introduced and the detection error below 0.02 pixels has been achieved. For the optical distortion measurement, a new method using the specially designed lattice pattern has been proposed and the validity has been confirmed through simulations and camera experiments. Furthermore, the MTF measurement method with a high SNR has been developed. The verification experiments show that it successfully estimates the inclination between lens and image sensor.

研究分野：計測工学

キーワード：カメラ評価 シャッター振動測定 MTF測定 画像情報処理

### 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割を保持しており、家電製品の「最後の砦」とも言われる。近年はこのカメラについても海外メーカーから類似の機能および性能をもつ製品が開発されており、我が国の立場を揺るがしかねない状況になっている。我が国のカメラ技術の優位性は、レンズ・撮像素子・カメラ筐体・手ブレ補正などの電子精密機械技術にあり、他国に真似できない技術の高さを誇っている。しかしながらそれらの性能を適切に評価し差別化できないと、他の家電製品と同様に価格競争にさらされ、やがては海外製にシェアを奪われかねない。

このような危機意識から我々は、カメラ撮影時の手ブレおよび筐体の振動を高精度に測定する方法を提案し実用化に至っている。その特徴は、被写体として動画のテストチャートを撮影し、それをPC上でパターン解析することにより、手ブレや振動を3次元軌跡として検出可能なことである。それにより補正装置の効果を定量的に評価可能にするシステムの開発に成功した。これまでカメラの各種評価には、静止画のテストチャートを用いることが一般的であったのに対して、動画を用いることで手ブレや振動を軌跡として検出できこれにより定量評価が可能になった。その後、科研費基盤(C)「高速点滅光の分散配置による振動計測システムの開発」において、シャッター振動などの微小なカメラ振動の測定に対しても本手法の有効性を検証している。

しかしながら、日本製のカメラ技術の強みはレンズや撮像素子にもあり、これらを含めて総合的に評価可能なシステムはまだ存在しない。本課題では、カメラの基本性能にかかわるレンズ・撮像素子・カメラ筐体・手ブレ補正に対して総合的に測定・評価可能なシステムを開発し、最終的には日本製カメラ技術の高さを世界にアピールすることでモノづくり日本の復興を支援することを狙いとす。

### 2. 研究の目的

カメラ性能の評価項目は多岐にわたるが、日本製カメラ技術の強みという点で、レンズ・撮像素子・カメラ筐体・手ブレ補正に絞った測定・評価システムを開発する。その実現に向けて下記について検討する。

(1) シャッター振動を高感度かつ高精度に検出する技術の開発：すでにコンパクトタイプ、携帯電話やスマートフォン付属カメラがそうであるように、一眼レフカメラでさえも近年ミラーレス化が進んでおり、電子部品のアセンブリだけでカメラが作れるようになった。このようなカメラであっても、筐体の作りやシャッター機構などの機械部分があるため、振動による画像劣化は避けられない。これを検出できるようにシステムの改良

を行う。

(2) 撮像素子の性能を評価する方法の検討：これはSN(信号対雑音)比の測定になるが、手ブレ補正の評価と密接な関係がある。つまり露光時間が短ければ手ブレは減少するがSN比は低下し、露光時間が長ければ手ブレは増加するがSN比は向上する。ここでは、手ブレ量とSN比の評価を同時に行う方法について検討する。

(3) レンズ性能の評価：これには静止画チャートを利用する方法がすでに確立されているが、独自開発のLEDディスプレイを最大限に活用した手法を開発する。各レンズ収差の測定および、レンズから撮像素子まで含めたトータルなMTF(光強度伝達特性)の測定法について検討する。

### 3. 研究の方法

(1) シャッター振動を高感度かつ高精度に検出する技術の開発：前課題においてシャッター時のミラーの跳ね上がりによる振動が検出可能なことが確認できているが、近年は一眼レフカメラのミラーレス化が進んでおり、ミラーショックによりフォーカルプレーンシャッター等によるより微小な振動が中心である。高画素化が進んでいるため微小振動も無視できず、またカメラの小型軽量化により筐体の作りがそのまま振動性能に影響を与えるため、ますます高精度な測定が不可欠になっている。

このことを踏まえ、微小振動の検出に対応した動画テストチャートの設計およびテストチャート表示のためのLEDディスプレイの試作、上記に対応した検出プログラムの見直しおよび検証実験を行う。については、テストチャートに用いる格子パターン格子点数を増やし密度を上げることにより検出精度の向上を図る。の検証実験については、XYステージにより既知の微小変位を与えることにより検出精度を評価する。

(2) 撮像素子の性能を評価する方法の検討：撮像素子のSN比は露光時間や撮影感度と密接な関係があり、またそれらは手ブレの大きさとも関係しトータルで画質に影響を与える。特に、海外メーカーで採用されることが多い電子式手ブレ補正では、露光時間を短くすることで手ブレを軽減している例が見られ、この場合はSN比が低下するためトータル性能としては決して高くないことが示されるであろう。

SN比の測定は、手ブレ測定と共通の動画テストチャートを用いることで行える。すなわちテストチャートの撮影画像において、点発光部分が信号成分、それ以外の背景画像がノイズ成分に対応することから、それぞれのパワー(画素値の二乗平均)を計算しその比がSN比に相当する。1つの撮影画像で手ブレ量とSN比が同時に測定できるので、個別のチャートを用いて各性能を評価する方法に比べてごまかしが効かない方法といえる。

以上に基づく SN 比計算のためのプログラムを新たに作成する。

(3) レンズ性能の評価: LED ディスプレイの動画全フレームを同時点灯した静止画モードを用いて、レンズの歪曲収差を測定する。収差がない理想的な場合は、パターン各点は正方格子上に正確に並ぶことになるが、歪曲収差があると画像の中心から周辺にいくにしたがって格子点の位置ずれが大きくなる。この変位分布を 2 次曲面に当てはめることにより歪曲収差が求められる。

レンズ面と撮像素子面の正対性が保たれていないと、画像の片側にボケ(片ボケ)が発生する。その度合いを精密に測定しておくことが画像の高精細化には不可欠である。そのために画像各所での MTF を高精度に測定する方法として、周期縞チャートを被写体として撮影することで高周波成分においても高い SN 比で測定可能な手法を開発する。これによりレンズと撮像素子の間の傾きを高精度に測定可能なことを実験により示す。

#### 4. 研究成果

(1) シャッター振動を高感度かつ高精度に検出する技術の開発: 精密測定が可能な LED ディスプレイの試作を行った(図 1 参照)。



図 1 試作した LED ディスプレイ

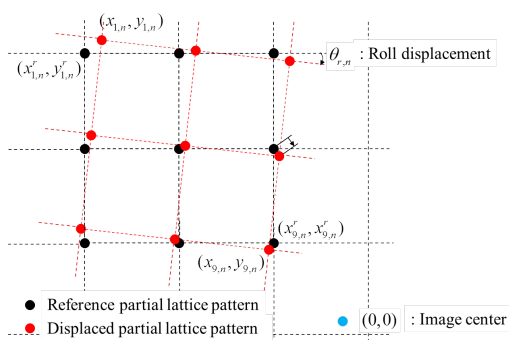


図 2 格子点の位置ズレを計算

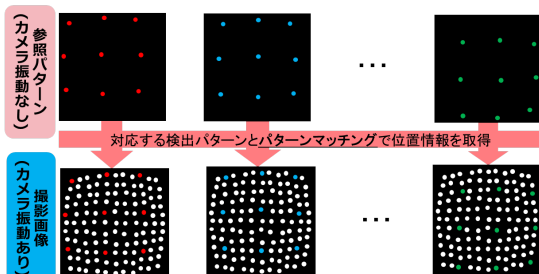


図 3 基準パターンとのマッチング

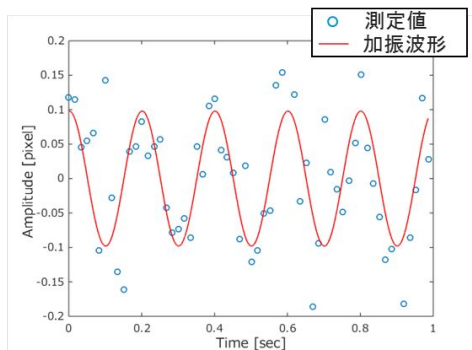


図 4 試作した 1 軸微小加振台

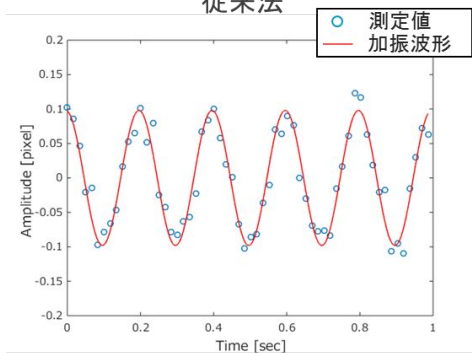
フォーカルプレーンシャッター等による微小振動の検出を可能にするために、従来のディスプレイに対して 1 フレームあたりの格子点数を増やすなどの改良を行った。当初は X Y ステージにより既知の微小変位を与えることにより検出精度を評価する予定であったが、振動の測定精度を評価する上で X Y ステージが必要な動作精度を有していないことが判明したため、LED ディスプレイの設計値に基づき仮想的に変位を与えた画像データを作成しこれより振動検出精度の検証を行った。その結果、画像上で  $\pm 0.1$  画素以内の精度で振動が検出可能なことがわかった。試作した LED ディスプレイによる実際の振動測定では、他のカメラとの比較によりミラレスカメラでのフォーカルプレーンシャッターによる振動が検出可能であることを確認した。

さらに検出精度を向上すべく画像処理の改良を行った。従来では格子パターンの各格子点の中心座標を求めた上で各格子点の位置ズレを検出する方法をとっていたが(図 2 参照)、本年度新たに開発した方法では各フレームの格子パターンについて、振動がないときの基準パターンと振動がともなったときの移動パターンを互いに照合することでパターンの位置ズレを検出する(図 3 参照)。ここではカメラに既知の微小振動を与えることで測定精度の検証を行った。上下方向のみの 1 軸振動ではあるが、シャッター振動のような極微小の振動を付与できる piezo 駆動タイプの加振台を試作した(図 4 参照)。振幅  $0.1 \text{ pixel}$  の正弦波振動に対する検出結果を見ると、新手法の方が忠実に振動を捉えている(図 5 参照)。振動振幅をいろいろ変えて測定したところ、検出誤差は  $\pm 0.02$  画素以下に抑えられることが確認できた(図 6 参照)。また実撮影環境へのロバスト性についても各種実験を通して検証し、本システムが高い実用性を有することを確認した。

以上に加えて、学術的意義をさらに高めるために、カメラ振動の 3 次元的振る舞いについてホモグラフィ行列によりモデル化を行い、各方向への回転運動や平行移動に対する画像への影響について明確にした。



従来法



新手法

図5 正弦波振動に対する検出結果

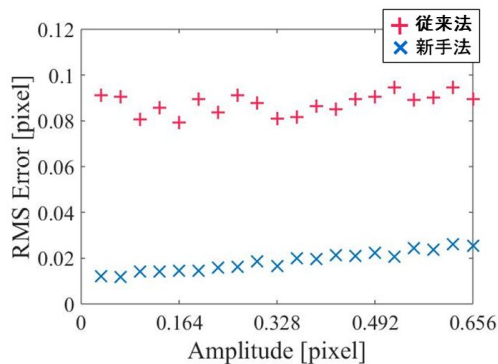


図6 各振幅に対する測定誤差

(2) 撮像素子の性能を評価する方法の検討：作成したプログラムによりSN比を計算した。まず基本特性として、ISO感度を上げていくほどSN比が低下することを確認した。露光時間が1/25秒より早くなるとSN比が急激に低下し始めるが、遅くしてもSN比はあまり変化がないことが確認できた(図7参照)。露光時間を長く設定することはSN比の点から有利であり、手ブレ補正はそれを促すものであることをあらためて確認した。

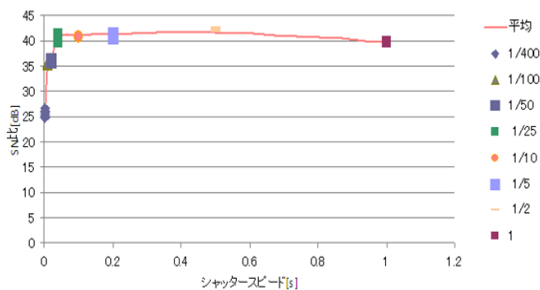


図7 シャッター速度とSN比の関係

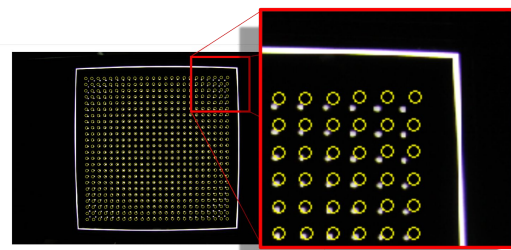


図8 歪曲収差の推定と補正



図9 試作した撮像素子傾斜実験装置

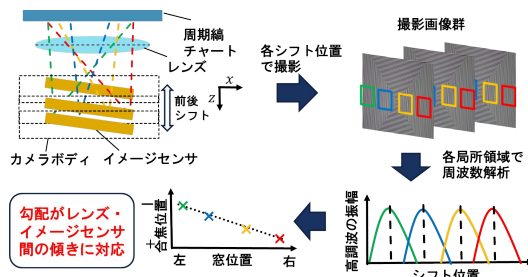
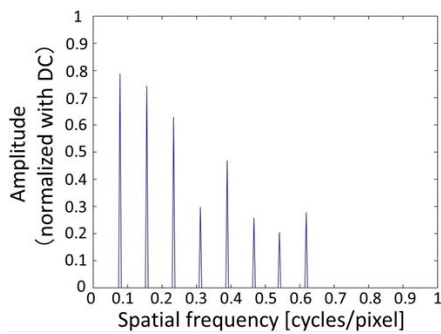


図10 撮像素子傾き測定の手順

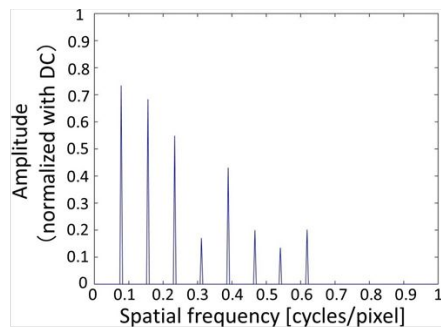
(3) レンズ性能の評価：まず歪曲収差については、各格子点の座標を高精度に求め、歪曲モデルを最小二乗の意味で最も良く当てはめるようにモデルパラメータを決定するプログラムを作成した。既知の歪曲収差を与えたシミュレーション画像に対する推定結果においては、ほぼ誤差なしですべてのパラメータが推定可能なことを確認した。また実写の歪曲収差画像に対してパラメータ推定を行い、それに基づいて収差を補正した画像を得ることでパラメータが正しく推定できていることを確認した(図8参照、白点が元の歪曲収差画像、黄色が補正後の画像)。

レンズ面と撮像素子面の正対性の評価実験のための実験装置を作成した(図9参照)。撮像素子が傾いているとき、撮像素子を光軸方向に前後シフトさせていくと、イメージセンサ面上の各場所での合焦位置と前後シフト量との関係において、その勾配からイメージセンサの傾きが求められる。周期縞チャートを撮影した画像の各局所領域に対して周波数解析を行い、カメラ前後シフトによる特定高次高調波成分の変化に着目する。高調波の減衰が最も少ないセンサシフト位置がそこでの合焦点となる。各窓位置での合焦点を結ぶことでセンサの傾きが求められる(図10参照)。





シフト前



50 μmシフト後

図 1 1 シフト前後の MTF

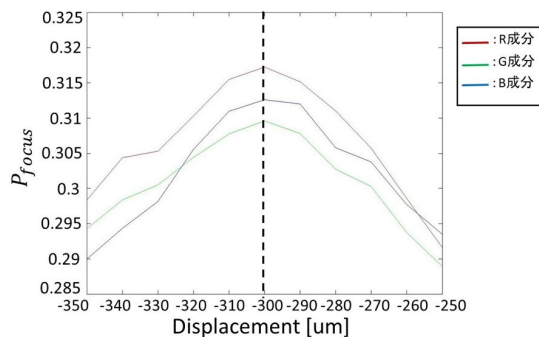


図 1 2 前後シフトによるスペクトル値の変化

画像右端の輝度分布から MTF を求めた(図 1 1 参照)。撮像素子のわずかなシフトでも MTF の変化が観測できる。合焦位置付近において 10 μm 刻みで撮像素子を前後シフトさせながら(横軸)、各スペクトルピーク値の合計値(縦軸)を求めグラフ化した(図 1 2 参照)。10 μm の分解能で合焦位置(図中破線部)が検出できていることがわかる。

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

[1] Kazuki Nishi, Yuichi Matsuda, “Camera vibration measurement using blinking light-emitting diode array”, Optics Express, Vol.25, No.2, pp. 1084-1105, 2017. 10.1364/OE.25.001084 (査読有)

[学会発表](計 6 件)

[1] 桐本 剛志, 岩田 理生, 西 一樹: “シ

ャッター振動における回転/平行移動成分の検出”, 第 23 回画像センシングシンポジウム, パシフィコ横浜, 2017.6.7.

[2] 小林 和行, 西 一樹: “片ボケを考慮したイメージセンサの位置決めに関する検討”, 第 23 回画像センシングシンポジウム, パシフィコ横浜, 2017.6.8.

[3] 宮良 岳士, 西 一樹: “斜めエッジ法による各種 MTF 計測ツールの性能比較”, 第 22 回画像センシングシンポジウム, パシフィコ横浜, 2016.6.10.

[4] 岩田 理生, 松田 雄一, 西 一樹: “シャッター振動の高精度測定”, 第 22 回画像センシングシンポジウム, パシフィコ横浜, 2016.6.10.

[5] 小澤 佑太郎, 西 一樹, 小林 和行, 藤井 啓史, 長田 宏二: “ボケの高周波減衰特性を用いたレンズ・イメージセンサ間傾き計測”, 第 21 回画像センシングシンポジウム, パシフィコ横浜, 2015.6.11.

[6] 松田雄一, 岩田理生, 西 一樹, 長田宏二: “Smart Shake Analyzer: スマートフォンカメラの手ブレ補正効果を測る”, 第 21 回画像センシングシンポジウム, パシフィコ横浜, 2015.6.10~12.

〔その他〕

ホームページ等

<http://nishi-lab.cei.uec.ac.jp/>

## 6 . 研究組織

(1)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所・准教授

研究者番号: 00208125