鑄造品の迅速リバースエンジニアリングに関する研究*

— 鑄肌面と機械加工面の分離に基づく面属性付きの整形ソリッドモデルの生成 —

浦田昇尚** 伊達宏昭*** 金井 理*** 後藤孝行† 安田星季††

A Study on Rapid Reverse Engineering of Castings

- Generation of Beautified Solid Models with Surface Properties Based on the Separation of Casting and Machining Surfaces -

Akihisa URATA, Hiroaki DATE, Satoshi KANAI, Takayuki GOTOH and Seiki YASUDA

The purpose of our research is to establish a new RE (Reverse Engineering) method which efficiently generates easy-to-use solid models from scanned data of casting. The resulting models have properties of various types of surfaces and are beautified, which means the machining surfaces are aligned, for downstream applications such as duplication with machining and redesign. The proposed RE method is based on the separation of casting and machining surfaces in order to realize efficient RE process. The method consists of four processes. First, the surfaces of the scanned mesh are separated into casting and machining surfaces by existing roughness estimation method. Then, screw threads, through holes, and rotational small features are recognized from the separated machining surfaces. Next, beautification is done to make machining planes and cylinders parallel, orthogonal, co-planar, and co-axial using estimated dominant axes. Finally, beautified solid models with surface properties of castings are generated using Boolean operation of solid models generated from each surface. In this paper, methods for second, third and final process are newly proposed, and their performances are shown through the experiments. The effectiveness of the proposed RE method is also confirmed by comparison of RE time by our method with the one by skilled worker.

Key words: reverse engineering, castings, triangular mesh, surface recognition, beautification, solid model generation

1. 緒 言

鑄造品は、自動車におけるエンジン、水道管におけるバルブなど幅広く使われている。また、非接触式三次元形状測定機を用いて得られた製品の計測データに基づいてソリッドモデルを生成するリバースエンジニアリング (Reverse Engineering, RE) が、製品開発の効率化や製品の高品質化に用いられている。鑄造品に対しても、例えば、現物の形状に基づく強度解析等の各種解析作業や、寸法の確認といった目的での RE が実施されており、現在、鑄造品に対するより高効率な RE 手法の確立が必要となっている。

鑄造品の表面は、機能面である機械加工面とその他の鑄肌面からなっており、RE で得られたソリッドモデルに対して、鑄肌面と機械加工面ではその利用において要求される精度が異なる場合がある。また、RE で得られたソリッドモデルの複製や再設計などへの応用においては、その表面が鑄肌面と機械加工面で区別されていることが望ましい。そのため、鑄肌面と機械加工面を分離し、それぞれの曲面に適した幾何処理を適用することで効率的な RE とソリッドモデルの利用が実現できると考えられる。この考えのもとで、浦田ら¹⁾は、鑄造品の鑄肌面と機械加工面の分離に基づく RE 手法を提案している。この手法は、従来の高品質な曲面の抽出やロバストな曲面の抽出を主題とした RE

Fig. 1 Main surface types of castings

の研究^{2)~4)}とは異なり、計測三角形メッシュから推定される表面粗さに基づいて鑄肌面と機械加工面とを分離し、分離した機械加工面から平面および円筒面を効率的に認識している。また、曲面分離機能を用いることにより、約 15% の RE 作業時間の短縮が可能であったことが示されている。

一方で、RE の結果として、ネジ加工面や貫通穴等の面属性が付与され、さらに機械加工面が整列されたソリッドモデルが得られることは、モデル利用においてより有益である。例えば、面属性の付与は複製において曲面種類に応じた加工方法の自動決定、設計においては表面が持つ機能の理解を可能とする。また、生成されたソリッドモデルに基づき機械加工するためには、機械加工面が整列 (平行化、直交化、共面化、同軸化) されていることが必要である。そこで本論文では、利用しやすい鑄造品のソリッドモデルを RE により迅速に生成することを目的として、各種機械加工面の認識手法、ならびに認識した機械加工面の整列手法を提案する。

鑄造品の主要な面は、図 1 に示す通り、鑄肌面、機械加工平面、機械加工円筒面、ネジ加工面、貫通穴、そして、旋盤加工に

* 原稿受付 平成 30 年 8 月 3 日
掲載決定 平成 30 年 11 月 20 日
** 学生会員 北海道大学大学院情報科学研究科 (北海道札幌市北区北 14 条西 9 丁目)
*** 正 会 員 北海道大学大学院情報科学研究科 (同上)
† 正 会 員 旭川工業高等専門学校 (北海道旭川市春光台 2 条 2 丁目)
†† 正 会 員 北海道立総合研究機構工業試験場 (北海道札幌市北区北 19 条西 11 丁目)

Fig. 2 Overview of the proposed RE method

よって形成される機械加工面間の面取りやフィレットといった回転面状従属フィーチャである。本論文では既存手法¹⁾では認識されていない、ネジ加工面、貫通穴、回転面状従属フィーチャを認識する手法を提案する。また、機械加工面の整列のための、機械加工平面法線と円筒軸の平行化と直交化、同一平面上にあると推定される機械加工平面の共面化、同一軸上にあると推定される機械加工円筒面の同軸化手法を提案する。さらに、提案法により得られた各種機械加工面、ならびに分離した鋳肌面から集合演算によりソリッドモデルを生成する手法について述べ、熟練 RE 作業による RE の作業時間等の比較を通して提案 RE 手法の有用性を示す。

本論文の構成は以下の通りである。まず、第 2 章で提案 RE 手法の全体像と関連研究について述べる。第 3 章で、提案する各種機械加工面の認識手法、機械加工面の整列手法、ならびにソリッドモデル生成手法について述べ、各手法の結果と考察を合わせて述べる。最後に、第 4 章で結言について述べる。

2. 提案 RE 手法の全体像と関連研究

2.1 提案 RE 手法の全体像

提案する鋳造品の RE 手法の全体像を図 2 に示す。本手法は以下に示す 4 つのプロセスからなる。

- (1) 計測三角形メッシュの分離¹⁾ (図 2, A1)
 鋳造品の計測三角形メッシュから表面の粗さを推定し、粗さに基づく鋳肌面と機械加工面の分離を行う。さらに、機械加工面を平面と円筒面に分離する。
- (2) 機械加工面の認識 (図 2, A2)
 鋳造品の機械加工面中に頻出するネジ加工面、貫通穴、回転面状従属フィーチャを分離された機械加工面から認識する。
- (3) 抽出曲面の整形 (図 2, A3)
 認識された機械加工平面と円筒面に対し、平行化、直交化、共面化、同軸化を行う。また、分離された鋳肌面のメッシュ境界を機械加工面と交差するように修正する¹⁾。
- (4) ソリッドモデル生成 (図 2, A4)
 分離された鋳肌面および機械加工面から個々のソリッドモデルを生成し、それらの集合演算により面属性付きの整形ソリッドモデルを生成する。

2.2 関連研究

本節では、本論文で提案する各種機械加工面の認識手法と整列手法の関連研究について述べる。

2.2.1 ネジ加工面の認識

ネジ加工面の品質検査を目的に、ネジ加工面の表面を計測し、その計測データからネジ加工面のパラメータを推定する研究はいくつか存在する⁵⁶⁾。例えば Sergey ら⁵⁷⁾や Kosarevsky ら⁵⁸⁾は、Hough 変換を用いて、接触式の変位センサによるネジ加工面の軸方向に沿った二次元計測データや CT スキャンによる三次元計測データからネジ加工面のパラメータを推定する手法を提案している。これらの研究ではネジ加工面のピッチ等のパラメータを高精度に推定できているが、ネジ加工面のみが計測された計測データ、もしくは計測データ中から手動で抽出したネジ加工面部分を入力としており、機械加工部品中のネジ加工面の自動認識は行っていない。本研究では、ネジ加工面は同一局所形状がその軸方向に沿って一定間隔で存在するという性質を用いて、鋳造品全体の計測三角形メッシュからネジ加工面を自動的に認識する手法を提案する。また、ネジ加工面領域の法線集合や三角形集合に対する各種フィッティングにより、ネジ加工面パラメータを推定する方法を提案する。

2.2.2 貫通穴の認識

貫通穴 (丸穴) などは、側面の計測が十分に行えず計測領域が不十分となることが多く、円筒面フィッティングによる認識は困難である。また、側面の計測が十分に行われていない貫通穴の認識に関する研究は著者らの知る限り存在しない。本研究では、側面がほとんど計測されていない貫通穴であっても、貫通穴によって物体表面に形成される円状のメッシュ境界を手がかりにすることで貫通穴を認識する手法を提案する。

2.2.3 回転面状従属フィーチャの認識

本論文では、鋳造品によくみられる、円錐面として定義される面取りや、トーラス面として定義されるフィレットといった回転面状従属フィーチャを認識の対象とする。従来、計測データに含まれるトーラス面や円錐面は、例えば、RANSAC⁵⁹⁾に基づく曲面フィッティングや領域成長法などにより認識される。また、計測データから回転面を認識する研究も行われており、例えば、緑川ら⁶⁰⁾は、計測データの断面系列への円フィッティングに基づく中心軸の推定と、中心軸周りの点の投影像に対する直線と円弧のフィッティングにより回転面を認識する手法を開発した。

本研究では、回転面状従属フィーチャは、すでに認識した機械加工面の間に存在し、その軸が、隣接の機械加工面と一致するという性質を用いて、計測三角形メッシュから回転面状従属フィーチャを効率よく認識する手法を提案する。また、本手法は微小なフィーチャであっても安定して抽出でき、さらに、隣接する機

機械加工面との接続を考慮しながら面が生成される。

2.2.4 抽出機械加工面の整列

計測メッシュから認識された曲面を整列する研究がいくつか行われている。例えば Kovács ら⁸⁾は、計測メッシュから認識した曲面から整列された CAD モデルを生成することを目的に、認識された曲面に対し、平行化、直交化、規則化、対称化を行う。最初に、認識された平面の法線や円筒面の軸方向ベクトルのクラスタリングにより、支配的な軸ベクトルを推定し、さらに、直交関係にあるものを初期の直交する支配的な軸として推定する。そして、最小値関数を含む、曲面の面積を信頼性として重み付けされた軸間の角度評価関数に対する最小化問題を解くことで、最終的な直交する支配的な軸を推定する。得られた直交する支配的な軸に基づき、認識された曲面の法線や軸方向を修正することにより曲面の整列を行う。しかしながら高い計算コストの課題が指摘されており、本研究では、より単純な計算による機械加工平面、円筒面の整列手法を提案する。具体的には、曲面の面積で重みづけした平面の法線や円筒面の軸に対する主成分分析による支配的な軸の推定を用いた平行化、直交化、ならびに重み付き平均に基づく共面化、同軸化手法を提案し、その有効性を確認する。

3. 鋳肌面と機械加工面の分離に基づく面属性付きの整形ソリッドモデルの生成手法

はじめに、鋳肌面と機械加工面の分離手法¹⁾について述べる。その後、各節にて各種機械加工面の認識と整列手法、そして鋳肌面と機械加工面との集合演算によるソリッドモデル生成手法を述べ、その適用結果を示す。

3.1 鋳肌面と機械加工面の分離¹⁾

最初に、計測三角形メッシュの各三角形 t に対し、周辺領域の面粗さを表す三角形粗さ値 r_t をスムージング前後の単位法線ベクトルの差として算出する。その後、三角形粗さ値 r_t が高い三角形を鋳肌面、低い三角形を機械加工面とする閾値処理により計測三角形メッシュを分離する。最後に、領域成長法と円筒面フィッティングにより機械加工面から機械加工円筒面領域を抽出し、大きな半径を持つ円筒面領域を機械加工平面領域として抽出する。

3.2 ネジ加工面の認識

本研究では、ネジ加工面は同一局所形状がその軸方向に沿って一定間隔で存在するという性質を用いることにより、鋳造品の計測三角形メッシュからネジ加工面領域を自動的に認識し、そのパラメータを推定する。

図 3(a)にネジ加工面領域認識手法の流れを示す。最初に、3.1 節の手法により認識した機械加工面に対し Lloyd のアルゴリズム⁹⁾を適用し、同一局所形状の検出に用いる等面積局所領域集合 R を得る。次に、各領域 $r_a \in R$ に対し、その近傍領域集合 $N(a)$ を抽出し、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム¹⁰⁾により r_a を非隣接の近傍領域 $r_n \in N(a)$ へ位置合わせする。 r_a の各頂点から r_n の最近点までの平均距離が閾値以下の場合、 r_a と r_n が同一局所形状であると判定し、ネジ加工面の局所領域の候補としてラベル付けする。そして、ラベルの付いた局所領域の連結集合を作成し、それぞれの集合をネジ加工面の候補領域として認識する。本研究で使用している三角形粗さ値推定手法はエッジ部分で三角形粗さ値が高く推定される傾向にある。ネジ加工面部分においては尾根と谷の部分で三角形粗さ値が高く推定され鋳肌面として判定されるため、図 3(b)に示すように、ネジ加工面領域はネジ

Fig. 3 Screw thread recognition

Fig. 4 Parameters of the screw thread

の尾根線よりも上側の領域と下側の領域の二つに分割されて認識される。本手法では各候補領域に対してネジ加工面パラメータを推定し、最後に、類似したパラメータを持つ領域同士を統合することで一つのネジ加工面として認識する。

次に、ネジのパラメータである、軸方向ベクトル $\mathbf{a}$ と軸上の1点 $\mathbf{c}$ 、フランク角 α 、外形もしくは内径 d 、ピッチ p を認識したネジ加工面候補領域から推定する。まず、ネジ加工面候補領域の三角形法線ベクトルはネジの軸に対し一定角度で傾くため、それらのガウス球上の像は平面上に乗り、この平面の法線は、ネジの軸方向ベクトルとみなせる。そのため、図 4(b)に示すように、ネジ加工面候補領域の三角形法線 (図 4(a)) をガウス球に投影し、その像に対し最小二乗法を用いて平面をフィッティングする。得られたフィット平面 F_p の法線を軸方向ベクトル $\mathbf{a}$ とする。次に、中心軸に対するネジ加工面領域の三角形法線ベクトルの傾きはフランク角に依存することから、図 4(c)に示すように、フランク角 α は、ガウス球の中心とフィット平面 F_p の距離から推定する。そして、外径ネジの外径 d は、ネジ加工面領域にフィッティングする最小外接円筒面の直径となることから、図 4(d)に示すように、ネジ加工面の軸方向ベクトル $\mathbf{a}$ に垂直な平面に投影した頂点の像に対する最小外接円¹¹⁾の直径 (内径ネジの内径の場合、最大内接円の直径) として推定する。ピッチ p は、ネジ加工面領域が軸方向に一定間隔で同一局所形状が現れるという性質を用いる。図 4(e)に示すように、最初に、ネジ加工面候補領域からランダムに選択した一つの頂点を通り、方向が $\mathbf{a}$ である軸を持つ探索円筒領域を設定する。次に、探索円筒領域内の連結している局所領域を取り出し、最も領域の重心点間距離が短い領域のペアに対し

ICP アルゴリズムによる位置合わせを行い、軸方向の移動量を算出する。この頂点の選択と移動量の算出を複数回実施し、移動量の平均をピッチとして推定する。最後に、ネジ加工面の規格に適合しないパラメータを持つ候補領域の除去および空間的に距離が近く類似パラメータを持つ候補領域を統合しネジ加工面を認識する。

図 5 にネジ加工面を含む計測三角形メッシュに対するネジ加工面の認識結果（緑：ネジ加工面，黒：その他の面）を示す。計測三角形メッシュに存在するネジ加工面を一部分欠けはあるものの認識できていることがわかる。また、表 1 に提案手法により推定したネジ加工面パラメータと RE ソフトウェア上で手動により計測したネジ加工面パラメータ、そしてネジの規格を示す。提案手法は手動による推定と同程度の精度でネジ加工面のパラメータを推定できることを確認し、さらに、JIS におけるネジの規格との比較から、提案手法はネジ加工面の規格を特定するのに十分な精度でパラメータを推定できることを確認した。

3.3 貫通穴の認識

円筒面状の貫通穴は鋳造品の機能上重要であるにも関わらず、三次元計測の際の影響による計測抜けが発生する場合が多い。このような計測抜けでほとんど穴側面が計測されていない場合、一般的な曲面抽出手法¹⁹⁾では貫通穴を認識することが困難である。そこで、本研究では、貫通穴により物体表面に形成される円状のメッシュ境界を手がかりにすることで、穴側面の大部分が未計測となっている計測三角形メッシュから円筒面状の貫通穴を認識する。なお、本研究では締結部といった物体同士が接触している箇所の貫通穴を対象とし、貫通穴の少なくとも一方の境界が機械加工平面上に存在し、かつ穴の軸は平面に垂直であると仮定する。

最初に、図 6(a)に示す抽出した機械加工平面 P_i のメッシュ M^{P_i} から貫通穴の一方の境界となる円状の境界頂点集合 $C_j^{P_i}$ を抽出するために、図 6(b)に示すように、 M^{P_i} 内の各境界ループ j 上の頂点集合 $B_j^{P_i}$ を抽出する。そして、 $B_j^{P_i}$ を平面 P_i に投影し、図 6(c)に示すように、投影点に対し RANSAC⁹⁾による円 F_j をフィッティングし、インライアが十分な割合で存在する場合、 $B_j^{P_i}$ を円状境界頂点集合 $C_j^{P_i}$ として抽出する。

次に、円状境界頂点集合 $C_j^{P_i}$ について、貫通穴のもう一端の境界頂点集合 $C_j^{P_{i'}}$ を抽出する。まず、図 6(d)に示すように、 F_j の中心から $C_j^{P_i}$ の最遠点までの距離を半径とする円 F_j' を定義し、 P_i の形状内向き法線方向への F_j' のスイープにより定義される探索円筒領域 S_c を生成する。そして、 S_c 内のメッシュ境界頂点集合をもう一端の境界頂点集合の候補 $B_j^{P_{i'}}$ とする。次に、以下の二つの条件をともに満たす $B_j^{P_{i'}}$ を、 $C_j^{P_i}$ のもう一端の境界頂点集合 $C_j^{P_{i'}}$ として抽出する。

- ① 平面 P_i に投影した $B_j^{P_{i'}}$ のうち、 F_j から一定距離以上離れた点の割合が閾値以下
- ② P_i の形状外向き法線と $B_j^{P_{i'}}$ の接続三角形集合の平均法線との法線間角度が閾値以上

ここで、①の条件は、円筒状の貫通穴によって生成された境界を選択するためであり、②の条件は、機械加工平面 P_i 側の境界付近に存在する面取り部分の境界の選択を回避するため、そして貫通穴のもう一端の境界として不適切な向きを持つ境界の選択を回避するためである。また、複数の $C_j^{P_i}$ の候補が得られた場合には、 $C_j^{P_i}$ に最も境界頂点集合の重心間距離に近いものを選択する。

最後に、貫通穴の軸方向ベクトルを P_i の法線、内径と軸上点を

Fig. 5 Recognized screw thread

Table 1 Estimated screw thread parameters

	Plug 1 (Fig. 5 (a))			Plug 2 (Fig. 5 (b))		
	proposed method	manual measurement	G2 (JIS B 0202)	proposed method	manual measurement	G3/4 (JIS B 0202)
External diameter mm	59.7	59.6	59.5	26.9	26.3	26.4
Pitch mm	2.3	2.3	2.3	1.8	1.8	1.8
Flank angle deg	29.0	27.5	26.5	27.2	27.5	27.5

Fig. 6 Through hole recognition

Fig. 7 Recognized through holes

Table 2 Estimated through hole diameters mm

	Manual measurement	Proposed method	Error
Hole of A	27.0	26.8	0.2
Hole of B	11.3	Max: 11.2	0.1
		Min: 11.1	0.2

P_i に投影された S_c 内の頂点の像に対するフィット円の直径と中心点から推定する。本論文では、これらのフィット円から推定される貫通穴について、内部に他の形状が含まれていないことを確認し、さらに、計測三角形メッシュ上で貫通できる最大の径を保証するため、最大内接円フィッティング¹¹⁾を用いて内径を推

定する。フィッティングした最大内接円の径が C_j^{Pl} へのフィッティング円 F_j の径とほぼ等しい場合、貫通穴として認識する。

貫通穴の認識結果を図 7 に示す。図中の黒が貫通穴であり、灰がその他の面である。図 7 (a)では鋳造品中に存在する貫通穴を全て認識できた。一方、図 7 (b)のモデルでは、機械加工平面に一方の境界を持つという仮定を満たさない貫通穴が二つ存在したため、認識率は 81.8% (11 個中 9 個) となった。また、表 2 は図 7 (b)中の A, B の貫通穴に対する推定パラメータと誤差を示しており、最大誤差は 0.2mm であった。

3.4 回転面状従属フィーチャの認識

3.1 節の鋳肌面と機械加工面の分離において、計測三角形メッシュの全ての三角形は鋳肌面と機械加工面に分類され、3.3 節までの曲面認識処理を通して、機械加工面上の三角形は、平面、円筒面、ネジ加工面、貫通穴、その他のいずれか一つに分類される。本研究では、鋳造品中の軸対称の機械加工面間に存在する面取り(円錐面)やフィレット(トーラス面)といった回転面状従属フィーチャを、機械加工面上のその他の三角形集合 T_0 から認識し、そのプロファイル曲線を抽出する。なお、本手法で使用する機械加工平面の法線ベクトルおよび機械加工円筒面の軸方向ベクトルは 3.5 節で示す機械加工面整形手法により整理されているものとする。

最初に、その他の三角形集合 T_0 から連結三角形集合 C_i を抽出する。そして、図 8(a)に示すように、 C_i の頂点を、隣接する機械加工円筒面の軸からの距離を u 軸、軸上の位置を v 軸として定義される投影面 P_i に投影する。また、隣接する機械加工面 A, B を投影し、それらの投影像 I_A, I_B を得る。ここで、 I_A, I_B は、機械加工平面であれば u 軸に平行な直線分、円筒面であれば u 軸に垂直な直線分となる。平面の像の直線分の端点は、平面領域内の頂点の支配的な軸からの最大および最小距離に位置し、円筒面の像の直線分の端点は、領域内頂点の支配的な軸に沿った方向の最大、最小の位置となる。次に、投影点に対しRANSAC⁹⁾を用いた直線フィッティングを適用する。もし、直線がよくフィッティングする(十分に多くの投影点が直線上に存在する)場合、面取りと判定し、図 8(b)に示すように、隣接する機械加工面の P 上の像である直線 I_A, I_B と交差する点 c_1, c_2 により分割された線分をプロファイル曲線として抽出する。面取りと判定されなかった場合には、図 8(c)に示すように、投影点に対し隣接する機械加工面の像 I_A, I_B に正接するフィット円を、 I_A, I_B 間のフィレットのプロファイル曲線として抽出する。

図 9 は本手法で抽出したプロファイル曲線を計測三角形メッシュに重畳表示した結果であり、図中の赤線が抽出したプロファイル曲線である。微小な領域であっても計測三角形メッシュから回転面状従属フィーチャとして認識できていることがわかる。

3.5 支配的な軸に基づく認識機械加工面の整理

鋳造品の機械加工平面や機械加工円筒面は、しばしば機能的な役割のために同じ法線方向や軸方向、さらに共面や同軸の関係を持つように設計される。従って、RE で得られるソリッドモデルは、複製における加工や再設計といった応用では、認識された曲面が整理されていることが求められる。そこで、本研究では、認識された機械加工面に対して、大きな面積を持つ機械加工面から抽出したパラメータは高い信頼性があることを考慮しながら、平行、直交、共面、同軸の 4 つの関係に従い整理する。

図 10 に認識された機械加工平面法線ベクトルと円筒面軸方向ベクトルに基づく鋳造品の支配的な軸の推定手法を示す。最

Fig. 8 Rotational small feature extraction

Fig. 9 Estimated profile of surface of revolution

Fig. 10 Extraction of the orthogonal dominant axis

Fig. 11 Aligned machining surfaces

初に、図 10(a)に示す機械加工平面の単位法線ベクトルと機械加工円筒面の単位軸方向ベクトルを、図 10(b)に示すようにガウス

Fig. 12 Solid model generation process

Table 3 The processing time of the solid model generation

Model	[A] Mesh informations			[B] Time of RE by proposed method min									[C] Time of manual RE by a skilled worker min
	#vtxs	#tels	Ave. edge length mm	Surface separation & recognition (our method)	Casting surface processing			Machining surface processing			Boolean operation	Total	
					Hole filling	Surface fitting	Solid generation	Surface generation (manual)	Solid generation	Assigning surfaces properties (manual)			
(a) Plug	1,010k	1,960k	0.14	1	2	5	1	7	1	1	2	20	19
(b) Joint	550k	1,040k	0.27	1	11	4	1	14	1	-	4	36	50

球に投影する。次に、図 10(c)に示すように、投影像に対し k-means クラスタリングを適用し、各クラスターの重心を支配的な軸として抽出する。このとき、初期クラスターのシードは正 20 面体を一様分割した 320 面体の面法線とし、クラスタリングの各繰返し処理において隣接するクラスターの重心の位置ベクトル間の角度が閾値以下のクラスターを統合する。次に、図 10(d)に示すように、ほぼ垂直な関係を持つ支配的な軸の組合せ C^{comb} を総当たりで検出する。複数の C^{comb} が検出された場合、各 C^{comb} に属する法線と軸方向ベクトルに対応する機械加工面の面積の総和を求め、総面積が最大となる C^{comb} を選択する。そして、 C^{comb} に属する各法線、軸ベクトルを、対応する機械加工面の面積で重みづけし、得られたベクトルの集合に対して原点を平均とする主成分分析を適用する。具体的には式(1)で得られる行列 C の固有値解析を行う。

$$C = \frac{1}{|M^{CC}|} \sum_{i \in M^{CC}} a_i^2 (v_i v_i^T) \quad (1)$$

ここで、 M^{CC} は C^{comb} に含まれる法線もしくは軸を持つ機械加工面の集合、 a_i は機械加工面 i の表面積、 v_i は機械加工面 i の単位法線ベクトルもしくは単位軸方向ベクトルである。得られた固有ベクトルを直交する支配的な軸とする。

次に、 C^{comb} に属する法線と軸方向ベクトルに対応する支配的な軸に置き換えることで平行化および直交化を行う。また、同クラスターに属し、原点から平面までの距離がほぼ等しい平面集合を共面関係にあるとみなし、それらの原点からの距離を、面積による重み付き平均距離に置き換えることで共面化する。同様に、同クラスターに属し、軸間距離が閾値以下となる円筒面集合を同軸関係にあるとみなし、それぞれの円筒面位置ベクトルを、面積による重み付き平均に修正することで同軸化する。最後に、置き換えた曲面のパラメータを拘束して平面もしくは円筒面を再フィッティングし、機械加工面のパラメータを修正する。

図 11 に機械加工面の整列結果を示す。図 11 中の赤、緑、青はそれぞれ得られた直交する支配的な軸に属する機械加工面であり、黒は直交する支配的な軸に属していない機械加工面である。目視ではあるが、直交する支配的な軸が正しく推定されていること、ならびに、各軸に属する面が正しく認識できていることを確認した。また、法線と軸の整列の結果、図 11(a)の軸方向は最大で 0.58 度、図 11(b)の軸方向は最大で 0.79 度修正された。

Fig. 13 Generated solid models

3.6 集合演算による抽出曲面からのソリッドモデル生成

図 12 に提案手法を用いた計測三角形メッシュからのソリッドモデル生成手順を示す。最初に、計測三角形メッシュを鑄肌面と機械加工面に分離する (図 12(A))。そして、分離された鑄肌面に対し穴埋め、自由曲面フィッティング (図 12(B))、ソリッドモデル化 (図 12(C)) を適用し、鑄肌面のソリッドモデルを生成する。一方、分離された機械加工面は、認識機械加工面ごとに曲面情報に基づきソリッドモデルを生成し曲面属性やパラメータを与える (図 12(D))。最後に、鑄肌面と機械加工面のソリッドモデルの集合演算により、機械加工面が整列された面属性付きの鑄造品のソリッドモデルを生成 (図 12(E)) する。

図 13(a)と(b)に、提案手法により計測三角形メッシュから生成した機械加工面が整列された面属性付きのソリッドモデルを示す。また、本ソリッドモデル生成において鑄肌面の穴埋め、自由曲面フィッティングには市販の RE ソフトウェアである Geomagic Studio 2012¹²⁾、鑄肌面および機械加工面のソリッドモデル化には同 CAD ソフトウェアである CATIA V5¹³⁾を使用した。また、本プロセスにおける手作業が必要な箇所は機械加工面の曲面情報に基づきソリッドモデルを生成する作業と曲面属性のパラメータを付与する作業である。また、鑄造品の三次元計測には Steinbichler 社製 COMET 5 II M¹⁴⁾を使用する。なお、機械加工面計測時に発生する計測光の鏡面反射を低減するために、計測対象物の表面に白色粉末を塗布した上で計測を行った。

表 3 に本実験に使用した三角形メッシュの頂点数、三角形数、平均稜線長 [A]、そして提案手法に基づくソリッドモデル生成処

理の作業時間[B], 面分離を用いず熟練作業者が手動で RE を行った作業時間[C]を示す. 表 3[B]に示すように, 提案手法による Plug および Joint の作業時間はそれぞれ 20 分と 36 分であった. 表 3[C]と比較し, Plug は熟練作業者による RE とほぼ同等の作業時間であり, Joint は作業時間を 28%短縮することができた. また, 手動の作業時間に注目するとそれぞれ 58%, 72%短縮されており, 提案 RE 手法は RE 作業者の負担を低減することが可能であることがわかる. さらに, 提案手法により生成されたソリッドモデルには鋳肌面と機械加工面との区別や機械加工面の曲面情報の付与, 並びに機械加工面の整列が行われており, 従来手法により生成されたソリッドモデルと比較して複製における工程設計や再設計といった応用で有効に活用することが可能である.

4. 結 言

本研究では鋳肌面と機械加工面の分離に基づいて鋳造品の機械加工面が整列された面属性付きソリッドモデルを効率よく生成するための研究を行い, 以下の結論を得た.

- (1) 部分形状の規則配置性の認識に基づく, ネジ加工面の自動認識手法を提案し, 実モデルへの適用を通して, 提案手法はネジ加工面を自動で認識し, ネジの規格の同定に十分な精度でネジのパラメータを推定できることを確認した.
- (2) 機械加工面上の貫通穴の境界円検出に基づく, 計測三角形メッシュ中の側面が未計測の貫通穴を認識する手法を提案した. 実験より, 機械加工面上に一方の円状の境界を持つ貫通穴をすべて認識できることを確認した.
- (3) 隣接する機械加工円筒面の軸周りに投影した機械加工面間のメッシュ頂点への直線・円フィッティングに基づく, 面取りやフィレットといった回転面状従属フィーチャを認識する手法を提案した. 実験より, 計測三角形メッシュから回転面状従属フィーチャのプロファイル曲線を抽出できることを確認した.
- (4) 認識した機械加工面の平面法線および円筒軸の面分面積の重み付き主成分分析により鋳造品の支配的な軸を推定し, 推定した支配的な軸に基づき機械加工面を平行化, 直交化, 共面化, 同軸化できることを確認した.
- (5) 分離した鋳肌面と認識した機械加工面の曲面情報から生成したソリッドモデルとの集合演算を行い, 面属性が付与されており, かつ機械加工面が整列された鋳造品のソリッドモデルを生成できることを確認した.
- (6) 提案 RE 手法および熟練 RE 作業者による面分離を行わない手動による RE 手法のソリッドモデル生成における作業時間の比較を行った結果, 単純な部品では従来とほぼ同等であり, 複雑な部品では作業時間を 28%短縮できることを確認した. また, RE における手動の作業時間はそれぞれ 58%, 72%短縮できることを確認した.

参 考 文 献

- 1) 浦田昇尚, 伊達宏昭, 金井 理, 後藤孝行, 安田星季: 鋳造品の迅速リバースエンジニアリングに関する研究, 精密工学会誌, **83**, 5 (2017) 474.
- 2) S. Tsuchie and H. Masatake: Extraction of Surface-feature Lines on Meshes Using Normal Tensor Framework, Computer-Aided Design and Applications, **11**, 2 (2014) 172.
- 3) M. Vieira and K. Shimada: Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing, Computer-Aided Design, **22**, 8 (2005) 771.
- 4) R. Schnabel, W. Roland and K. Reinhard: Efficient RANSAC for point-cloud shape detection, Computer Graphics Forum, **26**, 2 (2007) 214.
- 5) K. Sergey and V. Latypov: Development of an algorithm to detect screw threads in planar point clouds, Measurement Science Review, **10**, 4 (2010) 136.
- 6) S. Kosarevsky and V. Latypov: Detection of screw threads in computed tomography 3D density fields, Measurement Science Review, **13**, 6 (2013) 292.
- 7) 緑川佳孝, 齋藤和人, 増田 宏: 断面推定に基づく大規模点群からの形状再構成, 2016 年度精密工学会秋季大会講演論文集, (2016) 34.
- 8) I. Kovács, T. Várady and P. Salvi: Applying geometric constraints for perfecting CAD models in reverse engineering, Graphical Models, **82** (2015) 44.
- 9) D. Cohen-Steiner, P. Alliez and M. Desbrun: Variational shape approximation, ACM Transactions on Graphics (TOG), **23**, 3 (2004) 905.
- 10) P. J. Besl and N. D. McKay: A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **14**, 2 (1992) 239.
- 11) 石畑清: 点の集合を包含する球, 情報処理, **43**, 9 (2002) 1009.
- 12) Geomagic Studio 2012, <https://ja.3dsystems.com/software/>, accessed 2018. 09.19.
- 13) CATIA V5, <https://www.3ds.com/products-services/catia/>, accessed 2018. 09.19.
- 14) COMET 5 11M, <https://optotechnik.zeiss.com/en/products/3d-scanning/>, accessed 2018. 09.19.