

平成 21 年 6 月 9 日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007 ～ 2008  
 課題番号：19360067  
 研究課題名（和文）CT計測データからの全自動・高品質3次元形状モデル構築技術の開発  
 研究課題名（英文）A study on automatic high-quality 3D geometric model generation methods from X-ray CT scan data  
 研究代表者  
 金井 理（KANAI SATOSHI）  
 北海道大学・大学院情報科学研究科・教授  
 研究者番号：90194878

**研究成果の概要：** 本研究は、工業用 X 線 CT 計測データから全自動・高品質な 3 次元形状モデルを構築する技術を実現すべく、実工業製品の大規模な X 線 CT 計測メッシュから、エンジニアリングで要求される高品質な 3 次元形状モデルのフィーチャ認識を、高精度に、安定かつ自動で、しかも高速に行なえるアルゴリズムと、認識の基本となる高精度なメッシュ曲率算出アルゴリズムを開発し、そのアルゴリズムが十分な実用性をもつことを検証した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2008 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	9,900,000	2,970,000	12,870,000

研究分野：CAD, 機械工学・生産工学、設計工学、形状モデリング

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、形状モデリング、CAD、X線CTスキャン

## 1. 研究開始当初の背景

近年、工業用 X 線 CT スキャナによる 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することが容易となり、これに伴って製品開発の様々な領域でこの計測メッシュをさらに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 3 次元 CAD データを再設計するリバースエンジニアリングが必要となる。また、実製品上の欠陥や誤差を含めた性能推定のため、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、解析対象の局所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、実製品形状上の局所領域間に発生している寸法誤差や幾何誤差を、基準形状と比較評価し検査することも有用である。

しかし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局所領域や大局的規則性・対称性の情報を陽には持っていない。このため、微小三角形集合であるメッシュモデルから、計測物体上の局所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が必要不可欠となる。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

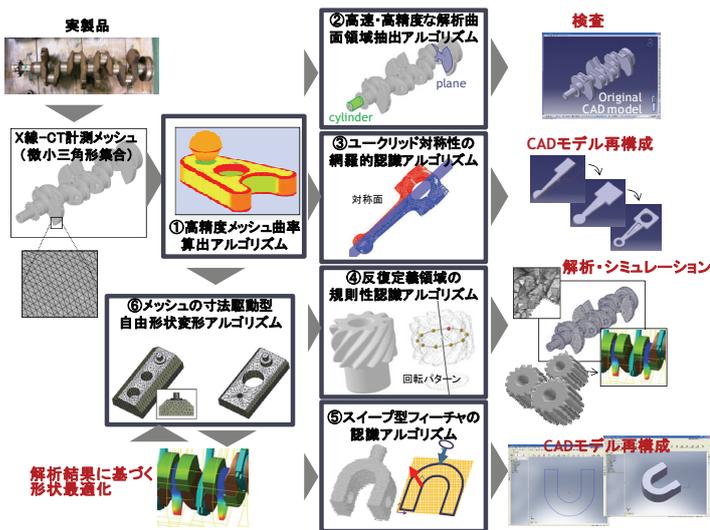


図1 本研究の概要

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。また複数の解析曲面領域間の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重要である。さらに認識された領域間の寸法拘束などをメッシュモデルのままに自由に変形することも、解析結果に基づく形状最適化などで非常に重要となる。

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。このような計測メッシュ上の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。

## 2. 研究の目的

そこで本研究は、CT計測データから全自動・高品質な3次元形状モデルを構築する技術を実現すべく、実工業製品の大型なX線CT計測メッシュから、エンジニアリングで要求される3次元形状モデルの様々なフィーチャ認識を、高精度に安定かつ自動で、しかも高速に行なえるアルゴリズムと、認識の基本となる高精度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ている。

## 3. 研究の方法

本研究では図1に示す下記アルゴリズムの開発を行うと共に、実用規模のX線CT計

測メッシュへこれらを適用し、処理精度・処理時間、処理の自動化レベルを検証することでアルゴリズムの有効性を検証した。

- (1) フィーチャ認識の基本となる高精度メッシュ曲率算出アルゴリズム
- (2) Region Growing/Mergingによる高速・高精度な解析曲面領域抽出アルゴリズム
- (3) Region Growingを応用したユークリッド対称性の網羅的認識アルゴリズム
- (4) 回転や平行移動などの反復型定義領域を認識できる規則性認識アルゴリズム
- (5) 押し出し・軸対称などで定義可能なスweep型フィーチャの認識アルゴリズム
- (6) 領域間の寸法拘束関係の認識と、これを用いたメッシュの寸法駆動型自由形状変形アルゴリズム

## 4. 研究成果

### (1) 高精度メッシュ曲率算出アルゴリズムの開発

まず幾つかの既存メッシュ曲率算出アルゴリズムの精度評価を行い、局所2次多項式曲面フィッティングに基づく曲率算出法が、計測ノイズが大きい場合にも高精度で高速な評価が可能であることを実験より示し、このフィッティングを反復的に適用する2パスメッシュ曲率算出アルゴリズムを新たに提案した。本曲率算出アルゴリズムにより、従来は算出精度が低下していたシャープエッジ付近の頂点においても、曲率計算が高精度に行えることを、計算機シミュレーションおよびCTスキャンから得られた実製品計測メッシュに対する処理結果から明らかにした。

### (2) Region Growing/Mergingによる高速高精度な解析曲面領域抽出アルゴリズムの開発

単一解析曲面(平面・円筒面・球面・円錐面)にフィットできる計測メッシュ上の領域抽出を行うセグメンテーションアルゴリズムを提案した。まず、頂点主曲率をもとに、領域の核となる主曲率値変動が少ないシード領域を発見し、2次多項式曲面を用いたRegion Growingにより、条件を満たす領域近傍の頂点を反復的にシード領域に追加し拡大を行う。さらにこの抽出領域を新たなシード領域として、2次曲面に切り替えたRegion Growingを再度実施し、円筒面・球面・円錐面で近似可能なより広い領域を抽出している。最後に、同一タイプで同一定義パラメータを持つ領域間を統合するRegion Mergingを適用する。これにより、異なるタイプの解析曲面領域が滑らかに接続されていても、各曲面領域を適切に分離・抽出し、しかも過度に細かな領域を抽出することを防止できる。

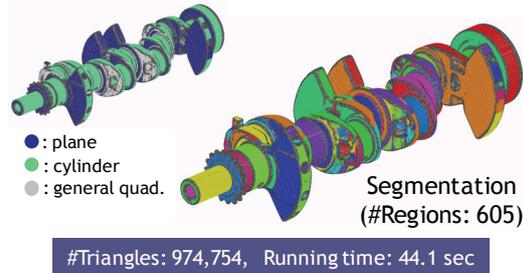
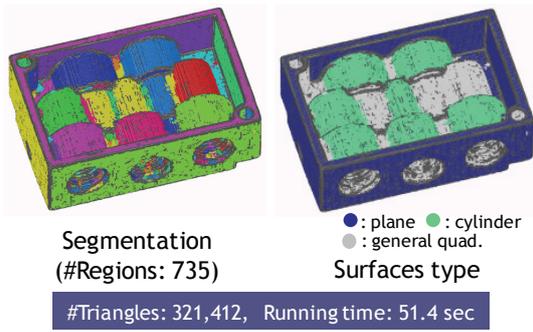


図2 自動車部品 X線 CT 計測メッシュからの解析曲面領域抽出結果

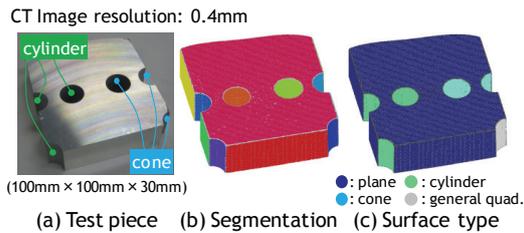


図3 テストピース X線 CT 計測メッシュの領域抽出精度

図2に示されるように、X線CT計測で得られた約百万ポリゴンの自動車エンジン部品の測定メッシュから、提案したRegion-Growing法とRegion-Merging法を併用し、1分以内の処理時間で、4種類の解析曲面領域を認識でき、認識された曲面領域の種類・個数も妥当であることを確認できた。また図3に示された通り、テストピースの機械式3次元測定器の結果との比較により、提案アルゴリズムは計測画像分解能の1/10以下の誤差で高精度に解析曲面領域が抽出できることを実証した。

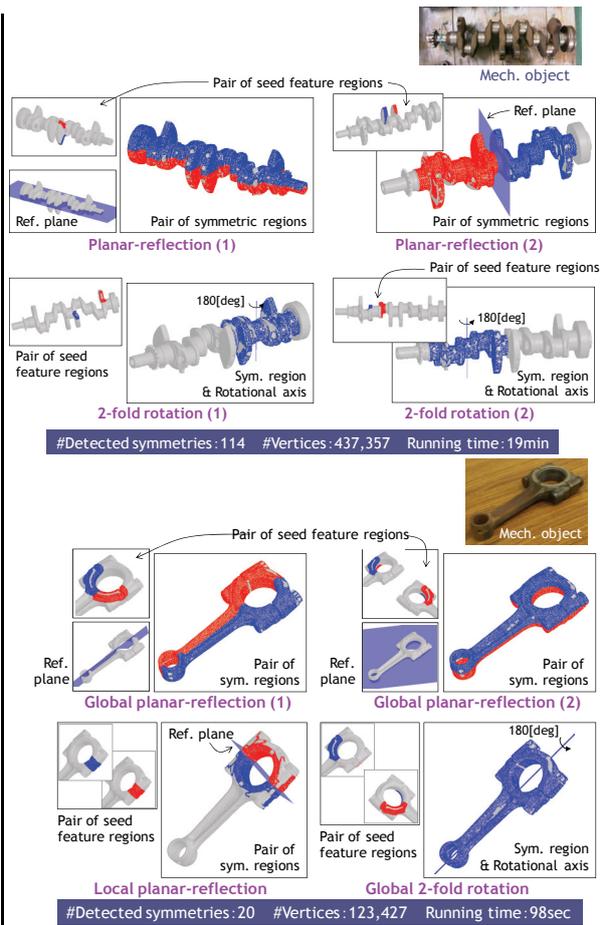


図4 自動車部品 X線 CT 計測メッシュからの対称性認識結果

### (3) Region Growing を応用したユークリッド対称性の網羅的認識アルゴリズムの開発

頂点主曲率をもとに、曲率が急激に変化する領域境界付近の頂点集合を特徴領域として抽出し、領域ペアに対する頂点数比較とICP(Iterative Closest Point)法を用いた領域間合同性判定を行い、これをシード特徴領域ペアとして抽出した。次に、ICP法とRegion-Growing法を組み合わせ、同一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し、ユークリッド対称関係にある最大領域ペアを抽出した。さらに、単一平面反射対称性を利用し、元の計測メッシュの全体形状を再構築可能な全手順をAND/ORグラフに集約表現する対称性を利用したコンパクトな形状定義を実現している。

最後に、自動車部品などのX線CT計測メッシュに対する実験から、図4のように提案アルゴリズムがメッシュ上の全ユークリッド対称性を数分以内に認識できること(図4の例では、合計114種類の対称性を認識)、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、モデル全体形状がメッシュ稜線長の高精度に再構築できることを実験的に検証できた。

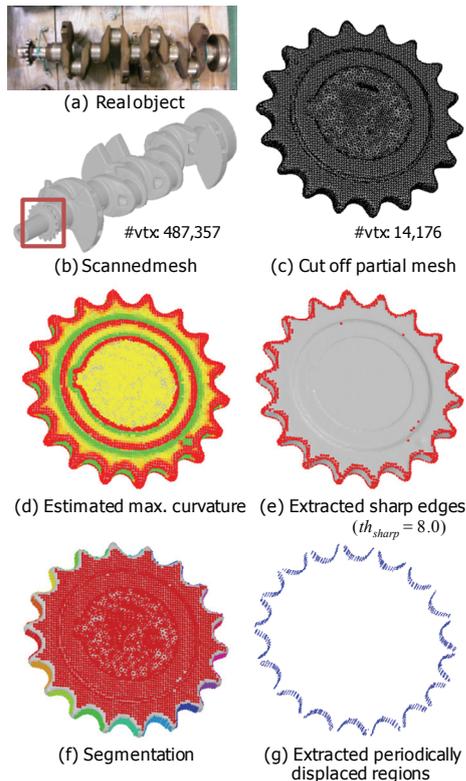


図5 自動車部品X線CT計測メッシュからの規則配置領域認識結果

#### (4) 反復型定義領域を認識できる規則性認識アルゴリズムの開発

まずメッシュ頂点の主曲率をもとに、計測メッシュを複数領域へセグメンテーションし、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Indexed ICP法により、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。

最後に図5に示されるように、歯車やヒートシンク等の規則性をもつ製品のX線計測メッシュに対する認識実験から、提案アルゴリズムが、その規則領域を漏れなく抽出でき、かつ基底ベクトル等の規則領域のCADモデルを定義する際に必要となる定義パラメータを、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。

#### (5) スイープ型フィーチャの認識アルゴリズムの開発

測定メッシュ上から、コンパクトなCADモデル生成には必要不可欠となるスイープ型Featureを自動認識するための法線

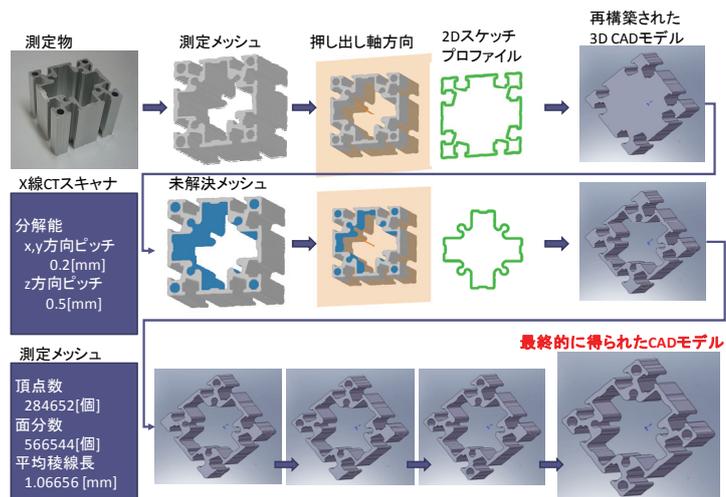


図6 アルミ押し出し材X線CT計測メッシュからのスイープ型押し出しフィーチャの認識結果と、これに基づく3次元CADモデル構築結果

Gauss-Image 投票法を新たに考案し、図6に示されたように、アルミ押し出し材のX線CT計測データからスイープ型フィーチャを連続的に認識し、数分以内でその3次元ソリッドCADモデルを自動的に構築できた。

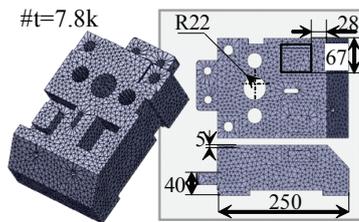
これにより生成された部品単体の3次元CADモデルの精度検証を、測定物の機械式3次元測定器による測定結果と比較し実施した結果、いずれの場合も、その誤差は計測画像分解能の1/10以下、測定メッシュ平均稜線長の50%以下という十分な値を持つことを確認できた。

#### (6) 領域間寸法拘束関係認識とメッシュの寸法駆動型自由形状変形アルゴリズムの開発

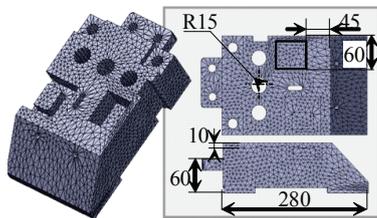
計測メッシュモデル上の面分間2面角の閾値処理によるセグメンテーションを用いて認識されたメッシュ上の面分領域から、領域間に存在する3種類の寸法・幾何拘束関係をルールにより自動認識し、これに基づきメッシュ形状の寸法駆動型自由変形を実時間で与える手法を開発した。

変形が指定できる寸法は、平面間距離、円筒面半径、平面上の物体位置の、3つの寸法を対象とする。これらの寸法は、スケッチの押し出し距離、ポケットの深さやボスの高さ、丸穴径や穴の軸位置といった、幾何フィーチャのパラメータに対応し、その変更は機械部品の設計変更にも有用である。

メッシュ変形では、アフィン変換により内部の頂点位置が変化する制御空間、変形処理前後で内部頂点位置が変化しない固定空間、並びに、制御空間の変化を固定空間に伝播しないよう吸収しながら適切に内部形状を変形させる変形空間を定義する。変形空間は、制御空間と固定空間の間に位置する。変形空間内部の頂点は、重心座標を用いたメッシュ



(a) 入力メッシュ



(b) 各種寸法変更結果

図7 機械製品メッシュの寸法駆動変形

変形手法により変形する。

図7に寸法駆動変形の異なる例を示す。現実的な機械部品のメッシュモデルの寸法を、領域等選択と数値入力により対話的かつ容易に変更できることを確認した。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計7件)

- ① 溝口知広, 金井理: 「ICP とリージョングロウイングを組み合わせた機械部品計測メッシュのユークリッド対称性認識手法」, 精密工学会誌, Vol.75, No.4, pp.545-556, (2009) 査読あり.
- ② Hiroaki Date, So Noguchi, Masahiko Onosato, Satoshi Kanai: “Flexible Control of Multimaterial Tetrahedral Mesh Properties by Using Multiresolution Techniques”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.45, No.3, pp.1352-1355, (2009) 査読あり.  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?isnumber=4787272&arnumber=4787349&count=238&index=105](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?isnumber=4787272&arnumber=4787349&count=238&index=105)
- ③ Hiroaki Date, Masahiko Onosato: “Triangular Mesh Deformation based on Dimensions”, Computer-Aided Design and Applications, Vol.5, No.1-4, pp.287-295, (2009) 査読あり.  
[www.cadanda.com/CAD\\_5\\_1-4\\_287-295.pdf](http://www.cadanda.com/CAD_5_1-4_287-295.pdf)
- ④ 溝口知広, 伊達宏昭, 金井理: 「Region Growing/ Merging を用いた効率的なセグメンテーション」, 精密工学会誌, Vol.74, No.7, pp.752-759, (2008) 査読あり  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110006827298>
- ⑤ Tomohiro Mizoguchi and Satoshi Kanai: “Euclidean Symmetry Detection from Scanned Meshes based on a Combination of ICP and Region Growing Algorithm,” Proc. of ASME/DETC (CD-ROM), DETC-2008-49698, (2008) 査読あり.
- ⑥ Daisuke Kondo, Tomohiro Mizoguchi and Satoshi Kanai: “Recognizing Periodicities on 3D Scanned Meshes Based on Indexed-ICP Algorithm,” Proc. of Virtual Concept (CD-ROM), IDMME\_P35, (2008) 査読あり.
- ⑦ Tomohiro Mizoguchi, Hiroaki Date, and Satoshi Kanai: “Quasi-optimal mesh segmentation via region growing/merging,” Proc. of ASME/DETC (CD-ROM), DETC-2007-35157, (2007) 査読あり.  
<http://store.asme.org/product.asp?catalog%5Fname=Coference+Papers&category%5Fname=&product%5Fid=DETC2007%2D35171>

### 〔学会発表〕(計15件)

- ① 近藤大輔, 溝口知広, 金井理: 「三次元規則パターン認識手法の研究(第1報)ー平行移動・回転組み合わせ型パターンの認識ー」, 2009年度精密工学会春季大会学術講演会, 2009年3月11日, 中央大学, 東京都.  
[http://jglobal.jst.go.jp/detail.php?JGLOBAL\\_ID=200902252148683604](http://jglobal.jst.go.jp/detail.php?JGLOBAL_ID=200902252148683604)
- ② 溝口知広, 金井理: 「規則性認識に基づく組立品計測メッシュの部品別分解と運動シミュレーションへの応用」, 2009年度精密工学会春季大会学術講演会, 2009年3月11日, 中央大学, 東京都.  
[http://jglobal.jst.go.jp/detail.php?JGLOBAL\\_ID=200902291925643617](http://jglobal.jst.go.jp/detail.php?JGLOBAL_ID=200902291925643617)
- ③ Kensuke Sato, Hiroaki Date, Masahiko Onosato: “Fast matching, combinations extraction and configuration of mesh models using graph-based feature representation”, IDMME-Virtual Concept 2008, 2008年10月8日, Friendship Hotel, Beijing, China
- ④ 溝口知広, 金井理: 「リバースエンジニアリングのためのユークリッド対称性認識に関する研究(第3報)ーAND/ORグラフを利用した対称性の階層的表現生成ー」, 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2008年9月17日, 東北大学, 仙台市.  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2008A/0/2008A\\_757/\\_article/-char/ja/](http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2008A/0/2008A_757/_article/-char/ja/)
- ⑤ 近藤大輔, 溝口知広, 金井理: 「計測データからの三次元規則パターン認識手法の研究」, 2008年度精密工学会北海道支部学術講演会, 2008年9月6日, 旭川高専, 旭川市.
- ⑥ 溝口知広, 金井理: 「リバースエンジニアリングのためのユークリッド対称性認識に関する研究(第4報)」, 2008年度精密工学会北海道支部学術講演会, 2008年9月6日, 旭川高専, 旭川市.
- ⑦ 溝口知広, 金井理: 「高密度X線CT計測

モデルからのユークリッド対称性認識」, 2008 年度機械学会生産システム部門研究発表講演会, 2008 年 7 月 4 日, 産業技術大学院大学, 東京都.

- ⑧ 近藤大輔, 溝口知広, 金井理: 「計測データからの 3 次元規則形状認識手法の研究」 2008 年度精密工学会春季大会卒業研究発表会, 2008 年 3 月 17 日, 明治大学, 川崎市.
- ⑨ 伊達宏昭, 小野里雅彦, 田中文基: 「重心座標表現を用いたメッシュ形状変形 — グローバル—ハンドル生成と寸法駆動変形—」, 2008 年度精密工学会 春季大会学術講演会, 2008 年 3 月 17 日, 明治大学, 川崎市.  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2008S/0/2008S\\_1/\\_article/-char/ja/](http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2008S/0/2008S_1/_article/-char/ja/)
- ⑩ 山下憲史, 溝口知広, 金井理: 「スウィープ型フィーチャの認識に基づく測定メッシュからの CAD モデル自動生成(第 2 報)」, 2008 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2008 年 3 月 17 日, 明治大学, 川崎市.  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2008S/0/2008S\\_17/\\_article/-char/ja/](http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2008S/0/2008S_17/_article/-char/ja/)
- ⑪ 溝口知広, 金井理: 「リバースエンジニアリングのためのユークリッド対称性認識手法(第 2 報) — ICP と region growing の組み合わせによる対称性認識手法の開発 —」, 2008 年度精密工学会春季大会学術講演会 2008 年 3 月 17 日, 明治大学, 川崎市.  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2008S/0/2008S\\_9/\\_article/-char/ja/](http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2008S/0/2008S_9/_article/-char/ja/)
- ⑫ 山下憲史, 溝口知広, 金井理: 「スウィープ型フィーチャの認識に基づく測定メッシュからの CAD モデル自動生成」, 2007 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2007 年 9 月 12 日, 旭川ときわ市民ホール, 旭川市.  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2007A/0/2007A\\_319/\\_article/-char/ja/](http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2007A/0/2007A_319/_article/-char/ja/)
- ⑬ 溝口知広, 金井理: 「リバースエンジニアリングのためのユークリッド対称性認識に関する研究」, 2007 年度精密工学会秋季大会学術講演, 2007 年 9 月 12 日, 旭川ときわ市民ホール, 旭川市.  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2007A/0/2007A\\_325/\\_article/-char/ja/](http://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2007A/0/2007A_325/_article/-char/ja/)
- ⑭ 溝口知広, 金井理: 「リバースエンジニアリングのためのユークリッド対称性認識手法」, 2007 年度精密工学会北海道支部学術講演会, 2007 年 8 月 25 日, 苫小牧工業高専, 苫小牧市.
- ⑮ 山下憲史, 溝口知広, 金井理: 「スウィープ型フィーチャの認識に基づく測定メッシュからの CAD モデル自動生成」, 2007 年度精密工学会北海道支部学術講演会, 2007

年 8 月 25 日, 苫小牧工業高専, 苫小牧市.

#### 〔産業財産権〕

#### ○出願状況 (計 1 件)

- ① 名称: ユークリッド対称性認識システム, 方法及びプログラム  
発明者: 金井理, 溝口知広  
権利者: 北海道大学  
種類: 特許  
番号: 特許 2008-174641  
出願年月日: 2008 年 7 月 3 日  
国内外の別: 国内

#### ○取得状況 (計 3 件)

- ① 名称: 電子情報埋め込み方法およびその抽出方法, 電子情報埋め込み装置およびその抽出装置, 並びにそのプログラム  
発明者: 金井理, 中根達英  
権利者: 国際航業(株)  
種類: 特許  
番号: 特許第 4175551 号  
取得年月日: 2008 年 8 月 29 日  
国内外の別: 国内
- ② 名称: 電子情報データ埋め込み方法及び抽出方法並びに電子情報データ埋め込み装置及び抽出装置, 並びに前記方法のプログラムを記録した記録媒体  
発明者: 金井理, 伊達宏昭, 青木潔, 遠藤明彦  
権利者: 金井理, (株)エクサ  
種類: 特許  
番号: 特許第 4189705 号  
取得年月日: 2008 年 9 月 26 日  
国内外の別: 国内
- ③ 名称: Electronic information embedding method and extracting method, electronic information burying apparatus and extracting apparatus, and programs therefor  
発明者: Kanai Satoshi, Nakane Tatsuhide, Kurisaki Naoko, Kitamura Ikuhiro  
権利者: Kokusai Kogyo Co., Ltd.  
種類: 特許  
番号: United States Patent 7370363  
取得年月日: 2008 年 5 月 6 日  
国内外の別: 国外 (米国)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

- 金井理 (KANAI SATOSHI)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号: 90194878

##### (2) 研究分担者

- 伊達宏昭 (DATE HIROAKI)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号: 20374605