

## 鋳造品の自動リバースエンジニアリングのための 計測メッシュからの計測困難な貫通穴の推定

北海道大学 ○浦田昇尚, 伊達宏昭, 金井理  
旭川工業高等専門学校 後藤孝行  
北海道立総合研究機構工業試験場 安田星季

### 要旨

本研究では、鋳造品の自動リバースエンジニアリングのために、計測方向の制約や遮蔽により計測三角形メッシュ上で計測抜けとなっている貫通穴を推定する手法を提案する。本手法では鋳造品の計測三角形メッシュに対する貫通穴の境界円の頑健な抽出と最大内接円筒面フィッティングにより貫通穴を推定する。

### 1. はじめに

本研究は、非接触式三次元形状測定器を用いた鋳造品の迅速なリバースエンジニアリング (RE) の実現を目的とした、計測三角形メッシュの領域分けと曲面抽出法の開発を行ってきた[1]。一方、鋳造品の三次元計測では、図1に示すフランジ部のように、貫通穴は計測方向の制約や周囲の遮蔽による影響により計測抜けとなる場合が多く、従来研究では貫通穴として抽出することは困難であった。そこで本報では、鋳造品の自動 RE のために、計測が十分に行えず計測点がほとんど存在しない円筒形の貫通穴 (以降、貫通穴と呼ぶ) を、計測三角形メッシュから推定する手法を提案する。本研究では、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すると仮定し、機械加工平面領域の抽出と円形境界の検出、ペアとなる貫通穴の另一端の境界の抽出、及び最大内接円筒面フィッティングによる貫通穴の円筒パラメータの推定を行う。

### 2. 計測メッシュからの計測困難な貫通穴の推定手法

#### 2.1 手法概要

図1に、計測三角形メッシュからの計測困難な貫通穴の推定手法を示す。最初に、計測三角形メッシュに対し、三角形粗さ値 $r^t$ の推定を行い、 $r^t$ に対する閾値処理により計測三角形メッシュを鋳肌面メッシュと機械加工面メッシュに分離する (図1 A1)。次に、機械加工面メッシュに対し平面・円筒面フィッティングを適用し、機械加工平面・円筒面領域を抽出する (図1 A2)。次に、抽出した機械加工平面領域の境界に対する円フィッティングにより、円状の境界頂点集合を抽出する (図1 A3)。そして、抽出した各円状の境界頂点集合に対し円フィッティングを適用し、ペアとなる貫通穴の另一端の境界頂点集合を取得する (図1 A4)。最後に、各貫通穴の二つの境界頂点集合及び貫通穴側面を計測したと推定される頂点集合に対し、最大内接円筒面フィッティングを適用することで貫通穴を生成する (図1 A5)。

#### 2.2 鋳肌面・機械加工面分離 (図1 A1)

本研究では三角形 $t$ の三角形粗さ値 $r^t$ を滑らかな基準面からの三角形の傾きとして求め、 $r^t$ に対する閾値処理により計測三角形メッシュを鋳肌面メッシュと機械加工面メッシュに分離する。最初に、計測三角形メッシュに対し $\lambda$ - $\mu$ アルゴリズム[2]に基づくスムージング処理を適用する。次に、各三角形 $t$ のスムージング前後の三角形法線 $\mathbf{n}_t, \tilde{\mathbf{n}}_t$ の差

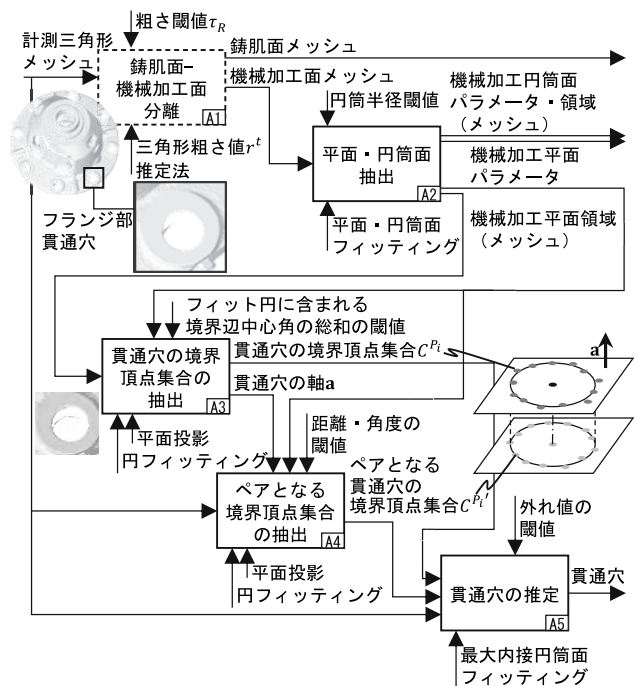


図1 計測メッシュからの貫通穴の推定手法

$d_t = \|\mathbf{n}_t - \tilde{\mathbf{n}}_t\|$ を求め、各三角形 $t$ の近傍三角形集合 $t^*$ における $d_t$ の中央値を三角形 $t$ の三角形粗さ値 $r^t = \text{med}_{t^*}(d_t)$  ( $\text{med}(A)$ はデータ集合 $A$ の中央値を取得する関数)とする。最後に、 $r^t$ が閾値 $\tau_R$ 以上の三角形 $t$ を鋳肌面の三角形、それ以外を機械加工面の三角形として分離する。

#### 2.3 平面・円筒面抽出 (図1 A2)

機械加工面メッシュに対し、平面・円筒面フィッティングを適用することで機械加工平面及び円筒面領域を抽出する。最初に、機械加工面メッシュに対し円筒面パラメータ推定と領域成長に基づく円筒面フィッティングを適用し、機械加工円筒面領域を抽出する。次に、抽出した機械加工円筒面領域の内、円筒半径が十分に大きい領域を平面領域とし、領域に対する平面フィッティングを適用することで平面のパラメータを算出する。

#### 2.4 貫通穴の境界頂点集合の抽出 (図1 A3)

図2(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境界頂点集合 $C_j^{P_i}$ を抽出する。最初に図2(b)に示すように、 $M^{P_i}$ の各境界ループ $j$ 上の

頂点集合 $B_j^{P_i}$ を抽出する。次に、 $B_j^{P_i}$ を平面 $P_i$ に投影し、RANSACに基づく円フィッティングを適用する。そして図2(c)に示すようにフィット円に対し両端がインライア頂点である境界辺の中心角 $\theta_k$ の総和が閾値 $\theta_k$ 以上であれば、 $B_j^{P_i}$ のインライア頂点を円状境界頂点集合 $C_j^{P_i}$ として抽出する。

## 2.5 ペアとなる境界頂点集合の抽出 (図 1 A4)

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。最初に、図2(d)に示すように、フィット円の中心からインライア閾値までの距離を半径とし、平面の法線方向を軸方向とする円筒面に含まれる入力メッシュの境界頂点集合 $B_j^{P_i'}$ を抽出する。次に、以下の2つの条件を共に満たす $B_j^{P_i'}$ を $C_j^{P_i}$ のペアとなる境界頂点集合 $C_j^{P_i'}$ として抽出する。

- ①  $B_j^{P_i'}$ を機械加工平面 $P_i$ に投影し、フィット円から一定距離内にある投影点を両端点とする境界辺の中心角 $\theta_k$ の総和が閾値 $\tau_\theta$ 以上
- 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 $\tau_{angle}$ 以下 (貫通穴の入口と出口では接続する領域の法線が逆方向となる仮定から)

最後に、複数の $C_j^{P_i'}$ の候補が得られた場合には、 $C_j^{P_i}$ に最も重心間距離に近い候補を選択する。

## 2.6 貫通穴の推定 (図 1 A5)

図3に示すように、 $C_j^{P_i}$ と $C_j^{P_i'}$ 及び2.5節の処理で得られた円筒に含まれる頂点集合 $H_j^{P_i}$ から貫通穴のパラメータを推定する。本手法では、計測三角形メッシュから推定される最大の径の貫通穴を取得することを目的として、最大内接円筒面フィッティングにより内径を算出する。最初に、貫通穴の軸方向を平面 $P_i$ の法線とする。次に、貫通穴の内径を算出するために、 $H_j^{P_i}$ を平面 $P_i$ に投影し、投影点に対する最大内接円フィッティングを適用する。ここで、内接円の中心点は、その初期位置から最近点の逆方向へ微小に繰り返し移動することで求め、内接円の半径は、最終的な中心点から最近点までの距離とした[3]。最後に、貫通穴の軸方向長さを $H_j^{P_i}$ の軸方向における上端から下端までの距離とし、軸上点を軸方向における上端と下端の中心とした。

## 3. 結果と考察

図4に検証に用いた計測三角形メッシュと貫通穴の推定結果 (黒: 推定した貫通穴の円筒表示, 灰: その他), 及び表1に結果の詳細を示す。モデル1では約76.9%, モデル2では100%の抽出率であった。モデル1では、機械加工平面に一方の境界を持つという前提を満たさない、機械加工円錐面や鋳肌面のみ境界を持つ貫通穴が検出できなかった、なお、処理時間はモデル1では215秒、モデル2では237秒であった (CPU: Intel Core i7-6700K 4.00GHz)。

## 4. 終わりに

本報では、鋳造品の自動REのための、計測三角形メッシュからの計測困難な貫通穴の推定手法を提案し、実モデルに適用した結果、本研究での仮定をよく満たす貫通穴ならば推定できることがわかった。

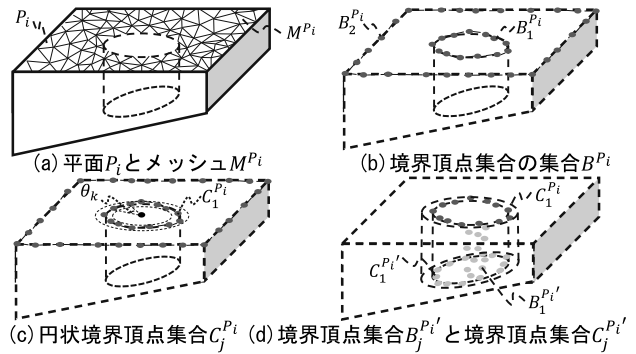


図2 貫通穴の推定

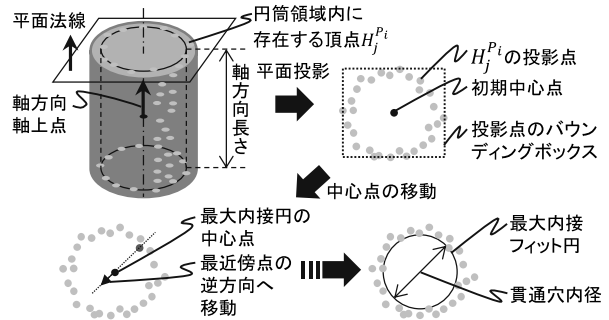


図3 最大内接円フィッティングによる貫通穴のパラメータ推定



(a)モデル1 (左: 計測三角形メッシュ, 右: 推定結果)

(b)モデル2 (左: 計測三角形メッシュ, 右: 推定結果)

図4 計測三角形メッシュからの貫通穴推定結果

表1 貫通穴推定結果

	モデル1	モデル2
頂点数	2,112,046	2,745,892
三角形数	4,168,883	5,297,662
貫通穴抽出率	76.9%	100%
(正解抽出数/実貫通穴数)	(10/13)	(15/15)

## 参考文献

- [1] 例えば, 浦田昇尚他: 鋳造品の迅速リバーエンジニアリングに関する研究 -高品質 CAD モデル生成のための鋳肌面境界と機械加工面の整形-, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2016), pp.193-194.
- [2] Gabriel Taubin: A Signal Processing Approach To Fair Surface Design, SIGGRAPH '95, (1995), pp.351-358.
- [3] 石畑清: 点の集合を包含する球, 情報処理学会, 43 (9), 2002, pp.1009-1015.