

# Visual simulation of crack and bend generation in deteriorated films coated on metal objects: Combination of static fracture and position-based deformation

石飛 晶啓<sup>†</sup>

中山 雅紀<sup>‡</sup>

藤代 一成<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>慶應義塾大学 大学院理工学研究科    <sup>‡</sup>慶應義塾大学 理工学部

E-mail: {akinori.ishitobi, nakayama, fuji}@fj.ics.keio.ac.jp



図1 提案手法を用いて三次元モデルにウェザリングを施した結果. 左から順に劣化が進行していく. 本手法は, シミュレーション進行中にメッシュを再分割しないが, 均質かつランダムな三角ポリゴンメッシュで構成されるモデルを対象とすることで自然な形状の亀裂が生成できる

## 概要

風雨などの作用による経年劣化を表現する技法であるウェザリングは, 写実的なCGの描画に欠かせないものであり, 数多くの手法が提案されている. 特に日常生活に偏在する金属は代表的な研究対象であるが, 現実的なシーンを想定するならば, 金属に塗布された防腐剤の経年劣化も表現すべきである. そこで本研究では, 金属物体上の塗膜を対象としたウェザリングを提案する. 提案手法では塗膜をポリゴンメッシュで表現し, 塗膜内部における力の釣合いに基づいて破壊判定を行う破壊シミュレーションと, 幾何学的な制約に従って頂点を移動させる位置ベースの湾曲シミュレーションを組み合わせることで塗膜を変形させる. 本手法により, マテリアルの操作だけでは表現が難しい立体的な変形を伴う塗膜の経年劣化が再現できる.

本研究は文献[1, 2]として刊行された. また, 文献[1]での発表内容はVC論文賞 (2nd prize), CGVI優秀研究発表賞, CGVI学生発表賞を受賞している.

## 1 背景と目的

現実世界において経年劣化は普遍的な現象であり, それに伴ってほとんどの物体は外観も変化していく. さらに, 物体を見る人にとって, 経年劣化に伴う外観の変化は, 長期的な時間経過を印象付けるものであり, たとえ初めて見

る対象であっても, その劣化の度合いは物体の“年齢”として認識される重大な要素である. 一方で, CGで描画される仮想世界には, 一般に経年劣化の影響を受けないという現実世界との本質的な差異がある. そのため, CGのオブジェクトに“年齢”を付与し, 現実世界との乖離を緩和させるためには, 作品に対して積極的に劣化を施す技法である, ウェザリングを施す必要がある.

特に金属の腐食は現実世界において最も身近な経年劣化の代表例であり, CGにおけるウェザリング手法も特に多く提案されている. ところが, 劣化しやすい金属には防腐剤が塗布されることがほとんどであり, 金属のウェザリングのみを使用して効果的に経年劣化を表現できるシーンは限定されてしまう. また, 既存のウェザリング手法の多くは物体の質感の変化を重視しており, 変形を扱っているものは少ない. テクスチャ空間上の亀裂生成の結果をもとに, 変位マップやポリゴンメッシュの操作によって岩のひび割れや塗膜の剝離を表現する手法は存在しているが, 変形は表面的なものにとどまっている.

本研究は, 我々の先行研究[3]を発展させ, 亀裂の生成と塗膜の湾曲を伴う経年劣化を表現することを目的とする. 図1に示すように, 本手法によって, 塗膜における立体的な変形のシミュレーションが可能であり, 手動ではモデリングが難しい複雑なモデルが生成できる.

## 2 関連研究

経年劣化は普遍的な現象であり、Mérillouらによる調査[4]で示されているように、それをCGで表現する試みは多く存在する。その代表例として、Dorseyら[5]は緑青の生成過程を再現している。他にも金属を対象としたウェザリング手法は多く提案されており、金属の孔食[6]、海中における錆の生成[7]などが知られている。一方で塗膜を対象としたものは多くない。Paquetteらの手法[8]やGobronらの手法[9]は、亀裂の生成手法としての側面が大きく、塗膜の湾曲は亀裂の近傍のみで生じる表面的なものにとどまっている。我々の先行研究[3]では、亀裂と剥離の両方を表現しているが、枝分かれした亀裂や反り返るような湾曲を含む、現実世界でよく見かける剥離現象は再現できない。

固体変形の代表的なシミュレーション手法として有限要素法 (FEM: Finite Element Method) [10]が挙げられる。FEMは物理的に厳密な結果を得られるものの、複雑で支配方程式の構築が困難な現象を扱う場合には向かない。一方で、位置ベース動力学 (PBD: Position Based Dynamics) [11]は、自然法則ではなく幾何的な制約条件に基づいて頂点を移動させる。そのため、物理的正確さを損なう場合はあるものの、変形や運動を少ない計算量で安定にシミュレーションすることができるという特長がある。以上をふまえ、提案手法ではPBDによって塗膜の湾曲を表現する。

## 3 提案手法

本手法では塗膜を三角ポリゴンメッシュでモデル化し、これを加工することで経年劣化を表現する。また、ポリゴンメッシュは頂点、面、半稜線の三種類の幾何要素から成るハーフエッジ構造で構成する。以降では説明を簡単にするため、隣接する半稜線の組のことを稜線とよぶ。

第3.1小節で説明する湾曲シミュレーションでは、劣化の進行に依らず継続的にモデルを湾曲させる。ただし、処理の対象となる領域は破壊が進行するごとに変更される。破壊シミュレーションでは、図2に示すように分離、断裂、剥落の三段階で劣化を進行させ、次の段階に進むことを破壊とよぶ。破壊判定は静力学的な力の釣合いに基づいて計算し、破壊発生時のパラメータ値の変更やポリゴンの位相操作を行う。破壊時の処理は第3.2小節で述べる。さらに、変形以外の劣化として黒ずみと流れ錆の二種類の汚れを表現する。汚れ表現の方法は第3.3小節で言及する。

### 3.1 湾曲シミュレーション

湾曲シミュレーションのベースとなるPBD[11]の概要を説明する。PBDは複数の頂点に対して幾何的な制約条件を与え、条件が満たされるように頂点の位置を反復して修正する手法である。 $N$  個の頂点に関する制約条件は、それぞれの位置ベクトルの関数  $C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N)$  で表され、制約条件が満たされているときに値が0となるように定義する。このとき、位置  $\mathbf{p}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) の修正量  $\Delta \mathbf{p}_i$  は、各頂点の

質量の逆数を  $w_i$  として、以下のように計算される：

$$\Delta \mathbf{p}_i = -s w_i \nabla_{\mathbf{p}_i} C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N)$$
$$s = \frac{C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N)}{\sum_j w_j \|\nabla_{\mathbf{p}_j} C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N)\|^2}$$

端点の位置が  $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$  である線分の長さを目標値  $d$  に保つための制約  $C_{\text{length}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$  は以下のように定義される：

$$C_{\text{length}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \|\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2\| - d.$$

以降では、距離を制御するための制約を長さ制約とよぶ。

続いて図3(a)に示すように、隣接するポリゴンのなす角  $\phi$  が目標値  $\phi_0$  となるように制約を設定する。ポリゴンが共有している稜線の端点の位置を  $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ 、それ以外の頂点の位置を  $\mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4$  とする。各ポリゴンにおける法線ベクトル  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$  を利用すれば、 $\phi = \arccos(-\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2)$  によって  $\phi$  が求められる。そのため、角度を制御するための制約条件として  $C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4) = \phi - \phi_0$  が考えられる。しかし、 $\phi$  の値域は  $[0, \pi]$  であり、山折りと谷折りの区別ができない。そのため、 $\phi_0 < \pi$  として制約を定義すると、意図した方向と逆に曲がる現象が発生する。そこで、図3(b)に示すように、 $\mathbf{n}_{\text{neutral}} = (\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2) / \|\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2\|$  を中立軸方向として、 $\mathbf{n}_{\text{neutral}}$  と各ポリゴンのなす角  $\phi_1, \phi_2$  がそれぞれ  $\phi_0/2$  となるように制約条件を二つ設定する。これにより、 $0 < \phi_0 < \pi$  で谷折り、 $\pi < \phi_0 < 2\pi$  で山折りとなり、曲げる方向を指定できるようになる。以降では、角度を制御するための二つの制約の組を曲げ制約とよぶ。

ポリゴンメッシュにおける全稜線に対して、自身の長さを維持するような長さ制約と、自身を挟むポリゴンのなす角を小さくするような曲げ制約を適用することで、薄膜の湾曲を表現できる。ただし、本研究では経年劣化に伴う塗膜の剥離を表現するため、次小節で述べる通り、破壊の状態に応じて段階的に制約を適用する。

### 3.2 破壊シミュレーション

塗膜の剥離をポリゴンメッシュで表現するため、図4に示す基本モデルを導入する。このモデルでは、隣接するポリゴンが互いに畳むように力をかけるとともに、引き合うような張力もかける。初期状態では頂点が基板に付着しているが、付着力が徐々に弱まることで頂点が基板から分離する。また、張力は徐々に大きくなり、ポリゴンどうしをつなぐ結合力を上回るとポリゴンのペアが断裂する。

基本モデルを実装するため、モデルの各幾何要素に力学パラメータを設定する。頂点には基板から受ける付着力、面には半稜線どうしの結合を断つための張力、そして半稜線にはポリゴンをつなぎとめる結合力と頂点を基板から剥がす揚力を、それぞれ設定する。

ある頂点の付着力が周囲の半稜線から受ける揚力の総和を上回った場合に、その頂点が分離したと判定する。初期状態における付着力の分布はPerlinノイズ[12]に従うように設定する。これは、塗りのむらなどによってばらつきがありながらも連続的に分布する、現実世界の付着力分布を再

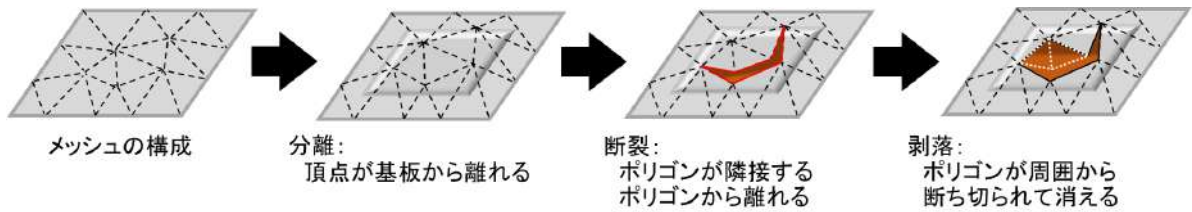


図2 本手法における剥離の進行. 次の段階に進むか否かは静力学的な破壊条件によって判定される

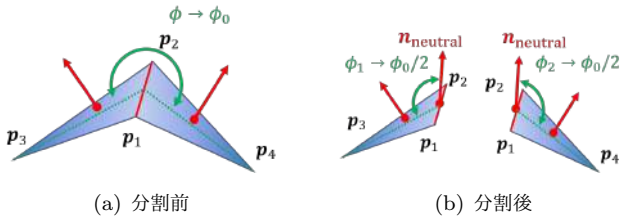


図3 角度制約の分割方法. 各ポリゴンの法線ベクトルの平均から中立軸方向 $n_{neutral}$ を定め, この方向と各ポリゴンがなす角 $\phi_1, \phi_2$ を制約の対象とする

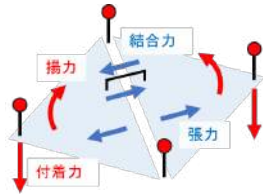


図4 基本モデルの概要. 赤い矢印は分離判定で比較する力, 青い矢印は断裂判定で比較する力をそれぞれ表す

現するためである. 一方で, 各頂点における揚力は経過時間に対して線形に減少する. 頂点が分離した場合には, 分離した頂点に揚力を加えていた稜線 (揚力を加えていた半稜線とそのペア) に曲げ制約を設定する. また, 分離した頂点に接続している稜線に長さ制約を設定する. これにより, 分離した頂点は基板から浮き上がるように移動する.

ある稜線において, その両端が分離しており, なおかつ, それを挟む二枚の面の張力が結合力を上回った場合に, 稜線は断裂したとみなす. 張力は初期状態では全ての面で等しく設定するが, 結合力は一部の稜線で極端に小さく設定する. これは現実の材料に存在し, 多くの場合に破壊の起点となる微小な欠損を再現するものである. また, 張力は時間に対して線形に増加させるのに対し, 結合力は低下させる. 断裂した稜線に設定されていた曲げ制約は削除する. 断裂した稜線の端点が断裂した別の稜線と接続している場合, この頂点を同じ位置に複製し, 断裂箇所を越えて頂点が参照されないよう, 位相情報や制約条件を更新する. また, 断裂した稜線を構成する半稜線が共有する長さ制約を複製し, 各半稜線に個別の長さ制約を設定する.

ある面について, 周囲の三本の半稜線が全て断裂した場合に剥落したとみなす. 剥落した面と周囲の半稜線を削除する. また, 削除した半稜線に設定されていた長さ制約を削除する.

### 3.3 汚れの表現

本小節ではIshitobiらの手法[3]に基づいて, 塗膜表面に表れる流れ錆と黒ずみを表現する方法を述べる.

流れ錆を表現ために, 各頂点に錆の量を記録し, 剥離箇所から塗膜表面に沿って下方へ値を伝播させる. そして錆の量に応じて頂点カラー, 反射率を操作する. 本手法においては湾曲シミュレーションによって亀裂の幅が広がられていくため, 剥落時ではなく断裂発生時に錆の流出を開始させる必要がある. そのため亀裂の輪郭に沿って周囲よりも低い箇所, すなわち亀裂の谷間を錆の流出源に設定する.

同様に黒ずみでも, 各頂点で塵の量を計算し, その量に基づいて頂点カラーを黒くするとともに反射率を低下させることで, モデル全体の質感を変化させる. 現実世界においては, 物理・化学的作用が黒ずみ方に影響するが, 尤もらしい塵の分布を効率よく生成するため, 本手法では各頂点における幾何学量のみから塵の堆積速度を計算する. 各頂点で参照する幾何学量は, 高さ, 法線方向, 曲率の三種類であり, 高さが高く, 法線方向が重力方向に近く, 凸になっているほど堆積しにくく設定する.

## 4 結果

シミュレーションは Intel Core i9-10980 CPU, Intel UHD Graphics, 32.0 GB RAM を搭載したマシンを使用して, Unity 2019.4.14f1 上で実行した.

我々の先行研究[3]と, 本手法でそれぞれウェザリングを実行した結果を図5に示す. 我々の先行研究においては亀裂が剥落箇所の近傍にしか現れていないのに対し, 本手法における破壊シミュレーションでは剥落箇所から離れた位置へ伸びた亀裂を生成できている. さらに, 湾曲シミュレーションにより, 塗膜が反返っていく様子が表現できていることに加え, 亀裂の幅が広げられるために剥落箇所と亀裂が自然に接続されている.

ソリッドモデルに本手法を適用した結果を図1に示す. 閉曲面かつ複雑な形状のモデルにおいても, 単純な曲面で実行した場合と同様のシミュレーションが実行可能である.

平板, 曲板, Stanford Bunnyの三種類のモデルに対して本手法を適用した結果を図6, その実行時間を表1にそれぞれ示す. 実行時間はポリゴン数に従って増加するが,  $10^4$ ポリゴンであればおよそ10 fpsほどで実行できる.



(a) 我々の先行研究[3]



(b) 本手法

図5 我々の先行研究[3](a)と本手法(b)の実行結果の比較



図6 実行時間を測定するために三種類のモデルに対してウェザリングを施した結果。実行時間を表1に示す

## 5 まとめと今後の課題

本研究では、力の釣合いを計算する破壊シミュレーションと位置ベース変形を用いた湾曲シミュレーションを組み合わせるにより、変形を伴う塗膜の経年劣化を表現した。破壊シミュレーションでは、塗膜内部の力の釣合いに関する簡単な計算によって破壊の発生を判定し、ポリゴンメッシュの位相操作によって、自然な形状の亀裂を生成できることを確認した。さらに、亀裂の発生箇所から塗膜を湾曲させることで、現実の塗膜に近い剥離を再現した。

今後の課題としては、現実世界における物性値を考慮したパラメタ値の設定が挙げられる。特にシミュレーションによる劣化が、実際にはどれほどの時間が経過した場合に対応するかを明確にする必要がある。また、三角ポリゴンごとに剥落を判定しているため、複数のポリゴンで構成される塗膜片が基板から離れた状態で残存する可能性がある。そのため、亀裂で囲まれた領域ごとに剥落を判定する処理を実現すべきである。

表1 三種類のモデルに対するウェザリングの実行時間

	平板	曲板	Stanford Bunny
ステップ数	1,000	1,000	1,000
ポリゴン数	3,005	3,012	10,000
実行時間 (秒)	15.4	16.7	65.8

## 謝辞

本研究の一部はJSPS科研費基盤研究(A)21H04916及びJSPS特別研究員奨励費21J21729の支援により実施された。

## 参考文献

- [1] 石飛 晶啓, 中山 雅紀, 藤代 一成, “経年劣化に伴う金属物体上の塗膜の亀裂・湾曲表現—静力学的破壊判定と位置ベース変形による準静的過程のビジュアルシミュレーション—”, *Visual Computing 2022 発表予稿集*, pp. 2:1–2:6, Oct. 2022.
- [2] A. Ishitobi, M. Nakayama, and I. Fujishiro, “Visual simulation of crack and bend generation in deteriorated films coated on metal objects: Combination of static fracture and position-based deformation,” *Vis. Comput.*, vol. 39, no. 8, pp. 3403–3415, Aug. 2023.
- [3] —, “Visual simulation of weathering coated metallic objects,” *The Visual Computer*, vol. 36, no. 10, pp. 2383–2393, August 2020.
- [4] S. Mérillou and D. Ghazanfarpour, “A survey of aging and weathering phenomena in computer graphics,” *Computers & Graphics*, vol. 32, no. 2, pp. 159–174, January 2008.
- [5] J. Dorsey and P. Hanrahan, “Modeling and rendering of metallic patinas,” in *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, August 1996, pp. 387–396.
- [6] S. Merillou, J.-M. Dischler, and D. Ghazanfarpour, “Corrosion: Simulating and rendering,” in *Proceedings of the Graphics Interface 2001 Conference*, June 2001, pp. 167–174.
- [7] Y.-X. Chang and Z.-C. Shih, “The synthesis of rust in seawater,” *The Visual Computer*, vol. 19, no. 1, pp. 50–66, March 2003.
- [8] E. Paquette, P. Poulin, and G. Drettakis, “The simulation of paint cracking and peeling,” in *Graphics Interface 2002 Conference Proceedings*, May 2002, pp. 59–68.
- [9] S. Gobron and N. Chiba, “Simulation of peeling using 3d-surface cellular automata,” in *Proceedings of Ninth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, October 2001, pp. 338–347.
- [10] M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, and L. J. Topp, “Stiffness and deflection analysis of complex structures,” *Journal of the Aeronautical Sciences*, vol. 23, no. 9, pp. 805–823, September 1956.
- [11] M. Müller, B. Heidelberger, M. Hennix, and J. Ratcliff, “Position based dynamics,” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 18, no. 2, pp. 109–118, April 2007.
- [12] K. Perlin, “Improving noise,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 21, no. 3, pp. 681–682, July 2002.