

2008年度 卒業論文

ピンホール現象を考慮した
木漏れ日による影の生成に関する研究

指導教員：渡辺 大地講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト
学籍番号 M0105208
櫻井 しおり

2008年度 卒業論文概要

論文題目

ピンホール現象を考慮した
木漏れ日による影の生成に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0105208

氏名

櫻井 しおり

指導
教員

渡辺 大地講師

キーワード

CG、木漏れ日、樹木、ソフトシャドウ、ピンホール現象

近年、コンピュータグラフィックス（以下CG）分野の発展は著しく、コンピュータの高性能化に伴い写実的なシーンの描画が可能となった。特にリアルな自然景観の表現はCG分野の中でも重要なテーマの1つである。中でも影は写実性を高めるためには欠くことのできない要素である。影の表現については現在まで多くの研究がされており、レイトレーシング法やシャドウマップ法、ソフトシャドウ法などが代表的である。レイトレーシング法とシャドウマップ法は物体が光を遮る現象に着目して影を表現している。レイトレーシング法は反射や屈折を正確に計算するため計算コストが高くリアルタイムの利用に不向きである。シャドウマップ法は光源と物体までの距離から影を算出しているため計算コストが低く、リアルタイムでの影を生成する手法だが、ハードシャドウと呼ばれる輪郭がはっきりとした影が描画されてしまい影としては不自然であるという欠点がある。シャドウマップ法で生成したハードシャドウを画像処理でぼかし、輪郭のぼやけた影、ソフトシャドウを表現する手法がソフトシャドウ法である。ソフトシャドウ法はハードシャドウを画像処理でぼかしているため、光学現象としての影のぼかし表現はできない。例えば樹木の下にできる影の場合、葉の形や幹、枝といった樹木そのものの影の他に丸い光斑が現れる。この木漏れ日の光斑は光学現象の1つであるピンホール現象によって結ばれた太陽の像である。レイトレーシング法やシャドウマップ法では幹や枝の影は表現できても丸い光斑は表現できない。またハードシャドウを画像処理によってぼかしたソフトシャドウ法ではピンホール現象によって結ばれた太陽の形を表現できない。

本研究では地面から光源方向に見上げたときの樹木の様子を画像として生成し、その画像をピンホールとして用いた。光源の形を画像として作成しピンホール用に生成した画像に重ね、光源の画像がピンホールによってどのくらい隠れるかを求めた。求めた値は地面に届く光源の明るさの数値として影画像を生成した。以上の流れを踏まえたピンホール現象を利用した、木漏れ日が地面に映し出す光斑ならびに影の生成手法を提案する。また本手法をプログラミングを用いてシミュレーションし、太陽の高度による変化や、光源の形を変化による木漏れ日の影画像の生成を行った。シミュレーションで得た木漏れ日の影画像を実際の木漏れ日の様子と比較し検証した結果、本手法について有効性を確認した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	本論文の構成	3
第2章	物理現象としての木漏れ日	4
2.1	影と木漏れ日の特徴	4
2.2	ピンホール現象	6
2.3	木漏れ日のピンホール現象	7
2.3.1	ピンホール平面に投影される太陽の像の大きさ	7
2.3.2	木漏れ日の明るさ	9
第3章	提案する木漏れ日の生成法	12
3.1	樹木モデルの読み込み	12
3.2	平行投影によるシーン画像の生成	13
3.3	ピンホール現象を考慮した明るさの算出	16
第4章	結果と考察	19
4.1	木漏れ日の影の生成結果	19
4.2	動作検証	25
4.3	問題点	26
第5章	まとめ	27
	謝辞	28
	参考文献	29

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

近年、コンピュータグラフィックス(以下CG)分野の発展は著しく、コンピュータの高性能化に伴い写実的なシーンの描画が可能となった。特にリアルな自然景観の表現 [1] はCG分野の中でも重要なテーマの1つである。中でも影は写実性を高めるためには欠くことのできない要素である。影の表現については現在まで多くの研究がされている [2][3][4]。中でもレイトレーシング法 [5] は物体が光を遮る現象に着目して生成を行う代表的な手法である。レイトレーシング法は光線追跡法とも呼ばれ、物体の座標データや光源や視点の位置などの環境に関するデータを計算してレンダリングする手法の1つである。視点に届く光線を逆にたどり描画するため、物体の表面の反射率や透明度・屈折率などを細かく反映させることができる。高品質での描画が求められる映画などで多く利用されている手法だが、計算コストからリアルタイムの利用に不向きである。リアルタイムで影を生成する手法としてはシャドウマップ法 [6][7] がある。シャドウマップ法は光源から見たシーンを描画し、光源からの距離データをシャドウマップという画像に格納する。そして描画対象のシーンをレンダリングする際にシャドウマップを参照し、現在描画しようとしているピクセルが影であるかどうかを判定することで影付けを行う。シャドウマップ法は幾何学的計算をしないにも関わらず、セルフシャドウなど正確な影が描画できるが、ハードシャドウと呼ばれる輪郭がはっきりとした影が

描画されてしまい影としては不自然であるという欠点がある。シャドウマップ法で生成したハードシャドウを画像処理でぼかし、輪郭のぼやけた影、ソフトシャドウを表現する手法がソフトシャドウ法 [8][9] である。ソフトシャドウ法は数多く研究され、光源の大きさと光源からの投射距離を考慮し、輪郭のぼやけた影を表現している。ソフトシャドウ法はシャドウマップ法と同様にリアルタイムでの影の生成が可能である。しかしソフトシャドウ法はハードシャドウを画像処理でぼかしているため、光学現象としての影のぼかし表現はできない。例えば樹木の下にできる影の場合、葉の形や幹、枝といった樹木そのものの影の他に丸い光の粒（以下この現象を光斑と呼ぶ）が現れる。この木漏れ日の光斑は光学現象の1つであるピンホール現象によって結ばれた太陽の像である。このような現象は物体が光を遮る現象に着目して影を表現しているレイトレーシング法やシャドウマップ法では幹や枝の影は表現できても丸い光斑は表現できない。またハードシャドウを画像処理によってぼかしたソフトシャドウ法ではピンホール現象によって結ばれた太陽の形を表現できない。

そこで本研究では木漏れ日が地面に映し出す光斑ならびに影の生成手法を提案する。本手法ではピンホール現象を用いて光源の形に依存した影を生成した。地面から光源方向に見上げたときの樹木の様子を画像として生成し、その画像をピンホールとして用いた。光源の形を画像として作成しピンホール用に生成した画像に重ね、光源の画像がピンホールによってどのくらい隠れるかを求めた。求めた値を地面に届く光源の明るさの数値として影画像を生成した。また本手法をプログラミングを用いてシミュレーションし、太陽の高度による変化や、光源の形を変化による木漏れ日の影画像の生成を行った。シミュレーションで得た木漏れ日の影画像を実際の木漏れ日の様子と比較し検証を行った結果、本手法について有効性を確認した。

木漏れ日とは本来は樹木の間から差し込む光のことを指すが、本研究では以降、樹木の下にできる光斑の集合を木漏れ日と呼び、木漏れ日を含む樹木の影画像の生成手法を提案する。

1.2 本論文の構成

本論文は全 5 章で構成する。第 2 章では影と木漏れ日の物理的な特徴について述べ、木漏れ日の表現の定義を明確化する。第 3 章では本研究で提案する木漏れ日の影の生成手法について説明する。第 4 章では本研究で開発した木漏れ日の影生成プログラムより、生成した結果画像の検証と考察を行う。最後に第 5 章では本研究の成果と意義をまとめ、今後の展望について述べる。

第 2 章

物理現象としての木漏れ日

本章では木漏れ日と影の、物理現象としての特徴について述べる。木漏れ日とピンホール現象との関係を説明し、本論文で提案する木漏れ日の表現の定義を明確化する。

2.1 影と木漏れ日の特徴

影とは物体が光の進行を遮ったときに壁や地面に生じる暗い領域のことである。影ができる壁や地面の角度によっては歪んだ像になることもあるが、一般的に影は光を遮った物体の輪郭に似た形をしている。しかし樹木の下にできる影には丸い形をした木漏れ日が現れる。図 2.1 は晴れた日の樹木の影であり、丸い形をした木漏れ日の様子を表した図である。木の葉が光を遮って影を作っているとするだけではこの木漏れ日の形は説明できない現象である。

最初にこの現象を観察したのは紀元前 4 世紀、古代ギリシャのアリストテレスである。彼は木の葉の間から漏れる光が地面に丸い木漏れ日を作ることに気づき、「どうして丸い形になるのか」という疑問を記している [10]。そして日食の日に木の下の木漏れ日が、太陽と同じように三日月形に欠けていくのを見て、それが太陽の像であると気づいた。図 2.2 は実際の日食での木漏れ日が欠けている様子である。

木漏れ日は言い換えれば太陽の像であり、葉と葉が重なり合っでできる小さな穴が光の方向を限定することで地面に光の像を結んでいる。このように光が小さな穴を通ることによって像を結ぶ現象をピンホール現象と言う。



図 2.1: タイルに落ちた木漏れ日



図 2.2: 日食時の木漏れ日 (2002年6月11日テニアン島にて) 撮影・提供: 吉住千亜紀氏

2.2 ピンホール現象

ピンホール現象は様々な場面で用いられ、カメラオブスクラ [11] やプラネタリウム [12] もこの原理を利用している。しかし一般的にピンホール現象はピンホールカメラの原理として利用することが多い [13][14]。ピンホールカメラとは、レンズを使う代わりに小さな穴を開けて写真を撮るカメラのことである。これは光の直進性を利用した手法で、小さな穴を開けることによって、その穴を通ることができる光が限られ、1つの方向の光しか通さなくなる。図 2.3 はピンホール現象を模式的に表した図である。

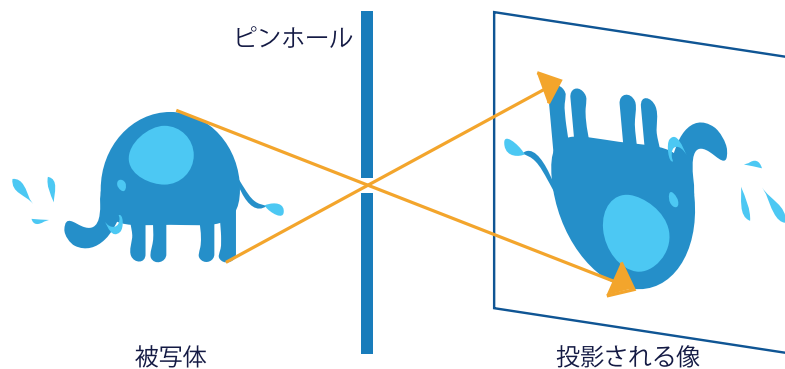


図 2.3: ピンホール現象の模式図

図 2.3 では左側の被写体から飛んできた光はピンホールによって遮られ、右側のフィルム上のある 1 点に届く様子を示している。光は様々な方向に光子を飛ばしているが、ピンホールがあることでフィルムに届く光子が限られる。つまりフィルム上のある 1 点に到達する光は、ピンホールによって 1 つの方向の光に限定される。

また図 2.3 は被写体の上から飛んできた光子がピンホールを通過し、フィルムの下の方に到達する様子を示している。これはピンホール現象の特徴の 1 つで、投影される像は上下左右が逆になる。

2.3 木漏れ日のピンホール現象

木漏れ日はピンホール現象によって太陽の形を地面に映し出していることから自然が作り出したカメラであるといえる。しかしピンホールカメラと木漏れ日の違いは有限距離にある被写体を映すか、実質的に無限遠にある太陽を映すかということである。木漏れ日を考える際には実質的に無限遠にある太陽と、太陽の光の強さを考慮する必要がある。また木漏れ日には明るい光斑と暗い光斑が存在する。この明るさの違いは木の葉によるピンホールの大きさと、そのピンホールによって遮られる光の量、太陽からの光の方向に対して垂直なピンホールが存在する平面（以下この平面をピンホール平面と呼ぶ）に投影される太陽の像の大きさに関係している。

2.3.1 ピンホール平面に投影される太陽の像の大きさ

通常のカメラで写真を撮る際には被写体の大きさやカメラから被写体までの距離が深く関係している [15]。被写体までの距離が近ければ大きく写り、遠ければ小さくなる。しかし木漏れ日は太陽が被写体であり太陽までの距離は実質的に無限大であるため、距離の変化によって木漏れ日の大きさが極端に変化することはない。実際の木漏れ日の大きさは一定ではなく、様々な大きさの光斑が地面に現れる。木漏れ日の大きさには地球から太陽までの距離と天体としての太陽の大きさ、地表面から木の葉によるピンホールまでの高さが深く関わっている。

太陽と地球の距離は年間を通して一定ではない。年間の平均距離を 1 天文単位 (AU) と呼び、(2.1) 式により求まる。

$$1\text{AU} = 1.496 \times 10^8 \text{km} \quad (2.1)$$

年間の異なる時点距離を求めるには (2.1) 式に補正が必要になる [16]。しかし本手法では太陽と地球の距離は一定とし、1 天文単位の近似値として $1.5 \times 10^8 \text{km}$ で計算している。

地球上の1点から太陽を観察した場合、太陽の中心点から輪郭線までの偏角は一定となる。太陽と地球の距離と太陽の半径の関係から三角比を求める。地表面上のある点 o を基準とし、点 o から太陽の中心点 c に向かうベクトルを C 、点 o から太陽の輪郭線上の点 r に向かうベクトルを R とする。 C と R の偏角を θ とする。 C の大きさは $1.5 \times 10^8 \text{km}$ とする。また $C - R$ で求めたベクトルを S とおくと、 S の大きさは太陽の半径の値である。太陽の半径は $6.96 \times 10^5 \text{km}$ [17] であるが、本手法では近似値として $7 \times 10^5 \text{km}$ で考える。求める偏角 θ の正接は (2.2) 式となる。

$$\tan \theta = \frac{|S|}{|C|} = \frac{7}{1500} \quad (2.2)$$

図 2.4 は偏角 θ の関係図である。

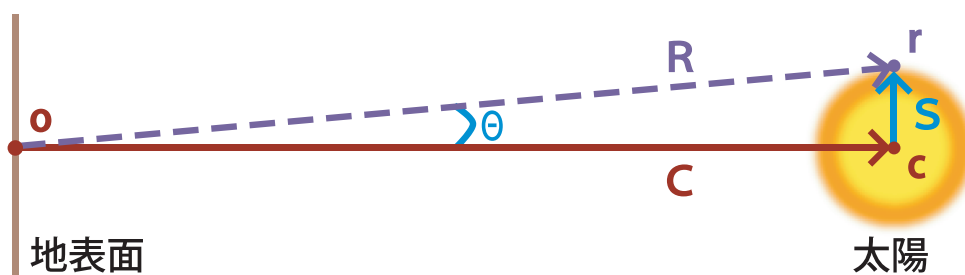


図 2.4: 偏角 θ の関係図

(2.2) 式と透視投影 [18] の考え方からピンホール平面に投影される太陽の像の大きさを導く。透視投影とは 3 次元の物体を 2 次元で表す投影手法の 1 つで、投影中心から伸びる線分は距離が長くなるほど広がる。透視投影した物体を投影する投影面には遠くにある物体は小さく、手前にある物体は大きく表示し、遠近感を表現している。右手系の座標空間で考え、太陽の中心点 $c(|C|, 0, 0)$ と太陽の輪郭線上の点 $r(|C|, |S|, 0)$ とする。地表面上の点 $o(0, 0, 0)$ を投影中心とし、木の葉によるピンホールの中心点を $H(h, 0, 0)$ とおく。ピンホール平面は yz 平面と平行で、ピンホール平面の中心点はピンホールの中心点と同じ位置である。点 r をピンホール平面上に投影したときの点を $X(h, x, 0)$ とすると、三角形の相似から (2.3) 式を

得る。

$$\begin{aligned}h : |C| &= x : |S| \\ \therefore x &= h \frac{|S|}{|C|}\end{aligned}\tag{2.3}$$

また (2.2) 式より (2.3) 式を (2.4) 式のように置き換える。

$$x = h \tan \theta\tag{2.4}$$

図 2.5 は点 o と、点 c 、点 r 、点 H 、点 X を座標系で表わし、透視投影した太陽をピンホール平面投影する関係を表した図である。

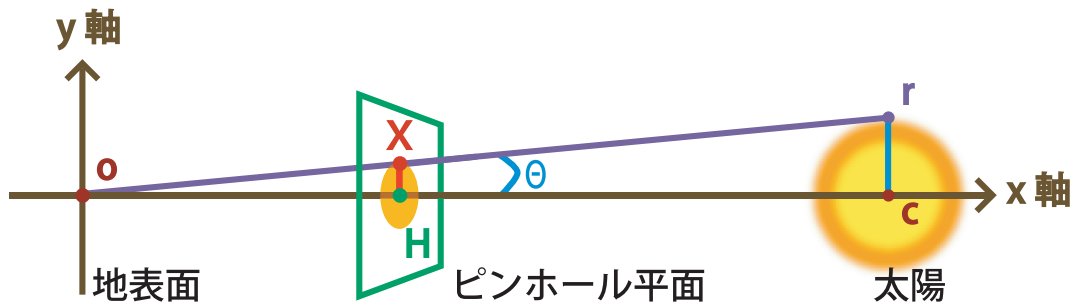


図 2.5: 透視投影した太陽をピンホール平面に投影する関係図

点 o から木の葉によるピンホールの中心点までの高さは h は任意に変えることができ、 $\tan \theta$ は (2.2) 式より定数であるため投影される太陽の像の半径 x が求まる。太陽の像の半径 x がわかればピンホールが太陽の光をどのくらい遮るのがわかる。例えばピンホールまでの高さ $h = 5\text{m}$ のとき、太陽の像の半径 x は 2.3cm となるため、直径は 4.6cm となる。このことから高さ 5m に直径 4.6cm のピンホールがあるとすると、太陽からの光はピンホールで遮られることなくすべて地面に届き、明るくはっきりとした木漏れ日が地面に現れる。

2.3.2 木漏れ日の明るさ

地球には太陽から年平均で 1040kcal/cm^2 の光エネルギーが大気圏外に入射している。太陽光のエネルギーは雲や大気に吸収され、また雲によって反射するので

地表に到達する太陽光エネルギーは減少する。気象学的に、地表のある点に到達する太陽光エネルギーを日射量といい、太陽光の明るさそのものである [19][20]。日射量には太陽光が吸収や散乱しないで直接地表に届く直達日射量と、大気中で散乱されて届く散乱日射量がある。このうち本手法で扱うのは木漏れ日の形成により重要な直達日射量であり、以下で述べる日射量は全て直達日射量を意味する。

木漏れ日の明るさは太陽が木の葉によるピンホールによってどのくらい遮られるのかで変化する。太陽がピンホールによって遮られるということは、その点に到達する日射量が減ることを意味する。(2.3) 式より地表面からの高さ h のピンホール平面にできる太陽の像の大きさがわかるので、太陽の像がピンホールによってどのくらい遮られるのかを求める。図 2.6 は A 点と B 点での太陽の見え方の違いを模式的に表した図である。

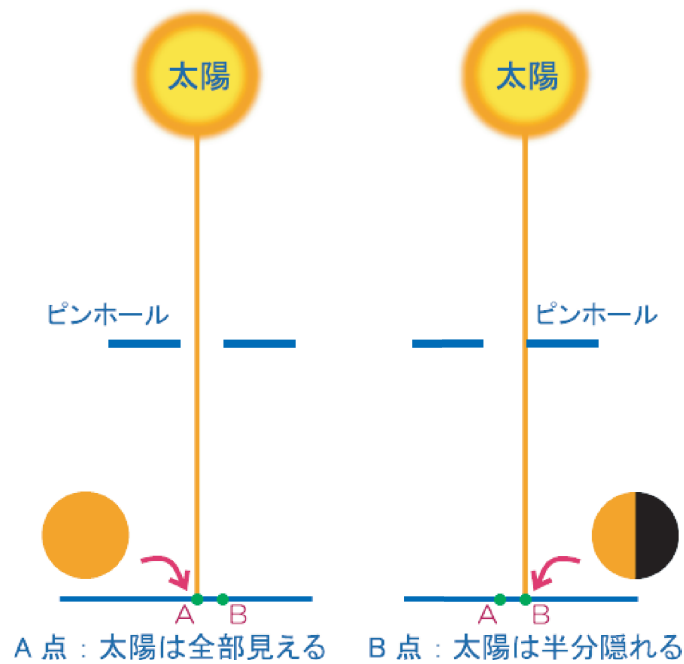


図 2.6: A、B 点での太陽の見え方の違い

A 点と B 点は地表面上のある点であり、その点から見た太陽が木の葉によるピンホールによってどのくらい遮られるのかを計算し、各点に届く日射量を求める。

A点からは太陽はピンホールによって遮られることなくすべて見ることができるため、A点の明るさは日射量のほぼ全てであるといえる。しかしB点からは太陽がピンホールによって半分隠されてしまい、太陽のすべてを見るできない。したがってB点は単純に考えてA点の半分の日射量しかないといえる。

図2.6で示したA点とB点の明るさの違いを実際の木漏れ日の写真に重ねて表したのが図2.7である。木漏れ日の中心部分の1番明るい点をA、A点よりもやや暗くなっている点をBとして徐々に暗くなっていく様子が図2.7からわかる。

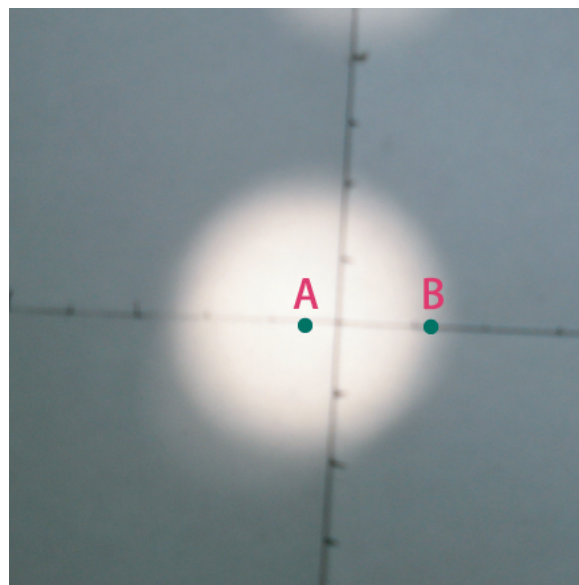


図 2.7: A、B 点を木漏れ日に重ねた図

第 3 章

提案する木漏れ日の生成法

本章では木漏れ日のピンホール現象を考慮した影の生成方法について述べる。木漏れ日の影画像の生成の流れは以下の手順である。

1. 樹木モデルの読み込み
2. 平行投影によるシーン画像の生成
3. ピンホール現象を考慮した明るさの算出

以下個々の内容について説明する。

3.1 樹木モデルの読み込み

木漏れ日の画像を生成するために必要な樹木モデルを読み込む。樹木のモデリング方法はいくつかあり、幹や枝、葉など全てをモデルデータとしてポリゴンで作成する方法と、葉はテクスチャマッピングと不透明マッピングを併用し作成する方法がある。本手法を用いて木漏れ日を作成する場合は、樹木モデル作成にはどちらの方法も有効である。しかしピンホール現象の性質上、葉同士が重なりピンホールを作り出すようなモデルが必要である。

木漏れ日の影画像は地面から光源方向を見たシーンを描画し生成する。そのため樹木モデルは地面から見上げたときにシーンに映るように作成しなければならない

ない。特に葉をテクスチャマッピングで作成する場合は、葉を片面のみ生成することが多い。葉を片面のみ作成していると地面から見上げたシーンには何も映らないため、葉を両面化してモデルを作成する必要がある。

3.2 平行投影によるシーン画像の生成

地面から見上げたシーンを描画する際には平行投影を用いる [21][22]。平行投影とは投影中心が無限遠にあり、投影線が平行になることに由来している。平行投影で描画したシーンにおいて、空間中の平行線が投影像においても平行性を保つ。3DCG で一般的によく用いられる透視投影は、投影の中心が有限距離にあり、投影面に平行でない全ての平行線は消失点に収束する [18]。木漏れ日においては、投影の中心となる太陽が実質的に無限遠に位置すると捉えると、平行投影を用いる必要がある。図 3.1 は投影面と樹木モデル、投影した画像を影テクスチャとしてマッピングする関係を示したものである。

樹木モデルの影テクスチャ面は地面上にあり、樹木モデルをはさんで太陽の反対側にある。 θ は太陽高度角であり、太陽の高さを角度で表わしている。平行投影での投影面 S は太陽のベクトル V に対して垂直な面である。影テクスチャ面の横幅を W 、縦幅を H とし、投影面の横幅を W_s とすると投影面の縦幅 H_s の求める式は以下ようになる。

$$\begin{cases} H_s = W_s \frac{H}{W} \sin \theta \\ W : H = W_s : H_s \end{cases} \quad (3.1)$$

投影面の縦幅は太陽高度角によって変化するのが (3.1) 式よりわかる。太陽の高度が低くなるにつれて投影面の縦幅は小さくなる。(3.1) 式を用いることにより太陽高度角がどんな値でも正確な投影範囲を指定することができる。

しかし太陽の位置は太陽高度角だけでは表せない。太陽は 1 時間に 15° ずつ東から西へ移動している。東から西への移動角度を時角といい、南中時刻と 0 とし、午前の方角を正、午後の方角を負として測る。図 3.2 は太陽高度角と時角の関係を表した図であり、 θ が高度角、 ϕ が時角を表す。

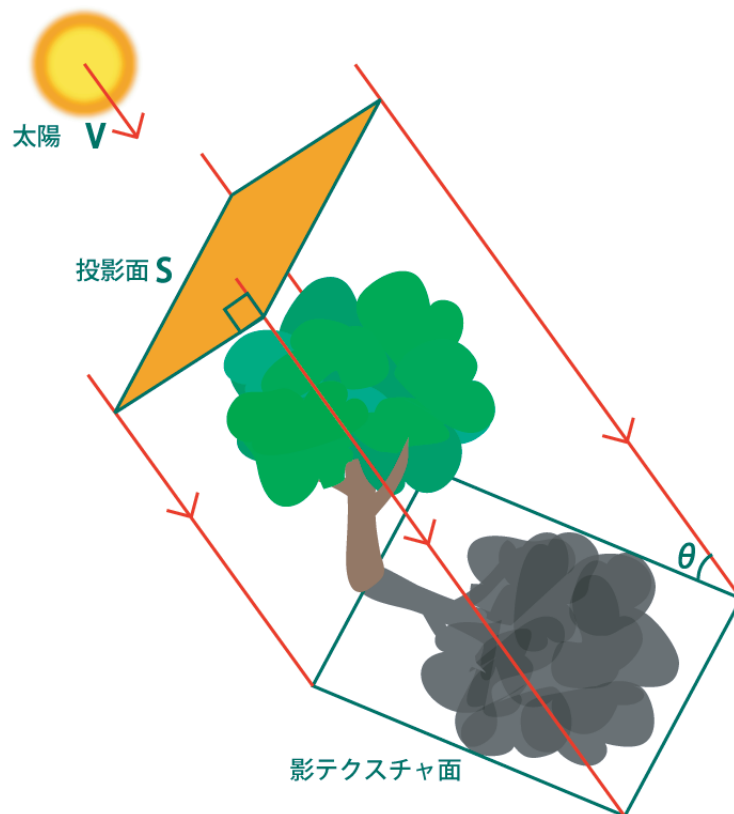


図 3.1: 投影面とモデル、影テクスチャの関係図

投影範囲を指定する際には時角は南中にあるものとして、太陽高度角だけで求めるとよい。太陽と樹木モデルは時角に負の値を掛けた分だけ回転させ、太陽は真南に置く。影テクスチャ面は真北に生成されるので、投影面の縦横の大きさも (3.1) 式で簡単に求めることができる。影テクスチャ面を生成できたら、あらかじめ回転させた時角分を元に戻し、太陽と樹木モデル、影テクスチャ面と一緒に回転させる。太陽高度角と時角を用いることで、あらゆる季節、時間の木漏れ日の影を生成できる。

図 3.3 は平行投影によるシーン画像である。太陽の高度角は 90° としたため樹木モデルの真下から見上げる画像を生成した。

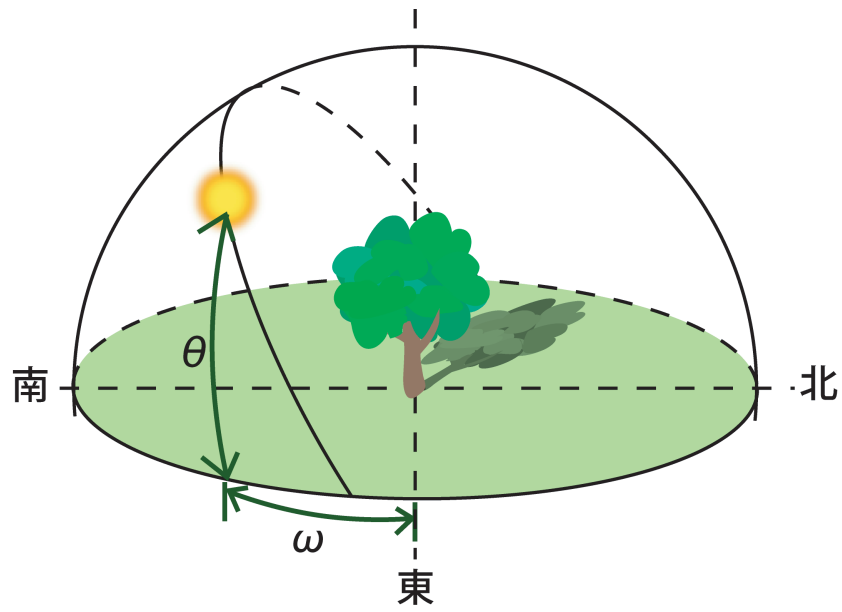


図 3.2: 太陽の高度と時角の関係図

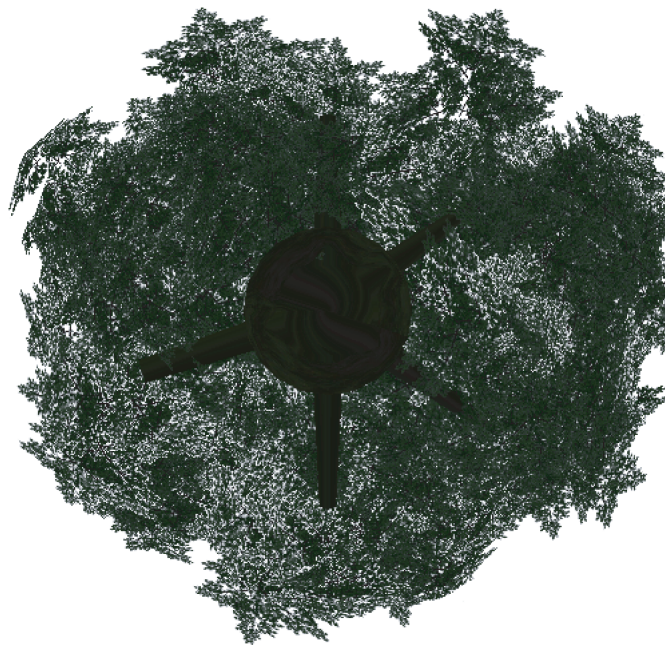


図 3.3: 平行投影で描画したシーン画像

3.3 ピンホール現象を考慮した明るさの算出

(3.1) 式より求めた投影面のサイズで平行投影を行い、描画したシーン画像を元に木漏れ日の影画像を生成する。2.2 節や 2.3.2 項で述べたように木漏れ日の明るさは太陽がピンホールによってどのくらい隠れるかということである。したがって 3.2 節で生成したシーン画像をピンホールとして用いるが、使用する際にはグレースケール画像に変換すると効率が良い。グレースケール画像を生成するには RGB の各色の値を足して平均値を取り、求めた平均値を RGB の値に代入し、RGB の値を等しくする。

図 3.4 は本手法で用いた太陽画像であり、大きさは 16×16 ピクセルである。太陽の正確な大きさは 2.3.1 項で述べたが、本手法では太陽の画像を用意し大きさは近似とした。このシーン画像の 1 つのピクセルに対して、そのピクセルを中心に



図 3.4: 本手法で用いた太陽画像

図 3.4 のような太陽画像を重ね、どのくらい隠れるのか計算することでそのピクセルの明るさを求める。太陽が見える割合は、太陽画像の白いピクセル数を太陽画像を重ねた場合の白いピクセル数で割ったものである。RGB の色はそれぞれ 256 段階で表現されているので、太陽が見える割合に 255 を掛けるとピクセルの明るさは 0 ~ 255 の間の値で求まる。

しかしこのままでは画像として黒に近い色の値が多く、影の色のグラデーションが表現できず不自然に暗い画像が生成される。ピクセルの明るさの値をガンマ変換をかけることで色のバリエーションを増やすことができる。画像のピクセルの濃淡値を変換して出力するとき、入力された値と出力する値との対応関係を与える関数を階調変換関数と呼び、それをグラフにしたものをトーンカーブと呼ぶ [23]。ガンマ変換は階調変換関数の一種である [24]。求めたピクセルの明るさを入

力値 x とし、(3.2) 式により y にガンマ変換する。トーンカーブは $\gamma > 1$ では凹型になり、 $\gamma < 1$ では凸型になる。 $\gamma = 1$ では濃淡値は変化しない。

$$y = x^\gamma \quad (3.2)$$

影の色は灰色～白色にかけての色数を増やすと影のグラデーションが滑らかになる。よって γ は 1 よりも小さい値を入れる。

図 3.5 と図 3.6 はいずれも図 3.3 を用いて木漏れ日の影を生成した画像である。図 3.5 はガンマ変換前の木漏れ日の影画像で、図 3.6 は $\gamma = \frac{1}{2}$ で変換を行った木漏れ日の影画像である。

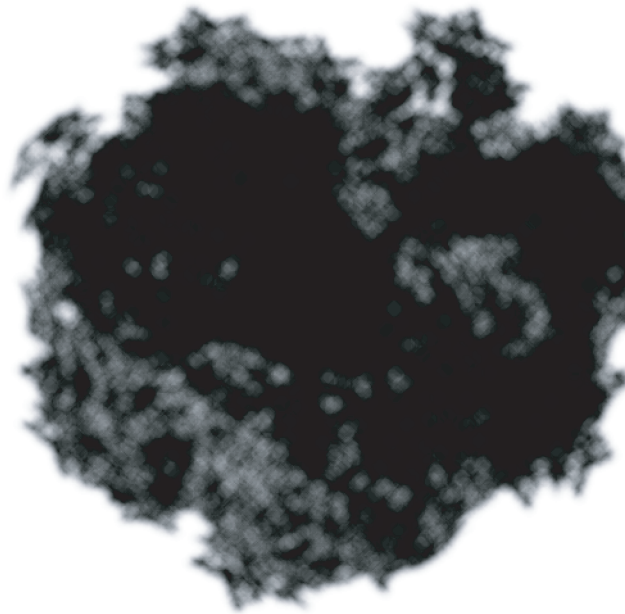


図 3.5: ガンマ変換前の木漏れ日の影画像

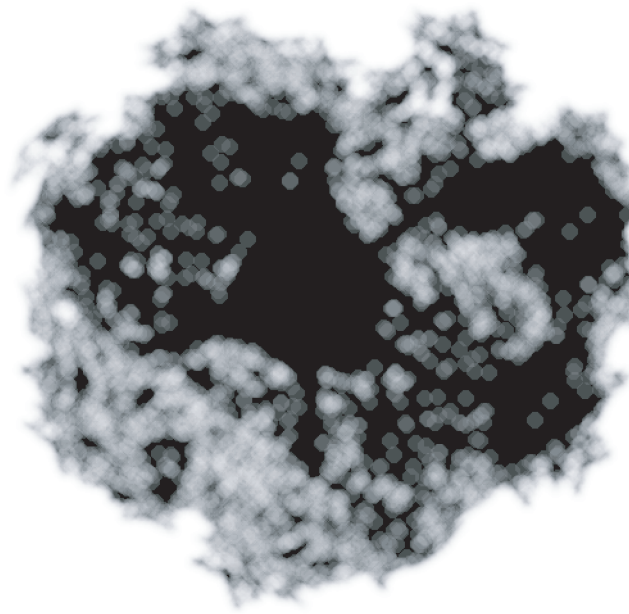


図 3.6: ガンマ変換後の木漏れ日の影画像

第 4 章

結果と考察

本章では第 3 章で述べた手法による木漏れ日の影画像の生成結果を示し、本手法の有効性を検証する。影画像の生成においては OpenGL をベースとした 3DCG ツールキットである FK Toolkit System[25] を用いて実装した。次いで本手法について考察を行う。

4.1 木漏れ日の影の生成結果

本節ではピンホール現象を考慮した木漏れ日の影画像の生成について結果を示す。樹木モデルについては Maya を用い、葉の部分はテクスチャマッピングと不透明マッピングを併用して作成した。図 4.1、図 4.2、図 4.3、図 4.4、図 4.5 はそれぞれ太陽高度角を変えて出力した画像である。図 4.1 は太陽高度角が 90° の結果画像であり、太陽高度角が大きいため、木漏れ日の影は樹木モデルと似た形をしている。図 4.2 は太陽高度角が 60° 、図 4.3 は 45° 、図 4.4 は 30° の結果画像であり、太陽高度角が小さくなるにつれ木漏れ日の影が長く伸びる様子を表現している。図 4.5 は太陽高度角が 15° のときの結果画像であり、夕暮れ時の影のように木漏れ日の影は長く伸びている。

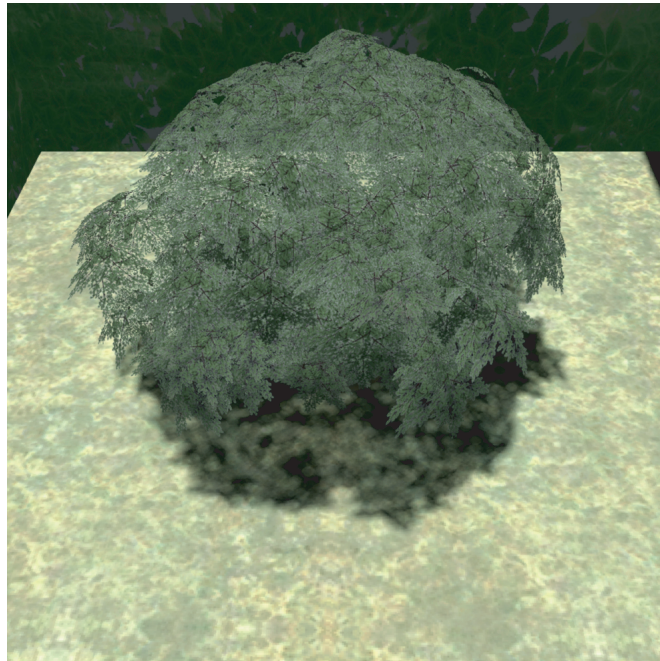


図 4.1: 太陽の角度 90 度の木漏れ日の影

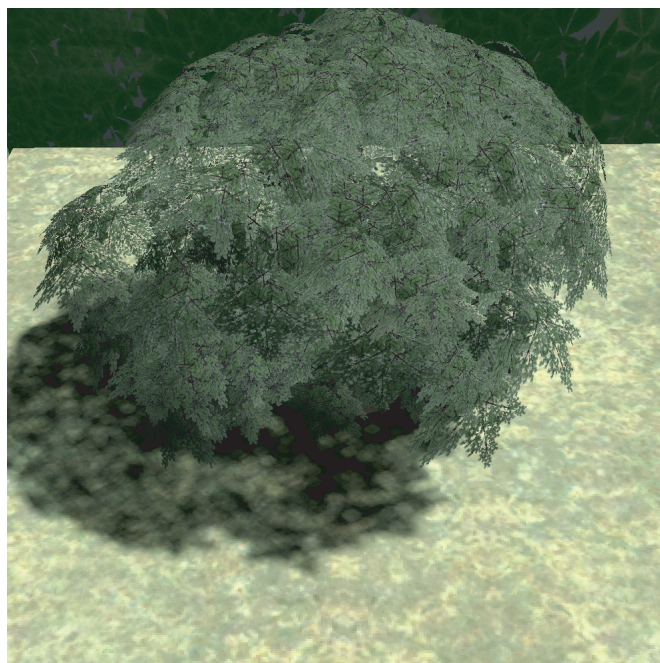


図 4.2: 太陽の角度 60 度の木漏れ日の影

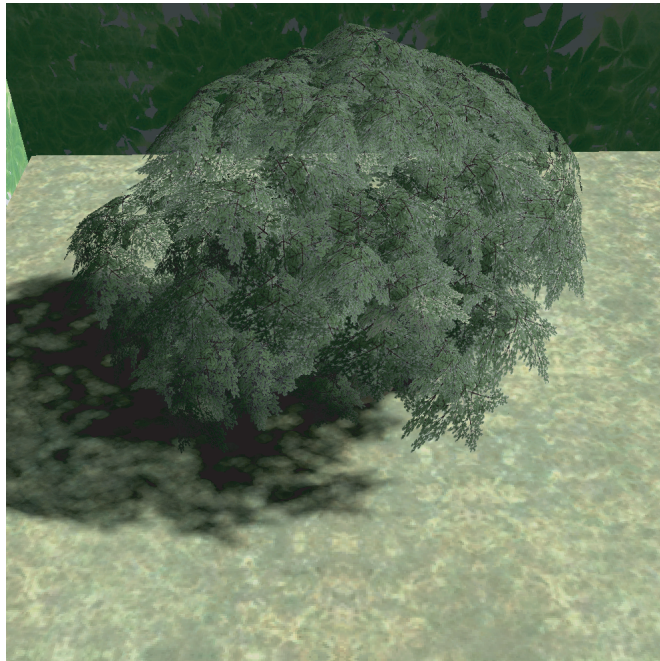


図 4.3: 太陽の角度 45 度の木漏れ日の影



図 4.4: 太陽の角度 30 度の木漏れ日の影



図 4.5: 太陽の角度 15 度の木漏れ日の影

木漏れ日は光源の形に依存した光斑を生成する。日食時を想定し、図 4.6 の三日月型の太陽画像を使用し木漏れ日の影を生成した。図 4.7 は日食時を想定した木漏れ日の影の結果画像である。図 4.8 は木漏れ日の影だけを生成した画像である。太陽画像の形を変えることで太陽の像である光斑の形が変化する様子を表現できる。太陽画像として用いた図 4.6 と木漏れ日の影の生成結果である図 4.8 からピンホール現象の特徴である太陽の像の左右の反転が表現できている。



図 4.6: 三日月型の太陽画像

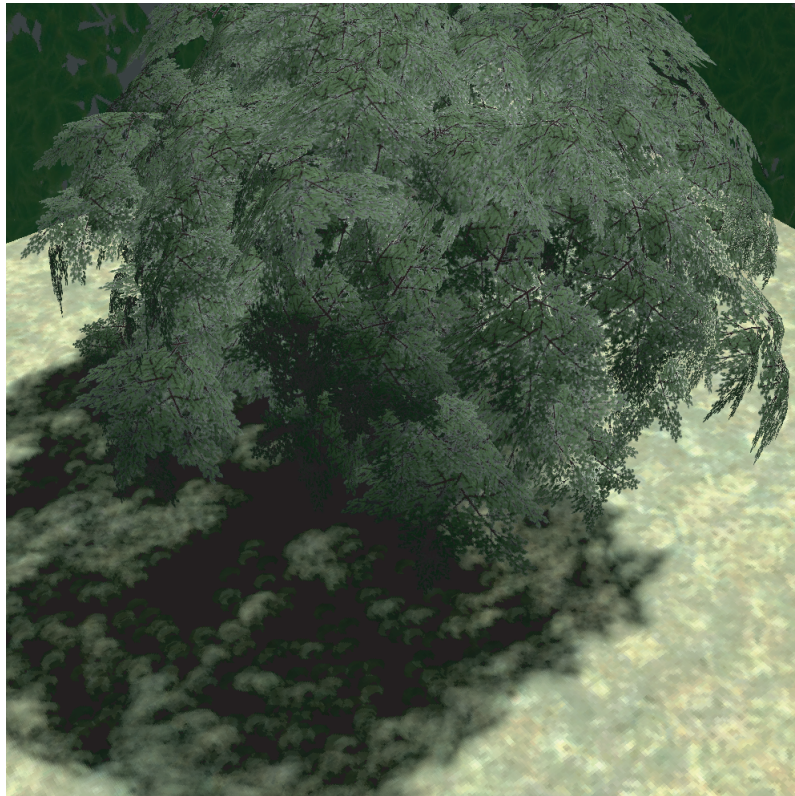


図 4.7: 日食時の木漏れ日の結果画像

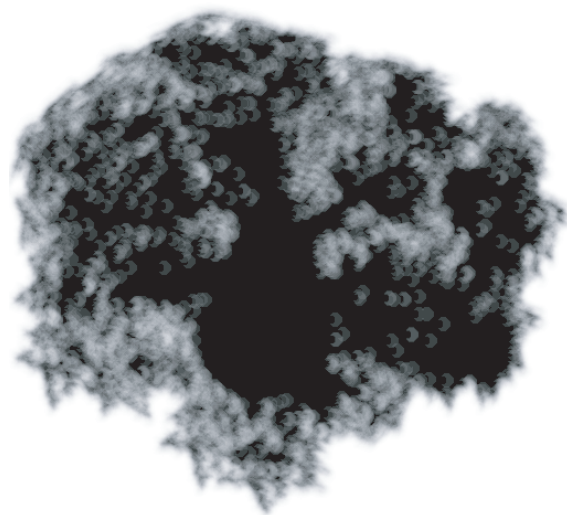


図 4.8: 日食時の木漏れ日の影の画像

図 4.9 は星型の太陽画像であり、星型のこもれ日の結果画像を図 4.10 に示す。図 4.11 は星型の木漏れ日の影画像である。図 4.9 で示した星型の太陽画像と図 4.11 で生成した影画像を比べると、太陽の像である星型の上下が反転している様子が表現できている。



図 4.9: 星型の太陽画像

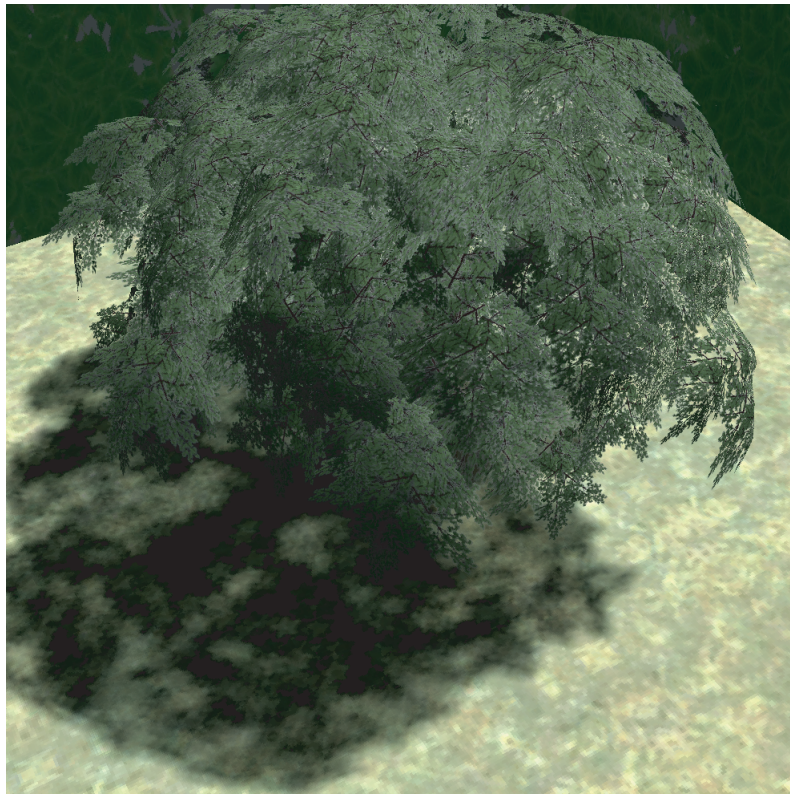


図 4.10: 星型の木漏れ日の結果画像

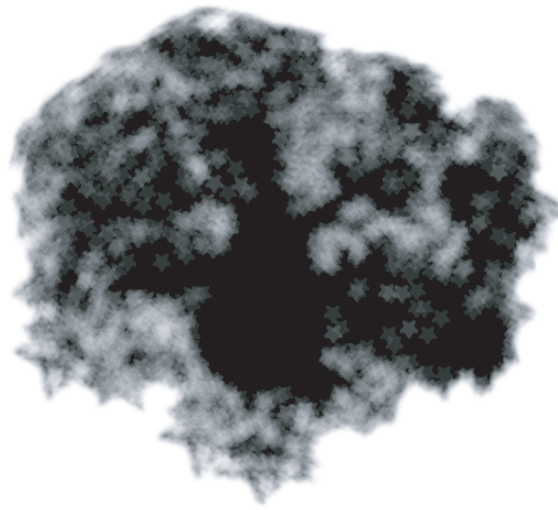


図 4.11: 星型の木漏れ日の影の画像

本手法ではどの太陽高度角でも木漏れ日の特徴である丸い光斑が再現でき、ピンホール現象の特徴である上下左右が反転した太陽の像の表現が可能である。また実際の日食時の木漏れ日の様子である 2.1 節の図 2.2 と図 4.7 を比較し、実際の日食時と同様の表現が再現できたことから、本手法を用いた木漏れ日の影画像の生成に関し、有効性を確認できた。

4.2 動作検証

本節では木漏れ日の影画像を 1 枚生成する時間を測り検証する。動作検証に使用した実行環境は表 4.1 の通りである。

表 4.1: 実行環境

OS	WindowsXP
CPU	Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8500 3.16GHz
GPU	NVIDIA GeForce 9800 GTX
メモリ	3.25GB

平行投影した画像を図 4.8 のような木漏れ日の影画像に変換するまでの時間を計測した。木漏れ日の影画像のテクスチャサイズは 512 ピクセルと 1024 ピクセルの両方で生成した。影画像のテクスチャサイズを 2 種類用意したのは、512 ピクセルでは樹木モデルの全てを投影できなかったためである。また太陽高度角に応じて投影面の縦幅の値が変化するため 15°、30°、45°、60°、90° の角度でそれぞれ検証を行った。検証結果を表 4.2 に示す。

表 4.2: 影画像の生成時間

太陽高度角 (度)	15		30		45		60		90	
影画像の縦幅 (pix)	512	1024	512	1024	512	1024	512	1024	512	1024
投影面の縦幅 (pix)	132	264	256	512	362	724	443	886	512	1024
生成時間 (ミリ秒)	480	2052	984	4066	1422	5844	1740	7119	2037	8250

表 4.2 より投影面の大きさに比例して生成時間が長くなるのがわかる。また影画像の縦幅が 512 ピクセルから 1024 ピクセルになると処理時間も単純計算で 4 倍になっていることから、処理時間は画像サイズに比例していると言える。

4.3 問題点

現状の問題点としては第一に、太陽画像の大きさが実際の太陽の大きさとは違う点が挙げられる。地球上での太陽の大きさは 2.3.1 項で述べた通りである。しかし本手法では太陽は任意の大きさの画像として扱っているため、地球上での適切な太陽の大きさではない。樹木モデルの大きさから適切な太陽の大きさを求める必要がある。

第二に、太陽高度角が小さくなるにつれ投影する面積が小さくなる。このため太陽高度角が小さいほど生成される影画像が粗くなり、ジャギーが目立つ結果になる。

第 5 章

まとめ

本研究では、ピンホール現象により、樹木の下にできる木漏れ日の影の生成する手法の研究に取り組んだ。本手法を用いることでレイトレーシング法やシャドウマップ法では表現できない木漏れ日の丸い光斑の表現と、光学現象を考慮したソフトシャドウの表現が可能になった。未だ木漏れ日の影画像の生成にはいくつか課題は残るものの、光源の形に依存した影の生成は、より写実的な自然景観の表現に大いに役立つだろう。

今後の展望として 4.3 節で述べたように、太陽画像の適切な大きさへの変換手法の考案、太陽高度角が低い場合の解像度不足による影画像のジャギーの対処が挙げられる。また影画像の生成時間を短縮し、リアルタイムに影画像を生成し、木漏れ日のきらめく様子の表現することで、よりリアルな自然景観表現が可能となるだろう。

謝辞

本論文を締めくくるにあたり、研究の方針や開発の手法、論文の執筆と幅広いご指導を頂いた、本校メディア学部の渡辺大地講師、三上浩司講師に深く感謝いたします。また論文に写真を掲載するにあたり快く承諾してくださいました、和歌山大学観光学部の吉住千亜紀氏に厚く御礼申し上げます。最後にプログラムの実装方法や研究方針、論文の執筆方法など様々な相談に乗って下さった竹内亮太先輩をはじめ院生の方々、研究中の困難を共にし励ましあった学部生のみんなに心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 西田友是, ”リアリスティックな自然景観CG画像の追求”, 第16回 NICO-GRAPH/MULTIMEDIA 論文コンテスト, 2000.
- [2] Yung-Yu Chuang, Dan B. Goldman, Brian Curless, David H. Salesin, Richard Szeliski, ”Shadow Matting and Compositing”, Proceedings of ACM SIGGRAPH’03, 2003.
- [3] Ulf Assarsson, Tomas Akenine-Moller, ”A Geometry-based Soft Shadow Volume Algorithm using Graphics Hardware”, Proceedings of ACM SIGGRAPH’03, 2003.
- [4] Samuli Laine, Timo Aila, Ulf Assarsson, Jaakko Lehtinen, Tomas Akenine-Moller, ”Soft Shadow Volumes for Ray Tracing”, Proceedings of ACM SIGGRAPH’05, 2005.
- [5] Alexander Reshetov, Alexei Soupikov, Jim Hurley, ”Multi-Level Ray Tracing Algorithm” Proceedings of ACM SIGGRAPH’05, 2005.
- [6] Marc Stamminger, George Drettakis, ”Perspective Shadow Maps”, Proceedings of ACM SIGGRAPH’02, 2002.
- [7] Pradeep Sen, Michael Cammarano, Pat Hanrahan, ”Shadow Silhouette Maps”, Proceedings of ACM SIGGRAPH’03, 2003.

- [8] 堤靖典, "2枚のシャドウマップを基にした近傍画素検索によるソフトシャドウ表現の研究", 東京工科大学, メディア学科, 渡辺研究室, 2005.
- [9] Thomas Annen, Zhao Dong, Tom Mertens, Philippe Bekaert, Hans-Peter Seidel, Jan Kautz, "Real-Time, All-Frequency Shadows in Dynamic Scenes", Proceedings of ACM SIGGRAPH'08, 2008.
- [10] 戸塚七郎訳, 「アリストテレス全集 第11巻 問題集」, 岩波書店, 1968.
- [11] John H. Hammond, 「カメラ・オブスクラ年代記」, 朝日新聞社, 2000.
- [12] 大人の科学マガジン, Vol.09, プラネタリウム, 学習研究社, 2005.
- [13] 熊崎勝, 「はじめてのピンホールカメラ - 入門」, 風媒社, 1998.
- [14] 針穴写真協会, < <http://jpps.jp/web/indexsai.htm> > .
- [15] 木村卓 編著, 「デジタル映像表現 [改訂版] -CGによる映像制作-」, CG ARTS 協会, 2006.
- [16] 柴田和雄・内嶋善兵衛編, 「日本分光学会測定法シリーズ15 太陽エネルギーの分布と測定」, 学会出版センター, 1987.
- [17] 天文年鑑編集委員会編, 「天文年鑑2009年版」, 誠文堂新光社, 2008.
- [18] 中前栄八郎, 西田友是, 「3次元コンピュータグラフィックス」, 昭晃堂, 1986.
- [19] 伊藤朋恭, "シミュレーション的手法による大気環境情報教育-日射量の天頂角依存性-", 大妻女子大学紀要-社会情報学系- 社会情報学研究 14, 2005.
- [20] 宇田川光弘, 木村健一, "水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定", 日本建築学会論文報告集, 第267号, 1978.
- [21] James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, John F. Hughes, 「コンピュータグラフィックス 理論と実践」, オーム社, 2001.

- [22] Randima Fernando, Mark J.Kilgard, 「The Cg Tutorial 日本語版」, ボーン
デジタル, pp242-243, 2003.
- [23] 牟田敦, 「アートのための数学」, オーム社, 2008.
- [24] 藤代一成, 「コンピュータグラフィックス」, CG-ARTS 協会, 2004.
- [25] 渡辺大地, FK Tool Kit System , < <http://fktoolkit.sourceforge.jp/> > .