コンピュータグラフィックスによる 照明シミュレーション[†]

正会員 平田 貢* 正会員 西浜 伸通** 専門会員 大八木 幸三**

1. ま え が き

最近、照明の量だけではなく照明の質や演出効果に配慮した快適な照明環境の実現が重視されるようになった。快適な照明環境を実現するためには図 1 に示すように照明ソフトの確立、照明器具開発、照明設計および空間の利用者に対する効果的なプレゼンテーションが必要である。

図 1 快適な照明環境の実現のための要素

これらの各要素において照明環境を予測、評価するために、照度計算の結果を図 2 のような等照度曲線として、CRT や XY プロッタに出力するコンピュータシステムが従来から用いられているが、これは 1 平面の分布を表現するものであり、空間全体が理解しにくく照明環境を評価するために十分でなかった。

模型や実物を用いた照明実験によれば、照明環境を予測評価することができるが、照明実験には次のような問題があった。

- (1) 時と場所に制限があり再現が困難。
- (2) 建物の色や、照明計画などの条件を簡単に変えられない。
- (3) 照明器具、ランプの模型化が困難。

図 2 等照度曲線図の例

そこで、コンピュータグラフィックス*** (CG) を応用して、任意の位置からカラー陰影表示の透視図を作成することができる、照明シミュレーションシステム¹⁾を開発し実用化した。これは西田らの開発したシステム²⁾に加えて、軸対称以外の一般の照明器具の配光を扱えるように改良したもので、当社のすべての照明器具の配光を扱うことができ、たとえば住宅照明のように静的な照明環境の評価に有効である。

しかし、スポーツ照明や道路照明などの動的な照明環境の評価には、物体や見る位置の動きを考慮する必要がある。静止画だけでは十分ではない。そこで、前述の照明シミュレーションシステムに、三次元アニメーション作成機能を追加し、動的な照明環境の変化を評価することができるようにした³⁾。

本報では、照明環境の評価にカラーの静止画またはアニメーションを用いるために要求された課題、およびその解決方法について述べる。

[†] Computer Graphics Simulation System for Lighting Design

* 松下電工株式会社営業本部エンジニアリング総合部 Mitsugu Hirata

** 松下電工株式会社電機事業本部照明開発研究所
Nobumichi Nishihama, Kouzou Ooyagi

〒571 大阪府門真市門真 1048

1048 Kadoma, Kadoma city, Osaka 571 Japan

資料の一部は、昭和 63 年照明学会全国大会にて発表したものである。

*** コンピュータグラフィックス：コンピュータにより生成された画像。

本報では特にカラーの静止画およびアニメーションをいう。

2. 静的な照明シミュレーション

カラー陰影表示の透視図を照明環境の評価に用いるためには次の機能を有することが必要である。

- (1) 任意の実用的な照明器具の配光が扱える。
- (2) 物体による遮光（影）を考慮できる。
- (3) 物体の形状を簡単に定義できる。
- (4) 視点や視線方向を簡単に変えることができる。

以下これらの課題を解決した方法について述べる。

2.1 物体の形状定義

本システムによって画像を生成するためには、目的の空間の建築構造、什器、照明設備などの物体形状を立体的に定義しなければならない。この物体形状を効率よく定義するために用いた方法について説明する。

CG でよく用いられる、三次元物体形状の定義方法には次の2種類がある。

(1) B-Reps (Boundary Representation)

物体形状を多面体で定義し、各面ごとに各頂点の三次元座標を入力する方法で、たとえば図3の例では面数は7、頂点数は10である。この方法では形状の最小要素が面であるためあらゆる形状を定義できるが、形状を記述するためのデータ量が多くなる欠点がある。

図3 B-Reps の定義

(2) CSG (Constructive Solid Geometry)

あらかじめ定義されたプリミティブ（直方体や円柱などの基本形状）を、集合演算（Boolean Operation）に用いて組み合わせて物体形状を定義する。たとえば図4の例では3個のプリミティブを用いている。この方法では形状の最小要素がプリミティブであるため、データ量は少なくすむが、定義できる形状に制限がある。

そこで、形状定義要素としてプリミティブと面の両方が使用でき、さらに物体の複写や集合演算が簡単にできる三

図4 CSG の定義

次元の対話型モデラー*を使用して形状定義を行ない、モデラーの形状出力をB-Repsに変換して用いることにした。また、モデラーを使用することによって、人力済みの形状データを保存しておくことが可能であり、たとえばインテリアや什器などを部品化しておいて、自由に組み合わせて使用するなど、データの修正、流用が容易にできる。

2.2 視点・注視点の定義

図5に示すように視点および注視点は、物体の定義に用いた三次元座標系の点で定義する。視線方向は視点から注視点へ向かう方向である。また、視点から注視点に向かうベクトルを視線ベクトルと呼ぶ。画像は視線ベクトルに直角な平面（スクリーン）に投影され、その平面のうち、実際のディスプレイに表示される領域をスクリーンウインドという。スクリーンウインドは正方形でその大きさは視野を表わすので、スクリーンウインドと視点で作られる空間を視野ピラミッドという。

図5 視点・注視点の定義

スクリーンウインドの中心に注視点があるとき、視野角 α は(1)式で計算できる。

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \frac{W_s}{2 \cdot V} \quad (1)$$

ただし、 W_s : スクリーンウインドの幅

V : 視線ベクトルの長さ

視点および注視点は、三次元の点の情報であるから簡単に変更することができる。

2.3 配光および影を考慮した画像の計算方法

本システムでは、図6のアルゴリズムによって画像を計算している。入力データのうち三次元物体形状、視点、

図6 画像生成のアルゴリズム

* モデラー：三次元の物体形状を定義し、コンピュータに入力するためのハードウェアおよびソフトウェアシステム。

注視点についてはすでに説明したので、物体の色・材質などの属性、照明器具の種類と取付け位置および取付け角度などについて説明する。

物体の色は、白色光が入射したときの反射光の赤成分 (C_r)、緑成分 (C_g)、青成分 (C_b) で定義する。材質データには BOZO (複数の色をランダムにつける) や、大理石などの模様や鏡面反射率や透過率などがある。

照明器具データとしては配光、ランプ光束、取付け位置や取付け角度などをを入力する。取付け位置は形状定義と同じ三次元座標系で入力し、取付け角度は配光測定時の姿勢からの変位角を x 軸、 y 軸、 z 軸の回転軸ごとに与える。

以上のデータを入力し、レイ・トレーシング*および輝度計算により画像を作成しグラフィックディスプレイ、写真、ビデオテープなどに出力する。

図 7 レイ・トレーシングおよび直射照度計算

次に図 7 のレイ・トレーシング、および輝度計算による画像計算方法について説明する。画像はたとえば 1,024 × 1,024 個の画素の集まりであり、各画素ごとにディスプレイに出力するための RGB** の値を計算することによって得られる。1 画素の RGB を計算するためには、まず、視点からスクリーンウインド上の画素を通る光線を求める。次にその光線と 2.1 で定義した物体との交点計算を行ない、視点に最も近い交点を計算点とする。

この計算点について各光源ごとに直射照度計算を行なう。このとき光源と計算点を結ぶ線分が他の物体に交差するか判定し、もし交わればその光源について計算点は影になっているので直射照度は 0 になる。影でなければ、それぞれの器具を点光源として(2)式により直射照度を計算する。

$$E_i = \frac{I_i \cdot \cos \theta}{L^2} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、
 E_i : 光源 i による直射照度
 I_i : 光源 i の計算点方向への光度 (cd)
 θ : 光源 i の方向と計算面の法線方向とのなす角
 L : 光源 i と計算点との距離 (m)
 光源の計算点方向への光度は、配光データから計算す

る。配光データは照明器具を配光測定装置に取り付け全方向の光度を測定することで得られる。この直射照度から(3)～(5)式により RGB を計算する。

$$R = C_r \cdot \{ (1-H) \cdot k \cdot \sum_{i=1}^n E_i \cdot F_{ri} + H \} \dots \dots \dots (3)$$

$$G = C_g \cdot \{ (1-H) \cdot k \cdot \sum_{i=1}^n E_i \cdot F_{gi} + H \} \dots \dots \dots (4)$$

$$B = C_b \cdot \{ (1-H) \cdot k \cdot \sum_{i=1}^n E_i \cdot F_{bi} + H \} \dots \dots \dots (5)$$

ただし、
 R : ディスプレイに出力する色の赤成分
 G : ディスプレイに出力する色の緑成分
 B : ディスプレイに出力する色の青成分
 F_{ri} : 光源 i の光色の赤成分
 F_{gi} : 光源 i の光色の緑成分
 F_{bi} : 光源 i の光色の青成分
 k : 表示装置の輝度レベルと整合させるための係数
 H : 間接照度
 n : 光源数

建築パースや CAD などの分野で用いられている CG システムでは、光源として平行光線かすべての方向の光度が一定の点光源しか扱えない。これに対して本システムは以上の方法により、実際の照明器具の配光を用いることができ、照明環境を評価するためのツールとして実用化することができた。

3. 動的な照明シミュレーション

たとえば、自動車の運転者からの道路照明の見え方のように動的に照明環境が変化する場合には、静止画による評価だけでは十分ではなく、動画 (アニメーション) による評価が必要である。アニメーションは 1 秒間に 10～30 枚の画像を 2 章と同じアルゴリズムにより作成し、連続的にビデオテープに録画することにより得られる。2 章の機能だけを使って 1 コマ 1 コマ形状などを定義してもアニメーションを作成できるが、たいへんな作業になるので実用的ではない。そこで物体形状、視線などの初期状態、およびそれらの軌跡を指定するだけで、アニメーションを作成する方法を開発した。この三次元アニメーションを動的な照明環境の評価に用いるためには、次のような機能が必要である。

- (1) 物体の動きに応じた各種軌跡が扱える。
- (2) 視点・注視点も同様に動かすことができる。
- (3) 簡単に太陽軌跡を定義できる。

以下これらの課題を解決した方法について述べる。

3.1 動作軌跡

動作軌跡は、図 8 に示すように直線や円弧などの簡単な軌跡を P_i で示す接点で結んだ曲線で、各接点ごとに通過時刻 (t_i)、速度 (V_i) および通過座標 (x_i, y_i, z_i) を定義する。このタイムチャートから任意の時刻 t における物体の位置を計算する方法を、最も簡単な直線の場合で説明する。

*レイ・トレーシング法：画像計算法の一つで、1 画素ごとに目に入る光線をその逆方向に追跡する (トレース) する方法。
 **RGB：光の 3 原色である。Red, Green, Blue の略。カラー CRT の各画素は、R、G、B の 3 点が一組になっていて、その 3 点の輝度の合成によってさまざまな色を出している。

$t_1 \leq t \leq t_2$ であれば、 P_1 と P_2 を結ぶ線分上に時刻 t における物体の位置 (点 P) がある。このとき、 $P_1 \rightarrow P_2$ の加速度 a は(6)式で表わされる。

$$a = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots(6)$$

P_1 と P_2 の間を等加速度運動と考えると、 P 点の座標 (x , y , z) は(7)~(11)式で求められる。

$$\Delta L = V_1 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \cdot a(t - t_1)^2 \dots\dots\dots(7)$$

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \dots\dots\dots(8)$$

$$x = \frac{\Delta L}{L}(x_2 - x_1) + x_1 \dots\dots\dots(9)$$

$$y = \frac{\Delta L}{L}(y_2 - y_1) + y_1 \dots\dots\dots(10)$$

$$z = \frac{\Delta L}{L}(z_2 - z_1) + z_1 \dots\dots\dots(11)$$

図 8 動作軌跡の定義
(a) タイム・チャートの例 (b) 軌跡の例

3.2 視点・注視点の定義

視点と注視点が固定の場合 2 章と同様にして定義する。

図 9 視線ベクトルの大きさとスクリーンウインドの関係
(a) ウインドサイズが一定のとき
(b) 視角が一定のとき

視点または注視点が移動するときは、3.1 と同様にして軌跡およびタイムチャートを定義する。視点または注視点の移動により、視線ベクトルの長さが変化する場合はスクリーンウインドの大きさは、一般には図 9 (b)のように視野角を固定にする。とくに注視している物体の表示サイズを変えたくない場合は、図 9 (a)のようにウインドサイズを一定にする。

3.3 太陽軌跡

日付とシミュレーション地点の経度、および緯度を指定するだけで、直射日光による建築構造の影の一日の変化をアニメーションで検討、評価することができる。直射日光の方向は(12)~(13)式により計算している。⁴⁾

$$\sin S_a = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \tau \dots\dots\dots(12)$$

$$\sin S_b = \cos \delta \cdot \sin \tau \cdot \sec S_a \dots\dots\dots(13)$$

ただし、

S_a : 太陽高度角

S_b : 太陽方位角

ϕ : シミュレーション地点の経度

δ : 太陽赤緯*

τ : 時角**

4. ハードウェア

本システムのハードウェア構成を図 10 に示す。画像は大型コンピュータで計算し、計算した画像を 16M バイトのイメージメモリ***に転送し、グラフィックディスプレイに表示している。中心となるグラフィックディスプレイは、解像度 1,024×1,024 画素で 1 画素ごとに RGB 各 256 輝度レベルの表示が可能である。入出力装置としては VTR、テレビカメラ、イメージレコーダなどがある。イメージレコーダは、ディスプレイに表示された画像のハードコピーを取るための装置で、ポラロイドまたは 35 mm フィルムに出力できる。

他には形状定義用の三次元モデラー端末がある。

図 10 ハードウェア構成

* 太陽赤緯：太陽軌道の赤道面からの高度角。

**時角：時刻（真太陽時）を角度で表わした量。1 日を 360° に対応させ正午を 0°、午前 6 時を -90°、午後 6 時を +90° とする。

***イメージメモリ：画面の表示内容を記憶するためのメモリ。本システムでは 1 画素ごとに RGB 各 256 (2⁸) 輝度レベルで表示するために 1 画素ごとに RGB 各 1 バイト (8 ビット) のメモリを使用している。

5. 適用例

(1) 道路照明の例

口絵1は図2と同じ照明条件の道路をシミュレーションした例で図11の配光を使用している。口絵2は同じ道路で道路灯の取付け間隔を倍の70mに広げた場合のシミュレーション例で、口絵1に比べて路面上の照度分布が悪くなっていることがわかる。従来は照度均斉度の評価に最小照度と平均照度の比などの数値を使用していた。これに対し本システムでは、直接画面で明るさ分布を透視図として見ることができ、照度分布を直感的に理解することができる。

(2) 飛行場エプロンの例

口絵3は飛行場エプロンの屋景。口絵4は同じエプロン

図11 配光曲線

の夜間照明例で、投光器は建物上の照明塔（地上高さ25m）に取り付けられている。航空機は複数の照明塔から照明されているので複雑な影を生じており、このような影が、たとえば航空機の整備に支障ないか評価することができる。

(3) 大型タンクのカラー演出照明例

大型タンク（地上高さ30m）の夜間の景観を高めるために投光器によって地上から照明した例。口絵5は白色光源であるメタルハライドランプによる照明で、口絵6はカラーHIDランプの緑と青を混光した例である。

(4) 防犯灯による照明例

防犯灯による歩道の照明例で、口絵7の照明器具では民家の壁面や田畑に防犯灯からの光が漏れている。口絵8は前方および後方の配光を規制した照明器具で、口絵7に比べて歩道の明るさはあまり変わらないが、民家の壁面や田畑への光が少なくなっていることがわかる。

(5) ビルの投光照明例

口絵9は高層ビルの屋景で、口絵10は同じビルの投光照明例で、夜間の景観を高めるためにビルの最上部を投光器によって照明した例である。側面に投光器を配置し屋上にはボール照明器具を取り付けている。

(6) 住宅照明例

口絵11はリビングの照明シミュレーション例で、ソファや食卓上のペンダント、壁面のブラケットやダウンライトに加えて天井への間接照明を設置してあり、広がり感のある空間を演出している。口絵12は同じ部屋で食事に必要な照明を消灯または調光した例である。カーペットの模様はBOZOの材質データで定義している。

口絵13は別の部屋のシミュレーション例で、スポットラ

図12 三次元アニメーション例

イトやダウンライトを中心としたリズムカルな空間を演出している。壁の一部に鏡面の材質データを定義している。

(7) 景観シミュレーション例

口絵14は背景となるビルの実写写真をテレビカメラで入力した画像。口絵15は画像計算で作成した時計塔を口絵14に重ねた画像。時計塔のデザインが背景にマッチしているか評価することができる。本例に限り背景に実写を使用している。本例以外の適用例は実写を使用せずすべて画像計算によって作成した。

(8) 三次元アニメーション例

図 12 は、競技中のバレーボールの見え方を評価するために作った三次元アニメーション (32 コマ) の画像の一部である。サーブしたボールが反対側のエンドラインに達するまでを 1/10 秒間隔で VTR へ録画した。ボールの軌跡は放物線を用いており、床に落ちて跳ね返るところは、反発係数を定義することで自動的に処理している。

6. あ と が き

本システムは、照明器具光学特性を考慮できる初の実用

三次元 CG システムであり、これまでに照明設備設計の強力なツールとして屋内外の照明設計、および新商品開発に活用している。今後は順応あるいは照明光や照度により変化する色の見え (appearance) を考慮した画像作成、リアリティを上げるために、CRT やプリンタの特性を考慮した色・輝度の表現方法、および現在数十分から数時間を要する計算時間の短縮が必要である。

最後に、本システムの開発にあたりご協力いただいた当社中央 EC 矢野主査ほか、関係者各位に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

(1) 平田ほか：CG による照明シミュレーション，松下電工技報 36 (昭 63) 40～43
(2) 西田，中前：複数光源による照度分布のカラー透視図表現法，照学誌 66 (昭 57) 150～156
(3) 西浜ほか：CG アニメーションを用いた照明シミュレーションシステムの開発，照学全大 (昭 63) 66
(4) 建築設計資料集成 1 環境，日本建築学会編，丸善 (昭 58) 51

(受付 1988 年 5 月 28 日)

新 製 品 紹 介

白いスポット光「マルチスポット」
松下電器より新発売

松下電器株式会社では、商業施設のスポットライト・ダウンライト用光源として、色温度 3400 K の白色光で 2,000 時間の長寿命化を図った一般照明用ハロゲン電球「マルチスポット」4 品種を発売した。

マルチスポットは、この高色温度化を実現するために、可視光の内の黄色から赤色部分の透過率を一部減少させる多層干渉膜を、バルブ表面に塗布した発光管を新開発のレフ形バルブに内蔵したものである。口金には既設器具にそのまま使用できる E26 口金を取り付け、ビーム角 18° のスポット照明用ハロゲン電球として商品化した。

既設のビーム電球やレフ電球からの置換により、さわやかな白色感のあるスポット効果が得られ、いきいきとした照明空間

ができる。

特 長

- (1) ハイビーム電球やレフ電球のやや黄みを帯びた光色と異なり、色温度 3400 K のさわやかな白色光。
- (2) ビーム角 18° のシャープな配光。
- (3) E26 電球ソケットでそのまま使用できるハロゲン電球。

■ 定 格 表

品 番	バルブ 仕上	寸 法 (mm)		口 金	定格消費 電力 (W)	ビーム角 (度)	全光束 (lm)	ビーム光束 (lm)	中心光度 (cd)	色温度 (K)	定格寿命 (h)	(¥)
		バルブ径	長 さ									
JDR100(110)V 80W・SN	フロスト	95	128	E26	80	18	800	140	2400	3400	2000	2300
JDR100(110)V 100W・SN	フロスト	95	128	E26	100	18	1000	180	3000	3400	2000	2300

(お問い合わせ先 松下電器産業株式会社管球事業部
〒569 大阪府高槻市幸町 電話0726—82—5521)