

人工光源を考慮した夜空の効率的な描画に関する一検討

石川 尚登^{1,a)} 土橋 宜典^{1,b)}

概要：コンピュータグラフィックスを利用した夜空の表現は、映画やプラネタリウム、各種シミュレータやゲームなどにおいて利用が期待される。日中の空は太陽が支配的な光源であるのに対して、夜空は月や星・大気光などに代表される天然光源と都市の照明を中心とした人工光源により照らされており、多様な光源が見え方に影響を与えている。前者を考慮した夜空のモデルはすでに提案されており、主要な天然光源に関しては忠実な夜空を表現できる。一方、人工光源に関する研究は少ないが、天然光源と比較して明るいため、都市近郊の地点での夜空の見え方に与える影響が非常に大きい。したがって、より現実に即した夜空を表現するためには天然光源に加えて人工光源も考慮することが必要である。本稿では、都市の照明によって照らされる夜空（スカイグロー）を描画する手法について提案する。提案法では光害研究の分野でよく知られている Garstang による光害モデルを利用して、位置や強度が異なる複数の点光源によるスカイグローを描画する。光害モデルの計算にアダプティブサンプリングを利用することで、任意の方向の空の明るさを短時間で効率的に計算する。

キーワード：スカイグロー、光害、夜空、アダプティブサンプリング

1. はじめに

コンピュータグラフィックスによる夜空の表現は、プラネタリウムソフトウェアやフライト・ナビゲーションシミュレーター、ゲームにおける夜間のシーンなどの背景に役立つ。また、天体観測や写真撮影を趣味とする人々にとって、特定の場所、時間、視線方向で見た夜空をシミュレーションできることは、適切な観測地を見つけるのに有用である。これらのアプリケーションでは、現実的な夜空をリアルタイムでレンダリングすることが重要である。

日中の空においては太陽が極めて明るい光源であるため、他の光源は無視することができる。一方、夜空には太陽のような支配的な光源がなく、様々な光源が見え方に影響を与える。夜空の見え方に影響を与えている光源は月や星・大気光などの天然光源と都市の照明を中心とした人工光源の2つに分類される。

天然光源のみを考慮した物理ベースの夜空のモデル [1] はすでに提案されており、人工光源がない環境での夜空をリアルに表現できる。しかし、人工光源は天然光源と比較して明るく、都市近郊の地点では夜空は明るく照らされる。したがって、地球上の任意地点の夜空をリアルに表現する

ためには天然光源に加えて人工光源も考慮することが必要である。

本研究では人工光源を考慮した夜空のレンダリングの前段階として、複数の都市の位置や明るさなどを入力とし、都市の光源のみにより照らされた夜空（スカイグロー）をレンダリングする手法を提案する。ある観測点から見たスカイグローの強度分布は光害研究者により様々なモデルが提案されている [2]。提案法では光害研究の分野で有名でよく用いられている Garstang による光害モデル [3] を利用する。Garstang の光害モデルは被積分関数が多いパラメータに依存し複雑であるため、高速に計算することが困難である。そこで、アダプティブサンプリングにより短時間で効率的にスカイグローのレンダリングを行う手法を提案する。

2. 関連研究

物理ベースの夜空のモデルが Jensen らによって提案されている [1]。このモデルは月・星・大気光などの主要な光源と大気による散乱を考慮して、バストレーシングやスペクトラルレンダリングにより夜空をリアルにレンダリングできる。また、人の目のグレア効果や暗所視を考慮したトーンマッピングを利用することで、人間の視覚特性も再現している。Minor らはこのモデルを拡張して、都市の光源を考慮したモデルを提案した [4]。この手法では

¹ 北海道大学
Hokkaido University

^{a)} ishikawa@ime.ist.hokudai.ac.jp

^{b)} doba@ime.ist.hokudai.ac.jp

Garstang による光害モデルを採用してスカイグローをレンダリングしている．現実的な夜空をレンダリングできるものの，リアルタイムでのレンダリングは実現していない．Stellarium[5] など，夜空をリアルタイムでレンダリングできる市販のソフトウェアがいくつかある．これらのソフトウェアは天体の位置をリアルタイムで表示でき，都市の明かりによる空の全体的な明るさを推定して描画できるものもある．しかし，グレア効果や暗所視は考慮されておらず，都市の方向に近い空における局所的なスカイグローが再現できないため，写実性が制限される．

光害研究の分野では様々なモデルが提案されている [2]．Garstang による光害モデル [3] は最も良く知られているモデルで，都市の内外において任意の天頂角の夜空の明るさを計算できる．それまでの都市を点光源とみなした光害モデルとは異なり，このモデルでは都市を明るさが一様に分布する円形としたことで観測者が都市の内部あるいは都市に極めて近い地点にいる場合の光害も計算できる．Kocifaj は Garstang による放射関数を導入したスケラブルな理論モデルを提案した [6]．このモデルでは光源間の量や距離に制限がなく，任意の数の光源を入力できるようになった．また，必要な計算がそれまでのモデルと比較して少なく，数値的に高速なコードで実行できることが利点の一つとされている．Garstang のモデルではエアロゾルと大気分子のパラメータを考慮しつつも快晴の場合のシミュレーションしかできなかったが，このモデルでは雲層の高度とスペクトル反射率を考慮に加えることで曇りの場合のシミュレーションも可能である．これらのモデルを利用して光害をシミュレーションするソフトウェアも開発されている [7][8]．Kocifaj のモデル [6] による光害のシミュレーションには数秒から 1 分程度の時間を要するとされており（文献 [9] の 3 章），リアルタイムでのシミュレーションは実現していない．

3. 光害モデル

本節では，提案手法で用いる Garstang による光害モデル [3] について説明する．この光害モデルは都市の位置や人口，半径と大気分子・エアロゾルに関するパラメータなどを利用して，観測者から見た任意の方向の空の明るさを計算するものである．

その基本的な計算式（文献 [3] の式 17）と各変数の幾何学的な意味をそれぞれ式 (1) と図 1 に示す．

$$b = \pi N_m \sigma_R \exp(-cH) \int \int (dx dy / \pi R^2) \int_0^\infty du \\ \times I_{up} s^{-2} (EF)_{XO} (EF)_{QO} (DS) \\ \times \{ \exp(-ch) 3(1 + \cos^2[\theta + \phi]) / (16\pi) \\ + \exp(-ah) 11.11 K f(\theta + \phi) \} \quad (1)$$

ここで，左辺 b は輝度で，単位は CGS 単位系のランバート

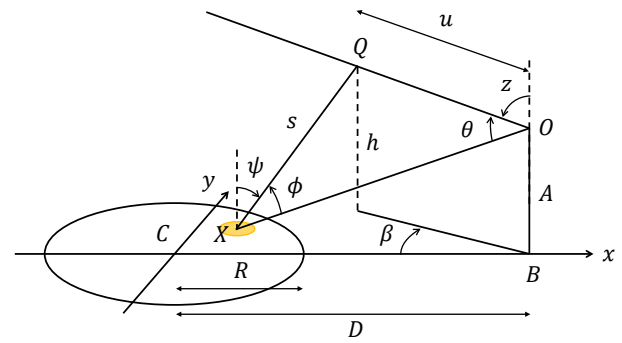


図 1: Garstang の光害モデルにおける変数と幾何学的関係

である．右辺では都市の部分領域 X から放射される光について，観測者 O からの距離 u の地点 Q における散乱光の計算と視線方向に沿った積分が行われる．視線方向の積分に関する被積分関数について， $(EF)_{XO}$ と $(EF)_{QO}$ はそれぞれ XO と QO にかけての光の減衰で， (DS) は二次散乱の近似式である．

I_{up} は都市から空に向けて放出される光の量であり， XQ の天頂角 ψ の関数として式 (2) で表される．

$$I_{up} = \frac{LP}{2\pi} \{ 2G(1 - F) \cos \psi + 0.554F\psi^4 \} \quad (2)$$

1 人あたりに放出される光の量 L と都市の人口 P の積により，都市から放射される光の総量が見積もられている． G は地面に到達する光のうち空に向けてランバート反射をする割合で，地上の状態により変化するが 15% 程度である． F は都市から放たれる光のうち水平より上に放射される割合で，観測値とのフィッティングによれば 11% 程度である．

$f(\theta)$ は大気のエアロゾルによる散乱関数で，視線方向と都市の方向とのなす角 θ の関数として式 (3) で表される．

$$\begin{aligned} 0 \leq \theta \leq 10^\circ & \quad f(\theta) = 7.0 \exp(-0.2462\theta) \\ 10^\circ < \theta \leq 90^\circ & \quad f(\theta) = 0.9124 \exp(-0.04245\theta) \\ 90^\circ < \theta \leq 180^\circ & \quad f(\theta) = 0.02 \end{aligned} \quad (3)$$

そのほかの変数については次に示す通りである．

- N_m : 海面における大気分子の密度
- σ_R : 海面における大気分子の断面積
- c : ある高度での分子密度を求める式の係数
- H : 都市の海拔
- K : 大気の透明度の指標となるパラメータ，地上におけるエアロゾル粒子の密度や大気分子の断面積をもとに計算できる
- a : エアロゾルのスケールハイトの逆数
- D : 観測者から都市の中心までの距離

4. 提案手法の概要

提案手法では式 (1) をすべてのピクセルに対して計算することでスカイグローの描画を行う．簡略化のため光源となる都市は円形ではなく点光源とし， $dx dy / \pi R^2 = 1$ とみなす．視線方向の積分では被積分関数が多い変数に依存して複雑であるため，数値積分によって積分値を求める．

点光源である都市までの距離 D が観測点から 10km 先にある場合の被積分関数のグラフを図 2 に示す．横軸が観測点からの距離，縦軸は被積分関数の値である．視線の方位角 (β) と天頂角 (z) が異なる 4 種類のグラフを示している．ただし，方位角は都市方向を 0° とする．図 2a や図 2b が示すように，方位角が大きいつまなわち，視線が都市と異なる方向を向いているとき，被積分関数は単調で全体的に滑らかな関数となっている．一方，視線方向の天頂角が大きく，方位角が小さい場合は図 2c や図 2d のように変化が急峻となっている．そこで，アダプティブサンプリングを行い効率的に積分値を計算する．

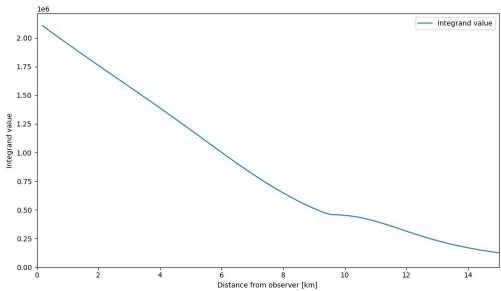
提案法では，まず，積分範囲を $D/4$ の等間隔の積分区間に分割し，各区分間両端での非積分関数値を評価しておく．次に，各区分間に対して，その中間点での値をサンプリングする．そして，各区分間の開始点と終了点でサンプリングされた値を用いて線形補完した値に対して，中間点でサンプリングされた値が 30% 以上大きい場合，開始点-中間点と中間点-終了点を新たな積分区間として細分割する．これにより変化の急峻な区間においてサンプル数を増やすことができる．しかし前述のような天頂角 z が大きく方位角 β が小さい場合は都市の近傍において特に変化が著しく，この方法だけでは不十分な場合がある．そこで， $z > 87^\circ$ かつ $\beta < 2^\circ$ が満たされ，さらに都市の近傍におけるサンプリング間隔が $D/8$ 以上の場合は中間点でサンプリングされた値によらず新たに積分区間を追加する．

5. 結果

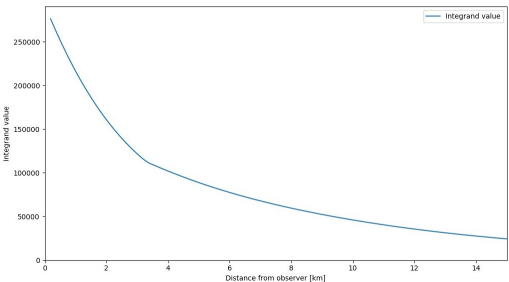
提案手法により描画したスカイグローを図 3 に示す．光源は 3 つであり，観測者を原点としたそれらの座標や人口は表 1 の通りである．

図 3 から，光源が観測者に近いほどスカイグローの拡がりが大きいたことが確認できる．また，人口の多い都市ほどスカイグローが強くなることも再現できている．

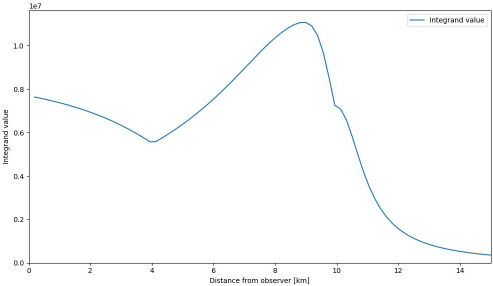
アダプティブサンプリングを利用した場合と等間隔でサンプリングした場合の描画時間の比較を行った．サンプリング間隔は，被積分関数をアダプティブにサンプリングした場合と同程度の精度で近似するのに十分な $D/20$ とし，各ピクセルでのサンプル数は 30 である．等間隔でレンダリングした結果と実行時間の比較をそれぞれ図 4 と表 2



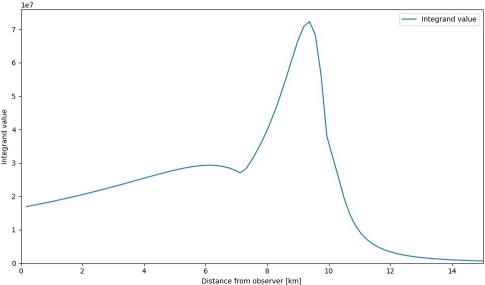
(a) 方位角 10° ，天頂角 75°



(b) 方位角 70° ，天頂角 75°



(c) 方位角 0° ，天頂角 84°



(d) 方位角 2° ，天頂角 88°

図 2: 視線方向の被積分関数のプロット

表 2: レンダリング時間の比較

	レンダリング時間 [ms]
提案手法	6,398
等間隔サンプリング	6,609

に示す．都市の位置や人口は表 1 の通りである．レンダリング結果の画像を比較すると，同程度の品質の画像が生成されていることが分かる．レンダリング時間は提案手法の方がわずかに高速である．

表 1: 光源の位置と人口

	座標	観測者からの距離	人口
A	(10, 0, 10)	14.1	5,000
B	(2, 0, 10)	10.2	1,000
C	(0, 0, 5)	5	1,000

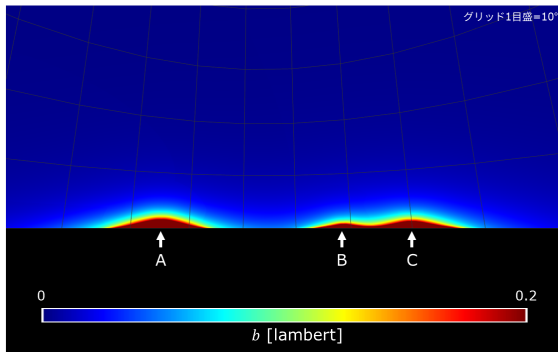


図 3: 提案手法で描画したスカイグロー

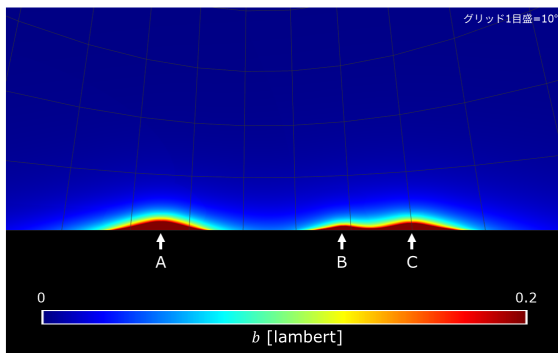


図 4: 等間隔サンプリングで描画したスカイグロー

6. まとめと今後の課題

本稿では Garstang の光害モデルを利用して、スカイグローを効率的に描画する手法について検討した。複雑な積分を効率的に計算するため、適応的・経験的にサンプリング間隔を決定することで比較的短時間で描画することが可能である。

今後の課題として、レンダリング時間の短縮と光源の数を増やした場合の高速化が挙げられる。提案手法ではアダプティブサンプリングを GPU で実装しているが、分岐処理が含まれるためにサンプリング数が減少しているにもかかわらずレンダリング時間が改善しないものと考えられる。また、スカイグローを描画するにあたっては面的な都市の拡がりを考慮することが不可欠であるが、現在の手法では光源の数が増えるにしたがって描画にかかるコストも増加する。そのほかに、実際の都市では様々な種類の光源が用いられているため、光源の色を考慮することも課題の一つである。

参考文献

- [1] H. W. Jensen, F. Durand, J. Dorsey, M. M. Stark, P. Shirley, and S. Premoze, "A physically-based night sky model," in Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '01, Not Known, 2001, pp. 399408. doi: 10.1145/383259.383306.
- [2] H. A. Solano Lamphar, "The emission function of ground-based light sources: State of the art and research challenges," Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, vol. 211, pp. 3543, May 2018, doi: 10.1016/j.jqsrt.2018.02.034.
- [3] R. H. Garstang, "Model for Artificial Night-Sky Illumination," PASP, vol. 98, p. 364, Mar. 1986, doi: 10.1086/131768.
- [4] T. Minor, R. R. Poncelet, and E. F. Anderson, "Skyglow: Towards a Night-time Illumination Model for Urban Environments," EG 2016 - Posters, p. 2 pages, 2016, doi: 10.2312/EGP.20161055.
- [5] "Stellarium Astronomy Software" <https://stellarium.org/ja/> (accessed Jul. 21, 2021)
- [6] M. Kocifaj, "Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources," Applied optics, 2007, doi: 10.1364/AO.46.003013.
- [7] M. Kocifaj and F. Kundracik, "Modeling the night sky brightness distribution via new SkyGlow Simulator," in 2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), Sep. 2016, pp. 13. doi: 10.1109/LUMENV.2016.7745553.
- [8] "Skyglow Estimation Toolbox — SET 0.0.1 documentation." <https://nasa-develop.github.io/SET/> (accessed Jul. 29, 2021).
- [9] M. Kocifaj, "Modelling the spectral behaviour of night skylight close to artificial light sources," Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 403, no. 4, pp. 21052110, Apr. 2010, doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16241.x.