

## 天空光により照射される屋内の陰影表示

Half-Tone Representation of An Interior Illuminated by Sky Light

西田友是

Tomoyuki NISHITA

福山大学工学部

(Fukuyama University)

中前栄八郎

Eihachiro NAKAMAE

広島大学工学部

(Hiroshima University)

Previous shading models have only handled artificial lighting. This paper proposes the shading model for interior daylighting considering sky light and reflected light from buildings and/or grounds.

The proposed method has the following advantages:

- 1) The effect of shadows caused by obstructions such as desks, buildings, and grounds, is taken into account; the illuminance in a room is calculated by the luminance of part of sky and objects visible from the calculation point.
- 2) The indirect illuminance caused by the interreflection between objects gives realistic images.
- 3) Displaying the distribution of daylight factor is available for daylighting designs.

## 1. はじめに

3次元物体の陰影表示は、機器・建築物のCADあるいはアニメーションに有用であり、種々の研究がなされている。本論文では、照明設計に有用な陰影表示法について提案する。

筆者らは、光源の配光特性や相互反射の計算などの照明問題を対象として、点光源、線光源、面光源、多面体光源に対する陰影表示法を開発してきた[1-4]。最近、アメリカでも照明問題に関心もたれるようになり、人工光に関する3次元物体の陰影表示法が開発されるようになった[5-7]。昼光光源は直射日光と天空光に分けることができるが、前者だけでは十分ではなく、より現実感のある画像を得るためには、天空光によって照射される3次元物体の陰影表示についても考慮する必要がある。屋内のある点での照度は、窓から入射する光と相互反射による間接光からなる。さらに、窓から入射する光は、天空光および建築物や地面からの反射光から構成される。また、相互反射は、室内の構成面や室内中の物体によって生じる。ここでは、これらの要素を考慮した屋内の陰影表示法について提案する。ただし、直射日光は平行光線として取り扱うことができるが、本稿では考慮にれないものとする。

提案手法は次の特徴をもっている。

- 1) 室内の物体の他に、屋外の建築物やひさしおよび地面の影響を考慮した陰影表示ができる。
- 2) 室内を構成する床、天井等の相互反射だけでなく、室内中に存在する物体による相互反射も考慮できる。
- 3) 窓からの光に対する影は、本影と半影からなるが、この両者の表示が可能である。
- 4) 採光設計の際に有用な昼光率分布の表示ができる。

## 2. 準備および処理の概略

準備として次の仮定をする。

- 1) 取り扱う物体は凸多面体または凸多角形の集合とする。
- 2) 物体の構成面および地面は完全拡散性の面とする。
- 3) 天空は完全拡散光源で、一様輝度とする。
- 4) 窓は透明とする。

提案手法の基本的な考え方を以下に述べる。

(1) 窓からの光による室内中のある点での照度は、次のようにして求める。すなわち、計算点から窓を通して見える天空および屋外の各物体(建物、ひさし、地面)の可視部分を面光源とみなして境界積分することにより求める。これらの可視部分の立体角投射率にそれぞれの輝度を乗じたものの総和が、その点の照度となる。

(2) 窓からの光に対する室内中の物体による遮蔽効果(すなわち、物体による影の影響)は、次のように求める。面上の各点ごとに影の計算を行うと時間を要するので、あらかじめ各面上の影の領域を求める。すなわち、窓を面光源と考え、光源と物体により構成される影を生じさせる空間(半影および本影を生じる空間をそれぞれ半影多面体および本影多面体とする[3])を求め、この空間と影を求めようとする面との交差領域を求める。

(3) 相互反射は次のようにして求める。壁、天井などの室内を構成する面および室内に存在する物体の構成面をいくつかの面素に分割し、(1)の方法を用いて各面素での直射照度を求め、それを利用して相互反射をあらかじめ計算しておく[4]。そして、透視図上の任意の点での相互反射は、面素の4隅の点の照度を用いた補間法を使用する。

処理の概略手順は次の通りである。

1) 3次元モデルの作成。2) 面素分割。3) 影に関する面の分類。4) 影を生じる空間の抽出。5) 影の領域の計算。6) 各面素での直射照度の計算。7) 各面素での相互反射の計算。8) 与えられた視点に対する物体の優先順位の決定。9) 図形の走査、可視面上の各点の照度計算、および図形の表示。

ここで、3)の面の分類とは、光源(窓を面光源とみなす)からの直射光のすべてが当たる面か、一部が当たる面か、または全く当たらない面かの分類である。この処理は、5)の影を求める必要のある面、6)、9)の照度を計算する必要のある面の抽出に利用する。5)は、6)および9)において、計算点に影を落とす物体を効率よく抽出するためのものである。

本稿では、6)、9)における窓からの光の計算法について述べる(3)、4)、5)については文献[3]、2)、7)については文献[4]、8)については文献[8]参照)。

### 3. 天空光による照度計算

昼光光源は直射日光と天空光に分けることができる。ここでは、天空光について考える。天空輝度(sky luminance)は全天で一様ではなく、晴天空や曇天空の輝度分布はかなり規則的であるが、薄雲り時の輝度分布は不規則で時間的に変動する[9]。しかし、計算の簡単化のために、ここでは一様輝度と仮定する。この仮定のもとでの照度は、立体角投射率(configuration factor, 以下、投射率と呼ぶ)を用いて求めることができる。この天空光は半径の非常に大きい半球光源(または無限に大きい面光源)とみなして計算することができる。しかし、室内の場合、窓から見える天空は有限な大きさになるので一般に面光源とみなすことができる。したがって、窓から入射する天空光をさえぎる物体がない場合には、窓を一つの面光源として処理できるが、実際には室内や屋外の物体の影響を無視できない。本稿では、この影響を考慮した照度計算法について述べる。

以下に、まず地面の反射を考慮しない場合について述べ、次に地面からの反射を考慮した場合の計算法について記述する。

### 3.1 室内および屋外の物体を考慮した窓からの光の計算

窓からの入射光は、窓を通して計算点から見える天空と屋外および物体の各可視部分の投射率（求め方は、付録参照）と、それぞれの輝度を乗じたものの総和により求めることができる。すなわち、図1に示すように、天空の投射率と輝度をそれぞれ、 $C_0$ 、 $L_0$ 、屋外の物体の投射率と輝度をそれぞれ  $C_i$ 、 $L_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ : $N$ は窓から見える物体数)とおけば、照度は次式により求まる。

$$E = \pi \sum_{i=0}^N L_i C_i \quad (1)$$

室内の物体による影の影響を考慮するには、前述の可視部分を求める際に、室内の物体も含めて調べればよい。したがって、計算点Pから見たこれらの可視部分（図2参照）を計算上の新たな面光源と考え、境界積分法を用いて投射率  $C_i$  を求めることにより点Pの照度が求まる。

面光源が隣り合う場合、その境界では、それぞれの面光源に対する投射率の絶対値は等しく符号が異なる。したがって、この性質を利用することによって照度計算の効率化を図ることができる。すなわち、隣接する2つの面光源について夫々境界積分する必要はなく、面光源同志の境界での境界積分値（すなわち、投射率）に両者の輝度の差を乗じればよい。

なお、屋外の各物体の輝度はあらかじめ与えられているものとする。ただし、室内中の物体の計算点から見た際の可視面は天空光による直射光は当らず、したがって天空光に比べて間接光による輝度は小さいので、直射照度の計算の際には、これらの面の輝度は無視できるものとする。

複数個の物体による影響（遮蔽効果）を考慮した直射光は次の手順により求まる。

- 1) 点Pから見た際の屋外の物体を抽出する。
- 2) 窓を面光源とした場合に計算点Pに影を落とす室内の物体を求め、それらの輪郭線を求める。
- 3) 屋外および屋内の物体について、点Pから見たこれらの輪郭線の窓内の可視区間を求める。

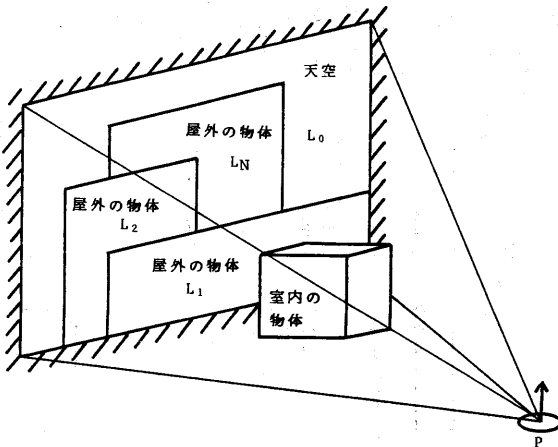


図1 窓から見える天空と屋外の物体

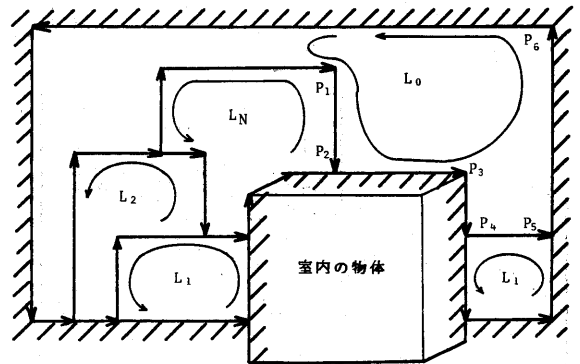


図2 計算点から見た天空と屋外

4) 各可視区間を境界積分する。この際、各可視区間は隣接する面光源の境界であるので、前述の性質を用いる。すなわち、境界積分値（投射率）に、積分の進行方向に向かって左側の物体の輝度と右側の物体の輝度の差を乗じる（図2の $P_1 P_2$ では $(L_0 - L_N)$ を、 $P_4 P_5$ では $(L_0 - L_1)$ を積分値に乘じる）。ただし、室内の物体と窓の輪郭（例えば、 $P_2 P_3$ 、 $P_3 P_4$ 、 $P_5 P_6$ ）では左側の輝度のみ乗じる。ここで、物体の輪郭線は右回り、窓の境界は左回りに与えられているものとし、境界積分はこれらの方向に従うものとする。

5) 各可視区間に対する積分値の総和をとる。この値は天空と屋外物体の可視部分の閉領域をそれぞれ境界積分したことに等しい。

なお、2)において、点Pに影を落とす物体は、2.で述べた手順5)において求めた影の領域内に点Pを含むものである。3)において、室内の輪郭線は窓と点Pによって構成されるピラミッドを用いてクリッピングすることにより求めることができ、また、ピラミッド内の輪郭線の可視区間の判定は、隠線消去の判定に用いる不可視度数の考え方を用いればよい[10]。

### 3.2 地面からの反射を考慮した計算

地面からの反射を考慮する場合の照度は、3.1において、無限に広い平面を考慮することによって求めることができる。無限に広い平面を考えた場合には、窓を通して見える天空と地面の境界は、計算点を含む水平面 $S_e$ と窓との交線と等しい。したがって図3に示すように、計算点のZ座標（高さ成分）によって次の三つの場合に分けて計算する。

- ケースA : 計算点が窓のZ座標の最小値より小さい場合
- ケースB : 計算点が窓のZ座標の最大値より大きい場合
- ケースC : その他の場合

ここで、ケースAの場合は、地面は全く見えず、また、ケースBの場合は、天空は全く見えない。したがって、ケースAの場合は前述の3.1の方法と同じ方法により求めることができ、ケースBの場合は前述の3.1の方法における天空を地面におきかえて計算すればよい。すなわち、天空輝度 $L_0$ のかわりに地面の輝度 $L_e$ を用いればよい。ここで、地面の輝度は天空輝度に地面の反射率を乗じたものである。

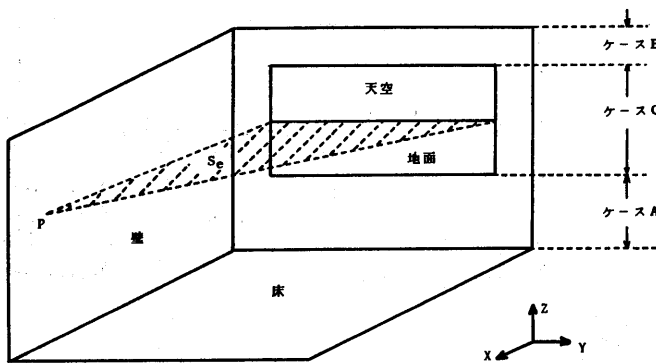


図3 計算点と窓による場合分け

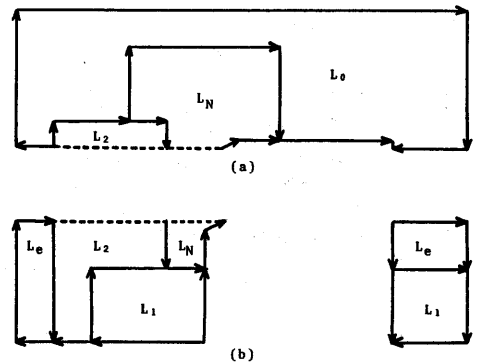


図4 計算点を含む水平面による分割

ケースCの場合は次のように計算する。図4（図3の例に地面を加えたもの）に示すように、計算点Pから窓を通して見えるすべての物体を平面 $S_0$ によって二分割し、分割された上部の可視部分（図4（a））については、ケースAと同じ方法で、また、下部の可視部分（図4（b））についてはケースBと同じ方法で照度を求める。ただし、天空と地面との境界の境界積分は、境界の可視区間についての投射率に輝度差（ $L_0 - L_g$ ）を乗じたものを用いる。なお、実際の計算においては、物体を分割する必要はなく、輪郭線のみを分割すればよい。

#### 4. 昼光率の表示

採光による室内の照度は、天空の輝度によって影響を受け、この天空の輝度は絶えず変動する。したがって、人工照明の場合のように照度を採光設計の指標とすることは適当でないので、天空の変動による影響の少ない昼光率(daylight factor)が一般に用いられている。昼光率は、受光点の照度と全天空照度との比（単位は%）として定義される。ここで、全天空照度とは、建物その他すべての障害物を取り除いたときの照度で、直射日光によるものは含まれない。この昼光率の分布を示すために、昼光率の値に対応したカラーベルトを透視図上に重畳する（図5の適用例参照）。この表示法により、現実感のある画像が得られるだけでなく、数値情報も同時に得られるので照明設計上、有効である。

#### 5. 適用例

図5は、窓からの天空光によって照射された計算機室を表示したものである。（a）は、室内中の物体による影と相互反射を考慮したものである。（b）は、（a）にさらに屋外の物体（建物とひさし）および地面からの反射を考慮したものである。（c）、（d）は、（a）、（b）両者の明るさの差を検討するために、4.で述べた昼光率の分布を示している。なお、図の下部のカラースケールは昼光率の値を示す。図からわかるように、（a）に比べ（b）の方が天井や他の部分が暗くなっている。この例は、屋外の物体および地面からの反射を考慮する必要があることを示している。

なお、この例においては、地面の反射率は0.25とし、室内については、壁、床、天井の他に計算機、机、クーラの表面による相互反射も考慮している。また、面素数は980で、反射の次数は4次まで計算した。

本適用例の計算にはTOSBACデータシステム600 およびグラフィカM508R(512 × 512画素、RGB各256レベル)を用いた。なお、（b）の場合、計算時間は121分であった。

#### 6. おわりに

本論文では、天空光によって照射される屋内の表示法について提案した。本論文の特徴と得られた成果は以下の通りである。

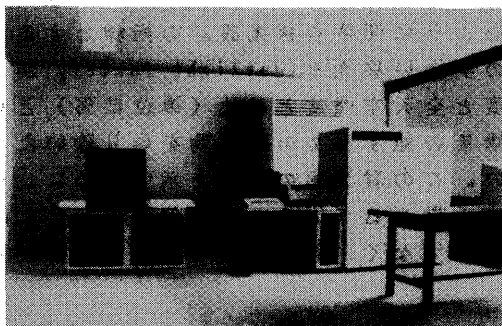
1) 窓から入射する天空光について、室内に存在する物体や屋外の物体による遮蔽効果および地面からの反射についても考慮することにより、より現実感のある画像が得られた。

2) 窓からの天空光は、計算点から窓を通して見た場合の天空と屋外の建物、ひさ

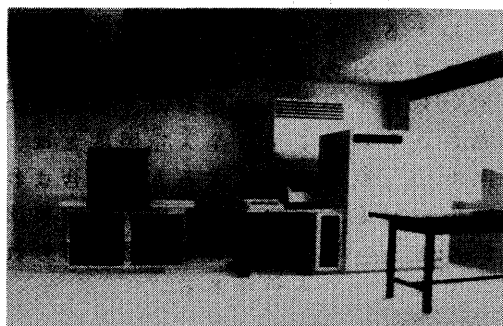
しや地面の可視部分の立体角投射率に、それぞれの輝度を乗じたものの総和により求めることができる。この投射率は、物体の輪郭線の窓内の可視部分を求め、これに沿った境界積分を行うことにより求められる。

3) 地面の影響を考える場合には、窓と計算点との位置関係によって場合分けを行い、計算の効率化を行った。

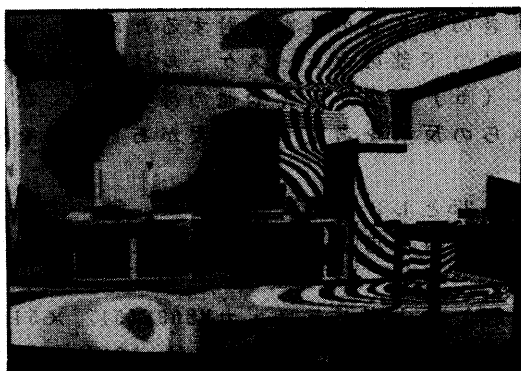
4) 昼光率の分布を表示することにより、照明設計、特に採光設計に利用できる。



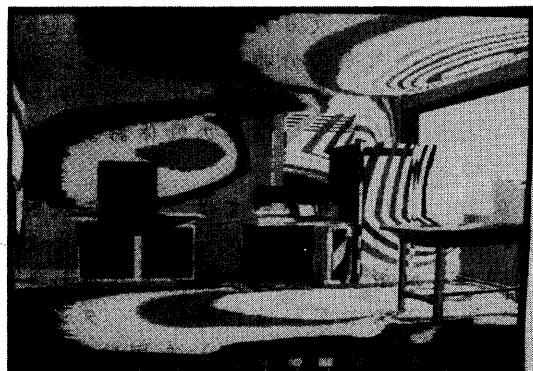
(a)



(b)



(c)



(d)

図5 適用例

[謝辞]

プログラムの開発およびデータの作成に協力頂いた、福山大学計算機室藤井克典氏および大学院生伊東寿則君（現、新川電機）に感謝の意を表します。

[参考文献]

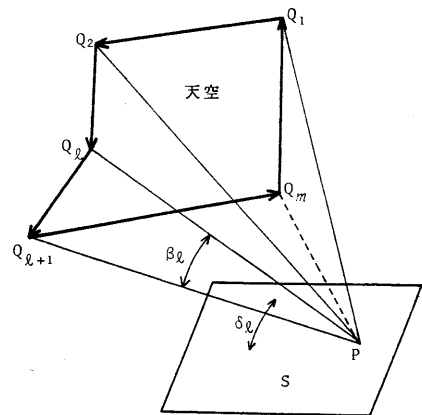
- 1) 西田, 中前: 三次元物体のカラー-陰影表示の一手法、情報処理学会、コンピュータビジョン研究会4-18(1980).
- 2) 西田, 中前: 線光源により照射された三次元物体の陰影表示、情報処理学会誌、Vol.23、No.4(1982) pp.373-380.
- 3) Nishita, T. and Nakamae, E.: Half-Tone Representation of 3-D Objects Illuminated by Area Sources or Polyhedron Sources, IEEE, Proc. of COMPSAC (1983) pp.237-241.
- 4) Nishita, T. and Nakamae, E.: Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Taking Account of Shadows and Interreflection, Computer Graphics, Vol.19, No.3 (1985) pp.23-30.
- 5) Warn, D.R.: Lighting Controls for Synthetic Images, Computer Graphics, Vol.17, No.3(1983) pp.13-21.
- 6) Verbeck C. and Greenberg, D.: A Comprehensive Light Sources Description for Computer Graphics, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 4, No.7 (1984) pp.66-75.
- 7) Goral, C.M., Torrance, K.E., Greenberg, D.P. and Battaile, B., Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces, Computer Graphics, Vol.18 No.3 (1984) pp.213- 222.
- 8) 西田, 中前: 三次元物体の陰影表示の方法、情報処理、Vol.15, No.1(1974) pp.18 -25.
- 9) 日本建築学会編、建築設計資料集成 1 環境、丸善 (1978) p.77-78.
- 10) 中前, 西田: 多面体の隠線消去の一手法、情報処理、Vol.13, No.4 (1972) pp.239-246.

付録 立体角投射率の計算法

面 S 上の点 P における立体角投射率は、境界積分法を用いて求めることができる。すなわち、頂点  $Q_\ell$  ( $\ell = 1, 2, \dots, m$ ) からなる  $m$  多角形の面光源による立体角投射率  $C$  は次式により求まる。

$$C = \frac{1}{2\pi} \sum_{\ell=1}^m \beta_\ell \cos \delta_\ell \quad (\text{付1})$$

ここで、 $\beta_\ell$  は  $PQ_\ell$  と  $PQ_{\ell+1}$  のなす角、 $\delta_\ell$  は  $P, Q_\ell, Q_{\ell+1}$  よりなる3角形と面 S とのなす角である。なお、 $Q_\ell$  は必ずしも同一平面上にある必要はない。



付図1 立体角投射率の計算