

## 順・逆両問題アプローチを統合したインタラクティブ照明設計システムの開発

広島市立大学	土橋 宜典
富士通株式会社	中谷 秀貴
広島大学	正会員 金田 和文
広島大学	正会員 山下 英生

〈あらまし〉 近年、コンピュータグラフィックスは室内照明設計にとって有効な技術となりつつある。コンピュータグラフィックスを用いれば、室内の照明効果を事前にかつ視覚的に評価することができる。室内照明設計では、順問題アプローチあるいは逆問題アプローチを用いて照明設計を行うことが多い。しかし、多くの場合、いずれか一方のアプローチを用いて照明設計が行われている。また、従来の照明設計手法では、相互反射環境下での照明計算に多くの時間を必要とするため、インタラクティブに照明設計を行うことは困難であった。本論文では順問題および逆問題の二つのアプローチを統合したインタラクティブな照明設計システムを提案する。これにより、順問題アプローチ、逆問題アプローチ双方向からの照明設計が可能となる。提案システムを用いれば、効率的かつ直感的な照明設計が可能となる。

〈Summary〉 Recently computer graphics have been one of indispensable techniques for interior lighting design. Using computer graphics, lighting effects design can be visualized in advance. Traditionally either a forward or an inverse approach is used for the lighting design. Besides, it is very difficult to interactively design lighting effects under interreflective environment since high computational cost is required for obtaining the results. This paper proposes a new system for an interactive lighting design, integrating both the forward and the inverse approaches. The proposed system makes it possible to design lighting effects from both the forward and inverse points of views. Using the proposed system, users can design lighting effects efficiently and intuitively

### 1. まえがき

近年、コンピュータグラフィックスが室内照明設計にとって有効な技術となりつつある。コンピュータグラフィックスを用いれば、その照明効果を事前にかつ視覚的に評価することができる。照明設計の手法は、順問題アプローチと逆問題アプローチの二つに大別される。一つ目の順問題アプローチでは、まず設計者によって光源の

種類、設置位置、配光特性、灯軸、色などの光源に関するパラメータが指定され、これに対する室内の輝度分布を算出・表示する。一方、逆問題アプローチでは、与えられた希望輝度分布を実現する最適な光源パラメータを算出する。

順問題アプローチに属する手法として、壁面間の光の相互反射を考慮して照度計算を行う Radiosity 法が提案された<sup>1)2)</sup>。その後、質感や精度向上のために多くの手法が開発されている<sup>3)~9)</sup>。これらの手法の開発により、極めて写実的な画像を生成することが可能となったが、それに伴って、計算コストも莫大となっている。特に、室内照明設計を行う上で不可欠な相互反射光の計算は、壁面を小さなパッチに分割し、パッチ間のエネルギーの

“An Interactive Lighting Design System Integrating Forward and Inverse Approach” by Yoshinori DOBASHI (Hiroshima City University), Hideki NAKATANI (Fujitsu Corporation), Kazufumi KANEDA (Member) and Hideo YAMASHITA (Member) (Hiroshima University).

やりとりを計算しなくてはならないため、極めて計算コストが高い。計算時間の短縮を目的とした手法<sup>10)~12)</sup>を用いても光源に関するパラメータの変更を行った場合にはすべての計算をはじめからやり直す必要があり、インタラクティブな照明設計は困難である。

逆問題アプローチに属する手法では、希望輝度分布に最も近い輝度分布を与える点光源の強度と色相を制約付き最小二乗法を解くことにより算出する手法<sup>13)</sup>や、人間の知覚を考慮することで光源の強度やスポットライトの方向などの最適光源パラメータを算出する手法が提案されている<sup>14)</sup>。しかし、これらの手法では、配光特性の形状を算出することはできない。さらに、いずれの手法も点光源のみしか取り扱うことができない。

本論文では、これらの問題点を解決し、かつ、二つの照明設計アプローチを統合した新たな照明設計システムを提案する。すなわち、順問題アプローチにおいては、光源に関するパラメータを変更した場合でも高速に画像を生成でき、また、逆問題アプローチでは、与えられた希望輝度分布を満たす配光特性や光源の色を自動的に算出する。さらに、点光源だけでなく線光源も取り扱うことができる。これらのことを実現するため、基底関数を用いた高速画像生成手法<sup>15)</sup>を用いる。ただし、この手法では、光源として点光源のみを対象としているため、線光源を扱えるよう拡張する。また、逆問題アプローチでは、遺伝的アルゴリズムを用いて光源に関するパラメータを算出する。この際、モンテカルロ法<sup>16)</sup>を利用して計算時間を削減する手法を提案する。さらに、本システムでは、二つのアプローチを統合しているため、順問題アプローチで得られた輝度分布をもとに逆問題アプローチでの希望輝度分布を作成することや、逆問題アプローチで算出された光源パラメータを順問題アプローチでさらに改善することが可能となる。

一般に、光源の設置位置は室内の空間的な要素から決定される場合が多いため、本システムでは、光源の設置位置は照明設計を始める前にユーザにより与えられているとする。また、光源色については一般の室内照明器具と同様に全方向に一樣な色を発するものとする。

以下、本システムの特徴について述べた後、本システムで順問題アプローチおよび逆問題アプローチを実現する手法について説明する。ただし、順問題アプローチのための手法については、文献<sup>15)</sup>において、すでにその一部を述べているため、本論文では、その拡張部分についてのみ述べる。

## 2. システムの特徴

本システムでの照明設計手順は以下の通りである。ま

ず順問題アプローチを用いて、配光特性、灯軸、色を設定・変更し、それに対する輝度分布を算出する。これを繰り返すことで希望に近い輝度分布を得る。しかし、この順問題アプローチだけでは希望する輝度分布を満たすことは一般に困難である。そこで、この得られた輝度分布をもとにして、輝度分布の修正および変更を行い、希望輝度分布を作成する。そして、この希望輝度分布から、逆問題アプローチにより配光特性、灯軸、色を算出する。次に、算出された光源パラメータを用いて、順問題アプローチにより、輝度分布を作成し、希望輝度分布との比較・検討を行い、必要であれば、さらに光源パラメータを変更し、照明効果の改善を行うことができる。このように、本システムでは、順問題および逆問題アプローチを統合した照明設計が可能である。その利点について以下に述べる。

図1に示すように、順問題アプローチでは、希望する照明効果を得るためには、光源パラメータをさまざまに変更して試行錯誤を繰り返す必要がある。これを解決する方法として逆問題アプローチがあるが、逆問題アプローチでは、設計者が希望する輝度分布を作成する必要がある。しかし、希望輝度分布を作成するために、すべての壁面における輝度値を指定するのは極めて繁雑な作業である。本システムでは、ある程度希望する輝度分布に近い輝度分布を順問題アプローチにより作成し、これをもとに、その一部を修正あるいは変更することで、容易に希望輝度分布を作成できる。また、逆問題アプローチでは、設計者の希望する輝度分布を実現する最適光源パラメータを算出することができるが、その算出された光源パラメータによる輝度分布が希望輝度分布と完全に一致しない場合がある。そのような場合、順問題アプローチにより照明効果の改善を行う必要がある。また、逆問題アプローチでの最適化処理において、設計者の希望とは異なる解に収束しつつあると設計者が判断した場合には、処理を中断し、光源パラメータの改善を行った

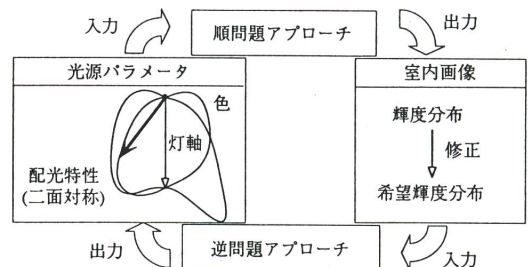


図1 順逆両問題アプローチの統合  
Fig.1 Integration of forward and inverse approaches



後、引き続き逆問題アプローチを実行することでより良い解に収束させることができる。本システムでは、順問題アプローチと逆問題アプローチを相互に行き来可能であるため、これらのことを容易に実現することができる。

### 3. 順問題アプローチ

本システムでは、順問題アプローチのための手法として、すでに提案されている相互反射環境下での高速画像生成手法<sup>15)</sup>を拡張した手法を用いる。しかし、この手法では、光源として、軸対称な配光特性をもつ点光源のみを対象としているため、本システムでは、これを二面対称な配光特性を持つ線光源が取り扱えるよう拡張する。ここで、二面対称な配光特性とは、図1に示すように、灯軸を含み、互いに直交するある一組の二つの断面を選んだとき、これら二つの断面における配光がどちらも灯軸に対して対称な配光特性である<sup>17)</sup>。ここで、直交する一組の二つの断面については、以下のように選ぶ。システムを起動した初期状態において、灯軸方向は鉛直下向きとする。この状態において、線光源の場合、線光源の管軸に平行な断面と管軸に垂直な断面にとる場合が多いため、本システムにおいてもこれを用いる。また、点光源の場合は、ユーザにより任意に設定可能であるが、本論文では、光源位置を通り、 $xz$ 面および $yz$ 面に平行な平面に設定した。灯軸方向を変更した場合、これらの二つの断面もその位置関係を保ったまま回転される。以下、本節では、高速画像生成手法の基本的な考え方について述べた後、線光源への拡張方法を提案する。

#### 3.1 基本的な考え方

図2に示すように、光源の配光特性をいくつかの基底関数の重み付き和によって表現する。このとき、各基底関数を配光特性として持つ光源を設置し、壁面間の光の相互反射を考慮してすべての面の輝度分布を前処理として計算し、基本輝度データとして記憶しておく。このとき、図2の左辺の配光特性を持つ光源による室内の輝度

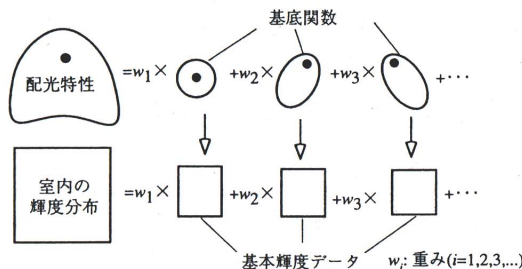


図2 配光特性の基底関数表現

Fig. 2 Representing a luminous intensity distribution using basis functions

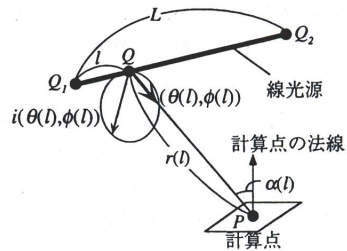
分布は基本輝度データの重み付き加算によって得ることができる。また、各基底関数に対する重みを変更することで、様々な種類の配光特性を表現することができ、変更後の配光特性を持つ光源による室内の輝度分布は、変更後の重みを用いて、対応する基本輝度データの重み付き加算をするだけで高速に得ることができる。ここで、点光源の配光特性は単位球上で定義される関数であり、また、線光源の配光特性は線光源を点光源とみなせるだけ十分離れた位置で測定される<sup>17)</sup>。これらのことから、配光特性を表現するための基底関数には、球面調和関数<sup>18)</sup>を用いる。また、本システムでは、室内を細かい四角形パッチに分割し、各パッチごとに基本輝度データを記憶する。

#### 3.2 線光源への拡張

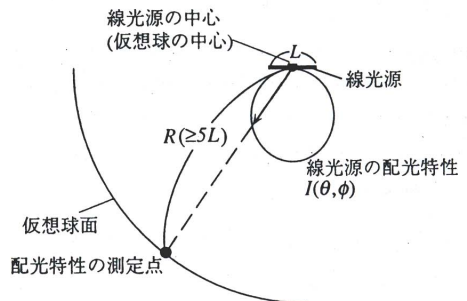
本システムでは、線光源上の任意の点の配光特性は線光源全体にわたってすべて同一と考える。この配光特性を  $i^{(\lambda)}(\theta, \phi)$  で表す。ここで、 $\theta, \phi$  は、図5に示すように、光源位置を原点とした極座標であり、 $\theta$  は  $z$  軸からの角度、 $\phi$  は  $x$  軸からの角度を表わす。式(1)に示すように、 $i^{(\lambda)}(\theta, \phi)$  を球面調和関数  $Y_l(\theta, \phi)$  を用いて表現する。

$$i^{(\lambda)}(\theta, \phi) = \sum_{j=1}^{N_b} w_j^{(\lambda)} Y_j(\theta, \phi) \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  は波長であり、通常用いられる赤(R)、緑



(a) 配光特性を持つ線光源による照度計算



(b) 線光源の配光特性の測定方法

図3 線光源の配光特性

Fig. 3 The luminous intensity distribution of a linear light source

(G), 青(B)の3成分でサンプルする。また、 $N_b$ は配光特性を表現するために必要な球面調和関数の項数、 $w_j^{(a)}$ は各球面調和関数にかかる重みである。

いま、図3(a)に示すように、線光源の両端点を $Q_1, Q_2$ とし、線光源上の点 $Q$ の $Q_1$ からの距離を $l$ とする。このとき、計算点 $P$ における線光源による直射照度は次式で表わされる<sup>19)</sup>。

$$E_{line}^{(a)} = \int_0^L H(l) \frac{i^{(a)}(\theta(l), \phi(l))}{(r(l))^2} \cos \alpha(l) dl \quad (2)$$

ここで、 $r(l)$ は点 $P$ と点 $Q$ の距離、 $\alpha(l)$ は計算点の法線と点 $P$ と点 $Q$ をむすぶベクトルのなす角、 $H(l)$ は点 $P$ から見て点 $Q$ が可視なら1、そうでなければ0をとる。上式に式(1)を代入すると次式を得る。

$$E_{line}^{(a)} = \sum_{j=1}^{N_b} w_j^{(a)} \int_0^L H(l) \frac{Y_j(\theta(l), \phi(l))}{(r(l))^2} \cos \alpha(l) dl \\ = \sum_{j=1}^{N_b} w_j^{(a)} B_j \quad (3)$$

ただし、

$$B_j = \int_0^L H(l) \frac{Y_j(\theta(l), \phi(l))}{(r(l))^2} \cos \alpha(l) dl \quad (4)$$

これから、前処理において、各パッチに対して、各球面調和関数に対する $B_j$ を計算した後、相互反射計算を行って、基本輝度データとして記憶しておけば、前節で述べた考え方を用いて高速に画像を作成できる。次に、球面調和関数にかかる重み $w_j^{(a)}$ の決定方法について以下に述べる。

一般に線光源の配光特性 $I^{(a)}(\theta, \phi)$ は、線光源を点光源とみなせるだけ十分に離れた距離で測定される。すなわち、図3(b)に示すように、線光源の長さを $L$ とすると、線光源の中心からの距離が $5L$ 以上である仮想球面上で測定される<sup>17)</sup>。そこで、本システムでは、ユーザは線光源を点光源とみなしたときの配光特性を指定する。この配光特性 $I^{(a)}(\theta, \phi)$ を球面調和関数を用いて表現する。すなわち、

$$I^{(a)}(\theta, \phi) = \sum_{j=1}^{N_b} W_j^{(a)} Y_j(\theta, \phi) \quad (5)$$

ここで、本システムでは、配光特性 $I^{(a)}(\theta, \phi)$ を表現するために必要な球面調和関数の項数は配光特性 $i^{(a)}(\theta, \phi)$ を表現するために必要な項数 $N_b$ と同数とする。また、 $W_j^{(a)}$ は各球面調和関数にかかる重みであり、次式により計算できる<sup>18)</sup>。

$$W_j^{(a)} = \frac{1}{|Y_j(\theta, \phi)|^2} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} I_{usr}^{(a)}(\theta, \phi) Y_j(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (6)$$

ここで、 $I_{usr}^{(a)}(\theta, \phi)$ はユーザにより指定される希望配光特性である。このとき、半径 $5L$ 以上の球面上では、配光特性 $I^{(a)}(\theta, \phi)$ を持つ点光源による照度と線光源による照度はほぼ等しいとおけるため<sup>17)</sup>、次式を得ること

ができる。

$$i^{(a)}(\theta, \phi) \approx \frac{1}{L} I^{(a)}(\theta, \phi) \quad (7)$$

すなわち、配光特性 $i^{(a)}(\theta, \phi)$ は配光特性 $I^{(a)}(\theta, \phi)$ の相似形であり、その大きさを $1/L$ 倍したものと考えられる。したがって、配光特性 $i^{(a)}(\theta, \phi)$ を表現する各球面調和関数にかかる重み $w_j^{(a)}$ は、配光特性 $I^{(a)}(\theta, \phi)$ を表現する各球面調和関数にかかる重み $W_j^{(a)}$ を $1/L$ 倍することによって求められる。

#### 4. 逆問題アプローチ

本システムにおいて、照明設計における逆問題では、与えられた希望輝度分布を実現するための各光源の配光特性、色、灯軸方向を解として算出する。この際、光源数の増加にともない、解の探索空間が指数関数的に拡大し、計算時間が増大するという問題点が生じる。そこで、本システムでは、逆問題を二段階の処理に分けて解く方法を提案する。第一段階では、与えられた希望輝度分布をもとにして、各光源に対する希望輝度分布を算出する。第二段階では、各光源の希望輝度分布から遺伝的アルゴリズム<sup>20)</sup>を用いて光源パラメータを算出する。このような二段階方式をとることによって、第二段階では光源どうしの組み合わせを考えなくてよくなるため、探索空間が拡大することなく、計算量も光源数に対して線形に増加するのみである。しかし、この二段階法を用いても、第二段階の遺伝的アルゴリズムは多くの処理時間を要してしまう。これを解決するために、近隣に存在するパッチ間の輝度値は類似性を持つことを利用し、モンテカルロ法を用いて、高速に遺伝的アルゴリズムを解く方法を提案する。

##### 4.1 各光源の希望輝度分布の算出(第一段階)

第一段階では、各パッチの希望輝度値と算出される輝度値との二乗和が最小となるよう各基本輝度データにかかる重みを算出する。そして、算出した重みを用いた各光源ごとの希望輝度分布を算出する。すなわち、式(8)に示す目的関数 $S$ を最小とするような基本輝度データにかかる重みを算出する。

$$S = \sum_{\lambda=R,G,B} \sum_{k=1}^{N_p} f_k a_k \left\{ E_k^*(\lambda) - \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{j=1}^{N_b} w_j^{(a)} E_{ijk}(\lambda) \right\}^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

ここで、 $N_p$ はパッチ数、 $N_i$ は光源数、 $f_k$ はパッチ $k$ の忠実度であり大きな値を持つパッチほど、より希望輝度に近い輝度を得ることができる。例えば、床のパッチの忠実度を他の部分の忠実度よりも高く設定した場合、床は床以外に比べて、より希望輝度に近い輝度を得ることができる。また、 $a_k$ はパッチ $k$ の面積、 $E_k^*(\lambda)$ はパ



ッチ  $k$  における波長  $\lambda(R, G, B)$  成分の希望輝度,  $w_i^{(k)}$  は重み係数,  $E_{ijk}(\lambda)$  は光源  $i$  によるパッチ  $k$  の  $j$  番目の球面調和関数に対応する基本輝度データである。式(8)を最小とする重みは, 次式で表わされる正規方程式を解くことにより求められる。

$$\begin{bmatrix} \{E_{i1}(\lambda), E_{i1}(\lambda)\} \cdots \{E_{N_i N_b}(\lambda), E_{i1}(\lambda)\} \\ \vdots \\ \{E_{i1}(\lambda), E_{N_i N_b}(\lambda)\} \cdots \{E_{N_i N_b}(\lambda), E_{N_i N_b}(\lambda)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_i^{(1)} \\ \vdots \\ w_i^{(N_b)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{E^*(\lambda), E_{i1}(\lambda)\} \\ \vdots \\ \{E^*(\lambda), E_{N_i N_b}(\lambda)\} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで,  $\{E^*(\lambda), E_{ij}(\lambda)\}, \{E_{ij}(\lambda), E_{ki}(\lambda)\}$  はそれぞれ式(10), 式(11)で表される。

$$\{E^*(\lambda), E_{ij}(\lambda)\} = \sum_{m=1}^{N_b} f_m a_m E_m^*(\lambda) E_{ijm}(\lambda) \quad (10)$$

$$\{E_{ij}(\lambda), E_{ki}(\lambda)\} = \sum_{m=1}^{N_b} f_m a_m E_{ijm}(\lambda) E_{kim}(\lambda) \quad (11)$$

本システムでは, 最急降下法<sup>21)</sup>を用いて式(9)で表わされる正規方程式を解く。このとき, その係数マトリックスを求めるために多くの計算時間を必要とする。本システムでは, 順問題アプローチと逆問題アプローチを相互に行き来しながら照明設計を行うため, 逆問題アプローチに移行するたびに係数マトリックスを求めては処理時間が増大する。そこで, これを短縮するため, 一旦, 計算した係数マトリックスは記憶しておく。そして, 忠実度に変更された場合は, 変更されたパッチについてのみ次式を用いてその変化分のみを求め直す。

$$\begin{aligned} \{E_{ij}(\lambda), E_{ki}(\lambda)\} &= \{E_{ij}(\lambda), E_{ki}(\lambda)\}^{old} \\ &+ \sum_{k=1}^{N_b} (f_m^{(k)} - f_m^{old(k)}) a_m E_{ikm(k)}(\lambda) E_{jkm(k)}(\lambda) \end{aligned} \quad (12)$$

ただし,  $\{E_{ij}(\lambda), E_{ki}(\lambda)\}^{old}, f_m^{old(k)}$  は, それぞれ, 変更前の係数マトリックスの値, 忠実度を表わす。また,  $N_k$  は忠実度に変更されたパッチ数,  $m(k)$  はそのパッチ番号を表わす。これにより, 忠実度に変更された場合は, 変更されたパッチについてのみ再計算することで, 係数マトリックス作成のための計算時間を短縮できる。

以上により算出された重み  $w_i^{(k)}$  を用いて, 光源  $i$  のパッチ  $k$  の希望輝度  $E_{ik}^*(\lambda)$  は次式により算出する。

$$E_{ik}^*(\lambda) = \sum_{j=1}^{N_b} w_j^{(k)} E_{ijk}(\lambda) \quad (i=1, \dots, N_i; k=1, \dots, N_p) \quad (13)$$

#### 4.2 遺伝的アルゴリズムによる光源パラメータの算出(第二段階)

本節では, 前節で述べた手法により得られる各光源ごとの希望輝度分布から光源パラメータを得る手法を述べ

る。提案手法では, 希望輝度分布と算出される光源パラメータから得られる輝度分布との差を最小とするよう光源パラメータを求める。しかし, この最適化問題では, 多くの準最適解, すなわち, 局所解が存在する。また, 最急降下法などの通常の最適化手法では局所解に陥りやすく, 精度良い解を得ることが困難である。そこで, 提案手法では, 大域解の探索能力に優れた遺伝的アルゴリズム<sup>20)</sup> (Genetic Algorithm; 以下, GA と呼ぶ)を用いて, 各光源ごとに第一段階で得られた各光源の希望輝度分布を満たす配光特性, 灯軸, 色を算出する。GA では, 光源パラメータに関する情報を遺伝子に持つ個体同士により交叉や突然変異を行って世代交代を繰り返し, より良い個体を生成することで最適解が算出される<sup>20)</sup>。

このとき, 本システムでは, ユーザがあらかじめ設定した世代ごとに, 最も目的関数値の小さい個体による光源パラメータとそれに対応する画像および希望輝度分布との相対誤差分布が3節で述べた順問題アプローチによる手法を用いて瞬時に表示される。ユーザはそれらをもとにして, 任意の世代で遺伝的アルゴリズムを終了させることができる。そのため, ユーザの意図する照明効果と異なる方向に解が収束し始めた場合, 逆問題アプローチから順問題アプローチに移行し, 光源パラメータに修正を加え, 再び逆問題アプローチを続行することができる。すなわち, 人手による修正を加えることで, より良い方向に解を収束させることが可能である。

以下, 光源パラメータ算出へGAを適用するために, 個体の評価を行うための目的関数および光源パラメータの遺伝子への割り付け方法について述べる。

##### 4.2.1 目的関数

光源  $i$  の個体の評価を行うための目的関数を次式で定義する。

$$O_i = \sum_{k=R, G, B} \sum_{k=1}^{N_p} f_k a_k (E_{ik}^*(\lambda) - E_{GA, k}(\lambda))^2 \quad (14)$$

ここで,  $E_{ik}^*(\lambda)$  は式(13)によって算出された光源  $i$  による希望輝度分布,  $E_{GA, k}(\lambda)$  はGAの個体によるパッチ  $k$  の輝度値である。式(14)に示す目的関数値がより小さくなる個体がより優れた個体となる。

##### 4.2.2 個体の遺伝子

図4に示すように, 個体の各遺伝子には, 配光特性,

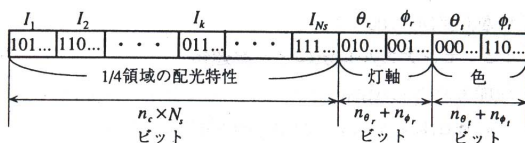


図4 個体の遺伝子  
Fig.4 Genes of an individual

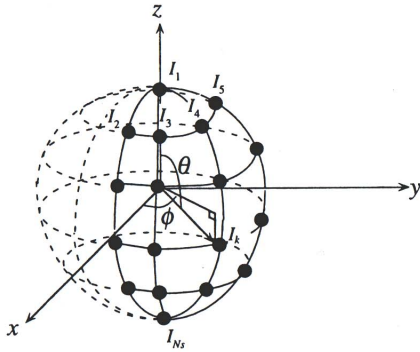


図5 配光特性のサンプリング  
Fig. 5 Sampling the luminous intensity distribution

灯軸方向、色に関する情報が割り付けられる。ここで、光源はどの方向にも同じ色の光を発することから、R、G、B成分の配光特性は相似形とする。個体の各遺伝子は0または1の二進数で表現する。光源の配光特性については、図5に示すように、配光特性をいくつかの方向でサンプルし、そのサンプル方向での光の強さ  $I_k$  を割り当てる。このとき、二対称な配光特性を算出するため、遺伝子に割り当てる配光特性はその四分の一領域のみとし、残りの領域については、その対称性から算出する。また、配光特性が負の値をとることがないように、サンプル方向の光の強さは必ず正であるという制約を設ける。次に、灯軸方向については、極座標  $(\theta_r, \phi_r)$  ( $0 \leq \theta_r \leq \pi [rad], 0 \leq \phi_r \leq 2\pi [rad]$ ) を割り当てる。また、光源色については、RGBの3成分の代わりに  $(\theta_i, \phi_i)$  ( $0 \leq \theta_i, \phi_i \leq \frac{\pi}{2}$ ) を割り当てる。実際の光源色を表わすRGB成分の比率  $t_r, t_g, t_b$  は、次式で計算する。

$$\begin{bmatrix} t_r \\ t_g \\ t_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_i \cos \phi_i \\ \sin \theta_i \sin \phi_i \\ \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (15)$$

これにより、光源色に関する未知変数の数が3から2になるため、解の探索空間が縮小する。

光源の配光特性の各サンプル方向の光の強度を表現するためのビット数  $n_\theta$ 、灯軸方向  $(\theta_r, \phi_r)$  の各々の成分を表わすためのビット数  $n_{\theta_r}$  および  $n_{\phi_r}$ 、また、光源色を決定する要素  $(\theta_i, \phi_i)$  の各々の成分を表わすためのビット数  $n_{\theta_i}$  および  $n_{\phi_i}$  については、それらの精度に応じて任意に設定可能である。

### 4.3 モンテカルロ法による高速化

前節で述べた遺伝的アルゴリズムを用いた光源パラメータの算出において、最も計算時間を要するのは、目的関数値の計算である。式(14)からわかるように、目的関数値の計算時間はパッチ数に比例して増加する。従っ

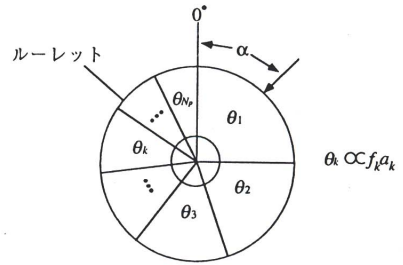


図6 ルーレットの作成  
Fig. 6 Making a roulette

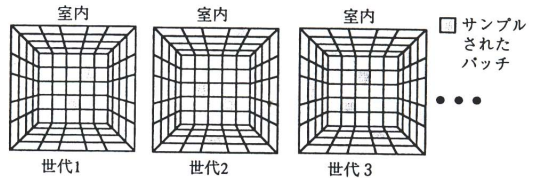


図7 各世代でサンプルされたパッチ  
Fig. 7 Sampled patches in each generation

て、モデルが複雑化し、パッチ数が増加するにつれて、膨大な計算時間が必要となる。そこで、この処理を高速化するために、隣接するパッチ間で輝度値の変化は小さいという性質を利用し、すべてのパッチの中からサンプルした少数のパッチのみを用いて、次式により目的関数値の推定を行う。

$$\hat{O}_i = \frac{N_p}{N_s} \sum_{\lambda=R,G,B,K=1}^{N_s} (E_{i,s(k)}^*(\lambda) - E_{CA,s(k)}(\lambda))^2 \quad (16)$$

ここで、 $N_s$  はサンプルするパッチ数、 $s(k)$  はサンプルされたパッチの番号である。

次にパッチのサンプル方法について説明する。より重要度の高い領域、すなわち、忠実度の高い領域と面積の大きい領域を優先的にサンプルする。そのため、まず、図6に示すように、サンプルされる確率が各パッチの忠実度  $f_k$  と面積  $a_k$  に比例したルーレットを作成する。すなわち、パッチ1から  $N_p$  に対応する扇形の角度  $\theta_k$  から  $\theta_{N_p}$  が、それぞれ  $f_1 a_1$  から  $f_{N_p} a_{N_p}$  に比例するようにルーレットを作成する。角度  $\theta_k$  [度] は次式により算出する。

$$\theta_k = 360 \times \frac{f_k a_k}{\sum_{p=1}^{N_p} f_p a_p} \quad (17)$$

そして、0から360の範囲の一様乱数  $\alpha$  を発生させ、その角度  $\alpha$  (図6の矢印) の位置にあるパッチをサンプルする。上述の方法によりサンプルしたパッチを用いて目的関数値を推定することで、GAにおける各個体の目的関数値計算を高速化することができる。しかし、サンプルするパッチをすべての世代で同一のものを用いると、サ



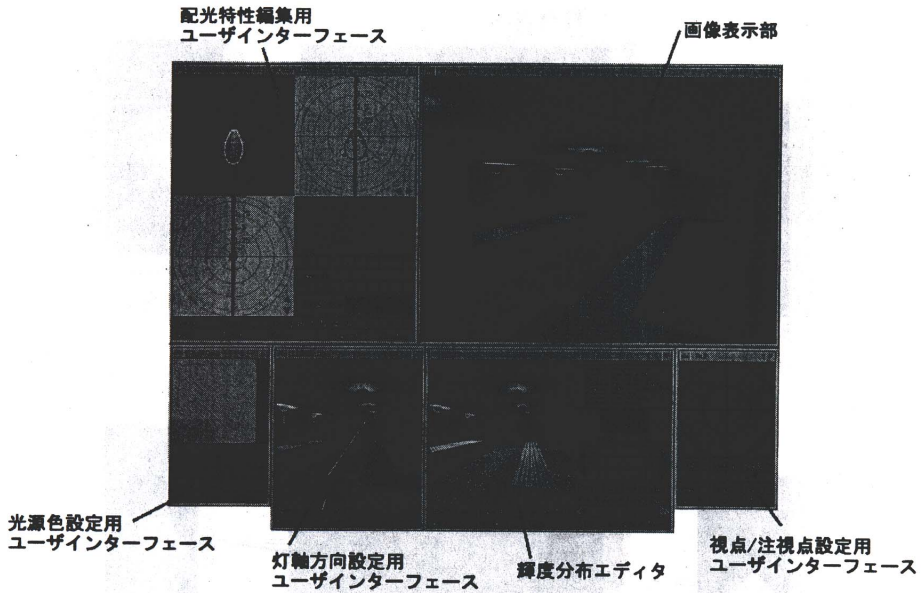


図 8 システム構成  
Fig. 8 The proposed system

ンプルされなかったパッチは個体の評価に全く考慮されなくなり、特定のパッチについてのみ希望輝度に近い値を与える解が算出されてしまう。この問題を解決するため、提案手法では、図7に示すようにGAの各世代において、式(16)を評価するパッチをすべてサンプルし直す。これにより、十分な回数だけ世代交代を繰り返すと室内全体のパッチが選択されるため、特定のパッチについてのみ精度良い解を与える個体は淘汰され、室内の全体のパッチに対して精度よい解を与える個体が算出される。

### 5. システム構成

図8にシステムの全体図を示す。図8に示すように、本システムでは、配光特性の編集、灯軸方向の設定、光源色の設定、視点・注視点の変更をグラフィカルユーザインターフェースを用いてインタラクティブに行うことができ、設定された値に応じて画像表示部に画像が表示される。特に、配光特性エディタでは、配光特性が立体表示され(以下、配光立体と呼ぶ)、順問題アプローチでは、灯軸を含み等角度間隔で配置された断面上での配光曲線をマウスを用いて、直接指定することができる。また、配光立体は、光源色設定用インターフェースで設定した色で表示される。

また、希望輝度分布は輝度分布エディタで作成する。輝度分布エディタでは、指定された視点位置から見た画像が表示されており、ユーザはその画像上で修正・変更

を行いたい領域をマウスを用いて直接指定し、その領域の輝度値を変化させることができる。変更する領域はパッチ単位あるいは面単位で指定できる。

### 6. 適用例

本システムを用いてゲストハウスの照明設計を行った例を図9に示す。ゲストハウスは約10,000個のパッチで構成されており、右側のロングテーブルの上方の天井に同一の配光特性を持つ6個の点光源と左側のショートテーブルの上方の天井に同一の配光特性を持つ2個の線光源が設置されている。それぞれの光源の配光特性を表現するための球面調和関数の項数は36項である。システムを起動すると、光源はデフォルト値に設定され、そのときの画像が表示される(図9(a)参照)。このとき、配光特性は全方向に一定の強度を持つ配光とし、灯軸方向は下向き、光源色は白色に設定されている。設計者はこれを出発点として照明設計を始める。まず、光源パラメータをさまざまに変更し、希望する輝度分布に近い輝度分布を作成する。図9(b)に順問題アプローチによって得られた結果を示す。次に、設計者は図9(b)をもとに、輝度分布を修正・変更することにより、希望輝度分布を作成する。ここでは、ロングテーブル、ロングチェア、フロアおよびショートテーブルの輝度値のR、G成分をもとの1.6倍に明るくし、忠実度をそれ以外の部分の100倍に設定した。作成した希望輝度分布を図9(c)に示す。次に、この希望輝度分布を満たす最適な光源パ

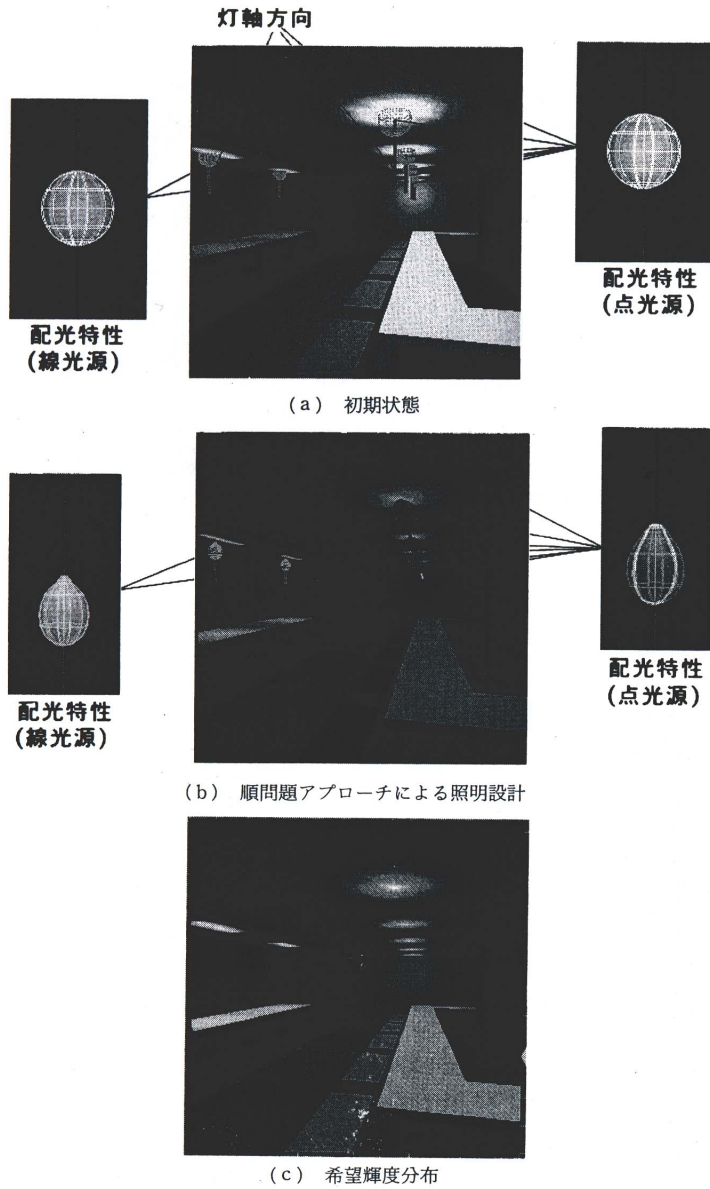


図9 ゲストハウスの照明設計

Fig. 9 Lighting design of a guest house



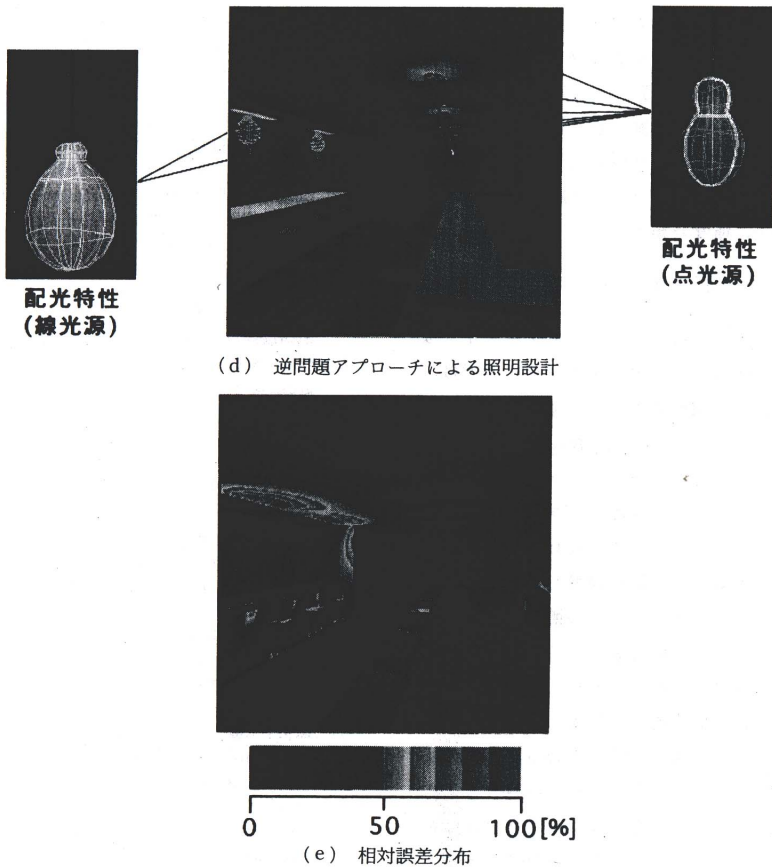


図 9 ゲストハウスの照明設計  
Fig.9 Lighting design of a guest house

表 1 計算時間  
Table 1

順問題	前処理	約90[分]
	画像生成	約2[秒]
逆問題	第一段階	20[秒]
	第二段階	26[秒]

使用計算機: Silicon Graphics Indigo2  
(R4400 150MHz, 主メモリ:64MB)

ラメータを4節で述べた手法を用いて算出した。モンテカルロ法によるパッチのサンプル数は全パッチの1% (約1,000パッチ)とし、GAの全世代数は200世代とした。逆問題アプローチにより得られた画像および希望輝度分布との誤差分布を、それぞれ、図9(d)および(e)に示す。希望輝度分布との相対平均誤差は21.7%であった。しかし、図9(e)に示す誤差分布から、忠実度を高く設定した箇所はほぼ希望輝度分布に一致した結果が得られているのがわかる。

計算時間を表1に示す。順問題アプローチでは、一旦前処理において、基本輝度データを作成しておけば、光

源パラメータを変更しても極めて高速に画像を生成できることが表1からわかる。そのため、光源パラメータをインタラクティブに変更して画像を生成し、希望に近い輝度分布を得ることが可能である。逆問題アプローチでは、やや計算時間を必要とするが、4.2節で述べたように、最適解までの収束過程がインタラクティブに表示されるため、この計算時間は実用上ほとんど問題にならない。なお、4.3節で述べたモンテカルロ法を用いた高速化手法を用いない場合、同程度の精度の解を得るまでに830秒かかる。このことから、モンテカルロ法を用いることによって、40倍以上の高速化がなされているのがわかる。逆問題アプローチでは、GAの世代交代にしたがって各世代での最良の個体が表わす光源パラメータと対応する画像が瞬時に表示される。設計者はその画像を見ながら、逆問題アプローチを途中で終了し、順問題アプローチに移行することも可能である。

このように、本システムでは、順問題アプローチにより光源パラメータを変更しながらインタラクティブに希

望する輝度分布を作成することができる。そして、逆問題アプローチにより、希望輝度分布を与え、それを実現する最適な光源パラメータを得ることができる。さらに、得られた輝度分布が希望輝度分布と異なる部分がある場合には、逆問題アプローチで得られた光源パラメータを修正して、再び順問題アプローチを繰り返すことにより、より希望に近い輝度分布を得ることができる。

## 7. む す び

順逆両問題アプローチを統合したインタラクティブな照明設計システムを提案した。順問題アプローチでは、点光源の配光特性を球面調和関数を用いて表現することで高速に画像を生成する手法<sup>15)</sup>を拡張し、線光源まで扱うことを可能とした。また、逆問題アプローチでは、遺伝的アルゴリズムを用いて各光源のパラメータを算出する手法を提案し、さらに、モンテカルロ法を用いてその処理時間を大幅に短縮する手法を開発した。本システムを用いれば、相互反射環境下における照明設計をインタラクティブに行うことが可能である。これにより効率的かつ直観的な照明設計が可能となった。

今後の課題としては、面光源への拡張、光源設置位置の変更、鏡面反射成分の考慮、壁面や物体などの材質および色の変更、また、得られた配光特性を実現するための光源の反射傘の形状を設計する手法の開発等が挙げられる。また、バーチャルリアリティ技術を利用すれば、仮想空間において照明効果を疑似体験しながら照明設計を行うことが可能となる。

## 参考文献

- 1) Cohen, M. F. and Greenberg, D. P.: "A Radiosity Solution for Complex Environment", Computer Graphics 19-3, pp. 31-40 (1985).
- 2) Nishita, T. and Nakamae, E.: "Continuous Tone Representation of Three Dimensional Objects Taking Account of Shadows and Interreflection", Computer Graphics 19-3, pp. 23-30 (1985).
- 3) Immel, D. S., Cohen, M. F. and Greenberg, D. P.: "A Radiosity Method for Non-Diffuse Environments", Computer Graphics 20-4, pp. 133-142 (1986).
- 4) Kajiya, J. T.: "The Rendering Equation", Computer Graphics 20-4, pp. 143-150 (1986).
- 5) Rushmeier, H. E. and Torrance, K. E.: "The Zonal Method for Calculating Light Intensities in the Presence of a Participating Medium", Computer Graphics 21-4, pp. 293-302 (1987).
- 6) Wallace, J. R., Cohen, M. F., and Greenberg, D. P.: "A Twopass Solution to the Rendering Equation: A Synthesis of Ray Tracing and Radiosity Methods", Computer Graphics 21-4, pp. 311-320 (1987).
- 7) Wallace, J. R., Elmquist, K. A., and Haines, E. A.: "A Ray Tracing Algorithm for Progressive Radiosity", Computer Graphics 23-3, pp. 315-324 (1989).

- 8) Baum, D. R., Rushmeier, H. E., and Winget, J. M.: "Improving Radiosity Solutions Through the Use of Analytical Determined Form-Factors", Computer Graphics 23-3, pp. 325-334 (1989).
- 9) Sillion, F. X., Arvo, J. R., Westin, S. H., and Greenberg D. P.: "Global Illumination Solution for General Reflectance Distributions", Computer Graphics 25-4, pp. 187-196 (1991).
- 10) Cohen, M. F., Chen, S. E., Wallace, J. R. and Greenberg, D. P.: "A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation", Computer Graphics 22-4, pp. 93-101 (1988).
- 11) Chao M., Peng Q., and Liang Y.: "A New Radiosity Approach by Procedural Refinements for Realistic Image Synthesis", Computer Graphics 22-4, pp. 93-101 (1988).
- 12) Chen, S. E.: "Incremental Radiosity: An Extension of Progressive Radiosity to an Interactive Image Synthesis System", Computer Graphics 24-4, pp. 135-144 (1990).
- 13) Schoeneman, C., Dorsey, J., Smits, B., Arvo, J. and Greenberg, D.: "Painting with Light", Computer Graphics Annual Conference Series, pp. 143-146 (1993).
- 14) Kawai, J. K. and Painter, J. S. and Cohen, M. F.: "Radiosity Optimization: Goal Based Rendering", Computer Graphics Annual Conference Series, pp. 147-154 (1993).
- 15) Dobashi, Y., Kaneda, K., Nakatani, H. and Yamashita, H., Nishita, T.: "A Quick Rendering Method Using Basis Functions for Interactive Lighting Design", Computer Graphics Forum 14-3, pp. C299-C240 (1995).
- 16) 水上, 市山, 野田, 南原, 渡辺: "コンピュータによる数値計算", 朝倉書店(1989).
- 17) 照明学会編: "ライティングハンドブック", オーム社(1987).
- 18) 森口, 宇田川, 一松: "数学公式III-特殊関数-", 岩波書店(1960).
- 19) 中前, 西田: "3次元コンピュータグラフィックス", 昭晃堂(1986).
- 20) Goldberg, D. E.: "Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company Inc. (1989).
- 21) 戸川: "マトリクスの数値計算", オーム社(1971).

## 土 橋 宜 典



平4, 広島大学工学部第二類(電気系)卒業。平6, 同大学大学院工学研究科システム工学専攻博士課程前期修了。平9, 同専攻博士課程後期修了。同年より広島市立大学情報科学部助手。コンピュータグラフィックスに関して、照明シミュレーション、景観予測、などの研究に従事。平7, EUROGRAPHICS Best Paper Award受賞。平8, 画像電子学会論文賞受賞。工学博士。情報処理学会会員。

## 中 谷 秀 貴

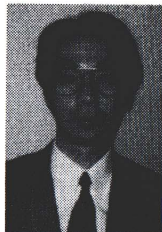


平7, 広島大学工学部第二類(電気系)卒業。平9, 同大学大学院工学研究科システム工学専攻博士課程前期修了。同年、富士通株式会社入社。コンピュータグラフィックスに関して、照明シミュレーションの研究に従事。情報処理学会会員。



順・逆両問題アプローチを統合したインタラクティブ照明設計システムの開発

金 田 和 文 (正会員)



昭57, 広島大学工学部第二類(電気系)卒業。昭59, 同大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年, 中国電力(株)入社。昭61より広島大学工学部第二類(電気系)助手。平7, 同大学助教授。平3より1年間米国ブリガムヤング大学へ出張。主として, コンピュータグラフィックス, 画像処理の研究開発に従事。工学博士。電子情報通信学会など5学会に所属。

山 下 英 生 (正会員)



昭39, 広島大学工学部電気工学科卒業。昭43, 広島大学大学院修士課程修了。同年, 広島大学工学部電気工学科助手。平4, 同教授第二類(電気系)電気機器工学教育科目担当。この間昭56, 2月より1年6ヶ月間アメリカ・クラークソン工科大学へ出張。主として, 有限要素法による電気機器の電界・磁界解析, 逆問題解法, サイエンティフィックビジュアルライゼーションに関する研究に従事。工学博士。画像電子学会, 電気学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 日本シミュレーション学会, 日本AEM学会, IEEE, ACM, 各会員。