光のシミュレーションとコンピュータグラフィックス[†]

専門会員 中前栄八郎* 正会員 西田友是**

1. はじめに

80年代に入って誕生したグラフィックスワークステーションの急速な進歩とフォトリアリスティックな画像創生技法の着実な進展は、コンピュータグラフィックス（以下CGと略す）の活用を、科学、工学、医学等の各分野に広げ、産業界においても経済的に十分実用可能な域に到達した。このことは照明の分野においても例外ではない。

ところで、今日の照明は、狭い意味での工学の分野に留まらず、広く光の文化の先導者としての役割を担っている。本稿では、CGにおけるフォトリアリズムの立場から、屋内・屋外照明、言い換えると、人工光・自然光下における視環境評価に、CG技術のなし得る可能性について、光のシミュレーションの進歩の経緯にふれながら議論したい。

2. CGにおける光のシミュレーション

CGの研究は1960年代前半から始められ、当初、見えない線を消去して表示する隠線消去問題、見えない面を消去して表示する隠面消去法の研究が行なわれ、1970年代、平行光線あるいは点光源に対する陰影計算、付影処理法の基礎的技術が確立した。1980年代に入ってから、よりリアルな画像創成の手段として、人工光源に関して、配光特性を考えた点光源¹⁾、線光源²⁾、面光源³⁾、多面体光源⁴⁾と、その多様化が進められた。これらの成果を踏まえて、1980年代半ば頃から、壁などからの相互反射光（CGの分野ではラディオシティと呼ばれる）^{5)~9)}に関する研究が進み、面の拡散・鏡面反射を考慮した手法が開発され、照度計算の精度が向上した。その結果、照明問題への適用が可能となり、CG画像と実測値を比較し、その実用性を検証する研究¹⁰⁾や、実際の舞台照明の予測に活用¹¹⁾できるようになった。先進的なグラフィックスワークステーションの中には、すでに相互反射の計算をハードウェア化したものもあり、照明設計用のソフトウェアも市販されるまでにな

り、照明器具メーカーや大手建設会社が、照明プランのプレゼンテーションにCGを日常的に利用し始めた¹²⁾。

一方、自然光下の景観評価のための研究は、1980年代後半から本格的に始まった。すなわち、天空光¹³⁾、大気中の粒子によるビーム光、煙、霞の効果¹⁴⁾をはじめ、大気散乱を考慮した天空によって照射される建築物や雲の色計算¹⁵⁾、さらに、高輝度光源の回折効果¹⁶⁾、太陽の大きさを考慮した影（半影）の計算¹⁷⁾が可能となった。被照射体についても、路面の反射特性を考慮した道路照明（濡れた路面の表示）¹⁶⁾、水面の色計算（太陽位置、水深、波面への写り込みを考慮）¹⁸⁾（図1（口絵）参照）などが次々と開発されており、CGにおける光のシミュレーション技術は、屋内外を問わず視環境の事前評価になくてはならないものになりつつある。

以下に著者らの研究を中心に、人工光と自然光それぞれに対する光のシミュレーションについて紹介する。

3. 人工光源の照明シミュレーション

前述のように、初期のシェーディング（陰影）には、平行光線あるいは点光源に対する反射光（拡散反射、鏡面反射）のみが考慮されたが、その後、幾何形状、配光特性、スペクトルを考慮した光源、反射、透過・屈折を考慮した被照体、影（本影、半影）、間接光（相互反射）、および大気の散乱・吸収効果が考慮されるようになった。

3.1 影を考慮した照度計算

種々の光源に対する基本的な照度計算式はよく知られているが、物体表面上の照度については、照明工学分野では、限定された形状（例えば、光源が正方形で遮蔽物が円盤）の影を考慮した計算式しか確立していなかった。この問題は、リアルな画像を創生する立場から、CGの分野において解決された。線光源の場合の照度計算は線積分で、面光源の場合は境界積分法（立体角投射法）で各点の照度を求めることができる。しかし、面光源等の大きさをもつ光源の場合、半影の部分の照度分布は複雑になる。半影は、被照点から見た際の光源の可視領域を計算上の新たな光源とみなして、隠面消去法を適用することによって計算される^{2~4)}。また、半影あるいは本影を生じる空間をあらかじめ求めておくことによる高速化も行なわれた。図2（口絵）に、複数（48本）の円柱光源に照射された会議

[†] Lighting simulation and computer graphics

* 広島大学工学部 Eihachiro Nakamae

〒724 広島市鏡山1丁目4-1

** 福山大学工学部 Tomoyuki Nishita

〒729-02 福山市東村町三蔵985

室の照明予測例（半影の計算）を示す。

3.2 高輝度光源の表現

高輝度光源の光が眼に入るとき、まつ毛と瞳孔による回折効果を生じる。まつ毛に対しては、平行な細線のフィルタによって実現できる¹⁶⁾。また、霧中の照射空間は明るくみえる。これについては、空気中の粒子の散乱光を計算することで得られる¹⁴⁾。両者の方法を適用した例を図3（口絵）に示す。

3.3 相互反射の計算

(1) 研究の経緯：照明工学の分野における相互反射の計算は、1920年代後半に遡る。しかし、物体間の反射光を遮る物体の影響を考慮した計算法までは確立していなかった。この問題は1984年にCGの立場から取り上げられた^{5,6)}。一方熱工学分野における放射伝達理論として相互反射が1970年代後半から研究されていたが、この分野の成果もCG分野に導入された⁷⁾⁸⁾。以後毎年のように相互反射の計算法の論文がACM SIGGRAPH（コンピュータグラフィックスに関する世界最大の会議）で発表されている。そこでの話題は、1)影、2)鏡面反射成分、3)大気中の微粒子の効果、4)レンズによる集光効果、5)半透明物体、6)凹凸のある表面、毛のような表面での相互反射、7)天空光に照射された物体間の相互反射、と多岐にわたり、今日ではリアルな画像創成の代表的技法の一つとなっている。

相互反射の計算法については、(A)物体の構成面を幾つかの面素に分割して連立方程式を解く方法、(B)レイトレーシング法を拡張した方法、および(C)両者を組み合わせた方法が議論の対象となっている。従来は、各面素間のエネルギーの授受の割合を決めるフォームファクタは、単純な形状（例えば長方形室内で什器なし）のものが求められていた。実際問題に適用するために、1)物体間の遮蔽物を考慮したフォームファクタ、2)鏡面反射成分も考慮したフォームファクタ、3)連立方程式の高速化解法、4)輝度変化の激しい部分を適応的に面素を細分割することによる精度の向上、などが試みられている。

(2) フォームファクタの計算法：任意の形状の面素間の相互反射の影響を考慮したフォームファクタの高速計算法の代表的なものは次のようである。

ある面素上の任意の点と他の面素とのフォームファクタは、その点を中心とした半球表面に面素を投影し、さらにそれを半球底面に正投影することにより得られることが知られている。この半球を半立方体で近似する方法（Hemi-cube法と呼ばれる）⁸⁾が開発された。すなわち、図4のように、面素の中心に半立方体を置き、その各面をメッシュに分割し、この各メッシュに予め計算しておいたフォームファクタを割当てておく（デルタフォームファクタと呼ぶ）。次に、面素の中心から見て、面素の可視領域が覆うメッシュのデルタフォームファクタを加算することによりフォームファクタを求める。この方法の難点は、離散化された点でサンプリングすることによる精度の低下にある。この一解決法として、計算相手の面素から計算点へレイ

図4 hemi cube法によるフォームファクタの計算
Fig. 4 Calculation of form-factor by using hemi-cube method.

（光線）を放つ方法⁹⁾が開発された。すなわち、面素はいくつかの円盤の集合として近似され、円盤の中心からレイが発射される。また、光源および被照体が曲面の場合を対象とし、曲面の面素を半球面に投影し、それを帯状に分割して、各帯の可視部分を総和することでフォームファクタを求める方法も提案されている¹⁹⁾。この方法による相互反射の計算例を図5（口絵）に示す。

4. 自然光シミュレーション

屋光光源は、直射日光と、大気中の粒子による散乱光（天空光）からなっている。相互反射がインテリアデザインで重要な役割を果たすのと同じように、天空光も建物の視環境デザインに対して有効である。直射光については、一般に平行光線とみなされているが、実際には大きさを持っており、そのため影は厳密には、本影と半影からなる。また、自然現象は千変万化であり、さまざまな天候を考える必要があり、霧の場合は、空気ほかに微粒子による散乱・吸収効果も考慮した視環境評価が望まれる。

4.1 天空光による照明

天空は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、地上の被照点は、常に半球の中心にあるものと

図6 天空光の計算
Fig. 6 Illuminance calculation due to sky light

して取り扱うことができる¹³⁾。図6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。帯光源の中心線をサンプル線とすると、これは傾いた平面（サンプル面と呼ぶ）と半球との交線である。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、これらの可視領域による輝度を加算して、全天空光による照度を求めることができる。ここで、サンプル線の可視区間は、サンプル面と物体との交差判定によって求まる。なお、天空輝度分布はCIE標準輝度分布（曇天、晴天）を利用し、帯光源による照度は帯の長さ方向に予め積分しておくことによって実現できる。すなわち、各帯光源において、帯の長さ方向に帯光源（例えば数度ごと）による照度を予め加算したものを配列に記憶しておき、可視区間が求まったら、この配列を参照することによって、可視区間からの照度計算が簡単に求まる。図7に、天空光、地上からの反射光、および相互反射を考慮した室内の計算例を示す。

4.2 大気中の微粒子

一般に、遠方のものは霞んでみえる。これは空気分子やエアロゾルによる散乱・吸収による。これらの散乱特性について、前者はレーリの散乱、後者はミーの散乱に従うことが知られている。この効果は、遠方の物体の色および視線上に存在する粒子による散乱光が視点に到達するまでの

図7 天空光、地上からの反射光、および相互反射を考慮した計算例

Fig. 7 A room illuminated by sky light, reflected light from the ground, and interreflection of light.

図9 ビルの谷間から漏れる光を考慮した画像の計算例

Fig. 9 Shaft of light pass through from gaps of buildings.

吸収効果を計算することで得られる。この結果、霞の効果のみならず、粒子に入射する光が人工光源の場合の光源の廻りの空間の明るさや、スポットライトによるビームを表現できる¹⁴⁾。また、照射が太陽光の場合、空の色（青空、夕焼け）や、ビルの谷間から漏れるビームを表現できる¹⁵⁾。

図8（口絵）に大気散乱を考慮した直射光および天空光（晴天時）によって照射されたビル（材質はアルミ）を示す。また、図9にビルの谷間から漏れる光を考慮した画像の計算例を示す。

4.3 太陽光による半影

太陽は大きさを持っており、それによる影は半影を伴う。したがって、よりリアルな画像を得るにはこの効果を考慮する必要がある。被照点から太陽を眺めた場合、光源は、常に方向一定で、一定の大きさの円盤光源とみなすことができる。光源の一部が物体に隠された場合が半影であるから、被照点から見た際の太陽の可視領域を求めることにより照度計算ができる¹⁷⁾。図10（口絵）に太陽光による半影を考慮した画像の計算例を示す。

5. おわりに

計算機の高速度化とグラフィックス機能の向上、CGソフトの急速な進歩は、種々の光学的特性を考慮したリアルな画像の創成を可能にし、臨場感あふれる動画としても提示できるまでになった。これらの技術の一部は照明工学を基礎として発展したが、本稿で示したようにCG分野での照明シミュレーションは、照明工学本来の分野より遙かに進んでいる部分も少なくない。種々の現象の解析解を求めることの重要さは論を待たないが、一方、その結果を人間の感性に訴えて、右脳と左脳をバランスよく活用して、よりよい照明設計、よりよい環境事前評価を行う必要がある。その意味において、CGの利用は今後ますます増加するであろうし、またその役割の重要さは増すであろう。

参考文献

- (1) 西田，中前：照明学会誌，**66**，4（1982）150-156.
- (2) Nishita, T., Okamura, I., Nakamae, E., ACM Trans. on Graphics, **4**, 2（1985）124-146.
- (3) 西田，中前：照明学会誌，**68**，2（1984）61-66.
- (4) Nishita, T., Nakamae, E., IEEE COMPSAC（1983）237-242.
- (5) 西田，中前：照学全大（1984）No. 63
- (6) Nishita, T., Nakamae, E., *Computer Graphics*, **19**, 3（1985）23-30.
- (7) Goral, CM., Torrance, KE, Greenberg, DP, *Computer Graphics*, **18**, 3（1984）213-222.
- (8) Cohen, MH, Greenberg, DP., *Computer Graphics*, **19**, 3（1985）31-40.
- (9) Wallace, JR, Elmquist, KE, Haines, EA, *Computer Graphics*, **23**, 3（1989）315-324.
- (10) Takagi, A., et al., *Computer Graphics*, **24**, 4（1990）263-272.
- (11) Dorsey, J. O'B., Sillion, F., Greenberg, DP, *Computer*

- Graphics*, **25**, 4 (1991) 41-50.
- (12) PIXEL 編集部, *PIXEL*, **106** (1991) 145-148.
- (13) Nishita, T., Nakamae, E., *Computer Graphics*, **20**, 3 (1986) 125-132.
- (14) Nishita, T., Nakamae, E., *Computer Graphics*, **21**, 3 (1987) 303-310.
- (15) Kaneda, K., Okamoto, T., Nakamae, E., Nishita, T., *The Visual Computer*, **7**, 5 (1991) 247-258.
- (16) Nakamae, E., Kaneda, K., Okamoto, T., Nishita, T., *Computer Graphics*, **24**, 4 (1990) 395-404.
- (17) Takita, S., Kaneda, K., Iriyama, H., Nakamae, E., Nishita, T., *The Visual Computer*, **7**, 5 (1991) 259-268.
- (18) Kaneda, K., Yuan, G., Nakamae, E., Nishita, T., Proc. of CG & CAD '91 (1991) 25-30.
- (19) 西田, 中前: 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会, (1990) 88-CG-32.

(受付 1991 年 11 月 13 日)