

## CGによる路面状況を考慮した水しぶきの表現手法の開発

坂本英男 水上嘉樹 多田村克己  
山口大学大学院理工学研究科

概要：コンピュータグラフィックスによる降雨時における凹凸を考慮した地表面の時間的変化を表現するための、効率の良い手法を提案する。降雨が地面にしみこみ、濡れた状態になり、やがて浮き出た水が溜まり始める様子を表現可能な地表面の微小な凹凸表現モデルとそれを基にした水の移動モデルを考案した。さらに、地表面の水分量情報を利用して、濡れた地面を通過するタイヤから生じる水しぶきの強さを地表面の水分量に対応させて変化させることが可能な水しぶき発生モデルを提案する。提案手法を実装し、適用例によりその有効性を確認した。

### Expression of spray taking road surface condition into account

Hideo Sakamoto Yoshiki Mizukami Katsumi Tadamura  
Graduate School of Science and Engineering Yamaguchi University

This paper proposes a model for rendering bumpy road surface in rainy weather. In the model, the rain drops sink into the road surface and make it wet. Then the saturated water moves to the low portion of the surface and accumulates there. This paper also proposes a model for rendering spray from a driving tire on the wet surface and puddles on the road. In the model, the amount of spray is decided on the condition of the road surface. This study implemented the proposed models and evaluated their efficiency.

#### 1. はじめに

ドライブシミュレータやフライトシミュレータに代表されるコンピュータグラフィックス(CG)による仮想空間中でのビジュアルシミュレーションは、様々な状況を設定可能であり、繰り返し実行できるという特徴を持つ。シミュレーションに用いられる画像は、許容される計算コスト内でできる限り現実感の高いものが望まれる。CGにより現実感の高い屋外景観を生成するためには、様々な要素が関係する。ここで、気候・天候に代表される自然現象を忠実に再現するためには、物理法則に従い複雑なモデルを用いて画像生成のための計算を行う必要がある。通常、写実性(自然への忠実度)と計算コストは比例するため、両者の適切なトレードオフを実現する計算モデルが必要である。

屋外景観画像の写実性に対して、天候の及ぼす影響は大きい。中でも降雨、降雪、霧等の悪天候

は、景観のビジュアルシミュレーションにおいてそれ自身が主役になることがある。ここで、降雨表現に着目すると、雨粒の落下軌跡や、地表面に落下した雨粒の振る舞い等に加え、水たまりに関係する水しぶきや、波紋の表現も、雨天時独特の重要な要素である。しかし、未だ地表面の凹凸を考慮し、降雨により水が溜まる様子の時間的、空間的变化を表現する手法は開発されていない。本論文では、地面の凹凸を考慮した水の移動モデルと濡れた路面の表現手法、及び降雨時もしくは降雨後の路面を車が走行する際に生じる水しぶきを、その路面の保水状況に対応させて発生し、表示するための手法を提案する。

降雨に関する諸現象をCGにより表現する研究として、まず、中前らにより写実性の高い濡れた地面をリアルに表現する手法[1]が開発された。金田らは、ドライブシミュレータへの適用を意識した、車のフロントガラスを流れる水滴の表現手

法[2]を提案している。また、桂らは、水のしみこみを考慮した降雨による平坦な地表面の変化表現手法[3]を開発した。佐々木らは、降雨の局所性を考慮した雨粒落下軌跡描画手法[4]を提案した。Gargらは視線や照明光の方向を考慮したフォトリアルな降雨軌跡の描画手法[5]を提案した。

水しぶき表現については、しぶきを粒子として捉えるパーティクルシステムが通常用いられる。Simsらにより波が砕けて生じるしぶきや、滝から落ちた水により生じる水しぶきを表現する手法[6]、Williamらによる海の水しぶきを表現する手法[7]、Jamesらによる水面にボールが落ちたときに起こる水しぶきを表現する手法[8]等が提案されている。

さらに、グラフィクスハードウェアを用いた高速処理に関する研究も盛んになっており、Krugerらは、水たまりにできる波紋を高速描画する手法[8]を提案した。これらの研究により、雨天時の景観を適切な計算コストで品質良く表現できるようになった。

ここで本論文と関係の深い路面の濡れの表現や、水たまりからの水しぶき表現について注目すると、中前らの手法[1]は濡れ具合に対応したレンダリングモデルを用いることで、現実感の高い路面表現を可能にしているが、降雨と路面状態との関係は不明である。桂らの手法[3]は、雨が降り始めてから水溜りができるまで地面の水分量を記憶し、それを表示に利用しているが、地面はフラットであり、あふれた水の移動も考慮されていないという問題があった。水しぶきの表現に関しては、海や川などの水深が十分にある場所での発生が対象となっており、本論文のように地面上の水分量を反映させた水しぶきを表現しようとした研究はこれまでに見当たらない。

## 2. 基本的な考え方

前述のように、本論文では、降雨により路面が徐々に濡れていき、水たまりができていく様子を路面の凹凸を考慮して表現すること、及び路面の保水状況に応じた走行中のタイヤにより生じる水しぶきを表現することを目的とする。

本章では、具体的な実現手段考案の際の前提条

件、及び提案手法の基本的な考えを説明する。

### 2.1 前提条件

提案手法では、降雨景観画像を写実性を保ちながら、できるだけ効率良く生成することを目標としている。降雨に関する現象は複雑であり、計算コストを抑えるため、以下のような前提条件を設ける。

- ① 水に関する微小な物理現象（毛管現象、表面張力）は表現対象外とする。
- ② 雨粒は一様に落下する。
- ③ シーン内は無風であり、水しぶきの運動は、タイヤと路面との関係により決定できる。

### 2.2 基本的な考え方

微小な凹凸や、アスファルト、土などの表面特性を考慮して路面を厳密に表現するためには、必要なデータ量が膨大になることは容易に想像できる。ここで、地面形状はどの地点においても異なるため、地面の凹凸に関しては必要最小限の精度を保証してデータを保持する必要がある。よく知られているように、広範囲の地面表示のためには、視点からの距離に応じた表示に関するLOD制御が必要である。すなわち、視点から離れるほど、細かな現象を再現することに対する費用対効果は小さくなるので、必要な表示精度に合わせた地面属性記憶のためのデータ構造を持つことが望ましい。そこで提案手法では、地面を視点距離に応じて段階的に変化する正方形のメッシュに分割し、メッシュ構成要素であるセル単位で地面属性を記憶する。セルの属性の1つとして保有水分量を記憶し、それを反映した描画を行うことで、降雨時における路面状況の時間的、空間的変化を表現する。

路面の微小な凹凸は、セルを単位とするディスプレイメントマッピングにより表現し、描画はそれを利用して得られる法線ベクトルによるパンプマッピングを用いて表現する。地表面をテクスチャマッピングにより表現する場合は、計算コスト低減やエリアシング発生抑制の観点から、通常視点からの距離をベースにしたLOD制御が行われる。降雨によって生じるしみや水たまりも、地表面の模様の一様と考えることができるので、表示に関しては、同様の仕組みを用意する。すなわ

ち、図1に示すように視点近傍では蜜にサンプリングし、視点から遠ざかるに従い粗くしていく。

水しぶきの表現に関しては、タイヤが濡れた路面を通るときに発生する水しぶきの表現のみを考える。具体的には、タイヤがかき出して発生する水しぶき、タイヤが水たまりに侵入することにより発生する水しぶきの二つを表現する。タイヤから発生する水しぶき及び水たまりから発生する水しぶきの水分量、及び水滴の大きさは、タイヤが通過する接地面の水分量により決定する。ここで、発生したしぶきの水分量の総量に等しい水分量が地面から除かれると考える。また、タイヤが侵入したときの進行方向と速度により、水しぶきとして発生する水滴の進行方向、速度を決定する。

### 3. 地面の凹凸を考慮した水分量移動モデル

#### 3.1 データ構造

地表面の属性データ記憶のため、提案手法では前述したように、凹凸情報記憶用と表示用の二重のデータ構造を持つ。それらの最小単位は同一であり、雨粒により生じるしみの大きさを基準にしている。地表面の水分量の管理は、図1に示すセル単位で行う。

表示対象領域に含まれる地面をセル単位に分割する。セルの大きさは視点からの距離に比例して、段階的に大きくしていく。処理を容易にするため、セルの大きさは最小（最も視点に近い）セルの2のべき乗倍で大きくなるとする。すなわち、表示領域内の路面上の点Pの属するセルの大きさを $S_p$ とすると $S_p$ は次式で与えられる。

$$S_p = S_0 \times 2^{level(p)} \quad (1)$$

ここで $S_0$ は最も視点に近いセルの大きさであり、Level(p)は点Pの位置に対応するセルレベル(0、1、2、...)を表す関数である。ここで、セルの大きさの変化を、厳密に視点距離に準じて行うならば、同心円状にセルが大きくなっていくべきであるが、データ管理が煩雑になるため、図1に示すように正方形状に変化していくとする。

地表面の凹凸表現は前述のように、ディスプレイマッピングにより定義する。具体的

には、十分な大きさを持つ8bitのグレースケール画像を用い、各画素の明るさに比例したディスプレイメントを与える。

#### 3.2 水分量移動モデル

セル間の水の移動は、そのセルに対応する地面の状態を考慮して行う。提案手法では、表示のための内部状態を4種類、水分量移動のための内部状態を2種類持つ。前者は、乾燥(Dry)、濡れ(Wet)、水の浮き出し(Drench)、水たまり(Puddle)であり、後者は飽和、未飽和である。その状態は、水分量により遷移する。未飽和状態の間は、受け取った水分量を自らのセルに蓄積する。飽和状態になると、セルは浮き出した水分を周りのセルへ移動させていく。図2は、提案手法における飽和状態になったセル(図中の中央のセル)から隣接するセルへの水の移動を表したものである。飽和状態となったあるセルにおける水分量の移動量は、そのセルに連結する4近傍セルの水位(地面の高さ+浮き出した水分量)と水分量の関係により決定する。図3は地面の水分量移動処理を擬似コード表現したものである。

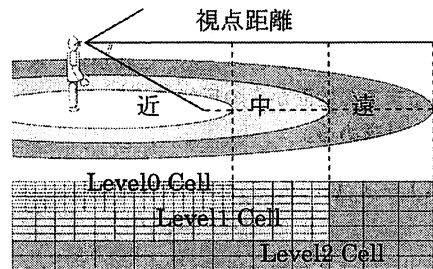


図1. 地面のセルへの分割

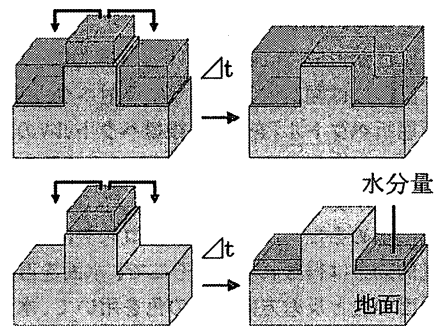


図2. 飽和状態セルからの水の移動モデル

```

地面の水分量更新処理:
for (全てのセルレベル(粗いセルレベルから)) {
  for (セルレベル i に属する全てのセル数) {
    if (セルが飽和状態) {
      周りに流れる水分量を計算
    } else {
      if (セル水分量 > 蓄積量限界値) {
        セル飽和状態へ移行
        自セルの浮き出る水分量を計算
      } else 水分量蓄積
    }
  }
}

```

図 3. 水分量更新処理と移動処理アルゴリズム

### 3.3 レンダリング

提案手法では、桂らにより既に開発された手法[3]を用いて地表面の描画を行う。具体的には、計算を簡潔にするため、地面は拡散反射成分のみ持つと仮定し、地表面が濡れていく様子を拡散反射率を落としていくことで表現する。すなわちセルに保持される水分量と拡散反射率が反比例の関係あるものと仮定し、図 4 に示すように前述の描画のための 4 つの内部状態を用いて、拡散反射強度が減衰するものとする。これから、水が浮き出るまでの地面からの反射光強度  $I(\lambda)$  は(2)式により求める。

$$I(\lambda) = I_o(\lambda) h_d k_d(\lambda) \cos \theta \quad (2)$$

$$(\lambda: \{r, g, b\})$$

ここで  $h_d$  は拡散反射係数低減率、 $I_o(\lambda)$  は入射光強度、 $k_d(\lambda)$  は拡散反射係数、 $\cos \theta$  は入射角余弦である。セルが飽和状態になり、水が浮き出して水面が形成されると映り込みが生じる。これは、厳密には図 5 に示すように反射ベクトル  $R$ 、及び屈折ベクトル  $T$  を求め、視線ベクトル  $V$  の入射角から反射率を求めて、水面からの光線強度を求める必要がある。しかし路面の場合、屈折方向を正確に求めるために要する計算コストに見合う視覚的効果は得られない。そこで、水面を直進した地面の色と反射方向からの色を用いて、水面からの反射光を求める。なお、反射方向からの光線

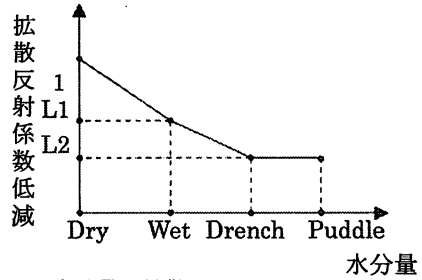


図 4. 水分量と拡散反射係数低減率の関係

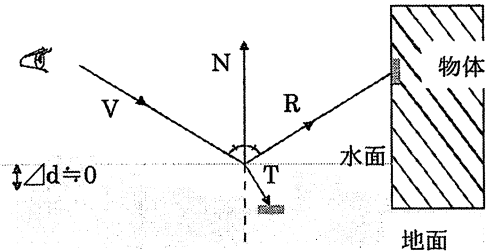


図 5. 水面の表面画像の概念図

の計算の際には、レイトレーシングは行わず、環境マッピングを利用する。

## 4. タイヤによる水しぶきの表現

### 4.1 タイヤの回転による水しぶき

#### 4.1.1 予備実験

まず、タイヤの回転による水しぶきがどのように発生しているかを確認するため、高速度カメラを用いて、図 6 に示すようなタイヤ近傍の水滴の軌跡追跡を行った(撮影記録速度 250, 500fps)。これから以下の情報が得られた。

- ① 水滴の発生位置、進行方向、及び速度
- ② 飛び出す水滴の量(水滴の発生個数)
- ③ 水滴の大きさ

#### 4.1.2 水しぶき発生モデル

予備実験により得られた情報を基本とし、さらに実際の車両には、泥除けがついていることを考慮して、水滴の発生位置、及びその確率を決定した。図 7 に示すように、発生確率は、鉛直下向きからの角度をパラメータとする確率密度関数に従う。水しぶきの大きさは、4種類の地面状態を用いて変化させる(表 1 参照)。さらに、発生する水しぶきの総量は、タイヤの位置と接地面の水分量の関係から求める。

#### 4.2 水たまりから飛散する水しぶき

タイヤが水たまりに侵入することにより、水たまりから飛び出す水しぶきの発生位置および進行方向は、路面状態及びタイヤの進行方向を基準にして決定する。図8はその様子を模式図で表したものである。水しぶきの分布は、タイヤの進行方向とのなす角 $\theta$ をパラメータとする密度関数 $f(\theta)$  ( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ )を用いて与える。水しぶきとして飛び出す総水量、及び速度については、路面状態とタイヤの速度から決定する(表1参照)。提案手法では、噴水アニメーション作成に用いられた水滴飛翔モデル[10]を、路面から発生する水しぶき、及びタイヤから発生する水しぶきの両方の軌道計算に採用した。



図6. 高速度カメラによる撮影画像画像

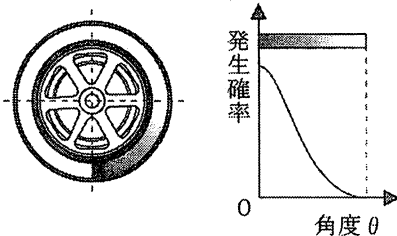


図7. 水しぶきの発生位置分布

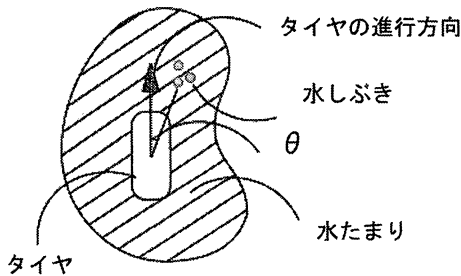


図8. 水しぶきの発生位置とタイヤとの関係

表1. 路面状態と水しぶきとの関係

路面状態	Dry	Wet	Drench	Puddle
発生する				
水滴の大きさ	-	小	中	大
タイヤから発生	×	○	○	○
路面から発生	×	×	×	○
路面への影響	-	×	×	○

#### 4.3 水しぶきの路面への影響

提案手法では、前述のようにタイヤから発生する水しぶきの大きさを、タイヤが接している地面の状態に対応させて3段階用意した。本来は、降雨と水しぶきは同じ水滴であり、それが落下後地面に及ぼす影響は異ならない。しかし、タイヤから発生した水しぶき全ての軌道追跡は計算負荷が大きい。そこで、提案手法では計算量と表示効果とを勘案し、しぶきが小さい場合、それが路面に落下してもその部分の水分量は増えないとして、最大サイズの水滴(路面状態がPuddleの状態が発生する水しぶき)のみ、それが地面に落下したとき、該当するセルの水分量を増加させる。

#### 4.5 レンダリング

厳密には、水滴ごと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、高速で飛翔する微小な水しぶきを注視可能であることはほとんどなく、また水滴の数も多いため、1粒ずつ表示処理する計算コストに見合うだけの効果(画質の向上)は得られないと考える。そこで提案手法では、水しぶきの運動をパーティクルシステムとして扱い、その軌跡を求め、レンダリング時には水しぶきテクスチャをマッピングすることで効率よく処理を行う。

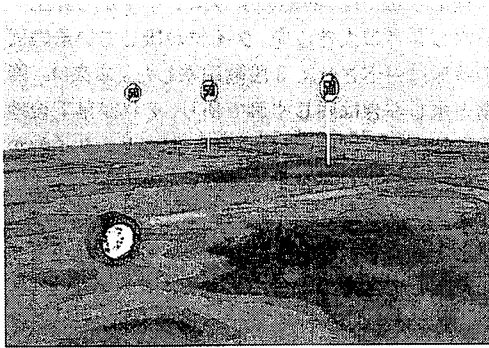
#### 5. 適用例

提案手法を実装し、生成した画像を図9に示す。図9(a)では地面路面状態全てを表現している。すなわち、乾燥(Dry)、濡れ(Wet)、水の浮き出し(Drench)、水たまり(Puddle)の4種類である。図9(b)は4種類の路面状態をタイヤが通過時におきた水しぶきの様子を示している。画面の左下に着目するとタイヤから発生した水しぶきにより

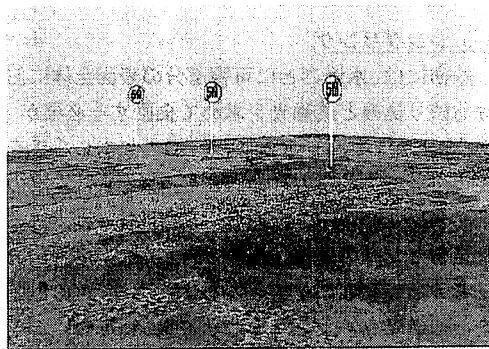
路面が濡れている様子が分かる。

## 6. おわりに

本論文では、地面の凹凸を考慮した水の移動モデルとその表現手法、及び路面状態を考慮したタイヤによる水しぶきモデルとその表現手法を提案した。今後の課題として、水滴落下により水たまりにできる波紋や水跳ね現象の表現などが上げられる。



(a) 地面の濡れた様子



(b) タイヤによる水しぶき

図9. 適用例

## 参考文献

- [1] Nakamae, E. Kaneda, K. Okamoto, T. and Nishita, T., A Lighting Model Aiming at Drive Simulators, ACM Computer Graphics, Vol. 24, No. 4, pp. 395-404, 1990.
- [2] Kaneda, K. Ikeda, S. and Yamashita, H., Animation of Water Droplets Moving Down a Surface, The Journal of Visualization and

Computer Animation, Vol. 10, No. 1, pp. 15-26, 1999.

[3] 桂, 多田村, 降雨開始時における地表面変化表現手法の開発, 画像電子学会第206回研究会, pp. 45-51, 2003.

[4] 佐々木, 水上, 多田村, 降雨の局所性を考慮した雨粒落下軌跡描画手法, Visual Computing/グラフィクスとCAD合同シンポジウム2006, pp. 71-76, 2006.

[5] Garg, K. and Nayar, S., Photorealistic Rendering of Rain Streaks, ACM Transactions on Graphics, Vol. 25, No. 3, pp. 996-1002, 2006.

[6] Sims, K., Particle Animation and Rendering Using Data Parallel Computation, ACM Computer Graphics, Vol. 24, No. 4, pp. 405-413, 1990.

[7] Fournier, A. and William, T. Reeves., A Simple Model of Ocean Wave, ACM Computer Graphics, Vol. 20, No. 4, pp. 75-84, 1986.

[8] O'Brien, J.F. and Hodgins, J.K., Dynamic Simulation of Splashing Fluids, Proceedings of Computer Animation, pp. 198-205, 1995.

[9] Kruger, J. and Westermann, R., Linear Algebra Operators for GPU Implementation of Numerical Algorithms, ACM Transactions on Graphics, Vol. 22, No. 3, pp. 908-916, 2003.

[10] 花田, 金田, パーティクルシステムを用いた噴水のアニメーション, 電気・情報関連学会中国支部第56回連合大会予稿, pp. 348, 2005.