

光ビームを用いた表面下散乱方程式の解法に関する研究

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写実的な画像生成は、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。本研究では、光ビームの通過経路を考慮して離散化を行い、表面下散乱方程式を解く方法を開発した。すなわち、最初の散乱点までは、1本の光ビームの通過経路に沿った離散化を行い、多重散乱光に対しては、初期散乱後の光ビームの通過する空間全体に対して離散化を行う。

2. 表面下散乱方程式

本研究では、単散乱光と二重散乱光を取り扱う。1本の光ビームによ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方向 ω_s に屈折する。その屈折光が距離 l_1 進んだ点で散乱され、方向が ω_o に変わり、さらに距離 l_2 進んで物質面へ到達する。このとき、初期散乱後の放射輝度 L_1 は(1)式で表される。射出点における物質表面下での放射照度 E_1 は(2)式で表される[1]。

$$L_1 = \int_r \sigma_s e^{-\sigma_s l_1} \int_{\Omega_s} p(\theta_1) L_{in} F(\phi_m) e^{-\sigma_s l_2} d\omega_s dl_2 \quad (1)$$

$$E_1 = \int_{\Omega_2} L_1 \cos \phi_o d\omega_o \quad (2)$$

σ_s : 散乱係数 σ : 消散係数 L_{in} : 入射光輝度
 $p(\theta)$: 位相関数(Henyey-Greenstein 位相関数)
 $F(\phi_m)$: フレネルの透過率 Ω_s : 光ビームの立体角
 r : 光ビームの ω_o 方向の通過距離

二重散乱の場合、初期散乱後、全方向に散乱し、第2散乱後の放射輝度 L_2 は(3)式で表される。射出点における物質表面下での放射照度 E_2 は(4)式で表される。これらの式は解析的に解くことは困難である。

$$L_2 = \int_r \sigma_s e^{-\sigma_s l_1} \int_{\Omega} p(\theta_2) L_1 d\omega'_s dl_3 \quad (3)$$

$$E_2 = \int_{\Omega_2} L_2 \cos \phi_o d\omega_o \quad (4)$$

3. 離散化方法

図2に示すように、物質面に光ビームが入射する場合を考える。 ω_o が決まれば、 l_1 が一意に決定する。そこで、 l_1 を一定間隔で離散化する。その際、光ビームに内接する球ボリュームを用いる。球ボリュームの間隔は、光ビームの体積と個々の球ボリュームの体積の和が一致するように決定する。球ボリュームの中心を散乱点として、(1)、(2)式を解くことにより単散乱光を算出する。

二重散乱の場合、第2散乱点は第1散乱点以外の物質内部の点と考えられる。そのため、物質内部をグリッドに区切り、球ボリュームを配置し、その中心を散乱点とする。球ボリュームの直径は、個々の球ボリュームの体積の和が物質体積と一致するように決定する(図3参照)。離散式は次式で表される。

$$E_1 = \sum_i \sigma_s e^{-\sigma_s l_1} p(\theta_1) L_{in} F(\phi_m) e^{-\sigma_s l_2} \frac{(\Delta w)^2 \Delta w \cos \phi_o}{16} \frac{(\Delta w)^2}{4l_2^2} \quad (5)$$

$$E_2 = \sum_j \sum_i \sigma_s e^{-\sigma_s l_1} p(\theta_1) L_{in} F(\phi_m) e^{-\sigma_s l_2} \frac{(\Delta w)^2}{16} \Delta w p(\theta_2) \frac{(\Delta w)^2}{16l_2^2} \sigma_s e^{-\sigma_s l_3} \Delta w \cos \phi_o \frac{(\Delta w)^2}{16l_3^2} \quad (6)$$

Δw : 球ボリュームの直径 i : 第1散乱点 j : 第2散乱点

4. 結果

(5)式、(6)式を用いて物質表面下の放射照度分布を算出した。図4に示すように、入射角60度の時の斜線部分の放射照度分布を図5、6に示す。

単散乱よりも二重散乱の方が放射照度のピークが入射点から離れていくことがわかる。

5. おわりに

本稿では、表面下散乱方程式を、球ボリュームを用いて離散化して解く方法とその結果について述べた。今後の課題としては、計算効率向上のために、第2散乱点の球ボリュームの配置と直径をアダプティブに設定することが挙げられる。

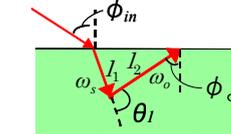


図1 単散乱光の経路

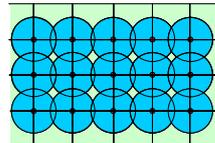


図3 第2散乱点

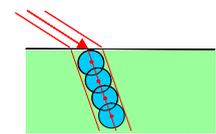
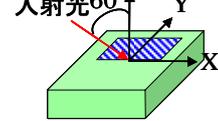


図2 第一散乱点



平面:20cm×20cm 厚さ:5cm
表示範囲:10mm×5mm

図4 シミュレーションモデル

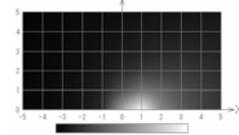


図5 単散乱

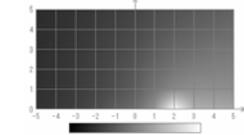


図6 二重散乱

参考文献

[1] P. Dutre, P. Bekaert, K. Bala, "Advanced Global Illumination," A K Peters Ltd, 2003.