

## リアルタイム破壊シミュレーションにおける亀裂表現の改良

熊田 和太† 藤澤 誠† 三河 正彦†

† 筑波大学

## 1 はじめに

現在、多くの映画やゲームなどのエンターテインメントコンテンツにおいてコンピュータグラフィックス (CG) による表現が多く用いられている。物体の破壊シーンもそのうちのひとつであり、アクション映画やアクションゲームなどには欠かせない表現となっている。特に、ゲームなどのリアルタイムアプリケーションでは、破壊対象オブジェクトを、破片を表すエフェクトに置き換えて破壊を表現するエフェクト置換手法、シミュレーション前に予めオブジェクトを切り分けておいて扱う事前分割手法、定義されている分割パターンという図形に基づいてオブジェクトを切り分ける動的分割手法など、物理的な正確さよりも実行効率を重視した方法が主に用いられている。

現実の破壊現象を観測すると、物体が壊れるときは破壊発生位置から徐々に亀裂が進展していき、元のオブジェクトから分離した部分が破片形状として生成されるはずである。実際には亀裂の進展は非常に速いものであるが、CGでの破壊シーンには継続的な力で徐々に亀裂が進んだり、破壊をスローモーションで表現するときがあり、この亀裂の進展の表現が重要となる。しかし、現在の、エフェクト置換手法、事前分割手法、動的分割手法などのリアルタイム破壊シミュレーションを実現している従来手法は、破壊が発生した直後のフレームには全ての破片形状が生成されており、亀裂の進展については考慮されていない。本論文では、従来の動的分割手法にグラフ構造の発想を取り入れることで、破壊対象オブジェクトを徐々に破片形状へと分離させる段階的な破壊表現手法を提案する。

## 2 提案手法

提案手法の全体像：本提案手法では、Müller ら [1] の動的分割手法と同じく、オブジェクトの分割形状を定義する分割パターンとしてボロノイ図を用いる。ボロノイ図の母点のサンプリングには Poisson Disk Sampling を採用し、Bridson の方法 [2] を用いることで高速に生成する。ボロノイ図の頂点とボロノイ辺をそれぞれグラフのノード (節点) とエッジ (枝) として捉え、破壊開始位置のノードから分離判定をグラフに沿って伝播させていくことで、各ボロノイ点 (ノード) の分離するタイミングをずらして段階的な破壊を実現する。

本研究では、複数のグラフ構造で提案手法を検証した。

手法の全体の流れを以下に示す。

1. 分割パターンの定義
2. 分割パターンによる破片形状の生成
3. 破片形状への段階的な分割

手順 3 が本研究の提案部分となる。この部分では、まず、破壊対象オブジェクトに物体を破壊する力が加えられたとき、力を加えられた位置に最も近いノードを根ノードとする。シミュレーションの毎ステップで破壊伝播処理を行い、根ノードから繋がる各ノードへ分離判定を伝播させていき、その分離情報に基づいて破片形状への分離を行うことで段階的な破壊を表現する。

単純重み付き無向グラフを用いた段階的な破壊表現：分割パターンとして定義されたボロノイ図のボロノイ辺の幾何学的距離をエッジの重みとして、ボロノイ点の隣接関係から単純重み付き無向グラフを構築する。一度の破壊伝播処理では、ユーザ定義の伝播距離  $\Delta d$  の分だけグラフの探索を進めるものとする。そして、破壊伝播処理が  $n$  回行われたとき、根ノードから見て現在どこまで破壊が進んでいるのかを総伝播距離  $sum(d) = n\Delta d$  と表す。シミュレーションの毎フレームで破壊伝播処理を行い、根ノードから見た最短経路値が  $sum(d)$  を下回ったノードについて分離処理を行う。このときの各ノードの最短経路値はダイクストラ法で求めるものとする。以上の流れで、破壊開始位置の根ノードに近い点から優先して分離させていく段階的な破壊表現が可能となる。

また、物体に加えられた力の向きとエッジの延びる方向を考慮して、各エッジの重みを修正することで、加えられた力に対して、破壊の伝播のしやすい方向を定義することができる。つまり、破壊対象の物体に、力に対してどの方向に割れやすいかという属性を与えることができる。ここでの、新しい重み  $W_{new}$  を、元の重み  $W_{org}$  と係数  $C$  を用いて、式 (1) で表す。

$$W_{new} = W_{org} \times C \quad (1)$$

エッジの延びる方向を  $\vec{E}$ 、加えられた力の方向を  $\vec{F}$  として表し、どちらのベクトルも正規化済みであるとき、係数  $C$  はユーザ定義の 3 つのパラメータ  $\alpha, \beta, \gamma > 0$  を用いて、式 (2) で求める。

$$C = \begin{cases} (\alpha - \beta) \times \vec{E} \cdot \vec{F} + \beta & (0 \leq \vec{E} \cdot \vec{F} \text{ のとき}) \\ (\beta - \gamma) \times \vec{E} \cdot \vec{F} + \beta & (\vec{E} \cdot \vec{F} < 0 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2)$$

Visual Quality Improvement for Real-time Fracture Simulation  
Kazuhiro KUMADA†, Makoto FUJISAWA† and Masahiko  
MIKAWA†

†University of Tsukuba

このときのパラメータ  $\alpha, \beta, \gamma$  は図1に示すように、 $\vec{F}$  と  $\vec{E}$  の方向が一致するときに  $C = \alpha$ 、 $\vec{F}$  と  $\vec{E}$  の方向が直交するときに  $C = \beta$ 、 $\vec{F}$  と  $\vec{E}$  の方向が正反対のときに  $C = \gamma$  とするためのものである。以上の式 (1) と式 (2) より、 $W_{new}$  が求められる。

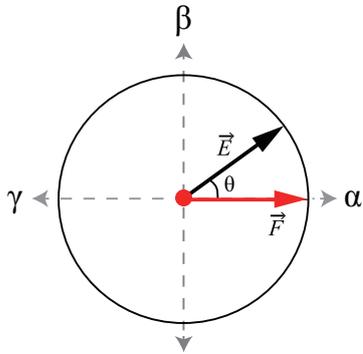


図 1: パラメータ  $\alpha, \beta, \gamma$  と各ベクトルの関係

破断点を用いた段階的な破壊表現：グラフによって、各ノードに分離判定を伝播させていく上記の方法では、エッジ上で亀裂がどこまで進んでいるかを表すことができなかったため、ここでは新しい破断点モデルを提案する。破断点とは根ノードから発生し、グラフに沿って伝播していく点であり、破断点が通過することで分離判定が行われる点であると定義する。破断点は別のノードに到達するたびに分岐して各エッジごとに新たに生成されるものとし、同一のエッジ上で2つの破断点がぶつかるときはその2つの破断点を削除し、そのエッジの分離処理を行うものとする。破断点とノードを結ぶ線分、もしくはポロノイ面上の破断点とノードで構成される破断面を描画することで、2D,3D どちらの場合でも連続的に進行する破壊を表現できる。

### 3 実験結果

2D シミュレータ上で重み付きグラフ、破断点モデルのそれぞれで段階的な破壊を行った実験結果を示す。すべての結果の図は、緑色で描画されている物体が元オブジェクトを表しており、黄色で描画される物体が元オブジェクトから完全に分離した破片形状を現している。

重み付きグラフを用いた実験では、パラメータ  $\alpha, \beta, \gamma$  を変えた2種類(図2, 図3)を検証している。どちらの実験にも同一の分割パターンを用いており、どちらのオブジェクトにも上部から鉛直下方向の力を加えている。図2ではパラメータを  $(\alpha, \beta, \gamma) = (2.0, 0.2, 1.0)$  と設定しており、力と同一方向には伝播しにくく、力と直交する方向に伝播しやすい結果が得られた。対して、 $(\alpha, \beta, \gamma) = (0.7, 2.5, 1.0)$  と設定した図3では、力と同一方向に伝播しやすいものの、力と直交する方向には伝播しにくい結果が得られた。これらの結果から、パラメータ  $\alpha, \beta, \gamma$  による重み修正の効果が十分に認められる。

破断点モデルを用いた実験結果(図4)では、破断点と

ノードを結ぶ線分を追加で描画しており、破片形状への分離が行われなくとも、亀裂がどこまで進展しているかを明確に捉えることができる。

いずれの結果も破片形状の分離するタイミングにずれが生じており、提案手法によって、段階的に進行していく破壊を実現できている。また、計算環境はプロセッサ:1.7GHz Intel Core i5, メモリ:4GB 1600MHz DDR3 であり、この環境において、全ての結果はリアルタイム (30fps 以上) で動作している。

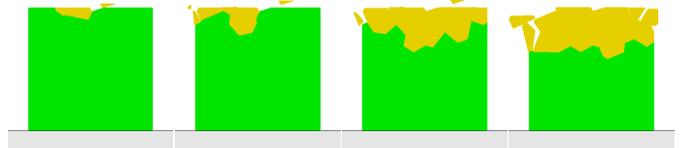


図 2:  $(\alpha, \beta, \gamma) = (2.0, 0.2, 1.0)$

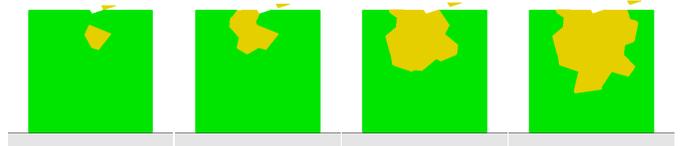


図 3:  $(\alpha, \beta, \gamma) = (0.7, 2.5, 1.0)$

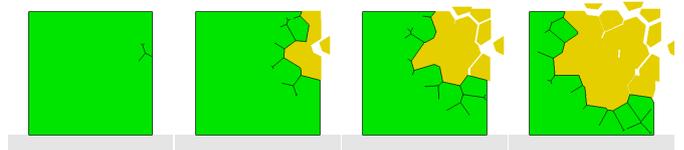


図 4: 破断点モデルによる段階的な破壊

### 4 まとめと今後の課題

本論文では、従来の動的分割手法にグラフ構造を取り入れることで、亀裂の進展を考慮した段階的な破壊を行う手法を開発した。また、グラフの構成法を調整することで、伝播の課程をある程度制御できることを実験結果で示した。破断点モデルにより、亀裂そのものを可視化することにも成功している。今後の課題として、動的にグラフを再構成する方法の検討、新たなグラフ構成法の開発、破断点モデルによって得られた亀裂情報の効果的な可視化手法の検討などが挙げられる。

### 参考文献

- [1] M. Müller, N. Chentanez, and T. Y. Kim, "Real time dynamic fracture with volumetric approximate convex decompositions", ACM Transactions on Graphics(TOG) - SIGGRAPH 2013 Conference, Vol. 32, No. 4, pp. 115:1-115:10, 2013.
- [2] R. Bridson, "Fast poisson disk sampling in arbitrary dimensions", In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007 sketches, p. 22:1, 2007.