

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：32682  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22560135  
 研究課題名（和文） リバースエンジニアリングにおける特徴線抽出技術に基づいた NURBS 曲面の生成  
 研究課題名（英文） NURBS surface generation based on the feature extraction techniques in the reverse engineering  
 研究代表者  
 篠田 淳一（SHINODA JUNICHI）  
 明治大学・研究・知財戦略機構・研究員  
 研究者番号：60266880

研究成果の概要（和文）：リバースエンジニアリングの基幹技術としての特徴線抽出によるセグメンテーション技術の開発を行い、正多面体を用いた手法や円錐面や球面などの解析的な曲面を同定した後に自由曲面をセグメンテーションする手法が得られたが、その中でラインベースの手法が有効であるという結論に至った。さらに T スプラインを用いたパッチの結合アルゴリズムの高度化を行った。加えて、セグメンテーションを高速化する技術も併せて開発も行った。

研究成果の概要（英文）：As the fundamental techniques in the reverse engineering, we developed the segmentation techniques such as the one with platonic solids, and the one identifying the analytic surfaces for example, conics and spheres, and thus segmenting the remaining free-form surfaces, based on the feature lines. We concluded that the line-based method is the best among them. We also enhanced the combination algorithm of T-splines. Moreover we developed the technique to accelerate the segmentation algorithm.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：リバースエンジニアリング、特徴線、NURBS 曲面、CAD、CAE、四面体メッシュ、T スプライン、セグメンテーション

### 1. 研究開始当初の背景

自動車業界などでは実測データから CAD を生成しそれをもとに更に性能向上を目指すリバースエンジニアリングで開発期間の短縮が図られている。ただし、大規模の STL (STereo Lithography) モデルとなると、最終ゴールの CAD 面生成にたどり着くまで相当のベテランでもゆうに1ヶ月を要しているのが現状であり、いかに効率的に理想的な CAD

面を生成するかということが重要な課題になっている。

### 2. 研究の目的

(1) 計測散乱点はノイズも多く、その構造再構成にはドローネの手法が使用されるのが一般であるが、これに対して代表者のグループでは、MOA 法 (Maximum Opposite Angulation; 最大角度法) を開発している。

構造再構成のキーポイントは特徴線を確実に捉えることであり未だ決定打は得られていない。これまでの主な手法は1) 法線ベクトルによる手法、2) 粒子系を用いる手法、3) 正多面体を用いる手法で、代表者のグループもそれぞれに独自の手法を編み出しており、これら三つの手法それぞれの高度化を図るとともに得失を見極め、形状に即した効率的な組み合わせ法を検討する必要がある。

(2)最終ゴールのCAD面はNURBSが標準である。NURBSは複数の四角形パッチに必要な連続性を付与して接続される。まずは四角形パッチを求めるためいくつかの四角形に分けるステップが必要でこのステップはセグメンテーションと称されている。大規模モデルに対するセグメンテーションは、手作業なしでは未だどこも成功していない。これは全ての特徴線は境界線にすることが望ましいが、これだけでは多角形を作ることは困難な場合があったり、時には、四角形以外の多角形ができたりする。代表者のグループは一般の多角形をより小さな四角形の集まりに分解するのに再分割法(Subdivision法)のCatmull-Clarkアルゴリズムを使用して検討したものの未だ成功していない。

(3)次に四角形に分けた後のNURBSの生成はすでに代表者のグループで成功しているもののパッチ間の連続性付与はG1連続(接合点で両側の1階微分係数の方向は等しいが大きさは異なっても良い)以上となるとどこも成功していない。自動車の外板などではC1連続(1階微分まで連続)が要求されるものの、これは敬遠されそれよりも拘束の緩いG1連続の付与の研究が主流であるが代表者のグループも含めどこも成功していない。逆に目的のC1連続を直接検討し、境界上のC1連続には条件付きで成功した。この条件付きというのは境界線上のC1連続の代償として境界付近の形状が元とずれることである。この解決を目指すにはC1検討の成果をG1連続の検討にフィードバックして確立し、もう一度C1連続の検討を行い、条件付きなしで達成することが本研究の課題である。

### 3. 研究の方法

(1)まず、特徴線抽出技術の高度化を図る。特徴線の抽出技術は、形状の特徴を決定する鍵となるだけではなく、後工程であるセグメンテーション技術および高品質なCADパッチの生成技術と関連し、リバーエンジニアリング技術の中でも、特に重要なものである。特徴線の抽出技術には、法線ベクトルによる手法、粒子系を用いる手法、正多面体を用いる手法が代表的なものであるが研究代表者のグループではそれぞれに独自の手法を展

開している。その中で粒子系による手法に焦点を当てて、この手法に必要なとなるポテンシャルの開発を行い、今まで、困難とされてきた凹部の特徴線抽出の問題を解決する。

(2)加えて、5つある正多面体、すなわち正四面体、正六面体、正八面体、正十二面体、正二十面体を用いた特徴線抽出法を高度化する。この手法において、鋭利でない特徴線を抽出するのに有効であるという数値実験結果が得られている。基礎となる部分は既に得られているが、与えられた構造物に対して、どの正多面体が適切であるかという課題が残っている。これには最適化解析手法の援用により解決を試みる。さらにより汎用性を高めるために、正多面体だけではなく準正多面体などの多面体も加えることにより応答曲面法最適化解析で最適な角度と最適な多面体の選択の際の多面体の候補の増加による更なる精度向上を図る。

(3)上記と並行して、NURBS曲面のパッチ間の連続性付与についての研究開発を行う。NURBS曲面は、単独パッチ内では十分な滑らかさ(例えばC1)を付与することは可能であるが、その十分な滑らかさをパッチ間においても保てるかどうかは難しい課題である。代表者らのグループで理論的に得られている、パッチ間でのC1連続性を保ったNURBS曲面の接続手法について、制御点と接続部分の近傍の形状に及ぼす影響との関係を明らかにする。更に必要があれば、G1連続性の理論にも立ち返り、これで得られる知見を再びC1連続の付与に援用することも検討する。C1連続性の理論と既存のG1連続性の理論に対して、プログラムの試作を通じて理論の検証と形状についての評価を行う。

### 4. 研究成果

(1)曲率を用いて特徴線の抽出アルゴリズムの研究を行った。さらに、これと領域成長を用いた対象物表面の形状の分類に関する研究、すなわち、平面、円筒面、円錐面、トーラス面、球面、フィレット面、押し出し面、線織面の分類に関する研究を行った(図1参照)。特徴線の抽出には、法線ベクトルや平均曲率を利用し、形状の分類には、メッシュの局所的な性質を調べるためにガウス写像の次元とその形状特性を利用した。ここで得られた結果により、各セグメントの境界部分の抽出が高精度に行うことができ、加えてそのセグメントの境界が滑らかなものとして得ることができる。これは、NURBS曲面などの曲面生成を行うための一つの重要な要素となる。

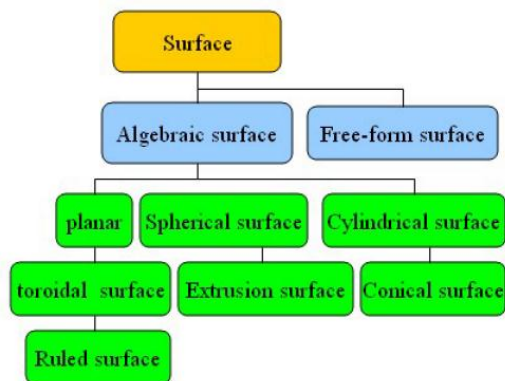


図1 曲面の分類

(2)第2ステップとして、シャープエッジやフィレットの認識の後に部分的なセグメンテーションを行い、残りの自由曲面に対して、法線ベクトルを用いて全体のセグメンテーションを完成するなど、同定アルゴリズムの高度化により、正確なセグメンテーションを実現した(図2)。

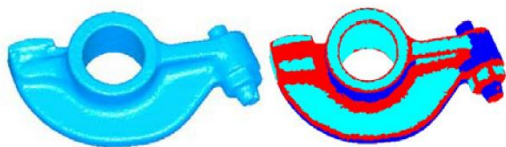


図2 セグメンテーション結果

(3)次に、四面体メッシュ生成アルゴリズムとして、基本的に使用されているドローネ法では表面メッシュの構造を保持した上での自動的四面体メッシュを生成することは困難である。そこで、与えられた表面の三角形メッシュを正確に保持するというアドバンシング・フロント法の長所を生かし、内部にグリッド点を生成し、境界から内部に向かって、グリッド点の中から要素品質が最良となるような点を選択して四面体要素を生成することにより、中心部分の要素品質が悪くなるというアドバンシング・フロント法の欠点も自動生成で克服した。

(4)Tスプラインを用いて、表面パッチの結合による、ギャップのない、任意形状の自由表面の生成法を提案した。このTスプラインによる結合アルゴリズムは、(1)隣接するパッチの共有部分を決定する共有パラメータ領域の決定、(2)スケールとエッジのノット間隔が、接合する他の面とのノット間隔と同じになるようにする再パラメータ化、(3)接合部分上にあるそれぞれのエッジと頂点の機械情報の結合位置情報の認識、(4)接合部分上にあるそれぞれのエッジと頂点の位相情報の認識、と4つの主要ステップからな

る。以上により既存のNURBSパッチの結合アルゴリズムでは困難な、T字型構造を持つNURBSパッチ間の結合も可能にした。

(5)NURBS曲面を生成の精度をよくするためには、その前段階であるセグメンテーションの工程を、精度をよく行う必要がある。そのため、シャープエッジの検出を基調として、平面、円筒面、球面、押し出し面、線識面、回転面、トーラス面、フィレット曲面などの曲面型を同定するセグメンテーション手法と、正四面体、正六面体、正八面体、正十二面体、正二十面体の五つの正多面体(プラトン立体)を基にセグメンテーションを行う手法に加えて、次の手法の研究を行った。その手法とは、各三角形要素の法線ベクトルの計算し、その法線ベクトルの単位球面へ射影し、その座標(点)を三角形に対応させ、次に、法線ベクトルの近さによって点群のクラスタリングを行い、さらに平均値シフト法により点群クラスターの密度中心を求め、これにWardの最小残差法と経路密度法を用いて点群クラスターをマージしてセグメンテーションを行うものである。これらの手法の得失を検討した結果、形状の特性を考慮したセグメンテーションを行うためには、領域成長法による手法、特にラインベースの手法が有効であるという結論に至った。

(6)また、リバースエンジニアリングに現れるような莫大な数の点を有するモデルに対してセグメンテーション技術適用するためには、アルゴリズムの高速化を図る必要も生じてくる。そのため、今回も、上記に加えて、各点に対して、それに接続する全ての三角形要素を考え、各法線ベクトルの平均を考えることにより高速化を実現した。

## 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7件)

①L. Rodriguez, L. Diago, I. Hagiwara, Interactive image segmentation through image polygonal representation, 画像電子学会誌第41号第3号, 2012-6, 223-234, 査読有

②B. Yu, L. A. Diago, M. Savchenko, I. Hagiwara, Line-based region growing image segmentation for mobile device applications, The Journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan, 査読有, Vol. 41, 2012, 7-17

③Z. Zhang, M. Savchenko, Y. Feng, T.

Fukuhisa, J. Shinoda, I. Hagiwara, Automatic segmentation technique for triangular meshes, Transactions of the Japan Society for Computational Engineering and Science, 査読有, 2011, 2010

〔学会発表〕(計8件)

①Z. Zhang, M. Savchenko, J. Shinoda, I. Hagiwara, Mesh based approaches for reverse engineering and manufacturing: shape optimization of the models, 日本応用数理学会 2011 年度年会, 2011 年 9 月 14 日, 同志社大学

②Z. Zhang, J. Shinoda, I. Hagiwara, T. Fukuhisa, Y. Feng, A novel mesh segmentation method based on sharp edge and region growing in reverse engineering, 第 15 回計算工学講演会, 2010 年 5 月 27 日, 九州大学

〔図書〕(計3件)

①日本シミュレーション学会 編(篠田分担), コロナ社, シミュレーション辞典, 2012, 127-127

②篠田淳一, 萩原一郎, シミュレーション学会, シミュレーション, 2010, 160-162

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

篠田 淳一 (SHINODA JUNICHI)  
明治大学・研究・知財戦略機構・研究員  
研究者番号: **60266880**

### (2) 研究分担者

サブチェンコ マリア  
(SAVCHENKO MARIA)  
明治大学・研究・知財戦略機構・研究員  
研究者番号: 40599304

ディアゴ ルイス・アリエル  
(DHIAGO RUISE. ARIERU)  
明治大学・研究・知財戦略機構・研究員  
研究者番号: 20467020