

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25420100

研究課題名(和文) 累進焦点レンズの設計最適化

研究課題名(英文) Design Optimization of Progressive Additional Spectacle Lenses

研究代表者

柿本 正憲 (KAKIMOTO, Masanori)

東京工科大学・メディア学部・教授

研究者番号：20537683

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：遠近両用眼鏡レンズとして使われる累進焦点レンズは、各着用者個別の設計が必要である。これを自動化する手法を検討した。事前に大まかに人が設計したレンズ表面形状のデータを出発点とし、少しずつ形状を自動修正して所望の性能のレンズ形状データを得ることが最終目標である。自動修正の繰り返しは最適化と言われる方法を適用する。修正のたびに、CG技術を活用して見え方のシミュレーションを行い、性能値を算出する。性能が最良となるように形状の自動修正を行う。最適化により、より良い性能のレンズ形状データが得られることを確認した。また、性能値としてレンズ表面各点の焦点ボケ量および像歪み量を算出する方法を確立した。

研究成果の概要(英文)：The progressive power lens used as a bifocal spectacle lens needs to be designed for each wearer individually. We examined a method to automate this process. The final goal is to obtain lens shape data of desired performance by automatically correcting the shape little by little with the data of the surface shape of the lens roughly designed by a person as a starting point. To repeat automatic correction, we applied a method called optimization. Every time the correction is made, simulation of appearance is performed by applying CG technology and the performance value is calculated. The system automatically corrects the shape so that the best performance is achieved. We confirmed that by optimization, lens shape data with better performance can be obtained. We also established a method to calculate the focus blur amount and the image distortion amount of each point on the lens surface as performance values.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：累進焦点レンズ 多目的最適化 焦点ボケ 像歪み 眼鏡レンズ設計

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 遠近両用の眼鏡レンズとして需要の大きい累進焦点レンズは、レンズ表面上の場所によって曲率が変化する。また、着用者の近視・乱視・老視等の度合いに合わせた個別のレンズ設計が必要である。このため設計に手間と時間がかかる問題点がある。

(2) レンズ設計者を支援するため、先行研究として CG シミュレーションによって着用者がレンズを通して見た場合の見え方を再現した。焦点ボケと屈折像の歪みのリアルタイム CG 表示を実現した。

(3) 一方で、CG 表示だけでなく、焦点ボケや歪みを定量的に評価することが、レンズ設計において重要な手段となる。本研究では、これらの量を単に計算したり可視化したりするだけでなく、最適化設計手法に適用することによって、所望の累進焦点レンズの表面形状を自動設計することを目指した。

### 2. 研究の目的

(1) 設計中のレンズ表面形状データを入力とし、その眼鏡の特性の良し悪しを判定できる指標の計算法を確立する。指標は、見え方シミュレーションにおける焦点ボケ量及び像歪み量の二つである。

(2) この二つの指標は両方とも最小であることが理想である。しかしながら、二つはトレードオフの関係にあり、一方を最小にする設計を行うと他方が大きくなってしまいうという問題がある。本研究では最適化手法によって最も適切なレンズ表面形状を求める手法を開発する。指標が目的関数で、表面形状データが設計変数となる。

(3) 累進焦点眼鏡レンズは表面の場所によって要求される性能が異なる。そのため表面各所の指標分布を得る。表面のサンプリング数は数 100 から 1,000 程度必要である。これだけ多くの目的関数は非現実的である。そこで、指標分布から目的関数を絞り込む方法を確立する。

### 3. 研究の方法

(1) 焦点ボケ量の算出は先行研究の方法を用いる。眼鏡レンズ表面を格子状に標準化した各標本点に対して、着用者の網膜中心窩を想定した視点から視線レイを発する。眼と眼鏡レンズの屈折を経て、空間内に配置したテスト壁面までレイを到達させる。次に、瞳の拡がり considering、レイに沿って細長い円錐形を計算する。屈折を経て、テスト壁面上での円錐の拡がり、すなわち楕円形を求める。この楕円の大きさが当該標本点での焦点ボケ量となる。各標本点について前記処理を繰り返せばレンズ表面各所の焦点ボケ量分布が得られる。

(2) 像歪み量については、着用者の視力と関係なくレンズ表面形状から算出する。本研究ではレンズ各所での曲率の違いが像歪み量と等価であると考えた。曲率は屈折力と等価であり、屈折力は像の拡大率と等価である。そして、レンズ上の一点の拡大率とその近傍の拡大率との変化の大きさは像歪み量と等価と考えられる。従って、既知の量である曲率分布の空間微分により像歪み量分布が得られる。

(3) 多目的最適化によって、前記の 2 つの指標 (目的関数) が最小となるようなレンズ表面形状 (設計変数) を求める。目的関数は最終的には 2 つの指標のスカラー値とした。各標本点での指標の重み付平均によってスカラー値を算出する。各標本点の重みは、着用者の視線が通る頻度を想定して設定する。累進焦点レンズで特に重要な中心線 (中央上部から中央下部にいたる) に沿って重みを大きく、逆にほとんど使わないレンズ下部の左右端は重みを小さく設定する。

(4) レンズ表面形状は B-スプライン曲面によって設定する。曲面の制御点が設計変数となる。B-スプライン曲面は多数の制御点を使用しながらも曲面の連続性が保証される。

### 4. 研究成果

(1) 累進焦点眼鏡レンズの性能評価を行うためには、着用者が実生活で使用する条件に近いシーンを想定する必要がある。ここでいうシーンとは、見え方シミュレーションでの仮想着用者が眼鏡レンズ形状モデルを通して見る対象物で、物体や背景の CG 形状モデルである。レンズ上部 (遠用部) を通して遠方を、レンズ下部 (近用部) を通して本や新聞などの近方物体を見るのが累進焦点レンズの使い方である。このような条件に近く、かつシンプルで一般的なシーンが望ましい。本研究で用意した CG シーンの例を図 1 に示す。

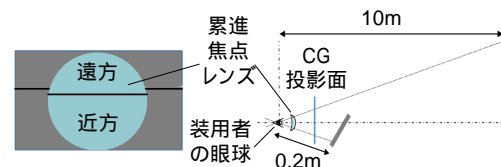


図 1 想定する見え方(左)とシーン例(右)

実際の性能評価として使用する尺度 (目的関数) は、図 1 左のレンズに相当する領域 (薄い青の円盤部分) に可視化される焦点ボケなどの計算結果である。

(2) 基礎実験として、多目的最適化を実現する手法のひとつである進化計算を用いたレンズ形状自動設計を行った。進化計算過程で

与える設計変数として、表面が3次B-スプライン曲面で裏面が平面となる円型レンズ形状簡易モデルを設定した。図2には、使用したレンズ形状の性能評価領域と曲面形状の制御点配置とを示す。

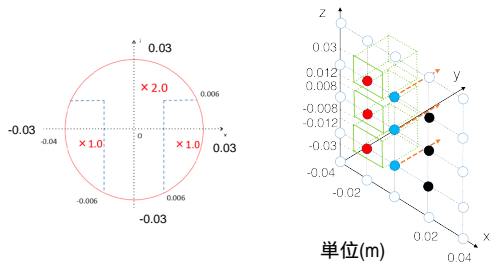


図2 基礎実験に使用したレンズ形状データ(左:目的関数評価領域と重み 右:曲面の制御点配置)

制御点は5×5の25点で、内側の3×3の9点が可動点である。これら可動点のxyz座標が実際の設計変数である。薄緑で縁取られた箱は可動範囲である。黒い3点、水色の3点をはさんで対称となるそれぞれの赤い点に連動して動くように設定した。見え方シミュレーションで得られる焦点ボケ分布は、円形レンズ上の各標本点(図2左では省略)で算出する。標本点の場所の重要度に応じて重みを設定し、焦点ボケ量の重み付平均を求める。その結果が目的関数のうちのひとつとなるボケ量である。二つ目の目的関数は、本来は像歪み量だが、基礎実験ではより簡単に評価できる、レンズの平均厚みを設定した。両方の目的関数とも値が小さいほどレンズ性能が良いとみなすことができる。これらの条件に基づき、可動点の微修正と目的関数の計算との繰り返しを行う進化計算を実行した。

(3) 基礎実験の結果として、多目的進化計算により得られた目的関数分布を図3に示す。

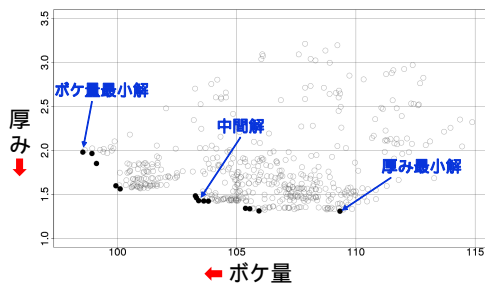


図3 基礎実験で得られた特徴解の分布

図3に分布する多数の薄い白抜きの丸は、進化計算過程で得られた二つの目的関数の評価値を座標とした点である。黒丸はその評価値のうち、特徴解と呼ぶことのできる結果である。分布図中の左方にはボケ量最小解が、右方には厚み最小解が得られている。それらの中間にはボケ量及び厚みの両者がバランス良く最適に近い中間解の分布が見てとれ

る。このような分布(黒丸)を示す特徴解はパレート最適解であり、トレードオフ関係にある二つの目的関数が適切に最適化されていることを示すものである。

(4) 上記の結果で示す特徴解について、対応するレンズ形状表面各標本点におけるボケ量分布と厚み分布の可視化結果を図4に示す。

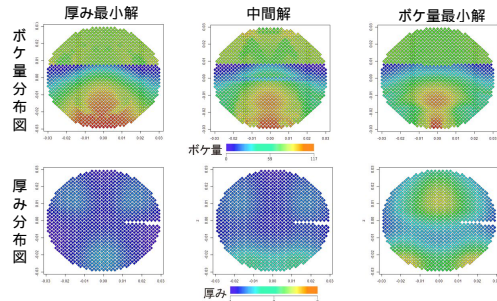


図4 三つの特徴解に対応するレンズ形状のボケ量分布及び厚み分布可視化結果

図4では、青い部分ほど量が小さく(性能が良い)、赤い部分ほど量が大きい(性能が悪い)ことを示す。厚み最小解ではレンズ下部のボケ量が大きくなり、ボケ量最小解では厚みが全体的に大きくなるのがわかる。なお、ボケ量分布図で、レンズ下部(近用部)の性能が悪く、中段の左右端の性能が良い結果となっており、本来の累進焦点レンズとしては望ましくない結果である。これは、制御点の少ない簡易レンズ曲面を使用したためである。

(5) 累進焦点レンズにおいて像歪みは避けることのできない現象である。レンズ設計にあたっては、像歪み量は最小限に抑える必要がある。図5は、像歪みがレンズ下部に生じた例を示す見え方シミュレーション結果である。



図5 像歪みのシミュレーション結果

図5左は現実の場面を模したCGモデルを使った像歪み結果である。図5右は、対象CGモデルとして正方形の田の字型格子を使った例で、レンズを通した場合に歪んで見えることがわかる。従来研究の像歪み計算法として、歪んで見える田の字型が正方形からどれだけ変形したかを幾何学的に評価していた。しかしながらその手法は、レンズ表面の標本点における歪み量ではなく、標本点周囲の比較的広い範囲の歪みを計測することになる。

また、レンズ周辺部では田の字型がレンズからはみ出るため、標本点で正しい評価ができない。これでは、最適化に必要な精度の像歪み量分布を得ることはできない。

(6) そこで本研究では、レンズ表面の一点の歪み量を解析的に求め、差分法によって算出する。これにより、標本点間隔の精度で像歪み量分布が得られ、レンズ周辺部に評価不可の領域が生じることもない。解析的な像歪み算出には曲率を利用する。曲率は、レンズ曲面設計時に任意の標本点での正確な値を得ることができる。そのため曲率情報は、各標本点を頂点メッシュとする入力レンズ形状データに含まれる。一般に、レンズの曲率は屈折力と等価で、屈折力は像の拡大率と等価である。ある注目点における像の歪みは、その点と近傍との拡大率が異なることが原因で生じる。したがって、各標本点における像歪み量は、曲率の空間微分によって得られると仮定した。実際には、任意の注目標本点における曲率と、隣接標本点の曲率との差として像歪み量を計算する差分法を使う。図6は曲率に対して差分法を用いて像歪み量分布を計算した結果を可視化したものである。

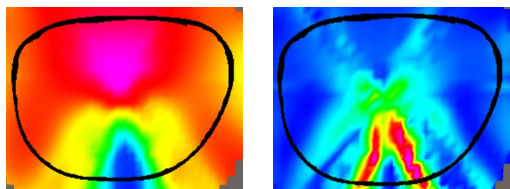


図6 入力の曲率分布(左)と出力の像歪み量分布(右)の可視化結果

図6左は、入力データとして与えられている曲率データ(主曲率及び主方向ベクトル)から平均曲率を算出して分布を求めたものである。青色の場所は値が小さく、赤色の場所は値が大きい。レンズ上部は凹レンズ(曲率大)に、下部は凸レンズ(曲率が小または負の値)になっており、遠近タイプの累進焦点レンズの典型例であることがわかる。図6右は、平均曲率の分布から差分法によって水平方向の曲率変化を求め、像歪み量分布として可視化した結果画像である。使用したレンズ形状データは図5で使用したものと同一である。図5左で像歪みの目立つ場所と、図6右の像歪み量分布で値の大きい場所とがおおむね一致していることがわかる。

(7) 本研究では、累進焦点レンズ設計を自動化する原理を提案した。多目的最適化を適用した基礎実験によって、レンズ曲面形状を漸進的に変化させて性能のより高いレンズが自動的に得られることを確認した。また、レンズ性能評価の重要な指標である像歪みを算出する手法を考案した。今後の課題として、基礎実験で用いた焦点ボケ量分布と、像歪み量分布を組み合わせた目的関数を用いた最

適化実験のほか、実際の眼鏡レンズ製品の設計データを設計変数とする最適化実験が挙げられる。

## 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)

[学会発表](計3件)

松川 修平、藤堂 英樹、柿本 正憲、累進焦点レンズ設計における屈折像の歪み分布評価、情報処理学会第80回全国大会、2018、3X-04

立川 智章、松口 友祐、柿本 正憲、進化計算を用いた累進屈折力眼鏡レンズの多目的最適化、第53回日本眼光学学会総会一般口演、2017

Y. Gotanda, M. Kawase, M. Kakimoto, Real-Time Rendering of Physically Based Optical Effects in Theory and Practices, ACM SIGGRAPH 2015 Courses, 2015

[その他]

柿本 正憲、ビジュアルシミュレーション技術の眼鏡レンズ設計への応用、東京工科大学メディア学部連携公開講座、東京・秋葉原、2013

柿本 正憲、篠原 俊英、平林 久義、立川 智章、西田 友是、前庭動眼反射を考慮したバーチャル眼鏡レンズシステム、画像電子技術賞展示、第41回画像電子学会年次大会、青森市、2013

セイコーオプティカルプロダクツ株式会社、3Dリアルタイムシミュレーション、<http://www.seiko-opt.co.jp/technology/simulation/> (研究代表者による成果)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柿本 正憲 (KAKIMOTO, Masanori)  
東京工科大学・メディア学部・教授  
研究者番号：20537683

### (3) 連携研究者

立川 智章 (TATSUKAWA, Tomoaki)  
東京理科大学・工学部・講師  
研究者番号：90633959

### (4) 研究協力者

西田 友是 (NISHITA, Tomoyuki)  
篠原 俊英 (SHINOHARA, Toshihide)  
平林 久義 (HIRABAYASHI, Hisayoshi)