

---

# スキャナ照明系のシミュレーション技術

## A Simulation Technique of Scanner Illuminating System

多田 武\*  
Takeshi TADA

野本 光正\*  
Mitsumasa NOMOTO

---

### 要 旨

仮想環境でのスキャナ設計を目指し、スキャナ照明系の3次元照度分布を計算するシミュレーション技術を光線追跡法とモンテカルロ法を用いて開発した。特に原稿照明ランプは発光原理に基づいたランプ内の多重反射計算を考慮したモデル化を行うことで物理現象に近いシミュレーションを実現した。さらにCCDカメラを用いた動的な3次元照度分布計測と本手法による結果をいくつかの条件で比較したところ、照度分布の形状が一致することを確認した。

### ABSTRACT

With the objective of virtual environmental design for scanner, a new simulation technique utilizing ray trace method and Monte Carlo method was developed to calculate three dimensional illuminated distribution of scanner illuminating system. In the technique, the modeling of document-illuminating lamp could simulate the physical phenomenon mostly, by considering the multiple-reflections from inner wall of the lamp based on light-emitting principle. Furthermore, it was clarified that the shape of illuminated distribution calculated by the developed technique agreed with that obtained by three dimensional dynamic illumination measurement using CCD camera under some conditions.

---

\* 研究開発本部 生産技術研究所  
Manufacturing Technology R&D Center, Research and Development Group

## 1. 背景・目的

シミュレーション技術の発展、コンピュータの高速化によって仮想環境下での機器設計が現実的になってきている。スキャナのような光学機器では光学系設計や収差解析に光線追跡法を用いたシミュレーションが広く使われている。一方、照明系設計も光線追跡法を応用したシミュレーションシステムが開発されている。しかし、シミュレーション結果を実際の照度分布に近づけるためには照明光学系の構成や物理現象に応じたモデル化が必要であり、簡単には実現できない。特に光源のモデルはその形状や発光原理を考慮したモデル化が必要となる。

そこでスキャナで用いられる直管型の照明ランプにおいて管内面での発光および多重反射を考慮してランプのモデル化を行った。さらに光線追跡法とモンテカルロ法を用いて照明光学系内の光線の挙動を計算し、スキャナの3次元照度分布を得るシミュレーションシステムを開発した。また、動的な3次元照度分布計測法を開発し、実際の照度分布とシミュレーション結果との比較を行った。

## 2. 技術

### 2-1 全体構成

スキャナ照明光学系における照度分布は照明ランプを物体面とし、原稿面を撮像面としたときに、途中の光学系を通過した後の撮像面における光強度の分布を求めることに他ならない。そこで、照明ランプから方向と強度を持った多数の光線を発射し、それらが途中の光学系を通過して、最終的に原稿面に到達するモデルを考える。このとき原稿面上を離散的なメッシュで分割し、メッシュ毎に光線の光強度を積分して全体の分布を求める。本シミュレーションシステムはこのモデルを2つに分けて考えた。(1)照明ランプからの発光分布を計算する照明ランプモデル。(2)光線の伝播計算を行い、照度分布を計算する照明光学系モデル。照明ランプモデルはランプの発光を発光原理に基づいてモデル化したものである。照明光学系モデルはリフレクタ、コンタクトガラスなどの光学部材を配置し、それらによって反射・屈折する光線の光線追跡を行い、原稿面上での光強度を積分して照度分布を計算

するモデルである。

### 2-2 照明ランプモデル

スキャナにはハロゲンランプ、キセノンランプ、蛍光管などの発光ランプが用いられる。ハロゲンランプは管中心のフィラメントが発光する線発光光源である。一方、Fig.1に示されるようなキセノンランプや蛍光管は管内面の電極から飛び出した電子が管内の原子に当たって励起し、励起原子が基底準位に戻るときに放出された紫外線が管内壁に塗布されている蛍光体に当たって可視光線を発光する面発光光源である。

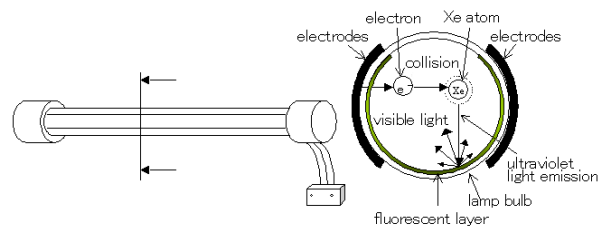


Fig.1 Surface type of lamp radiation.

このときランプ管内面の1点に注目し、そこからの発光を考える。Fig.2に示されるように、光源面と垂直な方向への放射強度を $I_0$ とすると、面法線と $\phi$ の角度をなす方向への放射強度 $I$ は以下のようなランバートのコサイン則で表される。

$$I = I_0 \cos \phi \quad (1)$$

これは光源が完全拡散面であるとした場合であり、一般的によく用いられる分布であるが、全ての場合に成り立つわけではなく、光源によって配光分布特性を考慮すべきである。

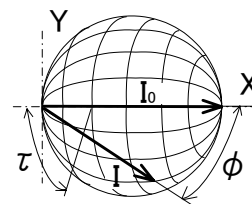


Fig.2 Radiant intensity of light source.

Fig.2のように $\phi$ および $\tau$ によって分割された各領域の単位面積毎に等しい本数の光線を発射させることで、より少ない本数で正確な光源の配光分布が得られる。これは等方的な発光を考慮する上で重要であり、単に角度分割で光線を発射

させると結果の発光分布の形が崩れてしまう。このとき各単位面積内での光線はランダムな方向に発射する。この手法はモンテカルロ法として知られており、この手法を用いることで照明ランプからの発光分布に不要な規則性が出ることを防止することができる。

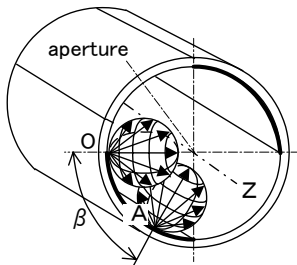


Fig.3 Radiation from inner wall of lamp.

照明ランプは内壁面に沿ってFig.2のような点発光源が無数に並んでいるFig.3のようなモデルを考える。A点の発光点座標はO点を原点としたとき、Z軸まわりに $\beta$ だけ回転したものであるから、回転行列を  $R_z(\beta)$  とし、元の発光方向ベクトルを  $U(x_u, y_u, z_u)$  とすれば回転後の方向ベクトル  $W(x_w, y_w, z_w)$  は以下のように求められる。

$$W = URz \quad (2)$$

これによって、各点発光源での配光方向ベクトルが計算できる。

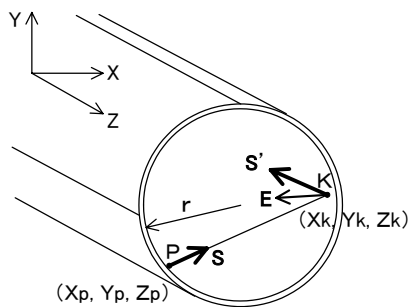


Fig.4 Reflection from inner wall of lamp.

照明ランプ内部の多重反射としてはFig.4のようなモデルを考える。発光点  $P(x_p, y_p, z_p)$  から  $S(x_s, y_s, z_s)$  方向に発射した光線は  $K(x_k, y_k, z_k)$  に当たり、反射する。このとき  $PK=m$  とすると以下の式が成り立つ。

$$x_k = x_p + ms_x \quad (3)$$

$$y_k = y_p + ms_y \quad (4)$$

$$z_k = z_p + ms_z \quad (5)$$

$$x_k^2 + y_k^2 - r^2 = 0 \quad (6)$$

ただし  $r$  は照明ランプの半径である。この連立方程式を解き、 $m$  を求め、(3)~(5)式に代入することで  $K$  の座標点を求めることができる。一方、 $K$  で反射された光線は  $S'(s'_x, s'_y, s'_z)$  方向に反射する。 $K$  での法線ベクトル  $E(E_x, E_y, E_z)$  は(6)式の勾配をとり、正規化して以下のように表される。

$$(E_x, E_y, E_z) = (x_k/r, y_k/r, 0) \quad (7)$$

反射法則により  $S'$  は以下のように表せる<sup>1)</sup>。

$$S' = S - 2E(E \cdot S) \quad (8)$$

以上のように照明ランプ内壁のさまざまな点からの配光分布を持った光線が照明ランプ内で反射する計算を繰り返すことにより、多重反射計算を行うことができる。このとき照明ランプ内面の反射率を定義し、内壁面での反射毎に光強度が減っていくようにすれば多重反射による光強度の減衰も計算することが可能となる。内壁面が粗面である場合には反射光も散乱反射されるが、この場合は内壁面からの散乱分布特性を考えた反射を計算する。ただし計算する光線本数が指数的に増えるので、光線本数の制限あるいは計算される光強度のしきい値を設けている。これらの光線のうち、開口部に達した光線のみがランプ外に出射する。出射した光線の光強度を開口部上で単位面積毎に積分した分布が照明ランプの発光分布となる。

### 2-3 照明光学系モデル

照明光学系モデルとしてはFig.5に示すような照明ランプ、リフレクタ、コンタクトガラスで構成される光学系を考える。

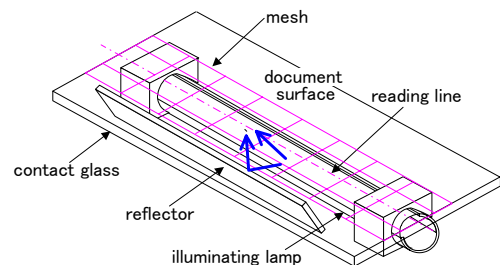


Fig.5 Schematic of scanner illuminating system.

このモデルではリフレクタによる反射、コンタクトガラスによる屈折を考慮した計算を行い、照明ランプから出射し

た光線の追跡を実行することで、原稿面上での受光点座標と光強度を計算する。原稿面上は矩形のメッシュで分割され、前記の受光点座標とメッシュ座標から各メッシュ内に入射する光線の光強度が積分され、その領域の光強度となる。メッシュ全体の光強度の分布が原稿面上の照度分布を表す。

### 2-3-1 リフレクタによる反射計算

リフレクタによる反射計算は照明ランプ内の光線の出射座標点および方向ベクトルとリフレクタの形状関数から求められる。このときFig.6に示されるように光学系のグローバル座標系XYZからリフレクタの原点を中心としたローカル座標系X'Y'Z'への座標変換を行い、ローカル座標系において光線追跡を行えばリフレクタの形状が平面あるいは任意の曲面であっても統一的に計算が実行できる。

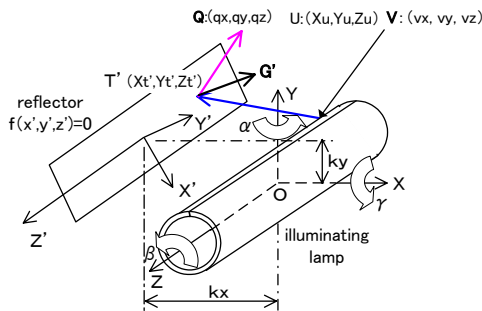


Fig.6 Reflection of a ray by plane reflector.

照明ランプ内の出射点U (xu,yu,zu) からV (vx,vy,vz) 方向に発射した光線のリフレクタ中心のローカル座標系X'Y'Z'への座標変換は回転・並進行列をRxyz (α, β, γ, kx, ky) とすれば以下のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} xu' \\ yu' \\ zu' \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} xu \\ yu \\ zu \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} vx' \\ vy' \\ vz' \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} vx \\ vy \\ vz \end{bmatrix} \quad (10)$$

点U' (xu',yu',zu') からV' (vx',vy',vz') 方向に発射した光線が形状関数 f (x',y',z') = 0で表されるリフレクタ面上の点T' (xt',yt',zt') に当たる位置はU'T'=1とすれば以下の式が成り立つ。

$$xt' = xu' + l vx' \quad (11)$$

$$yt' = yu' + l vy' \quad (12)$$

$$zt' = zu' + l vz' \quad (13)$$

$$f(xt', yt', zt') = 0 \quad (14)$$

この連立方程式を解き、lを求め、(11)~(13)式に代入することでT'の座標点を求めることができる。一方、T'で反射された光線はQ' (qx',qy',qz') 方向に反射する。T'での法線ベクトルG' (gx',gy',gz') はリフレクタ面の勾配であるから(14)式より以下のように表される。

$$G' = \text{grad } f \quad (15)$$

反射法則によりQ'は以下のように表せる<sup>1)</sup>。

$$Q' = V' - 2G'(G' \cdot V') \quad (16)$$

以上のようにしてローカル座標系での反射点および反射方向を求めることができる。あとはグローバル座標系に戻すだけであるので、前述の回転・並進行列の逆行列 Rxyz<sup>-1</sup> (α, β, γ, kx, ky) を用いて、反射点T (xt,yt,zt) および反射方向Q (qx,qy,qz) は以下のように計算できる。

$$\begin{bmatrix} xt \\ yt \\ zt \end{bmatrix} = [R]^{-1} \begin{bmatrix} xt' \\ yt' \\ zt' \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} qx \\ qy \\ qz \end{bmatrix} = [R]^{-1} \begin{bmatrix} qx' \\ qy' \\ qz' \end{bmatrix} \quad (18)$$

### 2-3-2 コンタクトガラスによる屈折計算

コンタクトガラスに入射する光線は照明ランプから直接入射する光とリフレクタから反射した光の2つが存在する。どちらの場合も出射点の座標および方向ベクトルとコンタクトガラスの厚さおよび屈折率がわかれば屈折計算が可能である。Fig.7にコンタクトガラス断面での光線の屈折を示す。

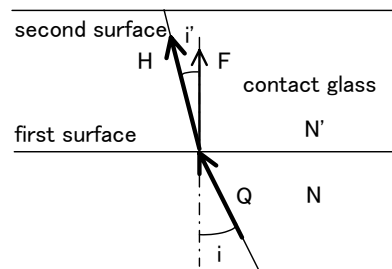


Fig.7 Refraction of contact glass.

光線がコンタクトガラス面に当たる座標はリフレクタによる反射計算で行った計算と同様である。異なるのはコンタクトガラス面での屈折方向であり、たとえば第1面での屈折を考える。入射方向ベクトルQ (qx,qy,qz) とし、入射角i, 屈折角i', 法線ベクトルF (fx,fy,fz) とすれば、スネルの法則を用いて、屈折光ベクトルH (hx,hy,hz) は以下のように求められる<sup>1)</sup>。

$$H = \frac{N}{N'} Q + F(\cos i' - \frac{N}{N'} \cos i) \quad (19)$$

ここで  $\cos i'$  は以下のように表される。

$$\cos i' = \text{sign}(\cos i) \sqrt{1 - \left(\frac{N}{N'}\right)^2 (1 - \cos^2 i)} \quad (20)$$

$\text{sign}(x)$  は  $x$  の正負によって +1 もしくは -1 となる関数である。  $N$  および  $N'$  は媒質の屈折率である。(19), (20) 式によって第1面での屈折方向が求まる。同様に第2面での屈折方向も計算できる。第1面および第2面を通過する際の界面の透過率はコンタクトガラスへの入射角度によって変化する。これはフレネルの公式<sup>2)</sup>として知られている。この公式では2つの偏光成分毎の透過率を扱うが、ここでは照明ランプの偏光特性から偏光成分の平均を取った透過率で表現する。この効果を考慮して各光線の光強度が計算される。このようにして第1面および第2面を通過した光線の光強度はコンタクトガラス上すなわち原稿面上に切られた矩形のメッシュ毎に積分され、メッシュ全面での光強度分布が最終的な照度分布となる。メッシュの分割数を多くすれば照度分布も細かく得られるが、必要となる光線数も多くなり計算時間がかかる。全体の形状を知る目的では20から40分割で十分である。

## 2-4 シミュレーション例

開発したシミュレーションシステムを用いて計算された3次元照度分布の一例をFig.8に示す。

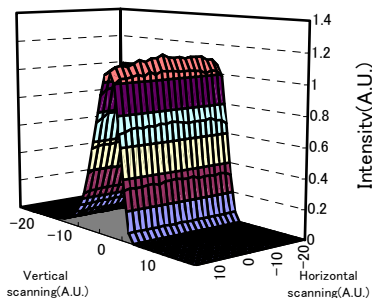


Fig.8 Three-dimensional illuminated distribution by simulation.

ここでは約150万本の光線追跡を行っている。原稿面上のメッシュ分割数は主走査20分割、副走査40分割である。光強度は副走査中央の光強度を中心に正規化している。

## 2-5 3次元照度分布計測

シミュレーションで得られた照度分布を検証するためには実機のスキヤナでの照度分布を計測する方法が必要となる。そこでCCDカメラを用いた3次元照度分布計測法を開発した。Fig.9にその構成を示す。

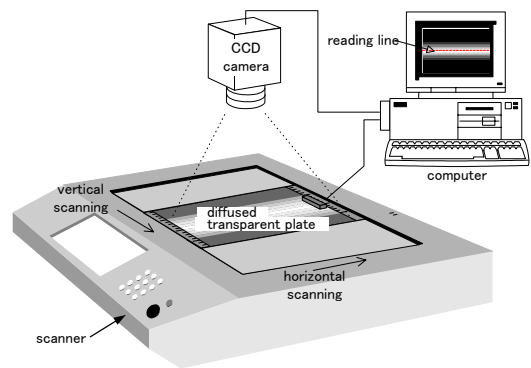


Fig.9 Three-dimensional illumination measurement system.

この計測法はスキヤナの上原稿面上に拡散透過板を設置し、拡散された照明光をCCDカメラで撮影する手法である。拡散透過板として、均一な濃度の拡散透過シートとNDフィルタを用いている。CCDカメラのシャッタースキヤナ走査の同期を取ることで動的な3次元照度分布が測定可能である。また、カメラレンズによる周辺光量の減少もシェーディング処理を行うことで補正できるようになっている。

## 3. 成果

スキヤナ照明系の3次元照度分布シミュレーションシステムを開発した。また、検証としてCCDカメラを用いた動的な3次元照度分布計測法を開発し、両者での結果の比較を行った。Fig.10に中央位置での主走査断面および主走査中央での副走査方向断面の照度分布の比較を示す。

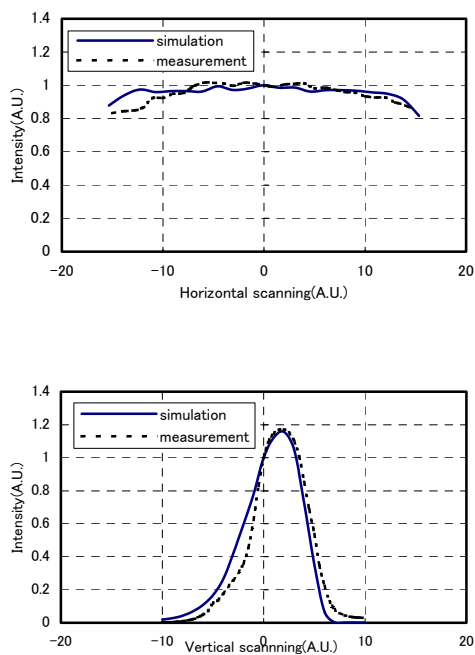


Fig.10 Results of illumination measurement and simulation.

副走査方向の照度分布は計測とシミュレーションではよく一致している。主走査方向では計測で左右非対称性が存在し、端部では照度分布が多少異なるものの全体的な傾向は一致している。次に光学系のレイアウトを変えたときの傾向を見るために照明ランプの開口部をリフレクタ側に倒していった場合のシミュレーションと計測の差をFig.11に示す。

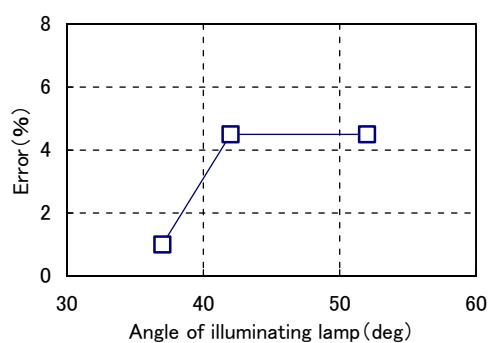


Fig.11 Comparison of measurement and simulation.

この誤差は主・副走査に関して計測とシミュレーションの差分を取り、平均誤差を計算している。計測結果を基準とすれば誤差4.5%以内であることが確認できた。

## 4. 今後の展開

今回開発したシステムをベースとして、光学部材における再反射光や多重反射光などのノンシーケンシャルな光線追跡を加えたアルゴリズム開発を行うことで、原稿面上での再照明光問題などへ応用展開していく。

### 参考文献

- 1) 草川 徹：レンズ光学－理論と実用プログラマー，東海大学出版会，(1991)，pp.81-100.
- 2) M.Born, E.Wolf：光学の原理 I，東海大学出版会，(1980)，pp.63-64.