

5. 写実的レンダリングの基礎技術と最近の話題

Photo-realistic Rendering and Its Recent Topics by Masaki AONO, Ryutarou OHBUCHI and Takayuki ITOH (Tokyo Research Laboratory, IBM Japan Ltd.).

青野 雅樹¹ 大 淵 竜太郎¹ 伊 藤 貴 之¹

¹ 日本アイ・ピー・エム(株)東京基礎研究所

1. はじめに

CGの世界でいうレンダリングとは実在しない物体があたかもそこにあるかのように「それらしい」表現をすることを意味する。狭義には、3次元の幾何データモデルと光源およびカメラデータを与え、濃淡づけ (shading) して画像を作り出すことを意味するが、隠面処理、付影処理、テクスチャマッピング、レイトレーシング、およびラジオシティなどの実在感を与える表現技術を包括的に表す言葉として用いられることもある。レンダリングの大前提としてシーンを構成するデータの幾何モデルの存在がある。しかし、特定の幾何モデルをもたず、実物の写真やビデオなどから取り込んだ画像の集合体をもとにしたレンダリング (画像ベースのレンダリング (文献4),9)参照) や3次元データを特定の幾何データに変換することなくレンダリングする技術 (ボリュームレンダリング (文献13)9章参照) などもレンダリングに分類される。

ここでは、このようなレンダリングのうち、とくに写実的レンダリング技術について基本的な技術と、最近の話題の中から対話的な応答時間を目指した写実的レンダリングの高速化の技術のいくつかの手法を紹介する。

2. 写実的レンダリングのための基礎技術

写実的レンダリングをもたらす最もオーソドックスなアプローチは、光学現象のよりリアルな物理モデルを導入することである⁶⁾。

基本的なアイデアは、光を3次元空間で動く粒子と考え、これが物質の中を流れ、物質と相互作用する過程をモデル化しようとするものである。これにより、たとえば、光の散乱や吸収現象など

を説明できる。また、粒子に波長 (色属性) をもたせることで、たとえばRGB色モデルの表現もできる。

2.1 反射モデル

CGで光学現象をシミュレートする場合、最終的には空間中の物体 (の表面) の輝度という形で光のエネルギーを表現する。光のエネルギーを計算するためには、入ってきた光が各物体の表面でどう相互作用し、反射して出ていくかが重要になってくる。このモデルは**反射モデル**と呼ばれ、物体表面の物理的性質と光源の特性に依存する**双方向反射分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflection Distribution Function)** と呼ばれる関数で表現される。

BRDFを図で説明する。ある面上の点 x (法線ベクトル N) に微小立体角 $d\omega_i$ で方向 ω_i から光が入射し、方向 ω_r に反射していくとする (図-1参照)。

単位面積あたりの方向 ω_i から入ってくる入射光のエネルギー ($dE(\omega_i)$) は方向 ω_r へ出ていく単位面積あたりの反射光のエネルギー ($dL_r(\omega_r)$) に比例することが知られている⁵⁾。この比例定数が**双方向反射分布関数 (BRDF)** の正体である。いま、BRDFを $f_r(\omega_i \rightarrow \omega_r)$ で表すと、

$$f_r(\omega_i \rightarrow \omega_r) \equiv \frac{dL_r(\omega_r)}{L_i(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i}$$

となる。BRDFの単位は立体角の逆数である。

一般に、ある面上にやってくる光エネルギーの単位面積あたりの量を**入射束密度 (irradiance)** と呼び、ここでは E で表すことにする。またその面から放射される単位面積あたりの量を**ラジオシティ (radiosity)** と呼び、 B で表すことにする。また、光粒子が入射してくる方向 (または反射していく方向) に垂直な面を考える。この面が

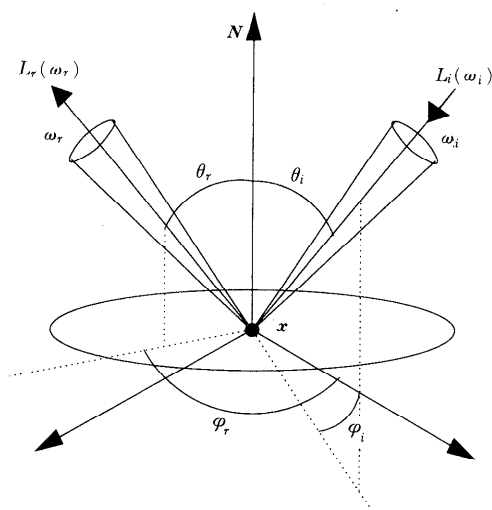


図-1 双方向反射の概念図

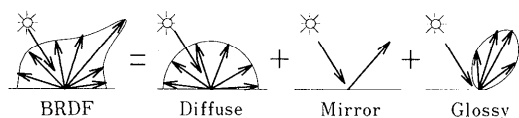


図-2 BRDF の概念図

今着目している点を含む面に投影された部分の寄与を考え、この単位面積あたりのエネルギー量を入射輝度（または反射輝度）(radiance) と呼び、 L で表すことにする。 L に関しては入射と反射を同じ記号で表す。入射束密度 E と入射輝度 L の間には次の関係が成り立つ。

$$E = \int_{\Omega} L \cos \theta d\omega$$

ラジオシティ B と反射輝度 L の間にも同じ関係が成り立つ。ただし、 Ω は半球空間を表す。

BRDF の重要な性質の1つとして、値が常に正の関数であることがあげられる。これが、分布関数と呼ばれる所以である。上式を変形して立体角全体で積分すると、

$$L_r(\omega_r) = \int_{\Omega_i} f_r(\omega_i \rightarrow \omega_r) L_i(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

となる。これは**反射方程式**と呼ばれる。BRDF の簡便な扱いとして、これが3つの項、すなわち、完全な鏡面反射 (mirror reflection)、完全な拡散反射 (diffuse reflection)、および光沢反射 (glossy reflection) から合成されたものと考えるのがCGの世界で通常とられているモデルである (図-2 参照)。

完全鏡面反射

完全鏡面反射のBRDFは、デルタ関数 $\delta(x)$ を用いて簡潔に次式のように表現される。

$$f_{r,m} = \frac{\delta(\cos \theta_i - \cos \theta_r)}{\cos \theta_i} \delta(\phi_i - (\phi_r \pm \pi))$$

完全拡散反射

完全拡散反射する面では、入射光の方向によらず、反射光は任意方向に同等に散乱するような面とモデル化できるものである。これは、BRDF が定数であることにほかならない。すなわち、

$$f_{r,d} \equiv \text{constant}$$

光沢反射

光沢反射とは、完全拡散反射とか完全鏡面反射のように、数学的にきわめて簡単に表現できる場合でなく、表面に微細な凹凸があると仮定して成り立つもので、反射光が入射光の方向に依存する反射モデルである。

CGの世界では光沢反射のモデルとして古くから、面は**微小面素**からなり、各々が小さな鏡であると仮定して、光沢反射光をモデル化するアプローチがとられてきた²⁾。このモデルでは、光沢反射光は面上の点から視点に向かうベクトルとその点から光源に向かうベクトルの中間方向に向く微小面素の相対数に比例すると仮定する。これをBRDFの式で表すと、

$$f_{r,g} = \frac{DGF}{4 \cos \theta_i \cos \theta_r}$$

と表現される。ここで D は微小面素の分布関数、 G は自影による幾何学的な減衰ファクタ、 F はフレネルの反射項を表す (文献2) 参照)。

2.2 レンダリング方程式

前節で述べた反射方程式より、入射光とその物体のBRDFが与えられれば、反射光の分布を計算できることになる。このうち、入射光の分布を与えるモデルを、**照明モデル** (illumination model) と呼ぶ。CGにおける古典的な照明モデルとして、点光源あるいは平行光線の存在を仮定し、かつ、光源と着目している物体の間に障害物が入り込まないとして影づけを無視するきわめてシンプルなモデルが採用されてきた。これを**ローカル照明モデル**と呼ぶ。ローカル照明モデルの特

徴は、光源と着目している物体との間の関係だけで、入射光分布が決定できることである。これに対し、レイトレーシングのように影づけを考慮する照明モデルをグローバル照明モデルと呼ぶ。グローバル照明モデルでは、光源と着目している物体の間の関係だけでなく、全体の環境を考慮しなければならない。より一般的なグローバル照明モデルでは、光源からくる直接光だけでなく、ほかの物体からくる間接光も考慮する。このような一般化されたグローバル照明モデルはレンダリング方程式で与えることができる⁸⁾。

レンダリング方程式は、反射方程式から導出することができる。反射方程式は

$$L_r(\omega_r) = \int_{\omega_i} f_r(\omega_i \rightarrow \omega_r) L_i(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

で与えられたが、物体上の点 x における光源 S (直接光源でも間接光源でもよい) 上の点 x' からの入射光は、

$$L_i(x, \omega_i) = L_s(x', \omega_i) V(x, x')$$

で与えられる (図-3 参照)。ここで、 $V(x, x')$ は点 x から点 x' がみえるかどうかの関数で、みえるとき 1、みえないとき 0 を意味する。 $L_s(x', \omega_i)$ は光源上の点 x' における反射輝度を表す。

次に半球 Ω 上の積分を物体表面上の面積分に変換する。半径 r の半球上の微小面積 a に対する微小立体角 $d\omega$ が $d\omega = a/r^2$ で与えられることから $d\omega_i$ は

$$d\omega_i = \frac{dA' \cos \theta'}{\|x - x'\|^2}$$

で与えられる。いま、

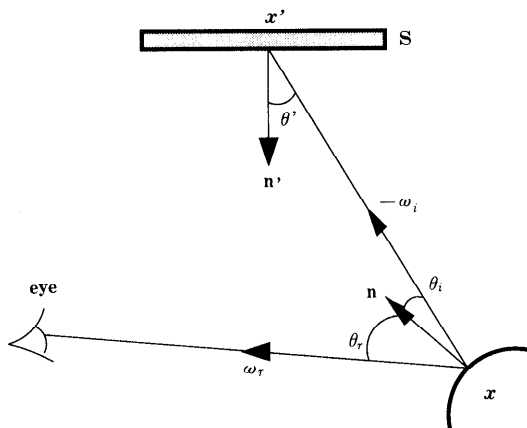


図-3 グローバル照明モデルの概念図

$$\begin{cases} G(x, x') \equiv (\cos \theta_i \cos \theta') / \|x - x'\|^2, \\ F \equiv f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_r) V(x, x') G(x, x') \end{cases}$$

とおくと、

$$L_r(x, \omega_r) = \int_{x' \in S} F L_s(x', \omega_i) dA'$$

が得られる。これにさらに点 x のある物体自身のエミッション $L_e(x, \omega_r)$ を加えた式がレンダリング方程式と呼ばれる。すなわち、

$$L_r(x, \omega_r) = L_e(x, \omega_r) + \int_{x' \in S} F L_s(x', \omega_i) dA'$$

で表現される。

上式で完全な拡散反射面を考えると、BRDF は $f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_r) = \rho_d / \pi$ という定数で表現される。ここで ρ_d は拡散反射定数を表す。さらに入射 (反射) 輝度が方向に依存しないことなどを考慮すると、レンダリング方程式から、

$$B(x) = E(x) + \frac{\rho_d}{\pi} \int_{x' \in S} V(x, x') G(x, x') B(x') dA'$$

が得られる。これをラジオシティ方程式と呼ぶ。

3. 代表的なレンダリング方程式の解法

以下で、代表的なレンダリング方程式の解法としてラジオシティ法とレイトレーシングについて簡単に述べる。

3.1 ラジオシティ法

ラジオシティ法とは物体間の光エネルギーの放射・収集の平衡状態を求めることにより、物体の輝度を算出するレンダリング手法である。レンダリング方程式の言葉では、BRDF として完全な拡散反射面を考えた特殊ケースとして扱う (前章参照) のが元来のラジオシティ法の姿である。物体の輝度計算は通常、入力物体を多数のポリゴンに分割し、各ポリゴンが放射する光エネルギーの連立方程式を解くことで行う。この計算の中心をなすのは、2つの物体 (ポリゴン) 間の幾何学的な関係だけで決まるフォームファクタと呼ばれる量の計算である⁹⁾。

素朴に連立方程式を解いてフォームファクタの計算をすると、シーンの中に含まれるポリゴンの数を N とすると N^2 のオーダがかかる。これまでのラジオシティの研究の多くはいかにして、高速にフォームファクタを計算するか、1つの焦

点が置かれてきた。最もよく用いられている高速化の手法は、シーンの中のポリゴンデータを階層的にもたせるアプローチである。中でもポリゴンデータをパッチと呼ばれるポリゴンの小片の集合に分割し、パッチをさらにエレメントと呼ばれる細かい小片に分割する3階層での階層的なラジオシティ法が有名である⁵⁾。

3.2 レイトレーシング

レイトレーシング (raytracing) とは、空間中の任意の点 (通常、視点あるいは光源) から適当な方向に向けてレイを放ち、これを追跡しながら輝度計算しようというレンダリング手法のことを意味する。

前節で述べた言葉で説明すると、レイトレーシングとは、BRDFとして図-2で与えたすべての項を含み、かつ面の透過光成分も加えたより一般化されたBRDFモデルによるレンダリング方程式のシミュレーション方法とみることができる。レンダリング方程式は積分方程式の一種であり、通常のレイトレーシングでは、これを離散的なレイでサンプルする。サンプリングの誤差はエイリアシングとなって出力される画像に現れる。これを除去するための最も簡単な方法は、サンプリングの数を増やすことである。この方法には、単純にシーン全体の計算でサンプル数を増やすものから、モンテカルロ積分を応用して乱数あるいは擬似乱数を使うものまでさまざまな手法が研究されている⁶⁾。

4. 写実的レンダリングの高速化

これまで、写実的レンダリングの分野は特殊なハードウェアがないかぎり対話的な応答速度をもたらす動作は期待できないものとして扱われてきた。しかしながら、画像ベースのレンダリング⁷⁾⁹⁾やインクリメンタルレンダリング³⁾などの各種のコヒーレンスを利用したレンダリングなどの出現により、PCなどの安価なハードウェア環境下でも写実的なレンダリング表示を対話的な応答速度でみせることができるようになってきた。以下で、筆者らがかかわってきたいくつかの写実的レンダリングの高速化の手法について簡単に述べる。

4.1 ラジオシティ法用の適応的ポリゴン生成

ラジオシティ法で写実性を向上するためには、

パッチやエレメントを十分細かく生成する必要がある。しかし、ラジオシティ法による算出結果を用いて対話的な視点移動操作 (ウォークスルー) を実現するためには、ポリゴン数の増加は抑えられなければならない。そこで陰影やハイライトの周辺など、輝度変化の大きい部位のみを細かく分割する適応的なポリゴンメッシュ生成手法によって、ラジオシティ法を高速化する手法がよく用いられる。代表例として、1回目のラジオシティ法の算出結果から、輝度変化の大きい部位のエレメントをさらに分割する手法がある。しかしこの手法は、エレメント数が増加しやすい。一方、ラジオシティ法のフォームファクタの算出過程において、輝度変化が大きくなると推測される部位のエレメントを階層的に分割する階層型ラジオシティ法もよく用いられる。そのほかに、光源から多数のパーティクルをランダムに放射した結果を用いてポリゴンメッシュを生成する手法¹²⁾や、1回目のラジオシティ法の算出結果を参照してポリゴンメッシュを全面的に再生成する手法などが知られている⁷⁾。これらの手法は、エレメント数の増加を抑え、かつエレメントの形状の歪みを小さくする。

4.2 光源移動に対応した擬似ラジオシティ法

一般のラジオシティ法に基づくウォークスルーでは、動的なインタラクションは視点の変更に限られている。光源や物体の位置や形状が変わるなど、シーンに変化があると、基本的にはシーン全体でラジオシティの再計算が必要になる。我々は光源(群)を移動させたときの効果をラジオシティ再計算せずに関数近似でレンダリングするアプローチを提案した¹¹⁾。具体的にはまず、前処理として、あらかじめ離散的にサンプルした複数の光源の位置でラジオシティ法を適用する。その結果を基に、各ポリゴンメッシュの頂点で、光源の位置を変数とした輝度値の近似関数を求める。表示する際には、動的に変わる光源や物体の位置に基づいて輝度の近似関数を各頂点で評価し、その結果を表示する。

図-4に類似したデータ (約3500ポリゴン) を使い、補間して生成した画像と補間を指定した光源の位置で実際にラジオシティ法を適用して生成した画像とを比較したところ、我々の目でみるかぎり区別はつかなかった。

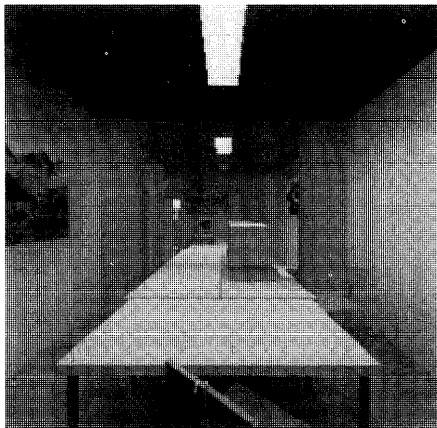


図-4 レイトレーシングによるレンダリング

このように特殊な状況下では、線形補間に代表される関数近似でかなりそれらしい結果をほぼ対話的に出せる。たとえば、補間計算には上述のデータの場合、100 MHz PPC 604 で線形補間関数で約 15 msec/シーン、3 次スプライン補間関数で約 20 msec/シーンかかった。しかし、光源の位置や向きに関して自由度を上げていくと、それに比例して関数系も複雑化せざるを得ず、実用化に対してはまだ課題は多い。

4.3 全方向リフレクションマッピング

いわゆる「写り込み」の CG シミュレーションは、レイトレーシングの最も得意とする分野である。しかし、一般にレイトレーシングでは時間がかかりすぎて対話的な処理は期待できない。この写り込みを高速にシミュレーションしようとする 1 つの技術がリフレクションマッピングあるいは環境マッピングと呼ばれる技術である。これは、OpenGL¹⁰⁾ のような汎用の 3 次元グラフィクス API で採用されて急速に広まった。

環境マッピングとは、テクスチャマッピングの一手法で、物体の頂点に付随する静的なテクスチャ座標でテクスチャをアクセスするかわりに、視点の動きとともに頂点ごとに動的に決まる反射ベクトルでテクスチャをアクセスすることで、グローバルな反射効果を簡便にシミュレーションしようとするものである。

OpenGL で採用されている「環境マップ」は、魚眼レンズで撮影した画像に相当する「球面マップ」と呼ばれる形態の画像である。環境マップはその簡便さと高速性のため、レイトレーシングの代用としてよく用いられる。しかし、OpenGL

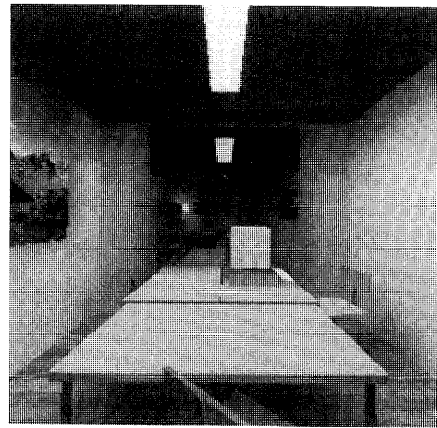


図-5 全方向リフレクションマッピングの適用例

で使われる環境マッピングにはいくつかの問題点がある。まず、環境マップ自体が全立体角方向 (720°) をカバーできない。さらに球面マップに由来する歪みが、平面的な鏡への写り込みをシミュレーションしようとするとき無視できなくなる。そして、環境マッピングが視点座標系でしか定義されておらず、視点とともに移動してしまい、たとえば球面状の鏡の裏側はいつまでたってもみえないという問題がある。我々は、対話的な環境下で利用でき、これらの問題を解決した全方向をカバーするリフレクションマッピング技術を考案した¹⁾。

一例として、図-4 と図-5 は、オフィスデータに大きな平面鏡を壁に置いてこれをレイトレーシングでレンダリングしたもの (図-4) と我々の手法でリフレクションマッピングによりレンダリングしたもの (図-5) を示す。レイトレーシングの出力に一致させることは本質的にできないが、かなり近いイメージが得られることがわかる。我々の手法ではオフィスデータ内で視点を動的に変更した場合、PC 上でほぼ対話時間で鏡への写り込みが変化するのに対し、レイトレーシングでは何十分もかかることを注記しておく。

5. ま と め

写実的レンダリングの研究は、歴史的には 20 年以上も前から始められている分野であるが、対話的な応答速度を目指す技術は近年になって始まったものばかりである。PC やワークステーションの高速化・高機能化、および WWW に代表されるネットワークの普及にともない、写実的レ

ンダリング表示を高速に（ネットワークを通して）表示したいという要求は今後ますます増大するであろう。まだまだ挑戦的な課題の多い分野である。

なお、写実的レンダリングに関する文献としては、ACMのSIGGRAPHのほか、Eurographicsの中のRendering Workshopが詳しいので参照されたい。

参 考 文 献

- 1) Aono, M. and Ohbuchi, R.: Polygon-based, Interactive, Omni-directional Reflection Mapping, TRL Technical Report RT 0167, IBM Research, Tokyo Research Lab. (Sep. 1996).
- 2) Blinn, J. F.: Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '77), 11 (2), pp. 192-198 (1977).
- 3) Biere, N. and Poulin, P.: Hierarchical View-dependent Structures for Interactive Scene Manipulation, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '96), pp. 83-90 (1996).
- 4) Chen, S. E.: QuickTime® VR—An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation, Computer Graphics Proceedings (SIGGRAPH '95), pp. 29-38 (1995).
- 5) Cohen, M. and Wallace, J. R.: Radiosity and Realistic Image Synthesis, Academic Press Professional (1993).
- 6) Glassner, A. S.: Principles of Digital Image Synthesis, Volume I and II, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, CA (1995).
- 7) 伊藤貴之他: バブル・メッシュ法を用いたラジオシティ法のための適応的メッシュ生成, 情報処理学会グラフィクスとCAD研究報告, 96-CG-81, pp. 73-78 (1996).
- 8) Kajiya, J.: The Rendering Equation, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '86), 20 (4), pp. 143-150 (1986).
- 9) McMillan, L. and Bishop, G.: Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System, Computer Graphics Proceedings (SIGGRAPH '95), pp. 39-46 (1995).
- 10) Neider, J. et al.: OpenGL™ Programming Guide, Addison-Wesley Publishing Co. (1993).
- 11) 大淵竜太郎, 青野雅樹: 光源や物体の動的移

動を考慮した擬似ラジオシティ法, 情報処理学会第53回全国大会, 7P-1 (1996).

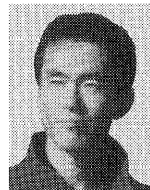
- 12) Shirley, P. et al.: Global Illumination via Density-Estimation, in Rendering Techniques '95, P. M. Hanrahan and W. Purgathofer Eds, pp. 219-230, Springer Verlag (1995).
- 13) Watt, A.: 3D Computer Graphics, Addison-Wesley (1993).

(平成8年10月31日受付)



青野 雅樹 (正会員)

1984年東京大学理学部情報科学科修士課程修了。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社。1994年ニューヨーク州レンセラー工科大学計算機学科Ph.D.取得。ACM, IEEE Computer Society各会員。



大淵竜太郎 (正会員)

1981年上智大学理工学部電気電子工学科卒業。1983年電気通信大学計算機科学科修士課程修了。1994年University of North Carolina Computer Science DepartmentよりPh.D.取得。1994年より日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所所属。インタラクティブコンピュータグラフィクス全般、とくにaugmented realityとrealistic image synthesisに興味をもつ。ACM, IEEE Computer Society, 日本ソフトウェア科学会各会員。趣味は岩登りと山岳スキー。



伊藤 貴之 (正会員)

1968年生。1990年早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。1992年同大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社。現在、同社東京基礎研究所にて、計算機による形状処理および画像生成に関する研究に従事。