照明器具光学系の 3次元光学シミュレーションシステム

正会員 村上 忠史* 正会員 阪口 敏彦* 専門会員 大塚 忠弘*

Development of Three Dimensional Photometric Simulation System for Luminaires

Tadashi Murakami (Member), Toshihiko Sakaguchi (Member),
Tadahiro Otsuka (Fellow Member)

(Lighting Products Research & Development Laboratory, Matsushita Electric Works, Ltd.)

ABSTRACT

Recently, computer simulations of photometric performance of luminaires have improved, resulting in more suitable lighting. However, due to some approximations in the modeling of optical systems, the simulations have a restricted application, their applications are limited to quadric or rational surfaces.

We have solved these problems by developing a new computer simulation system for three dimensional optical systems. This paper presents the method of simulation and validates it.

To simulate an optical system which has an asymmetric shape, we have developed a ray-tracing method for parametric surfaces. Every geometric shape of an optical system can be transformed into parametric surfaces and can be analyzed by this system. It is efficient to express an optical system as parametric surfaces, in the aspect of computation time and accuracy and data input time for simulation. This method can analyze optical systems which are intended to be non-quadric or which must be non-quadric for manufacturing reasons. To verify the validity of this method, we made some experiments. Luminous distribution by simulation agrees with the result of measurement.

1. はじめに

近年、快適性への関心が高まり、照明分野においても快適な照明状態を実現するための各種照明手法が検討・考案されている。それに伴い照明状態の実現手段である照明器具の機能・特性への要求が高度化・複雑化している。

このようなニーズに対応するための照明器具光学系は、従来に比べて精密な光学制御機能を目標とするので、複雑な光学要素で構成されることが多い。一方、光学系設計を支援する反射板 CAD システムや配光シミュレーションシステムについては従来から多数の報告があるが、取り扱える光学形状に制限があり、上記のような光学系について汎用的に適用できるものはなかった^{1),2),3)}。

本論文ではこのような問題を克服するために筆者らが開発した「自由曲面**まで考慮できる 3次元光学シミュレーションシステム」について、その解析手法及び適用事例を中心に報告する。

2. 自由曲面の解析の必要性

一般に照明器具光学系は平面、球面、回転放物面、回転楕円面等の基本形状の組み合わせで設計されることが多い。これは製造面での制約および設計面での考慮しやすさという理由によっている。しかしながら近年のプレス成型技術の発展に伴い、かなり複雑な形状の光学系も精度よく製造できるようになり、より高度な光学特性を得るために上記のような曲面以外の形状を持つ光学系も増えている。図 1 はその一例で、断面 AOA' と BOB' が異なる反射光の広がりを与える形状であり、その間を滑らかな面で構成することによって楕円形の照射パターンを狙ったものである。また、光学設計思想そのものは初等幾何曲面であっても、目標とする光学特性を得るためには自由曲面の検討が必要なものもある。図 2 はその一例である。この光学系は目的の配光を得るために、複数の回転放物面のファセットから構成されている。

このような思想の設計による光学系は光束制御の自由度が極めて高く、各種の配光の照明器具が実現できるので、近年では様々な光学系が提案・実用化されている。しかしながらこのような精密な配光を目的とする器具においては、「基本設計配光と実際の配光との差」が無視できない場合が多い。この差の原因は、製造上の要求による基本設計からの偏差や製造精度の問題などがある。例えば図 2 の例では、ファセット間のつなぎ面の影響や、各ファ

* 松下電工株式会社 照明開発研究所

本論文の一部は平成 2 および 3 年の照明学会全国大会で発表したものである。

** 平面、球面、回転放物面・楕円面等の初等関数で記述できる曲面を初等幾何曲面という。これらの曲面とさらに初等関数で記述できない曲面とを総称して自由曲面という。厳密な数学用語ではないが、CAD 分野等では一般的によく用いられる。

図1 2断面をスムーズにつないだ自由曲面

図2 放物面ファセットの組み合わせによる光学系

セット面の面精度などがどの程度であれば目標の配光を満足できるかを事前に評価できることは非常に重要である。

3. 従来の手法

照明器具光学系設計におけるコンピュータ利用は、まず軸対称あるいはシリンダカルな形状について、その対称性に着目し断面上での解析・設計が行われてきた。しかしながら、現実においては理想的な対称形状ではないものが多く、解析精度の面で問題があった。これに対し近年、上記の問題を克服するためや光学性能へのニーズの高度化などにも対応するため、3次元的な解析・設計が検討されるようになり、コンピュータパワーの増大に伴い実用的なシステムが開発されるようになってきた。

ここで、従来から一般に報告されている3次元光学解析システムの概要について述べる。

3.1 初等幾何曲面による3次元解析

光学系の形状を、下記パラメータにより記述する手法である。

- (1) 断面形状 (直線・円・楕円・放物線等の初等関数で記述)
- (2) 断面のスweep方法 ((1)の断面をある軸を中心に回転あるいは、直線方向にシリンダカルにスweep)
- (3) 座標系情報 ((1)の断面記述をした局所座標系と光学系の基本座標系との位置関係)
- (4) 境界条件 ((1)~(3)で定義された曲面の境界条件)

この手法の場合、上記のように光学形状が初等関数と数値パラメータで表される。したがって、レイトレーシングは数学的には比較的容易である。しかしながらレイトレーシングの交点計算アルゴリズムは基本断面の方程式ごとに異なり、プログラムは複雑

化する。さらに、光学形状の入力作業においては上記のような多様な数学パラメータを入力せねばならないので、複雑な形状入力のためには極めて時間を要する。また、自由曲面を基本曲面の集まりで近似することは理論上は可能だが、実質的には極めて困難である。

3.2 汎用3次元CADシステムを利用した解析手法

3次元形状を取り扱える光学解析手法として、汎用3次元CADシステムを利用したものも提案されている⁴⁾⁵⁾。この手法においては入力された光学形状を多面体に近似することによって、レイトレーシングアルゴリズムを簡易化し高速化を図っている。汎用3次元CADシステムを形状入力手段としたことで、入力時間は大幅に削減することができる。しかしながら、この手法では自由曲面の解析には問題がある。すなわち多面体への近似分割数を多くすれば、理論的には自由曲面も解析可能ではあるが、計算時間が極めて長くなってしまふのである。したがってこのシステムは、蛍光灯や拡散形ランプを用いた光学系や、拡散反射要素を含む光学系の解析には実用的な精度を持つが、ここで問題としているような精密な配光制御を目的とした光学系を解析するには実用的でない。

4. 今回のシミュレーションシステムの概要と解析理論

4.1 光学系の表現方法

今回のシステムでは反射板、プリズム、レンズ、ランプ等の光学要素形状を自由曲面で定義することとした。自由曲面の定義方法については、各種方法が提案されている⁶⁾。その中で今回は、金型製作等自動NC加工分野で多く利用されている「高次多項式によるパラメトリック曲面」の方法に着目した。この方法は、照明器具の光学解析に応用された例はないが、金型加工データの作成や流体解析における形状定義の方法としては、一般的である。本手法の特徴は、平面、初等幾何曲面から自由曲面にいたるまで、あらゆる形状が(1)式の形で現される事になるので、光路追跡における交点計算等が1つのアルゴリズムに集約できる。

$$\begin{aligned} x &= F_x(u, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{i,j} \times u^{(i-1)} \times v^{(j-1)} \\ y &= F_y(u, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Y_{i,j} \times u^{(i-1)} \times v^{(j-1)} \quad \dots\dots\dots(1) \\ z &= F_z(u, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Z_{i,j} \times u^{(i-1)} \times v^{(j-1)} \end{aligned}$$

ここで、

図3 パラメトリック曲面

$X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}$ は曲面を表す高次多項式の係数
 u, v は媒介変数 ($0 \leq u, v \leq 1$)
 n, m は曲面のアイソパラメトリック曲線***の次数

4.2 光学系定義精度の確保

光学解析システムに「高次多項式によるパラメトリック曲面」を用いるには、設計した光学系曲面を精度良く「高次多項式によるパラメトリック曲面」に変換する必要がある。そこで、今回のシステムでは、放物線や、楕円といった光学的に基本となる2次曲線を3次元的に定義し、それを回転あるいは直線方向・曲線方向などにスイープさせることにより「高次多項式によるパラメトリック曲面」を自動的に作成するデータインタフェースシステムを開発した。また、断面としてスプライン曲線も使用可能である。(1)式における多項式次数 n, m は最大15で、これにより、いかなる曲面も1/100(mm)以内の偏差で定義できる。

このデータインタフェースシステムを利用して「高次多項式によるパラメトリック曲面」を定義することによって、従来の3次元光学解析システムに比べ、光学形状入力の所用時間は1/3~1/10になった。

以上の基本的な機能以外にも今回光学シミュレーション汎用CADシステムとして各種機能を付け備えたので、ここに紹介しておく。

- (1) 属性値付加機能****反射率、透過率、屈折率、輝度等の光学要素の属性値を各光学要素ごとに簡単に設定・修正できるようにした。
- (2) 標準部品機能****ランプデータを光学要素と同様に三次元の任意形状で定義し、一元管理を行うようにした。
- (3) 子図面機能****繰り返しのある光学要素の形状定義を容易にした。これにより、ファセットやディンプルのような複数の同一形状の光学要素を一回のデータ入力で済むようになり、データ入力の時間は大幅に短縮される。

またこれらの機能は、間接的には計算時間の短縮等にも効果を発している。

4.3 シミュレーション理論

光路の解析手法は、従来から行われているレイトレーシング手法であり、光学要素と光線の最近傍交点を求め、そこでの垂線・反射方向を求める。今回、自由曲面「高次多項式によるパラメトリック曲面」上で光線のレイトレーシングを行うアルゴリズムを開発したので、次に紹介する。

レイトレーシング手法によって光学解析を行う場合の中心となるのは、光線と光学要素(曲面)との交点計算、及び反射・屈折後の光線方向計算である。

今、データインタフェースによって、光学要素曲面データは前述の(1)式の形でコンピュータ内に登録されている。

一方、光線は半直線と考える事ができ、(2)式で与えられる。

$$\begin{aligned} x &= x_0 + pt \\ y &= y_0 + qt \\ z &= z_0 + rt \end{aligned} \tag{2}$$

*** 2媒介変数表現の曲面において1変数を一定として求められる曲線。曲面をメッシュ状に表示した時の各メッシュを表す曲線。

**** これらは一般的な汎用CADシステムならば具備している機能で、属性値付加機能は、各形状要素に、材質等の離散値や反射率等の数値データを付加できる機能。標準部品機能は、部品の一元管理機能。子図面機能は、同じ部品要素の繰り返し使用を容易にする機能である。

ただし、 p, q, r は方向余弦
 x_0, y_0, z_0 は光線の始点座標
 t は媒介変数 ($t \geq 0$)
したがって、光線と曲面の交点は(1),(2)式を連立させた下記の u, v, t の3元非線形連立方程式を解けば求められる。

$$\begin{aligned} x_0 + pt &= F_x(u, v) \\ y_0 + qt &= F_y(u, v) \\ z_0 + rt &= F_z(u, v) \end{aligned} \tag{3}$$

自由曲面と光線の交点計算手法には、「光線を2平面の交線とみなし、2平面と曲面との交線から求める手法」⁷⁾等も提案されているが、今回は、BRENT法⁸⁾を用いて数値解法で上記方程式を解き交点 $P(x, y, z)$ を求めることとした。今回、この手法を採用した最大の理由は、本手法があらゆる微分可能な曲面について交点が求められる事である。また、微分不可能な曲面については、分割して定義するようにした。

次に法線方向についてであるが、これは、交点 P における曲面の2つの接線のベクトル外積で求めることとした。今、曲面の媒介変数 u, v 方向への接線ベクトルを T_u, T_v とすると、

$$T_u = \left(\frac{\partial(F_x(u, v))}{\partial u}, \frac{\partial(F_y(u, v))}{\partial u}, \frac{\partial(F_z(u, v))}{\partial u} \right) \tag{4}$$

$$T_v = \left(\frac{\partial(F_x(u, v))}{\partial v}, \frac{\partial(F_y(u, v))}{\partial v}, \frac{\partial(F_z(u, v))}{\partial v} \right) \tag{5}$$

であるので、法線方向ベクトル N は下式で求められる。

$$N = T_u \times T_v \quad (\times \text{は外積})$$

さらに交点における各ベクトルを図4のように決めると、反射・屈折方向ベクトルは(6), (7)式によって決定できる。ただし、各ベクトルは大きさ1.0に正規化されているものとする。

$$Rr = R - 2(R \cdot N)N \quad (\cdot \text{は内積}) \tag{6}$$

$$Rt = \cos\theta_2 N + \sin\theta_2 T \tag{7}$$

$$\theta_2 = \text{Arcsin}\left(\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1\right) \tag{8}$$

ここで、

- R : 入射光ベクトル
- T : N 及び R と同じ平面内にある曲面の接線ベクトル
- Rr : 反射光ベクトル
- Rt : 屈折光ベクトル
- θ_1, θ_2 : 曲面の法線に対する入射, 出射角でSnellの法則にて計算される
- n_1, n_2 : 光線の入射, 出射側の媒質の屈折率である。

図4 交点における反射・透過ベクトル

今回、以上のように「高次多項式によるパラメトリック曲面」で定義される自由曲面上での交点計算ロジックを開発した。これ

によって、実質上あらゆる形状の曲面について光学解析が可能になった。また、あらゆる曲面が同一のアルゴリズムで処理され、しかも、計算精度・計算処理速度の面でも従来方法に比べ大幅な改善が見られた。

レイトレーシングによる光度・照度計算手法は他でも報告されているのでここでは詳述しないが⁹⁾、光線を追跡する方向により順・逆の2手法があり、その概念図を図5に示しておく。なお同図では照度計算手法を示したが、いずれの手法でも光度（配光）計算も可能である。これらの手法はシステム利用者が選択できるようにになっている。一般に順方向レイトレーシング手法は全断面配光や器具効率を求めるのに適し、逆方向レイトレーシング手法

は部分的な配光を詳細に解析する目的に適している。また、逆方向レイトレーシング手法は、器具の見かけの輝度分布を解析する場合にも有効である¹⁰⁾。

5. 理論値との比較結果

シミュレーションの精度確認のため、解析的に解が求まる光学系で確認を行なった。光学系に自由曲面等の複雑形状を含む場合、光度・照度等を解析的に求めることは一般的には不可能である。ここでは、図6に示すような輝度均一の自由曲面光源による照度分布についてシミュレーション値との比較を行なった。シミュレーションの条件は光線本数10000本で、計算時間は約10秒であった

図5 計算手法概説図

図6 理論値計算に用いた自由曲面光源

(マシンは富士通M380)。一方、解析解についてはこのように単純な光学系でも照度分布を解析的には求められないので、先の図5(b)に示したような手法で、3次元CADの投影機能を用いて光源を単位球面に投影しさらに水平面に投影した面積を求め、立体角投射法によって照度を計算し、これを理論値とした。

シミュレーションとの比較結果を図7に示す。離散的な光線で計算する誤差のため、最大1.0(%)程度の違いはあるが、極めて高い精度で照度分布がシミュレーションされている事が分る。

なお、実測値との比較および従来手法との比較は次項で行なっている。

図7 理論値との比較結果

(図6に示した光源による直射照度分布である)

6. 実測値との比較結果

6.1 検討に用いた光学系

検討に用いた光学系形状を図8に示す。同図に示すようにこの光学系は、 $S_0, S_1, S_2, \dots, S_{12}, S_{11}', S_{12}', \dots, S_{12}'$ の25面の帯状ファセット反射面及び、前後の逆U字形の遮光板 N_1, N_2 から構成される。光学系は、同図のA-A'断面に対して左右対称である。各ファセット面 $S_0 \sim S_{12}$ はランプ中心を焦点とし、その反射光が図9の OP_0 からの角度 $\beta_0 \sim \beta_{12}$ に対応する直線上の点 $P_0, P_1, \dots, P_k, \dots, P_{12}$ に到達するように回転軸を傾けて設定された回転放物面である。また、面 $S_0 \sim S_{12}$ の境界条件は、前記遮光板 N_1, N_2 と、ランプ軸を含む2平面である。この2平面は図10に示すように角度 θ_k をなしている。以上の各パラメタを表1に示す。

ランプは片口金直管型の180W 高圧ナトリウムランプ(NH180 L)を使用し、遮光板 N_2 側に口金を向け水平点灯している。

6.2 解析モデル

シミュレーションにおいては、光源を直径8.5(mm)、長さ75(mm)の均一な Lambert 放射面として扱っている。また、反射板の反射率を80(%)の正反射面、遮光板の反射率は0(%)とし、器具開口部のガラスは厚さ5(mm)で屈折率1.52の透過系要素としてモデリングした。

各ファセット面はできるだけ段差がが少なくなるように焦点距離を変化させて設計されているが、表1に示すように焦点距離が異なるのでファセット面間に段差がある(最大段差は S_{11} と S_{12} の間のソケット側で2.65(mm))。しかしながら実際の反射板製造時

図8 検証実験用器具

図9 各反射面の光軸方向

図10 反射面の境界条件

反射面	焦点距離 (mm)	反射方向 β_1 (deg.)	境界条件 Θ_1 (deg.)
S ₀	100.0	0	8.20
S ₁	100.2	5	8.20
S ₂	100.7	10	8.20
S ₃	101.6	15	8.45
S ₄	102.8	20	8.45
S ₅	104.5	25	8.74
S ₆	106.5	30	9.03
S ₇	109.1	35	9.10
S ₈	112.0	40	9.36
S ₉	115.6	45	9.90
S ₁₀	119.7	50	10.57
S ₁₁	124.5	55	11.26
S ₁₂	131.0	60	10.06

表1 各反射面の形状パラメータ

には、基本設計のような急峻な段差は成形できず、成形された反射板は基本設計面と完全には同じ形にはならない。そこでシミュレーションにおいては、各ファセット面が設計どおりの理想的放物面である場合と、製造された反射板を3次元形状測定機で測定した形状を自由曲面に変換した場合との2種類について解析した。なお、実際に測定された反射板形状は、各ファセットのつなぎ部分で基本設計曲面に対して最大0.2~0.88(mm)の偏差があった。

また、解析手法は逆方向レイトレーシング手法を用い、全光線本数は16000本、という条件で1方向の光度値計算の所要CPU時間は約2分であった(マシンは富士通M380)。

6.3 実測とシミュレーションの比較

実測とシミュレーションの比較結果を図11に示す。同図から、基本設計の光学系の場合に比べ、実際の反射板では同図の断面の配光に凹凸が現れており、この原因はファセットのつなぎ部分の影響であることがわかった。今回はシミュレーションの検証のために、実際に製造された反射板形状を測定し解析したが、基本設計形状に対する形状変形がどの程度ならば目標とする光学特性を満足するかという検討が、このシミュレーションシステムを用いてできることがわかる。実験・研究用の光学系のようにNC研削

図11 $\alpha=20$ (deg.)断面配光の計算値とシミュレーション値

や研磨で光学系を作成をする場合には問題にはならないが、プレス成形等の大量生産方法で製造し、かつ高度な光学機能を得ることを目的とする光学系においては、このような検討ができることは非常に重要である。

7. 結論

以上の結果より、3次元の光学シミュレーションシステムとして、「高次多項式によるパラメトリック曲面」でデータを定義することは、計算精度面・計算処理時間面・データ入力時間面において極めて有効である。特に、設計意図あるいは製造要因で自由曲面を含む光学系については、従来の手法ではできなかった解析が可能になり、近年開発が盛んな高機能な配光制御光学系開発にこの手法が有用である。

また、今回は自由曲面の反射板にて検証を行ったが、先に述べたようにランプの発光部も自由曲面で取り扱えるので、白熱灯のフィラメント形状による照射面のムラの解析や、HIDランプのアーキ形状が理想的な円筒形でないために配光に与える影響などの解析も可能である^{11),12)}。

以上より、今回のシミュレーション手法は、従来より高機能な照明器具光学系の短期間開発に貢献できるものと考える。

参考文献

- 1) 松下, 堀, 高橋: HID ランプ反射がきのCAD, 照学誌, 63-4 PP.20-24 (昭54)
- 2) 阪口, 大八木, 田淵: HID ランプ投光器CADにおける発光輝度分布の問題, 照学誌63-4 PP.29-32 (昭54)
- 3) 明道, 狩野, 山ノ下: HID ランプ用照明器具鏡面反射板のCADシステム, 照学誌67-2 PP.53-59 (昭58)
- 4) Lighting Technologies, inc.: FiELD-Finite Element Luminaire Design, Technical Prospectus and Sample Luminaire Analysis, (1988)
- 5) Murray, J. F.: The Automated Measurement of BRDFs and Their Application to Luminaire Modeling, J. of IES winter, PP.87-99(1990)
- 6) 山口富士夫: コンピュータディスプレイによる形状処理工学, 日刊工業新聞社 (昭57) など
- 7) Kajiya: Highly Realistic Visual Simulation of Outdoor Scenes Under Various Atmospheric Conditions, Proceeding of CG International '90 (1990)
- 8) Marquardt, W. D.: An Algorithm for Least Squares Estimation of Non-linear Parameters, J. Appl. Math. 11 PP.431-441(1963)
- 9) 佐藤光治: レンズ光学系の配光予測とその応用, 照学全大 P.55 (昭57)
- 10) 佐藤光治, 松下信夫: 高効率・高拡散プリズムパネルの開発とその応用, 照学誌73-2 PP.16-20 (平1)
- 11) 村上忠史, 阪口敏彦: 自由曲面まで拡張した3次元光学解析(2), 照学全大 P.70 (平2)
- 12) 村上忠史, 阪口敏彦: HID ランプのアーキ形状を考慮した光学解析, 照学全大 P.108 (平3)

(受付1992年3月10日)

著者紹介はP52