

鋳造品の最適計測位置姿勢推定に関する研究 - 計測シミュレーションに基づく推定結果の有用性評価 -

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

本研究ではこれまでに、鋳造品の高品質計測三角形メッシュ取得のための最適計測位置姿勢の推定手法を提案した。本報では、計測シミュレーションに基づく提案した最適計測位置姿勢の推定手法の有用性評価を行う。本報は、CADモデルから生成した三角形メッシュに対し、本手法で推定した最適計測位置姿勢を用いた計測シミュレーションを行い、未計測部網羅率と計測品質（各三角形への計測角度）により提案手法の有用性を評価する。

1. はじめに

本研究は、鋳造品の三次元計測メッシュから面粗さの異なる鋳肌面、機械加工面を分離し、それぞれに適したモデリング手法を適用することによる鋳造品の新たな迅速リバースエンジニアリング (RE) の実現を目的としている。本研究ではこれまでに、表面の粗さ推定に基づく鋳肌・機械加工面分離、機械加工面 (平面, 円筒面, ネジ加工面, 貫通穴, 回転面状従属フィーチャ) の認識と整列, 集合演算に基づく鋳造品ソリッドモデル生成法を提案した[1]。より高品質な鋳造品ソリッドモデルを生成するために、前報[2]において、計測抜けがなく、かつ精度よく計測された質の高い計測三角形メッシュを得るための、鋳造品向け最適計測位置姿勢 (Next Best View, NBV) を推定する手法を提案した。本報では、推定した最適計測位置姿勢の有用性を、計測シミュレーションを用いた未計測部網羅率と各三角形への計測角度に基づく計測品質の観点から評価する。

2. 最適計測位置姿勢推定を用いた鋳造品の効率的計測

2.1 概要

図1に提案する最適計測位置姿勢推定を用いた鋳造品効率的計測プロセスを示す。最初に、ターンテーブル等を用いて対象物全体をおおまかに自動計測して得た計測メッシュから、既提案の曲面認識手法[1]により鋳肌面、機械加工平面、機械加工円筒面、貫通穴、ネジ加工面を認識する。次に、最適計測位置姿勢の推定では、認識された曲面集合に基づいて、各未計測部 (遮蔽による計測抜け) を計測可能な計測位置姿勢ならびに、各曲面の計測品質 (計測精度) を向上可能な計測位置姿勢の候補集合を求め、得られた計測位置姿勢の候補集合から総合的に良い計測が行える可能性のある姿勢を最適計測位置姿勢として出力する。ここで、鋳肌面と機械加工面では計測における要求精度が異なることから、鋳肌面では、未計測部の計測のみを考慮し、機械加工面では、未計測部の計測と計測品質向上の両方を考慮し最適計測位置姿勢を決定する。また、計測器のモデルは、計測範囲を表す錐台ならびに最適計測距離 d_{OPT} を持ち、計測精度は計測角度が 90 度 (法線方向からの計測) の場合に最も高く、計測三角形メッシュの各三角形は計測された際の計測角度を保持しているものとする。

2.2 最適計測位置姿勢候補の算出

未計測部を計測するための次の計測位置姿勢 (計測器の位置と計測方向) 候補は、未計測部が計測器からなるべくよく観察できる姿勢として求める。これは、図2(a)に示すように、未計測部のメッシュ境界エッジループ頂点集合 B_i の重心 c_i を通り、 B_i にフィットした平面 f_i の外向き法線方向に d_{OPT} だけ離れた位置 p_i 、計測方向 d_i は形状内向き法線方向として求める。

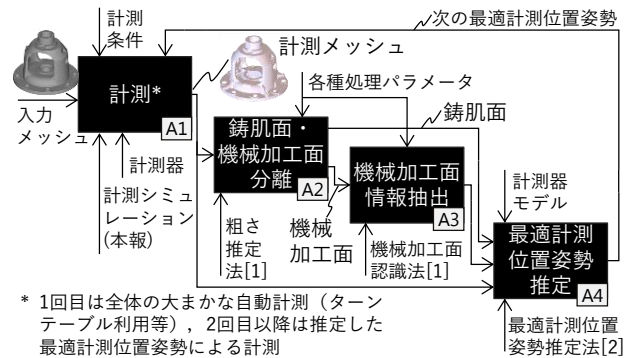


図1 最適計測位置姿勢推定を用いた鋳造品効率的計測プロセス

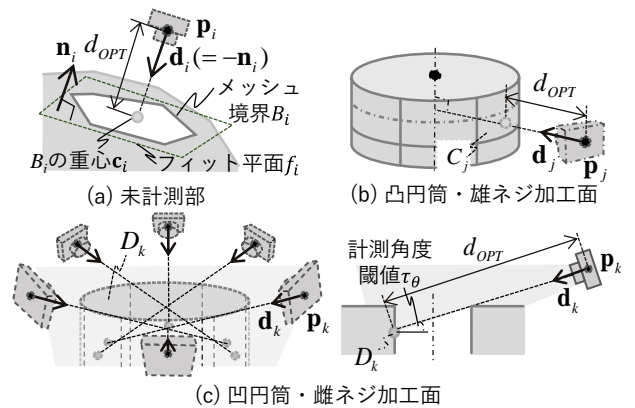


図2 認識曲面に基づく最適計測位置姿勢候補の算出

機械加工面は、領域内の各三角形の計測角度の平均が一定値以下であれば計測品質が不十分であるとして再計測を行う。平面領域は、その領域内頂点の重心と面法線を用いて、未計測部と同様に次の計測位置姿勢候補を求める。凸円筒面・雄ネジ加工面は図2(b)に示すように、円筒面を軸方向・円周方向に一定間隔で分割し、各分割領域 C_j で再計測が必要であれば、円筒面軸に垂直かつ分割領域中心を計測中心軸が通る計測位置姿勢候補を求める。凹円筒面・凹ネジ加工面は、図2(c)に示すように、円筒面を軸に沿って複数に分割し、再計測が必要な分割領域 D_k ごとに、円筒面の径と計測角度閾値 τ_θ から算出される、最も深くまで計測できる計測器の位置姿勢を、次の計測位置姿勢候補とする。

2.3 最適計測位置姿勢の決定

2.2節で求めた計測位置姿勢候補集合 $S = \{(p_i, d_i)\}$ から、式(1)に示す評価値を最大化するものを最適計測位置姿勢として出力する。

$$(\hat{\mathbf{p}}, \hat{\mathbf{d}}) = \arg \max_{(\mathbf{p}, \mathbf{d}) \in S} (1 - \alpha) o(\mathbf{p}, \mathbf{d}) + \alpha \sum_{m_j \in M} q(\mathbf{p}, \mathbf{d}, m_j) a(\mathbf{p}, \mathbf{d}, m_j) \quad (1)$$

ここで、一つ目の項は未計測領域の計測可能性、二つ目の項は各機械加工面の計測品質を評価しており、重み α により出力される最適計測位置姿勢の性質を変更することができる。また、 $o(\mathbf{p}, \mathbf{d})$ は (\mathbf{p}, \mathbf{d}) から可視な境界ループの長さであり、 (\mathbf{p}, \mathbf{d}) の位置を視点として計測メッシュをレンダリングしたときに描画されるメッシュ境界ループのピクセル数として求める。 $q(\mathbf{p}, \mathbf{d}, m_j)$ は、 (\mathbf{p}, \mathbf{d}) から可視な機械加工面集合 m_j に対する評価関数であり、機械加工平面では \mathbf{d} が平面法線方向と近いほど高くなり、機械加工円筒面・ネジ加工面では \mathbf{d} と軸方向との角度が大きいくほど高くなる。 $a(\mathbf{p}, \mathbf{d}, m_j)$ は、機械加工面 m_j の (\mathbf{p}, \mathbf{d}) から可視な面積である。

3. 計測シミュレーションの実施と評価方法

本報では推定した最適計測位置姿勢の評価を、計測シミュレーションを用いて行う。計測シミュレーションでは対象物の CAD モデルから三角形面積が一樣となるように生成した三角形メッシュを擬似計測三角形メッシュの取得に用いる。メッシュの各三角形に鑄肌面か否かの情報を事前に付与し、各三角形は、計測済みか否か、ならびに計測時の最大計測角度の3つのパラメータを持ち、計測シミュレーションで計測された（計測器の視野錐台に含まれる可視三角形）と判定された三角形には計測済みの情報を与え、さらに、これまでに計測された計測角度の最大値を付与する。

推定した最適計測位置姿勢の評価は次の手順で行う。まず、実計測でも用いられるターンテーブルを利用した計測を模し、大まかな対象物全体形状の計測シミュレーションを行う。具体的には、水平面に対し斜め45度上方および下方から、計測物鉛直軸周りに120度ずつ3回計測する。次に、2節の手法で推定した最適計測位置姿勢を用いて計測シミュレーションを繰り返し行う。計測後に新たに計測された三角形数が閾値以上ならば計測シミュレーションを継続し、閾値未達ならば計測シミュレーションを終了する。最後に、計測済みの三角形集合に対して、次式で示される計測率 A 、未計測部網羅率 C 、計測品質 Q を評価する。

$$A = \frac{A_N}{A_S} \quad (2)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N A_{NBV_i}}{A_{Occ}} \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{|T_N|} \sum_{t \in T_N} q_t \quad (4)$$

ここで A_N は N 回目の最適計測後に計測済みの三角形の面積の総和、 A_S は入力メッシュの表面積、 A_{Occ} はターンテーブル計測後の未計測三角形の面積の総和、 A_{NBV_i} は i 番目の最適計測で新規に計測された三角形の面積の総和、 T_N は N 回目の最適計測後に計測済みの三角形集合、 q_t は三角形 t の計測角度である。

4. 結果と考察

本報では、最適計測位置姿勢を算出する式(1)の重み α について、計測面積のみを考慮した場合($\alpha = 0$, ケース1)と、計測品質のみを考慮した場合($\alpha = 1$, ケース2)のそれぞれで計測シミュレーションを行った。

図3に計測シミュレーション中の各最適計測位置姿勢による計測結果(灰:計測済み三角形, 黒:新たに計測された三角形)を示す。ケース1では6回目、ケース2では5回

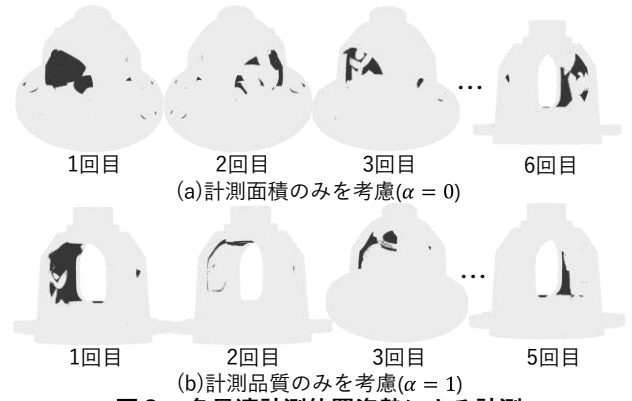


図3 各最適計測位置姿勢による計測結果(灰:計測済み三角形, 黒:新たに計測された三角形)

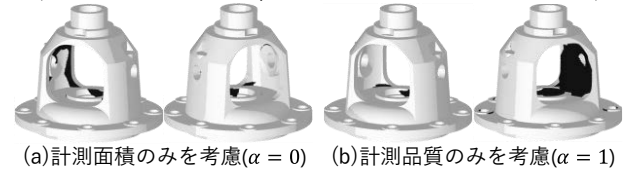


図4 計測シミュレーション結果(灰:計測済み三角形, 黒:未計測部)

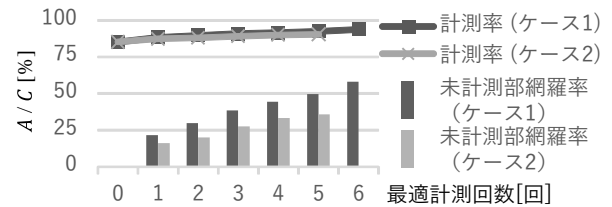


図5 計測率 A と未計測部網羅率 C の推移

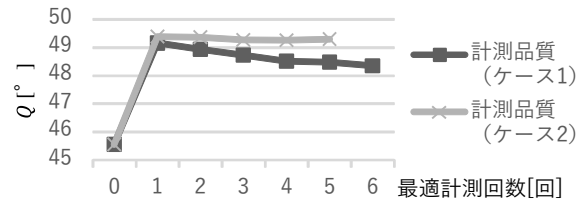


図6 計測品質 Q の推移

目の最適計測で計測が終了した。また、図4はそれぞれの計測シミュレーション結果(灰:計測済み三角形, 黒:未計測部)である。また、図5に計測率 A と未計測部網羅率 C の推移、図6に計測品質 Q の推移を示す。ここで、図5および図6の0回目の値はターンテーブルによる計測終了時点での評価値を示している。最終的な計測率 A 、未計測部網羅率 C 、計測品質 Q の評価値は、ケース1では $(A, C, Q) = (93.7\%, 58.2\%, 48.3^\circ)$ 、ケース2では $(A, C, Q) = (90.4\%, 35.6\%, 49.3^\circ)$ となった。ケース1では計測率および未計測部網羅率が、ケース2では計測品質が計測終了後に他方よりも改善されており、提案手法は未計測部の計測面積と計測品質向上といった性質を調整可能な次の計測位置姿勢が推定できることを確認した。しかしながら、計測結果にはまだ未計測部が残っており、これは2.2節で算出する最適計測位置姿勢の候補が不足していることが原因と考えられ、今後、改善を行う。

参考文献

- [1] 浦田他, 鋳造品の迅速リバースエンジニアリングに関する研究, 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.401-402 (2017).
- [2] 浦田他, 鋳造品の迅速リバースエンジニアリングに関する研究, 2018年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.103-104 (2018).