

I-047

# 大気中の粒子による散乱現象を反映した空の色の高速シミュレーション A high-speed sky color simulation technique that reflects scattering of particles in the atmosphere

黒田 たから†  
Takara Kuroda

床井 浩平‡  
Kohei Tokoi

## 1. はじめに

近年のCG技術の普及とともに、CGによるリアルな自然景観を描画するための研究が盛んに行われるようになった。そしてリアルな自然景観を描画するために、空は欠かせない要素のひとつである。

空の色を精密に再現するには、大気中の粒子による太陽光の散乱現象をシミュレートする必要がある。しかし、散乱現象を精密に再現しようとすると、計算コストが大きく増大してしまう。そこで本研究では、大気中にあらかじめ粒子を散布し、この粒子を点光源として、大気中の光の散乱を再現する手法を開発した。

この手法では、散布する粒子の密度を位置に応じて適応的に変化させることによって、不均一な空の色を再現することができる。例えば、太陽方向の粒子の密度を増加することで太陽周りの色の変化を精密に再現したり、大気中のエアロゾルの密度を増加することで、曇り空を再現したりといったことが可能となる。

また、散乱光の強度を求める計算式を輝度値、散乱位相関数、減衰率の3つのパラメータに分割し、この値をあらかじめ計算して粒子に与えておくことで、計算時間の短縮を図る。

## 2. 関連研究

現在までに、空を描画するためのさまざまな手法が提案されている。Klassenは大気中の微粒子による散乱現象をシミュレートして空の色を計算する手法を提案した[1]。この手法では大気層が水平であると仮定していたため、太陽高度が低い場合は大気中の太陽光の進路距離が無限大になるという問題があった。そこKanedaらは、大気層が半球であり、粒子の密度が高度に対して指数関数的に減少していくと仮定して計算する手法を提案した[2]。

計算の高速化の手法としては、以下のものがある。Hoffmanらは近似式を用いて散乱現象を簡略化することでリアルタイム描画を実現した[3]。この手法では空をリアルタイムに描画することが可能だが、写実性が他の手法に比べて劣る。またIwasakiらは、大気を仮想的な層に分割し、それらの層上での散乱光の輝度分布を散乱マップと呼ぶテクスチャとして扱うことで、グラフィックスハードウェアを効果的に使用する手法を提案した[4]。この手法では、写実的な空を高速で描画しているが、かわりに前計算の計算コストが大きいという問題点がある。

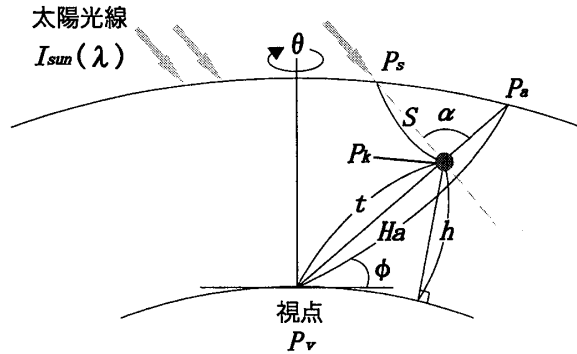


図1 大気層の設定

## 3. 提案手法

### 3.1 描画プロセス

まず、大気層を半径100kmの半球であると仮定する(図1)。この大気層モデルの中に数百個の空気分子とエアロゾルを散布する。この粒子が視点方向に放つ光の色が空の色になる。このとき、粒子の密度が高度によって指数関数的に減少するように設定する。また、エアロゾルに関しては、高度0~30kmの範囲で存在すると仮定する。次に、視線方向( $\theta, \phi$ )に存在する粒子を検索する。視界に入った粒子に対して、粒子から視線方向に届く散乱光の強度を計算する。この輝度値の計算は散乱光の分光分布を求めているので、これを最終的にRGB値に変換する。

散乱光の強度 $I$ は、以下の式で計算する。

$$I = I(\theta, \phi, \lambda) \times F(\theta, \phi) \times G(\theta, \phi, \lambda) \quad (1)$$

ここで、 $I(\theta, \phi, \lambda)$ は粒子に届く太陽光の輝度値、 $F(\theta, \phi)$ は散乱位相関数、 $G(\theta, \phi, \lambda)$ は減衰率を表す。これらの詳細については次の章で記述する。

### 3.2 前計算

本研究では、散乱光の強度を求める計算式を輝度値、散乱位相関数、減衰率の3つのパラメータに分割する。そし

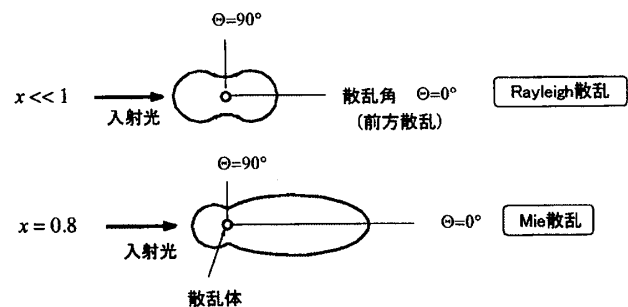


図2 粒子の大きさ と 散乱位相関数の関係

†和歌山大学大学院 システム工学研究科

‡和歌山大学 システム工学部

て、この3つのパラメータの値をあらかじめ計算してデータを保持しておく。実際に空の色を求めるとき、つまり粒子が放つ光の照度を求めるときに、この3つの値を用いて計算する。

それぞれのパラメータについて簡単に説明する。輝度値は、大気層中で散乱現象を繰り返した太陽光が粒子に到達したときの光の強度を表す。散乱位相関数は、粒子に衝突した光のうち、視線方向に散乱する光の割合を表す(図2)。減衰率は、粒子から視点に届くまでの間に減衰する光の割合を表す。この3つの値について計算するとき、大気中の散乱現象にはレイリー散乱とミー散乱の2種類あることを考慮しなければならない。つまりこれらの値についてそれぞれ、レイリー散乱が起きたときと、ミー散乱が起きたときの2種類のパターンを計算しておかなければならない。

レイリー散乱は空気分子による散乱現象で、散乱光の強度が波長の4乗に反比例し、前方散乱と後方散乱の割合が同じという特性を持つ。ミー散乱はエアロゾルによる散乱現象で、レイリー散乱のような波長依存性はないが、指向性が高いという特徴を持つ。

#### 4. 実験結果

図2, 3は提案法により生成された画像である。図2は視線方向 $(\theta, \phi) = (0^\circ, 50^\circ)$ 、太陽の位置 $(\theta, \phi) = (0^\circ, 80^\circ)$ のときの空の画像、図3は視線方向 $(\theta, \phi) = (0^\circ, 25^\circ)$ 、太陽の位置 $(\theta, \phi) = (0^\circ, 5^\circ)$ の空の様子を描画している。また視野角は、横 $90^\circ$ 、縦 $45^\circ$ に設定している。また大気中の粒子は、空気分子、エアロゾルともに200個とし、密度の変化は大気層の高度のみ考慮に入れた。

提案法により、太陽高度の変化とともに空の色も変化した。しかし、同じ太陽高度で実際の空の様子と比べると差異を感じる結果となった。

また、前計算を行った場合と行わなかった場合とでの、画像生成にかかる時間を比較した。実験に使用した機器を以下に示す。生成画像は $320 \times 160$  pixelで、5回の生成時間の平均をとった。

- CPU : Intel® Core™ i5 2.67 GHz
- 使用メモリ : 2.99GB
- ビデオカード : NVIDIA GeForceGT240
- OS : Windows7 Home Premium
- コンパイラ : Microsoft Visual C++ 2008

処理時間は、前計算を行った場合は3.17秒、行わなかった場合は11.32秒であった。よって、提案法を用いることで計算時間が約4分の1に短縮された。これは、生成画像の大きさや太陽高度を変化させても同じ結果になった。

しかしながら、リアルタイム描画を実現するまでには至らなかった。

#### 5. まとめ

本研究では大気中の粒子を点光源と仮定して、大気中の密度変化を自由に行えるようにした。また、視線方向に届く散乱光の強度を求める計算式を、輝度値、散乱位相関数、減衰率の3つのパラメータに分割し、前計算で値を求めておくことで、計算時間の短縮を試みた。

実験の結果、提案手法は、太陽高度による空の色の変化は再現できたが、実際の空の色と完全には一致しなかった。



図3 日中の空の画像

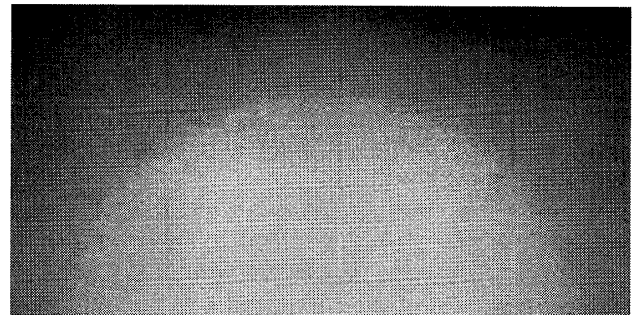


図4 夕方の空の画像

この理由として、得られた分光分布をRGB値に変換する際、計算値が飽和して分光分布が正しくRGB値に変換されなかったことが考えられる。したがって、分光分布の変換法を改善する必要がある。

計算時間の短縮については、前計算を行うことで実現することができた。しかしながら、リアルタイム描画は達成できなかった。処理をリアルタイム化するには、グラフィックスハードウェアを効率よく利用できるデータ構造を採用することなどが考えられる。また、本研究では多重散乱を考慮していないので、多重散乱を計算しながら高速に描画する方法を開発する必要がある。

提案手法は、大気中の粒子の分布を任意に設定できるため、様々な大気条件の空を描画可能である。

#### 参考文献

- [1] R. VICTOR KLASSEN, "Modeling the Effect of the Atmosphere on Light", ACM Transactions Graphic, Vol.6, No.3, pp. 215-227, 1987
- [2] K. Kaneda, T. Okamoto, E. Nakamae, T. Nishita, "Photorealistic image synthesis for outdoor scenery under various atmospheric conditions", The Visual Computer, Vol.7, No.5, 1991, pp.247-258
- [3] N.Hoffman, A.J.Preetham, "Rendering Outdoor Light Scattering in Real Time", 2002
- [4] K.Iwasaki, T.Yanagita, Y.Dobashi, T.Nishita, "A Calculation of Multiple Scattering Using Scattering Maps and An Efficient Method for Rendering Sky", Journal of IIEEJ, Vol.33, No.4, 2004
- [5] 竹内延夫, "日本分光学会 測定法シリーズ 39 地球大気 の分光リモートセンシング", 学会出版センター, 2001