形状の特徴や動的な変形を考慮した リアルタイム 3DCG における輪郭線の誇張表現手法

Shape Oriented Dynamic Line Drawing for Deformable Object in Real-Time 3DCG

松尾隆志[†], 正会員 三上浩司^{††}, 渡辺大地^{††}, 正会員 近藤邦雄^{††}

Takashi Matsuo[†], Koji Mikami^{††}, Taichi Watanabe^{††} and Kunio Kondo^{††}

Abstract In two-dimensional (2D) animation, the thickness of object outlines and contour lines is often varied to emphasize or exaggerate the shape of the object. Adding a 2D touch to three-dimensional computer graphics (3DCG) animation using toon-rendering is common, but existing techniques cannot achieve varying line thickness. This paper proposes a method of recreating the effect of varying the outline and contour line thicknesses based on the object shape in real-time 3D environments such as video games. Our method focuses on exaggerating the thickness of lines where the target polygon is curved. Furthermore, by using a backface polygon of the target polygon, we are able to create a continuous outline of the object, thus recreating a closed outline of the object with varying line thickness.

キーワード: 3DCG, トゥーンレンダリング, 輪郭線, 誇張表現, 曲率

1. ま え が き

人は物体を見るとき、明度や彩度、色彩によって形を認識している。絵画などではこれに加え、元々物体にはない輪郭線を描くことで、より簡単に認識することができ、意図的に形状や差を強調することができる。この輪郭線は主に 2D アニメーションや漫画に利用されている。特に 2D アニメーションで用いられる輪郭線は、演出や効果の目的で線の太さを変えた表現で描くことがある。

透明なシートであるセルを用いる、セルアニメーションでの輪郭線は、作画工程で描いた線を転写機であるトレスマシンや、人の手によってセルに転写していた。これらの手法では、人が描いた線をそのままセルに転写するため、描いた輪郭線の太さの変化を直接セルに反映できる。近年用いられているデジタル 2D アニメーションでは、作画工程で描いた紙をコンピュータ上にスキャンする際に、輪郭線を均一太さの線として処理しており、均一な太さの線

が多い。また、3次元コンピュータグラフィックス（以下「3DCG」）上でデジタル 2D アニメーション調の表現を行うトゥーンレンダリングにおいても、処理が最も単純である均一な太さの線を多く用いている。

しかし 2D アニメーションの作品では、様々な表現を実現するために、線の強弱で輪郭を誇張表現することがある。この誇張する表現によって、輪郭や形状をより多様に表現することができる。こうした輪郭線の誇張表現を 2D アニメーション上で行うためには、ポストエフェクトによる処理や手作業によるレタッチなどの手間を加える必要がある。

3DCG 上においても同様に、輪郭線の太さが変化するような処理^{1)~3)}を行う必要がある。3DCG アニメーションで用いるプリレンダリングでのトゥーンレンダリングは、計算や処理に時間をかけることで、太さが変化する輪郭線の誇張表現を実現している。一方で、1秒間に 30~60 回描画する制約の中で表現するリアルタイムレンダリングでは、多くの処理時間をかけるプリレンダリングと同様の手法や表現を行うことは難しい。このため、リアルタイムレンダリングでのトゥーンレンダリングの多くは、描画に影響が少なく容易な手法である、均一な線で表現することが多い。

この課題を解決するために、本研究ではリアルタイム 3DCG でのトゥーンレンダリングにおいて、物体の形状をより効果的に表現する輪郭線の誇張表現手法を提案する。本研究では、輪郭線の誇張表現をリアルタイム 3DCG 上で実現するために、次の 3 項目を目的として設定した。

2012 年 7 月 27 日受付, 2012 年 10 月 1 日再受付, 2012 年 11 月 4 日採録
† 東京工科大学大学院 バイオ・情報メディア研究科 メディアサイエンス専攻

(〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1, TEL 042-637-2111)

†† 東京工科大学 メディア学部

(〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1, TEL 042-637-2111)

† Graduate School of Bionics, Computer and Media Sciences, Tokyo University of Technology

(1404-1, Katukuracho, Hachioji, Tokyo 192-0982, Japan)

†† School of Media Science, Tokyo University of Technology

(1404-1, Katukuracho, Hachioji, Tokyo 192-0982, Japan)

- (1) 物体の形状に沿う太さの変化での輪郭線の誇張表現
- (2) リアルタイムで実行できる処理速度
- (3) 3次元形状の形状変形に対応した輪郭線の誇張表現

なお、本研究で目標とする輪郭線の誇張表現は、2Dアニメーションにおいて用いられる、輪郭線の太さ変化の強弱による表現とし、特に輪郭の曲率によって輪郭線の太さが変化する表現手法に着目した。

2Dアニメーションの輪郭線の太さ変化による表現は、紙に画を描いていく作画工程で用いる、デッサンやイラストの手法が基となっている。デッサンやイラストにおける輪郭線の太さ変化は、曲線と奥行きを表現する際に用い、丸みや立体感、強調といった形状を誇張する効果を与える目的で用いている⁴⁾。この手法に基づいた2Dアニメーションでの作画工程でも、同様の目的でこの手法を用いて紙に画を描く。また線の強弱は、描き手のストロークや筆圧が太さとして直接反映する手法⁵⁾であり、形状を効果的に表現する手描き表現ならではの手法であるため、2Dアニメーション作品上の演出としても用いることがある。

デッサンなどにおける輪郭線の太さの変化の手法として、対象の形状の輪郭の曲がりの程度である、輪郭の曲率により変化する手法⁵⁾がある。これは、輪郭の曲線箇所と直線の箇所とで太さが異なる手法である。また、膨らんだ形状や窪んだ形状といった凹凸に関係なく、輪郭の曲率が大きい箇所に対して太さがより太くなるため、曲率によって太さが太くなる正の相関関係にある手法である。

本研究では、輪郭線の太さ変化に関して、この曲率による太さ変化の手法に着目した。3次元形状上で輪郭が曲線となる部分を対象とし、連続した太さ変化のある輪郭線をリアルタイム3DCG上で行う。また、3次元形状のアニメーションによる変形に対応した、太さ変化での誇張表現を行う。

提案手法では、ポリゴンモデルの裏側のポリゴンを用いた輪郭線の描画手法を用い、線の強弱が出やすい曲線となる特徴を利用した輪郭線の太さ変化を表現する手法を用いた。

また、提案手法を用いた検証を行い、手法の有用性やリアルタイム性を検証した。検証結果から、リアルタイム3DCGでのトゥーンレンダリングにおいて、輪郭線の連続した太さの変化により、手で描いたような輪郭線の表現を行い、3次元形状をより効果的に表現することが実現できた。

以下、2節にて従来手法と研究対象について述べ、3節にて提案手法を述べる。4節で提案手法を用いた描画効果や描画速度の検証について述べる。

2. 従来手法と研究対象

2.1 従来手法

本研究では、2Dアニメーションで用いる、輪郭線の太さの変化による誇張表現に着目した。次の項目に従来手法と

表 1 輪郭線の表現手法ごとの特徴
The difference between each contour line drawing method.

手法	連続した線	太さ変化	連続した太さ変化	
			プリレンダ	リアルタイム
均一な輪郭線	○	×	×	×
変化のある輪郭線	○	○	○	×
絵画風の輪郭線	×	○	○	×

してトゥーンレンダリングで用いるような3次元形状（以下「モデル」）を利用する手法を3点挙げる。

- (1) モデルを用いた均一な太さの輪郭線の表現手法
- (2) モデルを用いた太さ変化のある輪郭線の表現手法
- (3) NPRにおける絵画風の輪郭線の表現手法

特に、従来手法の特徴について述べる。

- (1) モデルを用いた均一な太さの輪郭線の表現手法

Saito ら⁶⁾は、画像処理を用いた均一な太さの輪郭線の描画手法を提案し、Decaudin⁷⁾はSaito らの手法を改良し、トゥーンレンダリングの輪郭線の描画手法として用いた。望月ら⁸⁾⁹⁾は、輪郭を特徴ごとに分類し、特徴ごとに太さや色に変化する輪郭線の描画手法を提案した。また、Card ら¹⁰⁾やMitchell ら¹¹⁾は、均一な太さの輪郭線をリアルタイムに実行する手法を提案した。

- (2) モデルを用いた太さ変化のある輪郭線の表現手法

太さ変化のある輪郭線の研究として、Gooch ら¹²⁾は、ポリゴン面の法線ベクトルを利用し、輪郭と見なしたポリゴン面を塗りつぶすことでの輪郭線の描画手法を提案した。Marshall¹³⁾は、Gooch らの手法をリアルタイムで実行する手法を提案した。また、Goodwin ら¹⁴⁾は、シェーディングによる形状に沿った輪郭線の太さ変化を実現した。

- (3) NPRにおける絵画風の輪郭線の表現手法

手で描いたような質感の画像を再現するNPR (Non-Photorealistic Rendering: NPR) の分野においても、絵画調の表現をする研究^{15)~17)}の中で、均一な太さの輪郭線¹⁸⁾や輪郭線を誇張する表現¹⁹⁾を実現している。Northrup ら²⁰⁾は、太さ変化のある線をテクスチャとしてモデルの輪郭に貼ることで、輪郭線の太さ変化表現を実現した。また、Kalnins ら²¹⁾²²⁾はNorthrup らの手法を用い、画面上に描いた絵や線のテクスチャをモデルに貼り付けることで、ユーザの入力による自由な輪郭線表現を実現した。

2.2 研究対象

2.1節での郭線の表現手法の特徴を表1にまとめ、本研究で取り扱う課題について述べる。各手法において輪郭線の描画は可能であるが、それぞれの手法で特徴に違いがある。

- (1) モデルを用いた均一な太さの輪郭線の表現手法

Saito らの手法によって均一な太さの輪郭線は実現でき、リアルタイムでの描画も実現している。しかし、実際の2Dアニメーションでは、線の強弱や濃淡などの変化で輪郭を

図 1 モデルの凹凸部分
Features of 3D model.

誇張表現することがある。この誇張表現を既存手法上で行うためには、別の手法を加えることが必要となる。

(2) モデルを用いた太さ変化のある輪郭線の表現手法

Gooch らの手法によって太さ変化のある輪郭線が実現しており、段階的に太さが変化するような連続した太さ変化も実現している。しかし、Gooch らの手法ではポリゴン面の角度や視線の方向によっては、輪郭以外の箇所を黒く塗りつぶすため、輪郭線とはいえない状態になることがある。また、Goodwin らの手法では、プリレンダリングによる輪郭線の太さ変化表現のため、この手法をそのままリアルタイムレンダリングで利用することはできない。

(3) NPR における絵画風の輪郭線の表現手法

絵画風の輪郭線の表現手法では、輪郭線の太さ変化を実現しており、手で描いたような太さの強弱のある輪郭線の表現を実現している。しかし、絵画風の表現をトゥーンレンダリングに用いた場合、多くの場合では連続した線ではなく、絵画風の途切れた線の表現となり、連続した輪郭線による 2D アニメーション調の表現とは異なるものとなる。このため、途切れることのない連続した太さの強弱変化で、手描きに近い輪郭線の表現を行うことが必要である。

以上の従来手法の成果と課題より、リアルタイム 3DCG のトゥーンレンダリングでは、連続した輪郭線の太さ変化を表現することが望まれている。このため本研究では、1 節で述べた 3 項目の目的を満たす、連続した輪郭線の太さ変化による誇張表現手法を提案する。

本研究では、線の強弱を表現する対象として、輪郭が曲線を描く部分を対象とした。3DCG 上で曲線となる部分は、モデルにおける凹形部分と凸形部分である。図 1 はモデルにおける凹凸の例を示したものであり、青い丸で囲んだ部分がモデルの凹形部分、赤い丸で囲んだ部分がモデルの凸形部分である。図 1 の青い丸、赤い丸で示す箇所のような特徴を検出し、特徴に応じて輪郭線の変化を付けることにより、連続した変化のある輪郭線の誇張表現を行う。

2.3 先行研究

本研究の先行研究として筆者らは、リアルタイム 3DCG における輪郭線の誇張表現手法を提案した²³⁾。提案手法では、モデルの各頂点と隣接する頂点から凹凸の特徴を検出

図 2 先行研究における結果画像
The results of previous work.

し、特徴となる頂点の周囲に輪郭線の太さを制御する点を手動で配置した後、特徴の頂点を制御する点に沿って動かすことで、リアルタイムでの輪郭線の誇張表現を実現した。

図 2 に先行研究における結果を示す。図 2(a) は先行研究の手法を用いた結果を示し、図 2(b) 特徴となる頂点の周囲に配置した太さを制御する点を視覚化した際の図である。

先行研究では、輪郭線の太さを制御するための点は図 2(b) で示す通り、モデルの凹凸の特徴となる点の周囲に手動で配置していく必要がある。このため、凹凸の多い複雑な形状の場合には、形状に沿って手動で配置することが煩雑とある問題がある。また、モデルの形状変形によって変化した凹凸に対して誇張表現を行う場合には、制御する点を適宜モデルの変形に合わせて移動する必要がある。加えて、太さを制御する点の配置により、輪郭線の太さ変化の効果が変わるため、輪郭線の誇張表現の効果を一定にすることが難しい。このため、動的に輪郭線の誇張表現を変化することは難しく、モデルのアニメーションによる形状変形によって新たに生じた凹凸に対する輪郭線の誇張表現は難しい。

このため本研究では、先行研究の手法における、輪郭線の太さを制御する点の煩雑さや配置による効果の不安定さを解決し、動的な形状変形に対応した、より効果的な輪郭線の太さ変化による誇張表現を実現する。

3. 輪郭線の誇張表現手法

3.1 手法の概要

提案手法は次の二つのステップに分かれている。

1. モデルを構成する頂点の曲率の計算による特徴の検出
2. 曲率を反映した裏ポリゴンモデルの変形による輪郭線の誇張表現

まず、3.2 節にてポリゴンモデルの特徴を検出する手法を説明する。次に、3.3 節にて検出した特徴に応じた輪郭線の太さ変化手法を説明する。最後に、3.4 節にて動的な形状変形に対応した輪郭線の誇張表現について説明する。

3.2 曲率を用いたポリゴンモデルの特徴検出

本研究では、ポリゴンモデル上で輪郭が曲線となる部分を対象とし、輪郭の曲率が大きい程太さが太くなる正の相

図3 ポリゴンメッシュの例
An example of polygon mesh.

図4 曲率の変化の様子
An example of curvature change.

関関係で輪郭線の太さを決定する。ポリゴンモデル上での曲線部分は、2.2節で述べた通り、モデルの凹形部分と凸形部分の曲率が大きい箇所とした。曲率を用いることで、原理的には多様な形状に対し、一様の手法でポリゴンモデルの特徴を検出できる。本手法では曲率を算出する手法として、Meyer らの平均曲率を求める手法²⁴⁾を用いた。

図3はあるポリゴンメッシュ上の頂点 x_i とその周りに隣接する頂点を示したものである。頂点 x_i と稜線で結ぶ隣接する頂点 m 個の集合を $N(i)$ とし、 $N(i)$ に属する頂点を $x_j (j = 0, 1, 2, \dots, m-1)$ とする。このとき、頂点 x_i の曲率法線 $K(x_i)n_i$ を式(1)に示す。なお、式(1)において $\alpha_{ij} = \angle x_i x_{j+1} x_j$, $\beta_{ij} = \angle x_i x_{j-1} x_j$ であり、式(2)に示す $A(i)$ は、点 x_i を中心としたポリゴンメッシュ上における x_i のボロノイ領域である。

$$K(x_i)n_i = \frac{1}{4A(i)} \sum_{j \in N(i)} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij})(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$A(i) = \frac{1}{8} \sum_{j \in N(i)} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij}) |x_i - x_j|^2 \quad (2)$$

各頂点において曲率法線 $K(x_i)n_i$ を計算し、頂点の曲率 $K(x_i)$ を求める。本手法ではこの曲率の計算をすべての頂点で行い、ポリゴンモデルの曲率を計算した。

図4にモデルに計算を適用した結果を示す。図4(a)のモデルに対して、式(1)と式(2)を用いて計算した曲率 $K(x_i)$ を可視化した図を図4(b)に示す。図4の図中で赤色が濃いほど曲率 $K(x_i)$ の値が大きく、白色が濃いほど曲率 $K(x_i)$ の値が小さいことを示している。図4(b)から、凹凸形状である箇所は赤色が濃くなっていることが確認できる。

3.3 曲率を反映した輪郭線の誇張表現

(1) 輪郭線の描画手法

3.2節で計算したポリゴンモデルの頂点ごとの曲率を利用し、輪郭線の誇張表現を行う。

本研究では、リアルタイム3DCG上で形状に沿った輪郭線の誇張表現を行う。このため輪郭線の表現における基本的な要件として、次の2点を考慮することとした。

- モデルの形状に沿う輪郭線
- リアルタイムレンダリングを維持可能な実行速度

これらを踏まえ本研究では、Raskar らのモデルを複製した後引き伸ばし、ポリゴンの表裏を反転する手法²⁵⁾を用いた。その概略として鈴木らの研究²⁶⁾における手順を次に示す。

手順1 モデルの複製

ベースのモデルを複製し、輪郭線用のモデルを生成する。

手順2 モデルの拡大

輪郭線用のモデルの頂点の法線方向に拡大する。頂点の法線は、その頂点を構成要素に持つポリゴンの法線ベクトルの平均とする。

手順3 ポリゴンの表裏の反転

拡大したモデルのポリゴンの表裏を反転し、視点から見て手前になる面は表示せず、奥となる面を表示し、黒く塗りつぶす。

手順4 モデルの合成

拡大し、ポリゴンの表裏を反転したモデルに、ベースとなるモデルを重ね合わせる。

次の図5に、各手順を表した図をそれぞれ示す。図5(a)は、手順1の輪郭線を描画する対象であるベースのモデルを複製したモデル、図5(b)は、手順2の複製したモデルの頂点を法線方向に拡大したモデル、図5(c)は、手順3のポリゴンの表裏を反転して黒く塗りつぶしたモデル、図5(d)は、手順4のベースのモデルを重ね合わせた図である。

この描画手法の特徴として、単純な処理で均一な輪郭線が描画できる点と、輪郭線となるモデル（以下「裏ポリゴンモデル」）を変形することで、輪郭線の太さを容易に変化できる点がある。また、単純に同じモデルを二つ重ねて用いるため、形状に沿った正確な輪郭線が描画でき、かつ高速で処理することができる。

(2) 輪郭線の誇張表現

均一な太さの輪郭線に、3.2節で計算した曲率を反映することで、輪郭線に太さ変化をつける。

次の図6に、(1)で述べた手法を示す図5に、曲率を反映した裏ポリゴンモデルの変形過程を組み入れた図を示す。

図6(a)は輪郭線の描画対象であるベースのモデルを複製したモデル、図6(b)は複製したモデルの頂点を法線方向に拡大したモデル、図6(c)はポリゴンの表裏を反転して黒く

図 5 裏ポリゴンモデルを用いた均一な太さの輪郭線生成方法
Generate the outline of a constant thickness.

図 6 曲率を反映した変化のある輪郭線の生成方法
Generate the outline of a varying thickness.

塗りつぶしたモデル，図 6(d) はベースのモデルを重ね合わせた図である．提案手法では，図 6(b) での法線方向に拡大する際に曲率を反映することで，輪郭線の誇張表現を行うこととし，次の手順で裏ポリゴンモデルの変形処理を行う．

手順 1 ベースモデルの複製

まず，輪郭線の描画対象であるベースのモデルを複製する．また，3.2 節における式 (1) を利用し，モデルの頂点ごとに平均曲率 $K(\mathbf{x}_i)$ を計算する．図 6(a) はベースのモデルを複製した状態である．

手順 2 モデルの拡大と曲率を反映した変形

次に，複製したモデルの頂点を法線方向に拡大することで輪郭線を生成する．このとき，先に計算した曲率を拡大する値に反映し，輪郭線の太さに変化を加える．

連続した太さ変化にするために，3.2 節で計算した曲率 $K(\mathbf{x}_i)$ に任意のしきい値 $s(0 < s \leq 1)$ を設定し，これに沿って輪郭線となる裏ポリゴンモデルの頂点 $\mathbf{x}_i$ を法線ベクトル $\mathbf{n}_i$ 方向に移動する．頂点 $\mathbf{x}_i$ を法線方向へ移動後の頂点 $\mathbf{x}'_i$ の座標を算出する式を式 (3) に示す．なお， $u(0 < u)$ は輪郭線の太さの最大値を定義する任意の値であり， $t(0 < t)$ は曲率が 0 の時の輪郭線の太さを示す値である．

$$\mathbf{x}'_i = \begin{cases} \mathbf{x}_i + \left(\frac{K(\mathbf{x}_i)u}{s} + t \right) \mathbf{n}_i & (s > K(\mathbf{x}_i)) \\ \mathbf{x}_i + (u + t) \mathbf{n}_i & (s \leq K(\mathbf{x}_i)) \end{cases} \quad (3)$$

裏ポリゴンモデルの頂点 $\mathbf{x}_i$ を，式 (3) で求めた $\mathbf{x}'_i$ に移動することで，太さ変化のある輪郭線を表現する．

このとき，曲率 $K(\mathbf{x}_i)$ のしきい値である s の値が大きい程輪郭線の変化の幅が大きく， s の値が小さい程輪郭線の変化の幅が小さい．このため，曲率が大きい箇所の太さ変化を意図的に大きくする場合には s の値を大きくし，曲率の大小を満遍なく太さ変化に反映する場合は s の値を小さくすることにより，輪郭線の太さ変化を制御することができる．

また，輪郭線の太さの最大値である t の値が大きいほど

太さ変化の変化量が大きくなり， t の値が小さいほど太さ変化の変化量が小さくなる．このため， t の値が大きい場合には，曲率が大きい箇所と小さい箇所での輪郭線の太さの差が大きくなり， t の値が小さい場合には，曲率の変化による輪郭線の太さの差は小さくなる．

輪郭線の太さの基準となる u の値は，曲率が 0 となる場合の太さを定義する値であり， u の値が大きい程輪郭線のものが太く， u の値が小さいほど輪郭線は細い．このとき，輪郭線の太さを定義する頂点の移動ベクトル $\mathbf{V}_i$ は $u\mathbf{n}_i$ よりも大きく， $u\mathbf{n}_i$ より小さくなることはない．

図 6(b) は，複製したモデルの拡大に曲率を反映した状態である．曲率を反映していない図 5(b) と比べ，大きさに変化が出ていることがわかる．

手順 3 ポリゴン面の反転

複製し，拡大したモデルを輪郭線のモデルにするため，ポリゴンの面を反転し黒く塗りつぶす．図 6(c) は，曲率を反映して拡大したモデルのポリゴンの面を反転し，黒く塗りつぶした様子である．

手順 4 ベースとなるモデルと合成

最後に，複製し拡大したモデルを輪郭線として描画する．図 6(d) は，図 6(c) のモデルをベースのモデルと合成した様子である．

また図 7 に，以上の輪郭線の描画処理をモデルに適用した結果を示した図を示す．ベースとなるモデルである図 7(a) に，図 5 での処理を行った結果が図 7(b) であり，図 6 での処理を行った結果が図 7(c) である．均一な太さの輪郭線である図 7(b) と比べ，提案手法を用いた図 7(c) は輪郭線の太さに変化に差が出ていることが確認できる．

3.4 動的な形状変形に対応した誇張表現

本研究では，先行研究での課題である動的な形状変形に対応した誇張表現を行う．提案手法では，誇張表現を行う特徴を各頂点の曲率から算出している．このため，形状変形手法として頂点を移動することで変形を行う，ボーンア

図7 裏ポリゴンモデルに曲率を反映した輪郭線
Reflect curvature to backface polygon model.

表2 実行環境
Spec.

OS	Windows 7 Enterprise 64bit
CPU	Intel Core i7 3.4GHz
メモリー	8.00GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti
解像度	1024 × 768

ニメーションに対応することとした。ボーンアニメーションとは、骨に見立てたボーンで階層構造を作り、階層構造とモデルと関連付けることで、ボーンの動きに沿ってモデルの頂点の移動を行う、モデルの変形手法の一つである²⁷⁾。

本研究では、このボーンアニメーションによって移動したモデルの頂点の曲率を計算し、曲率に沿った輪郭線の太さ変表現を行うことで、動的な形状変形に対応した輪郭線の誇張表現を行うこととした。

4. 検証

4.1 効果の検証

本手法を用いた輪郭線の誇張表現について検証する。検証に使用した環境を次の表2に示す。

図8に、均一な太さの輪郭線と本手法を用いた輪郭線の比較を示す。図8(a)は元となるモデル、図8(b)均一な太さの輪郭線を描画したモデルである。図8(c)は3.2節での曲率に色を付けた図であり、赤色が濃いほど曲率の大きいことを示す。図8(d)は本手法を適用した結果のモデルである。

図8(b)の均一な太さの輪郭線表現に対し、図8(d)の提案手法の輪郭線表現は、輪郭線に連続した強弱の変化が出ており、誇張した輪郭線によってよりモデルの形状の凹凸を強調するように表現している。また、付・Aに他のモデルを用いた輪郭線表現の比較を行った図を別途示す。

本研究では、動的な形状変形の場合に新たに生じる凹凸形状にも誇張表現を行う。このため、ポリゴンモデルの形状変形手法であるボーンアニメーションを用いた場合に本手法を適用した場合の検証を行った。

図9にボーンアニメーションを本手法に適用した結果を示す。図9(a)は均一な太さの輪郭線の場合、図9(b)は本手法を適用した誇張表現のアニメーションの様子である。なお、図の変化をわかりやすくするため、円柱の上部と下部

(a) 均一な太さの輪郭線でのボーンアニメーション

(b) 提案手法を用いた輪郭線でのボーンアニメーション

図9 ボーンアニメーション上での輪郭線表現の比較 (頂点数 10,149)

Comparison of line drawing method with using bone animation (10,149 vertices).

の各頂点の曲率 $K(\mathbf{x}_i)$ を一定の値に置換することで、輪郭線の太さの変化が生じないように処理を加えている。

図8と同様に、本手法を適用した図9の輪郭線に連続した強弱の変化が出ていることが分かる。また、変形が進むに応じて曲率が変化しているため、変形箇所の輪郭線の太さも変化していることがわかる。

以上のことより、本手法は既存の手法よりも輪郭線をより多様に表現し、画を描いた時のような太さ変化のある輪郭線の表現をしているといえる。

4.2 リアルタイム性の検証

本手法のリアルタイム性を検証する。検証には4.1節と同様に、表2の環境を用いた。

提案手法では、モデルの頂点ごとに曲率を計算し、頂点を移動することで輪郭線の誇張表現を行っている。このため、頂点数の違う複数のモデルを用意し、検証を行った。

表3は、本手法を用いた輪郭線の誇張表現の1秒間当たりの描画回数を示したものであり、均一な太さの輪郭線を描画する場合の描画速度と、本手法を適用した場合の描画速度を示している。なお、描画速度の単位はfps (Frames

図 8 輪郭線表現の比較 (頂点数 12,801)
Comparison of line drawing method (12,801 vertices).

表 3 描画速度の測定結果
A result of rendering times.

頂点数	描画速度 (fps)	
	均一な太さの輪郭線	本手法を用いた輪郭線
485	3298.5	3230.6
4250	3023.8	2889.3
15859	2119.6	1500.4
28741	1276.1	863.9
63576	390.4	256.1

表 4 ボーンアニメーションを用いた場合の描画速度
A result of rendering times with using bone animation.

頂点数	描画速度 (fps)	
	本手法を用いた輪郭線	本手法とボーンアニメーション
485	3234.5	3112.5
2419	1653.3	1602.2
10149	731.2	717.2
22226	428.1	416.1

Per Second) である。

本手法の場合、均一な太さの輪郭線よりも描画速度は低下する。しかし、表 3 に示すように、頂点数が多くとも 60fps 以上の描画速度を十分に維持できている。このため、本手法を適用した場合でも十分にリアルタイム性を維持することが可能であるといえる。

また、モデルの形状が実際に変形する処理を加えた場合の検証も行った。表 4 は、本手法での輪郭線の描画速度と、本手法とボーンアニメーションを行った場合の輪郭線の描画速度を示したものである。なお、表 4 は表 3 と利用したモデルが異なるため、異なる頂点数で検証を行った。

本手法にボーンアニメーションを加えた誇張表現の場合、ボーンアニメーション分の処理が加わるため、本手法のみの場合よりも描画速度は低下する。しかし、頂点数が 20,000 程度でも 400fps という描画速度であるため、ボーンアニメーションを用いた変形による表現もリアルタイムで充分に実行できる。よって、モデルの曲率が変化する場合でも、提案手法は適用可能であるといえる。

5. む す び

本研究では、リアルタイム 3DCG におけるトゥーンレンダリングにて輪郭線の誇張表現を行うための手法を提案し、評価実験を行った。この結果、次のことが可能となった。

(1) 物体の形状に沿う太さの変化での輪郭線の誇張表現

本研究では、デッサンやイラストに用いる線の強弱による誇張表現に注目した。提案手法ではモデルの曲率を計算し、モデルの凹凸となる部分を検出することで、多様な形状でも一様な手法で特徴を検出することとした。裏ポリゴンモデルによる輪郭線を、計算した曲率の変化によって誇張する変化を変えることにより、形状に沿った輪郭線の強弱による誇張表現が可能となった。

また提案手法では、先行研究での輪郭線の太さを制御する点の配置を行う必要がないため、点の配置の煩雑さや、変形に沿った点の移動を考慮せずに、輪郭線の誇張表現の効果を一定に得ることが可能となった。

(2) リアルタイムで実行できる処理速度

本研究では、モデルの形状に沿って輪郭線を描画することができ、かつ処理が単純である裏ポリゴンモデルを利用する輪郭線表現手法に着目した。これにより、連続した線の強弱による輪郭線の誇張表現が、リアルタイム 3DCG でのトゥーンレンダリングで実現でき、多様なモデルに対して手描きに近い輪郭線の表現が可能となった。

(3) 3 次元形状の形状変形に対応した輪郭線の誇張表現

本研究では、先行研究では対応が難しかった、動的な形状変形の場合に新たに生じる凹凸形状にも誇張表現を行う。提案手法では、特徴の検出をモデルの曲率によって行うため、モデルの形状が変化した場合でも再度曲率計算を行い、輪郭線に反映することで対応できる。本研究では、モデルの頂点を移動することで形状変形する手法のひとつである、ボーンアニメーションを用いて検証を行った。検証の結果、形状変形に対応した輪郭線の太さ変化表現を実現でき、形状が変化しても一様な効果を得ることが可能となった。ま

た、リアルタイム上でも充分に実行することができた。

今後の課題は、次の通りである。

(1) 任意の箇所の意図的な変化の調整の問題

本手法では、各頂点ごとの変化の値を変えることにより、輪郭線の太さの変化を任意に操作することは可能であるが、特定の箇所の誇張表現を任意に操作するには、頂点ごとに操作する必要があるため煩雑である。これに対し、リアルタイム単位で線の太さを変更する設定や、入力により太さの変化が調整可能なインタフェースを加えることにより、容易に太さの変化の幅を設定可能にできる必要がある。

(2) モデルと視点からの曲率との違いの問題

現状の手法ではモデルの形状の曲率を計算することで、多様な形状に対して一様な手法でモデルの特徴を検出し、効果を得ている。しかし条件によっては、実行結果と視点から見た画像上での曲率との差異が生じることがある。このため、より2Dアニメーションに近い表現を行うためには、視点から見た画像上と差異の少ない表現を行う必要がある。

今後、このような課題を解決することで、ゲームなどのインタラクティブなコンテンツで用いることができるようにしたい。また、イラストなどで用いる光源や奥行きによる輪郭線の太さの変化にも対応することで、より手描きに近いトゥーンレンダリングの表現として高めていきたい。

【文 献】

- David Bremer, John F. Hughes: "Rapid Approximate Silhouette Rendering Of Implicit Surfaces", Proc. Implicit Surfaces 1998 (1998)
- Pierre Benard, Forrester Cole, Aleksey Golovinskiy, Adam Finkelstein: "Self-Similar Texture for Coherent Line Stylization", Proc. NPAR 2010, pp.91-97 (2010)
- Stefan S Bert, Bert Schonwalder, Lars Schumann, Thomas Strothotte: "Surfaces To Lines: Rendering Rich Line Drawings", Proc. WSCG 1998, pp. 354-361 (1998)
- AL Guptill, SE Meyer: "ペンで描く", マール社, pp.48-56 (1976)
- AL Guptill, SE Meyer: "鉛筆で描く", マール社, pp.33-43 (1977)
- Takafumi Saito, Tokiichihiro Takahashi: "Comprehensible Rendering of 3-D Shapes", Proc. SIGGRAPH 1990, pp.197-206 (1990)
- Philippe Decaudin: "Cartoon-looking rendering of 3D-scenes", Research Report (1996)
- 望月義典, 近藤邦雄: "再分割曲面の輪郭線抽出描画手法", 情処学論, **41**, 3, pp.601-607, (2000)
- 望月義典, 近藤邦雄: "形状特徴表現のためのエッジ強調描画手法", 情処学論, **40**, 3, pp.1148-1155, (1999)
- Drew Card, Jason L. Mitchell: "Non-Photorealistic Rendering with Pixel and Vertex Shaders", ShaderX: Vertex and Pixel Shader Tips and Tricks, pp.319-333, (2002)
- Jason L. Mitchell, Chris Brennan, Drew Card: "Real-time image-space outlining for non-photorealistic rendering", Proc. SIGGRAPH 2002, pp.239-239 (2002)
- Bruce Gooch, Peter-Pike J. Sloan, Amy Gooch, Peter Shirley, Richard Riesenfeld: "Interactive technical illustration", Proc. I3D 1999, pp.31-38, (1999)
- Carl S. Marshall, Mark DeLour: "Game Programing Gems 2 日本語版", ボーンデジタル, pp.436-443, (2002)
- Todd Goodwin, Ian Vollick, Aaron Hertzmann: "Isophote Distance: A Shading Approach to Artistic Stroke Thickness", Proc. NPAR 2007, pp.53-62, (2007)
- 村上恭子, 鶴野玲治: "顔料及び支持体の特性を考慮したパステル画風レンダリング", 芸術科学論文, **1**, 2, pp.89-96 (2002)
- 川崎敬二, 中丸幸治, 大野義夫: "NPR におけるストローク方向の決定と水墨画調レンダリングへの適用", 芸術科学論文, **3**, 4, pp.235-243

(2004)

- Michael A. Kowalski, Lee Markosian, J. D. Northrup, Lubomir Bourdev, Ronen Barzel, Loring S. Holden, John F. Hughes: "Art-based rendering of fur, grass, and trees", Proc. SIGGRAPH 1999, pp.433-438 (1999)
- H Lee, S Kwon, S Lee: "Real-time pencil rendering", Proc. NPAR 2006, pp.37-45 (2006)
- Mario Costa Sousa, John W. Buchanan: "Computer-Generated Graphite Pencil Rendering of 3D Polygonal Models", Proc. Eurographics 1999, pp.195-208 (1999)
- J. D. Northrup, Lee Markosian: "Artistic silhouettes: a hybrid approach", Proc. NPAR 2000, pp.31-37 (2000)
- Robert D. Kalnins, Lee Markosian, Barbara J. Meier, Michael A. Kowalski, Joseph C. Lee, Philip L. Davidson, Matthew Webb, John F. Hughes, Adam Finkelstein: "WYSIWYG: NPR Drawing Strokes Directly on 3D Models", Proc. SIGGRAPH 2002, pp.755-762 (2002)
- Robert D. Kalnins, Philip L. Davidson, Lee Markosian, Adam Finkelstein: "Coherent Stylized Silhouettes", Proc. SIGGRAPH 2003, pp.856-861 (2003)
- 松尾隆志, 三上浩司, 渡辺大地, 近藤邦雄: "リアルタイム 3DCG における物体の形状を考慮した輪郭線の誇張表現手法の提案", 芸術科学論文, **10**, 4 (2011)
- M Meyer, M Desbrun, P Schroder, A H. Barr: "Discrete Differential-Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds", Visualization and mathematics, Vol.3, No.3, pp.34-57 (2002)
- Ramesh Raskar, Michael F Cohen: "Image Precision Silhouette Edges", Proc. I3D 1999, pp.135-140 (1999)
- 鈴木隼人, 渡辺大地: "リアルタイム 3DCG における米国漫画調レンダリングの開発", 情処学会 第 66 回 全国大会 講演論文集, 4N-9, pp.185-186 (2004)
- CG-ARTS 協会: "デジタル映像表現 改訂版", CG-ARTS 協会, pp.158-159 (2006)

まつお たかし
松尾 隆志 2010 年, 東京工科大学卒業. 2012 年, 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科メディアサイエンス専攻修士課程修了. 修士 (メディアサイエンス).

みかみ こうじ
三上 浩司 1995 年慶應義塾大学環境情報学部卒業. 博士 (政策・メディア: 2008 年慶應義塾大学). 1999 年より, 東京工科大学片柳研究所クリエイティブ・ラボに従事し, 現在はメディア学部准教授. 主に 3DCG を利用したアニメ, ゲームの制作技術と管理手法に関する研究開発に従事. 正会員.

わたなべ たいち
渡辺 大地 1994 年慶應義塾大学環境情報学部卒業. 1996 年慶應義塾大学政策・メディア研究科修士課程修了. 修士 (政策・メディア). 1999 年より, 東京工科大学メディア学部講師. コンピュータグラフィックスやゲーム制作に関する研究に従事.

こんどう くにお
近藤 邦雄 名古屋工業大学卒業. 工学博士 (東京大学). 名古屋大学, 東京工芸大学, 埼玉大学工学部情報システム工学科を経て, 現在は東京工科大学メディア学部教授. 正会員.

付・図 1 輪郭線表現の比較 (1)
Comparison of line drawing method (1) .

付・図 2 輪郭線表現の比較 (2)
Comparison of line drawing method (2) .

〈付 録〉

A. 提案手法を用いた例

提案手法を用いて検証した他の結果を付・図 1 と付・図 2 に示す。付・図 1(a), 付・図 2(a) は輪郭線表現をしていないモデル, 付・図 1(b), 付・図 2(b) が裏ポリゴンモデルを利用した輪郭線表現を行ったモデルである。付・図 1(c), 付・図 2(c) が曲率の大小を色で表現したモデル, 付・図 1(d), 付・図 2(d) が提案手法を用いた輪郭線の誇張表現を行ったモデルである。