

物体表面の熱伝播を考慮した 時間経過により変化するテクスチャ合成手法

三嶋 道弘^{1,a)} 川崎 洋²

概要: コンピュータグラフィックスにおいて表面反射特性は物体の見た目の印象を決める、重要な要素である。その中でも、時間経過により表面反射特性の変化する物質は身の周りにも多く存在し、例えば、サビや苔の成長、湿度の高い部屋でガラスが曇る現象などがあり、それらを再現する研究が多く行われている。しかし、冷たい物質に空気中の水分が蒸着する現象は身近に見られ、最初は BRDF の変化に始まり、徐々に水滴を形成しながらテクスチャの変化にまで発展する複雑な現象のため、これまで再現された例が少ない。この現象は、時間に依存するばかりではなく、物体の性質や形状にも依存する。そこで、提案手法では、時間経過により変化する水滴のテクスチャを取得し、データベースを作成し、描画時には、このデータベース中の画像を合成することで、物体表面上で変化する水滴の様子をリアルに再現する。テクスチャの時間推移は、物体表面上の温度と相関を持つことから、画像合成の際には、物体の熱伝播情報をシミュレーションし、これを用いて時間変化する水滴の様子を再現する。実験では、実際に水滴の蒸着する様子を計測し、得られたテクスチャから明度成分を取り出し、これを既存の CG 描画手法に追加適用することで、リアルな水滴の蒸着現象を描画可能であることを示す。

MICHIHIRO MIKAMO^{1,a)} HIROSHI KAWASAKI²

1. はじめに

コンピュータグラフィックスにおいて、リアルな表面反射特性を表現するための研究が行われている。その中でも、時間に応じて物体の見た目に変化する現象が注目されている。例えば、錆や苔の成長、湿度の高い部屋でガラスがくもる現象など、多くの現象が知られており、コンピュータグラフィックスでそれらを再現する研究も多く行われている。特に、冷たい物質に空気中の水分が蒸着する現象は身近に見られ、最初は BRDF の変化に始まり、徐々に水滴を形成し、形状を劇的に変化させながら、鏡面反射を伴うテクスチャの変化にまで発展する複雑な現象であるため、これまで再現された例が少ない。そこで、今回は、この現象を CG で再現することを目指す。このような現象は、冬場に、窓に発生する結露として日常的に観察される他、ガラスに冷たい水を注いだ時のガラス表面や、冷蔵庫から缶ジュースやペットボトルを取り出した際に汗をかく現象として身

近なものである。

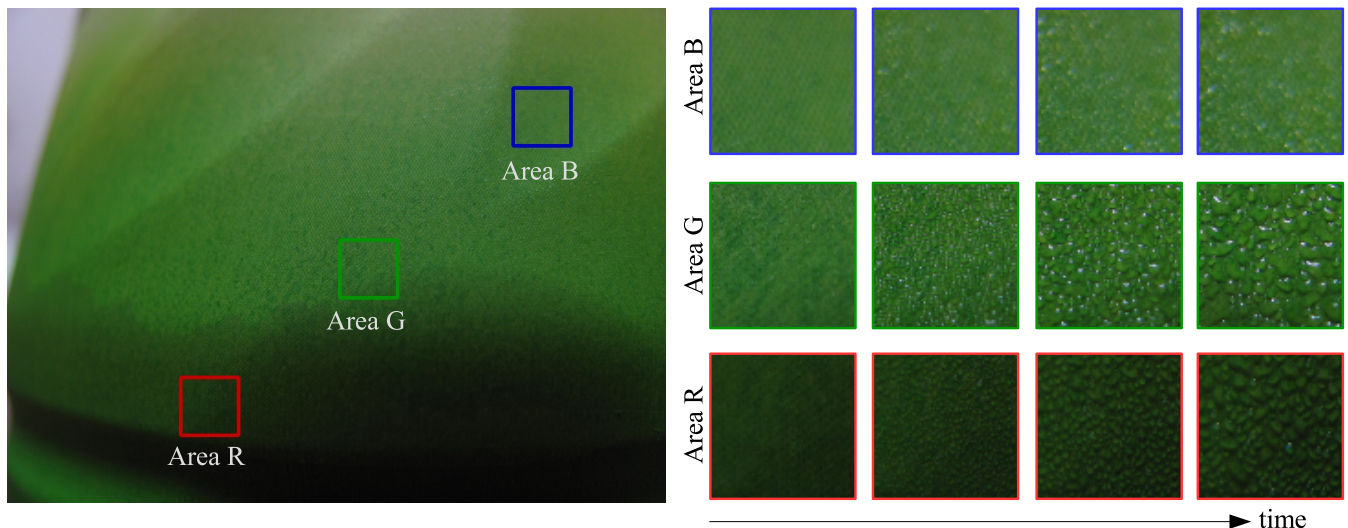
実際にペットボトルのパッケージの表面に水滴が付着し、成長する様子を図 1 に示す。右の図 1(b) は時間経過による水滴の変化を表し、図 1(a) の赤で囲った領域 R、緑で囲った領域 G、青で囲った領域 B のそれぞれの領域について、水滴の成長する様子を示している。図 1(b) の下部に時間軸を示しており、それぞれの図は右に向かうほど、時間経過した水滴の状態を示している。まず、物体表面に空気中の水分が付着し、小さな水滴の粒が形成される。このとき、粒はまだ非常に微細なため、表面反射特性の変化として観測される。時間が経過すると、空気中の水分が表面上の水滴と結合し、水滴は大きくなり、一つ一つの水滴を識別可能となるが、テクスチャはほぼ同様である。さらに、時間が経過すると、表面の水滴どうしが結合し合うようになり、複雑なテクスチャ模様を構成する。また、領域 G では、領域 R、B と比較して水滴が速く成長するといった領域ごとの違いが観測される。これは、表面の温度変化が物体の材質や形状などに依存して異なるためと考えられる。

物体表面の反射特性の表現方法関連して、今まで多くの研究が行われてきた。代表的な手法としては、テクスチャ

¹ 鹿児島大学大学院学術研究院理工学域工学系
鹿児島市郡元 1 丁目 21-40

² 九州大学大学院システム情報科学府情報知能工学専攻

^{a)} mikamo@ibe.kagoshima-u.ac.jp



(a) Captured image of a sweating bottle.

(b) Transitions of textures of three patches.

図 1 The transitions of the appearance of the surface of the sweating bottle.

マッピングにシェーディング計算を加える手法が一般的であり、通常ハードウェア実装されている。また、よりリアルな表現を目指して、視線方向、光源方向に応じた表面反射特性を再現するために、双方向テクスチャ関数を用いた手法も広く研究開発されている。一方で、表面の凹凸を物理的な形状モデルまたは法線マップとして再現し、リアルな反射特性を描画する手法も研究されている。

本論文では、物体に蒸着する水滴が成長し、その表面の見え方が変化してゆく時系列的な変化の様子を再現するため、水滴が変化してゆく様子を実際に撮影し、データベースを作成し、描画時にこれを利用する手法を提案する。このような画像データベースを用いたアプローチは、複雑なBRDFやBTFの再現においてよく使われる手法である。具体的な手法としては、一定温度・湿度にコントロールされた環境下において、形状既知の物体を置き、その表面のRGB画像とサーモメータの温度マップを同時撮影したデータを入力として、時空間テクスチャデータを構築する。描画時には、物体表面上の温度変化を熱伝播マップとして計算し、それを基にして時空間データからテクスチャ合成し、表面水滴の成長を表現する。本論文で提案する手法には以下の特長がある。

- 時間変化に伴う水滴の蒸着現象をリアルに再現する。
- 実際に撮影された画像を用いるため、小さな計算コストでリアルなテクスチャを再現できる。
- 描画の際に、ターゲットのmaterialやshapeを考慮したシミュレーションにより熱伝播マップを作成することで、物体の温度変化と形状に依存したテクスチャの変化を表現できる。

本論文は以下のように構成される。まず、次節で関連研究を述べる。次に、第3節で実装方法について述べ、第4節で提案手法によって得られる結果を述べる。第5節で手

法の限界について述べ、最後に第6節でまとめとする。

2. 関連研究

2.1 表面反射特性の表現

コンピュータグラフィクスでは表面反射特性を表すために多くの手法が提案されている。基本的な手法は、テクスチャマップ+シェーディングであり、ハードウェア実装されている。一方で、より複雑な反射特性を実現するために、様々なBRDFモデルが開発されている [1]。最近では、表面上の細かな傷を表現する方法も提案されている [5] [10]。複雑なBRDFモデルを再現するために、実際の物質を計測しデータベースを構築しレンダリング時にはそれを参照する手法が知られている [4]。この手法は、簡易にリアルな表面反射特性が再現されるが、データサイズが大きくなる問題がある。

最近のテクスチャデータを応用した研究では、ディープラーニングを用いたテクスチャ認識手法などがある。これは取得したテクスチャから学習データを作成し、新たに撮影された物質を推定する手法である。例えば、Zhangらは、学習過程において、新たにEncoding layerを追加することで、認識率を向上させた [11]。また、Xueらは、様々な方向から撮影した地面のデータから、データベースを作成し、そこからディープラーニングを用いた物質認識手法を開発している [9]。

2.2 水滴表現手法

物体表面の形状の構造が大きくなると、テクスチャで表現するよりも形状モデルとして扱われる。例えば、Wangらは、ナビエストックス方程式から、水滴を流体として表現し、水滴どうしが結合しあい、大きくなっていく様子を再現した [7]。メタボールを用いることで水滴の形状変化

を表現し、水滴が流れる様子を表現する手法も開発されている [3]。メタボールによる計算コストは、流体の物理シミュレーションよりも小さいというメリットがある。

雨粒のレンダリング手法も開発されている。Slomp らは、多数の雨粒を高速にレンダリングする手法を開発した [6]。雨粒は多く存在するため、その反射屈折の計算量は多くなる。そこで、反射屈折計算は前処理によって行い、さらに GPU を利用することで、高速で多数の雨粒がレンダリング可能な手法を開発した。

2.3 時間変化する表面反射特性の表現

現実世界の物体の見え方は周囲の環境との相互作用により、時間によって変化する。また、その時間変化は、周囲の環境や物体形状、物体の原料などによって異なる。例えば、水に濡れた衣類が乾いてゆく現象、木が燃えることにより炭化してゆく現象、金属表面に錆が伝播してゆく現象や、リンゴが腐ってゆく現象などがある。これらは、Aging や Weathering と呼ばれる [1]。

これらの現象に対して、Gu らは、時間依存の BRDF モデルを用いて表現した手法を提案した [2][8]。求めた BRDF モデルを別の物体に適用することは可能である。しかし、これらの手法では、物体形状に合わせた表面反射特性の変化を表現することは難しい。例えば、水に濡れた衣類が乾いてゆく現象、木が燃えることにより炭化してゆく現象などには、物質の形状によって、現象が起こり易い場所とそうでない場所がある。例えば、木片の薄い部分ほど、炭化する速度は大きいことが想像できる。しかし、これらの手法は、そのような物体形状については考慮しておらず、ユーザーが指定するなどの操作が必要である。

本手法では、物体表面の温度分布に従って、割り当てるテクスチャを変えることにより、時間変化と、さらに、形状依存の表面反射特性を表現することができる。

2.4 提案手法の流れ

本手法の目的は、物体表面の反射特性や質感が時間変化する現象の見た目を再現することである。これを物理的に再現することは困難ため、画像ベースの手法をとる。物理シミュレーションを行わないことで、計算コストをかけずに写実的なレンダリングできる可能性がある。これを実現するため、提案手法では、時間変化するテクスチャを全て画像データと保存し利用する。具体的には、時間変化するテクスチャを実際に撮影・解析しデータベースを作成し、描画時には、必要に応じて合成する。画像合成の際に用いるパラメータは、物体の温度とする。これは、環境の温度が上がるほど、物体表面に付着する水滴の量が増え、その結果、テクスチャの見た目が変化するという、テクスチャの変化と温度に強い相関が観測されたためである。実験ではこの検証も行っている。物体の温度は、環境条件、

例えば、温度や湿度と物体の材質や形状に依存するため、提案手法では有限要素法により計算する。

データキャプチャ

データキャプチャでは、物体に適用するテクスチャを取得する。具体的には、以下のような操作を行う。まず、室温・湿度を一定に保った部屋で冷凍したサンプルを取り出し、テクスチャと温度変化を一定間隔で計測する。次に、計測したデータから物体表面に付着する水滴の成分を取り出す。最後に、主成分分析を用いて、その水滴成分を低次元で、高精度に表現する。

レンダリング

水滴の成長は、物体表面の温度に依存する。そのため、まず、物体表面温度がどのように変化するのかが情報が必要である。それには、熱伝播マップを作成する。熱伝播マップは物体形状を用いて、熱方程式を解くことで作成する。次に、熱伝播マップから得られる、物体を構成する各面の温度から、それぞれに対応するテクスチャを選ぶ。

3. 実装

3.1 Data capturing process

物体表面で成長する水滴の変化を観察するため図 2 に示すように、カメラと水滴テクスチャを取得するための試料を準備する。実験室は、エアーコンディショナーと加湿器で環境の温度と湿度を一定に保つようにし、カメラはプラスチックケースに対して正対するように配置し、タイムラプス撮影により、10 秒間隔で 1 時間撮影を行った。このとき得られた画像の一部を切り取りテクスチャデータとする。試料にはプラスチックケースには水を入れて凍らせたものや、水を入れたペットボトルを凍らせたものを使用した。

提案手法では、取得したテクスチャの明度成分が水滴らしさを表すものとみなし、明度成分のみを取り出しデータベースとする。これにより、あらゆるテクスチャに水滴を付加させる効果を与えることができる。

計測により得られたデータは膨大になるため、提案手法ではこれを PCA により削減する。復元する際には、寄与率の大きい固有画像を 13 成分用いた。実際に撮影したデータから PCA により得られた主要成分のテクスチャ画像の一部を図 3 に示す。

3.2 ノードの温度推定

物体表面上の温度変化は、物体を包含するノードの温度変化を基に計算する。ここでは、各ノードの温度変化を算出する方法について述べる。

各ノードの温度変化を算出するために、有限要素法を用いて熱拡散方程式を解く。有限要素法は数値解析により微分方程式の近似解を得るための手法の代表的な手法である。熱拡散方程式は以下の式で表される。



図 2 データの取得

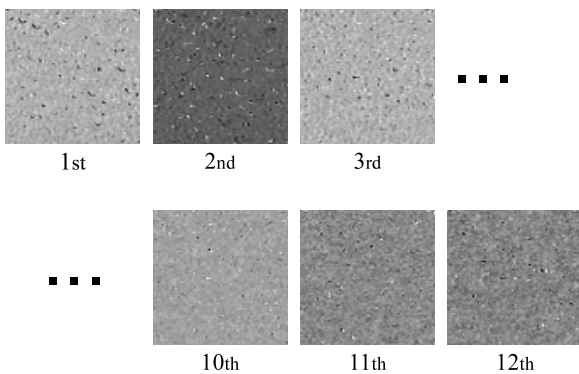


図 3 固有テクスチャ

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \nabla^2 T \quad (1)$$

有限要素法を適用するために、以下の弱形式に変換する。

$$\int_{\Omega} v \frac{dT}{dt} dx - D \int_{\Omega} \nabla T \cdot \nabla v = 0 \quad (2)$$

ここで、 v は $v(0) = 0$, $v(\partial\Omega) = 0$ を満たす 2 階微分可能な関数、 D は定数である。

ノードの割り当て

有限要素法では空間や物体を格子に分け、それぞれのノードに対する値を計算する。以下に順を追って、ノードを割り当て方法を説明する。図 4 では説明のため 2 次元の図を用いているが、実際には 3 次元空間内を想定して計算している。

Step 1 格子状に分けられた空間内に物体を配置する (図 4 Step 1)。このとき、提案手法では、格子の間隔が上下左右とも同じ長さになるように設定した。

Step 2.1 格子状にあるノードが物体の外側にあるか、内側にあるかで、割り当てるノードの種類を決める。このとき、ノードが物体の外側にあるか、内側にあるかは、凸形状とベクトルの外積の関係を利用して判定できる。この判定を行うため、まず、対象とする物体形状を、最も基本的な凸形状である四面体で分割する。四面体に分割するにはドロネー四面体分割を用いた。四面体分割後、物体を構成

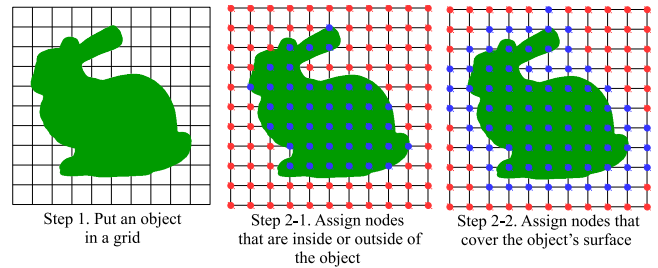


図 4 ノードのグループ分け

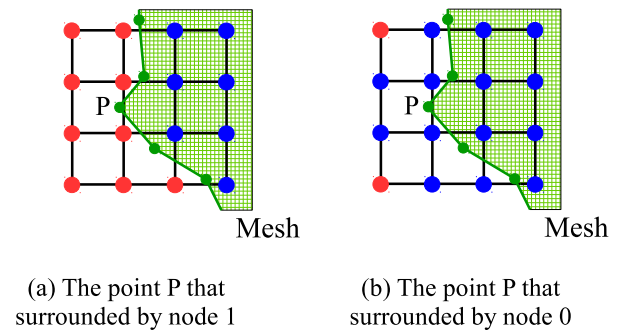


図 5 Step2-2 の処理

する各四面体において、四面体を構成する面とノードの位置の関係から、ベクトルの外積を利用して着目するノードが四面体内部にあるか、外部にあるかを判定する。この判定を行った結果を図 4 Step2-1 に示す。格子状にある赤いノードは、物体外側にあるノード、青いノードが物体内側にあるノードを意味する。提案手法では、赤いノードから青いノードへ伝わってゆく温度を有限要素法で計算する。

Step 2.2 物体全体が覆われるようにノードを再度割り当てる。Step 2-1 のように内側のノードと外側のノードにグループ分けしたとき、図 5(a) のように物体表面上の頂点 P の近傍ノードが、全て、外側のノードになる場合がある。提案手法で使用する熱伝播マップは、物体の頂点温度を、頂点の近傍のノードの温度から補間することにより求めるため、このような場合、P において、温度変化が生じなくなる。しかし、現実世界では、そのようなことは起こらないため、点 P は内側のノードに囲まれていなければならない。そのため、物体表面上の点を含む範囲まで内部ノードの分布を広げる必要がある (図 5(b))。これには、物体表面上の点を含む格子は全て内側のノードになるように条件を付加する。そのように内部ノードの分布を物体表面の頂点全部を含むように広げた様子が図 4 Step2-2 である。このように、物体表面全体を包含するようにノードをそれぞれ外部、内部のグループに分けた後、有限要素法により熱拡散方程式を解き、各ノードの温度変化を得る。

熱伝播マップの計算

有限要素法で得られた各ノードの温度からまず、ポリゴンを構成する三つの各頂点の温度を求める。これは、近接す

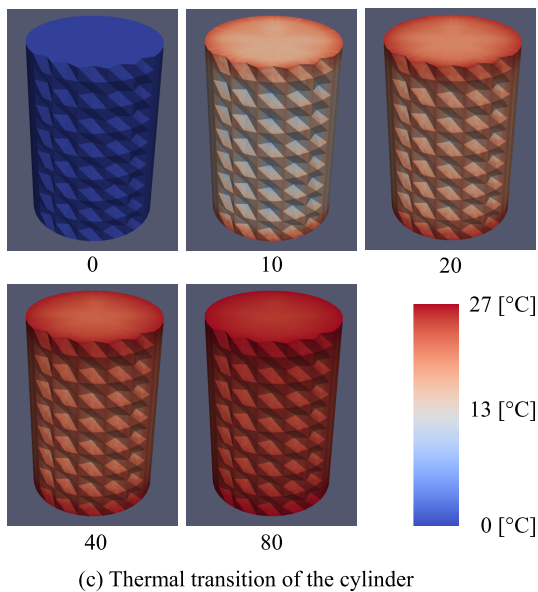
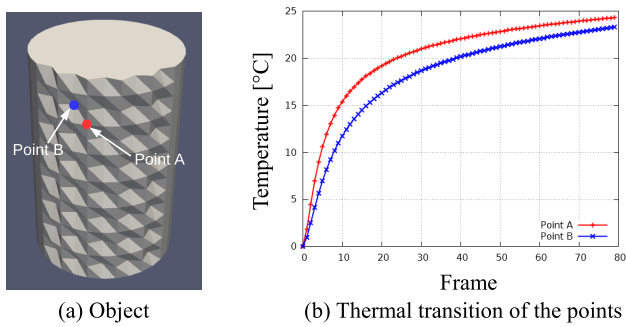


図 6 Thermal transitions of the surface

る 8 つのノードから補間する。次に、求めた三つの頂点の温度の平均を取ることで、これを着目する面の温度とする。

テクスチャを面に割り当てるには、テクスチャと温度の対応が必要である。これには、次の仮定を用いる。すなわち、計測の際、一番最初に得られたテクスチャをポリゴンが持つ初期温度と仮定する。さらに、物体表面温度が時間に比例して高くなっていくと仮定する。これにより、一定時間毎に変化するテクスチャを温度に比例させて対応させる。このようにして、各面に割り当てるテクスチャを設定する。

4. Experiments

4.1 評価実験

まず、有限要素法を用いて熱拡散方程式を解いた場合、凹凸形状が熱伝播にどのような影響を与えるのかを確認した。図 6(a) に示した表面上に凹凸を付けたシリンダーを包含するようにノードをグループ分けし、頂点 A, B について温度変化を求めた結果を図 6(b) 示す。シリンダーの半径は 1.0, 高さは 2.0 であり、凹部分の深さは円周から中心軸に向かって 0.1 である。格子の縦 × 横 × 高さは $3.0 \times 3.0 \times 4.0$ であり、これを $49 \times 49 \times 66$ に分割した。シリンダーの外側にあるノードの初期温度を $27[^\circ\text{C}]$, シリン

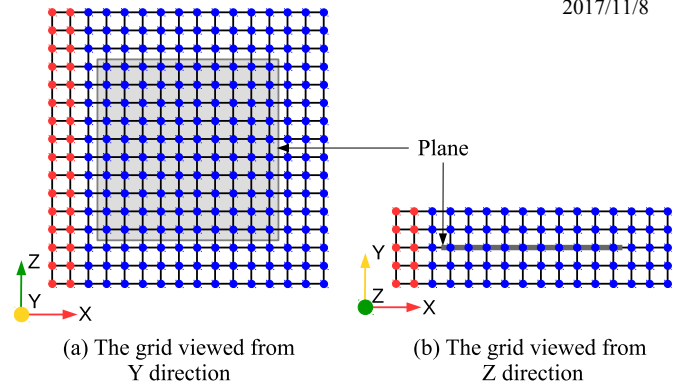


図 7 Experimental conditions

ダーの内側にあるノードの初期温度を $0[^\circ\text{C}]$ に設定した。図 6(b) のグラフの横軸が経過時間を表すフレーム番号、縦軸が有限要素法と補間により得られる頂点の温度である。頂点 A は凸部分にあり、頂点 B は凹部分にある。また、図 6(c) に時間が経過したときの全体の表面温度を示す。図 6(b)(c) からわかるように、凸部分にある頂点 A と凹部分にある頂点 B で、温度上昇に違いがある。特に、凸部分にある点 A の方が、凹部分にある点 B よりも温度上昇が速いことがわかる。

次に、メッシュの細かさとそのとき割り当てられるテクスチャの大きさによる見た目の違いを示す。図 8 に想定した平面と、そのときの熱伝播マップに対して割り当てられたテクスチャの様子を示した。図の下にある矢印は時間軸を示しており、それぞれの図は右に向かうほど、時間経過した水滴の状態を示している。

図 7 は熱伝播マップを計算するために用いた格子を示している。平面の横 × 高さは 2×2 であり、これを縦 × 横 × 高さが $0.8 \times 3.0 \times 3.0$, $4 \times 15 \times 15$ に分割した格子内部に配置した。ノードのグループ分けは、図 7 中の赤に示す 2 列をのノードの初期温度を $27[^\circ\text{C}]$, その他の列のノードを $0[^\circ\text{C}]$ に設定し、温度が x 軸方向に伝わってゆくものとした。

図 8(a) は、メッシュ内の点の間隔が大きい場合であり、このときメッシュ内の点の間隔は、格子の間隔の 2 倍である。メッシュが大きいぶんだけ、割り当てられるテクスチャも広くなり、水滴形状が分かる。図 8(b) は、メッシュ内の点の間隔が格子の間隔と同じ場合である。熱伝播の様子は (a) と見た目変わらない。図 8(a) と比べ、メッシュが細かくなるが、まだ、水滴形状を保っている。図 8(c) は、メッシュ内の点の間隔が細かい場合であり、このときメッシュ内の点の間隔は、格子の間隔の $1/2$ である。熱伝播に縞模様が現れ、伝播の様子が図 8(a), (b) と比べて細かくとれている。また、各面に貼られるメッシュは細かくなるが、そのため、水滴形状の判断が難しい。

4.2 自由形状における描画例

ここでは、さらに複雑な形状に提案手法を適用した結果を示す。図の下部にある矢印は時間軸を示しており、それ

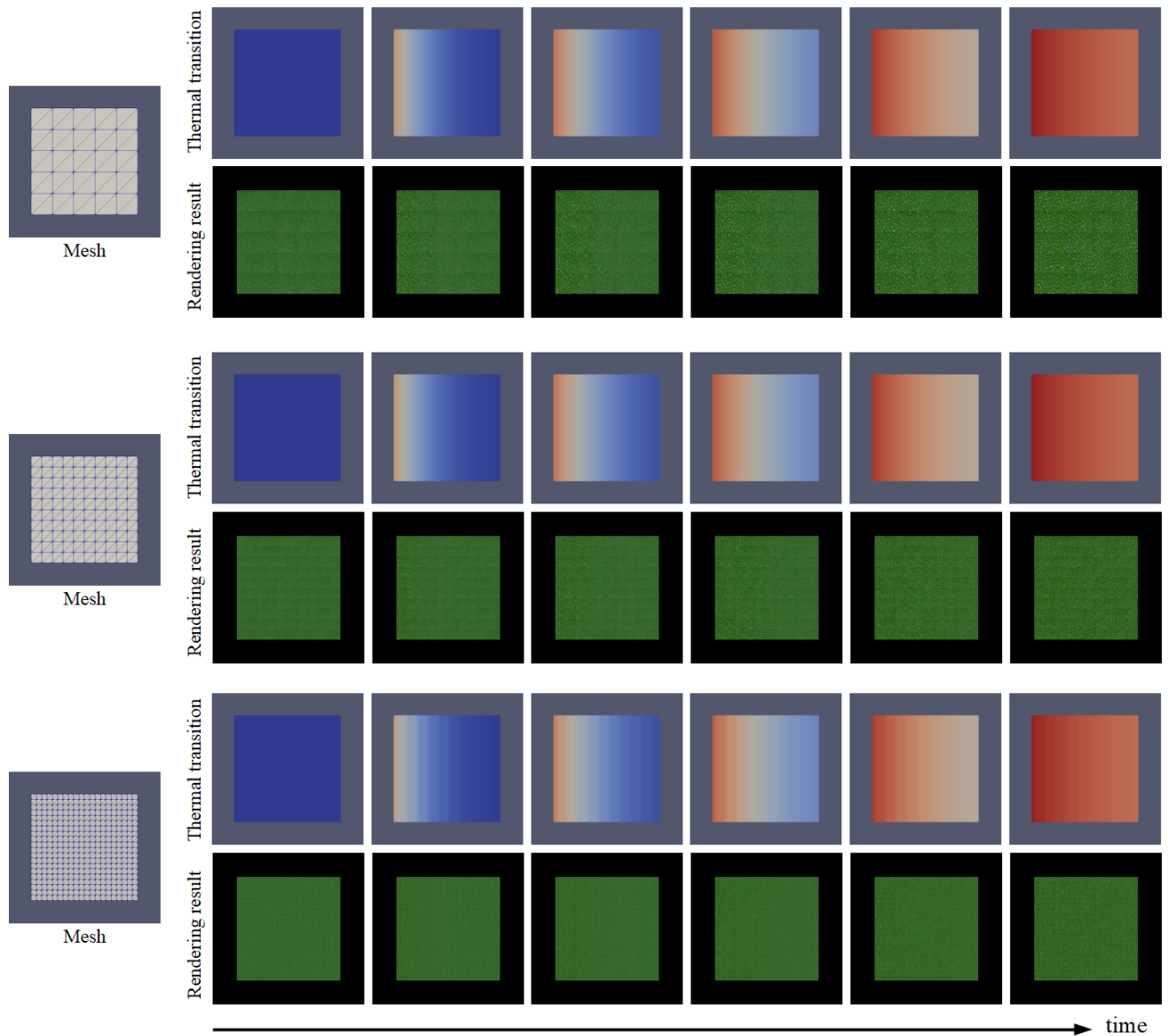


図 8 Texture assignment depending on the thermal transition

それぞれの図は右に向かうほど、時間経過した水滴の状態を示している。

図 9 に、提案手法を三次元物体に適用した結果を示す。一番上の行に並べた図からわかるように、bunny の耳の部分のように薄い部分では熱伝播が速い。また、bunny の脚のつけ根の部分のように、凸部分は熱伝播が速く、また、足と体間の凹部分は熱伝播が遅い。

レンダリング結果を中央の行に並べた図に示す。熱伝播に応じて、次第に大きな水滴のテクスチャが割り当てられることがわかる。さらに、一番下の行に並べた図は、中央の行に並べた図の一部を拡大したものである。また、それぞれの図に対して、割り当てられるテクスチャを比べると、凸部分に割り当てられるテクスチャの水滴の粒が、凹部分に割り当てられるテクスチャの水滴の粒よりも大きくなる。このように、提案手法を適用することで、時間変化する熱伝播に応じて変化する水滴の大きさと、さらに、物

体表面上の水滴の粒の大きさの分布まで考慮した表現が可能である。

4.3 応用例

図 10 は、水滴が付着していないテクスチャに対して、水滴を取得したデータから、明度値を取り出し、加え合わせて、テクスチャマッピングした結果である。図 10 の各図の一部を拡大したものをそれぞれの右下に示している。図 10 からわかるように、水滴が付加した効果を表現でき、また、時間経過によって水滴が大きくなってゆく様子を表現できている。

さらなる応用例として、取り出した明度値をディスプレイメントマップ作成に利用し、適用した例を図 11 に示す。ワイングラスの表面上の水滴を表現するために、同じ形状の透過物体にディスプレイメントマップを適用したものを、グラス表面に置いた。この結果からも、ワイン

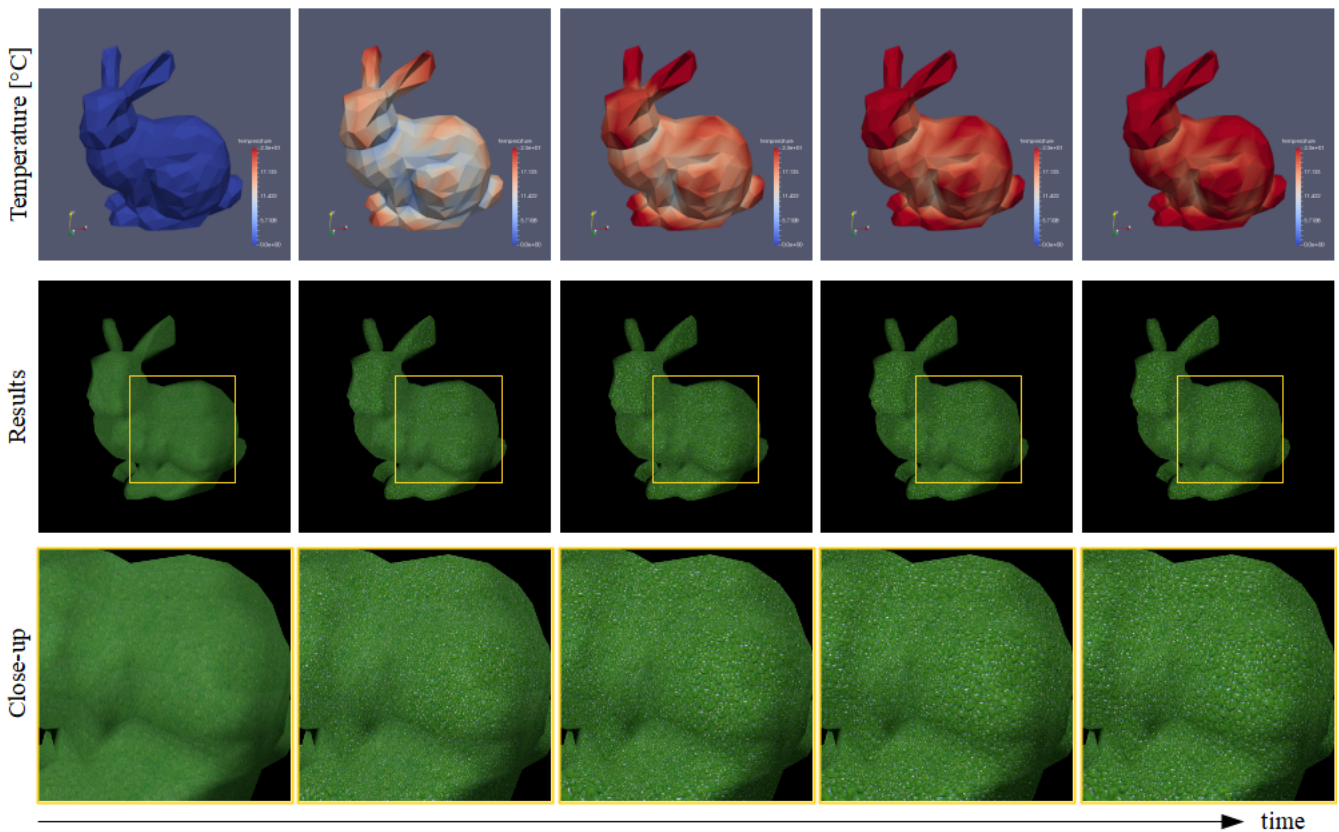


図 9 提案手法を 3 次元形状に適用した結果

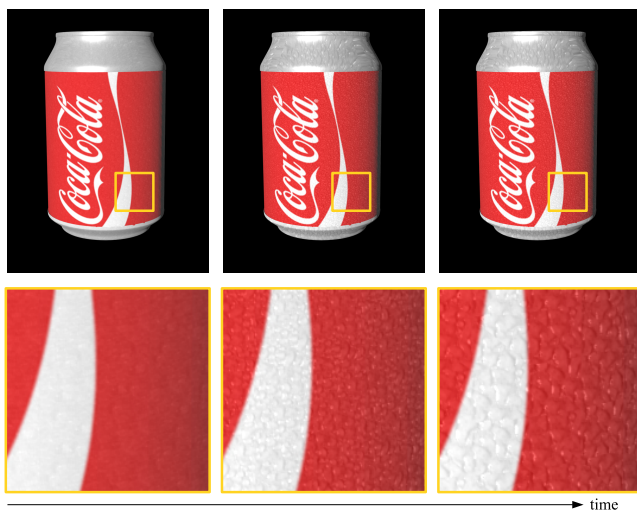


図 10 取得した水滴パターンを既存の物体表面に適用した結果

ラスの凹凸の程度により水滴の成長速度が異なることが表現できている。さらに、ディスプレイメントマップとして形状情報を持たせることで、明度値を加え合わせたテクスチャマッピングだけではできなかった、水滴形状に依存して反射する光を表現できる。

5. 手法の制限

本手法はテクスチャを物体表面の温度に対応させ、マッピングする方法を用いている。そのため以下のような制限が挙げられる。まず、物体表面に対して、テクスチャを

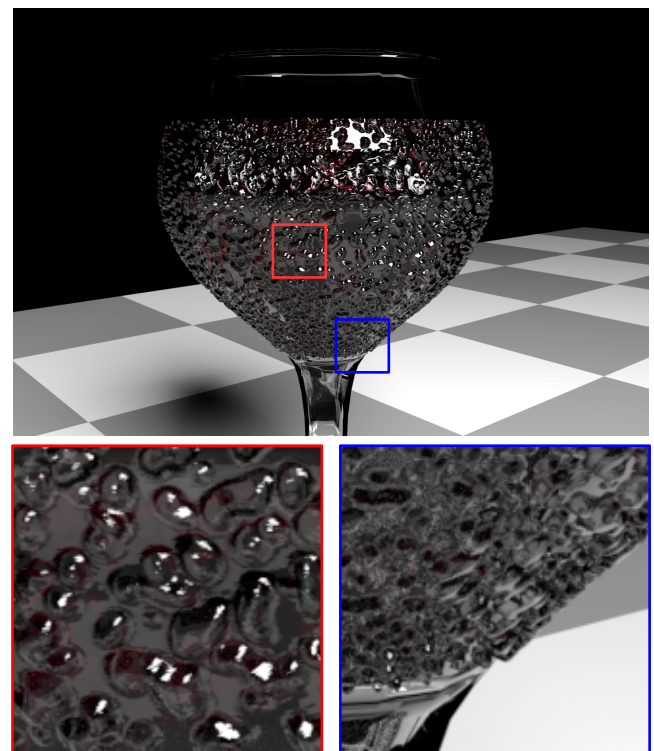


図 11 取得した水滴パターンをディスプレイメントマップとし、透過物体 (ワイングラス) の表面に適用した結果

マッピングするときはその大きさを合わせる必要がある。これは、例として、前節、図 8 にテクスチャの大きさ、貼

り付ける面の大きさにより、その見た目の印象は大きく変化することを示した。この大きさの設定は現在、ユーザーが結果に応じて任意に決定できるようにしている。また、手法では物体の各面に対してパッチを割り当てている。そのため、テクスチャ間の依存関係は保持できていない。その結果、例えば、物体表面を移動するような水滴の表現はできない。

6. まとめと今後の課題

本論文では、一定時間間隔で撮影した水滴テクスチャデータと、熱伝播マップを利用して、物体表面上にテクスチャを割り当てることで、物体表面に水滴が付着し、変化してゆく様子を表現をする手法を提案した。

熱伝播マップは以下の二つの情報を持つ。時間に応じて変化する物体の表面温度情報と、物体の形状に依存して異なる熱伝播速度情報である。この熱伝播マップを基に、物体表面にテクスチャを割り当てることで、時間経過と、さらに、物体形状に応じて異なる速度で成長する水滴分布を表現することができる。さらに、取得した時間変化する水滴データから、明度を取り出し、他の物体表面に付加することで、任意の物体についても表面で成長する水滴の様子を付加することができる。また、取り出した明度をディスプレイメントマップとして利用することもできる。

今後の課題として、BRDF、テクスチャ、ディスプレイメントマップを統一的に表現する手法の開発などが挙げられる。提案手法は現在、表面反射特性を表現するためにテクスチャを主に扱っており、テクスチャマッピングを行うことで物体の表面反射特性を表現している。図 11 では、ディスプレイメントマップにも応用可能なことも示したが、テクスチャとその使い分けについては未だ明確な基準はない。これらを統一的に表現することで、より利便性の高い表面反射特性表現が可能になると考えられる。

参考文献

- [1] Dorsey, J., Rushmeier, H. and Sillion, F.: *Digital Modeling of Material Appearance*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA (2008).
- [2] Gu, J., Tu, C.-I., Ramamoorthi, R., Belhumeur, P., Matusik, W. and Nayar, S.: Time-varying Surface Appearance: Acquisition, Modeling and Rendering, *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, SIGGRAPH '06, New York, NY, USA, ACM, pp. 762–771 (online), DOI: 10.1145/1179352.1141952 (2006).
- [3] Kaneda, K., Zuyama, Y. and Yamashita, H.: Animation of Water Droplet Flow on Curved Surfaces, *Proceedings of Pacific Graphics '96*, pp. 50–65 (1996).
- [4] Müller, G., Meseth, J., Sattler, M., Sarlette, R. and Klein, R.: Acquisition, Synthesis and Rendering of Bidirectional Texture Functions, *Eurographics 2004, State of the Art Reports* (Schlick, C. and Purgathofer, W., eds.), INRIA and Eurographics Association, pp. 69–94 (2004).
- [5] Raymond, B., Guennebaud, G. and Barla, P.: Multi-scale Rendering of Scratched Materials Using a Structured SV-BRDF Model, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 4, pp. 57:1–57:11 (online), DOI: 10.1145/2897824.2925945 (2016).
- [6] Slomp, M., Johnson, M. W., Tamaki, T. and Kaneda, K.: Photorealistic real-time rendering of spherical raindrops with hierarchical reflective and refractive maps, *Computer Animation and Virtual Worlds*, Vol. 22 (2011).
- [7] Wang, H., Mucha, P. J. and Turk, G.: Water Drops on Surfaces, *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, SIGGRAPH '05, New York, NY, USA, ACM, pp. 921–929 (online), DOI: 10.1145/1186822.1073284 (2005).
- [8] Wang, J., Tong, X., Lin, S., Pan, M., Wang, C., Bao, H., Guo, B. and Shum, H.-Y.: Appearance Manifolds for Modeling Time-variant Appearance of Materials, *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, SIGGRAPH '06, New York, NY, USA, ACM, pp. 754–761 (online), DOI: 10.1145/1179352.1141951 (2006).
- [9] Xue, J., Zhang, H., Dana, K. and Nishino, K.: Differential Angular Imaging for Material Recognition, *In Proceedings of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1–10 (2017).
- [10] Yan, L.-Q., Hašan, M., Marschner, S. and Ramamoorthi, R.: Position-normal Distributions for Efficient Rendering of Specular Microstructure, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 4, pp. 56:1–56:9 (online), DOI: 10.1145/2897824.2925915 (2016).
- [11] Zhang, H., Xue, J., Dana, K. and Nishino, K.: Deep TEN: Texture Encoding Network, *In Proceedings of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1–11 (2017).