

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11933

研究課題名(和文) モバイル端末・車載・監視用カメラのためのイメージセンサ傾き測定法の開発

研究課題名(英文) Tilt measurement of image sensor for mobile 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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：モバイル端末・車載・監視用カメラなどの小型カメラモジュールにおいて、レンズ・イメージセンサの組み立て時の歪みは画質低下を招く原因になっている。本研究では、テストチャートの撮影とその画像解析だけで歪みを検出する方法として、テストチャート・レンズ・イメージセンサ間の幾何学的配置と画像の振幅・位相の関係を利用する方法を提案している。光学設計ソフトを用いたシミュレーションにより本手法の有効性を確認した。カメラ実験では収差の影響が予想以上に大きいことが判明したため、それを補償する画像処理法を現在検討中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はテストチャートの撮影と画像解析だけでセンサの傾きを高精度に検出可能な方法を提案するものであり、その最大の特徴はテストチャート・レンズ・イメージセンサ間の幾何学的配置と画像の振幅・位相の関係を利用することにより、キャリブレーションフリーな測定系が実現可能なことである。技術立国として我が国の立場が危ぶまれる中、カメラ技術ははまだ世界をリードしている中、今後需要がモバイル端末・車載・監視用カメラに移ってもなお、高い品質を維持する上で本測定技術の確立は不可欠になると考える。

研究成果の概要(英文)：In compact camera modules for mobile phones, in-vehicle cameras, and surveillance cameras, distortion during lens/image sensor assembly is a cause of image quality degradation. In this study, we propose a method to detect distortion only by capturing a test chart and analyzing the image, using the relationship between the geometric arrangement between the test chart, lens, and image sensor and the amplitude and phase of the image. The effectiveness of this method was confirmed by simulation using optical design software. Since the aberration effect was found to be larger than expected in the camera experiment, an image processing method to compensate for it is currently under consideration.

研究分野：画像計測

キーワード：光軸歪み 傾き計測 MTF コントラスト 傾斜エッジ法 シャインブルーフの原理 ディストーション

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

カメラモジュールではレンズやイメージセンサの取り付け位置精度が画質に大きな影響を与える。両者は平行になるようにアライメント調整されるが、モジュールが小型であるため僅かな歪みがあるだけでも画質低下を招く。特にレンズ・イメージセンサ間の傾きにより生じる「片ボケ」はユーザーからのクレームが多く、歩留まりを高める上でアライメント調整の精度を上げる必要がある。モバイル端末・車載・監視用など多方面に利用されていく中で片ボケの抑制は喫緊の課題である。カメラからの画像データは人の目による確認だけでなく、AIへの入力情報としても中心的な役割を担っている。画像歪みは認識精度を低下させる原因になるため、画像品質の維持はAIシステムを支える要素技術としても重要である。

イメージセンサの傾きを検出するための従来の方法では、カメラモジュールを測定装置に取り付ける際に歪みがあると、イメージセンサ自体の傾きとの分離ができないという根本的な問題があった。目的とするイメージセンサの傾きを測定するのに、それ以上の精度で被測定対象を測定装置へ取り付ける必要がある。製造ラインで測定・調整することを考えた場合、測定装置への取り付け精度は低くてもイメージセンサの傾きについては高精度に測定できなければならない。この相反する要求を同時に実現することが本研究課題の狙いである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、カメラモジュール組み立て時に不可避なレンズ・イメージセンサ間の僅かな傾きを検出および補正を可能にしつつ、測定装置へ取り付けの際の精度を要しないキャリブレーションフリーな測定法を提案するとともにその有効性を検証することである。

イメージセンサの傾きについての幾何光学的な関係として、被写体・レンズ・センサの各面の延長線が1点で交わるときにセンサ全面で合焦することが「シャインプルーフの原理」として知られる。この関係を満たす被写体面の傾きはセンサ面の傾きに対してレンズ・被写体間の距離に比例し拡大するため、センサ面の微小な傾きが被写体面の大きな傾きとして検出可能になる。センサ全面が合焦するように被写体面の傾きを調整することで、その傾き角から目的とするセンサの傾きが求められる。

画像の位相情報に着目すると、レンズがどのように傾いていてもテストチャートとセンサが平行であれば、レンズ中心に対して点対称の位置関係にある両画像の各点間で像倍率が一定、すなわち撮影画像に歪みが生じないという性質がある。逆に画像に歪みがなくなるようにテストチャートの傾きを調整すれば、それがセンサの傾きに一致する。

以上のシャインプルーフ条件と平行条件の両者を組み合わせることで、キャリブレーションフリーな測定系を実現できる。もし両者の条件を同時に満たすようにテストチャートの傾きを調整できたならば、テストチャート・レンズ・イメージセンサの3面が平行になっていることを示す。レンズ・イメージセンサ間に傾きがあると各条件を満たすテストチャートの傾き角は一致しないため、このズレからセンサの傾きを知ることができる。以上の有効性を検証するのが本件の目的である。

3. 研究の方法

(1) センサ傾き測定法のためのボケ測定法の検討

センサ傾きが画像上ではボケの偏りとして現れることに着目し、ボケ量の違いを高感度に検出可能な方法について検討する。1つは、ラインチャートの撮影画像に対してエッジに近接して並ぶ画素方向の輝度分布を抽出し、その画素間差分からエッジ付近でのボケ広がり度合いを求め、画像の各位置でこれを計算しボケ量に関する画像分布を得る方法である。ラインチャートの提示には、高精細発光可能なELパネルをもつスマートフォン画面を利用する。2つ目は、国際標準規格の傾斜エッジ法に対して、ピン処理によるローパス効果を補正するフィルタ処理を導入することにより、ボケ検出に不可欠な高域のMTF (Modulation Transfer Function) 推定精度の向上を図る方法である。ノイズの影響についても考察する。3つ目は、正弦波チャートの撮影画像に対して、画像の各位置でのコントラストを画像の輝度振幅情報から取得する方法である。わずかに傾けた正弦波パーチャートの撮影画像に対して、画素データを傾きに対して垂直な軸に射影することで画素間隔以下のサンプリングデータを得た上で、正弦波モデルとの最小二乗フィッティングを通して振幅を推定する。傾斜エッジ法との比較およびカメラ撮影実験により有効性を確認する。

(2) 振幅・位相情報の融合による光軸歪み測定法の検討

正弦波チャートに対する撮影画像の輝度分布をフーリエ変換することで位相成分を抽出し、その画素間差分をとることにより画像各点での局所周波数を計算するプログラムを作成する。以上より振幅情報および位相情報による2つの傾き測定法を融合することで、カメラモジュールの設置精度に依存しないセンサ傾き測定が可能なことを検証する。ボケ量の画像分布と画像の局所周波数分布について、センサの各傾き角に対してそれぞれの分布が最も水平になるチャートの傾き角を求める。それぞれのチャート傾き角からセンサの傾きを推定し、予め与えたセン

サ傾きの設定値と一致することを確認する。特にそれぞれのチャート傾き角が一致するとき、チャート・レンズ・イメージセンサの3面が平行になることを光学設計ソフトによるシミュレーションと実際のカメラ撮影実験により確かめる。

(3) 局所コントラスト法による高精度 MTF 測定法の提案

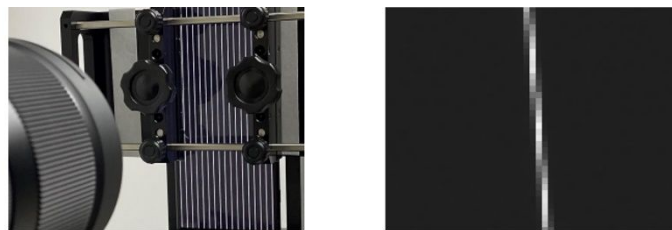
カメラ撮影実験では、画像のディストーション(広角レンズの特性から画像周辺部になるにつれて画像が歪む現象)の影響が大きいことが予想されるため、ディストーションを有する画像であっても局所的には歪みが無視でき様なボケをもつことに着目し、コントラストを画像局所で求める方法を新たに提案する。シミュレーションによりその有効性を確認する。

4. 研究成果

(1) センサ傾き測定法のためのボケ測定法の検討

ラインチャートによる方法

スマートフォンをステージ上に設置し、焦点距離 40mm の広角レンズを取り付けたカメラにより 50cm の距離で撮影した(図 1 (a))。ステージを物理的に 5 度傾斜させることでラインチャートに傾きを与えている。ただし正確な傾斜角は撮影画像から求める。この撮影画像(図 1 (b))

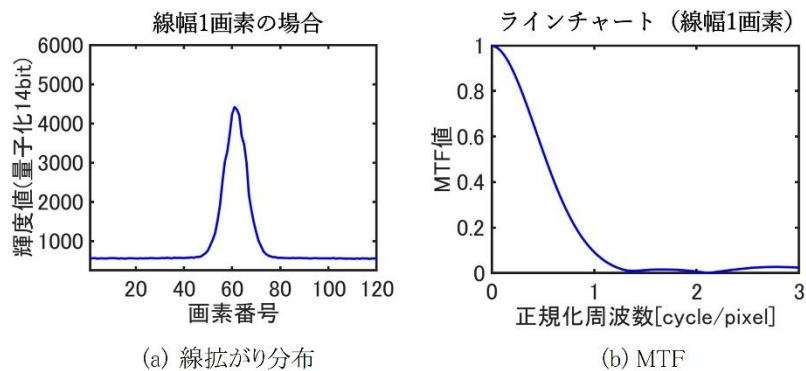


(a) スマートフォン画面による
ラインチャート提示

(b) 撮影画像

図 1 ラインチャートによる実験

から縦方向各列の画素データを読み取ったものに対して MTF 計算を行った。図 2 (a) はラインチャートの撮影画像について中央縦一列の輝度分布をプロットしたものであり、同図(b)はそのフーリエ変換から MTF を求めた結果である。本手法では画素間差分を要しないため、ノイズ耐性に優れた MTF 測定が可能なが実験的にも確認できた。



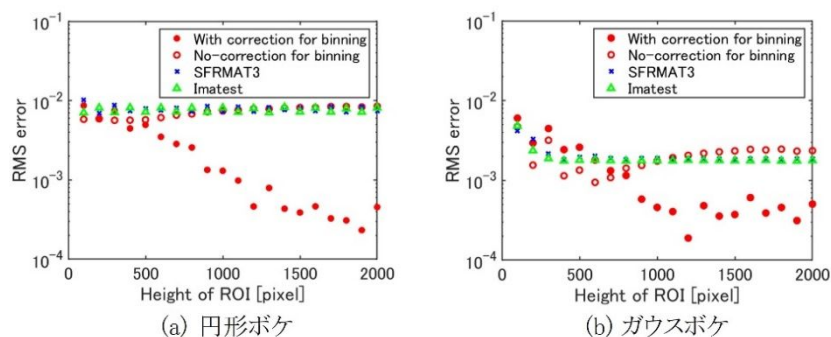
(a) 線拡がり分布

(b) MTF

図 2 ラインチャートによるボケ測定

傾斜エッジ法の改良

ボケを人工的に付与した傾斜エッジ画像に対して、ピン補正処理ありなしそれぞれに対する MTF 計算と理論値、他の有償ツールとの誤差比較を行った結果が図 3 である。ピン分割数を 4、ボケの標準偏差が 0.7pixel のガウスボケとボケ半径が 0.7pixel の円形ボケの 2 種類について、画像の横幅を固定し縦幅のみを変化させて計算した。縦幅が小さいときはどの方法もほとん



(a) 円形ボケ

(b) ガウスボケ

図 3 ピン処理補正の効果

ど差がないが、大きくなると提案法による誤差が減少していくことが確認できた。

正弦波チャートによるコントラスト測定

空間周波数が異なる複数の正弦波チャートの撮影画像に対して、本手法による各コントラストを求めた結果と MTF の理論曲線との比較結果が図4である。また傾斜エッジ法と正弦波チャート法におけるノイズ耐性を比較した結果が図5であり、正弦波チャート法は高域においても高いノイズ耐性を有することが確認できた。

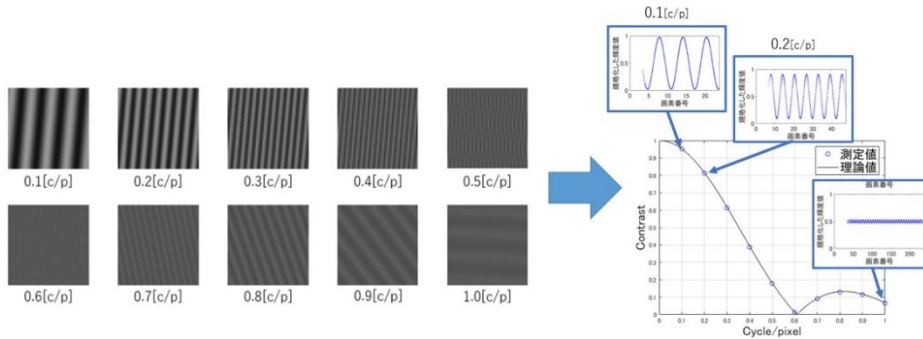


図4 コントラストとMTFの関係

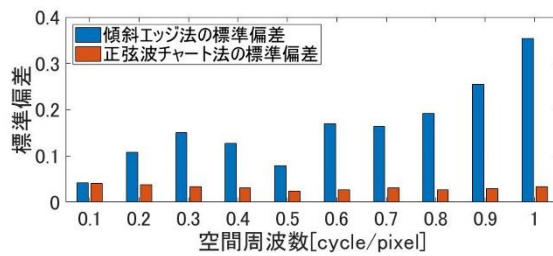


図5 ノイズ耐性の比較

(2)振幅・位相情報の融合による光軸歪み測定法の検討

光学シミュレーションソフトを用いて結像レンズモデルを構成し(図6) チャートとセンサをそれぞれ傾けながらセンサ上で観測される画像を合成した。得られた画像に対して振幅情報から合焦位置を求めるとともに、位相情報から幾何歪みが最小となる傾きを求めた結果が図7である。両角度が一致した点がチャート・レンズ・センサの各面が正対した状態に対応し、これが0度に一致することから理論通りの関係を確認できた。

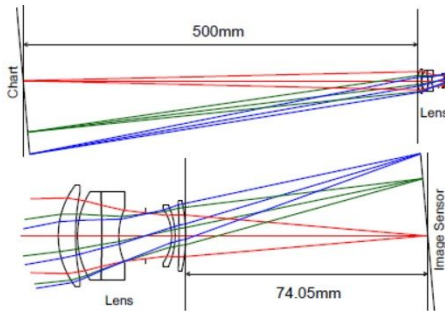


図6 光学シミュレーションにおけるレンズ・センサの配置

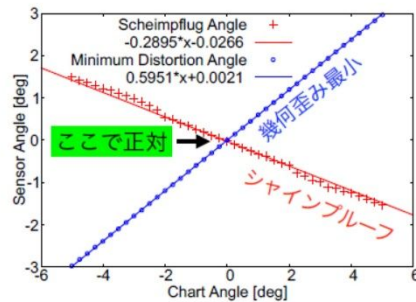
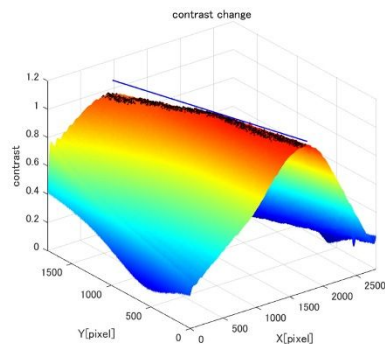
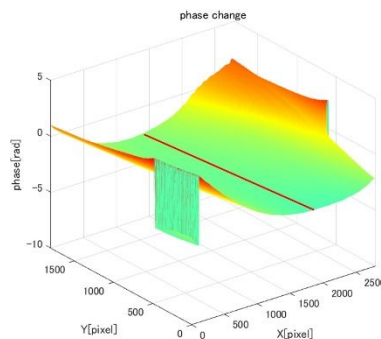


図7 正対状態の検出



(a) 合焦位置の検出



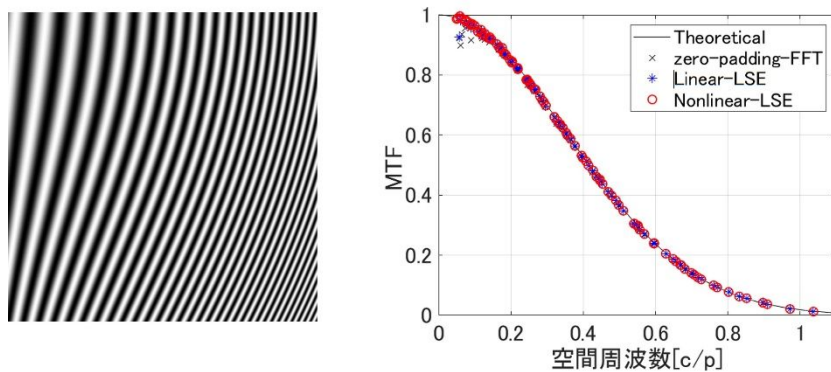
(b) ディストーション最小位置の検出

図8 Yaw・Pitchの2自由度の傾き測定

ストライプチャートをカメラ撮影した画像から振幅・位相情報を抽出し、コントラストおよびディストーションを画像上の各点で求めた結果が図8である。それぞれ最小値をとる位置が直線上に分布していることが確認できた。これはチャートおよびセンサがレンズ面に対してYaw・Pitchの2軸で傾いていることを示しているが、現状では特にディストーションの検出精度が悪く正対状態を確認するまでには至らなかった。

(3) 局所コントラスト法による高精度 MTF 測定法の提案

ディストーションをともなった画像に対して正弦波振幅および周波数を局所領域で高精度に推定する方法として、振幅・周波数・位相・DC成分を同時推定可能な非線形最小二乗法による方法を新たに提案した。20×20画素の各局所領域で推定した正弦波パラメータからMTFを求めた結果が図9である。従来法では特に周波数が低いと局所領域では正弦波が1周期未満となり推定精度が低下するが、提案法では全周波数にわたって高精度に推定可能なが確認できた。



(a) ディストーション画像

(b) 画像各所でのMTF推定

図9 非線形最小二乗法による正弦波パラメータの推定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nishi Kazuki	4. 巻 40
2. 論文標題 Does the slanted-edge method provide the true value of spatial frequency response?	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 259 ~ 269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/josaa.478864	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Kazuyuki, Kawamata Takumi, Nishi Kazuki	4. 巻 30
2. 論文標題 Measurement of image sensor tilt based on amplitude and phase of image	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 342 ~ 349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10043-023-00802-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kobayashi Kazuyuki, Kawamata Takumi, Nishi Kazuki
2. 発表標題 Optical simulation of lens-sensor misalignment detection based on amplitude and phase of image
3. 学会等名 13th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication (ODF'22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Miu Fujita, Kazuki Nishi
2. 発表標題 A Slanted-Edge Method for High-Accuracy Measurement of Modulation Transfer Function
3. 学会等名 The 4th ASEAN UEC Workshop 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田美卯、西 一樹
2. 発表標題 ピン処理補正を考慮した傾斜エッジ法
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口 広樹、藤田美卯、西 一樹、戸田 浩一
2. 発表標題 スマートフォン画面を利用した高精度MTF計測
3. 学会等名 第28回画像センシングシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 WAN QUAN, 西 一樹
2. 発表標題 傾斜エッジ法によるMTF計測のノイズ解析
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

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撮像素子傾き計測における光学シミュレーションによる検証
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口広樹, 藤田美卯, 西 一樹, 戸田浩一
2. 発表標題 正弦波チャートを用いたノイズに頑健なMTF計測
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2022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
---------	---------