

3D Computer Graphics における 経年変化表現

平 俊男

Aging/Weathering with 3D Computer Graphics

Toshio HIRA

The 3D computer-generated images have been more photorealistic through the remarkable development within both of hardware and software in decade. As a result, it could be said that the 3D computer graphics has become a conventional way to make the product images in the conceptual design review and the advertisement for consumers. These virtual images always depict the brand-new products just shipped out, since these are rendered as the smooth and clean objects. On the other hand, real products in service have often dirty appearances with aging. Thus the aging and weathering effect, such as rust and/or dust, on the surfaces of the product should be taken into account to generate more realistic image.

In this paper, we proposed the two models to simulate the process for generating dirt accumulated pattern on wet planar surface and to spatially evaluate the geometry by means of ambient occlusion with voxel-based object. The dirt accumulated pattern on the wet surface is iteratively formed through flow of water in the process, which consists of water adhesion, transfer, and evaporation and dirt accumulation and washing away. The cellular automaton was utilized in order to simulate this phenomenon. The local interaction rules heuristically given and defined among neighbors for water transfer and growth as droplets demonstrated the capability to generate the pattern that was similar to real one. The aging/weathering effect at the specific area on the object is affected by the degree of how that area is occluded from or exposed to the surrounding environment. The simple model that evaluates the dirt concentrated area by means of the ambient occlusion with voxelized object was shown and exemplified through the examples.

1. はじめに

近年、3次元 Computer Graphics (3D CG) による物体の写実的表現は、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、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を作成する手段として 3D CG は既に定着しており、多くの商用ソフトウェアも存在している。これらの写実的表現においては、主に対象とする製品の出荷直後のような、いわゆる綺麗で鮮やかな状態での利用シーンの提示が多くみられる。一方で、実際の製品には使用に伴って錆や塵による汚れや摩耗や塗装の剥がれなどが生じるので、違和感のない写実的表現を 3D CG によって実現するためには、これらの経年変化を考慮する必要がある。

本研究では、経年変化を伴う機械製品の 3D CG による写実的表現を目的とし、平板上の汚れ堆積パターンの形成を対象としたセルオートマトンによる再現手法と、経年変化に対する幾何形状の影響をボクセル表現された空間における環境遮蔽によって評価する手法を提案する。

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 に示す画像は筆者が作成（図 1 (a) のバルブ部品のモデリングは、平成 20 年度の本専攻科の課題として専攻科学生が担当）したものであり、個人ベースでも比較的写実的な描写が得られるようになっている。しかしながら、図 2 に示すような実際に使われている状態にある機械製品の描写には程遠いのが現状である。その理由の一つとして製品外観の経年変化が挙げられ、たとえば (a) のバイスや (b) のドリル研磨機では、掃除の際に手が触れられにくい窪んだ個所での変色が見られる。逆に (c) の操作ハンドルでは、手との接触のおこりやすい個所（この場合、ノブ部分やダイヤルの一部）が磨かれたような質感を持っている。これらの経年変化は、特に過酷な環境下で使用されているものに限られず、基本的には人工物、自然物を問わず全てのものにみられる。したがって、3D CG において、より写実的な表現のためには、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⁽¹⁾。これらを3D CGにおいて再現するために、以前から錆や塗装の剥がれを描いた画像を物体表面のテクスチャとして準備し、ポストプロセスによって合成することや、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、この手法は、経験的な要素が多く、また、多大な人手とコストがかかることから、映画産業など限られた分野でしか現実的ではない⁽²⁾。

これに対して、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⁽²⁾や、仏像表面の緑青の進展をシミュレーションする手法⁽³⁾を示している。これらの手法では、経年変化していく対象物を、人手を介することなく写實的に描写することが可能であるが、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ことが必要となる。Chengらは、より広い範囲の経年変化を再現するために、経年変化を生じさせる γ -tonと呼ぶ仮想的な粒子を用いる手法を提案している⁽⁴⁾。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(reflect)、跳返り(bounce)、流れ(flow)を経た後に物体表面に定着(settled)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大スケールの形状



(a) Valve parts

(b) Pens

Fig.1 Rendered Image



(a) Machine vise

(b) Drill sharpener

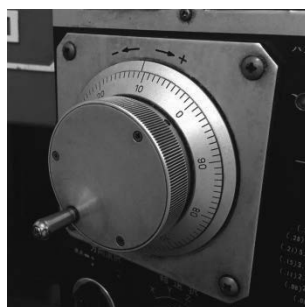


Fig.2 Actual Image

変化が再現できる。一方で、Luらはシミュレーションではなく、実物の3次元形状と外観を継続的に計測し、幾何形状が外観の経年変化に及ぼす影響を解析することでルールを抽出し、それを新たな物体に対して適用する手法を提案し、そのような外観テクスチャをContext-Aware Texturesと呼んでいる⁽⁵⁾。

本論文では、対象物として機械製品を例にとり、その外観の経年変化のシミュレーション手法の検討を行う。経年変化過程では、水分や油分の付着、移動、除去に伴う汚れパターンの形成と幾何形状の影響のみを取扱い、幾何形状が変化するような腐食や摩耗は取り扱わない。

3. ガラス表面の汚れパターンの再現

3. 1 ガラス表面の汚れパターンの形成

ここでは、図3に示すような、窓ガラス表面の汚れの再現をとりあげる。このような汚れのパターンは、ガラス表面と、空気中の砂塵、雨水などの相互作用に形成されている。汚れとしてみられるものには、水に含まれているケイ酸塩やカルシウムがガラス表面に固着したものや、砂塵そのものがある。特に前者は、白い鱗状のパターンを形成し、容易に除去できないことから地下水で洗浄を行う交通車輛において問題となっている⁽⁶⁾。

このような汚れは、

- (1) ガラス表面に、水分がランダムに付着する。
- (2) 水分は、重力および表面張力により周辺の水分と相互作用を生じ、水滴を形成(凝集)しようとする。
- (3) 同時に蒸発効果により、水分量は減少する。
- (4) ある程度の質量を持つ水滴が形成された場合、ガラス表面の砂塵は水滴とともに下方へ流される。
- (5) 一方で、水滴を形成できない水分量の場合、砂塵はその場にとどまる。

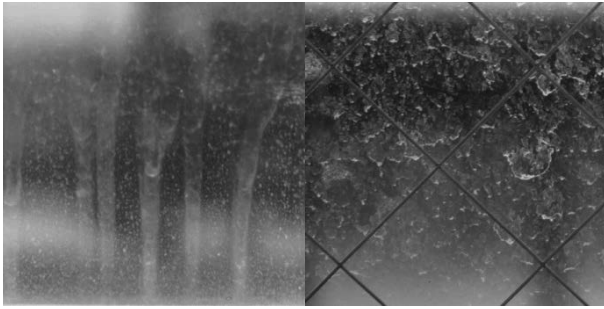
という過程を繰り返すことでパターンが形成されていると考えられる。このような過程はカオス性をもち、ここでは、セルオートマトン(Cellular Automaton, CA)を利用することでパターン形成過程の再現を試みる。

セルオートマトンは、場をセルと呼ばれる格子状に区切り、それぞれのセルの状態量を、隣接したセルとの局所的相互作用から定まる新たな状態量で更新していく。個々のセルは、近傍セルの状態量のみで記述される単純なルール(局所近傍則)により更新されており、場の全体に関する法則が与えられていなくとも大域的なふるまいを生成できる手法である⁽⁷⁾。工学的な応用例としては、閉鎖空間での避難流動を対象にした群集行動のモデル化⁽⁸⁾や、移流拡散現象を局所近傍則と遷移則で記述した物理現象のモデル化⁽⁹⁾などがみられる。

3. 2 セルオートマトンによる汚れパターン形成過程のモデル化

3. 2. 1 シミュレーション条件

セルオートマトンによるシミュレーションにあたっては、垂直で平滑なガラス表面を想定し、水分の流動は幾何学的形状の影響を受けないとする。ガラス表面は水平方向



(a) Pattern 1 (b) Pattern 2
Fig.3 Lime Scale on the Glass

N , 垂直方向 M に分割されたセルで表し, 状態量として水分量 w_{ij} ($i=1, \dots, N, j=1, \dots, M$), 砂塵の堆積量 d_{ij} ($i=1, \dots, N, j=1, \dots, M$) を持つ. また左上の格子を $i=1, j=1$ で表し, 左右の境界には周期境界条件を適用する.

セル間の局所相互作用については, 重力による水分量の移動と, 表面張力による水分量の凝集を考える. また, 一般的なセルオートマトンでは, 質量保存が成立つ現象を表現できない事から, 鈴木提案する非同期セルオートマトン手法⁽¹⁰⁾を用いて水分量の更新を行う.

(a) 重力による水分量の移動

重力によるセル間の水分量の移動については, 注目するセルに隣接する8つのセル(ムーア近傍)の水分量に注目する. 隣接セルそれぞれに対して重み係数 p_{ij} ($i=-1, 0, 1, j=-1, 0, 1$) を設定し, 一様乱数 q ($= [0, 1]$) によって決められた量だけ中心のセルに水分量が移動する. したがって, 時間 $t+1$ における中心セルの水分量 w_{IJ} は, 時間 t における状態量を用いて

$$w_{IJ}^{(t+1)} = w_{IJ}^{(t)} + \sum_{j=-1}^1 \sum_{i=-1}^1 qp_{ij}w_{I+i, J+j}^{(t)} \dots\dots\dots (1)$$

と表される. 近傍セルには中心セルに移動した水分量の残りがとどまる.

(b) 凝集による水分量の移動

場に分布している水分は, 表面張力によって凝集し, 水滴を形成しようとする. ここでは, 中心のセルの水分量が閾値 θ_f を超えた場合に, 近傍セルの水分量を全て中心に移動させる. したがって, 時間 $t+1$ における中心セルの水分量 w_{IJ} は, 時間 t における状態量を用いて

$$w_{IJ}^{(t+1)} = \begin{cases} w_{IJ}^{(t)} & (w_{IJ}^{(t)} < \theta_f) \\ w_{IJ}^{(t)} + \sum_{j=-1}^{J+1} \sum_{i=-1}^{I+1} w_{ij}^{(t)} & (\text{otherwise}) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

と表される. このとき, 近傍セルの水分量は全て0となる.

3. 2. 2 砂塵堆積過程

砂塵の挙動は, セルの水分量に応じて変化する. ここでは, 水分量がある範囲 θ_{d0} から θ_{d1} の場合に, そのセルに対応する砂塵は堆積していくとし, ある閾値 θ_d を超えた

場合にそのセルに対応する砂塵は水分によって流されるとする.

3. 3 シミュレーション結果

水平方向に $N=100$ 分割, 垂直方向に $M=100$ 分割した2次元空間において, セル状態量の更新を200回行う. 非同期型のCAであるので, 1回の場合の更新においては, 全セル数10000を近傍セル数9で除した個数のセルがランダムに選ばれ, 前節に示した重力および凝集による水分量の移動と砂塵堆積量の更新が行われる. この更新の前後においては, 全水分量は保たれる. これとは別に, 全体に対する水分の付着, 蒸発が各セルにランダムに行われる.

重力の影響については, 注目セルの水分量 w_{IJ} に対して, 図4のような重み p_{ij} を与え, 式(1)にしたがって水分量を更新させる. ここでは, 注目セルの真上のセルからの水分移動の確率を最も大きくし, 次いで上の左右のセルからの移動の確率をもたせている. 注目セルの左右及び下方からは水分の移動は生じない. 砂塵堆積については, 水分量が0.001~0.1の範囲にある時に増加するものとし, 流失に関する閾値は $\theta_d=0.5$ とする.

図5は, 凝集に関する閾値 θ_f として0.3, 0.5を与えたものである. 閾値 θ_f が小さい場合, 凝集がおこりやすく, 砂塵が流出しやすいことが分かる. 閾値を0.5とした場合, 実際の汚れ(図3)と類似のパターンが形成されることが確認された.

4. 物体形状の環境遮蔽による評価

前章では, セルオートマトンによって汚れパターン形成の再現を試みたが, 物体表面の幾何形状の影響は考慮していない. 一方で, 実物では, 窪んだ部分への汚れの堆積や, 凸な形状になっている部分での塗装の剥がれなどが観察される. ここでは, 経年変化に対する幾何形状の影響の評価のために, 環境遮蔽 (ambient occlusion) の利用を考える.

4. 1 環境遮蔽

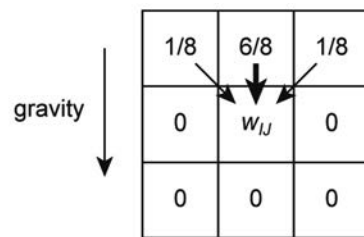
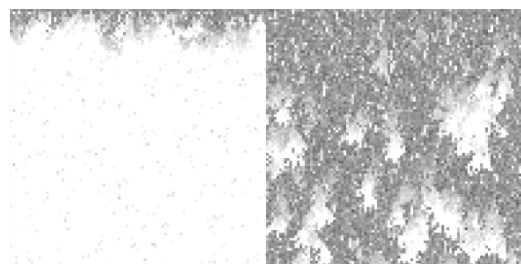


Fig.4 Weight for each Neighbor Cell



(a) Threshold $\theta_f = 0.3$ (b) $\theta_f = 0.5$

Fig.5 Simulated Dust Accumulation

環境遮蔽とは、3次元コンピュータグラフィックス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ものである。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、

$$A(\mathbf{x}, \mathbf{n}) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} V(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega})(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}) d\boldsymbol{\omega} \dots\dots\dots (3)$$

目点、法線ベクトルを表す。 $V(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega})$ は可視関数であり、注目点 \mathbf{x} から $\boldsymbol{\omega}$ 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 Ω は、一般に物体表面上の法線に対して半球とする⁽¹¹⁾。したがって、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に近づくこととなる。図6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。

3次元コンピュータグラフィックスでは、この環境遮蔽

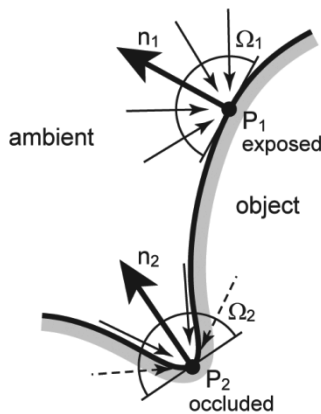


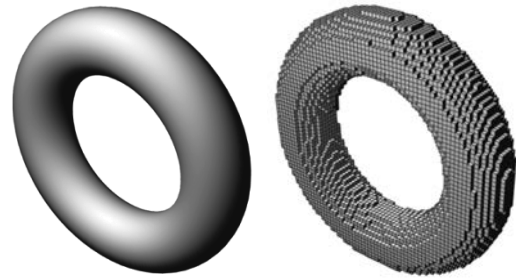
Fig.6 Concept of Ambient Occlusion

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ているが、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と考えられる。すなわち、物体表面の窪んだ部分は、環境への露出が少ない事から、堆積した塵、水分、油分などの汚れが除去されにくく、凸な部分は環境への露出が多い事から、他の物体との摩擦接触が生じやすく、塗装の剥がれや摩耗などが生じやすい。ここでは、この環境遮蔽を経年変化に対する幾何形状の影響の評価に用いることを検討する。

4. 2 空間のボクセル表現による環境遮蔽の評価

前節で述べた環境遮蔽の算出には、高速化を目指して様々な手法が提案されている⁽¹²⁾。ここでは、前章に示したセルオートマトンによる汚れパターンの再現との親和性を考慮して、対象とする物体と環境遮蔽の評価対象にボクセル表現を用いるものとする。

図7に示すように、3次元物体を小さな立方体の集合として離散的に表現し、この立方体の事をボクセル (voxel) と呼ぶ。ここでは、3次元空間内の各ボクセルの状態量と



(a) Torus (b) Voxelized torus

Fig.7 Concept of Voxelized Object

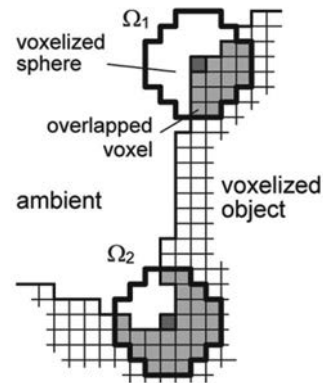


Fig.8 Voxel-based Ambient Occlusion

して、物体の体積が存在するかどうかの2値のみを考える。

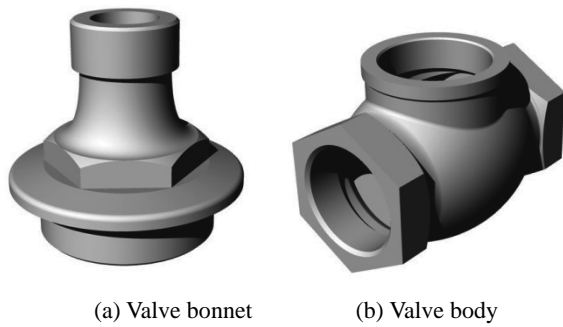
ボクセル表現された物体に対する環境遮蔽の評価は図8に模式的に示すように、ある点の周囲環境としてボクセル表現された仮想的な球を用いる。ここで、3次元空間内の立方体の2値の状態量として $o_{ijk} (= \{0, 1\})$ を考え、値が1のときに物体が存在、0のときに存在しないとする。また、式(3)における積分範囲 Ω は、半径 R の仮想的な球とし、各辺の長さが $2R+1$ の立方体内で2値の状態量 $s_{ijk} (= \{0, 1\})$ によって表現する。空間内の点 P_{ijk} における環境の遮蔽度 c_{ijk} は、その周囲で物体と仮想球のボクセルがともに存在する場所の比率、

$$c_{ijk} = o_{ijk} \frac{\sum_{i=-R}^R \sum_{j=-R}^R \sum_{k=-R}^R o_{I+i, J+j, K+k} s_{ijk}}{\sum_{i=-R}^R \sum_{j=-R}^R \sum_{k=-R}^R s_{ijk}} \dots\dots\dots (4)$$

と表現される。なお、ここでは大域照明における環境遮蔽を表現するために用いられる斜入光特性(コサイン項)は考慮しない。また、前節の式(3)で定義された環境遮蔽係数とは逆に、 c_{ijk} の値は、周囲環境に遮蔽されているほど1に近づくものとなり、環境遮蔽度と呼ぶこととする。

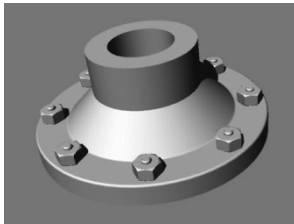
4. 3 実装及び評価

経年変化に対する幾何形状の変化の評価例として、図9の3つの部品((a)バルブ・ボンネット、(b)バルブ弁箱、(c)フランジ管継手)をとりあげる。これらの3次元オブジェクトに対して、幅、高さ、奥行き最大の寸法の1/256



(a) Valve bonnet

(b) Valve body



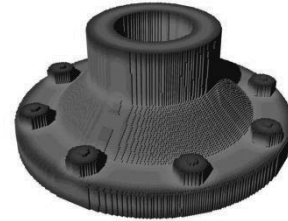
(c) Flange joint

Fig.9 Target Object



(a) Valve bonnet

(b) Valve body



(c) Flange joint

Fig.11 Evaluated Result

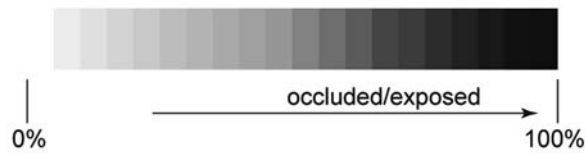


Fig.10 Assigned Color



(a) Bolt head

(b) C-clamp

Fig.12 Actual Rust on the Rubbed Area

を1辺の長さとした立方体によってボクセル化を行い、半径12の仮想球によって環境遮蔽度を求めた。これらの物体表面上のボクセルに対して求められた環境遮蔽度に応じて白色から赤錆を想定した色を割当てたものを図10に示す。

図11(a)のバルブ・ボンネットは、環境遮蔽度の低いボクセルに対して白、高いボクセルに対して濃色を割当てている。これは、物体表面上で窪んでいるところでは、拭き掃除等に対して水分や油分、塵などが除去されにくく、錆や汚れなどが発生、残留しやすい状態(図2(a),(b))に対応している。逆に、図11(b),(c)では、環境遮蔽度の高いボクセルに対して白、低いボクセルに対して濃色を割当てている。この表現は、図12に示すような経年変化に対応しており、物体表面の凸な部分で、摩擦による塗装や表面被膜の剥がれ等が起りやすく、その結果、錆が生じやすくなっているような現象を表しているとみなせる。

5. おわりに

経年変化を伴う機械製品の3D Computer Graphicsによる写実的表現を目的とし、平板上の汚れ堆積パターン形成の再現と、ボクセル表現による環境遮蔽評価手法の提案を行った。

平板上の汚れ堆積パターンは、水分の付着、移動、蒸発と砂塵の付着と流出が繰り返されることで形成される。この現象に対して、セルオートマトンを用い、セル間の水分の

移動に対してヒューリスティックに与えた局所相互作用と遷移則を適用することで、実際の汚れパターンと定性的に類似したパターンが再現できることを示した。また、経年変化過程では、物体表面のそれぞれの箇所がその形状によって環境へどのように露出されているかが影響を与える。ここでは、ボクセル表現された3次元物体に対して環境遮蔽の評価を行う手法を示し、経年変化に対する幾何形状の影響を簡便に得られることを示した。これらの手法は格子状に区切られた領域を取扱うことに共通点があり、セルオートマトンの手法により3次元物体の表面上の汚れパターンを再現することが次の課題である。また、現状では定性的にしか行っていない、実物との比較手法の確立も課題となる。

なお、本研究における平板上の汚れ堆積パターンのセルオートマトンの再現に関するソフトウェアの実装については、奈良高専 石橋拓也君、ボクセル表現による環境遮蔽の評価に関するソフトウェアの実装については、奈良高専 灰塚興君の協力を得た。記して謝意を表する。

文 献

- (1) Merillou, S. and Ghazanfarpour, D., "A Survey of Aging and Weathering Phenomena in Computer

- Graphics,” *Computers & Graphics* 32, (2008), pp.159-174.
- (2) Dorsey, J., Pedersen, H.K., and Hanrahan, P., “Flow and Changes in Appearance,” *ACM SIGGRAPH 1996*, (1996), pp.411-420.
- (3) Dorsey, J. and Hanrahan, P., “Modeling and Rendering of Metallic Patinas,” *ACM SIGGRAPH 1996*, (1996), pp.387-396.
- (4) Chen, Y., Xia, L., Wong, T-T., Bao, H., Guo, B., and Shum, H-Y., “Visual Simulation of Weathering By g-ton Tracing,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 24.3 (2005), pp.1127-1133.
- (5) Lu, J., Georghiadis, A.S., Glaser, A., Wu, H., Wei, L-Y., Guo, B., Dorsey, J., and Rushmeier, H., “Context-Aware Textures,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 26.1 (2007): 3.
- (6) 志知哲也, 勝又健一, ナノシート光触媒コーティングガラスの開発, 表面技術, Vol.61, No.1, (2010), pp.30-35.
- (7) 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋, セルオートマトン法—複雑系の自己組織化と超並列処理, (1998), 森北出版.
- (8) 大鑄史男, 小野木基裕, セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, 51, (2008), pp.94-111.
- (9) 鳥羽康介, 板垣靖, 森下信, セルオートマトンによる移流拡散現象のモデル化, 日本機械学会 D&D 機械力学・計測制御講演論文集, No.01-5, (2001), #228.
- (10) 鈴木知明, 質量保存則を有する非同期セルオートマトンの空間パターン形成と遺伝的アルゴリズムによる探索, 情報処理学会研究報告, 2003-MPS-047, (2003), pp.13-16.
- (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) 服部智仁, 久保尋之, 森島繁生, 遮蔽度の曲率近似によるアンビエントオクルージョンの局所照明モデル化, 情報処理学会研究報告, Vol.2010-CG-138, No.13, (2010), pp.1-6.