

モンテカルロ法による撮影レンズの 量産シミュレーション手法の開発

The Development of a Monte Carlo Simulation of the Mass-Production of Image Pickup Lenses

佐野 永悟*
Eigo SANO

松坂 慶二*
Keiji MATSUSAKA

要旨

近年、CCD型イメージセンサやCMOS型イメージセンサ等の固体撮像素子を用いた撮像装置の高性能化、小型化に伴い、撮像装置を備えた携帯電話や携帯情報端末が普及しつつある。また、これらの撮像装置に搭載される撮像レンズには、更なる小型化、高性能化への要求が高まっている。それに伴って撮像レンズの製造難易度も高まってきている。

そこで、乱数発生を活用したモンテカルロ法を使用し、製造誤差を発生させたレンズを擬似的に作製することにより、量産時の性能バラツキをシミュレーションする手法を開発した。また、その結果を画像劣化シミュレーションと組み合わせることで、試作前に量産性能を視覚的に確認することが可能となった。さらに、実際の量産レンズに適用することで、試作前にモジュールの完成度を高め、不要工程の削減や不良廃棄品の低減に貢献することができた。本稿ではそのシミュレーションの有用性について報告する。

Abstract

The recent widespread use of cell-phones and other mobile terminals equipped with image pickup apparatus stems from ever higher performance and greater downsizing of solid-state image pickup elements such as CCD and CMOS image sensors. This has placed exceptional demands on the image pickup lenses and, in turn, upon the difficulty of producing them. Therefore, by employing the Monte Carlo method utilizing a random number generator and by manufacturing virtually-created image pickup lenses having generated manufacturing tolerances, we developed a simulation method of estimating performance variations during the mass-production of image pickup lenses. By combining these results with image degradation simulation, mass-production performance can be visually apprehended prior to preproduction. Moreover, by applying this simulation to the mass production of image pickup lenses, we were able to contribute to the completeness of module quality before preproduction, thus reducing unnecessary production steps and minimizing defective products. Reported here are both the method by which we developed our simulation and the applicability of that method to the development of other such simulations.

* コニカミノルタオプト(株) 事業開発センター 開発部

1 はじめに

DSC (Digital Still Camera) 向け、携帯電話向けのレンズユニットに求められる画質は年々向上してきており、より高画素数の撮像素子を使用したレンズユニットが増えてきている。また、顧客からサイズに関する要望も強く、高性能かつコンパクトなレンズユニットが求められており、それに伴って、レンズユニットに使用する撮影レンズの製造難易度も徐々に高まってきている。撮影レンズの製造難易度が高いと、量産時の不良品が大量に発生し、再生可能部品以外は全て廃棄せざるを得なくなるため、量産数が非常に多く、量産日程のタイトな携帯電話向けのカメラユニットでは特に深刻な問題となっている。そのため、設計段階でレンズユニットの製造難易度を的確に把握することは非常に重要なことと言える。

従来から撮影レンズの製造誤差に対する性能劣化の敏感度を数値化し既存の機種と比較することで、設計段階で製造難易度を予測することは行っていた。しかし、敏感度を数値化しただけでは、複雑な誤差が組み合わさった量産時の性能劣化を統計的に把握することは困難であり、近年の製造難易度の高いレンズユニットには対応しきれなくなってきた。

そこで我々は、モンテカルロ法を用いた量産シミュレーションツールの開発を行ってきた。量産シミュレーションを行い、その結果を随時設計にフィードバックすることによって、より製造難易度を下げた設計や最適な調整箇所の検討を早期に行うことが可能となる。また、その結果をメカ設計者や製造部門へフィードバックすることによって、メカ構造や製造面の技術課題に関する検討をコンカレントに進めることができ、試作前にモジュールの完成度を高められるため、試作、量産時のトラブルを低減することが可能となる。そうすることによって、不良廃棄品の削減や無駄な工程の削減による省エネ効果も期待でき、再生可能部品を増やす設計やククトタイムの短い調整方法の検討など、量産フロー全体での最適化を意識したモノ作りの基礎データとしても活用することができる。

本稿では我々が開発した量産シミュレーションツールの原理を紹介し、実際に量産機種に適用した事例を通し

て、本シミュレーションツールの有用性について報告する。

2 量産シミュレーション手法

2.1 シミュレーションの流れ

我々が行っているモンテカルロ法を使用した量産シミュレーション手法について、Fig.1に示すシミュレーション全体の流れに沿って説明する。

①公差の設定

公差はレンズ単品で発生する誤差の他にレンズ組み込み時の誤差やメカ構造により発生しうる誤差も含めて設定する必要がある。考慮すべき設定公差としては、以下が挙げられる。

- 1) 光学部品単品誤差
 - ・ニュートン/面クセ、芯厚/レンズ間隔誤差
 - ・屈折率/アッペ数誤差
 - ・非球面精度
 - ・相対面偏芯（シフト/チルト）
 - ・屈曲光学系での反射部材（プリズムなど）の精度
 - ・接合レンズの精度
- 2) メカ部品誤差、組み込み誤差
 - ・レンズ同士の嵌合ガタ、レンズ浮き
 - ・アクチュエーター関連の誤差
 - ・撮像素子関連の誤差
 - ・鏡枠の誤差（真円度、レンズ外径との嵌合ガタ）

②調整箇所の設定

実際のオートフォーカスユニットではレンズの一部、または全体を移動させて合焦を行っており、ズームレンズユニットでは、性能向上を目的とした調芯を行うことが一般的である。最終的な量産性能を予測する上で、この合焦や調芯をどのレンズまたはレンズ群で行うか、どのようなアルゴリズムで行うかは非常に重要なファクターであり、的確に設定する必要がある。特にズームレンズユニットでの調芯は複雑なアルゴリズムを使用しており、具体的には以降の適用事例で説明する。

③誤差を発生させたレンズの擬似量産

各設定公差の範囲内で誤差を乱数的に発生させ、設計レンズデータに付与する。各誤差量バラツキは設計値基準のガウシアン分布に従うと仮定している。ただし、プラスチックレンズのようなモールド成形を行うレンズでは、誤差量が設計値基準のガウシアン分布に従わない場合が一般的であり、その場合の誤差発生の方法については、以降の適用事例で説明する。通常は400個～1000個程度の誤差込みのレンズデータを作製し、擬似量産の母集団とする。

④性能評価

擬似量産したレンズ全てに対し、性能評価（撮像レンズではMTFの計算）を行い、統計的に解析を行う。本稿では撮像レンズに限定しているため、評価尺度は

MTFとしているが、これに限ったことではなく、例えば、回折効率やエンサークルドエナジーなどのバラツキを評価することも可能である。また、ここで擬似的にレンズを多数作製しているので、MTF等の光学性能バラツキだけでなく、量産時のディストーションのバラツキや、センサ面入射角度のバラツキ、画角のバラツキなども必要に応じて計算することが可能である。

⑤各種フォーマットグラフ出力

全てのレンズに対しての性能評価が終了したら、その結果をヒストグラムや累積確率プロットにまとめる。量産時の規格が決定しているレンズに関しては、推定収率を計算することも可能である。通常使用する各種グラフに関しては、全て自動化しており、ワンクリックで出力可能としている。主要なアウトプット例については次章で紹介する。

⑥画像劣化シミュレーション

画像劣化シミュレーションとは、レンズデータをベースに、対象レンズの光学特性の数値データを計算し、理想的な原画像と組み合わせることで、そのレンズを通じた後の劣化画像を得るシステムのことである。画像劣化シミュレーションを使用することで、レンズ製造前に収差図よりも直感的にレンズの描画性能を把握でき、光学を専門としていない他部門や顧客へのプレゼンテーションに有効、といったメリットが得られる。

我々は量産シミュレーションと画像劣化シミュレーションを組み合わせることで、量産時の描画性能をより視覚的に確認できるシステムを構築した。ただし、本画像劣化シミュレーションは光学設計段階で行うことを想

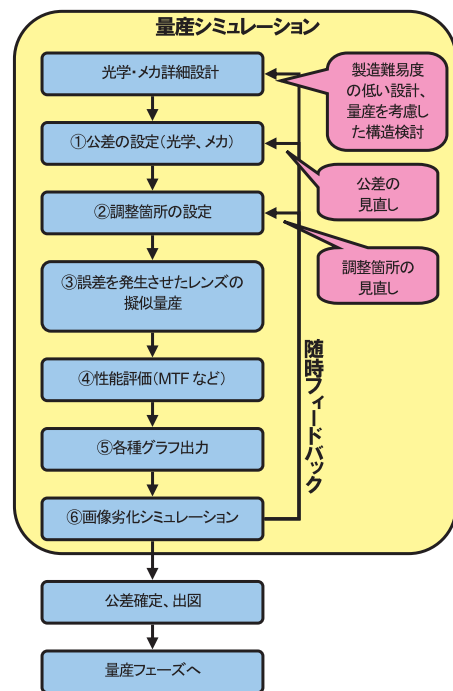


Fig.1 Flow chart of mass-production simulation

定しているため、実機では最終的に行っている画像処理によるチューニングは考慮しない場合が多い。

2.2 出力, アウトプット例

量産シミュレーションで使用する主要なアウトプット例をFig.2に示す。

a) ヒストグラム (Histogram)

擬似量産レンズのMTFの分布を表示する。MTFのバラツキを視覚的に把握することができる。

b) 包絡線 (Envelope curve)

擬似量産レンズを性能でソートし、下限からあるサンプル数をカットした時の最悪値をデフォーカスごとにプロットしたグラフ。つまり、「20%カット包絡線」とは、「擬似量産レンズの80%はこのMTF値以上となる」というMTF値を意味している。

c) 累積確率プロット (Cumulative probability)

横軸にMTF、縦軸に累積確率をプロットしたグラフ。規格値が決定しているレンズに関しては、限界性能に応じた推定収率を確認することができる。

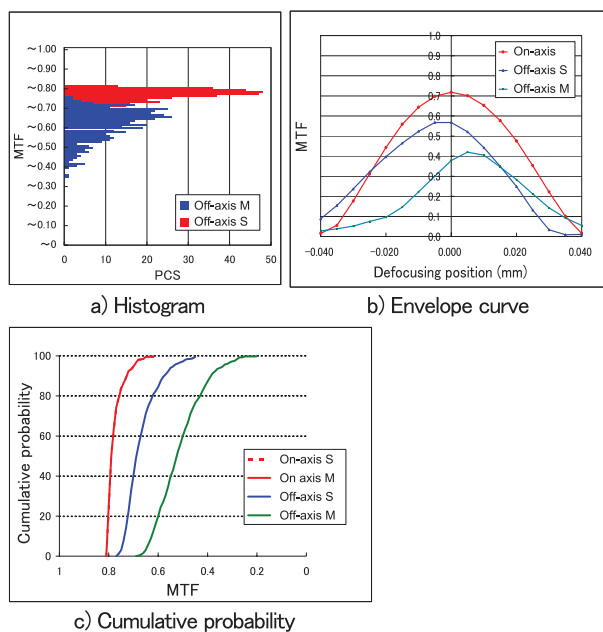


Fig.2 Major output examples of our simulation

3 適用事例

3.1 携帯電話向け単焦点光学系

適用事例として携帯電話向け単焦点光学系を例に取り、実機との相関性を見ることで、量産シミュレーション精度の検証を行った。検証に使用したレンズは、携帯電話向けプラスチックレンズ4枚構成の単焦点レンズとした。

今回の検証で最も重要な部分は、前章でも述べたように、プラスチックレンズはモールド成形であるため、誤

差量バラツキがガウシアン分布に従わないのが一般的であるという点である。また、単焦点レンズ系では、レンズ単品で偏芯誤差がある程度発生していても、レンズを180°または90°ピッチで回転させて組み込むことで、全系での片ボケ量をキャンセルさせる、一種の調芯のような調整を行っている場合もある。

上記2点の携帯電話向け単焦点レンズならではの項目を量産シミュレーションに反映させるため、本シミュレーションでは以下のようなアルゴリズムを取り入れた。

- ①偏芯誤差に関してのみ、従来機種の偏芯量測定から発生しうる偏芯量の傾向と実力値を把握し、設計値のレンズに最初から誤差量を付与する。
- ②その状態で全系の片ボケ量をキャンセルさせるようにレンズを90°ピッチで回転させ、全系の片ボケ量が最小となるベスト回転角度を検索する。
- ③レンズの回転方向が決定したら、その状態をスタートにして、同じく従来機種の測定値から算出した繰り返し成形バラツキの実力値を公差として設定し、量産シミュレーションを実行する。

以上のようにすることで、初期レンズに偏差を持たせることができ、設計値を基準としたガウシアン分布で誤差量がばらつくとするシミュレーションよりも実際に近づくと考えられる。

このようにして実行させた量産シミュレーション結果と、実際の試作レンズ約3000個のMTFバラツキを比較したヒストグラムをFig.3に示す。

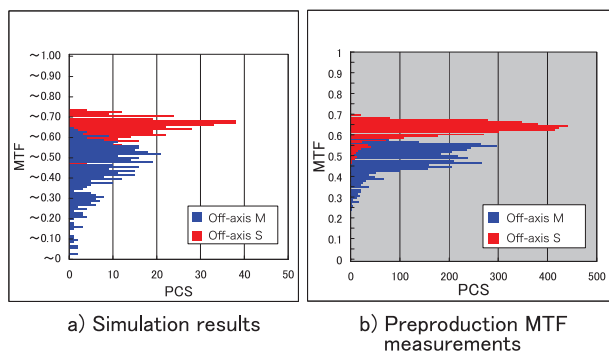


Fig.3 MTF histogram of simulation result and preproduction

この結果より、実際に試作したレンズのMTFバラツキと、シミュレーション結果で、分布のピークは同じ位置に現れていることが分かる。よって、設計段階での大まかな量産性能の見積もりには十分対応できる精度を持ったツールであると言える。

ただし、MTFの下限付近の分布は試作品の測定結果とシミュレーション結果で相違が見られる。これは、実際の生産精度の実力値と入力公差の違いや、実際の誤差発生原理とシミュレーションでの誤差発生アルゴリズムの違いなどが影響しているものと考えられる。この点

については今後改善していかなければならない課題であり、より高精度なデータ蓄積が必要となってくると考えられる。

3.2 ズーム光学系

ズーム光学系は、単焦点光学系に比べて部品点数がはるかに多く、また長距離駆動部を有するため、トータル誤差による性能劣化が相対的に大きくなる。特に変倍レンズ群に関連した部品誤差は、近年の高画質化に対して、許容できないレベルとなってきた。そのため、DSCや携帯電話向けズームレンズユニットでは、組み立て時にレンズ間や群間で調芯を行うことが一般的である。

我々の開発したシミュレーション手法では、様々な調芯方法に応じたシミュレーション、補助光学系を用いたレンズ調芯、異なる焦点位置での複数箇所調芯を順に行えるシステム、など複雑なアルゴリズムを用いて、所望の量産性能予測を実施している。以下にその具体例を示す。

Fig.4 に、あるズーム光学系でのモンテカルロシミュレーション結果を示す。ここでは、MTFヒストグラムを用いて、望遠端での軸外MTF性能比較を行う。a) は調芯を行わない場合、b) は1箇所調芯を行った場合、c) は2箇所調芯を行った場合を示す。

Fig.4 から、調芯によって軸外MTF性能の分布が大幅に改善し、かつ調芯箇所を増やしても、改善度合いが小さいことから、一箇所の調芯で十分な画質を得られることが分かる。

これらの調芯シミュレーションを高精度に行うことは、光学設計段階で、調芯手法や必要精度、工程数などを的確に把握することにつながるため、光学性能の予測

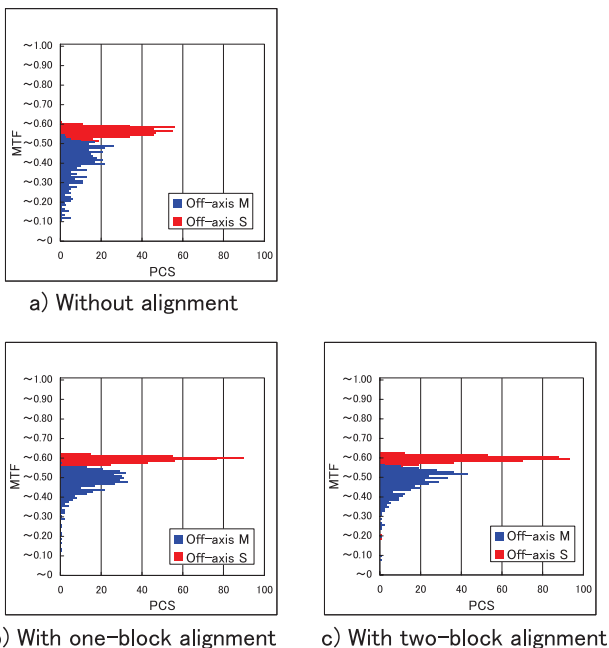


Fig.4 MTF histogram corresponding to alignment types

に留まらず、試作での確認項目の明確化や量産コスト見積り、収率向上への取り組みなど様々なシーンでの判断材料として用いることができる。

4 画像劣化シミュレーション

適用事例で紹介した携帯電話向け単焦点光学系の量産シミュレーションと画像劣化シミュレーションを組み合わせた出力例を紹介する。今回は原画像として我々が作成した白黒チャート画像を設定し、原画像、設計レンズでの出力画像、及び顧客からの要求規格を満足する限度サンプルレンズでの出力画像の3つを比較した。Fig.5 に示す出力画像は、上記3つの画像の7割像高付近の一部分を抜き出した画像である。

この出力結果より、限度サンプルでは周辺での画質劣化を再現できており、設計段階で限度サンプルの画質を視覚的に確認することが可能であることが分かる。

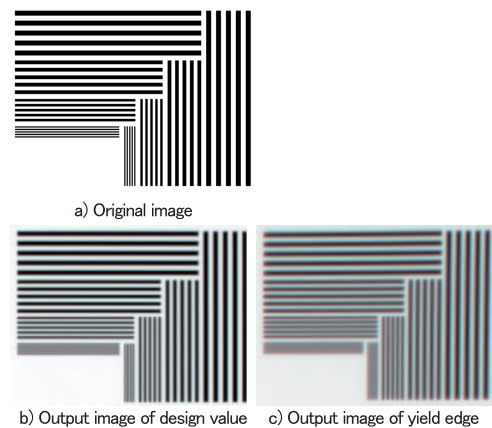


Fig.5 Output image of our image simulation

5 まとめ

我々は実際の量産に近い誤差や調整などを考慮した量産シミュレーションツールを開発した。さらには、擬似的に作製したレンズで画像劣化シミュレーションを実行することにより、試作前にレンズの描画性能を視覚的に把握することが可能となった。また、実際の量産レンズに本シミュレーションを適用したことにより、試作前にモジュールの完成度を高め、量産コスト見積もりを的確に行うことによって、無駄な工程の削減や不良廃棄品の低減に貢献することができた。

ただし、まだ実機の性能バラツキとの相関が完全に取れたとは言えず、それにはさらなるデータベースの蓄積や誤差発生、調整アルゴリズムの改良が必要であると思われる。今後はより高精度なツールへの改良を進めて、完成度をさらに高めていきたい。