

天空光と鏡面反射を考慮した陰影表示

中前栄八郎・岡本敬・金田和文・西田友是

広島大学工学部

福山大学工学部

建築物などの屋外の物体を表示するためには、直射日光と、大気中の粒子による散乱光、すなわち天空光について考える必要がある。提案手法は、著者らが既に関連している直射日光と天空光の両者を考慮した陰影表示法を改良したもので、次の特徴を持つ。

- (1) 直射日光と天空光の両者による拡散反射光に加え、鏡面反射光も考慮することによって、よりリアルな画像が作成できる。
- (2) 鏡面反射光の計算は、天空の一部分のみ用いることにより高速化を図っている。
- (3) 天空のスペクトル分布を考慮することにより、様々の太陽高度における建物の色調の変化を表現することも可能である。

Continuous tone representation
considered sky light and specular reflectance

Eihachiro NAKAMAE, Takashi OKAMOTO, Kazufumi KANEDA, Tomoyuki NISHITA

Faculty of Engineering

Hiroshima University

Saijocho, Higashihiroshima

724, Japan

Faculty of Engineering

Fukuyama University

Higashimura, Fukuyama

729-02, Japan

To render outdoor objects such as buildings, it is necessary to consider both direct sunlight and scattered light caused by air molecules and aerosols in the atmosphere. We improved continuous tone representation method considered direct sunlight and sky light. The proposed method has the following advantage.

- (1) Diffuse reflectance illuminated by both sunlight and sky light and specular reflectance give much more realistic images.
- (2) Using part of sky saves calculation time for specular reflectance.
- (3) Considering sky spectrum distribution at various solar altitudes changes the color on the buildings.

1. はじめに

建築物などの屋外の物体を表示するには、自然光について考慮する必要がある。自然光は、直射日光と、大気中の粒子による散乱光、すなわち天空光の二つからなる。著者らは、直射光と天空光の両者を考慮した陰影表示法¹⁾を、既に開発している。

しかし、この方法には二つの未解決な点がある。まず第1に、物体の反射光には拡散反射光と鏡面反射光があるにも拘らず、直射日光と天空光それぞれについて、拡散反射光しか考慮していない。直射日光と天空光それぞれに対する鏡面反射光も考慮すると、それぞれの材質に応じた鏡面反射特性を持つ材質も表現でき、よりリアルな画像が作成できる。第2に、これまでの方法では、天空のスペクトル分布までは考慮していない。特に夕焼けのように、太陽高度が低いときは天空のスペクトル分布の変化が大きく、これを考慮することにより光源の影響によって生じる建物などの色調の変化を表現できる。

本稿では、これら2点を解決する手法を提案する。

2. 基本的な考え方

本稿では、直射光と天空光の両者を考慮した陰影表示法¹⁾を次の2点について改良した。すなわち、直射日光と天空光それぞれの、拡散反射光と鏡面反射光を考慮し、また、空の色を計算するために、著者らが開発した大気拡散モデル²⁾を使用する。この章では、提案手法で使用した反射モデル、直射光と天空光の両者を考慮した陰影表示法、および大気拡散モデルについて述べる。

2. 1 反射モデル

よりリアルな画像を得るには、物体がいかに光を反射するかを、正確にシミュレートする必要がある。反射モデルには、Phongのモデル³⁾、Blinnのモデル⁴⁾、Cook-Torranceのモデル⁵⁾などがある。本稿では、これらのモデルの中で、金属感の表現に適したCook-Torranceのモデルを採用した(付録参照)。

2. 2 物体による遮蔽効果を考慮した天空光の計算法

天空は半径の非常に大きい半球光源と考えることができる。したがって、計算点は常に半球の中心にあるものとみなせる。図1のように、この半球をいくつかの帯光源に分割して、天空を帯光源の集合として考える。この帯光源の輝度は、帯の長さ方向に連続的に変化する。ℓ番目の帯光源を S_ℓ ($\ell=1, 2, \dots, N$) とし、水平面との角度が δ_ℓ の平面(サンプル面と呼ぶ)と半球との交線をサンプル線とする。図2のように、このサンプル線の可視区間を用いて、各帯光源の可視領域を求めて、これらの可視領域による輝度を加算して全天空光による輝度を求める。ここで、サンプル線の可視区間は、サンプル面と物体の交差判定により求める。

図1のように帯光源を微小面積の天空要素の集合と考え、天空要素を点光源 P 。と見なすと、計算点 P での輝度 dE は逆二乗則により求めることができる。 P 。の

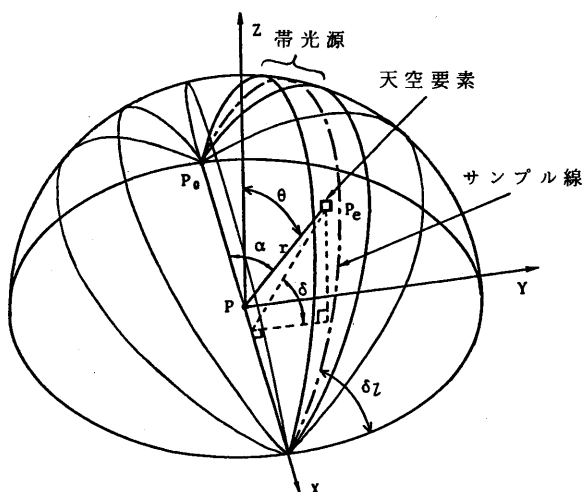


図 1. 天空の帯光源への分割

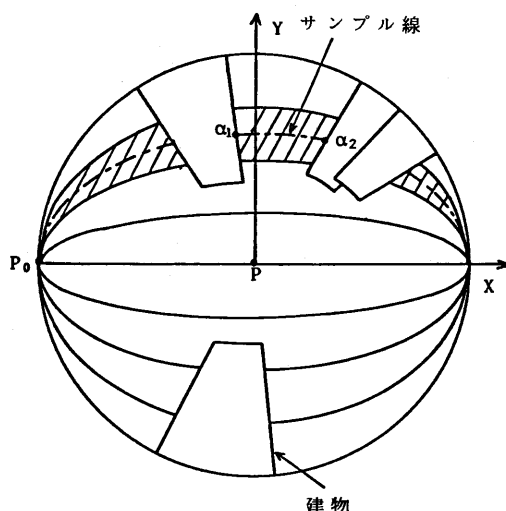


図 2. サンプル線を用いた
帯光源の可視領域の計算

位置を X 軸 (P P₀) と P₀ P とのなす角 α と、水平面からの角 δ で表現する。 0 から α までの領域の帯光源による輝度 $E_1(\alpha)$ は、

$$E_{\lambda}(\alpha) = d_{\lambda} \int_0^{\alpha} L(\alpha, \delta_{\lambda}) \cdot \sin^2 \alpha \cdot d\alpha \quad (1)$$

反射光と鏡面反射光の違いは、拡散反射光が全ての方向に一樣の強さで反射するのに対し、鏡面反射光は特定の方向に強く反射することである。天空要素を点光源 P_0 とみなし、 P_0 の位置を X 軸 (PP_0) と P_0P_0 とのなす角 α と、水平面からの角 δ で表現する。天空要素の輝度 $L(\alpha, \delta)$ は、大気拡散モデルによって得ることができる。視点方向の単位ベクトルを V とし、天空要素に対する面の鏡面反射率を $R_s(\alpha, \delta, V)$ とすると、天空要素の鏡面反射光 dI は、

$$dI = R_s(\alpha, \delta, V) \cdot L(\alpha, \delta) \cdot \sin \alpha \cdot \sin \delta \cdot r^{-2} \cdot dA \quad (2)$$

となる。ここで、 dA は天空要素の面積である。また

$$dA = (r \cdot d\alpha) \cdot (r \cdot d\delta \cdot \sin \alpha) \quad (3)$$

であるから、帯光源 S_1 による鏡面反射光 I_1 は、式 (2) を積分し

$$I_1 = \int_0^\pi \int_{\delta_1 - \Delta_1}^{\delta_1 + \Delta_1} R_s(\alpha, \delta, V) \cdot L(\alpha, \delta) \cdot \sin \delta \cdot \sin^2 \alpha \cdot d\delta \cdot d\alpha \quad (4)$$

となる。一つの帯光源の微小区間 $\delta_1 - \Delta_1 \leq \delta < \delta_1 + \Delta_1$ において、天空要素の輝度 $L(\alpha, \delta)$ および面の鏡面反射率 $R_s(\alpha, \delta, V)$ は一定と考え、

$$L(\alpha, \delta) = L(\alpha, \delta_1) \quad (5)$$

$$R_s(\alpha, \delta, V) = R_s(\alpha, \delta_1, V) \quad (6)$$

とおく。式 (4) は次式で表わされる。

$$I_1 = \frac{1}{N} \cdot \int_0^\pi R_s(\alpha, \delta_1, V) \cdot L(\alpha, \delta_1) \cdot \sin^2 \alpha \cdot d\alpha \quad (7)$$

となる。したがって天空全体の鏡面反射光 I は、

$$I = \sum_{Q=1}^N I_1 \quad (8)$$

となる。

前に述べたように、鏡面反射率は視点の方向によって変化する。そのため各計算点ごとに、天空要素それぞれの鏡面反射率を計算しなければならない。しかし、面の粗さにもよるが、図 3 の (a) のように天空要素 P_1 の正反射方向と視点が近い場合には、視点に届く P_1 の鏡面反射光は大きく、(b) のように天空要素 P_2 の正反射方向と視点の方向が大きくずれた場合には視点に届く P_2 の鏡面反射光は非常に小さくなる。そこで、この性質を利用して天空の一部分だけの積分を行なう。

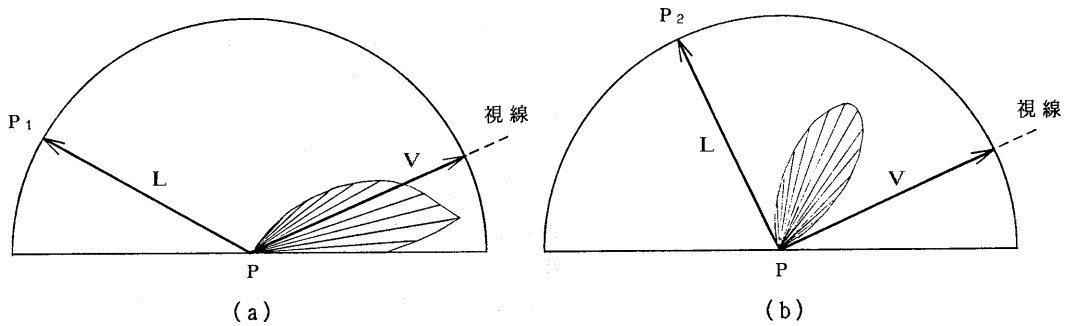


図 3. 天空要素の鏡面反射光

天空要素 P の判定関数 $G(\alpha, \delta, V)$ を次式で定義する。

$$G(\alpha, \delta, V) = L(\alpha, \delta) \cdot R_s(\alpha, \delta, V) \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

$G(\alpha, \delta, V)$ があるしきい値 ε 以上となる領域を積分領域とする。 $G(\alpha, \delta, V)$ が複雑なため、この積分領域をあらかじめ求めることはできない。したがって、 $G(\alpha, \delta, V)$ の値の大きな部分から小さな部分へ向かって、すなわち正反射方向の天空要素からその天空要素から離れる方向に積分を行ない、 $G(\alpha, \delta, V) < \varepsilon$ となればそこで積分を打ち切る。

次に具体的な積分法について説明する (図 4 参照)。

- (1) 視点の正反射方向の天球ドーム上の点 Q を求める。図 1 のように、 Q 番目の帯光源を S_l ($l = 1, 2, \dots, N$) とし、水平面との角度が δ_l の平面 (サンプル面と呼ぶ) と半球との交線をサンプル線とすると、点 Q は帯光源 S_l のサンプル線と帯光源 S_{l+1} のサンプル線とにあるものとする。

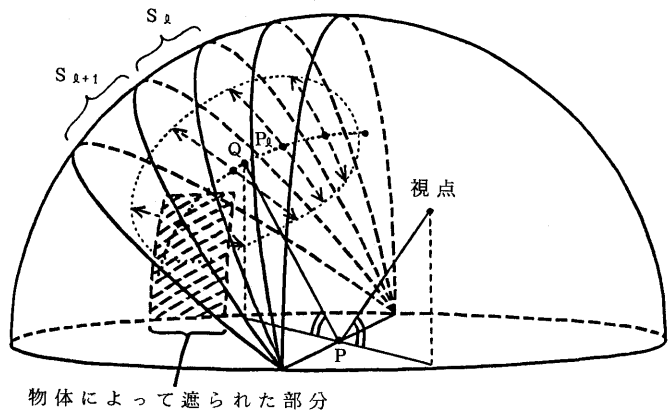


図 4. 鏡面反射光の積分領域の決定法

- (2) 帯光源 S_l のサンプル線上で Q に最も近い天空要素 P_l を見つけ、 P_l と X 軸 (PP_0) と P_0P_l とのなす角を α_{l1} とする。 P_l の判定関数 $G(\alpha_{l1}, \delta_l, V) \geq \varepsilon$ ならばこの帯光源 S_l の積分を行なう。帯光源 S_l の積分は次のようにして行なう。
 - (2.1) 帯光源のサンプル線上で Q に最も近い天空要素 $P_l(\alpha_{l1}, \delta_l)$ から、サンプル線に沿って帯光源の片方の端に向かって、ある積分間隔 $d\alpha$ ずつ台形積分を行ない、 $G(\alpha, \delta_l, V) < \varepsilon$ となればそこで積分を打ち切る。物体による遮蔽効果を考えるため、まわりの物体によってサンプ

ル線が遮られて見えない部分があれば、その部分はとばして積分を行なう。サンプル線の可視区間は、サンプル面と物体の交差判定により求める。

(2.2) 天空要素 $P_k(\alpha_{k1}, \delta_k)$ から、サンプル線に沿って、(2.1) で積分した方向と反対側の端に向かって、(2.1) と同様に台形積分を行なう。

(4) 隣の帯光源 S_{k-1} に移り、(2) と同様の処理を行なう。

(5) このように S_{k-2} 、 S_{k-3} 、 $\dots$ の処理を行なっていく、 i 番目 ($i=k-1, k-2, \dots, 1$) の帯光源のサンプル線上で点 Q に最も近い天空要素 P_i の判定関数 $G(\alpha_{i1}, \delta_i, V) < \varepsilon$ となれば、帯光源ごとの積分を打ち切る。

(6) 帯光源 S_{k+1} 、 S_{k+2} 、 $\dots$ も (2) ~ (4) と同様の処理を行ない、 i 番目 ($i=k+1, k+2, \dots, N$) の帯光源のサンプル線上で点 Q に最も近い天空要素 P_i の判定関数 $G(\alpha_{i1}, \delta_i, V) < \varepsilon$ となれば、帯光源ごとの積分を打ち切る。

4. 適用例

図 5 (a) ~ (d) は、すべて窓と窓枠に鏡面反射を考慮している。壁面はそれぞれ、鏡面反射無しで拡散反射のみを考慮したもの、普通の壁面（塗装した面）、タイル、アルミニウムである。太陽高度は 4 枚とも 50° である。図 6 (a) ~ (d) は、すべて建物の壁面はタイルである。太陽高度はそれぞれ、朝の 17° 、正午の 60° 、夕方の 8° 、夕方の 4° である。

このように、建物の材質によって、また太陽の高度によって、建物の色は大きく変化する。

5. おわりに

提案手法により、よりリアルな画像が表示できるようになった。特に、金属を含む建築物や、太陽高度に応じたリアルな画像を表示できるようになった。提案手法の今後の課題として、(1) 物体間の相互反射、(2) 計算時間のより一層の高速化を考える必要がある。

(付録) Cook-Torrance のモデル

反射の幾何学モデルとして、図 1 を考える。図 1 において、

f : 被照面

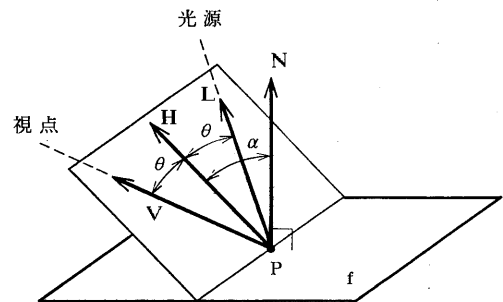
P : f 上の面の反射光輝度計算点

N : 点 P 上の面の単位法線ベクトル

L : 点 P より光源方向への単位ベクトル

V : 点 P より視点方向への単位ベクトル

H : 点 P 、光源、視点の 3 点を含む面上の L と V の 2 等分線上における単位ベクトル



付図 1. 反射の幾何学モデル

θ : L と H (または H と V) のなす角

α : H と N のなす角

である。面 f が無数の微小面で構成されていると仮定すれば、H は光源からの光を視点方向 (V 方向) に理想的鏡面反射をするある微小面の単位法線ベクトルであると考えることができる。鏡面反射率 R_s は次式で示される。

$$R_s = \frac{F}{\pi} \cdot \frac{D \cdot G}{(N \cdot L) \cdot (N \cdot V)}$$

ここで

F : 完全にスムーズな面の反射率 (物質の透過率と θ の関数)

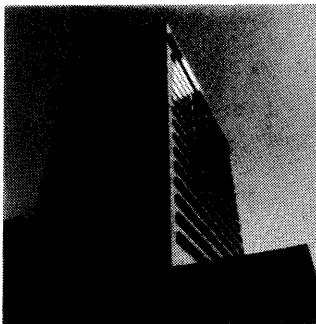
D : 微小面の分布関数 (Beckmann 分布関数、面の粗さを示す定数と α の関数)

G : 幾何学的減衰因子 (N、L、V、H の関数)

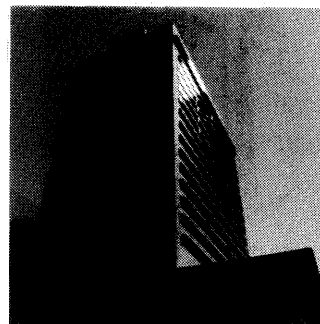
である。

[参考文献]

- 1) Nishita, T. and Nakamae, E.: CONTINUOUS TONE REPRESENTATION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS ILLUMINATED BY SKY LIGHT, Computer Graphics, Vol. 20, No. 4 (1986) pp. 125-132.
- 2) 西田-中前: スペクトルを考慮した天空光のシェーディングモデル, 情報処理学会第36回全国大会1Z-1 (1988).
- 3) Bui-Tuong, Phong: Illumination for Computer-Generated Pictures, Comm. ACM, Vol. 18, No. 6 (1975) pp. 311-317.
- 4) Blinn, J.F.: Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures, Computer Graphics, Vol. 11, No. 2 (1977) pp. 192-198.
- 5) Cook, R.L. and Torrance, K.E.: A Reflectance Model for Computer Graphics, ACM Trans. on Graphics, Vol. 1, No. 1 (1982) pp. 7-24.

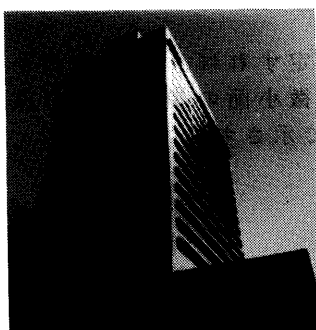


(a) 鏡面反射のない壁面

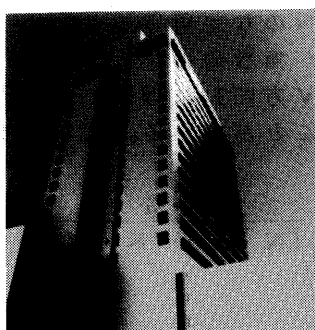


(b) 普通の壁面 (塗装した面)

図 5. 壁面の材質による影響

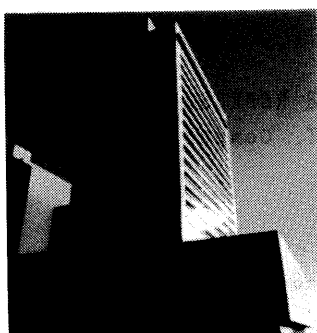


(c) タイルの壁面

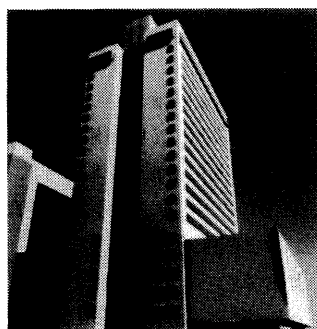


(d) アルミニウムの壁面

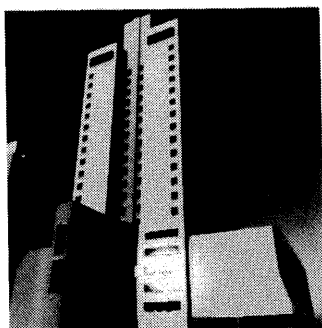
図 5. 壁面の材質による影響



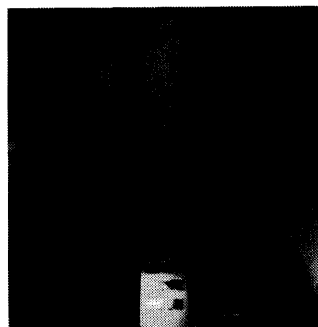
(a) 太陽高度：朝の 17°



(b) 太陽高度：正午の 60°



(c) 太陽高度：夕方の 8°



(d) 太陽高度：夕方の 4°

図 6. 太陽高度の影響