

## 3次元コンピュータグラフィックスにおける経年変化の表現 (ワークフローの確立)

平 俊男

Computational Aging/Weathering on 3D Computer Graphics: Establishing a Workflow

HIRA Toshio

Three dimensional computer-generated images have been more photorealistic through the remarkable advance within both computer hardware and software in a decade. As a result, 3D computer graphics (3D CG) have become a popular way to create product images for design review and in consumer advertising. These virtual images always depict the brand-new products just been shipped, since these are rendered as smooth and clean objects. Besides, virtual reality (VR) and augmented reality (AR), which renders the digital images onto the real-world object in real-time, have been installed in smartphones and anyone would have been able to access these technologies easily. The smooth and clean 3D CG mentioned above is far from the actual appearance of the object. This is suitable for advertising images, but it is expected to cause an unnatural appearance in AR, where a digital 3D model is displayed in the real environment, because the appearance of real object have been varied to dirty one during its use.

In this paper, we show the workflow to produce the 3D CG having weathered and aged appearance without individual artistic ability. It is observed on the tools in use that the dust and/or rust is accumulated in the concave area and worn or paint chipping is shown in the convex area on the object. In the workflow, texture images, used as the input to Physically Based Rendering material, are generated by spatially evaluated exposedness or occludedness on the object surface by means of the ambient occlusion in the CG technique. We demonstrate the procedures to generate the aged images through the 3D rendering of some tools, anvil, hammer, and height gauge, and to create the model for AR.

### 1 はじめに

3次元コンピュータグラフィックス(3D CG)による表現は、ハードウェアの高速化、メモリの大容量化、ソフトウェア技術の発展などによって、近年、著しく進展している。その結果として、製品企画段階のレビューや、消費者向けの広告画像の作成手段として3D CGは広く定着したといえる。また、リアルタイムに3Dモデルを描写するVR (Virtual Reality)やAR (Augmented Reality)がスマートフォンに搭載されるようになり、これらの技術に誰もが容易に触れられるような状況にある。

広告画像にみられる3D CGでは、出荷直後の製品のようには、いわゆる綺麗で鮮やかな状態の表現が多くみられる。一方で、実際の製品には使用に伴う錆や塵による汚れ、摩耗や塗装の剥がれなどが生じているため、実環境の拡張であるARなどで用いられる3Dモデルの外観には、経年変化の考慮が必要となる。

3D CGにおける経年変化の考慮は、これまで様々な手法が試みられ、学術的には計算コストを伴う手法<sup>(1)</sup>が、実用的にはアートの要素を含む属人的な技法<sup>(2)</sup>が主にとられてきた。本研究では、比較的小さな計算コストで属人的な要素を伴わない経年変化表現を実現するためのワークフローを検討し、その確立を目的とする。なお、物

理的現象としての経年変化のシミュレーションを目指すのではなく、ARなどで用いるための経年変化を反映した3Dモデルの生成に主眼をおいている。

### 2 背景

近年の3D CGの進展はハードウェア・ソフトウェアの両面から目覚ましいものがある。たとえば図1に示す画像は、2017年度の本科5年生が作成した3Dモデルを用いて著者がレンダリングを行ったものであり、個人レベルでも比較的写実的な描写が得られるようになっている。このような3Dモデル、3D CGの個人レベルでの利用は、3Dプリンタの普及やVR、AR技術を利用したスマートフォン上のアプリケーションの展開などに伴ってさらに広がりを見せ、3Dモデル共有サービス<sup>(3)</sup>も数多くみられるようになってきた。

一方で、3D CGの描写の多くは図2に示すような道具の実物からは程遠い。このことは、出荷直後の製品を想定している広告画像等では問題とならないが、実環境に3Dモデルが合成して表示されるARなどでは違和感をもたらすことが予想される。その理由の一つには製品外観の経年変化が挙げられ、たとえば図2(a)のアンビル(金床)や(b)のボールピンハンマ(金工ハンマ)では、錆や塵による窪んだ個所での変色や、他の物体との接触が発生する箇



Fig. 1 3D Rendered Guitar

所での摩耗による金属的光沢などがみられる。また、図2(c)のハイトゲージの台では、人に握られる個所で塗装の剥がれがみられる。したがって、より現実的な3D CGの作成にあたっては、これらの経年変化の考慮が必要となる。

物体の経年変化は、(1) 錆、腐食などの化学的過程、(2) 風化、輸送、堆積、塗装のひびや剥がれなどの機械的過程、(3) カビなどによる生物的過程に大別される。これらを3D CGにおいて再現するためには、錆などの汚れを手作業で付加することや、描かれたテクスチャ画像を3次元モデルに貼付けたものをレンダリングすることが行われてきた。しかしながら、これらの手法は、アートの要素を多く含み、誰もが容易に習得できるものではない。また、多大なコストがかかることから、エンタテインメント産業などの限られた分野でしか現実的ではない<sup>(4)</sup>。

Dorsey らは、建造物や彫像の表面上の水滴の流れを、重力、摩擦、風、表面粗さと制約に基づいた現象論的なモデルによってシミュレーションし、物体の外観の変化を再現する手法<sup>(5)</sup>を示している。この手法では、人手を介さない経年変化の描写が可能であるが、物体と水との相互作用のメカニズムのモデルを個別に用意する必要がある。Cheng らは、より広い範囲の経年変化を再現するために、 $\gamma$ -ton と呼ぶ仮想的な粒子を用いる手法を提案している<sup>(6)</sup>。この仮想的な粒子は、環境中に散布され、物体表面での反射、跳ね返り、流れを経た後に物体表面に定着する。この手法では、間接的な錆の進行や、コケと汚れの同時進行、石像の風化のような形状変化が再現



(a) Anvil



(b) Ball-peen hammer



(c) Height gauge (base)

Fig. 2 Really aged tools in use

できる。このような仮想的な粒子を用いる手法は、雨染みのシミュレーション<sup>(7)</sup>や地形の浸食の解析<sup>(8)</sup>など広く展開されている。

著者らは、機械製品を例にとり、物体の幾何形状をボクセルモデルとして表現し、各ボクセルに対する環境遮蔽度を評価することで、主に錆による経年変化を表現する手法を提案している<sup>(9)</sup>。この手法では、計算コストは減少させられるものの、最終的な物体形状の表現がボクセルモデルであるため、3D CGの写実性が乏しいという課題があった。

### 3 経年変化に対する物体形状の影響とその評価

#### 3.1 経年変化に対する物体形状の影響

図2に示した実環境で使われている道具を観察すると、窪んだ部分には汚れや錆、凸な部分には塗装の剥がれや摩耗などがみられる。これらの原因としては、窪んだ部分を拭うことが容易ではないために錆や塵が残留しやすくなること、また油分なども同様に除去されにくくなるために塵などが固着しやすくなることが挙げられる。一方で、凸な部分は他の物体との接触が生じ、物体に防錆膜処理がされている場合には摩耗による金属地肌の露出が、塗装の場合には塗膜の剥がれが生じやすい。ただし、これらの傾向は一概にはいえず、屋外環境で用いられる鋼橋では、鋼板エッジやボルトの角部などの凸な部分から発錆することが知られている。この原因は、道具の例のような他の物体との接触ではなく、塗装膜厚が角部で薄くなる傾向によるものであることが報告されている<sup>(10)</sup>。いずれにせよ、経年変化の表現にあたっては物体形状の凹凸度の評価が鍵となり、ここでは、前報と同様に環境遮蔽(ambient occlusion, AO)の利用を考える。

3.2 環境遮蔽

環境遮蔽とは、3DCGにおいてより写実的な結果を得るために、光源による直接照明だけではなく、環境光のような大域照明モデルを近似的に再現するために考案された手法である。物体上の任意の点において、環境光は近傍の物体による遮蔽によって減衰するものとし、その影響を環境遮蔽係数とすると、

$$A(x, n) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} V(x, \omega)(\omega \cdot n) d\omega \dots\dots\dots(1)$$

と表される。ただし  $x, n$  は、それぞれ物体表面上の注目点、法線ベクトルを表す。 $V(x, \omega)$ は可視関数であり、注目点  $x$  から  $\omega$ 方向に物体があり、環境から遮蔽されていれば0、なければ1をとる。また、積分領域 $\Omega$ は、一般に物体表面上の法線に対して半球とする<sup>(11)</sup>。この係数  $A$  は、ある点が環境に遮蔽されている割合が多い時に0に近づき、遮蔽されていない割合が多い時に1に近づく。図3に模式的に示すように、点  $P_1$  では周囲に環境光を遮るものが少なく、点  $P_2$  では遮るものが多くなる。

3DCGでは、この環境遮蔽係数  $A$  をもとに環境光  $1 - A$  として大域照明の近似に用いるが、環境への露出度を表していることから経年変化への影響を評価することができる。

3.3 3次元形状のデータ表現

3次元物体の形状(図4(a))のデータ表現には、ポリゴンやファセットと呼ばれる多角形の集合として表すポリゴンモデル(図4(b))や、立方体の集合として表すボクセルモ

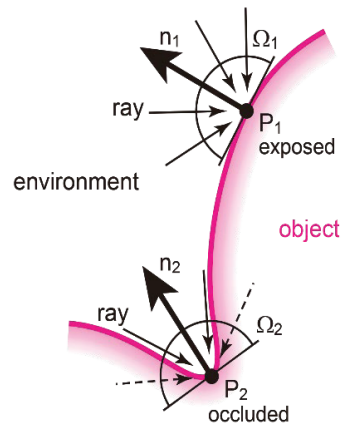


Fig. 3 Concept of Ambient Occlusion

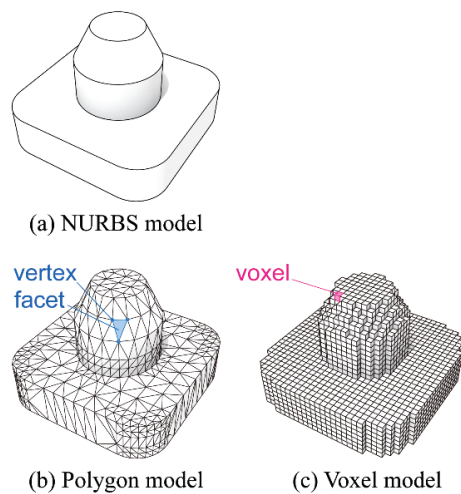


Fig. 4 3D shape models

デル(図4(c))が用いられる。ポリゴンモデルは、頂点や面に保持される法線情報を用いることで、ボクセルモデルに比べると相対的に滑らかな形状表現が得られる。しかしながら、ある点が物体の内部なのか外部なのかを知るためには、その点がポリゴンによって完全に囲まれているかどうかを判定する必要がある。

ポリゴンモデルは、 $N$ 個の頂点座標  $v_n = (v_{nx}, v_{ny}, v_{nz})$  ( $n = 1, \dots, N$ )と、 $M$ 個のポリゴン  $f_m$  ( $m = 1, \dots, M$ )を持つ。ここでは各ポリゴンを三角形に限定し、3つの頂点によって  $f_m = (v_{m1}, v_{m2}, v_{m3})$  ( $v_{mk} \in \{v_n\}, k = 1, 2, 3$ )と表す。このとき、標準的なデータ形式に従い三角形の頂点を物体外側からみて反時計回りとなるような順番に記述する。さらに、各頂点は3Dモデルを2次元のUV平面上に展開(図5)した際のUV座標  $t_n = (t_{nu}, t_{nv})$  ( $n = 1, \dots, N$ )や、レンダリングの際にスムーズな外観を得るために用いられる法線ベクトル  $n_n = (n_{nx}, n_{ny}, n_{nz})$ を持つ。

ボクセルモデルは、物体を内包する空間を立方体によって格子状に区切り、 $x$ 方向に  $i$ ,  $y$ 方向に  $j$ ,  $z$ 方向に  $k$

を用いて  $e_{ijk} \in \{0, 1\}$  と表す. このとき, 添え字  $ijk$  が指す立方体が物体の内部であれば 1, 外部であれば 0 である.

3.4 ポリゴンモデル上の環境遮蔽の評価

環境遮蔽の評価にあたり, 前報<sup>(9)</sup>ではボクセルモデルに基づいていたが, その評価を反映する経年変化の表現をボクセルモデル上に行っていたために 3D モデルの空間解像度が低いという課題があった. 本報では, 遮蔽度の評価にはボクセルモデルを用い, その反映にはポリゴンモデルを用いることを試みる.

ポリゴンモデルの頂点  $v_n$  における環境遮蔽度の評価にあたり, 頂点を中心とする半径  $R$  の仮想的な球を設け, その内部に  $I$  個のサンプリング点  $P_i = (P_{ix}, P_{iy}, P_{iz})$  ( $i = 1, \dots, I$ ) を, 3つの一様乱数  $\theta$  ( $0 < \theta < 2\pi$ ),  $z$  ( $-1 < z < 1$ ),  $r$  ( $0 < r < R$ ) によって以下のように生成する.

$$\begin{cases} P_{ix} = v_{nx} + r\sqrt{1-z^2} \cos \theta \\ P_{iy} = v_{ny} + r\sqrt{1-z^2} \sin \theta \\ P_{iz} = v_{nz} + rz \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, サンプリング点の分布は仮想球中心からの半径反比例するような密度となる.

頂点  $v_n$  における遮蔽度  $O_n$  は, サンプリング点  $P_i$  が物体の内部か外部かを返す 2 値関数(0 が外部, 1 が内部)  $e(P_i)$  を用いて以下のようになる.

$$O_n = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I e(P_i) \dots\dots\dots (3)$$

ポリゴン  $f_m$  は, 複数の頂点から構成されるので遮蔽度を複数持つことになるが, ここでは単純に 3つの頂点の遮蔽度の平均をそのポリゴンの遮蔽度とする. なお, ここで設定するサンプリング数  $I$  は, 経年変化過程のランダムさを調整するパラメータとしての意味も持つ.

以上の過程を図 6 に模式的に示す. この図では, 右側に物体が存在し, 左側が環境である. 物体表面はポリゴンメッシュによって表現され(図中青色の折線), さらに物体内部はボクセル化されている. 頂点  $v_1, v_2$  を中心に仮想球  $\Omega_1, \Omega_2$  を設け, それぞれサンプリングを行うと, 頂点  $v_1$  では低い遮蔽度, 頂点  $v_2$  では高い遮蔽度が得られる.

4 経年変化表現のためのワークフロー

4.1 3D CG 表現で用いられるマテリアル

3次元モデルのCG表現においては, そのマテリアル設

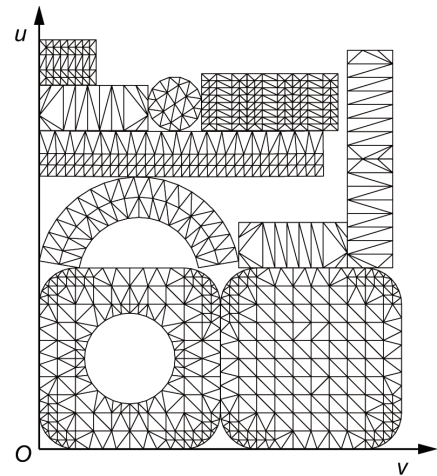


Fig. 5 Unwrapped UV map

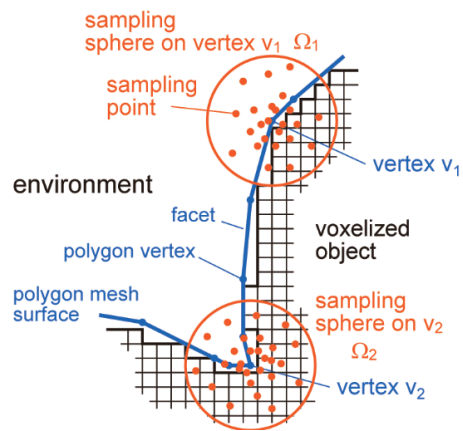


Fig. 6 Voxel-based Ambient Occlusion

定が重要となる. レンダリングに対して十分な計算が行えなかった頃にはアドホックなシェーダが提案されてきたが, 近年では物理ベースシェーダによる物理ベースレンダリング(Physically Based Rendering, PBR)を使うことが標準的になりつつある<sup>(12)</sup>. PBRマテリアルを用いている例としては, 2010年代後半にリリースされた多くの商用ソフトウェア, ゲームエンジンとして広く普及しているUnityやUnreal Engine, フリーのオープンソース3Dツールとして広く用いられているBlender, Pixarによって開発されたUniversal Scene Description (USD)で用いられるマテリアル設定などがある. USD形式はiOSやMac OSでAR環境を提供するARKitでも採用されている<sup>(13)</sup>. このようなマテリアル設定の共通化によって, 3D CGの作成時の各ソフトウェアでのマテリアル設定やモデル共有のコストが軽減されるようになってきている.

PBRマテリアルの主要なパラメータとしては, 物体色BaseColor, 表面粗さRoughness, 金属感Metallic, 法線Normal, 透過度Transmissionなどがある. 次節では, 前章の手法で求めた遮蔽度をこれらのパラメータに反映する手順を示す.

## 4.2 遮蔽度に基づくPBR入力画像とレンダリング

### 4.2.1 遮蔽度の評価

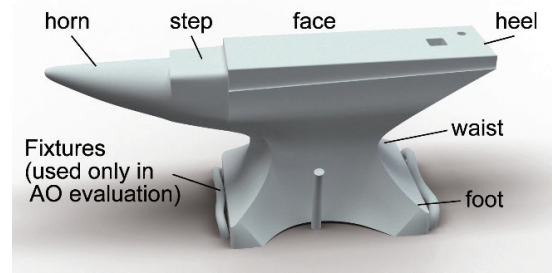
図2(a)で示したアンビルの3Dモデル(図7(a))を作成し、そのモデルに経年変化を反映させたCGを得るまでの過程を以下に述べる。この3Dモデルは、頂点数83934、ポリゴン数149088のポリゴンメッシュモデルである。また、ボクセル化にあたっては、幅、高さ、奥行き寸法のうち最も大きな幅を基準として、空間を $1024^3$ 分割とした。また図7(a)では遮蔽度の評価時のみに考慮する固定用金具も示している。図7(b)はホーン部のポリゴンメッシュの拡大図である。

このポリゴンモデルの各頂点について遮蔽度の評価を仮想球半径 $R$ として物体幅の10%、サンプリング数として $I = 5000$ と $100$ で行った例をそれぞれ図7(c), (d)に示す。これらの図では、遮蔽度8%が青色、遮蔽度70%が赤色に対応している。なお遮蔽度70%を超えるポリゴンが面積比で15%程度存在するが、これらは全てアンビル下面で床面と接触しており通常は見えない部分である。以下に述べるテクスチャ生成では、ランダムさを持たせたサンプリング数100の遮蔽度マップを用いる。

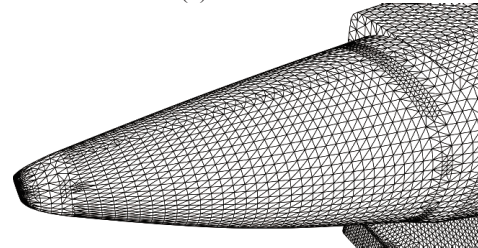
### 4.2.2 遮蔽度に基づくテクスチャ生成

このアンビルの例では、経年変化に伴う発錆を表す表面色、塵やスケール(金属氧化物)の蓄積、使用時の接触による摩耗を表すテクスチャを生成する。レンダリングにあたっては、Blender 2.79b (Blender Foundation) を用いた。図8は、遮蔽度(図中(b))に対応する各テクスチャの色を表しており、たとえば、錆色テクスチャ(図中(c))に対しては遮蔽度18%未満で黒色、70%以上で赤茶色(RGB値(0.753, 0.282, 0.000))とし、塵・スケールテクスチャ(図中(d))に対しては遮蔽度50%以上の窪んだ箇所にグレーを与えている。

3Dモデル各頂点のUV座標 $t_n$ に基づいてUV展開したマップ画像を図9に示す。図中(b)から(d)では、レンダリングに用いる実際の画像では透明のピクセルを紙色との区別のために青色で表示している。各テクスチャ画像は高さ、幅ともに8192ピクセルとして生成し、半径1%のぼかし処理を行っている。図中(b)から(d)はグレイスケール画像であり輝度のみが意味を持つ。図8(e)の摩耗テクスチャに対応している図9(c)のグロスマップではピクセル値が1(白)に近づくほど表面の鏡面反射の度合いが高くなり、遮蔽度が18%未満のポリゴンに適用される。一方で遮蔽度が34%以上のポリゴンではピクセル値が0(黒)となり鏡面反射は起こらない。図9(d)の粗さマップは図9(c)のグロスマップを階調反転させたもので、モデル表面に



(a) 3D model



(b) Polygon mesh

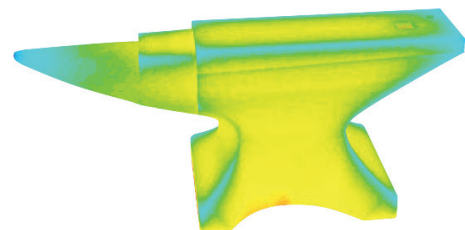
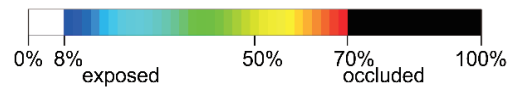
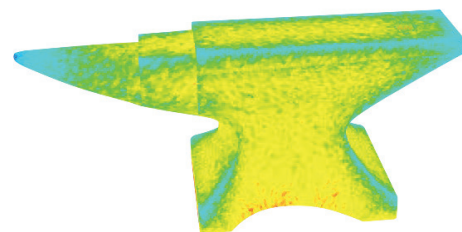
(c) Occludedness on polygons ( $I = 5000$ )(d) Occludedness on polygons ( $I = 100$ )

Fig. 7 Anvil as 3D model

生じさせたパーリンノイズによる凹凸の高さに対してピクセル値を乗算する。すなわち、白色(ピクセル値1)の部分では凹凸高さはそのまま用いられ、遮蔽度が低く(周囲への露出が高く)グレイ(ピクセル値が1未満)の部分では凹凸の高さが小さくなるのが表現される。

### 4.2.3 テクスチャ画像を用いたレンダリング

アンビルのフェイス部以外に、前項で得られたマップ画像をそれぞれPrincipled BSDFの入力としたレンダリング例を図10に示す。錆色マップを用いたレンダリング(図10(a))では、遮蔽度に応じた錆色が表現されている。塵・

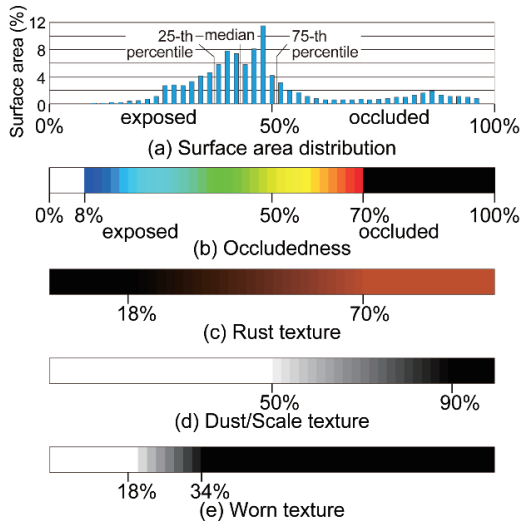


Fig. 8 Color chart w.r.t. occludedness on anvil

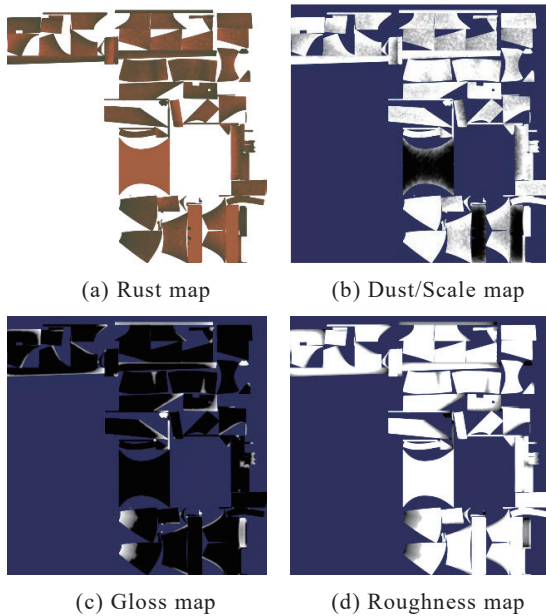
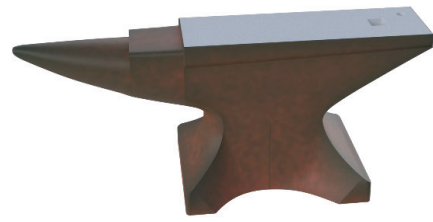


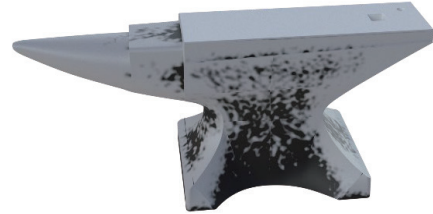
Fig. 9 Texture images used for BSDF input

スケールマップを用いたレンダリング(図10(b))では、塵やスケールが残存しやすくなる遮蔽度が50%以上のくぼんだ箇所や固定具による環境遮蔽が高い個所が黒く表現されていることが確認できる。また、グロスマップを用いたレンダリング(図10(c))では、遮蔽度の低い凸な部分では周囲環境の映り込みが生じている。さらに、アンビルのヒール部などのように遮蔽度が低い個所は粗さマップによって表面の凹凸の度合が小さくなっている(図10(d))。

これらのテクスチャを合成し、レンダリングした結果を図11に示す。物体周囲の環境マップ画像としては、本校実験実習棟鑄鍛造場を正距円筒図法により撮影したHDR (High Dynamic Range) 画像(図12)を用いている。この画像はピクセル階調として32ビットのレンジを持ち、鏡面反射をする3Dモデルへの映り込みや照明のために



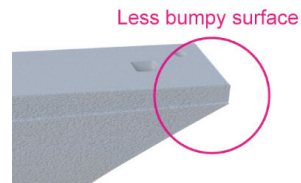
(a) With rust texture



(b) With dust texture



(c) With gloss texture



(d) Effect of Roughness texture

Fig. 10 3D rendered images with texture maps



Fig. 11 Synthesized 3D CG image with aging



Fig. 12 Equirectangular image for environment map

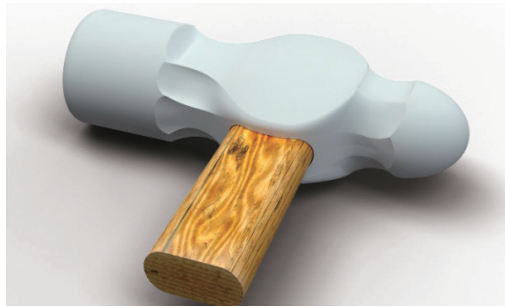


Fig. 13 Ball-peen hammer as 3D model

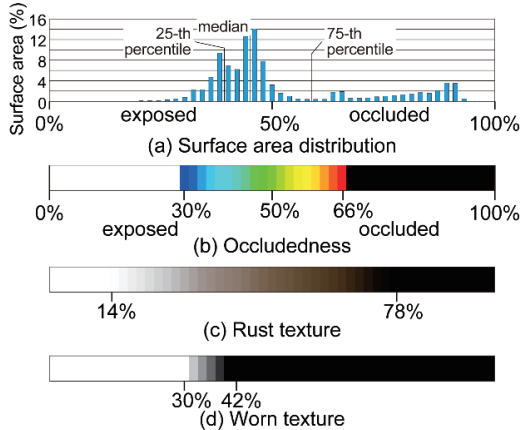


Fig. 14 Color chart w.r.t. occludedness on hammer

参照される。

### 4.3 他の道具に対する経年変化表現

#### 4.3.1 ボールピンハンマ

図2(b)に示したようなボールピンハンマの3Dモデル(図13)を作成し、経年変化を表現する。このモデルは、頂点数70995, ポリゴン数131854のポリゴンメッシュモデルである。また、ボクセル化にあたっては、幅、高さ、奥行きのうち最も大きな幅を基準として、空間を $1024^3$ 分割とした。なお柄の木材のマテリアルにはGabriel de Laubier氏作成のProcedural PBR wood shader (CC0ライセンス)<sup>(14)</sup>を用いている。

遮蔽度の評価にあたり、仮想球半径 $R$ を物体幅の10%とし、サンプリング数 $I$ を1000とした。図14に遮蔽度に対応する(a)表面積比, (b)評価色, (c)錆色, (d)摩耗度をそれぞれ示す。アンピルの例と比べると、遮蔽度の低い箇所が少ないことが特徴である。経年変化の表現にあたっては、まず図15(a)のように経年変化のない表面色(RGB値(0.251, 0.267, 0.275))と粗さパラメータ0.2を物体表面に一样に与える。次に、錆色は前節と同様に生成した錆色マップの色相, 彩度を物体表面に重ねたものをBaseColorとし、錆色マップをグレイスケール画像に変換後に反転させたものを表面粗さRoughnessとしてBSDFに入力する(図15(b))。後者は一般的に発錆部の表面は粗く艶が失われていることを表現している。最後に、摩耗度(図14(d))



(a) Initial material



(b) Rust and roughness



(c) Worn texture (Final peen view)



(d) Worn texture (Final face view)

Fig. 15 Aging process with textures

に応じたグロスマップを適用することで、凸な表面を持ち摩耗が進んだ箇所に周囲環境の映り込みが生じるようになる(図15(c), (d))。

#### 4.3.2 ハイトゲージの台(塗装の剥がれ)

図2(c)に示したようなハイトゲージの台には、使用時に人に握られることによる塗装の剥がれがみられる。経年変化としてここまで主に扱ってきた発錆とはスケールが異なるため、遮蔽度を用いることは共通であるが、テクスチャ画像の取扱いが異なる。ここでは異なる部分

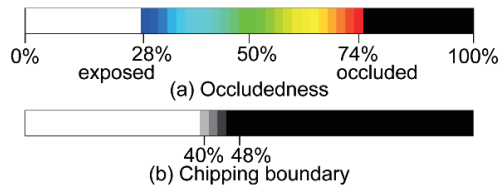


Fig. 16 Color chart on height gauge base

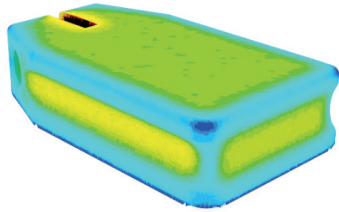
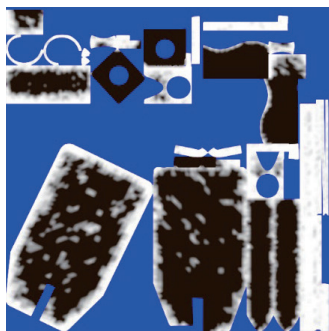


Fig. 17 Occludedness on 3D model



(a) Reference gradation for chipping map

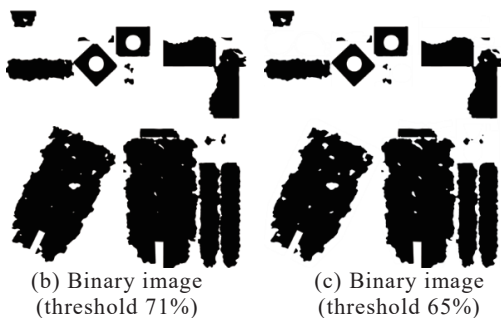
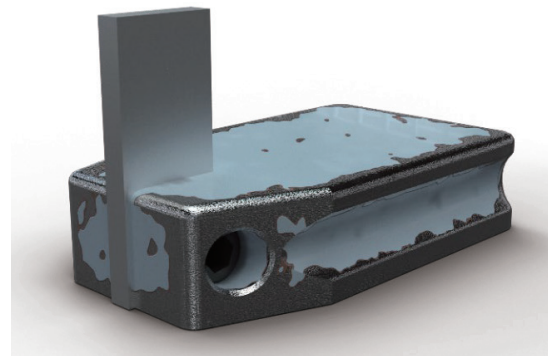


Fig. 18 Chipping map

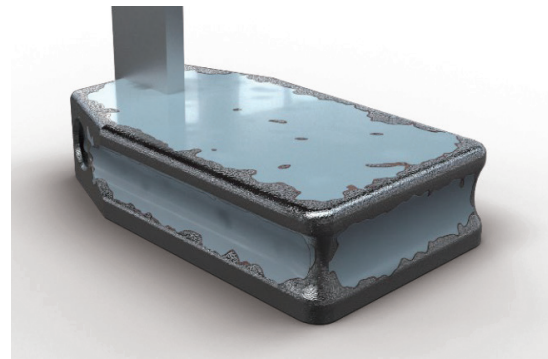
に焦点を絞って述べる。

遮蔽度に応じて図16(a)に示した色を割当てた3Dモデルの外観を図17に示す。次に遮蔽度が40%未満のポリゴンに白、48%以上のポリゴンに黒を割当てたUVマップ画像にぼかし処理を行い、剥がれ参照画像(図18(a))を得る。このとき、3Dモデルのメッシュ分割は相対的に粗くしており、頂点数11781、ポリゴン数28622である。また、遮蔽度評価のサンプリング数 $I=100$ としランダムさを高くしている。

図18(a)の剥がれ参照画像に対して、閾値71%、65%として2値画像(図18(b), (c))を得る。これらの2値画像は剥がれが生じているかどうかを参照するために利用することができ、ここでは図18(b)を防錆塗料の領域、(c)を塗装領域として取扱う。また塗装膜には厚みがあるため、これ



(a) Front side view



(b) Tail view

Fig. 19 3D images with chipping

らの画像の白黒を反転させたものを高さマップとする。以上のマップ画像を適用して得られたレンダリング画像が図19である。

#### 4.4 レンダリング画像に関するまとめ

経年変化を考慮した3D CGの作成にあたり、3Dモデル外観を表す画像を遮蔽度のみから得ることができることを示した。この手法によって汚れなどの経年変化を表現する外観画像を人が描くという工程がなくなり、人の技量に左右されない3D CGが得られる。

一方で、アンビルの例(図11)では、3Dモデルを構成する曲面の境界部で輪郭が目立つ結果となっている。本手法では、ポリゴン単位で遮蔽度に対応した色を決定しているため、より滑らかなグラデーションが得られるようにUV展開された画像上でぼかし処理をおこなっている。この際、3次元空間上での近傍関係がUV空間においても保たれるとは限らないために、離れた位置の色情報が混ざることが原因であると考えられる。

ここでとりあげたアンビルやハンマのような道具の実物では、使用に伴って塑性変形や打ち傷が生じる。また、打面は摩擦によって磨かれたような質感をもつことが多い。そのため、ハンマの打面を示した図15(d)のように、他の表面と同様の発錆表現では、現実感がやや失われる結果となる。したがって、経年変化表現の次の段階とし



ては幾何形状だけではなく、人による使用形態の考慮が必要となる。

#### 4.5 USD形式によるARでの利用

ボールピンハンマの3Dモデル(図13)をもとに、4.3.1項と同様に遮蔽度に対応したディフューズ色、金属感、表面粗さのマップ画像(図20. 図中青色は透明ピクセルを表す)を生成し、Apple社の提供するUSDZ Tools<sup>(15)</sup>によってUSD形式の3Dモデルを得る。この形式で記述された3Dモデルは、iOSを搭載するiPhoneやiPadなどの携帯端末の標準機能でAR表示が可能である。AR表示では、携帯端末上で自己位置推定を行いリアルタイムに3Dモデルの外観描写が更新される。

窓際にハンマをAR表示させた例を図21に示す。4.3節に述べた静的な3D CGとは照明モデルが異なるため、色味等の調整が未だ必要な段階ではあるが、ハンマの影が窓枠に描写されていること、窓枠の黄色の塗装の映り込みがハンマ下面の摩擦部に生じていることが確認できる。

## 5 おわりに

経年変化を伴う3D CGの作成にあたり、3Dモデル表面の遮蔽度を評価し、遮蔽度に対応したテクスチャ画像を作成するワークフローを示した。表面形状の凹凸の度合を示す遮蔽度の分布からは、(1)錆や塵による汚れを反映する画像、(2)摩擦の程度を反映する画像、(3)汚れによる表面粗さの変化を反映する画像、(4)塗装の剥がれを反映する画像が得られ、これらはPBRマテリアルの入力やARモデルのマップ画像として利用できる。なお、ここで示した手法は対象物体の幾何形状のみを考慮しており、ハンマやアンピルの打面(フェイス)に生じる摩擦や塑性変形、打痕などは表現されない。今後、より現実感を持つ経年変化を表現するためには、人による使用形態の考慮が課題となる。

なお、ポリゴンモデルに遮蔽度を反映させるソフトウェアの基本的な実装については小林陸君(2018年度本科5年)、摩擦による周辺環境の映り込みに関する検証については山岡遼平君(2019年度本科5年)の協力を得た。記して謝意を表す。

## 文 献

- (1) たとえば、Merillou, S. and Ghazanfarpour, D., "A Survey of Aging and Weathering Phenomena in Computer Graphics," *Computers & Graphics* 32, (2008), pp.159-174.
- (2) たとえば、宮田一乗, プロシージャル技術とデザイ

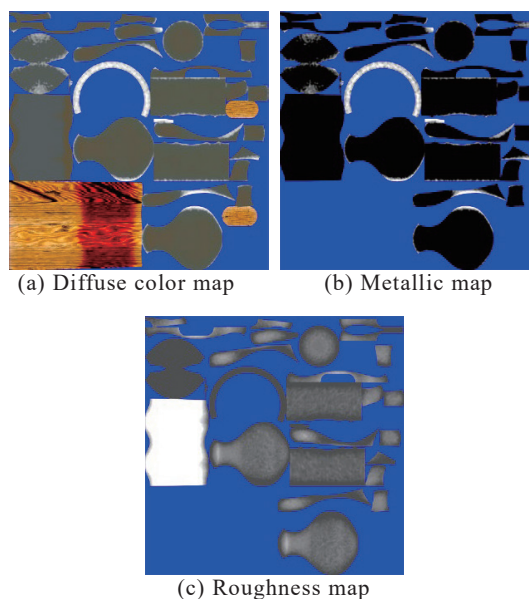


Fig. 20 Images for PBR materials on USD



Fig. 21 Ball-peen hammer in AR view

- ン, デザイン学研究, Vol.17-3, No.67, (2010), pp.22-29.
- (3) たとえば, AUTODESK, オンラインギャラリー, <https://gallery.autodesk.com/projects/> (参照日2020年9月27日).
- (4) Dorsey, J., Pedersen, H.K., and Hanrahan, P., "Flow and Changes in Appearance," *ACM SIGGRAPH 1996*, (1996), pp.411-420.
- (5) Dorsey, J. and Hanrahan, P., "Modeling and Rendering of Metallic Patinas," *ACM SIGGRAPH 1996*, (1996), pp.387-396.
- (6) Chen, Y., Xia, L., Wong, T-T., Bao, H., Guo, B., and Shum, H-Y., "Visual Simulation of Weathering By  $\gamma$ -ton Tracing," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 24.3 (2005), pp.1127-1133.
- (7) 田中将貴, 床井浩平, 粒子法による雨染みのシミュ

- レーションの GPU による高速化, 芸術科学会論文誌, Vol. 12, No.3, (2013), pp.124-131.
- (8) 大坪晃輔, 草間晴幸, 粒子法による 3 次元地形の浸食解析プログラムの開発, 芸術工学への誘い, Vol.19, (2014), pp.47-56.
- (9) 平 俊男, 3D Computer Graphics における経年変化表現, 奈良高専研究紀要, 第 51 号, (2015), pp.1-6.
- (10) 清水善行, 伊藤義人, 金仁泰, 角部形状が鋼橋防食性能に与える影響に関する基礎的研究, 構造工学論文集 Vol.53A, (2007), pp.825-833.
- (11) Kontkanen, J. and Laine, S., “Ambient Occlusion Fields,” *Proc. ACM SIGGRAPH 2005 Symposium on Interactive 3D Graphics and Game*, (2005), pp.41-48.
- (12) Hery, Christophe and Villemin, Ryusuke, “Physically Based Lighting at Pixar,” *ACM SIGGRAPH Courses*, (2013).
- (13) Apple, 「Apple、ARKit2を発表」, <https://www.apple.com/jp/newsroom/2018/06/apple-unveils-arkit-2/> (2018) (参照日2020年9月27日).
- (14) de Laubier, Gabriel, “Procedural CC-0 PBR wood shader,” <https://www.blendernation.com/2017/10/20/procedural-cc-0-pbr-wood-shader/> (参照日 2020 年 9 月 27 日).
- (15) Apple, “Working with USD,” <https://developer.apple.com/wwdc19/602> (2019) (参照日 2020 年 9 月 30 日).