

自由曲線フレネルを用いたLED配光制御素子の開発

Development of Lighting Optics for Light-Emitting Diodes Using a Freeform Fresnel Lens

小林 大介*
Daisuke KOBAYASHI

橋本 雅文*
Masafumi HASHIMOTO

要旨

スマートフォン等に搭載されるカメラ用フラッシュには、近年は主にLED光源が用いられるようになってきている。一方で搭載されるカメラは高画素化が進み、それに伴って撮像素子の画素サイズは次第に小さくなってきている。これによる単位画素当たりの受光光量の減少から、よりの確に撮影範囲を明るく照らすフラッシュの要望が強まっている。この要望を満足するためには、中心照度値を高く、かつ照度値分布は矩形にする必要がある。

我々は配光分布と効率に加え、金型加工や成形し易さといった生産性も加味して幾つかのタイプ比較を行い、上記要望を満たすため、新たに輪帯の稜線が自由曲線を描くように構成された『自由曲線フレネル形状』を採用したレンズを設計、試作した。

設計に際してまず、LEDからレンズまでの距離をレンズの厚さも加味して最適な値に設定した。レンズの縦横寸法は採用したLEDパッケージの外形寸法と一致させ、これらをサイズの制約とした。設計の結果、レンズの中心付近の輪帯は中心照度値に、外側の輪帯は配光分布に大きく寄与することが分かった。それによりレンズ形状は中心付近の輪帯が光軸対称の円に近く、中帯から周辺にかけての輪帯が矩形に近い自由曲線となった。光軸方向断面において各輪帯の光軸からの傾き角を内側 θ 、外側 ϕ とした場合、各輪帯の角度 θ は、その一つ内側の輪帯からの光束を遮らないよう、周辺の輪帯程大きくなり、逆に角度 ϕ は周辺の輪帯程小さくなった。また同一輪帯内での角度 ϕ はレンズ対角方向で最も大きく、レンズ上下方向で最も小さい値となった。これらの構成で所望の配光と明るさの特性を得ることが出来た。また、リフロー工程に耐え得る熱耐性を持つ材料を採用し、LEDとレンズの別組立てを廃止して工程での不良率低減による量産性向上にも貢献出来るレンズとした。試作したレンズでは、設計予測に対し中心照度値の誤差10%、配光分布の誤差2%とほぼ設計に近い特性を実現出来た。

本レンズによって、高画素カメラに最適なフラッシュを搭載した、より薄型のスマートフォンや携帯電話の提供が可能になると考えている。

Abstract

Today, LEDs are the main light source for camera flashes in such devices as smartphones. As image sensor pixels grow smaller with technical advances, camera resolutions increase, and each pixel requires more light than before. Thus the demand for brighter camera flashes that can illuminate the image area more precisely. Meeting this demand requires high center illuminance and a rectangular-like light distribution. This became our objective.

We compared lenses' light distributions, light utilization efficiency, molding die workability, and ease of lens molding, and we adopted a freeform Fresnel lens with rectangular-like freeform curve ridges in its circle zones. We set the optimum LED/lens distance, factoring in lens thickness. Lens dimensions were made to fit the LED package we had adopted. We found that the central region of the lens mainly affects center illuminance, while the outer region mainly affects light distribution, so the central ridges of the circle zones had circle-like forms, and the outer ridges had rectangular-like freeforms. We defined " θ " as the inside angle between the light axis and each annular slope and " ϕ " as the outside angle. The θ of each circle zone increases gradually, so as not to screen light from the inner circle zone, and, conversely, the ϕ decreases gradually. We set the height of each circle zone as a constant. The angles ϕ in the same circle zone had their maximum values in the diagonal directions of the lens and minimum values in the non-diagonal directions. The resultant lens had good illumination and light distribution. We also used material that would be heat resistant in a reflow process, and abolished the separate assembly of the LED and lens, resulting in higher productivity.

Our prototype showed about 10% error in center illuminance, and about 2% error in light distribution, close to our design values. The new camera flash lens is compact, easy to mass produce, and has the desired illuminance and light distribution, making possible thinner smartphones with high resolution cameras.

* 開発統括本部 第3技術開発センター

1 はじめに

近年、低消費電力な光源としてLED (Light Emitting Diode) を用いた照明の普及が急速に進んでいる。家庭や公共の場、車など、いろいろな場所でLED照明を目にするようになった。多くの場合、それらの照明ではLEDの光をそのままの状態か、もしくは簡易的な砲弾型と呼ばれるレンズを付属させた状態で用いている。一方で、LEDからの光をより効率的に照明に用いるために、所望の範囲を明るく照らすための最適なレンズを用いたいという要望も増えている。

スマートフォンやタブレット等に搭載されるカメラ用フラッシュでもカメラの高画素化と共にこの要求が強くなっており、ハイスペックな機種ではレンズを使用したものが多くなっている。ここでは、『適切な照明範囲』を『明るく照らす』ニーズをコンパクトな構成で達成する事が求められ、その要望を満たすレンズを如何に達成するかが重要となる。そこで我々は光学設計の強みを活かした小型なカメラフラッシュ用レンズの開発をスタートした。



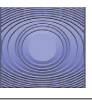
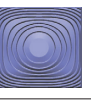
2 タイプ選定

LED照明に用いられるレンズとしてドームレンズやフレネルレンズがある。ドームレンズは配光を所望のものにしようとするともレンズの厚みが増し易く、サイズの制約がある場合は好ましくない。一方フレネルレンズは小型化に有利であるが、単純な軸対称構造のフレネルレンズでは、円形以外の任意の領域を照明する配光分布とする事が困難である。我々はこれらの課題を解決すべく新しいタイプのレンズ形状を検討した。

例えばスマートフォンに搭載されるLEDフラッシュ用のレンズにおいては、撮影範囲に応じた矩形の配光分布が求められる。そこで最初にフレネルレンズの輪帯を上下左右の領域に分割して、画面の縦方向と横方向とで異なる屈折パワーを与える方式で矩形に近い配光を実現した。しかしこの方式では、製造の際に用いる金型構造が複雑化してしまい、また成形の際に輪帯の境界部分で形状に不具合が生じ易いという課題もあった。そこで我々は輪帯を分割しない方法を検討した。まず配光分布が上下左右で非対称になるレンズ形状として輪帯が楕円のフレネルレンズを試みたところ、製造容易でかつ配光制御可能な光学素子が得られたが、照射範囲の対角方向の配光を制御する観点で改善の余地があった。これらの経緯を経て、我々は最終的に輪帯の稜線が長方形に近い自由曲線を描くように構成されたレンズ形状を採用した。

Table 1 はこれまでのレンズ製造の観点や配光制御の観点だけでなく、光の利用効率の観点も加えて、様々なレンズタイプの特徴をまとめたものである。これらの観点で比較すると、我々の採用した自由曲線フレネルレンズが最も望ましいタイプとなっている。

Table 1 Characteristics of lens types. Based on this comparison, we selected a freeform Fresnel lens.

	Lens type			
	Dome lens	Segmented Fresnel lens	Elliptical Fresnel lens	Freeform Fresnel lens
A: Excellent B: Good C: Fair D: Poor				
Output light flux	B	C	B	B
Simplicity of metal die	A	C	B	B
Mold quality	B	C	B	B
Size	D	B	B	B
Light distribution control	D	B	C	A
Thermal tolerance	D	B	B	B

更には、リフロー工程に耐えうる材料の選択で熱耐性の向上を図っている。この目的は、レンズをLEDに直接実装して従来より行われているLEDとレンズの別組立てを廃止し、レンズ位置不良による不良率を改善する事である。

3 パラメーター設計

フラッシュに求められる仕様は主に (1) 中心照度値、(2) 配光分布、(3) サイズである。一般的にLEDのような拡散面光源の近くにレンズを配置すると、様々な方向から光が入射するために配光の制御は困難となる。逆に配光の制御をし易くするためにレンズを光源から離して設置すると、光学系自体を大きくする必要が生じて、無理に小型化すると照明としての効率が低下する。このように小型化と効率、配光制御の間にはトレードオフの関係があり、これらの最適なバランス解を得るのが小型照明光学系の重要な課題である。

望ましいスペックはカメラの撮像素子によって異なるが、今回我々は、(1) 中心照度値はフラッシュモジュールから1m先の照射面で300lx以上、(2) 配光分布は、照射面(撮影領域)のアスペクト比が4:3の時、中心照度値に対する周辺照度値が上下端中央、左右端中央でそれぞれ30%以上、四隅で15%以上、を目標値とした。Fig. 1は、(1)と(2)の仕様を図に示したものである。

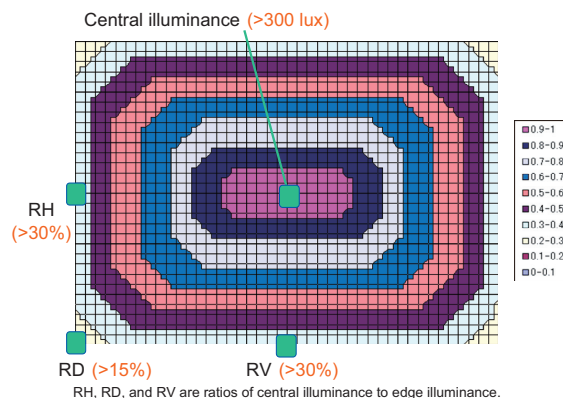


Fig. 1 Target illuminance at 1 m from the lens. Center illuminance should be over 200 lux, the ratio of horizontal and vertical illuminance to central illuminance should be over 30%, and the ratio of diagonal illuminance to central illuminance should be over 15%.

設計で中心照度値を上げる方法として、LEDからの光をコリメート光のように照射する方法がある。しかしその場合、照射面に当たる光が多くなり、照明として効率は高くなるが、照度分布が周辺に向かって急激に下がる形になり易い点が問題となる。我々は、望ましい照度分布を得るために、中心の照度値と照射面周辺の照度を最適にバランスする光学設計を以下の手順で行った。

まず光の利用効率と配光制御の行い易さを考慮してLEDとレンズとの最適な距離を明らかにする。その上でサイズを満たすようにフレネルレンズの厚さを設定する。これらを設定した上で最終的に中心照度値と配光分布の仕様を満足するようフレネルレンズの輪帯形状を設計した。

Fig. 2 (a) は今回設計したレンズの光軸に沿った方向の断面概念図である。また Fig. 2 (b) は輪帯断面概念図である。ここで示す輪帯断面で稜線を挟んで斜面をなす内側、外側それぞれの面の光軸方向に対する傾き角 θ 、 ϕ を、輪帯形状の設計を行う際のパラメーターとした。そしてレンズを正面から見た際の上下、左右、対角、それぞれの方向で θ 、 ϕ を設定した。上下と対角、左右と対角の各方向の間の輪帯は、それぞれの方向で設定した θ と ϕ をスプライン補間で繋ぐ形状とした。光源の大きさに対してレンズが比較的近距离にあり様々な角度の光が輪帯に入射するため、直線的な単純形状でも、斜面部を曲線とした場合と特性が大きく変わらない結果となった。そこで、輪帯の断面における斜面の形状を、傾き θ 、 ϕ を有する直線で構成した。

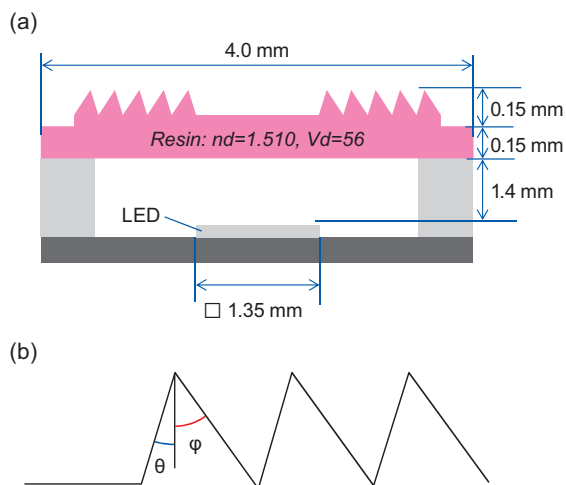


Fig. 2 Cross section of the lens: (a) Schematic side view of the lens and LED with important lens dimensions. (b) Schematic of the Fresnel portion. We defined " θ " and " ϕ " as the inside and outside angles between the light axis and each annular slope respectively.

4 設計結果

今回LED光源として、外形W4.2mm×L4.0mmを想定した。LEDチップのサイズは1.35mm角、発光光量は320lmである。光源の配光特性はシミュレーション上重要であり、今回はニアフィールドでの配光分布を測定

し、それをシミュレーションソフトに取り込み設計に反映した。

LEDとレンズの距離については、トレードオフの関係である効率と配光が最適となる位置を数式計算によって割り出した。今回の設計では、その最適距離は1.4mmとなった。レンズ自体の厚みについても、厚いほど配光制御が容易になるが、量産性が悪くなる懸念もあるため、バランスの取れる厚みとして0.3mmを選択した。因みにレンズの横と縦のサイズは、LEDパッケージの外形サイズと同じW4.2mm×L4.0mmとした。

検討の結果、照射面中心の照度値と周辺の配光を両立させるには、レンズの中央部の輪帯で照射面中央に照度値のピークをもつ分布を作り、周辺部の輪帯で照射面周辺部の矩形配光を作ることが効率的と分かった。そのために、中心部の輪帯を軸対象に近い形状にし、周辺部の輪帯にいくほどレンズの正面から見て矩形に近くなる形状とした。具体的には、レンズの正面から見て上下、左右方向の輪帯では、中心の輪帯の角度 ϕ が一番大きく、周辺の輪帯にいくほど ϕ が小さくなり、左右方向で $\phi=61\sim34^\circ$ 、上下方向で $\phi=61\sim25^\circ$ とした。対角方向はそれに合わせて矩形分布ができるように、 $\phi=61\sim31^\circ$ で調整した。一方で角度 θ は、ある輪帯斜面から射出する光束を他の輪帯で遮らない角度が適切で、照射面とレンズの距離から換算して中心の輪帯で 16° 、周辺の輪帯ほど角度を大きくし、最周辺では 23° が最適であった。

また設計の際にフレネル形状面をレンズの照射面側に設けたが、これにより各輪帯への光線進入角度が浅くなり過ぎる事を防ぎ、フレネル反射による光量損失の低減を図っている。更にはLED光源が有限の大きさを持つため、レンズ中心部の輪帯を凸レンズ状にしても、照射面に到達する光量と照射面の外に向かう光量の比率は大きく変わらなかった。金型の加工性を考慮し、レンズ中心部の輪帯は平面形状を採用した。これらの結果得たレンズ形状を正面から見た際の図を Fig. 3 に示す。

Fig. 4 は上記設計の特性シミュレーション結果である。1m先の照射面で中心照度値345lx、周辺の照度値は中心照度値に対して上下端中央35%、左右端中央34%、四隅16%のほぼ矩形といえる配光分布となり、初期設定した目標仕様を達成した。

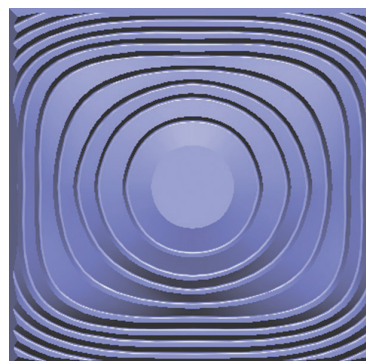


Fig. 3 Design shape: front view.

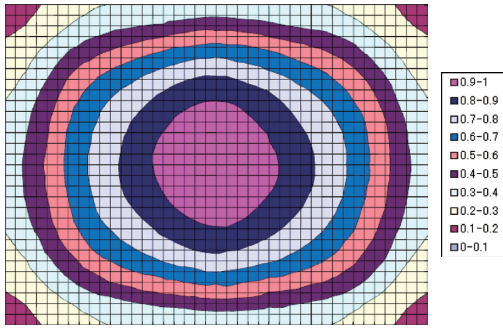


Fig. 4 Contour map of simulated illuminance: simulated light distribution of the designed lens.

5 試作結果

我々は、実際にこのレンズの試作を行いその性能を評価した。試作品の写真をFig. 5に示す。またFig. 6は試作したレンズの照射面左右方向の形状測定値と設計値の比較である。ほぼ設計に近い形状が達成できている。ここでは照射面の左右方向の比較結果を示したが、上下、対角の各方向においても同様に精度良く成形できている事が確認された。このレンズを用いて1m先の照度値を測定し、シミュレーション結果と比較したところ、中心照度値は誤差10%以下、中心に対する周辺照度値はそれぞれ誤差2%以下で一致した。

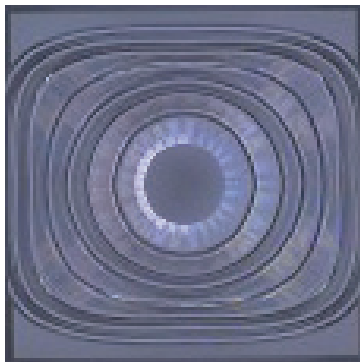


Fig. 5 Test product lens shape: front view.

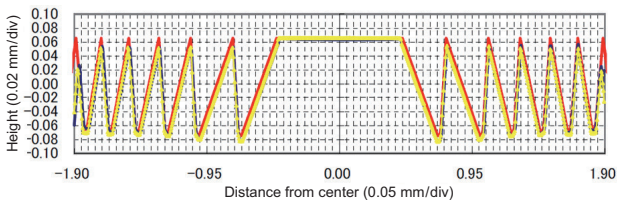


Fig. 6 Horizontal lens profile comparison: lens design (red), measurement of the molded lens (blue), and measurement of the molding die (yellow).

6 おわりに

我々は、従来のドームレンズやフレネルレンズの課題を解決し、生産性を確保しながら所望の配光特性を実現する自由曲線フレネルレンズを開発した。また光源とレ

ンズの最適距離の関係や、輪帯毎の役割の違いなどの設計技術を新たに獲得できた。単純な形状でありながら配光特性を制御し易い本形状の開発によって、LED照明の様々なニーズに合った配光特性のレンズを提供できるものと考えている。特に、今回開発したレンズにはリフロー耐性も付与しているため、LED光源とレンズの位置関係を固定した状態で一体的に提供できる。そのため、スマートフォンやタブレット等の携帯端末に搭載されるLEDフラッシュ用レンズとして用いた場合は、光源とレンズの位置ずれによる不良率の改善につながり、製造コストの抑制が可能となる。

我々は、今回の開発により高機能かつ薄型の携帯端末が手ごろな価格で手に入るというユーザーメリットが提供可能になると考えている。