

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月17日現在

機関番号：62615

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K15999

研究課題名(和文) ユーザの意図を反映した高品質メッシュの作成方法に関する研究

研究課題名(英文) On methods for generating high-quality meshes that respect user intent

研究代表者

高山 健志 (Takayama, Kenshi)

国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・特任助教

研究者番号：80614370

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、CG分野と機械工学分野それぞれにおいて重要な役割を果たす四角形メッシュと六面体メッシュについて、それをユーザの意図を反映した高品質な形で生成できる手法を提案する。四角形メッシュ生成に関しては、過去に手作業で作成された四角形メッシュの蓄積を分析・再利用するデータドリブンなアプローチを開発した。六面体メッシュ生成に関しては、グラフ双対に着目したインタラクティブ3Dモデリングに基づくアプローチを開発した。これらの成果をまとめた論文は、それぞれSIGGRAPHとEurographicsというCG分野で権威ある学会に採択された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

四角形メッシュ生成というトピックにおいて、既存の四角形メッシュの蓄積を再利用するというデータドリブンなアプローチを試みたのは、本研究が初めてである。六面体メッシュ生成というトピックはまだ非常に未開拓な領域であり、満足なメッシュを生成できるアルゴリズムは数少ない中で、本研究は独自の一手法を提案した。またグラフ双対を利用して六面体メッシュを生成する具体的なアルゴリズムを与えたのも、本研究が初めてである。本研究のソースコードは寛容なライセンスで公開しているので、さらなる研究の発展や産業での応用に資することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：We propose methods for generating high-quality quadrilateral meshes and hexahedral meshes -- data structure that plays an important role for the fields of computer graphics and mechanical engineering, respectively -- in a manner that well respects the user's intent. For quad meshing, we proposed a data-driven approach that analyzes and reuses a collection of existing manually-created quad meshes. For hex meshing, we proposed an interactive 3D modeling-based approach that makes use of the combinatorial dual of hex meshes. Papers on these contributions were accepted to SIGGRAPH and Eurographics, both prestigious conferences in computer graphics.

研究分野：コンピュータグラフィクス

キーワード：四角形メッシュ 六面体メッシュ キャラクターアニメーション シミュレーション CAD メッシュ生成
形状処理 3Dモデリング

1. 研究開始当初の背景

四角形メッシュ生成に関しては、様々な全自動アルゴリズムが研究されてきたが(文献)、どんな条件下でも確実にロバストに動作できるようにすることは未だに難しく、しばしば失敗することがある。また入力パラメタをどう変えたら結果がどう変わるのかということもユーザにとっては理解しにくく、そのため思い通りの結果を得るための微調整がしにくいという問題があった。この状況に一石を投じる意味で、2013年に研究代表者が提案したインタラクティブなスケッチ入力に基づく手法は、高い評価を得た(文献)。このアプローチをさらに発展させることが本研究の主旨の一つである。

六面体メッシュ生成に関しては、四角形メッシュ生成と問題設定が似ているため(四角形メッシュ生成は二次元的な問題であり、六面体メッシュ生成はその三次元版である)、前述のようなインタラクティブなアプローチを六面体メッシュ生成にも適用してみようという自然な発想が、本研究のもう一つの主旨である。六面体メッシュ生成は四角形メッシュ生成に比べて技術的に格段に難しく、まだまだ未開拓な分野である。2011年頃からCG研究者の間でにわかに注目され始めたが(文献)、実用に耐えうる決定的な手法は未だに現れていない。本研究で提案する手法も、多くの手作業を要するという点で実用面に問題はあつたものの、分野の発展にとっては十分に有意義な貢献であると思われる。

2. 研究の目的

四角形メッシュ生成に関しては、研究代表者が過去に提案したアプローチ(文献)を発展させ、ユーザがインタラクティブなスケッチ入力によって高品質な四角形メッシュをより簡単に生成できるようにすることを目指す。

六面体メッシュ生成に関しては、ユーザがインタラクティブな3Dモデリング操作を行うことにより、高品質な六面体メッシュをロバストに生成できるような技術の開発を目指す。

3. 研究の方法

研究活動の中心は、文献調査とプロトタイプシステムの実装・実験のサイクルを繰り返すことである。四角形メッシュ生成に関しては、海外の研究者と共同で取り組んだので、スカイプを用いた遠隔ミーティングによって議論を進めた。また海外のCG制作現場のアーティストを対象としたユーザスタディを行ったが、その際にもスカイプを使用した。プログラムのソースコードをバージョン管理ソフトSubversionを使って共著者の間で管理・共有し、協調してソフトウェア開発を行った。六面体メッシュのケースでは、チームを組まずに単独で研究を行った。

4. 研究成果

(1) 四角形メッシュ生成に関しては、既存の四角形メッシュのデータを多数集めて、それを分析して得られた知識を再利用するというデータドリブンなアプローチを開発した(図1)。

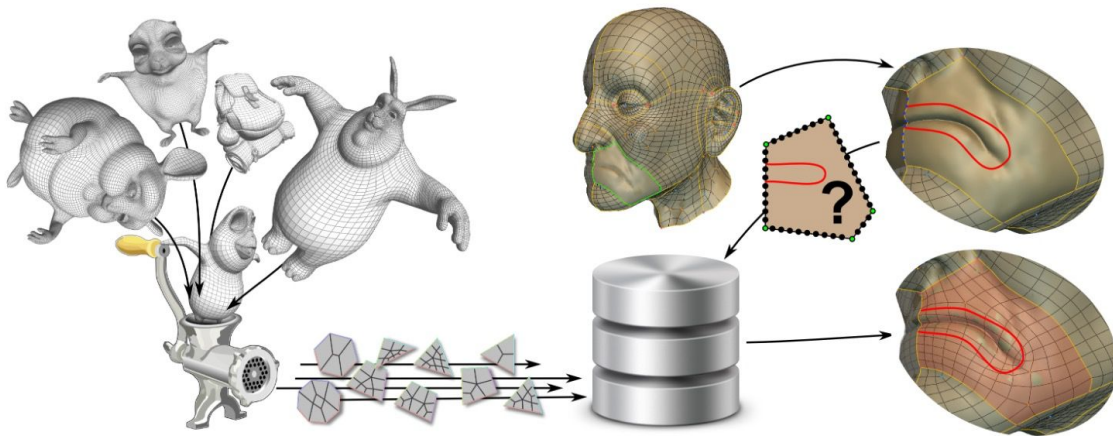


図1: 提案した四角形メッシュ生成手法の概要

本研究の出発点となった研究代表者の過去の研究(文献)では、ユーザがサーフェスを多角形状のパッチに分割し、各パッチの内部に対してシステムが自動的に四角形メッシュを生成する。この際、システムは事前に用意しておいたいくつかの四角形メッシュのパターンの集合を利用する。本研究の着眼点は、ここで使われる四角形メッシュのパターンの集合を大幅に拡充することで、生成できる四角形メッシュのバリエーションを増やそうというものである。これを実現するために、既存の手作業で作られた四角形メッシュデータを多数分析することで、四角形メッシュの様々なパターンを抽出した(図2)。

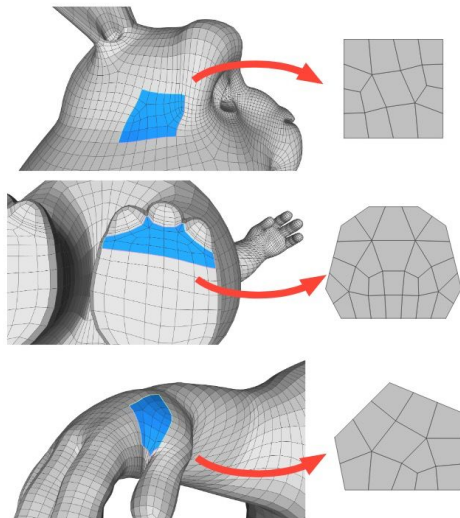


図 2: 既存の四角形メッシュからのパターンの抽出

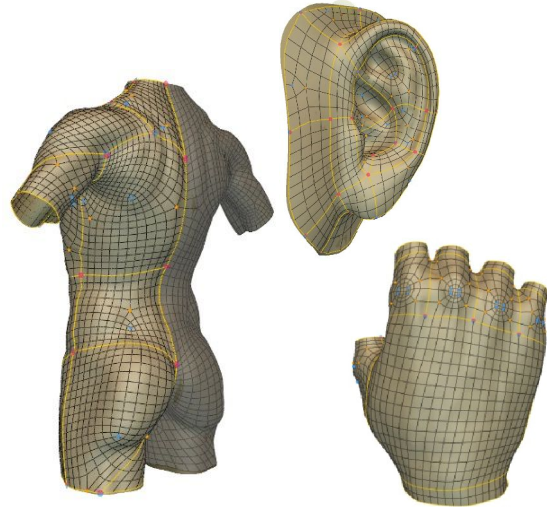


図 3: ユーザスタディでアーティストによって作成された四角形メッシュ

ただし、このままでは生成される四角形メッシュのバリエーションが多すぎて、その中からユーザにとって望ましいものを選び出すのが難しくなってしまう。そこで、生成された四角形メッシュのバリエーションの中から、望ましいものだけを簡単にフィルタリングできる機能を提案した。具体的には、ユーザが四角形の一連の並びを表すストロークをパッチの中に描くと(図 1 右側の赤い線)、それに最も良くフィットするものが即座に提示される。複数のストロークを描いて、フィルタリング結果をさらに絞り込むこともできる。

オリジナルの手法(文献)に対する提案法の有効性を検証するために、CG 制作現場のアーティスト 3 名を対象としてユーザテストを行った(図 3)。その結果、確かにモデリング時間が軽減されることを確認できた。

(2) 六面体メッシュ生成に関しては、既存の全自動アルゴリズム(文献)ではロバスト性や一般性の面で問題があったので、本研究ではロバストでかつ一般性のある六面体メッシュ生成手法を実現するために、六面体メッシュのグラフ双対に着目した。六面体のグラフ双対は、物体内部を切断する多数のサーフェスが交差したようなものとして捉えることができる。そのようなサーフェスのことを、ここではデュアルシートと呼ぶ(図 4)。

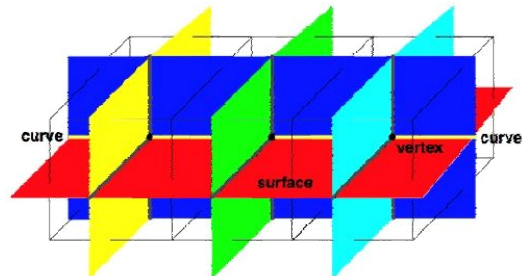


図 4: 六面体メッシュ(黒線)のグラフ双対として得られるデュアルシート(赤、青、黄、緑、シアン)

本研究の基本的なアイデアは、(一定の条件を満たす)デュアルシートの集まりを何らかの方法で作ることができれば、そのグラフ双対を取ることで六面体メッシュをロバストに得ることができる、というものである。このようなグラフ双対に着目した考え方は、四角形メッシュ生成のケースでは既に有効であることが示されており(文献)、本研究は同様のアプローチを六面体メッシュ生成に適用するものである。

上述のデュアルシートの集合をいかにして生成するかは、本アプローチにおける本質的な課題である。研究を進める過程で、デュアルシートの生成を完全あるいは部分的に自動化する方法として様々な可能性を試行錯誤したが、最終的にこの問題は現状では難しすぎて解決できないという結論に至った。そこで本研究では次善の策として、デュアルシートの生成をユーザによる手作業での 3D モデリングに任せるとの方針を採用し、その作業がしやすくなるように 3D モデリングのインターフェース設計をある程度工夫した(図 5)。

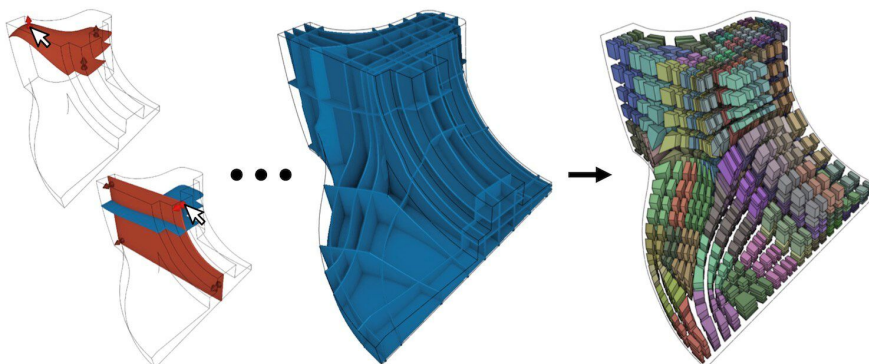


図 5: 提案した六面体メッシュ生成手法の概要

また、デュアルシートの集合が与えられた時、そのグラフ双対を求めて最終的な六面体メッシュを得るためのアルゴリズムも、それほど自明ではない(四角形メッシュの場合は、グラフ双対が一次元的なループ状の構造を持つので、アルゴリズムも単純だった)。本研究では、シート間の交差の検出や、六面体メッシュの接続情報の生成といった処理を簡潔にするために、シートを陰的に表現(スカラー関数のゼロ等値面として表現)する方法を提案した。また最終的な六面体メッシュの頂点座標を得るための方法として、Harmonic parameterizationに基づくシンプルでロバストな方法を提案した。この方法の着想には、2018年に発表された論文(文献)で述べられていた知見が大きな役割を果たした。

(3) 上記の研究を通して開発したソースコードは、寛容なライセンスの下で一般に公開しており、今後の研究の発展および産業界での応用に資することが期待される。

<引用文献>

- Bommes, Levy, Pietroni, Puppo, Silva, Tarini, Zorin, "Quad-Mesh Generation and Processing: A Survey", Computer Graphics Forum, 32(6), 2013
Takayama, Panozzo, Sorkine-Hornung, Sorkine-Hornung, "Sketch-Based Generation and Editing of Quad Meshes", ACM Transactions on Graphics, 32(4), 2013
Nieser, Reitebuch, Polthier, "CubeCover - Parameterization of 3D Volumes", Computer Graphics Forum, 30(5), 2011
Gregson, Sheffer, Zhang, "All-Hex Mesh Generation via Volumetric PolyCube Deformation", Computer Graphics Forum, 30(5), 2011
Huang, Tong, Wei, Bao, "Boundary Aligned Smooth 3D Cross-Frame Field", ACM Transactions on Graphics, 30(6), 2011
Li, Liu, Xu, Wang, Guo, "All-Hex Meshing using Singularity-Restricted Field", ACM Transactions on Graphics, 31(6), 2012
Campen, Bommes, Kobbelt, "Dual Loops Meshing: Quality Quad Layouts on Manifolds", ACM Transactions on Graphics, 31(4), 2012
Campen, Kobbelt, "Dual Strip Weaving: Interactive Design of Quad Layouts using Elastica Strips", ACM Transactions on Graphics, 33(6), 2014
Liu, Zhang, Chien, Solomon, Bommes, "Singularity-constrained octahedral fields for hexahedral meshing", ACM Transactions on Graphics, 37(4), 2018

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

- Kenshi Takayama, "Dual Sheet Meshing: An Interactive Approach to Robust Hexahedralization", Computer Graphics Forum (proceedings of Eurographics), 査読有, Vol.38, No.2, 2019, pp.37--48
DOI: 10.1111/cgf.13617
Giorgio Marcias, Kenshi Takayama, Nico Pietroni, Daniele Panozzo, Olga Sorkine-Hornung, Enrico Puppo, and Paolo Cignoni, "Data-Driven Interactive Quadrangulation", ACM Transactions on Graphics (proceedings of ACM SIGGRAPH), 査読有, Vol.34, No.4, 2015, pp.65:1--65:10
DOI: 10.1145/2766964

[学会発表](計1件)

- Giorgio Marcias, Kenshi Takayama, Nico Pietroni, Daniele Panozzo, Olga Sorkine-Hornung, Enrico Puppo, and Paolo Cignoni, "Data-Driven Interactive Quadrangulation", ACM SIGGRAPH, 2015

[その他]

雑誌論文 のソースコードリポジトリ

<https://bitbucket.org/kenshi84/dual-sheet-meshing/>

雑誌論文 のプロジェクトページ

<http://vcg.isti.cnr.it/Publications/2015/MTPPSPC15/>

研究代表者ホームページ

<http://research.nii.ac.jp/~takayama/>

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。