

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14580

研究課題名(和文) 完全位相保存型の骨格線抽出法の開発

研究課題名(英文) Homotopy-Preserving Curve-Skeleton Extraction without Volume Meshes

研究代表者

森口 昌樹(Moriguchi, Masaki)

中央大学・理工学部・准教授

研究者番号：10525893

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：3次元に埋め込まれた表面メッシュに対して、立体としての位相を保存する骨格線を抽出するアルゴリズムを設計した。また、それを実行するソフトウェアの開発も行った。本アルゴリズムは表面メッシュに辺縮約を繰り返し適用するものだが、辺縮約操作が位相を保存するための交叉禁止条件を導出することができた。さらに、辺分割を拡張した局所位相操作を組み合わせて使用することにより、処理の難しいモデルにも対応するロバストな骨格線抽出法が設計できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、位相保存の保証を持つロバストな骨格線抽出法を開発した。骨格線は形状モデリングや形状解析において多くの応用を持つ構造であり、この理論保証やロバスト化は映像産業や製造業での課題解決にも役立つことが期待できる。

また、幾何形状処理の分野では、辺縮約がどのような位相的性質を保存できるかについての研究が続けられているが、本研究は新しい保存可能な性質を導いた。これは、辺縮約の新たな応用先の開拓にもつながるものである。

研究成果の概要(英文)：We propose an algorithm of homotopy-preserving curve-skeleton extraction for surface meshes embedded in 3-dimensional space. The proposed method computes curve-skeletons that have the same homotopy type of the solid bounded by the given surface mesh. While it is easy to preserve the homotopy type if we have volume meshes, we achieve the homotopy preservation even without computing volume meshes. Our algorithm is based on extraction methods using edge contractions and we derive novel conditions on edge contractions for the homotopy preservation. There exist meshes that cannot be contracted into curve-skeleton with the same homotopy type, but we also propose a solution to this problem by modifying the edge split operation.

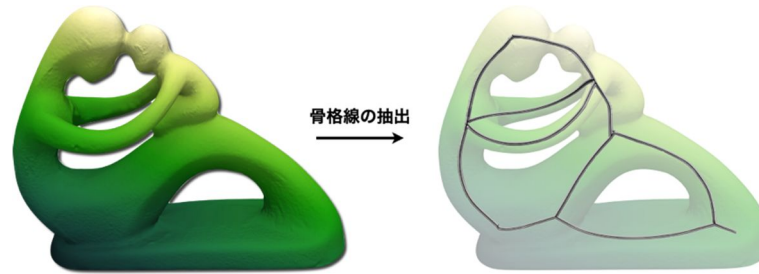
研究分野：幾何形状処理

キーワード：表面メッシュ 骨格線 位相保存 形状モデリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

骨格線とは、形状の幾何的情報および位相的情報を簡潔に表現した 1 次元構造物（頂点と辺の集合）のことである。計算機上では、3 次元形状は 2 次元構造物（頂点、辺、面の集合）である表面メッシュとして表現されることが多い。表面メッシュと比較すると、骨格線は次元が低いため扱いやすく、形状検索、位相簡略化、メッシュ変形、四角形メッシュ生成など数多くの応用に利用されている。



応用によって骨格線に望まれる性質は異なるが、特に

- ・位相の保存
- ・表面メッシュ・骨格線間の対応点関係の構築

が重要である。3 次元形状と骨格線は次元が違うのでこれらが同じ位相を持つことはないが、骨格線が 3 次元形状とホモトピー同値であるとき、その骨格線は位相保存型と呼ばれる。表面メッシュに辺縮約を繰り返し適用して骨格線を抽出する方法は、対応点関係を構築することのできる有用な手法である。位相保存型の骨格線を抽出できるように辺縮約を用いた骨格線抽出法を拡張する試みがいくつか行われたが、それらは失敗に終わっている。

表面メッシュの内部のポリウムメッシュを作成すれば、位相保存型の骨格線は容易に抽出できる。しかし、形状によっては安定してポリウムメッシュを作成することが難しく、また分割により形状の複雑度が大幅に増えてしまうことがある。そのため、ポリウムメッシュを作成せずに、上記で述べた二つの性質（位相の保存、対応点関係の構築）を持つ骨格線抽出法の開発が期待されている。

2. 研究の目的

3 次元形状の骨格線は形状の幾何情報と位相情報を簡潔に表した 1 次元構造物であり、形状変形や形状解析など幾何形状処理において広く応用されている。骨格線は 3 次元形状の表面の位相情報だけでなく、ソリッドの位相情報をもとにして抽出することが重要である。入力形状がポリウムメッシュとして表現されている場合は容易にソリッドの位相情報を得ることができる。一方、表面メッシュとして表現されている入力形状からソリッドの位相情報を得るときには、前処理として形状が囲う領域をポリウム分割するという操作が行われる。しかし、形状によっては安定して分割することが難しく、また分割により形状の複雑度が大幅に増えてしまうことがあるため、可能ならばポリウム分割は避けたほうがよい。

本研究は 3 次元空間内の立体から骨格線を抽出する手法に関するものである。より具体的には、表面メッシュとして表現された入力形状に対して、ポリウム分割せずに「位相の保存」と「対応点関係の構築」ができる骨格線抽出法を設計することを目的としている。辺縮約を用いた骨格線抽出法を修正し、ホモトピーを保存する辺縮約のみを適用することで上記の二つの性質を満たすアルゴリズムが得られる。このアルゴリズムを実現するためには、辺縮約がホモトピーを保存するための条件を導出する必要がある。

幾何形状処理の分野では、辺縮約がどのような位相的性質を保存できるかについての研究も行われている。例えば、メッシュの位相型やホモトピー型を保存する辺縮約の条件が解明されている。本研究は「表面メッシュに対する辺縮約が立体のホモトピー型を保存するための条件」を導出しており、このテーマとの関係は深い。なお、本研究が扱っているホモトピー型はメッシュ自身（境界）のものではなく、メッシュが囲っている立体（ソリッド）のものである。そのため、本研究が新たに導いた条件は、既存研究である「辺縮約がメッシュ自身のホモトピー型を保存するための条件」とは異なるものである。

また、幾何形状処理の分野では、辺縮約操作はほとんどの場合は単体的複体に対して利用される。一方、本研究は曲面上の埋め込みグラフに対する辺縮約操作（位相幾何学的グラフ理論で使用されているもの）を利用する。位相幾何学的グラフ理論では、通常三角形分割ではなく平行辺や自己ループが許された擬三角形分割も操作の対象にしている。本研究でも同様に、三角形分割だけでなく擬三角形分割まで考慮に入れている。この拡張を幾何形状処理で利用することで辺縮約の応用範囲を広げることができるが、具体的に何が新しくできるようになったのかを明らかにすることも本研究の目的の一つである（立体の）ホモトピー型を保存するための条件は、擬三角形分割上での辺縮約を考えることにより求められることができた。

3. 研究の方法

本研究が提案する手法は辺縮約を用いた骨格線抽出法をもとにしており、ホモトピーを保存する辺縮約のみを選択的に適用することで位相保存型の骨格線を抽出する。本研究は以下の手順で実施した。

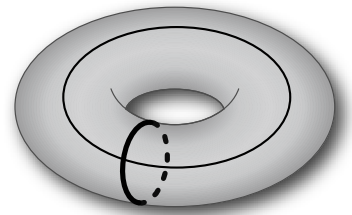
- (1) 辺縮約がホモトピー型を保存するための条件を求める。
- (2) 提案アルゴリズムを実装する。
- (3) 計算機実験により、提案法の有効性を検証する。

計算機実験により、提案法は特殊なメッシュの骨格線抽出に失敗することが分かった。そのメッシュに対するアルゴリズムの動作を解析したところ、辺縮約だけではこの問題を解決できないことも判明した。そのため、辺縮約とは異なる局所操作(辺分割を拡張したサイクル分割という操作)も使用することにした。この変更により、アルゴリズムのロバスト化が達成できた。

4. 研究成果

本研究は3次元に埋め込まれた表面メッシュに対する骨格線抽出法を提案するもので、以下の成果が得られた。

(1) 表面メッシュのみを用いて(つまり、立体のボリュームメッシュを作成せずに)、立体とホモトピー同値な骨格線を抽出するアルゴリズムを設計した。これは、表面メッシュ上の辺縮約が立体のホモトピー型を保存するための条件を導出することで達成できたものである。右図のような交叉するサイクル対に対して、辺縮約が二つのサイクルを両方潰してしまうとホモトピー型が変化してしまう。



(2) 入力メッシュが小さなハンドル・トンネルを持つ場合、(1)の手法は骨格線の抽出に失敗することがある。この問題を解決するために、辺分割を拡張したサイクル分割という操作を提案した。これにより、どんな入力メッシュ(3次元に埋め込まれ、閉曲面と同相であるということは仮定する)でも骨格線が抽出できるようになった。このアルゴリズムは位相的ノイズを含む入力メッシュに対しても問題なく動作する、ロバストな骨格線抽出法である。

(2)の手法では、まだ骨格線が抽出できていないのに縮約可能な辺がなくなった場合にサイクル分割を適用する。必要に応じてサイクル分割を適用することで骨格線を抽出することができるが、何回サイクル分割が必要になるかは辺縮約を適用する順番に依存する。サイクル分割の回数を最小化するような辺縮約列の計算は、本研究では解決できなかったため今後も取り組んでいきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sugihara Kokichi, Moriguchi Masaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Reflexively-Fused Cylinders	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 275:1 ~ 275:9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/sym10070275	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 森口昌樹
2. 発表標題 離散曲面の骨格線とその計算
3. 学会等名 Interaction between Pure and Applied Mathematics 2018（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森口昌樹
2. 発表標題 鏡映合成型の錯視立体
3. 学会等名 数理工学センター（MCME）セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森口昌樹
2. 発表標題 視体積交差法と錯視立体
3. 学会等名 MIMS研究集会「幾何的解析と形状表現の数理」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森口昌樹
2. 発表標題 視体積交差メッシュの接続性計算
3. 学会等名 日本応用数理学会2018年度年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森口昌樹
2. 発表標題 多義立体と視体積交差法
3. 学会等名 第13回錯覚ワークショップ「錯覚現象のモデリングとその応用」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shahroz Khan, Erkan Gunpinar, M. Moriguchi
2. 発表標題 Customer-centered design sampling for CAD products using spatial simulated annealing
3. 学会等名 International CAD Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ren Suzuki, Masaki Moriguchi, Keiko Imai
2. 発表標題 Generation and optimization of multi-view wire art
3. 学会等名 Pacific Graphics (Posters) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiro Onda, Masaki Moriguchi, Keiko Imai
2. 発表標題 Automatic drawing for Tokyo metro map
3. 学会等名 European Workshop on Computational Geometry (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 恩田雅大, 森口昌樹, 今井桂子
2. 発表標題 東京の路線網に対する鉄道路線図生成手法
3. 学会等名 電子情報通信学会 コンピューテーション研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 道川隆士, 鈴木宏正, 森口昌樹, 荻原直道, 近藤修, 小林靖
2. 発表標題 頭蓋CT画像からの脳鑄型形状の自動抽出手法
3. 学会等名 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森口昌樹, 今井桂子, 杉原厚吉
2. 発表標題 融合型シャドウアートのモデリング
3. 学会等名 第12回錯覚ワークショップ「錯覚科学への諸アプローチとその応用」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森口昌樹
2. 発表標題 空間埋め込みの幾何情報を用いた骨格線計算
3. 学会等名 日本応用数学会2018年研究部会連合発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考