

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760124

研究課題名(和文)全自動完全六面体メッシュジェネレータの開発

研究課題名(英文)development of all hexahedral mesh generator

研究代表者

川原田 寛(Kawaharada, Hiroshi)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・研究教員

研究者番号：40462676

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文):物体の表面形状から高精度な有限要素法が可能な六面体メッシュを自動で作成した。まず表面形状と同じ位相を持つ初期六面体メッシュを作成し、次に初期六面体メッシュの表面を目的となる表面形状へとフィッティングした。その際表面形状の角を保存するよう六面体メッシュの境界頂点を配置した。さらに六面体メッシュの内部頂点位置を、RBFを使用したベクトル場に基づいたポアソン方程式を解くことにより定めた。

研究成果の概要(英文):Finite element method for all hexahedral meshes is more precisely than that for tetrahedral meshes. Thus, we generated all hexahedral meshes whose boundary surfaces represent target shapes precisely. First we made initial all hexahedral meshes whose topologies are equal to those of target shapes. Next we fit the boundary surfaces of the meshes to target surfaces. We could represent sharp features of target surfaces at the time. Finally we decide the positions of inner vertices by solving Poisson equation using vector field from Radial Basis Functions.

研究分野：形状設計

キーワード：ボリュームメッシュ 全自動生成

1. 研究開始当初の背景

ものつくりにおいて、PC 上で仮想の製品を作りシミュレーションを行うことは、実際の試作品を用いて衝突実験などを行うよりも低コストである。しかし通常 CAD モデルは製品を設計する際に作成されるが、それから自動で有限要素解析用メッシュを作成することは未だに困難を伴う。また加工上の問題等により CAD モデル通りの製品は得られず、現物と CAD モデルの間に差異が生じることも多い。そのため CAD モデルから（例えば衝突）解析用メッシュを作成したとしても信頼性のあるシミュレーションの結果が得られない。そこで、現物に即したシミュレーションを行うために、現物を測定したデータから解析用メッシュを自動で作成することが求められていた。四面体メッシュ、六面体メッシュを初めとするポリウムメッシュ生成は有限要素解析（以下 FEM と略す）において非常に重要な役割を持っている。なぜならポリウムメッシュの質は FEM の結果の精度に大きく影響するからである。特に対象となる物体に適合した境界を持つ境界適合型六面体メッシュは境界適合型の四面体メッシュよりも精度の点で非常に優位とされ重要視されていた。

ただし、FEM のためのポリウムメッシュはヤコビアンが正であるという制約を満たさなければならない。ヤコビアンとは要素のコーナーに接続する 3 つの辺をベクトル a, b, c としたときの三重積 $a \cdot (b \times c)$ のことをいう。ヤコビアンが全て正という制約を境界適合型（ポリウムメッシュの表面が目的形状に合致しているタイプの）六面体メッシュ、特に六面体要素のみからなる完全六面体メッシュで達成することは困難であるとされ 20 年以上研究がつけられているが性能の良いアルゴリズムは発表されず、六面体メッシュ作成の現場では手作業によるメッシュの修正が行われているのが現実であった。

ポリウムメッシュ生成は全自動性が強く求められる。高品質なポリウムメッシュは流体解析、応力解析など幅広い分野に求められるが、自動車に対するシミュレーションなどでは現在のところ多くの人手をかけた行っている。さらには流体解析における境界形状、応力解析における対象形状が変化するような問題では、各時間ごとにポリウムメッシュを作成しなおすことが求められるが、手作業の場合その手間は膨大となるため不可能であった。このように FEM 可能なポリウムメッシュの全自動生成は大きな需要があるが、四面体メッシュに関しては近年ようやく可能になってきたのに対して、六面体メッシュでは未だ不可能であった。

2. 研究の目的

現物を三次元レーザ測定器でスキャンした目的形状は中身がなく、FEM には使えない。よって、目的形状を包み込むように発生

させたボクセル群（中身がある）を目的形状に適合させるという操作を行い、解析用モデルを得る。FEM は自動車産業などの製造業の分野で最もよく用いられているシミュレーション手法であり、その結果の精度向上は現在も産業上強く求められている。特に、本研究で扱う対象となる物体に適合した境界を持つ境界適合型六面体メッシュはシミュレーションにおいて四面体メッシュよりも精度が優位なため重要視されていた。

3. 研究の方法

私はポリウム細分割というポリウムメッシュ中のヤコビアンを全自動で上昇させる手法を開発していた。ただし、この手法には対象とするポリウムメッシュ中に特定のメッシュパターンが存在するとヤコビアンが減少するという欠点があったため、任意のメッシュパターンに対しヤコビアンが減少させない改良を施した。しかしこれらの手法を用いてもヤコビアンが正、つまり FEM が実行可能である六面体メッシュを作成できない場合が存在したため、ポリウム細分割を施す前のメッシュを全自動で、かつ高品位に作成する必要があった。

そこでまず、初期の六面体メッシュ（以下初期メッシュと呼ぶ）をボクセルの集合として作成し、それを変形した。初期メッシュの位相は目的となる形状（以下目的形状と呼ぶ）となるべく同一となるようにした。初期メッシュの変形は 2 段階に分かれる。表面の頂点を目的形状上に移動させる表面フィッティングと内部頂点を目的形状内部へと移動させる内部頂点位置決めである。

表面フィッティングは簡単な手法であるラプラシアンに基づくエネルギーの最小化を行うこととした。この手法は実装が容易であり実行速度もはやいため有用であった。しかしフィッティングの結果であるメッシュ表面に角が存在しないという問題があった。物体の角は工業製品に多く見受けられる箇所である。角は物理シミュレーションの衝突解析で接触部になりやすく、また流体解析などでも流体の挙動を一変させる可能性がある。つまり角が保存されない六面体メッシュでは高精度な解析は望めないのである。この角の保存のために、複数法線ベクトル、辺に基づくフィッティングなど様々な手法を考案し、良好な結果を得た。さらに内部頂点位置決めでは radial basis function を用いたベクトル場を使用してポアソン方程式を解くことにより、通常よりも良い位置決めを達成することができた。

最後に、我々がバッファエレメント法と呼ぶ手法を適用した。これはポリウムメッシュの外側に新たなセルの層を作成するもので、これを使用することによりポリウム細分割でヤコビアンが減少するメッシュパターンを排除することができた。

また、初期メッシュはボクセルの集合であ

るが，作成されるボクセルには物体の回転の分だけ自由度が残っていた．この回転は，工業製品のような平らな個所と角を多く含む物体を対象とした場合では，特に大きな影響を結果のメッシュに及ぼした．そこで物体の平らな面がなるべく座標軸に沿うような回転を求めることとした．

4．研究成果

これらの工夫により，物体の角の再現を論理的に保証することはできなかったが，ボリューム細分割の対象となる良質な六面体メッシュを全自動で作成することができた．ボリューム細分割も全自動であるため，全自動で高品位な六面体メッシュ生成が可能になったと言える．

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

H. Kawaharada, Y. Imai, H. Hiraoka, “Quadrilateral Meshing for Hexahedral Mesh Generation Based on Facet Normal Matching”, International Journal of Automation Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 356-364, May 2014.

Y. Imai, H. Hiraoka, H. Kawaharada, “Quadrilateral Mesh Fitting that Preserves Sharp Features based on Multi-Normals for Laplacian Energy”, Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 1, No. 2, pp. 88-95, 2014.

[学会発表](計 12 件)

今井祐介，吉田雄飛，平岡弘之，川原田寛：六面体メッシュ生成時の目的形状姿勢と表面の数値評価，精密工学会 2015 年度春季大会，東洋大学，2015 年 3 月 17～19 日．

Y. Yoshida, Y. Imai, S. Kim, H. Kawaharada, “Positioning of vertices of Voxel-Based All-Hexahedral Meshes Using Radial Basis Functions”, In the Proc. of ACDDE2014, Jinan, China, October 31 – November 2, 2014.

吉田雄飛，今井祐介，川原田寛：六面体メッシュ生成のための曲面マッチングアルゴリズムの改良，精密工学会 2014 年度秋季大会，鳥取大学，2014 年 9 月 16～18 日．

Y. Imai, H. Hiraoka, H. Kawaharada, “Hexahedral Mesh Generation Using

Adaptive Sampling based on Sharp Features”, In the Proc. of ICGG2014, Innsbruck, Austria, August 4-8, 2014.

Y. Imai, S. Moriya, H. Hiraoka, H. Kawaharada, “Replicating Sharp Features of a Quadrilateral Mesh using the Corresponding Normal Vector”, In the Proc. of ICPE2014, Kanazawa, Ishikawa, Japan, July 22-25, 2014.

今井祐介，平岡弘之，川原田寛：曲面マッチングに基づく境界適合型六面体メッシュ生成，精密工学会第 21 回学生会員卒業研究発表講演会，東京大学本郷キャンパス，2014 年 3 月 18 日．

今井祐介，平岡弘之，川原田寛：精密な角を保存するフィッティングにおける最適なパラメータ推定，日本機械学会第 23 回設計工学・システム部門講演会，沖縄県読谷村 2013 年 10 月 23 日．

守屋翔悟，平岡弘之，今井祐介，川原田寛：セルの形状変形による六面体ボリュームメッシュのヤコビアン改善，2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会，関西大学千里山キャンパス，2013 年 9 月 12～14 日．

今井祐介，守屋翔悟，平岡弘之，川原田寛：辺に付随する法線ベクトルを考慮した Laplacian energy 最小化による精密な角の再構築，日本応用数理学会 2013 年度年会，福岡市アクロス福岡，2013 年 9 月 9～11 日．

川原田寛：境界適合型完全六面体メッシュの自動生成”，NPO 法人 VCAD システム研究会第 33 回定例研究会(招待講演)，理化学研究所計算科学研究機構，2013 年 4 月 16 日．

河原匠，川原田寛，守屋翔悟，平岡弘之：ボリュームメッシュ生成における精密な角の再現のための複数法線ベクトルを考慮したフィッティング，精密工学会 2013 年度春季大会学生会員卒業研究発表講演会，東京工業大学大岡山キャンパス，2013 年 3 月 13 日．

S. Moriya, H. Hiraoka, H. Kawaharada, “Replication of Sharp Features of Hexahedral Meshes Using Modified Laplacian Energy Minimization”, In the Proc. of ACDDE2012, Niseko, Japan, December 7, 2012.

〔図書〕(計 1 件)

川原田寛, 平岡弘之, 井原透, 辻知章,
大川宏史, 加藤慧, 鎌田涼也, 守屋翔悟,
田村亮佑, 南条佳祐, 新津哲, 松田貴仁,
“Creo による CAD/CAE/CAM 入門 - 生産統
合演習 5 日間 - ”, 中央大学出版部, 247
ページ, ISBN978-4-8057-9209-4, 2014
年.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 格子生成装置、及び格子生成プログラ
ム

発明者: 守屋翔悟, 川原田寛

権利者: 学校法人 中央大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-264459

出願年月日: 2012 年 11 月 30 日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川原田 寛 (KAWAHARADA HIROSHI)

横浜国立大学・工学研究院・研究教員

研究者番号: 40462676

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: