

人工衛星の気象データによるスペクトルベースの天空照明生成法

Haoke Zhang 齋藤豪
東京工業大学 情報理工学院

1 はじめに

光源による照明は画像を描画するための重要な要素であり、太陽からの天空照明は野外におけるリアルなシーンの画像を生成するには不可欠な情報である。本研究では気象衛星によりもたらされる測定データを利用して、雲の上界、下界の高度や大気の特徴を推定して、体積格子で大気モデルを構築し、AT3D[1]により、計算された分光放射輝度を用いて大域照明用の環境マップを生成する。本研究では、時間分解能の優れたHIMAWARI-8, 9の静止衛星の測定データを利用して天空照明用の環境マップを生成し、同時刻の天空照明との比較を行う。

2 大気モデルの構築手法

2.1 雲の構築

本研究で使用する測定データはJAXAが提供している気象衛星HIMAWARI-8, 9の二次元格子状の大気の測定データである。雲が存在する全ての格子から、雲頂高度 (Cloud Top Height, CTH)、光学的深度 (Cloud Optical Thickness, COT)、滴の有効半径 (Effective Radius of Cloud Droplet, r_{eff}) のデータを抽出する。しかし、HIMAWARI-8, 9は後方散乱された太陽光放射しか探知できないため、既存の物理量を利用して雲底高度 (Cloud Base Height, CBH) を推定する。

2.1.1 雲底高度の推定

Tanら[2]は、垂直方向でのCBHは有効雲水含有量 (Effective Cloud Water Content, ECWC) と相関を持つことを示した。本来垂直方向上の格子ごとの雲水含有量 (Cloud Water Content, CWC) は異なっているが、一様な構造であると仮定すると、ECWCを利用して雲の上下界の物理的厚み D_{physical} が計算できる。CTHから D_{physical} を引くことでCBHを決定できる。

$$\begin{aligned} \text{CWP} &= \int_{\text{CBH}}^{\text{CTH}} \text{ECWC} dz \\ D_{\text{physical}} &= \frac{\text{CWP}}{\text{ECWC}} \\ \text{CBH} &= \text{CTH} - D_{\text{physical}} \end{aligned} \quad (1)$$

雲水経路 (Cloud Water Path, CWP) は格子の単位面積上の水含有量である。Lebsockら[3]の研究に従い、一様構造である雲のCWPを滴の有効半径と光学的深度から導く。

$$\text{CWP} = \frac{2}{3} \rho_w \cdot \text{COT} \cdot r_{\text{eff}} \quad (2)$$

ここでのCOTと r_{eff} は測定データであり、 ρ_w は液体水の密度である。季節、緯度、地表種類 (陸地または海)、雲水経路、雲頂高度の組からECWC値が参照できるTanら[2]のLookUPTableを利用する。得られたECWCを式(1)に代入することで、格子毎の雲の下界が求められ、更に大気モデルの垂直上の格子数 N_z が設定できる。

2.1.2 雲の内部構造

CTHとCBHの間を一様と仮定すると、雲水含有量と滴の有効半径は一様となるため、雲底から雲頂までの N_z 個の格子の各格子のCWCと r_{eff} は次のように設定できる。

$$\begin{aligned} \text{CWC}_{(n=1, 2, \dots, N_z)} &= \text{CWP} / N_z \\ r_{\text{eff}}((n=1, 2, \dots, N_z)) &= r_{\text{eff}}(\text{top}) \end{aligned} \quad (3)$$

$r_{\text{eff}}(\text{top})$ は測定データにある雲頂滴の有効半径である。

2.2 気体分子

地球大気には酸素、窒素などの気体分子が存在し、その散乱と熱吸収の相互作用は太陽光放射伝達に影響を与える。気体分子は体積格子の設定が不要であり、高度の層において、層毎の温度、圧力と異なる気体分子の濃度を設定することで構築される。Air Force Geophysical Laboratory USA[4]が1986年に測定した異なる四季と地域の6つのモデルである。本稿では中緯度地域の冬季のモデルを使用した。

The method to generate spectral sky illuminations by satellite weather measurements
Haoke Zhang
Suguru Saito
School of Computing, Tokyo Institute of Technology

2.3 エアゾール

雲物理学では、エアゾールは雲を形成するための最小粒子であるため、大気モデルに不可欠な要素であり、それが低高度での散乱と熱吸収により、太陽光放射に相互作用を起こし、天空像へ大きな影響を与える。エアゾールはOPAC[5]では9つのタイプがあり、気体分子と同様に、エアゾールは高度の層における異なる種類のエアゾールの濃度を設定することで構築される。本稿では陸のクリーンタイプを使用した。

3 実験結果

3.1 環境マップと全景図の環境マッピング結果

本稿では空間的分解能が $5\text{km} \times 5\text{km} \times 0.16\text{km}$ である $40 \times 40 \times 100$ 個の体積格子から構成された大気モデルを AT3D[1] にて、10 個の可視光スペクトルサンプリングデータを計算することで環境マップを作成した。図 1 に RGB へ変換した結果を示す。

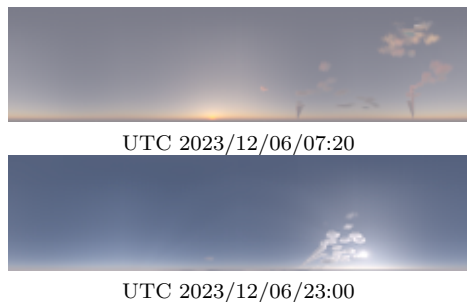


図 1: 異なる時刻で生成された照明結果

3.2 写真との比較

シミュレータにより生成した環境マップと実際に撮影された HDR の写真を図 2 に、それらの輝度ヒストグラムを図 3 に示す。写真の青色が明確であることに対して、シミュレーション結果ではエアゾールの影響が大きく、色味が異なり澄んでいない。実際のエアゾールはよりクリーンであったと考えられ、更に雲が完全に一致していないことから、測定データから存在すると推定した雲の判定が不十分であったと考えられる。

4 まとめ

本稿では人工衛星の測定データに基づいて雲のモデルを構成し、気体分子及びエアゾールモデルを使用して大気モデルを構築して AT3D[1] で環境マップを作成した。更に、今回生成した環境マップを写真と比較し、シミュレーション結果と類似した輝度分布であることを確認した。実際の同時刻の写真との類似性を向上させる余地は十分あるので雲の存在決定、エアゾールのパラメータ等の調整法の検討が今後の課題である。



図 2: HDR 写真とシミュレーション結果による照明の比較

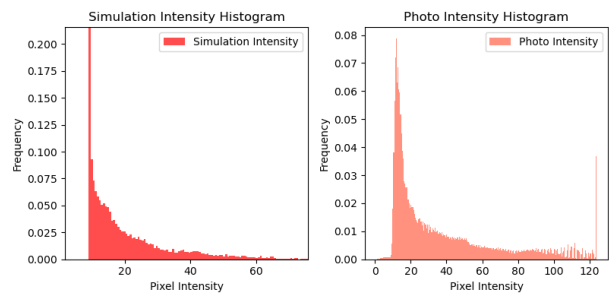


図 3: 輝度分布ヒストグラムの比較

参考文献

- [1] Jesse Loveridge and Aviad Levis. Atmospheric Tomography with 3D Radiative Transfer, 8 2022.
- [2] Zhonghui Tan, et al. Retrieving cloud base height from passive radiometer observations via a systematic effective cloud water content table. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 294, p. 113633, 2023.
- [3] Matthew Lebsock and Hui Su. Application of active spaceborne remote sensing for understanding biases between passive cloud water path retrievals. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 119, No. 14, pp. 8962–8979, 2014.
- [4] AIR FORCE. Afgl atmospheric constituent profiles (0-120km). 1986.
- [5] Michael Hess, et al. Optical properties of aerosols and clouds: The software package opac. *Bulletin of the American meteorological society*, Vol. 79, No. 5, pp. 831–844, 1998.