

散乱マップを用いて多重散乱を考慮した天空光の高速表示

柳田 哲一[†] 岩崎 慶[†] 土橋 宜典[‡] 西田 友是[‡]

[†] 東京大学 [‡] 北海道大学

1 はじめに

景観表示の研究はCGの分野において重要な分野の一つである。景観画像を作成する上で考慮すべき自然光として天空光が挙げられる。天空光は大気中の気体分子やエアロゾルのような微粒子によって散乱した光である。天空光の輝度値の計算に関してはいくつかの研究がなされており、多重散乱を考慮した研究も行われているが、多くは視線上で輝度計算を、多数の仮想的な点（サンプル点）を用いて行うために高い計算コストがかかっていた[1,2,3]。

本稿では、多重散乱を考慮した天空光の計算を効率良く行うために、仮想的な層（サンプリングシェル）を用いる。天空を幾層かのサンプリングシェルに分割し、各サンプリングシェル上においてサンプル点の散乱光の輝度を計算する。サンプリングシェル上の各サンプル点の輝度はテクスチャとして保存し、描画の際にはテクスチャ同士の演算を行うことにより、高速なレンダリングを行う。

2 概要

太陽光は大気中の分子やエアロゾルのような微粒子によって散乱する。光の波長の10分の1以下の大きさである大気分子による散乱はレイリー散乱と呼ばれ、波長と同程度の大きさであるエアロゾルによる散乱はミー散乱と呼ばれる。視点に届く天空光の輝度は、微粒子による散乱光の輝度を視線上で積分した値である。散乱光の輝度は、光が視点に届くまでに大気中を通過した距離による減衰と散乱の度合いによって決まり、散乱の度合いは、微粒子に入射する方向と散乱する方向の間の角度によって決まり、位相関数で計算される。

視線上の散乱光の輝度計算を、1次散乱を例に説明すると以下ようになる（図2参照）。まず天空を n 層のサンプリングシェルに分割し、そのサンプリングシェル上のサンプル点 P_k に到達する太陽光の輝度を求める。これは、太陽光が地球の大気層に突入してから P_k に届くまでに大気中を通過した距離による減衰を考慮したものとなる。次に、 P_k における散乱率を位相関数を用いて計算し、最後に、 P_k から視点に到達するまでの光の減衰を考慮することで、サンプル点 P_k で散乱し、視点に到達する散乱光の輝度値を求めることができる。その後、視点に到達する1次散乱光を、視線上の散乱光の輝度を視線に沿って足し合わせることで求める。2次散乱による輝度値の計算については後に詳解するが、1次および2次の散乱における輝

度値も計算後、散乱マップとしてテクスチャとして値を保存しておき、レンダリングの際にはテクスチャ同士の演算を行う。また、輝度計算の際に必要な要素であった、密度、位相関数、減衰率とサンプル点に到達した太陽光の輝度は、前もって計算しテーブルとして保存しておくことで計算の効率化を図る。図1は提案法の概要を示したものである。ここで、イルミネーションマップとはサンプル点に到達した太陽光の輝度をマップにしたものである。

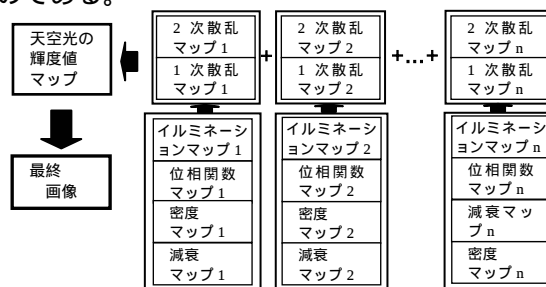


図1： 散乱マップを用いた天空光の計算

3 提案法

3.1 1次散乱

まず視点を中心とした半球ドームを形成する。天頂方向を z 軸とし、 xy 平面からの仰角を ϕ 、 xz 平面からの方位角を θ 、太陽光の輝度を I_{sun} とすると、 (θ, ϕ) 方向の天空光の輝度 I_{sky} は以下のような式で表される。

$$I_{sky}(\theta, \phi, \lambda) = I_{sun}(\lambda) \int_0^T (\beta_r(\alpha, \lambda) \rho_r(t) + \beta_m(\alpha, \lambda) \rho_m(t)) \times \exp(-(\tau_r(s, \lambda) + \tau_m(s, \lambda))) \times \exp(-(\tau_r(t, \lambda) + \tau_m(t, \lambda))) dt, \quad (1)$$

ここで λ は光の波長、 T は視線と大気境界の交点を P とした時の、視点と P との距離であり $\beta_r, \beta_m, \tau_r, \tau_m$ はレイリー散乱、ミー散乱における位相関数と光学的距離である。また ρ_r と ρ_m は大気分子の密度とエアロゾルの密度、 t は視点とサンプリングシェル上の点 P_k の距離、 s は太陽光と大気境界の交点 P_s と P_k の距離である（図2参照）。

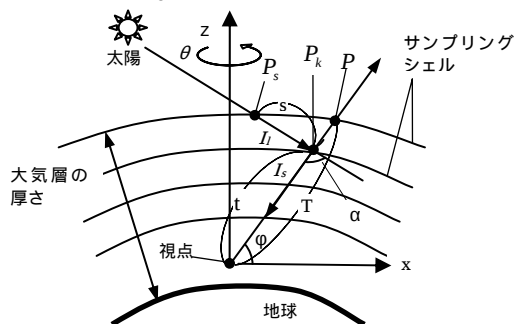


図2： 1次散乱の計算
サンプリングシェル上のサンプル点 P_k から視点方

Efficient Rendering of Sky Light Taking into Account Multiple Scattering Using Scattering Maps

[†] Tetsuichi Yanagita, Kei Iwasaki, Tomoyuki Nishita

[‡] Yoshinori Dobashi

The University of Tokyo([†])

Hokkaido University([‡])

向に向かう散乱光の輝度は以下の式で計算される。

$$I_s(\theta_k, \phi_k, \lambda) = I_l(\theta_k, \phi_k, \lambda) G(\theta_k, \phi_k, \lambda) (F_r(\theta_k, \phi_k, \lambda) (2) \\ \times D_r(\phi_k) + F_m(\theta_k, \phi_k, \lambda) D_m(\phi_k)),$$

ただし、

$$D_r(\theta_k, \phi_k) = \rho_r(\phi_k), D_m(\theta_k, \phi_k) = \rho_m(\phi_k) \quad (3)$$

$$I_l(\theta_k, \phi_k, \lambda) = I_{sun}(\lambda) \exp(-(\tau_r(s(\theta_k, \phi_k), \lambda) \\ + \tau_m(s(\theta_k, \phi_k), \lambda))) \quad (4)$$

$$F_r(\theta_k, \phi_k, \lambda) = \beta_r(\alpha(\theta_k, \phi_k), \lambda) \quad (5)$$

$$F_m(\theta_k, \phi_k, \lambda) = \beta_m(\alpha(\theta_k, \phi_k), \lambda) \quad (6)$$

$$G(\theta_k, \phi_k, \lambda) = \exp(-(\tau_r(t(\theta_k, \phi_k), \lambda) \\ + \tau_m(t(\theta_k, \phi_k), \lambda))) \quad (7)$$

ここで θ_k, ϕ_k は視点から点 P_k 方向への角度を表す。(3)式は密度分布、(4)式は点 P_k に入射する太陽光の輝度、(5)(6)式は位相関数、(7)式は点 P_k と視点間での減衰率を表し、それぞれの計算結果の値は密度マップ、イルミネーションマップ、位相関数マップ、減衰マップとして保存する。散乱マップはこれらのマップを使って計算され、アキュムレーションバッファを用いて足し合わせることで天空光の輝度が計算される。

3.2 多重散乱

エアロゾルの密度は大気分子に比べて微少なので2次散乱においてはレイリー散乱のみを考慮する。サンプリングシェル上のサンプル点 P_k における2次散乱光の輝度は解析的には計算できない。そこで、散乱光の積分を行うために n_ω 個のサンプリング方向 q を用いる。ある方向 ω から P_k に到達する1次散乱光の輝度の合計を $I_t(P_k, \omega, \lambda)$ とすると、 $I_t(P_k, \omega, \lambda)$ は方向 ω 上の微粒子によって散乱された光の合計になるので、2次散乱による点 P_k での散乱光の輝度は以下の式で表される(図3参照)。

$$I_s^{(2)}(P_k, \lambda) = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \beta_r(\alpha') \rho_r(\phi_k) I_t(P_k, \omega, \lambda) d\omega, \quad (8)$$

ここで α' はサンプリング方向 q と視点方向のなす角度である。1次散乱の計算と同様に、 $I_t(P_k, \omega, \lambda)$ も前もって計算し、テーブルに保存しておく。また、2次散乱による散乱光の輝度も、計算後に散乱マップとして保存し、描画の際にはアキュムレーションバッファを用いて足し合わせる。

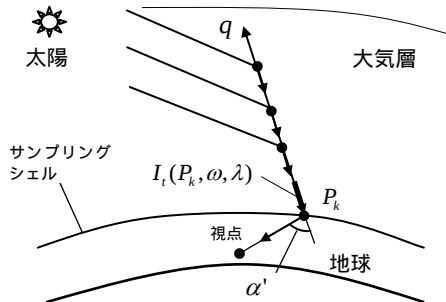


図3: 2次散乱の計算

4 サンプリングシェル、サンプリング方向の適正値に関する考察

最後にサンプリングシェルの数 n とサンプリング方向の数 n_ω の適正値を考察する。まず2次散乱光に関しては、 $n_\omega = 36$ での散乱マップの輝度値

$I_{n_\omega=36}^{(2)}$ を基準に、様々な n_ω での誤差を散乱マップ上の各点において測定し、 $I_{n_\omega=36}^{(2)}$ に対する割合を求めた。サンプリングシェルの数についても同様に、 $n = 100$ の時の輝度値を基準に様々な n における誤差率を測定した。本稿では、実験より $n_\omega = 15$ および $n = 40$ を適正値として採用した。

5 結果

提案法によって生成した結果画像を以下に示す。図4は太陽の高度 $\phi = 10$ 、図5は $\phi = 60$ 、視点の地球上における高度はどちらも10mである。散乱マップの解像度は 32×60 で天空光の計算、レンダリングにかかる時間はPentium 2.2GHz Ge Force4 のPCでそれぞれ9.5秒と0.02秒であった。

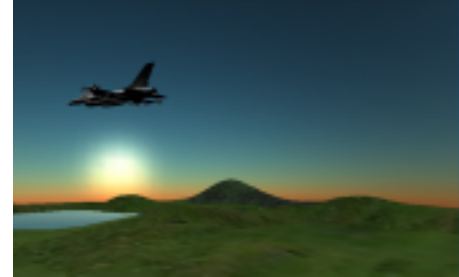


図4: 結果例その1

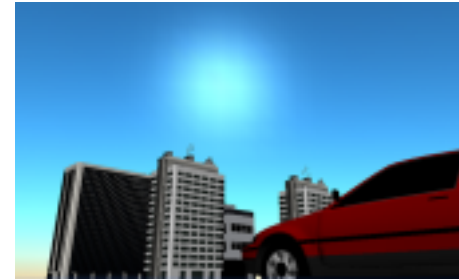


図5: 結果例その2

6 まとめと今後の課題

本稿では、2次の項まで考慮した大気中の微粒子による太陽光の散乱を、位相関数、大気の密度、光の減衰率、サンプル点に到達した光の輝度値、サンプル点に到達する1次散乱光を前もって計算し、テーブルに保存することにより、効率良く計算する手法を提案した。また、計算後の天空光の輝度値をテクスチャとして保存し、描画の際にはハードウェアを用いて足し合わせることで高速なレンダリングを可能とした。今後の課題としては、太陽の位置や視点の高度が変化したときの散乱光の計算を、より高速化することによって様々な条件下での天空光をリアルタイムに描画することが挙げられる。

参考文献

- [1] T. Nishita, Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, "Display Method of the Sky Color Taking into Account Multiple Scattering," *Proc. Pacific Graphics '96*, 1996, pp.117-132.
- [2] Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Nishita, "A Fast Display Method of Sky Color using Basis functions," *The Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 8, No. 2, 1997, pp. 115-127.
- [3] A. J. Preetham, P. Shirley, B. Smits, "A Practical Analytic Model for Daylight," *Proc. SIGGRAPH '99*, 1999, pp. 91-100.