

コンピュータグラフィックスによる
光学特性を考慮した写実的表示手法に関する研究

多田村 克己

コンピュータグラフィックスによる
光学特性を考慮した写実的表示手法に関する研究

多田村 克 己

緒言

本論文は、コンピュータグラフィックス (以降 CG) による景観シミュレーション実現のための光学的特性を考慮した写実的表示手法について、これまでに著者が行った研究成果を纏めたものである。

豊潤な時代を迎え、都市景観や自然景観の保護が大きな社会問題化してきた。また、商業照明とは趣を異にする都市照明としての、ランドマークのライトアップが盛んに行われるようになってきた。このような背景のもと、土木・建築、および照明の分野における景観シミュレーションへの CG の活用が盛んになってきた。具体的には、2次元の設計図面の作成は無論のこと、大規模構造物建設による視環境変化の事前評価手段や、内装、照明設計手段に3次元 CG が積極的に利用されるようになってきた。当初は、手描きの画像や模型に比べて修正が容易なことや、視点を自由に変更可能なことが3次元 CG の大きな利点とみなされていた。しかし、近年ではこれに加え、気象条件をはじめとする様々な環境条件下におけるシミュレーション結果を反映した、物理現象にできるだけ忠実な写実的な画像が強く望まれるようになってきた。

そのため、写実性の高い画像生成に必要な二つのモデル、形状モデルと光学モデルに関する研究が盛んに行われるようになった。前者の形状モデルに関する研究は、雲、波、樹木、および地形等の複雑形状のモデル化に関する研究である。本論文の主題である光学モデルに関する研究は、物理現象にできるだけ忠実な照明計算を行うことにより、写実性を高めようとするものである。これはさらに、物体の材質感を表現するための物体表面における光の振舞い、すなわち、光の反射・透過モデルに関する研究と、大気や水質の状態を表現するための空気中や水中における光の振舞い、すなわち、光の散乱・吸収モデルに関する研究に分類できる。

本論文は、これらのうち、特に以下の4点に焦点を当てた研究・開発を行い、CGによる景観の事前評価ならびに照明シミュレーションを行う際の写実的な画像生成手法を提案する。

- (1) 水面やガラス等の半透明物体および映り込みを考慮する物体を含んだ画像の高速表示手法、
- (2) 自然光ならびに水上・水中に設置された人工光源に照射された水辺付近の景観の表示手法、
- (3) 天空光を考慮した景観画像の高速表示手法、
- (4) 軽量なデータを用いた写実的な樹木の高速表示手法、

以下、これらの各研究項目の開発の必要性と問題点をあげ、その解決法と成果について述べる。

透明または半透明な固体・液体、および映り込みのある物体の表示には、光の屈折、および鏡面反射、特に正反射方向の映り込みの考慮が重要である。CGにおいて、この光の反射・屈折効果を表現するためには、基本的には、視点へ向かう光線を逆方向に探索する光線追跡 (ray tracing) を行う必要がある。具体的には、スクリーン中の各画素と視点とを結んだ直線を視点と逆方向に物体表面での反射・屈折を考慮しながら追跡する光線追跡法を適用する。その結果、水面やガラス、鏡等の物体をリアルに表示することができる。しかし、この光線追跡法は、追跡する光線と物体との交差判定を、隣接する画素の光線追跡の結果とは無関係に行うため、多大な計算時間を消費する手法として知られている。このため、光線追跡の高速化が強く望まれている。本研究では、“光線追跡を複数回行う必要があるのは、スクリーン中の透明、半透明物体や鏡のような物体の存在する領域のみであり、一般にそれが画像中に占める面積は小さい” 点に注目し、この問題を解決する。

すなわち、処理が高速なスキャンライン法を基本とし、光線の正反射による映り込みおよび屈折を考慮する必要のある物体に対してのみ、局所的に光線追跡法を適用することにより、スキャンライン法と光線追跡法の長所を合わせ持つ写実的な表示法を提案する。さらに、光線追跡法自体を高速化する手法と、光線追跡を行う物体の境界部分を効率よく抽出して、エリアシング (物体の境界部分が階段状に見える現象) を除去する手法を開発し、高品質な画像を比較的短時間で生成することを可能にした。

空気中と水中を通過する光の振る舞いを比較すると、両者の光学的な特性の相異のため、光の反射・屈折、散乱・吸収等の効果が甚だしく異なる。例えば、液体から空気中に光が進む場合、液体の屈折率が空気のそれよりも大きいため、液体表面への入射光線がすべて反射される全反射を生じることがある。近年、建築物の中に水路や噴水、プール等の水面を積極的に取り入れる設計が盛んに行われるようになった。ところが前述のように、空気中と水中の光の諸特性が著しく異なるため、水面を含む景観設計の場合、熟練した設計者をもってしても、照明条件、水深等が変化した場合の、水面の見え方の変化を予測するのは困難である。このため水深や混濁度、水底の材質、光源の種類、位置、配光の変更が水面の色の変化に与える影響を事前に評価するための、写実的な CG 画像を利用した水面を含む視環境を観察可能な手法の考案が求められている。このような水面を含む環境の設計支援・事前評価を、CG により行うために

は、水の特性を考慮した照明シミュレーション手法の開発が重要な課題の一つとなる。液体を含む環境を CG で表現するためには、前述の光線追跡法とは逆に、光源から放射された光線が物体表面に到達するまでの過程を追跡する逆光線追跡 (backward ray tracing) が必要になる。ここで、光の反射・屈折および散乱・吸収を考慮した光源からの逆光線追跡を、光源の配光、スペクトル分布を考慮して行くと、多大な計算時間を要する。また、人工光源を水中に配置した場合の照明モデルがこれまでに提案されていない。したがって、上記の問題を解決し、水面を含む環境に対しても効率良く計算できる照明モデルの考案が望まれている。

本研究では、光学モデルに基づいた水面における光の反射・屈折および水中における光の散乱・吸収効果を考慮した、自然昼光および人工光源による光学シミュレーション手法について提案する。提案手法は以下の特徴をもつ。

- (a) 水質・水深および水底の形状・材質を様々に変化させた場合の照明シミュレーションができる。
- (b) 水中光源の場合に頻繁に生じる水面で光が全反射する現象を含めた、精度のよい照明シミュレーションができる。

提案手法により、従来の単一媒体中での適用を前提とした照明モデルによる画像と比べて、特に水中部分の現実感の高い画像の生成を実現した。

自然昼光は、太陽直射光と天空光からなる。曇天時や晴天時の夕刻等の天候・時刻を反映した写実的な屋外の景観画像生成のためには、天空光の考慮は欠かすことができない。この天空光は、太陽光線が大気中を通過する際、大気中の空気分子・塵・水蒸気等の微粒子と衝突して生じる散乱光によるものである。また、光が大気中を通過する際、これらの微粒子によるエネルギーの吸収が生じる。大気中を光が通過する際のこのような光の散乱・吸収効果は、光の波長すなわちスペクトルによって異なる。これが、青空や夕焼け空等の自然景観を構成する。CG においても、大気中の微粒子により生ずる光の散乱・吸収効果を、スペクトル分布を考慮して表現することにより、自然昼光のもう一つの要素である天空光をシミュレートすることができる。

天空輝度分布については、国際照明委員会 (CIE) により、経験的に得られた標準天空輝度分

布が数式化されている。ただし、CIE の標準天空輝度分布はスペクトル分布を考慮していない。したがって、スペクトル分布を考慮し、なおかつ CIE の標準天空輝度分布と整合の取れたモデルの開発が望まれる。これまでに、天空照度計算法と大気中の散乱・吸収を考慮した空の表示手法が開発されてきた。しかし、前者は天空の遮蔽計算のために計算時間を大量に消費し、CIE の標準天空輝度分布を利用して照度計算を行っているため、天空光のスペクトル分布を考慮できない。後者は、CIE の標準との整合性についての保証が全くないという問題点がある。本研究では、スペクトル分布を考慮しかつ CIE の標準天空輝度分布と整合が取れる、大気の光学的特性（散乱光分布を規定する位相関数と消散係数）を求める方法、グラフィックスエンジンを利用した高速天空光計算手法、および視点を変えた画像の作成時に効果の大きい照度マッピング手法について提案する。提案手法により、精度の高い天空光に照射された景観画像を高速に生成することを可能にした。

雲、波、樹木および地形のような自然の創造物は、工業製品のような設計図がなく、同一種類のものであってもその形状は複雑多岐である。本論文では、自然景観の表示に欠かせない樹木に注目する。景観評価画像中では、樹木は主役ではないが、自然な違和感のない樹木の表示は、写実的な景観画像生成に対して重要な役割をもつ。この場合、視点がいかなる方向に対して連続に変化する際にも、違和感なく表示される必要がある。樹木が単独で現れることはまれであり、並木、林など多数の樹木の配置を必要とする場合が多い。このため、必要なデータ量ができるだけ少ないことが望まれる。これまでに、フラクタル理論を応用して樹木を生成する手法や植物の種別ごとにこの生長モデルを記述し、樹齢、葉の繁り具合の異なる樹木を生成する手法が開発されている。しかし、これらは、最終形状を三角形パッチの集合として記憶するため、葉の繁り具合によっては1本当たり何万パッチにもなる。したがって、樹木の計算コストが非常に大きくなるという問題がある。

本研究では、垂直および水平方向の樹木の写真画像を利用し、仮想の透明な垂直／水平平面上に上記写真画像をテクスチャマッピングすることにより、樹木とその落とす影を写実的に表示する簡易モデルを提案する。すなわち、陰影付けを行う際、樹木の外接モデルと小領域に割り当てた法線ベクトルを利用し、各透明平面上のテクスチャの透明度をその平面と視線とのなす角の関数で表す。また、透明仮想平面の大きさを変えることにより、同一テクスチャから大

きさの異なる樹木を生成することができる。したがって、樹木の数が増加しても透明平面の数が増すだけで、必要なテクスチャのデータ量は増加しない利点がある。

まず、第1章では、建築・照明設計や視環境の事前評価に対する光学特性を考慮した写実的な画像の必要性和有効性について述べ、本研究の目的と意義を明らかにしている。また、これまでに研究された写実的な画像生成手法について概説し、本研究の位置付けを明らかにした上で、本論文で提案するCGによる写実的表現法の概要について述べている。

第2章では、光の反射・屈折を考慮した画像を高速に表示するための一手法を提案している。まず、物体空間における空間一様性を利用して前後判定と隠面消去を行う際の処理が高速なスキャンライン法を用いて、可視面とその占める領域を求める。次に、可視面の情報を利用して、光線追跡を必要とする物体の占める領域を抽出し、多大な計算時間を必要とする光線追跡法の適用部分を局所化する。これにより、画像全体を光線追跡法のみにより計算する場合に比べて、格段に計算時間を削減できる。なお、半透明物体や映り込みのある物体を含む画像生成の適用例をあげ、提案手法の有効性を示している。

第3章では、自然昼光および人工光源に照射された水面を含む環境の写実的な表示を行うための一手法を提案している。提案手法では、水面における光の反射・屈折および、水中における光の散乱・吸収現象を、自然昼光・人工光源それぞれに対して物理法則に則った光学モデルを考案し、第2章で述べた局所光線追跡を水面に対して行うことにより、写実的な水面を含む環境のCG画像を生成できる。水辺付近の景観シミュレーション、水中照明シミュレーションへの応用例を挙げ、提案手法が有用であることを示す。

第4章では、まず天空光を考慮した景観画像を生成する際、提案手法が採用したモデルに基づいた天空輝度分布と、CIE標準天空輝度分布とのマッチングの問題を取りあげる。具体的には、スペクトル分布を考慮するための大気中の光の散乱・吸収モデルに基づく天空輝度分布と、標準の天空輝度分布との誤差が最小になるエアロゾルの位相関数と消散係数について述べる。さらに、グラフィックス用ハードウェアを利用した画像の生成法と照度マッピングによる天空照度計算法を提案し、その有用性を確認している。

第5章では、写実的な樹木の簡易表示法について提案している。すなわち、樹木の正面からの写真と、水平断面の写真を垂直および水平な透明平面にそれぞれマッピングし、これを樹木

自体の表示と樹木の落とす影の計算に利用することにより、簡易なデータで写実的な樹木を表示する。提案手法は、同一の樹木を多数配置した場合、透明仮想平面が増えるだけで済むので、必要なデータ量がほとんど変わらないという特長を持つ。適用例により、本手法による樹木が景観画像の写実性向上に有用であることを示す。

最後に、第6章において本研究で得られた成果をまとめて記述し、今後の研究課題について述べている。

目次

1 序論	1
1.1 研究の目的	1
1.2 研究の概況	4
1.2.1 光学特性を考慮した写実的表示手法	4
1.2.2 映り込み・半透明物体表示に関する研究概況	7
1.2.3 水面表示に関する研究概況	7
1.2.4 景観評価画像生成のための光学モデルに関する研究概況	8
1.2.5 樹木の表示に関する研究概況	9
1.3 本論文の概要	10
2 局所光線追跡による高速陰影表示	11
2.1 概説	11
2.1.1 光線追跡法の高速化に関する研究概況	12
2.1.2 提案手法の概略	13

2.2	局所光線追跡の基本的な考え方	14
2.3	局所化のための処理	16
2.3.1	外接凸多面体の生成	16
2.3.2	スキャンライン上における可視面および影の区間の抽出	17
2.3.3	曲面体の境界の処理	18
2.4	光線追跡法の改良	19
2.4.1	影の処理の効率化	20
2.4.2	透明物体による影の処理	21
2.5	適用例および評価	23
2.6	結言	25
3	水上および水中照明シミュレーション	27
3.1	概説	27
3.1.1	水面を含む環境の照明シミュレーションに関する研究概況	28
3.1.2	提案手法の概略	28
3.2	基本的な考え方	29
3.2.1	仮定と前提条件	29
3.2.2	処理の基本構成	31
3.3	1次光線と相互反射の計算	32

3.3.1	自然昼光による1次光線の計算	33
3.3.2	人工光源による1次光線の計算	35
3.3.3	水上および水中における相互反射計算	37
3.4	水面のレンダリング	39
3.4.1	ライティングモデル	39
3.4.2	視点に到達する光線の成分毎の計算	40
3.5	水中での散乱光の計算	42
3.5.1	自然昼光による水中での散乱光の計算	42
3.5.2	点光源による水中での散乱光の計算	47
3.6	適用例	48
3.7	結言	51
4	天空光を考慮した景観画像の高速生成法	57
4.1	概説	57
4.1.1	天空光を考慮した景観画像生成に関する研究概況	58
4.1.2	提案手法の概略	60
4.2	天空輝度分布の計算	60
4.2.1	大気拡散モデル	60
4.2.2	CIE 標準輝度分布との比較	65

4.3	受光直方体を用いた天空照度の計算	67
4.3.1	基本的な考え方	67
4.3.2	受光直方体の設定	69
4.3.3	寄与係数の計算	70
4.3.4	受光直方体の最適化	71
4.3.5	天空照度計算	71
4.3.6	帯光源法と受光直方体法の比較	75
4.4	照度マッピングを利用した画像作成	75
4.5	適用例	79
4.6	結言	79
5	写実的な樹木の簡易表示法	82
5.1	概説	82
5.1.1	写実的な樹木表示に関する研究概況	83
5.1.2	提案手法の概略	84
5.2	2種類の写真画像を用いた樹木の表示	84
5.2.1	仮想平面の設定	84
5.2.2	樹木テクスチャのマッピング方法	85
5.3	シェーディングと影の処理	90

5.3.1	葉の向きを考慮したシェーディング	90
5.3.2	小領域への単位法線ベクトルの設定	92
5.3.3	影の処理	95
5.4	適用例	98
5.5	結言	99
6	結論	104
A	散乱関数	117
B	Jerlov の散乱モデル	119
C	準一次散乱 (QSS) モデル	120

第 1 章

序論

本章では、本論文の研究目的と、これまでに研究されているコンピュータグラフィックス(以降 CG)による光学特性を考慮した写実的表現法について概説し、本研究の位置付けを明確にした後、本研究の概要について述べる。

1.1 研究の目的

計算機の価格対性能比の飛躍的向上とメモリの高集積低価格化により、CG が実用化の時代を迎え、あらゆる分野で利用されている。

特に昨今、社会的に視環境問題がクローズアップされ、大規模開発の場合、周辺景観との調和が非常に重要な問題となってきた。このため、建造物の計画・設計段階において、できるだけ実在の環境に近い形で完成後の景観予測シミュレーションを様々な角度から行えることが望まれている。すなわち、景観予測シミュレーション用 CG 画像に対して、従来は、地形変化や建造物の形状・配置を提示できれば十分とされていたが、最近では、それがより写実的であることが求められるようになってきた。

また、照明による演出効果も広く認識されるようになり、著名建築物のライトアップや、噴水、プール等における水中照明が盛んに行われるようになってきた。これらは共通して、照明器具を一旦設置すると変更が困難であるという問題を持つ。そのため、事前に様々な角度から

十分なシミュレーションを行う必要があり、CG が利用されている。屋内照明も、アメニティ(快適さ)志向が強まり、従来の蛍光灯や白熱電球を機械的に配置しただけのものから、照明による屋内の雰囲気演出効果を重視した様々な照明器具を組み合わせるものへと変化している。このため、床、壁、天井の材質、配色と光源の特性とが複雑に影響し合い、結果的にどのように見えるかが重要となり、従来の照度および輝度の数値データだけではその把握が困難になっている。また、内装および照明設計段階から CG を援用して、顧客と設計者が話し合いながら最終的な仕様を決めていく試みも始まっている。

このような、景観評価、照明設計の問題に対しては、CG で生成する画像が実際のシーンに限りなく近いこと、すなわち、写実的であること、さらにその画像をできるだけ短時間に生成できることが要求される。

本研究は、景観シミュレーションや照明シミュレーションに適した、物理現象にできるだけ忠実な CG 画像の、簡易なモデルを用いた高速生成法に関する問題を取り扱う。

景観シミュレーションの立場からは、

- (1) 水面やガラス等の半透明物体や鏡面を含んだ画像を高速に処理する手法の開発
- (2) スペクトル分布を考慮した天空光を含む自然昼光に照射された景観画像の高速表示手法の開発
- (3) 写実的な樹木の簡易な表示手法の開発

照明シミュレーションの立場からは、

- (4) 自然昼光と、水上・水中に設置された人工光源による水辺付近の照明シミュレーション手法の開発

以上 4 点の開発を本研究の目的とする。以下、各項目の研究目的について詳述する。

透明・半透明の固体、液体の表面では、光の反射・屈折が生じる。写実性の高い画像生成のためには、建物の窓や景観中の水面等、半透明物体や映り込みを生じる物体表面における光の反射・屈折効果の表現は欠かすことができない。これらの現象を表現できる画像生成アルゴリ

ズムとして、視点に到達する光線を逆にたどっていく光線追跡法が知られているが、これはまた、計算時間を大量に消費する手法としても知られている。本研究では、一般的な画像においては、光線追跡の必要のない完全拡散反射、バンプマッピング、およびスペキュラリフレクションで取り扱える物体が大部分を占めるという点に着目し、この問題を解決する。すなわち、必要最小限の領域に光線追跡法を適用することにより、正反射方向からの映り込みおよび屈折方向からの透過を表現でき、高品質の画像を高速に生成する手法を開発する。

水中と空気中では、光の反射・屈折、および散乱・吸収効果が甚だしく異なる。このため、例えばプールの建設の際、熟練した設計者をもってしても、水深、水質等の変化により、水面がどのように見えるかを予想するのは困難である。この問題を解決するため、水深や水質および水底の材質の変更が水面の色の変化に与える影響を容易に観察することが可能な手法の考案が求められている。特に、人工光源により照射された水面を含む環境を写實的に表現するための照明モデルの提案が望まれている。本研究では、自然日光および人工光源に照射された水面について、物理モデルに基づいた水面における光の反射・屈折効果、ならびに水中における光の散乱・吸収効果を考慮した光学シミュレーション手法を開発する。

太陽光線が大気中を通過する際、大気中の空気分子や塵等の微粒子と衝突することにより生じる散乱光が天空光である。写實的な景観画像生成のためには、天空光の考慮は欠かすことができない。そこで、国際照明委員会 (CIE) において経験的、統計的に得られた晴天時および曇天時の天空輝度分布を与える式が規定されている。現実感の高い画像を生成するためには、天空光に対してもスペクトル分布を考慮することが求められる。しかし、スペクトル分布を考慮した天空光計算は、大気中の微粒子による光の散乱・吸収のシミュレーションを、すべての計算点について、その点から見える天空部分に対して行う必要があるため、計算コストが大きい。したがって、CIE 標準天空輝度分布と整合がとれ、かつ、比較的計算コストの小さい天空光を考慮した景観画像の生成手法の開発が望まれている。本研究では、前者に対しては、スペクトル分布を考慮した上で CIE の標準天空輝度分布と整合が取れるエーロゾルの位相関数、消散係数を求め、後者に対しては、グラフィックスエンジンを利用できる天空光計算モデルを考案する。

景観中には、ほとんどの場合樹木が含まれる。この際、樹木は主役になることはないが自然

な樹木の表示は、違和感のない写実的な景観画像生成のためには欠かすこともできない。ここで、樹木を三角形パッチの集合体として表現すると、形状の精度および樹木の数にデータ量が比例する。このため、高精度の樹木を多数配置すると、計算コストが非常に大きくなる。本研究では、以下の3点を考慮した樹木の表示手法を開発する。

- (1) 平面的でなく、立体感がある。
- (2) 視点が自由に移動する際にも違和感なく見える。
- (3) 同じ種類の樹木を少ないデータ量で追加できる。

1.2 研究の概況

まず1.2.1において、光学的特性を考慮した写実的表示手法全般に関して、これまでに行われた研究の概略について述べる。このうち、本論文に関係の深い事項に関する研究概況に対して、1.2.2, 1.2.3, 1.2.4, 1.2.5節で詳述し、本論文が取り扱う研究範囲を明確にする。

1.2.1 光学特性を考慮した写実的表示手法

CGに関する研究は、大きくモデリングとレンダリングの二つの分野に分けることができる。写実的な画像生成もアプローチの方法により、以下のように分類できる。

(a) レンダリング

- (1) 固体(表面)の光学モデルによる材質感の表現
- (2) 媒体(液体、気体)の光学モデルによる媒体の表現
- (3) 光源モデルによる照明効果の表現

(b) モデリング

- (4) 複雑な形状の表現

本節では、上記の4項目について概略を述べる。

(1)は、固体の材質に起因する光学特性をモデル化し、シェーディングの際に入射光に対する反射・透過光を計算することにより、それぞれの材質感を表現するものである。初期段階の

シェーディングでは、被照面をどの方向から見ても同じ明るさ、同じ色に見える完全拡散反射面のみですべての物体が構成されていた。その後、金属やプラスチックの質感を出すため、鏡面反射によるハイライトを描画するモデルの研究 [1, 2] が行われた。物体表面の複雑な模様やシミ等を簡易に表現するためのテクスチャマッピングに関する研究 [3]、さらに、正反射方向からの映り込みや半透明物体を表示するため、物体表面における光の反射・屈折を光学現象に基づきシミュレートする手法の研究 [4] が行われた。最近では、物体表面での入射光と反射光の関係を複雑な関数を用いて、できるだけ精密に表現する手法の研究 [5] が行われている。

第2章は、これらの中でも特に映り込みや半透明物体を表示する手法に深く係わる。これに関する研究概況は 1.2.2 節において詳述する。

(2) は媒体中に存在する微粒子により生じる光の散乱・吸収現象をモデル化し、固体以外の物質の存在を表現するものである。自然界における媒体は、大気と水が大部分を占める。大気中の微粒子の影響を考慮する手法として、太陽の位置の違いによる空の色の変化を表現するための研究 [6] や、煙、雲、霧、および霞を表現するための研究 [7, 8] が行われた。最近では、大気圏外から見た地球の表示手法の研究 [9] が行われている。水中の微粒子の影響を考慮する手法としては、水の濁り具合や、水質の違いを表現する手法の研究 [10] が行われている。

第3章は、水中の微粒子による光の散乱・吸収の影響を考慮した光学シミュレーション手法について提案している。これに関する研究概況は 1.2.3 節で詳述する。さらに、第4章では、大気中の微粒子による光の散乱・吸収を考慮した天空輝度分布の計算手法について述べている。これに関する研究概況は 1.2.4 節において詳述する。

(3) は、任意に配置した光源に対して、物理／光学現象に基づいた照明効果をモデル化するものである。光源は、その発生源により自然昼光(太陽直射光、天空光)、人工光源に分類する場合と、直接光か間接光かにより1次光源と2次光源に分類する場合がある。1次光源は、自然昼光における太陽からの直達光、人工光源におけるランプからの直射光が相当する。2次光源は、自然昼光における天空光、被照射面が他の面を照射する相互反射光が相当する。初期のCGは、1次光源に対する簡単な光源モデル(平行光線、配光一様の点光源)を用い、2次光源の代わりに、シーンに対して一様な環境光(ambient light)を与えるため、本影のみが表示可能であった。その後、1次光源については、線光源、面光源モデル、および太陽の大きさを考慮

した太陽直射光による照明モデルの研究 [11, 12] が行われ、半影の表現ができるようになった。さらに、2次光源については、屋内照明問題における相互反射照明モデル、および屋外照明問題における天空光モデルの研究 [13]-[16] が行われた。これにより、1次光源(直射光)が照射しない部分における照明効果の写実性が飛躍的に向上し、非常に現実感の高い画像を生成できるようになった。

第3章は、水中に光源を配置した際の照明シミュレーション手法について提案しており、これに関する研究概況は1.2.3節で詳述する。第4章では、天空光モデルによる光学シミュレーションを提案しており、これに関する研究概況は1.2.4節で詳述する。

(4)は、形状が複雑であったり常に変化する現象を近似的に表現するものである。これは静的モデルと動的モデルに分類できる。まず、静的モデルについて概説する。

景観画像作成には、海岸、山岳等の地形や樹木、草花等の植物は欠かすことができない。これらを、フラクタルや確率理論等を応用した数理モデルを用いて表示する手法の研究(例えば[17])が盛んに行われている。また、生物の形状や水流をメタボールやパーティクルシステムを用いて表現する手法(例えば[18])が提案された。これとは別に、法線ベクトルのみを物体表面にマッピングして形状自体を変化させることなく表面の凹凸感を近似的に表現する手法(バンパマッピング)(例えば[19])が提案された。さらに、3次元の立体テクスチャ(ソリッドテクスチャ)を考案し、毛皮や毛髪を表現する手法(例えば[20])が提案された。また、自由曲面の表示は人工物の画像生成に欠くことができないものであり、CGの初期からこれに関する研究(例えば[21])が行われてきている。

動的モデルについては、水たまり、波の動き、植物等の生長を表現するための手続きモデル(例えば[22, 23, 24])が、提案されている。また、写実的な画像生成手法とは異なるがCG特有の形状変形手法として、morphing, deformationのための手法(例えば[25, 26])が提案されている。

第5章は、静的モデルのうちの自然景観用の樹木の生成法について提案したものであり、これに関する研究概況は1.2.5節で詳述する。

1.2.2 映り込み・半透明物体表示に関する研究概況

半透明物体や映り込みを表現するには、物体表面における正反射方向からの映り込み・屈折を考慮する必要がある。この実現手法として、視点に到達する光線の経路を視点から逆方向に探索する光線探索 (ray tracing) 法 [4] が開発された。光線探索法は、表示対象の適用範囲が広く、アルゴリズムも簡単なため、上述の現象の写実的な画像生成を行うのに最適なレンダリングアルゴリズムであるが、画像生成のためのサンプリング点ごとに視点に到達する光線を独立に追跡することによる、計算時間の大量消費、およびサンプリングによる量子化誤差に起因するエリアシング (物体の境界部分が階段状になったり、小さい物体が表示されない) の発生という問題点がある。この問題に対し、外接箱や空間分割法を適用して交点計算の量を削減して高速化を図る手法 [27]-[29] や、エリアサンプリングにより、エリアシングを除去する手法 [30, 31] が提案された。しかし、高速化の度合いとメモリ消費量が trade-off の関係になる問題があり、高速化とエリアシングの除去の両方を実現した手法の提案はなかった。

本論文では、第 2 章において上記問題を解決し、光線追跡を必要とする物体を含む画像を、高速かつ高品質に生成する手法を提案する。

なお、本論文で提案する手法の発表後、大容量のメモリが比較的低価格で利用できるようになり、空間分割法を発展させた、さらに高速で高品質の画像を生成する手法が提案されている [32, 33]。

1.2.3 水面表示に関する研究概況

(1) レンダリングに関する研究

水面の表示に関しては、前節で述べた光線追跡法を利用して、水面への映り込みや水底からの透過光を表現する手法 [23] が開発された。そして、水面での反射・透過光を考慮した簡易な手法として、視線の水面上での反射・屈折用の 2 種類のテクスチャ画像を Fresnel の法則による反射率を考慮してマッピングする手法 [34] が提案された。また、光源からの光線が波などにより集光された結果現れる火線 (caustics) を表現するため、光源で発生した光線が物体表面に到達するまでの経路を探索する手法 (backward ray-tracing) [35, 36] が開発された。しかし、こ

れまでに開発された水面表示に係わる照明モデルは、光源が水上にあることを前提としており、人工光源を水中・水上の両方に配置することを前提とした照明モデルの提案はまだない。

第3章で、水面を含むシーンの自然昼光および水中・水上の人工光源それぞれに対する照明モデルと、それを適用したシミュレーションの一手法を提案する。

(2) 波の形状モデリングに関する研究

波の形状に関する研究は、まず、正弦波とストークス波 [37] を合成して穏やかな水面を表現する手法 [23] が提案された。その後、波の詳細形状を表現するため、波のしぶきをパーティクルシステムを用いて表現する手法 [18] が開発された。さらに、多値関数を用いて波の形状モデルを記述することにより、しぶきのある大波を表現する手法 [38] が開発された。

本論文は、ストークス波を2次元に拡張した手法 [10] を採用する。

1.2.4 景観評価画像生成のための光学モデルに関する研究概況

CGを利用した景観シミュレーションは、まず、背景となる写真画像中にCGで生成した建造物をはめ込むモンタージュ技法 [39] の開発が行われた。この際、光源は、平行光線と一様強度の環境光を用いていた。また、遠方になるほど白っぽく見える霞の効果を考慮していた。一方、CIEの標準天空輝度分布を利用した天空光による照度計算法 [16] が開発された。この手法は、CIEの標準天空輝度分布がスペクトルを考慮していないため、スペクトル分布を考慮した天空光による照度を表現できないことおよび計算時間が大きいという問題点があった。さらに現実感の高い画像を生成するため、大気中の微粒子により太陽光線が散乱・吸収される現象を、スペクトル分布を考慮してモデル化し、上記モデルに基づく天空の表示を行う手法 [6] が開発された。ただし、この手法については標準天空輝度分布との整合性がないという問題がある。また、様々な場所での天空輝度と色温度を測定し、天空輝度と相関色温度との関係を表す経験的な変換式を求め、相関色温度から、スペクトル分布を求める方法 [40] が提案された。この手法は、精度の良い天空照度を得ることができる反面、データ計測のために特別な装置を必要とし、かつ、計算時間が大きいという問題点がある。

第4章では、CIE標準天空輝度分布にマッチする大気中の微粒子の光学特性パラメータについて述べ、さらに、天空光を考慮した画像を、グラフィックス用ハードウェアを利用して高速

処理する手法、およびアニメーション化を前提とした照度マッピングによる天空光照度の高速計算手法を提案する。

1.2.5 樹木の表示に関する研究概況

植物の表示手法は、大きく推計モデル、ルールモデル、印象派モデルに分類できる。

推計モデルは、フラクタルや乱数を用いて、枝の太さ、長さ、分岐の角度などを制御して樹木を発生する方法 [17, 18, 41, 42] である。

ルールモデルは、植物の形態規則に基づいて、理論的に樹木を発生する方法 [24, 43, 44] である。なお、この手法を応用したソフトウェア [45] も市販されている。

印象派モデルは、樹木の形状を2次曲面で近似し、この曲面上に数学的なテクスチャパターンをマッピングすることにより、樹木を表示する方法 [46] である。

ここで、前二者の手法を景観評価用画像の樹木表示のために使用すると、豊富な樹木データベースの作成のためには、膨大な計算時間を要する。推計モデルにおいては、希望する種類、形状の樹木を生成するためには、試行錯誤が必要であり、ルールモデルでは、その樹木の詳細な形態調査から始めなければならない。また、推計モデルもルールモデルも樹木の詳細構造の表現に主眼を置いている。言い換えると、画像中で樹木が主役として表現される。そして、これらのモデルでは、最終形状が多角形の集合として与えられるため、街路樹のように樹木を多数配置する必要がある場合、データ量、計算量ともに大きくなるという問題点がある。これに対して、印象派モデルは、比較的容易な手続きで樹木を表現することができ、表示も経済的に行なうことができる。しかし、数学的なパターンをテクスチャとして使用しているため、樹木の種類を識別できるまでの詳細な表現は困難である。

第5章では、景観評価用の樹木の生成を指向した樹木表示モデルを提案する。ここでは、推計モデルやルールモデルのように樹木を中心とした画像を生成するのではなく、印象派モデルと同じ範疇の脇役的な樹木を生成することを目的とする。具体的には、樹木の正面からの写真と、複数の水平断面の写真を垂直および水平な透明平面にそれぞれマッピングし、これを樹木自体の表示と樹木の落とす影の計算に利用することにより、リアルな樹木を簡易に表示する手法について提案する。

1.3 本論文の概要

本論文では、CGによる景観・照明シミュレーションの実現を目的とし、以下の4項目について研究を行った。本節では、その主な手法と成果について述べる。

第2章では、半透明物体の表面における正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を表現する際の計算コストの問題を解決するため、計算コストの大きい光線追跡法を適用する部分を局所化することにより、画像全体を光線追跡法を用いて計算する場合に比べて計算時間を削減可能な手法を開発した。半透明物体や鏡面反射物体を含む画像生成に適用する場合を例に挙げ、提案手法の有効性を示した。

第3章では、自然昼光および人工光源に照射された水面を含む環境を表示する問題について、水面における光の反射・屈折現象、および水中における光の散乱・吸収現象を表現するための物理法則に則った照明モデルを考案し、水上光源のみならず水中光源による照明効果も表現可能な手法を開発した。そして、水辺付近の景観シミュレーション、水中照明シミュレーションへの応用例を挙げ、提案手法が有用であることを示した。

第4章では、天空光を考慮した景観画像を生成する際のCIE標準天空輝度とのマッチングの問題に対して、晴天時の標準天空輝度分布に適合するエアロゾルの位相関数の形状と消散係数を、発見的な手法で求めた。さらに、アニメーション化を前提とした処理の高速化を実現するため、天空光を考慮した画像を、グラフィックス用ハードウェアを利用して表示する手法を開発した。提案手法と従来法との誤差評価を行い、景観評価用画像作成への応用例をあげ、有用性を確認した。

第5章では、リアルな樹木を簡易なデータで表示する問題に対して、樹木の正面からの写真と、複数の水平断面の写真をそれぞれ、垂直および水平な透明平面にマッピングし、これを樹木自体の表示と樹木の落とす影の計算に利用することにより、データ量が樹木の数に影響されない手法を開発した。視点、天候等について、様々な条件下の樹木を含む画像を作成し、提案手法の有効性を示した。

第 2 章

局所光線追跡による高速陰影表示

本章では、空間一様性を利用した物体の前後判定および隠面消去が可能で、かつ画像表示が高速に行えるスキャンライン法を用い、正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過の表現に必要な計算量の多い光線追跡法の適用を局所化することにより、計算時間を短縮できる画像表示法を提案する。さらに、光線追跡法を適用する際に生ずる画質の問題について、光線追跡法を適用する部分の境界を正確に求めることにより、画質の向上を実現する手法を提案する。

2.1 概説

光線追跡法は、正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を考慮することが可能なことや、各種形状の物体を取り扱える長所がある一方、探索する光線と物体との交点を求めるために膨大な計算時間を必要とする欠点がある。本章ではこの問題に対して、一般に処理の速いスキャンライン法を基本とし、正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を考慮する必要がある物体のみに局所的に光線追跡法を適用する手法を提案する。

提案手法は、以下の特徴を持つ。(1) 光線追跡法は、正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を考慮する物体に対してのみ適用する。この際、可視面（視線と最初に交差する面）は、スキャンライン法により容易に求められるから、光線追跡法を適用する領域を容易に局所化できる。(2) 光線追跡法を適用する際の視線の探索および影の処理に、外接箱 (bounding box) とシャドウ・ボリューム (shadow volume) を用いる。これにより、計算点に他の物体が影を落

とすか否かの判定を高速化できる。

本章で提案する手法を、半透明物体および映り込みが生じる鏡面反射物体を含む画像の生成に適用し、本手法の有効性を示す。

2.1.1 光線追跡法の高速化に関する研究概況

CGによる写実的な画像を生成するため、様々な3次元物体の隠面消去アルゴリズムが開発されてきた。その代表的なものに、光線追跡法、Zバッファ法、スキャンライン法がある。光線追跡法は、正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を考慮する必要がある物体の表示に適している。その反面、追跡する光線と最初に交わる物体との交点計算に多大な時間を費やすという欠点がある。その原因は、隣接する画素間においては、多くの場合急激には画像が変化しないという画像の空間一様性を考慮しにくい点にある。

これに対して、Zバッファ法、スキャンライン法は、画像の空間一様性を考慮しており、光線追跡法よりも高速に処理が行える。Zバッファ法は、アルゴリズムは簡単であるが、視点に対する図形の奥行きに関する判定に主眼を置いた手法であり、光源に対する図形相互の位置関係を考慮していないので、精度のよい影の処理を行うには難点がある。スキャンライン法は、影の処理やエリアシングの除去処理をアルゴリズムの中に容易に組み込める長所があるが、アルゴリズムが複雑なのが欠点である。一方、Zバッファ法、スキャンライン法とも正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を表現しにくい短所がある。

光線追跡法の最大の問題点である光線と物体との膨大な交点計算量を減らす方法として、以下の方法が開発されている。一つは、物体の存在する空間を直方体に分割し、これを各直方体中に適当な数の物体が含まれるまで細かく分割していき、Octreeと呼ばれる階層構造で直方体間の関係を記述する。そして、交点計算の際、Octreeの利用により計算量を少なくする方法 [27] である。また、画像空間を等分割し、3次元直線発生アルゴリズムを用いて光線と交差する立方体を高速に選択する方法 [28] が開発された。その他、いくつかの物体を囲む外接箱を用いて、物体を階層構造化し、交点計算量を減らす方法 [29] も開発されている。従来の光線追跡法 [4, 47] では、前述のように画像の空間一様性が考慮されていないため、画像中の各サンプル点（一般に画素の中心）ごとに、視線（以降、有向視線）と最初に交差する物体を求める必要

があった。そこで、光線追跡法の前処理に、Z-バッファ法を用いた手法 [30] や、Z-バッファ法に加えて、どの物体がどの物体に対して影を落とすかを予め求めておく手法 [48] も提案されているが、いずれも影の領域までは計算していない。また、追跡する有向視線を一本の線ではなく、広がりを持った光束とする方法 [31] も提案されている。しかし、この方法は、アルゴリズムの性格上、多角形の集合しか取り扱えないので曲面を表現しにくい。また、正反射・屈折光の方向を線形変換しているので、光学的に正しい表現ができない欠点がある。

2.1.2 提案手法の概略

本章では、スキャンライン法と光線追跡法の長所を組み合わせることにより、正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を考慮する必要がある物体を効率よく表示する手法を提案する。すなわち、影の領域をあらかじめ計算することのできるスキャンライン法を基本とし、正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を考慮する必要がある物体の存在領域についてのみ、局所的に光線追跡法を適用することにより、処理時間の大幅な短縮を実現している。文献 [30] の方法は、光線追跡法を適用する前に可視面の走査を行うという点では、提案手法と同じ立場に立つものである。しかし、文献 [30] の方法は、正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を考慮する必要のない画像に対しても照度計算、陰影表示のために、有向視線と面との交点計算を行う必要がある。

提案手法では、光線追跡法を適用する部分を抽出するためにスキャンライン法を用いており、必要最小限の領域に対して光線追跡法を適用する。これを実現するために、光線追跡法を適用する部分と、スキャンライン法を適用する部分との境界部の処理法を開発した。さらに、光線追跡法そのものについても、その処理のより高速化と高品質な画像を得るための改良を行った。具体的には、外接箱の概念 [29, 30, 49, 50] を影の計算に対しても拡張して処理時間の短縮化を図り、仮想の走査線を増加する方法 [51] によりエリアシングの除去を可能にした。

2.2 局所光線追跡の基本的な考え方

本章の基本的な考え方は、次の2点である。

(1) 光線追跡法を適用する部分の局所化、(2) 光線追跡法の改良。以下に、それぞれについて詳述する。

(1) 光線追跡法を適用する部分の局所化

- (a) スキャンライン法の効率をよくするため、シェーディング処理を行うまでは、すべての物体は凸多面体または、凸多角形の集合として処理する。
- (b) 曲面体(球、円柱、円錐、円錐台などの標準化しやすいもの)の形状に適した外接凸多面体を発生する。なお、複雑な形状の場合は、これらの曲面体間のセットオペレーションで定義するが、この場合は、個々の曲面体について外接凸多面体を発生する。これらの外接凸多面体を用いて、スキャンライン法の適用を可能にするとともに、光線追跡法を適用する領域を小さくする。一方、物体間のセットオペレーションで定義できない複雑な形状の自由曲面に対しては、三角形パッチに自動分割し([52]参照)、各三角形に対してスキャンライン法を適用するものとする。
- (c) 光線追跡法による輝度計算は、走査線上を占める物体のうち、必要があるものの区間のみ(図2.1においては、 $P_1 - P_2$ 間)行い、処理の高速化を図る。
- (d) エリアシングの除去法としては、仮想的な走査線を考え、走査線の数を増す方法[51]を拡張した方法を適用する。
- (e) 各物体と光源によって構成される影を生ずる空間(シャドウ・ボリューム)、および光源に対する物体相互間の前後関係をあらかじめ求める。これらを用いて面上の影の領域を計算する。この面上の影の領域は、シャドウ・ボリュームと面との交差部分として求まる([54]参照)。したがって、スキャンライン上での可視面、すなわち有向視線と最初に交わる面上の影の区間を、輝度計算の前に決定しておくことができる。

(2) 透明物体によって落された影の表現と高速化のための光線追跡法の改良

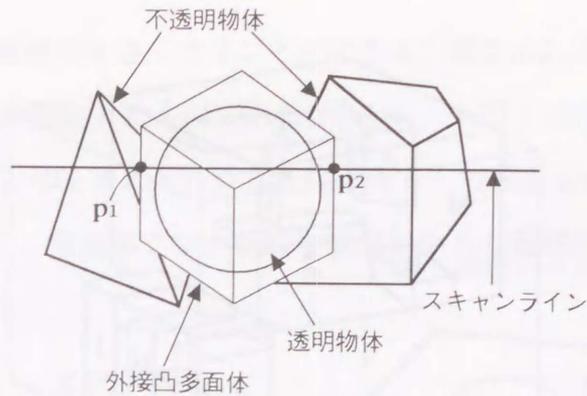


図 2.1: 光線追跡法を適用する区間

- (a) 光線が透明物体中を通過する際、Lambert-Beer の法則に基づくエネルギーの減衰を考慮する。
- (b) 透明物体によって落とされた影の処理を行う際、透明物体による光線の屈折を無視する。ただし、光線の入射角が、物体の持つ屈折率により定まる臨界角を越えるときは、その点において光は全反射し、透過しない。
- (c) 有向視線と物体との交点および影の計算には、隣接する物体群に対して外接箱 (図 2.2 参照) を定義し、これを階層化して処理の高効率化を図る。ただし、ここで必要な影の計算とは、(1)(e) で求まっていない影、すなわち正反射、屈折後に有向視線が交差する面上の影である。

局所化を含むレンダリング全体の処理手順の概略は、次のとおりである。

- (1) データ入力
- (2) 外接凸多面体および外接箱の生成
- (3) 物体の前後判定、シャドウ・ボリュームの計算 ([53] 参照)
- (4) スキャンライン上の可視面および影の区間の抽出
- (5) 輝度計算
- (6) 出力

輝度計算を行う際、(4) で得た情報をもとにして正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を考慮する必要がある物体に対してのみ、光線追跡法を適用する。スキャンライン法に光線追跡法を組み込むために必要な (2),(4) の処理、および輝度計算を行う際の曲面体の境界の

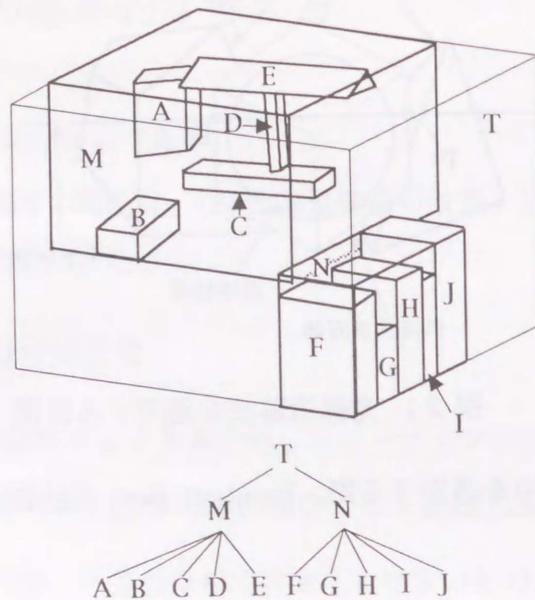


図 2.2: 外接箱の階層構造

処理については 2.3 節で述べる。光線追跡法の適用にかかわらずスキャンライン法と共通な (5) については 2.4 節で詳述する。

2.3 局所化のための処理

2.3.1 外接凸多面体の生成

有向視線と曲面体の交差判定の回数を減少させるために、曲面体に外接する凸多面体を発生する。

スキャンライン法 [53] では、球、円柱などの曲面体は凸多角形に近似して表示される。このため、曲面の輪郭の部分が多角形状に見える欠点がある。これに対処するには、曲面体の真の境界を求める必要がある。外接凸多面体は、真の境界の存在範囲を限定し、これを能率よく求めるためにも有用である。本章で使用する外接凸多面体は、一般によく用いられている $x-y, y-z, z-x$ 平面に平行な六面体ではなく、底面に外接する正方形を底面を持つ六面体 (円錐は四角錐) とする。その結果、外接凸多面体とスキャンラインとの交差判定を行い、これと交わる部分につい

て行う光線追跡法の適用範囲を小さくすることができる。図 2.3は、傾いた円柱に対して外接凸多面体を異なる手法により発生したものである。(a)は、上円・下円に外接する直方体を、(b)は、各軸平面に平行な直方体をそれぞれ外接凸多面体として発生したものである。図からも明らかのように、(a)の方が、曲面体でない無駄な領域が小さく効率がよい。

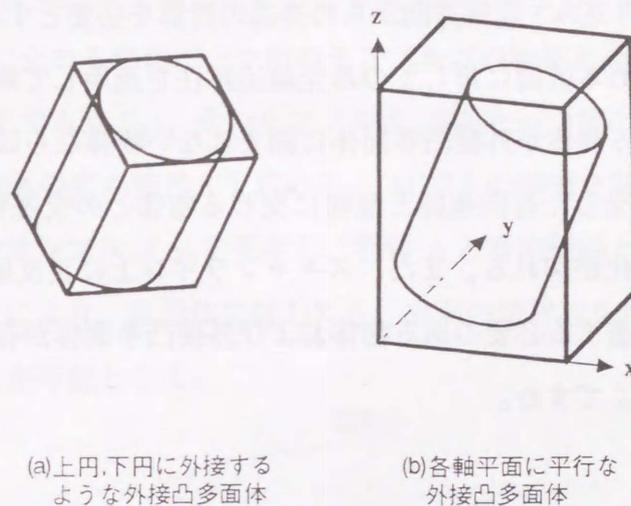


図 2.3: 外接凸多面体

2.3.2 スキャンライン上における可視面および影の区間の抽出

スキャンライン法によって、可視面およびその面上の影の抽出を行う。この処理によって得られる情報を用いて、従来の計算法によって輝度計算を行う区間と、光線追跡法により行う必要のある区間を判別することができる。本節では、説明を簡単にするため、エリアシングの除去を考慮しない場合の可視面および影の領域の抽出の概略手順について述べる。

- (1) 走査中のスキャンラインと交わる面と、その区間を求める。このとき、曲面体に対しては、外接凸多面体の各面に対してこの処理を行う。
- (2) (1)で求めた区間内に存在する影の区間を求める。この影の区間は、走査面(スキャンラインと視点を含む平面)と可視面との交線と、シャドウ・ボリュームとの共通区間である([54] 参照)。

(3) 走査中のスキャンライン上のすべての物体に対して、この処理が終了した後、スキャンライン上における各面の可視区間を求める。

以上の処理により、スキャンライン上における可視面とその区間が決定され、可視区間を持つ面(物体)および影の交点リストが作成される。この可視区間をもとにして輝度計算を行う際、正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過の計算を必要とする物体の占める区間と、透明物体の落とす影の占める区間に対してのみ光線追跡法を適用して輝度計算を行う。この際に、光線追跡法を適用する物体が外接凸多面体に囲まれない物体ならば、可視となる物体は既知であるので、視点から発した有向視線と最初に交わる物体との交差判定を行う必要はない。したがって、処理の高速化が図れる。また、スキャンライン上に正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を考慮する必要のある物体および外接凸多面体が存在しない場合には、光線追跡法は全く適用しなくてすむ。

2.3.3 曲面体の境界の処理

各画素についてサンプル点を1点だけとって輝度計算を行うと、一般に、サンプリング誤差により生ずるエリアシングが問題となる。この問題に対処するため、マルチスキャンニング法 [51] を用いる。この手法は、画素中に占める各図形の面積を求め、それぞれの面積と輝度とを考慮して画素の輝度値を決定するものである。画素中の図形の面積を正確に求めることができれば、それだけ画質の良い画像が得られる。そこで、数本の仮想の走査線(以降サブスキャンライン(図2.4参照))を考え、これで画素を分割し、各サブスキャンライン上に占める図形の長さを求め、これを台形積分することにより、図形の面積を求める。図2.4は、サブスキャンラインにより画素を3分割した場合の例である。図形Aが画素*i*中に占める面積*S*(図中斜線部)は、図形Aが画素*i*中のサブスキャンライン*j*(*j*: 0, 1, 2, 3)上に占める長さをそれぞれ*L_j*とすると次式から求めることができる。

$$S = \frac{h}{2}(L_0 + 2L_1 + 2L_2 + L_3)$$

ここで、*h*はサブスキャンラインの間隔である。したがって、多角形のみで構成される図形のように、それらの境界を容易に求められるものに対しては、非常に効果的な手法である。しか

し、球や円柱などの曲面体に対しては、その外接凸多面体に対してサンプル点発生のための処理を行っているため、真の境界を求める必要がある。そこで、外接凸多面体の占める区間では、以下の手順により曲面体の真の境界を考慮したサンプリングを行う。(1) 図 2.5 に示すように、外接凸多面体とスキャンラインとの交点 ac 間のそれぞれの画素に占める線分の midpoint に 1 次サンプル点を発生する。(2) 1 次サンプル点に対して有向視線を発生し、有向視線と最初に交わる物体を求める。(3) 最初に交わる物体が一つ前のサンプル点の物体と異なる場合 (背景にある物体 B から物体 A へと変化する点 S_3)、そのサンプル点 (S_3) と一つ前のサンプル点 (S_2) を用いて、収束計算を行い、物体の真の境界 b を求める。(4) 点 b の情報を基に物体 A がその画素に占める線分の midpoint に 2 次サンプル点 S_5 を発生し、物体 A と有向視線との交点を求める。

以上の処理を行うことにより、曲面体に対しても、曲面の境界点を精度よく求めることができ、エリアシングの除去が可能となる。

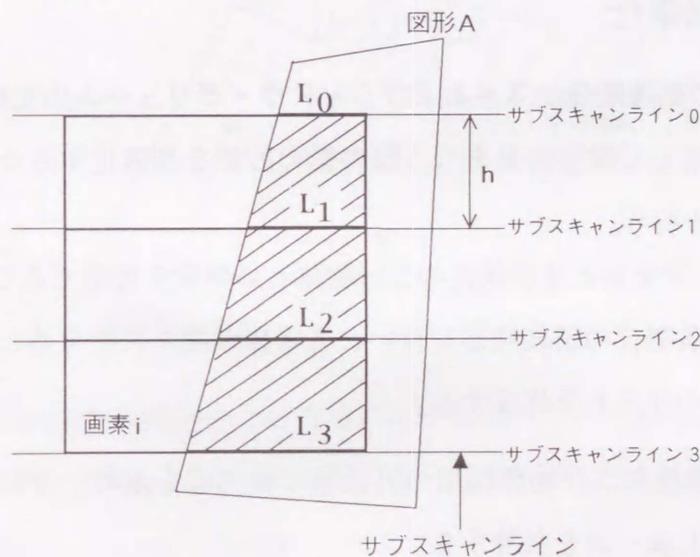


図 2.4: マルチスキャンニング法によるエリアシングの除去

2.4 光線追跡法の改良

従来の光線追跡法に対する改良点は次の 2 点である。

(1) 影の処理の効率化, (2) 透明物体による影の表示法。

以下、それぞれの改良点について詳述する。

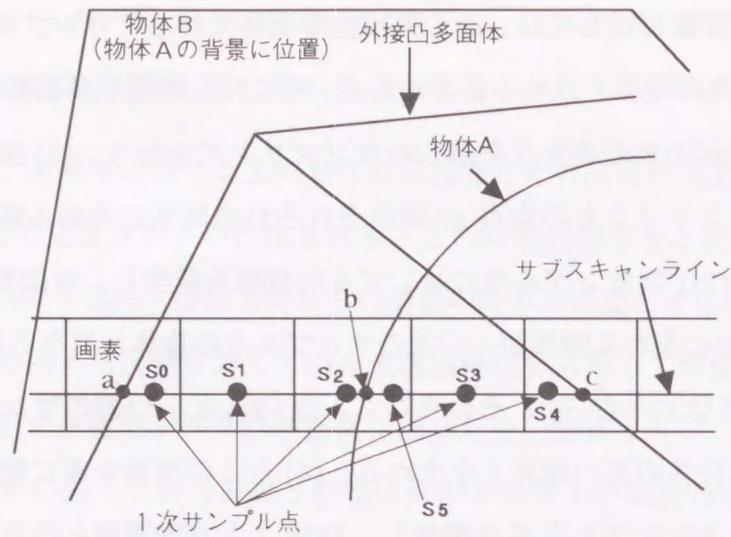


図 2.5: 外接凸多面体内のサンプル点

2.4.1 影の処理の効率化

(1) 光源に対する物体の前後関係リストおよびシャドウ・ボリュームの生成

光線追跡法を適用して輝度計算を行う際の影の計算を高速化するために、輝度計算を行う前に次の処理を行う。

- (a) 計算点に対して影を落とす可能性のない物体との処理を省略できるように、それぞれの光源に対する各物体の前後判定を行い、各物体の面上に影を落とす可能性のある物体を求め、そのリストを作成する。
- (b) 光源からみた物体および物体群用の外接箱の輪郭線を求め、それらと光源からなるシャドウ・ボリュームを計算する。
- (c) 光線追跡を行う球、円柱などの曲面体については、外接凸多面体に対するシャドウ・ボリュームを求めておき、後で詳しく影の領域を求める。

(2) 影を落とす物体の探索法

複数の隣接する物体に対して一つの外接箱を定義し、いくつかの外接箱を包含するさらに上位レベルの外接箱を階層構造で定義し、それを用いて階層の順を追って光線追跡を行う光線追跡法の高速化手法は、これまでにいくつか報告されている。本章では、影の探索に文献 [50] の手法を拡張して処理の高速化を図る。すなわち、(1) ある計算点にお

ける影の判定を行う際に、有向視線と交わる物体を探索したのと同様に、上位階層の外接箱から順に処理を行う(図 2.6参照)。それに加えて、(2) 計算点が影となるか否かの判定を行う際、計算点の属する面に対して、影を落とす可能性のある物体を前項で作成したリストから求める。さらに、(3) その物体が計算点に影を落とすか否かをシャドウ・ボリュームと計算点との包含関係を用いて調べる。

これらの拡張を行うことにより、従来の、計算点と光源とを結ぶ直線と物体との交点を計算し、影となるか否かの判定を行う方法に比べ、高速化が実現できる(表 2.1参照)。

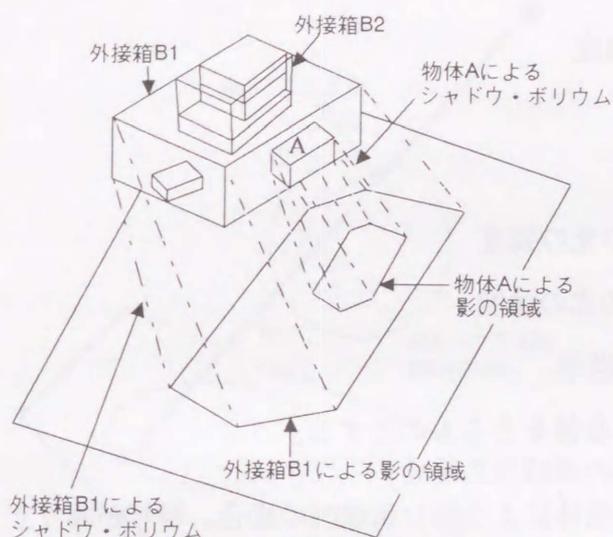


図 2.6: 外接箱および物体に対するシャドウ・ボリューム

2.4.2 透明物体による影の処理

透明物体によって落とされた影と、不透明物体によって落とされた影は、影の濃さが異なる。また、透明物体によって落とされた影は、同一物体による影であっても濃淡の違う部分が生じる。そこで、提案手法では以下の近似手法により、透明物体の落とす影の処理を行い、透明感を表現する。

有向視線と物体との交点における光の強度は、文献 [4] のモデルを基本として求めるが、本論文では、次式のように、透明物体による影を表示するために光源からの光のエネルギー透過率を考慮する。

$$I = I_a + k_d \sum_{j=1}^m (\mathbf{L}_j \cdot \mathbf{N}) t_{pj} \cdot I_j + k_s S + k_t T \quad (2.1)$$

I : 物体表面からの光の強度

I_a : 環境光に対する光の強度

k_d : 拡散反射係数

m : 光源数

\mathbf{L}_j : 光源 j の方向の単位ベクトル

\mathbf{N} : 面の単位法線ベクトル

I_j : 光源 j の光の強度

k_s : 反射係数

k_t : 透過係数

S : 反射方向からの光の強度

T : 透過方向からの光の強度

t_{pj} : エネルギー透過率

ここで、 t_{pj} は次のような値をとるものとする。

$$t_{pj} = 1 \quad (\text{影の領域外の場合})$$

$$0 \leq t_{pj} < 1 \quad (\text{透明体による影の領域内の場合。等号が成り立つのは、光源からの光が全反射する場合})$$

$$t_{pj} = 0 \quad (\text{不透明物体による影の領域内の場合})$$

ここで、光源と計算点の間に複数 (n) 個の透明物体が存在する場合、 t_{pj} は次式により得られる。

$$t_{pj} = \prod_{k=1}^n t_{pjk} \quad (2.2)$$

具体的には次のようにして求める。

図 2.7 に示すように、光線が物体表面から入るときと出るときの反射率をそれぞれ r_a, r_b 、また、透明物体中を光線が通過する際の透明物体の光の吸収係数が q 、通過距離が d であるとする。点 P における光源 J による直接光の透過率 t_{pj} は

$$t_{pj} = (1 - r_a)(1 - r_b)e^{-qd} \quad (2.3)$$

となる。なお、点 a もしくは点 b において入射角が臨界角より大きい場合は、 $r_a = 1$ もしくは

$r_b = 1$ となり点 P に光源 J の直接光は届かない。すなわち、 $t_{pj} = 0$ となる。また、不透明体による影の場合は $t_{pj} = 0$ であり、影の領域外の場合は、 $t_{pj} = 1$ である。こうして求めた t_{pj} を式 (2.1) に代入する。以上の処理により、近似的ではあるが透明感のある影の表示が可能となった。なお、有向視線の追跡には、光線の反射率、透過率を考慮し、透明物体を通過する際の光の吸収率を考慮した全体の光線の減衰が、あるしきい値以下になるか、もしくは、光線追跡木の深さが5になるまで行う。このようにして各交点で求められた輝度と反射率、透過率、吸収率を考慮してサンプル点における輝度値を決定する。

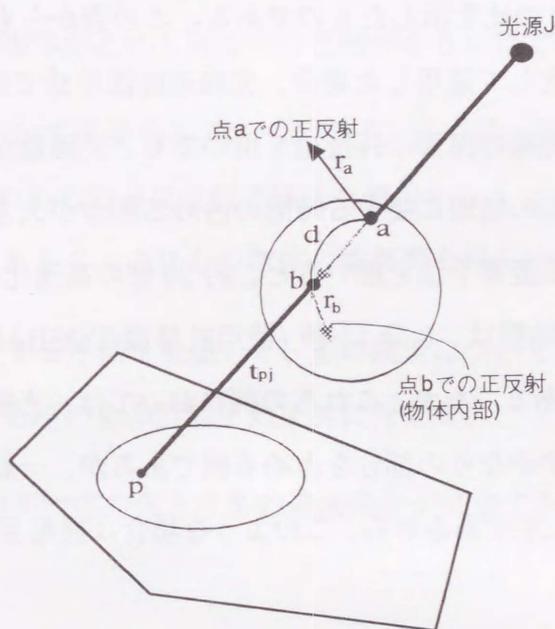


図 2.7: 透明物体による影

2.5 適用例および評価

提案手法に用いた物体の表示例を図 2.8(a), (b), (c), (d) に示す。

(a) は 10 面体のガラス台上に円柱状のガラス（屈折率、 $n = 1.52$ ）を配置した例であり、この二つの物体の部分に光線追跡法を適用した。図中、円柱の影で色の濃い部分と薄い部分があるが、濃い部分は光源の入射角が臨界角を越えている領域である。

(b) は透明な時計およびインク壺と、不透明な本と鉛筆を表示したものである。このうち光

線追跡法を適用するものは時計およびインク壺と鉛筆であり、インク壺は、緑の吸収率の大きい色付き透明物体である。鉛筆に光線追跡法を用いたのは、完全な曲面を表示するためである。なお、光源は点光源を2箇所配置している。

(c) は12個の物体から構成された寒暖計、その他の物体を表示したものである。

(d) は局所光線追跡法と外接箱の有効性を確かめるために用いた例で、2光源の場合を示す。なお、この画像は完全鏡面反射の球と16個の角柱を1群とした4群を表示したものである。表2.1は、IIの光線追跡法とスキャンライン法を組み合わせる外接箱を用いない場合の処理時間を1とし、それと各々の手法との比を示したものである。この表からも判るように、スキャンライン法に光線追跡法を局所化して適用した場合、光線追跡法単独で処理する場合の約2.5倍の高速化が実現できる。有向視線の探索に外接箱を用いても、光源数が増加するに従ってその効果が落ちている。これは、影の処理に要する時間の占める割合が大きいためと考えられる。影の処理にも外接箱を利用する提案手法を用いると、約20倍の高速化が実現する。表2.1ケースIV、光源数2の場合の計算時間は、8分15秒(使用計算機:TOSBAC データシステム 600/80 (8MIPS, メモリ 1.2MB))である。なお、これらの例においては、光線追跡法の適用を必要とする透明物体および反射物体がかなりの部分を占める例であるが、一般には、スキャンライン法で処理可能な不透明物体が大半であるから、このような場合は提案手法の有効性が一層大きい。

表 2.1: 計算時間の比較

	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>
光源数	光線追跡法のみに(a)	(a)+スキャンライン法による局所化(b)	(a) + (b)+有向視線の探索に外接箱を使用(c)	(a) + (b) + (c)+影の探索にも外接箱を使用
1	2.50	1.0	0.65	0.18
2	2.51	1.0	0.85	0.16
3	2.36	1.0	0.89	0.12

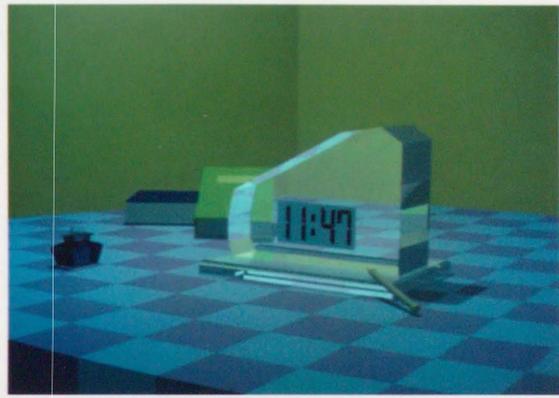
2.6 結言

本章では、スキャンライン法と光線追跡法のそれぞれの長所を組み合わせることにより、正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を考慮する必要のある物体を含む画像の表示を効率よく行う手法を示した。本手法の利点は次のとおりである。

- (1) あらかじめスキャンライン法によって可視面の抽出を行うので、光線追跡法を適用して輝度計算を行う区間が小さくなり、処理時間の節約が図れる。なお、提案手法の効果は、光線追跡法を適用する物体が占める画面中の面積が小さいほど顕著である。
- (2) 物体を多角形の集合として表現するスキャンライン法では、物体の輪郭が滑らかでなくなる欠点があるが、これらの物体に光線追跡法を適用することにより、スキャンライン法の利点を余り損なうことなく、これらの物体の輪郭線を滑らかに表示できる。
- (3) 物体の外接箱を階層化する手法を拡張して、影の探索についても階層的に処理を行うので、光線追跡法を適用する際の影の計算を効果的に行える。
- (4) 近似的ではあるが、透明物体の落とす影の濃淡表示が可能である。



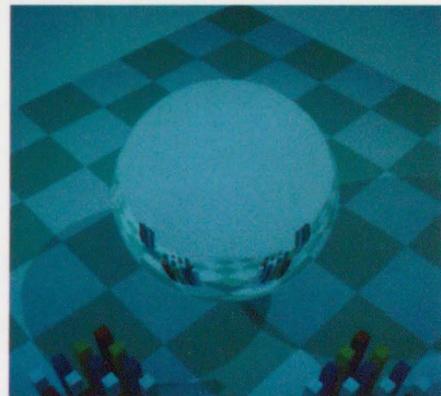
(a)



(b)



(c)



(d)

图 2.8: 适用例

第 3 章

水上および水中照明シミュレーション

本章では、水面の表示に関する二つの問題、水面の形状および水の色彩表現のうちの後者を取り扱う。水中での光の散乱・吸収、水上および水中における相互反射、水底の形状、水面および水中に投下される物体の影の影響を考慮した写実的な水面の色彩表現方法を提案する。提案手法は、太陽直射光および天空光からなる自然昼光と、人工光源として配光・スペクトル特性を持つ点光源に対して適用できる。

3.1 概説

景観評価用画像生成の際、水面は写実的な表示に欠かすことができない要素である。また、水面を取り入れた建築物の設計が盛んになり、水面を含む屋内環境の照明シミュレーション手法が不可欠になってきている。本章で提案する手法は、太陽直射光・天空光の自然昼光、水中・水上の点光源に照射された種々の水質の水の色をリアルに表現することにより、景観および照明効果の予測手段を提供することを目的とするものであり、以下の現象を考慮している。

(a) 太陽直射光・天空光の自然昼光、および CG で一般に用いられている一様な配光で白色の点光源ではなく、配光、スペクトルを考慮した水中・水上の点光源による物体表面における鏡面反射および完全拡散反射面の相互反射効果

(b) 水中・水上光源の水面における反射・屈折効果

(c) 水中における光の散乱・吸収を含む水の混濁度の影響

(d) 水面および水中に投下される影の影響

自然昼光下における水面の照明問題については、水辺を含む環境の景観画像の生成例を示し、人工光源に照射された水面の照明問題については、水面を含む環境について、実際のプールの照明例と提案手法の比較を行い、本章の手法の有用性を示す。

3.1.1 水面を含む環境の照明シミュレーションに関する研究概況

水面を含む環境の光学シミュレーション手法としては、これまで、自然昼光を光源とし、波により生ずる火線の表示法 [35, 36, 56] が開発されている。また、リモートセンシングの分野では、自然昼光により海中で生じる散乱光の計算方法として準一次散乱 (QSS(Quasi Single Scattering)) モデル [64, 65] が提案されている。ところが、この手法は、海洋のような遮蔽物のない環境での適用を前提としているため、水上・水中の物体による遮蔽の影響が考慮できない。さらに、太陽光線の入射方向が天頂方向に限定されている。水辺付近の景観の光学シミュレーションに利用するためには、これらの問題を解決する必要がある。

屋内における照明問題については、人工光源による水面を含む環境の照明シミュレーション手法の提案がこれまでにない。すなわち、水中での光の諸現象を考慮した水上もしくは水中に配置された人工光源の照明シミュレーション手法が開発が望まれている。

3.1.2 提案手法の概略

本章で提案する手法は、自然昼光、人工光源により照射された水面を含む屋内・屋外のシミュレーションを実現するものである。前述のように、これまでに開発された屋外における水面の表示に関する研究 [23, 35, 36, 56] は、水面の映り込みや波による集光効果の表現に注目していた。提案手法は、自然昼光に関しては、QSSモデルを改良し、太陽の入射方向と水面・水中に落ちる影の影響を両方とも考慮可能な水中の散乱光を考慮した水面の表示を実現する。さらに、

従来、取り扱われていなかった水面を含む屋内の照明問題に対処するため、水上もしくは水中に設置した人工光源により照射された水面の表示を実現する。

これらの実現のため、以下の手法を新たに開発した。

- 太陽光線により水中で生ずる散乱光を影の影響を考慮して高速に計算する手法。
- 天空光により水中で生ずる散乱光を計算するための簡易モデル。
- 点光源からの光線が、水面で反射もしくは屈折後、計算点(視線上の点)に到達するまでの経路算出方法。
- 光源の配光, スペクトル特性, 物体表面間の相互反射、水中の微粒子による光の散乱・吸収効果の表現手法。

これにより、自然昼光および水中・水上に配置した人工光源に照射された環境を、水面での映り込み、水底での反射、水中での散乱光をそれぞれ、影、天空光、および相互反射の影響を考慮して表示することができる。

3.2 基本的な考え方

本章で提案する手法を適用する際の仮定と前提条件、および処理の基本構成について述べる。

3.2.1 仮定と前提条件

水面の写実的な表示手法を開発するに当って、本論文では以下の条件を仮定する。

- (1) 人工光源は、CG で一般に用いられている一様な配光で白色の点光源ではなく、スペクトルおよび配光特性をもつ点光源とし、視点は水面より上方にあるものとする。

- (2) 水中へ入射する天空光を考えると、水面からみた天空輝度分布は水面上で一様とし、水面の大きさは無限大と仮定する。すなわち、この場合、天空は遮へいされず、かつ、天空光はすべて水中へ入射する。
- (3) 視線からの光線を探索するときには、水面の形状、映り込み、任意形状の水底の表示を可能にする。しかし、光源からの光線探索には、計算コストの観点から水面は水平と仮定する。すなわち、水中の火線現象(波のレンズ効果によって集光され、水中・水底に非常に明るい部分が生じる現象)を無視する。
- (4) 自然水はアルベド(=散乱係数/消散係数)が小さいことを勘案して([7]参照)、水中での光の散乱は一次散乱のみ考慮する。
- (5) 水中の漂遊粒子の濃度分布は一様とする。
- (6) 水中における光の散乱は、光の波長に比べて十分小さい微小粒子によって生じるレーリー散乱と、比較的大きい粒子によるミー散乱に分離して考えられる。しかし、入手できるデータの関係上、散乱特性を表す体積散乱関数(位相関数)は、レーリー散乱とミー散乱を分離していない計測データ([59]参照)を用いる。
- (7) 図 3.1に示す経路をとる光線を、水中および水上の物体表面へ到達する1次光線と定義する。すなわち、水面は媒体の境界部分であるが、反射光は完全鏡面反射であるから、直接光として取り扱う。ここで、天空光については、計算を簡単にするため、水面での反射成分は無視し、直射成分のみとする。したがって、被照射面の位置によって、以下の二つの場合に分けて定義する。

- 被照射面上の点が水上物体の場合

$$(1 \text{ 次光線}) = (\text{水上光源からの直達光 } L_{ad} + \text{水面で反射後の到達光 } L_{ar}) \\ + (\text{水中光源から水面透過後の到達光 } L_{wt})$$

- 被照射面上の点が水中物体の場合

$$(1 \text{ 次光線}) = (\text{水中光源からの直達光 } L_{wd} + \text{水面で反射後の到達光 } L_{wr}) \\ + (\text{水上光源から水面透過後の到達光線 } L_{at})$$

ただし、ある光源から計算点までの経路に物体が存在する場合は、その光線は遮蔽され、その光源からの1次光線は零となる。

- (8) 直射光に対する物体表面の反射は、拡散反射と鏡面反射を考慮する。ただし、水上の物体表面間および水中の物体表面間の相互反射を個別に考慮する。すなわち、異なる媒体に存在する物体の表面間の相互反射は無視する。

相互反射の計算は、物体表面上の拡散反射成分のみを対象とし、鏡面反射成分は無視する。一方、水中の物体表面間での相互反射を計算する際には、計算コストを勘案して、水中の微粒子の散乱・吸収による光の減衰のみ考慮する。

- (9) 水中での光の散乱・吸収の計算には、1次光線、相互反射光ともに光のスペクトルを考慮する。

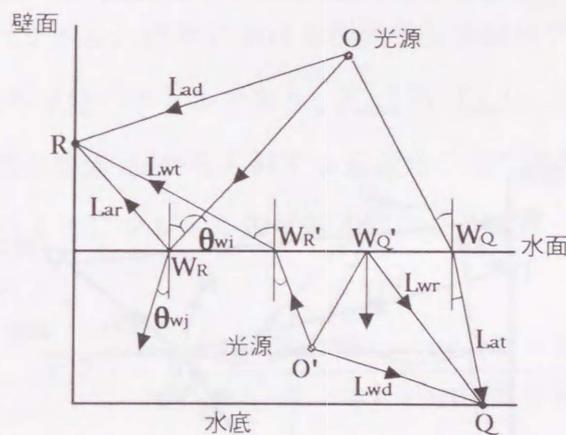


図 3.1: 一次光線の経路

3.2.2 処理の基本構成

本章で提案する手法は、次の3つのステップで構成され、各光源について以下の処理を行う。

- (1) 前処理：影の処理を高速化するため、水中および水上物体は分離して記憶する。水面を長方形メッシュに分割し、メッシュに影を落とす可能性のある物体を記憶する。光源とこれらの物体により構成されるシャドウ・ボリュームを生成する。

- (2) 可視領域とは無関係に行う計算：1次光線による物体表面の照度、およびそれにより生じる水上・水中それぞれの物体表面間の拡散反射成分による相互反射光を計算する。
- (3) 水面のレンダリング：スキャンライン上の計算点 (R) が水上物体面の場合 (図 3.2 経路 V_R) は、1次光線により生じる鏡面反射光を求める。計算点 (P) が水面の場合 (図 3.2 経路 V_P) は、その点の波の形状を考慮した光線追跡を行い、以下の手順で水面から視点へ向かう光線を計算する (3.4 節で詳述)。図 3.2 を例にとると、
- 水面上の点 P での正反射・屈折方向および反射率の計算。
 - 正反射方向にある水上の物体表面の点 T から点 P に向かう鏡面反射光、および相互反射光も含む拡散反射光の計算。
 - 屈折方向と水中の物体表面の交点 Q から点 P へ向かう鏡面反射光および相互反射光も含む拡散反射光の計算と、それらが点 P に到達するまでの減衰率の計算。
 - PQ 間の微粒子により生じる1次光線による散乱光のうち、点 P に到達する光線の計算。

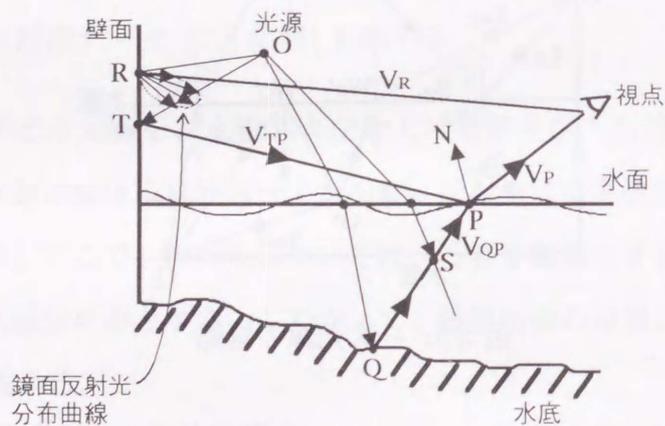


図 3.2: 視点に入射する光線の経路

3.3 1次光線と相互反射の計算

水上・水中における被照射面上の計算点における照度計算を行う際、直射光として扱う光源からの1次光線の経路を自然日光、人工光源それぞれについて示す。そして、水面での正反射

成分を考慮した相互反射光の計算方法について述べる。

3.3.1 自然昼光による1次光線の計算

(1) 水上物体面への1次光線

自然昼光として、太陽直射光と天空光を考える(図3.3参照)。点Rにおける1次光線による照度を計算する際、3.2.1(7)で述べたように水面で反射した天空光は無視し、水面は水平と仮定しているから、大気による光の減衰を無視すると、直射成分による照度 $E_{sd}(\lambda)$ と水面からの反射光による照度 $E_{sr}(\lambda)$ は、次式により求めることができる。

$$E_{sd}(\lambda) = (\mathbf{V}_{sun} \cdot \mathbf{N}_R) I_{sun}(\lambda) + \int_{2\pi} (\mathbf{V}_{R\omega} \cdot \mathbf{N}_R) I_{sky}(\omega, \lambda) d\omega \quad (3.1)$$

$$E_{sr}(\lambda) = (\mathbf{V}'_{sun} \cdot \mathbf{N}_R) \alpha_{sun} I_{sun}(\lambda) \quad (3.2)$$

ここで、 \mathbf{V}_{sun} , \mathbf{V}'_{sun} , \mathbf{N}_R , $\mathbf{V}_{R\omega}$ はそれぞれ、太陽光線の入射方向の単位ベクトル、水面で反射後の太陽光線の方向の単位ベクトル、点Rにおける面の単位法線ベクトル、および点Rから可視の天空の微小要素 $d\omega$ 方向の単位ベクトルであり、 $I_{sun}(\lambda)$, $I_{sky}(\omega, \lambda)$ はそれぞれ、波長 λ の太陽光線の光の強度、天空の微小要素 $d\omega$ から入射する天空光の光の強度である。 α_{sun} は点 W_R における水の反射率で、周知のようにフレネルの反射法則により、式(3.3)の θ_i, θ_j に θ_{WRi} , θ_{WRj} (図3.3参照) を代入して得られる。

$$\alpha_{sun}(\theta_i, \theta_j) = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2(\theta_i - \theta_j)}{\tan^2(\theta_i + \theta_j)} + \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_j)}{\sin^2(\theta_i + \theta_j)} \right) \quad (3.3)$$

(2) 水中物体面への1次光線

水中を光が伝播する際の光の散乱・吸収に起因する光の減衰は、消散([60]参照)と呼ばれ、散乱と吸収の和で表される。消散は、波長により大きく異なり、距離のべき乗に比例する。

$$attenuation(\lambda) = e^{-c(\lambda)l} \quad (3.4)$$

ここで、 $c(\lambda)$ は、波長 λ のときの消散係数であり、水の混濁度により大幅に変化する([59]参照)。また、輝度 L_1 の光線が屈折率 n_1 の媒体 M_1 から屈折率 n_2 の媒体 M_2 へ進むとき、境界での反射率を α とすると、境界部を通過直後の光線の輝度 $L_2(\lambda)$ は、

$$L_2(\lambda) = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 (1 - \alpha) L_1(\lambda) \quad (3.5)$$

ここで、 $\alpha(\theta_\omega)$ は ω 方向の天空の微小要素からの光線が水面に入射する際の反射率、 $I_{sky}(\omega, \lambda)$ は ω 方向の天空の微小要素からの光線の強度である。

なお、水中へ入射する天空光強度は水面のどこでも等しく、かつ、水上・水中での遮蔽を無視するから、 E_{skyt} は計算点の水深の関数となる。したがって、水深をパラメータとして E_{skyt} をテーブル化しておけば、実際の計算の際には、線形補間により該当する水深の E_{skyt} を得ることができる。

3.3.2 人工光源による1次光線の計算

(1) 水上光源

(a) 光源から水上物体面への1次光線

点光源 O (問題を簡単にするため配光が球状と仮定) について考える (図 3.1 参照)。光源 O から点 R への1次光線による照度は、水面は水平であると仮定しているから、大気による光の減衰を無視すると、光源からの直射光による照度 $E_{ad}(\lambda)$ と水面からの反射光による照度 $E_{ar}(\lambda)$ からなる。

$$E_{ad}(\lambda) = \frac{1}{r_{OR}^2} (\mathbf{V}_{OR} \cdot \mathbf{N}_R) I_o(\lambda) \quad (3.9)$$

$$E_{ar}(\lambda) = \frac{1}{(r_{OW_R} + r_{WR_R})^2} (\mathbf{V}_{WR_R} \cdot \mathbf{N}_R) \alpha_{WR} I_o(\lambda) \quad (3.10)$$

ここで、 $\mathbf{V}_{OR}, \mathbf{N}_R, \mathbf{V}_{WR_R}$ はそれぞれ点 R から光源 O 方向の単位ベクトル、点 R における面の単位法線ベクトル、および点 R から点 W_R 方向の単位ベクトルであり、 $r_{OR}, r_{OW_R}, r_{WR_R}$ はそれぞれ $O - R$ 間、 $O - W_R$ 間および $W_R - R$ 間の距離である。 I_o は光源の光の強度である。

(b) 光源から水中物体面への1次光線

自然日光の場合と同様に、空気と水の屈折率の違い、水中での光の減衰を考慮して、光源 O から点 Q へ到達する光による照度は、次式から求められる。

$$E_{at}(\lambda) = \frac{(1 - \alpha_{W_Q}) n^2 \sec \theta_{W_Q} (\mathbf{V}_{W_Q} \cdot \mathbf{N}_Q) \cdot e^{-c(\lambda) r_{W_Q Q}} I_o(\lambda)}{(r_{OW_Q} + r_{W_Q Q})^2} \quad (3.11)$$

ここで、 $\mathbf{V}_{W_Q}, \mathbf{N}_Q$ はそれぞれ点 Q から点 W_Q 方向の単位ベクトル、および点 Q における面の

単位法線ベクトルであり、 $(1 - \alpha_{W_Q})$ は点 W_Q での透過率、 r_{OW_Q}, r_{W_QQ} は $O - W_Q, W_Q - Q$ 間の距離、 $\sec\theta_{W_Qj}$ は水中へ光が入射する際の集光状態を示す。

(2) 水中光源

(a) 水上物体面への1次光線

図 3.1 中の点 R に入射する光線の照度について考える。 R へ到達する光線は光源 O' から水面上の点 W'_R を通って来る光線 L_{wt} だけであり、それによる照度 $E_{wt}(\lambda)$ は、

$$E_{wt}(\lambda) = \frac{(1 - \alpha_{W'_R}) \cos\theta_{W'_Ri}}{(r_{O'W'_R} + r_{W'_RR})^2 n^2} (\mathbf{V}_{W'_RR} \cdot \mathbf{N}_R) e^{-c(\lambda)r_{O'W'_R}} I_{O'}(\lambda) \quad (3.12)$$

ここで、 $\mathbf{V}_{W'_RR}$ は点 R から点 W'_R 方向の単位ベクトル、 $(1 - \alpha_{W'_R})$ は点 W'_R での光の透過率を示し、式 (3.3) に $\theta_{W'_Ri}$ と $\theta_{W'_Rj}$ を代入して求めることができる。 $r_{O'W'_R}$ は $O' - W'_R$ 間の距離、 $\cos\theta_{W'_Ri}$ は光が水中から水上へ出る際の拡散の様子を示す。

(b) 水中物体面への1次光線

図 3.1 中の Q 点に入射する光線による照度は、(1)(a) の光源から点 R に入射する光線の照度の場合とほぼ同様にして求められる。異なる点は、 O' から Q へ光が到達する経路すべてについて水中での減衰を考慮する点である。したがって、点 Q での照度 $E_{wd}(\lambda), E_{wr}(\lambda)$ は、次式から得られる。

$$E_{wd}(\lambda) = \frac{(\mathbf{V}_{O'Q} \cdot \mathbf{N}_Q) e^{-c(\lambda)r_{O'Q}} I_{O'}(\lambda)}{r_{O'Q}^2} \quad (3.13)$$

$$E_{wr}(\lambda) = \frac{\alpha_{W'_Q} (\mathbf{V}_{W'_QQ} \cdot \mathbf{N}_Q) e^{-c(\lambda)(r_{O'W'_Q} + r_{W'_QQ})} I_{O'}(\lambda)}{(r_{O'W'_Q} + r_{W'_QQ})^2} \quad (3.14)$$

ここで、 $\mathbf{V}_{O'Q}, \mathbf{V}_{W'_QQ}$ はそれぞれ点 Q から光源 O' 方向および点 Q から点 W'_Q 方向の単位ベクトル、 $r_{O'Q}, r_{O'W'_Q}, r_{W'_QQ}$ はそれぞれ $O' - Q$ 間、 $O' - W'_Q$ 間、および $W'_Q - Q$ 間の距離であり、 $\alpha_{W'_Q}$ は点 W'_Q における水の反射率で、式 (3.3) の θ_i, θ_j に $\theta_{W'_Qi}, \theta_{W'_Qj}$ を代入して得られる。しかし、水の屈折率が空気のそれより大きいため、点 O' からの水面への入射角 $\theta_{W'_Qi}$ が臨界角 θ_c を越える場合は、入射光線は全反射して水上には出ない。すなわち $\alpha_{W'_Q} = 1$ となる点に注意を要する。

(3) 1次光線の通過経路の計算

点光源からの光線は、水面への入射角が場所により異なるため、光源から水面で反射・屈折し

た光線が物体表面へ到る経路長を、計算点毎に求める必要がある。ここで、1次光線の水面上での反射・屈折方向の計算は、水面が水平であると仮定しているから、終点を指定した逆方向光線追跡を用いることにより、比較的少ない計算量で、計算点へ到達する経路と入射光ベクトルを求めることができる。光線の通過経路のうち、図3.1の点 W_R および W'_Q は水面を水平と仮定しているから容易に求まる。図3.1の W_Q および W'_R は以下の方法により求められる。図3.4において、点 O は光源の位置、点 Q は水中物体上の点であり、 O_w, Q_w はそれぞれ点 O 、点 Q から水面へ下ろした垂線の足、 W_Q は点 O から点 Q へ到達する光線の水面における通過点、 W'_Q は直線 OQ と水面との交点である。ここで、スネルの法則から $\sin\theta_i = n \times \sin\theta_j$ が成り立つ。したがって、この式は次のように変形できる。

$$\frac{x}{\sqrt{x^2 + h_o^2}} = \frac{n(r-x)}{\sqrt{(r-x)^2 + h_q^2}} \quad (3.15)$$

ここで、 r, x, h_o, h_q はそれぞれ、 O_w と W_Q との距離、 O と Q_w との距離、 O と O_w の距離、および Q と Q_w の距離である。 x について展開すると、次式が得られる。

$$(n^2 - 1)x^4 - 2(n^2 - 1)rx^3 + \{n^2h_o^2 - h_q^2 + (n^2 - 1)r^2\}x^2 - 2rh_o^2n^2x + n^2r^2h_o^2 = 0 \quad (3.16)$$

式(3.16)の x は距離 $O_wW'_Q$ および距離 O_wQ_w を初期値として線形補間を繰り返すことにより、1,2回の繰返し計算により収束する。したがって、 O_wQ_w 方向の単位ベクトルを \mathbf{u} とすると、点 W_Q は次式により求まる。

$$\mathbf{W}_Q = \mathbf{O}_w + x\mathbf{u} \quad (3.17)$$

3.3.3 水上および水中における相互反射計算

相互反射光の計算の際、1次光線として3.3.1, 3.3.2で述べた入射光をあらかじめ計算しておく。3.2.1(8)で述べたように、相互反射は拡散反射成分に対してのみ、水上物体表面間および水中物体表面間に対して個別に計算する。相互反射光の計算を行うため、あらかじめすべての面を微小なパッチに分割しておく。なお、水中物体表面間の相互反射については、水中の微粒子による光の減衰を考慮する。

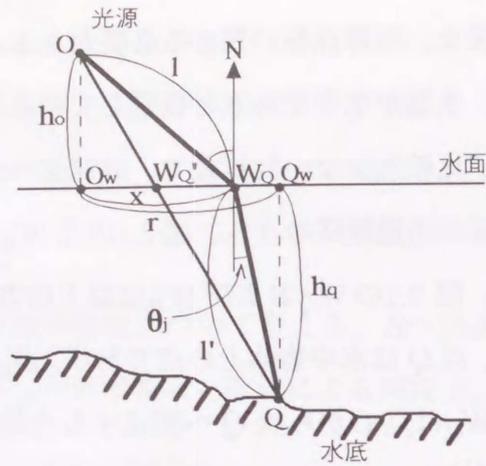


図 3.4: 点光源からの光線の水面上での交点の計算

水上物体上の2つの物体上のパッチ i, j 間の経路 (a_d) (図 3.5参照) での相互反射光計算に用いる固有入射光束係数 (Form factor) $F_{ij}(\lambda)$ は、よく知られているように次式で表される ([13]参照)。

$$F_{ij}(\lambda) = \frac{1}{\pi A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{r_{ij}^2} dA_i dA_j \quad (3.18)$$

また、水面で反射した光が水上物体表面間で作用する相互反射光は、空気中の鏡による反射を考慮した相互反射計算手法 [55] の考え方を活用できる。すなわち、水面について対称な位置に仮想のパッチを発生し、これを利用して計算する。図 3.5に示すように、パッチ a とパッチ b 間の水面の反射による相互反射光は、パッチ b の水面に対して対称なパッチ b' を考え、 $a-b'$ 間の媒体は空気と仮定して計算する。この時、水面における光線の反射率 $\alpha(\theta'_{ai})$ を考慮する。したがって、パッチ a, b 間の経路 (a'_i) での相互反射光計算に用いるパッチ b のパッチ a に対する固有入射光束係数は、次式により求める。

$$F_{b'a}(\lambda) = \frac{1}{\pi A_a} \int_{A_a} \int_{A_b} \frac{\cos \theta'_a \cos \theta'_b}{r'^2_{b'a}} \alpha(\theta'_{ai}) dA_a dA_b \quad (3.19)$$

水中における物体表面間の相互反射も、水上の物体間の相互反射光と同様の方法により計算する。ただし、水中における光の減衰 $e^{-c(\lambda)r_{kl}}$ を考慮する点が異なる。すなわち、図 3.5のパッチ k, l 間の経路 (w_d) での相互反射光計算の際に用いるパッチ k のパッチ l に対する固有入射光束係数は、次式により求める。

$$F_{kl}(\lambda) = \frac{1}{\pi A_l} \int_{A_l} \int_{A_k} \frac{\cos \theta_k \cos \theta_l}{r_{kl}^2} e^{-c(\lambda)r_{kl}} dA_l dA_k \quad (3.20)$$

ここで、 I_r と I_w はそれぞれ水面上で正反射した光線と水中からの透過光線である。 α_P は点 P における反射率であり、式(3.3)で与えられる。 θ_i は点 P における水面の法線ベクトル N と点 P から視点へ向かう光線とのなす角、 θ_j は点 P で屈折した光線と N の逆方向ベクトルとのなす角であり、共にスネルの法則に従う。また、 $I_w(\lambda)$ は水中の物体上の点 Q における反射光 $I_Q(\lambda)$ が点 P に到達したときの強度 $I'_Q(\lambda)$ と、 PQ 間の微粒子を照射する光により P の方向に散乱され点 P に到達した散乱光 $I_{PQ}(\lambda)$ からなる。すなわち、

$$I_w(\lambda) = I'_Q(\lambda) + I_{PQ}(\lambda) \quad (3.22)$$

3.4.2 視点に到達する光線の成分毎の計算

視点に到達する光線の成分、すなわち、水面からの反射光、水中での散乱光、および水中の物体表面の反射光の計算方法についてそれぞれ説明する。

(1) 水面からの反射光

水面上の点 P に、視線に対して正反射方向(図3.6中では点 R)から到達する光線の強度 $I_r(\lambda)$ は、水上物体の表面での拡散反射光と鏡面反射光の和で与えられる。すなわち、相互反射の計算結果から得られた拡散反射光を $I_{ri}(\lambda)$ とし、3.3.1, 3.3.2の方法により1次光線の経路と強度を求め、その鏡面反射成分を $I_{rs}(\lambda)$ とすると、 $I_r(\lambda)$ は次式で与えられる。

$$I_r(\lambda) = I_{ri}(\lambda, R) + I_{rs}(\lambda, R) \quad (3.23)$$

なお、大気中の微粒子による光の散乱・吸収を考慮する場合は文献[8]の方法を適用すればよい。

(2) 水中での散乱光

図3.6中の点 S に存在する微粒子による光の散乱は、微粒子への入射光と散乱光のなす角 θ と波長 λ の関数である。したがって、点 S を含む微小体積 dv での照度 $E_e(\lambda)$ の入射光に対する θ 方向への単位立体角あたりの散乱光強度 $dI_s(\lambda)$ は、

$$dI_s(\lambda) = \beta(\theta, \lambda)E_e(\lambda, S)dv \quad (3.24)$$

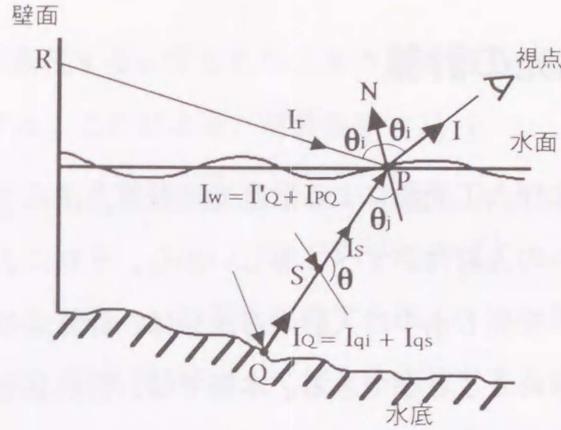


図 3.6: 水面での反射/屈折後の視線の経路

で表せる。ここで、 $\beta(\theta, \lambda)$ は散乱の分布を表す位相関数にその基準となる値（位相角が 90 度の時の散乱の絶対値（単位: m^{-1} ））を乗じた散乱関数（付録 A 参照）である。点光源の場合、 E_e の計算には、水上光源の場合は式 (3.11) を適用し、水中光源の場合は式 (3.13), (3.14) を適用する。点 S で発生した散乱光が点 P に到達する光線の強度は、次式で与えられる。

$$I_S(\lambda) = \beta(\theta, \lambda) E_e(\lambda, S) e^{-c(\lambda)r_{PS}} \quad (3.25)$$

ここで、 r_{PS} は点 S から水面 P までの距離である。したがって、水中の区間 PQ で発生する散乱光が点 P に到達する光の強度 $I_{PQ}(\lambda)$ は、次式で表される。

$$I_{PQ}(\lambda) = \int_{PQ} \beta(\theta, \lambda) E_e(\lambda, r) e^{-c(\lambda)r} dr \quad (3.26)$$

なお、 I_{PQ} の計算方法については、次節で詳細に述べる。

(3) 水中の物体表面の反射光

水中の物体上の点 Q からの反射光 I_Q と、水面へ到達する光 I'_Q の関係について考える。点 Q からの相互反射を考慮した拡散反射光の強度を $I_{qi}(\lambda)$ 、1 次光線による点 Q における鏡面反射成分を $I_{qs}(\lambda)$ とすると、 $I'_Q(\lambda)$ は次式により与えられる。

$$I'_Q(\lambda) = (I_{qi}(\lambda, Q) + I_{qs}(\lambda, Q)) e^{-c(\lambda)r_Q} \quad (3.27)$$

したがって、式 (3.26), (3.27) から $I_w(\lambda)$ は次式で与えられる。

$$I_w(\lambda) = (I_{qi}(\lambda, Q) + I_{qs}(\lambda, Q)) e^{-c(\lambda)r_Q} + \int_{PQ} \beta(\theta, \lambda) E_e(\lambda, r) e^{-c(\lambda)r} dr \quad (3.28)$$

3.5 水中での散乱光の計算

水中における自然昼光および人工光源による散乱光の計算方法について述べる。自然昼光のうち、太陽直射光は、水中への入射角がすべて等しいから、それによる散乱光は解析的に求めることができる。同様に、天空光も水中に入射する成分は、計算点の水深の関数として表すことができるため、解析的に求めることができる。本節では、自然昼光の水中での散乱光の計算方法に関する従来の研究、およびそれを CG に応用する際の問題点について述べ、その解決手法を示す。

人工光源による散乱光は、光源が配光分布を持ち、さらにエネルギーが距離の自乗に反比例するため、解析的には求められない。このため、サンプル点を水中の経路上に発生し、数値積分により散乱光を求める必要がある。そこで本節では、効率良くサンプル点を発生し、計算時間を削減する方法について述べる。

3.5.1 自然昼光による水中での散乱光の計算

これまでに行われてきた自然昼光による水中の散乱光の計算方法とその問題点について述べ、本研究で採用した計算方法を説明する。

(1) 一次散乱モデル

(a) Jerlov の一次散乱モデル

Jerlov は水中での光の散乱を一次散乱のみとし、かつ散乱光のソース光源を直射太陽光のみとして、水中の光の伝播を、直接積分法から求める方法 (集光放射理論) ([59] 参照) を提案した (付録 B 参照)。このモデルは簡単であるが、天空光を考慮していない。

(b) 準一次散乱 (QSS) モデル

Gordon と McCluney は準一次散乱 (Quasi-Single-Scattering (QSS)) モデル ([64, 65] 参照) を提案した。彼らは、以下の前提の下で計算を行った。

(i) 水深が無限大であり、水底からの反射光を無視する。

- (ii) 光の多重散乱を無視する。すなわち、水中の微粒子による散乱光のうち、前方散乱の成分を無視する。これにより、消散係数 $c(\lambda)$ を

$$\begin{aligned}c(\lambda) &= a(\lambda) + (1 - F)b(\lambda) \\ &= c(\lambda)(1 - \omega_0 F)\end{aligned}$$

に置き換える。ここで、 ω_0 はアルベドであり、 F は全散乱光に対する前方散乱の割合、 $a(\lambda), b(\lambda), c(\lambda)$ は波長 λ によって決まる定数である。

- (iii) 太陽直射光は入射方向の微小立体角で一定であるとし、水面直下の放射照度 $E_0(\lambda)$ は一定と仮定する。すなわち、遮蔽物体により水面および水中に落ちる影の影響を無視する。

- (iv) 天空輝度分布はすべての方向で一定とする。すなわち、天空輝度分布を無視する。

- (v) 水面の大きさは無限大とする。

上記の仮定の下での、QSS モデルにおける、点 P へ到達する太陽直射光による散乱光の強度の計算方法は付録 C によって示される。

(2) QSS モデルの問題点

水面の色彩のレンダリングに、QSS モデルを用いて散乱光の放射輝度を計算する場合、以下の点が問題となる。

- (i) 水深を無限大と仮定しているため、水深の浅い海岸等へ適用すると誤差が大きい。また、水底の形状と水深の差による水の色の変化を表現することができない。
- (ii) 水面に落ちる影の影響を無視しているから、水の上にある物体、あるいは岸辺近傍の物体により水面に落ちる影の影響を表現できない。
- (iii) 天空輝度分布を考慮していないから、太陽の位置、天候の状態による天空輝度分布の変化を表現できない。

(3) 水中の影の影響を考慮した太陽直射光による散乱光の計算

上述の QSS モデルにおける問題点を解決するため、QSS モデルを改良した以下の特徴を持つ手法を開発した。

- (i) 視点に到達する散乱光を計算する際、水底の形状を考慮する。すなわち、水深の変化の影響を考慮する。
- (ii) 散乱光計算経路中の、水中のシャドウ・ボリュームの領域を考慮して、太陽直射光により照射される区間だけに対して、水中での散乱光を求める。
- (iii) 水中に入射する天空輝度分布を考慮して、天空光による水中での散乱光を計算する。すなわち、太陽の位置と水質および水深をパラメータとする水中の散乱光強度を予め計算し、テーブル化する。水中の天空光による散乱光を求めるとき、このテーブルを利用し、線形補間により該当する水深の散乱光強度を得る。

QSS モデルを改良し、水底の点 Q の深さ z_d を考慮した (すなわち、水底の形状を考慮した) 点 P に到達する散乱光 I_{PQsun} を次式により求める (図 3.7 参照)。

$$I_{PQsun}(\lambda) = \frac{E_0(\lambda) \sec \theta_w \beta(\lambda, \theta)}{n^2} \int_0^{z_d} e^{-c(\lambda)(1-\omega_0(\lambda)F(\lambda))z(\sec \theta_w + \sec \theta_j)} dz, \quad (3.29)$$

ここで、 θ_j は水面上の点 P の法線ベクトルの逆成分と視線が点 P で屈折して水中に入る視線ベクトルとのなす角、 θ_w は天頂の逆方向と入射太陽光線が点 W_Q で屈折した光線ベクトルのなす角である。また、 $E_0(\lambda)$ は水面直下の太陽光の放射照度、 n は水の屈折率、 $\beta(\lambda, \theta)$ は体積散乱関数である。

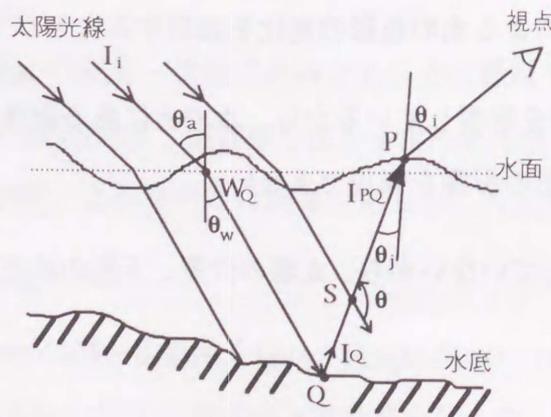


図 3.7: 太陽直射光線による水中の散乱光

本研究では、一次散乱だけを考慮しているから、直射光が照射しない領域の微粒子では散乱光は生じない。したがって、散乱光を計算する際、水面へ落ちる影の影響を考慮することによりリアルな画像を生成できる。図 3.8 の場合、散乱光計算区間 PQ のうち、区間 S_1S_2 は、物体 A により太陽直射光が遮られるため、直射光による散乱光は発生しない。この物体 A による太陽直射光が遮られる領域、すなわち、物体 A のシャドウ・ボリュームは、水面を水平と仮定すると水面に入射後も水面上の影の輪郭線とそれを通る平面により構成される立体で表わすことができる。水中での影の方向は波面の影響を受けるが、その影響は影の境界部においてのみ問題となる。したがって、極めて小さい物体の影の場合を除いて、上記の仮定を置いても、視点が水面の極く近傍にある時以外はその誤差は許容できる範囲であると考えられる。したがって、視点へ到達する散乱光を計算するとき、上記の散乱光を発生する微粒子の存在する区間 (図 3.7 の PQ) に対して水面に影を落とすすべての物体の水面入射後のシャドウ・ボリュームでクリッピング (clipping) を行い、太陽直射光が照射する区間を求める。水中にシャドウ・ボリュームが存在しない場合、式 (3.29) は次式のような簡単な形式で表わされる。

$$I_{PQsun}(\lambda) = A(\lambda) \int_r f(r) dr, \quad (3.30)$$

ここで、 $A(\lambda)$ は式 (3.29) 中の積分符号の前の係数 ($= E_0(\lambda) \sec \theta_w \beta(\lambda, \theta)$) であり、 r は PQ 間の距離 ($z_d \sec \theta_j$) で、 $f(r)$ は PQ 上の点における光の減衰関数 ($= e^{-c(\lambda)(1-\omega_0(\lambda)F(\lambda))r(1+\cos \theta_j \sec \theta_w)}$) である。

水面に落ちる影がある場合は、クリッピング後の照射区間を r_1, r_2, \dots, r_n とすると、水面の影を考慮した点 P へ向かう散乱光の放射輝度 $I'_{PQsun}(\lambda)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} I'_{PQsun}(\lambda) &= A(\lambda) \left(\int_{r_1} f(r) dr + \int_{r_2} f(r) dr + \dots + \int_{r_m} f(r) dr \right), \\ &= A(\lambda) \sum_{m=1}^n \int_{r_m} f(r) dr. \end{aligned} \quad (3.31)$$

(4) 天空光による散乱光の計算

水中の点 S における天空光の 1 次光線による放射輝度は、式 (3.7) により与えられる。したがって、 P に到達する S からの散乱光強度 $I_{Ssky}(\lambda)$ は次式から得ることができる (図 3.9)。

$$I_{Ssky}(\lambda) = e^{-c(\lambda)z \sec \theta_j} \int_{2\pi} \beta(\lambda, \theta) \alpha(\theta_w) I_{sky}(\omega, \lambda) e^{-c(\lambda)z \sec \theta'_w} d\omega, \quad (3.32)$$

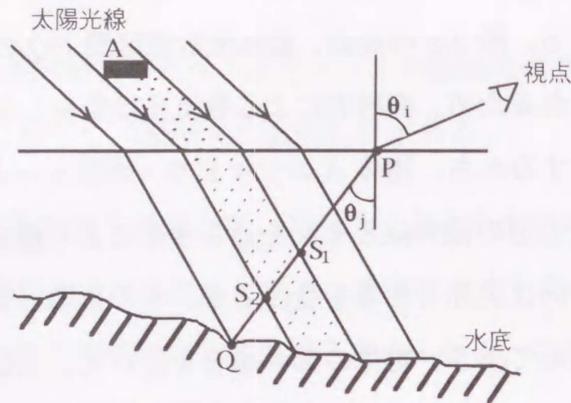


図 3.8: 水中の影の影響の考慮

ここで、 z は点 S の水深、 $\theta_\omega, \theta'_\omega$ はそれぞれ、天空の微小要素 ω 方向からの光線の水面への入射角と水中への屈折角であり、 $I_{sky}(\omega, \lambda)$ は天空の微小要素 ω の放射輝度値である。したがって、 PQ 上で発生した天空光による散乱光のうち、点 P に到達する $I_{PQsky}(\lambda)$ は $I_{Ssky}(\lambda)$ を経路 PQ 上で積分することにより得ることができる。ここで、太陽の位置により、 $I_{sky}(\omega, \lambda)$ が定まり、水質により $c(\lambda)$ が定まり、水底との交点 Q により積分区間が定まる。天空光による水中の散乱光は、影の影響を無視するので、予めこれら3変数をパラメータとして $I_{PQsky}(\lambda)$ を計算してテーブル化する。太陽の位置と水質は、画像を作成する時点で決まるから、天空光による散乱光は計算点の水深が決まると線形補間により求めることができる。

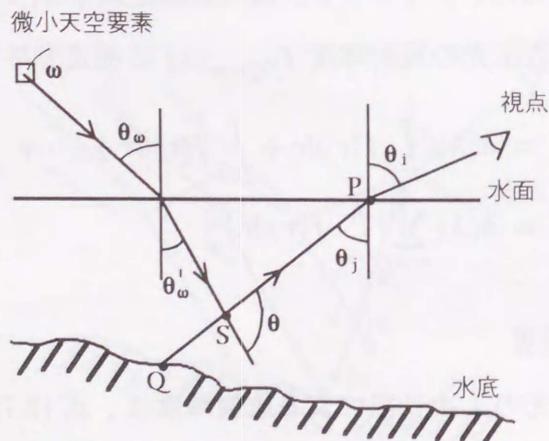


図 3.9: 天空光による水中の散乱光

3.5.2 点光源による水中での散乱光の計算

水中での散乱光は、位相角による散乱強度の差が非常に大きく、また、点光源の場合、光源からの1次光線の強度分布が一様ではない。このため、前節で述べた水底から水面までの散乱光を求める式(3.26)の積分計算では、(i)水中の視線上にサンプル点をアダプティブに発生し、(ii)サンプル点毎に、光源からの光線の通過経路を求め、(iii)1次光線の強度を求め、散乱光を計算し、(iv)数値積分を行う。

この数値積分を計算精度を落とさずに効率よく行うサンプル点発生法について述べる。図3.2および図3.6の計算点 S における点 P 方向への散乱光の強度は、光源から点 S までの光のエネルギーの減衰と、点 S への入射光線の方向ベクトルと視線ベクトルとのなす角 θ により決まる体積散乱関数の値によって大きく左右される。

(1) 水中光源の場合：

光源付近および灯軸方向の散乱光は非常に大きく、また、その変化も激しい。したがって、提案手法では、同一光源であっても経路の異なる入射光線(例えば、図3.1の L_{wr} と L_{wd})による散乱光はそれぞれ独立に計算する。また一般に、3次元空間中では2本の直線(灯軸と水中の視線)が交わることはほとんどない。そこで、灯軸と視線との最短距離の点 S_0 (図3.10参照)を求め、点 S_0 を中心にして、視線上の水面上の点 P および水中物体上の点 Q の方向にサンプル点を発生する。すなわち、

$$\mathbf{S}_{i+1} = \text{Min}\{\text{step_max}, \text{Max}(f(I_{S_i}), \text{step_min})\} \mathbf{u} + \mathbf{S}_i \quad (3.33)$$

ここで、 $\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{i+1}$ は現在、および次に発生するサンプル点の位置ベクトル、 \mathbf{u} はサンプル点発生方向の単位ベクトル、 $\text{step_max}, \text{step_min}$ はそれぞれサンプル点の最大および最小発生間隔であり、データとして与える。サンプル点 \mathbf{S}_i における視線方向の散乱光強度が I_{S_i} のとき、 $f(I_{S_i})$ は次式で与えられる。

$$f(I_{S_i}) = \frac{I_o}{I_{S_i}}, \quad (3.34)$$

ここで、 I_o は step_max の場合の視線方向の散乱光強度であり、データとして与える。 $I_{S_i} = 0$ 、すなわち点 \mathbf{S}_i が影の領域内にあるときは、 step_next には、点 \mathbf{S}_i と点 \mathbf{S}_{i-1} 間の距離を与える。

また、下記の条件を両方満足するときは、散乱光の計算を打ち切る。

$$\begin{aligned} (\mathbf{S}_{i+1} - \mathbf{O}) \cdot (\mathbf{S}_{i+1} - \mathbf{S}_i) &\geq 0 \\ I_{S_i} &\leq I_\epsilon \end{aligned} \quad (3.35)$$

ここで、 \mathbf{O} は光源の位置ベクトルであり、 I_ϵ は計算打ち切りのための閾値である。

(2) 水上光源の場合：

水面から水底に向かってサンプル点を式(3.33),(3.34)の規則に基づいて発生し、式(3.35)第2項のみを評価する。

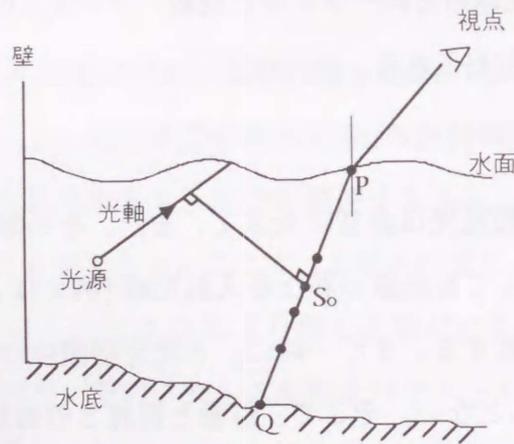


図 3.10: 人工光源による散乱光積分計算用サンプル点の発生

3.6 適用例

提案手法の有効性を検証するため、自然日光、人工光源に対して提案手法を適用した例をそれぞれ示す。

まず、自然日光の例を示す。図 3.11は、水質が水面の色彩に及ぼす影響を示すものである。この例の場合は、太陽高度が60度であり、水深は5mである。(a),(b),(c)の消散係数 $c(\lambda)$ と散乱係数 $b(\lambda)$ を、表 3.1 に示す。(a),(b)は太平洋の異なる2地点の水のデータである。(c)は濁った水であり、緑色の散乱成分が他に比べて大きいため、水面が少し緑っぽくて、植物プラ

ンクトンが多い水に似ている。

表 3.1: 散乱係数、消散係数データ

図 No.	散乱係数			消散係数		
	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>
(a)	0.03399	0.03500	0.03719	0.718	0.159	0.133
(b)	0.06798	0.17500	0.07438	0.808	0.379	0.283
(c)	1.41015	0.84100	0.13119	1.632	1.281	0.730

天空光の考慮による影響を図 3.12 に示す。これらの画像は、ゴルフ場の池を表示したものであり、水質のデータは図 3.11(c) と同じで、太陽高度は共に 45 度である。(a) は天空光を考慮していない画像であり、(b) は天空光を考慮している画像である。天空光による散乱を考慮すると、水面が明るく波の形状もよく見える。

水深が水面の色に及ぼす影響を図 3.13 に示す。水深以外のデータは共通で、水深の変化の影響を判り易くするため、水底の色を白色にしている。(a) と (b) の水深はそれぞれ 2.5m と 5m である。(b) のほうが水深が深いため水底からの反射光線の赤成分が減衰され、青っぽく見える。(a) は水深が浅いため、水底がよく見える。

図 3.14 に水底の色が水面の色の見え方に及ぼす影響について示す。水底の色以外のデータはすべて共通である。(a) は水底の色を白色にした場合であり、(b) は茶色にした場合である。この例から、水面の色には水質ばかりでなく、水底の色も大きく影響することが判る。

次に、人工光源への適用例を示す。図 3.15 は、水の有無、水深、水質が物体の色の見え方に及ぼす影響を検討したものである。光源は点光源で、球形の配光特性をもち、(a)~(d) については、正規化したスペクトル分布が $(r,g,b)=(1.0,0.7,0.4)$ とし、プール中央および画像中に見える部屋の隅付近の天井の 2ヶ所に配置する。プールサイドの手すりは、アルミニウムの反射特性をもち、プールの床面の反射特性は、完全拡散反射と鏡面反射の比率が 9 対 1 とし、その他の壁面は、完全拡散反射面とする。なお、物体間での相互反射に対しては完全拡散面と仮定す

る。また、本論文では、物体表面を一様な大きさの微小なパッチに分割し、これを用いて3次の相互反射成分まで計算した。上記計算結果をパッチの中心に割り付け、線形補間により拡散反射成分の計算の際の相互反射成分を求める。

図 3.15(a) は水の無いプールを表示したものであり、(b),(c) は (a) のプールに蒸留水をそれぞれ、50cm,115cm 入れた場合の画像である。水による光の散乱・吸収による水の色の変化、光の屈折効果による水底の見かけ上の位置の変化が観察される。(d) は水の混濁度の影響を見るために、(c) の水質を位相関数の形状を変えずに散乱係数の値を 200 倍にした画像である。(e) は光源のスペクトル分布の影響を観察するためのもので、(c) の場合の光源のスペクトル分布を (0.8,1.0,0.95) に変更した画像である。

図 3.16は、水中照明シミュレーション結果と写真を比較検討したものであり、図 (a) は写真画像である。(b),(c),(d) は、(a) の照明器具の配光、スペクトル分布および光源の位置に関するデータに基づいたシミュレーション結果を示す。図 (b) は完全拡散反射光成分と鏡面反射光成分のみを表示した画像、(c) は (b) に相互反射光成分を加えて表示した画像である。本例のように、光源がスポットライトで直射光の照射範囲が限定される場合は、相互反射成分の考慮による効果大きい。中でも、水面で反射した光線による相互反射成分 (図 3.5. 経路 w_i) が重要である。(d) は、(c) にさらに水中での散乱光成分を加えた画像である。なお光源は、最大光度 1099cd、垂直、45°、水平各断面のビームの開き角はそれぞれ、25°、34°、57°であり、3断面について 2.5° 間隔の配光データを入力データとして用いた。表 3.2にシミュレーションに用いた水の光学特性を記す。

表 3.2: プールの水のデータ

	R	G	B
消散係数 (m^{-1})	0.718	0.159	0.133
$\beta(90, \lambda)(m^{-1})$	1.8×10^{-4}	2.3×10^{-4}	3.63×10^{-4}
屈折率	1.331	1.3345	1.3405

ここで、消散係数および散乱係数の基準値 $\beta(90, \lambda)$ は、著者らは計測装置を持たないため、文献から入手可能な太平洋の海水のデータ ([59] 参照) を利用した。実際に用いる水道水に対してシミュレーションを行う場合には、実測によりこれらの係数を求めることが望まれる。

図 (a) は印画紙をスキャナで読みとり、カラープリンタで出力したものである。一方、(d) は CRT 出力画像をカラープリンタに出力したものである。そのため、明度、色度、彩度にかかなりの差異が生じたものと推察する。このため、写真画像とシミュレーションの結果えられる画像とを単純に比較できないが、(d) から得られる情報は、水中の照明設計の際、光束や水底の反射光などの、水中照明効果の評価に十分有用であると考えられる。図 3.17 は、図 3.16 のプールを水中および水上光源により照射したときの照明効果の表示例である。

画像生成のための所要した計算時間は、例えば図 3.15(d) の場合、相互反射成分の計算に 10 時間 21 分 9 秒 (パッチ数 17,462)、画像のレンダリング計算 (画像サイズ 512X384) に 18 時間 31 分 25 秒を要した (使用計算機: CPU: R4000SC 100MHz, メモリ: 128MB)。

3.7 結言

天空光を含んだ自然昼光と配光およびスペクトル特性を考慮した点光源に照射された種々の水質をもつ水面の色をリアルに表現することにより、水辺を含む環境の照明効果を予測する一つの手法を提供した。提案手法は、以下の現象を表現できる。

- (1) 光源の配光・スペクトル特性を持つ水中・水上光源に照射される、物体表面の鏡面反射および相互反射効果。
- (2) 水中・水上光源により照射される水面の反射・屈折効果。
- (3) 水中における光の散乱・吸収を考慮した水の混濁度の影響。
- (4) 水面および水中に投下される影の影響。

提案手法により、従来法では実現できなかった自然昼光下での水中の散乱を考慮した光学シミュレーションができるようになった。さらに、水面を含む屋内照明問題に対して、水上・水中の人工光源により照射された環境の照明シミュレーション手法を開発した。これにより、予

測が困難であるにもかかわらず、経験に頼って設計せざるをえなかった水中照明の事前照明シミュレーションができるようになり、提案手法の実用上の利点は非常に大きいと考える。



(a)



(b)



(c)

図 3.11: 自然光源に照射された水質の異なる水の表示例



(a)



(b)

図 3.12: 天空光による水中の散乱光の考慮

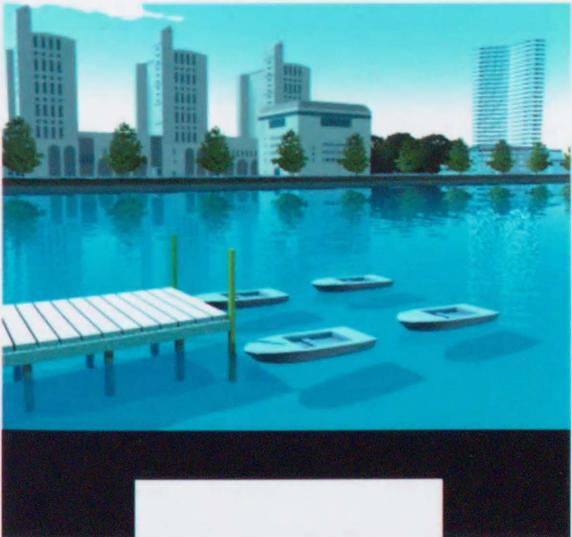


(a)



(b)

図 3.13: 水深の違いの及ぼす影響



(a)



(b)

図 3.14: 水底の色の影響



(a)



(b)



(c)

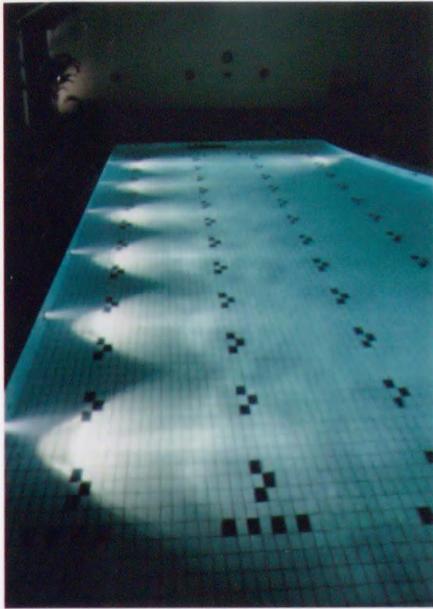


(d)



(e)

図 3.15: 人工光源に照射された環境に水の存在が及ぼす影響の評価



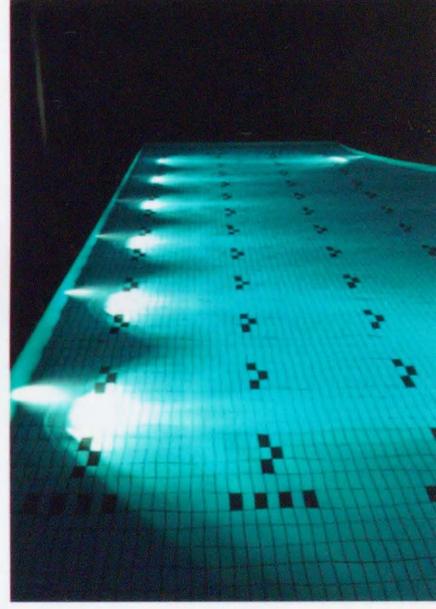
(a)



(b)



(c)



(d)

図 3.16: 水中照明のシミュレーションへの応用

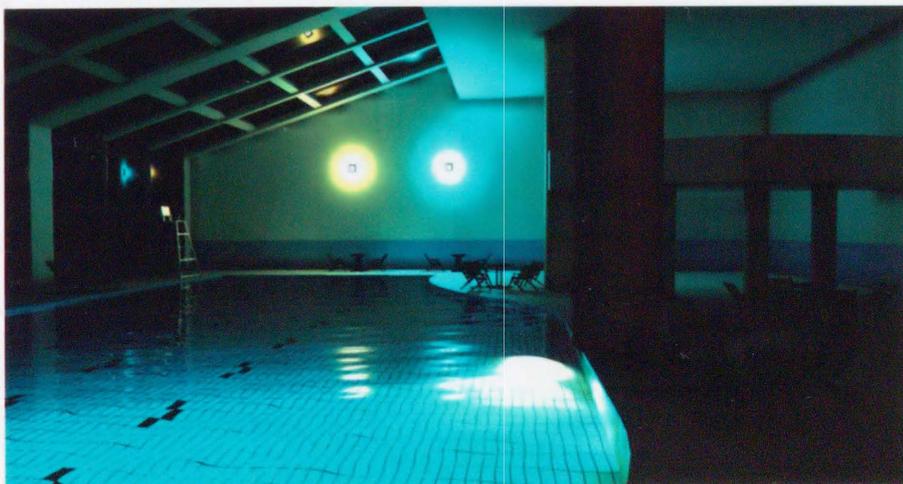


図 3.17: 屋内プール照明の例

第 4 章

天空光を考慮した景観画像の高速生成法

本章では、天空光を考慮した景観予測のための写実的な CG 画像を、実用的な計算コストで生成する手法を提案する。すなわち、グラフィックス用ハードウェアを利用した天空照度計算手法により、従来の手法と比較して、小さい計算コストで天空光の影響を考慮した屋外景観評価用画像が作成でき、照度マッピングの利用により天空光を考慮した画像によるアニメーションを高速に作成できる手法を提案する。本章で提案する手法を、都市再開発の景観評価用画像の生成に適用し、その有効性を示す。

4.1 概説

CG による写実的な画像を景観事前評価に利用することの有効性が認識され始めている。よりリアルな CG 景観予測画像作成のためには、太陽の直射光だけでなく、種々の気象状態を反映できる天空光の考慮が必要である。本章では、以下の考え方にに基づき、写実的な景観予測画像をできる限り忠実にかつ高速に作成する手法を提案する。

- (1) 大気中の微粒子による散乱・吸収を考慮したモデルを考案する。そのモデルに基づいた天空光の輝度分布を求め、CIE 標準天空輝度分布と比較して、その精度が十分なことを確かめる。この輝度分布を用いて、あらゆる太陽高度に対するスペクトルを考慮した天空光による照度計算を高精度に行う。

- (2) 天空光特有の輝度分布特性に応じた直方体形状の仮想受光面を設定し、グラフィックスハードウェアを利用して、遮蔽物の影響を考慮した天空光による照度を効率よく求める。
- (3) 物体表面をメッシュに分割し、格子点の天空光による照度(天空照度)を求め、可視面上の任意の点の天空照度を、格子点の天空照度を線形補間することにより求める。

上述の(1),(2)の手法の適用により、高品質な景観予測画像を実用的な計算コストで生成でき、さらに(3)の手法の適用により、アニメーションを従来と比べて低いコストで制作できる。

4.1.1 天空光を考慮した景観画像生成に関する研究概況

CGによる景観評価画像を作成する際には、次の2つの要求が満たされることが強く望まれる。

- (1) 自然昼光の中でも特に、天空光輝度分布および天空照度が、物理的な根拠のある光源モデルに基づいて計算されること。
- (2) 様々な視点からの景観の検討を、低コスト、高画質の画像で行えること。

これに対して、1970年代および1980年代前半においては、屋外環境における画像作成の際には、直射光として平行光線を用い、環境光成分として一様の照度値を与える方法や、視点位置に2次的な光源を設置する方法[75]が用いられてきた。しかし、これらの手法では、十分に写実的な表示画像を得ることはできない。この問題に対して、屋外でのより正確な環境光を実現するために、天空光を用いた陰影表示法[16]が提案された。この手法は、天空を半球のドーム状と仮定し(図4.4参照)、それを分割した帯光源を用いて照度計算を行う。帯光源は、照度計算面に正投影した面積が等しくなるように分割され、帯の中心線を用いて天空のどの部分が遮蔽されるかをサンプルする。この手法により、CIEの標準天空輝度分布を用いて精度よく天空照度を求めることができる。しかし、この方法には以下のような問題点がある。

- (1) 天空のスペクトル分布が考慮されていない。

- (2) 天空の可視領域を求めるための物体の輪郭線の計算、および輪郭線とサンプル線との交差判定に計算時間を要する。
- (3) 一般に、曇天時には天頂付近の、晴天時には太陽付近の輝度分布の変化が最も大きい。しかし、この手法は、帯光源への分割、すなわちサンプル線の発生を天空輝度分布特性を考慮しないで行うため、かなり細かく分割しないと照度計算の誤差が大きくなる。

大気中の微粒子の影響によるスペクトル分布の変化を考慮した天空の色の表示法 [6] が提案されたが、この方法は単にいくつかの係数を用いた場合の空の色の表示例を示しているに過ぎず、標準の天空輝度分布である CIE 標準天空 [76] との関係には触れていない。また大気を水平な層の重なりと仮定しているため、太陽高度が低くなると太陽の光路が無限になる。また、大気中の微粒子の分布を等密度と仮定しており、実際の大気の状態との整合性に関する検証という点で問題が残された。さらに、直射光と天空光の両者について、このスペクトル分布の変化を考慮した鏡面反射を含む陰影表示法 [77] が開発された。この手法においては、鏡面反射の正反射方向から反射光を計算することにより計算時間の短縮を行っている。また、実測したデータに基づき、任意の大気の状態に対して、天空のスペクトルを求め、リアルな画像を作成する手法 [40] が開発された。この方法は、まず天空の輝度分布を CIE の標準輝度分布式から求め、色々な場所で輝度と相関色温度との関係を実験的に調べ、その変換式を示している。この相関色温度に Judd らの手法 [78] を用いて天空のスペクトルに変換している。この手法は、CIE の標準天空と一致する天空輝度分布に基づく高品質の画像生成手段を提供するものであるが、高価で特別な計測装置を必要とすることから実用性の面で大きな問題がある。この他に、太陽の大きさを考慮することにより、半影を表示する手法 [12] が提案された。これらの手法は、屋外環境での視環境評価のうえで極めて重要な写実的な表現法を大幅に進歩させた。しかし、上述のように、実用性の点からみると、計算コスト、精度、必要な機器という面でそれぞれ問題があり、改善が望まれる。

本章で提案する手法は、上述の問題を解決するため、実際 of 自然昼光にできるだけ忠実なモデルを構築し、かつ、実用的なコストで天空光を考慮した画像を生成することを目的とする。

4.1.2 提案手法の概略

提案手法は文献 [6] と同様に物理モデルに準拠するものであるが、大気中の微粒子の属性に関する係数を試行錯誤的に変化させて、あらゆる太陽高度に対して CIE 標準と整合する係数を見だし、物理的根拠に基づくスペクトル分布を考慮した天空光を CG で活用できるようにする。具体的には、以下の手法を開発した。

- (1) 受光直方体 (図 4.5 参照) を基本とする天空モデルを考案し、これを天空輝度分布に適応した形状に変形させて利用する天空照度計算手法。これにより、天空輝度のサンプル点をその強度に比例させて発生させることができる。したがって、前節で述べた帯光源を用いる方法に比べて、効率良く天空照度計算を行うことができる。
- (2) 天空照度計算の際、天空の可視領域を高速に判定するため、グラフィックスワークステーション (以降 GWS) のグラフィックス用ハードウェア (描画用エンジン) を活用できるアルゴリズムを考案した。これにより、帯光源法で問題となっていた天空の可視領域の判定に要する計算時間を削減し、全体の計算コストを小さくすることができる。
- (3) アニメーションのように多数の画像が必要なときに、照度マッピングを用いる手法。これによりフレーム当たりの計算時間を削減することができる。

4.2 天空輝度分布の計算

まず、提案手法で採用した大気拡散モデルによる散乱光計算法について述べる。次に、大気拡散モデルにより計算した天空輝度分布と、CIE の標準天空輝度分布との比較を行い、両者が最も良く一致するエアロゾルの係数について述べる。

4.2.1 大気拡散モデル

まずモデルを構築する際の前提条件について述べ、空気分子およびエアロゾルによる散乱光の計算方法について述べる。

空の色は太陽高度、大気の状態、および見る方向によって異なる。その結果、建築物などの見え方にも大きな変化をもたらす。できるだけ実際の物理現象に即したモデルを構築するため、本章で提案する手法は、以下の仮定をおく。

- (a) 大気の領域は球面状とみなす。
- (b) 空気分子およびエアロゾルの密度分布は高度に対して指数関数的に減少する。
- (c) 多重散乱を無視する。
- (d) 空気分子による光の吸収は、エアロゾルに比べて少ないので無視する。
- (e) 地面からの反射は考慮しない。
- (f) 大気の密度差による太陽光線の屈折は考慮しない。

以下に空気分子とエアロゾルによる散乱光について説明する。

(1) 空気分子による散乱

よく知られているように、入射光が空気分子により散乱する現象は、一般にレーリー散乱と呼ばれる。前述の仮定 (a),(b) のように、大気を図 4.1 のように球面状とし、また、空気分子の密度が高度に対して指数関数的に減少すると考える。ある点 P を含む微小体積中の空気分子により P_v 方向に散乱する光の強度 $I'(\lambda)$ を求める。偏光を無視すると、一般に、空気分子により生ずるレーリー散乱は、次式により表される ([82] 参照)。

$$I'(\lambda, \theta) = \frac{2\pi^2(n^2 - 1)^2}{3\lambda^4 N} F_m(\theta) \cdot I_0(\lambda) \quad (4.1)$$

ただし、

- I' : 散乱光の強さ
- λ : 入射光の波長
- I_0 : 入射光の強さ
- θ : 入射光と散乱光のなす角
- F_m : 散乱特性を示す角度関数 (位相関数)
- n : 空気分子の屈折率
- N : 単位体積中の空気の分子数

ここで、空気分子の位相関数は次式で与えられる ([82] 参照)。

$$F_m(\theta) = \frac{3}{4} \cdot (1 + \cos^2 \theta) \quad (4.2)$$

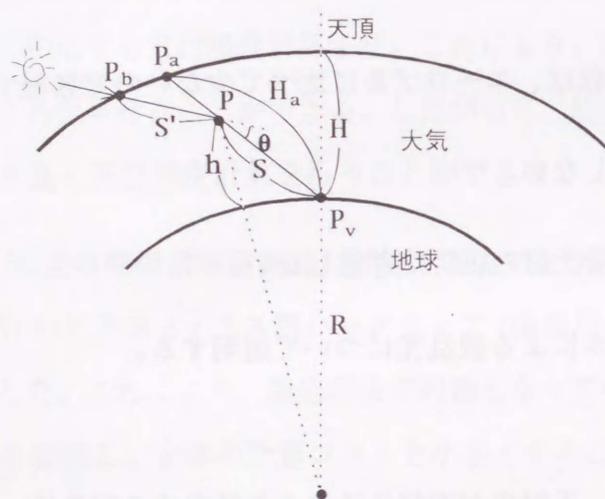


図 4.1: 球面大気モデル

n は波長により異なるが、可視領域に対しては約 1.0002 ([83] 参照) であり定数として扱う。ここで、仮定から空気分子による光の吸収を無視すると、光が空気中を通過する際のエネルギーの減衰 (消散) は光の散乱によるもののみによって生ずる。したがって、ここでは光の散乱による減衰だけを考慮する。光が単位長だけ空気中を通過する際に散乱されて減衰する割合、すなわち体積散乱係数 b は式 (4.1) 右辺第 1 項を全立体角について積分することにより求まる。したがって、

$$\begin{aligned} b &= \int_{4\pi} \frac{2\pi^2(n^2 - 1)^2}{3\lambda^4 N} \cdot \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \theta) d\omega \\ &= \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{2\lambda^4 N} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (1 + \cos^2 \theta) \sin \theta d\theta d\varphi \\ &= \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3\lambda^4 N} \end{aligned} \quad (4.3)$$

波長 λ の光が大気中を距離 s だけ通過するときの減衰量を計算するため、体積散乱係数 b を s で積分することにより得られる光学的距離を用いる。高度による空気の分子数の変化を考慮すると、光学的距離 t_m は

$$t_m(s, \lambda) = \int_0^s b(l) dl \quad (4.4)$$

となる。仮定により、地表からの高さ h に対して空気分子の数は指数関数的に減少するから、高度 h での空気の分子数 $N(h)$ は次式で表わされる。

$$N(h) = N_s \exp\left(-\frac{h}{H_0}\right) \quad (4.5)$$

ただし、 N_s は標準大気の単位容積中の空気分子数 ($2.5473 \times 10^{25} m^{-3}$ Loschmidt 数 ([82] 参照))、 H_0 はスケールハイトであり、等密度大気を仮定した場合の大気の厚み (7994m) ([82] 参照) に相当する。大気圏外での太陽光の強さを $I_s(\lambda)$ とし、大気圏外から点 P までの距離を s' とすると、点 P での P_v 方向への散乱光 $I_p(\lambda)$ は

$$I_p(\lambda, x) = \frac{I_s(\lambda) k(x) F_m(\theta)}{\lambda^4} \cdot \exp[-t_m(s', \lambda)] \quad (4.6)$$

となる。ここで、 x は点 P の高度であり、 $k(x)$ は次式で表される。

$$k(x) = \frac{2\pi^2(n^2 - 1)^2}{3N(x)} \quad (4.7)$$

点 P で散乱された光は減衰して P_v に到達する。点 P_v に到達する光 $I_v(\lambda)$ は $P_v P_a$ 間、すなわち、距離 H_a の分子の散乱光を積分することにより求まる。したがって、

$$I_v(\lambda) = \int_0^{H_a} I_p(\lambda, s) \cdot \exp[-t_m(s, \lambda)] ds \quad (4.8)$$

となる。太陽光は平行光線と考えられるから、散乱角は $P_v P_a$ 上で一定である。大気圏を図 4.1 に示すように球面状とし、空気分子密度が高度に対して指数関数的に減少すると考えたとき、視点 P_v に到達する光 $I_v(\lambda)$ は大気圏外の点 P_a から P_v に到達するまでの散乱光を積分することにより、次式で示される。

$$I_v(\lambda) = I_s(\lambda) \frac{F_m(\theta)}{\lambda^4} \int_0^{H_a} k(s) \exp(-t_m(s, \lambda) - t_m(s', \lambda)) ds \quad (4.9)$$

(2) エーロゾルによる散乱

エーロゾルによる散乱光の強度が散乱角の小さい領域で著しく強いことにより、太陽周辺光

を発生する。エアロゾルによる散乱は、ミー散乱と呼ばれ粒径や波長に依存する。一般にエアロゾルによる散乱光の強さは、波長に反比例することが知られている。ミー散乱は非常に複雑なので、近似的な手法によりこれを表現する。具体的には、散乱光の分布を関数により近似する。Klassen[6]は、エアロゾルによる散乱の位相関数として、Blinnが提案した位相関数[70]を用いた。一方、光学の立場から Gibbons は霞や霧の位相関数[80]を測定し、以下の位相関数を提案している。

霞やもやにたいしては、

$$F_a(\theta) = a(1 + 9 \cos^{16} \frac{\theta}{2}), \quad (4.10)$$

霧に対しては、

$$F_a(\theta) = a(1 + 50 \cos^{64} \frac{\theta}{2}). \quad (4.11)$$

エアロゾルによる消散係数は $B\lambda^{-\alpha}$ の形式で表され、 α の値は一般に 1.0 であることが知られている ([81] 参照)。 B は混濁因子と呼ばれ、大気中のエアロゾルの割合によって変化する ($B = 0.05 \sim 0.2$) ([81] 参照)。したがって、空気分子と同様に高度によるエアロゾルの分子数の変化を考慮すると、光学的距離 $t_a(s, \lambda)$ は次式で表される。

$$t_a(s, \lambda) = \int_0^s B(l)\lambda^{-\alpha} \cdot dl = \lambda^{-\alpha} \int_0^s B(l)dl \quad (4.12)$$

なお、エアロゾルの分布も空気分子と同様、地表からの高さに対し指数関数的に減少し、その変化の割合は空気分子のそれとは異なることが知られている。エアロゾルのスケールハイトは 1200m とした ([84] 参照)。

なお、散乱角 θ の際の入射光に対する散乱光の強度の比を与える体積散乱関数は、次式で表される ([86] 参照)。

$$\beta(\lambda, \theta) = \frac{\lambda_0}{\lambda} \beta(\lambda_0, 90) F_a(\theta) \quad (4.13)$$

ここで、 λ_0 は体積散乱関数を計測する際に用いた光線の波長であり、 $\beta(\lambda_0, 90)$ は散乱角 90 度の時の体積散乱関数の値である。

したがって、図 4.1 の場合の視点に到達するエアロゾルによる散乱光 $I_{va}(\lambda)$ は、次式により与えられる。

$$I_{va}(\lambda) = I_s(\lambda) \beta(\lambda, \theta) \int_0^{H_a} \exp(-t_a(s, \lambda) - t_a(s', \lambda)) ds \quad (4.14)$$

4.2.2 CIE 標準輝度分布との比較

式 (4.9) および式 (4.14) から得られる空気分子による散乱と、エアロゾルによる散乱を考慮して求めた天空の輝度 $I(\lambda)$ は、次式により求められる。

$$I(\lambda) = I_s(\lambda) \int_0^{H_a} \left(\frac{k(s)}{\lambda^4} F_m(\theta) + \frac{\lambda_0}{\lambda} \beta(\lambda_0, 90) F_a(\theta) \right) \times \exp(-(t_m(s, \lambda) + t_m(s', \lambda)) - (t_a(s, \lambda) + t_a(s', \lambda))) ds \quad (4.15)$$

上式により求めた天空輝度と CIE 標準輝度分布とを比較することにより、CIE 標準輝度分布との誤差を求めた。式 (4.10), (4.11) の a および前述の B を変化させ、CIE 標準との誤差が最小となる組み合わせを試行錯誤で探し、エアロゾルの位相関数として、次の関数を用いることにした。

$$F_r(\theta) = a(1 + 9 \cos^{16} \frac{\theta}{2}) \quad (4.16)$$

ここで、 a を 0.02 とし、前述の B を 0.09 としたとき、CIE 標準輝度分布とよく一致した。図 4.2 に式 (4.16) により与えられる位相関数と実際に計測された位相関数 [87] との比較を示す。この場合、図からも明らかのように、95 度以上の散乱角で誤差が大きくなっている。

上記のエアロゾルの位相関数と消散係数を用い、大気の厚みを 30km として式 (4.15) により天空輝度分布を計算し、水平面に正投影した画像を図 4.3 に示す。図の上段は CIE 標準晴天輝度分布式 [76] を用いて太陽高度 10 度から 90 度まで 10 度おきに天空輝度分布を求め、その最大値を赤とし、50 段階で表示したものである。中段は大気拡散モデルを用いて天空輝度を求め 50 段階表示したものである。下段は上段の CIE 式と中段の大気拡散モデルの式それぞれの値の差の絶対値を示したものである。いずれの太陽高度に対しても、地平線部分を除いては、良く一致している。その差は最大値でも 20% 以下に収まっている。これは、図 4.2 で示した散乱角が 90 度よりも大きくなると誤差が大きくなる点に起因していると考えられる。

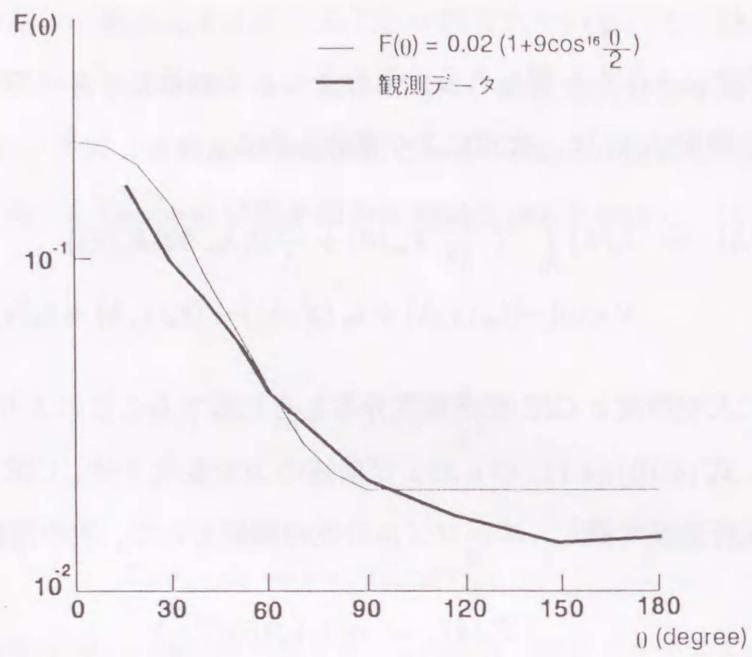


図 4.2: エーロゾルの位相関数の比較

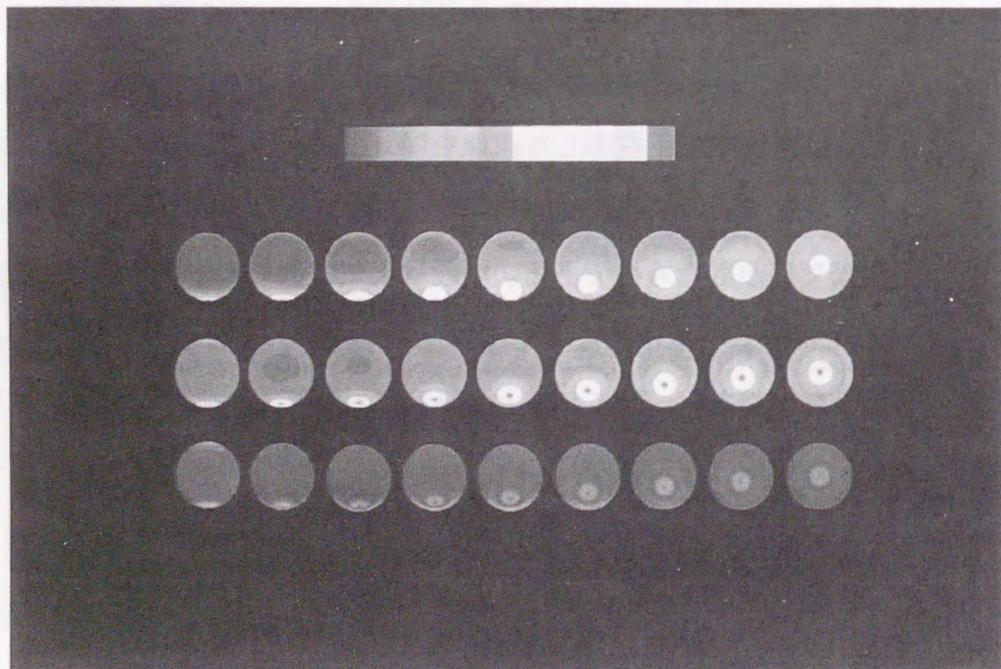


図 4.3: 提案手法と CIE 標準との比較

4.3 受光直方体を用いた天空照度の計算

帯光源を用いた天空照度計算法の概略と、その問題点について述べ、本章で提案する受光直方体の特徴について述べる。次に、太陽高度の変化にともなう天空輝度分布の変化を反映した受光直方体の形状の最適化の方法、および受光直方体を用いた天空照度計算法について述べる。最後に、帯光源法と本章で提案する手法との比較を行う。

4.3.1 基本的な考え方

(1) 従来法の問題点

従来の天空光を考慮した陰影表示法 [16] では、天空を半径の非常に大きな半球状 (天空ドーム) の非一様な分布の光源とみなし、任意の計算点 P での天空照度の計算を以下の手順で行っている (図 4.4 参照)。

(i) 天空ドームをいくつかの帯光源に分割する。

(ii) 物体による遮へい効果を考慮するため、その帯光源の中心線であるサンプル線に沿って可視領域を求める。

(iii) その可視区間による照度の総和を求めることにより、天空照度を計算する。

この手法により、精度よく天空照度を求めることができるが、天空の可視領域を求めるための物体の輪郭線の計算、および輪郭線とサンプル線との交差判定に多大な計算コストを要する。すなわち、高輝度となる部分の分布には無関係に、帯光源を照度計算面に正投影した面積が等しくなるように分割している。このため、太陽近傍領域における遮へい計算を本来精密に行う必要があるが、帯光源の中心線で帯全体を代表してサンプルするため、高輝度の領域では、誤差が大きくなる。これを避けるためには、帯の幅を小さくするしかなく、この場合、計算コストが増大するだけでなく、不要に細かくサンプルされる部分も多く効率が悪い。

(2) 受光直方体を用いた天空照度計算の基本的な考え方

前述の帯光源を用いる手法の問題に対処するため、天空照度計算を効率良く行える形状を持

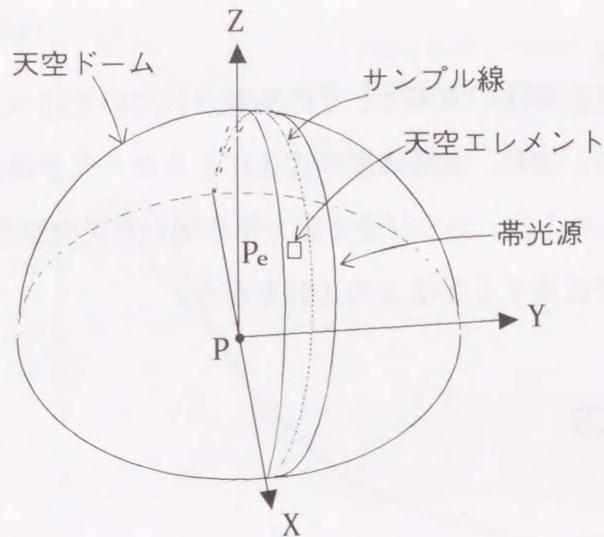


図 4.4: 帯光源による天空光計算のためのモデル

つ可動の受光直方体 (図 4.5 参照) を設ける。図 (a) は、晴天時の受光直方体の設定を示したものである。受光直方体の上面の中心は、常に最も輝度の高い部分 (この場合は太陽の方向) を向くように設定される。図 (b) は、断面図を示したものである。図中 θ は太陽高度であり、 φ は受光直方体の中心からみた開き角である。この受光直方体に張ったメッシュのエレメント毎に、受光直方体の中心から見た天空の輝度値を割り当てる。各エレメントに対して、天空照度を計算する際の寄与を計算し記憶する。計算点における天空照度は、受光直方体のエレメントのうち計算点から見て遮蔽されないものの寄与の総和をとることにより得られる。したがって、エレメントの遮蔽判定は提案手法の中でも重要な位置を占める。ここでは、GWS のグラフィックス用ハードウェア、具体的には、フレームバッファと描画用エンジンを活用することにより、高速処理を実現する手法を考案した。受光直方体の特徴は以下の通りである。

- (a) 精度良く天空照度の計算を行うために、直方体の上面が常に天空輝度の最も高い方向 (晴天時には太陽方向、曇天時には天頂方向) を向くように、受光直方体を可動とし、上面の分割数を側面の分割よりも細かくする。
- (b) 上面と側面のエレメント分割数、および上面の開き角は、各エレメントの天空全体のエネルギーに対する割合 (以下、寄与係数と呼ぶ) が等しくなるように自動的に決定する。

(c) グラフィックス用ハードウェアを用いて天空の遮蔽物体を受光直方体上に投影することにより、特に物体数の多いとき、高速に天空の可視領域を求めることができる。

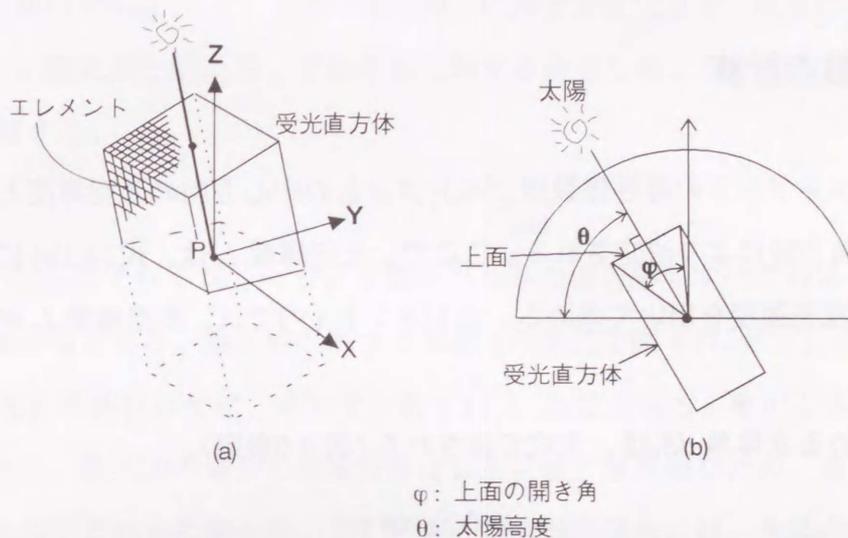


図 4.5: 天空照度計算のための受光直方体

4.3.2 受光直方体の設定

図 4.3 から明らかなように、晴天天空の場合は、太陽位置の輝度が最も高く、また太陽近傍の領域も非常に輝度が高い。しかし、それからはずれると急激に輝度が減少し、太陽から 90 度の方向の輝度が最も低くなる。一方、曇天空の場合、常に天頂の輝度が高く、輝度変化の割合や変化幅は、晴天時のそれらと比べて小さい。各エレメントに割り当てられた寄与係数 (次節にて詳述) がすべて等しいとき、最も精度よく天空照度が計算できるものと考え、次のように受光直方体を設定する。

- (i) 上面を高輝度方向へ向ける (すなわち、受光直方体の上面を晴天時は太陽方向、曇天時は天頂へ向ける)。
- (ii) 天空の輝度分布に応じて、上面のエレメントの分割を側面より細かくする。
- (iii) (ii) と関連して上面の開き角 φ を各エレメントの寄与係数の差が最小となるように、適切な大きさに設定する。

このように設定された直方体のエレメントの寄与率が、すべて等しい値をもつとき、最も効率良く、高精度の天空照度が得られると期待できる。

4.3.3 寄与係数の計算

受光直方体の各エレメントの寄与係数は、エレメントの中心方向の天空輝度と、そのエレメントの占める立体角 [79] により決定される。ここで、天空輝度 L_i は、式 (4.15) により計算した r,g,b 各成分毎の散乱光強度を用いて求める。エレメント i 内では、天空輝度 L_i が一定であると仮定する。

エレメントの占める立体角 dS_i は、次式で表される (図 4.6 参照)。

$$dS_i = \frac{\Delta S_e \cos \psi_i}{r^2} \quad (4.17)$$

ここで、 ΔS_e はエレメントの面積、 ψ_i は受光直方体の中心 (計算点) P からエレメントの中心へ向かうベクトルとエレメントの属する受光直方体の面の法線とのなす角、 r は点 P からエレメントの中心までの距離である。ここで、エレメント i の寄与係数 C_i を次式で表す。

$$C_i = \frac{L_i dS_i}{2\pi} \quad (4.18)$$

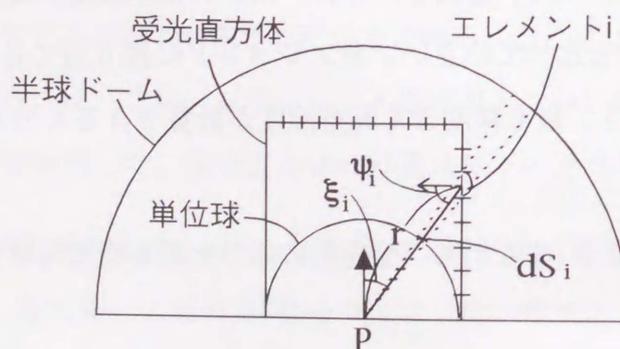


図 4.6: エレメントの占める立体角

4.3.4 受光直方体の最適化

最適な受光直方体の上面の開き角と分割数の組み合わせは、解析的には求められない。そこで、側面に対する上面の分割比 m と、上面の開き角 φ の両者を変化させ、収束計算により最適な m と φ を決定する。晴天空と曇天空、それぞれに対する適切な値として、次の関数 g を最小にする m と φ を採用する。

$$g(m, \varphi) = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} \quad (4.19)$$

ただし、 C_{\max} 、 C_{\min} はそれぞれ、 m と φ を用いたときの直方体のすべてのエレメントの寄与係数の最大値と最小値である。曇天時に対する関数 g の変化を図 4.7 に示す。この場合の $g(\varphi)$ が最小となる m と φ の組み合わせは、それぞれ約 1.15 と 75 度であり、そのときの g の値は約 3 であることがわかる。曇天空の場合の輝度分布は太陽位置に無関係なため、適切な直方体の上面の分割比と開き角にこれらの値を用いる。一方、晴天空の場合には、太陽の位置により天空の輝度分布が変化するため、太陽高度 θ をパラメータとして上述の収束計算を行った。その結果を図 4.8 に示す。したがって、この結果を用いて、晴天空に対して適切な m と φ を太陽高度 θ の関数としてルックアップテーブル化しておき、画像生成開始時点で、与えられた太陽高度からルックアップテーブルを参照し、それに適した分割数と開き角を決定することができる。

4.3.5 天空照度計算

天空照度の計算は、以下の手順で行なう。

- (i) 受光直方体の中心 O を天空照度計算点 P に置く。このとき、水平面より下にあるエレメントは、受光直方体の方向・形状を決めた時点で予め判っているものとする。
- (ii) 計算点 P の属する面 S の裏側に存在するエレメントを記憶する。
- (iii) 点 P を視点、受光直方体の各面を独立のビューポートとする視野を考える。このとき、それぞれのビューポートの解像度は、受光直方体のエレメント数と一致させる。したがって、受光直方体の 1 エレメントは、ビューポートの 1 画素と一致する。

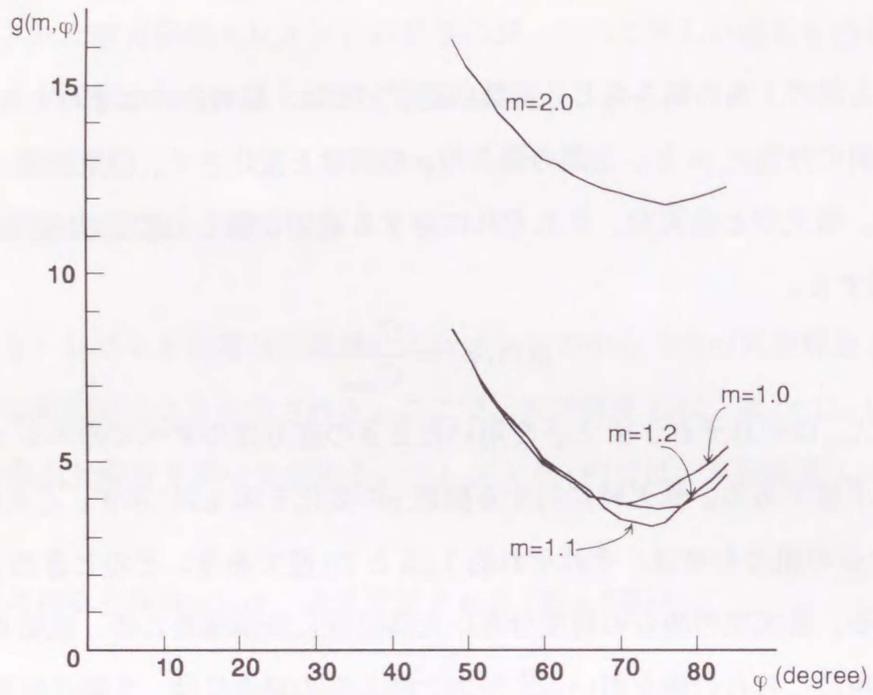


図 4.7: 曇天時における評価関数

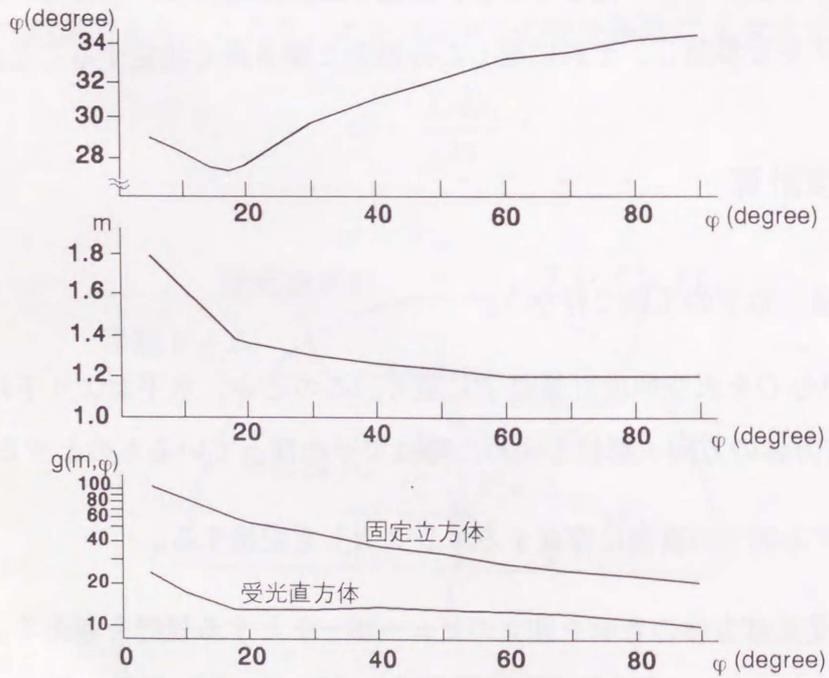


図 4.8: 晴天時における評価関数

(iv) (i),(ii)の結果、完全に隠れてしまう受光直方体の側面(図4.9の例では、面Q)以外のすべての受光直方体の構成面に対し、(iii)で定義したビューポートへ面S以外の面をzバッファ法によりフレームバッファへ描画する。このとき、zバッファ法による描画にGWSのグラフィックス用ハードウェアを利用する。

(v) フレームバッファに描画された内容をビューポート毎に取り出す。ここで、背景以外のものが描画されている画素は、図4.10の斜線部と同様に、点Pから天空を見た際にいずれかの物体により遮蔽される部分であることを示す。

(vi) (v)の結果、遮蔽されないエレメントの寄与率を利用して天空照度計算を行う。

可視面の照度計算を開始する前に、受光直方体の中心Oと各エレメントの中心を結んだ方向からの天空光強度 $I_i(\lambda)$ を、R,G,B各成分に対して求めておく。ここで、(vi)の計算は次式により行う。

$$E(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n H_i I_i(\lambda) dS_i \cos \xi_i \quad (4.20)$$

ここで、 I_i は各エレメントの中心方向のR,G,B成分の天空光強度である。また、 H_i は次の関数である。

$$H_i = \begin{cases} 0 & (\text{エレメント } i \text{ が遮蔽されているとき}) \\ 1 & (\text{エレメント } i \text{ が遮蔽されていないとき}) \end{cases}$$

n はエレメントの総数、 ξ_i は計算点からエレメント i の中心に向かうベクトルと計算面の法線ベクトルとのなす角である(図4.9参照)。この天空照度の計算をさらに高速化するために、受光直方体の各面毎に、1番目から k 番目までのエレメントにより生ずる照度を加算したテーブル、 $E'_k(\lambda)$ ($E'_k(\lambda) = \sum_{i=1}^k I_i(\lambda) dS_i \cos \xi_i$, ($k = 1, 2, \dots, n$))、を照度計算開始前に作成し記憶する。天空照度計算時に、遮蔽されたエレメントの情報を用いてこのテーブルを参照することにより、高速に天空照度を求めることができる。たとえば、受光直方体のある面のエレメント j_1 からエレメント j_2 ($1 \leq j_1 < j_2 \leq n$)までが可視の場合、それらのエレメントによる照度の加算値 $E_{j_1, j_2}(\lambda)$ は、次式のように減算を1回行うだけで求めることができる。

$$E_{j_1, j_2}(\lambda) = E'_{j_2}(\lambda) - E'_{j_1-1}(\lambda) \quad (4.21)$$

このテーブルは、ソフトウェア的なキャッシュとして複数の法線ベクトルに対するテーブルを記憶しておく。同一面の計算、あるいは同一法線ベクトル用のテーブルがキャッシュ内に登録

されている面の計算の時は、そのテーブルを利用する。照度計算を行う面の法線ベクトルと一致する法線ベクトル用のデータがキャッシュ内に登録されていない場合、空きがあれば新規に登録し、空きがなければ一般的な LRU アルゴリズムを適用し、書き換えるデータを決め、それと入れ換える。

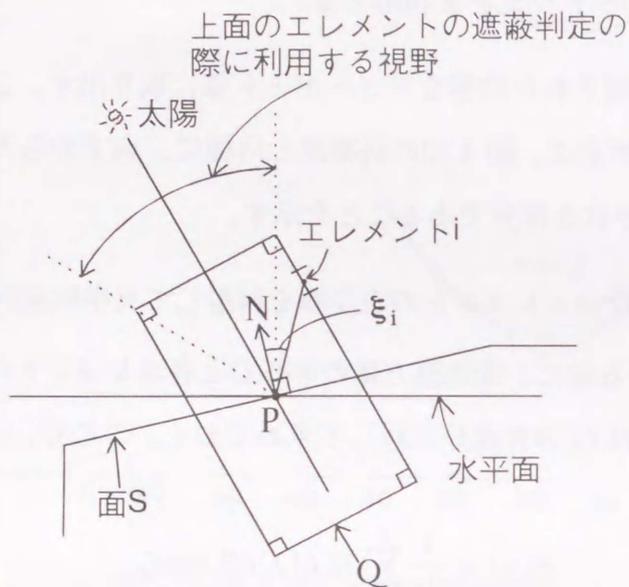


図 4.9: 受光直方体の元素の遮蔽判定のためのビューポートの設定

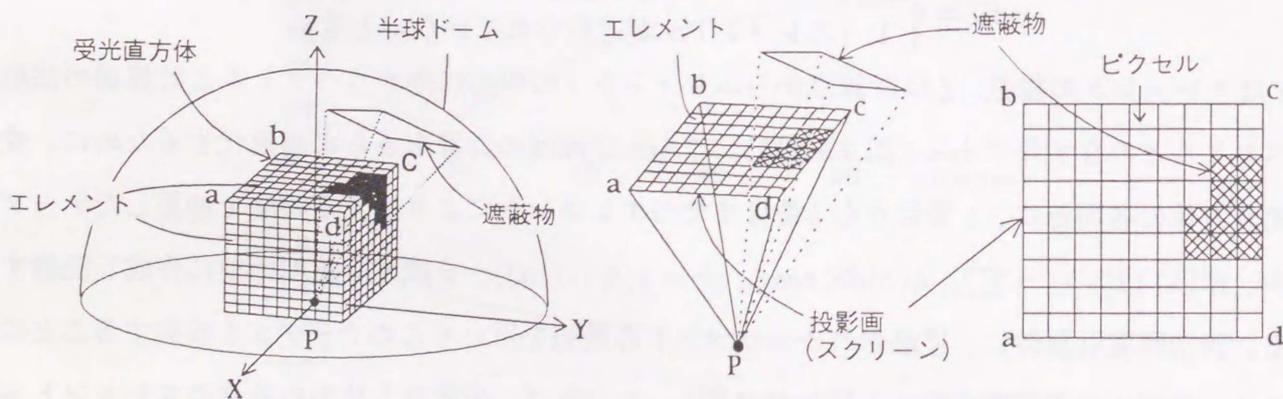


図 4.10: 遮蔽物の受光直方体への投影

4.3.6 帯光源法と受光直方体法の比較

帯光源および受光直方体を用いた天空照度計算手法の比較を行なうために、図 4.11 に示す画像を作成する場合について、両者のエレメントの数を変化させたときの天空照度計算の精度について検討した。図 4.12 の横軸は、帯光源手法を用いたときは帯光源数 n を、受光直方体手法を用いたときは上面のエレメント数 ($n \times n$) の n を示す。縦軸は、 $n=100$ の時の画像を真値とした場合のスクリーン全面の自乗平均誤差 (Root Mean Square:RMS) を表す。RMS は次式のように定義した。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (I_i - I'_i)^2} \quad (4.22)$$

ここで、 m は画像のピクセル数、 I は $n = 100$ の時のピクセル i の輝度値 (0~255) で、 I' はそれぞれの n のときのピクセル i の輝度値である。図からも判るように、帯光源数が 40、受光直方体の上面のエレメント数が 40×40 の時に、両者とも RMS が約 0.5 になっており、この時はほぼ等しい画質が得られていると考えられる。図 4.13 は前述の n を 40 に固定した場合の、物体数に対する計算時間の変化を示したものである。この場合、作成された画像は図 4.11 と同じであるが、視野外の直方体の数を増加することにより、総物体数を増加させている。図 4.13 から明らかなように、この例では、物体数が多くなるほど受光直方体による手法の効果が上がることが判る。

4.4 照度マッピングを利用した画像作成

物体のすべての面が完全拡散面であると仮定すると、物体上のある点で生ずる輝度は視点の位置に無関係で、その点の照度だけに依存する。そこで、物体をいくつかのパッチに分割し、パッチの頂点であらかじめ天空照度を計算しておく。画像作成時にはパッチの頂点での天空照度を線形補間することにより、任意の計算点における照度を計算する。視点が移動するアニメーションを作成する場合には、あらかじめ計算しておいた照度を利用することにより、高速に個々の画像を作成することができる。

以下に、その処理手順について述べる。まず、前処理として以下のことを行う。

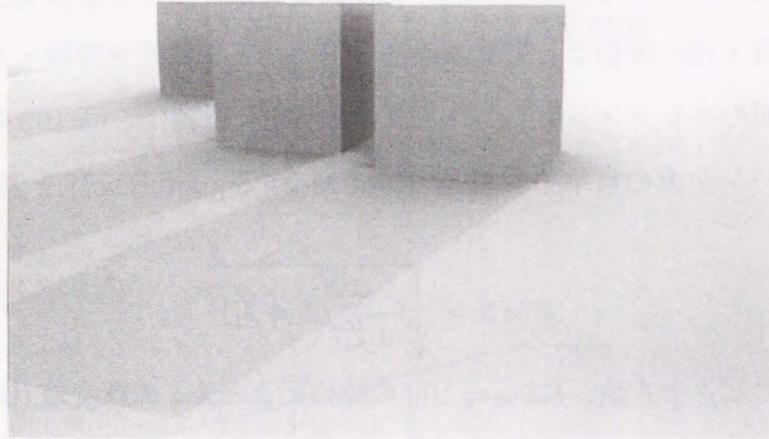


図 4.11: 比較に用いた物体

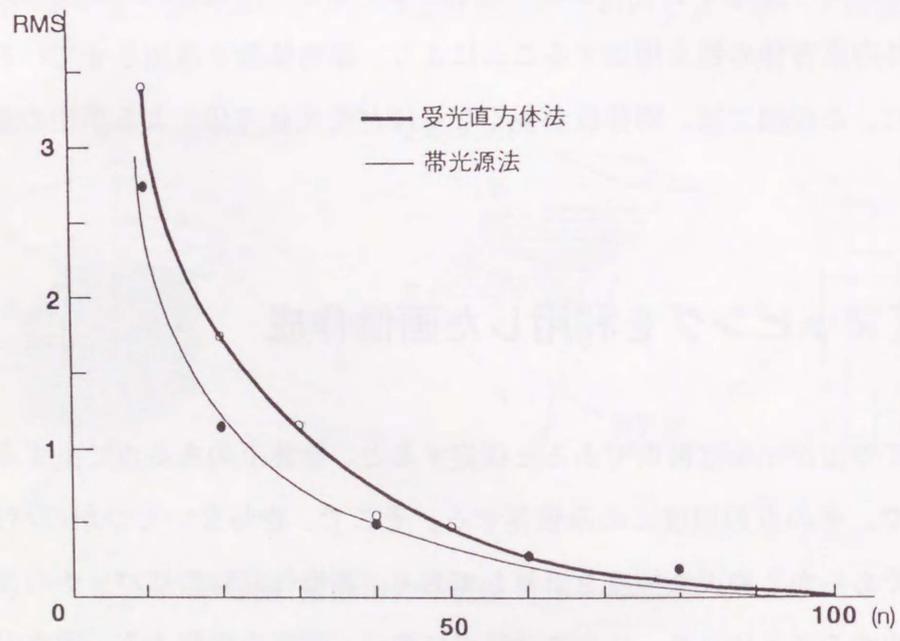


図 4.12: 自乗誤差

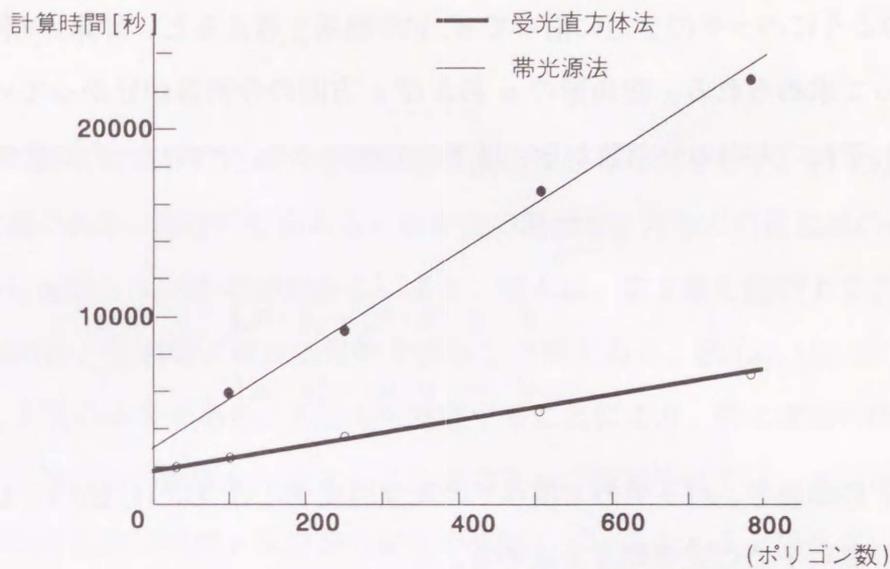


図 4.13: 計算時間の比較

- (1) すべての物体の面をいくつかの四角形に分割する。
- (2) 四角形を細かいメッシュに分割する。
- (3) メッシュの格子点における天空光照度を計算する。

太陽の位置が変化した場合には、上記 (3) の処理を行う。本章では、画像生成時の隠面消去アルゴリズムにスキャンライン法を採用した。スキャンライン法による画像作成のための照度計算点は、スキャンライン上に占める可視面の情報を利用して決める。

以下に、メッシュの格子点上に記憶した天空照度を利用し、任意の計算点における天空照度を計算する方法を説明する。

- (i) すべての四角形に対して、四角形の 2 辺に沿った u, v 座標系を考え、計算点の u, v 座標値を求める。計算点は、 u および v の両方とも 0 から 1 の範囲にある四角形内に存在している。
- (ii) 計算点がどのパッチに含まれているかを次の方法により求める。四角形の u, v 方向の分割数をそれぞれ、 n_u, n_v とすると、計算点の位置するパッチは、 u, v 方向にそれぞれ、 $|u \cdot n_u| + 1$, $|v \cdot n_v| + 1$ 番目 ($| \cdot |$ は切捨てを表わす) のパッチである。

(iii) 図 4.14 のようにパッチの 2 辺に沿って u' , v' 座標系を考えると、計算点の u' , v' 座標値は次式によって求められる。四角形の u および v 方向の分割数が分かっているので、 u, v 座標とそれぞれの方向の分割数から、以下の方法により、どのパッチに含まれているかを計算する。

$$\begin{aligned} u' &= u \cdot n_u - |u \cdot n_u| \\ v' &= v \cdot n_v - |v \cdot n_v| \end{aligned} \quad (4.23)$$

(iv) この u' , v' 座標値と、パッチの 4 頂点での天空照度 $E_1(\lambda)$, $E_2(\lambda)$, $E_3(\lambda)$, $E_4(\lambda)$ から、次式により計算点 P での天空照度を求める。

$$E_p(\lambda) = (1 - u')(1 - v')E_1(\lambda) + (1 - u')v'E_2(\lambda) + u'v'E_3(\lambda) + u'(1 - v')E_4(\lambda). \quad (4.24)$$

各面における自然昼光による照度は、太陽直射光による照度と天空照度の 2 つの要素から成っている。しかし、実際には両者を合わせた値が照度値として測定される。提案手法では、太陽直射光成分と天空光成分を独立に計算しており、これを合理的な比率で合成して、最終的な輝度計算を行う必要がある。自然昼光に占める太陽直射光成分と天空光成分の比率の計算は、直散分離の問題として知られており、本章では、太陽直射光を Bourges の式 [88] により、天空光を永田の式 [88] により求めることにより、太陽直射光と天空光の比率を求めている。

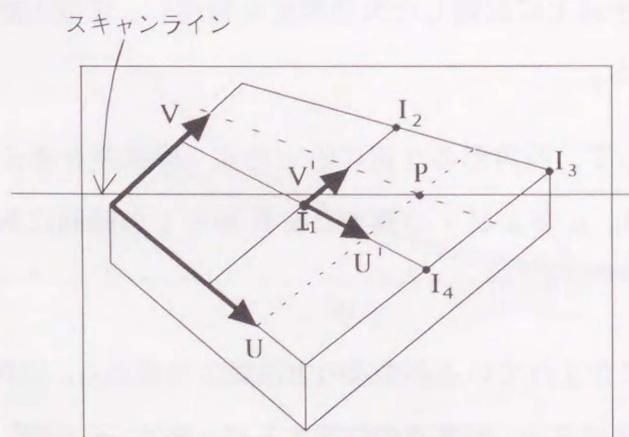


図 4.14: uv 座標

4.5 適用例

提案手法を用いて都市再開発のための景観評価画像を作成した例を示す。図 4.15は、曇天時の建物を表示した例である。建物の壁面あるいは歩道の路面で、天空の可視領域の違いにより、その明るさが微妙に変化しているのがわかる。また、樹木は、第5章で説明する手法により表示している。図 4.16は、晴天時における建物を表示した例である。図 (a), (b) は、それぞれ、太陽高度が 60 度、5 度の場合である。天空光を考慮することにより、特に建物の壁面の影の部分等において、写実性の高い画像を作成することができる。提案手法では、大気中の微粒子による直射光と天空光両者のスペクトル分布の変化を考慮しているため、太陽高度による建物の陰影のみならず、色あいの変化も表現可能である。また、直射光に関しては、鏡面反射成分と太陽の大きさを考慮して表示を行っているため、建物壁面からの鏡面反射光や、樹木の半影がリアルに表現されている。太陽高度 5 度の時の別の視点からの画像を図 4.17 に示す。適用例に使用した物体に対して、(a) 帯光源を使用して照度を計算し、照度マッピングにより画像を作成した場合、(b) 受光直方体を使用して照度を計算し、照度マッピングにより画像を作成した場合、および (c) 照度マッピングを使用せず視点毎に照度を計算した場合について、計算時間を測定した。その結果を表 4.1 に示す。なお、画像中における物体数は約 800 であり、受光直方体のエレメント数は約 32,000 である。また、帯光源数は 48 である。表に示すように、受光直方体を用いると従来法の約 1/3 の時間でメッシュの格子点での天空照度を計算することができる。また、アニメーションのように複数の画像を作成する場合、照度マッピングを使用する方法は、視点毎に照度を計算する方法に比べて、メッシュの格子点の天空照度を計算するための前処理に時間を要するが、1 フレームの画像を 20 分で作成できるので、画像枚数が増えるほど効率よく作成が行える。

4.6 結言

本章では、屋外環境における天空光を考慮した画像の高速生成手法について述べた。提案手法は次に示す特徴をもつ。

表 4.1: 計算時間の比較

帯光源	前処理 (照度計算)	9 時間 21 分
	画像作成	20 分
受光直方体	前処理 (照度計算)	3 時間 13 分
	画像作成	20 分
	各視点毎照度計算	2 時間 24 分

使用計算機: IRIS 4D/120GTX

- (1) 大気中の微粒子による散乱・吸収を考慮した天空輝度分布を計算することにより、大気の状態や太陽の高度が変化したときの天空光を求めることができる。また、CIE 標準晴天天空輝度分布とよく一致するエアロゾルの係数を発見し、天空輝度分布を高精度に表現可能にした。
- (2) 天空光特有の輝度分布特性に基づく受光直方体を用いることにより、効率よく天空照度を計算することができる。また、物体による遮蔽効果をグラフィックスハードウェアを利用することにより高速に求めることができる。
- (3) 天空照度分布を事前に計算して照度マップに記憶し、これを画像生成の際に利用することにより、天空光を考慮した画像の作成時間を大幅に短縮することができ、より現実感の高いアニメーションの作成を可能にする。

提案手法の適用により、屋外環境における写実的な画像作成の際の隘路である計算コストの問題を解決することができた。また、建造物の視環境評価等の実務レベルにおいても高画質の画像を用いたアニメーションが利用できるようになった。



図 4.15: 曇天時における景観予測画像



(a)



(b)

図 4.16: 晴天時における景観予測画像



図 4.17: 別の視点からの景観予測画像

第 5 章

写実的な樹木の簡易表示法

本章では、写実性の高い樹木の簡易な表現手法を提案する。すなわち、水平、垂直の2種類の樹木の写真画像を撮り込み樹木の写真画像を透明な仮想の平面にマッピングする。視点の位置によらずリアルな画像の観察を可能にするため、視線方向によって透明度を自動的に変更し、樹木の外観形状、葉の繁り具合に応じたシェーディングを行えるモデルを開発した。このモデルは、樹木の影、および樹木に落ちる影の表示もできる。樹木を含む景観画像の生成に提案手法を適用し、その有用性を確認する。

5.1 概説

CGを使用した景観予測方法 [39, 89, 90] は、従来使用されていた水彩パース画や模型を作成する方法に比べて、(1) 数多くの代替案を容易に作成でき、(2) あらゆる視点からの予測画像が作成でき、アニメーション化も容易であるという特徴を持つ。しかし、CGによる景観予測画像が、並木や林などの樹木を含む場合、以下の点を満足することが必要である。

- (1) 景観予測には、種々の樹木を使用するため、樹木のデータベースを容易に構築できること。
- (2) 数多くの代替案を作成する必要があるため、樹木群を高速に表示できること。
- (3) 任意の視点位置からの表示が可能であり、アニメーション化も可能なこと。

以下に、これらに関する研究概況と提案手法の概略について述べる。

5.1.1 写実的な樹木表示に関する研究概況

これまでに開発されてきた樹木の表示法は、推計モデル、ルールモデル、印象派モデルの三つに大別することができる。ここでは、これらの手法について述べる。

(1) 推計モデル

推計モデルは、フラクタルや乱数を用いて、枝の太さ、長さ、分岐の角度などを制御して樹木を発生する方法である。これに関しては、まず、フラクタルを用いた手法 [17] が提案され、ついで、パーティクルシステムを用いて、推計モデルにより発生した草の表示手法 [18] が提案された。続いて、少ない入力データで複雑な形状を表示するための IFS (Iterated Function Systems) に基づいたフラクタル計算法が提案された [92]。また、発生した樹木の幹にバンプマッピングをほどこすことにより、極めてリアルな画像を作成する手法 [41]、群生した樹木をパーティクルシステムを用いて、照度計算、影付けを行ない表示する手法 [91] が開発された。さらに、樹皮にも確率モデルをほどこした樹木を作成する手法 [42] が開発された。そして、上述の文献 [41, 42, 91] の手法をさらに発展させ、形状の制御が可能な改良手法 [93] が提案された。

(2) ルールモデル

ルールモデルは、植物の形態規則に基づいて、理論的に樹木を発生する方法 [24, 94] である。この考え方に基づいて、時間的な樹木の成長をルールモデルを使用して表現する手法 [43, 44] が開発された。さらに、種々の形状の樹木を自動的に生成する手法 [95] が開発された。

(3) 印象派モデル

印象派モデルは、樹木の形状を 2 次曲面で近似し、この曲面上に数学的なテクスチャパターンをマッピングすることにより、樹木を表示する方法 [46] である。

推計モデルもルールモデルも樹木の詳細構造の表現に主眼を置いている。言い換えると、画像中で樹木が主役として表現される。これらの手法を景観評価用画像の樹木表示のために使用すると、樹木データベースの作成に膨大な計算時間を要する。推計モデルによって、希望する種類、形状の樹木を生成するには、試行錯誤が必要であり、ルールモデルでは、その樹木の詳細な形態調査から始めなければならない。さらに、推計モデル、ルールモデルはポリゴンの形で樹木が表現されるから、それだけで数万、数十万ポリゴンとなり、データ量の点から景観評

価値用画像には不向きである。印象派モデルは、前述の二つの方法と違い、比較的容易な手続きで樹木を表現することができ、また、表示も経済的に行なうことができる。しかし、数学的なパターンをテクスチャとして使用しているため、樹木の種類を識別できるまでの詳細な表現は困難で、景観評価用画像に用いるには画質が悪すぎる。

5.1.2 提案手法の概略

本章では、画像中において、脇役的存在ながら比較的重要な役割を持つ樹木の新しい表示手法を提案する。提案手法では、2種類の樹木の写真画像を透明な平面にマッピングする。この提案手法においては、データベースの作成は、実際の写真画像から樹木を切り出すだけでよく、種々の樹木のデータベースを比較的容易に作成できる。また、樹木を表示する計算コストも、テクスチャマッピングによるため、パーティクルシステムによる手法 [91] に比べて極端に少なく、経済的な範囲においてより多くの代替案を作成することができる。しかし、写真画像は本質的には、2次元情報しか持っていないため、視点移動によるアニメーション化の際には工夫が必要となる。提案手法では、正面および上面から撮影した2種類の写真画像を垂直および複数の水平な透明平面にマッピングする。これらを用いて疑似的に3次元表示を行なう方法を開発し、この問題を解決している。

5.2 2種類の写真画像を用いた樹木の表示

5.2.1 仮想平面の設定

景観評価画像作成の際、視点は、自動車の運転時、歩行時、高層住宅の窓などからの俯瞰視など自由に選択可能としておく必要がある。テクスチャは平面にマッピングされるから、視線に対して平面が垂直でない場合は、樹木が歪んで見え不自然である。平面が視線方向と平行になると、全く見えなくなる。この点を解決し、視線の方向に関係なく、どこからみても樹木を自然に表示するために、以下に述べる方法により、写真画像をマッピングする仮想平面を設定し、疑似的に3次元表示を行なう(図 5.1参照)。

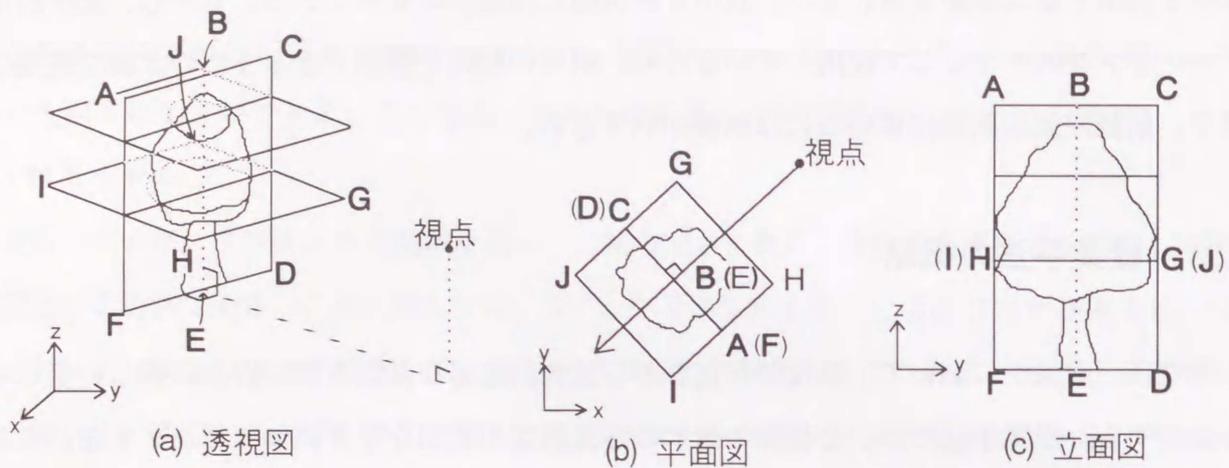


図 5.1: 樹木の画像をマッピングする仮想平面の設定

- (1) 地面に垂直な仮想平面 ACDF を、その法線が常に視点の水平成分と一致する方向を向くように設定する。すなわち、この仮想平面は、幹の中心線 BE を軸として回転し、視点が変わると、常に視点方向を向くように設定される (図 5.2(a) 参照)。
- (2) 水平方向の仮想平面 (GHIJ など) を、垂直仮想平面 ACDF 中の木の葉の幅の最大付近を含む適切な高さに設定する。枚数は樹木の枝振りや繁り方に依存して決定する。つまり、葉のあまり繁っていない樹木の場合は、多くの水平仮想平面が必要であるが、葉が繁っている樹木の場合は、少なくてよい。視点が変わると、水平方向の仮想平面も、垂直仮想平面の回転と同期して回転させる。
- (3) 正反射方向からの映り込み・屈折方向からの透過を考慮する物体がシーン中に存在する場合は、上述と同様の方法により仮想平面を設定する。すなわち、それぞれの垂直仮想平面の法線ベクトルが、視線と物体との交点の方向を向くように回転させる (図 5.2(c) 参照)。

5.2.2 樹木テクスチャのマッピング方法

垂直仮想平面には、樹木を横方向から撮影した写真画像から画像処理技法によって背景を除去した画像をテクスチャとしてマッピングする。水平仮想平面には、樹木を上方向から撮影し

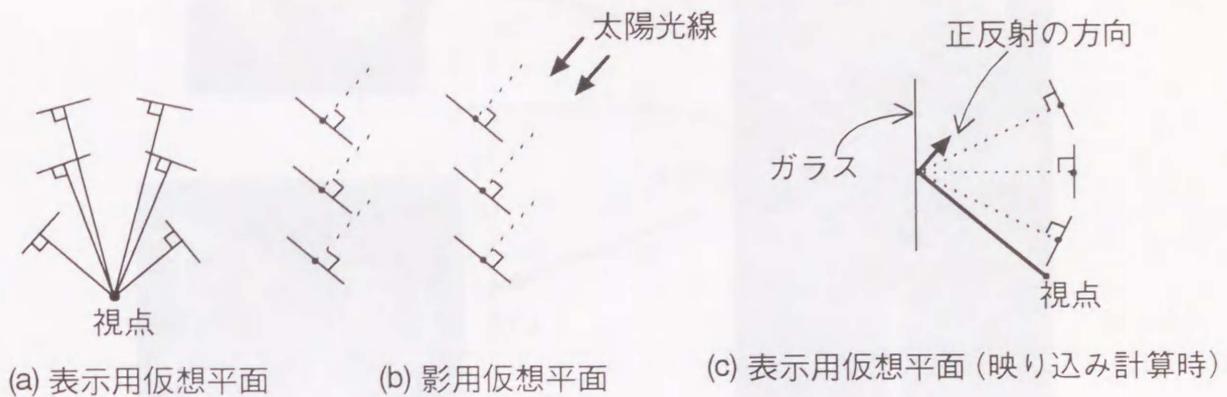


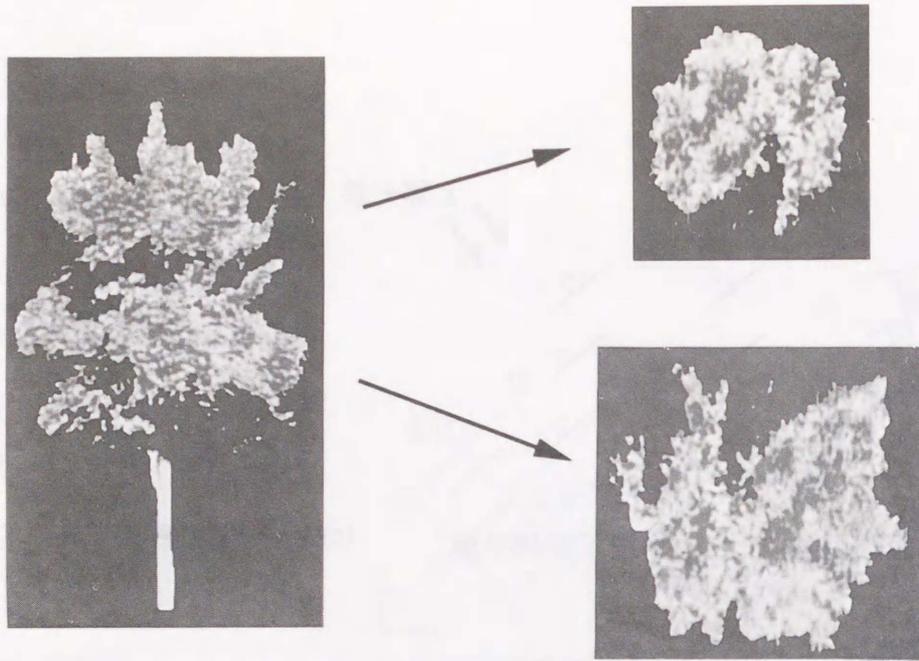
図 5.2: 仮想平面の設定

た画像から、背景を除去した画像を用いる。ただし、水平仮想平面を設定する高さに応じて、水平仮想平面にマッピングするテクスチャの直径を垂直平面のそれに合うように調整する。すなわち、水平仮想平面の高さにおける垂直仮想平面中の樹木の枝の幅に合わせて大きさを変えたり、葉の繁みの少ない樹木に対しては、水平仮想平面の位置する高さ付近の葉のみを切り出してテクスチャ画像を作成する。図 5.3 に垂直仮想平面用テクスチャと数枚の水平仮想平面用テクスチャについて、葉の繁った樹木と、葉の繁っていない樹木の 2 例を示す。視線が任意の方向に移動する際、樹木は自然にスムーズに変化しなければならない。各仮想平面と視線との交点における色は、視点から離れた交点から視点に向かって、次式にしたがい順次合成する (図 5.4 参照)。

$$B_{k+1} = (1 - t_{k+1})C_{k+1} + t_{k+1}B_k \quad (5.1)$$

$$B_1 = C_1 \quad (5.2)$$

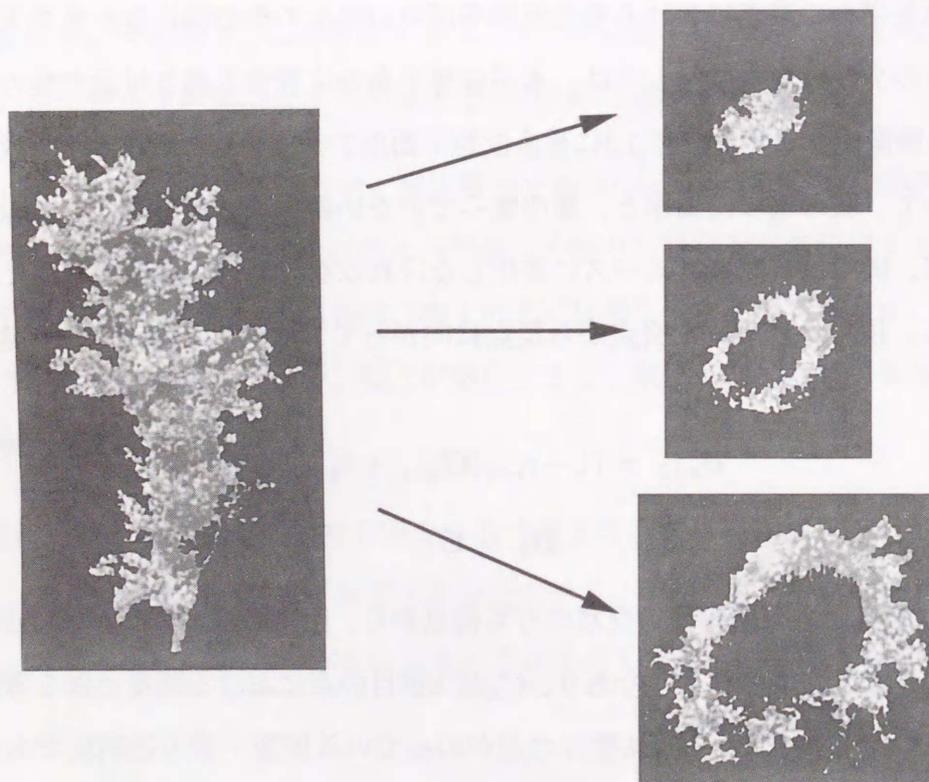
ここで、 B_k は視線と各仮想平面の交点のうち視点から、距離の遠い方から順に k 番目の点までのテクスチャ要素を合成したものであり、 C_k は k 番目の点における照度と影を考慮したテクスチャ要素の色である。また、 t_k は k 番目の点がついている仮想平面の透明度である。この透明度は、以下の条件を満たす。(1) 樹木を真横から見たときには、横から撮影した垂直仮想平面上のテクスチャだけが表示される。(2) 真上から見たときには、上から撮影した水平仮想平面上のテクスチャだけが見える。(3) その中間は、連続的に係数値が変化する。すなわち、 t_k は θ_k を仮想平面の法線ベクトルと視点からその仮想平面の中心点へのベクトルのなす角度としたと



(垂直仮想平面用)

(水平仮想平面用)

(a) 葉の繁った樹木



(垂直仮想平面用)

(水平仮想平面用)

(b) 葉の繁っていない樹木

図 5.3: 樹木を表示するために使用するテクスチャ

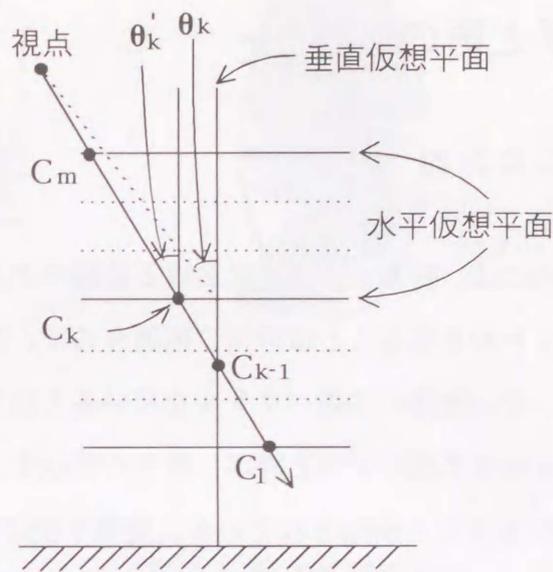


図 5.4: 各仮想平面上のテクスチャ要素の合成法

き、この θ_k をパラメータとした関数となる。計算時間を節約するため、上記の条件を満たす関数として、 $t_k = 1 - \cos \theta_k$ を使用する。視線と交点をもつ仮想平面が m 枚とすると、最終的に表示される樹木の色 C は、

$$C = B_m \quad (5.3)$$

となる。このように視点と仮想平面のなす角により、それぞれの仮想平面の透明度を変化させ、各仮想平面上のテクスチャを合成表示することにより、視点が樹木の真横から真上まで連続的に変化した場合でも、自然な樹木の表示を行なうことができる。すなわち、最初は、横方向からみた樹木のテクスチャのみが表示される。そして、視点の移動にともない、表示されるテクスチャの重みが横方向のものから上方向のものへ連続的に変化し、最終的に視点が樹木の真上に来たときには、上方向からみた樹木のテクスチャのみが表示される。本手法では、常に垂直仮想平面が視点に対して正対する方向を向いているため、視点が水平方向に移動しても、得られる樹木の画像はいつも同じもので、樹木の枝振りの変化は表現できない。すなわち、本手法により作成したアニメーションでは樹木の外見が変化しない。しかし、実際の景観評価のためのアニメーションにおいては、個々の樹木の相互の位置関係が注目され、視点の移動による樹木の外見の変化が問題になることはない。すなわち、個々の樹木の外見の変化はそれを直ぐ近くで眺めていない限り実用上問題とならない。

5.3 シェーディングと影の処理

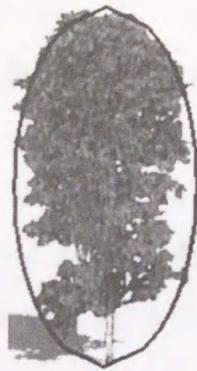
5.3.1 葉の向きを考慮したシェーディング

樹木の照度計算を行なうためには、樹木上の各点における法線ベクトルが必要となる。実際の樹木の各点における法線ベクトルを得ることは非常に困難なので、本章では、樹木の外観を樹木を外包する物体で近似し、その物体の法線ベクトルを用いる方法を提案する。以下、この樹木の外観を表すための物体を樹木外観モデルと呼ぶ。樹木の形状を大別すると鉛筆型、楕円体、逆円錐の3タイプに分類できることが知られている。提案手法では、図 5.5 に示すようにこの3タイプの樹木外観モデルを用意している。実際の樹木では、葉の法線ベクトル全体を見ると、おおむね樹木外観モデルの法線ベクトルと一致する方向を向いて、各々の葉では、ある程度のばらつきを持っている。そのため、樹木外観モデルの法線ベクトルをそのまま用いて、照度計算を行なうと不自然な表示となる。この点を解決するために、乱数を用いて法線ベクトルにばらつきをもたせる方法を採用する。樹木はその葉ごとに法線ベクトルがほぼ一致しており、その照度は一定であると考えることができる。このため、計算点ごとに独立に法線ベクトルを振らせると、ピクセルごとに照度に変化し、不自然な表示となる。図 5.5 に示すモデルを用いて各テクスチャ要素の照度計算を以下のようにして行う。

- (1) アニメーションを作成した場合に樹木の部分がちらついてしまうことを防ぐため、使用するテクスチャをあらかじめ図 5.6 に示すような楕円形の小領域に分割し、それぞれの領域に単位法線ベクトル $\mathbf{N}_{k,i}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) を割り付ける。ここで、 n は小領域の個数で、 k は仮想平面番号である。このとき、この小領域は、それぞれが1枚の葉を表しており、その大きさは、樹木のテクスチャ上での葉の大きさを考慮して決定する。また、小領域に割り付けておく単位法線ベクトルの向きは、葉を1枚の平面と考えたときの向きを意味し、算出方法は次節において述べる。
- (2) 視点と輝度計算を行う計算点とを結んだ視線と、樹木外観モデルとの交点 P を求める (図 5.7 参照)。また点 P における接平面の法線ベクトル \mathbf{N} と xz 平面とのなす角 φ を求める。視線と仮想平面 k との交点 P' を含む小領域 i に割り付けられている。単位法線ベクトル



(a) 鉛筆型

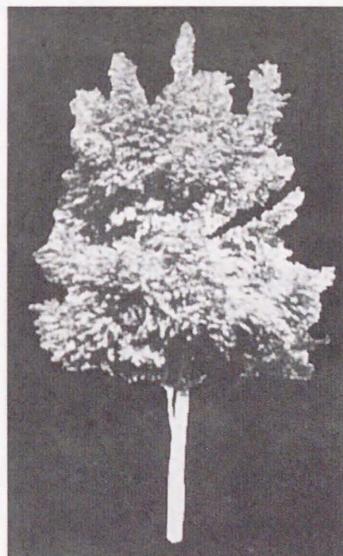


(b) 楕円体型

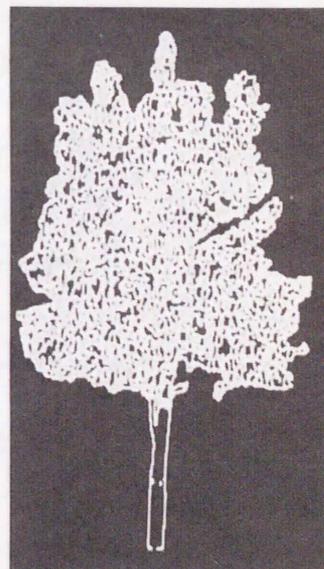


(c) 逆円錐型

図 5.5: 樹木外観モデル



(a) テクスチャ



(b) 小領域

図 5.6: テクスチャの小領域への分割

$N_{k,i}$ を樹木の中心軸に対して φ だけ回転した $N'_{k,i}$ を求める。

- (3) $N_{k,j}$ を視線と仮想平面 k との交点 P' を含む小領域 i における法線ベクトルと仮定し、 $N'_{k,i}$ を樹木外観モデルの点 P における法線ベクトルと仮定することにより、照度計算を行なう。すなわち、点 P における照度を考慮したテクスチャ要素の色 C_k は Lambert の法則により次式となる。

$$C_k = \begin{cases} (1 - \alpha)(L \cdot N'_{k,i})C'_k + \alpha C'_k & (L \cdot N'_{k,i} > 0 \text{ のとき}) \\ \alpha C'_k & (L \cdot N'_{k,i} \leq 0 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (5.4)$$

ここで、 L は、点 P から光源方向を向いた単位ベクトル、 α ($0 \leq \alpha \leq 1$)は環境光成分、 C'_k は仮想平面 k 上の点 P' のテクスチャ要素の色である。

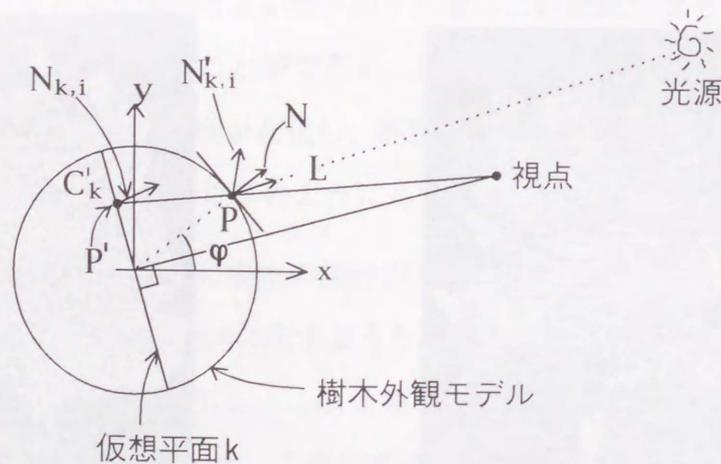


図 5.7: 樹木の照度計算方法

5.3.2 小領域への単位法線ベクトルの設定

小領域に設定する単位法線ベクトル $N_{k,i}$ は x 軸を樹木の中心から外へ向かう方向にとった場合の葉の法線ベクトルを表わす (図 5.8参照)。ここで、個々の葉の法線ベクトルは様々な方向

を向いているが、全体としてみると、法線ベクトルが樹木の中心から外へ向かう方向（すなわち、 x 軸方向）を向く葉が一番多く、その分布は正規分布に従っていると仮定し、 $N_{k,i}$ を次式で決定する。

$$\begin{cases} (N_{k,i})_x = \cos \varphi \\ (N_{k,i})_y = \sin \varphi \cos \xi \\ (N_{k,i})_z = \sin \varphi \sin \xi \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\varphi = \pi a |\text{randn}| \quad (0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \text{ のみを使用}) \quad (5.6)$$

$$\xi = 2\pi |\text{rand}| \quad (5.7)$$

ここで、 randn は平均 0、分散 1 の正規乱数を、 rand ($0 \leq \text{rand} < 1$) は一様乱数を表わす。 a ($a > 0$) は小領域の方向の分布に関するパラメータである。このようにして $N_{k,i}$ を決定すると、 $N_{k,i}$ は半径 1 の半球上に分布する。 a を小さくするほど、 x 軸のまわりにかたまって分布するようになる (図 5.9 参照)。すなわち、葉が規則正しく外側を向いている樹木では a を小さく設定する。

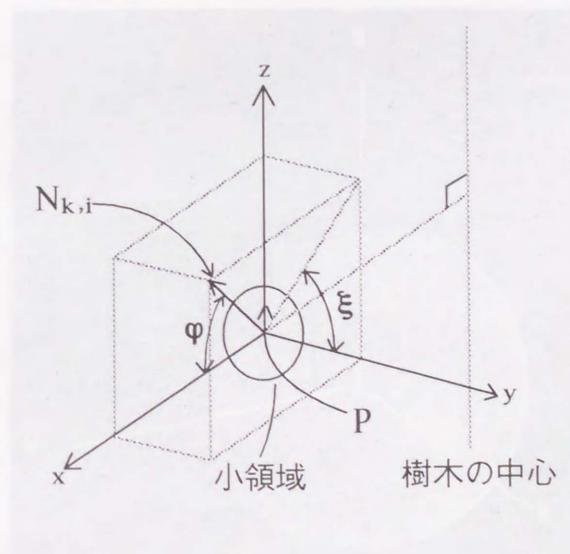
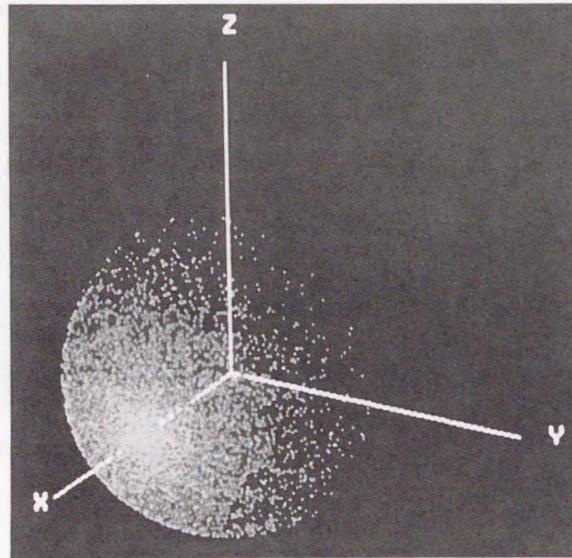
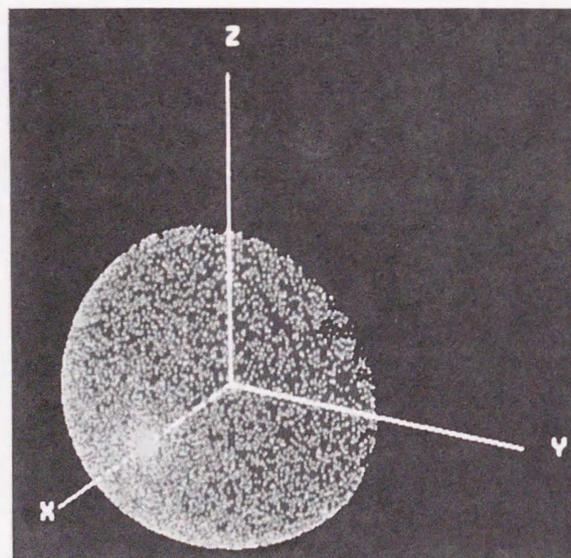


図 5.8: 小領域に割り付ける単位法線ベクトル



(a) $a = \frac{1}{6}$



(b) $a = \frac{5}{3}$

図 5.9: 小領域に割り付ける単位法線ベクトルの分布

5.3.3 影の処理

樹木の影を表示する際の仮想平面と光源の関係は、樹木を表示する際の仮想平面と視点との関係におきかえて考えることができる。樹木の影を表示するために、樹木表示用の仮想平面をそのまま用いると、仮想平面を斜めから照らす位置に光源がある場合には、縦に細長く不自然な影が表示されてしまう。そこで、影付けを行なうために、樹木表示用仮想平面とは別に、影付け用仮想平面を新たに設ける。すなわち、影用垂直仮想平面が光源の方向を向くように幹の中心線を軸として回転する仮想平面の組を、樹木の影の処理のために用いる。垂直仮想平面の回転は、その法線ベクトルが、光源が太陽光線の場合は太陽の方向と一致し、点光源の場合は垂直仮想平面の中心と光源を結んでできるベクトルの水平成分と一致させることにより実現する。この影用仮想平面にも表示用仮想平面と同じテクスチャをマッピングする。しかし、このテクスチャ自身は表示されず影の処理のみに使用する。影付けは、(a) 樹木自らが自分自身の幹に影を落とす場合、(b) 樹木が樹木以外の物体に影を落とす場合、(c) 樹木以外の物体が樹木に影を落とす場合、(d) 樹木が他の樹木に影を落とす場合、の4ケースに分けて処理を行なう。

(1) 樹木が自分自身の幹に落とす影

ほとんどの樹木は、樹木の葉が自分自身の幹に影を落とす(図5.10参照)。計算点 P が幹と判定された場合は、計算点 P と光源を結ぶ線分が、自分自身の影用水平仮想平面 S_i ($i = 1, \dots, m$) と交わる点 P_i, P_{i+1} を求める。ここで、交点にテクスチャの要素が一つでも存在する場合、計算点 P は影の内部にあるとして処理を行なう。

(2) 樹木が他の物体に落とす影

樹木が他の物体へ落とす影の計算は、以下の手順で行う。

- (i) 各影用仮想平面 F_k ($k = 1, 2, \dots, n$: n は影用仮想平面の枚数) と光源の位置によりシャドウボリュームを作成する
- (ii) 計算点 P がこのシャドウボリューム内に含まれているか否かを判定する。含まれていない場合には、点 P は影の内部にはない。含まれている場合には、点 P と光源を結ぶ線分と、

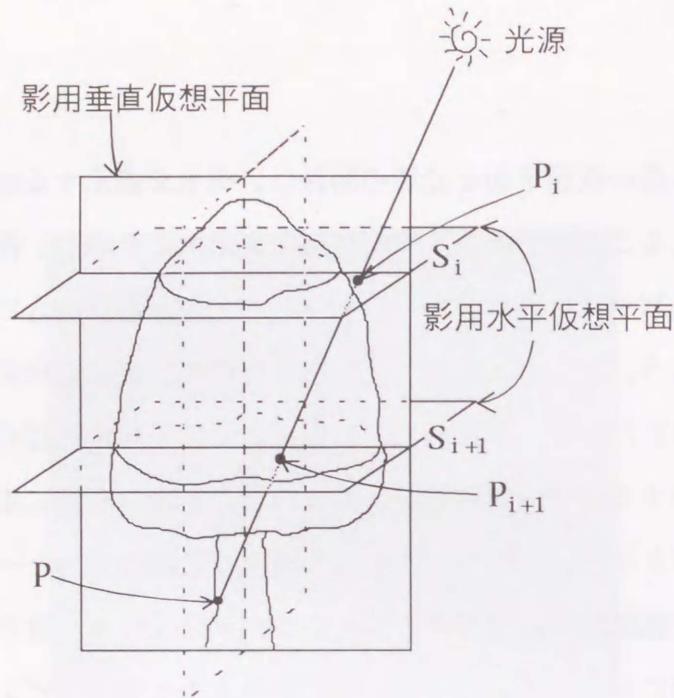


図 5.10: 自分自身に落ちる影

影用仮想平面の交点を求める。(1)で述べた方法と同様の処理を行うが、この場合、水平仮想平面だけでなく、垂直仮想平面もテストする。

(iii) 上記テストの結果、影用仮想平面との交点に、テクスチャ要素が一つでも存在するときは、点 P は樹木による影の内部にあるとして処理を行なう。

(3) 他の物体が樹木に落とす影

(a) 葉が繁った樹木

葉が繁った樹木では、樹木外観モデルを多面体近似した物体を用いて影の処理を行なう(図 5.11 (a) 参照)。すなわち、視線と樹木外観モデルの交点 P' が他の物体のシャドウボリューム内にあるか否かを判定することにより、影の領域にあるか否かを判定する。実際の樹木の葉の位置は樹木外観近似モデル上から多少前後しているため、樹木に落ちる影の境界は、凸凹したものとなる。しかし、上述の方法では、樹木に落ちる影の境界がはっきりして不自然となる。これを解決するために、次に述べる方法を用いて影の境界をぼかす。まず、図 5.11 (b) に示すように、計算中のピクセルの中心 P から影の境界までのうち、近い方の距離 l を計算する。次に 0 から $\max(0, 1-l/l_{max})$ の間の値をとる乱数を発生する。ここで l_{max} は、影の境界からそれ以上離れた領域は完全に影の中にあるとして処理するパラメータ値である。そこで、計算点における色

は、上記乱数値に影を考慮しない場合の色を掛け合わせて得る。そして、アニメーション化した際のちらつきを防止するため、上述の乱数は、予め樹木のテクスチャ領域を分割して作成した小領域と対応させて割り付けておく。

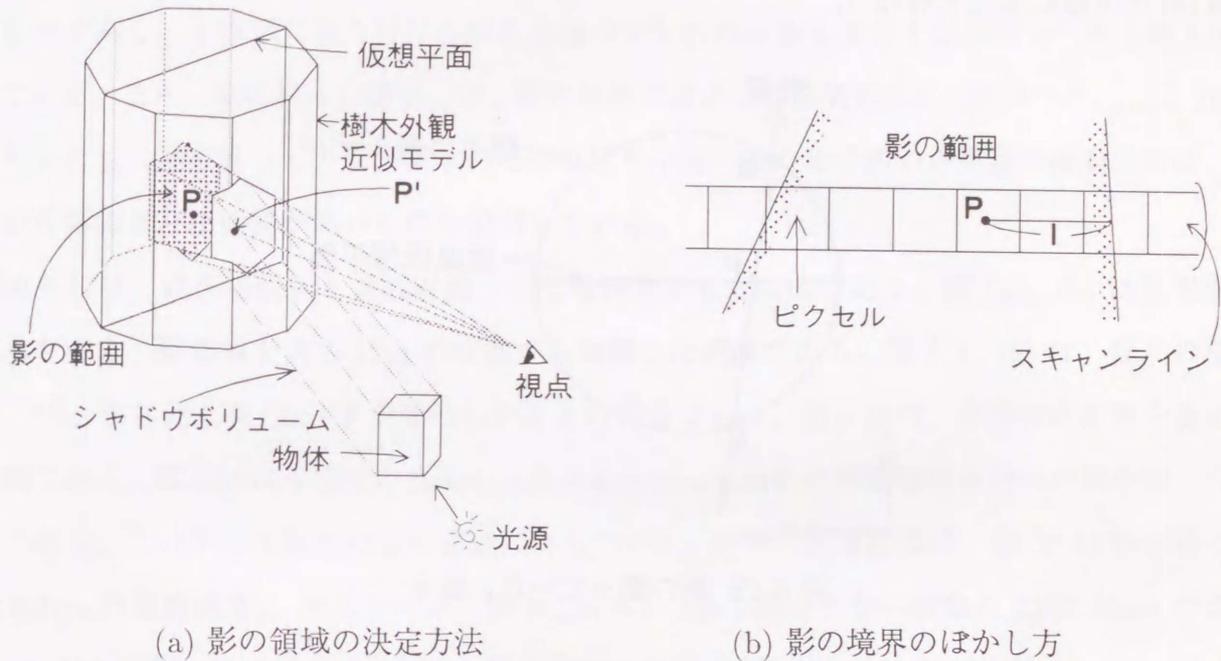


図 5.11: 葉の繁った樹木

(b) 葉が繁っていない樹木

葉の繁みの少ない樹木の葉が影の領域にあるか否かを決定するため、葉の3次元空間中での位置の決定が必要となる。樹木のテクスチャは、2次元情報しか持たないため、本章で提案する手法では、次に示す確率的な方法を用いて3次元空間上での葉の位置を決定する。

点Pをテクスチャ要素を持つ処理対象となる仮想平面上の点とする(図5.12参照)。点Pでの葉は、視線と樹木外観モデルの交点A、Bの間の線分上に存在する。そこで、乱数を用いて線分AB上での葉の位置Cを決定する。この乱数は、他の乱数と同様にアニメーションを作成する場合に生じる樹木の部分のちらつきを防ぐため、テクスチャを分割した小領域ごとにあらかじめ割り付ける。点Cが影を落とす物体いずれかのシャドウボリューム内であれば、点Pのテ

クスチャは影の内部にあるとして処理される。

(4) 樹木が他の樹木に落とす影

樹木が他の樹木へ影を落とす場合は、次のような方法で処理する。まず、本節(2)の方法を用いて計算点における葉の位置を決定する。次に、その点が影の領域内にあるか否かの判定を本節(3)の方法によって行なう。

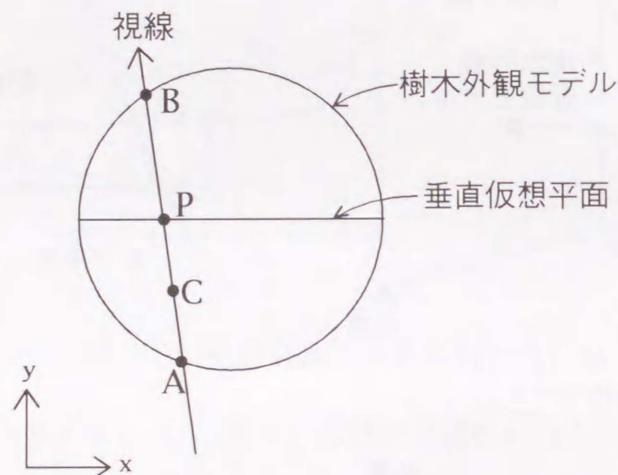


図 5.12: 葉の繁っていない樹木

5.4 適用例

先ず、図 5.5 に示す 3 種類の樹木のタイプを用いて、樹木の表示、陰影付けを行うために必要な水平仮想平面の枚数について検討を行なう。そして、駐車場、街路樹および田園風景の表示に応用した例を示し、提案手法の有用性を示す。

水平仮想平面の枚数は、樹木の形状や葉の繁り具合に依存する。図 5.13 に、鉛筆型のよく繁った樹木を、水平仮想平面の枚数を変えて表示した例を示す。視点の俯角は、図 (a)、(b)、(c) でそれぞれ 30° 、 60° 、 90° である。同様に、図 5.14 に楕円体型のよく繁った樹木を、図 5.15 に逆円錐型のあまり繁っていない樹木を表示した例を示す。水平仮想平面の設定されていない樹木については、当然のことながら俯角が 90° になると表示されなくなる。水平仮想平面の枚数を増していくと、視点の上下方向の移動に対して、より自然な樹木を表示できることがわか

る。しかし、3枚もしくは4枚の水平仮想平面で一般的には十分である。

図 5.16では、物体(この例では壁)による影が葉の繁った樹木(図(a))、および、あまり繁っていない樹木(図(b))に落ちた場合の例を表示している。それぞれの図において、左側は樹木外観モデルの法線ベクトルをそのまま用いて照度計算を行ない、樹木外観近似モデル上の点を用い、境界をぼかさずに影付けを行なっている。右側は 5.3.3 節で述べた手法を用いて表示したものである。小領域に割り付けられる法線ベクトルの分布を決定するパラメータ a は 1.0 としている。また、葉の繁った樹木では、影の境界のぼかし幅を決定するパラメータ l_{max} を 10 ピクセルとし、葉の繁っていない樹木の葉の位置を決定するために用いる乱数の確率分布は、樹木の背面側より正面側が高いものを使用している。

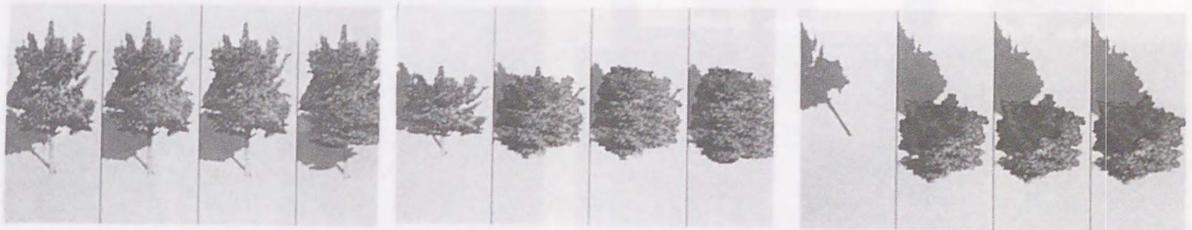
図 5.17は、駐車場設計と景観評価への応用例を示したものである。図(a)、(b)は使用する樹木を変え、駐車場を高さ 12m の位置から俯瞰した画像である。図(c)、(d)は、視点の高さを、35m から地上高(2m)まで降ろしたときの画像である。図 5.18は、夕方の駐車場を表示した例である。図 5.19は天空光と太陽の大きさを考慮して街路の景観設計を行った例を示したものである。この例では樹木の影が道路に落ちている。本例の計算時間は、38分43秒であった(3.2Mips 計算機使用)。同じシーンで樹木(10本)のある画像とない画像の CPU Time の比率は、1.472であった。図 5.20はゴルフ場の設計への応用例を示したものである。

本章で提案した手法は、視環境評価のためのおよび都市景観評価のアニメーション用画像制作に応用されている。

5.5 結言

本章では、景観予測画像のための樹木を表示する方法を提案した。提案手法では、樹木正面と樹木上空から撮影した2枚の写真からデジタル化されたテクスチャを、法線ベクトルの水平成分が常に視点の方向を向いている垂直仮想平面と、これに同期して回転する数枚の水平仮想平面上にマッピングするテクスチャマッピングを基本としているため、きわめて小さい計算コストで様々な樹木を含んだ景観評価用の静止画像およびアニメーションを生成することが可能である。また、照度計算や影の処理のために、多面体の樹木外観モデルを用いている。照度

計算は、樹木用テクスチャを分割した小領域に割り付けた法線ベクトルを用いて行う。また、葉の繁り具合にかかわらず、樹木に落ちる影および、樹木が他に落とす影の両方を自然に表現することを可能にした。



水平仮想
平面枚数:

0

2

3

4

0

2

3

4

0

2

3

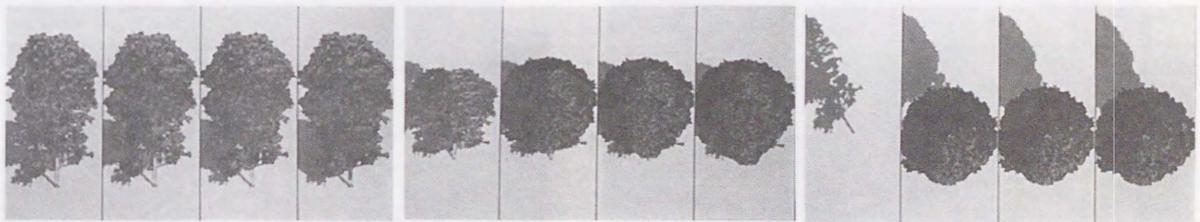
4

(a) 俯角 30°

(b) 俯角 60°

(c) 俯角 90°

図 5.13: 鉛筆型樹木



水平仮想
平面枚数:

0

2

3

4

0

2

3

4

0

2

3

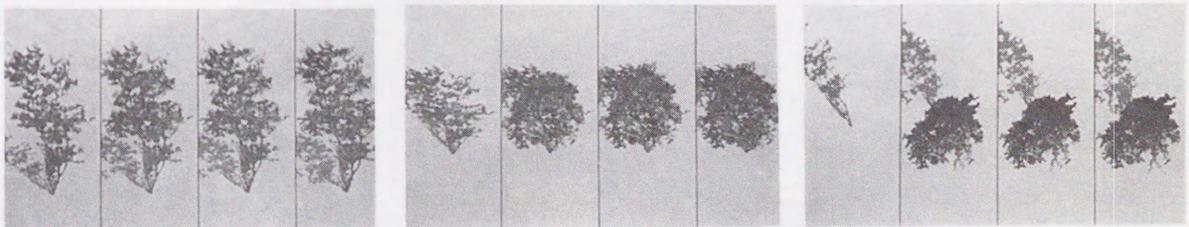
4

(a) 俯角 30°

(b) 俯角 60°

(c) 俯角 90°

図 5.14: 楕円体型樹木



水平仮想
平面枚数:

0

3

4

5

0

3

4

5

0

3

4

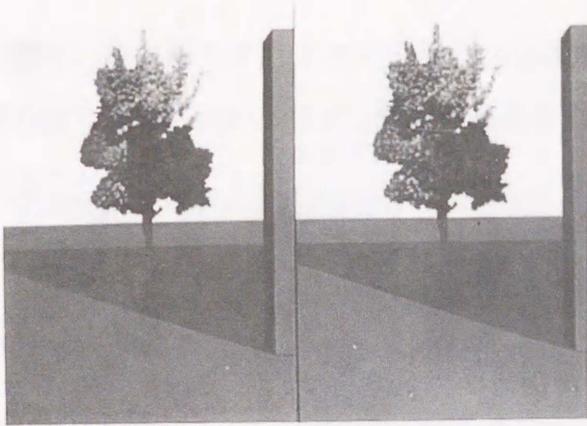
5

(a) 俯角 30°

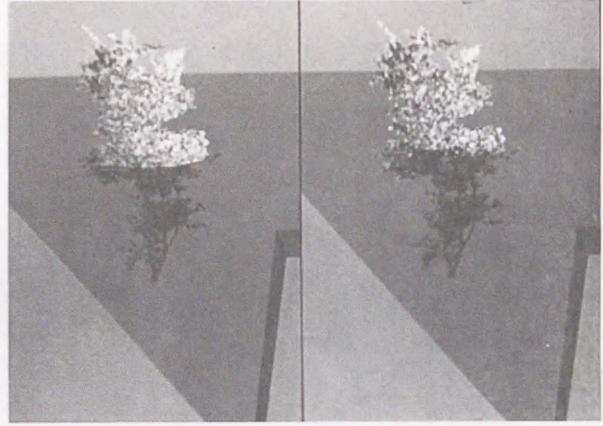
(b) 俯角 60°

(c) 俯角 90°

図 5.15: 逆円錐型樹木



(a) 俯角 0°



(b) 俯角 30°

図 5.16: 樹木に落ちる影



(a) 視点高度 12m



(b) 視点高度 12m



(c) 視点高度 35m



(d) 視点高度 2m

図 5.17: 駐車場設計のための景観予測画像



図 5.18: 夕方の駐車場



図 5.19: 街路設計のための景観予測画像



図 5.20: ゴルフ場の景観評価への適用例

第 6 章

結論

本論文では、景観シミュレーションや照明シミュレーションに適した、物理現象にできるだけ忠実な CG 画像の、簡易なモデルを用いた高速生成手法を提案した。

半透明物体や水面および樹木のような複雑な形状の物体を含み、天候や時刻の変化を表現できる写実的な CG 画像を生成するためには、物理現象にできるだけ忠実なモデルに基づく描画アルゴリズムを開発する必要がある。このため、写実性を高めるための効果の追加は、計算時間の大幅な増加を招くという問題があり、これが、写実性の高い CG 画像を景観・照明シミュレーションへ適用する際の大きな障害になっている。

ハードウェアの面からは、高性能な CPU、大容量のメモリ、および専用のグラフィックスエンジンを搭載した GWS の低価格化が進み、特別高価な設備でなくともフルカラーの CG が利用可能になってきた。本論文は、ソフトウェアの面から、(i) 半透明物体を含む環境、(ii) 水面を含む環境、(iii) 天空照度を考慮した景観、(iv) 樹木を含む景観の表示を、物理現象にできるだけ忠実でありながら、4 項目それぞれに対して簡易なモデルを考案することにより、写実性の高い CG 画像を高速に生成する手法を開発した。

以下に、本研究で得られた成果を各問題ごとにまとめる。

- (1) スキャンライン法と光線追跡法のそれぞれの長所を組み合わせることにより、光の鏡面反射・屈折を生じる物体を含む画像の表示を効率よく行う手法を開発した。提案手法は以下の利点をもつ。

- (i) あらかじめスキャンライン法によって可視面の抽出を行うので、光線追跡法を適用して輝度計算を行う領域が小さくなり、処理時間の節約が図られる。なお、提案手法の効果は、光線追跡法の適用を必要とする物体が占める画面中の面積が小さいほど顕著に現れる。
 - (ii) 物体を多角形の集合として表現するスキャンライン法では、物体の輪郭が滑らかでなくなる欠点があるが、これらの物体に光線追跡法を適用することにより、スキャンライン法の利点を余り損なうことなく、輪郭線を滑らかに表示できる。
 - (iii) 物体の外接箱を階層化する手法を拡張して、影の探索についても階層的に処理を行うので、光線追跡法を適用する際の影の計算を効果的に行える。
 - (iv) 近似的ではあるが、透明物体の落とす影の濃淡表示が可能である。
- (2) 天空光を含んだ自然昼光と配光およびスペクトル特性を考慮した水中・水上の点光源それぞれについて、これらによって照射された種々の水質の水面の色を写實的に表現することにより、水辺を含む環境および照明効果を予測する一つの手法を開発した。提案手法により、以下の現象を考慮した画像を生成することが可能になった。
- (i) 光源の配光・スペクトル特性をもつ水中・水上光源による、物体表面における鏡面反射および相互反射効果。
 - (ii) 水中・水上光源によって照射される水面の反射・屈折効果。
 - (iii) 水中における光の散乱・吸収を考慮した水の混濁度の影響の表示。
 - (iv) 水面および水中に投下される影の影響。
- (3) グラフィックス用ハードウェアを有効利用可能な、屋外環境における天空光を考慮した画像の高速生成手法を開発した。提案手法は次に示す特長をもつ。
- (i) 大気中の微粒子による散乱吸収を考慮して天空輝度を計算することにより、大気の状態や太陽の高度が変化したときの天空光を求めることができる。また、CIE 標準晴天輝度との比較を行うことにより、光源として天空光を考慮するときの標準となる値を示し、コンピュータグラフィックスで天空光を考慮することを容易にする。

- (ii) 天空光特有の輝度分布特性に基づく受光直方体を用いることにより、効率よく天空照度を計算することができる。また、物体による遮蔽効果を、グラフィックスハードウェアを利用することにより高速に求めることができる。
 - (iii) 照度マッピングを用いることにより、天空光を考慮した画像の作成時間を大幅に短縮することができ、より写実的なアニメーションの作成を可能にする。
- (4) 景観予測画像のための樹木を表示する方法を開発した。提案手法は、以下の特長を持つ。
- (i) 樹木正面と上空から撮影した2枚の写真からデジタル化されたテクスチャを、垂直および複数の水平の仮想平面上にテクスチャマッピングする。垂直仮想平面は、その法線ベクトルの水平成分が常に視点の方向を向いており、水平仮想平面は、垂直仮想平面と同期して回転する。これにより、きわめて小さい計算コストで、様々な樹木を含んだ景観評価用の静止画像およびアニメーションを生成することが可能である。
 - (ii) 照度計算や影の処理のために、樹木の形状に応じた多面体の樹木外観モデル、樹木用テクスチャを分割した小領域に割り付けた法線ベクトル、および乱数を用いる。これに、葉の繁り具合を考慮した処理を行うことにより、樹木に自然な陰影を与えるだけでなく、樹木自身に落ちる影および樹木が他の物体に落とす影の両方を表現することができる。

今後の課題

本研究により、写実的なCG画像の高速生成に関して有効な成果が得られた。しかし、写実性と高速性のさらなる向上を図るため、なお、以下の項目が研究課題として残されている。

- (1) 半透明物体の表示に関しては、正反射 (mirror reflection) 方向からの映り込みと鏡面反射 (specular reflection) とは独立に扱った。これに対して、その後 bidirectional reflectance-function (BRDF) や bidirectional shading function (BSF) を考慮した描画モデルを利用することにより、両者を統一的に取り扱う手法 [96] が提案されている。しかし、現在、な

お計算コストが非常に大きい。そこで、表示効果と計算コストの両者を満足する簡易なモデルを考案する必要がある。

- (2) 水面を含む環境の照明問題に関しては、水中の物体表面と水上の物体表面との間の相互反射成分と、鏡面反射成分を考慮した水中物体表面間の相互反射成分は、これを無視した。これらの計算手法の考案、および計算時間と表示効果のトレード・オフについての検討が必要である。

また、水の消散係数、散乱関数等、水質に関するデータベースの構築と、写真焼き付けの際の色彩変化に関する調査も、シミュレーション結果を正確に評価するために必要である。

- (3) 太陽の位置の変化をアニメーションに反映するため、天空照度計算のさらなる高速化が必要である。また、現状では晴天か、曇天かのいずれかのモデルしか表現できないが、様々な高度にある雲の影響を考慮した天空輝度分布、天空照度計算手法の開発が必要である。

- (4) 本論文では、写真画像をテクスチャマッピングして樹木を表示した。このため、風により樹木が揺れるアニメーションの作成が非常に困難である。これに対しては、CGにより生成した樹木画像をテクスチャマッピングに利用することが考えられるが、樹木用テクスチャの計算コスト、画質等についての検討が必要である。また、様々な樹木を容易に配置できるように、樹木のデータベースの構築が必要である。

謝辞

本論文は、著者が広島大学工学部、同学工学研究科(博士課程前期)に在学中、および広島県立大学に在職中の研究成果をまとめたものである。本論文をまとめるにあたり、懇切な御指導を賜りました、広島大学工学部山下英生教授に深く感謝致します。

本論文をまとめるにあたり、有益なご教示を多数賜りました、広島大学工学部佐々木博司教授、長町三生教授、雛元孝夫教授に深く感謝致します。

広島大学および広島県立大学において、本研究の機会を与えていただき終始御指導、ご鞭撻を賜りました、広島県立大学経営学部 中前栄八郎教授に衷心より感謝致します。

本研究の写実的な樹木の簡易表示法に関して議論していただき、地形データおよび樹木の写真データをご提供いただきました、東京電力(株)野口高男氏、加藤二二和氏に深く感謝致します。

本研究の水上および水中照明シミュレーションに関して議論していただき、プールの構造および照明器具のデータをご提供いただきました、(株)ヤマギワ研究所濱辺徹氏(現(株)野村総合研究所)に深く感謝致します。

さらに、本研究を進めるにあたり、有益な御討論をいただきました福山大学工学部 西田友是教授、広島大学工学部 金田和文助教授に深く感謝致します。また、本研究の遂行の際、プログラム開発に協力いただいた広島大学工学部電気機器工学研究室 馬場雅志氏(現、広島市立大学)、土橋宜典氏(大学院生)、ならびに同研究室の諸氏に感謝致します。

参考文献

- [1] Phong, B. T.: "Illumination for Computer-Generated Pictures," *Communication ACM*, Vol. 18, No. 6, pp. 311-317(1975).
- [2] Cook, R. L. and Torrance, K. E.: "A Reflectance Model for Computer Graphics," *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 1, No. 1, pp. 7-24(1982).
- [3] Blinn, J. F. and Newell, M. E.: "Texture and Reflection in Computer Generated Images," *Communication ACM*, Vol. 19, No. 10, pp. 542-547(1976).
- [4] Whitted, T.: "An Improved Illumination Model for Shaded Display," *Communication ACM*, Vol. 23, No. 6, pp. 343-349(1980).
- [5] He, X. D., Torrance, K. E., Sillion, F. X. and Greenberg, D. P.: "A Comprehensive Physical Model for Light Reflection," *Computer Graphics*, Vol.25, No.4, pp. 175-186(1991).
- [6] Klassen, R, V.: "Modeling the Effect of the Atmosphere on Light," *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 6, No. 3, pp. 215-237(1987).
- [7] Kajiya, T. J and Von Herzen, P. B.: "Ray Tracing Volume Densities," *Computer Graphics*, Vol. 18, No 3, pp. 165-174(1984).
- [8] Nishita, T. Miyawaki, T and Nakamae, E. A Shading Model for Atmospheric Scattering Considering Luminous Intensity Distribution of Light Sources. *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 303-310(1987).
- [9] Nishita, T. Shirai, T. Tadamura, K. and Nakamae, E.: "Display of The Earth Taking into Account Atmospheric Scattering," *Computer Graphics*, Vol. 27, No. 4, pp. 175-182(1993)

- [10] Kaneda, K., Yuan, G., Tomoda, Y., Baba, M., Nakamae, E., and Nishita, T.: "Realistic Visual Simulation of Water Surfaces Taking into Account Radiative Transfer," *Proceedings of CAD/Graphics '91*, pp. 25-30(1991).
- [11] 西田, 中前: "影を考慮した面光源による照度の計算とその表示法," 照明学会誌, Vol.68, No.2, pp. 61-66(1984).
- [12] Takita, S., Kaneda, K., Akinibu, T., Iriyama, H., Nakamae, E., and Nishita, T.: "A Simple Method for Rendering Penumbra Caused by Sunlight," *The Visual Computer*, Vol.7, No.5-6, pp.259-268(1991).
- [13] Nishita, T., and Nakamae, E.: "Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Taking Account of Shadows and Interreflection," *Computer Graphics*, Vol. 19, No. 4, pp. 23-30(1985).
- [14] Cohen, M and Greenberg, D. P.: "The Hemi-Cube: a Radiosity Solution for Complex Environments," *Computer Graphics*, Vol. 19, No. 4, pp. 31-40(1985).
- [15] Sillion, F. X., Arvo, J. R., Westin, S. H. and Greenberg, D. P.: "A Global Illumination Solution for General Reflectance Distributions," *Computer Graphics*, Vol.25, No.4, pp. 187-196(1991).
- [16] 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).
- [17] Fournier, A., Fussell, D. and Carpenter, L.: "Computer Rendering of Stochastic Models," *Commumication ACM*, Vol. 25, No. 6, pp. 371-384(1982).
- [18] Reeves, W.: "Particle Systems — A Technique for Modelling a Class of Fuzzy Objects," *Computer Graphics*, Vol. 17, No. 3, pp. 359-376(1983).
- [19] Blinn, J. F.: "Simulation of Wrinkled Surfaces," *Computer Graphics*, Vol. 12, No. 3, pp. 286-292(1978).
- [20] Kajiya, J. T. and Kay, T. L.: "Rendering Fur with Three Dimensional Textures," *Computer Graphics*, Vol.23, No.3, pp. 271-280(1989).
- [21] Forrest, A.: "On Coons and other Methods for the Representation of Curved Surfaces," *Computer Graphics and Image Processing*, Vol.1, pp. 341-359(1972).

- [22] Nakamae, E., Kaneda, K., Okamoto, T., and Nishita, T.: "A Lighting Model Aiming at Drive Simulators," *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.395-404(1990).
- [23] Max, N. L.: "Vectorized Procedural Models for Natural Terrain: Waves and Islands in the Sunset," *Computer Graphics*, Vol. 15, No. 3, pp. 317-324(1981).
- [24] Aono, M. and Kunii, T. L.: "Botanical Tree Image Generation," *IEEE CG & A*, Vol. 4, No. 5, pp. 10-34(1984).
- [25] Sederberg, T. W., Parry, S. R.: "Free-Form Deformation of Solid Geometric Models," *Computer Graphics*, Vol.20, No.4, pp. 151-160(1986).
- [26] Beier, T. and Neely, S.: "Feature-Based Image Meta-morphosis," *Computer Graphics*, Vol.26, No.2, pp.35-39(1992).
- [27] Glassner, A. S.: "Space Subdivision for Fast Ray Tracing," *IEEE CG & A*, Vol.4, No.10, pp. 15-22(1984).
- [28] Fujimoto, A. and Iwata, K.: "Accelerated Ray Tracing," *CG TOKYO '85 Proceedings*, T1-2(1985).
- [29] Rubin, S. M. and Whitted, T.: "A 3-Dimensional Representation for Fast Rendering of Complex Scenes," *Computer Graphics*, Vol.14, No.3, pp. 110-116(1980).
- [30] Weghorst, H., Hooper, G. and Greenberg, D. P.: "Improved Computational Method for Ray Tracing," *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 3, No. 1, pp. 52-69(1984).
- [31] Heckbert, P. S. and Hanrahan, P.: "Beam Tracing Polygonal Objects," *Computer Graphics*, Vol. 18, No. 3, pp. 119-127(1984).
- [32] Arvo, J. and Kirk, D.: "Fast Ray Tracing by Ray Classification," *Computer Graphics*, Vol.21, No.4, pp.55-64(1987).
- [33] Samet, H.: "Implementing Ray Tracing with Octrees and Neighbor Finding," *Computers and Graphics*, Vol.13, No.4, pp.445-460(1989).
- [34] Ts'o, P. Y. and Barsky, B. A. "Modeling and Rendering Waves: Wave-Tracing Using Beta-Splines and Reflective and Refractive Texture Mapping," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 6, No. 3, pp. 191-214(1987).

- [35] Shinya, M., Saito, T., Takahashi, T.: "Rendering Techniques for Transparent Objects," *Proceedings of Graphics Interface*, London, Ontario, pp 173-182(1989).
- [36] Watt, M.: "Light-Water Interaction using Backward Beam Tracing," *Computer Graphics*, Vol, 24, No. 4, pp. 377-385(1990).
- [37] Stokes, G. G.: "Mathematical and Physical Papers," Vol. 1, Cambridge University Press, p. 341(1880).
- [38] Fournier, A.: "A Simple Model of Ocean Waves," *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 75-84(1986).
- [39] Nakamae, E., Ishizaki, T., Nishita, T., and Takita, S.: "A Montage Method: The Overlaying of the Computer Generated Images onto A Background Photograph," *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 207-214(1986).
- [40] Takagi, A., Takaoka, H., Oshima, T., Ogata, Y.: "Accurate Rendering Technique Based on Colorimetric Conception," *Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 263-272(1990).
- [41] Bloomenthal, J.: "Modeling the Mighty Maple," *Computer Graphics*, Vol. 19, No. 3, pp. 305-311(1985).
- [42] Oppenheimer, P. E.: "Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees," *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 55-64(1986).
- [43] Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A. and Hanan, J.: "Developmental Models of Herbaceous Plants for Computer Imagery Purposes," *Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 141-150(1988).
- [44] Reffye, P., Edelin, C., Françon, J., Jaeger, M. and Puech, C.: "Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development," *Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 151-158(1988).
- [45] Cirad.: "Amap Plant Catalogue", CIRAD Modeling Laboratory (1992).
- [46] Gardner, G. Y.: "Simulation of Natural Scenes Using Textured Quadric Surfaces," *Computer Graphics*, Vol.18, No.3, pp. 11-20(1984).

- [47] 安田, 横井, 鶴岡, 三宅.: "透明物体表示のための改良光線追跡法 (2)," 情報処理学会論文誌, Vol.26, No.4, pp. 591-599(1985).
- [48] 日高, 平井, 浅原, 鷺宮: "マルチコンピュータシステム MC-1 における画像生成手法," グラフィックスと CAD 研究会, 18-4 (1985).
- [49] 出口, 西村, 吉村, 河田, 白川, 大村: "コンピュータグラフィックス LINKS-1 における画像合成の高速化手法," 情報処理学会論文誌, Vol.25, No.6, pp. 944-952(1984).
- [50] 出口, 西田, 西村, 河田, 白川, 大村: "視線探索法による画像生成のための木構造並列処理システム," 信学論 (D), Vol.J69-D, No.2, pp. 170-179(1985).
- [51] 西田, 中前: "マルチスキヤニング法によるスムーズエッジ処理を施した三次元物体の陰影表示," 情報処理学会論文誌, Vol.25, No.5, pp. 703-711(1984).
- [52] 岡村, 原田, 中前, 西田: "三角形近似による自由曲面のカラー陰影表示," 電子通信学会画像工学研究会, IE 82-92, pp. 19-24(1983).
- [53] 西田, 中前: "三次元物体のカラー陰影表示の一手法," 情報処理学会 コンピュータビジョン研究会, 14-8(1980).
- [54] Nishita, T, Okamura, I. and Nakamae, E.: "Shading Model for Point and Linear Sources," *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 4, No. 2, pp. 124-146(1985).
- [55] Immel, S. D, Cohen, F. M, Greenberg, P. D.: "A Radiosity Method for Non-Diffuse Environments," *Computer Graphics*, Vol. 20, No 4, pp. 133-142(1986)
- [56] Kass, M and Miller, G.: "Rapid, Stable Fluid Dynamics for Computer Graphics," *Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 49-57(1990).
- [57] Rushmeier, E. H.: "The Zonal Method for Calculating Light Intensities in The Presence of a Participating Medium," *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 293-302(1987)
- [58] Hardy, A. C. and Perrin, F. H.: "Principles of Optics," McGraw-Hill, New York (1932)
- [59] Jerlov, N, G.: "Optical Oceanography," Elsevier, Amsterdam (1968)
- [60] 杉森康宏, 坂本亘: "海洋環境光学," 東海大学出版会, pp.80-128(1985)

- [61] Beardsley, G. F. and Zaneveld, R. V.: "Theoretical Dependence of the Near-Asymptotic Apparent Optical Properties on the Inherent Optical Properties of Sea Water," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 59, No. 4, pp. 373-377(1969).
- [62] Hulburt, E. O.: "Optics of Distilled and Natural Water," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 35, No. 11, pp. 698-705(1945).
- [63] Preisendorfer, R. W.: "Radiative Transfer on Discrete Space," Pergamon, New York (1965).
- [64] Gordon, H. R. Simple Calculation of the Diffuse Reflectance of the Ocean. *Applied Optics*, Vol. 12, No. 12,(1973),pp. 2803-2804.
- [65] McCluney, W.R. Ocean Color Spectrum Calculations. *Applied Optics*, Vol. 13, No. 10,(1974),pp. 2422-2429.
- [66] Peachey, D. R.: "Modeling Waves and Surf," *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 65-74(1986).
- [67] Kirk, D. B.: "The Simulation of Natural Features Using Cone Tracing," In *Advanced Computer Graphics*, Springer-Verlag, Tokyo, pp. 129-144(1986).
- [68] Lewis, J. P.: "Generalized Stochastic Subdivision," *IEEE CG & A*, Vol. 6, No. 3, pp. 167-190(1987).
- [69] Mastin, G. A., Watterberg, P. A., and Mareda, J. F. Fourier .: "Synthesis of Ocean Scenes," *IEEE CG & A*, Vol. 7, No. 3, pp. 16-23(1987).
- [70] Blinn, J. F.: "Light Reflection Functions for Simulation of Clouds and Dusty Surfaces," *Computer Graphics*, Vol. 16, No. 3,pp. 21-29(1982).
- [71] 宇野, 斉藤, 小菅: 海洋技術者のための流れ学, 東海大学出版会
- [72] Tyler, J.E.: "Predicted Optical Properties for Clear Natural Water," *Journal of the Optical Society of America*., Vol. 62, No. 1,2), pp. 83-91(1972).
- [73] Gordon, H.R.: "Computed Relationships Between the Inherent and Apparent Optical Properties of a Flat Homogeneous Ocean," *Applied Optics*, Vol. 14, No. 2, pp. 417-427(1975).

- [74] Nakamae, E., Kaneda, K., Harada, K., Miwa, T., Nishita, T., and Saiki, R.: "Reliability of Computer Graphics Images for Visual Assessment," *The Visual Computer Vol. 7*, No. 2, pp. 138-147(1991).
- [75] Foley, J. D. and Van Dam, A.: "Fundamentals of Interactive Computer Graphics," Addison-Wesley Publishing Company (1982).
- [76] CIE : Publication TC 4.2, No.22, "Standardization of Luminance Distribution on clear skies ", (1973).
- [77] Kaneda, K., Okamoto, T., Nakamae, E., and Nishita, T.: "Highly Realistic Visual Simulation of Outdoor Scene under Various Atmospheric Conditions," *Proc. CG International '90* 117-131(1990).
- [78] Judd, D. B., MacAdam, D. L., Wyszecki, G. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 54, p.1031(1964).
- [79] 照明学会編:"ライティングハンドブック," オーム社 (1987).
- [80] Gibbons, M. G.: "Radiation Received by Uncollimated Receiver from a 4π Source," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 48, No. 8, pp. 550-555(1958).
- [81] Littlefair, J. P.: "The luminous efficacy of daylight: a review," *Lighting Research & Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 162-182(1985).
- [82] 関根:"Rayleigh 大気における四次散乱光までの評価 (1)," 照明学会誌, Vol. 60, No. 8, pp. 438-444(1976).
- [83] 国立天文台編:"理科年表 1995 年版," 丸善 (1995).
- [84] 関根:"混濁大気の光学的特性," 照明学会誌, Vol. 71, No. 6, pp. 333-338(1987).
- [85] Natural Daylight. Official Recommendations, Comptes Rendus CIE 13e Session 1955, (Paris : The Commission, Vol.2, 1955), Committee(E-3.2), P. 11,(1955).
- [86] Morel, A.: "Optical Properties of pure water and pure sea water," *Optical Aspects of Oceanography*, Academic Press, New York, pp.1-24(1974).

- [87] Takamura, T. and Tanaka, M.: "Measurements of intensity and degree of polarization of light scattered by aerosols," *Sci.Rep. Tohoku Univ., Ser. 5, Geophys.* 25, pp.169-196(1978).
- [88] 宇田川:"パソコンによる空気調和計算法," オーム社 (1986).
- [89] Maver, T. W., Purdie, C. and Stearn, D.: "Visual Impact Analysis — Modeling and Viewing the Natural and Built Environment," *Computer & Graphics*, Vol. 9, No. 2, pp. 117-124(1985).
- [90] Kaneda, K., Kato, F., Nakamae, E., Nishita, T., Tanaka, H. and Noguchi, T.: "Three Dimensional Terrain modeling and Display for Environmental Assessment," *Computer Graphics*, Vol.23, No.4, pp. 207-214(1989).
- [91] Reeves, W. T. and Blau, R.: "Approximate and Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems," *Computer Graphics*, Vol. 19, No. 3, pp. 313-322(1985).
- [92] Demko, S., Hodges, L. and Naylor, B.: "Construction of Fractal Objects with Iterated Function Systems," *Computer Graphics*, Vol. 19, No. 3, pp. 271-278(1985).
- [93] Viennot, G. X., Janey, N. and Arquès, D.: "Combinatorial Analysis of Ramified Patterns and Computer Imagery of Trees," *Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 31-40(1989).
- [94] Smith, A. R. Plants, Fractals, and Formal Languages, *Computer Graphics*, 18, 3(1984), 1-10.
- [95] 安居院, 福田, 中嶋: "景観表示のための樹木の生成手法," *情報処理学会論文誌*, Vol. 32, No. 5, pp. 618-625(1991).
- [96] Schlick, C.: "A Survey of Shading and Reflectance Models," *Computer Graphics forum*, Vol. 13, No. 2, pp. 121-131(1994).

付録 A

散乱関数

散乱関数 $\beta(\lambda, \theta)$ は、次式により与えられる。

$$\beta(\lambda, \theta) = \beta(\lambda, 90^\circ)f(\theta), \quad (\text{A.1})$$

ここで、 λ は光の波長、 $f(\theta)$ は位相関数である。本論文では、次式を位相関数として用いる ([61] 参照)。

$$f(\theta) = \frac{1}{(1 - e_f \cos \theta)^4 (1 + e_b \cos \theta)^4}, \quad (\text{A.2})$$

ここで、 e_f と e_b は、この位相関数の形状を決定するパラメータであり、本論文では、海水の実測値の一例 [61] を引用してそれぞれ 0.95 と 0.57 を用いた。この場合のパラメータ値に対応する位相関数のグラフ図 A.1 にを示す。

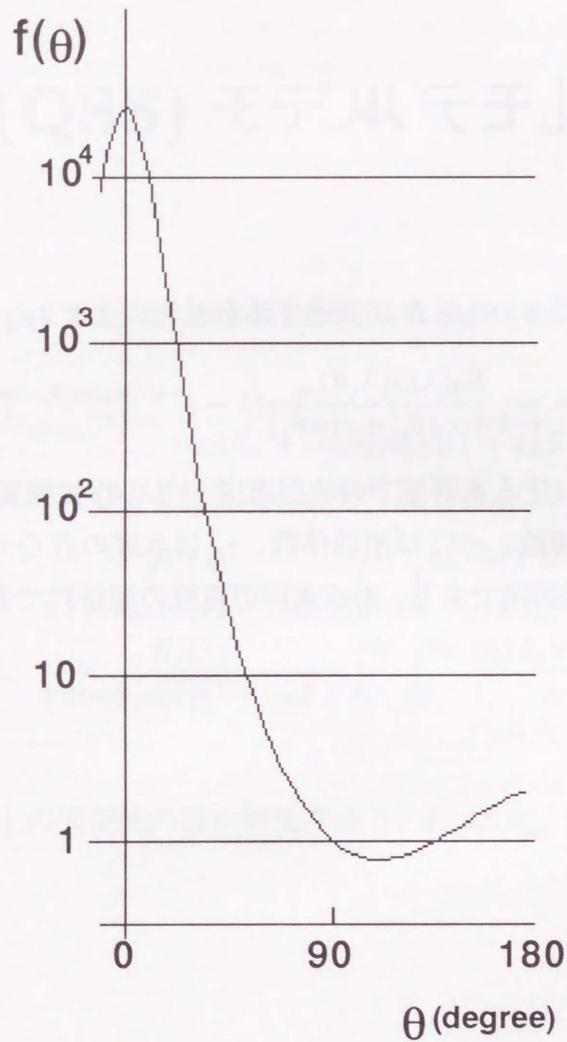


図 A.1: 海水の位相関数の例

付録 B

Jerlov の散乱モデル

Jerlov の方法によると、図 3.7 の点 P に到達する散乱光の強度 $I_{PQ}(\lambda)$ は次式で与えられる。

$$I_{PQ}(\lambda) = \frac{E_0(\lambda)\beta(\lambda, \theta)}{c(\lambda)(\cos \theta_w + \cos \theta_j)} (1 - e^{-c(\lambda)z_d(\sec \theta_w + \sec \theta_j)}), \quad (\text{B.1})$$

ここで、 $E_0(\lambda)$ は、点 P における水面直下の放射照度、 $\beta(\lambda, \theta)$ は波長 λ の入射光に対して θ 方向に散乱する際の体積散乱関数、 $c(\lambda)$ は消散係数、 z_d は水底の点 Q の水深であり、 θ_w は太陽光線の入射角 θ_a に対する屈折角であり、 θ_j は水中の視線の屈折角である。

付録 C

準一次散乱 (QSS) モデル

QSS モデルにおいて、点 P へ到達する太陽直射光による散乱光の強度 $I_{PQsun}(\lambda)$ は次式により与えられる。

$$I_{PQsun}(\lambda) = \frac{E_0(\lambda)\beta(\lambda, \theta)}{(\cos \theta_w + \cos \theta_j)c(\lambda)(1 - \omega_0 F)}, \quad (C.1)$$

また、点 P へ到達する天空光による散乱光の放射輝度 $I_{PSsky}(\lambda)$ は次式から得られる。

$$\begin{aligned} I_{PSsky}(\lambda) &= \frac{H_s(\lambda)}{\pi \cos \theta_w c(\lambda)(1 - \omega_0 F)} \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{wc}} \frac{\beta(\lambda, \theta') \sin \theta_w}{\sec \theta_w + \sec \theta_j} d\theta d\phi \\ &= \frac{H_s(\lambda)}{\pi \cos \theta_w c(\lambda)(1 - \omega_0 F)} \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{wc}} \frac{\beta_\lambda(\lambda, \pi - \theta_w - \theta_s) \sin \theta_w}{\sec \theta_w + \sec \theta_j} d\theta d\phi, \end{aligned} \quad (C.2)$$

ただし、 $H_s(\lambda)$ は水面直上の天空光の放射照度であり、 θ_{wc} は $\theta_{wc} = \sin^{-1}(1/n)$ で定まる臨界角である。

著者学術研究論文等研究業績一覧

A.学会誌等学術研究論文

- [1] 中前栄八郎、多田村克己、西田友是：“局所レイトレーシングによる陰影表示法”，情報処理学会論文誌，27巻11号，頁1077-1085 (1986).
- [2] K.TADAMURA, K.KANEDA, E.NAKAMAE, T.NOGUCHI, and F.KATO：“A Display Method of Trees by Using Photo Images”，Journal of Information Processing, Vol.15, No.4, pp.526-534 (1992).
- [3] 中前栄八郎、西田友是、金田和文、多田村克己：“散乱光モデルを用いたホトリアリスティックな画像生成”，電子情報通信学会論文誌(D-「), J76-D「巻8号，頁1515-1527 (1993).
- [4] K.TADAMURA, E.NAKAMAE, K.KANEDA, M.BABA, H.YAMASHITA, and T.NISHITA：“Modeling of Skylight and Rendering of Outdoor Scenes”，Computer Graphics forum, Vol.12, No.3, pp.189-200 (1993).
- [5] T.NISHITA, T.SHIRAI, K.TADAMURA, and E.NAKAMAE：“Display of the Earth Taking into Account Atmospheric Scattering”，Computer Graphics, Vol. 27, No. 4, pp.175-182 (1993).
- [6] Y.DOBASHI, K.KANEDA, T.NAKASHIMA, H.YAMASHITA, T.NISHITA, and K.TADAMURA：“Sky-light for Interior Lighting Design”，Computer Graphics forum, Vol.13, No.3, pp.85-96 (1994).
- [7] E.NAKAMAE and K.TADAMURA：“Photorealism in Computer Graphics -past and present-”，Computers and Graphics, Vol.19, No.1, pp.119-130 (1995).
- [8] 多田村克己、中前栄八郎：“水上および水中照明シミュレーション”，照明学会論文誌，第79巻，第8号，pp.11-17 (1995).
- [9] G.JIAO, K.TADAMURA, E.NAKAMAE, H.INUYAMA：“On the Extraction of Various Regions in Vector Maps”，電子情報通信学会英文論文誌，Vol.78-D, No.12 pp.1539-1545.

B.国際会議等発表研究論文

- [1] E.NAKAMAE, K.TADAMURA, H.YAMASHITA, K.KANEDA, and T.NISHITA：“Lighting Model on Gas and Liquid”，Proc. CG International '93, pp.89-103 (1993).
- [2] G.JIAO, K.TADAMURA, and E.NAKAMAE, H.INUYAMA：“On the Extraction of Various Regions in Vector Maps”，Proc. IAPR MVA '94, pp.230-234 (1994).
- [3] K.TADAMURA and E.NAKAMAE：“Modeling Water Color in Lighting Design”，Proc. CG International '95, pp. 97-114 (1995).
- [4] G. JIAO, E. NAKAMAE, K.TADAMURA, and F. KATO：“A Model of Skylight and Calculation of Its Illuminance”，Proc. ICSC'95, pp.205-214.

C. 学会技術研究会研究発表

- [1] 多田村克己, 中前栄八郎, 西田友是 ” 局所レイトレーシングによる陰影表示法” ,情報処理学会グラフィックスとCAD研究会,19-2, pp.1-8 (1985).
- [2] 西田友是, 多田村克己, 名原健治, 中前栄八郎 ” スポットライトの表示法” ,情報処理学会グラフィックスとCADシンポジウム 論文集, pp.53-61 (1985).
- [3] 金田和文, 山下英生, 多田村克己, 加藤二二和, 野口高男 ” CGを用いた景観シミュレーション” , Visual Computing '93, pp.173-178(1993).
- [4] 土橋宜典, 金田和文, 山下英生, 西田友是, 多田村克己 ” 天空光の透過光を考慮した陰影表示” ,グラフィックスとCADシンポジウム (1993).
- [5] 多田村克己, 大原ルミ子, 中前栄八郎 ” 雲の形状入力表示プログラムの開発” , Visual Computing '94, pp.97-98 (1994).