

レンズ表面上の微細構造が投影像の鮮明度を与える影響

機械科 豊田敏裕* 鈴木敬明**

Method for estimating the influence of the microstructure of the lens surfaces on the sharpness of the projected image

Toshihiro TOYOTA and Taka-aki SUZUKI

Dark and light area are in the image projected by the headlamps, and a light and dark boundary are called a cutoff line. The sharp cutoff line makes the drivers and/or pedestrians uncomfortable when a vehicle is shaking and a tilt of the vehicle change. This is why it is necessary to make the cutoff line blur.

In the projector type headlamp, although the sharpness of the projected image can be controlled by adjusting the optical arrangement, chromatic aberration (color bleeding) occurs near the cutoff line due to wavelength dispersion of the refractive index of the lens. The color occurred this chromatic aberration largely differs according to slight differences in optical arrangement and lens shape.

Some headlamp products, which apply a micro-structure to the lens surface and diffuse light to adjust sharpness of projected image, have been developed.

The lighting simulation is effective to investigate the relationship between the micro-structure and the sharpness of the projected image. However, a 3D modeling of a lens with a micro-structure pattern on its surface gives limitations on the size of data and the amount of calculation in lighting simulation.

In this research, a convenient method to predict the sharpness of the projected image, which convolute a light diffusion property caused by one micro-structure and a projected image formed by a lens without micro-structure, are proposed.

Keywords : light simulation, micro-structure, micro-lens, image processing, head lamp

キーワード：照明シミュレーション、微細形状、マイクロレンズ、画像処理、ヘッドランプ

1 はじめに

LEDなどの高輝度・微小発光体を光源とするヘッドランプ設計においては、効率的な集光と配光を実現するために樹脂製のレンズが使用されている。対向車がある場合のすれ違い用ビームの配光設計では、走行車線の路面を最大限に明るくしながら、対向車に幻惑感を与えないことが重要視される。そのため、上半分が暗く、下半分を明るい、カットオフラインと呼ばれる明暗部境界を持つ投影像が形成される。鮮明なカットオフラインは、車両の揺れにより投影像にブレが生じた際に、不快なちらつきを感じさせる原因となる。それを排除する目的で、法規¹⁾によりカットオフラインの鮮明度が規定されている。

明暗部境界を不鮮明にする（暈す）ことは、投影像を鮮明に結像させない（焦点を外す）ことで容易に

実現可能であるが、樹脂レンズを用いたヘッドランプでは色収差と呼ばれる現象により、カットオフラインに色のにじみが生じることになる。色収差は、樹脂レンズのわずかな形状誤差や、取り付け誤差により容易に変化してしまうことから、焦点調節によるカットオフラインの色味や不鮮明度の制御は困難である。一方で、樹脂レンズの表面にマイクロレンズと呼ばれるミクロンオーダーの微細な凹凸形状を施すことで、投影像の鮮明度を制御する取り組みがある。しかしながら、形状と不鮮明度との対応付けはトライアンドエラーで行われている。照明シミュレーションは、製品の性能予測には有効な手段であるが、マイクロレンズを含むモデルは計算量が膨大となる。

そこで本研究では、マイクロレンズによる光の広がりを照明シミュレーションで予測した結果を点拡がり関数

*) 現 照明音響科 ***) 現 研究調整監

とみなし、マイクロレンズ形状が付与されていない樹脂レンズを用いた投影像予測結果に畳み込みを行う画像処理により、特定のマイクロレンズ形状を、対象とする樹脂レンズの前面に付与した際の投影像を予測する技術を開発した。

2 方法

2.1 マイクロレンズによる投影像の照明シミュレーション

図1に示す照明シミュレーションモデルを作成した。照明シミュレーションには、視認性評価CGシステムLu micept Ver.9.73 x64 (インテグラ社製)を用いた。照明シミュレーションモデルの詳細は次に述べる通りである。

(1) マイクロレンズの形状定義とマイクロレンズ形状モデルの生成

マイクロレンズは、凸部と平坦部から成る平凸形状とした。凸部側の形状は、複数の三角関数から成る設計式 $z=M(x, y)$ で定義した。ここで、 x 、 y 、 z は空間座標に対応しており、それぞれ縦、横、高さであり、単位はmmである。縦 x [mm]、横 y [mm]の座標に依存

して、高さ z が Z_{min} [mm]~ Z_{max} [mm]の範囲で変化するような設計式とした。マイクロレンズの大きさ縦0.5[mm]×横0.5[mm]とし、高さの範囲は、 $Z_{min}=0.0$ [mm]、 $Z_{max}=3 \times 10^{-3}$ [mm]とした。また、平坦部側は光軸を法線とする平面とし、凸部の Z_{min} から1.0[mm]離れた位置に配置した。よって、マイクロレンズの厚さ(高さ)は、空間的に $Z_{min}+1.0$ [mm]~ $Z_{max}+1.0$ [mm]の範囲で変化する。

照明シミュレーション対象のマイクロレンズ形状モデルは、上述の設計式で記述されたものに加えて、設計式に基づいて実際に成形された樹脂レンズ(以下、成形品という)から実測した形状2種類の計3種類とした。

加工条件が異なる金型2種類による成形品の凸面側の形状を非接触三次元形状測定機CCI HD(アメテック製)を用いて測定し、空間解像度横： 4.09×10^{-4} [mm/px]×縦： 4.09×10^{-4} [mm/px]×高さ： 0.01×10^{-6} [mm]で点群データとして取得した。図2は、設計式に基づく点群データと、非接触三次元形状測定機で取得した点群データに基づき、マイクロレンズの高さ方向を等高線で表示したものである。マイクロレンズの形状は、中心部から周辺部にかけて、等高線の形状

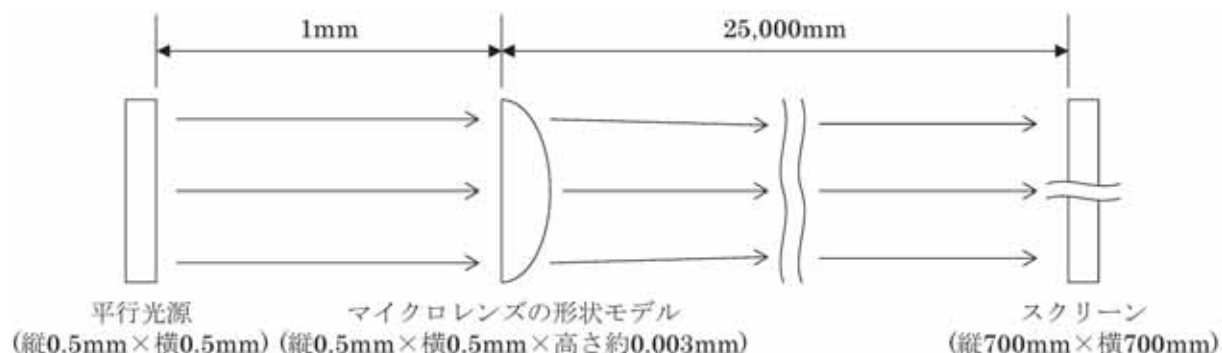


図1 照明シミュレーションモデルの概要

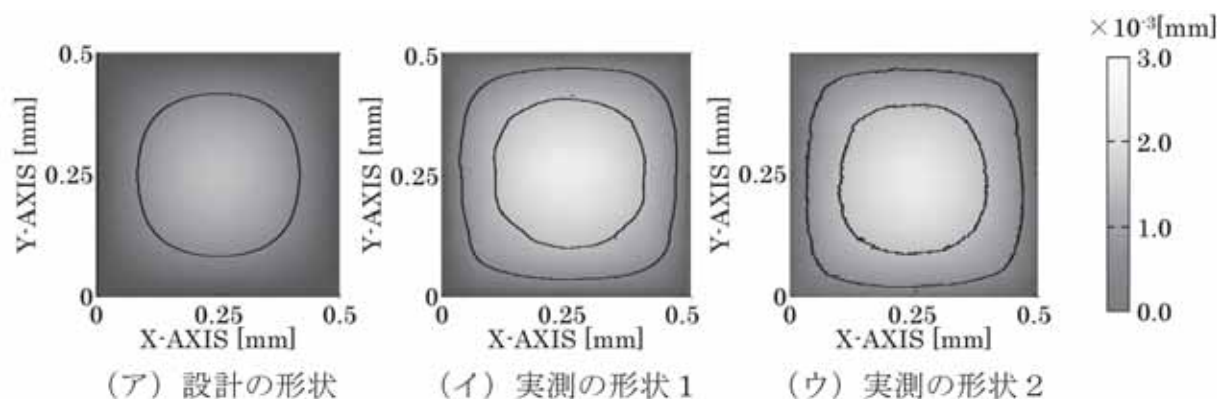


図2 照明シミュレーション対象のマイクロレンズの形状

設計形状及び実測したマイクロレンズの高さを濃淡と等高線で示している。

が円から矩形に変化するような設計（図2（ア））であり、成形品（図2（イ）及び（ウ））もこの傾向に従った形状であることがわかる。これらの点群データを視認性評価CGシステムに取り込んで曲面を生成し、同システムで作成した平坦部側と組み合わせてマイクロレンズ形状モデル3種類を作成した。

（2）照明シミュレーションのモデル構成

照明シミュレーションモデル（以下、照明源という）は、光源とマイクロレンズ形状モデルから構成した。

マイクロレンズ形状モデルは、高さ方向に対応するZ軸が光軸（投影方向）に一致するよう配置した。マイクロレンズは樹脂製を想定し、屈折率は1.49、樹脂による光の吸収は起きないものとした。

光源は、縦0.5[mm]×横0.5[mm]の平面光源とし、マイクロレンズ形状モデルの平坦部から光軸に沿って1.0[mm]後方に離れた位置に配置した。配光特性は光軸に平行な平行光、全光束は1[lm]とした。照明シミュレーションでは、0.5[mm]×0.5[mm]の範囲のランダムな位置から平行光が生成される。

なお、レンズを用いた光学系では、色収差と呼ばれる屈折率の波長依存性による色むらが発生するが、本研究では、検討の対象外とした。したがって、照明シミュレーションで得られる投影像は、前述の通り、樹脂（PMMA）製のマイクロレンズの屈折率が1.49となる波長における投影像に等しく、照明シミュレーション結果は無彩色（グレースケール）の画像として得られることになる。

投影像は、照明源から25,000[mm]の位置に配置した、光軸を法線とする縦700[mm]×横700[mm]（視野角で縦1.6[deg]×横1.6[deg]）の仮想スクリーンを通過する光線として取得した。仮想スクリーンの画素数は縦700[px]×横700[px]とした。投影距離とスクリーンの大

きさから、空間解像度は縦1.0[mm/px]、横1.0[mm/px]（縦0.016 [deg/px]、横0.016 [deg/px]）であった。

照明シミュレーションの収束条件は、誤差5%以下とした。ここで、誤差とは、照明シミュレーション結果の真値に対する評価ではなく、評価（発生）した光線に通し番号を付して奇数番号と偶数番号の光線群に分けた際の評価対象の差異を指している。本研究では、誤差の評価対象は25,000[mm]先に設置された仮想スクリーンに対する投影像とした。

2.2 畳み込みによる投影像の鮮明度予測

処理の概要を図3に示す。右側通行用の車両に装着されるヘッドランプが形成する投影像を想定した、カットオフラインを有する2値画像を原画像 $f(x, y)$ とした。原画像の画素数は、縦801[px]×横1,601[px]（視角で縦8.0[deg]×横16.0[deg]）とした。

本研究では、マイクロレンズのような微小領域に入射した光が空間内に拡散することを点拡がり関数として表現した。つまり、2.1の照明シミュレーションで取得した投影像を点拡がり関数psf（point spread function）と見なした。そして、空間領域において、現画像 $f(x, y)$ の各画素に点拡がり関数 $p(x, y)$ を適用する、すなわち周波数領域で原画像 $F(\omega)$ を点拡がり関数 $P(\omega)$ で畳み込むことで、マイクロレンズによる投影像の鮮明度制御の効果を予測した。

まず、事前処理として、原画像 $f(x, y)$ と点拡がり関数 $p(x, y)$ の空間解像度が一致するよう点拡がり関数 $p(x, y)$ の画素数を調整し、原画像 $f(x, y)$ と点拡がり関数 $p(x, y)$ の空間解像度を縦4.48[mm/px]、横4.48[mm/px]（視角で縦0.01[deg/px]、横0.01[deg/px]）に揃えた。

次に、周波数領域での画像演算のため、原画像 $f(x, y)$ と点拡がり関数 $p(x, y)$ を各々フーリエ変換し、

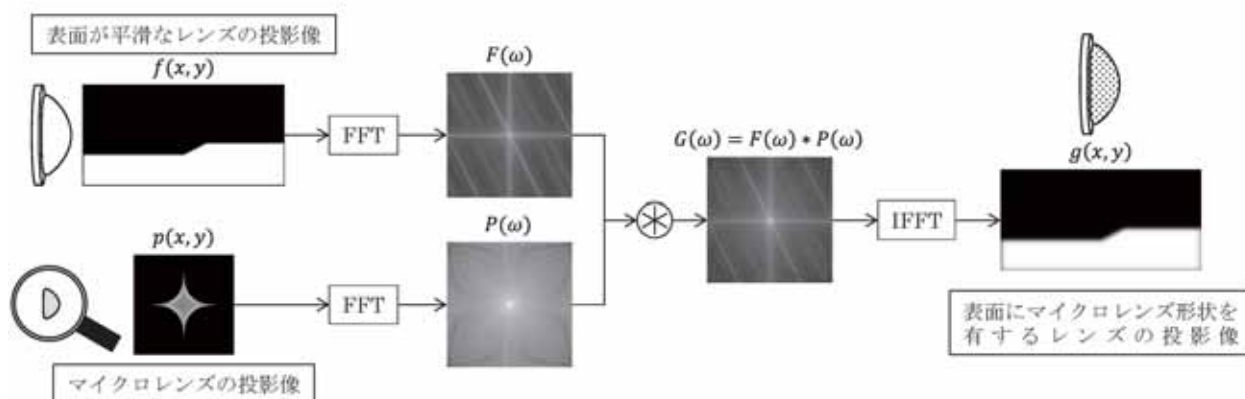


図3 畳み込みによるフィルター処理の流れ

原画像 $f(x, y)$ のパワースペクトル $F(\omega)$ と点拡がり関数 $p(x, y)$ のパワースペクトル $P(\omega)$ に変換した。そして、原画像 $f(x, y)$ のパワースペクトル $F(\omega)$ と点拡がり関数 $p(x, y)$ のパワースペクトル $P(\omega)$ を畳み込み、鮮明度低下画像 $g(x, y)$ のパワースペクトル $G(\omega) = F(\omega) * P(\omega)$ を得た。最後に、鮮明度制御画像 $g(x, y)$ のパワースペクトル $G(\omega)$ を逆フーリエ変換することで、シャープな投影像（原画像 $f(x, y)$ ）の鮮明度を、マイクロレンズ（点拡がり関数 $p(x, y)$ ）を用いて制御した結果を予測する画像を取得した。なお、一連の処理はMATLAB® R2013b (MathWorks® 社製) を用いた。

3 結果と考察

3.1 マイクロレンズによる投影像の照明シミュレーション

各モデルでは、誤差 5 % の収束条件に達するまでに 69,000,000 本以上の光線が評価された。

もし、照明シミュレーションに用いたマイクロレンズが配光制御の機能を果たさない（集光等の光学的な役割がない）と考えられる場合、光源の形状がそのまま投影像として得られる、すなわち、25,000[mm]先の仮想スクリーンには横 0.5[mm] × 幅 0.5[mm] の矩形の発光面が投影されることになるか、いわゆる焦点外れにより、明暗部境界が不鮮明な矩形状の投影像が得られるものと考えられる。照明シミュレーションの結果、設計式に基づくマイクロレンズを用いた照明シミュレーションモデルは、鮮明な明暗部境界を有するダイヤモンド状の投影パターンを呈した（図 4（ア））。また、成形品においても、明暗部境界の鮮明度の違いはあるが、同様に異方性のある投影パターンを呈する傾向がみられた（図 4（イ）及び（ウ））。この傾向は、マイクロレンズの形状が頂点を中心とする回転対称の形状でないことに由来すると考えられる。以上の結果から、照明シミュレーションに用いたマイクロレンズは、縦 0.5[mm] × 横 0.5[mm] の矩形範囲から出た平行光を、25,000[mm]先で縦 470[mm] × 横 470[mm] の範囲にダイヤモンド状の特徴的な投影像のパターンを形成する機能を有することがわかった。

3.2 畳み込みによる投影像の鮮明度予測

図 5（ア）に示す原画像 $f(x, y)$ に、図 4（ア）～（ウ）に示す点拡がり関数 $p(x, y)$ を畳み込むことで、図 5（イ）～（エ）に示すような、不鮮明な明暗部境界を持つ画像が得られた。これは、図 5（ア）に示

すような投影像を形成する光学系の樹脂レンズの表面に、図 2（ア）～（ウ）で示すマイクロレンズの形状を並置して転写した場合、図 5（イ）～（エ）に示すような投影像が形成されると予測されることを示している。

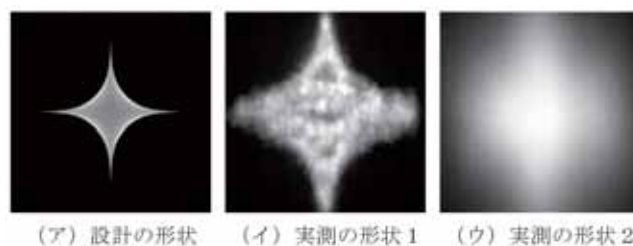


図 4 マイクロレンズが形成する投影像の照明シミュレーション結果

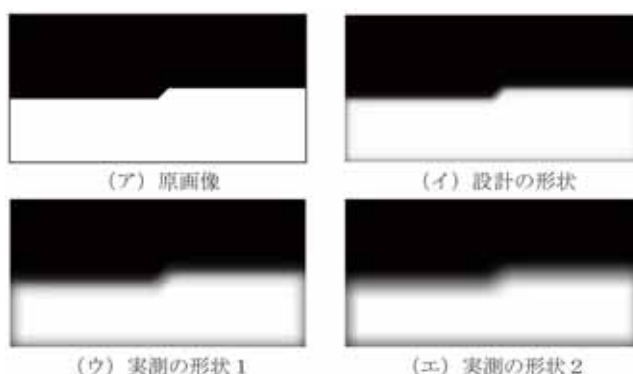


図 5 マイクロレンズを付与したレンズによる投影像の予測

3.3 G値に基づくカットオフラインの鮮明度評価

図 6（イ）は、部品の光学配置を調整し、意図的に焦点外れを発生させることによりカットオフラインを不鮮明にした状況を想定し、同様の手順で、原画像 $f(x, y)$ （図 5（ア））に等方性（ガウス状）の点拡がり関数 $p(x, y)$ （図 6（ア））を適用した結果である。以上の予測結果に基づき、光の広がり（異方性の有無）が投影像にどのような影響を与えているかを調査するために、投影像の鮮明度を評価する自動車用ヘッドランプの国際規格（UN/ECE R112）を参考に、2.0L（画像の中心を視角 0[deg]とし、左側に視角 2.0[deg]）の垂直断面における明るさを抽出し、G値を評価した。G値は、カットオフラインの鮮明度を評価する指標であり、 $G(\beta) = \log_{10}(I_{\beta}) - \log_{10}(I_{\beta+0.1})$ と定義されている。ここで β は、2.0L の断面における垂直方向の視角（単位は[deg]）、 I_{β} は視角 β [deg] における明るさである。G値の式は、 $G(\beta) = \log_{10}(I_{\beta} / I_{\beta+0.1})$ と表すこともできることから、この指標は空間的な明るさの変動割合を評価するものである。

図 7 に、2.0L の垂直断面における明るさ変化を示す。

鮮明な明るさ変化を示す原画像（実線）に対し、点拡がり関数に依存して、空間的な明るさ変化に違いが見られ、その違いが明るさ変化の傾きとして現われている。明暗部境界付近の明るさ変化が緩やかになる（傾きが小さくなる）と、明暗部境界が不鮮明になることがわかる（点線、破線、一点鎖線、二点鎖線）。

図8は、図7で抽出した明るさ変化に基づきG値を評価した結果である。G値は、その評価式の定義から、明るさ変化が生じない場合は0、明るさ変化が大きくなるほど値が大きくなる。よって、図8の実線で示している原画像のように、急激な明暗変化が生じる場合は、明暗部境界で無限大、それ以外の部分では0となる。図7において、焦点外れ（破線）と成形品1（一点鎖線）の明るさ変化は類似しているが、その変化をG値として評価すると、G値にはその違いが顕著に表れている（図8の破線及び一点鎖線）。焦点外れのような等方性のボケでは、局所的な明るさ変化が単調に変化しているのに対し、マイクロレンズをレンズ表面に付与してボケに異方性を持たせることで、局所的な明るさ変化を投影位置に依存して変化させられることが分かる。これは、異方性のあるボケを生じさせることにより、投影像の鮮明度を局所的に制御できることを示している。

4 まとめ

本研究では、集光レンズを用いた照明光学系における投影像の鮮明度制御に有効な手段である、集光レンズ表面へのマイクロレンズ形状の付与について、マイクロレンズの形状設計を効率化するための、投影像予測技術を開発した。本研究で対象としたような、異方性のある投影像を形成するマイクロレンズを用いることで、特定の方位の鮮明度を選択的に制御でき、投影像の品質を向上させることができる。

今後、本技術の実用化に向けて、投影像の実測に基づく解析や、集光レンズの表面にマイクロレンズ形状のパターンを形成する場合のマイクロレンズの法線決定（ベース曲面の法線に一致させるか、光軸に一致させるか）など、検討を進めていく予定である。

参考文献

[1] UN/ECE R112: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting an asymmetrical passing-beam or a driving-beam or both and equipped with filament lamps and/or light-emitting diode (LED) modules.

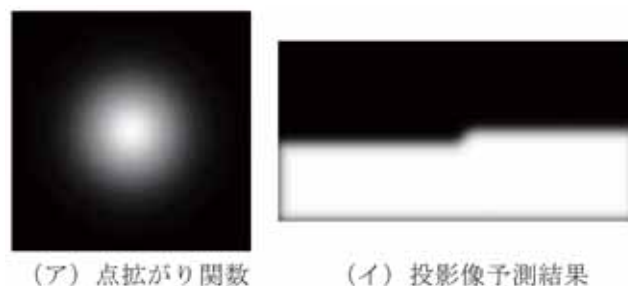


図6 焦点外れを想定した投影像の予測結果

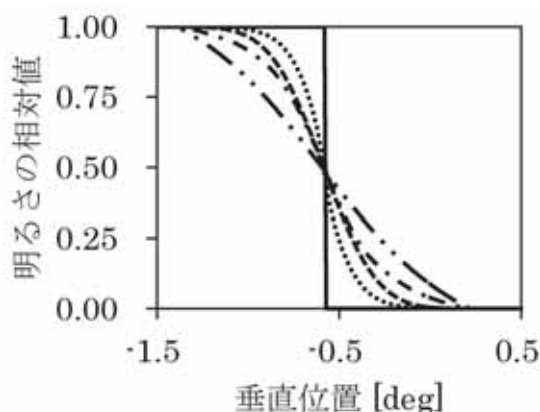


図7 カットオフライン付近の明暗変化

実線：原画像（鮮明な明暗境界）、点線：設計形状、一点鎖線：成形品1、二点鎖線：成形品2、破線：焦点外れ

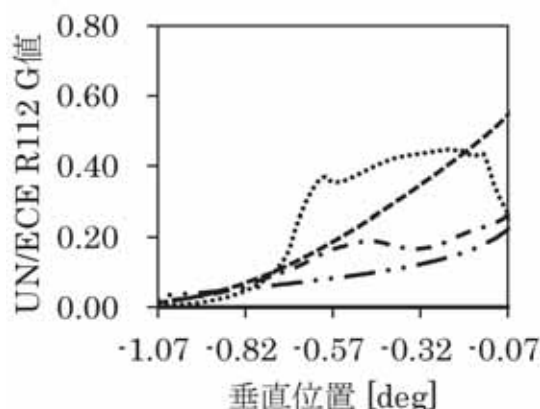


図8 G値の解析結果

実線：原画像（鮮明な明暗境界）、点線：設計形状、一点鎖線：成形品1、二点鎖線：成形品2、破線：焦点外れ