

屋外景観画像のための水跡による 汚れを含んだテクスチャ生成の一手法

加藤 二二和[†] 金田 和文^{††} 山下 英生^{††}

景観評価のために屋外シーンをレンダリングする際、汚れを含むテクスチャをマッピングすることは、フォトリアリスティックな画像を作成するうえで重要である。本論文では、水が流れることにより生じる汚れを含んだテクスチャを簡易的に生成する方法を提案する。提案手法では、まず、3次元の物体形状を近似した面上で、離散面を移動する水滴モデルを用いて水滴が移動した軌跡を求め、その軌跡を汚れの色で着色することにより汚れを描画する。細かな凹凸やタイル目地に対応した自然な汚れも作成可能である。提案手法で生成した汚れを含んだテクスチャを電力設備や建物にマッピングして表示することにより、提案手法の有用性を示す。

A Method for Generating Weathering Textures Containing Water Flow Stains for Outdoor Scenes

FUJIWA KATO,[†] KAZUFUMI KANEDA^{††} and HIDEO YAMASHITA^{††}

When rendering outdoor scenes for landscape evaluation, weathering textures mapped onto objects play an important role in creating realistic images. This paper presents a method for generating weathering textures containing water flow stains in a simple manner. The proposed method calculates the tracks of water flow on approximated shapes of three-dimensional objects using a water droplet model with a discretized surface, and renders the stains by painting the tracks of water flow with dirt color. The natural stains corresponding to rugged surfaces and tiled wall patterns can be generated. Textures generated by the proposed method have been mapped onto electric power facilities and buildings to demonstrate the usefulness of the method.

1. はじめに

近年、景観保全に対する意識の高まりから、電力設備や建築物などの大型構造物の建設に景観評価は欠かせないものとなってきている。その際、コンピュータグラフィックス(CG)によるフォトモンタージュ法で景観画像を作成する方法が主に利用されているが、背景となる実写画像とCGで描画した新設構造物の画質が合わない場合、リアリティーに欠ける不自然な画像となる。さらに近年、HDTVや高画質カラープリンタなどの高解像度の表示媒体の普及により、CGで描画された画像に対しても、より現実に近い質感表現が求められるようになってきた。

リアルな景観画像の作成、すなわち、違和感なく実

写画像と合成を行うためには、(1)位置や大きさなどの幾何学的整合、(2)光学的整合、(3)解像度の整合の3つがとれている必要があるといわれている¹⁾。(2)に関しては、霞の効果を考慮して合成する方法やCGで描画する物体の質感を高める方法がある。Nakamaeらは遠くの物体ほど霞の影響を受け青白く描画する手法²⁾を提案している。また、物体表面の光の反射特性を正確に表現することにより物体の質感を高める方法^{3),4)}も提案されている。

これらに加えて、(4)経年変化による質感の整合をとる必要がある。すなわち、現実の世界では、すべてのものが時の流れとともに汚れ、傷つき、あるいは壊れるなどの経年変化をとともなうため、CGによる物体描画においてエイジング効果を施し質感を高めることが重要である。エイジング効果を表現する研究として、ほこりの堆積⁵⁾、錆^{6),7)}、水の流れに起因する汚れ⁸⁾、足跡により床に生じる汚れ⁹⁾、ガラスに生じるひび割れ¹⁰⁾や粘土が乾燥する際に生じるひび割れ^{11),12)}など、様々な現象に対するものが開発されている。こ

[†] 東京電力株式会社システム研究所
Computer & Communications R&D Center, Tokyo
Electric Power Company

^{††} 広島大学工学部
Faculty of Engineering, Hiroshima University

れらは物理法則に従ったシミュレーションに基づくもの^{(6),(8),(12)}と現象論的立場をとり自然な視覚的效果を簡易に得ることを主目的としたもの^{(5),(7),(9)~(11)}の2種類に大別できる。

本論文では、電力設備や建築物などの屋外構造物を対象とするので、そのエイジング効果として水の流れに起因する汚れを表現することにより質感を高めることが最も効果的であると考え、物理法則に従ったシミュレーションに基づく汚れを表現する手法としてDorseyらが提案した手法⁽⁸⁾は、彫刻などの複雑な3次元形状モデルの表面を流れる水の粒子の軌跡を計算し、その粒子に含まれる汚れが面上に残る量を物理的なシミュレーションによって求めるものである。それに対し、本論文では、後者の立場、すなわち、自然な視覚的效果を簡易に得るアプローチをとる。なぜならば、電力設備などの大型構造物では、物体データ量を軽減するため、細かな部品が省略され、主に直方体などの平面から成るモデルで入力されているからである。そして、このようなラフなモデルに対して、テクスチャマッピングは物体表面の属性を簡単な処理で表現できる手法であり、モデルの質感を効率良く高めることができる。すなわち、簡易的手法により作成された汚れを含むテクスチャをマッピングすることにより、低コストで現実に近い屋外景観画像を得る。

本論文では、平面で構成された比較的単純な形状モデルで入力された屋外の電力設備や建築物などのための汚れを含んだ景観画像を簡単かつ短時間で作成するため、平面上を水などが流れた跡(水跡)に発生する汚れ模様を含んだテクスチャを生成する簡易手法を提案する。提案手法により生成されたテクスチャは、汚れのコンテンツ画像として使用し、一般のレンダリングソフトウェアを用いて物体を構成する平面上の汚れの発生位置に合わせてマッピングすることで最終的な景観画像を作成する。すなわち、提案手法では、マッピングする物体に合わせて汚れを生成するのではなく、標準的に汚れを含むテクスチャを生成しておき、たとえば壁に取りつけられた金具や窓枠など汚れの発生源の下にユーザがマッピング位置を調整して使用する立場をとる。したがって、提案手法では、文献8)で述べてある金具の下に自動的に汚れを生成したり、水滴が地面で跳ね返ることにより生じる壁の汚れを自動的に生成したりすることは対象としない。

提案手法での汚れ模様の発生は、自然な汚れを短時間で生成することに主眼を置き、物理的な主要因のみを考慮するアプローチをとる。すなわち、すでに開発されている水滴の流れの簡易シミュレーション⁽¹³⁾を改

良して水跡を求め、その水跡に汚れの色を着色して汚れ模様を含んだテクスチャを生成する。提案手法では、様々な汚れ模様を生成するために、以下の手法を組み合わせ使用する。

- (1) 実際に汚れた壁の観察結果から、一筋の汚れの色の濃淡は、ほぼ一樣な色のものと中心部分が薄く端ほど濃くグラデーションがついたものの2種類に分類できる。グラデーションのついた汚れを表現するため、汚れの色を着色する際に、水滴の形状を利用して水滴の高さが高い中心に薄い色を、高さが低い端ほど濃い色を着色する。
- (2) 物体表面の局所的な汚れの付き方の違いを表現するために、水滴の流れをシミュレーションする際に水滴と物体表面に汚れ量を与え、水滴が流れて移動するとともに変化する水滴に含まれる汚れ量を反映して汚れの色を着色する。
- (3) 物体表面の凹凸模様に沿った汚れを表現するために、凹凸模様を表すテクスチャの輝度値を利用して、水滴の流れをシミュレーションする際の水滴の流れの方向を決める一要因である親和係数⁽¹³⁾を設定する。
- (4) エイジング効果を経時的に表現する方法として、また、まったく新たなパターンの汚れを表現する方法として、生成した汚れを含んだ複数のテクスチャの画像補間をとる。

以下、2章では、汚れの表示の基本的な考えを述べ、3章で汚れの表示手法を提案する。4章で生成した汚れを含んだテクスチャを電力設備や建築物にマッピングすることにより、提案手法の有用性を示し、5章で今後の課題を述べてまとめを行う。

2. 汚れの表示の基本方針

汚れを含んだテクスチャを生成するための基本的な処理の流れは、(1)物体表面を流れる水滴の簡易シミュレーション⁽¹³⁾を改良したものをを用いてテクスチャ座標系において水跡を求め、(2)その水跡の位置に汚れの色を付加して汚れ模様を表現する。本論文では主として(2)の汚れの表示部分に関する提案を行うが、その前に、(1)の部分について若干の改良を加えたので説明する。以下、水滴の流れの簡易シミュレーションを水滴のシミュレーションと記す。

2.1 水滴のシミュレーション

文献13)で提案した水滴のシミュレーションでは、物体表面を平面に近似し、その平面を微小なメッシュに分割した離散的なモデルを用い、そのメッシュ中心を移動する水滴の軌跡を求める。図1は、平面を $n_u \times n_v$

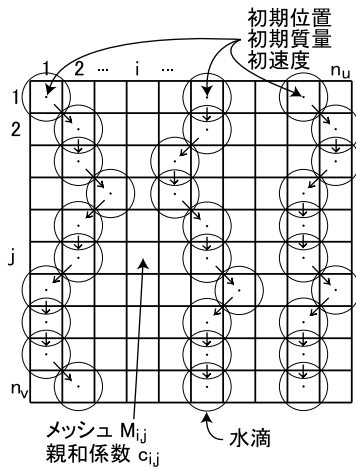


図1 面のメッシュモデル
Fig. 1 Mesh model of a surface.

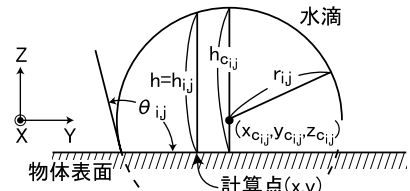


図2 水滴のモデル
Fig. 2 Water droplet model.

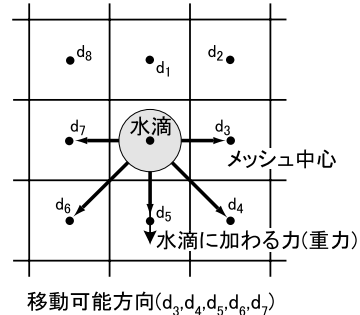


図3 水滴の移動可能方向
Fig. 3 Directions to which a water droplet can be move.

のメッシュに分割した離散的なモデルを示している。各メッシュ $M_{i,j}$ には、親和係数 $c_{i,j}$ をランダムに割り付けてある。親和係数とは、傷などによる物体表面上の不均質性を表しており、水滴の移動しやすい方向やその場に残る水滴の量が表面上で異なることを表現するためのパラメータである。この水滴のシミュレーションでは、水滴の位置、質量、移動速度を初期値として入力し、物理的の要因のみを考慮して水滴のあるメッシュからそれに隣接するメッシュへと順次移動し、水滴が通過したメッシュ位置とそこに残った水滴の質量および接触角を出力する。水滴が隣のメッシュへ移動する際には、水滴のすべてが移動するのではなく、メッシュに存在する水滴の最小最大質量の範囲内でそのメッシュの親和係数に比例する質量の水滴がその場に残る。また、乱数で調整した質量の水滴を定期的に初期位置に補充することにより、連続した水滴の軌跡を生成している¹³⁾。なお、接触角とは、物体表面と球形で近似した水滴の接線のなす角 $\theta_{i,j}$ である(図2参照)。

水滴の移動に関して、文献13)では水滴の移動可能方向を水滴の存在するメッシュの斜め左下、真下、斜め右下のメッシュに限定していた。そして、3方向のうちすでに水滴が存在する方向を最優先し、存在しないときには3方向のうち水滴に加わる力(重力)の移動可能方向成分と親和係数の積が最大となる方向を移動方向としていた。そのため、水滴が真下から左右45度方向の範囲にしか移動しないという問題があり、3.3節で述べる物体表面の凹凸に沿った汚れの表現において、たとえば図8(a)のように真下から左右60度方向に移動が必要な場合に対応することができなかつ

た。そこで、図3に示すように、左と右の真横のメッシュに移動する2つの方向を加えた5方向を移動可能方向とするように改良を行った。また、移動方向の決定に、従来手法である水滴に加わる力(重力)の移動可能方向成分と親和係数の積を用いていたのでは、重力方向と直交する真横でつねに値が0となり、真横への移動が実現しない。これを解決するため、移動方向の決定に関しても、水滴に加わる力と親和係数と水滴が存在するか否かの3要素をそれぞれ重み付けしたものの和が最大となる方向を移動方向とするように改良した。

2.2 汚れの色の付加

水跡による汚れを含んだテクスチャを生成するため、色を付加する前のオリジナルのテクスチャに前述の $n_u \times n_v$ のメッシュを対応付ける。基本的にメッシュの分割数 n_u と n_v は、テクスチャの横方向と縦方向のピクセル数と同じ値とすることで対応付けるが、経験的にはテクスチャサイズの2倍または1/2倍の値に設定してもよい。その後、水滴のシミュレーション結果である水滴の通過したメッシュ位置と質量から求める水滴の半径(式(5)参照)から、オリジナルテクスチャ上での水滴の存在するピクセルを求め、簡易的な半透明表示手法として広く用いられている Newell の方法^{14),15)}を用いて汚れの付着したテクスチャの色を決定する。すなわち、ピクセルの色 B を式(1)で求

まる値 C に置き換える .

$$C = (1 - t)D + tB \tag{1}$$

t : 汚れの透過率

D : 付加する汚れの色

B : 汚れを付加する前のテクスチャの色

3. 汚れの表示手法

ここでは, 2 章で述べた基本的な考えに基づき様々な汚れのパターンを表現する方法を提案する .

3.1 水滴形状を利用した一筋の汚れの濃淡表現

実際に汚れた壁を観察すると, 一筋の汚れの色の濃淡は次の 2 種類に分類することができる .

- ほぼ一様な濃淡のもの
- 中心部分が薄く, 端ほど濃いグラデーションのもの

式 (1) での汚れの透過率 t を制御して, これら 2 種類の濃淡を表現するために, 水滴の形状を利用する . すなわち, 図 2 に示すように, 水滴を球形状とし, それが物体表面で接触角 $\theta_{i,j}$ をなすようにカットされた形状であると近似する . 水滴の高さが中心付近ほど高く, 端ほど低くなっていることを利用し, 汚れの透過率 t を計算点 (x, y) における水滴の高さ h を用いて次式で決定する .

$$t = f\left(k_1 \frac{h}{h_{c_{i,j}}} + k_2\right) \tag{2}$$

k_1 : 水滴の高さに対する汚れの付き方を制御する係数

k_2 : 汚れの基準透過率

$h_{c_{i,j}}$: メッシュ $M_{i,j}$ に位置する水滴の中心での高さ (図 2 参照)

ここで f は次に示す関数である .

$$f(\varphi) = \begin{cases} 0 & (\varphi \leq 0) \\ \varphi & (0 < \varphi < 1) \\ 1 & (1 \leq \varphi) \end{cases} \tag{3}$$

また, 接触角が $\theta_{i,j}$ である水滴の計算点 (x, y) における高さ h は, 次式で与えられる (図 2 参照) .

$$h = \sqrt{r_{i,j}^2 - \{(x - x_{c_{i,j}})^2 + (y - y_{c_{i,j}})^2\}} - r_{i,j} \cos \theta_{i,j} \tag{4}$$

$r_{i,j}$: 水滴の半径

$(x_{c_{i,j}}, y_{c_{i,j}})$: 水滴の中心位置

$\theta_{i,j}$: 接触角

なお, 水滴の半径 $r_{i,j}$ は, 水滴の比重を $1 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ と仮定し, 水滴の質量 $m_{i,j}$ と接触角 $\theta_{i,j}$ から次式により与えられる .

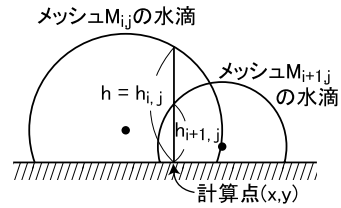
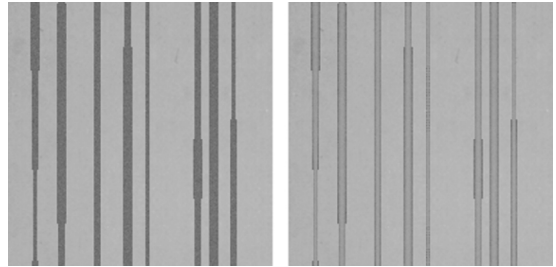


図 4 水滴の高さ

Fig. 4 Heights of water droplets.



(a) 一様な濃淡 ($k_1 = 0.01$) (b) グラデーション ($k_1 = 0.5$)

図 5 汚れのパターン ($k_2 = 0.3$)

Fig. 5 Stain color patterns ($k_2 = 0.3$).

$$r_{i,j} = \sqrt[3]{\frac{3m_{i,j}}{\pi(2 + \cos^3 \theta_{i,j} - 3 \cos \theta_{i,j})}} \tag{5}$$

式 (2) において, $k_1 \doteq 0$ とするとほぼ一様な濃淡の汚れが, k_1 の値を大きくするほど中心と端の濃淡の差を大きくすることが可能である .

前述のように, 基本的に本手法ではメッシュ分割数とテクスチャのピクセル数を同一に設定するので, 水滴の平均中心間隔はテクスチャ上で約 1.2 ピクセルとなる . また, 汚れの幅は, グラデーション効果を表現するために 3 ピクセル以上になることが望ましい . そのため, 水滴中心間隔に比べて水滴半径が大きくなり, 1 つの計算点が複数の水滴内部に存在する場合が多くなる . このようなときは, 図 4 に示すように, それぞれの水滴に対して高さ $(h_{i,j}, h_{i+1,j})$ を求め, 最大のものを計算点における水滴の高さ h として式 (2) に適用する .

図 5 に基準透過率 k_2 を一定とし, 係数 k_1 を変化させたときの汚れの濃淡の違いを示す . 図 5 (a) は, 汚れの色がほぼ一様に表現されているのに対し, 図 5 (b) は, 一筋の汚れの中央付近の色が薄く, 端に行くほど濃いグラデーションがかかっているのが分かる . なお, 汚れの幅の違いは, 水滴の半径の違いを反映している .

3.2 汚れ量の導入

前節では, 水滴の高さを考慮した一筋の汚れの色の

濃淡表現を示した．しかしながら，これだけでは物体表面上の局所的な汚れの付き方の違いを表現することができない．そこで，2.1 節で述べた水滴のシミュレーションの際に，水滴に含まれる汚れ量と物体表面上に存在する汚れ量を新たに導入する．そして，以下の手順で水滴に含まれる汚れ量を計算し，式 (2) の基準透過率 k_2 とする方法を提案する．

- (1) あらかじめ，メッシュ $M_{i,j}$ (図 1 参照) に物体表面の汚れ量 $d_{s_{i,j}}$ を割り付ける．割り付け方としては，乱数による方法と画像の輝度値などを用いる方法が考えられる．
- (2) 水滴の初期位置 $M_{i,j}$ に，汚れ量 d_{w_0} を含んだ汚れた水滴を注入する．その場合，注入後の水滴に含まれる汚れ量 $d_{w_{i,j}}$ は式 (6) となる．

$$d_{w_{i,j}} = d_{s_{i,j}} + d_{w_0} \quad (6)$$

- (3) メッシュ $M_{i,j}$ に存在する水滴が隣のメッシュ $M_{i+k,j+l}$ ($k, l = -1, 0, 1$; ただし，ともに $k = l = 0$ のときを除く) に移動する際，その場に残る水滴に含まれる汚れ量 $d'_{w_{i,j}}$ を式 (7) により求める．ここで， $m_{i,j}$ は，メッシュ $M_{i,j}$ の水滴の移動する前の質量， $m'_{i,j}$ は，水滴移動後のメッシュ $M_{i,j}$ に残る水滴の質量¹³⁾である．

$$d'_{w_{i,j}} = \frac{m'_{i,j}}{m_{i,j}} d_{w_{i,j}} \quad (7)$$

- (4) 移動先のメッシュにすでに水滴が存在する場合は，移動後の水滴に含まれる汚れ量 $d'_{w_{i+k,j+l}}$ を式 (8) により求める．

$$d'_{w_{i+k,j+l}} = d_{w_{i+k,j+l}} + d_{w_{i,j}} - d'_{w_{i,j}} \quad (8)$$

また，移動先のメッシュに他の水滴が存在しない場合には， $d_{w_{i+k,j+l}}$ の代わりに，移動先のメッシュが持つ物体表面の汚れ量 $d_{s_{i+k,j+l}}$ を用いる．

- (5) 水滴のシミュレーション終了後，メッシュ $M_{i,j}$ に位置する水滴に含まれる汚れ量 $d_{w_{i,j}}$ とその水滴が物体表面に接触する面積 $A_{w_{i,j}} (= \pi r_{i,j}^2 \cos^2 \theta_{i,j})$ を用いて，式 (2) の基準透過率 k_2 を次式により算出する．

$$k_2 = 1 - k_3 \frac{d_{w_{i,j}}}{A_{w_{i,j}}} \quad (9)$$

k_3 : 単位面積あたりの汚れ量に対する
汚れの付き方を制御する係数

図 6 に物体表面上に存在する汚れ量と初期値として水滴に与える汚れ量を変えて生成した汚れの例を示す．図 6 (a) は，物体表面の汚れ量を濃淡画像で示したもので，色の濃い部分ほど汚れ量が多いことを示している．図 6 (b) 上部の点と線は，水滴の初期位置とシミュ

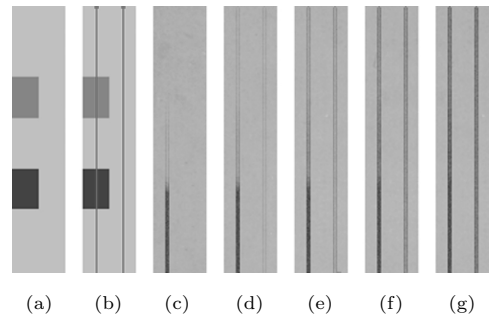


図 6 汚れ量の考慮
Fig. 6 Consideration of the amount of dirt.

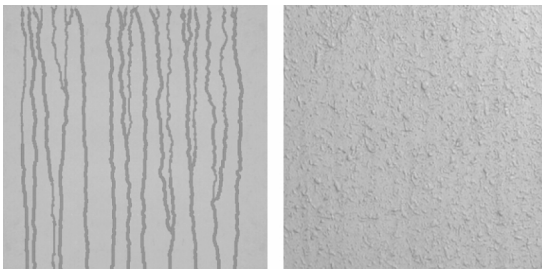
レーションにより生成された軌跡を示している．左側の軌跡は，汚れ量の大きい部分を 2 カ所通過するのに対し，右側は，一様に汚れた部分のみを通過するように設定した．図 6 (c) ~ (g) は，図 6 (b) で示した初期位置において初期値として与える水滴に含まれる汚れ量を変化させて生成した汚れを含むテクスチャである．図 6 (c) から図 6 (g) に向かうにつれて与えた汚れ量が増加している．これらの図から，水滴に与える初期の汚れ量と物体表面に与える汚れ量を変えることにより，生成する汚れの度合いを変えることができることが分かる．

3.3 物体表面の凹凸に沿った汚れの表現

3.3.1 細かな凹凸に沿った汚れ

ここでは，より自然な汚れ模様を生成するため，物体表面の素材により生じる細かな凹凸に沿った汚れを表現する方法を提案する．提案手法では，これを簡易的に実現するため，物体表面の凹凸模様のテクスチャの輝度値を利用し，水滴のシミュレーション時の水滴の流れの方向を決める一要因である親和係数を設定する．一般的に，凹凸のある物体表面の輝度値は，凸の部分が明るく，凹の部分が暗い．文献 13) の手法では，大きな値の親和係数 $c_{i,j}$ ($0 \leq c_{i,j} \leq 1$) を持つメッシュほど水滴が通過しやすくなるので，凹の部分，すなわち，輝度値が低い部分ほど親和係数が 1 に近くなるようにテクスチャの輝度値に反比例した値を親和係数に設定する．処理手順は，以下のとおりである．

- (1) 凹凸模様のテクスチャと同じサイズのメッシュを準備する．各ピクセルの RGB 色成分を YIQ 原色系に変換し，輝度値 Y を求め，輝度分布を算出する．ここで輝度分布は正規分布に従うと仮定し，平均 \bar{Y} ，標準偏差 σ を計算する．
- (2) 凹凸模様のテクスチャの各ピクセルに対する親和係数 $c_{i,j}$ を式 (10) により求める．



(a) 生成したテクスチャ (b) 凹凸のあるテクスチャ

図7 凹凸模様に沿った汚れ

Fig. 7 Stain adhering along a rugged surface pattern.

$$c_{i,j} = \begin{cases} 1 & (Y \leq Y_l) \\ (1 - \frac{Y - Y_l}{Y_h - Y_l})^\alpha & (Y_l < Y < Y_h) \\ 0 & (Y_h \leq Y) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、

$$Y_l = \bar{Y} - n\sigma$$

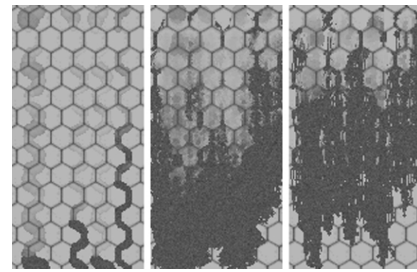
$$Y_h = \bar{Y} + n\sigma$$

n, α : パラメータ

図7(a)に凹凸模様に沿った汚れの生成例を示す。ここで、式(10)のパラメータ n, α はそれぞれ、3と2に設定した。図7(b)は、親和係数を求める際に用いた凹凸のあるテクスチャである。

3.3.2 タイル目地に沿った汚れ

前項よりも大きな周期で凹凸のあるタイル目地に沿った汚れを表現する方法を提案する。基本的には、前項同様テクスチャの輝度値を用いて親和係数を設定し、水滴のシミュレーションを行う。タイル部分に比べ目地の部分の輝度値が低い場合、前項までで述べた方法により、完全に目地に沿った汚れを生成することができる(図8(a)参照)。また、現実には目地で分岐する汚れも存在する¹⁶⁾。これを表現するため、水滴の移動方向の決定に確率的な手法を用いる。すなわち、2.1節で述べた水滴に加わる力、親和係数、そして水滴の有無による評価値のべき乗を面積比とするルーレットを用いて移動方向を決定する。これは、水滴に加わる力により真下に移動しやすく、かつ、水滴の有無により過去に水滴が移動した方向に移動しやすいという本質的特性を、ルーレットによって他方向へ移動する可能性を増加させることを目的としたものである。これにより、図8(b)に示すように、水滴の流れに分岐を実現し、面的に広がった汚れを生成することが可能となった。しかし、これでは一様に汚れが広がりすぎて目地に沿う特性が失われるので、決定論的手法と確率的手法を組み合わせ、ルーレットを使用する条件を真下のメッシュの親和係数が他の方向より小さいとき



(a) (b) (c)

図8 タイル目地に沿った汚れ

Fig. 8 Stain adhering along a tiled wall pattern.

のみとした。これは、鉛直方向の目地に水滴があるときは分岐することなく目地に沿って移動することを期待するので2.1節で述べた評価値の和の最大値により移動方向を決定し、目地の分岐点においては真横や斜め下に移動することを期待してルーレットで移動方向を決定するという現象論的立場から出てきた条件である。図8(c)に示すように、この条件により、目地に沿う特性を保持しながら、目地の分岐より下の部分では広がりを持った、より自然な汚れを表現することが可能となった。

3.4 画像補間

文献17)によると、建造物の側面の代表的な汚れのパターンである縦縞状の汚れは、初期段階では汚れの本数が少なく、汚れの程度も低いものが、経時的に本数も増加し、汚れが重なる部分で程度が増加する。また、さらに汚れが進行すると、汚れの隙間がなくなり面全体に汚れが広がっていく。そこで、汚れの経時の変化をいくつかの時点での静止画像として生成することを前提とした手法を提案する。すなわち、これまでに提案した手法を組み合わせることで汚れの本数が少なく汚れの色も薄いもの(図9(a))と同じ軌跡と幅を持つ色の濃い汚れを配置し、必要に応じて汚れの本数を増やして密度を高めたもの(図9(d))の2つを生成し、それらを画像補間する。

図9(b)は、図9(a)と図9(d)を2:1の比率、図9(c)は1:2の比率で補間した画像である。図9(a)から図9(d)を順に見て分かるように、ある条件で作成した2枚の画像を補間するという非常に簡単な方法で、静止画ではあるがエイジング効果を表現可能な汚れを含んだテクスチャが生成可能である。

また、図10(a)と図10(d)に示すように、軌跡は同じであるが、幅の異なる2パターンの汚れを補間することにより、油がにじんだような汚れ模様(図10(b),(c)参照)を新たに発生することも可能である。

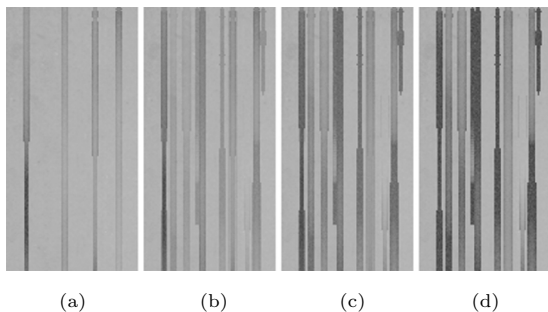


図 9 画像補間による経時変化

Fig. 9 Aging effect by image interpolation.

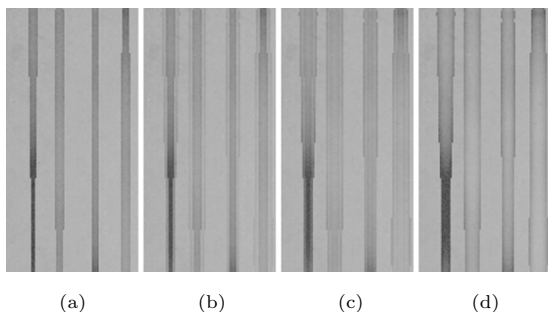


図 10 画像補間による新しい汚れ模様の発生

Fig. 10 New pattern generation by image interpolation.

3.5 評価

提案手法により生成した汚れと実際の汚れを比較した一例を図 11 に示す。図 11 (a) は、実際に壁についた汚れを写真撮影したものである。図中上部の矢印の先にある 2 点は、水滴を与える初期位置として設定した場所である。図 11 (b) は、図 11 (a) で示した点より下に提案手法で 2 本の汚れを追加したものである。周りの実際の汚れと比較して、違和感なく表現できていることが分かる。なお、この汚れの生成には、3.1 節で提案したグラデーション表示、3.2 節で提案した汚れ量の考慮、3.3.1 項で提案した凹凸模様の輝度値を親和係数として利用する手法を使用し、実際の汚れが線状で広がりを持たないため、水滴の移動方向の決定に決定論的手法を使用した。

次に、提案手法により汚れを含んだテクスチャの生成に必要な時間を計測した。図 12 (a) ~ (c) および図 8 (c) に示すテクスチャの生成に必要な計算時間を表 1 に示す。画像サイズは、図 12 のテクスチャが 200 × 400 ピクセル、図 8 のものが 100 × 200 ピクセルであり、使用した計算機は SGI OCTANE (CPU R10000 195 MHz) である。図 12 (a) は、4 章で適用する電力設備の表面に凹凸がないので、親和係数は一定値 0.5 として生成し、図 12 (b), (c) は、凹凸のある建物壁面へ適用したので、それぞれもとのテクスチャ

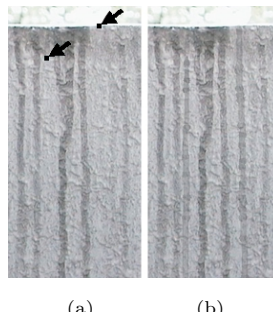


図 11 実際の汚れとの比較

Fig. 11 Comparison between real and generated stains.

表 1 計算時間 (CPU タイム : 秒)

Table 1 Calculation time (CPU time: in seconds).

	水滴数 (個)	水跡計 算時間	汚れ描 画時間	総計算 時間
図 12 (a)	3605	67.0	28.7	95.9
図 12 (b)	2635	48.5	21.8	70.5
図 12 (c)	3185	64.4	28.0	92.6
図 8 (c)	14442	47.7	103.5	151.2

の輝度成分画像である図 12 (d), (e) の画像の輝度値を用いて親和係数を設定した。

計算時間は水滴のシミュレーションで発生した水滴数に依存するが、最も多い場合 (図 8 (c)) でもわずか 3 分弱の計算時間でテクスチャを生成することができる。本手法では、 k_1 などの係数を決めるのに多少試行錯誤が必要である。図 8 (c) のように複雑な汚れになると試行錯誤の回数は少なくなるが、図 12 (b) のように比較的単純な汚れの場合に、試行錯誤回数が多くなることが経験上分かっている。図 12 (b) における試行錯誤回数は、水滴の軌跡の調整で水跡計算を 5 回、水滴の質量と汚れ量の調整で水跡計算と汚れの描画計算をともに 10 回、汚れの色とパラメータ k_1, k_3 の調整で汚れの描画計算を 5 回、合計約 25 分の処理時間を要した。このように試行錯誤の時間を含めても十分短い時間で、リアルな汚れを表現することが可能である。

4. 適用例

生成したテクスチャを電力設備や建築物にマッピングした景観画像を作成し、提案手法の有用性を示す。図 13 (a) は、汚れを含まないテクスチャをマッピングした電力設備のフォトモンタージュ画像である。図 13 (b) は、図 12 (a) や図 9, 図 10 で示した汚れを含むテクスチャをレンダリングソフトウェアで窓の下など汚れの発生しやすい箇所にマッピング位置を設定し

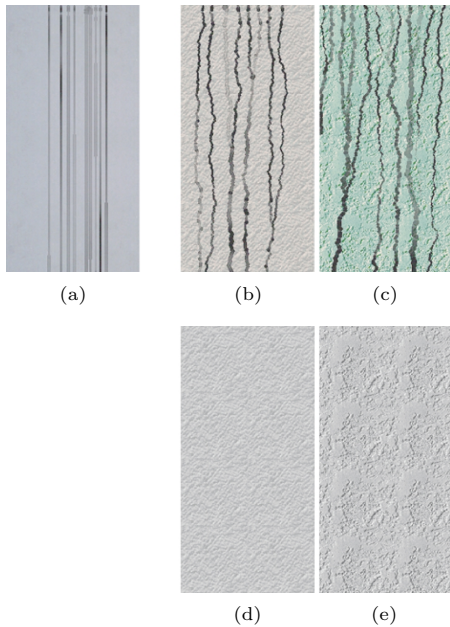


図 12 生成した汚れを含むテクスチャ
Fig. 12 Resultant textures.

て作成した画像である．また，中心付近を拡大したものを図 13 (c) に示す．汚れを含むテクスチャをマッピングした方が，背景の実写画像，特に設備を据え付けた基礎や後ろの塀などと質感の整合がよくとれていることが分かる．図 13 (d) は，図 12 (b)，(c) で示した汚れを含むテクスチャを建築物へ適用し，すべて CG で描画した例である．この場合，汚れを含むテクスチャをレンダリングソフトウェアで窓の下などに配置する際に，テクスチャを伸縮させたり裏返したりすることにより，擬似的にパターンを増やしてマッピングしている．

5. おわりに

本論文では，水が流れた後に生ずる汚れを含むテクスチャを簡易的に生成する手法を提案し，屋外の電力設備や建築物の景観画像に生成したテクスチャをマッピング表示することにより本手法の有用性を示した．

汚れを含むテクスチャを生成する際の係数は，現在，試行錯誤により経験的に求めている．しかし，より多くのパターンの汚れを簡単に生成するためにも，これ



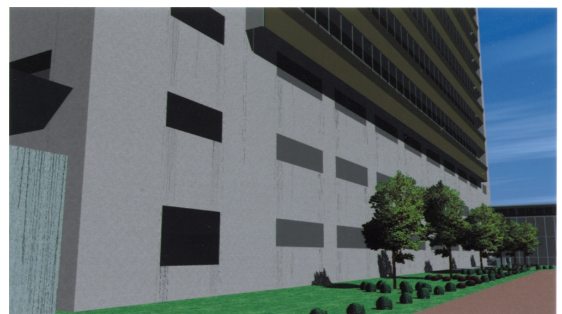
(a) 電力設備 (フォトモンタージュ) 汚れなし



(b) 汚れあり



(c) (b) の拡大図



(d) 建築物 (すべて CG)

図 13 景観画像への適用
Fig. 13 Examples of application.

らパラメータを簡単に設定する手法の開発が必要である。また、汚れをマッピングできる対象物の適用範囲を広げるため、曲面上の汚れの簡易表示手法の開発があげられる。すでに開発されている曲面形状を持つ物体表面での水滴のシミュレーション法¹⁸⁾を利用することが1つの解決法と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 中前栄八郎：コンピュータグラフィックス，オーム社 (1987).
- 2) Nakamae, E., Harada, K., Ishizaki, T. and Nishita, T.: A Montage Method: The Overlaying of the Computer Generated Images onto a Background Photograph, *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '86)*, Vol.20, No.4, pp.207-214 (1986).
- 3) Oren, M. and Nayar, S.K.: Generalization of Lambert's Reflectance Model, *Proc. SIGGRAPH '94*, pp.239-246 (1994).
- 4) Gondek, J.S., Meyer, G.W. and Newman, J.G.: Wavelength Dependent Reflectance Functions, *Proc. SIGGRAPH '94*, pp.213-220 (1994).
- 5) Hsu, S. and Wong, T.: Simulating Dust Accumulation, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.15, No.1, pp.18-22 (1995).
- 6) Dorsey, J. and Hanrahan, P.: Modeling and Rendering of Metallic Patinas, *Proc. SIGGRAPH '96*, pp.387-396 (1996).
- 7) 小澤奈緒，藤代一成：研磨効果を考慮した錆のレンダリング，情報処理学会研究報告，97-CG-87-3, pp.13-18 (1997).
- 8) Dorsey, J., Pedersen, H.K. and Hanrahan, P.: Flow and Changes in Appearance, *Proc. SIGGRAPH '96*, pp.411-420 (1996).
- 9) 穂浪大輔，田中敏光，大西 昇：汚れによる室内の質感表現手法の提案，電子情報通信学会技術研究報告，IE98-152, pp.97-102 (1999).
- 10) 安居院猛，森山耕一，長尾智晴，中島正之：CGによる板ガラスのひび割れ形状の表現手法，情報処理学会論文誌，Vol.33, No.10, pp.1235-1244 (1992).
- 11) 千葉則茂，海野啓明，和田誓一，村岡一信：ひび割れの行動モデルとそのCGへの応用，電子情報通信学会論文誌，Vol.J73-D-II, No.10, pp.1742-1750 (1990).
- 12) 田上靖行，広田光一，金子豊久：物理モデルによる3次元物体のひび割れとアニメーション，情報処理学会研究報告，99-CG-94-3, pp.13-18 (1999).
- 13) Kaneda, K., Kagawa, T. and Yamashita, H.: Animation of Water Droplets on a Glass Plate, *Proc. Computer Animation '93*, pp.177-189 (1993).
- 14) Newell, M.E., Newell, R.G. and Sancha, T.L.: A New Approach to the Shaded Picture Problem, *Proc. ACM Nat. Conf.*, p.443 (1972).
- 15) 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).
- 16) 内藤龍夫，井上容實：建物の汚れの原因と対策シート，彰国社 (1996).
- 17) 冬川一宏，窪田陽一：コンクリート表面の汚れパターンの視覚的評価に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol.IV-35, No.562, pp.97-107 (1997).
- 18) Kaneda, K., Zuyama, Y., Yamashita, H. and Nishita, T.: Animation of Water Droplet Flow on Curved Surfaces, *Proc. Pacific Graphics '96*, pp.50-65 (1996).

(平成 11 年 8 月 31 日受付)

(平成 12 年 2 月 4 日採録)



加藤二二和 (正会員)

昭和 39 年 12 月 22 日生。平成元年 3 月広島大学大学院工学研究科博士課程前期システム工学専攻修了。同年 4 月東京電力(株)入社。電力分野へのコンピュータグラフィックス技術応用システムの研究開発に従事。第 47 回電気科学技術奨励賞(オーム技術賞)受賞。電気学会会員。



金田 和文 (正会員)

昭和 34 年 10 月 1 日生。昭和 59 年 3 月広島大学大学院工学研究科博士課程前期システム工学専攻修了。同年 4 月中国電力(株)入社。61 年広島大学工学部第二類(電気系)助手，平成 7 年同大学同学部助教授。この間，平成 3 年 1 年間米国ブリガムヤング大学へ出張。コンピュータグラフィックス，画像処理の研究開発に従事。工学博士。ACM，電気学会，電子情報通信学会，画像電子学会各会員。



山下 英生 (正会員)

昭和 16 年 10 月 22 日生。昭和 39 年 3 月広島大学工学部電気工学科卒業。43 年 3 月同大学院修士課程修了。広島大学工学部電気工学科助手，53 年同大学同学部第二類(電気系)助教授。平成 4 年同大学同学部教授。有限要素法による電気機器の電磁界解析，コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。工学博士。IEEE，電気学会，電子情報通信学会，日本 AEM 学会，画像電子学会各会員。