

重点的サンプリングを用いた光の表面下散乱シミュレーションに関する研究

益池 功 玉木 徹 金田 和文

(広島大学 大学院工学研究科)

1. はじめに

コンピュータグラフィックスによるフォトリアリスティックな画像生成は、映画や工業製品のデザインなどに要求されている。コンピュータグラフィックスにおいて、物質をリアルに表現するためには、物質表面上だけでなく、物質内部における光の散乱を考慮する必要がある。散乱方程式を数値的に解いて内部散乱をシミュレーションする際、サンプリング間隔を一定とする方法では、その間隔を非常に細かくとらなければならないため、計算時間が膨大となる。効率的な計算のためには、サンプル点(散乱点)の取り方が重要となってくる。本研究では、上述の問題を解決するため、重点的サンプリングを用いた光のシミュレーションを行う方法について検討を行った。

2. 表面下散乱方程式

本研究では、単散乱光によるシミュレーションを考える。単散乱光の経路を図1に示す。まず、光が物質内部へ鏡面透過する際、スネルの法則により屈折する。その屈折光が距離 l_1 進んで角度 θ_1 の方向へ散乱する。さらに距離 l_2 進んで物質面へ到達する。 ϕ は散乱光線と到達する面の法線との成す角度である。このとき、ある射出点における物質表面下の放射照度は次式で表される[1]。この式は解析的に解くことは困難である。

$$E = \int \sigma_s F(\phi_m) p(\theta_1) e^{-(\sigma_s + \sigma_a)s} L_{in} \cos \phi ds \quad (1)$$

σ_s : 散乱係数 σ_a : 吸収係数 L_{in} : 入射光輝度

$p(\theta_1)$: 位相関数(Henyey-Greenstein 位相関数)

$F(\phi_m)$: フレネルの透過率 ϕ_m : 入射角

s : 物質内部を通過する距離($s=l_1+l_2$)

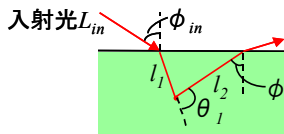


図1: 単散乱シミュレーション(断面図)

3. サンプリング法

3.1 一定間隔サンプリング

式(1)の積分区間を一定間隔で離散化すると次式が得られる。

$$E_c = \Delta s \sum \sigma_s F(\phi_m) p(\theta_1) e^{-(\sigma_s + \sigma_a)s} L_{in} \cos \phi \quad (2)$$

ここで、 N はサンプル数、 Δs はサンプル幅である。 Δs を十分小さい値とした場合は、放射照度値 E_c は真値とみなすことができる。

しかし、一定間隔サンプリングでは、物質内部を通過する距離が長くなると、光の減衰が大きく、表面下放射照度が小さいものが多く含まれるようになり、計算効率が悪くなる。

3.2 重点的サンプリング

式(1)を、重点的サンプリングを用いて離散化を行う。重点的サンプリングとは、表面下放射照度に与える影響が大きいサンプル点(散乱点)を重点的にサンプリングし、真値への収束を速める方法である。

サンプリングする際、重要度を決定する必要がある。被積分関数にできるだけ類似した関数を重要度とするのが望ましい。位相関数は物質によって異なるため、次式により重要度を決定する。

$$P(s) = e^{-(\sigma_s + \sigma_a)s} \cos \phi \quad (3)$$

式(3)から確率的に内部距離 s を決定し、そのときの放射照度を計算する。求められた放射照度の期待値をとることで、次式により式(1)の推定値が求められる。

$$E_s = \frac{1}{N} \sum \sigma_s F(\phi_m) p(\theta_1) L_{in} P(s) ds \quad (4)$$

4. 結果

離散化の際のサンプル数と放射照度との関係を調査し、重点的サンプリングと一定間隔サンプリングの真値への収束過程を評価し、その際、入射角 0, 30, 60 度に対して、放射照度のピーク位置と入射点から 0.5[mm]離れた点での放射照度を求めた。入射角 60 度のサンプル数と放射照度の関係を図2に示す。

図2より、重点的サンプリングを用いると、ピーク位置付近では真値への収束が速く、ピーク位置から離れるにつれて収束速度が落ちるといった結果が得られた。

次に、物質表面上の放射照度分布を調査した。その際、図3のように、入射角 60 度、離散化時のサンプル数を 50 とした時の斜線部分での放射照度分布を図4に示す。また、真値の放射照度分布(図5)との誤差分布を図6に示す。

重点的サンプリングを用いた場合、少ないサンプル数で真値に近い放射照度分布が得られることが分かる。

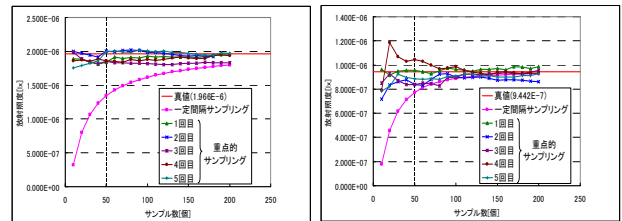


図2: サンプル数と放射照度の関係

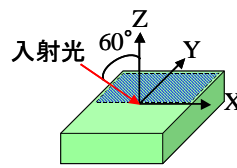


図3: モデル

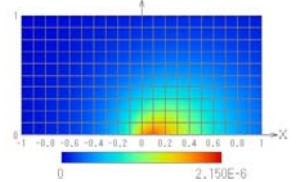


図5: 真値の放射照度分布

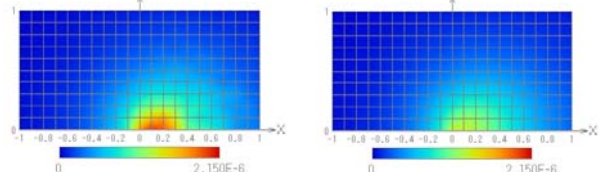


図4: 放射照度分布

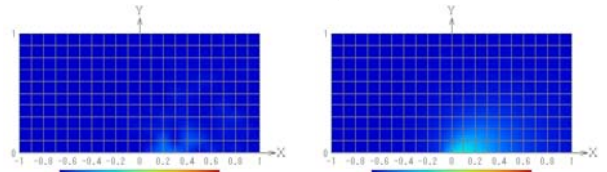


図6: 真値との誤差分布

5. おわりに

単散乱シミュレーションする際、重点的サンプリングを用いることにより、効率的な計算が可能となった。今後の課題としては、重点的サンプリングを用いた多重散乱シミュレーション手法の開発が挙げられる。

参考文献

[1] H. W. Jensen, et al. "A Practical Model for Subsurface Light Transport," Proc. SIGGRAPH'01, pp. 511-518 (2001).