

スポットライトの表示

西田友是 多田村克己 名原健治 中前栄八郎
 (福山大学工学部) (広島大学工学部)

1. はじめに

3次元物体の陰影表示は、機器・建築物等のCADをはじめアニメーション等、種々の分野に利用されており、そのための各種の表示技法が開発されている。本論文では、照明効果を表現する一方法として、スポットライトとその光跡の表示法について提案する。

照明効果を表現する方法として、筆者らは、すでに、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、照明問題に関する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]。本報告で議論するスポットライト、すなわち、照射方向が限定された点光源は、スタジオや舞台を局部的に照射する効果だけではなく、その光跡(光幕)によって視覚的な効果を高めるために利用されている。また、屋外の投光照明、街灯、自動車のヘッドライト等においても、光源のまわりに光跡が生じる。本報告は、これらを考慮した照明効果の表現法について提案するものである。

提案手法は次の特徴をもっている。

- 1) 任意の形状の配光特性をもつスポットライトを取り扱うことができる。すなわち、被照面上の照射光のエッジがシャープなものやソフトなものが表現でき、また、水玉模様や放射状のパターンなどの非軸対称のものも表現できる。
- 2) 空気中の粒子により、スポットライトの照射空間には一般に光跡が表われる。この光跡が遮蔽物体に当たったときの影響を考慮した表示ができる。

2. 検討対象

スポットライトは部分的照明効果を得るための照明器具であり、次の特徴をもっている。a) スポットライトは、その配光特性を調整することにより、照射される範囲を明瞭化することができ、強力な光で、投光の周辺にエッジを生じることができる。b) 投光の方向と角度(照射範囲)を自由に決定できる。c) 種々の色光が得られる。

スポットライトは、投光の周辺にできるエッジの形により、ソフトエッジスポットライト、シャープエッジスポットライト、および平凸レンズスポットライトに大別される。ソフトエッジスポットライトは、エッジが柔らかく、ソフトムードの出せる照明器具である。シャープエッジスポットライトは、投射光の境界がシャープで、出演者のフォローに欠かせないものである。平凸レンズスポットライトの光は、ソフトエッジスポットライトより硬く、エッジもはっきり出るが、シャープエッジスポットライトのようにエッジのピントが合った光ではない。また、ショー等では、水玉や放射状光線など動く模様を表現することも多い。ここでは、これらのエッジの異なるスポットライトや特殊な配光をもつライトについて述べる。なお、スポットライトの光はレンズを用いて平行光線に近いものもあるが、ここでは、レンズの効果を無視し配光特性のみを考慮した点光源として処理するものとする。

スポットライトの光は強いため、空気中の粒子により光は散乱され、その投光空間

が明るくなる。また、屋外照明においても、霧等の大気中の粒子 (aerosols) により同様の現象がある。屋外の場合光の散乱だけでなく、光の吸収 (減衰) 現象も考慮する必要がある。霧がある場合は光源の近傍にかさのような光跡を生じる。これらの現象についてのシミュレーション結果の表示を行う。

3. 配光特性を考慮したスポットライトの輝度計算

配光曲線を考慮した点光源の計算法は既に開発しているが [1]、ここでは、スポットライトに適した配光の表現式について提案する。

光源は各々独自の配光曲線をもっており、一般に $I(\theta, \phi)$ で与えられる。ここで、 θ は灯軸と光線との角 (一般に垂直角とよばれる) で、 ϕ は回転角 (一般に水平角とよばれ、灯軸を含む基準面となす角) である。面 S_f 上のある点 P の輝度は、距離の逆二乗則と入射余弦則により次式により表わされる。

$$I = \rho I(\theta, \phi) \cos \alpha / r^2 \quad (1)$$

ここで、 r は光源 (光中心) Q_e と点 P との距離、 ρ は面 S_f の反射率、 α は面 S_f の法線と光線との角である (図 1 参照)。

いま、面 S_f と任意の点 $Q(X, Y, Z)$ との位置関係 (距離) を表わす関数を次のように定義する。

$$F(S_f, Q) = aX + bY + cZ + d \quad (2)$$

ここで、 (a, b, c) は面 S_f 面単位法線ベクトルであり、その方向は物体の外部を向いているものとする。 $F(S_f, Q_e)$ が正なら、 S_f は一般に、光の当る面であるから輝度計算を行う必要がある。 S_f 上の任意の点 P における輝度 I は式 (1) により求まるが、 $F(S_f, Q_e) = r \cos \alpha$ の関係を用いると、 I は次式によって表わされる。

$$I = \rho I(\theta, \phi) F(S_f, Q_e) / r^3 \quad (3)$$

ここで、 $F(S_f, Q_e)$ は同一平面上では一定値となる。

スポットライトでは、照射範囲 (ビームの開き) が限定されているので、 θ が照射範囲内にあるときのみ輝度計算を行い、そのほかの範囲の輝度は 0 と考えればよい。また、物体による影中の輝度も、他からの反射光を考えない場合は、当然 0 である (影の求め方は文献 [1] 参照)。

実用されている光源は、近似的に軸対称とみなされることが多いので、まず、配光が軸対称の場合 (すなわち、 θ のみの関数) を考える。

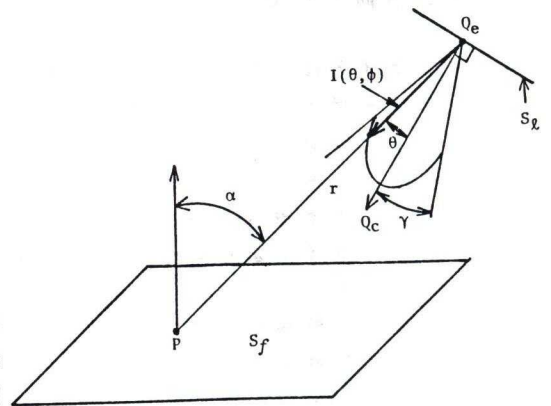
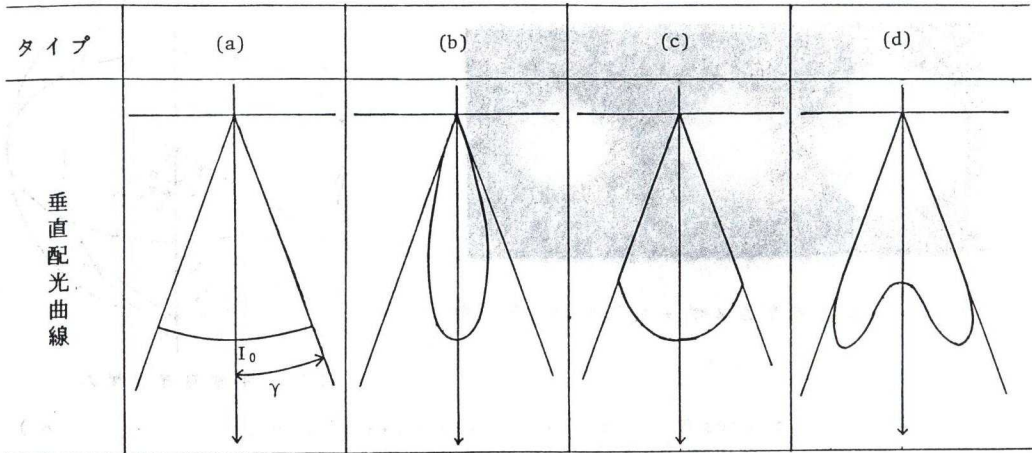


図 1 輝度計算

3. 1 軸対称の場合

表 1 軸対称配光のタイプ



ほとんどの場合、光度は $\cos \theta$ の多項式として表現できる。したがって、あらかじめ代表的な配光曲線を表わす関数を準備しておき、配光のタイプとパラメータを指定する方法を採用した。

本稿では、表 1 に示す配光の光源を準備した。ここで、 γ はビームの開き (beam spread) である。

表中、(a) はシャープエッジ (式 (4) 参照)、(b) はソフトエッジ (式 (5) 参照) のスポットライトである。また、(c) は (a) と (b) の中間的なエッジ (式 (6) 参照) が得られ、 $q = 1$ なら (a) と同じで、 $q = 0$ なら (b) と同じになる。なお、(b) において γ が大きい場合はスポットライトとは言えないが、 $\gamma = \pi$ のときはハート型の配光で、 $\gamma = \pi / 2$ のときは円形の配光となる。

$$I(\theta) = I_0 \quad (4)$$

$$I(\theta) = I_0 (\cos \theta - \cos \gamma) / (1 - \cos \gamma) \quad (5)$$

$$I(\theta) = I_0 \{ (1 - q)(\cos \theta - \cos \gamma) / (1 - \cos \gamma) + q \} \quad (6)$$

ここで、 I_0 は $\theta = 0$ のときの光度である。上式を用いて表示したスポットライトの例を図 2 に示す (左から順に (a)、(c)、(b))。照射範囲を制御するため、光度を $I_0 (\cos \theta)^c$ で表現する方法も提案されている [5]。ここで、 c が大きいほど指向性は強くなる。ただし、この方法は、べき乗演算に時間を要し、また、シャープなエッジを得ることができないのでスポットライトには適さない。

関数で表現できない場合 (例えば、表 1 中の d) には、例えば、 θ が 5° 毎の光度データを与え、中間の値を線形補間することにより求めることができる。すなわち、 5° 毎に与えられた角を θ_i ($\theta_i = 0, 5, 10, \dots, 180^\circ$) とすると、 $\theta_i \leq \theta < \theta_{i+1}$ で表わされる θ に対する光度 $I(\theta)$ は、次式により求まる。

$$I(\theta) = I(\theta_i) + (I(\theta_{i+1}) - I(\theta_i))t \quad (7)$$

ただし、 $t = (\theta - \theta_i) / (\theta_{i+1} - \theta_i)$

なお、 $\cos \theta_i$ および $1 / (\cos \theta_{i+1} - \cos \theta_i)$ のルックアップテーブルを準備しておき、 t を次式により近似すると便利である。

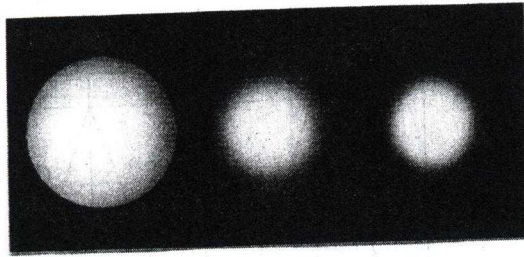


図2 エッジの異なるスポットライトの表示例

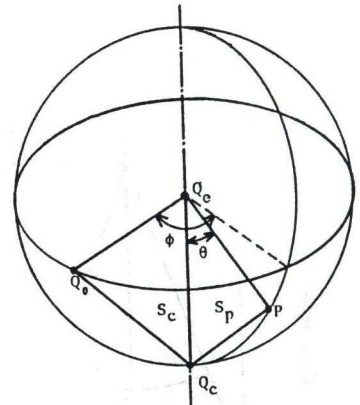


図3 非軸対称の配光

$$t = (\cos \theta - \cos \theta_i) / (\cos \theta_{i+1} - \cos \theta_i) \quad (8)$$

上式において、 t を余弦の関数で表現したのは、 $\cos \theta$ が簡単に求めることができるためである。すなわち、 Q_e 点を含み灯軸に垂直な平面 S_Q を考えると、 $\cos \theta$ は次式により求まる (図1参照)。

$$\cos \theta = F(S_Q, P) / r \quad (9)$$

3.2 軸対称でない場合

配光曲線が灯軸に関して非対称な場合について述べる。この場合には、光度は前述のように $I(\theta, \phi)$ で与えられる。ここで、 ϕ は灯軸上にある一点を基準点として、その点からの軸に対する回転角で与えられる。

図3に示すように、光源 Q_e 、基準点 Q_0 、灯軸上の一点 Q_c (指向点と呼ぶ) と任意の点 P を考えると、 ϕ は Q_e 、 Q_0 、 Q_c よりなる面 S_c と P 、 Q_c 、 Q_e よりなる面 S_p とのなす角である。したがって、 S_c と S_p の法線ベクトルの内積により $\cos \phi$ は求まる。

3.1と同様に、配光の計算式を準備するが、ここでは、放射状の配光と水玉模様の場合について説明する。これらの光源の場合、光度 $I(\theta, \phi)$ は、前述の $I(\theta)$ に、 ϕ 方向の配光を表現する関数 $k(\phi)$ を乗じることにより表現できる。ここで、 $k(\phi)$ は次式で定義する。

$$k(\phi) = \max \{ q + (1-q) | 2 \text{mod}(\phi, \Delta\phi) - \Delta\phi | / \Delta\phi, 0 \} \quad (10)$$

なお、記号 mod は剰余を示す。図4に示すように、 $\Delta\phi$ は配光の強弱の周期で、 q ($q < 1$) は光度の最小値の最大値に対する比率である。ここで、 q を小さく (負も許す) すると個々の水玉の半径が小さくなる。

放射状の光源の場合、光度は次式により得られる。

$$I(\theta, \phi) = I(\theta) k(\phi) \quad (11)$$

ここで、 $I(\theta)$ は式(4)、(5)、(6)のいずれかのタイプを選ぶ。

水玉模様の場合、式(11)に θ 方向の強弱の変化を与えることにより得られる。すなわち、光度は次式により得られる。

$$I(\theta, \phi) = I(\theta) k(\phi) k(\theta) v \quad (12)$$

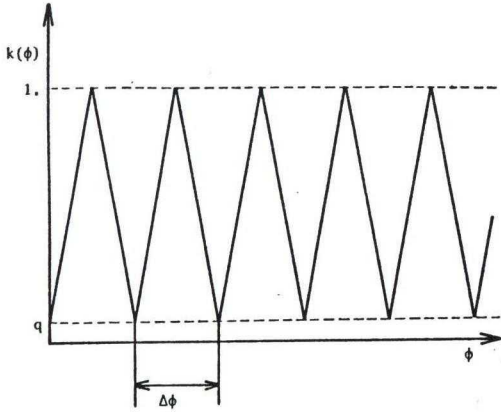


図4 配光の表現関数

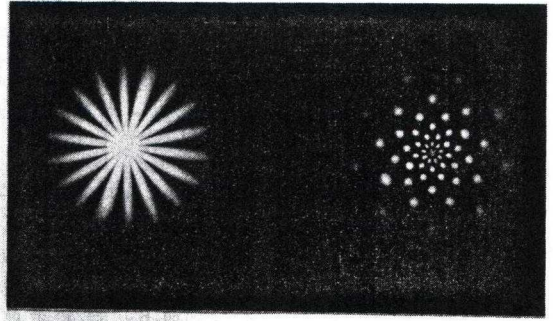


図5 非軸対称光源の表示例

ただし、 $v = \text{mod}([\phi / \Delta\phi] + [\theta / \Delta\theta], 2)$ で、 v は 0 または 1 となる。この v は水玉の個数をまびくための係数である。また、 $k(\theta)$ は (10) 式において ϕ を θ におきかえたもので、 $\Delta\theta$ は強弱の周期である。図5に式(11)、(12)を用いて得られた配光で照射した例を示す。

スタジオ照明の場合、これらの光源は一般に動きを伴なう。この場合、照射方向 (Q_0 を移動) を変化させたり、 ϕ 方向の回転 (Q_0 を移動) を与えればよい。街灯や道路照明などでは、配光を関数で表現できないことが多い。このような非軸対称光源において、 $\cos\theta$ 、 $\cos\phi$ の多項式によって表現できないものについては、軸対称光源の場合に述べた方法と同様に、 θ および ϕ 方向のサンプル点の配光データを入力し、その中間の方向での光度を補間により求めればよい。

4. 光跡の表示

大気中の粒子による光散乱によって、スポットライトの投射範囲の空間は明るくなる。また、その光は、観察者まで到達するまでに、大気中の粒子により減衰する。まず、この現象について説明し、次に、光跡の表示法について述べる。

4.1 光の散乱吸収現象

図6(a)において、対象物V上の任意の点Pからの光が視線 PP_v に沿って点 P_v を通過するとき、その点の光の強さ I は、その微小区間 ds における、吸収、散乱による減衰と、周囲の大気の散乱光の視線方向の放射成分とにより決定される。すなわち、

$$dI = -\tau I ds + \tau J ds \quad (13)$$

ここで、右辺第1項は減衰による損失で、第2項は放射による利得で、 τ および J は、それぞれ減衰係数と光源関数(散乱光は仮想の光源と考えることができる)である。したがって、光路長 ds におけるエネルギーの収支、すなわち、放射伝達方程式 [8] は、次式で表わされる。

$$-\frac{dI}{\tau ds} = I - J \quad (14)$$

いま、線分 $P_v P$ の長さを l とすると、視点 P_v から P をみたときに到達する光の

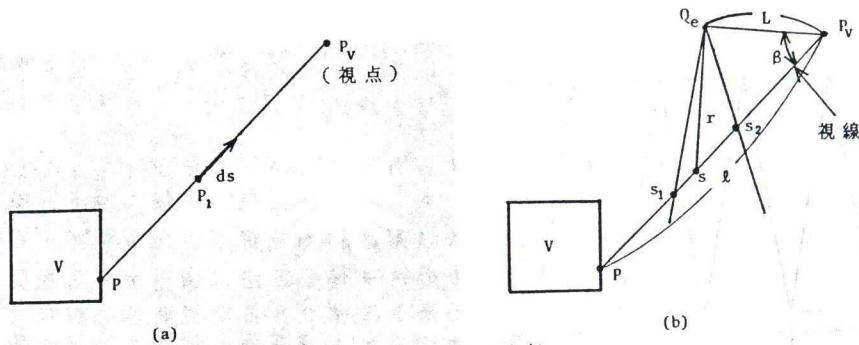


図6 光の散乱と吸収

強さ $I(l)$ は、式(14)から次式で表わされる。

$$I(l) = I(0) e^{-\tau l} + \int_0^l J(s) e^{-\tau s} \tau ds \quad (15)$$

ここで、 $I(0)$ は $s=0$ 、すなわち、計算点 P での強度を示す。図6(b)のように視線がスポットライトの照射空間内を通過する場合、この空間中の光源関数は、

$$J(s) = J_a + J_s(s) \quad (16)$$

となる。ここで、 J_a は環境光による光源関数(一様と考える)、 J_s はスポットライトの照射空間内(図6(b)中 s_1 から s_2 の区間)の光源関数である。式(16)を式(15)に代入して次式を得る。

$$I(l) = I(0) e^{-\tau l} + J_a(1 - e^{-\tau l}) + \int_{s_1}^{s_2} J_s(s) e^{-\tau s} \tau ds \quad (17)$$

ここで、第3項がスポットライトによる光跡を表わしている。すなわち、スポットライトの照射空間を視線が通過しない場合は、第1項と第2項のみで決まる。光源関数は次のように仮定する。すなわち、厳密には、粒子の大きさ、大気中の粒子の分布状態(濃度)、屈折率(または反射率)、光の波長、散乱の方向性(散乱光の配光)、光の偏光などを考慮する必要があるが、ここでは、粒子は一様に分布しているものとし、粒子に当る光は完全拡散するものとする。この場合、粒子は新たな点光源とみなすことができ、点光源が一様に分布しているものと考えることができる。ただし、その各点の輝度は光源との位置関係により異なることに注意する必要がある。スポットライトは点光源とみなしているので、照射空間中の光源関数(粒子を光源とみなした光度)は、次のように仮定することができる。

$$J_s(s) = \rho I(\theta, \phi) / r^2 \quad (18)$$

ここで、 $I(\theta, \phi)$ は3.で述べた光源の光度(軸対称の場合は $I(\theta)$)であり、 ρ は粒子の反射率であり、 r は光源と粒子との距離である。なお、 $I(\theta, \phi)$ は s の関数であり、 r^2 も次式のように s の関数で表現される。

$$r^2 = (l - s)^2 - 2L \cos \beta (l - s) + L^2 \quad (19)$$

ここで、 L は P と Q_e の距離で、 β は $P_V P$ と $P_V Q_e$ の角である(図6(b)参照)。室内では、光路長は長くないので、光の減衰は一般に無視できる(すなわち $e^{-\tau l} = 1$)。屋外の場合、 J_a は無限遠点の大気の色に相当する。すなわち、式(17)で第

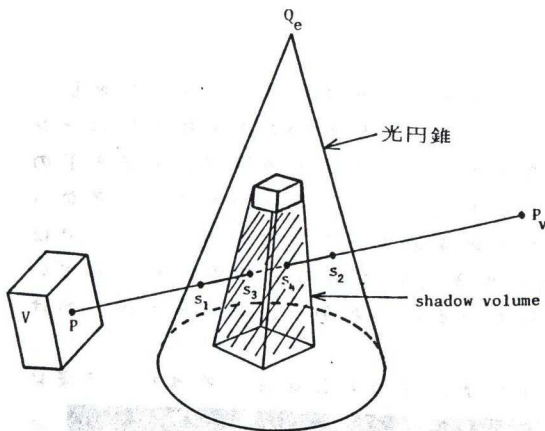


図7 視線と光円錐の位置関係

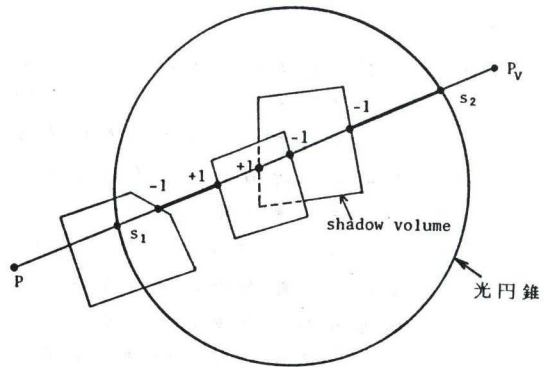


図8 積分区間(光の当る区間)の計算
(視点から遮蔽物体を眺めた図)

3項を除いたものは霞の効果の計算式[9]と一致する。

4.2 遮蔽物体を考慮した光跡の表示

スポットライトによる光跡を計算するには、スポットライトの照射空間内の視線の光路長をまず求める必要がある。光源関数 J の値は、光源との距離および遮蔽物体の影響を受け、光路上の各点で異なる。

スポットライトの照射空間は遮蔽物体を考慮しない場合には円錐となる。この円錐を光円錐と呼ぶことにする。光円錐は、光源の位置を頂点とし、灯軸と、ビームの開きにより決定される。したがって、この光円錐と視線(物体上の計算点と視点を通る直線)との交点を求める必要がある。また、照射空間内に物体がある場合には、円錐内においても光が当たらない部分が存在する(例えば、図7中の s_3 と s_4 の間)。この光が当たらない部分は、光源から視線を見た際の遮蔽物体により隠される空間(shadow volume[3])と視線との交差線分として求まる。以下に、遮蔽物体を考慮した輝度の計算手順について説明する。

- 1) 視線と光円錐とが交差するか否かの判定を行い、交差する場合は次の処理を行う。交差しない場合は、式(17)第3項の積分計算は不要である。
- 2) 光円錐と交差する物体を求める。
- 3) 光源から見た際のこれらの物体の輪郭線を求め、この輪郭線と光源により構成される多角錐(shadow volume)を求める。
- 4) 視線の光円錐内の区間(例えば、図7中 s_1 、 s_2)を求め、その区間とshadow volumeとの交点(s_3 、 s_4)を求める。
- 5) 光源から見た視線の可視区間(s_1 、 s_3 、 s_4 、 s_2)を求める。
- 6) これらの可視区間について光源関数を積分して光跡の輝度を求める。

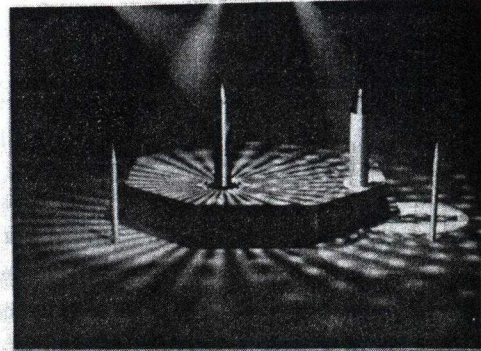
ここで、2)では、物体を囲む包含球(bounding sphere)を考え、この包含球と円錐との交差判定を行う。5)の可視区間の判定は、隠線除去に用いる不可視度数の考え方[10]を用いる。すなわち、視線に方向を考え、shadow volumeに入る交点では+1、出る交点では-1の指標を与え、まず s_1 での不可視度数を求め(図8の例では1)、 s_1 を起点として進み交点通過時に指標を加えると、不可視度数が0の区間が可視区間である。6)では、式(17)の第3項(J_s は式(18)を用いる)について、可視区間を数値積分する(本稿では、シンプソンの積分法を用いた)。

5. 適用例

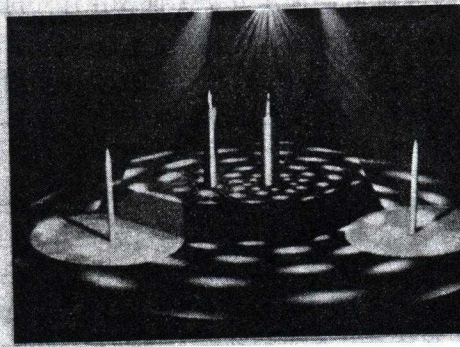
図9に適用例を示す。(a)～(c)はスタジオ照明の例で、ペンがダンスをし、光とたわむれるアニメーション『Feast of Light』(SIGGRAPH'85の出品作品)のシーンである。(a)では、色光の異なる3つのスポットライトと放射状および水玉配光のライトにより照射している。なお、スポットライトのエッジのタイプも異なっている。(a)は、水玉模様のライトについて光跡を表示していないが、(b)で表示している。なお、(a)では、水玉の色は回転方向に関して虹色に変化している。(c)では、遮蔽物体により光跡が変形しているのがわかる。これらの例における曲面は3角形近似で表現している[11]。

(d)、(e)は屋外照明の例である。(d)は、霧のある場合の光跡および霧による光の減衰効果(遠方が霞む)を示している。(e)は、霧中で自動車のヘッドライトにより照射した建物である。なお、街灯およびヘッドライトは関数により表現できない配光曲線(配光のデータを入力)の光源である。

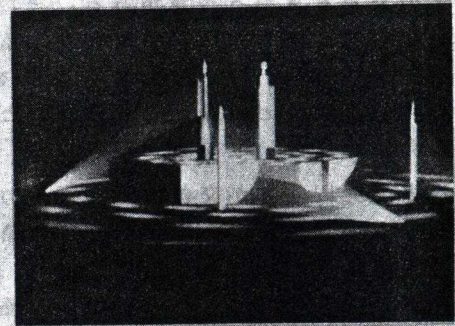
これらの適用例で明らかなように、かなり現実感のある画像が得られるようになった。



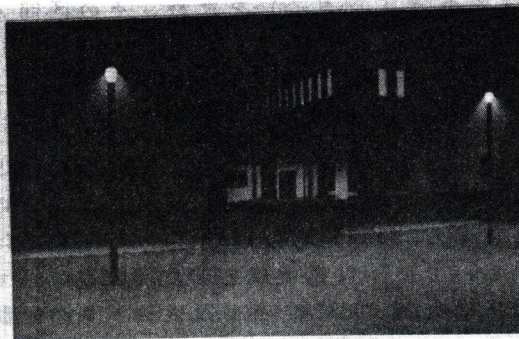
(a)



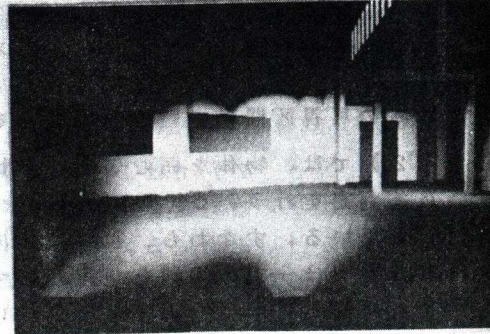
(b)



(c)



(d)



(e)

図9 適用例

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。

6. おわりに

本論文では、照明効果を表現する方法の一つとしてスポットライト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) スポットライトの照射部分のエッジを自由に調整できる配光の表現式を開発した。また、水玉模様などの特殊効果を表現できる配光特性の表現も可能になった。
- 2) 空気中の粒子により、スポットライトの照射空間には光跡が表われるが、遮蔽物体を考慮したスポットライトの光跡の表示が可能となった。これは、光の照射空間内に無数の点光源があるものと考えて輝度計算することにより実現した。

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 Battaille, B., Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces, Computer Graphics, Vol.18 No.3 (1984) pp.213-222。
- 8) S. K. フリードランド：エアロゾルの科学、産業図書、p.131。
- 9) 中前、岡本、西田他：コンピュータ創生構造パースと背景写真のモニター、情報処理学会、コンピュータビジョン研究会 28-2(1984)。
- 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。
- 11) 岡村、原田、中前、西田：三角形近似による自由曲面のカラー陰影表示法、電子通信学会、研究会、IE 82-92(1983)。