

## 環境光強度を反映した降雨景観生成手法の開発

山本 庸弘<sup>†</sup> 多田村 克己<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 山口大学大学院理工学研究科 <sup>‡</sup> 山口大学工学部  
〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16番1号  
E-mail: { <sup>†</sup> y049fh, <sup>‡</sup> tadamura } @yamaguchi-u.ac.jp

あらまし コンピュータグラフィックス(CG)により写実性の高い降雨景観を生成するための手法を提案する. 具体的には, シーンの明るさを降雨強度に対応して変化させる手法, および雨粒落下軌跡を天空の遮蔽状況を反映させた明るさで描画する手法を考案した. これらの手法をできるだけ小さい計算負荷で実現するため, シーンの明るさは簡略雨天モデルを利用して計算し, 天空の遮蔽状態はあらかじめ離散点において計算しておいたデータを利用する. 提案手法を用いて作成した降雨景観のアニメーションにより, 有効性を確認した.

### Development of a method for generating a realistic rainy scene taking into account the ambient light intensity

Nobuhiro YAMAMOTO<sup>†</sup> Katsumi TADAMURA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University  
<sup>‡</sup> Faculty of Engineering, Yamaguchi University  
2-16-1 Tokiwa-Dai, Ube, 755-8611, Japan  
E-mail: { <sup>†</sup> y049fh, <sup>‡</sup> tadamura } @yamaguchi-u.ac.jp

**Abstract** : We propose a method for rendering a realistic rainy computer generated image taking into account both the strength of the rainfall and the ambient light intensity. The proposed method consists of two techniques; one is to change the brightness of the scene with the strength of the rainfall, and the other one is to render a path of a raindrop whose brightness is varied depending on the intensity of ambient light. In order to achieve these methods with small computation costs, we calculate the brightness of the scene with a simple rain model and we also obtain the obscuration of the sky for each raindrop through beforehand calculated look-up table for discrete 3D location. Effectiveness of the proposed method was confirmed through a rainfall animation.

#### 1. はじめに

コンピュータグラフィックス(CG)により、写実性の高い景観画像を生成するためには、多様な要素を考慮する必要があり、これまでに多くの研究成果が得られている。最近のCG画像の高速生成技法の開発や、グラフィックスハードウェアの進歩により、フルCGによるウォークスルー、ドライブスルーシミュレータなどのような、リアルタイム処理が要求される用途にも写実性の高い画像が利用されるようになってきた。これらのシミュレータにおいては、様々な天候下の景観を表現できることが重要である。太陽光線の大気中に

おける放射伝達(微粒子による光の吸収、散乱)をシミュレートすることにより、空の色や雲、および霞の表現が可能であり、最近ではこれらを高速処理するための多重散乱を考慮した空の色や雲の表現手法[1]、ハードウェアを利用して大気中の光の散乱現象を高速に処理する手法[2]が提案されている。雨天時の表現に注目すると、降雨後の濡れた路面の表現手法[3]、車のフロントガラスを滑り落ちる雨粒の表現手法[4]、天候の変化を反映した遠景の表現手法[5]などが提案されている。降雨状況そのものを表現する手法として、降雨軌跡の表現手法[6]および、降雨により生じるシミの表現

手法[7]が提案されている。文献[6]は、雨粒落下軌跡を描画する対象を限定するなどの工夫により計算負荷の軽減を実現したが、降雨と背景との関係については考慮されていない。

本稿では、降雨による景観の明るさ(環境光強度)の変化を画像生成に反映させる手法、具体的には、降雨強度に対応させてシーン全体の明るさを変化させる手法と、落下軌跡として描画する雨粒の明るさを、天空の遮蔽状態を反映させて決定する手法を提案する。提案手法により、様々な降雨強度に対応したリアルな降雨景観画像を生成可能になる。

本稿では、次章において提案手法の基本的な考え方を述べ、3章において降雨強度に合わせて、背景となる景観の明るさを変化させる方法を説明する。さらに、4章では天空の遮蔽状態を雨粒落下軌跡の明るさに反映させて表現するための手法を説明する。5章において、提案手法の適用例を示し、最後にまとめを述べる。

## 2. 基本的な考え方

### 2.1. 前提条件

提案手法は、降雨景観画像を写実性を保ちながら、できるだけ高速に生成することを目的にしている。ここで、降雨現象も他の自然現象と同様にそのメカニズムは非常に複雑であるため、目的達成のためには、何らかの簡略化が必要である。そこで、以下の前提条件を置く。

- (1) 領域内の雨粒の属性(粒径、光学特性)は同一であり、その分布は一様とする。風が吹く場合は、風向、風速は同一であるとする。
- (2) 降雨時は完全曇天空であり、同一の性質を持つ雲により、全天空が均一に覆われた状態であるとする。
- (3) 雨粒個別の軌跡は、視点近傍に存在する雨粒のみ描画する[6]。
- (4) 光源は、天空光のみとし、人工光源は考慮しない。

### 2.2. 提案手法の概要

提案手法では、降雨時の景観を、個別に雨粒の軌跡が確認可能な視点近傍領域と、モヤとして降雨を表現する遠景領域とに分割し、それぞれの領域に対して異なる処理を行う。具体的には、視点近傍領域では雨粒の落下軌跡を描画し、遠景領域ではモヤの度合いを降雨強度に応じて変化させることで降雨景観を生成する。

提案手法による降雨景観画像を生成する際の処理と利用するデータの関係を図1に示す。ユーザが任意のパラメータとして指定するのは、降雨強度と、天空光による水平面照度(全天空照度)であり、後者は、太

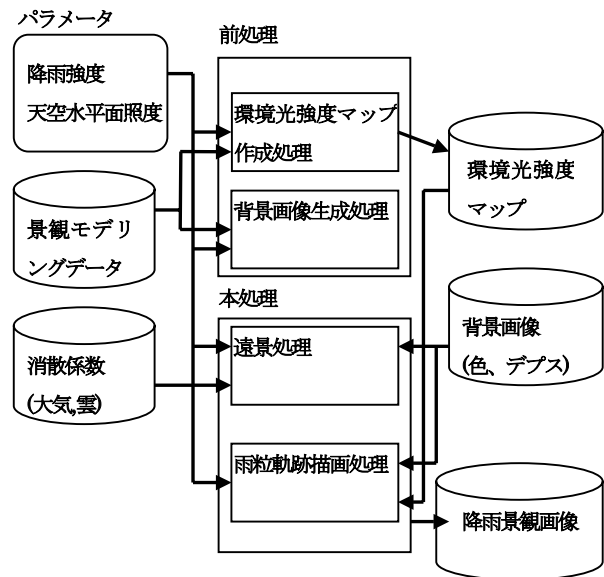


図1 提案手法の処理手順とデータの関係

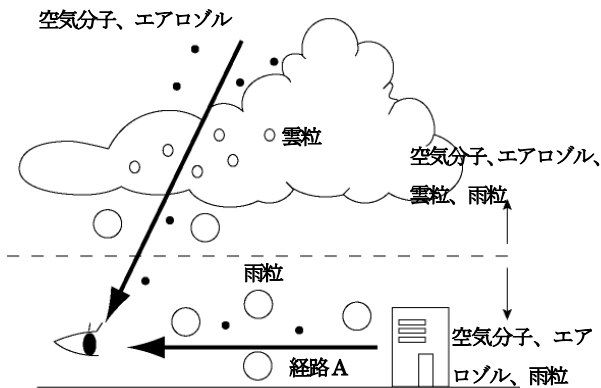
陽高度の違いや雲の厚さの違いを反映するためのものであり、季節感を表現する。これらのパラメータと景観のモデリングデータを用いて、完全曇天時の景観画像を作成し、色情報とデプス情報を記憶する。アニメーションの場合は、作成フレーム数分を用意する。さらに、シーン内の離散点における天空の遮蔽を考慮した天空照度、すなわち環境光の強さを求め、テーブルを作成する。提案手法では、これを環境光強度マップと呼ぶ。以上の処理を前処理として行い、本処理では、背景データを用いて、遠景の降雨を考慮した「モヤ」表現のための処理を行う。その後、降雨強度、環境光の強度を考慮して雨粒落下軌跡を描画すれば、降雨景観画像を得ることができる。

## 3. 降雨による景観の明るさ変化の表現

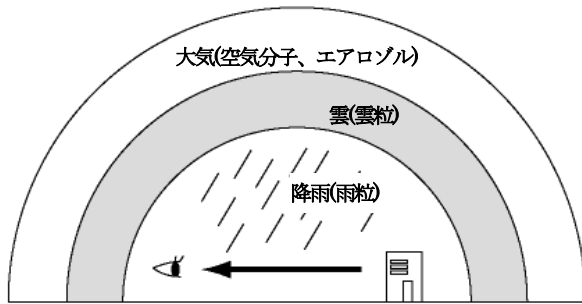
本章では、降雨に起因する景観の変化、具体的には、降雨により生じる視程の低下、および場の明るさの変化について説明する。そして、提案手法におけるこれらの表現モデルを示す。

雨天時に景観を変化させる要因として、モヤ、雨、雲、霧などがある。青島らにより提案されたこれらの手法[5]は、シミュレーションや観測データを用いて天候の変化を表現可能である。しかし、降雨による視程の低下の表現に限定されており、アニメーションで表現することができない。また、画素毎に視線上の放射伝達(散乱,吸収)を計算するため、計算負荷も大きい。このため、リアルタイムでの画像作成は、より簡易なモデルを利用するなどの配慮が必要となる。提案手法

は、以下に説明するような、計算負荷を考慮した簡易なモデルを用いて、視程や場の明るさの変化を表現する。



(a)雨天時に視点に到達する光源



(b)簡略化雨天モデル

図2. 降雨時の放射伝達モデルとその簡略化

### 3.1 視程と景観の変化

図2(a)中の経路Aに示すように、物体表面で反射した光線は、それが視点に届くまで大気中の微粒子による散乱や吸収のため強度が減衰する。その一方で、これらの微粒子が、経路Aとは異なる方向からの入射光線を散乱した光線が視点に入る。降雨時の散乱は、ミー散乱によるものが優勢であり、散乱強度は波長に依存しない、すなわち、白色であることから視点と物体との距離が大きくなるほど白っぽく見える。この現象は、霞の効果とか空気遠近と呼ばれる。視程の低下を考慮した図2(a)の経路A上における、視点に到達する光線の強度Iと距離dの物体表面上での反射光の強度I<sub>0</sub>の関係は、前提条件から雨が一樣に降っていると考えるので、次式により表すことができる。

$$I = I_0 e^{-\sigma d} + \int_d I_s(l) e^{-\sigma(d-l)} dl \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$ は降雨を考慮した消散係数である。第二項が散乱光成分であり、I<sub>s</sub>は経路上の点における視点に

向かう散乱光強度である。いま、入射光源として天空光のみを考え、簡単のため、天空は遮蔽されず、経路上で天空輝度分布が変化しないとすると、I<sub>s</sub>は定数と考えることができるので、(1)式は以下のように変形できる。

$$\begin{aligned} I &= I_0 e^{-\sigma d} + I_s \int_d e^{-\sigma(d-l)} dl \\ &= I_0 e^{-\sigma d} + I_s \frac{1}{\sigma} (1 - e^{-\sigma d}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、天空光の散乱光強度I<sub>s</sub>は天空の微小要素d $\omega$ からの光線強度L( $\omega$ )とし、散乱角を $\theta$ とすると、次式により求めることができる。

$$I_s = \int_{2\pi} L(\omega) \alpha(\theta) d\omega \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$ は散乱(位相)関数である。

### 3.2 天空輝度分布

空の明るさ、すなわち天空輝度分布は、場所による降雨状態の違いや、雲の高度、厚さ、光学的特性などにより現実には複雑な分布をしている。ここで、提案手法で問題にしているのは、色合いではなく明るさであるので、雲の分布状態を反映させた輝度分布は表現できないが、数式で表現され処理の容易な、CIE標準曇天空を利用する。CIE標準曇天空モデル[8]では、次式に示すように天空輝度L<sub>oc</sub>は天頂輝度L<sub>zoc</sub>に対する相対輝度で表されている。

$$\frac{L_{oc}}{L_{zoc}} = \frac{1 + 2 \sin \gamma}{3} \quad (4)$$

ここで、 $\sin \gamma$ は天空要素の高度成分である。さらに、天頂輝度L<sub>zoc</sub>は遮蔽のない空間における全天空照度E<sub>soc</sub>から、次式により求めることができる。

$$L_{zoc} = \frac{9}{7\pi} E_{soc} \quad (5)$$

提案手法では、雲の厚さや太陽高度の違い季節感を天空輝度分布に反映させるため、明るさの異なる完全曇天時の水平面照度を実測し、(8)式で利用している。

### 3.3 簡略雨天モデル

提案手法では、雨天時の大気の状態を図2(b)に示すような、簡略化したモデルで表現する。すなわち、前提条件(2)で述べたように、同一高度、厚みの均一な雲に覆われていると考える。そして、(4)式で与えられる天空輝度分布を、図2(b)中の雲領域と降雨領域との境

界の半球部分にマッピングする。雲の高さ  $H$  は降雨強度と関係があるため[9]、降雨強度の関数として与える。経路上の天空光散乱強度  $I_s$  は、それぞれの場所での天空の遮蔽を考慮する必要があるが、計算コスト対表示効果の点で問題がある。提案手法では、経路上で視点に向かう天空光の散乱成分の総和は、その点における水平面照度に比例すると考え、さらに、経路上では  $I_s$  は変化せず一定と仮定することで、(2)式の  $I_s$  は視点位置での天空光による水平面照度  $E_{hv}$  を用いて、 $I_s = k_s E_{hv}$  から得る。

大気中の消散係数  $\sigma$  は、降雨の状況および、大気中の微粒子の分布状況により異なる。提案手法では、シーン内では図 2(b)の降雨領域においては、降雨状態と大気の状態、すなわち、単位体積中の水の量とエアロゾル量は一定と仮定する。また、大気中の微粒子や雨粒による光の吸収は無視できる[10]ため、消散係数  $\sigma$  は散乱係数を利用する。大気中の微粒子の散乱係数を  $\sigma_{par}$ 、降雨散乱係数を  $\sigma_{rain}$  とすると、 $\sigma$  は次式で得ることができる。

$$\sigma = \sigma_{par} + \sigma_{rain} (R_{st}) \quad (6)$$

ここで、 $R_{st}$  は降雨強度(4段階)である。上記、 $I_s$ 、 $\sigma$  を(2)式に代入して、降雨を考慮して視程の変化を表現する。

#### 4. 天空の遮蔽状態を考慮した雨粒落下軌跡の描画

提案手法では、視点近傍域を描画用雨粒の存在領域とし(詳細は文献[6]参照)、この存在領域内のみ雨粒を発生させ、その雨粒落下軌跡を背景画像に合成して降雨画像を生成する。従来手法[6]では、雨粒に天空が一定の明るさで映り込む、すなわち、天空の明るさの違いや、遮蔽状況を考慮せずに落下軌跡を描画していた。このため、降雨強度が強くなり、雨粒が大きくなると、明るく太い落下軌跡が描画され、不自然さが際立つなどの問題が生じていた。そこで、天空の明るさの違いや遮蔽状況を考慮すれば、この問題を解決できると考えられるが、個々の雨粒単位で考えると、画面に対する貢献度が低く、視点近傍に限定しているものの、1フレーム当り数万個の雨粒軌跡を描画するため、簡易な方法で周囲の遮蔽感や曇り具合の雰囲気、雨粒軌跡に反映できることが望ましい。以下に、計算量を抑えて視点近傍の雨粒落下軌跡の明るさを計算するための、レンダリングモデル、および景観全体の環境光強度の分布を事前計算するための環境光強度マップについて説明する。

#### 4.1. 雨粒レンダリングモデル

通常、雨粒が画面上で数画素を占める程の大きさになることはないため、厳密には雨粒毎に可視部分の表面全体における映り込みと透過光を求めて描画する必要がある。しかし、落下する雨粒を注視することはほとんどなく、計算負荷に見合うだけの表現効果を得られないことが自明であるため、何らかの簡易化が必要である。ここで、雨粒表面の映り込み像として視点に到達するエネルギーの大半は、天空からのものであると考えてよいので、雨粒の位置における天空の遮蔽状況が、映り込みを通して得られるエネルギーに反映される。提案手法では、雨粒位置での水平面照度と映り込みの光線強度が、比例関係にあると仮定する。また、透過(屈折)方向からの光線については、一定の広がりを持つ領域からの光線が視点に到達すると考えられるが、簡略化のため、視点から雨粒に到達した方向に直進する。すなわち、雨粒のない背景に雨粒の透過率を掛けた光線が視点に届くものとする。以上をまとめ、雨粒から視点方向に向かう光線強度  $I_v$  は、天空の雨粒への映り込みの光線強度  $I_R$ 、雨粒方向の背景からの光線強度を  $I_T$  とすると次式から得ることができる。

$$I_v = r I_R + (1 - r) I_T \quad (7)$$

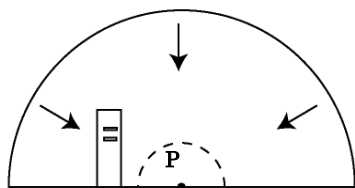
ここで、 $r$  は反射率であり、視点と雨粒との相対位置関係の関数となるがここでは定数とする。雨粒位置での水平面天空照度を  $E_R$  とすると、 $I_R = k E_R$  ( $k$  は定数)と表すことができる。 $I_T$  は、雨粒方向の背景からの光線強度である。 $E_R$  は、その点から見た天空輝度分布と天空の遮蔽情報から計算できる。

#### 4.2. 天空光による水平面照度計算

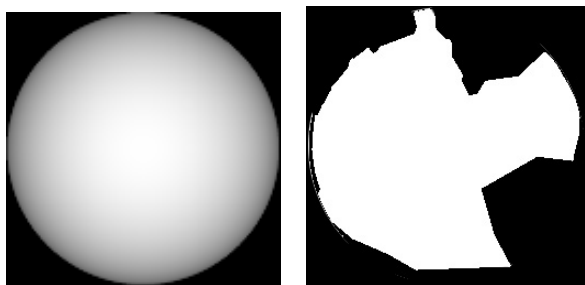
提案手法では、(4)式で表される CIE の標準天空モデル(完全曇天空)[8]を用いて天空輝度分布(図 3(b)参照)を与える。提案手法では、天空光は図 3(a)に示すように、地表を覆う十分な大きさの半球状の面光源と考え、雲領域と降雨領域の境界面上にマップする。天空を微小な面光源の集合と考え、各面光源を単位球面に射影し、水平面に正射影することで水平面照度が計算可能である。同様の方法で天空の遮蔽状況を得ることができる(図 3(c))。これらの情報を用いて天空光による水平面照度を計算する(図 3(d)に示す天空の可視部分を利用して天空照度を求める)。このとき、降雨による影響を考慮するため、天空光を降雨強度に対応させて減衰させる。水平面上の正射影を、水平方向に  $\Delta i$  間隔、垂直方向に  $\Delta j$  間隔でサンプリングすると、天空光による水平面照度  $E_h$  は次式で計算可能である。

$$E_h = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M \cos \theta_{ij} \tau(i, j) \times L(i, j) H(i, j) \Delta i \Delta j \quad (8)$$

ここで、 $\tau(i, j)$ は天空要素 $(i, j)$ 方向の降雨による減衰率、 $\cos \theta_{ij}$ は、天空要素 $(i, j)$ から計算点(図 3(a)点 P)への入射角、 $L(i, j)$ は天空輝度分布、 $H(i, j)$ は、天空要素 $(i, j)$ からの入射光が遮蔽される場合には 0、遮蔽されない場合には 1 を返す関数である。



(a) 天空モデル



(b) 天空輝度分布

(c) 遮蔽状態マスク



(d) 遮蔽を考慮した天空輝度分布

図 3. 天空光による水平面照度計算のため利用するデータ

#### 4.3. 環境光強度マップ生成

個別の雨粒に対して、天空による水平面照度を(7)式を用いて計算すると、膨大な計算量が必要となる。一方、屋外では通常、天空の遮蔽状況は急激には変化しない。すなわち、人工光源のない完全曇天空下では、空間中の 1 点の近傍領域においては、水平面照度はほとんど変化しないと考えてよい。そこで、景観全体を均一なメッシュで区切り、予めメッシュ格子点における天空光による水平面照度を計算し、結果をテーブルに記憶しておき、雨粒軌跡描画の際に必要な天空照度

を、このテーブルを用いて計算することで計算量を削減する。具体的には、雨粒の軌跡を描画する視点近傍領域の中心点 O を囲む格子点を求め、それらの格子点 O における天空照度を、点 O の位置を用いて線形補間して得られる値を全ての雨粒に対して適用する。

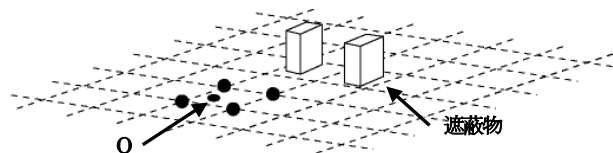


図 4. 環境光強度マップ用の正方格子

#### 5. 適用例

提案手法と従来手法により生成した降雨景観画像を比較して、提案手法の効果を評価する。図 5(a)は、降雨のない完全曇天下での景観を表示したものである。これが背景である。(b)は、従来手法により、雨粒部分は背景と一定強度の環境光(白色)を反射率 0.5 で合成して表現して得られた画像である。降雨により生じるモヤは表現していない。(c)は、提案手法により生成した画像である。(b)と比較して、(c)では、降雨軌跡が見えにくくなる一方で、遠方の空が降雨のため暗くなった状況、および、降雨によるモヤで正面奥のビルが見えにくくなっている(視程の低下)状況も表現できている。(d)は(c)より降雨強度を弱くしたものである。降雨軌跡が細くなっただけでなく、シーン全体が少し明るくなっている。

#### 6. 結論

降雨景観画像を、天空の遮蔽状態や明るさ、降雨強度、雲の厚さを反映した環境光強度の変化を考慮して生成するための、簡易計算モデルを提案した。適用例によって景観の明るさの変化、および遮蔽物体による雨粒軌跡の明るさの変化確認をした。

今後の課題として、計算時間の短縮、環境光強度マップ分割の最適化、降雨強度と雲の簡易モデルの再検討が挙げられる。

#### 参考文献

- [1]岩崎他, 散乱マップを用いた多重散乱の計算と空の色の高速表示法, 画像電子学会誌, Vol.33, No.4-B, pp.515-522, 2004.
- [2]Hoffman, Nathaniel and Arcot J. Preetham. Rendering Outdoor Light Scattering in Real Time, Proceedings of Game Developer Conference 2002.
- [3]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.

[4] Kaneda, K., Ikeda, S. and Yamashita, H., Animation of Water Droplets Moving Down a Surface, The Journal of Visualization & Computer Animation, Vol. 10, No. 1, pp.15-26, 1999.

[5] 青島他, 主に気象による景観の変化の再現を目的とした景観シミュレーション, 写真計測とリモートセンシング, Vol.34, No.6, pp.4-16, 1995.

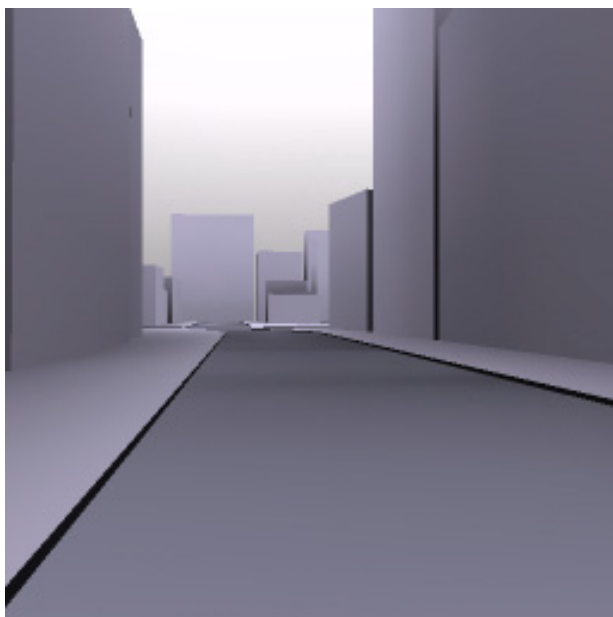
[6] 山本, 多田村, 視野変化をリアルに表現可能なCGによる降雨アニメーション生成手法の開発, 第31回画像電子年次大会, pp.137-138, 2003.

[7] 桂健一, 多田村克己, 降雨開始時の地表面変化表現手法の開発, 画像電子学会第169回研究会, 03-11-21, pp.17-23, 2003.

[8] 照明学会編, 照明ハンドブック第二版, オーム社, 2003.

[9] 柴田清孝. 雲と雨の気象学, 朝倉書房, 1999.

[10] 柴田清孝. 光の気象学, 朝倉書房, 1999.



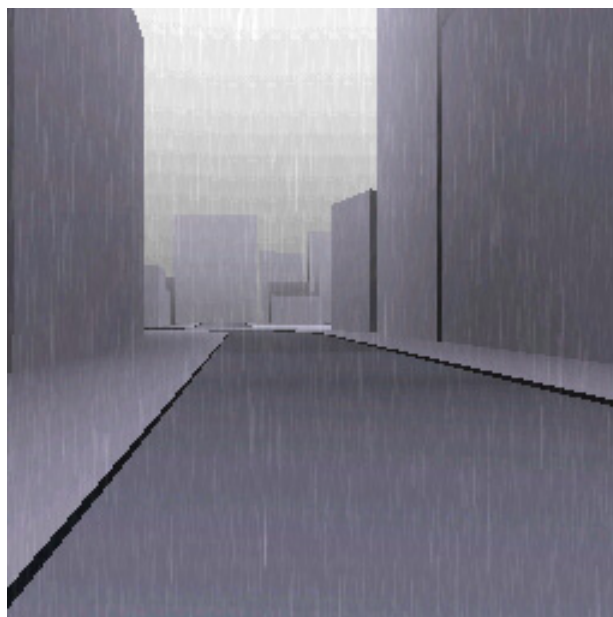
(a) 背景



(c) 提案手法(強雨)



(b) 従来手法(強雨:15mm/h)



(d) 提案手法(並雨: 4mm/h)

図5. 従来手法および提案手法による降雨景観画像