

学位論文題名

Algorithms for Advanced Feature Recognition
on Scanned Meshes of Engineering Objects

（工業製品計測メッシュの高度フィーチャ認識アルゴリズム）

学位論文内容の要旨

3次元レーザスキャナやX線CTスキャナなどの非接触3次元計測機の普及と性能向上に伴い、エンジンなどの実製品から高密度な3次元計測メッシュを取得し、製品開発プロセスの様々な分野でこの計測メッシュを有効に活用したいという要求が近年高まっている。その中でも、製造時期が古いため製品は存在するがそのCADモデルが存在しない場合や、CADモデルと製品との形状誤差が著しく大きな場合、計測メッシュデータに基づいて3次元CADモデルを再構築するリバースエンジニアリング手法が必要となる。工業的に有用なリバースエンジニアリング手法が確立できれば、計測メッシュを検査・再設計・解析等のプロセスで活用でき、製品の品質向上や長寿命化に極めて有効となる。

計測メッシュは、製品表面を微小な三角形の集合で表現したモデルであり、設計で意味のある大局的形状情報を持たない。このためリバースエンジニアリングでは、CADモデルを設計者がモデリングする際に入力するであろう形狀定義を計測メッシュから自動的に認識することが、重要な処理となる。特に機械製品を対象とした場合、その表面は平面や円筒面などの解析曲面で構成されていることが多く、これらの解析曲面領域とその定義パラメータを認識することが求められる。また機能的観点から、機械製品によく現れる形状領域間の対称性や規則性を認識することも、CADモデルのコンパクトな定義や、高精度な解析モデル生成には重要となる。本研究では、この計測メッシュ上に存在する解析曲面領域、ならびに対称性や規則性を有する領域集合を総称し、「フィーチャ」と呼ぶ。このようなフィーチャ認識に関する研究にはさまざまな報告例があるが、それらには共通して、(1)計測ノイズに対するロバスト性や処理安定性が低い、(2)大規模な計測メッシュに対する処理効率性が低い、(3)対称性や規則性をもつフィーチャの認識能力が低い、(4)全自动での認識能力が不十分である、といった欠点がある。

本論文は、機械製品の計測メッシュに対する有用性の高いリバースエンジニアリング手法確立のため、これら4つの欠点を解決した計測メッシュの高度フィーチャ認識を行う3つのアルゴリズムと、認識の基本となる計測メッシュに対する高精度な曲率算出アルゴリズムを提案することを目的とする。

まず、メッシュモデルに対する幾つかの曲率算出アルゴリズムの精度評価より、局所2次多項式曲面フィッティングに基づく算出手法が、計測ノイズが大きいメッシュに対しても高精度な曲率評価が可能であることを示し、局所2次多項式曲面フィッティングを反復に適用する2パスメッシュ曲率算出アルゴリズムを新たに提案している。このアルゴリズムは、従来手法では曲率算出誤差が大

きくなりやすかったメッシュ上のシャープエッジ付近の頂点も含めて、高精度に曲率を算出可能で
きることを明らかにしている。

次に、単一の解析曲面（平面・円筒面・球面・円錐面）で近似可能なメッシュ上の領域抽出を効率的に行える、リージョン・グローイングとマージングに基づくメッシュセグメンテーションアルゴリズムを提案している。まず、前述のアルゴリズムで得られたメッシュ頂点の主曲率をもとに、解析曲面領域の核となる曲率値変動が少ないシード領域を発見する。次に、2次多項式曲面を用いたリージョン・グローイングにより、このシード領域に条件を満たす近傍頂点を反復的に追加することで領域の拡大と抽出を行い、さらにこの抽出領域を新たなシード領域として、2次曲面を用いたリージョン・グローイングを行い、円筒面・球面・円錐面で近似可能なより広い領域を抽出する。最後に、領域境界間の連続性を比較し、同一種類・同一定義パラメータを持つ領域間を統合するリージョン・マージングを適用する。このアルゴリズムは、異種類の解析曲面領域が滑らかに接続されていても、各々の曲面領域を適切に分離・抽出でき、しかも過度に細かな領域を抽出することがないといった特徴をもつ。X線CT計測より得られた大規模な計測メッシュに対し、このアルゴリズムを適用し、抽出された解析曲面の領域形状や曲面分類結果、曲面定義パラメータ精度、処理時間がいずれも妥当かつ実用的であることを実験的に検証している。

次に、計測メッシュ中に存在する形状領域間のユークリッド対称性を、網羅的に認識できる対称性認識アルゴリズムを提案している。まずメッシュ頂点の主曲率をもとに、曲率が急激に変化する平面領域境界付近の頂点集合を特徴領域として抽出し、各特徴領域のペアに対し、頂点数比較やICP(Iterative Closest Point)法を用いて領域間の合同性を判定し、合同な対をシード特徴領域ペアとして抽出する。次に、ICP法とリージョン・グローイングを組み合わせ、同一の座標変換で写像可能な頂点ペアを、逐次的に各シード特徴領域に追加することで領域ペアを反復的に拡大し、ユークリッド対称な領域ペアを抽出する。さらに抽出した対称性のうち、単一平面反射対称性のみを利用して元の3次元形状を再構築可能な全手順を導出し、これを1つのAND/ORグラフで集約表現する。このアルゴリズムは、平行移動・回転・平面反射およびそれら任意の組み合わせからなるユークリッド対称性の認識が可能で、かつ計測メッシュ上の部分的・大局的な対称性のいずれも認識可能である特徴を持つ。自動車部品などのX線CT計測メッシュに対する実験により、提案アルゴリズムが、メッシュ上のユークリッド対称性を数分以内に網羅的に認識できること、ならびに抽出された平面反射対称性とその構築手順に従って、モデル全体形状が高精度に再構築できることを確認している。

次に、計測メッシュ中に存在する形状領域間の平行移動と回転の規則性を認識できるメッシュの規則性認識アルゴリズムを提案している。まずメッシュ頂点の主曲率をもとに、曲率変動が少ない複数領域へのセグメンテーションを行い、得られた領域集合に対し、ICP法を用いた領域形状間の合同性判定を行う。次に、合同な領域集合の重心点群とその点群が存在する参照平面を推定し、参照平面上での投影重心点群に対するスコア関数評価から、平行移動の最小基底ベクトルもしくは回転の最小基底角を推定する。さらに、ある参照領域を最小基底ベクトルや最小基底角の整数倍だけ座標変換し、他の全領域にフィットした際の誤差が最小となる最適基底ベクトル・最適基底角を求めるためのIndexed ICP法を独自に提案している。歯車等の規則性をもつ計測メッシュに対する認識実験により、提案アルゴリズムが、その規則性と規則性の定義パラメータを、高速かつ高精度に抽出認識できることを実験的に確認している。

以上の結果より、本論文で提案する計測メッシュに対する高度フィーチャ認識アルゴリズムは、X線CT計測などから得られた大規模な計測メッシュから3次元CADモデルを再構築するために必須となる、解析曲面領域や複数領域間の対称性や規則性を高精度にかつ高速に認識可能であり、工業

的に有用性の高いリバースエンジニアリング手法の確立に寄与できることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主　査　教　授　金　井　理
副　査　教　授　金　子　俊　一
副　査　教　授　小　野　里　雅　彦

学位論文題名

Algorithms for Advanced Feature Recognition on Scanned Meshes of Engineering Objects

(工業製品計測メッシュの高度フィーチャ認識アルゴリズム)

近年, レーザスキャナや X 線 CT スキャナなどの非接触 3 次元計測技術の性能向上に伴い, エンジンなどの実製品から高密度な 3 次元計測メッシュを取得し, 製品開発の様々な領域でこの計測メッシュを有効活用する要求が高まっている. 例えば, 実製品は存在するがその CAD データが存在しない場合, 計測メッシュから, 主要な面分領域を抽出し, 3 次元 CAD データを再設計することが望まれる. また, 実製品上の欠陥や誤差を含めた性能推定のために, 計測メッシュから有限要素解析メッシュを構築する場合, 解析対象の面分領域形状の特徴に合わせ高精度な解析が行えるようメッシュの再分割を行ったり, 大局的な規則性や対称性に応じてメッシュのサイズを簡略化し, 解析の効率化を図ることも望まれる. さらに検査においては, 実製品形状の面分領域間の寸法誤差や幾何誤差を, CAD データのもつ基準値と比較評価することも必要となる.

しかしこの計測メッシュ自身は, 製品表面を微小三角形の集合として表現したモデルであり, 検査・再設計・解析等の処理で必要とされる面分領域や, 大局的な規則性・対称性の情報を陽には持っていない. 特に機械製品を対象とした場合, その表面の基準形状は, 平面や円筒面などの解析曲面から表現されていることが多く, この解析曲面領域と定義パラメータを計測メッシュから認識するセグメンテーション処理が求められる. また複数の領域間関係として機械製品によく現れる, 形状領域間の対称性や規則性を認識することも, 上述の理由から重要である. このため, 微小三角形集合であるメッシュモデルから, 計測物体上の面分領域や大局的規則性・対称性を自動的に認識するアルゴリズムの開発が, 必要不可欠となる.

本研究では, この計測メッシュ上に存在する解析曲面領域, ならびに対称性や規則性を有する領域集合を総称し, 「フィーチャ」と呼ぶ. このような計測メッシュ上のフィーチャ認識に関する研究には既にさまざまな報告例があるが, それらには, (1) 計測ノイズに対するロバスト性や処理安定性が低い, (2) 大規模な計測メッシュに対する処理能力や処理効率が低い, (3) 対称性や規則性をもつフィーチャの認識能力が低い, (4) 全自動での認識能力が不十分である, といった欠点がある.

本論文は、これらの問題点を解決すべく、実工業製品を計測した数 10-数 100 万面分程度の大規模計測メッシュから、検査・再設計・解析等のエンジニアリングで要求されるフィーチャを、安定かつ自動で、しかも高速に認識できる 3 種類のアルゴリズムと、その認識の基本処理となる高精度なメッシュ曲率算出アルゴリズムを提案することを目的としたものであり、6 章から構成されている。

第 1 章 *Introduction* では、従来の計測メッシュを対象としたフィーチャ認識アルゴリズムの研究例とその問題点を、セグメンテーション・対称性認識・規則性認識という処理の観点からそれぞれ指摘し、これらを解決する新たなアルゴリズムの提案が、本論文の目的であることを述べている。

第 2 章 *Robust and Accurate Curvature Estimation based on Two-pass Method* では、フィーチャ認識の基本となる、局所 2 次多項式曲面フィッティングに基づく高精度メッシュ曲率算出アルゴリズムの提案を行い、測定ノイズを含んだ計測メッシュ上でも曲率が高精度に計算可能なことを、シミュレーションと X 線 CT 計測から得られた工業製品の計測メッシュに対する処理結果に基づき明らかにしている。

第 3 章 *Efficient Mesh Segmentation based on Region Growing and Merging* では、単一解析曲面(平面・円筒面・球面・円錐面)にフィットするメッシュ上の領域抽出を安定に行えるリージョン・グローリング法とリージョン・マージング法を組み合わせたメッシュセグメンテーションアルゴリズムを提案し、領域の抽出精度と抽出処理時間が実用上十分に高精度かつ効率的であることを、自動車部品の大規模計測メッシュを対象に実験的に検証している。

第 4 章 *Euclidean Symmetry Detection based on ICP and Region Growing* では、計測メッシュ中に存在する領域間のユークリッド対称性を網羅的に認識する対称性認識アルゴリズムを提案し、自動車部品の大規模計測メッシュに対する実験から、領域の認識精度が実用上十分であることを実験的に検証している。

第 5 章 *Periodicity Recognition based on Indexed-ICP* では、計測メッシュ中に存在する領域間の回転ならびに平行移動規則性を認識する規則性認識アルゴリズムを提案し、歯車等の計測メッシュに対する認識実験から、規則性とその定義パラメータを高速かつ高精度に認識可能であることを、実験的に確認している。

第 6 章 *Conclusion* では、本研究から得られた結論と今後の課題が要約されている。

これを要するに、著者は、X 線 CT 計測などから得られた機械製品の大規模計測メッシュデータを検査・再設計・解析等のプロセスで有効利用するために必要となる、計測メッシュ上の解析曲面領域や対称性・規則性を高精度・高速に自動認識できる有用性の高いアルゴリズムを確立しており、生産工学、設計工学、デジタル幾何処理工学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。