

太陽による半影および天空光を考慮した景観画像の一高速生成手法

中前 栄八郎^{†1} 多田村 克己^{†2} 焦 芳^{†3}
 加藤 二二和^{†4} 三好 孝治^{†5}

太陽直射光および天空光に照射された屋外の景観画像を生成するためには、多大な計算コストを要する。これは、天空光による照射効果と太陽直射光による半影の表現に、それぞれ異なるアルゴリズムを適用していることが原因となっている。本論文では、両者による照射効果を多階層の受光直方体を用いて一元的に処理する。さらに、両者の照射エネルギーの比率が、地表上の計測点の位置と日時により定まる太陽位置から得られる理論値にできるだけ近い光源モデルを採用して、現実感の高い画像を生成する。また、最も計算時間を要する受光直方体の遮蔽計算を効率良く行うため、描画対象の物体の階層構造化および受光直方体の分割面を利用した空間分割に整合した物体の割付けを行うことにより、照度計算の高速化を実現する。この結果、天空光および太陽による半影を考慮した写実性の高い画像の作成を、計算精度を保証しながら少ない計算量で実現できる。

High-speed Landscape Rendering with Skylight Illuminance and Solar Penumbra Effects

EIHACHIRO NAKAMAE,^{†1} KATSUMI TADAMURA,^{†2} GUOFANG JIAO,^{†3}
 FUJIWA KATO^{†4} and TAKAHARU MIYOSHI^{†5}

It has still been extremely expensive to make outdoor scenes illuminated by direct sunlight and skylight. One reason is because previous works individually employ two algorithms are required for expressing the illumination effects of skylight and of penumbra due to direct sunlight. We propose a simple algorithm with a multi-layered parallelepiped for representing these effects. In order to render high quality images of outdoor scenes, the following lighting model is employed: keeping the illuminating energy ratio (illuminance due to direct sunlight vs. skylight) as close as possible to the theoretical value which is determined by both the location (latitude, longitude) of the calculating point and the date. The other one is because the process of executing an occlusion test for calculating skylight illuminance consumes the largest amount of computation time. To overcome this problem we developed two techniques utilizing hierarchical grouping of objects and space subdivision by using planes composing view volumes to reduce computation time for the occlusion test. They achieve the goal of creating a photo-realistic landscape image considering skylight illuminance and solar penumbra with reasonable computation costs.

1. はじめに

景観事前評価用の画像は、高い写実性を持ち、天候や太陽位置の変化の影響を考慮できることが望まれる。本論文の目的は、これらを実用可能な計算時間で実現することである。

太陽直射光や天空光を扱うための光学モデルや両者により照射された屋外景観を表示するためのアルゴリズムが、これまでに多数研究されている。天空光を考慮した陰影モデルについては、CIE の数理モデル^{†1}を用いて天空輝度分布を定義し、天空を半球ドーム（天空ドーム）と仮定してそれをいくつかの帯状の光源に分割し、それぞれの帯の中心線を用いて帯光源の遮蔽

†1 広島工業大学工学部

Faculty of Engineering, Hiroshima Institute of Technology

†2 広島県立大学経営学部

School of Business, Hiroshima Prefectural University

†3 株式会社三英技研

Sanei Co., Ltd.

†4 東京電力株式会社システム研究所

Computer & Communications R&D Center, Tokyo Electric Power Company

†5 広島工業大学環境学部

Faculty of Environment, Hiroshima Institute of Technology

の状態をサンプリングすることにより、天空光による照度（天空照度）を求める手法²⁾が提案された。この手法は太陽光線の照射していない部分のリアルな表現を実現したが、以下の問題点があった。(1)スペクトル分布が考慮されていない。(2)帶光源は、中央部分ほどその幅が広くなる。このため、実際にサンプリングを行う中心線とのずれが大きくなる帶の中央部分ほど大きな誤差を含む。

これらの問題を解決するため、天空輝度分布表現および天空照度計算のための受光直方体モデル³⁾が提案された。これは、帶光源モデルに比べてアルゴリズムが簡潔で、計算時間と精度との間のより良いトレードオフを実現したものである。しかし、このモデルにおいても太陽近傍の天空からの照射エネルギーの変化を適切に表現するためには、エレメント密度を上げる必要があり、反面エネルギー変化が小さい部分にとっては不必要的計算を行うことになる問題点がある。

さらに、大気中の微粒子による光の散乱・吸収を考慮した空や大気圏外から見た地球を表示するための手法^{4),5)}、スペクトル分布を考慮した天空光による鏡面反射光成分の計算方法⁶⁾、およびガラスを透過した天空光による照射効果の表現方法⁷⁾が提案されている。これら従来の天空光を考慮した景観表示手法においては、天空光による照度計算と、直射光による照度計算とは独立に行われており、計算の結果得られた直射光と天空光による照度の比率は、ユーザの適当な設定にまかされているのが現状である。また、直射光・天空照度はいずれも太陽高度のみをパラメータとするため、季節感、すなわち同一の太陽高度でも、季節による照明効果（全照度および直射光と天空光の比率が異なる）を表現できない。

上述の天空照度計算とは独立に、太陽の大きさを考慮した半影を表現する手法⁸⁾が提案されている。この手法は、半影領域の候補をあらかじめ求めておき、その領域内の照度計算点ごとに太陽の遮蔽率をray castingの結果により求めている。このray castingは、走査するrayとシーン中のすべての物体との間の交差判定を行うため、計算量が大きい。

これらとは別に、計測により得た天空輝度分布を用いて様々な天候下での天空照度を計算する手法⁹⁾が提案された。これは、計測データに基づいて天候や大気の状態の地理的な特性を考慮できる特徴を持つ反面、計測による天空輝度分布のデータベースを構築する必要があるという実用上の問題点がある。

従来の天空光を考慮した景観画像作成手法における問題点をまとめると、以下の4点である。

- 受光直方体の導入により天空照度計算はかなり高速化されたが、いまだ実用的な計算コストとはいがたい。
- 太陽近傍の天空からの照射エネルギーの変化に効率良く対応できない。
- 太陽の大きさを考慮した半影表現のための計算と、天空照度の計算が独立に行われているため効率が悪い。
- 季節感を表現できない。

提案手法は、これらの問題を解決するため、太陽直射光および天空光による鏡面および拡散反射光成分の計算と太陽直射光による半影の計算を1つのアルゴリズムに統一し、高速画像生成を実現するものである。さらに、季節間で変動する天空光と直射光の照度比を、計測データを利用した数式で求め、これを実際の照度計算に反映することにより、同一の太陽高度であっても、季節により異なる照明効果が得られるようにした。

2. 提案手法の特徴

2.1 従来の受光直方体を用いた天空照度計算

従来法の問題点と提案手法の理解を容易にするため、すでに開発されている受光直方体を用いた天空照度計算手法³⁾の概略を説明する。

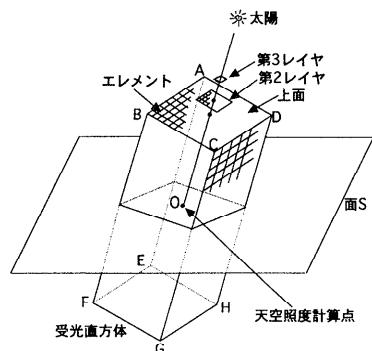
受光直方体は、図1(a)に示すように（ただし、従来法では第2、第3レイヤは存在しない）、上面の中心がつねに天空中の最も輝度の高い太陽の方向を向くように回転し、直方体の各面が一様な大きさの矩形のエレメント（ただし、上面とそれ以外の面のエレメントの密度比は、太陽の位置をパラメータにしてあらかじめ求められている）で構成されている。受光直方体を用いた天空照度計算の概略処理手順は以下のとおりである。

(1) レンダリングの前処理として受光直方体の各エレメントに割り付ける量子化された天空からの照射エネルギーを計算する。

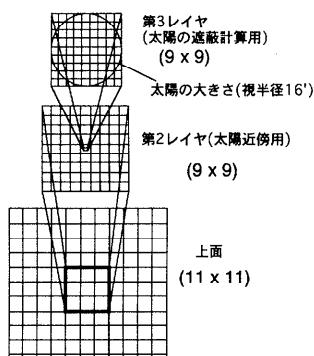
視点を受光直方体の中心とし、地面以外に何も存在しないと考えたときの各エレメントに対応する天空方向からの照射エネルギー（エレメント*i*の寄与係数*C_i*）を、エレメントの中心方向の天空光強度*I_i*と、そのエレメントが張る立体角*dS_i*の積から求める。

(2) レンダリングの際、可視面上の天空照度計算点において以下の計算を行う。

受光直方体の中心を天空照度計算点に置き、計算点を視点とし、受光直方体の各面をウインドウとするビューポリューム（遮蔽判定ビューポリューム）ごとに、各面のエレメント数に相当する解像度のビュー



(a) 多階層受光直方体の概略構成



(b) 上面の階層構造

図1 天空照度計算用受光直方体の構成
Fig. 1 Gometry of a parallelepiped.

ポートを割り当て、ウインドウごとに物体を描画し、遮蔽計算を行う。

計算点において、天空光により生じる照度 E （簡単のため、スペクトル項 λ を省略）は、物体により遮蔽されないエレメントによる照度の総和であるから、次式で求められる。

$$E = \sum_{i=1}^N H_i C_i \cos \varphi_i, \quad (1)$$

ここで、エレメントが物体により遮蔽されているときは H_i は 0 であり、そうでないときは 1 である。 C_i は受光直方体のエレメント i の寄与係数、 N はエレメントの総数、 φ_i は計算点を含む面の法線ベクトルと計算点からエレメント i の中心に向かうベクトルとのなす角である。

2.2 提案手法の特徴と前提条件

提案手法は、上記の受光直方体の欠点を補い、1章で述べた従来法の4つの問題点を解決するものであり、以下の特徴を持つ。

(a) 多階層受光直方体を用いた天空照度および半影計算の統合

完全晴天時には、太陽近傍の天空からの照射エネルギーは非常に大きく、そこからはずれると急激に減少する。したがって、この近傍を精度良く計算するため、受光直方体の上面の中心付近のエレメントの密度が大きくなるよう太陽近傍用のレイヤを設ける。天空照度計算も半影計算も物体による遮蔽を求める点では共通している。したがって、両者の遮蔽計算を統合することにより、アルゴリズムが簡単になり、かつ計算の高速化が期待できる。そこで、太陽の視半径に相当する大きさの円に外接する方形領域を高密度に分割したレイヤを設ける（図1(b) 参照）。これに太陽近傍用のレイヤの遮蔽候補を利用して、太陽の直射光に対する遮蔽率を求める。このように受光直方体を多階層化して、統一したアルゴリズムによる天空照度計算と半影計算を実現した。この詳細は、3章で述べる。

(b) 遮蔽候補物体数削減による遮蔽計算の高速化

2.1節(2)に示した受光直方体法における天空照度計算の大部分は、遮蔽計算に費やしている。したがって、遮蔽計算の効率向上が天空照度計算の高速化につながる。遮蔽計算は、物体を遮蔽判定ビューポリュームの座標系に透視変換して描画することである。すなわち、天空照度計算点から見た可視面を抽出することである。可視面を高速に抽出する手法に関しては、多数の研究成果が発表されている¹⁰⁾。最近では、多数のポリゴンからなる複雑なモデル中でのウォークスルーを、リアルタイムで実現するための手法^{11),12)}も提案されている。

本論文では、太陽光線が平行光線であるため、受光直方体の向きが天空照度計算点によらず一定になるという特徴を考慮し、これらの高速化手法のうち、階層構造を持つ bounding box と物体空間を一様に分割する手法を組み合わせ、受光直方体による天空の遮蔽計算に適した可視面抽出の高速化手法を開発した。具体的には、次の2つの手法を用いて高速化を図る。(1)受光直方体の遮蔽判定ビューポリュームを構成する面を利用した空間分割と物体へのインデックスを利用して遮蔽候補になる物体数を削減する。(2)物体を階層構造にグループ化し、天空照度計算点と物体との距離に応じて遮蔽候補になる階層レベルを決定することにより、描画するポリゴン数を削減する。これらの詳細は、4章で述べる。

(c) 季節を考慮するための直射光照度と天空照度の比率補正

従来法では、太陽の位置のみが直射光照度および天

空照度に対するパラメータであり、太陽高度が同一であれば直射光照度に対する天空照度の比率は一定であった。しかし、実際には、その比率は季節により変化している。そこで、計測データから得られる大気の透過率を用い、式^{13),14)}により月ごとの両者の比率を計算し、それを季節補正項として照度計算に利用することにより季節感の表現を実現する。この詳細は、5章で述べる。

提案手法の適用に際し、光源モデルの物理的な正確さと計算コストとの間のトレードオフを勘案して以下の前提条件をおく。

- (1) 太陽直射光と天空光を光源とし、地表物体間の相互反射は考慮しない。
- (2) 晴天下での景観の表現への適用に限定し、雲による影響は考慮しない。
- (3) 視点に到達する天空光の強度は、大気中の空気分子・エーロゾルにより生じる太陽直射光の1次散乱エネルギーにより求める。このエネルギーが半球ドームの内側の表面に分布していると仮定する。
- (4) 景観対象は、地表からのものに限定する。したがって、視野の範囲はたかだか数十キロメートルであり、このような範囲内では太陽の位置は同一と考えても問題はない。そこで、天空照度計算の際、すべての計算点で同一の天空輝度分布を用いる。

提案手法は、照射エネルギーの絶対値および変化の大きい太陽近傍の天空部分を細かくサンプリングすることにより計算精度の向上を図るものである。これは、ラジオシティを精度良くかつ効率良く計算するための適応的再分割¹⁵⁾と同様の考え方に基づく。しかし、提案手法では、後述のように受光直方体をつねに太陽に正対するように回転させるため、精度良くサンプリングする必要のある部分すなわち太陽の近傍領域は、受光直方体上では太陽の位置によらず不变である点が異なる。

3. 多階層受光直方体

1章において述べたように、天空からの照射エネルギー分布は一様ではない。特に完全晴天空の場合、太陽近傍の天空からの照射エネルギーは、太陽から離れた部分からの照射エネルギーと比べると非常に大きい。提案手法では、受光直方体の各々のエレメントに割り当てる天空からの照射エネルギーをできるだけ平均化して精度良く計算するため、受光直方体の上面の中心付近のエレメントの密度が大きくなるように、太陽近

傍レイヤを設ける(図1(b)参照)。これ以降、受光直方体の上面を第1レイヤと呼び、追加したレイヤを第2レイヤと呼ぶ。ただし、太陽の位置が天頂付近にある場合と地平線付近にある場合とでは、直射光と天空光の照射エネルギーの比率、および太陽近傍領域の天空からと太陽から離れた領域の天空からの照射エネルギーの比率が大きく異なる。提案手法では、太陽が天頂付近にある場合(直射光の照射エネルギーの比率および太陽近傍領域の天空からの照射エネルギーの比率が大きい)にも精度が保てるよう、以下に述べるエレメントの分割法を採用している。すなわち、第1レイヤは $N_1 \times N_1$ (N_1 は奇数、経験的に $N_1 = 11$ 以上では画質にほとんど差が認められない。 $N_1 = 7$ 以下では画質が明らかに悪化する) エレメントに分割され、その中心部の $N_c \times N_c$ (N_c は奇数かつ $N_1 > N_c$ 、太陽の周辺 5 度程度の天空を含む領域、 $N_1 = 11$ の場合、 $N_c = 3$ を採用) エレメントが第2レイヤの $N_2 \times N_2$ (N_2 は奇数、 $N_1 = 11$ の場合、経験的に $N_2 = 9$ 以上では画質にほとんど差が認められない。 $N_2 = 5$ 以下では、このレイヤを設けた効果が認められない) エレメントに置き換える。受光直方体の各面および第2レイヤに含まれる各エレメントに対して、受光直方体の中心から各エレメントの中心の方向を見た経路上で生じる散乱光のうち、受光直方体の中心に到達するものの総和にそのエレメントが張る立体角を考慮して得られる寄与係数を計算する(文献3)参照)。このようにして、半球状に分布している天空からの照射エネルギーを受光直方体の各エレメントに割り付ける。

太陽は有限な大きさを持つから、本影だけでなく半影を生じる。また、照射エネルギーが大きいから、鏡面反射光成分が目立つ。これらをリアルに表現するためには、太陽の遮蔽状況を精度良く求める必要がある。そこで、内接円が太陽の大きさと同じ視半径を張る第3のレイヤ(解像度 $N_3 \times N_3$: N_3 は奇数、経験的に $N_3 = 9$ 以上では画質にほとんど差が認められない)を、受光直方体の中心から太陽を見た方向に設ける(図1(b)参照)。なお、内接円の外側のエレメントは無視する。この第3レイヤを用いることによって、太陽による半影や半影を考慮した鏡面反射光の計算を高速に行うことができる。すなわち、(1) 第3レイヤの内接円の内側のエレメントに対しては、物体によって遮蔽されていないエレメントを数えて太陽直射光の到達する比率(照射率)を求めるだけでよい。すなわち、太陽直射光による拡散反射光と鏡面反射光を計算する際に、あらかじめ太陽の中心方向からの平行光線

に対して遮蔽を無視して計算した値に、この照射率を掛けることにより半影効果を求める。(2) 遮蔽計算の際の遮蔽候補には、4章で説明される手法により削減された第2レイヤの遮蔽候補物体を利用することができる。

4. 遮蔽計算の高速化

4.1 物体のグループ化とその利用

提案手法が対象としている屋外景観は、物体(ポリゴン)が広い範囲に種々の密度分布(たとえば、建物、車両、原野等)で散在している。したがって、ある可視面上の天空照度計算点から地上物体を見た場合、遠方に膨大な物体が存在するが、計算点が所属する可視面の裏側に完全に存在する物体は、その面上の天空照度計算点(辺上は除く)から見た天空の遮蔽候補にはなりえない。また、残りのものが多くも、その計算点から見た天空の遮蔽に影響を及ぼさない。

提案手法では、物体空間におけるこれらの特性を利用し、レイトトレーシングの高速化によく用いられているように、ポリゴンを物体および物体群にまとめ、以下に述べる階層化手法により、遮蔽計算の際に描画するポリゴン数の削減を実現する。提案手法では、図2に示すようなsceneをrootとする階層構造(scene tree)を構築する。それぞれのnodeは、物体もしくは物体群を表し、leafはポリゴンを表す。このとき、物体および物体群に対してそれぞれbounding boxを定義する。この階層構造およびbounding boxの生成は、レンダリングの前に行う。レンダリングの際、天空照度計算は可視面ごとに行うが、まず、計算対象の可視面に対して完全に裏側にある物体(群)を抽出する。具体的には、scene treeの上位レベルから順に計算対象とする面に対して完全に裏側にある(すなわち、すべての頂点が面の裏側にある)か否かの判定を行い、“表(遮蔽候補)”, “裏(遮蔽候補でない)”のラベル

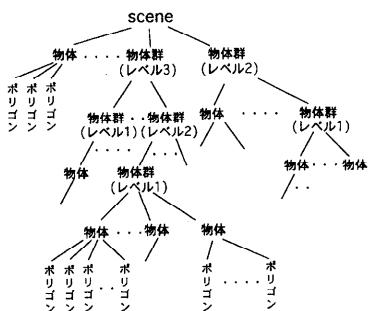


図2 物体データの階層構造化

Fig. 2 Hierarchy of object data.

付けを行う。この判定は、物体もしくは物体群に対しては、そのbounding boxの頂点を用い、ポリゴンに対しては、構成頂点を用いて行う。この際、あるレベルで完全に裏側にあると判定されると、それより下位レベルの物体(群)、ポリゴンはすべて“遮蔽候補でない”的ラベルを付ける。

天空照度計算点においては、前述の判定で“遮蔽候補”的ラベルが付いている物体(群)を、再びscene treeの最上位から走査し、計算点から見た物体もしくは物体群のbounding boxが張る立体角と、受光直方体の各面の中央のエレメントの張る立体角との比較を行う。その結果、前者が後者よりも小さいとき、天空照度計算点から見てその物体(群)より下位レベルのものは受光直方体のエレメントよりも小さいから、天空の遮蔽にほとんど影響を及ぼさない。したがって、bounding boxの構成面を遮蔽候補とし、それよりも下位のレベルの物体(群)およびポリゴンを遮蔽候補から除外する。ここで、天空照度計算点ごとに物体群や物体のbounding boxの張る立体角を正確に計算すると、立体角計算のための計算量が大きくなり、全体として高速化の効果が失われる。そこで、以下に示す近似的な計算によりこの判定を実施する(図3参照)。

$$dS_{je} > \frac{l_R^2}{l_{OR}^2}, \quad (2)$$

ここで、 dS_{je} は受光直方体の面 j の頂点を含むエレメント e_e (図3参照)を、受光直方体の中心から見たときに張る立体角、 l_R は物体 R のbounding boxの対角の長さであり、ともに受光直方体生成時、およびbounding boxを定義したときにあらかじめ計算して

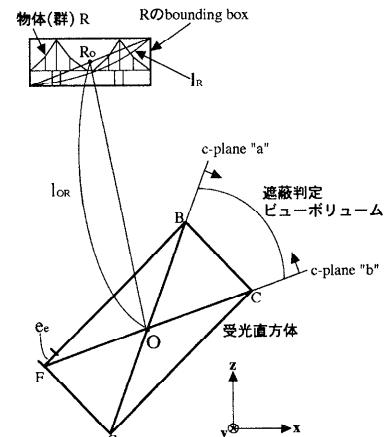


図3 物体群のbounding boxの占める立体角の近似
Fig. 3 Approximation of solid angle made by a bounding box.

おく。 l_{OR} は、天空照度計算点から bounding box の中心までの距離であり、天空照度計算点が変化するごとに再計算する。式(2)の右辺は、実際に bounding box が張る立体角より小さくなることはない。したがって、この近似計算を行うことにより天空照度の計算精度が落ちることはない。なお、式(2)の比較を行う際、計算が必要なのは l_{OR} だけである。このように、わずかな計算量（たとえば図6の例の場合、1%以下）で無意味な遮蔽計算を回避することができる。

4.2 空間分割による物体の分類

4.1節で述べた手法により絞り込まれた遮蔽候補に対して、以下の処理を施すことにより、描画されるポリゴン数をさらに削減する。すなわち、遮蔽判定ビューポリュームを構成する面(c-plane 図3参照)を利用して空間分割とそれによる物体(群)およびポリゴンのインデックス付けを行い、その情報を利用する。遮蔽判定ビューポリュームの構成面は、上面の第2、第3レイヤを除いて、すべて2つの遮蔽判定ビューポリュームに共有される(図1(a)の例では、面CDEFは、面ABCDおよび面CGHDをウインドウとする2つの遮蔽判定ビューポリュームに共有される)。このため、遮蔽判定ビューポリュームの構成面の表と裏を別々の面と考える必要があり、c-planeは16($=6*2+4$)面になる。具体的には、図1(a)に示す受光直方体において、面ABGHと面BAHGは異なるc-planeである。提案手法では、それぞれのc-planeに平行な平面で物体空間を等間隔に分割し、それぞれの分割面にインデックスを付ける(たとえば、面ABGHに平行な面は a_i 、面CDEFに平行な面は b_j (図3参照))。図4は、簡単のため上記 a_i 、 b_j を2次元で表現したものである。c-planeのインデックス番号は、面の表向きの方向に値が増加していく(図4参照)。次に、物体のすべての頂点にc-planeごとのインデックス番号

を付与する。インデックス番号のルールは、あるc-planeについて、その頂点が表側に存在し、かつ最も近いc-planeのインデックス番号をそのc-planeに対する頂点のインデックス番号とする。図の例では物体 T_3 の頂点 v_1 は、c-plane "a"について、インデックスは $i-4$ になる。ポリゴン(もしくは物体(群)のbounding box)のc-planeごとのインデックス番号は、構成頂点のインデックス番号の最大のものをとる。図の例では、c-plane "a"、"b"に対して、ポリゴン T_1 、 T_2 、 T_3 のインデックス番号はそれぞれ $(i+4, j+2)$ 、 $(i, j+5)$ 、 $(i-1, j+5)$ になる。ここで、ポリゴン T_1 を例にとると、c-plane "a"について、天空照度計算点 p のインデックス番号により、以下のようにして T_1 が遮蔽候補となりうるか否か分類できる。

$$(p \text{ のインデックス番号}) \leq i+4$$

: T_1 は p の遮蔽候補になりうる

$$(p \text{ のインデックス番号}) > i+4$$

: T_1 は p の遮蔽候補にならない

したがって、c-plane "a"、"b"の両方に対して、ポリゴン T_1 のインデックス番号が計算点 p のインデックス番号以上であるときのみ、ポリゴン T_1 は遮蔽候補になる。このようにして、受光直方体の第1レイヤの各面および上面の第2レイヤでの遮蔽計算を行う際、対応する遮蔽判定ビューポリュームを構成するすべてのc-planeについて、天空照度計算点 p のインデックス番号より大きいインデックス番号を持つ物体(群)およびポリゴンのみが、最終的な遮蔽候補として抽出され、描画される。ここで、c-planeの方向は、受光直方体の向き、すなわち太陽の位置にのみ依存し、視点・注視点、天空照度計算点とは無関係である。したがって、アニメーションを作成する際、太陽の位置が変わらなければ、移動物体に対してのみインデックス番号を再計算すればよく、視点・注視点の移動に対しては、インデックス番号の計算は必要ない。図4の例において、天空照度計算点が点 p の位置にあるとすると、この点のc-planeのインデックス番号は $(i, j+1)$ である。すなわち、ポリゴン T_1 、 T_2 、 T_3 の中で最終的な遮蔽候補となるのはポリゴン T_1 および T_2 である。

5. 直射光強度と天空照度の補正

提案手法では、文献3)と同様に空気分子およびエーロゾルの密度分布を高度をパラメータにした関数で与え、これを用いて地表に到達する直射光強度および天空輝度分布を計算している。しかし、実際には季節によりこれらの分布は変化している。大気中の水蒸気量は気温に依存するので、特にエーロゾルは季節間での

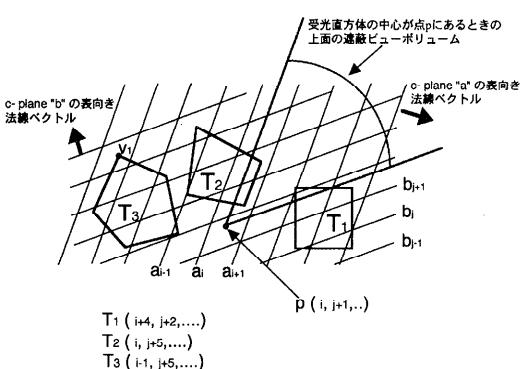


図4 c-planeによる物体空間の分割

Fig. 4 Division of object space by c-planes.

変化が激しいと考えられる。さらに、同一の太陽高度に対する直射光と天空光による照射エネルギーの比率の季節変動は、無視できないほど大きい（直射光：天空光 = 4:1 (夏), = 10:1 (冬)¹³⁾）。したがって、季節ごとの補正を施したうえで直射光強度、天空強度を計算することにより、より実際に近い画像を得ることができる。提案手法では、太陽光と天空光の照射量を比較的精度良く与える式^{13),14)}を用いて求め、これらと提案手法のモデルで求めたそれぞれの値を比較することにより、補正值を算出する。具体的な方法を以下に示す。法線面直達日射量（太陽光線に垂直な面での放射照度（文献 13）参照） I_{DS} は、ブーゲの式¹³⁾として知られる次式により与えられる。

$$I_{DS} = I_0 P^{1/\sin \theta}, \quad (3)$$

ここで、 I_0 は、大気圏外での太陽光の強度、 θ は太陽高度である。 P は、大気の透過率であり月ごとの計測値を用いる。また、水平面天空日射量（水平面での天空光による放射照度（文献 13）参照）は、永田の式¹⁴⁾として知られる次式で求めることができる。

$$I_{sky} = \sin \theta (0.5 + (0.4 - 0.3P) \sin \theta) \times (0.66 - 0.32 \sin \theta) (I_0 - I_{DS}). \quad (4)$$

雲がないときの地表面における直射光による法線面直達日射量は、大気中の微粒子による光の減衰を考慮して次式で求めることができる。

$$I'_{DS}(\lambda) = I_0 \exp^{-t(\lambda)}, \quad (5)$$

ここで、 λ は、光の波長であり、提案手法では r, g, b に相当する波長でサンプリングしている。 $t(\lambda)$ は、太陽光線が地表に到達するまでの光学的距離（文献 3）参照）である。また、水平面天空日射量は、次式で求めることができる。

$$I'_{sky}(\lambda) = \sum_{i=1}^N C_i(\lambda) \cos \varphi_i, \quad (6)$$

ここで、 C_i は、受光直方体のエレメント i の寄与係数であり、 N はエレメントの総数である。 φ_i は、天頂方向（地平面の法線ベクトル）と受光直方体の中心からエレメント i の中心に向かうベクトルとのなす角である。したがって、直射光強度、天空輝度（すなわち、受光直方体の各エレメントの寄与率）の補正係数は、次式により求めることができる。

$$s_{sun} = \frac{I_{DS}}{\sum_{\lambda} I'_{DS}(\lambda)}, \quad (7)$$

$$s_{sky} = \frac{I_{sky}}{\sum_{\lambda} I'_{sky}(\lambda)}. \quad (8)$$

上述の手法により、大気の透過率の季節変動を考慮することにより、同一の太陽高度でも地上の被照体の季節による変化を表現できる。

6. 適用例

図 5 は、本論文で提案した遮蔽計算の高速化手法の効果を評価するために、提案手法の高速化を実施した場合としない場合、すなわち、天空照度計算の際の遮蔽候補物体数削減による遮蔽計算の高速化を実施した場合としない場合の、天空照度および画像生成に要した計算時間とポリゴン数の関係をグラフにしたものである。計算時間計測の際、可視面の抽出および遮蔽判定のために行うポリゴンのスキヤンコンバージョンは、すべてハードウェアで実現した。使用した物体データは、市販の三次元コンピュータグラフィックスソフトウェアで作成し、物体群の階層化レベルは最大 3 である。図 5 から分かるように、ポリゴン数に比例して、提案手法の高速化の効果が顕著になる。高速化を施さない場合の天空照度計算量がほぼ $O(n^2)$ (n : ポリゴン数) であるのに対し、提案手法を適用することにより $O(n)$ にまで減少できる。表 1 は、図 5 のポリゴン数が最大（27,403）のデータの計算時間の構成比を示したものである。表中の処理項目は具体的には以下のとおりである。“天空輝度分布生成”は、2.1 節（1）の処理、すなわち、受光直方体の各エレメントの中心方向の天空光強度の計算および寄与率の計算を含む。“可視面抽出”は、ハードウェアの z-バッファを用いたシーンの描画処理と、その結果から、各画素を占め

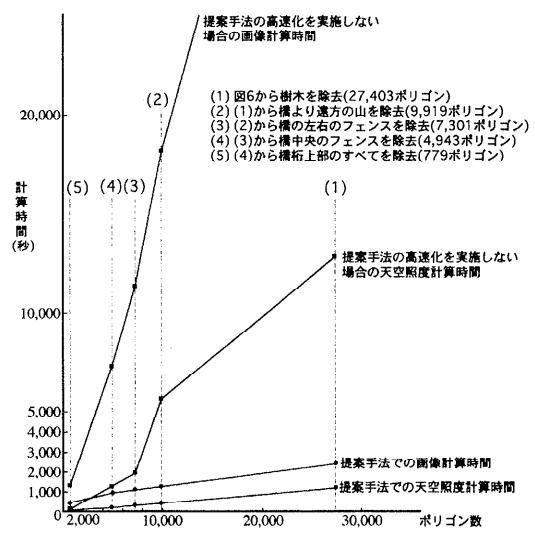


図 5 計算時間の比較
Fig. 5 Comparison of computation times.

表 1 処理時間構成の比較
Table 1 Timing statistics.

処 理	計算時間 (sec)	
	従来法	提案法
天空輝度分布生成	3.9	3.5
可視面抽出	3.4	4.8
遮蔽候補限定	—	69.6
遮蔽判定(天空光)	12,821.6	1,172.4
照度計算(天空光)	14.1	14.8
天空照度計算時間(小計)	12,843.0	1,265.1
遮蔽判定(直射光)	33,726.2	1,019.5
照度計算(直射光)	224.4	148.2
その他	10.6	6.6
画像生成時間	46,804.2	2,439.4

る可視面の情報を得るための処理を含む。“遮蔽候補限定”は、4章で述べた高速化のための処理である。これは、物体群のためのbounding box生成、および受光直方体のすべてのc-planeによる物体空間の分割とその結果得られる各ポリゴンへのインデックスの付与を行う前処理と、その情報を利用して各天空照度計算点でフレームバッファに描画するポリゴンを限定する処理を含む。“遮蔽判定(天空光)”は、天空照度計算点ごとの受光直方体の各面に対応するフレームバッファに遮蔽候補のポリゴンを描画する処理と、描画結果をフレームバッファからメモリに読み込む処理を含む。“照度計算(天空光)”は、上述の描画結果から式(1)の H_i を決定し、照度計算を行い拡散反射光成分を計算する処理と、天空光による鏡面反射光成分を計算する処理を含む。“天空照度計算時間”は以上の処理の小計を記したものである。“遮蔽判定(直射光)”は、直射光照度計算点において、第3レイヤの解像度のフレームバッファに遮蔽候補を描画する処理と、描画結果をフレームバッファからメモリに読み込む処理を含む。“照度計算(直射光)”は、上述の描画結果から直射光の照射率を求めて照度計算を行い拡散反射光成分を計算する処理と、直射光による鏡面反射光成分を計算する処理を含む。“その他”には、上記以外の処理すべてを含む(ファイル入出力など)。この表からも分かるように、提案手法の適用により、遮蔽判定のための処理が天空光については従来法の約10%に、直射光については約3%に短縮し、画像生成時間全体を約5%に短縮できた。提案手法による高速化のため追加した処理(“遮蔽候補限定”の項目)は、削減した計算量に比べて非常に小さく効率が良いことが分かる。しかし、高速化にもかかわらず、依然として天空照度、直射光照度計算のための遮蔽計算に処理時間の

大部分を費やしている。

図6は、大気の透過率を考慮した天空照度と直射光照度の比率の補正効果を評価するための画像である。東京における1月21日(大気の透過率:0.80¹³⁾)の正午(図6(a))と等しい太陽高度になる、7月21日7時41分(大気の透過率:0.62¹³⁾)(図6(b)), および4月21日8時6分(大気の透過率:0.71¹³⁾)(図6(c))を示したものである。当然のことながら、3者それぞれの太陽の方位角が異なる。そこで、大気の透過率以外の条件を統一して3者を比較しやすくするために、図6(b)および図6(c)は視線と物体を回転させて視線と太陽光線のなす角が等しく、かつ幾何形状的には、同じ景観になるようにしている。図7(a)は、図6(b)をグレースケールで表示したものである。図7(a)に示す4点における図6(a)と図6(b)の差が分かりやすいように、タイル状に拡大して比較したものが図7(b)である。点A, Bは直射光および天空光が照射しており、点Dは、天空光のみが照射している。図6(a)は同図(b)に比べて大気の透過率が大きいため、太陽直射光の比率が大きい。このため、直射光の照射している点Aおよび点Bは、白っぽく、太陽が隠れるため天空光のみが照射している点Dにおいては図6(b)の方が明るくかつ青く見える。また、大気の透過率とエーロゾルの密度は反比例すると考えられ、冬は、エーロゾルによる散乱光成分が小さくなり、大気が澄んで空が青く見える。図6(c)は、大気の透過率が図6(a)と図6(b)の中間であり、得られた画像も中間的な色合いになっている。

従来法では、受光直方体の上面の解像度を必要に大きくしなくては表現できなかった、太陽近傍の天空光による鏡面反射成分の影響を、太陽近傍用の第2レイヤを追加したことにより精度良く表現できるようになった。また、天空の遮蔽判定の際に採用した物体(群)ごとのbounding boxによる近似の影響により、近似を行わない場合に比べて画像が暗くなることが懸念される。しかし、晴天時の直射光照度対天空照度比は9:1~7:3であり、近似の影響を受ける受光直方体のエレメント数は、5%程度であるから、観察者はほとんど判別できない範囲(本影部分で1/255~3/255)に収まる。

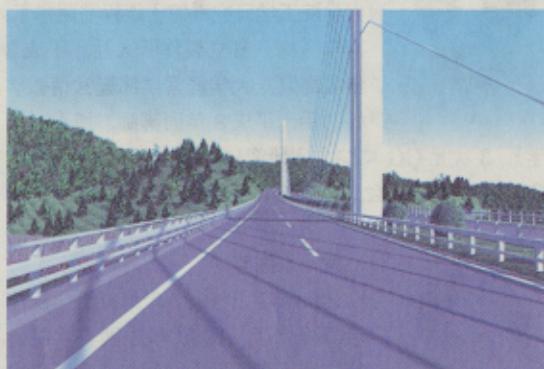
なお、画像の作成および計算時間の計測はすべてSilicon Graphics Inc. Indigo Elan(R4000, 100 MHz)で行った。

7. 結 論

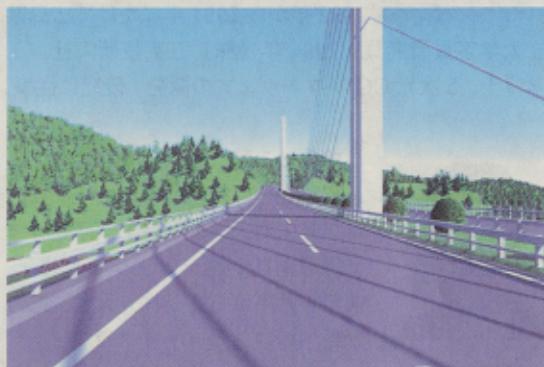
本論文では、天空照度および太陽の半影を考慮した



(a) 東京 1月 21 日正午



(b) 東京 7月 21 日午前 7時 41 分



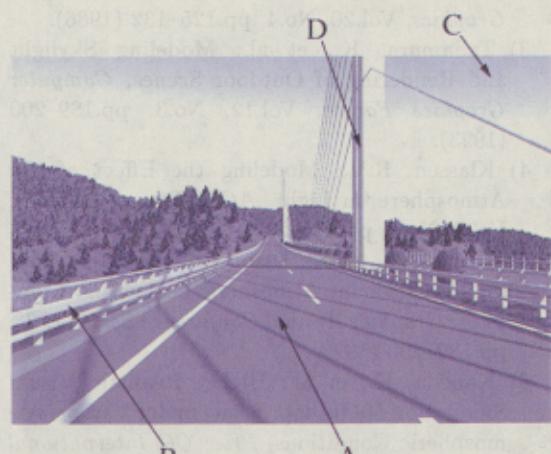
(c) 東京 4月 21 日午前 8時 6分

図6 季節感の表現効果の評価

Fig. 6 Evaluation of the effects for expressing a sense of the season.

高品質の景観画像を高速に生成するための以下の手法を提案した。

- 天空照度計算、天空光による鏡面反射光計算、および太陽の大きさを考慮した半影表示の処理を、統合した1つのアルゴリズムで実現するための、多階層構造受光直方体を用いた計算手法。
- 天空照度計算の際の遮蔽物体抽出の高速化手法。



(a) サンプリング点の配置

		画像サンプリング点			
		A	B	C	D
画像データ	図6 (a)				
	図6 (b)				

(b) サンプリング点の色

図7 画像の色の比較

Fig. 7 Comparison of colors at some sampling points.

- 季節を考慮するための直射光照度と天空照度の比率補正手法。

今後の課題として、本論文では考慮対象外とした、雲の天空輝度分布および太陽直射光への影響を、計算速度を損なうことなく実現する手法の開発、および天空の遮蔽計算の高速化技術の効果の解析とそれに基づく改良があげられる。

謝辞 画像作成、計算時間計測にご協力いただきました（株）三英技研秦学英さんに感謝いたします。

参考文献

- 1) 照明学会(編)：ライティングハンドブック、オーム社(1987)。
- 2) Nishita, T. and Nakamae, E.: Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Illuminated by Sky Light, *Computer*

- Graphics*, Vol.20, No.4, pp.125–132 (1986).
- 3) Tadamura, K., et al.: Modeling Skylight and Rendering of Outdoor Scenes, *Computer Graphics Forum*, Vol.12, No.3, pp.189–200 (1993).
 - 4) Klassen, R.V.: Modeling the Effect of the Atmosphere on Light, *ACM Trans. Graphics*, Vol.6, No.3, pp.215–237 (1987).
 - 5) Nishita, T., et al.: Display of the Earth Taking into Account Atmospheric Scattering, *Computer Graphics Annual Conference Series 1993*, pp.189–200 (1993).
 - 6) Kaneda, K., et al.: Highly Realistic Visual Simulation of Outdoor Scene under Various Atmospheric Conditions, *Proc. CG International '90*, pp.117–131 (1990).
 - 7) Dobashi, Y., et al.: Skylight for Interior Lighting Design, *Computer Graphics Forum*, Vol.13, No.3, pp.85–96 (1994).
 - 8) Takita, S., et al.: A Simple Rendering for Penumbra Caused by Sunlight, *Proc. CG International '90*, pp.187–201 (1990).
 - 9) Takagi, A., et al.: Accurate Rendering Technique Based on Colorimetric Conception, *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.263–272 (1990).
 - 10) Foley, J., et al.: *Computer Graphics: Principles and Practice*, Addison Wesley (1990).
 - 11) Greene, N.: Hierarchical Polygon Tiling with Coverage Masks, *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series 1996*, pp.65–74 (1996).
 - 12) Zhang, H., et al.: Visibility Culling using Hierarchical Occlusion Maps, *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series 1997*, pp.77–88 (1997).
 - 13) 宇田川光弘：パソコンによる空気調和計算法，オーム社（1986）。
 - 14) 永田忠彦, 沢田康二：晴天時の全天空照度と天空輝度分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.45–46 (1979).
 - 15) Campbell, A.T. and Fussel, D.S.: Adaptive mesh generation for global diffuse illumination, *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.155–164 (1990).

(平成9年3月7日受付)
(平成9年9月10日採録)



中前栄八郎（正会員）

昭和4年生。昭和31年早稲田大学大学院工学研究科修士課程修了。同年広島大学工学部電気工学科助手。昭和43年同教授。平成4年広島県立大学経営学部教授。平成8年広島工業大学工学部教授。工学博士。3次元CGに関する研究に従事。IEEE, ACM, 電気学会, 電子情報通信学会, 照明学会, 画像電子学会各会員。



多田村克己（正会員）

昭和36年生。昭和61年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年（株）日立製作所入社。平成3年広島県立大学経営学部経営情報学科助手。平成8年同講師。博士（工学）。3次元CGに関する研究に従事。IEEE, 照明学会, 画像電子学会, 日本経営工学会各会員。



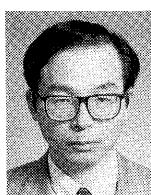
黒木国芳

1963年生。1987年華東工学院修士課程修了。1990年中国科学院計算技術研究所博士課程修了。同年中国科学院計算技術研究所研究助手。1992年から1994年にかけて広島県立大学客員研究員。1994年（株）三英技研入社。工学博士。3次元CGソフトウェアの開発・研究に従事。



加藤二二和（正会員）

昭和39年12月22日生。平成元年3月広島大学大学院工学研究科博士課程前期システム工学専攻修了。同年4月東京電力（株）入社。電力分野へのコンピュータグラフィックス技術応用システムの研究開発に従事。電気学会会員。



三好 孝治（正会員）

昭和24年生。昭和51年広島大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。広島工業大学専門学校を経て、平成6年広島工業大学環境学部環境デザイン学科講師。現在に至る。コンピュータ画像処理、高度情報処理技術者育成教育の方法論の研究に従事。日本科学教育学会会員。