

令和元年6月1日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02818

研究課題名(和文) 3次元形状の特徴線抽出とその応用

研究課題名(英文) Feature Line Extraction and Its Application

研究代表者

山口 泰 (Yamaguchi, Yasushi)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：80210376

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：3次元メッシュデータの特徴線は、幾何学的特徴量が極値をとる点の列として求められる。多くの特徴線抽出や描画手法では、メッシュの稜線上で特徴量の方向微分が0になる点を求めるが、抽出される線には途切れや揺れが生じてしまう。本研究では、途切れや揺れが生じる理由を解析し、各頂点に最も近い極値点を求めることで途切れや揺れを抑える手法を提案する。また、曲率などの2階微分を安定に求めるためには頂点周り2近傍以上の情報が必要となるため、比較的少数の面により構成される特徴線を抽出することは難しい。本研究では頂点周りの積分量を解析し、微分量の代わりに積分量を用いることで小さな特徴線を抽出する方法を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、3次元スキャナや3次元プリンタの発展によって、一般社会においても3次元データの利用が進みつつある。3次元データの利用にあたっては、(たとえば、頭、胴、腕、脚のように)部分形状に分割・再配置して動作を再現するとか、対象形状を線で描いた線画を作成して利用するなどが考えられる。このように対象形状を分割したり描画したりする際には、形状の特徴を示した特徴線の抽出が欠かせない。本研究は3次元メッシュデータから、途切れや揺れなどのない安定した特徴線を抽出する手法を示すことに成功しており、3次元データの利用発展に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Feature lines can be defined as the loci of points which maximize a certain geometric property along the corresponding "critical directions." Lines generated by existing algorithms suffer frequently from fragmentation (gaps on lines) and fluctuation (lack of smoothness), because they are based on zero-crossings of directional derivatives. We propose a novel method for tracing such lines. Points on feature lines are located by interpolating extrema in the vicinity of mesh vertices. Meanwhile, the majority of the existing algorithms employ high-order derivatives of the underlying surfaces, which leads incapability of capturing local features. By leveraging integral invariants, which can be defined over an appropriately small neighborhood, we are able to extract features of small scales.

研究分野：画像処理・形状処理

キーワード：形状処理 特徴線 遮蔽率

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、3次元形状情報の取得と応用は急速に広まってきた。形状データのノイズ除去や簡略化、効果的な表示技術などにおいて、形状における特徴の保存や強調の重要性が認識されている。曲面形状の特徴としては、これまで平均曲率がよく用いられてきた。その際、平均曲率や平均曲率の変化の高い部分を広がりのある領域として抽出できるものの、折り目のようにひとつながりの特徴線として扱う方法は限られていた。特に関連する研究には3次元メッシュデータから特徴線を抽出する手法として線画表示に関する一連の研究が挙げられる。しかし、いずれの研究においても、抽出される特徴線には途切れや揺れなどが避けられなかった。

### 2. 研究の目的

「1. 研究開始当初の背景」で書いたように、従来手法を用いてメッシュデータから特徴線の抽出を試みると、途切れや揺れが発生してしまいスムーズな線を得ることが困難であった。本研究では特徴線の途切れや揺れを抑えて、スムーズかつ一貫した特徴線を抽出する方法を検討し、様々な応用に供することを目的とした。尾根線や谷線などの特徴線は曲率が極大や極小となる箇所と考えられる。そこで、尾根線の場合、メッシュ上の頂点において最大主曲率とその方向(主方向)を求める。この主方向に沿って最大主曲率が大きくなる向き(主曲率の方向微分が正となる向き)に曲面を辿り、最大主曲率が極大となる点が尾根線上の点となる。このような計算を行うためには曲率の変化量を扱うことになるが、曲率自体が2階の微分量であるため形状データの3階微分量を扱う必要が生じる。結果として測定データにおけるノイズの影響を避けられなくなることが、特徴線の途切れや揺れの主要原因と推定された。そこで、ノイズを拡大する微分量に代わって、ノイズの影響を抑えられる積分量を用いることによって、スムーズで一貫した特徴線抽出が実現できると仮定して研究を進めることにした。つまり、主曲率と主方向に対応する幾何学的特徴量(以下、積分量と臨界方向と呼ぶ)を積分量から計算して利用することを考えた。

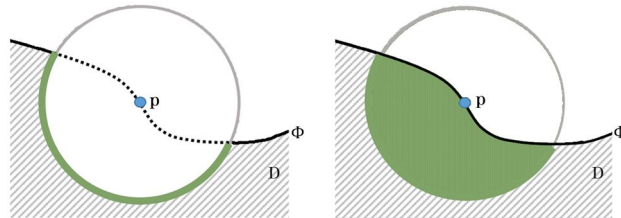


図1 曲面の近傍球面と近傍球体

### 3. 研究の方法

幾何学的特徴量としては、Pottmannらが提案した積分量や遮蔽率などの利用が考えられた。前者は曲面上の各点を中心とする近傍球を考えた際に曲面で切り取られる近傍球面ないし近傍球体の部分(図1の緑色の領域)に着目した方法である。曲面が平面状であれば切り取られる部分は半球(切り口は半円)になるが、尾根線や谷線付近の場合の切り口は細長い楕円状となる。この領域に対するモーメント量を計算することで、主曲率と主方向を推定できる。すなわち0次モーメント量である球面部分の面積や球体部分の体積を積分量、2次モーメント量で求められる慣性主軸を臨界方向として利用できる。一方、遮蔽率も近傍における面の広がり具合を表す量となるが、図2に示すように曲面上の点から周囲を見渡したときに近傍球が地平線で切り取られる部分が対応する。地平線で切り取られる球面部分の面積を積分量とし、相対的に地平線が高くなっている山の方向を臨界方向として利用できる。この他にも、主曲率と主方向に代わりうる、様々な積分量や臨界方向が考えられた。そこで、それらの積分量と臨界方向を、単純な幾何曲面、機械部品形状、自由曲面などの典型的な曲面形状について計算し、曲面上にプロットするとともに、実際に特徴線を計算して尾根線や谷線と一致するか否かを調べることにした。

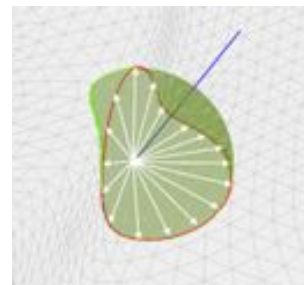


図2 遮蔽率

### 4. 研究成果

多くの積分量について調査した結果、積分量の性質は概ね好ましく、尾根線や谷線の検出に利用可能と推察された。具体的には、尾根線や谷線上において積分量は極値を取るとともに、尾根線や谷線の近くで求められた臨界方向は尾根線や谷線に垂直となる(各点から尾根線や谷線に至る最短の方向を示す)ことが確認された。しかし、それらの積分量と臨界方向を用いて特徴線を求めても、途切れや揺れが生じることが判明した。機械部品など平面や円筒面で構成される比較的単純な形状でも起こりうるばかりでなく、比較的単純な形状で尾根線や谷線がメッシュの稜線と一致する際に発生することから、途切れが発生する箇所を詳細に解析したところ、途切れの仕組みが明らかになってきた。最初に述べたように、対象形状は連続な曲面ではなく、三角形面から構成されるメッシュデータであることから、特徴線上の点はメッシュ稜線の上で求められる。その際、従来手法では両端点における臨界方向の積分量変化を利用して、稜線上の特徴点(図3左の紫色の点)の位置を求めている。つまり、稜線を挟んだ2頂点における臨界方向が互いに向き合っている場合に、当該2頂点における積分量の変化量で稜線を内分することで特徴点を特定していた。しかし、メッシュ稜線(図3の例ではuv)が薄い灰色で示した特徴線と平行に近い角度で交わる場合、両端点u,vにおける臨界方向はほぼ稜線と垂直に近くなり、さらにメッ

シュの不均一さやノイズの影響などにyって幾分左右に振れることがある。この際、臨界方向がお互いに反発しあう方向に振れる(稜線から遠ざかる方向に向く)と、稜線から離れる向きに特徴点を求めようとするために、稜線上に特徴点が求まらなくなり、結果として途切れが発生することが判明した。

そこでメッシュ上の各頂点に最も近い特徴点を求めて利用することを考えた。具体的には、当該頂点の臨界方向と周辺頂点における積分量とから、臨界方向で特徴量が極値をとる点(図3右の緑の点、以下最近特徴点と呼ぶ)を計算する。その上で、稜線の両端点に対応する最近特徴点を結んだ線(図3右の緑の点線)と稜線との交点によって、稜線上の特徴点(図3右の赤の点)を計算する。特徴線の途切れだけでなく、揺れについても稜線が特徴線とほぼ一致するような位置関係になると発生すること、また上に書いた各頂点の最近特徴点を利用する方法によって問題を解決できることがわかった。

一方で、積分量の利用も有効であることが確認された。主曲率を利用する際には、曲面上で整合かつ安定したものを得るために、2近傍以内の頂点の情報が必要とすることから、それよりも広い(具体的には尾根線や谷線を挟んで片側3枚以上の面の)範囲で定義される曲率が対象となる。

しかし、尾根や谷がより少ない面で構成される場合には、それらの特徴形状が周囲の形状によって潰されてしまい検出できなくなる。積分量とそれに付随する臨界方向は、より狭い範囲においても安定的に求められるため、メッシュサイズに対して小さな(=より少ない面で構成される)特徴線の抽出に有効である。図4は従来法と提案法で求められた特徴線を示したもので途切れならびに揺れが、ともに改善されている。

本研究では、3次元メッシュデータにおける形状特徴をスムーズかつ一貫した特徴線として抽出する手法とその応用について検討してきた。従来手法における問題点を明らかにして、途切れや揺れの少ない特徴線抽出が可能となった。しかし、新しい手法においても積分量や臨界方向が比較的単調に変化することを仮定している。具体的には特徴線が交わって三叉路や四叉路状になっている分岐点付近では、特徴線が1本の線にはならないため現行の手法では扱うことができない。原理的に尾根線や谷線が三叉になる場所は、曲面状で複数存在しうるので、そのような分岐点での処理を考える必要がある。また、今回は尾根線や谷線など、3次元形状の空間的な特徴を扱ったが、線画に用いられるような視点依存の特徴線など、他の種類の特徴線抽出についても検討を行いたい。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

Qiqi Gao, Yasushi Yamaguchi. Extraction of smooth and coherent feature lines from meshes with fine details. Computers & Graphics, Elsevier, to appear. (査読有) DOI 10.1016/j.cag.2019.05.020

Tasuya Yatagawa, Hideki Todo, Yasushi Yamaguchi, Shigeo Morishima. Data Compression for Measured Heterogeneous Subsurface Scattering via Scattering Profile Blending. The Visual Computer, Vol.35, No.2, 1-18, Springer, 2019. (査読有) DOI 10.1007/s00371-018-01626-x

Akito Adachi, Tomonhiro Tachi, Yasushi Yamaguchi. Dual Tiling Origami. Journal for Geometry and Graphics, Vol.22, No.2, 269-281, Heldermann, 2018. (査読有) URL <http://www.heldermann.de/JGG/JGG22/JGG222/jgg22024.htm>

Peeraya Sripiyan, Yasushi Yamaguchi. Synthesis and Assessment Methods for an Edge-Alignment Free Hybrid Image. The Journal of Electronic Imaging, Vol.26, No.4, 043016:1-14, IS&T and SPIE, 2017. (査読有) DOI 10.1117/1.JEI.26.4.043016

Hideki Todo, Yasushi Yamaguchi. Estimating reflectance and shape of objects from a single cartoon-shaded image. Computational Visual Media, Vol.3, No.1, 21-31, Springer, 2017. (査読有) DOI 10.1007/s41095-016-0066-0

Ayumi Miyai, Yasushi Yamaguchi. New Approach to Camerawork Skills Education in 3D/S3D Computer Graphics Animation. Computers & Graphics, Vol.59, 119-129, Elsevier, 2016. (査読有) DOI 10.1016/j.cag.2016.07.003

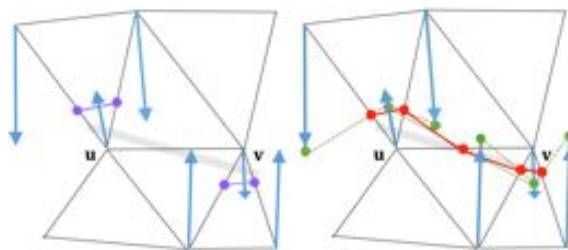


図3 途切れの仕組み(左)と解決法(右)

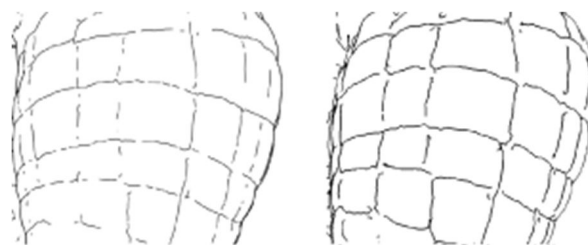


図4 従来法(左)と提案法(右)の結果

〔学会発表〕(計 16 件)

Hanqin Wang, Yingxue Chen, Yasushi Yamaguchi. Line Drawings from 3D Mesh Data Based on CNN Using Multi-Lighting Images. Visual Computing 2019. 2019 年 6 月 27 日 発表予定。(査読有)

Qiqi Gao, Yasushi Yamaguchi. Coherent and Smooth Feature Lines Extraction from Meshes. Visual Computing 2019. 2019 年 6 月 27 日発表予定。(査読有)

谷田川達也, 山口 泰, 森島繁生. 分離型畳み込みカーネルを用いた非均一表面下散乱の効率的な計測と実時間レンダリング法. Visual Computing 2019. 2019 年 6 月 27 日発表予定。(査読無)

Peeraya Sripiyan, Yasushi Yamaguchi. Hybrid Image of three contents. Cumulus Conference Rovaniemi 2019. 2019 年 5 月 27 日。(査読有)

杉浦 真, 山田 修, 山口 泰. 内々神社拝殿・墓股『龍』における錯視効果を用いた制作技術の考察. 日本図学会春季大会. 2019 年 5 月 11 日。(査読無)

Shun Iwasa, Yasushi Yamaguchi. Color Selection and Editing for Palette-based Photo Recoloring. International Conference on Image Processing. 2018 年 10 月 7 日。(査読有)

Kai Suto, Akito Adachi, Tomohiro Tachi, Yasushi Yamaguchi. Edge Extrusion Approach to Generate the Extruded Miura-Ori and Double Tiling Patterns. 7OSME - The 7th Intl. Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education. 2018 年 9 月 5 日。(査読有)

Qiqi Gao, Yasushi Yamaguchi. Detection of Critical Direction for Feature Line Extraction on Meshes Based on Local Integral Invariants. The 18th Intl. Conf. on Geometry and Graphics. 2018 年 8 月 4 日。(査読有)

谷田川達也, 藤堂英樹, 山口 泰, 森島繁生. 基本材質の拡散プロファイル混合による実測 BSSRDF データの圧縮. Visual Computing 2018. 2018 年 6 月 21 日。(査読有)

岩佐 駿, 山口 泰. パレットカラーの決定とそれを利用した画像の色編集. 情報処理学会コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学研究会研究発表会. 2018 年 6 月 21 日。(査読無)

須藤海, 舘知宏, 山口 泰. ミウラ折りの押し出しによる厚みのある両面タイリングの生成. コロキウム構造形態の解析と創生 2017. 2017 年 10 月 19 日。(査読有)

Hidetoshi Suzuki, Yasushi Yamaguchi. Line-Width Editing for Achieving 3D-Like Appearance in Line Drawings. The 14th Congress of the Italian Union for Drawing. 2017 年 9 月 14 日。(査読有)

Akito Adachi, Tomohiro Tachi, Yasushi Yamaguchi. Dual Tiling Origami. The 11th Asian Forum on Graphic Science. 2017 年 8 月 19 日。(査読有)

Hideki Todo, Yasushi Yamaguchi. Reflectance and Shape Estimation for Cartoon Shaded Objects. Pacific Graphics. 2016 年 10 月 11 日。(査読有)

谷田川達也, 山口 泰. 単一画像を入力とした非均質物体の BSSRDF 推定. Visual Computing / グラフィックスと CAD シンポジウム. 2016 年 6 月 18 日。(査読有)

藤堂英樹, 山口 泰. 減色されたトゥーンシェーディング画像の形状反射推定. Visual Computing / グラフィックスと CAD シンポジウム. 2016 年 6 月 18 日。(査読有)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 5 件)

名称: 画像編集装置, 画像編集方法及び画像編集プログラム

発明者: 山口 泰, 岩佐 駿

権利者: 国立大学法人 東京大学

種類: 特許出願

番号: 特願 2018-102447

出願年: 2018 年 5 月 29 日

国内外の別: 国内

名称: 平行平面連結構造

発明者: 山口 泰, 舘 知宏, 安達 瑛翔, 須藤 海

権利者: 国立大学法人 東京大学

種類: 特許出願

番号: 特願 2018-047855

出願年: 2018 年 3 月 15 日

国内外の別: 国内

名称: 曲面連結構造および立体連結構造

発明者: 山口 泰, 舘 知宏, 大嶋 泰介

権利者：国立大学法人 東京大学  
種類：特許出願  
番号：特願 2017-142663  
出願年：2017年 7月 24日  
国内外の別：国内

名称：双対タイリング構造 (Dual tiling structure)  
発明者：山口 泰, 舘 知宏, 安達 瑛翔  
権利者：国立大学法人 東京大学  
種類：特許米国暫定出願  
番号：62/520996  
出願年：2017年 6月 16日  
国内外の別：国外

名称：Folding Structure, Foldable Structure Manufacturing Method, Foldable Structure Manufacturing Device, and Program  
発明者：舘 知宏, 山口 泰, Evgueni T. FILIPOV, Glancio H. PAULINO  
権利者：独立行政法人 科学技術振興機構  
種類：PCT 出願  
番号：PCT/JP2016073806  
出願年：2016年 8月 12日  
国内外の別：国外

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://researchmap.jp/read0180577/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：舘 知宏

ローマ字氏名：(TACHI, tomohiro)

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院総合文化研究科

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：50586740

研究分担者氏名：籾内 佐斗司

ローマ字氏名：(YABUUCHI, satoshi)

所属研究機関名：東京藝術大学

部局名：大学院美術研究科

職名：教授

研究者番号 (8桁)：10376931

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：植田 一博

ローマ字氏名：(UEDA, kazuhiko)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。